

에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수

이상연* · 윤수진* · 박동창* · 윤현걸*

Equivalent Shear Modulus of Egg-Box Core

SangYoun Lee* · SuJin Yun* · DongChang Park* · HyunGull Yoon*

ABSTRACT

This paper deals with the equivalent shear modulus of the egg-box core. There are three approaches to obtain the equivalent shear modulus of core: a finite element analysis, an analytical study, and an empirical method. In this study, an 3-point bending test is used to evaluate the equivalent shear modulus of the Egg-Box core. As a result of the present work, the equivalent shear modulus of egg-box core at room temperature can be obtained. And this result is compared with the result of finite element analysis.

초 록

이 논문은 에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수에 대해 다루고 있다. 코어의 등가 전단 탄성계수를 얻는 방법으로 유한요소해석, 수치 해석, 실험이 있다. 이번 연구에서는 에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수를 평가하기 위하여 3점 굽힘 시험을 수행하였으며, 그 결과로부터 상온에서의 에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수를 획득하였다. 이 결과를 유한요소해석으로부터 얻어진 결과와 비교하였다.

Key Words: Equivalent shear modulus(등가 전단 탄성계수), Equivalent flexural stiffness(등가 굽힘 강성), Equivalent shear stiffness(등가 전단 강성), Sandwich Panel(샌드위치 판넬), Egg-Box Core(에그-박스 코어), 3-Point Bending Test(3점 굽힘 시험)

1. 서 론

샌드위치 판넬은 항공, 조선, 철도, 자동차 산업 분야 등 교통수단의 고속화를 위해 필수적인 구조물 경량화를 위하여 사용되어 온 중요한 구성 요소이다. 샌드위치 판넬은 두 개의 얇고 높

은 밀도를 가지고 있는 스킨과 낮은 밀도를 가지고 있는 코어의 세 개 층으로 구성된다. 샌드위치 판넬의 스킨은 구조물에 작용하는 인장하중, 압축하중 및 굽힘 하중을 지탱하며, 샌드위치 판넬 코어는 스킨 사이에 이격거리를 부여하고, 두 개의 스킨 사이에 작용하는 전단 하중을 지탱한다.

샌드위치 판넬 코어가 지탱할 수 있는 전단

* 국방과학연구소 1기술연구본부 5부
† 교신저자, E-mail: sy12717@paran.com

하중은 코어의 기하학적 형상에 따라 변화되는 등가 전단 물성에 의해 결정된다. 이러한 이유 때문에 다양한 형상의 샌드위치 판넬 코어의 등가 전단 물성에 대하여 많은 연구자들이 이론적 및 실험적인 방법으로 연구를 수행하였다.[1-5] 그러나 에그-박스 코어가 실제 구조물에 적용된 경우의 등가 전단 탄성계수에 대한 연구 결과는 찾을 수 없었다.

본 논문에서 다루고 있는 에그-박스 코어는 충격완화 목적으로 최근 자동차 산업 및 항공 산업 분야에서 에너지 흡수 구조체로 각광받고 있으며, 경량화 목적으로 발사체 구조체에 활용되고 있다. Fig. 1은 에그-박스 코어의 기하학적 형상을 보여주고 있다. 전체적인 형상이 계단판과 흡사하다. 코어의 마루(Peak)와 골(Trough)이 반복적으로 형성되어 전체 형상을 만들며 마루와 골에 각각 스킨이 용접되어 샌드위치 판넬을 형성한다. 에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수를 획득하기 위해 3점 굽힘시험을 수행하였으며 이를 통해 등가 전단 탄성계수를 평가하였다.

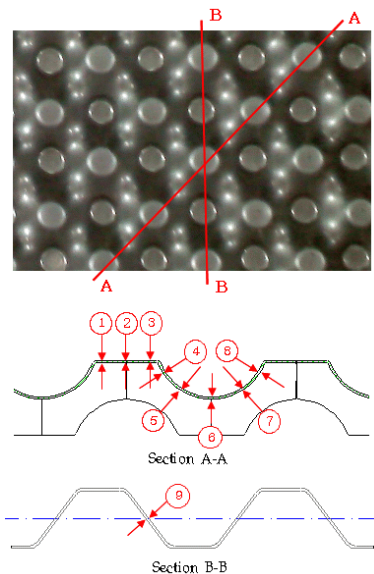


Fig. 1 Egg-Box Core

2. 시험편 및 시험 방법

2.1 시험편

에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수 평가를 위해 사용된 시험편에 적용된 코어의 재료는 오스테나이트계 스테인레스 스틸로 연신율이 높아 냉간 성형성이 좋은 AISI321이고, 스킨 재료는 석출경화 스테인레스 스틸로 높은 온도에서 높은 강도를 가진 내열강 17-4PH이다. Table 1에 각 재료에 대한 기계적 물성값을 보여주고 있다.

Table 1. Mechanical Properties of Sandwich Panel with Egg-Box Core

재료 \ 물성	E(GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)
AISI321	193	215	590
17-4PH(H900)	197	1172	1310

에그-박스 코어는 냉간 성형 공정(cold forming)을 통해 제작 된다. Table 2는 0.3 mm의 판재가 에그-박스 코어로 성형된 후 Fig. 1에 나타난 위치에 대한 두께 측정 결과를 보여주고 있다. 성형 후 두께 변화가 가장 심한 부분은 코어의 마루 부분으로 두께 변화가 0.07 mm 발생하였다. 또한 코어 피크 부분에서는 위치에 상관없이 거의 유사한 두께를 가지고 있었다. 측정위치 6번이 성형 후 두께변화율이 가장 작은 부분으로 0.01 mm 두께 변화가 발생하였다. 대체적으로 코어 피크에 인접한 부분일수록 냉간 성형에 의한 두께 변화가 심하다.

에그-박스 코어를 가지는 샌드위치 판넬 한쪽 스킨과 코어는 전기 점용접을 통해 결합되며, 다른 한쪽 스킨과 코어는 argon-arc 점용접을 통해

Table 2. Thickness after Cold Forming(unit: mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
#1	0.23	0.24	0.24	0.25	0.29	0.30	0.29	0.26	0.27
#2	0.24	0.23	0.23	0.25	0.28	0.30	0.29	0.25	
#3	0.24	0.24	0.23	0.26	0.28	0.30	0.29	0.26	
#4	0.24	0.24	0.24	0.25	0.28	0.29	0.29	0.27	
#5	0.23	0.24	0.24	0.25	0.28	0.29	0.28	0.25	
Avg	0.23	0.23	0.23	0.25	0.28	0.29	0.29	0.25	0.27

결합된다.

에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수를 평가하기 위해 시험에 적용될 샌드위치 판넬은 길이 280 mm, 폭 60 mm, 스킨 두께 1.0 mm이고, 코어 두께 10.0 mm로 전체 두께는 12.0 mm이다.

2.2 시험방법

에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수를 평가하기 위해 3점 굽힘시험을 수행하였으며 Fig. 2는 시험 수행 중인 사진을 보여주고 있다. 시험은 ASTM D 7250에 의거 수행되었으며 시험편의 지지거리는 240 mm이고 하중속도는 1 mm/min로 하였다. 하중이 가해지는 시험편의 중앙에는 국부적인 파손이 발생되지 않도록 고무판을 이용하였으며 시험편 중앙에서의 처짐을 평가하기 위해 시험편 중앙의 밑면에 LVDT를 설치하였다. 로드셀에서 계측된 하중과 LVDT에서 계측된 변위를 이용하여 에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수를 평가할 것이다.

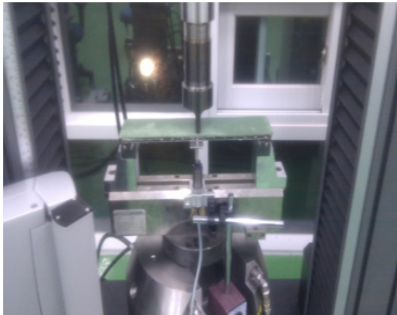


Fig. 2 Photo of 3-Point Bending Test

3. 시험 결과

3.1 등가 전단 탄성계수

샌드위치 판넬에 굽힘 하중을 가했을 때 발생하는 샌드위치 판넬의 전체 처짐(δ_t)은 굽힘 변형에 의해 발생하는 처짐(δ_b)과 샌드위치 코어의 전단 변형에 의해 발생하는 처짐(δ_s)의 합으로 생각할 수 있다. 이러한 관계를 이용하면 샌드위치 판넬 코어의 등가 전단 탄성계수 관계식을

다음과 같이 얻을 수 있다.

$$G_{c-eq} = \frac{Pl}{2bc(\delta_t - (Pl^3/24E_f btd^2))} \quad (1)$$

여기에서, P 는 작용 하중, l 은 샌드위치 판넬의 길이, E_f 는 샌드위치 판넬 스킨의 탄성계수, t 는 샌드위치 판넬 스킨의 두께, c 는 샌드위치 판넬 코어의 두께, b 는 샌드위치 판넬의 두께, d 는 샌드위치 판넬 스킨 중심 사이의 거리이다. 샌드위치 판넬의 전체 처짐(δ_t)은 3점 굽힘시험에서 시험편 중앙에 설치된 LVDT로부터 얻을 수 있다.

Figure 3은 3점 굽힘시험으로부터 얻어진 하중-처짐 선도이다. 선도에서 시험 초기 구간에 나타나는 비선형 구간은 시험 초기 시험 치구와 시험편과의 접촉 불균형에 의해 발생하는 구간이며, 시험 말기 구간에 나타나는 비선형 구간은 시험편의 소성 변형에 의해 발생하는 구간이다. 에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수를 획득하기 위해서 선도의 선형 구간만을 활용하였다.

Table 3은 3점 굽힘 시험으로부터 얻어진 최대 굽힘 하중과 등가 전단 탄성계수 결과를 보여주고 있다. 시험편의 파손은 하중 부하 위치에 고무판을 설치했음에도 불구하고 하중 부하 위치에서 국부적인 소성 변형에 의해 발생되었다. 하중 부하 위치가 점 용접부에 어느 정도 근접하느냐에 따라 최대 굽힘 하중이 변하였다. 하중 부하 위치가 점 용접부 근처일수록 높았으며 평균 최대 굽힘 하중은 2,466N 이다. 에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수는 시험편 폭 방향으로 위치하는 점 용접 수량에 따라 변하였다. 시험편의 폭이 60 mm 이지만 시험편의 절단 상태에 따라 시험편의 폭 내에 위치하는 점 용접 수량이 6.0개 혹은 6.5개 이었다. 동일한 폭에 점 용접 수량이 많다는 것은 전단 하중을 공유하는 능력이 증가한다는 것을 의미하므로 동일한 전단 하중에 대해 전단 변형이 적으며 이는 전단 강성이 높아짐을 의미한다. 점 용접 수량이 6.0개의 경우, 평균 등가 전단 계수는 333.3 MPa이

고 점 용접 수량이 6.5개의 경우, 평균 등가 전단 계수가 367.4 MPa로 6.0개인 경우 보다 10.2% 높은 값을 가지고 있다.

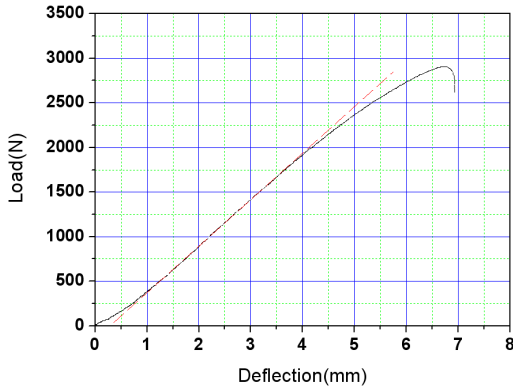


Fig. 3 Load-Deflection Curve Obtained from 3-Point Bending Test

Table 3. Maximum Bending Load and Equivalent Shear Modulus

Test No.	Max. Load (N)	G_{c-eq} (Mpa)	No. of Welding Point
#1	2760	329.0	6.0
#2	2310	339.9	6.0
#3	2050	367.5	6.5
#4	2910	361.3	6.5
#5	2720	373.6	6.5
#6	2050	331.0	6.0
Avg	2466	350.3	-

3.2 유한 요소 해석 결과와 3점 굽힘 시험 결과 비교

에그-박스 코어를 가지는 샌드위치 판넬에 대한 유한 요소 해석[6]로부터 예측된 등가 전단 탄성계수는 499.7 MPa로 3점 굽힘 시험 결과인 350.3 MPa보다 높게 예측되었다. 이는 Table 2에서 보여지는 것처럼 유한요소 해석 시 성형 후 두께를 고려하여 모델링을 하여야 하지만 실제 두께가 0.3 mm로 모델링됨에 따라 나타난 결과이다. 차후 성형 후 두께를 고려한 유한 요소 해석을 통해 등가 전단 탄성계수를 예측하여야 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 에그-박스 코어를 가지는 샌드위치 판넬에 대한 3점 굽힘시험을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 샌드위치 판넬의 폭 방향 점 용접 수에 따라 에그-박스 코어의 등가 전단 탄성계수 변화함을 확인할 수 있었다.
2. 성형 후 두께를 고려하지 않은 유한요소해석 결과와 시험 결과를 비교하였으므로, 시험결과 측정된 등가 전단 탄성계수가 유한요소해석 결과에 비하여 작게 나타남을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. A.R.Akisanya and N.A.Fleck, "Plastic Collapse of Thin-Walled Frusta and Egg-Box Material under Shear and Normal Loading," International Journal of Mechanical Sciences, 2006, pp.799-808
2. Charles Libove and Ralph E. Hubka, "Elastic Constants for Corrugated-Core Sandwich Plates," NACA TN 2289, 1951
3. William L. Ko, "Elastic Constants for Superplastically Formed/Diffusion Bonded Sandwich Structures," Proc of 20th Structures, 1979, pp.188-207
4. C.E.S.Ueng, E.E.Underwood and T.L. Liu, "Shear modulus of superplastically formed sandwich cores," Computers & Structures, 1974, pp.393-397
5. C.E.S.Ueng, T.D Kim, "Shear modulus of Core Materials with Arbitrary Polygonal Shape," Computers & Structures, 1983, pp.21-25
6. 이상연, 윤수진, 박동창, 윤현걸, "샌드위치 판넬 코어의 등가 전단 탄성계수 예측", 한국 추진공학회 춘계학술대회, 2011