

동하중 측정 신호처리의 개발에 관한 연구

A study on the development of dynamic weighing measurement system

박찬원* 신형재** 이영준** 신영균** 안광희***
Park, Chan-Won* Shin, Hyoung-Jae** Lee, Young-Jun** Shin, Young-kyun** Ann, Kwang-Hee***

ABSTRACT

A high speed and stable A/D conversion data process is required to weigh a mass on moving conveyer weighing platter. This paper presents a new method to obtain stable and fast automatic weighing A/D conversion data process. Dynamic weighing system which is constructed with dual load cell is realized by the stable A/D conversion data process algorithm using DSP. The proposed method is applied to the real design, and that experimental results showed good performances of the weighing stability.

Keywords : load cell, dynamic weighing, A/D conversion, DSP

1. 서론

정지 상태에서 수직으로 작용하는 중력 하중에 의해서만 계량하는 정지 하중 측정에 비해 동하중의 측정은 보다 정확하고 신속한 자동 계량 설비가 요구되고 있는데, 대부분 수입의 고가품에 의존하고 현재 국내 설계 및 생산 기술은 거의 전무한 실정이다.[1][2]

이에 관련된 연구로서 Auslander등에 의한 자동계량에 관한 실험적 연구가 있는데 자동계량의 개념과 그에 관한 weighing algorithm은 주목할만 하나 실험의 대상이 낮은 분해능의 prototype의 센서를 이용한 관계로 실용적으로 현장에서의 이용에는 미흡한 점이 많이 있다.[3][4] 정지간이 아닌 이동간 질량 측정(Dynamic weighing of mass)에 관한 몇 가지 기존 연구들이 보고되어 있는데, 대부분 소프트웨어 알고리즘에 의한 고속 측정값예측에 관한 논문들로서 하드웨어 신호처리 부분에서는 상당히 고가인 범용 A/D변환장치를 이용하여 제품화를 위한 실용성에는

문제가 많은 것으로 평가되었다. 따라서 이에 대한 센서 신호의 분석과 진동에 대한 필터의 설계 그리고 A/D 변환된 데이터의 안정화 처리는 하드웨어와 소프트웨어 두 가지의 복합적 고려 요소에 의해 구현이 가능하다.[2] 또한, 프레스나 모터 등의 운전에 의한 바닥 진동이 발생하는 장소에서 빠르고 정확한 동하중 측정의 구현은 현실적으로 매우 어려운 문제이다.[5][6]

이에 본 연구에서는 dual load cell 시스템을 사용하여 보다 정확하고 정밀한 동하중 측정을 구현하고자 하였고, 속도가 빠른 자동계량 시스템의 구현에 주안점을 두어 고속 디지털 연산 처리를 목적으로 한 Digital Signal Processor(DSP)를 이용하여 중량 센서 신호의 A/D변환과 안정화 등의 성능 개선 방법을 제시하고자 한다.[7][8][9]

2. 동하중 신호처리 시스템의 하드웨어 구성

하드웨어의 구성은 Fig. 1과 같다. 로드셀에 압력이 가해지면 로드셀에서 하중에 비례하는 수 $\mu V \sim$ 수십mV 범위의 미세한 전압의 변화가 발생한다.[7][10][11] 이 전압을 amplifier에서 일정 크기로 전압 증폭을 하고 A/D board에서 샘플링을 수행함으로써 디지털 데이터로 변환한다.[12] 변환된 디지털

* 강원대학교 전기공학과 교수

** 강원대학교 대학원 전기공학과 석사 과정

*** 국립 기술 품질원

털 데이터는 DSP board에서 PC에서의 명령에 의한 연산과정을 거치고, 연산이 수행된 데이터는 PC로 보내진다. PC는 DSP board로부터 받은 데이터를 monitor에 세그먼트 디지털식 중량 표시 및 실시간 중량 변화 그래프로 디스플레이 하는 시스템을 구성하였다.

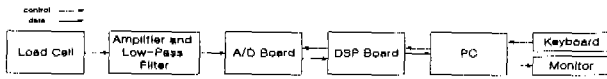


Fig. 177. Block diagram of dynamic weighing measurement system

2.1. 동하중 센싱 및 기구부

본 연구에서 사용된 하중 센서는 물체의 중량과 바닥 진동값이 함께 가해지는 센서와, 진동만이 가해지는 센서로 구성되어 있다. 하중 센서로는 2개의 로드셀을 사용하였다. 실제로 중량을 측정하는 중량 로드셀에는 계량대 위의 물체 중량과 함께 주변 환경에 의해 생기는 바닥 진동도 같이 포함되어 측정된다. 진동 검출 로드셀(dummy load cell)에서는 순수 진동만을 측정할 수 있도록 Fig. 2와 같이 계량대가 기구적으로 연결되어 있지 않은 상태를 유지시켰다. Fig. 2는 동하중 측정장치의 개략도이다.

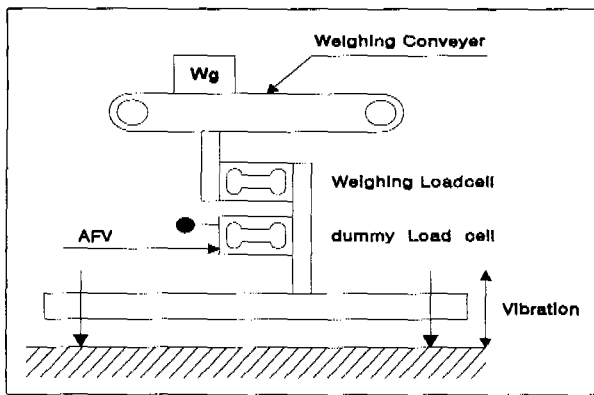


Fig. 178. Dynamic weighing measurement system

그림과 같이 계량기의 설치면 진동을 검출하기 위한 dummy 로드셀을 탑재하여 AFV(Anti Floor Vibration) 기능을 부가한 것으로서 프레스와 같은 공작 기계의 바닥 진동이 있는 환경 하에서도 AFV 기능에 의해 계량용 로드셀의 출력에서 진동에 의한 오차를 제거 할 수 있으므로 고정도 계량이 가능하다. 즉 중량 w 는

$$W = \text{계량용 로드셀의 출력} - \text{AFV 출력} \quad (1)$$

으로 계산된다.

2.2. Amplifier

로드셀에서 측정되는 전압의 변화는 수 μV 에서 수 mV 로 아주 미세하기 때문에, 이를 바로 A/D 변환하기에는 정밀도나 정확성에서 문제점이 많아 적합하지 않다. 따라서 로드셀의 출력을 증폭하여 A/D 변환을 수행한다. 다음 Fig. 3은 본 연구에 사용된 증폭기와 LPF의 회로도이다.

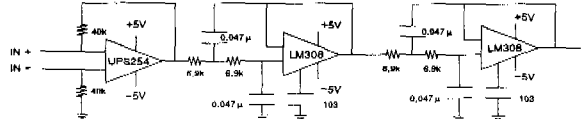


Fig. 179. Amplifier and Low-Pass Filter

그림과 같이 로드셀의 출력이 IN+와 IN- 단자에 인가되어 원하는 레벨까지 증폭시키고 노이즈(Noise) 제거를 위해 2단 butterworth low-Pass Filter(LPF)를 통과시킨다. 증폭기는 고정밀 저드립트형의 OP amp($\mu PC254$)를 사용하였으며 증폭이득을 결정하는 입력 저항은 로드셀의 스트레인게이지에 대한 테브난 저항값을 이용하였다.

여기서 중량 로드셀과 진동 감지 로드셀에 동시에 가해지는 바닥 진동은 같지만, 두 로드셀의 특성이 같지 않다면 A/D 변환된 바닥 진동에 대한 디지털 데이터는 서로 같지 않게 되어 정확한 중량을 계산할 수 없다. 따라서 진동에 대한 A/D 변환값이 같도록 각각 두 로드셀에 대한 증폭비율을 조절하였다.

2.3. A/D board

A/D board의 입력 신호는 최대 $\pm 15V$ 까지 가능하며 입력 아날로그 신호 두 채널에 대해 16bit의 분해능을 갖고 있다. 샘플링 속도는 최대 48kHz까지 구현할 수 있으며 이 속도는 프로그램으로 조절이 가능하다. 이득 조절 또한 입력 신호의 full scale이 $\pm 10.0V$, $\pm 1.0V$, 또는 $\pm 100.0mV$ 에 대해 프로그램으로 1배, 10배, 또는 100배의 조절이 가능하다. 또한 두 개의 입력이득의 미소한 조정을 위하여 정밀 포텐서미터를 스팬저항값으로 LPF의 출력단에 부가하였다.

Fig. 4는 A/D board의 블록도이고 그 센싱 순서는 다음과 같다. 센서에서 입력된 아날로그 신호를 DSP의 프로그램에 의한 programmable gain amplifier에서 증폭을 한 후, 노이즈 제거와 앨리어싱 억제를 위한 low pass filter를 거쳐, DSP 프로그램에서 정의된 샘플링 시간에 맞게 A/D 컨버터에서 디지털 데

이터로 변환한다. 이 변환된 디지털 데이터는 내부 ADC 데이터 레지스터에 저장되고, 프로그램으로 이 레지스터에서 데이터를 읽어 DSP 메모리에 저장한다. ADC 데이터 레지스터는 한번 데이터를 읽어 가면 클리어 된다.

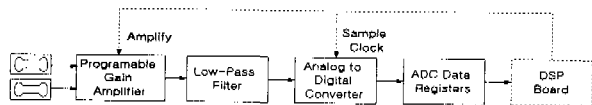


Fig. 180. Block diagram of A/D board

2.4. DSP와의 데이터 통신

본 연구에서는 DSP와 PC간의 데이터 교환을 시리얼 혹은 패러렐 통신을 이용하는 것이 아니라, DSP의 메모리의 한 블록을 PC의 메모리 공간에 링크시킴으로써 DSP나 PC는 각각 자신의 메모리 공간에 읽고 쓰기를 하면서 자유롭게 데이터를 교환하는 방식을 취하고 있다.

이 방법은 DSP의 외부 메모리를 DPRAM (Dual-port RAM)을 사용하여 Fig. 5와 같이 DSP 메모리 맵의 어느 일정 구간을 양방향 액세스가 가능하게 하는 방법이다. DPRAM의 한쪽은 DSP의 메모리 영역이 되고 다른 한쪽은 PC의 메모리 영역으로 설정되어 서로 다른 메모리 번지를 갖지만, 실은 같은 메모리를 사용하는 것이다.

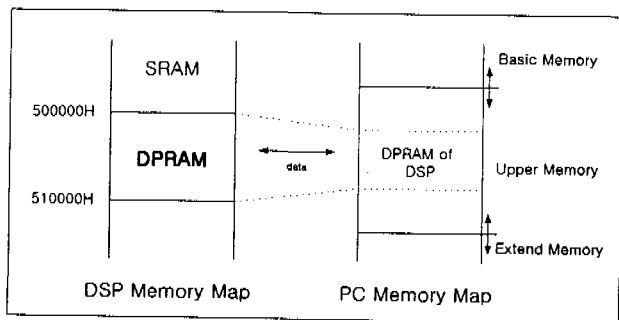


Fig. 181. Communication using DPRAM

그림과 같이 DSP 메모리 번지 500000H에서 50FFFFH까지 DPRAM으로 구성하였고, PC에서는 상위 메모리 번지에 DPRAM 영역을 반영시켰다. 여기서 DSP의 데이터 버스는 32비트이고, PC의 데이터 버스는 16비트이므로 PC에서는 2번을 읽어가야 DSP로부터 한 개의 32비트 워드를 읽는 것이 된다.

이러한 방식은 자신의 메모리 영역에 자유롭게 읽고 쓰는 것만으로 통신이 이루어지므로 다른 통신 방법에서와 같은 복잡한 설정이 필요하지 않다.

2.5. PC

본 연구에서 사용된 DSP board와 A/D board는 모두 인터페이스 방식으로 PC ISA 슬롯에 장착하였다. board간의 데이터 이동은 직접 연결된 케이블을 이용하고 DSP board와 PC 간의 데이터 이동은 ISA 슬롯을 통해 이루어진다.

3. 신호처리 소프트웨어 구성과 동작

본 연구에서의 소프트웨어는 A/D 인터페이스 입력을 처리하는 DSP측 소프트웨어와 모니터 화면 표시 및 board간의 통신을 하기 위한 PC측 소프트웨어로 구성되어 있다.

3.1. DSP 측 프로그램

기본적으로 DSP측 프로그램은 PC에서 각 명령을 받아 기능별 수행을 하게 구성하였다. Fig. 6은 본 연구에서 개발된 DSP측 소프트웨어의 흐름도이다.

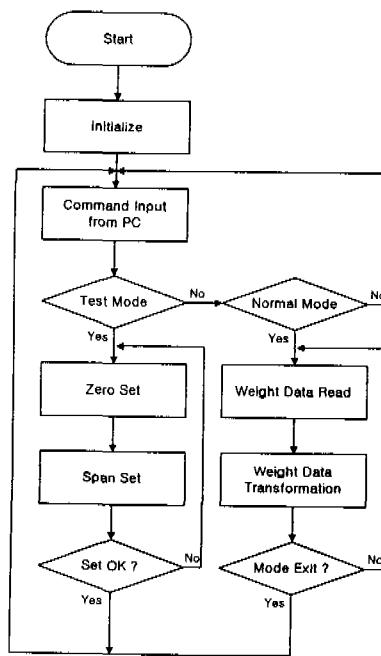


Fig. 182. Flowchart of the DSP program

(1) 초기화

초기화에서는 DSP board와 A/D를 포함하고 있는 I/O board에 대한 각 설정, 즉 DSP의 내부 버스 설정, 인터럽트 및 인터럽트 우선 순위, DPRAM address와 I/O board의 A/D에 대한 샘플링 시간, 내부 레지스터, 그리고 각 채널별 이득 등이 초기화된

다.

(2) Test Mode

test mode는 압력 센서로부터의 아날로그 신호를 A/D하여 얻은 디지털 신호를 일반적인 중량 표시값으로 변환하기 위한 기준을 설정하는 모드이다.

① Zero Set에서는 압력센서에 계량대 이외의 아무런 하중이 가해지지 않은 상태에서 A/D 값을 읽어, 그 값을 일반적인 중량 표시 0으로 설정한다.

② Span Set에서는 압력센서에서 계량할 최대 중량을 설정한다. 우선 계량할 최대 하중을 가하고, 이때의 A/D 값을 일반적인 중량 표시의 최대값으로 설정한다.

이로써 $y=ax+b$ 의 형식의 관계식을 얻을 수 있고 이후 계량될 동하중을 일반적인 중량 표시로 표현할 수 있다.

(3) Normal Mode

normal mode에서는 I/O board에서 A/D된 신호를 test mode에서 정의된 $y = ax + b$ 의 관계식을 이용해 중량 표시값으로 변환하여 저장한다. 그 후 저장된 10개의 데이터의 평균을 내어 미세한 오차를 줄이고, 다시 이 평균값이 연속 4회 이상 계속 유지될 경우에만 계측에 유효한 데이터로 인정하여 PC로 전송한다. 이는 샘플링 중간의 과도한 변동은 에러로 처리하여 안정된 데이터로 인정하지 않는 것이다.

(4) 인터럽트 서비스 루틴

본 연구에서는 인터럽트가 발생될 때마다 A/D 값을 DSP로 읽어 오도록 프로그램 하였다. 인터럽트는 초기화에서 설정된 샘플링주기 마다 발생한다. Fig. 7은 인터럽트 서비스 루틴의 흐름도이다.

인터럽트가 발생되면 채널1의 중량 로드셀 신호와 채널 2의 더미 로드셀 신호를 메모리에 저장하고, 각 로드셀의 A/D값이 0보다 작은지 검사한다. 만약 0보다 작으면 절대값을 구한 후 하위 16비트 이동시키고 다시 부호 비트를 세트 시켜 음의 값으로 만든다. 0보다 크면 하위 16비트 이동만 수행한다. 이는 각 채널의 A/D값은 상위 16비트만 유효하기 때문에 하위 16비트로 이동하여 연산하기 위한 과정이다.

위 과정이 끝나면 채널 1의 신호에서 채널 2의 신호를 빼, 두 신호의 차를 구해 저장한다. 주프로그램에서는 이 차 값을 이용하여 중량을 구한다. 그리고 다음 인터럽트를 발생시키기 위해 DSP의 인터럽트 플래그를 클리어하고 리턴 한다.

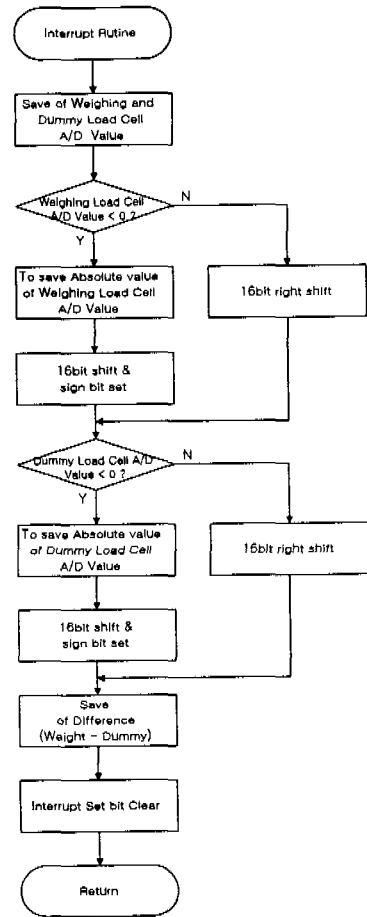


Fig. 183. Flowchart of the interrupt service routine

3.2. PC측 프로그램

PC측 프로그램은 DSP board에서 DPRAM을 통해 데이터를 받아 숫자와 그래프로 표시한다. 또 DSP에서의 데이터를 초기 설정하고, 그 환경을 저장하는 기능을 수행한다. 다음 Fig. 8은 PC측 소프트웨어의 흐름도이다.

(1) DPRAM 설정

일반적으로 PC와 인터페이스간의 통신은 RS-232 혹은 RS-485 같은 시리얼 포트를 이용하여 수행된다. 그러나 본 연구에서는 DSP board가 PC 인터페이스임을 감안하여 DSP의 메모리의 한 블록을 PC의 메모리 맵에 매칭시키는 DPRAM 형식을 취해 통신을 수행하도록 하였다. 이는 DSP측 프로그램에서 DPRAM영역에 해당하는 메모리에 데이터를 저장하고, PC측에서는 그에 해당되는 메모리에서 데이터를 불러오는 것으로 DSP와 PC간의 통신이 수행되는 것이다.

PC에서의 DPRAM 영역은 상위 메모리에 위치하고 그 사용 메모리 번지를 DSP에 알려 주어야 한다.

이 번지는 고정되어 있지 않고 DSP에 알려 주는 것으로 설정되는 유동성을 가진다.

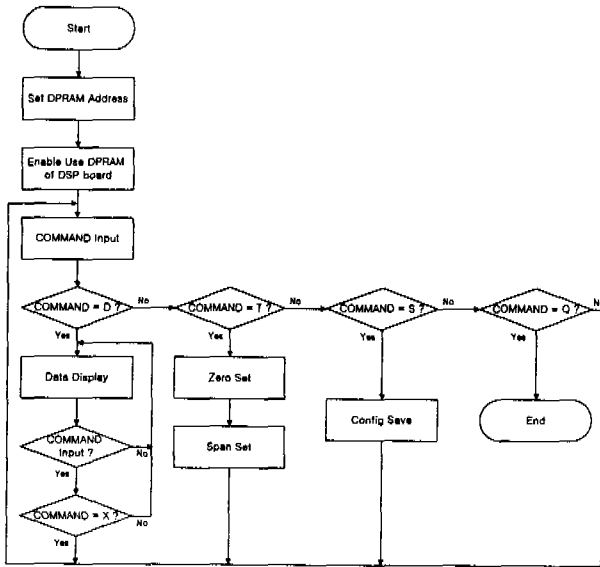


Fig. 184. Flowchart of the PC program

(2) Monitor Display 와 Command 구성

Fig. 9는 본 연구에서 개발한 PC의 동하중 중량 표시 디스플레이 화면이다.

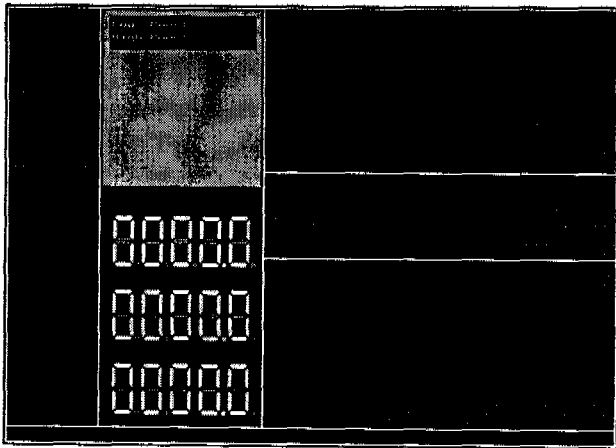


Fig. 185. Initial display of the PC program

① 화면 구성

화면의 좌측은 각종 명령어로 구성했고 가운데는 현재 설정 정보와 중간 아래에 세그먼트식 디스플레이로 중량 로드셀 입력, 진동 감지 로드셀 입력과 동하중 중량 표시를 하게 하였고, 화면 우측에는 중량 로드셀과 진동 감지 로드셀의 입력 파형, 그리고 동하중의 실제 중량을 그래프 형식으로 출력한다.

② 명령어

· Low Count

계량대 위에 아무런 압력이 없을 때의 A/D 값을 중량 표시값으로 변환하는데 이때의 중량 표시값을 통상 0으로 정하지만 사용자가 임의로 이때의 A/D 값에 해당하는 중량 표시값을 설정할 때 사용한다.

· High Count

계량대에 최대 측정 중량을 가했을 때의 A/D 값을 중량 표시값으로 변환하는데 이 중량 표시값을 임의로 정의 할 때 사용한다.

· Zero set

중량 표시값의 0kg 설정을 위한 DSP 보드에서의 Zero Set을 실행시킬 때 사용한다.

· Span set

중량 표시의 최대값 설정을 위한 DSP 보드에서의 Span Set을 실행시킬 때 사용한다.

· Config Sav

Zero Count, Full Count, Zero set 그리고 Span set에서 설정된 값의 저장한다.

· Default

미리 저장되어 있던 Zero Count, Full Count, Zero set 그리고 Span set에서 설정된 값의 다시 불러 사용한다.

· Run

중량 로드셀과 진동 측정 로드셀의 두 A/D 값과 중량 표시값으로 환산된 동하중을 세그먼트식 표시로 출력하고 각각의 변동을 실시간 그래프 형식으로 모니터에 디스플레이 한다.

· Exit

프로그램을 종료한다.

4. 동하중 시스템 실험 및 측정 결과

4.1. 시스템 구성

Fig. 10은 본 연구에서 구성한 동하중 측정 시스템이다.

그림에서와 같이 PC에서 중량 측정 로드셀과 진동 측정 로드셀의 아날로그 신호를 각각 증폭기와 LPF를 거쳐 DSP로 보내고, 이 아날로그 신호를 ISA 슬롯에 장착된 A/D 보드에서 디지털 데이터로 변환 과정을 거친 후, 역시 ISA 슬롯에 장착된 DSP보드에서 연산과정을 거쳐 모니터 상에 연산 결과를 보여주고, 모터제어를 통해 물체의 이동 속도를 제어하도록 하였다.

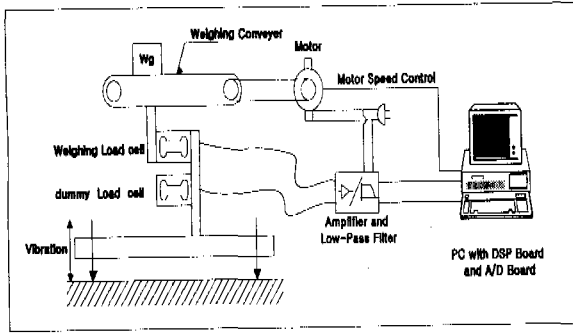


Fig. 186. Schematic diagram of the dynamic weighing measurement system

Fig. 11은 본 연구에서 사용된 모터 속도 제어 회로이다. 모터는 직류 브러시리스 모터를 사용하였으며 속도의 제어는 전용 제어기의 가변 저항에 의한 수동모드와 PC에 의한 프리셋트 방법을 병행하였다.

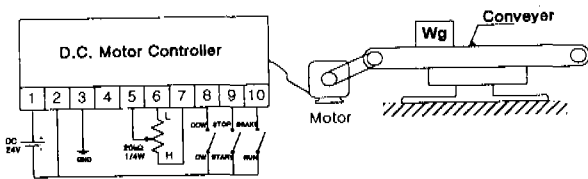


Fig. 187. Motor controller for conveyer speed

콘베어 위의 피계량물의 이동 속도는 최저 0.2%부터 최고 2.0%까지 변화시켜 각 속도에서 계측을 실행하였다. 그리고 임의의 바닥 진동을 만들어 주기 위해 편심 부하 모터를 사용하여 진동 발생기를 제작하였으며, 진동의 크기는 편심 부하 모터의 속도 제어에 의해 조절하였다.

이러한 과정에서 동하중에 의한 센서의 아날로그 파형을 LPF의 입력단과 출력단에서 비교하고, 또 그 변화량을 PC의 모니터 상에서 확인하였다. 또 진동 강도에 따른 계량 오차 비교와 특성과 계량 속도에 대한 특성을 분석하였다.

Fig. 12는 본 연구에서 사용된 콘베어 계량부의 사진이다.

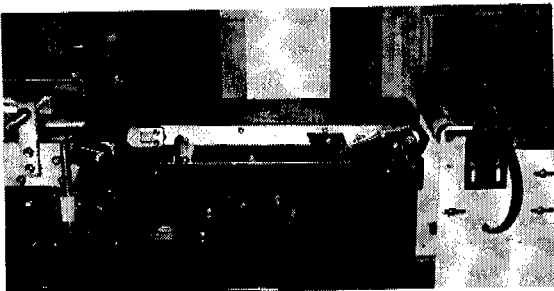


Fig. 188. Photo of weighing conveyor

4.2. LPF 입력단 신호와 출력단의 신호 비교

Fig. 13은 계량대에 중량이 가해질 때 LPF의 입력단에서 측정된 중량 측정 로드셀의 신호와 LPF를 통과한 후의 파형을 비교한 것이고, Fig. 14는 진동 측정 로드셀의 LPF의 입력단과 출력단의 파형을 비교한 것으로 표시효과를 극대화하기 위해 계량대 위의 충격을 기구적으로 크게하여 측정된 것이다.

물체가 계량대에 올려질 때 생기는 진동 파형이 LPF 통과 이후에는 상당히 감쇄된 것을 알 수 있다.

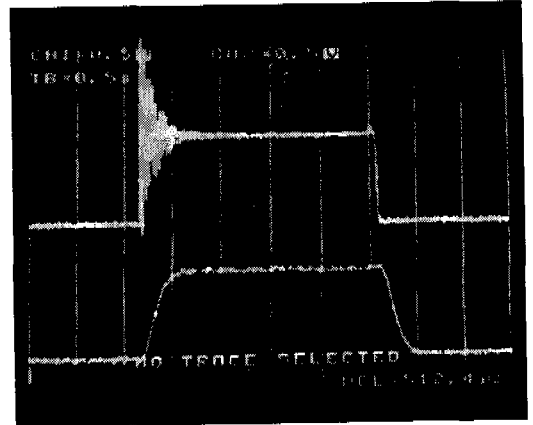


Fig. 189. LPF input(up) and output(down) signal of weighing load cell

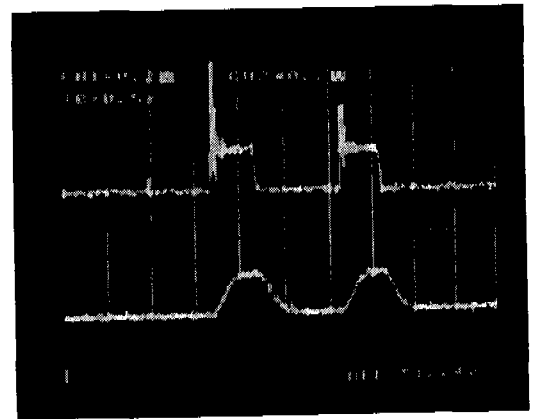


Fig. 190. LPF input(up) and output(down) signal of dummy load cell

4.3. 개발된 프로그램에서의 그래픽 출력

Fig. 15는 개발된 PC 소프트웨어를 사용하여 나타낸 동하중 측정 결과이다.

진동 측정 로드셀의 파형(가운데)을 보면 중량 측정기간 동안 진동이 가해진 것을 알 수 있다. 이러한 진동은 중량 측정 로드셀의 파형(위)에 그대로 오차가 되어 나타나 있지만 진동성분이 제거된 파형(아래)에서는 이러한 진동 오차가 상당히 감쇄되었음을

알 수 있다.

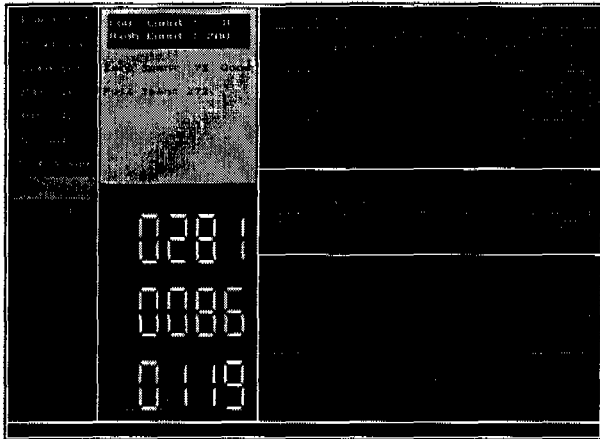


Fig. 191. Example display of the PC program

Fig. 16은 기존 방식과 본 연구에서 제시한 AFV 방식의 바닥 진동강도에 따른 계량 오차 효과의 비교이다. 기존 방식(conventional)은 터미 로드셀을 사용하지 않고 중량 로드셀 하나만을 사용하여 계측하는 방식이다. 여기서 y축은 정밀도 1/1000의 full scale에 대한 오차이고 x축은 본 연구에서 사용한 진동 발생 장치의 진동 강도를 6단계로 나눈 상대적인 진동 강도(relative vibration strength)이다. 피계량물의 이동 속도는 계량 로드셀의 통과 개수를 75개/분으로 하였다.

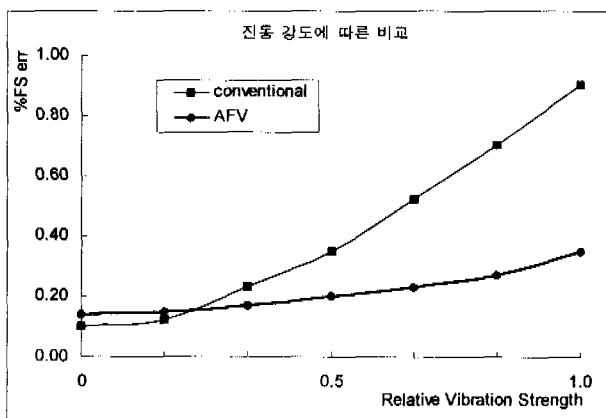


Fig. 192. Comparison of measurement error effects under floor vibration

그림에서와 같이 바닥 진동의 폭이 커짐에 따라 AFV 방식의 계측 오차가 기존 방식의 계측 오차보다 현저히 작음을 알 수 있다. 하지만 바닥 진동이 작은 장소에서는 기존 방식의 오차가 AFV 방식의 계측 오차 보다 작았다. 이는 DSP의 디지털 신호 변

환 처리 과정에서 생긴 오차로 생각되며, 추후에 개선하여야 할 과제이다.

Fig. 17은 바닥 진동 강도에 따른 계량 속도 효과의 비교이다. 여기서 y축은 허용오차 0.1%내의 분당 계측 가능한 피계량물의 계량 콘베어 통과 개수이고, x축은 Fig. 16과 같다.

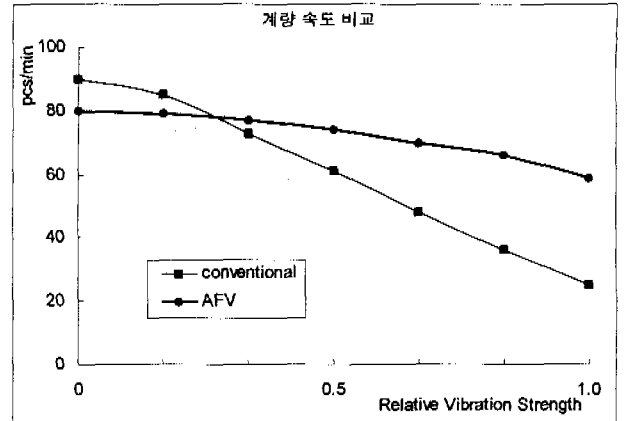


Fig. 193. Comparison of measurement speed effects under floor vibration

그림에서와 같이 바닥 진동의 폭이 커짐에 따라 AFV 방식을 적용한 피계량물의 계량처리 속도가 기존 계량 방식의 경우 보다 더 양호함을 알 수 있다. 하지만 이 실험에서도 바닥 진동이 작은 장소에서는 기존 계량 방식이 AFV 방식 보다 더 좋은 특성을 나타냈다. 이 또한 DSP의 디지털 신호 변환 처리 과정에서 생긴 오차로 생각되며, 추후에 개선할 연구 과제이다.

5. 결론

DSP와 로드셀을 이용하여 동하중 측정 시스템을 만들었고 이에 관련된 프로그램을 개발하였다. 저가형 DSP를 사용하여 경제적이면서도 쉽게 실시간으로 로드셀에 가해지는 중량과 진동 데이터를 관찰할 수 있다. 또 일반적인 통신 방법에서 탈피하여 Dual Port RAM을 사용함으로써 DSP와 PC 간의 통신이 간략, 간편하고 DSP가 자신의 메모리 저장과 동시에 PC에서 그 데이터를 가져갈 수 있어 실시간 데이터 처리에 적합하다.

개발된 프로그램은 동하중의 변화량을 그대로 그래프로 보여주는 것은 물론이고, 중량 측정 로드셀의 입력 파형과 진동 측정 로드셀의 입력 파형 또한 각각 그래프로 보여주어 두 로드셀의 파형을 비교, 관

찰할 수 있다. 뿐만 아니라 로드셀의 디지털 데이터와 중량 표시값도 쉽게 읽을 수 있도록 세그먼트 형식으로 표시하였다.

Circuit and systems CAS-25(7), pp.391-418,1

본 논문에서 제시한 방법은 저가형 DSP를 사용하여 실시간 데이터 처리와 더불어 경제적이면서도 효율적인 동하중 측정을 가능하게 함으로써 관련분야에의 적용이 기대된다.

참고문헌

- [1] W.J.Tompkins and G.Webster, *Interfacing Sensors to the IBM PC*, Prentice-Hall Inc., 1988.
- [2] Woo-Gab Lee, Jin-Wan Chung, Kwang-Pyo Kim, "Development of Speed Accuracy for Mass Measurements in Check Weighers and Conveyor Belt Scales", *Advanced Measurement of Force and Mass*, pp.23-28, 1994.
- [3] David M.Auslander & Paul Saques, *Microprocessor for Measurement and control*, 1981.
- [4] Joseph T.Kung, Regan N.Mills, and Hae-Seung Lee, "Digital Cancellation of Noise and Offset for Capacitive measurement", vol. 42, NO. 5, OCT. 1993.
- [5] Masao, Osawa, *New Technology in Weight Control with Checkweighers and Automatic Combination Weighers*, 91' *Advanced Techniques in automation*, (Korean), Seoul, 1991.
- [6] Ono,T, "Dynamic Weighing of Mass", *Instrumentation and Automation*, vol. 12, no. 2, 35(1984).
- [7] 박찬원, 민남기, 능동회로에 의해 온도 보상된 이중 범 로드셀의 개발, *대한전기학회*, 제44권, 제8호, pp. 1057-1062, 1995.
- [8] 小島之夫, "비움 형 로드 셀의 비선형 특성," *日本機械學會論文集* 57卷 540號, pp.2746-2768, 1991.
- [9] 渡邊理, *히즈미 게이지 도서의 응용 Ch. 2*, 日刊工業社, 1987.
- [10] A.Bray and G.Barbato, In: *Sensors vol. 7*, H.H.Bau, N.F.deRoosj. B.Kloock(eds): Weinheim (Germany) : VCH-Verlag, pp.57-103, 1993.
- [11] 박찬원, 안광희, "계량설비용 디지털 출력 로드셀의 개발에 관한 연구" *한국조명 전기설비학회논문집*, Vol.11, No.11, (1997)
- [12] Gordon, B., "Linear electronic analog/digital conversion architectures, origins, parameters, limitations, and applications:", *IEEE Trans.*