

제 2 차년도
연차보고서

GOVP1199108897

KSRI-91-77-IR

첨단계측기기 개발

Development of Advanced Scientific Instruments

Manganin 압력게이지 개발

Development of manganin pressure gauge

연구기관

재단법인 한국표준연구소

寄贈

과학기술처	一九九一年十月
서	사

과학기술처

BIBLIOGRAPHIC DATA SHEET		1. 관리번호	2. 수행부서 압력진공연구실	3. 발행일 1991. 5.
4. 제목/부제 Manganin 압력게이지 개발			7. 주제분야 1402	
5. 저자(공저자) 이확주, 우삼용, 김국진, 한승웅		8. 수행기관 보고서번호 KSRI-91-77-IR		
6. 수행기관(KSRI 이외의 공동 혹은 위촉연구기관)		9. 계약번호		
		10. 자료내역 2 차년도 최종보고서		
11. 위탁기관 과학기술처				
12. 보증사항				
13. 초록(주요 참고문헌이나 관련문헌이 있을 경우 여기에 명시한다)				
<p>망가닌선의 압저항효과를 이용하여 3,500 bar 까지 측정할 수 있는 압력 게이지를 제작하여 특성조사를 수행하였다.</p> <p>제작한 게이지는 2 차식 $P = 0.3764 \times \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right) + 0.0011 \times \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2$ 으로 표시되고 적합직선식 잔차의 표준편차는 4 bar 로 구간의 0.1%에 해당하는 정밀계기급이었다. 이때 고압을 받는 부분은 maraging Steel 을 이용하였으며 coil 의 열처리 특성을 아울러 조사하였다.</p>				
14. 키워드(6~12개)				
망가닌선, 압력게이지, 마레이징스틸, 압저항효과.				
15. 배포구분 01		16. 해제기간		17. 면수 62
				18. 가격

BIBLIOGRAPHIC DATA SHEET		1. REPORT NO.	2. PERFORMING LAB. Pressure & Vacuum Lab.	3. REPORT DATE 1991. 5
4. TITLE/SUBTITLE Development of manganin pressure gage			7. SUBJECT CATEGORY 1402	
5. AUTHOR(S) Hwack Joo Lee, Sam Yong Woo, Kook Jin Kim, Seong Woong Han		8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO. KSRI-91-77-IR		
6. PERFORMING ORGANIZATION NAME		9. CONTRACT OR GRANT NO.		
		10. TYPE OF REPORT Final Report(2nd year)		
11. SPONSORING ORGANIZATION Ministry of Science and Technology of R.O.K				
12. SUPPLEMENTARY NOTES				
13. ABSTRACT The manganin pressure gage was manufactured. The pressure ranges from 0 up to 3,500 bar and its characteristic equation was described as $P = 0.3764 \times \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right) + 0.0011 \times \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2$ The standard deviation of residuals was 4 bar and the gage was proved to be precise instrument with accuracy of 0.1 % of full span. Maraging steel was used in the high pressure parts and characteristics of manganin coil was investigated.				
14. KEYWORDS Manganin wire, pressure gage, maraging steel, piezo-resistive effect.				
15. CLASSIFICATION 01		16. SCHEDULE OF DECLASSIFICATION		17. NO. OF PAGES 62
				18. PRICE

요 약 문

I. 연구제목

Manganin 압력게이지 개발

II. 연구의 목적 및 중요성

고압 응용 및 측정기술은 그 활용 범위가 넓고 부가가치가 높은 첨단 기술로서 산업 및 과학발전에 필수적인 기술이면서도 외국으로부터 기술도입이 어려운 실정이다. 따라서 본 연구는 고압 측정 기술 확보를 위해 고압게이지로 많이 사용되는 망가닌 압력게이지 개발을 목표로 하였으며 이를 통해 고압발생기술 및 응용 기술 향상에 크게 기여할 것으로 보인다

III. 연구의 내용 및 범위

1 차년도에는 망가닌 압력게이지 개발에 대한 기초연구를 수행하였으며
2 차년도에는 제작조건연구, 게이지 설계, 시제품 제작, 특성검사를 중심으로 연구하였다. 사용한 망가닌선은 직경 0.09 mm 로 에나멜 코팅된 것이고 50,000 psi (약 3,500 bar)까지의 압저항 특성을 조사하였다.

IV. 연구의 결과 및 활용

1. 연구개발결과

망가닌 압력게이지의 설계를 완료하였으며 각 구성요소의 재질 및 특성을 연구하였다. 특히 망가닌 코일의 열처리특성과 접속부연구, 몸체 및 지지나사의 재질 및 응력연구를 수행하였다.

시제품을 제작하여 3,500 bar까지의 압저항특성 특히 비선형 특성을 조사하였다.

2차식으로 표시된 관계식은

$$P_q = 0.3764 (\Delta R/R_0) + 0.0011 (\Delta R/R_0)^2$$

이었으며 잔차의 표준편차는 4 bar로 측정구간의 0.1%인 정밀계기급 이었다.

2. 활용에 대한 건의

가. 고압게이지 개발을 통한 측정의 자동화

나. 새로운 압저항게이지 개발연구에 활용

다. 신소재 특성 평가에 활용

Summary

I. Title

Development of manganin pressure gauge

II. Objectives and Importance of Technology Development

The applications of measurement techniques of high pressures are widely used for productions of the highly expensive new materials, thus the high pressure industry became a new branch of highly advanced technologies. The high pressure technologies are essential parts in advanced science and applied industry, though, it is becoming very difficult to induce those technologies from foreign countries due to protection of highly advanced techniques. The objective of this project to develop the manganin high pressure gages for high pressure measurements and to improve the techniques of generating high pressure and also those of accurate measurements and control.

III. Contents and Scope of the Study

The basic researches on the development of manganin pressure gauges were carried out in the first year.

In the second year, the researches on the manufacturing condition

and design of gauge were carried out.

The manganin coil and the characteristics of pressure vs. resistance of the gauge was investigated upto 50,000 psi (about 3,500 bar).

IV. Results and Application

1. Results

The design of manganin pressure gauge was completed. Heat treatment of coil, electrical connection and stress analysis were carried out. The characteristics of pressure vs. resistance was investigated upto 50,000 psi with the interval of 1,000 psi.

The least squared fitted curve was obtained as $P_q = 0.3764(\Delta R/R_0) + 0.0011(\Delta R/R_0)^2$.

The standard deviation of the residuals was 4 bar which was 0.1 % of full span and was proved as precision instrument.

2. Applications

- Automation of measurements by high pressure gauges.
- Application to develop new high pressure gauges.
- Application to characterize the new materials.

Contents

Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Theory on the measurement	4
Chapter 3. Fabrication of manganin pressure gauge	9
Section 1. Material and manufacturing principle of gauge	9
Section 2. Design of pressure cell	14
Section 3. Manufacturing of the gauge	30
Section 4. Pressure indicater	37
Chapter 4. Characteristic test of manganin gauge	39
Section 1. Method of experiment	39
Section 2. Results and discussion	41
Chapter 5. Conclusion	50
Reference	52

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 측정 이론	4
제 3 장 망가닌 게이지 제작	9
제 1 절 재질 및 제작원리	9
제 2 절 압력 cell 설계	14
제 3 절 게이지 제작	30
제 4 절 압력 지시부 연구	37
제 4 장 시제품 특성 조사	39
제 1 절 측정장치 및 방법	39
제 2 절 측정결과 및 고찰	41
제 5 장 결 론	50
참 고 문 헌	52

제 1 장 서 론

압력의 측정만큼 일상 생활이나 산업체 현장에서 중요한 비중을 차지하는 측정 분야도 별로 없을 것이다. 매일매일 발표되는 일기예보 중에서 그날의 대기압을 알게되며 어느 생산공장을 방문하더라도 무수히 많은 압력계들이 생산라인속에 부착되어 있음을 보고 압력계측의 중요성을 인식하게 된다. 이들 압력계들은 여러가지 형태로 개발되어 있으며 대부분이 부르돈관(Bourdon tube), 벨로우즈(bellows), 다이어프램(diaphragm) 등 기계식 센서들이 주종을 이루고 있으며 최근에는 공장 자동화와 관련하여 자동제어 및 기록용으로 전기신호 발생식 압력계가 개발되어 널리 사용되고 있다.

압력을 측정하는 방법은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 하나는 힘의 평형 상태를 이용하는 방법이며 단위 면적당 작용하는 힘의 크기가 압력이라는 기본 정의에 입각하여 압력을 측정한다. 이에는 분동식 압력계(deadweight piston gage)와 액주형 압력계(liquid manometer)가 있다.⁽¹⁾ 다른 하나는 물질의 탄성 변형(elastic deformation), 전기저항, 전기용량, 압전효과 등과 같은 물리적 현상을 직접 이용하거나 이들을 결합하여 간접적으로 이용하는 2차 압력계가 있으며 이들이 주로 실제 작업 현장에서 많이 사용된다.⁽²⁻⁴⁾

최근 산업의 다양화와 발전에 따라 높은 유압을 정확하게 측정할 필요성이 증대되었으며 이를 위해 압력에 따른 재료의 다양한 전기적 성질이 계속 연구되어 왔다.⁽⁵⁾ 그 중 전기 저항이 압력을 측정하는데 주로 사용

되었다. 전기저항 측정 방식에는 압력 변화에 따른 연속적인 저항 측정 방식과 재료의 상변화에 따른 급격한 저항 변화를 측정하는 불연속 저항 방식인 압력 고정점 측정 방식이 있다.⁽⁶⁾ 압력고정점 측정에 사용되는 재료로는 수은 (7.5 kbar, 0 °C), Bi (1-2 : 28 kbar, 3-5 : 74 kbar), Tl (36 kbar), Pb (1-2 : 130 kbar) 등이 있다. 망가닌은 연속적인 저항변화를 측정하는 방식에 사용된다. 대부분의 금속에 있어 전기 저항은 재현성이 있고 연속적이므로 압력 특히 고압게이지의 기초로 널리 쓰인다. 그러나 대부분의 금속은 온도에 따라 저항이 급속히 변하므로 온도가 잘 제어된 조건에서만 저항압력계로 쓸 수 있다. 대부분의 순금속의 경우 실온에서 1 °C 변화는 압력 1 kbar에 해당하는 저항 변화를 나타낸다. 이들이 압력 센서로 사용 되려면 저항의 낮은 온도계수와 높은 압력 계수를 가져야 한다. 여러 종류의 금속 선 (wire)의 전기저항에 대한 압력 효과는 Bridgman에 의해 광범위하게 조사 되었다.⁽⁷⁾ 전기저항 변화의 메카니즘은 명확히 알려 지지는 않았지만 Frank와 Slater에 의하면⁽⁸⁻⁹⁾ 외부압력에 의해 금속 내의 결정 격자가 변형되며 이로 인해 저항이 변하는것으로 알려져 있다.

전형적인 망가닌은 84 Cu-12 Mn-4 Ni의 조성을 갖는 합금으로 작은 온도 저항계수를 갖고 있어 정밀한 저항기로 널리 사용되고 있다.(Manganin 은 독일 Isabellenhütte사의 trade-mark이다). 망가닌은 1903년 Lisell이 처음으로 압력 센서로 쓸것을 제안하였으며⁽¹⁰⁾ 1912년에 Bridgman은 고압용 게이지를 제작한바 있다.⁽¹¹⁾ 그후 Michels과 Lenssen⁽¹²⁾에 의해 3,000 기압까지 측정할 수 있는 전기식 마노메타가 제작되었으며 Adams⁽¹³⁾ 등에 의해 망가닌 저항 게이지의 구조 및 제작조

건에 대한 연구가 수행되었다. 최근에는 Yamamoto⁽¹⁴⁻¹⁵⁾가 코일의 직경, 절연 조건, 열처리 조건등을 광범위하게 조사한 바 있다. 그러나 우리나라에서는 이에 대한 연구가 전무하며 세계적으로도 아직 망가닌 게이지는 측정 목적에 맞도록 특별 제작되고 있는 실정이다.

본 연구는 총 3차년도 연구과제로서 1차년도에는 세계적인 기술 현황 분석과 자료분석을 중심으로 개발 코자하는 게이지의 설계를 완료하여 간단한 시제품을 제작, 1,600기압까지의 게이지 특성을 조사, 양호한 결과를 얻었다. 2차년도에는 1차년도 연구 결과를 바탕으로 설계를 개선하고 제조 과정 기본 연구를 병행 하였으며 측정범위를 3,500기압으로 확장하였다. 3차년도에는 측정 범위를 7,000기압으로 확장하고 고압에서의 압력 cell 부의 응력 해석과 함께 전기식 지시계를 제작하여 상용화 연구를 수행할 예정이다.

제 2 장 측정 이론

저항 압력 게이지에 있어 가장 중요한 인자는 압력에 의한 저항변화 ($\Delta R/R_0$)와 가한 압력 (P)로 표현하는 저항의 압력계수로 Peggs⁽⁶⁾는 압력에 대한 저항변화를 다음과 같이 2차식으로 표현하였다.

$$P_q = a(\Delta R/R_0) + b(\Delta R/R_0)^2 + P_0 \quad (2-1)$$

여기서 $\Delta R = R(P) - R(P_0) = R(P) - R(0)$ 이다. 이식은 근사적으로 1차식으로 표현할 수 있으며 선형 비례 계수를 a_0 라하면 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$P_1 = a_0(\Delta R/R_0) + P_0 \quad (2-2)$$

많은 경우 망가닌 게이지는 압력 고정점(수은의 경우 $P_{Hg} = 7.5 \text{ kbar}$)에서 교정하며 주어진 ($\Delta R/R_0$)하에서 계산된 압력 P_q 와 P_1 의 차이값은 $P = P_0$ 와 $P = P_{Hg}$ 를 두식 공통의 초기 조건으로 하면 ($P - P_0$) ($P - P_{Hg}$)에 비례한다. $0 < P < P_{Hg}$ 구간에서 이 두식의 최대 차이값은 $\Delta R/R_0 = (a_0 - a)/(2b)$ 에서 발생하고 그 값은 $(a_0 - a)^2/(4b)$ 이 된다.

Newhall⁽¹⁶⁾ 등은 게이지 특성을 표시하는 다른 방법으로 CF(cell factor)를 사용하였다. 즉

$$P = \frac{\Delta R}{R_0 \times CF} \quad (2-3)$$

만일 망가닌이 완전히 압력에 선형이라면 CF는 상수가 되지만 실제로는 작은 2차 특성을 갖고 있으므로 Fig.2-1과 같이 압력에 따른 변화를 보인다. CF_p 는 압력 P에서의 cell factor이고 CF_0 는 결정된 기울기를 연장하여 절편값을 취한 것으로 대기압에서의 cell factor이다.

Fig.2-1에서 기울기 $m = \tan \phi = (CF_0 - CF_p) / P$ 이다. 따라서

$$CF_p = CF_0 - mP \quad (2-4)$$

$$P = \frac{\Delta R}{R_0 (CF_0 - mP)} \quad (2-5)$$

식 (2-5)는 압력에 대해 2차식으로 표현되어 있다.

Fig.2-2는 게이지 단자 저항을 나타내고 있다. 게이지 lead선 저항을 R_1 , 측정저항을 R_0, R_p , 전체 저항을 R_{s0}, R_{sp} 라 하면 $R_p = R_{sp} - R_1$ 이고 $R_0 = R_{s0} - R_1$ 이다. 따라서 식 (2-5)를 다시 쓰면

$$mP^2 - P(CF_0) + \left[\frac{R_{sp} - R_1}{R_{s0} - R_1} - 1 \right] = 0 \quad (2-6)$$

$$P = \frac{1}{2m} \left[CF_0 - \sqrt{CF_0^2 - 4m \left[\frac{R_{sp} - R_1}{R_{s0} - R_1} - 1 \right]} \right] \quad (2-7)$$

소련의 Atanov와 Ivanova⁽¹⁷⁾는 저항의 압력 계수를 $k = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{P}$ 로 나타내어 k값이 4 kbar 이하에서 불규칙적이고 그이상에서는 선형적으로 감소한다고 발표하였다. 측정값은 최소 자승법을 이용하여 $P = \alpha (\Delta R) + \beta (\Delta R)^2$ 로 해석할 수 있으므로 압력 계수 k는 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$k = \frac{1}{R_0} \frac{1}{(\alpha + \beta \Delta R)} \approx \frac{1}{\alpha R_0} \left[1 - \frac{\beta \Delta R}{\alpha} \right] = k_0 (1 - \gamma \Delta R) \quad (2-8)$$

여기서 k_0 는 $\frac{1}{\alpha R_0}$ 이며 압력 0에서의 게이지의 압력 계수값이며 γ 는 $\frac{\beta}{\alpha}$ 로 $k-\Delta R$ plot의 기울기를 나타내는 값으로 k_0 와 γ 의 분산을 조사하여 게이지의 특성을 판단할 수 있다. 측정 압력은 식 (2-8)의 압력계수를 이용하여 식 (2-9)처럼 나타낼 수 있으며 측정 게이지의 근사식으로 게이지 교정에 사용될 수 있다.

$$P = \frac{\Delta R}{R_0} \frac{1}{k} = \frac{\Delta R}{R_0} \frac{1}{k_0 (1 - \gamma \Delta R)} \quad (2-9)$$

망가닌 게이지는 표준 압력계나 압력기준값에 대해 교정하고 그 이상의 압력에 대해서는 외삽법을 사용하여도 별 오차가 없다. 이것은 실험 결과로 입증 하기는 곤란 하지만 Murnaghan 표현식으로 설명할 수 있다.⁽⁶⁾ 이 식은 물리적으로 측정할 수 있는 양 X가 압력 P의 증가에 선형적으로 재현성 있게 변한다는 가정에서 근사적으로 dP/dX 는 $A + BP$ 에 요구되는 정확도 내에서 비례하고 dX/dP 역시 X에 직접 의존 할 경우 적용할 수 있다. 따라서 망가닌 게이지의 경우,

$$\frac{dP}{dX} = \frac{A + BP}{X} \quad (2-10)$$

로 쓸 수 있으며 이 식을 적분하고 초기 조건 $P = 0$ 에서 $X = X_0$ 를 적용하면

$$P = \frac{A}{B} \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^B - 1 \right] \quad (2-11)$$

이다. 이 식은 급수 전개를 통해 근사적으로 식 (2-1) 및 (2-2) 형태로 나타낼 수 있다.

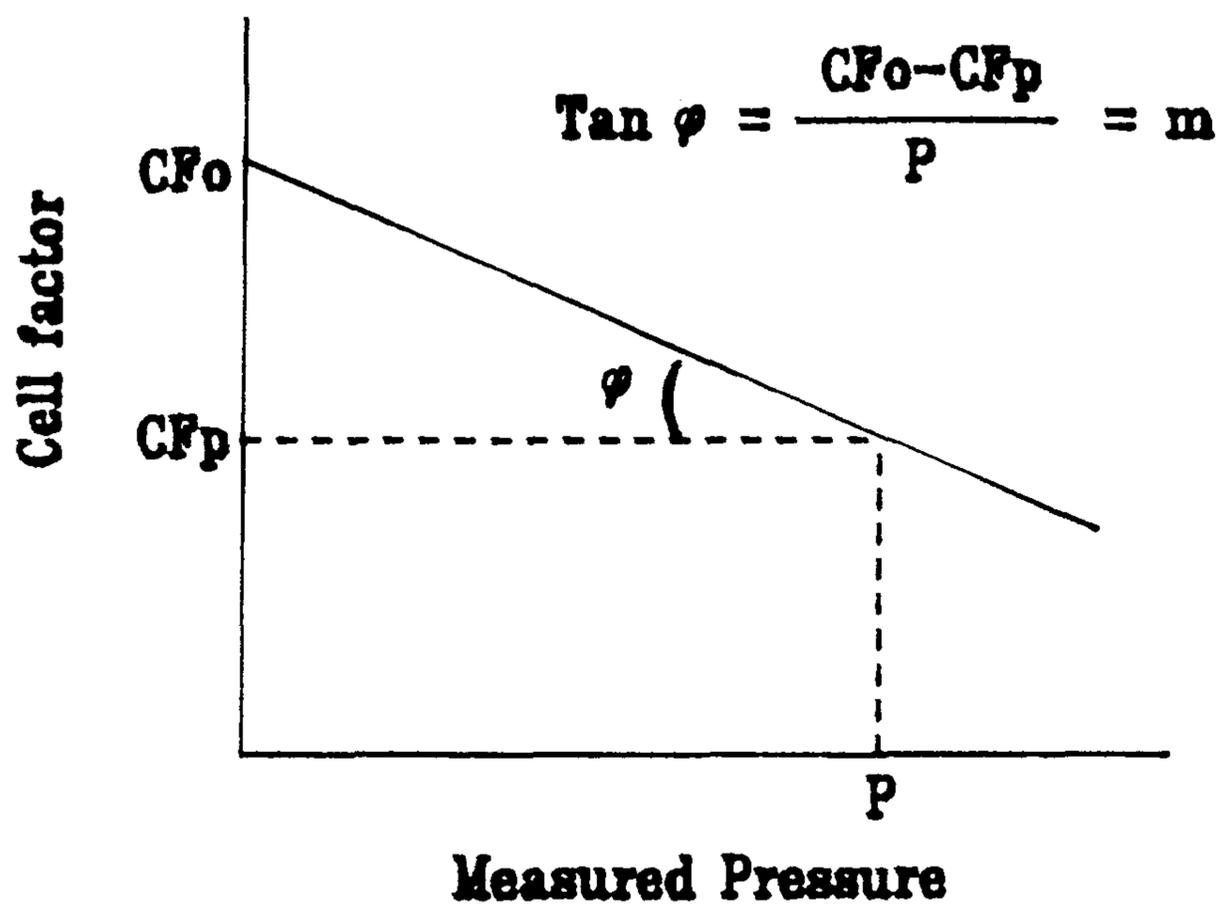


Fig. 2-1. Typical variation of cell factor with pressure.

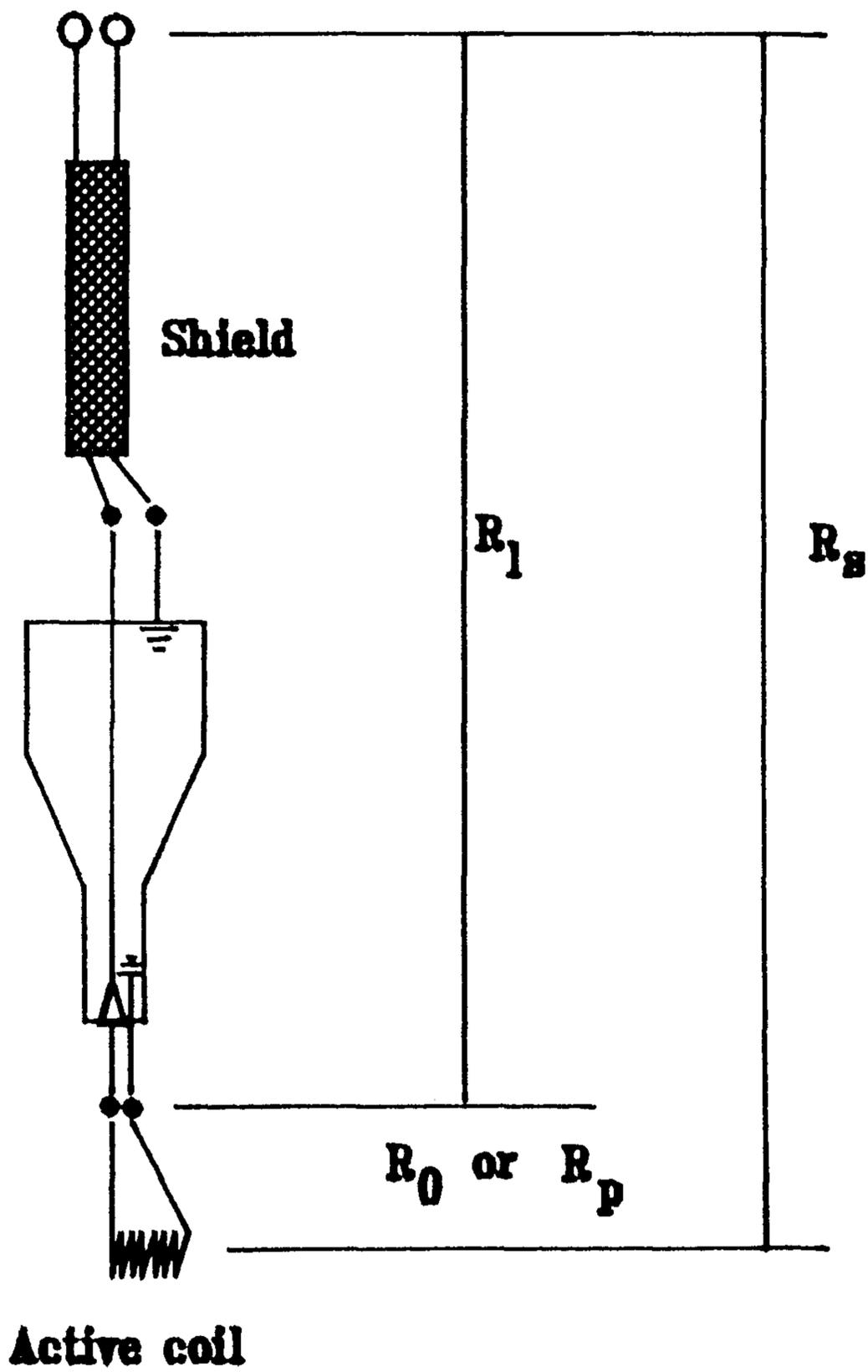


Fig. 2-2. Terminal resistance of active coil.

제 3 장 망가닌 게이지 제작

제 1 절 재질 및 제작원리

현재 저항 압력 게이지로 가장 널리 쓰이는 재질은 망가닌으로 Cu 82-84%, Mn 12-13%, Ni 4-5%의 서로 다른 조성을 갖고 있으며 제작회사마다 구성 성분이 약간 다르다. 1889년 K. Feussner 등⁽¹⁸⁾에 의하여 최초로 망가닌 특성 조사가 시작되었고 이후 정밀저항 제조업체들에 의해 우수한 특성을 갖는 망가닌이 계속 개발되었다. 망가닌은 20-50℃에서 작은 온도 저항 계수를 갖고 있으며 장기 안정도(long-term stability)가 우수하고 상온에서 구리에 대한 열기전력이 작으며 양호한 기계적 특성을 갖고 있다. 망가닌은 타금속에 비해 압력 계수가 크고(약 $2.3 \times 10^{-5}/\text{MPa}$) 온도와 압력에 따른 압력 계수 변화가 비교적 작으므로 압력 게이지로서 적합한 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾ 망가닌의 저항-온도 곡선의 극대점은 보통 25℃ 근처이며 이 값은 Fe 성분의 양에 관련 된다. Hunter⁽⁶⁾에 따르면 Fe 성분이 없으면 최대값이 40℃ 근처에서 나타나고 Fe가 1.0-1.5% 정도 있으면 25℃ 근처에서 최대값이 나타나는 것으로 보고하고 있다.

망가닌은 결정 구조상 구리에 망간과 니켈이 면심 입방 고용된(cubic facecentred solid solution) 합금으로 입방 격자(cubic lattice)의 등방 압축성으로 원리상 정수압(hydrostatic pressure)하에서 재질의 성질에 영구 변화가 생기지 않는다. 그러나 실제로는 영구 변화가

생길 수 있으며 온도와 압력 처리 과정 (temperature and pressure seasoning) 을 실시 하므로써 이를 최소화 할 수 있다. 망가닌의 저항에 대한 압력계수는 batch에 따라 약 10 % 정도 달라질 수 있으나 Atanov와 Ivanova⁽¹⁹⁾는 많은 망가닌 게이지를 교정한 결과 동일한 처리 과정을 실시 할 경우 게이지의 압력계수 변화를 0.5 % 이내로 줄일 수 있다고 보고하고 있다. Yamamoto⁽¹⁴⁾는 직경 0.04-0.32 mm 범위의 다양한 망가닌 선의 게이지의 특성을 조사한 결과 굵은 선이 가는 선 보다 더 작은 압력 계수를 갖지만 선형성이 우수하다고 보고하였다. 대부분의 게이지는 게이지 감도와 제작의 편이를 위해 보통 직경 0.1 mm의 선을 사용하고 있다.

망가닌 게이지가 좋은 성능을 갖기 위해서는 제작 방법이 매우 중요하다. 게이지를 감는 방법으로는 단순한 실패 (bobbin) 위에 느슨하게 감는 방법, 헬리컬 홈 (helical groove) 위에 코일을 코일형태 (coiled-coil) 로 감는 방법 그리고 머리핀 (hair pin) 형상으로 구부려 만드는 3가지 방법을 대부분 사용하고 있다.⁽⁵⁾

첫번째 방법은 가장 많이 사용되는 방법으로 명주 (silk) 등으로 절연된 저항 코일을 실패위에 임의로 감는 방법이다. 코일은 실패에 의해 지지되고 압력 전달 매체는 코일에 직접 작용한다. 이때 코일에는 영구변형이 생기지 않도록 주의하여야 한다. Bean과 Molinar 등은 선 한가닥을 실패에 삽입하여 코일을 감은후 이를 제거 함으로 변형을 제거하는것이 좋다고 제안 하였는데 이것은 단단한 실패인 경우 효과적이다. 실패 재질로는 테프론 (Teflon) , 종이, 철, 알루미늄, 세라믹 등이 사용된다.

두번째 방법은 Bowman과 Johnson에 의해 변형이 전혀 없는 제작 방

법으로 제안된 것으로 선을 직경 1.2 mm의 봉에 감은 다음 이것을 다시 세라믹 포머에 헬리컬 형상으로 감는 것이다.

세번째 방법은 게이지의 열적 응답을 개선하기 위하여 Morris에 의해 제안된 방법으로 망가닌 선을 이중 머리핀 형상으로 직경 2 mm의 튜브 위에 고정하여 제작하며 굽힘 부분에 비교적 큰 응력이 집중됨에도 불구하고 게이지의 재현성이 좋고 드리프트(drift)가 작은 것으로 알려져있다.

그러나 Yamamoto는 게이지 제작의 여러 방법을 비교 검토하여 잘 제작한 경우 각 방법은 그다지 차이가 없다고 보고하고 있다.

또 한가지 코일 제작시 중요한 요소는 측정 장치의 전기적 잡음을 최소화 하는 문제인데 이를 위해서는 코일의 인덕턴스를 최소로 하는 권선(non-inductive winding) 방법이 필요하다.

코일의 전기저항 측정 방법으로는 보편적인 2단자법과 리드 선의 선저항과 측정기와의 접촉 저항의 영향을 배제하기 위해 전압과 전류 단자가 분리된 4단자 저항 측정 방식이 사용되며 정밀 저항 측정시 브리지 회로와 결합한 4단자법이 주로 사용되고 있다.

리드(lead)선을 망가닌 코일에 접속하는 방법으로는 금이나 은 합금을 브레이징(brasing)하는 것이 가장 좋은 방법으로 알려져 있으나 스폿(spot) 용접 또는 납땜(soldering)도 많이 사용되고 있다. 그러나 Rostocki 등⁽²⁶⁾은 여러 형상의 납땜 접속의 압력 특성을 조사하여 납땜 접속이 압력 측정시 최고 3 bar의 이력(hysteresis)을 보이는 것으로 보고 하고 있다.

Peggs⁽⁶⁾는 저항 압력 게이지 처럼 반복 압력을 받는 동작 조건 하에

서 게이지를 안정화 시키기 위해서는 코일에 온도 및 압력처리 (seasoning)를 하여야 한다고 보고하고 있다. 이것은 사용하는 합금에 따라 달라지고 연구자에 따라 다르지만 대부분 정밀 저항을 만드는 기술을 응용한 것이다. 다만 주된 차이점은 정밀 저항의 경우 대기압 하에서의 장기 안정성을 중요시 하지만 저항 압력 게이지는 추가로 압력을 받은 후의 안정성이 중요도에 포함되는 것이 다르다. Lyakh는 망가닌의 적합한 열처리 과정으로 시간과 온도 사이의 관계식을 다음과 같이 제시하였다.

$$T = (2.929 - \log \theta) / 0.0165 \quad (3-1)$$

여기서 T는 시간 (hour)이고 θ 는 온도 ($^{\circ}\text{C}$)이다. 실제 압력 측정의 경우 절연 재료로 명주를 많이 사용하므로 명주의 절연 한계인 140°C 를 최대 처리 온도로 하여 식에 대입하면 약 48시간이 되어 Yamamoto 등이 보고한 실험 조건과 잘 일치한다. 열처리는 온도 뿐만 아니라 가열 시간, 가열 방식, 냉각 방식 등에 따라 다른 특성을 보이게 되는데

Bridgman은 코일을 140°C 에서 18시간을 가열하고 dry-ice 온도에서 약 2시간을 급냉하였으며 이 과정을 수회 반복 하였다. (이를 보통 Bridgman cycle이라 부른다.) Alexeyev는 코일에 전기에너지를 공급하여 선의 온도를 $500-600^{\circ}\text{C}$ 로 올리는 새로운 방식을 제안하였으며 이때 가열 회로의 축전기 (capacitor bank)에 작용하는 전압은

$$V = 400 S (R \theta / C)^{1/2} \quad (3-2)$$

으로 표시하였다. 여기서 S는 선의 단면적 (cm^2)이고 R은 코일의 저항 (ohm), C는 회로의 정전 용량, θ 는 선의 온도이다. 이 방법으로

비교적 양호한 결과를 얻었지만 선의 저항 변화, 열손실 mechanism 등의 요소에 의한 전처리 조건의 재현성에 난점이 있다. 한편 Wisniewski는 2단계 열처리 즉 첫번째 단계에서는 코일을 150 °C 실리콘 오일 속에서 36시간 가열하고 두번째 단계에서는 150 °C 공기중에서 재가열하는 방식을 제안하여 재질의 구조적 결함 즉 point defect나 전위 (dislocation) 등을 감소 시킬 수 있으며 표면층을 안정한 산화막으로 처리할 수 있다고 보고하고 있다. 특히 비절연 망가닌 선인 경우 이보다 약간 높은 180 °C에서 20시간 가열 함으로써 좋은 결과를 가져올 수 있다고 제안하고 있다. Yamamoto는 여러 열처리 기술을 실험 비교하여 실리콘 오일 중에서 가열 하는 것이 가장 좋다고 결론지었다. 이 방식은 Giellesse에 의해 1.3 GPa까지의 압력 게이지 제작에 성공적으로 사용 되었다.

압력 처리 (pressure cycling)는 Bridgman에 의해서 제안된 처리 방법으로 게이지에 사용 예상 압력 보다 높은 압력을 가해 주므로써 저항 압력 게이지의 이력을 감소시키고 게이지의 재현성을 증대시키는 등 성능을 향상 시킨다. 그러나 최근 Yamamoto는 이것이 꼭 필요한 것은 아니라고 주장하여 보통 1회 정도 압력 처리를 실시하고 있다.

제 2 절 압력 cell 설계

1. 응력 해석

고압을 받는 압력 cell 은 형상이 복잡하지만 근사적으로 원통형으로 볼 수 있다. Thick-wall cylinder에 대한 이론적 해석은 Lamé 방정식(1883)을 이용한다. 이것은 radial, hoop, axial stress를 고려하며 실린더가 완전히 탄성 영역하에 있는 것으로 간주한다. 그 이상의 영역은 shrink-fitting, wire winding, autofrettage 등을 이용하여 사용 범위를 넓힌다.

그림 3-1 과 같은 실린더의 정적 평형으로 부터

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = r (d\sigma_r / dr) \quad (3-3)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 r 은 반경, σ_{θ} 는 hoop stress, σ_r 은 반경 방향 응력을 나타낸다. 응력과 변형도는 대칭성에 의해 접선 방향, 축방향, 반경 방향이 주방향이 된다. 전단 응력과 변형도를 τ 와 γ 로 표시하면 θ 평면에서의 반경 방향의 전단 응력은

$$\tau_r = (\sigma_{\theta} - \sigma_r) / 2 \quad (3-4)$$

이다. 식 (3-1)에 대입하고 적분하면

$$P_i - P_o = 2 \int_{r_i}^{r_o} \tau_r d(\ln r) \quad (3-5)$$

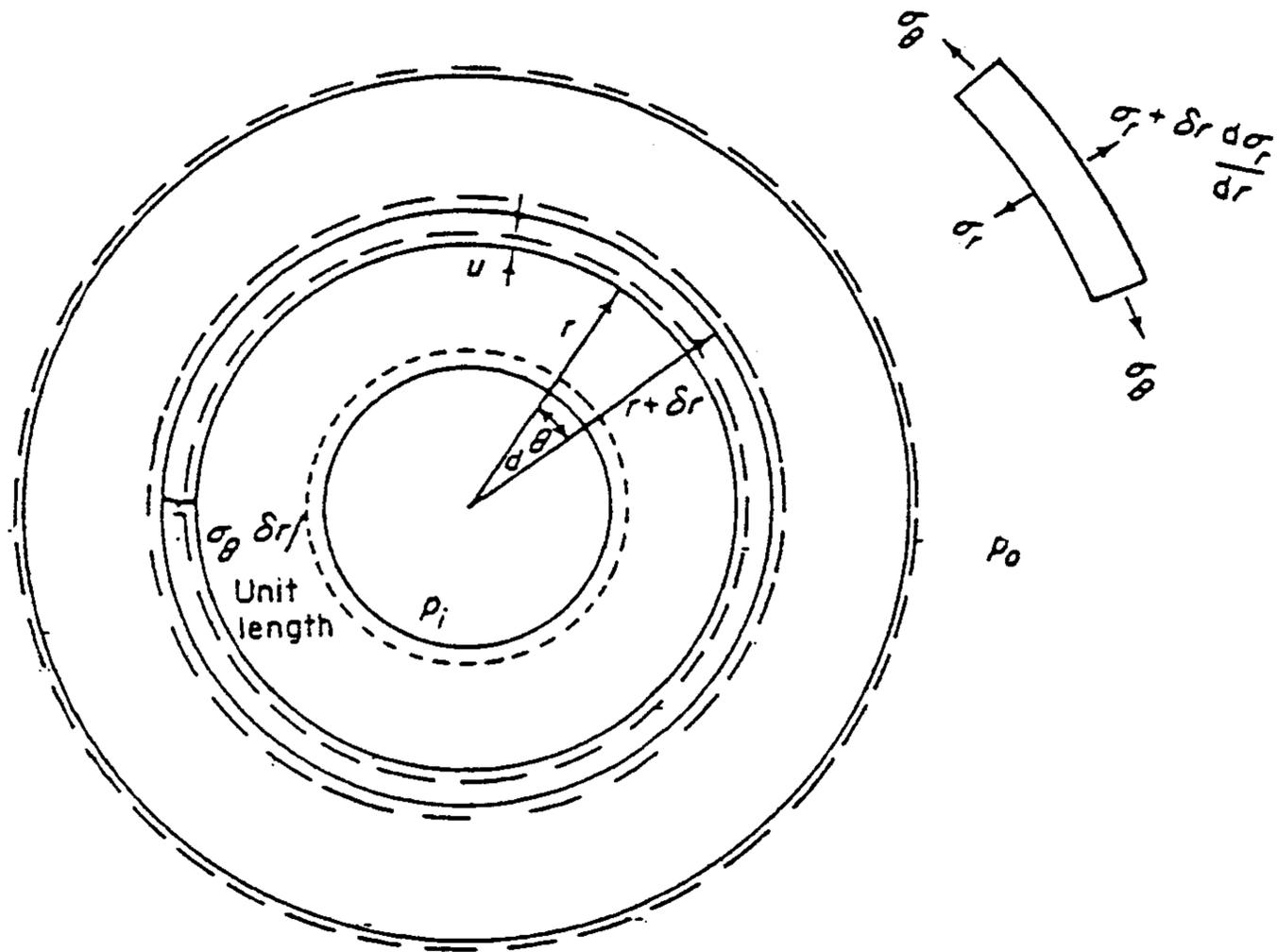


Fig. 3-1. Corss-section of thick-wall cylinder. Solid circles show unstrained cylinder, and dashed lines indicate the pressurized cylinder.

로 쓸 수 있다. 여기서 P_i 는 원통 내부의 압력, P_o 는 바깥의 압력이다. 만일 완전 소성이면 전단응력이 τ^* 로 일정하고 식 (3-3)은

$$P_i - P_o = 2 \tau^* \ln (r_o / r_i) = \tau^* \ln k^2 \quad (3-6)$$

단 $K = r_o / r_i$ 로 반경비를 나타낸다.

일반적인 응력 - 변형도 관계식은

$$E\epsilon_{\theta} = \sigma_{\theta} - \nu (\sigma_z + \sigma_r) \quad (3-7)$$

$$E\epsilon_z = \sigma_z - \nu (\sigma_{\theta} + \sigma_r) \quad (3-8)$$

$$E\epsilon_r = \sigma_r - \nu (\sigma_{\theta} + \sigma_z) \quad (3-9)$$

여기서 E는 Young률, ν 는 poisson 비이다.

평면단면은 평면을 유지하면

$$\frac{d(\epsilon_z)}{dr} = 0 \quad (3-10)$$

정의에 의해

$$\epsilon_{\theta} = \frac{2\pi(r+u) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{u}{r} \quad (3-11)$$

$$\epsilon_r = \frac{(\delta_r + \frac{du}{dr} \delta_r) - \delta_r}{\delta_r} = \frac{du}{dr} \quad (3-12)$$

여기서 u는 radial shift 를 나타낸다.

식 (3-3) 과 (3-7)에서 식 (3-12)까지의 7개의 식과 미지수 7개를 풀면

$$\sigma_{\theta} + \sigma_r = 2A \quad (3-13)$$

여기서 A는 적분상수이다.

식 (3-3) 과 식 (3-13)을 연립하면

$$\sigma_r = A + \frac{B}{r^2} \quad (3-14)$$

$$\sigma_\theta = A - \frac{B}{r^2} \quad (3-15)$$

A와 B는 경계조건에 의해 결정되는 상수이다. 만일 $r = r_i$ 에서 압력이 p_i 이고 $r = r_o$ 에서 압력이 p_o 이면 $\sigma_{ri} = -p_i$, $\sigma_{ro} = -p_o$ 이므로

$$A = \frac{-p_o k^2 + p_i}{k^2 - 1} \quad (3-16)$$

$$B = \frac{(p_o - p_i) k^2 r_i^2}{k^2 - 1} \quad (3-17)$$

z 방향으로 외압이 있으면

$$\sigma_z = \frac{\pi r_i^2 p_i - \pi r_o^2 p_o}{\pi (r_o^2 - r_i^2)} = \frac{p_i - k^2 p_o}{k^2 - 1} \quad (3-18)$$

이다. 또한,

$$\tau_{\theta r} = \frac{1}{2} (\sigma_\theta - \sigma_r) = -\frac{B}{r^2} = -\frac{(p_o - p_i) k^2}{k^2 - 1} \left(\frac{r_i}{r}\right)^2 \quad (3-19)$$

만일 $p_o = 0$ 라면

$$\sigma_r = \frac{p_i}{k^2 - 1} - \frac{p_i k^2}{k^2 - 1} \left(\frac{r_i}{r}\right)^2 \quad (3-20)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_i}{k^2 - 1} + \frac{p_i k^2}{k^2 - 1} \left(\frac{r_i}{r}\right)^2 \quad (3-21)$$

$$\tau_{\theta r} = \frac{p_i k^2}{k^2 - 1} \left(\frac{r_i}{r}\right)^2 \quad (3-22)$$

각 응력의 최대값은 $r = r_i$ 에서 발생하고

$$\sigma_r)_{\max} = -p_i \quad (3-23)$$

$$\sigma_\theta)_{\max} = p_i (k^2 + 1)/(k^2 - 1) \quad (3-24)$$

$$\sigma_z)_{\max} = p_i k^2 / (k^2 - 1) \quad (3-25)$$

이 식을 보통 Lamé formulae 라 부른다.

일반식에서 $\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_\theta + \sigma_r + \sigma_z) = \frac{-p_o k^2 + p_i}{k^2 - 1} = A$ 로 hydrostatic

tensile stress로 볼 수 있다. Fig.3-2는 내압을 받는 thick-wall cylinder의 응력분포를 나타낸 것이다. 결국 탄성 cylinder의 응력분포로부터 3가지 중요한 사실을 알 수 있다.

(1) system은 순수전단응력 $\frac{(p_o - p_i) k^2}{k^2 - 1} \left(\frac{r_i}{r}\right)^2$ 과 hydrostatic

stress $\frac{-p_o k^2 + p_i}{k^2 - 1}$ 로 구성되어 있다.

(2) 전단응력은 내부표면에서 최대값을 갖는다.

(3) 모든 응력의 최대값은 직경비에 의존하고 실제 크기에는 무관하다.

시제품 제작에 사용된 cell은 내경이 7 mm, 외경이 29 mm인 원통형 cylinder이고 재질은 maragingsteel를 사용하였다. 이때 Young률은 27.5×10^6 psi, poisson비는 0.3이고 K는 4이므로 식 (3-20), (3-21), (3-22)에서

$$\sigma_r = \frac{p_i}{15} - \frac{16 p_i}{15} \left(\frac{3.5}{r}\right)^2 = \frac{p_i}{15} - 13.07 \frac{p_i}{r^2} \quad (3-26)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_i}{15} + \frac{16 p_i}{15} \left(\frac{3.5}{r}\right)^2 = \frac{p_i}{15} + 13.07 \frac{p_i}{r^2} \quad (3-27)$$

$$\tau_r = \frac{16 p_i}{15} \left(\frac{3.5}{r}\right)^2 = 13.07 \frac{p_i}{r^2} \quad (3-28)$$

응력의 최대값은 $r = r_i$ 에서 발생하고

$$\sigma_r)_{\max} = -p_i \quad (3-29)$$

$$\sigma_{\theta})_{\max} = \frac{17}{15} p_i \quad (3-30)$$

$$\tau_r)_{\max} = \frac{16}{15} p_i \quad (3-31)$$

Thick-wall cylinder 에서 영구변형의 시작은 전단응력 τ 가 허용한계 τ^* 에 도달할 때 일어나므로 식 (3-25)에서

$$\tau^* = Pe \frac{K^2}{K^2 - 1} \quad (3-32)$$

여기서 Pe 는 탄성영역에서 가할 수 있는 최대 압력이다. 즉

$$Pe = (K^2 - 1) \tau^* / K^2 \quad (3-33)$$

Maraging Steel (VascoMax, C-300)의 경우 인장강도가 294 ksi 이므로 전단응력의 Maxwell correlation 으로 $\tau^* = \sigma^* / \sqrt{3}$ 이라 볼 수 있으므로 τ^* 는 170 ksi 이다.

따라서 탄성영역에서 가할 수 있는 최대압력은 $Pe = \frac{15}{16} \times 170 \text{ ksi} = 159 \text{ ksi} \approx 10.963 \text{ bar}$ 이다.

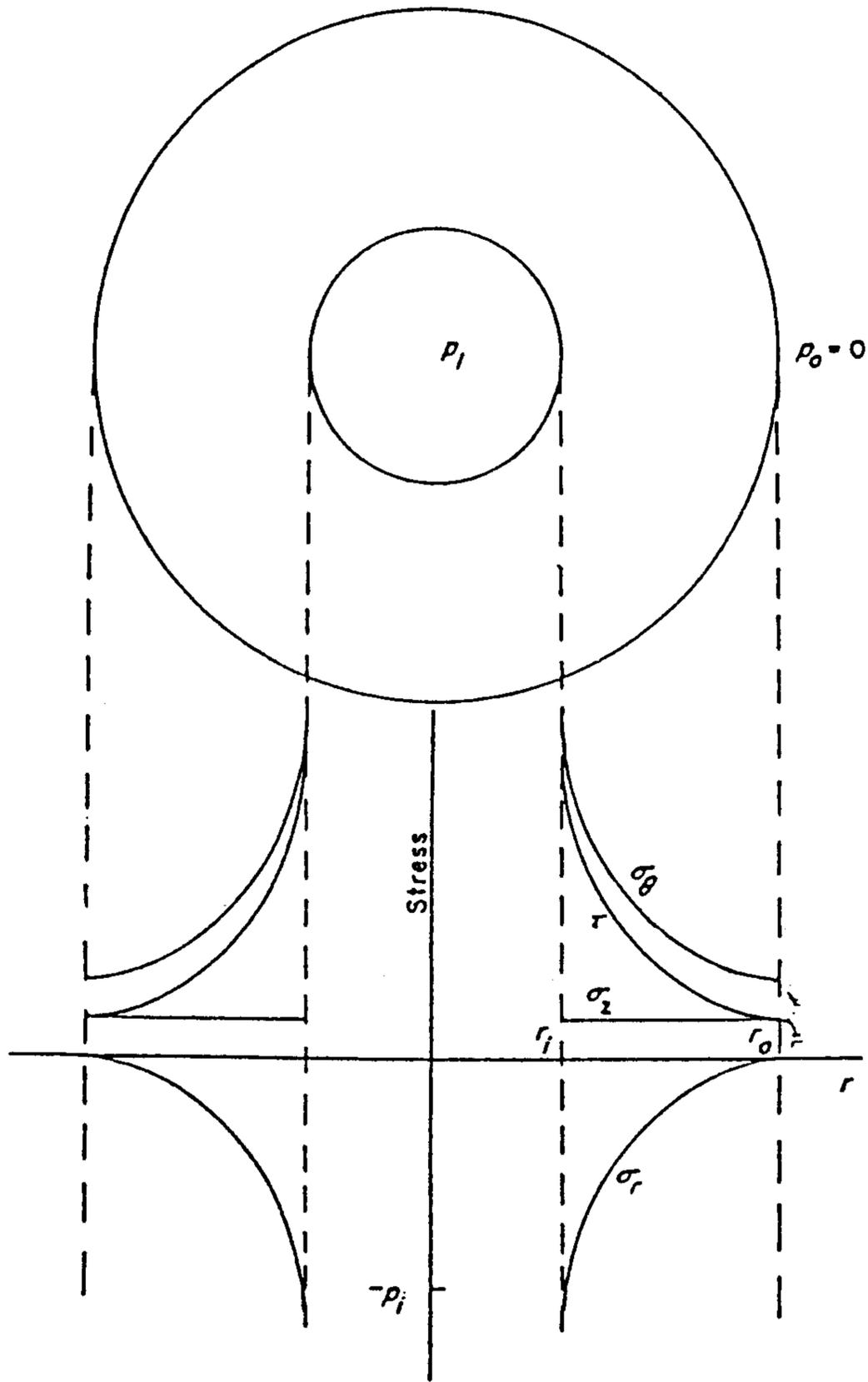


Fig. 3-2. The stress distributions within an internally pressurized thick-wall cylinder.

실린더가 얼마나 강한가 하는 문제를 생각하면 그것은 탄성영역을 벗어난 소성영역에서의 거동을 생각하여야 한다. 이때도 원통형 대칭성에서 별로 벗어나지 않고 Lamé 방정식의 가정이 유효하다면 전단응력 τ 는 $(\sigma_o \sim \sigma_r)/2$ 로 볼 수 있고 실린더 벽내의 압력은 벽을 가로질러 $d\sigma_r$ 의 적분으로 표시된다. 즉

$$P_o - P_i = - \int_{r=r_i}^{r_o} d\sigma_r \quad (3-34)$$

만일 외부압력 P_o 가 0 라면

$$P_i = \int_{r=r_i}^{r_o} d\sigma_r \quad (3-35)$$

식 (3-35)와 $\tau = (\sigma_o \sim \sigma_r)/2$ 로부터 $d\sigma_r = 2 \tau dr/r$ 이므로

$$P_i = 2 \int_{r_i}^{r_o} \tau dr/r \quad (3-36)$$

일반적으로 τ 는 r 의 함수이므로 이식은 간단하지 않다. 그러나 실린더 내벽에서는 τ 는 τ^* 에 접근한다. 여기서 τ^* 는 단순 비틀림에서의 항복 응력이다.

첫번째 경우로 $\tau = \tau^*$ 인 이상적인 overstrained 재질과 탄성 재질 사이의 경계가 실린더 바깥원주 바로 안쪽으로 pushout 된 경우를 생각하면

$$P_i^* = 2 \tau^* \int_{r_i}^{r_o} dr/r = 2 \tau^* (\ln r_o - \ln r_i) = \tau^* \ln K^2 \quad (3-37)$$

여기서 P_i^* 는 전 실린더 벽을 overstrained 조건으로 만드는데 필요한 압력이다. 실제 실린더 제작에 사용되는 재료 대부분은 가공 경화가 일어나므로 τ 는 τ^* 이상으로 올라가고 P_i^* 는 최대 파열 압력 (ultimate

bursting pressure)이 되지는 않는다. 그러나 P_i^* 이하의 압력에서는 실린더 변형이 재료의 탄성 변형과 같은 order로 남아 있다. 이것은 바깥층이 여전히 탄성 한계내에 있기 때문이다. P_i^* 이상이 되면 실린더는 크기가 급변하게 되고 파열의 위험성이 증대된다. P_i^* 이하에서는 작은 크기 변화가 수반되므로 많은 횡수를 사용할 수 있으며 이에 대한 연구 보고도 발표된바가 있다. 결국 $P_i^* = \tau^* \ln K^2$ 은 훌륭한 설계기준으로 볼 수 있다. 여기서 τ^* 를 안다거나 견본으로부터 측정 가능하면 이식을 이용할 수 있지만 그렇지 않은 경우는 σ^* (단순 인장에서의 항복 응력)를 Maxwell (von Mises) correlation $\tau^* = \sigma^* / \sqrt{3}$ 에 의거 사용될 수 있다.

설계기준으로 K 를 P_i^* 의 함수로 표시할 수 있으며 $P_i^* = \tau^* \ln K^2$ 에서

$$K = \exp (P_i^* / 2 \tau^*) = \exp (\sqrt{3} P_i^* / 2 \sigma^*) \quad (3-38)$$

Table 3-1은 K 가 2이상인 경우 실린더 벽이 overstrained 되는 압력을 나타내고 있다.

앞에서도 언급하였듯이 실제 실린더의 최대 파열 압력은 P_i^* 보다 클 것으로 기대되지만 P_i^* 이상은 실린더에 큰 변형을 가져올 수 있다. 만일 최대 파열 압력을 구하려면 τ 는 r 의 함수로 한 Manning의 수치 해석적인 방법을 사용할 수 있다. 이때 변형 과정동안 단면적의 변화는 없고 전단 응력과 변형도 사이의 관계는 비틀림 시험시와 일치한다는 가정을 기본으로 하고 있다.

그러나 실제 대부분의 고압 연구의 목적은 고압 실린더나 관이 파열하

Table 3-1 Pressures that would just cause complete overstrain in thick wall cylinders of various K values > 2 .

P_i^*	K	P_i^*	K	P_i^*/τ^*	P_i^*/σ^*	K
		σ^*	2.38	1.39	0.8	2
$2\tau^*$	2.72	$2\sigma^*$	5.64	3.22	1.9	5
$3\tau^*$	4.48	$3\sigma^*$	13.46	4.60	2.7	10
$4\tau^*$	7.39	$4\sigma^*$	32.00	6.80	3.9	30
$5\tau^*$	12.20			9.20	5.3	100
$6\tau^*$	20.10					
$7\tau^*$	33.00					

는것을 피하는데 있으므로 사용 압력은 P_i^* 보다 훨씬 낮은, 즉 overstained 경계가 실린더 내벽에 머물 수 있도록 하여 사용한다. 이조건은 탄성 - 소성 (elastic-plastic) 실린더로 설명된다.

탄성 - 소성 실린더 벽 내의 응력 분포는 그림 3-3로 설명될 수 있다. 자세한 형상은 Manning 형식의 수치적으로 구할 수 있지만 그 특성은 외부 탄성 실린더내에 완전 소성 실린더가 들어 있는 것으로 관찰할 수 있다.

그림 3.3에서 내부압이 높아 질수록 탄성 - 소성 경계는 외경쪽으로 이동하고 $(\sigma_r)_o$ 는 $2\tau^*$ 에 근접하게 된다. 그러나 σ 가 $\sqrt{3}\tau^*$ 를 넘으면 재료는 인장으로 항복이 일어나게 된다. 따라서 탄성 - 소성 경계가

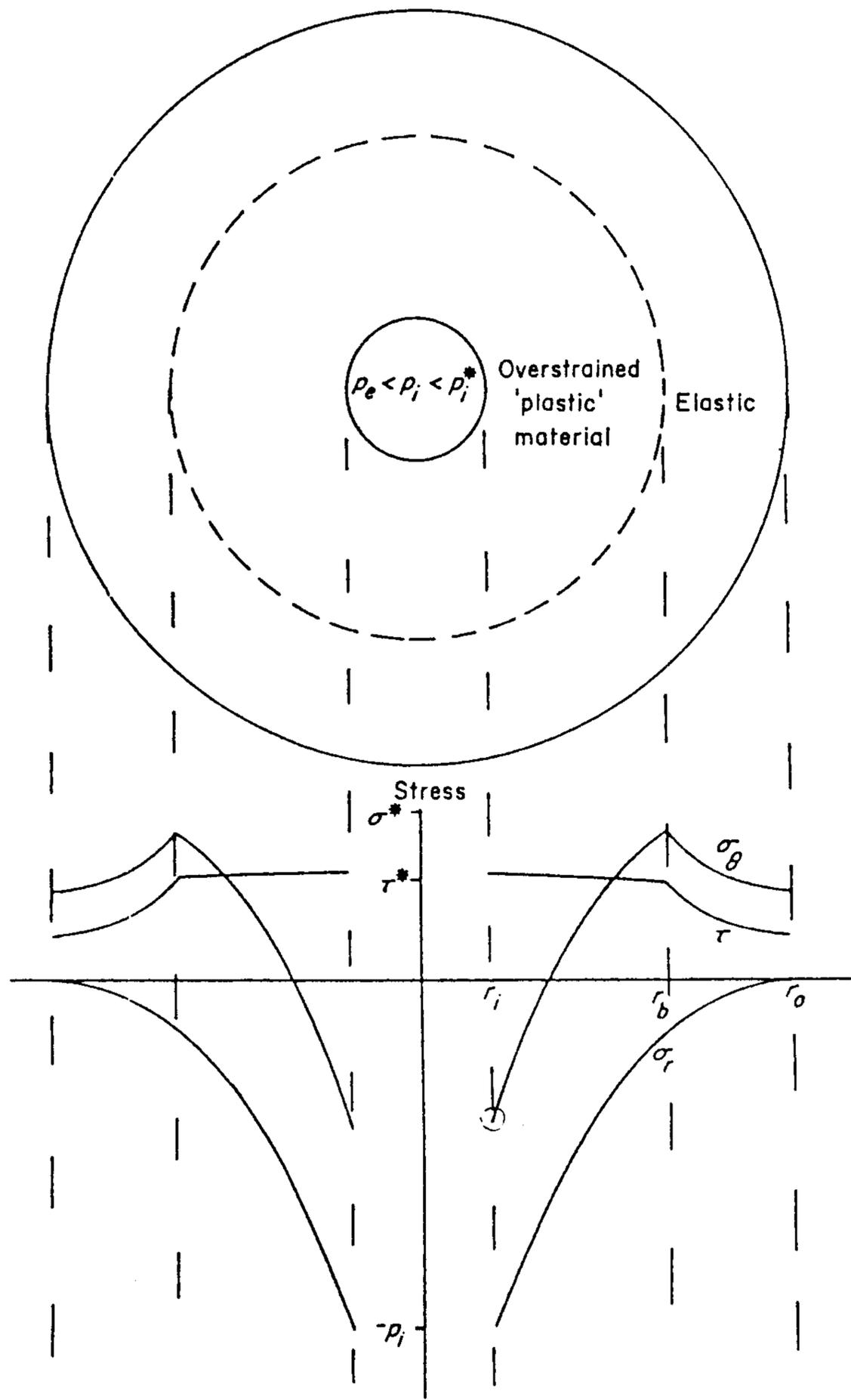


Fig. 3-3. Stress distributions within the walls of a thick-wall cylinder which in supporting sufficient internal pressure to force the inner material into an overstrained condition.

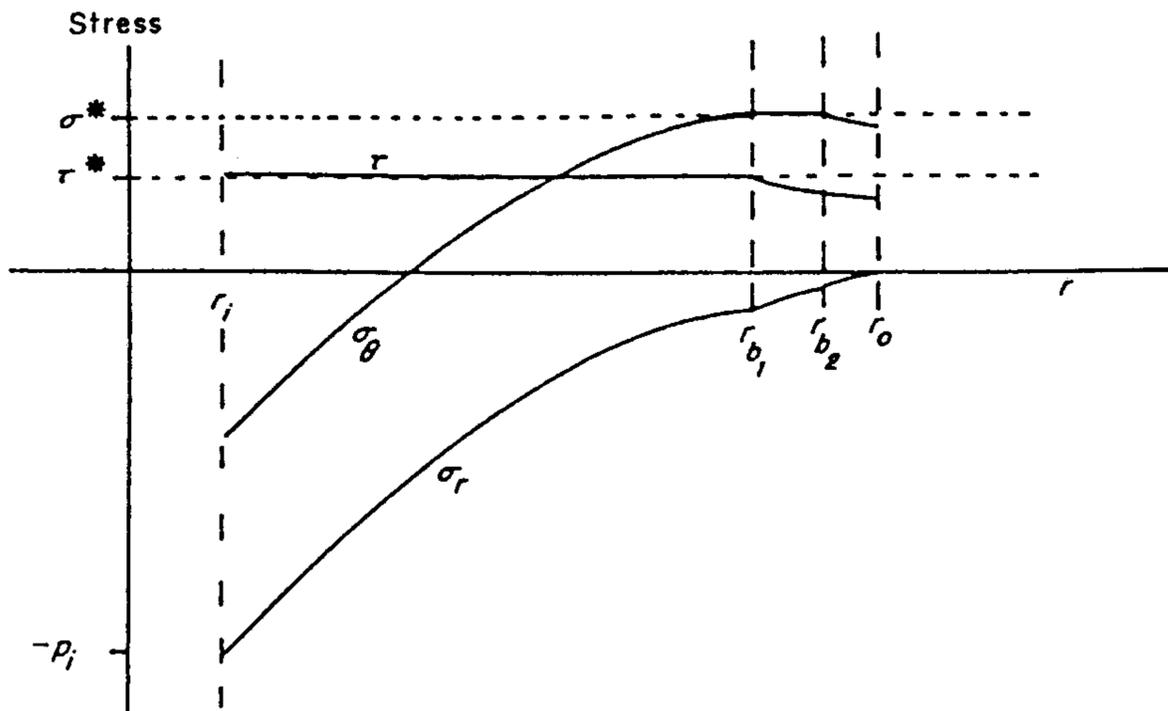


Fig. 3-4. Stress distributions within the walls of thick-wall cylinder which is supporting sufficient internal pressure to force most of the material into an overstrained condition. Notice in particular, the region $r_{b1} < r < r_{b2}$ where the wall is distorting under excess tension.

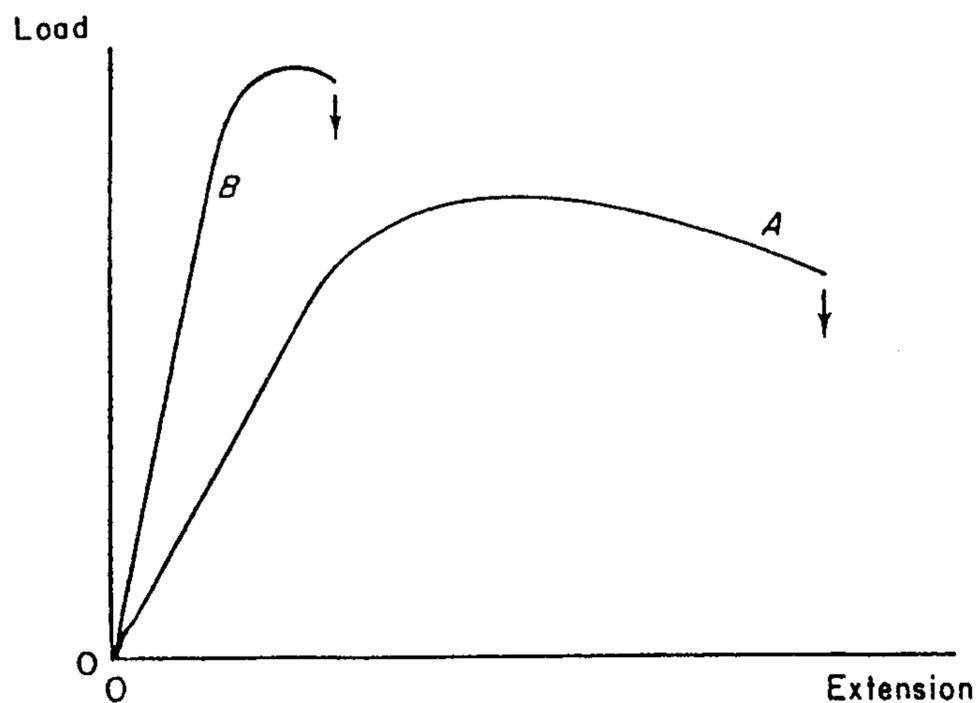


Fig. 3-5. Schematic illustration of tension test (load versus extension) data for two different types of material. The downward pointing arrows indicate where the samples fail and the loads return discontinuously to zero.

0.856 r_0 ($K = 1.17$)가 되면 경계 껍질은 전단 보다는 인장에 의해 변형하게 된다. 전단 보다는 인장에 의해 변형이 시작되는 첫번째 영역은 바깥 표면에서 0.144 r_0 인 곳이므로 이것은 외부로 나타나는 징후 즉 고압부에서의 누출이나 변형이 없이 발생하므로 대단히 위험하다.

그림 3.4는 탄성-소성 경계가 외부 실린더 표면 근처일 때 thick-wall cylinder에서의 응력 분포이다. 초과인장 (excess tension)에 의해 변형되는 영역은 $\sigma_0 = \sigma^*$ 이다. 비교적 연성이 큰 재질은 인장에 의한 가공 경화를 보이므로 그림과 같은 응력 분포를 견딜 수 있지만 파괴전에 그다지 큰 인장을 보이지 않는 취성 재료는 견디지 못한다. Manning이 보였듯이 thick-wall cylinder에 대해 최대 파열 압력을 잘 예측할 수 있는 것은 비틀림 시험 자료이다. 그러나 파괴의 형상은 인장 시험의 형상으로 부터 예측할 수 있으므로 그림 3.5의 A와같은 곡선을 갖는 철의 경우 파괴전에 큰 외경 변화가 예상되지만 (crack-in-bulge) 재질 B는 실린더 외경의 별 변화없이 큰 내압을 견디다가 갑자기 크게 찢어지는 파괴가 예상된다. 재질 B는 높은 파열 압력을 갖고 변형이 안정되는 장점이 있지만 갑자기 크게 변형될 위험이 있다. 따라서 파열 압력 근처에서는 변형을 정확히 측정해야 한다. 실제 사용시 외부 자켓은 재질 A로 내부는 재질 B로 하여 강제 박음하든지 따로 권선하여 성능을 높일 수 있다.

또 한가지 실제 고압연구에서 중요한 사항 하나는 압력 사이클에서 압력을 낮출 때의 문제이다. 만일 실린더가 탄성 영역에서 사용된다면 압력을 낮출 경우 재질의 거동은 loading cycle을 그대로 따를 것이고 몇 회가 반복 되더라도 모든 응력은 0으로 돌아갈 것이다. 그러나 내

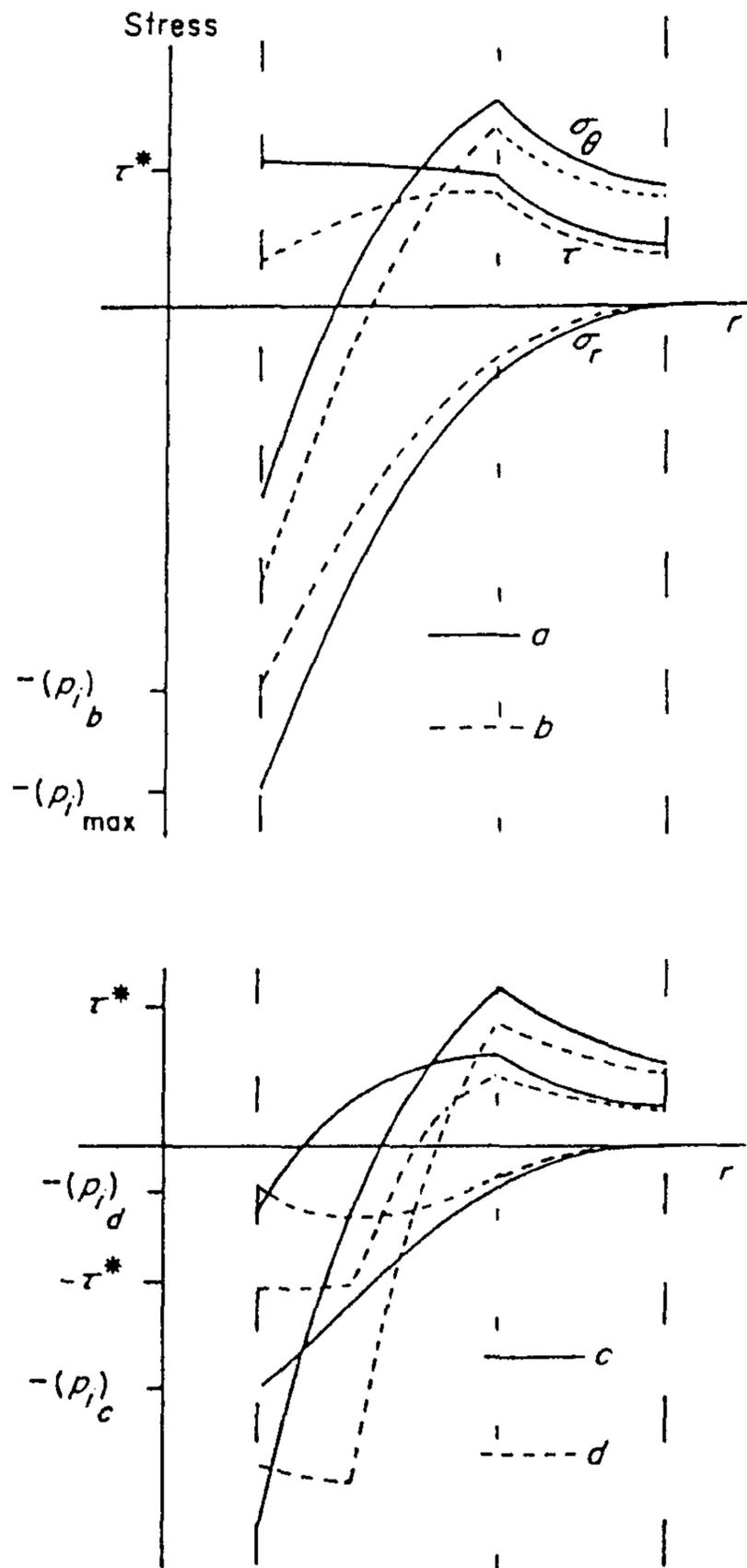


Fig. 3-6. Stress distributions within the walls of a thick-wall cylinder which has been overstressed by a large internal pressure $(P_i)_{\max}$ and zero outside pressure. The maximum overstressed condition is shown in (a), and the stress distributions (b), (c) and (d), show the result of progressively reducing the internal pressure. Note that in (d), the τ value would have been forced below $-\tau^*$ if the material would have allowed this, and σ_θ is shown more negative than $-\sigma^*$.

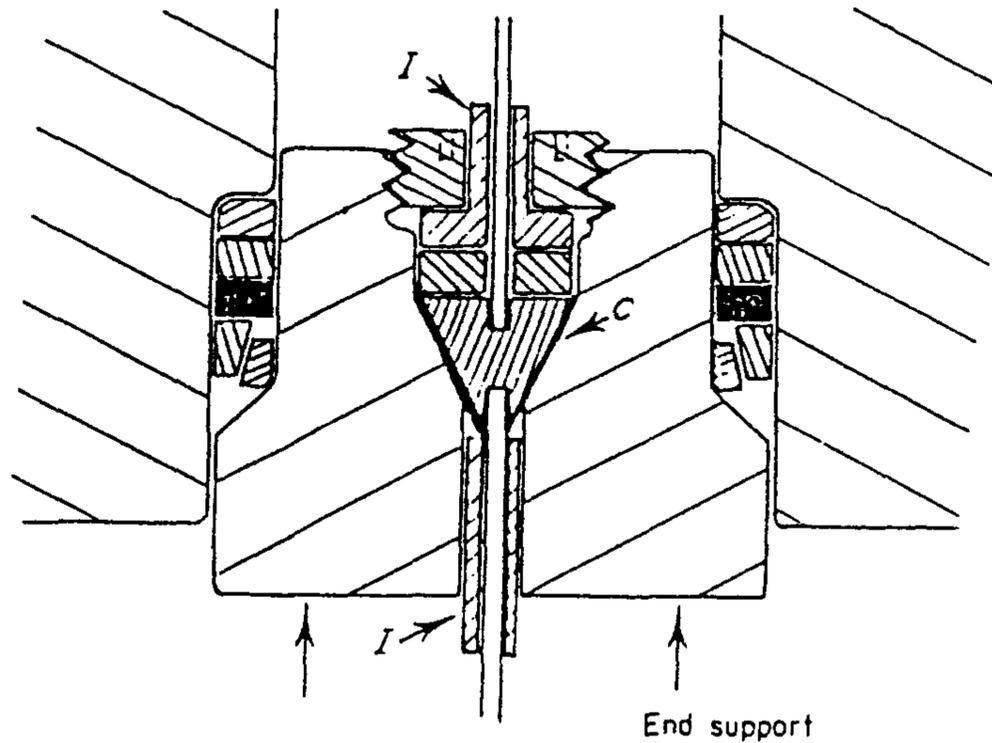


Fig. 3-7. The Bridgman cone-type of electrical lead-through. C indicates a thin conical shell of pipestone and I indicates electrical insulation.

압이 탄성 한계 (P_e)를 벗어 나면 실린더 벽 재질은 비탄성적으로 변형하여 내경과 외경은 늘어난 상태가 될 것이다. 다음 주기에서는 실린더는 P_e 이상까지 탄성을 유지하게 되며 이를 이용한 것이 autofrettage이다.

그림 3.3에서 내압이 감소 될때의 응력 분포를 생각해 보기로 한다. 앞에서와 유사한 방법으로 탄성 회복에 대한 식을 유도할 수 있다. 이것은 탄성 Lamé식과 같은 형태로 σ_r 과 σ_o 의 변화를 P_i 와 P_o 의 변화로 나타낼 수가 있다.

$$\Delta \sigma_o = \frac{\Delta P_i - K^2 (\Delta P_o)}{K^2 - 1} + \frac{(\Delta P_i - \Delta P_o) r_o^2}{(K^2 - 1) r^2} \quad (3-39)$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{\Delta P_i - K^2(\Delta P_o)}{K^2 - 1} - \frac{(\Delta P_i - \Delta P_o)r_o^2}{(K^2 - 1)r^2} \quad (3-40)$$

이 식들은 탄성영역과 소성 영역에 별도로 적용 되어야 한다.

2. Electrical leads

망가닌 게이지는 전기저항을 측정하므로 고압에서의 전기적 lead-through 가 필수적이다. 고압연구에서 많이 쓰이는 전기 접속은 망가닌 게이지나 열전대 및 heater 등을 들 수 있다. 이것들은 여러가지가 있으나 가장 기본적인 것은 conical seal을 이용한 Bridgman 방식이다(그림 3.7). 이 방식은 supporting steel plug와 금속 콘, pipestone 으로된 conical sleeve로 구성되어 있다. 초기에 압력의 누출가능성이 있으므로 밀봉을 위해 콘을 미리 압축하거나 왁스 코팅 혹은 heavy oil로 압력을 가하는 방식이 있다. 콘은 고압 및 저압부에 접속되고 전기 전도성이 좋아야 한다. 콘 재료로는 비교적 연성이 큰 베릴륨 동, 스테인레스 스틸, 연강, maraging steel 등이 사용된다.

또 다른 접속 방법으로는 콘 중앙을 구멍을 파서 은납으로 접속하여 직접 선을 연결하는 방식으로 열기전력으로 인한 오차요인을 배제할 수 있는 장점이 있지만 튼튼하지 못한 단점이 있다. 비록 연속 선이라 하더라도 압력에 의한 열기전력이 발생할 수 있으므로 완전히 열기전력이 없다고 생각하면 안된다. 실제 이것은 많은 실험을 거쳐 조건을 확립하여야 한다.

콘 형식 전기적 lead-through에서 중요한 또 하나의 요소는 지지

플러그와 콘 사이의 재질 문제이다. 이것은 압력 매체, 전기절연 정도, 사용 전압 및 전류에 따라 달라진다. 실제 사용되는 재질로는 pipe-stone, pyrophyllite, 종이, 운모, 테프론, 나일론, 수축 튜브, 세라믹스, 에폭시 레진, 유리등이 있다.

제 3 절 게이지 제작

그림 3-8은 제작한 망가닌 압력 게이지의 구조이다. 게이지는 덮개 (cap), 지지 나사 (supporting nut), 몸체 (body) 및 전기 신호부로 구성되어 있다.

전기신호부는 압력 감지 코일과 온도 보상 코일로 이루어져 있으며 플러그 (plug)는 압력 감지 코일의 전기적 피드쓰루 (feedthrough)와 압력 밀봉 작용을 하고 있다. 지지나사, 플러그 및 몸체는 maraging steel (VascoMax C-300)으로 제작하였다.

C-300은 18.5% Ni, 9% Co, 4.8% Mo, Ti 0.6%의 조성을 갖고 있으며 주 합금 원소는 Ni이며 탄소는 거의 없다.

Maraging steel의 장점은 열처리 전에는 기계 가공이 용이하지만 열처리 후에는 높은 항복 및 인장 강도를 갖고 있어 각종 금형 및 고압 용기에 널리 쓰이고 있다. Table 3-2는 열처리 후의 C-300 봉의 기계적 및 물리적 특성을 나타낸 것이다.

구매시 VascoMax 합금은 경도 30/35 R_c의 solution annealed 상태이므로 적당한 열처리가 필요하다. 열처리 조건은 업체에서 추천한 것이

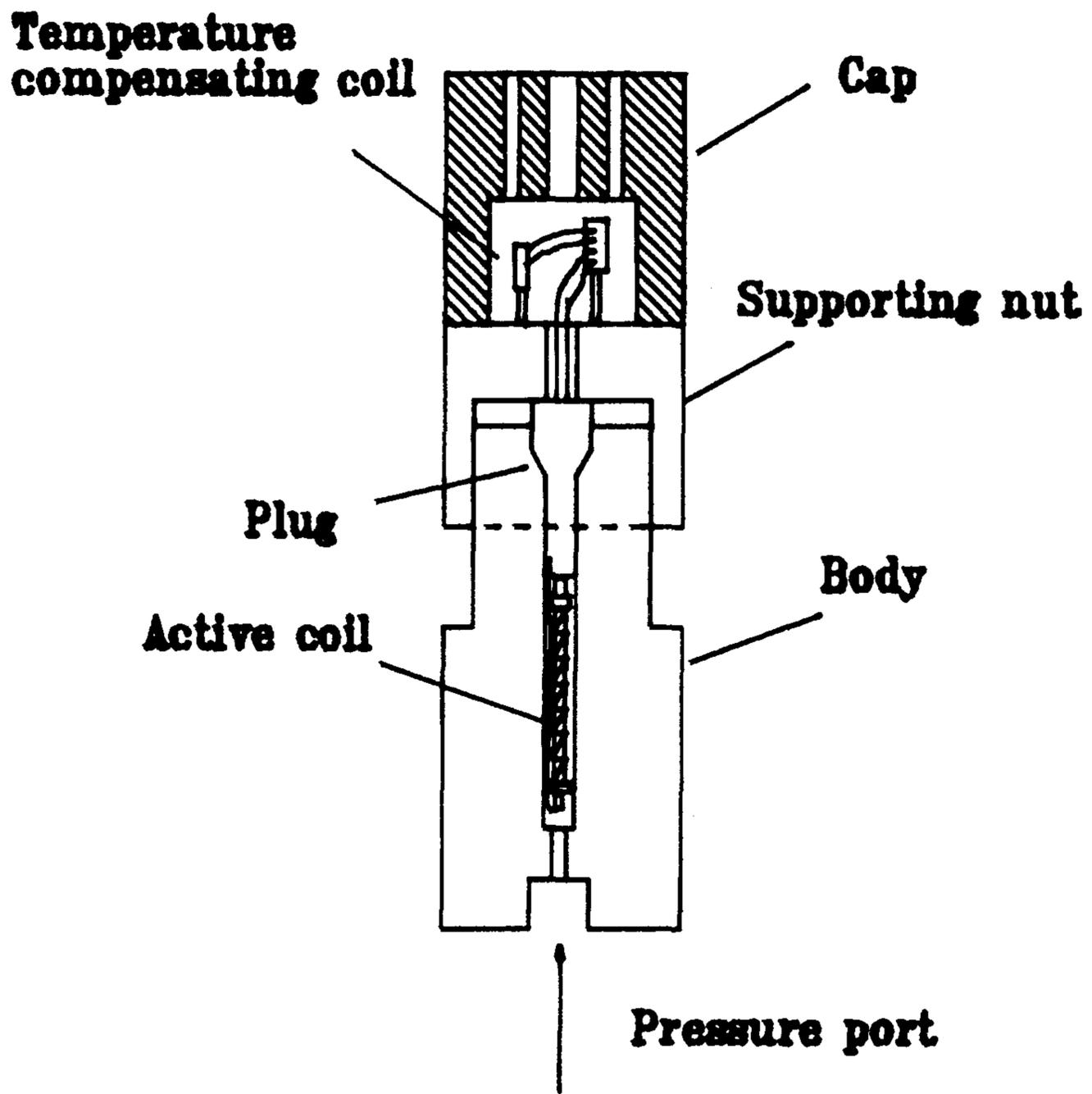
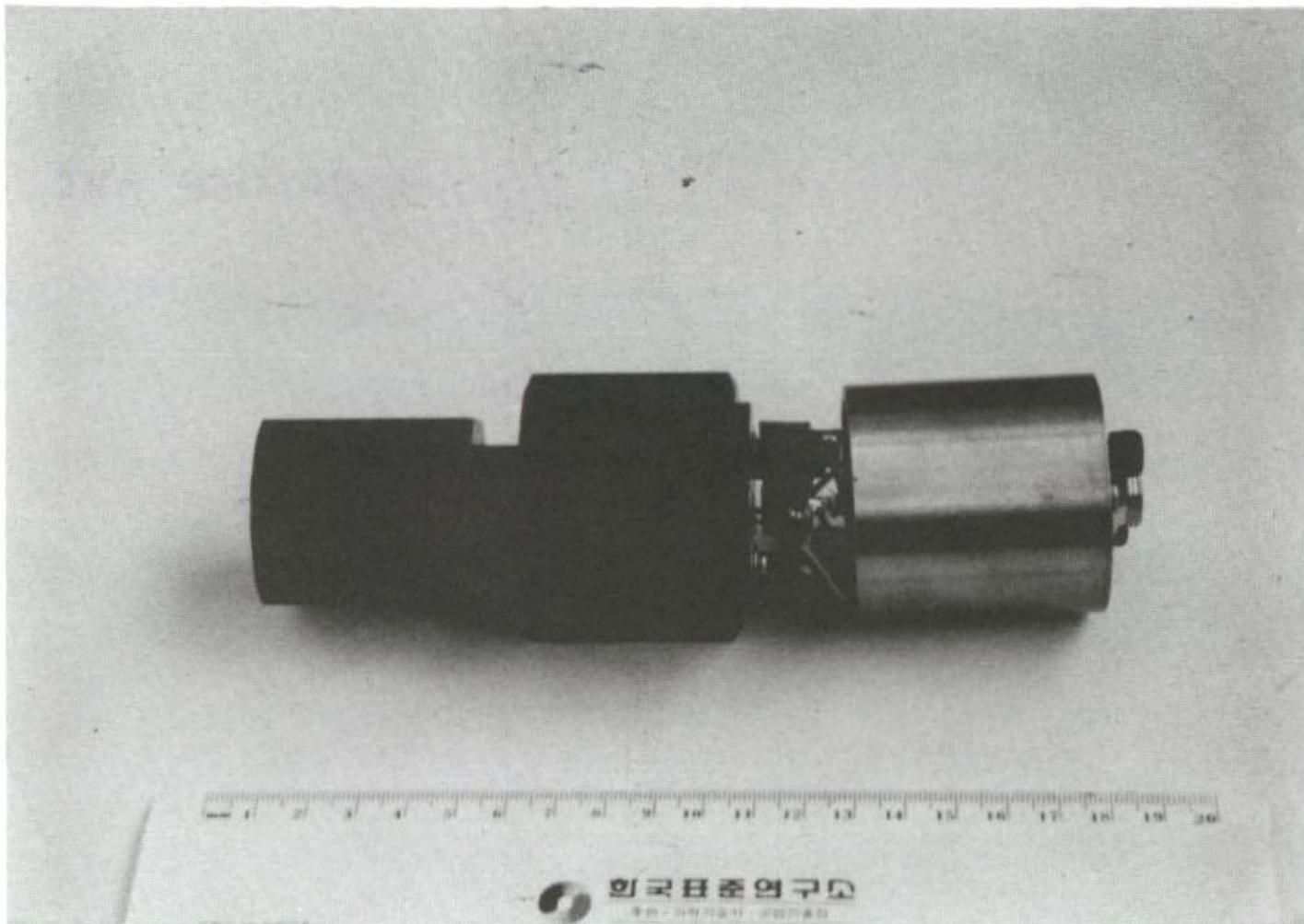


Fig. 3-8. (a) Structure of manganin pressure gauge.



(b) Photograph of manganin pressure gauge.

Table 3-2 Mechanical and physical properties of VascoMax C-300 maraging steel following heat treatment.

Tensile strength (ksi)	294.0
0.2 % yield strength (ksi)	290.0
Elongation (%)	11.8
Reduction of area (%)	56.6
Hardness Rockwell "C"	54.3
Thermal expansion coeff. /in./in./°F	5.6 X 10 ⁻⁶
Modulus of Elasticity (ksi)	27.5 X 10 ³
Density (g/cm ³)	8.0
Thermal conductivity at 68 °F BTU/(ft) (hr) (°F)	14.6

490 °C, 6시간이고 열처리 후의 길이 수축율은 0.001 inch/inch이다.

Vasco와 VascoMax는 Teledyne Vasco사의 상호이다. VascoMax 합금(18% Ni maraging steel)에는 화학 조성에서 1차 강화 요소에 따라 크게 2종류로 나뉘어진다. 1960년대 초에 최초로 maraging steel이 소개될 때에는 강화 요소로 Co(등급에 따라 7~12%)를 사용하였으므로 Co-강화 18% Ni maraging steel이었다. 1980년대 초 Teledyne Vasco는 Co를 사용하지 않고 Ti를 강화재로 쓴 Ti-강화 18% Ni maraging steel을 소개하였다. 이들은 이를 각각 C type 과

T type 으로 구분하였으며 T type이 약간 싼 편이고 기계적인 성질은 비슷하다. VascoMax 강은 탄소가 아닌 Ni이 주 합금요소이고 근본적으로는 carbon-free이다. 최초 maraging steel은 1960년대 초 항공우주용으로 INCO(International Nickel Company)에서 초고강도 강의 개발요구로 시작되었다. 즉 고체 추진 로켓 모터 케이스, load cell, 미사일 안내 기구로 쓰이는 flexure, 헬리콥터 구동축, 비행기 날개 요소 등에 사용되었다. 실제 C-type 18 Ni 250은 아폴로 15호 달 착륙선의 torsion bar로 사용되었다. 그후 공구강으로서의 중요성이 인식되어 각종 금형에 사용되었다.

제작시 사용한 열처리 조건은 다음과 같다.

- (1) 분당 5° 씩 온도를 높인다.
- (2) 490°C 로 6시간을 유지한다.
- (3) 전원을 끈후 노냉하여 15시간후 꺼냈다.

열처리 후의 재료의 평균경도는 $54 R_c$ 이었으며 기준 규격과 일치한다. 게이지 덮개는 황동으로 제작하였으며 전기 신호부의 보호와 리드선의 접속을 위해 단자가 부착되어 있다. 지지 나사는 몸체와 나사로 체결되며 플러그를 압축하여 플러그와 몸체 사이에서 고압 밀봉이 가능하도록 하였다. 플러그는 Fig.3-9과 같이 철 원추(steel cone), 원추형 절연 껍질(insulating conical shell), 전극(electrode)로 구성되어 있으며 압력발생시 원추의 단면적 차이에 의한 압축력으로 자연 밀봉이 되도록 하였다. 플러그의 외부 경사각은 60° 이고 내부 경사각은 15° 이다. 철 원추의 한쪽에는 망가닌 봉이 연결되어 그 위에 압력 감지 코일이 얹히게 되고 다른쪽은 직경 1mm 의 망가닌 선이 테프론 튜브로 절연되며 연

결되어 있다.

압력감지 코일 주위는 테프론 튜브로 보호되어 유체속에서의 예기치 못한 변형과 그로 인한 단락을 막아 준다. 사용된 망가닌 선은 독일 Isabellenhutte (enamel coated, 직경 0.09 mm)사 제품으로 화학조성이 Cu, 86 wt % ; Mn, 12 wt % ; Ni, 2 wt % 이고 규격은 Table 3-3 과 같다.

망가닌을 감는 방법은 여러가지가 있으나 본 연구에서는 화학적으로 안정되고 가공이 용이하며 강도가 낮은 테프론을 사용하여 실패형의 보빈 (bobbin)을 만들고 그위에 망가닌 코일을 느슨히 감아 잔류응력이 생기지 않도록 하였다. 코일의 전기적 잡음을 제거하기 위해 비 인덕턴스 방식인 2중선을 이용한 바이필라 (bi-filar) 감기 (winding)를 하였다

Table 3-3 Specification of Isabellenhutte manganin wire.

Electrical resistivity at 20 °C	0.43 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
Temp. coeff. of resistance at 20 °C	$< \pm 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Thermal EMF vs. copper betw. 0-100 °C	- 0.6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Coeff. of thermal linear expansion betw. 20-100 °C	$18 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Melting point	960 °C
Density at 20 °C	8.4 g/cm^3

망가닌선과 구리선의 연결은 납땜을 하였으며 전기적 접촉저항을 줄이기 위해 표면을 깨끗이 청소 (cleaning) 한 다음 열박음 하였다. 미세한 망가닌선을 균일하게 감기위해 현미경 (배율 10) 이 부착되고 장력 제어가 가능한 권선기를 제작하여 권선하였다.

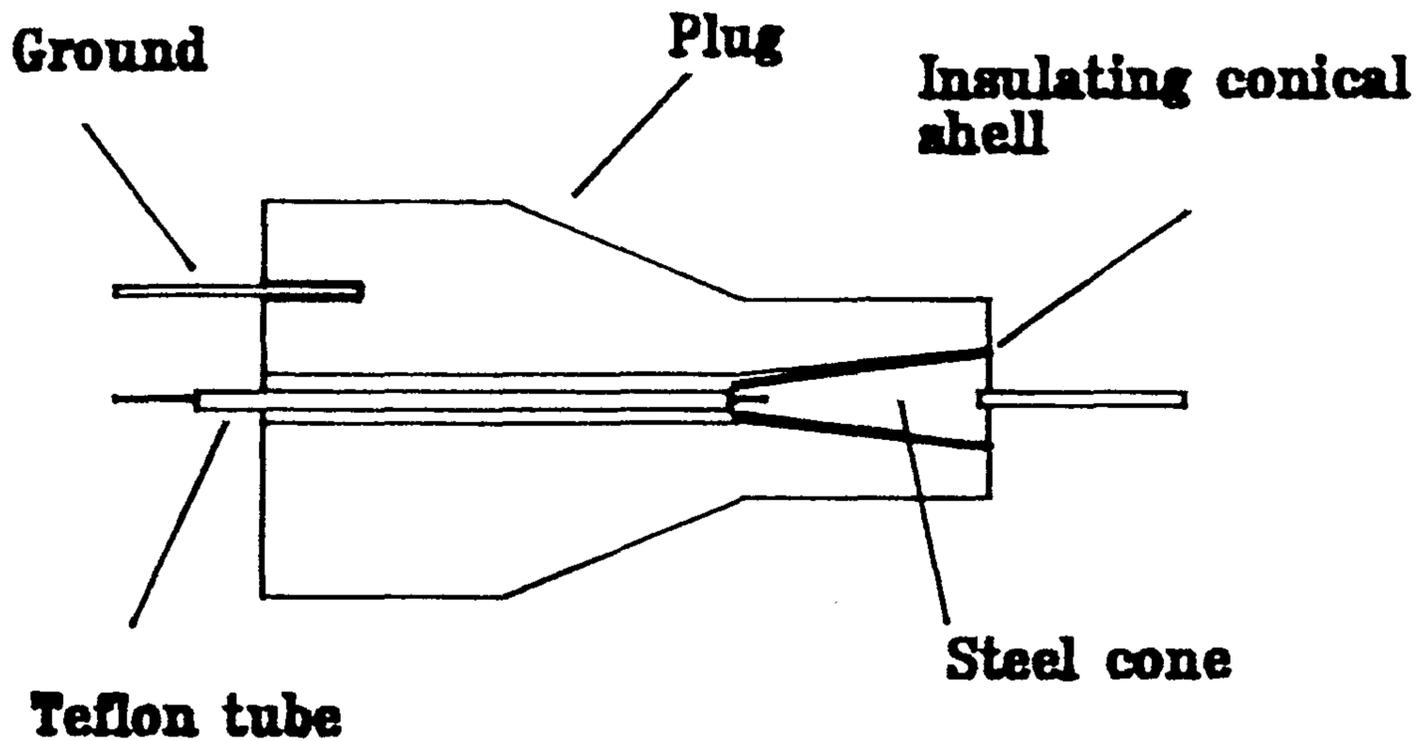


Fig. 3-9. Plug and electrical feedthrough.

제 4 절 압력 지시부 제작 연구

망가닌 압력 센서는 작은 압력 차를 측정하므로 지시부 제작에 관한 연구가 필요하다. 전기적 회로에서 작은 저항 변화를 측정하는 방법은 다양하며 그중 shunt network 를 이용하는 것은 잘 알려진 기술이다.

Shunt 들 중 하나에 가변 저항을 부착하여 작은 저항 변화를 받는 브리지의 평형을 유지한다. 브리지는 0점 지시기가 사용될 수 있다.

Fig.3-10은 제작 예정인 지시계의 회로를 나타내고 있다. 여기서 arm A와 C는 명목 저항 120Ω 이며 1 : 1의 비를 갖도록 조정한다.

S_2 는 decade 저항으로 대부분의 step이 0.02% 이상 trimming되어 있다. 측정 코일은 R_0 또는 R_p 이고 리드선의 저항은 R_L 이다. Arm D의 shunt 저항을 이용하여 코일의 저항을 측정할 수가 있다. 브리지가 평형을 이루면 $A/C = B/D$ 이고 $A/C = 1$ 이므로 $B = D$ 이다. B는 단자 저항(R_T)와 같고 이것은 $R_0 + R_L$ 과 같다.

Shunt 저항 a의 값을 구하기 위해 표준저항을 사용할 수 있으며 표준 저항을 active post에 부착하여 decade로 평형을 이루도록 한다. 이때 D에서의 shunt 회로 저항은 표준 저항과 리드선 저항을 합한것과 같으며 S_1, S_2 로 부터 a저항을 풀 수 있다.

$$\text{즉 } 1/R_s = 1/a + 1/S_1 + S_2 \text{ 이다.}$$

브리지는 2개의 직류 전원이 소요되고 전류는 보통 3 mA를 사용한다. 이것은 보통 rheostat에 의해 조정할 수 있다. 제작한 망가닌선은 5개의 리드선이 있으며 적/백색은 측정 코일(active coil), 황색은 접지, 흑/녹색은 온도 보상 코일에 접속된다. Cable은 차폐선을 사용하여

주변 전자 장비로 부터의 stray signal 로 부터 보호한다.

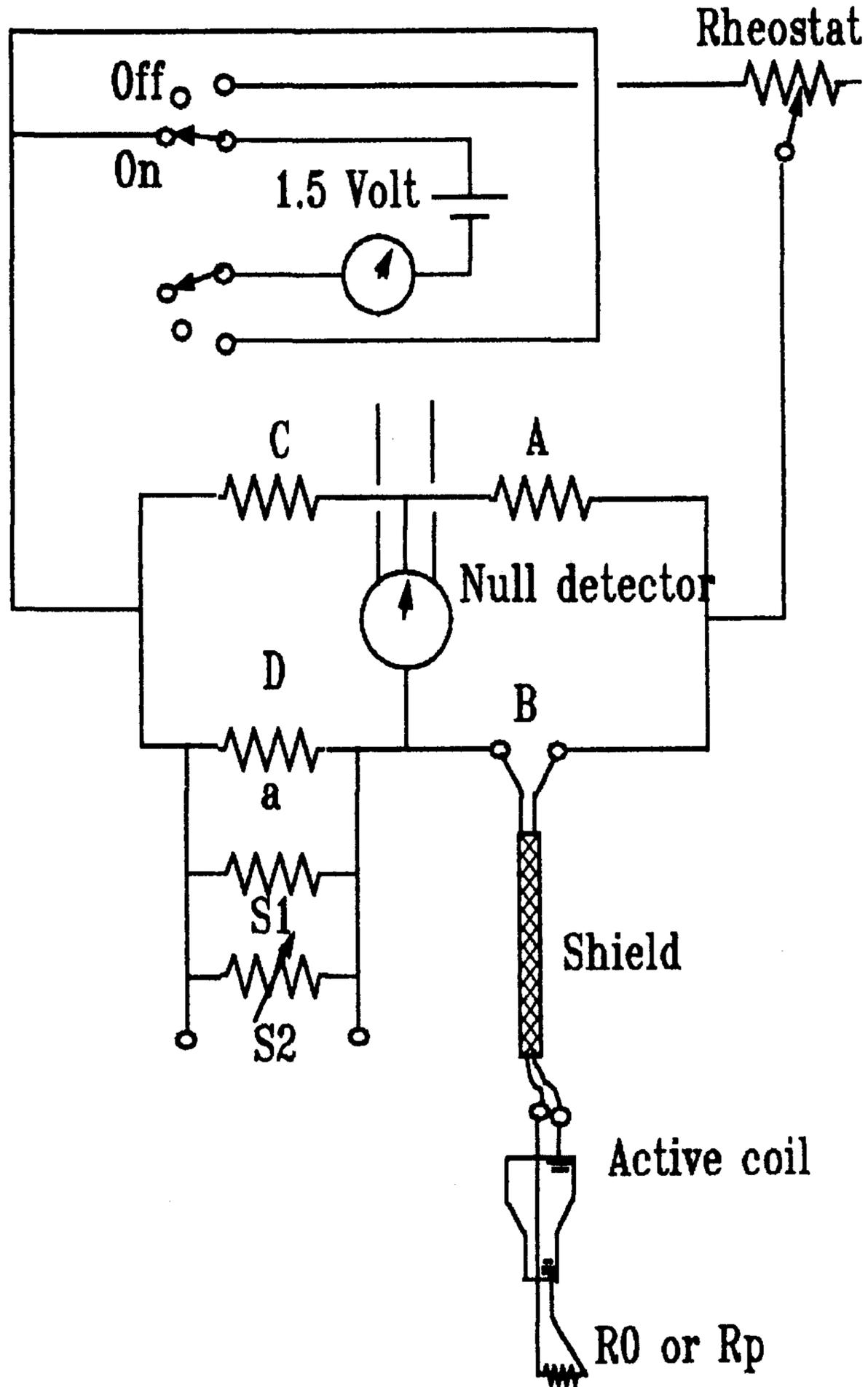


Fig. 3-10. Electrical schematic of manganin gage indicator.

제 4 장 시제품 특성 조사

제 1 절 측정 장치 및 방법

망가닌 게이지의 특성을 조사하기 위한 실험 장치도는 그림 4-1 과 같다. 압력 발생 및 측정을 위해 피스톤과 실린더 사이의 간격을 자켓 (jacket) 을 이용하여 조절하여 분동을 포함한 피스톤의 낙하속도를 제어하는 방식으로 1953년 Newhall에 의해 개발된 간격 조절식 분동식 압력계 (controlled clearance deadweight piston gauge, Harwood Model DWT-500 D)를 이용하였다. 간격 조절식 분동식 압력계의 측정원리는 압력이 단위면적에 작용하는 힘이라는 정의에 의하여 피스톤 끝에 발생하는 압력은 분동과 피스톤의 무게와 이들의 부력 보정, 온도 보정, 표면장력효과, 압력에 따른 유효 단면적의 변화 등을 고려하여 다음 식으로 계산된다.⁽¹⁾

$$P = \frac{\sum M_i g (1 - \rho_{air} / \rho_{Mi}) + r C}{A_0 [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(T - T_{ref})][1 + bP]} \quad (4-1)$$

제작한 망가닌 게이지의 저항변화는 DMM(digital multimeter, HP 3478A)로 측정하고 이것은 computer(Tidcom-AT)와 interface하여 자동기록할 수 있도록 하였다. 압력은 0 psi에서 50,000 psi까지 2,000 psi 간격으로 변화시키며 측정하였다. 각 측정점은 압력 평형 후 5분간 대기한 후 1초간격으로 5회 측정한 값을 평균하여 하나로 하고 이를 다시 10회 측정하여 이를 평균한 값이 측정된 값 하나가 되도록 하였다. 이때 표준 편차를 계산하여 신뢰도가 떨어지는 경우 재 측정하였다. 측정시

실험실 온도 변화에 의한 저항 변화가 예상 되므로 이를 분석하기 위하여 온도 보상 코일과 압력 감지 코일의 저항을 각각 측정하였다. 압력 전달시 고압이 작용하므로 유체의 점도를 낮추기 위하여 분동식 압력계용 오일 (Ruska, spindle type) 과 휘발유를 1 : 1로 섞어 압력 전달 유체로 사용하였다.

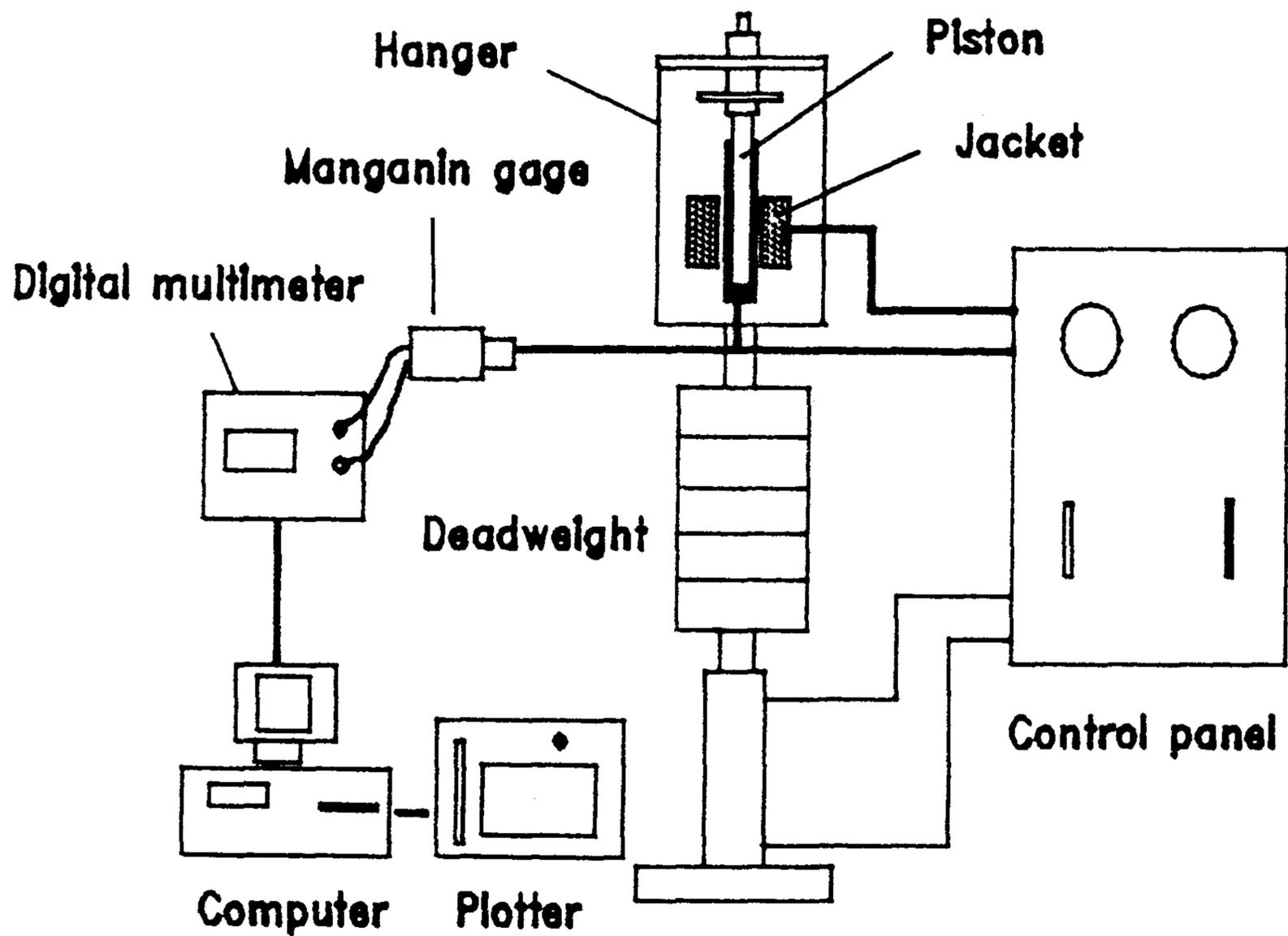


Fig. 4-1. Experimental arrangement for measuring manganin pressure gauge.

제 2 절 측정 결과 및 고찰

먼저 망가닌 선의 열처리 특성을 조사하기 위하여 실패에 감은 망가닌 선을 실리콘 오일이 들어 있는 항온조 (Neslab, EX-250 HT) 속에서 140 °C 의 온도로 24 시간 가열하며 열처리 시간에 따른 상대적인 저항 변화를 관찰하여 그림 4-2 에 나타내었다. 처음 30 분 동안 저항은 급속한 감소를 보이다가 그 이후 점차 안정한 값을 유지함을 알 수 있다. 상온에서 코일의 초기 저항은 압력 감지 코일이 127.7 Ω , 온도 보상코일이 125.7 Ω 이었으나 열처리 후의 저항은 모두 0.577 % 감소 하였으며 이 값은 Yamamoto가 제시한 0.5 ~ 0.6 % 저항 감소 값과 잘 일치하고 있다.

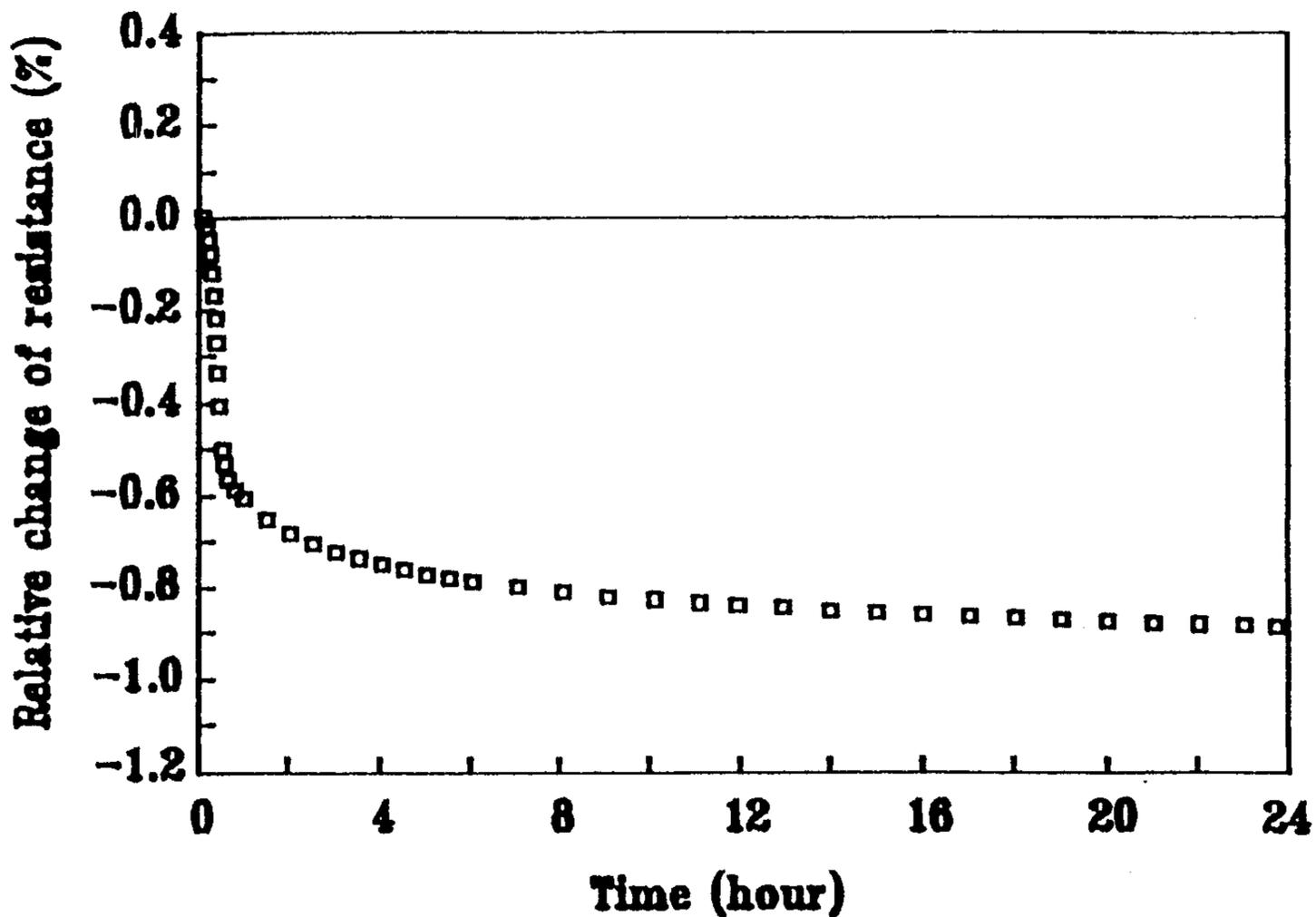


Fig. 4-2. Resistance change of manganin coil by heat treatment.

Table 4-1은 제작한 망가닌 게이지의 압저항 효과를 측정하기 위해 압력 변화에 따른 온도 보상 코일 (ref. coil)과 압력 감지 코일 (meas coil)의 저항값을 측정하고 그 차이값을 계산한 후 초기 저항에 대한 저항 증가를 계산하여 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 저항 증가는 압력과 근사적으로 선형 비례의 관계에 있었으며 최소 제곱법을 이용한 적합식은

$$P = 3.1291 (\Delta R) \quad (4-2)$$

로 표현되었다. 여기서 P는 bar, ΔR 은 $m\Omega$ 단위이다. 보통 게이지 감도는 저항의 1 ppm 이상이 적합하며 제작한 게이지는 감도가 $3.2 \times 10^{-4} \Omega/\text{bar}$ 로 2.7 ppm이므로 만족할만 하였다. 게이지 감도는 망가닌 코일의 길이에 따라 변화하므로 필요한 감도에 따라 적합한 길이를 선정할 수 있다. 따라서 식 (4-2)를 무차원화한 식 (2-2)가 게이지 특성 방정식으로 적합한 것으로 사료되며 최소 제곱법을 이용한 적합 직선식을 계산하여 다음과 같은 결과식을 얻었다.

$$P_1 = 0.3839 (\Delta R / R_0) \quad (4-3)$$

여기서 P_1 은 kbar 단위로 표시된 압력이고, R_0 는 압력 감지 코일의 초기 저항이며 대기압은 0이다. 이 경우 P_1 의 잔차 (residual)의 표준편차는 11 bar로 측정구간의 0.3%에 해당하였다. 그림 4-3에 압력과 $\Delta R/R_0$ 의 관계를 나타내었다. 근사적으로 이들은 선형 비례관계에 있지만 실제 게이지는 비선형 요소를 포함하고 있으므로 식 (2-1)과 같은 2

Table 4-1. Manganin pressure gage test results

pressure		ref. coil	meas. coil	diff.	dR	dR/RO
(psi)	(bar)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(m Ω)	(m Ω / Ω)
0	0	122.0830	122.6755	0.5925	0.0	0.0000
2,000	138	122.0829	122.7210	0.6381	45.6	0.3717
4,000	276	122.0834	122.7649	0.6815	89.0	0.7254
6,000	414	122.0829	122.8101	0.7272	134.7	1.0979
8,000	552	122.0831	122.8550	0.7719	179.4	1.4623
10,000	690	122.0830	122.8992	0.8162	223.7	1.8234
12,000	827	122.0829	122.9425	0.8596	267.1	2.1771
14,000	965	122.0830	122.9870	0.9040	311.5	2.5390
16,000	1,103	122.0832	123.0319	0.9487	356.2	2.9034
18,000	1,241	122.0831	123.0744	0.9913	389.8	3.2506
20,000	1,379	122.0831	123.1199	1.0368	444.3	3.6215
22,000	1,517	122.0830	123.1640	1.0810	488.5	3.9818
24,000	1,655	122.0829	123.2071	1.1242	531.7	4.3339
26,000	1,793	122.0827	123.2510	1.1683	575.8	4.6934
28,000	1,931	122.0822	123.2951	1.2129	620.4	5.0569
30,000	2,069	122.0830	123.3389	1.2559	663.4	5.4074
32,000	2,206	122.0827	123.3829	1.3002	707.7	5.7685
34,000	2,344	122.0831	123.4271	1.3440	751.5	6.1255
36,000	2,482	122.0830	123.4720	1.3890	796.5	6.4923
38,000	2,620	122.0828	123.5131	1.4303	837.8	6.8289
40,000	2,758	122.0829	123.5562	1.4733	880.8	7.1794
42,000	2,896	122.0830	123.6004	1.5174	924.9	7.5389
44,000	3,034	122.0832	123.6449	1.5617	969.2	7.9000
46,000	3,172	122.0830	123.6852	1.6022	1009.7	8.2301
48,000	3,310	122.0829	123.7263	1.6434	1050.9	8.5659
50,000	3,448	122.0830	123.7680	1.6850	1092.5	8.9050

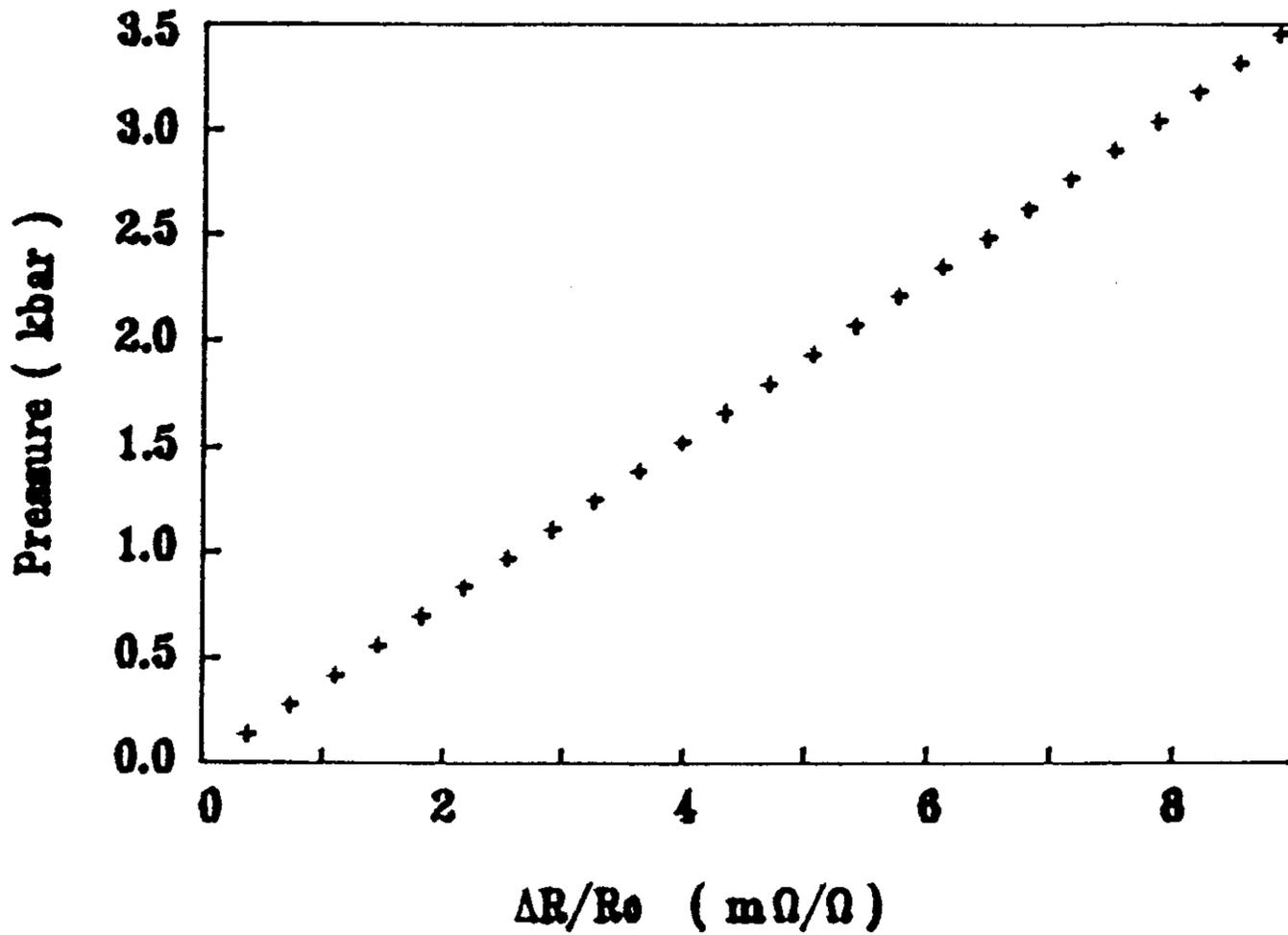


Fig. 4-3. Characteristic curve of manganin pressure gauge.

차식으로 최적 곡선식을 구하였다.

$$P_q = 0.3764 (\Delta R/R_0) + 0.0011 (\Delta R/R_0)^2 \quad (4-4)$$

이들 계수의 상대적 크기로 부터 비선형 특성이 미소하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 또 P_q 의 잔차의 표준편차를 계산하면 4 bar가 되고 이값은 측정 구간의 0.1%에 해당하므로 매우 정확한 적합식이 구해졌음을 알 수 있다. 그림 4-4는 식(4-3), (4-4)의 잔차를 측정압력에 따라 나타낸 것이다.

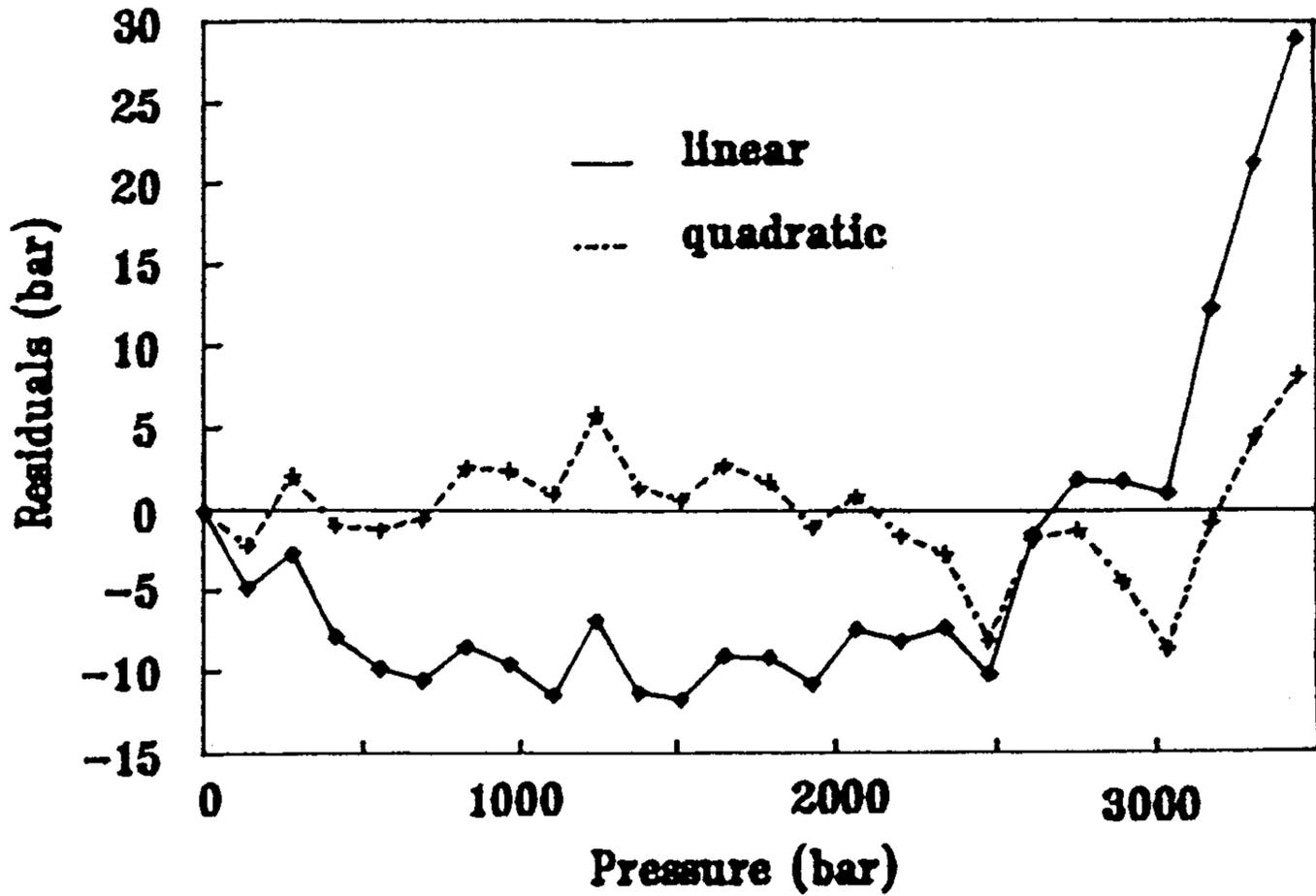


Fig. 4-4. Residuals of linear and quadratic fit equations.

Yamamoto 는 식 (4-4) 를 변형한 $\Delta R = R_0 (A_q \cdot P + B_q \cdot P^2)$ 의 형태로 여러 실험 결과를 분석하였으며 본 연구 결과를 이와 비교하여 Table. 4-2 에 나타내었다. 기본적으로 본 연구의 결과는 다른 연구자들과 일치하고 있음을 알 수 있다. 1차 압력 계수는 게이지의 선형 감도를 나타내는 것으로 클수록 좋으므로 제작한 게이지가 이점에서는 가장 유리한 것으로 판단된다. 다만 비선형의 크기를 나타내는 2차 항이 다른 것보다 크고 표준 편차가 다소 큰 것이 단점으로 지적된다.

망가닌 게이지의 비선형 특성은 CF (cell factor) 로 나타낼 수 있다고 앞에서 언급한 바 있다. 게이지의 압력 특성이 완전히 선형이면 CF

Table 4-2 Comparison of pressure coefficients of manganin gauge

Researcher	Insulation	Diameter (mm)	$A_q \cdot 10^6$ (bar ⁻¹)	$B_q \cdot 10^{12}$ (bar ⁻¹)	$\sigma_q \cdot 10^4$ (Ω)
Harwood ⁽¹⁴⁾	fiber glass	0.1	2.3739	-1.82	4.8
S. Yamamoto ⁽¹⁴⁾	double silk	0.1	2.25-2.45	-1.0~2.0	1.3~90.2
Atanov ⁽¹⁷⁾	-	0.08	2.41		
C.Y. Wang ⁽²⁰⁾	-	-	2.37		
KSRI	enamel	0.09	2.6553	-19.10	11.6

값은 상수가 될것이지만 실제로는 비선형이므로 약간의 기울기를 갖는다. 압력에 대한 CF 값의 변화를 최소 제곱법을 이용하여 구하면 적합 직선식은 다음과 같다.

$$CF = -0.0204 P + 2.6580 \quad (4-5)$$

결국 대기압에서의 cell factor CF₀ 값은 2.6580임을 알 수 있고 직선의 기울기 m은 0.0204가 된다. 그림 4-5는 저항 증가에 따른 CF 변화를 보인 것이다. CF 값은 압력 증가에 따라 미소한 감소를 보이는데 이것은 압력 계수가 작아지는 것을 의미한다.

망가닌 선은 온도에 따른 저항 변화가 작지만 정밀한 측정에 있어서는 이것 역시 큰 오차를 유발할 것으로 생각되어 이를 분석하였다. 보통 망가닌 코일은 온도변화에 따른 저항 변화가 상온 근처(성분에 따라

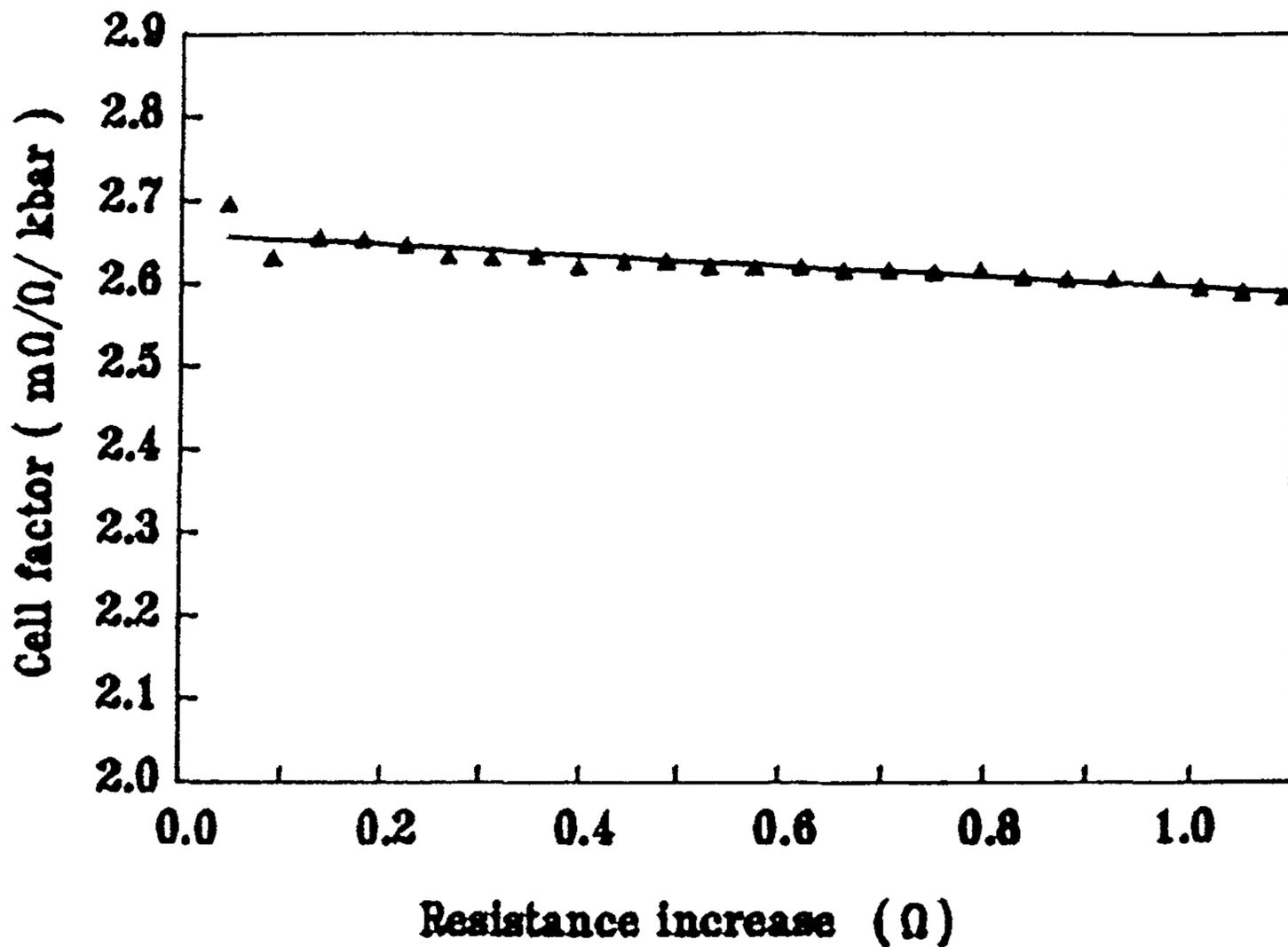


Fig. 4-5. Variation of cell factor with resistance change.

20 ~ 50 °C)에서 극대값을 보이고 포물선 형태로 감소한다. Isabel-
 hütte사의 기술 자료에 의하면 20 °C에서 극대점을 이룬 경우 30 °C 에
 서 50 ppm, 40 °C에서 200 ppm의 저항 감소를 보이는 것으로 나타나 있
 다. 따라서 0 °C에서 40 °C까지의 평균 저항 변화는 10 ppm/°C이 되므
 로 압력으로 환산하면 4 bar/°C가 된다. 실제 압력 측정의 경우 대기
 온도는 수시로 변하고 이의 영향을 배제할 수 없으므로 스트레인 게이지
 의 측정 방식을 이용하여 온도 보상 코일 (dummy or ref. coil)을 삽

입하여 압력 감지 코일과의 저항차를 측정 하므로써 온도 보상을 하고자 하였다. 온도 보상 코일은 압력 감지 코일과 동일한 방법으로 제작하였다. 온도보상 효과를 실험으로 확인하기 위하여 제작한 게이지에 대기압을 가한 후 두 코일의 저항 변화를 15분 간격으로 24시간동안 측정하였다. 그림 4-6(a)는 압력 감지 코일의 저항 변화를 나타낸 것이다. 측정 시작 시간은 오후 5시경으로 이후 실험실 온도가 점차 떨어지고 있음을 알 수 있다. 측정후 15시간이 지난 후 부터 저항은 급상승 하였는데 이때는 오전 9시경으로 난방 장치의 가동 때문으로 사료된다. 이 부분의 저항 증가는 약 30 bar의 오차를 유발하여 정밀 측정에 큰 장애가 됨을 알 수 있다. 그림 4-6(b)는 압력 감지 코일과 온도 보상 코일의 저항차를 측정하여 시간에 따른 변화를 보인 것이다. 이 경우 실험실 온도변화에 의한 저항 변화가 두 코일에 동시에 작용하므로 그 차를 측정 하므로써 온도 보상이 이루어져서 전체적으로 고른 저항 분산을 보이고 오차도 1/10로 현저히 줄어든 것을 알 수 있다.

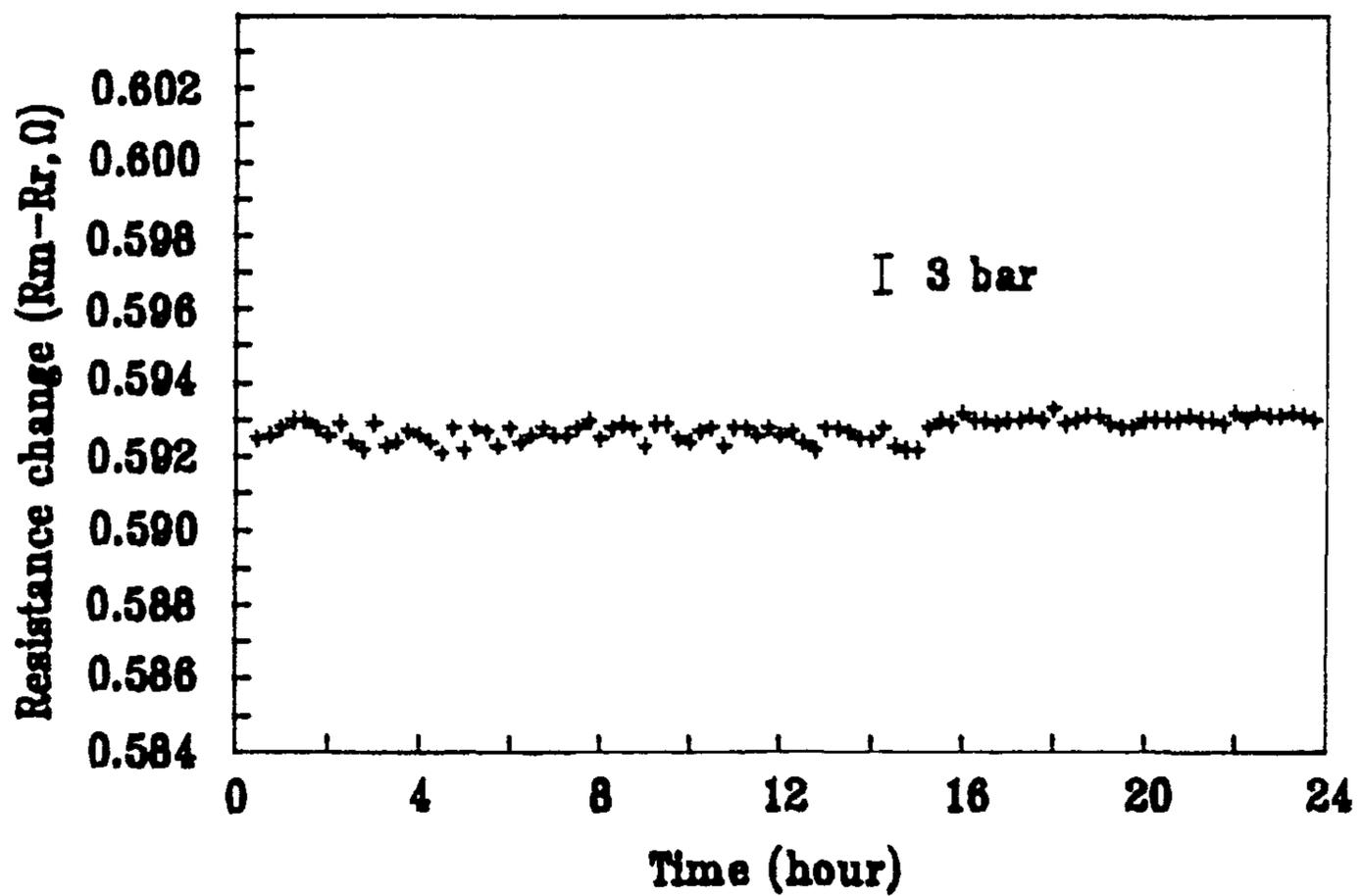
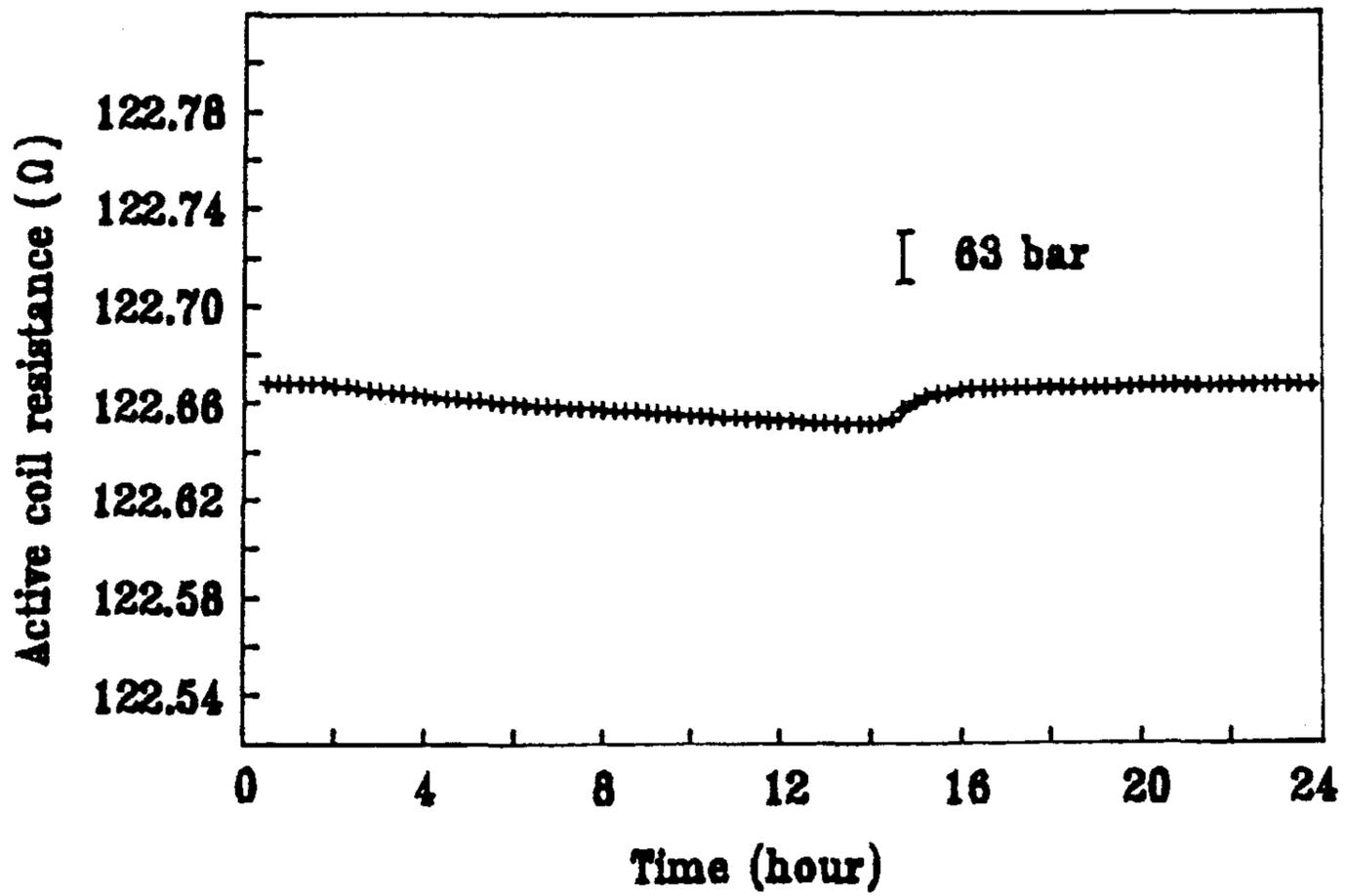


Fig. 4-6. (a) Resistance variation of active coil.
 (b) Resistance difference vs. time.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 표준 저항선으로 많이 사용되는 망가닌 선의 압저항 효과를 이용하여 50,000 psi까지의 유압을 측정 할 수 있는 망가닌 유압 게이지를 제작하여 그 특성을 분석하였다.

본 연구를 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 140 °C의 실리콘 오일 중에서 24시간 열처리를 받은 망가닌 선의 저항 증가는 압력의 증감에 따라 재현적이고 안정된 값을 보인다.
- (2) 제작한 게이지는 작은 비선형 특성을 포함하고 있으며 압저항 특성은 적합 곡선식 $P_q = 0.3764 \times (\Delta R/R_0) + 0.0011 \times (\Delta R/R_0)^2$ 으로 표시되고 적합 곡선식에 대한 잔차의 표준 편차는 4 bar로 구간의 0.1%에 해당하는 정밀 계기급이었다.
- (3) 게이지의 저항 증가는 근사적으로 압력에 선형적이고 계산된 적합 직선식은 $P_1 = 0.3839 \times (\Delta R/R_0)$ 이며 이경우 잔차의 표준 편차는 11 bar로 구간의 0.3%에 해당한다.
- (4) CF로 표시된 게이지 특성식은 $CF = -0.0204 \times P + 2.6580$ 로서 압력 증가에 따른 CF값의 미소한 감소를 관찰할 수 있었다.
- (5) 게이지는 온도 보상 코일과 압력감지 코일로 구성되며 그 차이값을 측정하여 온도 영향을 1/10로 현저히 줄일 수 있었다.

2차년도 연구를 통해 파악한 문제점 및 개선사항을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 망가닌 압력 게이지는 저항 게이지이므로 전체저항이 안정되어야 하고 특히 접촉 저항 안정이 매우 중요하다. 플러그와 접지선의 연결시 열박음을 하였으나 제작 공정이 복잡하여 다른 방식(나사식)으로 바꿀 예정이다. 플러그의 열처리 과정에서 표면이 산화 되어 접촉 저항이 증대 되었으며 이를 방지하기 위해 진공 열처리, 분위기 열처리, 접속부 밀봉 등 여러 방법이 검토되고 있다.
- (2) 에나멜 코팅 망가닌 선과 아울러 fiber-glass 로 절연된 망가닌선을 사용한 압력 게이지를 제작할 예정이다. 이는 에나멜 코팅시의 잔류 응력이 배제 된점과 수분에 강한것이 장점으로 꼽히고 있다.
- (3) 3차년도에는 게이지 제작공정의 확립과 오차요소의 분석, 저항 측정 및 지시부 제작, 저압 영역으로의 측정 범위 확대, 고압 영역으로의 측정 범위 확대, zeranin 등 다른 금속의 압저항 효과 연구등을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. P.L.M. Heydemann and B.E. Welch, Experimental thermodynamics Vol.2, Ch.4, p.147, J.P. McCullough and D.W. Scott eds., Butterworths, London (1968)
2. E.O. Doebelin, "Measurement systems", McGraw-Hill, New York, p. 384 (1975)
3. R.P. Benedict, "Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements", John Wiley and Sons, New York, p. 334 (1977)
4. T.G. Beckwith et al., "Mechanical measurements", Addison Wesley, Reading Mass., p. 340 (1982)
5. G.N. Peggs, High pressure measurement techniques, Chap. 6., Applied Science Publishers, New York (1983)
6. W.F. Sherman and A.A. Stadtmuller, Experimental techniques in high-pressure research, Ch. 6, John Wiley & Sons Ltd. (1987)
7. P.W. Bridgman, The Physics of High Pressure, 257-306 (1952).
8. Frank, N. H., Phys. Rev., 47, 282 (1937).
9. J.C. Slater, Introduction to Chemical Physics, Chap. 29, McGraw-Hill Book Co., New York (1939).
10. Lisell, E., "On the effect of pressure on the electrical resistance of metal and the new methods of technique for measuring high pressures", Uppsala Univ. Arsskr., 1(1903)
11. P.W. Bridgman, The measurement of hydrostatic pressures up to 20,000 kg/cm², Proc. Am. Acad. Arts Sci. 47, p. 321-43 (1912).

12. A. Michels and M. Lenssen, An electric manometer for pressures up to 3,000 kg/cm², J. Sci. Instrum., 11, 345-7 (1934)
13. L. H. Adams, R. W. Goranson and R. E. Gibson, Construction and properties of the manganin resistance gauge, Rev. Sci. Instrum., 8, 230-5 (1937)
14. S. Yamamoto, Bull. Nat'l. Res. Lab. Metrol. Tokyo 24, 23 (1972)
15. S. Yamamoto, Bull. Nat'l. Res. Lab. Metrol. Tokyo 25, 1 (1972)
16. D. Newhall and L. Abbot, Manganin pressure gauges, Harwood Eng. Co. (1970)
17. Y. A. Atanov and E. M. Ivanova, Manganin resistance gauges as accurate instruments for high-pressure measurements, In: Accurate characterization of the high pressure environment, Lloyd, E. C. (ed.), NBS special publication 326, Washington DC, pp. 49-51. (1971)
18. K. Feussner and S. Lindeck, Metallegirungen für elektrische Widerstände, Z. Instrumkde, 9, 233-6 (1889) (in German.)
19. Atanov, A. Yu and Ivanova, E. M. High pressure measurements with manganin pressure gauges, Izmerit, Tekh., 2, 46-8 (1971)
20. C. Y. Wang, Electrical resistance of manganin coil to 7 kbar and 200°C, Rev. Sci. Instrum., 38, 24-6 (1967)
21. R. C. Lincoln, A device for length and other thermodynamic measurements at high pressure, PhD thesis, Cornell University (1971)
22. E. C. Morris, An investigation of the mercury-melting pressure scale, Metrologia, 14, 105-9 (1978)
23. P. W. Bridgman, proc. Am. Acad. Ars Sci. 47, 321 (1911).
24. P. W. Bridgman, proc. Am. Acad. Ars Sci. 74, 1 (1940).

25. R. Wisniewski, properties of resistive (manganin, gold-chromium and zeranin) transducers applied to measurement of hydrostatic and dynamic pressures. In: High pressure techniques in science and technology, Dümtechniky CV-TS, Praha, Czechoslovakia, pp. 125-30 (1975).
26. A. J. Rostocki and R. Wisniewski, influence of hydrostatic pressure on electroresistive properties of soldered connections, Archwm Electrotech., 24, pp473-6 (1975). (in Polish).