

스페이스 프레임을 가진 경주용 차량의 충돌에 관한 시뮬레이션 해석

조재웅^{1*}, 방승옥², 김기선¹
¹공주대학교 기계자동차공학부, ²공주대학교 대학원 기계공학과

Simulation Analysis on the Impact of Racing Car with Space Frame

Cho, Jae Ung^{1*}, Bang, Seung Ok² and Kim, Key Sun¹
¹Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju University,
²Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju University

요약 본 논문에서는 충돌하중 하에서 스페이스 프레임을 사용하는 경주용 차량의 프레임 변형 및 응력을 분석한다. 충돌 시 변형을 최소한으로 줄이고, 취약부분을 파악하여 운전자의 안전을 확보한다. 탄소강의 물성치를 바탕으로 트러스 구조로 설계된 차량 프레임의 유한요소모델을 만들고, ANSYS 프로그램을 이용하여 정면충돌 시 속도 변화에 따른 충격량 증가가 프레임에 미치는 영향을 분석한다. 또한 정면, 측면, 후면 방향에 충돌하중을 적용하여 프레임의 변형을 해석한다. 정면 및 후면충돌에서는 운전석에 가해지는 영향이 적지만, 측면충돌 시 충격에 의한 변형이 운전석까지 진행된다. 이러한 변형에 대한 취약부분의 보강을 통하여 프레임의 안전성 설계를 증진시키고 시뮬레이션 해석의 결과를 실제 프레임 제작에 활용한다.

Abstract In this paper, strain and stress on space frame are analyzed at racing car under crash loads. As the deformation is reduced to a minimum during crash and the vulnerable parts are grasped, the safety of driver is ensured. The vehicle frame is modelled with truss structure by inputting the material property of carbon steel on finite element analysis. The increase of impulse momentum is due to speed change at frontal collision. This influence effected on vehicle frame is also analyzed by ANSYS program. The deformation of the frame is studied by applying the crash loads at front, side and rear directions. Though the influence on the seat of driver is small at frontal and rear crash, the deformation due to impact is progressed into this seat. The safety of frame is enhanced by making up for these weak deformations and these results of simulation analysis can be applied to the production of the actual vehicle frame.

Key Words : Space Frame, Impact, Finite Element Model, Impulse

1. 서론

차량의 프레임은 현가장치 및 동력발생장치 등을 장착하기 위한 골격으로서 주행 중 노면으로부터 전달되는 충격과 하중에 의한 각종 반력 등을 지지하는 중요한 부분이다. 또한 프레임은 외부 충돌로부터 운전자를 보호하는 구조로 설계되어야 하며 충분한 강도와 강성을 필요로

한다[1]. 동시에 불필요한 부재를 제거함으로써 경량화를 통한 연비상승과 원가절감도 함께 고려되어야 한다.

경주용 차량의 경우에는 운전석의 공간과 엔진 및 동력장치에 필요한 공간을 효율적으로 설계되어야 하며, 프레임 자체가 운전자를 보호하는 롤 케이지의 역할을 병행하도록 한다. 이러한 차체의 굽힘 및 비틀림 강성, 진동 특성, 충돌안전도 및 경량화 등의 다분야 설계 제약조건

본 연구는 지식경제부 지정 공주대학교 자동차의장 및 편의부품 지역혁신센터의 지원에 의한 것입니다.

*교신저자 : 조재웅(jucho@kongju.ac.kr)

접수일 10년 05월 07일

수정일 10년 06월 21일

게재확정일 10년 07월 06일

들[2,3]을 초기설계에 반영하고, 구조물의 연결부에 작용하는 응력집중 현상을 연구하는 것이 중요하다[4]. 그 중에서도 충돌안전도 설계는 저속 및 고속충돌로 나뉘는데 저속충돌에서는 가능한 변형이 없도록 하여 손상성과 수리성을 낮추고, 고속충돌에서는 효과적인 변형으로 충돌 에너지 흡수를 최대화하여 운전자 상해치를 저감시키는 것이 관건이다[5].

최근에는 스페이스 프레임을 적용한 차량이 양산되면서 프레임의 구조설계 및 충돌해석에 관한 논문[6,7]이 발표되고 있으나, 대부분 충격을 흡수하기 위하여 프레임의 일부 부위에만 한정시켜 적용한 것이다.

본 논문에서는 CATIA 및 ANSYS 프로그램을 사용하여 경주용 차량의 스페이스 프레임을 유한요소모델로 제작하고, 콘크리트 벽과 프레임의 동적 충돌해석을 수행한다. 정면충돌 과정에서 속도가 증가함에 따라 프레임과 각각의 연결 부위에 생기는 변형을 분석하고 이러한 변형이 운전석에 미치는 영향을 연구한다. 또한 후면 및 측면방향에서의 충돌해석을 통하여 구조적 건고성을 파악한다.

해석을 수행하는 과정에서 가장 취약한 부분에 보강재를 설치하고, 보강 전·후의 충돌해석을 비교함으로써 안전성이 증진됨을 보여준다. 또한 본 논문을 통하여 얻어진 충돌안전도설계와 충돌해석 결과를 실제 프레임 제작에 활용한다.

2. 해석모델 및 충돌해석

2.1 해석모델

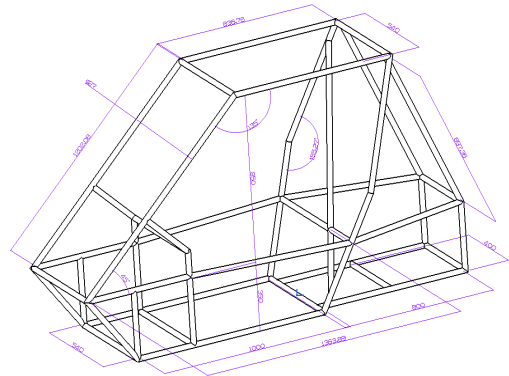


[그림 1] 경주용 자동차의 스페이스 프레임 사진

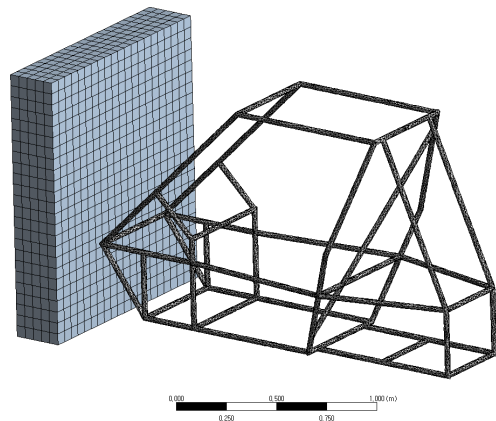
경주용 차량에 사용되는 스페이스 프레임은 차체의 강성을 높이고 무게절감 효과를 얻기 위하여 사각형이나 원형 단면의 강관을 트리스 구조로 차량 외형에 맞게 용접한다. 그림 1은 스페이스 프레임을 적용한 경주용 차량

의 사진이다.

이러한 트리스 구조를 사용하여 전장 2000mm, 전폭 820mm, 높이 1200mm의 스페이스 프레임 모델을 그림 2와 같은 치수로 제작한다. 충돌해석을 수행하기 위하여 콘크리트 벽과 프레임은 CATIA 프로그램을 이용하여 모델링을 하고 원활한 해석을 수행하기 위하여 ANSYS로 그림 3과 같이 유한요소분할을 한다.



[그림 2] 프레임의 치수



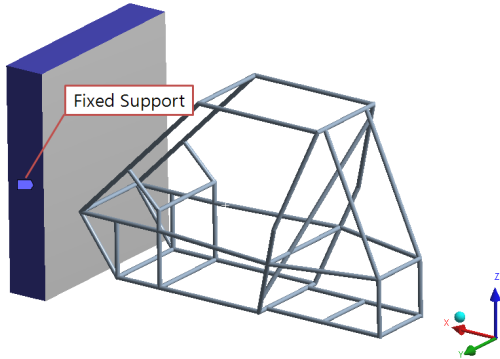
[그림 3] 유한요소분할 형상

여기서 콘크리트 벽은 육면체 요소(Hexahedral Element)로 생성하였으며, 스페이스 프레임은 사면체 요소(Tetrahedral Element)로 생성하였다. 유한요소분할된 콘크리트 벽과 스페이스 프레임 모델의 절점 및 요소들의 개수는 표 1에 나타나 있다.

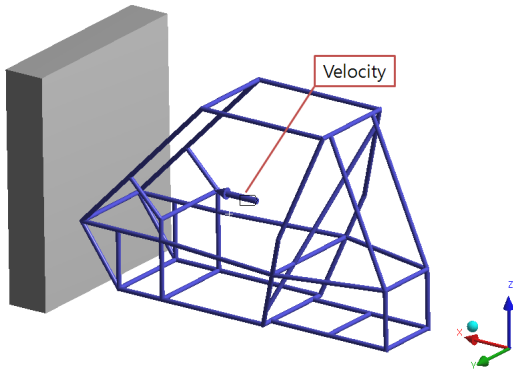
[표 1] 해석모델의 절점 및 요소들의 개수

	콘크리트 벽	스페이스 프레임
Nodes	3300	13158
Elements	2520	38278

콘크리트 벽은 차량과 충돌하는 건물의 일부분이므로 그림 4와 같이 가장자리 부분에 구속조건을 준다. 또한 스페이스 프레임은 그림 5와 같이 X축 방향으로 이동 속도를 주어 두께가 250mm인 콘크리트 벽과 충돌하도록 설정한다.



[그림 4] 모델의 구속조건



[그림 5] 모델의 속도조건

스페이스 프레임의 재질은 ANSYS에서 제공하는 Johnson-Cook Strength에 의한 Steel 4340을 사용하였고, 재질의 물성치는 표 2에 나타나 있다.

[표 2] Steel 4340의 물성치

Young's Modulus	2.1×10^5 MPa
Poisson's Ratio	0.31
Mass Density	7.85×10^{-6} kg/mm ³
Thermal Expansion	1.7×10^{-5} 1/°C
Tensile Yield Strength	1550 MPa
Tensile Ultimate Strength	1855 MPa

2.2 충돌해석

2.2.1 기본이론

물체에 작용하는 충격량은 물체의 운동량의 변화량과 같다. 충돌 과정에서 물체가 받는 충격력을 \vec{F} , 충돌 시간을 Δt 라 하고, 충격량-운동량 정리를 구하면 식 (1)과 같다.

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \vec{a} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v} = \Delta \vec{P} \quad (1)$$

여기서 $\Delta \vec{P}$ 는 운동량, m 은 물체의 질량, $\Delta \vec{v}$ 는 물체의 속도이다. 충격력과 속도가 일정하다고 하면, 물체의 충돌 과정에서 물체가 받는 충격력 \vec{F} 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \frac{m \cdot \Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (2)$$

이처럼 차체의 무게와 충돌 시간이 일정하게 작용하였을 때, 속도에 따라 충격력이 변한다.

2.2.2 정면충돌 시 속도변화에 따른 프레임 해석

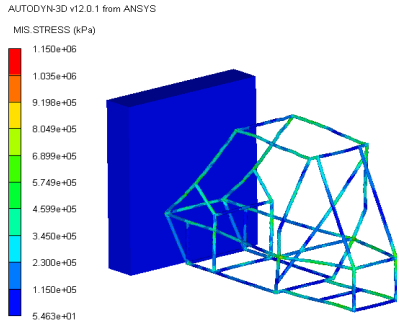
해석모델과 같은 경주용 차량의 최고 속도가 평균적으로 70~80km/h인 것을 감안하여, 저속(30km/h) 및 중속(50km/h)과 고속(70km/h)의 속도조건을 주었다. 모든 부품을 포함하는 무게 240kg 차량에 60kg의 운전자를 포함하여 차량의 총 무게는 300kg으로 하였다. 해석은 충돌 전·후로 총 0.02s 시간 동안 진행하였으며, 각각의 속도에 따라 충돌 시작으로부터 0.01s가 되는 순간의 프레임 변형을 분석하였다. 또한 콘크리트 벽과 스페이스 프레임의 충돌 전·후 과정을 0.5ms 간격으로 해석 결과를 기록하였다.

단, 본 논문에서는 프레임에 작용하는 응력과 변형이 운전자에게 미치는 영향을 분석하는 것이 중점이므로 상대적으로 중요도가 적은 벽은 강체로 보고 프레임에 대하여 해석을 하였다.

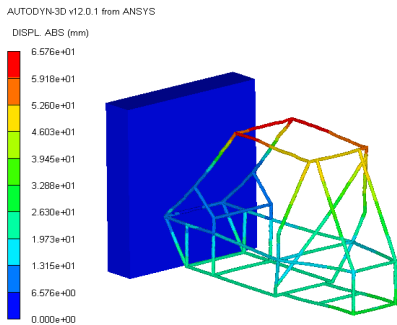
스페이스 프레임이 30km/h의 속도로 콘크리트 벽에 정면으로 충돌하였을 경우에는 그림 6에서와 같이 $2.300e+05$ KPa 정도의 충격이 프레임 앞부분에 작용하고, 연결부분에서는 $6.899e+05$ KPa 이상의 응력이 집중된다.

프레임의 변형길이는 차량의 속도에 따른 이동거리를 포함하고 있기 때문에 수치가 작은 부분일수록 변형이 커지며, 각 부분의 변형길이는 최대 수치에서 각 부분의

수치를 뺀 값이다. 그림 7에서 프레임의 정면 부분에는 5.918e+01mm 정도의 변형이 생기고 상단 부분은 비교적 변형이 작다.

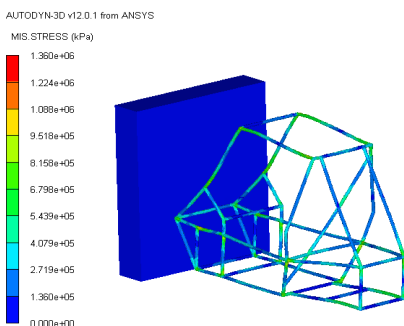


[그림 6] 30km/h 충돌 시 프레임의 응력

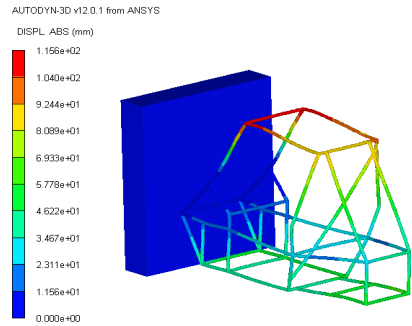


[그림 7] 30km/h 충돌 시 프레임의 변형

속도가 50km/h인 정면 충돌과정에서 그림 8과 같이 프레임 앞부분에는 2.719e+05 KPa 정도의 충격이 가해지고, 연결부에는 8.158e+05 KPa 이상의 응력이 집중되어 발생한다. 충돌에 의하여 그림 9에서 보이는 바와 같이 차량의 정면 윗부분에 1.04e+02mm 이상의 최대 변형이 생기고, 하단 부분에는 6.938e+01mm 정도 변형이 발생한다.



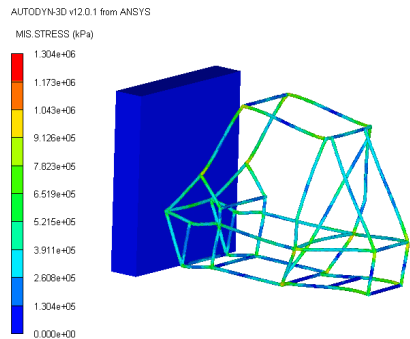
[그림 8] 50km/h 충돌 시 프레임의 응력



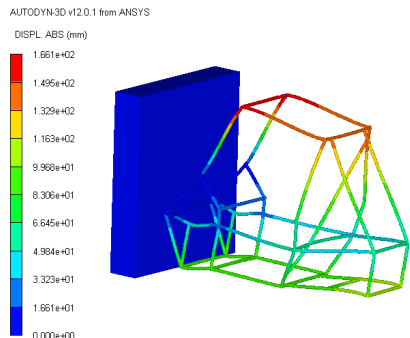
[그림 9] 50km/h 충돌 시 프레임의 변형

속도가 70km/h인 충돌에서는 차량의 앞부분이 충격에 의하여 크게 휘어지면서 그림 10과 같이 운전석의 상·하 방향으로 변형된다. 프레임 앞부분에는 3.911e+05 KPa 정도의 충격이 가해지고, 저속 및 중속에서의 충돌해석과 마찬가지로 프레임의 연결 부에 응력이 집중되는 것을 볼 수 있다.

충돌에 의한 변형은 그림 11에서와 같이 프레임의 정면 부분이 운전석 쪽으로 밀리면서 1.495e+02mm 이상의 최대 변형이 발생하고, 하단 부분에는 프레임이 물결모양으로 휘어지면서 8.304e+01mm 정도 변형이 발생한다.



[그림 10] 70km/h 충돌 시 프레임의 응력

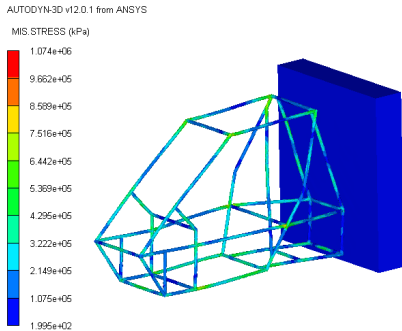


[그림 11] 70km/h 충돌 시 프레임의 변형

2.2.3 충돌 방향에 따른 프레임 해석

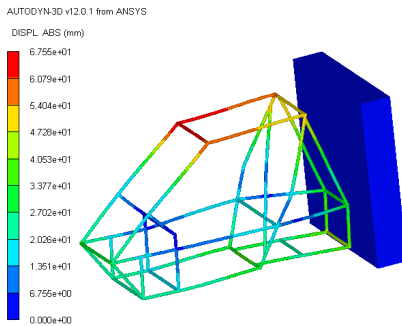
충돌 방향에 따른 스페이스 프레임의 변형을 해석하기 위하여 30km/h의 속도로 후면과 운전석 측면 및 45° 각도의 Offset 충돌을 주었다.

후면충돌 과정에서는 그림 12에서와 같이 연결부위를 제외한 나머지 부분에 2.149e+05 KPa 이내로 응력이 작용한다.



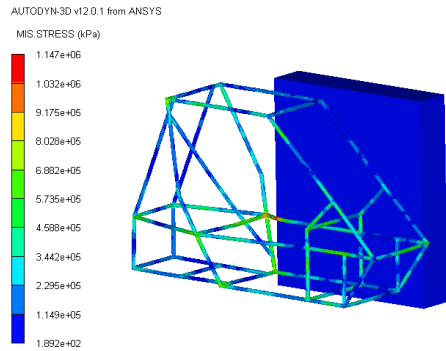
[그림 12] 후면충돌 시 프레임의 응력

충돌 후 그림 13과 같이 프레임의 중심 부분에는 5.404e+01mm 이상, 하단에는 4.053e+01mm 이내의 변형이 발생한다.

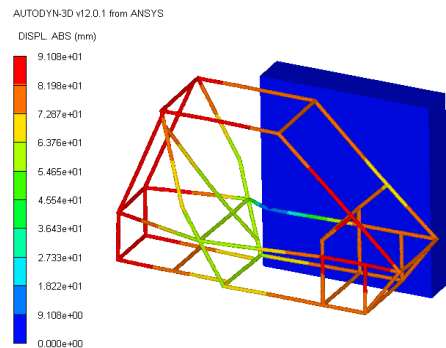


[그림 13] 후면충돌 시 프레임의 변형

측면 충돌에서 그림 14와 같이 1.147e+06 KPa의 최대 응력이 발생하였다. 프레임은 그림 15에서와 같이 운전석 측면 부분이 8.197e+01mm 이상 변형되고, 차체가 할대처럼 휘어지게 된다.

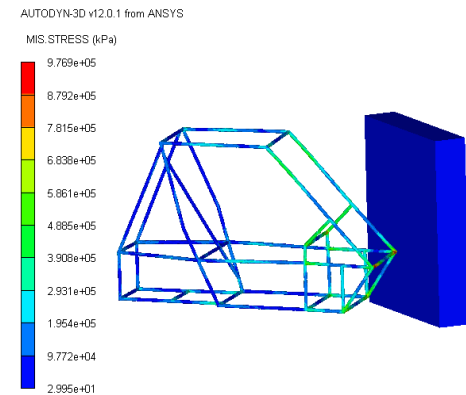


[그림 14] 측면충돌 시 프레임의 응력

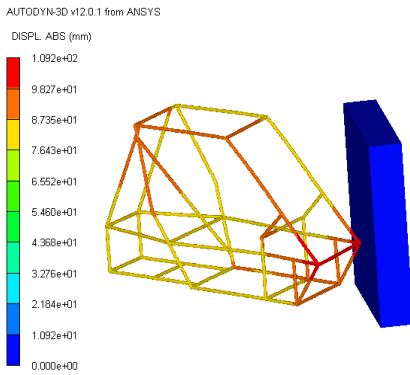


[그림 15] 측면충돌 시 프레임의 변형

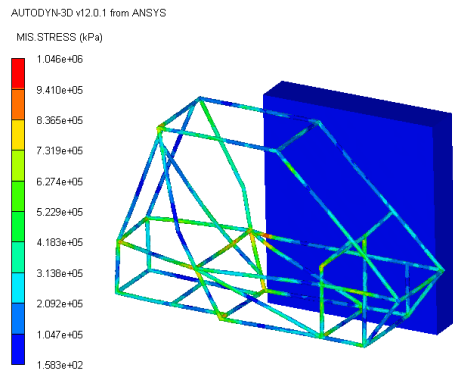
45° 각도의 Offset 충돌에서는 그림 16과 같이 차량의 모서리 부분에 6.838e+05 KPa 이상의 응력이 작용한다. 프레임에 가해지는 응력들은 주로 차량의 앞부분에 집중되며, 충돌하는 반대 방향으로 휘어진다. 이로 인하여 프레임이 비틀어지면서 그림 17에서 보이는 바와 같이 프레임 전체에 3.277e+01mm 이상의 변형이 발생한다.



[그림 16] Offset 충돌 시 프레임의 응력



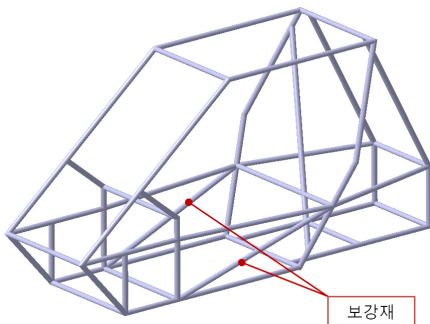
[그림 17] Offset 충돌 시 프레임의 변형



[그림 19] 측면 보강 후 프레임의 응력

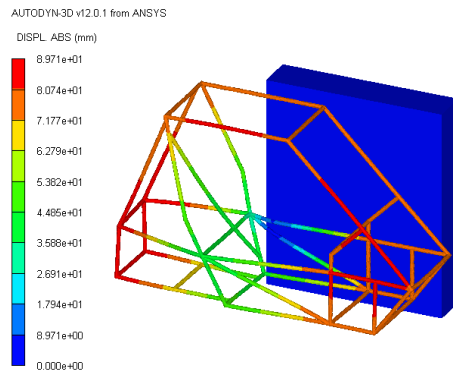
2.2.4 측면 보강 전·후의 프레임 충돌해석

각각의 충돌 과정에서 프레임의 변형으로 인하여 운전석에 영향을 미치는 정도를 분석하여 본 결과, 정면 또는 후면충돌보다는 측면충돌의 경우가 운전석에 영향을 줄 가능성이 더 높을 것으로 예상된다. 따라서 취약부분인 프레임의 측면 부분을 그림 18과 같이 파이프를 추가하여 보강한 후 충돌해석을 수행하였다. 충돌 속도는 30km/h로 보강 전과 동일하며, 컨트를 조건으로 하였다.



[그림 18] 측면 보강한 프레임 모델

측면에 보강재를 추가로 설치하였을 경우, 그림 19에서와 같이 차량 프레임에 작용하는 최대 응력은 1.046e+06 KPa로 측면을 보강하기 전과 비교하면 1.01e+05 KPa 정도 감소하였으며, 프레임의 변형은 그림 20과 같이 8.971e+01mm로 보강 전보다 1.37mm 정도 감소하였다.



[그림 20] 측면 보강 후 프레임의 변형

이러한 결과를 바탕으로 충돌 시 프레임에 생기는 응력집중 현상을 예측하고, 실제 경주용 차량의 제작에 활용하였다. 그림 21은 실제로 제작되고 있는 프레임으로서 현재 80%의 완성도를 보이고 있다.



[그림 21] 실제 제작중인 프레임의 사진

본 논문에서는 동적 충돌에 의한 스페이스 프레임의 응력분포와 변형만 고려하였는데, 엔진 및 노면으로부터

받는 진동에 의하여 프레임의 연결부에 생기는 피로 또는 비틀림에 의한 반력 등을 추가적으로 적용하여 해석할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 결론

본 논문에서는 스페이스 프레임을 사용하는 경주용 차량의 저/중/고속 충돌성능 및 운전자의 안전성을 동시에 고려하여 차체를 설계하고, 유한요소모델을 만들어 속도와 충돌 방향에 변화를 주면서 분석하였다. 또한 충돌로 인하여 프레임에 작용하는 응력과 변형을 파악하고 취약부분의 구조적 보강을 통하여 구조적 안전성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 정면충돌 시, 속도가 20km/h씩 증가함에 따라서 0.01s 동안 프레임의 앞부분에 가해지는 응력이 증가하고 각각의 연결부에 응력집중 현상이 발생한다. 또한, 고속 충돌의 경우에는 최대 응력이 $1.304e+06$ KPa으로 저속 충돌의 경우보다 1.5배 정도 높다.
2. 정면충돌 과정에서 프레임 앞부분의 변형이 크며, 고속 충돌의 경우에 $1.661e-02$ mm로 저속 충돌보다 2.5배 정도 변형이 심하다.
3. 충돌 방향이 운전석에 미치는 영향을 분석한 결과, 상대적으로 구조가 단순한 측면이 충돌로 인하여 프레임이 운전석 안쪽까지 휘어지면서 운전자에게 상해를 입힐 가능성이 가장 높다.
4. 가장 취약한 측면에 보강재를 추가하여 충돌에 의한 프레임의 변형을 줄이고, 운전석에 미치는 영향을 감소시켜 구조적 안전성을 증진시켰다.

참고문헌

[1] 주용선, 김영권, 김방원, 문정오, 이기수, “대형 자동차 프레임의 구조해석”, 한국자동차공학회 논문집, 제4권, 제2호, pp. 1417-1422, 11월, 2003.

[2] R. J. Yang, L. Gu, C. H. Tho and J. Sobieszczanski-Sobieski, “Multidisciplinary Design Optimization of a Full Vehicle with High Performance Computing”, AIAA Paper AIAA-2001-1273, AIAA/ASME/AHS/ASC, 42nd, Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Seattle, Washington, 2001.

[3] J. Sobieszczanski-Sobieski, S. Kodiyalam and R. J. Yang, “Optimization of Car Body under Constraints

of Noise, Vibration, and Harshness(NVH), and Crash”, AIAA Paper AIAA-2000-1521, AIAA/ASME/AHS/ASC, 41st, Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Atlanta, 2000.

[4] 전형용, 성낙원, 한근조, “브레이크 결합형식에 따른 용접 구조물의 파이프에서 발생하는 응력분포와 응력집중에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제16권, 제8호, pp. 28-37, 8월, 1999.

[5] 김범진, 김민수, 허승진, “다분야 설계 제약 조건을 고려한 알루미늄 스페이스 프레임 차체의 최적 설계”, 한국자동차공학회 논문집, 제14권, 제1호, pp. 1-7, 1월, 2006.

[6] 신정규, 심진욱, 황상진, 박경진, “저속차량 차체의 구조해석 및 구조최적설계”, 한국자동차공학회 논문집, 제11권, 제4호, pp. 68-78, 7월, 2003.

[7] 강혁, 경우민, “알루미늄 스페이스 프레임 차량의 구조 최적화 설계 기법”, 한국자동차공학회 논문집, 제16권, 제1호, pp. 175-180, 1월, 2008.

조 재 응(Jae-Ung Cho)

[정회원]



- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학사)
- 1982년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학석사)
- 1986년 8월 : 인하대학교 기계공학과(공학박사)
- 1988년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가, 피로 또는 충돌 시 동적 해석

방 승 옥(Seung-Ok Bang)

[준회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 자동차공학과(공학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>

기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가, 피로 또는 충돌 시 동적 해석

김 기 선(Key-Sun Kim)

[정회원]



- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과 학사
- 1983년 2월 : 인하대학교 기계공학과 석사
- 1994년 2월 : 인하대학교 기계공학 박사
- 1989년 7월 : 기계제작 기술사
- 1994년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수(현)

<관심분야>

자동차 새시 부품