

# 경량 마그네슘 합금의 표면 신뢰성 향상을 위한 마찰교반공정의 적용\*

길용찬 · 김재연 · 현창용<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 신소재공학과

## Application of Friction Stir Process to Improve Surface Reliability of Light Weight Magnesium Alloy<sup>\*</sup>

Ung-Chan Gil · Jae-Yeon Kim · Chang-Young Hyun<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology

**Purpose:** Purpose of this study is to analyze the effect of particle size as well as number of pass on surface microstructure and hardness of SiC(p)/AZ31 surface composite fabricated by friction stir process (FSP).

**Method:** SiC(p)/AZ31 surface composite containing different size of SiC particle (i. e., 2 $\mu$ m and 8 $\mu$ m) was fabricated by multi-pass FSP. Microstructure was observed by scanning electron microscope and surface hardness was determined by Vickers hardness tester.

**Results:** For all the FSPed specimens with and without hardening particles, grain size was refined due to dynamic recrystallization behavior. Surface hardness was observed to increase with decreasing particle size in the composite layer. Increasing number of FSP pass was effective for homogeneous distribution of the hardening particles and for resulting increase in surface hardness.

**Conclusion:** FSP was effective to modify surface microstructure for improving surface hardness of SiC/AZ31 composite.

**Keywords:** Friction Stir Process(FSP), Magnesium Alloy, Surface Reliability, Hardness

### 1. 서론

마그네슘 합금은 알루미늄, 철 등의 구조용 재료들과 비교하여 가볍고 우수한 비강도, 낮은 밀도, 우수한 주조성 및 절삭저항 등과 같은 장점들을 가지고 있어 수송기기 동체, 전자부품 외장재 등 여러 분야에서 각광을 받고 있다. 그러나 마그네슘 합금은 다른 구조

용 합금에 비하여 상대적으로 경도, 강도, 피로수명, 마모수명, 내식수명 등 구조물성과 극한환경에서의 수명이 낮은 단점이 있어 장수명 고신뢰성이 요구되는 부품소재로 사용되는 데는 한계가 있다[1, 2].

특히, 피로수명, 마모수명은 합금의 표면 특성에 의해 큰 영향을 받기 때문에, 표면층에 섬유상이나 분말상 등의 강화상을 복합화한 금속기지 표면복합재료

\* 본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었음

<sup>†</sup> 교신저자 cyhyun@seoultech.ac.kr

2016년 6월 1일 접수, 2016년 6월 10일 수정본 접수, 2016년 6월 14일 게재 확정.

(surface composite)를 제조하는 연구가 진행되어 왔다. 금속 표면개질을 위한 공정중의 하나로 친환경적이고 공정이 간편한 마찰교반공정(Friction Stir Process)이 연구되고 있다[1-5]. 마찰교반공정은 어깨부와 핀 두 부분으로 구성된 공구를 상온에서 고속으로 회전시켜 모재와 공구 간 마찰열을 이용하여 금속 표면을 연화시키고 소성유동을 일으켜 표면 미세구조를 제어하는 공정이다. 공구는 공정시 국부적 가열과 재료의 소성유동을 발생시키는 기능을 수행하며 어깨부와 핀의 형상과 치수를 달리하여 열 발생 정도와 소성 유동성을 달리 할 수 있다.

공정의 품질에 영향을 미치는 인자로서 공구의 회전속도와 이동속도가 있다. 공구의 회전속도가 느리고 이동속도가 빠름에 따라 낮은 마찰 입열량으로 인한 보다 미세한 미세조직으로 제어가 가능하다 또한 일반적으로 공구가 진행되는 방향으로 약 2~4° 정도의 전진각을 설정하여, 재료의 혼합과 흐름에 도움을 준다[1]. 마찰교반공정의 효과로는 동적 재결정 및 시편 냉각속도 제어를 통해 초미세 결정조직을 얻을 수 있으며[4], 주조재 표면 조직을 균질화[5] 시킬 수 있다. 또한 CNT, SiC 등 탄소소재 및 세라믹 소재를 물리적인 교반을 통해 금속재료 내부에 분산시켜 금속 기지복합재료 제조 할 수 있다[1, 4, 5].

Morisada *et al.*[6]은 마찰교반공정을 이용하여 AZ31/MWCNT 금속기지 복합재료를 제조하였으며 기계적 특성과 미세조직을 분석하였다 또한 Mishra *et al.*[7]은 마찰교반공정을 적용해 Al/SiC 복합재료를 제조하였으며, 강화상의 분산과 기계적 특성을 분석하였다

본 연구에서는 AZ31 마그네슘 합금에 반복마찰교반 공정을 이용하여 SiC 강화상 입자를 분산시켜 표면 복합재료를 제조하였다. 이 때 공정변수는 SiC 입자의 크기, 마찰교반 반복 횟수로 하였다. 공정 변수에 따른 시편의 교반부 단면과 교반부의 결정립 크기 및 경도를 비교하였으며, 고신뢰성 마그네슘 표면 복합재료로 활용 가능성을 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 압연된 AZ31 마그네슘 합금 판재를 두께 6.5mm, 길이 100mm, 폭 100mm으로 절단하여 사용하였다. 합금의 화학 조성은 Mg: balance, Al: 2.5-3.5, Zn: 0.6-1.4, Mn: 0.2-1.0, Si: <0.1, Fe: <0.005, Cu: <0.04 and Ni: <0.005 mass% 이다. 복합재료 제조를 위한 강화상으로는 직경이 2 $\mu$ m 및 8 $\mu$ m의 순도 99% SiC 분말을 사용하였다. 사용된 공구는 어깨부(shoulder) 직경 16mm, 핀 직경 4mm, 핀 길이 4mm로 구성 되었으며, 재료는 SKH-11을 사용하였다. 공구의 핀은 효율적 교반을 위해 나선형상으로 가공하였다. 공구의 회전속도와 이동속도는 각각 1400rpm 및 21mm/min로 고정하였다. 공구의 전진각은 3°로 설정하였으며, 회전하는 공구를 표면으로부터 4.2mm 까지 삽입하여 공정을 수행하였다.

<Fig. 1>은 반복마찰교반 공정을 적용하여 표면 복합재료를 제조하는 공정 모식도이다. 표면복합재료를 제조하기 위해 판형상의 AZ31 시편에 폭 2mm, 길

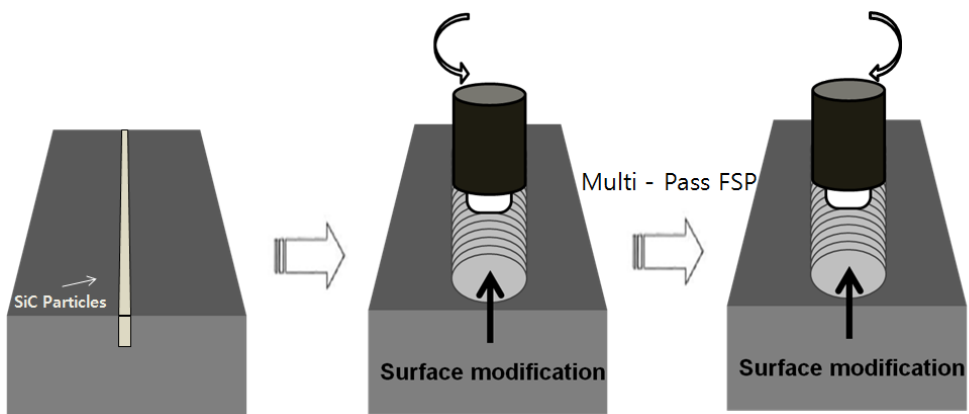


Fig. 1 Schematic of multi-pass friction stir processing for fabrication of AZ31/SiC surface composite

이 4mm의 홈을 가공하였다. 강화상의 크기가 마찰교반 공정으로 제조된 복합재료층에 미치는 영향을 확인하고자 2 $\mu$ m, 8 $\mu$ m의 SiC 분말을 각각 홈에 가득 채워 넣었다. 마찰교반 공정 중에 분말 형태인 강화상의 비산을 방지하기 위해 평면의 어깨부로부터 구성된 공구를 이용하여 마찰교반 공정을 실시하여 홈을 막아 주었다. 이어서 편을 가진 공구를 이용하여 마찰교반 공정을 실시하였다. 반복 마찰교반 공정 복합재료 층에 미치는 영향을 확인하기 위해 pass 수를 2, 4, 6번으로 다르게 반복공정을 실시하였다. 이때 공구의 회전방향을 시계방향과 반시계 방향으로 반복 적용하였다.

제조된 복합층의 미세구조는 Acetic picral 부식액 (아세트산 7ml + 피크린 산 4.2g + 증류수 10ml + 에탄올 70ml)을 이용하여 3~5초 동안 상온에서 에칭 후 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였다. 마이크로 비커스 경도기(Future-Tech Co., Japan, 402MVD)를 이용하여 하중 200gf, 압입시간 15초로 시편 단면부의 경도를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

먼저 강화상 없이 마찰교반 공정을 반복 적용하여 교반부에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 공구 이동속도, 회전속도를 고정한 뒤 반복 공정수(number of pass)를 다르게 하여 시편을 제작하였다. <Fig. 2>는

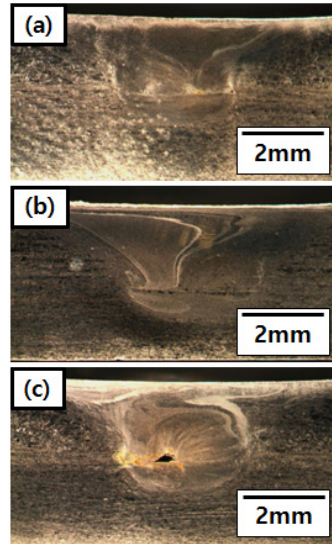


Fig. 2 Cross-sectional macrographs of friction stir processed AZ31 alloy with number of FSP pass : (a) 2 pass, (d) 4 pass and (c) 6 pass

반복 공정에 따른 AZ31 합금의 단면부 사진이다. 모든 시편에서 4mm 깊이의 교반 영역이 형성 되었으나 6회 반복공정된 시편의 교반부에서 거시적 결함이 관찰 되었다.

<Fig. 3>은 마찰교반공정된 AZ31 교반부의 미세구조를 광학현미경으로 결정립 구조를 관찰한 사진이다. 결함이 관찰된 6회 반복공정 된 시편에서는 교반부의

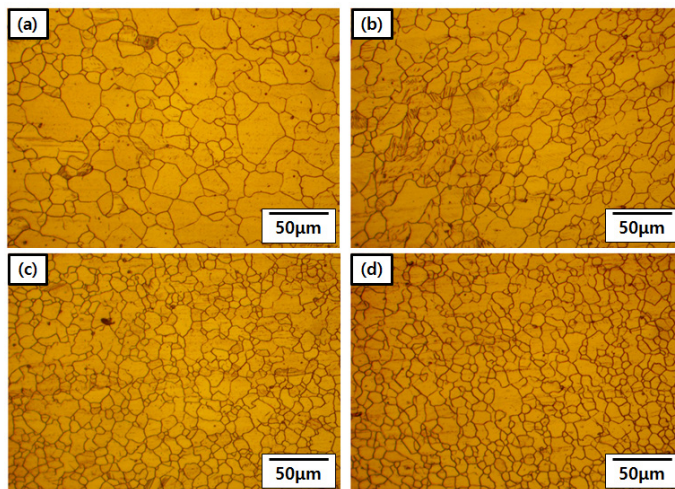


Fig. 3 Optical microstructure in the stir zone of the FSPed AZ31 alloy with number of FSP pass: (a) as-received, (b) 2 pass, (c) 4 pass and (d) 6 pass

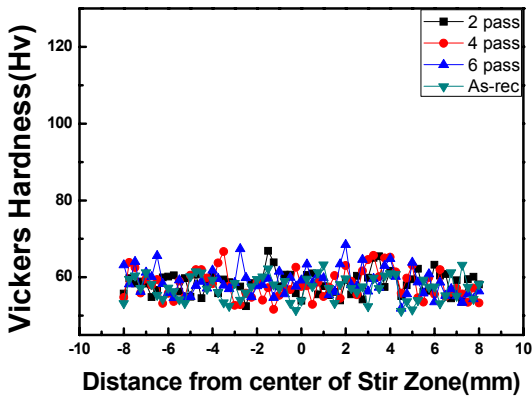


Fig. 4 Cross-sectional micro-hardness profiles of the FSPed AZ31 in the stir zone with FSP pass

건전부 미세구조를 관찰하였다. 모재의 결정립 크기는 약  $20\mu\text{m}$ 이었으며, 2회, 4회, 6회로 반복 마찰교반된 시편의 평균 결정립 크기는 각각  $11.4\mu\text{m}$ ,  $10.2\mu\text{m}$ ,  $9.2\mu\text{m}$ 로 모재대비 모든 시편에서 결정립이 미세화되었으며, 반복 교반 횟수가 증가함에 따라 평균 결정립의 크기는 약간 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 마찰교반 공정중에 발생하는 마찰열과 소성유동으로 인해 교반부에서 동적 재결정에 의한 결정립 미세화가 발생되었기 때문이다[1].

<Fig. 4>는 마찰교반 횟수에 따른 교반부(stir zone) 단면의 경도분포를 나타낸 것이다. 모재의 평균 경도

는 57Hv이며, 2, 4, 6 pass로 반복 마찰교반된 시편 단면부의 평균 경도는 각각 57Hv, 58Hv, 58Hv로 거의 pass 수에 관계없이 유사하게 측정되었다. 초기 재료 내 전위밀도가 비교적 높은 압연재 AZ31 합금은 마찰교반공정 시에 발생하는 동적재결정에 의한 새로운 결정립의 생성으로 전위밀도 감소효과가 발생하게 된다. 이에 따라 결정립 미세화로 인한 경도증가 효과는 전위밀도 감소에 의한 경도감소 효과에 의해 상쇄된 것으로 사료된다.

반복 마찰교반공정이 AZ31/SiC 표면 복합재료에 미치는 영향을 확인하고자 길이4mm, 폭2mm의 홈에 SiC 분말을 채워 넣어 각각 2, 4, 6회 반복 공정을 실시하였다. 또한 교반부에서 SiC 분말크기의 영향을 확인하고자  $2\mu\text{m}$  및  $8\mu\text{m}$ 의 SiC 분말을 각각 채워 넣었다. <Fig. 5>는 마찰교반공정 반복 수 및 SiC 분말 크기에 따라 제작된 표면 복합층의 단면부 사진이다.  $2\mu\text{m}$  SiC가 분산된 복합층의 경우 마찰교반 횟수가 증가함에 따라 강화상의 분산도가 향상되었음을 확인하였다. 또한 공구의 회전방향을 양방향으로 적용해준 결과 강화상이 한쪽으로 물리는 현상이 비교적 완화된 것을 관찰할 수 있었다.  $8\mu\text{m}$ 의 강화상을 첨가한 경우도 마찰교반 횟수가 증가함에 따라 결합의 크기가 감소하고 균일한 교반부가 형성되기는 하였으나  $2\mu\text{m}$  시편에 비해서는 모든 시편에서 교반부 균일도가 낮았다. <Fig. 6>은 마찰교반공정 반복 수 및 SiC 분말 크기에 따라 제작된 표면 복합층의 저배율 주사전자현미경

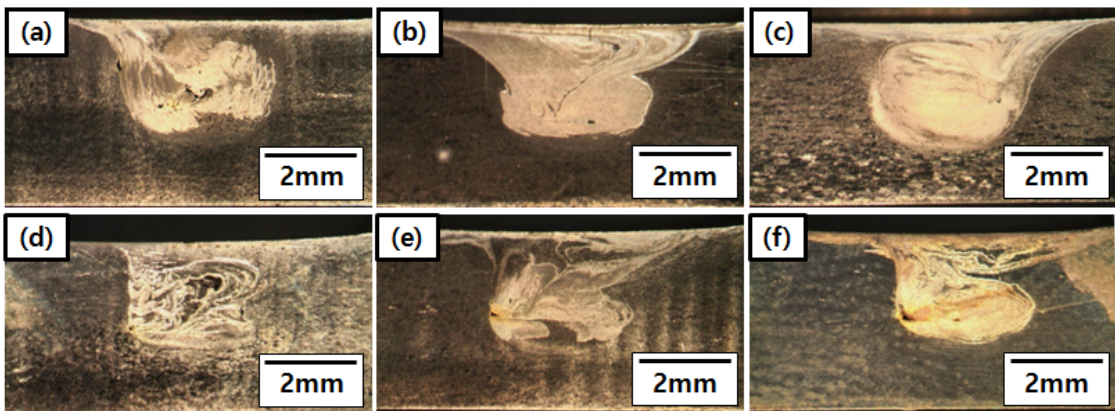


Fig. 5 Cross-sectional macro image of the AZ31/SiC composite with number of FSP pass and particle size, respectively : (a)  $2\mu\text{m}$ , 2 pass, (b)  $2\mu\text{m}$ , 4 pass, (c)  $2\mu\text{m}$ , 6 pass (d)  $8\mu\text{m}$ , 2 pass, (e)  $8\mu\text{m}$ , 4 pass and (f)  $8\mu\text{m}$ , 6 pass

관찰 사진이다. 반복 공정수가 증가함에 따라 입자들이 비교적 고르게 분산된 것을 확인할 수 있었다.

<Fig. 7>은 마찰교반공정 반복 횟수 및 SiC 분말 크

기에 따라 제작된 표면 복합층의 고배율 주사전자현미경 사진이다. 강화상이 분산된 모든 복합재료 시편에서 강화상 없이 마찰교반된 시편의 결정립 크기

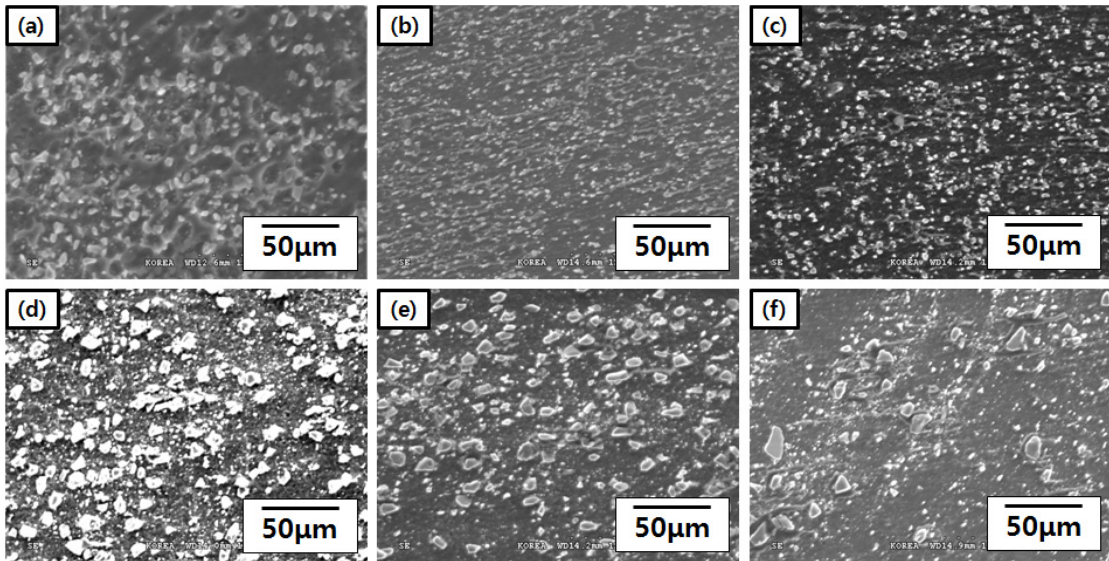


Fig. 6 Low magnification SEM images in the stir zone of AZ31/SiC composite with number of FSP passe and particle size : (a) 2 $\mu$ m, 2 pass, (b) 2 $\mu$ m, 4 pass, (c) 2 $\mu$ m, 6 pass, (d) 8 $\mu$ m, 2 pass, (e) 4 pass, and (f) 8 $\mu$ m, 6 pass

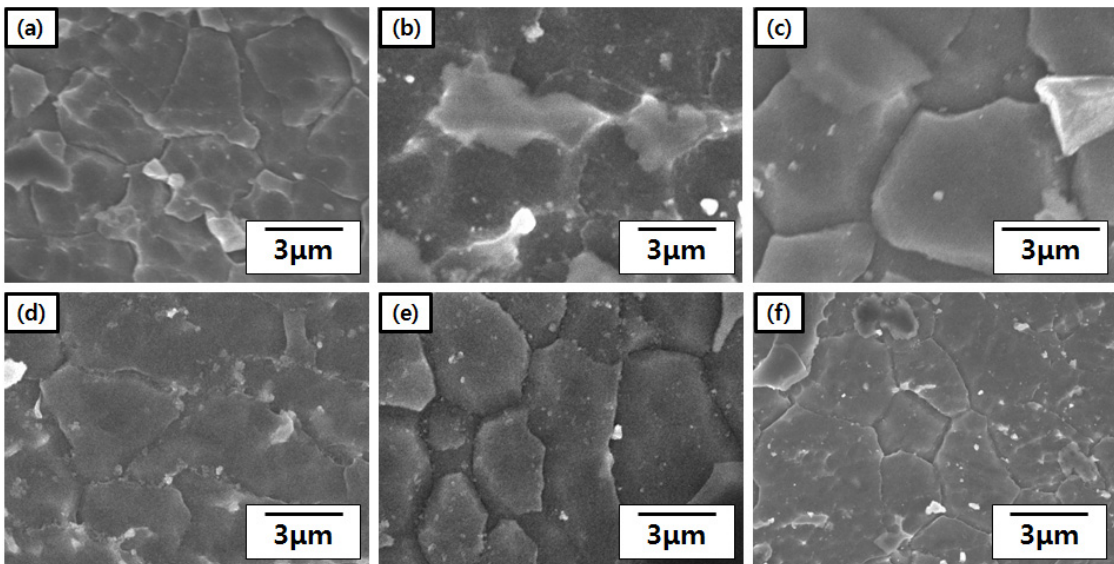


Fig. 7 High magnification SEM images in the stir zone of AZ31/SiC composite with number of FSP passe and particle size : (a) 2 $\mu$ m, 2 pass, (b) 2 $\mu$ m, 4 pass, (c) 2 $\mu$ m, 6 pass, (d) 8 $\mu$ m, 2 pass, (e) 4 pass, and (f) 8 $\mu$ m, 6 pass

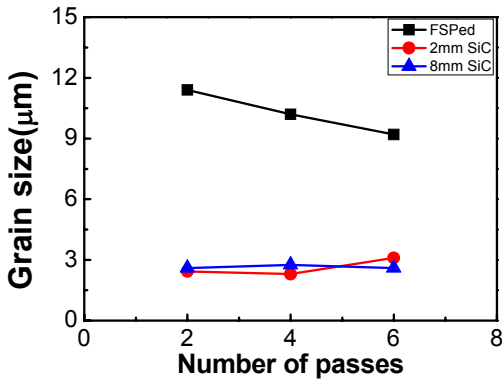


Fig. 8 Variation of average grain size with number of FSP passe and particle size

(9.2~11.4μm)보다 미세한 약 2.3~3.2μm의 미세해진 결정립이 관찰되었다. 이러한 결과는 강화상과 기지의 계면에서 동적재결정의 핵생성 사이트가 증가하고, 강화상의 피닝효과에 의해 결정립 성장이 억제되었기 때문이다[8]. <Fig. 8>은 <Fig. 7>의 주사전자현미경 사진에서 정량적으로 측정된 평균 결정립 크기 그래프이다. 2μm 및 8μm SiC 입자가 각각 분산된 시편에서 마찰교반 반복 횟수가 증가함에 따라 평균 결정립 크기의 변화가 거의 없는 것으로 관찰되었다.

<Fig. 9>는 반복마찰 교반 횟수 및 강화상의 크기에 따른 단면부 경도 분포를 나타낸 것이다. 마찰교반공정으로 제조된 모든 시편 복합층의 평균경도는 강화상 없이 제조된 표면 개질층의 경도에 비해 향상되었다. 복합층의 평균 경도는 2μm SiC 분말을 첨가한 경우 반

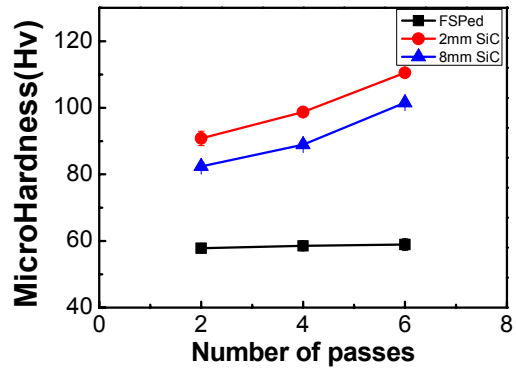


Fig. 10 Cross-sectional micro-hardness profiles in the stir zone with particle size: (a) 2μm and (b) 8μm

복 횟수에 따라서 각각 90.8Hv(증가율: 57%), 98.7Hv(70%), 110.5 Hv(91%)로 증가하였으며, 8μm SiC 분말을 첨가한 경우 각각 82.4Hv(42%), 88.9 Hv(53%), 101.5Hv(75%)로 증가하였다. <Fig. 10>은 <Fig. 9>에서 측정된 시편들의 교반부 평균 경도 변화 그래프이다. 마찰교반 횟수가 증가할수록 그리고 강화상의 크기가 작을수록 복합층의 평균경도가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 SiC 입자로 의한 분산 강화 효과에 의한 것으로 사료된다[8]. 최적화된 마찰교반공정(2μm, 6pass)로 제작된 시편은 모재에 비해서 표면부의 경도가 약 2배 정도 향상되었다. 표면 경도가 높을 소재는 고주기 피로 조건에서 사용될 때 표면 균열 발생 저항성이 우수하므로 고주기 피로수명이 우수

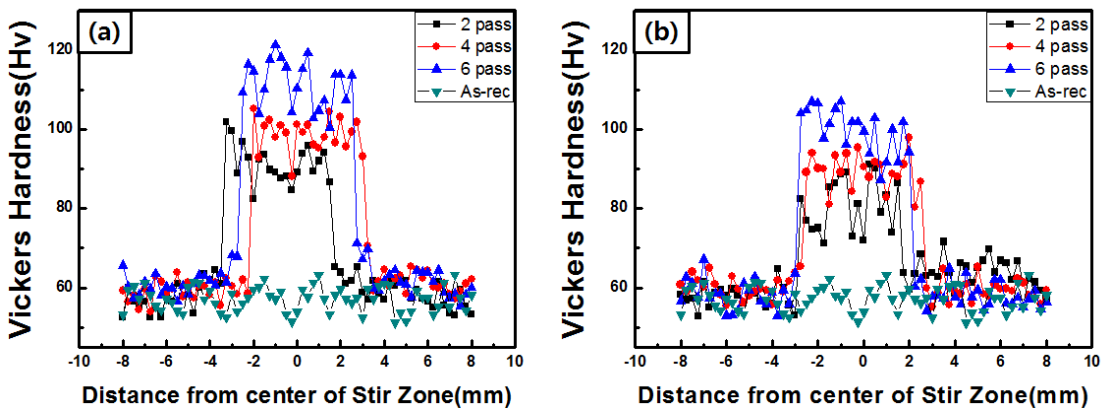


Fig. 9 Cross-sectional micro-hardness profiles in the stir zone with number of pass and particle size : (a) 2 μm and (b) 8 μm.

할 것으로 예상된다. 또한 강화상에 의해 표면경도가 증가된 소재는 마모 스트레스 조건에서 사용 시 마모량을 줄여주어 마모수명을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

#### 4. 요약 및 결론

AZ31 경량 마그네슘 합금에 마찰교반공정을 적용하여 금속기지 표면복합재료를 제조 시 pass 횟수 및 강화상의 크기가 미치는 영향을 확인하고자 연구를 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공구 회전속도 1400rpm, 공구 이송속도 21mm/min의 조건으로 강화상 없이 2, 4, 6 pass의 마찰교반공정을 실시하여 합금 표면에 미세한 동적 재결정립이 형성된 표면 개질 층을 제조하였다
2. AZ31/SiC 표면복합재료 제조 시 SiC 입자 강화상의 크기가 작고(2 $\mu$ m) 반복마찰교반 횟수가 증가함에 따라 결함이 없고, 강화상 분산도가 양호한 표면 복합재료를 제조할 수 있었다. 반면 강화상의 크기가 큰 경우(8 $\mu$ m)는 공정의 반복 횟수가 증가 함에도 결함이 발생하였으며 강화상의 원활한 분산이 어려웠다.
3. 반복 마찰교반공정으로 제조된 AZ31/SiC 복합재료층의 결정립은 모재에 비해 미세하였으며, 표면 경도도 최대 약 90%까지 향상되었다. 표면 경도 증가에 따라 고주기피로 환경에서 표면균열 발생 저항성이 증가하여 피로수명 향상이 가능할 것으로 예상된다.

#### References

- [1] Mishra, R. S. and Ma, Z. Y. (2005). "Friction stir welding and processing". *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, No. 1, pp. 1-78.
- [2] Chang, C., Du, X. H. and Huang, J. C. (2008). "Producing nanograined microstructure in Mg-Al-Zn alloy by two-step friction stir processing". *Scripta materialia*, Vol. 59, No. 3, pp. 356-359.
- [3] Wen, W., Kuaishe, W., Qiang, G. and Nan, W. (2012). "Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of cast AZ31 magnesium alloy". *Rare Metal Materials and Engineering*, Vol. 41, No. 9, pp. 1522-1526.
- [4] Azizieh, M., Kokabi, A. H. and Abachi, P. (2011). "Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites fabricated by friction stir processing". *Materials & Design*, Vol. 32, No. 4, pp. 2034-2041.
- [5] Asadi, P., Givi, M. B., Abrinia, K., Taherishargh, M. and Salekrostam, R. (2011). "Effects of SiC particle size and process parameters on the microstructure and hardness of AZ91/SiC composite layer fabricated by FSP". *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 20, No. 9, pp. 1554-1562.
- [6] Morisada, Y., Fujii, H., Nagaoka, T. and Fukusumi, M. (2006). "MWCNTs/AZ31 surface composites fabricated by friction stir processing". *Materials science and engineering: A*, Vol. 419, No. 1, pp. 344-348.
- [7] Mishra, R. S., Ma, Z. Y. and Charit, I. (2003). "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite". *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 341, No. 1, pp. 307-310.
- [8] Asadi, P., Faraji, G., Masoumi, A. and Besharati Givi, M. B. (2011). "Experimental investigation of magnesium-base nanocomposite produced by friction stir processing: effects of particle types and number of friction stir processing passes". *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42, No. 9, pp. 2820-2832.