

로드 셀의 개선된 온도보상

An Improved Temperature Compensation of a Load Cell

°김진배, 정선태

충실파워 전자공학과(Tel: 817-5987; Fax: 821-7653; E-mail: jjin@syscon.soongsil.ac.kr)

개요 (ABSTRACT)

로드 셀의 정밀측정 예리의 가장 큰 요인은 온도에 의한 출력특성 변화이다. 본 논문에서는 주어진 어떤 온도 구간에서만 온도특성을 보상하였던 기존의 방법에 비해 보다 넓은 온도구간에서 로드 셀의 출력의 온도 특성을 보상하고 또한 출력의 온도 특성이 기존의 방식에 의한 것보다 개선된 새로운 로드 셀의 온도보상 방법을 제안하였다.

1. 서론

현대의 계측은 센서에서 검출한 물리량의 대부분을 display장치에 이용한다든지 A/D 컨버팅해서 직접 디지털 제어에 이용하기 때문에 힘의 측정 분야에서는 출력으로 전압을 내주는 '스트레인 게이지식 로드 셀(以下 로드 셀)'이 60년대 이후 주종을 이루고 있다. 현재 로드 셀은 교통량 제어에 중요한 교각의 하중 측정에서부터 우편물의 아주 작은 무게를 측정하는 전자저울에 이르기까지 그 응용이 광범위하다.

로드 셀의 경우에 정밀도를 저해하는 가장 큰 원인은 온도변화에 따른 측정 오차이다[1]. 로드 셀 출력의 온도 보상을 위해, 기존의 방식[2,3]에서는 로드 셀 내의 브릿지 회로 앞단에 온도에 민감한 저항(모듈러스 저항)을 삽입하여 온도가 증가하면 브릿지 회로 양단에 걸리는 전압이 감소하게 하여 브릿지 회로의 온도에 의한 로드 셀의 출력에러를 감소시켰다. 그런데 이 방식은 사용된 모듈러스 저항이 특정 온도 범위에 대해서만 보상되도록 계산된 것이어서, 측정 환경이 이 온도 범위를 넘어서면 온도변화에 따른 출력에러가 커진다. 이는 이 방식이 feedforward 방식이어서 로드 셀의 브릿지 회로의 출력에 대한 온도 영향을 제대로 고려하여 보상하기 힘들기 때문이다. 넓은 온도 범위에서 출력에 대한 온도 영향을 제대로 보상

하기 위해서는, 각 온도에서 온도에 따른 출력에러에 대한 정보를 알아 이 정보가 보상회로에 이용되어 설계될 필요가 있다. 본 논문에서는 브릿지 회로의 스트레인 게이지와 온도 특성이 같은 스트레인 게이지 저항을 통해 온도에 따른 브릿지 회로의 출력에러가 궤환(feedback)되어 이에 비례하도록 브릿지 회로의 인가 전압을 제어하여 온도에 따른 출력전압에러를 조절함으로써 넓은 온도 범위에 대해서 로드 셀의 온도 보상이 이루어지게 하는 feedback 방식의 새로운 로드 셀 온도 보상 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에 로드 셀의 힘 측정 원리와 로드 셀의 힘 측정에 대한 온도 영향에 대해서 설명하며, 제3절에서는 기존의 온도 보상 방법을 소개하고 이의 문제점을 살펴본다. 본 논문에서 새로 제안하는 개선된 온도 보상 방법에 대한 사항들(보상회로 동작, 보상회로 파라미터 결정방법 등)이 제4절에서 설명된다. 제5절에서는 제안된 온도 보상 방법의 개선을 보여주는 시뮬레이션 결과가 주어지며, 마지막으로 제6절에 결론이 주어진다.

2. 로드 셀

2.1. 로드 셀의 힘 측정 원리

로드 셀은 strain(일그러짐)이 일어나는 물체 즉, 탄성체 표면에 strain을 전기저항의 변화로 변환하는 스트레인 게이지를 접착한 것이다. 하중이 가해지면 탄성체에서 하중에 비례한 strain이 발생하여 strain의 크기에 따라서 브릿지 회로의 arm을 구성하고 있는 스트레인 게이지의 전기 저항이 바뀌기 때문에 브릿지 회로의 평형이 깨져서 출력 전압이 변화하게 된다. 로드 셀 내의 브릿지 회로의 개념도가 그림 1에 있다.

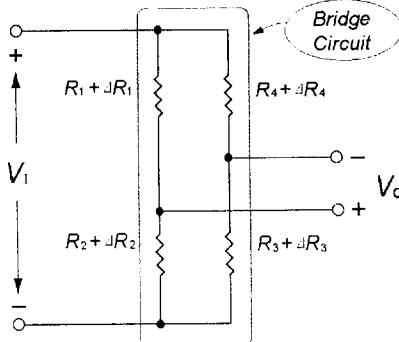


그림 1. 브릿지 회로의 힘 측정

이 때 브릿지 회로의 출력 전압 \$V_o\$는 \$g\$를 브릿지 회로의 계인이라 할 때 다음과 같이 표시된다[4].

$$\begin{aligned} V_o &= g \cdot V_i \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_i \end{aligned} \quad (2.1)$$

2.2. 힘 측정시의 온도 영향

스트레인 게이지의 전기 저항이 외부요인으로 인하여 변하면 브릿지 회로는 출력을 내게 된다고 2.1절에서 살펴 보았다. 스트레인 게이지의 저항을 \$R\$, 길이를 \$l\$, 지름을 \$d\$라고 하면 하중에 의한 스트레인 게이지의 저항의 변화는 식 2.2와 같다.

$$\Delta R = R \left[\left(1 + 2 \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \right) \frac{\Delta l}{l} \right] \quad (2.2)$$

식 2.1에서 \$\Delta d\$와 \$\Delta l/l\$이 하중에 의해서만 발생하는 이

상적인 경우에는 측정오차가 없겠지만 측정환경에는 온도가 존재하며 그 결과 \$\Delta d\$와 \$\Delta l/l\$ 온도변화에 의해서도 발생하게 된다. 결국 식 2.1과 같이 표현되는 브릿지 회로의 계인 \$g\$의 각 항들의 증분은 식 2.2로 기술되므로 브릿지 회로의 계인은 온도의 함수가 되며, 따라서 식 2.1에서 볼 수 있듯이 브릿지 회로의 출력은 온도에 직접적인 영향을 받게 된다. 그림 2는 온도에 따른 브릿지 회로의 계인의 선형적인 증가로 인한 출력 분포의 변화를 보여주고 있다[2].

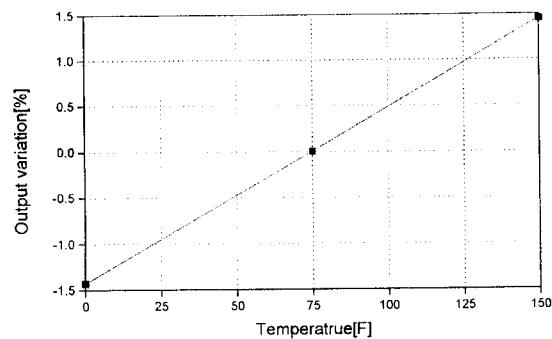


그림 2. 온도에 따른 브릿지 회로의 출력 분포도 (보상되지 않은 상태)

3. 기존의 온도보상 방법

온도 증가시 계인은 증가하게 되는데 이로인해 온도 증가에 따라 출력이 증가함을 그림 2에서 살펴보았다. 온도 상승에 따른 출력증가는, 식 2.1에서 \$V_o = g \cdot V_i\$이므로 온도 상승에 따른 계인 \$g\$의 증가를 브릿지 회로 입력전압 \$V_i\$를 감소시킴으로 보상할 수 있다. 기존의 방식[2,3]에서는 \$V_i\$의 감소를, 브릿지 회로 입력단에 온도에 민감한 모듈러스 저항을 삽입하고 온도가 상승하면 모듈러스 저항 증가가 브릿지 회로의 (등가)저항보다 더 크므로 전압 분배법칙에 따라 브릿지 회로에 걸리는 입력 전압이 감소하게 되는 것을 이용하였다. 모듈러스 저항의 저항값 \$R_m\$을 구하는 방법은 다음과 같다.

우선 변수를 다음과 같이 잡는다. 모듈러스 게이지가 삽입된 후의 브릿지 출력은 \$E_m\$, 삽입전의 출력은 \$E\$, 실험의 관점 온도 범위중 상한온도에 관계되는 부분은 첨자 \$h\$, 하한온도에 관계되는 부분은 첨자 \$l\$로 구분하자. 이해를 돋기 위해 그림 3에 회로의 구성을

나타냈다.

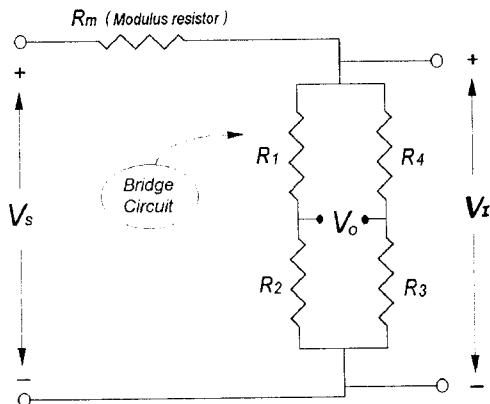


그림 3. 출력 값 온도보상을 위한 기존의 회로도

이 때 온도 범위 $t \sim h$ 에서 전압 E_m 은 다음과 같다.

$$E_{m_l} = \frac{Rb_l}{Rb_l + Rm_l} E_l \quad (3.1)$$

$$E_{m_h} = \frac{Rb_h}{Rb_h + Rm_h} E_h \quad (3.2)$$

보상을 한다는 것은 두 식이 같아야 함을 의미하므로, 두식을 같게 놓고 정리하면 모듈러스 저항의 저항 R_m 은 결국 식 3.3이 된다. 식에서 TC는 모듈러스 저항의 온도에 대한 변화 비율이다.

$$R_{ml} = \frac{Rb_h \left(\frac{E_h}{E_l} - 1 \right)}{TC_h - \left(\frac{E_h}{E_l} \cdot \frac{Rb_h}{Rb_l} \right)} \quad (3.3)$$

기존의 방식은 실험상에서 정해진 지정 온도범위를 조금이라도 넘어서면 출력의 정확도를 예측할 수 없게 된다. 그리고 보상과정은 식 3.3에 의해 구한 R_m 을 삽입한 후 약간씩 모듈러스 저항을 조정하며 보상 실험을 반복하게 된다. 기존의 방법에서는 이 과정이 숙련자의 경험을 많이 필요로 하며, 인간의 경험이 출력 정확도에 직접 영향을 미치게 되는 요인이 된다.

4. 개선된 온도보상 방법

4.1. 보상회로의 구성

본 논문에서 제안하는 보상회로의 구성은 다음과 같다. 브릿지 회로의 arm들을 이루고 있는 스트레인 게이지의 온도 변화로 인한 전압변화분을 검출하여 feedback 시키기 위한 검출 게이지 저항 R_o , 브릿지 회로의 인가전압과 검출 게이지 저항으로부터의 전압 강하와의 차이를 증폭시키는 차동증폭기, 브릿지 회로에 전압을 인가하기 위한 정전압 IC(7805) 등으로 구성된다(그림 4참조).

검출 게이지 저항 R_o 는 브릿지에 사용된 스트레인 게이지의 저항과 저항치가 같은 동종의 게이지를 기준의 게이지와 수직방향으로 부착한다. 스트레인 게이지의 구조상 한쪽 방향으로만 stress에 민감하도록 설계되어 있기 때문에[5] 새로이 부착된 게이지는 온도에 의해서만 저항이 변하며 이로인해 브릿지 회로 게이지의 온도로 인한 영향을 검출할 수 있다.

정전압 IC인 7805는 그리운드 단자로부터 5[V]가 출력단자에 걸리도록 설계되어 있으므로, 그림 4에서 보면 7805의 출력은 (5+V3)가 된다. R_o 와 R_D 사이 node의 offset을 제거해 주고 R_D 의 온도로 인한 변화가 브릿지 회로의 인가전압의 제어에 민감하게 반영되도록 7805의 출력전압을 V_2 단자로 연결한다.

온도로 인한 출력변동을 보정하는 것으로 온도에 의해 게인이 커지는 것을 검출해야 한다. 그리고 그 검출된 증가(혹은 감소)분의 게인이 브릿지 양단에 걸리는 전압 V_1 의 제어에 이용되어야 한다. 따라서 전압 V_1 과 V_2 를 feedback 시켜 온도로 인한 R_D 의 변화분만큼의 차를 OP-AMP를 이용한 차동증폭기를 이용하여 증폭하면 원하는 결과를 얻을 수 있다. 이상의 회로도는 그림 4와 같다.

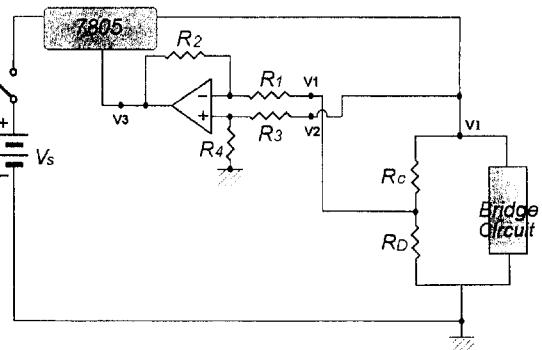


그림 4. 출력 값 온도보상을 위한 개선된 회로도

4.3절에서 자세히 살펴보겠지만, 회로에 사용되는 저항들의 설정은 다음과 같다. R_C 는 R_D 와는 달리 온도에 의한 영향을 거의 받지 않는 저항을 사용하며 R_D 가 상온에 있을 때의 저항값과 같도록 설정한다. 차동증폭기 쪽의 저항 R_1, R_2, R_3, R_4 는 R_C, R_D 에 비해 상당히 큰 것을 사용한다.

4.2. 보상회로의 동작 원리

브릿지 회로의 출력 전압 $E(T)$ 는 다음과 같다.

$$E(T) = g(T) \cdot V_I \quad (4.1)$$

여기서 V_I 는 브릿지 회로 양단에 걸리는 전압이고 $g(T)$ 는 브릿지 회로의 계인이며 온도 T 의 함수이다. 제안된 보상회로에서는 V_I 를 온도에 따른 $g(T)$ 의 증감 분에 따라 조절되게 함으로써 브릿지 회로 출력 전압의 온도 보상이 이루어진다. 다음에서 이를 보인다.

먼저 그림 4의 회로에서 다음이 성립한다.

$$V_3 = \frac{1 + R_2/R_1}{1 + R_3/R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_I \quad (4.2)$$

$R_1 \gg R_0$ 으로 가정했으므로, V_1 은

$$V_1 = \frac{R_D}{R_D + R_C} V_I \quad (4.3)$$

$V_2 = V_1$ 와 식 4.3을 식 4.2에 대입하면, V_3 는 식 4.4가 된다.

$$\begin{aligned} V_3 &= \left(\frac{1 + R_2/R_1}{1 + R_3/R_4} - \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_D(T)}{R_D(T) + R_C} \right) \right) V_I \\ &= -\alpha(T) V_I \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\alpha(T) \triangleq \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_D(T)}{R_D(T) + R_C} = \frac{1 + R_2/R_1}{1 + R_3/R_4} \quad (4.5)$$

또한 전압 V_I 는

$$V_I = V_3 + 5 = \frac{5}{1 + \alpha(T)} \quad (4.6)$$

이고 출력 전압 $E(T)$ 는

$$E(T) = \frac{g(T)}{1 + \alpha(T)} 5 \quad (4.7)$$

온도 T 가 증가하면 $g(T)$ 가 증가하는데, $\alpha(T)$ 는 R_D 가 온도에 따라 증가하므로 $\alpha(T)$ 도 증가하게 된다. 따라서 온도 증가에 따른 브릿지 회로의 계인 $g(T)$ 의 증가는 $\alpha(T)$ 의 증가에 의해 보상되게 된다. 더구나 R_D 는 브릿지 회로의 스트레인 게이지와 같은 동종을 사

용하였기 때문에, R_D 의 온도 특성은 브릿지 회로의 계인 $g(T)$ 의 온도 특성과 유사하여 잘 보상되게 된다.

4.3. 보상회로 파라미터 결정

보상회로의 파라미터 결정은 상온시의 출력전압과 관심있는 온도범위의 최고 온도에서의 출력전압이 같도록 한다. 즉, 상온시의 출력 전압과 최고온도에서의 출력전압 다음과 같이 표시할 때

$$\begin{aligned} V_O(l) &= g(l) \cdot V_I = g(l) \cdot \frac{5}{1 + \alpha(l)} \\ V_O(h) &= g(h) \cdot V_I = g(h) \cdot \frac{5}{1 + \alpha(h)} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\frac{g(h)}{1 + \alpha(h)} = \frac{g(l)}{1 + \alpha(l)} \quad (4.9)$$

가 되도록 결정한다. 이 때

$$\alpha(l) = \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_D(l)}{R_D(l) + R_C} \right) - \frac{1 + R_2/R_1}{1 + R_3/R_4} \quad (4.10)$$

$$\alpha(h) = \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_D(h)}{R_D(h) + R_C} \right) - \frac{1 + R_2/R_1}{1 + R_3/R_4} \quad (4.11)$$

$\frac{g(l)}{g(h) - g(l)}$ 를 k 라 하면(즉 $k \triangleq \frac{g(l)}{g(h) - g(l)}$), 다음의 관계식이 성립한다.

$$\alpha(h) = \alpha(l) \left(1 + \frac{1}{k} \right) + \frac{1}{k} \quad (4.12)$$

식 4.12가 만족되도록 $\alpha(T)$ 를 잡는 것이 보상이므로 다음과 같이 식 4.10과 식 4.11을 식 4.12에 대입하여 파라미터들을 결정하게 된다.

식 4.12에서, k 는 보상되지 않은 브릿지 회로에서 구할 수 있다. 그리고 나머지 각 파라미터들을 결정하기 위해 다음을 가정하자. R_C 와 R_D 는 온도 l 에서 같으며, $R_1 \gg R_D$ 이므로 R_1 을 R_D 의 200배 이상으로 잡는다. 다시 R_1 과 R_3 는 같게 놓고 R_2/R_1 은 어떻게 잡아도 상관

없으나 10으로 가정하자. 그러면 R_2 도 구해졌으므로, 이제 식 4.12에서는 R_4 만 미지수로 남게 되고 마지막으로 R_4 를 구할 수 있게 된다.

예를 들면 R_D 가 상온에서 $350[\Omega]$ 이었다면 위의 가정대로 R_C 역시 온도에 둔감한 저항 $350[\Omega]$ 을 잡는다. R_1 과 R_3 는 $100K[\Omega]$, R_2/R_1 을 10으로 잡으면 R_2 는 $1M[\Omega]$ 가 된다. 이제 식 4.12를 만족하도록 각 파라미터를 대입하고 R_4 를 구하면 $88.857K[\Omega]$ 이 된다.

온도 [°F]	R_D [Ω]	입력전압 [V]	게인 [10^{-3}]	출력전압 [mV]	출력분포 [%]
0	348.32	6.1575	2.3085	14.21459	0.02673
25	348.88	6.1272	2.3197	14.21308	0.01613
50	349.44	6.0973	2.3308	14.21183	0.00732
75	350.00	6.0678	2.3420	14.21079	-0.00002
100	350.56	6.0385	2.3533	14.21040	-0.00274
125	351.12	6.0096	2.3646	14.21030	-0.00345
150	351.68	5.9810	2.3760	14.21086	0.00046

표 1. 시뮬레이션 결과

5. 시뮬레이션

5.1. 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 프로그램은 PSPICE를 사용했으며, R_D 의 재료는 닉롬 V 게이지를 가정했다. 닉롬 V 게이지의 온도변화율은 $64[\mu\Omega/\Omega/°F]$ 이다[6]. 정전압 IC 7805는 5[V]의 전압원으로 대체했다. 그 밖의 파라미터들은 앞절에서 구했듯이 아래와 같이 잡았다. (단위: [Ω])

$$\begin{array}{ll} R_1 = 100K & R_2 = 1000K \\ R_3 = 100K & R_4 = 88.857K \\ R_C = 350 & R_D = 350 \end{array}$$

R_D 는 상온시 $350[\Omega]$ 에서 온도에 따라 다음과 같이 변한다. (단위: [Ω]))

$$\begin{array}{ll} 0°F : 348.32 \\ 75°F : 350.00 \\ 150°F : 351.68 \end{array}$$

5.2. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 환경(게인의 증가, R_D 의 선정) 등은 이전 방식의 논문[2]을 참고로 했다. 온도 변화에 따른 브릿지 입력 전압의 변화와 그 때의 예상 출력전압($=$ 입력전압 \times 게인) 그리고 $75[°F]$ 기준시의 출력 전압의 출력분포를 표 1에 나타냈다.

그림 5는 이전의 보상 방식과 본 논문에서 제시한 보상방법과의 차이를 보여주고 있다.

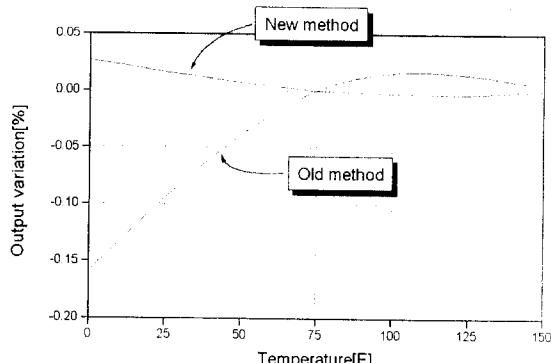


그림 5. 기존의 방법과 제안된 방법의 시뮬레이션 결과 비교

제안된 방법의 온도변화에 대한 브릿지 회로 출력분포는 $0.00046[~0.02673\%]$ 을 시뮬레이션을 통해서 알수 있었고, 이것은 기존의 보상 방법이 $0.0045[~0.1593\%]$ 인 것을 볼 때 정확도 면에서 상당히 향상될 수 있음을 알 수 있다. 또한 본 논문에서 제시한 feedback에 의한 브릿지 입력전압 제어는 기존방법의 문제점들로 지적된 사항들을 개선할 수 있음을 볼 수 있다. 즉, 여러 온도에서 견실하게 보상을 할 수 있게 되며, 숙련자가 아니더라도 얼마든지 조정할 수 있게 되고, 온도 범위가 넓더라도 삽입게이지가 온도에 대해 선형변화를 가져오는 지점까지는 얼마든지 정확도를 유지시킬 수 있는 장점들을 갖게 된다.

6. 결론

본 논문에서는 기존의 방법에 비해 보다 넓은 온도구간에서 로드 셀 출력의 온도 특성을 보상하고 또한 출력의 온도 특성이 기존의 방식에 의한 것보다 개선된 새로운 로드 셀의 온도보상 방법을 제안하였다. 출력분포를 비교한 결과 제안된 방법이 보상 온도범위, 출력정확도 등이 개선되었으며, 더불어 실험과정이 용이해질수 있음을 보였다.

7. 참고문헌

- [1] 일본자동화 기술, "센서기술", 세화, 1991,
pp.134-158
- [2] James Dorsey, "Linearization of tranducer
compensation", ISA 1977, pp.439-442
- [3] 김승호, "스트레인게이지식 로드셀의 온도보상에
관한 연구", 한양대석사, 1991
- [4] Karl Hoffman, "An introduction to measurements
using strain gages", HBM 1989
- [5] J. Michael Jacob, "Industrial control electronics",
Prentice Hall, 1989, pp.110-122
- [6] R. L. Hannah/S. E. Reed, "Strain gage-user's
handbook", SEM 1992