

마찰교반프로세스를 이용한 금속기 복합소재 제조 및 특성

최 돈 현* · 연 윤 모** · 정 승 부*†

*성균관대학교 신소재공학부

**수원과학대학 신소재응용과

Manufacturing and Properties of Metal Based Composite Produced By Friction Stir Processing

Don-Hyun Choi*, Yun-Mo Yeon** and Seung-Boo Jung*†

*School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University

**Department of Advanced Materials Application, Suwon Science College

†Corresponding author : sbjung@skku.edu

Abstract

Friction stir processing (FSP), developed based on the basic principles of friction stir welding(FSW), a solid-state joining process originally developed for various metal alloys, is an emerging metalworking technique that can provide localized modification and control of microstructures in near-surface layers of processed metallic components. The FSP causes intense plastic deformation, material mixing, and thermal exposure, resulting in significant microstructural refinement, densification, and homogeneity of the processed zone. The FSP technique has been successfully used for producing the fine-grained structure and surface composite, modifying the microstructure of materials, and synthesizing the composite and intermetallic compound in situ.

In this review article, the current state of the understanding and development of FSP is addressed

Key Words : Friction stir processing, Metal matrix composites(MMCs), Reinforce materials, Pinning effect

1. 서 론

국내소재산업이 글로벌화의 진전 등 거대한 환경변화 속에서 생존하기 위해서는, 세계적인 첨단 신소재에 대한 새로운 아이디어 창출과 개발을 통한 기술선점으로 시장을 지배하는 혁신이 필요한 시점이다. 친환경·고령화·에너지 문제 대두, 첨단기술 융합 및 혁신적인 신개념의 제품 출현으로 신소재 창출 기회가 확대되고 있으며, ‘기존 금속소재를 뛰어 넘는, 혹은 기존 활용영역을 뛰어 넘는 소재인 금속복합재료(Metal Matrix Composites, MMCs)의 개발을 요구하고 있다.

금속복합재료는 기지재료를 금속으로 하는 복합재료를 의미하며, 제2상의 인위적인 강화재를 넣어 제조하여 개개의 구성 재료보다 우수한 특성을 얻을 수 있는 재료이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 강화재는 하중 지지, 마모, 열팽창 제어 등 기능적인 역할을 담당하며,

기지금속은 하중의 전달이나 강화재를 보호하는 역할을 한다.

Table 1은 금속복합재료용으로 사용 가능한 강화재와 기지금속을 나타낸 것이다. 강화재는 SiC, Al₂O₃ 등의 세라믹계 보강재, 탄소 등이 널리 사용되고 있으며, 기지금속은 사용온도에 따라 선택적으로 사용하고, 강화재와의 기계적 및 화학적 양립성(Compatibility)과 젖음성(Wettability)에 따라 그 사용 합금계를 결정할 수 있다.

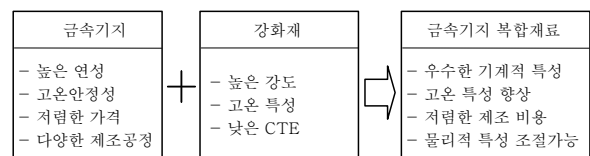


Fig. 1 Role of the reinforcement materials and matrix metal in MMC

Table 1 Matrix metal and reinforcement materials used in MMC

	Reinforcement materials	Matrix metals
1	SiC, Al ₂ O ₃ , C, Mo, TiC, TiB ₂ , B ₄ C	Al, Al alloy Al-Li alloy Mg, Mg alloy
2	SiC, Al ₂ O ₃ , C, Si ₃ N ₄ , 9Al ₂ O ₃ ·2B ₂ O ₃	Cu, Cu alloy Pb alloy, Ti, Ti alloy
3	SiC, Al ₂ O ₃ , C, B	Intermetallic compounds (Ti ₃ Al, TiAl, iAl, MoSi ₂)
4	CNT, Graphene	Complex matrix (e.g. Al-Li+Al)

일반적으로 입자강화 복합소재의 제조방법으로는 액상 제조 공정과 고상 제조 공정으로 구분할 수 있다. 액상 제조법의 종류에는 일반적인 주조법(casting), 고압다이캐스팅(high-pressure die casting), 혼합주조(compcasting) 등이 있으며 고상 제조법에는 분말 야금법(powder metallurgy)을 이용하여 고온진공가압(vacuum hot pressing), 열간등가압(hot isostatic pressing)으로 성형하는 방법이 주로 사용되고 있다²⁾.

액상제조법의 경우 공정비용이 적다는 장점이 있으나 제조 시 강화재와 기지금속과의 상호반응을 통하여 계면에서 부산물이 생성될 수 있고, 또한 강화재의 주입과정에서 균집현상이 발생함에 따라 불균일한 강화재의 분포에 의해 복합소재의 성능이 저하될 수 있다는 단점이 있다. 고상제조법의 경우 기지금속과 강화재 계면간의 반응을 억제할 수 있으며 균일한 강화재의 분포를 얻을 수 있는 장점이 있으나 생산 비용이 높다는 문제점을 지니고 있다³⁾.

한편, 마찰교반접합법(Friction Stir Welding; FSW) 특성을 이용하여, 이 기술을 재료의 미세조직제어에 응용한 기술로 알려진 마찰교반프로세스(Friction Stir Process; FSP)는 알루미늄, 마그네슘, 타이타늄 등의 재료의 표면 개질에 관하여 연구 및 적용이 되고 있으며⁴⁻¹⁰⁾ 최근에는 마찰교반프로세스를 이용한 금속재료의 복합소재화 기술 또한 연구가 진행이 되고 있다¹¹⁻¹⁵⁾. 마찰교반프로세스를 이용한 복합소재화의 경우 고상 공정이므로 강화재와 기지금속과의 반응을 억제할 수 있으며 또한 틀의 교반에 의하여 강화 재료의 균일한 분포를 얻을 수 있다. 뿐만 아니라 이미 제조된 소재에 대해서도 적용이 가능하며 교반 조건에 따라서 소재 전체가 아닌 원하는 깊이 및 영역에 대해서만 복합소재화를 할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 논문에서는 마찰교반프로세스를 이용한 금속재료의 복합소재화 기술에 있어서 지금까지 보고된 연구 결과를 중심으로 공정 조건 및 강화재의 종류, 크기가 복합소재화 된 교반부의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 소개하고자 한다.

2. 교반부의 복합소재화 원리 및 특성

마찰교반프로세스를 이용한 비철재료의 복합소재화 원리는 기존의 마찰교반프로세스와 거의 유사하나 공정 중에 강화재 (SiC, B₄C, CNT 등) 를 삽입한다는 점에서 차이점을 나타내고 있다. 일반적으로 마찰교반 프로세스 공정 중에 강화재를 삽입하기 위해서는 하기의 그림과 같이 조직 개질을 하고자 하는 위치에 홈을 가공한 후 이러한 홈 내부에 2상 강화물질을 삽입한다. 이후에 기존의 마찰교반프로세스와 동일하게 고속으로 회전하고 있는 마찰교반용 공구의 핀 부분을 피가공재의 내부에 삽입시킨 후, 공구를 피가공재의 표면을 따라 임의의 방향으로 이동시킨다. 이때, 공구의 핀 부분과 Shoulder 부분이 피가공재와 마찰하여 발생하는 마찰열에 의해 피가공재의 온도가 상승함으로써 가공부가 연화된다.

이와 동시에, 피가공재의 내부에 삽입되어 고속으로 회전하고 있는 핀에 의해 연화된 피가공재가 기계적으로 교반되어 강소성변형을 일으키게 되며 동시에 삽입되어 있던 2상 강화물질들이 틀의 교반에 의하여 재료 내부에 분산이 된다. 그 결과 피가공재 내부에서 발생한 동적재결정에 의하여 미세 결정립이 형성 되며 동시에 분산된 강화재에 의하여 개질된 영역이 복합소재화가 된다.

3. 교반 변수에 따른 복합소재화 교반부의 특성

틀 회전속도 1600rpm, 이송속도 80mm/min 의 조건에서 5 μ m 크기의 SiC 입자가 함유된 AM60 마그네슘 합금의 교반부 및 모재의 미세조직을 Fig. 3에 나타내었다. 모재의 경우 전형적인 주조 조직을 나타내고

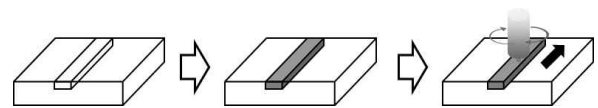


Fig. 2 FSP procedure to produce MMC: (a) cutting a groove, (b) compacting with ceramic particles and (c) traversing of tools (with and without pin)

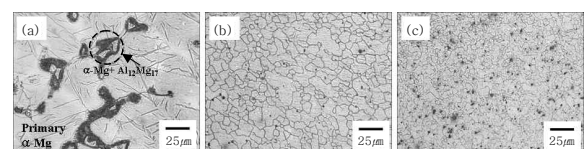


Fig. 3 Optical microstructure of AM60 : (a) base metal, (b) SZ without SiCp, (c) SZ with SiCp

있으며 α 상의 마그네슘과 $Mg_{17}Al_{12}$ 의 금속간화합물로 구성이 되어 있는 것으로 관찰되었다. 교반부의 경우 주조 조직 형상은 사라졌으며 등축정의 균일한 결정립이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이는 공정 중에 틀 교반에 의한 소성변형 및 마찰열에 의하여 동적재결정이 일어나 형성된 결정립으로 보고된 바 있다. SiC가 함유된 교반부 미세조직의 경우에도 SiC가 함유되지 않은 교반부의 미세조직과 비슷한 형상의 등축정 결정립을 나타내었다. 하지만 결정립내에 검은색의 미세 입자들이 관찰이 되었으며 이는 공정 시 함유된 SiC 입자로 사료가 된다. 또한 결정립의 크기를 비교하였을때 SiC 입자가 함유되지 않은 교반부의 경우 약 $20\mu m$ 크기의 결정립을 나타내고 있었지만 SiC입자가 함유된 교반부의 경우 약 $10\mu m$ 크기의 결정립을 나타내는 것으로 관찰이 되었다. 동일한 교반 조건하에서 다른 결정립 크기를 나타내는 것은 교반 시 함유된 SiC 입자에 의한 것으로 사료가 된다.

Fig. 4 는 SiC가 함유된 교반부의 XRD 및 EPMA 분석 결과를 나타내고 있다. 분석 결과에서 볼 수 있듯이 교반부 내에는 SiC가 존재하는 것을 확인할 수 있으며 이는 공정 시 함유된 SiC 입자는 기지 금속과의 반응 및 상변태가 일어나지 않은 것으로 사료가 된다.

틀 회전속도 및 이송속도를 변수로 하여 $5\mu m$ 크기의 SiC 입자를 함유한 구리 교반부의 미세조직을 Fig. 5

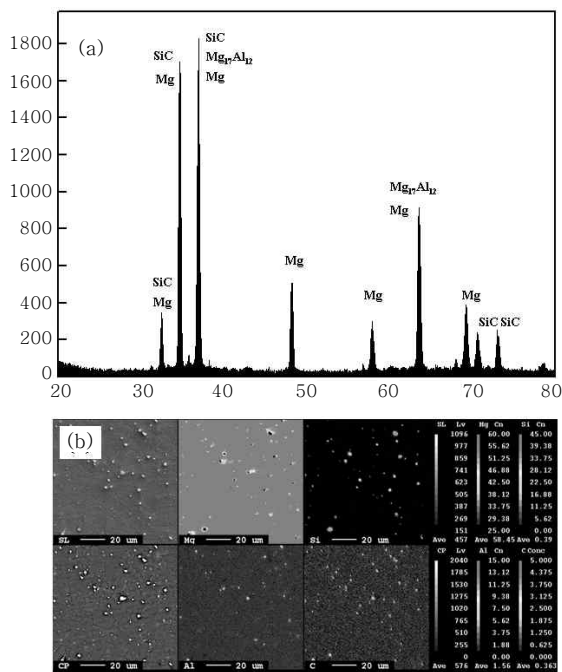


Fig. 4 Phase and chemical composition analysis of SZ with SiCp: (a) XRD analysis, (b) EPMA analysis

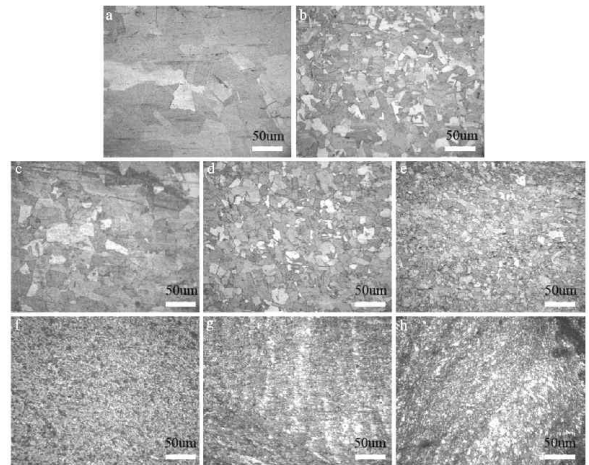


Fig. 5 OM micrographs of (a) base metal, stir zone of specimens FSPed without SiC particles at (b) rotational and traverse speed of 1120 rpm and 80mm/min, (c-e) rotational speed of 900 rpm and traverse speeds of 40, 80 and 200mm/min respectively, and (f-h) specimens FSPed with SiC particles at rotational speed of 900 rpm and traverse speeds of 40, 80 and 200mm/min respectively¹⁶⁾

에 나타내었다¹⁶⁾. 모재의 경우 $40\sim 50\mu m$ 크기의 조대한 등축정 조직을 나타내고 있다. 동일한 이송속도 조건(80mm/min)에서 틀 회전속도가 감소함에 따라 결정립 크기가 다소 감소하는 것을 관찰 할 수 있으며 동일한 틀 회전속도(900rpm) 조건에서 이송속도가 증가함에 따라 결정립 크기가 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 현상은 틀 회전속도의 증가 및 이송속도의 감소는 교반 시 입열량을 증가시키는 요인으로 알려져 있으며 입열량 증가에 따라 결정립의 크기는 증가하는 것으로 사료된다. SiC가 함유된 교반부의 경우 SiC가 없는 교반부에 비해 상대적으로 매우 미세한 결정립을 형성한 것을 관찰 할 수 있었다. 또한 SiC가 함유된 교반부의 경우 기존의 현상과는 다르게 이송속도가 증가함에 따라 결정립 크기가 증가하는 것으로 나타났으며 틀 회전속도 및 이송속도, SiC 유무에 따른 교반부의 결정립 크기를 Fig. 6에 정리하였다.

Fig. 7은 SiC 함유의 유무 및 이송속도에 따른 교반부의 경도 측정 결과를 나타낸다. 경도 측정 결과에서 볼 수 있듯이 SiC가 없는 교반부의 경우 이송속도가 증가함에 따라 경도 값이 증가하는 것을 관찰 할 수 있었으며 이는 앞서 설명한 바와 같이 입열량 감소에 따른 결정립 성장 저하에 의한 결과로 사료된다. SiC가 함유된 교반부의 경우 반대로 이송속도가 감소함에 따라 경도 값이 증가하는 현상을 나타내었으며 SiC가

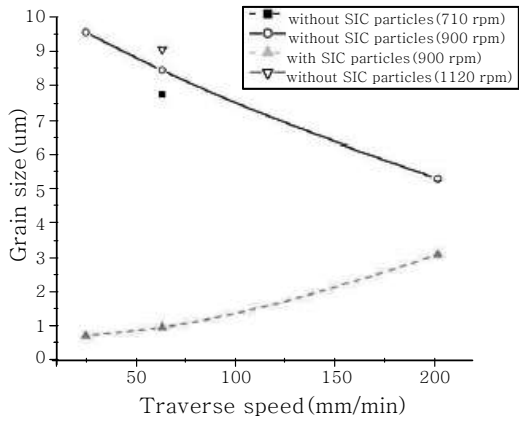


Fig. 6 Variation of grain size of specimens produced with and without SiC particles in different rotational and traverse speeds¹⁶⁾

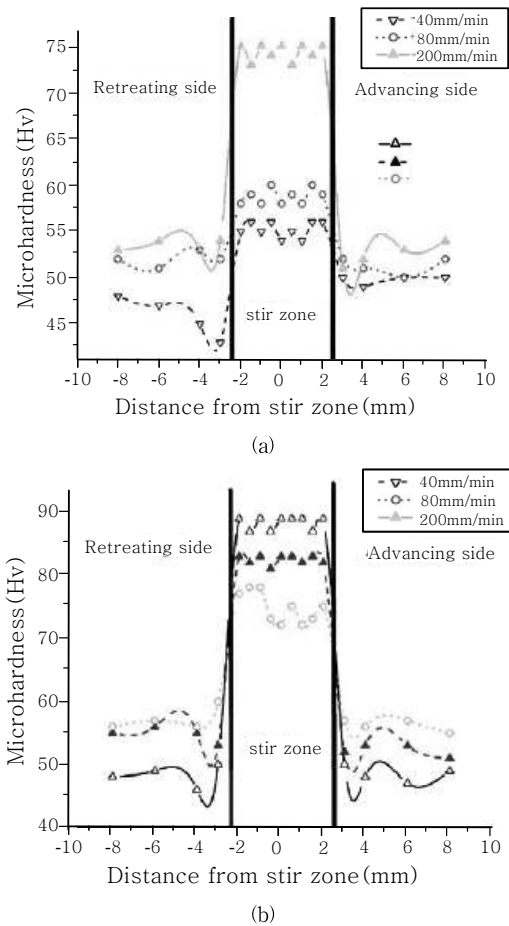


Fig. 7 Microhardness values of specimens FSPed (a) without SiC particles and (b) with SiC particles in different traverse speeds¹⁶⁾

함유되지 않은 교반부의 경도 측정 값과 반대의 현상을 나타내는 것을 관찰 할 수 있다.

마찰교반프로세스를 이용하여 제조된 복합소재의 경

우 기존의 마찰교반프로세스로 제조된 교반부와는 다른 미세조직 및 기계적 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 마찰교반프로세스 중에는 톨의 교반에 생성되는 소성변형과 마찰열에 의하여 교반부에서는 동적재결정이 일어나 미세결정립을 형성하는 것으로 알려져 있다. 하지만 SiC와 같은 강화재료가 함유되는 경우 교반 시 동적재결정이 일어나는 동안에 2상 강화물질에 의한 결정립 성장 방해, 즉 pinning effect가 발생이 되어 최종적으로 미세한 결정립이 형성되는 것으로 보고되고 있다. Fig. 5 에서도 볼 수 있는 바와 같이 SiC가 함유된 교반부의 경우 SiC가 함유되지 않은 교반부에 비해 매우 미세한 결정립으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 미세 결정립의 형성은 최종적으로 Hall-Petch 법칙에 의하여 더 높은 경도 값을 나타내는 것으로 알려져 있다. 또한 톨의 회전속도 및 이송속도는 공정 시 강화재료의 분산과 직접적인 관계가 있으며 톨 회전속도가 빠르고 이송속도가 느려질수록 강화재료의 분산은 더 증가하는 것으로 알려져 있다. 상기 경도 측정 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 이송속도가 느려질수록 교반부에 함유된 SiC 입자는 균일하게 분산이 되며 이에 따라 pinning effect 효과를 나타내는 영역 또한 증가하기에 이송속도가 느려질수록 더 높은 경도 값을 나타낸다. 또한 교반부의 경도 값 증가의 원인은 미세결정립 형성뿐만 아니라 교반부에 함유되어 있는 강화재료가 가지는 높은 경도 특성이 교반부의 전체 경도 값을 증가시키는 것으로 알려져 있다.

즉 마찰교반프로세스를 이용한 복합소재화 공정은 기존의 마찰교반프로세스와는 반대의 최적 공정을 나타내고 있으며 이에 적합한 톨 회전속도 및 이송속도가 요구되는 것을 알 수 있다.

4. 강화입자의 종류 및 크기에 따른 복합소재화 교반부의 특성

복합소재의 경우 기지금속 내에 함유되는 강화재료의 종류에 따라서 그 특성이 달라지며 이는 강화재료의 특성에 기인하는 것으로 알려져 있다. 톨 회전속도 1600rpm, 이송속도 60mm/min 조건에서 6360 알루미늄 합금에 TiC(2 μ m), B₄C(3 μ m) 입자를 혼합하여 삽입한 복합소재의 마모 특성을 Fig. 8에 나타내었다¹⁷⁾.

시험 결과에서 볼 수 있듯이 모재보다는 교반부가 더 우수한 내마모 특성을 나타내었으며 이는 마찰교반프로세스에 의해 형성된 미세 결정립들이 내마모성 증가에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 또한 TiC와 B₄C 입

Table 2 Average micro-hardness and grain size of the surface at the stir zone of specimens¹⁸⁾

Material	Average micro-hardness, Hv		Average grain size, μm	
	FSP with alumina particles	FSP without particles	FSP with alumina particles	FSP without particles
AZ91 as-cast	70	70	~150	...
AZ91 FSP/square tool/particle size 3000nm	98	97.11	9.63	...
AZ91 FSP/square tool/particle size 300nm	101.3	96.87	6.7	...
AZ91 FSP/square tool/particle size 30nm	103.2	98.52	5.94	7.27

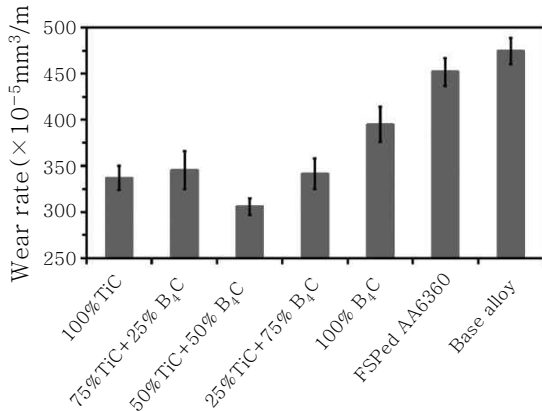


Fig. 8 Wear rate of fabricated mono and hybrid MMC¹⁷⁾

자가 함유된 교반부의 경우 더 우수한 내마모 특성을 나타내었으며 이러한 이유는 강화재료에 의한 영향으로 사료된다.

또한 TiC와 B₄C 입자가 내마모성에 미치는 영향을 비교하였을 때 B₄C가 함유된 교반부 보다는 TiC가 함유된 교반부의 내마모성이 우수한 것을 확인할 수 있으며 이러한 TiC와 B₄C를 50:50으로 혼합하여 함유했을 경우 가장 우수한 내마모 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 TiC와 B₄C 입자의 고유한 특성에 의한 것으로 알려져 있다. 기계적 강도의 경우 일반적으로 B₄C 입자가 TiC 입자보다 높은 경도값을 가지는 것으로 알려져 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때에 내마모 특성 또한 B₄C만 함유된 교반부의 경우 가장 우수한 내마모 특성을 나타내어야 한다. 하지만 TiC가 함유된 교반부가 더 높은 내마모 특성을 나타내는 이유는 TiC 입자의 윤활 작용에 의한 것으로 사료된다. TiC는 B₄C에 비해 경도값은 낮으나 마찰계수가 적어 고체 윤활유 효과를 나타내는 것을 알려져 있으며 이러한 TiC의 윤활 작용에 의하여 내마모 특성에서는 우수한 효과를 나타내는 것으로 사료된다. 또한 상기 언급한 바와 같이 이러한 특성을 지니는 TiC와 B₄C 입자가 50:50으로 혼합된 경우 가장 우수한 내마

모 특성을 나타내었으며 이러한 이유는 TiC의 고체 윤활 효과와 B₄C의 우수한 내마모 특성이 함께 작용하여 나타난 결과로 사료된다.

틀 회전속도 900rpm, 이송속도 63mm/min 조건에서 Al₂O₃의 크기(3, 0.3, 0.03 μm)에 따라 마찰교반프로세스된 AZ91 합금의 교반부 미세조직을 Fig. 9에 나타내었다. 모재 조직의 경우 전형적인 주조 조직을 나타내었으며 교반부의 경우 소성변형과 마찰열에 의해 형성된 등축정의 미세 결정립이 관찰되었다. 또한 Al₂O₃ 입자가 작아질수록 (3→0.03 μm) 교반부의 결정립 크기 또한 작아지는 것을 관찰 할 수 있다¹⁸⁾.

Table 2는 Al₂O₃의 크기에 따른 교반부의 경도 및 결정립 크기를 나타낸다. Table 2에서 볼 수 있듯이 Al₂O₃의 크기가 작아질수록 결정립 크기는 더욱 미세해졌으며 (9.63→5.63 μm) 경도는 증가하는 것을 관찰할 수 있다 (98→103.2Hv).

동일한 교반 조건에서 강화재료의 크기가 작아짐에 따라 결정립의 미세화 및 기계적 특성의 증가되는 현상은 강화재료에 의한 pinning effect와 관련이 있는 것으

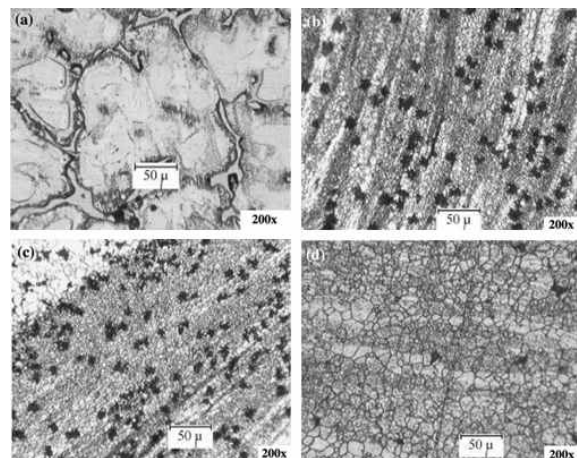


Fig. 9 Effect of alumina particle size and tool geometry on grain size and cluster size (a) base metal, (b, c, and d) FSPed specimen with 0.03, 0.3, 3 μm alumina particle size, respectively¹⁸⁾

로 사료된다. 즉 동일한 부피의 강화재료가 함유된다고 하면 강화재료의 크기가 작아짐에 따라 입자의 개수는 증가하게 된다. 예를 들어 $3\mu\text{m}$ 크기의 입자 1개와 $0.03\mu\text{m}$ 크기의 입자 1개를 비교하였을 때에 부피비를 계산하면 1:100000의 비율을 가지게 되며 이는 동일한 부피 내에서의 입자 개수로 볼 수 있다. 즉 강화재의 크기가 작아질수록 함유되는 입자의 개수는 크기에 반비례하여 증가하게 된다. 강화재료의 개수가 증가함에 따라 교반부 내에서는 더 많은 영역에서 pinning effect가 발생할 수 있게 되며 이는 최종적으로 더 미세한 결정립을 형성하는 결과를 나타내는 것으로 사료된다.

마찰교반프로세스를 이용한 복합소재화의 경우 상기 언급한 바와 같이 함유되는 강화재료의 종류 및 크기에 따라서 교반부의 기계적 특성이 달라지며 복합소재가 사용되는 환경에 따라 적절한 종류 및 크기를 가지는 강화재료를 사용해야 할 것으로 사료 된다.

5. 맺 음 말

마찰교반프로세스를 이용한 복합소재화에 대해 상기와 같이 조사·정리한 결과 이들 소재에 대한 접합 변수와 미세조직의 관계, 미세조직과 기계적 특성과의 관계 등의 분석 결과를 확인 할 수 있었으며 이에 따라 마찰교반프로세스를 이용한 복합소재화가 매우 실용적인 수준까지 연구가 진행 된 것을 확인할 수 있었다. 다만 생산 현장 적용 단계에서 보다 필요한 자료로 예상되는 공정 소요 시간 및 공정 장비 설계 등의 실질적인 연구 자료와 부식 및 피로 저항 특성 등 다양한 교반부의 신뢰성 평가에 관한 연구 결과가 부족한 상황으로 파악되었다. 향후 산업계에서 복합소재의 수요가 점차 늘어나는 것을 고려할 때 마찰교반프로세스의 적용 확대를 위하여 보다 다양하면서도 세밀한 연구가 계속되어야 할 것으로 생각되고, 특히 기술 국산화를 위한 국내 연구진들의 노력이 더욱 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 지식경제부 산업원천기술개발사업(과제번호 : 10038688)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 이상관, 이상복: 금속복합재료 액상성형기술, 재료마당, 24권 3호 (2011), 25-31

2. M.M. Schwartz: ASM Handbook volume 21: Composite(Eds., D.B. Miracle and S.L. Donalson), ASM International, 2001, 1-22

3. D.R. Heriling, G.J. Grant, W.H. Hunt: Low-cost aluminium metal matrix composite. *Advanced Materials & Processing*, 159-7 (2001), 37-40

4. R.S. Mishra, M.W. Mahoney, S.X. McFadden, N.A. Mara, and A.K. Mukherjee: *Scripta Mater.*, 2000, vol. 42, 163-68

5. R.S. Mishra and M.W. Mahoney: *Mater. Sci. Forum*, 2001, vols. 357-359, 507-12

6. Z.Y. Ma, R.S. Mishra, and M.W. Mahoney: *Acta Mater.*, 2002, vol. 50, 4419-30

7. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, and I. Charit: *Mater. Sci. Eng., A*, 2002, vol. A341, 307-10

8. P.B. Berbon, W.H. Bingel, R.S. Mishra, C.C. Bampton, and M.W. Mahoney: *Scripta Mater.*, 2001, vol. 44, 61-6

9. Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra, and M.W. Mahoney: *Mater. Sci. Forum*, 2003, vols. 426-432, 2891-96

10. C.J. Lee, J.C. Huang, and P.J. Hsieh: *Scripta Mater.*, 2006, vol. 54, 1415-20

11. S. Soleymani, A. Abdollah-zadeh, S.A. Alidokht: Microstructural and tribological properties of Al5083 based surface hybrid composite produced by friction stir processing, *Wear* 278-279 (2012) 41-47

12. J. Qua, H. Xua, Z. Fenga, D. A. Fredericka, L. Anb, H. Heinrichb: Improving the tribological characteristics of aluminum 6061 alloy by surface compositing with sub-micro-size ceramic particles via friction stir processing, *Wear*, 271 (2011) 1940-1945

13. A. Shamsipur, S.F.K. Bozorg, A.Z. Hanzaki: The effects of friction-stir process parameters on the fabrication of Ti/SiC nano-composite surface layer, *Surface & Coatings Technology* 206 (2011) 1372-1381

14. D.H. Choi, Y.H. Kim, B.W. Ahn, Y.I. Kim, S.B. Jung: Microstructure and mechanical property of an A356 based composite by friction stir processing, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, in press

15. D.H. Choi, Y.I. Kim, D.U. Kim, S.B. Jung: Effect of SiC particles on the microstructure and mechanical property of friction stir processed AA6061-T4, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, in press

16. B. Mohsen, K.B.G. Mohammad, S. Javad: On the role of processing parameters in producing Cu/SiC metal matrix composites via friction stir processing: Investigating microstructure, microhardness, wear and tensile behavior, *Materials characterization*, 62 (2011), 108-117

17. C. Maxwell Rejil, I. Dinaharanb, S.J. Vijayb, N.

Murugan: Microstructure and sliding wear behavior of AA6360/(TiC + B₄C) hybrid surface composite layer synthesized by friction stir processing on aluminum substrate, Materials science and engineering A, 552(2012), 336-344

18. G. Faraji, O. Dastani, S.A.A. Mousavi: Effect of Process Parameters on Microstructure and Micro-hardness of AZ91/Al₂O₃ Surface Composite Produced by FSP, Journal of Materials Engineering and Performance, 20(9)(2011), 1853-1590



- 최동현
- 1982년생
- 성균관대학교 신소재공학부
- 마찰교반접합, 마찰교반접합
- e-mail : cdh0326@skku.edu



- 정승부
- 1959년생
- 성균관대학교 신소재공학부
- 마이크로조이닝, 마찰교반접합
- e-mail : sbjung@skku.edu



- 연윤모(延倫模)
- 1953년생
- 수원과학대학 신소재응용과
- 마찰교반접합, 마찰용접
- e-mail : ymyeon@ssc.ac.kr