

|||||||
論 文
 |||||

가스 - 입자 동시주입법에 의한 A356/SiCp 복합재료의 제조 및 기계적 특성

이정무 · 강석봉 · 엄철용 · 임차용[†]

Fabrication and Mechanical Properties of A356/SiCp Manufactured by Gas-Particle Co-injection Method

Jung-Moo Lee, Suk-Bong Kang, Chil-Yong Eum and Cha-Yong Lim[†]

Abstract

Among the many techniques available to synthesis metal matrix composites, liquid phase processing, especially, conventional casting process such as stir-casting process is particularly attractive for their simplicity, economy and flexibility. In the present study, A356/20%SiCp composites were fabricated by gas-particle co-injection method. The gas-particle co-injection method is a modified stir-casting method and the corporation of particle could be improved by acceleration of particles due to rotation of impeller and gas purging. The microstructures and mechanical properties such as tensile properties and resistance to wear of fabricated materials were examined. Further, the particle injection mechanism in gas-particle co-injection method was discussed.

(Received December 8, 2000)

1. 서 론

금속기지 복합재료는 경량이며, 고강도, 고강성을 가지고 내마모성과 고온 특성이 우수하기 때문에 자동차 및 항공 소재 분야에 적용 가능성이 높다[1,2].

금속기지 복합재료는 여러 가지의 다양한 방법에 의해 제조되고 있는데, 이들 중 대표적인 제조 공정인 분말야금법과 주조법을 비교하여 보면 다음과 같다. 분말야금법은 낮은 제조 온도로 강화재/기지 간의 계면 반응이 적으며 균일한 강화재의 분포를 얻을 수 있는 장점이 있으나 제조 공정이 복잡하고 금속분말 이용으로 제조단가가 높은 단점이 있다. 반면, 주조법은 공정이 단순하고 대량생산이 용이하여 제조단가가 낮으며 near-net shape 성형이 가능한 장점을 가지고 있다.

금속기지 복합재료의 기계적 특성은 기지합금의 조성 및 첨가되는 강화재의 종류와 함께 강화재의 크기와 형상, 부피분율 등에 의해 영향을 받으며 강화재 분포상황에 따라서도 달라진다.

일반적으로 주조법으로 입자강화 복합재료를 제조할 경우, 첨가되는 강화 입자는 기지금속과의 낮은 습윤성으로 인하여 용탕 내에 첨가하기가 용이하지 않을 뿐만 아니라[3] 응고과정에서 강화 입자가 편석됨으로써 복합재료의 기계적 특성을 저하시키는 요인을 제공한다.

금속기지 복합재료를 제조할 때 어려운 점은 용탕에 대한 강화 입자의 습윤성이 낮아 입자가 용탕에 자발적으로 주입되지 않는다는 것이다. 이를 해결하기 위하여 여러 가지 방안이 제시되고 있다.

i) 강화입자 계면에 Cu, Ni등의 금속을 코팅하여 습윤각을 감소시키는 방법[4,5]

ii) 용탕에 Mg, Li과 같은 활성화 원소를 첨가하여 표면에너지를 줄이는 방법[6,7]

iii) 초음파 등을 이용하여 용탕에 진동을 가하거나 [8], 로터를 이용하여 와류를 일으키는 기계적인 교반 방법 등이다.

위에서 제시한 방법 중에서 강화입자에 금속 코팅을

[†]한국기계연구원 재료기술연구부(Department of Materials Engineering Korea Institute of Machinery and Materials)

[†]E-mail : cylim@kmail.kimm.re.kr

하는 방법은 제조 원가를 상승시키게 되며, 입자 주입 후 코팅재로 사용된 원소가 용탕에 불순물로 들어가게 되어 기지의 조성을 변화시키므로 사용에 제한이 따른다. 또한, 용탕에 활성화 원소를 첨가하여 표면에너지를 줄이는 방법은 기지재의 조성을 바꾸게 되어 제조할 수 있는 기지재의 선정에 제약을 가하게 된다.

입자강화 복합재료의 기계적 특성을 저하시키는 하나의 요인으로 작용하는 강화입자의 뭉침 현상은 크게 두 가지 관점에서 고려될 수 있다. 하나는 응고 과정에서 발생하는 것으로 응고시에 생성되는 초정상이 강화입자를 밀어내는 현상(pushing)에 기인하는 것으로 강화입자는 최종적으로 응고되는 수지상정 선단으로 밀려나며 국부적으로 입자의 편석이 유발된다[9]. 또 다른 뭉침의 원인은 강화입자가 가진 특성에 의해 야기되는 것으로, 입자가 상호 흡착하는데 기인하는 것으로 이는 입자의 크기가 작을수록 그 경향이 크다.

입자강화 복합재료 제조시에 야기되는 이상과 같은 문제점을 해결하기 위하여 기존의 stir-casting 방법을 개량하여 가스와 입자를 동시에 용탕 내부로 주입하여 입자의 주입능을 향상시키고 양호한 분포를 가질 수 있는 제조 방법이 개발되었다. 본 연구에서는 가스-입자 동시주입법으로 제조된 소재에 대하여 미세조직 및 기계적 특성을 조사하였으며 이와 더불어 가스-입자 동시 주입법의 주입 기구를 규명하였다.

2. 실험 방법

주조용 알루미늄합금으로 가장 많이 사용되는 Al-Si 계 합금인 A356합금을 기지합금으로 사용하였고 SiC 입자를 강화재로 사용하였다. A356합금은 대한알루미늄(주)에서 제조한 A356.2합금을 사용하였으며 Table 1에 화학 조성을 나타내었다. 기지합금의 액상선을 알아보기 위하여 DTA 열분석을 하였는데, A356합금의 액상선은 614°C이었다. 강화재인 SiC 입자는 Washington Mill사에서 제조된 것으로 평균 입경이 17.3, 9.3 μm인 것을 사용하였으며, 편의상 평균 입경을 20, 10 μm으로 표시하겠다. Table 2에 SiC 입자의 화학조성을 나타내었다. Fig. 1은 SiC 입자를 SEM으로 관찰한 것

Table 1. Chemical composition of the A356 matrix alloy (wt.%).

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Al
0.003	0.364	0.001	6.855	0.118	0.001	0.156	bal.

Table 2. Surface chemical analysis of SiC.

SiC	SiO ₂	Si	Fe	Al	Free C
99.7%	0.15%	0.02%	0.02%	0.02%	0.15%

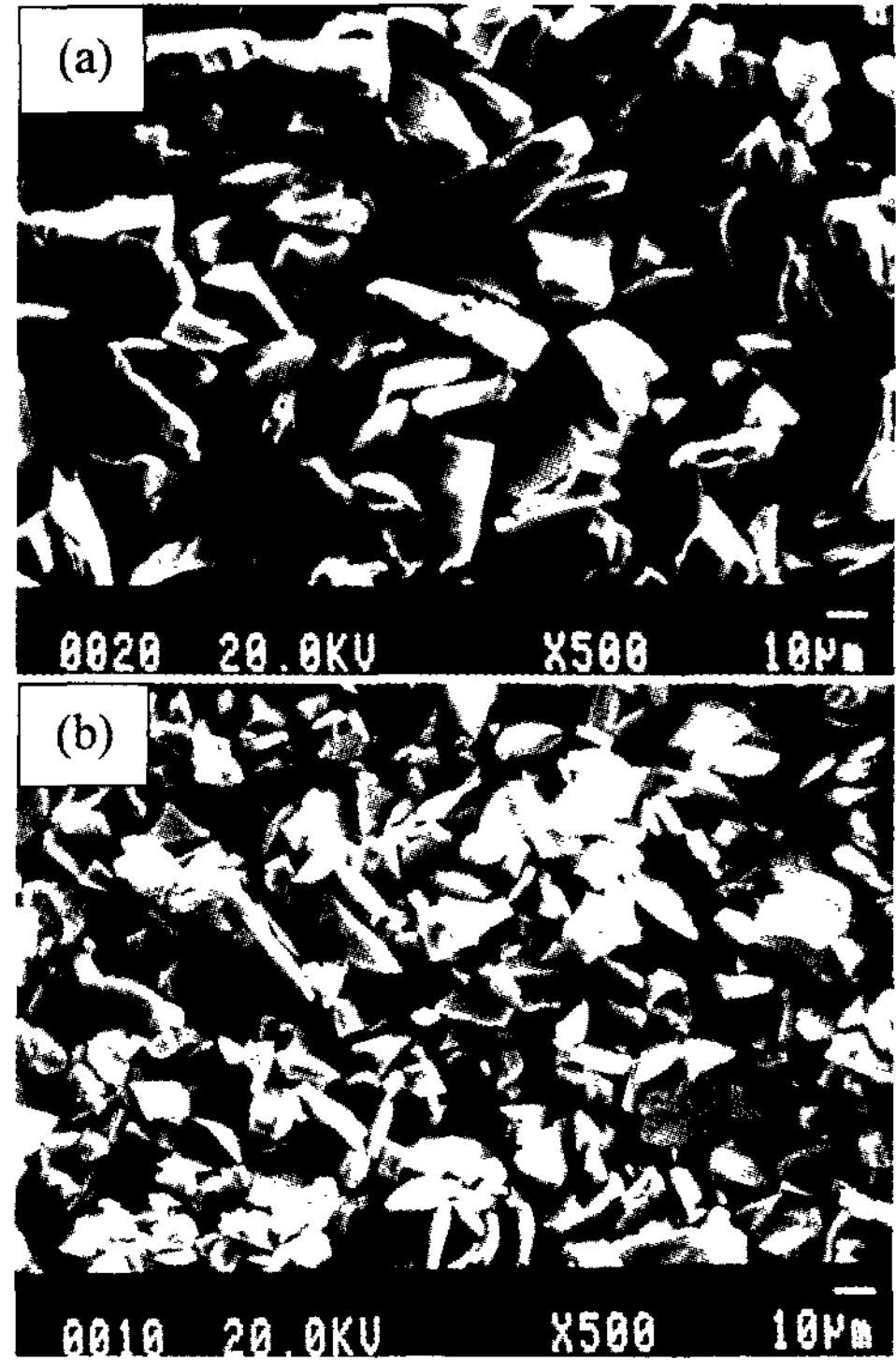


Fig. 1. SEM micrographs of SiC particles (a) 20 μm (b) 10 μm.

으로 입자의 형상은 각형인 것을 알 수 있었으며 X-ray 회절 분석을 통하여 SiC입자들이 β-SiC임을 알 수 있었다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 제조 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 이 장치를 이용하여, 기지합금을 680°C로 완전히 용해한 다음, 표면의 수화물을 제거하고 표면에너지를 증가시키기 위하여 800°C에서 2시간 동안 예열시킨 SiC 입자를 hopper에 장입한 후 흑연봉을 용탕에 주입하여 Ar 가스의 주입과 동시에 SiC 입자를 용탕 내부로 주입하였다. 제조시에 용탕의 온도 및 임펠러의 회전속도는 일정하게 유지하였다. 입자의 주입이 완료되면 용탕을 20분간 안정시킨 다음 직경 80 mm, 길이 250 mm의 금형에 주조하였다.

제조된 주괴를 수직으로 절단하여 조직을 관찰하고, 538°C에서 8시간 동안 용체화처리한 후 154°C에서 5시간동안 시효처리하여 인장시험 및 마모시험을 하였다.

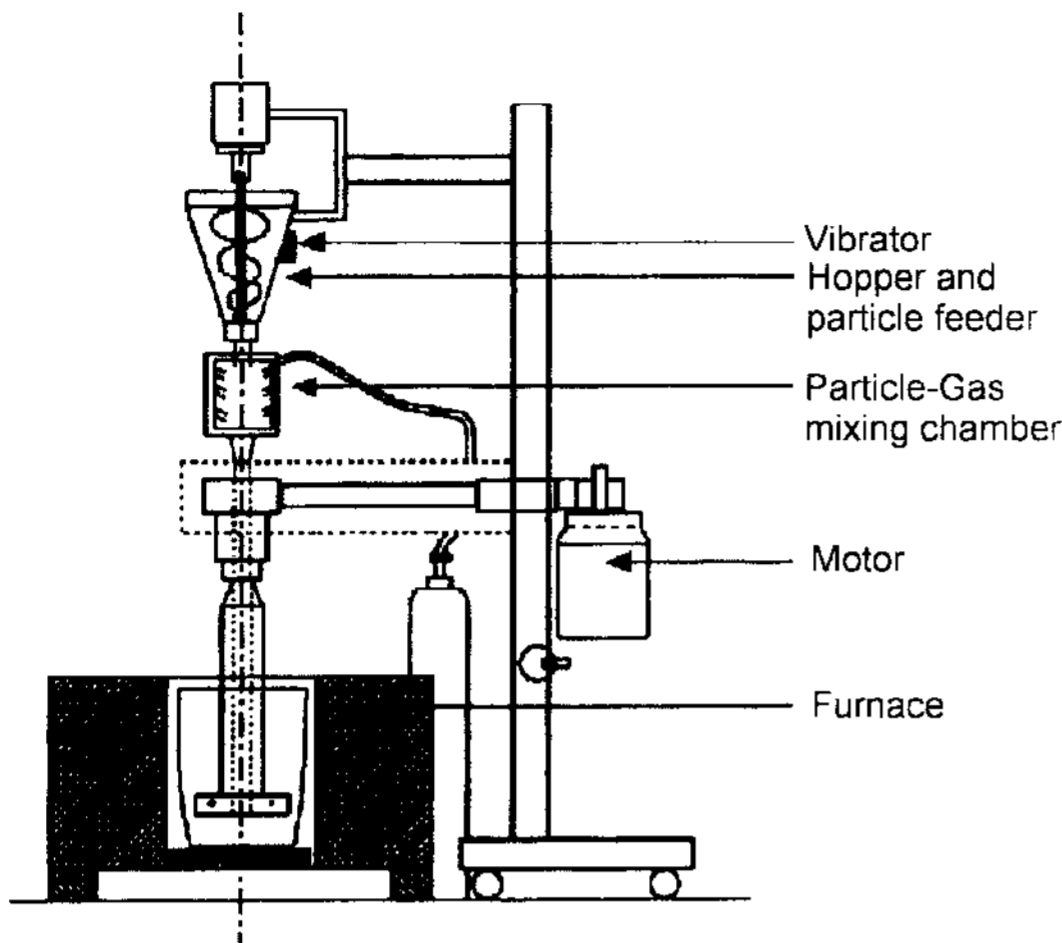


Fig. 2. Schematic drawing of the stir-casting equipment for gas-particle co-injection method.

제조된 소재의 특성을 비교하기 위하여 Duralcan사에서 제조한 F3S.20S (A359/20vol%SiCp)를 [10]가 규정한 채용해 방법에 따라 [10] 제조하여 동일한 열처리를 하고 특성을 분석하였다.

3. 실험 결과

3.1 임펠러 회전속도에 따른 입자의 주입

액상제조법, 특히 stir-casting법으로 금속기지 복합재료를 제조할 경우, 입자의 주입능 및 입자의 분포는 용탕의 교반 방법에 따라 큰 영향을 받게 된다. 또한, 용탕 속으로 가스를 침투시키는 경우 용탕 내에서 발생하는 가스 버블의 크기가 용탕의 교반 방법에 따라 달라지게 된다.

용탕의 교반에 영향을 주는 인자로는 임펠러의 회전 속도, 임펠러의 용탕 내 위치, 임펠러와 용해로의 크기비, 가스 유량 등이 있다 [11]. 본 연구에서는 수모델 실험을 통하여 임펠러의 용탕 내 위치, 임펠러와 용해로의 크기비, 가스 유량 등의 최적 조건을 설정한 다음 임펠러의 회전속도를 변화시키며 제조되는 복합재료의 미세조직을 관찰하였다.

Fig. 3은 임펠러를 250 rpm의 속도로 회전시키며 20 μm의 SiC 입자를 15vol.% 첨가한 미세조직을 보여주는 것으로, 조직내에는 목표로 한 SiC입자의 양보다 훨씬 적은 양의 SiC 입자가 주입된 것을 알 수 있다. 또한, 이와 동일한 회전 속도에서 10 μm의 SiC

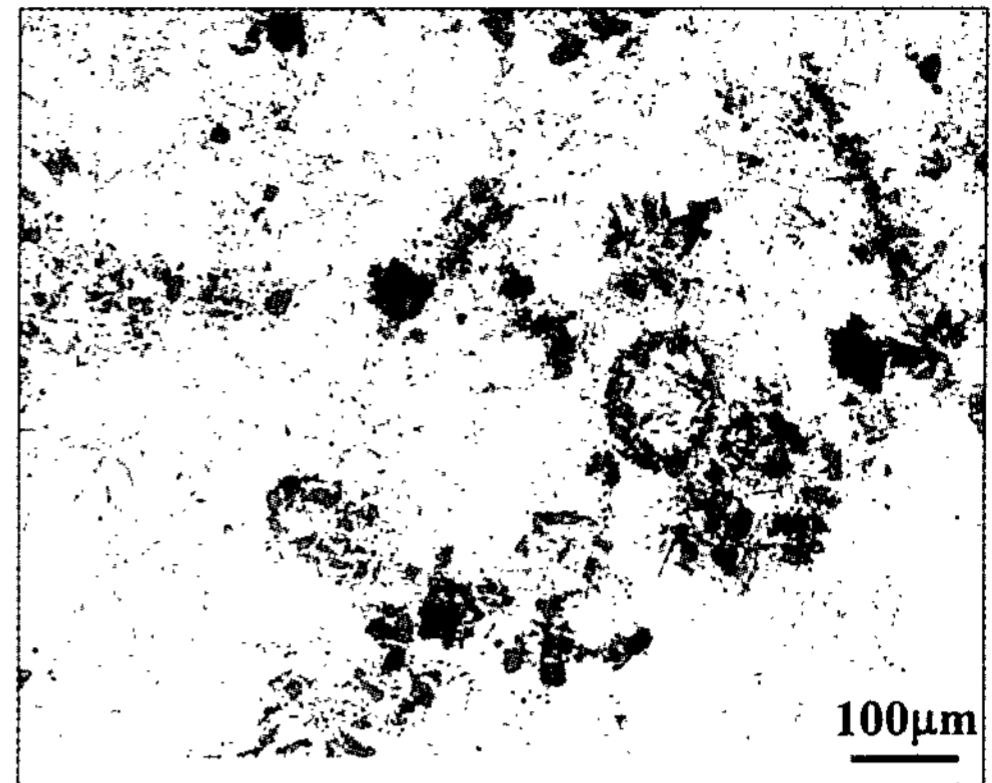


Fig. 3. Optical micrograph of A356/SiCp. The rotation of impeller was maintained at 250 rpm during fabrication.

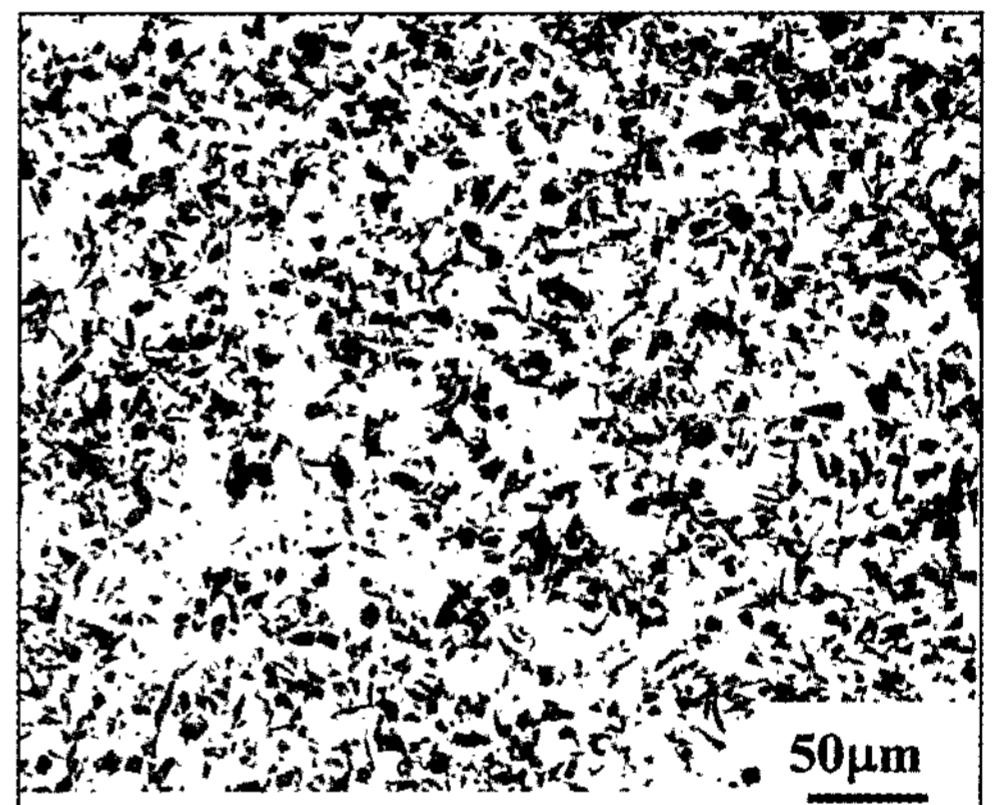


Fig. 4. Optical micrograph of A356/SiCp. The rotation of impeller was maintained at 450 rpm during fabrication.

입자는 전혀 주입이 되지 않고 용탕 밖으로 빠져 나오는 것을 관찰 할 수 있었다.

Fig. 4는 임펠러를 450 rpm의 속도로 회전시키며 10 μm의 SiC 입자를 20vol.% 첨가한 미세조직을 보여주는 것으로, 조직내에는 SiC 입자가 균일하게 분포하는 것을 볼 수 있다. 이 조건에서는 용탕 밖으로 빠져 나오는 SiC 입자의 양은 거의 없었으며, 20 μm 크기의 SiC 입자도 이와 동일한 양상을 보였다.

따라서, 가스-입자 동시주입법으로 제조시에 임펠러의 회전속도는 입자의 주입에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 이는 다음의 고찰에서 자세히 언급하겠다.

3.2 미세조직적 특성

Fig. 5는 가스-입자 동시주입법으로 제조된 소재의 특성을 비교하기 위하여 사용된 Duralcan사의 F30S.20S의 미세조직을 관찰한 것으로, 기지내에 SiC 입자가 균일하게 분포한 것을 알 수 있다.

가스-입자 동시주입법으로 제조된 소재의 부피분율 및 소재 내부의 편석을 조사하기 위하여 제조된 소재의 횡단면 조직에서 길이방향으로 5부위를 무작위로 선정하여 영상 입도 분석을 실시하였다. Fig. 6은 소재의 면적분율을 나타낸 것으로 시험편 부위별로 약간의 차이는 있지만 Duralcan사의 소재는 약 21vol.%이었으며, 제조 소재는 이보다 약간 낮은 19vol.%이었다. SiC 입자의 크기는 Duralcan사의 소재가 약 13.7 μm인데 비하여 제조 소재는 이보다 미세한 9.7 μm이었다.

주조법으로 제조되는 금속기지 복합재료는 용탕 교반으로 인한 와류의 발생이나 수소 취입등으로 인하여 주조시에 기공이 발생하게 된다. 기공의 양은 일반적

으로 강화재의 부피분율에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있다[12]. 특히, stir-casting법으로 제조되는 금속기지 복합재료는 임펠러의 형상이나 위치, 교반속도 등에 따라 주조시에 생성되는 기공의 양이 달라진다. 본 연구에서는 수입소재와 개발소재에 대하여 밀도를 측정하고 이를 바탕으로 기공도를 구하여 소재의 건전성을 비교하여 보았다.

소재의 밀도는 시편부위 중에서 18군데를 무작위로 선정하여 직경 8 mm, 길이 15 mm로 가공한 다음 이를 아르키메데스 원리를 이용하여 측정하였다. Fig. 7은 측정된 밀도값을 비교하여 나타낸 것으로, Duralcan 소재의 밀도가 제조 소재에 비하여 약간 높은 밀도를 갖고 있는 것을 알 수 있으며, 시편 부위별로 편차가 적은 것을 알 수 있었다.

위에서 구한 밀도값을 이용하여 다음의 식으로 소재 내부에 생성되어 있는 기공의 양, V_o 를 구하였다.

$$\rho_{th} = V_p \rho_p + (1 - V_p) \rho_M \quad (1)$$

$$V_o = (\rho_{th} - \rho_{mes}) / \rho_M \quad (2)$$

여기서 ρ_M 은 기지합금인 A356합금의 밀도인 2.685를 사용하였고 이론 밀도, ρ_{th} 는 앞에서의 부피분율 측정결과를 바탕으로 식(1)에 따라 구하였으며, V_p 와 ρ_p 는 각각 강화재의 부피분율과 밀도이다.

Fig. 8은 식 (2)에 따라 구한 기공도를 나타낸 것이다. Duralcan 재용해 소재의 경우 기공율이 1.5% 가량으로 낮은 반면 개발소재는 4.5% 정도로 높은 값을 가짐을 알 수 있었다. 제조 소재와 Duralcan 소재의 기공율은 공히 1% 이상으로 높은 값을 가지는데, 이로

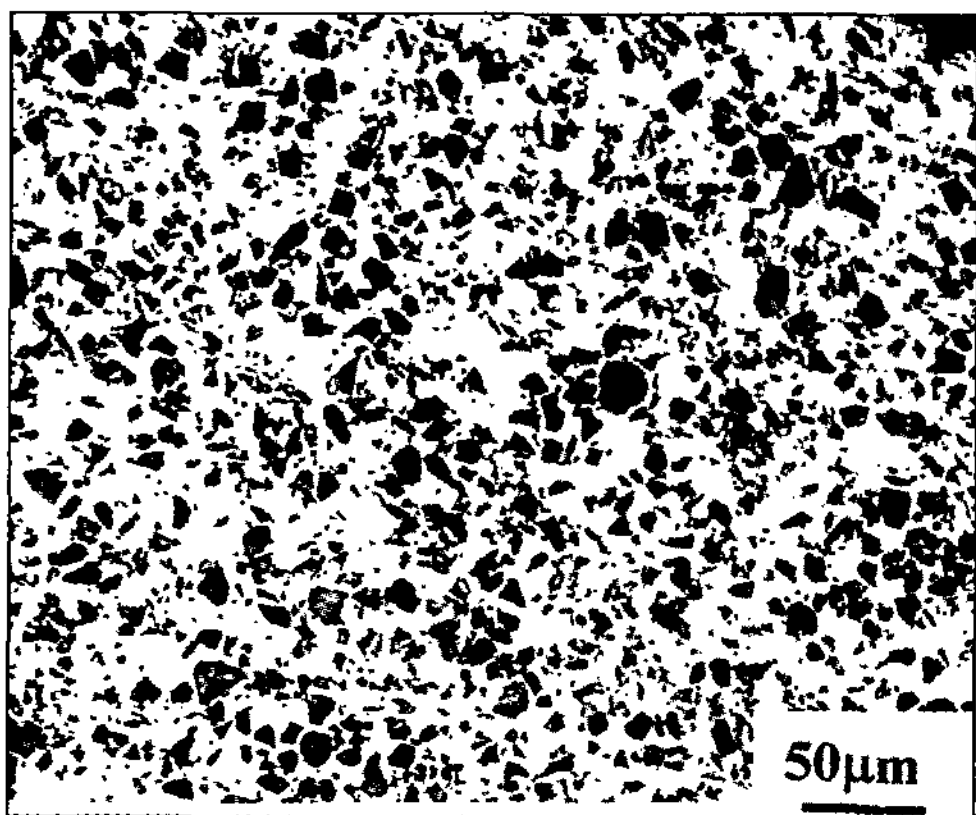


Fig. 5. Optical micrograph of F30S.20S.

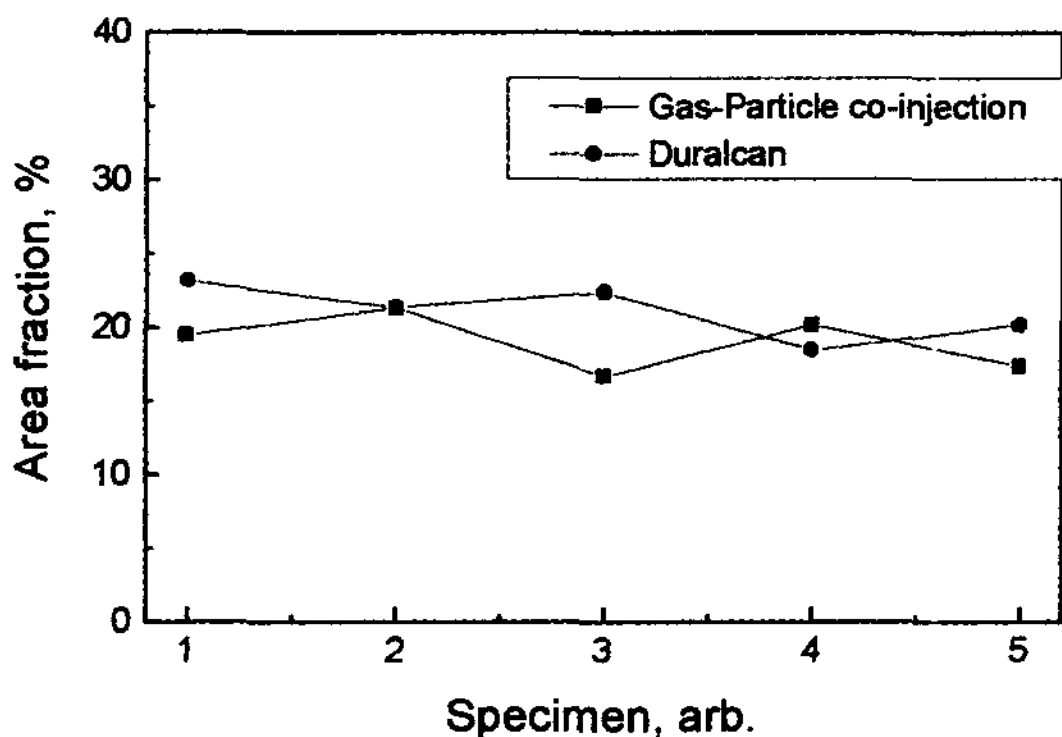


Fig. 6. Comparison of area fraction of SiC particles in as-cast A356/SiCp.

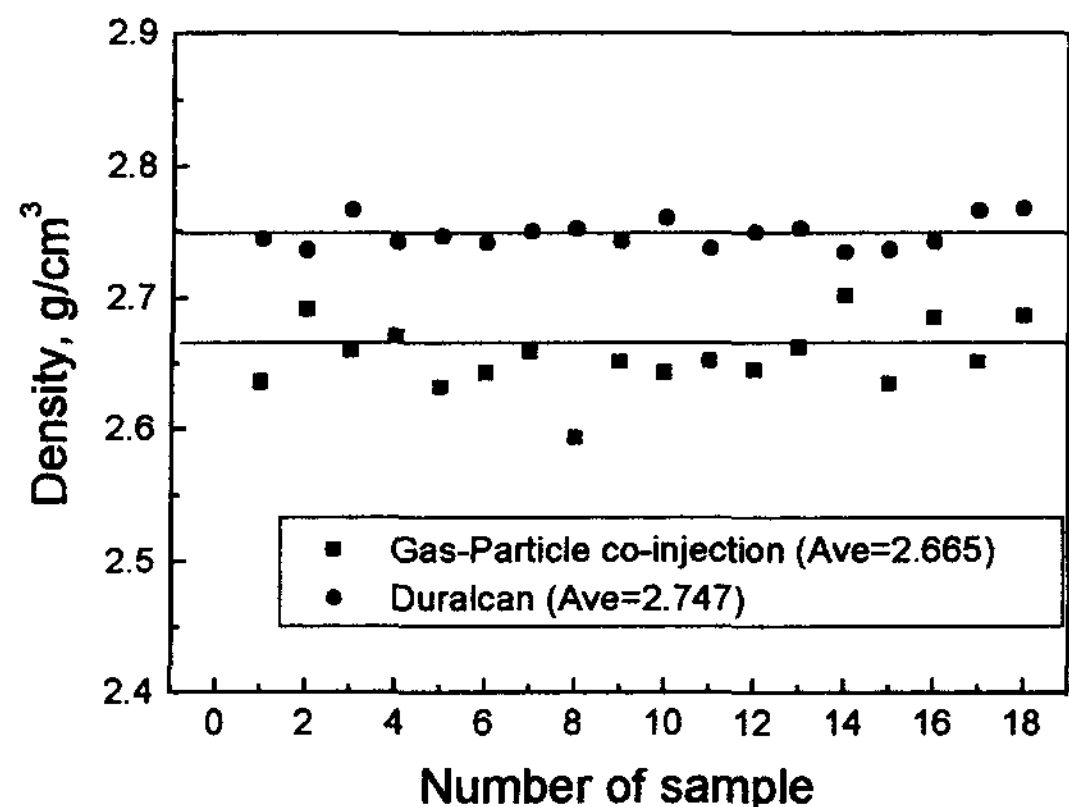


Fig. 7. Comparison of density of as-cast A356/SiCp.

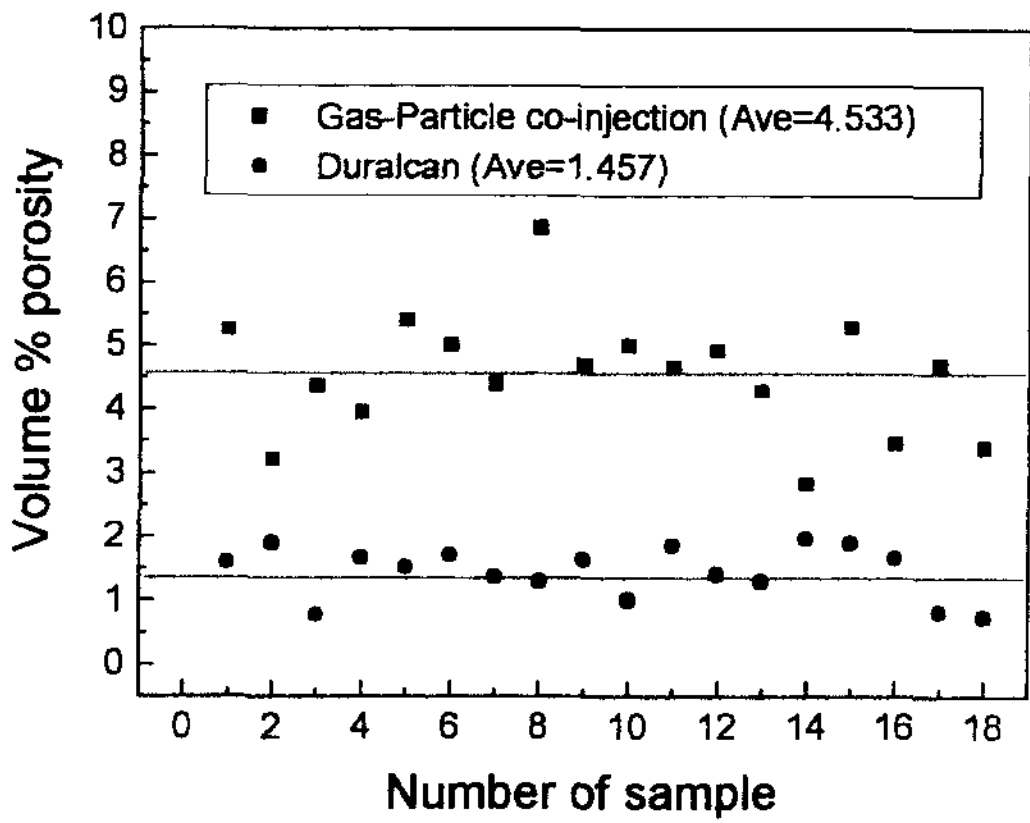
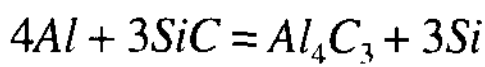


Fig. 8. Comparison of volume fraction of porosity of as-cast A356/SiCp.

인해 기계적 성질은 취약할 것이 예상되며, 높은 기공율은 용해후 주조시의 문제점으로 생각되며 이 부분에 대한 보다 세밀한 검토가 요구되는 것으로 판단된다.

액상법으로 금속기지 복합재료를 제조할 경우, 특히, 강화재가 탄화물인 경우 용탕인 알루미늄과 탄화물이 다음과 같은 반응을 하여 반응생성물을 만들게 된다.



강화재 계면에 생성된 반응생성물인 Al_4C_3 는 취약하여 계면 결합력을 떨어뜨려서 기계적 특성에 나쁜 영향을 미치므로 생성을 억제할 필요가 있다. 온도가 증가할수록 그리고 유지시간이 길어질수록 이 반응은 활발하게 일어나므로 [13] 주조법으로 소재를 제조할 경우 가능하면 용탕의 온도를 낮게 하고 유지시간을 단

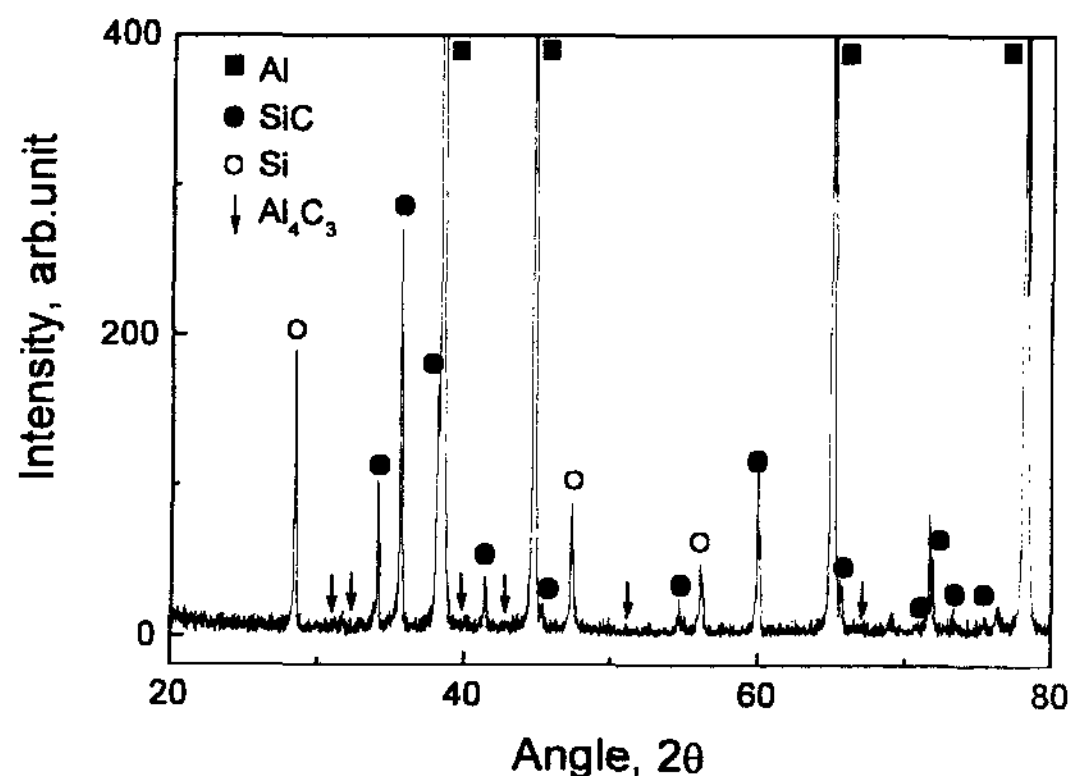


Fig. 9. X-ray diffraction pattern of as-cast A356/SiCp fabricated by gas-particle co-injection method.

축시켜 반응을 억제할 필요가 있다. Fig. 9는 제조 소재에 대하여 X-ray로 회절분석을 한 결과로 기지내에 Al_4C_3 의 생성반응이 일어나지 않은 것을 알 수 있었다.

3.3 인장 특성

인장시험은 Instron으로 crosshead speed 2.5 mm/min으로 하여 3회 측정하였다. Fig. 10은 인장시험 결과를 나타낸 것으로 제조 소재나 채용해한 Duralcan 소재 모두 양호한 인장 특성을 보이고 있지 못하다. 이는 기공율 측정 결과에서 예측한 바와 같이 시편 내부에 생성된 기공으로 인한 것으로 판단된다. 따라서 주조시의 기공율을 줄일 수 있는 방안을 모색하거나 주조재의 경우 압출이나 반응용성형과 같은 후속가공의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

3.4 내마모성

마모시험은 ring-on-block 타입의 마모시험기로 수행하였다. Fig. 11은 마모시험기의 형상 및 마모시험후의 마모량을 계산한 방법을 나타낸 것으로 마모량은 다음의 식에 따라 구하였다.

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

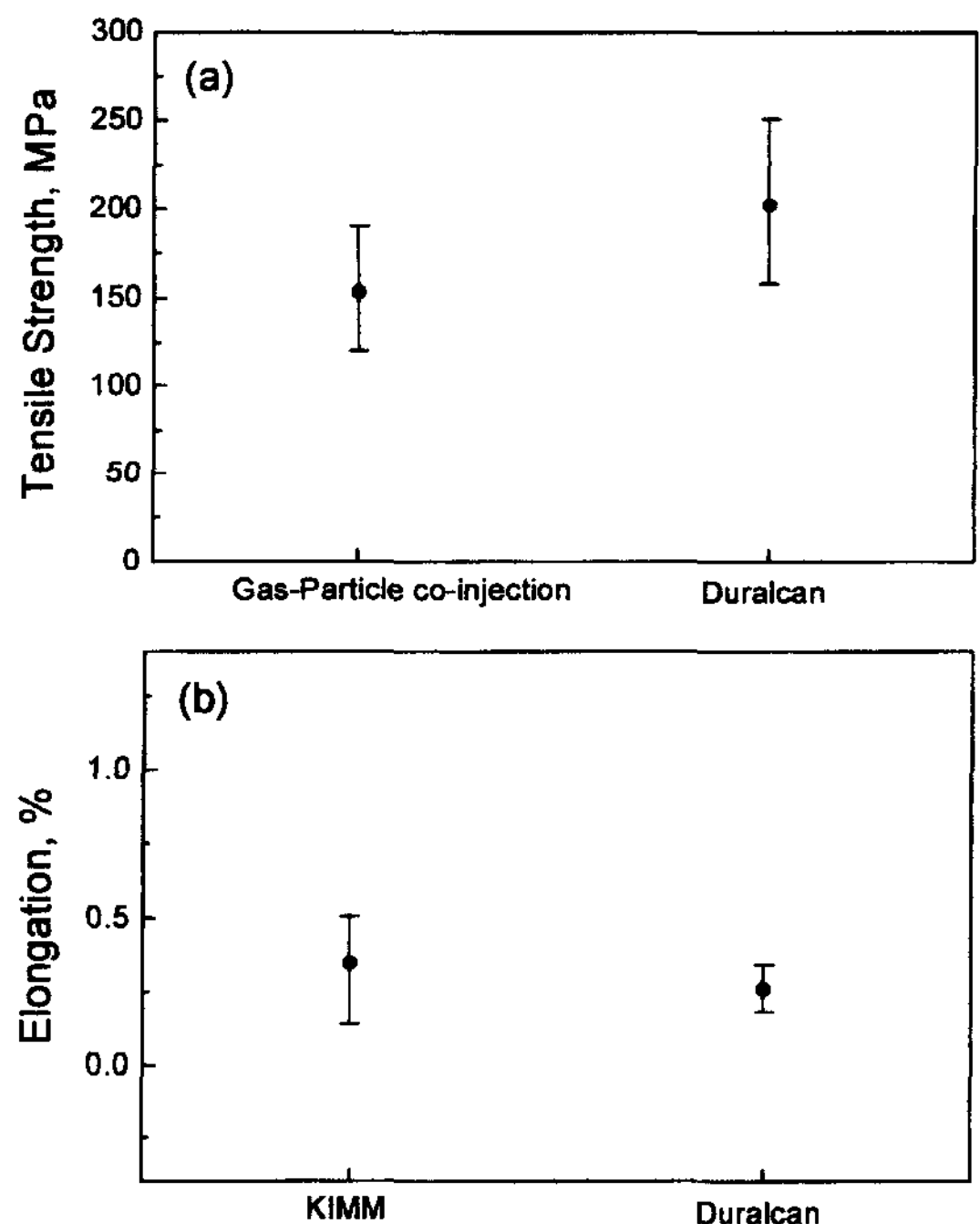


Fig. 10. Comparison of tensile properties of A356/SiCp (T6 condition) (a) tensile strength (b) elongation.

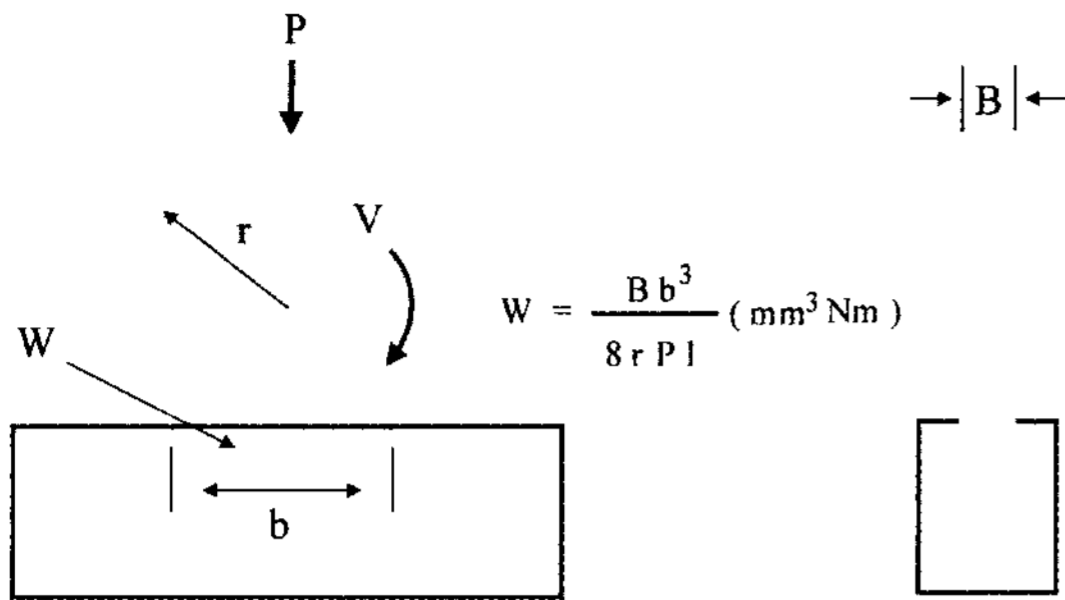


Fig. 11. Shape and geometry of ring-on-block wear test apparatus.

여기서 B는 상대재 Ring의 두께로 3 mm이며, b는 마모흔의 길이, r은 ring의 반경으로 15 mm, P는 시험시에 부가한 하중, l은 마모거리이다. 본 실험에서는 총 마모거리를 200 m로 고정하고, 마모속도를 1.11, 1.98, 3.53 m/sec로 변화시키고, 부가하중을 20.58, 61.74N으로 변화시켜 실험하였다. 상대재로는 AISI4140을 사용하였다. 마모시험편은 제조 소재와 수입소재를 비교하였으며 이와 더불어 주철(KS D4301)도 비교하여 보았다. Fig. 12는 마모거리 및 부가하중에 따른 비마모량을 나타낸 것이다. 시험편 모두 마모 속도가 증가함에 따라 비마모량은 감소하고 부가 하중이 증가함에 따라 비마모량은 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 시험편 별로 비교하여 보면 알루미늄합금 기지 복합재료의 비마모량이 주철에 비하여 상당히 우수함을 알 수 있다. Duralcan 소재와 제조 소재를 비교하여 보면, 낮은 부가하중에서는 동일한 정도의 비마모량을 보이고 있지만 높은 부가 하중에서는 Duralcan 소재의 비마모량이 약간 적은 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 보인 기공율의 차이에 기인하는 것으로 낮은 하중에서는 주로 oxidative wear mechanism에 의해 마모가 진행되며 SiC 입자가 하중을 지탱하여 기공이 마모량에 큰 영향을 주지 않지만, 높은 부가하중에서는 delamination wear mechanism에 의해 마모가 진행되며 기공이 delamination을 촉진하여 마모가 급속히 진행된다기 때문으로[14] 판단된다.

4. 고 찰

가스-입자 동시 주입법은 stir-casting 장치를 개선한 제조장치로서, hopper에서 주입되는 강화입자를 불활성 가스를 이용하여 용탕속으로 실어나르고, 가스와 임펠

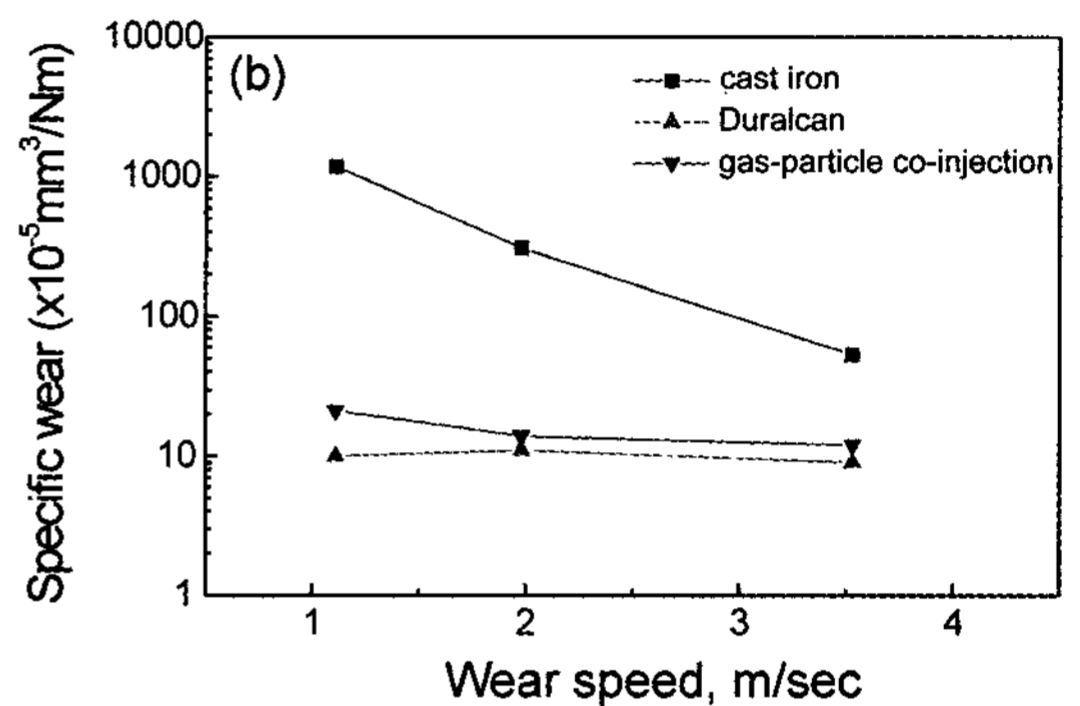
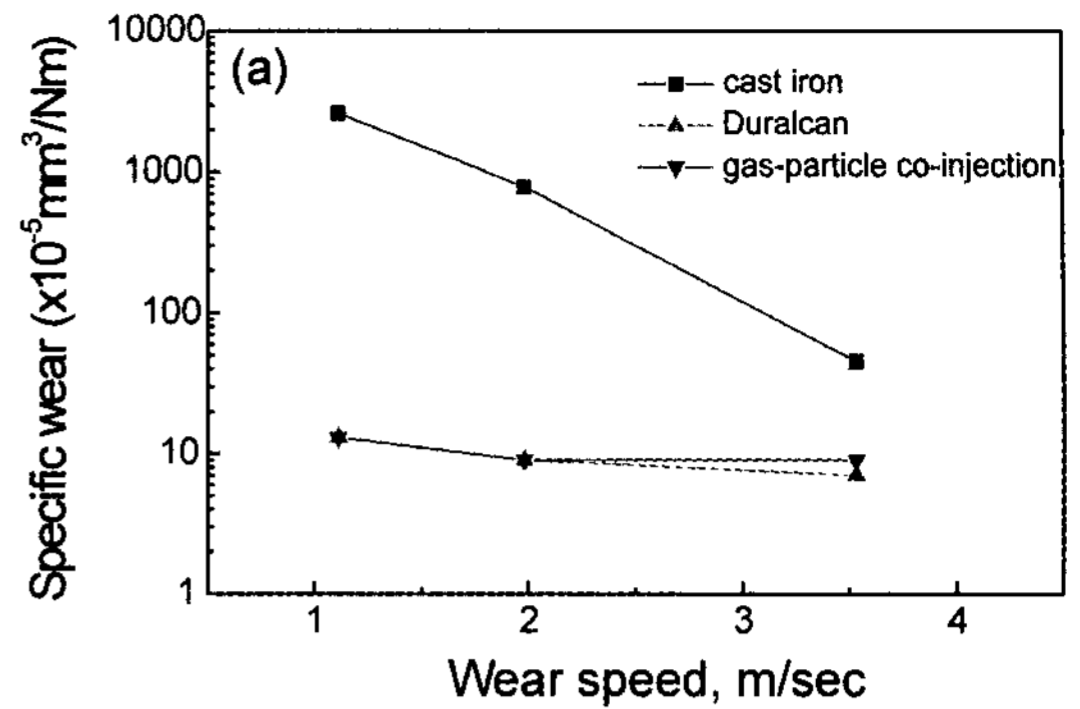


Fig. 12. Comparison of specific wear with wear speed. (a) load 20.58N (b) load 61.74N.

러의 교반에 의해 강화입자를 가속시켜 용탕에서 입자의 주입성을 향상시키는 장치이다.

지금까지 액상법으로 복합재료를 제조하는데 있어, 강화입자의 주입기구에 대한 많은 논의가 있었다[3, 15]. 이는 주로 입자가 용탕에 주입될 때 입자에 작용하는 에너지의 변화를 이론적으로 계산한 것으로 정상 상태에서의 에너지 변화를 고려하였다. 본 연구에서는 정상 상태의 에너지 변화에 더하여 임펠러의 회전과 가스의 주입으로 인해 가해지는 에너지의 변화를 고려하였는데, 다음과 같다.

반경 R을 가진 강화 입자가 용탕 표면에 주입될 때 주입각 ω에 따라 자유에너지의 변화가 수반된다. 전체 자유에너지 변화, ΔE_t는 위치에너지(ΔE_p), 운동에너지(ΔE_k), 표면에너지(ΔE_s), 부력의 변화(ΔE_b)로 이루어지며 다음의 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta E_t = \Delta E_p + \Delta E_s + \Delta E_b + \Delta E_k \tag{4}$$

$$\Delta E_t = \Delta E_{st} + \Delta E_k \tag{5}$$

여기서 ΔE_{st}는 운동에너지를 제외한 정상 상태의 에너지 변화의 합이다.

개별적인 에너지 변화는 다음의 식(6)-(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta E_i = -\frac{4}{3}\pi R^4 \rho_p g(1 - \cos\omega) \quad (6)$$

$$\Delta E_s = -\pi R^2 \gamma_{LG}[2(1 - \cos\omega)\cos\theta + \sin^2\omega] \quad (7)$$

$$\Delta E_b = \frac{1}{3}\pi R^4 \rho_L g(2 - 5\cos\omega + 3\cos^2\omega + \cos^3\omega + \cos^4\omega) \quad (8)$$

$$\Delta E_k = -\frac{2}{3}\pi R^3 \rho_p v_i^2 \quad (at \ \omega = \pi) \quad (9)$$

여기서 R은 입자의 반경, θ 는 습윤각(wetting angle), ω 는 주입각, γ 는 표면장력, g는 중력가속도, v_i 는 주입되는 입자의 속도, ρ_L 과 ρ_p 는 각각 액상과 입자의 밀도이다.

입자를 자중(自重)에 의해 주입할 때 자중만으로 주입이 되지 않으면, 완전히 주입이 되도록 외부에서 힘을 가해주어야 한다. 이때 가해주어야 하는 최소의 입자 속도는 자중에 의해 발생하는 에너지의 변화 ΔE_s 와 ΔE_k 의 합이 동일할 때의 속도이며 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta E_i = \Delta E_{st} + \Delta E_k = 0$$

$$\therefore v_i = \left(\frac{3\Delta E_{st}}{2\pi R^3 \rho_p} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Fig. 13은 입자를 용탕에 완전히 주입시키기 위하여 입자에 가해 주어야할 최소의 속도를 입자 크기 및 용탕 온도에 따라 나타낸 것이다. 용탕 온도에는 큰 변화가 없지만 입자 크기가 작아짐에 따라 속도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 주입되는 강화 입자를 가속시키기 위해서 고안된 가스-입자 동시주입법의 제조 공정에서 임펠러의 회전 속도는 상당히 중요한 역할을 하며 입자 주입에 필요한 임계 속도가 존재함을 알 수 있다.

Fig. 14는 가스-입자 동시주입법에서 입자 주입 기구를 형상화하여 나타낸 것이다. 우선 주입되는 Ar 가스는 임펠러 저면에 만들어진 가스 통로를 따라 빠져나오며 아주 짧은 시간에 용탕 내에서 작은 가스 버블을 형성한다[16]. 가스버블의 크기는 임펠러의 회전 속도, 용탕의 유동 방식등에 따라 달라지지만 수 mm의 크

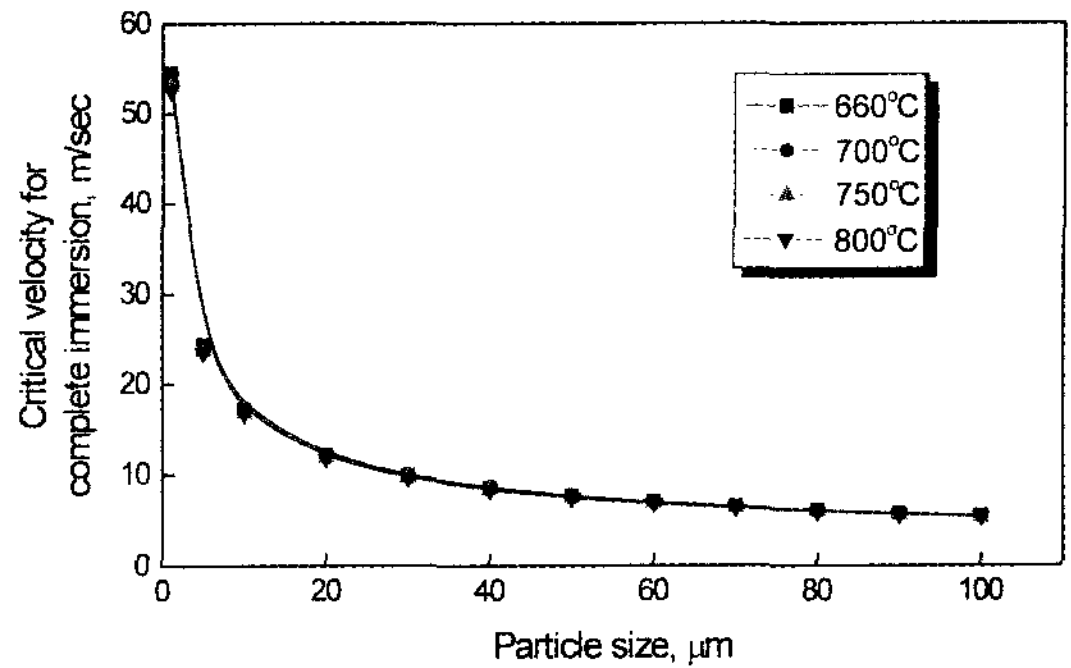


Fig. 13. Change of critical velocity for complete immersion with particle size.

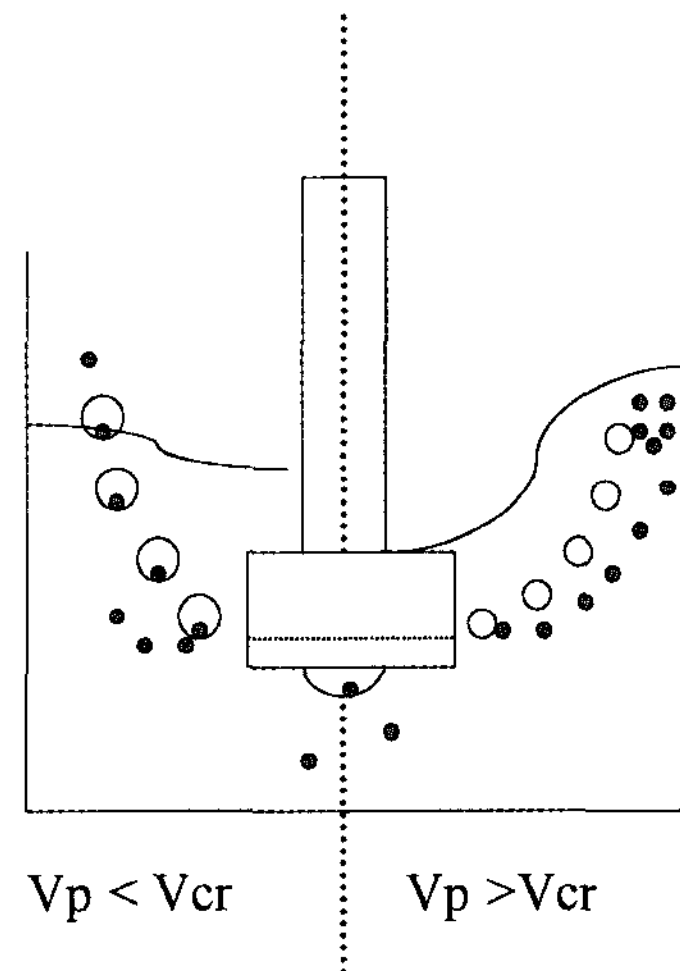


Fig. 14. Behavior of gas bubble and particles with rotation of impeller.

기를 갖는 것으로 알려져 있다[17]. 따라서 가스와 입자를 동시에 주입할 경우 임펠러를 빠져나오는 가스 버블 내부에는 상당히 많은 입자가 포집되어 있을 것으로 생각된다.

임펠러의 회전 속도가 임계속도보다 느린 경우, 즉 용탕내에 커다란 가스 버블이 형성되며, 임펠러에 의한 입자의 가속이 임계속도보다 느린 경우에는, 입자는 가스 버블에 포집된 채 용탕 속으로 들어 가지 못하고 가스 버블에 실려 용탕 밖으로 빠져 나오게 되는 것으로 생각된다. 반면에 임펠러의 회전 속도가 임계속도 이상인 경우에는, 가스 버블에 포집된 입자가 용탕의 표면장력을 넘어 주입이 이루어지며 가스 버블과 분리되는 것으로 판단된다.

5. 결 론

가스-입자 동시주입법으로 제조한 A356/SiCp의 복합 재료의 미세조직을 관찰하고 기공도, 부피분율, 기계적 특성등을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가스-입자 동시주입법으로 입자 강화 복합재료를 제조할 때 임펠러의 회전속도에는 임계속도가 존재하였으며, 임계 속도이하에서는 대부분의 입자가 용탕 표면으로 빠져나가지만 임계속도 이상에서는 입자가 용이하하게 주입되며 기지내부에 균일하게 분포하였다.

(2) 가스-입자 동시주입법으로 10 μm의 크기를 갖는 SiC 입자를 20vol.%까지 첨가할 수 있었으며, 제조된 소재는 높은 기공율로 인하여 인장 특성은 우수하지 못하지만 균일한 분산으로 우수한 내마모특성을 보였다.

후 기

본 연구는 2000년도 과학기술부에서 시행한 연구개발사업의 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] D. J. Lloyd : Int. Mater. Revs. 39 (1994) 1
 [2] J. Eliasson and R. Sandstrom : Key Eng. Mater. 104-107

(1995) 3
 [3] A. S. Kasar, F. Rana and D. M. Stefanescu : Mater. Sci. and Eng. A135 (1991) 95
 [4] B. C. Pai and P. K. Rohatgi : Mater. Sci. and Eng. 37(1975) 315
 [5] S. Abraham, B. C. Pai and K. G. Satyanarayana : J. Mater. Sci. 27 (1992) 3479
 [6] F. Delannay, L. Frozen and A. Deryttere : J. Mater. Sci. 22 (1987) 1
 [7] M. Kobayashi and T. Choh : Mater. Trans. JIM 31 (1990) 1101
 [8] H. J. Seeman and H. Staats : Z. Metallkd 59 (1968) 347
 [9] P. K. Rohatgi, R. Asthana and S. Das : Inter. Metals Rev. 31 (1986) 115
 [10] D. Hammond and B. Cox : Duralcan Al MMC Materials, edited by U. Harnisch, Uralcan USA, (1996), 18
 [11] S. Ray : Key Eng. Mater. 104-107 (1995) 417
 [12] S. Ray : Proc. Inter. Sympo. on Adv. in Cast Reinforced Metal Composites, (1988) 77
 [13] J. M. Lee, S. B. Kang, A. Kamio, T. Sato and H. Tezuka : Mater. Trans. JIM 40 (1999) 537
 [14] M. Gui, S. B. Kang and J. M. Lee : Mater. Sci. and Eng. A293(2000) 146
 [15] P. K. Rohatgi, R. Asthana, R. N. Yadav and S. Ray : Metall. Trans., 21A (1990) 2073
 [16] J. L. Liow and N. B. Gray : Chem. Eng. Sci. 43 (1988) 3129
 [17] Y. Ohno, D. T. Hampton and A. W. Moores : Light Metals, (1993) 915