

다구찌 기법을 이용한 이종재료 경사 홀 클린칭 접합부 수평 방향 접합강도 예측 및 검증

강동식¹ · 박으뜸² · A. Tullu² · 강범수² · 송우진[#]

Prediction and Verification of Lateral Joining Strength for Tapered-Hole Clinching using the Taguchi Method

D. S. Kang, E. T. Park, A. Tullu, B. S. Kang, W. J. Song

(Received September 21, 2015 / Revised November 11, 2015 / Accepted November 12, 2015)

Abstract

Fiber metal laminates (FMLs) are well known for improved fatigue strength, better impact resistance, superior damage tolerance and slow crack growth rate compared to traditional metallic materials. However, defects and loss of strength of a composite material can occur due to the vertical load from the punch during the joining with a dissimilar material using a conventional clinching method. In the current study, tapered-hole clinching was an alternative process used to join Al 5052 and FMLs. The tapered hole was formed in the FML before the joining. For the better understanding of static and dynamic characteristics, a clinched joining followed by a tensile-shear test was numerically simulated using the finite element analysis. The design parameters were also evaluated for the geometry of the tapered hole by the Taguchi method in order to improve and compare the lateral joining strength of the clinched joint. The influence of the neck thickness and the undercut were evaluated and the contribution of each design parameter was determined. Then, actual experiments for the joining and tensile-shear test were conducted to verify the results of the numerical simulations. In conclusion, the appropriate combination of the design parameters can improve the joining strength and the cross-sections of the tapered-hole clinched joint formed in the actual experiments were in good agreement with the results of the numerical simulations.

Key Words : Fiber Metal Laminates, Tapered-hole Clinching, Taguchi Method, Lateral Joining Strength

1. 서론

섬유금속적층판(fiber metal laminates, FMLs)은 금속 재료와 섬유강화 복합재료를 교대로 적층한 소재이며, 기존의 섬유강화 복합재료와 관련된 단점의 보완과 금속재료에 비해 높은 비강도, 비강성, 에너지 흡수성 등 우수한 기계적 특성을 지니고 있다 [1~3]. 이러한 이유로 FMLs에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근 항공기의 구조물로서 FMLs

의 적용이 증가하고 있다[4]. 하지만 기존에 사용되던 소재를 FMLs로 설계 및 제작함에 따라 FMLs과 이종소재간 접합 문제가 발생하게 된다[5]. 일반적으로 FMLs과 이종소재간 접합에는 접착제(adhesive bonding) 접합방법이 널리 쓰이고 있으나, 결합시간이 길고 환경적 문제가 발생할 수 있어 기존의 접합 방법을 대체할 효과적인 접합방법이 요구된다. 이러한 문제점의 대안으로 클린칭 접합공정(clinched joining process)이 주목을 받고 있다[6, 7]. 클린칭 접

1. 부산대학교 첨단정밀공학 협동과정

2. 부산대학교 항공우주공학과

Corresponding Author : Graduate School of Convergence Science, Pusan National University, E-mail:woodysong@pusan.ac.kr

합은 소재를 가압하여 기계적인 결합을 유도하는 접합방법으로, 펀치(punch)와 다이(die)의 사용만으로 간단하게 접합이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 저항 점 용접(resistance spot welding)이나 셀프 피어싱 리벳(self-piercing rivet)접합 공정에 비해 접합력이 낮은 단점이 있어 클린칭 접합력을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[8]. Oudjene 등[9]은 다구찌 기법(taguchi method)과 유한요소해석을 이용하여 분리하중에 대한 형상변수의 영향성을 평가하고, 변수 수준을 최적설계 하였다. Kim 등[10]은 보다 다양한 형상변수를 고려하여 접합강도 향상을 위한 금형 형상변수의 최적화에 관한 연구를 수행하였다. 하지만, 일반적인 클린칭 접합공정을 이용하여 FMLs과 이종소재간의 접합을 시도할 경우, 내부에 적층된 복합소재가 수직하중을 견디지 못하고 파손되어 사실상 복합재료로서의 기능을 상실하게 된다[11]. 본 연구에서는 하부소재인 FMLs에 테이퍼 형상의 홀을 가공하여 클린칭 접합시 FMLs의 변형을 최소화시키는 경사 홀 클린칭(tapered-hole clinching, THC) 접합공정을 적용하였다. 그리고 유한요소해석과 다구찌 기법을 적용하여 수평 방향 접합강도 향상을 위해 설계변수들의 영향성을 분석하였다. 그리고 도출된 최적조건으로 유한요소해석을 추가적으로 수행하였으며, 이를 검증하기 위해 인장-전단(tensile-shear) 실험을 수행하여 접합강도 향상을 위한 수치해석 결과를 검증하였다.

2. THC 접합공정 설계 및 모델 정의

2.1 THC 접합 원리

THC 접합은 접합공정 이전에 테이퍼 형상의 홀을 하부소재인 FMLs에 가공 하여, 상부소재인 알루미늄 합금과 접합이 이루어지는 접합방법이다. Fig. 1 과 같이 펀치를 가압하여 상부소재가 소성변형이 발생하는 동안 하부소재의 변형을 최소화하고, 테이퍼 홀 체적만큼 구속시킴으로써, 상부소재와 하부소재 사이에 강한 결합력이 발생하여 접합되는 방법이다[11]. 일반적인 클린칭 접합방법을 적용 할 경우에는 가압되는 펀치력에 의하여 하부소재도 소성변형을 유발시키지만, THC 접합방법의 경우에는 사전에 가공된 홀에 의하여 하부소재의 변형을 최소화할 수 있으며, 접합 시 발생할 수 있는 FMLs 내부 소재의 파단이나 적층소재간의 층간 분리(delamination)

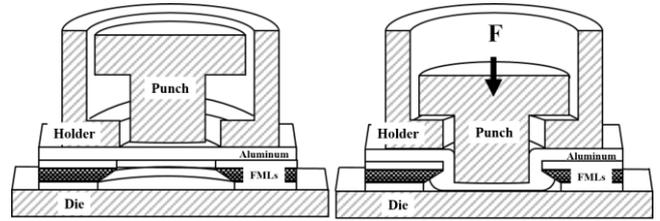


Fig. 1 THC process of dissimilar materials

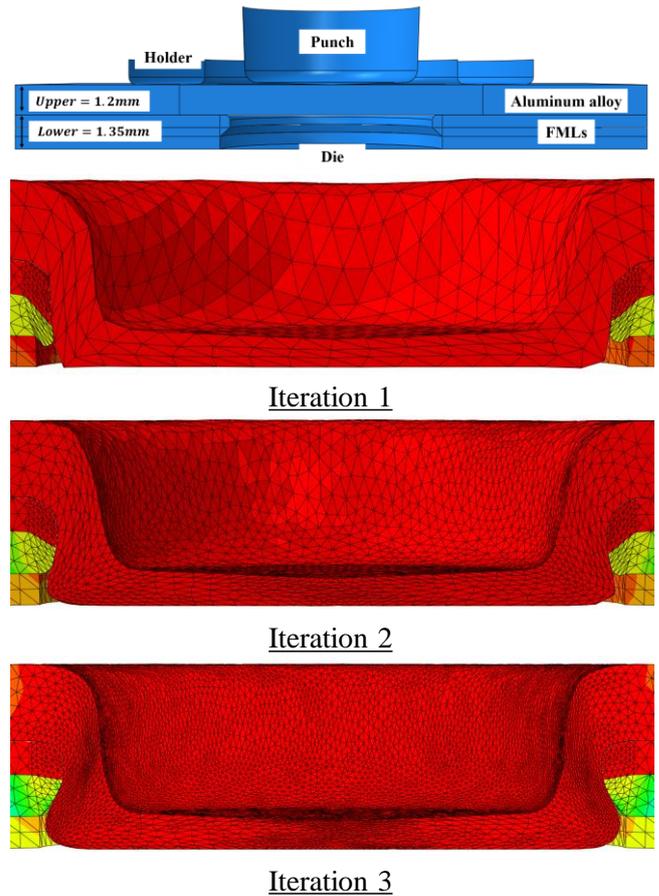


Fig. 2 FE-model of THC process and the detail view of each adaptive remeshing step

발생을 예방할 수 있다. 또한, THC 접합방법은 일반적인 클린칭 접합공정과 달리 평평한 다이를 사용하므로 성형깊이가 짧아지고 접합하중이 낮아지는 장점이 있다.

2.2 THC 접합해석 모델

본 연구에서는 1.35mm 두께의 FMLs 소재와 1.2mm 두께의 Al 5052 소재에 대한 THC 접합해석을 수행하였다. 유한요소 해석은 상용 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행하였으며, 효율적인

해석 수행을 위해 1/2 모델을 사용하였다. 또한 FMLs 내부 접착층의 거동을 구현하기 위해 접착 거동(cohesive behavior)기법을 적용하였으며, 접합해석을 수행하는 과정에서 발생하는 과도한 변형으로 인하여 요소망(mesh) 재구성이 불가피하므로, ABAQUS에서 제공하는 요소망 재구성 방법의 하나인 adaptive remeshing기법을 적용하였다. 요소망 재구성은 정확성과 해석시간을 고려하여 총 3회 반복하였으며, 해당 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 접합해석을 수행한 후, 접합부의 횡 방향 접합강도를 평가하기 위하여 인장-전단 실험과 동일한 방식으로 해석을 수행하였다. Table 1에는 유한요소 해석에 적용된 알루미늄 합금과 자기강화형 폴리프로필렌의 기계적 물성치를 나타내었다.

3. 다구찌 기법을 이용한 THC 수평 방향 접합강도 예측 및 검증

3.1 다구찌 기법

다구찌 기법은 제어할 수 있는 영향력이 큰 설계 변수를 직교배열표(orthogonal array)를 이용하여 자료를 얻고 이 결과로부터 S/N(signal-to-noise)비를 분석하여 실험결과에 유의한 영향을 미치는 인자를 파악하고, 최적조건을 선정하는 방법이다. S/N 비는 신호 대 잡음의 비율을 뜻하는 것으로 목적함수의 특성치에 따라 망대(larger-the-better), 망목(nominal-is-best), 망소(smaller-the-better)특성으로 그 정의가 달라지게 되며 식(1)과 같이 표현된다.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

여기서 N은 실험의 수, y_i 는 i번째 실험에서의 실험값이다. 본 연구에서는 다구찌 기법에 기초하여 THC 접합공정의 접합강도에 영향을 미치는 요인들의 특성을 평가하고, 접합강도를 증가시키기 위한 목적으로 수행하였다. 접합강도는 높을수록 좋은 특성을 나타내기 때문에 망대특성을 적용하였다.

3.2 설계변수 및 평가인자 설정

일반적으로 클린칭 접합의 접합특성은 상부소재의 목 두께(neck-thickness, t_N)와 언더컷(undercut, t_U)의 크기에 의하여 평가된다. 목두께가 일정량 이상 얇

Table 1 Mechanical properties of the SRPP and Al 5052

Material	SRPP	Al 5052
Young's modulus[GPa]	4.04	68.92
Yield strength[MPa]	18.76	188
Ultimate strength[MPa]	157.8	270
Strength coefficient[MPa]	1177.456	364.09
Work-hardening exponent[-]	0.9825	0.1327

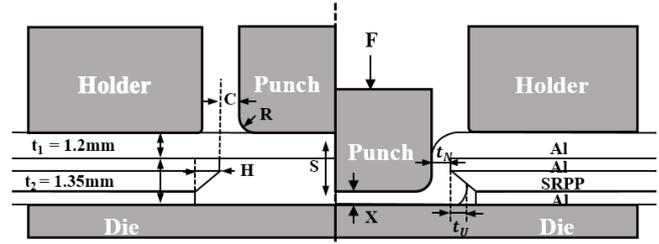


Fig. 3 Design parameters of THC joining

으면 목 파괴모드(neck fracture mode)가 발생하며, 충분한 언더컷이 형성되지 않을 시 분리파괴모드(button separation mode)가 발생한다[12]. 따라서 적절한 목 두께와 언더컷을 형성하면서 접합강도를 증가시키는 설계변수를 선정하는 것이 필수적이다.

일반적인 클린칭 접합에서는 다이 그루브 형상 및 깊이 등이 접합강도에 상당한 영향을 주지만, THC 접합은 하부소재인 FMLs이 다이의 역할을 대신하므로 FMLs의 형상에 대한 설계가 필요하다. 따라서, Fig. 3에 나타낸 것처럼 펀치 코너반경(R), 간극(C), 경사면 길이(H), 그리고 펀치 행정거리(S)를 설계변수로 설정하였다. 설정된 4개의 변수에 대한 3수준(Level)을 Table 2에 나타내었다. 설정된 펀치 코너반경은 충분한 언더컷을 형성할 수 있는 범위로 선정하였고, 간극은 최소 목 두께 치수를 1수준으로, 경사면 길이는 펀치 가압 시 하부소재의 처짐이 발생하지 않는 범위로 결정하였으며, 펀치 행정거리는 최대값을 3수준으로 선정하였다. Table 3에는 설정된 설계변수에 대한 직교배열표를 나타내었다.

3.3 유한요소 해석 결과

Table 4에는 직교배열표의 9가지 조합에 대한 THC 접합 해석의 목 두께(t_N), 언더컷(t_U), 그리고 인장-전단 강도에 대한 해석결과를 나타내었다. 유한요소

Table 2 Design variables and levels

Design Variables	R [mm]	C [mm]	H [mm]	S [mm]
Level 1	0.5	0.6	0.4	1.96
Level 2	1.0	0.7	0.5	2.07
Level 3	1.5	0.8	0.6	2.13

Table 3 Orthogonal array of Taguchi L₉(3⁴)

No.	Parameters				Experiment Condition
	R	C	H	S	
1	1	1	1	1	R ₁ C ₁ H ₁ S ₁
2	1	2	2	2	R ₁ C ₂ H ₂ S ₂
3	1	3	3	3	R ₁ C ₃ H ₃ S ₃
4	2	1	2	3	R ₂ C ₁ H ₂ S ₃
5	2	2	3	1	R ₂ C ₂ H ₃ S ₁
6	2	3	1	2	R ₂ C ₃ H ₁ S ₂
7	3	1	3	2	R ₃ C ₁ H ₃ S ₂
8	3	2	1	3	R ₃ C ₂ H ₁ S ₃
9	3	3	2	1	R ₃ C ₃ H ₂ S ₁

해석결과에서 알 수 있듯이 1, 2, 3, 4, 6 조합의 클린칭 접합결과는 양호한 반면, 5, 7, 8, 9 조합은 충분한 언더컷이 형성되지 않았음을 알 수 있었다. 그리고, 다구찌 기법을 적용하여 수준별 S/N 비 평균값과 설계변수가 S/N 비에 기여하는 순위를 Table 5에 나타내었다. 이 반응 표로부터 인장-전단 강도에 크게 영향을 미치는 인자는 펀치 코너반경(39.52%)이며, 영향력이 적은 인자는 경사면 길이(7.13%)임을 알 수 있다. Fig. 4에는 각 인자에 대한 수준별 영향도를 보여주고 있으며, 이 결과로부터 펀치 코너반경 0.5mm, 간극 0.6mm, 경사면 길이 0.4mm, 펀치 행정거리가 2.13mm가 되는 경우, 인장-전단 하중이 최대가 될 것이라고 예측할 수 있다.

3.4 설계변수 영향성 평가

Fig. 5는 각 수준별 인자들이 목 두께와 언더컷에 미치는 영향도를 보여준다. 목 두께 형성에 크게 영향을 미치는 인자는 펀치 코너반경과 간극으로 도출되었다. 펀치 코너반경의 경우, 1수준에서 0.73mm의 목 두께를 형성하였으며, 3수준에서의 목 두께 1.0mm와 큰 차이를 확인하였다. 이러한 현상은 펀치 압입시 상부소재는 전단 변형을 수반하게 되어

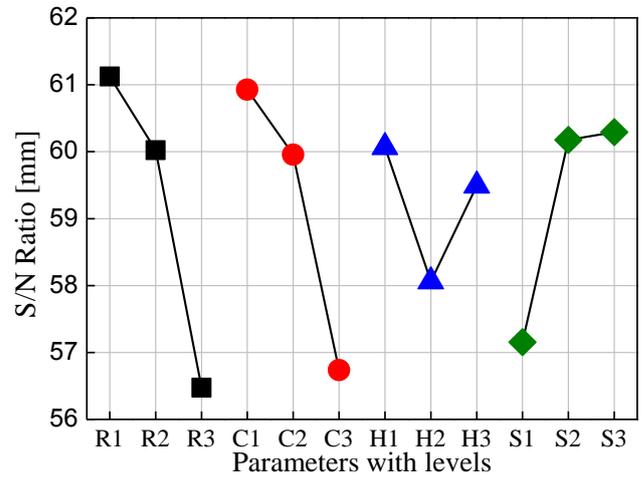


Fig. 4 S/N ratio distribution with respect to level of design parameters

Table 4 Results of FE-analysis

No.	Neck Thickness [mm]	Undercut [mm]	Maximum Load [N]	S/N Ratio [db]
1	0.655	0.117	1209.59	61.653
2	0.732	0.205	1215.97	61.699
3	0.807	0.205	1002.76	60.024
4	0.719	0.224	1213.55	61.681
5	0.876	0	891.775	59.005
6	0.94	0.153	931.1	59.38
7	0.985	0	938.41	59.448
8	0.976	0	908.675	59.168
9	1.05	0	346.97	50.806

Table 5 Response table for S/N Ratio

Factor		R	C	H	S
S/N Ratio	1	61.125	60.93	60.07	57.16
	2	60.02	59.957	58.06	60.18
	3	56.47	56.74	59.49	60.29
Rank		1	2	4	3
Contribution [%]		39.52	32.19	7.13	21.15

펀치 코너반경이 감소할수록 전단 응력의 증가에 따른 결과로 판단된다.

언더컷 형성에 크게 영향을 미치는 인자는 펀치 코너반경과 펀치 행정거리로 도출되었다. 펀치 코너반경은 1수준에서 9가장 큰 언더컷을 형성하였으며,

Table 6 Results of the ANOVA

Source	Sum of square	DOF	Mean Square	F	P
	S_i	Φ_i-1	$S_i/(\Phi_i-1)$	S_i/S_e	
R	35.438	2	17.719	5.54	0.153
C	28.876	2	14.438	4.51	0.181
S	18.977	2	9.488	2.97	0.252
Error	6.397	2	3.199		
Total	89.688	8			

R-Sq=92.87%, R-Sq(adj)=71.47%

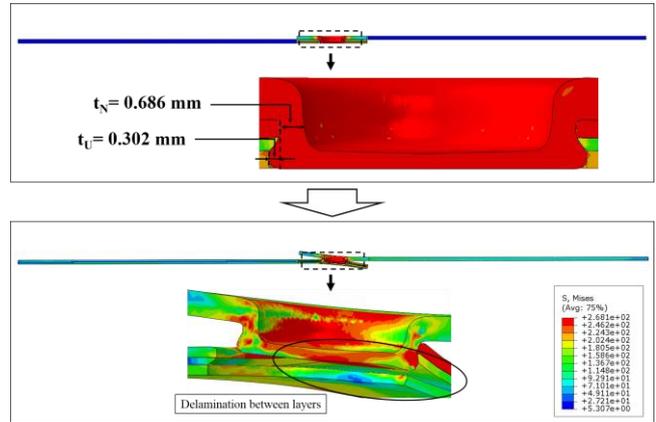


Fig. 6 Results of FE-analysis on the optimal condition

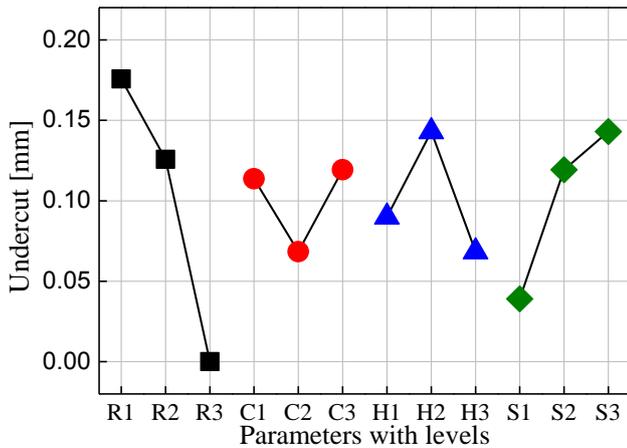
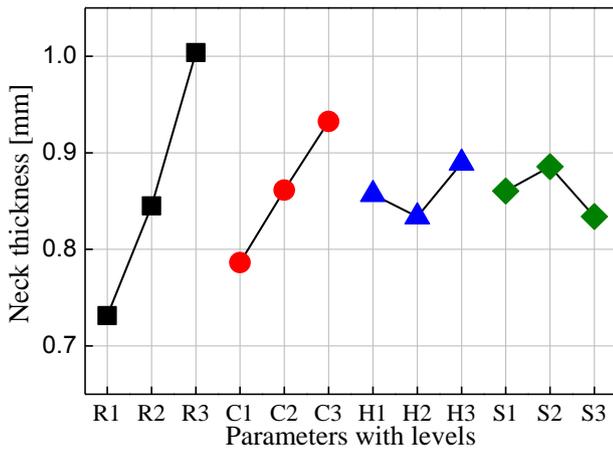


Fig. 5 Results on the average effect of each parameter

3수준의 펀치 코너반경(1.5mm)의 경우에는 언더컷이 형성되지 않았음을 확인하였다. 이는 펀치 코너반경 치수가 증가함으로써 상부소재와 펀치가 맞닿는 면적이 줄어들어 압축응력이 감소되므로 언더컷의 크기가 감소되는 것으로 판단된다. 펀치 행거거리의 경우에는 수준이 증가할수록 언더컷의 형성이 크게

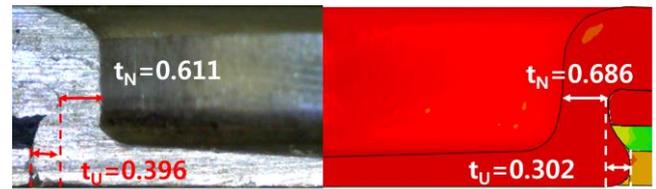


Fig. 7 Comparison of cross-section of THC joining area between the experiment and FE-analysis

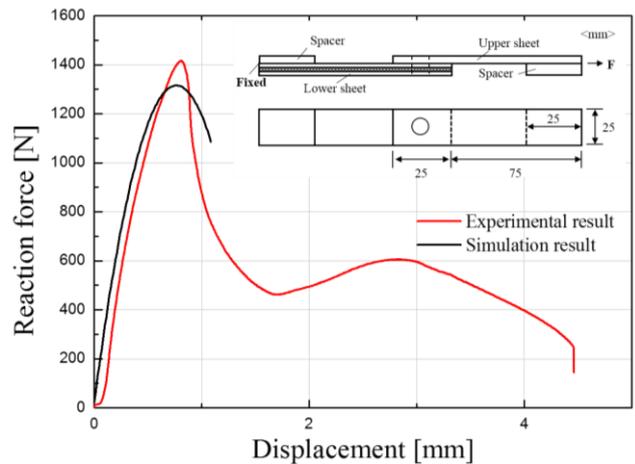


Fig. 8 Load-displacement curve of tensile-shear test

되었다. 이는 펀치 행거거리가 길어질수록 상부소재에 가해지는 압축응력이 커져 하부소재의 홀 공간으로 유입이 쉽기 때문에 언더컷의 형성이 커진 것으로 판단된다.

4. THC 접합부의 실험적 검증

THC 접합을 이용하여 접합부 수평 방향 접합강

도를 평가하기 위하여 앞서 도출된 $R_1C_1H_1S_3$ 조건에 대하여 인장-전단 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시편은 폭 25mm, 길이 100mm 및 겹침길이 25mm로 ASTM D5868-01의 규격을 참고하여 제작하였다[13]. 그리고 추가적으로 최적조건 $R_1C_1H_1S_3$ 에 대하여 THC 접합해석과 인장-전단 해석도 함께 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 해석에서 도출된 목 두께와 언더컷은 각각 0.686mm, 0.302mm이며, 최대 인장-전단 하중은 1314.67N으로 도출되었으며, 이는 직교배열표의 No. 2 조합에서 도출된 최대하중보다 증가되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 THC 클린칭 접합해석과 실험결과를 비교한 것이다. 펀치 행정거리는 유한요소해석과 동일한 2.13mm로 접합을 수행하였다. 목 두께는 목 파괴 또는 네킹(necking)이 발생하지 않는 범위에서 형성되었으며, 상부소재의 유입이 적절하게 이루어져 충분한 언더컷이 형성되었음을 알 수 있다. 접합단면을 비교한 결과, 유한요소해석과 실험의 결과가 상당히 비슷한 경향을 보이는 것을 확인 하였다.

Fig. 8에는 $R_1C_1H_1S_3$ 조건의 실험과 해석에서 도출된 하중-변위 선도를 나타내었다. 인장-전단 실험에서 최대 하중은 1416.29N으로 측정되었다. 실험에서 측정된 최대하중이 약간 높게 측정되었지만, 유한요소해석과 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 실험에서 얻어진 S/N 비는 63.02 수준이며, 이 값은 Table 6의 분산분석을 통해 얻은 신뢰도 95% 수준의 추정구간 62.38 ± 2.19 를 잘 충족시킴을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 알루미늄 합금과 자기 강화형 폴리프로필렌(SRPP)을 적층하여 제작된 섬유금속적층판(FMLs)과 알루미늄 합금의 기계적 접합을 가능하게 하는 경사 홀 클린칭(THC) 접합공정을 제안하였다. 그리고 다구찌 기법과 유한요소 해석을 통하여 접합력을 향상시키기 위해 설계변수들의 영향성을 분석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 펀치 코너반경, 클리어런스, 펀치 행정거리, 경사면 길이 순으로 접합력에 크게 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 접합력을 향상시키기 위한 최적 조건은 펀치 코너반경 0.5mm, 클리어런스 0.6mm,

경사면 길이 0.4mm, 펀치 행정거리 2.13mm일 경우로 도출되었다.

(2) 목 두께 치수에는 펀치 코너반경과 클리어런스가 주된 영향을 미치는 요인으로 평가되었으며, 언더컷의 형성에는 펀치 코너반경과 펀치 행정거리가 주된 영향을 미치는 요인으로 평가되었다.

(3) 최적 수준에 대한 유한요소해석을 수행하였으며, 유한요소해석결과와 THC 접합실험으로 측정된 접합단면을 비교하여 유효성을 검증하였다. 또한 인장-전단 실험을 통해 접합강도를 평가하였으며, 그 결과 최대하중이 약 10% 향상되었다.

다구찌 기법과 유한요소 해석을 통해 접합강도가 향상되었음을 확인하였고, 접합실험과 인장-전단 실험을 통하여 THC 접합의 유효성을 입증하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었으며, 교신저자는 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] M. R. Abdullah, Y. Prawoto, W. J. Cantwell, 2015, Interfacial Fracture of the Fiber-metal Laminates Based on Fibre Reinforced Thermoplastics, Mater. Des., Vol. 66, pp. 446~452.
- [2] J. J. C. Remmers, R. de Borst, 2001, Delamination Buckling of Fiber-metal Laminates. Compos. Sci. Technol., Vol. 61, No, 15, pp. 2207~2213.
- [3] 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.
- [4] S. J. Kim, T. U. Kim, S. Kim, 2014, The Study on Structural Performance of Fiber Metal Laminates, Kor. Aerospace Research Institute, Vol. 13, No. 1, pp. 20~26.
- [5] J. C. Jeong, S. H. Cho, H. J. Cho, K. B. Shin, S. H. Yoon, 2004, Evaluation for Joint Performance of the Hybrid Composite Carbody Structure, Kor. Soc. Compos. Mater., pp. 185~188.
- [6] J. Mucha, W. Witkowski, 2014, The Clinching Joints

- Strength Analysis in the Aspects of Chances in the Forming Technology and Load Conditions, *Thin. Wall. Struct.*, Vol. 82, pp. 55~66.
- [7] K. Mori, Y. Abe, T. Kato, 2012, Mechanism of Superiority of Fatigue Strength for Aluminum Alloy Sheets Joined by Mechanical Clinching and Self-pierce Riveting, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 212, No. 9, pp. 1900~1905.
- [8] J. Varis, 2006, Economics of Clinched Joint Compared to Riveted Joint and Example of Applying Calculations to a Volume Product, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 172, No. 1, pp. 130~138.
- [9] M. Oudjene, L. Ben-Ayed, 2008, On the Parametrical Study of Clinch Joining of Metallic Sheets using the Taguchi Method, *Eng. Struct.*, Vol. 30, No. 6, pp. 1782~1788.
- [10] J. Y. Kim, C. J. Lee, S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, 2009, Effect of Shape Parameters of Tool Improvement of Joining Strength in Clinching, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, No. 5, pp. 392~400.
- [11] D. S. Kang, B. E. Lee, E. T. Park, J. Kim, B. S. Kang, W. J. Song, 2015, Numerical Study for the Improvement of Tapered-hole Clinching Joint Strength of Fiber Metal Laminates and Aluminum 5052 using the Taguchi Method, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 24, No. 1, pp. 37~43.
- [12] C. J. Lee, J. Y. Kim, S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, 2010, Parametric Study on Mechanical Clinching Process for Joining Aluminum Alloy and High-Strength Steel Sheets, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 1, pp. 123~126.
- [13] ASTM D 5868-01, 2008, Standard Test Methods for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding.