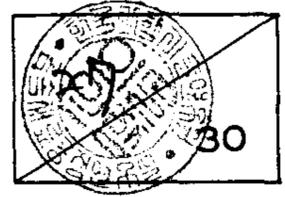


제 3 차 년 도  
최 종 보 고 서



# Thermoelectric Device의 개발 및 응용에 관한 연구

Development of Thermoelectric Devices for Application to  
Direct Energy Conversion Systems

연구기관  
한국과학기술연구원

과  
학  
기  
술  
처  
1991  
년  
10  
월  
8  
일

과 학 기 술 처

## 제 출 문

과학기술처장관 귀하

본 보고서를 “Thermoelectric device의 개발 및 응용에 관한 연구” 사업의 최종보고서로 제출합니다.

1991. 8.

연구 기관 : 한국 과학 기술 연구 원

연구책임자: 심재동(한국과학기술연구원 책임연구원)

연구 원: 정순효(한국과학기술연구원 책임연구원)  
현도빈(한국과학기술연구원 선임연구원)  
변지영(한국과학기술연구원 연구원)  
하헌필(한국과학기술연구원 연구원)

여 백

## 요 약 문

### I. 연구 제목

Thermoelectric Device의 개발 및 응용에 관한 연구

### II. 연구의 목적 및 중요성

가열하면 전력이 발생하고, 이와는 반대로 전류를 통하면 냉각되는 열전 재료의 에너지 직접변환 기능을 이용하는 열전변환 device로서 열전발전 (thermoelectric generation)과 열전냉각 (thermoelectric cooling)은 다음과 같은 장점이 있다.

- 1) 작동부분이 없어 구조가 간단한 점
- 2) 무소음, 무진동이며 고장이 적은 점
- 3) 미소부분의 선택적 냉각이 가능한 점
- 4) 열응답 감도가 높아 온도제어가 가능한 점

이와 같은 특징 때문에 electronics 분야를 위시한 다방면에서 실용화가 확대되고 있고, 새로운 용도 개발도 활발히 추진되고 있다. 즉 전류를 통하여 냉각을 얻는 열전냉각은 반도체에 의한 일종의 고체회로이므로 반도체 레이저, 트랜지스터, 광학소자, 영상소자등의 다른 고체전자회로와의 정합성이 우수하여 최근 반도체 소자화에 의하여 소형화와 고성능화를 추구하는

각종의 반도체 소자, 전자기기의 부품냉각이나 항온제어에 불가결한 device로서 수요가 증대되고 있다. 뿐만 아니라 냉장고, 냉난방장치, 건조장치 등의 민생용 가전제품에 대한 용도개발도 유망한 분야로써 주목되고 있다. 한편 열전발전은 벽지전원이나 우주, 해양, 군사용등의 소형독립전원장치에 광범위하게 이용되고 있으며, 또한 열전재료의 고성능화에 수반하여 각종의 산업폐열이나 저급자연에너지를 열원으로 하는 열전발전도 새로운 에너지기술로서 유망시 된다.

본 연구팀은 열전재료의 개발연구를 통하여 열전발전용으로 Fe-Si계 고온용 재료 및 열전냉각용으로 최대온도차  $\Delta T = 65$  K의 Bi-Te계 단결정 재료 시제품을 개발한 바 있으므로 본 연구는 이들 재료를 실용 device에 응용할수 있는 기반기술을 제공하게 될 것이다.

### Ⅲ. 연구 내용 및 범위

1. Metal dielectric substrate에 의한 열전 module의 제조법 연구.
  - Metal 기판의 양극산화 방법 및 산화막의 절연특성
  - 양극산화 절연층의 Metallizing 방법
  - Cu 전극 tap 형성 방법 및 P-N 소자 접합 방법
2. 열전 module 시제품 제조 및 성능 평가
  - P-N 소자조의 assembling 방법
  - 열전 module 시제품의 냉각성능 평가
  - ceramic substrate module과의 성능 비교

### 3. 열전식 소형 냉각 device 설계 및 시제품 제조

- Design parameter에 의한 실험적 해석
- Simulation에 의한 성능요인의 분석
- 냉각장치의 시제품 제조와 성능 실증

## IV. 결론 및 건의사항

1. 알루미늄 금속기판을 양극산화시켜 생성된  $Al_2O_3$  피막의 절연특성은 인가전압 100 volt 미만에서  $3 \times 10^{13} \Omega$  으로 열전 module의 절연기판으로 충분함이 확인되었으며, 최적의 양극산화 조건은 다음과 같다.

전해액 : 13%  $H_2SO_4$ , 전원 : 15 - 20 volt, 20 - 25 mA/cm<sup>2</sup>,  
온도 : 6 - 8 °C,  $Al_2O_3$  피막성장속도 : 0.33  $\mu m/min$

2.  $Al_2O_3$  절연피막에 대한 Ni 무전해도금과 Cu 전해도금에 의하여 절연기판/Cu 전극의 직접 접합이 가능하였으며, 최적의 Cu 전해도금 조건은 다음과 같다.

전해액 :  $CuSO_4$  (200 g/l) +  $H_2SO_4$  (60 g/l),  
전류밀도 : 30 - 35 mA/cm<sup>2</sup>,  
Cu 후막 : 120 - 150  $\mu m$  (2.5 hrs.)

3. Screen printing법에 의한 전극 pattern 형성과 cellular jig에 의한 열전소자의 접합으로 열전 module 시제품을 제조하였으며, 시제품의 성능사양은 다음과 같다.

열전소자 치수 : 4 x 4 x 4 mm, P-N 소자대의 수 : 17 대
최대냉각능 : 0.046 watt, 최대온도차 : $\Delta T = 65.6$ K
최대전류 : 11.6 amp, 최대전압 : $6.47 \times 10^{-3}$ volt

4. 열전 module 제조법으로서 종래의 ceramic 기판에 대체하여 양극산화에 의한 알루미늄 기판의 이용 가능성이 확인되었다. 알루미늄기판의 경우 알루미늄 기판 사용시에 비해 작은 전류값으로 동일한 흡열능을 얻을 수 있었으며, 동일한 전류에서는 모듈양단의 온도차를 크게 할 수 있었다.
5. 열전냉각 device로서 소형냉각장치의 최적 설계요인을 분석하고, 내용적 10 - 40 l의 소형냉장고 시제품의 설계조건에 따른 성능평가로부터 내외부 온도차  $\Delta T = 13 - 20$  K의 냉각능력 확보가 가능하였다.
6. 냉각장치 내부의 전열 device로서 열전도성 금속박판의 내장 lining에 의한 자연대류방식 보다는 공기순환 fan의 설치에 의한 강제대류방식이 냉각성능면에서 우수함이 밝혀졌다.

## SUMMARY

### I. Title

Development of Thermoelectric Devices for Application to Direct Energy Conversion Systems

### II. Object and Significance

Thermoelectric devices such as thermoelectric generators and coolers, which utilize the direct energy conversion property of the thermoelectric materials, have several advantages over the conventional devices. They include:

- 1) Simple construction due to the absence of mechanical parts
- 2) Soundless, no vibratory noise and excellent reliability
- 3) Selective cooling
- 4) High sensitivity to heat response

Therefore, the application fields of the thermoelectric devices including micro-electronics expanding rapidly and new applications are being searched actively.

Thermoelectric cooling devices are very efficient in selective

cooling and temperature control of various solid state electronic devices such as semiconductor lasers, power IC's, optical devices and charge coupled device (CCD). In addition, they can be applied to electric home appliances such as refrigerators, air conditioners, driers as well as to portable refrigerators.

Thermoelectric power generators have so far been exclusively used as independent electricity sources for specialized applications such as spacecrafts, deep-sea explorers and various military devices. As the performance of the thermoelectric materials being improved, they can also be exploited as a power generator using industrial waste heat and low grade natural energies.

Since we have already developed production technologies of polycrystalline Fe-Si systems for high temperature electricity generation and single crystals of Bi-Te systems with  $\Delta T$  of 65 K for cooling devices, the present work concerns on basic technologies which can be applied to the fabrication of practical devices using these materials.

### III. Scope and Contents

1. Development of thermoelectric module fabrication technology using a metal-dielectric substrate
  - o Anodizing of Al metal substrate and characterization of the dielectric property of oxide film
  - o Metallizing of anodized layer

- o Bonding of Cu electrode tap and P-N element set
2. Fabrication of a test module and evaluation of its performance
    - o Assembling of P-N element sets
    - o Evaluation of cooling performance of the test module
    - o Comparison of performance between the ceramic substrate and anodized metal substrate module
  3. Design and fabrication of a small refrigerator
    - o Experimental analysis of design parameters
    - o Analysis of effects of the design parameters by simulation
    - o Construction of a test refrigerator and its performance test

#### IV. Conclusions

1. The electrical insulation property of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  film made by anodizing an aluminium substrate was  $3 \times 10^{13} \Omega$  below 100 Volts of applied potential, which confirms its applicability as an insulating substrate for the thermoelectric module. The optimum anodizing conditions are as follows:

electrolyte: 13% $\text{H}_2\text{SO}_4$ , potential: 15 ~ 20 V, current density: 20 ~ 25 mA/cm <sup>2</sup> , temperature: 6 ~ 8°C growth rate of $\text{Al}_2\text{O}_3$ film : 0.33 $\mu\text{m}/\text{min}$
---

2. It was possible to deposit Ni layer on the anodized substrate by electroless plating and to bond Cu electrode directly on to the Ni layer by electroplating. The optimum conditions of Cu electroplating are as follows:

electrolyte : $\text{CuSO}_4$ (200 g/l) + $\text{H}_2\text{SO}_4$ (60 g/l)
current density : 30 ~ 35 mA/cm <sup>2</sup>
Cu thick film thickness : 120 ~ 150 $\mu\text{m}$ ( 2.5 hrs )

3. A test thermoelectric module was fabricated using a screen printing technology for electrode patterning and a cellular jig for soldering of P-N element sets. The specification of the test module was as follows:

dimension of element : 4 x 4 x 4 mm,
number of P-N element set: 17
maximum cooling power: 0.046 watt,
maximum current: 11.6 Amp
maximum temperature difference: $\Delta T = 65.6$ K
maximum potential: $6.47 \times 10^{-3}$ Volt

4. It has been confirmed that the anodized aluminum substrate can replace the conventional ceramic substrate.
  
5. It was possible to maintain a temperature difference of about 13 ~ 20 K between atmosphere and the inside of portable refrigerators ( 10 ~ 40 l capacity ) using the test module by optimizing the design parameters.

여 백

## CONTENTS

Chapter 1. Introduction .....	17
Chapter 2. Fabrication of Test Thermoelectric Module .....	21
2-1 Design of Fabrication Method .....	21
2-2 Anodizing of Aluminium Substrate .....	25
2-2-1 Experimental Procedure .....	26
2-2-2 Formation of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Insulation Film .....	28
2-2-3 Dielectric Property of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Film .....	30
2-3 Electroless Plating of Ni on Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Film .....	30
2-3-1 Experimental Procedure .....	32
2-3-2 Characterization of Ni Layer .....	33
2-4 Bonding of Cu Electrode and Electrode Patterning .....	37
2-4-1 Electro-plating of Cu Thick Film .....	37
2-4-2 Electrode Patterning .....	38
2-5 Bonding of P-N Element Sets .....	42
2-5-1 Surface Treatment of Thermoelement .....	42
2-5-2 Contact Resistance between Electrode and Thermoelement .....	46
2-6 Fabrication and Evaluation of Test Module .....	47
2-6-1 Fabrication Procedure .....	47
2-6-2 Maximum Parameters and Performance Evaluation .....	51
2-7 Comparison of Performance between Modules with different	

substrates .....	59
2-7-1 Characterization of Thermoelectric Performance .....	59
2-7-2 $Q_c - \phi - I$ Curve .....	61
 Chapter 3. Design and Performance Evaluation of Thermoelectric	
CoolingDevice .....	64
3-1 Energy Balance of Thermoelectric Cooling .....	64
3-2 Analysis of Heat Transfer by Simulation .....	67
3-2-1 Construction of Heat Exchanger .....	67
3-2-2 Effect of Heat Dissipation Capacity and Thermal	
Resistance .....	72
3-2-3 Cooling Performance and Temperature Loss	
with Varying Supply Voltage .....	74
3-3 Relation between types of Heat Transfer and	
Cooling Performance .....	83
3-4 Design and Performance Evaluation of Test Cooling Device .....	90
3-4-1 Design and Performance Evaluation of Heat Dissipator .	91
3-4-2 Fabrication of Test Cooling Device .....	96
3-4-3 Cooling Performance Evaluation .....	98
 Chapter 4. Conclusions .....	103
 REFERENCES .....	105

## 목 차

제 1 장 서론 .....	17
제 2 장 열전모듈 제조실험 및 시제품의 제조 .....	21
제 1 절 열전모듈의 제조방법 설계 .....	21
제 2 절 알미늄 기판의 양극산화 처리 .....	25
2-1 실험장치및 방법 .....	26
2-2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 절연피막의 형성 .....	28
2-3 절연피막의 dielectric 특성 .....	30
제 3 절 절연피막의 Ni 무전해 도금 실험 .....	30
3-1 실험장치및 방법 .....	32
3-2 Ni 도금층의 특성 평가 .....	33
제 4 절 Cu 전극 형성 및 전극 pattern 형성 방법 .....	37
4-1 전해 도금법에 의한 Cu 후막 생성 .....	37
4-2 전극 pattern 형성 방법 .....	38
제 5 절 열전소자의 P-N 접합 및 전극접합 방법 .....	42
5-1 열전소자의 표면처리 .....	42
5-2 접합전극의 접촉저항 .....	46
제 6 절 열전모듈의 시제품 제조 및 성능 평가 .....	47
6-1 열전모듈 제조 공정 .....	47
6-2 시제품 열전모듈의 최대 parameter 와 특성도 .....	51
제 7 절 기판종류에 따른 모듈특성 비교 .....	59
7-1 모듈의 열전특성 .....	59

7-2 $Q_c - \phi - I$ 특성도 .....	61
제 3 장 열전 냉각 장치의 설계 및 성능 분석 .....	64
제 1 절 열전 냉각의 에너지 수지 .....	64
제 2 절 Simulation 에 의한 열전달 해석 .....	67
2-1 열교환부의 구성과 simulation 조건 .....	67
2-2 방열능력의 영향과 열전달 저항 .....	72
2-3 공급 전원에 따른 냉각성능과 온도차 손실 .....	74
제 3 절 용기 내부의 전열방식과 냉각성능 .....	83
제 4 절 냉각장치의 설계와 시제품의 성능평가 .....	90
4-1 방열기의 설계와 성능해석 .....	91
4-2 냉각장치 시제품의 제조 .....	96
4-3 냉각장치의 성능평가 .....	98
제 4 장 결 론 .....	103
참 고 문 헌 .....	105

## 제 1 장 서 론

가열하면 전력이 발생하고 전류를 통하면 냉각되는 열전반도체 재료의 에너지 직접 변환 기능을 이용하는 열전 device의 응용과 용도개발이 열전 냉각 (Thermoelectric cooling)과 열전발전(Thermoelectric generation) 분야에서 80년대 이후 본격화되고 있으며 이미 전자공업을 위시한 산업부문에 널리 실용되고 있다. 특히 전자냉각 device의 개발은 급속히 진전되어 다음의 각 분야에서 실용적 용도가 더욱 증대될 것으로 전망된다. 열전변환 device의 실용분야와 향후의 용도개발 전망을 개괄하면 다음과 같다.

### ○ 국부 냉각 분야 :

각종 전자 광학기기의 소형화, 고성능화 추세에 따라 열의 발생에 의한 출력특성의 저하가 가장 큰 기술적 문제점이 되고 있다. 이의 해결책으로서 전자냉각소자를 이용하는 국부냉각 부품이나 항온제어 부품의 수요가 증대하고 있으며 각종 전자 device의 고성능화에 불가결한 요소기술로 되고 있다. 특히 전기에너지를 냉각에너지로 변환하는 전자냉각 방식은 반도체에 의한 일종의 고체회로이므로 IC화에 의한 전자기기의 고도화에 수반하여 레이저 다이오드, 광검출 소자, 촬상소자(CCD), GaAs FET등의 반도체 소자를 내장하는 전자광학 기기의 항온제어 부품으로서 널리 실용되고 있으며 이와 같은 고체 전자 device와의 복합적 용도가 더욱 확대되고 있다.

### ○ 항온제어 장치 분야 :

열전재료는 열기전력이 통상의 열전대에 비하여 수십 내지 수백배나 크

기 때문에 온도응답이 신속하고 정확하여 정밀한 온도제어가 요하는 항온장치에 실용된다. 특히 최근 반도체 device 제조공정과 관련하여 불순물 확산로, 각종 약액이나 에칭액의 항온순환장치에 수요가 크며 이외에도 공업용 항온조, 생화학용 배양조, 과학계측기기등의 항온제어 부품으로 이용된다.

#### ○ 냉장고 및 냉난방 장치 :

전자냉각은 무소음, 무진동이며 기존의 가스 압축식 냉각방식과는 달리 냉매가스가 불요하므로 몬트리얼 협정에 의한 CFC의 사용규제와 관련하여 열전식 냉장고, 냉난방장치등 민생용 가전제품에의 응용이 크게 기대된다. 이에 열전소자를 응용하는 소형냉장고(cooling box)가 상품화되어 있고 크린룸용 공조패널, 전자기기의 수납용 캐비닛 등도 실용되고 있다. 앞으로 고성능 열전재료의 성능향상에 의하여 CFC에 대체한 냉각방식으로서의 응용과 용도개발이 주목된다.

#### ○ 저온 system 장치 :

현재 열전모듈의 최대 냉각능력은 일단 모듈에서  $\Delta T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  정도이며 다단모듈에서는  $\Delta T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  수준으로 상온( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )을 기준으로 하면 최저온도는  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각이 가능하다. 현재의 실용용도는 진공 trap이나 적외선 센사등 일부에 국한되고 있으나 고온초전도체의 실용화 전망과 관련하여 경제적인 냉각 system으로서 열전냉각의 응용이 크게 기대된다. 이외에도 극저온을 필요로 하는 의료기기, 과학기기, 극저온 장치등에의 실용화가 진전되고 있다.

○ 열전발전분야 :

열전재료를 이용하는 열전발전기는 우주항공용, 군사용, 벽지용등의 특수전원장치에 용도가 국한되고 있으나 에너지 문제와 관련하여 산업폐열이나 자연에너지를 경제적으로 회수하는 새로운 에너지 기술로서의 용도가 기대된다.

이상과 같이 열전 device는 관련제품에 현실적으로 실용되고 있을 뿐만 아니라 용도가 다양하여 새로운 응용제품의 개발과 관련하여 향후의 용도와 수요가 크게 전망된다. 당 연구실에서는 sinter-annealing법에 기초한 Fe-Si계 고온용 열전반도체 재료의 제조기술을 개발한 바 있고, 전자냉각용으로서 최대온도차  $\Delta T = 60 - 65$  K의 성능을 갖는 V-VI 반도체화합물(Bi-Sb-Te-Se계)의 단결정 성장법을 개발한 바 있으므로 열전 device의 개발에 관한 본 연구는 이들 재료를 실용화에 연결시킬 수 있는 계기가 될 것이다.

본 연구는 3차년에 걸쳐 수행되어 제 1 차년도 연구에서는 100°C 미만의 저급열원을 이용하는 열전발전 응용에 대하여 연구하였으며, 제 2 차년도에서는 ceramic기판에 의한 열전모듈 제조법과 이를 이용하는 열전냉각 device의 성능요인에 대하여 연구하였다. 이에 이어서 당해년도 연구에서는 금속기판에 의한 열전모듈 제조방법 및 소형냉각장치의 설계와 시제품 성능에 대하여 연구하였으며, 당해년도의 연구내용은 다음과 같다.

(1) 금속기판을 이용하는 열전 모듈 제조 방법

- 금속기판의 양극산화 조건 및 절연특성의 측정
- 양극산화 절연층의 metallizing 실험
- Cu 전극 접합법 및 P-N소자 접합 실험

(2) 열전모듈 시제품제조 및 성능평가

- o P-N소자군의 assembling방법
- o 열전모듈의 냉각성능평가

(3) 소형냉각 device의 제작 및 성능실증

- o 냉각성능에 미치는 설계요인의 분석
- o 시제품의 제작 및 성능실증

## 제 2 장 열전모듈 제조 실험 및 시제품의 제조

### 제 1 절 열전모듈의 제조방법 설계

열전모듈은 P형과 N형의 열전소자를 전극으로 접합한 복수개의 P-N소자대를 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병렬이 되도록 접속하여 unit화한 것이다. 일반적으로 사용하는  $\Pi$ 자형 열전모듈의 단면구조는 Fig. 2-1과 같다. 열전모듈은 중앙에 열전소자를 중심으로 하여 상하양측에 대칭적으로 접합전극, metallized layer, 절연기판으로 구성되어 열전소자/전극/metallized layer/절연기판과 같이 다수의 이종재료 접합층이 존재한다. 따라서 열전모듈을 냉각에 이용하는 경우 heat flux의 이동은 피냉각체 - 절연기판 - metallized layer - 열전소자 - 전극 - metallized layer - 절연기판 - 방열 분위기의 제과정을 거쳐 피냉각체로 부터 열이 제거된다. 이와같이 열이 다수의 이종재료나 접합계면을 통과하기 때문에 열전달저항이 존재하여 온도차 손실이 생긴다. Fig. 2-1에 열전모듈의 온도분포상태를 모식적으로 나타내었는데 열전달저항으로 인하여 각 부위에서 나타나는 온도차의 크기는  $\Delta T_E$ (열전소자간 온도차) >  $\Delta T_M$ (절연기판간 온도차) >  $\Delta T_S$ (system 온도차)의 순이다. 즉 열전소자에 의하여 얻을 수 있는 온도차는  $\Delta T_E$  인데 비하여 실용적으로 이용할 수 있는 온도차는  $\Delta T_S$ 에 불과하여 ( $\Delta T_E - \Delta T_S$ ) 만큼의 온도차 손실이 발생한다. 열전소자의 냉각능력을 높은 효율로 이용하기 위해서는  $\Delta T_E$ 을  $\Delta T_M$ 에 접근시킬 수 있도록 모듈의 열전달저항을 최소화할 수 있는 모듈설계가 필요하다. 열전달저항은 모듈을 구성하는 재료의 종류와 이종재료의 접합상태에 따라 달라지므로 관련재료의 선택과 접합방법은 모듈제조기술의 핵심적 과제이다. 현재 실용되고

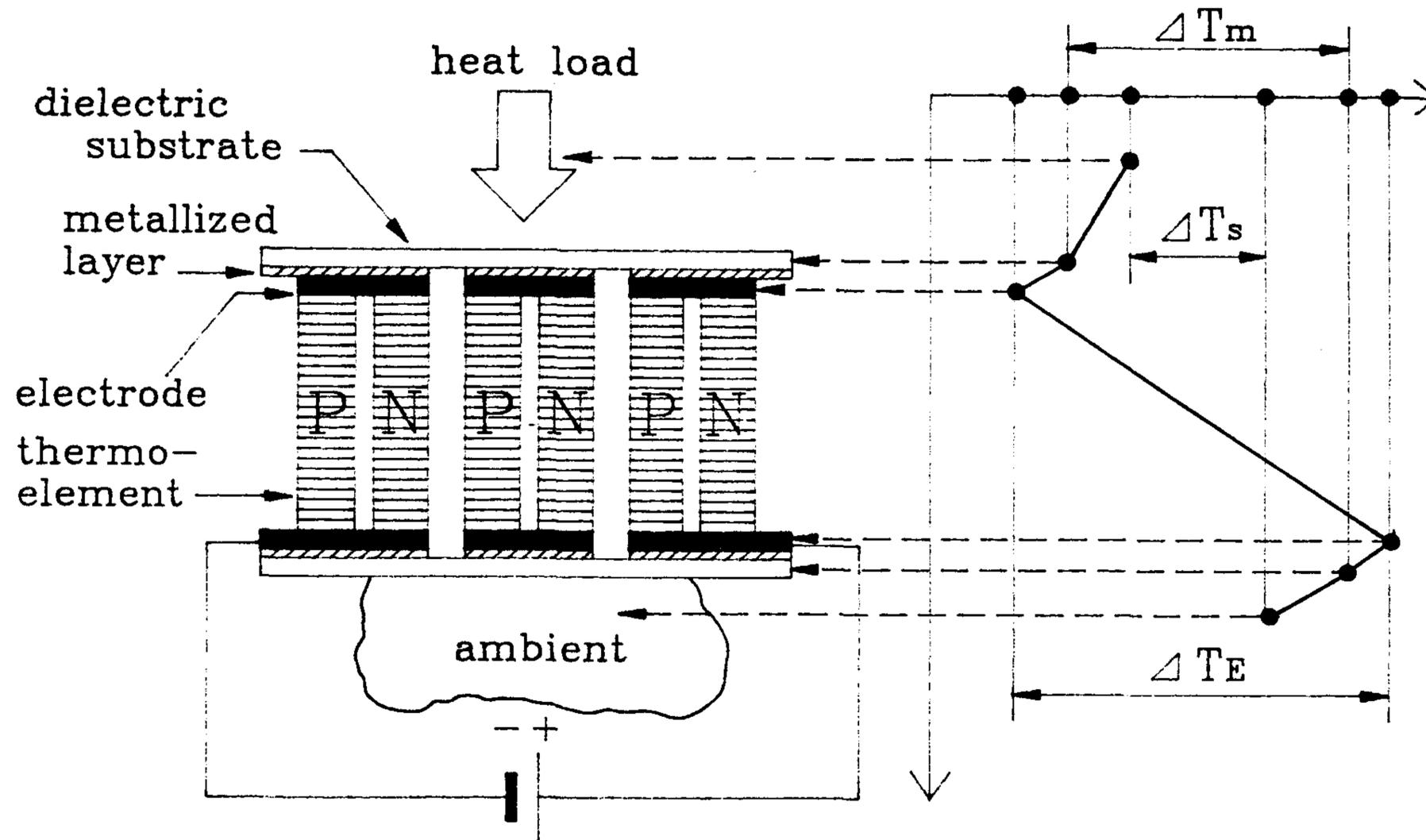


Fig. 2-1  $\Pi$ 형 열전 module의 온도분포 상태를 나타내는 모식도.

있는 열전모듈의 제조법은 표 2-1에서 보는 바와 같이 절연기판으로서 열전도율이 낮은 ceramic재료를 사용하고 soldering에 의하여 전극을 접합하기 때문에 열전달저항과 접촉저항이 크다는 문제가 있다. 또 전극접합을 위한 절연기판의 metallizing법으로 sputtering이나 CVD법 등을 채용하고 있어 생산성이 낮고 공정비가 크게 되는 것도 단점이다.

표 2-1. 열전모듈의 제조법과 관련재료

항 목	관련재료 또는 제조법	문 제 점
절연기판	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 또는 BeO	열전도율이 낮아 ΔT <sub>M</sub> 이 낮음
Metallized layer	Mo 또는 W을 sputtering, CVD, 증착등의 방법으로 형성	생산성이 낮고 공정비가 큼
전극접합	Cu를 soldering으로 접합	soldering층의 접촉 저항 및 열전달저항의 증가
전극 tab형성	photolithography법과 screen printing법으로 형성	
전극/소자 접합	soldering에 의한 접합	

본 연구에서는 현행의 모듈제조방법이 갖는 상기와 같은 결점의 개선을 위하여 다음과 같은 모듈제조방법을 설계하여 이에 대한 가능성을 실험적으로 검토하였다.

- (1) 기판재료의 선택 :  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 비하여 열전도율이 10배 이상 큰 Al기판을 사용
- (2) 절연층의 형성 방법 :  
양극산화에 의한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 절연피막의 형성
- (3) 절연피막의 metallizing 방법 :  
무전해 도금에 의한 Ni coating
- (4) Cu 전극의 접합 :  
전해도금에 의한 Cu 후막의 직접접합
- (5) 전극 tab patterning 방법 :  
masking 물질의 screen printing 후에 etching함
- (6) 전극/소자 접합법 :  
solder cream에 의한 Cu 전극/열전소자의 접합
- (7) 열전소자의 모듈화 방법 :  
cellular jig에 의한 P-N 소자의 assembling 및 접합

## 제 2 절 알미늄기판의 양극산화처리

양극산화처리기술(anodizing)이란 금속 또는 반도체를 적절한 전해액중에 양극으로 침지하여 그 위에 산화물을 전기적으로 형성시켜 주는 것을 말한다. 이때 생성되는 산화물은 전기적 특성에 따라 두종류로 나뉘어지며 그중 하나는 산화물의 절연성이 뛰어나 높은 전압을 가해주어야만 간신히 이온전도성을 나타내게 되는 것으로 대표적인 산화물은  $Al_2O_3$  이며, 다른 하나는 산화물이 전자전도성을 가지고 있으나 이온전도성이 없는 것으로 stainless steel 표면 보호막이 그 대표적인 예이다. 후자의 경우에는 산화물 막중으로 이온이 통과하지 않기 때문에 장시간 전류를 통과시켜도 막의 두께가 성장하지 않으며, 통상 수십 Å을 초과하지 않는다. 반면 절연성 산화막의 경우에는 높은 전압을 가하면 이온이 이동하여 그에 따라 막의 두께가 증가하게 된다. 양극산화에 의한 산화피막생성법은 이 원리를 이용한 것으로 이때 생성된 산화물의 치밀성은 금속의 종류에 따라 달라지나 일반적으로 생성되는 금속산화물의 부피와 금속의 부피와의 비로서 판단한다. 부피비가 1 보다 작은 원소인 경우 산화물층의 부피가 금속보다 작어 산화물층에 틈이 발생하기 쉽게 되고, 반면 산화물층의 부피가 금속보다 현저하게 큰 경우에는 어느정도 이상의 산화물층이 형성되게 되면 내부응력이 증가하여 산화물층의 파괴가 일어나므로 양자공히 보호성 산화물 피막을 형성하기 어렵게 된다. 보호성 산화물 피막을 형성하기에 적합한 부피비는 1 - 2사이의 범위로 되고 이 범위에 해당하는 원소로는 Be, Ti, Zr, Cu 및 Al등이 알려져 있다. (1)

일반적으로 열전 module에 사용되는 기판은 열전도성 및 전기절연성이 우수해야 하고 부가하여 물리적인 충격을 흡수할 수 있을 정도로 어느 정도의 내구성을 가져야 하며 값이 저렴해야 한다. 본 연구에서는 이러한 조

건을 가장 잘 만족시키는 Al을 선택하고 이를 양극산화하여 기판재료로 사용하였다.

## 2-1. 실험장치 및 방법

Al 위에 생성되는 산화막은 막의 구조에 따라 장벽형(barrier형)과 기공형(porous형)으로 나누어지며 그 구조를 Fig. 2-2에 나타내었다. Fig. 2-2를 살펴보면 장벽형의 경우에는 생성된 산화물층에 기공이 없고, 반면 기공형의 경우에는 Al 소지위에 100Å 정도의 장벽형 산화물층이 존재하고 그 위에 수직으로 porous한 산화물층이 성장하며 porous한 산화물층 사이에 기공이 형성됨을 알 수 있다. 양극산화된 Al을 열전 module용 기판으로 사용하는 경우 방열판으로 작용하는 Al소지와 전극간에 module 사용전압 및 전류에서 통전되지 않아야 하므로 생성된 산화물층은 사용조건에서 절연성을 유지할 필요가 있다. 이런 점에서는 치밀한 산화물층을 형성하는 장벽형이 절연성이 뛰어나므로 유리할 것으로 판단된다. 그러나 열전 module을 제조하는 공정중에는 생성된 산화물층 위에 전극부형성 및 전극과 열전재료와의 접합공정이 포함되며 이러한 공정은 어떤 방법을 선택하느냐에 따라

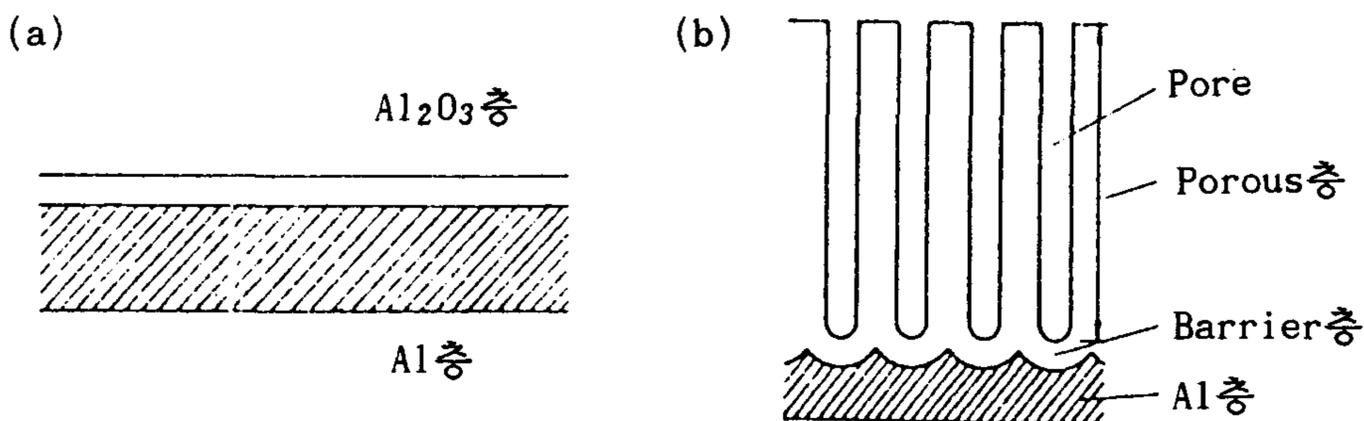


Fig. 2-2 양극산화처리된 Al의 단면도: (a)장벽형 (b)기공형

달라지나 Al 소지 및 산화물층의 온도는 100 - 400°C 범위에 있게 된다. Al 및 alumina의 선팅계수는 각각  $26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  및  $7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  이며 이 차이는 온도가 상승했을 경우 Al과 산화물층 접합계면에 mechanical stress를 야기시켜 산화물층에 crack을 유발할 수 있을 것으로 예상된다. 이점을 방지하기 위해서는 응력흡수체가 존재하여 접합계면에서 발생하는 응력을 유기시켜 줄 필요가 있다. 기공형의 경우 기공이 이러한 역할을 담당할 수 있을 것으로 기대되며 기공형산화피막이 module 사용조건에서 절연성을 유지할 수 있다면 기공형이 장벽형 보다 적합하리라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기공형 산화피막 제조법인 황산욕 경질피막 제조조건을 선택하여 1 mm 두께의 Al판을 양극산화처리 하였다. 황산욕을 이용하여 양극산화처리 피막을 생성시킬 때 생성된 피막의 황산욕으로의 용해량을 감소시키기 위해 전해액 온도를 0 - 10°C 범위로 유지시켜야 하므로 본 연구에서는 얼음과 물을 이용하여 전해액의 온도를  $6 \pm 2^\circ\text{C}$  범위로 조절하였으며 사용된 전해액은 13% 황산욕이고 양극전류밀도가 20-25 mA/cm<sup>2</sup>이 되도록 직류 정전압 공급장치를 이용하여 전압을 15 - 20 volt로 조절하였다. Fig. 2-3에 사용한 장치의 개략도를 나타내었고 음극으로는 304 stainless강을 사용하였다. 양극산화 처리할 Al판은 두께 1 mm의 것으로 45 x 45 mm로 절단하여 1200번 까지 기계연마 후 20wt.% NaOH 용액에 30 - 60초간 침지하여 탈지 및 etching을 행한 후 20 - 25wt.% HNO<sub>3</sub>용액에서 중화처리하고 증류수로 세척하여 표면 전처리를 하였다. 형성된 양극산화피막의 두께는 단면을 현미경으로 관찰하여 측정하였으며 절연특성은 I-V 특성곡선을 이용하여 판단하였다.

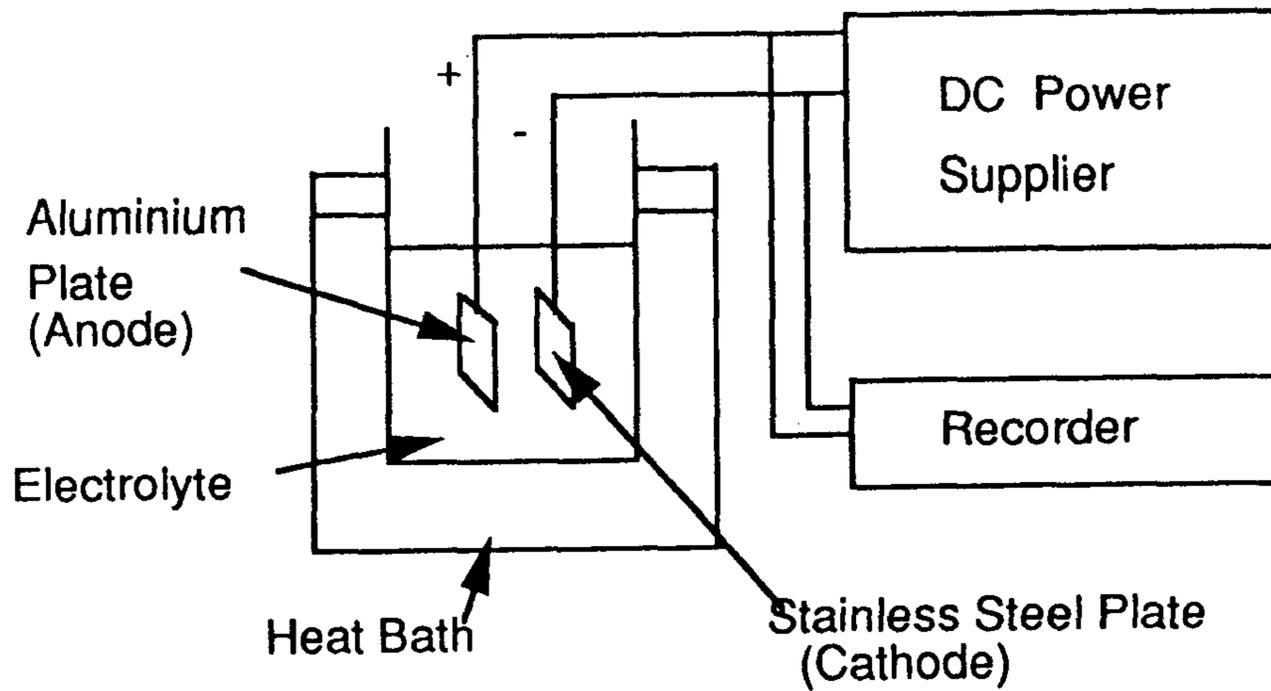
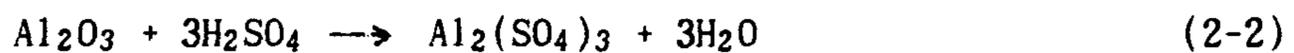
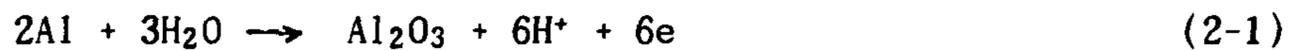


Fig. 2-3 알루미늄 기판 anodizing 실험장치의 개략도.

## 2-2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 절연 피막의 형성

물은 황산용액중에서 Al을 양극산화시킬 때의 주반응은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 생성반응과 생성된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 황산용액으로의 용해반응으로 대별되며 생성반응을 식(2-1)에 용해반응을 식(2-2)에 나타내었다.



피막의 성장속도와 용해속도는 시간의 변화에 따라 피막중량이 어떻게 변화하는가로 나타내어질 수 있으며 피막생성량은 Faraday의 법칙에 따르므로 시간에 대해 직선적으로 증가하나 피막의 용해량은 시간의 자승에 비례한다

고 알려져 있다. 1) Fig. 2-4는 양극산화 처리시간과 절연층 ( $Al_2O_3$ ) 두께와의 관계를 나타낸 것으로 본 실험조건에서는 양극산화 시간이 60분까지는 피막용해속도가 늦어 거의 직선적으로 생성속도가 증가하는 것이 관찰되나 그 이상에서는 절연층의 용해속도가 증가하여 성장이 둔화됨을 알수 있다. 직선영역에서의 성장속도는  $0.33\mu\text{m}/\text{min}$  이었다.

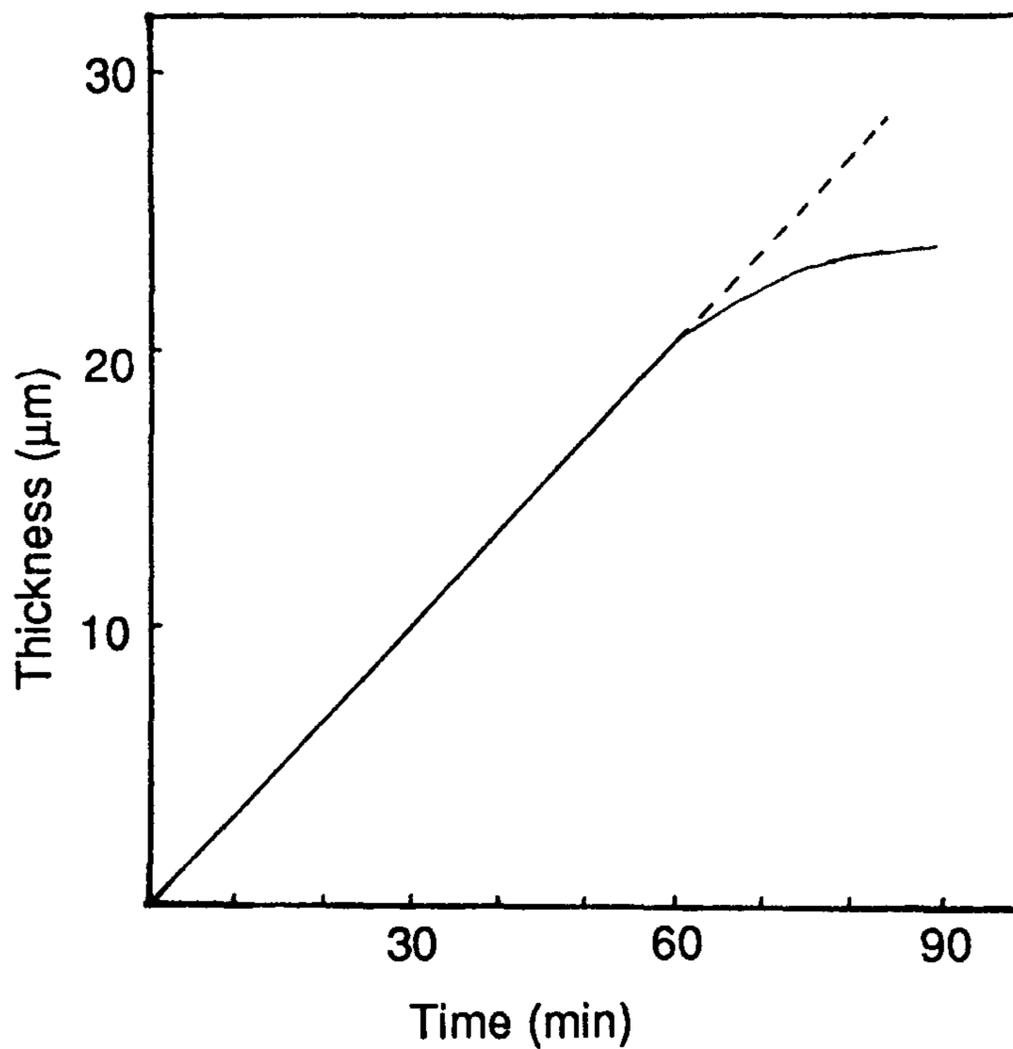


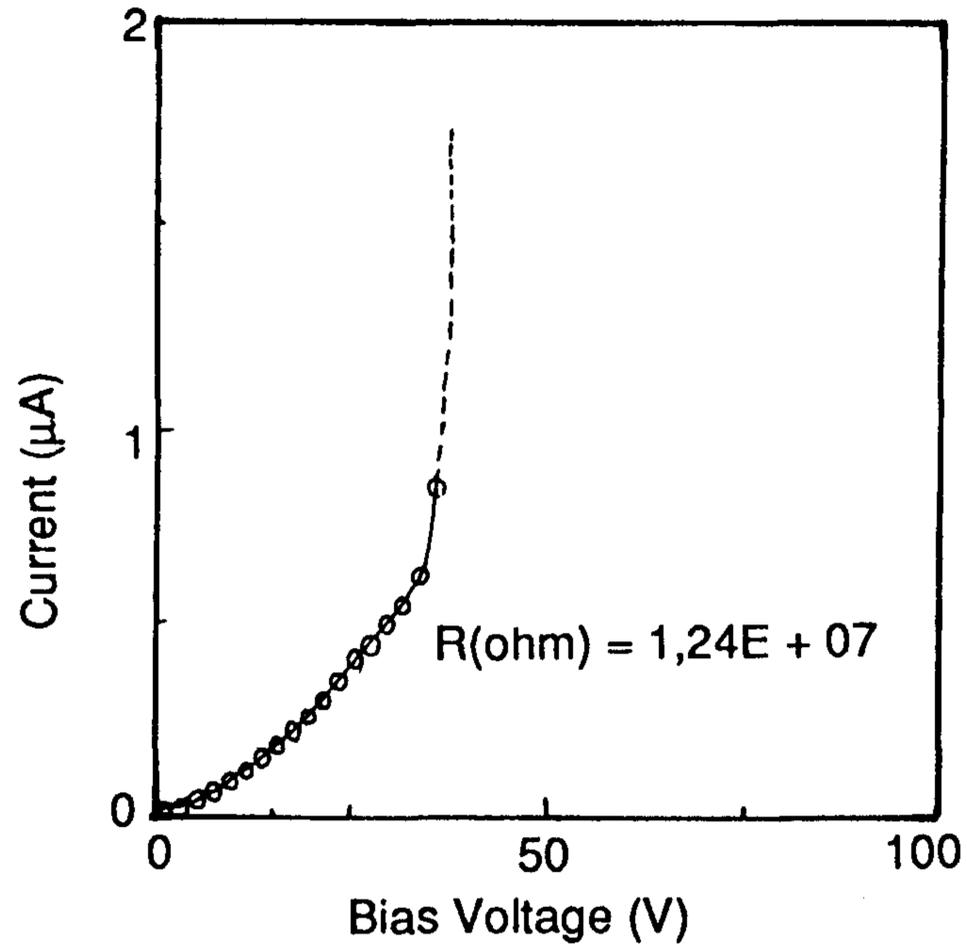
Fig. 2-4 양극산화 처리시간과  $Al_2O_3$  절연층 두께와의 관계.

### 2-3. 절연피막의 dielectric 특성

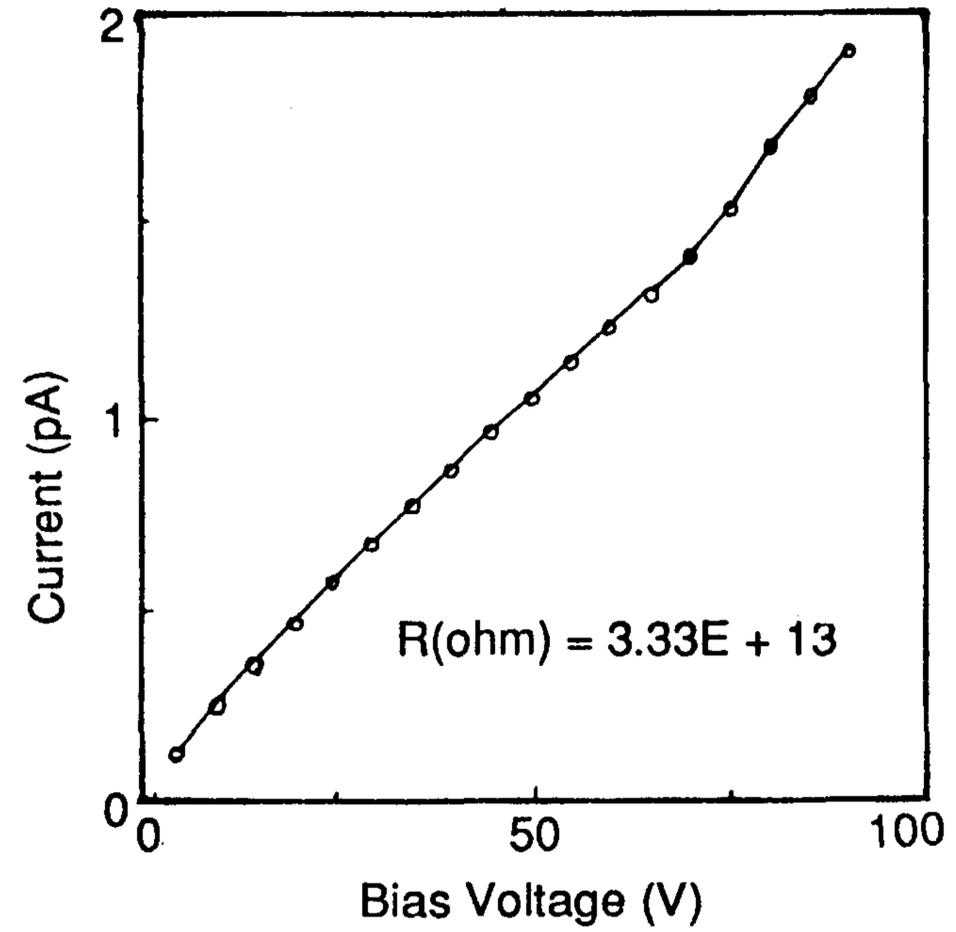
Fig. 2-5는 양극산화된 절연층의 두께가 10  $\mu\text{m}$  및 23  $\mu\text{m}$ 인 경우 인가전압에 따른 통전성을 나타낸 것이다. 두께가 10  $\mu\text{m}$ 인 경우 전압이 35V 이상이 되면 절연층이 파괴되어 급격한 통전이 이루어짐을 알 수 있다. 그러나 두께가 23  $\mu\text{m}$ 에서는 인가전압이 100V 정도까지 통전전류가 2 pA 미만으로 매우 양호한 절연특성을 보여주고 있다. 일반적으로 사용되는 냉각용 열전 module의 인가전압은 24 volt 미만이므로 양극산화피막은 10  $\mu\text{m}$  정도로도 사용 가능하나 안정성을 고려하여 20  $\mu\text{m}$  정도의 두께를 갖는 절연피막을 형성시킨다면 전기저항은 약  $3 \times 10^{13}$  Ohm으로 절연용 기판으로 충분함을 알 수 있다. 양극산화막의 두께를 증가시키면 절연성은 더욱 강화되나 이 경우 산화피막을 통하는 열전달저항이 증가하므로 module 성능을 저해한다. 이상의 결과로 부터 module 기판으로서 양극산화처리에 의하여 절연층을 형성시킨 Al 금속기판의 이용이 가능함을 알 수 있으며 Al은  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 에 비해 열전도율이 10배 이상 크므로 본 방법에 의한 Al 금속 기판의 사용으로 종래의 module 방식에 비하여 성능향상이 기대된다.

### 제 3 절 절연피막의 Ni 무전해 도금 실험

양극산화처리로 형성된  $\text{Al}_2\text{O}_3$  절연층에 Cu 전극을 접합하기 위하여는 산화물 표면에 metallized layer의 형성이 요구된다. Metallizing법에는 증착법, sputtering법, 도전체 paste의 소성법, 무전해도금법등이 널리 알려져 있는데 본 연구에서는 공정이 단순하고 설비비가 저렴한 Ni 무전해 도금법의 실용가능성을 검토하였다.



(a)



(b)

Fig. 2-5 양극산화된 절연층의 인가전압과 통전성과의 관계.

(a) 두께  $10 \mu\text{m}$ , (b) 두께  $23 \mu\text{m}$

### 3-1. 실험장치 및 방법

무전해도금 용액으로는 상품화되어 있는 일본 Kanigen 제품의 pink sumer (sensitizer), red sumer (activator), nickel sumer(도금액)을 구입하여 하기와 같은 순서로 도금하였으며 이때 사용된 장치의 개략도는 Fig. 2-6에 나타내었다.

- (1) 양극산화된 절연피막의 초음파 세척
- (2) 10 vol.% pink sumer 용액에 침지 (20 - 25°C, 3-4분)
- (3) 증류수 세척
- (4) 20vol.% red sumer 용액에 침지 (20 - 25°C, 3-4분)
- (5) 증류수 세척
- (6) 20 vol.% nickel sumer 용액에서 도금 (80 - 90°C)
- (7) 증류수 세척

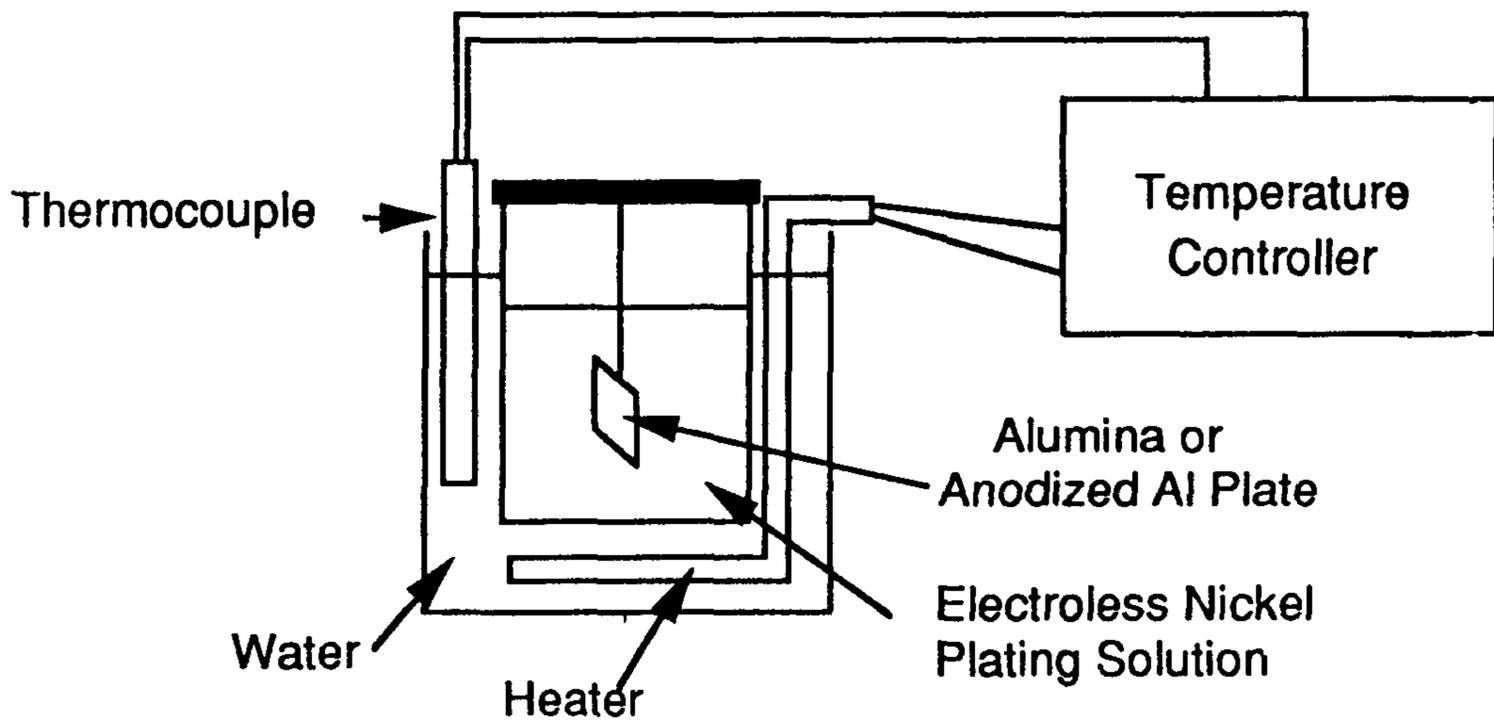


Fig. 2-6 Nickel 무전해 도금장치의 개략도.

### 3-2. Ni 도금층의 특성 평가

Metallized ceramic 기판을 열전모듈에 사용하고자 할때 그 기판에 요구되는 특성 및 특성평가 항목을 metallizing공정뒤에 행해지는 Cu 전해도금, pattern 형성, 소자/전극 접합 공정의 관점에서 살펴 보면 (1) Cu 전해도금시 Cu와의 접착력이 좋아야 하고, (2) pattern 형성공정에서 masking된 부분은 ceramic기판에 붙어 있고 나머지 부분만 부식이 일어나도록 해야 하므로 ceramic 기판과의 접착력이 우수하여야 하며, (3) 소자/전극 접합시, 즉, soldering할 때 200°C 이상의 온도까지 상승하게 되는데 이 온도 부근에서도 ceramic 기판과의 접착력이 우수해야 할 필요가 있다. 이로 부터 특성평가 항목으로는 metallized layer가 ceramic 기판에 얼마만큼 균일하게 밀착되어 있는가와 그때의 접착강도를 들수 있을 것이다.

Fig. 2-7은 무전해 도금시간과 양극산화된 기판위에 생성된 도금층 두께와의 관계를 나타낸 것이고, Photo 1은 도금시간이 10, 20, 55분 일때의 단면사진을 나타낸 것이다. Fig. 2-7로 부터 본 실험조건에서 무전해도금층은 시간당 18  $\mu\text{m}$  까지 얻을수 있음을 알수 있고 Photo 1으로 부터 도금시간에 관계없이 양극산화막과 Ni도금층의 경계는 선명하고 도금층은 균일하게 형성되어 있음을 알수 있다. 후 공정인 pattern 성형시의 etching공정을 고려하면 무전해 도금층의 두께는 etching액의 과도한 손실을 방지하기 위하여 가능한 한 얇을 필요가 있으므로 본 연구에서는 무전해 도금층의 두께를 5 - 7.5  $\mu\text{m}$  로 조절하여 그 위에 Cu를 전해도금하였다. 한편 Ni도금층의 접착강도를 측정하기 위하여 Fig. 2-8과 같은 jig를 제작하여 pull-off test를 행하였다. 그 결과 무전해 Ni 도금층의 접착강도는 2.5 MPa 정도였다. 열전 모듈제조와 관련하여 접착강도의 기준치는 규정되어 있지 않으므로 접착강도의 적정성 여부는 판단하기 곤란하나 무리한 힘을 가하지 않

는 한 박리성에 대한 모듈의 안정성을 유지하기에는 충분하다고 판단된다

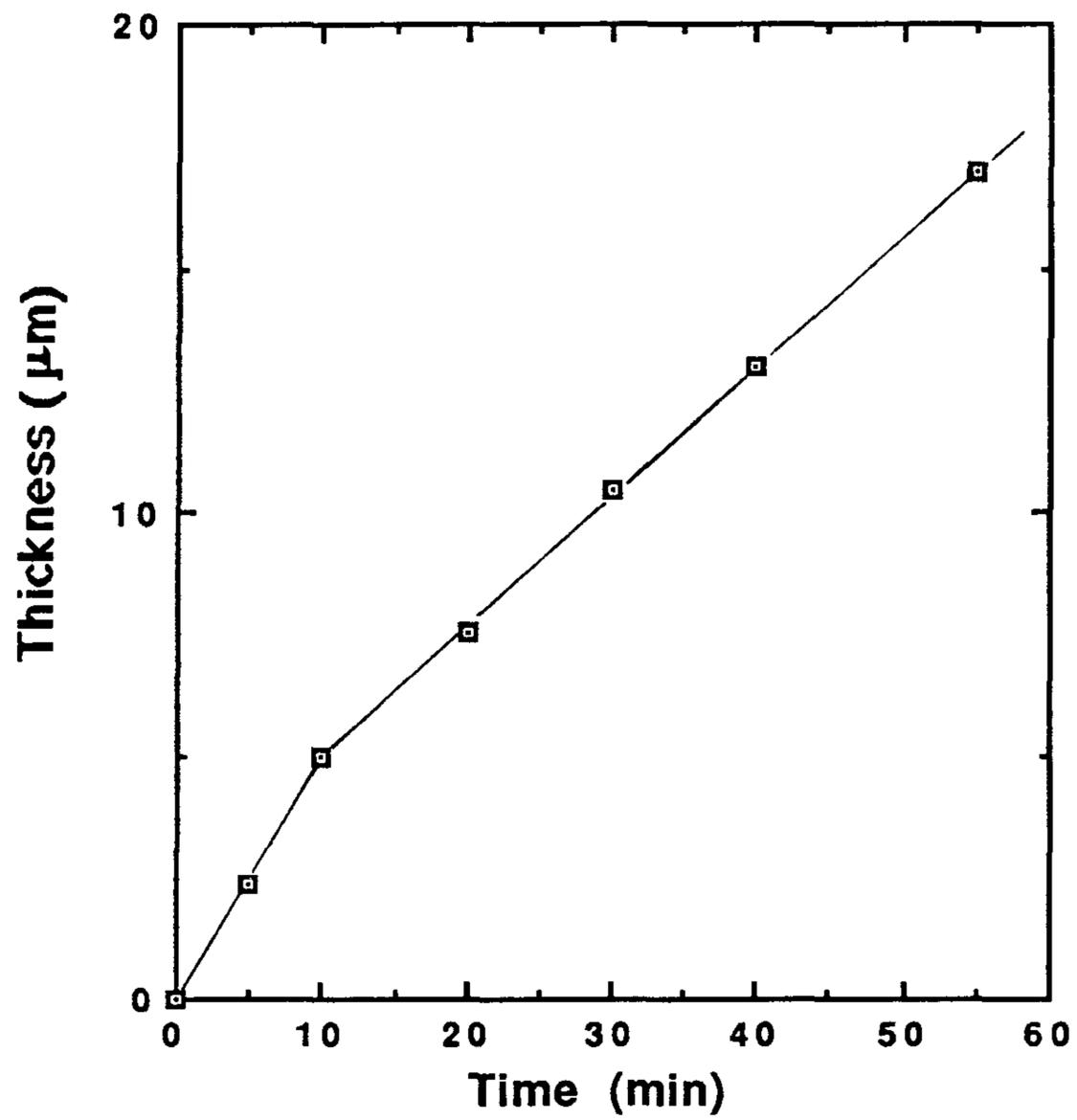


Fig. 2-7 무전해 도금시간과 도금층 두께의 관계.

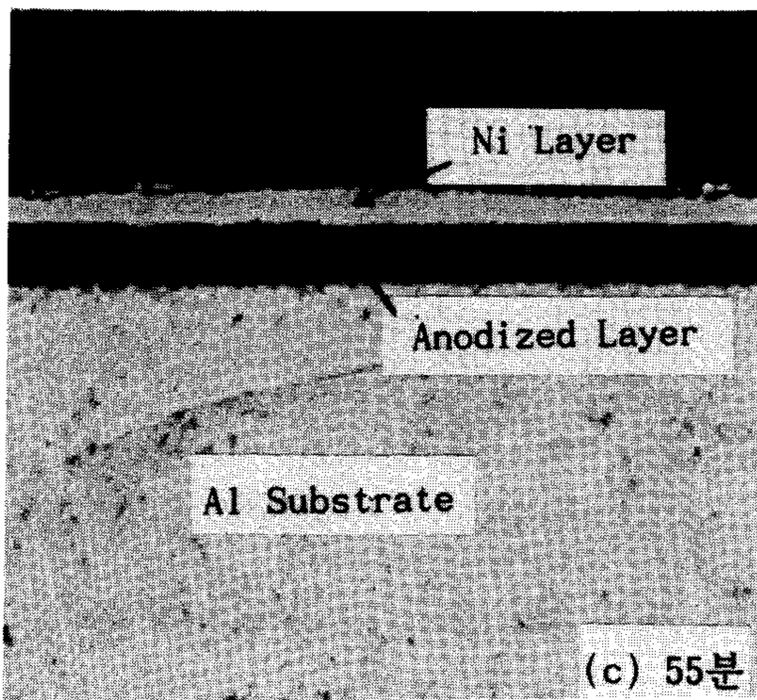
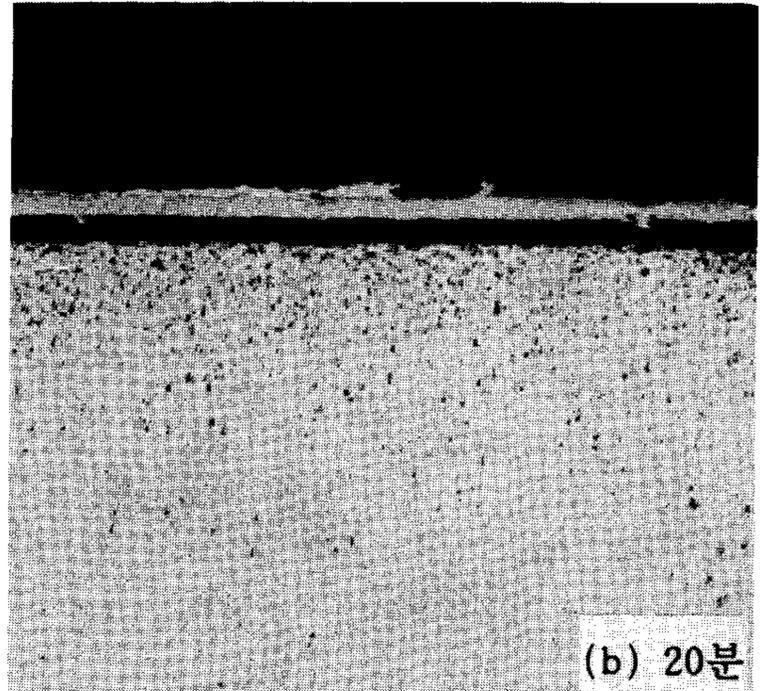
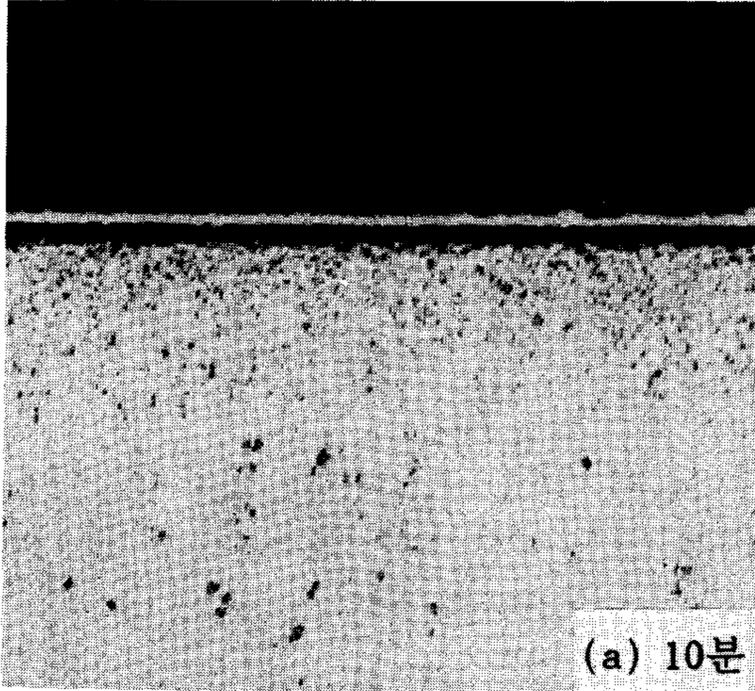


Photo.1 무전해 Ni 도금층의  
단면사진 (X200)

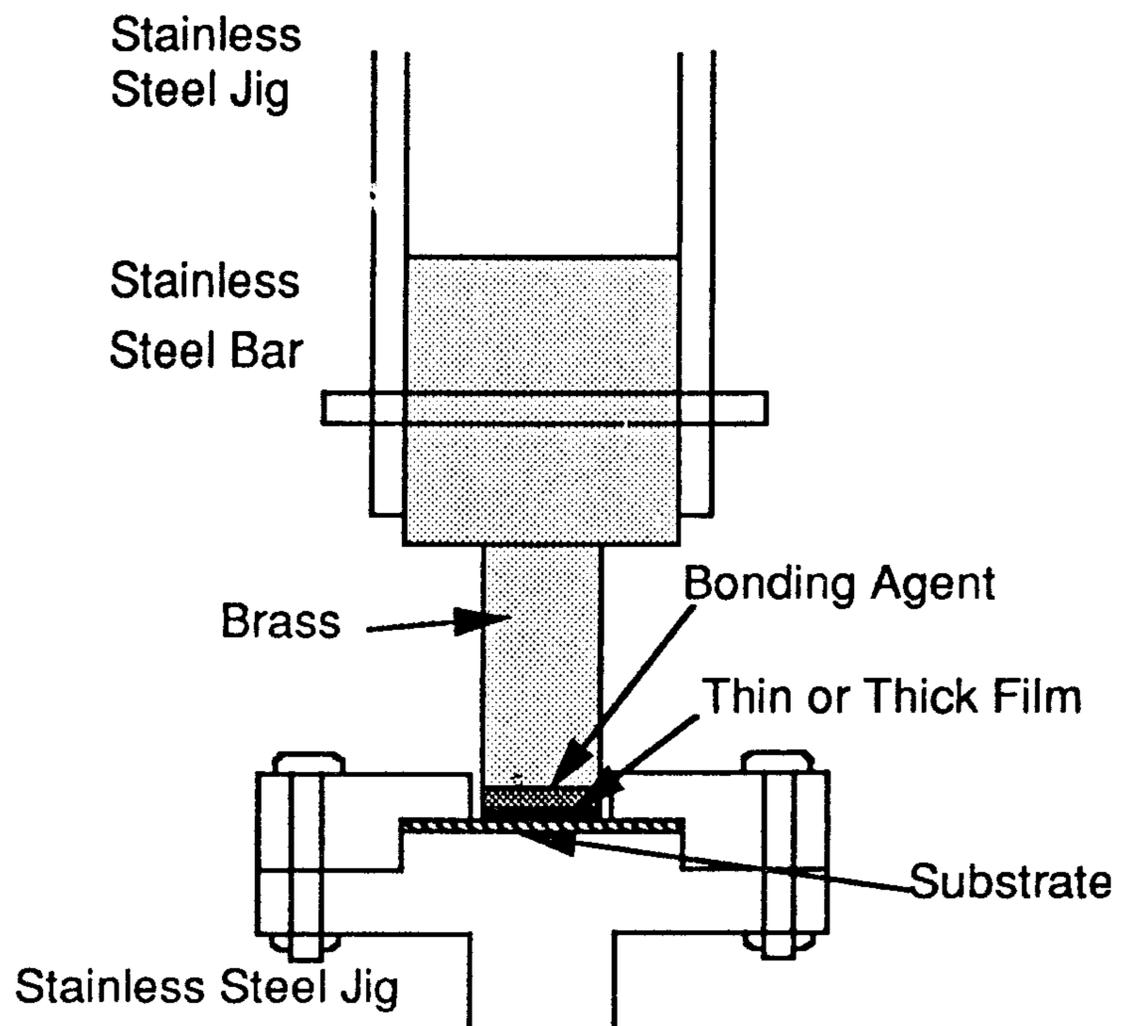


Fig. 2-8 Pull-off test용 jig의 개략도.

#### 제 4 절 Cu 전극형성 및 전극 pattern 형성 방법

Cu전극을 형성시키는 방법으로는 (1) Metallizing된 기판위에 Cu를 얇게 전해도금한 뒤 patterning하여 일정한 크기의 Cu tab을 solderling하는 방법, (2) metallizing된 기판위에 Cu판을 soldering한 후 patterning하는 방법, (3) metallizing된 기판위에 Cu를 전해도금한후 patterning하는 방법을 들수 있다. Pattern을 형성시키기 위해서는 masking 작업과 etching 작업을 거쳐야 하는데 방법 (2)를 선택하는 경우에는 etching시 Ni과 Cu외에 solder의 etching을 고려해야 한다. Ni과 Cu는 동일한  $FeCl_3$  용액에서 etching이 가능하나 Pb-Sn계 solder는  $FeCl_3$  용액으로는 etching이 어려워 또 다른 etching액을 사용해야 하는 단점이 있어 본 연구에서는 방법 (1)과 (3)을 선택하여 pattern 형성법에 대해 조사하였다.

##### 4-1. 전해도금법에 의한 Cu 후막 생성

P-N 소자의 접합전극으로 사용되는 Cu를 Ni metallized layer의 표면에 생성시키기 위해 전해도금법을 이용하였다. 전해도금에 사용한 장치의 개략은 Fig. 2-9와 같으며 전해액 조성은  $CuSO_4$  200 g/l,  $H_2SO_4$  60 g/l였으며 욕온은 20 - 25°C였다. 음극전류밀도는 30 - 50 mA/cm<sup>2</sup>의 조건이었으며 15 - 20분의 전해실험에 의해 10  $\mu m$  정도의 Cu 후막을 150분의 전해실험에 의해 120 - 150 $\mu m$ 의 Cu 후막을 생성시킬 수 있었다.

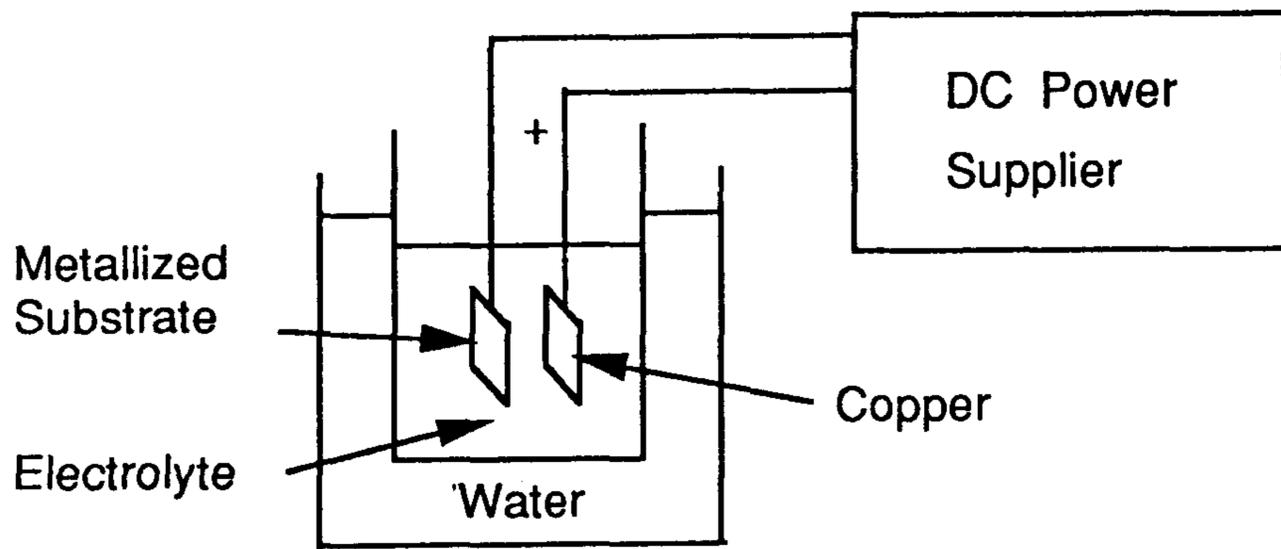


Fig. 2-9 Experimental apparatus for copper electroplating.

#### 4-2. 전극 pattern 형성 방법

대표적인 pattern 형성법으로는 (1) photolithography법과 (2)screen printing법이 있으며 방법 (1)은 pattern의 해상도 및 치수조절능은 뛰어나나 공정이 복잡하고 방법 (2)는 정도는 떨어지나 공정은 간단한 특성이 있다. 본 연구의 경우 pattern의 정도는 중요한 변수가 아니므로 방법 (2)를 선택하였다. 그러나 방법 (2)의 경우 masking 물질로 ink를 사용하는데 이 경우에는 etching후 ink를 제거하기 위한 기계연마작업이 추가되므로 불편한 단점이 있어 본 연구에서는 masking물질로 enamel을 선택하여 etching후 masking 물질을 acetone으로 제거하는 방법으로 ink printing법의 단점을 개선하였다. 실험방법의 개략도를 Fig. 2-10에 나타내었다. 이때 사용한 부식액은  $\text{FeCl}_3$  300 g/l 용액이었다. Ni 무전해도금층에 Cu를 120 - 150  $\mu\text{m}$ 의 두께로 전해도금한 기판을 patterning 하는 경우(방법

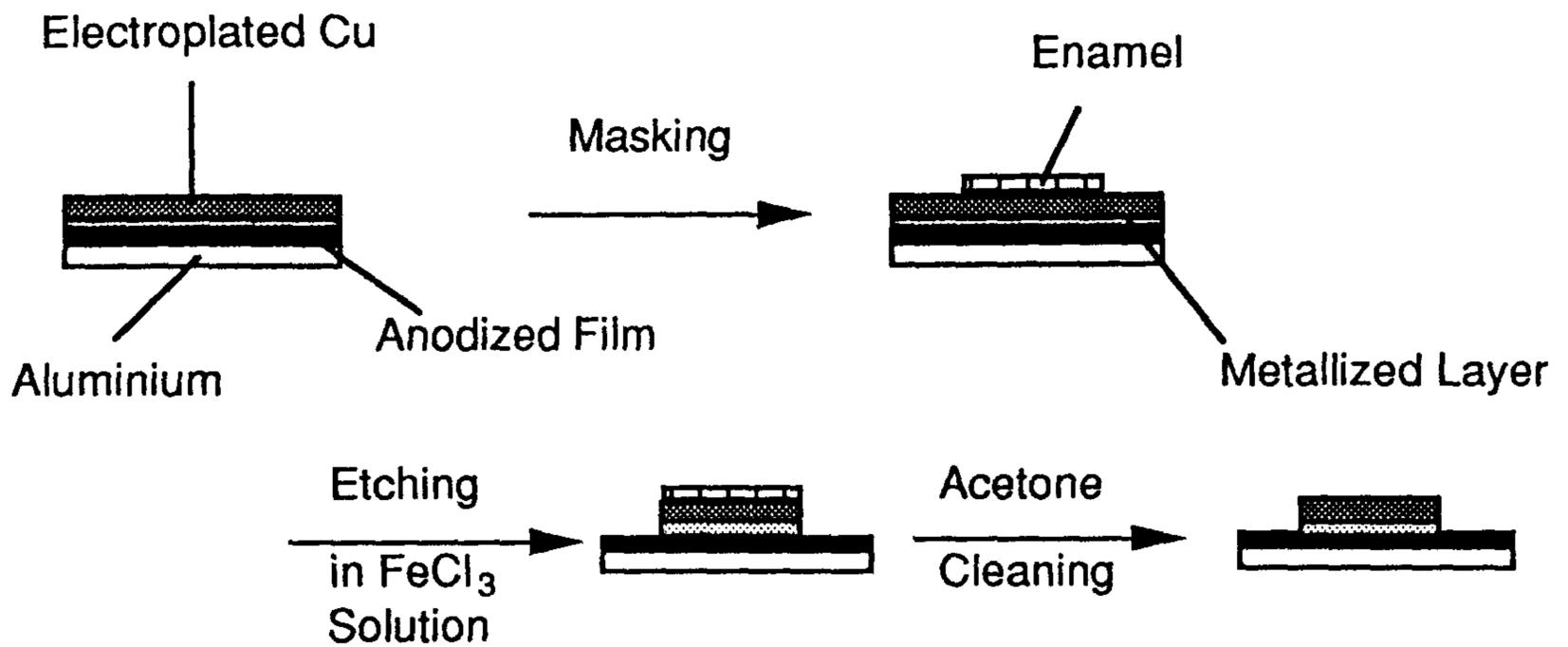


Fig. 2-10 Procedure of patterning.

(3)) Cu의 두께가 너무 두꺼워 etching시 pattern 형상이 변화하거나 무전해도금층과 양극산화처리된 기판의 접착부위가 떨어지는 등의 문제가 발생한다.

Fig. 2-11에 이 원인을 알아보기 위해 etching 경로를 개략적으로 나타내었는데 Fig. 2-11를 살펴보면 etching 초기에는 기판에 수직방향으로 etching이 진행되다가 어느 정도 진행되게 되면 Cu층의 가장자리 부근이 침식되기 시작한다. 이때 부터 Cu tab의 형상이 변화되기 시작하여 Cu층의 etching이 완료되면 형상이 완전히 변하게 된다. 한편 Cu층의 두께가 전체적으로 균일하지 않은 경우에는 masking 부근의 가장자리 부근은 Cu의 etching이 완료되었는데 masking사이의 간극에는 Cu가 남아 있게 된다.(Fig. 2-11(d)). 이때는 가장자리 부근의 Ni이 침식되기 시작하고 masking 사이의 Cu와 Ni의 침식이 완료될 때가 되면 masking하의 Ni의 침식

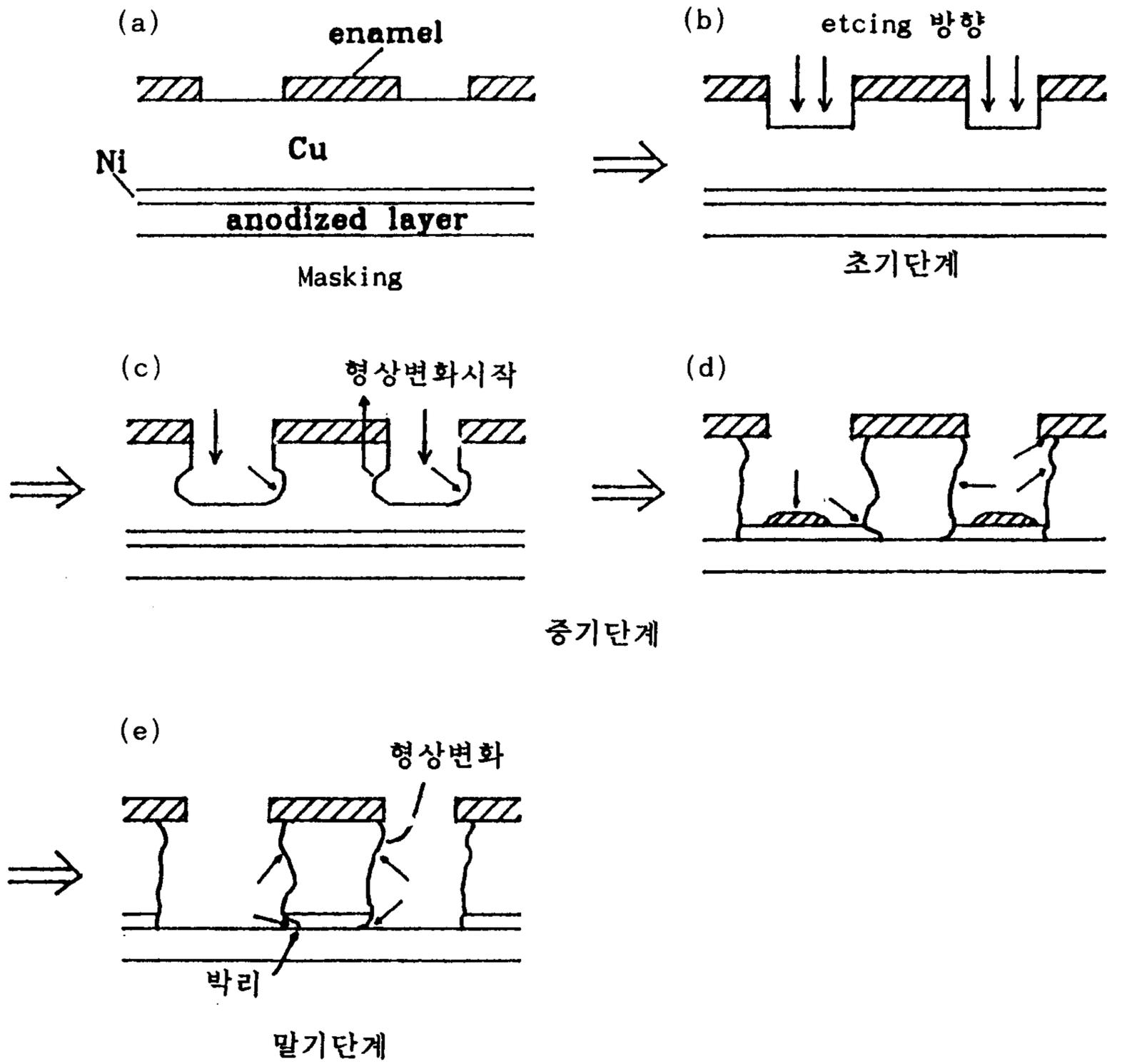


Fig. 2-11 Etching 진행과정의 모식도

이 상당부분 진행하게 되어 etching이 완료된 후에는 전극 tab이 anodized layer로 부터 분리되게 된다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해서는 Cu층의 두께가 얇을 것이 요구된다. 이런 관점에서 보면 Cu를 10 $\mu$ m정도 전해도금한 후 patterning하고 그 위에 일정 크기의 Cu tab을 soldering하는 방법 (1)이 적절하다고 판단되며 이 방법에 의해 형성된 전극 pattern을 Fig. 2-12에 나타내었다. 이때 사용된 solder는 Cu전극과 열전소자를 soldering할 때 사용할 Bi-Sn계 용점 139°C의 solder 사용시 Cu 전극 부위가 고체상태로 고정되도록 용점 189°C의 Pb-Sn계였다.

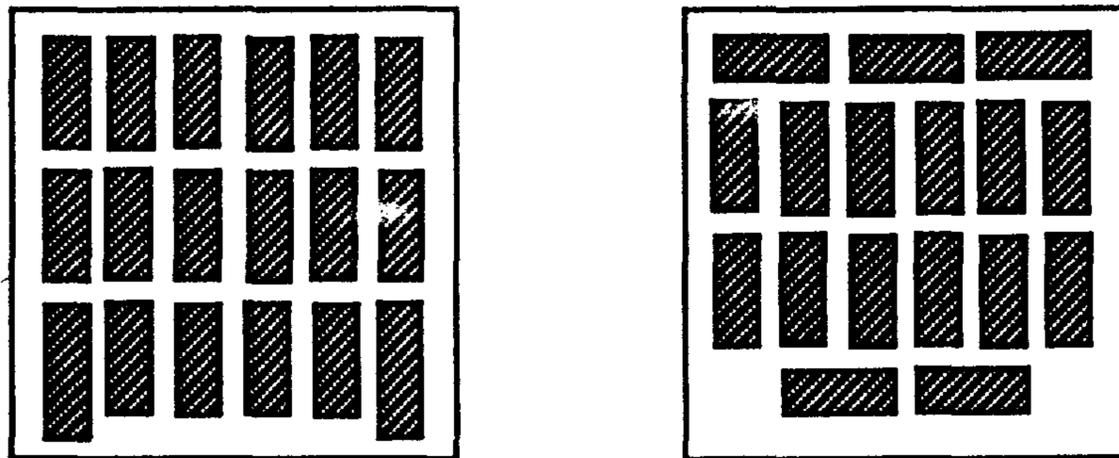


Fig. 2-12 Copper electrode tabs produced by enamel screen printing.

## 제 5 절 열전소자의 P-N접합 및 전극접합 방법

### 5-1. 열전소자의 표면처리

$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 계 열전소자와 Cu 전극을 직접 soldering하는 경우  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 계 열전소자내로의 Cu의 확산속도가 상당히 빨라 일정시간이 경과되고 나면 Cu가 소자내로 고용되어 소자의 열전특성을 변화시키므로 Cu의 확산방지층이 필요하다. 일반적으로 Ni이 Cu의 확산방지층으로 사용되는 데 Ni층을 어느 쪽에 형성시켜 주느냐에 따라 후처리 방법이 달라진다. Cu전극위에 Ni층을 형성하는 경우에는 Ni층과 열전소자를 soldering 해주어야 하는데 이때에는 소자 자체가 일반적인 solder에는 wetability가 나쁘기 때문에 Bi-Sn계 solder를 써야하고 부가하여 까다로운 표면세척기술이 요구되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 소자쪽에 Ni 확산방지층을 전해도금에 의해 형성시키는 방법을 선택하였다. 이 경우 Ni은 wetability가 좋기 때문에 solder 물질에 제약을 받지 않는 장점이 있다.

Fig. 2-13은 열전소자에 Ni을 전해도금하기에 앞서 열전소자의 표면을 세척하는 과정을 간략하게 나타낸 것이다. 질산-염산의 혼산에서 처리 후 농황산에서 재산세를 해주는 이유는 질산-염산의 혼산처리시 Te는  $\text{TeO}$ 로 되어 용해·제거되지 않으므로  $\text{TeO}$ 를  $\text{TeSO}_4$ 로 만들어 제거하고자 하기 때문이며 그후 빙초산용액에서 세척하는 이유는 산세 후 증류수로 직접세척할 때 표면에 남아 있는 Sb와 Bi 이온은 쉽게 수화되어 표면에 고착되기 때문이다. 산세후의 전해연마는 53%  $\text{H}_2\text{O}$  - 38% glycerol - 5% NaOH - 4% tartaric acid 용액에서 10V 정전압 조건에서 20초간 수차례 반복하여 행하였다. Photo 2에는 소자의 cutting후, 산세처리후, 전해연마후의 광학사진을 나타내었다. Photo 2(a)는 cutting 직후 acetone 용매를 사용하여 초음파세척

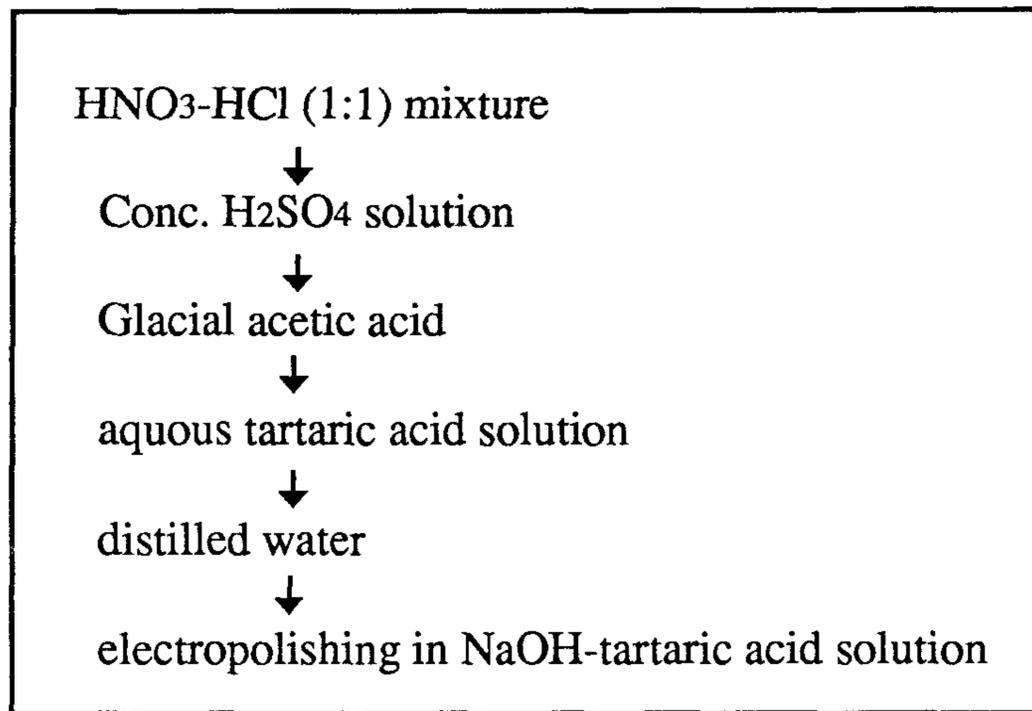


Fig. 2-13 열전소자의 세척법

을 한 후의 소자표면의 광학사진인 데 Photo 2(a)를 살펴 보면 다이아몬드 wheel 자국이 소자표면에 남아 있음을 알수 있고 이러한 표면 상태위에 Ni 을 전해도금하면 소자와 전해도금층의 접착력이 상당히 약할 것이 예측된다. 실제 Ni을 도금한 후 4 x 4 x 4 mm크기로 소자를 짜를 때 소자와 Ni 도금층과의 접착력이 나빠 전해도금층이 박리되는 현상이 관측되었다. Photo 2(b)는 산세후의 표면사진을 및 (c)는 전해연마후의 표면사진을 나타낸 것인 데 (b)의 경우 다이아몬드 wheel의 자국이 조금 남아 있으나 전체적으로 표면이 매끈해져 있고 (c)의 경우에는 깨끗한 표면을 나타내는 것을 알수 있다. 이로부터 전해연마후의 도금층의 접착력은 우수할 것이 예상되어 본 연구에서는 상기한 바와 같이 전해연마 까지 표면세척을 행한 후 Ni 을 전해도금하였다.

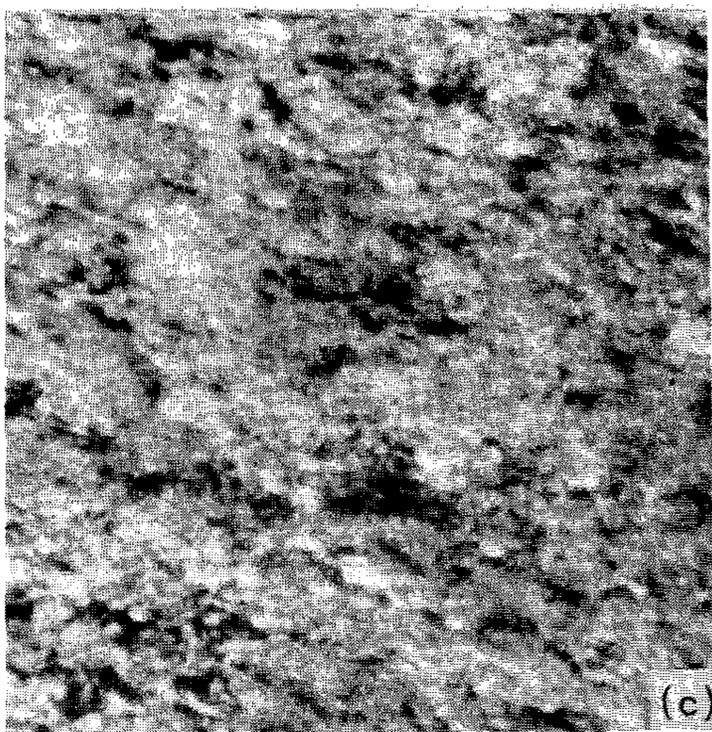
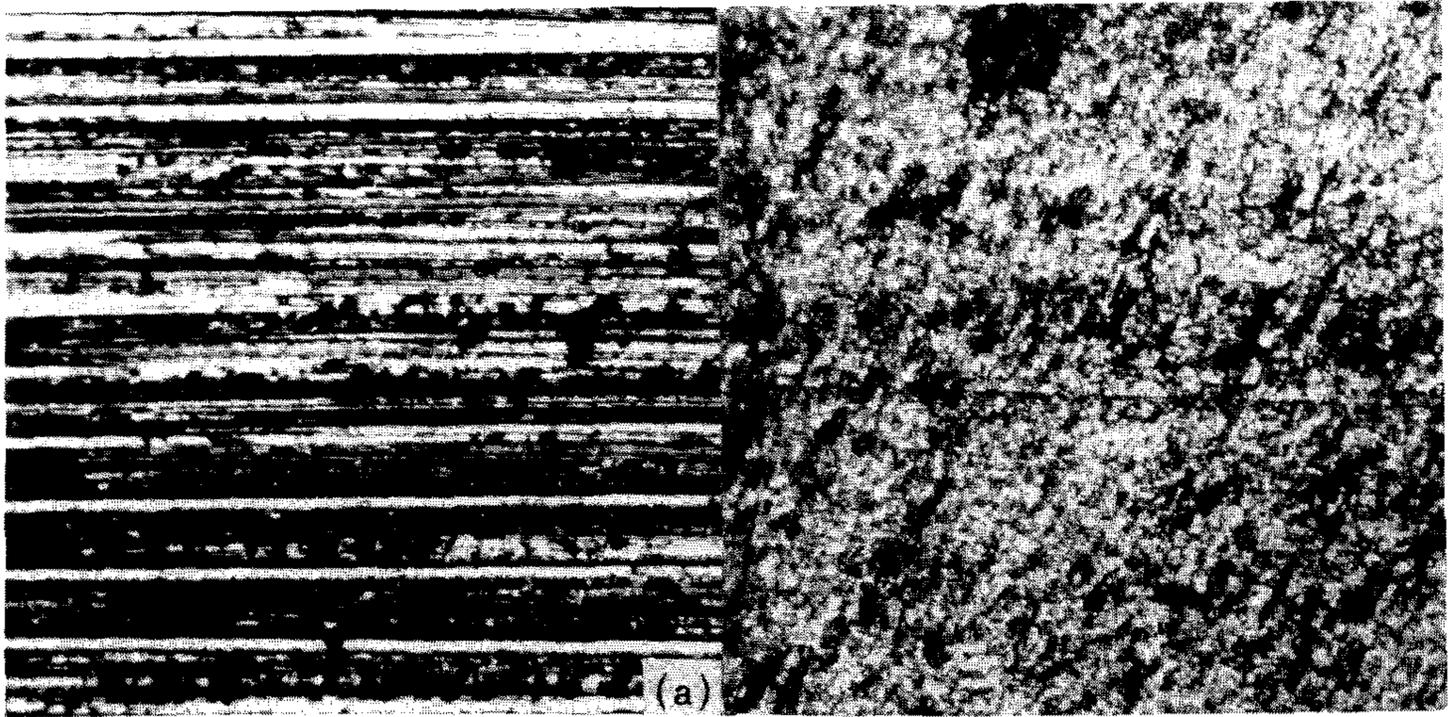


Photo 2 소자표면 사진 (x 200) :

(a) cutting 후

(b) 산세 후

(c) 전해연마 후

Ni의 전해도금은 통상의 Watts용액을 사용하였으며  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  240 g/l -  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  45 g/l -  $\text{H}_3\text{BO}_3$  30 g/l 용액을 이용하여  $48 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 33 - 35 mA/cm<sup>2</sup>의 음극전류밀도의 조건에서 행하였다. 이때 사용된 장치의 개략도를 Fig. 2-14에 나타내었다.

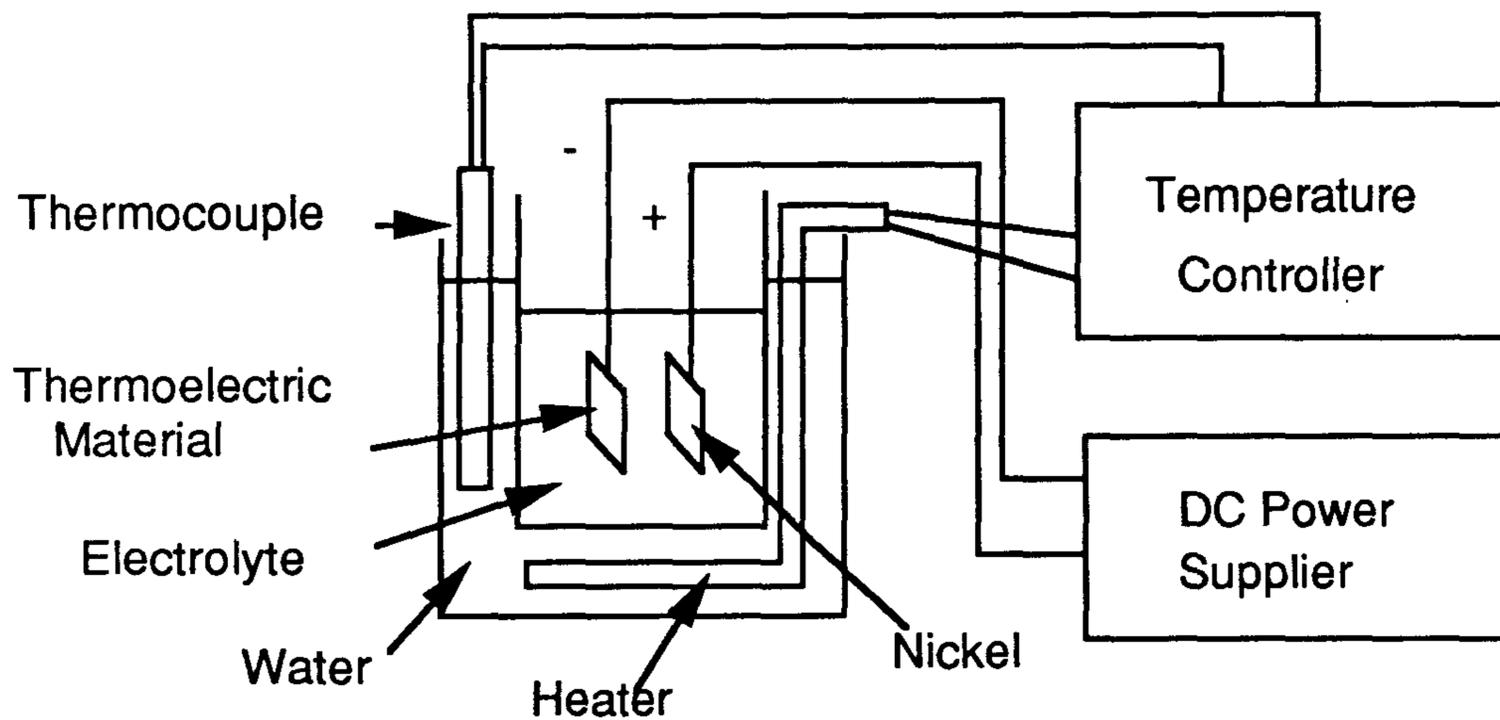


Fig. 2-14 Ni 전해도금장치의 개략도

## 5-2. 접합전극의 접촉저항

소자를 제외한 나머지 부분에서의 저항이 0으로 되는 것이 가장 이상적이나 실제로는 이종재료의 접합부에서 접촉저항이 발생한다. 접촉저항이 전체저항에서 차지하는 비율이 증가할수록 고온단과 저온단간의 열저항이 증가하게 되어 성적계수가 감소하므로 접촉저항은 모듈제조시 중요변수로 된다. 전해도금된 Ni과 소자간의 접촉저항은 Fig. 2-15와 같이 회로를 구성하고 거리에 따른 저항값을 측정하여 측정된 저항값을 거리가 0일 때의 값으로 외삽하면 구해질 수 있으며 그때의 접촉저항은  $5.4 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2$ 였다.

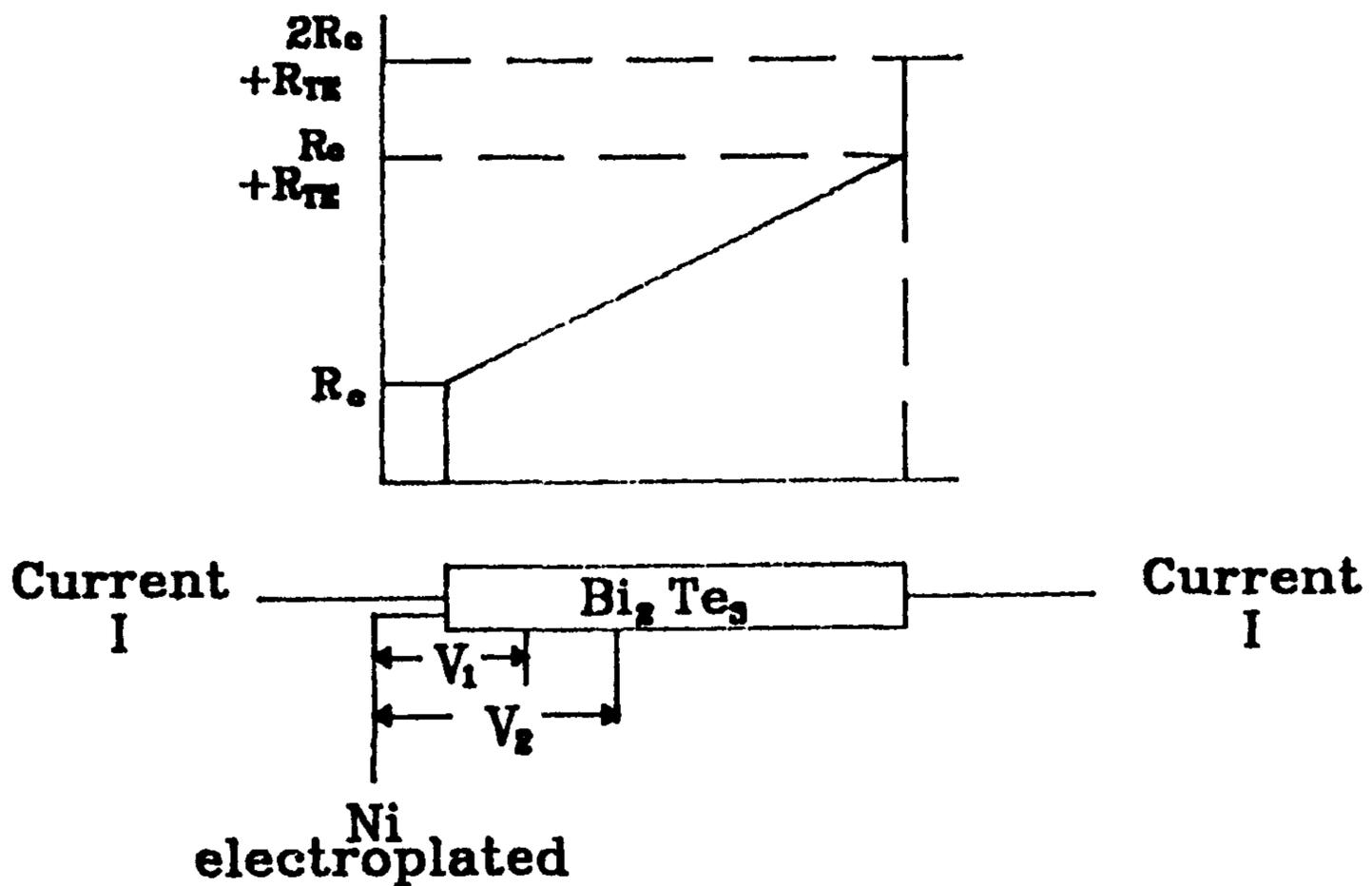


Fig. 2-15 접촉저항의 측정 방법.

## 제 6 절 열전모듈의 시제품제조 및 성능 평가

### 6-1. 열전모듈 제조공정

열전모듈의 제조공정은 제1절 - 제5절에서 기술한 바와 같이 Al 기판의 양극산화에서 부터 기판에 Cu 전극을 patterning하는 기판 처리과정이 완료 되면 전극기판 사이에 열전재료를 P-N-P- 배열이 되도록 정렬한 후 soldering에 의해 접합시켜 완료된다. 본 연구에서 실시한 제조공정도를 Fig. 2-16에 나타내었다. 열전소자는 Bridgman technique에 의해 실험실에서 성장시킨 직경 20 mm $\phi$ 의 잉고트를 4 x 4 x 4 mm의 크기로 절단하여 사용하였다. 전술한 바와 같이 잉고트는 slicing하여 양면에 확산방지층으로서 Ni 을 전해도금한 후 이를 4 x 4 mm<sup>2</sup>의 단면으로 dicing 하였으며 P-N 소자대의 수는 17쌍으로 하였다. 열전소자의 조성과 물성치는 표 2-2과 같다.

표 2-2. 열전소자의 조성과 물성치

	P 형 재 료	N 형 재 료
조 성	Bi <sub>0.5</sub> Sb <sub>1.5</sub> Te <sub>2.85</sub> Se <sub>0.15</sub> + 3% Te excess	Bi <sub>2.0</sub> Te <sub>2.55</sub> Se <sub>0.45</sub> + CuBr doped
열기전력 ( $\alpha$ )	178 [ $\mu$ V/K]	-190 [ $\mu$ V/K]
전기비저항( $\rho$ )	0.95 [m $\Omega$ ·m]	0.91 [m $\Omega$ ·m]
열전도도 ( $\kappa$ )	1.45x10 <sup>-2</sup> [W/m <sup>o</sup> C]	1.60x10 <sup>-2</sup> [W/m <sup>o</sup> C]
성능지수 (Z*)	2.3x10 <sup>-3</sup> [K <sup>-1</sup> ]	2.5x10 <sup>-3</sup> [K <sup>-1</sup> ]

$$* Z = \alpha^2 / \rho \cdot \kappa$$

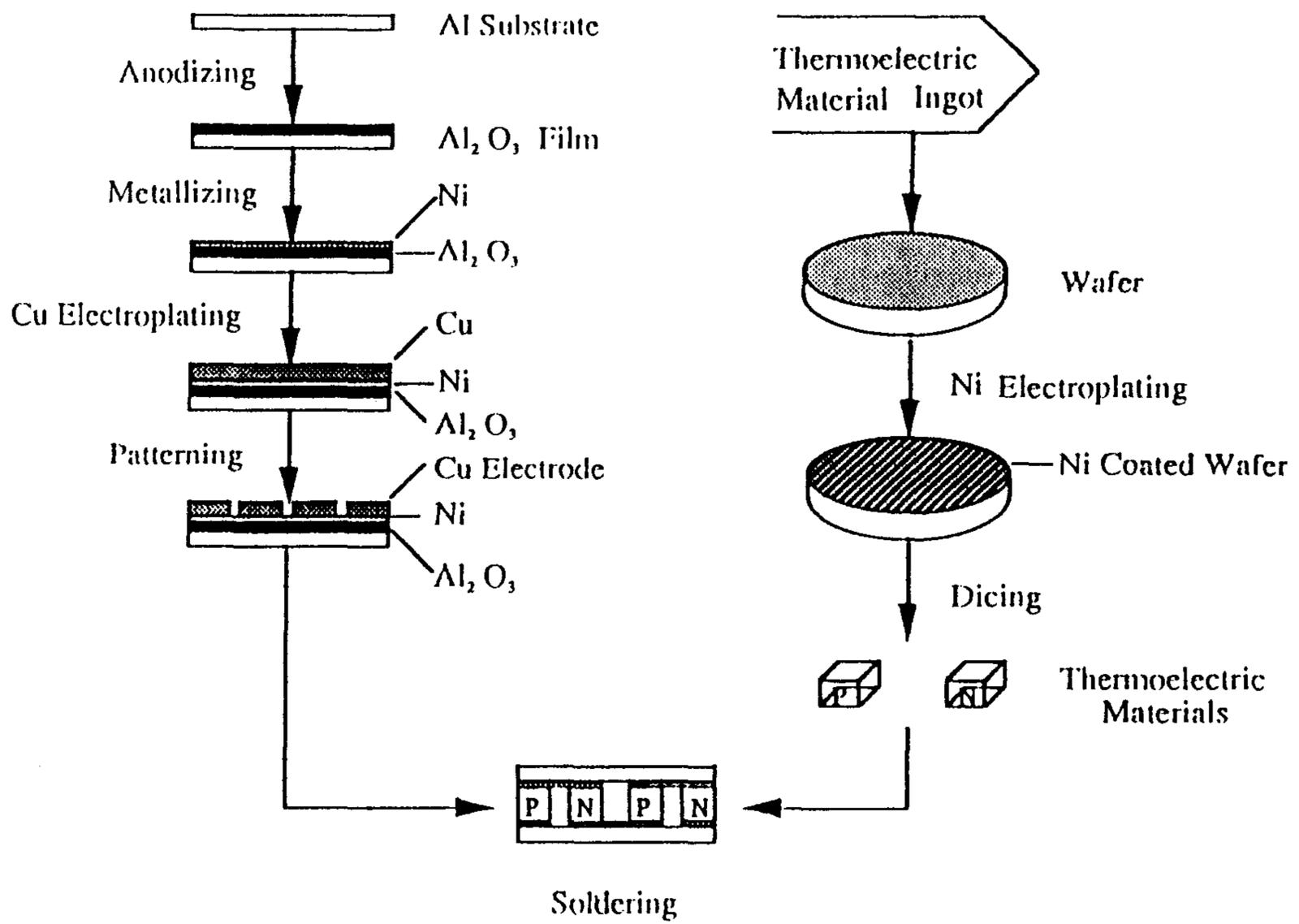


Fig. 2-16 Thermomodule manufacturing process.

열전모듈의 조립에는 여러가지 방식이 제안되고 있으나(2)-(5) 본 연구에서는 Fig. 2-17과 같은 조립용 치구를 제작하여 복수개의 열전소자를 동시에 접합하였다. 즉, 전극기판의 전극부위에 solder cream을 바른 후 치구의 base plate 저면에 정치한다. 다음에 cellular jig를 base plate에 끼우고 격자공간에 열전소자를 P-N-P-N- 순으로 삽입한 후 upper plate를 base plate에 맞추고 상부의 전극기판을 삽입한다. 전극기판의 삽입후에는 상부에 Cu block을 끼워 가볍게 압력을 가하는 상태에서 치구 unit을 soldering 온도로 유지된 노내에 장입한다. Soldering cream은 용점이 139°C인 57% Bi - 43% Sn 조성을 사용하였으며 150°C로 유지된 노내에 1 - 2분 정치시킴으로서 완료된다. Soldering이 완료되면 냉각 후 조립용 치구를 분해하여 열전모듈을 회수한다. 열전모듈은 trichloroethylene으로 초음파 세척하여 접합부 주위의 flux를 제거함으로써 모듈제조는 완료된다. 조립용치구는 열전도성을 고려하여 동을 사용하였는데 solder cream이 cellular jig에 용착하여 치구의 분해가 곤란한 경우가 있으므로 조립용치구의 재질에 대하여는 solder cream에 용착되지 않는 재료를 사용하는 것이 바람직하다. 그리고 전극기판의 전극 크기, cellular jig의 공간 간격, 열전소자의 크기는 공히 정합성을 유지할수 있도록 칫수조정의 정밀도에 주의를 요한다.

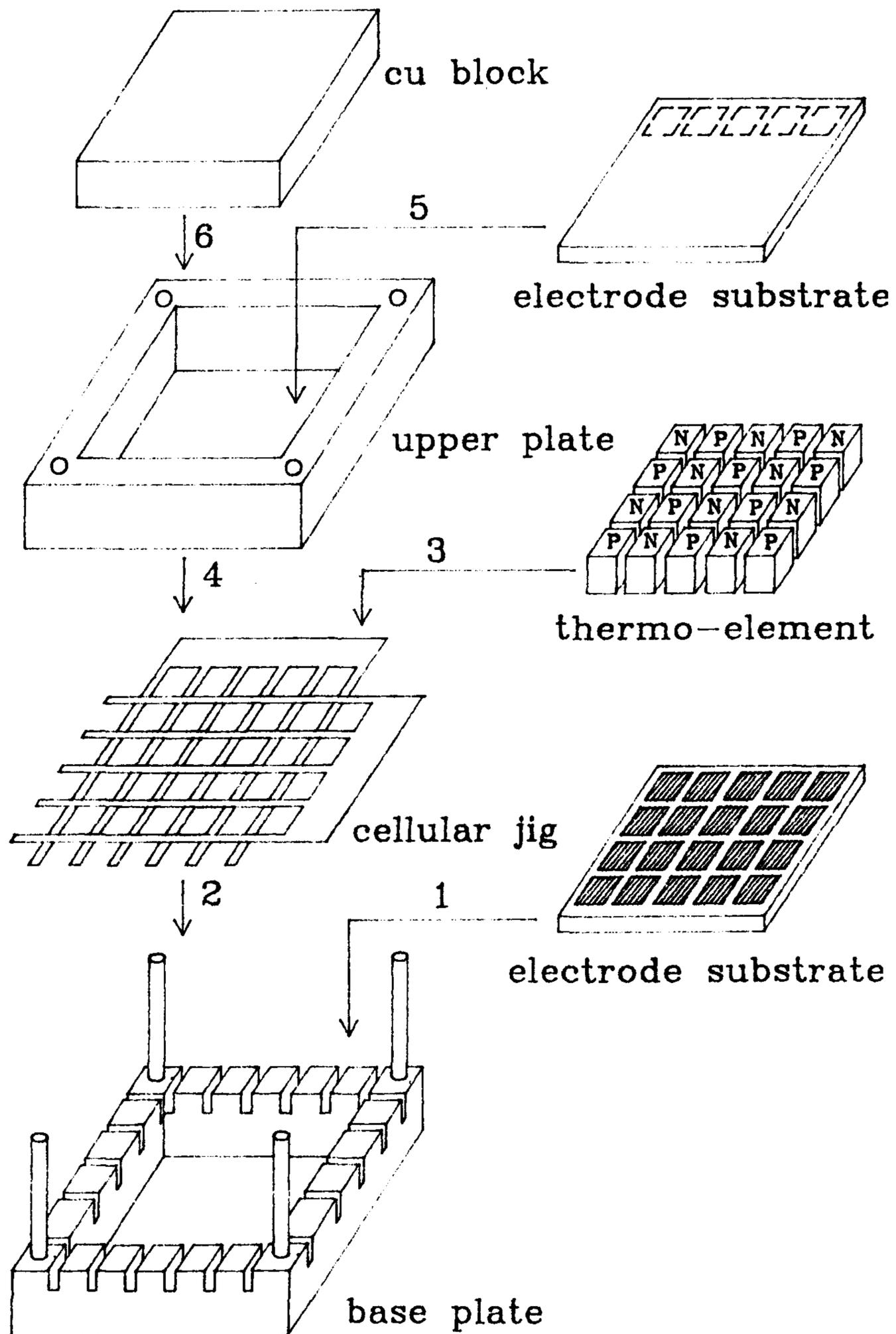


Fig. 2-17 Thermomodule 조립용 jig.

## 6-2. 시제품 열전모듈의 최대 parameter와 특성도

열전모듈의 냉각성능은 모듈을 구성하는 열전소자의 물성, 소자대의 수, 소자의 촌법에 따라 달라지기 때문에 모듈의 성능을 평가하는 특성치로서 최대 parameter가 사용된다. 최대 parameter로는 최대흡열량( $Q_{CM}$ ), 최대 온도차( $\Delta T_{max}$ ), 최대전류( $I_{CM}$ ), 최대단자전압( $V_{CM}$ )등이 있으며 이 값에는 열전소자의 촌법이나 소자대의 수가 포함되어 있으므로 모듈의 규격을 표시하는 특성치로서 이용하면 실용적으로 매우 편리하다. 최대 parameter의 산출방법은 열전냉각의 기초식<sup>6,7)</sup>으로 부터 도출되며 이에 대하여는 전년도 보고서<sup>8)</sup>에서도 상세히 다루었으므로 그 결과식만 표시하면 다음과 같다.

### (1) 최대전류( $I_{CM}$ ) :

열전소자의 양단간의 온도차,  $\Delta T_{max}$ 가 최대로 되는 전류

$$I_{CM} \cdot \gamma = (\kappa/\alpha) \cdot (M - 1), \quad M = (1 + 2 \cdot Z \cdot T_H)^{1/2} \quad (2-3)$$

$\gamma$  : 열전소자의 단면적과 길이의 비 (=L/A)

$\kappa$  : 열전소자의 열전도도 [W/cmK]

$\alpha$  : 열전소자의 Seebeck coeff. (=  $\alpha_P + \alpha_N$ ) [ $\mu V/K$ ]

Z : P-N 소자대의 성능지수

### (2) 최대온도차 ( $\Delta T_{max}$ ) :

열전소자의 저온접합부가 열의 유입이 없는 단열상태에서 소자양단간의 온도차

$$\Delta T_{\max} = T_H - \left( \frac{M - 1}{Z} \right) \quad (2-4)$$

(3) 최대흡열량 ( $Q_{CM}$ ) :

소자양단간의 온도차  $\Delta T = 0$  에서 전류  $I=I_{CM}$ 에서 소자의 저온단에서 흡열하는 열량

$$Q_{CM}(\gamma/N) = \kappa (M - 1) \left( T_H - \frac{M - 1}{2Z} \right) \quad (2-5)$$

$N$  : P-N 소자대의 수

(4) 최대단자전압 ( $V_{CM}$ ) :

$I=I_{CM}$ 에서 직류전원의 단자전압

$$V_{CM}/N = \alpha \cdot T_H \quad (2-6)$$

본 연구에서 제조한 시제품 모듈의  $\gamma$ 값은  $0.25 \text{ mm}^{-1}$ 이고  $N=17$ 이므로 표 2-2의 물성치를 이용하여 고온단의 온도  $T_H = 300 \text{ K}$ 에서 최대 parameter를 계산하면 표 2-3와 같다. 표 2-3에는 범용모듈로 시판되고 있는 일본의 Komatsu electronics co. 및 미국의 MELCOR제품과 특성치를 비교하였는데 본 시제품의 최대 parameter 값은 외국의 실용모듈과 거의 대등한 수준임을 알 수 있다.

표 2-3 열전모듈의 시제품의 최대 parameters

$T_H = 300 \text{ K}$

최대 Parameters	본연구 시제품	일본 Komatsu제품	미국MELCOR 제품
$Q_{CM} \cdot \gamma / N \text{ [W/cm]}$	3.12	2.87	3.72
$I_{CM} \cdot \gamma \text{ [Amp/cm]}$	46.4	40.5	50.0
$V_{CM} / N$ [Volts/pair]	0.11	0.116	0.114
$\Delta T_{max} \text{ [K]}$	65.6	65 - 70	73.2

Fig. 2-18과 Fig. 2-19는 고온단의 온도  $T_H$ 를 parameter로 하여  $\Delta T_{max}$ 과  $Z$ 의 관계 및 최저도달온도  $T_C$  및  $Z$ 의 관계를 도식한 것인데 열전소자의 성능지수  $Z$ 가 클수록  $\Delta T_{max}$ 은 커지며  $T_H$ 가 낮을수록  $T_C$ 도 낮아진다. 따라서 냉각온도를 가급적 낮추기 위해서는 열전모듈의 고온단의 발열상태가 중요한 요인임을 알수 있다. 한편 열전모듈의 저온단에서 흡수되는 흡열량 ( $Q_c$ )과 냉각효율( $\phi$ )은 각각 다음식으로 표시된다.

$$Q_c = N \alpha T_c I - RI^2/2 - K (T_H - T_c) \quad (2-7)$$

$$\phi = Q_c / P \quad (2-8)$$

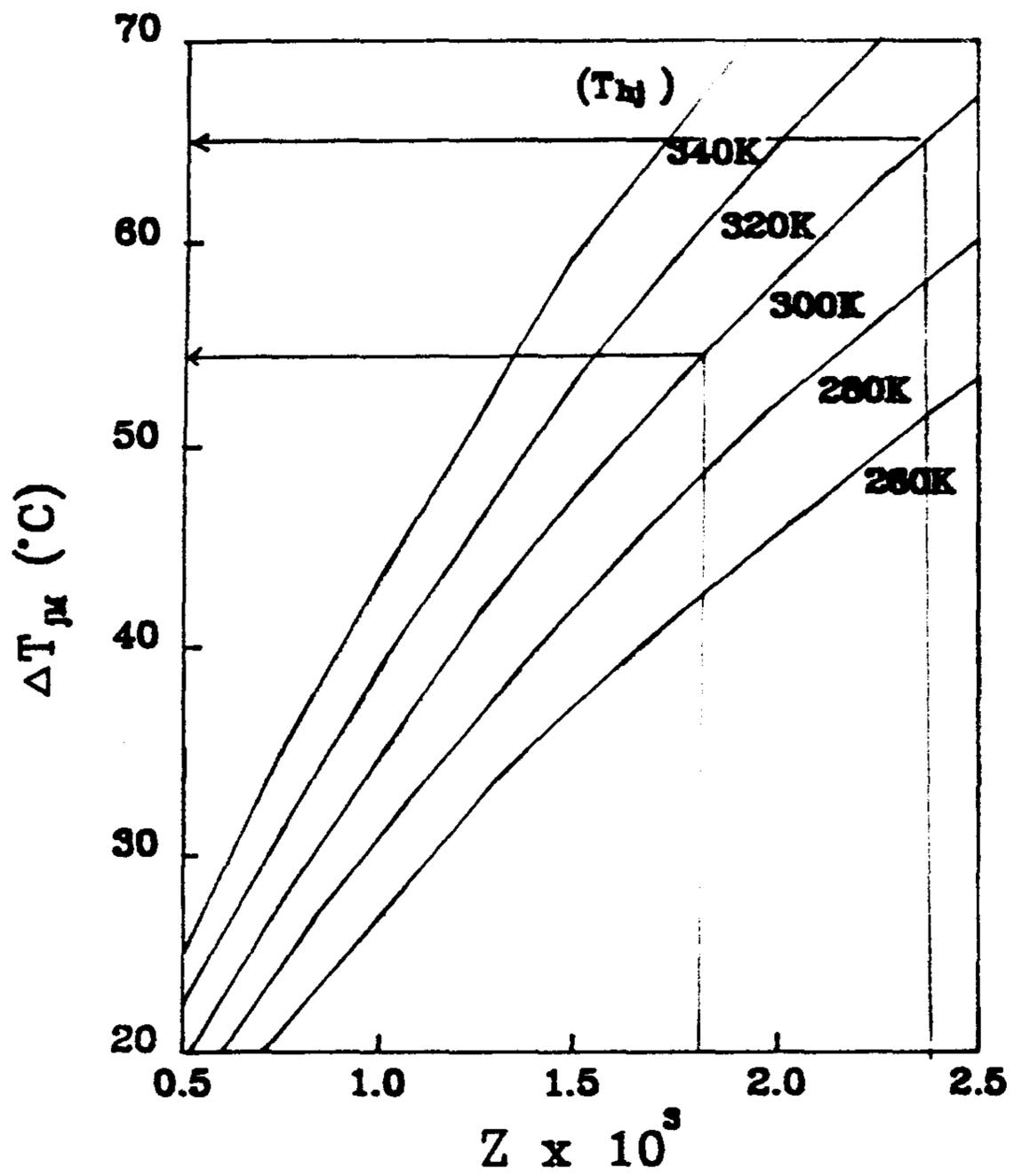


Fig. 2-18 Variations of maximum temperature difference according to figure of merit.

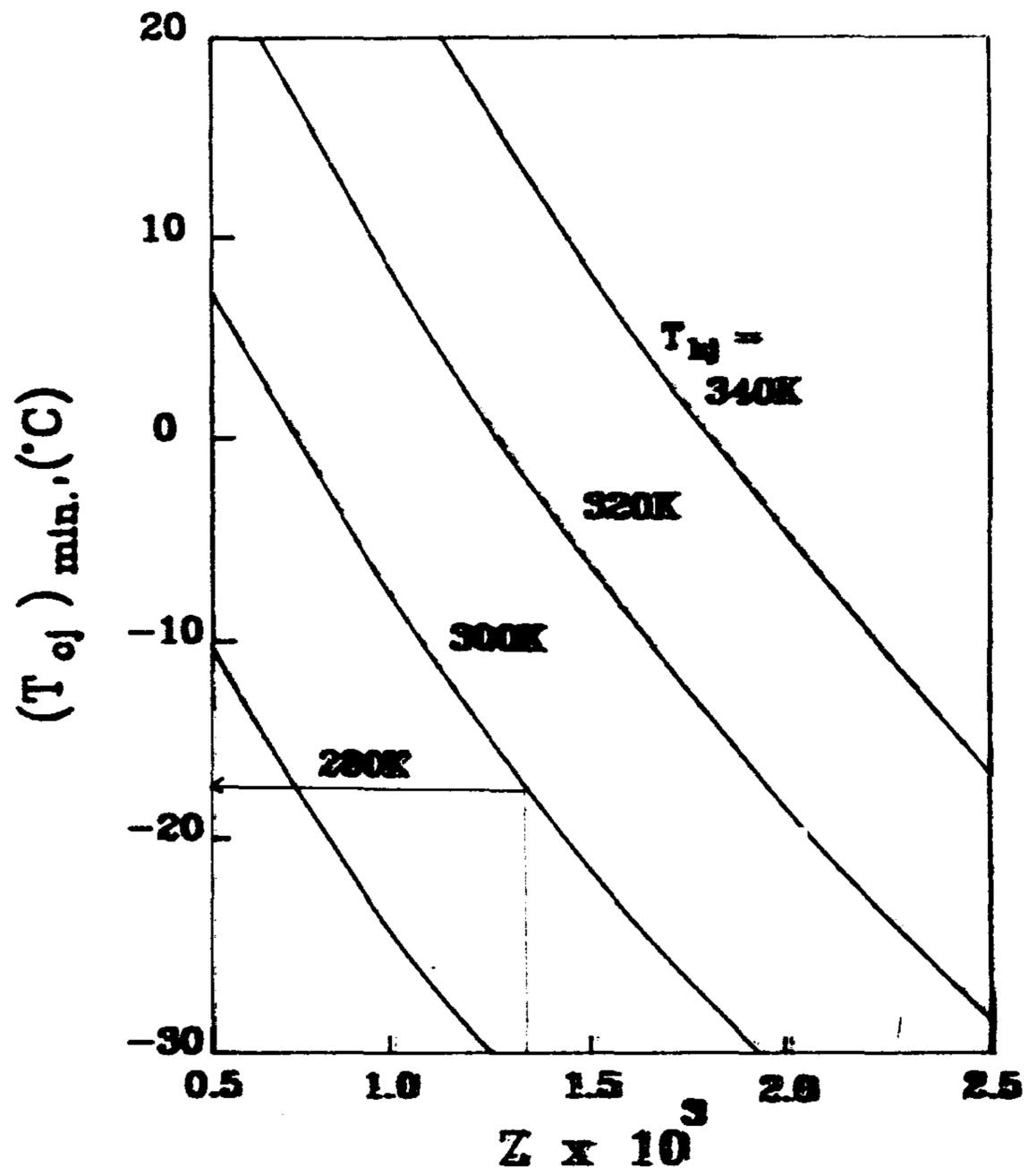


Fig. 2-19 Variations of minimum temperature according to figure of merit.

여기에서 R과 K는 열전소자의 total electric resistance 및 total thermal conductivity 이며 이때 P는 열전모듈에 공급된 전력으로서 이들은 각각 다음식으로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 R &= R_P + R_N = N \cdot \gamma (\rho_P + \rho_N) \\
 K &= K_P + K_N = \frac{N}{\gamma} (\kappa_P + \kappa_N) \\
 P &= V \cdot I = (N \cdot \alpha \cdot \Delta T + R \cdot I) \cdot I
 \end{aligned}
 \tag{2-9}$$

상기의 (2-7)식 - (2-9)식으로 부터  $T_H = 300$  K로 고정하고  $Q_c - \phi - I$ 의 관계를  $\Delta T_{max}$ 에 대하여 도시하면 Fig. 2-20과 같다.  $\Delta T_{max}$ 에 따라  $Q_c$ 와  $\phi$ 를 최대로 하는 전류치가 존재함을 알수 있다. 이는 공급전류 I가 증가할수록 (2-7)식에 의하여  $Q_c$ 는 증가하나 I가 임계치 이상에서는 joule열 ( $I^2R/2$ )의 증가에 의하여  $Q_c$ 가 감소하기 때문이다. 따라서 열전모듈의 실용에 있어서는 피냉각체의 열부하와 냉각효율을 고려하여 공급전류의 값을 적절히 선택하여야 한다. Fig. 2-21은 공급전류(I)와 단자전압(V)을 parameter로 하여  $Q_c - \Delta T - V$ 의 관계를 나타낸 것으로서 열전모듈의 응용에 있어서 냉각성능과 관련한 기본적인 자료를 제공한다. 일례로서 본 연구의 시제품 모듈을 사용하여  $\Delta T = 30$  K의 온도차를 얻으려하는 경우에 공급전류를  $I = 8$  Amp.로 하면 이때의 흡열량은  $Q_c = 5$  watt가 된다. 또  $I = 8$  Amp.에서 단자전압은  $V = 0.8$  volt 이므로 냉각효율은  $\phi = Q_c / V \cdot I = 0.78$  임을 알수 있다. 이때 열전모듈의 고온단에서 발생하는 발열량은  $Q_H = Q_c + V \cdot I = 11.4$  watt 로서 고온단에서 11.4watt 이상의 방열능력을 갖는 heat sink의 설치가 필요함을

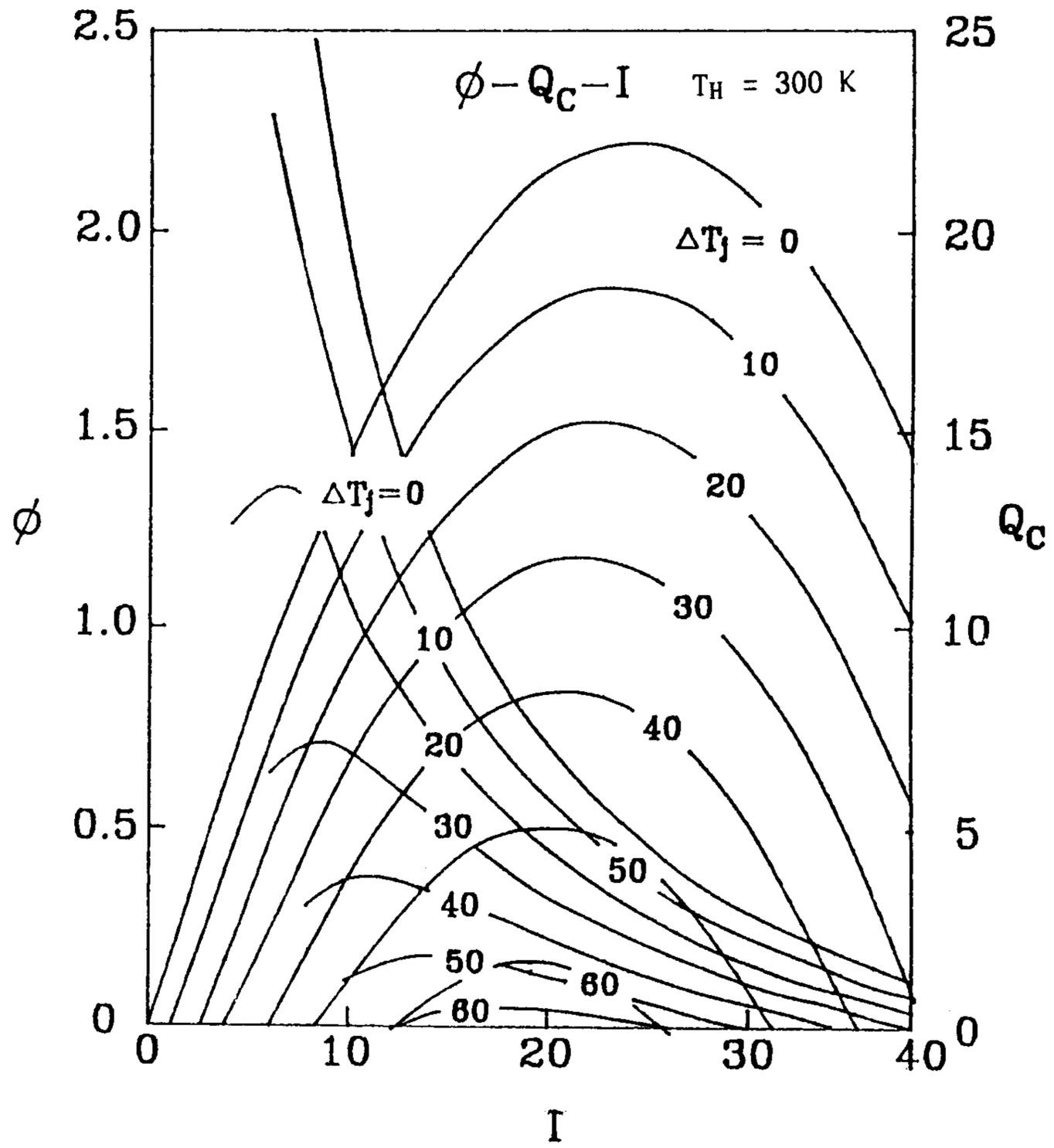


Fig. 2-20 시제품 열전 module의  $\phi$ - $Q_c$ - $I$  곡선.

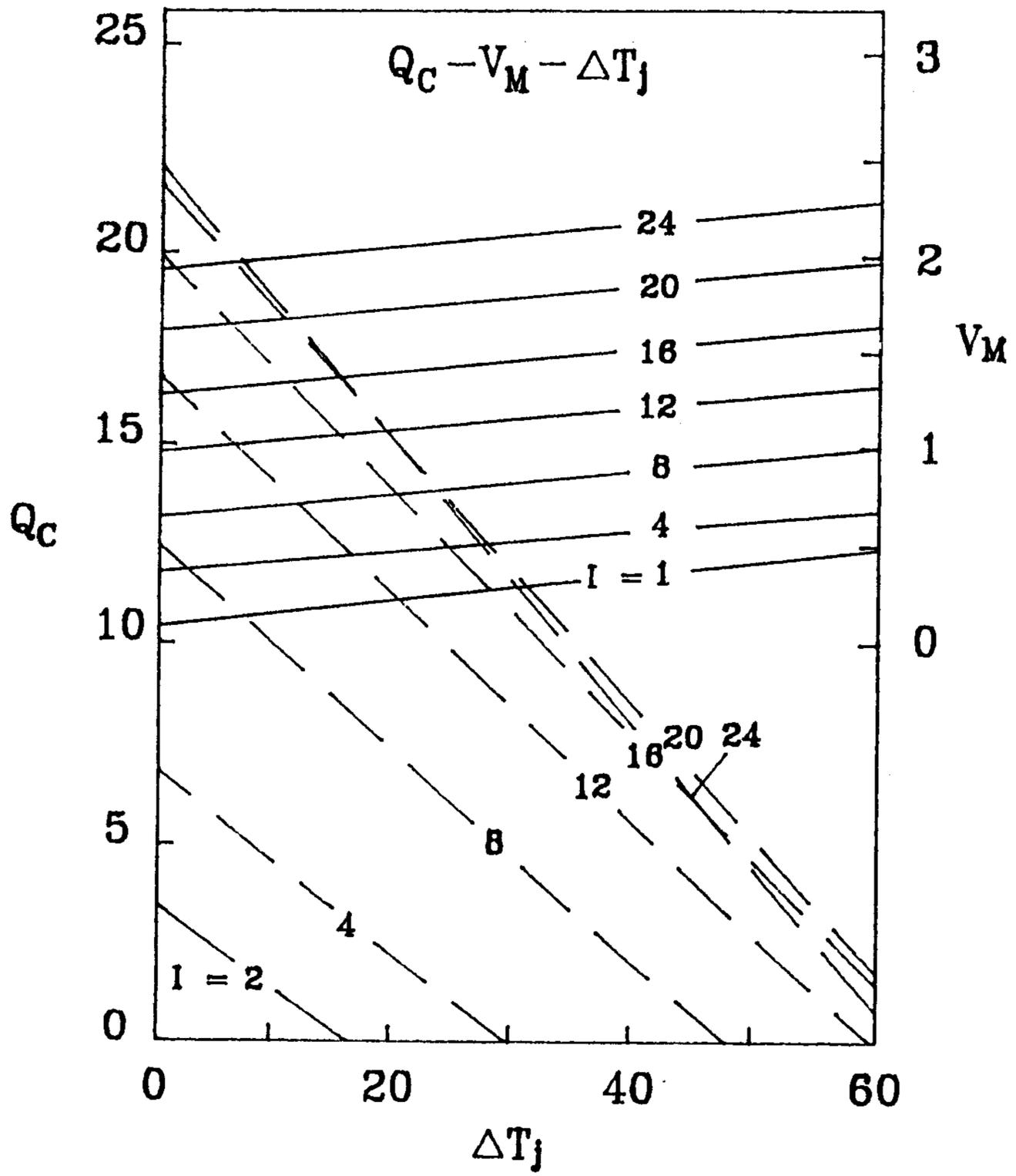


Fig. 2-21 시제품 열전 module의  $Q_c$ - $V_M$ - $\Delta T_j$  곡선.

알수 있다.

이상은 열전소자의 P-N junction base에 기초한 모듈의 특성치로서 실제로는 제 1 장의 Fig. 2-1에서 보는 바와 같이 절연기판과 이종재료의 접합층에서 생기는 열전달저항과 전극의 접촉저항에 의하여 열전모듈로서의 성능은 소자성능보다 낮다. 따라서 열전모듈의 실용적 이용에 있어서는 절연기판 base의 냉각성능에 기초한 device의 설계가 필요하다.

## 제 7 절 기판종류에 따른 모듈특성 비교

본 연구에서는 알루미늄 기판과 양극산화처리된 Al기판을 사용하여 두 종류의 열전모듈을 제작하여 기판이 변화함에 따라 모듈특성이 어떻게 변화하는가를 측정하였으며 그 결과를 아래에 서술하였다.

### 7-1. 모듈의 열전특성

열전모듈의 열전특성은 모듈양단간에 온도차를 주었을 때 발생하는 기전력과 모듈의 전체저항을 측정하여 평가할 수 있다. 측정방법의 상세한 설명은 전년도 보고서에 서술하였으므로 생략한다. Fig.2-22는 알루미늄 기판과 양극산화처리한 알루미늄 기판을 이용하여 제작한 열전모듈의 open voltage가 온도차에 의해 어떻게 변화하는가를 나타낸 것이다. 양자 공히 온도차가 증가할수록 open voltage가 직선적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있고, 이때의 overall Seebeck coeff.는 알루미늄을 사용하였을 경우 5.82mV/K 였으며 양극산화 처리된 알루미늄 기판의 경우는 5.75mV/K 였다.

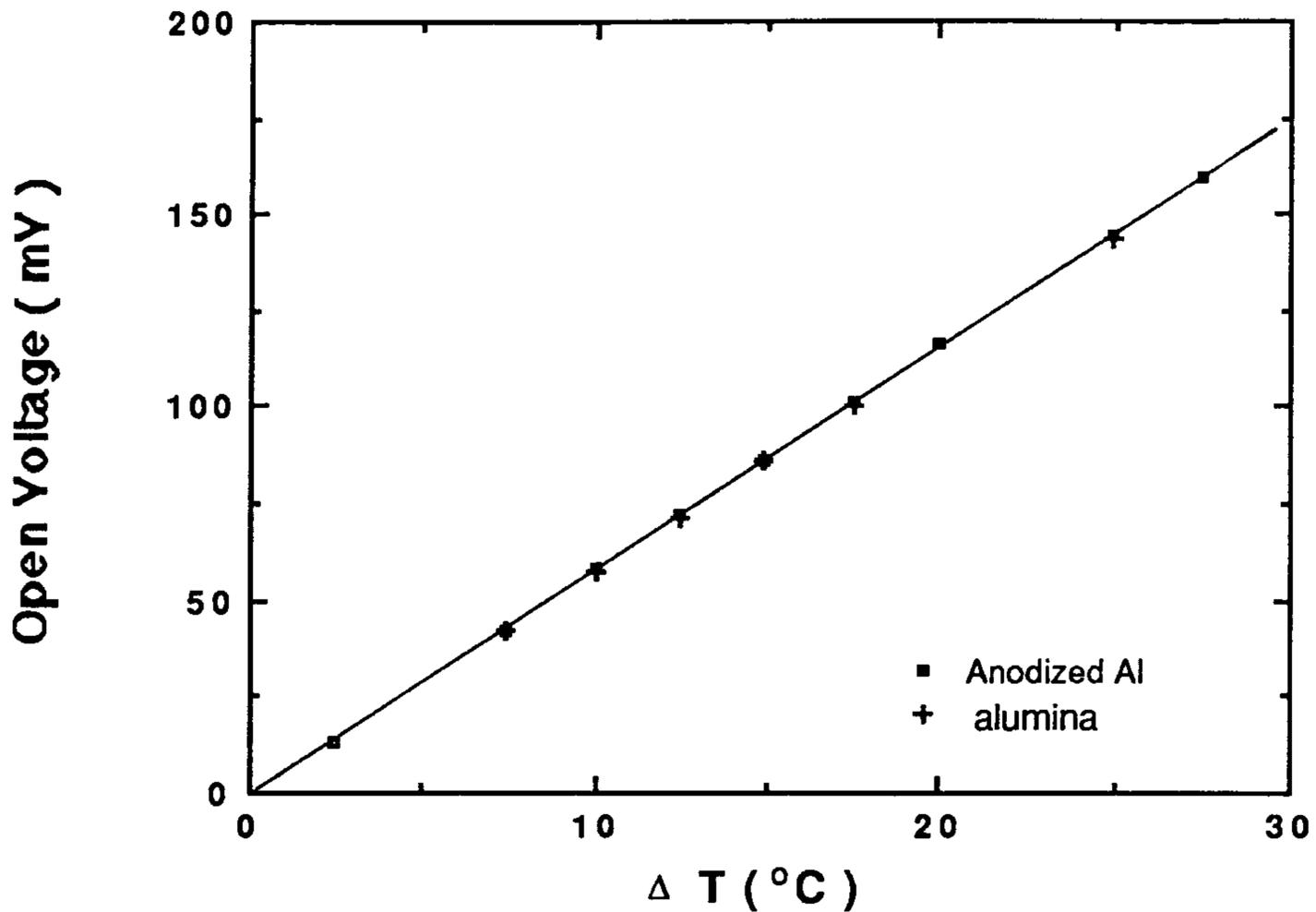


Fig. 2-22 기판양단간의 온도차에 따른 open voltage의 변화

Open voltage는 P형 소자와 N형 소자의 양단간의 온도차에 의해 발생하는 것으로 ceramic층의 열저항은 고려되어 있지 않다. 따라서 동일한 두께의 기판을 사용하였을 때 양극산화 처리된 기판이 알루미늄 기판보다 열저항이 10배 가량 작아 기판 양단간의 온도차가 동일한 경우 소자간의 온도차를 크게 낼 수 있기 때문에 open voltage 값이 커야 할 것이다. 그러나 본 실험의 양기판의 경우 그 값은 거의 비슷하나 양극산화 처리 기판의 값이 약간 낮게 되었다. Open voltage 는 소자의 크기, 이종재료의 접합 정도에 따라서도 변화하므로 사용된 소자 형태의 불균일 및 수동식 소자 접합기술의 부정확도가 원인으로 작용했으리라 생각된다. 한편 모듈의 전체저항은 양단간의 온도차를 일정하게 유지하고 모듈의 전극에 외부회로를 연결하여 외부부

하저항 변화에 따른 전압과 전류의 변화를 측정하면 그 비로 부터 구할 수 있으며 알루미나 기판을 사용한 모듈의 경우는  $450.2 \text{ m}\Omega$ , 양극산화 처리 기판의 경우에는  $452 \text{ m}\Omega$ 으로 비슷한 값을 나타내었다.

## 7-2. $Q_c - \Phi - I$ 특성도

소자의 물성치와 모듈양단간의 온도차를 알고 있으면 식(2-7) 및 (2-8)로부터  $Q_c$  및  $\Phi$ 가  $I$ 에 따라 어떻게 변하는 가를 알 수 있다. 식 (2-7)을 살펴 보면 온도에 관계된 항으로  $T_H$ 와  $T_c$ 가 있으며 이 식을 이용하여  $Q_c$ 를 계산하고자 할때  $T_H$  및  $T_c$ 는 소자의 고온측과 저온측의 온도값을 대입하여야 한다. 동일한 기판을 사용한 여러개의 모듈을 상호 비교할 때는 기판 외측의 고온단 및 저온단의 온도를 대입하여 상대적인 비교가 가능하나 다른 종류의 기판을 사용하여 모듈을 제작한 경우 기판 종류 변화에 따른 모듈 특성 비교를 위해서는 소자측의 온도를 측정하거나 계산을 통해서 소자측의 온도를 알아야 한다. 고온단과 저온단의 온도차를 ( $T_H' - T_c'$ )로 유지하였을 때 모듈 내부의 온도변화를 Fig.2-23에 나타내었다. 기판재료가 양극산화한 알미늄인 경우 알미늄의 열전도도가 알루미나에 비해 10 배 이상 크기 때문에 알루미나 기판을 사용하였을 때 보다 기판의 열저항이 작으므로 기판외측과 소자간의 온도차는 작을 것으로 예상된다. Fig.2-23에 알루미나를 기판으로 한 경우에는 소자측의 온도를  $T_H(c)$  및  $T_c(c)$ 로 양극산화 처리된 알미늄 기판의 경우에는  $T_H(m)$  및  $T_c(m)$ 으로 나타내었다. Fig.2-23을 참조하면 기판양단간의 온도차가 ( $T_H' - T_c'$ )로 주어졌을 때 Cu전극을 통한 열전달은 무시할 정도로 대단히 빠르다고 알루미나 기판을 사용하는 경우 정상상태조건에서 열수지식은 식 (2-10)과 같이 된다.

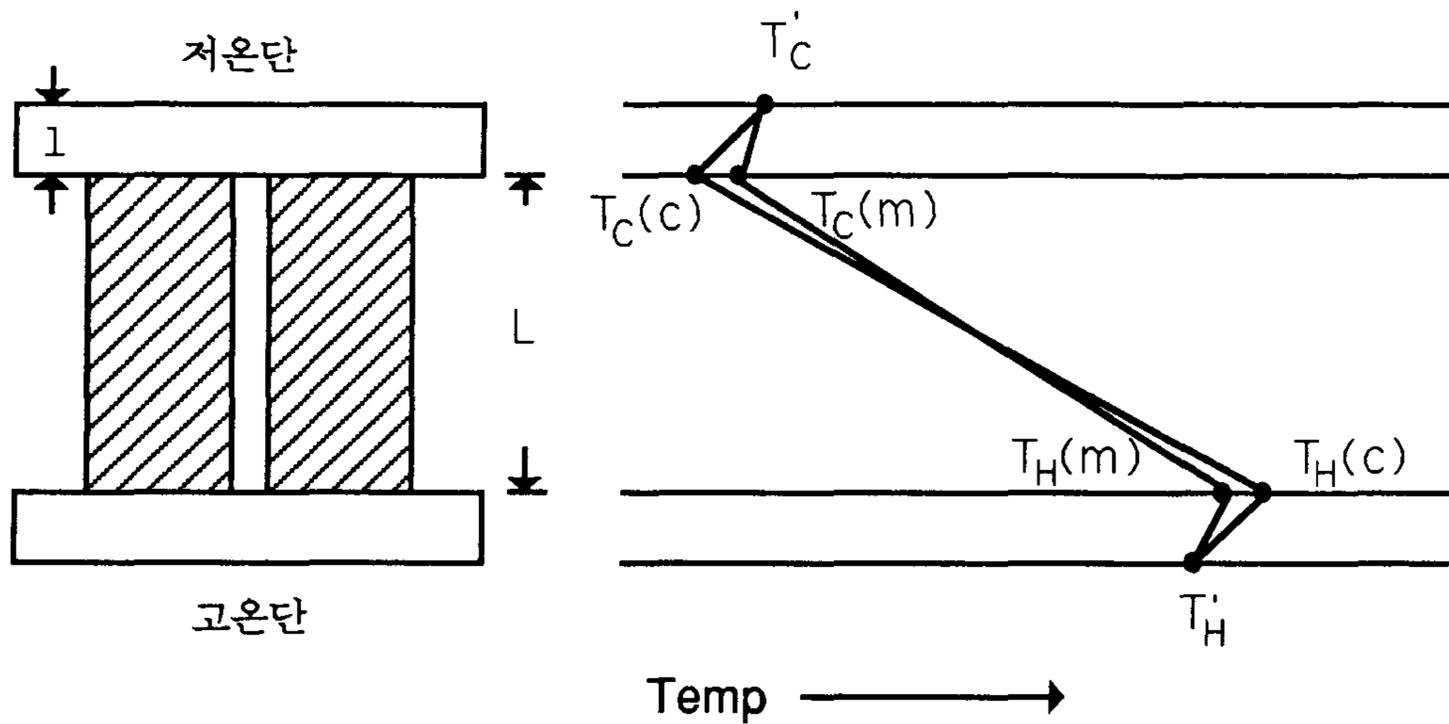


Fig. 2-23 열전모듈 내부의 온도분포 개략도

$$\begin{aligned}
 A\kappa_{Al203} (T_H' - T_H(c))/l &= A_1\kappa_{e1} (T_H(c) - T_C(c))/L \\
 &= A\kappa_{Al203} (T_C(c) - T_C')/l \quad \text{---- (2-10)}
 \end{aligned}$$

여기서,  $A$ 는 모듈의 단면적,  $A_1$ 은 열전소자의 단면적이고 각기의 값은 16.5.44  $\text{cm}^2$  이며,  $\kappa_{Al203}$ ,  $\kappa_{e1}$ 은 기판, 소자의 열전도도를 나타내며 그 값은 각각 0.25  $\text{watt}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{deg}^{-1}$ ,  $2.91\times 10^{-2}$   $\text{watt}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{deg}^{-1}$  을 사용하였다. 식 (2-10)으로 부터 고온단의 온도가 313.1 K이고 저온단의 온도가 295.6 K 일때  $T_H(c)$  및  $T_C(c)$  를 구해보면 각각 313.146 K 및 295.554 K로 되고 알미늄 기판의 경우에는  $T_H(m)$  및  $T_C(m)$ 가 313.135 K 및 295.565 K로 된다. 이 값을 식 (2-7) 및 (2-8)에 대입하여  $Q_c - \Phi - I$  특성도를 그려

보면 Fig.2-24와 같이 된다. Fig.2-24로 부터 동일한 전류값에서 양극산화 처리 기판의 경우  $Q_c$ 값이 알루미나 기판의 경우 보다 조금 높게 나오는 것이 관측되었다. 이로 부터 양극산화 처리 기판을 사용할 경우 알루미나 기판의 경우에 비해 보다 작은 전류값으로 동일한 흡열능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 그 값의 차이는 워낙 작기 때문에 본 실험에서와 같이 0.65 mm 의 두께를 가진 기판을 상용하는 기판의 경우에는 무시할 정도로 된다. 단 기판의 두께가 두꺼워져야 할 필요가 있는 경우에는 양극산화 처리 기판을 사용하는 것이 유리하리라 판단된다.

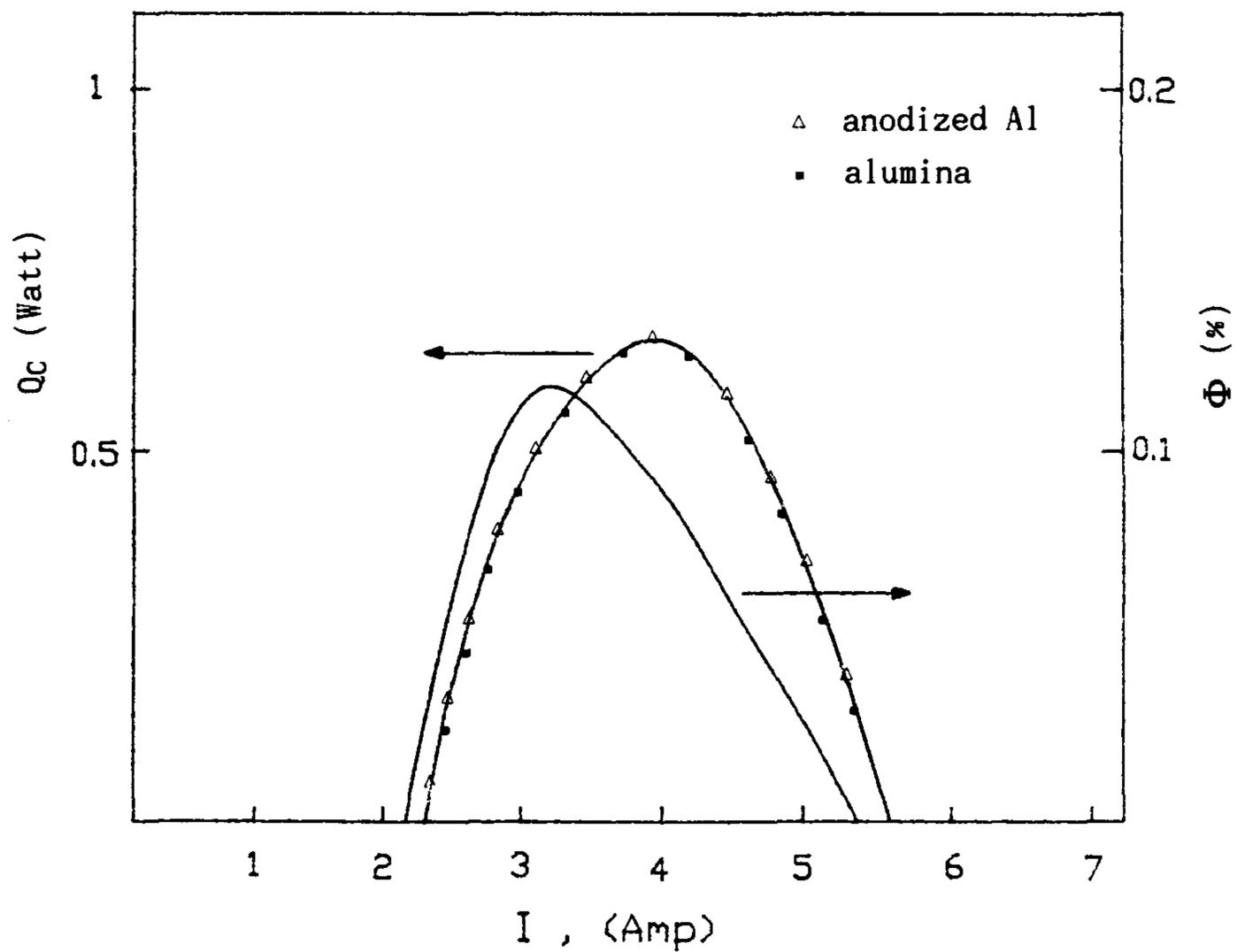


Fig. 2-24 시제품 모듈의  $Q_c - \Phi - I$  특성도

### 제 3 장 열전냉각장치의 설계 및 성능 분석

#### 제 1 절 열전냉각의 에너지 수지

열전냉각의 기본원리는 Fig. 3-1과 같이 P형 열전재료나 N형 열전재료를 전극으로 접합한  $\Pi$ 형 소자에 직류전류를 공급하면 P-N 접합전극에서 흡열이 일어나고 단자전극에서 발열이 일어난다. 이와같은 열전회로가 정상상태에 도달하면 일정전류 I가 흐르게 되고 접합전극은  $Q_c$ 의 열을 흡수하여  $T_c$ 로 유지되면 단자전극은  $Q_h$ 의 열을 발생하여  $T_h$ 의 온도로 유지된다. 즉, 정상상태에서는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\alpha \cdot T_c \cdot I = Q_c + \frac{RI^2}{2} - K(T_h - T_c) \quad (3-1)$$

Peltier 흡열량    유효흡열량    Joule열    역류하는 전도열

(3-1)식에 의하여 접합전극인 냉각단에서의 흡열량과 단자전극인 고온단에서의 발열량은 다음과 같다.

$$Q_c = \alpha \cdot T_c \cdot I - \frac{RI^2}{2} - K(T_h - T_c) \quad (3-2)$$

$$Q_h = \alpha \cdot T_c \cdot I + \frac{RI^2}{2} - K(T_h - T_c) \quad (3-3)$$

위식에서 제2항과 제3항은 비가역적인 에너지 손실량으로 열전소자의 물성과 공급전류에 의존한다. 또 열전냉각에 소비되는 공급전력(P)은  $Q_h$ 와  $Q_c$ 의 차이이므로 다음식으로 표시된다.

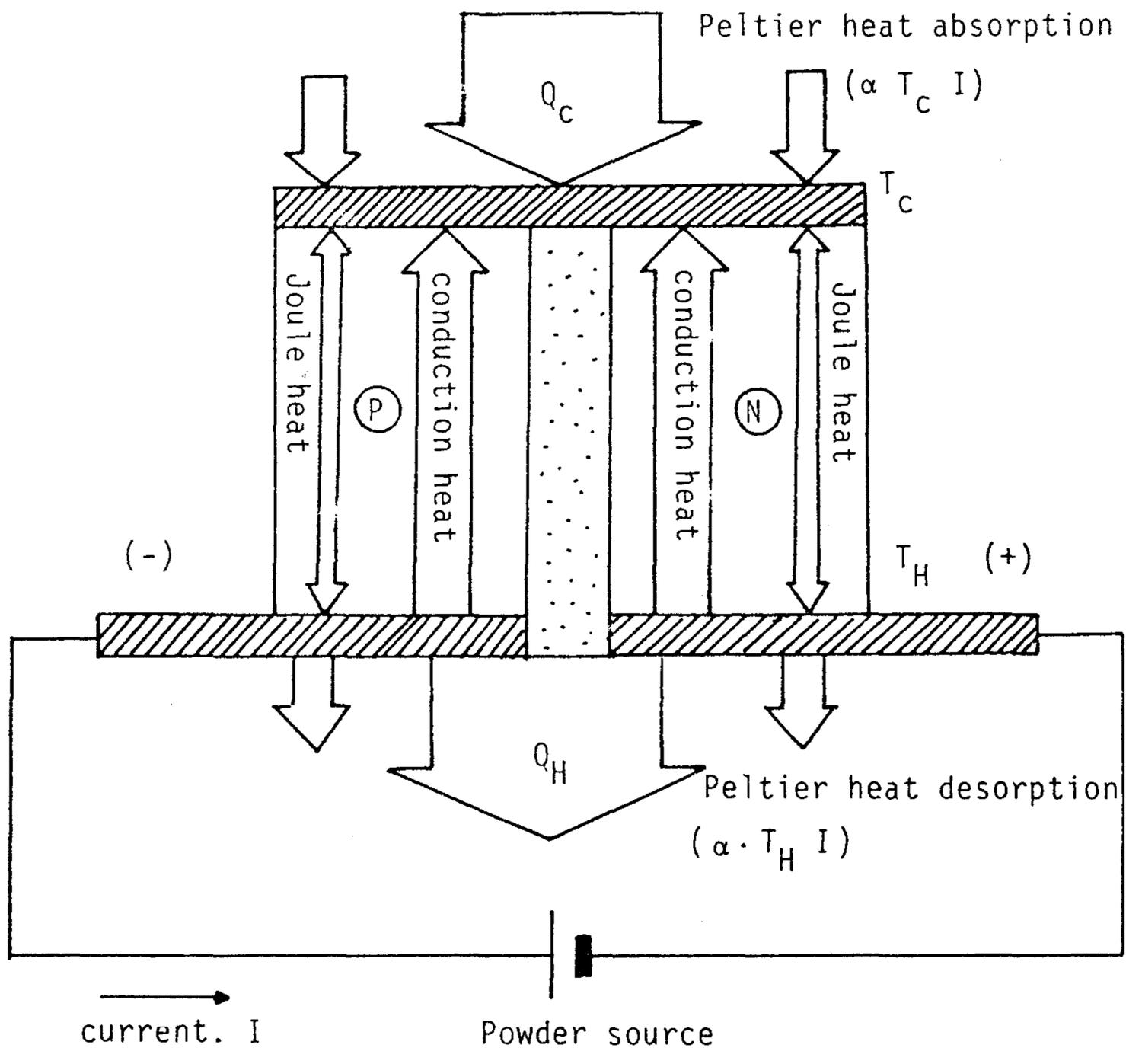


Fig. 3-1 열전냉각의 기본원리.

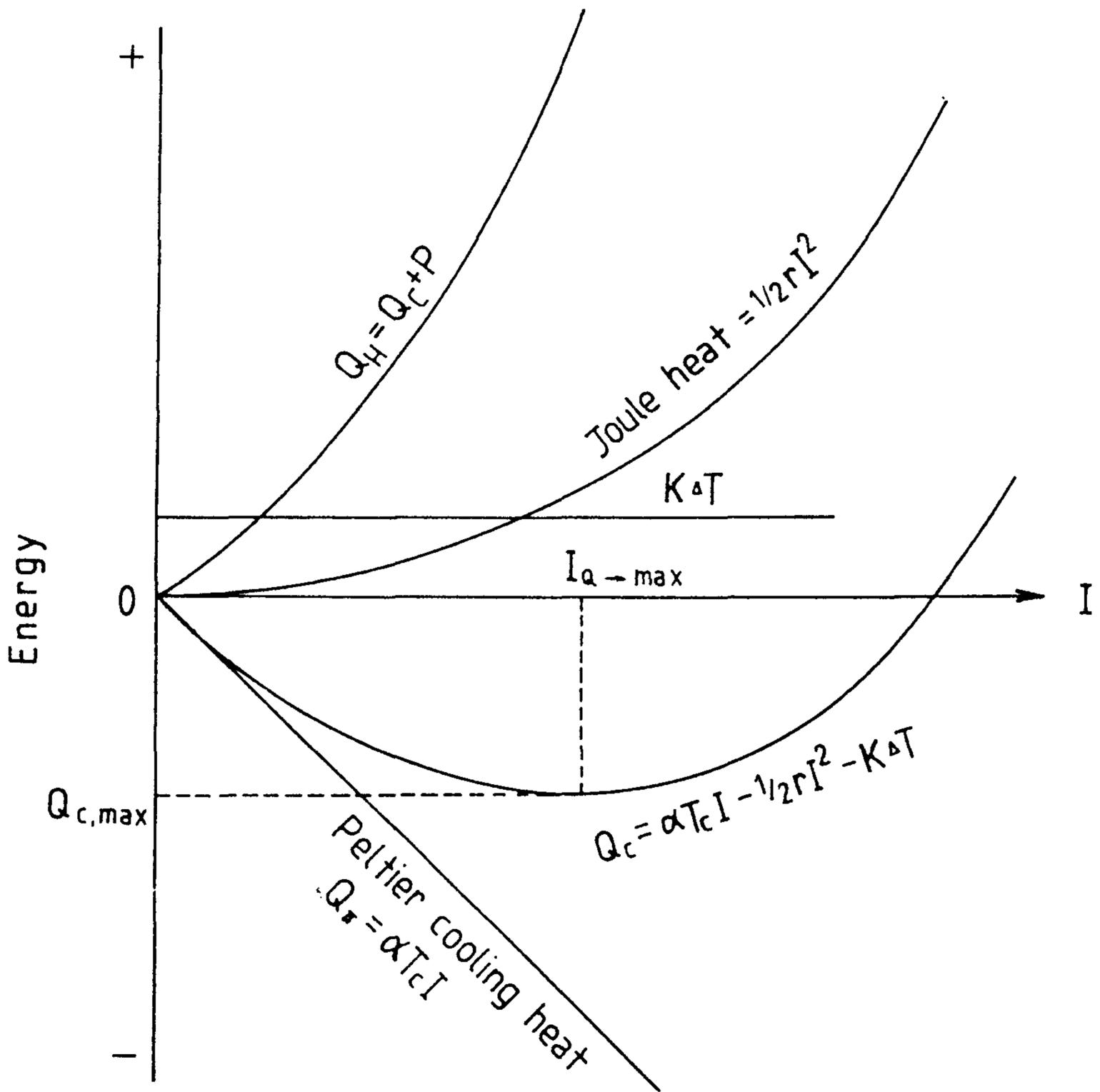


Fig. 3-2 열전냉각의 에너지수지.

$$P = Q_H - Q_C = (\alpha \cdot \Delta T + RI)I \quad (3-4)$$

Fig. 3-2에 열전냉각의 전류와 에너지수지와의 관계를 나타내었다. Peltier 흡열량,  $Q_C$ 는 전류에 비례하여 증가하나 열전소자의 저항에 의하여 발생하는 joule열은  $I^2$ 에 비례하여 증가하므로  $I$ 가 어느 한계 이상에서는 joule열이 Peltier열을 능가하므로 가열효과가 나타난다. 따라서  $Q_C$ 를 최대로 하는 임계전류가 존재하며 그 이상의 전류에서는 냉각효과의 감소와 전력소모의 증가가 있게 된다. 이와 같은 현상은 제 2 장에서 기술한 시제품 모듈의 특성분석에서도 명백하게 나타나고 있다. 또 열전모듈의 고온단에서는 공급전력에 따라  $Q_H = Q_C + P$ 의 발열이 있으므로 냉각 device의 설계에 있어서는 이와같은 발열을 효과적으로 제거할 수 있는 방열기의 설치가 필요함을 알수 있다. 한편 냉각효율은 흡열량에 대한 공급전력의 비로 정의되므로 다음식으로 표시된다.

$$\phi = \frac{Q_C}{P} = \frac{\alpha \cdot T_C \cdot I - RI^2/2 - K(T_H - T_C)}{\alpha \cdot \Delta T \cdot I + RI^2} \quad (3-5)$$

## 제 2 절 Simulation에 의한 열전달 해석

### 2-1. 열교환부의 구성과 simulation 조건

열전냉각장치의 열교환 unit은 용기를 구성하는 단열벽의 적당한 위치에 열전모듈과 방열기를 설치한 간단한 구조로 되어 있다. 열교환 unit의 구성방법이나 구조는 냉각성능과 관련하여 Fig. 3-3와 같이 설정하였다. 즉,

내부의 열교환기로서 열전모듈의 면적과 동일한 면적을 갖는 알루미늄 블록을 열전모듈의 저온단과 접촉시켜 양자의 두께를 단열벽의 두께와 같도록 하고 또 열전모듈의 고온단은 알루미늄 핀으로 된 방열기와 접촉시키는 구조를 상정하였다. 따라서 내부의 열은 다음의 이동단계르 거쳐 외부로 제거된다

(1) 용기내부의 알루미늄 블록에의 대류열전달 :

$$Q_1 = Ah ( T_{in} - T_1 )$$

(2) 알루미늄 블록내의 열전도 :

$$Q_2 = A k_{Al}/L_{Al} ( T_1 - T_2 )$$

(3) 모듈의 절연기판을 통하는 열전도 :

$$Q_3 = A k_{cer}/L_{cer} ( T_2 - T_c )$$

(4) 열전소자 냉각단의 Peltier 흡열 :

$$Q_c = \alpha T_c I - RI^2/2 - K ( T_H - T_c )$$

(5) 열전소자 고온단의 Peltier 발열 :

$$Q_H = \alpha T_c I + RI^2/2 - K ( T_H - T_c )$$

(6) 모듈의 절연기판을 통하는 열전도 :

$$Q_4 = A k_{cer}/L ( T_H - T_4 )$$

(7) 방열 핀으로 부터 분위기에의 발열 :

$$Q_5 = k_s ( T_4 - T_A )$$

이상과 같은 열의 이동단계외에 실제로는 이종재료의 접합계면을 통하는 열전달과정을 고려해야 하나 이에 대한 열전달계수의 정량화가 곤란하여 여기에서는 저항이 없는 ideal contact를 가정하였다. 한편 외부의 분위기로 부터 단열벽을 통하여 용기 내부로 유입되는 열량은 다음과 같다.

$$Q_0 = A_{Box} \cdot h_{eff} ( T_A - T_{in} )$$

열평형에 도달하는 정상상태에서는 다음의 관계가 성립한다.

$$Q_0 = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_C$$

$$Q_H = Q_4 = Q_5$$

위식에 대한 연립방정식의 해를 구하므로써 열전모듈의 성능, 공급전력, 방열핀의 방열능력 등의 설계조건과 작동조건에 따른 냉각성능을 검토할 수 있다. 계산에 이용한 재료의 물성치, 장치조건, 열전모듈의 사양등은 다음과 같다.

#### 냉각장치의 제원

- 내용적 : 30 l(30x40x25cm), 전열면적 A BOX = 0.59 m<sup>2</sup>
- 10 l(20x20x25cm), 전열면적 A Box = 0.28 m<sup>2</sup>
- 단열벽의 열전달계수 :  $h_{eff} = 1.5 \times 10^{-2}$  [watt/m<sup>2</sup>·deg]

### 열전모듈의 종류와 물성

	A module	B module
$\alpha$ [V/K]	0.048	0.027
R [ $\Omega$ ]	2.167	1.212
K [W/K]	0.420	0.234

### 기타수치

A : 알루미늄 블록의 전열 면적 ( $=1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ )

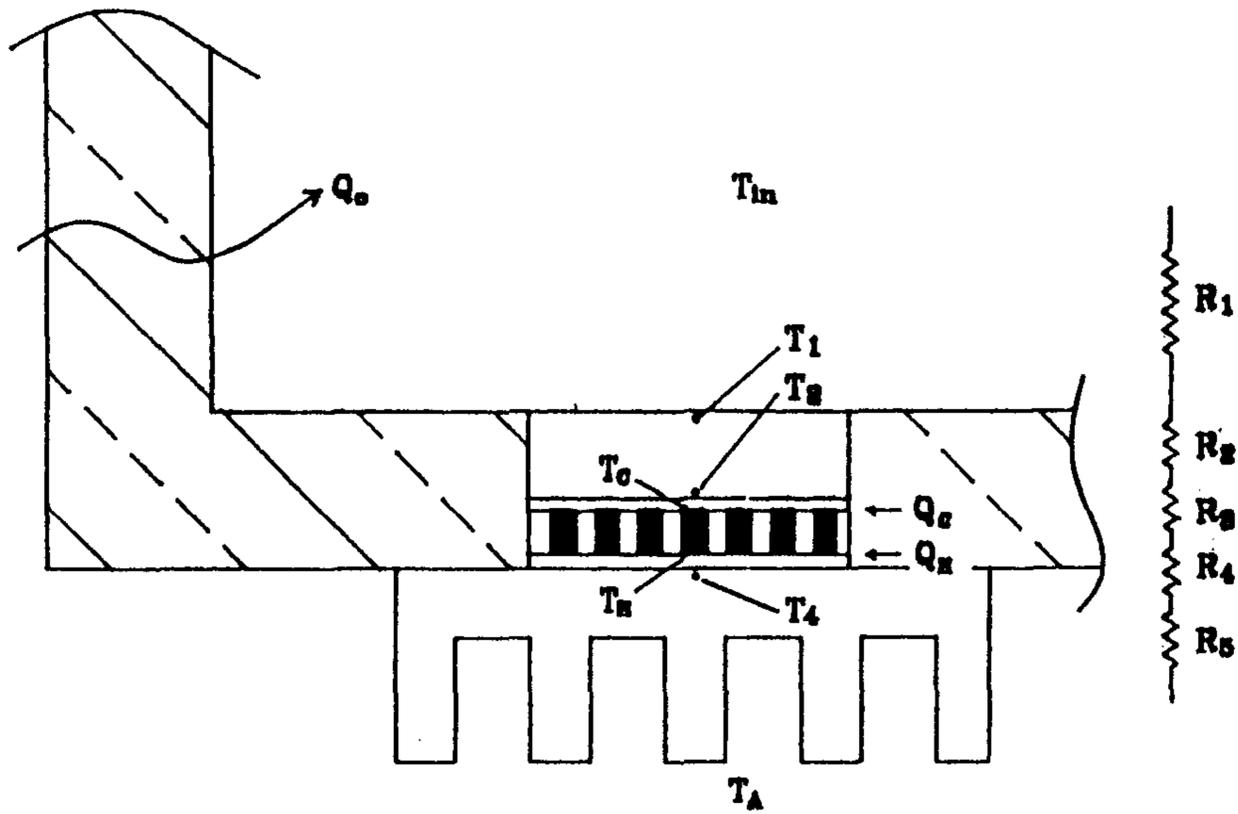
$L_{Al}$  : 알루미늄 블록의 두께 ( $=0.03\text{m}$ )

$K_{Al}$  : 알루미늄 블록의 열전도율 ( $= 204 \text{ watt/m } ^\circ\text{C}$ )

$L_{cer}$  : 절연기판의 두께 ( $= 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$ )

$K_{cer}$  : 절연기판의 열전도율 ( $= 20 \text{ watt/m } ^\circ\text{C}$ )

$T_A$  : 외기온도 ( $= 303 \text{ K}$ )



$$Q_1 = Ah (T_{in} - T_1)$$

$$Q_2 = AK_{Al}/L (T_1 - T_2)$$

$$Q_3 = AK_{cor}/l (T_2 - T_c)$$

$$Q_c = \alpha T_c l - 1/2 R I^2 - K (T_h - T_c)$$

$$Q_h = Q_c + \alpha (T_h - T_c) l + R I^2$$

$$Q_4 = AK_{cor}/l (T_h - T_4)$$

$$Q_5 = K_s (T_4 - T_A)$$

$$Q_o = A' h_{eff} (T_A - T_{in})$$

$$Q_o = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_c$$

$$Q_h = Q_4 = Q_5$$

$$1/R_1 = 0.0066 \text{ [W/K]}$$

$$1/R_2 = 8.330 \text{ [W/K]}$$

$$1/R_3 = 1/R_4 = 20.416 \text{ [W/K]}$$

$$1/R_5 = 10.0 \text{ [W/K]}$$

Fig. 3-3 열교환 unit의 구조.

## 2-2. 방열능력의 영향과 열전달 저항

열전냉각의 에너지수지 관계에서 알수 있는 바와 같이 저온단에서의 흡열량과 냉각성능은 고온단의 온도  $T_H$ 를 낮게 유지할수록 증가한다. 따라서 열전모듈의 고온단에서 발생하는 열을 제거하기 위한 방열기의 능력은 냉각 온도에 중요한 변수로 작용함을 예측할 수 있다. 이의 영향을 정량적으로 검토하기 위하여 방열기의 방열능력에 대한 내부온도의 변화를 계산하여 그 결과를 Fig. 3-4에 표시하였다. 열전모듈은 2개를 병렬로 연결하여 사용하였으며 단자전압은 A module에 대해서는 6 volt, B module에 대해서는 12 volt로 하였다. 냉각장치의 내용적에 관계없이 방열능력의 영향이 크게 나타나고 있으며 적어도 10 watt/K 이상의 방열능력을 갖는 방열기의 설치가 필요함을 알수 있다.

한편 Fig. 3-3에서 보는 바와 같이 장치의 내부로 부터 외부까지 열의 이동과정에는  $R_1 - R_5$ 의 열전달저항이 일어난다. 열전달저항의 크기는 냉각 장치의 내용적, 모듈의 수, 단자전압등에 따라 약간씩 달라지며 내용적 30 l에서 B module을 사용하여 단자전압 6 volt 경우의 결과는 표 3-1과 같다.

표 3-1. 열전달 저항의 비교

저항의 종류	N = 1	N=2(병렬연결)
용기내부 - 알루미늄 블록의 대류 : $R_1$	139 [K/W]	75.6 [K/W]
알루미늄 블록내의 열전달 : $R_2$	0.12 [K/W]	0.06 [K/W]
모듈의 절연기판의 열전달 : $R_3$	0.049 [K/W]	0.025 [K/W]
방열기의 열전달 : $R_4$	0.1 [K/W]	0.1 [K/W]

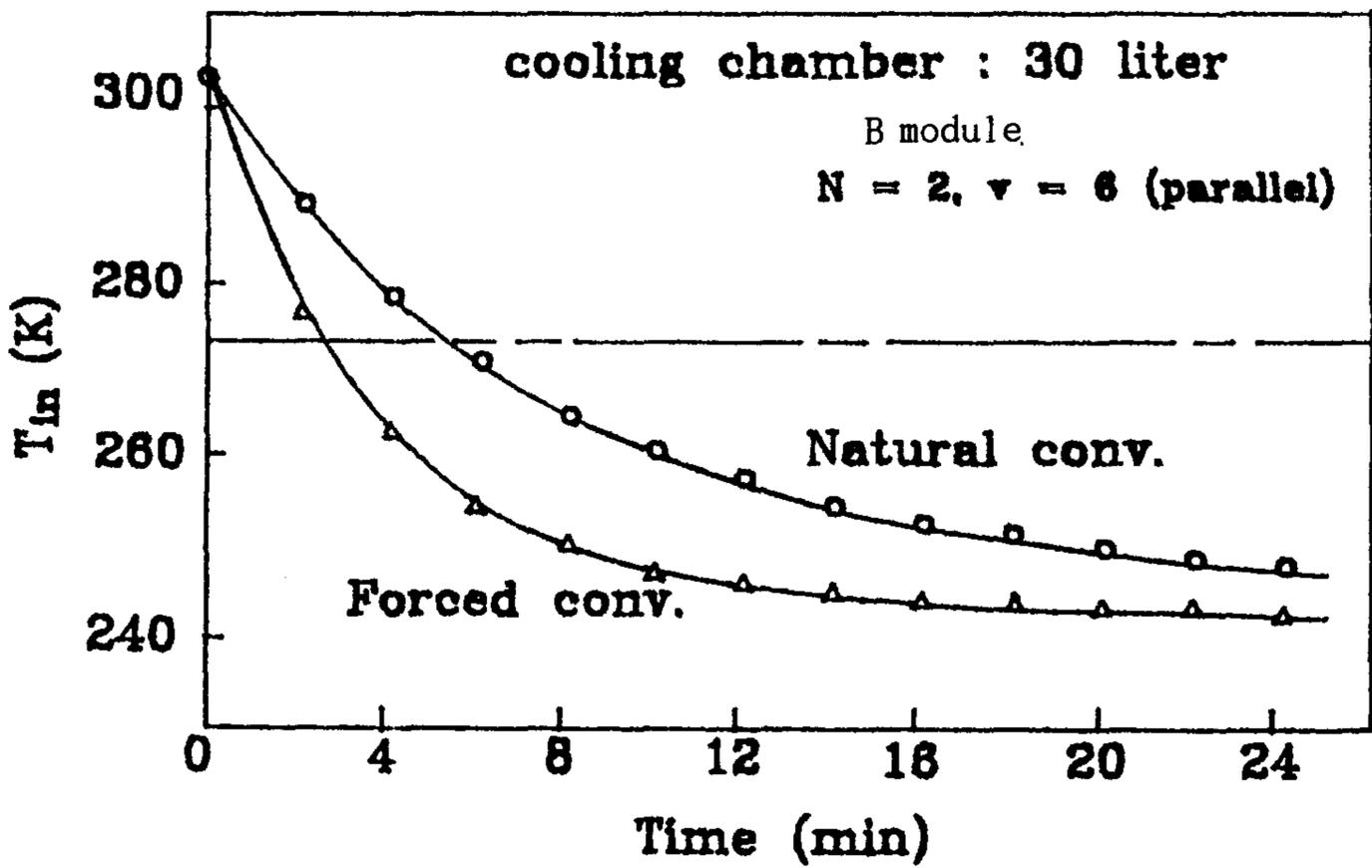
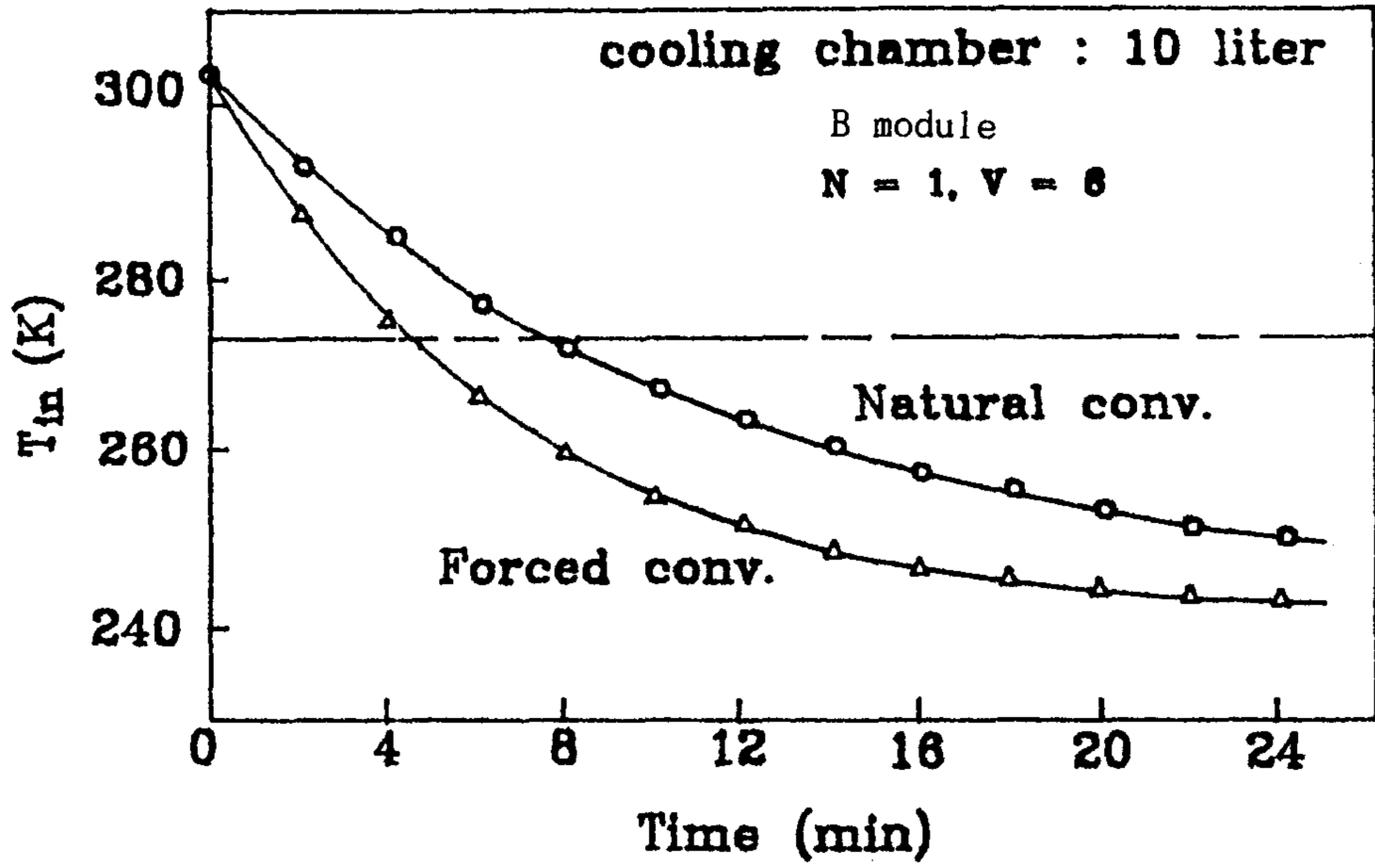


Fig. 3-4 대류방식에 따른 cooling chamber 내부온도 변화의 simulation 결과.

표 3-1에서 보는 바와 같이 내부의 열이 열전모듈을 통해서 용기외부로 이동하는 과정에서 용기내부의 대류열전달저항은 다른 저항들에 비하여 1000 배 이상이나 큼을 알수 있다. 이는 실제 device의 냉각온도와 관련하여 생각하면 용기내부의 냉각속도가 낮고 알미늄 블록의 온도( $T_1$ )와 용기내부의 온도( $T_{in}$ )사이에는 온도구배가 존재하여 온도차 손실이 커짐을 의미한다. 따라서  $T_{in}$ 을 가급적  $T_1$ 에 접근시켜 온도차손실을 최소화하기 위해서는 대류 열전달저항을 줄일수 있는 내부구조의설계가 필요함을 알수 있다. 이와같은 설계방안으로서는 용기의 내벽을 열전도성이 좋은 재료로 lining하는 방법이나 내부에 공기순환 device를 설치하여 강제대류시키는 방법을 생각할 수 있다. 이에 대하여는 제3절에서 검토하기로 한다.

### 2-3. 공급전원에 따른 냉각성능과 온도차 손실

직류전원의 인가전압, 모듈의 종류와 수, 회로연결방식 등에 따른 냉각장치 부위별 온도분포를 Fig. 3-5 - Fig. 3-8에 나타내었다. 우선 내부온도( $T_{in}$ )에 미치는 내용적의 영향을 보면 모듈종류와 전원조건에 따라 일정치 않으나 10 l의 경우 30 l에 비하여 냉각온도는 6 - 10°C정도 낮다. 이는 냉각장치의 내용적이 큰 경우 단열벽으로 부터의 유입열이 많아지고 내부열용량이 크기 때문이다. 또 모듈의 종류에 따라 냉각성능을 좋게 하는 적정전압조건이 존재함을 알수 있다. 즉, 10 l용기의 경우를 보면 A 모듈에서는 12 volt 전원이 유리하고 B 모듈에서는 6 volt전원이 유리하다. 따라서 모듈을 2개 사용하는 경우에는 A 모듈에서는 2개를 12 volt 병렬로 연결하고 B 모듈에서는 12 volt 직렬 연결이나 6 volt 병렬 연결하는 것이 좋을음을 알수 있다. B 모듈을 2개 사용하는 경우에는 12 volt 직렬 연결과 6

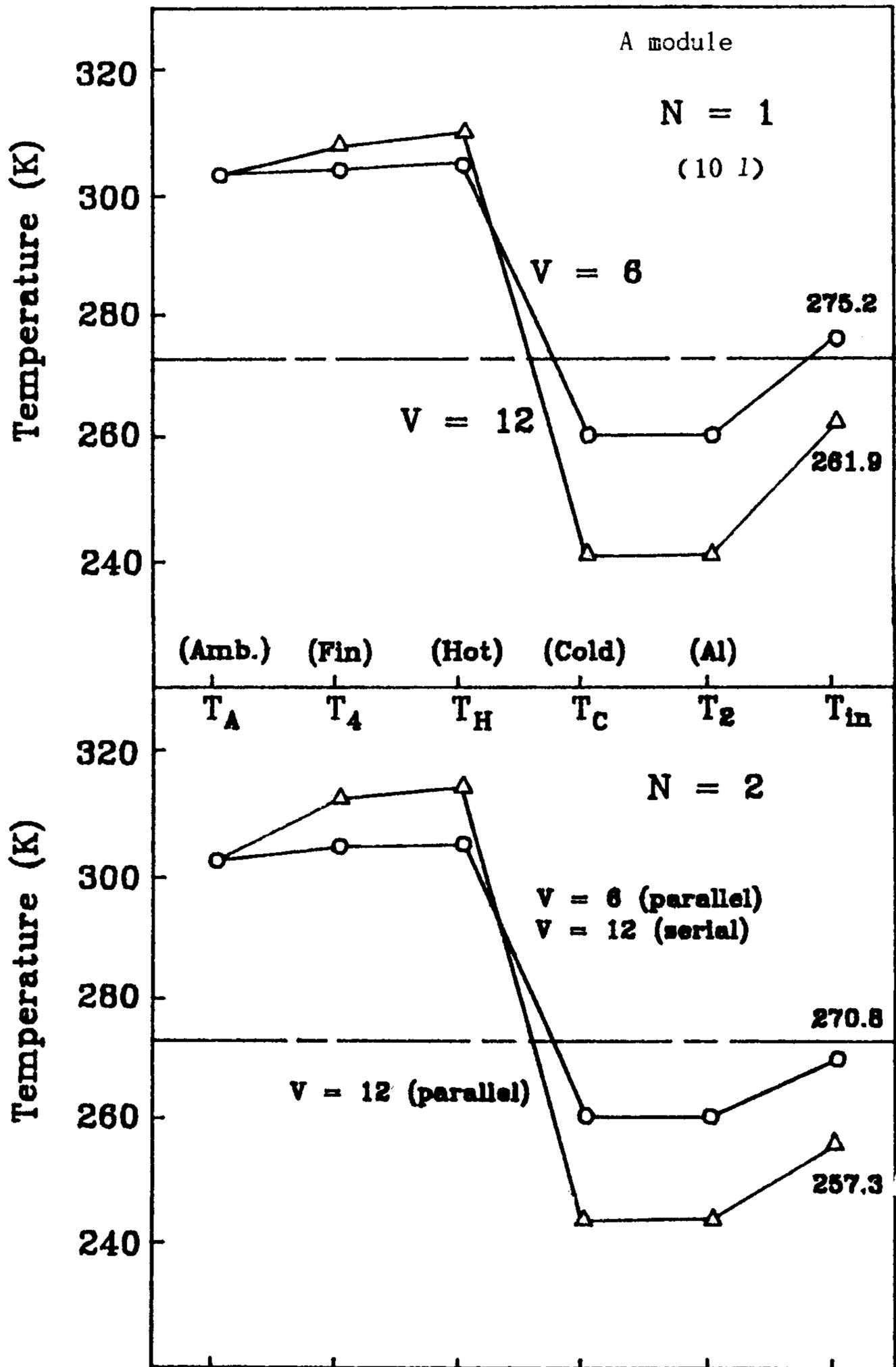


Fig. 3-5 Module의 종류와 갯수에 따른 냉각장치 부위별 온도분포 simulation 결과.

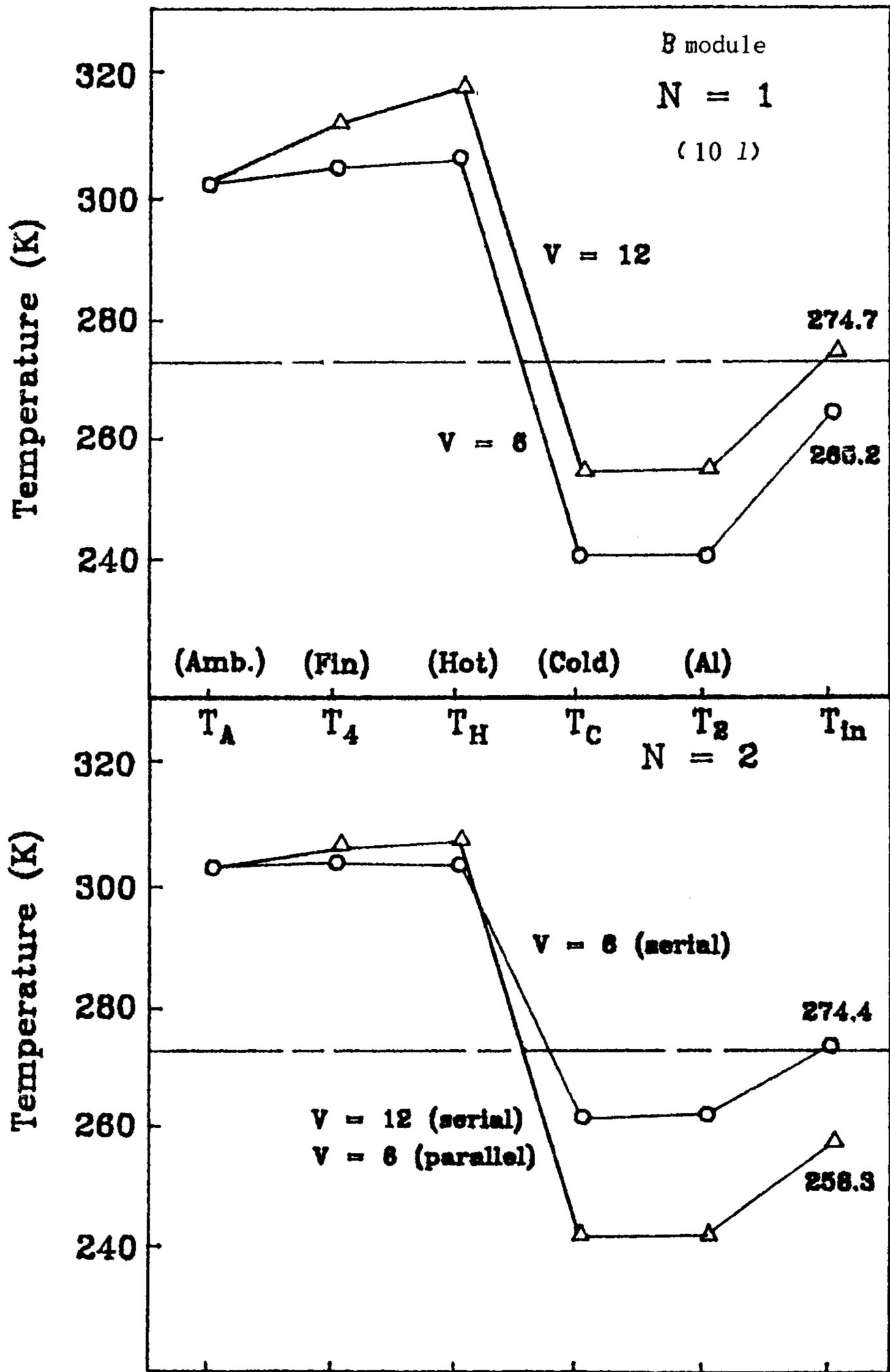


Fig. 3-6 Module의 종류와 갯수에 따른 냉각장치 부위별 온도분포 simulation 결과.

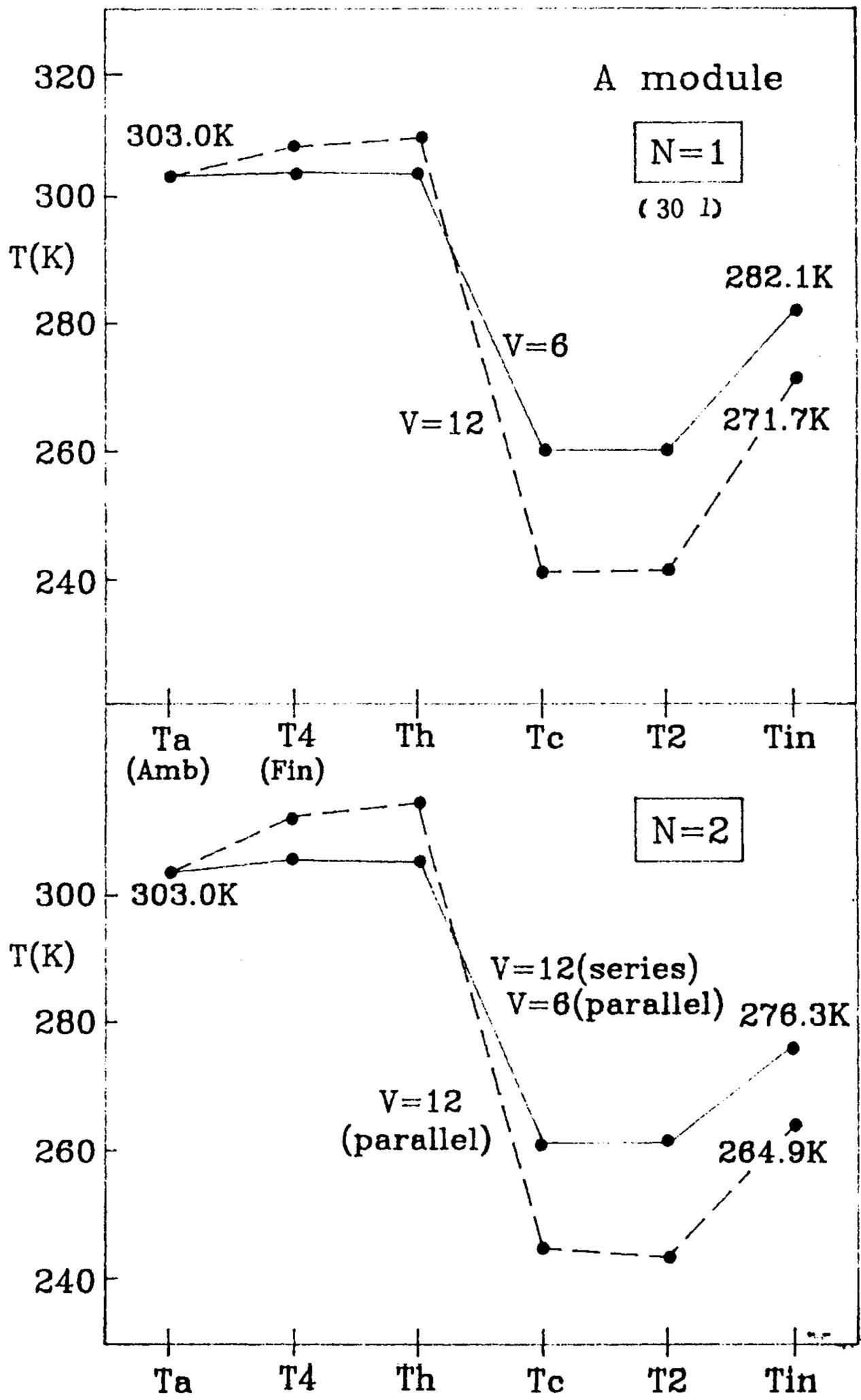


Fig. 3-7 Module의 종류와 갯수에 따른 냉각장치 부위별 온도분포 simulation 결과.

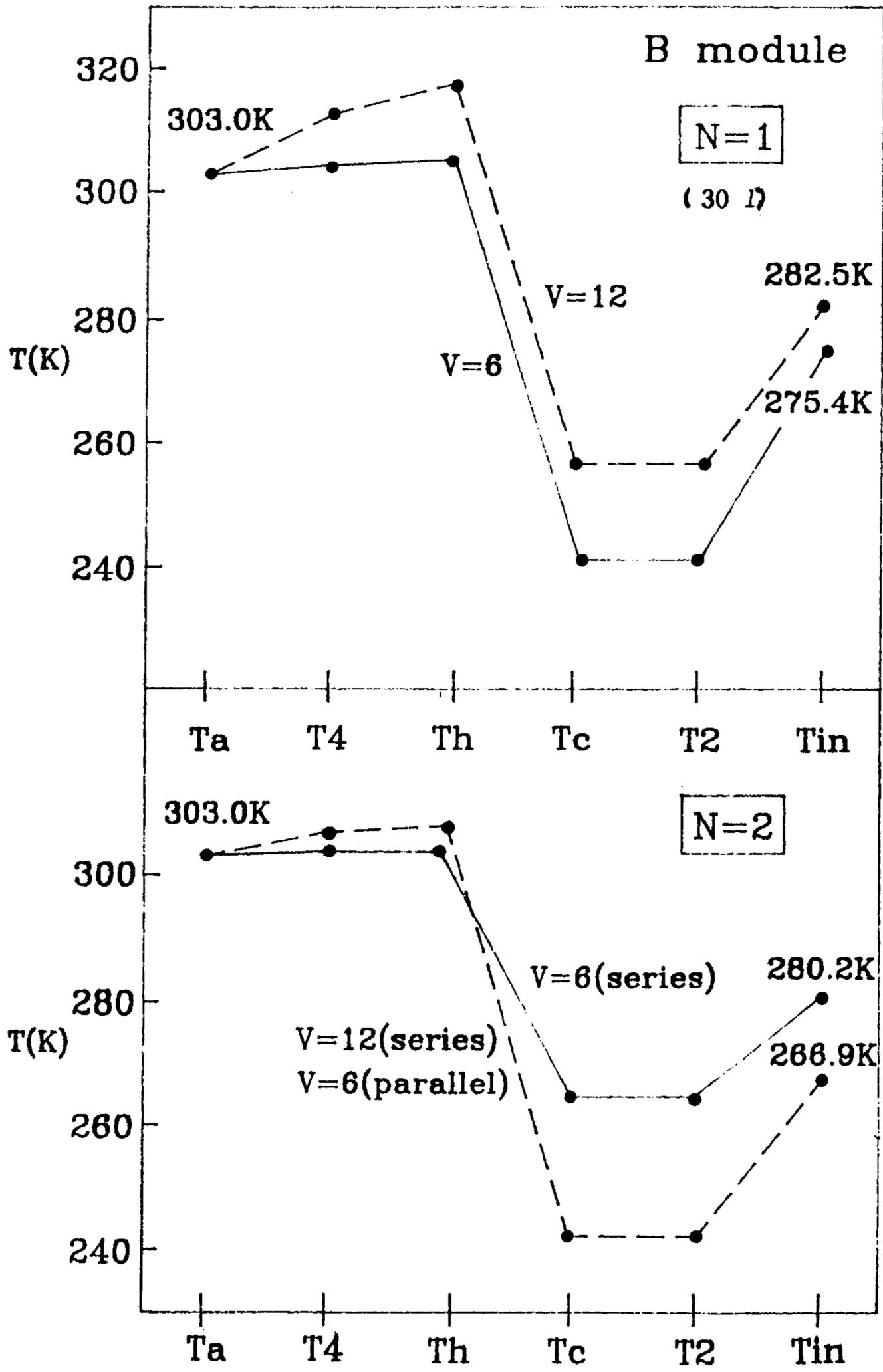


Fig. 3-8 Module의 종류와 갯수에 따른 냉각장치 부위별 온도분포 simulation 결과.

volt 병렬 연결은 냉각성능에서는 동일한 효과를 얻을 수 있으나 병렬은 직열보다 공급전류를 2배로 해야 하므로 연결방식은 사용전원의 용량을 고려하여 선택되어야 할 것이다. 모듈에 사용한 열전소자의 촌법(1.4 x 1.4 x 1.5 mm)과 소자대의 수 및 열전소자의 물성치 (전기비저항, 열전도율, Seebeck coeff.)로 부터 계산하면 A 모듈 및 B 모듈의 냉각성능에 관한 최대 parameter는 표 3-2와 같다.

한편 A 모듈 1개의 경우 공급전압을 각각 6 volt, 12 volt로 했을 때의 전류치는 각각 1.8 Amp., 4.0 Amp.로서 6 volt 전원에서는  $I_{max.}$ 의 30%, 12 volt 전원에서는  $I_{max.}$ 의 67% 였다. 또 B모듈의 경우에는 6 volt 전원에서  $I = 3.5$  Amp.로서  $I_{max.}$ 의 58% 인데 대하여  $V = 12$  volt 에서는  $I = 8.5$  Amp.로서  $I_{max.}$ 의 142% 였다. 모듈을 두개 사용하는 경우에도 냉각성능이 낮은 전압조건에서는 전류치가  $I_{max.}$ 의 50% 이하이거나 80% 이상이

표 3-2. 열전모듈의 최대 parameter

	A module	B module
최대전류, $I_{max.}$ (amp)	6.0	6.0
최대냉각, $Q_{max.}$ (watt)	51.4	28.7
최대전압, $V_{max.}$ (volt)	15.4	8.6
최대온도차, $\Delta T_{max}$ [K]	67	67

었다. 이런 점을 고려할 때 모듈의 사용전압은 실제의 인가전류가  $I_{max}$ 의 50 - 80%가 되도록 선택하는 것이 바람직하다. 즉, 직류전압의 선택은 다음의 관계식으로 부터 계산한 전압치를 기준으로 할수 있다.

$$V_{D.C} = \alpha \Delta T_{max} + (0.5-0.8)R I_{max} \quad (3-6)$$

$\Delta T_{max}$  와  $I_{max}$ 는 열전모듈의 사양에서 주어지는 최대 parameter값이며  $\alpha$ 와 R은 열전모듈의 total Seebeck coeff. 및 전기저항으로서 열전소자의 기하학적 dimension, 물성치, 소자대의 수에 의하여 결정된다.

한편 열전모듈의 저온단온도( $T_c$ )와 냉각장치의 내부온도( $T_{in}$ )와의 차이는 여러가지 조건에 따라 상이하나 10 l 용기의 경우에는 10 - 15°C, 30 l의 경우에는 15 - 35°C의 온도차 손실이 존재한다. 계산결과에 의하면 정상상태에서는  $T_c = T_1 = T_2$  이므로 이와같은 온도차손실은 전술한 바와 같이 용기내의 대류에 의한 열전달저항이 크기 때문이다. 온도차손실은 용기의 내용적이 크고, 모듈의 저온단온도가 낮을 수록 크게 나타난다. 열전모듈의 구성조건에 따른 냉각성능관련의 제반수치를 총괄하면 표 3-3과 같다.

표 3-3. 열전모듈의 구성조건에 따른 냉각성능의 비교

모듈 type	단자전압 (Volt)	모듈수 (N)		$T_{in}$ (K)	$Q_c$ (watt)	$Q_H$ (watt)	I (Amp)	$(T_{in}-T_c)$ (K)
A	6	N = 1		275.2 (282.1)	0.117 (0.185)	10.74 (10.82)	1.8 (1.8)	15 (23)
		N=2	직렬	284.9 (288.3)	0.076 (0.130)	5.15 (5.21)	0.83 (0.83)	
			병렬	270.8 (276.3)	0.135 (0.236)	21.31 (21.43)	3.56 (3.56)	11 (15)
		N = 1		261.9 (271.7)	0.173 (0.277)	48.68 (48.83)	4.02 (4.02)	22 (31)
	12	N=2	직렬	270.8 (276.3)	0.135 (0.236)	21.31 (21.43)	1.78 (1.78)	12 (15)
			병렬	275.3 (264.9)	0.192 (0.338)	96.86 (97.06)	8.0 (8.0)	13 (18)

(계 속)

표 3-3. 열전모듈의 구성조건에 따른 냉각성능의 비교

모듈 type	단자전압 (Volt)	모듈수 (N)		$T_{in}$ (K)	$Q_c$ (watt)	$Q_H$ (watt)	I (Amp)	$(T_{in}-T_c)$ (K)
B	6	N = 1		265.2 (275.4)	0.159 (0.245)	21.13 (21.24)	3.5 (3.5)	21 (34)
		N=2	직렬	274.4 (280.2)	0.120 (0.202)	9.38 (9.48)	1.6 (1.6)	11 (16)
			병렬	258.3 (266.9)	0.188 (0.320)	41.92 (42.09)	6.98 (6.98)	15 (25)
	12	N = 1		274.7 (282.5)	0.119 (0.181)	102.7 (102.8)	8.5 (8.5)	20 (27)
		N=2	직렬	258.3 (266.9)	0.188 (0.320)	42.92 (42.09)	3.5 (3.5)	15 (25)
			병렬	271.3 (277.7)	0.133 (0.224)	201.1 (201.8)	16.7 (16.7)	

### 제 3 절 용기내부의 전열방식과 냉각성능

앞절에서 본 바와 같이 용기내부의 열이 외부로 제거되는 열전달과정에 있어서 열전달저항이 가장 큰 단계는 용기내부의 대류 전열과정이다. 따라서 냉각장치의 내부설계에 있어서는 대류전열계수를 크게 할수 있는 방안이 필요하다. 이러한 설계방안으로서는 내부에 흡열핀과 공기순환용 팬을 설치하여 용기내부의 공기를 순환시키는 강제 대류방식과 용기내부의 내벽을 열전도성이 좋은 금속판으로 lining하여 절연면적을 크게 하는 자연대류방식을 생각할 수 있다. Fig. 3-9에 이와 같은 내부구조의 개념도를 나타내었다. 두가지 경우의 설계방식에 따른 냉각성능을 비교하기 위해 10 l 및 30 l 용기를 대상으로 다음과 같은 조건에서 simulation 계산을 행하였다.

#### ○ 강제대류의 경우

흡열핀 재질 : 알루미늄

흡열핀 면적 : 0.2 m<sup>2</sup>

순환공기의 유속( $v_g$ ) : 5 m/sec

강제대류 전열계수 :  $h = 4.3229 v_g$

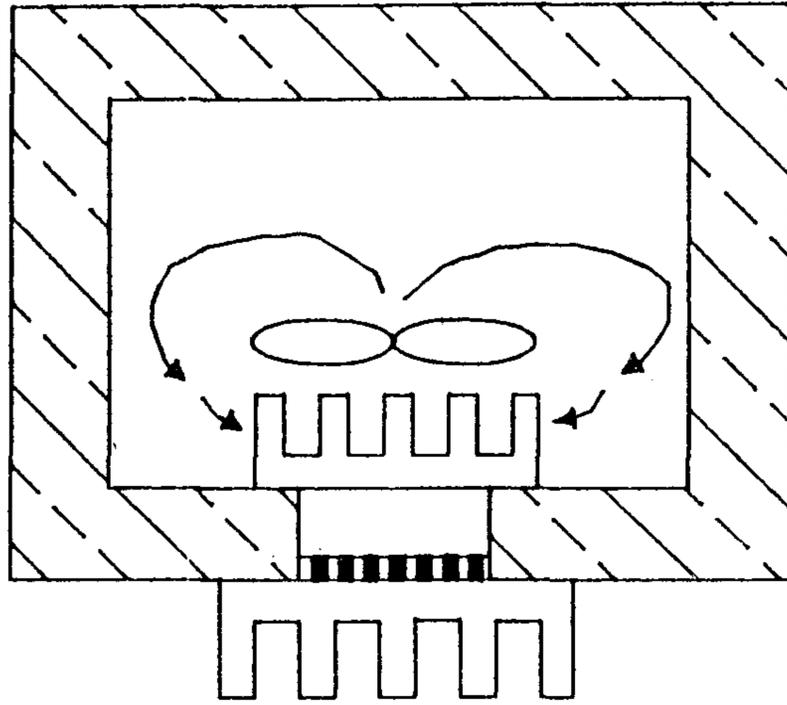
#### ○ 자연대류의 경우

내벽 lining : 알루미늄 판재 (두께 1 mm)

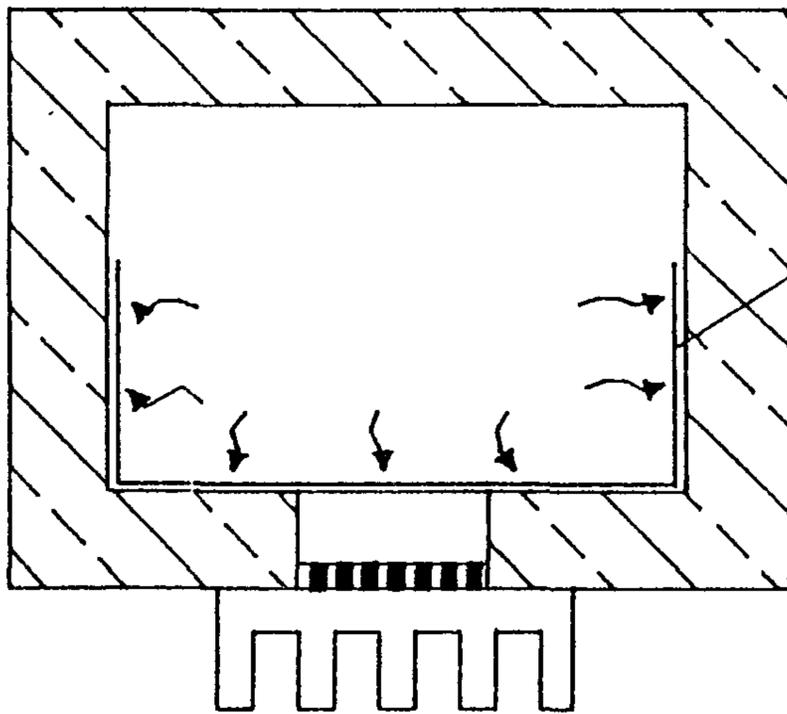
lining 면적 : 40L x 25W x 15H -- 30 l 용기

20L x 25W x 10H -- 10 l 용기

#### ○ 저장물의 열부하 : 2 kcal/°C, 30°C



(Forced convection)



Al lining

(Natural convection)

Fig. 3-9 강제대류 및 자연대류의 개념도.

위의 조건에 의한 simulation 결과 내부의 대류전열방식에 따른 열전달저항을 비교하면 표 3-4와 같다.

표 3-4 전열방식에 따른 열전달저항의 비교

(K/W)

		A module		B module	
		N=1, V=12	N=2, V=12 (parallel)	N=1, V=6	N=2, V=12 (series)
forced convection	10 l	0.226	0.226	0.226	0.226
	30 l	0.226	0.226	0.226	0.226
natural convection	10 l	4.65	4.70	4.62	4.67
	30 l	3.23	3.26	3.24	3.25
without device	10 l	120	67	151	84
	30 l	109	60	139	75

위표에서 보면 강제대류의 경우 자연대류에 비하여 대류열저항이  $1/14 - 1/20$ 에 불과하여 냉각성능 면에서는 용기내부의 설계방식을 강제순환식으로 하는 것이 유리함을 알수 있다. 그러나 자연대류방식의 경우에도 내부에 흡열 lining이 없는 경우에 비하여 전열저항이  $1/30 - 1/36$  이하이므로 양호한 냉각성능을 기대할 수 있다. 실제로 냉각장치의 기능면을 고려하면 강제대류방식은 냉각성능은 우수하나 유효내용적의 감소와 내용물의 저장에 불편하게 되는 결점이 있고 내벽 lining에 의한 자연대류방식은 성능은 불리하나 실용적으로는 편리한 장점을 갖는다. 따라서 실제의 device설계에 있어서는 성능과 기능 및 제작상의 문제등을 고려하여 내부 설계방식이 선택되어야 할 것이다.

한편 Fig. 3-10 과 Fig. 3-11에 A 모듈과 B 모듈에 대하여 자연대류방식과 강제대류방식을 이용한 경우의 냉각성능을 비교하였다. 모듈의 종류나 갯수에 관계없이 강제대류방식에서 냉각속도가 빠르고 최저냉각온도도 낮음을 알수 있다. 냉각장치의 내용적이 30 l인 경우에도 이와 같은 현상은 동일하게 나타나고 있다. 다만 열전도성 내벽 lining이나 공기순환 팬이 없는 경우에는 앞절에서 본 바와 같이 내용적에 따른 냉각성능의 차이가 크게 나타나고 있으나 Fig. 3-9과 같이 열전달저항이 적은 경우에는 내용적에 따른 냉각성능의 차이는 크게 나타나고 있지 않다. 일례로서 표 3-5에 각각의 냉각조건에 대하여 정상상태에서의 최저냉각온도( $T_{in}$ )을 비교하였는데 내용적이 3배로 증가해도 최저냉각온도는 크게 변하지 않는다. 또 모듈을 1개 사용하였을 경우 보다는 2개를 사용하였을 경우가 오히려 최저냉각온도는  $1 - 3^{\circ}\text{C}$  높다. 이와 같은 원인은 simulation 계산에 있어서 방열능력을  $k_s = 10 \text{ W/m}$ 로 일정하게 하였으므로 모듈 2개의 경우에는 방열능력의 부족에 의하여 열전모듈의 고온단의 열방출이 불량하였기 때문이라고 생각된다.

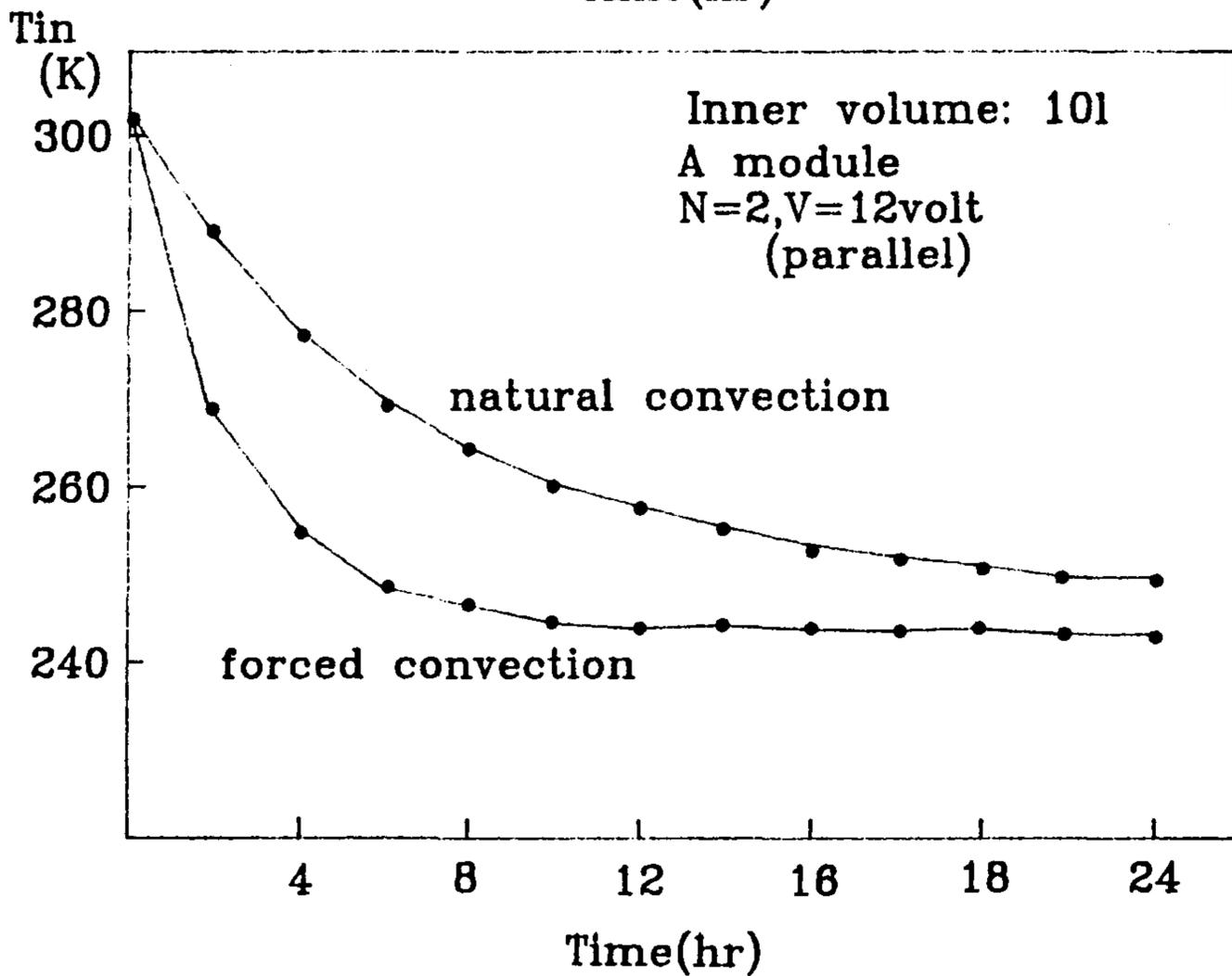
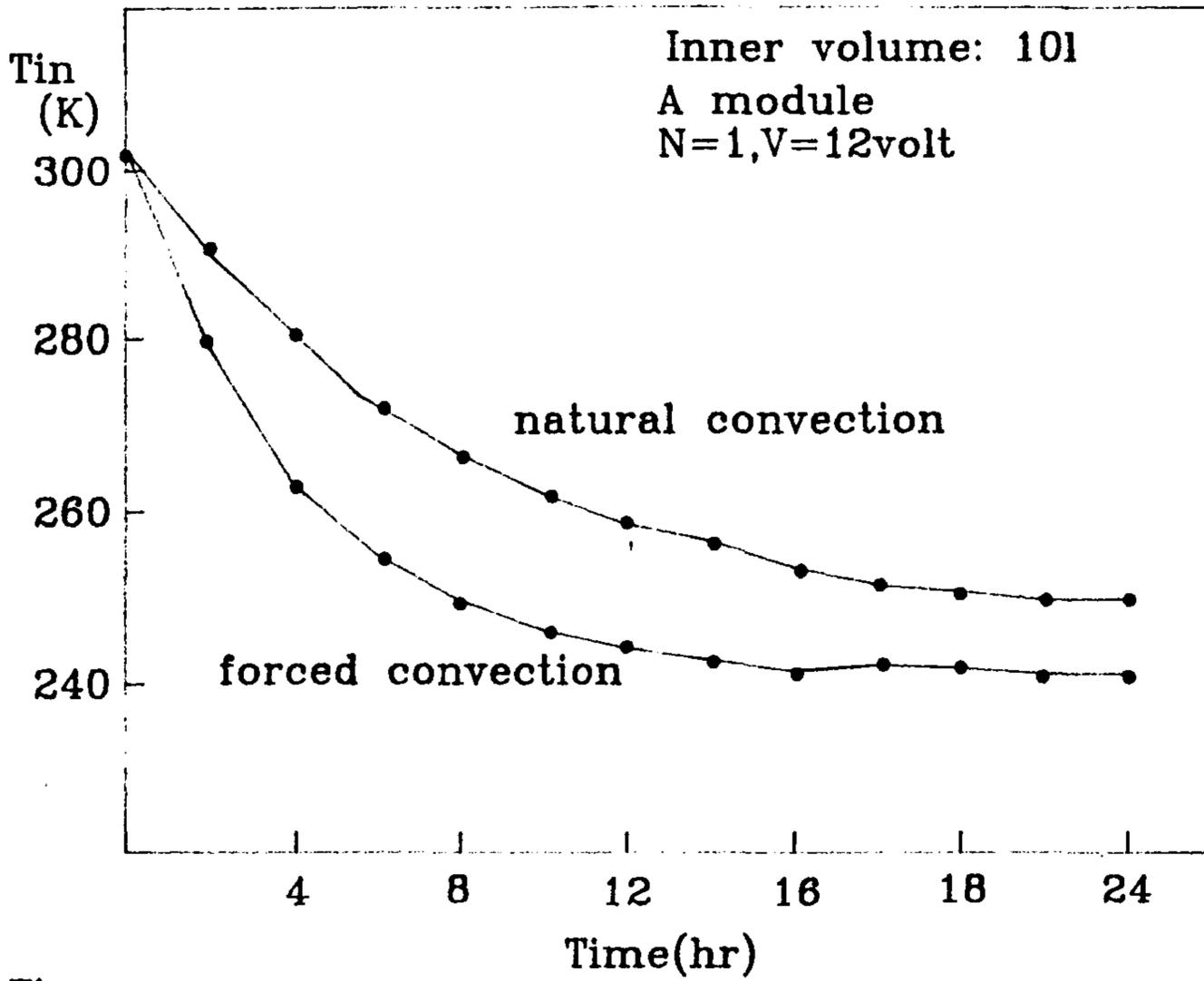


Fig. 3-10 대류방식에 따른 cooling chamber 내부온도 변화의 simulation 결과.

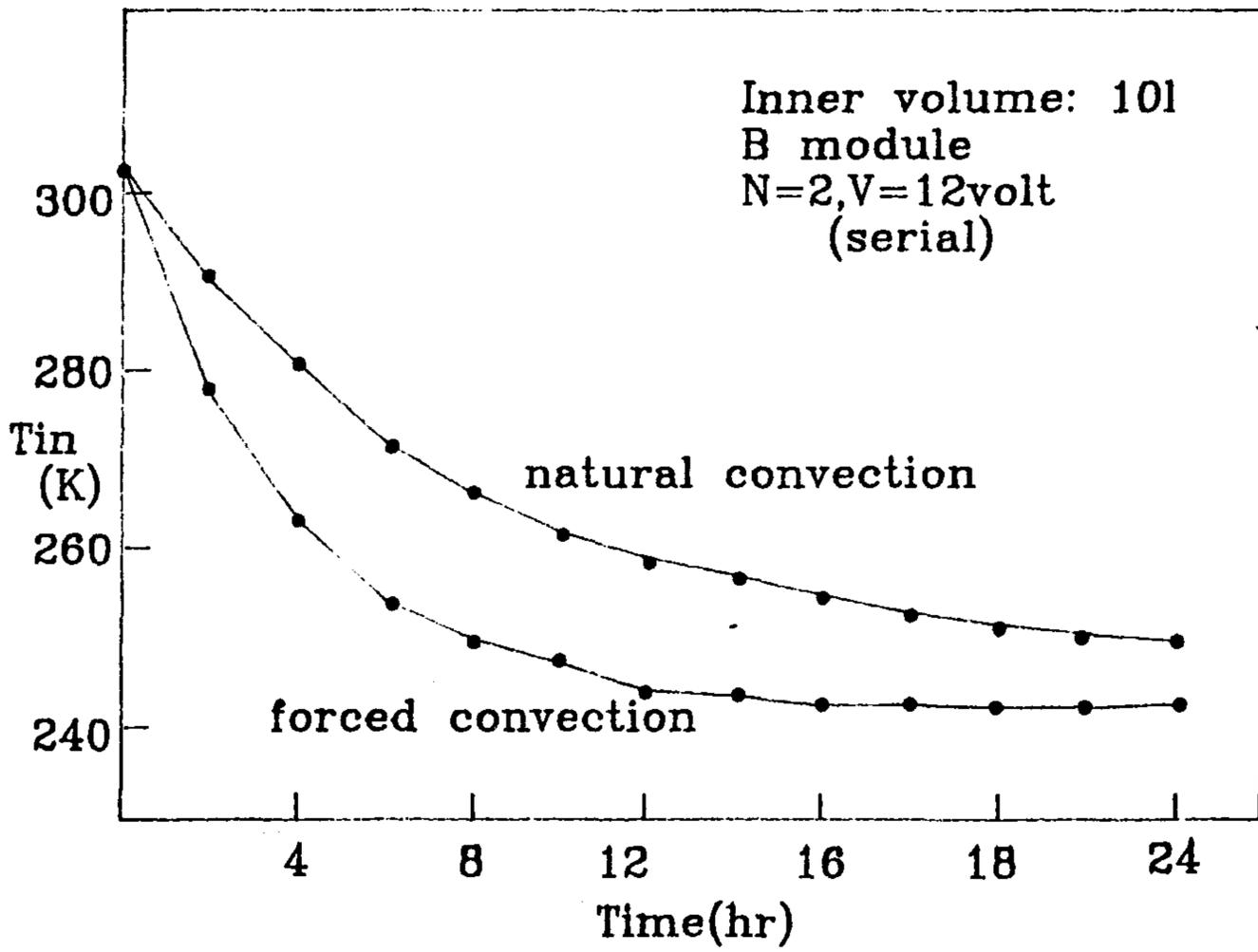
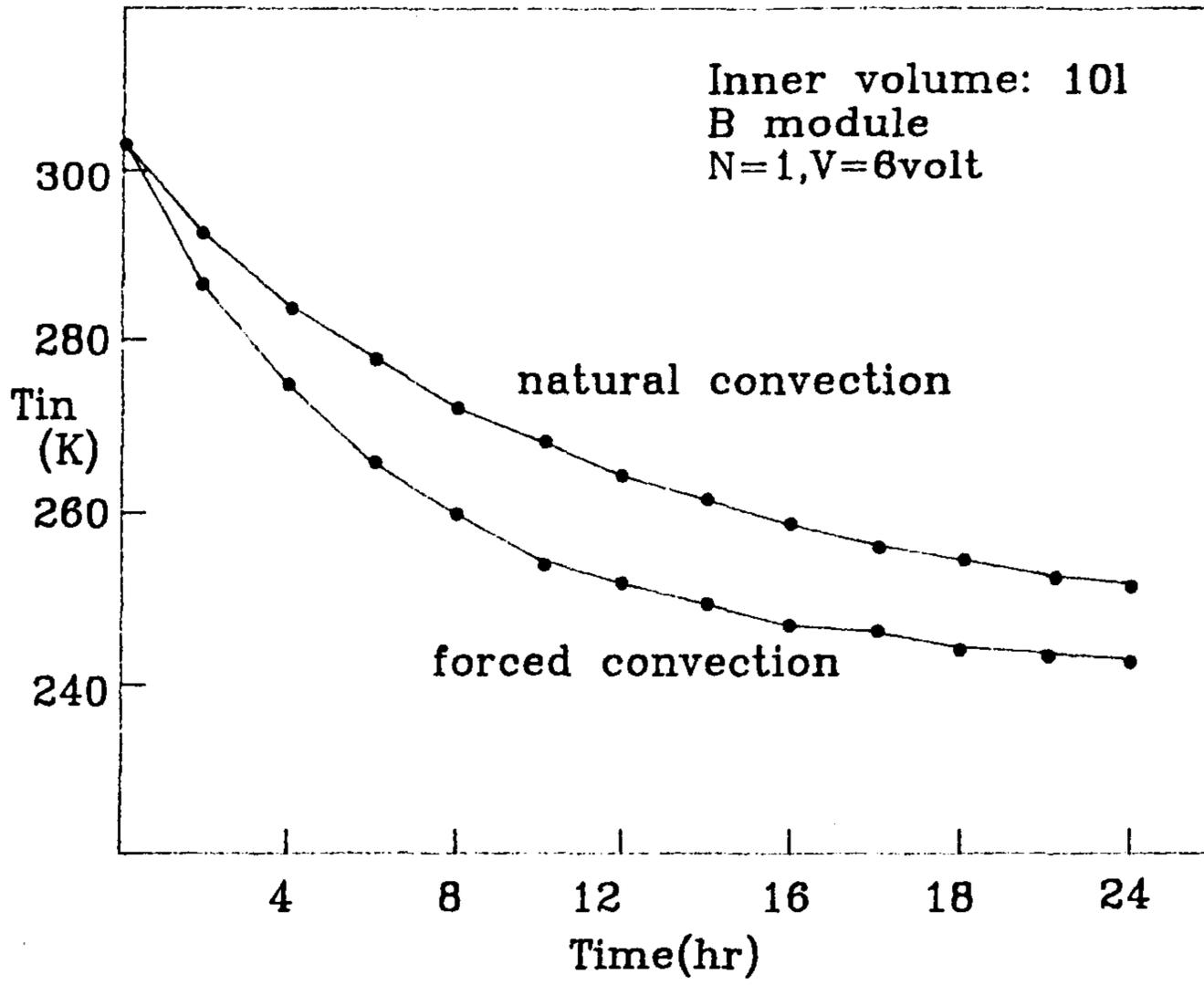


Fig. 3-11 대류방식에 따른 cooling chamber 내부온도 변화의 simulation 결과.

표 3-5. 냉각조건에 따른 내부의 최저도달온도 (Tin)

모 들	전 열	N = 1		N = 2	
	방 식	6 Volt	12 Volt	직 렬	병 렬
A	자 연		242.4 (243.4)		245.5 (246.2)
	강 제		241.2 (241.8)		244.4 (244.7)
B	자 연	242.8 (243.8)		243.9 (244.6)	
	강 제	241.4 (242.3)		242.6 (243.0)	

( )안은 30 l 용기

## 제 4 절 냉각장치의 설계와 시제품의 성능평가

### 4-1. 방열기의 설계와 성능해석

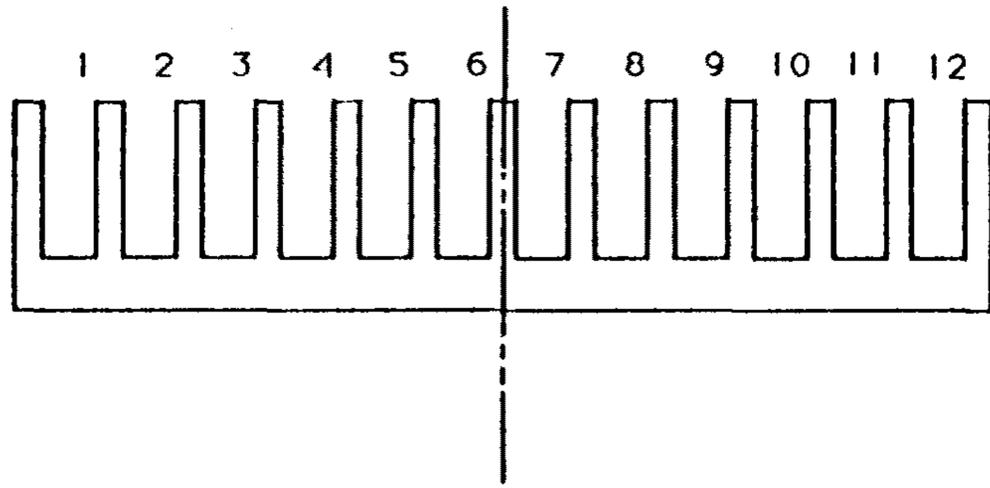
열전냉각장치의 열교환은 전술한 바와 같이 열전모듈의 Peltier 효과에 의존하는 것으로서 저온단에서 흡열된 열량( $Q_c$ )이 고온단으로 이동하여 열전모듈의 고온단에서는 인가된 전력( $P$ )에 따라  $Q_H = Q_c + P$ 의 발열이 있게 된다. 따라서 고온단에서 발생하는 열이 저온단으로 역류하지 않도록 방열기의 설치가 필요하며 고온단의 방열능력은 simulation 결과에서 본 바와 같이 냉각능력을 좌우하는 중요한 요인의 하나이다. 여기에서는 고온단의 방열방식으로서 고온단에 aluminum fin을 부착하고 이를 공기 순환 fan으로 강제냉각시키는 방법을 취하였다. 이 경우 방열기의 방열능력은 fin의 형상과 방열능력, fan의 형상, 설치위치등에 따라 달라진다. 따라서 우선 fan의 형상과 설치위치에 따른 유속분포의 변화를 조사하기 위하여 단면의 형상이 Fig. 3-12(a)와 같고 길이가 21 cm인 aluminum fin에 AC 모터로 작동되는 fan을 Fig. 3-12(b)와 같이 설치하여 회전수를 2,900 RPM으로 일정하게 유지한 상태에서 유속과 유량을 측정하였다. 즉, 공기의 유속은 pitot tube와 manometer로 측정된 압력차에 의하여 Bernoulli 정리로부터 다음식으로 계산된다.

$$P_o = P + \rho u^2 / 2 \quad (3-7)$$

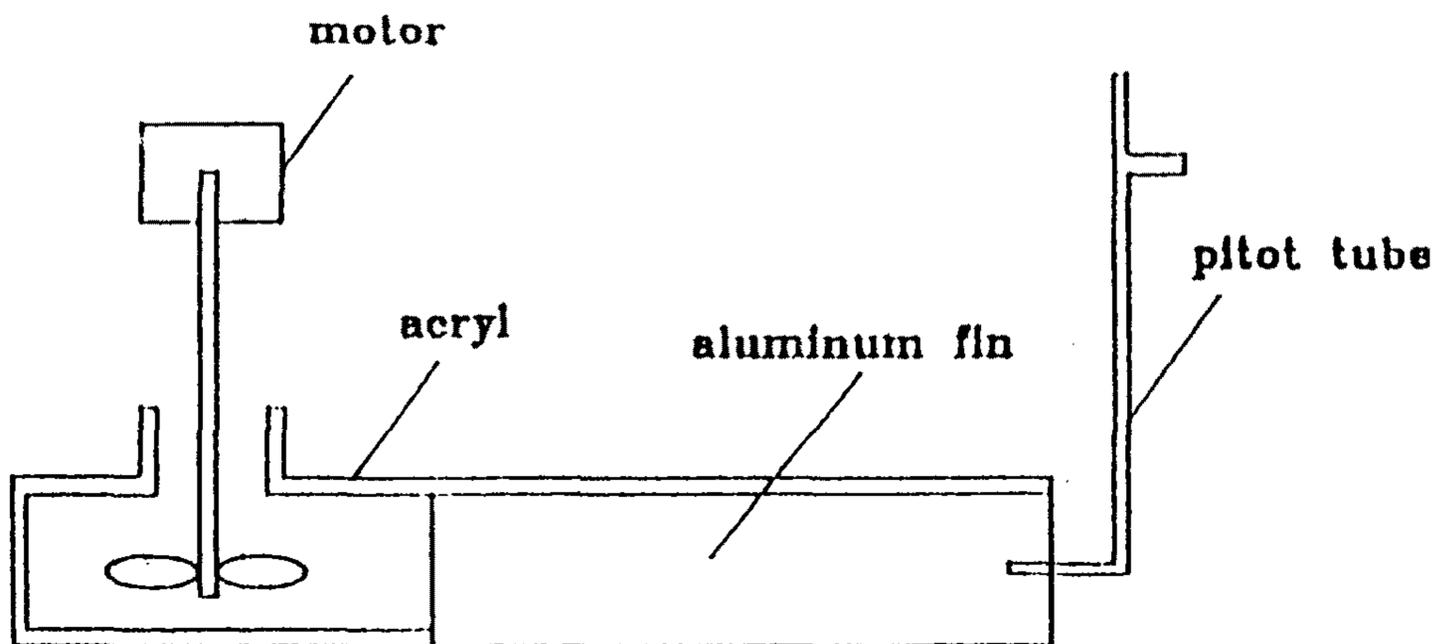
$$u = [2(P_o - P) / \rho]^{1/2} \quad (3-8)$$

u: 공기의 유속,  $P_o$ : 정체압력, P: 정압

Pitot tube에 의한 공기유속의 측정은 fin과 fin 사이의 channel 중심위치



(a)



(b)

Fig. 3-12 알루미늄 fin의 단면형상(a)과 유속분포 측정장치의 구성(b).

에서 수직방향으로 측정하였다. Channel의 간격은 좁으므로 수평단면에서의 공기유동은 2차원 Poiseuille 유동의 경우 수평단면에서의 평균속도는  $u_{max}/2$  이므로 각 channel을 통과하는 공기의 평균속도 ( $u$ )는 다음식으로 계산된다.

$$u = \frac{u_{max}}{2} \int_0^h \frac{u(y)}{u_{max}} dy \quad (3-9)$$

$u_{max}$  : 유동단면에서의 최대속도.

$h$  : fin의 높이,

방열 fin의 각 channel 에 대하여 fin base로 부터 fin tip 방향으로 측정한 공기의 유속분포를 최대속도에 대한 무차원 속도분포를 표시하면 Fig. 3-13과 같다. 속도분포는 fin 높이의 1/2 부근에서 유속이 최대인 전형적인 난류분포를 나타내며 이러한 현상은 channel에 관계없이 거의 일치한다. Fig. 3-13의 결과로 부터 (3-9)식의 적분항을 구하면 channel 중간 지점에서의 평균속도는  $u_{max}$ 의 91.7% 이었다. 따라서 공기의 평균유속과 유량은 다음식으로 계산된다.

$$u = 0.917 \times \frac{u_{max}}{2} \quad (3-10)$$

$$Q = u \cdot A = \int u dA \quad (3-11)$$

$A$  : 공기 유동의 단면적

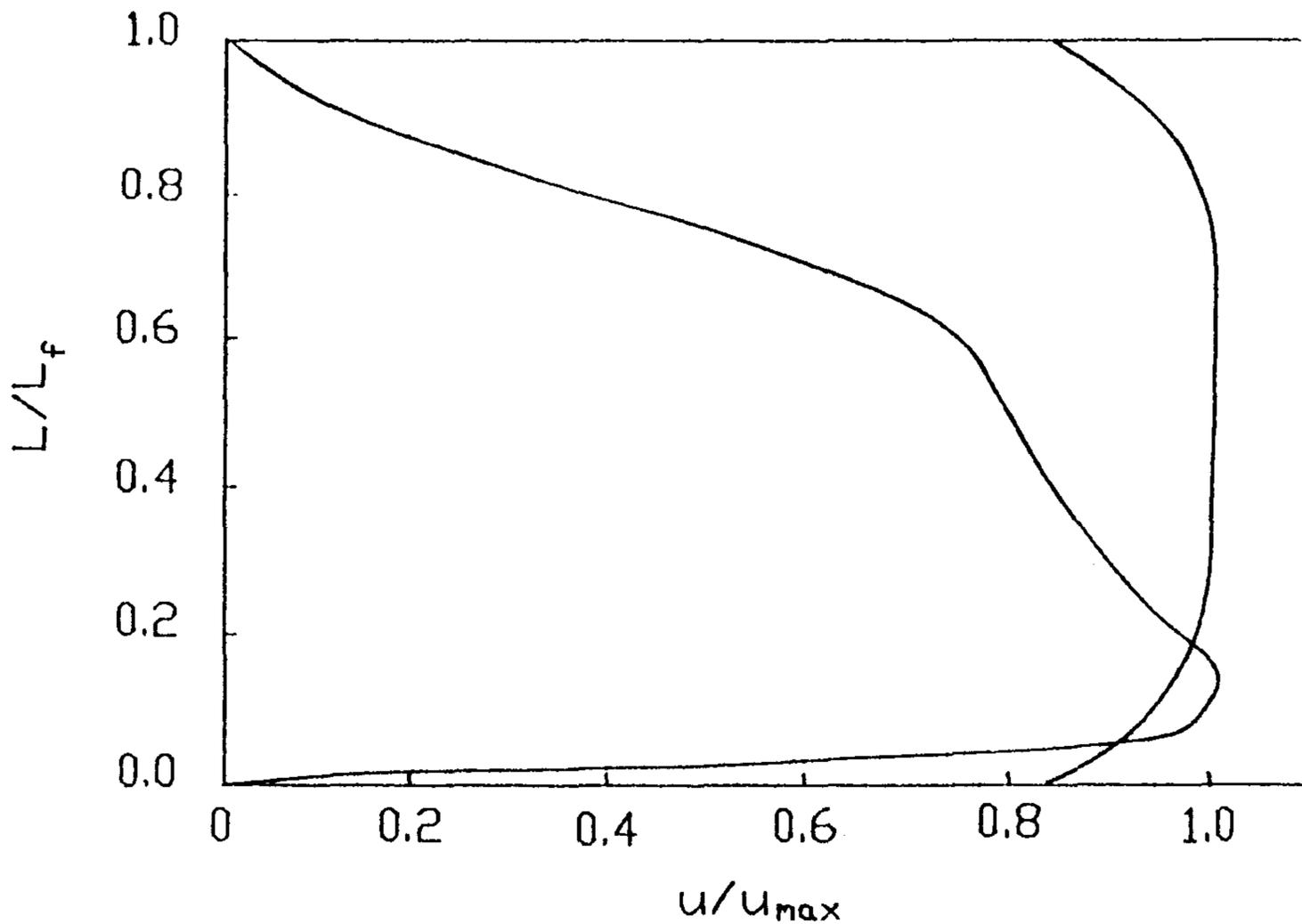
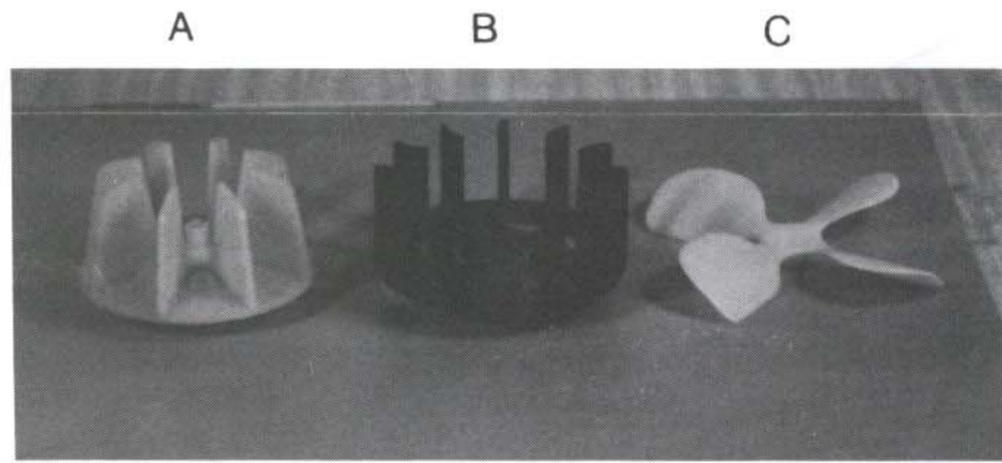
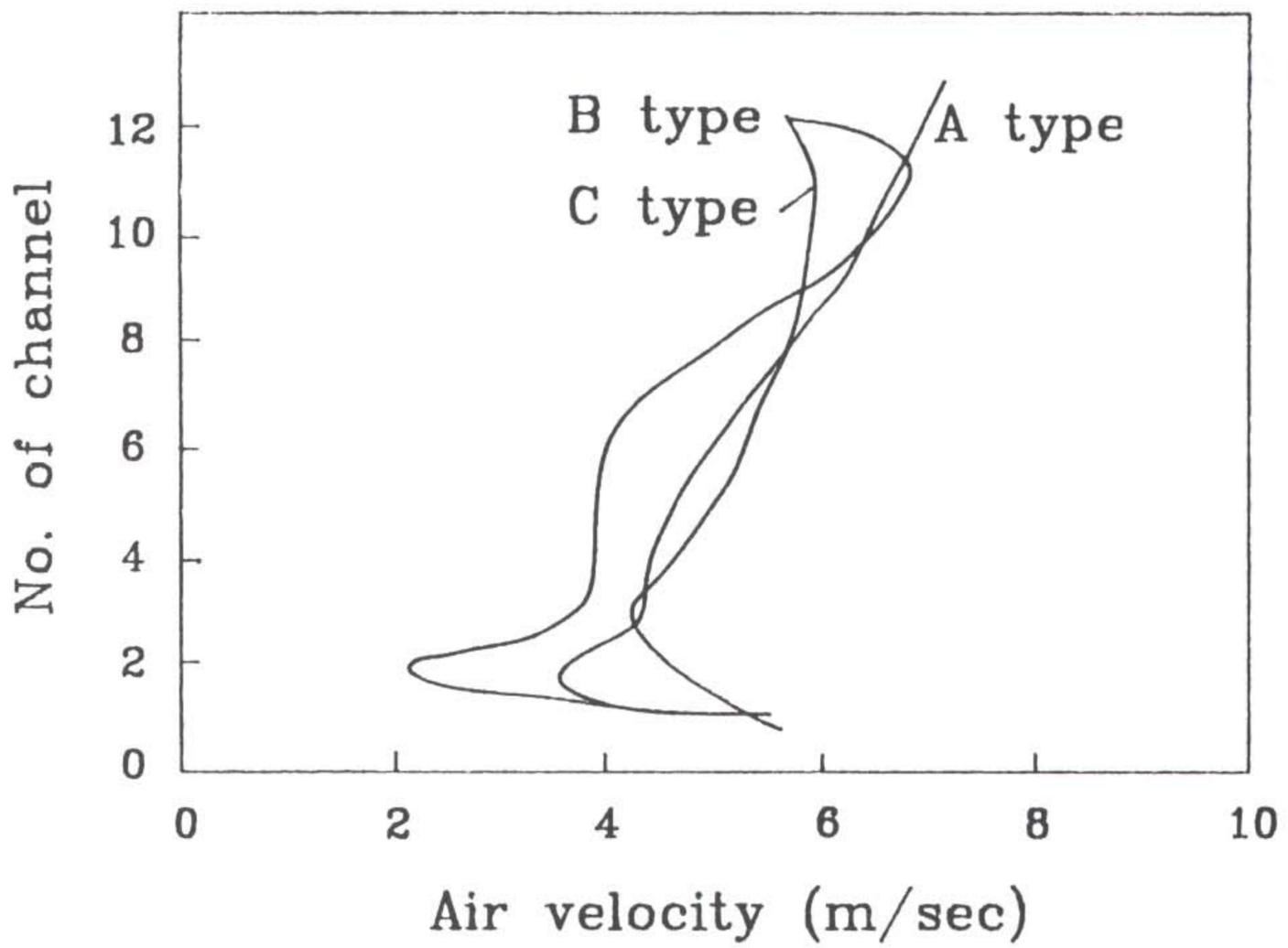


Fig. 3-13 Dimensionless velocity distribution of air.

한편 공기순환용 fan의 형상으로는 Fig. 3-14(a)와 같은 A, B, C의 3종류를 생각할수 있다. 이들 fan을 사용한 경우 각 channel 에서 측정된 최대속도의 분포는 Fig. 3-14(b)와 같다. 모터의 회전수는 2,900 RPM 으로 하고 유속은 fin 높이의 1/2 위치에서 측정하였다. 최대속도는 fan의 형상에 관계없이 4 - 7 m/sec 범위이며, channel의 단면적이 1.625 cm<sup>2</sup> 이고 channel의 갯수가 12개 이므로 (3-10)식과 (3-11)식으로 부터 channel을 통과하는 공기유량을 계산하면 다음과 같다.



(a)



(b)

Fig. 3-14 Fan의 형상(a)과 각 channel에서의 최대속도분포(b).

A type :  $5.7 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{sec}$

B type :  $5.1 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{sec}$

C type :  $5.7 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{sec}$

동일한 유속에서 방열능력은 공기유량에 비례하므로 방열용 fan의 형상은 A type 또는 C type이 적절함을 알수 있다. 방열 fin의 표면적이 주어지면 방열능력은 다음식으로 계산된다.

$$Q_s = S \cdot \alpha \cdot (T_s - T_A) \quad (3-12)$$

$Q_s$  : 방열능력 [Kcal/hr]

$S$  : 방열 fin의 표면적 [ $\text{m}^2$ ]

$\alpha$  : 강제대류전열계수 [ $\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ ]

$T_s$  : fin의 표면 온도

$T_A$  : 주위 온도

강제대류전열계수  $\alpha$ 는 공기의 유속에 의존하며 일반적으로 명확하지 않은 평면적에 평행인 실온 근방의 공기류에 대하여는 다음식을 적용하여  $\alpha$ 를 평가할수 있다.

$$u < 5 \text{ m/sec} : \alpha = 5.3 + 3.6u \text{ [Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}]$$

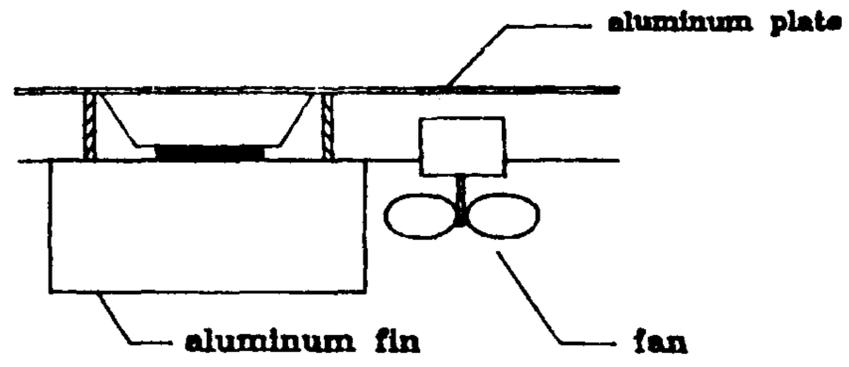
$$u > 5 \text{ m/sec} : \alpha = 6.47 \times u^{0.78} \text{ [Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}]$$

이상의 결과로 부터 방열 fin의 표면적, channel의 공기유속, 방열 fin 및 주위 공기의 온도가 주어지면 방열기의 방열능력을 알수 있으며, 실제 방열

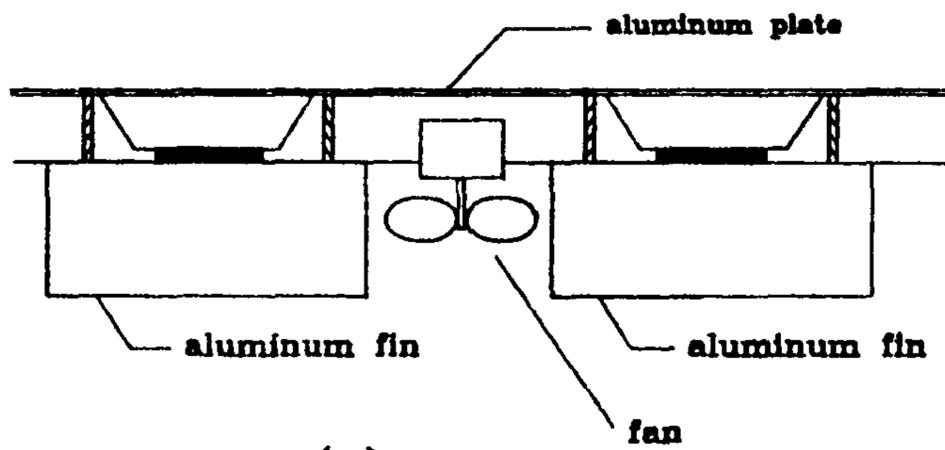
기의 설계에 있어서는 방열능력은 열전모듈 고온단의 발열량( $Q_H$ ) 보다 커야 하므로  $Q_H$ 에 대응하여 방열 fin의 표면적이나 fan의 회전수를 포함하는 방열기의 설계가 가능하다.

#### 4-2. 냉각장치 시제품의 제조

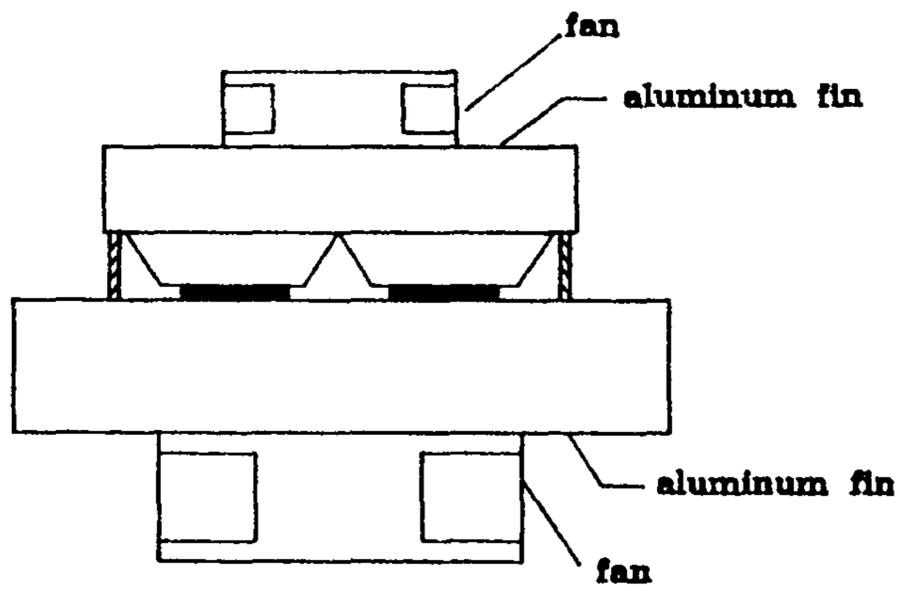
냉각장치의 시제품을 제작하기 위하여 내용적과 촌법이 각각 11 l (27.3L x 20.3W x 20.5H), 24 l (30.5L x 30.5W x 26.0H) 및 32 l (41.8L x 23.5W x 32.5H)인 시판의 합성수지제 용기를 사용하였다. 이들 용기는 단열재로서 ABS 수지 사이에 발포 우레탄이 충전된 것이다. 용기 내부의 대류전열방식은 11 l와 24 l 용기의 경우에는 용기 내벽을 알미늄 박판으로 lining한 자연대류방식을 취하였고, 32 l 용기의 경우에는 용기 내부에 공기순환용 fan을 설치함으로써 강제대류방식을 취하였다. 열전모듈은 열전소자의 촌법이 1.4 x 1.4 x 1.5 mm 이고 P-N 소자대의 수가 71개인 전술의 B module을 사용하였으며 module의 수는 11 l의 경우에는 1개, 24 l의 경우에는 2개를 사용하였다. 각 용기에 대한 열교환기의 구조 및 방열 fin의 형상과 촌법은 Fig. 3-15와 같다.



(a) 11 liter



(b) 24 liter



(c) 32 liter

Fig. 3-15 열교환기의 구조 및 방열 fin의 형상.

#### 4-3. 냉각장치의 성능평가

공급전원으로서 열전모듈을 1개 사용한 11 l의 경우에는 6 Volt 전원을, 2개 사용한 24 l 및 32 l의 경우에는 열전모듈을 직렬로 연결하여 12 Volt 전원을 사용하고, 방열 fan의 회전수를 2900 RPM으로 일정하게 유지한 조건에서 각각의 냉각성능을 측정하였다. 장치조건에 따른 냉각성능의 비교를 위하여 초기온도(외기온도)가 290 K 로 일정한 조건이 되도록 측정결과를 보정하여 그 결과를 Fig. 3-16에 나타내었다. 장치에 따라 일정치는 않으나 대체로 통전후 100분 정도에서 정상상태에 도달하며 외기온도와 최저의 냉각온도의 차이는 11 l의 경우  $\Delta T = 15K$ , 24 l의 경우  $\Delta T = 12.85K$ , 32 l의 경우  $\Delta T = 19.3K$  가 얻어졌다. 열전모듈의 수가 2개로 동일한 경우, 용기내부의 전열방식으로서 자연대류방식을 취한 24 l 보다 강제대류방식을 취한 32 l의 냉각성능이 우수하여 제 2 절에서 설명한 simulation 결과와 일치함을 알수 있다. 그러나 24 l의 용기와 32 l의 용기는 단열벽의 단열상태가 동일하지 않으므로 각각의 용기에 대한 냉각부하의 고려가 필요하다. 이에 대한 검토를 위하여 단열벽의 열관류계수(coeff. of heat transmission)를 측정하였다. 측정방법으로는 용기의 내부의 온도를 일정온도 T로 유지시킨 후 외부로 부터 열의 유입에 의하여 내부온도가 실온  $T_a$ 에 도달할 때까지 소요시간을 측정하였다. 이 경우 용기내의 공기가 얻는 열용량의 증가속도는 외부에서 유입되는 열량과 동일하므로 다음의 관계가 성립한다.

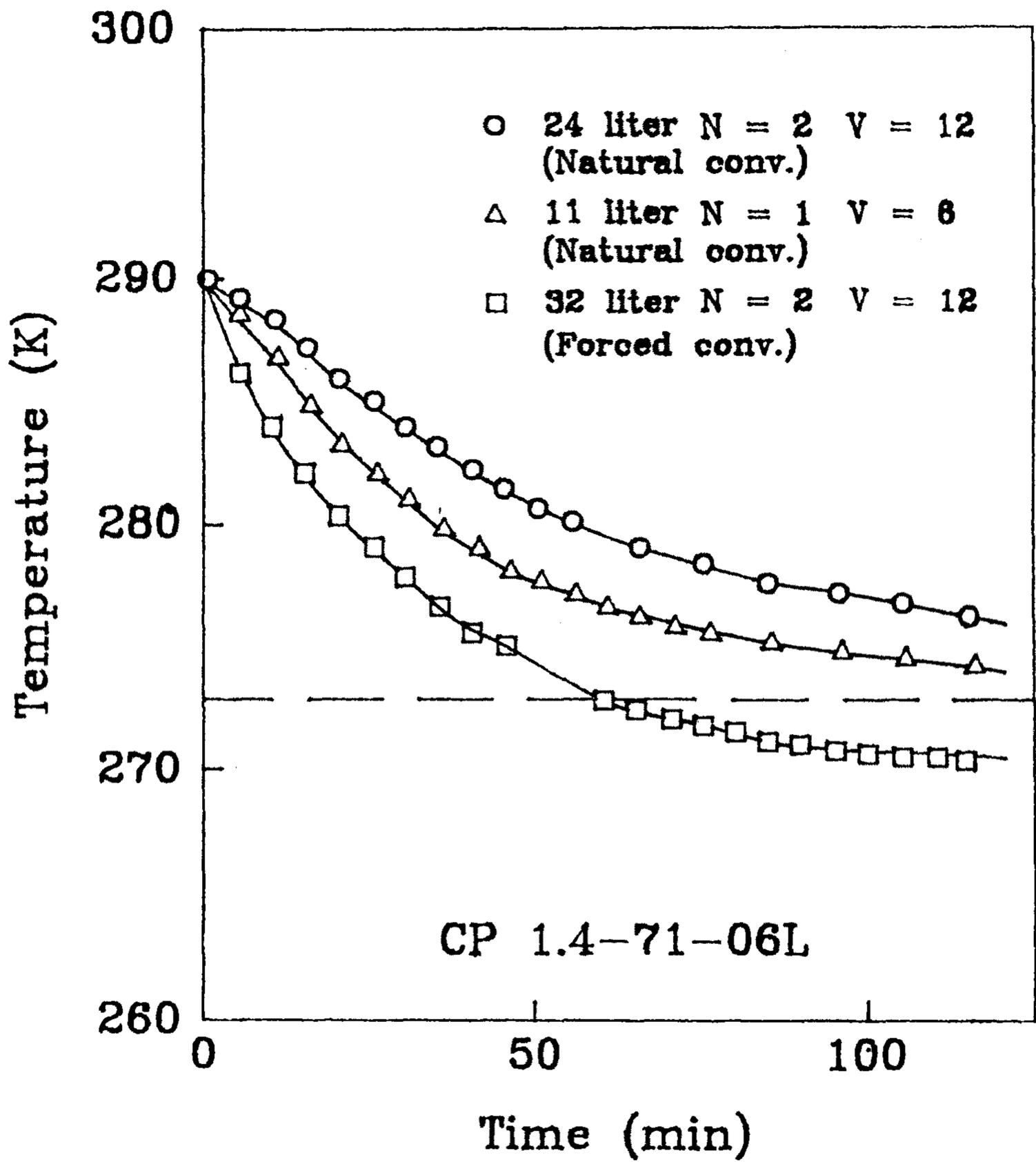


Fig. 3-16 11 l, 24 l, 32 l 냉각장치에 대한 냉각성능.

$$V \cdot \rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} = h \cdot A \cdot (T_A - T) \quad (3-13)$$

A : 용기의 표면적 [m<sup>2</sup>]

V : 용기의 내용적 [m<sup>3</sup>]

$\rho$  : 공기의 밀도 [Kg/m<sup>3</sup>]

C<sub>p</sub> : 공기의 비열 [KJ/Kg·deg]

h : 열관류계수 [watt/m<sup>2</sup>·deg]

(3-13)식을  $t = 0 ; T = T_i$  (초기온도)의 초기조건에서 적분하면 다음식이 얻어진다.

$$\left( \frac{T_A - T}{T_A - T_i} \right) = \exp\left( - \frac{h \cdot A}{V \cdot \rho \cdot C_p} t \right) \quad (3-14)$$

T<sub>A</sub>, T<sub>i</sub>, T의 실측치를 (3-14)식에 대입하여 정리하면 Fig. 3-17과 같다. 약간의 오차는 있으나 대체로 원점을 통하는 직선관계가 성립하여 (3-14)식을 만족하고 있다. 동도에서는 비교를 위하여 50 l급 시판의 냉장고에 대한 측정결과를 병기하였다. 각 용기의 경우 직선의 기울기는 다음과 같다.

11 l 용기 :  $2.913 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$

24 l 용기 :  $3.267 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$

32 l 용기 :  $1.956 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$

시판냉장고 :  $1.800 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$

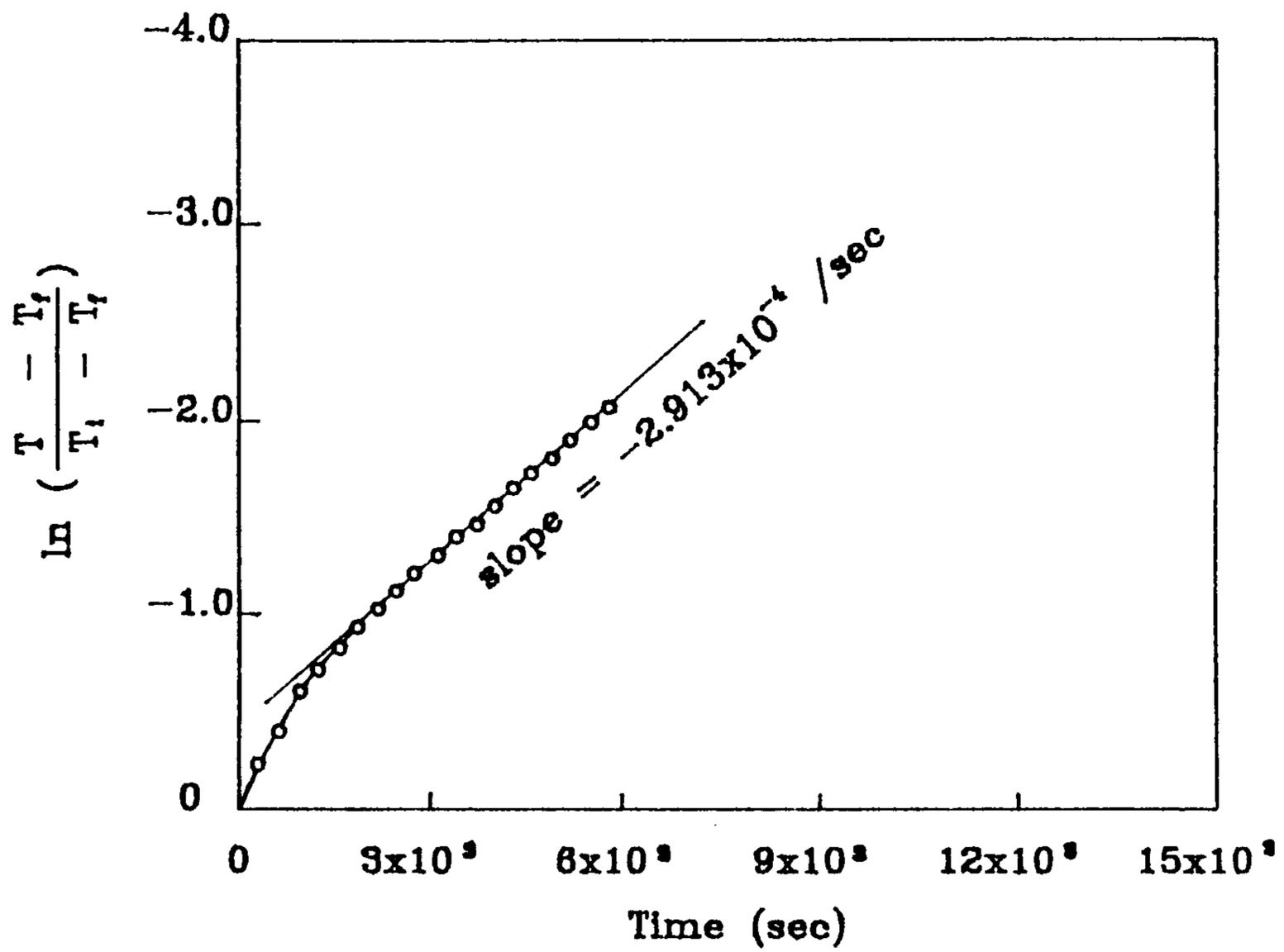


Fig.3-17 Overall heat transfer coefficient of container.

위의 측정결과에  $C_p = 1.0057 \text{ KJ/Kg}\cdot\text{deg}$ ,  $\rho = 1.1774 \text{ Kg/m}^3$  및 각용기의 내용적과 표면적을 대입하면 단열벽의 열관류계수로서 다음값이 얻어진다.

$$11 \text{ l 용기} : h = 1.263 \times 10^{-2} \text{ watt/m}^2\cdot\text{deg}$$

$$24 \text{ l 용기} : h = 1.851 \times 10^{-2} \text{ watt/m}^2\cdot\text{deg}$$

$$32 \text{ l 용기} : h = 1.192 \times 10^{-2} \text{ watt/m}^2\cdot\text{deg}$$

$$\text{시판냉장고} : h = 1.105 \times 10^{-2} \text{ watt/m}^2\cdot\text{deg}$$

냉각장치의 공기온도를  $T^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각시키는데 요하는 냉각부하는 단열벽을 통하여 용기내부로 유입되는 열부하와 동일하며 이는  $Q = Ah (T_a - T)$ 로 계산된다. 24 l의 용기와 32 l 용기의 경우 최저 냉각온도까지는 유입열에 대한 열부하를 계산하면 각각 11.9 watt, 14.3 watt로서 용기내부를 강제대류시키는 32 l의 경우 보다 크다. 열전모듈에 의한 냉각장치의 유효냉각 능력은 유입열의 냉각과 용기자체의 냉각에 소모된다. 용기자체의 냉각에 필요한 열부하의 정량적 산출은 곤란하나 내용적이 큰 경우 용기의 열용량도 크다는 점을 고려하면 용기의 냉각에 대한 열부하도 32 l의 경우가 크다고 볼수 있다. 따라서 용기의 내부를 강제대류시키는 냉각장치의 유효냉각 능력은 자연대류시키는 냉각장치 보다 훨씬 크며, 실제의 냉각 device의 설계에 있어서는 이러한 사실이 충분히 고려되어야 할 것이다.

## 제 4 장 결 론

최근 반도체나 전기광학기기의 소형화와 고성능화에 수반하여 국부냉각이나 항온제어 device로서 용도가 광범위하게 확대되고 있는 열전냉각에 대한 연구의 일환으로 열전 모듈의 제작 및 소형냉각장치에의 응용에 대한 연구를 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 알루미늄 금속기판을 양극산화시켜 생성된  $Al_2O_3$  피막의 절연특성은 인가전압 100 volt 미만에서  $3 \times 10^{13} \Omega$  으로 열전 module의 절연기판으로 충분함이 확인되었으며, 최적의 양극산화 조건은 다음과 같다.

전해액 : 13%  $H_2SO_4$ , 전원 : 15 - 20 volt, 20 - 25 mA/cm<sup>2</sup>,  
온도 : 6 - 8 °C,  $Al_2O_3$  피막성장속도 : 0.33  $\mu\text{m}/\text{min}$

2.  $Al_2O_3$  절연피막에 대한 Ni 무전해도금과 Cu 전해도금에 의하여 절연기판/Cu 전극의 직접 접합이 가능하였으며, 최적의 Cu 전해도금 조건은 다음과 같다.

전해액 :  $CuSO_4$  (200 g/l) +  $H_2SO_4$  (60 g/l),  
전류밀도 : 30 - 35 mA/cm<sup>2</sup>,  
Cu 후막 : 120 - 150  $\mu\text{m}$  (2.5 hrs.)

3. Screen printing법에 의한 전극 pattern 형성과 cellular jig에 의한 열전 소자의 접합으로 열전 module 시제품을 제조하였으며, 시제품의 성능사양은 다음과 같다.

열전소자 칩수 : 4 x 4 x 4 mm, P-N 소자대의 수 : 17 대
최대냉각능 : 0.046 watt, 최대온도차 : $\Delta T = 65.6$ K 최대전류 : 11.6 amp, 최대전압 : $6.47 \times 10^{-3}$ volt

4. 열전 module 제조법으로서 종래의 ceramic 기판에 대체하여 양극산화에 의한 알루미늄 기판의 이용 가능성이 확인되었다. 알루미늄기판의 경우 알루미늄 기판 사용시에 비해 작은 전류값으로 동일한 흡열능을 얻을 수 있었으며, 동일한 전류에서는 모듈양단의 온도차를 크게 할 수 있었다.
5. 열전냉각 device로서 소형냉각장치의 최적 설계요인을 분석하고, 내용적 10 - 40 l의 소형냉장고 시제품의 설계조건에 따른 성능평가로 부터 내외부 온도차  $\Delta T = 13 - 20$  K의 냉각능력 확보가 가능하였다.
6. 냉각장치 내부의 전열 device로서 열전도성 금속박판의 내장 lining에 의한 자연대류방식 보다는 공기순환 fan의 설치에 의한 강제대류방식이 냉각성능 면에서 우수함이 밝혀졌다.

## REFERENCES

- 1) 達板哲彌 二瓶公志 編集 : 「最新機能成膜プロセス技術」, 廣信社 (1987)
- 2) Sochard I.I. : Adv. Energy Conversion 2, 255 (1962)
- 3) Curtis P.B. et al : Brit. Patent Spec. No.941522 (1963)
- 4) Baker P.D. : Brit. Patent Spec. No.817076 (1959)
- 5) Curtis P.B. : Brit. Patent Spec. No.919147 (1963)
- 6) Goldsmid H.J. : 「Thermoelectric Refrigeration」, Plenum Press (1964)
- 7) 上村, 西田 : 「熱電半導體とその應用」, 日刊工業新聞社 (1988)
- 8) 심재동 외 : 「Thermoelectris Device의 개발 및 응용에 관한 연구」, 제2차년도 보고서, KIST, 476-3954-1 (1990)