

구조용 폼과 플라스틱 보강재를 적용한 모자 단면 부재의 좌굴 특성 분석

이 태 현* · 신 성 기

헨켈코리아(유) 오토모티브

Analysis of Buckling Characteristics for Hat Section Member Using Structural Foam and Plastic Reinforcement

Taehyun Lee* · Shounggi Shin

PD&TCS Lab., Henkel Korea Ltd. Automotive, 301-1 Sadong-ri, Daewol-myeon, Icheon-si, Gyeonggi 47-854, Korea

(Received 28 June 2007 / Accepted 22 October 2007)

Abstract : The modern automotive industry develops innovative vehicle designs to meet increasing stability of car and performance demands of their customers. The improvement of frame rigidity by the structural foam is thought to be an effective means to improve the performance because of high applicability and minimum weight. The object of this paper is to examine the use of structural foam in a hat section as an optimum reinforcing means, to compare the reinforcing performance of structural foam versus a plastic reinforcement. The result of this paper indicated that reinforcing efficiencies are achieved by structural foam and plastic reinforcement shape.

Key words : Structural foam(구조 폼), Three point bending test(3점 굽힘 시험), Buckling strength(좌굴 강도), Hat section(모자 단면), Plastic reinforcement (플라스틱 보강재)

1. 서론

최근 자동차는 안전관련 법규 강화, 운전자 안전성을 확보를 위해 고장력 강판과 파이프를 이용한 설계 기술이 많이 사용되고 있다. 하지만 앞에서 설명한 설계 기술은 차체의 강성을 향상키는 장점을 가지고 있지만 자동차의 중량을 증가시켜 자동차의 성능과 연비를 저하시키는 단점을 가지고 있다. 이에 차체의 강성을 향상시키면서 자동차 중량을 감소시키는 구조용 폼(structural foam)을 이용한 설계 방법이 많이 연구되고 있다.

구조용 폼의 원리는 자동차 차체인 사이드 레일(side rail), 필라(pillar), 루프레일(roof rail)등과 같이

중공으로 비어있는 공간을 구조용 폼으로 채워 주름(wrinkling)이나 좌굴(buckling)에 대해 안정화시킴으로써 바깥층에 지지 역할을 한다. 한 예로 Photo .1 과 같이 구조용 폼은 필라에 적용 되어 단단하게 정착시켜 한 개의 강체와 같이 거동한다.¹⁾

현재까지 구조용 폼의 재료특성과 폼 적용 효과, 구조용 폼의 두께, 보강재 두께, 플랜지 높이 등 부재의 경량화를 고려한 연구가 수행되었다.²⁻⁶⁾

본 논문에서는 3점 굽힘 해석 모델을 구성하여 구조용 폼의 형상과 플라스틱 보강재(Plastic reinforcement)형상에 따른 중량변화, 좌굴특성을 고찰하였다. 해석모델은 전문 PRE/ POST 프로그램인 HYPER-MESH를 이용하여 생성하였고, 해석은 비선형 상용 프로그램인 PAMCRASH를 이용하였다.

*Corresponding author, E-mail: taehyun.lee@kr.henkel.com

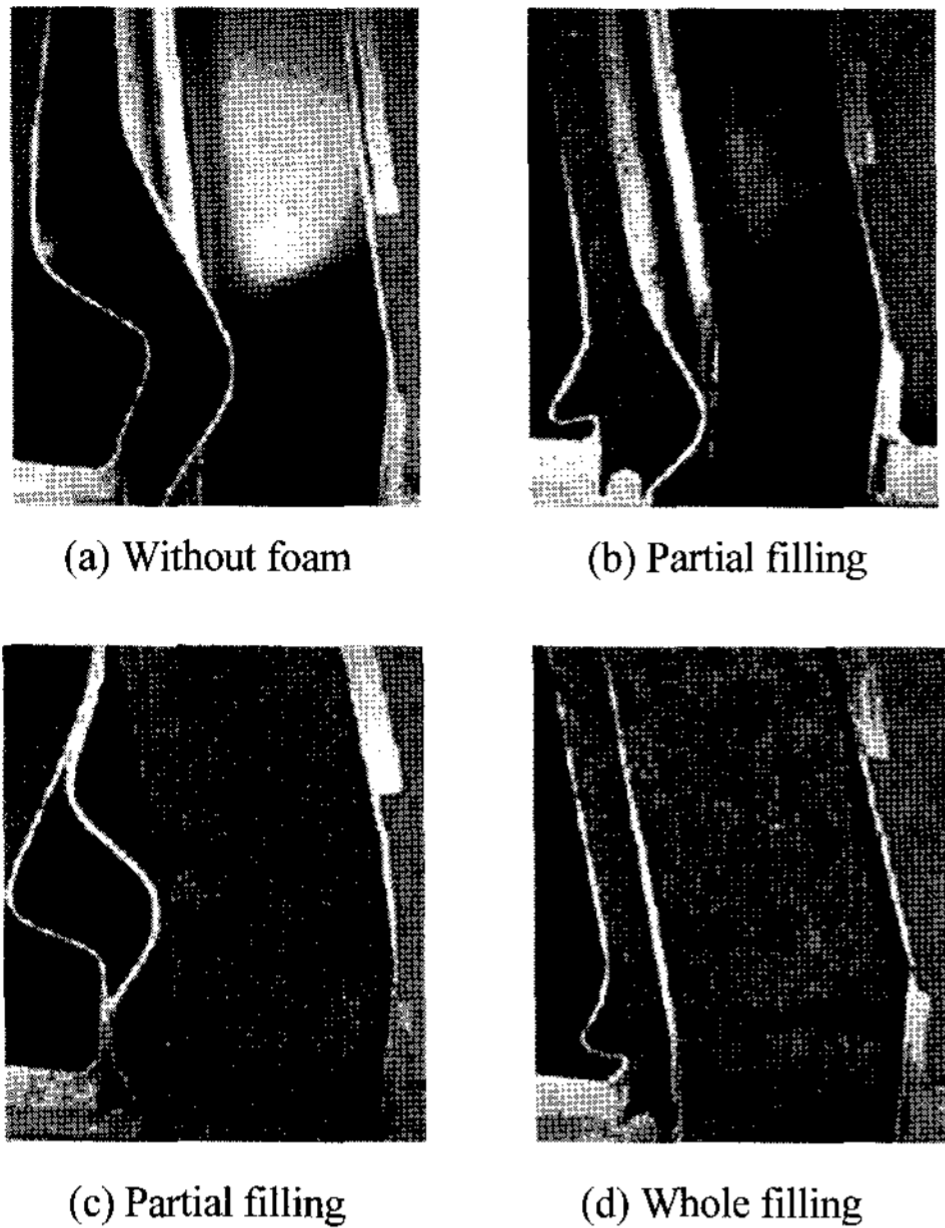


Photo. 1 Cross-section of B-pillar using structural foam

2. 3점 굽힘 해석 모델 및 구조용 폼 모델링 방법

2.1 해석 모델

기본이 되는 3점 굽힘 해석 모델은 Fig. 1과 같다. 부재의 전체 길이는 710mm이고, 부재는 50mm 간격으로 용접(spot welding) 되어 있으며 직경 40mm의 강체모델을 이용하여 준정적 해석 방법을 이용하여 부재의 중앙에 변위하중을 적용하였다. 재료의 물성은 부재 상판 외부(PL1), 하판 외부(PL4)는 일반적으로 사용되는 강판과 상판과 하판의 보강판넬(PL2, PL3)은 고장력 강판을 적용하였다.

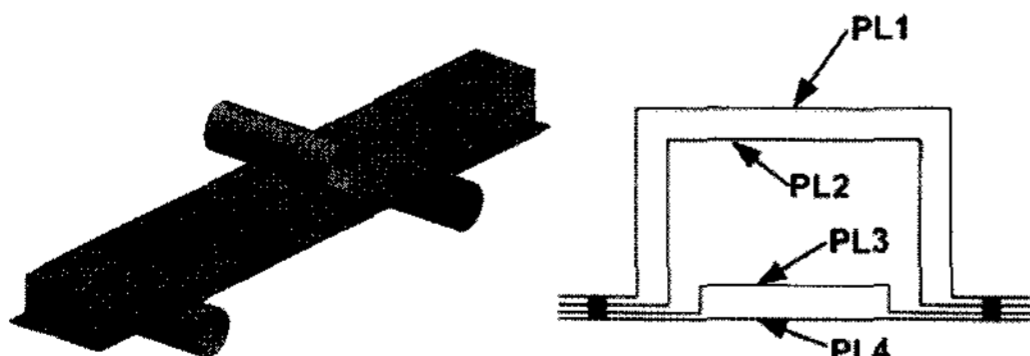


Fig. 1 FEM model for Three-point bending simulation

2.2 구조용 폼 모델링 방법

본 논문에서 사용된 구조용 폼은 헨켈코리아(주)

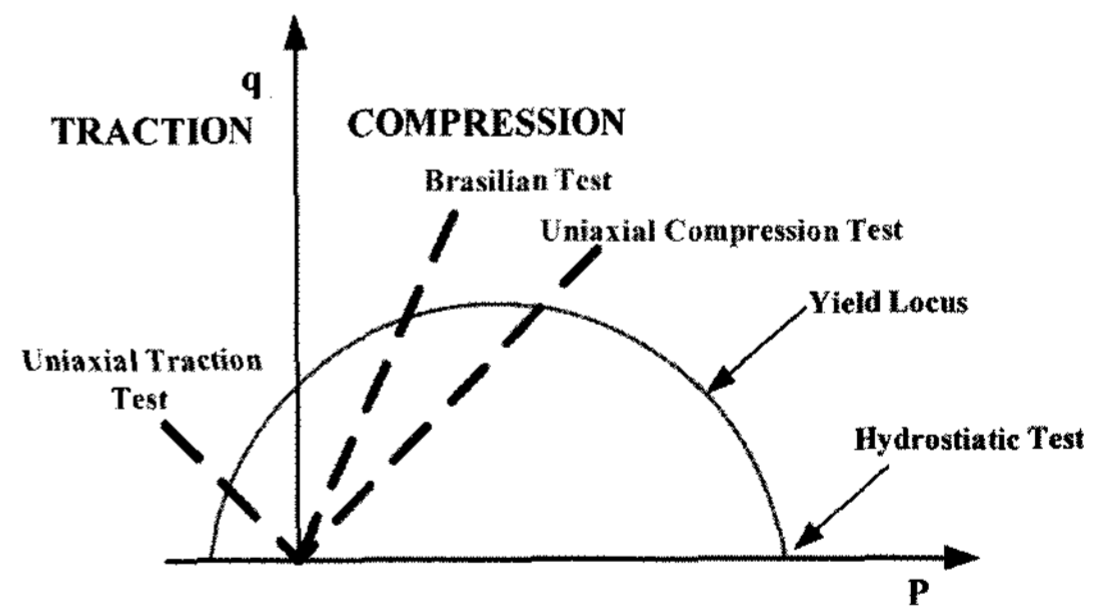
오토모티브에서 판매하는 TEROCORETM 제품으로 에폭시(epoxy) 소재로 저비중, 고강성의 구조 보강재이며 전착 오븐에 의해 발포 경화 된다.⁷⁾ 구조용 폼의 재료 물성은 압축과 인장 시 다른 응력-변형률 선도를 가지고 있다.^{5,6)}

$$a_2 \times p^2 + a_1 \times p + a_0 = q \quad (1)$$

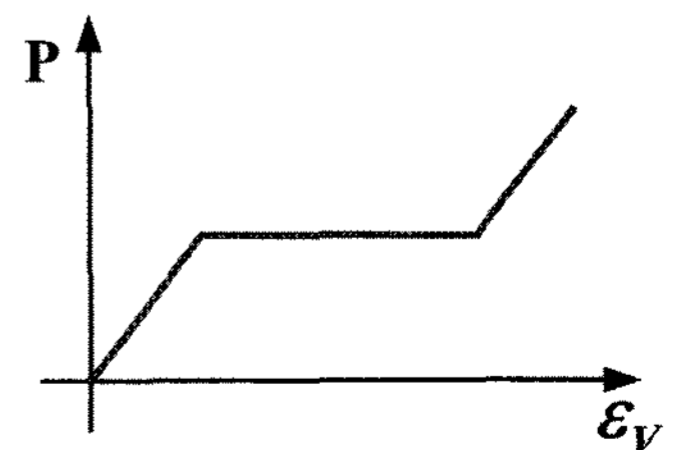
비선형 상용프로그램인 PAMCRASH 해석 시 물성 종류는 2번으로 CRUSHABLE FOAM SOLID 물성을 이용하여 구조용 폼 모델을 구성하였다.

CRUSHABLE FOAM SOLID는 Fig. 2와 같이 항복 곡면 선도(yield surface curve)와 부피 소성 선도(volumetric plasticity curve) 정보가 필요하다. 항복 곡면 선도는 식 (1)과 같이 간단하게 이론적으로 2차 함수로 표현할 수 있고 단축인장시험(Uniaxial Traction Test), 브라질식 인장시험(Brazilian Test), 단축압축 시험(Uniaxial Compression Test)을 통하여 식 (1)에서 a_2, a_1, a_0 변수의 값을 구하여 항복 곡면 선도를 표현할 수 있다.⁸⁾

구조용 폼은 상부와 하부의 외판과 보강판 사이에 8절점 솔리드 요소(solid element)를 이용하여 구성하였다.



(a) The crushable foam yield locus



(b) Pressure vs volumetric strain curve

Fig. 2 Material curve of crushable foam

3. 구조용 폼을 적용하지 않는 부재와 구조용 폼을 적용한 부재의 좌굴 특성 분석

3.1 구조용 폼을 적용하지 않는 부재 좌굴 특성 분석

Fig. 3은 앞에서 설명한 구조용 폼을 적용하지 않는 부재의 중앙에 강체헤드(rigid crush head)를 사용하여 지지부 중앙에 변위하중을 적용했을 때 좌굴 특성을 분석하기 위해 시간 변화 따른 중앙부의 단면을 도시하였다.

중앙 부위에 하중이 적용되면 Fig. 3(a)와 같이 상부 외판(PL1)에 좌굴이 발생되고 동시에 용접되어 있는 부위에서 변형이 발생된다. 그리고 Fig. 3(b)와 같이 상부 좌굴로 인하여 상부 보강 판넬과 접촉이 발생되어 보강 판넬에서 좌굴이 발생 된다. 마지막으로 Fig. 3(c), (d)에 도시한 그림과 같이 하부 보강 판넬 좌굴되고 하부 외판이 최종적으로 좌굴된다. 용접으로 4개의 판넬이 고정되어 있지만 좌굴이 순차적으로 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 자동차의 주요 구조물인 사이드 레일, 필라, 루프레일등도 외부에 하중이 적용되면 이와 같이 순차적 좌굴이 예상된다.

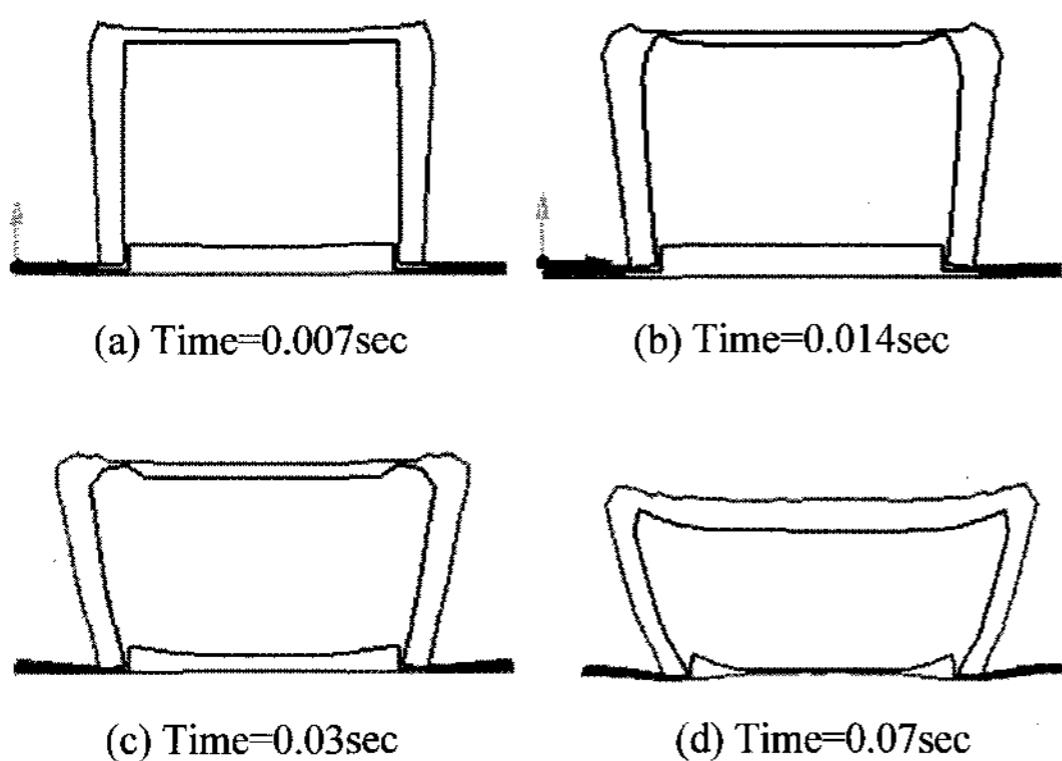


Fig. 3 Cross-section for hat section member without structural foam

이는 차체의 중량을 증가시키는 단점을 가지고 있는 고장력 강판과 파이프를 이용한 설계 기술은 한계가 있음을 나타내고 무엇보다도 차체 강성을 증가시키기 위해 한 개의 강체로 거동할 수 있는 설계 기술이 필요하다는 것을 나타내고 있다.

3.2 구조용 폼을 적용한 부재의 좌굴 특성 분석

구조용 폼을 적용한 부재를 적용한 3점 굽힘 해석을 수행하여 Fig. 4와 같이 시간에 따른 분석하기 위해 부재의 단면을 도시화하였다. Fig. 4(a)에서 상부 외판과 상부 보강 판넬이 구조용 폼의 단단한 접착력에 의하여 하나의 강체 거동특성이 나타나고 이후에 Fig. 4(b)와 같이 하부 외판과 하부 보강판넬이 하나의 강체 거동 특성이 나타낸다.

구조용 폼을 적용한 부재의 좌굴 특성은 앞 절에서 4개의 판넬이 시간에 따라 좌굴되는 특성과 상이한 결과이고 좌굴 강도에 상당한 차이가 예상된다.

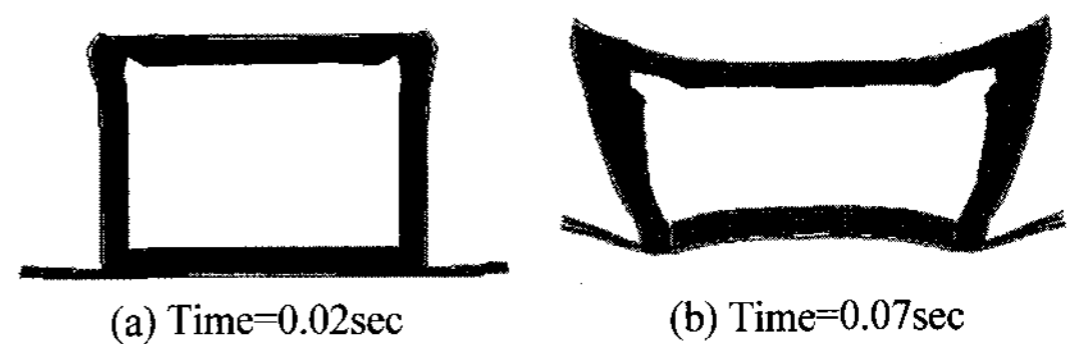


Fig. 4 Cross-section for hat section member with structural foam

4. 구조용 폼의 형상의 따른 좌굴 특성 분석

구조용 폼의 원리는 증공으로 비어있는 공간을 구조용 폼으로 채워 주름이나 좌굴에 대해 안정화 시킴으로써 바깥층에 지지 역할을 한다. 즉, 구조용 폼은 증공으로 비어있는 공간을 단단하게 접착시켜 한 개의 강체와 같이 거동시킨다. 그러므로 Fig. 5와 같이 구조용 폼의 형상에 따라 좌굴 특성을 관찰하고자 한다.

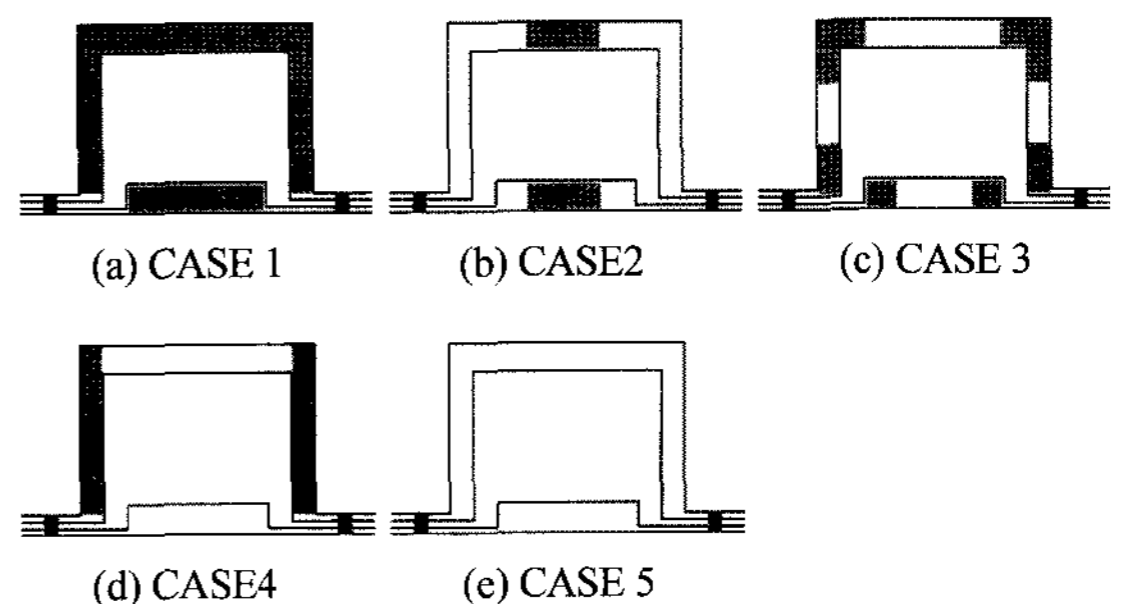


Fig. 5 Cross-section member type using structural foam

4.1 좌굴 강도 특성 분석

Fig. 6과 같이 3점 굽힘 해석 수행결과를 시간에

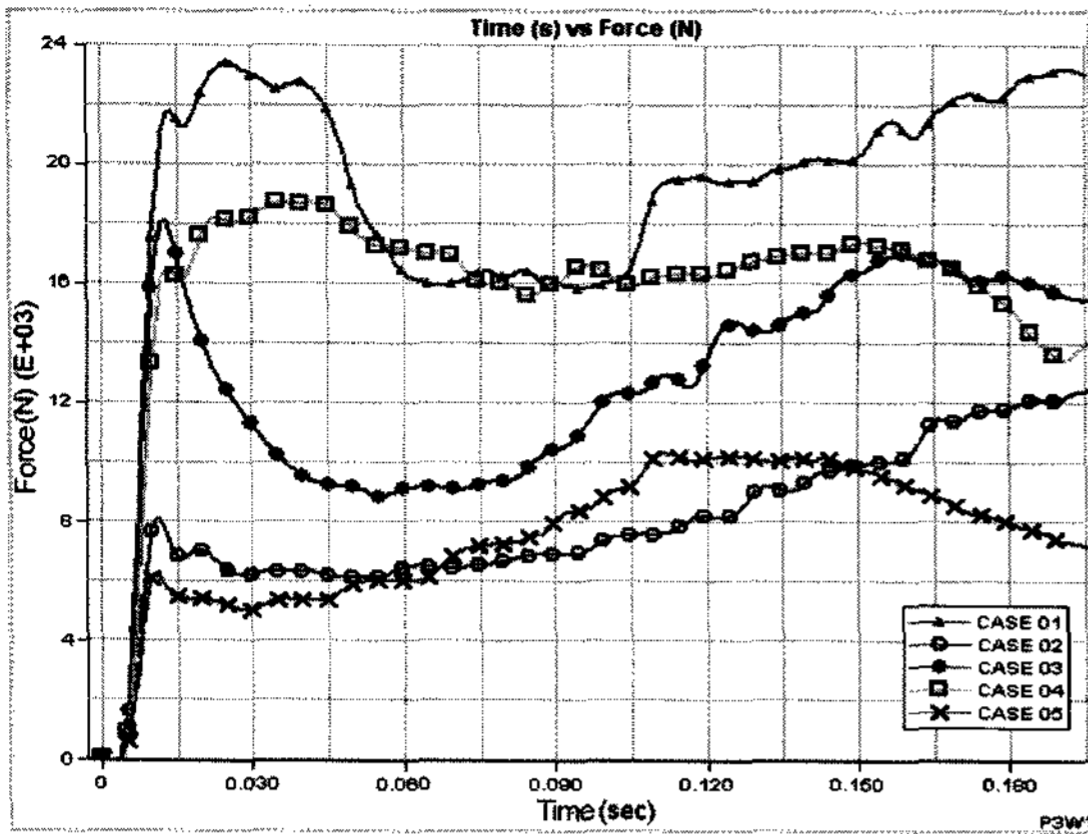


Fig. 6 Buckling strength vs Time curve

Table 1 Structural foam weight rate, buckling strength and buckling strength rate

	중량비(%)	좌굴강도(N)	좌굴강도비
CASE 1	0.017	22053.80	2.9
CASE 2	0.004	9392.42	1.2
CASE 3	0.006	18029.10	2.4
CASE 4	0.007	1647.60	2.2
CASE 5	0	7428.82	1

따른 좌굴 강도로 표현하였다. 시간에 따라 첫 번째 좌굴 발생 후가 급격히 감소하다가 좌굴 강도가 증가하는 경향을 보이고 있다.

Table 1에서 각각 CASE별로 전체부재에 대한 구조용 폼의 중량비, 좌굴강도 비를 나타내었다. 좌굴 강도 비는 구조용 폼을 적용하지 않은 CASE 5의 초기 좌굴 강도를 기준으로 각각 CASE별 초기 좌굴 강도를 나눈 값이다.

구조용 폼의 형상에 따라 구조용 폼을 적용하지 않은 부재보다 좌굴강도가 CASE 1에서 최대 약 2.9 배 높게 증가 되었다. 또한 CASE 3과 CASE 4의 구조용 폼 무게를 비교하면 CASE 3이 CASE 4 보다 약 38g 적게 적용됨에도 불구하고 좌굴 강도는 CASE 3 이 약 1.5KN 높게 나왔다.

CASE 1의 경우 중공 단면을 완전히 충전함으로써 외부 판넬과 보강 판넬을 단단하게 접착시켜 한 개의 강체로 거동하기 때문에 당연히 좌굴강도가 가장 높게 관찰되었다.

하지만 CASE 3의 경우에는 CASE 4에 비해 구조용 폼이 적게 적용했음에도 불구하고 더 높은 좌

굴강도를 나타내고 있다는 점, 구조용 폼의 적용 부위, 적용량에 따라 좌굴 강도가 다르다는 점을 볼 때 경제성을 고려하여 요구되는 좌굴 강도에 따라 적용 위치, 적용량을 선택 할 수 있는 최적화 기술이 필요함을 보여주고 있다.

5. 플라스틱 보강재의 형상에 따른 좌굴 특성 분석

구조용 폼은 중공으로 비어 있는 공간을 단단하게 접착시켜 한 개의 강체와 같이 거동시키는 역할을 한다. 하지만 경제성, 편이성, 경량화를 고려하여 구조용 폼으로 빈 공간을 모두 채우는 방법은 적합하지 않다. 그러므로 구조용 폼과 플라스틱을 접목한 복합구조가 현실에 더 적합하고 플라스틱 보강재가 좌굴강도에 어떤 영향을 미치는지 살펴볼 필요가 있다.

Fig. 7과 같이 구조적 보강을 위해 많이 사용하는 6가지 단면형상을 통해 좌굴 특성을 조사하였다. 플라스틱 보강재와 각 판넬 사이에는 구조용 폼을 이용하여 단단하게 접착시켜 하나의 강체와 같이 거동하도록 하였다.

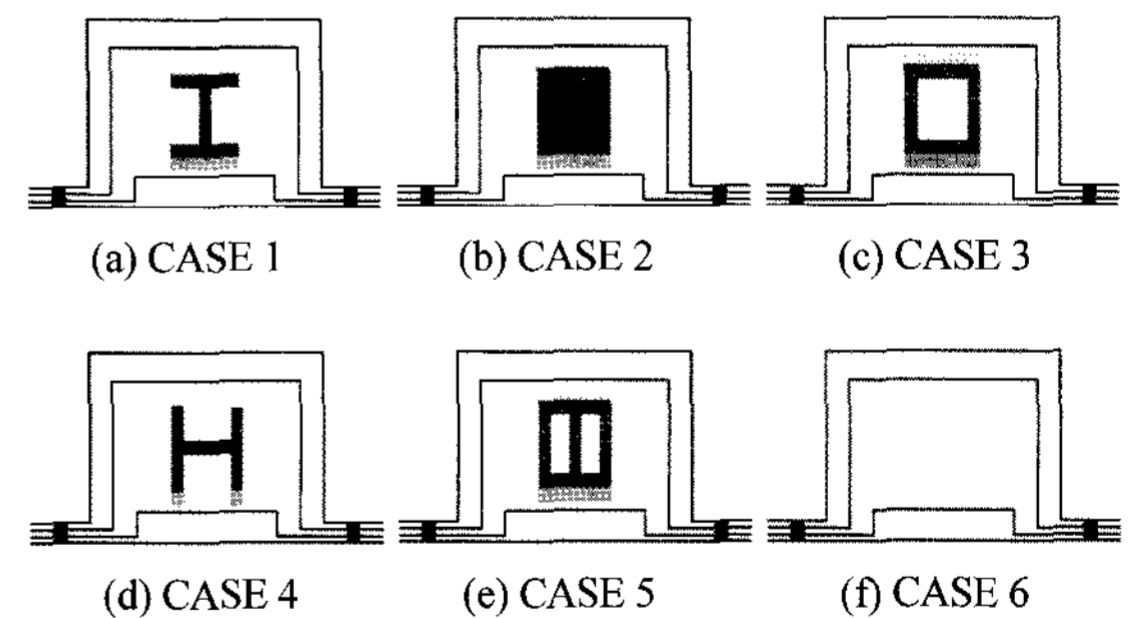


Fig. 7 Cross-section member types using plastic reinforcement

5.1 좌굴 강도 특성 분석

Fig. 8은 플라스틱 보강재를 적용한 부재에 대해 시간에 따른 좌굴 강도를 도시한 그림이다. 플라스틱 보강재 형상에 따라 초기에 발생하는 좌굴 강도는 일정하지만 초기 좌굴 이후 발생하는 좌굴 저항은 다르게 나타난다.

플라스틱 보강재를 적용하였지만 초기 발생하는 좌굴 강도에는 거의 영향이 없는 이유는 플라스틱

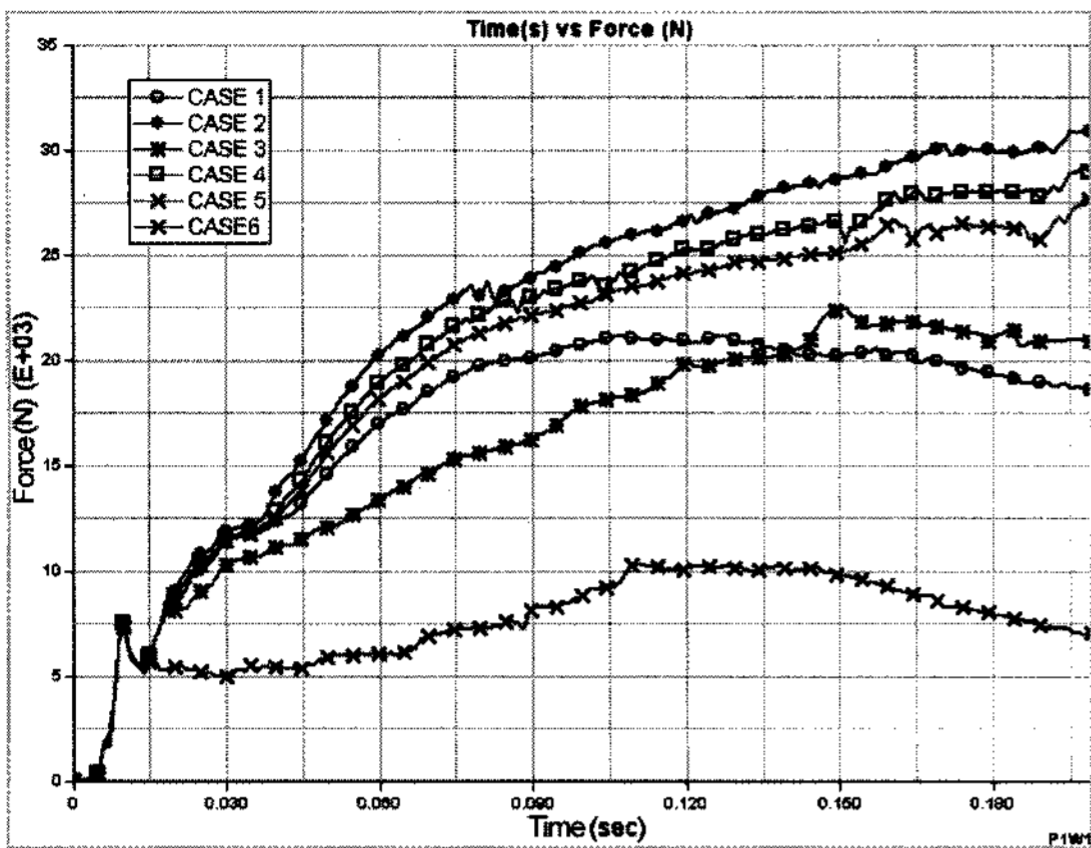


Fig. 8 Buckling strength vs Time curve

보강재가 초기 좌굴을 결정하는 상부 판넬(PL1)을 지지하지 못하기 때문이다.

플라스틱 보강재가 초기 좌굴 강도에 큰 영향이 없지만 초기 좌굴 이후 좌굴 저항이 계속 증가하므로 구조용 폼만 적용할 경우와 달리 초기 좌굴 이후에 급격히 감소하는 좌굴 저항을 상쇄시키는 보완 방법임을 보여준다.

6. 구조용 폼과 플라스틱 보강재를 접목한 모자단면의 좌굴 특성 분석

4절과 5절에서 모자단면에 구조용 폼과 플라스틱 보강재를 각각 적용함으로써 발생하는 좌굴 특성을 검토하였다. 또한, 구조용 폼 적용 시 발생하는 좌굴 후 급격히 감소하는 좌굴 강도의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 플라스틱 보강재를 제시하였다. 이에 Fig. 9와 같이 구조용 폼과 플라스틱 보강재를 접목한 구조로 적용한 모자단면 모델을 구성하여

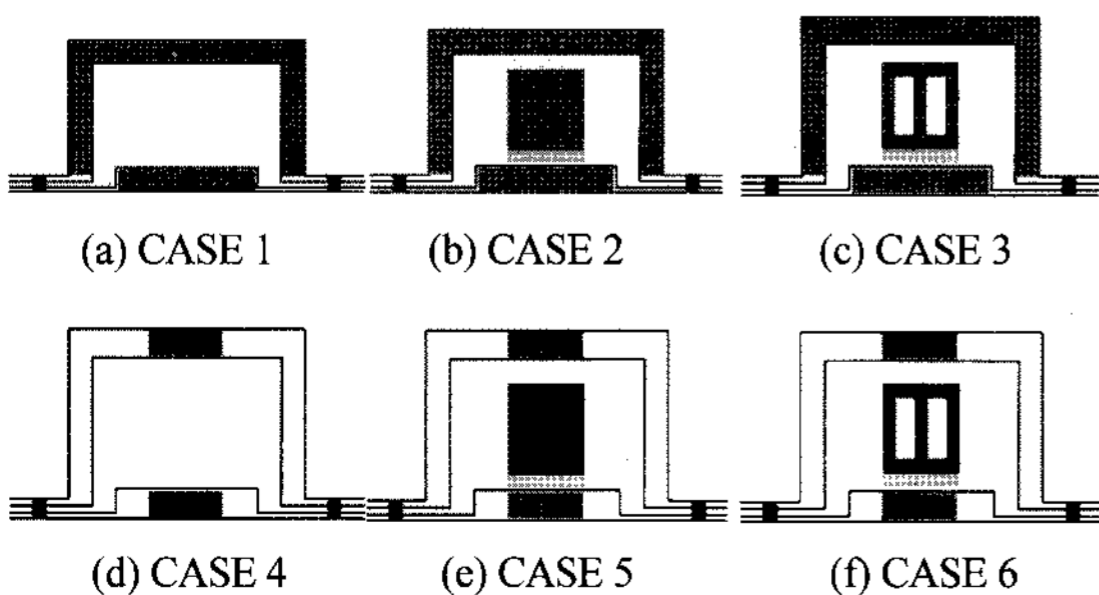


Fig. 9 Cross-section member types using structural foam and plastic reinforcement

해석을 수행하고 좌굴특성을 파악하였다.

6.1 좌굴 강도 특성 분석

Fig. 10은 구조용 폼과 플라스틱 보강재를 접목한 부재에 대해 시간에 따른 좌굴 강도를 도시한 그림이다. 또한, 비교의 편리를 위해 CASE 1, CASE 4와 같이 앞 절에서 도시한 구조용 폼과 플라스틱을 각각 적용한 부재의 좌굴강도를 같이 도시하였다.

4절에 제시한 바와 같이 구조용 폼 적용 시 발생된 좌굴 후 발생하는 급격한 감소하는 좌굴 강도를 상쇄시키는 효과를 CASE 2, CASE 3, CASE 5, CASE 6과 같이 증명하였다. 더불어 CASE 1, CASE 2에 비해 부재의 좌굴 강도가 증가하였다. 이와 같은 이유는 1차적으로 상판 외부(PL1)와 상판 보강판넬(PL2), 하판 외부(PL4)와 하판 보강판넬(PL3) 사이에 구조용 폼을 적용하여 하나의 강체 거동특성으로 좌굴강도가 증가하였고, 2차적으로 구조용 폼과 플라스틱 보강재 접목한 구조를 상부 판넬과 하부 판넬 사이에 적용함으로써 하나의 강체 거동특성을 나타내어 좌굴 강도가 증가하였다.

보다 구체적인 비교를 위해 Table 2와 같이 정리하였다. Table 2에서 각각 CASE별로 전체부재에 대한 구조용 폼의 중량 비, 좌굴강도, 좌굴강도 비를 나타내었다. 좌굴 강도 비는 구조용 폼만 적용한 부재의 초기 좌굴 강도를 기준으로 각각 CASE별 초기 좌굴 강도를 나눈 값이다.

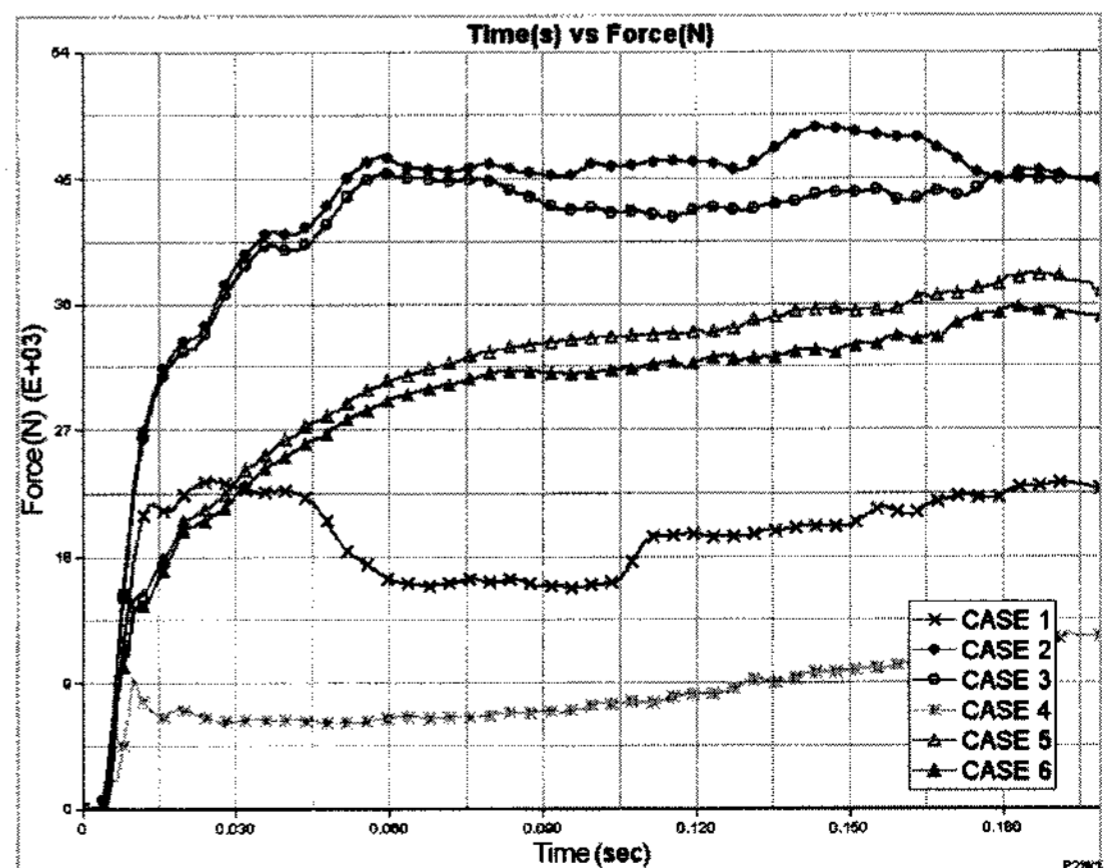


Fig. 10 Buckling strength vs Time curve

Table 2 Structural foam weight rate, buckling strength and buckling strength rate

	중량 비(%)	좌굴강도(N)	좌굴강도 비
CASE 1	0.017	22053	1
CASE 2	0.054	485878	2.2
CASE 3	0.040	45438	2
CASE 4	0.004	12481	1
CASE 5	0.042	38209	3
CASE 6	0.028	35766	2.8

구조용 폼과 플라스틱 보강재를 접목한 부재의 좌굴 강도가 구조용 폼과 플라스틱 보강재를 접목하지 않은 부재의 좌굴 강도 보다 약 2배 이상 높게 증가 되었다. 이는 앞에서 언급했듯이 구조를 보강하기 위해 구조용 폼만 사용하기에는 가격이나 적용 방법에 한계가 발생되므로 가격 및 적용 방법, 적용 부위에 따라 구조용 폼과 플라스틱 보강재와 접목한 설계 방법을 적용하면 보다 향상된 구조 강도를 가진 구조 설계의 가능성을 보여준다.

7. 결론

구조용 폼, 플라스틱 보강재 각각의 형상을 모자 단면 부재에 적용하여 3점 굽힘 시험에 대한 해석 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모자 단면 부재의 3점 굽힘 해석을 통해 각 판넬들이 순차적으로 좌굴되는 현상을 파악하였다.
- 2) 모자 단면에 구조용 폼을 적용하여 3점 굽힘 시험에 대한 해석을 수행하여 구조용 폼이 각 판넬을 일체화 시켜 하나의 강체 거동현상을 나타냄을 파악하였다.
- 3) 모자 단면 부재에 구조용 폼을 적용함으로써 구조용 폼을 적용하지 않는 부재와 비교하여 좌굴 강도가 증가됨을 보였다.
- 4) 플라스틱 보강재를 적용함으로써 초기 좌굴 강도에는 영향이 없지만 초기 좌굴 이후 좌굴 저항이 증가함을 파악하였다.

- 5) 구조용 폼과 플라스틱 보강재를 접목한 복합구조를 모자 단면에 적용함으로써 구조용 폼 적용시 초기 좌굴 이후 급격히 감소하는 좌굴 저항의 문제점을 해결하였다.
- 6) 구조용 폼과 플라스틱 보강재를 접목한 복합구조를 모자 단면에 적용함으로써 구조용 폼만 적용한 부재의 좌굴 강도를 향상시킴으로 구조의 강도 향상에 효과적인 설계 방법이다.

References

- 1) K. Ishida, M. Fukahori and K. Hanakawa, "Development of Technique to Strengthen Body Frame with Structural Foam," SAE 2001-01-0313, 2001.
- 2) J. Wycech and M. Butler, "Influence of Structural Foam Properties on the Performance of Automotive Body Reinforcements," SAE 2003-01-0326, 2003.
- 3) H. Lanzerath and R. Schilling, "Crash Simulation of Structural Foam," SAE 2003-01-0328, 2003.
- 4) M. Butler, J. Wycech, J. Parfitt and E. Tan, "Using Terocore[®] Brand Structural Foam to improve Bumper Beam Design," SAE 2002-01-20018, 2002.
- 5) Ilseok Lee, Sungjong Kang, "Bending Collapse Characteristics of Hat Section Beam Filled with Structural Foam," Transactions of KSAE, Vol. 14, No.2, pp.92-99, 2006.
- 6) I. S. Lee and S. J. Kang, "Foam Filling Effect on Bending Collapse Characteristics for Member Section Type," Transactions of KSAE, Vol.15, No.2, pp.41-49, 2007.
- 7) Henkel Korea Ltd. Automotive, Production Information, 2006.
- 8) Pamcrash Users Manual, ESI GROUP, 2006.