論文

탄소섬유/에폭시 면재, 알루미늄 허니컴 코어 샌드위치 복합재 구조의 압입 손상에 의한 잔류강도 연구

공창덕*+, 박현범*, 이승현*

A Study on Residual Strength of Carbon/Epoxy Face Sheet and Honeycomb Core Sandwich Composite Structure after Quasi Static Indentation Damage

Changduk Kong*+, Hyunbum Park*, Seounghyun Lee*

ABSTRACT

This study aims to investigate the residual strength of sandwich composites with Al honeycomb core and carbon fiber face sheets after the quasi-static indentation damage by the experimental investigation. The 3-point bending test and the edge-wise compressive strength test were used to find the mechanical properties, and the quasi-static point load was applied to introduce the simulated damage on the specimen. The damaged specimens were finally assessed by the 3-point bending test and the compressive strength test. The investigation results revealed the residual strength of the damaged specimens due to the quasi-static indentation. The both test results showed that the residual strength of the damaged specimen was decreased according to increases of the damaged depth.

초 록

본 연구에서는 알루미늄 허니컴 코어와 카본 면재가 적용된 샌드위치 복합재 구조에 대해 준정적 압입 손상 이후의 잔류 강도 평가에 대한 연구를 수행하였다. 3점 굽힘 시험과 압축 시험을 통해 시편의 강도를 확인하고 시편에 손상을 모사하기 위하여 준정적 압입 손상을 가하였다. 손상된 시편을 손상 전 시편과 동일한 시험을 통해 손상 전의 강도와 비교하였다. 압입 손상 이후 압축 강도와 굽힘 강도는 압입 깊이의 증가에 따라 강도가 감소하였고 손상 단계에 따른 잔류 강도 정도를 확인하였다.

Key Words : 준정정 압입 손상(Quasi-static indentation damage), 굽힘 시험(Bending test), 압축 시험(Compressive test), 잔류강도(Residual strength)

1. 서 론

복합재료는 그 특성상 경량화를 요구하는 항공분야는 물론 철도, 선박, 토목건축, 스포츠 산업 등 다양한 분야에서 적용되고 있다. 하지만 무게비 고강도, 고강성의 장점에도 불구하고, 고도의 구조적 신뢰를 요하는 분야에서는 그 사용 폭이 좁은 것이 사실이다. 이는 복합재료가 설계 및 제작할 때 마다 특성이 변하고, 변형 및 손상 거동 등과 같은 강도평가에 있어서 정확한 해석이 어렵기 때문이다. 또한 충격 흡수 능력이 취약하고 충격 후 손상에 의해 압축강도 또한 매우 약하다는 결점이 있으므로 복합재 구조의 손상 연구는 매우 중요하다[1, 2].

*+ 조선대학교 항공우주공학과 교신저자(E-mail:cdgong@chosun.ac.kr)
* 조선대학교 항공우주공학과

본 연구에서는 탄소섬유/에폭시 면재, 알루미늄 허니컴 코어 샌드위치 복합재료의 압입 손상에 따른 잔류강도 특성 연구를 수행하였다. 샌드위치 복합재료 시편을 오토클레이브 성형법을 이용하여 제작하고, 손상 모사를 위하여 준정적 압입 손상을 통해 각 시편에 단계별 손상을 모사하였다. 손상이 없는 경우와 단계별 손상이 있는 시편을 각각 굽힘 및 압축 시험을 수행하여 시편의 손상 크기에 따른 변형 및 손상 거동과 강도를 확인하였다. 실험 결과와 이론적 해석 결과의 비교 분석을 위해 유한 요소 해석을 수행하여 구조 거동을 비교하였다.

2. 본 론

2.1 시편 제작

본 연구에서 허니컴 샌드위치 구조의 손상에 관한 특성을 확인하기 위해 연구 대상 시편을 제작하였다. 허니컴 샌드위치 복합재료 적층판 성형시 면재는 카본/에폭시 일 방향 프리프레그(carbon/epoxy unidirectional prepreg, 한국화이바 HT145/RS1222)를 상하면에 각 4장씩 $[0/90]_2$ 와 같이 적층하였다. 심재는 알루미늄 하니컴 코어(Al-3/8″-5052-0.0026″)를 사용하였다. 제작된 시편으로부터 ASTM을 참고하여 각 실험에 맞는 시편 규격으로 재단하였다. Fig. 1은 시편 제작 진행 과정을 나타낸 것이다. 시편 실험은 첫째 손상이 없는 상태의 굽힘 및 압축 시험을 수행한 시편과 준정적 압입 손상을 통해 단계적 손상이 모사된 시편 시험 결과와 비교하였다.

2.2 압입 손상 시험

굽힘 및 압축 시험은 본 연구팀이 보유하고 있는 10톤 인장압축 시험기(Universal Test Machine)를 사용하여 시험을 수행하였다. 먼저 손상이 없는 시편에 대한 3점 굽힘 시험을 위해 ASTM C393, D790을 참고 하여 시편 시험을 수행하였다[3, 4]. 지지부 사이의 거리(L)는 192mm이며, 폭(b)은 50mm이며, 상부의 고정지지부와 하부에 두 개의 지지부로 구성 되어있고 변위 속도는 0.5mm/min를 유지하였다. 압축시험은 ASTM C364를 참고하여 시험을 수행하였으며[5] 압입속도는 굽힘 시험과 동일하게 0.5mm/min을 유지하였다.

구조 손상 모사는 직경 10mm의 인덴터를 적용하여 압입 손상을 모사하였다. 압입 속도를 동일하게 유지하여 코어 두께의 70%까지 압입하면서 압입 하중과 압입량에 관한 데이터를 획득하였다. Fig. 2는 허니컴 샌드위치 복합재료 시편의 압축 하중-압입량 곡선을 보여 주고있다. 시험을 통해 얻은 시편의 하중-압입량 곡선을 통해, 각 시편에 적용할 손상 압입량을 세 단계로 나누어 손상을 가정하고, 손상 후 잔류 강도를 평가하였다[6]. Case 1은 압입에 의한 심재의 선형탄성 구간이 끝나는 시점으로 첫 번째 항복구간이며, Case 2는 코어의 탄성구간 이후 면재에 크랙이 진전되기 시작하는 구간이다. 마지막 Case 3은 심재의 붕괴와 더불어 면재의 크랙이 크게 진전되면서 더

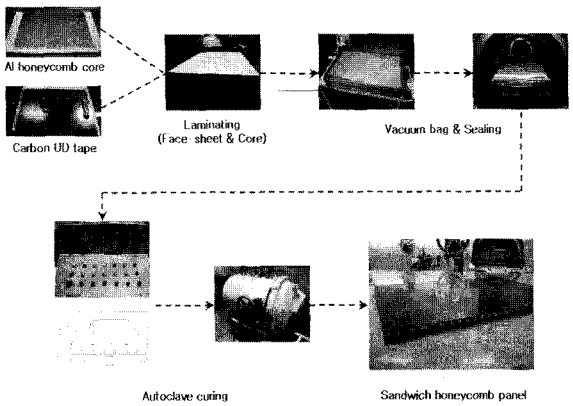


Fig. 1 Co-curing process flow of Al honeycomb sandwich panel.

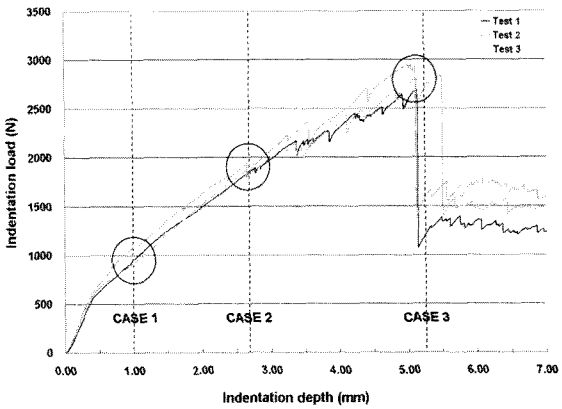


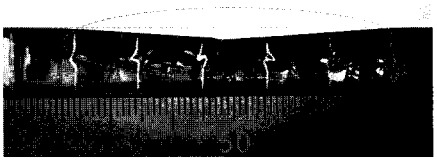
Fig. 2 Load-indentation depth of the quasi-static indentation.

이상 압입하중을 견디지 못하는 구간으로 압입 하중이 급격히 감소하는 구간이다. 따라서 세가지 Case를 압입 시험시 주요 변형 구간에 따라 구분하였다. Fig. 3~4는 압입에 의해 손상된 단면 형상과 압입량에 따른 면재의 손상부위 형상이다.

손상된 시편이 인장을 받는 경우와 압축을 받는 경우 두 가지에 대한 3점 굽힘 시험을 수행한 결과 두 가지 경우 유사한 경향을 보였다. 시편의 손상정도에 따른 결과를 보면, Case 1에 해당하는 경우 손상 전과 비교하여 동일한 결과를 보였다. 이는 1mm에 해당하는 압입량은 면재의 손상도 없었고, 코어에서만 국부적으로 좌굴이 생기는 시점으로 샌드위치 복합재료 시편의 강도에 큰 영향을 끼치지 못하였다. 하지만 일반적으로 손상이 있는 경우는 잔류강도가 감소하여야 하나 압입량이 1mm인 경우는 압입손상에 의한 잔류 굽힘 강도가 소폭 상승하였다. 이는 변형을 일으킨 시편 내부의 압축 잔류응력이 굽힘 강도를 증가시켜 준 것으로 판단된다[7]. 하지만 그 이상의 압입량에서는 강도의 저하가 오히려 급격하게 일어났다. Case 2에서는 2.7mm의 압입량으로 면재의 영구 압입이

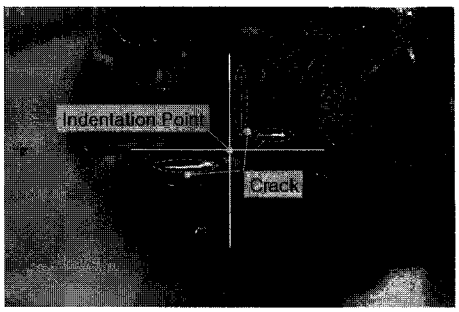
(a) CASE 1

(b) CASE 2

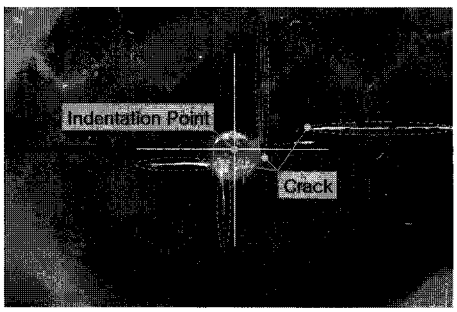


(c) CASE 3

Fig. 3 Cutting section of the indentation specimen.



(a) Indentation depth : 2.70mm

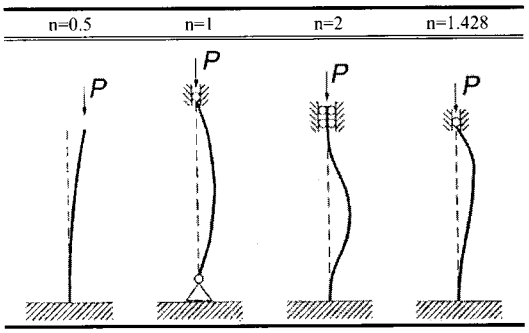


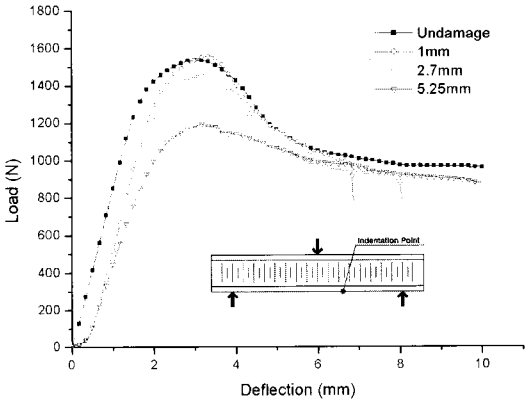
(b) Indentation depth : 5.25mm

Fig. 4 Cutting section of the indentation specimen.

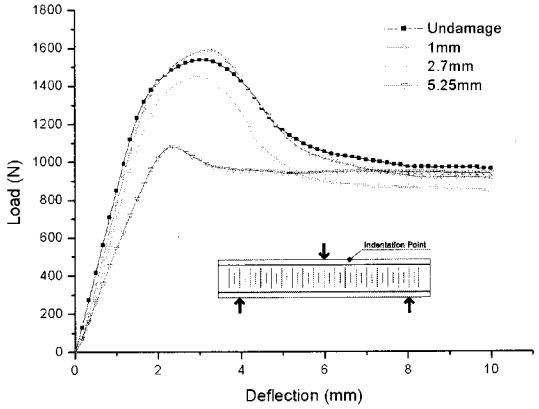
나타났고, 절단된 시편의 단면을 통해 코어의 붕괴가 일어난 것을 확인하였고 잔류강도를 비교해 보면 손상부위에서 인장,

Table 1 Euler's buckling cases





(a) Tension of indented side



(b) Compression of indented side

Fig. 5 Load-deflection curves according to 3-point bending tests.

압축 시 각각 4.7%, 5.1% 강도가 떨어진 것을 확인하였다. 압입량이 5.25mm인 Case 3에서는 앞 절에서 압입량 결정시 면재의 파괴가 일어났던 구간으로 앞 절에서 예상했던 것과 같이 현저한 잔류강도의 감소가 나타났다. 인장 시 본래 강도의 22.3% 감소했으며, 압축 시 조금 더 증가한 28.3%가량 잔류

강도가 감소하는 경향을 보였다. 복합재 구조의 압축 및 전단 강도보다 인장 강도가 우수한 일반적인 특성에 따라 본 연구에서도 손상부위가 인장인 경우 보다 대체로 압축인 경우 잔류강도의 감소가 크게 나타남을 확인하였다. Fig. 5, 6에 3점 굽힘 시험에 의한 손상 전후의 하중-변위 곡선을 나타내었다.

압축 시험은 ASTM C364를 참조하여 시험을 수행하였다. 시험결과 Fig. 7과 같이 손상 전보다 최대 압축하중이 크게 감소하였다. 이는 3점 굽힘 시험 결과와는 달리 Case 1을 적용한 시편 실험에서부터 손상부위를 중심으로 면재의 파괴가 생기면서 확연한 차이를 보였다. 하지만 면재의 손상이 없었던 Case 1 시편의 경우 손상이 없는 경우의 하중-변위 그래프와 거의 동일한 변화를 보이다 약 24.6kN에서 면재의 파괴가 발생하면서 급격히 하중이 감소하였다. Case 2, 3의 경우는 압입에 의해 이미 면재의 파괴가 발생한 경우이기 때문에 급격한 하중감소는 보이지 않았지만 전체적으로 면재의 파괴가 진전되면서 손상이 없는 시편의 경우보다 강도가 확연히 감소하였음을 확인하였다. 압입량이 증가할수록 최대 압축하중이 점차 감소하였고, Case 3에서는 손상이 없는 경우와의 비교에서 62.7%의 하중 감소를 보였다. 전체적으로 손상을 받은 시편이 압축을 받으며 심재의 심한 변형과 함께 굽힘이 발생하며, 최종적으로 면재 파괴가 진전되는 동일한 결과를 보였다. 본 연구에서 압축 파괴 모드는 Euler buckling의 파괴 모드가 확인되었으며 이론식과 비교 분석한 결과 Table 1에서 제시한 n=0.5에 해당하는 파괴 모드로 확인되었다.

2.3 시편 구조 해석

실험값과 이론값을 비교 검증하기 위해 3점 굽힘 시험용 샌드위치 복합재 구조 시편을 MSC. NASTRAN을 이용하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 시편의 모델링은 면재는 2차원 쉘 요소(QUAD4)를 사용하고, 심재는 3차원 솔리드 요소(HEXA8)를 사용 하였다. 실험조건과 동일하게 하단의 두 지지부 사이의 길이는 192mm이며, 폭은 50mm로 형상 및 하중조건의 대칭성을 이용하여 1/2모델링 후 해석을 수행하였다. 해석시 적용된 물성치는 Table 2에 명시하였다.

유한 요소 해석결과에서 얻은 하중에 따른 시편의 중앙지점에서의 변위와 실험에서 얻은 하중-처짐 곡선 데이터와 비교를 하였다. 선형탄성 영역에서는 이론값과 실험값이 일치하였고 유한요소 해석결과와는 전체적인 변형양상은 실험결과와 유사하였으나 결과 값에 있어서 이론값과는 다소 차이가 있었다. 선형영역 이후에서 발생하는 오차는 면재와 누름자 사이의 접촉에 의한 국부적 압입과 면재와 심재의 비선형 변화를 고려하지 않은 것에서 발생하는 오차일 것으로 판단된다. 3점 굽힘 유한 요소 모델링 모습과 시편의 변형 형상은 Fig. 8~9에 나타내었다. 해석 결과와 시험 결과의 비교 분석 데이터는 Table 3과 같다. 시편 시험시 변위는 변위게이지를 이용하여 측정하였고 유한 요소 해석 결과의 오차는 모델링 상의 요소에 의한 오차로 판단된다.

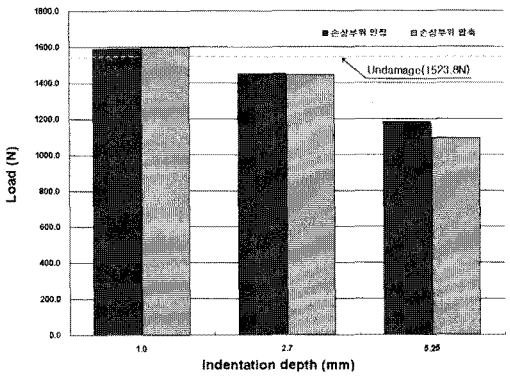


Fig. 6 Comparison of max. load on 3-point bending test after indentation.

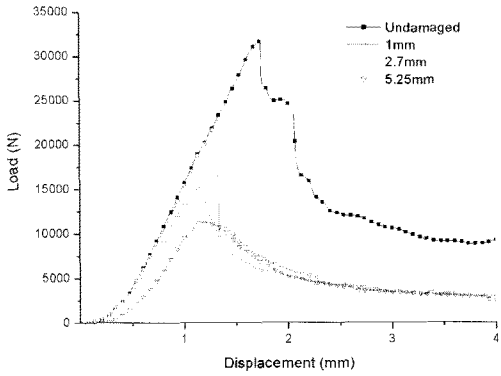


Fig. 7 Load-displacement curves of the edge-wise compressive tests.

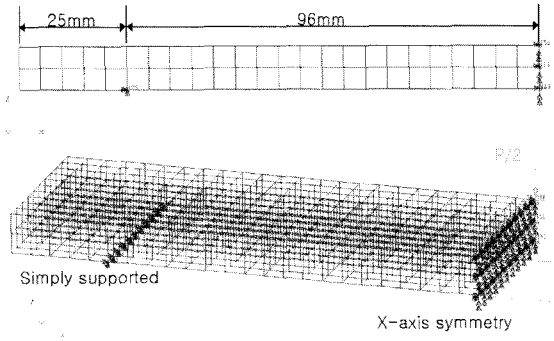


Fig. 8 Modeling shape of sandwich panel for 3-point bending FEM analysis.

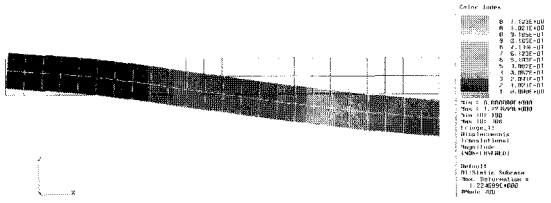


Fig. 9 Deflection shape of sandwich panel.

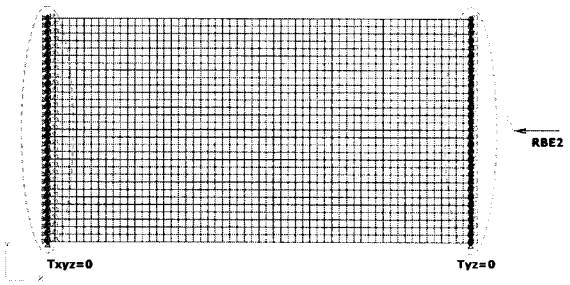


Fig. 10 Modeling shape of sandwich panel for edge-wise FEM analysis.

Table 2 Result of Load-deflection on the 3-point bending.

	E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	E_{33} (MPa)	ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}	G_{12} (MPa)	G_{23} (MPa)	G_{31} (MPa)
Carbon/Epoxy (HT145/RS 1222)	145,000	10,000	-	0.25	-	-	4,800	-	-
Al-Honeycomb (3/8″-5052 -0.0025″)	0.33	0.33	1370	0.991	0.0001	0.0001	0.08	180	180

Table 3 Result of Load-deflection on the 3-point bending

	Deflection (mm)		
Load (N)	Theory	FEM	Experiment
0	0	0	0
200	0.228	0.198	0.260
400	0.456	0.404	0.480
600	0.684	0.610	0.700
800	0.912	0.859	0.920
1000	1.140	1.020	1.160
1200	1.368	1.227	1.460
1400	1.596	1.433	2.030

Table 4 Results of the edge-wise compressive test

	Experiment	Theory	FEM
Buckling load (kN)	32.6	33.5	33.4

압축 시험 결과와 유한 요소 해석 결과 비교를 위해 3점 굽힘 해석 모델링과 동일한 방법으로 해석을 수행하였다. Fig. 10과 같이 압축 시험기 지그가 시편의 양 끝단을 고정하기 때문에 이에 적절한 경계조건 모사를 위해 RBE2요소를 사용하여 두께방향 변위를 고정하고 폭 방향 변위를 고정하는 하중 조건을 적용하였다.

해석 결과 좌굴형상은 Fig. 11과 같다. 좌굴하중 해석 결과는 1차 모드에서 이론값과는 다소 차이를 보이나 유사한 결과임을 확인하였다. 시험 결과와 약 2.4%의 오차를 보이며 이는 시편 시험에서 좌굴모드 발생 전 압축에 의한 면재의 파괴가 미소하게 먼저 발생하였기 때문에 발생하는 오차로 판단된다. Table 4에 해석 결과의 고찰 내용을 나타내었다.

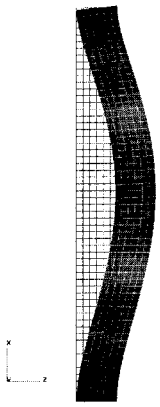


Fig. 11 Buckling shape of sandwich panel.

3. 결 론

본 연구에서 허니컴 샌드위치 구조의 손상에 따른 잔류 강도 특성 연구를 수행하였다. 손상이 없는 시편의 강도를 평가하기위해 3점 굽힘 시험과 압축 시험을 수행하였다. 시편의 손상 후 잔류강도를 평가하기 위해서 손상을 세 단계로 분류하여 잔류강도를 확인하였다.

1) 손상의 분류를 위해 시편에 준정적 압입 시험을 수행하여 얻어낸 하중-변위선도를 바탕으로 면재의 탄성영역(CASE 1), 면재와 심재의 소성영역(CASE 2), 그리고 면재의 크랙현상과 심재의 완전 붕괴가 발생되면서 강도가 급격히 감소하는 영역(CASE 3)으로 분류하였다. 위 결과를 바탕으로 굽힘 시편과 압축 시편에 각 단계별 손상을 적용하여 시험을 수행하였다.

2) 압입 손상 후 압축 강도와 굽힘 강도는 압입량이 클수록 저하하였다. 이는 압입시 압입하중이 시편의 면재층의 손상과, 심재의 변형을 일으킴으로서 시편의 기계적 강도를 저하시켰기 때문이다.

3) 길이방향 압축실험에서 손상의 증가에 따라 잔류강도가 감소하였고, 면재의 크랙 현상과 심재가 완전히 붕괴된 CASE 3단계 에서는 본래 강도보다 급격히 감소한 약 37%로 나타남을 알 수 있었다. 파괴 형상은 Euler buckling 형상으로 확인되었다. 이는 시편에 압축이 가해질 경우 주로 하중을 면재가 담당하는데, 면재의 심한 손상에서 기인하는 것으로 판단된다.

4) 3점 굽힘 시험에서는 손상부위가 인장일 경우와 압축인 경우로 각각 분류하여 시험을 수행하였다. 일반적으로 시편이 손상을 받은 경우 강도는 저하하나 CASE 1과 같이 손상정도가 적은 경우 오히려 잔류강도가 소폭 증가하였다. 이는 변형을 일으킨 시험편 내부의 압축 잔류응력이 굽힘 강도를 증가시켜 준 것으로 사료된다[7]. 하지만 손상정도가 그 이상인 CASE 2 와 CASE 3의 경우 손상부위를 중심으로 강도 저하가 급격히 발생하였다.

5) 유한 요소 해석을 통해 3점 굽힘 해석, 좌굴 해석을 수행하여 시험 결과 및 이론 결과와 비교 분석하였다. 해석 결과 시험 및 이론 결과와 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지방대학혁신역량강화(NURI) 사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1) John Newman, "Shearography NDT of Aerospace Structures," Advanced Testing Conference, 2006.
2) John Newman, "New Compact, Portable Shearography System for Composite Repairs," Airline Transportation Association 49th. NDT Forum, 2006.
3) ASTM C393 : Standard Test Methods for Flexural Properties of Sandwich Construction.
4) ASTM D790 : Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
5) ASTM C364 : Standard Test Methods for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Construction.
6) Maizlinda. I. Idris, Tania Vodenitcharova and Mark Hoffman, "Contact Damage Response of Carbon Fibre Skin/Closed-Cell Aluminum Foam Sandwich Composites," 16th ICCM Conference.
7) 윤흥수, "낙하식 충격에 의한 알루미늄 하니컴 샌드위치 복합재료의 변형 및 강도 특성" 한양대학교, 석사학위 논문, 2006.