

다구찌 기법을 적용한 섬유금속적층판 접착층의 에너지 해방률 강화에 대한 연구

길민규* · 박으뜸* · 송우진** · 강범수*†

Study on Enhancement for Interfacial Energy Release Rate of Adhesive Layer in Fiber Metal Laminates using Taguchi Method

Min-Gyu Kil*, Eu-Tteum Park*, Woo-Jin Song**, Beom-Soo Kang*†

ABSTRACT: The fiber metal laminates have been widely used at aerospace industry due to outstanding fatigue characteristic, corrosion resistance and impact resistance and so forth. The objective of this research is to establish the proper manufacturing variables for enhancing the interfacial energy release rate of fiber metal laminates using Taguchi method. The major variables of the manufacturing process are surface treatment, pre-specified temperature holding time and additional pressure. In order to determine the interfacial adhesive strength, the double cantilever beam and end-notched flexure tests were conducted. Afterward, Mode I and II energy release rates at various conditions were introduced signal-to-noise ratio with respect to each condition. Finally, the most efficient manufacturing variables are recognized using larger-the-better characteristic.

초 록: 섬유금속적층판은 우수한 피로특성, 내부식성, 충격저항 등으로 인하여 항공우주산업에서 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 다구찌 기법을 사용하여 섬유금속적층판의 내부 에너지 해방률을 향상시킬 수 있는 공정 조건을 도출하는 절차에 대해 실험적 연구가 수행되었다. 내부 접착력 향상을 위한 제조공정을 도출하기 위해서, 표면처리, 접착필름의 용융점 유지시간 및 초기 압력이 서로 다르다는 조건하에서 제작한 시편들에 대해서 Double cantilever beam과 End-notched flexure 시험을 수행하였다. 시험으로부터 모드 I과 모드 II의 에너지 해방률을 측정 한 후, 다구찌 기법의 망대특성에 의한 신호 잡음비를 비교하여 효율적인 제조공정을 도출하였다.

Key Words: 섬유금속적층판(Fiber metal laminate), 다구찌 기법(Taguchi method), 신호 잡음비(Signal-to-noise ratio), 에너지 해방률(Energy release rate)

1. 서 론

알루미늄 합금은 기존의 금속재료보다 비교적 가볍고 우수한 기계적 성질을 가지고 있어 경량화가 요구되는 항공기 산업에서 큰 비중을 차지하고 있다[1].

섬유강화플라스틱 (FRPs, Fiber Reinforced Plastics)은 알루미늄 합금에 비해 효율적인 피로강도와 비강성, 비강도를 가져 항공우주산업을 비롯한 다른 산업 분야에서 기존의 금속재료의 대체재로서 각광받고 있다. 하지만 FRPs는 섬유 면내 방향의 수직 방향에 대한 강도가 기지재의 강도

Received 12 August 2016, received in revised form 31 October 2016, accepted 31 October 2016

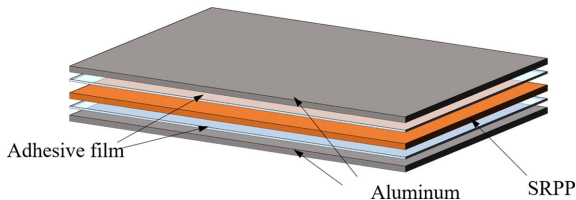
*Department of Aerospace Engineering, Pusan National University

*†Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, Corresponding author (E-mail: bskang@pusan.ac.kr)

**Graduate School of Convergence Science, Pusan National University

Table 1. Orthogonal array of Taguchi $L_9(3^3)$

Number of case	Variables			Experiment condition
	F	P	T	
1	1	1	1	$F_1P_1T_1$
2	1	2	2	$F_1P_2T_2$
3	1	3	3	$F_1P_3T_3$
4	2	1	2	$F_2P_1T_2$
5	2	2	3	$F_2P_2T_3$
6	2	3	1	$F_2P_3T_1$
7	3	1	3	$F_3P_1T_3$
8	3	2	1	$F_3P_2T_1$
9	3	3	2	$F_3P_3T_2$

**Fig. 1.** Fiber metal laminates

에 의존하는 특성을 가지고 있으며, 낮은 속도 조건에서 충격에 취약한 단점을 가지고 있기 때문에 사용이 제한적이다. 이러한 FRPs의 결점은 주로 복합재료 이루어져 있는 구조물의 파괴인성 혹은 손상허용의 감소를 야기한다[2]. FRPs의 장점은 유지한 채 수지를 사용한 복합재료의 저속충격에 대한 취약성을 보강하기 위해 기존 금속재료의 장점과 탄소섬유의 장점을 결합시킨 섬유강화복합판(FMLs, Fiber Metal Laminates)이 개발되었다. FMLs은 Fig. 1과 같이 금속재료와 섬유강화복합재료를 교대로 적층하여 만든 소재로서 피로파괴인성, 내부식성, 내충격성 등이 기존의 금속재료에 비해 우수하여 최근 Airbus사 A380의 상부 동체에 적용되는 등 일부 상용화가 진행되고 있다. 또한 FMLs는 금속재와 동일한 수리방법이 적용되기 때문에 기존의 섬유강화복합재료에 비해 결함을 발견하고 수리하기 용이하여 보다 적은 유지비용으로 항공기의 수명을 연장시킬 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점이 있는 반면 이종소재 간의 접합 시 기계적 성능 저하, 적층 소재간의 층간 분리 현상 등의 단점을 내포하고 있다[3-5].

이러한 단점을 극복하기 위해 최근 FMLs의 기계적 성질에 관한 연구가 진행되었으며, FMLs 제조를 위한 전처리 조건과 경화방법에 대한 연구, 경화 시 발생하는 열 잔류응력에 관한 연구 등 FMLs 제작 시 전·후 처리에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다[6,7]. 하지만 FMLs의 단점 중 하나인 적층 소재간의 층간 분리현상을 완화하기 위한 공정방법에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다. FMLs는 한 번 제작하는데 3~4시간 가량의 적지 않은 시간이 소요되며, 비교

적 많은 비용을 요구하기 때문에 효율적인 제조공정이 필수적이다. 효율적인 제조공정을 찾기 위해선 많은 실험이 요구되며, 이러한 실험의 경우, 다구찌 기법을 이용하면 실험 횟수를 획기적으로 줄일 수 있다. 다구찌 기법은 시간이 많이 소요되는 공정에 직교배열표, 손실함수, 신호 잡음비를 사용하여 최소한의 실험횟수로 적합한 공정을 도출한다[8]. 본 연구는 제작공정에서 조작 가능한 변수로 직교배열표를 만들어 각 조건 별로 FMLs를 제작하고, 모드 I, 모드 II 실험을 수행하고, 내부 접착력 측정에 적합한 에너지 해방률(Energy release rate)의 신호 잡음비를 비교해 적합한 제조공정을 도출하였다. 조작 변수는 표면처리, 접착제의 용융점 유지시간, 추가 압력으로 선정하였으며, 각 인자당 세 수준을 설정해 3수준 3인자($L_9(3^3)$)의 직교배열표를 만들었다. 여기서 목적함수인 에너지 해방률의 신호 잡음비는 높을 수록 좋으므로, 망대특성 손실함수를 적용하여 신호 잡음비를 구해 FMLs의 내부 접착력을 향상시키기 위한 제조공정을 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 실험

2.1 직교배열표를 활용한 실험 설계

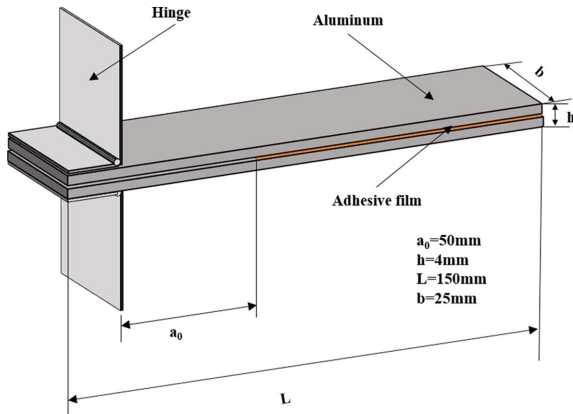
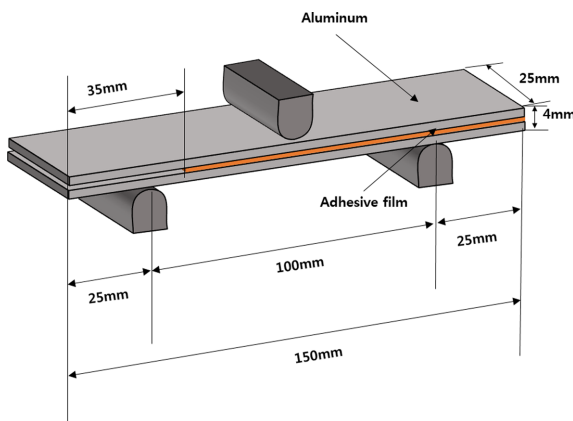
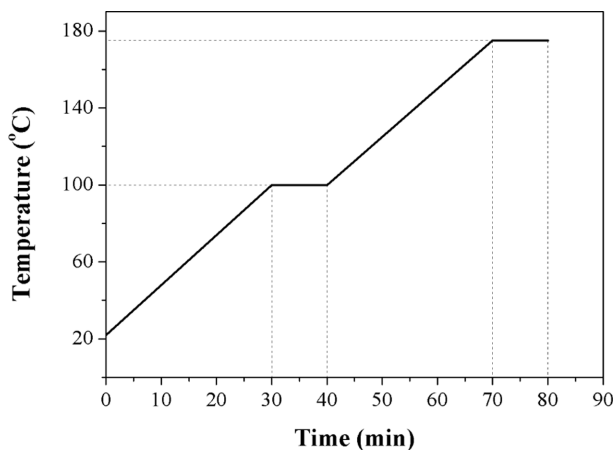
접착 강도가 비교적 우수하고 층간 접착이 안정적으로 유지되는 FMLs를 제작하기 위해서는 접착제와 피접착제의 계면에서 계면접촉이 필수적이며, 계면에서의 고유 접착력이 있어야 한다. 또한, 접착제의 고유 접착력의 세기와 성질이 매우 중요하다[9]. 본 연구에서 접착력 세기와 성질을 결정하는 방법 중 하나로 기계적 마모를 선택했다. 기계적 마모는 시편의 표면을 가공하여 생성된 요철에 접착제가 침투하여 고유접착력을 형성하고, 계면의 응력분산 변화를 통해 접착력을 향상시키는 방법이다. 또한, 계면에서 이형제, 유기물질 등의 불순물을 제거함으로써 접착제의 젖음(Wetting)을 쉽게 발생하게 한다[10]. 따라서, 본 연구에서는 표면을 사포로 가공하여 기계적 마모를 적용하였다.

표면 가공을 제외한 나머지 조작변수들은 제작과정에서 제어가 가능하며 결과에 영향을 끼칠 수 있는 것으로 설정해야 한다. 앞서 말한 두 조건을 모두 충족시키는 요인으로 접착제 용융점에서의 유지시간과 추가 압력이 있다. 따라서, 표면처리(F), 용융점에서의 유지시간(T)과 추가 압력(P)을 다음과 같은 조건으로 설정하여 실험을 실시하였다.

먼저 표면처리는 거칠기 200, 600, 1000의 사포를 사용하여 접착면을 가공하였으며, 접착필름의 용융점 도달 시 유지시간을 10, 35, 60분으로, 추가 압력을 0, 40, 60 psi로 정하여 다구찌 기법의 직교배열표로 나타내었다. 각 경우의 조건은 Table 1에 정리하였다. 공정변수의 수준은 실험 가능한 범위 내에서 변수를 지정하였다. 실험은 비슷한 추이의 데이터가 3개 이상 나올 때까지 실험하였으며, 평균 5회의

Table 2. Specimen size and its material properties

Material	Al 5052-H32	Adhesive film
Size (mm × mm)	150 × 25	150 × 25
Thickness (mm)	2	0.4
Young's modulus (E, GPa)	70.3	0.87
Shear modulus (G, GPa)	25.9	0.36

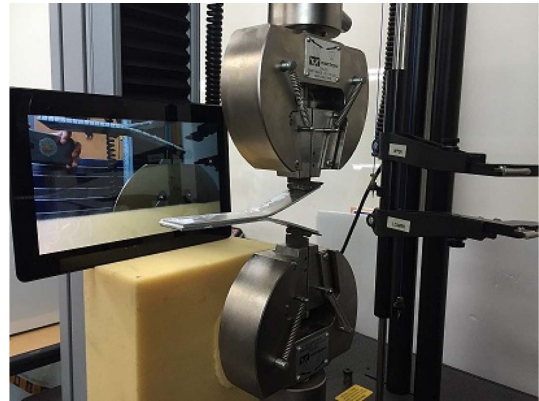
**Fig. 2.** Specimen configuration of DCB test**Fig. 3.** Specimen configuration of ENF test**Fig. 4.** Temperature profile on manufacturing process

실험을 수행하였다. 실험결과에서 각 모드에서의 에너지 해방률인 G_{IC} , G_{IIIC} 를 도출하여 다구찌 기법의 신호 잡음비가 최대값이 나오는 것을 비교적 효율적인 조건이라 채택하였다. 실험장비는 Instron사와 MTS사의 만능재료시험기를 사용하였다.

2.2 시편 제작

본격적인 실험을 위하여 두께 약 2 mm의 알루미늄 5052 계열과 Callano사의 폴리프로필렌 접착필름을 사용하여 Double cantilever beam (DCB), End-notched flexure (ENF) 시편을 제작하였다. 사용된 소재의 자세한 제원 및 물성치는 Table 2와 같다. DCB 실험에 사용된 시편은 Fig. 2과 같이 제작하였으며, ASTM D5528을 참고하였다[10]. 본 연구에서는 실험의 편의를 위해 힌지를 사용하였으며, 힌지는 구조용 접착제를 사용하여 시편에 고정하였다. ENF 실험에 사용된 시편은 기존의 논문에서 나와있는 규격을 참고하여 Fig. 3과 같이 제작하였다[12].

시편은 알루미늄 합금의 표면을 사포로 가공한 후, 핫프레스를 사용하여 제작하였다. 가공 시 시스템 상 온도변화는 Fig. 4에 나타내었으며, 용융점(175°C)에서 각 케이스에 따른 시간 유지 후 자연대류조건에서 냉각시켰다.

**Fig. 5.** Taking a video during DCB test**Fig. 6.** Fracture during ENF test

2.3 Double cantilever beam 시험

모드 I 에너지 해방률을 도출하기 위해 DCB 실험을 수행하였다. 장비는 Instron사의 만능 재료 시험기를 사용하였으며, 시편의 층간 분리 길이를 시각적으로 측정하기 용이하도록 시편 제작 시 측면에 눈금 자를 도시하고, Fig. 5와 같이 실험 중 동영상 촬영을 통해 시간당 층간 분리 길이를 측정할 수 있도록 했다. 인장 속도는 10 mm/min이며, 수직 방향의 변위와 하중을 측정하였다. Fig. 7는 수직 방향 변위와 하중에 대한 그래프이며, 9가지 Case 중 대표적으로 Case 1에 대해 도시하였다.

2.4 End-notched flexure 시험

모드 II 에너지 해방률을 도출하기 위해 Fig. 6과 같이 ENF 시험을 수행하였다. MTS사의 만능 재료 시험기를 사용한 3점 굽힘 실험을 수행하였으며, 인장 속도는 1 mm/min이다. 펀치의 수직 방향의 변위와 하중은 만능재료시험기를 사용하여 측정하였다. ENF 시험을 통해 도출한 Case 1의 수직 방향 변위와 하중에 대한 그래프는 Fig. 8과 같다.

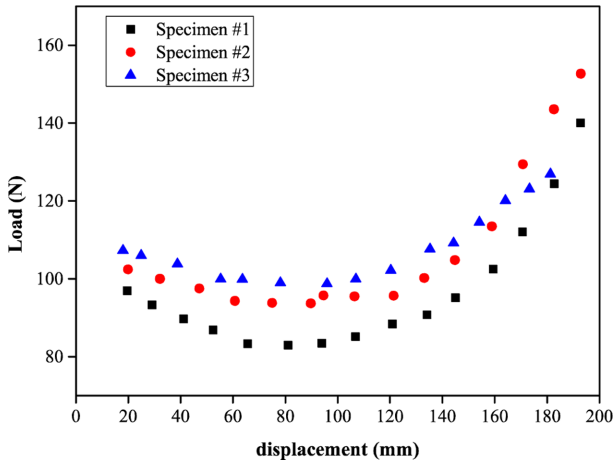


Fig. 7. Load-Displacement curves of Mode I

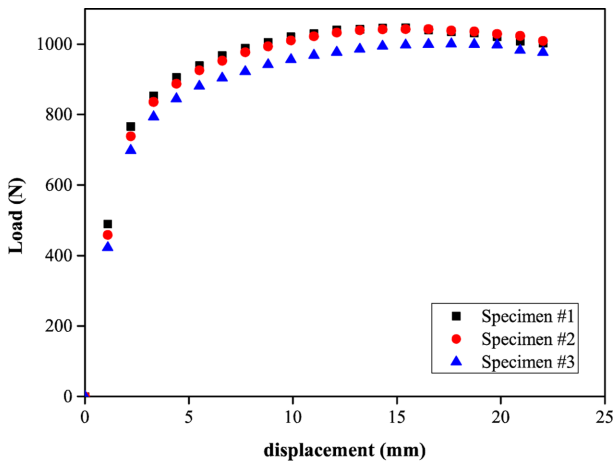


Fig. 8. Load - Displacement curves of Mode II

3. 에너지 해방률 도출

3.1 Modified beam theory

DCB의 에너지 해방률, G_{IC} 는 다음과 같다[11].

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (1)$$

여기서 P 는 최대 하중, δ 는 최대 하중일 때의 변위이며, b 는 시편의 폭, a 는 층간 분리 길이이다. 식 (1)은 시편의 끝단이 고정되어 있다는 가정을 내포하고 있다. 하지만 실제 실험에서는 시편의 끝을 고정시키지 않기 때문에 실험 중 시편의 끝이 회전하며 생기는 오차를 식 (2)와 같이 에너지 해방률을 보정할 수 있다[11].

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)} \quad (2)$$

위 식에서 보정인자 Δ 는 $C^{1/3}$ 과 층간 분리길이 a 의 그래프에서 a 축 절편이다. 여기서, C 는 컴플라이언스이며, 종방향 변위와 하중의 비인 δ/P 이다. 또한, 시편이 대변형을 보일 때, 보정계수인 F 와 N 을 추가하여 에너지 해방률을 보정한다[11].

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)N} F \quad (3)$$

여기서 F 는 모멘트 암이 줄어드는 길이, 즉 시편의 끝이 찌그러지는 정도를 말한다.

N 은 변위를 보정하는 값이며, 시편의 보강판이 블록에 의해 작용되는 힘을 포함한다.

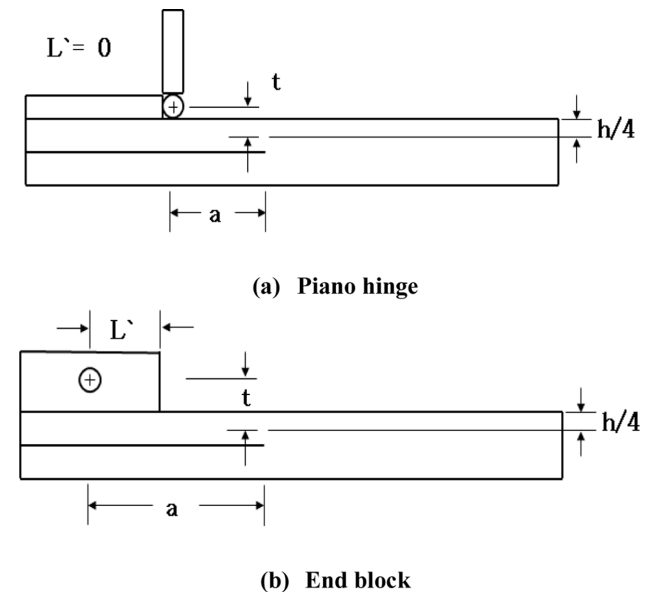


Fig. 9. Method for opening load to DCB specimen

$$F = 1 - \frac{3}{10} \left(\frac{\delta}{a} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{\delta t}{a^2} \right) \quad (4)$$

$$N = 1 - \left(\frac{L'}{a} \right)^3 - \frac{9}{8} \left[1 - \left(\frac{L'}{a} \right)^2 \right] \left(\frac{\delta t}{a^2} \right) - \frac{9}{35} \left(\frac{\delta}{a} \right)^2 \quad (5)$$

여기서 L' 과 t 는 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 힌지를 사용하기 때문에 $L' = 0$ 이며, N 은 식 (6)과 같이 간단히 표현가능하다.

$$N = 1 - \frac{9}{8} \left(\frac{\delta t}{a^2} \right) - \frac{9}{35} \left(\frac{\delta}{a} \right)^2 \quad (6)$$

3.2 Compliance Calibration Method

Compliance calibration method (CCM)을 이용해 G_{IC} 를 구하기 위해서, 먼저 $\log C$ 와 $\log a$ 에 대한 그래프에서, 선형 곡선접합을 사용하여 기울기, n 을 도출한다. 도출된 n 값을 사용하여 G_{IC} 를 구하면 다음과 같다.

$$G_{IC} = \frac{nP\delta}{2ba} \quad (7)$$

3.3 Mode II 에너지 해방률 도출

이 실험에서의 파단은 시편 내부의 전단응력에 의해서 전단방향으로 일어난다. 전단방향의 컴플라이언스 G_{SH} 및 전단응력에 대한 에너지 해방률 G_{IIC} 는 아래와 같은 식을 사용하여 구할 수 있다[13].

$$C_{SH} = \frac{6L + 3a_0 - \frac{L^3}{a_0^2}}{20whG_{I3}} \quad (8)$$

$$G_{IIC} = \frac{9a_0^2 P^2 (C - C_{SH})}{4wL^3 [1 + 1.5(a_0/L^3)]} \quad (9)$$

Fig. 10과 같이 L 은 시편의 중심에서 지지대까지의 거리이고, a_0 는 초기 크랙의 길이이다. w 는 시편 끝에서 지지대까지의 거리이며, h 는 시편의 두께이다. δ 는 크랙에서 박리가 시작될 때 시편 중간부분의 수직 방향 변위이고, G_{I3} 은 내부 전단 탄성률이다.

3.4 다구찌 기법을 통한 효율성 판단

본 연구에서는 FMLs의 내부 접착력을 향상시키기 위해

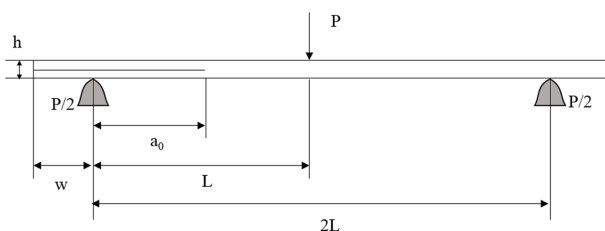


Fig. 10. Mode II specimen dimensions

제작 시 조작이 가능한 요인들을 고려하여 다구찌 기법을 이용한 직교배열표를 사용하였다. 직교배열표는 일부실시법을 사용하고 있어서, 실험횟수를 효율적으로 줄일 수 있으며, 손실함수 및 신호 잡음비를 도입하여 품질을 일정하게 유지할 수 있는 인자를 찾아가는 최적공정설계가 가능하다[14]. 에너지 해방률의 신호 잡음비는 높을수록 접착력이 강하다고 볼 수 있으므로 다구찌 기법의 망대특성에 대한 손실함수를 적용하여 신호 잡음비를 분석하였다. 여기서 망대특성에 대한 신호 잡음비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] [\text{dB}] \quad (10)$$

여기서 S/N 은 신호 잡음비, n 은 실험횟수, Y 는 i 번째 실험값이며, 인자 별 신호 잡음비의 평균값으로 각 조건에 대한 신호 잡음비를 도출 및 비교하여 효율성을 판단하였다.

4. 실험 결과 및 분석

시험 결과를 통해 Table 3과 같이 각 도출 방법에서의 평균 에너지 해방률을 도출 하였다. 또한, 표준편차를 통해 데이터의 분산 정도를 확인해 보았다. MBT, CCM과 같은 모드 I 시험의 경우 표준편차의 값이 모드 II 시험에 비해 크게 측정되었으나, 기존의 논문과 비교 했을 때, 본 연구에서의 실험오차는 타당하다 볼 수 있다[15]. 모드 I 실험 오차 발생 원인은 몇몇 시편에 힌지를 붙이는 과정에서 접착제가 힌지 부분에 스며들어 잉여응력을 발생시켰기 때문으로 판단된다. 반면, 모드 II 시험에는 힌지를 사용하지 않아 표준편차 값이 비교적 낮게 측정됨을 확인할 수 있다.

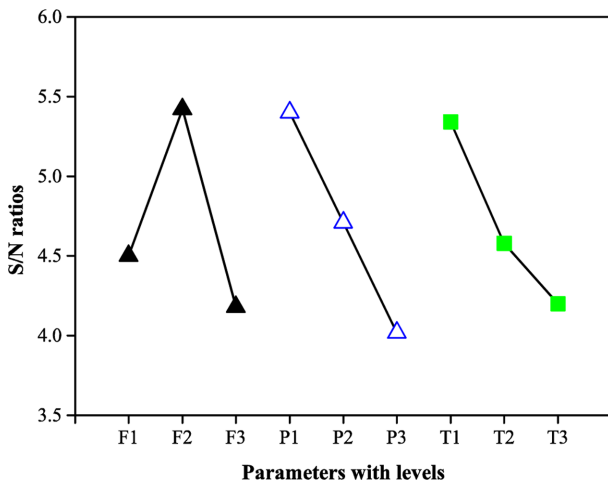
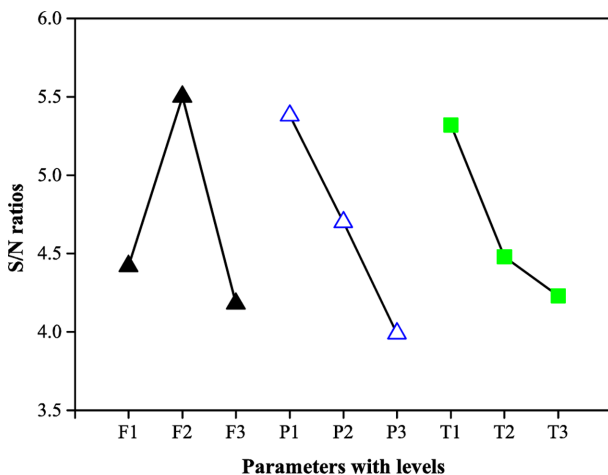
도출된 에너지 해방률에 대한 신호 잡음비는 Table 4와 같다.

Table 3. Energy release rate and standard derivation of each test

Number of case	Energy release rate (J/mm ²)			Standard deviation		
	G_{IC}		G_{IIC}	G_{IC}		G_{IIC}
	MBT	CCM		MBT	CCM	
1	1.834	2.227	1.225	0.099	0.101	0.016
2	1.757	2.376	1.213	0.275	0.444	0.078
3	1.465	2.009	0.975	0.488	0.403	0.123
4	2.000	2.470	1.175	0.318	0.390	0.025
5	1.656	2.117	1.268	0.305	0.237	0.104
6	1.986	2.646	1.252	0.117	0.054	0.043
7	1.767	2.032	1.372	0.617	0.582	0.063
8	1.733	2.323	1.207	0.184	0.204	0.045
9	1.372	1.717	1.300	0.302	0.396	0.060

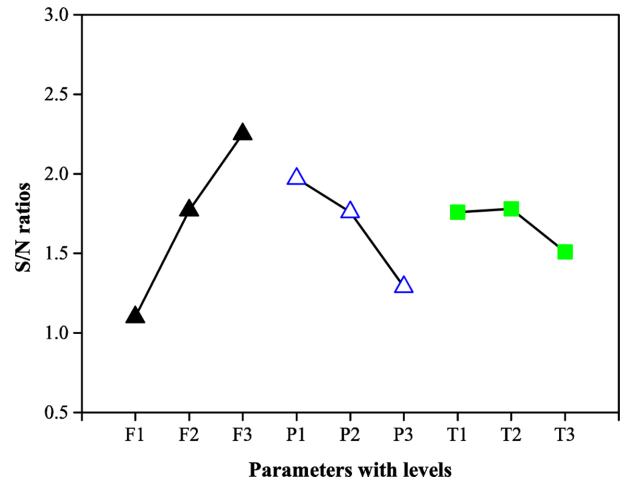
Table 4. S/N ratio of each factors

S/N Ratio			Factor		
			F	P	T
G_{IC}	MBT	1	4.5	5.4	5.34
		2	5.42	4.71	4.58
		3	4.18	4.02	4.2
	CCM	1	4.42	5.38	5.32
		2	5.5	4.7	4.48
		3	4.18	3.99	4.23
G_{IIC}		1	1.1	1.97	1.76
		2	1.77	1.76	1.78
		3	2.25	1.29	1.51

**Fig. 11.** S/N ratio distribution with respect to MBT on G_{IC} **Fig. 12.** S/N ratio distribution with respect to CCM on G_{IC}

4.1 DCB 시험 결과 및 분석

실험 결과값을 이용해 다구찌 기법 망대특성 손실함수의 각 공정에 대한 신호 잡음비 그래프를 도출하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 MBT와 CCM을 통해 도출한 결과그래

**Fig. 13.** S/N ratio distribution on G_{IIC}

프이며, 두 그래프의 신호 잡음비 값은 약 0.1~0.5 dB 정도의 차이를 보이나, 전체적인 경향은 유사한 것으로 판단된다.

결과 그래프를 살펴보면, 설정된 조건 중에 표면처리에 사용한 사포의 거칠기는 600(F_2)에서, 접착제의 용융점 유지시간은 10분(T_1), 추가 압력은 0 psi(P_1)에서 가장 높은 효율을 가지는 것으로 나타났다. 표면처리를 하는 이유는 계면의 접착 면적을 넓히고 요철에 의한 고유 접착력을 생성하기 위함일 뿐만 아니라, 계면에서의 응력분산의 변화로 접착효율을 높이는 것인데, 두 효과의 종합적인 면을 봤을 때 Mode I에서는 사포의 거칠기가 600인 조건에서 표면처리를 한 것이 가장 효율적임을 확인할 수 있다.

용융점 유지시간은 길어질수록 폴리프로필렌 접착필름이 용융된 상태가 오랫동안 지속되고, 용융된 접착필름이 새어나가 비교적 접착층이 얇아져, 접착력이 약해지는 것으로 판단된다. 추가압력의 경우, 적당한 압력 조건에서는 접착제 내부의 기포를 줄여 줄 수 있고, 요철 사이에 접착제가 더 잘 스며들 수 있게 해주어 높은 접착력을 기대할 수 있으나, 40 psi 이상의 높은 압력에서는 오히려 접착필름의 층이 얇아져 접착력이 낮아지는 역효과를 내는 것으로 보인다. 본 연구의 실험에서는 추가압력의 범위가 비교적 커 압력에 의한 접착력 증가가 효과를 보기 힘들었다. 하지만 추가 압력의 범위를 줄여 실험을 수행하면 좀 더 자세한 경향을 파악할 수 있으리라 판단된다. 결과적으로, 표면처리에 사용하는 사포의 거칠기는 600, 추가 압력과 시간은 작은 값이 비교적 효율이 좋음을 확인할 수 있었다.

4.2 ENF 시험 결과 및 분석

실험 결과에 의한 다구찌 기법의 망대특성 손실함수 신호 잡음비에 대한 그래프는 Fig. 13과 같다. 그래프에 따르면, 표면처리에 사용된 사포의 거칠기 1000(F_3), 추가압력은 0 psi(P_1)가 비교적 높았으며 용융점 유지시간은 10분(T_1)과 35분(T_2)에서 같은 값이 도출되었다. 시편의 표면에 요

철이 깊어질수록 접착면적은 넓어지나 요철 안쪽까지 접착제가 완벽하게 스며들지 못해 오히려 실질적인 접착 면적이 줄어들어 거칠기 값이 가장 높은, 요철을 비교적 얇게 생성하는 사포가 비교적 함침을 잘 일어나게 하고, 비교적 큰 신호 잡음비가 도출됨을 확인하였다. 용융점 유지시간은 35분과 10분에서 신호 잡음비가 같은 값이나, 공정시간이 짧을수록 제품을 만드는 비용이 줄어들기 때문에 10분이 더 효율적인 조건이라 볼 수 있다. 추가 압력은 DCB 시험과 비슷한 경향을 보였다.

종합적으로 살펴보면, 용융점에서의 유지시간이나 추가 압력은 DCB 시험 결과와 비슷한 경향을 보였으나, 표면처리는 다른 경향을 띄었다. 이는 응력이 작용하는 방향에 따라 계면접촉면적 증가와 응력분산에 의한 효율이 차지하는 비율이 다르다는 점을 내포한다. 따라서 낮은 추가 압력, 용융점에서의 유지시간과 높은 거칠기의 사포를 사용한 조건에서 비교적 효율이 높음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 섬유금속적층판 내부 접착력 향상을 위한 제조공정에 대한 연구로, 알루미늄 시편의 표면 거칠기, 접착 필름 용융점 유지시간, 추가 압력 등을 조건으로 시편을 제작하고, 실험을 통해 얻은 결과로 다구찌 기법을 활용하여 상대적으로 높은 접착효율을 가지는 제조공정을 도출하였다.

먼저 표면처리는 DCB와 ENF 시험에서 서로 다른 결과가 나왔다. DCB 시험에서는 거칠기가 600인 것이, ENF 시험에서는 1000인 것이 가장 효율적임을 보였다. 추가 압력 및 용융점 유지 시간은 DCB, ENF 시험에서 비슷한 추이를 보였으며, 낮은 추가 압력, 짧은 접착제 용융점 유지시간이 실험 조건 중 가장 효율이 좋았다.

종합적으로 살펴보면 최고온도 유지시간은 10분, 추가 압력은 0 psi가 효율적이며, 수직하중이나 충격에 노출이 많이 되는 부분은 사포의 거칠기가 600인 것을 사용하여 FMLs를 제작하고, 전단력, 비틀림이 많이 작용하는 부분에는 거칠기가 1000인 사포로 표면처리를 하여 제작하는 것이 좀 더 효율적으로 접착특성이 개선된 FMLs를 얻을 수 있음을 보였다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. 2012R1A5A1048294)의 지원을 받아 수행된 연구임. 또한, 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업(NRF-2015H1C1A1035499)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

REFERENCES

1. Jang, B.Z., *Advanced Polymer Composite: Principles and Applications*, CRC Press, ASM International, US, 1994.
2. Woo, S.C., and Choi, N.S., "Evaluation on Tensile Properties and Fracture Toughness of Glass Fiber/Aluminum Hybrid Laminates" *Transaction of the Korean Society of mechanical engineers*, Vol. 29, No. 6, 2005, pp. 876-888.
3. Asundi, A., and Choi, A.Y.N., "Fiber Metal Laminate: An Advanced Material for Future Aircraft," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 63, No. 1, 1997, pp. 384-394.
4. Caprino, G., Spataro, S., and Del Luongo, "Low-velocity Impact Behavior of Fiberglass-aluminum Laminate," *Composites: Part A*, Vol. 35, No. 5, 2012, pp. 189-205.
5. Kim, S.J., Kim, T.U., and Kim, S.H., "The Study on Structural Performance of Fiber Metal Laminates," *Korea Aerospace Research Institute*, Vol. 13, No. 1, 2014, pp. 20-26.
6. Lee, J.H., and Kim, Y.H., "Pre-treatment Condition and Curing Method for Fabrication of Al7075/CFRP Laminates" *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 13, No. 4, 2000, pp. 42-53.
7. Kim, S.Y., Choi, W.J., Park, S.Y., and Moon, C.R., "Thermal Residual Stress Behavior in Fiber Metal Laminates," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 33, No. 6, 2005, pp. 39-44.
8. Chung, W.J., Lee, C.M., Cho, D.Y., and Yoon, S.H., "Study on Decreasing Displacement of the MC(machining center) Moved Column with High-speed for the Taguchi Method," *Proceedings of KSPE 2014 Spring Conference*, Gyeong Ju, Korea, 2006, pp. 445-446.
9. Han, J.T., Lee, D.H., and Cho, K.W., "Adhesion Science and Technology," *International Conference on Engineering Education, San Juan, Puerto Rico*, Vol. 7, No. 4, 2004, pp. 43-54.
10. Evans, J.R., and Packham, D.E., *Journal of Adhesion*, Taylor & Francis, UK, 1979.
11. ASTM D5528-13, Standard Test Method for Mode I inter laminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, 2013.
12. AITM 1.0006, Determination of Fracture Toughness Energy of CFRP bonded joint - Mode II, 2006.
13. Tsai, G.C., "Design of Composite ENF Specimens and Conduct Three-Point Test to Calculate Mode II Fracture Toughness," 9th International Conference on Engineering Education, San Juan, Puerto Rico, July 2006, pp. 18-22.
14. Robert, L., Mason, F., Richard Gunst, L., and Jarnes Hess, *Statistical Design and Analysis of Experiments, Second Edition*, A John Wiley and Sons Publication, Hoboken New Jersey, US, 2003.
15. James, J.S., Alexander, E.B., and Philip, D.B., "Carbon Nanotube Shear-pressed Sheet Interleaves for Mode I Interlaminar Fracture Toughness Enhancement," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 80, 2016, pp. 127-137.