복합재 Iso-Grid 패널 제작 및 좌굴시험

유재석*· 김광수*· 장영순*

Composite Iso-Grid Panel Production and Buckling Test

Yoo, Jae-Seok • Kim, Kwang-Soo • Jang, Young-Soon

Abstract

A composite Iso-grid panel is manufactured and tested by compressive load. Vertical stringers and side stringers are joined with skin by secondary bonding using a liquid type adhesive. Bonding fixtures were developed to attach the stringers to skin. A-scan was done for inspection of secondary bonding region. The out of displacement field is visualized by shadow moire system. The strain and vertical displacement are measured by strain gages and LVDT (Linear Variable Differential Transformer). A local buckling is occurred at all grid sections. After that, the final failure is occurred. The strain of side stringer is much less than that of vertical stringer and skin. Due to the side stringer, the local buckling is delayed. Therefore the ratio of the first buckling to failure load is greater than that of vertical stringer stiffened panel.

Key Words: Composite Iso-grid Panel, Buckling, Shadow moire, secondary bonding.

1. 서 론

구조경량화를 요구로 하는 구조체 특히 발사체에 있어서 기존의 알루미늄으로 구성된 동체를 비강도 비강성이 좋은 복합재 구조물로 대체하는 연구가 수행중이다 [1][2][3]. 복합재 동체는 구성은 등방성 재료와 같이 스킨, 스트링거로 구성된 세미-모노코크형식으로 제작된다. 하부 동체쪽은 축 하중이 주로 작용하므로 수직 스트링거로 된 세미 모노코크 형식을 많이 채택하고, 복합하중이 작용하는 상부 동체 iso-grid 형식의 복합재 동체가 사용된다. 복합재 iso-grid 동체는 제작이 어렵기 때문에 큰 구조물에서는 효과적으로 제작하는 방법들이 연구되었다[4][5]. 복합재 Iso-grid 동체는 복합재를 사용함으로써 무게 경량화 할 수 있고, Iso-grid 채택해서 복합하중에 대해 구조효율을 높일 수 있다.

* 한국항공우주연구원 구조그룹

본 연구에서는 복합재 Iso-grid 동체를 전체를 제작하기 전에 우선 패널단위의 복합재 Iso-grid을 제작하여 시험함으로써 복합재 Iso-grid 패널의 제작 및 파손특성을 파악하여 효율적인 Iso-grid 동체 개발을 할 수 있다. 본 연구에서 복합재 Iso-grid 패널을 2차 본딩으로 제작하여 좌굴 및 파손 시험을 수행하였다.

2. 제작

본 연구에서 제작한 복합재 iso-grid 패널은 스킨과 스트링거의 2차 본딩을 적용하여 제작하였다. 가장 좋은 방법은 일체 성형이겠으나 보통의 보강된 패널들과 다르게 경사진 보강재의 일체성형이 어렵다. 복합재 iso-grid 패널의 파손이 경사 보강재에서 일어나지 않는다면 2차 본딩도 적합한 방법이라고 할 수 있다.

그림 1은 설계 도면으로 스킨 (①), 수직 보강재 (②,③), 경사 보강재 (④,⑤) 및 시편을 고정하기위한 알루미늄 potting 가드 (⑥)로 구성되어 있다.

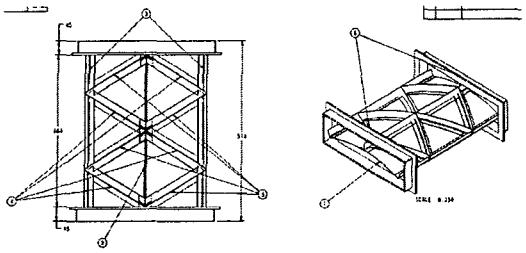

그림 1 복합재 Iso-grid 패널 조립도

전체적인 제작 순서를 살펴보면 스킨을 먼저 제작하고, 그 위에 수직 보강재를 2차 접합으로 결합한 후 경사 보강재를 2차 접합한다. 구체적인 성형절차는 아래 그림에 나타내었다. 수직 및 경사 보강재는 그림 2와 같은 성형치구에 적층한 후 autoclave에서 성형한다.

이렇게 제작된 스킨위에 그림 3,4와 같은 본딩 치구를 이용하여 수직 및 경사 보강재를 2차 접합한다. 2차 접합시 사용된 접착제는 HYSOL 사의 9309.3NA로 상온 경화용이다. 본딩치구의 스프링길이를 조절하여 2차 본딩에 적합한 3~4 psi 압력으로 접합하였다.

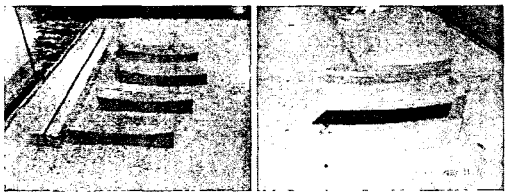

그림 2 수직 및 경사 보강재 성형치구

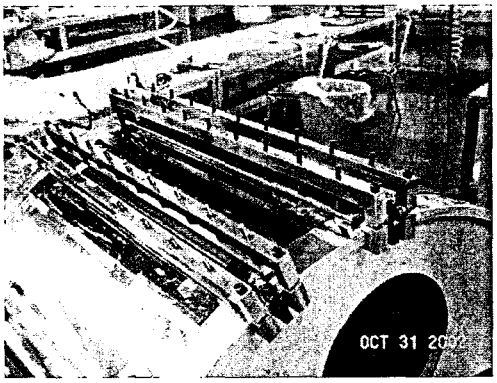

그림 3 수직 보강재 2차 접합

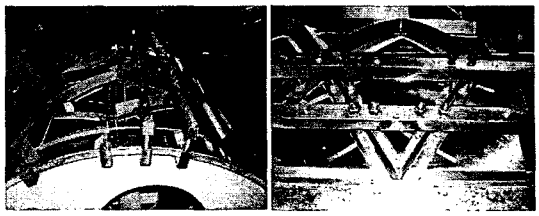

그림 4 경사 보강재 2차 접합

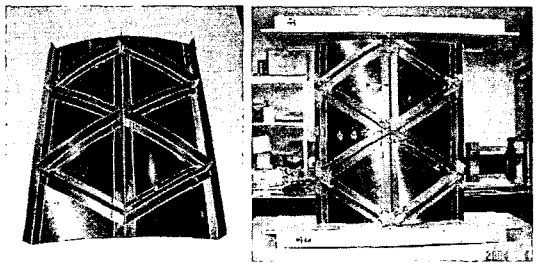

그림 5 보강재 및 potting이 접합된 iso-grid 패널 시편

수직 및 경사 보강재가 접합된 시편이 그림 5에 나타나 있다. 경사 와 수직 보강재가 만나는 부분에는 단섬유와 수지를 혼합하여 접합하는 형식으로 보강하였다.

3. 시험

그림 6 복합재 iso-grid 보강 패널 압축시험

복합재 iso-grid 패널시험은 MTS사의 25톤 만능 시험기 (model 810)를 사용하여 시험하였다. 압축 시험은 0.01mm/sec의 변위제어로 수행하였다.

그림 6은 iso-grid 시편이 장착된 사진으로, 변형률 측정을 위한 스트레인 게이지가 부착되어 있고, 변위측정을 위한 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)가 그림 6의 왼쪽 그림과 같이 좌우에 장착되어 있으며, 시편의 횡 방향 변위를 측정하기 위해서 그림 6의 오른쪽 그림과 같이 세 군데에 장착되어 있다. 전체적인 횡 방

향 변위분포를 보기 위해서 shadow moire 기법을 도입하였다. 시편에 장착된 grid sheet는 1mm 간격으로 0.4mm의 줄이 가로 방향으로 옵셋 인쇄되어 있으며, 조명은 바닥에서 45도 방향으로 시편을 비추고 있다. 이렇게 측정된 변위분포를 시편과 동일한 높이에서 비디오 카메라로 저장하였다.

4. 시험결과

복합재 iso-grid 패널 시험의 하중 및 변위 곡선은 그림 7과 같다. 그림 7은 MTS 장비의 stroke 대 하중 및 그림 6에 부착된 좌우 LVDT의 평균 변위 대 하중의 두 가지 선도를 나타냈다. 그림 7에서 두 선도의 수평축의 차이가 압축시험 치구의 변위를 나타낸다. 그림 7에서 보듯이 최초 좌굴은 40.8 KN에서 일어났다. 좌굴이 일어날 때 하중증가 없이 변위만 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 좌굴시점의 실제 캠코더 및 카메라 촬영을 통해도 알 수 있었다. 이후 4번째 국부좌굴까지 50 KN 이하에서 일어났다. 5번째와 6번째 좌굴은 서서히 점진적으로 일어나서 정확한 좌굴하중은 정하지 못하였다. 이후 시편 중앙 왼쪽의 수직 보강재와 스킨사이의 접착제의 de-bonding으로 시편이 파손되었고, 파손 하중은 70.8 KN 이였다. 자세한 좌굴 모드는 그림 8에 나타내었다. 좌굴은 전부 반경방향 중심쪽으로 일어났다. 파손 직전의 최대 횡방향 변위는 그림 9에서 보듯이 5.3 mm 정도로, 파손이 일어난 중앙 왼쪽 스킨 (DT 4)에서 일어났다.

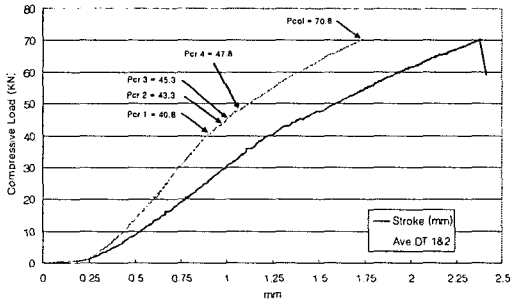

그림 7 복합재 iso-grid 패널의 하중 변위 곡선

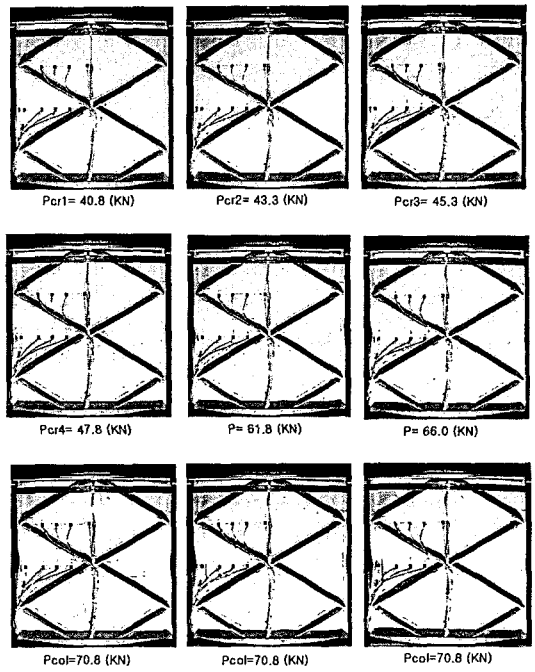

그림 8 복합재 iso-grid 패널의 좌굴모드 및 파손 사진

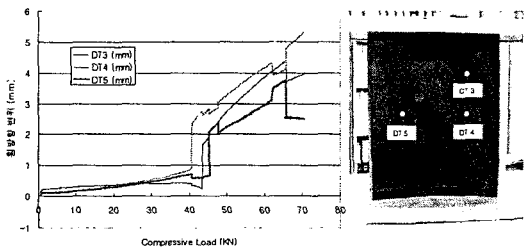

그림 9 패널의 횡방향 변위 선도

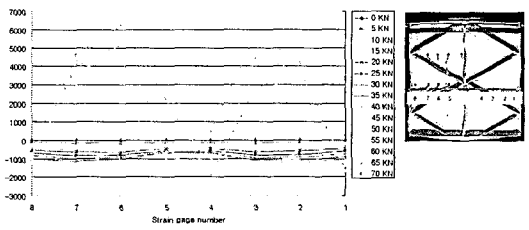

그림 10 작용하중에 따른 패널 중앙 뒷면의 변형률 분포

그림 10은 시편 중앙 뒷면의 변형률 분포를 나타낸 그림이다. 좌굴이 일어나기 전에는 압축하

중으로 인하여 시편이 전체적으로 압축을 받다가 좌굴이 일어난 순간부터 인장응력을 받는다. 이는 좌굴이 전부 패널 반경 중심으로 발생하므로 시편 안쪽의 변형률은 모두 양수 값을 가진다. 첫 번째 좌굴이 시편 중앙 왼쪽에서 일어났으므로 7번 6번 변형률 게이지가의 값이 크게 나타났고, 이후 오른쪽의 좌굴로 인하여 3번 2번 변형률게이지에서도 큰 값이 나타났다. 왼쪽 스킨의 최대 변형률은 하중 70.8 KN (파손하중)에서 6230 ($\mu\varepsilon$)이고, 오른쪽 스킨은 65 KN에서 5730 ($\mu\varepsilon$) 정도의 값이 측정되었다.

그림 11은 그림 10과는 다르게 모두 압축응력을 받는다. 좌굴발생시 시편의 정면이 좌굴 중심쪽 면이므로 압축응력을 받는다. 패널시편이 좌굴 전에 압축을 받고 또한 좌굴로 인한 추가적인 압축응력으로 인해 시편 정면에서 최대 응력이 발생한다. 시편 중앙 오른쪽의 최대 압축변형률은 하중이 70 KN일때 약 7000 ($\mu\varepsilon$) 이다.

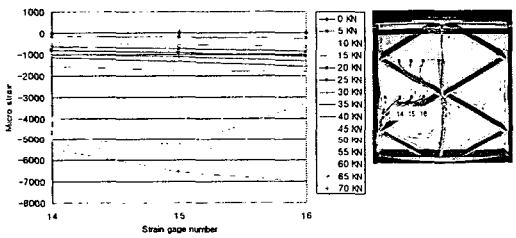

그림 11 작용하중에 따른 패널 중앙 앞면의 변형률 분포

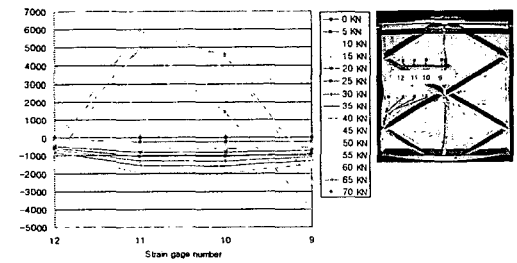

그림 12 작용하중에 따른 패널 왼쪽 상부 뒷면의 변형률 분포

그림 12는 상부 왼쪽 뒷면의 변형률분포이다. 그림 10과 비슷한 분포를 나타낸다. 최대 인장 변형률은 하중이 65 KN일때 5900 ($\mu\varepsilon$) 정도이다.

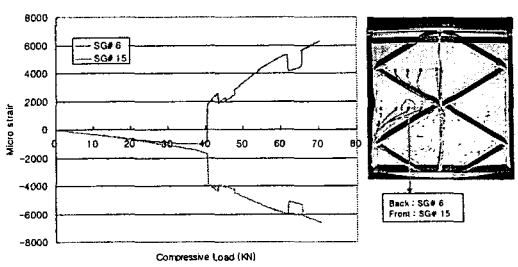

그림 13 Back to back 변형률 선도 (시편 중앙 왼쪽)

그림 13은 시편 중앙 왼쪽의 back to back 변형률 선도이다. 그림에서 보듯이 처음에는 같이 압축변형을 하다가 좌굴발생시에 앞면은 압축 뒷면은 인장응력을 받는다. 그림 13의 좌굴은 첫 번째 좌굴이므로 첫 번째 좌굴하중인 40.8 KN에서 가장 큰 변형률 변화를 보인다. 또한 시편 파손시 가장 큰 응력을 나타낸다.

그림 14는 경사 보강재 web의 back to back 변형률 선도이다. 그림에서 보듯이 경사 보강재는 수직 보강재 또는 스킨과 비교하여 아주 작은 변형률, 약 1/10 정도로 나타났다. 이것을 경사보강재에 큰 힘이 걸리지 않는다는 것을 의미한다. 경사보강재는 압축하중 초기에 프아송 효과로 인장응력이 나타나다가 일차 좌굴로 인하여 경사 보강재가 전체가 압축응력을 받는다. 압축응력을 받는 형태가 아래로 휘어지는 형태를 가진지 때문에 경사 보강재 윗면이 더 큰 압축을 받고, 아랫면이 윗면에 비해 상대적인 인장을 받는다. 발생하는 최대변형률은 파손 시, 경사 보강재 윗면에서 555 ($\mu\varepsilon$)로 나타났다.

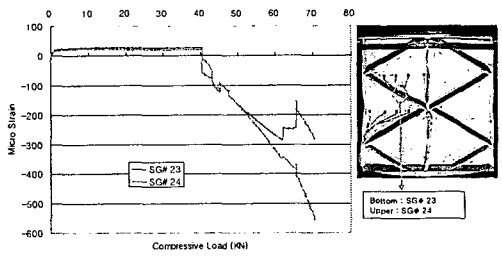

그림 14 왼쪽 경사 보강재 web의 back to back 변형률 선도

표 1 복합재 Iso-grid 패널 시험결과 정리

	Unit	Iso-Grid Panel	Panel 1 (UD) [2]
Measured Weight	kg	0.874	1.06
1st Skin Buckling Load, Pcr1	KN	40.8	80
2nd Skin Buckling Load, Pcr2	KN	43.3	88
3rd Skin Buckling Load, Pcr3	KN	45.3	105
4th Skin Buckling Load, Pcr4	KN	47.8	117
Max. Tensile Strain (Skin)	Micro Strain	6317	-
Max. Compressive Strain (Skin)	Micro Strain	7185	9450
Max. Compressive Strain (Stringer)	Micro Strain	6091	-
Panel Collapsed Load, Pcol	KN	70.8	198
Pcol / Pcr1	-	1.74	2.48
Pcol / Weight	KN/kg	81.0	186.8
Pcr1 / Weight	KN/kg	46.7	75.5

표 1은 iso-grid 패널시험 결과이다. 양쪽 potting 부분을 뺀 시편의 무게는 0.874 kg이다. 복합재 원통 보강 패널 시험결과 [1] 중 파손하중/무게비가 가장 큰 2차 접합 보강재 패널과 비교해 볼 때, 파손하중/무게비가 2배 이상 2차 접합 보강재 패널이 더 크다. 이것은 수직보강재의 개수와 단면관성모멘트가 차이나기 때문이다. iso-grid 패널의 수직 보강재는 왼쪽과 오른쪽이 반개, 중간이 한개 총 두개의 'ㅗ' 형식의 보강재가 있고, 기존의 복합재 패널은 hat 형의 보강재가 3개로 구성되어 있다. 그러나 파손하중/좌굴하중 비는 iso-grid 패널이 더 작다. 이것은 iso-grid의 경사 보강재가 스킨의 국부좌굴을 저지하기 때문에 경사 보강재가 없는 일반 복합재 패널보다 파손하중 대비 초기 좌굴하중이 더 늦게 일어난다.

5. 결론

본 연구에서는 복합재 iso-grid 시편의 압축시험을 수행하였다. Iso-grid 시편의 파손은 보강재로 둘러쌓인 스킨에서 좌굴이 순차적으로 일어난 후 최종파손이 일어났다. 파손지점은 왼쪽 수직 보강재 중간으로 스킨과 보강재가 떨어지는 debonding 이 일어났다. 스킨의 변형률이 7000 ($\mu\varepsilon$) 정도에서 파손이 일어났다. 시험결과에서 보듯이 외부하중이 압축만 작용할 경우에는 기존의 경사보강재가 없는 복합재 패널이 무게당 파손하중이 더 큰 것을 알 수 있었다. 압축하중에 의한 경사 보강재의 변형률을 보면 500~600 ($\mu\varepsilon$) 정도로 수직 보강재에 비해서 1/10정도 밖에 변형이 일어나지 않았다. 이것은 경사 보강재가 하중지지를 수직보강재에 비해 작게 하는 것이다. 그러나 경사 보강재로 인하여 파손 대비 좌굴을 늦출 수 있었다. 만약 압축하중의 정도가 작아지고 비틀림 등의 하중을 복합적으로 받는 하중일 때는 iso-grid 복합재 패널이 좀 더 효과적으로 하중을 지지할 수 있을 것이라 생각된다.

후 기

이 논문은 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

(1) 김광수, 유재석, 이호성, 장영순, "hat형 보강재를 갖는 복합재 보강패널의 이차 본딩 제작 및 압축시험", *항공우주학회 추계학술대회* 논문집(II) 2004, pp. 934-938.

(2) Thomas D. Kim, "Fabrication and testing of thin composite isogrid stiffened panel", *Composite Structures* No. 49, 2000, pp. 21-25

(3) Steven M. Huybrechts, et. al., "Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures", *Composites Part A*, No. 33, 2002, pp. 155-161

(4) Michael McCloy, et. al., "Fabrication of an Isogrid Fan Containment Case", *SAMPE Journal*, Vol 35, No. 1, January/February, 1999, pp. 22-29

(5) Dr. Edward Silverman, et. al., "Composite Isogrid Structures for Spacecraft Components", *SAMPE Journal*, Vol 35, No. 1, January/February, 1999, pp. 51-58