

## 압축하중을 받는 복합재료 샌드위치 패널의 구조해석

김광수\*, 장영순\*\*

### Structural Analysis of Composite Sandwich Panel under Compression Loading

Kwang-Soo Kim\*, Young-Soon Jang\*\*

#### Abstract

In this study, structural analyses were carried out on the composite sandwich panel which was tested under compression loading. In the structural analyses, three types of finite element modelling were considered and linear buckling analysis and nonlinear analysis were performed for each FE-model. Through the analyses, it was found that shell elements for face parts and solid elements for core part were appropriate for the better prediction of the buckling load of the panel. If the material failure of the face is critical than overall buckling of the sandwich panel, the use of one shell element through the thickness direction was suitable in the FE-model for the better predictions of failure location and failure load.

#### 초 록

본 연구에서는 이전에 구조시험[3]을 실시하였던 압축하중을 받는 샌드위치 패널 시편에 대한 구조 해석을 수행하였다. 구조 해석을 위해 세 가지 방식의 유한요소 모델링을 고려하였으며, 각각의 유한요소 모델을 이용해 선형좌굴해석과 비선형해석을 수행하였다. 이를 통해, 복합재 샌드위치 패널의 압축 좌굴 하중의 정확한 예측을 위해서는 면재는 쉘요소로 심재는 솔리드 요소로 모델링하는 것이 적절함을 확인하였다. 이것은 전체 샌드위치를 쉘 요소로 하는 경우, 심재의 국부적인 crushing 효과와 심재의 전단 강성의 영향을 고려할 수 없기 때문이다. 만일 샌드위치 패널이 좌굴 하중 보다 면재의 재료 파손이 더 취약한 경우, 면재의 재료 파손 하중 및 파손 위치의 정확한 예측을 위해서는 샌드위치를 두께 방향으로 한 개의 쉘 요소로 모델링 하는 것이 적절하였다.

키워드 : 발사체(launch vehicle), 동체(fuselage), 복합재 샌드위치(composite sandwich), 좌굴(buckling), 구조해석(structural analysis)

---

접수일(2009년12월21일), 수정일(1차 : 2010년 5월 10일, 2차 : 2010년 6월 16일, 게재 확정일 : 2010년 7월 1일)

\* 발사체구조팀/kskim@kari.re.kr

## 1. 서 론

발사체 동체 구조의 경량화를 위해 복합재료를 이용해 동체를 설계/제작하는 방법을 고려할 수 있으며, 실제로 복합재료를 이용해 발사체의 동체를 제작하는 경우가 많아지고 있다. 이미 설계하중이 크지 않은 대형발사체의 페이로드페어링(Payload fairing)의 경우 대부분 복합재료를 적용하고 있으며, 설계 하중이 큰 단연결부 등의 동체 구조에도 그 적용이 확대되고 있다[1]. 이것은 그 만큼 복합재료의 적용이 경량화 면에서 유리하기 때문이다.

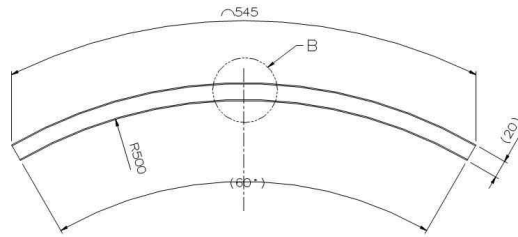
발사체의 복합재료 동체를 설계/개발할 경우, 대표적인 후보개념 중에 하나가 샌드위치 형식이라고 할 수 있다. 샌드위치 구조는 재질의 강도 및 강성이 큰 면재를 양쪽 바깥면에 사용하고 약하지만 가벼운 심재를 가운데 부분에 사용하므로 전체적인 패널의 비강도 및 비강성을 증가시킨 효과적인 구조 형식이라고 할 수 있다[2]. 이러한 복합재 샌드위치 구조를 발사체의 동체에 적용하기 위해서는 효과적이며 정확한 해석 방법 및 구조 모델링에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 앞서 구조시험[3]을 실시하였던 복합재 샌드위치 패널 시편에 대해 구조 해석을 수행하였다. 이를 위해 세 가지 방식의 유한요소 모델링을 고려하였으며, 각각의 유한요소 모델을 이용해 선형좌굴해석과 비선형해석을 수행하여 좌굴 하중과 재료 파손 하중을 예측하였다. 해석 결과의 분석을 통해, 구조시험 및 구조해석 결과를 비교해 보고 복합재 샌드위치 패널의 좌굴 하중 및 파손 하중 예측을 위한 적절한 유한요소 모델링 방법을 제시하였다. 또한 심재의 재료 물성치 변화가 패널의 좌굴 하중에 미치는 영향을 평가해 보았다.

## 2. 구조 설명

구조 해석의 대상이 되는 복합재료 샌드위치

패널의 단면모양 및 치수는 그림 1에 표시한 바와 같다. 패널은 원통형의 일부로 곡면을 있는 패널에 해당한다. 샌드위치 패널의 전체 두께는 20mm이며, 면재 두께는 1.2mm이다. 시편의 전체 길이는 600mm이다. 면재는 평직 탄소섬유/에폭시 복합재료인 HPW193/RS1222 (한국화이버 제작)를, 코아는 Flex core인 Hexel CR3 F40-5052-.0025-4.1 재료를 이용하였으며 재료 물성치는 표1에 기재한 바와 같다.



- 면재 재료 : HPW193/RS1222, Fabric, CFRP
- 면재 적층 : [0/45/0]<sub>s</sub>
- 코아 재료 : HEXEL CR3 F40-5052-.0025-4.1

그림 1. 복합재 샌드위치 패널의 구조 형상 및 주요 제원

표 1. 면재 및 코아 재료 물성치

면재 물성치 (HPW193/RS1222)	코아 물성치
E1=E2=63.8GPa	E1=E2=E3/10=128MPa
E3=11.0GPa	E3=185ksi=1276MPa
ply thickness=0.2mm	G13=43ksi=296MPa
Density=1.57e-6kg/mm <sup>3</sup>	G23=17ksi=117MPa
	G12=G23/10=11.7MPa
	Density=6.57e-8kg/mm <sup>3</sup>

샌드위치 패널의 압축 시험 모습은 그림 2와 같다. 시편은 시험을 위해 위쪽과 아래쪽의 45mm 길이의 부분에 에폭시 포팅을 하였다. 하중은 아래 면을 고정된 상태에서 위쪽 면을 동일 변위 하중으로 추가하였다. 그림 2에서 시편이 흰색으로 되어 있는 것은 시편의 앞쪽 면에는 흰색 페인트가 칠해져 있기 때문이다.



그림 2. 샌드위치 패널 시편의 압축 시험 모습

### 3. 구조 해석

#### 3.1 유한요소 모델링

샌드위치 패널에 대한 유한요소 모델링은 그림 3에서 보는 바와 같이 3가지 방법을 이용하였다. 첫 번째 방법(2D 모델)은 샌드위치 패널을 두께방향으로 하나의 셸 요소(shell element)를 사용해서 모델링하는 방법에 해당한다. 두 번째 방법(3D1 모델)은 면재는 셸요소(shell element)를 이용하고 심재는 1층의 솔리드 요소(solid element)를 이용하는 방법에 해당한다. 세 번째 방법(3D2 모델)은 두 번째 방법과 유사하며 다른 점은 심재를 두층의 솔리드 요소를 이용한 것이다. 심재를 두층으로 모델링하게 됨에 따라 세 번째 방법의 메쉬 조밀도가 두 번째 방법보다 약 2배정도 증가하였다. 결과적으로 첫 번째 방법이 가장 간단한 방법에 해당하며, 세 번째 방법이 가장 복잡하다고 할 수 있다.

그림 4에는 유한요소모델의 종류별 요소 수, 절점 수 및 자유도 수를 비교하였다. 그림 4를 보면, 2D 모델이 가장 작은 요소 수, 절점 수 및 자유도 수를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이에 비해 3D2 모델이 모델의 사이즈가 가장 크게 나타나고 있다. 자유도 수를 기준으로 하면, 3D2

모델의 자유도는 2D 모델의 그것보다 약 9.6배 큰 것을 알 수 있다.

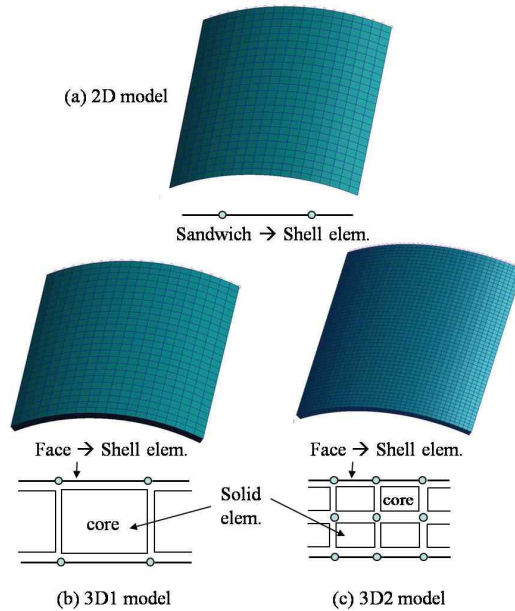


그림 3. 3가지 종류의 유한요소모델

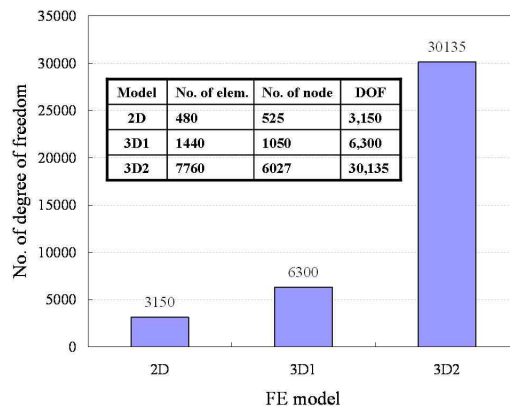


그림 4. 유한요소 모델 비교

#### 3.2 하중 및 경계 조건

샌드위치 패널에 대한 하중 및 경계 조건을 그림 5에 표시하였다. 하중 조건은 패널의 위쪽 끝단면 전체를 일정 변위 하중으로 부가하였다.

경계조건은 바닥면은 모든 변위를 고정하였으며 포팅 부위에 해당하는 부분에는 축방향 변위를 제외한 변위를 구속하였다.

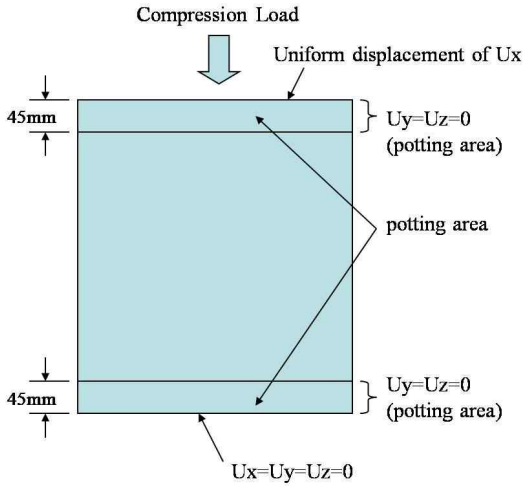


그림 5. 하중 및 경계 조건

해석 모델의 압축 강성이 약간 크게 나타났다. 특히, 2D 모델 보다는 3D 모델의 강성이 크게 나타났다. 2D모델보다 3D모델의 압축 강성이 더 크게 나타난 것은 심재를 별도로 솔리드 요소로 모델링 하므로 심재가 면재의 압축을 제한하는 효과가 고려된 것으로 판단된다.

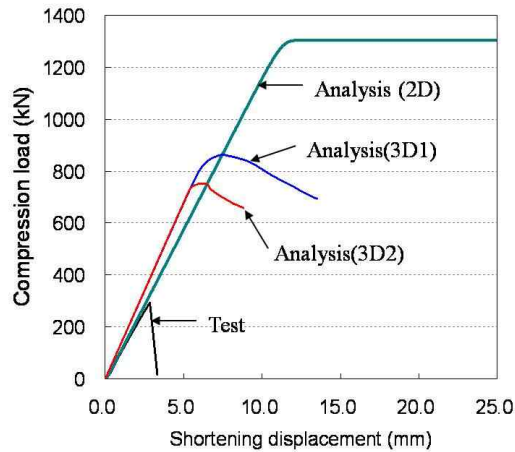


그림 6. 하중-변위 곡선

### 3.3 비선형 해석 및 선형 좌굴 해석

유한요소 해석은 MSC/MARC[4]를 이용해 비선형해석 및 선형 좌굴 해석을 각각 수행하였다. 비선형 해석에서는 기하 비선형만을 고려하였으며 Arc length 방법을 이용하였다. 재료 입력은 shell 요소는 복합재료 적층판으로 입력하였다. 심재의 솔리드 요소는 3차원 직교이방성 재료로 가정하여 재료 물성치를 입력하였다. 면재 및 심재의 재료가 모두 이방성 재료이므로 요소 좌표계의 정의가 중요하였다. 그런데, 샌드위치 패널의 위치에 따라 재료의 좌표가 달라져야 하므로 이를 반영하기 위해 요소좌표계를 적절히 조정하여 사용하였다.

## 4. 해석 결과 및 검토

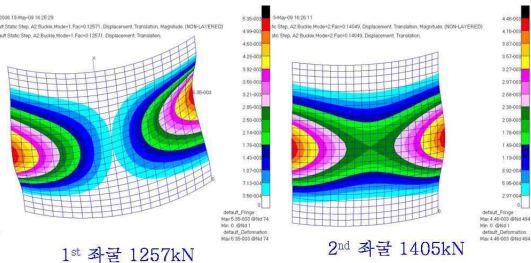
### 4.1 하중 변위 곡선

유한요소모델 종류별 하중-변위 곡선을 그림 6에 시험 결과와 비교하였다. 시험 결과에 비해

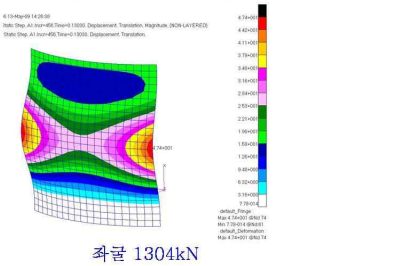
### 4.2 좌굴 하중 비교

유한요소해석을 통해 좌굴 하중 값을 예측해 보았다. 예측 결과, 2D 모델의 좌굴 해석 결과는 그림 7와 같다. 그림 7(a)에는 선형좌굴해석 결과(1차 및 2차 좌굴 모드)를 표시하였으며, 그림 7(b)에는 비선형 해석 결과를 표시하였다. 비선형 해석의 경우, 좌굴 모드가 선형 해석의 2차 모드와 동일하게 나타났으며 좌굴 하중 값도 선형해석의 2차 좌굴 값과 유사하게 나타났다. 따라서 선형 및 비선형 모두 좌굴 하중 값을 유사하게 예측하는 것을 알 수 있었다.

3D1 모델의 좌굴 해석 결과를 그림 8에 표시하였다. 마찬가지로 선형좌굴해석 결과가 비선형 해석 결과와 약간의 차이는 있지만 유사한 결과를 보이고 있다. 다만, 비선형 해석에서의 좌굴 모드가 선형해석의 2차 좌굴 모드와 일치하였다.

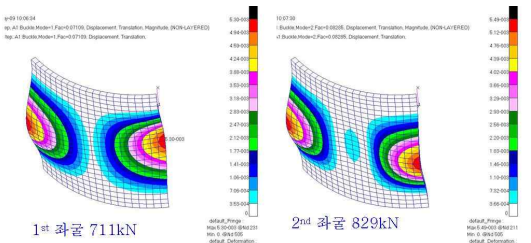


(a) Linear buckling analysis

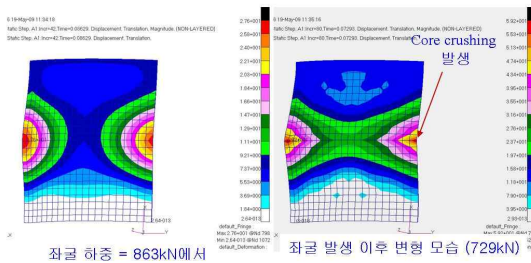


(b) Nonlinear analysis

그림 7. 2D 모델의 좌굴 예측 결과



(a) Linear buckling analysis



(b) Nonlinear analysis

그림 8. 3D1 모델의 좌굴 예측 결과

그림 9에는 세 가지 모델(2D, 3D1, 3D2)의 좌굴하중 예측 결과를 비교하였다. 그림 9의 결과를 보면, 우선 세 가지 모델의 좌굴 하중 예측 값이 실제 시편의 파손하중인 294kN보다 많이

큰 것을 알 수 있다. 따라서 본 시편은 좌굴 보다는 면재의 재료 파손에 취약한 경우임을 알 수 있다. 다만, 좌굴 하중 예측 값을 비교하는 것은 샌드위치 시편의 구조 설계에 따라 좌굴이 더 취약할 수 있으며 이 경우에는 좌굴하중을 정확하게 예측하는 것이 중요해지기 때문이다.

그림 9의 결과를 보면, 심재에 대해 솔리드 요소를 사용한 3D1 및 3D2 모델의 좌굴하중이 2D 모델보다 작게 예측되었으며, 3D1과 3D2 모델의 결과는 유사한 것을 알 수 있다. 3D1 및 3D2 모델의 좌굴 하중이 더 작게 예측된 이유는 그림 8의 좌굴 모드를 통해 유추할 수 있다. 즉, 본 해석 시편의 경우 심재의 강성이 약해 샌드위치 패널의 전체적인 굽힘변형의 좌굴보다는 코아의 국부적인 변형으로 좌굴 하중이 감소한 것으로 판단된다. 따라서 코아의 재질이 약한 경우, 정확한 좌굴 하중의 예측을 위해서는 코아를 별도의 솔리드 요소로 모델링하는 것이 필요하다고 할 수 있다. 그림 8(b)을 보면 실제로 좌굴 발생 직후 코아의 crushing 변형을 확인할 수 있으며 이를 통해 코아의 재질이 약하다는 것을 알 수 있다.

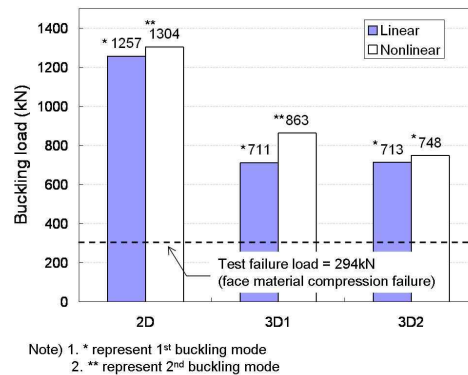


그림 9. 좌굴 하중 해석 결과 비교

### 4.3 파손 예측

본 샌드위치 패널 시편의 파손 하중 예측을 위해 면재의 압축 방향 strain 파손 허용 값을 기준으로 사용하였다. strain 파손 허용 값은 이전에 수행되었던 샌드위치 표준 압축 시편(ASTM

C364) 시험[5]으로부터 획득된 값을 다음과 같이 이용하였다. 물론 샌드위치 표준 시편의 면재 및 심재 규격은 본 시험시편과 동일한 것이었다.

- 면재 압축 파손 변형률(평균, 최대, 최소값) : 6413ue, 7109ue, 4362ue
- 시편 수량은 10개이며, strain 게이지는 총 20개를 이용해 측정된 결과임

본 샌드위치 시편에 대한 파손하중 예측 값 결과표를 그림 10에 정리하였다. 예측 값은 파손 변형률 허용값 3가지(평균, 최대, 최소)를 이용하여 Deviation를 함께 표시하였다. 평균값을 기준으로 할 경우, 모든 예측값이 시험 결과보다 높은 파손 하중으로 예측하였다. 2D 모델의 파손 예측값이 시험값과 가장 근접하였으며 약 30% 오차를 보였다. 해석적인(analytical) 방법의 파손 예측하중도 비교적 정확하여 약 38% 오차를 나타내었다. 해석적인 방법은 압축하중이 면재에만 작용한다고 가정하고 면재의 평균 변형률이 파손 변형률과 같아지는 하중을 파손하중으로 예측한 것이다. 이에 비해 심재를 3차원 솔리드 요소로 모델링한 3D1과 3D2 모델의 경우, 파손 하중 예측 오차가 크게 나타났다. 3D1 모델과 3D2 모델의 파손 예측 결과는 비슷하게 나타났다.

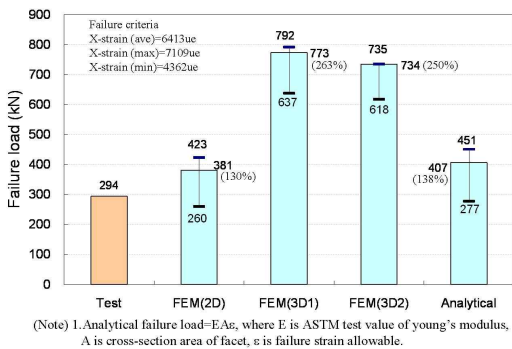


그림 10. 파손 예측 결과 비교

그림 11과 12에는 2D모델 및 3D모델의 비선형해석에서는 파손 예측 결과를 표시하였다. 그

림 11(a)에서 2D모델의 변형을 분포와 파손 예측 지점을 표시하였는데, 최대 변형률이 나타나는 지점을 파손 예상 지점이라고 할 때, 파손이 시편 양끝단의 포팅 경계 부분에서 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 11(b)에 표시한 실제 시편의 파손 위치와 일치하고 있다. 그림 12에는 3D1 모델과 3D2 모델의 변형을 분포와 파손 예상위치를 표시하였다. 이 경우에 파손 발생 하중이 많이 크게 예측되었고 이로 인해 이미 시편에서 좌굴 변형이 발생하고 있다. 좌굴 변형에 따라 압축을 받는 부분에 최대 압축 변형률이 작용하고 있으며, 이 부분이 파손 예상 부위에 해당한다고 할 수 있다.

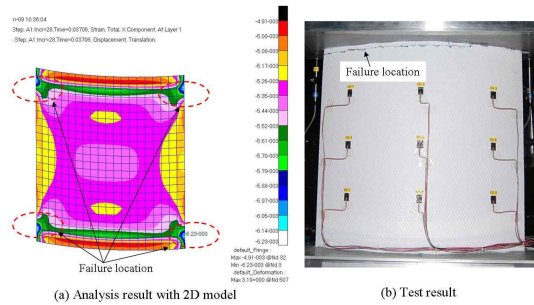


그림 11. 2D 모델의 파손 예측 지점과 시편의 파손 지점 비교

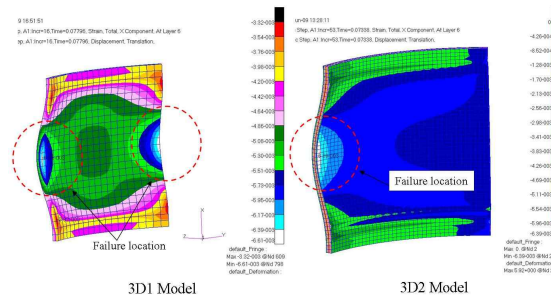


그림 12. 3D1 및 3D2 모델의 파손 예측 지점 및 변형을 분포

이상의 결과를 통해, 3D 모델의 경우 파손 하중 및 파손 예상 위치에 있어 오차가 큰 것을 알 수 있으며, 이에 비해 2D모델은 파손 하중뿐만 아니라 파손 예상 위치도 잘 예측하고 있는 것을



알 수 있다. 따라서 좌굴이 발생하기 전에 재료 파손에 의해 파손이 발생하는 경우의 파손 예측은 2차원 쉘요소 모델(2D)을 이용하는 것이 적절한 것을 알 수 있다.

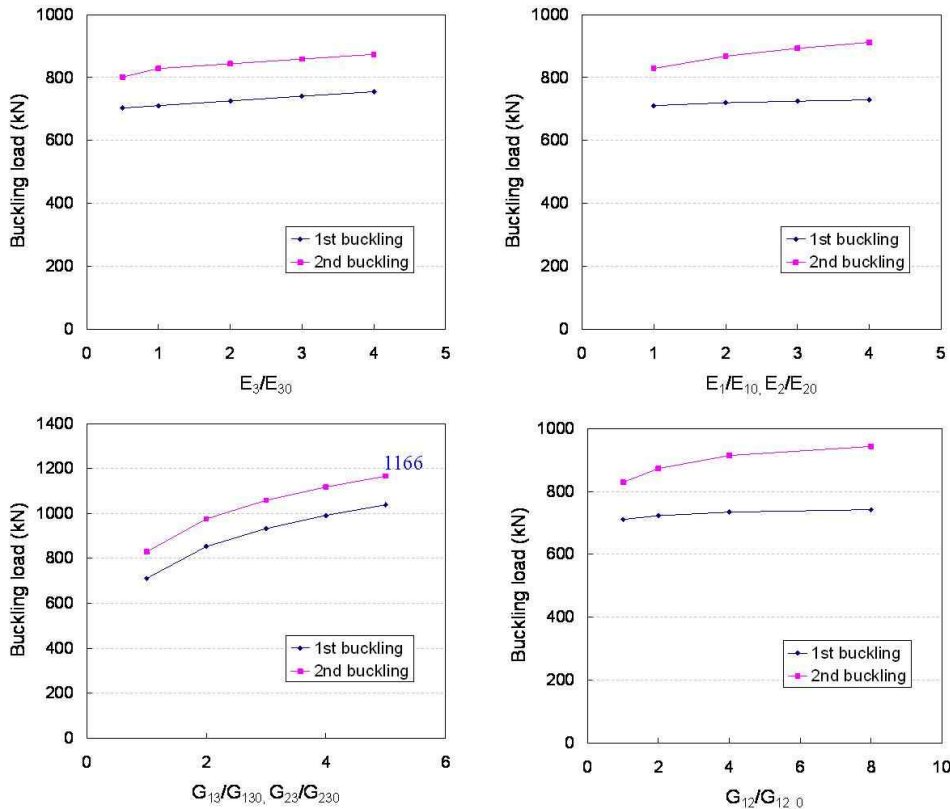
#### 4.4 심재 물성치에 대한 좌굴 하중 변화

3D1 모델을 이용해 심재의 재료 물성치를 변화시키면서 선형 좌굴 해석을 수행한 결과를 그림 13에 표시하였다. 해석 결과, 그림 13에서 알 수 있는 바와 같이 심재의 전단 강성인  $G_{13}$ ,  $G_{23}$ 가 좌굴 하중에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이에 비해 면내 강성에 해당하는  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$ 와 두께 방향 강성  $E_3$ 는 좌굴하중에 미치는 영향이 크지 않은 것을 알 수 있다. 샌드위치를 두께 방향으로 하나의 쉘 요소로 모델링

하는 경우, 심재의 전단 강성,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$ 의 영향은 고려되지 않는다. 따라서 앞서 살펴본 바와 같이 샌드위치를 “쉘+솔리드 요소”로 모델링하는 것이 정확한 좌굴 하중 예측을 위해 필요할 뿐만 아니라 심재의 전단 강성을 고려한다는 면에서도 더 타당하다고 할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 앞서 구조시험을 실시하였던 압축하중을 받는 샌드위치 패널 시편[3]에 대한 구조 해석을 수행하였다. 구조 해석을 위해 세 가지 방식의 유한요소 모델링을 고려하였으며, 각각의 유한요소 모델을 이용해 선형좌굴해석과 비선형해석을 수행하였다. 이를 통해, 복합재 샌드위치 패널의 압축 좌굴 하중의 정확한 예측을



(Note) 1.  $E_{10}$ ,  $E_{20}$ ,  $E_{30}$ ,  $G_{120}$ ,  $G_{230}$ ,  $G_{230}$  are original material values

그림 13. 코어 물성 변화에 따른 좌굴 하중 변화 민감도

위해서는 면재는 셸요소로 심재는 솔리드 요소로 모델링하는 것이 적절하였다. 이것은 전체 샌드위치의 셸 요소로 하는 경우, 심재의 국부적인 crushing 효과와 심재의 전단 강성의 영향을 고려할 수 없기 때문이다. 만일 샌드위치 패널이 좌굴 하중 보다 면재의 재료 파손이 더 취약한 경우, 면재의 재료 파손 하중 및 파손 위치의 정확한 예측을 위해서는 샌드위치를 두께 방향으로 한 개의 셸 요소로 모델링 하는 것이 적절하였다. 심재의 재료 물성치 중에 전단 강성 G13, G23가 패널의 좌굴 하중에 미치는 영향이 가장 크게 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. Kobayashi, M., Sakai, S., and Shimizu, R., "Development of H-2A launch vehicle composite interstage structure", Advanced Composite Materials, Vol. 10, No.2,3, pp.47~253, 2001.
2. J.R. Vinson, The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials, Technomic Publishing Co., Inc., 1999.
3. TR05MG0P0035, 연구원내부기술자료, 보강재가 있는 샌드위치 패널의 압축 시험 결과, 2009.05.06.
4. MSC.Marc User's manuals, MSC Software Co., 2005.
5. TR0MAG0P0028, 연구원내부기술자료, KSLV-I 국산화 단연결부 샌드위치 패널 압축강도 시편 시험 결과, 2008.10.31.