

<논문> SAE NO. 96370040

# 이상화된 자동차 측면부재의 충돌특성 향상에 관한 연구

## Crashworthiness Improvement of Idealized Vehicle's Side Rails

김 홍 수,\* 박 신 희,\* 강 신 유,\*\* 한 동 철\*\*\*  
H. S. Kim, S. H. Park, S. Y. Kang, D. C. Han

### ABSTRACT

In this study, the crashworthiness analysis was carried out for the hat type section side rails which had an important role of absorbing the impact energy during frontal crash. In case of a tapered hat type section model, numerical simulation models and test models were designed with varying design variables; welding pitch, taper angle, initiator shape, initiator location. The effect of variation of the design variables was investigated by quasi-static and dynamic test and numerical simulation.

주요기술용어 : Crashworthiness(충돌특성), Hat type section side rail(모자형단면 측면부재), Frontal crash(정면 충돌), Initiator(초기결합), Quasi-static and dynamic test(준정적, 동적 실험)

### 1. 서 론

자동차산업의 발달과 더불어 각국에서는 승차자 보호를 위한 법규를 날로 강화해 나가고 있다. 승차자 보호를 위해서는 크게 차체에 대한 충돌연구와 충돌시 승차자의 거동에 관한 연구로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 차체에 대한 충돌연구를 수행하고자 한다.

자동차 충돌시에 충돌되는 지점에 따라 정면충돌<sup>1)</sup>, 측면충돌<sup>2)</sup>, 후방충돌<sup>3)</sup>로 나눌 수 있으며 정면충돌이 가장 많은 경우로 Frank<sup>4)</sup>에 의하면 전체 충돌사고의 64.1%가 정면충돌사고로 보고되고 있으며, 정면충돌의 경우 흡수되는 에너지의 약 24% 정도를 측면부재가 흡수한다고 Park<sup>5)</sup>은 발표하고 있어 승용차의 정면충돌시 측면부재의 역할은 대단히 크다고 할 수 있다. 승용차에 사용되고 있는 측면부재는 생산되는 차종에 따라 각기 다르며, 단순한 형상으로 모델링하였을 때, 직선 사각관형<sup>6),7),8)</sup>, 2차원 평면 S자형, 3차원 사각관형(matching box type), 모자

\* 정회원, 서울대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 정회원, 강원대학교 정밀기계공학과

\*\*\* 정회원, 서울대학교 기계설계학과

형단면 측면부재 등으로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 모자형단면 측면부재를 대상으로 충돌 특성에 대하여 연구하고자 한다.

직선 모자형단면 측면부재에 관한 연구는 탄성 좌굴식에 기초하여 단면의 이상화를 통해 붕괴하중을 결정하는 방법<sup>9)</sup>과 상용 동적거동 해석용 프로그램인 DYNA3D<sup>10)</sup>, PAM-CRASH 등을 이용하여 충돌해석을 수행한 경우<sup>11),12)</sup> 등이 있어 왔으며 최근에는 후자와 같은 방법으로 해석을 수행하고 해석결과를 실험과 비교하는 연구가 진행되고 있는 추세이다. 테이퍼진 모자형단면 측면 부재에 대한 연구는 앞서 언급한 직선 모자형단면의 경우와 같이 이론적인 접근은 곤란하므로 동적 거동 해석용 프로그램을 사용하여 해석을 하고 있다.

본 연구에서는 테이퍼진 모자형단면 측면부재에 대한 충돌특성을 파악하기 위하여 이상화된 실험 모델을 제작하여 실험을 수행하고 그 결과를 동적거동 해석용 프로그램인 LS-DYNA3D<sup>13)</sup>를 사용하여 해석한 결과와 비교하고자 하며 또한 충돌특성에 영향을 주는 인자인 테이퍼 각도(taper angle), 용접간격(welding pitch), 초기결함(initiator) 유무, 초기결함의 위치와 같은 설계변수를 변화시켜 실험 모델 및 해석 모델을 만들어 각기 실험 및 해석을 수행한 후 그 결과를 비교 검토해 보고자 한다.

## 2. 이상화된 모자형단면 측면부재

실제 차량에 장착되는 측면부재는 형상이 복잡하여 해석 및 실험으로 일반적인 측면부재의 특

성을 파악하기에는 어려움이 있으므로 이를 이상화시켜 여러가지 설계변수들에 대하여 실험 및 해석을 수행하여 충돌특성을 파악하고자 하였다. 이상화된 측면부재(Fig.1)를 용접점 간격, 테이퍼 각도, 초기결함 유무 및 위치에 관하여 준정적실험을 수행하고, 이들 설계변수중에서 특히 충돌특성에 영향을 미치는 인자에 대해 측면부재의 충돌해석 및 실험을 수행하였다.

## 3. 준정적 실험

측면부재의 충돌에너지 흡수능력과 충돌시의 거동을 파악하기 위해서는 실제 상황과 유사한 대차실험이 필요하다. 그러나, 대차실험은 실험 과정이 복잡하고 반복실험이 쉽지 않고, 실험 결과의 분석이 용이하지 못한 점이 있다. 반면에, 준정적 실험은 실험장치를 쉽게 꾸밀 수 있으며, 반복실험이 용이함으로 여러가지 설계변수 변경에 따른 변화를 측정할 수 있다. 따라서, 준정적 실험을 실시하여 용접점간격, 테이퍼 각도, 초기결함의 설치 유무 및 위치 등의 설계변수들의 영향을 살펴보고자 한다.

### 3.1 준정적 실험 모델

준정적실험 모델은 Fig.1과 같은 모자형단면 부재를 기본으로하여 테이퍼진 모자형단면 부재로 제작하였다. 모자형단면 모델은 모자형 판재와 평판으로 구성되며 이를 점용접(spot welding)으로 결합하였다.

테이퍼진 모자형단면 부재에서는 용접피치, 테이퍼 각도, 초기결함 유무 및 위치의 설계변수들

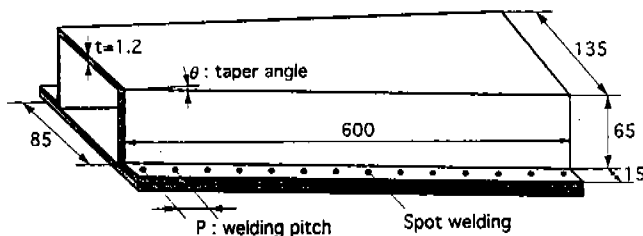


Fig.1 Idealized Side Rail

을 변화시켜 모델을 제작하였으며, 초기결합의 위치는 예비실험에서 나타난 요철지점에 초기결합을 설치한 것과 ABAQUS<sup>(4)</sup> 프로그램을 사용하여 탄성좌굴해석(elastic buckling analysis)을 수행한 결과로 산출된 좌굴모드형상(buckling mode shapes)에서의 요철지점에 초기결합을 설정한 2가지로 구분하였으며, 각각의 모델에 대하여 단면의 모서리(edge)에 초기결합을 설정한 것과 측면(side)에 설정한 2가지 모델을 제작하였다.

실험모델의 상세한 구분은 다음과 같다.

- (1) 용접점 간격에 따른 모델  
(용접 간격 : 40, 55, 70mm)
- (2) 테이퍼 각도 변화에 따른 모델

테이퍼 각도에 따른 모델에서 좁은 단면폭과 넓은 단면폭의 합이 220mm로 일정하도록 제작하였으며, 각각의 단면폭은 다음과 같다.

- ▶ 좁은 단면폭 75mm, 넓은 단면폭 145mm  
(테이퍼 각도 : 3.34°)
- ▶ 좁은 단면폭 85mm, 넓은 단면폭 135mm  
(테이퍼 각도 : 2.39°)
- ▶ 좁은 단면폭 95mm, 넓은 단면폭 125mm  
(테이퍼 각도 : 1.43°)
- ▶ 좁은 단면폭 110mm, 넓은 단면폭 110mm  
(테이퍼 각도 : 0°)

- (3) 초기 결합이 있는 모델

초기결합의 형상은 Fig.2에 나타난 바와 같이 초기결합을 모서리와 측면에 위치시킨 경우에 대

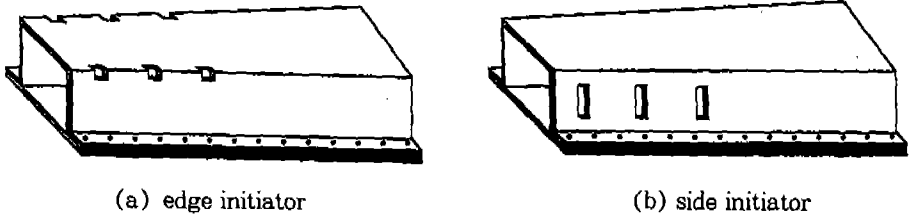


Fig.2 Side Rail with Initiator

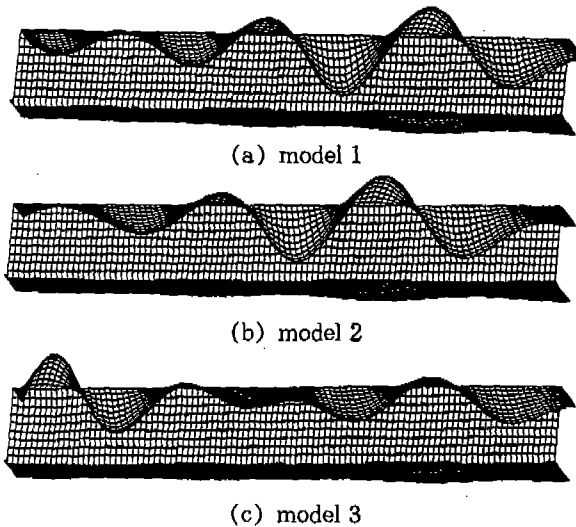


Fig.3 Buckling mode shapes of side rail

하여 설계하였다.

- ▶ 예비실험을 하여 나타난 변형형상에서 접힘이 발생한 위치에 초기결함을 위치시킨 경우(20, 120, 200mm에 초기결함을 위치시킴)
- ▶ 탄성좌굴해석(Fig.3)을 수행하여 나타난 좌굴모드의 피크(peak) 위치에 초기결함을 위치시킨 경우(90, 180, 260mm에 초기결함을 위치시킴)

### 3.2 준정적 실험장치

준정적실험은 만능시험기인 인스트론(INSTRON)을 사용하였다. 실험장치 모습은 Fig.4와 같으며 실험장치의 상단부인 헤드를 아래쪽으로 움직여 하중을 가하였다. 헤드의 속도는 10mm/min로 하였고, 실험장치 하단부에 장착된 로드셀(load cell)을 통하여 변형에 따른 반력을 측정하였다. 실험 모델을 실험장치에 설치하는 방법으로는 실험 모델의 양단을 알루미늄판으로 막아 설치하여 실험하는 방법과, 실험 모델의 양단을 철판으로 용접한 다음 실험장치에 설치하여 실험하는 방법을 사용하였으며, 동적실험 모델과 일치시키기 위해 후자의 방법을 주로 사용하였다.

### 3.3 준정적 실험 결과

준정적 실험 결과 변형하는 전형적인 형상을 Fig.5에 나타내었다. 측면부재가 많은 에너지를 흡수하기 위해서는 접힘이 일어날 때의 파장이 작아져서 많은 변형에너지를 소모하여야 한다. Fig.5(a)는 접히는 파장이 짧아서 에너지 흡수 성능이 좋은 경우이고, Fig.5(b)는 접힘이 발생하는 도중에 전체적인 굽힘변형(global bending collapse)이 발생하여 에너지 흡수성능을 저하시킨 경우이다.

#### (1) 용접간격에 따른 영향

용접점 간격을 각각 40mm, 55mm, 70mm로 하고, 각 경우당 4개씩의 모델을 제작하여 실험한 결과를 Fig.6에 나타내었다. Fig.6의 결과를 보면 최대하중의 차이와 에너지 흡수능력에 차이가 없어서 용접간격 변화가 측면부재의 충돌특성에 미치는 영향은 크지 않다고 할 수 있으나, 용접간격이 넓어질수록 용접점과 용접점 사이가 변형도중에 벌어져 변형이 비대칭으로 생기거나, 굽힘변형이 발생하는 경향이 있었다. 이후 본 연구에서는 용접점 간격을 40mm로 하였다.

#### (2) 테이퍼 각도에 따른 영향

테이퍼진 모자형단면 모델의 테이퍼 각도를 0°, 1.43°, 2.39°, 3.34°로 하여 실험 모델을 제

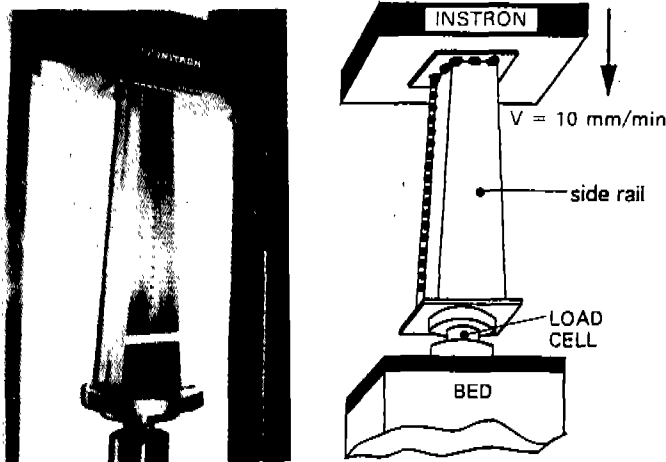
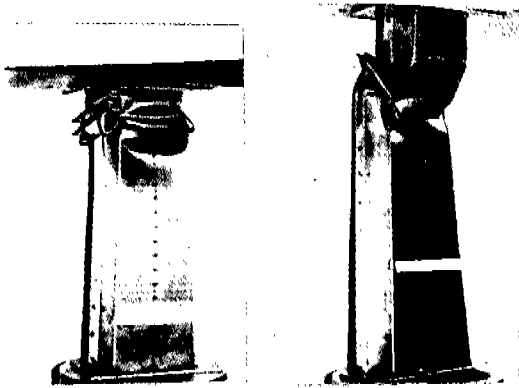


Fig.4 Quasi-static test setup

Table 1 Maximum load and energy absorption for tapered angle

| Tapered angle | Max. load(N) | Energy absorption(J) | Boundary condition |
|---------------|--------------|----------------------|--------------------|
| 0°            | 50700        | 3107                 | 알루미늄판으로 막음         |
| 1.42°         | 51000        | 2928                 | 철판을 대고 용접함         |
| 2.39°         | 46000        | 2786                 | 알루미늄판으로 막음         |
| 3.34°         | 50160        | 2724                 | 철판을 대고 용접함         |



(a) accordion collapse (b) bending collapse

Fig.5 Deformed shapes of Quasi-static test

작하고 테이퍼 각도변화에 따른 영향을 실험해 보았다. Fig.7의 테이퍼 각도변화에 따른 반력-변위선도에서 최대하중은 다음과 같다.

두가지 모델은 알루미늄판으로 양단을 막은 경우이고, 나머지 모델은 양단에 철판을 대고 용접한 경우이다. 철판으로 용접한 경우가 경계에서의 회전자유도를 모두 잡아주기때문에 알루미늄판으로 막은 경우보다는 최대반력이 높게 나타났으며, 테이퍼 각도가 클수록 최대반력은 낮아지는 것을 알 수 있다. 그리고, 실험에서 테이퍼 각도가 커질수록 전체적인 굽힘변형이 발생하는 경우가 작아져서 안정된 변형을 하는 것을 알 수 있었다.

(3) 초기결함에 따른 영향

Fig.8은 초기결함을 설정한 경우의 반력-변위선도이며 각각의 최대하중을 Table 2에 나타내었다.

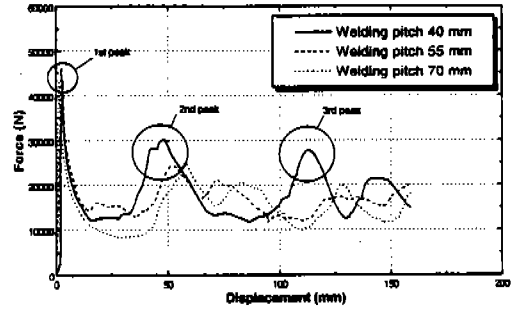


Fig.6 Time-Force curves for welding pitch

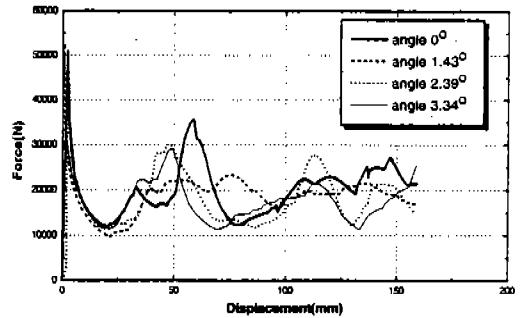


Fig.7 Time-Force curves for taper angle

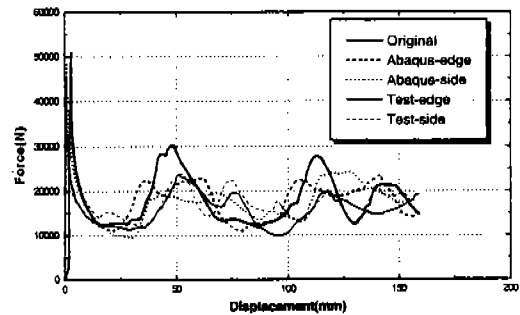


Fig.8 Time-Force curves for initiators

위의 Table 2에서 보는 보와 같이 모서리에 초기결함을 설치할 때 최대하중을 14%정도 감소시킬 수 있음을 나타낸다. 그러나, 모서리에 설치된 초기결함은 전체적인 굽힘변형이 일어나는 경우가 많았으며, 측면에 초기결함을 설정한 경우는 접합이 잘 유도 되었다.

Table 2 Maximum load for initiator  
(150mm deformation)

| Model               | Maximum load(N) | Energy absorption(J) |
|---------------------|-----------------|----------------------|
| Original            | 51000           | 2786                 |
| Buckling mode(edge) | 44000           | 2762                 |
| Buckling mode(side) | 47000           | 2724                 |
| Pre-test(edge)      | 44000           | 2454                 |
| Pre-test(side)      | 46000           | 2695                 |

3.4 준정적 실험 결과의 고찰

용접점 간격에 따른 최대하중이나 에너지 흡수량은 변하지 않으나, 용접점 간격이 넓은 경우에는 접합이 유도되는 과정에서 용접점들 사이가 벌어져서 굽힘변형을 일으키게 된다. 테이퍼 각도에 따라서는 테이퍼 각도가 클수록 안정된 변형을 유도하여 에너지 흡수성능을 높였으나, 실제 설계에 있어서 테이퍼 각도는 제약을 받는 경우가 있으며, 테이퍼 각도가 크면 전체적인 반력을 낮게한다. 초기결합을 모서리에 적용한 경우가 최대하중을 낮게하였으며, 측면에 초기결합을 적용한 경우에는 안정된 변형을 유도하였다. 초기결합은 설계시에 다른 부분과의 연결성을 방해하지 않으면서도 적용이 가능하므로 초기결합의 적용이 충돌특성의 변화를 위해서 중요하다고 판단하였다.

4. 수치 모델링 및 해석

4.1 수치 모델링

준정적 실험에서 살펴본 설계변수들 중에서 초기결합이 차량설계에서 쉽게 충돌특성을 변화시킬 수 있는 요소임을 알았다. 해석 모델에서는 동적 실험을 하기전에 준정적 실험결과를 토대로 초기결합에 다소 수정을 가하여 4가지 모델을 만들었으며, Fig.9에 전개도를 나타내었다. 자동차 충돌해석과 같은 동적붕괴해석에 사용되는 DYNA3D를 이용하여 붕괴해석을 수행하였다. 테이퍼진 모자형단면 측면부재의 모델로서 단면 폭이 넓은 쪽은 고정단으로 하고 단면폭이 좁은

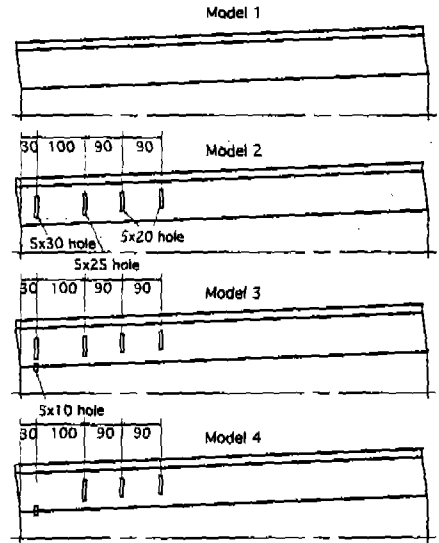


Fig.9 Analysis models

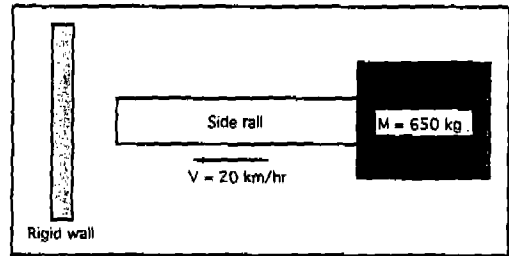


Fig.10 Analysis environment

쪽을 충돌부로 하였다. 단면의 상하대칭성을 이용하여 절반만 모델링하고 대칭면에는 대칭경계조건을 부여하였다. DYNA3D는 동적거동해석용 프로그램이므로 하중입력으로는 초기속도 및 충돌질량이 주어져야 한다. 따라서, 충돌 질량을 650kg, 초기속도를 20km/h로 하여 동적실험과 동일한 조건으로 해석을 수행하였고, Fig.10에 충돌해석상황을 나타내었다. 실험 모델에 있는 용접부에 대한 모델링은 고려치 않았으며 용접부가 있는 곳의 상하 평판이 1개의 판재로 되었다고 가정하여 모델링하였다. 총 절점수와 요소수는 3000개 정도이다.

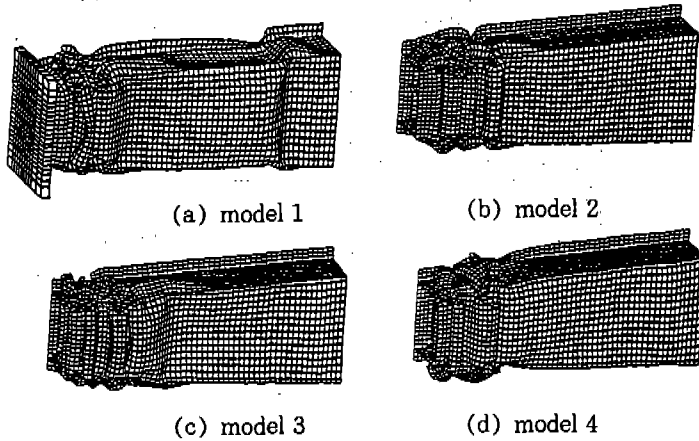


Fig.11 Deformed shapes of analysis

4.2 해석 결과

DYNA3D를 사용하여 해석한 결과를 Table 3 과 Fig.12에 나타내고, 변형되는 형상을 Fig.11에 나타내었다. 최대하중과 흡수된 에너지는 다음과 같다.

Table 3과 Fig.12의 결과를 보면 모서리와 측면에 모두 초기결함을 설치한 경우에 최대하중을 상당히 낮출 수 있음을 볼 수 있다. Fig.11의 변형성상에서는 초기결함이 없는 측면부재의 경우에 전체적인 굽힘변형은 발생하지 않았지만, 변형후반부에 불안정한 접힘이 발생하여 실제 상황에서는 굽힘변형을 유발시킬 소지가 있다. 그러나, 초기결함이 있는 2번 모델의 경우는 측면부재의 앞부분부터 접힘이 유도되어 변형후반까지 지속적으로 접힘이 유도됨을 볼 수 있다. 접힘이 잘 유도되었을 경우는 흡수되는 에너지를 증가시킨다. Table 3에서 알 수 있다.

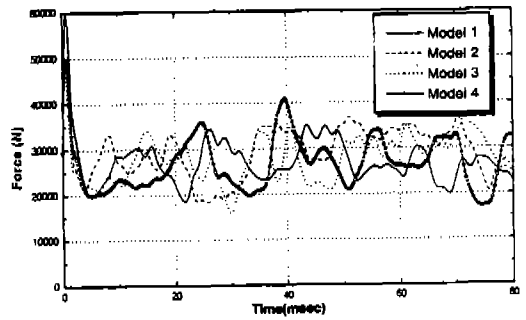


Fig.12 Time-Force curves of analysis

Table 3 Maximum load and Energy absorption of analysis results(Model 1, 2, 3, 4는 Fig.9 참조)

| Model | Maximum Load(N) | Energy Absorption(J) |
|-------|-----------------|----------------------|
| 1     | 59937           | 10748                |
| 2     | 49790           | 11375                |
| 3     | 46371           | 10681                |
| 4     | 49535           | 10510                |

5. 동적 실험

5.1 동적실험 모델

동적 실험 모델은 해석에서 사용한 4가지 모델을 가지고 실험하였다. 측면부재의 동적실험은 Fig.13과 같이 측면부재를 좌우에 대칭으로 제작

하여 대차에 장착하고 속도는 20km/h로 하고, 충돌질량은 1300kg(대차부계)로 하여 실험하였다.

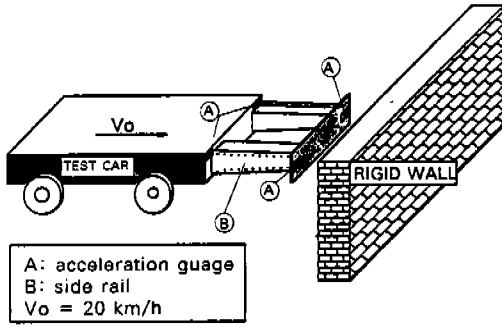


Fig.13 Dynamic test setup

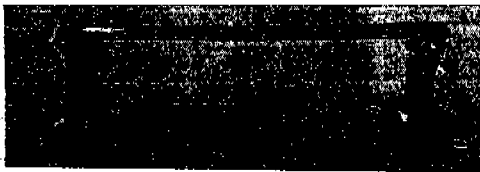


Fig.14 Typical deformed shapes of dynamic test

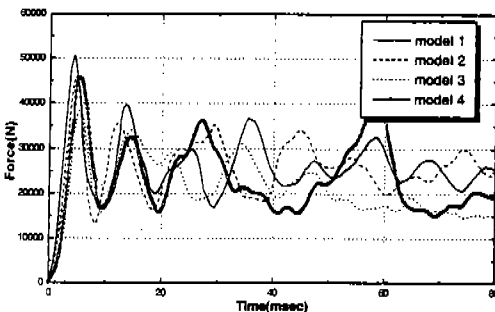


Fig.15 Time-force curves of dynamic test

Table 4 Maximum load and Energy absorption of dynamic tests

| Model | Maximum Load(N) | Energy Absorption(J) |
|-------|-----------------|----------------------|
| 1     | 50529           | 10500                |
| 2     | 45971           | 10300                |
| 3     | 38971           | 9800                 |
| 4     | 45561           | 9000                 |

5.2 동적실험 결과

동적실험 결과의 전형적인 변형모습은 Fig.14와 같으며 초기결함이 없는 모델의 변형성상을 나타내었다. 그리고, 실험결과에 나타난 시간-하중 선도를 Fig.15에 나타내었으며, Table 4에는 최대하중과 흡수되는 에너지를 나타내었다.

Table 4에 나타난 바와 같이 모서리에 초기결함을 적용한 경우에 최대반력을 많이 감소시킬 수 있으며 측면에 초기결함을 적용한 경우에는 최대반력을 감소시키면서 에너지 흡수 성능은 저하하지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 준정적 실험과 수치해석에서의 결과와 비교해 볼 때 유사한 경향을 나타내었다. 그리고 최대하중과 에너지 흡수량이 수치해석 결과와 비교할 때 값이 적게 나온 것은 수치해석에서는 점용접 (spot welding)을 고려하지 않고 플랜지의 두께를 늘려 계산하였기 때문에 강성이 더 강하게 계산된 것으로 판단하였다.

6. 결 론

모자형단면 측면부재를 대상으로 준정적 실험과 수치해석 그리고 동적실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 측면부재의 플랜지부분에서의 용접점 간격은 에너지 흡수성능이나 최대하중에 영향을 미치지 못하였으나 용접점 간격이 너무 넓은 경우에는 변형 후반부에 용접점 사이가 벌어져 불안정한 변형을 유도하는 경우가 많았다.



- 2) 측면부재의 테이퍼 각도가 클수록 최대하중을 감소시켰으나 테이퍼 각도가 너무 작거나 너무 큰 경우에는 굽힘 변형이 발생하여 에너지 흡수 성능을 저하시켰다.
- 3) 측면부재의 모서리에 초기결함을 적용한 경우에 최대하중을 크게 감소시키거나 단면의 굽힘강성을 저하시켜 전체적인 굽힘 변형을 유도함으로써 에너지 흡수성능을 저하시켰다.
- 4) 측면부재의 측면에 적용한 초기결함은 안정된 변형을 유도하고 최대하중을 감소시키며 에너지흡수성은 저하시키지 않았다.

이상은 이상화된 모자형단면 측면부재의 충돌특성 연구결과를 나타낸 것이다. 이상화된 측면부재의 경우에는 비교적 안정된 변형이 유도되어 초기결함이 안정된 변형을 유도하는 지에 대한 연구결과를 확실히 살펴볼 수 없었으나 실제 차량에 장착되는 측면부재는 단면의 형상이 비대칭이고 형상이 복잡하기 때문에 초기결함의 적용이 좀 더 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러므로, 향후에는 좀 더 실제적인 측면부재에 초기결함을 적용하여 그 특성을 연구하는 것이 필요할 것이다.

### 후 기

본 연구는 학술진흥재단의 93년도 신진연구인력 연구장려금의 지원을 받아 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Kennerly H. Digges and John B. Morris, "Opportunities for Frontal Crash Protection at Speeds Greater than 35 MPH", SAE 910807.
2. Thomas J. Trella "Side Impact Crashworthiness Design: Evaluation of Padding Characteristics Through Mathematical Simulations", SAE 912900.

3. Thomas J. Szabo, Judson B. Welcher, "Human Occupant Kinematic Response to Low Speed Rear-End Impacts", SAE 940532
4. T. Frank and K. Gruber, "Numerical Simulation of Frontal Impact and Frontal Offset Collision", CRAY channel, winter, 1992.
5. J. H. Park, S. H. Shin, H. S. Cho, "Application of the Finite Element Method for Improvement of Vehicle Crashworthiness", SAE Paper No. 912582, 1991.
6. 강신유, "충돌하중을 받은 차체 셸 구조물의 동적 붕괴 해석", 서울대학교 공학박사학위논문, 1992. 8
7. 강신유, 한동철, "사각관의 붕괴해석 및 실험에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제17권 제10호 pp. 2555~2562, 1993.
8. 강신유, 한동철, "사각관의 수치 모델링 및 동적 붕괴 해석", 한국자동차 공학회논문집, 제1권 2호, 1993년 9월
9. H. F. Mahmood and A. Paluszny, "Analytical Technique for Simulating Crash of Vehical Structures Composed of Beam Elements", SAE Paper No. 860820, 1986.
10. J. O. Hallquist, "DYNA3D User's Manual", Lawrence Livermore National Laboratory, 1987.
11. Y. Kitagawa and I. Hagiwara, "Development of a Collapse Mode Control Method for Side Members in Vehicle Collisions", SAE Paper No. 910809, 1991.
12. I Nishimura, T. Sakurai, "Prediction of the Crashworthiness of Vehicle Body Aided Computer", SAE Paper No. 912581, 1991.
13. LS-DYNA3D USER'S MANUAL, Version 3.3, Douglas W. Stilman & John O. Hallquist
14. ABAQUS USER'S MANUAL, Version 5.4, Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc., 1992.