

이종 알루미늄의 FSW 에서의 물질혼합에 관한 연구

홍 성 태[†]

(2008년 7월 15일 접수, 2008년 11월 26일 수정, 2009년 1월 20일 심사완료)

Mixing of Materials in FSW of Dissimilar Aluminum Alloys

Sung-Tae Hong

Key Words : Friction Stir Welding(마찰교반용접), Aluminum Alloys(알루미늄 합금), Etching(에칭)

Abstract

The mixing of two dissimilar aluminum alloys in friction stir welding (FSW) was investigated using etching. The results show that the materials from the retreating side mixed into the advancing side in rather narrow and elongated bands whereas the materials from the advancing side mixed into the retreating side in the form of thick bands and lobes. A computational method using smoothed particle hydrodynamics (SPH) is introduced as a way to properly describe the complex mixing behavior in FSW.

1. 서론

마찰교반용접(Friction Stir Welding; FSW)은 동종 혹은 이종 소재간의 접합이 소재의 용융점 이하에서 고형상태로 이루어지는 비용융 접합방법이다.⁽¹⁾ 기존의 용융접합 공정들에 비해서 FSW이 가지는 장점들을 다음과 같다.

- 적은 용접결함
- 낮은 잔류응력
- 우수한 피로강도
- 높은 연성과 인성
- 이종소재 혹은 일반적인 용접방법으로는 용접이 힘들거나 불가능한 소재의 용접이 가능
- 현격한 에너지/생산비용 절감

위와 같은 일반적인 용접방법에 대한 장점들로 인하여 FSW 에 대한 산업체의 관심은 지속적으로 증가하고 있다.

그러나 일반적으로, 특정한 응용분야에 관한 FSW공정의 개발은 실험적인 방법에 의존하여왔으며,^(2~6) 최근에 들어서야 FSW에 대한 수치해석적인 다양한 연구들이 보고되고 있다.^(7~14) 성공적인 FSW의 수치모델의 중요한 요소들 중의 하나는 접합부의 기계적 성질에 큰 영향을 미치는 용접과정 중의 소재들의 유동과 혼합을 정확히 예측하는 것이다. 그러므로, FSW의 수치모델에서 예측된 소재들의 유동과 혼합거동의 실제 실험결과와의 비교를 통해서 FSW의 수치해석 결과의 정확도를 검증할 수 있을 것이다.

비록 마커삽입법(marker insert technique)이 소재의 유동과 혼합거동에 관한 다양한 정보를 제공해 주기는 하지만^(15~18) 마커삽입법은 용접공정에 인위적인 불순물을 포함시키게 된다. 그러므로 본 논문에서와 같이 이종 금속재료간의 혼합거동을 연구할 경우에는 마커삽입법 보다는 에칭(etching)에 대한 금속재료들의 각기 다른 반응성을 사용하는 방법이⁽¹⁹⁾ 혼합거동에 관한 정보를 좀 더 정확하게 제공 할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 우선 FSW 공정 온도 영역에서의 각각의 알루미늄 합금들의 기계적 특성을 측정하여 상온에서의 기계적 특성들과 비교하였다.

[†] 회원, 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail : sthong@ulsan.ac.kr

TEL : (052)259-2129 FAX : (052)259-1680

Table 1 Compositions of aluminum 5182-O and 6111-T4 alloys and their mechanical properties

Al Alloys	Alloying element (wt %)	Yield strength [†] (MPa)		Tensile strength (MPa)		Elongation [‡] (%)		Melting range (°C)
		400°C	Room temp.	400°C	Room temp.	400°C	Room temp.	
5182-O	0.24 Fe; 4.88 Mg; 0.33 Mn;	28.3	138 (130)	29	288 (275)	190	24	577-638
6111-T4	0.27 Fe; 0.63 Si; 0.78 Mg; 0.21 Mn	39.5	189 (165)	41	298 (285)	50	21	N/A

[†]: 0.2% offset yield strength; [‡]: elongation at fracture; (): mechanical properties from ASM handbook⁽²¹⁾

Table 2 FSW parameters

Tool speed		Angle		Tool geometry Scrolled shoulder (12.7 mm diameter). Threaded pin (4.5 mm base diameter; 2.3 mm length; 10° taper along the length; three 0.25 mm flats by 120°; 5.1 mm fillet radius of pin surface)
Rotation	Translation	Lead	Transverse tilt	
2000 (rpm)	1.91 (m/min)	1°	2°	

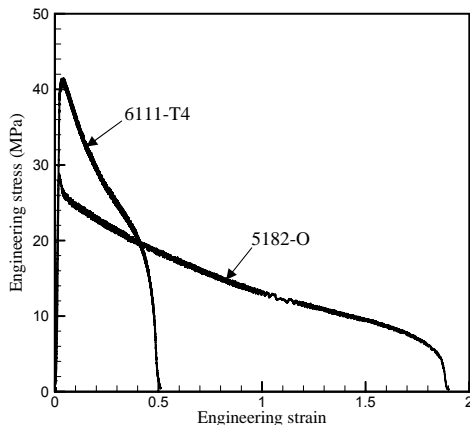


Fig. 1 The stress-stain curves of the aluminum 5182-O and 6111-T4 alloys at 400°C

이어서 두 종류의 알루미늄 합금의 에칭에 대한 각기 다른 반응성을 이용하여 공정 중의 공구 핀의 중단 면의 위치와 일치하는 FSW 접합부 단면에서의 소재간의 혼합거동을 연구하였다. 마지막으로 FSW 에서의 불균질한 유동과 혼합거동을 연구하는 수치해석 방법들 중 하나인 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)를 소개한다.

2. 알루미늄 합금과 용접 파라미터

본 연구에서는 두께 2.07 mm 의 알루미늄 5182-O 판재와 두께 1.45 mm 의 알루미늄 6111-T4 판재

가 소재로서 사용되었다. 본 연구에서 사용된 두 알루미늄 합금들은 에칭에 대하여 확연히 다른 반응성을 가지고 있다.

FSW 공정 중의 소재의 물성치의 변화의 이해를 위해서 본 연구에서 사용된 알루미늄 소재들의 인장 실험을 상온과 고온에서 각각 수행하였다. FSW 공정 중에, 접합부의 소재의 온도는 상승한다. 그러나 FSW공정 중에 접합부에서 발생하는 극심한 소재의 유동 때문에, 접합부에서의 소재의 온도에 대한 정보는 매우 제한되어 있다. 그러므로, 본 연구에서는 고온 인장 실험을 위한 실험온도를 임의로 알루미늄 5182 합금의 용융점⁽²⁰⁾의 65%정도인 400°C로 선택하였다. 일반적으로 알루미늄 합금의 용융점은 대략 600°C 정도이다.

고온인장시험을 위해서 전기로가 장착된 Instron 인장시험기를 사용하였으며 실험 중의 온도는 400 ± 5°C 의 범위에서 유지되었다. 시편 전체의 균일한 온도분포를 위하여 전기로의 온도가 설정치에 도달하고서 15 분 후에 인장시험을 실시하였다.⁽²⁰⁾ 인장시험을 위한 시편은 ASTM 기준에 따라 제작되었으며, 고온인장시험과 상온인장시험 모두 0.05 /sec의 변형률 속도에서 수행되었다.

Fig. 1 은 알루미늄 5182-O 그리고 알루미늄 6111-T4 의 400°C에서의 응력-변형률 선도도를 나타낸다. 또한, Table 1 은 알루미늄 5182-O 그리고 알루미늄 6111-T4 의 조성과 물성치들의 본 연구에서의 측정값과 문헌⁽²¹⁾에 수록된 값들을 나타낸다.

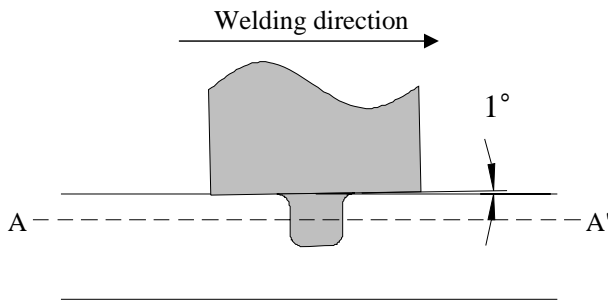


Fig. 2 A schematic of the location of cross-section

Fig. 1 과 Table 1 에 나타낸 바와 같이, 400°C 에서 알루미늄 5182-O 그리고 알루미늄 6111-T4 의 0.2% upset 항복응력들은 상온에서의 값들에 비하여 현저하게 낮았다. 두 합금들의 연성 또한 400°C 에서 현저하게 증가하였다. 특히, 알루미늄 5182-O 의 경우, 파단에서의 인장이 상온에서의 값의 790% 이상으로 증가하였다. 참고로, 본 연구에서 사용된 두 합금들 중에서 알루미늄 6111-T4 이 알루미늄 5182-O 에 비하여 상온과 400°C 모두에서 더 경한 특성을 보여준다.

Fig. 2 는 시편제작을 위한 FSW 공정을 개략적으로 나타내고 있다. 시편제작을 위해서 회전하는 FSW 공구를 두 알루미늄 판재들의 접촉면을 따라서 직선운동을 시켜 두 판재들간의 접합을 유도하였다. 시편제작을 위한 FSW 공정의 파라미터들은 Table 2 에 나타내어져 있다. 본 연구에서 사용된 알루미늄 5182-O 판재가 알루미늄 6111-T4 판재에 비하여 훨씬 두껍기 때문에, FSW 시편의 제작에서 알루미늄 5182-O 판재는 공구의 전진 측(advancing side)에 그리고 알루미늄 6111-T4 판재는 공구의 후퇴 측(retreating side)에 놓였다. 참고로, 같은 두께의 이중 금속 재료의 FSW 의 경우에는 일반적으로 더 경한 소재가 공구의 전진 측에 놓인다.

3. 소재간의 혼합 거동

FSW 접합부의 광학현미경 분석을 수행하였다. 에폭시 마운트에 고정된 시편은 정밀연마(polishing)를 거쳐서 Keller 에칭법⁽²²⁾으로 처리되었다. 본 연구에서 관찰한 접합부의 단면의 개략적인 위치가 Fig. 2 에 나타나 있다. Fig. 2 에 나타내진 바와 같이, 광학현미경 분석이 행해진 단면 A-A' 는 공구의 중단 면에 일치하게 선택되었다. 엄밀하게는 단면 A-A' 는 리드 앵글(lead angle)과

트랜스버스 틸트 앵글(transverse tilt angle: Fig. 2 의 개념도에는 생략됨) 때문에 공구의 중단 면과 완전히 일치하지는 않으나 그 차이는 미미하다.

Fig. 3 은 알루미늄 5182-O 판재(밝은 색, 전진 측)와 알루미늄 6111-T4 판재(어두운 색, 후퇴 측)의 FSW 접합부의 단면 A-A' 의 광학현미경 사진을 나타낸다. Fig. 3 의 두꺼운 화살표들은 용접과정 중의 공구의 진행 방향과 회전 방향을 나타낸다. 공구 팁의 마크가 핀 홀의 중심과 일치하지 않는 것은 리드 앵글과 트랜스버스 틸트 앵글의 영향 때문이다.

고배율의 광학현미경 분석 결과에 의하면, Fig. 3 의 어두운 색의 선으로 나타나는 B 영역의 물질은 공구의 후퇴 측에서 이동해 온 알루미늄 6111-T4 가 아닌 알루미늄 5182-O 이다. B 영역의 어두운 색상은 아마도 Heat-Affected Zone (HAZ)의 경계에서의 소재의 미세구조(microstructure)의 불연속적인 변화가 에칭에 다른 반응을 유도한 것으로 추정된다.

Fig. 3 에 나타난 바와 같이, FSW 공정 중의 소재간의 혼합은 불균등(non-homogeneous)하다. 후퇴 측의 소재가 약간 얇고 긴 띠(band)를 형성하면서 전진 측의 소재 속으로 섞여 들어 감에 비해서 전진 측의 소재는 굵은 띠와 주머니 형태로 후퇴 측의 소재로 섞여 들어간 형태를 보여준다. Fig. 3 에 나타난 불균등한 소재간의 혼합 거동의 근본 원리는 아직 명확히 알려져 있지 않으나 아마도 FSW 공구의 형상, 혹은 Fig. 1 과 Table 1 에 나타난 바와 같은 고온에서의 소재간의 물성치의 현격한 차이 때문일 것으로 추정된다.

Fig. 3 에 나타난 결과에서 특이할 만한 점은 얇은 띠(6111-T4)와 굵은 띠(5182-O)의 두께의 합이 공구의 1 회전간의 이동 거리에 거의 일치한다는 것이다. 또한 Fig. 3 에 나타난 결과는 공구의 전면에서 후퇴 측으로 빨려 들어가서 공구의 후면에서 두꺼운 띠와 주머니의 형태를 이루는 전진 측 소재의 유동을 제시하고 있다. 마지막으로, 공구 전면의 소성역(plastic zone)의 최대 두께는 대략 2.5 mm 로서, 공구핀의 지름과 같은 크기의 차수 내에 있다.

Fig. 4 는 Fig. 3 에 표시된 영역 a 의 확대된 모습을 나타낸다. Fig. 4 는 FSW 공정 중에 알루미늄 6111-T4 의 얇은 층들이 알루미늄 5182-O 와 공구핀의 둘레의 사이에 형성됨을 보여준다. 공구핀 둘레에 형성된 알루미늄 6111-T4 의 얇은 층들은 아마도 공구핀의 후면에서 전진 측으로 빨려 들

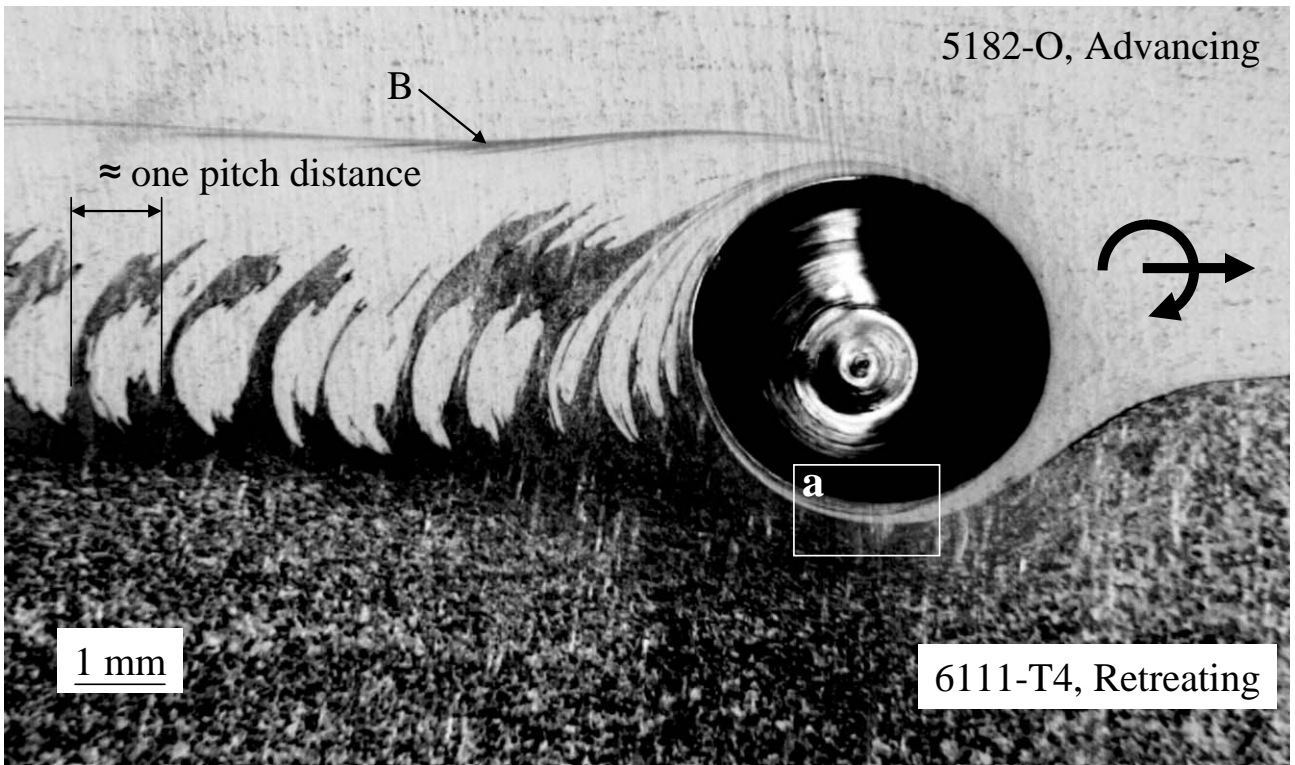


Fig. 3 An optical micrograph of the FSW of the aluminum 5182-O and the aluminum 6111-T4

어간 후퇴 측의 소재이거나 혹은 단면 A-A'의 위의 후퇴 측의 소재들이 공구편의 나사산을 따라서 아래로 빨리 들어온 것으로 추정된다.

4. SPH를 이용한 수치적 해법

최근에 FSW에 관한 다양한 수치적 모델링 기법과 해석방법이 제시되었지만, 대부분의 유한요소 모델들은 여전히 FSW의 특징인 짧은 시간에 이루어지는 소재의 대변위와 혼합거동을 다루는데 만족스러운 성능을 보이지 못하고 있다. 이에 대한 대안으로서, 전산유체역학(CFD)이 소재의 대변위와 혼합거동을 적절히 표현하기 위하여 사용될 수도 있다. 그러나 Eulerian-based CFD 모델을 사용한 해석 결과는 일반적으로 비현실적으로 큰 tool influenced zone을 포함한다.⁽¹⁰⁾

소재의 대변위와 복잡한 혼합거동을 해석하기 위한 또 다른 수치 모델로서 Lagrangian particle-based method인 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)가 사용되고 있다.^(13,14) SPH의 Lagrangian particle적인 특성은 이종소재간의 경계면을 모델링을 용이하게 수행할 수 있게 하고 복잡한 remeshing과정 없이 소재의 대변위의 모델링을 가

능하게 한다.⁽¹⁴⁾ SPH 모델의 또 하나의 장점은 소재에 대한 정보가 충분히 제공된다면 소재내의 임의의 점의 온도, 응력, 변형률, 단위시간당 변형률, 유동경로 등을 증분적으로 추적할 수 있다는 것이다.⁽¹⁴⁾

SPH의 FSW 모델링에의 적용가능성을 평가하기 위하여, 실험에서와 같이 연한 소재인 알루미늄 5182-O이 공구의 전진 측에 그리고 경한 소재인 알루미늄 6111-T4 이 공구의 후진 측에 놓여진 FSW를 SPH를 이용해서 시뮬레이션 하였다(Fig. 5). Fig.5의 화살표들은 FSW 과정 중의 공구의 진행 방향과 회전 방향을 나타낸다. 시뮬레이션의 자세한 내용은 Tartakovsky 등⁽¹⁴⁾의 논문에 자세하게 나타나 있다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, SPH를 사용한 시뮬레이션 결과는 비록 아직 완전하지는 않지만 실험결과와 근접한 경향을 보여주고 있다. Fig. 5에 나타내진 결과는 FSW시뮬레이션에서 SPH 모델이 기존의 grid-based 수치해석 모델의 매력적인 대안으로서 고려될 수 있음을 보여준다. 현재 3D 모델링을 포함한 FSW의 고해상도 SPH모델이 미국 Pacific Northwest National Laboratory에서 개발되고 있다.

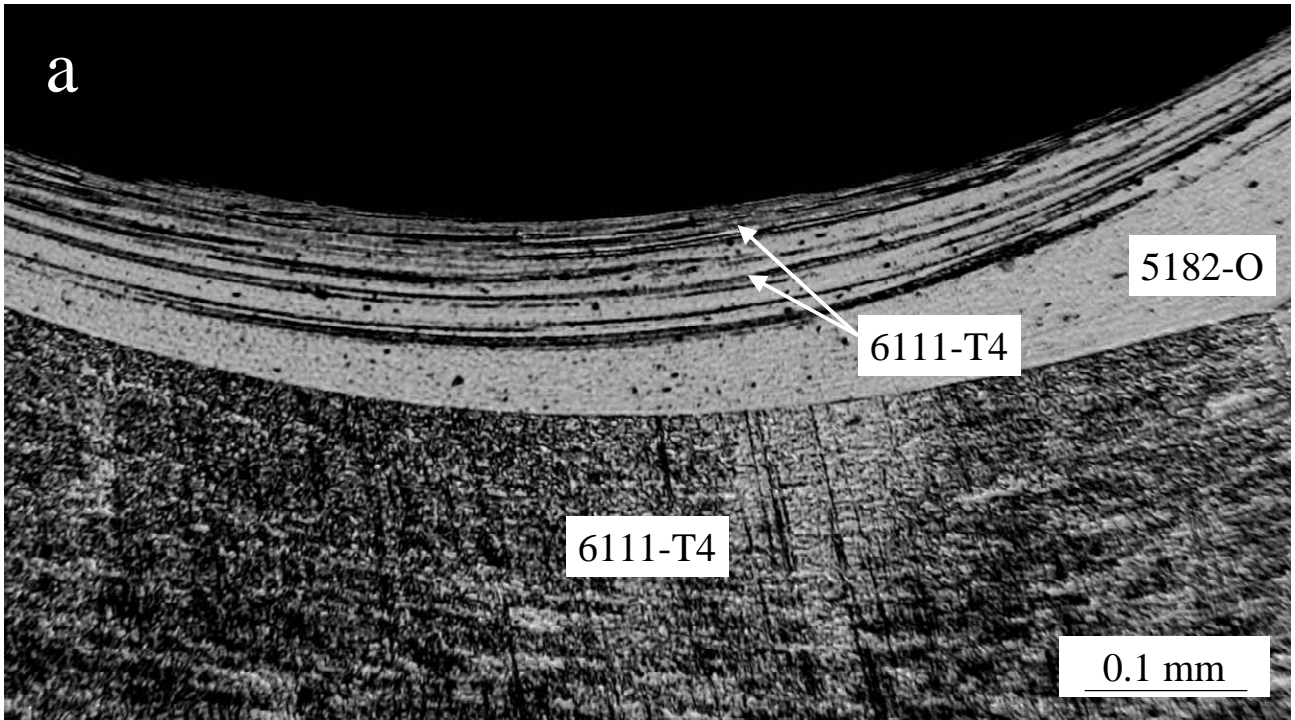


Fig. 4 A magnified view of the region a in Fig. 3

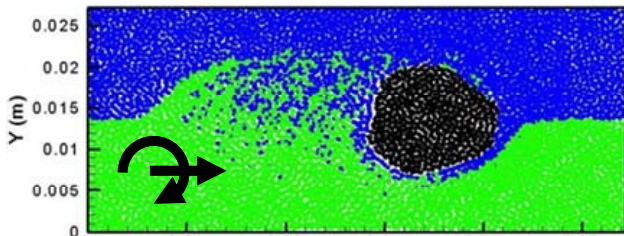


Fig. 5 The mixing of two dissimilar materials in FSW with harder materials in the retreating side from the computational simulation using SPH

5. 결론

본 논문에서는 두 종류의 다른 알루미늄 합금들의 FSW 공정 중의 혼합거동을 에칭에의 반응성의 차이를 이용하여서 연구하였다. 광학현미경 분석 결과에 의하면, FSW 공정 중의 두 소재간의 혼합은 불균등하다. 공구 후퇴 측의 소재가 약간 얇고 긴 띠를 형성하면서 공구 전진 측의 소재 속으로 섞여 들어 감에 비해서 전진 측의 소재는 굵은 띠와 주머니 형태로 후퇴 측의 소재로 섞여 들어간 형태를 보여준다. 불균등한 소재간의 혼합 거동의 이유는 아마도 FSW 공구의 형상의 영향, 혹은 고온에서의 소재간의 물성치의 현격한 차이 때문일 것으로 추정된다.

또한, 광학현미경 분석 결과는 FSW 공정 중에 알루미늄 6111-T4 의 얇은 층들이 알루미늄 5182-O 와 공구 핀의 둘레의 사이에 형성됨을 보여준다. 공구 핀 둘레에 형성된 알루미늄 6111-T4 의 얇은 층들은 아마도 공구 핀의 후면에서 전진 측으로 빨리 들어간 후퇴 측의 소재이거나 혹은 단면 A-A'의 위의 후퇴 측의 소재들이 공구핀의 나사산을 따라서 아래로 빨리 들어온 것으로 추정된다.

FSW 공정 중의 복잡한 소재의 유동과 소재간의 혼합거동을 적절하게 시뮬레이트하기 위해서 Lagrangian particle-based method 인 SPH 모델이 기존의 grid-based methods 의 대안으로서 소개되었다.

후 기

본 연구에서 광학현미경 분석을 위한 준비과정과 결과분석에 도움을 주신 미국 Pacific Northwest National Laboratory 의 Clyde E. Chamberlin 과 Glenn Grant 에게 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needhman, J. C., Church, M. G., Templesmith, P., and Dawes, C. J., "Friction Stir Butt Welding," *Intl Patent No.*

- PCT/GB92/02203.
- (2) Record, J. H., Covington, J. L., Nelson, T. W., Sorensen, C. D., Webb, B. W., 2004, "Fundamental Characterization of Friction Stir Welding," in: 5th Int. Symp. Fric. Stir Weld., Metz, France, 14-16 September.
 - (3) Sato, Y. S., Park, S. H. C., Michiuchi, M., Kokawa, H., 2004, "Constitutional Liquation during Dissimilar Friction Stir Welding of Al and Mg Alloys," *Scripta Mater.*, Vol. 50, No. 9, pp. 1233~1236.
 - (4) Cook, R., Arbegast, W., Fox, S. L., Handby, T., 2005, "Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloys," in: Proc. 2005 TMS annual meeting, San Francisco, USA, 13-17 February.
 - (5) Peel, M. J., Steuwer, A., Withers, P. J., Dickerson, T., Shi, Q., Shercliff, H., 2006, "Dissimilar Friction Stir Welds in AA5083-AA6082. Part I: Process Parameter Effects on Thermal History and Weld Properties," *Metall. Mater. Trans. A.*, Vol. 37, No. 7, pp. 2183~2193.
 - (6) Peel, M. J., Steuwer, A., Withers, P. J., 2006, "Dissimilar Friction Stir Welds in AA5083-AA6082. Part II: Process Parameter Effects on Microstructure," *Metall. Mater. Trans. A.*, Vol. 37, No. 7, pp. 2195~2206.
 - (7) Lockwood, W. D., Reynolds, A. P., 2003, "Simulation of the Global Response of a Friction Stir Weld using Local Constitutive Behavior," *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, Vol. 339, No. 1-2, pp. 35~42.
 - (8) Chen, C., Kovacevic, R., 2003, "Finite Element Modeling of Thermomechanical Performance of Friction Stir Welding," in Proc. 4th Int. Symp. Fric. Stir Weld., Park City, USA, 14-16 May,.
 - (9) Colegrove, P. A., Shercliff, H. R., Threadgill, P. L., 2003, "Modelling and Development of the Trivex™ Friction Stir Welding Tool," in: Proc. 4th Int. Symp. Fric. Stir Weld., Park City, USA, 14-16 May,.
 - (10) Colegrove, P. A., Shercliff, H. R., 2004, "Modelling of the Friction Stir Welding of Aerospace Alloys," in: 5th Int. Symp. Fric. Stir Weld., Metz, France, 14-16 September.
 - (11) Vilaca, P., Quintino, L., Dos Santos, J. F., 2005, "iSTIR—Analytical Thermal Model for Friction Stir Welding," *J. Mater. Process. Tech.* Vol. 169, No. 3, PP. 452~465.
 - (12) Kakarla, S. S. T., Mici-Kuchler, K. H., Arbegast, W. J., Allen, C. D., 2005, "Three-Dimensional Finite Element Model of the Friction Stir Welding Process," in: Proc. 2005 TMS annual meeting, San-Francisco, USA, 13-17 February.
 - (13) Tartakovsky, A. M., Grant, G. J., Sun, X., Khaleel, M., 2006, "Modeling of Friction Stir Welding (FSW) Process with Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)," SAE technical paper 2006-01-1394, SAE 2006 world congress, Detroit, USA, 3-6 April.
 - (14) Tartakovsky, A., Grant, G. J., Sun, X., Hong, S.-T., Khaleel, M., 2006, "Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) Model for Friction Stir Welding (FSW) of Dissimilar Materials," in: Proc. 6th Int. Symp. Fric. Stir Weld., Saint-Sauveur, Canada, 10-13 October.
 - (15) Coligan, K. J., 1999, "Material Flow Behavior During Friction Stir Welding," *Weld. J.*, Vol. 78, No. 7, pp. 229s~237s.
 - (16) Reynolds, A., Seidel, T. U., Simonsen, M., 1999, "Visualisation of Material Flow in an Autogenous Friction Stir Weld," in: Proc. 1st Int. Symp. Fric. Stir Weld., Thousand Oaks, USA, 14-16 June.
 - (17) Wert, J. A., 2003, "Microstructures of Friction Stir Weld Joints between an Aluminium-Base Metal Matrix Composite and a Monolithic Aluminium Alloy," *Scripta Mater.*, Vol. 49, No. 6, pp. 607~612.
 - (18) Zhao, Y.-H., Lin, S.-B., Qu, F.-X., Wu, L., 2006, "Influence of Pin Geometry on Material Flow in Friction Stir Welding Process," *Mater. Sci. Tech.*, Vol. 22, No. 6, pp. 45~50.
 - (19) Guerra, M., Schmidt, C., McClure, J. C., Murr, L. E., Nunes, A. C., 2002, "Flow Patterns During Friction Stir Welding," *Mater. Charact.* Vol. 49, No. 2, pp.95~101.
 - (20) Lim, J.-K., Seo, D.-W., Li, Z.-S., 1999, "A study on Tensile and Fatigue Properties of Aged NAS 254N Stainless Steel at Elevated Temperatures," *Journal of Mech. Science Tech.*, Vol. 13, No. 5, PP. 397~402.
 - (21) ASM handbook, Volume 20, *Materials Selection and Design*, ASM International Metals Park, Ohio 2004.
 - (22) ASM handbook, Volume 9, *Metallography and Microstructures*, ASM International Metals Park, Ohio 2004.