

# 알루미늄 판재의 압출전단접합에 관한 연구

이경국<sup>1</sup>· 이문용<sup>2</sup>· 진인태<sup>#</sup>

## A Study on Extrusion-Shear Welding(ESW) Process of Aluminum Plates

K. K. Lee, M. Y. Lee, I. T. Jin

(Received August 3, 2010 / Revised October 29, 2010 / Accepted November 3, 2010)

### Abstract

It was investigated that two plates of aluminum can be welded by hot extrusion-shear welding process with extrusion-shear welding dies, and that the welding strength and metal flow on the welding section were analyzed by computer simulation according to the welding variables such as inclined angle of cutter and overlapped length of plates and temperature of plates. It was known by computer simulation that welding strength on the welding section of plates could be influenced by the inclined angle of cutter and overlapped length of plates and temperature of plates. And it was known by experiments that two plates of aluminum can be welded on the end sections by hot extrusion-shear welding process using extrusion-shear welding dies, and that welding strength is the highest when inclined angle of dies is 70°, and overlapped length is 1.2 mm, and temperature is 520°, when aluminum 5052 two plates with 1.6 mm thickness are used as welding material.

**Key Words** : Extrusion-Shear Welding(ESW), Extrusion-Rivet Welding(ERW), Pressure Welding, Friction Stir Welding, Welding Dies, Aluminum Plate

### 1. 서 론

용접의 정의는 같은 종류 또는 다른 종류의 금속재료에 열과 압력을 가하여 직접 결합이 되도록 접합시키는 방법을 말한다. 일반적으로 기계요소에 사용되는 금속재료들의 접합을 위해서 기본적으로 접합 면을 청결하게 하고 두 재료의 접합 면에서의 금속원자가 서로 금속학적으로 결합할 수 있는 거리 이내에 두 재료를 접근시킬 수 있도록 열과 압력을 가해야 한다. 이를 위한 방법으로서 상호 접합부를 동시에 가열·용융시켜 그 부분의 금속원자를 재배열시키고 동시에 함께 응고하게 하여 접합하는 용융법과 접합부에 외부에

서 압력을 가해서 소성변형을 일으켜 접합하는 고상접합법으로 분류할 수 있다. 고상접합하는 방법에는 접합면상에서의 고체 금속의 확산에 의한 확산접합과 일정온도 이상의 조건에서 강한 압력에 의해 접합하는 압력접합이 있다. 압력접합은 접합할 때 냉간 상태에서 마찰력에 의해 열을 발생함과 동시에 접합하는 방법과 미리 열간 상태로 금속을 가열하여 강한 압력을 주어 접합시키는 방법이 있다. 최근에는 소성유동접합을 이용한 접합방법에 대한 연구가 활발한데, 그 중에서 접합하고자 하는 재료의 형태와 압력을 가하는 형태에 따라 분류하면 마찰접합(friction welding), 압출점접합(extrusion-riveting welding: ERW), 마찰교반용

1. 부경대학교 대학원  
2. (주)성우하이텍 기술연구소  
# 교신저자: 부경대학교 기계공학과, E-mail:jint@pknu.ac.kr

접(friction stir welding: FSW), 폭발용접(explosive welding)등이 있다[1~4].

본 논문에서의 알루미늄 금속판재를 접합하는 방법으로써 두 판재의 선단면의 일부를 중첩시킨 다음 전단력을 가하여 소성변형과 동시에 접합시키는 압출전단접합(extru-shear welding)방법을 채택하기로 한다[5].

본 연구를 진행하기 앞서서 예비실험으로서 전단날(cutter)이 없는 금형에 두 장의 금속 판재의 선단을 중첩 시킨 후 압력을 가하여 접합을 시도해 보았다. 그러나 접합부가 길이방향으로 퍼지게 되어 두 판재 금속의 선단이 전단되지 못한 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 1 은 전단날을 사용하지 않을 경우 전단접합의 시물레이션해석 공정도로서 그림에서와 같이 금속판재의 선단이 전단되지 못하고 소재의 일부가 접합부 뒤로 밀려나면서 단순압착 되는 현상을 도시하고 있다.

단순압착에 의한 소재는 접합되기 곤란하고 단순한 소성변형에 지나지 않으므로 소재를 접합하기 위해서는 소재의 접합부에 전단력이 가해질 필요가 있다. 그러나 전단날을 사용하지 않는 단순압착의 경우인 Fig. 1 처럼 중심부 및 표면에서 기울기의 변화가 전단력을 발생시키기 보다는 단순압착의 형태를 보이고 있음을 짐작 할 수 있다.

따라서 접합부에 생성되는 접합라인의 형상이 단순압착 되는 형상을 피하고 접합과 동시에 버(burr)가 제거 되는 것을 유도하기 위하여 본 연구에서는 접합하고자 하는 금속 판재의 선단면에 전단날을 두어 두 판재가 전단되면서 접합되도록 함과 동시에 전단날에 대한 연구의 필요성이 있었다.

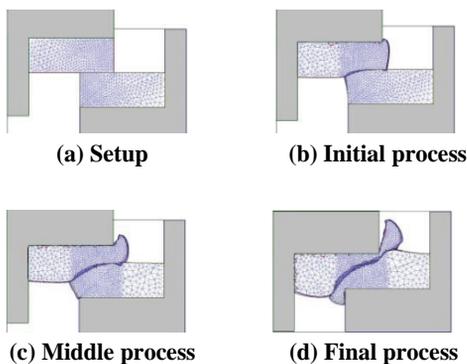


Fig. 1 Shear welding process by no cutter

따라서 본 논문은 전단날을 포함한 밀폐형 금형을 사용하고 소재와 금형의 외부에서 히터를 이용한 열을 공급하여 열간가공 상태의 두 알루미늄 판재의 접합면에 대하여 전단력(shear stress)을 가하여 접합 초기부터 접합면상에 전단과 동시에 두 소재가 접합이 되도록 하는 압출전단접합에 대한 연구이다. 강한 접합압력을 유지하기 위해서 두 판재의 이동을 막는 강한 클램프력을 가진 클램프를 사용하고 중첩된 판재의 과잉금속이 판재의 폭 방향으로 밀려나오는 대신 전단날의 성형공간으로 밀려나오게 하여 두 금속판재가 소성유동적으로 접합되도록 하는 압출전단접합공정을 제안하고 해석과 실험을 통하여 관련된 접합변수들의 최적조건을 찾고자 하였다.

## 2. 알루미늄판재의 압출전단접합공정

### 2.1 알루미늄판재의 압출전단접합 금형구조

Fig. 2는 전단날을 포함한 전단접합 금형 내부에 두 장의 알루미늄 판재가 전단될 수 있도록 두 소재를 상하로 중첩시킨 상태에서 일정 온도가 되도록 금형과 소재에 열을 가한 다음, 두 장의 판재의 상하로 압력을 가하게 되면 중첩되는 부분의 접합면상에서 전단변형이 발생하도록 하는 압출전단접합금형의 구조를 도시 하고 있다.

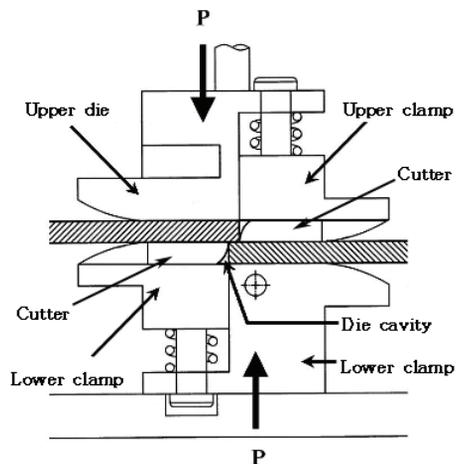
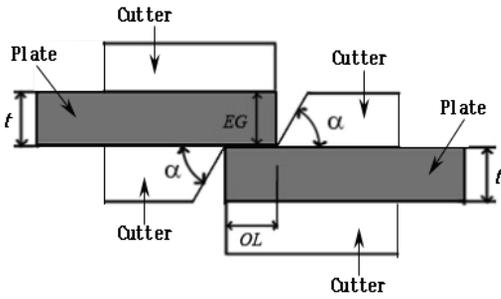


Fig. 2 Die assembly of extru-shear welding process

Fig.3은 상호 중첩된 판재와 전단날의 구조와 상호위치를 나타내는 그림이다. 다음 그림에서 전단날의 형태는 접합 과정에서 과잉소재와 불순물이 압출되고 절단될 수 있는 성형공간(cavity)을



OL: Overlapping Length      t : Thickness of plate  
 : Cutter angle                      EG: Extruding Gap

**Fig. 3 Nomenclature of location and shape of cutter of extru-shear welding dies**

구성하도록 상하 전단날의 단면 끝이 경사지도록 되어 있음을 볼 수 있다.

이 성형공간은 판재(plate)의 선단면과 전단날의 경사각( $\alpha$ )과의 사이로 구성되는 공간을 말한다.

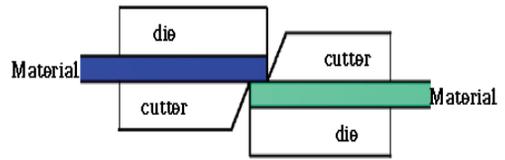
### 2.2 알루미늄판재의 압출전단접합 원리[5]

Fig. 4의 그림은 접합금형 속에 삽입된 알루미늄 판재를 소성유동접합 하는 과정을 나타낸 것이다. Fig. 4의 (a)는 압출전단접합에서 판재가 금형속에 놓여있는 위치를 나타내고 있으며 금형(die)과 전단날을 강하게 클램핑하여 판재가 좌우로 밀려가지 않도록 되어있다.

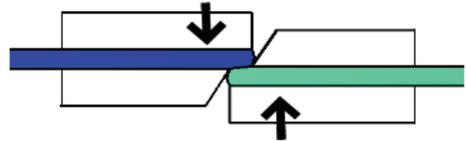
유압시스템에 의해서 좌측의 금형과 전단날이 하 방향으로 슬라이딩 이동하면서 각 금형에 의해 좌측상단의 판재와 우측하단의 판재의 중첩된 표면 위에 압하력을 가하도록 되어 있다. 압하력이 가해지기 전 내부 열원에 의해서 알루미늄 판재에 열이 공급되어 있다. Fig. 4의 (b)처럼 유압장치에 의해 금형과 전단날에 상하로 가압되면서 중첩된 부분에 소성변형이 발생하고 좌측상단의 금형과 우측상단의 전단날 사이의 성형공간으로 소재가 압출을 시작하게 된다.

Fig.4(c)는 중첩된 부분의 좌측 판재의 양의 절반과 중첩된 우측 판재의 양의 절반이 각각 섞이게 되면서 소성유동에 의해서 접합이 되게 된다.

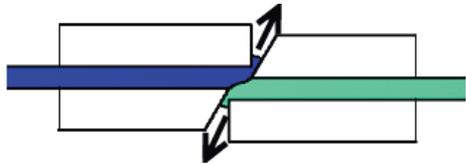
Fig.4(d)에서처럼 밀려나오는 과잉금속이 전단날의 경사면과 좌측상단의 금형에 의해 밀폐되어질 때 과잉금속을 강하게 압출하면서 판재의 선단면에 남아있는 산화막 찌꺼기도 함께 배출되면서 압출전단접합(extru-shear welding) 이 완성되는 과정을 도시하고 있다.



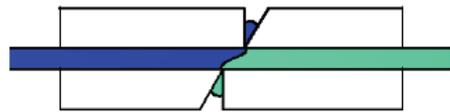
**(a) Setup & heating**



**(b) Pressing**



**(c) Extruding and welding**



**(d) Closed die and cut burr**

**Fig.4 Extru-shear welding process**

과잉금속의 압출과정에서 좌측의 금형과 우측의 전단날의 압출간격(EG)은 접합이 완료되는 시점에서 밀폐되도록 점점 좁아지도록 되어있으며, 이로 인하여 압출에 의한 소재의 접합응력의 증가가 발생하게 되고, 이 힘은 접합부의 접합강도의 증가로 전이되어 진다.

Fig. 5는 두 알루미늄 재가 압출전단접합 될 때 소성변형이 일어나 접합되면서 전단날의 성형공간의 형상에 따라 과잉금속이 압출되어 접합 면을 따라 판재상하면에 길게 돌출된 버가 형성되어 있는 것을 나타내고 있으며, 접합과 동시에 판재선단면상의 산화막 등의 불순물이 돌출부분을 따라 함께 배출된 모양을 나타내고 있으며 자동적으로 버가 단락 되도록 되어있다.

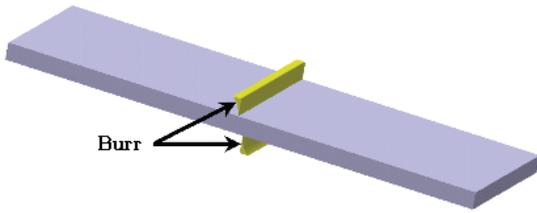


Fig. 5 Extru-shear welded plate with burr

### 3. 알루미늄판재의 압출전단접합공정해석

#### 3.1 압출전단접합공정 시뮬레이션해석

실험에 앞서 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션해석을 통하여 소재의 소성유동현상을 조사하여 전단접합변수의 종류와 그 영향에 대해서 조사하고 실험을 위한 접합금형제작에 활용하기로 하였다. 소성유동해석을 위해서 소성가공해석용 프로그램으로 많이 사용되어지는 DDEFORM-3D 소프트웨어를 사용하였으며, 실험용 금형의 제작에 앞서서 접합가공변수에 따라 접합부 접합강도의 특성을 파악하기 위하여 전단접합단면상에서의 응력분포를 중점으로 해석을 수행 하였다.

Fig. 6은 알루미늄판재의 압출전단접합공정해석 시뮬레이션을 실제 실험 공정에 사용되어지는 형상에 대해서 수행한 해석결과 그림으로서 (a)는 공정 시작에 앞서서 두 판재가 금형 내부에서 중첩부를 가지도록 위치한 상태로 가열이 되는 단계이다. ((b), (c), (d), (e), (f)는 성형공간으로 소재가 압출되어지면서 접합되어가는 단계를 보여주고 있다. (g)는 해석의 최종스텝으로 금형의 단힘에 의하여 성형공간이 사라지고 버가 제거되는 단계이다.

#### 3.2 압출전단접합부 접합강도해석

Fig. 7은 중첩길이 1.6mm, 전단날각 70°, 접합온도 520°C인 열간상태에서의 해석결과로서 세 개의 수집점(P1,P2,P3)을 통하여 접합부 응력을 확인 하였다.

Table 1은 각각의 중첩길이, 전단날각, 접합온도의 조건을 조합하여 해석한 접합부의 응력을 P1, P2, P3의 수집점에서 조사하여 정리한 표이다. 접합이 이루어진 소재의 파괴는 작은 균열로부터 시작하여 크게 퍼져 나가기 때문에 접합강도를 결정 짓는 가장 큰 수집점은 각각의 조건에서 응력이 가장 낮은 수집점이다.

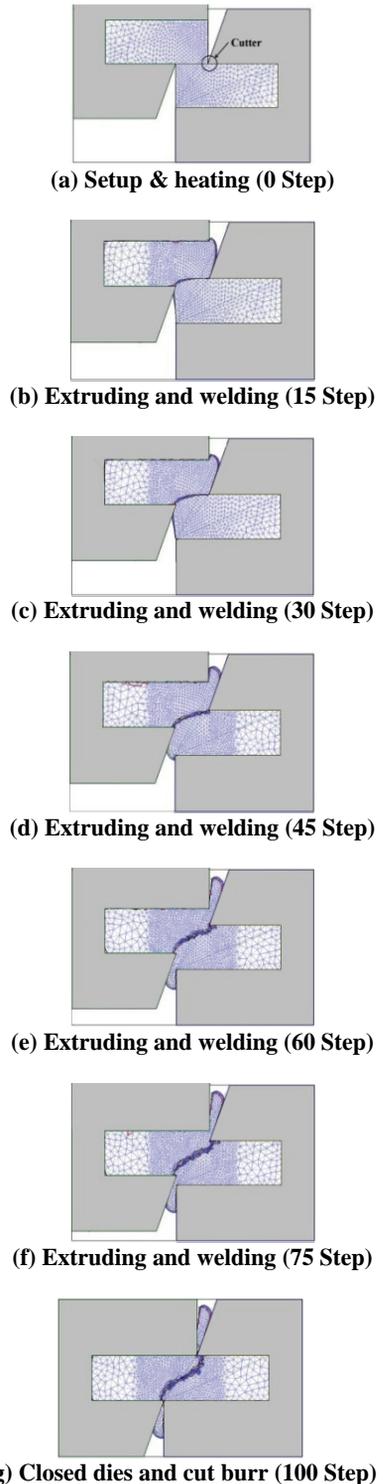
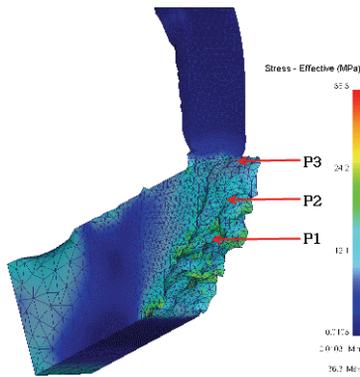


Fig. 6 Simulation of extru-shear welding process (OL=1.2mm, =70°, T=520 °C)



OL=1.6mm,  $\alpha=70^\circ$ , T=520°C  
 Fig. 7 Result of extru-welding simulation

Table 1 Stress of welded surface (N/mm<sup>2</sup>)

Temperature		520°C			
Over-lap Length	Cutter Angle( $\alpha$ )	P1	P2	P3	Average
1.2mm	50°	25.3	27.7	22.4	25.1
	60°	24.5	18.3	25.8	22.9
	70°	31	28.9	27.8	29.2
1.6mm	50°	24	26	28.1	26
	60°	28.7	30.9	34.3	31.3
	70°	24.6	22.1	30.3	25.7

해석 온도가 T=520°C이고 알루미늄 판재의 두께가 1.6mm일 때의 해석결과를 통하여 전단날의 각도가 변화함에 따라 수직점의 평균응력이 다소 차이가 남을 알 수 있었고, 판재의 중첩길이인 OL(overlap length)이 1.2mm일 때는 전단날의 각도가  $\alpha=70^\circ$  일 때가 접합강도가 가장 크게 나타났으며 중첩길이가 1.6mm일 때는 전단날의 각도가  $\alpha=60^\circ$  일 때가 가장 높게 나타남을 알 수 있었다.

#### 4. 알루미늄판재의 압출전단접합시험

##### 4.1 압출전단접합 시험장치

Fig.8의 그림은 시험에 사용된 압출전단접합 금형으로 좌측의 상부접합금형과 하부클램프로써 알루미늄 판재를 클램핑한 상태에서 우측의 하부 접합금형 위에 놓여 있는 알루미늄 판재 위에 상부 클램프로 구속한 다음 가압하면, 좌측의 클램핑된 다이와 클램프가 우측의 상부 클램프의 가

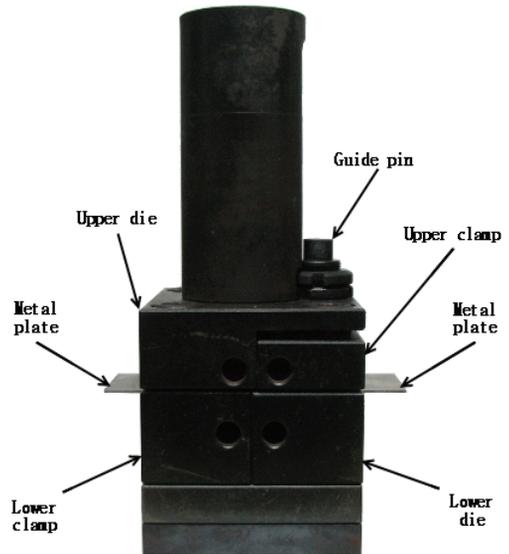


Fig. 8 Assembly of extru-shear welding dies

이드 핀과 하부금형의 두 개의 가이드 핀을 따라서 슬라이딩과 동시에 알루미늄 판재가 전단되면서 압출전단접합이 이루어지도록 되어있다. 금형 소재는 SKD61을 사용하여 열간실험시 열변형에 영향을 받지 않도록 하였다.

##### 4.2 압출전단접합 실험결과

실험에 사용된 소재는 Al-5052-H34이고 두께(t) 1.6mm의 알루미늄판재를 중첩길이 0.8mm, 1.2mm, 1.6mm 조건에서 전단날각도 50°, 60°, 70° 을 이용하여 각 온도별 460°C, 490°C, 520°C의 간격으로 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 압출전단접합금형을 이용하여 두 알루미늄 판재를 접합한 실험의 결과로 육안으로 접합부상에 휨(bending), 갈라짐(crack) 등의 문제점이 발생하지 않았다.

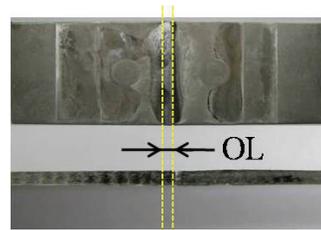


Fig. 9 Surface view of extru-shear welded plates ( OL=1.2mm,  $\alpha=70^\circ$ , T=520°C)

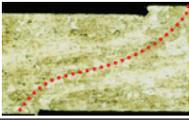
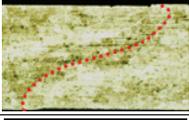
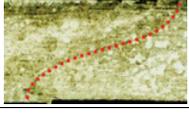
Temperature Cutter Angle	520 °C
50°	
60°	
70°	

Fig.10 Welded section according to cutter angle at T=520°C and OL=1.6mm

Fig. 10은 단면현미경사진으로서 온도 520°C일 때 전단각도에 따른 접합선의 형태를 나타내며 그 중에서도 전단날의 각도가 70°일 때 접합선의 형태가 Fig. 6에서 (g)의 해석결과와 유사하다.

#### 4.3 압출전단접합된 판재 굽힘강도시험

Fig. 11은 각 실험조건에 따라 접합한 판재시편으로서 KS B 0804를 참고하여 굽힘시험한 후의 판재형상을 보여주고 있으며 각 조건별로 배열한 상태이다.

Fig.12는 굽힘시험한 후의 외관상 양호한 판재와 불량한 판재의 기준이 되는 형상이다 각각의 변수인 전단날각도, 온도, 중첩길이의 실험범위의 조건에서 알루미늄 판재의 접합실험 후 접합된 판재의 외관상으로는 대부분 양호하게 나타났으나 굽힘시험에서 몇 가지 조건범위에서 불량이 발생하여 일반적인 굽힘시험에서 발생할 수 있는 갈라짐, 파단 등의 결과가 나타났다.

상기의 Table 2를 보면 중첩길이별로 분류할 경우에 전단날각과 온도가 클수록 그 굽힘시험의 결과가 양호하게 나타났다.

#### 4.4 압출전단접합된 판재 인장강도시험

상기 양호한 굽힘시험 결과를 참고하여 인장시험을 수행하였다. Fig. 13은 중첩길이 1.6mm, 전단날각 60°, 접합온도 520°C에서의 인장시험 결과로 접합라인을 따라서 파단이 발생하나 일부 모재가 뜯어지는 것이 확인되었다.



Fig.11 Shape and type of bended plates

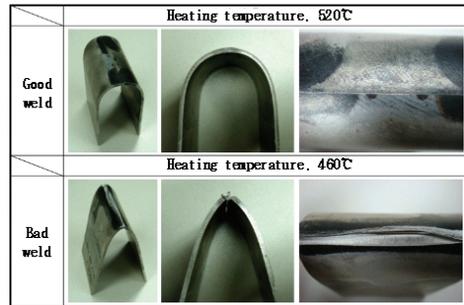
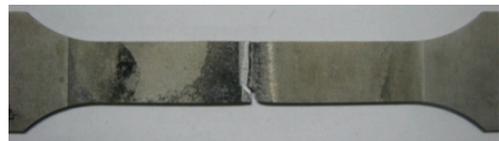


Fig.12 Bending test results of welded plates

Table 2 Results of bending test

Temperature		460 °C	490 °C	520 °C
Over-Lap Length	Cutter Angle ( $\alpha$ )			
0.8mm	50°			
	60°	X	X	X
	70°			
1.2 mm	50°			
	60°	X	▼	△
	70°	▼	△	○
1.6mm	50°	X	X	X
	60°	X	▼	△
	70°	▼	△	○

○ : Very good △ : Good ▼ : Bad X: Very poor



OL=1.6mm,  $\alpha=60^\circ$ , T=520 °C

Fig.13 Results of tensile test

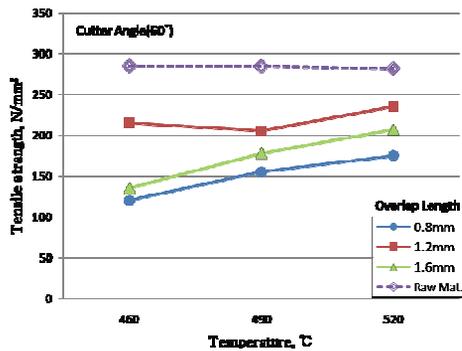


Fig.14 Tensile test by overlap length

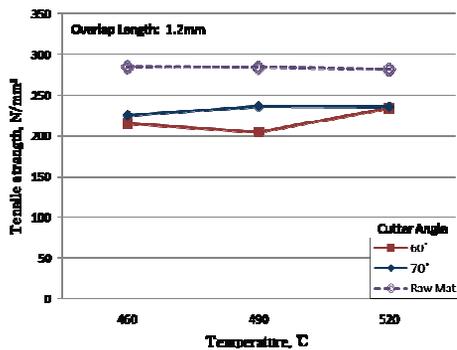


Fig. 15 Tensile test by cutter angle (OL=1.2mm)

Fig. 14 는 중첩길이에 따른 인장시험의 결과로서 60°전단날 각도를 기준으로 하여 중첩길이 0.8mm, 1.2mm, 1.6mm 의 범위에서 접합한 시편에 대해서 인장시험을 하였다. 전단날의 각도가 60°에서는 열간상태에서의 해석 결과와는 다르게 중첩길이가 1.2mm 인 경우 접합력이 가장 좋은 것을 알 수 있었다.

실제 실험의 경우 상온에서 충분히 온도를 식힌 후에 강도 시험이 이루어졌다는 점으로 보아 열간상태에서의 응력해석과 실제 실험 사이에는 소재의 열처리 효과에 의한 강도 변화 또는 열에 의한 재료의 수축과 팽창에 의한 잔류응력의 생성 등이 주요 요인으로 작용 하여 실제 실험 결과와 해석 결과 사이에 격차가 발생하는 것으로 판단된다. 하지만 소성가공의 특성상 실제 접합강도를 판단하는 데는 실험에 의한 결과가 해석보다 큰 비중을 차지 한다.

Fig. 15 는 앞선 실험조건 중에서 전단날 각도 60°에서 중첩길이 0.8mm, 1.2mm, 1.6mm 를 변화시

킨 조건 가운데 가장 좋은 인장시험 결과를 얻었던 중첩길이 1.2mm 에 대하여 60°, 70°의 전단날각의 변화에 따라 압출전단접합된 소재의 인장시험 결과이다.

Fig. 14 와 Fig. 15 를 종합해 보면 중첩 길이가 1.6mm 일 때 보다는 1.2mm 일 때가 온도에 관계 없이 전반적으로 높은 접합력을 가지고 있음을 확인할 수 있었고 역시 전단날각 60°보다 전단날각 70°가 전반적으로 조금 높은 수치의 결과를 얻을 수 있었다.

따라서 굽힘 시험과 인장 시험을 종합해 볼 때 중첩길이가 1.2mm 이고 전단날각 70°, 온도 520°C 일 때가 인장 강도뿐만 아니라 굽힘 강도 면에서도 가장 좋은 접합력을 얻을 수 있었으며 이 접합강도는 모재강도의 약 84%에 해당됨을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

압출전단접합 금형을 이용한 알루미늄 판재의 압출전단접합이 가능함을 해석과 실험을 통하여 확인하였고, 압출전단접합의 공정해석을 바탕으로 실험한 결과인 접합된 판재의 굽힘시험과 인장시험을 통하여 최적공정변수를 시험 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 두께가 1.6mm 인 알루미늄 판재의 압출전단접합의 컴퓨터 시뮬레이션 해석결과는 온도 T=520°C에서 판재의 중첩길이(overlap length)인 OL 가 1.2mm 일 때 전단날의 각도  $\alpha=70^\circ$ 일 때의 접합강도가 가장 크게 나타났으며 중첩길이가 1.6mm 일 때는 전단날각도가  $\alpha=60^\circ$ 일 때 가장 높게 나타남을 해석을 통해 알 수 있었다.

(2) 인장 시험과 굽힘 시험을 통하여 중첩길이 1.2mm 일 때 전단날각 70°, 온도 520°C에서 가장 좋은 접합력을 얻을 수 있었으며 이 접합강도는 모재강도의 약 84%에 해당 되었다.

(3) 압출전단접합강도에 영향을 주는 변수로서는 중첩길이(OL), 전단날각( $\alpha$ ), 접합온도(T)이며 각각의 변수의 조합에 따라 접합강도에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

따라서 압출전단접합금형으로써 접합한 알루미늄 판재의 접합강도는 각각의 두께에 따라 판재의 중첩길이, 전단날의 각도, 온도에 영향을 받으며 세 개의 주요변수를 조합하여 최적 설계 변수를 결정하는 것이 중요함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 부경대학교 학술연구비와 (주)성우하이텍 기술연구소의 연구비지원에 의해서 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Y. M. Yeon, C. Y. Lee, W. B. Lee, S. B. Jung, Keun Song, 2006, Joint Characteristics of Spot Friction Stir Welded A 5052 Alloy Sheet, J. Kor. Welding Soc., Vol. 24, No. 1, pp. 71~76.
- [2] Y. B. Park, J. S. Koo, B. C. Goo, 2009, A Study on Friction Stir Welding Properties of A6005 Extruded Aluminum Panels, J. Kor. Soc. Railway, Vol. 12, No. 4, pp. 512~517.
- [3] M. Fujimoto, S. Koga, N. Abe, S. Y. Sato, H. Kokawa, 2009, Analysis of plastic flow of the Al alloy joint produced by friction stir spot welding, J. Jpn. Welding Soc., Vol. 23, No. 8, pp. 589~596.
- [4] H. Y. Wu, S. Lee, Y. H. You, 2002, Genuine solid-state bonding characteristics of superplastic Al-alloys, J. Mater. Process. Technol., Vol. 122, No. 2/3, pp. 226~231.
- [5] I. T. Jin, 2006, Apparatus and method for hot bonding metal plates, Korea Patent, 10-0622524.
- [6] I. T. Jin, K. K. Lee, 2005, A Study on the Hot Pressure Welding of Aluminum Rods, Proc. Kor. Soc. Manuf. Process Eng. Conf., pp. 142~145.
- [7] I. T. Jin, K. K. Lee, 2005, Hot Extrusion-Pressure Welding of Aluminum Rods using Eccentric-inclined Stepped Welding Dies, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp. 206~209.
- [8] K. K. Lee, I. T. Jin, 2008, A study of Extrusion-Pressure Welding Strength of Aluminum Rods, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 4, pp. 284~291.