

마찰교반처리법을 이용한 복합재료 제조의 최근 동향

정 용 하* · 홍 성 태*·† · 서 호 철**

*울산대학교 기계공학부

** (주)세종공업

Recent Trends in the Manufacture of Composites by Friction Stir Processing

Yong-Ha Jeong*, Sung-Tae Hong*·† and Ho-Chul Seo**

*School of Mechanical Engineering, University of Ulsan

**Sejong Industrial Co.,

†Corresponding author : sthong@ulsan.ac.kr

Abstract

In various manufacturing industries including automotive industries, the use of lightweight materials is rapidly increasing. In the use of lightweight materials, it is obvious that enhancing their mechanical or material properties without significant weight increase is extremely beneficial. One method to enhance material properties of a lightweight material while maintaining its light weight is fabricating metal matrix composites (MMC) by adding reinforcements to the material. In the present study, recent trends in the manufacture of MMC by friction stir processing are briefly reviewed.

Key Words : Lightweight materials; Metal matrix composites; Friction stir processing

1. 서 론

오늘날 자동차 산업을 비롯한 다양한 산업 분야에서 에너지 절약, 연비개선 등을 위하여 경량소재에 대한 필요성이 증가하고 있다. 경량소재의 효용성을 증가시키기 위해서는 경량성을 유지한 채로 기계적 성질을 최대한 향상시키는 것이 바람직함은 명백하다. 금속소재의 특정한 물성치를 향상시키는 전형적인 방법으로는 재료에 강화재(reinforcement)를 첨가하여 복합재료를 제조하는 방법이 있다. 보통 경량금속을 모재로 사용하는 금속모재복합재료(Metal Matrix Composite: MMC)는 최근 다양한 산업분야에서 주목을 받고 있다. MMC를 제조하는 일반적인 방법들로는 주조나 분말야금을 응용한 방법들이 사용되며 이들 방법들을 통하여 다양한 종류의 MMC를 제조할 수 있다. 그러나 주조에 기인한 제조기술들의 경우에는 용융금속에서 미세한 크기의 강화재를 균일하게 분포시키기가 매우 어렵다는 단점이 존재한다. 또한, 주조에서 흔히 발생하는 결합

인 미세기공은 복합재료의 성능이 저하되는 주요 원인이 될 수 있다. 분말야금을 기초로 하는 제조기술들을 사용할 경우에는 성공적으로 MMC를 제조할 수 있으나, 제조 시간이 오래 걸리며 제조비용이 비싸다는 단점들이 존재한다. 이와 같은 단점을 극복하고자 최근 마찰교반처리법(Friction Stir Processing: FSP)을 응용하여 MMC를 제조하는 기술에 관한 관심이 높아지고 있다.

2. 마찰교반처리법

FSP는 고상 표면변형 기술로 영국의 TWI에 의해서 발명된 고상 접합 기술인 마찰교반용접(Friction Stir Welding: FSW)¹⁾와 유사한 원리를 사용한다. 잘 알려진 바와 같이 FSP는 어깨부(tool shoulder)와 핀을 가진 원통형상의 공구를 고속 회전시키는 상태에서 단일 소재에 삽입하여 소재와 공구간의 마찰열과 공구의 회전운동을 이용하여 소재 내부에 격렬한 소성유동을

발생시킨다. 이러한 소성유동과 마찰열의 영향으로 FSP가 적용된 소재는 미세구조에 재결정, 치밀화, 그리고 균질화 등의 현상이 발생하며 결과적으로 기계적 성질이 다양하게 변화한다. 공구의 형상과 공정 변수가 적절하게 선정될 경우 FSP는 손쉽게 대상 소재의 미세구조를 개질하고 기계적 특성을 제어할 수 있게 하는 대단한 공정상의 이점을 제공한다. 또한 FSW와 마찬가지로 FSP는 유해가스를 발생시키지 않으며 소음이 매우 적은 청정공정이다. FSP는 크게 두 종류로 나눌 수 있으며 소재의 두께 전체에 FSP를 적용하는 VFSP (in-volume FSP)와 일반적으로 표면에서 2 mm 깊이 까지만 FSP를 적용하는 표면처리 기술인 SFSP (surface FSP)로 구분된다²⁾.

FSP 공정 중 발생하는 공구의 회전에 의해 소재의 표면에서부터 내부에 걸쳐서 일어나는 격렬한 3차원적인 소성유동 혹은 교반현상(stirring)을 이용하면 마이크로 혹은 나노 크기의 강화재를 소재의 내부로 산포시킬 수 있으며 이는 FSP를 이용한 MMC 제조의 기초 원리가 된다. 본 논문에서는 FSP를 이용한 MMC 제조기술에 관한 최근의 다양한 연구들을 소개하고자 한다.

3. FSPed MMC의 최근 연구 동향

최근에 MMC의 제조에 FSP를 적용했던 연구들 중에서 우선 주목할 만한 것은 2003년 Mishra 등이 FSP를 이용하여 알루미늄 합금 판재에 SiC 강화재를 첨가하여 MMC를 성공적으로 제조한 것을 들 수 있다³⁾. Mishra 등은 알루미늄 합금 5083 압연 판재를 모재로 사용하였으며, MMC에 첨가하는 강화재는 순도 99.5%, 평균 입자사이즈 0.7 μm 의 상용 SiC 분말을 사용하였다. Mishra 등은 FSP를 적용하기에 앞서 SiC 분말을 메탄올과 혼합하여 알루미늄 모재 표면에 얇게 산포한 후 메탄올을 증발시키고 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 공정변수는 Table 1에 나타내어진 바와 같다. 실험 결과를 토대로 하여 Mishra 등은 공구의 이송속도와 삽입깊이가 MMC의 물성치에 미치는

영향을 평가하였다. 아래의 Fig. 1과 Fig. 2의 광학현미경 사진들에서 알 수 있듯이, 삽입깊이를 2.03 mm로 동일하게 하였을 때 이송속도 25.4 mm/min의 경우가 이송속도 101.6 mm/min의 경우에 비하여 SiC 강화재가 모재 내부에 월등히 고르게 산포되었으며 MMC 부위와 모재간의 접합도 확연히 잘 이루어졌다.

반면에 삽입 깊이를 1.78 mm와 2.28 mm로 선정된 실험들의 결과에서는 알루미늄 모재에 MMC가 발생하지 않았으며 이는 FSP를 적용하여 MMC를 제조하고자 할 때 적절한 공정변수의 선정이 매우 중요한 요소임을 잘 보여준다.

또한 MMC 중 SiC 입자의 부피비(volume fraction)의 차이에 따른 경도의 변화를 비교하였을 때 알루미늄 합금 5083 모재의 경도 85 Hv에 비하여, SiC의 부피비 13%의 경우 123 Hv, SiC의 부피비 27%의 경우 173 Hv와 같이 확연히 향상된 값들을 보여주었다.

2006년 Morisada 등은 마그네슘 합금 AZ31 판재를 모재로 사용하고 SiC 분말을 강화재를 사용하여 FSP를 이용한 MMC 제조를 성공적으로 수행하였다⁴⁾.

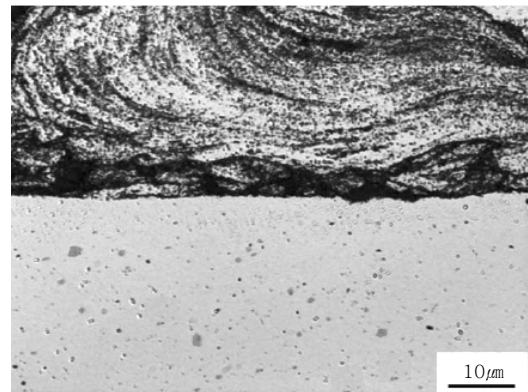


Fig. 1 Optical micrograph showing poor bonding between surface composite and aluminum alloy substrate at higher traverse speed (101.6 mm/min)³⁾ (reprinted with permission)

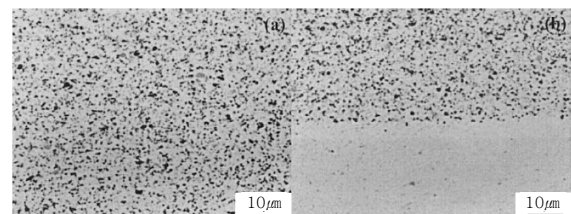


Fig. 2 Optical micrograph showing (a) uniform distribution of SiC particles (~13 vol.%) in aluminum alloy matrix, and (b) perfect bonding between surface composite and aluminum alloy substrate³⁾ (reprinted with permission)

Table 1 Process parameters and tool geometry³⁾

Process parameter				Tool geometry
Rotation speed (rpm)	Tool plunge depth (mm)	Tilt degree (°)	Traverse speed (mm/min)	Pin length (mm)
300	1.78	2.5	25.4	1.0
	2.03		101.6	
	2.28			

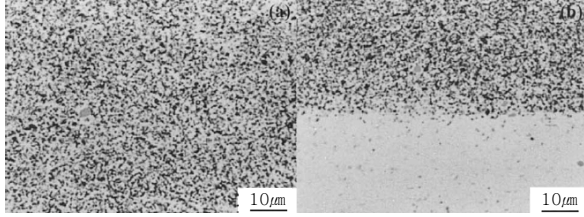


Fig. 3 Optical micrograph showing (a) uniform distribution of SiC particles (~27 vol.%) in aluminum alloy matrix, and (b) perfect bonding between surface composite and aluminum alloy substrate³⁾ (reprinted with permission)

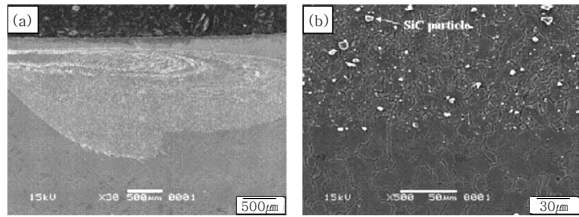


Fig. 4 SEM images of (a) stir zone with the SiC particle and (b) interface zone between the SiC particle/AZ31 and the AZ31⁴⁾ (reprinted with permission)

강화재를 적절히 교반시키기 위하여 마그네슘 합금 AZ31 판재의 표면에 길이방향으로 폭 1 mm, 깊이 2 mm 크기의 홈을 가공하여 SiC 분말을 채운 후 FSP를 적용하였다. 실험에 사용된 공정변수는 아래의 Table 2와 같다. 교반부의 SEM 분석결과는 SiC 입자가 AZ31 모재의 교반부에 잘 산포된 것을 보여준다 (Fig. 4).

Morisada 등은 FSP와 SiC 입자가 마그네슘 합금 모재의 미세구조에 미치는 영향을 분석하기 위하여 평균 결정립 크기를 측정하였고, 이를 근거로 하여 경도 값을 계산하여 비교하였다. Figure 5는 이송속도 50 mm/min의 실험에서 얻어진 미세조직의 SEM 결과를 모재의 미세조직과 비교하여 보여준다. FSP 적용 전의 모재(as-received AZ31), FSP만 적용된 모재(FSPed AZ31), 그리고 SiC가 산포된 MMC 교반부(FSPed AZ31 with the SiC particles)의 평균 결정립 크기는 각각 79.1, 12.9, 그리고 6.0 μm 로 측정되었으며 이에 따른 경도값들은 각각 48.1, 60.0, 그리고 69.3 Hv로 계산되었다. 이는 SiC 입자가 FSP의 미세조직 개질 효과에 더하여 추가적으로 모재의 결정립을 미세화 시키고 경도를 향상시킨다는 것을 보여준다. 또한 Morisada 등의 실험결과는 공구의 이송속도를 증가시킴에 따라 제조된 MMC의 결정립 크기가 감소함을 보

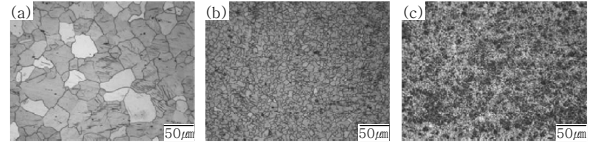


Fig. 5 Representative grain structures of (a) as-received AZ31, (b) FSPed AZ31, and (c) FSPed AZ31 with the SiC particles. The travel speed of (b) and (c) was 50 mm/min⁴⁾ (reprinted with permission)

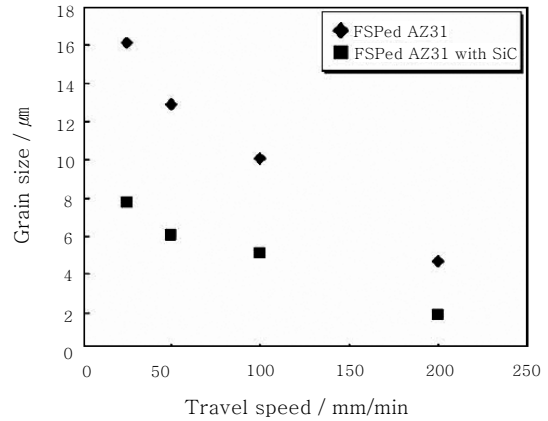


Fig. 6 Relationship between the grain size and the travel speed of the rotating tool⁴⁾ (reprinted with permission)

여준다(Fig. 6).

추가적으로 Morisada 등은 SiC 입자가 모재의 미세구조의 고온 안정성에 미치는 영향을 관찰하였다. FSP만이 적용된 경우에는 약 300°C에서 대상 마그네슘 합금의 미세구조가 불안정해지는데 비하여 MMC의 경우에는 약 400°C까지 미세구조가 안정적으로 유지되었다. 이는 SiC 강화재가 마그네슘 모재의 미세구조 개질 및 기계적 성질의 향상에 더하여 미세구조의 고온 안정성에도 크게 기여한다는 것을 보여준다.

최근 carbon nano-tubes(CNTs) 등의 탄소나노소재에 대한 관심이 증가하면서 FSP를 이용한 MMC의 제조에서도 CNTs 혹은 graphene 등의 탄소나노소재를 강화재로 사용한 연구들이 보고되고 있다.

2006년 Johannes 등은 알루미늄 합금 7075와 single-wall carbon nano-tubes(SWCNTs)를 각각 모재와 강화재로 사용하여 FSP를 통한 MMC 제조를 성공적으로 수행하였다⁵⁾. 실험을 위하여 Morisada 등의 경우⁴⁾와 비슷하게 모재 표면의 공구의 진행경로에 지름 6.4 mm, 깊이 4 mm의 구멍을 내어 SWCNTs를 채운 후 FSP를 수행하였다. MMC가 성공적으로 제조되었는지 확인하기 위하여 교반부의 Raman spectrum

을 측정하였으며(Fig. 7) 교반부 파단면을 SEM을 이용하여 관찰하였다(Fig. 8). Figures 7과 8에 보이듯이 Johannes 등의 결과는 SWCNTs를 강화재로 사용

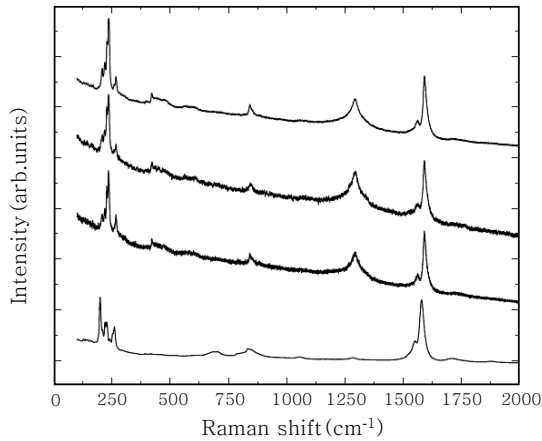


Fig. 7 The top three spectra are the results of Raman spectrometry on the fracture surface of the sample taken in the nugget. The radial breathing mode (RBM) can be seen around 236 cm^{-1} , a feature unique to SWCNTs. The D and G bands are also present in the spectra at $\sim 1295\text{ cm}^{-1}$ and $\sim 1580\text{ cm}^{-1}$. The bottom spectrum is from the SWCNTs before processing. In comparison it can be seen that the large D band is a result of FSP⁵⁾ (reprinted with permission)

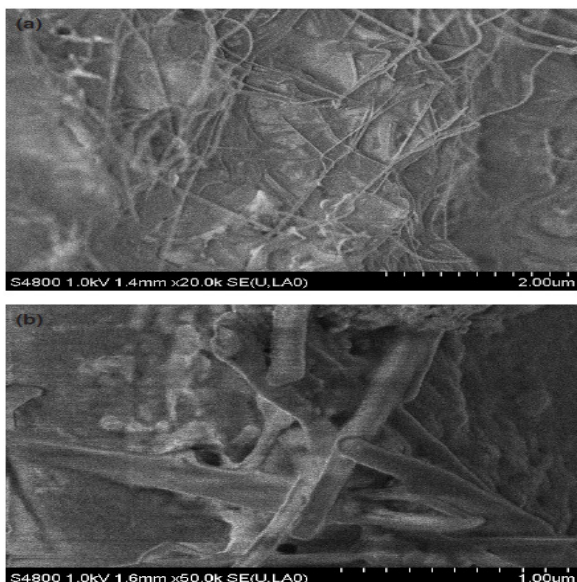


Fig. 8 SEM images showing SWCNTs in a friction stir processes aluminium matrix. (a) Nanotube bundles on the fracture surface (b), and what appear to be broken SWCNT ends⁵⁾ (reprinted with permission)

한 경우에도 FSP를 적용하여 금속 모재에 성공적으로 MMC를 발생 시킬 수 있다는 사실을 제시한다. 이는 탄소나노소재의 응용분야를 확장시키는 데 기여할 것으로 예상된다.

2006년 Morisada 등도 카본나노소재를 강화재로 이용하여 FSP를 사용한 MMC 제조 실험을 수행하였다⁶⁾. MMC 제조를 위하여 마그네슘 합금 AZ31 판재를 모재로 사용하였고 multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)를 강화재로 사용하였다. 기존의 SiC/Mg MMC 제조에서와 마찬가지로⁴⁾ 모재의 표면에 길이방향으로 폭 1 mm, 깊이 2 mm 크기의 홈을 가공하여 MWCNTs를 채운 후 FSP를 수행하였다. 실험에 사용된 FSP 고정변수들은 아래의 Table 2와 같다. 아래의 Figs. 9와 10은 제작된 MMC의 광학현미경 사진과 SEM 사진을 각각 보여준다.

Figures 9와 10에서 보이듯이 공구의 이송속도를 감소시킬수록 교반부 내에 MWCNTs가 더 균일하게 산포되었다. 또한 Fig. 11에 보이듯이 MMC의 경도값(78 Hv)은 모재의 경도값(41 Hv)에 비하여 확연하게 증가하였다. 이는 FSP의 미세조직 개질 효과와 MWCNTs 강화재에 의한 강도향상 효과의 복합적인 결과로 보여진다.

Table 2 Process parameters and tool geometry⁶⁾

Process parameter			Tool geometry		
Rotation speed (rpm)	Traverse speed (mm/min)	Tilt degree (°)	shoulder diameter (mm)	Pin diameter (mm)	Pin length (mm)
1500	25 50 100	3	12	4	1.8

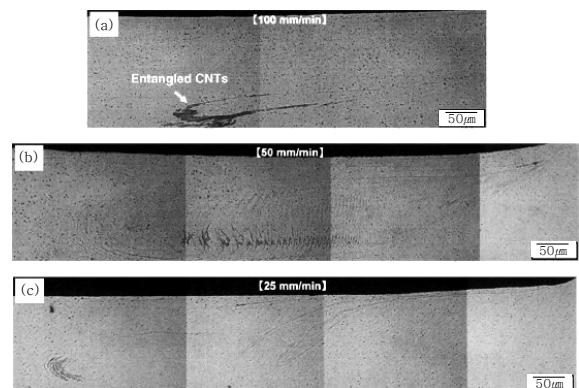


Fig. 9 OM images of the MWCNTs/AZ31 surface composites. The constant tool rotating rate was 1500 rpm. The travel speeds of (a), (b) and (c) were 100, 50, and 25 mm/min, respectively⁶⁾ (reprinted with permission)

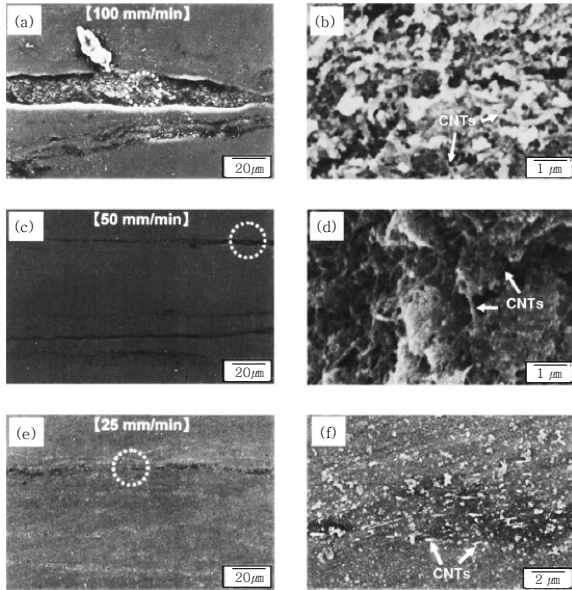


Fig. 10 SEM images of the MWCNTs/AZ31 surface composites. (b), (d) and (f) are enlargements of the microstructure inside a dotted circle for (a), (c) and (e), respectively. The constant tool rotating rate was 1500 rpm. The travel speeds of (a), (c) and (e) were 100, 50, and 25 mm/min, respectively⁶⁾ (reprinted with permission)

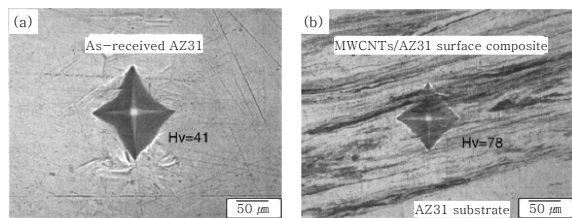


Fig. 11 The representative indentation prints for (a) as-received AZ31 and (b) the MWCNTs/AZ31 surface composites. The FSP condition was 1500 rpm and 50 mm/min⁶⁾ (reprinted with permission)

최근 Jeon 등은 CNTs에 비하여 상대적으로 저가인 graphene을 강화재로 사용하여 알루미늄 합금 5052-H32 모재에 FSP를 이용한 MMC를 성공적으로 제조하였다⁷⁾. Jeon 등은 기존에 제시된 모재 표면에 흠이나 구멍을 가공하여 강화재를 첨가하는 방식들을^{4,6)} 사용하지 않고 graphene oxide/water colloid를 모재의 표면에 직접 바른 후 FSP를 적용하는 방식을 사용하였다. 실험에 사용된 공정변수는 아래의 Table 3과 같다.

MMC가 성공적으로 제작되었는지를 확인하기 위하여 교반부의 Raman spectrum을 측정하였다. Fig. 12의 결과에서 보이듯이 교반부에서 graphene의 Raman

Table 3 Process parameters and tool geometry⁷⁾

Process parameter			Tool geometry		
Rotation speed (rpm)	Tool plunge depth (mm)	Traverse speed (mm/min)	shoulder diameter (mm)	Pin diameter (mm)	Pin length (mm)
700	3.1	70	20	6	3

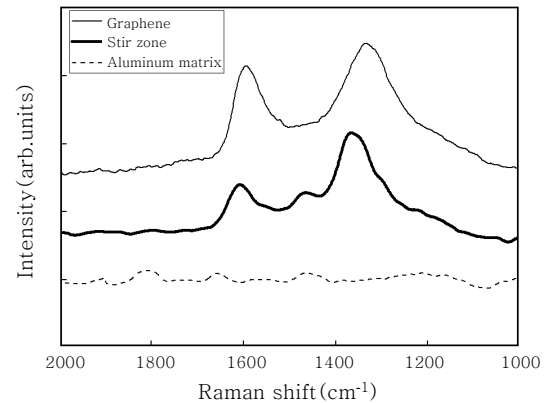


Fig. 12 Raman spectrum of the graphene/Al MMC

spectra가 관찰되었으며 이는 교반부에 MMC가 성공적으로 유도되었음을 보여준다. Graphene oxide 강화재가 알루미늄 모재의 물성치에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 MMC의 열전도율과 인장하중 하에서의 기계적 특성을 실험을 통하여 관찰하였다. 실험 결과에 의하면 MMC의 열전도율은 모재에 비하여 17%정도 향상되었으며 연신율은 모재에 비하여 50%이상 향상되었다.

4. 맺 음 말

FSP를 이용한 MMC 제조는 기존의 주조 혹은 분말 야금에 기초한 제조법들에 비하여 공정이 간단하고 모재와 강화재의 선택의 폭이 넓다는 장점을 제공한다. 특히 최근의 연구결과들에서 보이듯이 CNTs 혹은 graphene 등과 같은 첨단 나노소재들도 별다른 공정의 변화 없이 강화재로 사용하여 성공적으로 모재에 MMC를 발생시킬 수 있다. 또한 FSP 자체가 제공하는 미세조직 개질 효과와 물성치 향상 효과는 FSP를 이용한 MMC 제조법을 기존의 공정들의 매력적인 대안으로 자리매김하는데 기여한다. 다만 FSP의 특성 상 대면적의 MMC를 제조할 경우에는 공정시간이 상대적으로 길어질 수 있다는 단점이 존재한다.

후 기

This work was supported by the development program of local science park funded by the ULSAN Metropolitan City and the MEST (Ministry of Education, Science and Technology)

참 고 문 헌

1. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Church, P.T-Smith and C.J. Dawes, The Welding Institute, TWI, International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8 1991
2. A. Kurt, I. Uygur and E. Cete: Surface modification of aluminum by friction stir processing, *Journal of Materials Processing Technology*, **211** (2011) 313-317
3. R.S. Mishra, Z.Y. Ma and I. Charit: Friction stir processing : a novel technique for fabrication of surface

- composite, *Materials Science and Engineering*, **A341** (2003) 307-310
4. Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka and M. Fukusumi: Effect of friction stir processing with SiC particles on microstructure and hardness of AZ31, *Materials Science and Engineering*, **A433** (2006) 50-54
5. L.B. Johannes, L.L. Yowell and E. Sosa: Survivability of single-walled carbon nanotubes during friction stir processing, *Nanotechnology* **17** (2006) 3081-3084
6. Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka and M. Fukusumi: MWCNTs/AZ31 surface composites fabricated by friction stir processing, *Materials Science and Engineering*, **A419** (2006) 344-348
7. C.-H. Jeon, J.-J. Seo, S.-T. Hong, Y.-J. Yum, S.-H. Hur and K.-J. Lee: Friction stir processed graphene/aluminum metal matrix composites with high thermal conductivity for light-weight heat exchangers in solid oxide fuel cell systems, submitted to *Journal of Power Source*: in review



- 정용하
- 1988년생
- 울산대학교 기계공학부 대학원
- 마찰교반처리
- e-mail: yongha0831@naver.com



- 서호철
- 1964년생
- (주)세종공업
- 용접 및 접합
- e-mail: hcsuh@sjku.co.kr



- 홍성태
- 1971년생
- 울산대학교 기계공학부
- 마찰교반처리, 통전성형
- e-mail: sthong@ulsan.ac.kr