

충격흡수용 복합부재의 에너지 흡수특성에 관한 유한요소해석

신 현 우*

두원공과대학 자동화과

Finite Element Analysis on the Energy Absorption Characteristics of Hybrid Structure

Hyun-Woo Shin*

Department of Automation, Doowon Technical College, Gyeonggi 456-718, Korea

(Received 7 April 2004 / Accepted 15 July 2004)

Abstract : Recently the objective of vehicle design was focused on the crash safety and the energy saving. For the energy saving vehicle structures must be light weight, but for the crash safety some energy absorbing elements must be added. In this paper hybrid structure which consists of a steel and a FRP was studied on the energy absorption characteristics under the impact load by finite element method. Test results of the other researchers were compared with that of computer simulation on this simple hybrid structure. Side rail of vehicle front structure was replaced with hybrid materials for the application of the vehicle structure. 35mph frontal crash simulation was performed with hybrid structure and with conventional steel structure. By the adoption of hybrid structure, the improvement of energy absorption characteristics and reduction of weight was observed under the frontal crash simulation.

Key words : Hybrid structure(복합부재), Crash safety(충돌안전), FRP(섬유강화플라스틱), Energy absorption(에너지흡수), Frontal crash(정면충돌), Finite element method(유한요소법)

1. 서론

최근의 자동차 개발에 있어서 가장 중요하게 취급되는 부분은 자동차의 안전성과 환경친화성으로서 자동차 업체에서는 이 두 가지의 문제를 해결하기 위해 많은 인력과 자원을 투입하여 연구하고 있다. 환경친화성 연구란 대기오염 방지를 위한 자동차 배출가스 문제와 소음공해에 대한 것이며, 자동차의 안전성 연구란 차량의 사고 회피를 위한 시스템의 개발 및 차량 사고시에 차실 내부의 승객을 얼마나 보호할 수 있는가에 대한 연구로서 충격흡수 부재의 개발 및 효율적인 충격 흡수 시스템에 대한

연구를 의미한다.

충돌안전성의 관점에서 차체의 강도를 확보하고 또한 충격 에너지 흡수량을 증가시키는 방법으로써, 첫째 차체 주요부재에 사용되는 판재의 두께를 증대시키는 방법, 둘째 차체 주요부재에 인장강도가 높은 고장력 강관을 사용하는 방법, 셋째 주요부재의 형상을 변경 혹은 차체 구조를 변경하는 방법이 있다. 첫째 방법 즉 차체 주요부재의 소재 두께를 키우는 방법은 가장 손쉽게 채택할 수 있는 방법이나 충돌에너지 흡수량의 증가에 비해 부재의 중량이 상대적으로 많이 증가하여 오히려 충돌시의 충돌에너지를 증대시키기 때문에 효율적인 충돌성능 향상방안이라 할 수 없다. 둘째 고장력 강관을 사용하는 방법은 인장강도가 높은 재료를 사용함으로써

*To whom correspondence should be addressed.
hwshin@doowon.ac.kr

충돌에너지 흡수성능을 증대시키는 효과적인 방법 이기는 하나 판이 얇아지면서 축압괴시에 변형거동이 불안정해지는 점과 일반 강판에 비해 상대적으로 재료비가 비싸진다는 점을 단점으로 들 수 있다. 마지막으로 주요부재의 형상 변경 혹은 차체 구조의 변경은 실제의 변형거동을 정확하게 예측하여 양산차에 적용하기까지 시간과 비용이 많이 든다는 단점을 가지고 있다.

이상의 세 가지 방법 이외에 FRP와 같은 복합재료를 이용한 새로운 형태의 충격흡수용 부재에 대한 연구가 이루어지고 있다.^{1,4)}

일반적으로 충격 흡수용 부재는 원형이나 사각형 단면을 가진 긴 부재가 길이 방향으로 압축력을 받으면 마치 아코디언처럼 찌그러지면서 재료의 소성 변형으로 인하여 많은 충격에너지를 흡수하는 구조로 되어 있다. 복합재료를 이용한 새로운 충격 흡수 부재란 일정 단면의 긴 소재 내부에 또 다른 일정 단면의 소재를 넣어 두 부재가 동시에 축방향 하중을 받으며, 내외의 두 부재를 고정하기 위하여 발포 스토포폼으로 두 소재 사이의 간극을 채워 넣은 형태로 되어있다. 외부의 소재는 기존의 철강재료를 사용하고 내부의 소재는 FRP와 같은 복합재료를 사용하여 무게를 기존 부재에 비해 많이 늘이지 않으면서도 충격에너지 흡수량을 획기적으로 증대시킬 수 있는 점이 이 새로운 하이브리드 부재의 특성이다.^{5,6)} 일본에서는 이러한 부재에 대한 연구가 자동차 협회를 중심으로 자동차 업체들에서 많은 연구가 진행되고 있으며 일부 회사에서는 이와 관련된 특허를 출원 중에 있는 것으로 조사되었다.

한편 국내에서는 자동차 3사를 중심으로 철강재료를 이용한 충격 흡수용 부재의 개발이나 충돌흡수 시스템의 개발에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있으나⁷⁾, 아직 외국 기술의 모방이나 외국에서 개발된 시스템의 적용 정도에 그치고 있는 실정이다.

현재 이러한 하이브리드 복합부재가 실용화 된 것은 아니지만 곧 실용화 될 가능성이 높은 것으로 판단되며, 이러한 시점에서 국내에서도 많은 연구가 이루어져야 선진 외국에 비해 다소 개발 및 실용화가 늦더라도 국제적 특허를 피해갈 수 있으며 즉

각적인 대응이 가능하다고 할 수 있다. 이와 같은 연구는 국내 자동차의 안전도를 높여 자동차 산업의 경쟁력을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 나아가서는 국제 경쟁력도 높일 수 있는 계기가 될 것이다.

본 연구에서는 충격에너지의 흡수량을 획기적으로 증대시키면서도 중량의 증가가 그다지 크지 않고 실제 적용하기가 용이한 새로운 하이브리드 부재에 대하여 유한요소법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 이러한 부재의 충격 흡수 특성을 확인한다. 실험결과는 H. Mitsuishi 등⁶⁾의 연구 결과를 이용하여 비교하였다. 새로운 하이브리드 부재를 실차에 적용하여 정면충돌 시험과정을 컴퓨터로 시뮬레이션함으로써 실제로 어느 정도의 충격 흡수 능력이 향상되었는가를 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 FRP 재료의 에너지 흡수특성

일반적으로 FRP(Fiber Reinforced Plastic) 즉 섬유강화 플라스틱은 무게가 가볍고 충격에 대해 높은 에너지 흡수 능력을 가지고 있어 자동차를 비롯한 수송기기의 충격 흡수부재에 응용이 가능하다.

재료의 에너지 흡수 특성은 비 에너지 흡수량, 즉 단위질량당 에너지 흡수량으로 평가되며 단위는 kJ/kg이다. 강의 비 에너지 흡수량은 33.7kJ/kg, 알루미늄 66.9kJ/kg, Epoxy Base의 Glass Fiber의 경우 53.7kJ/kg, Epoxy Base의 Carbon Fiber의 경우 82.1kJ/kg으로써 FRP가 강이나 기타 금속에 비해 결코 떨어지지 않는 충격흡수 특성을 가짐을 알 수 있다.

FRP를 이용한 원통형 소재는 압축하중을 받으면 소성 변형이 일어나는 것이 아니고 내부의 fiber들이 파단되어 변형이 일어나는 연속적 취성 파괴 거동을 보인다. 이러한 거동을 미시적으로 수학적 모델을 구축하는 것은 매우 어렵다. 그러나 거시적인 측면에서 FRP를 연속체 중에서 가공경화가 없는 단성-완전소성체로 간주하여 재료가 일정한 힘을 받으면 연속적으로 변형이 일어나게 되어, 실제의 연속적 파괴거동과 유사한 하중-변위 곡선을 얻을 수 있다.

2.2 원통형 부재의 동적 압괴 특성

원통형 부재의 동적 압괴특성을 파악하기 위하여 외경 60mm, 두께 1.6mm, 길이 200mm인 철강제 원통, 내경 35mm, 두께 2.5mm의 FRP 원통을 9m의 높이에서 130kg의 추를 낙하시켜 충돌시키는 상황에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 충돌시 속도는 약 48km/h로서 차량의 정면 충돌 범규 시험 속도에 상당한다.

대칭성을 고려하여 원통의 반만을 1170개의 4각형 쉘 요소를 이용하여 모델링하고 대칭면에 대칭 경계조건을 부여하였다. 충돌해석 전용 비선형 유한요소 해석 소프트웨어인 LS-DYNA를 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 1에 시험 및 해석의 방법을 간략히 나타내었다.

Fig. 2, 3에 철강제 원통형 부재의 유한요소 모델과 충돌 후의 해석 결과를 나타내었다. 충돌시 에너지를 흡수하며 마치 아코디언처럼 변형하는 형상을

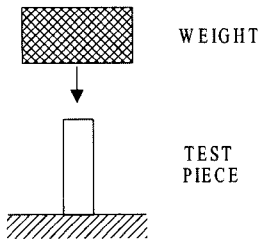


Fig. 1 Schematic diagram of the test and the simulation

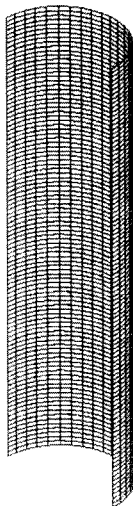


Fig. 2 Finite element model of steel pipe(half model)

보여주고 있다. 이는 실험결과⁶⁾와 매우 유사한 것으로 판단된다.

Fig. 4에 철강제 원통형 부재의 시간-하중 곡선을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 좌굴하중이 다소 낮은 것을 제외하고 전체적으로 실험결과⁶⁾와 좋은 일치를 보이고 있다. 평균 충격하중은 철강제 원통형 부재가 실험치 64.6kN, 해석치 52.6kN으로 해석치가 실험치에 비해 18.4% 낮다.

Fig. 5에 FRP 원통형 부재의 시간-하중 곡선을 나타내었는데 FRP 원통형 부재는 3msec까지는 해석과 실험 결과가 비교적 일치하고 있으나 실험에 있어서 3msec 이후에는 더 이상의 좌굴현상이 발생

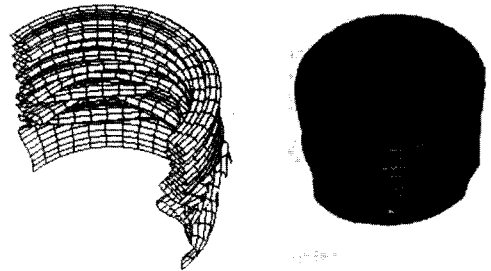


Fig. 3 Deformed model of steel pipe(half model) and test result⁶⁾

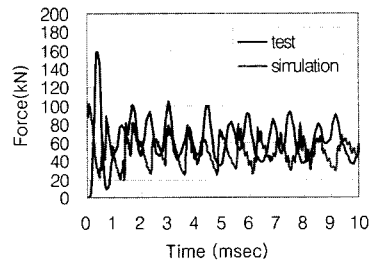


Fig. 4 Time-force relation of steel pipe

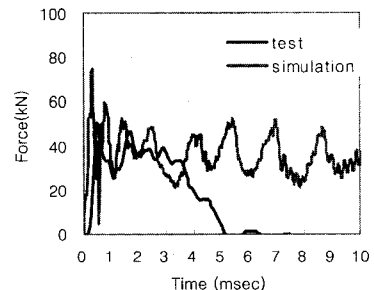


Fig. 5 Time-force relation of FRP pipe

하지 않고 부재가 구부러져 꺾어져 그림과 같은 그래프 형상이 나타났다고 보고되었다.⁶⁾ 3msec까지의 평균하중은 FRP 부재의 경우 실험치 32.9kN, 해석치 39.6 kN으로 해석치가 실험치에 비해 20.4% 높다.

2.3 하이브리드 부재에 대한 충돌 해석

철강재 원통 내부에 에너지 흡수 및 굽힘 강성을 증대시키기 위하여 사용하는 FRP는 유리섬유가 바둑판 형태로 삽입되어 있는 재료를 사용하였다. 철강재 원통은 외경 60mm, 두께 1.6mm, 길이 200mm 이고, FRP 원통은 내경 35mm, 두께 2.5mm이다. 실제 실험에서는 외부의 금속 강도 부재와 내부의 FRP 심재 사이에 우레탄 폼을 발포하여 하이브리드 부재를 구성하였으나⁶⁾ 우레탄 폼은 철강재와 FRP를 고정시키는 역할만 수행할 뿐 하중을 지지하지는 못하기 때문에 시뮬레이션 상에서는 생략하였다. 충돌해석에서는 앞의 해석과 마찬가지로 9m의 높이에서 130kg의 추를 낙하시켜 충돌시키는 상황을 시뮬레이션하였다.

외부 철강재 원통은 2000개의 사각형 셀 요소, 내부의 FRP 심재는 2000개의 사각형 셀 요소를 사용하였으며 낙하하는 추는 200개의 솔리드 요소로 처리하였다. Fig. 6에 전체적인 모양을 나타내었다.

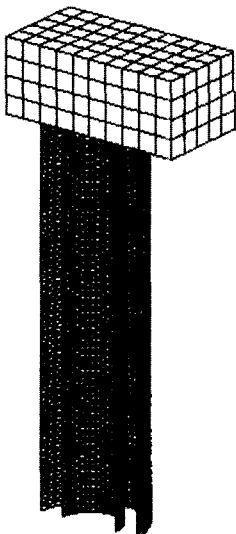


Fig. 6 Finite element model of hybrid structure

Fig. 7에서 보는 바와 같이 철강재 원통 안에 FRP 소재의 심재가 동시에 축방향 충격을 받을 경우 전체적인 변형이 철강재 원통만의 변형보다 적음을 알 수 있다. 이것은 적은 공간에서 많은 에너지를 흡수 할 수 있는 구조를 만들어 내는 것이 가능함을 보여주고 있다. Fig. 8에 하이브리드 부재의 충격시 시간-하중 곡선을 나타내었다. 전반적으로 앞선 실험 결과와 마찬가지로 초기의 충격하중이 실험 쪽의 경우가 높은 경향을 보이며 전체적으로도 실험치⁶⁾ 보다 해석 결과가 낮은 하중을 나타내고 있으나

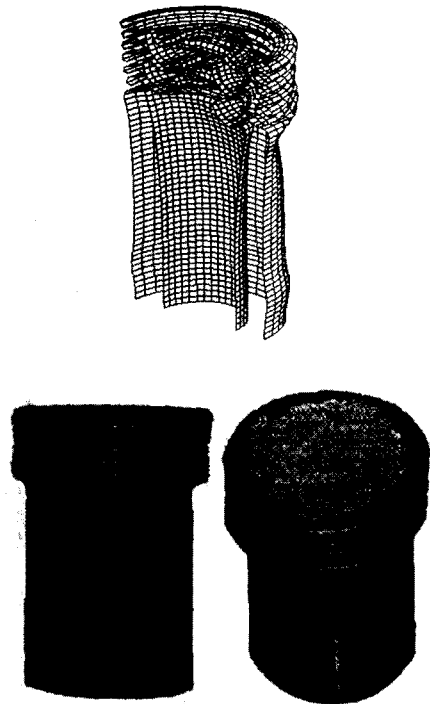


Fig. 7 Deformation of hybrid model after impact(10msec) and test results⁶⁾

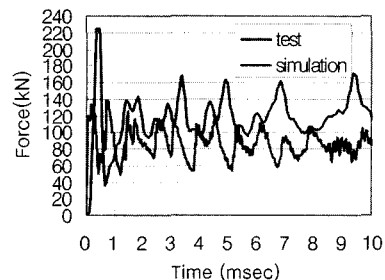


Fig. 8 Time -force relation of hybrid structure

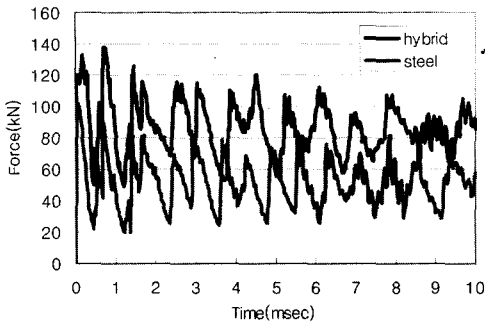


Fig. 9 Comparison of hybrid and steel structure in simulation

변형 모우드는 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 평균하중은 실험치 114.3kN, 해석치 86.6 kN으로 실험치가 해석치에 비해 24.2% 높다.

Fig. 9에 철강재 부재와 하이브리드 부재의 시간에 대한 충격하중을 나타내었다. 평균하중은 철강재 부재가 51.1kN이고 하이브리드 부재가 86.6 kN으로 하이브리드 부재가 철강재 부재에 비하여 69.5% 높아 하이브리드 부재의 유용성을 확인할 수 있다.

2.4 적용사례

철강재료와 FRP를 조합시킨 하이브리드 부재가 실차의 충돌시 어떠한 역할을 할 수 있는가를 확인하기 위하여 실제 차량의 Side Rail의 일부분을 하이브리드 충격부재로 변경하여 비교해석을 실시하였다. 대상 차량은 국내 차량의 실제 데이터를 얻기 어려운 관계로 인하여 차량의 앞부분만 모델링된 외국의 자료를 인터넷 상에서 다운받아 사용하였다.

차량의 정면 충돌시 충격에너지를 가장 많이 흡수하는 부재는 차량 좌우의 Side Rail이며 이 부재는 사각형 단면으로 이루어져 있고, 충돌시 아코디온 형태로 축방향으로 좌굴하면서 충격에너지를 흡수하는 구조로 되어 있다. Fig. 10에 대상 차량의 전체적인 모습을 나타내었다. 전체 요소수 8712개, 절점수 8659개로 이루어져 있으며 해석은 56km/h의 정면 충돌 상황을 시뮬레이션하였다. 정면 충돌시 충격 에너지의 대부분을 차량의 앞쪽 구조에서 흡수하기 때문에 차량의 앞부분, 즉 범퍼, Side Rail, 안쪽 Fender, Shock Absorber Tower, Under Rail, Engine 등으로 모델링 되어 있다. Fig. 11에 나타낸 바와 같이

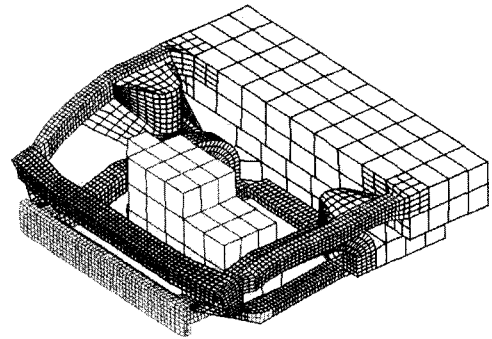


Fig. 10 Finite element model of vehicle front structure

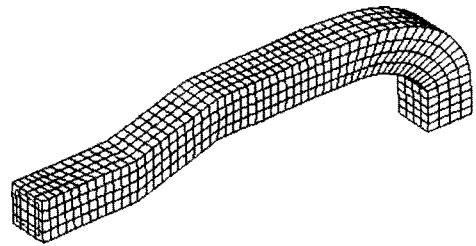


Fig. 11 Replaced part of side rail front

Side Rail의 앞부분 약 20cm 정도를 기존의 2t 강판으로 만든 사각형 단면부재 대신 1t의 철강재와 2t의 FRP 재료를 복합한 하이브리드 사각형 부재를 삽입하였다.

Fig. 12~15에 Original 모델과 Side Rail에 하이브리드 부재를 적용한 Modified 모델에 대한 충돌 후 변형양상을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 충돌 후 15msec에서는 변형양상이 비슷하나 30msec에서는 Front end 부분과 엔진과의 거리가 다르다. 이것은 하이브리드 부재를 적용한 Modified 모델의 경우가 Side Rail 중앙부의 굽힘이 적게 일어났기 때문이라는 것을 나타내고 있다. 이것은 초기에 충돌에너지를 받는 Side Rail 앞부분이 하이브리드 충격부재로 인하여 적절하게 변형하면서 에너지를 흡수하기 때문에 다른 부분의 변형량이 적게 된다는 사실을 나타내고 있다. 하이브리드 부재를 삽입한 경우 기존의 2t의 Side Rail에 비해 무게는 33% 줄어들게 되어 경량화의 효과는 매우 크며 기존 철강재 재료의 두께가 줄면서 좌굴이 일어나기 쉽게 되어 에너지 흡수 측면에서도 매우 유리하게 되었음을 알 수 있다.

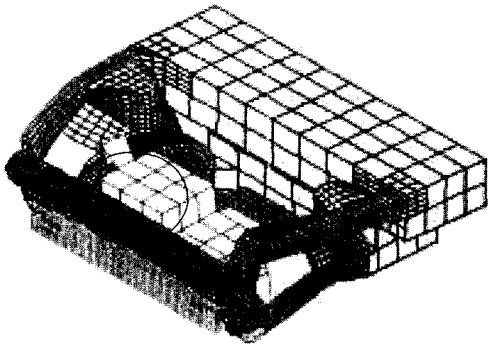


Fig. 12 Deformed model after impact(15msec, ORIGINAL model)

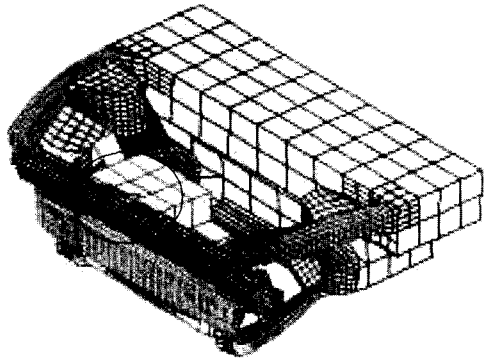


Fig. 13 Deformed model after impact(30msec, ORIGINAL model)

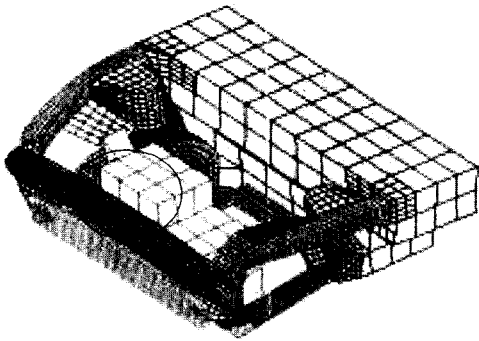


Fig. 14 Deformed model after impact(15msec, MODIFIED model)

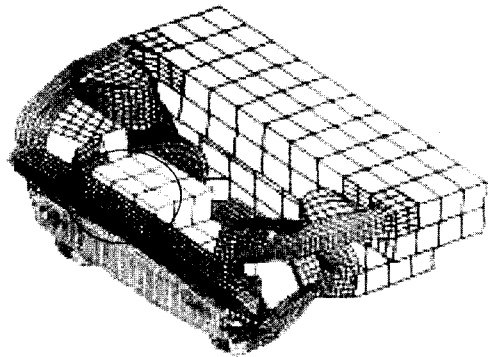


Fig. 15 Deformed model after impact(30msec, MODIFIED model)

Fig. 16에 차체 중심부의 가속도 파형을 Original 모델과 Modified 모델에 대하여 비교하여 나타내었다. 차체 중심부의 가속도 파형은 운전자 및 승객이 받는 충돌시의 감속도이므로 인체 상해에 대단히 큰 영향을 미치는 인자이다. 따라서 이 가속도 파형은 급격한 변화가 없으면서 낮고 넓게 분포하는 것이 가장 유리하다. 그림에서 보는 바와 같이 Original 모델에 비하여 하이브리드 부재를 적용한 Modified 모델의 경우 초기 5msec 부근의 peak 치가 낮아졌을 뿐 아니라 전체적으로 sharp한 곡선이 완만하게 분포됨을 보여주고 있다. 이는 Modified 모델이 충격 에너지를 비교적 긴 시간에 적절히 흡수함을 나타내고 있다.

Table 1에 시간대별 충돌 에너지 흡수량을 나타내었다. 하이브리드 부재를 적용한 경우가 철강재 재료만을 사용한 것보다 20msec 및 30msec 부근에서는

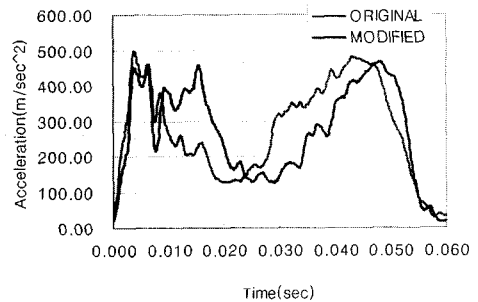


Fig. 16 Comparison of acceleration shape between ORIGINAL and MODIFIED model at body center

Table 1 시간대별 충돌 에너지 흡수량 비교

| Time(msec) | ORIGINAL(kJ) | MODIFIED(kJ) |
|------------|--------------|--------------|
| 10 | 35.0 | 35.1 |
| 20 | 55.7 | 58.9 |
| 30 | 78.8 | 80.2 |
| 40 | 94.8 | 92.6 |
| 50 | 101.4 | 100.0 |

다소 에너지를 많이 흡수하고 40msec 이후에는 다소 작은 량의 에너지를 흡수하는 것으로 보아 앞의 그림에서 보듯이 충돌에너지 흡수분포가 다소 고르게 되었음을 나타낸다.

3. 결 론

본 연구는 충돌에너지 흡수 성능을 향상시키면서도 경량화를 달성할 수 있는 새로운 하이브리드 복합부재에 대하여 유한요소법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 충돌 특성 확인하고, 사각형 부재를 실차에 적용하여 정면 충돌시의 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 충격흡수 성능을 확인하였다.

철강제 원통형 부재 안에 FRP 소재를 넣으면 평균 충격하중이 약 70% 증가하여 좁은 공간에서도 많은 에너지를 흡수할 수 있는 구조를 만들어 내는 것이 가능함을 보였다.

차량의 충돌시 충돌에너지를 주로 흡수하는 side rail 앞부분 200mm를 하이브리드 형태로 바꾸면서 철강의 두께를 2.0mm에서 1.0mm로 줄이면 기존의 부재보다 중량은 33%줄지만 충돌시의 에너지 흡수 정도는 거의 동일하고, 차체 중심부에서의 최고 감속도를 다소 줄이며, 에너지 흡수 분포도 고르게 되는 현상을 확인하였다.

FRP 부재는 그 무게에 비하여 강도가 매우 커 철강재와 FRP를 적절히 조합한 하이브리드 부재를 이용하면 실차의 무게를 줄이면서도 충돌 안전도를 향상시킬 수 있는 좋은 수단이 된다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 두원공과대학 학술연구과제로 수행되었습니다.

References

- 1) H. Wallentowitz, H. Adam, "The Use of Energy Absorbing Reinforcements in Automotive Applications," SAMPE Journal, 31-5, pp.23-28, 1995.
- 2) P. H. Thornton, H. F. Mahmood, C. L. Magee, "Energy Absorption by Structural Collapse," Structural Crashworthiness, pp.96-117, 1983.
- 3) Ir. Stefaan de Winter, "A Mass Producible, Low Cost Crash Energy Management System for Automobiles, Efficiency and Productability," Proc. of 2nd Japan International SAMPE Symposium, 1991.
- 4) M. J. Czaplicki, R. E. Robertson, P. H. Thornton, "Comparison of Bevel and Tulip Triggered Pultruded Tubes for Energy Absorption," Composites Science and Technology, Vol.40, pp.377-421, 1991.
- 5) T. Nakatani, H. Mitsuishi, H. Hamada, "Energy Absorption Properties of FRP Tube," JARI Research Journal, Vol.20, No.1, pp.38-43, 1998.
- 6) H. Mitsuishi, T. Nakatani, F. Matsukawa, "Energy Absorption Ability of Thin-Walled Steel and FRP Hybrid Structure," JARI Research Journal, Vol.21, No.2, pp.28-31, 1999.
- 7) C. W. Kim, B. K. Han, B. S. Kim, "A Study on Crushing Characteristics of Hatted Section Tube," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.212-219, 2002.