용접 조건이 Al-7075-T651의 마찰교반용접부의 인장 특성에 미치는 영향

Effect of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of Al-7075-T651 Plate

김치옥 · 김선진
C. O. Kim and S. J. Kim

(접수일 : 2010년 12월 14일, 수정일 : 2011년 01월 05일, 채택확정 : 2011년 01월 12일)

Key Words : Friction Stir Welding(마찰교반용접), Al 7075-T651(알루미늄 7075-T651), Welding Condition(용접 조건), Tensile Strength(인장강도), Rotation Speed(회전 속도), Traverse Speed(이송 속도)

Abstract : This paper investigates the tensile properties of the friction stir welded joints of Al 7075-T651 aluminum plate according to the welding conditions. A 7075-T651 aluminum alloy plate with a thickness of 6.0 mm was used in this investigation. For the friction stir welding (FSW) process, a tool with shoulder diameter of 20 mm and probe diameter of 9 mm was used. The rotation speed and traverse speed conditions were changed in this study, the other welding conditions are constant. The welding direction was aligned with the material rolling direction, and dimension of the FSW plate were 250×100×6 mm. As far as this work is concerned, the optimal FSW conditions are determined as the rotation speed, 600 rpm and traverse speed 0.8 mm/sec or the rotation speed, 800 rpm and traverse speed 0.5 mm/sec.

1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 1991년 영국 용접연구소(The Welding Institute, TWI)에서 개발된 고상용접 프로세스이고, 비소모성 회전공구를 이용하여 재료를 교반, 일체화한다고 하는 새로운 원리를 이용한 접합 방법이다^{1,2)}. 용융이나 응고 등에 의한 균열이나 기공의 발생이 없고, 용접 변형이 적다는 등의 여러 가지 장점이 있어 1990년대 중반부터 철도차량, 선박, 자동차, 항공우주 등의 수송기기를 중심으로 여러 산업 분야에서 실용화가 이루어진 괄목할 만한 용접기술로 인식되고 있다³⁾.

전통적으로 알루미늄 합금의 용접에는 MIG(Metal Inert Gas) 혹은 TIG(Tungsten Inert Gas) 용접과 같은 불활성가스를 이용한 용접이 주로 이용되어 왔으나 이들 용접은 접합부의 변형이나 결

함 등으로 알루미늄 합금의 용접에 많은 문제점이 대두되었다.

이러한 관점에서 마찰교반용접은 용융용접법의 문제점을 해결할 수 있는 기술로 근년 산업분야의 접합기술로 각광 받고 있다. 실용단계에 이르기까지 주로 알루미늄 합금에 관한 마찰교반용접의 여러 가지의 프로세스 개발, 접합부의 특성이나 조직에 관한 많은 연구가 행하여져 왔지만²⁾, 아직 해명할 문제가 남아있으며, 또한 접합원리나 현상에 관한 더 많은 이해를 요구하고 있다.

알루미늄은 현재 철강 다음으로 많이 이용되고 있는 것으로, 비중이 약 2.7이고 내식성 및 가공성이 좋아 모든 산업분야에서 그 사용 용도는 매우 광범위하다. 특히 고강도 알루미늄 합금재인 7075-T6재는 시효경화성 Al-Zn-Mg계 합금으로 항공기 등의 수송기거나 구조용 재료로서 많이 사용되고 있다.

고강도 알루미늄인 7075-T651에 대한 마찰 교반 용접에 대한 연구는 국내외적으로 많이 연구되어 왔지만⁴⁻¹¹⁾, 일반적으로 2XXX계열이나 7XXX계열

김선진(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6163
김치옥 : 부경대학교 대학원

과 같은 고강도 알루미늄 합금의 용접 조건 범위는 비교적 넓은 조건 범위를 갖는 6XXX계열과는 달리 좁은 용접 조건 범위를 보이고 있다²⁾. 따라서 실용적 관점에서 그 사용조건에 맞는 7075-T651에 대한 마찰 교반 용접조건에 대한 연구는 중요하다.

본 연구에서는 마찰교반용접재가 실제 구조물에서 운용될 때 중요한 문제로 대두되는 피로현상을 고찰하기 위한 연구의 일환으로 알루미늄 7075-T651의 판재의 마찰교반용접의 최적 용접조건을 결정하기 위하여, 현재까지의 각종 문헌의 조사와 경험을 토대로 톨의 회전속도와 이송속도를 변수로 하여 마찰교반용접을 수행하여 용접부의 육안검사를 행하고, 비교적 양호한 용접조건에 대하여 다시 용접을 수행하여 용접부의 인장시험을 통하여 최적의 마찰교반용접 조건을 결정하고자 하였다.

2. 마찰교반용접(FSW)의 원리 및 특성

마찰교반용접(FSW)은 모재를 회전시켜 마찰열을 이용하는 기존의 마찰용접(Friction Welding)과는 달리, 용접부에 삽입된 비소모성 회전 공구(tool)라 부르는 봉상의 공구를 고속으로 회전시키면서 용접할 두 재료 사이를 접촉시켜 용접라인을 따라 이동 시킴으로써, 재료와의 마찰열을 사용하여 용접부를 가열, 연화, 소성 유동화시켜 고상으로 용접하는 방법이다³⁾. 마찰교반용접 원리의 개념도를 Fig. 1에 나타낸다.

Fig. 2는 본 실험에서 이용된 회전공구(tool)로 직경이 큰 숄더(shoulder) 부와 선단에 있는 프로브(probe) 부로 구성되어 있다. 용접 중에는 프로브만이 재료에 압입되어 접합부의 면을 따라 이동시킨다. 이때 재료는 구속시키고, 고상의 상태를 유지하면서 회전공구에 의한 소성유동에 의해서 용접을 행한다.

접합부에 삽입되는 작은 지름의 프로브 혹은 핀(pin)은 통상 나사로 되어 있고, 우나사의 경우에는 좌회전, 좌나사의 경우에는 우회전에서 이용된다. 프로브의 길이는 밀판과의 접촉을 방지하기 위하여 용접재의 두께보다도 0.2 mm정도 짧은 것이 일반적이다. 또한 큰 지름의 숄더는 평면이 아닌 통상 약간의 요철면상으로 되어 있다.

Fig. 3은 마찰교반용접 과정의 개념도를 나타낸다. 그림에서 나타내는 바와 같이 회전공구는 진행 방향에 1~5°정도 경사진 것이 일반적이다. 이 각도

를 전진각(tilting angle)이라 부른다.

마찰교반용접에서는 공구를 회전시키면서 진행시키는 것으로써 미세조직 형성 등의 여러 특성은 용접중심에 대해서 완전한 좌우대칭이 되지는 않는다. 일반적으로 공구의 회전 방향과 진행 방향이 일치하는 측은 전진측(advancing side), 역으로 되는 측은 후퇴측(retreating side)이라 한다²⁾.

(a) Rotation of tool

(b) Contact of probe tip

(c) Probe indentation and contact of shoulder

(d) Traveling of tool

Fig. 1 Principles of friction stir welding (FSW)

Fig. 2 Photo of the rotating tool used in this work

Fig. 3 Schematic diagram of FSW process

마찰교반용접에서 가장 중요한 요소는 공구의 재질과 형상이다. 일반적으로 공구의 선단에는 높은 마찰열과 전단응력이 발생하므로 고온에서 정적, 동적인 성질이 우수한 공구강을 사용하거나 마르텐사이트계 스테인리스강을 사용하며 용접재료에 따라 공구의 형상과 치수를 설계해야 한다.

마찰교반용접의 가장 큰 특징은 고상용접이며, 또한 용접변형이 타의 용접법에 비하여 적다는 것이다. 또한 알루미늄 합금이나 마그네슘 합금 그리고 주조재, 복합재료와 같은 난용접재료의 접합도 가능하다. 용접할 때 차폐가스나 용가재와 같은 용접 재료가 필요하지 않으므로 원가절감 효과가 탁월하고, 기존의 용접법에 비해 흡이나 적외선, 자외선 등 유해 광선도 발생하지 않아 친환경 용접기술로 각광받고 있다. 그러나 용접중 재료를 견고히 구속할 필요가 있으며, 접합부에 공구의 프로브에 의한 구멍이 남기 때문에 후처리 가공을 실시하거나 엔드팁을 부착하여 제품을 바깥쪽에 위치해야 하는 단점도 있다³⁾.

3. 재료 및 실험방법

3.1 사용재료

본 실험에 사용된 재료는 국내 H사에서 제작된

Al 7075-T651 알루미늄 판재이다. 본 재료에 대한 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1 및 Table 2에 각각 나타내었다.

Table 1 The chemical composition of 7075-T651

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
7075-T651	0.08	0.19	1.61	0.052	2.52
Req. Comp.	≤ 0.40	≤ 0.50	1.2~2.0	≤ 0.30	2.1~2.9

Material	Cr	Ni	Zn	Ti
7075-T651	0.19	0.0061	5.79	0.022
Req. Comp.	0.18~0.28	≤ 0.05	5.1~6.1	≤ 0.20

Table 2 The mechanical properties of 7075-T651

Specimen	Longi. D	Transv. D	Remarks/Unit (Mill Sheet)
Tensile Strength	565	583	≥540/MPa
Yield Strength	481	517	≥460/MPa
Elongation	15	13	≥9/%
Microvirkers' Hardness	155		/VH

3.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 마찰교반용접기는 국내 W사의 3축 스텐드 타입의 터치 패널 조작방식의 직선 마찰교반용접기를 사용하였으며, Y축 스트로크의 최대용량은 1,000 mm 이다.

마찰교반용접 실험에 사용된 재료는 원판 치수 6 × 1250 × 2500 mm, 무게 51.83 kg의 압연 판재로부터 압연 방향을 250 mm, 폭 방향으로 100 mm의 직사각형 크기로 절단하여, 압연방향을 용접 진행 방향으로 하여 마찰교반용접을 수행하였다.

본 실험의 마찰교반용접에 사용된 공구의 치수는 솔더의 직경이 20 mm, 그리고 프로브의 솔더부 직경은 9 mm, 선단의 직경은 6.85 mm로 하고 프로브의 길이는 5.85 mm의 SKD61 공구강으로 프로브 부분의 끝 부분 직경이 작아지는 형상의 나사 형으로 설계, 제작하였다.

마찰교반용접을 실시한 7075-T651 합금의 인장강도의 특성 조사에 사용된 인장시험기는 만능시험

기(Model : KDU-50)를 사용하였으며, 모든 인장시험은 실온에서 KS B0801 제13호 규격에 따라 시험편을 가공, 분당 2 mm 속도로 인장하중을 가하여 수행되었다.

3.3 마찰교반용접의 초기 용접조건 설정

마찰교반용접 조건의 설정에는 많은 변수가 있지만, 크게 1)프로브의 “삽입깊이”, 2)용접 공구의 “회전속도”, 그리고 3)“용접 이송속도” 등이다. 통상 프로브의 삽입깊이는 일정으로 되도록 제어되는 것으로써, 실질적으로는 공구의 회전속도와 용접 이송속도가 주요한 용접조건이 된다. 일반적으로 공구의 회전속도가 증가하면 할수록, 또는 이송속도가 적으면 적을수록 피용접재에 투입되는 입열량은 증가한다. 회전속도와 용접 이송속도와의 관계가 적절하지 못하게 되면 용접불량이 발생하기 때문에, 본 연구에서는 두께 6 mm의 7075-T651의 최적 용접조건을 결정하기 위하여 여러 문헌 조사^{2,11)}와 경험에 의하여 Table 3과 같이 용접변수를 선정하여 실험을 수행하였다.

Table 3 FSW conditions for 7075-T651

Shoulder Diameter (mm)	Rotating Speed (rpm)	Welding Speed (mm/s)	Probe Length (mm)	Probe Diameter (mm)	Spec. ID
20	600	0.5	5.85	9.0	S-5
		1.0			S-3
	800	0.5			S-4
		0.8			S-7
		1.0			S-2
	1600	0.5			S-6
		1.6			S-1

(Tilting angle : 2°)

4. 실험결과 및 고찰

4.1 육안검사

Table 3의 용접 조건에 의한 마찰교반용접재에 대하여 육안검사를 실시하였다. Fig. 4는 마찰교반용접 완료 후 접합면의 앞면과 뒷면의 사진을 나타낸다.

본 예비 실험결과에서 알 수 있듯이 회전속도 1600 rpm, 용접 이송속도 1.6 m/s의 조건에서는 회전속도의 상승에 의한 입열량의 증가 등으로 인하여 용접표면에 요철형 결함과 비교적 큰 균열이 발생하였으며, 또한 회전속도 1600 rpm, 용접속도 0.5

m/s의 조건에서도 표면에 요철형 결함과 용접 방향으로의 긴 균열이 발생하였다. 또한 시험편 ID S-2와 S-7의 회전속도 800 rpm, 용접속도 1.0 mm/s 및 0.8 mm/s의 조건에서도 요철형 표면 결함과 거친 표면을 나타내었다. 본 예비 실험의 조건에서는 비교적 시험편 ID S-3, S-4 및 S-5의 용접조건에서 우수한 용접결과를 보임을 확인 할 수 있었다.

Specimen ID S-5

Rotating speed = 600rpm

Welding speed = 0.5mm/s

Front surface

Rear surface

Specimen ID S-3

Rotating speed = 600rpm

Welding speed = 1.0mm/s

Front surface

Rear surface

Specimen ID S-4

Rotating speed = 800rpm

Welding speed = 0.5mm/s

Front surface

Rear surface

Specimen ID S-7

Rotating speed = 800rpm

Welding speed = 0.8mm/s

Front surface

Rear surface

Fig. 4 Eye investigation of the FSW (Continued)

Fig. 4 Eye investigation of the FSW

이상과 같은 결과로부터 Table 4와 같은 용접 조건으로 7075-T651의 본 실험 재료에 대한 마찰교반 용접을 각 조건에 대하여 3 패스(pass) 씩 수행하여 기계적 특성을 조사하여 최적의 용접조건을 결정하고자하였다. 일례로 Table 4의 본 실험 마찰교반용접 조건에 대한 접합면의 앞면과 뒷면의 사진을

Table 4 Pre-optimal FSW conditions for 7075-T651

Shoulder Diameter (mm)	Rotating Speed (rpm)	Welding Speed (mm/s)	Probe Length (mm)	Probe Diameter (mm)	Spec. ID
20	600	0.5	5.85	9.0	SO-1
		0.8			SO-2
	800	0.5			SO-3
		0.8			SO-4

(Tilting angle : 2°)

Fig. 5에 나타낸다. 본 그림에서 볼 수 있듯이 이들 용접 조건에서는 육안으로는 비교적 양호한 용접 결과를 얻었다고 볼 수 있다.

Fig. 5 Eye investigation of the FSW under pre-optimal welding conditions

4.2 용접부와 모재의 인장시험 결과

용접부의 인장시험편은 Fig. 6과 같이 각 조건에서 마찰교반용접된 용접재에서 압연 방향에 수직방향으로 판재의 중심부와 좌측 지점에서 3개의 인장 시험편(Transverse Tensile Specimen, TTS)을 채

취하였으며, 또한 용접부와 압연 방향이 평행한 방향으로 2개의 시험편(Longitudinal Tensile Specimen, LTS)을 채취하였다. 모재의 경우에도 압연방향과 평행한 시험편과 압연 방향에 수직인 시험편을 제작하여, 용접 조건에 따른 인장 시험 결과와 비교 검토하였다.

(a) Tensile specimen for transverse direction

(b) Tensile specimen for longitudinal direction

(c) Shape of the tensile specimen

Fig. 6 Schematic diagram of the tensile specimen

Fig. 7은 일례로 ID SO-2(600 rpm, 0.8 mm/sec)에 대한 인장 실험 후의 하중과 변위 선도를 나타내고 있다. 그리고 Fig. 8에 모든 용접 조건에 따른 인장시험편의 인장시험 결과를 나타낸다.

알루미늄 7075-T651 모재의 압연 방향인 종 방향(longitudinal direction) 시험편에 대한 인장시험 결과, 인장강도 565 MPa, 항복강도 481 MPa 그리고 연신율 15 %를 얻었다. 압연 방향과 수직인 횡 방향(transverse direction)의 인장시험 결과는 인장강

도 583 MPa, 항복강도 517 MPa 그리고 연신율 13 %를 얻었다.

Fig. 7 Load and displacement diagrams (ID SO-2)

(a) Results for longitudinal direction

(b) Results for transverse direction

Fig. 8 Results of tensile tests on FS welded joint

본 마찰교반용접 조건에 따른 최고 인장강도는 종 방향의 경우 ID SO-2 시험편(600 rpm, 0.8 mm/sec)에서 464 MPa로 측정되었고, 횡 방향 시험편의 경우는 ID SO-3(800 rpm, 0.5 mm/sec)에서 383 MPa로 측정되었다. 한편 항복강도의 경우에는 종 방향의 경우 ID SO-1, ID SO-2 그리고 ID SO-3의 시험편에서 거의 300 MPa의 동일한 값으

로 측정되었으며, 횡 방향 시험편의 경우는 ID SO-3(800 rpm, 0.5 mm/sec)의 경우가 281 MPa로 가장 높게 측정되었다. 그리고 연신율의 경우는 종 방향의 경우 ID SO-2가 13 %, 횡 방향의 경우 ID SO-3가 7.1 %로 가장 높게 나타났다. 이상의 경우를 종합하여 보면 본 실험 조건에 의한 강도 측면에서는 ID SO-2(회전속도 600 rpm, 용접 이송속도 0.8 mm/sec) 혹은 ID SO-3(회전속도 800 rpm, 용접 이송속도 0.5 mm/sec) 시험편의 경우가 최적인 마찰교반용접 조건으로 사료된다.

ID SO-1, ID SO-2 그리고 ID SO-3의 인장 시험편에 대한 시험편은 모두 Fig. 9와 같이 열영향부에서 파단되었다. 이는 Mahoney 등⁴⁾의 실험 결과와도 잘 일치함을 알 수 있었다. 그러나 ID SO-4의 경우는 3개의 횡 방향 인장 시험편 중 하나의 시험편에서는 Fig. 10과 같이 마찰교반용접의 교반부(Stir Zone)에서 파단이 발생하였다. 이는 육안검사에서 나타내지 않은 용접부에서의 내부 결함에 의한 원인이 있지 않을까 생각하여 본 시험편에 대한 몇 개의 조직 시험편을 채취 조사한 결과 Fig. 11와 같은 터널상 결함이 존재함을 확인하였다. 이러한 결함은 교반부측 등의 원인에 의한 결함이라 사료된다²⁾.

Fig. 9 Fracture position for tensile test specimen

Fig. 10 Tensile fractured specimen in stir zone

Fig. 11 Tunnel shape defect in SO-4 specimen

이상의 인장시험 결과를 종합하여 나타낸 것이 Fig. 12이다. 그림에서 알 수 있듯이 본 실험 조건의 범위에 대한 최적의 마찰교반 용접의 조건은 회전속도 범위는 600~800 rpm이며, 용접 이송속도 범위는 0.5~0.8 mm/sec 임을 알 수 있다.

Fig. 12 results of tensile tests on FS welded joint

4. 결 론

고강도 알루미늄 합금인 7075-T651 판재에 대한 맞대기 마찰교반용접을 수행한 후 용접부의 인장 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 실험에 사용된 두께 6 mm의 7075-T651 판재의 모재에 대한 인장강도는 종방향이 565 MPa, 횡방향이 583 MPa 그리고 항복강도는 종방향이 481 MPa, 횡방향이 517 MPa로 나타났다.

(2) 4개의 본 실험 용접조건(ID SO-1~ID SO-4)에서 마찰교반용접된 인장강도는 종방향, 횡방향 모재의 61~82 %, 항복강도는 모재의 54~98 % 결과를 보였으며, 인장 시험편의 파단위치는 ID SO-4 시험편의 하나를 제외하고는 모두 열영향부(HAZ)측에서 나타났다.

(3) ID SO-4(600 rpm, 0.5 mm/sec)의 조건에서는 일부 교반부에서 인장 파단이 발생하였다. 이는

교반부족에 의한 재료 내부에 터널상 내부결함이 존재하였기 때문에 사료된다.

이상의 결과로부터 본 시험재에 대한 최적의 마찰교반용접 조건은 회전속도 600~800 rpm, 이송속도 0.5~0.8 mm/sec임을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murcg, M.G., Templesmith, P. and Dawes, C.J., 1991, "Friction Stir Butt Welding", International patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8, Dec. 1991, U>S> Patent No. 5,460,317, Oct. 1995.
2. 마찰압접협회, 2006, "마찰접합기술", 일간공업신문사(일서).
3. 김미선, 2009, "국내마찰(교반)용접 설비산업의 현황과 전망은?", 용접저널, 8월호, pp. 51-62.
4. Mahoney, M.W., Rhodes, C.G., Flintoff, J.G., Spurling, R.A. and Bingel, W.H., 1997, "Properties of Friction-Stir-Welded 7075 T651 Aluminum", Metallurgical and Materials Transactions Vol. 29A, pp. 1955-1964.
5. Shinoda, T. and Kondo, Y., 1997, "Friction Stir Welding of Aluminum Plate", Welding International, Vol. 11-3, pp. 179-184.
6. Sato, Y.S., Kokawa, H., Ikeda, K., Enomoto, M., Jogan, S. and hashimoto, T., 2001, "Microtexture in Friction Stir weld of an AluminumAlloy", Metallurgical and Materials Transactions Vol. 32A, pp. 941-948.
7. Fuller, C.B., Manohney, M.W., Calabrese, M. and Micon, L., 2010, "Evolution of Microstructure and Mechanical Properties in Naturally Aged 7075 and 7075 Al Friction Stir Welds", Materials Science and Engineering A527, pp. 2233-2240.
8. Hatamleh, O., Forth, S. and Reynolds, A.P., 2010, "Fatigue Crack Growth of Peened Friction Stir-Welded 7075 Aluminum Alloy Different load Ratios", Journal of Materials Engineering Performance, Vol. 19, pp. 99-106.
9. 이창용, 김선규, 이원배, 장웅성, 연윤모, 정승부, 2004, "7075 알루미늄 합금의 마찰교반용접특성", 대한용접학회 2004년도 춘계 학술대회발표논문, pp. 159-161.
10. 연윤모, 이원배, 정승부, 2001, "알루미늄 합금의 마찰교반용접부의 미세조직과 특성", 대한용접학회지, Vol. 19-6, pp. 187-193.
11. 장석기, 한민수, 전정일, 2007, "Al7075-T651의 마찰교반 용접에 대한 회전속도와 이송속도의 영향", 대한기계학회논문집 A권, 제31권 제4호, pp. 532-539.