

잔류응력을 고려한 섬유 금속 적층판의 기계적 물성치 예측에 관한 이론적 연구

강동식¹ · 이병언² · 박으뜸² · 김 정² · 강범수² · 송우진[#]

Analytical Study for the Prediction of Mechanical Properties of a Fiber Metal Laminate Considering Residual Stress

D. S. Kang, B. E. Lee, E. T. Park, J. Kim, B. S. Kang, W. J. Song

(Received April 9, 2014 / Revised May 28, 2014 / Accepted June 2, 2014)

Abstract

Uniaxial tensile tests were conducted to accurately evaluate the in-plane mechanical properties of fiber metal laminates (FMLs). The FMLs in the current study are comprised of a layer of self-reinforced polypropylene (SRPP) sandwiched between two layers of aluminum alloy 5052-H34. The nonlinear tensile behavior of the FMLs under in-plane loading conditions was investigated using both numerical simulations and a theoretical analysis. The numerical simulation was based on finite element modeling using the ABAQUS/Explicit code and the theoretical constitutive model was based on the volume fraction approach using the rule of mixture and a modification of the classical lamination theory, which incorporates the elastic-plastic behavior of the aluminum alloy and the SRPP. The simulations and the model are used to predict the in-plane mechanical properties such as stress-strain response and deformation behavior of the FMLs. In addition, a post-stretching process is used to reduce the thermal residual stresses before uniaxial tensile testing of the FMLs. Through comparison of both the numerical simulations and the theoretical analysis with the experimental results, it is concluded that the numerical simulation model and the theoretical approach can describe with sufficient accuracy the actual tensile stress-strain behavior of the FMLs.

Key Words : Fiber Metal Laminates, Uniaxial Tensile Tests, Modified Classical Lamination Theory, Rule of Mixture, Post-stretching

1. 서론

복합재료는 기존의 금속재료에 비해 높은 비강도, 비강성, 에너지 흡수성 등 우수한 기계적 특성을 지니고 있으며, 항공우주분야에서 우주왕복선이나 항공기 핵심부품에 폭넓게 사용되고 있다[1, 2]. 또한, 차체의 경량화와 내충격성을 증대시키기 위해 주로

자동차의 내장재 위주로 복합재료를 적용하던 추세에서, 최근에는 자동차의 범퍼(bumper)나 임팩트 빔(impact beam) 등의 차체 구조물에 금속 대신 복합재료를 적용하여 보다 효과적인 차체 경량화가 이루어지는 연구를 진행하는 추세이다[3]. 금속 부품을 사용하는 대신 복합재료를 사용하는 경우에 중량은 약 30% 이상, 그리고 부품의 수는 약 30~75% 감소

1. 부산대학교 첨단정밀공학 협동과정

2. 부산대학교 항공우주공학과

Corresponding Author : Industrial Liaison Innovation Center, Pusan National University, E-mail:woodysong@pusan.ac.kr

한다고 알려져 있다[4]. 하지만 복합재료의 경우, 수직 충격 하중에 대한 충격 저항의 취약성, 부분 파손 시 수리의 어려움 그리고, 수분 흡수에 의한 성능 저하 등의 단점을 가지고 있어 금속재료와 복합재료의 적층을 통한 섬유 금속 적층판(fiber metal laminates, FMLs)의 적용에 관한 연구가 많이 진행되고 있다[5]. 특히, 항공우주 및 자동차 제조 업계에서는 유리섬유 강화 플라스틱(glass-fiber-reinforced plastic, GFRP) 또는 탄소섬유 강화 플라스틱(carbon-fiber-reinforced plastic, CFRP) 그리고, 폴리프로필렌(polypropylene)과 금속재료를 적층한 섬유 금속 적층판이 폭넓게 사용되고 있고[6~9], 최근에는 GFRP나 CFRP를 대신하여 보강재(fiber)와 기지재(matrix)가 동일한 폴리머 재료로 만들어진 자기강화형 폴리프로필렌(self-reinforced polypropylene, SRPP)과 같은 열가소성 복합재료와 알루미늄 합금을 교대로 적층한 복합재료를 제안하여 새로운 수송기계 구조용 복합소재로서의 적용성에 관한 연구가 진행되고 있는 실정이다[10, 11]. 하지만 열가소성 수지를 이용한 섬유 금속 적층판의 경우는 열가소성 수지가 온도에 의해 용융되는 현상이 발생하거나 통전이 되지 않는 현상이 발생할 수 있으므로, 자동차 도장공정과 같은 고온 공정이나 점 용접(spot welding)과 같은 제작 공정에서의 적용에 한계점을 가질 수 있다.

본 논문에서는 단축 인장하중 상태에서 섬유 금속 적층판의 기계적 물성치를 예측하기 위하여 자기 강화형 폴리프로필렌과 알루미늄 합금을 적층한 섬유 금속 적층판에 대한 인장시험과 함께 유한요소 모델링을 통한 수치적 해석을 수행하였다. 또한, 섬유 금속 적층판의 응력-변형률 관계를 예측하기 위하여 체적 분율 접근법(volume fraction approach)과 알루미늄 합금 판재의 탄-소성 거동을 고려한 고전적층 이론(classical lamination theory)의 수정 모델을 사용하여 섬유 금속 적층판의 기계적 물성치 예측에 관한 이론적 연구를 수행하였다. 이와 함께, 섬유 금속 적층판 제작시 각 재료의 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 잔류 응력을 고려한 인장시험을 추가적으로 수행하였고, 이론적 예측을 통해 실험 및 해석 결과와 비교하였다.

2. 섬유 금속 적층판 제작 및 단축 방향 기계적 물성 실험적 평가

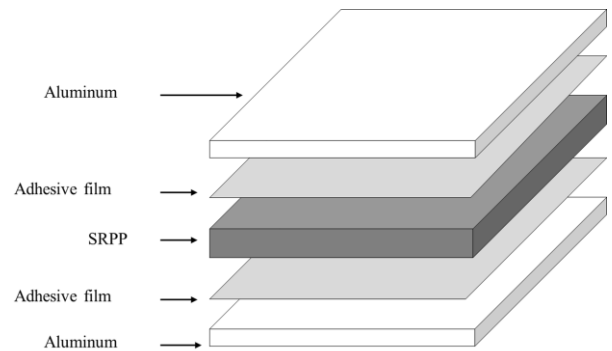


Fig. 1 Layup structure of the fiber metal laminates

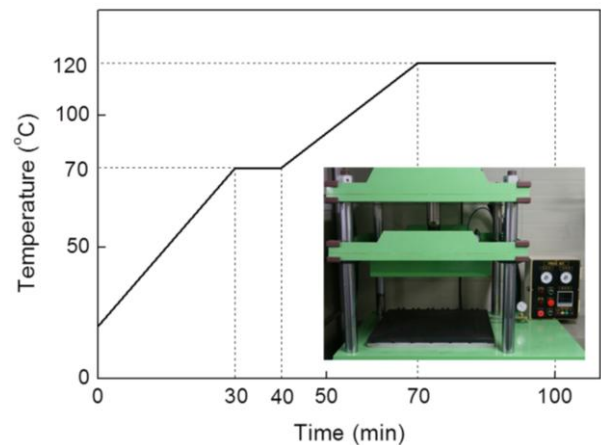


Fig. 2 Curing temperature with respect to time of the manufacturing process of the FMLs

2.1 섬유 금속 적층판의 구성요소 및 제작 과정

알루미늄 합금은 섬유 금속 적층판 제조에 사용되는 가장 일반적인 금속으로서, 본 연구에서 사용한 알루미늄 합금 50 계열은 자동차 업계에서도 폭넓게 사용되는 재료이며, 밀도는 $2,830\text{kg/m}^3$, 종탄성계수는 68.5GPa , 그리고 파단 연신율은 10%이다. 또한, 독일의 Curv社에서 제작된 자기 강화형 폴리프로필렌은 보강재와 기지재가 동일한 폴리머로 제작되어 재활용하기 쉬운 열가소성 재료이며, 밀도는 920kg/m^3 , 녹는점은 175°C 이다.

본 연구에서 사용된 섬유 금속 적층판은 Fig. 1과 같이, 두께 1mm의 SRPP와 두께 0.5mm의 알루미늄 합금, 그리고 접착필름을 적층하여 제작하였다. 각 적층 재료의 상호 접착성을 증가시키기 위하여 재료의 표면은 공업용 알코올을 사용하여 이물질 제거하였다. 섬유 금속 적층판의 제작은 Fig. 2와 같이 hot-press plate의 내부 압력을 0.4MPa, 진공압을

0.096MPa로 설정하여 섬유 금속 적층판 내부의 기공을 제거하였으며, 각 재료의 원활한 적층을 위하여 접착필름이 용융되는 온도를 최대 온도로 설정하여 섬유 금속 적층판을 제작하였다. 열을 가한 후, 각 적층 재료의 열팽창계수 차이에 의한 수축에 의해 굽힘 현상(bending effect)을 최소화하기 위하여 본 연구에서는 자연대류로 서서히 냉각하였다.

2. 2 단축 인장시험

모든 시편은 ASTM E8[12]의 규격을 참고하여 제작하였으며, 압연방향(rolling direction)을 기준으로 0°, 45°, 90°방향의 자기 강화형 폴리프로필렌과 알루미늄 합금 그리고 0°, 45°방향의 섬유 금속 적층판의 응력-변형률 관계, 파단 연신율 그리고 종단성계수를 측정하기 위하여 단축 인장시험을 수행하였다. 만능시험기 MTS를 사용하여 인장시험을 수행하였으며, 시편 고정부 마찰 면에 의한 영향을 줄이기 위하여 시편 끝 부분에 추가적으로 지그를 부착하였다. 알루미늄 합금, 자기 강화형 폴리프로필렌 그리고 섬유 금속 적층판의 치수는 각각 200mm×20mm×0.5mm, 250mm×15mm×1mm, 175mm×25mm×2mm이다.

일반적으로, 섬유 금속 적층판이 경화된 후 냉각시키는 과정에서 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌의 열팽창계수가 다르기 때문에 잔류응력이 발생하게 된다. 알루미늄 합금의 열팽창계수가 자기 강화형 폴리프로필렌보다 크기 때문에, 알루미늄 합금에는 인장 잔류응력이 남게 되고, 자기 강화형 폴리프로필렌에는 반대로 압축 잔류응력이 남게 된다. 경화 후 온도구배로 인해 발생하는 내부 잔류응력은 알루미늄 합금의 균열 발생시 균열의 확산을 가중시키고, 또한 항복강도의 감소를 유발한다[13]. 이러한 현상을 최소화하기 위하여, 1%내외의 소성변형을 시편에 부가하여 잔류응력을 감소시키는 방법이 적용되고 있다[14].

이러한 후-인발 공정(post-stretching)을 거쳐 가공된 섬유 금속 적층판의 경우 알루미늄에는 압축 잔류응력이, 자기 강화형 폴리프로필렌에는 인장 잔류응력이 작용하게 된다. 이와 같은 잔류응력의 역전 현상은 섬유 금속 적층판의 항복강도 증가를 가져오게 되며, 외부로부터 인장하중이 작용할 때 알루미늄 층의 압축 잔류응력이 균열 발생을 방지하는 역할을 하게 되어 피로특성이 향상된다[13].

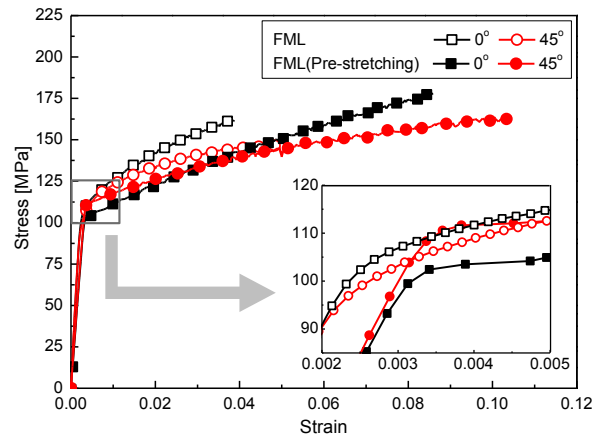


Fig. 3 Comparison of stress-strain curve before and after 1% post-stretching

Table 1 Material properties of the aluminum alloy and SRPP

	Material properties	Test (0°, 45°, 90°)
Aluminum alloy	Young's modulus (GPa)	68.92 / 66.67 / 66.70
	Yield strength (MPa)	188 / 178 / 182
	Ultimate Strength (MPa)	270 / 259 / 270
SRPP	Young's modulus (GPa)	4.04 / 2.84 / 3.53
	Yield strength (MPa)	18.76 / 15.19 / 8.01
	Ultimate Strength (MPa)	157.8 / 60.7 / 154.0

Table 2 Material properties of the FMLs

Material properties	Test (0° / 45°)
Young's modulus (GPa)	32.13 / 32.70
Yield strength (MPa)	105.0 / 110.33
Ultimate strength (MPa)	178.27 / 158.19

섬유 금속 적층판의 후-인발 공정 전후의 인장 시험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼, 0°방향에 대한 파단 연신율은 약 45.2% 증가 되었고, 45°방향에 대해서는 약 48% 증가 하였다. 또한, 잔류응력은 Fig. 3의 확대된 그래프에서 볼 수 있듯이, 0°방향에 대한 탄성과 소성영역 사이에서 약 10MPa 감소 하였다는 것을 알 수 있다. 방향 별 단축 인장시험을 통하여 측정된 알루

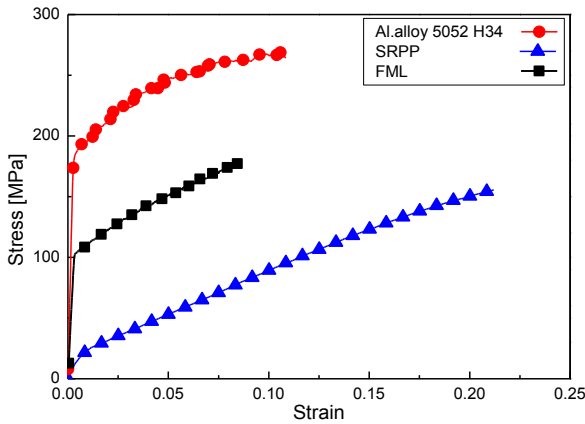


Fig. 4 Comparison of stress-strain curve of the 0° aluminum alloy, the SRPP and FMLs

미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌 및 섬유 금속 적층판의 기계적 물성치는 Table 1,2에 각각 정리 하였다.

0° 방향에 대한 알루미늄 합금, 자기 강화형 폴리프로필렌 그리고 섬유 금속 적층판의 응력-변형률 곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보여지듯이 섬유 금속 적층판의 응력 선도는 알루미늄과 자기 강화형 폴리프로필렌 특성의 산술 평균값과 유사하게 나타났으며, 섬유 금속 적층판의 파단 연신율은 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌보다 낮게 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용된 Al 5052-H34와 자기 강화형 폴리프로필렌의 신장도가 다르기 때문에 가열 후 냉각 과정에서 수축되는 길이의 차이가 발생하며, 이로 인해서 각 층의 내부에서 발생하는 접착력이 반대방향으로 작용되었기 때문으로 보여진다.

3. 단축 인장하중 상태에서 섬유 금속 적층판 기계적 물성치에 대한 이론적 평가

섬유 금속 적층판의 이론적 모델링은 종탄성계수와 단축 인장하중 모드에서의 기계적 물성치를 예측하기 위해 수행되었다. 섬유 금속 적층판의 기계적 물성치를 도출하기 위하여 체적분율과 고전 적층 이론을 기반으로 하여 도출된 결과들을 비교하였다. 체적분율을 이용한 이론적 해석은 섬유와 기지재료(matrix) 각각의 고유성은 무시하고, 알루미늄과 자기 강화형 폴리프로필렌은 균일한 직교 이방성 판재라고 가정하여 정리하였다[15].

$$\sigma_y^{FML} = v_f^{AL} \cdot \sigma_y^{AL} + (1 - v_f^{AL}) \cdot \sigma_y^{SRPP} \quad (1)$$

$$\sigma_u^{FML} = v_u^{AL} \cdot \sigma_u^{AL} + (1 - v_u^{AL}) \cdot \sigma_u^{SRPP} \quad (2)$$

$$E^{FML} = v_f^{AL} \cdot E^{AL} + (1 - v_f^{AL}) \cdot E^{SRPP} \quad (3)$$

E , σ_y 그리고 σ_u 는 각각 종탄성계수, 항복강도, 극한강도를 의미하고, v_f 는 체적분율(volume fraction)를 의미한다. 또한 위 첨자로 표현된 FML, AL 및 SRPP 는 각각 섬유 금속 적층판, 알루미늄 합금, 그리고 자기 강화형 폴리프로필렌을 의미한다.

자기 강화형 폴리프로필렌의 경우 금속에 비해 상당히 낮은 강도를 가지고 있다고 알려져 있기 때문에 본 연구에서 사용된 섬유 금속 적층판의 구성성분 재료에 대한 탄-소성 거동을 개략적으로 Fig. 5와 같이 가정할 수 있으며, 이러한 관계는 탄-소성 거동이 파괴 점까지 계속해서 일어난다고 가정한다. 섬유 금속 적층판의 응력-변형률 곡선에서 비추어 보면, 오직 단축 인장하중 조건과 축대칭일 경우 탄-소성 구간에 대하여 모든 층의 일 차원 응력을 고전 적층 이론을 바탕으로 아래의 식으로 표현할 수 있다[16]. 섬유 금속 적층판의 탄성거동에 대하여는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_y^{FML} = \frac{E^{FML}}{E^{AL}} \cdot \sigma_u^{AL} \quad (4)$$

$$\sigma^{FML} = \left(\frac{(E \cdot t)^{AL} + (E \cdot t)^{SRPP}}{t^{FML}} \right) \cdot \epsilon^{FML} \quad (5)$$

또한, 섬유 금속 적층판의 소성거동에 대해서는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E^{FML} = \left(\frac{(E_{pl} \cdot t)^{AL} + (E_{pl} \cdot t)^{SRPP}}{t^{FML}} \right) \quad (6)$$

$$\sigma^{FML} = E^{FML} \cdot \epsilon^{FML} + \sigma_y^{AL} \cdot \frac{t^{AL}}{t^{FML}} \left(1 - \left(\frac{E_{pl}}{E_{el}} \right)^{AL} \right) \quad (7)$$

알루미늄 합금의 두께(t)는 0.5mm이고, 자기 강화형 폴리프로필렌의 두께는 1mm, 그리고 접착 필름의 두께는 적층재료의 두께에 비해 상대적으로 얇기 때문에 무시 하였다.

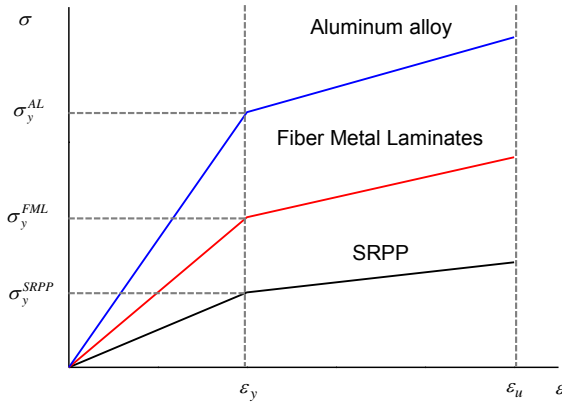


Fig. 5 Elastic-plastic behavior of the constituent materials of the FMLs

앞서 기술한 바와 같이, 각 재료의 열팽창계수가 상이하기 때문에 열을 가한 후 냉각과정에서 잔류 응력이 발생할 수 있다. 평형 방정식과 두 재료의 변형률은 동일하다는 적합조건을 이용하여 잔류응력을 계산할 수 있으며[17], 이를 통해, 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌 층에 남은 잔류응력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_r^{AL} = (\alpha^{AL} - \alpha^{SRPP}) \cdot \Delta T \cdot \frac{E_{SRPP} \cdot E_{AL} \cdot t_{SRPP}}{E_{SRPP} \cdot t_{SRPP} + E_{AL} \cdot t_{AL}} \quad (8)$$

$$\sigma_r^{SRPP} = (\alpha^{SRPP} - \alpha^{AL}) \cdot \Delta T \cdot \frac{E_{SRPP} \cdot E_{AL} \cdot t_{AL}}{E_{SRPP} \cdot t_{SRPP} + E_{AL} \cdot t_{AL}} \quad (9)$$

Fig. 2의 경화 사이클에서 보듯이, 경화 온도는 120°C이고, 30°C 상온 상태로 서서히 냉각 시켰으므로 ΔT는 90°C 이다. 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌 각각의 종탄성계수와 열팽창계수인 $\alpha^{AL} = 74 \times 10^{-6} / ^\circ C$, $\alpha^{SRPP} = 24 \times 10^{-6} / ^\circ C$ 을 식 (8), (9)에 대입하면, 알루미늄과 자기 강화형 폴리프로필렌의 잔류응력은 각각 $\sigma_r^{AL} = 19.84MPa$ 과 $\sigma_r^{SRPP} = -9.91MPa$ 임을 알 수 있다.

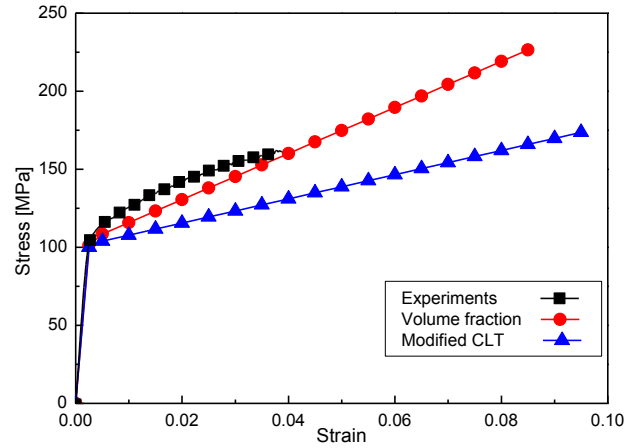
섬유 금속 적층판의 응력-변형률 관계는 식 (5)와 (7)을 사용하여 계산할 수 있고, 필요한 변수들은 Table 3에 나타내었고, 결과들을 정리하여 Table 4와 Fig. 6에 나타내었다. 특히, 1%의 소성변형을 초기에 시편에 부가하여 잔류응력을 감소시키는 방법을 적용하여 실험한 결과를 앞서 계산한 잔류 응력을 적용한 이론적 계산 결과와 비교하여 Fig.6에 나타내었다.

Table 3 Parameter for the theoretical calculations

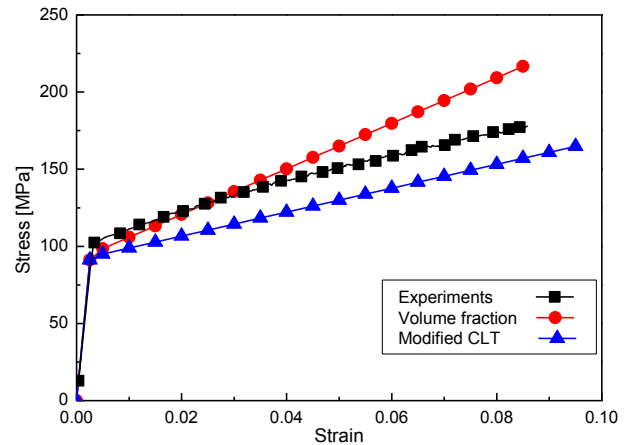
Materials	E_{el}	E_{pl}	σ_y	σ_u
Aluminum	68530	880	173	268
SRPP	3700	670	9.34	157.8

Table 4 Comparison of between the experimental and calculation results

FML	Experiments	Volume Fraction	CLT
σ_y (MPa)	99.4	92	91.2
E (GPa)	32.1	36.1	36.1



(a) Stress-strain curve before 1% post-stretching



(b) Stress-strain curve after 1% post-stretching

Fig. 6 Comparison between theoretical and experimental results

본 논문에서는 섬유 금속 적층판의 접착필름의 접착강도에 의한 효과를 고려하지 않았기 때문에, 그림에서 보여지는 것처럼 이론적 계산과 실험 결과들 간의 차이가 발생한 것으로 추정할 수 있다. 소성 거동 영역에서는 혼합율에 의한 체적분을 접근법을 사용하는 것보다 고전 적층 이론을 적용하는 것이 보다 정확한 값을 예측 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로, 섬유 금속 적층판의 재료 물성치를 예측하기 위해서는 접착강도를 고려해야 하며, 고전 적층 이론을 기반으로 하는 이론적 계산을 통해 추정된 물성치를 사용할 수 있을 것으로 판단되어진다.

4. 단축 인장하중 상태에서 섬유 금속 적층판 기계적 물성에 관한 수치적 평가

섬유 금속 적층판 구성재료의 인장시험 결과를 이용하여 수치적 해석을 수행하였다. 단축 인장시험에 대한 유한요소 해석은 상용 해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit를 사용하여 수행하였고, 효과적인 해석을 수행하기 위하여 1/4 모델을 사용하였다. 본 연구에서는 인장 거동에 초점이 맞춰져 있고 박리 현상에 관하여는 고려하지 않기 때문에, 섬유 금속 적층판 시편은 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌의 단축 응력을 구하기 위해 단층 솔리드 요소(solid element)로서 모델링하였다. Fig. 8은 실제 인장 시험과 동일 조건으로 모델링한 유한요소 모델 및 경계 조건을 나타내고 있다.

Fig. 9는 3절에서 나타낸 이론적 예측과 실험값으로부터 얻어진 물성치를 적용한 유한요소해석 결과를 비교하여 나타내었다. 실험값과 유한요소 해석 결과는 거의 일치하지만, 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌 사이에서 박리현상을 고려하지 않았으므로 어느 정도의 오차가 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌을 이용하여 섬유 금속 적층판을 제작하였고, 섬유 금속 적층판의 단축 인장하중 상태에서의 기계적 물성치에 관한 연구를 수행하였다. 압연방향을 기준으로 0°, 45°, 90°방향으로의 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌, 0°, 45°방향

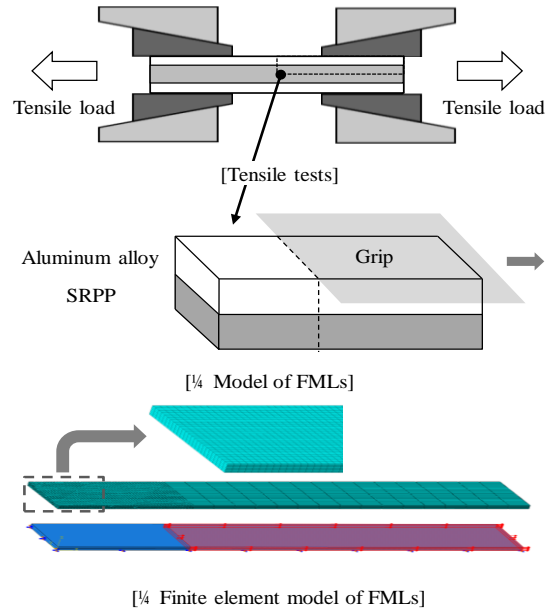


Fig. 8 Finite element model and boundary condition

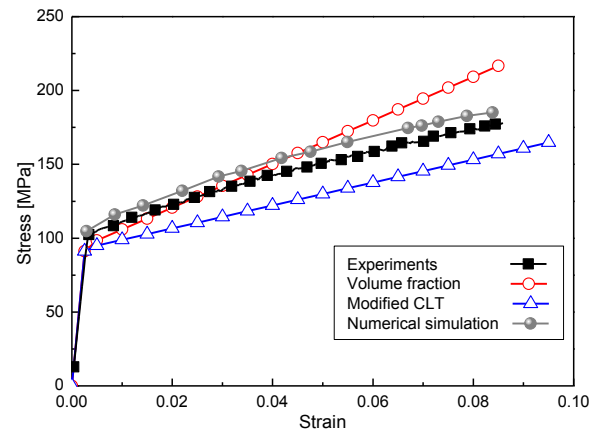


Fig. 9 Comparison of stress-strain curve of the FMLs

에서의 섬유 금속 적층판의 응력-변형률 관계, 과단연신율, 그리고 종탄성계수를 측정하기 위해 일축 인장시험을 수행하였다. 특히, 섬유 금속 적층판을 구성하는 각 재료의 열팽창계수 차이에 의한 잔류응력 제거를 위하여 소성변형 후 후-인발 공정을 통해 인장시험을 수행하여야 함을 확인하였다.

섬유 금속 적층판의 이론적 모델링은 종탄성계수를 결정하고 단축 인장하중 상태에서의 기계적 물성치를 예측하기 위해 수행하였고, 체적 분을 접근법과 고전 적층 이론을 이용하여 섬유 금속 적층판의 기계적 물성치를 예측하였다. 그 결과, 소성 거동 영역에서는 혼합물 법칙에 의한 체적 분을 접근법을 사용하는 것보다 고전 적층 이론을 기반으로

예측한 결과를 사용하는 것이 효과 적임을 확인하였다.

그리고 섬유 금속 적층판의 구성 재료에 대한 인장시험 결과를 이용하여 수치적 해석을 수행한 결과는 실험 결과와 거의 유사함을 확인할 수 있었다. 하지만 본 연구에서는, 이론적 모델에 접착제 층의 접착강도를 고려하지 않았으므로 실험과 이론적 계산 간에 약간의 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 섬유 금속 적층판의 정확한 물성치 확보를 위해서는 접착제 층을 고려한 연구가 필요하다는 사실을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A5A1048294). 또한 2012년도 한국에너지기술평가원(KEPTEP)의 에너지인력양성지원사업(No. 20124030200020)에 의해 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] L. B. Vogelesang, A. Vlot, 2000, Development of Fiber Metal Laminates for Advanced Aerospace Structure, J. Mater. Process. Technol., Vol. 103, No. 1, pp. 1~5.
- [2] K. S. Kim, K. M. Bae, S. Y. Oh, M. K. Seo, C. G. Kang, S. J. Park, 2012, Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles, Elastomers and Composites, Vol. 47, No. 1, pp. 65~74.
- [3] S. H. Kim, T. H. Choi, H. Huh, 1995, Proc. Spring Conf.(editor: Organizing Committee of Spring Conf), Kor. Soc. Automotive Eng., Seoul, Korea, pp. 9~15.
- [4] S. C. Kwon, C. M. Im, B. K. Choi, S. W. Lee, J. W. Han, Y. H. Kim, 2001, A Study on the Analysis of Cause & Minimizing of Defects at Composite Materials Sandwich Aircraft Structure in Autoclave Processing, J. Kor. Soc. Composite Mater., Vol. 14, No. 1, pp. 22~29.
- [5] H. S. Choi, H. S. Roh, G. H. Kang, M. S. Ha, 2004, Study on the Thermo-Mechanical Behaviors of Fiber Metal Laminates Using the Classical Lamination Theory, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 28, No. 4, pp. 394~401.
- [6] J. Gresham, W. Cantwell, M. J. Cardew-Hall, S. Kalyanasundaram, 2006, Drawing Behavior of Metal-composite Sandwich Structures, Composite Struct., Vol. 75, No. 1~4, pp. 305~312.
- [7] L. Mosse, P. Compston, W. J. Cantwell, M. Cardew-Hall, S. Kalyanasundaram, 2005, Stamp Forming of Polypropylene Based Fiber-metal Laminates: The Effect of Process Variables on Formability, J. Mater. Process. Technol, Vol. 172, No. 2, pp. 163~168.
- [8] L. Mosse, P. Compston, W. J. Cantwell, M. Cardew-Hall, S. Kalyanasundaram, 2006, The Development of a Finite Element Model for Simulating the Stamp Forming of Fibre-metal Laminates, Composite Struct., Vol. 75, No. 1~4, pp. 298~304.
- [9] C. Soutis, 2005, Fibre Reinforced Composites in Aircraft Construction, Progress in Aerospace Sci, Vol. 41, No. 2, pp. 143~151.
- [10] A. Sexton, W. Cantwell, S. Kalyanasundaram, 2011, Stretch Forming Studies on a Fibre Metal Laminate Based on a Self-reinforcing Polypropylene Composite, Composite Struct., Vol. 94, No. 2, pp. 431~437.
- [11] G. Reyes, H. Kang, 2007, Mechanical Behavior of Lightweight Thermoplastic Fiber-metal Laminates, J. Mater. Process Technol, Vol. 186, No. 1~3, pp. 284~290.
- [12] ASTM Standard E8, 2013, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [13] S. U. Khan, R. C. Alderliesten, R. Benedictus, 2009, Post-stretching Induced Stress Redistribution in Fibre Metal Laminates for Increased Fatigue Crack Growth Resistance, Compos. Sci. Technol., Vol. 69, No. 3~4, pp. 396~405.
- [14] J. G. Carrillo, W. J. Cantwell, 2009, Mechanical Properties of a Novel Fiber Metal Laminate Based on a Polypropylene Composite, Mech. Mater., Vol. 41, No. 7, pp. 828~838.
- [15] H. F. Wu, L. L. Wu, W. J. Slagter, J. L. Verolme, 1994, Use of Rule of Mixtures and Metal Volume Fraction for Mechanical Property Predictions of Fibre-reinforced Aluminium Laminates, J. Mater. Sci, Vol. 29, pp. 4583~4591.

- [16] S. Ebrahim Moussavi-Torshizi, S. Dariushi, M. Sadighi, P. Safarpour, 2010, A Study on Tensile Properties of a Novel Fiber Metal Laminates, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 527, No. 18~19, pp. 4920~4925.
- [17] J. Xue, W.-X. Wang, Y. Takao, T. Matsubara, 2011, Reduction of Thermal Residual Stress in Carbon Fiber Aluminum Laminates using a Thermal Expansion Clamp, Composites: Part A, Vol. 42, No. 8, pp. 986~992.