

본 연구는 97년도 교육부 학술 연구조성비(KRF-97-018-E00001) 에 의하여 연구되었음

## 고속충돌시험기 개발 및 부재의 충돌특성 실험에 관한 연구 ( I )

강신유\* , 장인배\* , 김현영\* , 정규진\*\* , 박경환\*\*

### A Study on the Development of Test Rig for High Speed Frontal Crash and Test of Members ( I )

S. Y. Kang\*, I. B. Chang\*, H. Y. Kim\*, G. J. Chung\*\* and K. H. Park\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, a simple high-speed crash test rig for members of vehicle was developed for the improvement of crashworthiness of vehicle's side rail. The cart hanging the specimen is accelerated up to 35 mph by the force of freely dropping weight and 1:3 accelerating pulleys. The cart with shock absorbers travels on the rail roads, so it does not transfer any additional vibration to the specimen. To measure the test results, two types of accelerator are considered. the one is a strain gage type and the other is a piezo type. The test rig is rated good to test the specimen like a side rail of vehicle as developing the vehicle's structures in the early design stage.

**Key Words** : Crash test rig(충돌시험기), Crashworthiness(충돌특성), Accelerating pulley(가속 풀리), Side rail(측면 부재), Accelerator(가속도계)

#### 1. 서론

자동차, 철도차량, 항공기 등과 같은 운송수단은 현대 사회에 있어 가장 필요한 운송수단으로 최근에는 고성능화와 경량화를 위한 노력을 필요로 하고 있다. 따라서, 이러한 추세에 따른 운송수단의 안전성 확보는 중요한 과제이다. 운송수단의 충돌시, 에너지의 대부분을 차체에서 흡수해야 승객의 인전이 보장되므로, 충돌에너지를 충분히 흡수할 수 있는 차체를 설계하기 위해서는 충돌 에너지를 흡수하는 부재의 특성이 명확히 규명되어야 한다. HEV(Hybrid Electric Vehicle)의 경우 차체의 대부분

은 사각관과 같은 관형부재로 구성되어 있어 안전도측면을 고려한 설계를 하기 위해서는 각각의 부재들의 충돌특성에 관한 연구가 필수적이라고 하겠다. 안전도측면을 고려한 설계를 위한 연구는 크게 두 분야로 진행되고 있으며 첫째는 수치 모델을 이용한 충돌해석이며, 둘째는 실제모델에 의한 실험으로 진행되고 있다.

차체부재에 관한 충돌실험은 기존의 실차 충돌 실험장비에 부재를 대차에 부착하여 실험을 실시하는 방법과 자유낙하하는 추의 아래쪽에 부재를 고정하여 충돌시키는 방법을 사용하고 있다.<sup>(1)</sup> 기존의 실차 충돌장비에 대차를 이용하여 부재실험을

\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

\*\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학과 대학원

할 경우 고가의 실험장비를 사용해야함으로 경비가 많이 들며, 부재실험용 전용 대차가 없는 경우 대부분 보유하고 있는 대차의 무게가 1톤 가량됨으로 운동에너지가 과다하여 대차의 손상이 우려되며 시험편의 변형도 과다하여 시험편의 충돌특성을 파악하기가 용이하지 못하였다. 또한, 견인시 노면에서 발생하는 가진이 시험편을 가진시켜 정확히 수평으로 충돌을 시키지 못하므로 단품 부재의 충돌특성을 연구하기에는 부적절하였다.<sup>(2)</sup>

자유낙하 추를 이용하는 실험장치의 경우 충돌시 등속도 충돌이 되지 못하며, 낙하하는 추의 평행이 유지되지 못하여 실험의 오차가 발생할 가

능성이 있으며, NCAP 정면충돌실험의 경우와 같이 35 mph와 같은 빠른 속도를 내기 위해서는 타워의 높이를 이론상 13 m 이상으로 해야하는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 상기 두 시스템의 단점을 보완한 실험장치를 구성하고자 한다. 개발하고자 하는 시스템은 자유낙하방식으로 운동에너지를 발생함에 따라 설치비가 적게 들며, 도르레의 원리를 이용하여 증속을 시키므로 타워의 높이도 5 m 정도면 35 mph 속도를 구현할 수 있다.

이 시스템을 이용하여 승용차 측면부재와 같은 단품, 또는 충돌에너지 흡수용 부재를 35 mph속도로 충돌실험을 수행하고, 그 결과를 제시하고자 한다.

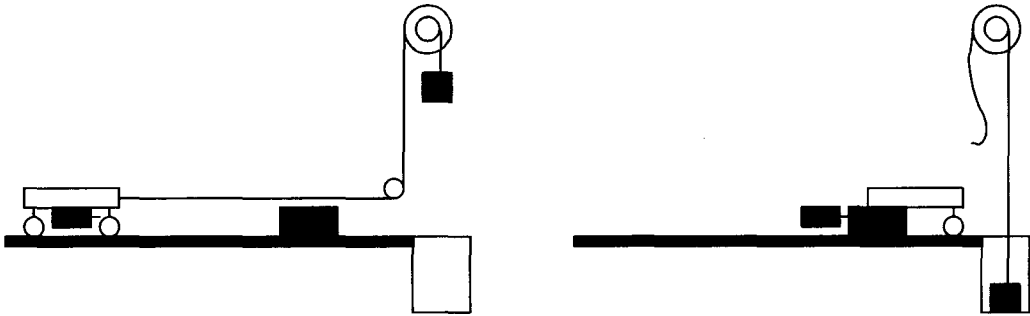


Fig. 1 The Principle of Crash Test Rig

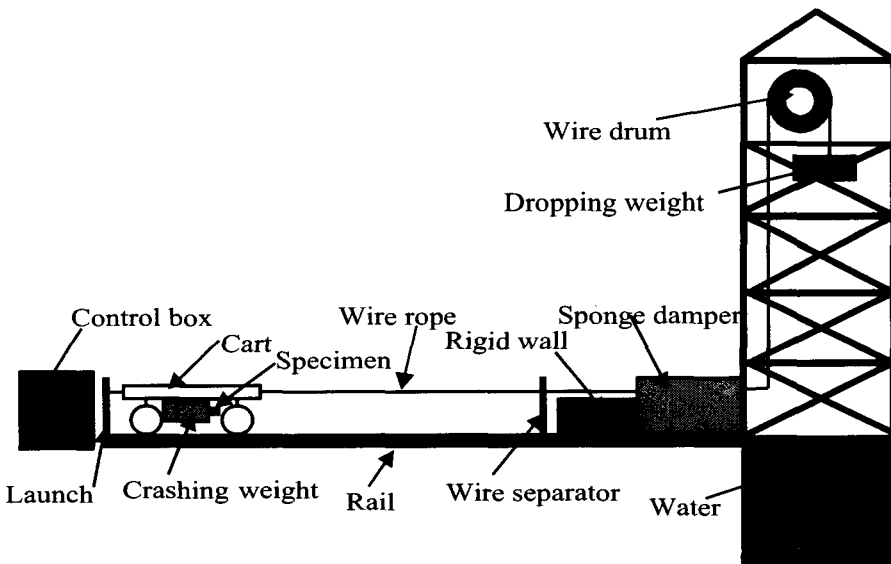


Fig. 2 A High-speed Crash Test Rig

## 2. 충돌시험기설계 및 제작

기존의 충돌시험기의 단점을 보완하기 위한 방법으로 본 연구에서는 타워에 위치한 추가 자유낙하하면서 발생하는 운동에너지를 이용하여 대차를 견인하고 부재를 고정 벽에 충돌하기 직전에 대차와 추사이의 로프를 분리시켜 등속도로 충돌이 가능하게끔 하는 새로운 형태의 충돌시험기를 설계하였다. 대차와 낙하 추는 와이어 로프로 연결되어 있으며, 대차는 충돌용 추와 시험편을 장착하고 출발선상에 위치한다. 이때, 낙하 추는 타워 상단에 견인되어 있으며 유압펌프를 이용한 브레이크에 의해 정지되며 컨트롤박스에서 스위치를 작동하여 브레이크를 풀어줄 경우 낙하하게 되며 증속폴리에 의해 연결된 로프는 시험용 대차를 견인하게 된다. Fig. 1은 자유낙하 추를 이용한 고속충돌시험기의 원리를 보여 주고 있다. Fig. 2는 본 연구에서 설계 제작한 충돌시험기의 시스템 개략도 이다.

대차와 낙하 추는 와이어로프로 연결되어 있으며, 대차는 충돌용 추와 시험편을 장착하고 출발선상에 위치한다. 스위치를 작동시켜 와이어 드럼의 브레이크를 풀어주면 낙하 추는 낙하를 시작하고 그와 동시에 대차는 고정 벽을 향하여 돌진하게 된다. 이때 대차와 연결된 와이어 로프는 충돌 1 m전에 분리되어 대차가 등속도 운동을 하게되며, 대차에 장착한 충돌용 추와 시험편은 고정 벽에 충돌하고, 대차는 충돌용 추와 분리되어 스펀지 뎀퍼와 충돌한다. 그리고, 낙하 추는 뎀퍼역할을 하는 수조속으로 들어가 에너지를 잃게 된다. 이와 같은 과정으로 부재 시험편을 대차에 장착하여 동적 충돌 실험을 수행하게 된다.

타워의 높이는 대차 속도가 35 mph(56 km/h) 나 오도록 설계하였다. 마찰을 고려하지 않고 에너지 보존법칙을 적용하면, 대차가 출발 전에는 추의 위치에너지만 존재하고 충돌순간에는 운동에너지만 존재한다. 또한, 와이어 드럼의 직경비를 3:1로 하면, 대차의 속도와 추의 속도도 3:1의 관계를 가진다. 출발전의 위치에너지는 식 (1)과같다.

$$E_1 = m_1gh_1 \quad (1)$$

여기서,  $m_1$ 은 낙하 추의 질량이며  $h_1$ 은 타워의 높이로써 견인된 낙하 추의 높이이다.

충돌직전의 추와 대차의 운동에너지는 식 (2)와 같다.

$$E_2 = \frac{1}{2} m_1v_1^2 + \frac{1}{2} m_2v_2^2 \quad (2)$$

여기서,  $m_2$ 는 충돌용 추의 질량,  $v_1$ 은 낙하 추의 속도,  $v_2$ 는 대차의 속도이다.

식(1), (2)를 이용해서 타워의 높이를 구하면 3.83 m 가 나온다. 이상적일 경우 기존의 자유 낙하식 충돌시험기에 비하여 타워의 높이를 약 1/3 정도로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 추의 무게와 마찰 효과를 고려하면 식 (2)는 다음과 같이 된다. 여기서,  $\mu$ 는 마찰계수이다.

$$E_3 = \frac{1}{2} m_1v_1^2 + \frac{1}{2} m_2v_2^2 + \mu m_2g(3h_1) \quad (3)$$

추의 수직방향 길이와 고정고리 및 기타 부착물의 높이를 고려하고, 식 (3)에 의하여 최종 설계된 타워의 높이는 7 m이며, 레일의 길이는 24 m로 제작하였다. Fig. 3은 설치 제작된 시험기의 모습으로 타워 상부에는 추를 올릴 수 있는 견인 장치와 유압식 브레이크 시스템이 설치되었고, 레일 전방부에는 고정 벽과 스펀지 뎀퍼가 설치되어 있으며, 레일 후방부에는 대차가 발차 될 수 있도록 컨트롤 박스가 설치되어 있다.



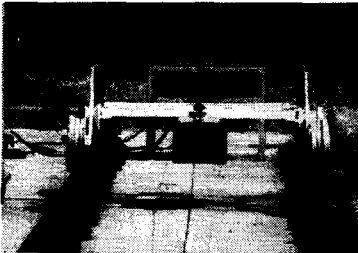
Fig. 3 Crash Test Rig System

낙하추가 자유낙하를 하였을 때, 에너지를 흡수하는 뎀퍼로 본 논문에서는 물을 가득 채운 수조를 사용하였다. 대차는 반복적인 사용과 순수한 동적 충돌을 얻기 위해 충돌직전 와이어 로프로부터 분

리되도록 설계하였다. 또한, 대차의 무게를 줄이기 위하여 사각관을 이용한 용접 구조물을 사용하였다. Fig.4는 완성된 대차의 형상이다.



(a) Side view



(b) Front view

Fig. 4 A Cart for High-Speed Crash Test Rig

와이어 견인용 도르레 시스템은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 크게 와이어 드럼, 브레이크, 유압 장치로 구성된다. 3개의 와이어 드럼이 주축에 체결되는데, 양쪽 두 개의 와이어 드럼은 낙하 추와 연결되고 나머지 한 개는 대차와 연결된 와이어 로프를 감는다. 이러한 주축은 큰 벤딩과 토션을 견뎌야만 한다. 따라서, 주축에 사용되는 베어링은 큰 하중이 걸리는 축에 유리한 특징을 가지고 있는 자동조심 풀러 베어링을 사용하였고, 축은 중공축으로 재질은 크롬-몰리브덴강(SCM440, 항복강도:85kgf/mm<sup>2</sup>)으로 하였다. 주축의 강성을 검토하기 위해서 굽힘 모멘트와 비틀림 모멘트가 동시에 받는다고 가정하였을 때, 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 최대 응력은 식(6)에 의해 계산한 결과 22.09 kgf/mm<sup>2</sup> 이므로 크롬-몰리브덴강의 항복강도에 1/4 정도밖에 되지 않아 충분한 강성이 있음을 알 수 있다.

$$M_e = \frac{M + \sqrt{M^2 + T^2}}{2} = \frac{M + T_e}{2} \quad (4)$$

$$T_e = \sqrt{M^2 + T^2} = M \sqrt{1 + \left(\frac{T}{M}\right)^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_e}{Z_p} \quad (6)$$

여기서,  $M_e$ 은 상당 굽힘 모멘트,  $T_e$ 는 상당 비틀림 모멘트,  $M$ 은 굽힘 모멘트,  $T$ 는 비틀림 모멘트,  $Z_p$ 은 극 단면 계수이다.

낙하 추와 대차에 사용될 와이어 로프는 식(7)에 의해 각각 6x19(19가닥 6꼬임),  $\phi$  19mm(절단하중:5670kgf), 6x19,  $\phi$  6.3mm(절단하중:2190kgf)인 와이어 로프를 선정하였다.

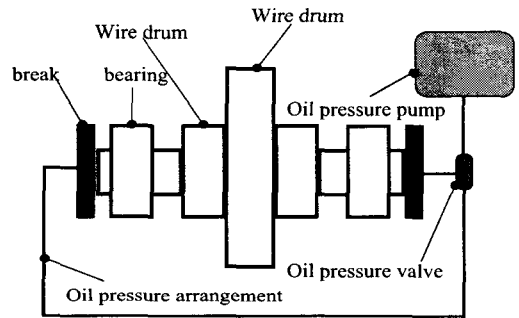


Fig. 5 Main shaft and Brake System

$$Q = W \times S \quad (7)$$

여기서,  $Q$ 는 절단하중,  $W$ 는 하중,  $S$ 는 안전 계수이다.

이러한 원리를 이용하여 제작한 주축의 형상과 와이어 드럼은 Fig. 6과 같다.

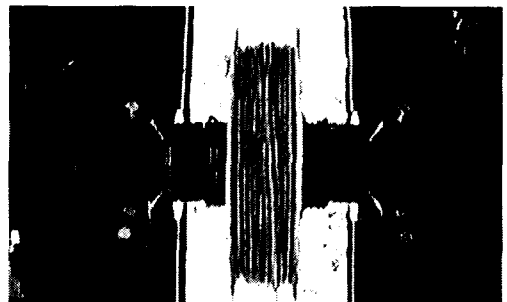


Fig. 6 View of Wire Drum

### 3. 실험

자유낙하 추를 이용한 고속 충돌장치를 사용하여 사각관 및 자동차 측면부재의 재질과 형상에

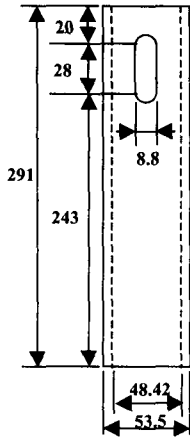


Fig. 7 Tube type Energy Absorber

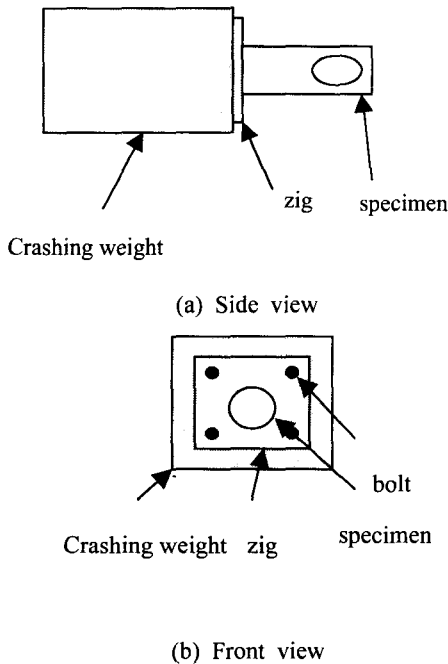


Fig. 8 Fixed zig to the crashing weight

대한 실험을 수행한 결과 목표한 속도인 35 mph에

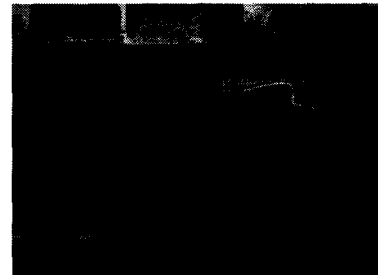
서의 충돌시험을 성공적으로 수행할 수 있었으며 다음과 같은 실험 결과를 얻을 수 있었다.

동적 실험에 사용된 부재는 slot이 있는 튜브형 에너지 업소버로써 재질은 일반구조용 탄소강 강관이다. Fig. 7은 동적 실험에 사용된 slot이 있는 튜브형 에너지 업소버이다.

튜브형 에너지 업소버를 충돌용추에 장착시켜 고정벽에 충돌시키게 되는데 이때 장착방법은 아래의 Fig. 8에 도시되어 있다.



(a)



(b)



(c)

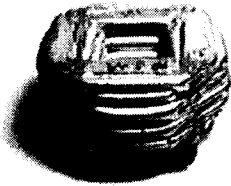
Fig. 9 Deformed Shapes of Dynamic Test

충돌과정의 진행은 Fig. 9에 도시되어 있는데 (a)는 충돌용 추에 실험부재가 장착되어 고정 벽에

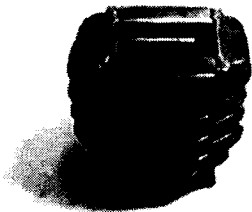
충돌이 시작되는 모습을 보여 준다. (b)는 시편이 운동에너지에 의해 변형이 계속 진행되고 있다. (c)는 실험부재가 고정 벽에 부딪히어 대차와 시험편이 분리되고 변형이 끝난 과정이다.



(a) Tube type Energy Absorber



(b) Aluminium specimen (50x50x2t)



(c) Steel specimen (50x50x2t)

Fig. 10 Test Results

Fig. 10의 (a)는 Fig. 9의 실험 결과이며, (b)와 (c)는 각각 알루미늄 사각관 및 스틸 사각관의 충돌 실험 후 변형 모습으로 고속 정면충돌과정에서 외

관의 유입없이 정확히 부재가 벽면과 수직으로 충돌하였음을 보여주고 있다.

#### 4. 측정

##### 4.1 대차의 주행속도 측정

실험장치의 속도측정을 위한 방법은 Photo sensor를 사용하였다. Fig. 11은 대차와 연결된 와이어 로프를 이탈시키는 용접 구조물에 ㄷ자형 앵글을 만들어 2개의 Photo sensor를 장착한 모습이다. 초기에 limit switch를 이용하여 속도를 측정하였으나 기계적인 구조가 가지는 응답의 시간차로 인한 오차가 있기 때문에 이를 Photo-sensor를 이용하여 실험시 대차의 속도를 측정하였다.

Fig. 12는 Photo-sensor로 측정한 Time-voltage 선도로 튜브형 에너지 업소버가 충돌 실험시 충돌

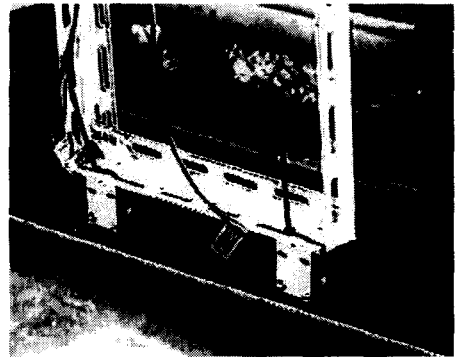


Fig. 11 Photo Sensor

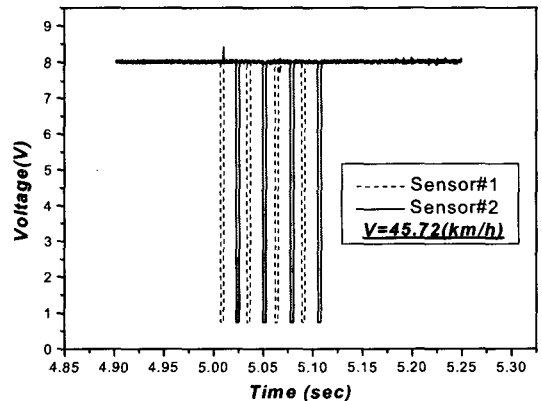


Fig. 12 Time-Voltage Curve of Energy Absorber

속도 45.72 km/h가 측정되었다.

### 4.2 충격력 측정

가속도 측정과 속도측정이 함께 이루어져야 할 충격력 측정은 고정벽(rigid wall)에 로드셀을 설치하여 충돌시 압축력을 측정하였다. 로드셀에서 나온 데이터는 strain amplifier를 거쳐 A/D Convert Board를 통해 저장된다.

Fig. 13은 로드셀을 rigid wall에 부착한 모습이다.

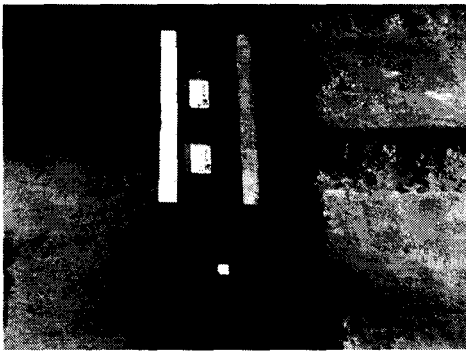


Fig. 13 Load cell

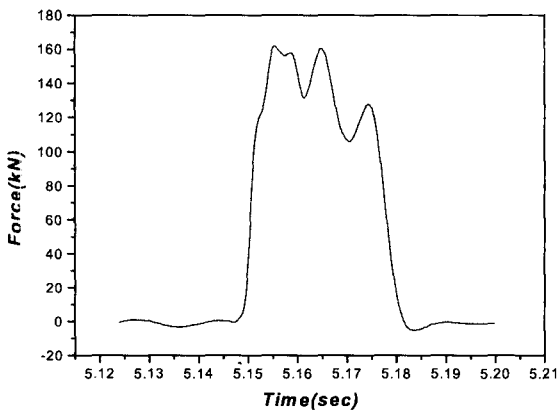


Fig. 14 Time-Force Curve of Energy Absorber

Fig. 14는 로드셀을 이용하여 튜브형 타입의 에너지 업소버가 충돌 시험시 측정된 데이터값으로 초기 압력하중(Deformation start force)이 162 kN으로 측정되었다.

### 4.3 계측시스템의 구성

정확한 충돌속도와 정확한 충돌하중을 알기 위해서 이 실험에서는 photo-sensor와 load cell로 신호를 받아들인후 이를 A/D BOARD를 통하여 PC로 받아들이도록 계측시스템을 구성하였다.

데이터의 처리과정은 Fig. 15 에 도시하였으며 photo-sensor와 load cell의 사양은 Table1에 정리하였다.

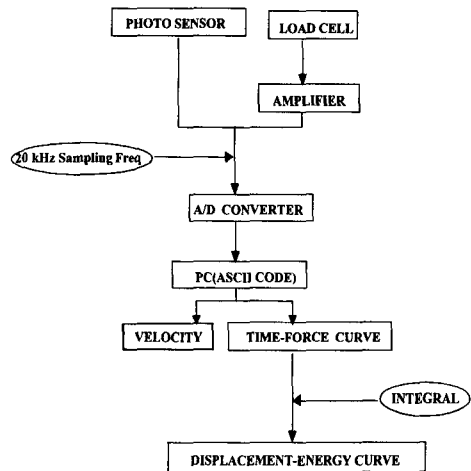


Fig. 15 Signal processing of danamic test

Table 1 Type of Load cell and Photo-sensor

	측정범위	모델명
Photo-sensor	응답속도 :0.7ms 검출거리:10-90mm	PD-RH09N
Load cell	20 tonf	LC-20TV-P (KYOWA)

### 5. 결론

자유낙하 추를 이용한 대차식 고속충돌시험기를 설계, 제작하여 충돌실험을 실시하였다. 본 연구에서는 기존의 충돌시험기에서 가능하지 못했던 짧은 거리에서 고속의 속도를 얻을 수 있었고, 충돌 전 대차가 분리되기 때문에 등속으로 충돌이 가능 할 수 있었다. 사각관 및 자동차 측면부재의

재질과 형상에 대한 실험을 한 결과 만족스러운 결과를 얻었고, 고속충돌시험기의 실험결과를 이용하여 압괴특성을 표현할수 있는 *Time-Force* 선도를 작성하였다.

### 참고문헌

1. 한병기, 안대식, 박봉현, "정사각튜브의 동적 평균 압괴하중 연구," 한국자동차공학회, 제4권, 제5호, pp. 157-167, 1996.
2. 강신유, 이화원, "모자형 단면 측면부재의 충돌 해석 및 실험에 관한 연구(Ⅱ)," 한국자동차공학회, 94년 안전, 전기, 전자부문학술강연초록집, pp. 24-31, 1995.
3. 강신유, 장인배, 정규진, 이준우, "35mph 정면충돌실험용 시험기 개발 및 부재실험," 대한기계학회, 춘계학술대회논문집, pp. 387-392, 1999.