

|||||||
論 文
|||||||

반용융 성형가공한 SiCp/AZ91HP Mg복합재료의 피로 및 내마모 특성

하홍수*† · 김명균* · 안선규** · 임병수** · 김영직*

Fatigue and Wear Properties of Semi-Liquid Formed SiCp/AZ91HP Mg Composites

Hong-Soo Ha*†, Myoung-Gyun Kim*, Sun-Kyu Ahn**, Byeong-Soo Lim** and Young-Jig Kim*

Abstract

The effect of size and mass fraction of SiC particulate on the fatigue and wear have been investigated for semi-liquid formed SiCp/AZ91HP Mg composites. In the study, different particulate sizes of 7, 20, 50 μm were prepared with various mass fraction for sample preparation. By tension-tension fatigue tests, whose procedures are standardized in ASTM standard 647E-93, the da/dN vs. ΔK curves were obtained. Also, the crack propagation paths were observed by optical microscope. As a result of wear test, specific wear loss is decreased with increasing mass fraction and particulate size. Specific wear loss of 30 mass% 50 μm SiC reinforced Mg composite is compared to SKD11. (Received July 21, 1997)

1. 서 론

에너지 자원의 절약 및 활용의 극대화와 아울러 CO₂가스에 기인한 지구 온난화 현상 등 지구환경문제가 최근 큰 과제로 부각되고 있다. 이에 부응하여 자동차업계에서는 연비향상을 위한 일련의 연구를 수행하고 있으며, 그 중에서 가시적이고 또한 효율이 높은 부품소재의 경량화에 큰 관심이 모아지고 있다. 이러한 관점에서 실용금속재료 중에서 중량비강도가 가장 높은 Mg기 복합재료가 주목받고 있다[1].

금속기 복합재료는 기지합금에 섬유상 또는 입자형태의 강화재를 첨가하여 재료의 기계적 성질을 향상시키는 방법이 가장 많이 쓰이고 있는데, 강화재는 그 종류나 양 그리고 크기에 따라 복합재료의 성질을 다양하게 변화시킨다[2-4].

본 연구에서는 입자형태의 SiC로 강화한 Mg복합재료를 기존의 impeller에서의 단점을 보완하여 자체적으로 개발한 교반관법[5]에 의해 제조하였으며, 제조된 복합재료에 형상부여를 위한 반용융 성형가공[6]을

행하였다. 반용융 성형가공된 시료에 관해서는 connecting-rod, cylinder block liner와 같은 자동차 부품에 적용시 요구되는 피로 및 내마모특성을 평가하였다.

2. 실험방법

본 실험에서는 기지금속으로 대표적 주조용 Mg합금인 AZ91HP에, 평균 입자크기 7, 20, 50 μm인 SiC를 각각 10, 20, 30 mass% 첨가한 복합재료를 사용하였다. Mg합금은 스웨덴의 Norsk Hydro社에서 구입하였으며 강화상은 일본 東海 Carbon社에서 제조된 aspect ratio 3이하인 SiC입자를 사용하였다. 기지합금인 AZ91HP의 화학성분과 SiCp의 물성치는 Table 1과 2와 같다.

SiCp/AZ91HP Mg복합재료의 제조는 U자형의 넓은

Table 1. Chemical composition of AZ91HP (mass%)

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
8.8	0.7	0.22	0.007	0.002	0.001	0.001	bal.

*성균관대학교 금속공학과 (Dept. of Metallurgical Eng., Sungkyunkwan Univ.)

†현, 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 (Applied superconductivity project team. KERI)

**성균관대학교 기계공학과 (Dept. of Mechanical Eng., Sungkyunkwan Univ.)

Table 2. Physical properties of AZ91HP and SiCp

Material	AZ91HP	SiCp
Density (g/cm ³ , at 20°C)	1.81	3.271
Thermal conductivity (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹ , at 20°C)	51.2-56.2	83.7
Thermal expansion (1/°C×10 ⁻⁶ , at 20-200°C)	27.2-27.3	4.2
Melting point (°C)	liquidus 602.2 solidus 444.6	2500

Table 3. Condition of fabrication of SiCp/AZ91HP Mg composite by stir-cylinder method

Matrix	AZ91HP Mg alloy
Reinforcement	SiC particulate (7, 20, 50 μm)
Fraction of SiCp	10, 20, 30 mass%
Additional rate	7 g/min
Temperature	650°C
Atmosphere	SF ₆ +CO ₂ , N ₂
Stirring rate	800, 1000 rpm

표면적과 안정한 용탕표면을 유지하여 강화상 입자의 양호한 젖음을 도모하며, 입자뭉침이나 기공을 제거하고, 용탕발화의 위험 및 난류를 방지할 수 있는 공정한 교반관법을 이용하였다. 복합재료 제조조건은 Table 3에 정리하여 나타내었다. 제조한 복합재료의 성형을 위하여 2차 가공으로 반응용 가압성형법을 이용하였는데, 가압성형시 가압력은 130 kgf/cm², 가압

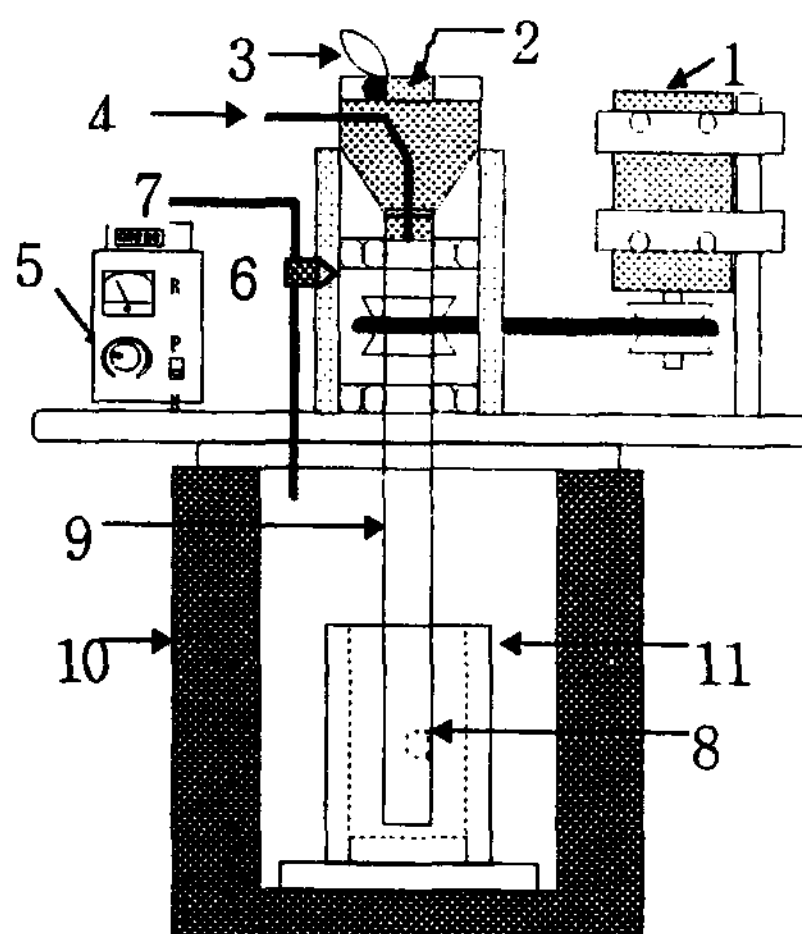


Fig. 1. Schematic diagram of stir-cylinder apparatus. (1) motor (2) SiCp (3) filter (4) N₂ gas (5) controller (6) rpm sensor (7) SF₆+CO₂ gas (8) stirrer (9) stir-cylinder (10) electric furnace (11) crucible



Fig. 2. Apparatus of semi-liquid forming machine.

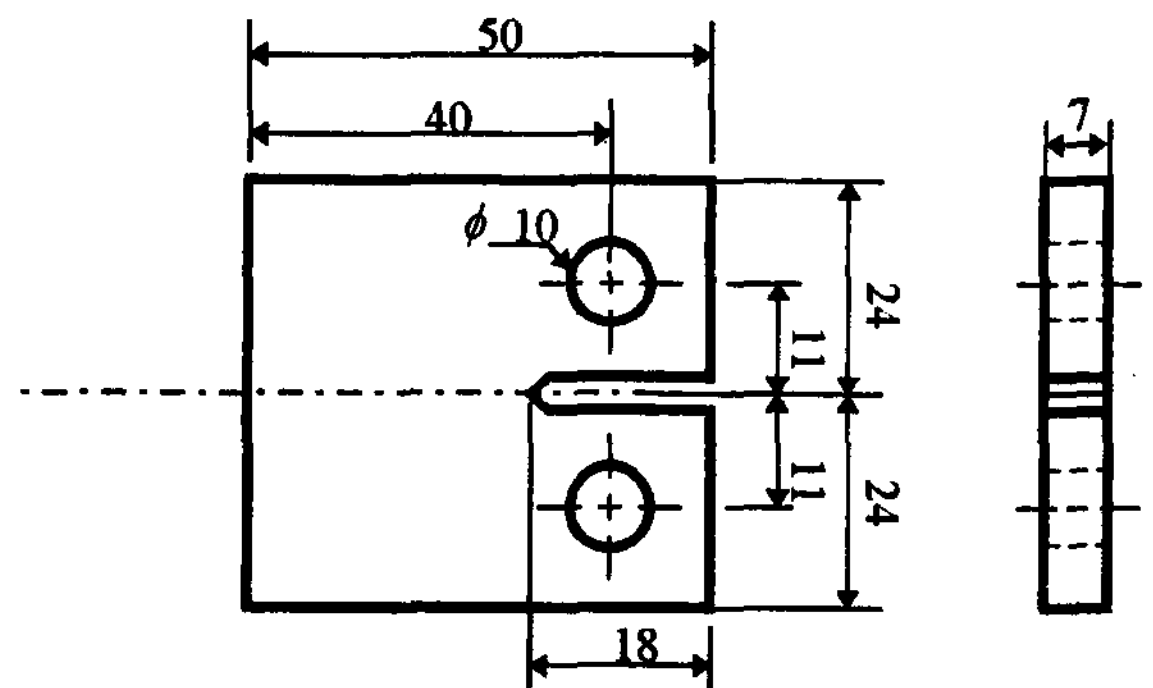


Fig. 3. Geometry of compact tension fatigue specimen.

속도는 0.5 m/s로 하였으며 금형에 열온도를 200°C로 하여 액상율이 0.5인 온도에서 실험을 행하였다. Fig. 1과 2는 각각 교반관법과 반응용 가압성형을 위한 장치도이다.

피로시험은 일본 Saginomiya사의 제품으로, 하중을 ±1 kg내로 조정할 수 있는 10ton 용량의 dynamic servo testing machine을 사용하였고 ASTM standard E 647-93에 제시된 ΔP일정 피로시험법에 따라 수행하였으며 피로시험 시편의 형상은 Fig. 3에, 실험 조건은 Table 4에 나타내었다.

Cycle진행에 따른 피로 균열길이 측정은 50배 배율,

Table 4. Conditions of fatigue test in semi-liquid SiCp/AZ 91HP Mg composites

	conditions
Control Mode	load control
Frequency	20 Hz
Load Ratio	0.1
Environment	laboratory air
Temperature	room temp.

1/100 mm의 정밀도를 갖는 이동식 현미경을 사용하였다.

crack전파시편은 피로시험을 수행한 후의 피로시편에서 채취하였다. 검사는 표준절차에 따라 mouting, grinding, polishing을 거친 후 부식을 하지 않은 상태에서 Nikon inverted micriscope를 사용하여 기지합금과 강화재를 관찰하며 사진 촬영을 실시하였다.

마모시험은 大越식 마모시험기를 이용하였으며 시험 전에 시편과 상대제를 emerypaper #800으로 연마 후 마모하중 50N, 마모거리 1000 m, 마모속도 1 m/s, 물윤활 분위기에서 실험을 행하였다. 상대제는 피스톤링 부위에 적용되고 있는 SKD11(직경40 mm, 두께 3.2 mm)을 사용하였다. 내마모성은 비마모량(specific wear:W)으로 나타내었으며 비마모량은 다음의 식으로부터 구하였다.

$$W = \frac{Bb^3}{8rPl}(\text{mm}^3/\text{Nm})$$

- B: rotor의 두께
- r: rotor반경(mm)
- b: 마모흔의 길이(mm)
- P: 시험하중(N)
- l: 마모거리(m)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

반응용 성형가공한 기지합금의 내부는 Fig. 4와 같

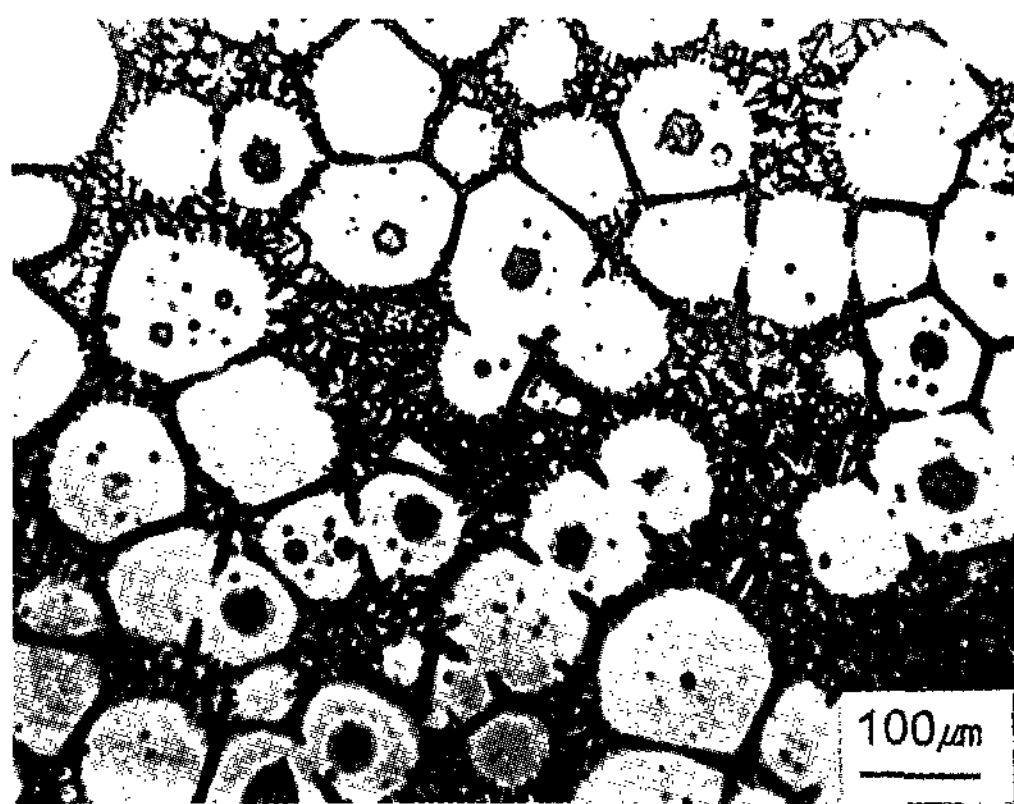


Fig. 4. Optical micrograph of semi-liquid formed AZ91HP mg alloy.

이 구형의 α상으로 이루어진 전형적인 thixotropic microstructure를 나타내고 있다. 또한 액상률 0.5에서의 반응용 가압성형한 복합재료의 강화재 크기와 첨가량 변화에 따른 미세조직을 Fig. 5에 제시하였다. 모든 시편의 미세조직에는 기지합금 중 α상 고상부가 구형으로 존재하고 있으며, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 α상 주변에 SiC 강화상이 Mg기지합금과 좋은 젖음성을 가지고 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다. Image Analyzer를 이용하여 각 조건에 대한 기지고상 크기를 비교한 결과, 강화상 입도가 7 μm인 경우 150 μm, 50 μm인 경우에는 약 80 μm로 나타났다. 아울러, 강화상의 크기가 미세할수록, 첨가량이 증가할수록, α상 조대화 억제작용이 인정된다.

3.2 복합재료의 피로시험

3.2.1 강화재의 무게분율 변화

Fig. 7은 입자크기가 7 μm로 일정한 경우, 무게분율을 10 mass%, 20 mass% 그리고 30 mass%로 구별하여, 재료내 강화재 양의 변화가 피로균열 전파속도에 어떠한 영향을 미치는가를 보여주고 있다.

Fig. 7의 결과를 살펴보면, 기울기가 일정한 제2구간에서는 강화재 SiC의 무게분율이 10 mass%인 복합재료의 피로 균열전파속도가 가장 빠르게 나타났으며, 20 mass% 그리고 30 mass%의 순서로 피로균열 전파속도가 늦어지고 있다. 실제로 ΔK값이 약 5 MPa인 경우 무게분율 10 mass% 시료의 da/dN값은 약 1.6 × 10⁻⁴ mm/Cycle이고 20 mass%인 경우 6.1 × 10⁻⁵ mm/Cycle, 30 mass%인 경우 4.9 × 10⁻⁵ mm/Cycle로써 이는 10 mass%SiC입자가 첨가된 복합재료의 균열전파속도는 20 mass%의 약 2.4배, 30 mass%의 약 3.1배에 해당하는 빠른 속도임을 나타내고 있다. 이러한 경향은 피로균열의 안정성장거동이 다음과 같은 균열성장거동법칙을 따르며 이때 대수를 취하면 m은 기울기가 되며 이러한 기울기의 변화로 인하여 피로균열 전파속도의 차이가 생긴다.

$$da/dN = -C(\Delta K)^m$$

반면, ΔK값이 8-9 MPa이상에서는 정반대로 30 mass%SiC입자가 첨가된 경우가 가장 빠른 균열성장속도를 나타내었으며 이때 최대ΔK에서 안정균열성장영역을 지나 파단에 이르는 K_{1c}에 가까운 기울기를 나타내었다. 그리고 첨가량이 증가할수록 K_{1c}값이 감소

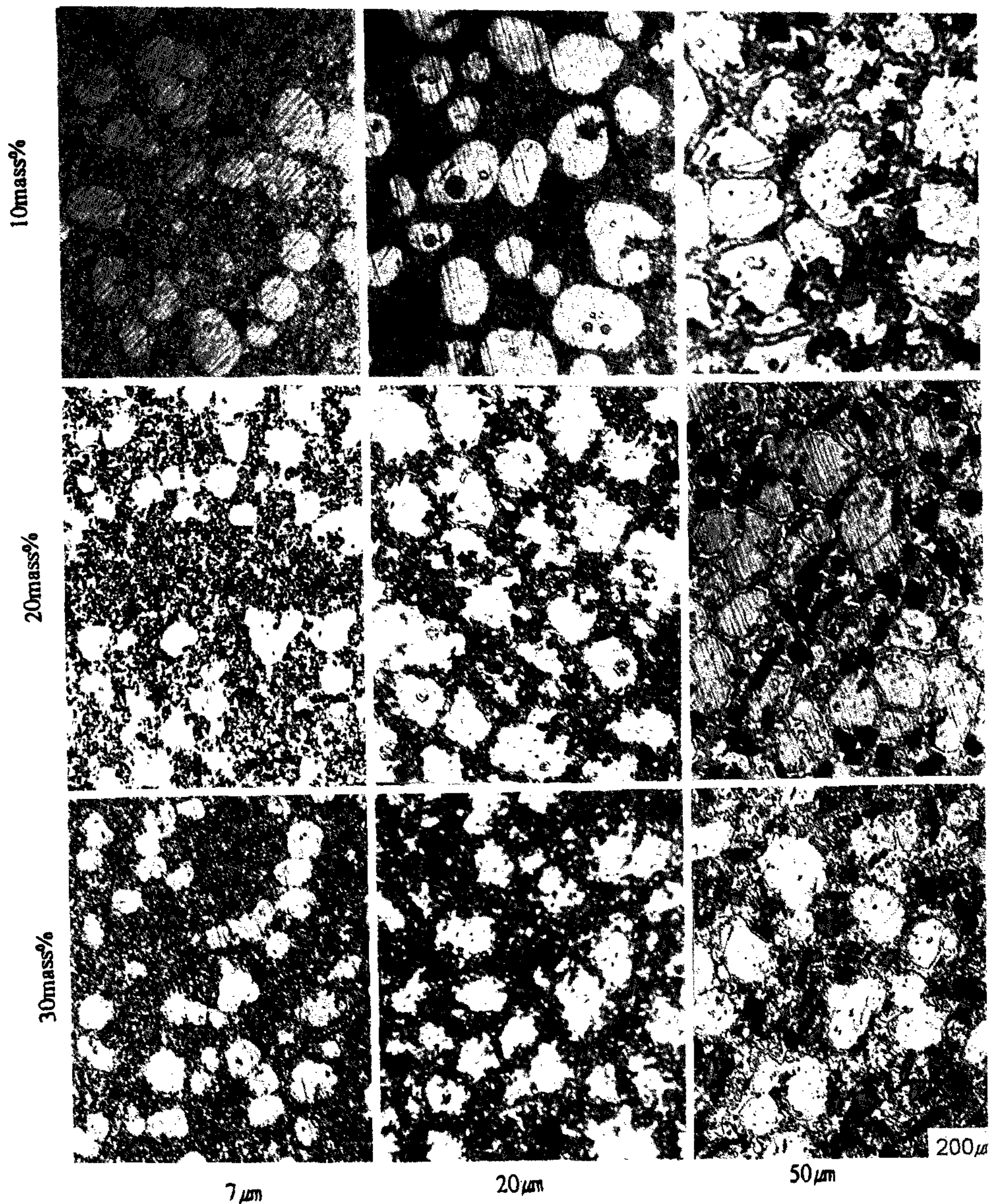


Fig. 5. Optical micrograph of semi-liquid formed SiCp/AZ91HP Mg composites ($f_L=0.5$).

함을 예측할 수 있었다[7].

3.2.2 강화재의 입도변화

Fig. 8은 강화재의 각 mass%별로 강화재의 입자크기가 피로균열에 미치는 영향을 조사한 실험결과를 보여주고 있다.

우선 10 mass%와 20 mass%에서의 결과를 살펴보면, 일정한 강화재의 무게분율하에서는 강화재의 크기가 클수록 피로균열 전파속도가 더 빠르게 나타났

다. 이것은 동일 응력하에서 강화재의 크기가 증가하면, SiC강화재와 기지와의 전체 표면적이 감소하며, 단위계면의 면적당 가해지는 응력이 커지기 때문에, SiC와 기지계면의 분리나, SiC입자의 파괴가 일어나기 쉽기 때문이다. 실제로 강화재의 크기가 20 μm와 50 μm의 실험에서는 강화재 자체의 파괴(Fig. 9)나 계면분리(Fig. 10)에 의하여 여러 개의 작은 균열이 생성 및 전파되기 때문에 실제균열의 성장을 관측하기에

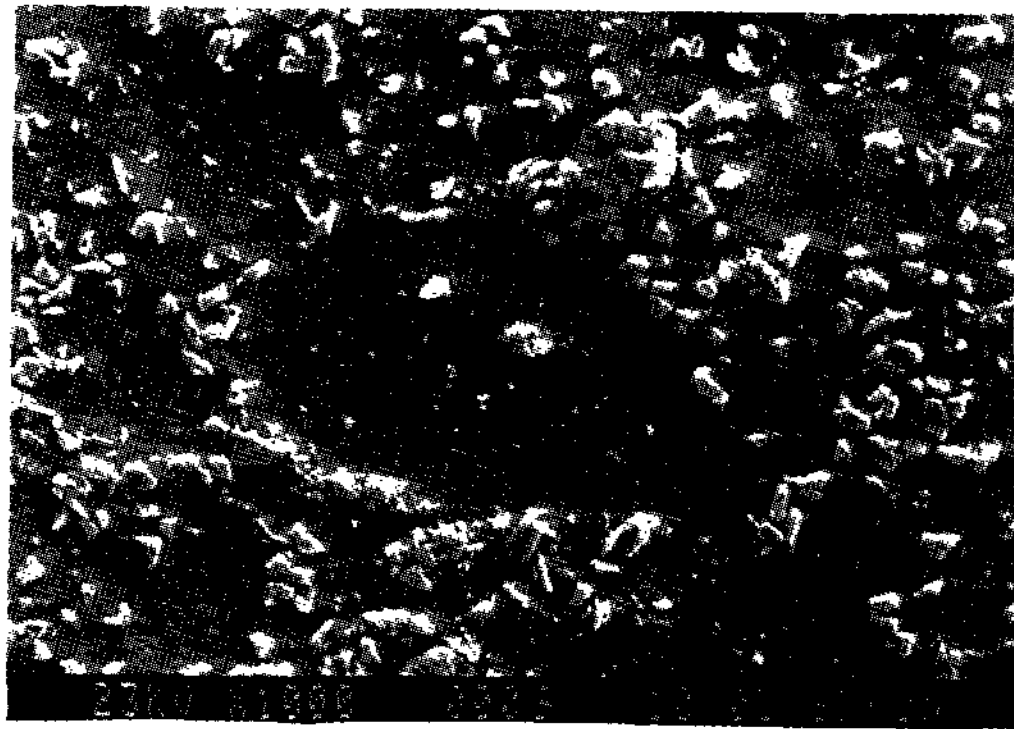


Fig. 6. SEM micrograph of semi-liquid formed 7 μm-20mass%SiCp/AZ91HP Mg composites.

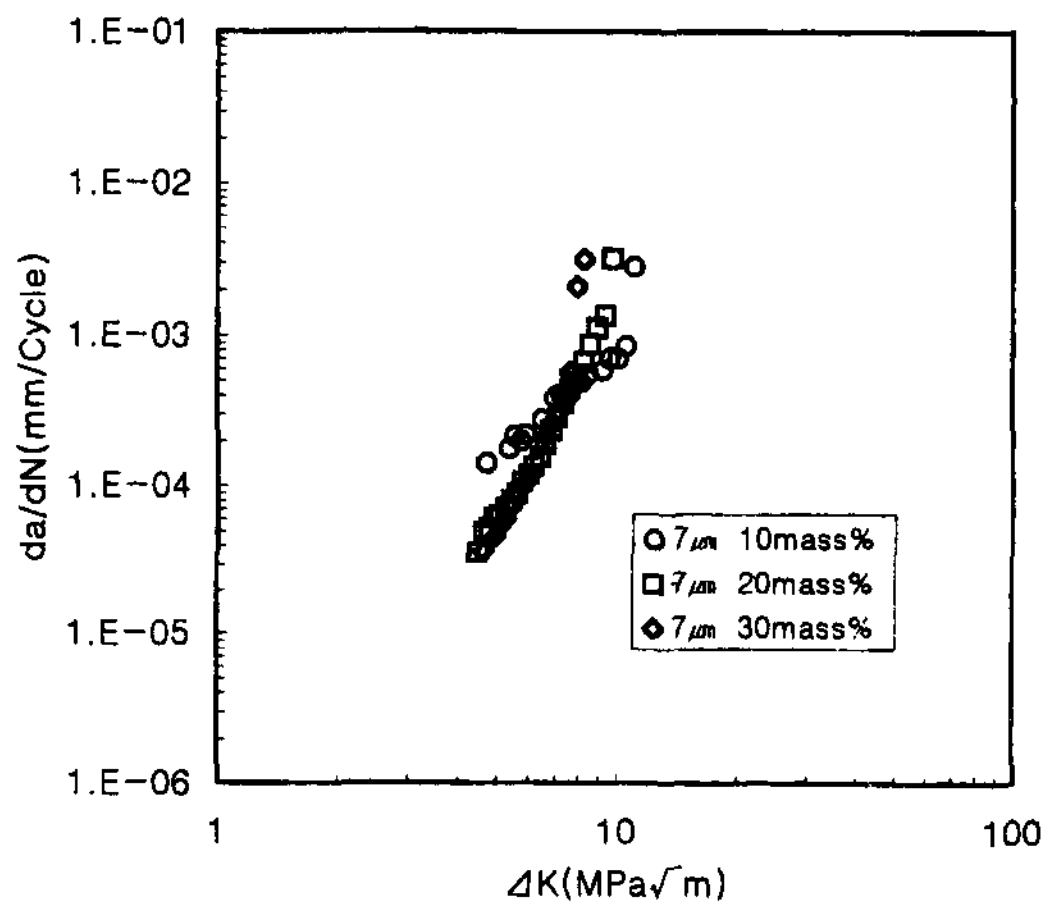


Fig. 7. da/dN vs. ΔK curve of 7 μm SiCp/AZ91HP Mg composites.

어려움이 있었다. 그러나, 강화재의 무게분율이 30 mass%에서의 실험에서는 7 μm시편의 균열전파속도가 20 μm시편의 그것보다 더 빠르게 나타났다. 이는 30 mass%의 경우 강화재의 고른 분포가 실제적으로 어렵고, 20 μm~30 mass% 시편에 비해 제조상에서의 뭉침현상과 같은 결함이 훨씬 많은 이유로 균열전파속도가 빨라진 것으로 사료된다[8].

3.2.3 균열전파 경로

복합재료의 균열의 성장은 주로 SiC가 밀집된 부위를 따라 진행하였다. Fig. 11은 Mg고상 지역을 우회하며 Martensen의 연구[9]에서 보여지듯이 강화재가 밀집된 지역을 따라 균열이 진행하고 있음을 보여준다.

일반적으로 복합재료내에서의 균열 성장과정은 다음과 같다. 즉, 균열이 진전하면서 강화재인 SiC를 만

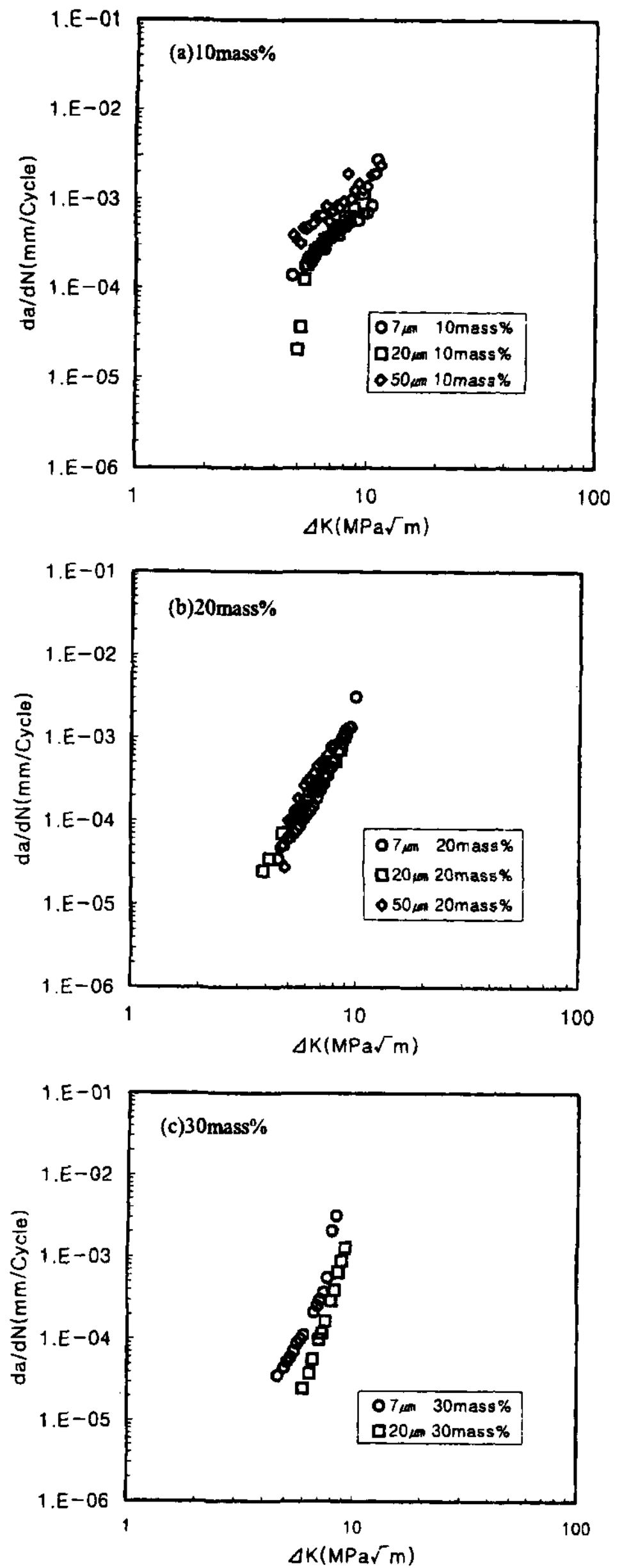


Fig. 8. da/dN vs. ΔK curve of SiCp/AZ91HP Mg composites with variation of SiCp contents.

나면 균열은 일단 멈추게 된다. 그리고, 균열 선단부분의 큰 응력장하에서 우선 취성이 큰 SiC강화재가 파괴되거나 Mg기지와의 경계면이 파괴되고 이로 인해 균열이 계속 진행되는 것으로 관찰되었다. 이는 Shinji Kumai의 연구[10]와 같은 결과이다.

균열성장의 관찰결과로부터 균열은 크게 2가지 방

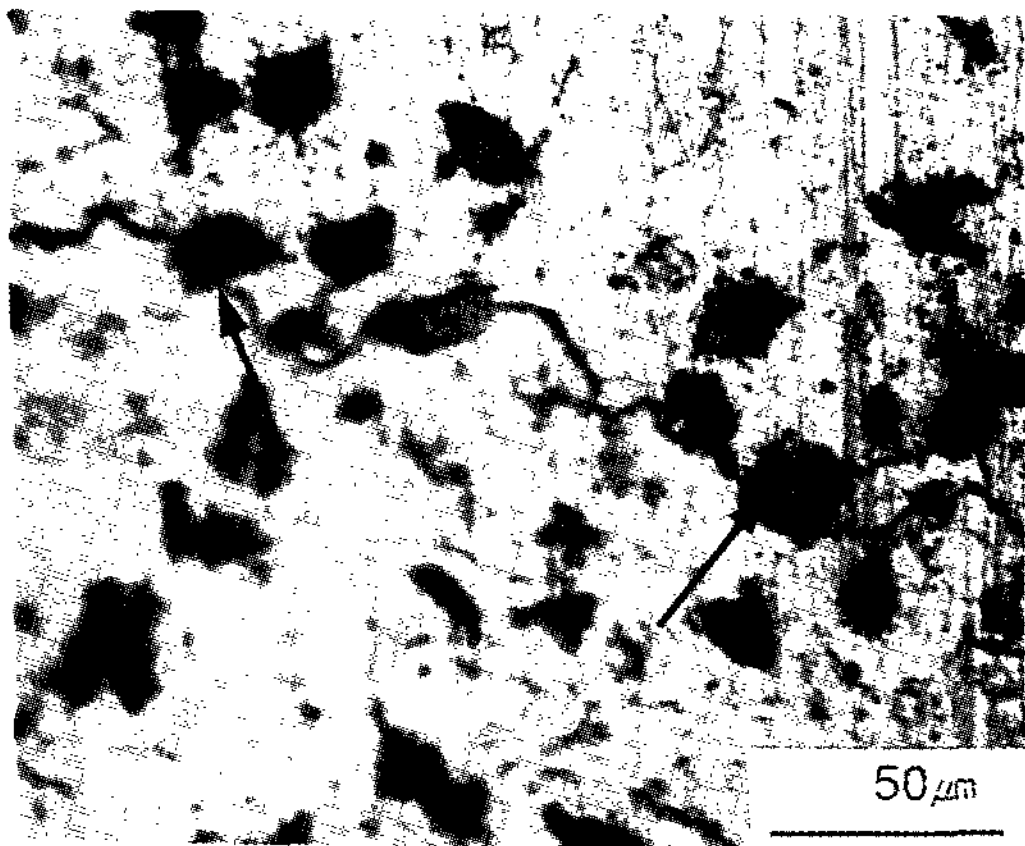


Fig. 9. Optical micrograph of crack propagation with fracture of SiCp in 20 μm~20 mass% SiC/AZ91HP Mg composites.

식으로 진행하고 있음을 알 수 있었다. 즉, SiC강화재의 파괴에 의한 균열과 SiC와 기지금속 경계부의 결합이 파괴되어서 균열이 진전하는 2가지로 관찰되었다. SiC강화재의 파괴에 의한 균열진전모습은 Fig. 9에, 그리고 SiC와 기지금속 경계부의 결합을 파괴시키며 진전하는 균열진전모습은 Fig. 10에 나타내었다. 이러한 현상은 큰 강화재인 50 μm에서 특히 심하게 나타나는데 진행 중인 균열(주균열)외의 새로운 균열(제2균열)을 형성하여 주균열과 합치거나 어느 정도까지 독자적으로 진전하는 현상을 보였다. 이러한 제2균열의 성장모습을 Fig. 12에 나타내었다.

이상의 결과를 요약하면, 상대적으로 7, 20 μm의 강

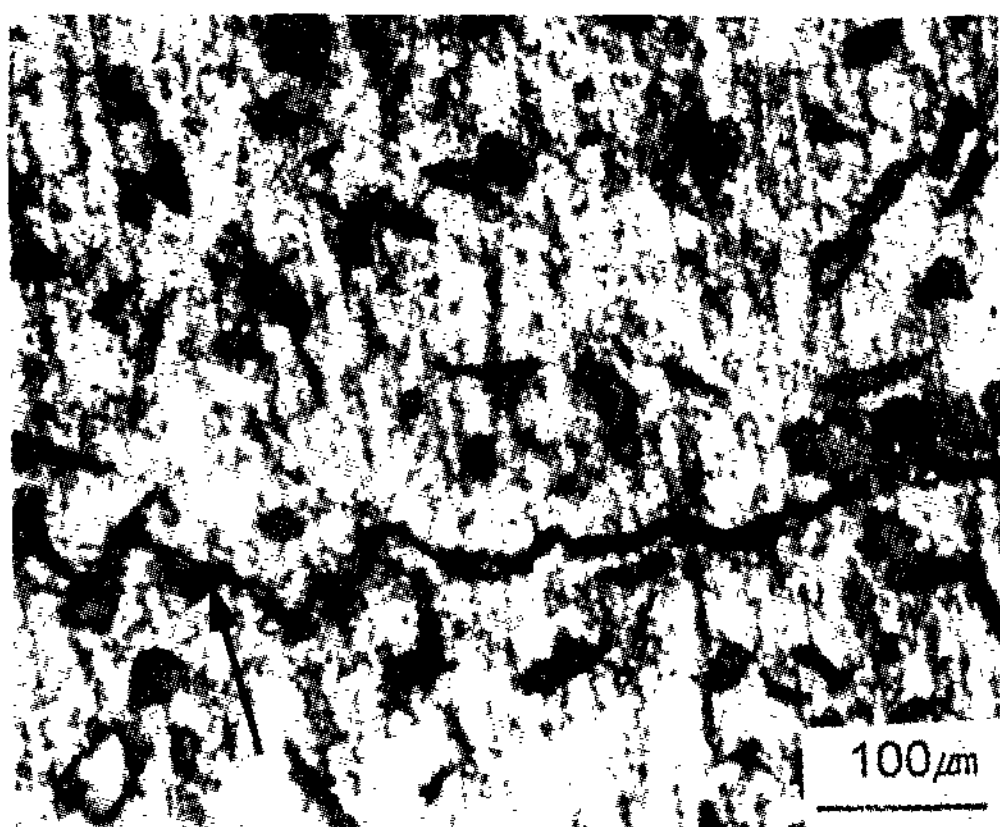


Fig. 10. Optical micrograph of crack propagation with fracture of interface of SiCp and matrix in 50 μm~20 mass% SiCp/AZ91HP Mg composites.

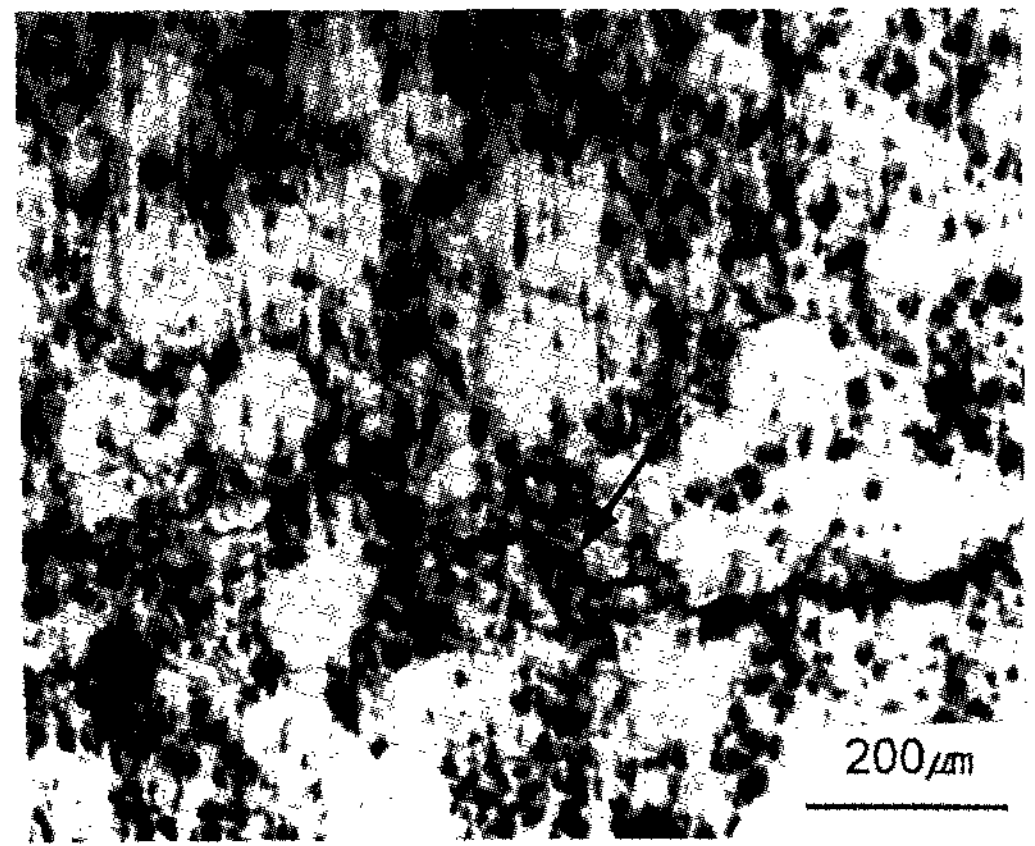


Fig. 11. Optical micrograph of crack propagation through the high density area of SiCp in 20 μm~10 mass% SiCp/AZ91HP Mg composites.

화재는 균열의 성장을 늦추는 역할을 하게 되었고, 50 μm의 경우 강화재는 이보다 작은 강화재와는 달리 강화재와 기지의 경계면이 균열의 핵이나 매개체 역할을 하여 균열성장을 빠르게 하는 것으로 나타났다.

3.3 마모시험결과

Fig. 13은 SiC 첨가량 및 크기에 따른 비마모량을 나타낸 것으로, 50 μm SiC입자를 30 mass%첨가한 경우 내마모성은 피스톤링으로 사용되고 있는 SKD11과 거의 동등한 값을 가진다.

마모시 SiC입자는 기지금속보다 내마모성이 월등하여 기지금속이 먼저 마모되므로 SiC입자가 기지금속을 완충하여 지속적인 마모를 억제하여, 첨가량이 증가하

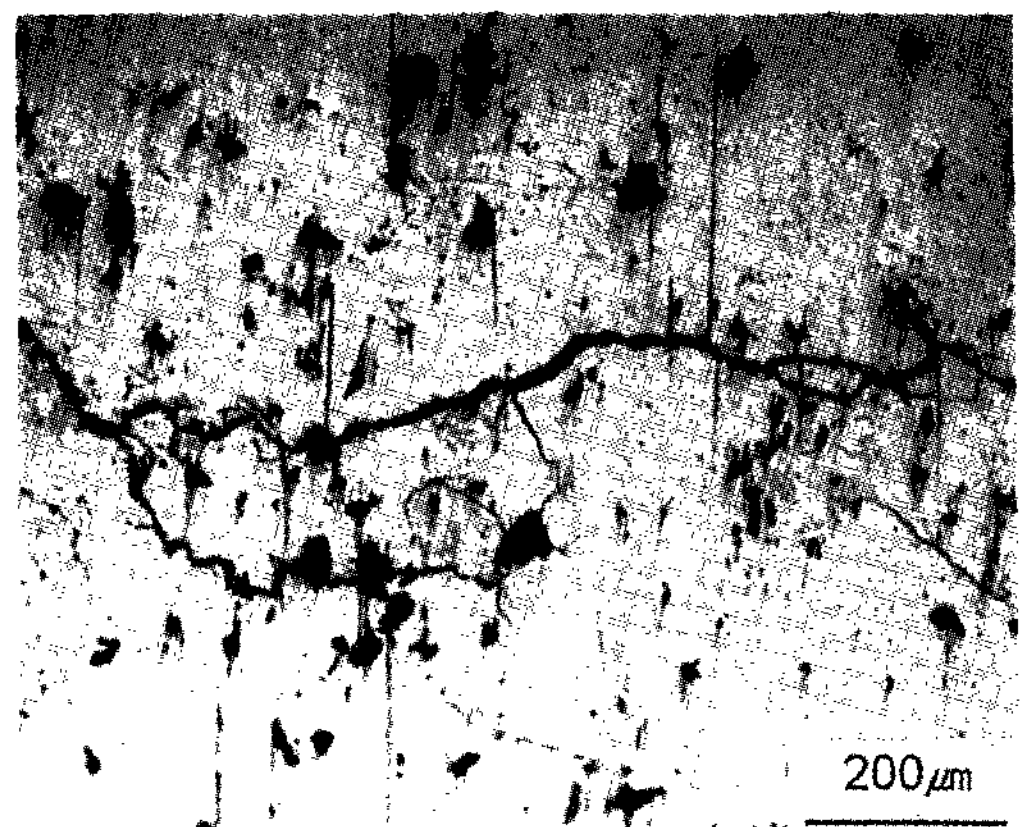


Fig. 12. Optical micrograph of secondary crack propagation in 20 μm~10wt% SiCp/AZ91HP Mg composites.

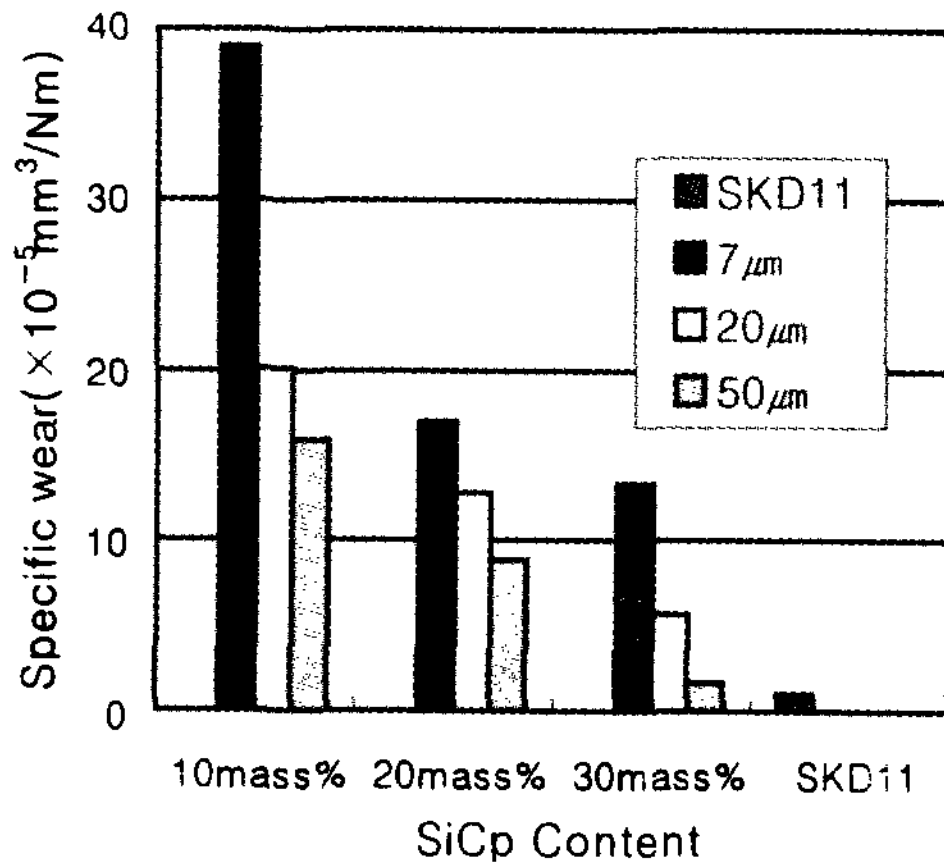


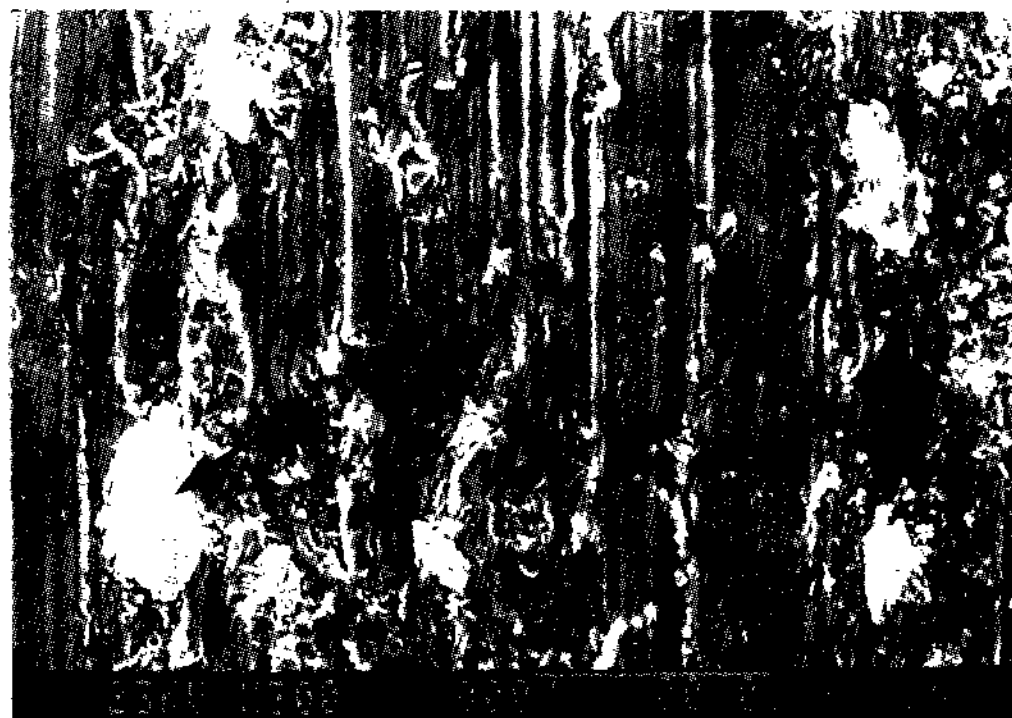
Fig. 13. Specific wear loss of semi-liquid formed.

면 완충영역의 증가로 인해 내마모특성은 향상한다. 크기영향을 고찰하면 7 µm SiC입자가 첨가된 경우

SiCp/AZ91HP Mg composites



(a) 7 µm



(b) 50 µm

Fig. 14. Wear surface of semi-liquid formed SiCp/AZ91HP Mg composites with variation of SiCp size.

마모시험시 상대체의 회전운동에 의하여 전단응력이 가해지면 완전히 마모되지 않은 상태에서 입자의 계면분리에 의해 이탈되어 나가기 용이하고, 상대적으로 20, 50 µm SiC입자가 첨가된 경우 입자가 이탈되어 나가기 어렵다[11]. 이러한 경향을 Fig. 14에 나타냈다. 화살표로 표시한 바와 같이 7 µm SiC입자의 경우 입자가 이탈되어 나간 부분이 다수 보였으며, 50 µm SiC입자의 경우는 마모 표면에 돌출되어 기지금속을 보호할 수 있었다.

4. 결 론

대표적 주조용 Mg합금 AZ91HP에 SiC강화재를 첨가한 복합재료를 반응용 성형가공한 후, 피로 및 내마모 특성평가 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 교반관법에 의해 제조한 복합재료를 2차 가공인 반응용 성형가공한 SiCp/AZ91HP Mg 복합재료는 전형적인 thixotropic microstructure를 가지며 α상의 미세화는 SiC입자크기와 첨가량에 의존하며, 강화재와 기지합금의 좋은 젖음성을 나타내고 있다.
- 2) 피로시험 결과 SiC입자 첨가량이 증가함에 따라 피로균열 전파속도의 차이를 나타내어 임계값을 기준으로 균열전파속도의 차이를 보였으며, 동일한 양에서 강화재 크기의 증가는 피로균열 전파속도를 증가시켰다.
- 3) 균열의 진전은 일반적으로 강화재의 양이 증가하면 방해 받는다. 또 균열은 강화재와 기지합금의 경계의 결함면을 파괴하거나 강화재 자체를 파괴하며 진전하였다. 이러한 현상은 큰 강화재에서 더욱 두드러지게 나타났다.
- 4) 내마모성은 SiC입자 크기와 첨가량이 증가할수록 현저히 향상되었으며 30mass% 50 µm SiC입자가 첨가된 경우 SKD11에 거의 근접한 비마모량을 나타내었으며 입자의 크기가 클수록 기지금속의 마모를 보호하는 경향이 크며, 입자크기가 작으면 마모시 강화재 이탈경향이 우세하였다.

후 기

본 연구는 에너지 절약기술 개발사업과 산업설비 안전성평가 연구센터(SAFE)의 지원에 의해 수행되었

으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 윤여창, 최정철, 박익민, 남태운 : 주조, 12(1992) 29.
 [2] S. J. Swindlehurst, I. W. Hall : J. Mat. Sci., 29(1994) 1075.
 [3] N. V. Ravikumar, E. S. Dwarakadasa, : J. Mat. Sci., 29(1994)1533.
 [4] R. H. Dauskardt, B. J. Dalgleish, D. Yao, R. O. Ritchie : J. Mat. Sci., 28(1993) 3258.
 [5] 이경태, 하홍수, 김영직 : 대한금속학회지, 43(1996) 1651.
 [6] 김달식, 김길수, 김영직 : 주조, 16(1996) 205.
 [7] M. J. Hadianfard *et al.* : Fatigue. Frac. Eng. Mat. Struc., 17(1994) 253.
 [8] J. K. Shang, W. Yu, R. O. Ritchie : Mat. Sci. Eng., A 102(1988) 181.
 [9] A. Mortensen : Fabrication of Particulates Reinforced Metal matrix Composites ed. by J. Masounave and F. G. Hamel ASM Ohio (1990) 217.
 [10] Shinji Kumai, Julia E. King, John F. Knott : Fatigue. Frac. Eng. Mat. Struc., 13(1990) 551.
 [11] S. V. Prasad, P. K. Rohatgi : JOM, 11(1987) 22.