

부재단면 형상에 따른 부재 굽힘붕괴 특성의 폼 충전 효과

이 일 석¹⁾ · 강 성 종^{*2)}

대구가톨릭대학교 대학원 자동차공학과¹⁾ · 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부²⁾

Foam Filling Effect on Bending Collapse Characteristics for Member Section Type

Ilseok Lee¹⁾ · Sungjong Kang^{*2)}

¹⁾Graduate school of Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

²⁾School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

(Received 11 May 2006 / Accepted 7 July 2006)

Abstract : More diversified and strengthened safety regulations require higher safety vehicle with less weight. The structural foam can play a role for restraining section distortion of main body members undergoing bending collapse at vehicle crash. In this study, using structural foam modeling technology, validated in previous work, the bending collapse characteristics were evaluated for two types of circular and actual vehicle body frame sections. With changing the foam filling method, outer panel thickness and section shape, load carrying capability and absorbed energy were observed. The results indicate valuable design strategy for effectively elevating bending collapse performance of body members with foam filled.

Key words : Structural foam(구조 폼), Solid foam filled(완전 폼 충전), Laminated foam filled(적층 폼 충전), Three point bending test(3점 굽힘시험), Load carrying curve(하중-변위 선도), Absorbed energy(흡수에너지)

1. 서 론

안전도 범규강화와 소비자의 안전성, 정숙성, 편의성에 관한 다양한 요구에 따라 자동차 중량이 증가하여 동력성과 연비를 저하시키게 되므로 차체에 대한 소재변경과 경량화 설계기술이 더욱 요구되고 있다. 특히 고안전, 경량 자동차 개발을 위해서는 충돌성능을 향상시킬 수 있는 차체 골격부재의 설계기술 확보가 요구된다.

충돌 시 차체에는 굽힘붕괴가 지배적으로 발생하며 굽힘 모멘트에 의해 국부좌굴이 발생하고 급격한 단면 변화(높이 축소)와 함께 소성 현지가 발생되어 쉽게 충돌저항력을 상실한다.¹⁾

경량화 목표를 달성하면서 충돌안전성을 확보하고자 고장력 강판의 적용과 알루미늄 프레임 차체 구조에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔으며,²⁾ 중량 증가를 최소화하면서 단면의 찌그러짐을 막아 저항력을 효과적으로 증가시킬 목적으로 부재 내부를 구조 폼(structural foam)으로 채우는 설계기술도 연구되고 있다. 그러나 구조 폼의 재료특성과 폼 적용 효과에 대한 연구가 주로 수행되어 왔으며,³⁻⁶⁾ 실제 차체 단면에 적용할 때에 고려되어야 할 여러가지 설계요소와 그 영향에 대해서는 연구가 미진하다.

본 연구에서는 앞서의 모자단면 빔 연구⁷⁾에서 검증된 폼 모델링 해석기술을 적용하여 파이프 단면 부재와 일반적인 차체 부재 단면형상을 나타내는 증장비 차체 프레임 단면 부재를 대상으로 3점 굽힘

*Corresponding author, E-mail: sjkang@cu.ac.kr

해석모델을 구성하여 폼 충전 부재의 붕괴특성을 조사하였다. 단면특성, 폼 충전 방법, 외관두께에 따른 붕괴특성(초기 좌굴강도와 흡수 에너지량)을 중앙 변화와 함께 고찰하였으며, 붕괴특성 변화에 대한 원인을 분석하였다. 해석은 비선형 상용 프로그램인 LS/DYNA를 사용하였다.⁸⁾

2. 재료특성 및 폼 모델링

2.1 재료특성

본 연구에 적용된 외관(outer pipe, tube) 및 내관(inner pipe, reinforcement)의 강재의 재료 특성은 Fig. 1과 같다.

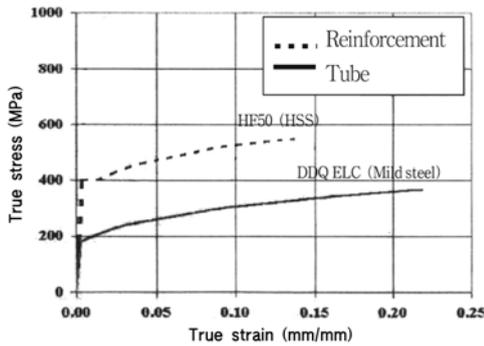


Fig. 1 True stress-strain curves of steels

또한, 본 연구에 적용된 폼 충전재는 에폭시(epoxy) 소재로 압축 시와 인장 시의 거동이 상이하 며 그 재료특성은 Fig. 2와 같다.⁹⁾

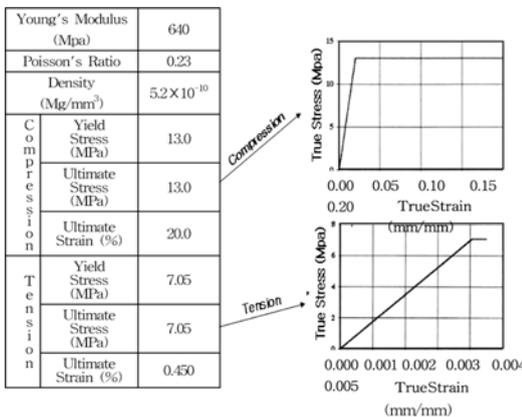
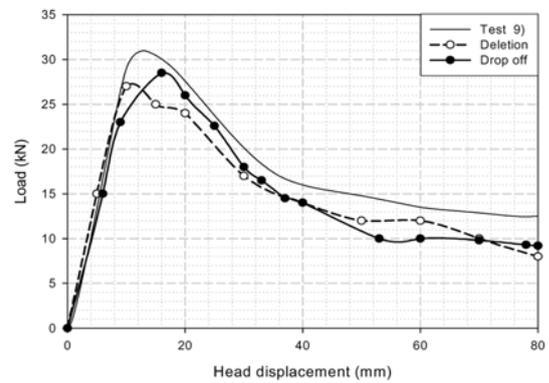


Fig. 2 Epoxy foam properties

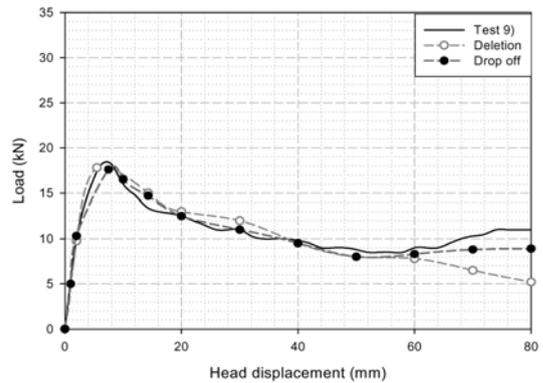
2.2 폼 모델링

완전 폼 충전(solid foam filled) 및 적층 폼 충전(laminated foam filled) 모자단면 빔의 3점 굽힘에 대한 앞서의 연구결과⁷⁾에서 그 타당성이 검증된(Fig. 3) 폼 모델링 기법을 적용하였다.

과단 이후의 폼 영향을 제거하기 위해 Fig. 4와 같이 일정한 변형률(인장: 0.5%, 압축: 20%)을 초과하면 응력이 0이 되도록 재료특성 곡선을 직접 정의하였다.(drop-off model, Fig. 4)



(a) Solid foam filled section



(b) Laminated foam filled section

Fig. 3 Results for hat section beam under three point bending

3. 파이프 단면 부재의 굽힘붕괴 특성 분석

3.1 단면 형상 및 모델 구성

단면은 기본모델, 완전 폼 충전 모델, 적층 폼 충전 모델 3가지로 구성하였다.(Fig. 5)

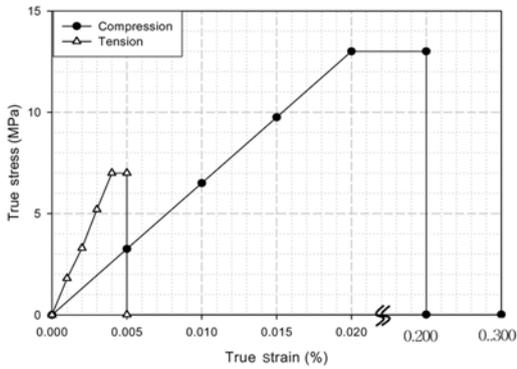


Fig. 4 Drop-off model of epoxy foam

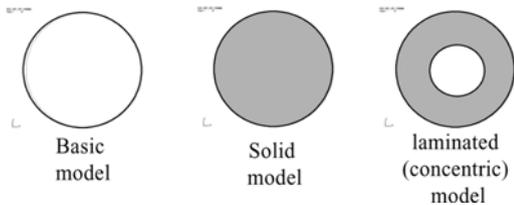


Fig. 5 Representative pipe section types

일반적인 도어 임팩트 빔을 기준으로 하여 외경을 31.8mm로 하였으며, 이중(double) 파이프 구조인 적층 폼 충전 모델의 경우, 내부파이프 외경은 15mm로 일정하게 유지하였다.

길이 800mm, 지지간격 600mm인 모델에 단순지지조건을 부여하고 직경 314mm의 강체 헤드를 사용하여 부재 중앙에 12mm/min로 변위하중을 가하였으며, 단면 대칭성을 이용하여 1/2 모델에 대해 3점 굽힘해석을 수행하였다.(Fig. 6)

파이프 재질은 외부파이프는 Fig. 4의 연강 재질,

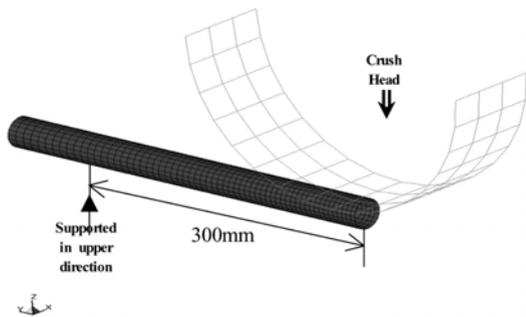


Fig. 6 Analysis model and configuration of three point bending test

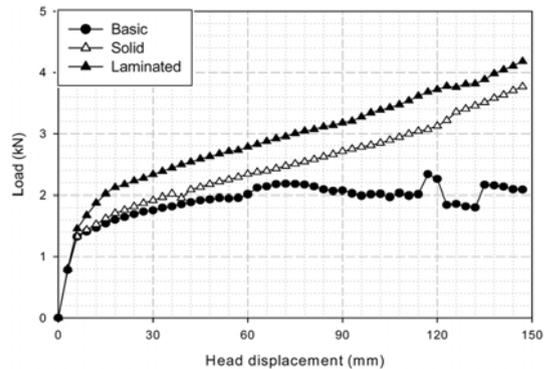
내부파이프는 Fig. 4의 고장력강 재질을 적용하였으며, 완전 폼 충전 모델의 경우 파이프는 1,300여개의 4절점 박판 요소(shell element), 폼은 3,200여개의 8절점 솔리드 요소(solid element)로 각각 구성하였다.

해석결과로서 강체 헤드의 하중-변위 선도와 헤드 변위 150mm까지의 에너지흡수량을 비교하였다.

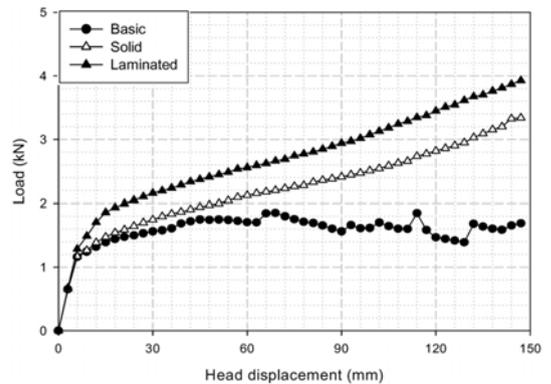
3.2 대표 단면의 굽힘붕괴 특성

Fig. 5의 세 가지 대표 단면에 대해 내부파이프 두께를 1.0mm로 하고 외부파이프 두께는 1.8mm, 2.0mm로 변화시켜 폼 충전 형태와 두께에 따른 영향을 파악하였다.(Fig. 6)

완전 폼 충전 모델과 적층 폼 충전 모델 모두 초기 좌굴 이후에도 지속적으로 저항력이 증가하는 바람직한 거동을 나타내고 있다.(Fig. 7)



(a) Outer pipe thickness 2.0mm



(b) Outer pipe thickness 1.8mm

Fig. 7 Load carrying curves of pipe section models with varied thickness

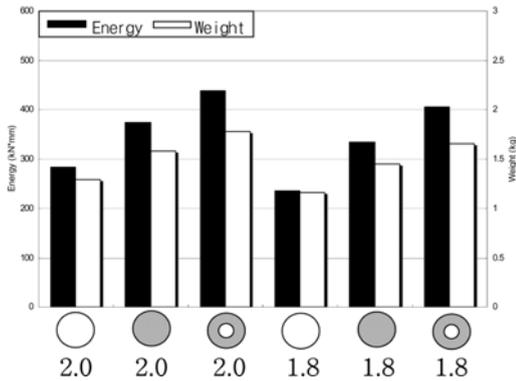


Fig. 8 Absorbed energy and weight of pipe section models with varied thickness

한편, 두께 2.0mm의 경우 두께 1.8mm에 비해 폼 추가에 따라 에너지 흡수량 증가가 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있으며, 적층 폼 충전 모델이 완전 폼 충전 모델에 비해 높은 에너지 흡수량을 나타내는데 이것은 앞서의 모자단면 부재에 대한 연구결과⁷⁾와 일치하는 결과이다.(Fig. 8)

따라서 부재의 두께를 줄이더라도 폼을 적절히 충전하면 충분히 큰 에너지 흡수량을 나타낸다는 것을 확인하였다.

3.3 적층 폼 충전 모델의 내부파이프 위치에 따른 굽힘붕괴 특성

적층 폼 충전 모델의 경우 내부파이프의 위치에 따라 상·하부 폼의 두께가 달라져 에너지 흡수량에 영향을 미칠 것이라 판단되므로 상부 폼의 압축에 의한 에너지 흡수량 증대를 목적으로 하여 내부파이프를 6mm 아래에 위치시킨 하부 편심 적층 폼 충전 모델(lower eccentric laminated model)과 반대로 하부 폼의 압축에 의한 에너지 흡수량 증대를 목적으로 하여 내부파이프를 6mm 위로 위치한 상부 편심 적층 폼 모델(upper eccentric laminated model)을 각각 구성하였다.(Fig. 9)

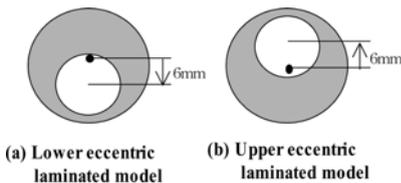


Fig. 9 Eccentric laminated models

외부파이프 두께를 2.0mm, 1.8mm 두 가지로 하여(내부파이프 1.0mm), 동심 적층 폼 충전 모델과 상·하부 편심 적층 폼 충전 모델에 대한 해석을 수행하였다.

해석결과(Fig. 10, 11)에서 알 수 있듯이 동심 적층 폼 모델에 비해 하부 편심 적층 폼 모델은 강체 헤드 변위가 약 100mm에서부터는 오히려 저항력이 작게 나타나며, 그에 따라 에너지 흡수량이 약간 작게 나타났다. 이것은 좌굴시 폼 두께가 두꺼운 윗부분보다 상대적으로 얇은 아랫부분 폼이 먼저 쉽게 압축되기 때문이며 결국, 하부 편심 모델은 기존의 동심 모델에 비해 장점이 없다는 것을 알 수 있다.

한편, 상부 편심 적층 폼 충전 모델의 경우 하부 편심 적층 폼 충전 모델에 비해 외부파이프 좌굴이 일찍 발생하나 이후 하부 폼이 압축되어 변형이 보

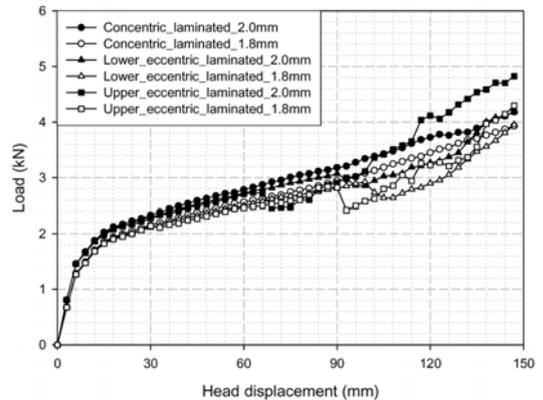


Fig. 10 Load carrying curves of pipe section models with varied inner pipe position

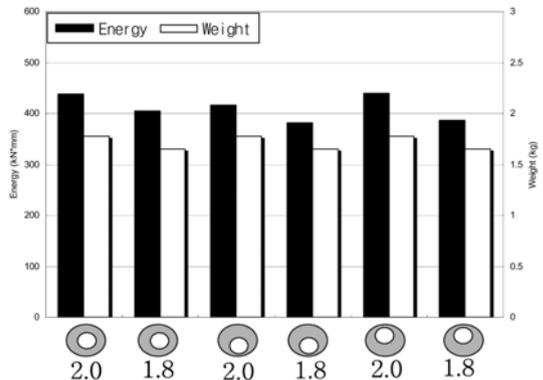


Fig. 11 Absorbed energy and weight of pipe section models with varied inner pipe position

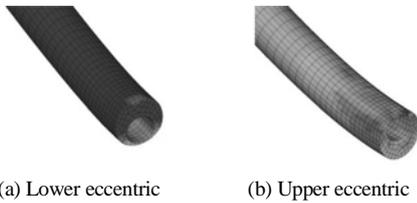


Fig. 12 Mean strain distributions and deformed shapes of eccentric laminated models at head displacement 120mm

다 폭넓게 발생하면서 지속적으로 저항력이 증가하여 하부 편심 적층 폼 충전 모델에 비해 높은 에너지 흡수량을 나타낸다.(Fig. 12)

그러나 두 편심 적층 폼 모델은 모두 동심 적층 폼 충전 모델에 비해 큰 효과는 기대할 수 없음을 알 수 있다.

3.4 폼 충전 길이 변화의 영향

파이프 단면에서 폼 충전 길이의 영향을 조사하기 위해 파이프 길이(L)에 대하여 전체 길이를 충전한 모델(모델명 L)과 중앙부 1/3 길이만을 충전한 모델(모델명 1/3 L)에 대해 해석을 수행하였다. 외부 파이프 두께 1.8mm, 내부파이프의 두께 1.0mm로 하여 완전 폼 충전 모델과 적층 폼 충전 모델을 구성하였으며 폼 충전 길이에 따른 에너지 흡수량은 Fig. 13에 나타냈다.

완전 폼 충전 모델의 경우 모자 단면의 경우⁷⁾에와 같이 폼 적용 길이에 대한 에너지 흡수량의 차이가 거의 없었으나 적층 폼 충전 모델의 경우는 1/3 L 충

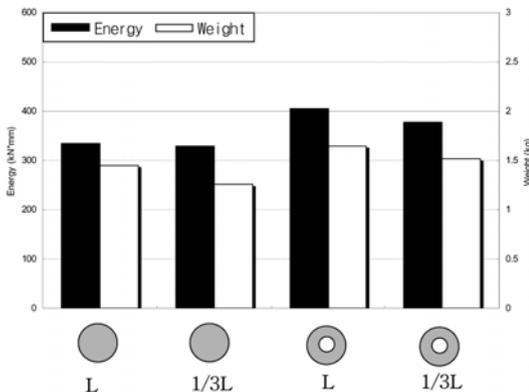


Fig. 13 Absorbed energy and weight of pipe section models with varied foam length

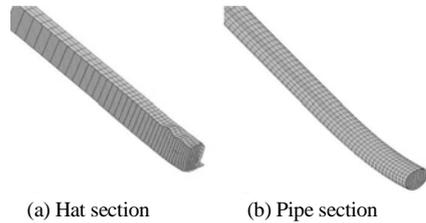


Fig. 14 Deformation of hat and pipe section with foam filled at head displacement 150mm

진의 경우가 전체길이 충전에 비해 약 20%의 에너지 흡수량 저하가 나타났다. 이것은 Fig. 14에서 볼 수 있듯이 적층 폼 충전 파이프 단면의 경우, 모자 단면과는 달리 파이프가 좌굴되면서 충전부에 단면 압축보다는 굽힘 변형이 주로 발생하고 폼을 길이 방향으로 밀어내는 변형도 크게 발생하기 때문이라 판단된다.

따라서 파이프 단면과 같이 폼 길이 방향으로 변형이 크게 발생할 수 있는 단면 형상이라면 폼 적용 길이도 에너지 흡수에 상당히 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

4. 중장비 차체 프레임 부재의 굽힘붕괴 특성 분석

4.1 해석 모델 구성

모자 단면과 파이프 단면 등의 부재들은 형상이 단순하여 실제로 차량에 적용되는 구조부재의 단면 형상과는 차이가 있다. 따라서 도출된 연구결과들의 신뢰성을 확보하고 실제 설계에 적용하기 위해 중장비 차체 프레임에 사용되는 단면에 대해 동일한 굽힘해석을 수행하였다.

기본, 완전 폼 충전, 적층 폼 충전 3가지 모델과 하단부 홈(groove)의 영향을 비교하기 위하여 홈을 제거한 3가지 모델을 해석하였다.(Fig. 15)

단면 사이즈와 굽힘 해석 모델은 Fig. 16과 같으며 부재 길이 1,500mm, 지지간격 1,000mm로 하여 직경 314mm의 강체 헤드로 중앙부에 12mm/min의 변위하중을 가하였다. 대칭성을 고려하여 1/2 모델만 구성하였으며 완전 폼 충전 모델의 경우 외관은 4,600여개의 4절점 박판 요소(shell element), 폼 충전재는 9,000여개의 8절점 솔리드 요소(solid element)로 각각 모델링 하였다. 외관 재질은 Fig. 4의 연강,

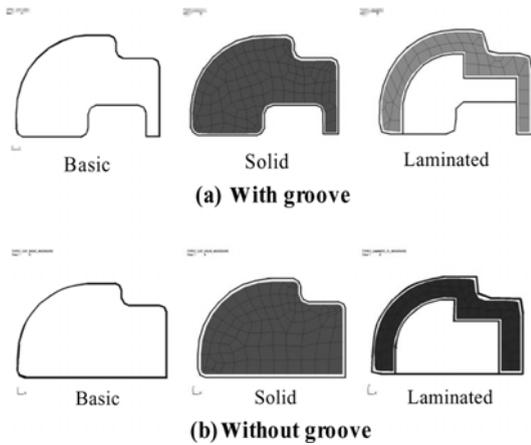
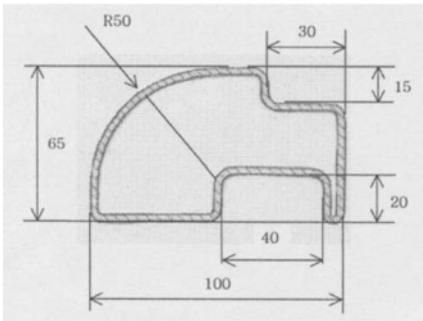
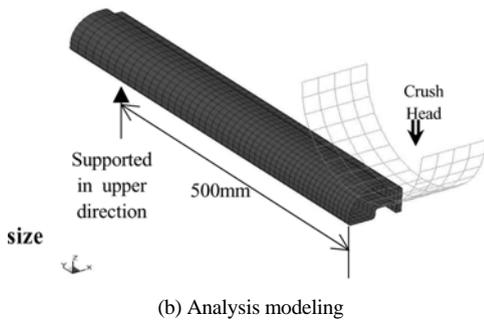


Fig. 15 Representative body frame section types with or without groove



(a) Size of actual section size



(b) Analysis modeling

Fig. 16 Section size and analysis modeling

보강재는 Fig. 4의 고장력강을 그대로 적용하였다. 적층 폼 충진 모델의 경우 홈 우측부(두께 10mm)를 제외하고 폼 충진 두께는 15mm로 하였다.

해석결과는 강제헤드의 하중-변위선도와 헤드변위 150mm까지의 에너지 흡수량으로 상호 비교하였다.

4.2 폼 적용 길이변화의 영향

외판 두께 3.0mm, 보강재 두께 1.0mm로 하여 완전 폼 충진 모델과 적층 폼 충진 모델에 대해 폼 적용길이를 변화시켜 해석을 수행하였다. 해석결과는 모자단면의 경우⁷⁾와 같이 폼 적용길이에 의한 굽힘붕괴 특성에 차이가 거의 없었다.(Fig. 17)

따라서 이후 해석은 모두 폼 적용 길이를 전체길이의 중앙부 1/3로 하여 수행하였다.

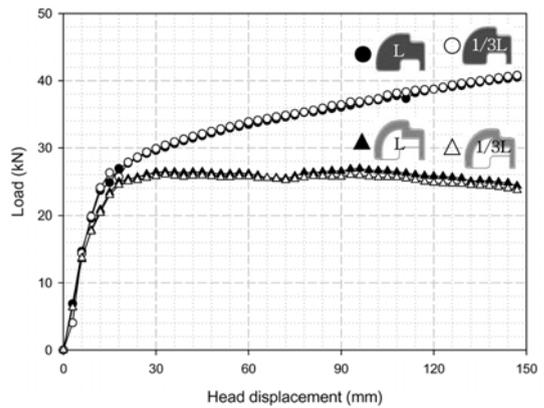


Fig. 17 Load carrying curves of body frame models with varied foam length

4.3 폼 충진 보강에 의한 굽힘붕괴 특성

기본모델은 두께 4.5mm와 3.0mm에 대해 그리고 폼 충진 모델은 외판 두께 3.0mm, 보강재 두께 1.0mm로 하여 해석결과를 비교하였다.

4.3.1 홈이 있는 차체 프레임 단면 해석

하부에 홈이 있는 프레임 형상(Fig. 15(a))에 대해 해석을 수행한 결과, 기존의 두께 4.5mm인 차체 프레임 부재는 초기 좌굴강도가 우수하지만 이후 저항력이 점차 감소하는 현상을 나타낸다. 반면 외판의 두께가 3.0mm인 완전 폼 충진 모델은 두께가 4.5mm인 기존의 차체 프레임 부재에 비해 좌굴강도가 다소 떨어지나 경량화 목적에 적합하고 좌굴 이후에 점차 저항력이 증가하여 우수한 에너지 흡수량을 나타낼 수 있다. 따라서 완전 폼 충진에 의해 기존 부재의 두께를 줄여 경량화를 달성하면서 우수한 굽힘붕괴 특성을 나타낼 수 있을 것으로 기대된다.

모자단면 부재⁷⁾와 앞서의 파이프 단면 부재의 해

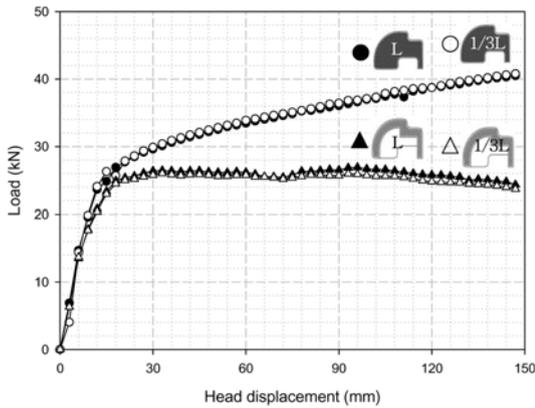


Fig. 18 Load carrying curves of body frame models with groove

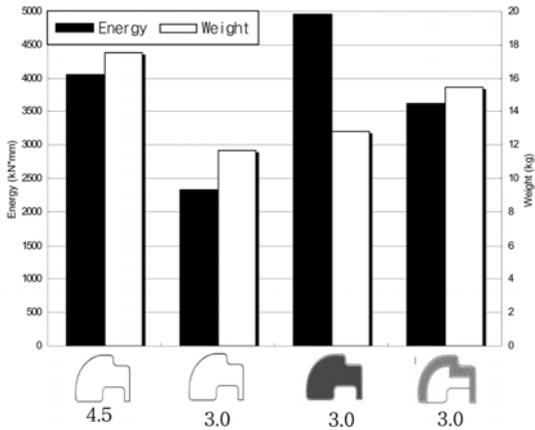


Fig. 19 Absorbed energy and weight of body frame models with groove

석결과와 반대로 적층 폼 충전 모델이 완전 폼 충전 모델에 비해 저항력과 에너지 흡수량 모두 뚜렷하게 작게 나타난다. 이는 Fig. 20에서 알 수 있듯이 적층 폼 충전 모델의 경우 차체 프레임의 홈 형상에 의해 좌굴시 부재단면이 좌우로 벌어지면서 폼이 압축되지 않아 충분한 에너지 흡수를 할 수 없기 때문이다.

4.3.2 홈이 없는 차체 프레임 단면 해석

단면의 벌어짐을 억제하여 폼 압축 효과를 높이 고자 Fig. 15(b)의 홈이 없는 3가지 모델에 대해 굽힘 해석을 수행하였다.

Fig. 21, 22 결과로부터 적층 폼 충전 모델의 좌굴 강도 및 저항력이 증가하여 홈이 있는 모델에 대한

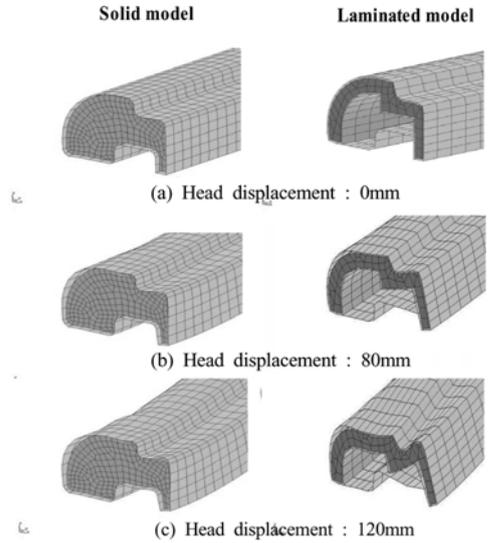


Fig. 20 Deformed shapes of solid and laminated model

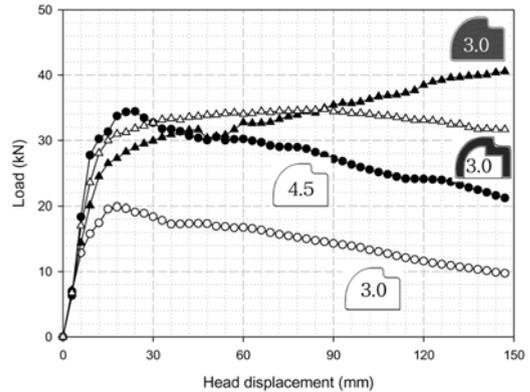


Fig. 21 Load carrying curves of body frame models without groove

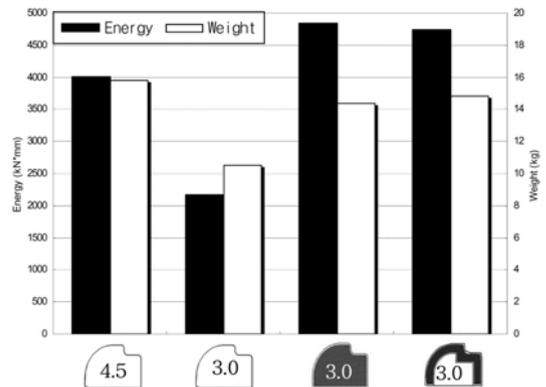


Fig. 22 Absorbed energy and weight of body frame models without groove

해석 결과(Fig. 19)에 비해 에너지 흡수량이 약 30% 정도 증가하여 완전 폼 충전 모델의 붕괴성능과 유사하게 나타나 폼 제거에 의해 구조성능이 크게 향상됨을 알 수 있다.

그러나, 모자 단면은 물론, 원형단면에 대한 결과(Fig. 13)와 반대로 적층 폼 단면이 완전 폼 충전 단면에 비해 여전히 열세임을 알 수 있다. 그 이유는 Fig. 23과 같이 모자 단면의 경우 하중방향인 수직방향으로 폼이 압축되는 현상이 나타나지만 차체 프레임 단면의 경우는 상부의 심한 굴곡으로 인해 폼이 압축보다는 단면의 찌그러짐 현상이 우선하여 발생하여 폼이 에너지흡수재로의 역할을 제대로 하지 못하기 때문이다.

따라서 굽힘 하중에 의해 벌어지기 쉬운 단면과 심한 굴곡을 가진 단면에 대한 적층 폼 충전에 의한 보강 방법은 큰 효과를 기대하기 어려우며 완전 폼 충전에 의한 보강 방법을 사용하는 것이 보다 효과적임을 알 수 있다.

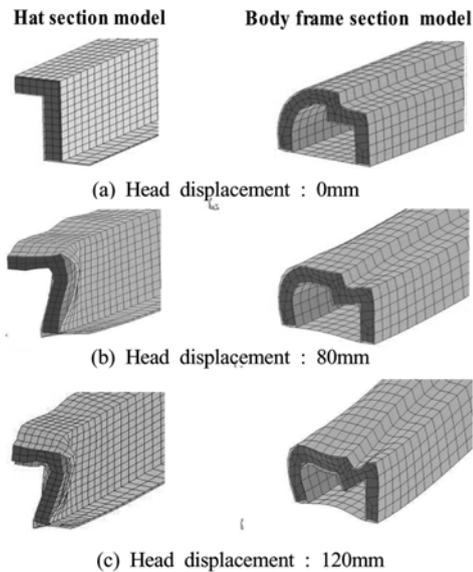


Fig. 23 Comparison of deformed shapes of laminated foam filled sections

5. 결론

파이프 원형 단면과 차체 프레임 단면 2가지 폼 충전 단면에 대해 3점 굽힘 해석모델을 구성하여 단

면형상 및 폼 충전 설계변수 변화에 따른 굽힘붕괴 특성을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저, 파이프 단면 부재에 대해

- 1) 두께가 클수록 폼 적용 효과가 뚜렷하게 나타나며 완전 폼 충전 보다 적층 폼 충전 모델이 높은 에너지 흡수량을 나타낸다.
- 2) 적층 폼 충전 모델에서 상부 편심 모델이 하부 편심 모델보다 우수한 에너지 흡수량을 나타내지만 두 가지 모두 동심 모델에 비해 큰 효과를 기대하기 어렵다.
- 3) 길이 방향 변형이 많이 발생하는 적층 폼 충전 모델에서는 완전 폼 충전 모델과는 달리 폼 충전 길이를 줄이면 붕괴특성이 저하된다.

다음 아래 홈이 있는 차체 프레임 단면 부재에 대해

- 1) 단면의 벌어짐 변형에 의해 폼이 충분히 압축되지 않아 모자단면, 파이프 단면과 달리 적층 폼 충전 모델이 완전 폼 충전 모델 보다 낮은 붕괴특성을 나타낸다.
- 2) 홈을 제거한 적층 폼 충전 부재는 홈이 있는 적층 폼 충전 부재에 비해 구조성능이 크게 향상되지만 찌그러짐 쉽게 발생하는 굴곡이 존재하는 단면형상으로 인해 여전히 완전 폼 충전 모델보다는 효과가 작게 나타났다.

이상으로부터 기본 단면형상에 따라 폼 충전 부재의 제작방법이 변경되어야 하며, 폼 충전 부재 설계 시 경량화와 함께 붕괴특성 향상을 극대화하기 위해서는 하중방향으로 최대한 압축이 유도되도록 단면을 형상화하고 단순화 하는 것이 중요한 선행 설계요소이다.

References

- 1) S. J. Kang, "Roof Crush Analysis Technique Using Simple Model with Plastic Hinge Concepts," Transactions of KSAE, Vol.4, No.6, pp.216-222, 1996.
- 2) H. Y. Kim, J. K. Kim, S. J. Heo and H. Kang, "Design of the Impact Energy Absorbing Member and Evaluation of the Crashworthiness for Aluminum Intensive Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.10, No.1, pp.216-233, 2002.

- 3) S. S. Chen and S. A. Meguid, "Crush Behavior of Metallic Foams for Passenger Car Design," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.5, No.1, pp.47-53, 2004.
- 4) K. Ishida, M. Fukahori, K. Hanakawa, H. Tanaka and K. Matsuda, "Development of a Technique to Strengthen Body Frame with Structural Foam," SAE 2001-01-0313, 2001.
- 5) B. J. Kim and S. J. Heo, "Collapse Characteristics of Aluminum Extrusions Filled with Structural Foam for Space Frame Vehicles," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.4, No.3, pp.141-147, 2003.
- 6) J. Wycech and M. Butler, "Influence of Structural Foam Properties on the Performance of Automotive Body Reinforcements," SP- 1765, SAE, pp.27-35, 2003.
- 7) I. Lee and S. Kang, "Bending Collapse Characteristic of Hat Section Beam Filled with Structural Foam", *Transactions of KSAE*, Vol.14, No.2, pp.92-99, 2006.
- 8) LS-DYNA User's Manual, Nonlinear Dynamic Analysis of Structures, Version 960, LSTC, 2001.
- 9) H. Lanzerath and R. Schilling, "Crash Simulation of Structural Foam," SP-1765, SAE, pp.47-55, 2003.