

# 슬리브관을 갖는 로드셀을 이용한 주퇴봉 당김력 계측시스템 개발

## A Development of the Recoil Rod Pull Force Measurement System Using the Load Cell with Sleeve

최 주 호, 홍 성 수, 유 준  
(Ju Ho Choi, Sung Soo Hong, and Joon Lyou)

**Abstract** : This paper presents a development of the recoil rod pull force measurement system using the load cell with a sleeve normally available in the recoil system test. The commercial load cell cannot be used in the recoil rod pull force measurement since only the application contact point of the load cell to apply force is used in the test of recoil system floating the breach contact point freely in the air. The load cell is designed and manufactured to meet the recoil system test condition. Theoretical analysis and experimental results show that the accuracy of the developed measurement system is within  $\pm 0.5\%$ . We notice that the measurement technique proposed in this paper is accurate and useful in the recoil rod pull force measurement of the recoil system.

**Keywords** : recoil rod pull force measurement system, load cell with sleeve, recoil system

### I. 서론

무기체계중 총·포의 개발에서 駐退裝置(recoil system)는 무기체계의 성능과 수명을 결정짓는 중요한 부분이다. 옛날 포에는 주퇴부가 없었으며 포신이 받는 모든 힘은 직접 砲架에 전달되도록 하였으나, 오늘날에는 주퇴부와 砲架 사이에 에너지 흡수 및 消散裝置를 두어 砲架가 받는 힘을 감소시켜 준다. 그러나 계속 사격을 하기 위하여 주퇴부가 다시 사격전 위치로 복귀하여야 하므로 주퇴시 주퇴부에 작용하는 에너지의 일부를 저장하였다가 포를 復座(counter recoil) 시키는데 사용된다. 이러한 모든 장치를 주퇴장치라고 부른다. 주퇴장치는 그림 1과 같이 주퇴실린더 및 복좌실린더를 가지고 있으며, 주퇴실린더 내부에는 포신의 주퇴운동을 제어하기 위한 주퇴제어 오리피스(recoil control orifice)가 설치되어 있고, 복좌운동 후반부에서 발생하는 완충운동을 제어하기 위한 완충제어 오리피스(damping control orifice) 및 완충제어 밸브가 설치되어 있다. 그리고 복좌실린더 내부에는 질소가스가 채워져 있어 포신의 주퇴운동중에는 압축되고, 주퇴운동이 완료되면 압축된 질소가스가 팽창을 시작하여 이 힘으로 복좌운동이 발생된다. 그림 1에서  $w_r$ 는 주퇴중량을 나타내고  $B(t)$ 는 포미력(breech force),  $F_p$ 는 주퇴실린더의 패킹(packings) 마찰력,  $F_o$ 는 주퇴실린더의 유체저항력,  $F_f$ 는 포신마찰력,  $F_r$ 은 주퇴복좌기의 복좌력을 나타낸다.

주퇴장치의 설계는 격발을 하였을 때 추진제가 점화되어 발생하는 압력이 폐쇄기(breech)에 미치는 힘과 주퇴부의 질량 및 주퇴거리에 대한 정보를 가지고 가

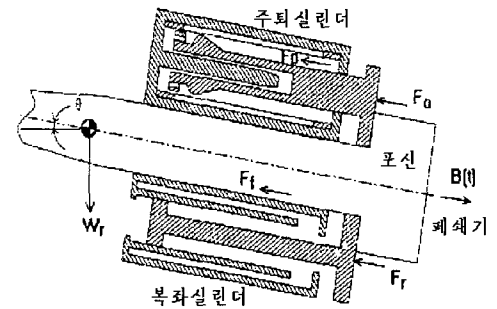


그림 1. 주퇴장치의 단면도.

Fig. 1. The cross section of the recoil system.

장 안정성 있는 주퇴당김력이 되도록 제어봉(control rod)을 설계하는 일이다. 이와 같은 최적의 주퇴장치를 설계하기 위하여 사격시 발생되는 약실압력(chamber pressure), 주퇴당김력, 주퇴거리, 주퇴복좌속도 및 주퇴복좌가속도 등을 계측하여 설계변수로 적용하고 있다.

본 논문에서는 주퇴장치를 설계하고 평가하는데 필수 계측항목으로 되어 있는 주퇴거리, 주퇴속도 및 주퇴당김력 중에서 지금까지 계측센서의 미확보로 계측하지 못했던 주퇴당김력의 계측시스템 개발결과를 제안하고자 한다. 주퇴당김력 계측은 로드셀(load cell)을 이용하여야 하는데, 상용화되어 있는 로드셀은 힘받는 부분과 지지부분이 있어 인장하중과 압축하중을 계측하도록 설계되어 있다. 그런데 총·포의 경우는 주퇴 및 복좌봉에 인장하중만 인가되도록 설계되어 로드셀은 지지부분이 없는 형태가 요구되고 있기 때문에 이와 같은 환경에 적용될 수 있는 계측용 센서를 설계 및 제작하여 당김력 계측에 활용하였다[1]-[3]. 그리고 주퇴당김력의 계측시스템 개발에 관한 내용중에서 특히, 계측시스템의 구성과 센서, 신호증폭기 및 자료처리기법에 관한 내

접수일자 : 2000. 5. 19., 수정완료 : 2000. 10. 31.  
최주호, 홍성수 : 국방과학연구소(cojuho@sunam.kreonet.re.kr /ssh1995kw@yahoo.co.kr)  
유 준 : 충남대학교 전자공학과(jlyou@hanbat.chungnam.ac.kr)

용을 언급하였다. 주퇴당김력 계측기법에서 센서의 설계개념과 제작의 필요성을 설명하였고, 또 센서회로의 해석과 브릿지회로의 평형방법, 비직선성 및 횡감도 오차보정방법 그리고 勵起 전압오차에 대한 처리방안과 계측결과와 당김력 계측시스템의 정확도를 분석하여 제안기법이 주퇴장치의 평가기법으로써 적합한지의 여부를 밝혀두었다[4]-[6].

II. 계측시스템 구성 및 특성

1. 계측시스템 구성

당김력 계측시스템 구성은 그림 2와 같으며 당김력 센서(pull force sensor)와 센서신호의 크기를 증폭하거나 불필요한 잡음신호를 제거하기 위한 신호조정기(signal conditioner), 주퇴 및 복좌 당김력을 계산하여 그 결과를 그래프로 그리기 위한 자료처리기(data processor) 및 출력장치로 구성되어 있다. 그리고 센서는 자체 개발된 센서이며, 신호조정기는 DC 차동증폭기로 구성되었고 자료처리기는 독일의 Transinstruments사의 것을 선정하였다[6]-[8].

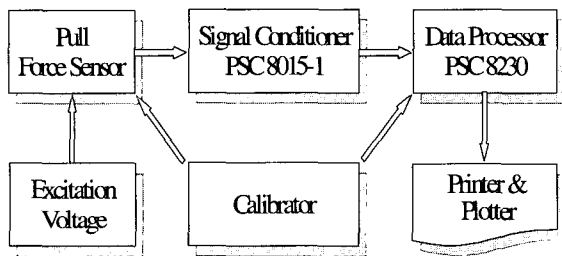


그림 2. 당김력 계측시스템의 블록다이어그램.  
Fig. 2. The block diagram of the pull force measurement system.

그림 2의 당김력 계측시스템의 동작개요는 시험전 당김력센서의 감도를 교정기로 확인하고 자료처리에 입력한다. 그리고 신호처리 과정은 당김력센서의 브릿지회로 입력단에 여기전압이 인가된 상태에서 당김력이 전달되면 브릿지회로의 전압이 출력되어 신호조정기에 입력되며, 자료처리기에서 아날로그 신호가 디지털로 변환되고 센서감도와 출력전압의 크기에 따라 최종당김력을 계산한다.

2. 당김력 센서의 구조

일반적으로 힘을 계측하기 위해서는 상용화된 로드셀을 이용하는데 상용화된 로드셀은 힘 받는 부분과 지지부분이 있어야 계측이 가능하다. 그런데 주퇴당김력은 지지부분이 공중에 떠 있는 로드셀이 요구되므로 본 연구에서는 단일 집합부만을 갖는 센서를 개발하게 되었다. 개발된 당김력 센서의 외형은 그림 3과 같으며 그림 3의 A센서는 복좌당김력 센서이고 C센서는 주퇴당김력 센서이다. B와 D는 로드셀의 지지부분 역할을 위한 것과 센서의 몸체를 보호하기 위한 것이다. 보호벽(sleeve)은 제어봉이 당겨질 때 센서 몸체의 팔각

부위와 접촉된 보호벽 끝단이 당김력을 지탱하게 되며, 센서 몸체에 인장응력이 전달된다. 그리고 센서의 팔 각부분은 센서 몸체와 제어봉을 고정시킬 때 이용한다. E는 신호연결용 콘넥터이다.

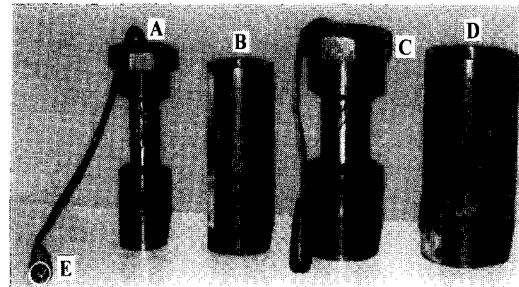


그림 3. 주퇴 당김력 센서의 외형.  
Fig. 3. Outward appearance of the pull force sensor.

그림 4는 주퇴 당김력 센서의 설계도면으로 그림 4의 (a)는 힘을 지지하기 위한 슬리브(sleeve)의 크기도면이며, (b)는 주퇴 당김력 센서의 몸체에 관한 크기도면이다.

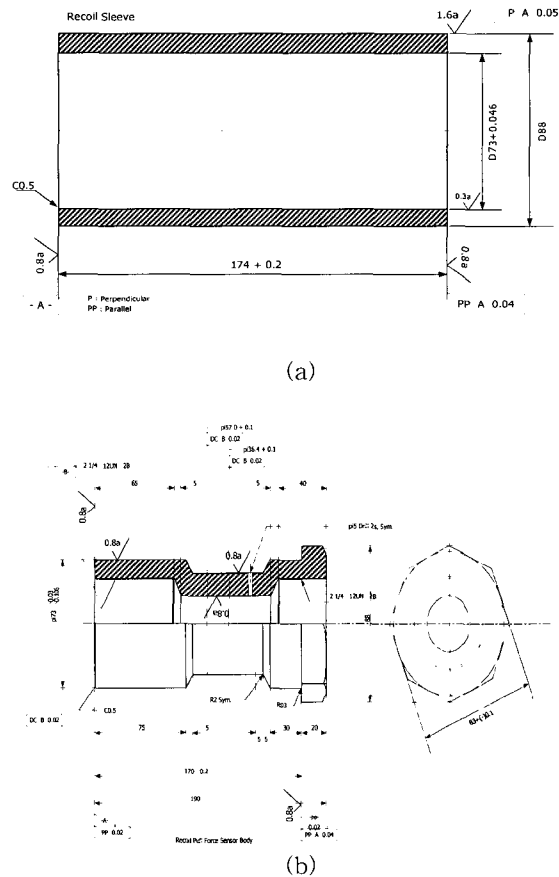


그림 4. 주퇴 당김력 센서의 설계도.  
Fig. 4. Outlet of the pull force sensor.

표 1. 제어기능 및 제어코드.

Table 1. Control function and control code.

기능	제어코드
output via bus	Output
bus-code(7) of computer and at PSC 8,000set address(13)	713
Channel-address 9	A09
mode "transducer-ampl."	M5
gain coarse(1)	R2
gain fine(500)	G500
filter, 100HZ	F4
special, PSC 8,000 manually control lable	S0
name of module	*DMS*
complete string for the computer	Output 713; "A09, M5, R2, G500, F4, S0, *DMS*"

3. 신호조정기

제안된 신호조정기는 DC 차동증폭기로 되어 있으며, DC 차동증폭기는 동상신호제거비(CMRR)가 120dB이며, 신호증폭율도 최대 1만배까지 가능하고 PC 제어가 가능하도록 IEEE488 인터페이스를 이용할 수 있다. 본 증폭기의 입력 임피던스는 10MΩ이고 출력 임피던스는 1Ω이며, 차동증폭기의 출력모드중 모드 1의 출력레벨은 ±10V이고, 모드 2는 0~10Vpp까지 조절할 수 있다. 그리고 신호여파 범위는 3Hz에서부터 8단계로 최대 10KHz까지 가능하다. 또, 증폭기의 직선성오차는 0.1% 이하이고, 센서 입력감도는 출력레벨에 따라 이득조정으로 원하는 감도조정이 가능한 시스템으로 되어 있다. 그리고 DC 차동증폭기는 여러가지의 센서들을 연결할 수 있으며, 자동 offset 평형기능과 offset 보정기능, 외부교정전압 연결기능, 브릿지회로의 offset 보정기능 및 브릿지회로에 대한 병렬교정 기능을 가지고 있다[7].

4. 자료처리기

데이터 프로세서는 PC 베이스로 구축되어 있다. 프로세서는 33MHz의 클럭과 4MB RAM에 128MB RAM을 선택 확장가능한 인텔사의 CPU(80486)가 내장되어 있으며, IEEE 인터페이스나 네트워크 어댑터와 연결이 가능하다. 그리고 하드디스크는 420MB이고 640x480 픽셀의 해상도를 갖는 VGA 그래픽 카드로 구성되어 있다. 실제 계측된 시험자료는 단순한 연산에서부터 삼각함수 계산이나 데이터 평활화, FFT 분석까지 처리가능하다. 입력신호는 단일접속(single ended) 또는 차동입력으로 받아들일 수 있다. 그리고 입력신호의 크기와offset을 선택가능하며, 만약 offset을 0으로 하고 20V의 입력범위를 선택하면 -10V에서 +10V까지 입력신호를 받아들인다. 이때, 1bit의 해상도는 20V/4096=4.88mV가 된다. 또, 입력범위를 10V로

하고 5V의 offset을 선택하면 계측입력범위는 0V에서 10V까지이며, 1bit의 해상도는 2.44mV가 된다.

컴퓨터 제어동작 때에는 수동기능은 자동적으로 스위치가 꺼지고, 증폭기의 각 모드는 인터페이스를 통하여 IEEE-bus로부터 지령을 기다린다. 컴퓨터 제어의 동작 예는 다음과 같다[7].

III. 센서회로 해석 및 설계

1. 센서회로 해석

해석을 간단히 하기 위하여 온도보정용 저항을 무시하면 그림 5와 같은 단순모델로 간략화할 수 있다 [6][9][10].

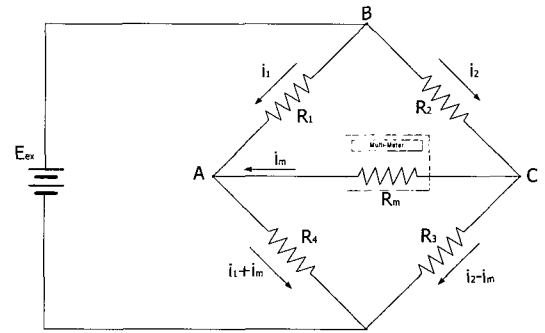


그림 5. 당김력센서의 간략화 회로.

Fig. 5. The abbreviated circuit of the pull force sensor.

그림 4에서  $i_m = 0$  일 때  $e_{AC}$  는 (1)과 같다.

$$e_{AC} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) E_{ex} \tag{1}$$

당김력 센서 회로가 평형이 되기 위하여 다음조건이 요구된다.

$$R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4, \Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4$$

$$e_{AC} = \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_4 + \Delta R_4)} - \frac{R_2 + \Delta R_2}{(R_2 + \Delta R_2) + (R_3 + \Delta R_3)} \right) E_{ex} \tag{2}$$

$$e_{AC} = \frac{\Delta R_1}{R} E_{ex} \tag{3}$$

그리고 스트레인 게이지형 로드셀의 감도는 그림 6과 같이 병렬보정기법을 이용하여 알 수 있다.

브릿지 회로의 감도를 S라 하면 감도는 (4)로 주어진다[8][9].

$$S \equiv \frac{e_{AC}}{\Delta R} [V/\Omega] \tag{4}$$

$$\Delta R = R_1 - \frac{R_1 R_c}{R_1 + R_c} \tag{5}$$

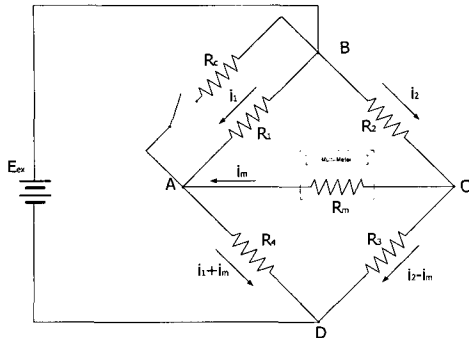


그림 6. 브릿지 회로의 평행교정.  
Fig. 6. The bridge circuit for the parallel calibration.

2. 센서설계

당김력센서의 몸체 재료는 SAE-4340 철봉을 사용하고 박막형 급속용 게이지가 몸체의 네면에 부착되고 센서의 몸체에 수평으로된 서로 마주보고 있는 그림 7의 게이지 1과 게이지 3은 걸리는 힘 ( $F_i$ )에 대해 직접적인 스트레스를 감지하고 게이지 2와 게이지 4는 포아슨비  $\nu$ 의 함수로 표현되는 전단응력(transverse stress)을 감지한다. 이와같은 구조는  $2(1+\nu)$  배의 감도를 가진다. 설계된 센서회로의 구성은 그림 8과 같으며, 4개의 게이지가 동일 온도조건에서 동작하기 위하여 온도보정용 저항  $R_{gc}$  및  $R_{mc}$ 가 부착되어 있다. 여기는  $R_{gc}$ 는 4개의 게이지의 저항 온도계수의 차를 보정하기 위한 저항이며,  $R_{mc}$ 는 부하를 감지하는 게이지들이 탄성률에 따라 달라지는 온도보정을 위한 것이다.  $R_{ss}$ 는  $E_{ex}$ 의 전압값에 대한 표준감도를 원하는

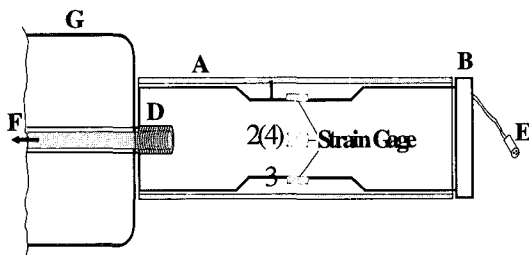


그림 7. 주퇴당김력 센서의 시험체에 부착모습.  
Fig. 7. Attachment figure of the recoil rod pull force sensor in the test object.

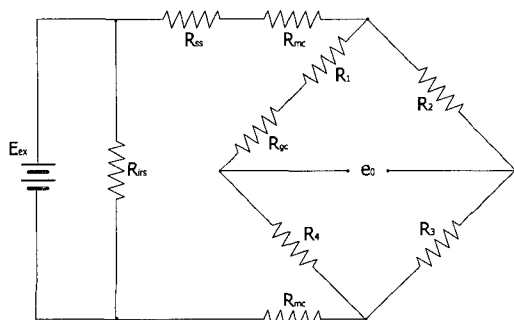


그림 8. 로드셀 변환기의 센서회로.  
Fig. 8. The sensor circuit of the load cell transducer.

값으로 조정하기 위한 저항이며,  $E_{irs}$ 는 입력저항을 임의의 값으로 조정하기 위한 저항이다[6][7].

그림 7은 주퇴봉 당김력 센서가 주퇴장치의 주퇴봉에 연결된 모습을 그림으로 나타낸 것이다. A는 센서 몸체 보호벽이고 B는 팔각부분이다. D부분은 주퇴봉과 당김력센서가 연결되기 위한 나사선 부분이고, F는 화살표 방향으로만 인장력이 작용하는 주퇴봉이다. E는 센서에 전원공급과 신호출력을 연결시킬 수 있는 컨넥터를 표시하고 있다. 그리고 G는 주퇴장치의 한 부분으로 고정되어 있고, 사격시 주퇴봉(F)에서 인장력이 걸리면 D에 전달되어 센서의 팔각부분 B가 보호벽 A에 의해 힘을 받게된다.

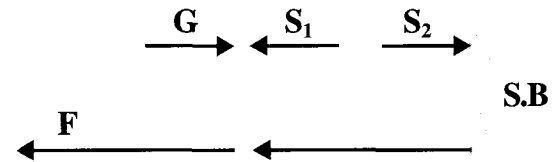


그림 9. 주퇴당김력 센서의 힘의 폐쇄회로.  
Fig. 9. Force closed loop of the recoil pull force sensor.

그림 9는 주퇴봉 당김력의 폐쇄회로를 나타낸 것이며, 주퇴봉에 힘 F가 가해지면 센서의 몸통(S.B)이 F 방향으로 당겨지는데 이 때 센서의 힘이 걸리도록 하기 위하여 그림 7의 A의 끝단(sleeve)  $S_1$ 과  $S_2$ 는 S.B와 주퇴장치 G에 반대 방향으로 힘이 작용되어 주퇴당김력이 센서에 전달된다.

3. 여기전압오차를 줄이기 위한 입력전압회로

그림 10은 브릿지회로에 연결되는 전원공급선의 저항이 브릿지회로에 공급되는 입력전압을 감소시켜 센서의 감도를 저하시킨다. 그림 10의 입력전압  $E_i$ 는 브릿지회로의 활성게이지 저항  $R_i (= 350\Omega)$ 와 신호케이블 저항  $r$ 과 브릿지회로 공급전압  $E$ 는 (6)과 같이 된다.

$$E_i = \frac{R_i}{R_i + r} E = 0.98E(V) \quad (6)$$

표 2. 당김력 센서의 전기적 특성.

Table 2. Electric characteristics of the pull force sensor.

내 용	규 격
*Rated output	1.5±0.1mV/V
Sensitivity	0.3423mV/kgf
Nonlinearity	0.03% or rated output
Hysteresis	0.03% of rated output
Repeatability	0.03% of rated output
Zero balance	±1% of rated output
Temperature effect on output	±0.002% of load
Output resistance	350±2%Ω
Excitation	2V DC

그러므로 케이블 저항  $r$  때문에 전압  $E_i$  가 감소하면 오차증폭기에서 기준전압과 비교되고, 차압이 발생하면 제어회로에서 일정전압을 브릿지회로에 공급하여 센서감도 저하를 방지하도록 하였다[1][2].

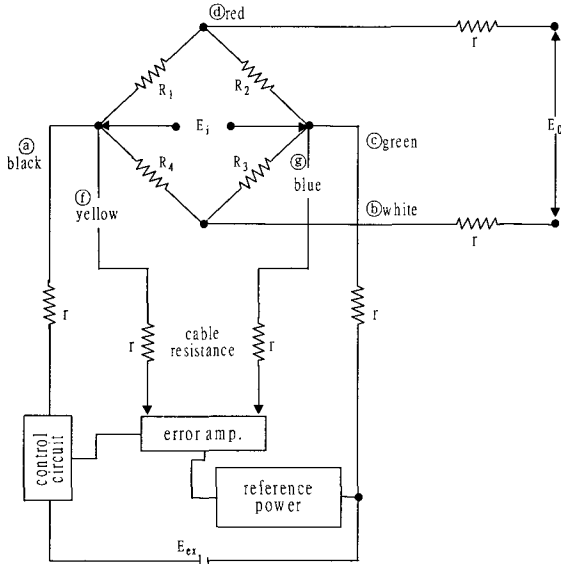


그림 10. 입력전압의 보상회로.  
Fig. 10. The compensation circuit of the input voltage.

4. 센서교정결과

인장시험기에 제작된 센서를 설치하고 브릿지 회로에 여기전압을 2V, 증폭기의 이득을 2,000배하고 그림 11의 (a)와 같이 입력하중을 가하면 (b)와 같은 입력하중 곡선과 비슷한 출력하중 곡선을 얻을 수 있다. 각 교정점의 평균감도는 0.3423mV/kgf이다. 그리고 전기적 특성은 표 2과 같이 주어진다.

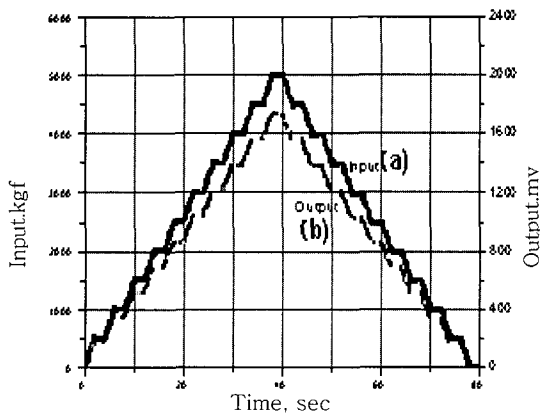
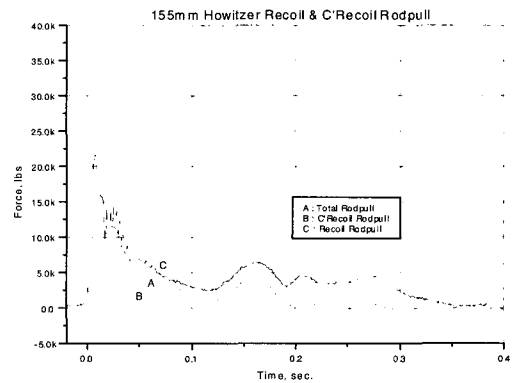


그림 11. 입·출력 하중곡선.  
Fig. 11. Input and output weighting curves.

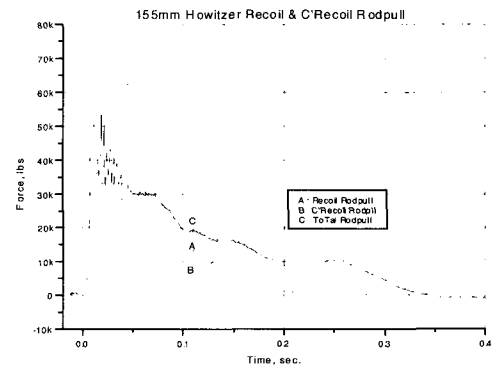
\* 여기전압을 1[V] 입력했을 때 출력의 최대치가 1,500.1mV까지 된다는 의미임.

5. 계측결과

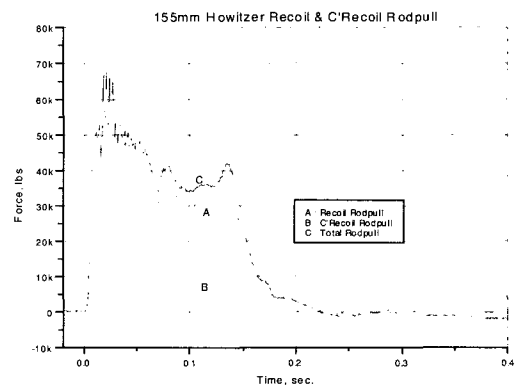
사격시 주퇴복좌기의 주퇴거리는 발사각에 따라 달라진다. 발사각이 약 10° 이하인 저각사격의 경우가 장주퇴(long recoil)이고, 발사각이 45° 이상인 고각사격일 때는 단주퇴(short recoil) 운동을 한다. 그리고 추진장약의 크기에 따라 주퇴당김력의 크기가 비례한다. 그림 12의 (a)는 추진장약이 3호 이하인 저장약 저각시험시 당김력이고 (b)는 추진장약이 7호 이상인 고장약 저각시험 결과이며, (c)는 고장약 고각시험시



(a)



(b)



(c)

그림 12. 당김력 신호파형.  
Fig. 12. Signal waveform of the pull force.

시험에서는 주퇴시간이 길어지고, 고각사격에서는 당김력의 크기를 나타낸 것이다. 그림에서 저각사격 주퇴시간이 짧아지는 것을 알 수 있다. A곡선은 주퇴시 주퇴봉에 걸리는 당김력이고, B곡선은 주퇴시 복좌봉에 걸리는 당김력을 나타낸다. C곡선은 A와 B의 합성한 것으로 주퇴장치 설계 및 평가시 최적의 주퇴복좌운동이 될 수 있도록 A, B, C의 곡선의 크기와 모양에 따라 주퇴봉의 가공치를 결정하게 된다.

IV. 계측의 오차분석과 정확도 평가

1. 직선성오차

브릿지회로에서 직선성오차는 브릿지회로가 불평형이 된 경우와 게이지 저항변화에 대한 스트레인의 변화비율이 일정하지 않을 때 발생된다. 즉, 저항변화에 대한 전류의 변화가 일정하기 위한 조건은 브릿지 저항을  $R_1, R_2, R_3, R_4$  라 하고 각 부릿지 저항의 변화분을  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$  라 할 경우 (7)과 (8)의 조건이 요구된다.

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} = 0 \tag{8}$$

브릿지회로에서  $R_1 R_3 = R_2 R_4$  의 조건이면 브릿지회로가 평형이 될 것으로 생각되나 저항변화가 비직선성을 가지므로 위의 조건은 사실과 다르다. 실험에 사용한 봉당김력 센서의 경우는 단축(uniaxial) 응력계이므로 출력전압  $E_0(mv)$  와 실제 가해진 스트레인  $\epsilon$  와 계측기에 지시된 스트레인  $\hat{\epsilon}$  관계는 (9)과 (10)로 주어진다[9][10].

$$\frac{E_0}{E} = \frac{F\epsilon \times 10^{-3}}{2} \left( \frac{1+\nu}{1 + \frac{1}{2}F\epsilon(1-\nu) \times 10^6} \right) \tag{9}$$

$$\frac{\epsilon}{\hat{\epsilon}} = 1 + \frac{F\hat{\epsilon}(1-\nu) \times 10^{-6}}{2 - F\hat{\epsilon}(1-\nu) \times 10^{-6}} \tag{10}$$

(9)에서 괄호속의 항이 비선형 특성을 나타내며,  $E$  는 브릿지 입력전압,  $F$  는 스트레인 게이지의 게이지 요소를 나타낸다. 이러한 오차변화분을  $n$  이라 하면 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \hat{\epsilon} + n \tag{11}$$

제작한 봉당김력의 센서는 게이지 요소 ( $F$ ) 가 2인 활성게이지 4개로 브릿지 회로가 구성되었으며, 여기서 실제 스트레인은 직선성오차 보정곡선에서 오차보정값을 구하고 (11)을 이용하여 계산할 수 있다. 보정 방법은 인장시험의 경우는 보정값을 더해주고 압축시험일 때는 빼준다. 그러므로 직선성오차를 줄이기 위하여 초기 평형상태를 유지하고  $\epsilon = \hat{\epsilon}$  이 되도록 직선성오차를 교정해 주면 정확한 계측결과를 얻을 수 있다.

2. 횡감도오차

횡감도는 스트레인게이지의 신호검출 주(primary)축에 수직이 되는 축방향의 감도에 관한 것이며, 이상적인 경우는 주축감도의 수 퍼센트에 불과하다. 일반적으로 스트레인 게이지는 횡게이지 감도요소 ( $F_t$ ) 와 종게이지 감도요소 ( $F_a$ ) 를 가지며, 스트레인계에서 횡게이지 감도요소는 주축에 수직성분이며, 종게이지 감도요소는 수평성분이 된다. 일반적으로 스트레인계에서 스트레인 게이지의 출력은 (12)로 표현된다.

$$\frac{\Delta R}{R} = F_a \epsilon_a + F_t \epsilon_t = F_a (\epsilon_a + K_t \epsilon_t) \tag{12}$$

(12)에서  $\epsilon_a, \epsilon_t$  는 게이지축에 대한 수평 및 수직 스트레인이고, 수평스트레인에 대한 수직스트레인 비를 포아슨 비 ( $\nu = -\epsilon_t / \epsilon_a$ ) 라 한다. 그리고 종방향 감도계수  $K_t$  는 종게이지 감도요소에 대한 횡게이지 감도요소의 비로 표현된다. 스트레인 횡감도가 0이 아니면, 스트레인 측정값은 항상 오차를 포함한다. 이 오차는 단축 스트레인의 경우 게이지 제로자가 포아슨 효과를 이미 고려하여 게이지 요소를 제공하고 있으므로 오차는 무시할 수 있다. 그러나 어떤 각을 이루고 있는 스트레인 게이지에 대한 횡감도의 백분율 오차는 (13)로 주어진다[11][12].

$$n_\epsilon = \frac{K_t \left( \frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} + \nu \right)}{1 - \nu_0 K_t} \times 100 \tag{13}$$

(13)에서  $n_\epsilon$  는 게이지축 방향의 실제 스트레인의 백분율 오차를 의미한다. 그림 13에서 (13)를 나타냈으며, 포아슨비가  $-0.285 \left( \frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} = -3.5 \right)$  이고, 횡감도가 -3%인 경우는 스트레인 지시치의 오차가 9% 이상임을 알 수 있다[10][11].

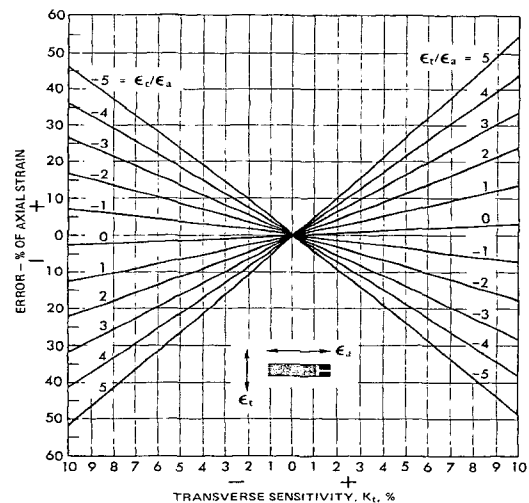


그림 13. 횡감도와 오차백분율.

Fig. 13. Transverse sensitivity and error percentage.

그러므로 어떤 각을 이루고 있는 스트레인 계측기는 횡감도 오차를 보정해 주어야 한다.

3. 여기(excitation)전압오차

여기전압오차는 브릿지 회로에 연결되는 전원 공급선의 저항이 브릿지 회로에 공급되는 입력전압의 레벨을 감소시켜 센서의 감도를 저하시키므로 오차요인이 되고 있다. 그림 10의 입력전압 보상회로에서 활성계이지의 저항은  $350\Omega$ 이라고 하고 케이블 저항을  $3.5\Omega$ 이라고 할 때 입력전압은 (14)과 같이 약 2%의 감도저하가 생긴다.

$$E_i = \frac{350}{350+7}E = 0.98E(V) \quad (14)$$

실제 계측에서 신호케이블의 저항  $r$ 를 무시하면 표준 여기전압과 다른 값이 입력되어 정확도를 감소시키는 원인이 된다.

4. 계측시스템의 정확도평가[13]

일반적으로 측정의 결과는 측정 대상의 특정량의 참값에 대한 근사치가 추정치에 불과하므로 불확도가 정상적으로 표시되어야 한다. 불확도에는 표준불확도와 합성표준불확도 및 확장불확도가 있다. 표준불확도  $u_c$ 는 측정결과 불확도의 원인이 되는 각 요소를 추정표준편차로 나타낸다. 합성표준불확도  $u_c$ 는 개개의 표준불확도  $u_i$ 를 통상의 RSS(Root Sum of Square) 방식이나 이와 동등한 미리 설정된 방식으로 합성시킨 것이다. 보통  $u_c$ 는 기본상수의 결정, 기본 도량형 연구, SI 단위 국제비교 등에서 사용된다. 그리고 확장 불확도는  $u_c$ 에 상수  $k$ 를 곱하여 확장불확도  $U$ 를 구한다. 즉,  $U = ku_c(y)$ ,  $U$ 를 구하는 목적은 측정 대상이 되는 특정량  $Y$ 의 값이 높은 신뢰수준을 갖고 존재한다고 주장할 수 있는 추정치  $y$  주변의 구간  $y-U$ 와  $y+U$ 를 설정하기 위한 것이다. 따라서  $Y$ 는 (15)로 표현된다.

$$Y = y \pm U \quad (15)$$

관습적으로  $u_c$ 를 사용하도록 되어있는 경우를 제외하고는 NIST(National Institute Science & Technology)에서는 확장불확도  $U$ 를 사용하도록 되어있다. 그리고 세계적 추세에 맞추어 NIST에서  $U$ 를 계산하는데 사용되는  $k$ 의 값은 2로 하도록 하고있다.  $k=2$ 일 때, 신뢰수준은 95.45%를 의미한다. 계측 시스템의 전체 정확도는 부하오차와 총정적오차(Total Static Error : TSE) 합으로 주어지며, 총정적 오차는 각각의 특성오차가 서로 독립적이고, 각 오차의 크기가 비슷하며, 또 오차가 정규분포를 이루고 있는 경우에는  $rms$  오차는  $1\sigma$ 의 불확도를 의미한다. 계측시스템의 시스템오차  $SE$ 와 총정적오차  $TSE$ 는 (16)와 (17)으로 표현된다.

$$SE = LE_0 + TSE \quad (16)$$

$$TSE = \sqrt{RE^2 + \left(\sum_{i=1}^l LE_i\right)^2 + \sum_{j=1}^m EE_j^2 + \sum_{k=1}^n CE_k^2} \quad (17)$$

(14)에서  $RE$ 는 읽음오차,  $LE_i$ 는 각 구성품의 직선성 오차,  $EE_j$ 를 환경오차 및  $CE_k$ 는 특성오차를 나타낸다. 그리고 그림 2의 당김력 계측시스템의 오차항목은 표 3과 같으며, 오차항목의 오차백분율은 센서 및 계측 장비의 규격에서 제시된 값을 이용하였고, 읽음 오차는 계측결과가 디지털값으로 표시되었을 때, 소수점 2자리까지 유효숫자로 표시되기 때문에 주되평균 거리를 1[m]로 하였을 때,  $\pm 0.01\%$ 의 오차를 갖는다. 그리고 양자화 오차는 양자화 잡음에 대한 계산으로 구하였으며, 랜덤오차는 측정에 의하여 제시된 값이다. 양자화 잡음오차는 A/D 변환기가 12bit로 되어 있기 때문에 오차백분율은 양자화된 12bit중 한자리오차의 잡음크기를 실험에 의하여 확인한 것을 고려하면  $\pm 0.02\%$ 를 얻을 수 있다.

당김력 계측시스템의 정확도는 불확도  $2\sigma$ 를 기준한 것으로  $\pm 0.5\%$  이하의 계측정확도를 가지고 있다. 그러므로 국방규격에서 요구하는  $\pm 2\%$ 에 비하면 실용화에 전혀 문제가 없음이 입증되었다.

표 3. 당김력 계측시스템의 오차항목.

Table 3. Error items of the pull force measurement system.

오 차 항 목		오차백분율(%)
Reading error	RE	$\pm 0.01$
Loading error	LE <sub>0</sub>	0
Sensor linearity error	LE <sub>1</sub>	$\pm 0.1$
Signal conditioner linearity error	LE <sub>2</sub>	$\pm 0.1$
Hysteresis error	CE <sub>1</sub>	$\pm 0.03$
Gain setting error	CE <sub>2</sub>	$\pm 0.08$
Repeatability error	CE <sub>3</sub>	$\pm 0.03$
Quantization error	CE <sub>4</sub>	$\pm 0.02$
Random error	CE <sub>5</sub>	$\pm 0.01$
Temperature error	EE <sub>1</sub>	$\pm 0.002$

$$e_{total} = LE_0 + \sqrt{RE^2 + \left(\sum_{i=1}^2 LE_i\right)^2 + EE_1^2 + \sum_{j=1}^5 (CE_j)^2} \quad (18)$$

$= \pm 0.5\% \text{이하}(2\sigma \text{ 기준})$

V. 결론

주되장치의 주되봉과 복좌봉에 걸리는 힘을 계측하기 위하여 당김력 센서를 제작하여 한국표준과학연구원에서 특성검사한 결과  $\pm 0.03\%$ 의 직선성오차를 가지고 있음을 확인하였다[1].

본 연구에서 힘의 지지부분이 공중에 떠 있는 경우 그림 7과 같은 형태의 센서를 설계 및 제작하였고, 입력저항 조정기능, 표준감도 조정기능, 횡감도 보정 및 여기전압 오차에 대한 문제해결이 가능한 센서회로가 개발되어 정밀계측이 요구되는 시험평가에 적용할 수 있었다. 그리고 이번에 개발된 주되당김력 계측시스템은 불확도를  $2\sigma$ 로 기준하였을 때  $\pm 0.5\%$  이하의 정확도를 가지기 때문에 국방규격에서 요구하는  $\pm 2\%$  이내

의 오차를 만족시키므로 주퇴장치의 성능평가용으로 사용할 수 있음이 입증되었다. 계측시스템의 정확도 계산에서 정적오차중 양자화오차와 읽음오차 등은 계산에 의하여 산출된 것이며, 부하오차나 동적오차를 무시하였는데 앞으로 부하오차와 동적오차의 크기를 정량적으로 분석할 필요가 있다고 본다. 특히 당김력 센서는 힘의 지지부분이 공중에 떠 있는 경우였는데 앞으로 유사한 조건에 널리 활용되리라 본다.

**참고문헌**

[1] 최주호, "주퇴복좌운동 측정기법에 관한연구," 국방 과학연구소, TAEC-514-89003, pp. 1~50, 1990.

[2] Wu, Charles T., "Transverse sensitivity of bonded strain gages," *Experimental Mechanics* 2 pp. 338-344, 1962.

[3] Harry N. Norton, "Sensor and analyzer handbook," Prentice-Hall, Inc., pp. 120-130, 1993.

[4] Hetenyi, M., "Handbook of experimental stress analysis," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950.

[5] Lee, G. H., "An introduction to experimental stress analysis," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950.

[6] Roark, R. J., "Formulas for stress and strain, 4<sup>th</sup> ED.," McGraw Hill New York, 1965.

[7] Ernest O. Doebelin, "Measurement systems application and design," McGraw-Hill, pp. 211-246, pp. 367-371, pp. 695-701, 1983.

[8] APG(Aberdeen Proving Ground), "Strain measurement-unidirectional," U.S.Army TECOM(Test and Evaluation Command) Test Operations Procedure(TOP) 3-1-006, pp. 1-7, pp. A1~E, 1983.

[9] Transinstruments User's Guide, "PSC 8015-1 DC-Differential amplifier," *IMO Industries GmbH*, pp. 1-17, 1995.

[10] Micro Measurements Tech. Notes "Wheatstone bridge nonlinearity", MM. Inc., TN 139-2, 1983.

[11] Meier, J. H., "On the transverse-strain sensitivity of foil gages", *Experimental Mechanics* 1, pp. 39-40, 1961.

[12] Micro Measurements Tech Notes, "Transverse sensitivity errors," MM, Inc. TN 137-2, 1983.

[13] Barry N. Tolyor and Chris E. Kuyatt, "Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results," *NIST Technical Note 1297*, pp. 1-25, 1992.



**최 주 호**

1949년 9월 18일생. 1976년 2월 부산대학교 전자공학과 졸업(학사), 1992년 2월 충남대학교 전자공학과(석사), 1999년 8월 동대학원(박사), 1977년 2월 ~ 현재 국방과학연구소 계측기법연구실 팀장. 주관

심 분야는 제어장치 자동화, 센서 및 계측, 퍼지, 신경망 응용 등임.



**홍 성 수**

1955년 11월 24일생. 1981년 2월 숭전대학교 전자공학과(학사), 미육군 APG시험장에 교환연구원으로 근무(1987년 8월 ~ 1998년 8월), 1981년 9월 ~ 현재 국방과학연구소 중합시험단 근무(선임연구원). 주관심

분야는 물리량계측 및 센서교정기법 등임.



**유 준**

1956년 3월 22일, 1978년 2월 서울대학교 전자공학과(학사), 1984년 8월 한국 과학기술원 전기 및 전자공학과(박사), 1984년 10월 ~ 현재 충남대학교 전자공학과 교수. 1989년 2월 ~ 1990년 2월 미쉬

건 주립대학 전기공학과 방문교수. 1994년 12월 ~ 1995년 2월 독일 Fraunhofer IPA 연구소 방문교수. 주관심 분야는 제어계측 공학, 산업공정에 의한 제어 응용 등임.