

## 자동차용 휠(wheel)의 충격해석 신뢰도 향상을 위한 13도법 충격시험기의 강성 연구

고길주<sup>\*1)</sup> · 김만섭<sup>1)</sup> · 송현우<sup>1)</sup> · 양창근<sup>2)</sup>

한국타이어 중앙연구소 신소재연구팀<sup>1)</sup> · 에이에스에이 엔지니어링팀<sup>2)</sup>

### A Study on the Stiffness of a 13degree-type Impact Tester for Aluminum Wheels

Kilju Ko<sup>\*1)</sup> · Manseob Kim<sup>1)</sup> · Hyunwoo Song<sup>1)</sup> · Changgeun Yang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Advanced Material Research Team, R&D Center, Hankook Tire Co., 23-1 Jang-dong, Yusung-gu, Daejeon 305-725, Korea

<sup>2)</sup>Engineering Team, ASA Co., 202 Gueok-ri, Jewon-myeon, Geumsan-gun, Chungnam 312-820, Korea

(Received 11 August 2005 / Accepted 7 February 2006)

**Abstract** : It is positively necessary to study on the stiffness of a 13degree-type impact tester in order to improve the fracture prediction of impact testing in wheels using FE(finite-element) analysis. The 13degree-type impact tester consists of an impact striker, a wheel fixer, a steel plate, and four cylindrical rubbers. Important parts of the tester are the steel plate and four cylindrical rubbers which play a role of absorbing impact energy during impact testing. Because of these buffers, the RF(reaction force) variation of the lower part in the 13degree-type impact tester showed the tendency like a damped harmony oscillation during impact testing. In order to investigate the stiffness of a 13degree-type impact tester, this work measured each stiffness of a steel plate and cylindrical rubbers. The stiffness of a cylindrical rubber was measured using a compressive tester. On the other hand, the stiffness of a steel plate was predicted by simulating experimental method using FE analysis.

**Key words** : Wheel(자동차용 휠), Stiffness(강성), 13degree-type impact tester(13도법 충격시험기), FE analysis(유한요소 해석), RF(반력), Steel plate(강재대), Cylindrical rubber(고무대), Compression tester(압축시험기)

#### Subsceipts

RF : reaction force  
FE analysis : finite-element analysis  
B/M : bending moment  
RR test : radial rolling test

#### 1. 서론

현재 자동차용으로 많이 사용되고 있는 알루미늄

합금 휠(aluminum alloy wheel)의 실내 시험법에는 크게 충격 시험(impact test), 굽힘 하중 내구 시험(B/M fatigue test), RR 내구 시험(radial rolling fatigue test) 등이 있다. 충격시험은 자동차 주행 시 휠의 충돌 각도에 따라 다시 13도법, 30도법, 90도법 충격시험으로 분류된다. 13도법과 30도법 충격시험은 휠의 스포크(spoke)와 허브(hub)의 파괴 유무를 측정하며, 90도법 충격시험은 휠의 림(rim)의 변형 여부를 측정하는 시험이다. 본 연구에서는 알루미늄 합금 휠의 13도법 충격 시험만을 고찰하였으며, 충격 해석의 신뢰도를 향상시키기 위하여 13도법 충격시

\*Corresponding author, E-mail: 20200158@hanta.co.kr

험기의 강성을 산출하고자 하였다.

충격시험 시 휠의 파괴는 휠이 큰 충격에너지를 흡수하여 소성 변형을 일으켜 나타난 결과이므로, 충격해석은 소성변형 특성을 가정하여 수행하게 된다. 휠의 파괴는 충격추가 휠에 닿는 순간부터 0.05 초 내에서 발생하기 때문에 휠의 충격현상은 동적 해석을 수행해야 한다. 그러나, 지금까지의 휠 충격 해석은 휠과 충격시험기의 전체 시스템이 아닌 휠의 특성만을 고려하여 해석을 수행하였다.<sup>1)</sup> 실제로 충격에너지는 휠보다 충격시험기(Fig. 1)의 강재대(steel plate)와 고무대(cylindrical rubber)에 70% 이상이 흡수되기 때문에 충격시험기 강성함수를 모르고는 동적해석으로 시스템을 구현하기가 어려우며, 충격시험의 해석 결과 또한 그 신뢰도가 낮게 된다.

따라서 본 연구에서는 충격해석의 신뢰도를 높이기 위해서 충격시험기의 강재대와 고무대의 특성을 고찰하고자 하였으며, 충격시험기의 강성은 강재대와 고무대의 강성으로부터 계산하였다. 고무대는 압축시험기(compressive tester)를 사용하여 하중 증가에 따른 변위를 측정하여 강성을 산출하였으며, 반면에 강재대는 유한요소 해석을 수행하여 강성을 산출하였다.<sup>2,3)</sup>

## 2. 충격 파괴시험

### 2.1 13도법 충격시험기

Fig. 1은 13도법 충격시험기(Germany, Hofmann Inc.)를 나타내었으며, Fig. 2는 충격시험기에서 휠을 고정시키는 부분을 개략적으로 나타내었다. Fig. 2는 실질적으로 휠의 충격시험에 영향을 주는 부분이며, 휠을 장착시키는 휠 취부대(wheel fixer), 충격량을 완화시켜주는 강재대와 고무대로 구성되어 있다. 충격추가 휠에 떨어질 경우, 스포팅 역할을 하는 강재대와 고무대가 없으면 충격힘은 기하급수적으로 커지게 되므로 완충재로서의 역할은 매우 중요하다.

13도법 휠 충격시험 경우, 충격추(impact striker)의 운동량 변화는 충격추의 무게와 높이에 따라 다소 차이가 있고, 강재대와 고무대의 탄성계수가 휠보다 작기 때문에 충격시험에서의 전체 강성은 강재대와 고무대의 탄성계수에 더 큰 영향을 받으며,

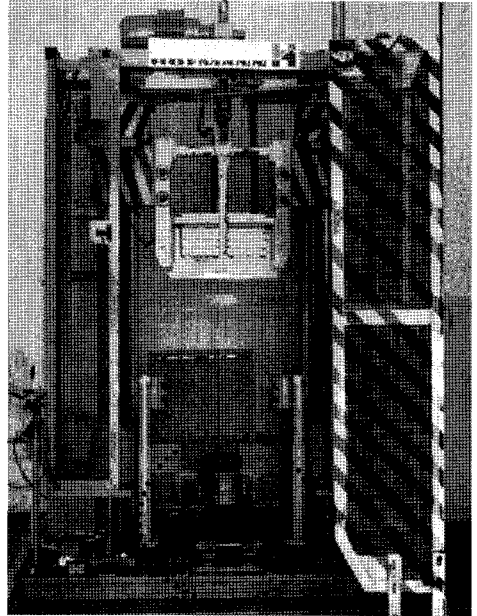


Fig. 1 13degree-type impact tester

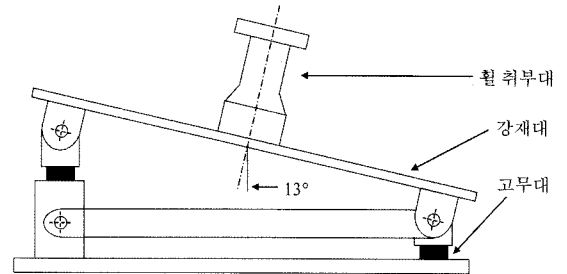


Fig. 2 Schematic diagram of the lower part in a 13degree-type impact tester

휠의 영향은 상대적으로 작아서 휠의 크기나 무게 등과는 상관성이 낮다. 충격시험기의 강성은 강재대와 고무대의 강성으로부터 구해지며, 강재대와 고무대의 강성에 따라서 동일한 충격추를 사용하여 충격시험을 하더라도 휠에 가해지는 충격힘에 차이가 발생한다.<sup>1,3)</sup>

### 2.2 충격시험에서의 반력측정

충격추에 의해서 강재대와 고무대가 받는 실제 충격힘을 측정하기 위해서 반력측정 시험을 수행하였다.

반력측정 시험은 13도법 충격시험기(Fig. 1)를 사용하여 충격추의 무게와 높이를 변화시키면서 반력

을 측정하였다.<sup>4,5)</sup> Fig. 2에서 보듯이 휠, 강재대, 고무대는 일직선 상에 연결되어 있어서 충격힘이 가해지면 동일한 힘이 앞의 세 부분에 전달되게 된다. 따라서 충격시험 시의 반력은 변형량을 쉽게 측정할 수 있는 강재대에 스트레인 게이지(CEA-06-032WT-120, MM inc.)를 부착하여 측정하였으나, 그 결과를 보면 측정값의 편차가 크게 나타나고 있다(Fig. 3). 이는 스트레인 게이지의 강재대 부착위치와 작업 숙련도에 따른 실험적 오차가 포함되어 있기 때문이며, 이로 인해서 정확한 반력을 측정할 수가 없다. 이러한 오차를 줄이기 위해서 휠의 취부대 대신에 충격시험 시의 굽힘 응력에 견딜 수 있도록 지지 로드셀(최대 지지하중, 10,000kgf)을 제작하였으며, 특정 높이에서 반력 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 반력은 측정 편차가 작았으며, 충격추

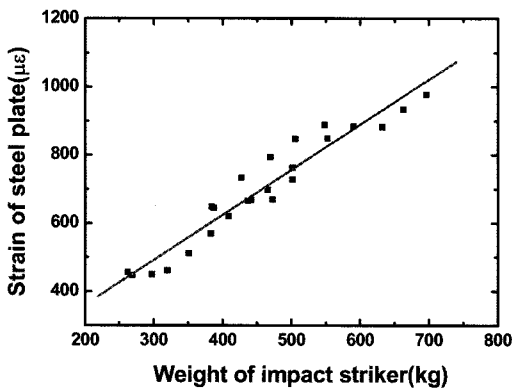


Fig. 3 Strain of steel plate vs. weight of impact striker

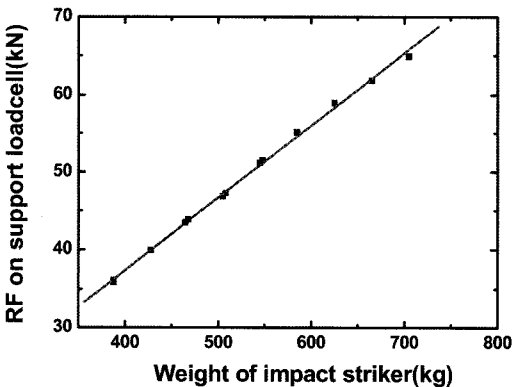


Fig. 4 RF on the support loadcell vs. weight of the impact striker

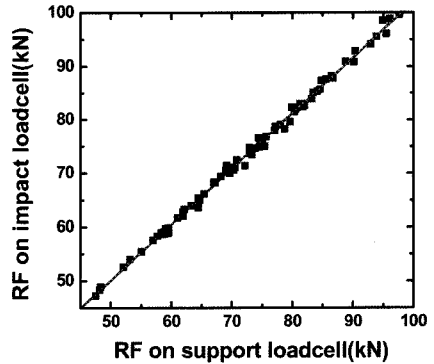


Fig. 5 RF on the impact loadcell vs. RF of the support loadcell

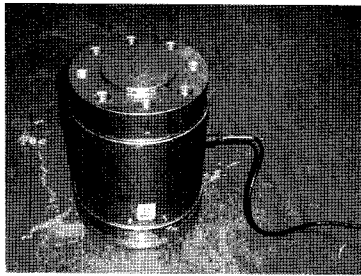
의 무게와 반력은 선형적인 관계를 보이고 있다.

Fig. 5는 충격추의 높이를 달리하여 충격 로드셀과 지지 로드셀에서 각각 측정한 반력을 선형적으로 나타내었으며, 반력은 약 1.1 kN의 차이를 보이고 있다.

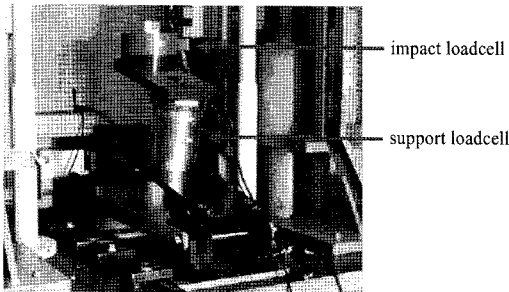
Fig. 6(a)는 휠 취부대 대신에 제작한 지지 로드셀을 나타내었고, Fig. 6(b)는 지지 로드셀과 충격 로드셀을 설치한 충격시험기의 하부를 나타내었다. 측정된 모든 데이터는 2 kHz의 sampling 처리속도와 12 bit 분해능을 가진 A/D convertor를 사용하여 저장하였다.<sup>6)</sup>

Fig. 7(a)는 시간에 따른 반력의 변화를 나타낸 것으로서 탄성체의 감쇠 조화운동과 유사한 경향을 나타내고, 충격추가 다시 위로 올라갈 때에는 반력이 나타나지 않는다. 또한 반력이 최대 정점까지 도달하는 데 걸리는 시간은 0.05초 내로 상대적으로 짧았다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 첫 번째 정점을 나타내었으며, 작은 정점이 먼저 나타나고 뒤이어 큰 정점이 나타나고 있다. 이는 상대적으로 큰 무게의 충격추가 빠른 속도로 충격시험기의 하부와 충돌하게 되면 충격시험기의 하부가 먼저 더 빠른 속도로 움직이고 뒤이어 조금 감소된 속도로 충격추가 움직이기 때문에 발생한다.<sup>2)</sup>

반력측정 시험은 충격추의 위치에너지를 다르게 하여 충격량을 변화시켰다. 충격추의 무게는 425~585kg로 하였고, 높이는 100, 150, 180, 230mm로 변화시켜 충격속도는 최소 1.4m/s에서 최대 약 2.1m/s가 되도록 하였다. 반력측정 시험은 충격 로드셀에

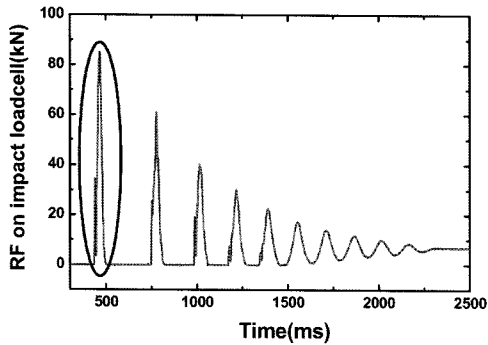


(a)

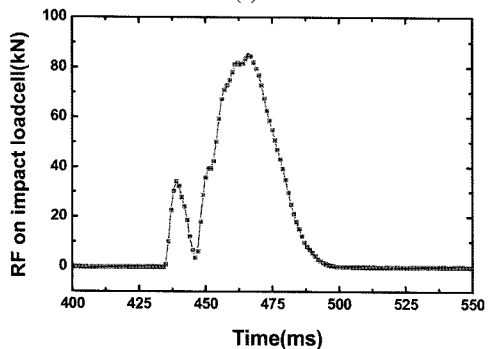


(b)

Fig. 6 (a) Support loadcell, and (b) the lower part with support loadcell in the impact tester



(a)



(b)

Fig. 7 RF measured during impact testing. (a) damped harmony oscillation, and (b) first peak

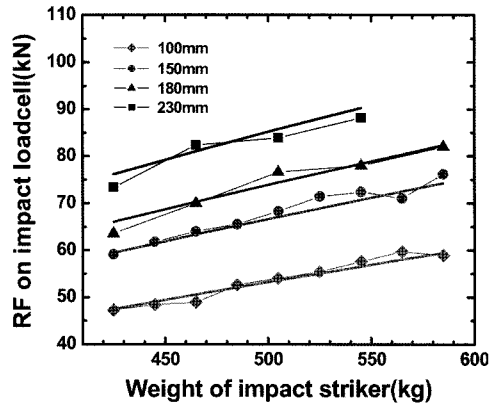


Fig. 8 RF according to weight and height of impact striker after 13degree impact test

충격힘이 먼저 전달되고, 굽힘 응력에 의해 지지 로드셀로 전달되어 최종적으로는 스프링 역할을 하는 강재대와 고무대에 전달되게 된다. Fig. 8은 충격추의 무게와 높이에 따른 반력의 변화를 나타내었다. 충격추의 무게와 반력은 거의 선형적인 관계를 나타내며, 충격추의 높이에 따라서 일정한 기울기로 증가하고 있다. 충격추의 높이가 230mm이고 무게가 580kg 이상인 시험조건에서는 높은 충격에너지로 인하여 강재대가 변형되기 때문에 시험을 진행할 수 없었다.

### 3. 충격시험기의 강성 산출

#### 3.1 최대 충격힘

휠에 작용하는 충격힘은 감소 조화운동과 유사한 경향을 보이고 있고(Fig. 7(a)), 휠이 파괴되지 않기 위해서는 첫 번째 정점의 최대 충격힘을 감당할 수 있어야 한다. 충격시험기의 강성이 상수라고 가정하면 최대 충격힘을 구할 수 있고, 식 (1)으로 표현되어 진다.<sup>7)</sup>

$$m \cdot g(h+x) = \frac{1}{2} Kx^2$$

$$x^2 - 2dx - 2dh = 0 (\because d = \frac{mg}{K})$$

$$x = d \pm \sqrt{d^2 + 2dh}$$

$$\therefore F_{MAX} = Kx = F + \sqrt{F^2 + 2FKh} \quad (1)$$

$$(\because F = mg)$$

where m: 충격추의 무게  
 h: 충격추의 높이  
 x: 충돌 후 이동거리  
 F: 충격힘  
 K: 강성식  
 (K = K<sub>휠</sub> + K<sub>강재대</sub> + 고무대)

그러나, 최대 충격힘은 식 (1)에서 구한 이론값과 실제 시험값의 차이가 발생하였는데, 이는 강재대와 고무대가 비선형이어서 충격시험기의 강성도 또한 비선형이 되기 때문이었다. 따라서 충격시험기의 강성은 상수가 아닌 비선형으로 가정하여 근사적인 방법인 수치 해석을 통해 충격시험기의 강성함수를 구하였다.

감쇄가 없다고 가정하고 충격시험기의 강성 함수가 구해지면 에너지 보존법칙을 이용하여 식 (1)과 유사한 최대 반력을 구할 수 있게 된다.

### 3.2 고무대의 강성

충격시험기에서 강제대와 함께 완충 작용을 하는 고무대는 실험적으로 그 강성을 구할 수가 있다. 고무대는 비선형적인 탄성체이며, 고무대에 사용된 고무의 재료 규격은 shore 경도 50으로만 규정되어 있다. 따라서 고무대의 강도는 제조 회사 마다 조금씩 차이가 발생하게 된다. 고무대는 지름이 50mm이고 두께가 27mm이며, 충격시험기에는 총 4개가 사용된다. 충격시험의 횟수가 많아지고 충격추의 무게가 무거워지면 고무대는 점차 경화되어 완충 역할을 제대로 수행하지 못하기 때문에 고무대의 경화 정도에 따라 교체해 주어야 한다.

충격시험 시 반력이 최대 정점까지 도달하는 데 걸리는 시간은 0.05초이고 고무대의 압축 변위는 15mm이기 때문에 고무대의 압축속도는 대략 18m/min이 된다. 따라서, 고무대의 강성은 고속의 하중 증가에 따른 압축 변위를 측정하여 실험적으로 산출해야 한다. 그러나 압축시험기를 사용하여 고속변형에 따른 고무대의 물성을 측정하는 것은 실제적으로 어렵기 때문에 측정가능한 압축속도인 200mm/min까지 시험을 수행하였다. 압축속도는 1, 50, 200mm/min으로 변화시켰으며, 그 결과는 Fig. 9에 나타내었다.

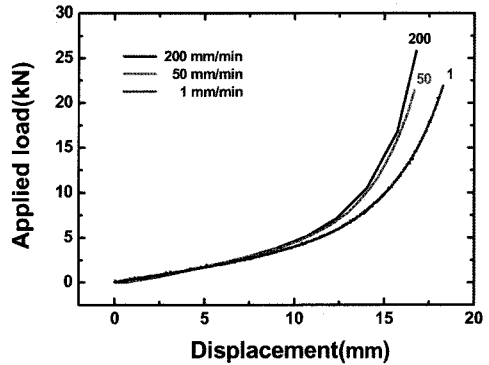


Fig. 9 Applied load vs. displacement of a cylindrical rubber after compressive test

하중이 낮은 구간에서는 압축 변위가 크게 증가하여 강성이 낮지만, 하중이 높은 구간에서는 고무의 특성으로 인해 압축 변위가 크게 증가하여 강성이 급격히 증가하고 있다. 압축속도가 1mm/min보다는 50mm/min일 때 고무 강성이 더 급격히 증가하지만, 200mm/min일 때와 비교하면 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다.<sup>8)</sup> 따라서 실험에서 얻은 물성치를 재료의 변형률 속도특성과 열적 연화특성을 고려할 수 있는 John-Cook 구성방정식으로 근사하여 고무대의 강성을 산출하였다. John-Cook 구성방정식은 식 (2)와 같이 표현되며, 본 충격시험에서의 열적 연화특성은 무시할 만한 수준이기 때문에 고려하지 않았다.

$$\sigma = [A + B\epsilon^n][1 + C\ln\dot{\epsilon}][1 - T^{*m}] \quad (2)$$

where

$$T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$$

T<sub>room</sub>: 상온(27°C)

T<sub>melt</sub>: 용융점

### 3.3 강제대의 강성

강재대는 고무대와는 달리 실험적으로 강성을 산출하기가 어렵다. 강재대는 크기가 매우 커서 일반적인 압축시험기로 간단하게 구할 수 없기 때문이다. 하지만 강재대는 재질이 강이고 형상이 단순하기 때문에 유한요소 해석으로도 충분히 실제 강성에 근사한 값을 구할 수 있다. 강재대 재질은 SCM 440(KS 규격)으로 열처리 정도에 따라 기계적 성질이 널리 알려져 있어서, 이를 이용하여 강재대의 강

성을 구하였다. Table 1에는 강제대의 화학 조성과 기계적 성질을 나타내었고, 강제대의 응력-변형률 곡선은 식 (3)과 (4)로 나타내었다.

$$\sigma = 1,312 \varepsilon^{0.078} \quad \varepsilon > 0.002 \quad (3)$$

$$\sigma = 404,000 \varepsilon \quad \varepsilon < 0.002 \quad (4)$$

where  $\sigma$ : 응력(MPa)

$\varepsilon$ : 변형률

강제대의 해석은 두가지 관점에서 볼 때, 재료적으로는 식 (3)과 (4)의 특성을 적용하였고, 형상적으로는 대변형 비선형 해석을 수행하였다. 강제대와 연결된 충격 로드셀과 지지 로드셀로 이루어진 부분(Fig. 6(b))은 강체로 가정하였으며, 충격 로드셀 부분에 수직으로 하중을 가하여 그 지점에서의 변위를 구하였다.<sup>9,10)</sup>

Fig. 10은 강성 해석을 위해 단순화시켜 만든 유한요소 해석 모델과 그 결과를 나타내었다. 해석 프로그램은 ABAQUS를 사용하였고, 요소 형태는 C3D10, 절점은 72,216개로 하여 ‘ㄱ’모양의 부재를

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SCM440

| SCM<br>440     | 화학 조성(wt. %)   |            |             |           |
|----------------|----------------|------------|-------------|-----------|
|                | C              | Mn         | Cr          | Mo        |
|                | 0.38~0.43      | 0.60~0.85  | 0.90~1.20   | 0.15~0.30 |
| 기계적 성질         |                |            |             |           |
| 인장 강도<br>(MPa) | 항복 강도<br>(MPa) | 연신율<br>(%) | 경도<br>(HRC) |           |
| 949            | 808            | 22.0       | 25          |           |

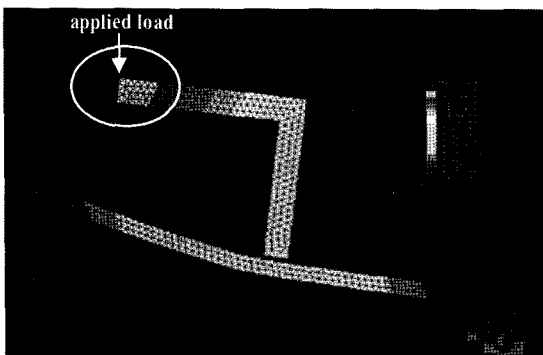


Fig. 10 Displacement contour of steel plate after FE analysis

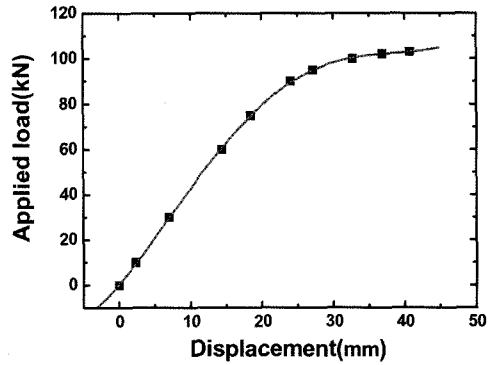


Fig. 11 Applied load vs. displacement of steel plate after FE analysis

강체로 가정하여 해석을 수행하였다. 변위는 하중을 가해준 부분에서 가장 크게 나타나고 있으며, 강제대가 하중을 받아서 소성 변형된 모습을 보이고 있다. Fig. 11은 유한요소 해석 후의 가해준 하중에 따른 변위를 나타내었다. 초기에는 하중에 따라 변위가 증가하는 선형적인 관계를 나타내지만, 하중이 대략 80kN이상이 되면 소성변형이 일어나 변위가 급격하게 증가하고 있다.

### 3.4 충격시험기의 강성

충격시험기의 강성은 3.2절과 3.3절에서 각각 구한 고무대와 강제대의 강성과 Fig. 7에 보이고 있는 감소조화운동의 감쇄 계수를 구하여 계산되어진다. 강제대와 고무대는 Fig. 12에 나타난 바와 같이 일직선 상에 연결된 스프링과 같기 때문에 강성 관계식에 따라 구할 수 있고 여기에 충격추 초기 속도를 계산하여 감쇄 효과를 구할 수 있다.

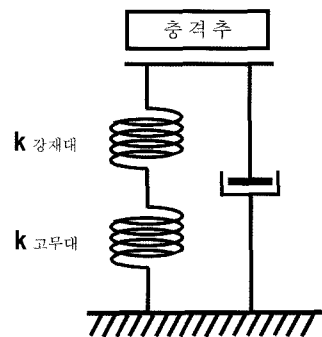


Fig. 12 Schematic diagram of a steel plate and cylindrical rubbers

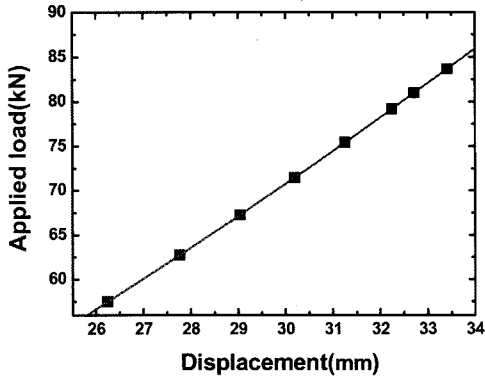


Fig. 13 Applied load vs. displacement of steel plate and cylindrical rubber

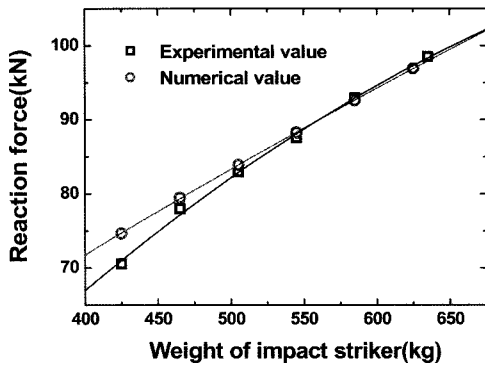


Fig. 14 Comparison between experimental value and numerical value

Fig. 13에는 고무대와 강재대의 강성과 감쇄 효과를 감안하여 계산된 충격시험기의 강성을 나타내었다.

충격시험 시 시간에 따른 반력의 변화(Fig. 7(a))는 지수함수로 나타내어지는 데, 이를 이용하여 감쇄효과를 적용하였다. 가해준 하중에 따른 변위는 2차식의 상관관계를 보였으며, 그 관계식은 식 (5)에 나타내었다.

$$Y = -8.7 + 1.6x + 0.03x^2 \quad (5)$$

where x: 변위(mm)

Fig. 14에는 충격시험기의 강성을 적용하여 수치적으로 산출한 반력과 실제 충격시험을 통해 측정된 반력을 나타내었다. 이론적으로 구한 반력값과 실제 반력값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 자동차용 알루미늄 합금 휠의 13도법 충격해석의 정량분석 신뢰도를 향상시키기 위하여 충격시험기의 강성에 대해서 고찰하고자 하였다.

- 1) 13도법 충격시험기는 충격추, 휠 취부대, 강재대와 고무대로 구성되어 있으며, 실질적으로 충격 에너지를 저장하는 부분은 강재대와 고무대, 휠이다.
- 2) 충격추에 의해서 강재대와 고무대가 받는 충격 힘을 측정하기 위해서 반력측정 시험을 수행하였으며, 시간에 따른 반력의 변화는 탄성체의 감쇠 조화운동과 유사한 경향을 나타내었다.
- 3) 고무대는 압축시험기를 사용하여 하중 증가에 따른 변위를 측정하여 강성을 산출하였으며, 반면에 강재대는 유한요소 해석을 수행하여 강성을 산출하였다.
- 4) 충격시험기의 강성은 강재대와 고무대의 강성 및 감쇄 효과로 계산하였으며, 가해준 하중과 변위는 2차식의 상관관계를 나타내었다.
- 5) 충격시험기의 강성을 적용하여 수치적으로 산출한 반력과 실제 충격시험을 통해 측정된 반력이 비교적 잘 일치하였다.

#### References

- 1) N. Li, "Kinetic Energy Compensation of Tire Absence in Numerical Modeling of Wheel Impact Testing," SAE 011825, 2005.
- 2) M. A. Meyers and K. K. Chawla, Mechanical Behavior of Materials, Prentice Hall International Editions, pp.432-459, 1999.
- 3) K. J. Ko, M. S. Kim, H. W. Song, C. G. Yang and K. M. Kim, "The FE analysis on Automotive Wheels for Fracture Prediction of 13degree Impact Test," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.710-716, 2004.
- 4) Wheel Standards Committee, "Wheels-Impact Teat Procedures-Road Vehicles," SAE J175, 2003.
- 5) R. S. Wallace and L. D. Nurkala, "Development of the Sae Biaxial Wheel Test Load File," SAE 2004 World Congress & Exhibition, 2004.

- 6) Y. Park, Linear IC Data Book, Se Wha, Ins., 1994.
- 7) T. L. Anderson, Fracture Mechanics, The Korea Economic Daily & Business Publication, 2000.
- 8) K. Miller, "Experimental Loading Conditions Used to Implement Hyperelastic and Plastic Material Models," MSC Software Users Conference. Materials, No.45, 2000.
- 9) M. Riesner, R. I. Devries, "Finite Element Analysis and Structural Optimization of Vehicle Wheels," SAE 830133, 1983.
- 10) J. Neter and W. Wasserman, Applied Linear Statistical Models, R. D. Irwin, Ins., Homewood, 1974.