

Truck Scale 용 Load Cell의 Smart Interface Board 개발

박 찬 원 · 박 중 연 · 홍 재 용 · 최 규 석 · 안 광 회

Development of Smart Interface Board for Truck Scale Load Cell

Chan-Won Park · Chong-Yeon Park · Jae-Yong Hong

Gyu-Suk Choi · Kwang-Hee An

ABSTRACT

This paper presents the design of a smart A/D conversion interface used for measuring the load of a truck. Since the load-cell sensor to be used is very sensitive for weight variation, the interface board must have the low-drift and the high-resolution of the A/D conversion for accuracy.

A new integrator and comparator has been developed to reduce the offset voltage and the drift current of operational amplifiers and has been adapted into the interface board. Also, a software algorithm has been developed to obtain the stable and accurate A/D conversion. This software includes a RS-485 communication program to control the interface, which gives a capability of backing-up the calibration data and transferring control data.

The test and evaluation of the designed interface has been shown as having the better performance compared to the other types of existing weighing systems and sensor instruments.

1. 서 론

최근 물류산업의 증대와 교통량의 증가로 과적차량에 의한 교량이나 도로의 파손이 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다. 트럭스케일이란 트럭의 공차중량과 만차중

량을 측정하여 적재함 내용물의 중량을 측정하는 것을 주요 목적으로 하는 일종의 대형저울이다. 최근에 와서는 앞서 언급한 바와 같이 과적차량을 적발하기 위한 장치로도 이용이 급속히 증대되고 있다. 이러한 트럭스케일은 그 센싱방식에 따라 기계식, 기계전자 조합식, 유압을 이용한 하이드롤릭식, 완전로드셀 방식등이 있는데 최근 센서기술과 전자회로 기술의 발달에 따라 거의 대부분 완전로드셀 방식이 채용되고 있다. 완전로드셀 방식은 4개에서 8

강원대학교 전기공학과 부교수

* 강원대학교 전기 공학과 교수

** (주)데스콤 기술연구소

*** (주)데스콤 기술연구소

**** 강원대학교 전기공학과 박사과정

개 정도의 수십톤 용량의 로드셀을 하중대의 모서리 부분에 설치하고, 질량의 측정을 로드셀의 기계적 변위량은 전기적 신호 즉, 아날로그 신호로 변환시키는 원추형 압축방식 로드셀 중량센서¹⁾를 이용하는 방법이다.

다수의 질량을 빠르고 정확하게 계속 측정하고 그 정보를 디지털화하여 마이크로 프로세서나 컴퓨터에 인터페이스 시킬 수 있도록 하기 위한 중량측정 센서로써 개발된 로드셀(load cell)은 전자저울 뿐 아니라 자동계량 시스템에 이르기까지 거의 모든 질량측정 시스템에 사용되고 있다. 하중에 의한 변위가 스트레인 게이지^{2,3)}의 브릿지 저항으로 검출된 로드셀의 출력신호는 1디지트당 수 μV 수준의 미소신호이므로 이를 노이즈와 구별하여 검출하고 증폭하여 A/D변환을 하면 중량을 디지털 신호로 변환시킬수 있으나 로드셀 센서의 기계적 물리적 특성과 아날로그 회로의 옴셋전압과 온도 드리프트 등에 의한 영향이 정밀한 A/D변환에 장애요소로 작용하며 후술하는 로드셀 신호의 특성은 중량으로 표시시키기 위해 소프트웨어적으로 A/D변환 데이터의 보정과 켈리브레이션 등의 특수한 처리를 요한다^{4),5)}.

트럭스케일의 경우 로드셀에서 감지된 중량의 신호는 여러개의 아날로그 신호를 4귀오차(4 point error)를 최소화 시켜 balance를 조정하고 이들 여러개의 신호를 합성하는 summing junction box를 통해서 인디케이터에서 A/D 변환하여 디지털 표시를 행하게 되는데 트럭스케일의 구조상 인디케이터와 로드셀은 수m ~ 수십m 정도 떨어져 미소전류가 흐르는 로드셀 케이블은 노이즈의 침투(RFI/EMI)로 인하여 특성이 불안정 해지기 쉬운 단점이 있다. 즉, 종래의 아날로그 신호를 표시부에 전

송시키는 방법으로는 외부노이즈나 케이블의 저항성분의 드리프트 등으로 정밀한 계량치를 기대하기가 어려운 점이 많다. 이를 위하여 고가의 특수 케이블을 사용하거나 current loop방식 혹은 노이즈 제거를 위한 필터를 부착하는 등 여러가지 방식의 제품들이 시판되고 있으나 앞서 언급한 문제점들을 완벽하게 처리하지 못한 관계로 정밀도와 분해능에는 자연히 한계가 따르게 마련이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점들이 해결 가능한 디지털 출력 로드셀의 개발이 요구되고 있는 현실에 착안하여 디지털 출력뿐만 아니라 인디케이터에서 로드셀 쪽으로 켈리브레이션도 가능하고 범용의 인디케이터에 접속이 가능한 smart load cell interface board를 개발하였다.

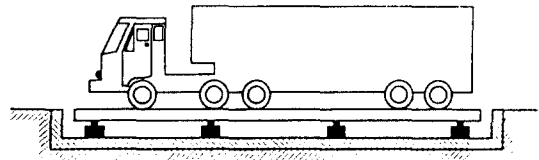
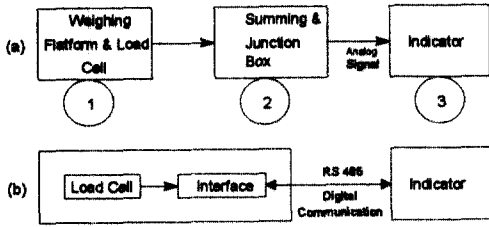


Fig. 1. Truck scale system.

2. Truckscale 계량 시스템과 smart interface board

트럭스케일 계량시스템은 그림 1과 같이 트럭이 계량대위에 정지하였을 때 가해지는 수직하중을 그림의 진한 흑색부분으로 표시된 수개의 로드셀로서 전기적 신호로 변화시켜 이를 병렬가산하여 인디케이터에서 디지털 수치로 표시시키는 장치이다. 그 구조는 크게 그림 2와 같이 세부분으로 구분된다.

현재 사용되고 있는 기존의 트럭스케일은 그림 2의 (a)와 같이 계량대 구조물 아래에 수개의 로드셀을 설치하고(①) 로드



(a) Conventional type (b) Proposed type
 Fig. 2. Block diagram of truck scale system.

셀 출력전압을 아날로그 가산기로서 밸런스를 조정하여 가산하여(②) 인디케이터에 보내어 인디케이터가 A/D 변환 및 디지털 표시(③)를 하도록 되어있다.

본 연구에서는 이를 그림 2의 (b)와 같은 단계로 변환하여 그 interface board를 개발하였다.그림에서 점선의 부분은 로드셀과 함께 전기적으로 차폐 봉입하여 최대한 노이즈의 침투를 줄일 수 있도록 한 구조이다. 즉, 로드셀의 최인접한 위치에 one chip CPU⁽⁶⁾를 탑재한 디지털 출력 인터페이스의 하드웨어를 구성하고 소프트웨어적으로 아날로그 스위치의 제어신호와 인터럽트 신호에 의해 2중적분형 A/D변환^(7,8,9)을 행하도록 하였으며 하드웨어와 소프트웨어의 적절한 구성에 의해 OP Amp의 옴셋전압과 드리프트에 의한 영향을 제거시키고 로드셀 신호의 안정된 A/D변환이 가능하도록 하고 로드셀의 비직선성 보정 알고리즘과 데이터 안정화 처리 및 auto zero tracking 처리를 할수있도록 구현하였다. 또한 출력된 디지털 데이터는 직렬통신을 이용하여 다소 원거리에서도 err가 없는 데이터의 쌍방향 전송이 가능하도록 하여 인디케이터에서 각 로드셀의 편차보정과 초기 캘리브레이션 기능을 갖는 smart interface board로서 이용될 수

있도록하였다.

3. 고안된 smart interface board의 특징

Truck scale용 로드셀은 금속 탄성 구조물에 스트레인 게이지를 부착하여 브릿지 저항 센싱방식을 이용한 중량트렌스듀서로서 고정밀도이고 직선성이 좋아 현재 대부분의 디지털 계량방식의 중량센서로서 많이 이용되고 있다. 로드셀 센서로 중량을 계량할 때 최대 span에서 로드셀의 출력전압은 대략 20mV 전후의 아주 미약한 직류 신호가 대부분이다. 이를 증폭하고 A/D 변환하여 안정된 디지털 신호 처리를 하기 위해서 본 연구에서 고안된 smart interface board는 다음과 같은 특징이 있다.

- ① 로드셀 센서 자체에서 보상하기 어려운 온도 드리프트 특성이나 hysteresis, creep 특성에 대한 소프트웨어 보정.
- ② A/D 변환회로 자체의 아날로그 회로의 온도 드리프트 및 옴셋 전압에 의한 영향의 보상.
- ③ 디지털로 변환된 데이터의 안정된 표시 및 영점 자동 보정.
- ④ 쌍방향 직렬 통신에 의한 디지털 캘리브레이션 데이터의 세트에 의한 auto span adjust 및 그 데이터의 백업.
- ⑤ RS-485 multi-drop 방식에 의한 인터페이스와 인디케이터 간의 쌍방향 직렬통신.

이와 같은 내용들을 하드웨어와 소프트웨어에 의한 방법으로 문제점들을 해결하였으며 그 구성에 대한 설명은 다음과 같다.

4. 하드웨어의 구성과 동작

그림 3의 회로는 고안된 디지털 출력 인터페이스의 개략적인 구성도이다. 각부분의 구성 및 동작은 다음과 같다.

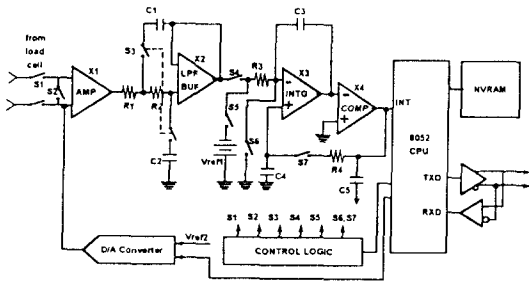


Fig. 3. Schematic diagram of proposed hardware circuits.

4.1 입력신호 증폭부

입력신호 증폭부(X1)는 고입력 평형 차동 앰프로써 입력신호는 두개의 아날로그 스위치에 의해 특정기간 단속된다. 입력신호를 증폭하여 실제 A/D 변환을 행할 때 연결되었다가 또 이를 OFF한채로 또다른 아날로그 스위치를 일정시간간격으로 단락하여 OP Amp의 드리프트 값을 감시하는 역할을 한다.

4.2 A/D 변환 동작과 오프셋전압의 보상

로드셀의 A/D변환은 화상처리나 음성인식과 같은 높은 스피드를 요하지 않으므로 기본적으로 이중적분형 A/D변환으로 충분히 높은 분해능의 A/D변환이 가능한데 OP Amp 회로의 드리프트와 오프셋의 영향은 피할 수 없다¹⁰⁾. 기존 A/D converter 제조사의 소자들이 다양하게 나오고 있지만 모두 입력적분 기간이 고정되어 있고 고분해능의 것은 가격이 비싸다¹¹⁾.

본 연구에서는 OP Amp, analog switch, one chip CPU 로써 구성되는 A/D 변환 회로를 구성하여 적분기의 오프셋과 소자의 온도 드리프트를 최대한 제거할 수 있는 방식을 시도하였다.

적분기와 비교기로서 2중 적분형 A/D 변환회로를 구성하였는데 아날로그 스위치(S4~S7)의 동작순서에 따라 영점보정기간, 입력신호 적분기간, 기준전압 적분기간으로 구분된 동작을 하게 된다. 먼저 S6,S7이 on(S4, S5 = off) 되면 적분기 OP Amp(X3)의 오프셋 전압은 C4에 역극성으로 충전되고 비교기(X4)의 오프셋 전압은 적분 콘덴서 C4에 충전된다. 따라서 적분기의 오프셋 전압은 C4에 의해 자동으로 상쇄되고 C3에 충전된 비교기의 오프셋 전압은 적분기의 동작 개시점 전압으로 되어 이후 항상 비교기는 정확하게 오프셋 전압에서 적분의 시작과 종료를 인지하게 되므로 비교기의 오프셋 오차로 인한 A/D변환의 오차는 없어지게 된다.

적분기와 비교기는 마이크로프로세서의 소프트웨어 동작에 의해 2중 적분형 A/D 변환 회로의 기능을 수행하는 데 먼저 센서 입력신호 적분시는 아날로그 스위치 S4가 연결되어 미지입력 신호(Vin)에 대한 적분을 마이크로 프로세서에서 정해진 기간(T1) 동안 적분하고 일정시간후 S4가 끊어지고 S5가 연결되어 부의 기준전압(-Vref)으로 방전한다. 기준전압 방전시간을 T2 라하면 밀러적분기의 원리에 의해 입력 아날로그 신호 전압⁹⁾은

$$T_2 = \frac{T_1}{V_{ref}} V_m \quad (1)$$

의 관계로 나타나 T2를 카운트 값으로 하는 디지털 데이터로 나타내게 된다.

이때 비교기는 적분기의 방전이 끝날때 출력신호가 반전하여 CPU가 이를 인지하

여 내부 타이머의 카운터 값으로 A/D 변환을 계산하게 된다. 그리고 적분기와 비교기의 옅셋 전압은 적분과 방전이 종료된 후 다시 최초의 과정을 반복하므로써 각 각 보상되어 각 주기간의 OP Amp의 옅셋 전압에 의한 오차는 자동보상이 된다.

비교기에서 적분의 시작 및 방전의 종료는 CPU의 인터럽트 형태로 bit capture mode로서 내부의 카운터로서 디지털 변환된다. 동시에 CPU는 각 아날로그 스위치의 동작 타이밍 신호를 발생시키고 또한 드리프트 보정기간마다 전회의 데이터와 비교하여 그 보상값을 계산하고 D/A 컨버터에 출력하여 이를 아날로그 보상전압으로서 OP Amp 입력으로 가산된다.

4.3 드리프트의 보상과 필터의 버퍼절환

그림 3에서 로드셀 센서의 입력신호는 S_1 이 연결되고 S_2 가 끊어질때 입력되고 이때 X_2 는 S_3 가 연결되어 저역 통과기로 동작된다. 이중적분형 A/D변환 방식은 주로 DC에 가까운 미소신호를 정밀하게 변환하는 것에 주로 사용되므로 외부 노이즈에 의한 영향을 제거하기 위해 저역통과기가 대부분 필요하다. 본 설계에서는 아날로그 스위치 2개로서 필터와 버퍼의 치환이 가능한 구조의 butterworth 특성을 갖는 저역통과기로서 이때 전달함수 $H(S)$ 와 차단 주파수 f_c 는 다음과 같다.

$$H(s) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} / \left[S^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) S + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right] \quad (2)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3)$$

따라서 R과 C값의 변환에 의해 f_c 를 간단히 조절할 수 있으며 아날로그 스위치의 병렬 확장에 의해 f_c 도 프로그래머블이 가능하게 설계하였다. 그림 4는 로드셀 출력신호의 저역통과기 전단(a)와 후단(b)에서 측정된 FFT 스펙트럼을 보여준다.

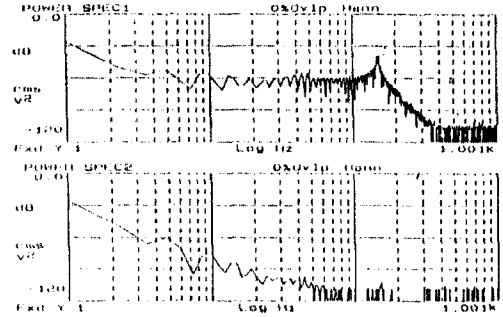


Fig. 4. FFT spectrums of load cell signal.
(a) Output of X_1 (B) Output of X_2

한편 X_1 증폭기의 드리프트 특성은 A/D 변환 정밀도에 중요한 영향을 미치므로 일정간격마다 S_1 은 개방시키고 S_2 를 단락, 그리고 S_3 를 개방함으로써 증폭기의 입력을 단락한 상태로 저역통과기를 버퍼로 절환하여 1회의 A/D변환을 한다. 변환된 디지털 데이터값은 직전값과 비교하여 차이가 난만큼의 CPU에서 연산된 디지털 값을 감산한 상태로 데이터 버스로 보내거나 D/A 컨버터에 전송하여 보정된 아날로그 출력으로 X_1 증폭기의 입력단에 보상한다.

이때 S_1 과 S_2 의 단속비율은 대략 20:1 이상의 비율로 X_1 증폭기의 특성에 따라 CPU프로그램으로 결정한다. 또한 X_2 가 버퍼로 절환되었다가 다시 S_3 가 ON되어 저역통과기로 되었을 때 C_1 과 C_2 에서의 직전 신호와의 충전된 전위차에 의한 전하의 방전으로 인하여 부정확한 A/D변환의 가능성이 있으므로 실험의 결과 드리프트 보정

후 3회의 A/D변환 데이터는 dummy 데이터로 처리할 필요가 있었다.

5. 소프트웨어의 구성과 동작

하드웨어로 아무리 정확히 A/D 변환을 하여도 로드셀 센서 자체의 물리적 특성, 입력신호, 전원회로 및 OP Amp 등의 특성으로 인하여 최종 디지털로 변환된 데이터는 주기적 혹은 불특정적으로 변환하거나 creep 현상이 발생한다¹²⁾. 특히 트럭스케일과 같은 중량을 감지하는 로드셀 센서의 신호와 그 A/D변환은 일반 다른 센서와는 달리 몇가지 특징이 있다¹³⁾. 즉,

- ① 영점은 로드셀 브릿지 저항의 초기 불균형 및 온도에 따른 탄성체의 열 수축 팽창으로 계속적으로 변한다. 즉 드리프트와 크리이프(creep) 특성을 갖는다.
- ② 중량의 측정은 센서 출력신호의 절대값이 아니라 직전의 값에 대한 상대적인 변위의 값만이 의미를 갖는다.
- ③ 하중의 가해지고 있는 상태에서는 안정시간 경과후는 디스플레이 되는 데이터의 흔들림이 있어서는 안되며 새로이 인가되는 하중에는 즉시 응답하여야 한다.
- ④ 중량을 제거했을때 센서의 히스테리시스특성에 의한 보정과 크리이프에 대한 보정이 필요하다.
- ⑤ 원래 로드셀 센서는 직선성이 우수하나 고정밀 계량의 경우 어느정도 직선성 보정을 요한다.
- ⑥ 트럭의 톤수가 다양하거나 적재재료의 종류와 경제적 가치에 따라 폭넓은 범위의 계량의 경우 일정구간(span) 별로 분해능을 변경시킬 필요가 있으며 그에 따른 A/D 변환의 분해능이 가변될 수 있어야 한다.

로드셀은 변위감지소자(strain gauge)가 휘스톤 브릿지 방식으로 연결되어 있어

느정도 온도변화에 자체보상이 되나 정밀도에 영향을 주는 온도 드리프트나 초기 영점 불평형은 자체 보상저항 삽입으로 제조 단계에서 대부분 허용범위 내에서 보상된다¹⁴⁾. 그러나 수감부의 자체온도 드리프트와 hysteresis, creep 특성은 그 변화가 예측불허의 복잡 다양한 요인을 가지고 있어 비직선성으로 영향을 나타내므로 부득이 A/D 변환후의 로드셀 센서의 특성에 맞춘 소프트웨어의 보상 알고리즘의 개발로 이를 해결하여야 한다. 또한 대부분의 CPU는 아키텍처상 인터럽트가 받아들여질 때 실행중의 명령 사이클의 종료후 인식되는 관계로 CPU 내부 타이머 인터럽트를 이용하는 경우 A/D 변환 카운트의 오차가 발생한다. 이는 CPU의 종류에 따라 다르나 본 연구에서는 Intel 8052 one chip CPU로서 두개의 내부 타이머를 이용하고 적절한 소프트웨어 처리를 가하여 오차를 ± 1 LSB 이내로 줄였다. 더우기 앞서 언급한 바와 같이 넓은 범위 계량의 경우 구간 별로 분해능을 가변시킬 필요가 있는 경우는 2중적분에 있어 미지 입력 신호 적분 시간(식(1)의 T)을 소프트웨어적으로 구간별로 변화시켜야 하는데 이는 범용의 분해능 고정형 A/D 컨버터에서는 불가능하나 본 연구에서는 소프트웨어적으로 가능하게 하여 한 종류의 로드셀로 다양한 용량의 중량계측을 가능하도록 하였다.

그림 5는 3개의 계량영역(triple-range)을 갖는 계량의 한 예로 영점과 최대 span

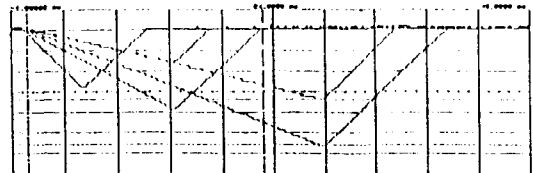


Fig. 5. A/D conversion waveforms of triple range weighing signal.

의 각각 3가지 2중적분 A/D 변환 파형을 축적형 오실로스코프로 합성한 것이다. 그림 6의 주 소프트웨어는 통상 계량시 stable, unstable 처리 루틴에서 표시디지트의 안정화 보정을 수행하며 영점 부근에서 auto zero tracking, 그리고 주기적으로 드리프트 보정을 행한다. 그림 7은 드리프트 보정시 제어신호와 적분기의 파형이다. 그림에서 (a)는 3개의 드리프트제어 신호가 나오는 기간중에서의 적분기의 출력신호 파형을 관찰한 것이다. 그림에서 적분파형이 불규칙하게 나타난 것은 측정한 디지털 축적형 오실로스코우프의 샘플링 타이밍에 따른 결과이다. 그림(b)는 이를 시간축상으로 확대한 것으로 센서신호 적분과 드리프트제어 신호발생시의 OP Amp의 드리프트신호 적분파형을 보여준다.

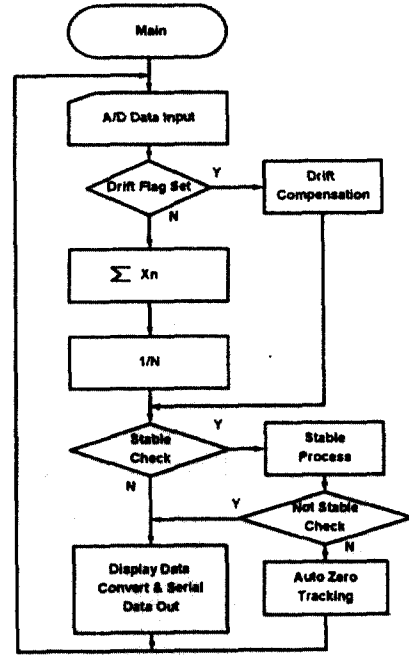


Fig. 6. Flow chart of main program.

6. 인디케이터와의 직렬통신과 켈리브레이션 데이터의 백업

인터페이스 보드에서 A/D변환된 로드셀의 디지털 데이터는 RS485 방식에 의한 쌍방향 직렬통신으로 전송되어 인디케이터로부터의 명령을 해독수행하고 결과데이터를 전송 및 수신하도록 하였다. 로드셀의 아날로그 출력에 대한 디지털치의 비례 변화구간 (span)은 측정용량이 변화되거나 Amp의 이득이 변화되면 틀려지게 되는데 이에대한 외부로부터의 켈리브레이션 세트의 기능이 필요하다. 또한, 이들 데이터는 전원 제거후에도 항상 유지될 하여야 함으로 one chip CPU에서 소용량의 serial NVRAM¹⁵⁾에 외부에서 준 직렬통신 명령으로 간편하게 켈리브레이션이 가능하도록 하여 갱신되는 데이터를 항상 기억 유지할 수 있게 하였다. zero point set와 auto span set 그리고 non linear compensation

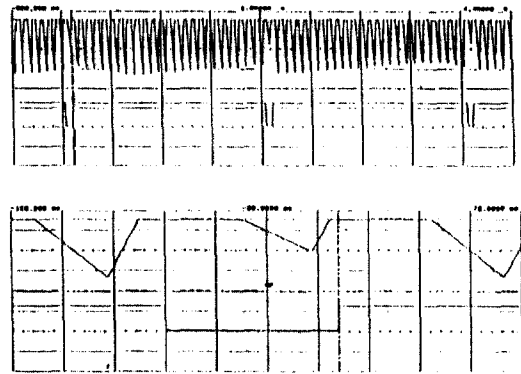


Fig. 7. Waveforms of A/D conversion and drift compensation signal.

process 등 초기 켈리브레이션 모드에서 완성된 켈리브레이션 데이터는 NVRAM에 저장되고 백업되어 전원이 차단되더라도 재수정 될때까지 기록 유지된다.

인터페이스 보드와 인디케이터는 쌍방향 디지털 통신으로 각 로드셀의 편차 보정과

초기 캘리브레이션을 인디케이터 측에서 조작하여 인터페이스 보드에 직렬 통신으로 데이터를 보내 NVRAM에 백업이 가능하도록하고 RS458 통신방식으로 각 로드셀과 연결되는 인터페이스 보드에 고유의 ID 번호를 갖게 함으로써 다수의 로드셀의 연결이 가능한 multi-drop 형태로 운용가능하게 하였다. 그림 8은 개발된 인터페이스 보드의 사진이다.

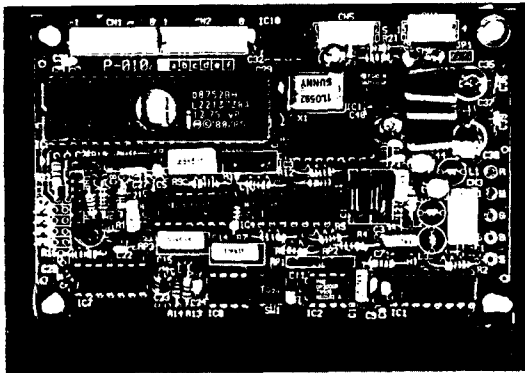


Fig. 8. Photo of developed smart interface board for truck scale load cell.

7. 결 론

트럭스케일용 로드셀 중량센서의 A/D 변환과 계량 신호를 안정하게 제어 계측할 수 있는 인터페이스 보드를 개발하였다. 트럭스케일 설치의 특성상 반고정 가변 저항이나 탭전환식의 조정요소를 제거하고 소프트웨어로서 캘리브레이션을 가능하게 하여 maintenance free가 가능하도록 고안하였다. 본 연구의 결과는 기존의 방식보다 low cost의 소자들로 구성이 가능하며 고정밀도이고 소프트웨어로서 가변 분해능이 가능하여 로드셀 센서 외에도 범용의 정밀 센서 계측기기의 A/D변환 모듈에의 실용적 이용도 기대된다. 아울러 remote

sensing이 필요한 conveyer scale이나 hopper scale과 같은 다수의 복합 계중 장치에 장착하는 multiple load cell용 인터페이스 모듈로서의 응용에도 향후 적극 기대된다.

후 기

본 연구는 1995년도 산학협동재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 연구수행에 적극적인 협조를 해준 (주)데스콤 기술연구소 관계자 여러분과 산학협동재단의 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 高橋 清, 센サエレクトロニクス p.241, 昭晃堂, 1984.
- [2] Mills Dean & Richard D. Donglas, "Semiconductor and Conventional Strain Gauges", *Academic Press*, pp45 ~ 75, 1962.
- [3] 渡邊 理, ひずみ ゲージとその應用 Ch.2, 日刊工業社, 1987.
- [4] Willis J. Tompkins & G. Webster, *Interfaceing Sensors to the IBM PC*, Prentice-Hall Inc., pp250 - 268, 1988.
- [5] Joseph J. Carr, *Sensors and Circuits*, Prentice-Hall Inc., pp1 - 37, 1993.
- [6] INTEL, *Embedded controller Handbook*, Intel Co., 1987.
- [7] 米山壽一, *Analog-to-Digital Converter*, オーム社, 1993.

- [8] F. H. Musa and R. C. Huntington, "A CMOS monolithic 3 · 1/2 digit A/D converter", *IEEE international Solid-state circuits conference Digest of technical papers (XIX)*, pp.144-145, 1986.
- [9] Gordon, B. M, "Linear electronic analog/digital conversion architectures, their origins, parameters limitations, and applications", *IEEE Trans, Circuit and systems, CAS-25(7)*, pp.391 ~ 418, 1978.
- [10] P. Gray and R. Meyer, "MOS operational amplifier design-A tutorial overview", *IEEE J. Solid State Circuits, Vol. SC-17*, pp.969-982, DEC. 1982.
- [11] Intersil, *A/D converter databook*, 1990.
- [12] David M. Auslander & Paul Saques, *Microprocessor for Measurement and control*, 1981.
- [13] 박찬원, "자동 계량 콘베어 설비에서의 중량 센서 신호처리에 관한 연구" *조명전기설비 학회 제8권 5호*, pp 428-434, 1994.
- [14] 박찬원, 민남기, "능동회로에 의해 보상된 이중빔 로드셀의 개발" *대한전기학회지 제 44권 8호*, pp.1052 - 1062, 1995.
- [15] Asahi Kasei microsystem, *E²P ROM for microprocessors*, JAPAN 1992.