

접치기 마찰교반접합된 Invar 42/SS 400 합금의 미세조직과 기계적 특성 발달

송 국 현^{*,†} · Kazuhiro Nakata^{**}

^{*}한국생산기술연구원 비철금속청정기술센터

^{**}오사카대학교 접합과학연구소

Development of Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Jointed Invar 42/SS 400

K.H. Song^{*,†} and K.Nakata^{**}

^{*}Korea Institute of Industrial Technology

^{**}Joining and Welding Research Institute

[†]Corresponding author : skhyun7@kitech.re.kr

Abstract

This study was conducted to investigate the microstructure and mechanical properties of friction stir lap joints. Invar 42 and SS 400 were selected as the experimental materials, and friction stir welding was carried out at a tool rotation speed of 200 rpm and welding speed of 100 mm/min. The application of friction stir welding to Invar 42 effectively reduced the grain size in the stir zone; the average grain size of Invar 42 was reduced from 11.5 μm in the base material to 6.4 μm in the stir zone, which resulted in an improvement in the mechanical properties of the stir zone. The joint interface between Invar 42 and SS 400 showed a relatively sound weld without voids and cracks, and the intermetallic compounds with L1₂ type in lap jointed interface were partially formed with size of 100 nm. Moreover, the hook in the advancing side of Invar 42 was formed from SS 400, which contributed to maintenance of the tensile strength. The evolution of microstructures and mechanical properties of friction stir lap jointed Invar 42 and SS 400 are also discussed herein.

Key Words : Friction stir welding, Lap joints, Microstructure, Mechanical properties.

1. 서 론

Invar 42는 열팽창계수가 현저히 낮은 특수합금으로서, 온도변화에 의해 치수가 변하면 오차의 원인이 되는 정밀기계부품에 사용될 뿐만 아니라, 특수선박의 부품소재로도 주로 사용되고 있다^{1,2)}. 일반적으로, 이들 기계와 선박의 제조나 보수작업의 한 방법으로서, gas tungsten arc welding, laser welding, electron beam welding 등이 주로 이용되어 왔으나, 이들 용접은 접합부의 미세조직의 발달을 동반한 기계적 물성의 향상에 제한적인 것으로 보고된 바 있다³⁻⁵⁾. 따라서 고상접합 프로세스 중 하나이며, 접합부의 미세조직 발달에

기초한 기계적 물성의 향상에 효과적인 마찰교반접합(friction stir welding, FSW)의 도입이 필요하다.

고체상태에서 접합이 가능한 마찰교반접합은 기존 용접에서 주로 발생하는 blow hole, segregation, cracking 등의 결함억제에 큰 효과가 있는 것으로 알려져 있다^{6,7)}. 뿐만 아니라, 접합속도의 증가와 감소에 의해 접합부의 결정립 미세화와 조대화를 제어할 수 있는 장점이 있다. 한편, 최근 산업적인 응용차원에서 이 종재료의 접합이 높은 관심을 받고 있다. 특히, 이종재료의 접합에 있어서, 마찰교반접합의 적용은 접합면의 미세조직과 기계적 물성의 향상에 효과적인 것으로 평가를 받고 있어 그 관심은 더욱 높아지고 있다⁸⁻¹⁰⁾.

하지만, Invar 합금에 대한 마찰교반접합의 기초연구와 응용연구는 아직까지 보고된 바가 없다. 따라서 이 연구는 Invar 42와 SS 400에 대하여 접치기 마찰교반접합을 적용하였고, 이 과정에서 나타나는 미세조직과 기계적 물성의 전개양상을 평가하고자 수행되었다.

2. 실험 방법

2.1 마찰교반접합

이 연구에 사용된 재료는 Invar 42와 SS 400 이었다. 마찰교반접합을 위하여, 시편은 200 mm × 70 mm × 1 mm (Invar 42, 상부재료)와 200 mm × 75 mm × 10 mm (SS 400, 하부재료)의 크기로 제작되었고, shoulder 직경 15 mm, probe 직경 6 mm와 길이 1 mm 크기를 갖는 WC-Co 툴을 이용하여 마찰교반접합되었다. 접합 시 소재표면의 산화를 방지할 목적으로 아르곤 가스를 충분히 흘려주었고, 양호한 접합성을 얻기 위하여 툴은 접합방향에 대해 3° 기울인 상태를 유지하였다. 이 때, 툴 회전속도 200 rpm과 이송속도 100 mm/min의 조건하에 마찰교반접합을 수행하였다.

2.2 조직 관찰

접합부의 거시조직과 미세조직을 관찰하기 위해, 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)과 에너지분산형분광계(energy dispersive spectroscopy, EDS)를 이용하여, Invar 42와 SS 400 간의 접합계면을 관찰하였다. 이를 위해 시편은 20 mm × 3 mm 크기로 제작된 후 기계적 연마를 통하여 경면을 얻었고, 시편표면에 대해 거시조직과 미세조직을 분석하였다. 또한, 접합계면에서 형성되는 금속간 화합물을 관찰하기 위하여, 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM)을 이용한 분석이 도입되었다. TEM 분석을 위하여 시편을 지름 3 mm, 두께 80 mm를 갖는 disc로 제작하였으며, 이후 CH₃OH:HClO₄= 80:20의 부피 비율을 갖는 혼합용액을 이용하여 -40°C에서 15V 전압 하에 전해연마가 수행되었다. TEM 분석은 Philips CM-200을 사용하여 가속전압 200kV의 조건으로 수행되었다. 한편, 마찰교반접합체의 동적재결정 양상을 평가하기 위해, 전자후방산란회절(electron backscattering diffraction, EBSD)법을 도입하였고, 이 때 양호한 회절패턴을 얻기 위해 시편표면이 기계적 연마와 진동연마기를 이용하여 연마되었다. 이후 FEG-SEM에 부착된 TSL-OIM™을 이용하여 시편표면에 대하여 분석이 진행되었다.

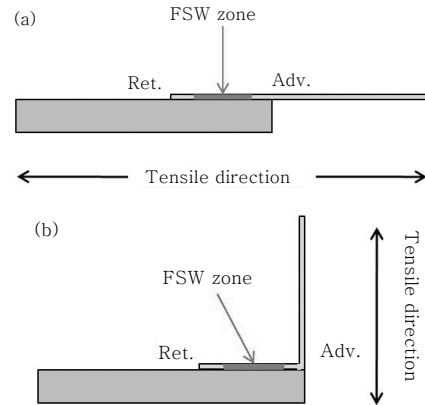


Fig. 1 Tensile and peel tested specimens in this study

2.3 물성 평가

마찰교반접합된 소재의 기계적 물성을 평가하기 위하여, 경도시험, 인장시험과 박리강도시험이 도입되었다. 경도 측정을 위하여, 시편은 20 mm × 3 mm의 크기로 절단되었고, 기계적 연마를 통하여 시편표면의 경면을 얻은 후 시편의 cross-section면에 대해 경도를 측정하였다. 특히, Invar 42와 SS 400의 모재와 교반부, 그리고 두 소재간의 접합계면에 대하여 3회씩 측정하였고, 이에 사용된 장비는 비커스 미소경도기 FM 7465였다. 측정은 다이아몬드 압입자 1 kg의 하중으로 15초간 압입하는 방식으로 수행되었다.

인장시험과 박리강도시험의 경우, 그림 1에 도시된 바와 같이, 폭 10 mm를 갖는 판상시편으로 절단한 후, 이에 대해 시험이 수행되었다. 시험은 INSTRON 4481형 기계식 만능재료 시험기를 이용하여 상온에서 인장속도 1 mm/min의 조건으로 수행되었고, 각 시편의 강도값은 3회 측정치의 평균값을 취하였다.

3. 실험 결과

3.1 접합재의 거시조직

SEM을 통해 관찰된 접치기 마찰교반접합재료 단면의 거시조직과 미세조직을 그림 2에 나타내었다. 서로 다른 소재간의 접합 단면을 관찰한 결과, 그림 2(a-c)에 나타난 바와 같이, 접합 시 발생하는 void, crack과 groove 등의 결함이 없이 양호한 접합단면을 나타내었다. 그러나 접합계면을 고배율(×10,000)로 확대한 결과, 전진측에서 그림 2(d)에 나타난 바와 같이, 50 mm 정도의 폭을 갖는 hook이 SS 400으로부터 형성되었다.

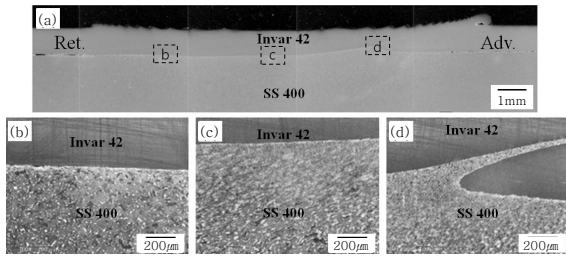


Fig. 2 SEM images of (a) cross sectioned macro-structure of the weld zone and (b-d) magnified weld interface between the Invar 42 and SS 400

3.2 접합재의 EBSD와 EDS 평가

마찰교반접합된 Invar 42의 모재와 교반부에 대하여 EBSD 분석이 이루어졌고, 이를 통해 얻어진 입계맵 (grain boundary map)과 입계어긋남각 (grain misorientation angle) 분포를 각각 그림 3과 4에 나타내었다. 초기 모재는, 그림 3(a)에 나타난 바와 같이, 3 mm에서 30 mm 사이의 크기를 갖는 결정립들로 구성되어 있었고, 평균적인 결정립 크기는 11.5 mm로 확인되었다. 이에 대하여 마찰교반접합을 적용한 결과, 교반부는 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 모재보다 현저히 미세한 결정립들로 구성됨으로써, 평균결정립 크기가 6.4 mm 까지 미세화 되었다. 아울러, 모재와 교반부 모두 결정립 내부에 고경각 입계 중 특수입계 (special boundary)로 분류되는 어닐링쌍정립계 (annealing twin boundary)가 다수 분포하였다. 한편, 두 소재의 입계맵에서 나타난 입계어긋남각을 분석한 결과, 그림 4(a)와 (b)에 나타난 바와 같이, 모재와 교반부 모두 전체입계 중 고경각 입계가 87% 이상을 차지함으로써, 재결정이 완결된 양상을 나타내었다. 특히, 60도 분포가 가장 높은 분율을 차지하였는데, 이들은 fcc 결정구조를 갖는 재료들 중 적층결합에너지가 낮은 재료에서 주로 형성되

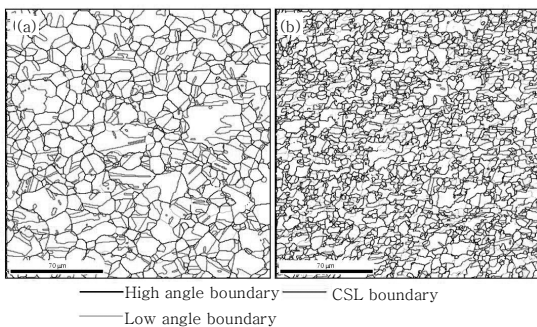
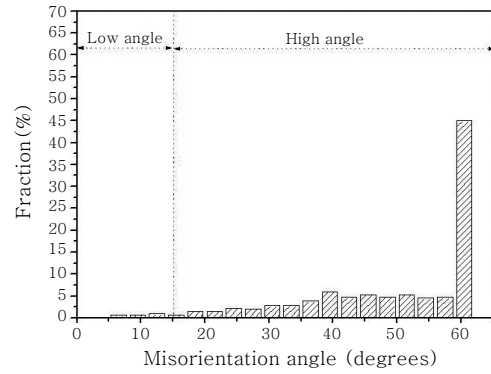
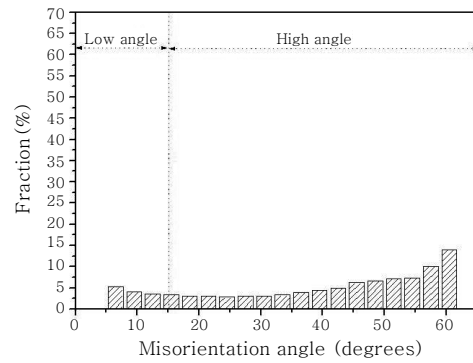


Fig. 3 Grain boundary maps of friction stir welded Invar 42 acquired by EBSD: (a) base material and (b) stir zone



(a)



(b)

Fig. 4 Misorientation angle distributions of friction stir welded Invar 42 acquired by EBSD: (a) base material and (b) stir zone

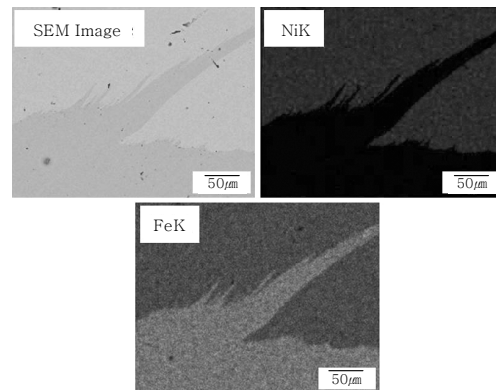


Fig. 5 EDS results of the hook formed at joint interface between the Invar 42 and SS 400

는 어닐링쌍정립계로 확인되었다.

접합계면 중 전진측에서 hook이 형성되었는데, 이에 대한 EDS 분석결과를 그림 5에 나타내었다. 분석결과, 그림에 나타난 바와 같이, hook을 이루는 주 성분은 Fe로 나타남으로써, SS 400으로부터 형성된 것임을 확인하였다. 두 재료간의 접합계면에 대하여 TEM 분석이 이루어졌고, 이의 결과를 그림 6에 나타내었다. 접합계면에서 대략 1 mm 정도의 결정립들이 분포하고 있었

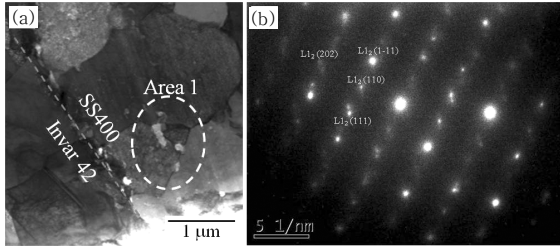


Fig. 6 (a) TEM bright field image and (b) selected area diffraction pattern observed at joint interface of Invar 42 and SS 400

으며, 100~200 nm 정도의 미소한 particle들이 분포하였다 (그림 6(a)). 이에 대하여 제한시야회절패턴을 분석한 결과, 그림 6(b)에 나타난 바와 같이, L1₂구조를 갖는 금속간 화합물로 확인되었다.

3.3 기계적 물성 평가

겹치기 마찰교반접합된 재료의 경도분포를 그림 7에 나타내었다. 초기 모재(Invar 42)는, 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 135 Hv에서 150 Hv 사이의 경도분포를 나타내었다. 이에 대하여 마찰교반접합을 수행한 결과, 교반부는 모재보다 20% 가량 증가된 155 Hv에

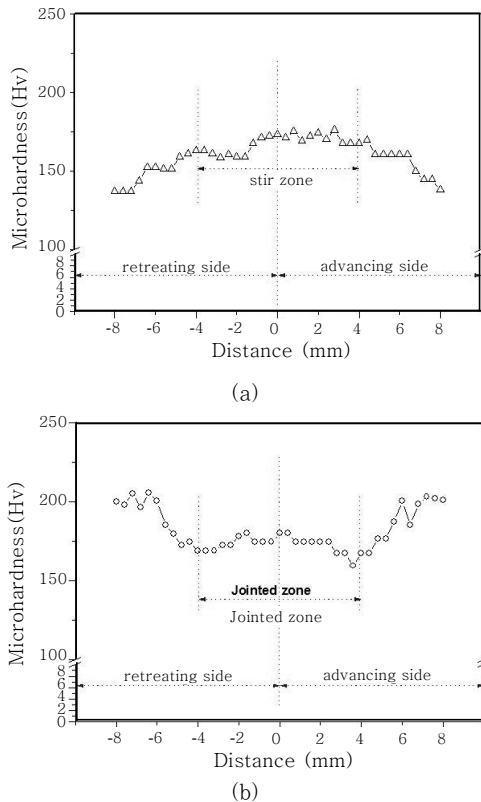


Fig. 7 Vickers micro hardness distributions of friction stir welded materials. (a) Invar 42 and (b) SS 400 areas

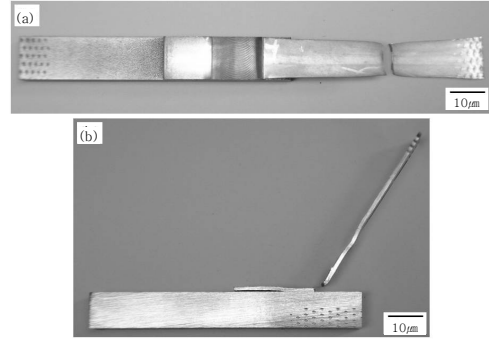


Fig. 8 Top views of (a) tensile and (b) peel tested specimens

서 175 Hv 정도의 경도분포를 나타내었다. SS 400의 경우, 모재와 접합면이 각각 190~210 Hv와 155~180 Hv 정도의 경도분포를 나타냄으로써, 접합면이 10% 이상 낮은 값을 나타내었다.

겹치기 마찰교반접합된 소재의 인장시험과 박리강도 시험된 시편의 외관을 그림 8에 나타내었다. 겹치기 접합된 소재의 인장시험 결과, 그림 8(a)에 나타난 바와 같이, Invar 42의 모재에서 우선적인 변형이 진행되어 파단된 양상을 나타내었다. 박리강도시험이 실시된 시편의 경우, 그림 8(b)에 나타난 바와 같이, 접합된 두 소재가 완전히 박리되지 않고 전진측에서 Invar 42 합금이 연신되면서 파단된 양상을 나타내었다. 한편, 인장시험과 박리강도시험 결과를 그림 9에 나타내었는데, 그림 9(a)에 나타난 바와 같이 초기 모재(Invar 42)의 항복강도와 인장강도는 각각 255 MPa와 488 MPa를 나타내었고, 연신율은 49%로 나타났다. 이에 대하여 겹치기 마찰교반접합을 수행한 결과, 항복강도와 인장강도가 275 MPa와 504 MPa를 나타냄으로써, 모재보다 강도가 향상된 양상을 나타내었으나, 연신율은 44%로써 모재보다 감소되었다. 박리강도시험의 경우, 그림 9(b)에 나타난 바와 같이, 그 값이 298 MPa를 보임으로써 우수한 접합강도를 나타내었다.

4. 실험 고찰

4.1 결정립 미세화

마찰교반접합의 적용은 결정립 미세화에 효과적이었다. 접합 시 튜의 회전에 의해 유도되는 금속의 소성유동은 재료내부에 큰 변형량을 수반하며, 이를 통해 접합되는 소재는 열 공급에 의해 재결정될 수 있는 충분한 변형량을 가지게 된다^{6,7)}. 뿐만 아니라, 튜과 재료간의 마찰에 의해 발생하는 열은 재료에 축적된 변형상태

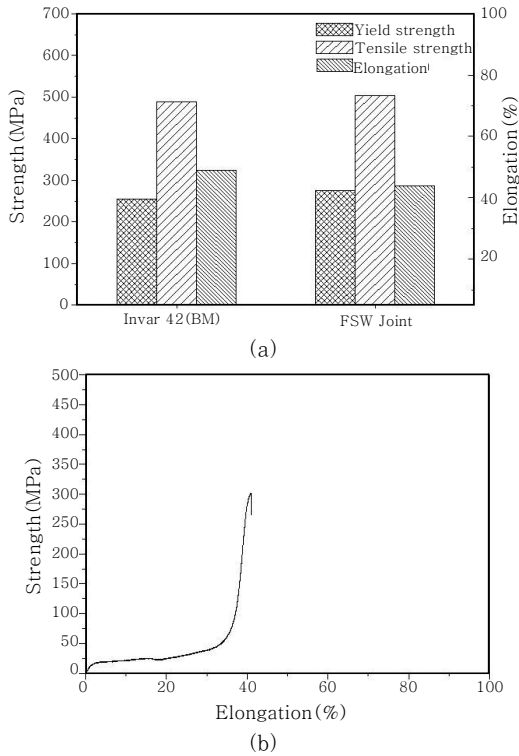


Fig. 9 (a) Tensile and (b) peel properties of base material (Invar 42) and friction stir welded materials

를 재결정 시키기에 충분하기 때문에, 동적재결정이 원활히 일어남으로써 결정립 미세화를 촉진시키게 된다.^{6,7)} 따라서 마찰교반접합을 통해 동반되는 큰 변형량과 마찰열은 결정립 미세화의 근간이 되며, 이들은 접합속도의 증가와 감소에 의해 그 정도가 제어될 수 있다. 특히, 이 연구에 사용된 소재(Invar 42)는 fcc 금속들 중 적층결합에너지가 낮은 재료이기 때문에, 결정립 미세화에 더욱 큰 효과를 나타낼 수 있다. 이들 금속은 동적회복에 의한 전위의 재배열이 어렵기 때문에, 결정립 내부와 결정립계에 더 많은 전위를 축적할 수 있다^{8,9)}. 그 결과 재결정 핵생성이 동시다발적으로 더 많은 사이트에서 일어날 수 있고, 이를 통해 결정립 미세화에 더욱 큰 효과를 나타내게 된다.

4.2 기계적 물성 발달

교반부의 결정립 미세화는 기계적 물성의 향상을 초래하였다. 초기모재(그림 3(a))는 11.5 mm의 평균결정립을 갖고 있었으나, 마찰교반접합을 통해 교반부(그림 3(b))는 6.4 mm까지 평균결정립이 두드러지게 미세화 되었다. 이와 같은 교반부의 결정립 미세화는 경도분포의 향상을 촉진하였고, 그 결과 모재보다 대략 20% 이상의 높은 경도값을 갖게 하였다. 일반적으로

결정립 크기는 재료의 기계적 성질을 결정짓는 가장 중요한 인자이다. 이 연구에서도 관찰된 바와 같이, 결정립 크기의 변화가 경도분포의 변화를 촉진시켰음을 직접적으로 알 수 있다. 특히, 전술한 바와 같이 입계맵(그림 3(b))에서 결정립 내부에 저각각 입계의 부재를 통해, 경도분포의 향상이 전위밀도의 영향이 아닌 순수하게 결정립 미세화에서 비롯되었음을 알 수 있다. 따라서 이 연구는 결정립 크기와 기계적 성질과의 관계를 분명히 보여준 것이라 할 수 있다.

접합계면의 전진측에 형성된 hook은 계면의 강도향상에 효과적이었다. 이종재료의 겹치기 마찰교반접합에서 hook의 발생은 상당히 일반적인 현상이다. 이들 hook은 마찰교반접합 시 작용하는 tool down force에 의해 발생하는 side effect로서, 인장강도나 박리강도의 향상에 긍정적인 것으로 보고된 바 있다¹⁰⁾. 이 연구에서도 그림 8에 나타난 바와 같이, 접합계의 인장시험과 박리강도시험 시 접합계면과단이 아닌 모재과단의 결과를 보임으로써, 접합계면의 인장저항성에 효과적인 것으로 확인되었다. 즉, 하부재료가 상부재료를 침투하여 형성된 hook은 횡방향 인장 시 상당한 저항력을 가지게 됨을 분명히 알 수 있었다.

5. 결 론

Invar 42와 SS 400간의 겹치기 마찰교반접합이 성공적으로 수행되었다. Invar 42에 대한 마찰교반접합의 적용은 결정립 미세화에 큰 효과를 보였는데, 그 결과 모재에서 11.5 mm였던 평균결정립이 교반부에서 6.4 mm까지 현저히 미세화 되었다. 이와 같은 결정립 미세화는 경도분포의 향상에 직접적인 영향을 주어, 교반부의 경도값이 모재보다 20% 가량 증가하는 결과를 초래하였다. 한편, 접합계면의 전진측에 형성된 hook은 접합계면의 강도를 증가시킴으로써, 인장시험과 박리강도시험 시 접합계면이 아닌 모재에서 과단되는 결과를 나타내었다. 따라서 Invar 42와 SS 400에 대한 겹치기 마찰교반접합의 적용은 미세조직 발달을 동반한 기계적 물성의 향상에 효과적임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Metals Handbook, vol. 2, ASM, Metal Park, OH, USA, (1979)
2. W. F. Smith: Structure and Properties of Engineering Alloys, (1981)
3. O. A. Ojo, N. L. Richards and M. C. Chaturvedi: Scripta Mater., 50 (2004), 641
4. C. A. Huang, T. H. Wang, W. C. Han and C. H.

Lee: Mater. Chem. Phys., **104** (2007), 293

5. J. D. Kim, C. J. Kim and C. M. Chung: J. Mater. Process. Tech., **114** (2001), 51

6. R. S. Mishra and Z. Y. Ma: Mater. Sci. Eng. R, **50** (2005), 1

7. R. S. Mishra and M. W. Mahoney: Friction Stir Welding and Processing, ASM Int, (2007)

8. F. J. Humphreys and M. Hatherly: Recrystallization and Related Annealing Phenomena. 1st ed., Elsevier Ltd., Oxford (1996)

9. R. E. Reed-Hill and R. Abbaschian: Physical Metallurgy Principles. 3rd ed., PWS, Boston, USA (1991)

10. K. H. Song, W. Y. Kim and K. Nakata: Kor. J. Mater. Res., **22** (2012), 303



- 송국현
- 1976년생
- 한국생산기술연구원
- 비철금속청정기술센터
- e-mail : skhyun7@kitech.re.kr

- Kazuhiro Nakata
- 1947년생
- 오사카대학교 접합과학연구소
- 에너지프로세스 연구그룹
- e-mail : nakata@jwri.osaka-u.ac.jp