

용접조건이 Al-7075-T651의 마찰교반용접부의 경도와 미세조직에 미치는 영향

Effects of Welding Condition on Hardness and Microstructure of Friction Stir Welded Joints of Al-7075-T651 Plate

김치옥 · 손혜정 · 김선진

C. O. Kim, H. J. Sohn and S. J. Kim

(접수일 : 2010년 12월 14일, 수정일 : 2011년 01월 06일, 채택확정 : 2011년 01월 12일)

Key Words : Friction Stir Welding(마찰교반용접), Aluminum 7075-T651(알루미늄 7075-T651), Hardness Distribution(경도 분포), Microstructure(미세조직), Stir Zone(교반부)

Abstract : As well known, the friction stir welding is a novel welding process which is a solid state welding process for sheet or plate using the friction stir phenomenon. This paper describes the effect of welding condition such as the rotation speed and the travelling speed during the friction stir welding process on the micro Vickers hardness and the microstructure of friction stir welded joints in Al-7075-T651 plate. From those investigations, the highest hardness of stir zone was observed at the welding condition of SO-3. The microstructures of the friction stir welded joints was not dependent on the welding conditions, but in the SO-4 specimen, the friction stir welding defect like tunnel shape was found in stir zone.

1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 1991년 영국 용접연구소(The Welding Institute, TWI)에서 개발된 고상용접 프로세스로¹⁾, 용융이나 응고 등에 의한 균열이나 기공의 발생이 없고, 용접 변형이 적다는 등의 여러 가지 장점이 있어 1990년대 중반부터 여러 산업 분야에서 실용화가 이루어진 괄목할 만한 용접기술로 인식되고 있다²⁾.

모재를 회전시켜 마찰열을 이용하여 접합하는 기존의 마찰용접(Friction Welding, FW)²⁾과 달리, 마찰교반용접은 Fig. 1과 같이 용접부에 삽입된 환봉의 회전공구(tool)를 용접할 두 재료 사이 용접라인을 따라 회전 이동시킴으로써, 용접부를 가열, 연화, 소성 유동화시켜 고상으로 용접하는 원리이다.

최근 환경보호와 에너지 절감에 대한 요구가 높아지면서 자동차 및 철도, 선박, 항공기 등 수송기기의 경량화를 위한 기술의 필요성이 대두되는 가운데, 이 기술은 알루미늄이나 마그네슘 등의 경량 합금을

접합하는 차세대 용접기술로 주목 받고 있다³⁾.

이러한 관점에서 많은 연구자들에 의하여 알루미늄 합금에 관한 마찰교반용접의 여러 가지의 프로세스 개발, 접합부의 특성이나 조직에 관한 많은 연구가 행하여지고 있지만⁴⁻¹¹⁾, 아직 해명할 문제가 남아있으며, 또한 접합원리나 현상에 관한 더 많은 이해를 요구하고 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 Al-7075-T651의 관재의 마찰교반용접의 최적 용접조건을 결정하기 위하여, 회전공구의 회전속도와 이송속도를 변수로 하여 용접조건이 마찰교반용접부의 경도와 미세조직에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

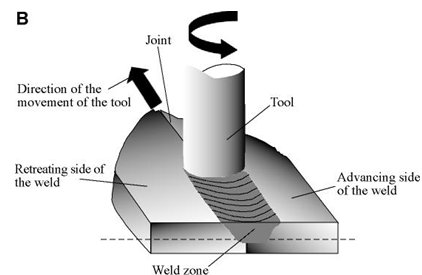


Fig. 1 Schematic illustration of friction stir welding

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

2. 재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 실험에 사용된 재료는 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(L)	13	≥9/%
Microvirkers' Hardness	155		/VH

2.2 실험장치 및 실험방법

마찰교반용접 실험에 사용된 재료는 원판 치수 6 × 1250 × 2500mm, 무게 3576kg의 압연 판재로부터 Fig. 2와 같은 직사각형 형태로 절단하여, 압연방향을 용접 진행방향으로 하여 마찰교반용접을 수행하였다.

본 실험에 사용된 재료의 마찰교반용접에 사용된 공구의 재질은 SKD61 공구강으로 Fig. 3과 같이 나사 형으로 설계 제작하였으며, 마찰교반용접재의 경도와 미세조직을 조사하기 위해 용접부를 중심으로 좌우 20mm를 절단한 후 시험편을 제작하였다.

용접재의 경도와 조직을 조사하기 위하여 마이크로 비커스 경도시험기(Model: HM-124)와 광학 현

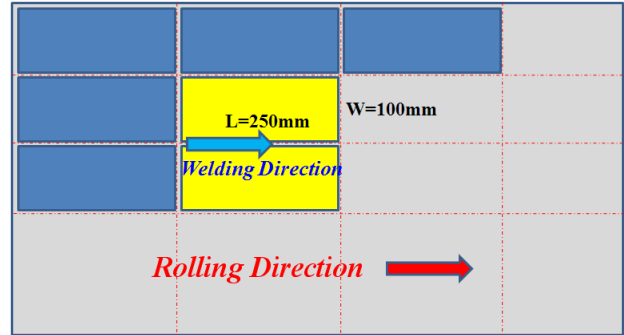


Fig. 2 Specimen cutting and welding direction



Fig. 3 Photo of the probe used in this study

미경(Model: GX51)을 사용하였다. 경도의 시험 하중은 100gf, 가압시간 10초로 하여 등간격으로 측정하였다. 한편 모재와 용접부의 미세조직을 관찰하기 위하여 증류수 150ml, 질산 3ml, 불산 6ml 그리고 염산 6ml의 혼합용액에 4분간 에칭하였다.

2.3 용접조건 설정

마찰교반용접 조건의 설정에는 많은 변수가 있지만, 문헌²⁾과 인장 특성을 조사한 결과¹²⁾를 바탕으로 Table 3과 같이 용접변수를 선정하여 실험을 수행

Table 3 FSW conditions for 7075-T651

(Tilting angle : 2°)

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

하여 마찰교반용접부의 경도와 미세조직을 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경도시험 결과

Fig. 4는 7075-T651 알루미늄 판재의 마찰교반용접부를 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 용접단면부의 표면에서 1.5mm 떨어진 상부, 3mm 중앙부 그리고 4.5mm 떨어진 하부의 3위치에서의 경도 측정위치를 나타낸 것이다. Fig. 5는 각 실험조건에 대하여 측정한 경도분포를 나타낸다.

경도값의 분포는 용접변수 ID SO-3의 시험편에서 가장 높게 나타났으며, 그 다음 용접변수 ID SO-2, ID SO-1 그리고 ID SO-4순으로 나타났다. 한편 동일 용접변수의 시험편에 대한 경도 분포는 대칭이 아니며, 열적·기계적 열영향부(TMAZ)와 열영향부(HAZ)는 교반부(SZ)나 모재보다도 낮게 나타났다. 이는 공구의 회전시 발생하는 마찰열에 의하여 결정립의 조대화가 원인인 것으로 사료된다. 또한 그 변동성을 보게 되면 용접변수 ID SO-2의 시험편에서 가장 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 동일 재료의 마찰교반용접부를 상부, 중부 그리고 하부의 위치에서 각 용접변수에 대하여 측정한 경도값의 분포도를 나타낸다. Fig. 6 (a)에서 알 수 있듯이 표면에서 0.5mm 떨어진 상부에서의 경도 분포는 용접변수 ID SO-3의 시험편, 그리고 ID SO-2, ID SO-1, ID SO-4의 순으로 나타났다. 중앙부 및 하부의 위치에서도 정도의 차이가 있지만, 용접변수 ID SO-3의 시험편, 그리고 ID SO-2, ID SO-1, ID SO-4의 순으로 나타났다.

거의 모든 시험편에서의 용접 중앙 부분에는 높은 열과 큰 변형으로 인한 회복과 재결정이 일어나는 동적 재결정 영역으로 인하여 넓은 범위에 걸쳐 타원형으로 발달된 너깃(nugget)에 의하여 그 영역에서의 경도분포는 블록 타원형의 경도분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

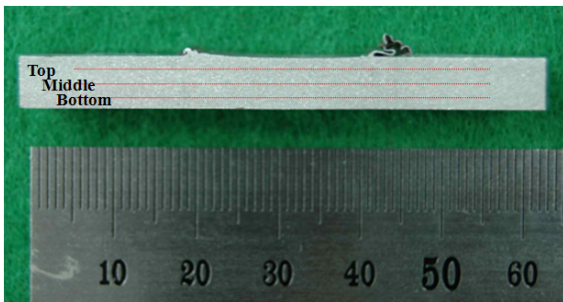
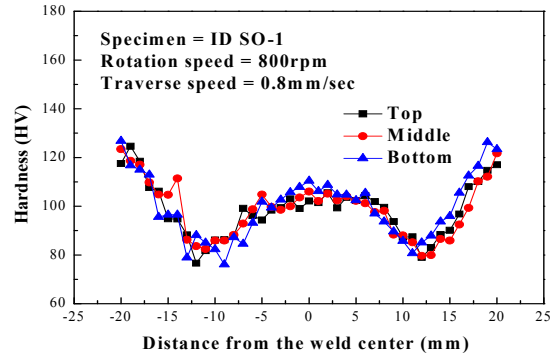
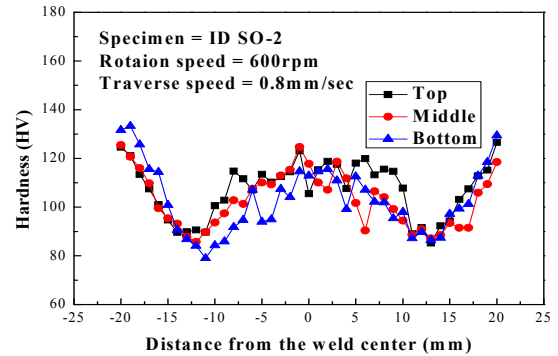


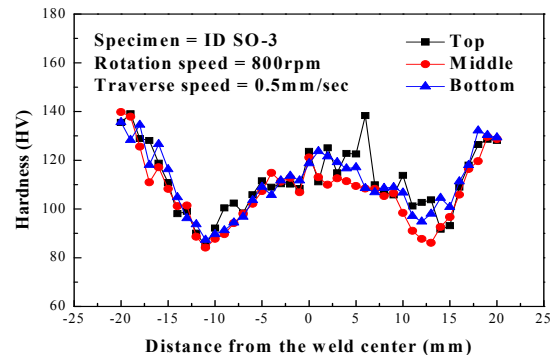
Fig. 4 Measuring positions of Virkers hardness



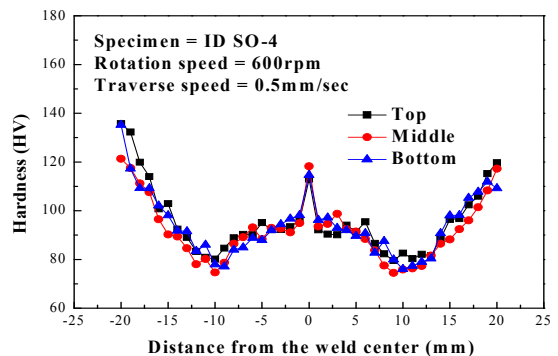
(a) Hardness distribution for ID SO-1 specimen



(b) Hardness distribution for ID SO-2 specimen

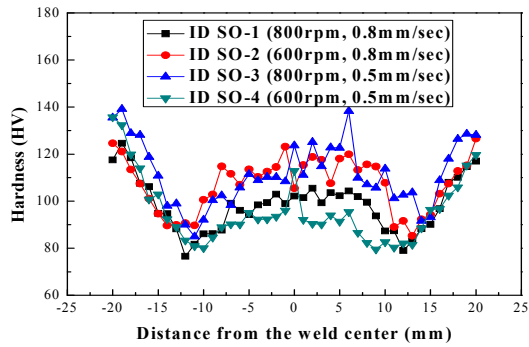


(c) Hardness distribution for ID SO-3 specimen

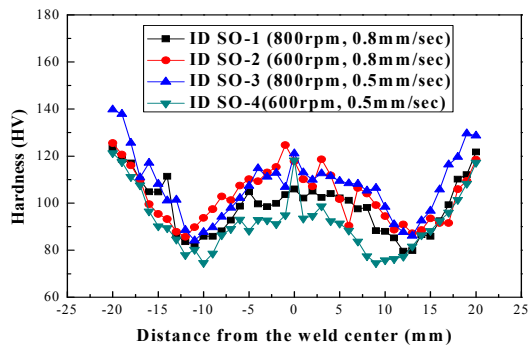


(d) Hardness distribution for ID SO-4 specimen

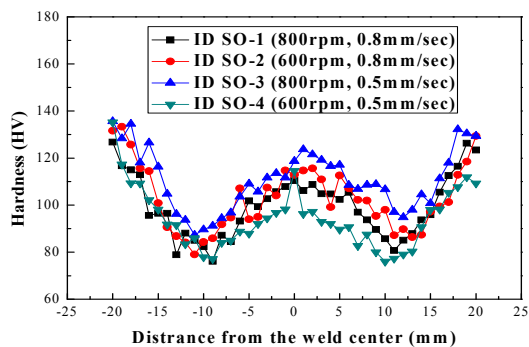
Fig. 5 Investigated hardness distribution for FSW



(a) Hardness distribution at top (1.5mm) position



(b) Hardness distribution at middle (3mm) position



(c) Hardness distribution at bottom (4.5mm) position

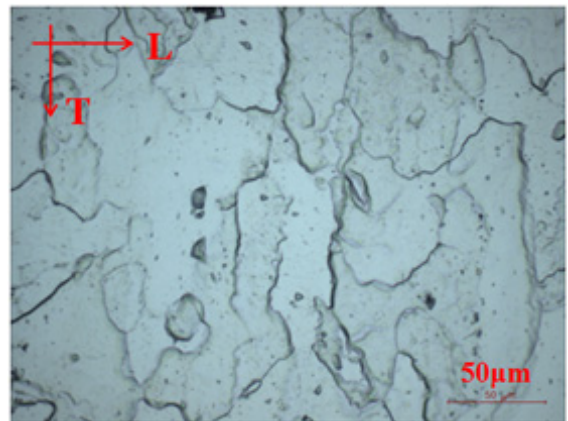
Fig. 6 Investigated hardness distribution for FSW

3.2 마찰교반용접부의 조직관찰

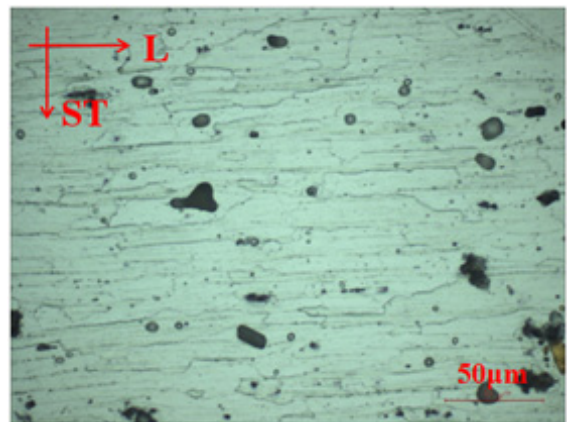
먼저 Al-7075-T651 모재에 대한 압연 방향(LT)에 대한 조직과 두께 방향(LST)에 대한 조직 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 압연 방향에 대한 조직은 등축 결정립으로 관찰되었으며, 결정립의 크기는 약 50에서 100 μm 까지 변화함을 알 수 있다. 그리고 두께 방향에 대한 조직은 강한 냉간 압연의 영향으로 길게 늘어난 결정립으로 관찰되었으며, 결정립의 평균 두께는 평균 약 10 μm 로 나타났다.

Fig. 8은 마찰교반용접을 행한 알루미늄 시험편의

전형적인 단면 조직의 개략도를 나타낸 것이다. 용접부 중심에는 교반부라 부르는 수 μm 정도의 등축적인 재결정조직이 존재한다. 교반부의 외측에는 소성유동에 의해 결정립이 늘어난 형상을 갖는 열·기계적 영향부(Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)가 존재하며, 그 외측에는 소성변형은 동반하지 않지만 열영향을 받는 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)가 존재한다. Fig. 9는 본 연구에서 조사한 시험편의 미세조직의 관찰 위치를 나타낸 것이다.



(a) Microstructure on rolling plate (LT)



(b) Microstructure on plate thickness (LST)

Fig. 7 Optical micrographs of the microstructure for base metal of Al-7075-T651

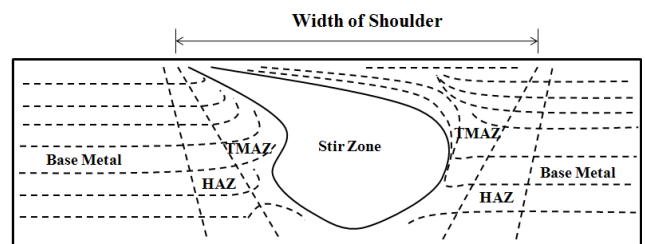


Fig. 8 Schematic diagram of FSW macrostructure

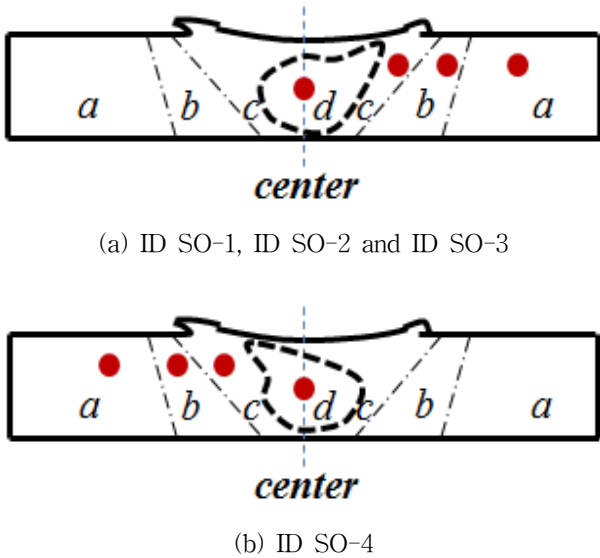


Fig. 9 Sketch of specimen for microstructure

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 그리고 Fig. 13에 ID SO-1, ID SO-2, ID SO-3 그리고 ID SO-4에 대한 미세조직의 관찰 결과를 각각 나타내었다. 광학현미경 시험의 관찰에서는 특별한 점은 보이지 않았고 거의 비슷한 결과를 보였다. 모든 시험편에서 "a"로 표시된 부분은 용접 과정에 의한 영향을 받지 않은 모재의 부분을 나타낸다. "b"로 표시된 부분은 열영향을 받은 열영향부(HAZ)이다. 비록 이 영역에서는 소성 변형이 발생하지 않지만 용접 중 열에 의하여 국부적으로 기계적 성질이 변화하지만, 사진에서 알 수 있는 것처럼 결정립 구조는 거의 모재의 구조로 남아 있음을 알 수 있다. 통상 공구의 어깨는 이 영역을 넘어서 이동하지 않는다. "c"로 표시된 부분은 열적 기계적으로 영향을 받는 열적기계적영향부(TMAZ)이다. 이 영역의 기계적 성질은 변형률과 공구의 어깨 및 핀에 의하여 영향을 받는 것으로써 그 미세조직은 다소 변화하지만 여전히 모재의 미세조직과 비슷하게 남아 있음을 알 수 있다. 그리고 그림에서 "d"로 표시된 부분을 용접 너깃(weld nugget)이라 하며, 소성 변형이 발생한 미세한 결정립을 갖는 영역이다. 이 영역을 일명 마찰교반된 영역 friction stir pressed zone(FSPZ) 혹은 동적 재결정된 영역 dynamically recrystallized zone (DXZ)라 부른다. 이 영역은 개략적으로 핀의 크기 정도를 나타내고 있다. 왜냐하면 회전 핀이 이 영역을 지나가기 때문이라 사료된다.

상기의 결과에서 알 수 있듯이 접합 시 발생한 마찰열과 소성유동에 의해 동적 재결정 영역이 발생하여 모든 그림의 (d)와 같이 결정립이 매우 미

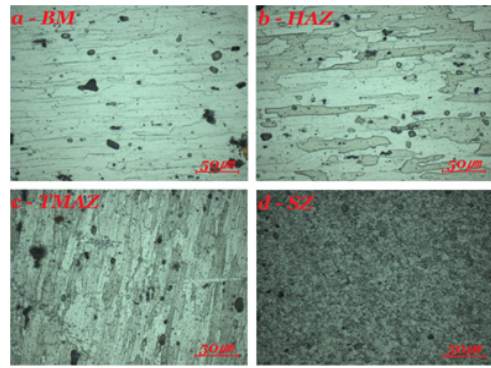


Fig. 10 Microstructures of FSWed joint for SO-1

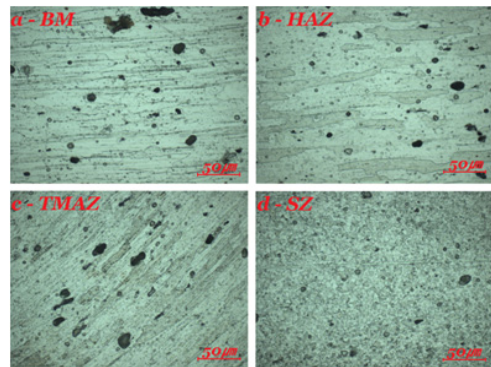


Fig. 11 Microstructures of FSWed joint for SO-2

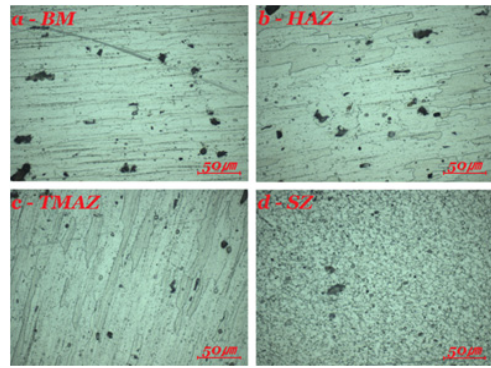


Fig. 12 Microstructures of FSWed joint for SO-3

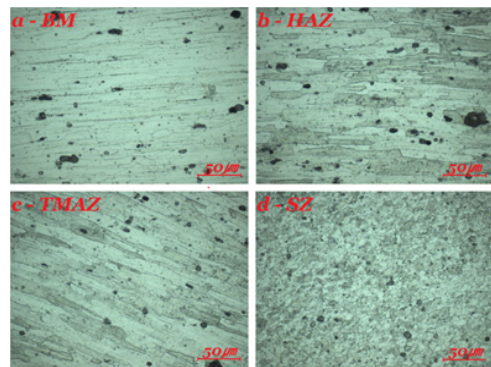


Fig. 13 Microstructures of FSWed joint for SO-4

제한 것으로 나타났으며, 이는 경도의 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 14³⁾와 같이 이러한 동적 재결정 영역이 발생하여 인장 시험편의 파단은 통상적으로 열영향부에서 나타나게 된다. 결과적으로 조직의 관찰 결과 정도의 차이는 있지만 정도분포와 인장시험 결과¹²⁾를 종합적으로 고찰한 결과 제한된 시험조건에서 ID SO-3 시험편인 회전속도 800rpm, 용접 이송속도 0.5mm/sec에서 우수한 용접 조건임을 알 수 있었다.

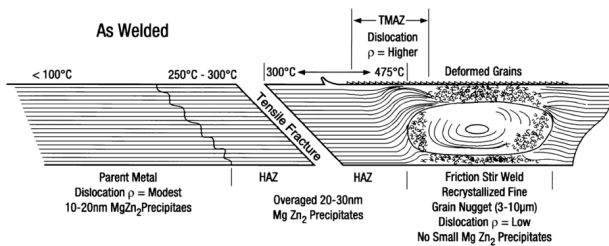


Fig. 14 Schematic illustration of friction stir weld zone microstructure for Al-7075-T651³⁾

4. 결 론

4가지의 제한된 용접조건에서 Al-7075-T651 판재에 대한 마찰교반용접을 수행한 후 경도와 미세조직을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정도값의 분포는 용접변수 ID SO-3(800rpm, 0.5 mm/sec)시험편에서 가장 높게 나타났으며, 그 다음 용접변수 ID SO-2, ID SO-1 그리고 ID SO-4 순으로 나타났다.

(2) 조직 현미경관찰 결과 마찰교반용접 시 발생한 마찰열과 소성유동에 의해 동적 재결정 영역이 발생하여 결정립이 매우 미세한 교반 영역이 나타났으며, 이는 정도 결과와도 잘 일치함을 알 수 있었다.

(3) 정도와 조직의 관찰 결과 ID SO-3 시험편인 회전속도 800rpm, 용접 주행속도 0.5mm/sec에서 우수한 용접조건임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과의 일부로 관계자에게 감사드립니다.

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., Jogam, S. and Hashimoto, T., 2001, "Microtexture in Friction Stir weld of an Aluminum Alloy", Metallurgical and Materials Trans. Vol. 32A, pp. 941-948.
7. Fuller, C.B., Manohney, M.W., Calabrese, M. and Micono, 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", J. of Mat. Eng. 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.
12. 김치옥, 김선진, 2010, “용접조건이 Al-7075-T651의 마찰교반용접부의 인장 특성에 미치는 영향”, 한국동력기계공학회지, 제15권 제2호, pp. 61-68.