

# 스트레인 게이지식 로드셀의 고정밀 크립보상 High Accurate Creep Compensation of the Loadcell using the Strain Gauge

서 해 준\*, 정 행 섭\*\*, 류 기 주\*\*\*, 조 태 원\*\*

Hae-Jun Seo\*, Haing-Sup Jung\*\*, Gi-Ju Ryu\*\*\*, Tae-Won Cho\*\*

## Abstract

This paper proposes a practical compensation method by using digital signal processing over the creep error which is representative in strain gauge loadcell. The signal compensation method carry out the simulation by deciding compensation constant (time constant) and coefficient measuring the loadcell output response. Then, compensation constant and coefficient are stored on the microprocessor. By using calculated on microprocessor creep error compensation values, weighting value is showed as a digital signal by reducing error values measured through output signals of loadcell. In addition, we apply error compensation method in order to have a dedicated software for loadcell electronic scale. This technique is useful because it has great influence on error rate reduction that has been produced by conventional electronic scales (0.03%). As a result our technique gives better accuracy (0.01%~0.003%) as what is given by digital electronic scale, while it has less complex operation processing.

## 요 약

본 논문은 스트레인 게이지(strain gauge)식 로드셀(loadcell)의 대표적인 크립오차(creep error)에 대해서 디지털 신호처리방식을 사용한 실용적인 보상법(compensation method)을 제안한다. 신호의 보상방법은 로드셀의 출력응답을 실측해서 보상상수(시정수)와 보상계수를 결정한 후 마이크로프로세서의 내부메모리에 보상상수와 보상계수를 저장한 후 중량값을 디지털로 표시할 시점에 마이크로프로세서에서 연산처리한 크립에러 보상치리값을 로드셀의 출력신호에서 실측한 에러값과 서로 상쇄시키는 보상방법이다. 추가적으로 보상방법을 디지털전자저울에 직접 적용 시험하기 위해서 전용의 보상소프트웨어를 제작한 후 디지털전자저울의 크립특성을 실측해서 보상전 정격출력의 크립오차 0.03%의 로드셀을 고정밀디지털전자저울의 허용오차 범위인 0.01%~0.001%이상으로 복잡한 연산처리 없이 정확하게 직접 보상처리하는 실용적인 방법을 제안했다.

*Key words : creep, loadcell, creep compensation, creep occurrence, strain gauge*

\* 忠北大學校 電子工學部

(School of Electronics Engineering, Chungbuk University)

\*\* 淸州大學校 電子工學科

(Department of Electronics Engineering, Cheongju University)

\*\*\* 韓國폴리텍大學 通信電子科

(Department of Communication Electronics, Seoul Kangseo College, Korea Foundation of Polytechnic Colleges)

★ 교신저자 (Corresponding author)

接受日:2012年 01月 31日, 修正完了日: 2012年 03月 06日

掲載確定日: 2012年 03月 09日

## 1. 서론

스트레인 게이지식 로드셀은 금속탄성체를 스프링 요소로 하고 스트레인 게이지라고 하는 필름저항을 알루미늄탄성체에 접착을 해서 전기적으로 배선을 한 후 신호를 출력시켜 디지털표시기와 연결해서 중량값을 표시할 때 사용하는 중량센서이다[1].

스트레인 게이지식 로드셀을 설계 및 제조 시에 여러가지 오차가 발생하고 있는데 로드셀이 완성후에는 품질보증을 위해서 성능시험을 한다. 이때 크립 (creep)오차에 대해서 허용오차를 벗어나면 즉시 폐기해서 다시 생산하여야만 하는 가장 치명적인 오차이다. 크립에 대한 연구는 다른 연구에 비해서 아주 미흡한 상태이다. 그 이유는 로드셀 관련분야에서는 노하우로 구분되어 공개하고 있지않고 전문가도 없는 상태라 학문적연구가 거의 이루어지고 있지않고 있다. 또한 스트레인 게이지식 로드셀의 특성으로 인해서 완성품이 된 후에는 크립특성을 확인해서 허용오차 범위를 벗어난 로드셀은 크립의 오차보상이 불가능한 센서이며, 현재 로드셀관련 기술수준이 보통급 전자저울에 사용가능한 수준이라서 정밀고급 전자저울의 경우에는 대부분 외국에서 수입하고 있다. 따라서 로드셀에서 대표적인 오차인 크립오차에 대한 보상방법을 제안하였고 정밀디지털전자저울의 오차보상 기술발전에 기여를 하고자한다.

본 논문은 로드셀에 접착하는 스트레인 게이지의 원리, 구조, 그리고 출력신호 회로구성인 휘스톤브리지회로에 대한 내용과 로드셀 신호정합에 대하여 기술하고, 스트레인 게이지식의 로드셀 크립지연 응답특성과 시험방법, 크립오차에 대한 문제점에 대해서 살펴본다. 또한 크립오차 문제점에 대해서 디지털식 보상방법과 실용적인 보상을 적용한 개선결과를 검토하고, 마지막으로 결론 및 향후 연구방향에 대하여 기술한다.

## II. 스트레인 게이지식 로드셀

디지털중량제어기 및 전자저울용 센서로 사용하고 있는 스트레인 게이지식 로드셀은 물건의 무게 즉 하중을 전기신호로 변환하는 트랜스듀서이다. 전기적으로 물건의 무게를 검출하는 방법으로는 마그네틱을 이용하는 자기식, 스트레인 게이지식, 음파식, 진동식 그리고 정전용량식 등이 있는데 대부분 스트레인게이지를 사용한 트랜스듀서를 로드셀이라고 부르고 있다. 이러한 로드셀의 특징으로는 비교적 소형으로 가벼워서 조립성이 좋고, 센서성능은 최대가 1/10,000 정도이며 구조가 간단하며 경시변화가 적다. 또한 정격하중이 수 그램으로부터 수백 킬로그램으로 사용범위가 넓다. 이러한 이유로 해서 스트레인 게이지식 로드셀이 많이 이용되고 있다[2].

### 1. 스트레인 게이지 원리

일반적인 표준 스트레인 게이지의 저항값은 120Ω에

서 1000Ω이며 저항값은 용도에 따라 다르게 선택하는데 전력소모를 줄이기 위해서는 1000Ω의 게이지를 많

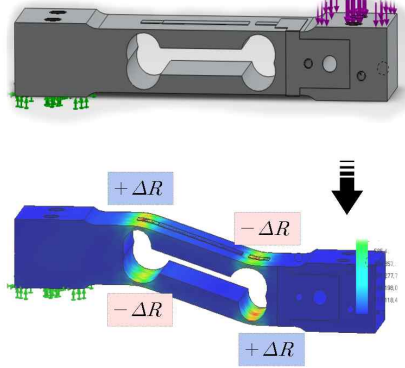


그림 1. 로드셀 바의 스트레인 변형현상  
Fig. 1. Strain variation phenomenon of the load cell bar

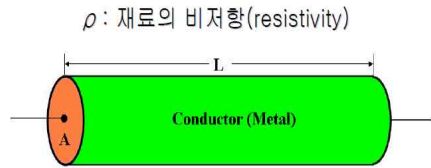


그림 2. 금속도선 길이와 면적기준  
Fig. 2. Metal wire length and area criteria

이 사용하며 일반적인 표준 로드셀은 대부분 350Ω 게이지를 사용하고 있다. 스트레인 게이지에 요구하는 특성은 온도와 시간에 의한 저항값이 변화가 생기는 것은 좋지않다. 그래서 대부분 합금재질을 이용하여 호일을 제작하고 그 후 저항값의 변화를 주지 않기 위해서 열처리를 실시하는데 콘스탄탄 호일의 경우에는 열처리하면 300℃까지 안정되게 사용할 수 있는 합금재질이기에 때문에 전자저울용 로드셀에 많이 사용하고 있다. 그림 1은 로드셀 바에 스트레인 게이지를 부착한 모습과 힘을 가하였을 때 로드셀 바가 휘어지는 모습을 나타내고 있다.

스트레인 게이지(strain gauge)는 금속이나 반도체에 응력을 가할 때 발생하는 변형으로 인해 그 저항값이 변화하는 성질을 이용한다. 저항 값( $R$ ), 저항선의 비저항(ρ), 단면적( $A$ ), 길이( $L$ )인 금속 도선의 저항은 식(1)과 같이 표현한다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{1}$$

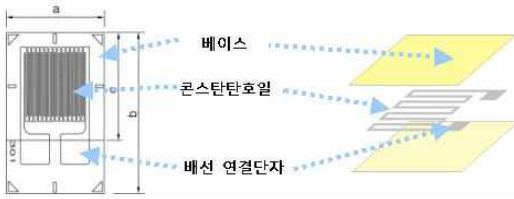


그림 3. 스트레인 게이지 구조  
Fig. 3. The strain gauge structure

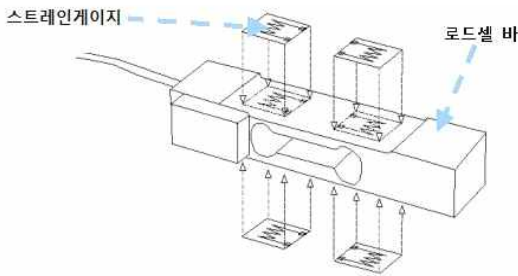


그림 4. 게이지 접착부 구조  
Fig. 4. The gauge adhesion structure

2. 스트레인 게이지 구조

로드셀에 사용하는 게이지는 와이어 게이지, 박막 게이지 또는 호일 게이지(foil gauge)가 사용된다. 그림 3을 보면 게이지의 구조를 알 수 있는데 호일 게이지의 경우는 구리와 니켈합금으로 되어있고 보통 5~10 $\mu$ m 정도로 얇게 만든 후에 베이스에 폴리미드라고 하는 것을 접착제로 접착한 후 노광 및 에칭과정을 거친 후 스트레인 게이지가 완성이 된다. 로드셀은 알루미늄재질의 바를 가공한 후 스트레인 게이지를 4장을 접착하는 곳은 스트레인이 가장 많이 발생하는 곳에 게이지를 접착해서 스트레인을 효율적으로 검출한다[3].

스트레인 게이지 저항값 변화는 스트레인과 직접적인 관계가 있어서 아래 식(2) 와 같이 성립한다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K * \epsilon$$

여기에서

- R : 스트레인 발생 전 저항 값  $\Omega$ ,
- $\Delta R$  : 하중이 작용하였을 때 저항 값 변화량  $\Omega$ ,
- K : 비례정수 (게이지 율 약 2),

$\epsilon$  : 스트레인( $\Delta L/L$ ) [ $10^{-6}$ ].

3. 스트레인 게이지식 로드셀의 측정

로드셀에 힘을 가하면 접촉되어진 게이지 저항값이 변화한다. 저항값 변화는 힘과 비례하게 나타나고 게이지의 저항값 변화는 대단히 작기때문에 일반적으로 그림 5와 같은 휘스톤브리지회로로 로드셀에 배선을 한다. 휘스톤브리지는 미세한 저항값 변화를 검출하기위한 전기회로로 스트레인에 의한 저항값 변화도 이러한 회로를 이용하여 변환하고 있다. 휘스톤브리지는 4개의 저항변화 조합으로 되어있으며  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 의 게이지가 그림과 같이 하중(힘)을 가하기 전의 출력과 전압은 전류흐름에 따라 식(3)과 같이 나타낸다.

$$V_{out} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_{in}$$

여기서  $V_{out}$ : 로드셀 출력전압,  $V_{in}$ : 로드셀 구동 전압.

브리지 4변에 접착된 게이지가 스트레인을 받으면 각 변  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 가 각각 미세변화를 해서  $+\Delta R_1, -\Delta R_2, +\Delta R_3, -\Delta R_4$ 의 스트레인이 발생하였다고 하면 출력 전압은 식(4)와 같이 된다[4].

$$\Delta V_{out} = \left\{ \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \right\} V_{in} + \left\{ \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right\} V_{in}$$

여기서  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 의 관계의 경우

$$\Delta V_{out} = \frac{\Delta R}{R} V_{in}$$

식(2)에서  $\frac{\Delta R}{R} = K * \epsilon$ 의 관계가 성립되어서

$$\Delta V_{out} = K * e * \epsilon$$

식(6)으로 나타나기에 출력전압( $\Delta V_{out}$ )은 스트레인( $\epsilon$ )에 비례하는 것을 알 수 있다.

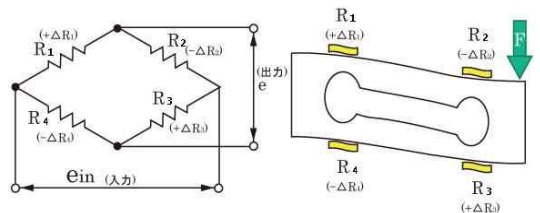


그림 5. 로드셀 적용을 위한 휘스톤브리지회로  
Fig. 5. Wheatstone bridge circuit for applying a load cell

4. 로드셀 보상방법과 신호정합

가. 로드셀 오차

로드셀의 오차는 구성 요소간의 연관성에 의해 오차가 발생하며 이에 대한 보상은 무척 까다롭고 제조업체의 노하우이며 제조사 별로 로드셀 오차에 대해서 보상을 실시한 후 성능확인을 실시하고 있다. 이에 대한 변수는 온도와 하중에 따라 발생하는데 온도의 경우 로드셀에서 가장 보상하기 어렵다. 그 이유는 OIML(국제법정계량기구)국제 기준에서 일반적으로 -10℃에서 40℃의 범위 내에서 성능 보상을 권고한바 로드셀의 온도를 변화시켜 보상을 실시하고 영향을 주는 인자들은 로드셀 바의 탄성계수, 스트레인 게이지 감도, 게이지율, 팽창계수 등이 있는데 반드시 보상을 하여야만 하는 오차로서는 아래의 다섯 가지가 있다. 브리지의 초기 불균형, 온도변화에 따른 영점이동, 온도변화에 따른 구간의 이동, 하중과 로드셀 출력사이의 직선성과 히스테리시스, 크립브리지가 초기 불균형에 대한 보상을 실시하지 않으면 신호정합에 문제가 발생되고 온도변화 및 구간이동에 대한 보상을 하지 않을 시에는 온도에 따라서 영점 값 불안정 및 무게 값이 정확히 표시되지 않기에 반드시 보상을 실시하여야만 하는 로드셀 오차이다. 이 중에서 크립이 가장 예측도 힘들고 발생한 오차에 대해서 보상도 가장 어렵다. 크립의 경우 지금까지 제조사에서 예측이 불가능해서 대부분 로드셀을 완성 후에 직접 하중을 가해서 합격, 불합격 판정을 하고 있지만 일단 성능미비의 경우 전부 폐기 하여야 하는 실정이지만 예측 및 보상방법이 없어서 제조사에서는 보상방법을 찾기 위해 노력을 하고 있지만 현재 실용적이며 개별보상 가능한 방법이 없다.

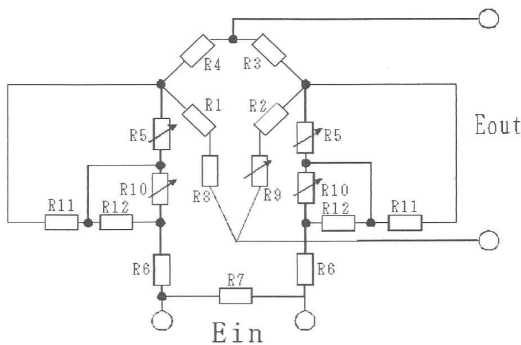


그림 6. 로드셀 보상회로  
Fig. 6. The load cell compensation circuit

나. 로드셀 보상회로

스트레인 게이지식 로드셀 기본회로는 휘스톤브리지회로를 사용하지만 실제로는 여러 종류의 오차가 발생하기 때문에 오차를 보상하기 위해서 그림 6과 같은 매우 복잡화한 보상회로를 사용하고 있다[4].

그림 6을 보면 보상회로는 다수의 저항으로 구성되어 있다. 이것은 로드셀에서 발생한 오차를 보상하기 위한 회로이며 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>의 경우는 스트레인 게이지이며 나머지 저항은 출력 감도보상, 온도보상 등을 하기위한 저항이다. 간단하게 스트레인 게이지를 제외한 나머지 저항의 역할을 설명하면 R<sub>5</sub>, R<sub>11</sub>은 출력전압의 온도보상용 저항이다. 온도에 따른 출력전압을 기본으로 해서 로드셀 바의 탄성계수는 알루미늄의 경우 -0.07[%/℃]의 스트레인 게이지율의 변화가 있다. 로드셀 출력전압에 포함되어있는 온도에 따른 오차요인을 보상하는 경우에 R<sub>5</sub>에 온도에 따라 저항값이 변화하는 소자를 접속한다. 로드셀 바의 영율과 스트레인 게이지율은 온도특성에 따른 출력변화량에 상당한분의 전류를 조정한다. 온도감지 저항소자는 보통 순수한 니켈이나 동과같이 정(+ )방향의 온도계수를 갖고 있는 것을 사용하며 R<sub>11</sub>은 고정저항으로 R<sub>5</sub>의 직선성 조정을 처리할 경우에 사용한다. R<sub>10</sub>과 R<sub>12</sub>는 출력전압의 비직선성을 보정하는 저항이다.

대용량의 계량시스템에서는 칼람형의 로드셀을 사용하고 있지만 힘에 따라 로드셀 바의 단면적 변화가 있기 때문에 직선성 오차가 발생한다. 따라서 별도로 로드셀의 스트레인을 감지하는 소자를 부착해서 브리지회로 전류를 자동적으로 조정해서 로드셀 출력전압의 직선화의 보상을 한다. R<sub>10</sub>은 반도체 게이지에서 사용하는 것이 일반적이다. R<sub>12</sub>는 고정저항으로 R<sub>10</sub>을 직선화하기 위한 조정을 할 경우 사용한다. R<sub>8</sub>은 영점 조정을 하는 저항이다. 게이지 4장은 약간의 오차로 영점 값 출력이 불 균일 하게 되는데 이때 조정을 하는 저항이다. R<sub>9</sub>는 온도에 따라서 변화하는 영점을 보상하는 저항이며 R<sub>8</sub>은 출력감도의 조정저항이며 R<sub>7</sub>은 입력저항 조정용의 저항이다.

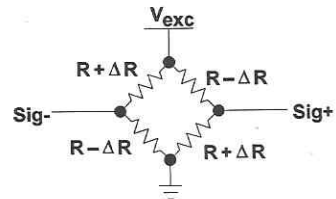


그림 7. 로드셀 내부회로의 구성  
Fig. 7. Composition of the load cell internal circuit

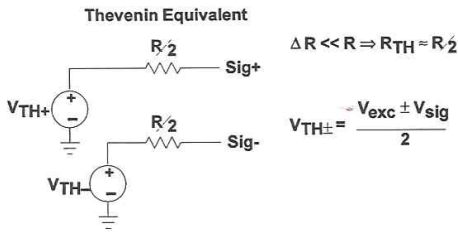


그림 8. 로드셀 출력신호와 임피던스  
Fig. 8. Load cell output signal and impedance

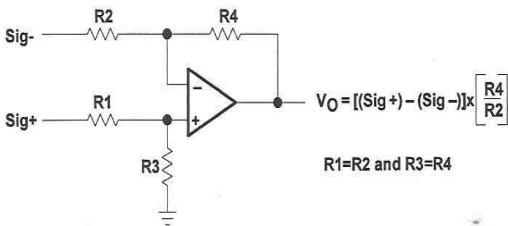


그림 9. 싱글 스테이지 연산증폭기  
Fig. 9. Single stage operational amplifier

다. 로드셀 출력과 연산증폭기 입력신호 정합  
일반적으로 로드셀 출력은 로드셀 설계시에 여러 요소를 고려해서 정격출력을 1~3[mV/V] 정도로 설계한다. 다만 반도체 게이지를 사용하면 수십 배 이상으로 출력이 크다. 로드셀 신호는 아주 미약한 신호 출력으로 인해서 사람이 읽을 수 있는 숫자로 표현하는 것은 불가능하다. 따라서 로드셀 신호를 받아서 신호를 증폭하는 회로가 1차적으로 필요하며 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 위한 신호정합 회로기술이 필요하다. 우선 로드셀 출력신호를 받아서 A/D변환하기 위한 증폭회로에는 전자저울의 정밀도에 따라서 차이가 있지만 주로 계측용 Op-Amp를 사용하고 있다. 그림 7에서와 같이 휘스톤브리지회로에서 나온 로드셀 출력이 Op-Amp의 입력 단으로 구성되어진다[5]. 로드셀 바에 스트레인 게이지를 접착(그림의 R+ΔR(2장), R-ΔR(2장))을 한 후에는 큐어링 과정을 실시한 후 다음 공정에서 휘스톤브리지를 구성하기 위해서 copper wire를 사용하여 배선을 실시한다. 또한 추가 검토할 사항은 보통 로드셀과 Op-Amp를 연결하면 원하는 출력값이 나오지 않는데 그 이유는 휘스톤브리지로 구성되었기에 이를 테브난 방정식으로 보면 Sig+, Sig-는 테브난 전압과 스트레인 게이지가 1/2저항으로 형성되기 때문에 A/D변환기 입력범위에 맞는 증폭도를 계산할때에는 주의가 기울여야 한다.

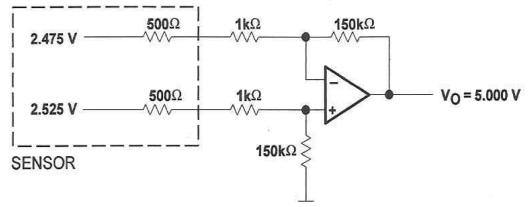


그림 10. 로드셀 출력  
Fig. 10. Load cell output

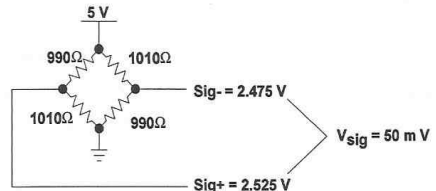


그림 11. 로드셀 출력과 연산증폭기의 구성  
Fig. 11. Composition of the load cell output and the op-amp

위의 그림 8과 9에 그 관계를 표시하였다. 로드셀 출력 및 Op-Amp 입력단 관계를 보면 테브난전압 [VTH+], [VTH-]는 그림 10의 실험과 같이 출력이 동일하게 2.5V가 된다. 따라서 Op-Amp의 반전, 비반전 단자에 접속되는 저항값은 1/2로 줄어든 R/2의 값으로 연결되는데 R/2은 로드셀에 스트레인 게이지 저항값이 1000Ω이 접속되어 있다면 500Ω으로 입력이 되는 것이다. 그리고 로드셀 출력을 증폭하기 위해서 Op-Amp를 사용했다면 회로해석은 아래와 같이 된다. Op-Amp의 입력임피던스는 로드셀 회로구성 및 증폭을 결정할 경우에도 관계가 있다.

로드셀을 테브난 방정식에 의해 정리를 하면  $R_1=R_2$  이고 그리고  $R_3=R_4$ 와 같다고 하면 증폭된 출력은  $V_o = [(Sig+) - (Sig-)] * \frac{R_4}{R_2}$  로 되는데 로드셀의 스트레인 게이지 4장의 저항값이 1000Ω이고 로드셀 정격출력이 10[mV/V]의 로드셀에 5V 전원을 접속하고 정격 하중을 가하면 로드셀 바에 스트레인의 상승, 하강으로  $\Delta R=10\Omega$ 이 변화했다고 하면 로드셀 출력은 그림 11과 같이 출력 Vsig은 50mV가 얻어질 것이다. Op-Amp의 출력 Vsig=50mV를 A/D변환기 입력 범위에 정합하게 하기 위해서는 로드셀에 하중을 가하면 로드셀 최대 출력 50mV를 Op-Amp에 입력 한 후 0~5V A/D변환기 입력범위에 맞게 신호를 정합하기 위해서 증폭도 100이 필요하다.

그림 10에서  $R_1=R_2$ 가 1kΩ 그리고  $R_3=R_4$ 는 100kΩ으로 연결하면 증폭이 100배로 되어 5V출력이 나올 것이라고 예상하지만 결과는 다르게 나올 것이다. 그림 10에서 점선으로 표시된 부분은 테브난정리에 의해 회로해석을 한 것으로 100배의 증폭을 하기위해서  $R_3=R_4$ 는 150kΩ이 필요하다. 추가로 주의할 내용은 Op-Amp 입력단 Sig-(반전단자)는 Vcom이 불안정하면 신호증폭시 출력변동이 생길 수 있고 비직선의 원인이 될 수 있다. 그래서 전자저울회로에서는 Op-Amp의 Sig+(비반전 단자)를 안정되게 하기 위해서 아날로그 회로에 공급하는 전압에서 분압을 시킨 후 피드백(feed-back)을 시켜서 나온 출력을 아날로그 신호 증폭부의 Vcom으로 사용하고 있다.

### III 로드셀 크립 특성

#### 1. 로드셀 크립 정의

스트레인 게이지식의 로드셀 바의 재료는 알루미늄을 사용하고 있다. 기본적으로 알루미늄은 금속이기 때문에 하중을 일정시간 가했을 때 반드시 크립현상이 나타난다. 크립과 크립오차에 대한 정의는 분야에 따라서 조금씩 다른 의미로 해석할 경우도 있지만 기본적인 내용은 동일하다. 크립정의는 금속재료 분야에서 정의라고 할 수 있는데 로드셀 센서에서 의미는 다음과 같다. 하중을 일정하게 하고 시간에 대해서 접착한 스트레인 게이지의 저항값 변화를 의미 하며, 크립오차의 내용을 보면 최대허용오차라는 용어를 볼 수 있는데 로드셀 단독으로 사용할 경우 최대허용오차와 전자저울용 센서로 해서 결합한 경우의 최대 허용 오차는 다르게 되어있다.

#### 2. 로드셀 크립 응답

스트레인 게이지식 로드셀의 대표 오차중의 하나인 크립오차는 알루미늄을 가공하여 탄성체로 사용하고 있는 고용량의 로드셀과 저용량에 많이 나타나고 있는 오차이다. 그림 12를 보면 알겠지만 탄성체의 커브 출력과 게이지 접착면에서 발생한 크립오차가 상쇄가 되면 하중을 가한 만큼의 로드셀 출력이 나올 수 있지만 대부분 불가능하고 로드셀 출력에 크립오차 성분이 포함되어 출력된다. 그림 12에서 로드(load)의 의미는 로드셀에 정격하중을 가한 상태를 의미하는데 정적으로 조용하게 하중을 가할 경우도 있고 급격하게 하중을 가할 경우 등 여러가지 로드 방식에 따라 크립커브 응답이 다르게 나타나서 로드셀 출력에 영향을 주고 있다. 안정된 후에 응답에 대한

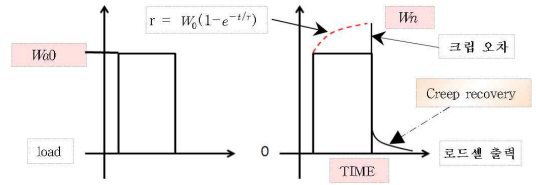


그림 12. 크립커브 특성  
Fig. 12. Creep curve characteristics

것은 식(7)과 같이 표현하는데 이것은 정격하중의 총량을 일시에 적용하였을 때 나타낸 수식이라 빠른 하중으로 인한 과도응답 및 순차적으로 하중을 가했을 때의 크립오차가 다르게 나타날 수 있으나 OIML의 기술권고 기준에서는 안정된 후 5초 이후의 값을 기준으로 설정하다보니 급격한 변화에 대한 오차는 보상처리가 미흡한 상태이다. 로드셀의 크립오차는 정(+ )방향으로 증가하는 오차도 있고 부(-)방향으로 증가하는 오차도 있다. 이에대한 커브는 직선적인 부분과 곡선부분이 중첩되어 나타나는데 이는 R과 C를 결합하였을 때 지수함수응답과 매우 유사한 것을 알 수 있다. 로드셀 바의 탄성곡선은 시간에 따라 대부분 정(+ )방향으로 증가하고 스트레인 게이지 접착부는 반대로 부(-) 방향으로 증가하는 크립오차가 발생하고 있다. 로드셀 출력(응답)을 수식적으로 표현하면 식(7)과 같이 나타난다.

$$r = W_0(1 - e^{-t/\tau}) \tag{7}$$

여기서 r은 로드셀 출력(즉 응답) t = 하중시간,  $W_0$ 는 초기상태의 값을 의미하고 지수응답은 비 직선의 형태로 나타나는데 이는 게이지 접착상태에 따라 원인을 제공하고 있기에 로드셀은 식(7)과 같은 응답 특성을 보이고 있다.

#### 3. 로드셀 크립 시험방법

로드셀에 대한 기술기준 및 시험방법은 국내에서도 국제기준과 동일하게 시험 및 오차를 적용하고 있는데 OIML R 76에서 제시한 시험방법은 아래와 같다. 본 논문에서 성능개선에 추가되는 크립에 대해서 OIML R 76에서는 시험방법도 내용에 포함되어 있다 [6]. 최대용량 (max load) 90%~100%에 해당하는 일정한 하중을 작용시킨 후 초기 값과 30분후에 읽은 종료 값의 차이가 작용하중에 의한 최대허용오차의 0.5e를 넘기지 말아야 한다. 20분이 경과한 후의 값과 30분이 경과한 후의 차이가 최대허용오차의 0.2e를 넘

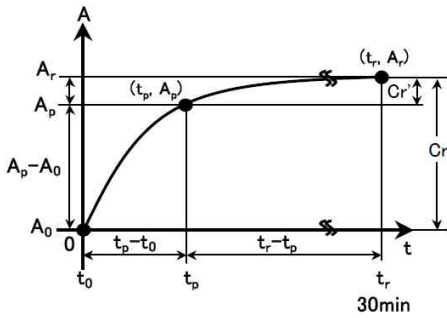


그림 13. 크립 시험 포인트  
Fig. 13. Creep test point

지 않아야 한다. 보통 최대용량에 해당하는 하중을 작용시킨 후의 5초 후의 값이 판독의 초기수치로 해서 30분 경과 후를 종료 값으로 해서 오차를 판정하여야 한다. 이유는 전자저울 및 인디케이터와 결합하여 무게를 표시할 경우에 안정되는 시간이 2초 내지는 3초가 소요되기에 초기 판독치는 5초가 경과한 후에 값을 기준으로 하여야한다. 그림 13은 앞에서 기술한 것 같이 하중시험 후 파라미터를 산출시 필요한 각각의 포인트를 나타낸 것이다[7]. 그림 13에서 보상을 위한 시작지점과 변화량을 확인하기 위한 시작점은 서로 다르게 나타나고 있기에 정확한 크립보상을 위해서는 시작점  $t_0$ 를 기준으로 해야 한다.

- $t_0$  : 크립 커브의 시작점
- $t_p$  : OIML R 60 의 시작점
- $t_r$  : 크립 시험 종료 지점 ( 30 min )
- $Cr$  : 크립 변화량

**4. 로드셀 크립 문제점**

스트레인 게이지식 로드셀은 탄성체인 알루미늄 바와 스트레인 게이지로 구성되어 있다. 따라서 3.2절에서 기술한 것 같이 하중을 가했을 때 초기 표시된 무게 값이 시간에 따라서 서서히 정(+), 부(-)방향으로 무게 값이 변화되면서 여러 가지 문제점을 발생시킨다. 문제점을 성능, 속도, 보상법, 기타 등으로 구분하면 아래와 같다.

첫째 현재 갖고 있는 기술수준으로는 크립 변화량이 하중을 가한 후 로드셀 정격 출력에 대한 최대  $\pm 0.03\%$  이상으로 크게 발생해서 정밀 급 전자저울에 사용이 불가능하다. 그 이유는 정밀 급 전자저울에서의 크립 허용범위가 이보다 10배이상 크립 변화량이

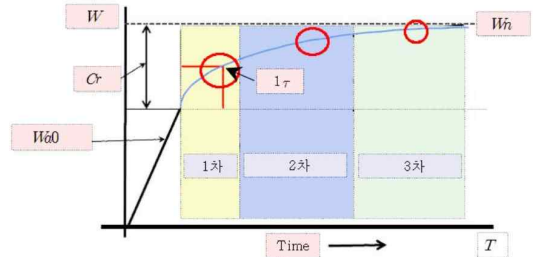


그림 14. 크립 오차에 대한 보상 알고리즘  
Fig. 14. Error compensation algorithm for creep

작아야만 되기 때문이다. 둘째 로드셀 출력 응답특성이 급속으로 이루어진 구성요소로 인해 크립 응답특성이 지연응답으로 발생한다. 이로 인해서 빠른 응답을 요구하는 곳에서는 사용이 불가능하다. 셋째 현재는 실측한 크립의 데이터를 기본으로 시뮬레이션해서 크립오차를 검증 후 정확도 등급에 따른 허용오차 범위내로 확인 가능한 방법이 없다는 점이다. 이외에도 부(-)방향 증가 크립오차 보상의 부정확성, 간단하게 실용적으로 사용 가능한 보상법이 없는 점이다.

**IV 제안한 크립보상 로드셀**

**1. 로드셀 크립 보상방법**

본 논문에서 제안한 크립오차 보상방법은 아래와 같다. 먼저 로드셀 출력을 실측한다. 실측한 데이터를 기본으로 보상 파라미터를 결정하기 위해서는 시뮬레이터를 이용한다. 시뮬레이터를 시간에 대해서 구간별로 1차, 2차 및 3차 보상을 실시해서 보상상수(시정수: $\tau$ )와 보상계수를 결정한다. 그 이후 제품 별로 저장된 파라미터를 확인해서 허용범위내로 순수한 무게 값을 출력하는 방법이다.

그림 14는 크립특성을 확인하기 위해서 하중을 가한 시작과 종료를 나타낸 그림으로 1차 보상의 구간에서는 아주 짧은시간 대비 급격한 무게 값 변화 후 2차 구간부터는 서서히 변화하다가 3차 구간에서 포화상태를 이루고 있다. 따라서 크립오차 보상도 구간별 변화특성에 맞추어 보상을 실시할 경우 정확한 크립오차를 보상할 수 있다. 그리고 다음으로 보상 수식을 전개하기 위해서 크립 응답특성을 세분해서 나타낸 것이 그림 15이다.

초기 하중에 대한 값과 크립시험 종료를 그림으로 같이 나타내면 아래와 같이 표현 할 수 있다. 여기서  $t_0$ 의 하중에 대한 값은 로드셀에 하중을 가하였을 때

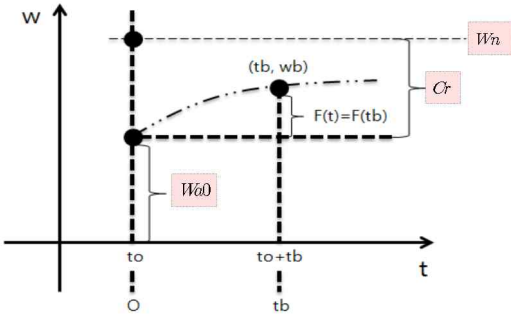


그림 15. 로드셀 크립 초기값과 종료값  
Fig. 15. Initial and final value of the loadcell creep

의 무게 값을 나타내고 있고 10kg의 무게만큼 하중을 가하였다면 10kg을 나타낸다. X축은 시간, Y축은 로드셀 출력(무게 값)을 나타내고 있으며  $W_n$ 는 로드셀에 하중을 가해 종료시간의 값을 나타내고 있고  $C_r$ 는 시간에 대한 크립오차를 나타내고 있기에  $W_n$ 를 수식으로 나타내면 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$W_n = W_a0 + C_r \tag{8}$$

하중이 제거된 시간부터는  $e^0=1$ 이기에 시간이 지남에 따라 지수함수형으로 감소한다. 이러한형태는 전기회로 뿐만아니라 종소리의 감쇠, 열의 발산, 방사능의 감쇠 뿐만아니라 매우 기본적인 식이므로 다른 곳에도 활용을 하면 오차보상을 하는데 있어 적절할 것이다. 전기회로에서 보면  $RC=\tau[t]$ 는 감쇠곡선을 정하는 중요한 상수인데 이를 시상수라고 한다. 로드셀 바의 응답에 대한 반대요소(게이지접착)의 응답도 미분회로의 감쇠곡선과 동일한 응답을 보이고 있다. 식(8)에서 보면  $W_n$ 은 초기하중  $W_a0$ 를 기반으로 크립 반응이 진행된 후 무게 값 이라는 것을 알 수 있다. 그림 15에서의  $F(t)$ 는 정확한 최종적인 값  $W_n$ 이 결정되지 않았기에  $F(t)$ 를 얻기 위해서는 식(9)로 대체될 수 있다.

$$F(t) = ( \frac{W_n}{d} ) * \tau_n(t) \tag{9}$$

$F(t)=F(t_n)$ 이라 하고  $t=t_0, t=t_n$ 라고 하면  $W_a0$ 는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_a0 = W_n - F(t_n) \tag{10}$$

마지막으로  $W_n$ 의 크립오차 변화량 합계  $C_r$ 은 다음의 식으로 결정할 수 있다.

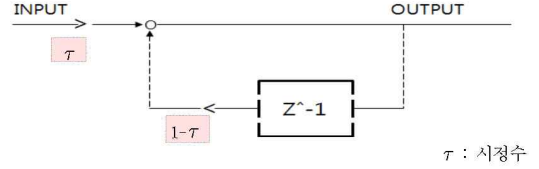


그림 16. 로드셀 크립오차 보상시스템  
Fig. 16. Creep error compensation system for loadcell

$$C_r = ( \tau_n ) * ( \frac{W_n}{d} ) \tag{11}$$

여기서 식(9)와 식(11)에서의  $\tau_n$ 은 크립오차 보상 시 로드셀 응답특성에 따라 1차 보상으로 크립오차가 완료 될 수 있는 로드셀도 있는 반면 2차 보상, 3차 보상으로 완벽하게 처리될 경우에 있어서의 각각에 대한 시정수 영향을 랑을 의미한다. 상기식에 의해 최종적으로 나타난 크립오차 보정식은 식(12)와 같이 나타낸다.

$$W_b(n) = W_a0 - ( \tau_n ) * ( \frac{W_n}{d} ) \tag{12}$$

그림 16은 스트레인 게이지식의 로드셀 크립커브에 대한 보상 시스템을 나타내고 있는데 하중을 가한 후 1차 지연 응답(CR 필터)의 모양으로 무게 값이 서서히 변화해서 최종적으로 포화까지의 움직임을 보상한 것으로 이것을 나타낸 것이다.

가. 정방향(+) 크립오차

그림 17은 지수 감쇠상수로 크립오차 보상이 가능한가를 시뮬레이션 한 그림이며 보상효과를 단순하게 하기 위해서 보상계수를 -60으로 고정하여 실시한 결과를 나타낸 것이다.

시뮬레이션의 방법은 스트레인 게이지식의 로드셀을 마이크로프로세스로 연산하는 PCB기판에 조립해서 내부 A/D컨버터의 디지털출력을 고분해능으로 한 후 PC와 RS-232C 통신포트를 연결해서 데이터를 취득한 후 엑셀 프로그램을 이용해서 시상수를 구한 후 원하는 보상계수를 조정해서 1차 보상에 대한 시상수와 조정계수를 적용한 후 2차 보상, 3차 보상 순서로 그래프로 확인하는 방법이다.

나. 부방향(-) 크립오차

그림 18은 크립 응답특성이 마이너스인 경우의 보상 처리한 시뮬레이션 그림이다. 그림 17과 18에서의 시뮬레이션 조건 CP1, CP2, CP3은 크립오차를 입력측에 예상된 값을 감쇠할 경우의 보상계수로서 그림 19를 보면 하중을 가한 후 크립오차를 측정할 값인데 종료까지의 시간은 20[min]으로 되어있고 시작 후의



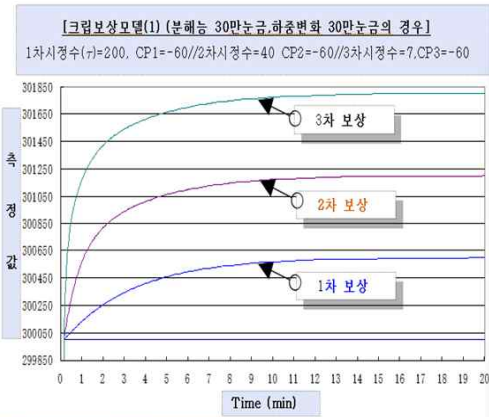


그림 17. 정 방향(+) 크립 오차보상  
Fig. 17. Positive creep error compensation



그림 18. 부방향(-) 크립 오차보상  
Fig. 18. Negative creep error compensation

20분 후 크립오차 양은(3차보상의 경우) 600 눈금이 변하였는데 감쇠를 몇 %로 결정할 경우에  $CP=Cr \cdot Ck$  (Cr: 크립양, Ck: 감쇠량)으로 결정할 수 있다.

**2. 로드셀 크립 보상결과**

가. 크립오차 보상 후 재현성 검증(1)

그림 19는 소프트웨어에 의한 크립오차 보상 후 시간이 경과된 후의 보상된 값이 유효한가를 검증한 것으로 단기간의 크립오차에 대해서 최소 10,000분의 1정도 재현성이 있다는 것을 알 수 있었다. 그림에서 소프트웨어 크립보상 결과를 보면 분해능 1/20000 기준에서 시험시간 20[min]의 크립오차 변화량이 13/

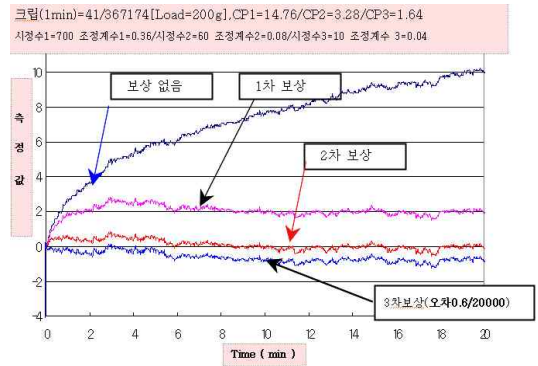


그림 19. 로드셀 보상 후 재현성(1)  
Fig. 19. Reproducibility after applying the load cell compensation

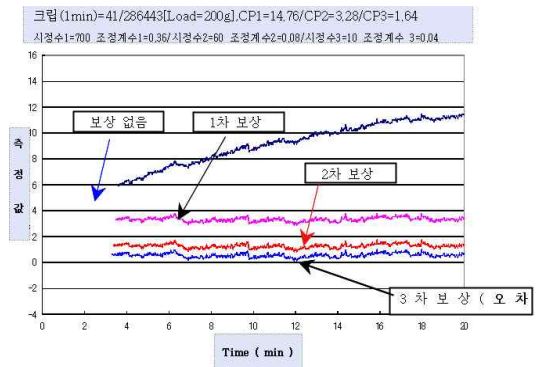


그림 20. 로드셀 보상 후 재현성(2)  
Fig. 20. Reproducibility after applying the load cell compensation

20000 = 0.065% -> 0.003% (3차 보상기준)로 정밀하게 크립오차가 보상된 것을 알 수 있다. 그림 20은 그림 19의 로드셀을 1일 경과 후 보정계수의 변화가 있는지를 확인하기 위하여 측정된 결과를 그래프로 나타낸 그림이다.

나. 크립오차 보상 후 재현성 검증(2)

그림 19와 그림 20의 3차보상에 대한 경시변화는 1/20000[눈금]에서 1일 경과 후에 약간의 변동은 있었지만 3차보상 변화만 보았을 때 -0.6/20000[눈금]로 소프트웨어 보상효과에 따른 경시변화는 문제가 없음이 검증되었다.



그림 21. 전자저울 시험과 보상 프로그램 시험  
Fig. 21. Electronic scale test and compensation program test

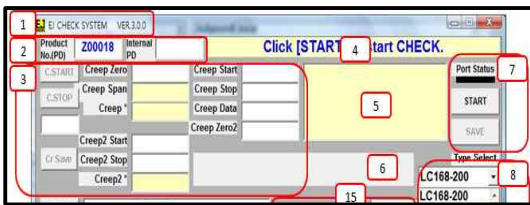


그림 22. PC 화면(보상 프로그램)구성  
Fig. 22. PC monitor display Combination(compensation program)

Table 1. Itemized description of the program  
표 1. 프로그램 항목별 설명

순서	항 목
1	프로그램 버전 표시
2	제품의 고유 번호 (Serial No)
3	크립 test 관련 data 표시란
4	영점범위 및 직선성 데이터 확인
5	크립 데이터 그래프
6	현재 상태 표시
7	시작 및 저장
8	로드셀 품명 번호

다. 정밀디지털저울에 적용된 크립오차 보상

크립오차 보상을 제품에 직접 적용하기 위하여 정밀(눈금 당:10mg)급 전자저울 공정에서 로드셀 출력 값을 실측한다. 또한 크립오차를 직접 보상하는 프로그램도 직접 실현해서 로드셀과 결합된 정밀급 전자저울에 개별적으로 보상을 실시하였다. 그림 21은 전용 프로그램을 이용해서 저울을 PC에 연결 후 크립오차를 보상하는 과정이다. 소프트웨어를 구동한 후 저울의 통신단자를 연결 후 분동을 이용하여 하중을 가한 모습이다. 적색 표시는 제품의 정격하중 만큼의 분동을 나타내고 있고 처리는 프로그램을 가동한 후 테스트할 제품의 로드셀 모양을 선택한 후 순서에 따라 크립 응답특성을 체크하기 위해서 하중을 가하고 지정한 시간 후 분동을 내리면 크립오차 보상계수를 계산 후 직접 제품에 보상 파라미터를 저장한다. 프로그램의 전체적인 화면의 구성의 자세한 내용은 그림 22에 나타내었다. 초기의 화면 구성은 보상파라미터를 결정하기 위한 크립 시작 값과 크립 종료 값이 중요하기에 화면별로 구분하였고 크립응답 특성을 나타낸 그래프화면도 포함 시켰다.

보상 프로그램의 시험은 표1 과 같은 순서로 크립오차 실측 후 직접 시상수와 보상계수를 전자저울에 직접 저장 후 종료한다. 로드셀에 대한 크립응답 특성은 각 제조사별로 스트레인 게이지 및 접착본드를 제조사별로 각각 다르게 적용하고 있고 로드셀 바도 제조사별로 용도에 적합한 재료를 사용하고 있어서 응답특성은 균일하게 나타나지 않기에 로드셀 출력 지연응답에 대한 크립오차 보상도 개별로 보상을 실시 않으면 정밀 급 저울용으로 사용이 불가능해 개별 크립오차 보상시스템의 중요성은 매우 크다고 할 수 있다.

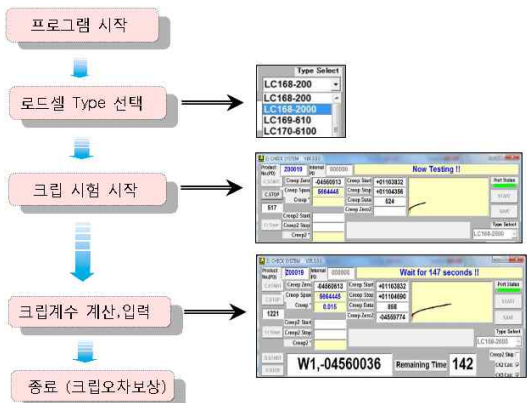


그림 23. 보상 순서도 도시  
Fig. 23. Illustration of the compensation flowchart

## V 결 론

본 논문에서는 스트레인 게이지식 로드셀의 크립오차에 대해서 실용적 보상법을 제안했다. 크립오차 문제점에 대해서 보상식 정밀과 디지털방식의 보상 소프트웨어로 실현하였고 일부 로드셀에서만 보상이 가능한 방식을 개별보상이 가능한 방식으로 실현되었으며 로드셀 출력의 부(-)방향 크립오차에 대한 보상도 검증을 거쳐 정확하게 보상을 할 수 있는 방법도 완성되었다. 가장 중요한 문제점의 하나였던 크립오차로 인해서 고정밀 전자저울에 사용이 불가능 하였던 로드셀도 제안된 보상법을 적용하여 보상전에  $\pm 0.03\%$ 의 크립오차를 최대  $\pm 0.003\%$ 까지 보상해서 정밀급 전자저울의 로드셀로 사용이 가능하게 되었다.

하지만 스트레인 게이지식의 로드셀은 수 그래프에서 수백 킬로그램까지 있는데 고중량 로드셀의 경우에는 시험 및 검증과정에 많은 어려움이 있어서 다루지 못한 점과 소프트웨어 보상방법으로 실현이 되어서 로드셀 출력에서 발생하는 지연응답 특성을 전자회로로 실현하는 방법이 추가적으로 필요하다. 또한 향후 연구에서 크립오차 보상에만 국한하지 않고 스트레인 게이지식 로드셀의 대표적 오차인 직선성, 히스테리시스에도 응답특성을 해석 후 감쇠보상법을 적용하면 정밀급 디지털전자저울 보상기술에 많은 발전이 이루어 질 것이다.

### 참고문헌

- [1] 정광화, "디지털저울의 정밀도향상을 위한 전기적 변환기의 성능검사 및 개선점 연구," 한국 표준 연구소, pp. 1-6. 1984.
- [2] Fukuda, K and H. Morinaka, "Test Methods Uncertainties for Loadcell for Weighting Instruments," 産總研計量標準報告. 117-121, 2005.
- [3] Tech application, "ひずみゲージ," pp. 1-3. A&D Co., Ltd.
- [4] Tech application, "ロードセルの基本回路," pp. 1-3. A&D Co., Ltd.
- [5] Tech application, "各種補正回路," , pp. 1-2. A&D Co., Ltd.
- [6] Tech application(1999), "Signal Conditioning Wheatstone Resistive Bridge Sensors," SLOA034, pp. 1-5. Texas instruments co., Ltd.
- [7] Otuka A and T. Koyama(2009) "Digital Creep Compensation Method for Loadcell in Varies Loading Patterns," SICE, pp. 369-373.
- [8] OIML R 76(2006(E)), "3.1 Accuracy classes," International recommendation OIML R 76.
- [9] OIML R 76(2006(E)), "3.5 Maximum permissible errors," International recommendation OIML R 76.
- [10] OIML R 76(2006(E)), "3.9.4.1 Creep" International recommendation OIML R 76.
- [11] Makabe M and K. Toru, "High Accurate Creep Compensation Method for Load Cell," SICE Annual Conference 2007, Sept. 17-20,2007.

### 저자 소개

#### 서 해 준 (정회원)

한국전기전자학회 논문지 제12권 1호 참조

#### 정 행 섭 (비회원)



2001년 : 청주대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 2003년 : 청주대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)  
 2011년 : 청주대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)  
 2011년 3월~현재 : (주)인터비주얼 <주관심분야> 컴퓨터비전, 임베디드시스템

#### 류 기 주 (정회원)



1990년 : 서울산업대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 1995년 : 인천대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)  
 2001년 9월~현재 : 충북대학교 대학원 전자공학과 (박사과정)  
 1997년 2월~현재 : 한국폴리텍, 서울강서대학, 통신전자과 부교수  
 <주관심분야> 임베디드시스템, 센서네트워크 시스템, 유비쿼터스 시스템

#### 조 태 원 (정회원)

한국전기전자학회 논문지 제12권 1호 참조