

결합부 강성을 고려한 단순차체모델의 승객거동 해석

Occupant Behavior Analysis of Simplified Full Car Model in Consideration of Joint

김 홍 욱*, 박 신 희*, 강 신 유**, 한 동 철***, 김 정 원****
H. W. Kim, S. H. Park, S. Y. Kang, D. C. Han, J. W. Kim

ABSTRACT

In substitution of beam-nonlinear spring model for real-car, it may have errors due to complicated characteristics of joint and overestimation of joints stiffness. In this research, a method for the joint modeling was suggested by nonlinear static and dynamic analyses of beam and shell joint models and verified by the application of accomplished joint modeling method to simplified full car model. In consequence, modified simplified full car model was improved in local acceleration and rigid wall force. Finally, the frontal crash analyses with the dummy were established and the accelerations of head, chest and pelvis had good agreements with those of shell model.

주요기술용어 : Nonlinear spring(비선형 스프링), Joint model(결합부 모델), Simplified full car model(단순차체모델), Occupant behavior analysis(승객거동해석)

1. 서 론

국제적으로 자동차 안전기준이 강화되고 있는 현재, 자동차 충돌해석은 차체설계 초기단계에서

중요한 위치를 차지하고 있다. 차체 충돌실험은 많은 경비와 시간이 들고, 분석이 어려운 반면, 1970년대 이후 컴퓨터의 하드웨어와 소프트웨어의 진보로 보편화된 유한요소해석을 이용한 충돌해석은 실험의 많은 단점을 극복하므로 현재의 사용이 일반적인 추세이다.¹⁾ 그러나, 셀 요소를 이용한 전 차체 모델링을 통한 해석은 빠른 설계 변경의 결과를 보이기 어렵고, 해석결과가 요소 수에 민감하며, 모델링에 많은 시간과

* 서울대학교 대학원

** 정회원, 강원대학교 정밀기계공학과

*** 정회원, 서울대학교 기계설계학과

**** 쌍용자동차(주)

노력이 소요되므로 최근에는 구조자체의 압축붕괴²⁾와 굽힘 붕괴³⁾의 특성을 이용한 보 요소와 비선형 스프링 요소를 이용한 해석기법이 개발되고 그 방법론이 제시되고 있다. 보 요소와 비선형 스프링 요소를 이용한 차체 충돌해석은 거동을 예측할 수 있는 부재의 특성곡선을 산출하여 미리 입력값으로 사용함으로써 요소 수를 줄이고 계산시간을 줄이면서도 해석의 정확도를 그대로 유지한다는 장점이 있다. 설계초기단계에서 그 유용성을 입증하는 연구결과도 발표되었다.⁴⁾ 이러한 단순모델 해석기법은 승객거동해석에 있어서도 빠른 시간에 더미의 거동을 해석함으로써 유용하게 사용되어질 수 있는데, 이를 위해서는 정확한 국부의 가속도가 적용되어야 한다. 기존연구⁴⁾에서는 결합부의 강성을 고려하지 않으므로 차체 강성이 과대 평가되었다. 본 연구에서는 결합부의 강성을 고려한 단순모델을 통하여 결합부 강성의 과대평가를 통한 문제점을 지적하고 이를 통하여 보다 유용하고 적합한 결과를 보일 수 있는가를 살펴보고자 한다.

2. 결합부 강성의 비선형해석

일반적으로 보 구조물에서 결합부는 보와 보가 만나는 경우 보의 기하학적인 연속성이 없어지는 영역 또는 하중을 전달하는 부재들의 교차점 또는 접합점과 그 점에 연결된 가지부재를 포함하여 정의된다.⁵⁾ 단순차체모델에서 결합부를 보 요소로 모델링 하는 경우, 차체 충돌 변형시 결합부에서는 굽힘 변형이 지배적으로 나타나게 된다. 이를 보 요소와 보 요소의 단순연결로 모델링하게 되는 경우, 실제 구조물에서 나타나는 국부 좌굴현상이 구현되지 않으므로 결국 더 큰 강성을 나타내게 된다. 실제 차체에서는 많은 부분이 결합부로 이루어져 있고, 과대 평가된 강성은 차체 가속도에 큰 영향을 미치게 된다. 이를 직접적으로 규명하기 위하여 상용 비선형해석 프로그램 ABAQUS를 통하여 보 요소로 모델된 결합부와 셸 요소로 모델링된 결합부를 해석하고 그 결과를 제시하였다. 결합부는 차체 부재 중 사이드실(side sill)과 필라(pillar)가 만나는

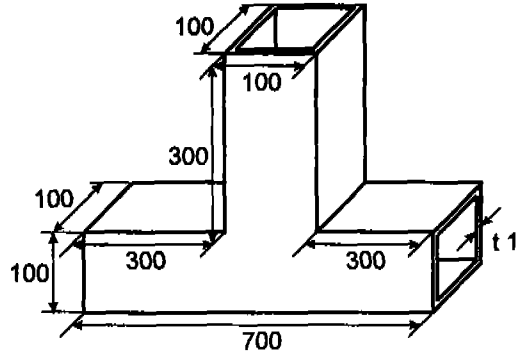


Fig. 1 해석에 사용된 결합부 형상

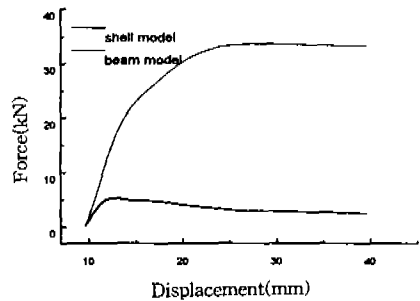


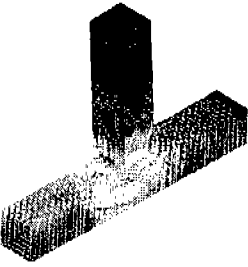
Fig. 2 보 요소 모델과 셸 모델 결합부의 반력곡선 비교

부분을 T자 형태로 간략모델화 하였고, 이는 다음의 Fig.1과 같다. 해석조건은 비교하고자 하는 전 차체 셸 모델의 변형이 모두 끝나는 시점에서 필라와 실의 상대변위가 30mm내외 정도에서 머무르므로 정적해석에서는 약 30mm정도의 변위조건을 부여하였다. 두 결과의 반력과 응력분포의 비교는 Fig.2, Fig.3과 같다.

결과를 통하여 반력곡선과 응력집중의 경향이 전혀 다르게 해석되고 있음을 알 수 있다. Fig.3에서 응력집중의 위치를 보면 셸 모델의 경우 굽힘 붕괴가 발생하기 시작하는 부분에서 국부적으로 응력과 변형이 집중되면서 박판의 좌굴을 통하여 굽힘 붕괴가 유도됨을 알 수 있다. 그러나 보 요소 모델의 경우 필라부에 해당하는 보에 응력이 전체적으로 분포하고, 최대응력을 갖는 위치도 필라와 사이드실이 만나는 결합부



(a) 보 요소 모델



(b) 셸 모델

Fig.3 보 요소 모델과 셸 모델 결합부의 응력비교

가 아니라 필라의 하단부에 걸리고 있다. 이는 앞에서 언급한 국부좌굴이 보 요소 모델에서 구현되지 않는 문제를 보여주고 있으며 결국 Fig.2의 반력곡선의 비교처럼 무려 6배에 해당하는 강성의 과대평가를 야기하게 된다. 결국 보 요소를 이용하여 차체 결합부를 모델링하기 위해서는 국부좌굴을 구현할 수 있는 요소의 삽입이 요구되어지고 이를 위하여 비선형 스프링 요소를 삽입하고자 한다.

3. 결합부 강성의 비선형 스프링 요소로의 삽입

기존에도 결합부의 강성을 합당하게 고려하기 위한 많은 연구가 있지만, 이들 연구가 대부분 실험결과에 의존하고 있고, 또는 그 결과를 바탕으로 만들어낸 실험식을 이용하고 있다.^{6,7)} 현재 해석에 사용하고자 하는 단순차체모델은 설계초기단계에서 적절하게 차체의 충돌특성을 빨리 구현하기 위한 방법으로써 각 경우마다의 결합부의 실험이나, 해석을 통한 결과를 이용하기보다는 기존의 이론을 이용하고, 이에 모델링 기법을 도입하여 적절히 결합부를 모델링하고자 한다. 본 연구에서 이용된 굽힘 붕괴 특성을 구현하기 위한 이론은 Kecman이론³⁾이다. 이를 간략히 보면, 부재가 축방향으로 붕괴할 때에 Fig.4의 각 국부 힌지선에서 에너지 흡수가 발생하며, i번째 힌지선에서 흡수된 에너지를 $W_i(\theta)$ 라고 한다면 총 에너지 흡수량은

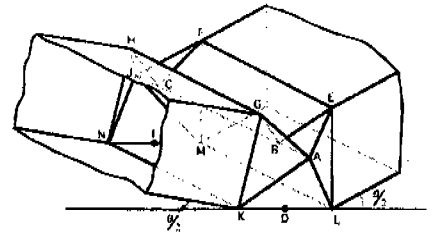


Fig.4 굽힘 붕괴 메카니즘

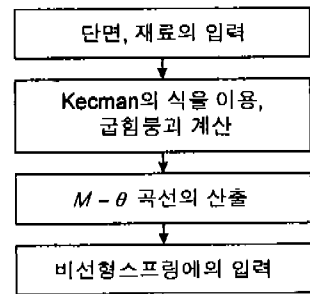


Fig.5 결합부 강성의 비선형 스프링 요소로의 삽입

$$W(\theta) = \sum_i^8 W_i(\theta) \quad (1)$$

가 되고, 이를 이용하여 모멘트를 구하면 다음과 같다.

$$M(\theta) = \frac{W(\theta + \Delta\theta) - W(\theta)}{\Delta\theta} \quad (2)$$

이를 토대로 $M-\theta$ 곡선을 구해낼 수 있게 된다. 여기서 구해진 $M-\theta$ 곡선은 부재의 변형 방향으로의 굽힘 강성으로써 비선형 스프링의 입력값으로 사용된다. 부재의 변형은 총 6자유도를 가지나 주로 굽힘 2방향과 축방향 압축이 발생하게 된다. 이 때의 굽힘 2방향으로의 강성값을 구하여 비선형 스프링 요소에 입력한다. 결합부 강성의 비선형 스프링 요소를 이용한 삽입을 간략히 보면 Fig.5의 순서도와 같다.

4. 비선형 스프링이 삽입된 보요소 모델의 동적 해석

보 요소 차체 결합부에 비선형 스프링을 삽입하여 실제 차체 충돌시 결합부의 거동과 유사한 에너지 흡수능력을 지니도록 하기 위한 모델링

방법을 얻기 위하여 비선형 스프링의 위치를 변화시키면서 해석을 수행하였다. 동적 해석에 사용된 해석코드는 PAM-CRASH이다. 해석에 사용되어진 셀 요소 모델은 정적해석에 사용되어진 Fig.1과 같은 모델이고, 파라미터 해석에 사용되어진 비선형 스프링과 보 요소로 이루어진 모델의 그룹은 다음의 Fig.6과 같다. 각 모델들은 정적해석을 통한 결과를 토대로 굽힘 변형이 예상되는 용력 집중 부위를 고려하여 선택되어진 위치에 적절한 조합으로 비선형 스프링이 삽입되었다. 제시되어있지 않은 모델은 셀 모델이다. 이들 모델을 해석하여 얻어진 결과의 비교는 Fig.7, Fig.8에 제시하였다.

셀 모델(모델1)과 보 요소만으로 이루어진 모델(모델2)을 비교해보면 최대반력이 무려 6배가 넘는 차이를 보이고 있다. 이는 정적해석에서와

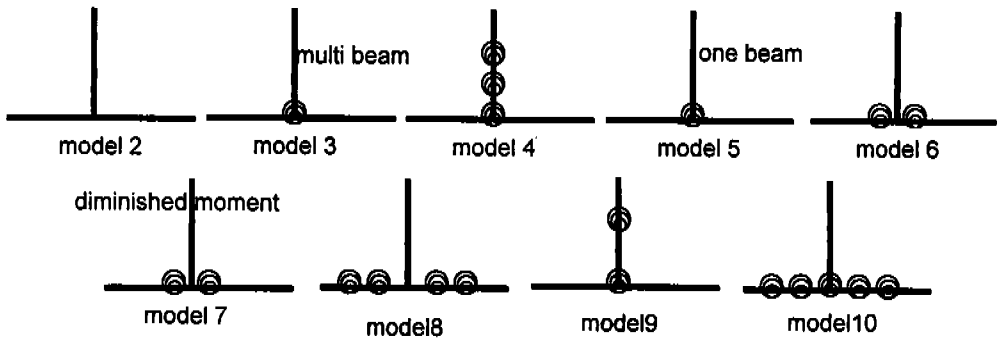
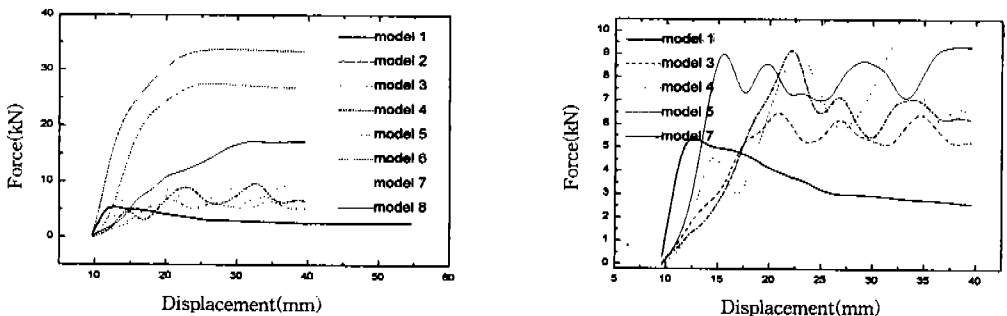


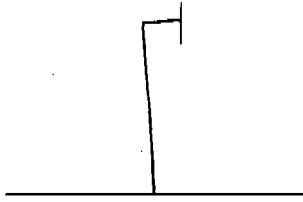
Fig.6 파라미터 해석에 사용되어진 모델



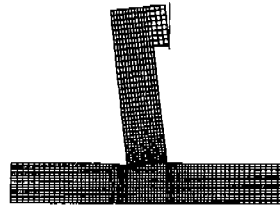
(a) 모든 모델의 반력의 비교

(b) 모델2,6,8을 제외한 모델의 반력비교

Fig.7 반력곡선의 비교



(a) 비선형 스프링 모델



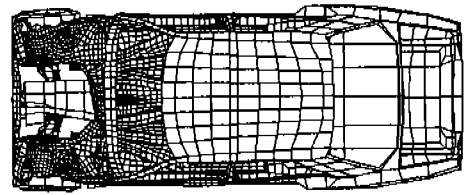
(b) 셀 모델

Fig.8 비선형 스프링 모델과 셀 모델의 변형형상 비교

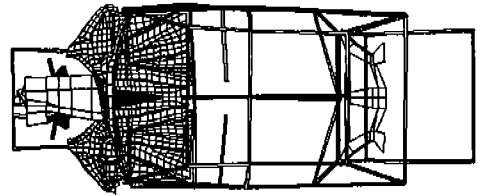
거의 흡사한 결과이다. 해석모델중 변형특성을 고려하여 결합부위 부근에만 비선형 스프링을 삽입한 모델(모델6, 모델8)도 마찬가지로 강성이 과대 평가되므로 결국 모델2, 모델6, 모델8을 제외한 반력곡선을 Fig.7의 오른쪽 그림으로 제시하였다. 모델3과 모델4, 모델5의 결과의 비교를 통하여, 보 요소의 개수가 증가할수록 강성이 줄어들고, 비선형 스프링이 필요이상으로 삽입되면 오히려 강성이 증가함을 알 수 있다. 이는 변형이 집중되는 부분에서 모든 에너지가 소산되지 않고, 힌전달과 변형의 차이로 인하여 실제로 소성에 도달하지 않는 주변에 설치된 비선형 스프링에서도 소성역에 도달하는 효과를 야기하기 때문으로 고려된다. 모델9와 모델10은 마찬가지로 비선형 스프링의 개수의 효과와 경계조건을 고려를 위한 해석모델로 앞에서 언급한대로 강성이 증가하는 결과를 보였다. 해석결과를 통하여 모델3이 가장 셀 모델에 근사하는 모델로써 셀 모델의 최대반력과 비교하여 20%의 오차 내에서 근사하고 있다. 이는 최초 보 요소만으로 이루어진 모델과 비교하여 볼 때 반력과 에너지 흡수에서 4배에 가까운 보정을 뜻한다. 다음의 Fig.8은 셀 모델과 모델3과의 변형양상의 비교이다.

5. 결합부 모델의 단순 차체 모델에의 적용

기존의 모델⁴⁾에서는 결합부가 보 요소와 보 요소를 직접 연결한 형태로 앞에서도 언급했듯이 실제보다 더 높게 평가된 강성을 나타내었다. 과대 평가된 강성문제를 해결하기 위하여 비선



(a) 셀 모델 전 차체 모델



(b) 수정된 단순 차체 모델

Fig.9 변형형상의 비교

형 스프링과 보 요소로 이루어진 결합부 모델을 단순 차체모델에 적용하였고, 이때 국부가속도와 강체벽의 반력곡선의 비교를 통하여 개선여부를 알아보았다. 다음의 Fig.9는 변형이 최대가 될 때의 셀 모델과 결합부 강성을 고려한 단순 모델의 변형형상이다. 변형형상은 기존의 단순모델과 큰 차이를 가지지 않는다.

Fig.10은 강체벽의 반력곡선으로, 기존의 모델에서 초반의 반력이 더 컸던 구간이 거의 셀 모델과 일치되고, 최대반력과 후반부의 반력경향 등 많은 점에서 큰 개선을 보이고 있다. Fig.11은 B필라부 하단의 가속도곡선으로 비선형 스프

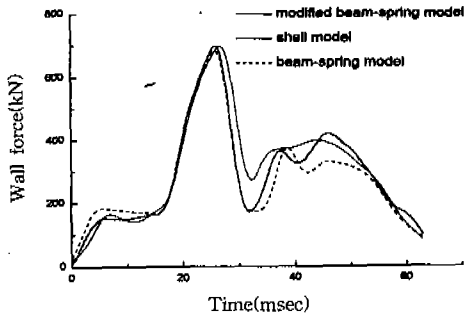


Fig.10 강체벽의 반력곡선

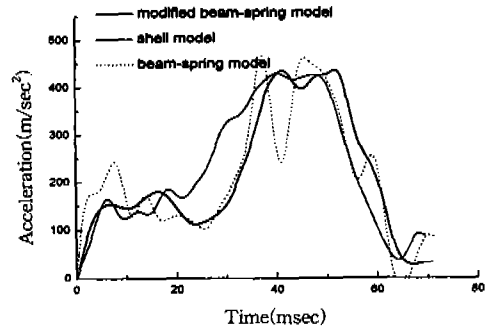
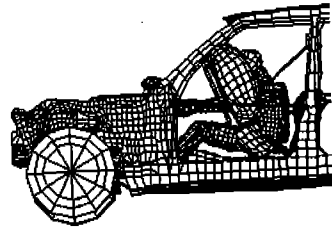


Fig.11 B필라 하단의 가속도곡선

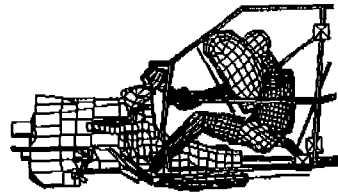
링이 삽입된 차체 결합부 근처의 가속도를 도시한 것으로 시간적인 지연이 당겨지는 않았으나, 초반의 거동과 가속도의 최대치, 경향성 등 상당한 개선을 가져오고 있음을 알 수 있다. 가속도의 시간적인 지연이 발생하는 이유는 셸 모델에서 단순 모델로 치환하는 과정에서 손실된 질량이 제대로 보상되지 않거나, 또는 적절한 위치에 보상되지 않았으므로 발생하는 이유로 추정된다.

6. 수정된 단순 모델을 이용한 승객 거동 해석

반력과 국부가속도가 더 적정히 평가된 수정된 단순차체모델에 더미를 탑재하고 해석을 수행함으로써 승객거동해석에 미치는 영향을 평가하였다. Fig.12는 셸 모델과 수정된 단순차체모델의 충돌해석시 더미의 거동의 비교이다. 기존의 단순차체모델에서와 마찬가지로 더미의 충돌 형상은 셸 모델과 거의 흡사함을 알 수 있다. 인체의 각 부위, 즉 머리(head), 가슴(chest), 골반(pelvis)에 미치는 가속도를 비교하면 Fig.13과 같다. 셸 모델과 단순 차체 모델, 그리고 수정된 단순 차체 모델을 비교하였으며, 단순 차체 모델과 비교하여 수정된 단순 차체 모델은 더욱 셸 모델과 근사하는 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 단, 인체의 상해치가 FMVSS규정을 만족시키지 못하는데 이는 셸 모델 자체가 스티어링 칼럼이 모델링 되어있지 않으므로 더미와



(a) 셸 모델



(b) 수정된 단순 차체 모델

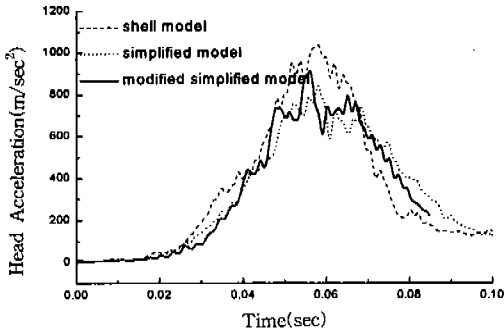
Fig.12 80ms에서의 더미의 거동비교

스티어링의 충돌시 컬럼의 붕괴를 통한 상해치의 감소가 구현되지 않기 때문으로 추정된다.

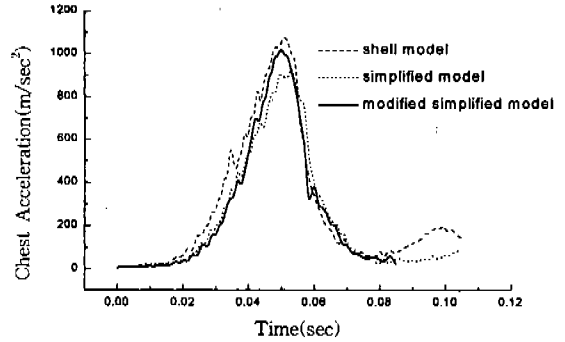
7. 결 론

비선형 스프링을 삽입하여 차체 결합부의 강성을 고려한 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

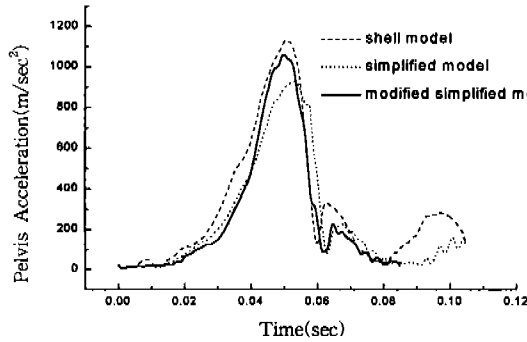
- 1) 보 요소로 이루어진 결합부는 국부좌굴을 구현하지 못함으로써 과대 평가된 강성을



(a) 머리의 가속도 비교



(b) 가슴의 가속도 비교



(c) 골반의 가속도 비교

Fig.13 인체 각부의 가속도의 비교

야기한다.

- 2) 굽힘 붕괴 이론과 적절한 모델링 방법을 이용하여 보 요소 모델에 비선형 스프링을 삽입함으로써 차체 결합부의 적절한 강성을 구현할 수 있다.
- 3) 전 차체 모델을 단순모델로 치환함에 있어서 비선형 스프링을 삽입한 구조결합부 모델을 통하여 반력과 국부가속도의 결과를 향상시킬 수 있다.
- 4) 보 요소와 비선형 스프링 요소를 이용한 단순 차체 모델을 통하여 승객 거동의 해석이 가능하고, 결합부를 고려함으로써 셀 모델을 이용한 승객 거동 해석과 근사한 가속도특성을 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 G7 프로젝트의 일환으로 서울대학교 터보동력기계에서 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. E. Haug, J. Clinckemaillie, X. Ni, A. K. Pickett, T. Queckborner, "Recent Trends and Advances in Crash Simulation and Design of Vehicles", Crashworthiness of Transportation Systems: Structural Impact and Occupant Protection, pp. 401~417, 1997.

2. T. Wierzbicki, W. Abramowicz, "On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, pp 727~734, 1983.
3. D. Kecman, "Bending Collapse of Rectangular and Square section Tubes", *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 25. NO. 9,10. pp. 623~636, 1983.
4. H.S. Kim, S.Y. Kang, I.H. Lee, S.H. Park, D.C. Han, "Vehicle Frontal Crashworthiness Analysis by Simplified Structure Modeling using Nonlinear Spring and Beam Elements", *I.J. Crash* Vol. 2. No. 1. pp. 107~117, 1997.
5. E. Nikolaidis, K. Lee, "A 3-D Joint Model for Automotive Structures", *International Congress and Exposition*, SAE Paper No. 921088, 1992.
6. 박경진, 이광원, 박영선, 이권희, 김만식, 이용래, 정태은, "최적화를 이용한 전기자동차 구조물 접합부의 특성 규명", *한국자동차공학회 추계학술대회*, pp. 176~183, 1995.
7. M. Matolcsy, "Crashworthiness of Bus Structures and Rollover Protection", *Crashworthiness of Transportation Systems: Structural Impact and Occupant Protection*, pp. 321~360, 1997.