

FMVSS 강도테스트에 따른 자동차 시트프레임의 유한요소 해석

The Finite Element Analysis of Car Seat Frame According to The FMVSS Strength Test

이 호 용*, 임 중 연**, 범 형 택***
Ho Yong Lee, Joong-Yeon Lim, Hyung Taek Bom

ABSTRACT

This study presents the structural analysis of car a seat frame by the finite element method. The load-deformation characteristics of seat frame are simulated according to the test requirements by FMVSS. Three dimensional modeling technique is applied to the components of the seat frame. The shell, solid, gap and rigid elements are employed to model the car seat frame assembly. Numerical results show that the recliner and knuckle plate are identified as the possible weak part of frame, and the results are well consistent with the experimental static load test. The current analysis model can provide useful informations to design a new car seat and can reduce the overall design cost and time.

주요기술용어 : Structural Analysis(구조해석), Car Seat Frame(자동차 시트프레임),
Finite Element Method(유한요소법), FMVSS(북미자동차 안전기준)

1. 서 론

최근 세계 자동차 산업에서는 자동차의

성능이나 품질의 향상은 물론 제품의 개발기간 단축과 생산비용의 절감 등을 위해 많은 노력을 하고 있다. 이를 위해 각국의 자동차사는 설계 초기 단계에서부터 CAE 기술을 적극 적용하여 설계 및 시제품 제작을 거쳐 제품 개선을 위한 시험 회수를 줄여 개발 기간의 단축을 꾀하고 있으며, 선진 자동차사

* 동국대학교 기계공학과

** 정희원, 동국대학교 기계공학과

*** 동국대학교 대학원

는 CAE 기법을 확대 적용하여 승객의 안전을 고려한 차량의 개발을 위해 차체의 구조나 안전벨트, 시트 등 승객의 안전과 직결되는 승객안전장치에 대해 CAE 해석을 통해 승객에 대한 안전도를 높이는 방향으로 제품을 설계, 생산하고 있다.^{1~4)}

이러한 승객안전장치 중에서 시트는 승객과 하드웨어가 직접 만나는 하나의 휴먼 인터페이스(human Interface)로서 자동차 전체 가격의 3~15%를 차지하고 있는 고가의 부품으로 기본적인 착좌 기능은 물론 차량에 대한 상품성 및 승객의 안전성과 직결되는 특성을 가지고 있다. 따라서 시트의 기본적인 기능을 만족하면서 승객의 안락도와 안전성을 위한 시트 설계를 위해 CAE 기법을 적용하여 시트에 대한 안락도 평가를 수행하고 이를 바탕으로 제품을 개선하는 여러 방법들이 연구되고 있으며, 연비 개선과 가격 경쟁력 확보의 측면에서 설계의 변경 등을 통한 제품의 경량화나, 시트에 대한 기존의 재료를 복합재료 등으로 대체하는 방법들에 대한 노력들이 진행되고 있다.^{5~8)} 또한 승객의 안전성 확보를 위해 차량의 충돌시 승객의 상해치를 최소화시키기 위해 제안된, 안전띠가 시트에 부착되어 있는 형태인 안전띠 일체형 시트(belt integrated seat)에 대해 설계 경향과 초기 설계안의 제시, 그리고 안전도 평가 및 구조해석을 통한 시제품 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.^{9~13)} 경험과 반복적인 시험을 통하여 제품을 개선, 생산하던 기존의 시트 설계 과정에서 탈피하여, 유한요소법에 의한 구조해석을 통해 얻은 정보를 이용해 제품을 설계, 생산하는 것은 매우 유용하며, 다양한 형상이나 재료에도 쉽게 적용이 가능하고, 시험을 통해 얻을 수 없는 응력, 변형률 분포 등의 다양한 정보를 얻을 수 있어 매우 생산적이고 경제적이다.

이를 위해 본 연구에서는 시트프레임의 구조요소에 대해 북미 자동차 안전기준

(FMVSS)에 따른 헤드레스트 강도 테스트와 시트백 후방모멘트 테스트의 시험 조건에 대한 유한요소해석을 실시하여 시트프레임에 생기는 응력, 변형률, 변형량 등을 구하여 시험 결과와 비교 검증하였다.

2. 강도테스트에 따른 시트프레임의 유한요소 해석

2.1 시험 조건 및 방법

본 논문에서는 주요 관심사인 시트 구조물의 변형량을 해석하기 위하여 북미 자동차 안전기준(FMVSS)에 따른 시트 강도 평가 항목인 헤드레스트 강도 테스트와 시트백 후방모멘트 테스트에 대해 해석을 실시하며, 그에 대한 시험 조건은 다음과 같다.

Table 1 Headrest strength test and seat back backward moment test by FMVSS

| Test Code | Test Conditions |
|--------------------------------|--|
| Headrest strength test (T-10) | Apply the load on the point of 63.5 mm under the headpart of headrest by head-form and in the orthogonal direction of torso reference line(DTRL). The load should generate the backward moment of 373 N · m. |
| Seat back backward moment test | Apply the load on the center point of upper back frame in the horizontal backward direction. The load should generate the backward moment of 412 N · m on the hip point(H.P.) |

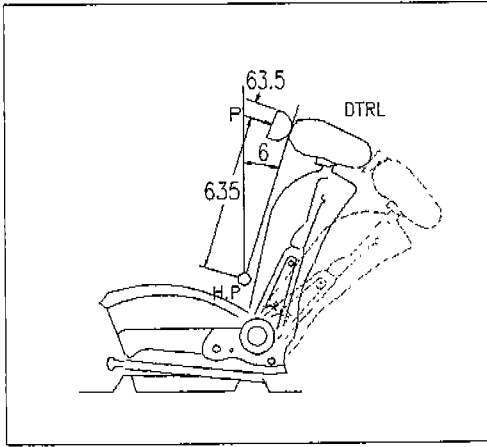


Fig. 1 Loading condition for headrest strength test

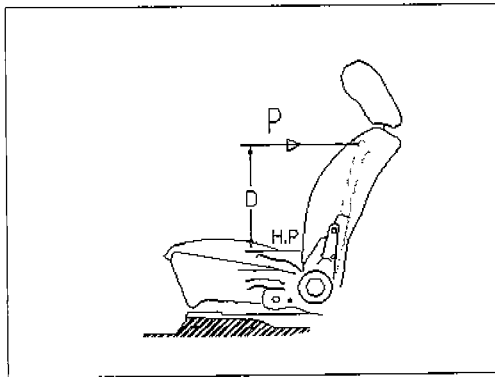


Fig. 2 Loading condition of seat back for backward moment test

2. 2 유한요소모델 및 경계조건

시트프레임에 대한 모델링은 상용 프로그램인 I-DEAS¹⁴⁾를 사용하여 모델링하고 모델링할 때 해석의 효율성을 고려하여 전체 구조의 요소에서 힘을 받는데 역할을 별로 하지 못하는 스프링이나 조그마한 구멍 및 기타 요소 등은 모델링에서 제외한다. 구조물에 대한 각 요소의 모델링이 완성되면 이를 이용하여 시트프레임의 전체적인 외형을 완성하고, 완성된 모델에 시트프레임의 수학적

해석을 위하여 유한요소를 생성한다. 유한요소 생성은 자동으로 4각형 유한요소를 생성하고 자동생성이 어려운 곳이나 기타 필요한 부위는 수동으로 3각형 또는 4각형 요소를 생성한다. 헤드레스트와 좌, 우 힌지부위 등 솔리드로 모델링된 부분은 직육면체 요소나 4면체 요소를 이용하여 유한요소를 생성한다. Fig. 3은 시트프레임의 3차원 유한요소 모델을 보여주고 있으며, 총 7,493개의 유한요소와 6,841개의 절점이 사용되었는데, 사용된 유한요소의 종류별 개수는 Table 2와 같고, 사용된 재료에 대한 물성치는 Table 3과 같다.

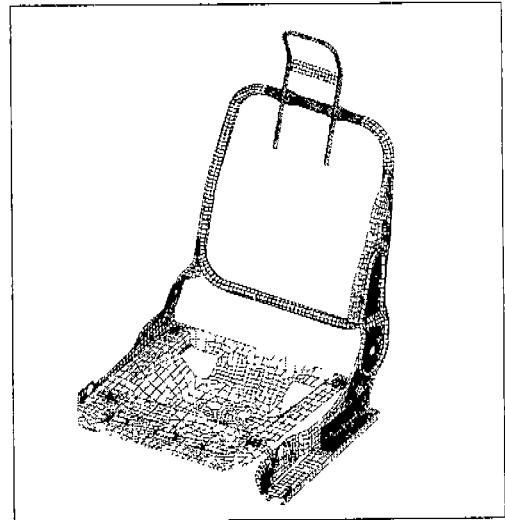


Fig. 3 Three dimensional finite element model of a seat frame

Table 2 Composition of finite elements for 3-D model

| Element | Quadri-lateral Shell | Triangular Shell | Solid | Gap | Total |
|---------|----------------------|------------------|-------|-----|-------|
| Number | 5,543 | 1,902 | 28 | 20 | 7,493 |

Table 3 Material properties for car seat frame

| Young's Modulus | Density | Poisson's ratio |
|--|---|-----------------|
| 206.8×10^9 kN/m ² | 7.82×10^3 kg/m ³ | 0.29 |

시트 모델에 대한 유한요소 모델이 완성되면 구조물의 해석을 위하여 좌, 우 연결부위에 변형 특성을 나타낼 수 있는 경계조건을 부여한다. 시트의 좌측 연결 부위는 윗부분과 아랫부분이 회전방향으로 아무런 제약 없이 움직일 수 있도록 되어 있으며, 이를 나타내기 위하여 Fig. 4와 같이 솔리드 요소를 사용하여 힌지 부분을 만들어 이를 윗부분에 결합시키기 위하여 합치시키고 다시 아랫부분과 연결하기 위하여 접촉하는 절점 부분을 반지름방향과 회전축방향으로 한쌍으로 연결시켜 반지름 방향과 회전축 방향으로 공유된 절점의 변위와 회전을 동일하게 구속한다.

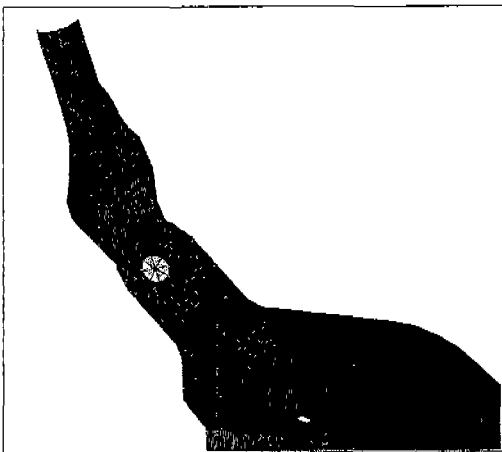


Fig. 4 Hinge part of a seat frame

또한 우측 연결부위의 경우는 Fig. 5와 같이 윗부분의 리클라이너와 중간의 연결부분,

그리고 아랫부분을 연결하기 위하여 솔리드 요소를 리클라이너에 만들어 합치시킨 후 다른 두 부분과는 반지름 방향으로 Gap 요소를 만들어서 반지름 방향의 움직임을 서로 구속하였다. 그 외 볼트나 리벳, 용접 등을 통한 각 부품간의 연결부위는 연결부분의 절점을 합치시켜서 동일한 변위를 갖도록 하였다.



Fig. 5 Recliner part of a seat frame

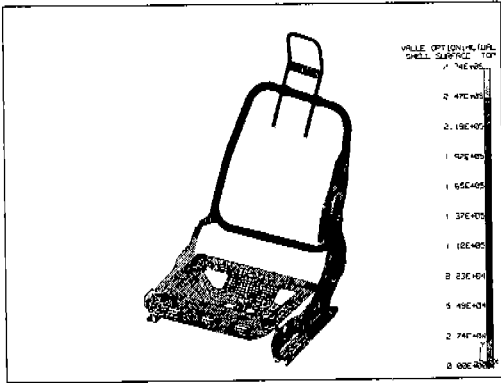
해석시 시트구조물 전체의 강체운동(rigid body motion)을 방지하기 위해 시트프레임의 레일부분을 x, y, z 모든 방향으로 구속하여 변위가 0이 되도록 한다. 유한요소 모델에 하중을 가하기 위하여 Table 1의 하중조건에 따라 정해진 위치에 하중을 가하며 국부적인 응력 집중을 방지하기 위하여 하중이 가해지는 부분에 몇 개의 강체요소(rigid element)를 만들어서 공유된 절점에 하중을 부여한다.

3. 유한요소 해석 결과

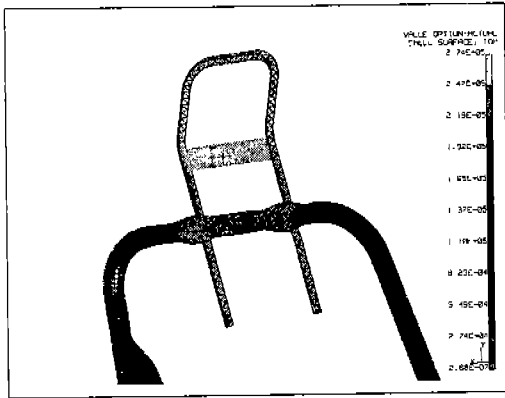
3.1 헤드레스트 강도 테스트

헤드레스트 강도 테스트는 Fig. 1과 같이 헤드레스트 좌우에 각각 0.286 kN의 하중을 이동 토르소 기준선(DTRL)에 직각인 방향으로

로 y, z 방향의 두 분력으로 나누어 가하여 해석하였다. Mises 응력의 최대값은 프레임 우측 상단에서 발생하며, 그 값은 $2.74 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 이다[Fig. 6].



(a) Whole seat frame body



(b) Enlarged position where maximum stress occurs

Fig. 6 Von Mises stress distributions of seat frame

우측 너클 플레이트 부분의 최대 응력은 $2.23 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 으로 프레임과 연결되는 윗부분에 발생하며, 리클라이너와 연결되는 중간부분에도 큰 응력이 발생한다. 리클라이너 부분은 하중이 가해짐에 따라 그 형태가 비틀어지며 최대응력은 $2.38 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 이

다. 시트프레임 우측의 위와 아래를 연결해주는 연결 플레이트 부분은 두 플레이트를 하나로 가정하여 모델링한 부분으로 최대 응력이 $2.33 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 이나, 서로 떨어진 부분을 하나로 가정하여 합치시켰기 때문이며 큰 값을 나타낸다.

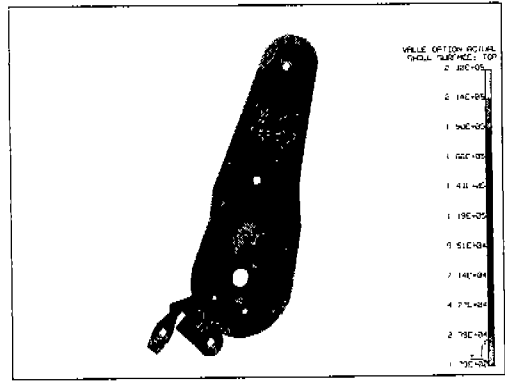


Fig. 7 Von Mises stress distributions of recliner assembly

너클 플레이트나 리클라이너 부위에 비해 시트 베이스 및 레일 부분은 매우 낮은 응력 분포를 나타낸다.

시험결과 측정 대상인 헤드폼 끝의 이동량은 컴퓨터 해석결과 좌우 하중작용점의 변형량(좌우 각각 16.2 mm, 12.6 mm)을 평균하여 구하였으며 그 값은 14.4 mm 로서 실제 시험결과인 12.4 mm 와 매우 유사한 결과를 보이고 있다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 좌측 힌지된 부분의 변형이 우측 리클라이너 부분의 변형보다 크며 이는 좌측 힌지 부분의 회전방향에 대한 움직임에 아무런 제약이 없기 때문이다.

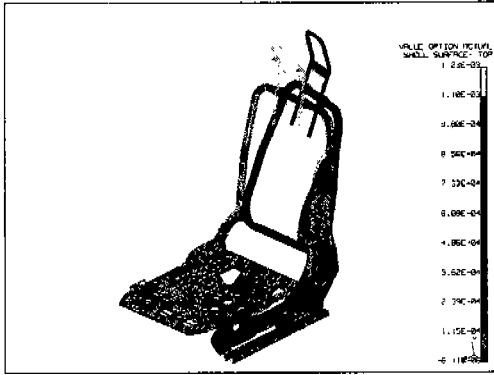


Fig. 8 Deformed configuration of whole seat frame body

3.2 시트백 후방모멘트 테스트

일반 사양에 따른 시트백 후방모멘트 강도 테스트에 대한 해석은 Fig. 2에서와 같이 백 프레임 상부 중앙의 위치에 수평 후방향으로 하중을 가하여 수행하며, 실제 시험 결과와 비교하기 위하여 하중을 일정하게 증가시키며 해석한다. 시험하중 1.088 kN 일 때의 응력 분포와 변형을 분포는 각각 Fig. 9, Fig. 10과 같고 최대 응력은 리클라이너의 중간부에서 발생하며, 그 값은 $3.54 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 이다.

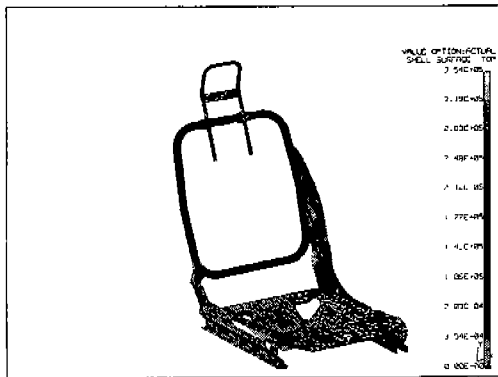


Fig. 9 Von Mises stress distributions of whole seat frame body

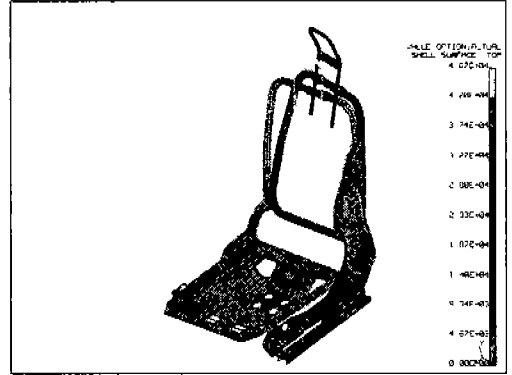


Fig. 10 Deformed configuration of whole seat frame body

해석결과 측정된 최대 이동량은 24.1 mm로 나타났으며, 시험 결과인 24.3 mm와 비교했을 때 약 0.8 %의 오차를 나타냈다. 하중 증가에 따른 최대 변형량을 실제 시험 결과와 비교해서 보여준 그래프는 Fig. 11과 같다.

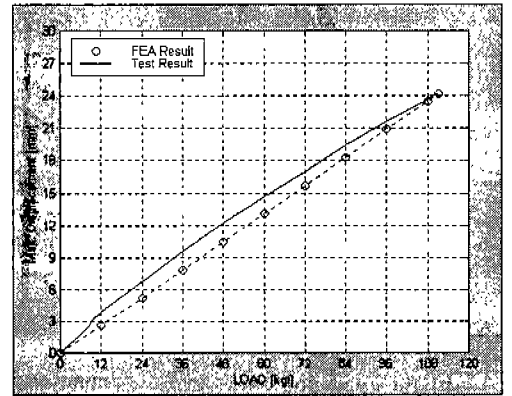


Fig.11 The comparison of maximum displacements between test and FEA result

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 시트프레임에 대해 유한요소모델을 생성하여, FMVSS 시험 규약에 따른 헤드레스트 강도 테스트와 시트백 후

방 모멘트 강도 테스트의 시험 조건을 적용하여 구조해석을 실시하였다.

해석 결과 전체적으로 리클라이너의 중간 부분에 응력 집중이 일어나므로 이 부분에 대해 응력 집중을 방지할 수 있는 방안이 요구되며 형상변경을 통해 이를 이룰 수 있다. 시트 베이스 부분이나 레일 부분은 다른 부분들에 비해 매우 낮은 응력 분포를 나타내는데, 두께를 변경하거나 시트 베이스 부분에 구멍을 추가 또는 확대하면, 시트 전체에 대한 중량을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 시트프레임의 변형량은 헤드레스트 강도 테스트의 경우 쿠션을 포함한 전체 완성 모델에 대한 시험 결과와 비교하였으며, 헤드레스트 선단의 이동량이 14.4 mm로 실제 시험 결과인 12.4 mm와 유사하게 나왔다. 시트백 후방 모멘트에 대한 경우는 프레임만으로 시험한 결과와 비교하였으며 그 결과 역시 거의 유사하게 나옴을 알 수 있다. 이와같이 시트프레임 전체 구조에 대해 유한요소해석법을 이용한 시뮬레이션을 시행하면 구조물에 대해 직접 시험해 보지 않고서도 경제적으로 시트프레임의 강도 해석을 할 수 있으며 단순한 변형 형태뿐만 아니라 시험적으로 확인할 수 없었던 구조물 전체의 응력 분포까지도 확인할 수 있고 이를 설계 제작에 계량적으로 응용할 수 있다. 또한 설계 변경을 통해 제품의 안전성 확보와 경량화를 이룰 수 있고, 더 나아가 이후 다른 모델에 대해 초기 설계 단계에서부터 이를 계량적으로 이용하면 설계 및 개발 기간의 단축과 경비 절감을 이룰 수 있어 보다 경쟁력 있는 제품을 생산할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Chang F. S., Hallquist J. O., "Finite Element Analysis of Low-Density High -Hysteresis Foam Materials and the Application in the Automotive Industry," SAE 940908, 1994, pp. 699-707.
2. Glance P., "Computer-Aided Engineering of Seat Structures." SAE 861394, 1986, 5396-5402.
3. Nagpal R., Kuo E. Y., "A Time-Domain Fatigue Life Prediction Method for Vehicle Body Structures," SAE 960567, 1996, pp. 607-616.
4. Mary M., "Seat Frame Evaluation Prototype," Bertrand Automobile, 1993.
5. Pywell J. F., "Automotive Seat Design Affecting Comfort and Safety," SAE 930108, 1993, pp. 142-151.
6. 김희성, "유한요소법을 이용한 자동차 시트 슬라이드 장치의 변형해석 및 경량화 연구," 홍익대, 1996.
7. 이호용, 임중연, 범형택, "자동차 시트프레임의 구조해석에 관한 연구," 1997년도 춘계 학술대회 논문집, 한국자동차공학회, 1997, pp. 170-176.
8. Wainwright J. C., "Integrated Restraint Seat with Composite Frame," SAE 940218, 1994, pp. 9-14.
9. 최금호, 송병록, "승용차 운전석용 경량 시트 프레임 시제품의 개발," 1997년도 추계 학술대회 논문집, 한국자동차공학회, 1997, pp. 855-862.
10. 박영선, 박경진, "다중충돌조건을 고려한 안전띠 일체형 의자의 최적설계," 1997년도 추계 학술대회 논문집, 한국자동차공학회, 1997, pp. 607-612.
11. 박영선, 양우호, "컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 안전띠 일체형 의자의 해석," 1997년도 추계 학술대회 논문집, 한국자동차공학회, 1997, pp. 849-854.
12. 양우호, "승객 안전도를 고려한 안전띠 일체형 의자의 정·후면 충돌 해석," 한양대학교, 1997.
13. Cole J. H., "Developing a Cost Effective Integrated Structural Seat," SAE 930109, 1993, pp. 154-183.
14. I-DEAS FEMTH User's Guide Manual, SDRC.