

자동차 보강 프레임에 대한 구조 설계 및 해석

강성수*, 조성근†

(논문접수일 2010. 5. 4, 심사완료일 2010. 5. 20)

Structural Design and Analysis for the Reinforced Frame of Vehicle

Sung-Soo Kang*, Seong-Keun Cho†

Abstract

To achieve the structural safety of the vehicle, designs in various cases are carried out by using CATIA program. It is promoted the relaxation of stresses by collisions from the front portion, the side part and the rear portion of the vehicle. In this study, we conduct a variety of design of frames for the light weight frame of the vehicle and structural analysis, to protect the driver by adding reinforced frame. In the case of such a collision, there are maximum stresses greater than yield strength of steel and a very large local plastic deformation at the collision part.

Key Words : Vehicle(차량), Structural Design(구조 설계), Frame(프레임), Computational Analysis(수치해석), Collision(충돌)

1. 서론

현대 사회에 있어서 자동차는 생활에 있어 선택할 수 있는 상품이 아니라 필수품이 되어감에 따라 이를 사용하는 운전자의 안전이 매우 중요한 문제로 제기되며, 안전성 확보의 중심이 되는 자동차 프레임 설계가 우선적으로 논의되어야 한다⁽¹⁾. 특히, 프레임은 차량의 골조를 형성하고 운전자를 직접 보호하는 구조물이므로 외부 충격이나 위협으로부터 운전자를 안전하게 보호할 수 있어야 한다⁽²⁻⁵⁾. 차체는 차량 내부를 둘러싸서 사람에게 안락과 안전을 제공함과 동시에 사람을 보호하는 데 도움을 준다. 차체의 구조는 매우 다양

하지만, 크게 차체와 프레임이 분리된 형태와 단일 차체, 스페이스 프레임(space frame) 등으로 나눌 수 있다⁽⁶⁾. 소수의 자동차만이 분리형 차체와 프레임을 장착하고 있다. 차체는 새시의 위쪽에 보이는 것이고, 여기서 새시는 일반적으로 차체를 제외한 모든 것을 포함하는 구조물을 말한다. 단일 차체는 별도의 프레임이 따로 없으며 차체 패널들은 용접으로 결합된다. 일반적으로 짧은 스티브 프레임(stub frame) 또는 엔진 크레이들(engine cradle)은 차체의 앞쪽 아래에 고정되는데, 이것은 엔진, 현가장치, 조향장치를 설치하는 데 필요한 강도와 부착점의 역할을 수행한다. 또한 스페이스 프레임 구조는 용접으로 일체가 된 강판 스탬핑(steel stamping)으로 만

* 전주대학교 기계자동차공학과 (sskang@jj.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200번지

† 전북대학교 대학원 정밀기계공학전공

들어진다. 이것은 경주용 차량의 튜브 새시 및 롤 케이지(roll cage)와 유사하며, 스페이스 프레임에 플라스틱 패널을 부착하면 차체가 완성된다.

차량 구조물에 대한 성능 평가^(1,4,7)는 주로 충돌 시험이 선행되어야 하겠지만 이를 위해서는 고가의 장비와 인력 및 경제성 면에서 많은 어려움이 예상된다⁽³⁾. 본 연구에서는 차량의 구조적 안전성과 경량화를 목표로 하여, CATIA V5를 사용하여 프레임의 설계를 실시하였으며⁽⁸⁾, 차량 경량화 및 보강 지지대에 중점을 두었고⁽⁹⁻¹²⁾, 전면, 측면, 후면충돌 시 프레임 변형을 최소화하여 운전자를 보호할 수 있도록 보강재를 추가하여 구조해석을 실시하였다.

2. 기본 프레임에 대한 구조해석

2.1 프레임에 대한 하중조건 및 재료상수

먼저 차량의 무게는 차체 무게(220kg)와 운전자 무게(80kg)를 더하여 300kg으로 하였으며, 최고 속도는 40km/h로 하였고, 충돌 접촉 시간은 일반적으로 통용되는 승용차 충돌 시간 0.5초로 설정하였다. 프레임의 재질은 강철(steel)이다. 충격량은 3333.33kg/s로 식 (1)과 같이 계산하였으며, 충돌 접촉 시간 동안 작용한 힘을 계산하면 식 (2)와 같으며, 충격량과 작용한 힘은 각각 3333.33kg·m/s 및 6667N으로 본 연구의 모든 경우에 대하여 동일하게 적용되었다.

$$I = mv = (220kg + 80kg) \times 40km/h \quad (1)$$

$$F = I/t \quad (2)$$

또한, 운전자의 승차를 가정한 균일 분포 하중을 받는 양 단고정보의 처짐은 식 (3)과 같다.

$$\delta = ul^4/384EI, w = P/l \quad (3)$$

본 해석에서 사용된 프레임의 재료상수는 표 1과 같으며, 프레임의 응력해석을 위해 전면 왼쪽 측면충돌, 전면충돌,

Table 1 Mechanical Properties of material

Elastic Modulus	148GPa
Poisson' Ratio	0.266
Density	7860kg/m ³
Yield Strength	250MPa

측면충돌, 후면충돌의 4가지 경우에 대하여 3차원 설계 프로그램인 CATIA V5를 이용하였고, 이를 통해 응력이 고르게 분산되는 프레임을 설계하였다. CATIA를 이용한 프레임 설계에는 Part Design에서의 Rib를 이용하는 방법과 Generative Shape Design에서의 Sweep를 이용하는 방법이 있는데, Sweep은 Surface를 설계하는 도구로서, Surface에서 두께의 수치 값을 입력하거나, Solid 형상으로 제작한다. 프레임 안이 비어있는 파이프 구조이므로 두께를 입력한다. 그러나 형성 과정에서의 교차하는 곡면이나 연결 부분에서의 이론적으로 접근할 수 없는 미세한 부분에서의 형성 때문에 해석에서의 오류가 발생한다. 프레임의 형상이 단순하거나, 많은 곡면을 요구하는 부분이 없는 경우에는 상관없지만, 그렇지 않은 경우 Rib를 이용한 해석이 보다 효율적이다⁽⁸⁾.

2.2 충돌해석

먼저, Fig. 1과 같은 기본 프레임에 대해 전면, 측면, 후면 충돌 해석을 실시하였다.

Fig. 2는 전면 왼쪽 측면충돌인 경우에 대한 프레임의 변형과 응력분포도이다. 후면을 고정시키고, 전면 왼쪽 부분에 정하중을 가한 결과, 하중을 직접적으로 받은 부분이 가장 큰 변형을 나타냈다. 또한, 가장 큰 변형을 나타낸 부분의 응력은 27GPa이었다. Fig. 3은 전면충돌인 경우에 대한 프레임의 변형과 응력분포도이다. 후면을 고정시키고, 전면 부분에 정하중을 가한 결과, 정하중을 직접적으로 받은 부분에서 가장 큰 응력(10GPa)이 발생하였다.

Fig. 4는 측면충돌인 경우에 대한 프레임의 변형과 응력분포도이다. 후면 좌측면을 고정시키고, 전면 우측면 부분에 정하중을 가한 결과, 정하중을 직접적으로 받은 측면 부분이 가장 큰 변형을 나타냈고 이곳에서의 응력은 4.76GPa이었으며, 전면 부분과 후면 부분이 상대적으로 작은 변형을 나



Fig. 1 Basic frame

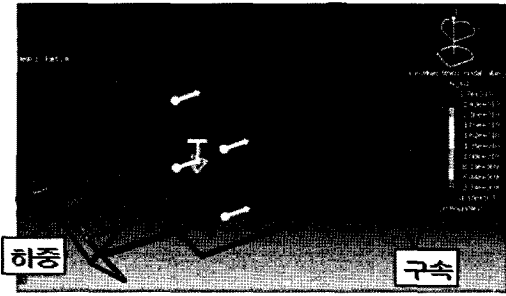


Fig. 2 Stress distribution and deformation of frame in case of the front left side impact

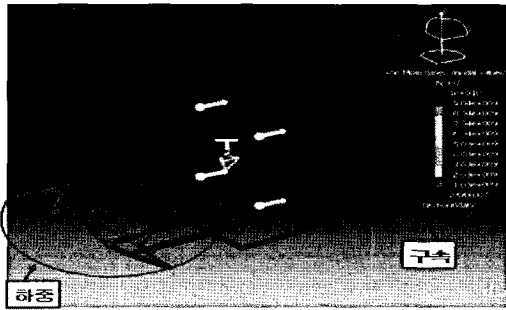
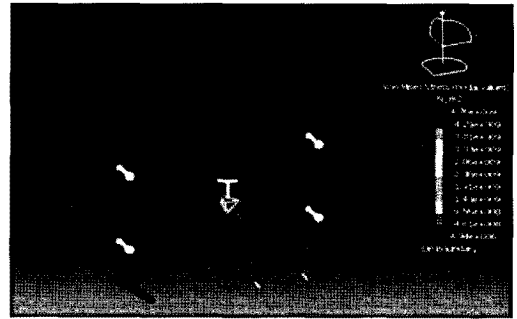
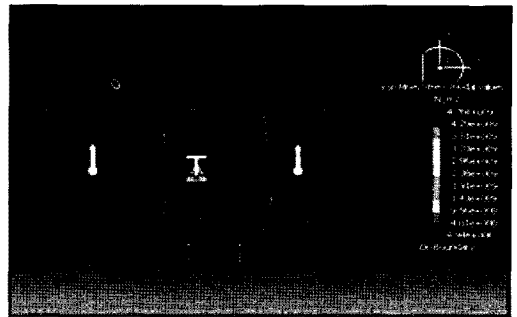


Fig. 3 Stress distribution and deformation of frame in case of the front impact



(a) perspective view



(b) upper view

Fig. 4 Stress distribution and deformation of frame in case of the side impact

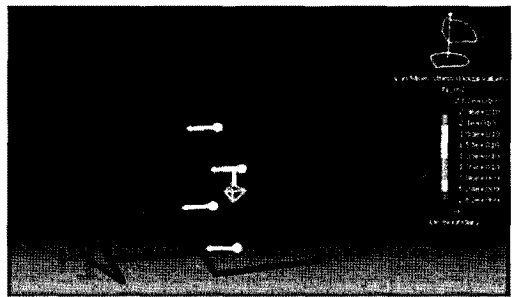


Fig. 5 Stress distribution and deformation of frame in case of the rear impact

타났다. Fig. 5는 후면충돌인 경우에 대한 프레임의 변형과 응력분포도이다. 전면 부분을 고정시키고, 후면 부분에 정하중을 가한 결과, 정하중을 직접적으로 받은 후면 부분이 가장 큰 변형을 나타냈고, 이곳에서의 응력은 26.2GPa이었다.

표 2는 기본 프레임에 대한 전면, 측면, 후면충돌 해석 결과를 정리한 것이다.

3. 전면 부분 보강 프레임에 대한 구조해석

전면 왼쪽 측면충돌, 전면충돌, 측면충돌, 후면충돌의 4개 부분에 대하여 CATIA V5를 이용해 분석한 결과, 차량의 전체적인 충돌에서 매우 큰 급힘 변형을 나타냈다. 따라서 프레임의 급힘 현상을 줄이기 위해 Fig. 6에서 보는 바와 같이 전면 부분을 보강하여 전면 왼쪽 측면충돌, 전면충돌, 측면충돌, 후면충돌의 4가지 경우에 대한 해석을 실시하였다.

Fig. 7은 전면부 보강 프레임의 후면 부분을 고정시키고, 전면 왼쪽측면에 충격량을 정하중으로 가한 경우에 대한 프레임의 변형과 응력분포도이며, 가장 큰 변형을 나타낸 부분

Table 2 Maximum Von-Mises stresses for basic frame

Collision case	Maximum Stress
Front left side impact	27.0GPa
Front impact	10.0GPa
Side impact	4.76GPa
Rear impact	26.2GPa

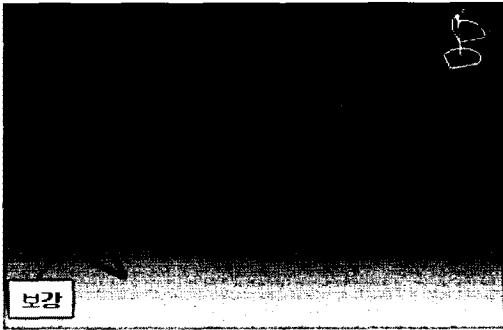
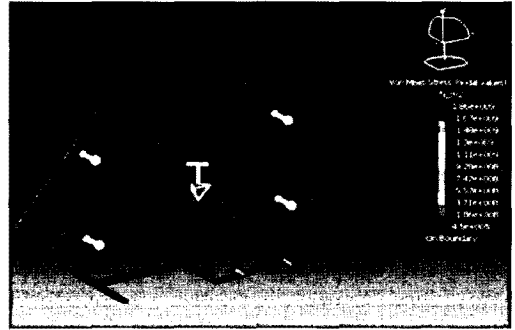


Fig. 6 Front reinforced frame



(a) perspective view

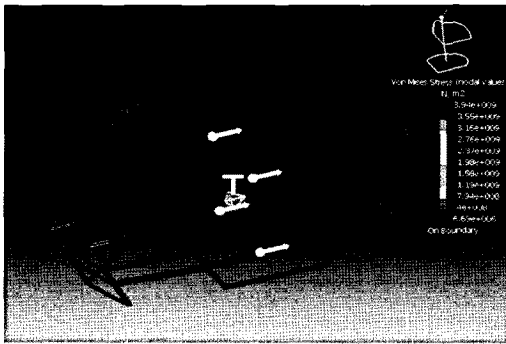
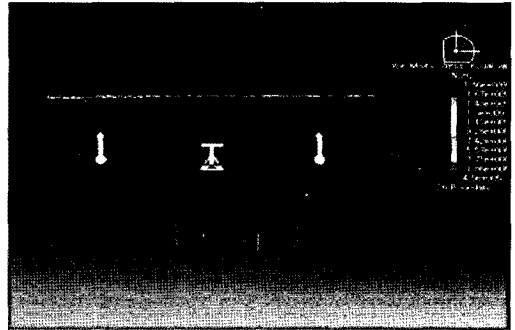


Fig. 7 Stress distribution and deformation of front reinforced frame in case of the front left side impact



(b) upper view

Fig. 9 Stress distribution and deformation of front reinforced frame in case of the side impact

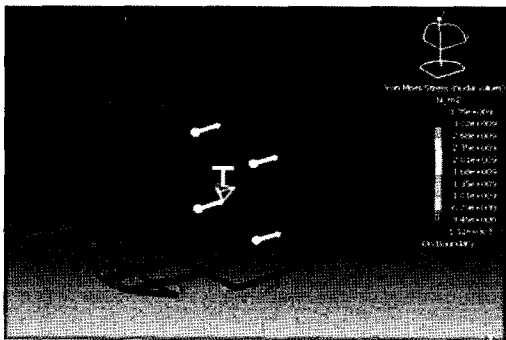


Fig. 8 Stress distribution and deformation of front reinforced frame in case of the front impact

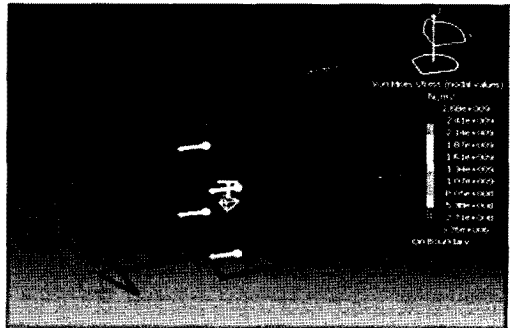


Fig. 10 Stress distribution and deformation of front reinforced frame in case of the rear impact

에서의 응력은 3.94GPa이었다. Fig. 8은 전면부 보강 프레임에 대한 전면충돌인 경우의 변형과 응력분포도이다. 후면 부분을 구속시키고 전면 부분에 정하중을 가한 결과, 가장 큰 변형을 일으킨 곳에서의 응력은 3.35GPa이었다.

Fig. 9는 전면부 보강 프레임에 대한 측면충돌인 경우의 변형과 응력분포도이다. 정하중을 직접적으로 받은 부분이 가장 큰 변형을 나타냈고 이곳에서의 응력은 1.86GPa이었으며, 전면부분과 후면부분이 상대적으로 작은 변형을 나타냈다. Fig. 10은 후면충돌인 경우에 대한 전면부 보강 프레임

Table 3 Maximum Von-Mises stresses for front reinforced frame

Collision case	Maximum Stress
Front left side impact	3.94GPa
Front impact	3.35GPa
Side impact	1.86GPa
Rear impact	2.68GPa

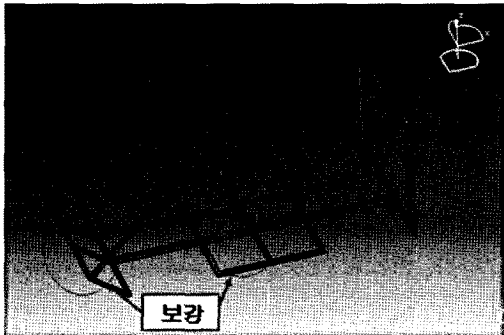


Fig. 11 Front and side reinforced frame

임의 변형과 응력분포도이며, 정하중을 직접적으로 받은 후면 부분에서 최대 응력이 2.68GPa을 나타내었다.

표 3은 전면부 보강 프레임에 대한 전면, 측면, 후면충돌 해석 결과를 정리한 것이다. Fig. 1의 기본 프레임의 결과와 Fig. 6의 전면부 보강 프레임에 대한 결과를 비교해 보면, 정면 왼쪽충돌의 경우 최대 응력이 27GPa에서 3.94GPa로 응력이 크게 완화되었고, 정면충돌, 측면충돌 및 후면충돌의 경우에서도 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

4. 전면 및 측면 부분 보강 프레임에 대한 구조해석

전면 부분을 보강한 프레임(Fig. 6 참조)의 응력해석을 위해 정면 왼쪽 측면충돌, 전면충돌, 측면충돌, 후면충돌의 4개 부분에 대하여 CATIA V5를 이용해 분석한 결과, 측면 충돌의 경우가 가장 취약하였다. 따라서 Fig. 11과 같이 전면 부분 및 측면 부분을 보강하여 여러 가지 형태의 충돌에 대한 해석을 실시하였다.

Fig. 12는 전면부와 측면부 보강 프레임의 후면 부분을 고정시키고, 정면 왼쪽 측면에 충격량을 정하중으로 가한 경우에 대한 프레임의 변형과 응력분포도이며, 가장 큰 변형을

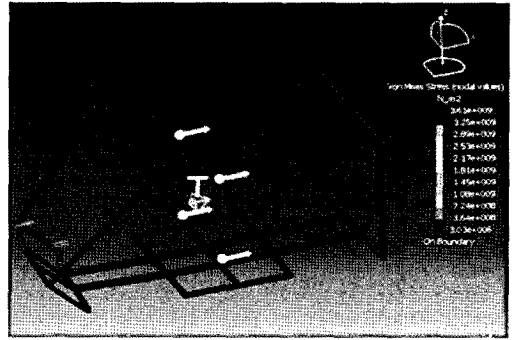


Fig. 12 Stress distribution and deformation of front and side reinforced frame in case of the front left side impact

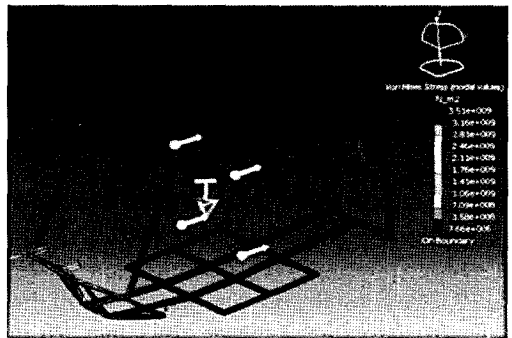
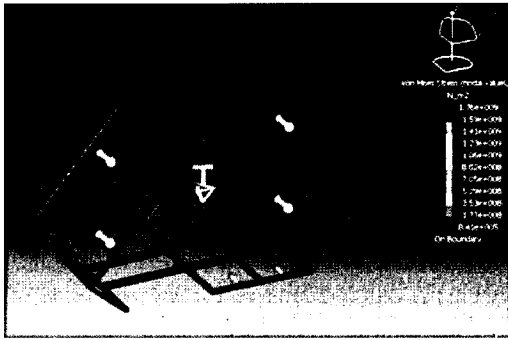


Fig. 13 Stress distribution and deformation of front and side reinforced frame in case of the front impact

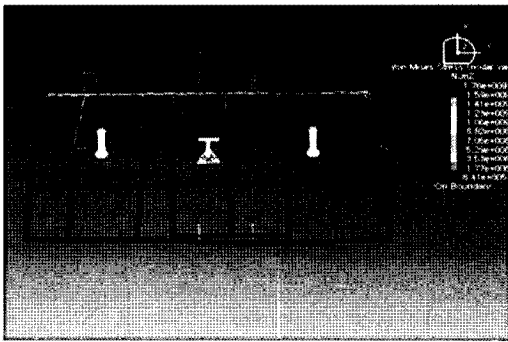
나타낸 부분에서의 최대 응력은 3.61GPa이었다. Fig. 13은 전면부와 측면부 보강 프레임에 대한 전면충돌인 경우의 변형과 응력분포도이다. 후면 부분을 구속시키고 정면 부분에 정하중을 가한 결과, 가장 큰 변형을 나타낸 곳에서의 최대 응력은 3.51GPa이었다.

Fig. 14는 전면부와 측면부 보강 프레임에 대한 측면충돌인 경우 프레임의 변형과 응력분포도이다. 후면 측면을 고정시키고, 정면 측면 부분에 정하중을 가한 결과, 하중을 직접적으로 받은 부분에서 가장 큰 변형을 나타냈고, 이곳에서의 응력은 최대 응력으로 1.76GPa이었다. Fig. 15는 후면충돌인 경우에 대한 전면부와 측면부 보강 프레임의 변형과 응력 분포도이며, 정하중을 직접적으로 받은 후면 부분에서 최대 응력이 2.52GPa을 나타내었다.

표 4는 전면부 및 측면부 보강 프레임에 대한 전면, 측면, 후면충돌 해석 결과를 정리한 것이다. Fig. 6의 전면부 보강



(a) perspective view



(b) upper view

Fig. 14 Stress distribution and deformation of front and side reinforced frame in case of the side impact

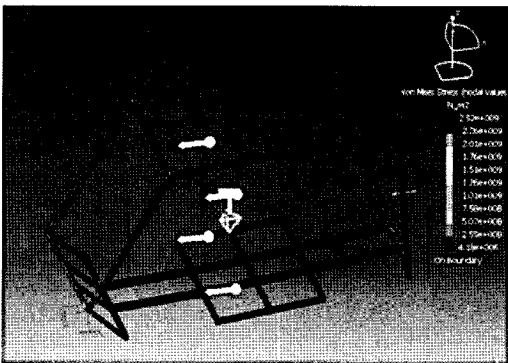


Fig. 15 Stress distribution and deformation of front and side reinforced frame in case of the rear impact

프레임의 결과와 Fig. 11의 전면부 및 측면부 보강 프레임의 결과를 비교해 보면, 정면 왼쪽 충돌의 경우 최대응력이 3.94GPa에서 3.61GPa로 응력이 완화되었고, 정면충돌의

Table 4 Maximum Von-Mises stresses for front and side reinforced frame

Collision case	Maximum Stress
Front left side impact	3.61GPa
Front impact	3.51GPa
Side impact	1.76GPa
Rear impact	2.52GPa

경우 3.35GPa에서 3.51GPa로 최대 응력이 약간 크게 나타났다. 이러한 경향은 측면충돌과 후면충돌에서도 나타났으나, Fig. 1의 기본 프레임의 경우와 비교하여 전면 부분 보강 프레임의 결과와 전면 부분 및 후면 부분 보강 프레임의 결과는 최대 응력의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 차량의 구조적 안전을 달성하기 위해 CATIA를 이용하여 다양한 경우의 설계를 실시하여, 차량의 전면 부분, 측면 부분 및 후면 부분으로부터의 충돌 시 발생하는 응력의 완화를 도모하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 표 2의 기본 프레임의 결과와 표 3의 전면부 보강 프레임의 결과를 비교해 보면, 정면 왼쪽충돌의 경우 최대 응력이 27GPa에서 3.94GPa로 응력이 크게 완화되었고, 정면충돌과 측면충돌 및 후면충돌에서도 같은 경향을 보였다.
- (2) 표 3의 전면부 보강 프레임의 결과와 표 4의 전면부 및 측면부 보강 프레임의 결과를 비교해 보면, 정면 왼쪽충돌의 경우 최대응력이 3.94GPa에서 3.61GPa로 응력이 완화되었고, 정면충돌과 측면충돌 및 후면충돌에서도 같은 경향을 보였다.
- (3) 기본 프레임의 경우와 비교하여 전면 부분 보강 프레임의 결과와 전면 부분 및 후면 부분 보강 프레임의 결과는 최대 응력의 차이가 거의 없으므로, 기본 프레임과 측면 부분에 추가 보강된 프레임보다 전면 부분만 보강된 프레임이, 충돌 시 더 큰 응력의 완화 효과를 보였다고 판단할 수 있다.
- (4) 모든 경우에 대하여, 강철의 항복강도(250MPa) 보다 큰 최대 응력이 발생함을 알 수 있었으며, 충돌 부분에 대해 국부적으로 아주 큰 소성변형이 일어남을 확인할 수 있었다.

앞으로, 동적인 충돌인 경우에 대한 차량의 응력 완화를 위한 구조 설계 및 실험 결과와의 비교를 통하여 보다 일반적인 경우에 대한 해석을 실시하고자 한다.

참 고 문 헌

- (1) Cho, J. U., Min, B. S., and Han, M. S., 2009, "Basic Study on Impact Analysis of Automobile," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 8, No. 1, pp. 64~70.
- (2) Kim, K. J., 2009, "Current and Future Technology of Car Crash Safety," *Auto Journal*, Vol. 10, pp. 107~111.
- (3) Cho, J. U., Min, B. S., and Han, M. S., 2009, "Analysis on Fracture Stress of Car Body Collision," *Proceedings of KSMPE Fall Conference 2009*, pp. 28~29.
- (4) Chae, S. W. and Jeong, J. H., 1997, "Development of a Finite Element Modeling System for Automobile Crash Analysis," *Proceedings of KSAE Fall Conference 1997*, pp. 1177~1182.
- (5) Jang, I. S. and Chae, D. B., 2000, "The Derivation of Simplified Vehicle Body Stiffness Equation Using Collision Analysis," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 8, No. 4, pp. 177~185.
- (6) Kim, S. S., 2002, *Automotive Dynamics*, Pearson Education, Korea.
- (7) Park, S. H., Kang, S. Y., Kim, H. Y., and Han, D. C., 1997, "Development of Vehicle Crash Program and Analyses of Frontal Crash and Side Impact," *Proceedings of KSAE Fall Conference 1997*, pp. 883~889.
- (8) Lee, S. S., 2004, *CATIA V5 Basic Version 5.11*, Science Technology, Korea.
- (9) Liu, Y., 2010, "Development and evaluation of a finite element truck chassis crash model," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 15, No. 1, pp. 107~113.
- (10) Liu, Y. and Day, M. L., 2007, "Development of simplified thin-walled beam models for crashworthiness analyses," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 12, No. 6, pp. 597~608.
- (11) Kim, H. S., Kang, S. Y., Lee, I. H., Park, S. H., and Han, D. C., 1997, "Vehicle Frontal Crashworthiness Analysis by Simplified Structure Modeling using Nonlinear Spring and Beam Elements," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 2, No. 1, pp. 107~118.
- (12) Park, H. S., Kim, J. H., and Dang, X. P., 2008, "Optimum Design of the Plastic Armrest Frame for Lightweight Automobiles," *Proceedings of KSMTE Fall Conference 2008*, pp. 172~178.