

## 다구찌 기법을 이용한 섬유금속적층판과 Al 5052 합금의 경사 홀 클린칭 접합력 향상을 위한 수치적 연구

강동식<sup>1</sup> · 이병언<sup>2</sup> · 박오뜸<sup>2</sup> · 김 정<sup>2</sup> · 강범수<sup>2</sup> · 송우진<sup>#</sup>

### Numerical Study for the Improvement of Tapered-hole Clinching Joint Strength of Fiber Metal Laminates and Aluminum 5052 using the Taguchi Method

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

(Received September 17, 2014/ Revised December 15, 2014 / Accepted December 18, 2014)

#### Abstract

The purpose of the current study is to improve the clinching joint strength of aluminum and fiber metal laminates (FMLs) comprised of three layers. The joining of FML and Al 5052 by a conventional clinching joint has some disadvantages such as necking of the upper sheet, lack of interlocking, defects caused by the vertical load, and especially loss of strength of the composite material due to the low ductility. In the current study, a tapered-hole clinching method is proposed as an alternative for the joining of Al 5052 and FMLs. A hole with a tapered shape is formed before the joining process. The design parameters were evaluated using the Taguchi method for the geometry of the tapered hole in order to determine the maximum separation load. The diameter of the punch corner, clearance, punch stroke and the tapered length were used as the main variables in the Taguchi method. In conclusion, the contribution ratio for each of the four variables examined was 35.07%, 22.44%, 21.32% and 14.11%, respectively. In addition, the appropriate combination of the design parameters can make a 5% improvement in the vertical direction joint strength.

**Key Words** : Fiber Metal Laminates, Separation Load, Interlocking, Tapered-hole Clinching, Taguchi Method

## 1. 서 론

섬유강화 복합재료를 항공기 구조물에 사용하는 경우에 비행 중 조류와의 충돌, 이착륙 시 작은 돌이나 파편 등 여러 종류의 외부 충돌체에 의한 저속 충격손상을 받게 되며, 이러한 결점은 섬유강화 복합재료가 항공기 주구조물(primary structure)에 적용되는데 결정적인 단점이 되어왔다[1]. 복합재료와 관련된 이러한 문제점을 해결하기 위하여 하이브리드 복합재료(hybrid composite)의 일종인 섬유금속적

층판(fiber metal laminates, FMLs)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. FML은 알루미늄 합금과 섬유강화 복합재료를 적층하여 제작되어지며, 내부식성, 내충격성, 내피로성 등이 기존의 금속재료에 비하여 월등히 향상된 특성을 갖는 것으로 알려져 있으며, 이러한 장점들로 인하여 최근 A380의 상부 동체 등에 적용되어 일부 실용화가 이루어졌다[3]. 그러나, 여러가지 장점과 더불어 층간 분리 현상과 같은 문제점 등도 내포하고 있기 때문에 FML에 대한 다양한 연구가 요구되어지며[4], 특히, FML과 이종소재

1. 부산대학교 첨단정밀공학 협동과정

2. 부산대학교 항공우주공학과

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

간의 접합 시 기계적 성능 저하, 적층소재간의 층간 분리 현상 등 많은 문제가 발생할 수 있기 때문에 FML과 금속간의 접합에 대한 연구가 필요하다.

일반적으로 FML과 금속간의 접합에는 SPR(self-piercing rivet) 접합, 접착제(adhesive bonding) 접합 방법이 널리 쓰이고 있으나, SPR 접합의 경우에는 불필요한 리벳의 추가로 인해 무게 증가를 초래하는 단점이 있으며, 접착제 접합의 경우에는 결합 시간이 길고 환경적 문제가 발생할 수 있으므로, 기존의 접합 방법을 대체할 효과적인 접합방법이 요구되고 있다[5]. 이러한 문제점의 대안으로 기계적 접합방법인 클린칭 접합(clinched joint)이 주목을 받고 있다. 클린칭 접합 방법은 SPR 접합과는 달리 추가적인 리벳이 필요없어 비용적인 측면에서 유리하고, 펀치(punch)와 다이(die)의 제작비용이 비싸지만 수명이 길기 때문에 타 접합 방법에 비해 생산 원가가 낮아지는 장점을 가지고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[5~7].

하지만 FML과 같이 적층된 소재와 금속의 클린칭 접합을 시도할 경우, Fig. 1과 같이 내부에 적층된 복합소재가 수직하중을 견디지 못하고 파손되어 사실상 복합재료의 기능을 상실하였음을 관찰할 수 있다. 그러므로 클린칭 접합 수행 시 하부소재인 FML에 최소한의 영향을 주면서 높은 접합강도를 도출하기 위한 연구가 필요하다.

이를 위해, 본 논문에서는 FML에 테이퍼 형상의 홀을 가공한 후 상부소재에 펀치를 가압하여 하부소재의 테이퍼 홀 체적만큼 구속시킴으로써 접합이 형성되는 방법(tapered-hole clinching, THC)을 제안하였다. 제안된 접합방법의 분리하중(separation load)을 증가시키는 요인들의 특성을 파악하기 위해 주요 설계변수를 정립하였고, 다구찌(Taguchi) 기법을 적용하여 직교배열표를 작성하였으며 S/N 비를 계산하였다. 계산된 S/N 비로 분리하중에 영향을 미치는 변수들의 기여도를 산출하였으며, 최대 분리하중을 도출하는 조합으로 유한요소 해석을 수행하여 분리하중이 향상되었음을 검증하였다.

## 2. THC 접합공정 개요 및 설계적용 해석 모델 정의

### 2.1 THC 접합

본 논문에서는 Fig. 2에서와 같이 상부에 Al 5052

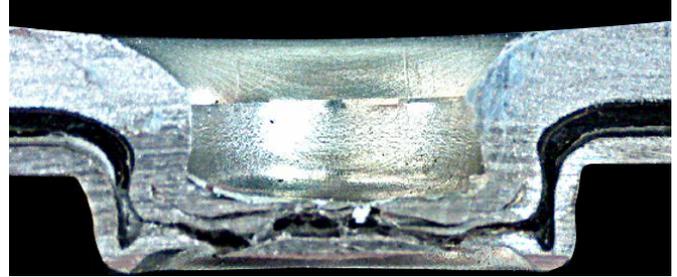


Fig. 1 Failure of the composite in the conventional clinching joint process

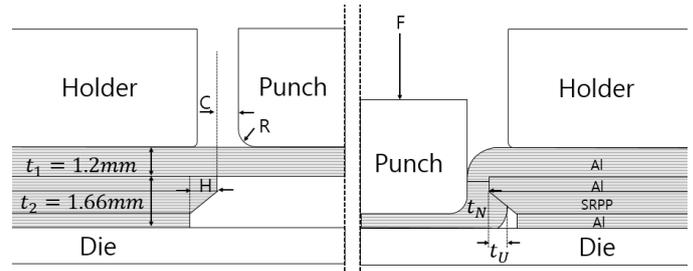


Fig. 2 Geometry of the tapered-hole clinching joint

소재를 위치시키고, 접합공정 이전에 테이퍼 형상의 홀이 가공된 낮은 연신율 특성의 FML을 하부에 위치시켜 접합시키는 공정을 제안하였다. 이와 같은 THC 접합공정은 펀치를 가압하여 상부소재가 소성 변형이 발생하는 동안 하부소재의 변형을 최소화하고, 테이퍼 홀 체적만큼 구속시킴으로써, 상부소재와 하부소재 사이에 강한 결합력이 발생하여 접합되는 방법이다. 이로 인해 FML 내부에 적층된 복합소재의 파단이나 적층된 소재간의 층간분리(delamination) 발생에 대한 위험을 사전에 예방할 수 있으며, 평평한 다이를 사용하므로 접합 후 외관상의 장점과 일반적인 클린칭 접합에 비하여 성형깊이가 짧아지는 장점이 있다.

일반적인 클린칭 접합 결합부의 형상특성은 다이의 형상에 의해 결정되며, 다이의 형상은 이종소재간의 결합력을 결정짓는 중요한 설계인자이다. 특히, 다이의 깊이와 접합소재의 두께에 따라 상부소재의 성형 깊이가 결정되며, 그 깊이는 접합 후 상부와 하부소재 두께 합 40~50% 수준으로 설정된다[8]. 또한, Ahn[9] 등은 홀 클린칭 접합의 기하학적 조건을 바탕으로 상부소재의 파단이 발생하지 않고 충분한 언더컷( $t_U$ )을 형성하는 성형 깊이를 80% 이상의 수준으로 설정하였다. 성형 깊이가 부족하면 충분한 언더컷( $t_U$ )을 형성하지 못하고, 필요이상으로

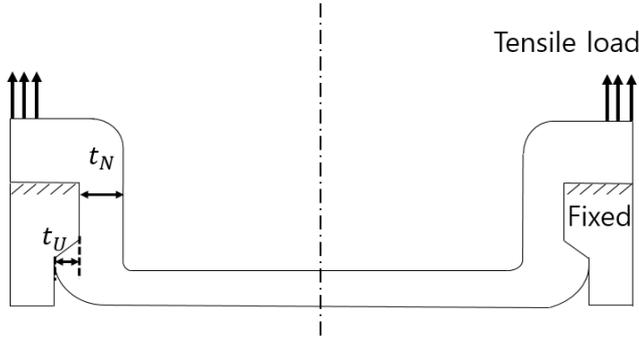


Fig. 3 Separation of the joint by vertical load

클 경우에는 상부소재의 파단이 발생할 수 있다. THC 접합의 경우, 성형 깊이가 일반적인 클린칭 접합에 비하여 작으나 펀치 압입시 데이퍼드 경사로 인해 하부소재의 처짐이 발생할 수 있으므로 적절한 값을 선택하여야 한다.

### 2.2 유한요소 해석 모델

THC 접합공정에 대한 유한요소 모델은 Fig. 2와 같이 1.2mm 두께의 Al 5052, 1.66mm 두께의 FML, 펀치(punch), 홀더(holder) 그리고 다이(die)로 구성된다. 유한요소 해석은 상용프로그램인 DEFORM 2-D를 이용하여 수행하였으며, 효율적인 해석 수행을 위하여 축 대칭 모델로 가정하였다.

클린칭 접합에 대한 해석을 수행한 후 접합부의 최대 인장하중을 평가하기 위하여 Fig. 3과 같이 하부소재를 구속시키고 상부 소재를 접합면에 수직 방향으로 하중을 인가하였다. 이 과정에서 수직 방향으로 하중이 가해지면서 상부소재와 하부소재의 분리가 발생하는데, 이 때 하중을 최대 인장강도로 고려하였다[10]. THC 접합공정에서 금형과 소재간의 마찰계수는 0.12, 그리고 소재 상호간에는 0.4로 설정하였으며[11], 해석에 적용된 소재는 Table 1의 물성치를 적용하여 해석을 수행하였다.

## 3. 다구찌 기법을 이용한 THC 접합공정 설계

### 3.1 다구찌 기법 개요

본 논문에서는 THC 접합의 접합력에 영향을 미치는 요인들의 특성을 평가하고, 접합력을 향상시키기 위해 다구찌 기법을 적용하였다. 다구찌 기법은 직교배열표를 이용한 일부실험을 사용하고 있어 실험의 크기를 작게 할 수 있으며, 손실함수와 S/N

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

Table 2 Design variables and levels

Design Variables	R [mm]	C [mm]	H [mm]	S [mm]
Level 1	0.5	0.5	0.56	2.3
Level 2	1.0	0.6	0.66	2.37
Level 3	1.5	0.7	0.76	2.43

비(signal-to-noise)를 도입하여 품질을 일정하게 유지할 수 있는 인자를 찾아가는 최적공정설계가 가능하다[12]. 분리하중은 높을수록 좋은 특성을 나타내므로 다구찌 기법의 망대특성(larger-the-better type characteristic) 손실함수를 적용하여 S/N 비를 분석하였다. 다구찌 기법에서는 목표치에 대한 평균제곱편차(mean square deviation, MSD) 값을 통하여 설계 또는 공정목표에 대하여 최적화를 수행한다[13]. MSD는 식(1)과 같이 표현된다.

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (1)$$

여기서 n은 실험 횟수, y<sub>i</sub>는 i번째 실험값이다. 손실함수를 망대특성으로 설정하였을 경우, S/N 비는 식(2)로 표현된다.

$$S/N = -10 \cdot \log(MSD) \quad (2)$$

### 3.2 설계변수와 직교배열표

클린칭 접합력에 영향을 미치는 중요한 요인은 목 두께(t<sub>N</sub>)와 언더컷(t<sub>U</sub>)으로, 목 두께(t<sub>N</sub>)는 다이깊이와 펀치코너반경, 언더컷(t<sub>U</sub>)은 펀치코너반경, 간극, 다이의 밀변각도 등과 밀접한 관련이 있다[5~6]. 접합력을 향상시키기 위해서 다이와 펀치의 적절한 설계가 필요하고, THC 접합에서는 다이의 역할을 하부소재가 대신하므로, 하부소재의 형상에 대한 설계가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 Fig. 2에 나타

**Table 3 Orthogonal array of Taguchi  $L_9(3^4)$**

No.	Variables				Experiment Condition
	R	C	H	S	
1	1	1	1	1	$R_1C_1H_1S_1$
2	1	2	2	2	$R_1C_2H_2S_2$
3	1	3	3	3	$R_1C_3H_3S_3$
4	2	1	2	3	$R_2C_1H_2S_3$
5	2	2	3	1	$R_2C_2H_3S_1$
6	2	3	1	2	$R_2C_3H_1S_2$
7	3	1	3	2	$R_3C_1H_3S_2$
8	3	2	1	3	$R_3C_2H_1S_3$
9	3	3	2	1	$R_3C_3H_2S_1$

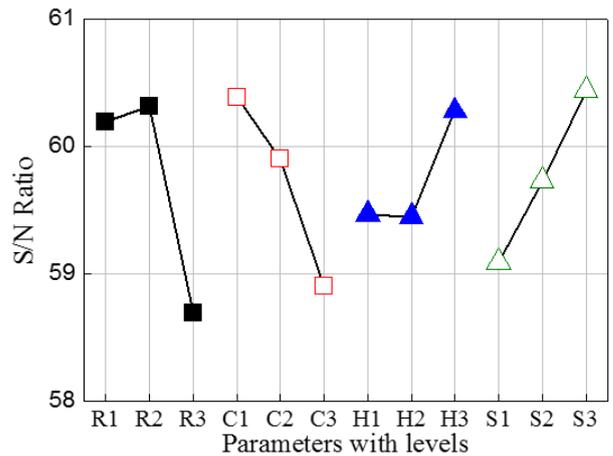
**Table 4 The results for FEA**

No.	Experimental Condition	Neck Thickness ( $t_N$ ) [mm]	Undercut ( $t_U$ ) [mm]	Maximum Tensile Load [N]	S/N Ratio [db]
1	$R_1C_1H_1S_1$	0.47	0.479	988	59.9
2	$R_1C_2H_2S_2$	0.557	0.485	1008	60.07
3	$R_1C_3H_3S_3$	0.654	0.51	1126	61.03
4	$R_2C_1H_2S_3$	0.473	0.624	1175	61.4
5	$R_2C_2H_3S_1$	0.565	0.343	1064	60.54
6	$R_2C_3H_1S_2$	0.676	0.274	921	59.29
7	$R_3C_1H_3S_2$	0.557	0.316	989	59.9
8	$R_3C_2H_1S_3$	0.654	0.245	924	59.31
9	$R_3C_3H_2S_1$	0.77	0.06	698	56.88

**Table 5 Response table for S/N Ratio**

Factor		R	C	H	S
S/N Ratio	1	60.19	60.39	59.47	59.03
	2	60.32	59.90	59.45	59.73
	3	58.69	58.90	60.28	60.44
Rank		1	2	4	3
Contribution [%]		36.72	25.91	10.19	22.09

낸 것처럼 펀치코너반경(R), 간극(C), 테이퍼드 길이(H) 그리고 행정거리(S)를 설계변수로 설정하였다.



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

설정된 4개의 요인에 대한 3수준(Level)을 Table 2에 나타내었으며, 각 인자들간의 교호작용은 없는 것으로 간주하여 독립적인 영향만을 분석하였다. 설정된 펀치 코너반경은 충분한 언더컷( $t_U$ )을 형성할 수 있는 범위로 설정하였고, 간극은 최소 목 두께( $t_N$ )치수를 1수준으로 설정하였으며, 테이퍼 길이는 1:1 두께 비를 가지는 치수를 2수준으로 설정하였으며 펀치 행정거리는 접합소재 두께의 합의 80%를 1수준으로 설정하였다. 이렇게 설정된 치수의  $L_9(3^4)$  직교배열표를 Table 3에 나타내었다.

### 3.3 유한요소 해석 분석 결과

직교배열표에 따른 각 변수 조합에 대하여 목 두께( $t_N$ ), 언더컷( $t_U$ ) 그리고 분리하중에 대한 유한요소 해석결과를 Table 4에 나타내었다. 다구찌 기법을 적용하여 수준별 S/N 비 평균값과 설계변수가 S/N 비에 영향을 미치는 순위를 Table 5에 나타내었으며, 이 반응 표로부터 R>C>S>H 순으로 S/N 비에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 4는 각 요인에 대한 수준별 영향도를 나타내었으며, 이 결과로부터 펀치 코너반경 1.0mm, 간극 0.5mm, 테이퍼드 길이 0.76mm, 펀치 행정거리가 2.43mm가 되는 경우 분리하중에 대한 S/N 비가 최대가 될 것이라고 판단된다. 또한, 각 요인의 기여율은 펀치 코너반경이 36.72%, 간극이 25.91%, 펀치 행정거리가 22.09%, 테이퍼드 길이가 10.19%로 도출된 것을 확인할 수 있었으며, 최적조건에서 S/N 비에 대한 예측 값  $\hat{\mu}_{SN_0}$  을 식(3)을 통하여 구할 수 있다.

$$\hat{\mu}_{SN_0} = \overline{R_2} + \overline{C_1} + \overline{H_3} + \overline{S_3} - 3\overline{T} \quad (3)$$

위 식에서  $\overline{R_2}$ ,  $\overline{C_1}$ ,  $\overline{H_3}$  그리고  $\overline{S_3}$  는 Table 5에서의 최적수준 S/N 비이며  $\overline{T}$  는 table 4 에서 도출된 모든 실험조건들의 S/N 비의 산술 평균값이다. 위 식으로 계산된 최적수준의 S/N 비 예측 값은 62.23 이 된다. 그리고 최적수준의 S/N 비 값을 식(1), (2), (3)을 이용하여 최대 인장하중으로 환산 했을 시 1,288N이 됨을 알 수 있다.

### 4. THC 접합공정 공정 설계인자 영향성 평가

#### 4.1 목 두께 영향 분석

Fig. 5는 각 수준별 인자들이 목 두께( $t_N$ )에 미치는 영향도를 나타내고 있다. 목 두께( $t_N$ )에 크게 영향을 미치는 인자는 펀치 코너반경과 간극으로, 두 인자 모두 치수가 증가할수록 목 두께( $t_N$ )가 증가되었다. 펀치 코너반경의 경우, 1수준에서 0.56mm의 목 두께( $t_N$ )를, 3수준에서는 0.67mm의 목 두께( $t_N$ )를 형성하였으며, 이러한 현상은 펀치 압입시 상부소재는 전단 변형을 수반하게 되어 펀치 코너반경이 감소할수록 전단 응력이 커짐에 따른 결과라고 할 수 있다. 그리고 간극의 경우, 각 수준별 간극의 치수와 거의 동일하게 측정되었다. 일반적인 클린칭 접합에서는 다이 깊이만큼 펀치 행정거리가 증가되고 펀치 압입시 상부소재가 다이 밀면에 닿기 직전까지 전단변형을 수반하게 되는데, 이때 극심한 소성변형으로 인하여 상부소재의 목 부분의 치수가 줄어들게 된다. 하지만 THC 접합의 경우에는 평평한 다이를 사용하므로 펀치 행정거리가 비교적 짧아 상부소재에 부하되는 전단응력의 크기가 상대적으로 작으므로 펀치 행정거리가 목 두께( $t_N$ )에 미치는 영향이 미비한 것으로 판단된다.

#### 4.2 언더컷 영향 분석

Fig. 6은 각 수준별 인자들이 언더컷( $t_U$ )에 미치는 영향도를 나타내고 있으며, 테이퍼드 길이를 제외한 나머지 인자들이 언더컷( $t_U$ ) 형성에 크게 관여한다는 것을 알 수 있다.

펀치 코너반경의 경우, 치수가 증가할수록 언더컷( $t_U$ )이 감소하는 것을 알 수 있고, 펀치 코너반경이 줄어들수록 상부소재와 펀치가 맞닿는 면적이 커져 압축응력이 증가되므로 언더컷( $t_U$ )이 증가하는 것으

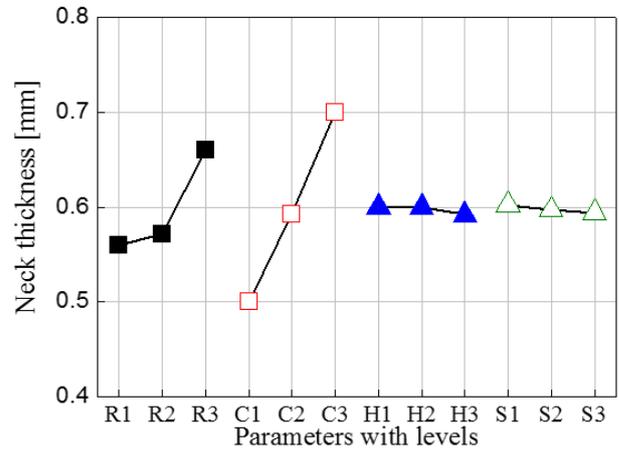


Fig. 5 Average effect of parameter levels on the neck thickness

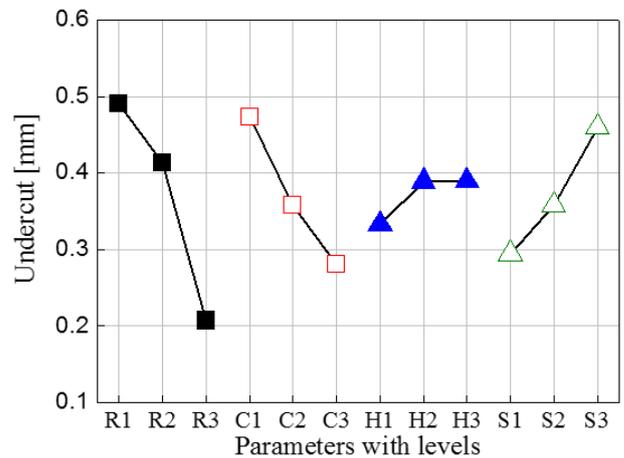


Fig. 6 Average effect of parameter levels on the undercut

로 판단된다.

간극 또한 펀치 코너반경과 마찬가지로 치수가 증가할수록 언더컷( $t_U$ )이 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 간극이 증가할수록 테이퍼드 홀 공간으로 압입 가능한 상부소재의 체적이 감소하여 언더컷( $t_U$ )이 감소되는 것으로 판단된다.

펀치 행정거리의 경우에는 치수가 증가할수록 언더컷( $t_U$ )이 증가되었으며, 이는 펀치 행정거리가 증가할수록 상부소재에 가하는 압축응력의 증가로 인하여 압축되는 체적만큼 상부소재가 홀 공간으로 유입되어 언더컷( $t_U$ )이 증가되는 것으로 판단된다.

펀치 코너반경과 간극의 치수가 적을수록 언더컷( $t_U$ )이 증가되지만, 과도하게 적은 치수로 설계 할

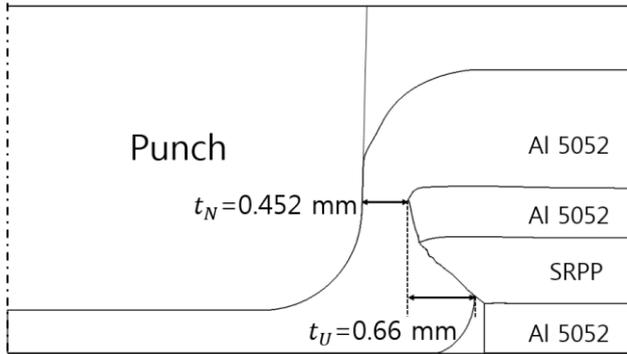


Fig. 7 FEA result of the optimum conditions

경우 언더컷( $t_U$ )을 형성할 수 있는 테이퍼 홀 체적을 초과하여 더 이상 언더컷( $t_U$ )을 형성할 수 없을 뿐만 아니라 목 부분에 과도한 소성변형으로 인한 파단이 발생 할 수 있다. 또한, 펀치 행정거리를 과도한 치수로 설계할 경우에는 접합 후 상부소재의 두께가 아주 얇아지게 되며, 이는 코이닝(coining)효과에 의한 하중 증가가 예상되므로[9], 각 변수들의 적절한 치수를 선정하여 설계하여야 한다.

#### 4.3 도출된 설계조건의 유한요소 해석

최적화된 설계조건의 타당성을 검증하기 위하여 THC 접합 해석을 최적 변수값을 적용하여 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

유한요소 해석 결과, 목 두께( $t_N$ )는 0.452mm, 언더컷( $t_U$ )은 0.66mm로 예측되었으며, 최대 인장하중은 1,233 N으로 도출 되었다. 유한요소 해석으로 도출된 값들을 Table 4에서 가장 높은 측정치가 도출된 No. 4와 비교하였을 때 목 두께( $t_N$ )는 0.021mm 감소하였고, 언더컷( $t_U$ )은 0.036mm 증가하였으며, 최대 인장하중은 약 5.0% 증가 되었다. 이 결과를 통하여 다구찌 기법을 이용한 최적조건에 신뢰성을 확인할 수 있었다.

### 5. 결론

본 논문에서는 다구찌 기법과 유한요소 해석을 통하여 테이퍼드 홀이 가공된 섬유금속적층판과 Al 5052의 접합력을 향상 시키기 위하여 설계인자들의 영향성을 분석하였다.

(1) 접합력을 향상 시키기 위한 적합 조건은 펀치 코너반경이 1.0mm, 간극이 0.5mm, 테이퍼드 길이 0.76mm 그리고 펀치 행정거리가 2.43mm일 경우로

나타났으며, 접합력에 영향을 미치는 기여도는 펀치 코너반경이 36.72%, 간극이 25.91%, 펀치 행정거리가 22.09%, 테이퍼드 길이가 10.19%로 나타났다.

(2) 목 두께( $t_N$ ) 치수에는 펀치 코너반경과 간극이 주된 영향을 미치는 요인으로 평가 되었으며, 언더컷( $t_U$ )의 형성에는 펀치 코너반경, 간극 그리고 펀치 행정거리가 주된 영향을 미치는 요인으로 평가 되었다. 또한 분리하중에 기여도가 높은 요인과 언더컷( $t_U$ ) 형성에 영향을 미치는 주된 요인이 동일함을 알 수 있었다.

(3) 최적 수준에 대한 유한요소해석과 No. 4과 비교하였을 때 목 두께( $t_N$ )는 0.021mm 감소하였고, 언더컷( $t_U$ )은 0.36mm 증가하였으며, 분리하중은 약 5.0% 향상 되었다.

본 논문에서는 수치해석을 통하여 다구찌 기법으로 설계된 접합공정에 대하여 섬유금속적층판과 Al 5052의 접합력이 향상되었음을 확인하였으나, 향후 수치해석의 정확성 및 신뢰성을 높이기 위해 추가적인 실험을 통한 실험결과와 비교·분석을 수행할 필요가 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] 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.
- [2] H. S. Choi, H. S. Roh, W. J. Choi, M, S, Ha, 2005, Load Transfer Behaviors of the Splice-Jointed Fiber Metal Laminates, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 29, No. 2, pp. 220~227.
- [3] G. Caprino, G. Spataro, S. Del Luongo, 2004, Low-velocity Impact Behaviour of Fiberglass-aluminium Laminates, Compos. Part A-Appl. S., Vol. 35, No. 5,

- pp. 605~616.
- [4] A. Asundi, A. Y. N. Choi, 1997, Fiber Metal Laminates: An Advanced Material for Future Aircraft, *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 63, No. 1, pp. 384~394.
- [5] D. H. Lim, B. W. Lee, H. H. Rhyu, H. K. Kim, 2003, An Experimental Study on the Strength Evaluation of Al-5052 Tensile-Shear Specimens Using a Mechanical Press Joining Method, *Trans. Kor. Soc. Mech. Tool. Eng.*, Vol. 12, No. 1, pp. 58~64.
- [6] J. P. Varis, 2003, The Suitability of Clinching as a Joining Method for High-strength Structural Steel, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 132, No. 1-3, pp. 242~249.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] N. S. Ahn, C. J. Lee, J. M. Kim, D. C. Ko, S. B. Lee, B. M. Kim, 2012, Joining High-Strength Steel and Al6061 Sheet Using Hole Clinching Process, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 36, No. 6, pp. 691~698.
- [10] 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.
- [11] J. P. Varis, J. Lepisto, 2003, A Simple Testing-based Procedure and Simulation of the Clinching Process Using Finite Element Analysis for Establishing Clinching Parameters, *Thin Wall. Struct.*, Vol. 41, No. 8, pp. 691~709.
- [12] K. T. Kim, Y. S. Kim, 2012, Optimization for Thermal Spray Process by Taguchi Method, *Kor. Soc. Power Eng.*, Vol. 16, No. 2, pp. 54~59.
- [13] T. H. Kwon, C. H. Suh, R. G. Lee, S. K. Oh, Y. C. Jung, H. B. Lim, 2013, Optimization of Design Parameters for Lock-Claws of Pneumatic Fitting Using Taguchi Method, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 37, No. 12, pp. 1541~1546.