

## 마찰교반 홀 클린칭을 이용한 알루미늄과 고장력강의 접합에 관한 연구

고룡해<sup>1</sup> · 강길석<sup>1</sup> · 이경훈<sup>2</sup> · 김병민<sup>2</sup> · 고대철<sup>#</sup>

### A Study on Joining of Aluminum and Advanced High Strength Steel Using Friction Stir Hole Clinching

L. H. Gao, G. S. Kang, K. Lee, B. M. Kim, D. C. Ko

(Received August 31, 2017 / Revised October 23, 2017 / Accepted October 26, 2017)

#### Abstract

In recent years, dissimilar materials such as aluminum, magnesium, titanium, and advanced high strength steel are widely used in automotive body due to environment concerns and fuel consumption. Therefore, joining technology is important for assembling components made of dissimilar materials. In this study, friction stir hole clinching (FSHC) was proposed as a new mechanical joining method to join dissimilar materials. This process stirs and heats the upper sheet, forming mechanical interlocking with the lower sheet. The feasibility of this FSHC process was verified by comparing cross-section of joint in FSHC and hole clinching process under the same processing condition. Taguchi method was also applied to the FSHC process to estimate the effect of process parameters on joint strength and obtain optimal combination of process parameters. Joint strength of FSHC with optimal process condition was compared to that of FSHC with initial process condition as well as that of hole clinching with optimal process condition. Results showed that the FSHC process was useful for joining dissimilar materials, even if the formability of materials was low.

**Key Words** : Friction Stir Hole Clinching, Hole Clinching, Taguchi Method, Dissimilar Materials, Joint Strength

#### 1. 서론

최근 자동차 산업에서는 환경규제가 강화됨에 따라 이산화탄소 저감 및 연비 향상을 위해 차체 경량화에 대한 요구가 증대되고 있다. 따라서 알루미늄, 마그네슘, 티타늄 및 고장력강 등의 다양한 경량화 소재를 자동차 부품에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1~3]. 특히 알루미늄 합금은 비강성과 내식성이 우수하기 때문에 경량제품에 많이 사용되고 있다. 그러나 알루미늄은 높은 열전도성(thermal conduction)과 표면의 산화층(oxide layer)으로

인해 기존의 금속 제품과의 접합에 있어서 일반적인 저항 점 용접(resistance spot welding)의 적용이 제한된다[4, 5]. 그러므로 이종소재(dissimilar material) 접합에 널리 사용되는 기계적 접합(mechanical joining) 방법인 볼트체결(bolting), SPR(self-piercing rivet) 및 클린칭(clinching) 등이 주로 적용되고 있다. 클린칭 접합의 경우 볼트체결 및 SPR과 달리 추가적인 접합 요소가 필요하지 않기 때문에 생산비용을 절감할 수 있다[6]. 그러나 알루미늄 합금과 고장력강의 접합 시 고장력강의 높은 강도와 낮은 연신율로 인해 클린칭 접합이 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해

1. 부산대학교 일반대학원 융합학부

2. 부산대학교 설계기반미래성형기술센터(ERC/ITAF)

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

하부 소재에 홀을 가공한 후 상부 소재의 변형만으로 기하학적 구속(geometrical interlocking)을 얻는 홀 클린칭(hole clinching) 공정이 제안되었다[7~10]. 금속과 탄소섬유강화 복합소재(carbon fiber reinforced plastic)와 같은 다양한 이종재료의 접합에 홀 클린칭 공정을 적용하였으며, 홀 클린칭 공정에서 공구 형상에 따른 접합강도(joint strength)의 영향을 평가하였다. 그러나 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 홀 클린칭 공정은 상부 소재의 두께방향으로 과도한 변형이 발생하기 때문에 성형성이 낮은 소재를 사용할 경우 목과괴(neck fracture)가 빈번하게 발생된다. 따라서 성형성(formability)이 낮은 이종소재의 접합을 위한 새로운 공정의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 마찰열을 이용하여 소재의 소성유동을 향상시켜 홀 클린칭 공정에서 발생하는 목과괴를 방지할 수 있는 마찰교반 홀 클린칭(friction stir hole clinching, FSHC) 공정을 개발하였다. 개발된 공정의 유효성을 검증하기 위해 홀 클린칭 공정과 동일한 성형조건에 대하여 접합부의 단면형상을 비교해 보았다. 또한 다구찌 실험계획법(Taguchi method)을 이용하여 접합강도에 대한 FSHC 공정의 주요 공정변수의 영향을 평가하고 최적 공정조건을 도출해 보았다. 최적 공정조건에 대해 FSHC 공정을 이

용하여 접합실험을 수행하고 접합부 단면형상과 접합강도를 평가해 보았다.

## 2. 마찰교반 홀 클린칭 공정의 개요

본 연구에서 제안한 FSHC 공정은 기존의 마찰교반 점 용접(friction stir spot welding)과 홀 클린칭의 장점들을 조합한 공정이다. FSHC 공정은 마찰교반 점 용접과 달리 상·하부 소재의 혼합과정이 없으며, 홀 클린칭 공정과 같이 하부 소재에 홀을 가공하고 상부 소재의 소성변형만을 통해 기하학적 구속을 얻는 기계적 접합방법이다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 FSHC 공정은 상부 소재와 회전하는 공구 사이의 회전 마찰로 인해 마찰열(frictional heat)이 발생되며, 공구의 압입으로 다이 공동부(cavity)에 상부 소재가 충전되어 언더컷을 형성하게 된다. 따라서 FSHC 공정은 추가적인 접합요소가 필요하지 않으므로 생산단가를 절감할 수 있다. 그러나 FSHC 공정은 마찰열을 이용함으로써 상부 소재가 열연화(thermal softening)되어 접합부의 강도를 저하시킬 수 있다. 반면에 마찰열로 인해 연화된 소재는 소성유동이 향상되기 때문에 접합부의 성형이 용이하여 성형성이 낮은 소재에도 적용이 가능하다.

FSHC 공정의 접합강도는 상부 소재의 열연화 특성 및 기하학적 구속부의 형상과 밀접한 관계가 있으며, 구속부의 형상은 목두께와 언더컷 길이 및 두께로 결정된다. 목두께는 FSHC 공구의 프로브(probe)와 하부 소재의 홀 직경 사이의 간극에 의해 결정되며, 언더컷 길이 및 두께는 다이 공동부의 깊이와 성형 시 상부 소재의 유입량에 의해 결정된다. 따라서 FSHC 공정의 열연화 특성과 기하학적 구속부의 형상에 대한 공정변수의 영향을 파악하는 것이 중요하다.

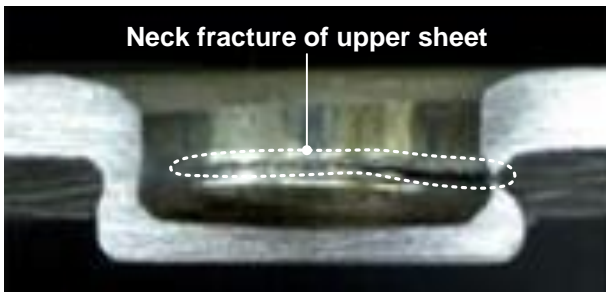


Fig. 1 Neck fracture in hole clinching [2]

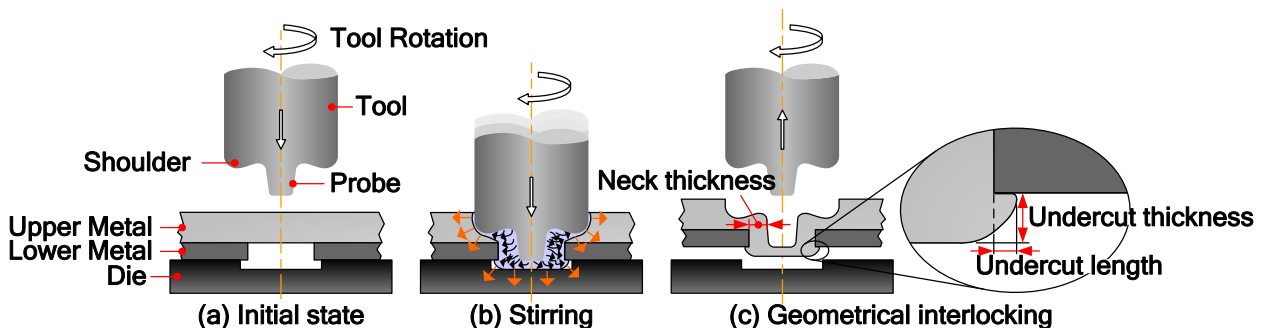


Fig. 2 Process sequence of friction stir hole clinching

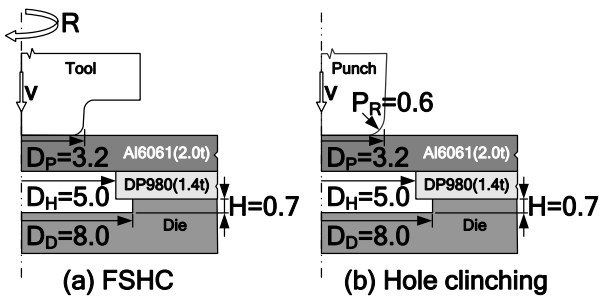


Fig. 3 Process condition of hole clinching and FSHC (unit: mm)

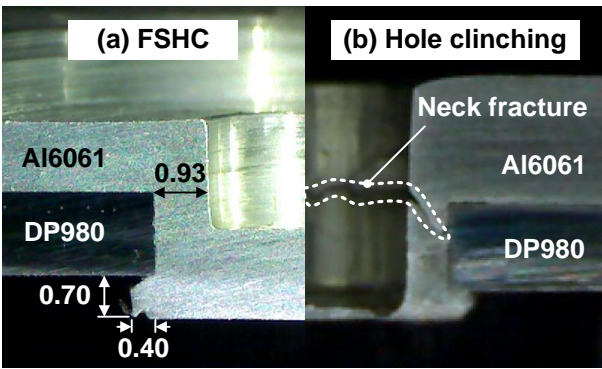


Fig. 4 Comparison of cross section of joint in hole clinching and FSHC (unit: mm)

### 3. FSHC 공정의 유효성 실험

#### 3.1 접합부 단면형상

FSHC 공정의 유효성을 검증하기 위하여 동일한 성형조건에 대하여 홀 클린칭 공정과 비교해 보았다. 두 공정의 금형형상을 Fig. 3에 나타내었으며, 유사한 접합부 형상을 얻기 위해 하부 소재에 직경 ( $D_H$ ) 5mm의 홀을 가공하고 다이 깊이(H)는 0.7mm로 동일하게 가공하였다. 그리고 FSHC 공정에서 공구의 회전속도(rotation speed, R)는 1000rpm, 압입 깊이(plunge depth,  $P_d$ )는 2.8mm, 압입 속도(plunge speed)는 0.2mm/sec로 선정하였다. 2mm 두께의 Al6061과 1.4mm 두께의 DP980 소재를 이용하여 각 공정에 대한 접합실험을 수행하였으며, Fig. 4는 두 공정에 대한 시험편의 접합부 단면형상을 보여준다. Fig. 4(a)와 같이 FSHC 공정에서는 결함없이 시험편의 접합이 이루어짐을 알 수 있으며, 접합부의 목두께와 언더컷 길이 및 두께는 각각 0.93mm, 0.40mm, 0.7mm로 측정되었다. 반면에 Fig. 4(b)와 같이 홀 클린칭 시험

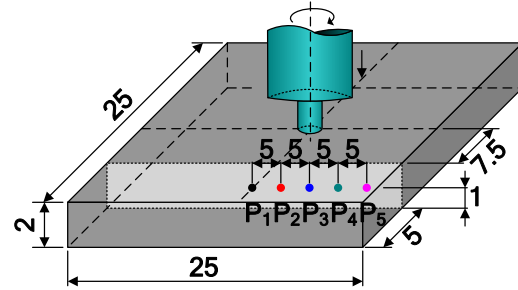


Fig. 5 Measuring points of temperature in upper sheet during FSHC (unit: mm)

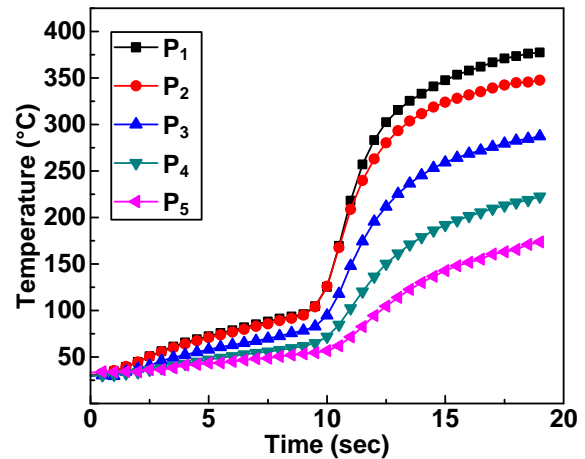


Fig. 6 Variation of temperature in upper sheet during FSHC

편은 접합과정에서 상부 소재에 목파괴가 발생함을 알 수 있다. 따라서 동일한 소재를 이용한 접합실험으로부터 FSHC 공정에서 상부 소재의 성형성이 향상됨을 알 수 있으며, 이로부터 FSHC 공정은 홀 클린칭 공정에 비해 성형성이 낮은 이종소재의 접합에 적용 가능할 것으로 판단된다.

#### 3.2 접합부 온도 및 경도분포

FSHC 공정에서 상부 소재의 성형성이 향상되는 원인을 파악하기 위해 접합부의 온도분포를 측정해 보았다. Fig. 5와 같이 상부 소재의 측면에 홀을 가공하고, 열전대를 삽입하여 FSHC 공정에서 상부 소재의 온도변화를 측정하였다. 그 결과 Fig. 6에 나타난 것과 같이 약 10sec까지 각 위치의 온도는 완만하게 증가하다가 그 이후에 급격히 증가됨을 확인할 수 있다. 측정된 5개의 위치 중에서 공구의 프로브와 접촉하는 시간이 가장 긴  $P_1$ 의 온도가 가장 높았으며, 최대온도는 약 377°C임을 알 수 있다. 이로부터

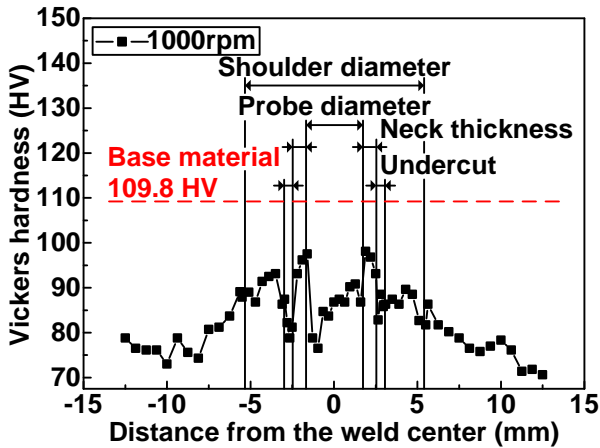


Fig. 7 Hardness distribution of joint after FSHC under initial condition

FSHC 공정 동안 마찰열에 의한 상부 소재의 온도 상승으로 성형성이 향상되는 것으로 판단된다.

그러나 상부 소재의 높은 온도는 접합부의 강도 저하를 야기할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 FSHC 공정으로 접합된 시험편의 경도를 측정해 보았으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 알루미늄 원소재의 경도는 약 109.8HV이며, FSHC 접합부의 경도는 원소재의 경도에 비해 전반적으로 낮은 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 FSHC 공정 동안 마찰열에 의한 온도 상승으로 상부 소재가 연화되었음을 나타낸다. 또한 공구의 압입으로 인해 소성변형이 일어나는 기하학적 구속부는 상대적으로 높은 경도를 나타내고 있다. 이는 FSHC 공정의 접합부는 연화와 동시에 가공경화가 일어나는 것으로 판단된다. 따라서 FSHC 공정에서 접합부의 강도 저하로 인해 접합강도가 감소할 수 있으므로, 접합강도를 향상시키기 위해서는 FSHC의 공정변수 최적화를 통해 최적의 기하학적 구속이 이루어지도록 해야 한다. 이를 위해 접합강도에 대한 공정변수의 영향을 평가하기 위한 연구가 필요하다.

#### 4. 실험계획법을 이용한 FSHC 공정설계

##### 4.1 다구찌 실험계획법

FSHC 공정의 접합강도에 영향을 미치는 공정변수를 분석하기 위하여 다구찌 실험계획법을 이용하였다. 다구찌 실험계획법은 설계변수의 수준(level)에 대해 직교배열표(orthogonal array)를 사용하여 변수의

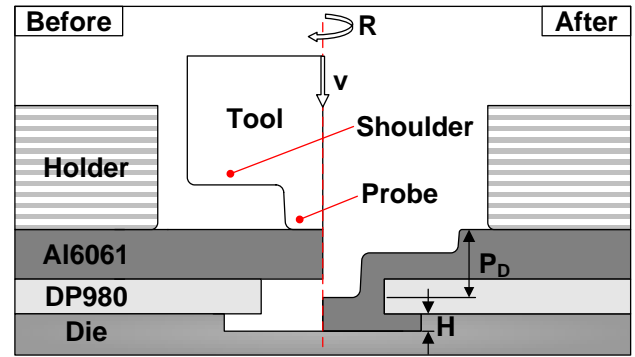


Fig. 8 Main process parameters of FSHC

조합을 얻는다. 변수의 조합에 대한 실험결과로부터 S/N(signal-to-noise ration)비를 분석하고 각각의 변수들의 영향을 평가하여 최적의 변수조합을 도출할 수 있는 방법이다[11, 12]. FSHC 공정에서는 접합강도가 높을수록 좋은 특성을 나타내므로 망대특성(larger-the-better)함수를 이용하여 S/N비를 분석하였다. 망대특성에 따른 S/N비는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 n은 실험 횟수이며, y<sub>i</sub>는 i번째 실험값이다.

##### 4.2 공정변수

Fig. 8과 같이 FSHC 공정의 공정변수는 공구의 회전속도(R), 압입 깊이(P<sub>D</sub>) 및 다이 깊이(H)로 선정하였다. 공구의 회전속도가 800rpm 보다 낮으면 접합부에 결함이 발생할 수 있으며[13, 14], 공구의 회전속도가 증가할수록 높은 마찰열로 인하여 결정립이 성장하기 때문에 접합강도가 감소하게 된다[15]. 공구의 압입 깊이가 깊을수록 접합강도는 증가하지만 과도한 솔더(shoulder)의 압입은 솔더와 접촉하는 상부 소재의 두께를 얇게 만들어 접합강도에 악영향을 미칠 수 있다[16]. 또한 다이 깊이는 언더컷 두께를 결정하며, 언더컷 두께가 너무 얇으면 접합강도는 감소하게 된다. 본 연구에서 선정한 3개의 변수에 대한 그 수준을 Table 1에 나타내었다. FSHC 공구의 회전속도는 800rpm, 1000rpm, 1200rpm, 압입 깊이는 2.6mm, 2.8mm, 3.0mm 그리고 다이 깊이는 0.7mm, 0.9mm, 1.1mm로 선정하였다. 여기서 3개의 변수에 대한 수준은 충분한 목두께와 언더컷을 형성할 수 있

**Table 1 Process parameters and their levels**

Parameters	DOF	Level 1	Level 2	Level 3
P <sub>D</sub> (mm)	2	2.6	2.8	3.0
H(mm)	2	0.7	0.9	1.1
R(rpm)	2	800	1000	1200
Total DOF	6			

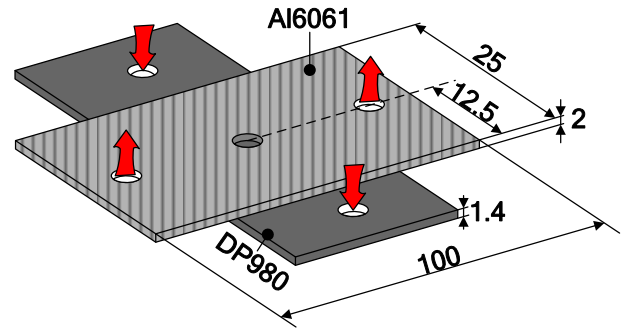
**Table 2 Taguchi orthogonal array with the assessed parameters**

Nomenclature of specimens	Exp. number	P <sub>D</sub> (mm)	H (mm)	R (rpm)
111	1	2.6	0.7	800
122	2	2.6	0.9	1000
133	3	2.6	1.1	1200
212	4	2.8	0.7	1000
223	5	2.8	0.9	1200
231	6	2.8	1.1	800
313	7	3.0	0.7	1200
321	8	3.0	0.9	800
332	9	3.0	1.1	1000

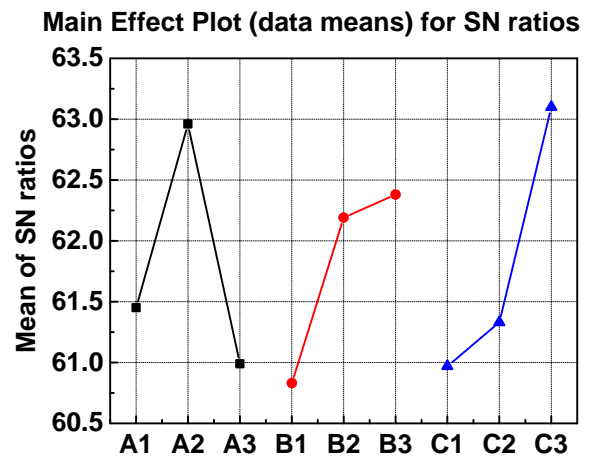
는 범위로 선정하였다. Table 2에 선정된 공정변수에 대한 직교배열표를 나타내었다. 3개의 변수 및 3수준으로 완전요인 실험계획법(full factorial experiments)을 사용하면 27회 실험을 수행해야 하지만, Table 2에서와 같은 직교배열표를 활용하면 9회의 실험으로 결과를 도출할 수 있게 되어 보다 효율적인 실험이 가능하게 된다.

### 4.3 실험결과 및 설계변수 영향도 평가

직교배열표의 9가지 조건에 대해 FSHC 공정을 이용하여 접합실험을 수행하고, Fig. 9에 나타낸 것 같이 십자인장시험(cross tension test)으로 접합강도를 평가하였다. Table 3에 직교배열표의 9가지 조건에 대한 접합강도 및 S/N비를 나타내었다. 그리고 각 수준별 S/N비 평균값을 이용하여 각 설계변수의 수준별 S/N비를 Fig. 10와 같이 나타내었다. 그 결과, A2B3C3에서 최대 접합강도가 얻어질 것으로 예측



**Fig. 9 Specimen shape for cross tension test and its dimension (unit: mm)**



**Fig.10 Average effect of parameter levels on SN ratio**

되었다. 각 변수들이 접합강도에 미치는 영향을 파악하기 위해 분산분석(analysis of variance)을 수행하였으며, 공정변수가 접합강도에 기여하는 순위를 Table 4에 나타내었다. 이로부터 접합강도에 대한 공구의 압입 깊이, 다이 깊이 및 회전속도의 기여도는 각각 30.02%, 20.09%, 36.80%임을 알 수 있다. 공구의 회전속도는 마찰열의 발생 및 소성유동과 밀접한 연관성을 가지므로 기하학적 구속부의 언더컷 형성에 큰 영향을 미친다. 그러므로 선정된 공정변수 중에서 공구의 회전속도가 접합강도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

### 4.4 최적 공정조건의 접합강도 평가

다구찌 실험계획법을 이용하여 도출된 최적 공정조건의 접합강도를 평가하기 위해 접합실험을 수행하였다. 앞서 홀 클린칭 공정과 비교하였던 FSHC의 공정조건을 초기 공정조건으로 선정하였으며, FSHC

**Table 3 Joint strength and the calculated S/N ratio**

Nomenclature of specimens	Joint strength (N)	S/N ratio (dB)
111	878	58.87
122	1230	60.74
133	1529	63.69
212	1242	61.88
223	1560	63.86
231	1434	63.13
313	1223	62.75
321	1110	60.91
332	1036	64.78

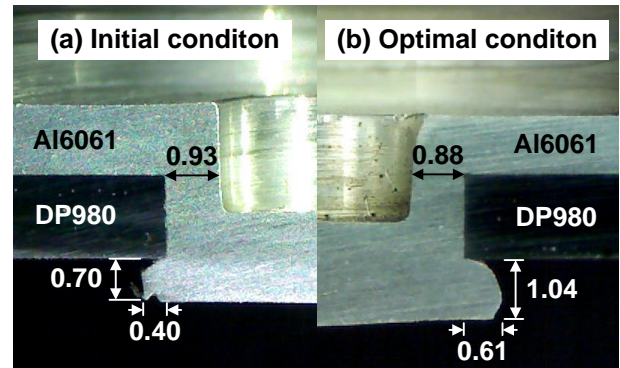
**Table 4 ANOVA table for means**

Source	DOF	Seq SS	Adj MS	F	Contribution (%)
P <sub>D</sub>	2	6.342	6.432	2.27	30.02
H	2	4.257	4.257	1.53	20.09
R	2	7.799	7.799	2.79	36.80
Error	2	2.791	2.791		12.91
Total	8	21.191			100

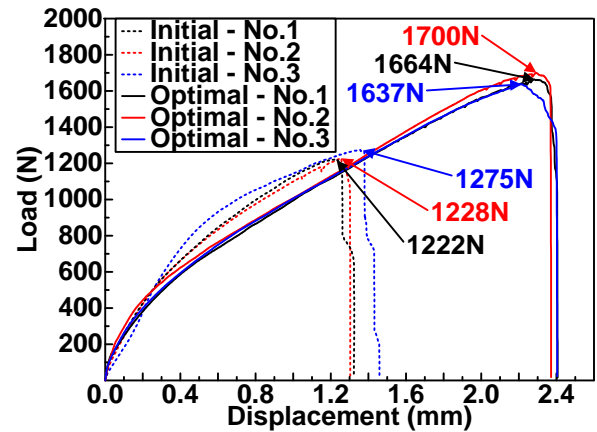
의 두 공정조건에 대한 접합부의 단면 형상을 Fig. 11에 나타내었다. 단면 형상의 치수를 측정된 결과, 최적 공정조건은 초기 공정조건과 유사한 목두께 형성되었으나, 언더컷 길이 및 두께가 0.61mm, 1.04mm로 증가하였음을 볼 수 있다.

Fig. 12는 두 공정조건의 접합강도를 비교한 결과이다. 최적 공정조건의 접합강도는 약 1667N이며, 기준 공정조건의 접합강도는 약 1242N임을 알 수 있다. 따라서 FSHC의 공정변수 최적화를 통해 약 34%의 접합강도를 향상시킬 수 있었다.

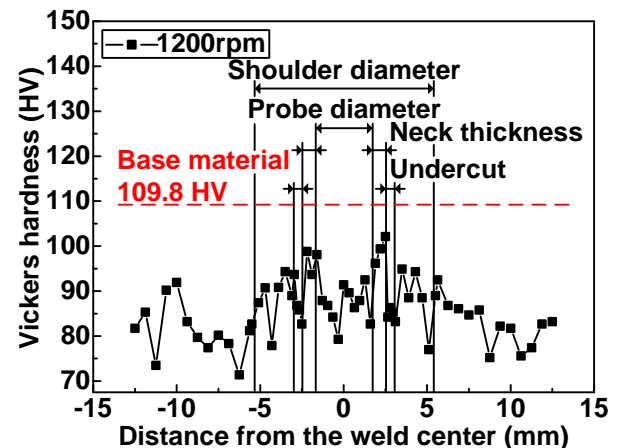
두 공정의 접합강도 차이점을 파악하기 위해 최적 공정조건의 접합 시험편에 대하여 경도를 측정해 보았다. Fig. 13에 측정된 경도값을 나타내었으며, Fig. 7의 초기 공정조건의 경도 분포와 유사함을 확인할 수 있다. 이로부터 두 공정조건의 접합강도 차이는 기하학적 구속부의 목두께, 언더컷 길이 및 두



**Fig.11 Comparison of cross section of joint in 2 cases of FSHC (unit: mm)**



**Fig.12 Comparison of joint strength in 2 cases of FSHC**



**Fig.13 Hardness distribution of joint after FSHC under optimal condition**

개의 차이로 인한 것으로 판단된다.

또한 동일한 소재에 대한 기존의 홀 클린칭 공정에서 공구의 최적형상설계를 통해 약 1425N의 최대

접합강도를 얻을 수 있었다[17]. FSHC 공정의 최대 접합강도는 기존의 홀 클린칭 공정에 비해 약 242N이 증가하였음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 FSHC 공정은 성형성이 낮은 이종소재의 접합에 유용하게 적용될 수 있으며, 공구 회전속도, 압입 깊이, 다이 깊이 등의 공정변수 최적화를 통해 접합강도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 개발된 FSHC의 유효성을 검증하기 위해 홀 클린칭 공정과 동일한 성형조건에 대하여 접합부의 단면형상을 비교해 보았으며, FSHC의 접합강도를 향상시키기 위해 다구찌 실험계획법을 이용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 동일한 성형조건 하에서 FSHC와 홀 클린칭 접합실험을 수행한 결과, 홀 클린칭 시험편은 접합과정에서 상부 소재에 목파괴가 발생하였으나, FSHC 공정은 마찰열에 의해 상부 소재의 성형성이 향상되어 결함없이 시험편의 접합이 가능하였다.

(2) FSHC 공정의 공구의 압입 깊이, 다이 깊이 및 회전속도의 접합강도에 대한 기여도는 30.02%, 20.09%, 36.80%로 나타났으며, 공구의 회전속도가 접합강도에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

(3) 다구찌 실험계획법을 통해 도출된 FSHC 공정의 최적 공정조건을 이용하여 약 1667N의 접합강도를 얻을 수 있었으며, 초기 공정조건의 접합강도에 비해 약 34% 향상됨을 확인할 수 있었다.

(4) 또한 FSHC 공정의 최대 접합강도는 기존의 홀 클린칭 공정의 최대 접합강도에 비해 약 242N이 증가됨을 알 수 있었다.

(5) 이상의 결과로부터 FSHC 공정은 성형성이 낮은 이종소재의 접합에 유용하게 적용될 수 있으며, 공구 회전속도, 압입 깊이, 다이 깊이 등의 공정변수 최적화를 통해 접합강도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의해 연구되었음.

## REFERENCES

- [1] S. M. Goushegir, J. F. Dos Santos, S. T. Amancio-Filho, 2015, Influence of Process Parameters on Mechanical Performance and Bonding Area of AA2024/Carbon Fiber Reinforced Poly Friction Spot Single Lap Joint, Mater. Des., Vol. 83, pp. 431~442.
- [2] H. Badarinarayan, Y. Shi, X. Li, K. Okamoto, 2009, Effect of Tool Geometry on Hook Formation and Static Strength of Friction Stir Spot Welded Aluminum 5754-O Sheets, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 49, No. 11, pp. 814~823.
- [3] K. Martinsen, S. J. Hu, B. E. Carlson, 2015, Joining of Dissimilar Materials, CIRP Ann. Manuf. Technol., Vol. 64, No. 2, pp. 679~699.
- [4] C. J. Lee, J. Y. Kim, S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, 2010, Design of Mechanical Clinching Tools for Joining of Aluminum Alloy Sheets, Mater. Des., Vol. 31, No. 4, pp. 1854~1861.
- [5] Y. Abe, K. Mon, T. Kato, 2012, Joining of High Strength Steel and Aluminum Alloy Sheets by Mechanical Clinching with Dies for Control of Metal Flow, J. Mater. Process. Technol., Vol. 212, No. 4, pp. 884~889.
- [6] V. Jayasekara, K. H. Min, J. H. Noh, M. T. Kim, J. M. Seo, H. Y. Lee, B. B. Hwang, 2010, Rigid Plastic and Elastic Plastic Finite Element Analysis on the Clinching Joint Process of Thin Metal Sheets, Met. Mater. Int., Vol. 16, No. 2, pp. 339~347.
- [7] N. S. Ahn, C. J. Lee, J. M. Lee, 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.
- [8] S. H. Lee, C. J. Lee, K. H. Lee, J. M. Lee, B. M. Kim, D. C. Ko, 2014, Influence of Tool Shape on Hole Clinching for Carbon Fiber-Reinforced Plastic and SPRC440, Adv. Mech. Eng., Vol. 2014, pp. 1~12.
- [9] C. J. Lee, S. H. Lee, J. M. Lee, B. H. Kim, B. M. Kim, D. C. Ko, 2014, Design of Hole Clinching Process for Joining CFRP and Aluminum Alloy Sheet, Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 15, No. 6, pp. 1151~1157.
- [10] C. J. Lee, J. M. Lee, H. Y. Ryu, K. H. Lee, B. M. Kim,

- D. C. Ko, 2014, Design of Hole Clinching Process for Joining of Dissimilar Materials Al6061-T4 Alloy with DP780 Steel, Hot Pressed 22MnB5 Steel, and Carbon Fiber Reinforced Plastic, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 214, No. 10, pp. 2169~2178.
- [11] 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
- [12] D. S. Kang, E. T. Park, A. Tullu, B. S. Kang, W. J. Song, W. J. Song, 2016, Prediction and Verification of Lateral Joining Strength for Tapered Hole Clinching using the Taguchi Method, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 25, No. 1, pp. 36~42.
- [13] W. Yuan, R.S. Mishra, S. Webb, Y.L. Chen, B. Carlson, D.R. Herling, G.J. Grant, 2011, Effect of Tool Design and Process Parameters on Properties of Al6016 Alloy Friction Stir Spot Welds, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 211, No. 6, pp. 972~977.
- [14] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, 2007, Effect of Tool Geometry on Microstructure and Static Strength in Friction Stir Spot Welded Aluminum Alloys, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 47, No. 15, pp. 2230~2236.
- [15] Y. Rostamiyan, A. Sedianloo, H. Sohrabpoor, R. Teimouri, 2015, Experimental Studies on Ultrasonically Assisted Friction Stir Spot Welding of AA6061, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, Vol. 15, No. 15, pp. 335~346.
- [16] M. Merzoug, M. Mazari, L. Berrahal, A. Imad, 2010, Parametric Studies of the Process of Friction Spot Stir Welding of Aluminum 6060-T5 Alloys, *Mater. Des.*, Vol. 31, No. 6, pp. 3023~3028.
- [17] G. Shen. 2016, Tool Geometry Design by the Prediction of Failure Mode in Hole Clinching of Dissimilar Materials, M. S. Thesis, Pusan National University, Pusan, pp. 56~57.