

縮小모델에 의한 室內外 綜合熱傳達 解析技法
開發 研究 (Ⅱ)

Development of Analyzing Method of Combined
Heat and Mass Transfer throughout the Building
by using Scale Model (Ⅱ)

研究機關

財團法人 韓國動力資源研究所

科學技術處

과학기술처

1991年

10月

14

提 出 文

科學技術處長官 貴下

本 報 告 書 를 “ 縮 小 모 델 에 의 한 室 內 外 綜 合 熱
傳 達 解 析 技 法 開 發 研 究 (Ⅱ)” 課 題 의 2 次 年 度 연
차 報 告 書 로 提 出 합니다.

1991 年 5 月

主管研究機關：韓國動力資源研究所

총괄연구책임자：吳 正 茂

연구책임자：徐 恒 錫

연구원：신 기 식

유 승 선

자문위원：장동순(충남대교수)

要 約 文

I. 研究題目

縮小모델에 의한 室內外 綜合熱傳達 解析技法 開發研究(II)

II. 研究目的 및 必要性

지금까지 建物 또는 다른 복합구조물의 熱性能을 定量的으로 解析하기 위한 方法은

- 實物規模實驗
- 數值解析
- 縮小模型實驗 및 實際規模 擴大解析

등의 3가지 方法이 있다. 첫째 方法은 結果에 대한 現實的인 신뢰성은 높지만 많은 예산과 긴 시간이 必要할 뿐만 아니라 實驗條件에 대한 재현성이 없기 때문에 實用的인 方法이라고 말하기는 어렵다. 한편 두번째 方法은 結果를 비교적 값싸고 빠르게 추출할 수 있으나 數值解析을 위한 제반 가정이 단순하기 때문에 복잡한 現實모델의 완벽한 예측이 어렵다.

이에 비해서 세번째 方法은 아직까지 우리나라에서는 시도하지 못했던 기술로서 본 연구는 이 기술을 實用化시키는 데 있다.

Ⅲ. 研究內容 및 範圍

이 研究는 1989년 6월부터 3년간 計劃으로 시작된 것으로서 이 기간중에 수행될 研究의 내용과 범위는 다음과 같다.

- 제 1 차년도 (1989.6-1990.6) : 縮小模型製作 및 流動可視化實驗 · 分析
- 제 2 차년도 (1990.7-1991.7) : 溫度場 可視化實驗 및 分析
- 제 3 차년도 (1991-1992) : 시범연구를 통한 縮小模型實驗 및 解析技術의 實用化

이 研究의 제 2 차년도인 올해에는 流動場 및 溫度場 可視化시스템을 개발한 후 이 시스템을 利用하여 縮小模型의 熱流動實驗을 수행한다. 溫度場에 대한 측정과 可視화를 위해 컴퓨터와 스테핑 모터에 의해 구동되는 溫度場測定 스케너를 개발한다.

올해의 縮小模型은 前年度와 同一한 모델을 使用했으며 다음과 같다.

- 實物모델 : 프랑스 LESTE 연구소에 있는 실험건물 (주위 벽체온도가 임의의 設定溫度로 조작가능함)
- 縮尺率 : $\frac{1}{4.49}$
- 使用流體 : R114

本 研究의 실험대상은, 제 1 차년도에서는 바닥의 右側 $\frac{1}{3}$ 의 面만을 加熱하는 하나의 모델을 대상으로 하였으나 올해에는 다음의 5가지 경우로 모델의 수를 확장시켰다 (작년도 모델은 이 5가지 경우중 첫번째 것임)

분 류 번 호	加 熱 面 의 面 積	加 熱 面 의 位 置
I	전 체 바 닥 의 $\frac{1}{3}$	右 側 바 닥
II	전 체 바 닥 의 $\frac{2}{3}$	右 側 바 닥
III	전 체 바 닥	전 체 바 닥
IV	전 체 바 닥 의 $\frac{1}{3}$	바 닥 中 央 部
V	전 체 바 닥 의 $\frac{2}{3}$	左 · 右 側 바 닥 各 各 $\frac{1}{3}$

본 연구는 이와 같은 5개 모델의 溫度場 및 流動場을 分析하는데 주안점을 두었으며 본 연구에서 수행된 연구내용은 다음과 같다.

- 1) 溫度場測定스케너의 개발
- 2) 熱流動可視화시스템에 의한 縮小模型實驗
- 3) 縮小模型內에서의 熱流動分析을 위한 數値解析 프로그램의 개발
- 4) 영상처리용 소프트 웨어의 개발
- 5) 실험 및 수치해석결과의 해석

IV. 研究結果

1. 컴퓨터와 스테핑 모터에 의해 구동되고 축소모형내의 210개 지점의 溫度를 측정할 수 있는 回轉式 溫度測定스케너를 개발하였다.
2. 溫度場可視化實驗의 結果 추출된 等溫線分布는 각 모델의 특성에 부합되는 만족스러운 것이었다.
3. 溫度場可視化實驗에서 주목되는 사항의 하나는 바닥에서의 加熱條件이 同一한 加熱面積, 同一한 加熱溫度인 경우에도 加熱面의 位置를 다르

게 配置하는 경우 室內溫度分布가 相異하게 나타나며 特定한 溫度範圍를 가지는 空間의 크기가 다르게 나타나는 點이다.

4. 이러한 實驗結果로 미루어 室內空間中 特定範圍의 空間을 特定溫度로 유지하기 위해서는 加熱面積, 加熱溫度 뿐만 아니라 加熱部位까지를 고려해야 한다는 사실을 確認할 수 있었으며 여기에 대한 구체적이고 후속적인 研究는 本 研究에서 使用한 縮小模型實驗法을 使用하는 것이 적합할 것으로 판단된다.
5. 本 研究의 流動實驗結果 추출된 縮小模型內의 流動의 速度는 左右側의 壁面近處에서 重力과 浮力의 영향으로 最大值를 가지며 약 15~20 cm/s이다. 이는 實物모델로 환산하는 경우 實際 溫突住宅의 값인 20~30 cm/s를 조금 上廻하는 35~46cm/s가 된다.
6. 이는 實際 溫突住宅의 경우 開口部가 있기 때문에 室內流動狀況이 다소 복잡한 양상을 가지고 있다는 點에 기인된다고 추측되나 正確한 原因의 규명을 위한 研究가 必要하다.
7. k-ε 모델을 도입해서 개발된 本 研究의 數值解析 프로그램은 Ra수가 10^{10} 정도인 實際 建物の 온돌방에 使用할 수 있는 성능을 가지고 있으며 本 研究의 실험결과와 비교하였을 때 流動場의 형태나 전체적인 等溫線分布狀況 등에서 만족할만한 結果를 얻었다.

SUMMARY

I. Subject

Development of Analyzing Method of Combined Heat and Mass Transfer Throughout the Building by using Scale Model (II)

II. Objectives and Necessities of the Project

There are three quantitative methods for learning about the thermal performance of a building or other complex structure.

They are

- Real size experimentation
- Numerical simulation
- Experimentation by a small-scale model and scale the result up to full-scale size

The first method is accurate but not generally practical since it may be excessively costly and require long periods of time.

The second method is simple to run but of questionable reliability due to the many uncontrolled approximations that underlie any such numerical simulation. The third method has not been fully exploited. This study is devoted to developing the third

method into a useful research and design tool.

III. Content and Scope

Our study is a national research project for three years starting from the june 1989. The contents and scopes of the study for three years contain the followings.

- The first year (june 1989 - June 1990) : design and install the small-scale model and analyse flow fields in the model by flow visualization by Laser Light Sheet system.
- The second year (july 1990 - july 1991) : analyse the thermal field in the model by visualization of isothermal lines
- The third year (1991-1992) : Sample study for practical use of the technology concerned the small-scale model experimentation.

In the second year of the research, we try to analyse the thermal and flow field of the model by using the temperature measurement scanner and flow visualization system. The temperature measurement scanner which we developed in our study is driven by the computer controled stepping motor.

The scale model for this study is same as those of the first year :

- Full scale building for reference : Experimental building

of the LESTE in France which can control the thermal boundary condition for Korean ONDOL heating system and whose dimension is $3.1\text{m(L)} \times 3.1\text{m(W)} \times 2.5\text{m(H)}$.

– Scale Factor : 1/4.49

– Experimental Gas : R114

The models for our experimentation can be classified into the following five cases, while in the first year we had only one case which is the first case in the followings.

Case	Heating area of floor	Location of heated floor
I	1/3 of the whole	Right side
II	2/3 of the whole	Right side
III	whole area	Whole floor
IV	1/3 of the whole	Middle side
V	2/3 of the whole	1/3 for right 1/3 for left side

The main contents of this study is to analyse thermal and flow field of the five cases above. For this research we try to do out the followings.

- 1) Development of temperature measurement scanner
- 2) Experiments of the small-scale model using visualization systems of temperature and flow field.
- 3) Numerical analysis for the model
- 4) Development of image processing soft ware

5) Interpretation the experimental and numerical results

IV. Results

1. Develop a temperature measurement scanner driven by two computer-controlled stepping motors which can measure temperature for 210 points in the scale model.
2. As a result of the visualization experiment for the thermal fields shows that the trends of the isothermal lines correspond to the thermal characteristics of each model.
3. One of the considerable things from the above results, the temperature distribution of two models, which have same area of heating and same temperature in the heated floor but different layout of the heated floor, has a great difference. In the two models above, the area of a zone having a particular range of temperature are different in each other.
4. This facts shows that for maintaining a desired temperature for the desired domain in the indoor space it is necessary to consider not only heating area and temperature of the floor but also the allocation of heating zone in the floor. It will be desirable to continue the detailed and intensive studies by using the technologies of scale model ex-

periment developed by this studies

5. Near the left and right corner of the bottom of vertical walls, the flow velocity of natural convection the small-scale model seems to have maximum value which lies approximately from 15 to 20 cm/s. this velocity converted to 35 cm/s to 46 cm/s in full scale model, while in the practical case of ondol room the velocity is 20 m/s to 30 m/s.
6. The reason of this unaccordence seems to be caused by the facts that in the practical ondol room there are window and doors which might slow down the flow velocity in the room.
7. The numerical simulation program for analyzing temperature and flow field of the cavity heated from below is developed using k- ϵ model. Computational limit of this program is sufficient for the ondol room whose Rayleigh number is about 10^{10} . Applying this program for our small-scale model, we have a favorable result of flow and temperature field compared with those of our experiments.

CONTENTS

Summary	i
Chapter 1. Background of the Study	1
Section 1. Introduction	1
Section 2. Summary of the Results of the last year	3
Section 3. Summary of the study of this year	6
Chapter 2. Model to Study	9
Chapter 3. Experimental System and Method	14
Section 1. Measurement System for Temperature Field	14
Section 2. Flow Visualization System	21
Section 3. Method of Experimentation	27
Chapter 4. Results and Analysis of the Experiments of Temperature Fields	30
Section 1. Experimental Model	30
Section 2. Results and Analysis on Isothermal Line	32
Section 3. Analysis on the Heat Flux Through the Wall.....	50
Chapter 5. Analysis on the Results of Flow Visualization	58

Section 1. Experimental Model	58
Section 2. Analysis of the Results	59
Chapter 6. Numerical Simulation	65
Section 1. Introduction	65
Section 2. Governing Equation and Method of Numerical Analysis	68
Section 3. Results and Discussions	71
Chapter 7. Conclusion	87
Reference	90
Appendix	95

目 次

要約文	i
第1章 研究概要	1
第1節 序 論	1
第2節 前年度 研究結果의 要約	3
第3節 今年度の 研究概要	6
第2章 모델의 設定	9
第3章 實驗裝置 및 實驗方法	14
第1節 溫度場 測定裝置	14
第2節 流動場可視化시스템	21
第3節 實驗方法	27
第4章 溫度場可視化 實驗結果 및 分析	30
第1節 實驗모델	30
第2節 等溫線分布 結果分析	32
第3節 壁을 통한 손실열량분석	50
第5章 流動可視化實驗 結果分析	58
第1節 實驗모델	58

第2節 實驗結果의 分析	59
第6章 縮小모델의 熱流動數值解析	65
第1節 序 論	65
第2節 支配方程式 및 數值解析方法	68
第3節 數值解析結果 및 討論	71
第7章 結 論	87
參考文獻	90
부 록	95

表 目 次

< 표 1.1 > 축소모델과 실물간의 각종 물리량에 대한 관계	4
< 표 4.1 > 溫度場可視化 實驗모델의 分類	31
< 표 5.1 > 流動可視化 실험 모델	58
< 표 6.1 > Calculation parameters	66
< 표 6.2 > Expressions for Γ_ϕ and S_ϕ	69

그 립 목 차

〔 그림 2-1 〕	축소모델의 概念圖	10
〔 그림 2-2 〕	實驗・分析 모델의 분류	11
〔 그림 2-3 〕	溫度場 測定, 分析領域	12
〔 그림 2-4 〕	流動場 測定, 分析領域	13
〔 그림 3-1 〕	온도측정 스캐너 및 熱電雙設置位置	16
〔 그림 3-2 〕	온도측정 단면에 있어서 온도측정 스캐너에 의한 溫度測定位置	17
〔 그림 3-3 〕	온도측정 스캐너에 의한 온도측정 장면	18
	(a) 스캐너가 15° 회전한 경우	
	(b) 스캐너가 45° 회전한 경우	
〔 그림 3-4 〕	溫度場 測定分析시스템의 概念圖	20
〔 그림 3-5 〕	유동가시화시스템의 概念圖 및 실험실에서의 배치도	22
〔 그림 3-6 〕	流動追跡粒子發生裝置	23
〔 그림 3-7 〕	실험에 사용한 탄산마그네슘의 입도분포도	24
〔 그림 3-8 〕	流動斷面 調明裝置	26
〔 그림 4-1 〕	실험모델 1의 등온선분포(1).....	33
〔 그림 4-2 〕	실험모델 1의 등온선분포(2)	34
〔 그림 4-3 〕	실험모델 1의 등온선분포(3)	35
〔 그림 4-4 〕	실험모델 2의 등온선분포(1)	37

[그림 4-5]	실험모델 2 의 등온선분포(2)	38
[그림 4-6]	실험모델 2 의 등온선분포(3)	39
[그림 4-7]	실험모델 3 의 등온선분포(1)	40
[그림 4-8]	실험모델 3 의 등온선분포(2)	41
[그림 4-9]	실험모델 3 의 등온선분포(3)	42
[그림 4-10]	실험모델 4 의 등온선분포(1)	43
[그림 4-11]	실험모델 4 의 등온선분포(2)	44
[그림 4-12]	실험모델 4 의 등온선분포(3)	45
[그림 4-13]	실험모델 5 의 등온선분포(1)	47
[그림 4-14]	실험모델 5 의 등온선분포(2)	48
[그림 4-15]	실험모델 5 의 등온선분포(3)	49
[그림 4-16]	$Nu(y)$ 계산을 위한 좌표	50
[그림 4-17]	바닥右側牆이 加熱面인 경우 右側壁높이에 대한 Nu 수 변화추이	53
[그림 4-18]	바닥右側牆가 加熱面인 경우 右側壁높이에 대한 Nu 수 변화추이	54
[그림 4-19]	전체바닥이 가열되는 경우 右側壁의 높이에 대한 Nu 수 변화추이	55
[그림 4-20]	바닥중앙牆이 加熱面인 경우 右側壁높이에 대한 Nu 수 변화추이	56
[그림 4-21]	左右側바닥牆씩이 加熱面인 경우 右側壁 높이에 대한 Nu 수의 변화추이	57

[그림 5-1]	실험모델 1의 유동사진 및 스케치 ; 촬영조건 : 레이저 = Ar 이온 레이저 5W, 사진기 = Nikon FM3, f4.0, 1 초, ASA400 흑백	60
[그림 5-2]	실험모델 2의 유동사진 및 스케치 ; 촬영조건 : 레이저 = Ar 이온레이저 5 W, 사진기 = Nikon FM3, f 4.0, 1/2 초, ASA400 흑백	62
[그림 5-3]	실험모델 3의 유동사진 및 스케치 ; 촬영조건 : 레이저 = Ar 이온레이저 5 W, 사진기 = Nikon FM3, f4.0, 1/2 초 ASA400 흑백	63
[그림 6-1]	Schematic diagram of a computation domain	66
[그림 6-2]	계산조건 1에서의 유동장	72
[그림 6-3]	계산번호 1에서의 온도장	73
[그림 6-4]	계산번호 1에서 높이 29 cm인 경우의 온도분포	74
[그림 6-5]	계산번호 1에서 높이 29 cm에 있어서 수직방향 속도 분포	75
[그림 6-6]	계산모델 2에서의 유선분포	77
[그림 6-7]	계산모델 2에서의 등온선분포	78
[그림 6-8]	계산모델 2에서의 입체화된 온도분포	79
[그림 6-9]	계산모델 3에서의 유선분포	80
[그림 6-10]	계산모델 3에서의 등온선 분포	81
[그림 6-11]	계산모델 3에서의 유선분포 입체도	82
[그림 6-12]	계산모델 4에서의 유선분포	84
[그림 6-13]	계산모델 4에서의 등온선 분포	85
[그림 6-14]	계산모델 4에서의 유선분포 입체도	86

第 1 章 研究概要

第 1 節 序 論

建物の熱解析問題は 에너지節約을 위한 建物設計分野와 적당한 室内熱環境을 유지하면서도 에너지를節約하는 建物에너지 管理分野에 있어서 가장 基本的인 技術임에도 불구하고 이 分野에 대한 研究는 아직까지는 多小 미진한 狀況이라고 할 수 있다. 現在 우리나라의 建物에너지 관련 研究의 接近方法은 첫째 實際規模로 建物を 建立하여 해당되는 측정과 실험을 수행하면서 熱的인 제반문제를 分析, 研究하는 方法과 둘째 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 實際狀況을 模擬研究하는 方法이 있다. 첫째 方法은 測定, 實驗結果가 가장 現實的이라는 長點은 있으나 實驗條件이 極小數의 경우에만 限定되어 있기 때문에 다양한 實驗이 어렵다. 왜냐하면 被實驗體로서의 實際規模의 建物は 크기와 重量問題로 인해 建物周邊의 境界조건을 변경시키기 위해서는 엄청난 實驗施設投資費가 要求될 뿐만 아니라 高層規模實驗에서는 人工氣候 조성장치가 없는한 實驗期間의 選擇을 外部自然氣候條件에 의존해야 하기 때문에 實驗時期 및 回數에 대한 制約도 있다.

한편 두번째 方法은 實驗上 入力條件의 變更이 쉽고 짧은 時間에 建物 에너지 相关 제반현상에 대한 數值的인 模擬實驗이 可能하다는 長點은 있으나 이를 위하여 使用되는 入力條件이 비교적 단순하기 때문에 복잡한 現實모델에 있어서 精밀한 에너지해석은 기대하기 곤란하다는 문제가 있다. 더욱이 分析對象이 되는 建물이 大空間이거나 특수한 구조를 가지는 경우

에는 아직까지의 電算技術로서의 精밀한 에너지해석이 어렵다.

이들 두가지 方法에 비해서 縮小模型實驗法은 建物の 縮小模型을 利用해서 建物の 熱・流動現象에 대한 實驗을 수행한 후 그 結果를 擴大解析함으로써 實際規模의 建物實驗에 준하는 效果를 기대하는 方法이다. 이 方法은 實際規模實驗과 比較할 때 現實的인 正確性은 다소 떨어지지만 주변경계조건과 제반 실험조건의 변경이 용이할 뿐만 아니라 被實驗體가 小規模이기 때문에 實驗을 위한 空間이 적게 所要되며 時間과 예산이 절약된다는 長點이 있다. 또한 이 方法은 컴퓨터 시뮬레이션에 비해 보다 多樣的 實驗이 가능하며 신뢰성도 높은 方法이라고 할 수 있다. 따라서 縮小模型實驗法은 建物에너지 관련 연구에 있어서 꼭 必要的 技術의 하나라고 할 수 있다.

本 研究는 縮小模型을 利用한 建物에너지 관련 熱・流動實驗 및 解析技術을 開發하기 위한 것으로서 向後 發生되는 建物에너지 관련 研究는 물론 熱・流動現象의 分析을 위해 實際規模로 代替할 수 있는 技術로서 많은 分野에 應用될 수 있을 것으로 생각된다. 특히 本 研究에서 開發되는 技術은 建物에너지 分野에 있어서 住居用 建物は 물론 상업용 건물과 체육관, 영화관, 강당, 공장건물 등과 같이 大空間을 가지는 特殊建物에 室內 熱・流動分析을 통해 設計後 建立에 앞선 實驗的인 사전모의 실험수단의 하나로서 活用될 수 있으며 超高層建物이나 아파트단지의 建物周邊風 研究 등 向後 建物에너지와 관련된 많은 分野의 研究開發力 向上에 一助를 할 것으로 기대되는 核心技術이다.

本 研究는 1989년 6월부터 3개년 計劃으로 시작된 科學技術處 特定 研究開發事業의 제 2차년도 연구로서

- 제 1 차년도(1989.6-1990.6)에는 縮小模型實驗法에 대한 基本技術을 確保하기 위한 研究를 수행하였으며 全體 實驗시스템 중에서 室內對流에 대한 流動可視化實驗에 主안점을 두고 研究를 進行시켰고
- 제 2 차년도(1990.7-1991.7)에는 縮小模型의 傳熱現象에 대한 分析을 위해 縮小模型內의 溫度場可視化 實驗장치를 추가로 제작하여 실험, 분석하였다.
- 제 3 차년도(1991-1992)에는 縮小模型을 利用한 建物の 熱·流動實驗 分析技術의 實用化를 위한 시범연구를 할 예정이다.

第 2 節 前年度 研究結果의 要約

1989년 6월부터 進行되었던 본 연구의 第1次年度の 研究에서는 縮小模型實驗과 관련된 理論檢討와 流動可視化 實驗을 수행하였다. 理論檢討에서는 相似則이 成立하는 縮尺方程式 設定에 대한 理論檢討와 流動可視化를 위해 使用되는 유동추적입자의 流動追跡理論 등을 檢討하였으며 아울러 可視화된 流動畫像의 處理技術(Image Processing Technology)에 대한 基本的인 理論을 소개하였다.

第1次年度の 實驗對象은 3.1m×3.1m×2.6m의 크기를 가지는 온돌방을 대상으로 하였는데 밑면의 $\frac{1}{3}$ 이 加熱되고 非加熱面과 外氣溫度가 各各一定하게 유지되는 것으로 하였다. 이때의 축적은 4.49 : 1로 하였으며 이러한 縮尺을 使用한 경우의 實物과 縮小模型間의 相似條件을 고려하여 프 레온가스(R114)를 實驗流體로 使用하였으며 流動追跡粒子는 염기성 탄산마

그네슘 분말을 使用하였다. 이때 산출된 축소모델과 실물간의 각종 물리량에 대한 縮尺率은 <표 1-1>과 같다.

<표 1-1> 축소모델과 실물간의 각종 물리량에 대한 관계

물리량	참고 물리량	무차원된 양	실물(*)대 축소모델간의 관계
온도	$\Delta T = T_h - T_l$	$T^+ = (T - T_o) / \Delta T$	$T^* = T$
길이	H	$l^+ = l / H$	$l^* = 4.49 l$
속도	$V_o = \alpha / H$	$\vec{V}^+ = \vec{V} / \vec{V}_o$	$\vec{V}^* = 2.31 \vec{V}$
시간	$\tau_o = H^2 / \alpha$	$\tau^+ = \tau / \tau_o$	$\tau^* = 1.95 \tau$
열속	$\phi_o = \lambda_o \Delta T / H$	$N_u = \phi / \phi_o$	$\phi^* = 0.56 \phi$

流動可視化는 流動追跡粒子를 Test Cell 內로 주입하여 부유시킨 후 밑면 加熱에 수반하여 나타나는 對流形狀을 레이저 流動斷面照射裝置 (Laser Light Sheet System ; LLS System) 로 斷面照射시켜서 이 斷面の 流動狀態를 촬영하는 것으로 했다. 실험을 비가열면 및 외기온도가 20° 로 유지되는 조건하에서 바닥의 $\frac{1}{3}$ 을 차지하는 加熱面の 온도가 각각 30°C, 33°C, 35°C, 40°C, 50°C의 5 단계로 변화시키면서 축소모형내의 流動을 LLS 法에 의해 可視化시키고 영상처리하는 方法으로 進行하였다. 이러한 流動可視化 實驗結果 다음과 같은 事實이 確認되었다.

1) 5 개 실험조건 모두에서 시계방향의 주세포유동(primary cell flow)이 밀폐공간내의 벽에 隣接하여 存在하며 加熱面에서 상승하고 비가열면에서 하강하는 전형적인 자연대류이었으며,

2) 밀폐공간의 구석과 주세포유동의 내부에 2 차세포유동(secondary cell flow)이 存在하고 있으며,

3) 가열면 상부 좌측 구석과 비가열면 상·하부 우측 구석 부근인 난류천이영역에서는 유동의 불안정성으로 인해 와류가 생성과 소멸을 주기적으로 반복되는 流動振動現象이 관찰되었는데 이 연구에서와 같이 Gr 수가 10^{10} 이상인 규모에서 수치해석적인 방법으로는 이러한 현상을 예측하기 힘들다.

4) 가열면에서 좌측 벽을 따라서 상승한 유체가 천정을 만나면 오른쪽으로 이동하면서 하강하기 시작하는데 가열면의 온도가 증가할수록 하강지점이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동한다. 이는 온도의 증가에 따른 부력의 증가 때문이라고 판단된다.

5) 이러한 현상은 40°C 일 때까지 계속되지만 50°C 인 경우에는 加熱面 中央 上部에 2차유동이 새롭게 형성되는 것이 관찰되었다. 이것은 온도상승에 따른 부력상승이 어떤 임계점보다도 더 커졌을 경우에 나타나는 것으로 해석할 수 있으며 향후 계속적으로 연구해야 할 중요한 문제이다.

한편 第1次年度에서는 縮小模型內的 熱·流動現象의 分析을 위한 數値解析도 시도되었다. 數値解析方法은 제어체적 (Control Volume)에 기초한 유한차분법을 사용하였으며 운동방정식의 압력 - 속도 연계성을 해결하기 위해서 Patankar의 SIMPLER 알고리즘을 적용하였고 差分化를 위해서 Power-law scheme을 적용한 결과 Ra 수가 10^9 정도에서 4,500 회의 반복계산에 의해 수렴된 상태에 도달될 수 있었으나 Ra 수가 10^{10} 이상에서는 불행히도 수렴된 결과를 얻지 못하였다. 이러한 수치해석결과 다음과 같은 사실이 확인되었다.

1) $Ra = 10^4$ 에서는 주세포 유동이 가열면의 중심선 부근에서 2개로 분리되어 있다가,

2) Ra 수가 증가하면 주세포 유동이 벽면을 따라 하나의 큰 타원형으로 형성되며 $Ra = 10^7$ 부근에서 주세포 유동내에 2차세포 유동이 2개정도 형성된다.

3) Ra 수가 $10^8, 10^9$ 으로 증가되면 2차세포 유동이 중심부에서 벽면으로 이동되면서 없어진다.

4) 이러한 경향으로 미루어 Ra 수가 10^{10} 을 넘는 경우에는 $Ra = 10^9$ 부근에서 형성된 2개의 2차세포 유동이 하나로 통합되며 난류전이 영역에 2차와류가 발생될 것으로 예측되며 이는 실험결과에 접근되고 있음을 알 수 있다.

그러나 이러한 수치해석결과는 사용된 축소모델에서의 Ra 수가 10^{10} 급이기 때문에 $Ra > 10^{10}$ 에도 수렴될 수 있도록 지속적인 노력이 요구되었으며 後述한 바와 같이 이번의 지속적인 연구에 의해 解決될 수 있게 되었다.

第3節 今年度の 研究概要

前술한 바와 같이 本 研究事業의 第1次年度인 前年度에는 주로 縮小模型實驗과 관련된 基本的인 理論을 定立하고 流動可視化實驗과 數值解析을 $Ra = 10^9$ 까지의 水準으로 수행하였다. 이에 비해 今年度에는 溫度可視化實驗과 數值解析水準을 本 縮小모델과 부합되는 $Ra > 10^{10}$ 水準까지 發展시키는데 主안점을 두었다. 今年度에 使用한 縮小模型은 前年度와 同一한 縮尺率인 4.49 : 1 을 使用하였으며 實驗流體도 前年度의 경우와 같은 프레온

가스(R114)를 사용하였다. 그러나 縮小模型의 밑바닥 加熱面은 前年度의 경우 全體 바닥면의 $\frac{1}{3}$ 만이 加熱面이었으나 올해의 경우에는 加熱面の 位置와 面積이 可變됨으로써 보다 多様な 바닥가열조건이 형성되도록 하였다.

溫度可視化實驗을 위해 당초의 예정은 本 研究의 目的으로 策定된 예산이 아닌 I.B.R.D 차관자금으로 非接觸式 等溫線 測定裝置인 Interferometer를 구입하여 使用할 예정이었으나 이 장비의 구입이 다소 지연되는 관계로 인해 熱電雙을 내장한 Temperature Measurement Scanner를 製作하여 縮小模型內의 溫度分布를 測定한 후 컴퓨터에 의해 等溫線을 可視化시키는 方法을 選擇하였다. 이 Temperature Measurement Scanner는 接觸式 測定方式으로서 縮小模型 內部에서 이 Scanner의 이동에 따라 流動場 및 溫度場이 원래의 狀態에서 바뀌어 測定되어지는 것을 最小化시키기 위해 스텝핑모타(Stepping Moter)를 구동시키고 熱電雙의 온도 감지시간을 充分히 고려하였다.

올해 使用한 溫突의 縮小模型의 바닥 加熱條件은 바닥의 加熱面 區域을 左右壁體의 밑바닥 모서리와 平行하게 3 등분을 한 후

- ① 加熱面이 全體 바닥면적의 $\frac{1}{3}$ 이고 右側區域에 存在하는 모델
- ② 加熱面이 全體 바닥면적의 $\frac{2}{3}$ 이고 右側區域에 存在하는 모델
- ③ 바닥면 全體를 加熱하는 모델
- ④ 加熱面이 各各 전체 바닥면적의 $\frac{1}{3}$ 씩이고 바닥의 左右側에 存在하는 모델
- ⑤ 加熱面이 전체 바닥면적의 $\frac{1}{3}$ 이고 바닥의 中心線에 存在하는 모델

과 같이 5개 種類로서 加熱面과 室內溫度를 各各 等溫으로 유지하면서 溫度場測定實驗을 수행하였다. 이때 測定된 實驗結果는 SURFER 라는 Gra-

phic Program에 의해 縮小模型内の 等溫線分布를 추출하였으며 各 모델 별로 壁面을 통해 손실되는 熱量을 比較하기 위해 右側壁面을 따라 변화 하는 Nu 수를 구하였다.

한편 流動場에 대한 可視化는 上記 5개 모델중 3개 모델을 選定하여 縮小모델의 中心垂直斷面에서의 流動狀態를 可視化, 分布하였다.

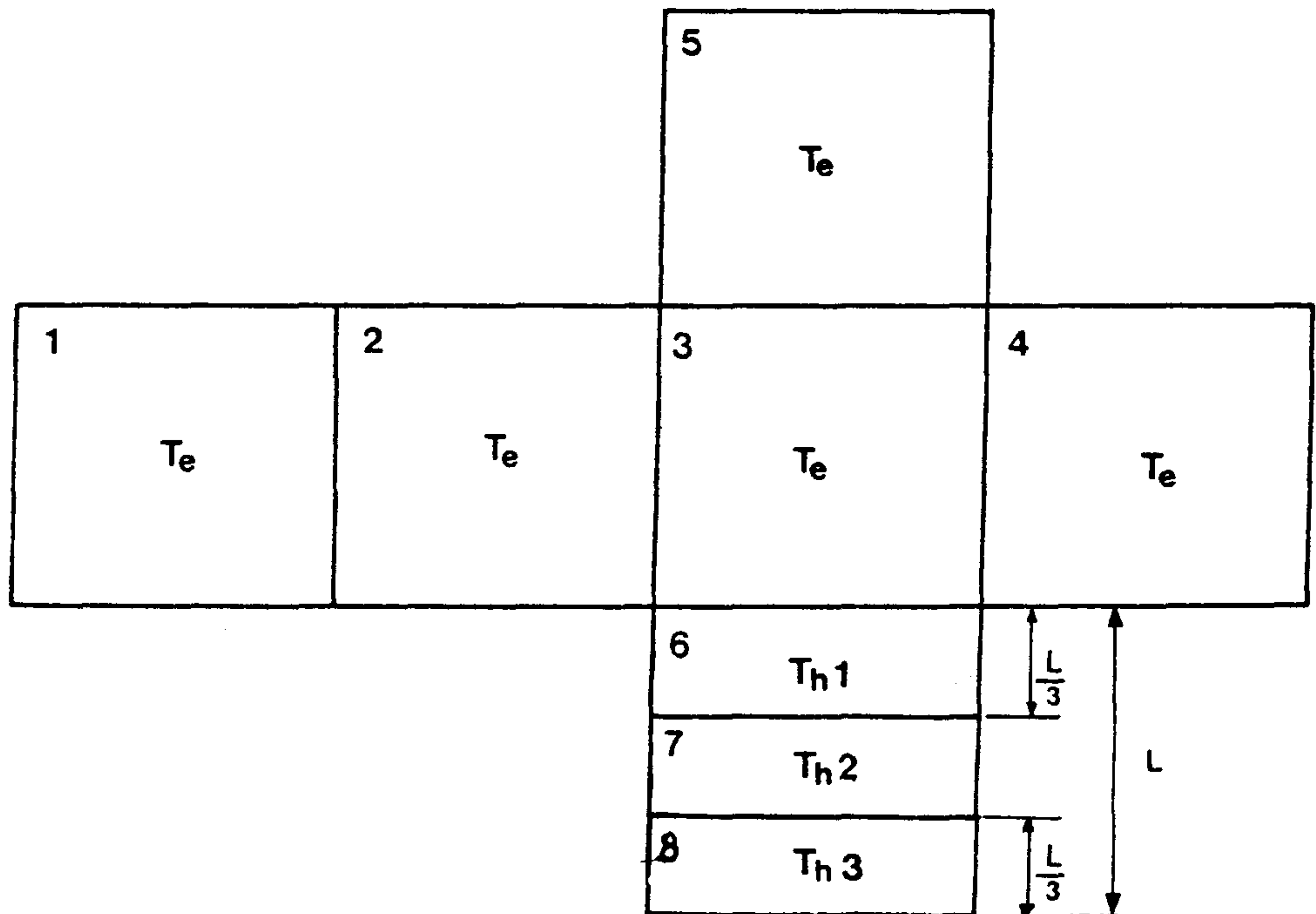
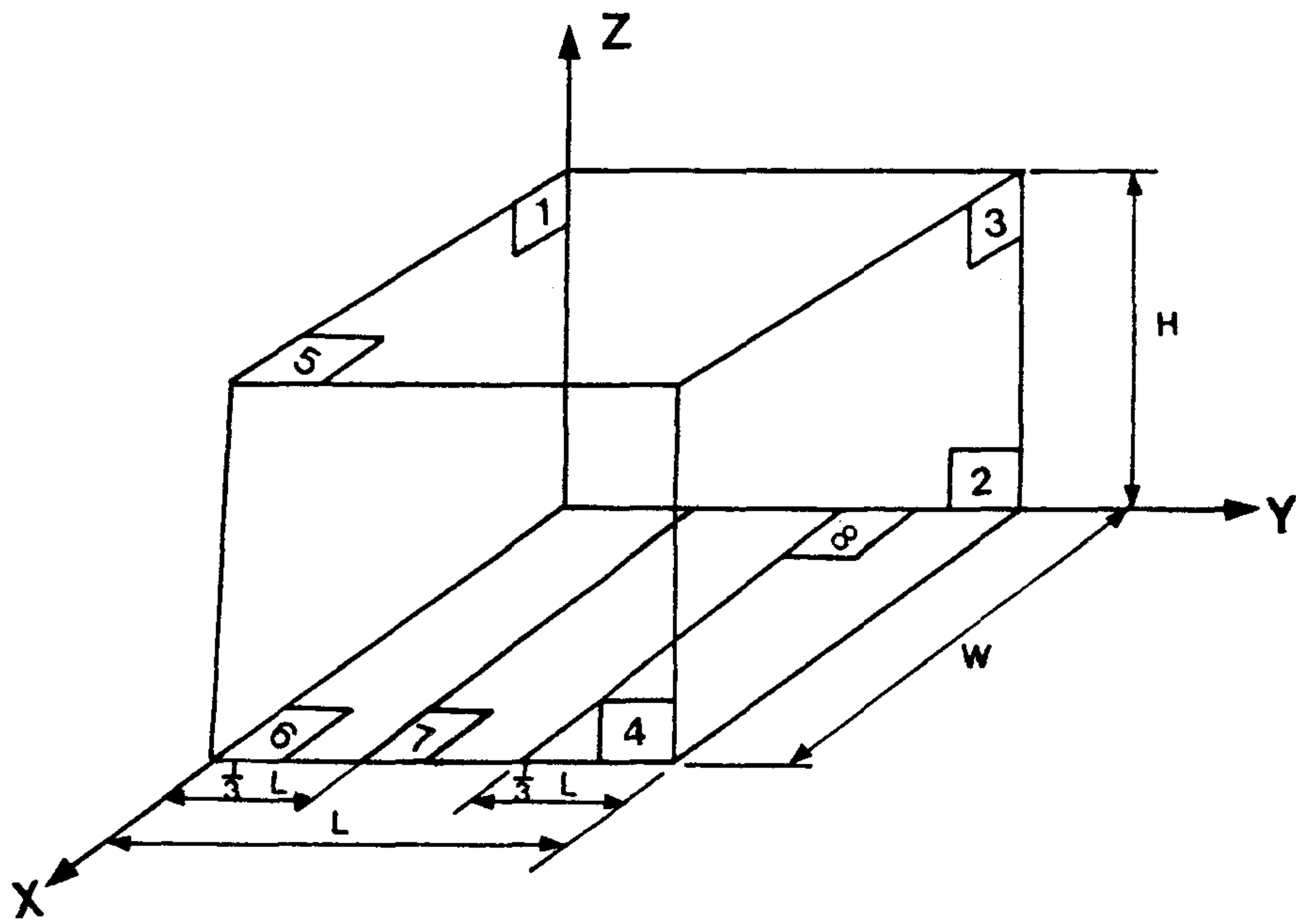
또한 이와 같은 熱・流動現象의 可視化, 分析과 아울러 縮小모델내의 熱 流動現象分析을 위해 數值解析을 前年度에 이어서 계속 수행하였다. 올해의 數值解析은 前年度에 도달하지 못한 水準인 $Ra > 10^{10}$ 인 경우에도 可能할 수 있도록 發展시키는데 主안점을 두고 進行시켰으며 이를 Turburence 모델을 도입하여 處理하였다.

第 2 章 모델의 設定

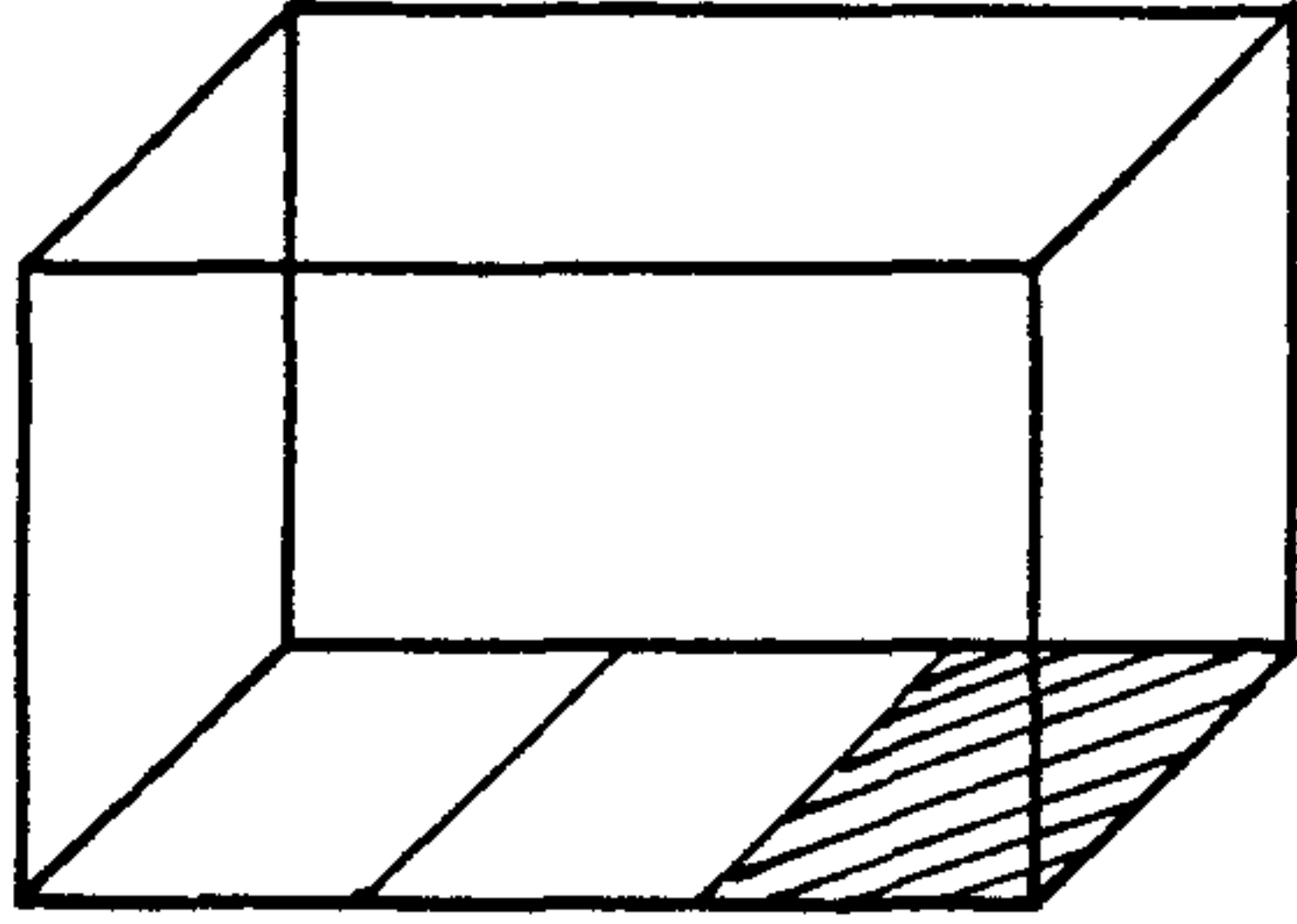
縮小模型에 대한 實際規模의 모델은 前年度에서 採擇한 것과 同一한 것을 使用하였다. 즉 本 研究의 協同研究機關인 프랑스의 R.A.M.S.E.S 外 5개 研究所에서 共同으로 活用하고 있는 3.1m×3.1m×2.5m인 建物を 對象으로 하였다. 이 建物は 前年度 研究報告書에서 說明한 바와 같이 建物を 구성하고 있는 6개의 壁面の 溫度가 임의의 設定溫度로 等溫制御되고 있다. 이 實驗모델의 基本構造, 溫度制御方式 등에 관한 자세한 사항은 本 研究의 第1次年度 研究報告書에 記述되어 있으므로 本 研究報告書에서는 생략하기로 한다.

本 研究를 위한 縮小模型은 上記 實物모델을 $\frac{1}{4.49}$ 로 縮小한 것으로서 [그림 2-1]과 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 바닥면은 6番面, 7番面, 8番面으로 삼등분하였으며 加熱面の 位置와 面積의 變化에 따라 다르게 나타나는 縮小模型內에서의 熱·流動現象의 特徵을 分析하기 위해 [그림 2-2]에서 보는 바와 같이 5개 種類의 모델을 實驗對象으로 設定하였다.

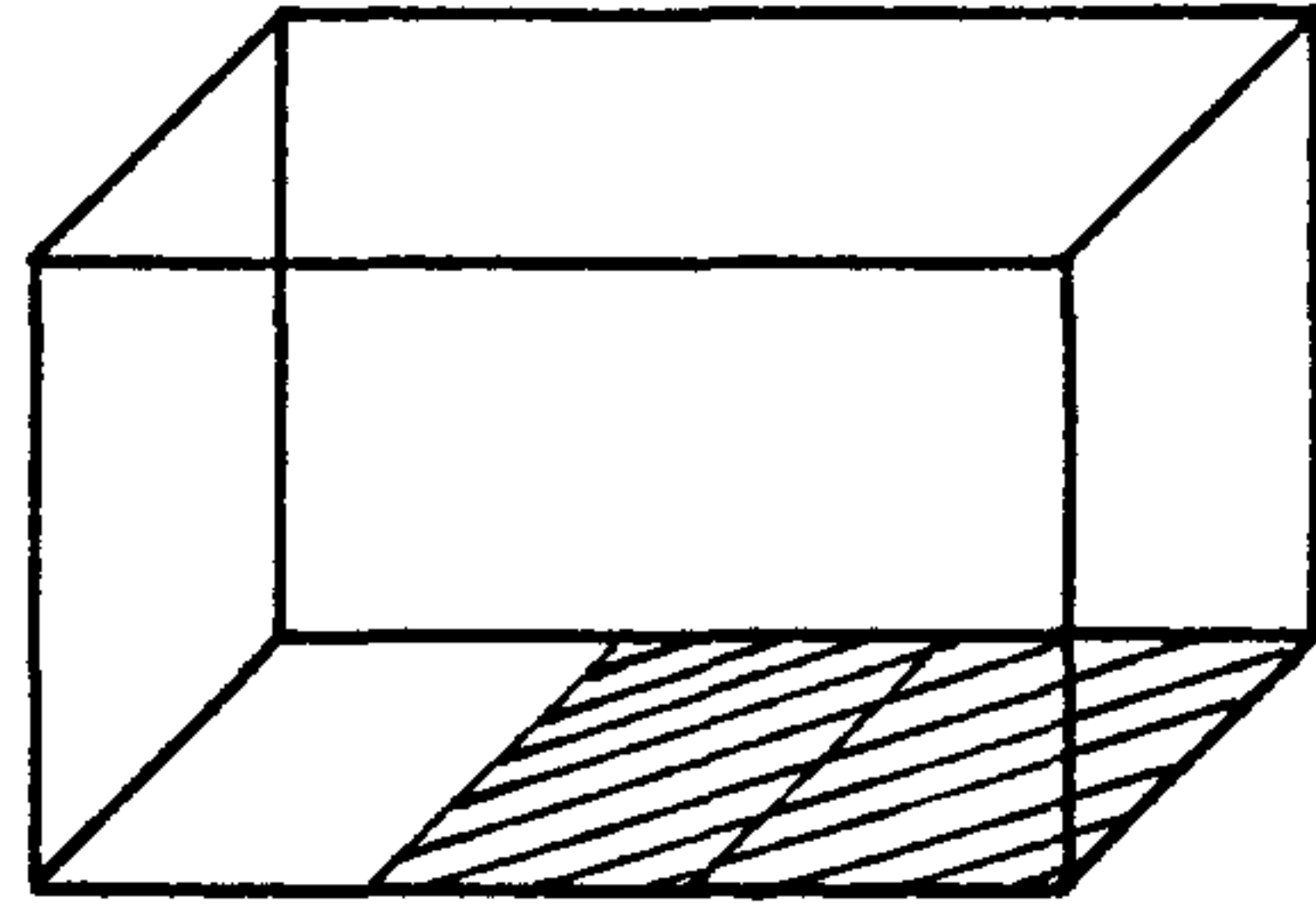
本 研究의 分析對象인 溫度場에 대해서는 測定分析의 영역을 [그림 2-3]에 있는 3개의 수직단면으로 하였고, 특히 中心線을 包含하는 수직단면에 대해서는 壁面을 통한 傳熱現象의 分析對象으로 設定하였다. 한편 流動場分析을 위해서는 [그림 2-4]의 수직단면을 測定·分析의 영역으로 하였다.



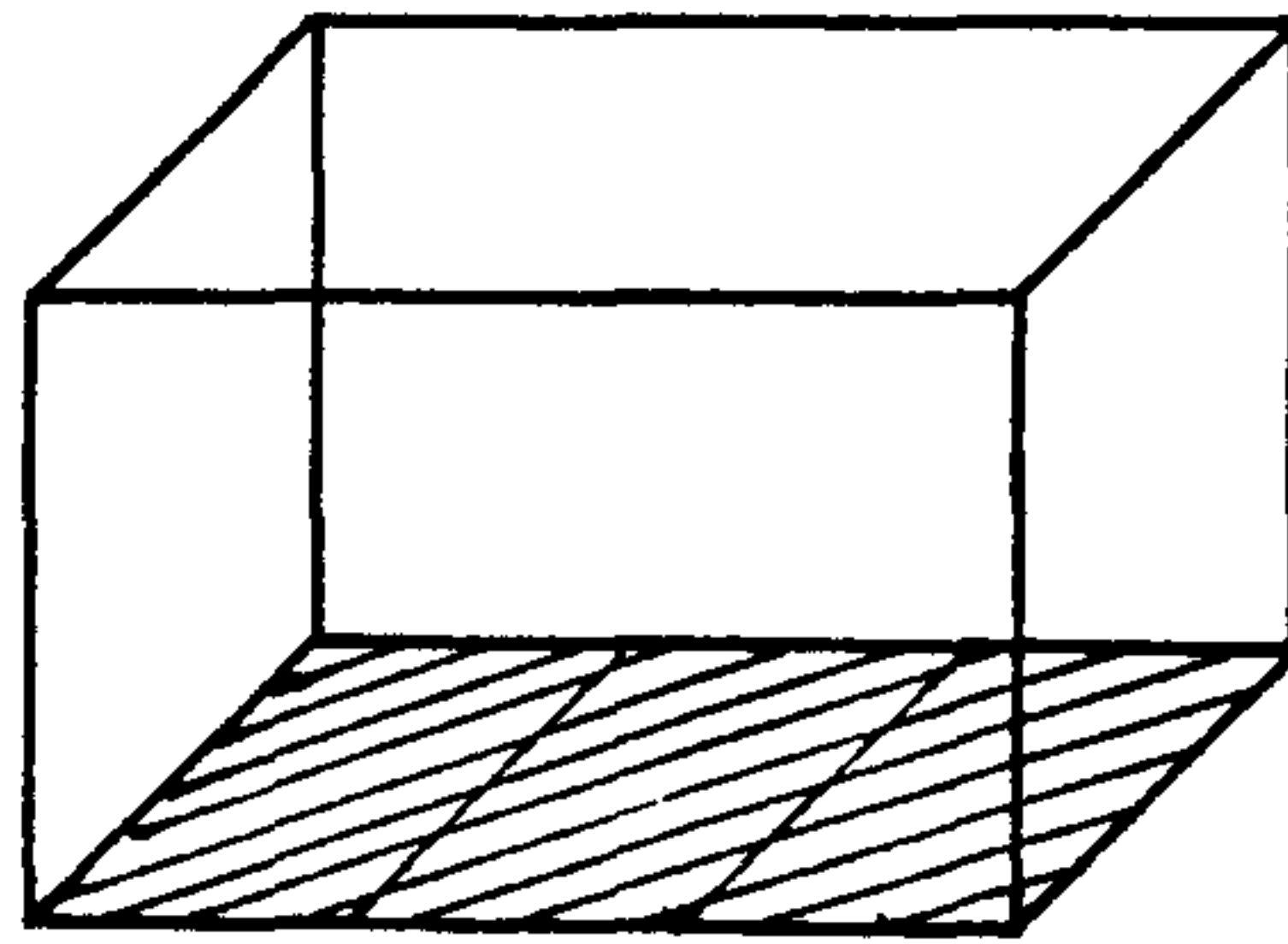
[그림 2-1] 축소모델의 개념도



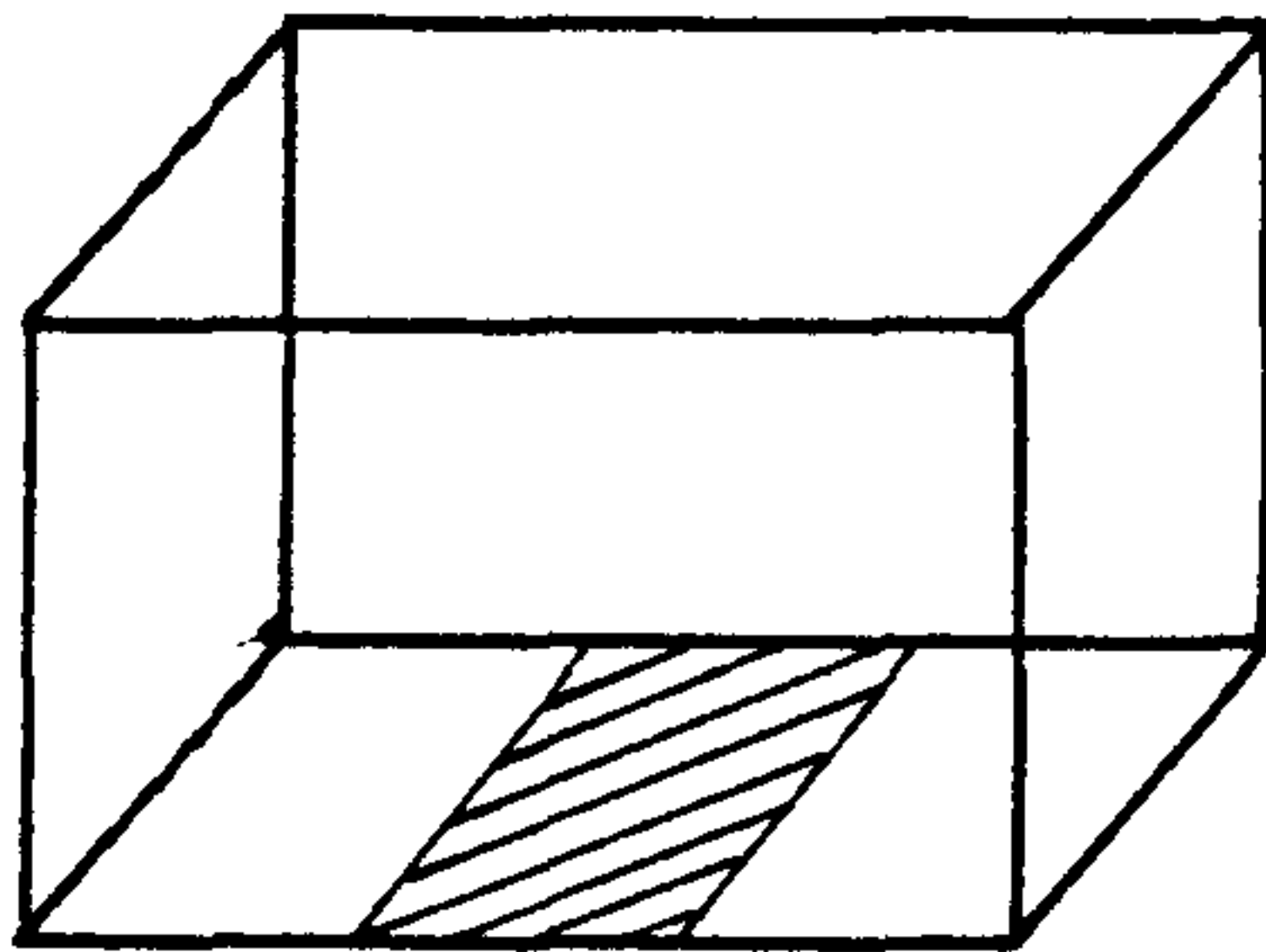
(모델 1)



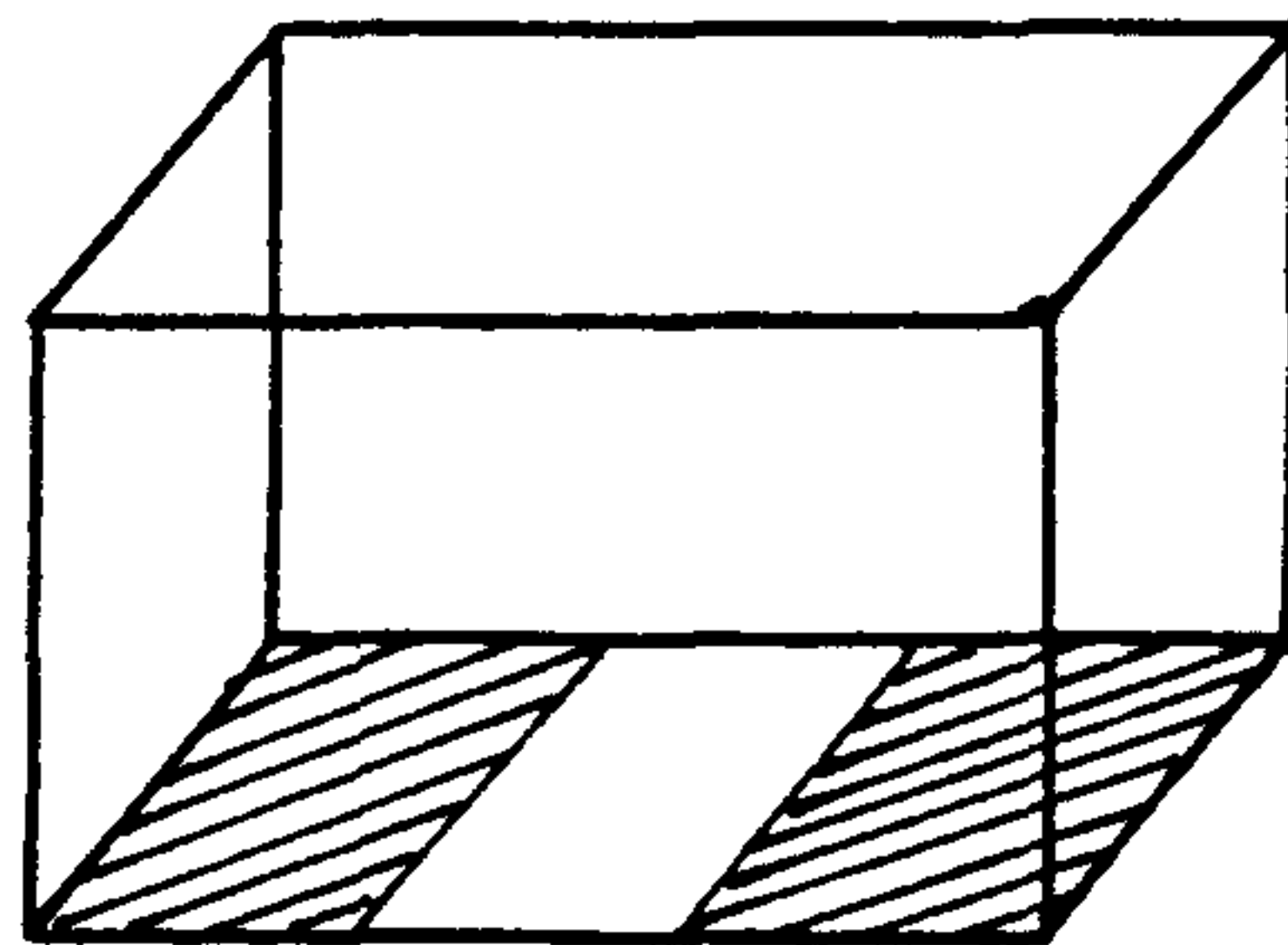
(모델 2)



(모델 3)

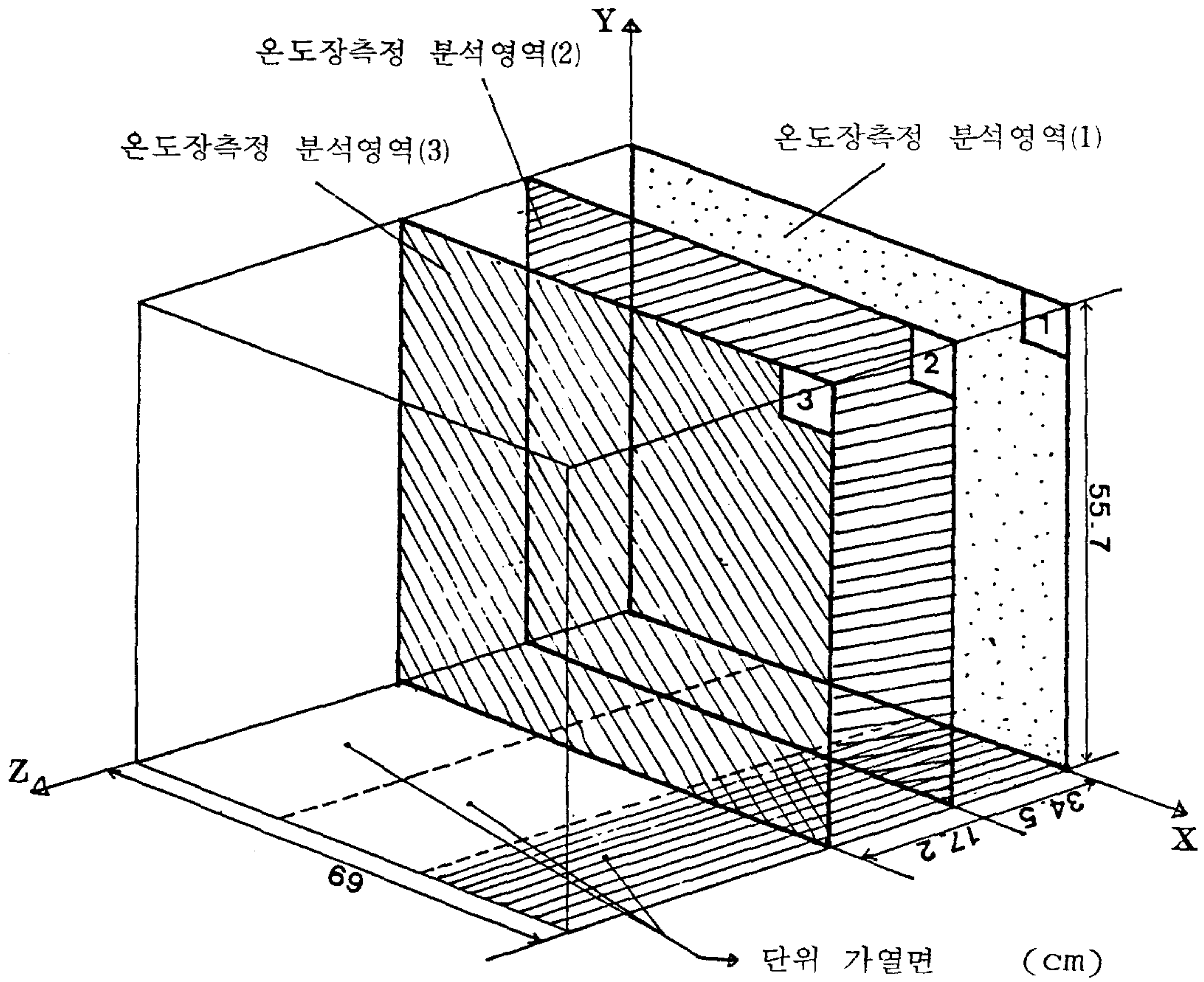


(모델 4)

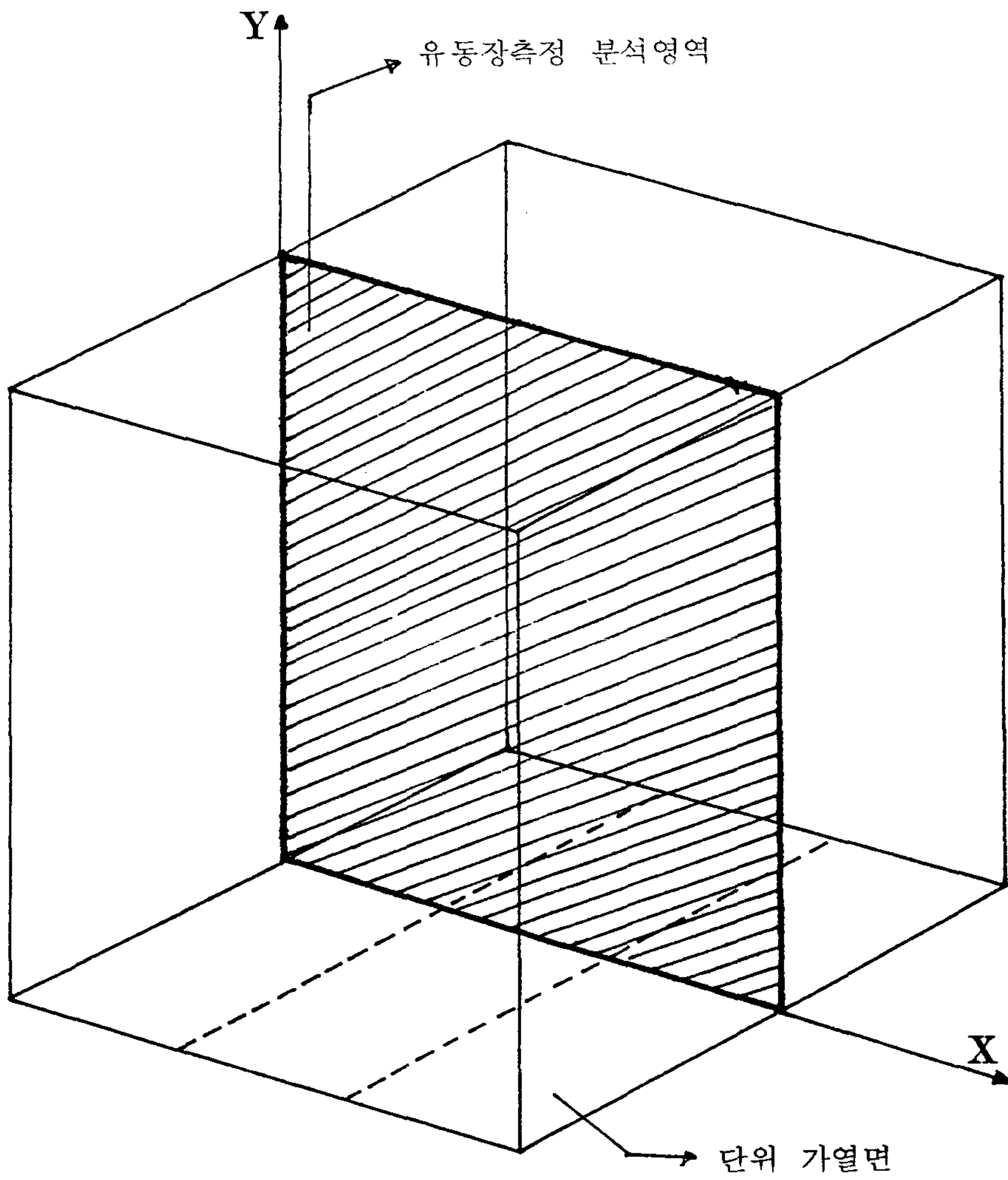


(모델 5)

[그림 2-2] 實驗・分析 모델의 分類



[그림 2-3] 温度場 測定, 分析領域



[그림 2-4] 流動場 測定, 分析領域

第 3 章 實驗裝置 및 實驗方法

第 1 節 溫度場 測定裝置

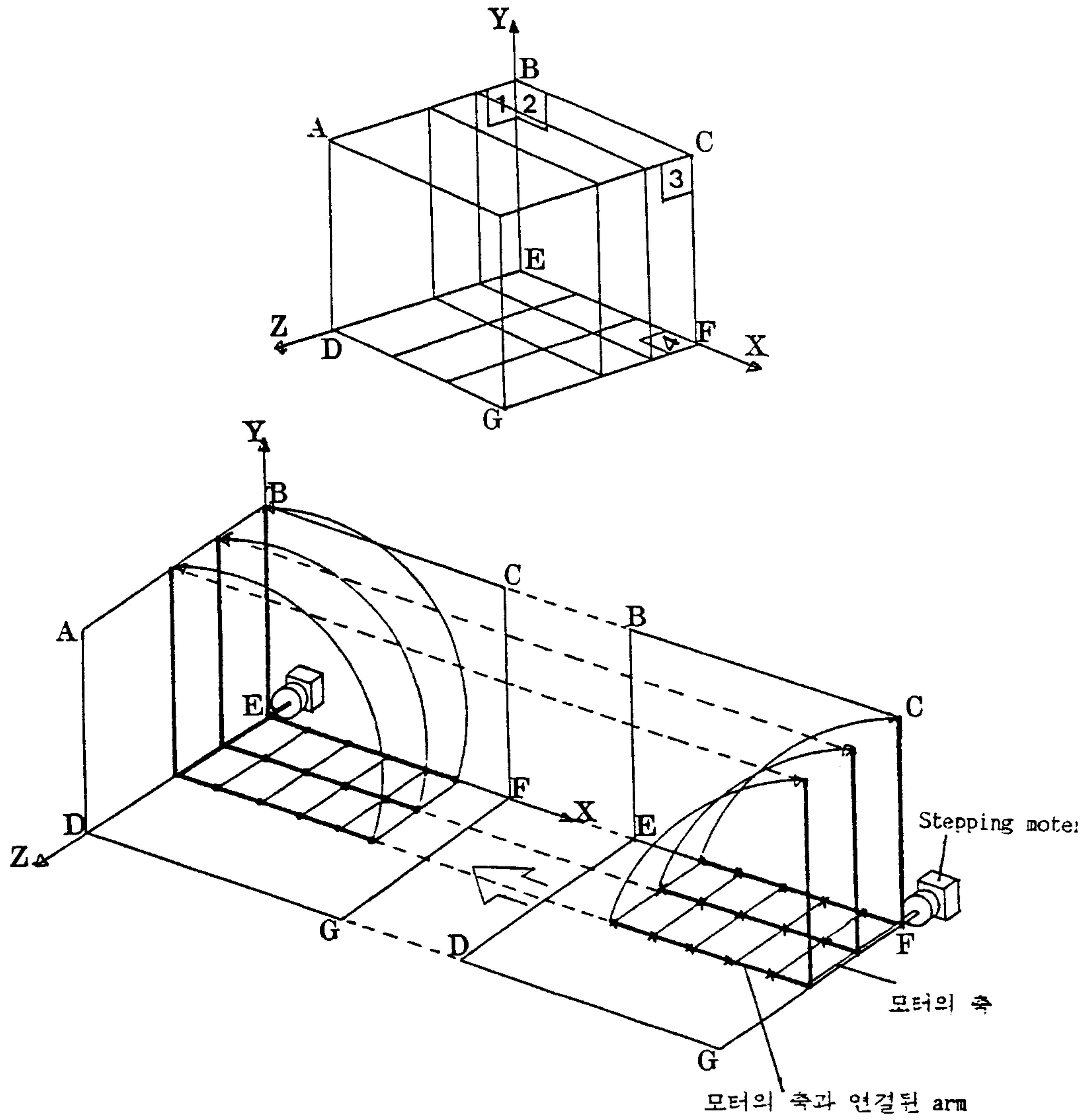
일반적으로 熱流動現象을 被測定시스템의 熱流動을 간섭하지 않으면서 測定하는 方法은 LDV(Laser Doppler Velocitymeter)나 Interferometer 등과 같은 非接觸式 測定시스템을 使用하는 것이 가장 理想的인 方法으로 알려져 있다. 그러나 이들 裝備는 高價이기 때문에 本 研究의 推進을 위한 事業豫算의 規模에서는 이들 장비의 確保가 不可能하였다. 따라서 本 研究에서는 부득이 熱電雙(Thermocouple)을 이용하는 接觸式 溫度測定法을 選擇하지 않으면 안되었다.

本 研究에서 測定, 分析의 관심영역은 本 研究報告書 第 2 章에서 記述한 바와 같이 $69\text{ cm} \times 55.7\text{ cm}$ 인 수직단면으로서 이 領域에서의 精밀한 溫度測定을 하기 위해서는 많은 수의 熱電雙의 設置가 要求되고 있다. 그러나 精밀한 溫度測定을 위해 많은 수의 熱電雙을 관심영역인 수직단면내에 설치하기 위해서는 熱電雙을 支持시키기 위한 構造物이 설치되어야 하며 熱電雙의 線을 가는 것을 使用한다고 하더라도 構造物의 列과 行을 따라서 설치되는 과정에서 여러 가닥의 熱電雙의 線이 합쳐져서 線의 굵기가 굵어지게 된다. 이와 같이 測定을 위해 설치되는 시스템이 커지게 되면 測定對象領域에서의 原來的 流動에 왜곡이 일어나기 때문에 正確한 溫度場의 測定이 어려워지게 된다.

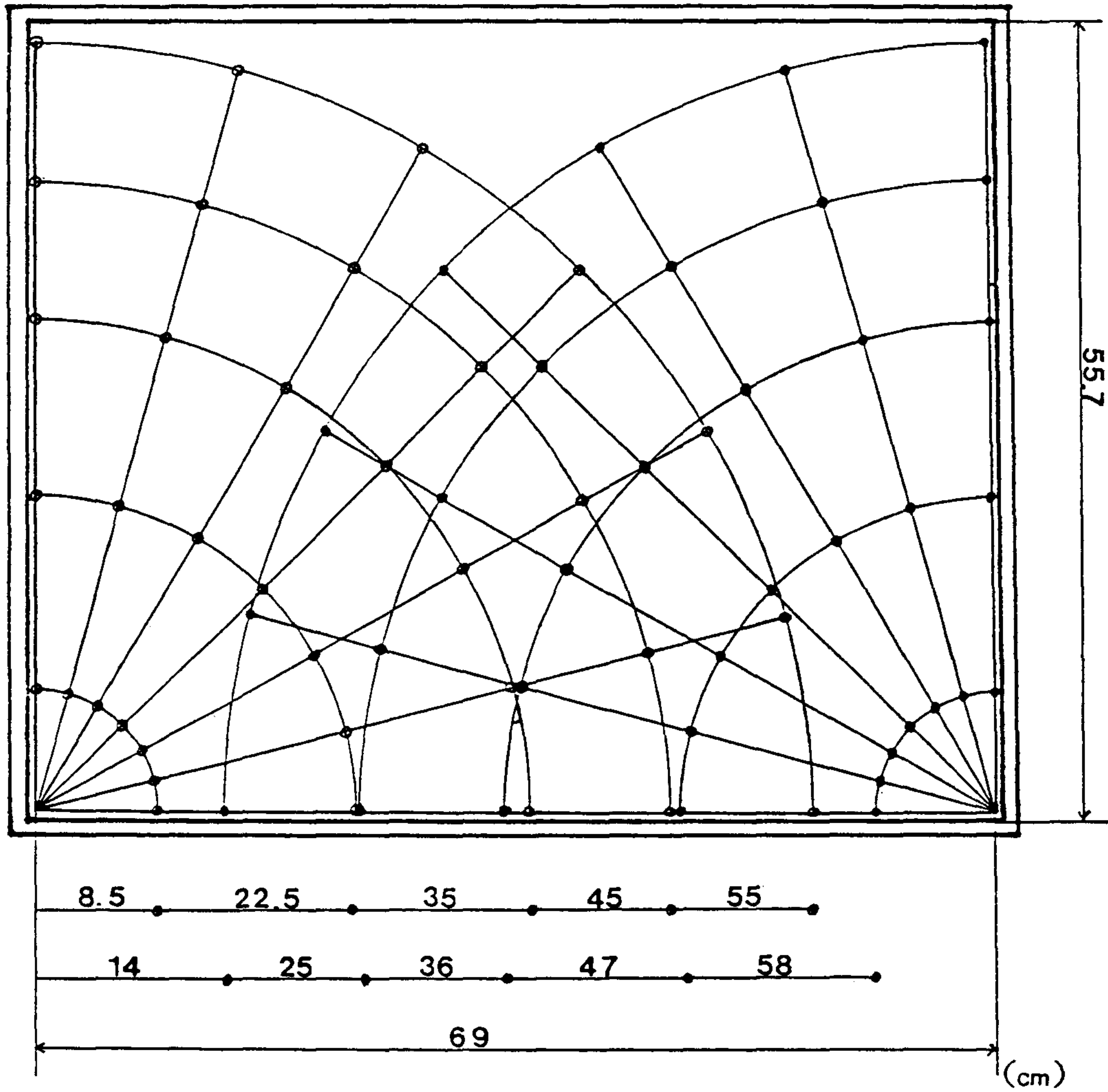
本 研究에서는 이와 같은 流動의 왜곡현상을 最小化하기 위해 [그림 3

-1]에서 보는 바와 같은 온도측정스캐너 (Temperature Measurement Scanner)를 開發, 製作하여 관심영역에서의 溫度를 측정하였다. 本 研究의 過程에서 개발된 온도측정스캐너는 [그림 3-1]에서 보는 바와 같이 2개의 Stepping Motor의 軸에 熱電雙設置를 위해 管으로 된 팔 (arm)을 부착시키고, 이 管으로 된 팔의 적정위치에 Test Cell 외부로부터 管의 속을 통해서 引入된 熱電雙을 設置한 후, Stepping Motor를 일정한 角度로 이동시키면서 관심영역인 수직단면상에서의 溫度가 測定될 수 있도록 하였다. 이때 모터의 軸은 熱電雙이 통과될 수 있도록 管으로 만들었으며 Test Cell의 壁面中 모터의 축이 관통되는 부위는 기계적인 실링 (Mechanical Sealing)을 함으로써 Test Cell 內로 注入되는 실험유체의 밀폐성이 유지될 수 있도록 하였다. 또한 모터의 축과 연결된 팔 (arm)은 가벼운 금속인 알루미늄제 관을 使用하였으며 Test Cell 內부의 온도대칭성을 고려하여 Test Cell 내부공간의 $\frac{1}{2}$ 만을 Scanning 하면서 측정토록 했다. 이 온도측정용 팔은 하나의 스텝핑 모터의 軸에 각각 3개씩 설치하였으며 하나의 팔에는 각각 5개 위치에 熱電雙을 설치하였다. 이들 熱電雙이 설치된 위치는 [그림 3-2]에서 보는 바와 같고 스텝핑 모터에 의해 바닥면에서 左右의 수직벽면까지 90° 각도를 15° 씩 회전하면서 溫度를 측정하는 것으로 되어 있다. 따라서 관심영역인 각각의 수직단면에서의 溫度測定點의 數는 左側의 Stepping Motor에 의한 것이 35개 地點, 右側의 Stepping Motor에 의한 것이 35개 地點으로 총 70개 地點에 달하고 있다. [그림 3-3]은 本 研究에서 개발한 온도측정 스캐너가 작동되는 장면을 나타낸 사진이다.

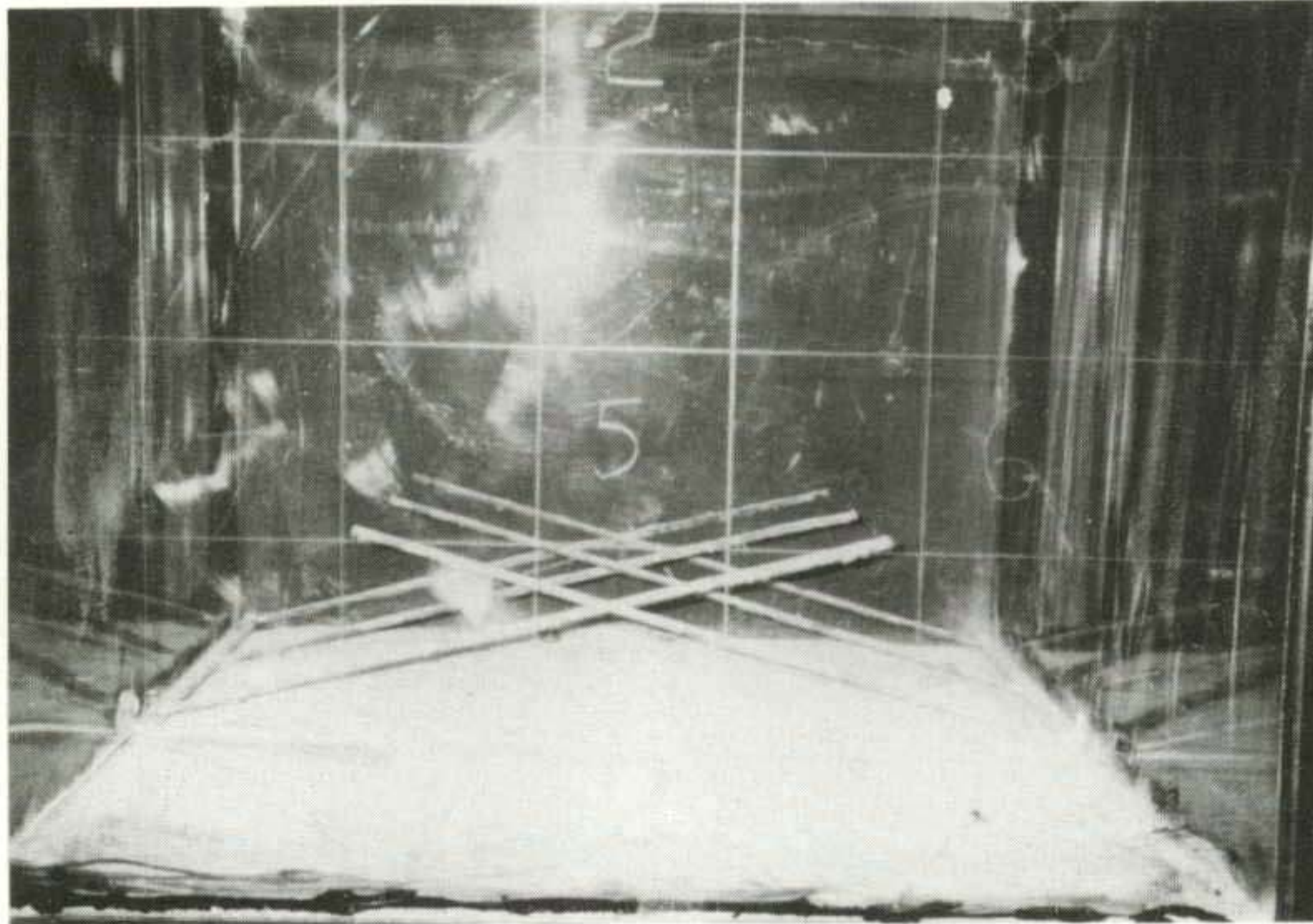
本 연구에서 사용한 스텝핑 모터는 日本의 オリエンタルモーター(株)의



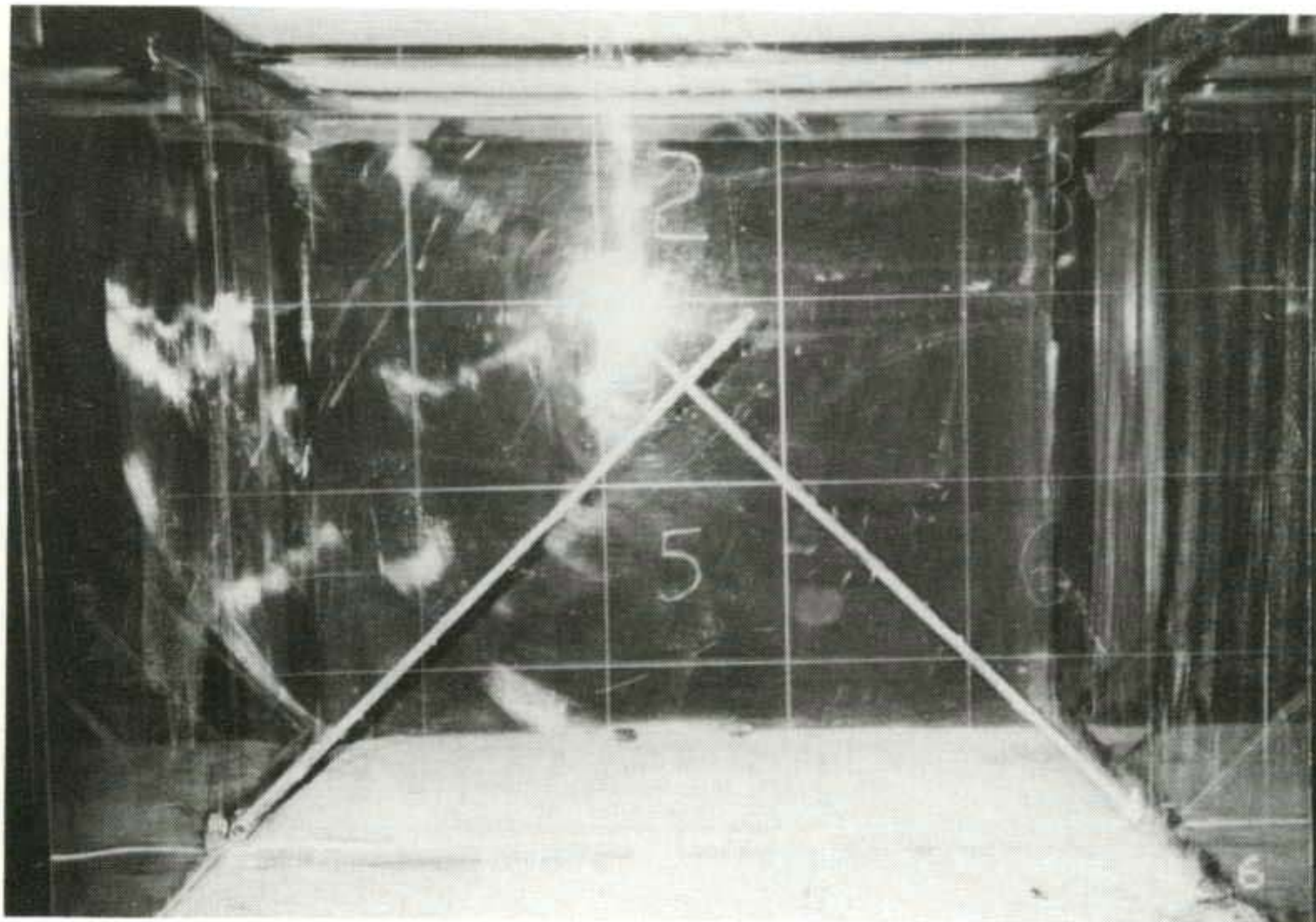
[그림 3-1] 온도측정스캐너 및 熱電雙設置位置



[그림 3-2] 온도측정단면에 있어서 온도측정스케너에 의한 温度測定位置



(a)



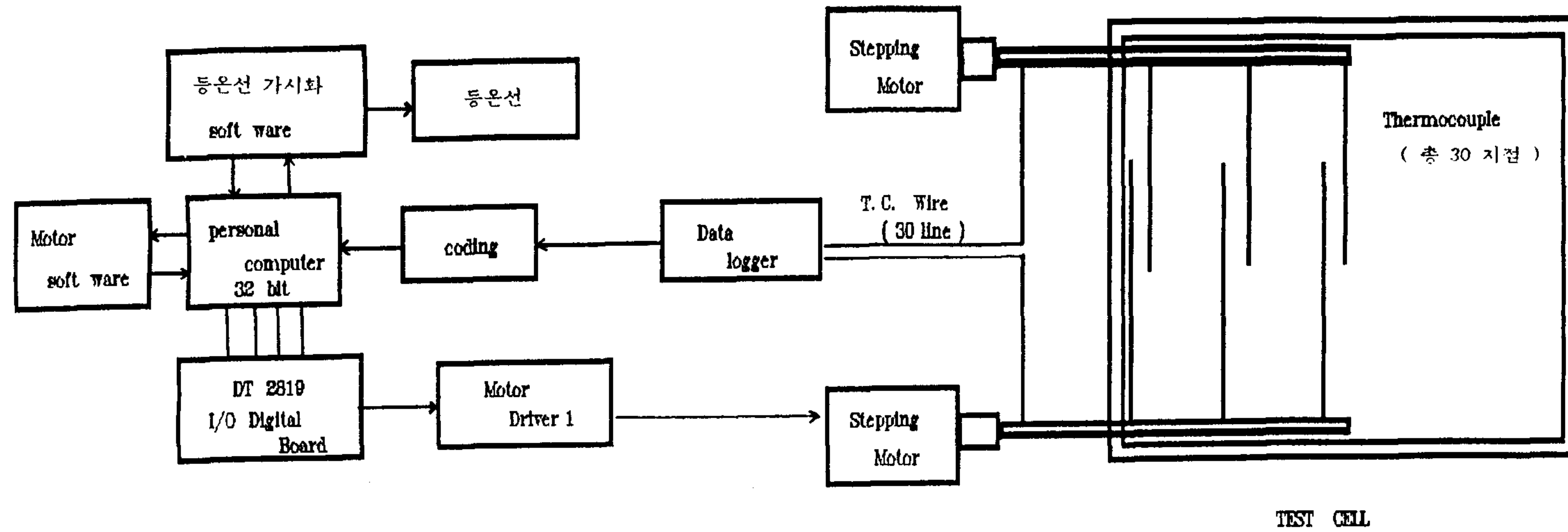
(b)

[그림 3-3] 온도측정스케너에 의한 온도측정장면
 (a) 스케너가 15° 회전한 경우
 (b) 스케너가 45° 회전한 경우

製品인 VEXTA 2 PHASE MOTOR(Model : PH266-01GK)를 使用하였으며
모터 드라이브도 同社 製品인 UD2115를 使用하였으며 [그림 3-4]에서
보는 바와 같이 Digital I/O Board를 D/C 컴퓨터 및 모터 드라이브
와 연결하여 컴퓨터에서 조작되는 Digital 신호를 Pulse신호로 변환시
켜서 Stepping Motor의 回轉動作이 조정될 수 있도록 하였다.

本 實驗에서는 Stepping Motor가 15°씩 繼續적으로 回轉되는데 15°
回轉 後 1分間 停止했다가 15° 回轉하고 다시 1分間 停止되었다가 15°
씩 回轉하는 動作을 바닥으로 부터 수직벽면까지 進行시킨 후에는 逆回轉
하면서 原來의 出發位置인 바닥면으로 돌아오는 것으로 하였다. Digital
I/O Board는 미국의 Data Translation, Inc.社 製品인 DT2819를 사
용했으며 모터구동조작 명령을 위한 Soft Ware는 PACER Program을
利用하되 本 研究目的에 부합되도록 프로그램을 작성해서 실행시켰다. 이
프로그램의 구성은 부록 1을 참고하기 바란다.

[그림 3-4]는 溫度場 測定分析시스템의 概念圖로서 온도측정스케너의 작
동과정과 측정된 縮小模型內的 溫度分布를 이용해 等溫線으로 可視化될 때
까지의 개략적인 과정을 나타낸 것으로서 本 溫度可視化 實驗의 概念을
理解하는데 도움이 될 것으로 생각된다.



[그림 3-4] 温度場 測定分析시스템의 概念圖

第 2 節 流動場可視化시스템

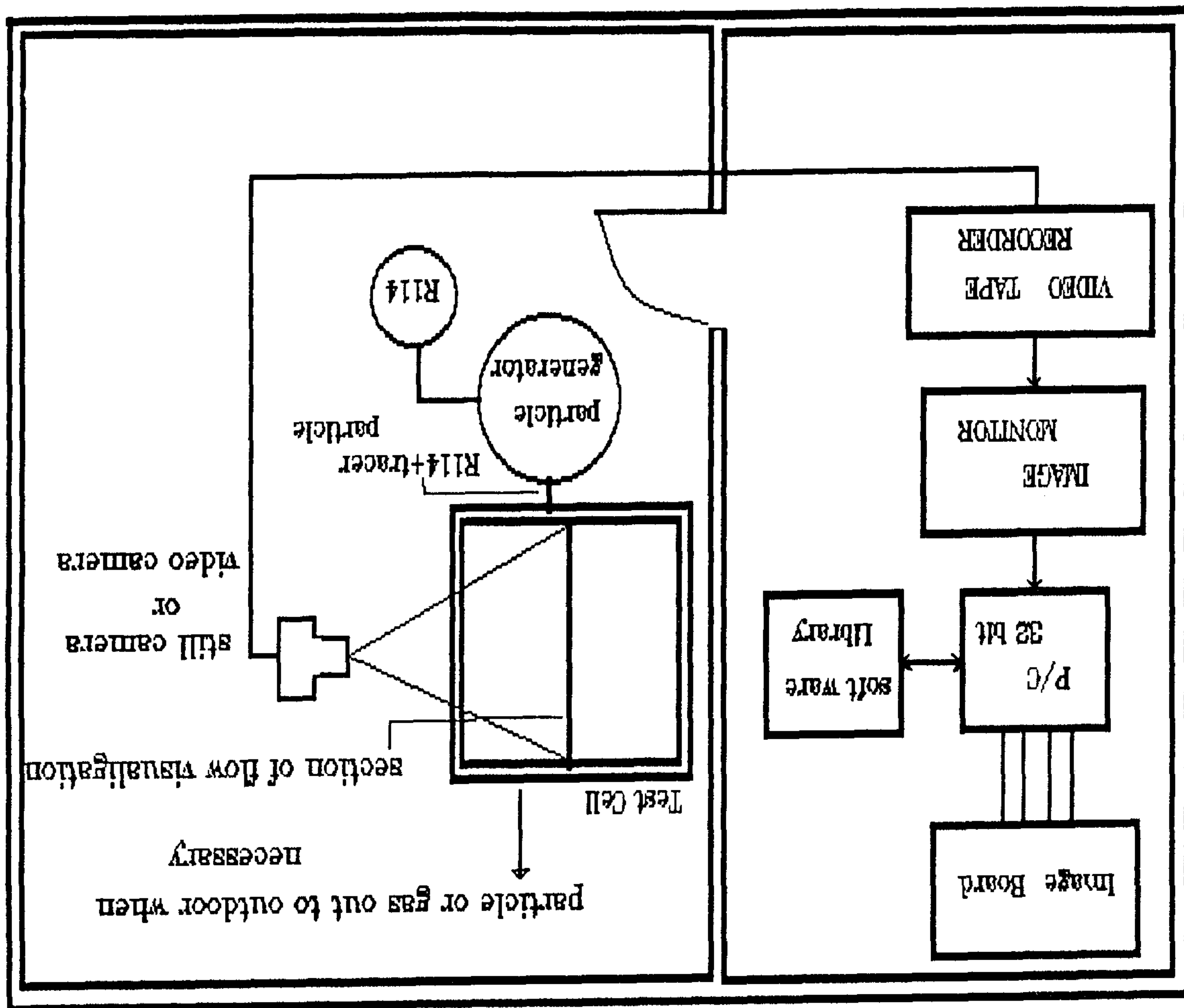
本 研究에서 使用한 유동가시화시스템은 다음과 같이 5개 種類의 장비로 구성되어 있다.

- 流動追跡粒子發生裝置
- 레이저 및 流動斷面照明裝置
- 流動場 촬영장치
- 촬영된 유동영상의 기록용 VTR
- 영상처리시스템

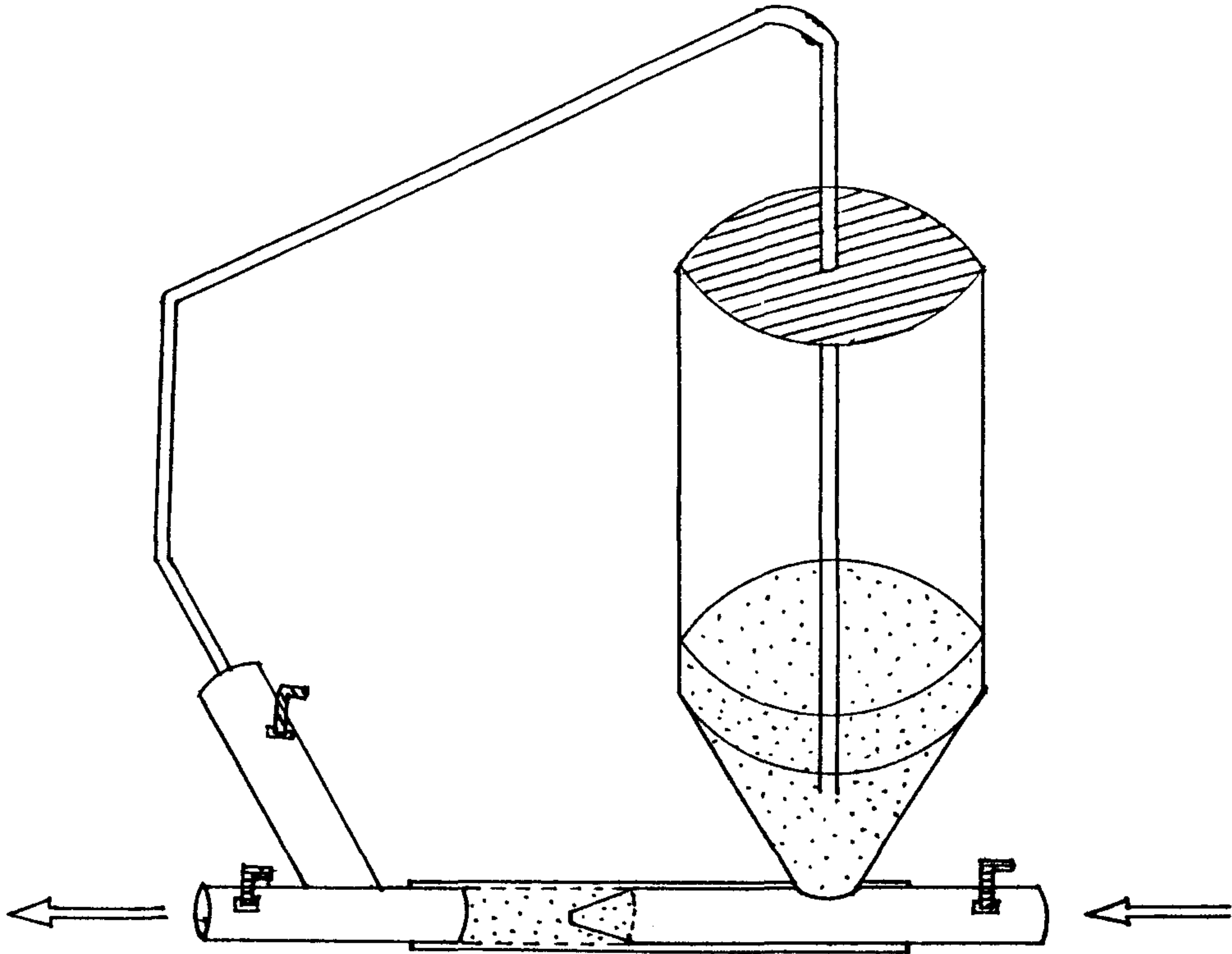
이러한 유동장가시화시스템은 대부분 前年度에 使用했던 장비를 그대로 이용했으나 유동추적입자발생장치와 촬영장치는 다소 개선시켰다.

[그림 3-5]는 올해 採擇한 유동가시화시스템의 概念圖이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 試驗體積內로 實驗流體인 R114와 流動追跡粒子가 注入되고 試驗體積의 주변경계조건을 願하는 條件으로 조작한 후 充分한 時間이 경과되면 시험체적내의 熱流動이 定常狀態에 도달된다. 이때 Laser를 방전시키기 시작하면 [그림 3-6]에서 보는 바와 같이 본 연구의 流動場分析을 위한 관심영역에 Laser Light Sheet가 형성되어 이 斷面에서의 流動狀態를 관찰할 수 있게 되며 [그림 3-5]에서 보는 바와 같이 Still Camera 또는 VIDEO Camera로 流動現象을 촬영한다. Video Camera로 촬영하는 경우 Test Cell이 있는 試驗室의 外部에 설치되어 있는 VTR로 Video Cable에 의한 영상을 보내어 녹화시키고 컴퓨터를 이용하여 可視화된 流動의 영상을 分析할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

流動追跡粒子發生裝置는 [그림 3-6]에서 보는 바와 같은 裝置를 製作하



[그림 3-5] 유동가시화시스템의 개념도 및 실험실에서의 배치도



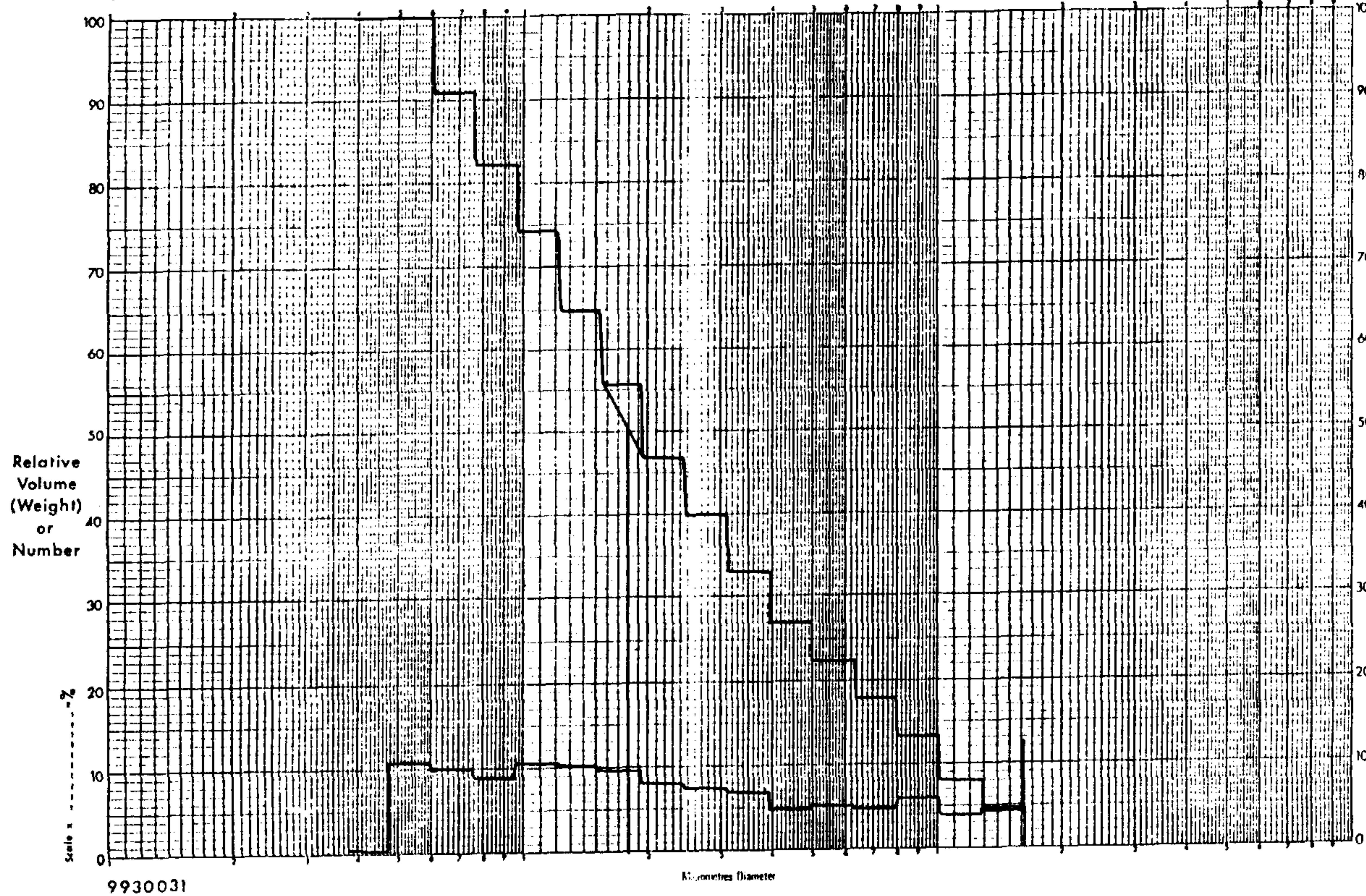
[그림 3-6] 流動追跡粒子發生裝置

여 사용하였으며 流動追跡粒子는 鹽基性 炭酸마그네슘 (Magnesium Carbonate, Basic ; $MgCO_3$; 分子量 84.32 ; 밀도 $1,640 \text{ kg/m}^3$) Extra pure 級 분말을 구입하여 Ball Mill에서 30時間 정도 습식분쇄한 후 전기건조로에서 140°C 로 17시간 정도로 充分히 건조시킨 후 사용하였다. 이렇게 해서 만들어진 탄산마그네슘 분말의 粒度分布는 [그림 3-7]에 나타난 바와 같이 平均粒徑 $1.8 \mu\text{m}$ 이고 粒徑이 $2 \mu\text{m}$ 以下인 것이 全體에 58.5%로 나타났다. R114로 가득찬 試驗體積內에서 粒徑 $2 \mu\text{m}$ 인 탄산마그네슘 粒子가 침강하는 速度는 Stoke 및 Kanigam의 보정식에¹⁾ 의해 계산하면 0.03 mm/s 로서 本 研究의 주어진 條件下에서 試驗體積內에서 發生되

COULTER COUNTER® MODEL TA II

SAMPLE _____
SOURCE _____

DATE _____
OPERATOR _____



W	2 ^w
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096
13	8192
14	16384
15	32768
16	65536
17	131072

Calibration	
Particle size d _p μm	
A	
W	
K	

$$d_{\mu m} = K \sqrt{\frac{2W}{A}}$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 2^{(w_2 - w_1)}$$



Electrolyte _____ Aperture Resistance _____ kΩ _____ ma. Sampling { Manometer _____ ml _____ 100% _____ Auto _____ Man _____ Extrap _____
Dispersant _____ Aperture Diameter _____ μm Serial No. _____ Preset _____ secs _____ count Baseline Channel _____ Gain _____

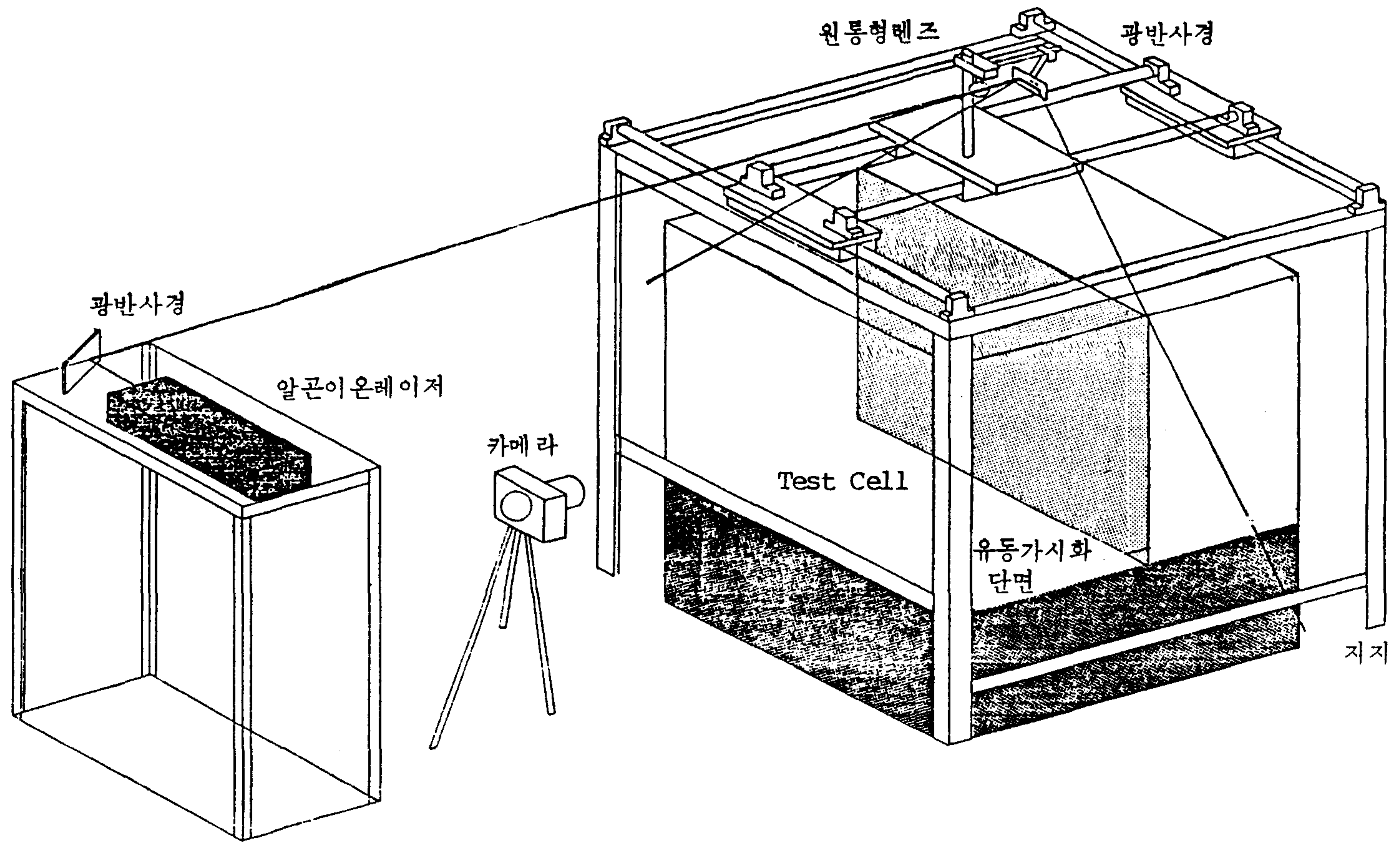
[그림 3-7] 실험에 사용한 탄산마그네슘 분말의 입도분포도

는 自然對流의 平均流速인 $10 \sim 50 \text{ cm/s}$ 와 비교할 때 입자의 침강속도가 평균유속의 $0.006 \sim 0.03 \%$ 정도로서 무시할 수 있는 미약한 값이 된다. 그러나 실제로는 $2 \mu\text{m}$ 이하인 미세입자가 상호 응결되기 때문에 침강속도는 多小 증가될 것으로 생각되나 이러한 입자의 응결체는 시험체적내에서 일어나는 對流過程에서 部分的인 分離가 일어나기 때문에 粒子에 의한 流動可視화가 가능하게 된다.

한편 流動斷面의 照明裝置는 前年度와 同一한 것을 使用하였으며 [그림 3-8]과 같다. 이 장치의 세부적인 內容에 대해서는 本 研究의 第1次年度의 研究報告書에 상세히 記述했으므로 여기에서는 說明을 생략하기로 한다. 조명장치를 위한 光源으로서는 Spectra Physics 社製 5W급 Ar 이온 레이저를 使用하였다.

照明된 流動斷面에서의 對流流動을 촬영하기 위해 Nikon FM3 카메라와 금성사의 비디오 카메라를 使用하였으며 本 研究報告書에서는 카메라에 의해 촬영한 流動사진을 中心으로 分析된 유동현상을 설명하고 비디오 카메라에 의한 유동의 녹화결과는 본 연구팀이 보관하고 있으면서 願하는 사람에게 공개시키거나 學術發表會 등과 같은 기회에 본 연구에서 포집한 유동을 시각적으로 전달하기 위하여 活用할 計劃이다.

한편 可視된 流動場影像의 定量的인 分析을 위한 영상처리장치는 Hardware적인 측면에서는 시스템을 구성하였으나 Hardware 구입시에 入手한 Software가 다소 미비한 점이 있어서 完全한 運用은 계속되는 研究期間에 보완하여 使用하기로 하였다. 이 영상처리시스템은 비디오에 의해 포집되는 유동의 영상을 임의의 2개 시점에서 정지된 形態의 粒子分布狀態를 잡아서 2개 시점간 粒子移動狀況 즉 속도벡터를 계산해서 나타나게



[그림 3-8] 流動斷面調明裝置

하며 Stream line, Vorticity line 및 壓力分布線 등을 나타낼 수 있는 기능을 보유하게 될 것이며, 本 研究에서는 비디오의 유동영상중 임의의 2개 시점에서의 정지된 영상을 Digitize 化해서 컴퓨터의 주기억장치에 기억시키는 단계까지의 작업을 完了하였음을 밝혀둔다.

第 3 節 實驗方法

縮小模型을 利用한 流動可視化 實驗을 위해 全體 시스템 중에서 프레온 가스용기, 流動追跡粒子發生裝置, Test Cell, 레이저, 流動斷面照明시스템, 사진기 또는 비디오 카메라는 恒溫, 斷熱暗室에 設置하고 Test Cell 內部에 온도측정스케너를 설치한다. 이와 함께 恒溫暗室의 前室에는 VTR, 컴퓨터, 온도측정스케너조작시스템, 영상처리장치를 설치하고 VTR 과 비디오 카메라는 Video Cable 로, 온도측정스케너와 同 스케너조작장치 및 Data Logger 는 熱電雙 (Thermocouple) 의 線과 스테핑 모터의 線을 前室과 恒溫室 사이의 壁에 뚫려져 있는 구멍을 通하여 연결시킨다.

그후 시험체적의 밑바닥을 面狀發熱體와 自動溫度調節器를 使用해서 원하는 시험조건으로 조절한 후 定常狀態에 도달될 때까지 充分한 時間을 기다린다. 엄밀한 의미에서 定常狀態에 도달하는 시간은 15시간 이상이 소요되지만 擬似定常狀態에 도달하는 時間은 1~2時間이면 된다. 本 實驗에서는 最小限 6時間 以上을 기다린 후 溫度場 및 流動場을 관찰하였다.

定常狀態에서 溫度場은 시험체적내에 설치되어 있는 溫度測定스케너를 恒溫室의 前室에 設置되어 있는 컴퓨터에 의해 원격조정한다. 이 溫度測定스

케너는 시험체적의 바닥을 3등분하여 설치한 加熱面の 境界선과 수직이며 바닥면에 수직인 溫度測定斷面을 15° 각도로 回轉하면서 이 斷面에서의 溫度分布를 熱電雙에 의해 측정하여 Data Logger 로 溫度情報를 보내고 컴퓨터에 의해 同 斷面에서의 等溫線分布가 可視化되어진다.

한편 流動場에 대한 측정을 위해서는 먼저 充分히 분쇄되고 건조된 염기성 탄산마그네슘 粉末을 實驗流體인 R114와 함께 시험체적내로 注入시킨다. 이를 위해서 시험체적 좌측벽의 하단부 中央에 있는 流動追跡粒子 注入口와 우측벽의 中央의 상단부에 있는 流出口를 열고 프레온 가스용기에 있는 밸브를 열면서 流動追跡粒子發生裝置를 작동시키면 프레온은 추적 입자발생장치를 통해 시험체적으로 注入되면서 追跡粒子로 염기성 탄산마그네슘 분말중에서 가벼운 粒子만을 동반하여 시험체적으로 注入된다. 이때 注入되는 流量은 140~150cm³/sec 内外로 하였으며 이러한 狀態에서 약 30분 정도가 경과되면 시험체적은 프레온가스와 追跡粒子가 혼합된 狀態로 가득 채워지는 즉시 프레온 가스용기의 밸브를 잠그고 시험체적에 있는 粒子-가스의 注入口와 流出口를 잠그고 시험체적의 밀폐성이 유지되도록 한다. 그 후 바닥온도의 條件을 원하는 實驗條件으로 조작하고 定常狀態가 될 때까지 充分한 時間을 기다린다.

바닥온도에 대한 온도조작은 시험체적 외부에 있는 자동온도조절기의 연결스위치를 조작하면 되는데 本 研究에서는 加熱面の 位置와 면적에 따라 5개의 實驗모델을 設定하였다. 이 모델의 세부내용에 대해서는 本 研究報告書 第2章을 參考하면 된다.

實驗條件으로 設定한 溫度에서 流動場이 定常狀態가 되면 流動分析斷面을 Laser Light Sheet에 의해 調明하면서 이 斷面に 나타나는 流線의 概

적을 적정노출조건에서 사진기로 촬영하고 비디오 카메라로 촬영한다. 本實驗에서와 같이 5W급 레이저에 의한 照明狀態인 경우 $f4.0 \sim f5.6$, 노출시간 1/2 ~ 2 秒 정도가 적합하며 Laser 光과 시험체적의 경계면에서 發生되는 反射, 散亂光을 防止하기 위해서는 흑색 無光 페인트를 바닥면과 시험체적내부의 배경면에 칠해주는 것이 좋다. 또한 사진촬영부위가 69cm × 55.7cm인 수직단면에 있는 미세입자로서 사진기의 위치가 가깝기 때문에 流動斷面の 中心부와 둘레부분 사이에는 초점거리의 차이가 발생된다. 따라서 관심도가 높은 영역을 中心으로 초점거리를 맞추는 것이 좋다. 이 때 流動場에 대한 촬영은 비디오 카메라로도 하였는데 本 報告書에는 사진촬영결과만을 中心으로 分析하되 비디오 촬영, 녹화결과를 참고하였다.

第 4 章 溫度場可視化 實驗結果 및 分析

第 1 節 實驗모델

溫度場可視化 實驗은 <表 4-1>에서 보는 바와 같이 15개 모델로 分類하여 수행하였으며 各各의 모델별로 [그림 2-3]에서 보는 바와 같이 縮小모델내의 바닥에 3等分되어 깔려있는 단위가열면의 縱線方向에 수직이며 바닥면과 수직을 이루는 3개의 수직단면에서의 溫度場 形成狀況을 分析하였다. <표 4-1>에서 보는 바와 같이 實驗모델은 모델번호 1번 부터 5번까지는 加熱面과 非加熱面의 溫度差異를 10°C 로 고정시키고 加熱面의 位置와 面積을 變경시키면서 實驗을 수행하였고 나머지는 加熱面과 非加熱面의 溫度差異가 15°C , 20°C , 25°C 로 증가시키면서 加熱面의 位置와 加熱面積의 變化에 따른 溫度場變化를 分析하였다. 이와같은 실험모델의 設定은 最近 溫突暖房에서 重要時되고 있는 室內 적정방열면적의 決定 및 방열위치선정에 따른 室內溫熱環境評價나 벽면을 통한 손실열량의 特性을 규명하는 등의 研究에 基本的인 實驗, 分析資料를 제공함이 목적이다.

本章에서는 이들 실험모델중 처음의 5개 모델에 대해서는 等溫線의 分布狀況을 分析할 예정이며 벽면을 통한 모델별 열손실특성을 分析하기 위해 右側壁을 따라 형성되는 Nusselt 수의 變化를 15개 모델에 대해서 分析할 예정이며 모델번호 6번 부터 15번 까지의 等溫線分布狀況은 부록에 수록하기로 하겠다.

〈表 4-1〉 溫度場可視化 實驗 모델의 分類

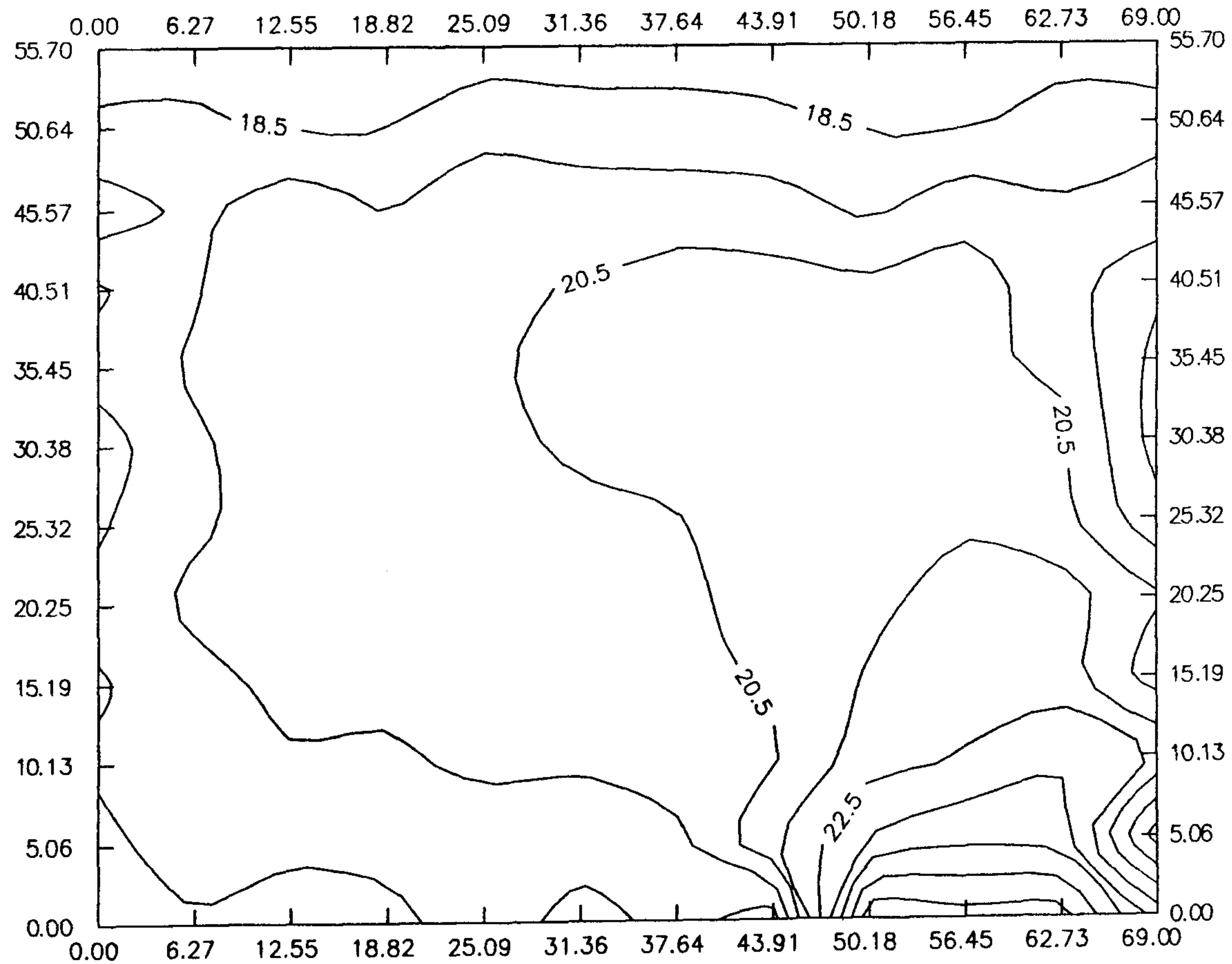
모델 번호	加熱面積 및 位置	加熱面溫度 °C	非加熱面 溫度, °C	溫度差 °C
1	바닥右側 $\frac{1}{3}$ (그림2-2 모델1)	28	18	10
2	바닥右側 $\frac{2}{3}$ (그림2-2 모델2)	30	20	10
3	전체바닥면 (그림2-2 모델3)	30	20	10
4	바닥中央 $\frac{1}{3}$ (그림2-2 모델4)	30	20	10
5	바닥左, 右側 各各 $\frac{1}{3}$ (그림2-2 모델5)	30	20	10
6	바닥右側 $\frac{1}{3}$ (그림2-2 모델1)	30	18	12
7	" (")	38	18	20
8	" (")	40	20	20
9	" (")	44	19	25
10	바닥右側 $\frac{2}{3}$ (그림2-2 모델2)	35	20	15
11	전체바닥면 (그림2-2 모델3)	38	23	15
12	바닥中央 $\frac{1}{3}$ (그림2-2 모델4)	38	18	20
13	바닥左, 右側 各各 $\frac{1}{3}$ (그림2-2 모델5)	39	29	10
14	" (")	40	25	15
15	" (")	50	30	20
16	바닥中央 $\frac{1}{3}$ (그림2-2 모델3)	49	24	25

第2節 等溫線分布 結果分析

本 研究의 溫度場 測定結果는 [그림 4-1]에서 [그림 4-15]와 같다. 本 研究에서 채택한 측정시스템은 本 研究의 수행과정에서 개발된 것으로서 本 研究報告書 第3章 第1節에서 상세하게 說明했기 때문에 本 節에서는 생략한다.

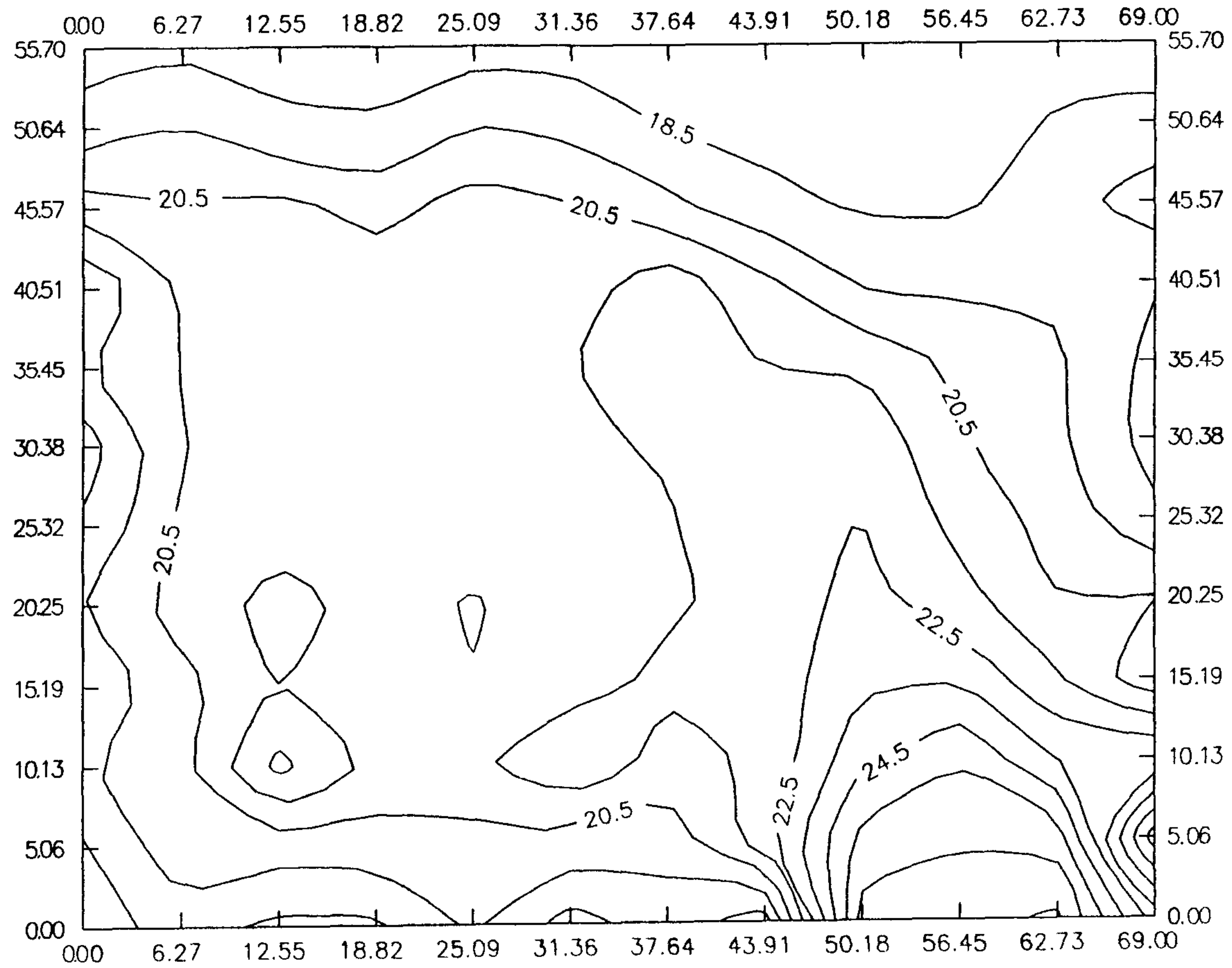
[그림 4-1], [그림 4-2], [그림 4-3]은 <表 4-1>의 실험모델중 1번 모델에 대한 等溫線分布를 나타내고 있다. [그림 4-1]은 [그림 2-3]에서 온도장의 측정분석영역중에서 1번의 수직단면상에서의 (XY plane) 등온선분포를 나타내고 있으며 [그림 4-2]는 2번의 수직단면 그리고 [그림 4-3]은 3번의 수직단면에서의 등온선분포를 나타낸다. 본 절에서는 계속되는 다른 모델의 분석에서도 일관되게 [그림 2-3]에서 정의한 온도장측정분석 수직단면의 번호를 사용할 예정이니 참고바란다. 이들 그림에서 나타난 등온선분포는 加熱面인 $X = 46\text{cm}$ 부터 $X = 69\text{cm}$ 부근에서 심한 溫度구배를 가지고 있으며 수직단면이 1번면에서 3번면으로 이동됨에 따라 左下部의 溫度가 上昇됨을 알 수 있는데 이는 實驗前부터 充分히 예측할 수 있는 결과이다. 벽면과 인접한 1번면인 경우 左下部는 3次元 축소모형에서 加熱面과의 相對的인 거리가 가장 큰 부분으로서 냉각효과가 커지고 있음을 알 수 있다. 또한 2번과 3번의 수직단면에서의 등온선분포중 左側部에 나타나는 等溫線의 2次세포는 축소모형내에서의 流動이 亂流流動으로서 2次세포유동의 생성 - 소멸이 發生되는 과정에서 나타나는 유동정체현상에 기인되는 것으로 판단되는데 이와 같은 현상의 數値解析에서는 추출하기 어려운 熱流動現象으로서 向後 계속적인 研究가 要求되는 문제중에 하나라고

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-1(28-18)



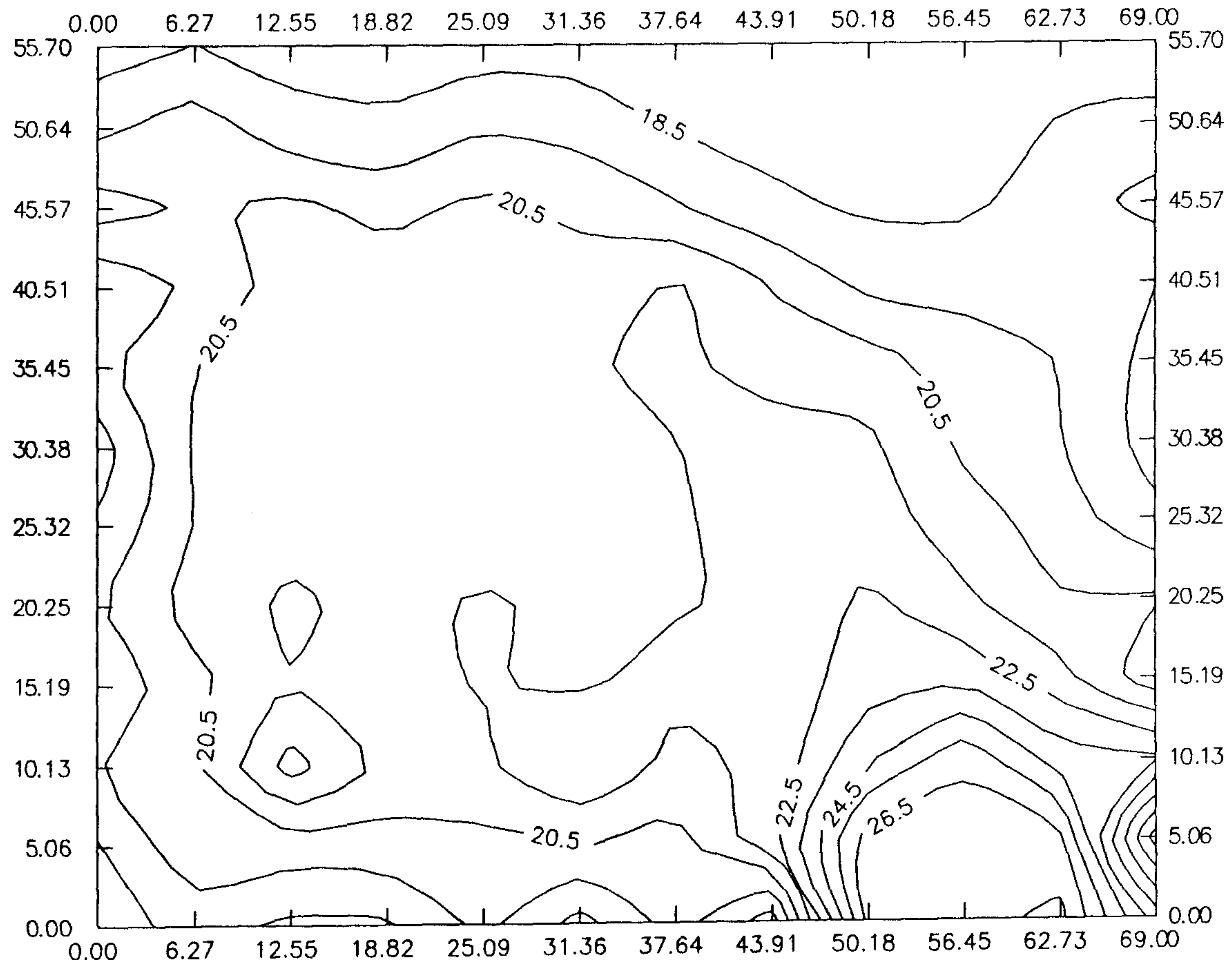
[그림 4-1] 실험모델 1의 등온선 분포 (1)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-2(28-18)



[그림 4-2] 실험모델 1의 등온선 분포 (2)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-3(28-18)



[그림 4-3] 실험모델 1의 등온선 분포 (3)

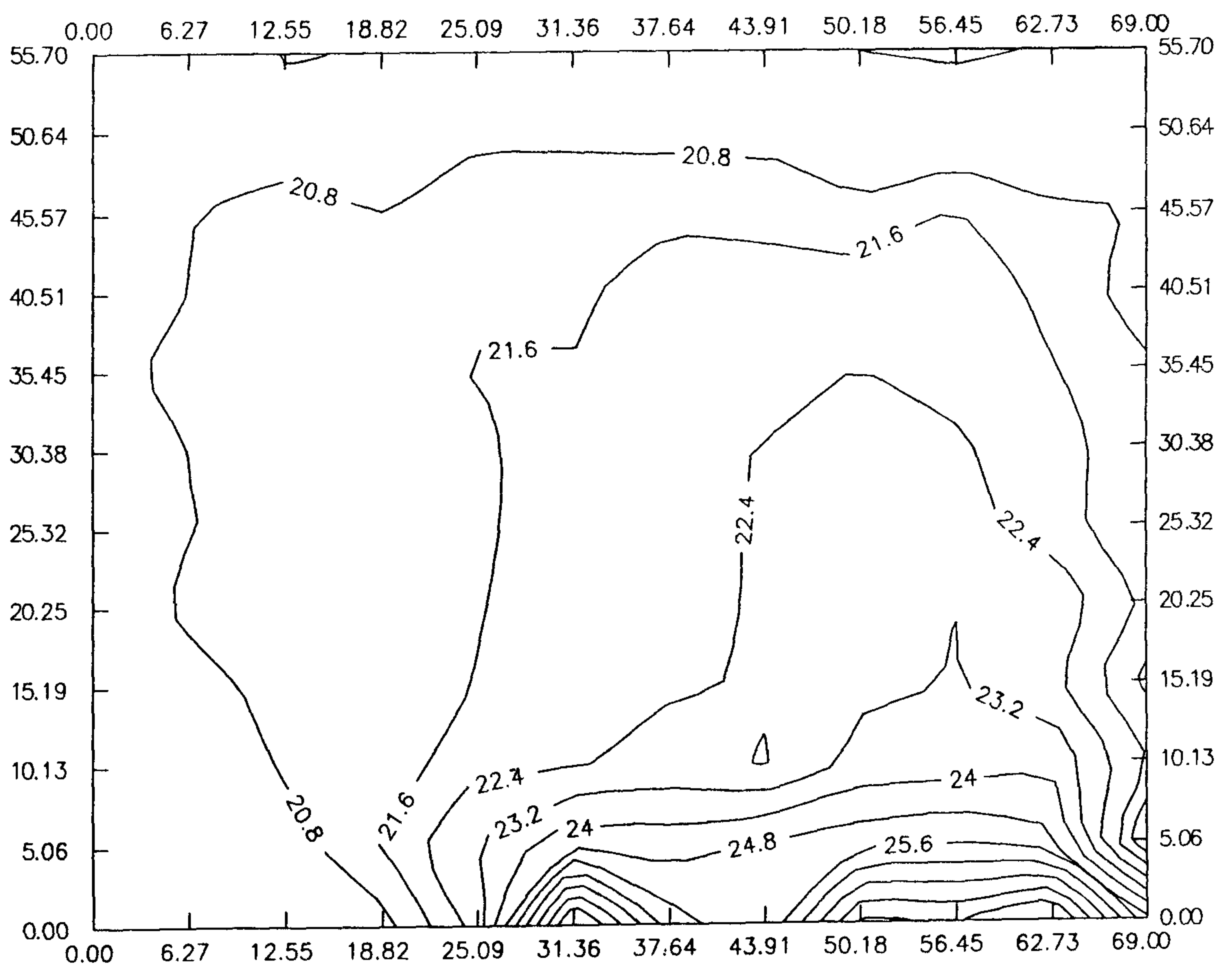
할 수 있다.

[그림 4-4], [그림 4-5], [그림 4-6]은 각각 <表 4-1>의 실험모델중 2번 모델에 대한 등온선분포중 [그림 2-3]의 1,2,3번 수직단면상의 등온선분포를 나타내고 있다. 이 모델은 밑면의 $\frac{2}{3}$ 가 加熱面으로서 加熱面の 위치가 $X=23\text{cm}$ 부터 $X=69\text{cm}$ 까지의 범위에 있는 것으로서 1번 실험 모델에 비해 加熱面の 면적이 2배이다. 2번 모델의 등온선의 분포경향은 대체적으로 1번 모델과 비슷한 양상을 나타내고 있으나 室内溫度的 분포가 比較的 높게 형성되어 있음을 알 수 있다. 2번 모델에서도 1번 수직단면 左下部에서의 냉각현상은 1번 모델의 경우와 비슷한 경향을 나타내고 있으며 1,2,3번 면에서의 등온線擴張現象도 1번 모델과 유사함을 알 수 있다.

[그림 4-7], [그림 4-8], [그림 4-9]는 각각 <表 4-1>의 실험모델중 3번 모델에 대한 등온선분포중 [그림 2-3]의 1,2,3번 수직단면상의 등온선 분포를 나타내고 있다. 이 모델은 전체바닥면이 加熱面으로서 1, 2, 3번 모든 수직단면에서 대체적으로 左右대칭이 이루어지고 있음을 알 수 있으나 部分的으로는 조금씩 어긋나는 부분도 存在하고 있다. 이는 本 實驗에서 使用된 Thermocouple 등에 流動追蹟粒子등이 도포되어 溫度感知時間에 문제가 發生된 것으로 추측되나 追後 계속적으로 규명해야 할 문제로 남아 있다. 이 모델에서도 앞의 2개 모델의 경우와 같이 壁面근처에서의 냉각현상이 관찰되었다.

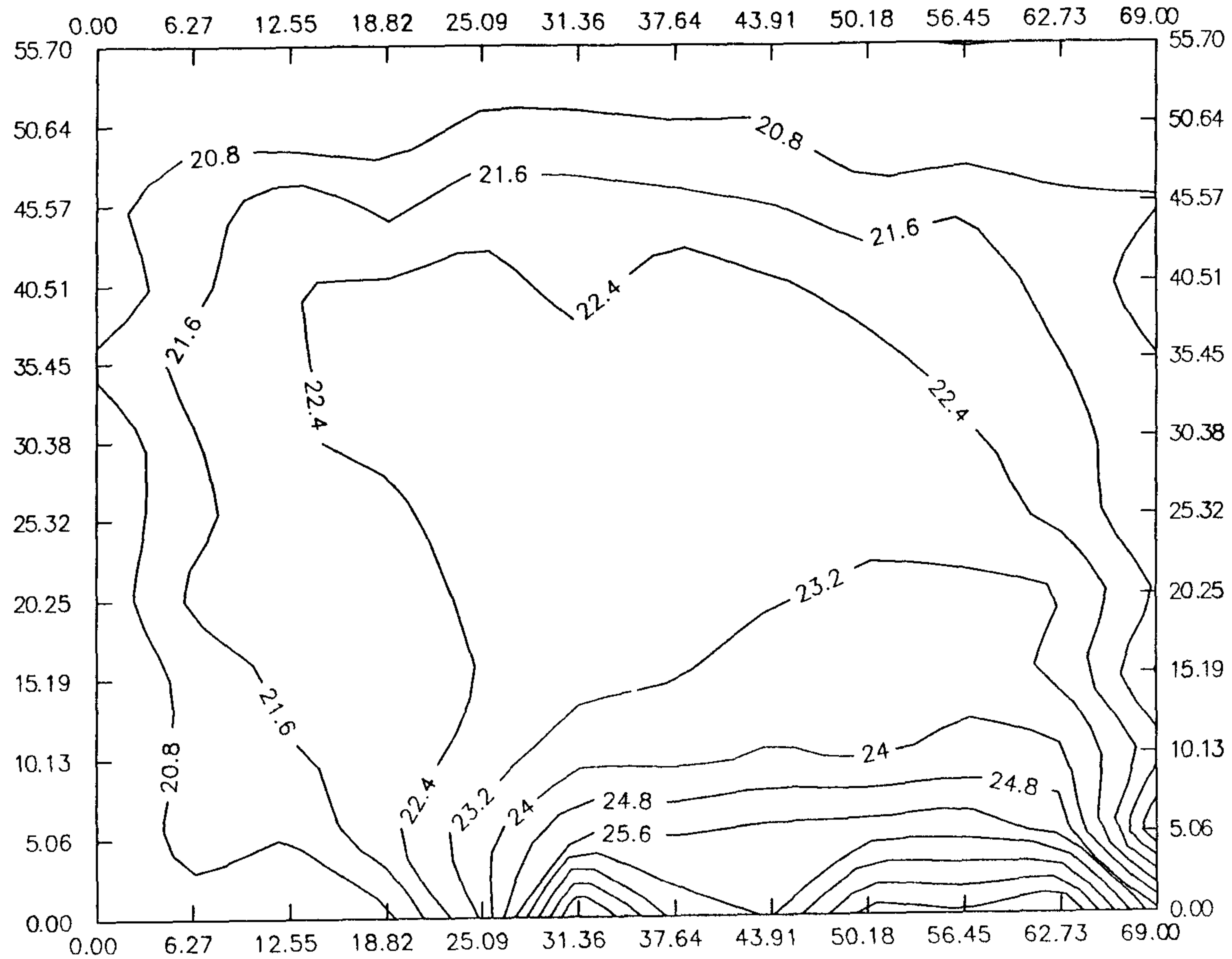
[그림 4-10], [그림 4-11], [그림 4-12]는 각각 <表 4-1>의 실험모델중 4번 모델에 대한 등온선분포중 [그림 2-3]의 1,2,3번의 수직단면상의 등온線分佈를 보여주는 것이다. 이 모델은 바닥의 全이 加熱面으로서

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL2-1(30-20)



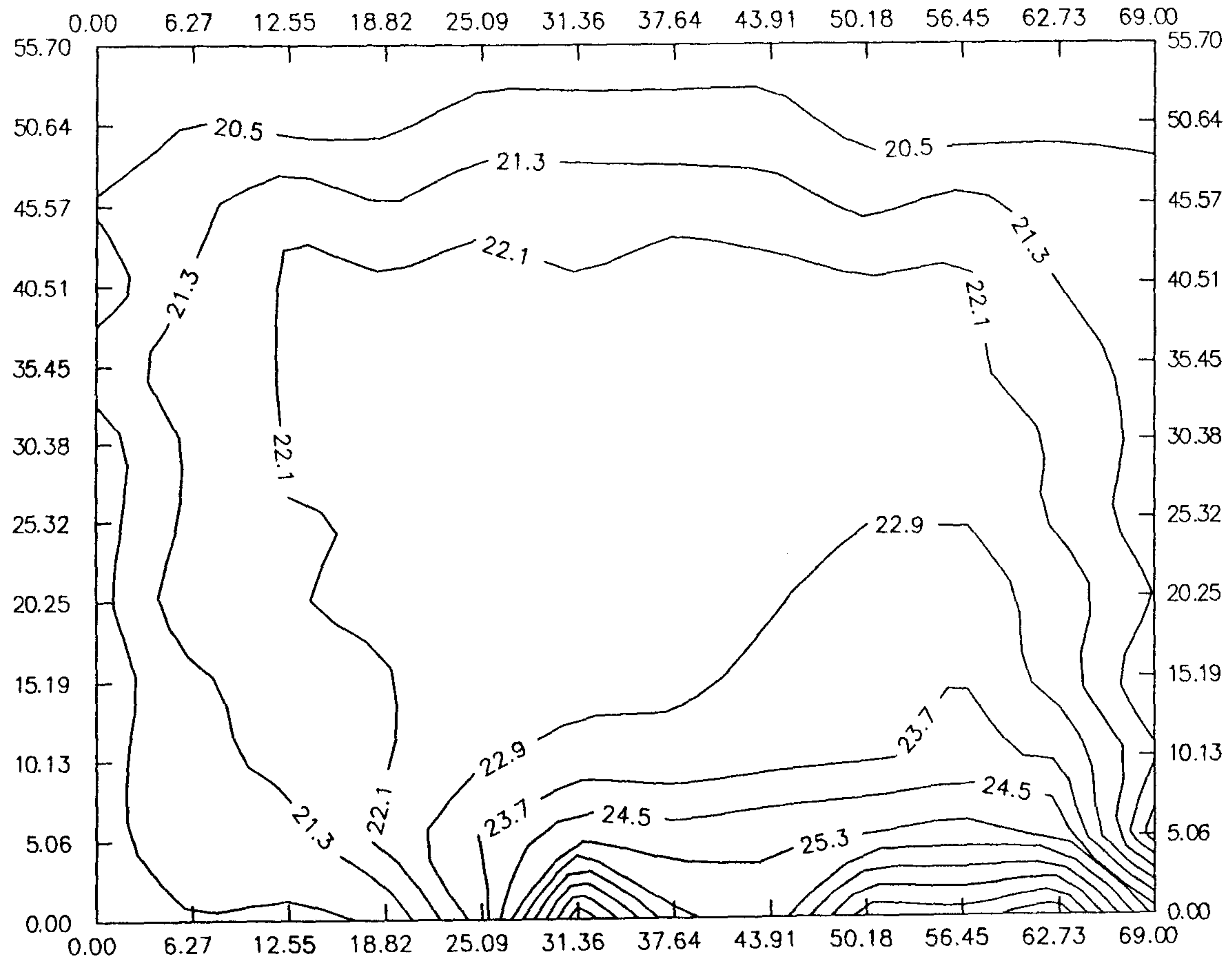
[그림 4-4] 실험모델 2의 등온선 분포 (1)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL2-2(30-20)



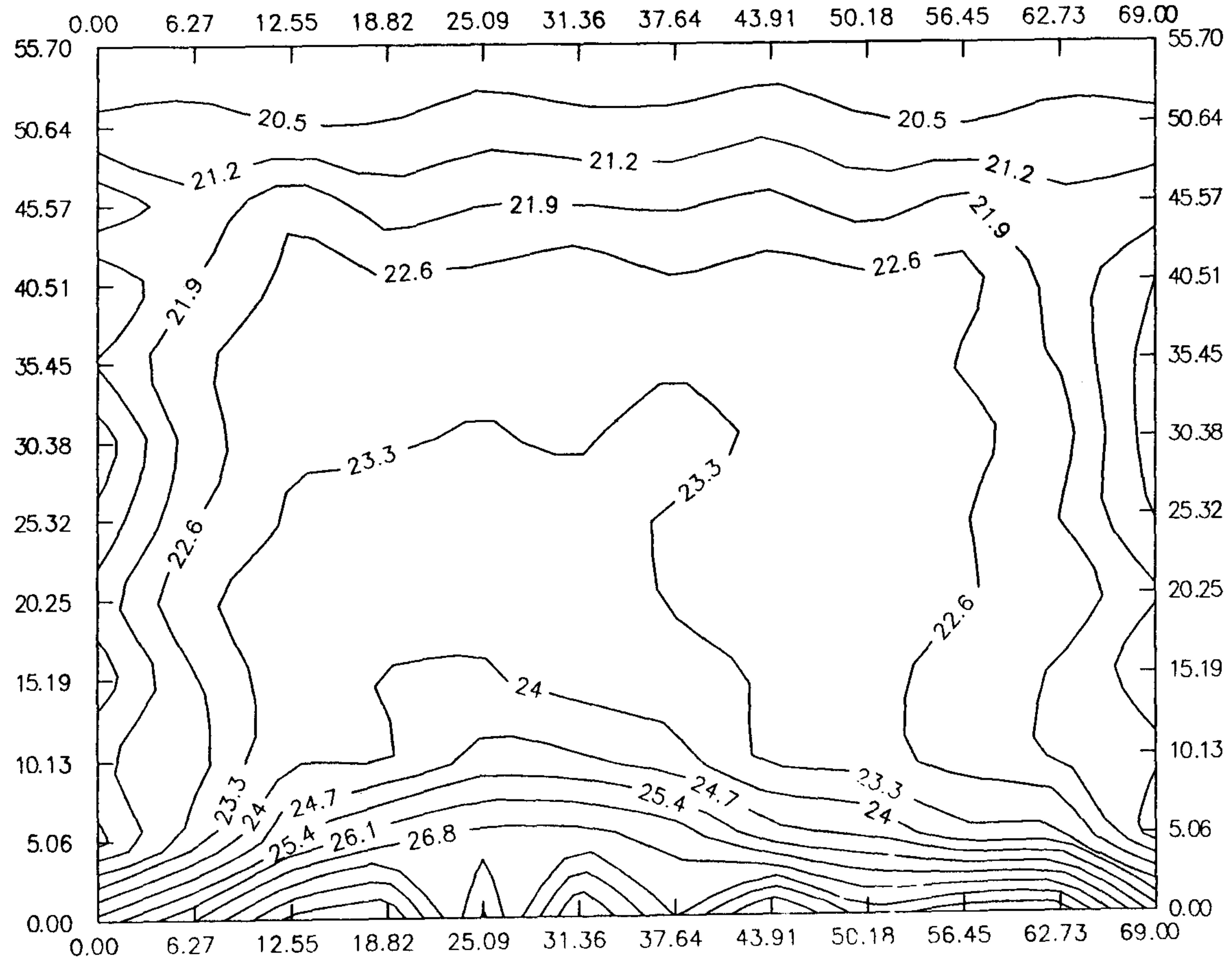
[그림 4-5] 실험모델 2 의 등온선 분포 (2)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL2-3(30-20)



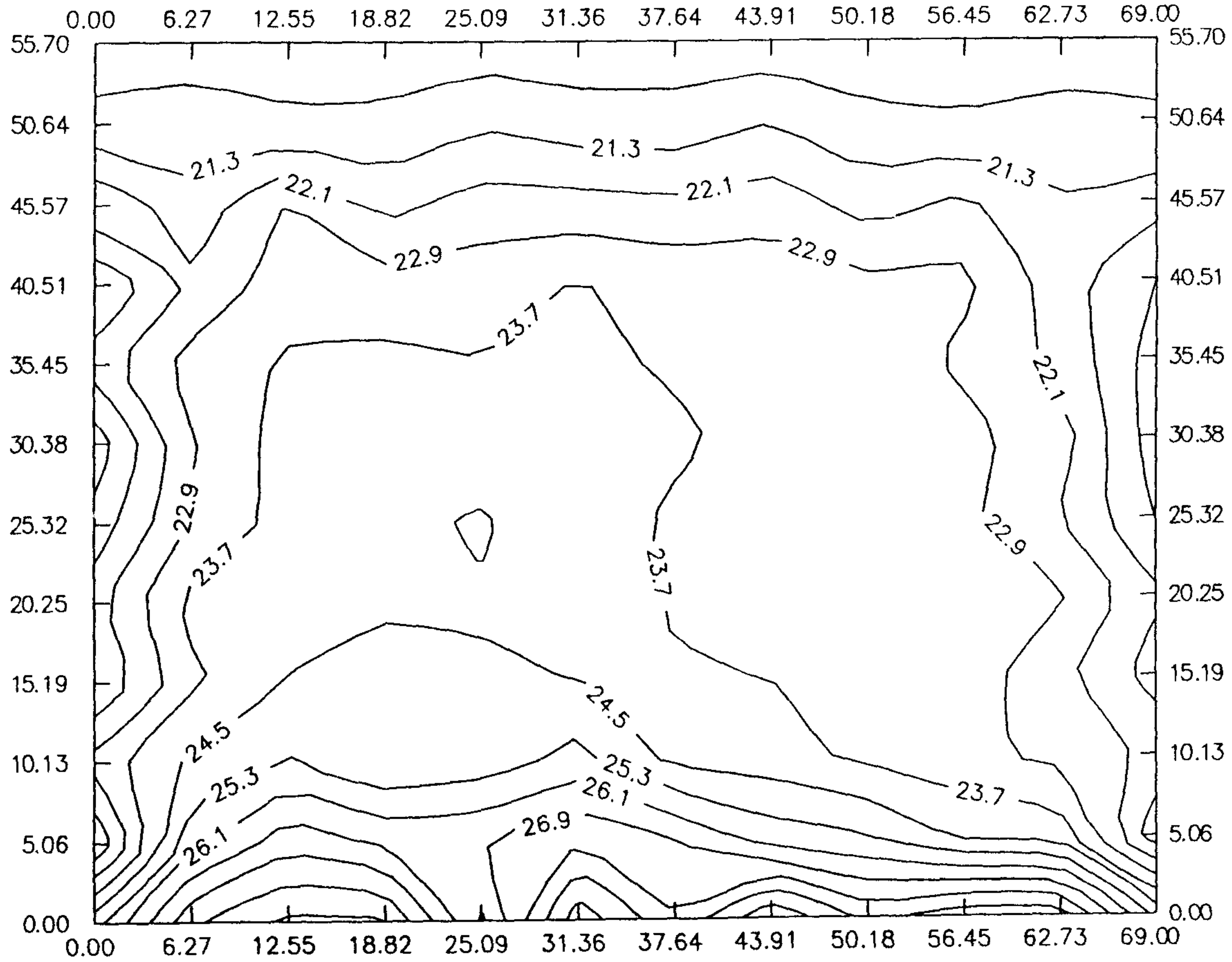
[그림 4-6] 실험모델 2의 등온선 분포 (3)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL3-1(30-20)



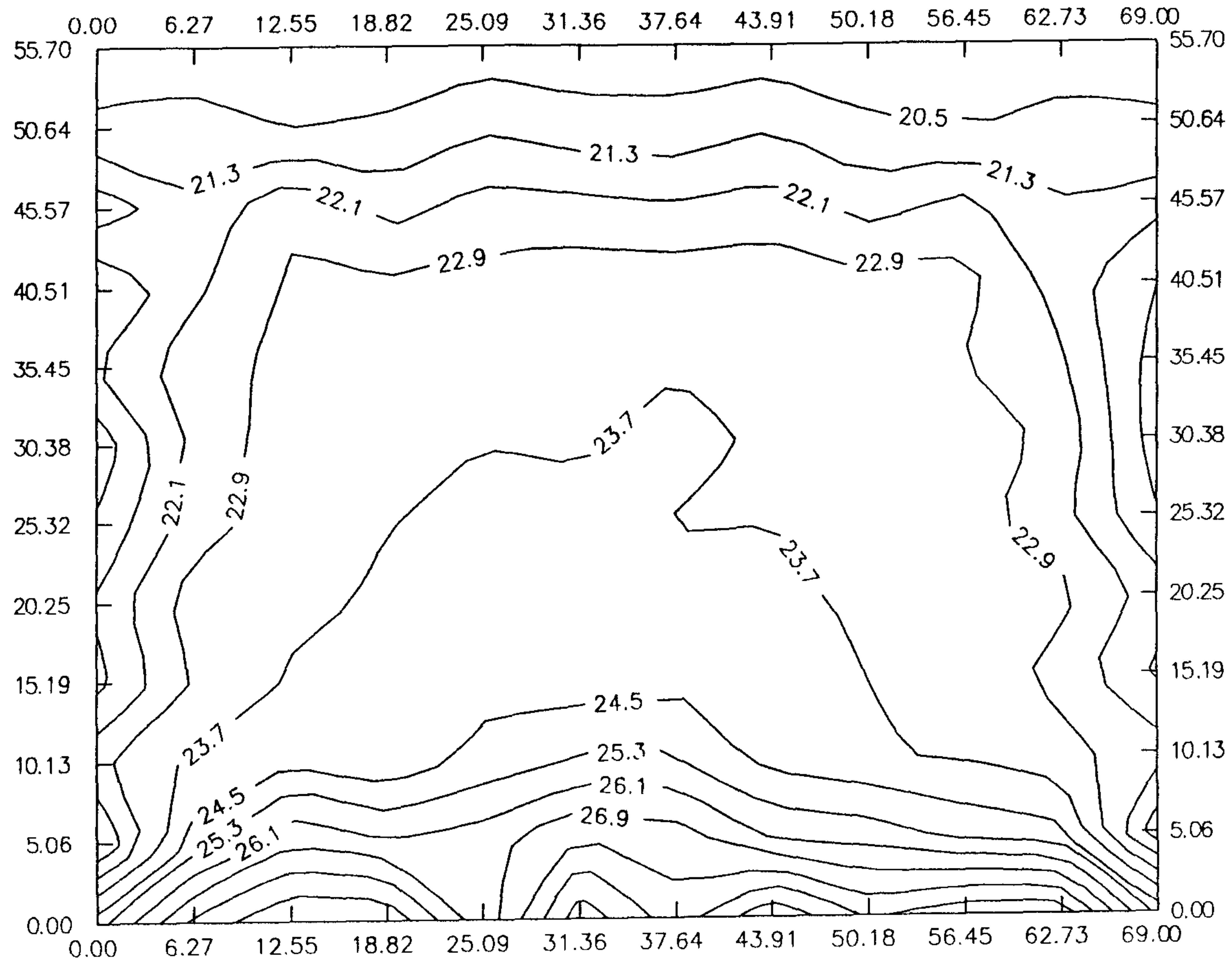
[그림 4-7] 실험모델 3의 등온선 분포 (1)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL3-2(30-20)



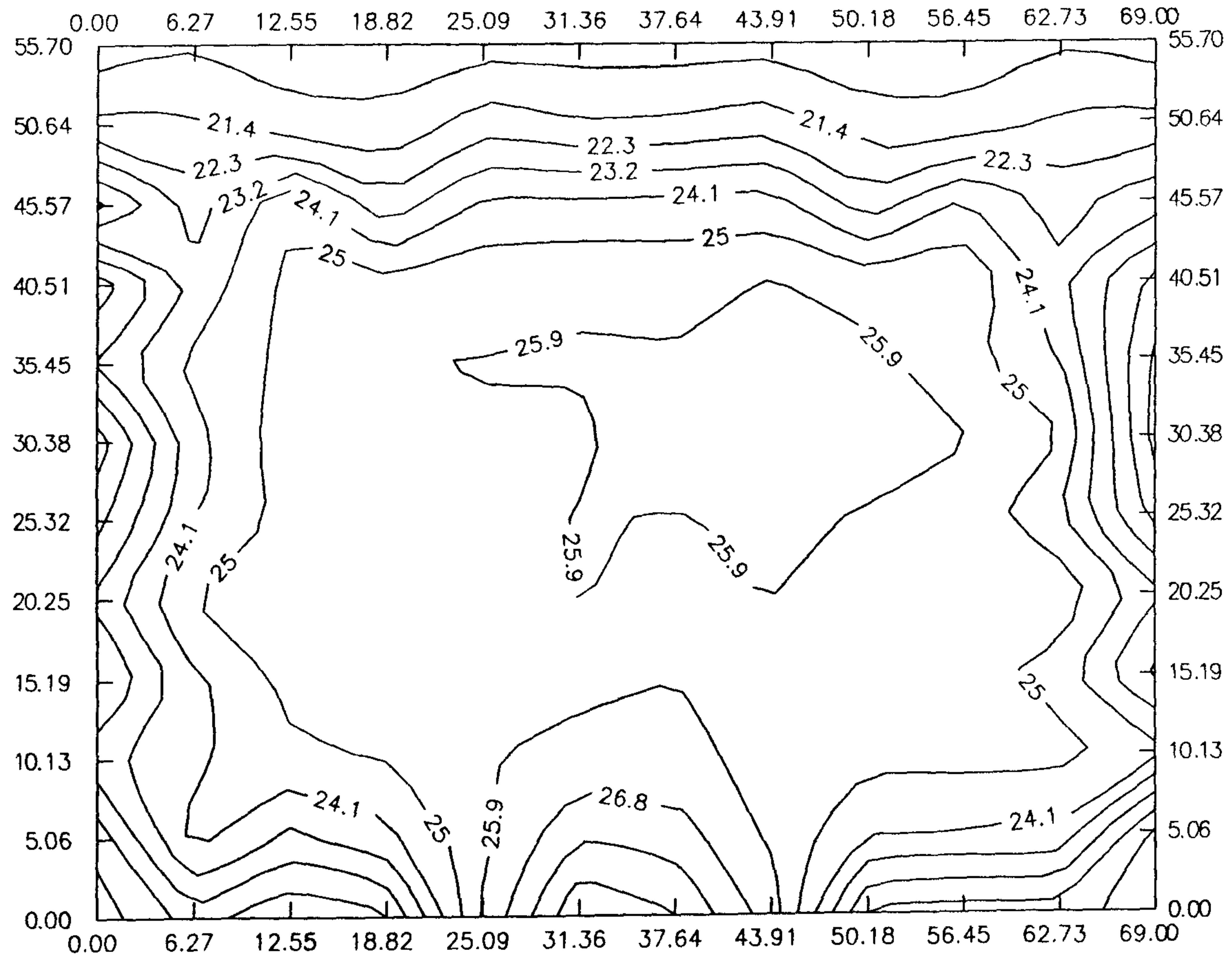
[그림 4-8] 실험모델 3의 등온선 분포 (2)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL3-3(30-20)



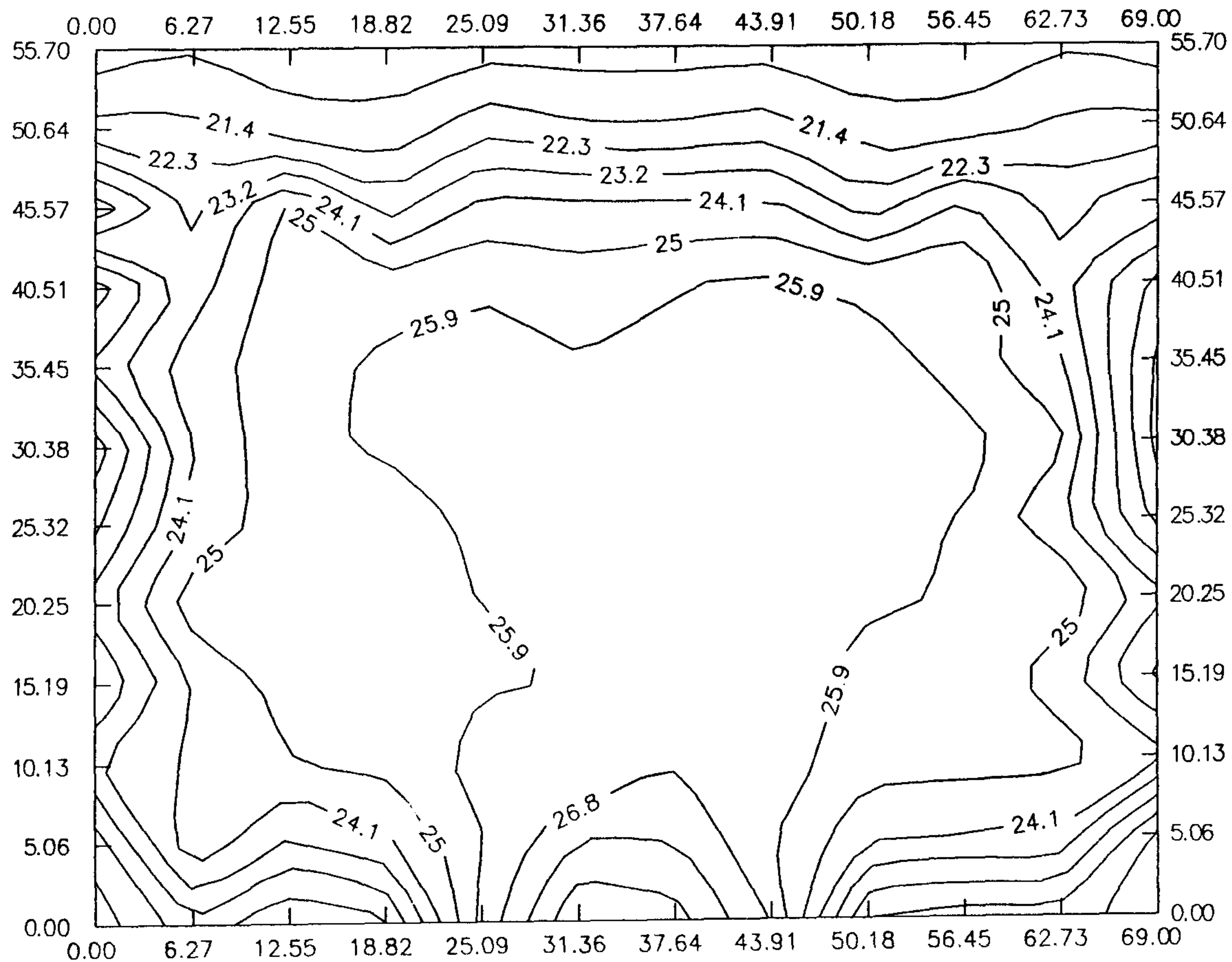
[그림 4-9] 실험모델 3의 등온선 분포 (3)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL4-1(30-20)



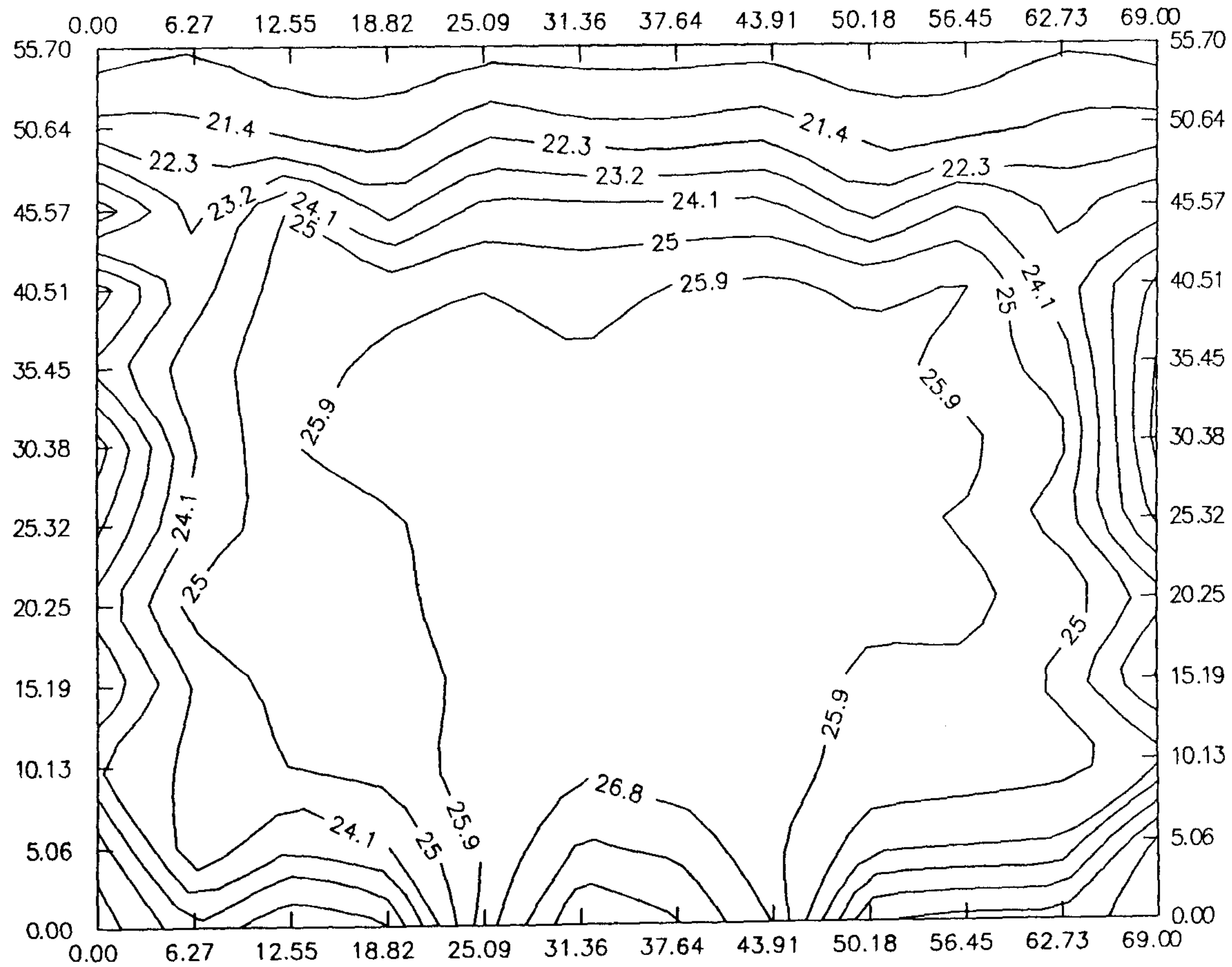
[그림 4-10] 실험모델 4의 등온선 분포 (1)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL4-2(30-20)



[그림 4-11] 실험모델 4의 등온선 분포 (2)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL4-3(30-20)

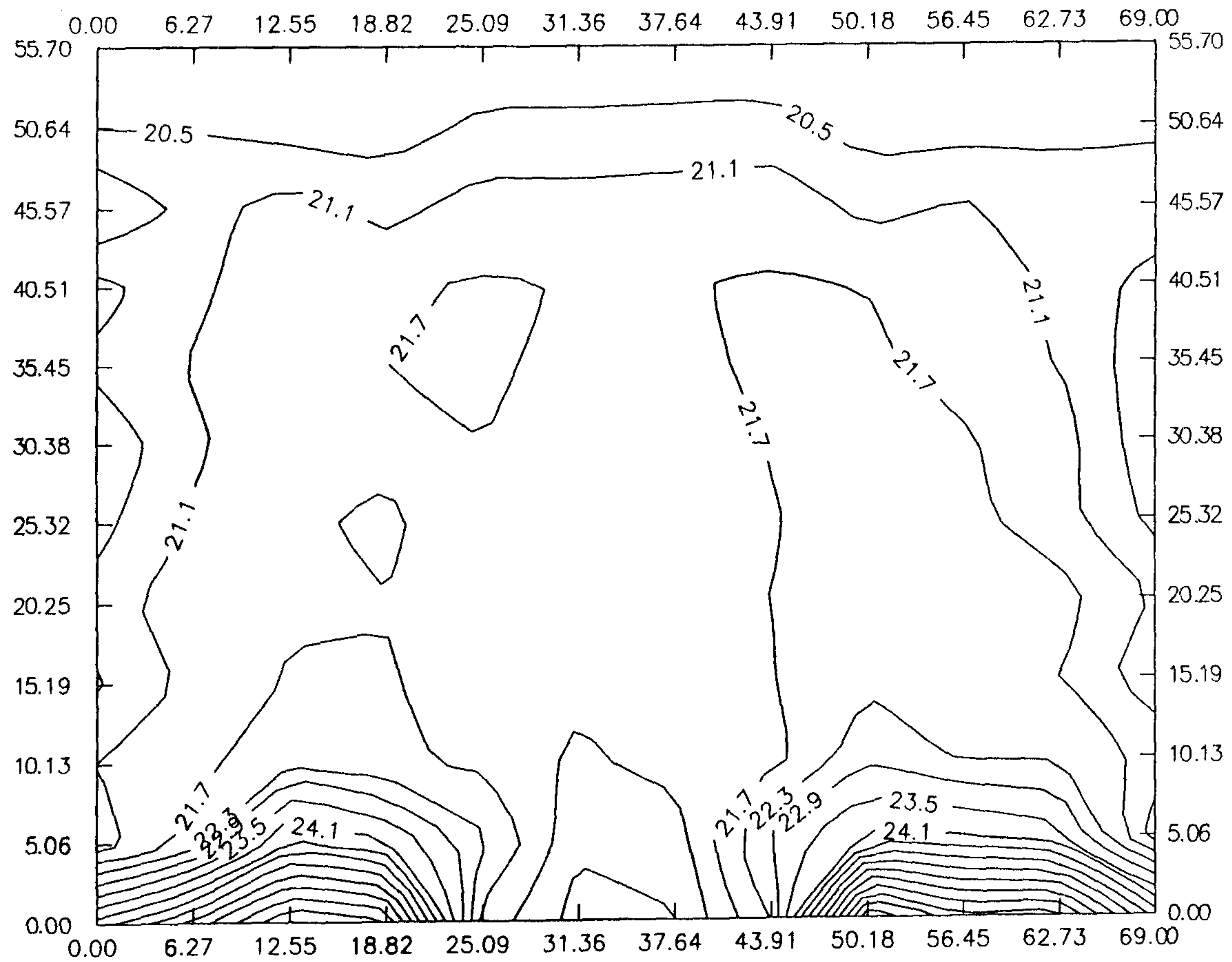


[그림 4-12] 실험모델 4의 등온선 분포 (3)

加熱面의 位置가 $X = 23\text{cm}$ 부터 $X = 46\text{cm}$ 까지의 범위인 바닥중앙부에 存在하는 것이다. 이 모델에 있어서 等溫線의 分布는 대체적으로 버섯모양을 하고 있는 것으로서 축소모형의 中央部인 3번 수직단면 쪽으로 갈수록 高溫部의 영역이 확장되고 있음을 알 수 있다. 그러나 [그림 4-10]에서 볼 수 있는 바와 같이 壁面과 인접한 1번 수직단면상에 형성되는 溫度場은 26°C 의 등온선이 [그림 4-11] 및 [그림 4-12]와는 달리 높게 발달하고 있지 않고 있는데 이는 이 부근의 영역이 바닥加熱面과 壁의 비가열면이 인접한 수직면이기 때문에 발생하는 벽체에 의한 냉각효과 때문이라고 판단된다.

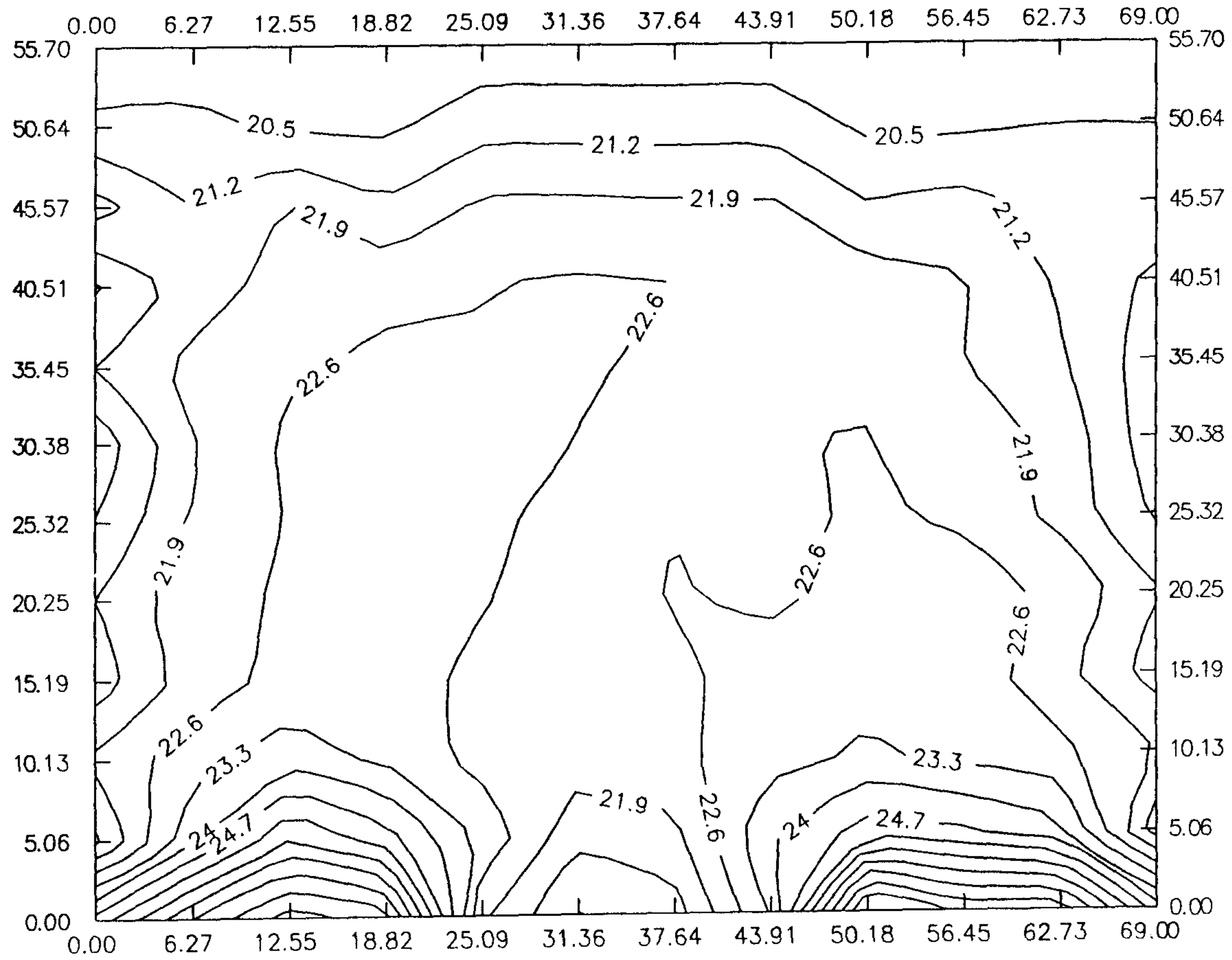
[그림 4-13], [그림 4-14], [그림 4-15]는 바닥의 左右側이 각각 전체 바닥면적의 1/3씩 加熱되는 모델에 있어서 등온선 분포를 나타내는 것으로서 각각 [그림 2-3]의 1, 2, 3번 수직단면상의 등온선분포이다. 이 모델의 등온선은 대체로 좌우대칭으로 나타나고 있다. 그러나 여기에서 특이한 사항중의 하나는 실험모델 2번과 비교할 때 加熱面의 溫度가 29°C 로 同一하며 加熱面積이 同一한데도 불구하고 等溫線의 分布狀況에 많은 차이가 있다는 점이다. 즉 모델 2와 모델 5의 경우 형성되는 等溫線에서 22°C 보다 높게 형성되는 空間의 영역이 모델 5의 경우가 모델 2의 경우보다 넓은 것을 알 수 있다. 이는 모델 5와 같은 기하학적인 배치를 가지는 加熱面을 선정한 경우가 모델 2에 비해 보다 활발한 熱流場으로 된다는 것을 의미하는 것이다. 이러한 경향은 같은 加熱面積을 가지면서 加熱面의 배치상태가 상이한 모델 1과 모델 4의 비교에서도 공통적으로 확인할 수 있는 사항으로서 向後 溫突研究에 있어서 加熱面의 位置配置와 적정한 加熱面積을 산정하는 온돌가열면설계기술에 대한 重要性을 인식하지 않으면 안된다는 것을 보여주고 있다.

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-1(30-20)



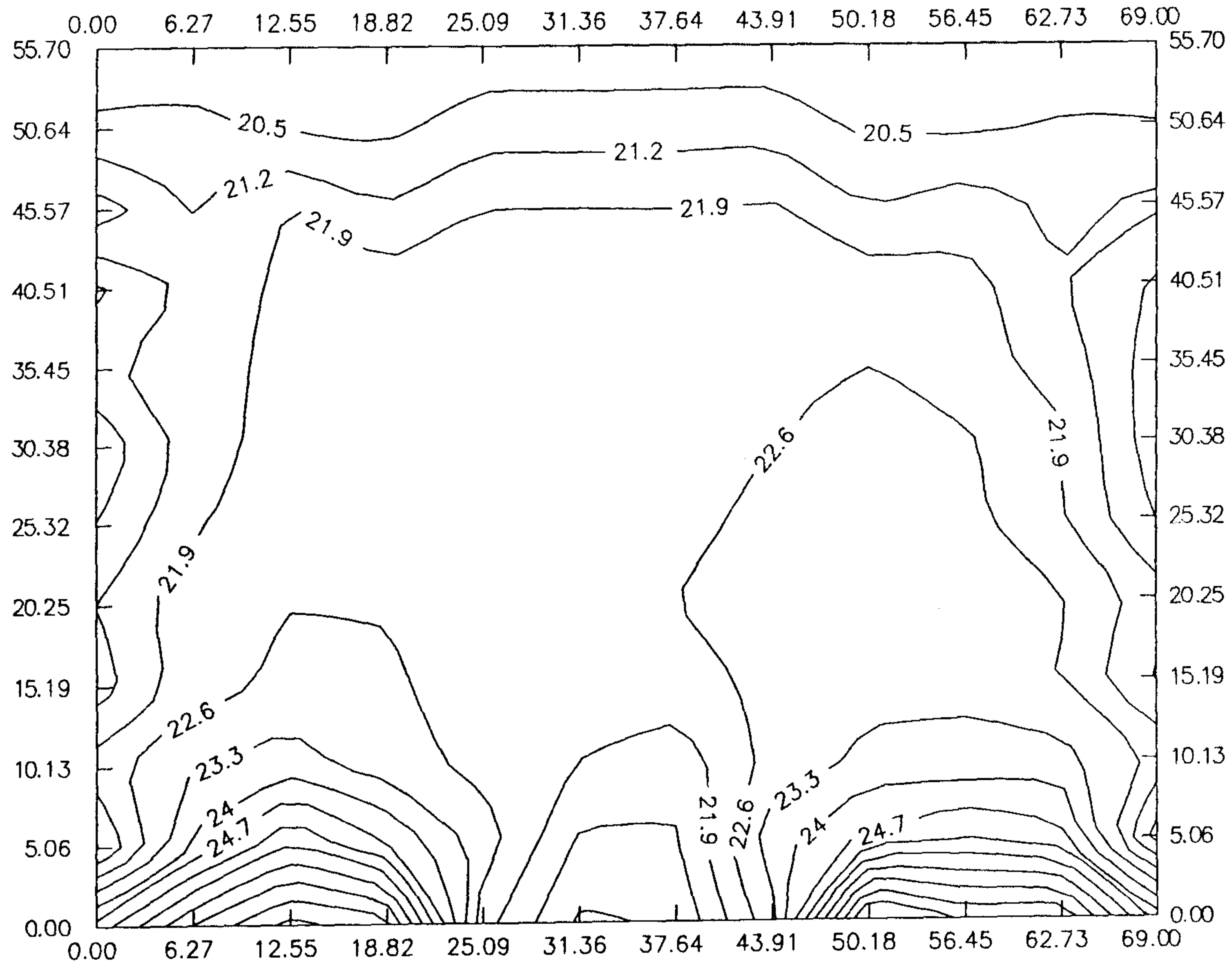
[그림 4-13] 실험모델 5의 등온선 분포 (1)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-2(30-20)



[그림 4-14] 실험모델 5의 등온선 분포 (2)

ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-3(30-20)



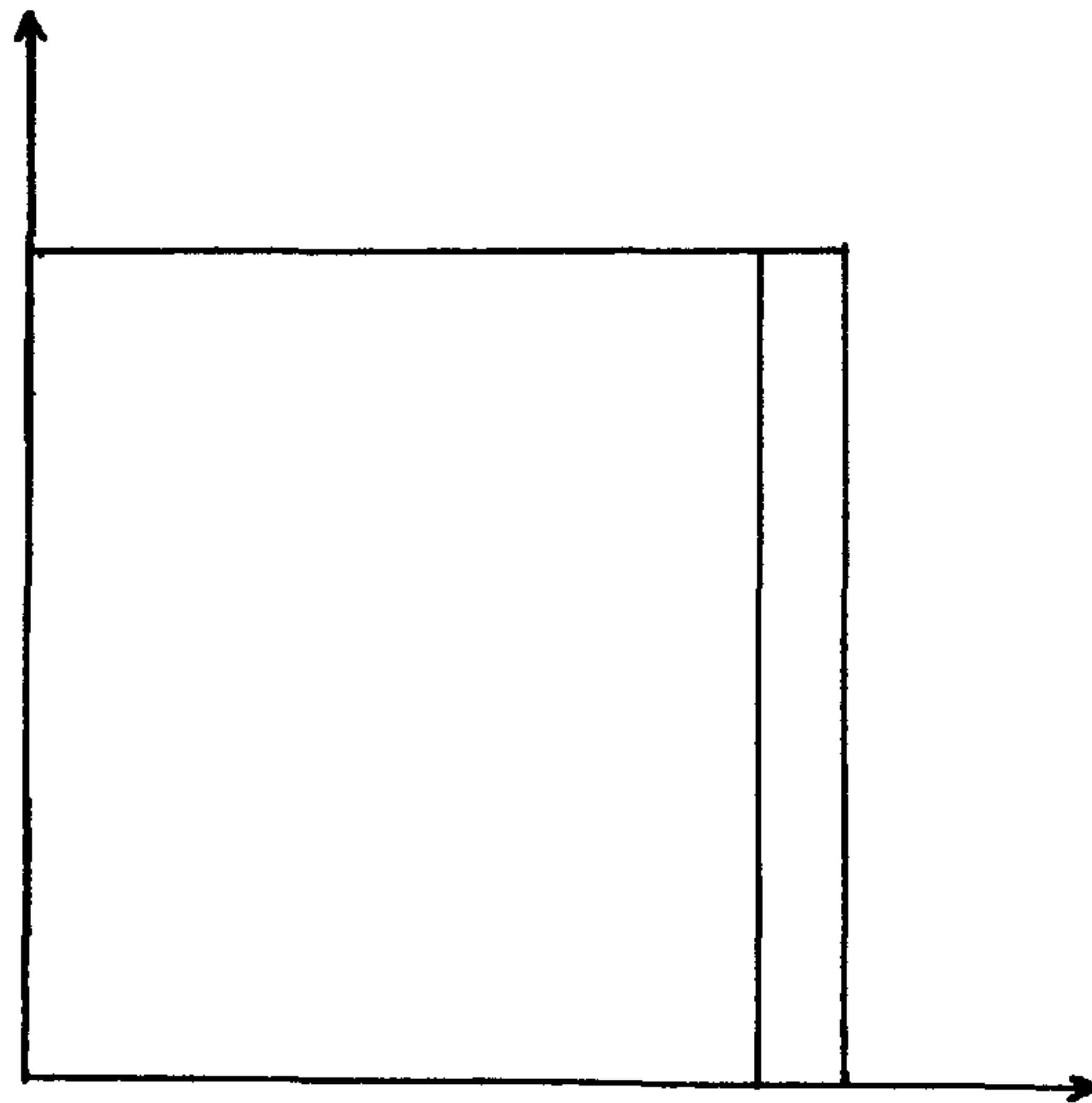
[그림 4-15] 실험모델 5의 등온선 분포 (3)

第3節 壁을 통한 손실열량분석

壁을 통한 손실열량을 第1節에서 設定한 모델별로 비교분석하기 위하여 무차원화된 열전달계수인 Nu 수 (Nusselt number) 를 도입하였다. 縮小모델의 全體壁面에 대한 分析은 實驗測定한 Data가 充分하지 못한 關係로 시도하지 못하고 축소모델의 右側壁面, 즉 [그림 2-3]의 $X = 69\text{cm}$ 인 벽과 溫度測定領域中 中央部에 위치한 3번 면이 接하는 線을 따라 Nu 수의 변화추이를 分析하였다. 이때 Nu 수를 계산하는 식은 Nu 수의 定義로 부터 다음과 같다.

$$\text{Nu}(y)|_{x=69} = -\left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_{x=69} \cdot \frac{L}{T_w(y) - T_\infty}$$

이식의 좌표설정은 [그림 4-16]과 같고 $T_w(y)$ 는 $x = 69\text{cm}$ 에서의 벽면의 온도를 T_∞ 는 縮小모델 內部空間의 平均溫度이다.



[그림 4-16] Nu(y) 계산을 위한 좌표

[그림 4-17] 부터 [그림 4-21]은 右側壁面의 높이변화에 따른 Nu 수의 변화추이를 나타낸 것이다. [그림 4-17]은 加熱面의 面積이 전체 바닥면적의 1/2이며 右側面과 인접한 右側 바닥에 위치한 경우로서 加熱面(非加熱面)의 온도가 30(20)°C, 28(18)°C, 40(20)°C, 44(19)°C, 38(18)°C로 유지되는 조건하에서의 Nu 수의 변화추이를 나타낸 것으로서 右側壁의 높이가 증가함에 따라 Nu 수가 급격히 감소하다가 벽면의 높이 30 ~ 35 cm에서 부터는 완만하게 감소되고 있음을 알 수 있다. 이는 바닥근처의 수직벽면에서 熱損失이 많다는 것을 의미하고 있는 주목할만한 현상이다. 즉 에너지절약적인 측면에서 볼 때 이러한 加熱條件을 가지는 溫突住宅인 경우 加熱面과 인접한 壁은 壁의 下部로 내려올수록 斷熱을 強化하거나 蓄열재 등을 사용한 蓄열성능을 向上시킬 必要가 있다는 點 즉 壁體의 높이에 따른 차등적인 단열, 축열설계가 要求된다는 사실이다.

[그림 4-18]은 加熱面의 位置는 [그림 4-17]의 경우와 같으나 加熱面積이 2배로 擴張된 경우로서 壁面의 높이에 따라 Nu 수가 대체로 線型的으로 감소하고 있다. 이러한 溫突構造에서도 前者와 마찬가지로 벽체높이에 따른 차등적인 단열 및 축열설계의 必要性을 지적할 수 있다.

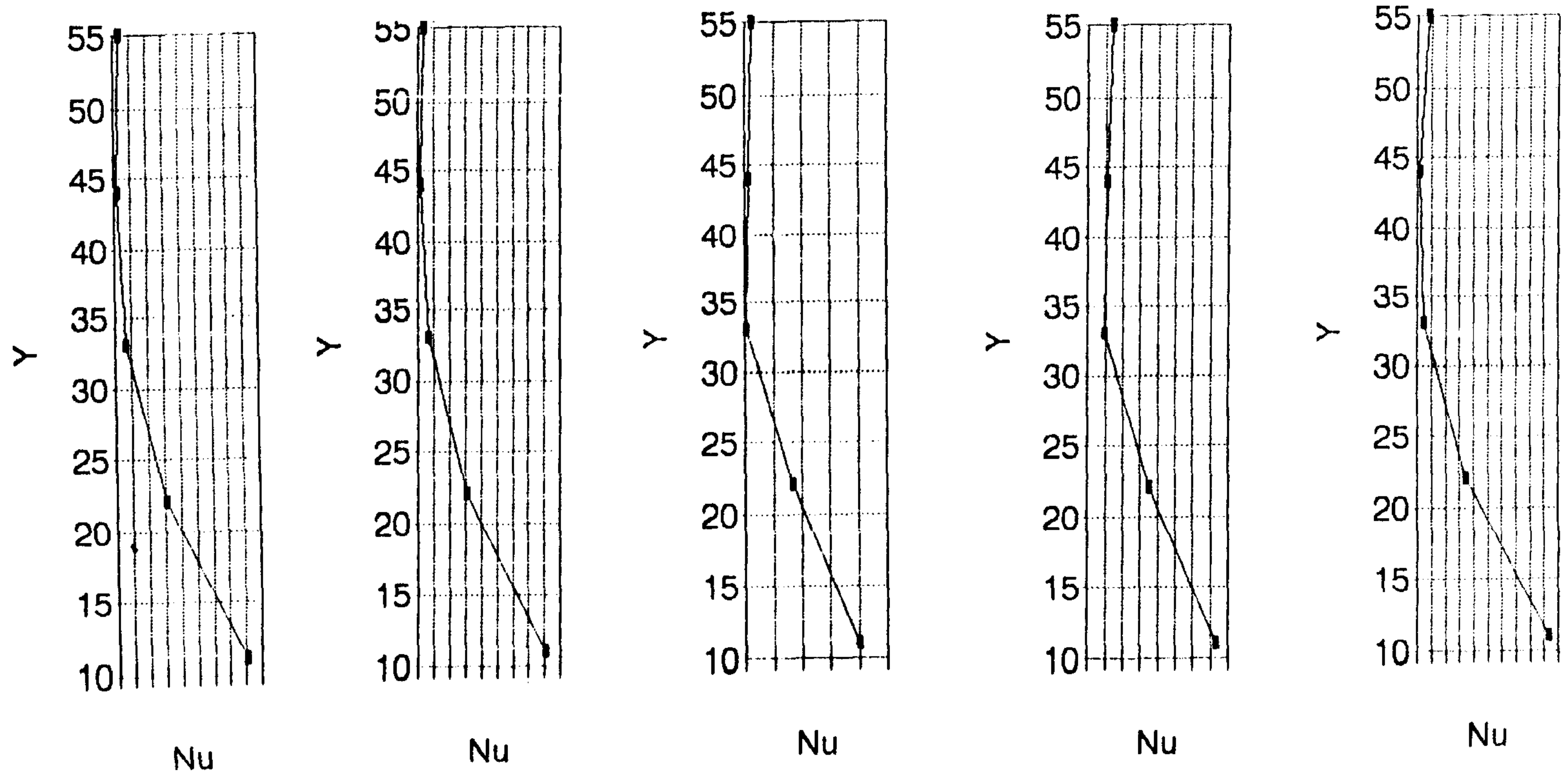
[그림 4-19]는 전체바닥의 加熱되는 경우이고 [그림 4-21]은 左右側 바닥이 각각 전체바닥면적의 1/2씩 加熱되는 경우인데 加熱面이 右側壁과 接하고 있기 때문에 前述한 2개의 경우와 大同小異한 경향을 나타내고 있다. 다만 加熱面과 非加熱面間의 溫度差와 加熱面積의 變化에 따라 약간의 차이는 나타내고 있다.

그러나 바닥의 加熱面積이 전체의 1/2이고 中央에 위치한 경우에는 [그림 4-20]에서 볼 수 있는 바와 같이 Nu 수가 壁體높이의 증가에 따라

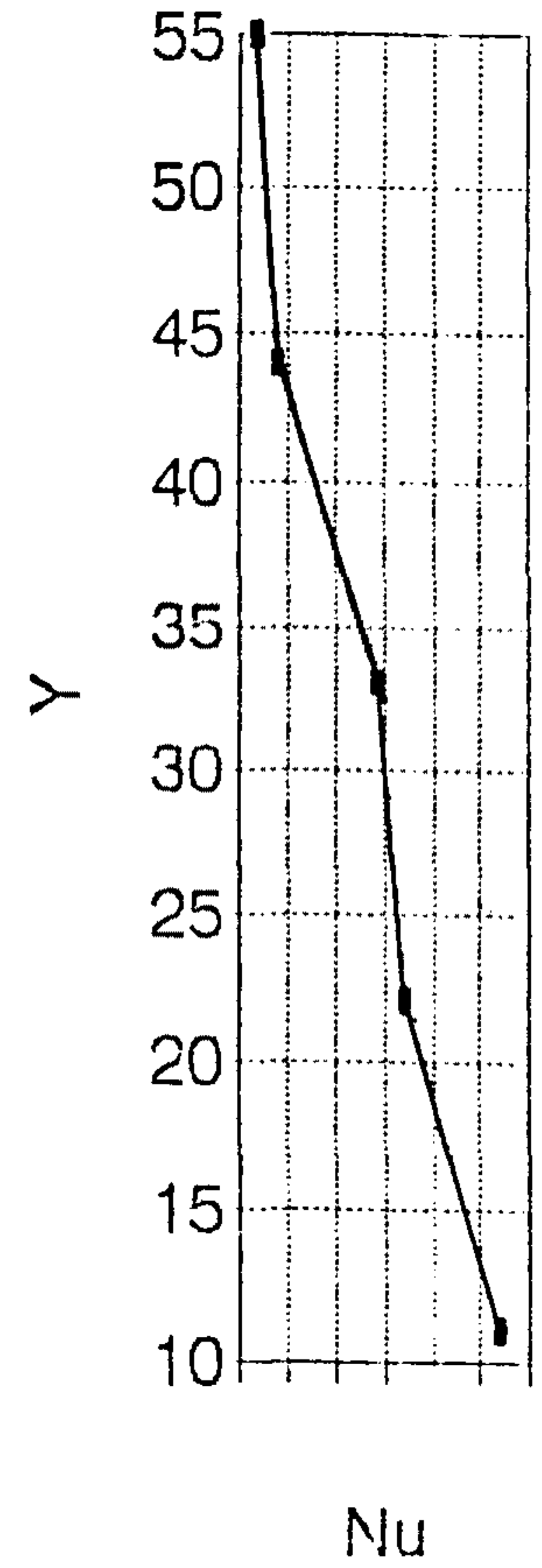
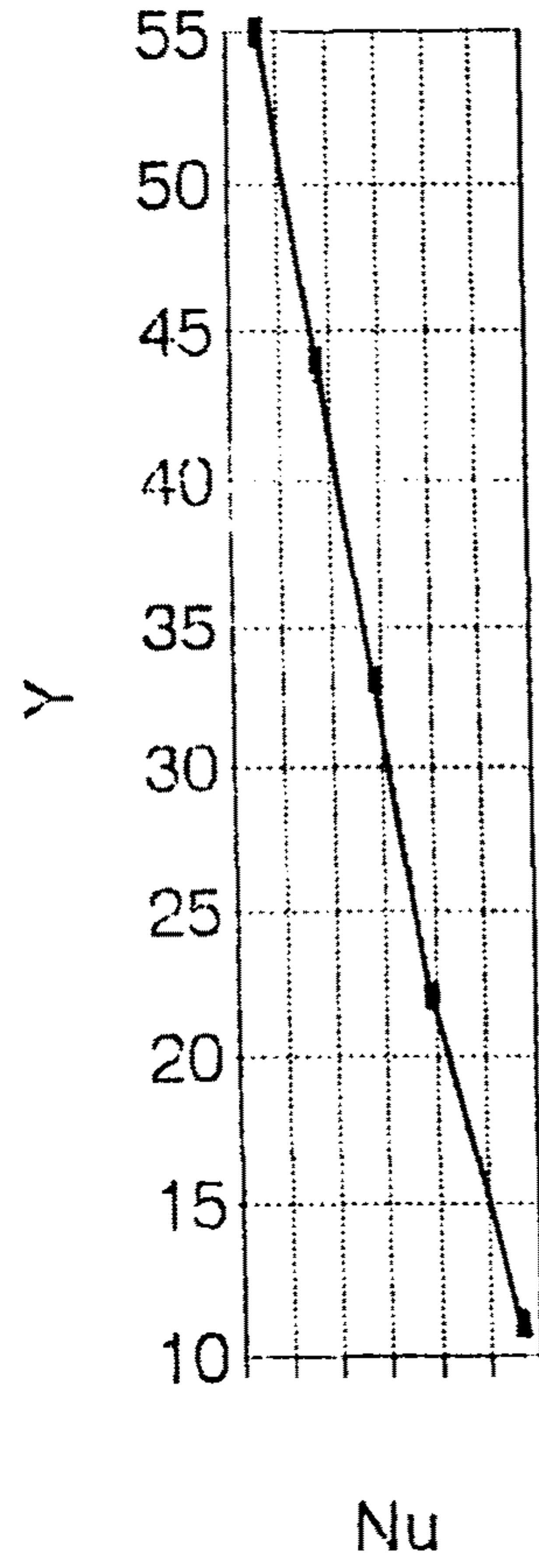
증가하다가 높이 30 ~ 45cm의 지점 부터는 감소하고 있다. 이는 이러한 溫突構造에서 熱損失이 많이 일어나는 部分은 加熱面의 길이방향과 平行을 이루는 수직벽면의 中上部이다. 이것은 斷熱性能이 취약한 窓門의 높이와 대체로 비슷한 높이가 된다. 따라서 이 경우와 같이 바닥의 中央部分이 加熱面인 경우 加熱面의 길이방향을 窓門이 있는 벽체와는 平行하게 배치시키는 것은 에너지절약을 위해 바람직하지 않다는 것을 의미한다.

以上으로 수직벽면을 따라 發生되는 熱損失의 變化추이를 Nu 수를 도입해서 설명하였다. 본 연구에서의 分析은 右側壁의 中央線의 높이에 따른 Nu 수의 變化추이만을 보는 제한적인 것이기 때문에 에너지절약과 관련된 溫突加熱面の 最適設計를 위해서는 계속적인 研究가 要求된다. 이를 위해서는 本 研究에서 探擇한 축소모형을 실험해석기술을 위시한 제반기술이 一助를 할 수 있을 것으로 기대된다.

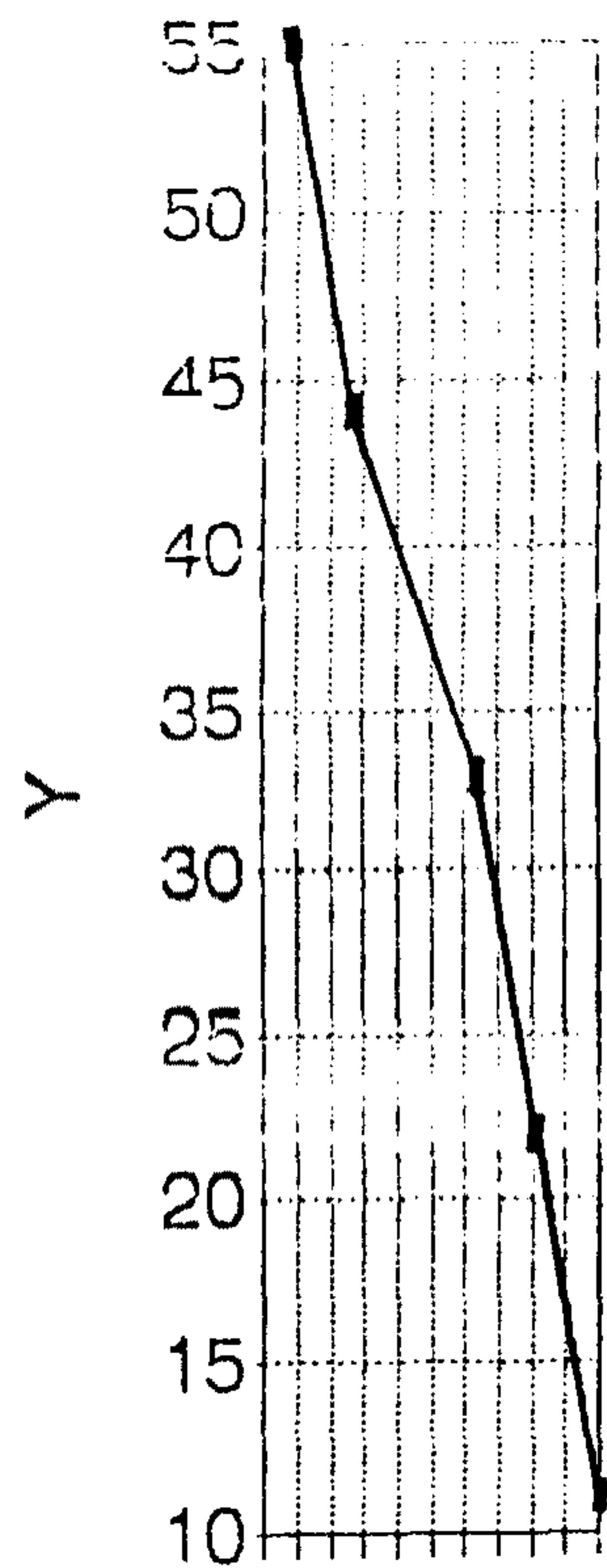
또한 前述한 壁體의 差等的인 熱設計技術도 向後 重要な 研究課題로 되어야 한다는 것을 提起하고 싶다.



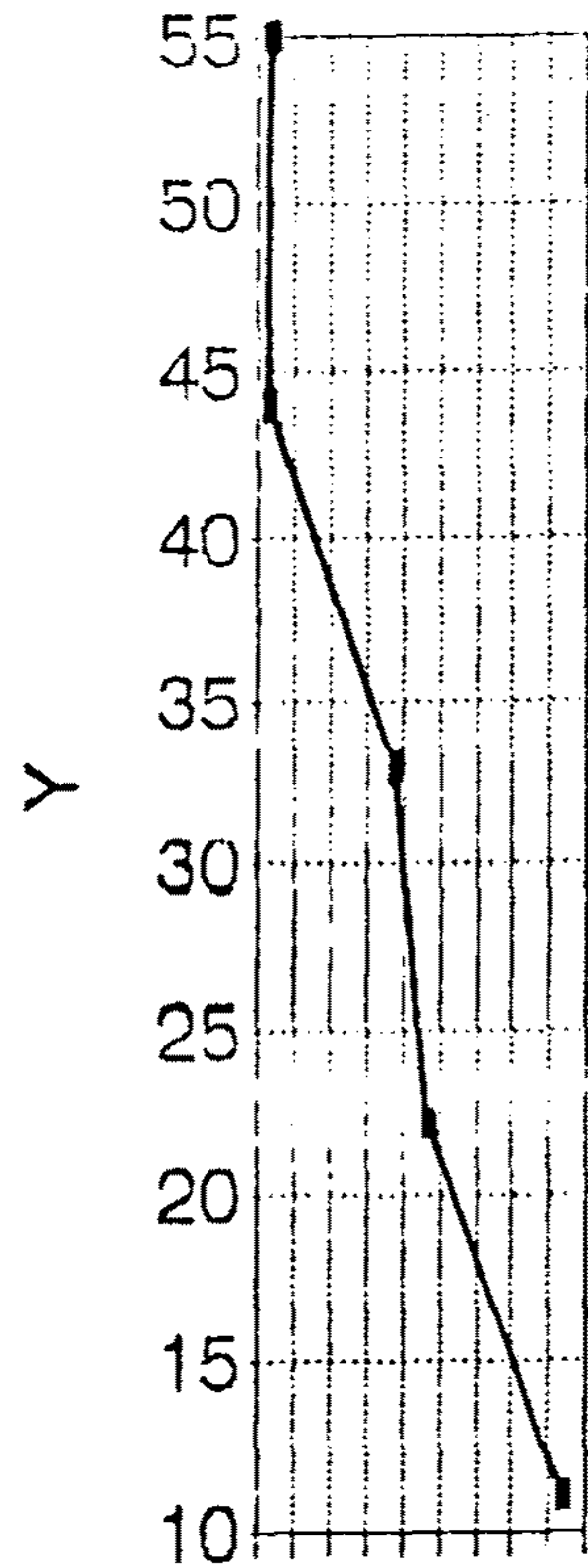
[그림 4-17] 바닥右側 1/3이 加熱面인 경우 右側壁 높이에 대한 Nu수 변화추이



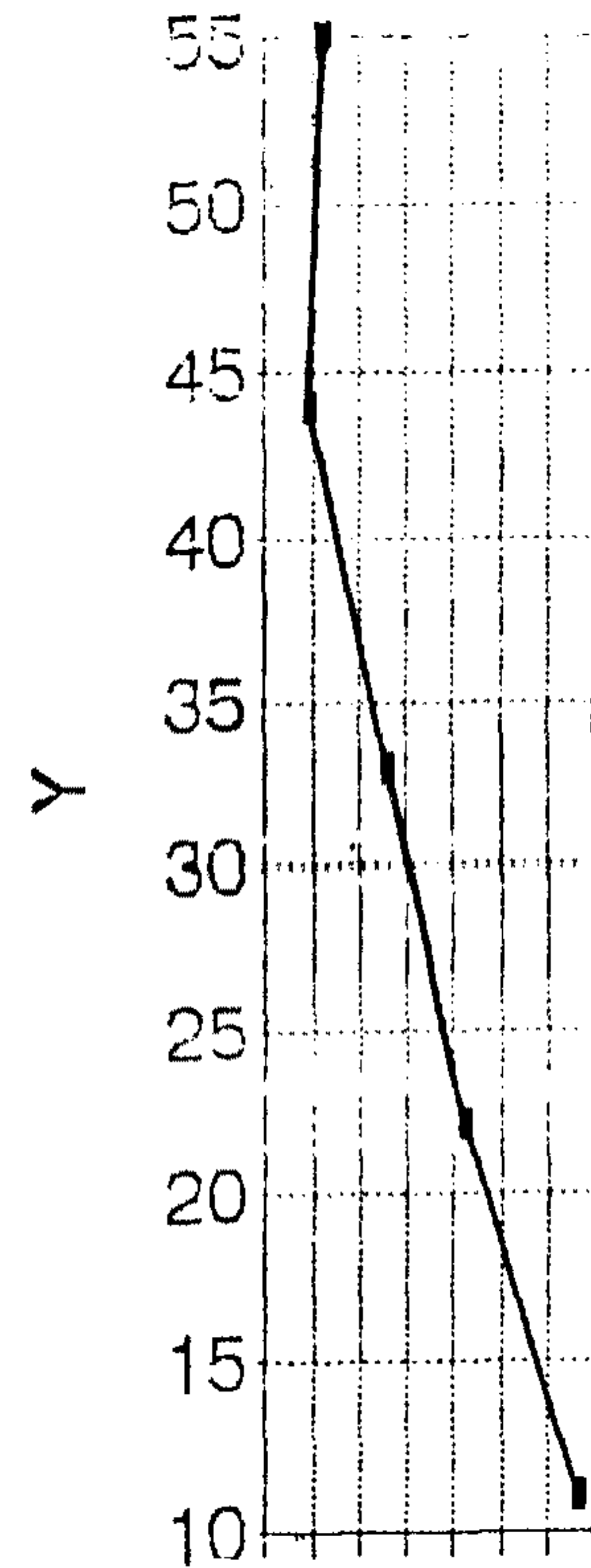
[그림 4-18] 바닥右側 $\frac{2}{3}$ 가 加熱面인 경우 右側壁 높이에 대한 Nu 수 변화추이



Nu

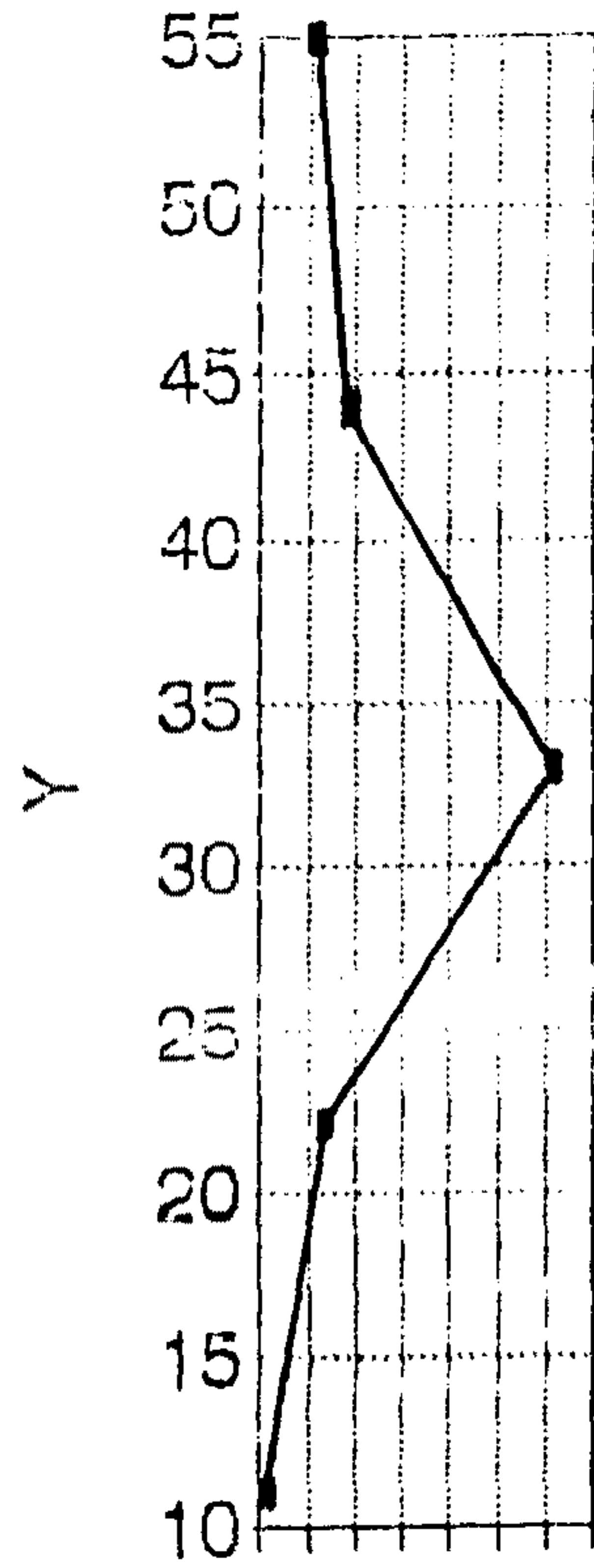


Nu

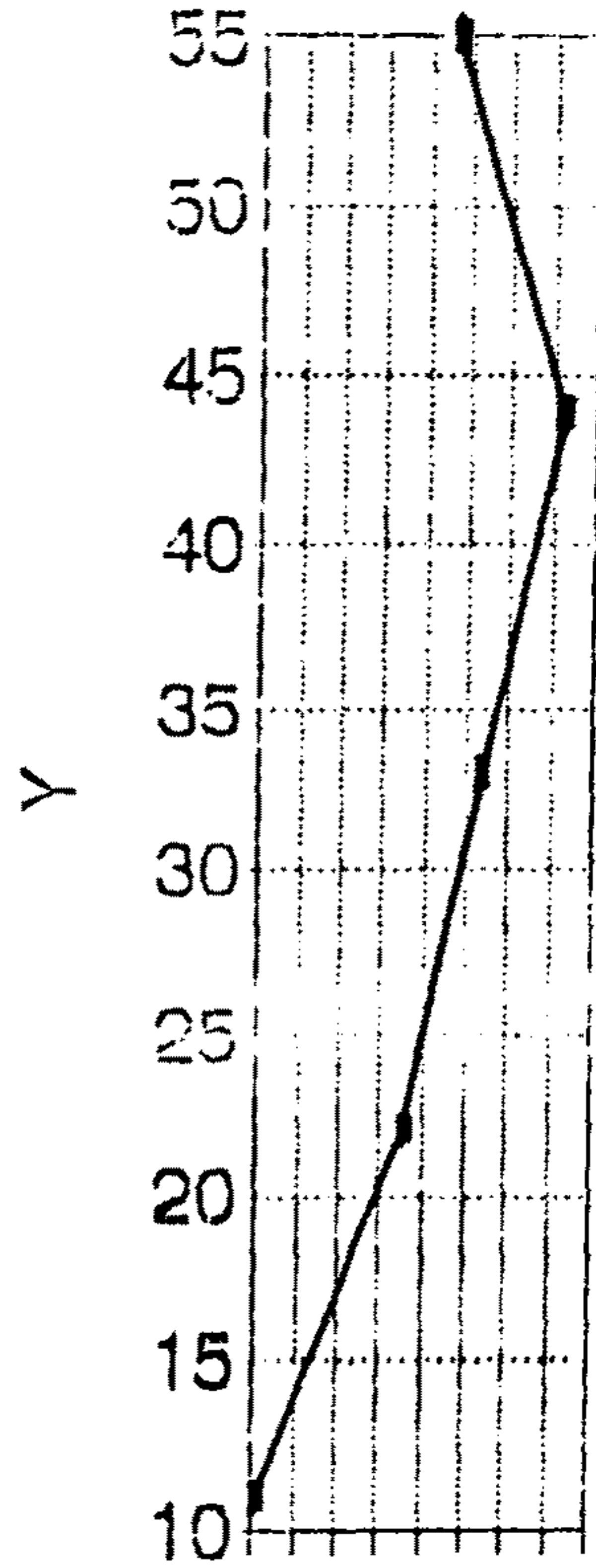


Nu

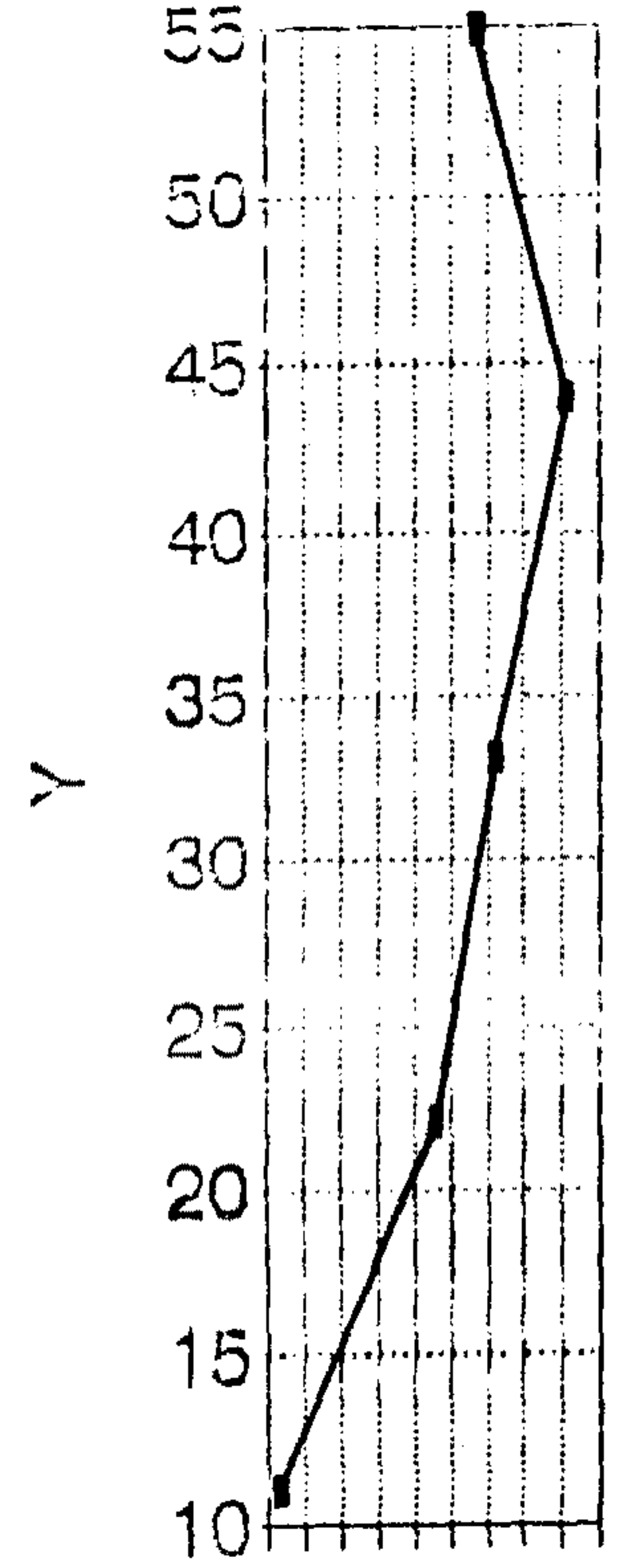
[그림 4-19] 전체바닥이 가열되는 경우 右側壁의 높이에 대한 Nu 수 변화추이



Nu

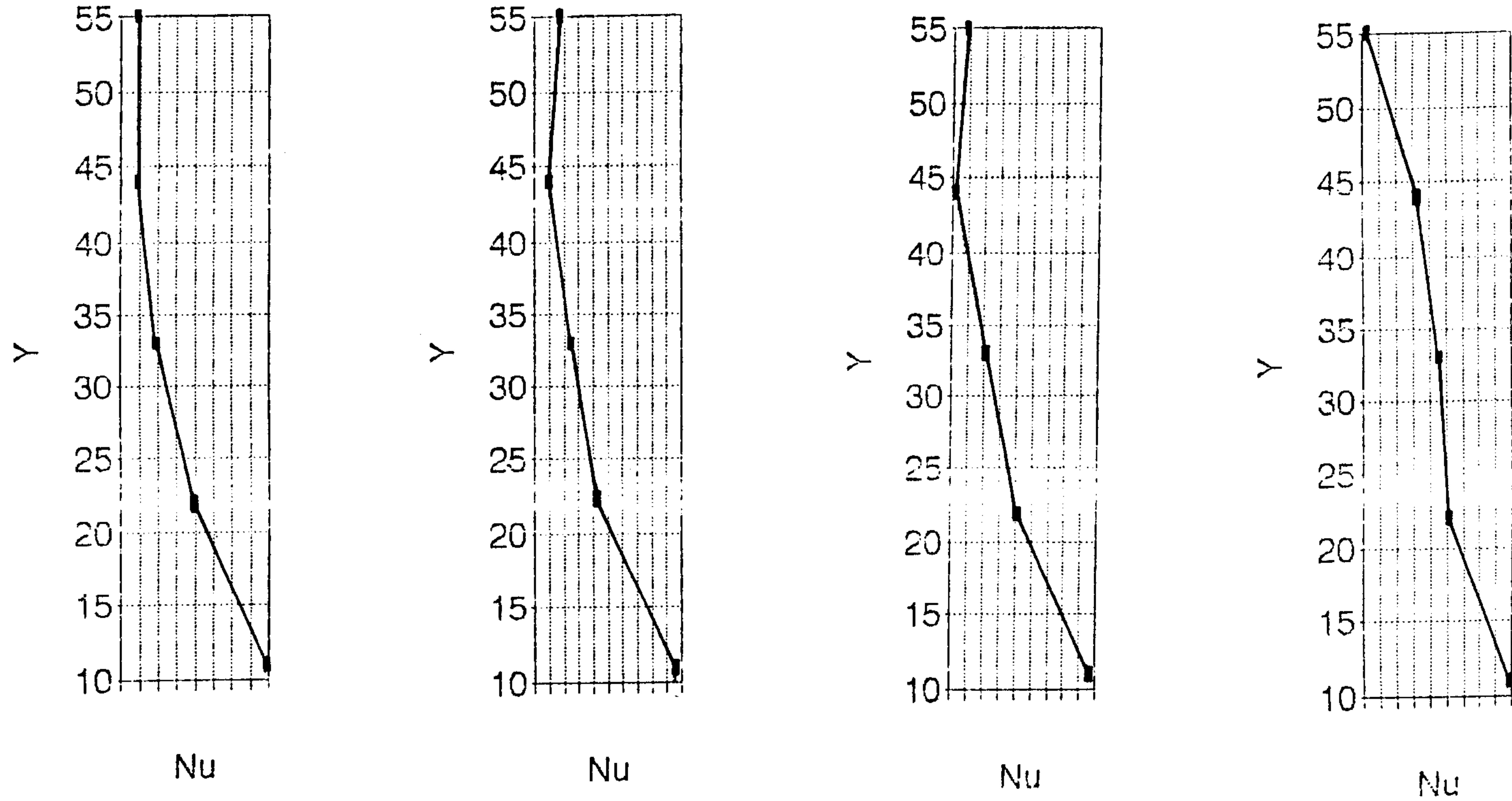


N u



Nu

[그림 4-20] 바닥중앙 1/2 이 加熱面인 경우 右側壁 높이에 대한 Nu 수 변화추이



[그림 4-21] 左右側 바닥층씩이 加熱面인 경우 右側壁 높이에 대한 Nu 수의 변화추이

第 5 章 流動可視化實驗 結果分析

第 1 節 實驗 모델

實驗 모델은 <表 5-1> 과 같이 3 개의 모델을 설정하였다.

<表 5-1> 流動可視化 실험 모델

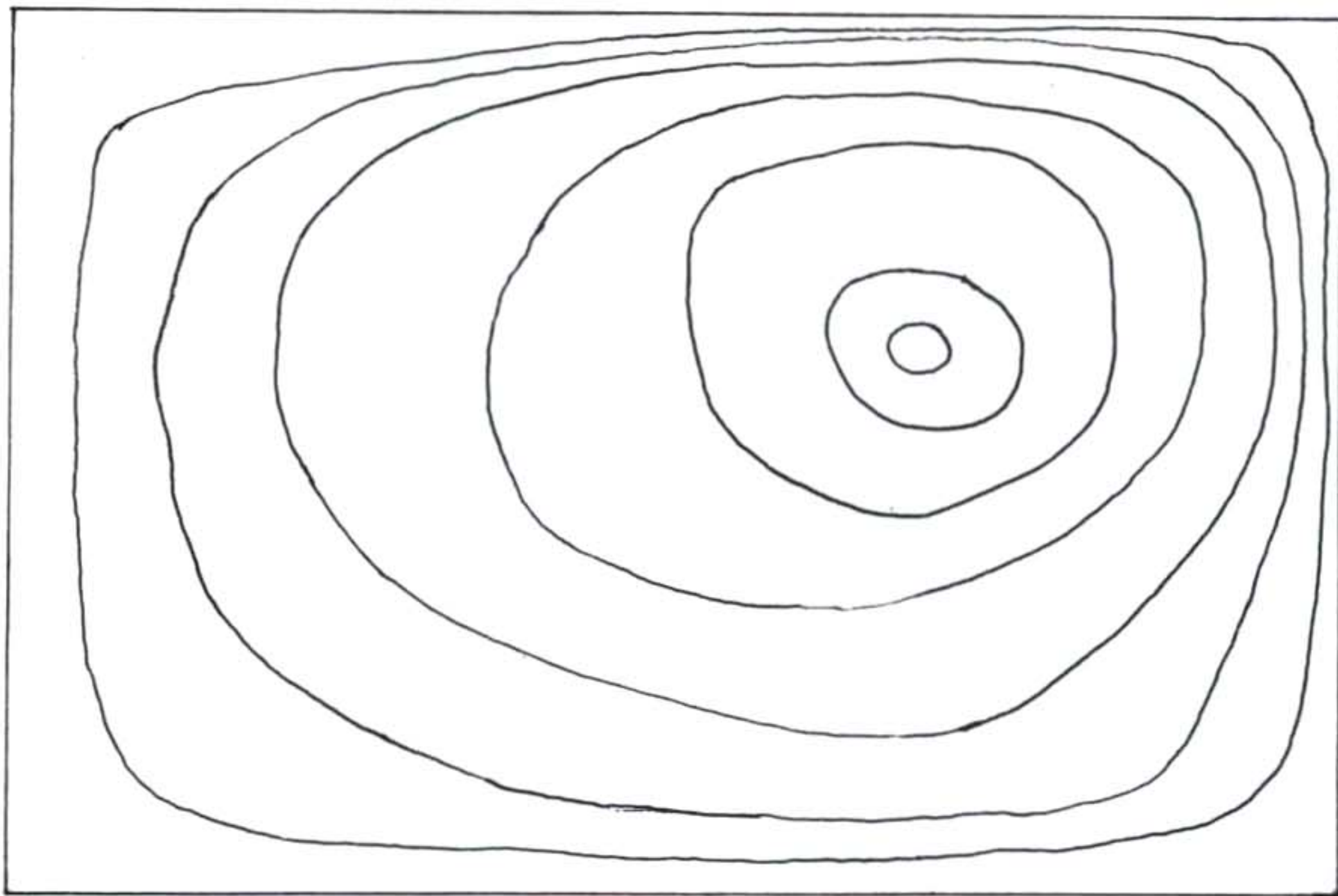
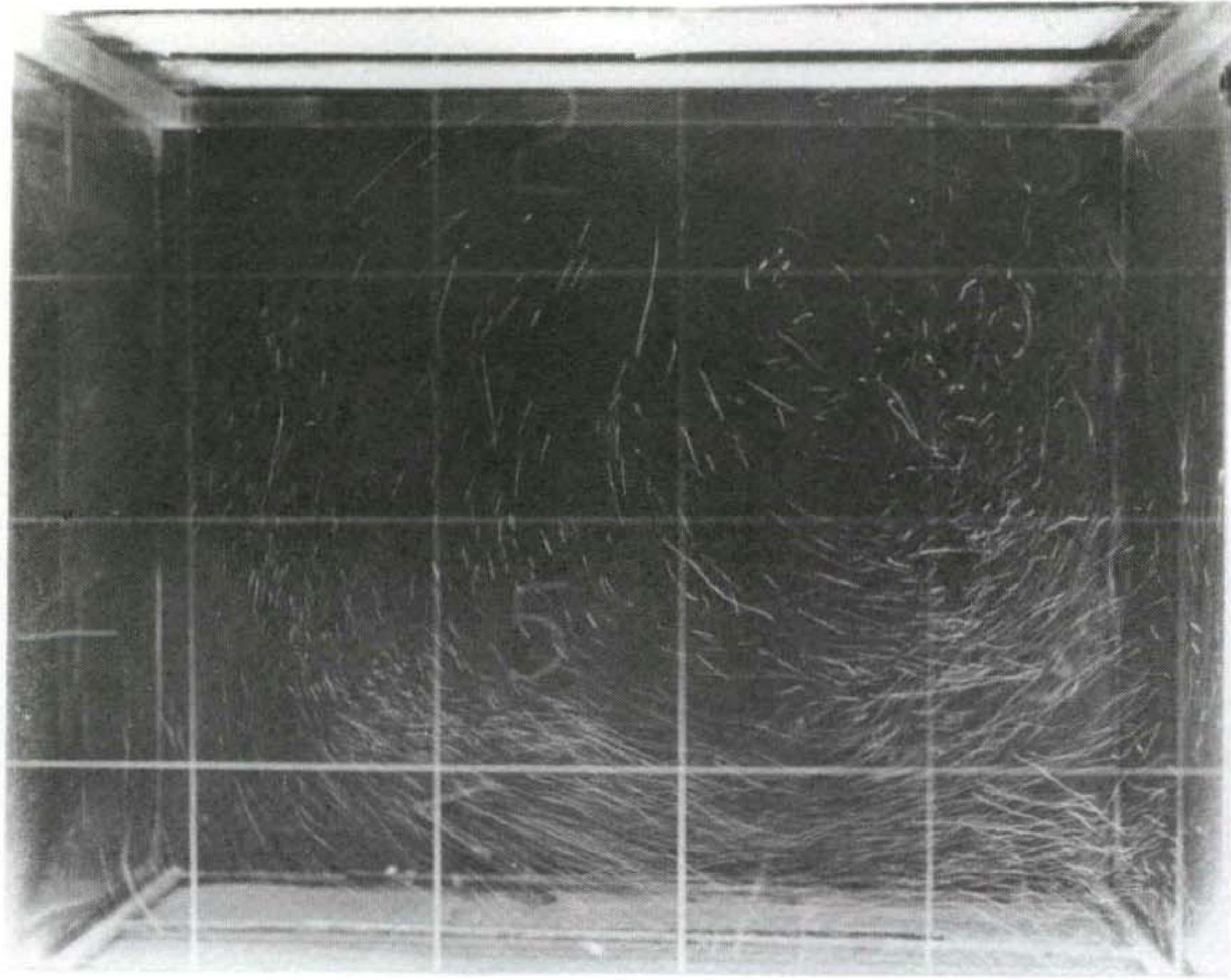
모델번호	加熱面積 및 위치	加熱面온도, °C	非加熱面온도, °C	溫度差, °C
1	바닥右側 1/3 (그림2-2의 모델1)	40	20	20
2	바닥右側 (그림2-2의 모델2)	40	20	20
3	바닥中央 1/3 (그림2-2의 모델4)	40	20	20

<表 5-1>에서 보는 바와 같이 모델 1은 바닥의 右側部分 1/3이 加熱面이고 나머지는 非加熱面으로서 加熱面の 溫度와 非加熱面の 온도는 각각 40°C, 20°C이다. 모델 2는 모델 1과 같은 조건에서 加熱面積을 2배로 확장시킨 것이며 모델 3은 加熱面的 위치를 右側部에서 中央部로 이동시킨 것이다. 流動可視化分析의 대상이 되는 관심영역은 본 실험에서 채택한 3가지 모델 모두 [그림 2-4]에 나타난 바와 같은 수직단면을 대상으로 하였다. 이러한 관심영역에서 流動斷面照明裝置에 의해 可視化된 流動場의 촬영은 Nikon FM3 카메라와 금성사제 비디오 카메라를 使用하였는데 본 보고서에서는 일반 카메라로 포착한 유동사진을 中心으로 分析을 한다. 비디오 카메라에 의해 촬영, 녹화된 流動의 動向에 대해서는 추후의 기회에

別途로 發表하기로 한다.

第2節 實驗結果의 分析

[그림 5-1]은 실험모델 1에 대한 流動사진과 이 사진 및 前述한 비디오 녹화화면을 관찰하면서 그린 유동의 스케치이다. 모델 1은 前述한 바와 같이 加熱面의 면적이 전체 바닥면적의 1/3로서 바닥 右側部에 위치하고 있다. 이 모델에서의 流動은 加熱面과 인접한 壁인 右側壁을 따라 上昇해서 축소모델 上部面을 右에서 左로 즉 加熱面이 있는 쪽에서 非加熱面이 있는 쪽으로 移動한 후 左側壁 즉 非加熱面과 인접한 수직벽을 따라 下降한 다음 加熱面까지 左에서 右로 移動하는 양상이다. 특히 左側의 수직벽면을 따라 下降하는 流動의 速度가 加熱面に 인접한 右側壁을 따라 上昇하는 流動의 速度보다 다소 빠른 것으로 나타났는데 이는 이 流動場에서 부력에 의한 영향보다 重力에 의한 영향이 다소 크다는 사실에서 기인되는 것으로 판단된다. 이 모델에서 주세포유동의 핵 (core)은 中央右上部 공간에 형성되어 있는데 이 핵은, 모델 2와 같이 加熱面積이 넓어지면서 加熱面의 中心이 右에서 左로 이동됨에 따라 右에서 左로 이동된다. 이 流動에서의 사진에 나타난 최대 流速은 左下部에서 約 15cm/s로서 이를 實際모델에 대한 速度縮尺率 2.31:1(本 研究報告書 第1章 第2節 또는 第1次年度 보고서 表4-2 참조)을 고려하면 實物規模에서의 流速은 約 35cm/s이다. 이 결과는 일반적인 온돌주택의 유속과 비슷한 값을 나타내고 있다.(當研究所內에 건립된 온돌시험주택에서의, 對流速度는 15cm/s

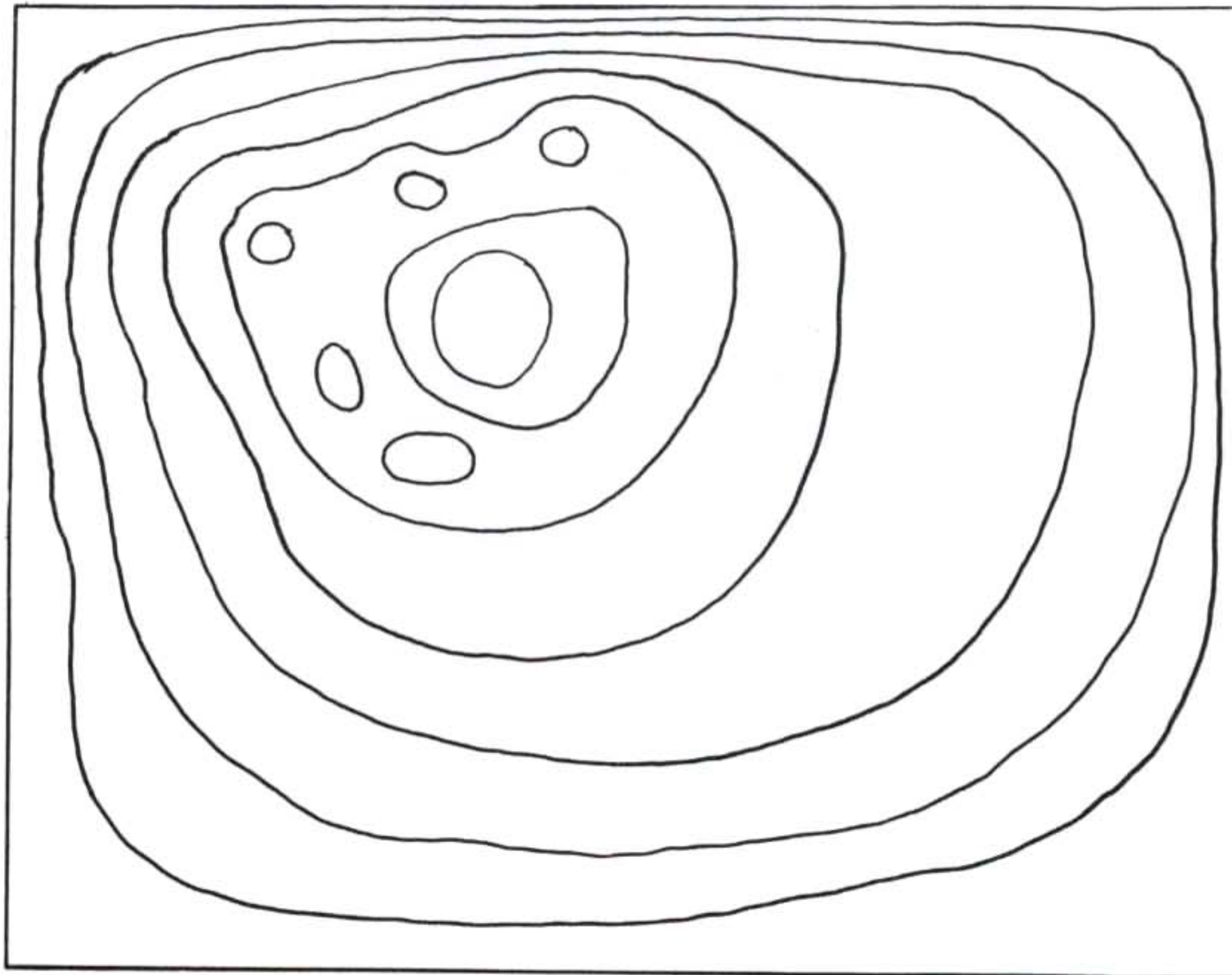
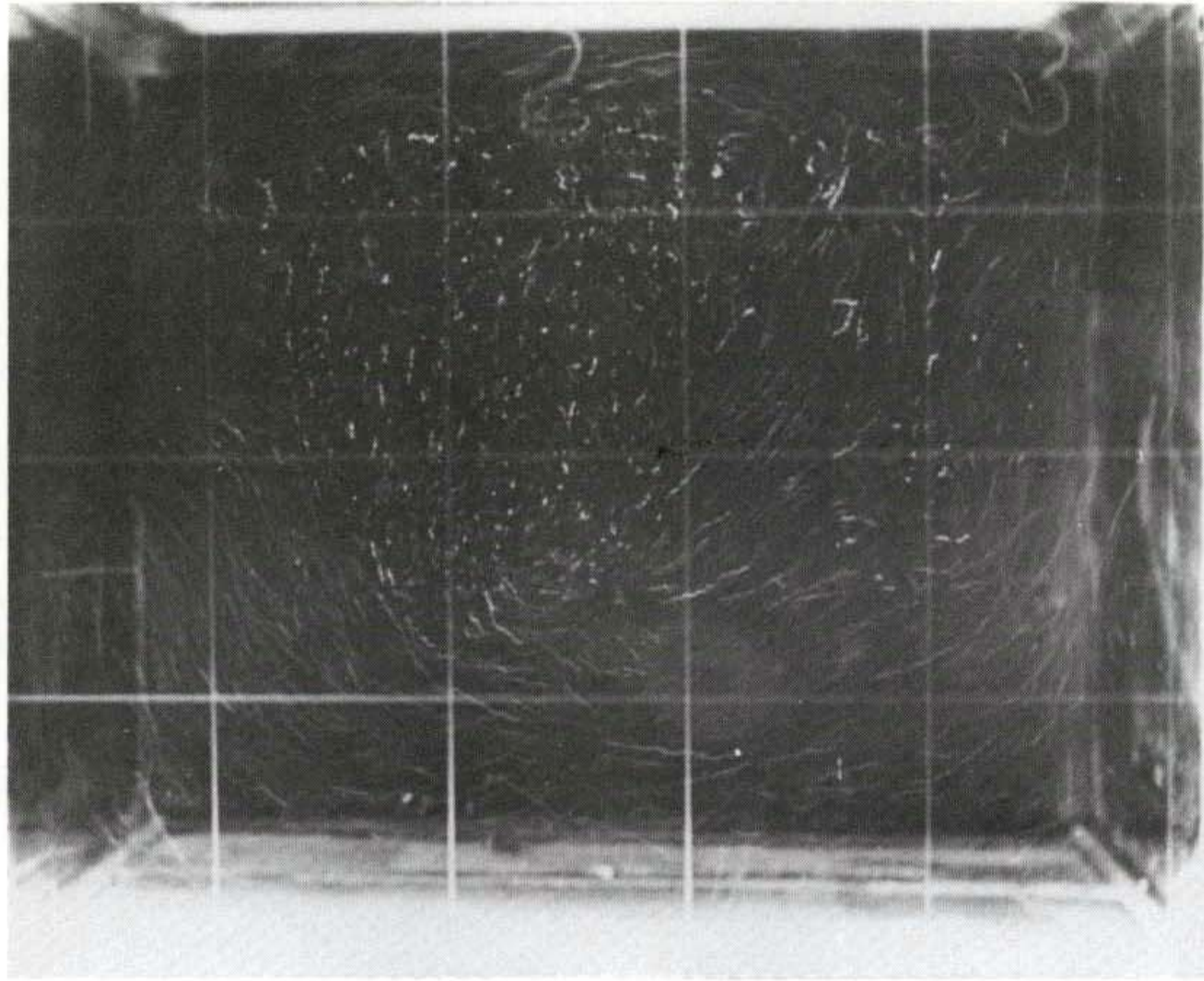


[그림 5-1] 실험모델 1의 유동사진 및 스케치 ; 촬영조건 : 레이저 = Ar 이온 레이저 5W, 사진기 = Nikon FM3, f 4.0 , 1 초, ASA 400 흑백

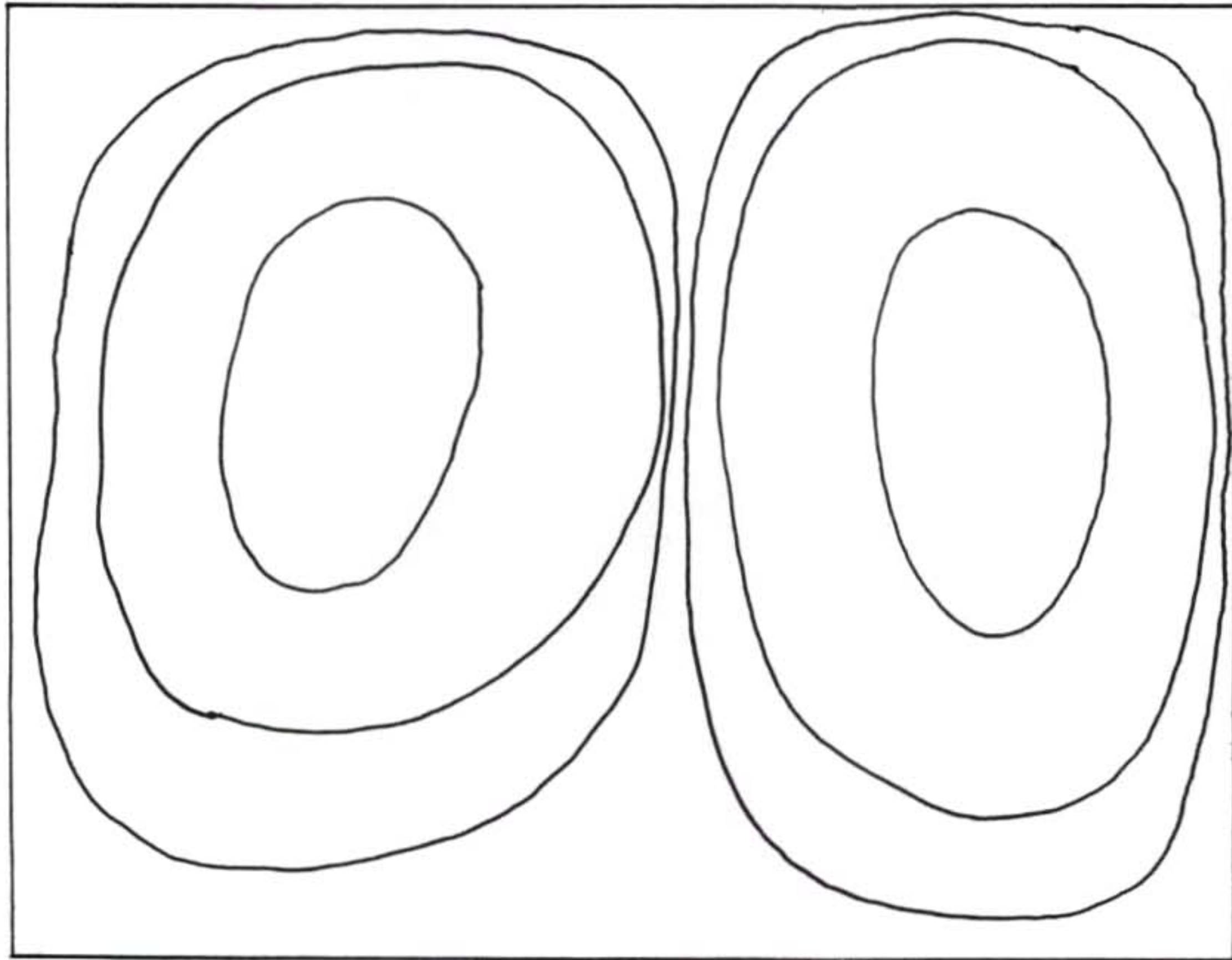
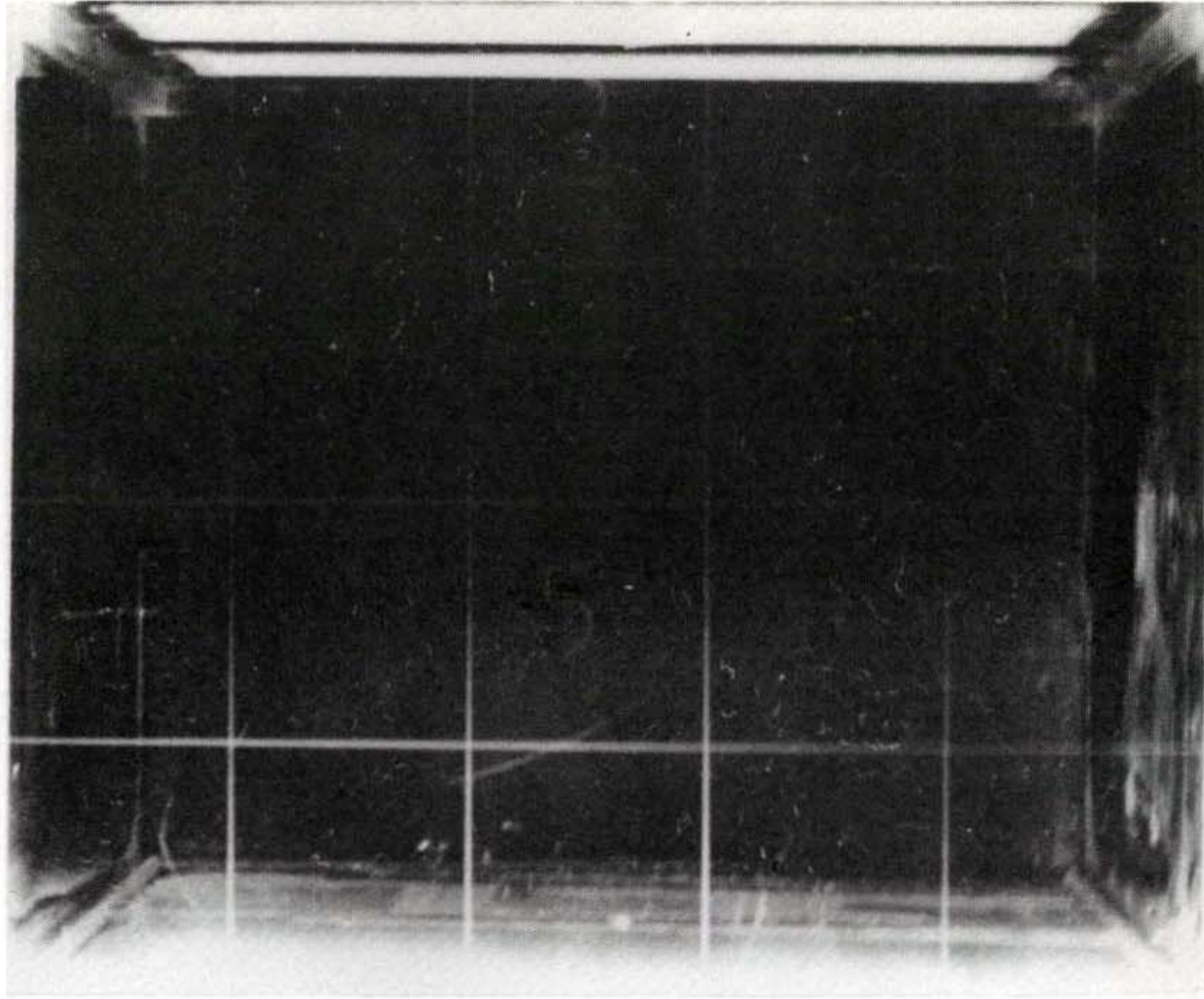
~ 20cm/s 로 측정되었음 ; 동자연 연구보고서 KE-82T-28-1 “비강관 배관 재를 이용한 온수온돌의 열효율 향상에 관한 연구” 참조)

[그림 5-2]는 실험모델 2의 유동사진과 스케치이다. 스케치는 모델 1의 경우와 마찬가지로 유동사진과 비디오 녹화화면을 관찰하면서 그린 것이다. 모델 2는 加熱面의 面積을 모델 1의 경우보다 2배 擴張시킨 것으로서 流動場이 모델 1에 비해 다소 擴張되었음을 알 수 있다. 이 모델에서의 流動은 [그림 5-2]에서 볼 수 있는 바와 같이 流動의 中心核이 모델 1에 비해 右에서 左로 移動되었으며 이 中心核의 부근에 2차세포이 군데 군데 分布되어 있다. 이 모델에서의 사진에서 나타난 流動의 速度는 左下部에서 약 20cm/s, 右下部에서 약 20cm/s 로 비슷한 값을 가지면서 上昇과 下降이 이루어지고 있는데 이는 모델 1에 비해 加熱面積의 증가로 인한 부력의 증가에 기인되는 것으로 판단된다. 축소모델에서의 이러한 流動速度는 實物모델로 擴大解析하는 경우 일반적인 예측치 보다 다소 높은 값인 46cm/s가 되는데 이는 實際 온돌주택의 경우 窓間등 開口部の 틈을 통한 流動低抗이 작용하고 있는데 그 原因이 있을 것으로 생각되지만 正確한 原因은 계속적인 研究를 통하여 규명되어야 할 것으로 생각된다.

[그림 5-3]은 실험모델 3에 있어서 유동사진 및 스케치를 나타낸 것으로서 바닥의 中央部가 加熱面인 이 모델의 전형적인 流動特性을 나타내고 있다. 즉 中央의 加熱面의 中央部에서 上昇하기 시작하는 流動은 中央上部에서 각각 左, 右로 分離되어 각각 上部壁面을 따라 左, 右壁으로 이동되며 그 후 左, 右壁面을 따라 非加熱面으로 下降해서 바닥을 따라 加熱面의 中央部까지 移動하는 流動場을 형성하고 있다. 이는 實驗前 부터 예측한 結果와 일치되고 있다. 이 모델에서의 流動速度는 사진의 상태가 不良



[그림 5-2] 실험모델 2의 유동사진 및 스케치; 촬영조건 레이저=
Ar 이온레이저 5W, 사진기=Nikon FM3, f 4.0,
1/2초, ASA 400 흑백



[그림 5-3] 실험모델 3의 유동사진 및 스케치 ; 촬영조건: 레이저= Ar 이온레이저 5W, 사진기=Nikon FM3, f 4.0, 1/2 초, ASA 400 흑백

한 관계로 현재로서는 分析이 어려운 실정이나 계속되는 研究에서 비디오 화면에 대한 영상처리프로그램이 개발된 후 녹화된 비디오 화면을 利用하면 流速에 대한 定量的인 分析이 可能하므로 계속되는 研究에서 수행할 예정이다.

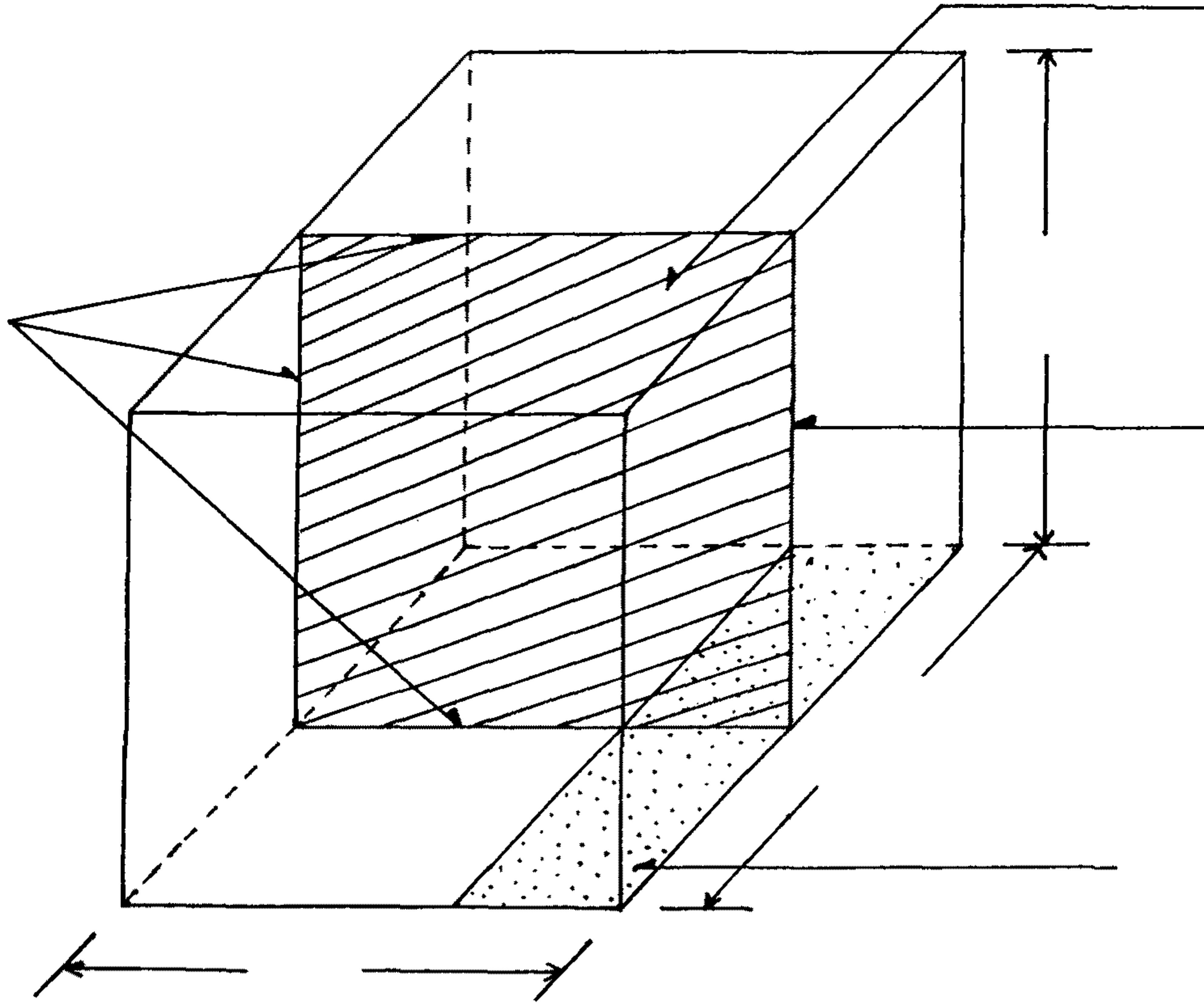
第 6 章 縮小모델의 熱流動 數值해석

第 1 節 序 論

本章에서는 亂流모델을 도입하여 2次元 축소모형에 대한 熱流動 數值解析을 하였다. 이 章의 目的은 熱流動 數值解析을 함으로써 流動現象에 대한 기구(mechanism)을 밝혀 理解를 증진시키고 實驗結果와 비교 검토할 수 있는 신뢰성이 있는 소프트웨어 컴퓨터 프로그램의 개발에 두었다. 지난해의 研究에서는 단순히 층류(laminar)의 경우에 대해 支配方程式을 無次元化하여 Rayleigh 수에 따른 流動現象을 규명하였는데 이 결과는 실험 조건에서의 Rayleigh 수가 亂流領域이어서 직접적인 비교에 어려움이 있었기 때문이다. 이를 보완하기 위해 위에서 언급한대로 亂流모델(k- ϵ)을 도입하였으며 無次元化하지 않은 變數들의 解를 직접 구하였다.

축소모형에 대한 2차원 해석을 위하여 [그림 6-1]과 같은 모형의 수직중심평면을 계산공간영역으로 설정하였다. 본장에서는 k- ϵ 난류모델을 使用하였고 數值解析의 安定性 및 효율성을 위하여 보다 능률적인 SIMPLEC (Semi-Implicit Method Pressure Linked Equations-Consistent) 알고리즘을 압력·속도가 연계된 운동방정식이 解를 구하기 위해 사용되었다. 本章에서는 加熱溫度, 境界條件, 實驗流體 등의 變수를 변화시켜가며 4가지 경우에 대해 수렴된 결과를 성공적으로 얻었는데 계산변수의 조건은 <표 6-1>과 같다.

加熱面の 온도는 50°C 나 60°C가 실험조건에서의 최대온도영역에 해당



[그림 6-1] Schematic diagram of a computation domain

< 表 6-1 > Calculation parameters

Calculat- ion No.	작 동 유 체	가열면온도 (°C)	가 열 인 접 수직벽면온도 (°C)	기 타 비가열면온도 (°C)
1	R 114	60	Linear	23
2	R 114	60	Isothermal	23
3	R 114	50	Linear	23
4	Air	60	Isothermal	23

되어 설정했고 비가열면의 온도는 23°C 를 고정하였다. 실험유체는 실험에 사용된 R114(밀도 $6.87\text{g}/\text{cm}^3$) 를 주로 사용하였으나 밀도차에 의한 영향을 조사하기 위하여 계산번호 4의 경우에는 공기(밀도: $1.16\text{g}/\text{cm}^3$) 로 사용했다. 그 이유는 流動可視化를 위해 사용된 분말의 농도에 따른 밀도의 변화가 流動場에 미칠 수 있는 영향을 간접적으로 검토하기 위해서이다.

加熱面과 인접한 수직벽면은 경계조건을 2가지로 설정하였는데 첫째는 벽의온도가 가열온도에서 비가열면의 온도까지 거리에 따라 線型的으로 변한다는 가정이고 다른 경우는 다른 비가열면과 같이 23°C 로 등온을 유지한다고 설정하였다. 이와 같은 고려에 대한 理由는 縮小模型의 內壁表面에서 加熱面과 非加熱面の 境界에서의 完全斷熱이 어렵고 等溫의 유지가 어려웠기 때문이다.

本 研究에서 개발한 수치해석프로그램에 의한 계산결과는 실험치와 비교하였을 때 流動場의 형태나 全體的인 등온선 分布狀況등에서 만종할만한 결과를 얻었으나 정량적인 비교분석은 추후 계속되어야 할 사항으로 남아 있다.

서론의 끝으로 언급되어야 할 사항은 좀 더 증진된 컴퓨터 프로그램의 개발을 위해서는 (1) 可視化를 위한 유동추적입자의 농도에 따른 流動場의 영향, (2) 위에서 사용한 高亂流모델 (high turbulent model) 을 低亂流모델로의 전환, (3) 복사효과분석을 위한 모델도입, (4) 3次元영역에서의 계산의 필요성 등이다. 계산에 사용된 컴퓨터 프로그램과 계산번호 1의 결과는 부록에 각각 첨부하였다.

第 2 節 支配方程式 및 數值解析方法

일반적으로 定常狀態, 2次元 直交좌표에서 운동량 및 온도에 대한 支配方程式(governing equation)은 아래식으로 주어진다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

윗식에서 ϕ 는 x와 y방향의 속도 u, v 난류에너지 및 소멸율 k, ϵ 그리고 온도 T를 나타내며 Γ_ϕ 는 각 종속변수(ϕ)에 따른 亂流에서의 擴散係數를 나타내며 S_ϕ 는 위의 정규형태의 支配方程式에 해당되지 않은 그 이외의 항을 포함한다.

종속변수 u, v, k, ϵ , T에 대한 Γ_ϕ 와 S_ϕ 의 表現式과 使用된 亂流常數는 <表 6-2>와 같다. <表 6-2>에서 보는 바와 같이 u와 v의 확산계수는 모두 μ_t 로서 等方性을 가정하여 (2)식을 사용했다.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (2)$$

μ_t 는 난류확산계수로서 층류에서의 점성계수 μ 에 비해 매우 크므로 μ 의 영향은 제외시킨다. k와 ϵ 는 단위질량당 난류에너지와 난류에너지의 소멸율을 나타내는 것이고 σ 는 난류에서는 Prandtl 수 ($Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha}$) 또는 Schmidt 수 ($Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$)를 나타낸다.

식(1)과 같은 2차 편미분방정식은 유한차분법을 사용하여 이산화(discretization)시킨 후 선형대수방정식을 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm) 또는 Thomas 알고리즘을 사용하여 解를 구하였다. 속도의 압력의 운동방정식에서의 연계는 SIMPLEC를 利用하여 解決하였다.

〈表 6-2〉 Expressions for Γ_ϕ and S_ϕ

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
u horizontal momentum	μ_t	$\frac{\partial}{\partial x} (\mu_t \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_t \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial p}{\partial x}$
v vertical momentum	μ_t	$\frac{\partial}{\partial x} (\mu_t \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_t \frac{\partial v}{\partial y}) - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g$
k turbulence kinetic energy	$\frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \epsilon$
ϵ turbulence kinetic energy dissipation rate	$\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \epsilon^2 / k$
T temperature	$\frac{\mu_t}{\sigma_T}$	0

$$G_k = \mu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} \right] + \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\}^2$$

Turbulence constants employed

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 0.9$$

$$C_1 = 1.42 \quad \sigma_\epsilon = 1.22$$

$$C_2 = 1.92 \quad \sigma_T = 0.9$$

SIMPLEC 알고리즘은 본 연구와 같이 밀폐된 공간에서 부력에 의한 유동해석의 경우 SIMPLE나 SIMPLER(SIMPLE-Revised)보다 능률적이고 안정된 것으로 보고되어 (Jang 등, 1986) 使用하였다. 여러 알고리즘의 구체적인 내용이나 평가는 위에서 인용한 문헌에 자세히 나타나 있으므로 여기에서는 생략한다. 그러나 SIMPLEC 알고리즘이 SIMPLER 알고리즘에 비해서 가지는 장점중의 하나는 기억용량이 SIMPLER에 비해 작게 요구되는 관계로 용량의 제약을 받는 Personal Computer에 의한 작업에 유리하다는 점은 언급하는 것이 좋겠다.

본 계산에서 사용한 격자계는 23×23 의 크기를 가지며 nonuniform한 格子分布를 일률적으로 사용하였으며 벽면근처의 경계층에서 매우 심한 온도 및 속도구배를 적절히 처리하기 위해서는 벽면근처에 많은 격자점을 할당하는 방법을 취하였다. 한편 경계층을 벗어난 코어(core) 영역에서의 온도 및 속도의 변화는 매우 완만할 것으로 예상되어 성긴 格子分布를 주었다. 벽면근처에서의 充分하지 못한 格子點 할당은 공간상의 온도나 속도의 심한 증가를 가져오는데 이는 식(1)의 생성항 S_{ϕ} 를 매우 커지게 하는 결과를 가져온다. 그래서 프로그램의 계산과정에서 쉽게 발산하는 경향을 보였다. 이에 대해서는 경험에 입각한 세심한 주의가 요구된다. 격자계의 크기에 대한 민감성테스트(sensitivity test)는 본 연구에서는 행하지 않았는데 이는 실험과 계산의 정량적인 비교 검토단계에서는 필요하리라 판단된다. 그러나 과도한 격자크기는 수렴이 매우 느리기 때문에 계산상의 큰 제약을 야기시키므로 이에 대한 적절한 타협이 요구된다.

본 연구에서와 같이 流動이 오직 溫度差異에 의한 밀도변화에 의해 야기되는 流動場의 해석은 중력 source 항인 $-\rho g$ 의 영향이 지대하므로 수

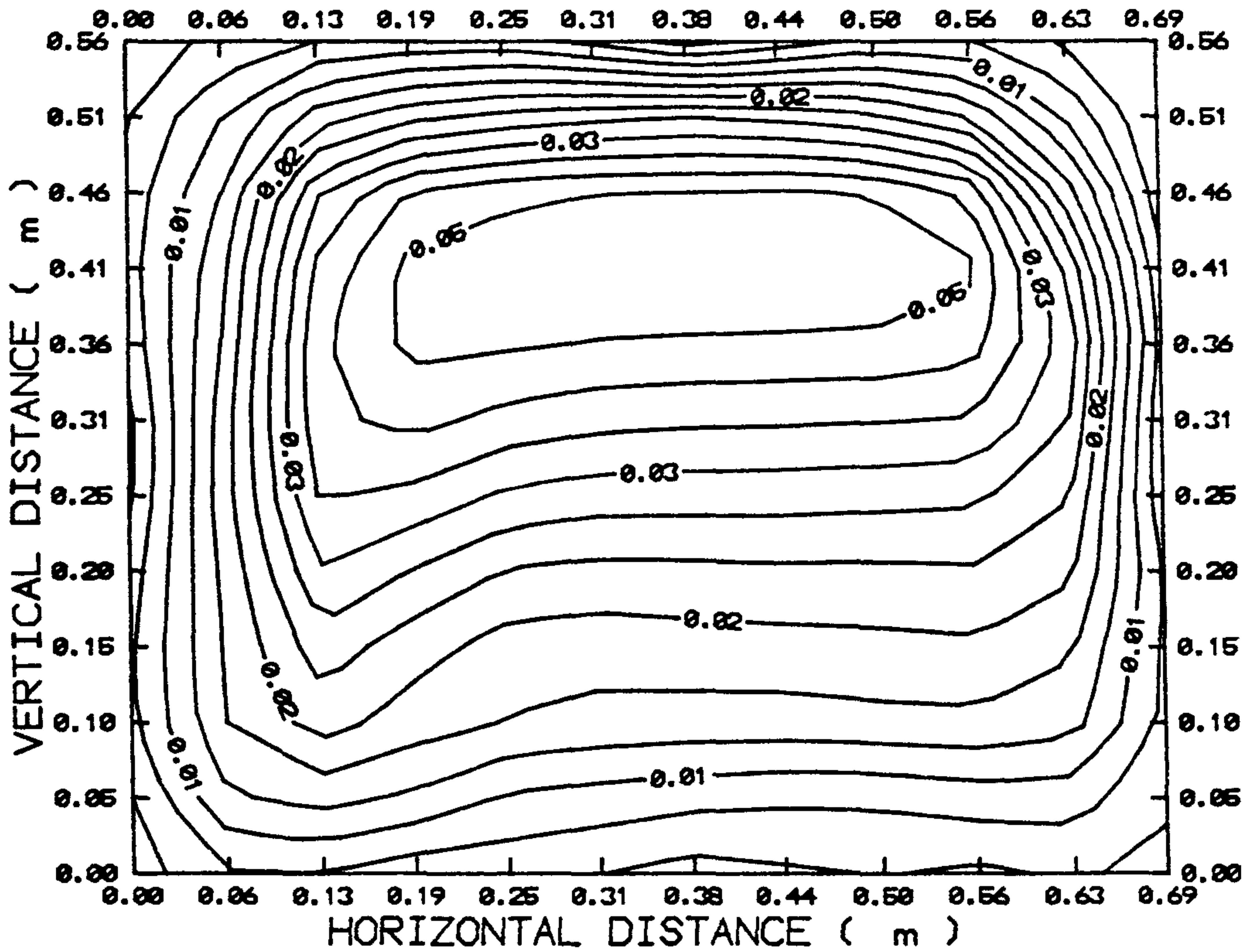
럼을 위해서는 source 항의 심한 underrelaxation이 필요하였다. 그래서 본 계산에서는 $-\rho g$ 의 효과를 2000번 정도의 반복계산을 통하여 서서히 증가시키는 방법을 택하였다. 특히 이러한 방법은 Ra 수가 크고 亂流인 경우에는 필요하다. 본계산을 위해 32Bit 퍼스날 컴퓨터를 사용하였으며 완전히 수렴된 解를 얻기 위해 약 6000번 内外의 반복계산을 행했다.

第 3 節 數值解析結果 및 토론

[그림 6-2]에서 [그림 6-5]까지는 계산번호 1, 즉 가열온도 60°C , 실험유체 R114, 가열면과 접한 수직벽면온도의 線型的인 變化狀態에서의 결과이다. [그림 6-2]는 流線을 나타내는 것으로서 전체적으로 하나의 커다란 유동형태를 보여주며 특히 오른쪽 수직면과 상층벽면 쪽에서 빠른 유체의 흐름을 나타내고 있다. [그림 6-3]은 等溫線을 나타내며 加熱되는 바닥면의 영역에서 溫度구배가 매우 심하게 형성되어 있는 것을 보여주고 있는데 이는 예상할 수 있는 결과이다. [그림 6-4]와 [그림 6-5]는 높이 29cm 지점에서의 수평방향으로의 온도 및 수직방향속도 v 의 分布이다. 주목할 것은 이미 등온선이나 流線의 分布에서 예측되었듯이 core 부분이 전체 계산영역의 많은 부분을 차지하며 熱的인 경계층과 운동량경계층은 壁面에 매우 작은 두께로 형성되는 것을 알 수 있다. 계산에서 나타난 최대속도는 기체가 상승하는 우측벽면에서는 약 14cm/s 로 하강하는 쪽에서는 18cm/s 정도로 된다. 하강하는 쪽의 속도가 더 큰 것은 운동방향과 同一한 方向으로 작용하는 重力에 의한 것이라고 판단된다.

LINEAR TEMPERATURE VARIATION OF
RIGHT VERTICAL WALL AND BOTTOM
1/3 PARTIAL HEATING

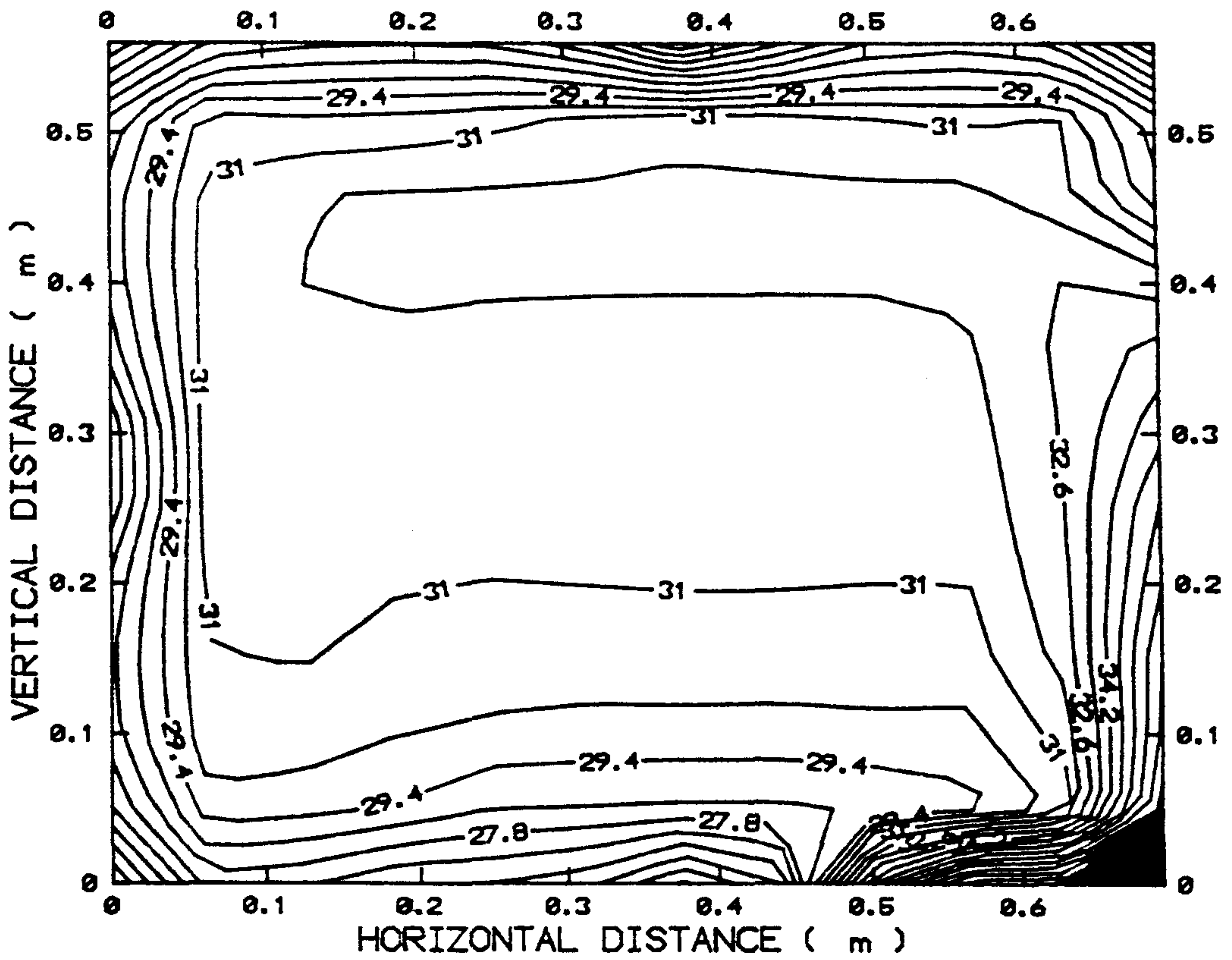
STREAMLINE PLOT (60 C HEATING)



[그림 6-2] 계산조건 1 에서의 유동장

LINEAR TEMPERATURE VARIATION OF
RIGHT VERTICAL WALL AND BOTTOM
1/3 PARTIAL HEATING

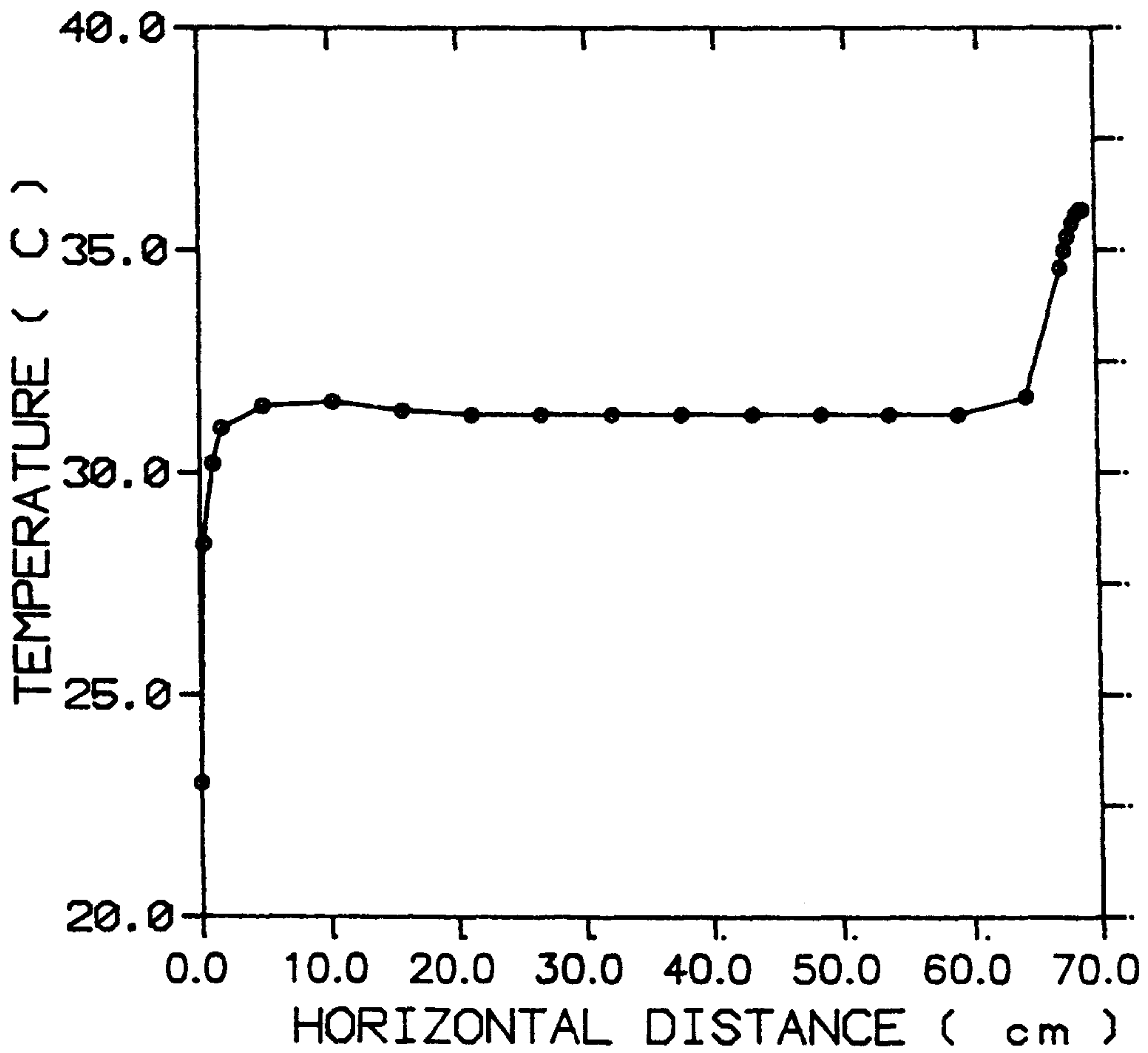
TEMPERATURE PROFILE (60 C HEATING)



[그림 6-3] 계산번호 1 에서의 온도장

LINEAR TEMPERATURE VARIATION OF
RIGHT VERTICAL WALL AND BOTTOM
1/3 PARTIAL HEATING

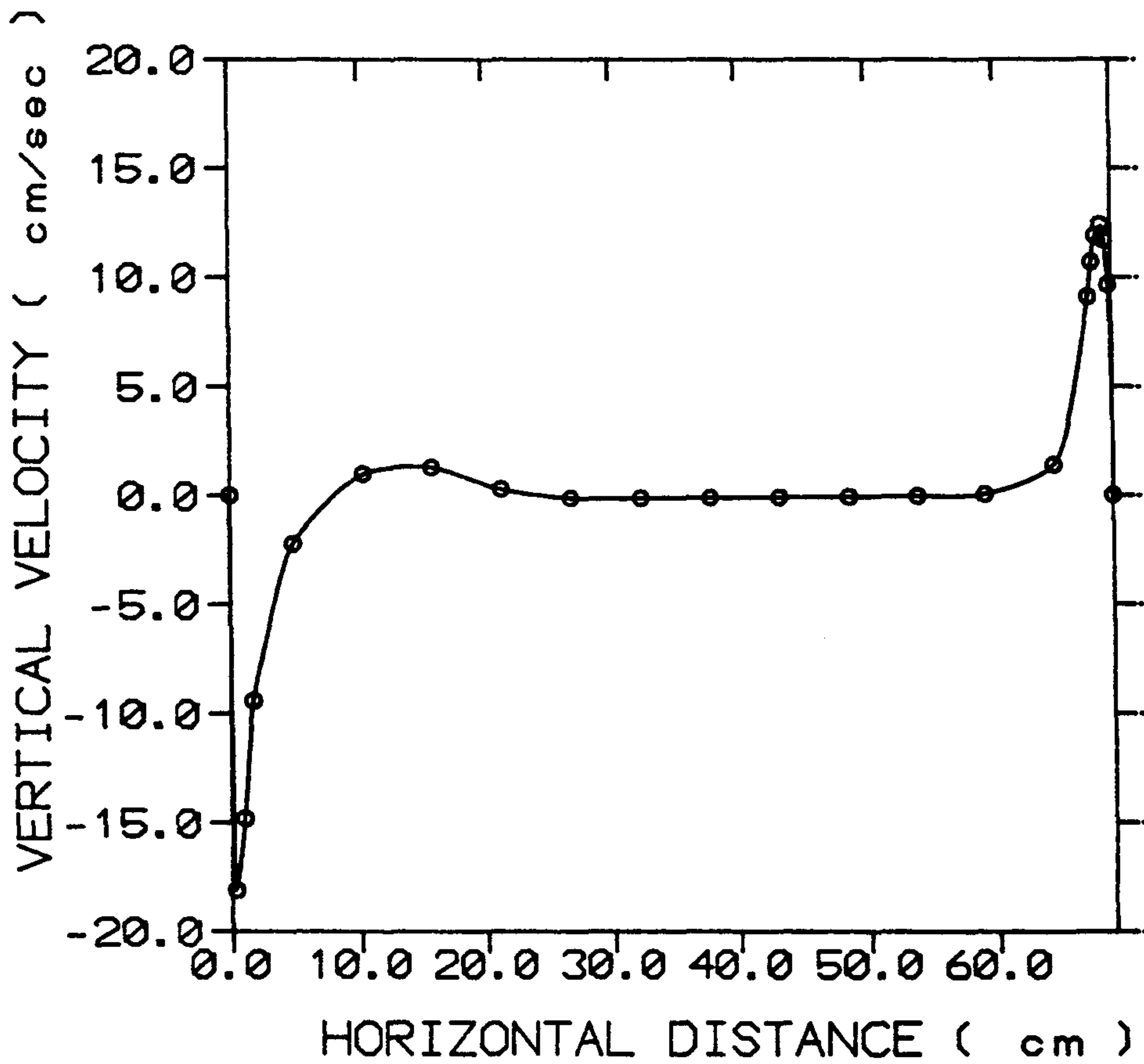
TEMPERATURE PROFILE $Y=29.0$ cm



[그림 6-4] 계산번호 1에서 높이 29 cm인 경우의 온도분포

LINEAR TEMPERATURE VARIATION OF
RIGHT VERTICAL WALL AND BOTTOM
1/3 PARTIAL HEATING

VERTICAL VELOCITY PROFILE AT $Y = 29.0$ cm



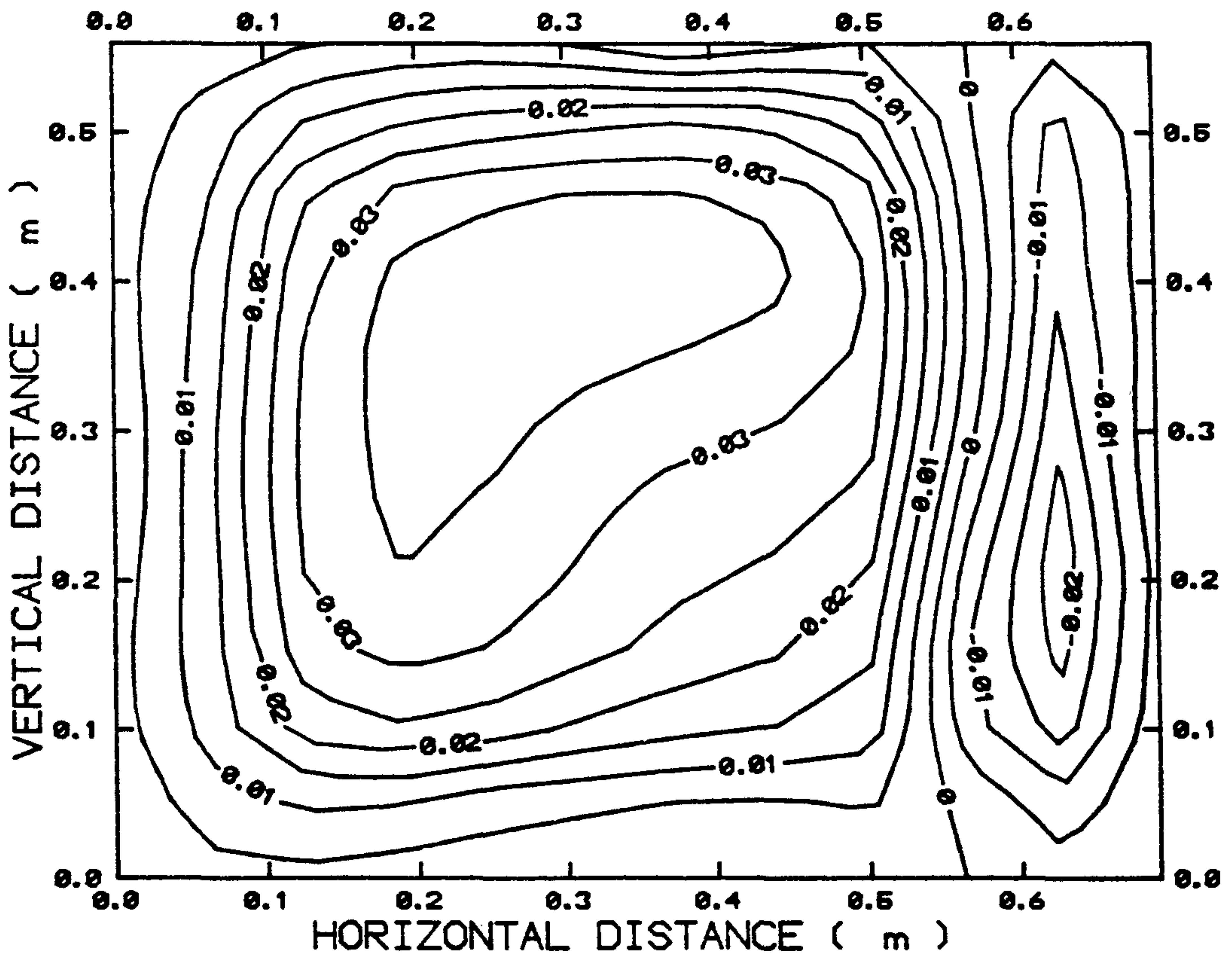
[그림 6-5] 계산번호 1 에서 높이 29 cm 에 있어서 수직방향
속도분포

한편 오른쪽 벽면의 경계온도에 의한 영향을 조사하기 위해 오른쪽 벽면온도가 23°C 로 등온인 경우에 대한 數値解析을 하였으며 그 結果는 각각 [그림 6-6], [그림 6-7], [그림 6-8]에 나타내었다. [그림 6-6]은 流線分布를 나타내는 것으로서 流動場이 계산번호 1의 경우와는 판이하게 달리 형성되어 있음을 알 수 있다. 즉 계산번호 2의 경우 유선이 두개로 分離되어 오른쪽 加熱面의 中央 右側部에 別途의 流動場이 형성되고 加熱面의 中央 左側部부터 左側壁面까지 주세포유동이 형성되어 있다. 이러한 結果는 오른쪽 벽면이 23°C 로 유지되었기 때문에 부력에 대항하여 오른쪽 쪽 쪽에 의한 냉각이 작용되었기 때문으로 판단된다. 이러한 차이점에 입각하여 주목할 사항은 경계조건에 따라 유동은 많은 차이가 나타난다는 것을 보인다는 점으로서 에너지절약이나 室內空氣의 오염제어라는 관점에서 正確한 경계조건에 따른 熱流動解析이 이루어져야 한다는 사실이다. [그림 6-7]은 등온선을 나타내는 것으로서 core의 온도가 계산번호 1의 경우에 비해 낮음을 보여주고 있다. [그림 6-8]은 온도계산 영역에서의 온도변화를 3차원으로 형상화시킨 것으로서 加熱되는 영역에서의 심하게 나타나는 온도구배를 입체화해서 볼 수 있다.

계산방법 3의 경우는 加熱溫度를 50°C 로 낮추고 右側壁의 온도분포를 선형적으로 설정한 것으로서 그 數値解析結果를 각각 [그림 6-9], [그림 6-10], [그림 6-11]에 나타내었다. [그림 6-9]와 [그림 6-10]은 각각 流動場과 溫度場의 형성상태를 나타낸 것으로서 계산번호 1의 경우와 비교할 때 거의 유사한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있으며 加熱溫度의 변화에 따른 차이점이 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 여기에서 언급해야 할 사항은 전반적인 溫度場이나 流動場의 모양이 유사하지만 벽면을 통

ISOTHERMAL WALL TEMPERATURE &
BOTTOM 1/3 PARTIAL HEATING

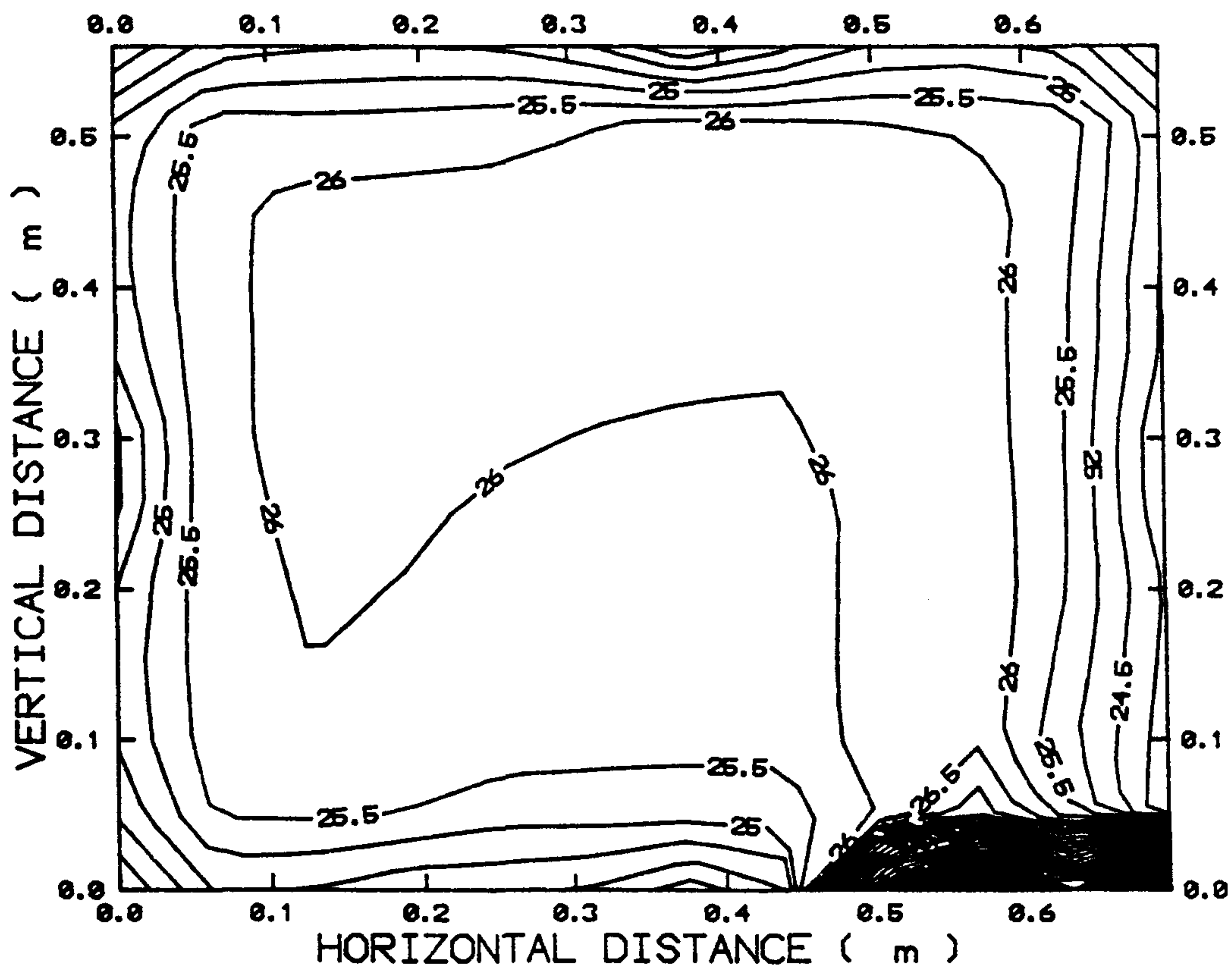
STREAMLINE PLOT (60 C HEATING)



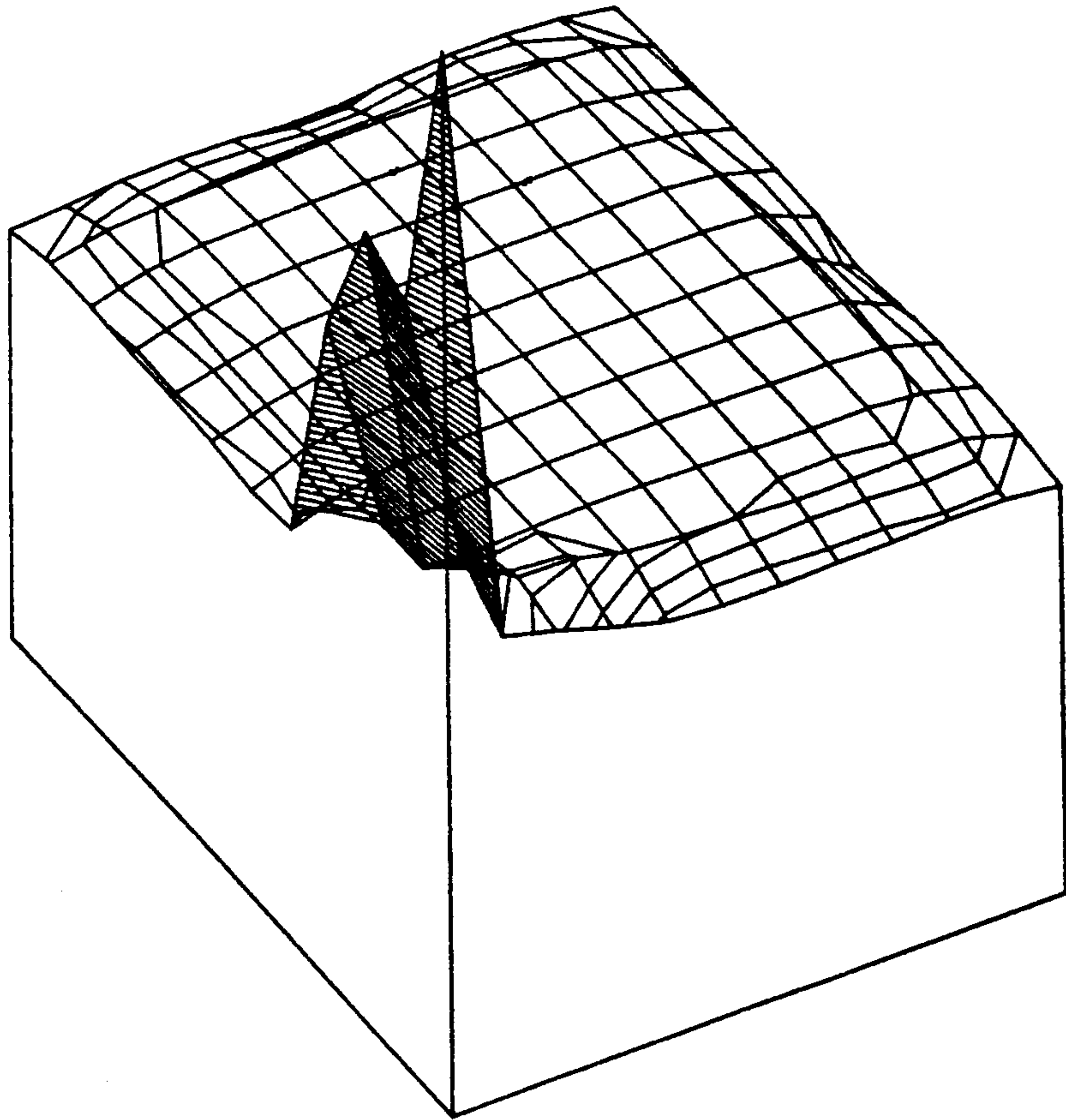
[그림 6-6] 계산모델 2에서의 유선분포

ISOTHERMAL WALL TEMPERATURE AND
BOTTOM 1/3 PARTIAL HEATING

TEMPERATURE PROFILE (60 C HEATING)



[그림 6-7] 계산모델 2 에서의 등온선 분포

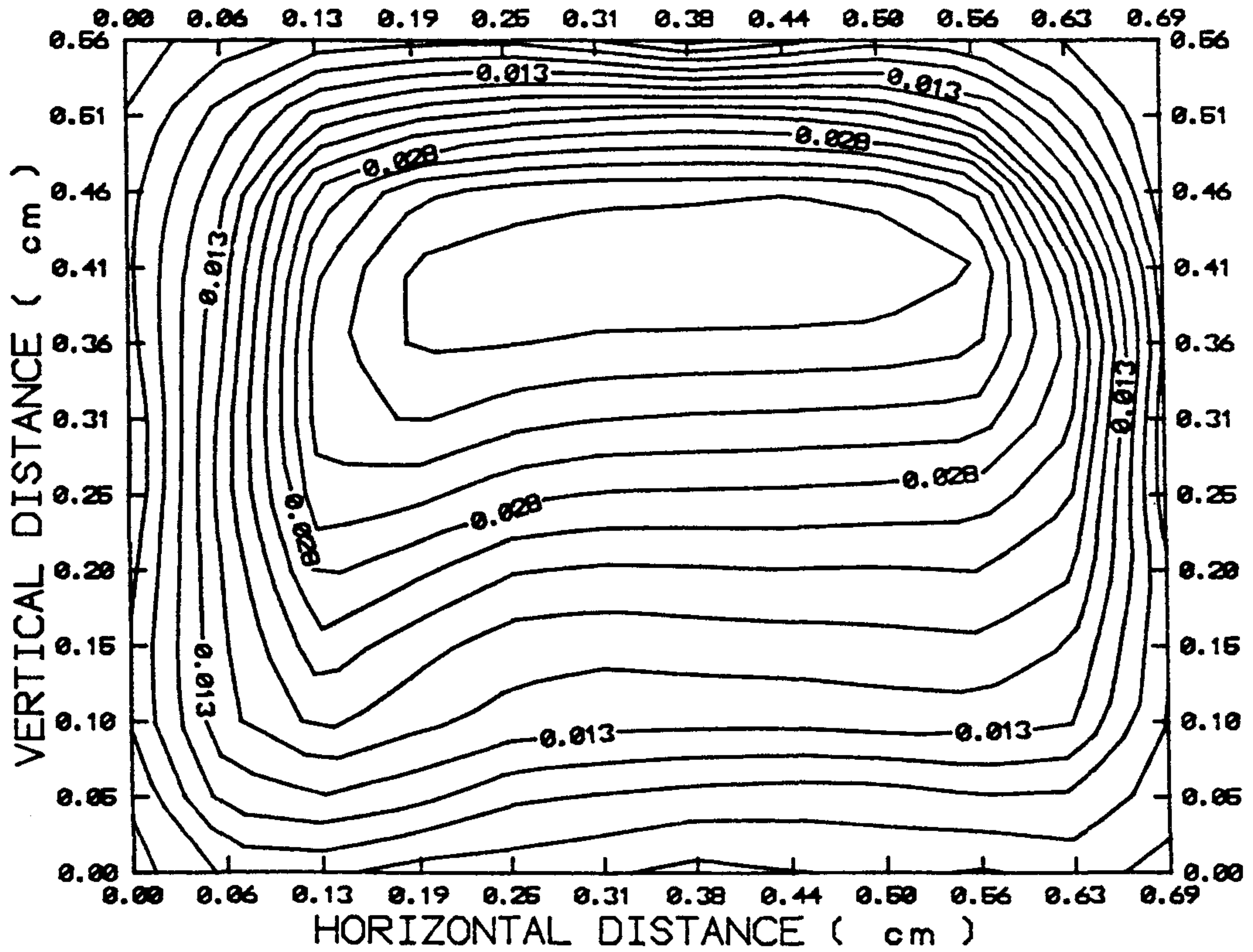


TEMPERATURE PROFILE (60 C HEATING)

[그림 6-8] 계산모델 2 에서의 입체화된 온도 분포

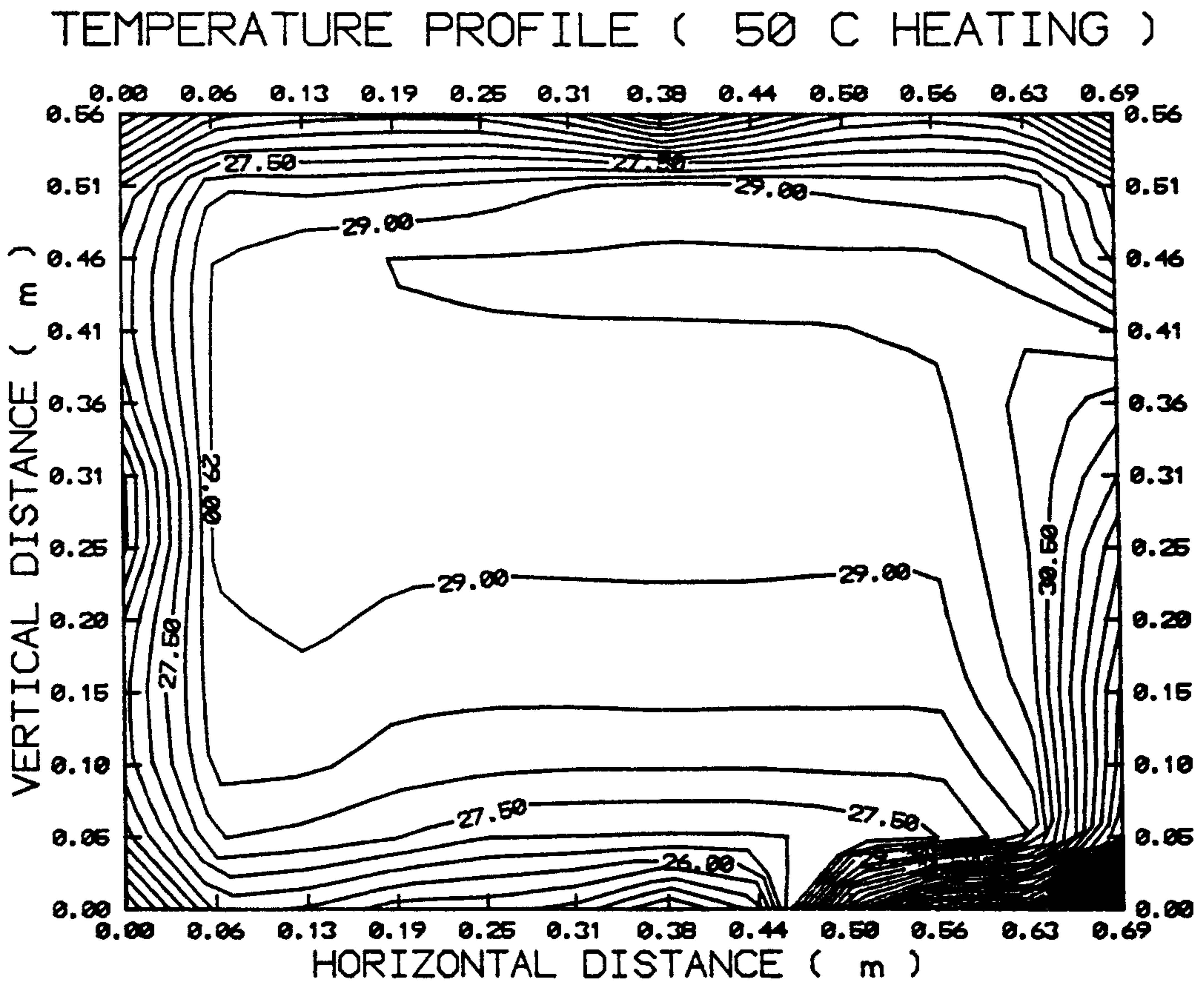
LINEAR TEMPERATURE VARIATION OF
RIGHT VERTICAL WALL AND BOTTOM
1/3 PARTIAL HEATING

STREAMLINE PLOT (50 C HEATING)

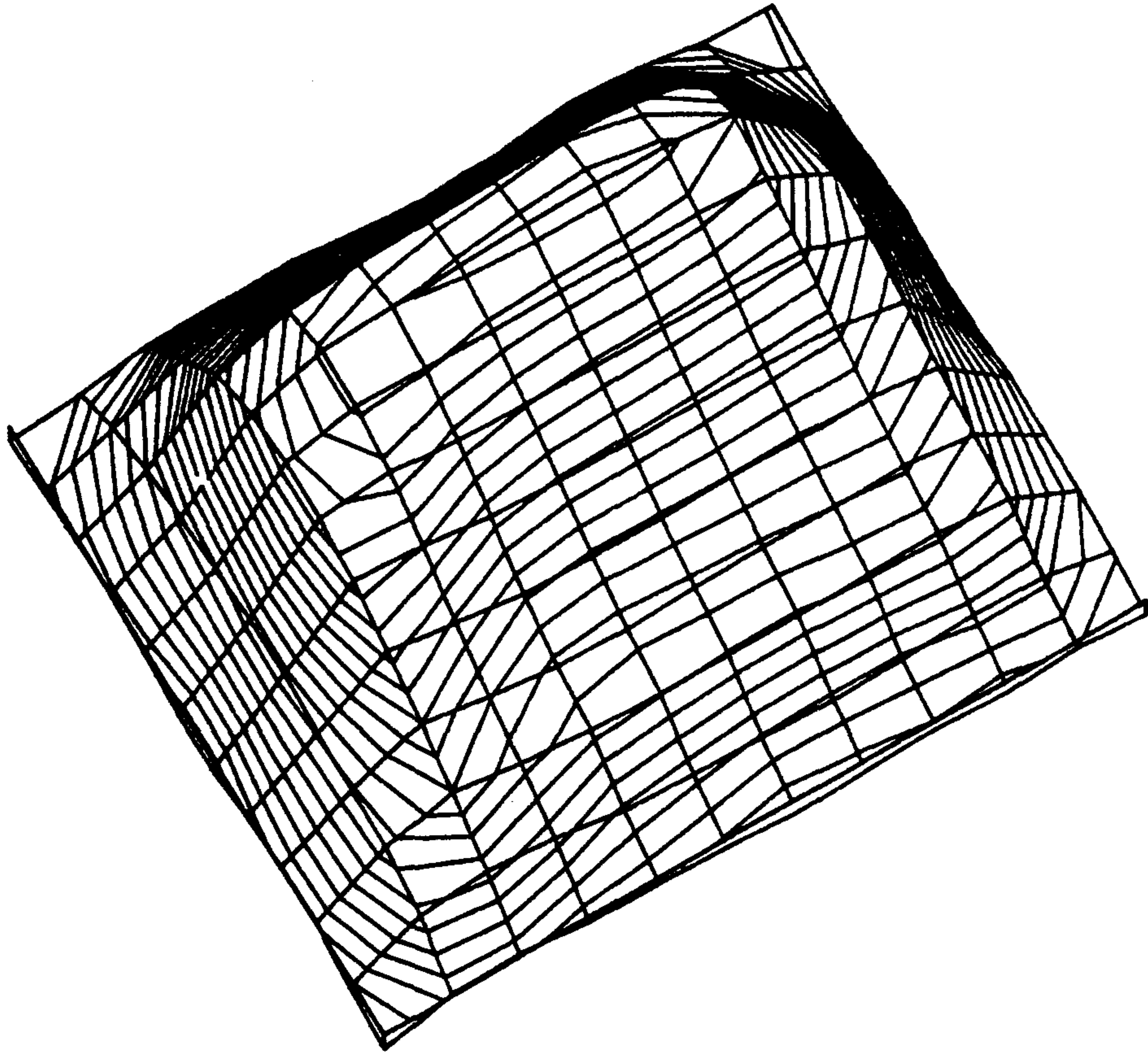


[그림 6-9] 계산모델 3에서의 유선분포

LINEAR TEMPERATURE VARIATION OF
RIGHT VERTICAL WALL AND BOTTOM
1/3 PARTIAL HEATING



[그림 6-10] 계산모델 3에서의 등온선 분포



STREAMLINE PLOT (50 C HEATING)

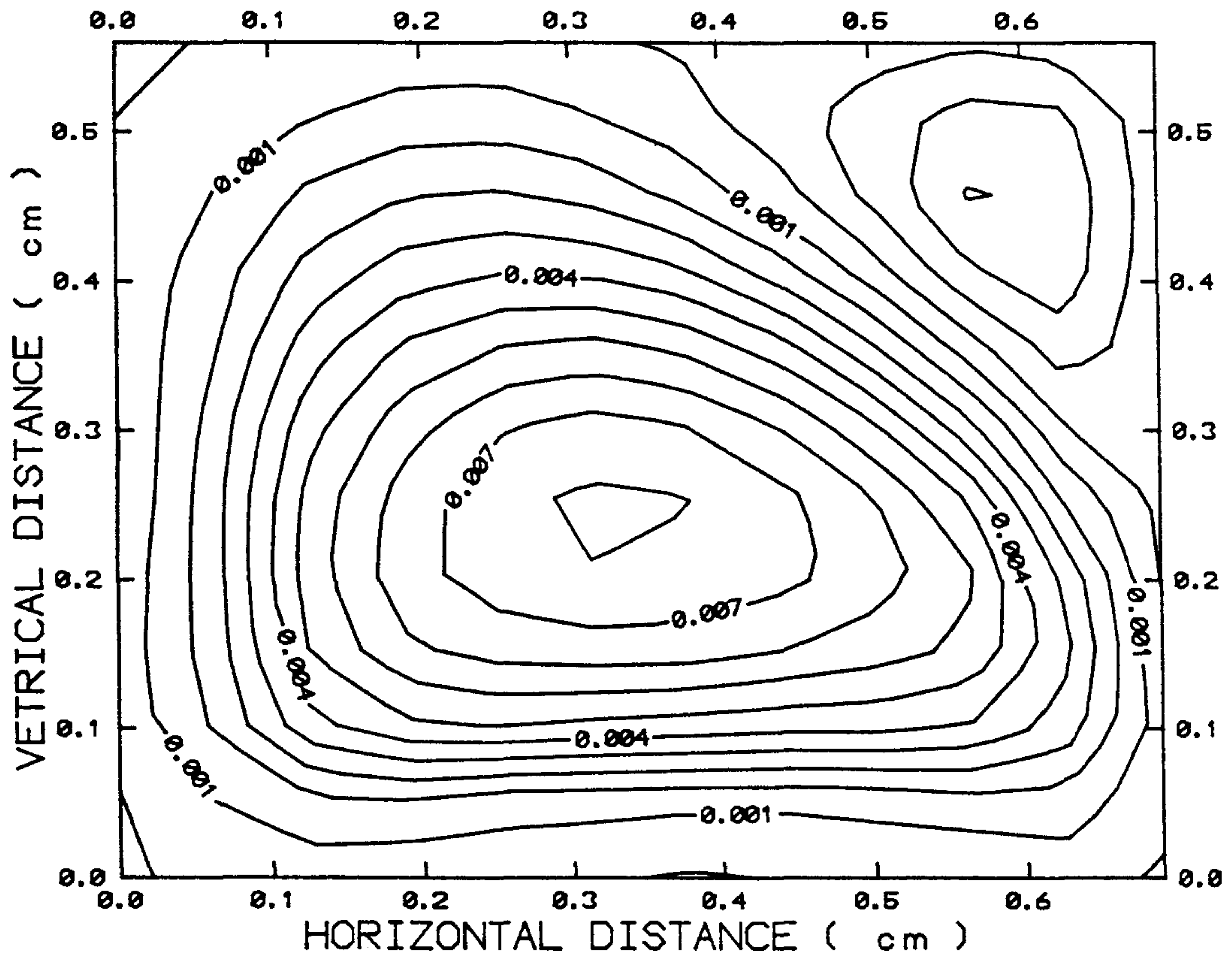
[그림 6-11] 계산모델 3 에서의 유선분포 입체도

한 傳熱效果등은 Nusselt 수 등의 계산에 의한 구체적인 비교가 이루어져야만 加熱溫度變化에 따른 에너지 손실량의 변화를 산정할 수 있다는 점이다. 이러한 계산에 대해서는 계속되는 연구에서 계속적으로 수행할 예정이다. [그림 6-11]은 流線을 3次元的으로 나타낸 것이다.

계산번호 4는 계산번호 2의 조건에서 實驗流體를 R114 代身 空氣로 바꾼 것으로서 밀도변화에 따른 流動場 變化를 포착하기 위한 것이다. 이는 실제 실험에서 可視化를 위해 사용된 粒子의 濃度에 의해 축소모형내 全體 流體 - 粒子의 밀도가 증가했을 경우의 효과를 간접적으로 유추할 수 있다는 시각에서 행하여진 것이다. [그림 6-12], [그림 6-13], [그림 6-14]는 이러한 경우의 數值解析結果를 나타낸 것이다. 실험유체를 비중이 큰 R114에서 비중이 작은 공기로 變化시켰을 때 계산번호 2에서 나타난 것과 같은 심한 流動二分化現象은 [그림 6-12]의 流動場에서는 나타나지 않고 단지 右上端 구석에서 재순환영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이 재순환 영역의 형성은 右側의 等溫壁에 기인되는 것으로 판단되며 비중이 가벼운 流體이기 때문에 계산번호 2의 결과에 비해 많이 축소되었다. 이러한 계산결과에 비추어 볼때 可視化를 위해 사용된 流動追蹟粒子의 영향은 보다 正確한 계산을 위해서는 규명되어야 될 문제의 하나라고 생각된다. 이러한 영향에 대해서는 계속되는 연구에서 보완할 예정이다. [그림 6-13]은 등온선의 分布를 [그림 6-14]는 流動場을 입체적으로 表現한 것이다.

ISOTHERMAL WALL TEMPERATURE &
BOTTOM 1/3 PARTIAL HEATING WITH
AIR WORKING FLUID

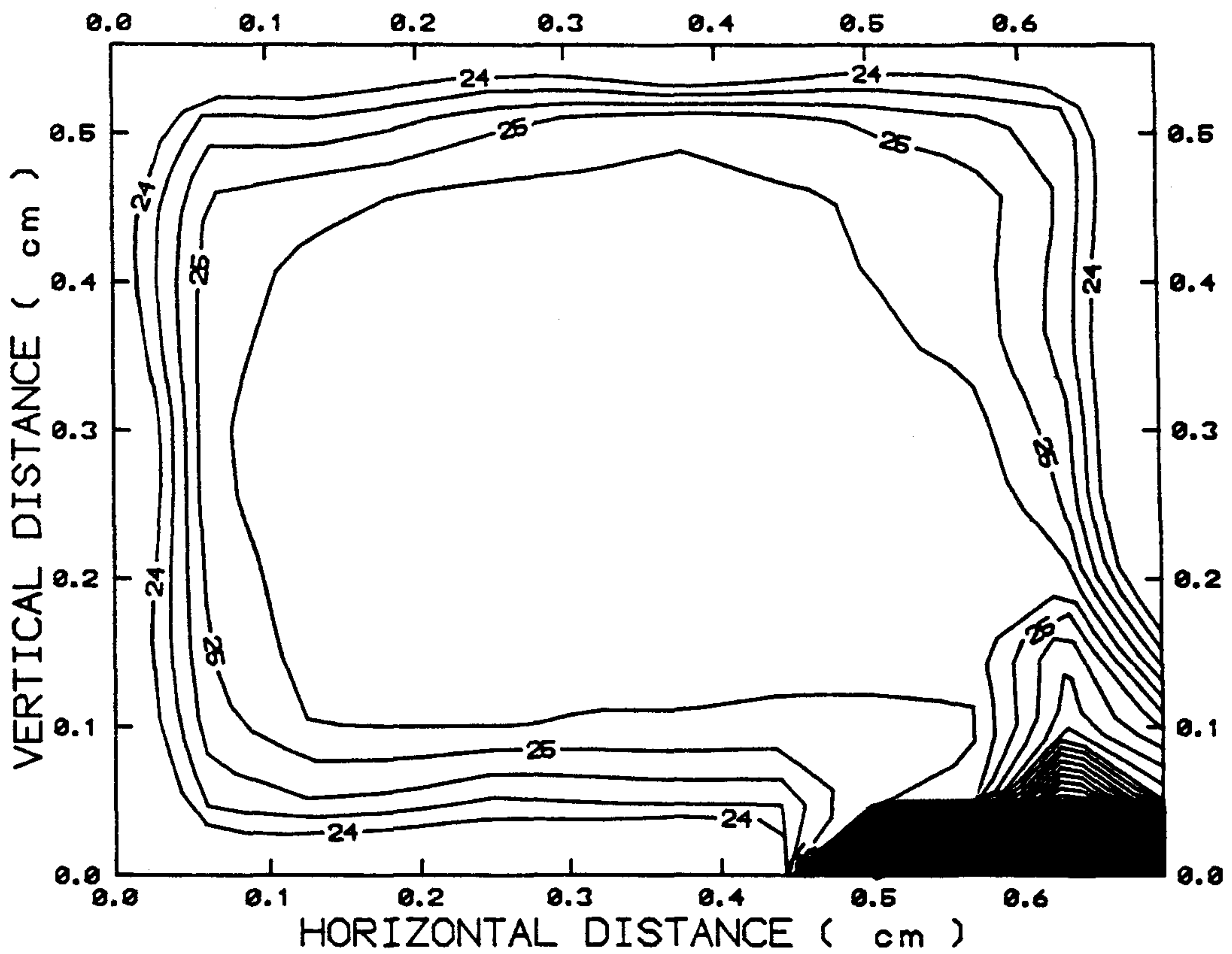
STREAMLINE PLOT (60 C HEATING)



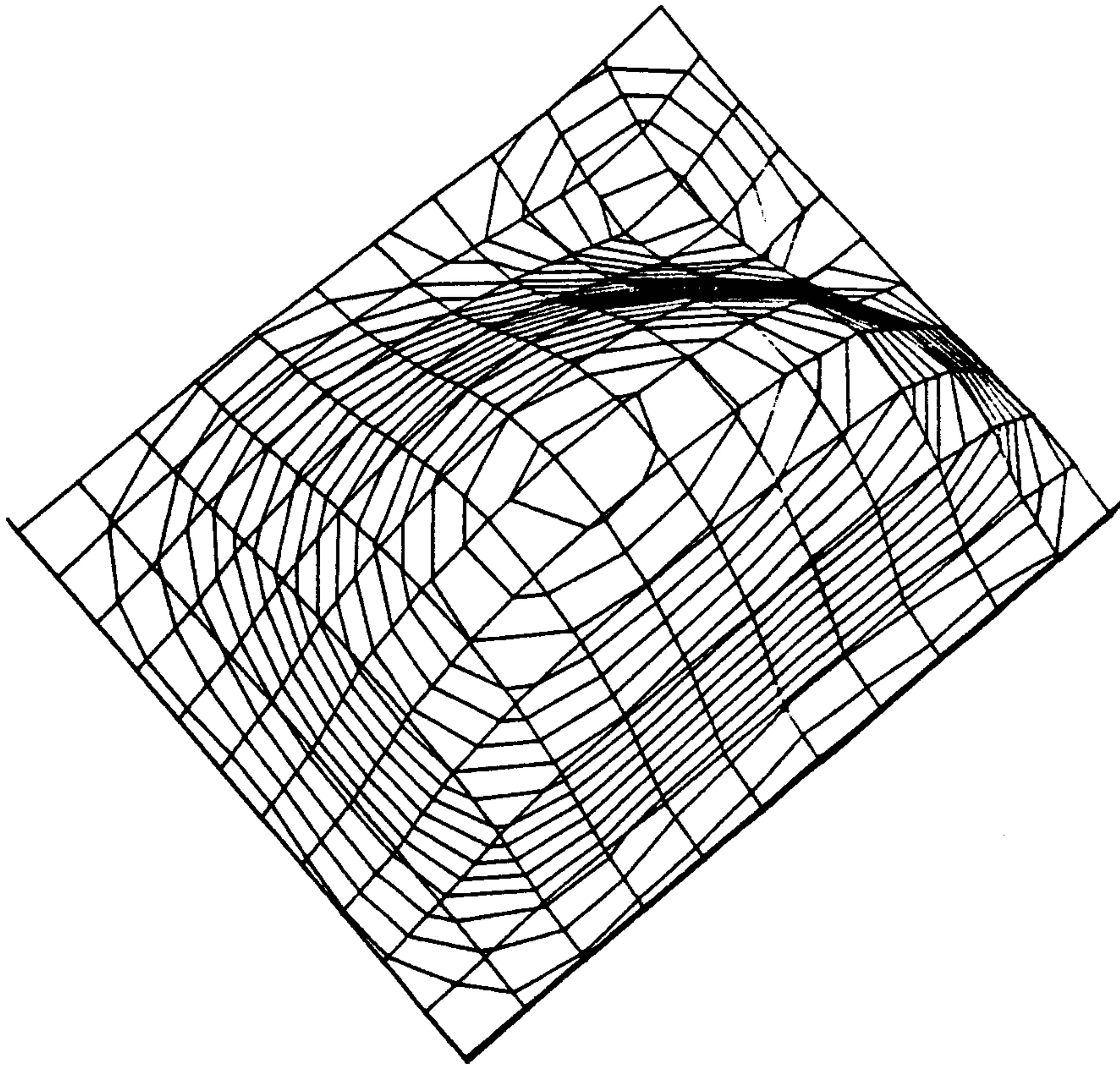
[그림 6-12] 계산모델 4 에서의 유선분포

ISOTHERMAL WALL TEMPERATURE &
BOTTOM 1/3 PARTIAL HEATING WITH
AIR WORKING FLUID

TEMPERATURE PROFILE (60 C HEATING)



[그림 6-13] 계산모델 4에서의 등온선 분포



STREAMLINE PLOT (60 C HEATING W/AIR)

[그림 6-14] 계산모델 4에서의 유선분포 입체도

第 7 章 結 論

本 研究는 1989년 6월 부터 3개년에 걸친 研究事業의 제 2 차년도 연구사업으로서 1990년 7월 13일 부터 1991년 7월 12일까지 1년간 수행한 것이다. 본 연구의 제 1 차년도의 연구기간중에서는 주로 축소모형 실험을 위한 基本的인 理論을 分析하였으며 流動可視化實驗을 수행하였다. 이때 축소모형연구의 대상이 되는 實物모델은 프랑스 Poitiers 대학의 실험용 人工氣條조절건물을 설정하였으며 바닥면의 高さ 일정한 온도로 加熱되는 온도를 研究對象으로 하였다.

同 研究의 2 차년도인 올해에는 第1 차년도와 같은 모델을 使用하였으며 縮小모델의 縮尺率과 유동추적입자 및 實驗氣體 등 모델축소에 대한 제반 조건도 전년도와 同一한 모델을 使用하였으나 바닥면에 대해서는 加熱面積 位置를 5개 종류로 可變조작할 수 있도록 하였다. 또한 제 1 차년도에서는 流動可視化實驗에 주안점을 두었으나 올해에는 溫度可視化實驗에 研究의 主안점을 두면서 流動可視化實驗과 전산수치해석을 병행해서 추진하였다.

溫度可視化實驗은 熱電雙 (Thermocouple)을 내장한 溫度測定스캐너 (Temperature Measurement Scanner)를 제작하여 使用하였으며 縮小模型 內部空間의 210개 地點의 溫度를 測定하여 P/C에 의해 등온선이 可視化 되도록 하였다. 溫度可視化實驗은 加熱面積, 加熱面의 位置, 加熱溫度등에 變化를 주면서 16가지 종류의 경우에 대한 실험을 수행하였다.

한편 流動可視化實驗은 加熱面積이 바닥 전체면적의 高さ이고 加熱面의 위치가 右側壁面과 인접한 경우 및 바닥의 中央部에 있는 경우와 가열면적이 전체 바닥면적의 高さ이고 加熱面이 右側壁과 인접한 경우 등 3개의 경우

에 대해서 수행하였다.

아울러 본 연구에서는 전산수치해석도 시도하였는데 Patangkar의 SIMPLEC을 이용하였으며 Turbulent 모델을 도입하였다. 이상과 같은 일련의 실험과 수치해석결과 다음과 같은 사항을 확인할 수 있었다.

- 1) 온도장가시화 결과 추출된 등온선분포는 각 모델의 특성에 부합되는 만족스러운 결과가 도출되었다.
- 2) 온도장가시화실험에서 주목되는 사항의 하나는 바닥에서의 가열조건이 동일한 가열면적, 동일한 가열온도인 경우에도 가열면의 위치를 다르게 배치하는 경우 실내온도분포가 상이하게 나타나며 특정한 온도범위를 가지는 공간의 크기가 다르게 나타난다는 점이다.
- 3) 이러한 실험결과로 미루어 실내공간중 특정범위의 공간을 특정온도로 유지하기 위해서는 가열면적, 가열온도 뿐만 아니라 가열부위의 위치까지를 고려해야 한다는 사실을 확인할 수 있었으며 여기에 대한 구체적인 후속적인 연구는 본 연구에서 사용한 축소모델실험법을 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구의 유동실험결과 추출된 축소모형내의 대류 유동의 속도는 좌우측의 벽면근처에서 중력과 부력의 영향으로 최대치를 가지며 약 15 ~ 20 cm/s인데 이는 실물모델로 환산하는 경우 실제 온도주택의 값인 20 ~ 30 cm/s를 조금 상회하는 35 ~ 46 cm/s가 된다.
- 5) 이는 실제 온도주택의 경우開口部가 있기 때문에 실내유동상황이 다소 복잡한 양상을 가지고 있다는 점에 기인된다고 추측되나 정확한 원인규명을 위한 연구가 완료된 후에야 명확하게 될 것으로 판단된다.

6) 乱流모델을 도입해서 開發된 본 연구의 수치해석프로그램은 Ra 수가 10^{10} 정도인 實際 建物の 온돌방에 使用할 수 있는 성능을 가지고 있으며 본 研究의 실험결과와 비교하였을 때 流動場의 형태나 全體的인 등온선 분포상황등에서 만족할만한 결과를 얻었다.

마지막으로 올해까지의 研究를 토대로 하여 계속되는 연구에서 수행되어야 하는 사항을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 비디오 녹화 流動畫面의 流動場 分析을 위한 영상처리기술개발
- 2) 縮小模型實驗技術의 實用化를 위한 시범적인 연구
- 3) 縮小模型實驗技術利用擴大를 위한 개방연구실 설치운용에 관한 연구
- 4) 난류, 복사, 可視化粒子등을 복합적으로 고려한 3차원 수치해석

參 考 文 獻

1. 徐恒錫外, “縮小모델에 의한 室內外 綜合熱傳達 解析技法 開發研究(I)”, 韓國動力資源研究所, 1990.
2. 朴相東, 徐恒錫外, “비강관 배관재를 이용한 溫水溫突의 熱效率向上에 관한 研究”, 韓國動力資源研究所, 1982.
3. V-TEK, “화상 처리 프로그램 V-TEK Reference Manual”, 브이텍, 1990.
4. Data Translation, “User Manual for DT 2851”, 1986.
5. Data Translation, “User Manual for DT 2819”, 1990.
6. D.S.Jang, R.Jetli, and S.Acharya, “Comparison of the PISO, SIMPLER, and SIMPLEC algorithms for the treatment of the pressure-velocity coupling in steady flow problems”, Numerical Heat Transfer, vol10, pp209-228, 1986.
7. Suhas V.Patankar, “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, McGraw Hill, 1980.
8. K.Imaichi & K.Onmi, “Quantitative Flow Analysis Aided by Image Processing of Flow Visualization Photographs”
9. W.K.Pratt, “Digital Image Processing”, John Wiley, 1978.
10. Breton J.L., Durou C., Grandfeix J.Y., Issanchou G., Lafon Th., “An experimental study of natural convection in an enclosure at high Rayleigh numbers”, Congres Euromech, 1986.

11. 今市憲作・近江和生, “可視化の畫像の數植的處理”, 機械學會講演論文集, 820-3, 1982.
12. 小林敏雄・吉式康裕, “流跡寫眞自動處理システムの開發”, 機械學會論文集 (B), 51-466, 1985.
13. 村上周三外, “乱流數植シミュレーションの computer graphics”, 生産研究, 38-1, 1986.
14. 岡島 厚・杉谷賢一郎, “角桂周りの流れの可視化實驗”, 流れの可視化シンポジウム(第6回)講演集, 1978.
15. Lafon T., “Convection naturelle dans les cavités de rapport de forme voisin de l'unité-Application á l'habitat”, Université Paul Sabatier, 1985.
16. Turlat C., “Etude sur maquette de la convection naturelle dans l'habitat par interférométrie holographique: détermination des régimes d'écoulements pariétaux”, Université Paul Sabatier, 1987.
17. Breton J.L., Durou C. and Lafon T., “Réflexions sur la similitude en convection naturelle”, Université Paul Sabatier, 1984.
18. Millan P., Mederic J.M. and Souyri B., “Etude expérimentale de la convection naturelle dans des cavités représentatives d'un habitat”.
19. J.Bran, “Modélisation thermique des batiments”, INSA, Lyon, 1980.

20. R.W. Richardson and S.M. Berman, "Dynamic similtude in scale models of Buildiugs", L.B.L., University of California, 1981.
21. F.N. Peedles & H.J. Garber, "Studies on the motion of Gas bubbles in liquids", Chem. Eng. Prog. 49-2, 1953.
22. P.G.Saffman, "The Life on a Small Sphere in a Slow Shear Flow", J. Fluid Mech., 22-2, 1965.
23. J.M.F. Vickers, "Thermal Scale Modeling", Astronautics and Aeronautics, 1965.
24. R.L.Shanon, " Thermal Scale Modeling of Radiation-Conduction-Convection Systems", J. of Spacecraft and Rockets 10, 1973.
25. J.G.Thompson, D. Han, and N.Z. Azer, "Design and Verification of a Thermal Scale Model for Environmental System Energy Studies", Paper presented at the ASHRAE Annual Meeting and to be published in ASHRAE Transactions 87, Part 2, 1981.
26. R.E.Johnstone and M.W. Thring, "Pilot Plants, Models, and Scale-up Methods in Chemical Engineering", McGraw-Hill Book Company, 1957.
27. S.Murakami, S.Kato, and S.Akabayashi, "Visualization with Laser Light Sheet applied to Internal and External Air Flow in Building Environmental Engineering", The Society

- of Instrument and Control Engineers, Japan, 1985.
28. 井伊谷鋼一編, “粉體工學ハンドブック”, 朝倉書店, 1965.
 29. 植松時雄, 池森龜鶴, “流體固體輸送工學ハンドブック”, 朝倉書店, 1966.
 30. 高橋幹二, “基礎エアロゾル工學”, 改訂版, 養賢堂, 1982.
“抗れの可視化”, 流れの可視化學會誌, Vol.1, No.1(1981)~Vol.8,
No.30(1988).
 31. 相原康彦, “流れの力學二基礎と應用”, 培風館, 1984.
 32. 淺沼 強編, “流れの可視化ハンドブック”, 朝倉書店, 1977.
 33. 秋山光庸外, “正方形曲リ管内の層流助走區間に關する解析と可視化實驗”,
日本機械學會論文集, 47-422, 1981.
 34. 谷 一郎, “流れ學”, 岩波書店, 1980.
 35. 小林敏雄, “乱流の數値シミュレーション—數食乱流風洞の夢—”, 機械工學
誌, 88-799, 1985.
 36. 中山滿茂, “畫象處理による流れ場の解析(氣液二相流, 燃燒場への應用)”,
日本機械學會第604回講習會教材, 1985.
 37. 鳥脇純一郎, 福村晃夫, “畫象處理のためのサブルーチンライブラリ SLIP
について”, 情報處理學會論文誌, 22-4, 1981.
 38. 坂上勝彦・木戸出正繼, “イメージプロセッサの最近の動向”, 電子通信學會
誌, 67-1, 1984.
 39. 田村秀行監修, “コンピュータ畫像處理入門”, 日本工業技術センター編, 総
研出版, 1985.

여 백

부 록

부록 1 : 스테핑 모터 제어용 프로그램 리스트

부록 2 : 等溫線 測定結果

부록 3 : 數値解析 컴퓨터 프로그램 리스트

여 백

부록 1 : 스태핑 모터 제어용 프로그램 리스트

```
result = PA.INITIALIZE(560)
IF (result <> NOERR) THEN
    PRINT "Error on PA.INITIALIZE: "; result
END IF

' reset the board to the power up state

result = PA.RESET
IF (result <> NOERR) THEN
    PRINT "Error on PA.RESET: "; result
END IF

' set up Port 0 for output

result = PA.ENABLE.FOR.OUTPUT(0)
IF (result <> NOERR) THEN
    PRINT "Error on PA.ENABLE.FOR.OUTPUT: "; result
END IF

' prompt the user for a value to output

PRINT
'PRINT "Enter value to output on Port 0 (256 to quit):"
value% = 0

' if 256 is entered then finish

IF (value% > 255) THEN
    GOTO 100
END IF
v1 = 2: v2 = 7: v3 = 8: v4 = 13
dur = 30: toggle% = 0
value1 = v1: value2 = v2
FOR L = 1 TO 2
FOR k = 1 TO 6
start: ' output the value
FOR i = 1 TO 50
result = PA.OUTPUT.DIGITAL.VALUE(0, value1)
```

```

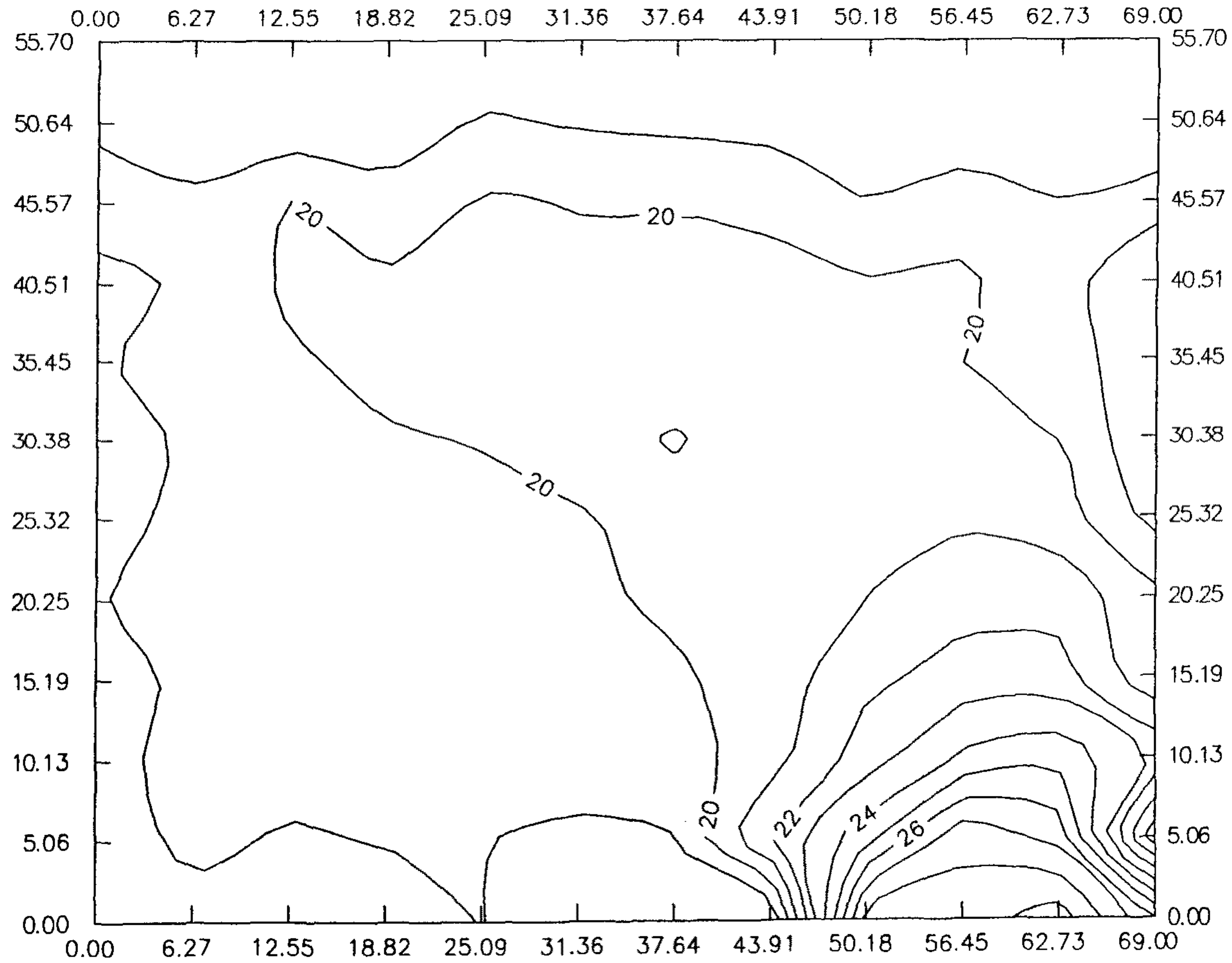
        FOR j = 1 TO dur: NEXT j
        result = PA.OUTPUT.DIGITAL.VALUE(0, value2)
        FOR j = 1 TO dur: NEXT j
        NEXT i
        t1 = TIMER
paus:
        IF (TIMER - t1) >= 60 THEN GOTO quit'start

        GOTO paus
quit:
        PRINT value1, value2
        NEXT k
        toggle% = toggle% + 1
        IF (-1) ^ toggle% > 0 THEN value1 = v1: value2 = v2
        IF (-1) ^ toggle% < 0 THEN value1 = v3: value2 = v4
        NEXT L
100 :
END

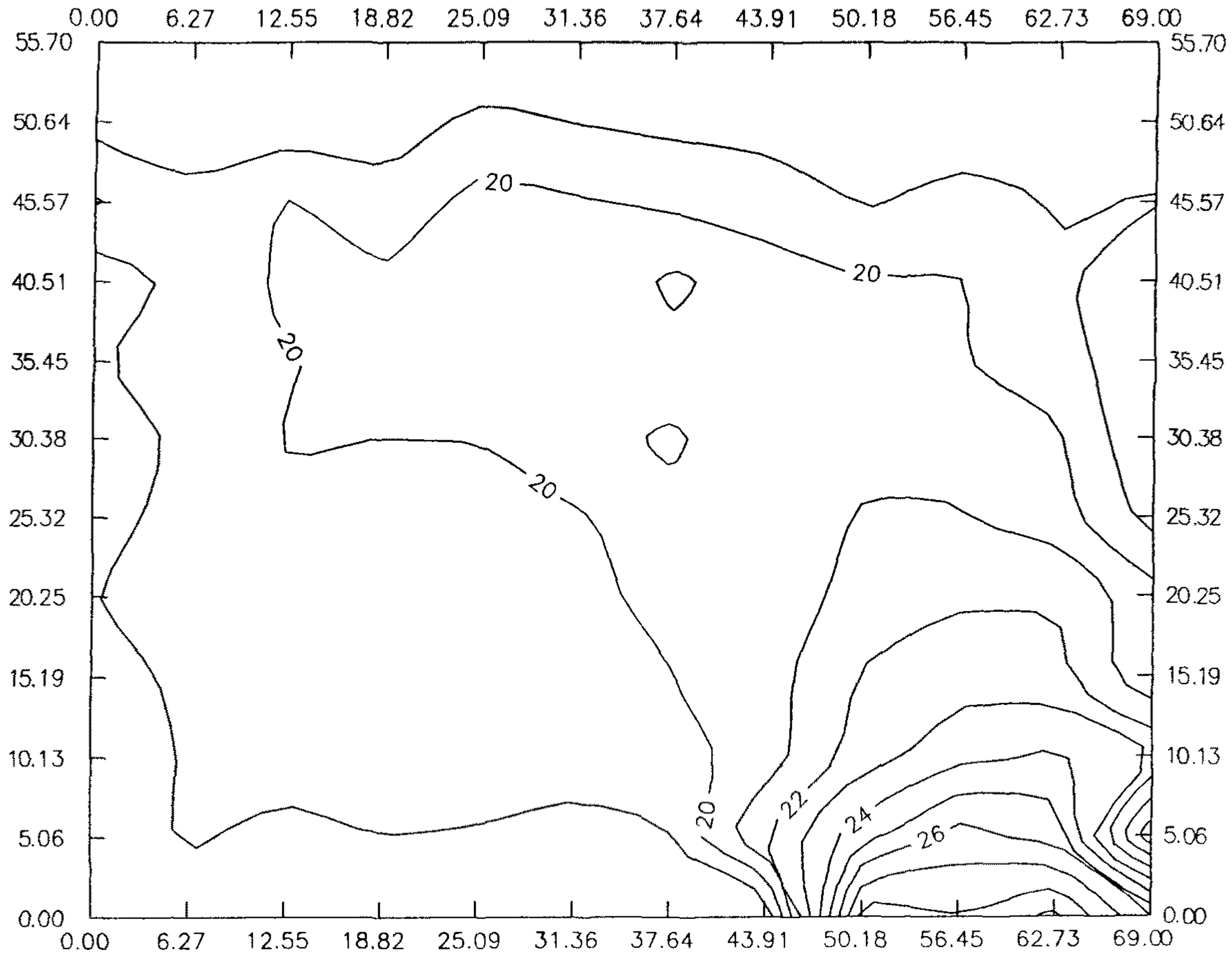
```

부록 2 : 등온선 측정결과(①=모델번호, ②=수직면의 번호, ③=가열면 온도, ④=비가열면 온도)

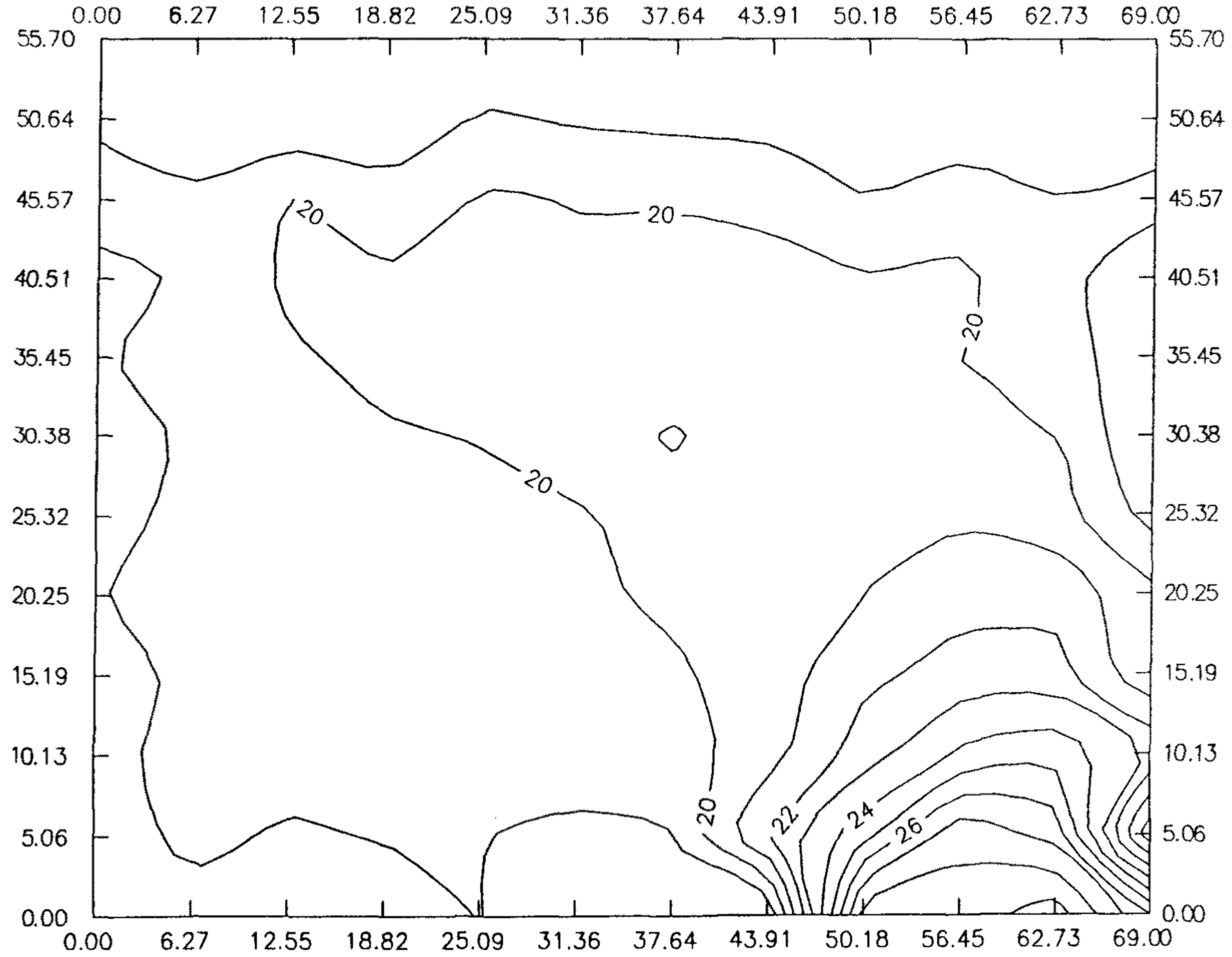
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-1(30-18)



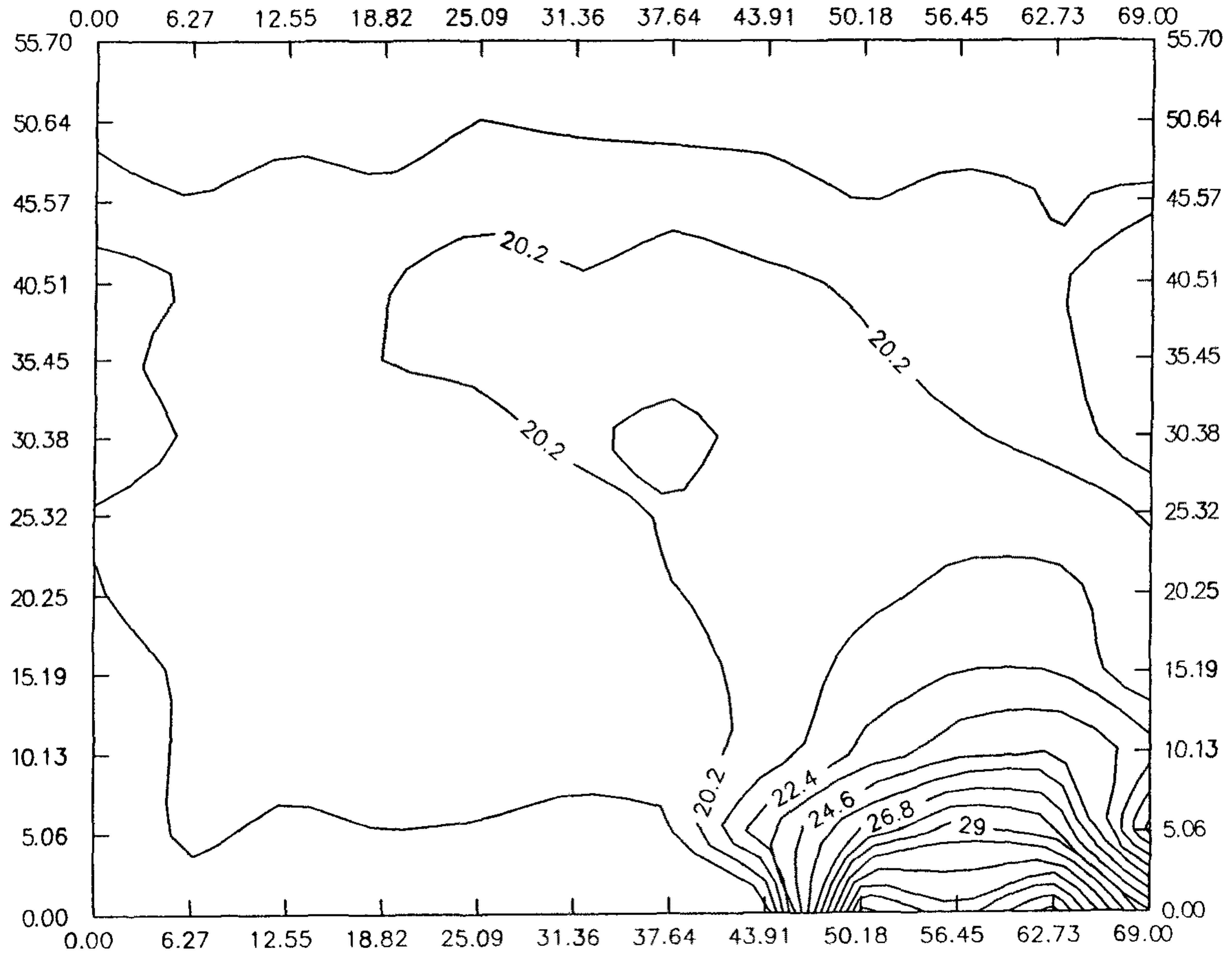
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-2(30-18)



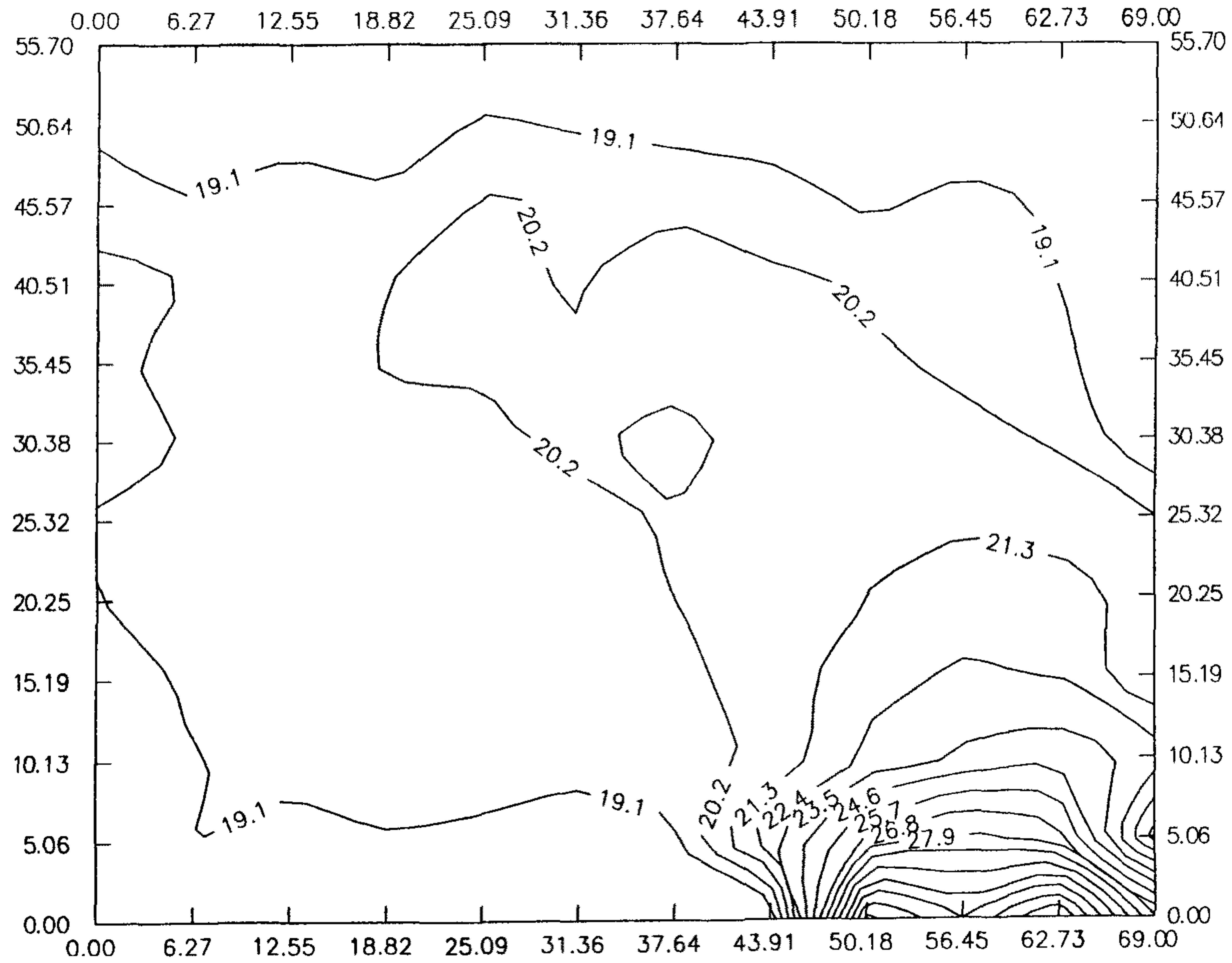
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-3(30-18)



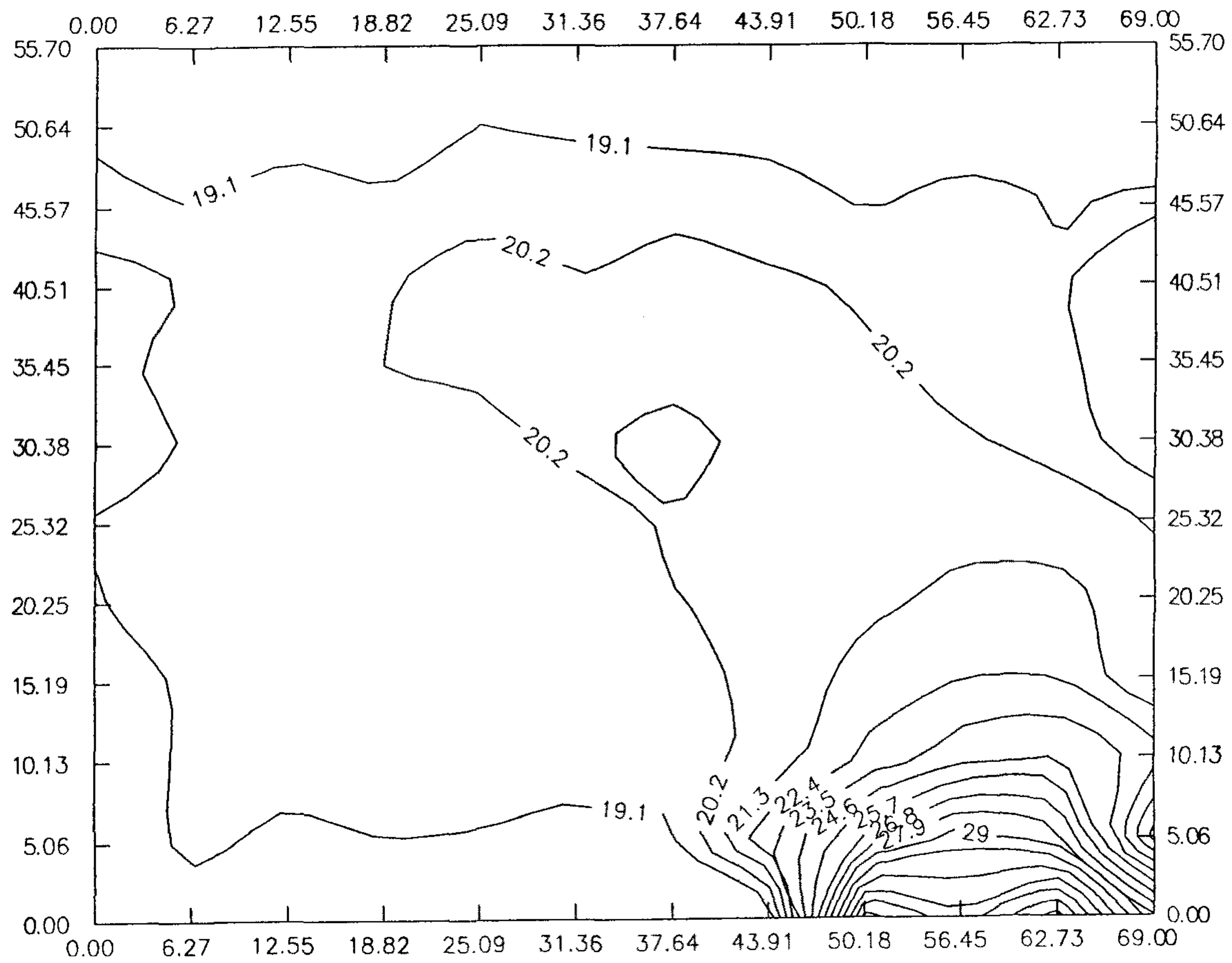
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-1(38-18)



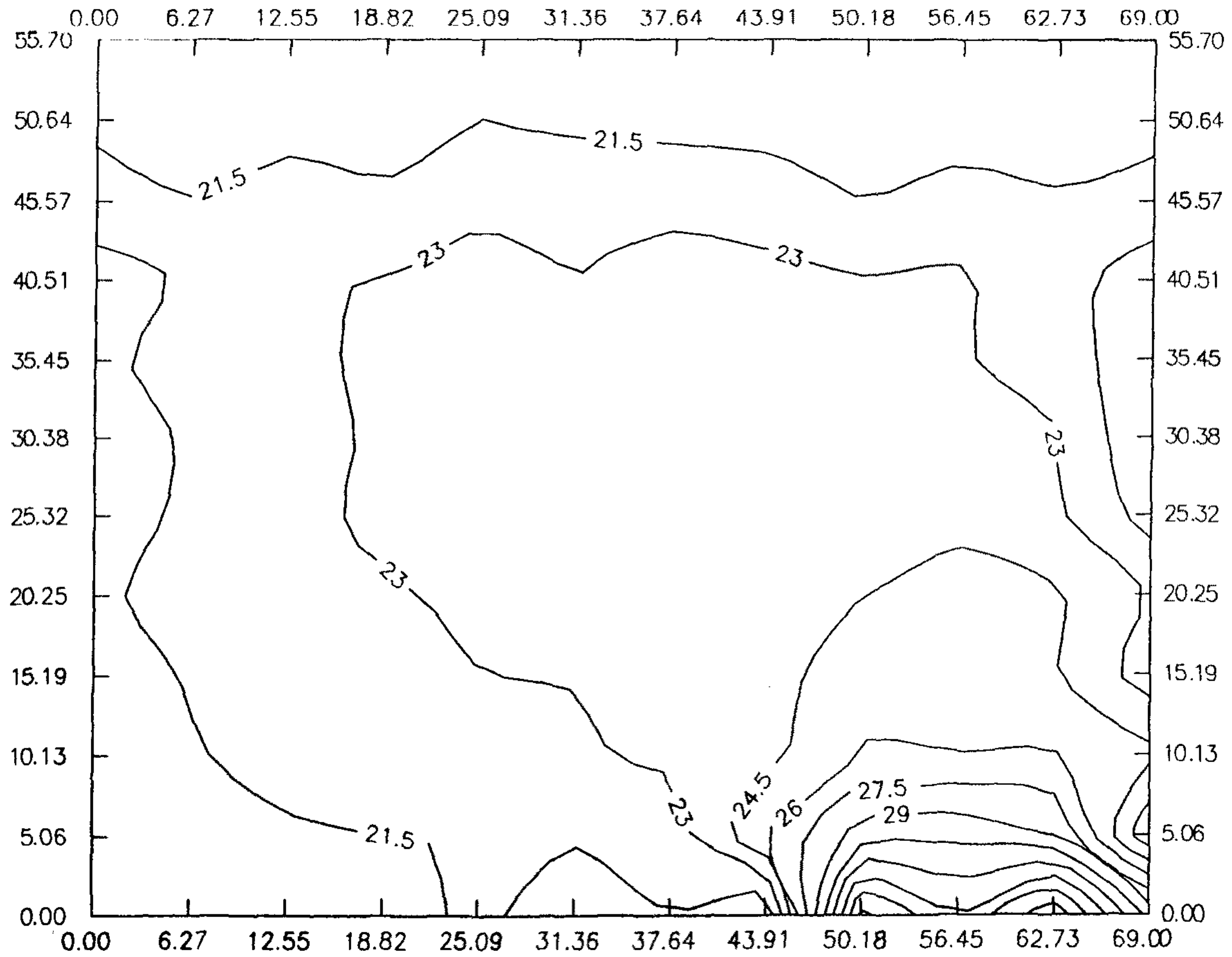
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-2(38-18)



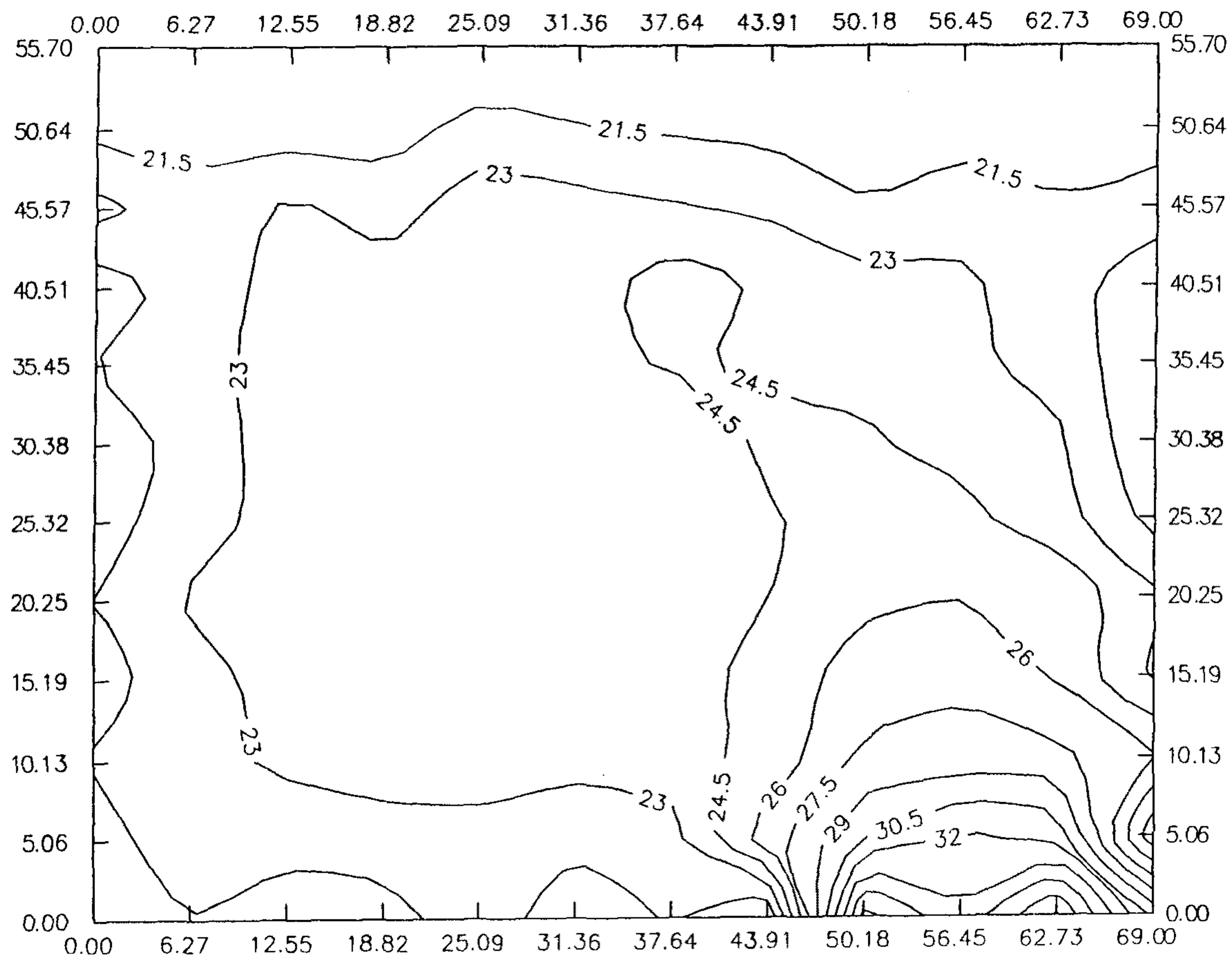
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-3(38-18)



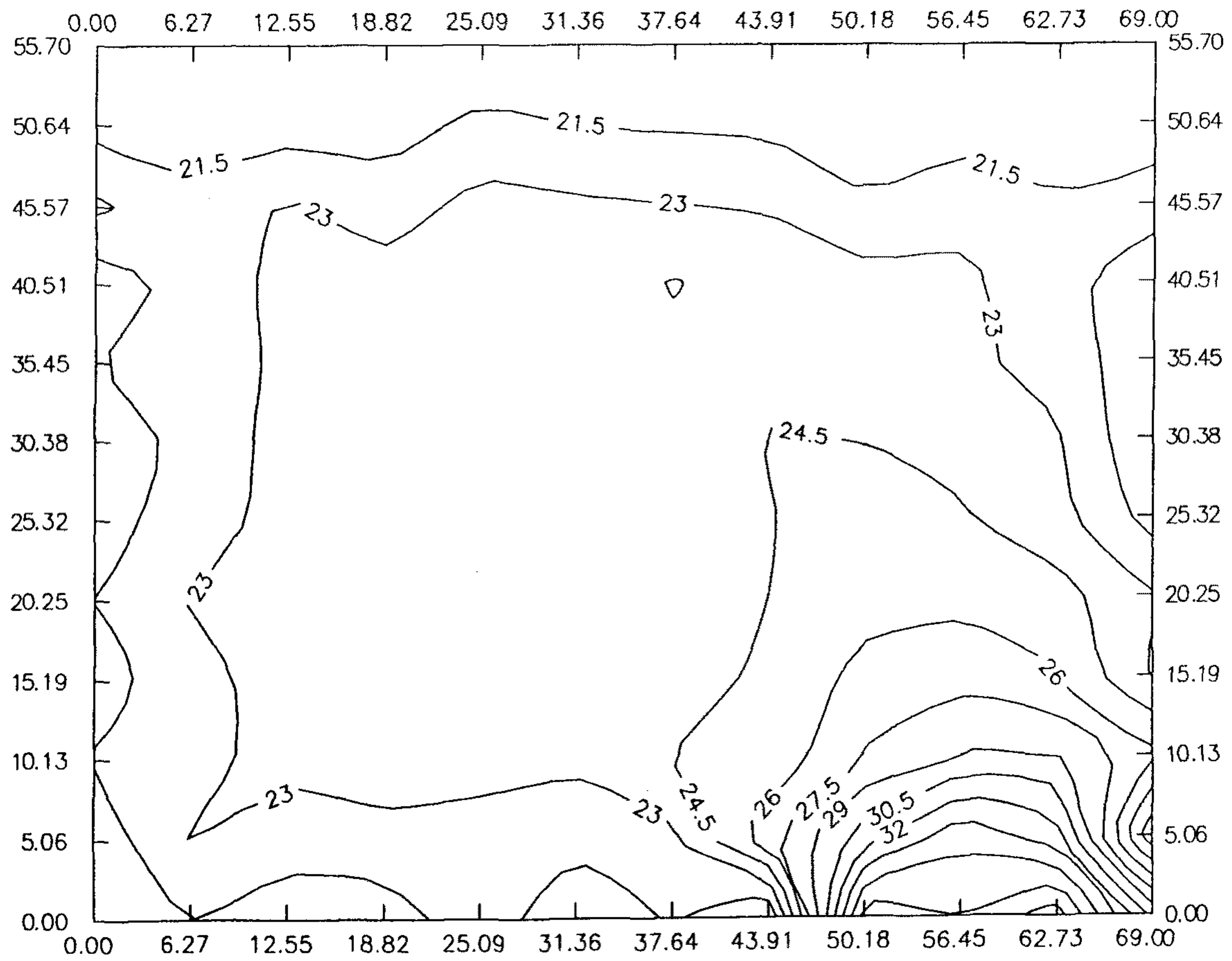
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL 1-1(40-20)



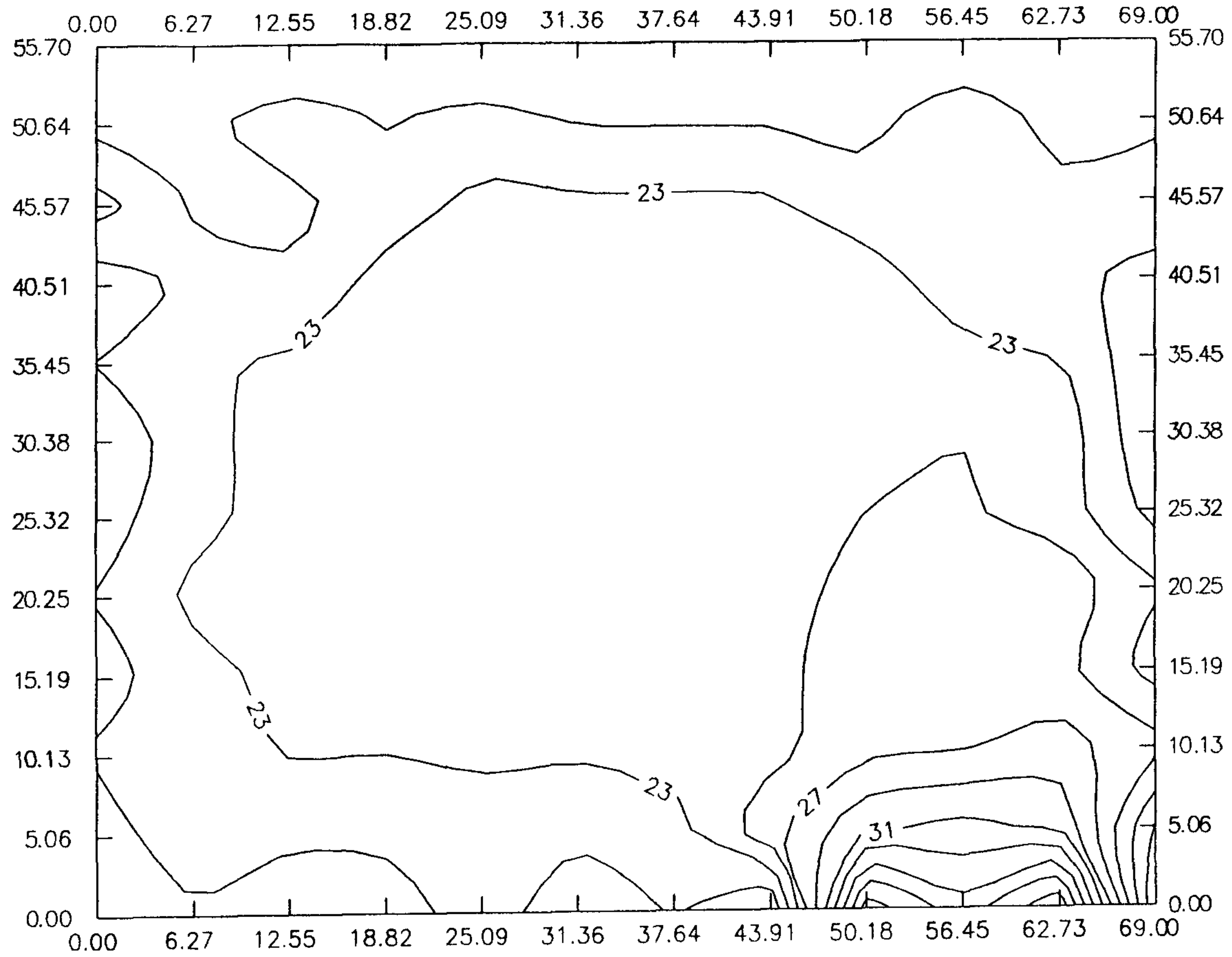
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-2(40-20)



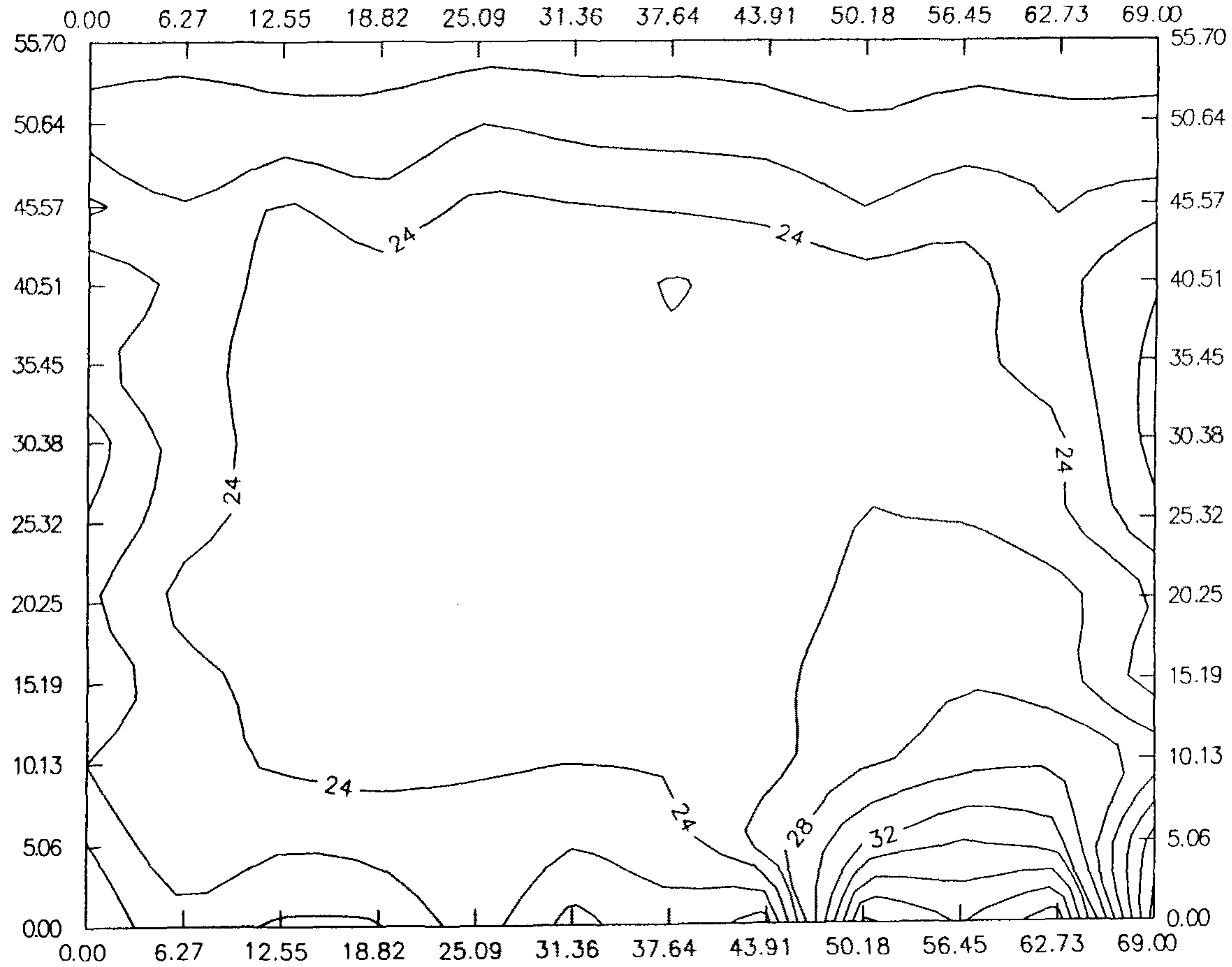
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-3(40-20)



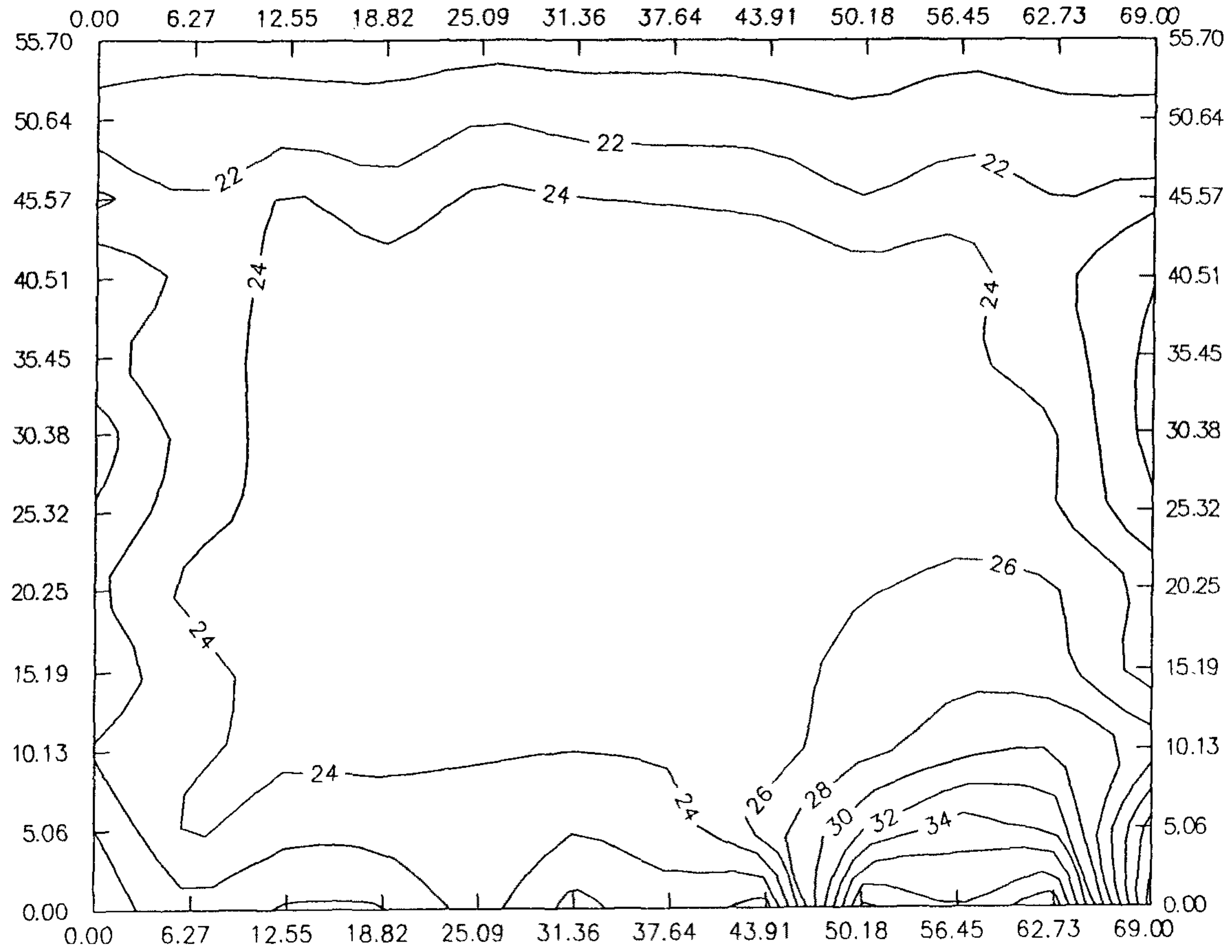
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL1-1(44-19)



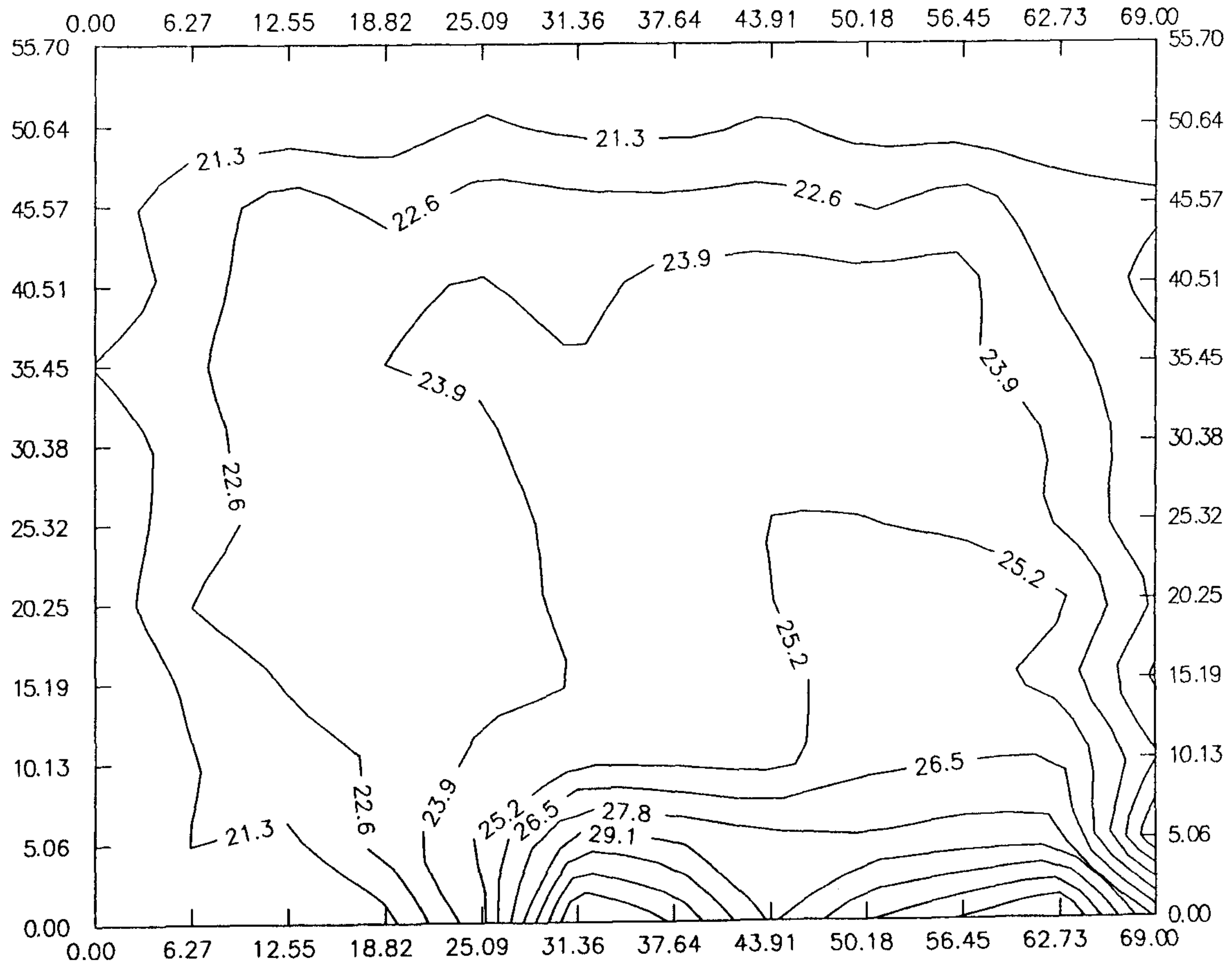
ISOTHERMAL LINE ONDOL MODEL1-2(44-19)



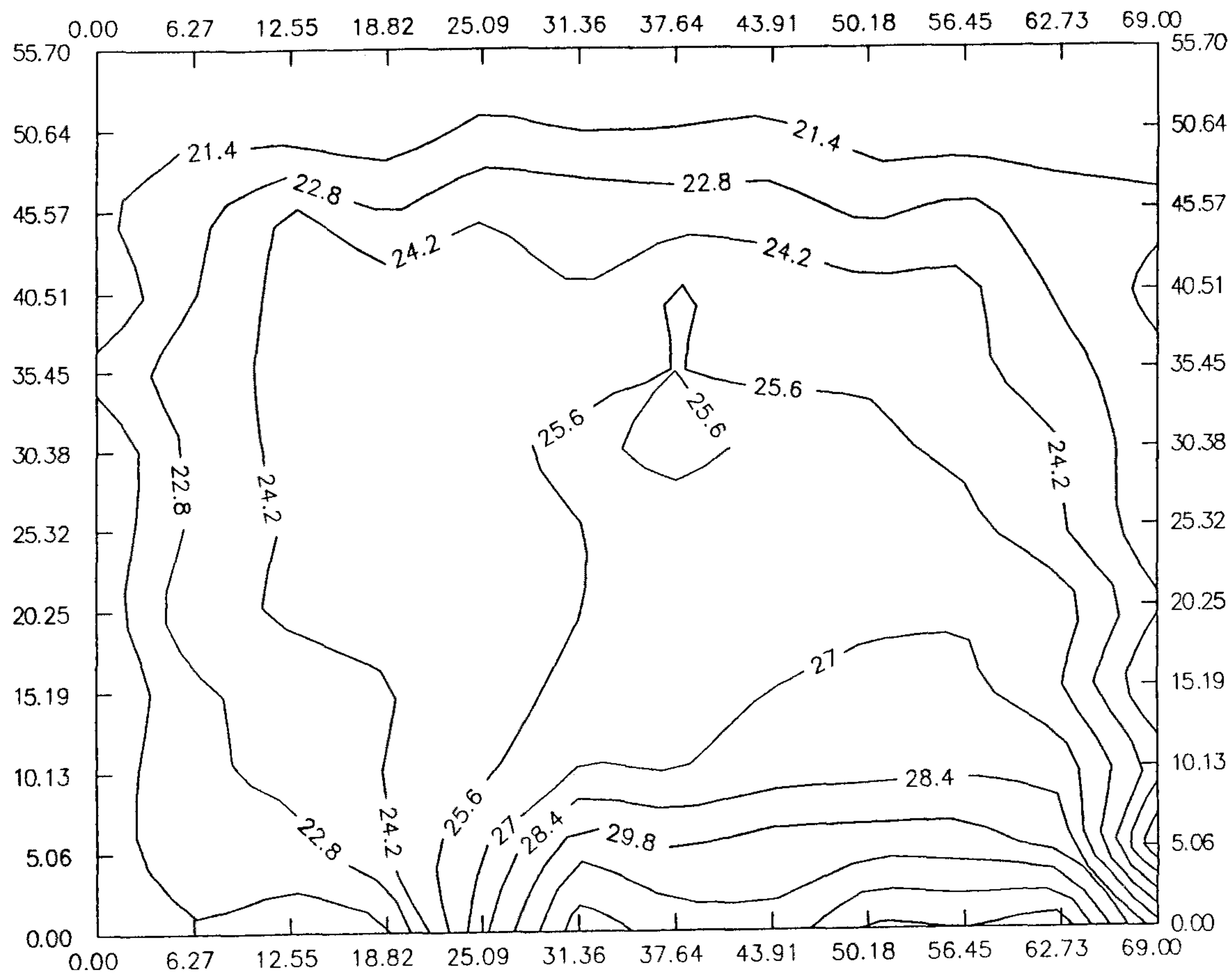
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL 1-3(44-19)



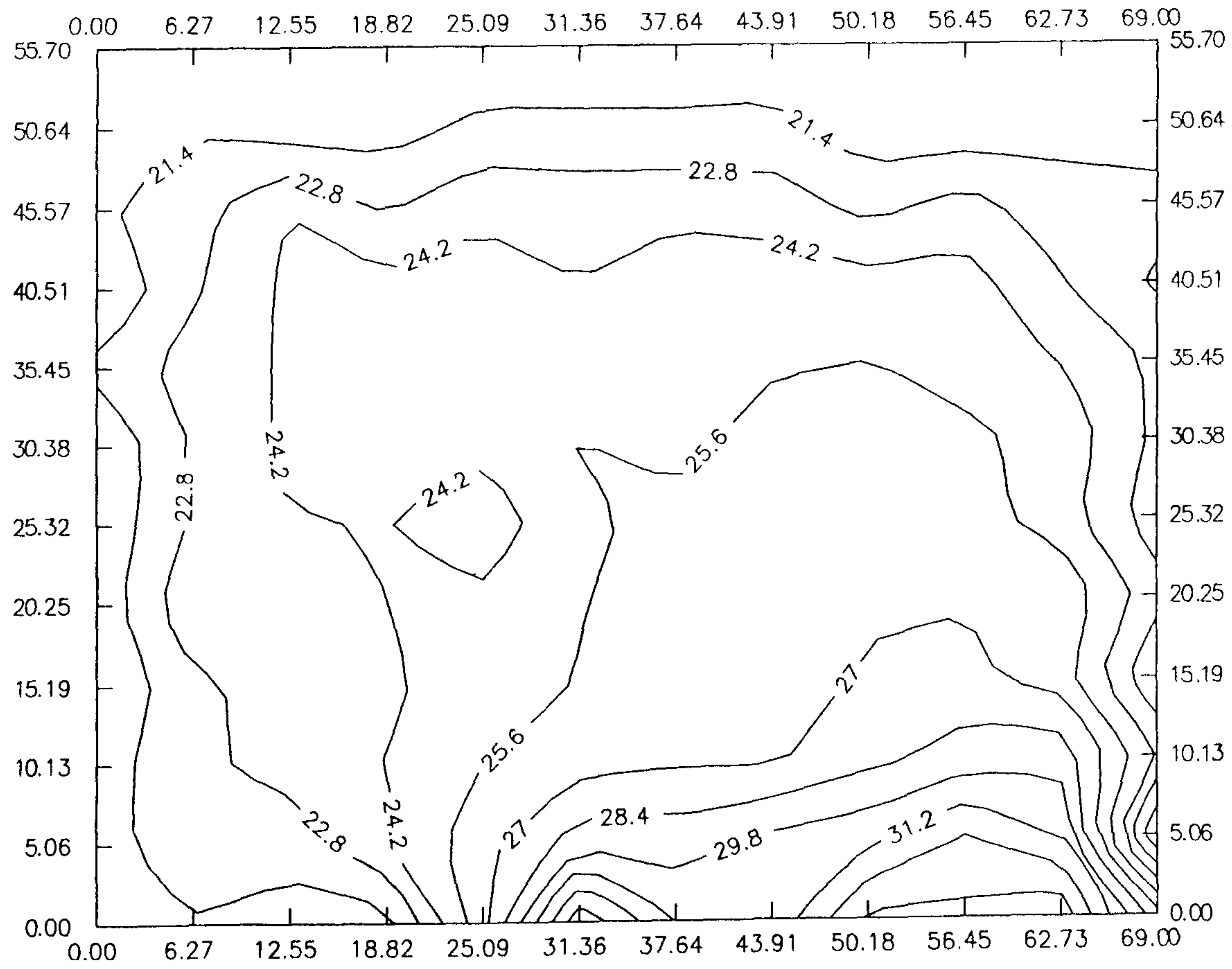
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL2-1(35-20)



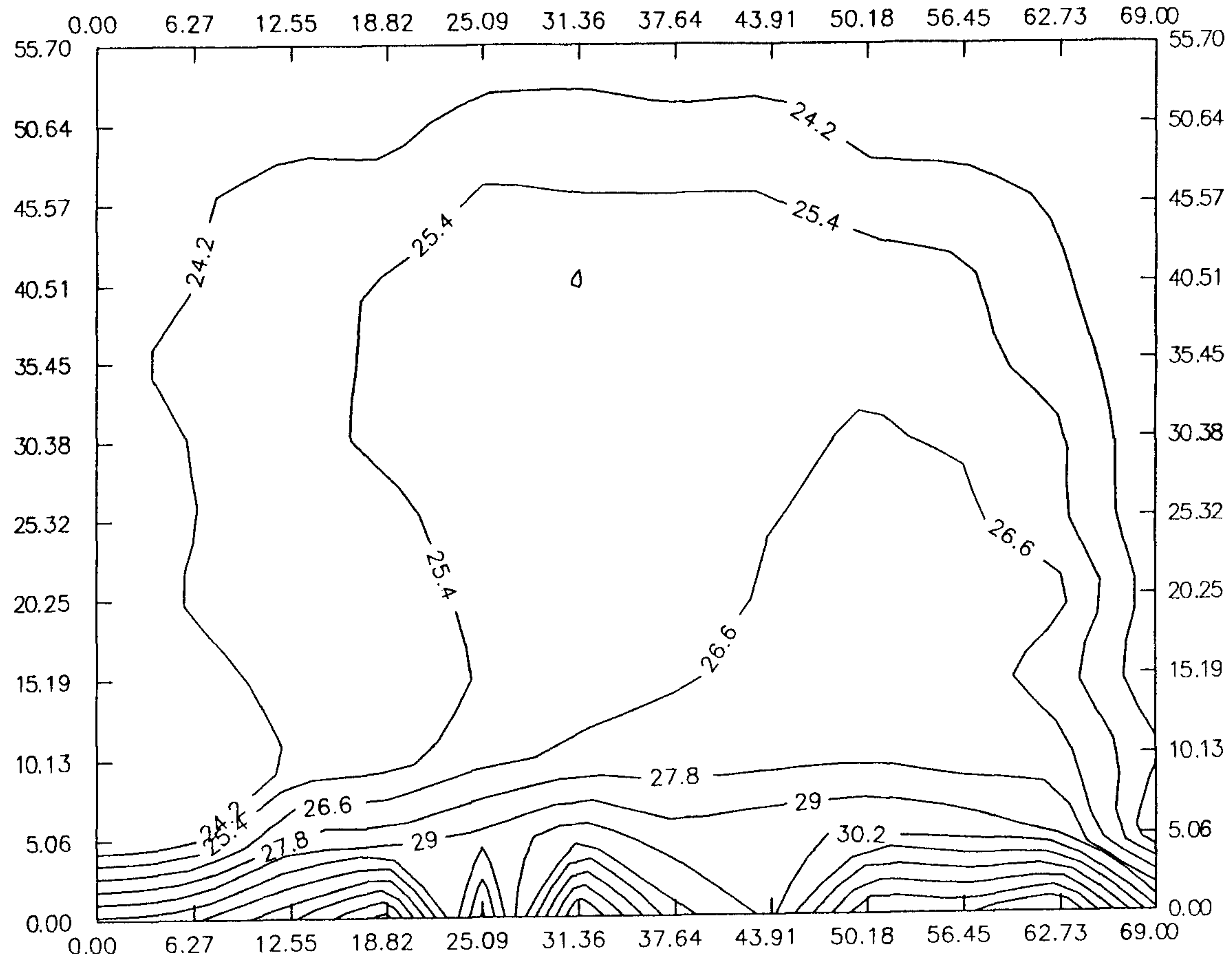
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL2-2(35-20)



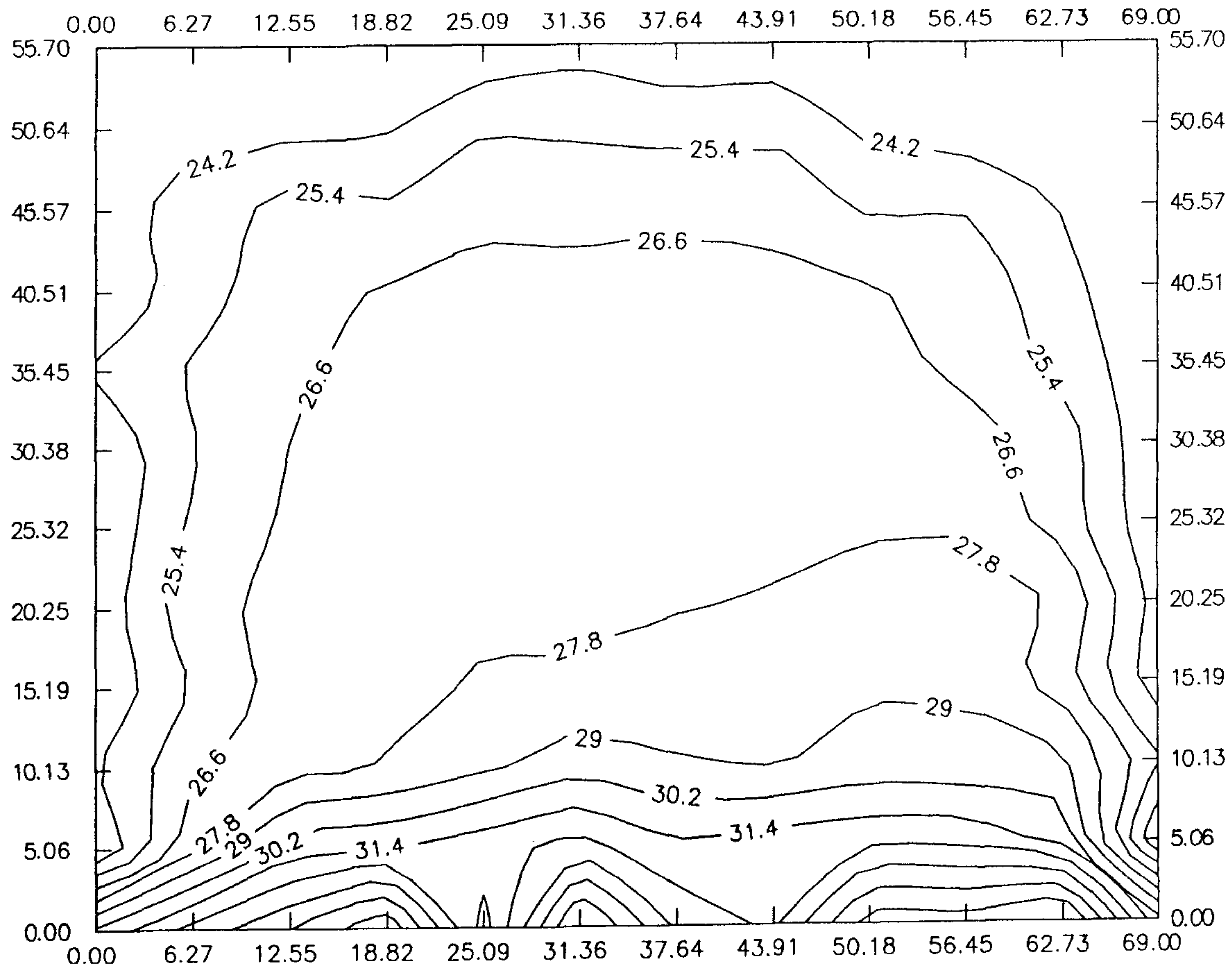
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL2-3(35-20)



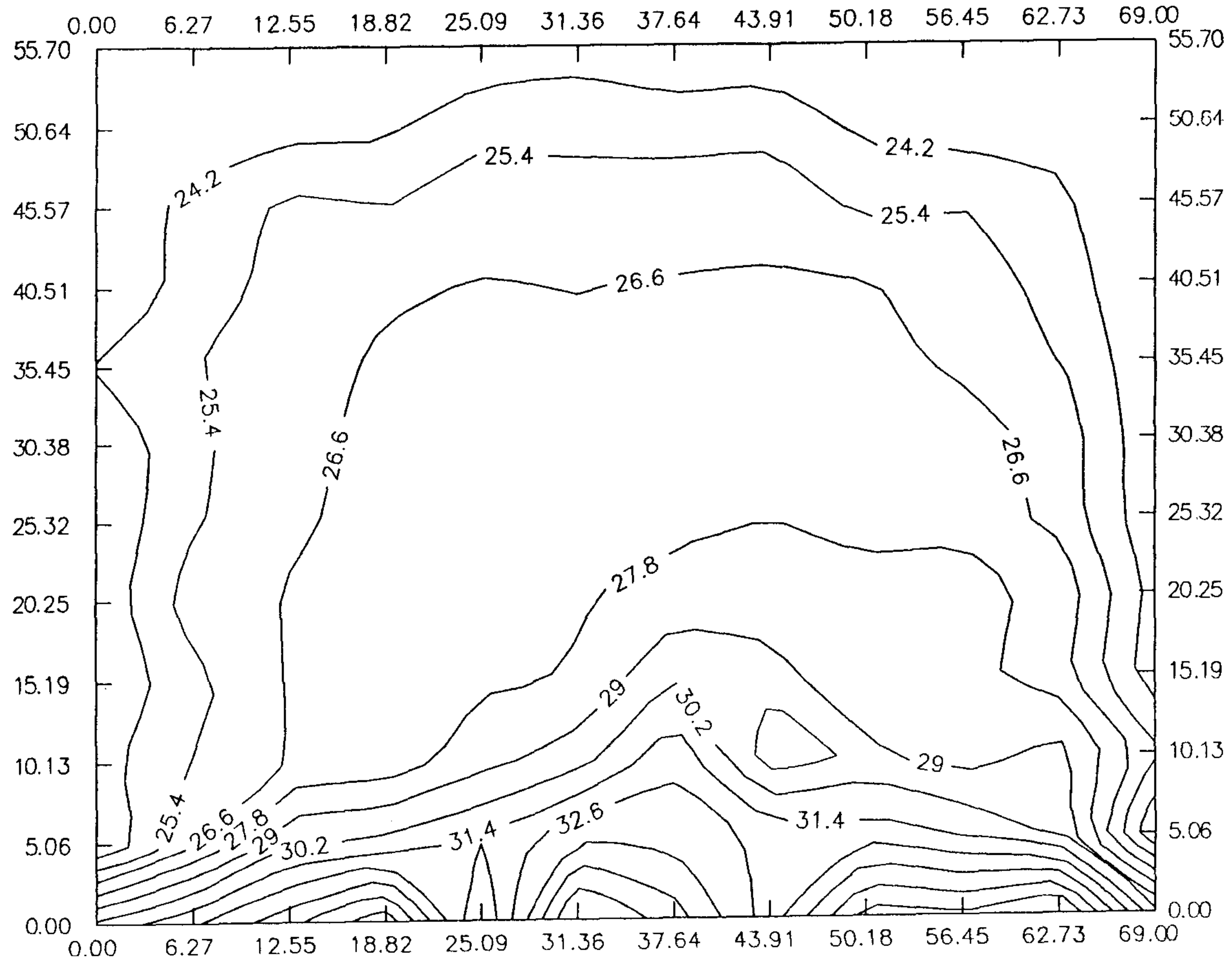
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL3-1(38-23)



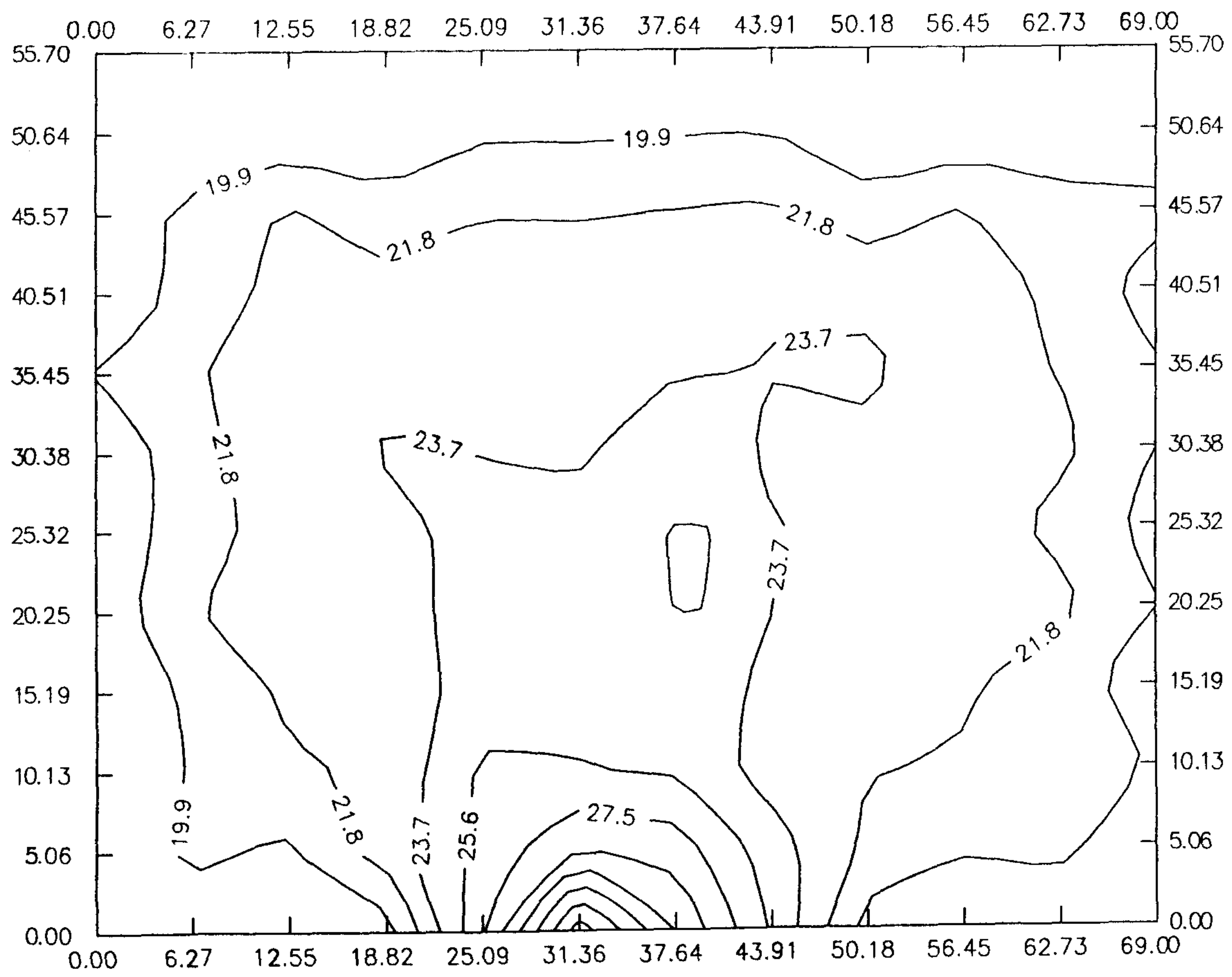
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL3-2(38-23)



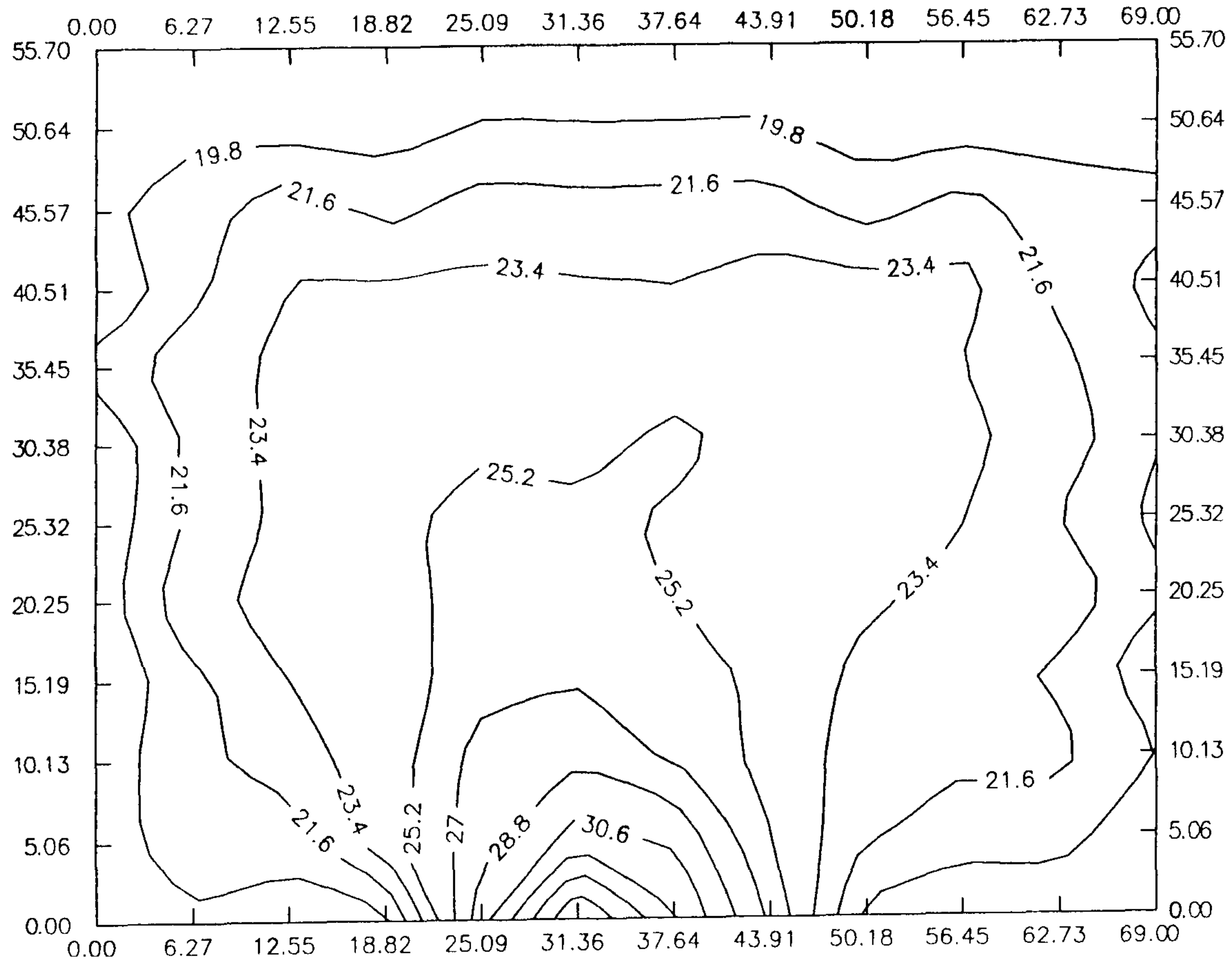
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL3-3(38-23)



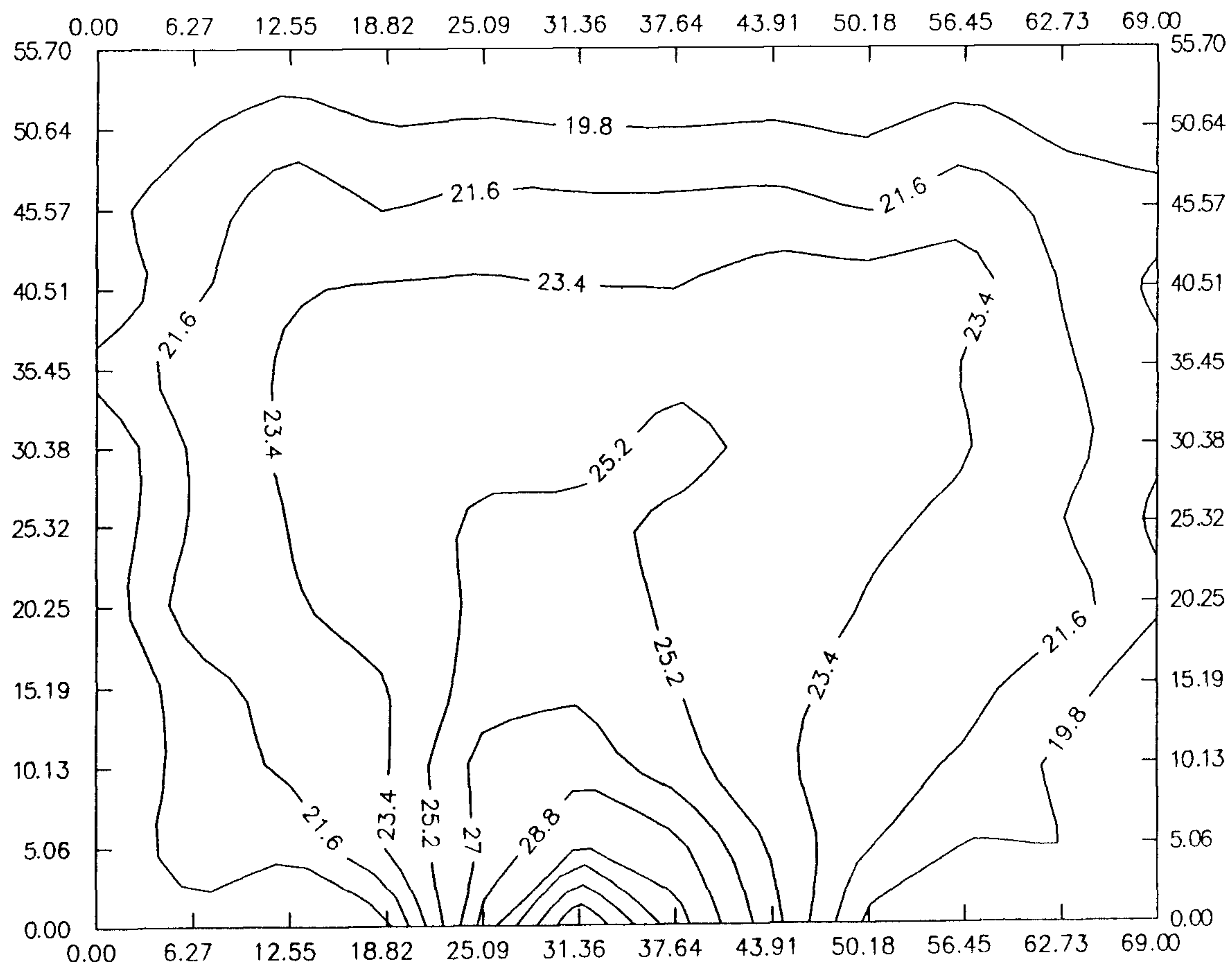
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL4-1(38-18)



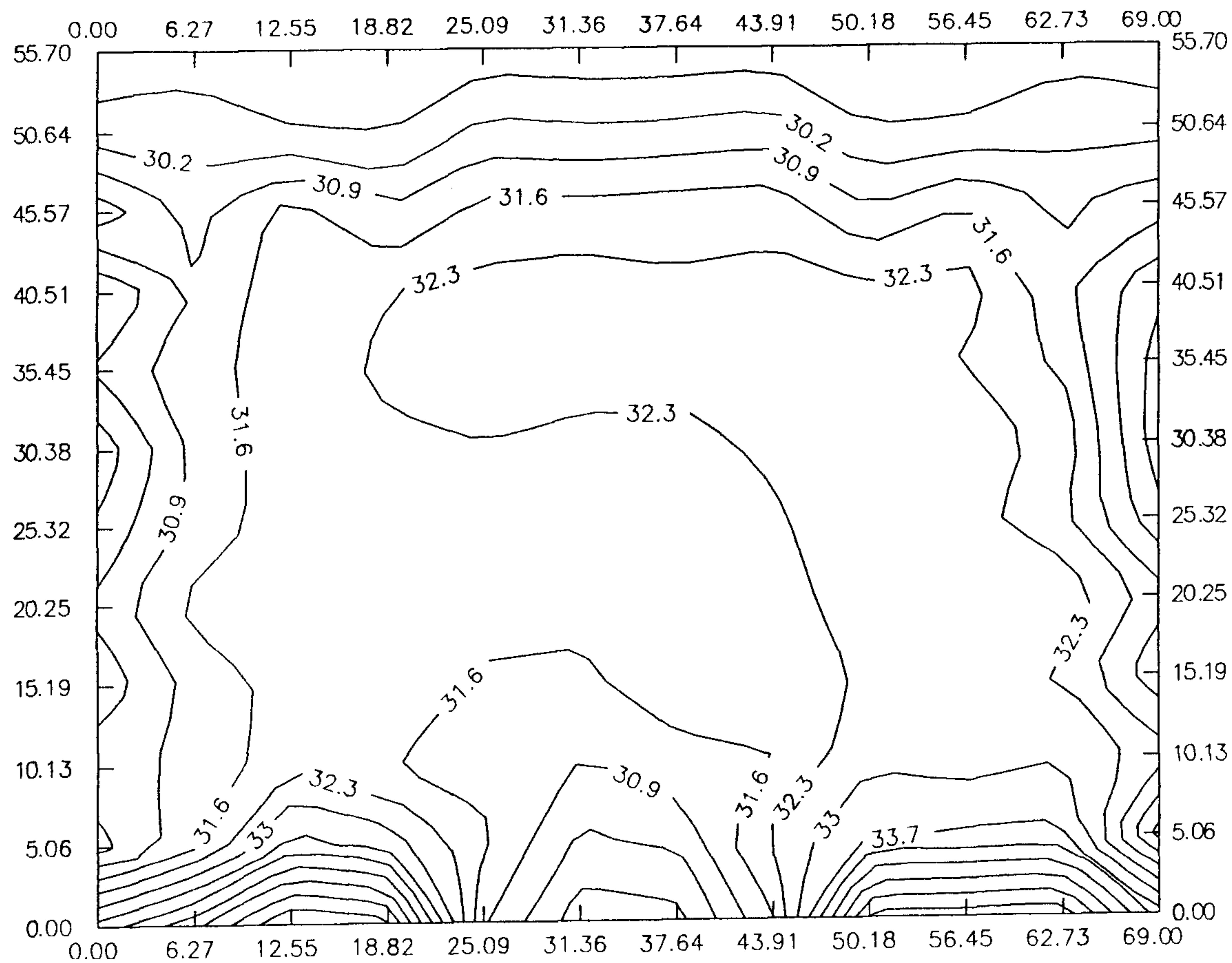
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL4-2(38-18)



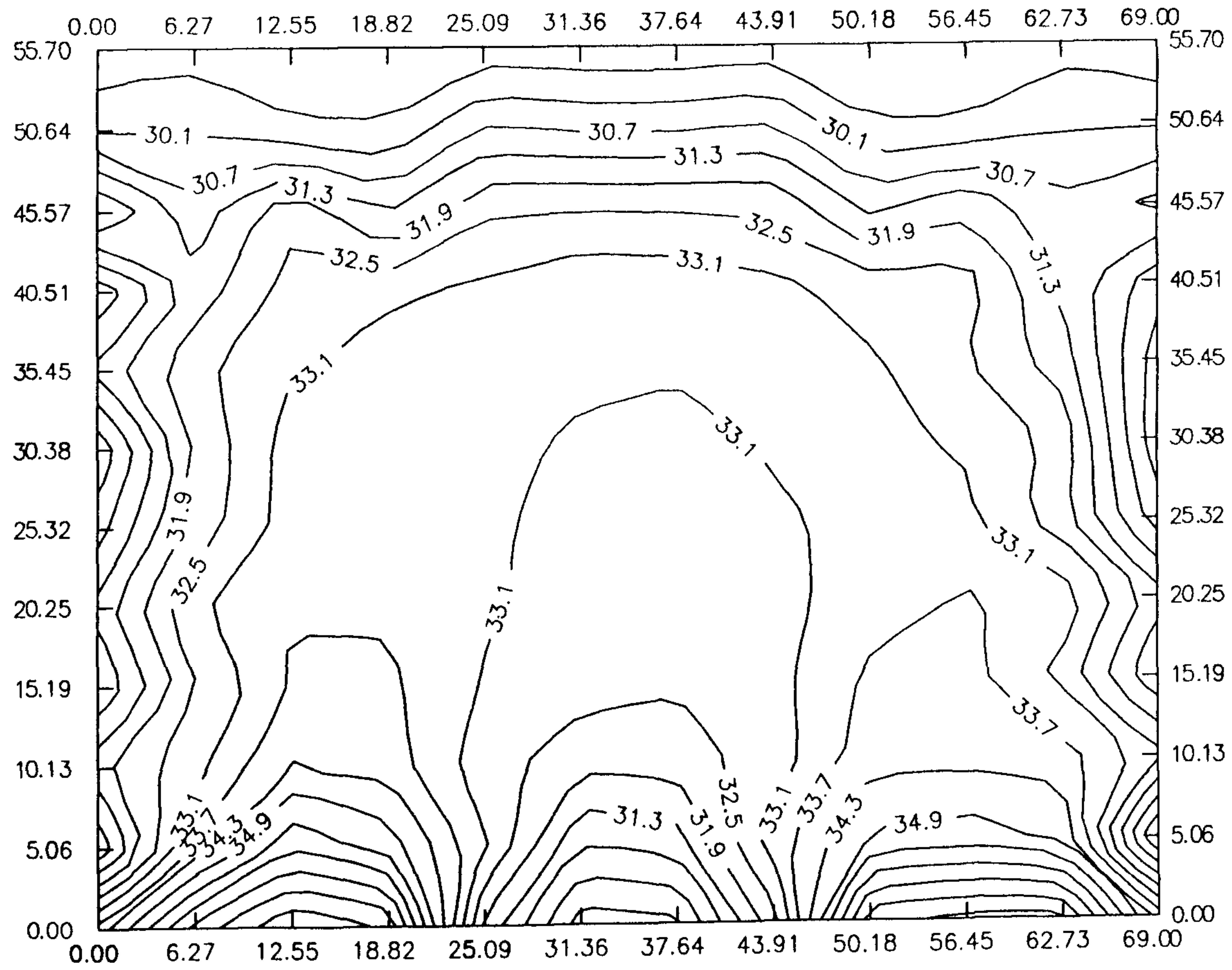
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL4-3(38-18)



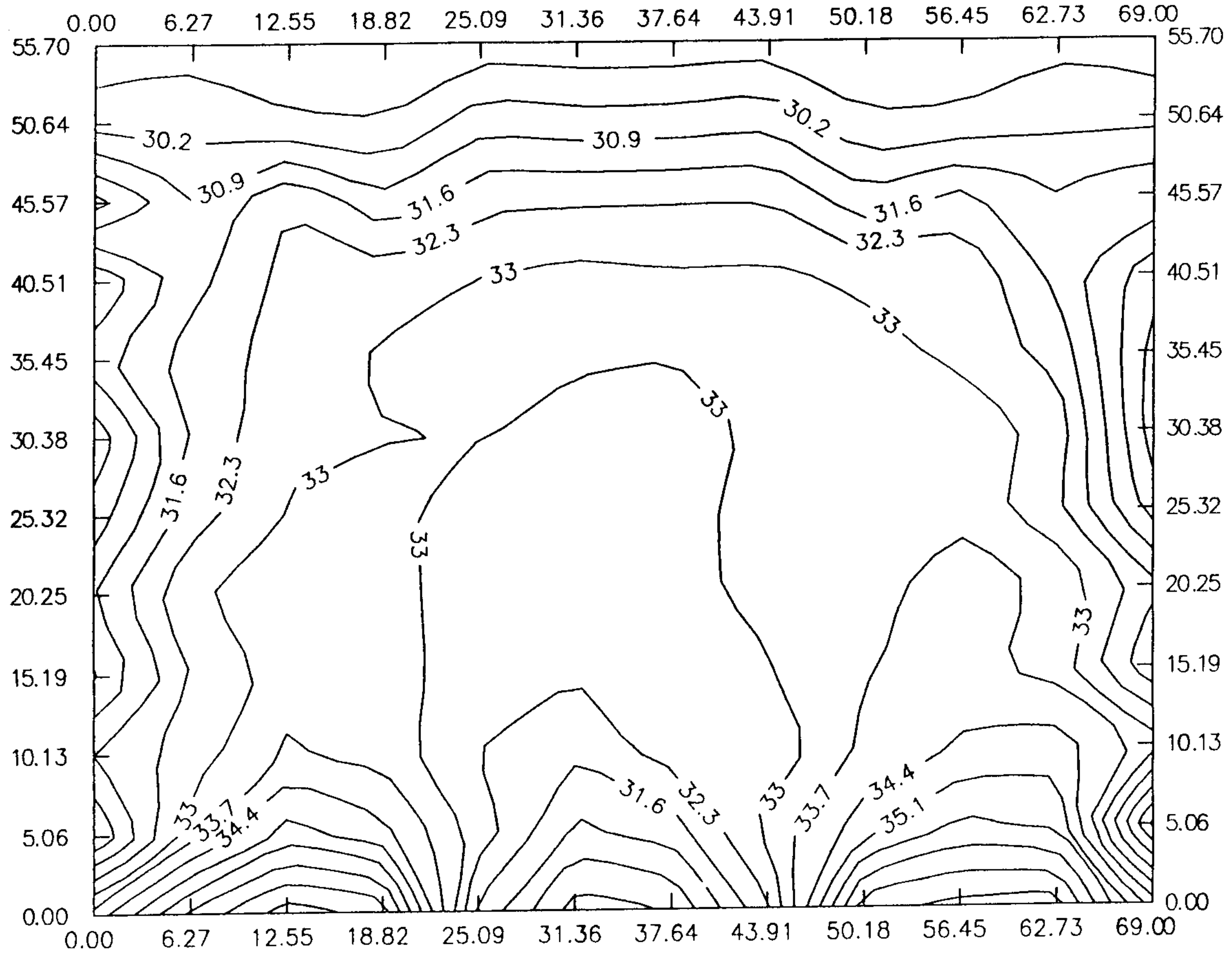
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-1(39-29)



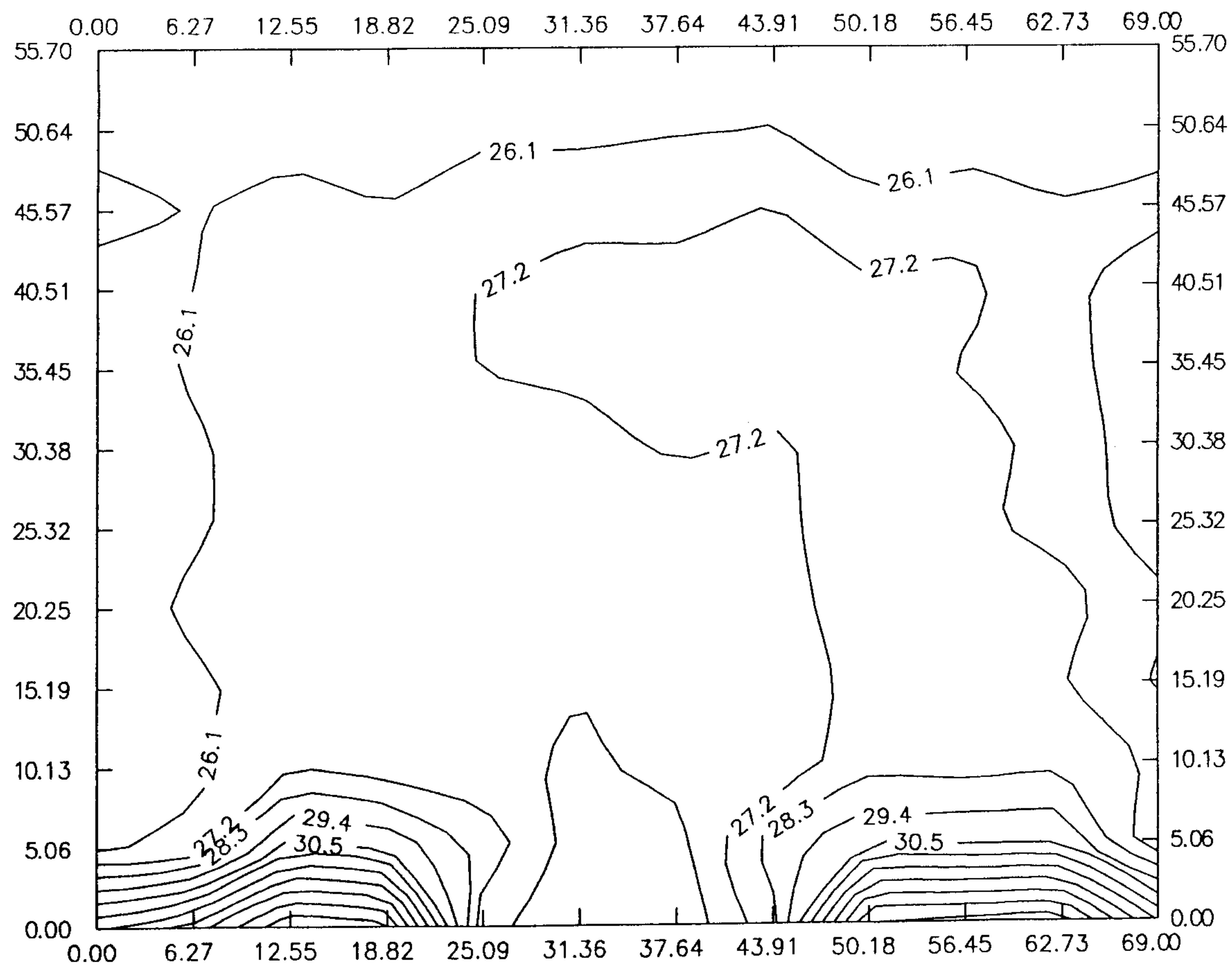
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-2(39-29)



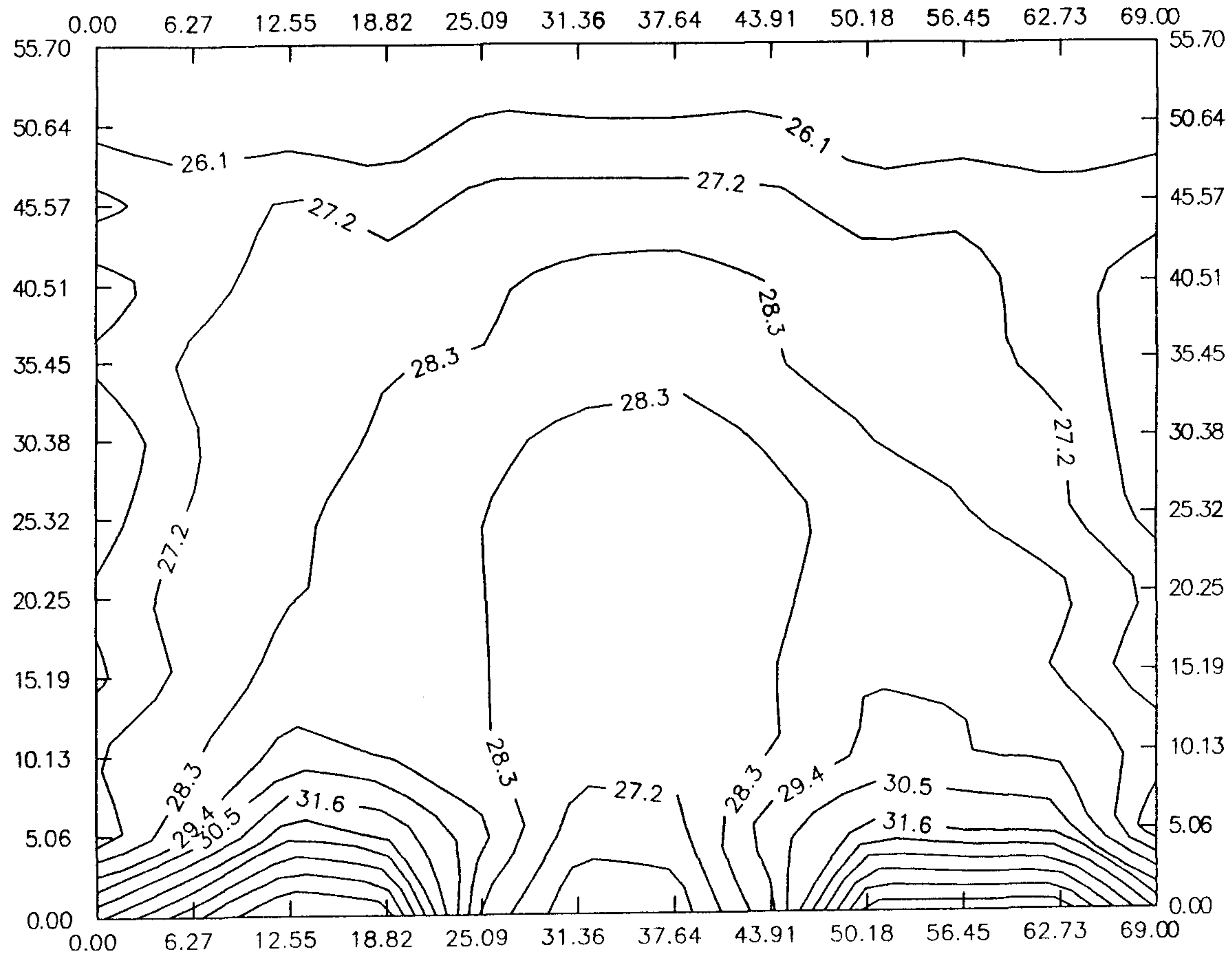
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-3(39-29)



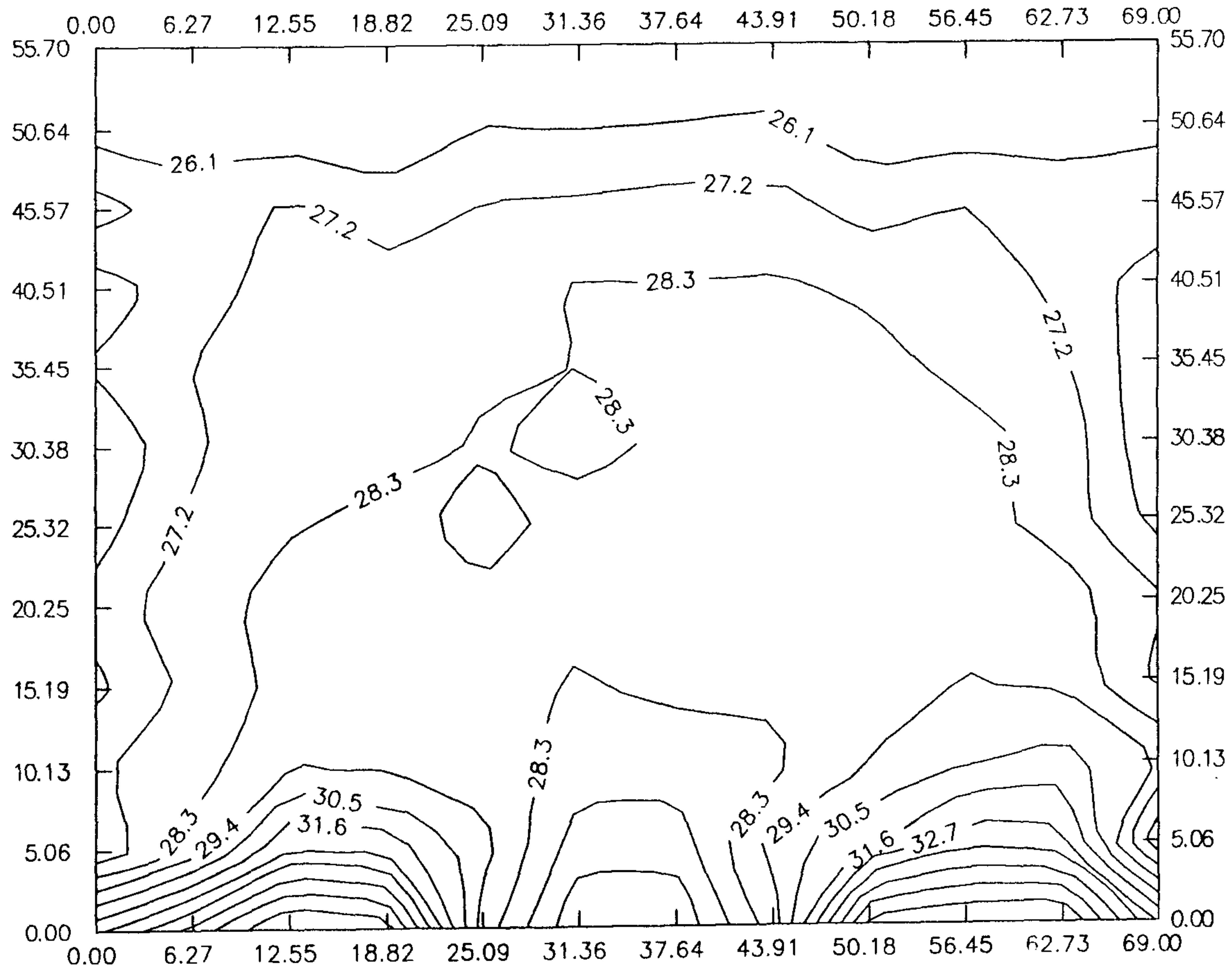
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-1(40-25)



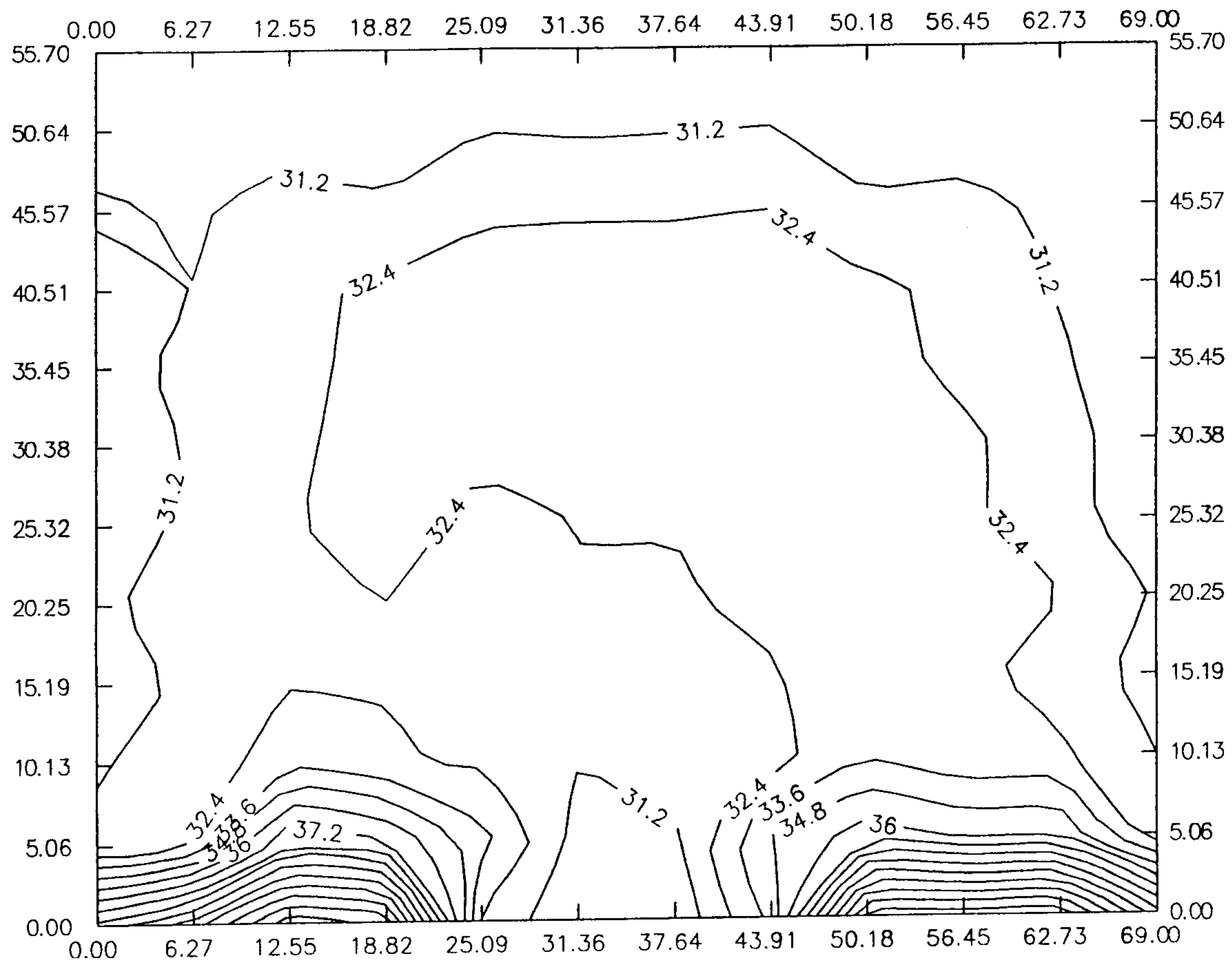
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-2(40-25)



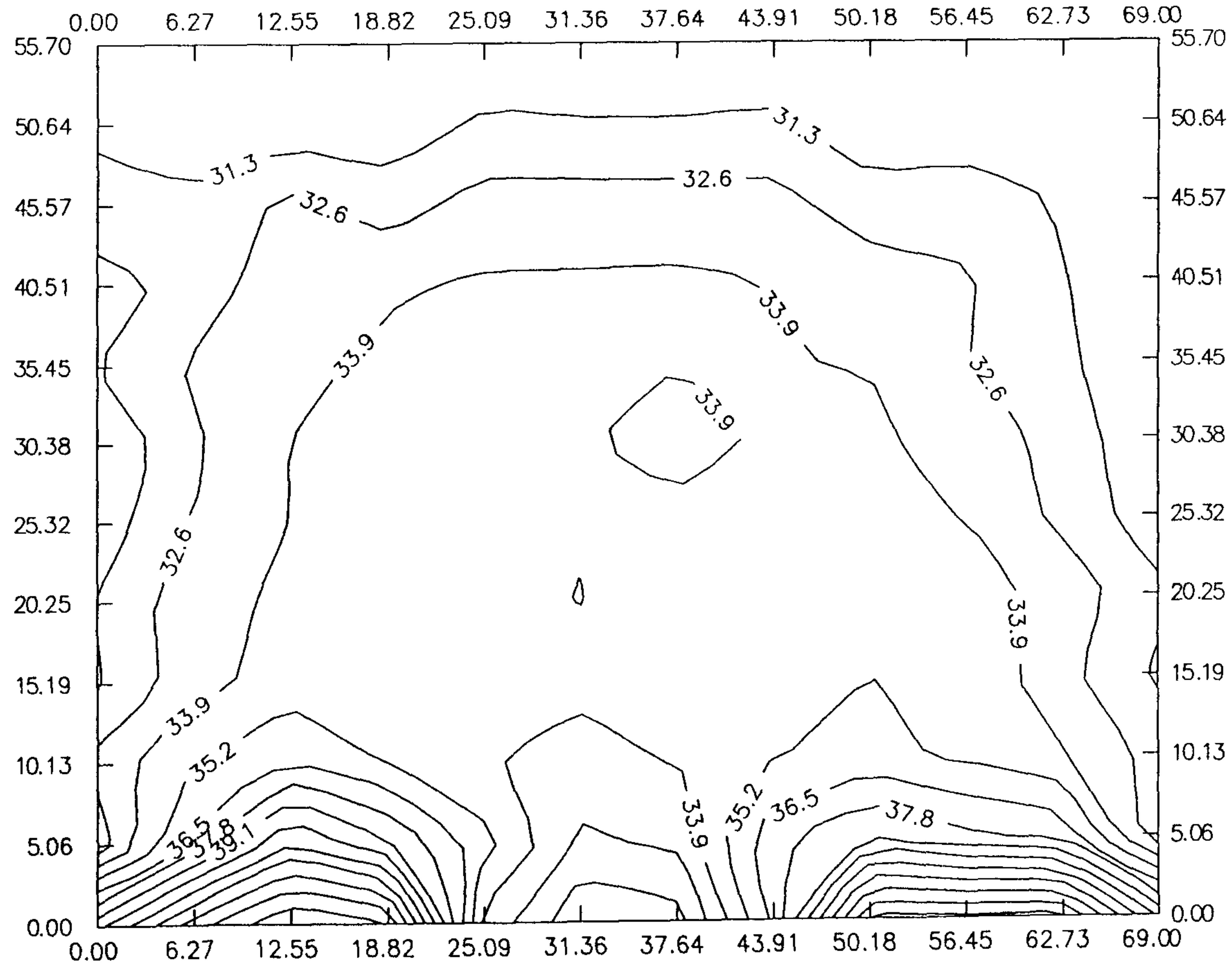
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-3(40-25)



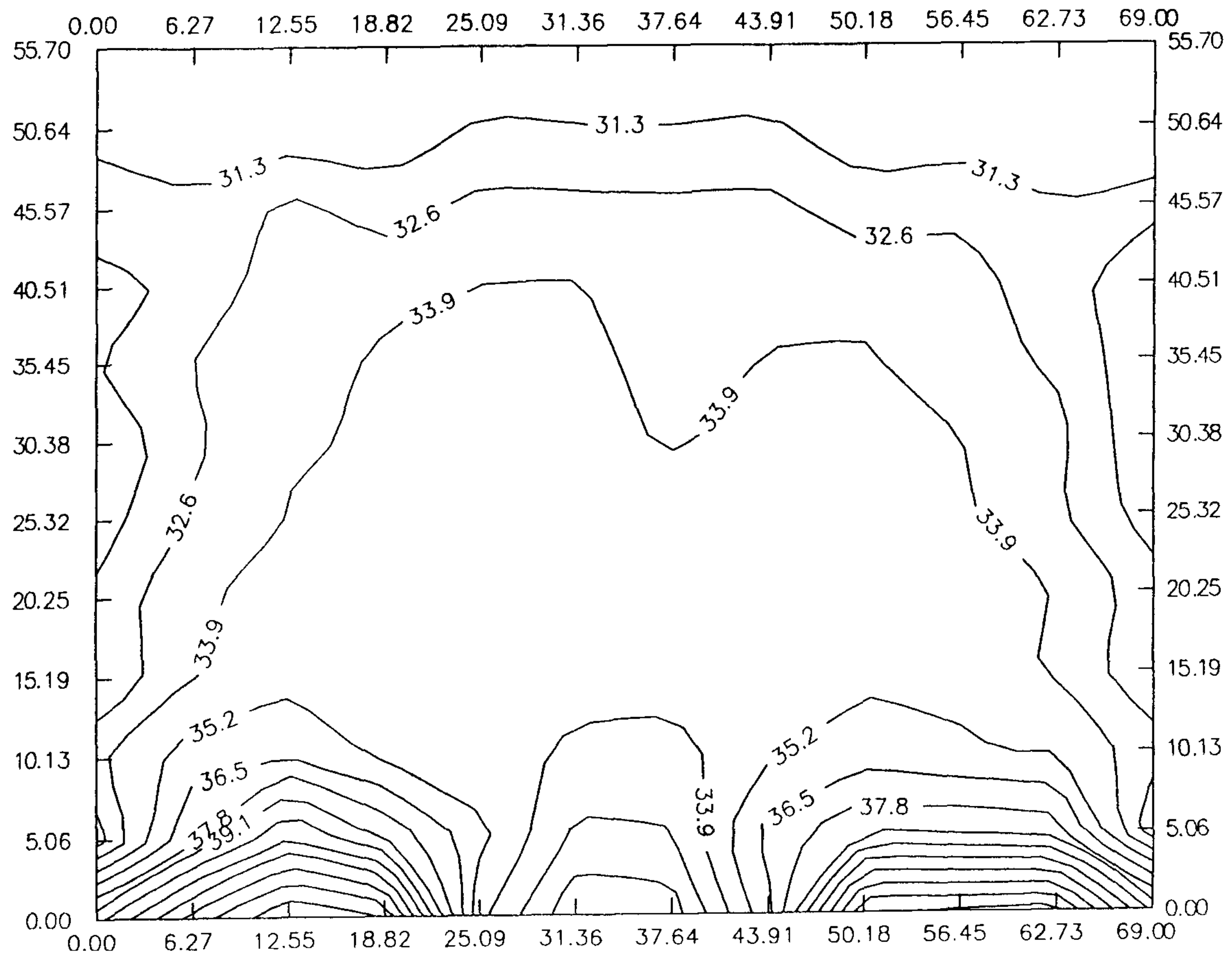
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-1(50-30)



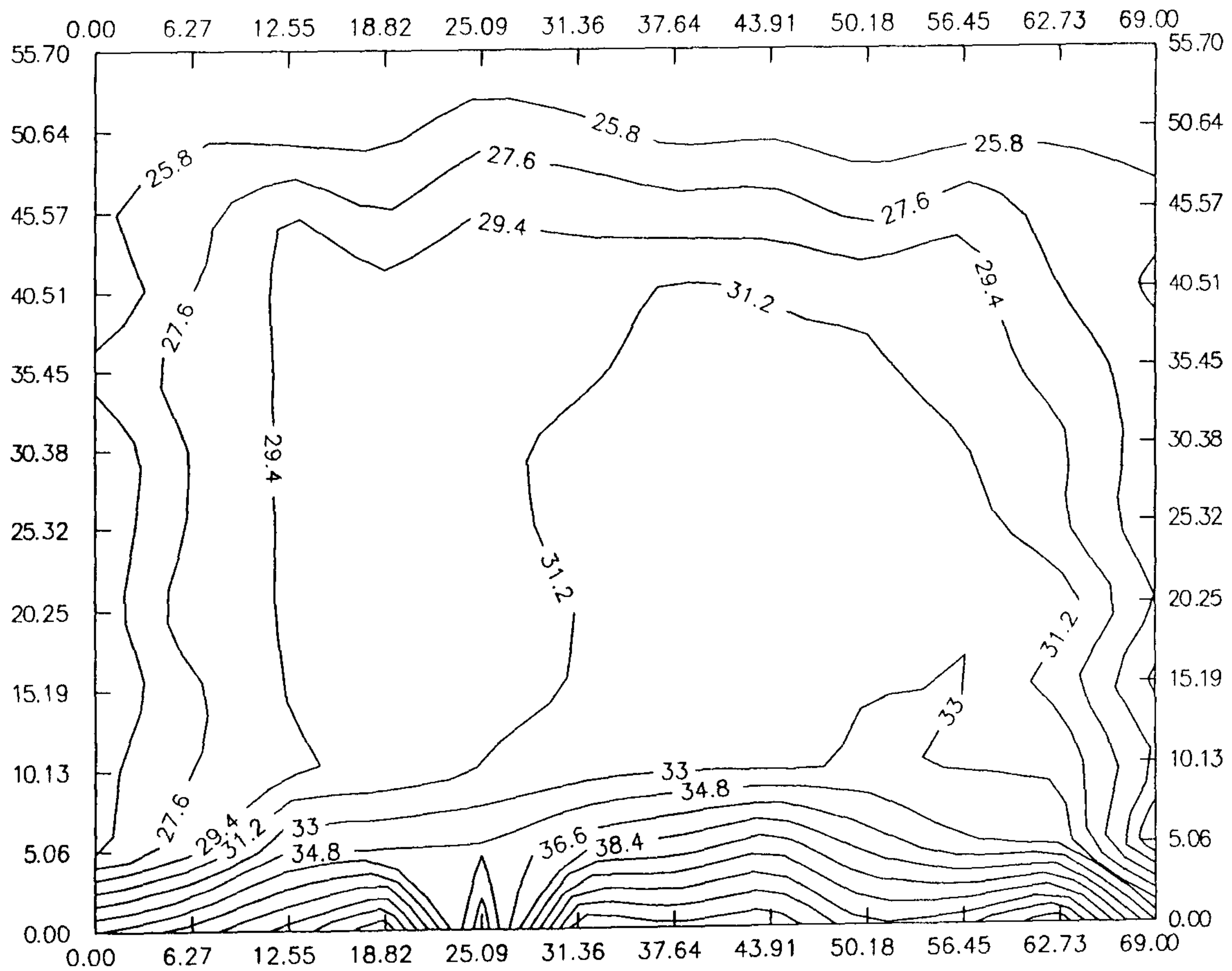
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-2(50-30)



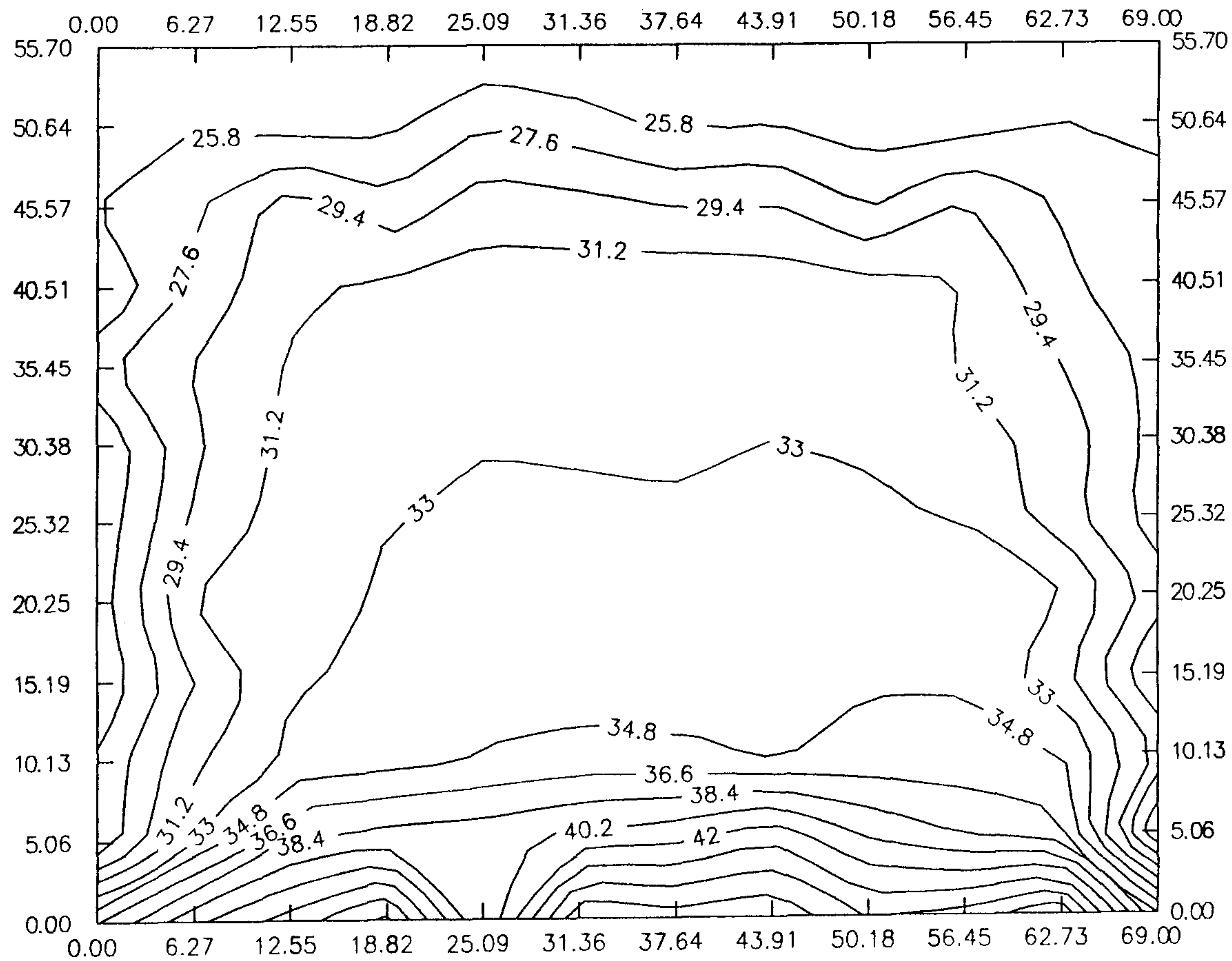
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL5-3(50-30)



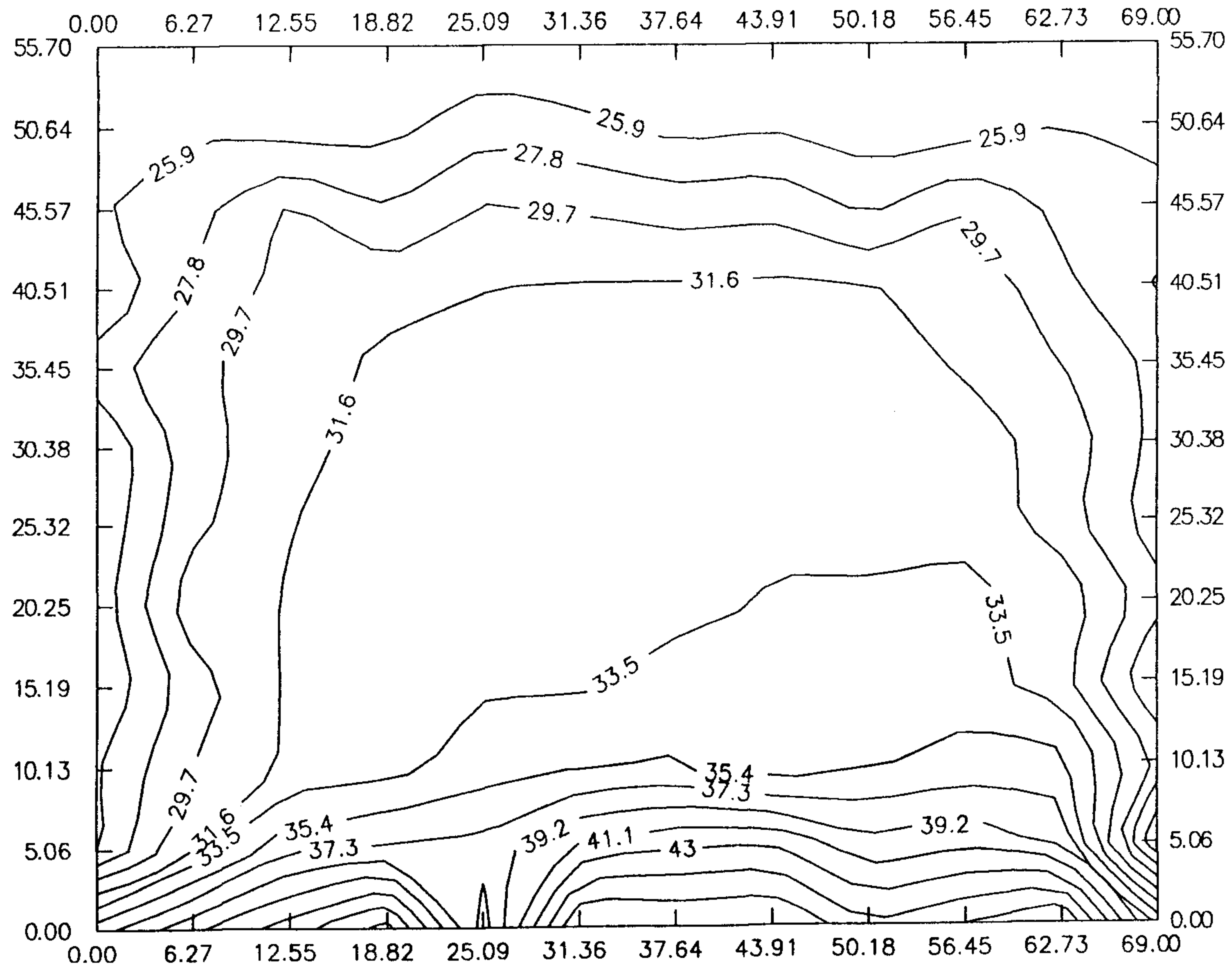
ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL3-1(49-24)



ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL3-2(49-24)



ISOTHERMAL LINE OF ONDOL MODEL3-3(49-24)



부록 3 : 수치해석 컴퓨터 프로그램 리스트

```

C*****
C      2-D CAVITY TURBULENT FLOW CALCULATION
C      ( WRITTEN BY DONG-SOON JANG, MARCH,1991)
C
C      SIMPLEC ALGORITHM
C      k-e TWO-EQUATION MODEL
C      RECTANGULAR ENCLOSURE WITH BOTTOM PARTIAL HEATING
C      VERY SLOW INTRODUCTION OF BUOYANCY FORCE
C
C      BOUNDARY CONDITION: ISOTHERMAL OR LINEAR VARIATION FOR A
C                          ADJACENT VERTICAL WALL,WHILE OTERS ISOTHERMAL
C      HIGHLY CLUSTERED GRID DISTRIBUTION NEAR WALLS
C
C      FURTHER THINGS TO BE CONSIDERED:
C      1. RADIATION
C      2. LOW REYNOLDS k-e
C      3. WELL DEFINED B.C. FROM EXPERIMENTS
C      4. THREE-DIM. CALCULATION
C
C*****
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      LOGICAL LSTOP
      COMMON/CNTL/LSTOP
C.....
C      OPEN (5,FILE='cavtur.inp')
C      OPEN (6,FILE='cavtu4.DAT')
C      OPEN (7,FILE='STFN4.DAT')
C      OPEN (8,FILE='TEMP4.DAT')
C      CALL GRID
C      CALL SETUP1
C      CALL START
10  CALL DENSE
C      CALL BOUND
C      CALL OUTPUT
C      IF(LSTOP) STOP
C      CALL SETUP2
C      GO TO 10
C      END
C
C*****
C
C      SUBROUTINE USER
C
C*****
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      LOGICAL LSOLVE, LPRINT,LBLK,LSTOP
      COMMON /AA/ F(60,60,11), RHO(60,60),GAM(60,60),CON(60,60)
      COMMON /BB/ AIP(60,60),AIM(60,60),AJP(60,60),AJM(60,60),AP(60,60)
      COMMON /CC/ X(60),XU(60),XDIF(60),XCV(60),XCVS(60),
1  Y(60),YV(60),YDIF(60),YCV(60),YCVS(60)
      COMMON /DD/ YCVR(60),YCVRS(60),ARX(60),ARXJ(60),ARXJP(60),
1  R(60),RMN(60),SX(60),SXMN(60),XCVI(60),XCVIP(60)
      COMMON DU(60,60),DV(60,60),FV(60),FVP(60),
1  FX(60),FXM(60),FY(60),FYM(60),PT(60),QT(60)
      COMMON/INDX/TITLE(13),
1  RELAX(13),TIME,DT,XL,YL,
2  RHOCON,
3  NF,NEMAX,NP,NRHO,NGAM,
4  L1,L2,L3,M1,M2,M3,
5  IST,JST,ITER,LAST,
6  IPREF,JPREF,LSOLVE(13),LPRINT(13),LBLK(13),MODE,NTIMES(13)
      COMMON/CNTL/LSTOP
      COMMON/SORC/SMAX,SSUM,IMAX,JMAX,NR1,NR2,NR3,NRO,NR11,NR21,NR31,
1  NRO1
      COMMON/COEF/FLOW,DIFF,ACOF
      DIMENSION U(60,60),V(60,60),PC(60,60),P(60,60)

```

```

EQUIVALENCE (F(1,1,1),U(1,1)),(F(1,1,2),V(1,1)),(F(1,1,3),PC(1,1))
1 ,(F(1,1,11),P(1,1))
DIMENSION TH(60),THU(60),THDIF(60),THCV(60),THCVS(60)
EQUIVALENCE (X,TH),(XU,THU),(XDIF,THDIF),(XCV,THCV)
1 ,(XCVS,THCVS),(XL,THL)
C*****
C
C.. TWO-DIMENSIONAL BUOYANCY-DRIVEN RECTANGULAR ENCLOSURE FLOWS
C ( BOTTOM PARTIAL HEATING FOR ON-DOL SIMULATION)
C
C*****
DIMENSION AKE(60,60),DIS(60,60),T(60,60),GK1(60,60),AMUT(60,60)
DIMENSION XPLUS(60),YPLUS(60)
EQUIVALENCE (F(1,1,4),AKE(1,1)),(F(1,1,5),DIS(1,1)),
1 (F(1,1,6),T(1,1)),(F(1,1,9),AMUT(1,1))
C*****
C SPECIFICATION OF PHYSICAL PROPERTIES, CONSTANTS OF TURBULENCE MODEL,
C AND CHARACTERISTIC LENGTH FOR EMPIRICAL FORMULA.....
C AMU=LAMINAR VISCOSITY
C CMU,C1,C2,SIGK,SIGE=CONSTANTS OF TURULENCE MODEL
C-----
C PHYSICAL PROPERTIES ARE GIVEN IN TERMS OF M.K.S. UNIT
C-----
DATA AMU/1.846E-5/
DATA CMU,C1,C2/0.09,1.42,1.92/
DATA SIGK,SIGE/0.9,1.22/
DATA SIGH/0.9/
C.....
ENTRY GRID
C.....
C SPECIFICATION OF ENCLOSURE GEOMETRY, DIMENSION etc.
C.....
MODE = 1
L1 = 23
M1 = 23
c L1 = 44
c M1 = 44
L2 = L1 - 1
M2 = M1 - 1
L3 = L1 - 2
M3 = M1 - 2
XL = 0.6900
YL = 0.5600
c WALL CONDITION
C-----
C IWALL = 1 ; ISOTHERMAL
C = 2 ; LINEAR VARIATION OF ADJACENT WALL TEMPERATURE
C-----
C IWALL = 1
C INONU = 3
C-----
c NONUNIFORM GRID SIZE DISTRIBUTION
c-----
POWER = 1.5
IMID = (L1 +1)/2
JMID = (M1 +1)/2
XU(2) = 0.0
YV(2) = 0.0
XU(L1) = XL
YV(M1) = YL
GO TO(120,121,122)INONU
120 CONTINUE
IM12 = IMID -2
DO 111 I = 3,IMID
XU(I) = (FLOAT(I-2)/FLOAT(IM12))**POWER*XL/2.0*0.9
111 CONTINUE

```

```

IMID1 = IMID + 1
DO 112 I = IMID1, L2
II = L1 - (I - IMID)
III = I+2-IMID
XU(II) = XL - XU(III)
112 CONTINUE
JMID = JMID - 2
DO 113 J = 3, JMID
YV(J) = (FLOAT(J-2)/FLOAT(JMID))**POWER*YL/2.0*0.9
113 CONTINUE
JMID1 = JMID + 1
DO 114 J = JMID1, M2
JJ = M1 - (J - JMID)
JJJ = J+2-JMID
YV(JJJ) = YL - YV(JJJ)
114 CONTINUE
RETURN
121 CONTINUE
C-----
CALL UGRID
C-----
RETURN
C-----
C X-COORDINATE GRID DISTRIBUTION
C-----
122 CONTINUE
X1 = 0.02
X2 = XL*2.0/3.0
X3 = XL - 0.02
NX1 = 5
NX2 = 13
NX3 = 17
ICOLD = NX2 - 1
NX11 = NX1 + 1
NX21 = NX2 + 1
NX31 = NX3 + 1
XU(2) = 0.0
DO 11 I = 3, NX1
XU(I) = XU(2) + (X1 - XU(2)) / FLOAT(NX1 - 2) * FLOAT(I - 2)
11 CONTINUE
DO 12 I = NX11, NX2
XU(I) = XU(NX1) + (X2 - X1) / FLOAT(NX2 - NX1) * FLOAT(I - NX1)
12 CONTINUE
DO 13 I = NX21, NX3
XU(I) = XU(NX2) + (X3 - X2) / FLOAT(NX3 - NX2) * FLOAT(I - NX2)
13 CONTINUE
DO 14 I = NX31, L1
XU(I) = XU(NX3) + (XL - X3) / FLOAT(L1 - NX3) * FLOAT(I - NX3)
14 CONTINUE
C-----
C Y-COORDINATE GRID DISTRIBUTION
C-----
Y1 = 0.02
Y2 = YL - 0.02
NY1 = 10
NY2 = 22
NY11 = NY1 + 1
NY21 = NY2 + 1
YV(2) = 0.0
DO 16 J = 3, NY1
YV(J) = YV(2) + (Y1 - YV(2)) / FLOAT(NY1 - 2) * FLOAT(J - 2)
16 CONTINUE
DO 17 J = NY11, NY2
YV(J) = YV(NY1) + (Y2 - Y1) / FLOAT(NY2 - NY1) * FLOAT(J - NY1)
17 CONTINUE
DO 18 J = NY21, M1

```



```

      YV(J) = YV(NY2)+(YL-Y2)/FLOAT(M1-NY2)*FLOAT(J-NY2)
18 CONTINUE
C
      RETURN
C
C.....
C
      ENTRY START
C.....
      LAST = 9200
      JUMP = LAST
      GRAVITY = 9.80
      RELAX(1) = 0.1
      RELAX(2) = 0.1
      RELAX(3) = 0.1
      RELAX(4) = 0.1
      RELAX(5) = 0.1
      RELAX(6) = 0.1
      REAMT = 0.1
C
      RELAX(11) = 0.2
C
      DEN = 6.87
      DEN = 1.1614
      PR = 0.78
      THOT = 273.0 + 60.0
      TCOLD = 273.0 + 23.0
      IF(INONU.EQ.2)ICOLD = (L1-2)/3 * 2
      smax = 0.0
      ssum = 0.0
C.....
C      WRITE INPUT PARAMETERS
C-----
      IF(INONU.EQ.3) WRITE(6,1382)
      IF(INONU.EQ.3) PRINT 1382
1382 FORMAT(1X,' NONUNIFORM GRID SIZE DISTRIBUTION ')
      WRITE (6,1383) LAST
      IF(IWALL.EQ.1) WRITE(6,1381)
      IF(IWALL.EQ.1) PRINT 1381
1381 FORMAT(1X,' ISOTHERMAL WALL BOUNDARY CONDITION ')
      IF(IWALL.EQ.2) WRITE(6,1380)
      IF(IWALL.EQ.2) PRINT 1380
1380 FORMAT(1X,' LINEAR ADJACENT VERTICAL WALL TEMPERATURE')
      PRINT 1383, LAST
1383 FORMAT(1X,'LAST = ',I5)
      WRITE (6,1384) RELAX(1),RELAX(2),RELAX(4),RELAX(5),
1 RELAX(6),REAMT
      PRINT 1384, RELAX(1),RELAX(2),RELAX(4),RELAX(5),
1 RELAX(6),REAMT
1384 FORMAT(1X,'RELAXATION FACTORS FOR U,V,AKE,DIS,T,AMUT= ',6F5.2)
      THOT1 = THOT - 273.0
      TCOLD1 = TCOLD - 273.0
      WRITE (6,1385) THOT1,TCOLD1
      PRINT 1385, THOT1,TCOLD1
1385 FORMAT(1X,' THOT = ',F8.2,' C',2X,'TCOLD = ',F8.2,' C')
C.....
C      INITIAL GUESSES
C.....
      DO 8 I = 2,L1
      DO 8 J = 1,M1
      U(I,J) = 0.01
      U(L1,J) = 0.0
      U(I,M1) = 0.0
      U(2,J) = 0.0
      U(I,1) = 0.0
8 CONTINUE
      DO 9 I = 1,L1
      DO 9 J = 2,M1

```



```

V(I,J) = 0.01
IF(I.GT.ICOLD.AND.J.LT.JMID)V(I,J) =0.50
V(1,J) = 0.0
V(L1,J) = 0.0
V(I,2) = 0.0
V(I,M1) = 0.0
9 CONTINUE
DO 10 I = 1,L1
DO 10 J = 1,M1
T(I,J) = (THOT - TCOLD)/4.0 + TCOLD
T(1,J) = TCOLD
T(I,M1) = TCOLD
T(I,1) = TCOLD
T(L1,J) = TCOLD
IF(IWALL.EQ.2)T(L1,J) = THOT - (THOT-TCOLD)*FLOAT(J)/FLOAT(M1)
IF(I.GT.ICOLD)T(I,1) = THOT
AKE(I,J) = 0.10*.05**2
DIS(I,J) = 0.1*AKE(I,J)
10 CONTINUE
C IF(NRUN.EQ.1) GO TO 2111
C.....
C USE PREVIOUS RUN DATA IF NRUN=2
C.....
C REWIND NRE
C READ (NRE) ((U(I,J),I=2,L1),J=1,M1),((V(I,J),I=1,L1),J=2,M1),
C 1 ((T(I,J),I=1,L1),J=1,M1),((P(I,J),I=1,L1),J=1,M1),
C 2 ((AKE(I,J),I=1,L1),J=1,M1),((DIS(I,J),I=1,L1),J=1,M1),
C 3 ((AMUT(I,J),I=1,L1),J=1,M1),((RHO(I,J),I=1,L1),J=1,M1)
C
C RETURN
C
C-----
C
C ENTRY DENSE
C.....
C CALCULATION OF WORKING FLUID DENSITY
DO 20 I=2,L2
DO 20 J=2,M2
RHO(I,J)=DEN*298.0/T(I,J)
20 CONTINUE
C-----
C SLOW INTRODUCTION OF GRAVITY EFFECT
C-----
IF(ITER.LE.2000)gravity = float(iter)/float(2000)*9.8
C-----
C CHANGE TEMPERATURE TO CELSIUS IF ITER=LAST
C-----
IF(ITER.NE.LAST) GO TO 22
DO 21 I = 1,L1
DO 21 J = 1,M1
T(I,J) = T(I,J) - 273.0
21 CONTINUE
22 CONTINUE
C-----
IF(ITER.LE.2500)RETURN
RELAX(1) = 0.2
RELAX(2) = 0.2
RELAX(3) = 0.2
RELAX(4) = 0.3
RELAX(5) = 0.3
RELAX(6) = 0.3
REAMT = 0.3
C-----
RETURN
C.....

```

```

C
  ENTRY BOUND
  RETURN
C.....
C
  ENTRY OUTPUT
C.....
C      XPLUS = PARAMETER FOR THE LAW OF THE WALL
C      YPLUS =      "
C.....
      jum1 = 40
      IF(ITER.EQ.0) GO TO 82
      IF(ITER.GE.1) GO TO 83
      GO TO 83
82 WRITE (6,71)
   PRINT 71
71 FORMAT(1X,' ITER',3X,'SMAX',5X,'SSUM',5X,
  1 ' V(L2,3)',1X,' T(L2,3) ')
   if(iter.eq.0) return
83 IF(MOD(ITER,JUM1).NE.0) RETURN
   WRITE (6,80) ITER,SMAX,SSUM,V(L2,3),T(L2,3)
   PRINT 80, ITER,SMAX,SSUM,V(L2,3),T(L2,3)
80 FORMAT(1X,I5,1P4E10.2)
   IF(MOD(ITER,JUMP).NE.0) RETURN
   CALL PRINT
C.....STORE DATA.....
C   REWIND NWR
C   WRITE (NWR) ((U(I,J),I=2,L1),J=1,M1),((V(I,J),I=1,L1),J=2,M1),
C   1 ((T(I,J),I=1,L1),J=1,M1),((P(I,J),I=1,L1),J=1,M1),
C   2 ((AKE(I,J),I=1,L1),J=1,M1),((DIS(I,J),I=1,L1),J=1,M1),
C   3 ((AMUT(I,J),I=1,L1),J=1,M1),((RHO(I,J),I=1,L1),J=1,M1)
   RETURN
C
C.....
  ENTRY GAMSOR
C.....
  IF(NF.EQ.3) RETURN
C.....
  CMU4=CMU**.25
  IF(NF.NE.1) GO TO 510
  REL=1.-REAMT
  DO 500 I=1,L1
  DO 500 J=1,M1
  AMT = CMU*RHO(I,J)*AKE(I,J)**2/(DIS(I,J)+1.E-30)
  IF(ITER.EQ.0) AMUT(I,J)=AMT
500 AMUT(I,J)=REAMT*AMT +REL*AMUT(I,J)
510 FACTOR = 1.
  IF(NF.EQ.4) FACTOR=1./SIGK
  IF(NF.EQ.5) FACTOR=1./SIGE
  IF(NF.EQ.6) FACTOR=1./SIGH
  DO 520 I=1,L1
  DO 520 J=1,M1
  GAM(I,J)=AMUT(I,J)*FACTOR
520 CONTINUE
C.....
C CALCULATION OF EFFECTIVE TURBULENT VISCOSITY AT THE WALL BOUNDARY
C   USING THE LOGARITHMIC LAW OF THE WALL AND SPECIFICATION OF
C   NEUNMANN CONDITION BY SETTING GAM=0.
C.....
C   LEFT WALL
C.....
  DO 530 J=2,M2
  GO TO (531,532,530,531,531,532),NF
C.....
532 XPLUS(J)=RHO(2,J)*DSQRT(AKE(2,J))*CMU4*XDIF(2)/AMU
  GAM(1,J)=AMU

```

```

IF(XPLUS(J).GT.11.5) GAM(1,J)=AMU*XPLUS(J)/(DLOG(9.*XPLUS(J))*2.5)
AMUT(1,J) = GAM(1,J)
IF(NF.EQ.6)GAM(1,J)=GAM(1,J)/PR
GO TO 530
531 GAM(1,J)=0.0
530 CONTINUE
C.....
C TOP WALL
C.....
DO 600 I=2,L2
GO TO (601,602,600,602,601),NF
601 YPLUS(I)=RHO(I,M2)*DSQRT(AKE(I,M2))*CMU4*YDIF(M1)/AMU
GAM(I,M1)=AMU
IF(YPLUS(I).GT.11.5)GAM(I,M1)=AMU*YPLUS(I)/(DLOG(9.*YPLUS(I))*2.5)
AMUT(I,M1)= GAM(I,M1)
IF(NF.EQ.6)GAM(I,M1)=GAM(I,M1)/PR
GO TO 600
602 GAM(I,M1)=0.0
600 CONTINUE
C-----
C BOTTOM WALL
C-----
DO 620 I = 2,L2
GO TO (621,622,620,622,621),NF
621 YPLUS(I)=RHO(I,2)*DSQRT(AKE(I,2))*CMU4*YDIF(2)/AMU
GAM(I,1) = AMU
IF(YPLUS(I).GT.11.5)GAM(I,1)=AMU*YPLUS(I)/(DLOG(9.*YPLUS(I))*2.5)
AMUT(I,1) = GAM(I,1)
IF(NF.EQ.6)GAM(I,1)=GAM(I,1)/PR
GO TO 620
622 GAM(I,1) = 0.0
620 CONTINUE
C.....
C RIGHT WALL
C.....
DO 610 I=2,M2
GO TO (611,612,610,611,611,612),NF
612 XPLUS(J)=RHO(L2,J)*DSQRT(AKE(L2,J))*CMU4*XDIF(L1)/AMU
GAM(L1,J)=AMU
IF(XPLUS(J).GT.11.5)GAM(L1,J)=AMU*XPLUS(J)/(DLOG(9.*XPLUS(J))*2.5)
AMUT(L1,J)=GAM(L1,J)
IF(NF.EQ.6)GAM(L1,J)=GAM(L1,J)/PR
GO TO 610
611 GAM(L1,J)=0.0
610 CONTINUE
C.....
C SOURCE TERM EXPRESSION
C.....
C NF = 1 ; U(I,J)
C.....
C GAM1,GAM2,GAM3 = HARMONIC MEAN OF GAM TOWARD THE CALCULATION
C OF GAMN AND GAMS
C GAMN,GAMS = GAM VALUE AT THE NORTH OR SOUTH FACE OF U(I,J)
C FN,FS,FE,FW = TEMPORARY USE OF INTERPOLATING FACTOR OF FYM(J+1),
C FYM(J),FXM(I+1),FXM(I) RESPECTIVELY
C.....
C
IF(NF.NE.1) GO TO 509
DO 590 I=3,L2
DO 590 J=2,M2
FW = FXM(I)
FN = FYM(J+1)
FS = FYM(J)
DXDUX = GAM(I,J)*(U(I+1,J)-U(I,J))/XCV(I)/XDIF(I)-
1 GAM(I-1,J)*(U(I,J)-U(I-1,J))/XCV(I-1)/XDIF(I)
GAM1 =1./(FW/(GAM(I,J)+1.E-30)+(1.-FW)/(GAM(I-1,J)+1.E-30))

```

```

GAM2 =1./(FW/(GAM(I,J+1)+1.E-30)+(1.-FW)/(GAM(I-1,J+1)+1.E-30))
GAM3 =1./(FW/(GAM(I,J-1)+1.E-30)+(1.-FW)/(GAM(I-1,J-1)+1.E-30))
GAMN =GAM1*FN +GAM2*(1.-FN)
GAMS =GAM3*FS +GAM1*(1.-FS)
DYDVX = (GAMN* (V(I,J+1)-V(I-1,J+1))
1 - GAMS* (V(I,J)-V(I-1,J)))/XDIF(I)/YCV(J)
CON(I,J) = DXDUX + DYDVX
AP(I,J) = 0.
590 CONTINUE
RETURN
C.....
C NF = 2 ; V(I,J)
C.....
C GAM1, GAM2, GAM3 = HARMONIC MEAN OF GAM LEADING THE CALCULATION
C OF GAME AND GAMW
C GAME, GAMW = GAM VALUE AT THE EAST AND WEST FACE OF V-CONTROL
C VOLUME
C DENV = DENSITY AT THE GRID POINT OF
C V-CONTROL VOLUME
C.....
C
509 IF(NF.NE.2) GO TO 519
DO 591 I=2,L2
DO 591 J=3,M2
FE = FXM(I+1)
FW = FXM(I)
FS = FYM(J)
GAM1 =1./(FS/(GAM(I,J)+1.E-30)+(1.-FS)/(GAM(I,J-1)+1.E-30))
GAM2 =1./(FS/(GAM(I-1,J)+1.E-30)+(1.-FS)/(GAM(I-1,J-1)+1.E-30))
GAM3 =1./(FS/(GAM(I+1,J)+1.E-30)+(1.-FS)/(GAM(I+1,J-1)+1.E-30))
DENV = FS*RHO(I,J-1)+(1.-FS)*RHO(I,J)
GAMW =GAM2*FW +GAM1*(1.-FW)
GAME =GAM1*FE +GAM3*(1.-FE)
DXDUY = GAME*(U(I+1,J)-U(I+1,J-1))-GAMW*(U(I,J)-U(I,J-1))
DXDUY = DXDUY/YDIF(J)/XCV(I)
DYDVY = ( (V(I,J+1)-V(I,J))/
1 YCV(J)*GAM(I,J)*Y(J) - GAM(I,J-1)*Y(J-1)*( V(I,J)-
2 V(I,J-1))/YCV(J-1) ) / YDIF(J)
CON(I,J)= - DENV * GRAVITY +DXDUY+DYDVY
AP(I,J) = 0.0
591 CONTINUE
RETURN
C.....
C NF = 4 ; AKE(I,J)
C.....
C DUDX = DUDX VALUE AT THE GRID POINT OF MAIN CONTROL VOLUME
C DVDY = DVDY "
C UN = U VELOCITY AT THE NORTH FACE OF MAIN CONTROL VOLUME
C US = U VELOCITY AT THE SOUTH FACE OF MAIN CONTROL VOLUME
C VW = V VELOCITY AT THE WEST FACE OF MAIN CONTROL VOLUME
C VE = V VELOCITY AT THE EAST FACE OF MAIN CONTROL VOLUME
C.....
C
519 IF(NF.NE.4) GO TO 529
DO 593 I=2,L2
DO 593 J=2,M2
FE = FXM(I+1)
FW = FXM(I)
FN = FYM(J+1)
FS = FYM(J)
DUDX = (U(I+1,J)-U(I,J))/XCV(I)
DVDY = (V(I,J+1)-V(I,J))/YCV(J)
UN = 0.5*(U(I+1,J+1)+U(I,J+1))*(1.-FN) +0.5*(U(I+1,J)+U(I,J))
1 *FN
US = 0.5*(U(I+1,J)+U(I,J))*(1.-FS) +0.5*(U(I+1,J-1)+U(I,J-1))
1 *FS

```



```

DUDY = (UN-US)/YCV(J)
VE = 0.5*(V(I+1,J+1)+V(I+1,J))*(1.-FE) +0.5*(V(I,J+1)+V(I,J))
1 *FE
VW = 0.5*(V(I,J+1)+V(I,J))*(1.-FW) +0.5*(V(I-1,J+1)+V(I-1,J))
1 *FW
DVDX = (VE-VW)/XCV(I)
GK1(I,J) = AMUT(I,J)*(2.*(DUDX**2+DVDY**2      ) +
1 (DUDY + DVDX)**2)
AP(I,J) = -RHO(I,J)*DIS(I,J)/(AKE(I,J)+1.E-30)
C.....
C MODIFICATION OF GK1 NEAR A WALL
C.....
C WEST WALL
C
C DUDY = 0. AND DVDX TERMS ARE REPLACED USING WALL SHEAR STRESS
C-----
1 IF(I.EQ.2)GK1(2,J)=2.*AMUT(2,J)*(DUDX**2 +
1 DVDY**2      ) + AMUT(1,J)*((V(2,J)+
2 V(2,J+1))**2/4.0      )/XDIF(2)**2
C-----
C EAST WALL
C-----
1 IF(I.EQ.L2)GK1(L2,J)=2.*AMUT(L2,J)*(DUDX**2 +
1 DVDY**2      ) + AMUT(L1,J)*((V(L2,J)+
2 V(L2,J+1))**2/4.0      )/XDIF(L1)**2
C-----
C NORTH WALL
C
C DVDX = 0. AND DVDY TERMS ARE REPLACED USING WALL SHEAR STRESS
C-----
1 IF(J.EQ.M2) GK1(I,M2) = 2.*AMUT(I,M2)*(DUDX**2 +
1 DVDY**2      ) + AMUT(I,M1)*
2 (U(I,M2)**2/YDIF(M1)**2)
C-----
C SOUTH WALL
C-----
1 IF(J.EQ.2) GK1(I,2) = 2.*AMUT(I,2)*(DUDX**2 +
1 DVDY**2      ) + AMUT(I,1)*
2 (U(I,2)**2/YDIF(2)**2)
C-----
CON(I,J) = GK1(I,J)
593 CONTINUE
RETURN
C.....
C NF = 5 ; DIS(I,J)
C.....
529 IF(NF.NE.5) GO TO 539
DO 594 I=2,L2
DO 594 J=2,M2
CONSTG = GK1(I,J)/AMUT(I,J)
CON(I,J) = C1*CMU*RHO(I,J)*AKE(I,J)*CONSTG
AP(I,J) = -C2*RHO(I,J)*DIS(I,J)/(AKE(I,J)+1.E-30)
594 CONTINUE
C.....
C LEFT WALL BOUNDARY
C.....
C DISS = FIXED VALUE OF DISSIPATION NEAR A WALL
C.....
DO 952 J=2,M2
DISS = CMU**0.75*AKE(2,J)**1.5/(0.4*XDIF(2))+1.E-30
CON(2,J) = 1.E+30*DISS
AP(2,J) = -1.E+30
952 CONTINUE
C.....
C TOP WALL BOUNDARY

```

```

C.....
DO 953 I=2,L2
DISS = CMU**0.75*AKE(I,M2)**1.5/(0.4*YDIF(M1))+1.E-30
CON(I,M2) = DISS*1.E+30
AP(I,M2) = -1.E+30
953 CONTINUE
C.....
C SOUTH WALL BOUNDARY
C-----
DO 955 I = 2,L2
DISS = CMU**0.75*AKE(I,2)**1.5/(0.4*YDIF(2))+1.E-30
CON(I,2) = DISS*1.E+30
AP(I,2) = -1.E+30
955 CONTINUE
C.....
C RIGHT WALL BOUNDARY
C-----
DO 954 J=2,M2
DISS = CMU**0.75*AKE(L2,J)**1.5/(0.4*YDIF(L1))+1.E-30
CON(L2,J) = DISS*1.E+30
AP(L2,J) = -1.E+30
954 CONTINUE
RETURN
C.....
C NF = 6 ; TEMPERATURE
C-----
539 IF(NF.NE.6) RETURN
RETURN
END
C.....
BLOCK DATA
C-----
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/INDX/TITLE(13),
1 RELAX(13),TIME,DT,XL,YL,
2 RHOCON,
3 NF,NFMAX,NP,NRHO,NGAM,
4 L1,L2,L3,M1,M2,M3,
5 IST,JST,ITER,LAST,
6 IPREF,JPREF,LSOLVE(13),LPRINT(13),LBLK(13),MODE,NTIMES(13)
LOGICAL LSOLVE,LPRINT,LBLK,LSTOP
COMMON/CNTL/LSTOP
DATA NFMAX,NP,NRHO,NGAM/10,11,12,13/
DATA LSOLVE,LPRINT,LSTOP/27*.FALSE./
DATA MODE,LAST,TIME,ITER/1,5,0.,0/
DATA RELAX,NTIMES/13*1.,13*1/
DATA DT,IPREF,JPREF,RHOCON/1.E10,1,1,1./
C.....
DATA TITLE(1),TITLE(2),TITLE(3)/
1 5HVEL U,5HVEL V,5HST FN/
DATA TITLE(12)/5H RHO/
DATA TITLE(4),TITLE(5),TITLE(6),TITLE(9)/
1 5H K ,5H DIS ,5H TEMP,5H AMUT/
DATA LSOLVE(1),LSOLVE(2),LSOLVE(3)/3*.TRUE./
DATA LSOLVE(4),LSOLVE(5),LSOLVE(6)/3*.TRUE./
DATA LPRINT(1),LPRINT(2),LPRINT(3)/3*.TRUE./
DATA LPRINT(4),LPRINT(5)/2*.TRUE./
DATA LPRINT(6),LPRINT(9)/2*.TRUE./
DATA LPRINT(12)/1*.TRUE./
END
C
C
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
SUBROUTINE DIFLOW
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)

```

```

C*****
COMMON/COEF/FLOW,DIFF,ACOF
C*****
ACOF=DIFF
IF(FLOW.EQ.0.) RETURN
TEMP=DIFF-DABS(FLOW)*0.1
ACOF=0.
IF(TEMP.LE.0.) RETURN
TEMP=TEMP/DIFF
ACOF=DIFF*TEMP**5
RETURN
END

C
C
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
SUBROUTINE SOLVE
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C*****
LOGICAL LSOLVE, LPRINT, LBLK, LSTOP
COMMON /AA/ F(60,60,11), RHO(60,60), GAM(60,60), CON(60,60)
COMMON /BB/ AIP(60,60), AIM(60,60), AJP(60,60), AJM(60,60), AP(60,60)
COMMON /CC/ X(60), XU(60), XDIF(60), XCV(60), XCVS(60),
1 Y(60), YV(60), YDIF(60), YCV(60), YCVS(60)
COMMON /DD/ YCVR(60), YCVRS(60), ARX(60), ARXJ(60), ARXJP(60),
1 R(60), RMN(60), SX(60), SXMN(60), XCVI(60), XCVIP(60)
COMMON DU(60,60), DV(60,60), FV(60), FVP(60),
1 FX(60), FXM(60), FY(60), FYM(60), PT(60), QT(60)
COMMON/INDX/TITLE(13),
1 RELAX(13), TIME, DT, XL, YL,
2 RHOCON,
3 NF, NFMAX, NP, NRHO, NGAM,
4 L1, L2, L3, M1, M2, M3,
5 IST, JST, ITER, LAST,
6 IPREF, JPREF, LSOLVE(13), LPRINT(13), LBLK(13), MODE, NTIMES(13)
C*****
ISTF=IST-1
JSTF=JST-1
IT1=L2+IST
IT2=L3+IST
JT1=M2+JST
JT2=M3+JST

C-----
NTF = NTIMES(NF)
DO 999 NT=1, NTF
DO 391 N=NF, NF
DO 90 J=JST, M2
PT(ISTF) = 0.
QT(ISTF)=F(ISTF, J, N)
DO 70 I=IST, L2
DENOM=AP(I, J)-PT(I-1)*AIM(I, J)
PT(I)=AIP(I, J)/DENOM
TEMP=CON(I, J)+AJP(I, J)*F(I, J+1, N)+AJM(I, J)*F(I, J-1, N)
QT(I)=(TEMP+AIM(I, J)*QT(I-1))/DENOM
70 CONTINUE
DO 80 II=IST, L2
I=IT1-II
80 F(I, J, N)=F(I+1, J, N)*PT(I)+QT(I)
90 CONTINUE

C-----
DO 190 JJ=JST, M3
J=JT2-JJ
PT(ISTF)=0.
QT(ISTF)=F(ISTF, J, N)
DO 170 I=IST, L2
DENOM=AP(I, J)-PT(I-1)*AIM(I, J)

```



```

PT(I)=AIP(I,J)/DENOM
TEMP=CON(I,J)+AJP(I,J)*F(I,J+1,N)+AJM(I,J)*F(I,J-1,N)
QT(I)=(TEMP+AIM(I,J)*QT(I-1))/DENOM
170 CONTINUE
DO 180 II=IST,L2
I=IT1-II
180 F(I,J,N)=F(I+1,J,N)*PT(I)+QT(I)
190 CONTINUE
C-----
DO 290 I=IST,L2
PT(JSTF)=0.
QT(JSTF)=F(I,JSTF,N)
DO 270 J=JST,M2
DENOM=AP(I,J)-PT(J-1)*AJM(I,J)
PT(J)=AJP(I,J)/DENOM
TEMP=CON(I,J)+AIP(I,J)*F(I+1,J,N)+AIM(I,J)*F(I-1,J,N)
QT(J)=(TEMP+AJM(I,J)*QT(J-1))/DENOM
270 CONTINUE
DO 280 JJ=JST,M2
J=JT1-JJ
280 F(I,J,N)=F(I,J+1,N)*PT(J)+QT(J)
290 CONTINUE
C-----
DO 390 II=IST,L3
I=IT2-II
PT(JSTF)=0.
QT(JSTF)=F(I,JSTF,N)
DO 370 J=JST,M2
DENOM=AP(I,J)-PT(J-1)*AJM(I,J)
PT(J)=AJP(I,J)/DENOM
TEMP=CON(I,J)+AIP(I,J)*F(I+1,J,N)+AIM(I,J)*F(I-1,J,N)
QT(J)=(TEMP+AJM(I,J)*QT(J-1))/DENOM
370 CONTINUE
DO 380 JJ=JST,M2
J=JT1-JJ
380 F(I,J,N)=F(I,J+1,N)*PT(J)+QT(J)
390 CONTINUE
391 CONTINUE
C*****
999 CONTINUE
DO 400 J=2,M2
DO 400 I=2,L2
CON(I,J)=0.
AP(I,J)=0.
400 CONTINUE
RETURN
END
C
C
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
SUBROUTINE SETUP
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C*****
LOGICAL LSOLVE, LPRINT, LBLK, LSTOP
COMMON /AA/ F(60,60,11), RHO(60,60), GAM(60,60), CON(60,60)
COMMON /BB/ AIP(60,60), AIM(60,60), AJP(60,60), AJM(60,60), AP(60,60)
COMMON /CC/ X(60), XU(60), XDIF(60), XCV(60), XCVS(60),
1 Y(60), YV(60), YDIF(60), YCV(60), YCVS(60)
COMMON /DD/ YCVR(60), YCVRS(60), ARX(60), ARXJ(60), ARXJP(60),
1 R(60), RMN(60), SX(60), SXMN(60), XCVI(60), XCVIP(60)
COMMON DU(60,60), DV(60,60), FV(60), FVP(60),
1 FX(60), FXM(60), FY(60), FYM(60), PT(60), QT(60)
COMMON/INDX/TITLE(13),
1 RELAX(13), TIME, DT, XL, YL,
2 RHOCON,

```



```

3 NF,NFMAX,NP,NRHO,NGAM,
4 L1,L2,L3,M1,M2,M3,
5 IST,JST,ITER,LAST,
6 IPREF,JPREF,LSOLVE(13),LPRINT(13),LBLK(13),MODE,NTIMES(13)
COMMON/CNTL/LSTOP
COMMON/SORC/SMAX,SSUM,IMAX,JMAX,NR1,NR2,NR3,NR0,NR11,NR21,NR31,
1 NR01
COMMON/COEF/FLOW,DIFF,ACOF
DIMENSION U(60,60),V(60,60),PC(60,60),P(60,60)
EQUIVALENCE (F(1,1,1),U(1,1)),(F(1,1,2),V(1,1)),(F(1,1,3),PC(1,1))
1 ,(F(1,1,11),P(1,1))
DIMENSION DDU(60,60),DDV(60,60)
C*****
1 FORMAT(15X,'COMPUTATION IN CARTESIAN COORDINATES')
2 FORMAT(15X,'COMPUTATION FOR AXISYMMETRIC SITUATION')
3 FORMAT(15X,'COMPUTATION IN POLAR COORDINATES')
4 FORMAT(14X,40(IH*),//)
C-----
ENTRY SETUP1
L2=L1-1
L3=L2-1
M2=M1-1
M3=M2-1
X(1)=XU(2)
DO 5 I=2,L2
5 X(I)=0.5*(XU(I+1)+XU(I))
X(L1)=XU(L1)
Y(1)=YV(2)
DO 10 J=2,M2
10 Y(J)=0.5*(YV(J+1)+YV(J))
Y(M1)=YV(M1)
DO 15 I=2,L1
15 XDIF(I)=X(I)-X(I-1)
DO 18 I=2,L2
18 XCV(I)=XU(I+1)-XU(I)
DO 20 I=3,L2
20 XCVS(I)=XDIF(I)
XCVS(3)=XCVS(3)+XDIF(2)
XCVS(L2)=XCVS(L2)+XDIF(L1)
DO 22 I=3,L3
XCVI(I)=0.5*XCV(I)
22 XCVIP(I)=XCVI(I)
XCVIP(2)=XCV(2)
XCVI(L2)=XCV(L2)
DO 35 J=2,M1
35 YDIF(J)=Y(J)-Y(J-1)
DO 40 J=2,M2
40 YCV(J)=YV(J+1)-YV(J)
DO 45 J=3,M2
45 YCVS(J)=YDIF(J)
YCVS(3)=YCVS(3)+YDIF(2)
YCVS(M2)=YCVS(M2)+YDIF(M1)
IF(MODE.NE.1) GO TO 55
DO 52 J=1,M1
RMN(J)=1.0
52 R(J)=1.0
GO TO 56
55 DO 50 J=2,M1
50 R(J)=R(J-1)+YDIF(J)
RMN(2)=R(1)
DO 60 J=3,M2
60 RMN(J)=RMN(J-1)+YCV(J-1)
RMN(M1)=R(M1)
56 CONTINUE
DO 57 J=1,M1
SX(J)=1.

```

```

SXMN(J)=1.
IF(MODE.NE.3) GO TO 57
SX(J)=R(J)
IF(J.NE.1) SXMN(J)=RMN(J)
57 CONTINUE
DO 62 J=2, M2
YCVR(J)=R(J)*YCV(J)
ARX(J)=YCVR(J)
IF(MODE.NE.3) GO TO 62
ARX(J)=YCV(J)
62 CONTINUE
DO 64 J=4, M3
64 YCVRS(J)=0.5*(R(J)+R(J-1))*YDIF(J)
YCVRS(3)=0.5*(R(3)+R(1))*YCVS(3)
YCVRS(M2)=0.5*(R(M1)+R(M3))*YCVS(M2)
IF(MODE.NE.2) GO TO 67
DO 65 J=3, M3
ARXJ(J)=0.25*(1.+RMN(J)/R(J))*ARX(J)
65 ARXJP(J)=ARX(J)-ARXJ(J)
GO TO 68
67 DO 66 J=3, M3
ARXJ(J)=0.5*ARX(J)
66 ARXJP(J)=ARXJ(J)
68 ARXJP(2)=ARX(2)
ARXJ(M2)=ARX(M2)
DO 70 J=3, M3
FV(J)=ARXJP(J)/ARX(J)
70 FVP(J)=1.-FV(J)
DO 85 I=3, L2
FX(I)=0.5*XCV(I-1)/XDIF(I)
85 FXM(I)=1.-FX(I)
FX(2)=0.
FXM(2)=1.
FX(L1)=1.
FXM(L1)=0.
DO 90 J=3, M2
FY(J)=0.5*YCV(J-1)/YDIF(J)
90 FYM(J)=1.-FY(J)
FY(2)=0.
FYM(2)=1.
FY(M1)=1.
FYM(M1)=0.
C*** CON,AP,U,V,RHO,PC AND P ARRAYS ARE INITIALIZED HERE
DO 95 J=1, M1
DO 95 I=1, L1
PC(I,J)=0.
U(I,J)=0.
V(I,J)=0.
CON(I,J)=0.
AP(I,J)=0.
RHO(I,J)=RHOCON
P(I,J)=0.
95 CONTINUE
IF(MODE.EQ.1) THEN
write (6,1)
PRINT 1
ENDIF
IF(MODE.EQ.2) THEN
write (6,2)
PRINT 2
ENDIF
IF(MODE.EQ.3) THEN
write (6,3)
PRINT 3
ENDIF
write (6,4)

```

```

PRINT 4
RETURN
C-----
ENTRY SETUP2
C*** COEFFICIENTS FOR THE U EQUATION
NF=1
IF(.NOT.LSOLVE(NF)) GO TO 100
IST=3
JST=2
CALL GAMSOR
REL=1.-RELAX(NF)
DO 102 I=3,L2
FL=XCVI(I)*V(I,2)*RHO(I,1)
FLM=XCVIP(I-1)*V(I-1,2)*RHO(I-1,1)
FLOW=R(1)*(FL+FLM)
DIFF=R(1)*(XCVI(I)*GAM(I,1)+XCVIP(I-1)*GAM(I-1,1))/YDIF(2)
CALL DIFLOW
102 AJM(I,2)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
DO 103 J=2,M2
FLOW=ARX(J)*U(2,J)*RHO(1,J)
DIFF=ARX(J)*GAM(1,J)/(XCV(2)*SX(J))
CALL DIFLOW
AIM(3,J)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
DO 103 I=3,L2
IF(I.EQ.L2) GO TO 104
FL=U(I,J)*(FX(I)*RHO(I,J)+FXM(I)*RHO(I-1,J))
FLP=U(I+1,J)*(FX(I+1)*RHO(I+1,J)+FXM(I+1)*RHO(I,J))
FLOW=ARX(J)*0.5*(FL+FLP)
DIFF=ARX(J)*GAM(I,J)/(XCV(I)*SX(J))
GO TO 105
104 FLOW=ARX(J)*U(L1,J)*RHO(L1,J)
DIFF=ARX(J)*GAM(L1,J)/(XCV(L2)*SX(J))
105 CALL DIFLOW
AIM(I+1,J)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
AIP(I,J)=AIM(I+1,J)-FLOW
IF(J.EQ.M2) GO TO 106
FL=XCVI(I)*V(I,J+1)*(FY(J+1)*RHO(I,J+1)+FYM(J+1)*RHO(I,J))
FLM=XCVIP(I-1)*V(I-1,J+1)*(FY(J+1)*RHO(I-1,J+1)+FYM(J+1)*
1 RHO(I-1,J))
GM=GAM(I,J)*GAM(I,J+1)/(YCV(J)*GAM(I,J+1)+YCV(J+1)*GAM(I,J)+
1 1.0E-30)*XCVI(I)
GMM=GAM(I-1,J)*GAM(I-1,J+1)/(YCV(J)*GAM(I-1,J+1)+YCV(J+1)*
1 GAM(I-1,J)+1.0E-30)*XCVIP(I-1)
DIFF=R(MN(J+1))*2.*(GM+GMM)
GO TO 107
106 FL=XCVI(I)*V(I,M1)*RHO(I,M1)
FLM=XCVIP(I-1)*V(I-1,M1)*RHO(I-1,M1)
DIFF=R(M1)*(XCVI(I)*GAM(I,M1)+XCVIP(I-1)*GAM(I-1,M1))/YDIF(M1)
107 FLOW=R(MN(J+1))*(FL+FLM)
CALL DIFLOW
AJM(I,J+1)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
AJP(I,J)=AJM(I,J+1)-FLOW
VOL=YCVR(J)*XCVS(I)
APT=(RHO(I,J)*XCVI(I)+RHO(I-1,J)*XCVIP(I-1))
1 /(XCVS(I)*DT)
AP(I,J)=AP(I,J)-APT
CON(I,J)=CON(I,J)+APT*U(I,J)
AP(I,J)=(-AP(I,J)*VOL+AIP(I,J)+AIM(I,J)+AJP(I,J)+AJM(I,J))
1 /RELAX(NF)
CON(I,J)=CON(I,J)*VOL+REL*AP(I,J)*U(I,J)
DU(I,J)=VOL/(XDIF(I)*SX(J))
CON(I,J)=CON(I,J)+DU(I,J)*(P(I-1,J)-P(I,J))
C DU(I,J)=DU(I,J)/AP(I,J)
C-----
c SIMPLEC IMPLEMENTATION
C-----

```

```

      DDU(I,J)=DU(I,J)/(AP(I,J)-AIP(I,J)-AIM(I,J)-AJP(I,J)-AJM(I,J)
      1 + 1.E-30)
C-----
      DU(I,J) = DU(I,J)/AP(I,J)
103 CONTINUE
      CALL SOLVE
100 CONTINUE
C*** COEFFICIENTS FOR THE V EQUATION
      NF=2
      IF(.NOT.LSOLVE(NF)) GO TO 200
      IST=2
      JST=3
      CALL GAMSOR
      REL=1.-RELAX(NF)
      DO 202 I=2,L2
      AREA=R(1)*XCV(I)
      FLOW=AREA*V(I,2)*RHO(I,1)
      DIFF=AREA*GAM(I,1)/YCV(2)
      CALL DIFLOW
202 AJM(I,3)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
      DO 203 J=3,M2
      FL=ARXJ(J)*U(2,J)*RHO(1,J)
      FLM=ARXJP(J-1)*U(2,J-1)*RHO(1,J-1)
      FLOW=FL+FLM
      DIFF=(ARXJ(J)*GAM(1,J)+ARXJP(J-1)*GAM(1,J-1))/(XDIF(2)*SXMN(J))
      CALL DIFLOW
      AIM(2,J)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
      DO 203 I=2,L2
      IF(I.EQ.L2) GO TO 204
      FL=ARXJ(J)*U(I+1,J)*(FX(I+1)*RHO(I+1,J)+FXM(I+1)*RHO(I,J))
      FLM=ARXJP(J-1)*U(I+1,J-1)*(FX(I+1)*RHO(I+1,J-1)+FXM(I+1)*
      1 RHO(I,J-1))
      GM=GAM(I,J)*GAM(I+1,J)/(XCV(I)*GAM(I+1,J)+XCV(I+1)*GAM(I,J)+
      1 1.0E-30)*ARXJ(J)
      GMM=GAM(I,J-1)*GAM(I+1,J-1)/(XCV(I)*GAM(I+1,J-1)+XCV(I+1)*
      1 GAM(I,J-1)+1.0E-30)*ARXJP(J-1)
      DIFF=2.*(GM+GMM)/SXMN(J)
      GO TO 205
204 FL=ARXJ(J)*U(L1,J)*RHO(L1,J)
      FLM=ARXJP(J-1)*U(L1,J-1)*RHO(L1,J-1)
      DIFF=(ARXJ(J)*GAM(L1,J)+ARXJP(J-1)*GAM(L1,J-1))/(XDIF(L1)*SXMN(J))
205 FLOW=FL+FLM
      CALL DIFLOW
      AIM(I+1,J)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
      AIP(I,J)=AIM(I+1,J)-FLOW
      IF(J.EQ.M2) GO TO 206
      AREA=R(J)*XCV(I)
      FL=V(I,J)*(FY(J)*RHO(I,J)+FYM(J)*RHO(I,J-1))*RMN(J)
      FLP=V(I,J+1)*(FY(J+1)*RHO(I,J+1)+FYM(J+1)*RHO(I,J))*RMN(J+1)
      FLOW=(FV(J)*FL+FVP(J)*FLP)*XCV(I)
      DIFF=AREA*GAM(I,J)/YCV(J)
      GO TO 207
206 AREA=R(M1)*XCV(I)
      FLOW=AREA*V(I,M1)*RHO(I,M1)
      DIFF=AREA*GAM(I,M1)/YCV(M2)
207 CALL DIFLOW
      AJM(I,J+1)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
      AJP(I,J)=AJM(I,J+1)-FLOW
      VOL=YCVRS(J)*XCV(I)
      SXT=SX(J)
      IF(J.EQ.M2) SXT=SX(M1)
      SXB=SX(J-1)
      IF(J.EQ.3) SXB=SX(1)
      APT=(ARXJ(J)*RHO(I,J)*0.5*(SXT+SXMN(J))+ARXJP(J-1)*RHO(I,J-1)*
      1 0.5*(SXB+SXMN(J)))/(YCVRS(J)*DT)
      AP(I,J)=AP(I,J)-APT

```



```

CON(I,J)=CON(I,J)+APT*V(I,J)
AP(I,J)=(-AP(I,J)*VOL+AIP(I,J)+AIM(I,J)+AJP(I,J)+AJM(I,J))
1 /RELAX(NF)
CON(I,J)=CON(I,J)*VOL+REL*AP(I,J)*V(I,J)
DV(I,J)=VOL/YDIF(J)
CON(I,J)=CON(I,J)+DV(I,J)*(P(I,J-1)-P(I,J))
C-----
C   SIMPLEX IMPLEMENTATION
C-----
DDV(I,J)=DV(I,J)/(AP(I,J)-AIP(I,J)-AIM(I,J)-AJM(I,J)-AJP(I,J)
1 + 1.E-30)
C-----
DV(I,J)=DV(I,J)/AP(I,J)
203 CONTINUE
CALL SOLVE
200 CONTINUE
C*** COEFFICIENTS FOR THE PRESSURE CORRECTION EQUATION
NF=3
IF(.NOT.LSOLVE(NF)) GO TO 500
IST=2
JST=2
CALL GAMSOR
SMAX=0.
SSUM=0.
DO 410 J=2,M2
DO 410 I=2,L2
VOL=YCVR(J)*XCV(I)
410 CON(I,J)=CON(I,J)*VOL
DO 474 I=2,L2
ARHO=R(1)*XCV(I)*RHO(I,1)
CON(I,2)=CON(I,2)+ARHO*V(I,2)
474 AJM(I,2)=0.
DO 475 J=2,M2
ARHO=ARX(J)*RHO(1,J)
CON(2,J)=CON(2,J)+ARHO*U(2,J)
AIM(2,J)=0.
DO 475 I=2,L2
IF(I.EQ.L2) GO TO 476
ARHO=ARX(J)*(FX(I+1)*RHO(I+1,J)+FXM(I+1)*RHO(I,J))
FLOW=ARHO*U(I+1,J)
CON(I,J)=CON(I,J)-FLOW
CON(I+1,J)=CON(I+1,J)+FLOW
AIP(I,J)=ARHO*DU(I+1,J)
AIM(I+1,J)=AIP(I,J)
GO TO 477
476 ARHO=ARX(J)*RHO(L1,J)
CON(I,J)=CON(I,J)-ARHO*U(L1,J)
AIP(I,J)=0.
477 IF(J.EQ.M2) GO TO 478
ARHO=RMN(J+1)*XCV(I)*(FY(J+1)*RHO(I,J+1)+FYM(J+1)*RHO(I,J))
FLOW=ARHO*V(I,J+1)
CON(I,J)=CON(I,J)-FLOW
CON(I,J+1)=CON(I,J+1)+FLOW
AJP(I,J)=ARHO*DV(I,J+1)
AJM(I,J+1)=AJP(I,J)
GO TO 479
478 ARHO=RMN(M1)*XCV(I)*RHO(I,M1)
CON(I,J)=CON(I,J)-ARHO*V(I,M1)
AJP(I,J)=0.
479 PC(I,J)=0.
AP(I,J)=AIP(I,J)+AIM(I,J)+AJP(I,J)+AJM(I,J)
TESTM=SMAX-DABS(CON(I,J))
IF(TESTM.LT.0.) THEN
IMAX=I
JMAX=J
ENDIF

```

```

      SMAX=DMAX1(SMAX,DABS(CON(I,J)))
      SSUM=SSUM+CON(I,J)
475 CONTINUE
      CALL SOLVE
C*** COME HERE TO CORRECT THE VELOCITIES
      DO 501 J=2,M2
      DO 501 I=2,L2
C-----
C   SIMPLEC IMPLEMENTATION
C-----
C   DU(I,J)=DU(I,J)/(AP(I,J)-AIP(I,J)-AIM(I,J)-AJP(I,J)-AJM(I,J)
C   1 + 1.E-30)
C   DV(I,J)=DV(I,J)/(AP(I,J)-AIP(I,J)-AIM(I,J)-AJM(I,J)-AJP(I,J)
C   1 + 1.E-30)
C-----
      P(I,J)=P(I,J)+PC(I,J)*RELAX(NP)
      IF (I.NE.2) U(I,J)=U(I,J)+DDU(I,J)*(PC(I-1,J)-PC(I,J))
      IF (J.NE.2) V(I,J)=V(I,J)+DDV(I,J)*(PC(I,J-1)-PC(I,J))
501 CONTINUE
500 CONTINUE
C*** COEFFICIENTS FOR OTHER EQUATIONS
      IST=2
      JST=2
      DO 600 NF=4,NFMAX
      IF(.NOT.LSOLVE(NF)) GO TO 600
      CALL GAMSOR
      REL=1.-RELAX(NF)
      DO 602 I=2,L2
      AREA=R(1)*XCV(I)
      FLOW=AREA*V(I,2)*RHO(I,1)
      DIFF=AREA*GAM(I,1)/YDIF(2)
      CALL DIFLOW
602 AJM(I,2)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
      DO 603 J=2,M2
      FLOW=ARX(J)*U(2,J)*RHO(1,J)
      DIFF=ARX(J)*GAM(1,J)/(XDIF(2)*SX(J))
      CALL DIFLOW
      AIM(2,J)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
      DO 603 I=2,L2
      IF(I.EQ.L2) GO TO 604
      FLOW=ARX(J)*U(I+1,J)*(FX(I+1)*RHO(I+1,J)+FXM(I+1)*RHO(I,J))
      DIFF=ARX(J)*2.*GAM(I,J)*GAM(I+1,J)/((XCV(I)*GAM(I+1,J)+
1 XCV(I+1)*GAM(I,J)+1.0E-30)*SX(J))
      GO TO 605
604 FLOW=ARX(J)*U(L1,J)*RHO(L1,J)
      DIFF=ARX(J)*GAM(L1,J)/(XDIF(L1)*SX(J))
605 CALL DIFLOW
      AIM(I+1,J)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
      AIP(I,J)=AIM(I+1,J)-FLOW
      AREA=RMN(J+1)*XCV(I)
      IF(J.EQ.M2) GO TO 606
      FLOW=AREA*V(I,J+1)*(FY(J+1)*RHO(I,J+1)+FYM(J+1)*RHO(I,J))
      DIFF=AREA*2.*GAM(I,J)*GAM(I,J+1)/(YCV(J)*GAM(I,J+1)+
1 YCV(J+1)*GAM(I,J)+1.0E-30)
      GO TO 607
606 FLOW=AREA*V(I,M1)*RHO(I,M1)
      DIFF=AREA*GAM(I,M1)/YDIF(M1)
607 CALL DIFLOW
      AJM(I,J+1)=ACOF+DMAX1(0.DO,FLOW)
      AJP(I,J)=AJM(I,J+1)-FLOW
      VOL=YCVR(J)*XCV(I)
      APT=RHO(I,J)/DT
      AP(I,J)=AP(I,J)-APT
      CON(I,J)=CON(I,J)+APT*F(I,J,NF)
      AP(I,J)=(-AP(I,J)*VOL+AIP(I,J)+AIM(I,J)+AJP(I,J)+AJM(I,J))
1 /RELAX(NF)

```

```

      CON(I,J)=CON(I,J)*VOL+REL*AP(I,J)*F(I,J,NF)
603 CONTINUE
      CALL SOLVE
600 CONTINUE
      TIME=TIME+DT
      ITER=ITER+1
      IF(ITER.GE.LAST) LSTOP=.TRUE.
      RETURN
      END
C
C
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
      SUBROUTINE SUPPLY
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C*****
      LOGICAL LSOLVE, LPRINT, LBLK, LSTOP
      COMMON /AA/ F(60,60,11), RHO(60,60), GAM(60,60), CON(60,60)
      COMMON /BB/ AIP(60,60), AIM(60,60), AJP(60,60), AJM(60,60), AP(60,60)
      COMMON /CC/ X(60), XU(60), XDIF(60), XCV(60), XCVS(60),
1 Y(60), YV(60), YDIF(60), YCV(60), YCVS(60)
      COMMON /DD/ YCVR(60), YCVRS(60), ARX(60), ARXJ(60), ARXJP(60),
1 R(60), RMN(60), SX(60), SXMN(60), XCVI(60), XCVIP(60)
      COMMON DU(60,60), DV(60,60), FV(60), FVP(60),
1 FX(60), FXM(60), FY(60), FYM(60), PT(60), QT(60)
      COMMON/INDX/TITLE(13),
1 RELAX(13), TIME, DT, XL, YL,
2 RHOCON,
3 NF, NEMAX, NP, NRHO, NGAM,
4 L1, L2, L3, M1, M2, M3,
5 IST, JST, ITER, LAST,
6 IPREF, JPREF, LSOLVE(13), LPRINT(13), LBLK(13), MODE, NTIMES(13)
      DIMENSION U(60,60), V(60,60), PC(60,60), P(60,60)
      EQUIVALENCE (F(1,1,1), U(1,1)), (F(1,1,2), V(1,1)), (F(1,1,3), PC(1,1))
1 , (F(1,1,11), P(1,1))
C*****
10 FORMAT(1X, 26(1H*), 3X, A8, 5X, 26(1H*))
20 FORMAT(1X, 4H I =, I6, 6I9)
30 FORMAT(1X, 1HJ)
40 FORMAT(1X, I2, 3X, 1P7E9.2)
50 FORMAT(1X, 1H )
51 FORMAT(1X, 'I =', 2X, 7(I4, 9X))
52 FORMAT(1X, 'X =', 1P7E13.5)
53 FORMAT(1X, 'TH =', 1P7E13.5)
54 FORMAT(1X, 'J =', 2X, 7(I4, 9X))
55 FORMAT(1X, 'Y =', 1P7E13.5)
C-----
      ENTRY UGRID
      XU(2)=0.
      DX=XL/FLOAT(L1-2)
      DO 1 I=3, L1
1 XU(I)=XU(I-1)+DX
      YV(2)=0.
      DY=YL/FLOAT(M1-2)
      DO 2 J=3, M1
2 YV(J)=YV(J-1)+DY
      RETURN
C*****
      ENTRY PRINT
      IF(.NOT.LPRINT(3)) GO TO 80
C*** CALCULATE THE STREAM FUNCTION
      F(2,2,3)=0.
      DO 82 I=2, L1
      IF(I.NE.2) F(I,2,3)=F(I-1,2,3)-RHO(I-1,1)*V(I-1,2)
1 *R(1)*XCV(I-1)
      DO 82 J=3, M1

```



```

      RHOM=FX(I)*RHO(I,J-1)+FXM(I)*RHO(I-1,J-1)
82 F(I,J,3)=F(I,J-1,3)+RHOM*U(I,J-1)*ARX(J-1)
80 CONTINUE
C
      IF(.NOT.LPRINT(NP)) GO TO 90
C
G*** CONSTRUCT BOUNDARY PRESSURES BY EXTRAPOLATION
      DO 91 J=2,M2
      P(1,J)=(P(2,J)*XCVS(3)-P(3,J)*XDIF(2))/XDIF(3)
91 P(L1,J)=(P(L2,J)*XCVS(L2)-P(L3,J)*XDIF(L1))/XDIF(L2)
      DO 92 I=2,L2
      P(I,1)=(P(I,2)*YCVS(3)-P(I,3)*YDIF(2))/YDIF(3)
92 P(I,M1)=(P(I,M2)*YCVS(M2)-P(I,M3)*YDIF(M1))/YDIF(M2)
      P(1,1)=P(2,1)+P(1,2)-P(2,2)
      P(L1,1)=P(L2,1)+P(L1,2)-P(L2,2)
      P(1,M1)=P(2,M1)+P(1,M2)-P(2,M2)
      P(L1,M1)=P(L2,M1)+P(L1,M2)-P(L2,M2)
      PREF=P(IPREF,JPREF)
      DO 93 J=1,M1
      DO 93 I=1,L1
93 P(I,J)=P(I,J)-PREF
90 CONTINUE
C
      write (6,50)
      PRINT 50
      IEND=0
301 IF(IEND.EQ.L1) GO TO 310
      IBEG=IEND+1
      IEND=IEND+7
      IEND=MINO(IEND,L1)
      write (6,50)
      PRINT 50
      write (6,51) (I,I=IBEG,IEND)
      PRINT 51, (I,I=IBEG,IEND)
      IF(MODE.EQ.3) GO TO 302
      write (6,52) (X(I),I=IBEG,IEND)
      PRINT 52, (X(I),I=IBEG,IEND)
      GO TO 303
302 write (6,53) (X(I),I=IBEG,IEND)
      PRINT 53, (X(I),I=IBEG,IEND)
303 GO TO 301
310 JEND=0
      write (6,50)
      PRINT 50
311 IF(JEND.EQ.M1) GO TO 320
      JBEG=JEND+1
      JEND=JEND+7
      JEND=MINO(JEND,M1)
      write (6,50)
      PRINT 50
      write (6,54) (J,J=JBEG,JEND)
      PRINT 54, (J,J=JBEG,JEND)
      write (6,55) (Y(J),J=JBEG,JEND)
      PRINT 55, (Y(J),J=JBEG,JEND)
      GO TO 311
320 CONTINUE
C
      DO 999 NF=1,NGAM
      IF(.NOT.LPRINT(NF)) GO TO 999
      write (6,50)
      PRINT 50
      write (6,10) TITLE(NF)
      PRINT 10, TITLE(NF)
      IFST=1
      JFST=1
      IF(NF.EQ.1.OR.NF.EQ.3) IFST=2

```



```

      IF(NF.EQ.2.OR.NF.EQ.3) JFST=2
      IBEG=1FST-7
110  CONTINUE
      IBEG=IBEG+7
      IEND=IBEG+6
      IEND=MINO(IEND,L1)
      write (6,50)
      PRINT 50
      write (6,20) (I,I=IBEG,IEND)
      PRINT 20, (I,I=IBEG,IEND)
      write (6,30)
      PRINT 30
      JFL=JFST+M1
      DO 115 JJ=JFST,M1
      J=JFL-JJ
      write (6,40) J, (F(I,J,NF), I=IBEG,IEND)
      PRINT 40, J, (F(I,J,NF), I=IBEG,IEND)
115  CONTINUE
      IF(IEND.LT.L1) GO TO 110
999  CONTINUE
C    DO 555 I=1,L1
C    DO 555 J=1,M1
C    write (7,99) I,J,X(I),Y(J),F(I,J,3)
C    PRINT 99, I,J,X(I),Y(J),F(I,J,3)
C 99  FORMAT(1X,I3,2X,I3,3(2X,E12.5))
C 555 CONTINUE
      DO 555 I=1,L1
      DO 555 J=1,M1
      write (7,99) X(I),Y(J),F(I,J,3)
99  FORMAT(1X,3(2X,E12.5))
555 CONTINUE
      DO 556 I=1,L1
      DO 556 J=1,M1
      write (8,89) X(I),Y(J),F(I,J,6)
89  FORMAT(1X,3(2X,E12.5))
556 CONTINUE
      RETURN
      END

```