

# 강철봉 제동 시스템에서의 감속파형 재현을 위한 유한 요소 해석

이종길<sup>1#</sup>, 석환호<sup>1</sup>

## FE simulation for the Reconstruction of Deceleration Profile in Steel Bar Breaking System

J. K. Lee, H. H. Suk

### Abstract

Sled test is widely used to evaluate the performance of occupant's safety system in frontal crash environment without having to conduct a full-scale crash test. Steel bar breaking system is used to generate deceleration profile which is experienced by passengers in frontal crash.

In this study, deformation analyses of steel bars were conducted using a commercial FE code. Several guidelines were proposed to improve the accuracy of simulation.

**Key Words** : Finite Element Analysis(유한 요소 해석), Sled test(슬레드 시험), Deceleration profile(감속 파형)

### 1. 서론

최근 자동차의 안전도 향상을 위하여, 세계 각국에서는 다양한 안전 관련 법규 및 상품성 평가가 제정되어 시행되고 있다. 자동차 승객 안전에 대한 평가 규정 중에서 ECE R44 규정<sup>(1)</sup>은 어린이 승객 안전을 평가하는 유럽의 규정이다. ECE R44에서는 슬레드를 이용한 충돌 시험을 통하여, 안전벨트와 같은 구속 시스템에 대한 안전 평가를 하는데, 차량의 감속 파형 구현을 위해 강철봉 제동 시스템(Steel bar breaking system)이 많이 사용된다. 강철봉 제동 시스템에서는 강철봉의 물성 및 크기에 따른 배치에 따라 특정 감속 파형을 구현 하는데, 강철봉 제동 시스템을 시행착오적 방법(trial and error methods)으로 구축할 경우 시간과 비용 면에서 손실이 크다. 따라서 유한 요소법과 같은 수치 해석적 방법을 활용하여, 강철봉의 선정, 배치 과정을 체계화할 필요가 있다.

본 논문은 이에 대한 기초 연구로 강철봉 제

동 시스템의 시뮬레이션 충돌 해석을 실행하고 실제 충돌 실험 결과와 비교를 통하여 해석을 신뢰도를 높이기 위한 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 변형률 속도의 고려 여부에 따른 해석의 정확도를 비교 평가 하였다. 충돌 해석에는 상용 유한 요소 프로그램인 LS-DYNA<sup>(2)</sup>를 사용하였고, 모델링에는 Hyper-Mesh<sup>(3)</sup>를 이용하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 해석 모델

실제 충돌 슬레드 시스템의 해석모델을 모델

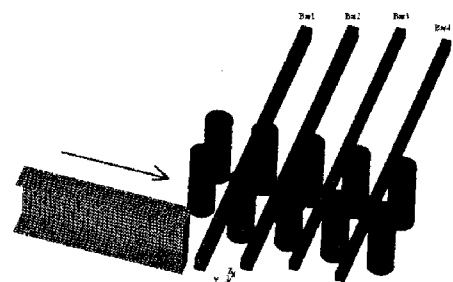


Fig. 1 Geometry of simulation model

1. 한국산업기술대학교 기계공학과  
# 한국산업기술대학교 기계공학과, E-mail : ljk@kpu.ac.kr

랑한 것은 Fig.1 에 나타났다. 강철봉은 사면체 요소로 모델링했는데, 네 개의 강철봉 요소의 총 개수는 49303 개였고, 크기는 5mm 를 기준으로 하였다. 그리고 해석에서 강체인 슬레드와 지지대는 셸(shell)요소로 모델링 하였다. (지지대의 직경은 76.3mm 이다.)

초기 경계 조건으로서 슬레드의 진행방향으로, 속도 48.697km/h 를 주었다. 슬레드의 총 질량은 1652kg 이며 해석에서는 대칭성을 고려하여 질량을 826kg 을 주었다.

### 2.2.1 정적 인장실험

강철봉 소재는 SM20C 이며, 인장 실험을 통해 얻은 응력-변형률 선도는 Fig.2 와 같다. 여기서 A 로 표시된 것은 Fig 1.의 bar3, bar4 에 대한 것이며 항복응력은 약 667.6MPa 수준이며, B 는 bar1, bar2 에 대한 것으로 항복응력이 약 559.3MPa 정도 이다.

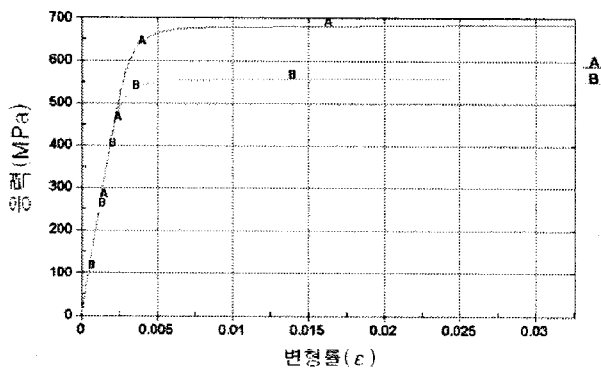


Fig. 2 Stress-Strain curves of steel bars

### 2.2.2 변형률 속도의 고려

본 강철봉 제동 시스템의 충돌 시험에 사용된 소재인 SM20C 는 저탄소강, 즉 연강의 일종으로 변형률 속도에 민감한데<sup>(4)</sup>, 변형률 속도의 영향을 고려하기 위해서 유동 응력을 일률적으로 상승시키는 방안과, Cowper-Simonds 구성 방정식<sup>(5)</sup>을 이용하는 두 가지의 방안을 고려하였다. 본 논문에서는 일률적으로 유동응력을 상승시키는 방안으로서, 변형률 속도가 큰 소재의 변형 해석을 위해 사용되는 타 해석 프로그램<sup>(6)</sup>의 물성 모델인 AISI 1020 Machining 을 사용하였다. 그리고 두 번째 방안으로 Cowper-Symonds 구성 방정식을 이용

하여 유동 응력을 다시 계산하는 방법을 사용하였다.

$$\frac{\sigma'}{\sigma} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (1)$$

여기서  $\sigma'$  은 동적 유동 응력이고  $\sigma$  은 정적 유동 응력이다. D 와 q 는 동 하중 시험으로 얻을 수 있는 재질 상수 이다. 그리고 D 와 q 상수 값은 일반적인 연강에 사용된다는 D=40.4s<sup>-1</sup> q=5 를 사용했다.<sup>(5)</sup>

### 2.3 해석 결과 및 토의

변형률 속도를 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때(정적 인장 물성)를 비교하기 위해 각각의 물성을 입력하여 해석을 실행했다. 변형률 속도 영향에 의한 해석 결과의 변화를 관찰하기 위해 Fig.3 에 감속도 파형의 결과를 정리하였다.

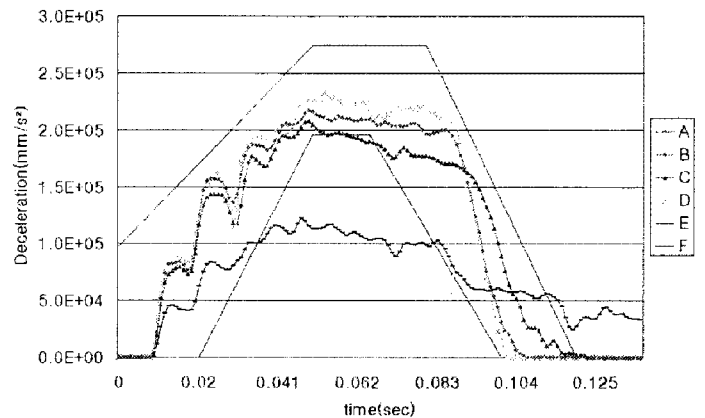


Fig. 3 Deceleration profiles predicted by FE simulations

정적인 인장 시험으로 얻은 물성을 그대로 사용하여 수행한 해석에서 얻은 감속 파형을 Fig. 3 의 A 에 나타내었다. 약 0.035 초에서 이미 R44 규 정 감속도 범위를 벗어나는 것을 볼 수 있다. 최대 감속도는 1.22x10<sup>5</sup>mm/s<sup>2</sup> 로 실제 시험 결과의 거의 절반 밖에 되지 않으며, 감속도 값이 영이 되는 시점도 실제보다 상당히 지연되고 있음을 알 수 있다.

유동응력의 크기를 적절히 증가시켜 변형률 속도의 효과를 고려하는 방법으로 AISI 1020 Machining 물성을 사용하여 수행한 해석에서 얻은 감속 파형을 Fig. 3 의 B 에 나타내었다. 최대 감속

도는  $2.18 \times 10^5 \text{mm/s}^2$ 였고, 실제 R44 관련 강철봉 제동 시스템의 시험 결과와 상당히 근사한 결과를 얻었다.

한편, Cowper-Simonds 의 식을 이용하여 변형률속도의 영향을 고려한 물성을 사용하여 수행한 해석에서 얻은 감속 파형을 Fig. 3 의 C 에 나타내었다. 최대 감속도는  $2.08 \times 10^5 \text{mm/s}^2$  였다. 그리고 약 0.05 초를 전후로 하여 R44 규정 감속도 범위에서 약간 벗어났다. 변형률 속도 고려하지 않았던 A 결과보다 변형률 속도 고려한 B 와 C 의 결과가 A 의 최대 감속도를 기준으로 하여 각각 77.7%, 69.9%씩 감속도 파형이 증가하였다.

실제 ECE R44 관련 강철봉 제동 시스템의 시험 결과는 Fig. 3 의 D 에 나타내었다. 최대 감속도는  $2.35 \times 10^5 \text{mm/s}^2$  로 나타났다.

이상의 결과로 보면 이론적으로 가장 잘 정리된 식을 사용한 Fig. 3 의 해석결과 C 가 실제로는 유동응력을 일률적으로 증가시킨 모델인 B 에 비하여 오히려 부정확한 듯이 보인다. 이는 본 연구에서 사용한 Cowper-Simonds 식 물성 상수들이 실제 실험에서 얻은 것이 아니라 일반적으로 알려진 연강의 값이라는 점에 기인한 것으로 판단되며, 시제로 이들 상수 값에 따라 파형그래프의 전체 경향과 최대감속파형의 크기가 달라진다.

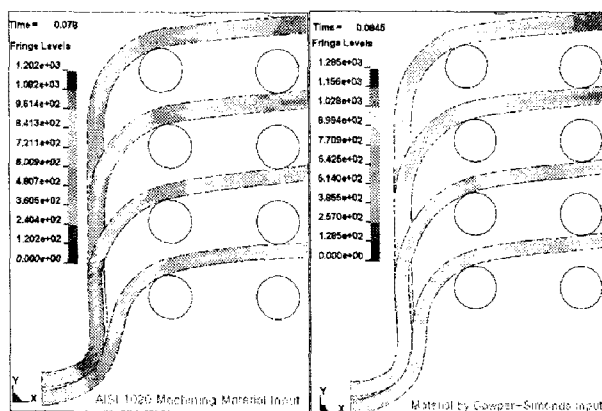


Fig.4 Predicted effective stress distribution in model B(left) and C(right)

강철봉의 응력 및 변형률 분포와 충돌 후의 시편 변형 모습을 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 4 에서 유효 응력은 속도가 '0'이 되었을 때 각각 1202MPa, 1285MPa 로 나타났다.

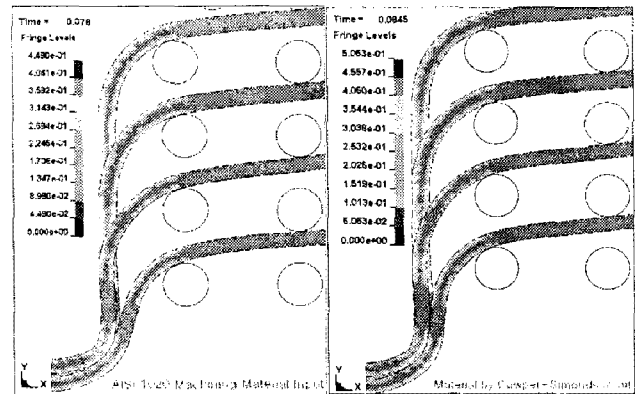


Fig.5 Predicted effective strain distribution in model B (left) and C (right)

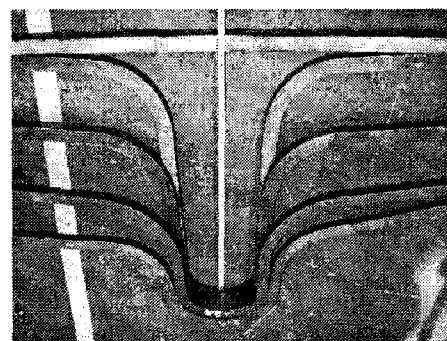


Fig.6 Deformed shaped of steel bars after test

실제 충돌 시험의 슬레드 변위는 628mm 였다. 실제 시험 결과와 가장 유사했던 B 의 변위 628.64mm 와 비교하여 거의 일치했다. 그리고 C 변위는 664.46mm 로 실제 해석 변위 628mm 기준으로 약 5.8%의 오차가 있었다.

### 3. 결론

- (1) 크기가 다른 강철봉 제동 시스템에서 강철봉의 적절한 배치를 이용해서, 감속 파형을 재현할 수 있음을 시험과 해석을 통하여 확인하였다.
- (2) 충돌 슬레드 시스템을 시뮬레이션으로 재현할 때 반드시 변형률 속도는 고려되어야 함을 알 수 있었다.
- (3) 변형률 속도 효과를 고려하기 위한 방법으로 Cowper-Simonds 구성 방정식이 효과적으로 사용될 수 있음을 볼 수 있었다.
- (4) 변형률 속도 고려를 위한 정확한 수학적 모

델이 없는 경우에도 유동응력을 일률적으로 증가시키는 방법으로 상당히 근사한 해석 결과를 얻을 수 있었다.

(5)향후 정확한 물성 실험을 통해 변형률 속도 관련 구성 방정식에, 적용 가능한 물성이 확보 된다면, 더욱 정확한 해석이 가능하다고 생각한다.

#### 4. 후기

이 논문을 쓰는데 지대한 관심과 관련 자료를 제공해주신 (주)택트 오성국 사장님께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] ECE R44 safety standard
- [2]LSTC, LS-DYNA User's Manual
- [3]Altair Engineering, HyperMesh User's Guide
- [4]William F. Hosford Robert M. Caddell, Metal Forming, Prantice Hall, pp. 90~95.
- [5]Abramowicz, W. and Jones, N., 1986, "Dymamic progressive buckling of circular and square tubes," Int. J. Impact Engng., Vol. 4, pp. 243~270
- [6]SFTC, DFFORM User's Manual