

◆특집◆ 하이브리드 프로세스

두께 불균일 AA6005 압출재의 하중제어 마찰교반접합에서 접합 조건과 툴 형상이 결함발생에 미치는 영향

윤태진*, 강명창*, 정병호**, 강정윤#

(*부산대학교 융합학부, **부경대학교 금속공학과, #부산대학교 재료공학부)

Effect of Welding Condition and Tool Shape on Defect Formation of Extruded AA6005 with Non-uniform Thickness using Load-Controlled Friction Stir Welding Technique

Tae-Jin Yoon*, Myung-Chang Kang*, Byong-Ho Jung**, Chung-Yun Kang#

(Received 11 December 2013; received in revised form 17 December 2013; accepted 23 December 2013)

ABSTRACT

Friction stir welding using aluminum alloys has been widely applied for transportation vehicles because of the light specific weight, which can be used to obtain sound joint and high mechanical properties. This study shows the effects of rotation speed, welding speed, welding load, and tool shape on defect formation with extruded AA6005, which is used for railway vehicle structures of non-uniform thickness welded by friction stir welding using load control systems. Optical microscopy observations and liquid penetrant testing of each FSW joint were carried out in order to observe defect formation. Two kinds of defects, that of probe wear and that of lack of penetration in the bottom of the welded zone, were observed. In the case of using a taper shaped tool, the defect free zone is very narrow, within 100 kgf; however, in case of using a cylindrical shape tool, the defect free zone is wider.

Key Words : Friction stir welding(마찰교반접합), Aluminium Alloy(알루미늄 합금), Defect formation(결함발생), Welding conditions(접합조건), Tool shape(툴(공구)형상)

1. 서 론

* Pusan National Univ., Graduate School of Convergence Science

Corresponding Author :
Pusan National Univ., School of Materials Science and Engineering
E-mail : kangcy@pusan.ac.kr

** Pukyong National Univ., School of Mechanical Engineering

각종 수송기기의 경량화와, 고 효율화, 설계의 최적화가 필요하다. 특히, 철도차량산업의 경량화를 위해 알루미늄 합금 차체 부품 적용 비율 점차 확대 추세이다^[1]. 현재 일본에서는 철도차량의 약

90%가 알루미늄 합금에 의해 제조되고 있으며 국내에서도 알루미늄 합금 철도차량의 적용이 확대되고 있다. 철도차량 패널에 적용되는 알루미늄 합금은 주로 압출을 이용해 생산되고 있으며, 압출재로 이루어진 패널은 생산사이즈 한계 및 고가의 금형비로 인해 용접을 통해 대형화 하는 방법을 채택하고 있다^[2].

알루미늄 합금을 이용하여 차체를 제조 할 때의 용접방법은 가스 메탈 아크용접(GMAW)과 가스 텅스텐 아크용접(GTAW)을 주로 적용하고 있으나 용융용접 시 용접부 불균일, 열 변형 발생 등 용접부 품질에 문제점이 발생한다^[3-4]. 알루미늄 합금은 열전도도가 스틸에 비하여 3-4배 정도 크므로 아크용접 시 접합부의 품질 저하와 같은 문제점이 발생한다. 따라서 철도차량 차체 용접기술로서 고상접합 공정인 마찰교반접합(Friction Stir Welding)이 일본, 유럽을 중심으로 적용되고 있고^[5-6], 국내에서도 연구가 활발히 진행되고 있다^[7-8].

한편 마찰교반접합의 기본적인 제어 방식에는 위치제어 방식과 하중제어 방식 두 가지가 있다. 위치제어 방식은 프로브의 끝 부분과 시편 바닥의 간격을 일정하게 유지하며 접합하는 것이다. 따라서 재료의 두께 편차로 인하여 두께가 얇을 경우 솔더가 시편과 접촉하는 면적이 작아져 입열량이 부족하게 되어 보이드와 같은 결함이 발생할 확률이 커지게 된다^[9]. 또한 두께가 두꺼울 경우 솔더가 과도하게 삼입되어 입열량이 과다하게 되어 액화균열과 같은 결함이 발생하게 된다^[10]. 한편 하중제어 방식은 표면접촉 시 설정된 하중을 일정하게 유지하며 접합을 실시하는 방식이다. 시편에 두께 편차가 있는 경우 표면에서부터 툴이 일정한 높이로 유지되면서 접합이 되는 방법이다.

일반적으로 철도차량 차체 패널에 사용되는 압출재의 두께는 약 2.5-3.2 mm를 사용하고 있고 이러한 압출재를 실제 압출할 경우 두께 편차가 발생한다고 알려져 있기 때문에^[3] 두께 편차가 발생하였을 때에도 이상적인 마찰교반접합을 위해서는 하중제어 방식을 적용하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 하중제어 방식을 이용한 압출된 두께 불균일 알루미늄합금의 마찰교반접합부의 결함발생에 미치는 접합변수와 툴 형상의 영

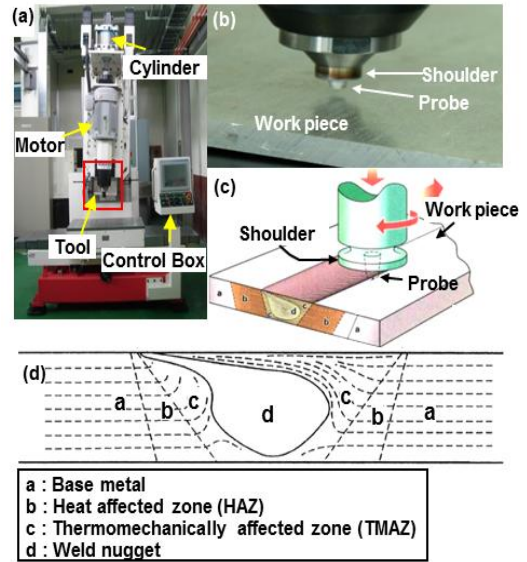


Fig. 1 (a) Experimental set up of FSW machine, (b) Set up of welding tool, (c) Schematic drawing of FSW and (d) Different zone after FSW

향을 비교분석하여 최적의 접합조건을 파악하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치 및 접합원리

Fig. 1(a)는 마찰교반접합 장비사진을 나타내고 Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 네모로 표시한 부분을 확대한 툴의 형상을 나타낸 것이다. 툴(tool)은 상부에 원통형의 솔더(shoulder)와 하부에 작은 원통형의 프로브(probe)로 이루어져 있다. Fig. 1(c)는 접합과정을 모식도로 나타낸 것이다. 비소모성 툴을 고속으로 회전시키면서 피 접합재에 삼입하면 회전하는 툴과 재료의 마찰에 의해 열이 발생한다. 툴 주변의 재료는 마찰열에 의해 연화되고 툴의 회전에 의한 소성유동현상이 발생하여 툴의 양쪽의 재료가 강제적으로 혼합되며 접합되는 원리이다. 마찰교반접합에 의해 생성된 너것은 크게 4부분으로 분류된다. Fig. 1(d)는 마찰교반접합부의 접합영역

을 분류한 모식도를 나타낸 것이다. 마찰교반접합부의 특징은 접합부 중앙에 너깃(nugget)이 존재하는 점이고, 주로 동적 재결정에 의해 그레인이 아주 미세하게 나타나는 것이 특징이며, 너깃형상은 재료에 따라 가변적이다. 그리고 너깃 외부의 상부 또는 하부로 연신된 영역은 열, 기계적 영향부(TMAZ)이다. 틀에 의한 소성변형과 열영향을 복합적으로 받는 부분이며 마찰교반접합부에서만 나타나는 특이한 현상이다. 이외에 용접부에서 일반적으로 나타나는 열영향부(HAZ)와 최외각의 모재(Base metal)로 접합영역이 분류될 수 있다.

2.2 실험 재료 및 방법

본 연구에서 사용한 재료는 철도차량의 외부 패널로 많이 사용되고 있는 A6005 합금이다. A6005 합금 압출재는 유럽에서 개발되었고, 독일의 특급 열차(ICE), 일본의 신칸센 등에 적용되고 있고, 국

Table 1 Chemical composition of A6005-T6 (wt%)

Chemical composition (wt%)							
Mg	Si	Cr	Mn	Cu	Zn	Fe	Al
0.5	0.78	0.1	0.16	0.01	0.03	0.13	Bal.

Mechanical properties		
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
260	215	8

Table 2 Welding conditions and tool shape

Welding conditions			
Rotation speed (rpm)	Welding speed (mm/min)	Welding load (kgf)	Tilting angle(°)
1400-1700	1200-1500	500-1500	3

Tool shape and dimension				
Tool Shape	Shoulder dia. (mm)	Probe top dia.(mm)	Probe bottom dia.(mm)	Material
Taper	16	4.5	4.0	SKD 61
Cylindrical			4.5	

내에서도 KTX에 적용되고 있는 합금이다. A6005 합금은 525℃ 부근에서 용체화 처리 후 170℃ 부근에서 인공시효를 실시하여 강도를 향상시킨 합금이고^[5], 이에 대한 화학적 조성과 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 두 판재의 맞대기 실험에 적용한 접합변수는 다음과 같다. 틀의 회전속도 1400, 1500, 1600 rpm으로 하였고, 접합속도는 1200, 1300, 1400, 1500 mm/min으로 변화시켜 실험을 진행하였다. 또한 하중제어방식이기 때문에 접합하중을 500~1,500 kgf까지 100 kgf간격으로 변화시켜 실험을 실시하였다. 틀 형상에 대한 최적조건 선정을 위해 일반적으로 많이 사용하는 나사산 형상에 프로브 하부로 갈수록 직경이 작아지는 Taper 형상과 상부와 하부의 직경이 같은 Cylindrical 형상의 두 가지 틀을 사용하였다. 실험에 사용한 접합조건과 틀에 대한 자세한 정보는 Table 2에 나타내었다. 각각의 접합조건으로 실험한 시험편 표면의 결합유무를 파악하기 위해 비파괴 시험 중의 한 가지인 액체 침투탐상시험(Liquid penetrant test)을 실시하였다. 또한 시험편을 접합진행방향과 수직으로 절단하여 연마한 후 접합부 단면의 마이크로 조직을 관찰하였으며, 이 때 켈러(Keller's reagent)용액을 이용하여 수십 초 간 부식하여 광학현미경(Olympus-BX51M)을 사용하여 조직을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압출재의 실제 두께 차이

우선 A6005 합금 압출재의 실제 두께차이를 알아보기 위해 철도차량에 적용되는 20 m길이의 더블스킨(double skin)형 압출재를 조인트 간섭이 없는 3개의 평편한 부분에서 1 m길이의 판재로 각각 2부분씩 가공하였다. 가공방법은 Fig. 2(a)에 나타내었다. 가공된 각 시편에 대해서 압출된 길이방향으로 10 cm간격으로 마이크로미터기를 이용하여 두께를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 이 결과로부터 측정 범위 내에서 압출재의 최소두께는 2.75 mm이었고, 최대 두께는 3.12 mm인 것을 알 수 있었다. 따라서 본 실험에서 사용된 압

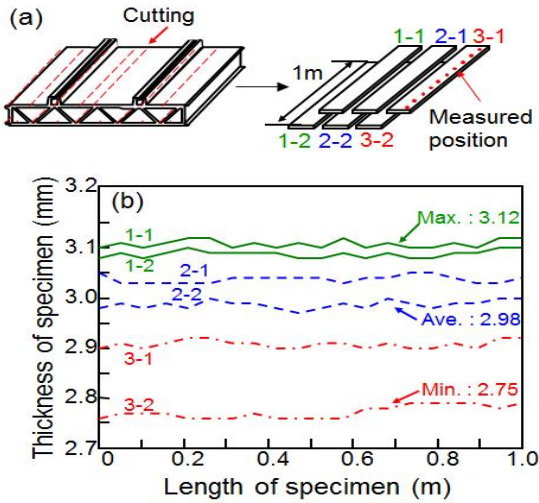


Fig. 2 (a) Measured positions of specimen and (b) Variation of thickness of extruded A6005-T6

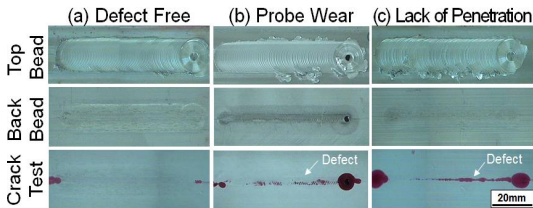


Fig. 3 Appearance of top, back bead and liquid penetrant test after FSW process: (a) Defect free, (b) Probe wear defect and (c) Lack of penetration defect
출 판재의 최대 두께 차이는 약 0.37 mm이었다.

3.2 최적접합조건의 선정 및 결함의 종류

Fig. 3은 두께 불균일 알루미늄 압출재를 하중제어 마찰교반용접을 적용한 결과를 나타내는 것으로서 접합조건 변화에 따른 대표적인 접합부 비드와 크랙 테스트 결과를 나타낸다. 이것으로부터 Fig. 3(a)는 표면 비드가 회전하는 톨에 의해 연속적으로 생성된 룬이 선명하게 보이는 표면결함이 없는 건전한 조건이다. 후면비드 또한 깨끗한 표면을 나타내었고, 크랙 테스트에서도 접합부 시작과 끝부분 바깥쪽에 맞대기 선에는 붉은색의 현상액이 세어 나오지만 접합부에는 현상액이 전혀 보이

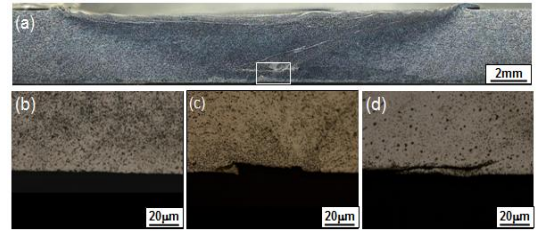


Fig. 4 Optical microscopy: (a) Representative Cross section, (b) Defect free, (c) Probe wear and (d) Lack of penetration

지 않았다. Fig. 3(b)는 표면에 약간의 플래쉬(flash)가 발생하였고, 접합부 끝부분의 엑시트홀(exit hole) 부분에 프로브 모양의 구멍이 뚫린 것을 확인할 수 있다. 또한 후면비드(back bead)에 어두운 색으로 변색된 프로브 자국이 불연속적으로 남아 있다. 크랙 테스트 시 접합부 시작부분 부터 끝부분까지 불연속적으로 현상액이 세어 나오는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 3(c) 역시 표면에 약간의 플래쉬가 발생하였지만, 후면비드는 건전한 조건과 같은 깨끗한 표면을 나타내었다. 크랙 테스트 시 접합부 시작부분부터 끝부분까지 연속적으로 현상액이 세어 나오는 것이 특징이다. 크랙 테스트에서 현상액이 하부에서 세어 나오는 것으로 보아 접합부 하부에서 결함이 발생하는 것을 알 수 있다.

접합부에서 발생하는 결함의 종류를 파악하기 위해 접합부 단면조직을 관찰하여 보았다. Fig. 4(a)는 A6005 마찰교반접합부의 대표적인 단면조직을 나타내었고, 톨에 의한 열적, 기계적 영향을 받아 접합부가 톨 형상으로 변색된 전형적인 너깃 형상을 나타내었다. Fig. 4(b)~(d)는 Fig. 3의 (a)~(c)에 대응하는 접합부 단면 하부 조직을 확대한 사진이다. Fig. 4(b)는 결함이 존재하지 않는 건전한 접합부 하부를 나타낸다. 맞대기 한 두 재료가 교반이 잘되어 모재와 같이 패널의 단차 없이 편평한 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 4(c)는 접합부 하부의 중앙에 프로브 형상으로 접합부가 소량 떨어져 나간 것을 볼 수 있다. 이 결함은 주로 입열이 큰 조건에서 접합부가 상대적으로 많이 연화되거나, 또한 접합하중이 커서 톨의 삼입깊이가 상대적으로 깊

은 경우 발생하는 결함으로서 프로브 마모 결함 (probe wear defect)으로 알려져 있다. 이 결함은 프로브가 판재를 관통해 나와서 모재가 떨어져 나가는 결함이며 오른쪽으로 경사진 나사산 형상을 가지고 있는 프로브가 회전하면서 판재 하부와 부분적으로 접촉하면서 생긴 결함으로 판단된다. 한편, Fig. 4(d)는 접합 후에도 접합부 하부의 중앙에 접합계면이 남아있는 것을 볼 수 있다. 이 결함은 주로 입열이 작은 조건에서 발생하는 결함으로서 교반부족결함(lack of penetration defect)으로 알려져 있다. 이 결함은 계면이 틀의 회전 방향으로 휘어져있는 모양처럼 소성유동은 받았으나 교반력 부족에 의해 두 재료는 섞이지 않는 결함임을 알 수 있다^[10].

이러한 결함들이 발생하지 않는 최적의 조건을 찾기 위하여 틀의 회전속도, 접합속도, 접합하중 그리고 틀의 형상에 따른 접합가능 범위를 조사하여 보았다. 프로브 마모와 교반부족 두 가지 결함이 모두 발생 하지 않는 조건을 찾기 위해 두 결함이 각각 발생하지 않는 영역을 표시하여 겹쳐지는 부분을 찾아보기로 하였다. 프로브 마모결함이 발생하지 않는 영역은 점선으로 표시하였고, 교반부족 결함이 발생하지 않는 영역은 실선으로 표시하였고, 두 가지 결함이 모두 발생하지 않는 영역은 사선영역으로 표시하였다.

Fig. 5(a)~(c)는 프로브 밑 부분 직경이 3.5 mm인 Taper 형상을 가지는 틀을 사용한 경우를 나타낸다. 프로브 마모 결함이 발생하지 않는 조건은 접

합하중이 1,100 kgf이하인 조건이며 회전속도와 접합속도의 영향을 거의 받지 않는 거의 같은 영역을 나타내었고, 교반부족 결함이 발생하지 않는 조건은 접합하중이 1,100 kgf이상인 조건에서 임계영역이 형성되며 회전속도가 100 rpm씩 증가할수록 교반부족 결함이 발생하지 않는 영역은 50 kgf씩 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림에서 알 수 있듯이 본 실험 조건에서는 미세한 약 50~100 kgf 하중 차이에 의해 결함 유무가 결정되는 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 5(d)~(f)는 프로브 밑 부분 직경이 4.5 mm 인 Cylindrical 형상을 가지는 틀을 사용한 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 틀의 하부 직경이 1 mm 커짐으로써 결함이 발생하지 않는 영역이 현저히 확대되었음을 알 수 있다. 프로브 마모결함이 발생하지 않는 조건은 회전속도가 1,400 rpm인 경우 접합속도에 관계없이 접합하중이 1,300 kgf이하인 조건이었으며, 회전속도가 증가할수록 임계하중은 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있다. 회전속도 1,600 rpm 조건에서는 1,000 kgf으로 감소하며, 접합속도가 증가함에 따라 임계 하중영역은 700 kgf까지 감소한다. 교반부족 결함이 발생하지 않는 조건은 회전속도가 1,400 rpm인 경우 임계하중이 800 kgf이며, 회전속도가 증가할수록 임계하중 값은 점점 감소하여 결함이 발생하지 않는 영역이 넓어지는 것을 알 수 있다.

결함이 발생하는 접합부에서는 극심한 변형과 접합 시 발생하는 마찰에 의한 온도에 의하여 소성유동이 발생한다. 이 때 소성유동성은 접합 시 발생하는 최대온도와 냉각속도에 의해서 결정된다. 최대온도가 증가하면 소성유동성이 좋아져 재료의 유동이 원활하게 되어 교반부족과 같은 저입열 결함이 발생하지 않지만 최대온도가 너무 높으면 고입열 결함인 프로브 마모 결함이 발생하게 된다. 따라서 접합조건에 따른 최대온도를 측정하여 보았다. 측정방법은 백킹플레이트(backing plate)와 결함이 발생하는 접합부 하부 즉, 틀이 삽입되었을 때 틀 바로 아래쪽에 직립드릴링 머신(Upright drilling machine)으로 구멍을 뚫은 후 구멍을 통하여 열전대를 통과 시켜 시험편에 고정된 후 디지털 레코더(Model GL 200A) 통하여 마찰교반접합중

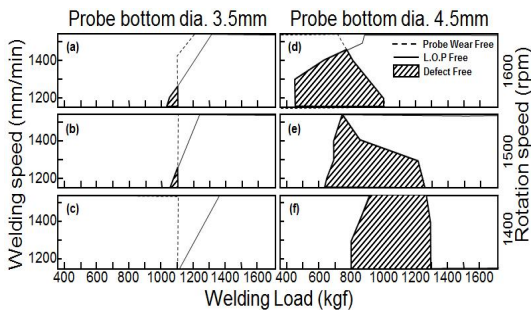


Fig. 5 Effect of welding parameters on formation of defect: (a) taper shape tool and (b) cylindrical shape tool

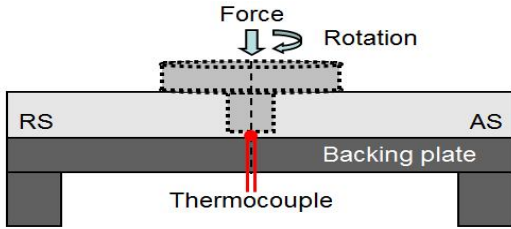


Fig. 6 Measured method of welding temperature and location of thermocouple during FSW process

의 결합발생 부위의 최대온도를 측정하였고, Fig. 6에 온도측정 방법을 모식도로 나타내었다. 결합 발생영역과 미발생영역의 접합 시 최대온도 확인을 위해서 회전속도 1,500 rpm, 접합속도 1,200 mm/min 조건에서 교반부족 결합이 발생하는 영역과 건전한 접합영역 그리고 프로브 마모 결합이 발생하는 접합영역까지 확인할 수 있도록 접합 하중을 600, 800, 1,100 그리고 1,300 kgf 4가지 조건에 대해서 접합온도를 측정하였고, 또한 두 가지 틀 형상에 대해서도 같은 조건의 최대온도를 조사하였다.

Fig. 7(a)는 프로브 밑 부분 직경이 3.5 mm인 Taper 형상을 가지는 틀을 사용한 경우를 나타낸다. 접합 하중이 클수록 접합부 최대온도는 증가하는 것을 알 수 있고, 접합하중이 최대인 1,300 kgf

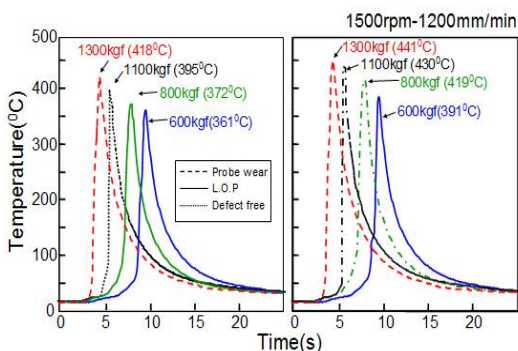


Fig. 7 Peak temperature of AA6005-T6 FSW joints with welding load at 1500rpm-1200mm/min: (a) taper shape tool and (b) cylindrical shape tool

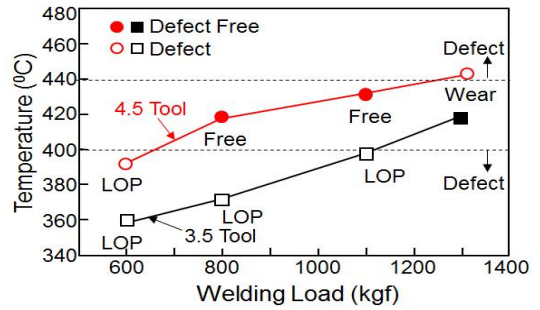


Fig. 8 Relationship peak temperature and defect formation with welding load

에서는 약 418°C까지 상승하였으며 접합하중이 최소인 600 kgf에서는 최대온도가 약 361°C로 상대적으로 낮았고, 접합하중에 따라 온도 차이가 50°C 이상 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 한편 Fig. 7(b)는 프로브 밑 부분 직경이 4.5 mm인 Cylindrical 형상을 가지는 틀을 사용한 경우를 나타낸다. 접합하중이 클수록 접합부 최대온도는 증가하였고, 접합하중이 최대인 1,300 kgf에서는 약 441°C까지 상승하였으며 접합하중이 최소인 600 kgf에서는 최대온도가 약 391°C 이었다. 따라서 프로브 밑 부분 직경이 4.5 mm인 경우가 3.5 mm인 틀을 사용한 경우에 비해 결합 발생 부위의 접합온도가 상대적으로 더 높은 것을 알 수 있다. 이것으로부터 프로브 밑 부분 직경이 4.5 mm인 Cylindrical 형상을 가지는 틀을 사용한 경우 틀 하부의 접합온도가 더 높기 때문에 교반부족결합이 발생하지 않고 건전한 영역이 더 넓어지는 것이라 판단된다.

본 실험에서는 접합부 결합이 하부에만 동일하게 위치하고 있기 때문에 결합 발생 부위의 최대 온도에 따른 결합발생 유무를 조사하여 보았다. Fig. 8은 Fig. 7의 최대 온도값을 접합 하중에 따른 최대온도 변화와 해당온도 조건에서 결합발생 유무를 정리한 것이다. 결합 발생 부위의 틀의 형상과는 관계없이 최대온도가 약 400°C이하인 경우 저입열 결합인 교반부족 결합이 발생하였으며, 최대온도가 약 440°C이상인 경우 프로브 마모 결합이 발생하였고, 약 400~440°C조건에서 결합이 없는 건전한 접합부를 얻을 수 있는 온도영역임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 하중제어 방식을 이용한 압출된 두께 불균일 알루미늄합금의 마찰교반접합부의 결함발생에 미치는 접합변수와 틀 형상의 영향을 비교분석하여 다음과 같은 실험결과를 얻었다. 두께 불균일 알루미늄 압출재에 하중제어 기술을 이용한 마찰교반접합법을 적용할 때 판재의 두께 편차에 의해서 접합하중이 클 경우 고입열 결함인 프로브 마모 결함이 발생하였고, 접합하중이 작을 경우 저입열 결함인 교반부족 결함이 발생하였다. 앞선 결과에서 프로브 하부 직경이 3.5 mm인 Taper 형상의 틀을 사용했을 경우, 약 100 kgf의 접합 하중 차이에 의해서 결함 발생 유무가 결정되었으나, 프로브 하부의 직경을 4.5 mm인 Cylindrical 형상의 틀을 사용했을 경우, 양호한 접합부를 얻을 수 있는 범위가 확대되었다. 이것으로부터 두께 불균일 알루미늄 압출재에 하중제어 방식의 마찰교반접합을 적용할 경우 결함이 없는 양호한 접합부를 얻기 위해서는 접합하중, 틀의 회전속도, 접합속도, 틀의 형상 및 치수 등을 관리하여 고입열과 저입열 조건을 피할 수 있는 정밀한 입열 관리 방법이 요구되어진다.

Acknowledgements

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2012R1A5A1048294)

REFERENCES

1. Thomas, W. M., "Friction Stir Welding for the Transportation Industries", Materials and Design, Vol. 18 No. 4, pp. 269-273, 1997.
2. Chun, C. K., "Friction Stir Welding Technology for Aluminum Rolling Stocks" J. of KSMPE, Vol. 11 No. 1, pp. 68-75, 2012.
3. Seo, S, G., "Welding Technology for Aluminum Rolling Stocks" J. of KWJS, Vol. 22 No. 3

- pp.228-234, 2004.
4. E. Aldanondo, Friction stir welding and processing V TMS, 2009.
5. I. SHIGEMATSU, "Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding", J. of mat. sci. letter Vol. 22 pp.353-356, 2003.
6. A. Gerlich, "Peak temperatures and microstructures in aluminium and magnesium alloy friction stir spot welds" Sci. Tech. Weld. Join, Vol. 10 No. 6, p647-653, 2005.
7. T. J. Yoon, "The effects of Welding Conditions on Tensile Properties of Friction Stir Lap Welded of Dissimilar Al Alloy, A6K31/A5J32" J of KWJS, Vol. 29, No. 5, 82, 2011.
8. T. J. Yoon, "The Effect of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Welds of KS5J32 Al Alloy" J of KWJS, Vol. 29 No. 2 72, 2011.
9. Song, S, W., "Effect of Welding Parameters on Weld Formation and Mechanical Properties in Dissimilar Al Alloy Joints by FSW" Materials Transactions, Vol. 51, No. 7 pp. 1319-1325, 2010.
10. W. J. Arbogast, "Friction Stir Welding and Processing", ASM International, Materials Park, OH, ISBN-13 978-0-87170-840-3, 2007.