

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2014.18.2.073>

## 에그-박스 코어 형상 변화에 따른 등가 전단 탄성계수 수치 해석 연구

이상연<sup>a,\*</sup> · 윤수진<sup>a</sup> · 박동창<sup>a</sup> · 황기영<sup>a</sup>

### Analytical Study on Equivalent Shear Modulus according to Shape of Egg-box Core

SangYoun Lee<sup>a,\*</sup> · Su-jin Yun<sup>a</sup> · DongChang Park<sup>a</sup> · Kiyoun Hwang<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Advanced Propulsion Technology Center, Agency for Defence Development, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [syl2717@hanmail.net](mailto:syl2717@hanmail.net)

#### ABSTRACT

The sandwich shell with Egg-box core has been used for the combustion chamber case of air breathing propulsion system. The alteration on pitch length and thickness of Egg-box core was required to be lighter and save manufacturing time and cost of combustion chamber case. In this paper, the finite element analysis method which simulated bending test was used to predict the equivalent shear modulus which affect structural stability of sandwich shell in short time. The result of FE calculation on sandwich panel with homogeneous material, H130-foam core, showed a good agreement with the values available in the reference. The equivalent shear modulus of Egg-box core according to the variation of pitch length and thickness can be obtained.

#### 초 록

본 논문에서 다루고 있는 에그-박스 코어는 공기 흡입식 추진기관의 연소실 케이스로 사용되고 있다. 무게의 경량화 및 제작 비용/시간을 절감하기 위한 목적으로 에그-박스 코어의 피치 길이 및 두께 변경의 필요성이 대두되었다. 짧은 시간 내에 에그-박스 코어 변경에 있어 연소실 케이스의 구조 안정성에 영향을 미치는 등가 전단 탄성계수의 특성을 파악할 수 있는 방법으로 굽힘 시험을 모사한 유한요소해석을 이용하였다. 등방성 재료인 H130-폼 코어를 가지는 샌드위치 판넬에 대한 유한요소해석을 수행하여 얻은 전단 탄성계수 값이 참고문헌에서 주어진 값과 거의 일치함을 확인하였다. 에그-박스 코어의 피치 길이와 두께 변화에 따른 등가 전단 탄성계수 변화를 확인할 수 있었다.

Key Words: Equivalent Shear Modulus(등가 전단 탄성계수), Sandwich Panel(샌드위치 판넬), Egg-box Core(에그-박스 코어), Finite Element Analysis(유한요소해석), Pitch Length(피치 길이)

Received 30 November 2012 / Revised 26 February 2014 / Accepted 6 March 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 22-23, 여수 디오션리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

#### 1. 서 론

샌드위치 판넬은 항공, 조선, 철도, 자동차 산

업 분야 등 교통 기관의 고속화를 위해 필수적인 구조물 경량화에 사용되어 왔다. 샌드위치 판넬은 두 개의 얇고 높은 밀도를 가지고 있는 스킨과 낮은 밀도를 가지고 있는 코어의 3개 층으로 구성된다. 샌드위치 판넬의 스킨은 구조물에 작용하는 인장하중, 압축하중 및 굽힘 하중을 지탱하며, 샌드위치 판넬 코어는 원하는 스킨 사이의 거리를 만들어 주는 기능 및 두 개의 스킨 사이에 작용하는 전단 하중을 지탱한다.

샌드위치 판넬 코어가 지탱할 수 있는 전단 하중은 코어의 기하학적 형상에 따라 변화되는 등가 전단 물성에 의해 결정된다. 다양한 샌드위치 판넬 코어 형상에 따른 등가 물성에 대하여 많은 연구자들이 이론적 및 실험적인 방법을 이용하여 연구해 왔다. 국외의 경우, Akisanya와 Fleck[1]은 에그-박스 코어 형상을 간략화한 원뿔대에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 이를 통하여 상대 밀도 및 원뿔대 경사 각도에 따른 등가 전단탄성계수와 두께 방향 등가 탄성계수를 제시하였다. Libove와 Hubka[2]는 균일한 두께를 가지고 있는 파형 코어(Corrugated core)에 대한 등가 물성을 이론 및 실험적으로 연구하였다. Ko[3]은 초소성 변형(Superplastically form)을 이용하여 제작될 경우 발생하는 비 균일 두께의 파형 코어에 대한 등가 물성을 제시하였다. Ueng 등[4,5]은 초소성 변형을 이용하여 제작될 수 있는 4개의 측면에서 다수의 측면을 가지는 피라미드 모양 코어(Pyramidal core)에 대한 전단 등가 물성을 이론적으로 평가하여 제시하였다. Meraghni 등[6]은 튜브 모양 코어(Tubular core)에 대한 등가 전단 물성을 해석, 이론 및 실험적으로 평가하여 제시하였다. 국내의 사례로, Kim 등[7]은 피라미드 트러스 코어에 대한 등가 물성을 해석 및 수치적으로 평가하였다. Ahn 등[8]은 망형 금속 코어를 가지고 있는 샌드위치 판넬에 대해 실험적 방법으로 전단 등가 물성을 평가하였다. Hwang 등[9]은 허니컴 코어를 가지는 스마트 스킨 구조물에 대한 수치해석을 통해 허니컴 코어의 물성을 평가하였다. Lee 등[10,11]은 에그-박스 코어에 대한 등가 전단 물성을 수치 및 실험적으로 평가하였다. 샌드위치

셀 구조체에 작용하는 압축하중 혹은 외부 압력에 의해 구조 불안정성이 발생할 수 있으며 이는 코어의 등가 전단 탄성계수와 밀접한 관계가 있다. 기존 연구에서는 에그-박스 코어의 형상 파라미터 변화에 따른 등가 전단 물성의 정량적 값 혹은 정성적 경향의 제시가 없었다. 본 논문에서는 에그-박스 코어의 형상 변화에 따른 등가 전단 탄성계수를 확인하여 구조체의 설계 변경에 적용하고자 한다.

Fig. 1은 자동차 산업 및 항공 산업 분야에서 에너지 흡수 구조체로 사용되고 있고 경량화 목적으로 액체 추진기관의 연소실 케이스로 사용되고 있는 에그-박스 코어 형상을 보여주고 있다. 전체적인 형상이 계단판과 유사하며 코어의 마루(peak)와 골(trough)이 반복적으로 형성되어 있고 냉간 성형 공정을 통해 제작된다. 코어의 마루는 스킨과 전기 점용접을 통해 결합되며 골은 스킨과 Arc 점용접을 통해 결합되어 샌드위치 판넬을 형성한다. 본 논문에서는 에그-박스 코어 형상 변화에 따른 등가 전단 탄성계수를 얻기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 기존 연소실 케이스에 적용된 에그-박스 코어의 피치 길이(Pitch length)는 20.0 mm, 두께( $t_c$ )는 0.3 mm이다. 연소실 케이스의 경량화 및 점용접 수량 감소를 통한 제작비용과 기간 감축을 위한 설계 변경을 위해 에그-박스의 형상 파라미터 중 코어의 피치 길이는 20.0 mm에서 25.0 mm까지의 범위에서 두께는 0.2 mm에서 0.4 mm까지의 범위에 대하여 등가 전단 탄성계수를 평가하였다.

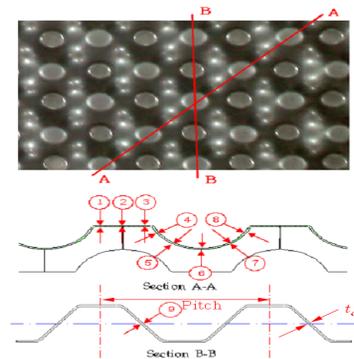


Fig. 1 Egg-box core.

## 2. 등가 전단 탄성계수 및 FEM 해석 모델

## 2.1 등가 전단 탄성계수

Fig. 2는 샌드위치 판넬에 굽힘 하중을 가했을 때 발생하는 처짐 양상을 보여주고 있다. 굽힘 하중에 의한 처짐은 샌드위치 구조물 굽힘 변형에서 발생하는 처짐( $\delta_b$ )과 샌드위치 코어의 전단 변형에 의해 발생하는 처짐( $\delta_s$ )으로 생각할 수 있다[12]. 이러한 굽힘 하중에 의한 전체 처짐( $\delta_t$ )을 이용하면 샌드위치 판넬 코어의 전단탄성계수를 얻을 수 있다.

샌드위치 판넬의 굽힘하중과 전체 처짐에 대한 일반적인 관계식은 다음과 같다.

$$\delta_t = \delta_b + \delta_s = \frac{Pl^3}{B_1(EI)_{eq}} + \frac{Pl}{B_2(AG)_{eq}} \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 작용 하중,  $l$ 은 샌드위치 판넬의 길이,  $(EI)_{eq}$ 는 샌드위치 판넬의 등가 굽힘 강성,  $(AG)_{eq}$ 는 샌드위치 판넬의 등가 전단 강성, 파라미터  $B_i$ 는 굽힘 경계조건에 따라 달라지는 상수이다.

샌드위치 판넬의 등가 굽힘 강성은 다음과 같이 표현된다.

$$(EI)_{eq} = E_f \left( \frac{bt^3}{6} + \frac{btd^2}{2} \right) + \frac{E_c bc^3}{12} \quad (2)$$

$d \cong c$ 이고  $t$ 가 작으면 위의 Eq. 2는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$(EI)_{eq} = E_f \frac{btd^2}{2} \quad (3)$$

여기서,  $E_f$ 는 샌드위치 판넬 스킨의 탄성계수,  $E_c$ 는 샌드위치 판넬 코어의 탄성계수,  $t$ 는 샌드위치 판넬 스킨의 두께,  $c$ 는 샌드위치 판넬 코어의 두께,  $b$ 는 샌드위치 판넬의 두께,  $d$ 는 샌드위치 판넬 스킨들 중심 사이의 거리이다.

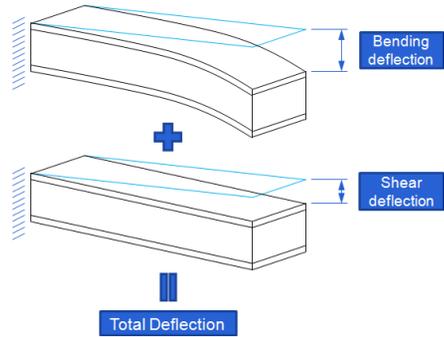


Fig. 2 Deflection of sandwich panel occurred by bending load.

샌드위치 판넬의 등가 전단 강성은 다음과 같이 표현된다.

$$(AG)_{eq} = \frac{bd^2 G_c}{c} \quad (4)$$

$d \cong c$ 이므로 위의 Eq. 4는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$(AG)_{eq} = bcG_c \quad (5)$$

여기서,  $G_c$ 는 샌드위치 판넬 코어의 전단탄성계수이다.

위의 식들을 이용하면 샌드위치 판넬 코어의 등가 전단 탄성계수 관계식은 다음과 같다.

$$G_{c-eq} = \frac{Pl}{2bc(\delta_t - \delta_b)} \quad (6)$$

위의 Eq. 6에서  $\delta_t$ 는 유한요소법을 이용한 구조해석 결과를 통해 얻고  $\delta_b$ 는 Eq. 1과 3을 이용한 해석적 방법으로 얻어 에그-박스 코어에 대한 등가 전단 탄성계수를 얻을 수 있다.

## 2.2 FEM 해석 모델

본 연구에서 에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수를 예측하기 위해 사용된 유한요소해석 소프트웨어는 ABAQUS 6.12이다. 에그-박스 코어

를 가지고 있는 샌드위치 판넬에 대한 유한요소 해석 이전에 유한요소해석을 이용한 코어의 등가 전단 탄성계수 예측 방법을 검증하기 위해서 코어가 등방성 재료인 H130-foam으로 만들어진 샌드위치 판넬에 대해 유한요소해석을 수행하였다. H130-foam은 상온에서 탄성계수는 132 MPa이고 포와송비는 0.32이다[13]. 주어진 물성값을 이용하여 코어의 전단 탄성계수를 구해보면  $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 50 \text{ MPa}$ 이다. Fig. 3은 에그-박스 코어를 가지는 샌드위치 판넬에 대한 해석 요소를 보여주고 있다. 사용된 해석 요소는 절점이 10개인 4면체 요소이며, 각 해석 조건별 차이는 있지만 대략 250,000개의 요소를 사용하였다. 유한요소해석은 균일 분포 압력이 작용하는 외팔보에 대하여 수행되었다. 작용 하중인 압력은 0.01 MPa로 해석을 수행하였다.

유한요소해석에 적용된 샌드위치 판넬 코어의 재료는 연신율과 냉간 성형성이 좋은 AISI321이고, 스킨 재료는 높은 온도에서 높은 강도를 가진 내열강인 17-4PH이며, Table 1은 각 재료에 대한 기계적 물성값을 보여주고 있다. AISI321의 탄성계수는 193 GPa이며 17-4PH의 탄성계수는 197 GPa이다.

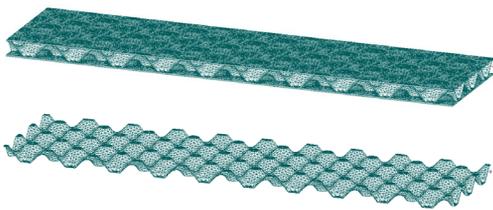


Fig. 3 FEM mesh model of Egg-box core.

Table 1. Mechanical properties of sandwich panel with Egg-box core.

Mechanical Properties	E (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)
AISI321	193	215	590
17-4PH (H900)	197	1172	1310

Fig. 4는 유한요소해석에 적용될 샌드위치 판넬의 기하학적 형상을 보여주고 있다. 코어가 폼으로 만들어진 샌드위치 판넬의 경우, 길이 420 mm, 폭 80 mm, 스킨 두께 1.0 mm이고 코어 두께 10.0 mm이다. 코어가 에그-박스 코어를 가진 샌드위치 판넬의 경우, 주요 치수는 Table 2와 같으며 스킨과 코어의 두께는 각각 1.0 mm와 10.0 mm로 일정하게 하였다. 에그-박스 코어 피치 길이 변화에 따른 등가 전단 탄성계수를 확인하기 위해서 에그-박스 피치를 20.0 mm에서 25 mm까지 변경하였다. 이때 에그-박스 코어 성형 전 두께( $t_c$ )는 0.3 mm로 일정하다. 샌드위치 판넬의 크기는 길이와 폭 방향 점용접 수량이 동일하도록 설정하였다. Case #1의 경우, 피치 20.0 mm, 길이 200 mm, 폭 60 mm이며, Case #5의 경우, 피치 25.0 mm, 길이 250 mm, 폭 75 mm이다. 동일한 크기의 시험편에서 비교하면 Case #5의 점용접 수는 Case #1의 점용접 수 대비 80%의 점용접 수를 가지고 있다. 에그-박스 코어 성형 전 재료 두께에 따른 등가 전단 탄성계수를 확인하기 위해서 두께를 0.2 mm에서 0.4 mm까지 변경하였다.

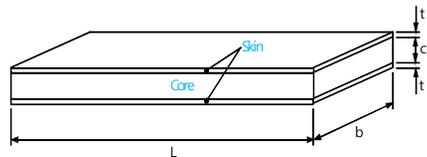


Fig. 4 Sandwich panel.

Table 2. Dimension of sandwich panel (Unit: mm).

Case	Pitch	L	b	$t_c$	Remark
#1	20.00	200.0	60.00	0.3	
#2	21.04	210.4	63.12	0.3	
#3	22.22	222.2	66.66	0.3	
#4	23.52	235.2	70.56	0.3	
#5	25.00	250.0	75.00	0.3	
#6	20.00	200.0	60.00	0.2	
#7	20.00	200.0	60.00	0.25	
#8	20.00	200.0	60.00	0.35	
#9	20.00	200.0	60.00	0.4	

3. 해석 결과

3.1 폼 코어 샌드위치 판넬

Fig. 5는 폼 코어를 적용하여 해석한 샌드위치 판넬의 처짐 크기를 보여주고 있다. 작용하는 균일분포 압력에 의해 끝단에서의 처짐이 13.69 mm 이었다. 이를 등가 전단 탄성계수로 계산하면 47.91 MPa이다. 폼 코어 재료의 탄성계수로 부터 계산된 전단 탄성계수 50.0 MPa와 유사한 값을 얻을 수 있었다.

3.2 에그-박스 코어 피치에 따른 등가 전단 탄성계수

Fig. 6와 7은 각각 에그-박스 코어의 피치가 20.0 mm와 25 mm일 때의 샌드위치 판넬의 변형 형상을 보여주고 있다. 각 해석 결과로부터 끝단에서의 처짐이 각각 0.64 mm, 1.58 mm이었으며 이를 등가 전단 탄성계수로 계산한 후 피치 20.0 mm 기준으로 각 해석 결과를 백분율로 표시하면 Fig. 8과 같다. 에그-박스 코어의 피치 길이가 20% 증가하였을 때 등가 전단 탄성계수가 약 42% 감소하였음을 볼 수 있다.

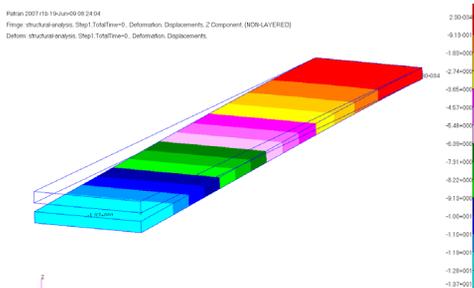


Fig. 5 Deflection of sandwich panel with foam core.

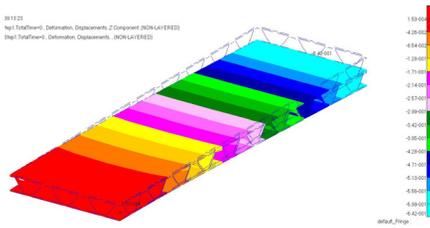


Fig. 6 Deflection of sandwich panel with Egg-box core at pitch = 20.00 mm (X10).

3.3 에그-박스 코어 두께에 따른 등가 전단 탄성계수

Fig. 9와 10은 각각 에그-박스 코어의 성형 전 두께가 0.2 mm와 0.4 mm일 때의 샌드위치 판넬의 변형 형상을 보여주고 있다. 각 해석 결과로부터 끝단에서의 처짐이 각각 0.655 mm, 0.635 mm이었으며 이를 등가 전단 탄성계수로 계산한 후 두께 0.3 mm 기준으로 각 해석 결과를 백분율로 표시하면 Fig. 11과 같다. 에그-박스 코어의 두께가 33% 감소하였을 때 등가 전단 탄성계수가 약 22% 감소하였고 두께가 33% 증가하였을 때 등가 전단 탄성계수가 18% 증가하였다.

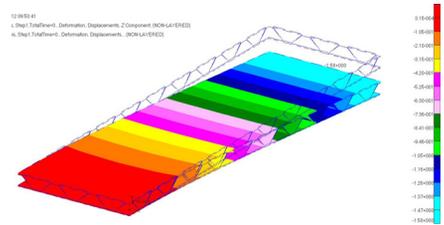


Fig. 7 Deflection of sandwich panel with Egg-box core at pitch = 25.0 mm (X10).

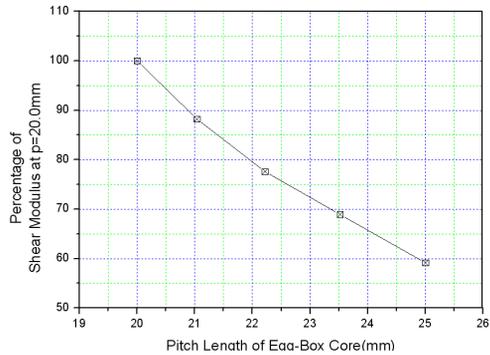


Fig. 10 Effect of pitch length on shear modulus.

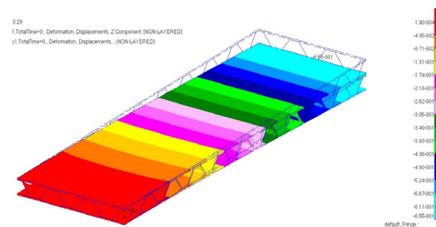


Fig. 11 Deflection of sandwich panel with Egg-box core at  $t_c = 0.2$  mm (X10).

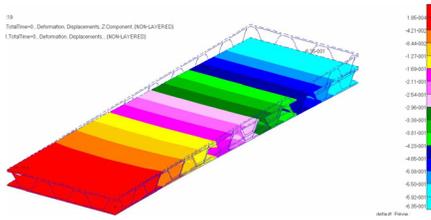


Fig. 12 Deflection of sandwich panel with Egg-box core at  $t_c = 0.4$  mm (X10).

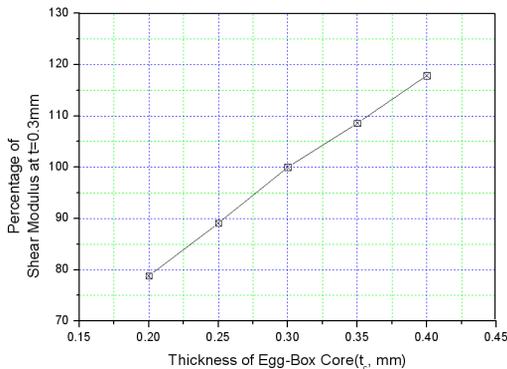


Fig. 15 Effect of thickness on shear modulus.

### 3.4 에그-박스 코어 볼륨에 따른 등가 전단 탄성계수

Fig. 12는 앞 절에서 얻어진 결과를 에그-박스 코어의 체적에 대해 분석한 결과를 보여주고 있다. Table 2에서 해석에 사용된 샌드위치 판넬의 크기가 400 mm(L)X400 mm(b)로 동일하다고 했을 때 각 조건에 대한 에그-박스 코어의 체적을 CATIA V5.0을 이용하여 얻었으며 피치가 20.0 mm, 에그-박스 코어 성형 전 두께( $t_c$ )가 0.3 mm 인 에그-박스 코어를 기준으로 백분율로 표시하였다. Fig. 12로부터 에그-박스 체적 변화에 대한 등가 전단 탄성계수 변화는 코어의 두께보다 코어의 피치 길이 변화가 더 민감하게 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 구조물의 설계 변경 시 코어의 등가 전단 탄성계수를 증가시킬 필요가 있을 때에는 코어의 피치를 변경하는 것이 바람직하다. 또한 구조물의 중량을 감소시키면서 코어의 등가 전단 탄성계수를 적게 변화하기 위해서는 코어의 피치 길이보다는 코어의 두께를 줄이는 것이 바람직하다.

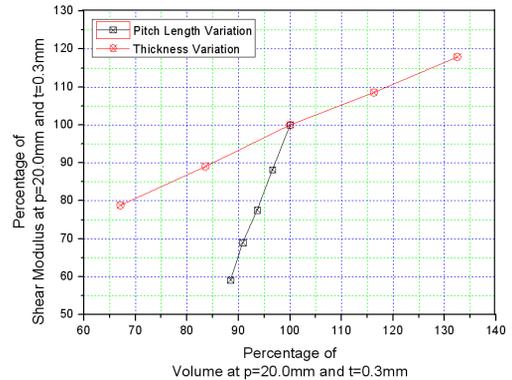


Fig. 18 Effect of volume on shear modulus.

## 4. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석을 수행하여 에그-박스 코어의 형상 변화에 따른 등가 전단 탄성계수를 평가하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 폼 코어의 등가 전단 탄성계수는 47.9 MPa로 폼 코어 재료의 탄성계수로부터 계산된 전단 탄성계수 50.0 MPa와 유사한 값을 얻을 수 있었다. 이를 통해서 유한요소해석을 통한 코어의 등가 전단 탄성계수 예측 방법을 검증할 수 있었다.
2. 에그-박스 코어 피치 길이 변화에 따른 등가 전단 탄성계수 변화를 평가하였다.
3. 에그-박스 코어 두께 변화에 따른 등가 전단 탄성계수 변화를 평가하였다.
4. 에그-박스 체적 변화에 대한 등가 전단 탄성계수 변화는 코어의 두께보다 코어의 피치 길이 변화가 더 민감하게 변화하고 있음을 확인할 수 있었다.

## References

1. Akisanya, A.R. and Fleck, N.A., "Plastic Collapse of Thin-Walled Frusta and

- Egg-Box Material under Shear and Normal Loading," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, pp. 799-808, 2006.
2. Libove, C. and Hubka, R.E., "Elastic Constants for Corrugated-Core Sandwich Plates," NACA TN 2289, 1951.
  3. Ko, W.L., "Elastic Constants for Superplastically Formed/Diffusion-Bonded Sandwich Structures," *AIAA Journal*, Vol. 18, No. 8, pp. 986-987, 1980.
  4. Ueng, C.E.S., Underwood, E.E. and Liu, T.L., "Shear modulus of superplastically formed sandwich cores," *Computers & Structures*, Vol. 10, No. 2, pp. 393-397, 1979.
  5. Ueng, C.E.S. and Kim, T.D., "Shear modulus of Core Materials with Arbitrary Polygonal Shape," *Computers & Structures*, Vol. 16, No. 1, pp. 21-25, 1983.
  6. Merghni, F., Desrumaux, F. and Benzeggagh, M.L., "Mechanical Behaviour of Cellular Core for Structural Sandwich Panels," *Composite Part A*, Vol. 30, No. 6, pp. 767-779, 1999.
  7. Kim, S.W., Lee, Y.S. and Kang, B.S., "Analytical and Numerical Study on Mechanical Behavior of Unit Cell of Pyramidal Truss," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 623-631, 2011.
  8. Ahn, D.G., Nam, G.H., Jung, C.G. and Yang, D.Y., "Elastic Properties of Thin Sandwich Plate with Woven Metal," *The KSPE Spring Conference*, pp. 167-168, 2009.
  9. Jeon, J.H. and Hwang, W.B., "FEM Analysis of Smart Skin Structure Specimen," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 16, No. 4, pp. 59-65, 2003.
  10. Lee, S.Y., Yun, S.J., Park, D.C. and Yoon, H.G., "Prediction of Equivalent Shear Modulus of Sandwich Panel," *The Korean Society for Propulsion Engineers Spring Conference*, 2011.
  11. Lee, S.Y., Yun, S.J., Park, D.C. and Yoon, H.G., "Equivalent Shear Modulus of Egg-Box Core," *The Korean Society for Propulsion Engineers Fall Conference*, 2011.
  12. Tom Bitzer, *Honeycomb Technology*, 1st Ed., Chapman & Hall, 1997.
  13. Toftegaard, H., "Initial Fixture Design for Direct Shear Testing of Sandwich Core Materials," *Proceedings of the 27th Riso International Symposium on Materials Science*, pp. 337-347, 2006.