

## 폼 충전 모자단면 빔의 굽힘붕괴 특성

이 일 석<sup>1)</sup> · 강 성 종<sup>\*2)</sup>

대구가톨릭대학교 대학원 자동차공학과<sup>1)</sup> · 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부<sup>2)</sup>

### Bending Collapse Characteristics of Hat Section Beam Filled with Structural Foam

Ilseok Lee<sup>1)</sup> · Sungjong Kang<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

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

(Received 15 July 2005 / Accepted 26 September 2005)

**Abstract** : Design capability for high safety vehicle with light weight is crucial to enhancing competitive power in vehicle market. The structural foam can contribute to restraining section distortion in body members undergoing bending collapse at vehicle crash. In this study, first, the validation of analysis model including structural foam model for simulating fracture behavior was discussed, and the bending collapse characteristics of five representative section types were analyzed and compared. Next, with changing the laminate foam shape, load carrying capability and absorbed energy were observed. The results suggests a design strategy of body members filled with laminate foam, leading to effectively elevating bending collapse characteristics with weight increase in the minimum.

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

### 1. 서론

최근 자동차 설계기술은 높은 안전성, 정숙성, 편의성을 추구하고 있다. 그러나 성능 향상과 함께 자동차의 중량이 증가하여 동력성과 연비를 저하시키고 원가 상승을 초래할 가능성이 높으므로 자동차의 경량화 설계기술이 더욱 요구되고 있다.

자동차 차체의 골격구조는 사이드 레일(side rail), 필라(pillar), 루프레일(roof rail) 등과 같이 중공(hollow)의 폐단면을 가지는 부재로 구성되며, 충돌 시 승객의 안전에 큰 영향을 주기 때문에 고안전, 경량 자동차 개발을 위해서는 중량 증가를 최대한 억

제하면서 충돌성능을 향상시킬 수 있는 골격부재 설계기술 확보가 요구된다.

충돌 시 차체의 주된 붕괴형태는 굽힘 붕괴로 충격력에 의해 발생하는 굽힘 모멘트에 의해 국부 좌굴이 발생하고 급격한 단면 변화(높이 축소)와 함께 소성힌지로 진행되어 저항력을 상실하게 된다.<sup>1)</sup> 이에 대응하고자 고장력 강판의 적용과 알루미늄 스페이스 프레임 구조의 경량차체 등에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔으며,<sup>2)</sup> 또한 최소한의 중량증가로 단면 찌그러짐(distorsion)에 대한 저항을 증가시켜 굽힘붕괴 특성을 효과적으로 향상시킬 목적으로 부재 내부(전체 혹은 일부분)를 구조 폼(structural foam)으로 채우는 설계기술에 대한 연구가 수행되고 있다. 그러나 구조 폼의 재료특성과 폼 적용 효과

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

에 대한 연구가 주로 수행되어 왔으며,<sup>3-6)</sup> 부재의 경량화를 고려하여 실제 적용 시 고려되어야 할 여러 설계기술에 대해서는 충분한 연구결과가 제시되어 있지 않다.

본 연구에서는 우선, 폼의 파단을 고려한 모자단면(hat section)을 갖는 3점 굽힘붕괴 해석모델을 구성하여 해석결과를 시험결과와 비교하여 그 타당성을 검토하였다. 다음으로 단면 구성방법에 따른 붕괴특성(초기 좌굴강도와 흡수에너지량)을 비교하였으며, 폼 충전 부재의 경량화 설계를 목적으로 플랜지부 높이, 폼 두께, 보강재 두께, 폼 적용길이를 변화시켜 가면서 구조물의 붕괴특성을 증량변화와 함께 고찰하였다. 해석은 비선형 상용프로그램인 LS/DYNA를 사용하였다.<sup>7)</sup>

## 2. 폼 모델의 신뢰성 검토

### 2.1 해석 모델

참고문헌<sup>8)</sup>에서 수행된 3점 굽힘 시험결과를 이용하여 폼 구조물의 모델링 기술에 대해 그 타당성을 검토하였다.

해석에 사용된 부재 단면형상, 시험 및 하중조건은 Fig. 1(a), (b)와 같다. 부재는 50mm의 간격으로 점용접(spot welding) 되었으며 부재의 전체 길이는 1068mm, 단순지지 간격은 864mm이며 직경 314mm의 강체 헤드(rigid crush head)를 사용하여 지지부 중앙에 변위하중을 가하였다. 두 개의 대칭이 존재하므로 국부 소성변형과 단면변형을 관찰하기 위하여 1/4 모델을 사용하였으며 완전 폼 충전 단면(solid foam filled section), 적층 폼 충전 단면(laminate foam filled section)의 두개 모델을 구성하였다(Fig. 1(c), (d)).

완전 폼 충전 모델의 경우 1100여개의 4절점 박판 요소(shell element)와 1300여개의 8절점 솔리드 요소(solid element)로 구성되었고 용접점은 양쪽의 변위를 서로 구속시켜 모델링 하였으며 강체헤드에 12mm/min의 속도로 변위하중을 가하면서 준정적 해석을 수행하였다.

### 2.2 폼 모델링 방법

본 해석에 사용된 폼은 에폭시(epoxy) 소재로 압

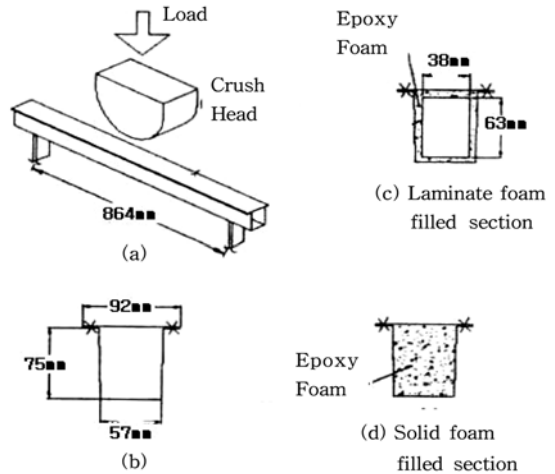


Fig. 1 Configuration of three point bending test and sections

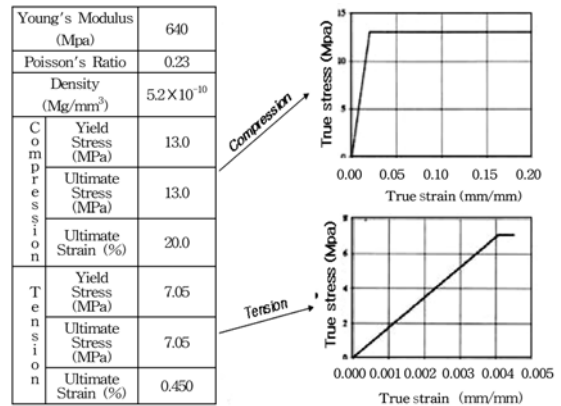


Fig. 2 Epoxy foam property

축시와 인장시가 상이하며 재료 특성치는 Fig. 2와 같다.<sup>8)</sup>

폼의 파단을 구현하기 위해 등가변형률이 일정한 값(0.5%)을 넘으면 모델에서 해당 폼 요소를 제거하여 폼의 파단상태를 표현하는 방법(deletion model)과 인장, 압축 재료특성치에 일정한 변형률(인장: 0.5%, 압축: 20%)을 초과하면 응력이 0이 되도록 재료특성치 곡선을 직접 정의하여 파단 이후의 영향을 제거하는 방법(drop-off model, Fig. 3)을 각각 적용하여 해석결과를 시험결과와 비교 검토하였다.

부재 외부의 튜브(tube)는 1.5mm 두께의 연강 DDQ ELC으로, 그리고 내부보강재(reinforcement)는 1.0mm 두께의 고장력강 HF50으로 각각 구성되었으며 재료특성은 Fig. 4와 같다.<sup>8)</sup>

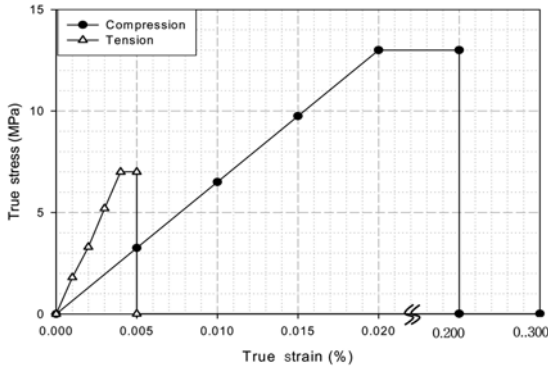


Fig. 3 Drop-off model of epoxy foam properties

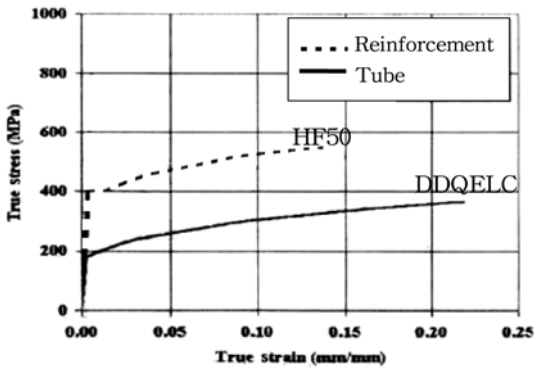


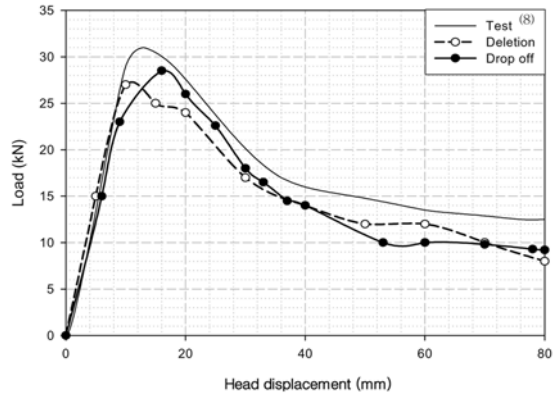
Fig. 4 True stress-strain curves of steels

### 2.3 해석결과 검토

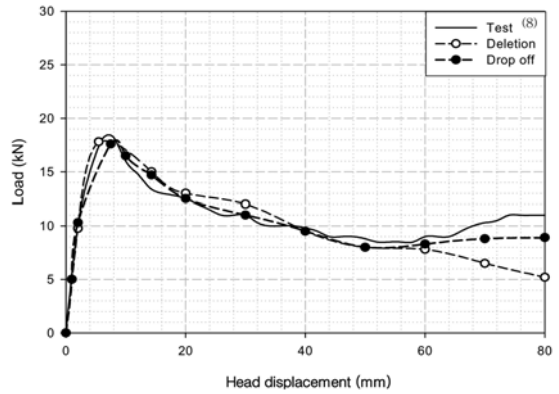
해석결과를 시험결과와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 등가변형률이 0.5% 초과 시 요소를 제거하는 모델링 방법과 인장과 압축 시 폼의 응력-변형 시험결과 특성을 별도로 정의하는 모델링 기법 모두 시험결과에 근접한 해석결과를 산출하고 있음을 알 수 있으며, 특히 특성곡선을 그대로 정의하는 기법은 적층 폼 충전 모델의 경우 붕괴 끝부분 거동까지 실험결과와 매우 유사하게 나타나 해석모델의 신뢰성을 보다 잘 나타내고 있다. 따라서, 이후의 해석에서는 시험을 통해 얻은 특성곡선을 인장과 압축에 대해 그대로 정의하는 방법(drop-off model)을 적용하였다.

### 3. 굽힘붕괴 특성에 대한 설계변수 영향 분석

앞 해석에서 검증된 폼 모델링 기술을 적용하여 단면형태를 변경하면서 해석을 수행하였다. 굽힘시



(a) Solid foam filled section



(b) Laminate foam filled section

Fig. 5 Results for validating foam modeling

험 조건, 부재 사이즈와 재료 특성치는 모두 앞의 해석과 동일하게 적용하였다. 한편, 자동차 차체 부재로 적용할 때의 현실성을 고려하여 플랜지 용접부가 강제 헤드 반대쪽에 위치하도록 하여 굽힘해석을 수행하였으며, 적층 폼 충전 모델의 경우 외관과 보강재 사이에 폼이 충전된 형상으로 단면을 보다 현실화 하였다(Fig. 6(d)).

먼저, 폼 적용 방법(완전 충전, 적층 충전), 보강재만 추가한 경우, 그리고 강재의 두께를 증가한 경우에 따라 대표 단면형상 모델을 구성하여 해석을 수행하였으며, 다음으로 적층 폼 충전 모델에 대해 플랜지부 높이 변화, 폼 두께 변화, 보강재 두께 변화, 폼 적용 길이 변화에 따른 굽힘붕괴특성 변화를 조사하였다.

#### 3.1 대표단면의 굽힘붕괴 특성

폼은 중량 증가를 최소화하면서 단면의 찌그러짐을 최대한 지연시켜 저항력을 유지 내지 증가시켜 에너지 흡수율을 증가시킬 목적으로 적용되며, 보강재는 일정 두께의 폼 적용을 가능하게 하고 순차적 굽힘붕괴 진행에 의해 굽힘 저항력을 유지하려는 목적으로 적용된다.

Fig. 6에서와 같이 기본모델, 완전 폼 충전 모델, 보강재 추가 모델(reinforcement added model), 적층 폼 충전 모델, 두께 증가 모델(thickness increased model) 등 총 5개의 대표단면 모델을 구성하여 폼과 보강재 추가에 따른 영향을 조사하였다.

기본모델의 내,외판 두께는 1.5mm이고 적층 폼 충전 모델의 폼 두께는 6mm로 하였다. 또한, 보강재의 두께는 1mm로 하였으며 두께증가 모델은 기본모델의 두께를 2.5mm로 증가시켰다.

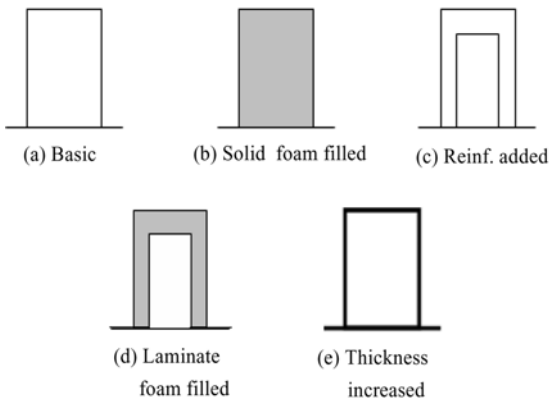


Fig. 6 Representative section types

Table 1은 대표단면을 적용했을 때 부재의 중량을 나타내고 있으며, 하중-변위 선도는 Fig. 7에, 강체 헤드 변위 80mm까지의 흡수 에너지 크기와 부재 중량은 Fig. 8에 함께 나타냈다.

결과에서 알 수 있듯이 보강재 추가모델의 경우

Table 1 Member weight

Section type	Weight(kg)
Basic	4.19
Solid foam filled	6.54
Reinf. added	6.13
Laminate foam filled	6.78
Thickness increased	6.98

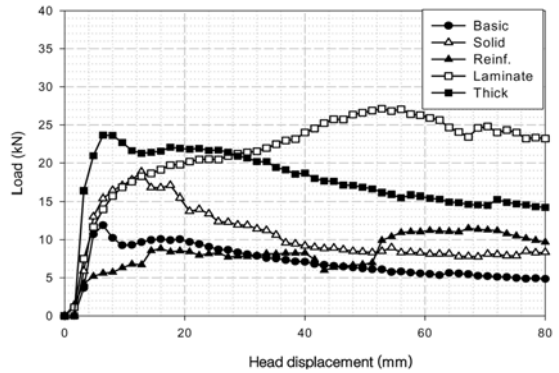


Fig. 7 Load carrying curves of representative section members

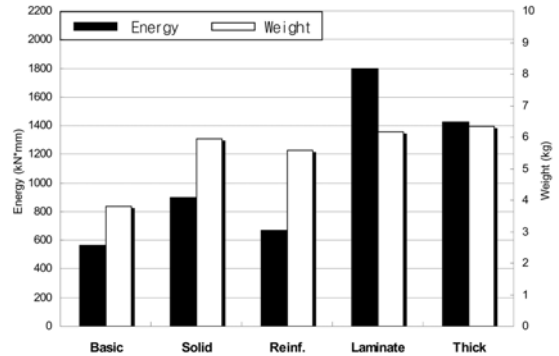


Fig. 8 Absorbed energy and weight of representative section members

상대적인 하단부 지지조건이 강하여 상부 단면의 국부좌굴이 쉽게 발생되나 국부좌굴 발생 후 외판의 보강재 접촉에 의해 붕괴저항이 증가하게 되어 기본모델 결과에 비해 초기 강도가 저하하고 붕괴 후반부에 저항이 증가하는 형태를 나타냈으며, 완전 폼 충전 모델과 두께 증가 모델의 경우는 기본모델에 비해 초기 좌굴강도와 좌굴 후의 저항 모두 크게 증가하였다.

특히, 적층 폼 충전 모델은 계속 붕괴저항이 증가하는 바람직한 붕괴거동을 나타내고 있으며, 기본모델에 비해 완전 폼 충전 모델과 비슷한 초기 좌굴강도와 3배(308.5%) 수준의 에너지 흡수량을 나타내고 있어 가장 뚜렷한 굽힘붕괴 성능 향상을 기대할 수 있으며, 완전 폼 충전 모델과 보강재 추가 모델 그리고 두께 증가 모델에 비해 비슷한 중량 증가에도 불구하고 월등한 붕괴특성을 나타냄을 알 수

있다. 다만, 기본모델에 비해서 중량증가가 크므로 (62%: 4.19kg → 6.78kg) 중량증가를 최소화하면서 붕괴특성을 향상시킬 수 있는 폼 재료의 선정과 설계방법에 대한 보완 연구가 필요하다.

### 3.2 플랜지 높이 변화의 영향

적층 폼 충전 모델의 플랜지 높이를 0 H로 하고 (H: 부재높이 75mm) 플랜지 높이를 1/4 H, 1/3 H로 변경한 적층 폼 충전 모델에 대해 하중-변위 선도를 구해 Fig. 10에 나타내었으며 흡수 에너지량과 부재 중량을 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 10으로부터 플랜지가 0 H에 위치한 모델의 경우 초기 강도가 상당히 떨어지고 이후 저항력이 약간 증가하는 형태를 나타내는 반면, 플랜지 높이 1/4 H, 1/3 H 모델은 초기 좌굴강도가 크고 좌굴 후 거의 일정한 저항력을 나타내고 있다. 흡수에너지 크기는 거의 비슷하나 1/4 H가 가장 바람직한 하중-변위 특성을 나타내고 있으며 중량도 6.33kg으로서 6.78kg의 플랜지 0 H 모델에 비해 약 8% 경량화 된다.

따라서 부재 설계 시 플랜지를 1/4 H 부근에 위치하도록 하는 것이 적층 폼 충전 부재의 효과적 설계 방안 중의 하나임을 알 수 있다.

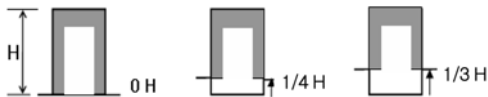


Fig. 9 Laminate foam filled models with varied flange height

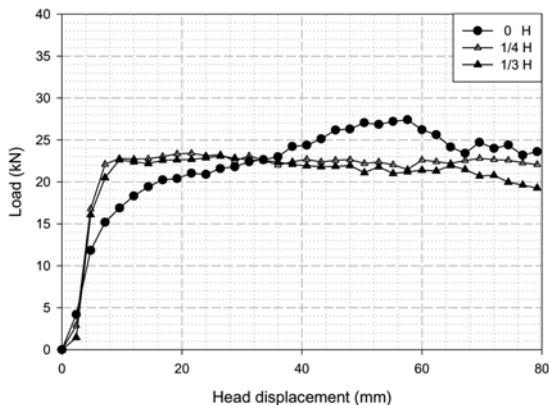


Fig. 10 Load carrying curves of laminate foam filled models with varied flange height

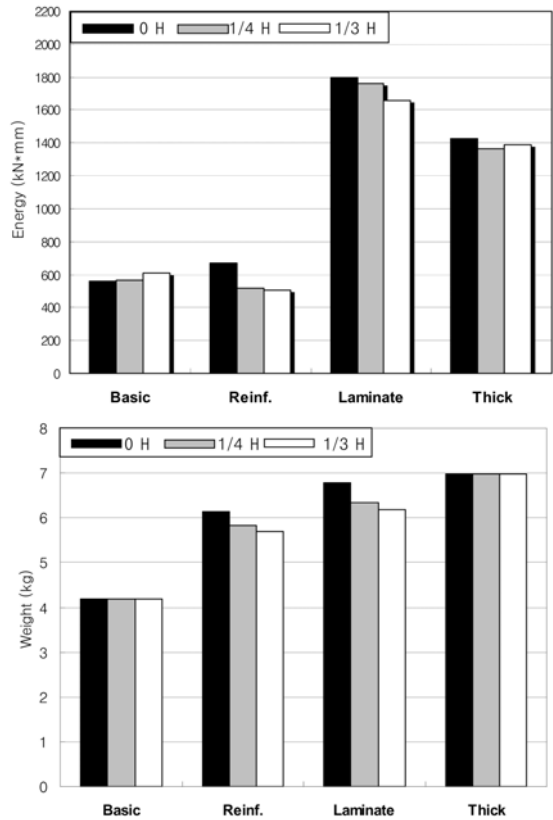


Fig. 11 Absorbed energy and weight of laminate foam filled models with varied flange height

### 3.3 폼 두께 변화의 영향

적층 폼 충전 모델에서 폼의 두께 변화에 따라 붕괴특성이 변화하는 정도를 파악하고자, 앞의 연구에서 가장 효과적이라고 판단된 플랜지 1/4 H 모델에 대해 두께를 기존의 6mm에서 3, 9, 10, 12mm로 변화시켜가면서 해석을 수행하였다(Fig. 12).

해석결과는 Fig. 13, Fig. 14와 같다. 폼 두께 3mm에서는 초기 좌굴강도 및 좌굴 후 급속 저항력이 급격히 감소하는 현상을 나타내지만 두께 6mm 이상에서는 전체적으로 큰 변화를 보이지 않음을 알 수 있으며, 9mm에서 초기 좌굴강도와 에너지 흡수능력이 가장 우수하고 9mm이상의 두께증가는 중량만 늘어나고 오히려 흡수에너지량이 감소됨을 알 수 있다.

따라서, 현재 단면을 기준으로 판단할 때 폼 두께를 9mm 정도로 하는 것이 바람직하다고 판단되며, 단면형상에 따라 최적의 폼 두께가 변화할 것으로

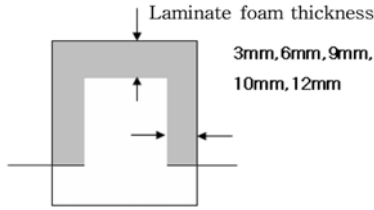


Fig. 12 Foam thickness variation

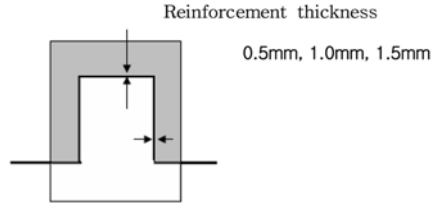


Fig. 15 Reinforcement thickness variation

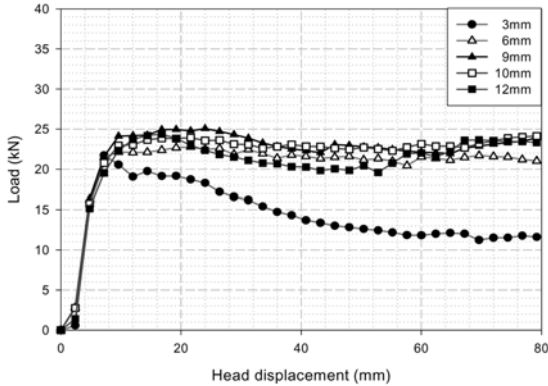


Fig. 13 Load carrying curves of laminate foam filled models with varied foam thickness

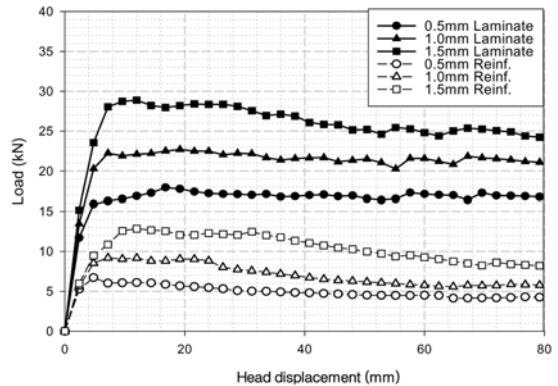


Fig. 16 Load carrying curves of laminate foam filled models with varied reinforcement thickness

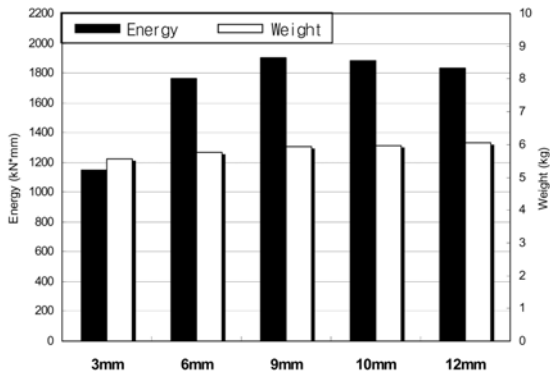


Fig. 14 Absorbed energy and weight of laminate foam filled models with varied foam thickness

예상되므로 중량증가를 최소화하기 위해서 부재 설계 시 폼 두께의 최적화도 검토되어야 한다.

### 3.4 보강재 두께 변화의 영향

폼 충전 공간을 구성하고 구조보강 역할을 위해 보강재가 추가된다. 따라서 폼을 지지하면서 구조보강 역할을 발휘하는 보강재의 두께가 경량화 설계와 관련되어 중요하다.

적층 폼 충전 모델에 대해 보강재의 두께를 변화시키면서 굽힘붕괴 특성의 변화를 관찰하였다. 플랜지 높이 1/4 H, 폼 두께 6mm 모델을 기준으로 하여 보강재 두께를 기존 1mm에서 0.5mm, 1.5mm 두 가지로 변화시켜 해석을 수행하였으며(Fig. 15), 폼 충전 효과를 상대적으로 평가하기 위해서 폼 충전 없이 보강재만 추가된 모델에 대한 해석도 수행하여 해석결과를 Fig. 16, 17에 나타내었다.

보강재의 두께가 증가 할수록 초기 좌굴강도와 전체적인 에너지 흡수량이 거의 비례적으로 증가하므로 보강재 두께는 단순히 폼을 지지할 뿐만 아니라 적층 폼 충전 부재의 굽힘붕괴 특성에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

특히 단순히 외판과 보강재 사이에 경량의 폼을 충전함에 의해 부재의 초기 좌굴강도와 흡수 에너지량이 대폭 증가하고 보강재 두께에 따른 흡수 에너지 증가율도 크게 향상됨을 알 수 있다.

### 3.5 폼 길이 변화의 영향

폼 충전 적용 길이의 영향을 조사하기 위해, 플랜

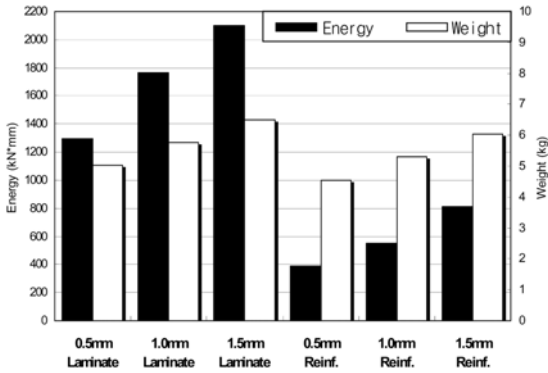
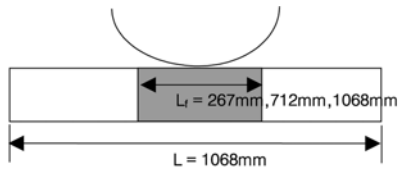


Fig. 17 Absorbed energy and weight of laminate foam filled models with varied reinforcement thickness



Flange: 1/4 H, Foam thickness: 6.0mm, Reinforcement thickness: 1.0mm

Fig. 18 Foam length variation

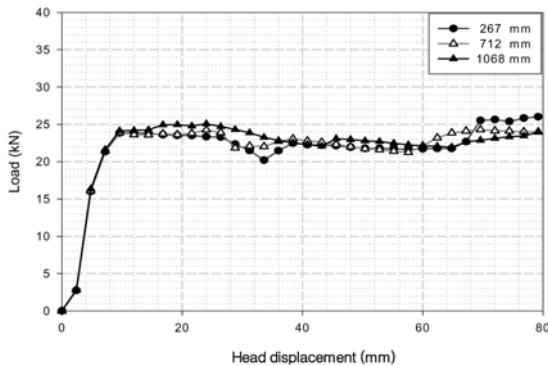


Fig. 19 Load carrying curves of laminate foam filled models with varied foam length

지 1/4 H, 폼 두께 6mm, 보강재 두께 1.0mm의 적층 폼 충전 모델에 대해 부재 중앙부를 중심으로 폼 길이(Lf)를 267mm(1/4 L, L: 부재 전체길이), 712mm (2/3 L)로 각각 변화시켜 해석을 수행하였다(Fig. 18).

Fig. 19, 20로부터 세 모델이 거의 유사한 값을 나타나므로 폼 충전부 길이 변화는 부재의 붕괴특성에 영향을 없는 것으로 판단된다. 따라서 부재의 굽

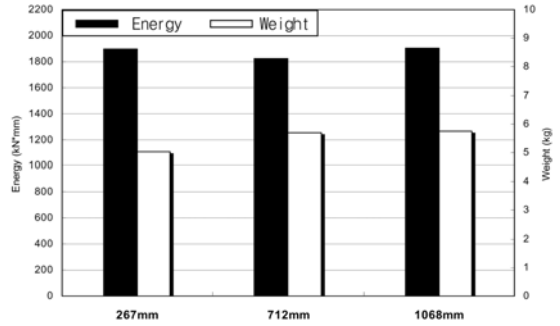


Fig. 20 Absorbed energy and weight of laminate foam filled models with varied foam length

힘좌굴 발생지점에 국부적으로 폼을 보강하는 것이 (본 연구모델의 경우 전체길이의 1/4까지도 가능) 경량화에 효과적이므로 적층 폼 충전 부재를 설계할 때는 예비 해석을 통해 굽힘붕괴가 발생하는 위치를 파악하여 해당부위에 적당한 길이의 폼을 적용하는 것이 바람직하다.

#### 4. 결론

자동차 중요 골격 부재 형상을 모사한 폼 충전 모자단면 부재에 대해 3점 굽힘시험에 대한 해석모델을 구성하여 단면형상 및 폼 충전 설계 변수 변화에 따른 굽힘붕괴 특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폼 구조물의 파단을 고려한 폼 파단 모델링 기법의 신뢰성을 확인하였다.
- 2) 폼 적용 방법, 보강재만 추가, 두께증가에 따라 대표 단면 형상을 구성하여 굽힘붕괴 특성을 조사한 결과, 적층 폼 충전 구조가 중량증가 대비 매우 우수한 붕괴특성을 나타내었다.
- 3) 적층 폼 충전 부재의 플랜지 위치를 바닥보다 약간 높여 흡수에너지 크기의 변화 없이 초기 좌굴 강도를 높일 수 있다.
- 4) 단면형상에 따라 최적의 적층 폼 두께가 존재하므로 적층 폼 충전 부재 설계시 폼 두께변화에 대한 영향도 검토되어야 한다.
- 5) 보강재의 두께가 증가 할수록 초기 좌굴강도와 흡수에너지량이 거의 비례적으로 증가하며, 단순히 폼 충진을 더하면 부재의 흡수에너지량이 대폭 증가하고 보강재 두께증가에 따른 흡수에

너지 증가율도 크게 향상 된다.

- 6) 폼 충진을 부재에 적용할 때는 예비 해석을 통해 굽힘붕괴 발생 위치를 파악하여 그 위치에 적당한 폼 길이를 적용하는 것이 부재 경량화를 위해 효과적이다.

### 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) LS-DYNA User's Manual, Nonlinear Dynamic Analysis or Structures, Version 950, 1999.
- 8) H. Lanzerath and R. Schilling, Crash Simulation of Structural Foam, SP-1765, SAE, pp. 47-55, 2003.