

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.10.963>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

굽힘하중을 받는 섬유 금속 적층판의 응력-변형을 예측을 위한 대변형 유한요소해석

염 경 미* · 이 종 수**

* 연세대학교 기계공학부

Finite Element Analysis of Large Deformation of Fiber Metal Laminates Under Bending for Stress-Strain Prediction

Kyung Mi Yeom* and Jongsoo Lee**

* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

(Received March 10, 2015 ; Revised July 30, 2015 ; Accepted July 31, 2015)

Key Words: Fiber Metal Laminates(섬유 금속 적층판), Metal Laminate(금속 적층판), Elastic Analysis(탄성 해석), Plastic Analysis(소성 해석), Elastic-plastic Stress-strain Behavior(탄소성거동), Large Deformation Analysis(대 변형 해석), 3-point Bending Test(3 점 굽힘 시험)

초록: 다양한 분야에서 금속 재료의 우수한 기계적 특성을 위해 경량화는 필수적이다. 최근에는 보다 효율적인 차체 경량화와 함께 내충격성 강화를 위하여 금속 부품 대신에 섬유 금속 적층판을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 경량화를 위해서 자동차 및 항공기에서 복합재료나 샌드위치 구조로 이루어진 섬유 금속 적층판이 유용하다. 하지만, 섬유 금속 적층판 형태에 따른 기계적 특성이 도출되지 않은 실정이다. 본 논문에서는 적층판 두께 조합에 따른 특성 비교를 위하여 두께를 인자로 하고, 섬유 금속 적층판의 완전 요인 배치법으로 실험을 계획한다. 또한 유한요소 해석을 사용하여 알루미늄 판과 섬유 금속 적층판을 탄성과 소성 해석을 한다. 이를 통해 적층판 두께 조합에 따른 섬유 금속 적층판 형태에 따른 기계적 특성을 분석하고, 굽힘 대변형 거동을 예측하는 유한요소 해석모델을 구축한다.

Abstract: Laminate structures are used in the automobile, aerospace, and display industries. The advantages of fiber metal laminates are well known. Fiber metal laminates are useful for reducing the weight and improving impact resistance. However, currently, the mechanical properties of fiber metal laminates are not derived. In this paper, we use thickness as a factor for comparing the properties of laminates of various thickness combinations. The properties fiber metal laminates are analyzed using design of experiments. In addition, the finite element method is used to analyze elastic and plastic strains of fiber metal laminates and aluminum plates. The final goal of this paper is to find a suitable finite element model of fiber metal laminates under bending.

- 기호설명 -

L : 전체 시편의 길이
 b : 전체 시편의 너비
 d : 전체 시편의 깊이

E : 탄성 계수
 σ : 응력
 ν : 푸아송 비
 σ_0 : 항복 응력
 δ : 인가변위
 α : 재료 상수
 m : 재료 가공경화 지수

† Corresponding Author, jleej@yonsei.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

복합재료는 기존의 금속재료에 비해 높은 비강도, 비강성, 에너지 흡수성 등 우수한 기계적 특성을 지니고 있으며, 항공기, 자동차, 중공업 분야 등 폭넓게 사용되고 있다. 특히 자동차 산업에서는 차량의 연비 상상을 위한 연구가 다각도로 진행되고 있으며, 차량의 경량화를 통해서 차량의 연비 상상을 추구하여 화석 연료의 사용을 줄임과 동시에 배기가스의 배출량을 감소시키는 연구에 대한 관심이 증대되고 있다. 이미 차량의 내장재 및 고강도, 고강성이 요구되지 않는 부품에 대해서는 복합재료가 적용되어 차체 경량화가 이루어지고 있으며, 최근에는 보다 효율적인 차체 경량화와 함께 내충격성 강화를 위하여 금속 부품 대신에 섬유 금속 적층판(fiber metal laminates, FMLs)을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.^(1,2)

섬유 금속 적층판은 일반적으로 샌드위치 구조로서 바깥쪽의 금속과 그 사이의 복합재료로 구성되어 있다. 이러한 섬유 금속 적층판은 자동차의 각 부품에 사용되는 금속 재료와 강성은 비슷하거나 크고 무게가 가볍고 충격에 대한 저항성이 크기 때문에 금속으로 제작된 부품에 대한 대체가 가능하여 차량 경량화에 효과적일 수 있다. 특히, 샌드위치 복합재료는 무게 대비 굽힘 강성을 획기적으로 증가시킬 수 있는 구조 형태로서, 굽힘을 받는 구조에 적용할 경우 기존의 단순 적층 복합재료 구조물 대비 최대 30% 가량의 중량 절감이 가능하다. 이처럼, 금속 샌드위치 구조는 무게대비 강도/강성 측면에서 많은 이점을 가지고 있다. 그렇기 때문에 자기 강화형 폴리 프로필렌을 사용한 섬유 금속 적층판은 실용화를 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 ABAQUS 6.11 를 사용하여 정확한 물성이 나와있는 알루미늄 합금판의 굽힘 거동 모델을 구축하였다. 구축한 굽힘 거동 모델의 정확성을 검증하기 위해 금속에서 정밀하게 나타낸 Ramberg-Osgood 식을 사용하였다. 이렇게 검증된 모델을 사용하여

알루미늄과 자기 강화형 폴리 프로필렌의 두께 조합에 따른 섬유 금속 적층판 형태에 따른 기계적 특성을 분석하고, 굽힘 대변형 거동을 예측하는 유한요소 해석모델을 구축한다.

2. 섬유 금속 적층판 물성

일반적으로 자동차에 광범위하게 사용되고 있는

복합재료인 폴리프로필렌은 탄소섬유나 유리섬유로 사용되고 있으나, 재사용이 불가능하기 때문에 환경 오염의 가능성이 높아 향후 발전 가능성이 높지 않다. 이를 해결하기 위해 복합재료의 환경 오염 문제 및 재사용에 관한 연구가 이루어지고 있다. 최근에 동일한 고분자 재료에서 매트릭스와 섬유를 만들어서 제작한 자기 강화형 폴리 프로필렌(self-reinforced polypropylene, SRPP)은 보강재가 기지재가 동일한 폴리머이기 때문에 재활용이 쉬운 재료이다.

이런 장점으로 자기 강화형 폴리프로필렌에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이를 활용한 섬유 금속 적층판에 관한 연구 역시 다각도로 이루어지고 있다.⁽⁴⁾

알루미늄 합금은 섬유 금속 적층판 제조에 사용되는 가장 일반적인 금속으로서, 본 연구에서 사용되는 알루미늄 합금은 자동차 업계에서도 폭넓게 사용되는 재료이다. 금속재료로서 알루미늄합금은 다른 재료에 비해 소성 가공이 쉽고, 얇은 박막으로 쉽게 제조 할 수 있으며, 또 알루미늄 합금은 가볍고 강한 재료특성으로 굽힘 시험에 적절하다.^(5,6) 본 연구에서는 알루미늄 합금(aluminum alloy, 6060-T5)을 유한요소해석에 사용 하였다.⁽⁷⁾

섬유 금속 적층판의 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌 및 섬유 금속 적층판의 기계적 물성치와 시편의 사이즈를 Table 1에 나타내었고, 섬유 적층판의 구조를 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 Model specification and material properties

Material property	Al	SRPP
Overall Length (mm)	32	
Thickness (mm)	0.2 or 0.3	
Width (mm)	12.7	
Young's modulus (GPa)	70	5
Poisson's ratio	0.35	0.15
Yield Stress (GPa)	270	180
Density(g/cm ³)	2.7	0.92

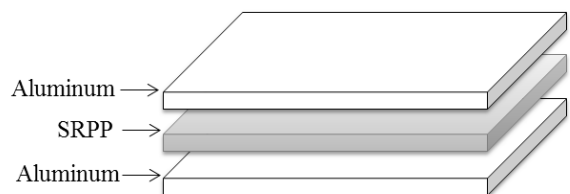


Fig. 1 Structure of FMLs

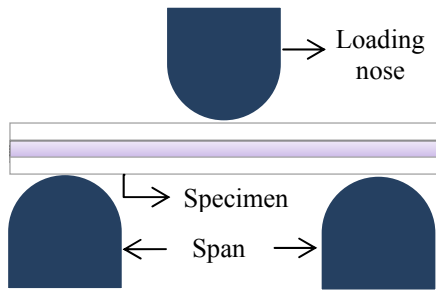


Fig. 2 Structure of 3-point bending test

3. 3 점 굽힘 시험 모델링

본 연구에서는 섬유 금속 적층판 굽힘 거동에 대한 이상적인 기계적 물성치를 예측하기 위한 대표적인 굽힘 방법인 3 점 굽힘(three-point bending) 방법을 사용하였다. 3 점 굽힘 시험 모델링은 ASTM 기반으로 실제 시험과 유사하게 설정하였다.⁽⁸⁾ 이와 같이 설정한 시뮬레이션으로 굽힘 거동과 이에 따른 응력과 변형률을 살펴 볼 것이다.^(9,10)

3 점 굽힘 시뮬레이션을 유한요소 해석을 위해 ABAQUS 6.12/Explicit 를 사용하였다. 3 점 굽힘 시뮬레이션의 구조를 Fig. 2 에 나타내었다. 3 점 굽힘 시뮬레이션은 Fig. 2 의 상부에 위치한 인가노즈(loading nose)가 있고, 이는 시편의 가운데를 눌러준다. Fig. 2 의 하부에 위치한 스패ن(span)이 있고, 이는 시편의 하부에서 시편을 지지해준다.

해석에 사용되는 모델링된 시편인 섬유 금속 적층판은 0.2 mm 또는 0.3mm 의 두께를 가지는 알루미늄 합금을 바깥쪽에 두고 그 사이에 0.2 mm 또는 0.3mm 의 두께를 가지는 자기 강화형 폴리프로필렌으로 구성되었다. 3 점 굽힘을 실시하기 위해 ASTM D790-10 의 규격을 참고하여 시편을 모델링을 하였다.⁽¹¹⁾

4. 유한 요소 해석 조건 및 이론

4.1 해석 조건

본 유한요소해석은 섬유 금속 적층판의 각 층을 개별적으로 분리하여 각 층간의 상호작용을 모사하기 위하여 3 층으로 구성된 솔리드 요소(solid element)로 모델링 하였다. 솔리드 요소의 종횡비를 맞추기 위하여 깊이 방향으로 치수를 매우 작게 하였다. 시편의 이상적 거동을 위해 섬유와 금

속 사이의 접촉제에 관한 물성은 무시하고 모델링 하였다.

격자 타입은 연속체 역학의 대변형 발생시 보다 정확하고 빠른 해석이 가능하도록 C3D8R 을 사용하였다. 격자의 크기는 길이와 폭은 동일한 0.3mm 의 요소를 생성하였고, 두께 부분에 대해서는 조밀한 격자를 위해, 0.2 mm 의 두께에서는 5 개의 요소를 생성하였고, 0.3 mm 두께에서는 7 개의 요소를 생성하였다. 전체적으로 균일한 크기의 육면체를 사용하였고, 요소의 수에 따른 결과 수렴성과 정확성을 분석하여, 두께 0.2 mm 시편에서 총 24,027 개의 요소와 29,954 개의 절점을 생성하였고, 두께 0.3mm 시편에서는 총 26,964 개의 요소와 32,508 개의 절점을 생성하였다.

각 시편의 하부 양끝단과 스패니 맞닿는 부분에 접촉 조건을 적용하였다. 박막 시편에 처짐이 일어나기 때문에 해석 시 노드들끼리 침투가 일어날 수 있다. 침투를 방지하기 위해 수직 거동(normal contact)은 강성 접촉(hard contact)으로 면 접촉(surface-to-surface)을 이용하였다. 접촉면 접선 방향 거동(tangential behavior)은 페널티 방법(penalty method)으로 등방성 마찰계수는 0.1 로 하였다. 마찰계수는 윤활제의 사용 여부 및 성형 수행 환경에 따라 달라지므로 정확한 측정값을 얻기 어렵기 때문에, 일반적인 금속 소재의 마찰계수로 알려져 있는 0.1 로 설정하였다. 접촉 쌍(contact pair)의 상대적 움직임에 대해서는 가장 일반적인 접근 방법인, 접촉면에 대해 접선 방향으로 접촉 구속을 부여하여 거동하는 유한-이동(finite-sliding)으로 하였다. 또한, 섬유 금속 적층판의 경우, Al 층과 SRPP 층 사이를 묶음 접촉(tie contact)방법으로 고정해주었다.

경계조건은 오직 수직방향으로만 이동이 발생하도록 수평방향의 노드들을 고정하고, 변위제어 방법으로 중심에 노드들을 변화시켜 시편 모델의 가운데가 처질 수 있도록 하였다. 시편 중심에 가하는 변위제어 방법은 인가노즈를 변형체로 모델링을 하여 시편의 전체 길이(overall length)의 가운데 절점들에 변위를 부여하였다.

섬유 금속판의 두께가 길이의 2% 이하로 붕괴하기 직전까지 전단변형을 무시하고 굽힘에 의한 변형만 발생한다고 가정하였다 또한, 이종 재료 적층 시 발생하는 박리현상은 무시하였다.

ABAQUS 6.12 를 이용한 3 점 굽힘 시험을 Fig. 3 에 나타내었다.

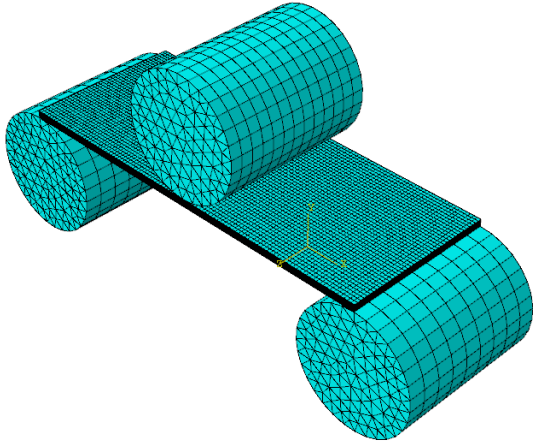


Fig. 3 Finite element model

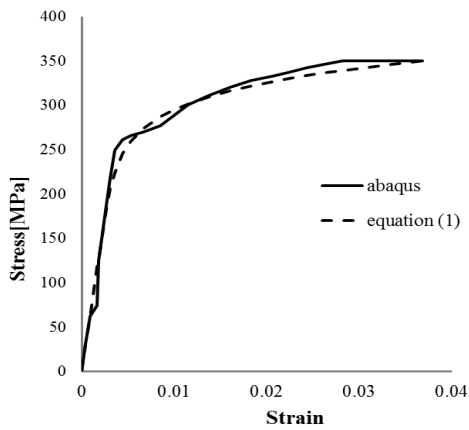


Fig. 4 Comparison of stress-strain curves

4.2 유한요소 해석 모델의 검증

응력과 변형률의 이론과 본 시뮬레이션 해석결과와의 오차를 비교하기 위하여 Ramberg-Osgood 이론을 이용하여 Case-1의 알루미늄 합금 단층의 유한요소해석결과와 응력-변형률 선도를 관찰하였다. Ramberg-Osgood는 알루미늄과 마그네슘을 포함한 금속에서 정밀하게 나타낸 식이다. 본 연구에서 제시한 예제에서는 알루미늄 합금을 사용하였기 때문에 Ramberg-Osgood 식을 도입하였다. Ramberg-Osgood 선도 상수는 $\alpha=3/7$, $m=10$, $\sigma_0 = 260$ MPa로 선정하였다.^(12,13)

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma_0 \alpha}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \quad (1)$$

Ramberg-Osgood 이론과 유한요소해석의 폰-미세스(von-mises stress)의 RMSE(Root Mean-Square Error)는 12.207로 이론의 평균값인 243.02 MPa의 5%인 신뢰성 있는 결과를 얻었다.

Table 2 Full factorial design

Factor	X ₁ (Al Thickness)	X ₂ (SRPP Thickness)	X ₃ (Loading Displacement)
Level	2	2	7

해석 결과는 전체 시편에 대한 ABAQUS 6.12를 이용하여 두께 2.0 mm 알루미늄 단층에 인가 변위를 0 ~ 3.0 mm를 가했을 때 폰-미세스 응력의 최대값과 평면 내 주 탄성 변형률(In-Plane Principal Elastic Strain)의 결과와 알루미늄 시편의 응력-변형률 이론인 Ramberg-Osgood 비교결과를 Fig. 4에 나타내었다.

4.3 완전요인배치 실험계획법

해석을 시행하기에 앞서 효율적인 실험방법을 설계하기 위하여 완전 요인 배치법(full factorial design)으로 실험을 설계 하였다.⁽¹⁴⁾ 완전요인배치법의 인자는 알루미늄 판의 두께, 자기 강화형 폴리프로필렌의 두께와 인가 변위(loading displacement)로 선정하였다. 두께는 각각 0.2 mm, 0.3 mm로 2 수준, 인가 변위는 0.1 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 7 수준으로 총 28회 시뮬레이션 하였다.

이후, 섬유 금속 적층 판과의 비교를 위해 알루미늄 합금의 단일 층의, 각각 두께 변위는 0.6 mm, 0.7 mm, 0.8 mm, 0.9 mm의 4 수준과 인가 변위는 0.1 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 7 수준으로 총 28회 시뮬레이션을 추가로 시행하였다. 이를 Table 2에 나타내었다.

5. 섬유 금속 적층판의 조합에 의한 경향분석

5.1 섬유 금속 적층 판의 중량 비교

두께에 따른 단층 알루미늄 판과 섬유 금속 적층판 각각 4개의 모델을 만들고 비교하여, 중량 절감 17~28%가 되었음을 확인하였다. 각 경우와 중량비를 Table 3에 나타내었다.

5.2 샌드위치 판과 단일 알루미늄 판 응력비교

자기 강화형 폴리프로필렌의 두께가 응력에 미치는 경향성을 확인하기 위하여 ABAQUS를 이용한 해석을 수행하였다. 해석 결과는 전체 시편에 대한 ABAQUS 6.12를 이용하여, 각 Case

Table 3 Gross weight of each structure

Case	Thickness (mm)		Weight (g)	Weight Ratio (%)
1	Al alloy Plate	0.6	0.6583	-
2		0.7	0.7681	-
3		0.8	0.8778	-
4		0.9	0.9875	-
5	Fiber Metal Laminates	0.2/0.2/0.2	0.5137	78.03
6		0.2/0.3/0.2	0.5511	72.75
7		0.3/0.2/0.3	0.7331	83.52
8		0.3/0.3/0.3	0.7705	78.02

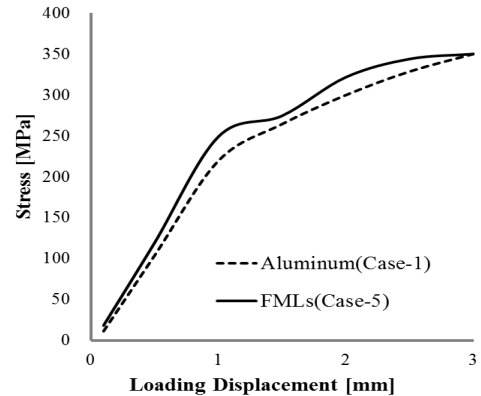
1~8의 모델에 인가 변위를 0 ~ 3.0 mm에 대한 Von Mises Stress의 최대값이다. 같은 두께끼리 비교를 위해 총 두께 0.6 mm인 Case-1 & 5과 총 두께 0.7 mm인 Case-2 & 6과 총 두께 0.8 mm인 Case-3 & 7과 총 두께 0.9 mm인 Case-4 & 8로 묶어서 설명하였다.

두께 0.6 mm인 단층 알루미늄 합금의 Case-1과 두께 0.2 mm인 알루미늄 합금 위에 두께 0.2 mm인 자기 강화형 폴리프로필렌 판 위에 두께 0.2 mm인 알루미늄 합금판을 적층한 Case-5의 인가 변위에 따른, 폰-미세스 응력 선도를 비교를 Fig. 5(a)에 나타내었다.

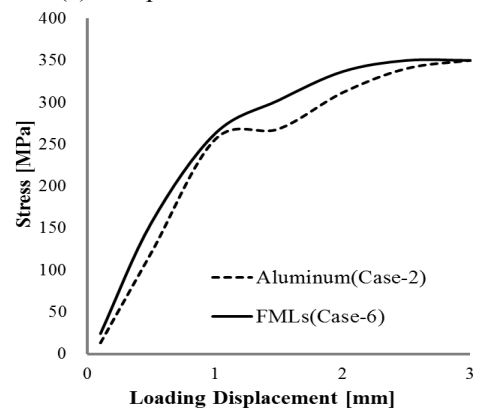
두께 0.7 mm인 단층 알루미늄 합금의 Case-2과 두께 0.2 mm인 알루미늄 합금 위에 두께 0.3 mm인 자기 강화형 폴리프로필렌 판 위에 두께 0.2 mm인 알루미늄 합금판을 적층한 Case-6의 인가 변위에 따른, 폰-미세스 응력 선도를 비교를 Fig. 5(b)에 나타내었다.

두께 0.8 mm인 단층 알루미늄 합금의 Case-3과 두께 0.3 mm인 알루미늄 합금 위에 두께 0.2 mm인 자기 강화형 폴리프로필렌 판 위에 두께 0.3 mm인 알루미늄 합금판을 적층한 Case-7의 인가 변위에 따른, 폰-미세스 응력 선도를 비교를 Fig. 5(c)에 나타내었다.

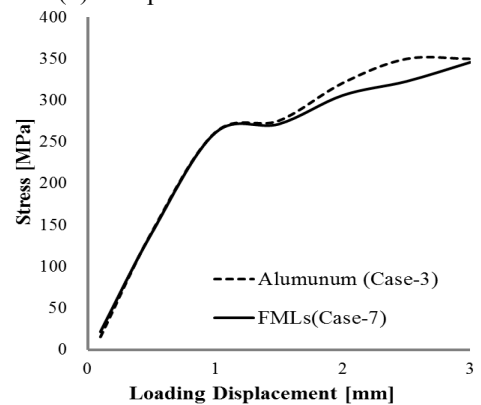
두께 0.9 mm인 단층 알루미늄 합금의 Case-4과 두께 0.3 mm인 알루미늄 합금 위에 두께 0.3



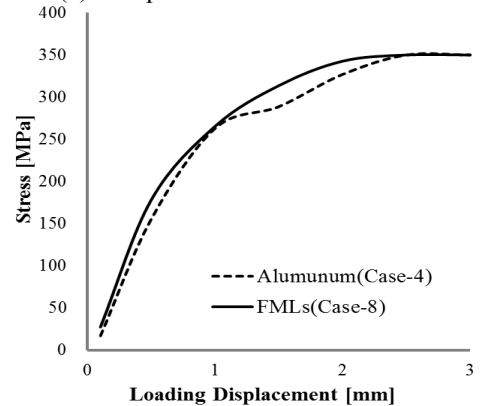
(a) Comparison Case-1 and Case-5



(b) Comparison Case-2 and Case-6



(c) Comparison Case-3 and Case-7



(d) Comparison Case-4 and Case-8

Fig. 5 Comparison of FMLs and aluminum plate

Table 4 Thickness and SRPP ratio

Case	Total Thickness (mm)	SRPP Thickness (mm)	Ratio (%)
5	0.6	0.2	33.3
6	0.7	0.3	42.9
7	0.8	0.2	25.0
8	0.9	0.3	33.3

mm 인 자기 강화형 폴리프로필렌 판 위에 두께 0.3 mm 인 알루미늄 합금판을 적층한 Case-8 의 인가 변위에 따른, 폰-미세스 응력 선도를 비교를 Fig. 5(d)에 나타내었다.

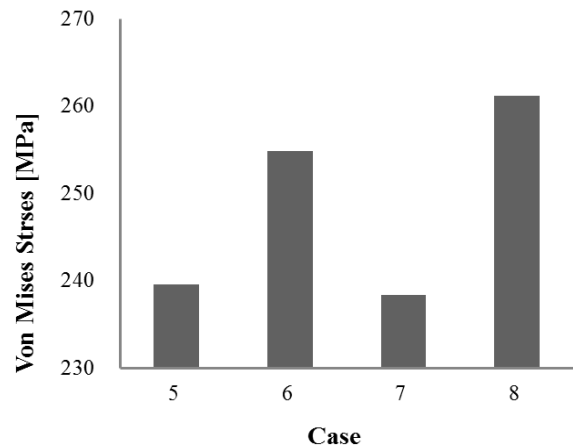
그림에서 보여지듯이 알루미늄과 자기 강화형 폴리프로필렌 응력은 유사하게 나타났다. Fig.5 (a), (b), (d)에서는 섬유 금속 적층판이 더 높은 응력 선도를 나타낸다. 반면에 Fig.5 (c)에서는 섬유 금속 적층판이 더 낮은 응력 선도를 나타냈다.

Case 5~8 중에서 알루미늄 대비 자기 강화형 폴리 프로필렌이 가장 적은 Case 7 의 경우는 알루미늄 보다 낮은 응력 선도가 나타났다. 자기 강화형 폴리프로필렌의 비율에 따라 응력-변형률 선도가 달라짐을 알 수 있었다. 전체 두께와 자기 강화형 폴리프로필렌의 두께의 비를 Table 4 에 나타내었다. 또한 알루미늄 합금판과 자기 강화형 폴리프로필렌의 두께에 따른 응력, 변형률이 유사한 경향성 확인을 하였다

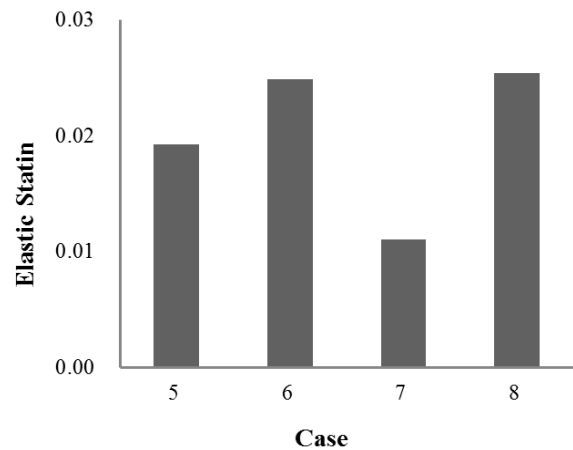
알루미늄판과 자기 강화형 폴리프로필렌을 적층한 섬유 금속판 인 Case-5,6,7,8 의 4 가지 경우에 대해 0.1~3.0 mm 인가변위를 가할 때, AI 과 SRPP 층 전 영역에 대한 응력, 탄성 변형률 소성 변형률의 최대값을 Fig. 6 에 나타내었다. 해석 결과는 전체 시편에 대한 ABAQUS 6.12 를 이용하였다.

Fig. 6(a)으로부터 자기 강화형 폴리프로필렌 0.2 mm 을 적층한 Case-5 와 Case-7 이 유사한 폰-미세스 응력 결과를 가지고 있었고, 자기 강화형 폴리 프로필렌 0.3 mm 를 적층한 Case-6 와 Case-8 이 유사한 폰-미세스 응력결과를 가지고 있음을 알 수 있다. 탄성 변형률과 소성 변형률도 유사한 경향을 보임을 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)에 나타내었다.

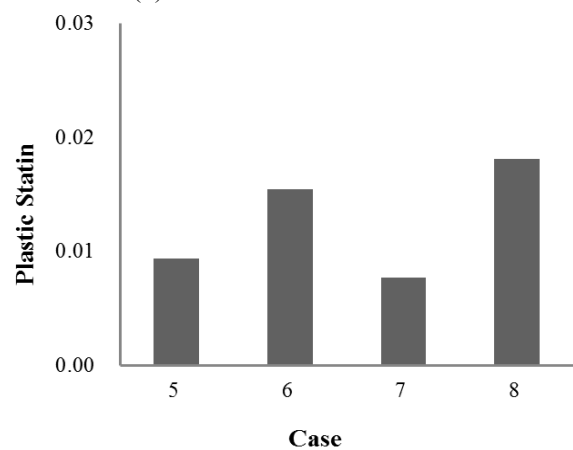
단일 알루미늄 합금층 7 mm 인 Case-3 의 응력과



(a) Stress of fiber metal laminates



(b) Strain of fiber metal laminates



(c) Plastic strain of fiber metal laminates

Fig. 6 Fiber metal laminates

변형률의 변화를 Fig. 7 에 나타내었다. Case-3 과 Case-7 은 Fig. 5 와 Fig. 6 에서 가장 낮은 응력과 변형률을 나타내었다. 두께 0.3 mm 인 알루미늄 합금 위에 두께 0.2 mm 인 자기 강화형 폴리프로필렌 판 위에 두께 0.3 mm 인 알루미늄 합금판을 적층한 Case-7 의 인가 변위 3.0 mm 에서의 응력과 변형률

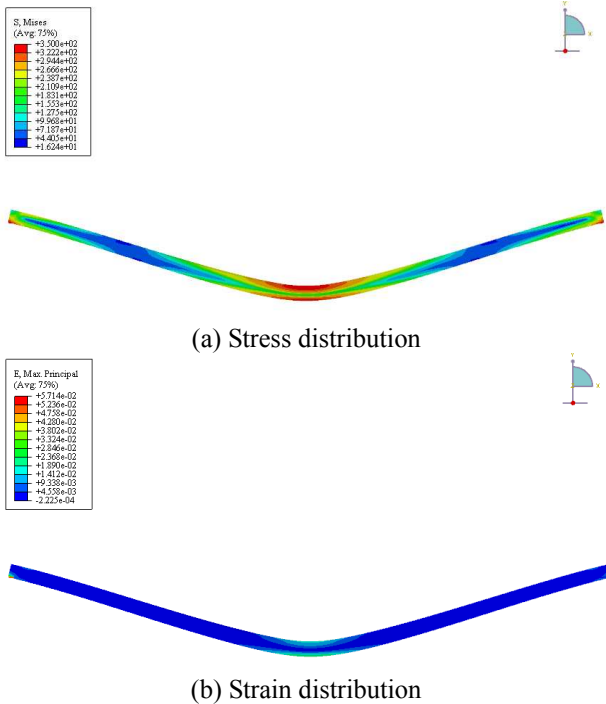


Fig. 7 Stress and strain distribution of Al alloy plate (Case-3)

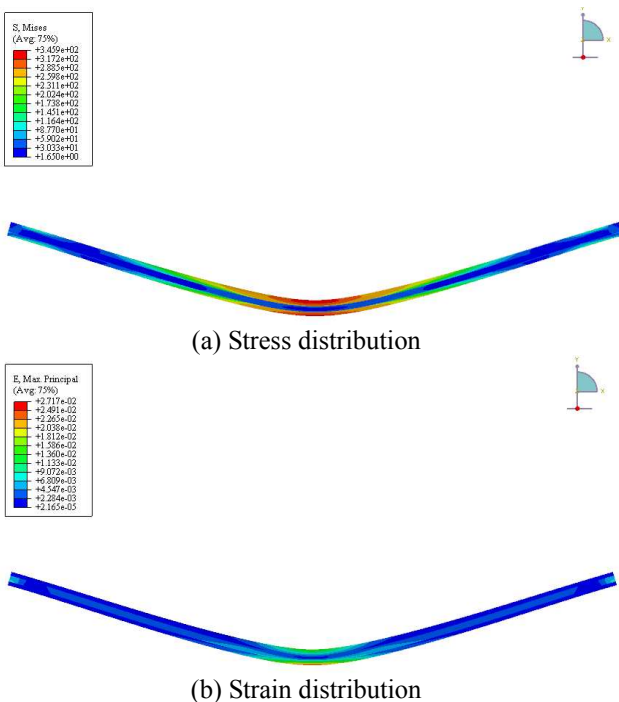


Fig. 8 Stress and strain distribution of FML (Case-7)

단면을 Fig. 8 에 나타내었다.

단일 알루미늄 합금판(Fig. 7)와 섬유 금속 적층판(Fig. 8)을 비교할 때, 알루미늄 합금판이 전체층에 높은 응력이 나타났고, 이에 비해 자기 강화형 폴리프로필렌 층에 국부적 변형을 하는

경향이 나타났으며, 섬유 금속 적층판의 주변부의 응력과 변형률이 급격히 변화함을 알 수 있었다.

6. 결론

유연한 구조물은 손상이 없이 변형되는 것을 지칭한다. 3 점 굽힘 시뮬레이션을 ABAQUS 6.12 로 구현하여 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌의 샌드위치 판의 굽힘에 따른 대 변형을 구현하였다

모델의 신뢰성을 검증하기 위해, 이론을 바탕으로 단일 층의 알루미늄 합금 판의 응력-변형률을 관측하였다. 알루미늄 판, Case-1 일 때의 Ramberg-Osgood 응력-변형률 이론과 오차는 RMSE 12.207 으로 평균 응력 243.02 MPa 의 5%인 신뢰성 있는 결과를 얻었다. 이 모델을 사용하여 실용화를 위해 자기 강화형 폴리 프로필렌을 사용한 섬유 금속판의 적층 변화와 인가 변위에 따른 굽힘 응력 경향을 예측하였다.

자기 강화형 폴리프로필렌을 사용함으로 알루미늄 합금 단층에 비교하여 섬유 금속 적층판, 중량 절감 28~17%가 되었음을 확인하였다.

섬유 금속판의 인자는 알루미늄 합금 판과 자기 강화형 폴리프로필렌 판의 두께 2 수준과 인가 변위를 7 수준으로 변화시켜 탄-소성 거동을 관측하였다. 거동은 동일한 두께의 알루미늄 단일 판과 유사한 거동을 보임을 알 수 있었고, 두 모델의 가장 큰 차이점은 동일한 인가 하중을 받을 때 섬유 금속판의 바깥 쪽 알루미늄 판에 국부적 집중 변형이 발생함을 알 수 있었다. 즉, 섬유 금속판의 적층의 중간 층인 자기 강화형 폴리프로필렌은 알루미늄 단일층보다 응력을 작게 받고, 낮은 변형이 일어난 것을 알 수 있었다.

참고문헌 (References)

- (1) Cho, K.-D., Ha, S.-R., Kang, K.-H., Kim, J.-E. and Yang, S.-C., 2012, "An Experimental Study on the Mechanical Properties of T-Joints Structure Using CFRP/Al Honeycomb Sandwich Composite," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.29, No.3, pp.313~318.
- (2) Lee, B.E., Kim, J., Kang, B. S. and Song, W. J., 2013, "Numerical Study of the Formability of Fiber Metal Laminates Based on Self-reinforced Polypropylene," *Transaction of Materials Processing*, 2013, Vol.22, No.3, pp.150~157.
- (3) Kim, S. J., Kim, T.-U. and Kim, S. H., 2014, "The

- Study on Structural Performance of Fiber Metal Laminates”, *Aerospace Engineering and Technology*, Vol.13, No.1, pp. 20~26.
- (4) Kang, D.S., Lee, B.E., Park, E. T., Kim, J., Kang, B. S. and Song, W. J, 2014, “Analytical Study for the Prediction of Mechanical Properties of a Fiber Metal Laminate Considering Residual Stress,” *Transaction of Materials Processing*, Vol.23, No.5, pp.289~296.
- (5) Kim, C. I., Yang, S. H. and Kim, Y. S., 2012, “Prediction of Formability of Aluminum Alloy 5454 Sheet,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.36, No.2, pp.179~186.
- (6) Kim, J. C. and Cheong, S. K., 2012, “Effect of Oxide Film Formation on the Fatigue Behavior of Aluminum Alloy,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.36, No.4, pp.421~428.
- (7) Gere, J.M., 2008, “Mechanical Of Materials” Vol.7, Cengage Learning, Stamford, pp 992~993.
- (8) Hong, C. H., Lee, J. H. and Lee, H., 2008, “Mathematical Expressions for Stress-Strain Curve of Metallic Material,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.32, No.1, pp.21~28.
- (9) Steeves, C. A. and Fleck, N. A., 2004, “Collapse Mechanisms of Sandwich Beams with Composite Faces and a Foam Core, Loaded in Three-Point Bending. Part I: Analytical Models and Minimum Weight Design,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, No.4, pp. 561~583.
- (10) Kim, D.H., Ahn, J-H., Choi, W. M., Kim, H-S., Kim, T. -H., Song, J., Huang, Y. Y., Liu, Z., Lu, C. and Rogers, J. A., 2008, “Stretchable and Foldable Silicon Integrated Circuits,” *Sci.*, Vol. 320, No. 5875, pp. 507~511.
- (11) ASTM international, 2010, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials,” D790-10.
- (12) Kim, J. S., Kim, Y. J., and Kim, Y. J., 2002, “Engineering J-Integral Estimation for Internal Axial Surface Cracks in Cylinders(I),” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.26, No.8, pp. 1672~1679.
- (13) Gere, James M., 2008, “Mechanical Of Materials” Vol.7, Cengage Learning, Stamford, p. 173.
- (14) Oh, S. K., Lee, K. K., Suh, C. H., Jung, Y. C., and Kim, Y. S., 2011, “Shape Optimization of Multilayer Bellows by Using Sequential Experimental Design,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.35, No.9, pp.1007~1013.