

.....
論 文

Squeeze Casting에 의한 Al-SiCp 복합재료의 제조 조건에 관한 연구

김석원*, 우기도, 한상원

A Study on Fabrication Conditions of Al-SiCp Composites by Squeeze Casting

Sug-Won Kim, Kee-Do Woo and Sang-Won Han

Abstract

Al-2%Si-2%Mg alloy containing SiC particle in 20, 70 μ m were prepared by mean of squeeze casting with various pressure 50, 100, 150 and 220MPa respectively.

The specimens were made by casting into 50 ϕ ×100 ℓ mold under various squeeze conditions(pressures, pressurizing temperature, particle sizes). Mechanical properties(hardness, tensile strength, elongation and wear characteristics) were evaluated at room temperature with those various fabrication factors. It became feasible to make favorable Al-SiCp composite free from casting defects by the injection of Ar gas during melting and 100MPa pressure squeeze casting. However, pressure of 50MPa was not sufficient to avoid completely porosity formation as a result of precessing and shrinkage during solidification. As the particle size is smaller and the squeeze pressure is higher, the hardness and tensile strength at room temperature are higher. Cell size became smaller gradually with increase of squeeze pressure. With increase of squeeze pressure(MPa), wear behaviors of those composites were changed from adhesive into abrasive wear, and the tendency of above behavior became outstanding with increasing sliding speed. The chemical reaction(4Al+3SiC→Al₄C₃+3Si) is more accelerated at interface between SiCp and matrix with increase of squeeze pressure. Therefore Al₄C₃ intercompound and Si peak intensity is increased at interface.

1. 서 론

금속기 복합재료(MMC)는 강도, 내마모성 및 고온강도 등의 성질이 우수하여 미래의 신소재로 주목받고 있는 재료이다. 이 금속기 복합재료 중에서도 Al기 복합재료는 비강도, 비탄성율이 높고, 제조에도 용이하여 자동차부품¹⁻⁵⁾, 항공기재료^{6,7)} 전기접점재료 등에 응용이 확대되어 많은 연구가 진행되어져 오고 있다.^{8,9)}

Al-SiC입자강화복합재료의 제조법에는 분말야금법(P/M)과 주조법(Casting)으로 크게 분류할 수 있고 주조법에는 Compocasting, Rheo-compo-

casting, Squeeze casting법 등이 있다. 특히 주조법은 분말야금제조법보다도 대량생산이 가능하기 때문에 경제성이 우수하다는 잇점이 있다. 그러나 주조법에서도 제조법에 따라서 각각 특성이 서로 달라지므로 여러가지의 제조조건이 Al-SiCp복합재료의 특성에 크게 영향을 미칠 것이다.

특히 가압주조법(Squeeze casting)은 복합화할 때 높은 온도가 필요하지만 복합화 시간이 단축되고, 2차 가공의 필요성이 없고 생산성이 우수한 제조법이다.¹⁰⁾

본 연구에서는 가압주조법을 이용하여 제조조

전북대학교 공과대학 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Chonbuk National University)

*전북대학교 공과대학 금속공학과, 급속응고 신소재연구소(Dept. of Matericals Eng., Chonbuk National Univ., Rapidly Solidified Materials Research Center)

건중 가압력, 가압온도 및 입자의 크기등을 변화시켜 Al-SiCp강화복합재료를 제조하여 미세조직 및 역학적 성질에 미치는 이들의 제조조건의 영향을 연구 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시편제조 및 조직관찰

Al-2%Si의 목표성분에 맞추어 Al과 Al-20wt%Si모합금을 실험도가니에 장입하여 로의 온도를 720°C로 하여 용해한 후 탈가스제(C₂Cl₆)로 탈가스를 실시한 후 용탕표면에 부유된 Slag를 완전히 제거한 뒤 2%Mg의 목표성분의 Mg합금을 첨가하였다.

Ar gas분위기에서 고액공존온도인 640°C에서 graphite impeller를 용탕에 침지시켜 교반하면서 SiC입자(20,70μm)을 첨가한 후 약 25분간 교반하여 완전히 SiCp의 분산이 이루어진 후에 용해 온도를 740°C까지 급승온시킨 후 출탕하여 금형(50φ×100 l)에 주입 후 금형내의 용탕온도가 620°C, 640°C의 고액공존온도에서 각각 50, 100, 150, 220MPa의 가압력으로 가압주조를 실시하여 원통상의 시편을 제조하였다. 이때 용탕 온도는 열전대를 금형하부 15mm에 설치하여 측정하였다.

조직관찰은 0.5%HF부식액을 이용하여 광학현미경으로 관찰하였으며, 계면조직 및 미세조직의 분석은 주사전자현미경 및 EDX을 이용하였다. X-선회절시험은 Al-SiCp복합재료에서 반응상을 조사하기 위하여 target : Cu, filter : Ni, voltage : 30KV, current : 20mA, scanning speed : 1/min, 회절각은 10~120°로 하여 실험하였다.

2.2 기계적성질 및 내마멸특성

경도측정은 SiCp강화복합재료에서 기지와 입자계면에 이르는 상호반응영역에서 생긴 반응생성물이 기계적 성질(경도)에 미치는 영향을 조사하기 위하여 기지의 경도는 Micro-vickers경도계(하중 10g, 하중시간 15초)로 측정하였고, 시편전체 경도는 Micro-vickers경도계(하중 1kg, 하중시간 15초)로 각 20회씩 측정한 후 최소 및 최대값 5개씩을 제외한 나머지 값을 산술 평균으로 구하였다.

인장시험은 Instron형 시험기를 이용하였고 cross head속도는 0.5mm/min으로 하여 실험하

였다. 내마멸특성은 고속마멸시험장치(TOKYO, OAT-U)¹¹⁾를 이용하여 건식마멸하였으며 마멸 조건은 마찰하중 12.6kg, 마찰거리 600m로 고정하였고 마찰속도를 0.64, 2.41, 3.67m/sec로 변화시켜 비마모량을 조사하였다. 상대마멸시편의 재질은 S45C이며 탄소강을 소준(normalizing)한 것을 사용하였고 시편은 emery paper로 #100~#1200까지 연마한 후 표면의 이물질을 제거하기 위하여 초음파 세척하여 사용하였다.

3. 실험 및 고찰

3.1 미세조직

Al-2%Si-2%Mg-15%SiCp(20μm) 합금을 compocasting(a)와 150MPa squeeze casting(b)로 주조하였을 때 나타나는 조직을 Photo 1에 나타냈다. 이들은 공히 초정 알루미늄 수지상정(primary aluminum dendrite)과 Si eutectics과 SiCp들로 구성되어 있음을 알 수 있다. (a)에서는 응고속도가 느리므로 냉각도중에 초정으로부터 SiCp가 일부 reject되어서 SiCp들이 cell boundary로 집중하여 불균일하게 SiCp가 기지에 분포되어 있고 SiCp와 공정조직이 혼합되어 있었다. 특히 SiCp들은 cell boundary에서 액체에 의해서

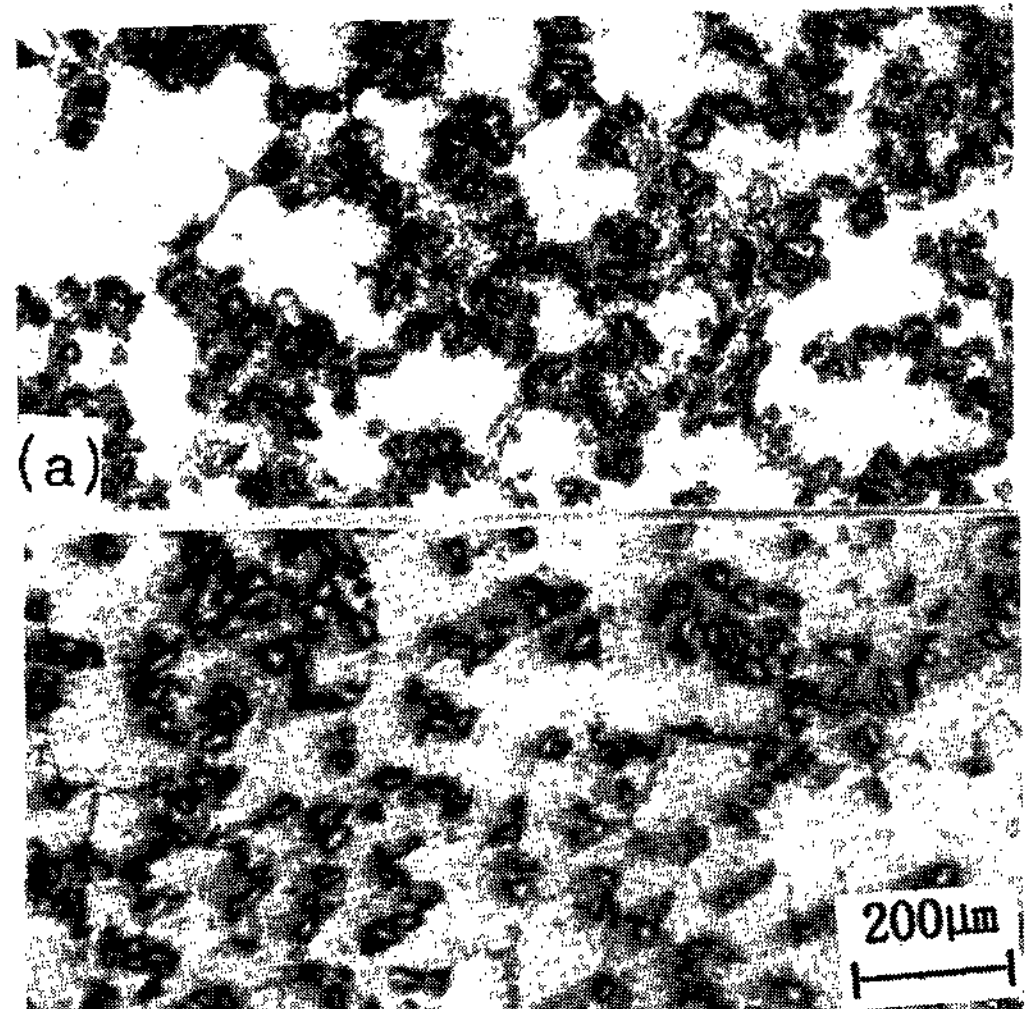


Photo 1. Microstructure of composites of compocasting and squeeze casting(150MPa), Al-2%Si-2%Mg-15%SiCp(20μm).
(a) Compocasting and
(b) 150MPa squeeze casting

포획됨으로써 SiCp사이의 Si eutectics들이 상당히 많이 혼재되어 있음을 알 수 있다. (b)는 150MPa의 가압력으로 (a)보다 냉각속도가 증가하여 SiCp가 비교적 균일하게 분포된 복합재료의 조직을 나타내므로써 가압력에 의해서 건전한 Al-SiCp의 복합재료를 제조할 수 있다고 생각된다.

또한 (a)와 (b)는 같은 조건으로 부식한 사진이지만 무가압보다 가압상태의 α 고용체는 Si를 많이 고용하므로써, 부식속도가 달라져서 (b)는 (a)보다 기지조직의 색이 보다 검게 나타나 있음을 알 수 있었다.

또한 cell size는 무가압보다 가압할 때에 상당히 미세화되어 있음을 알 수 있는데 이는 가압에 의한 응고속도의 증가로 핵생성속도가 증가되어서 cell size가 상대적으로 작아졌기 때문이라고 생각된다. 가압주조한 복합재료의 SiCp복합화부분과 비복합화부분의 응고조직은 보강입자와 금

속용탕과의 사이에 같은 가압력에 대하여서도 비복합화된 부분은 비교적 cell size가 크기만 SiCp가 존재하는 부분은 SiCp가 cell 성장을 방해하거나 SiCp가 응고속도에 영향을 미쳐 cell size가 작게 되었다고 생각된다. 따라서 복합화되었을 때 더욱 미세한 cell size의 조직을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

Photo 2 (a),(b),(c)는 무가압시 mold의 위치에 따라서 SiCp의 particle pushing effect^{12,13)}로 말미암아 SiCp의 분포가 어떻게 달라지는지를 나타낸 사진으로써 SiCp의 분포가 mold표면 및 용탕과 mold사이에는 비교적 고르게 분포되었고 중심부에서는 SiCp가 응집현상을 나타내었으며 부분적이고 크게 편석되었다. (c)는 용탕과 mold의 온도의 차이에 의한 냉각속도의 증가로 cell boundary로 응집된 SiCp가 적게 나타냈다. (a)는 mold wall (c)보다 냉각속도의 개화로 인해서 cell boundary SiCp의 분포의 불균일성을 나

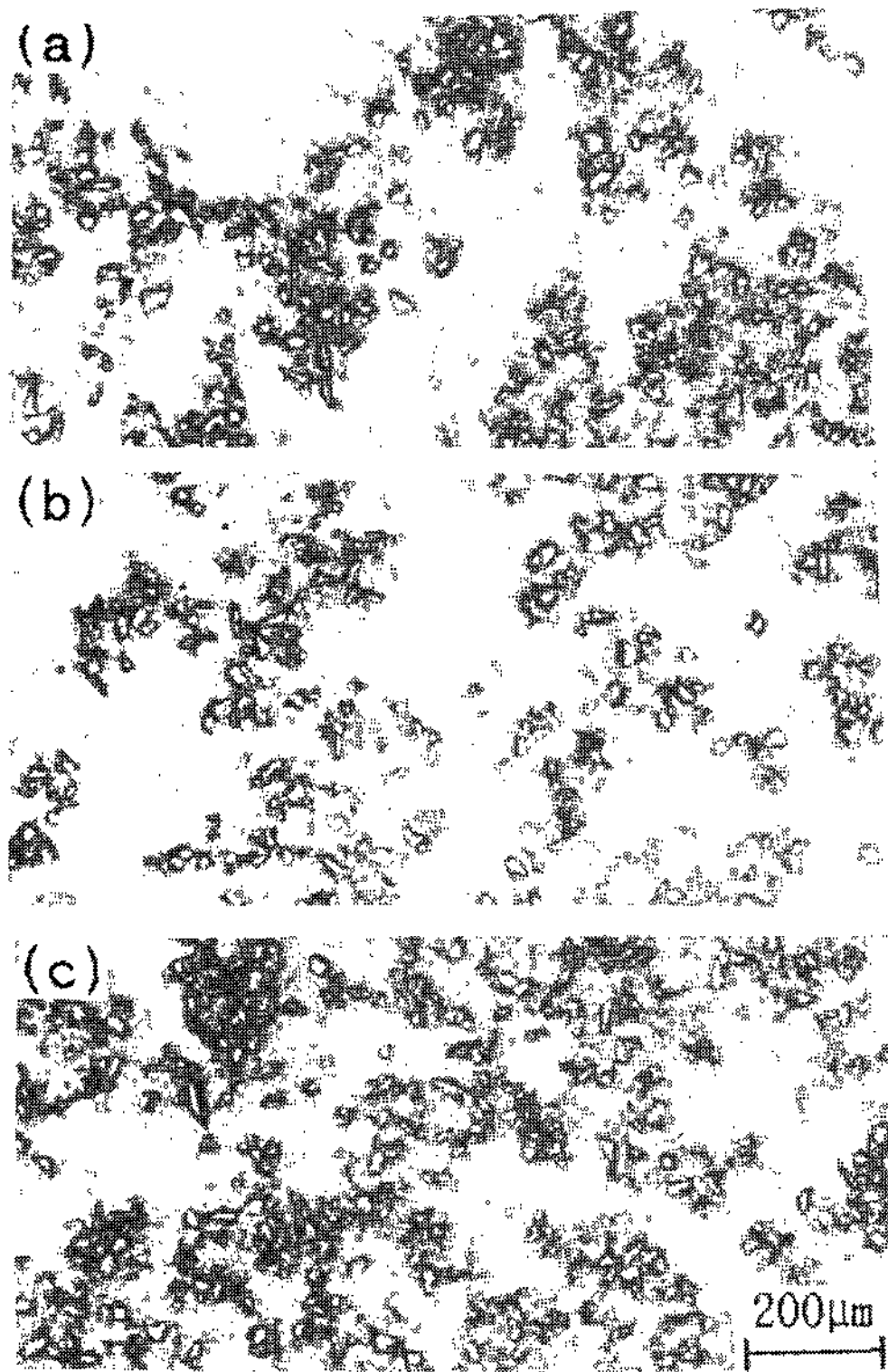


Photo 2. Changes of SiCp dispersion morphologies from mold wall to mold center.
(a) mold center, (b) middle between mold wall and mold center, and (c) mold wall

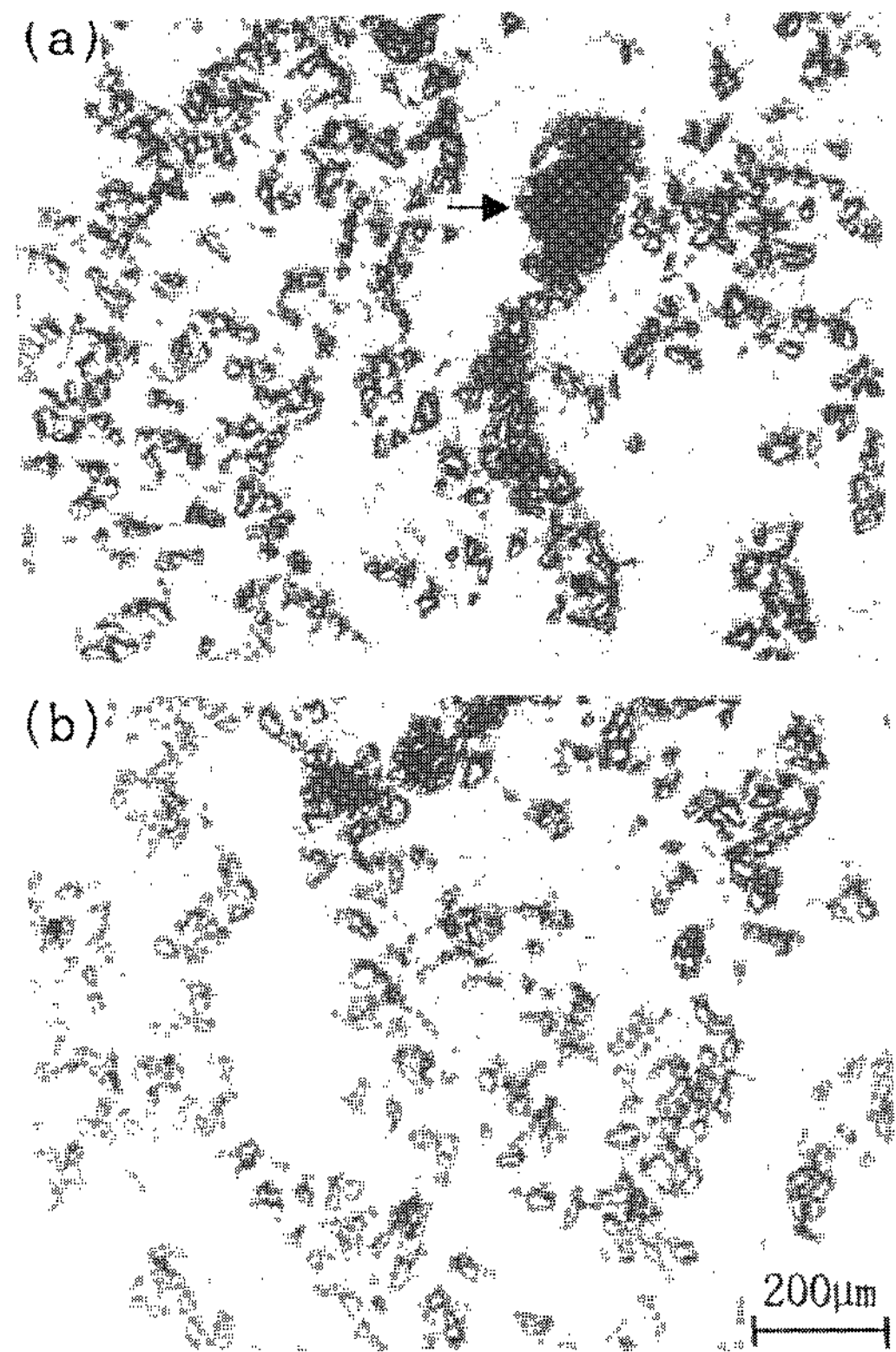


Photo 3. Photomicrographs showing (a) segregation of SiCp around bubble. (a) 50MPa pressure castings and (b) 100MPa pressure casting.

타나게 되었다.

Photo 3(a)와 (b)는 Al-2%Si-2%Mg-15% SiCp(20 μ m) 합금을 각각 50MPa, 100MPa로 가압주조했을 때 나타난 porosity들을 나타낸 조직 사진이다. (a)는 50MPa로 가압주조하였을 때 나타난 porosity(화살표)로써 용해중 용탕에 혼입 되어진 일부 가스가 그냥 남아서 생긴 기공의 결함들을 볼 수 있다. (b)는 100MPa의 가압으로 금형에 가압주조하였을 때 기공이 나타나지 않았음을 알 수 있다. 따라서 주조조직에서 발생할 수 있는 가스의 결함은 100MPa 이상의 squeeze casting에서 제거될 수 있음을 알 수 있었다.

Photo 4는 150MPa 가압주조시편의 주사전자 현미경 사진으로써 부분적으로 SiCp가 인접한 SiCp에 의해서 edge(끝부분)가 파괴되어 나타나 있는 형태를 알 수 있다. 이들 사실로부터 높은 가압력은 때로는 SiCp의 파괴를 초래하여 이 부분이 응력을 받을 때 균열의 개시점으로 작용하여 연성을 저하시킬 수 있다고 생각된다.

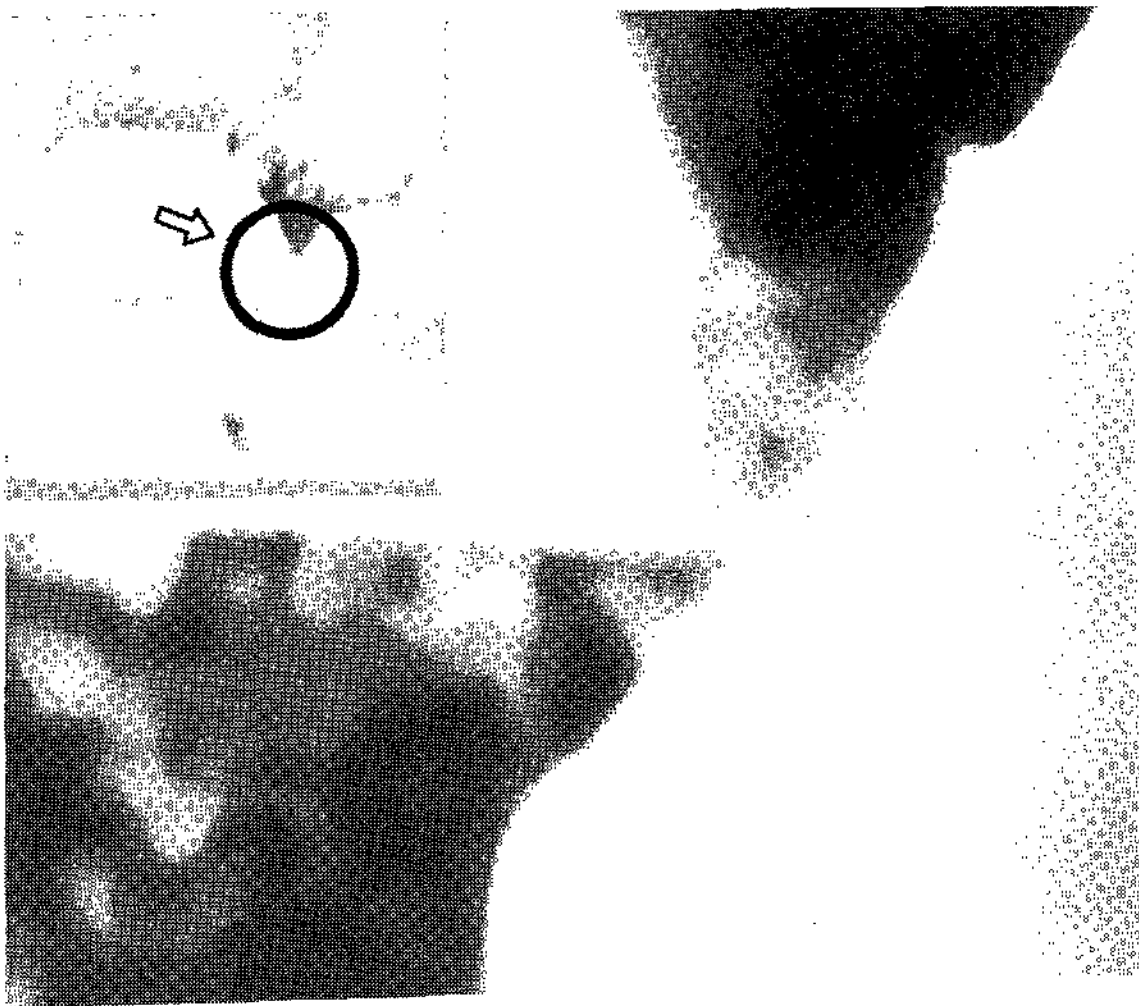


Photo 4. SEM micrograph showing cleavage and crack of particles by neighbouring particles (pressure 150MPa)

3.2 기계적 성질

Fig. 1은 Al-2%Si-2%Mg-15%SiCp(20 μ m, 70 μ m)의 복합재료의 가압력과 미소경도와와의 관계를 나타낸 그림이다. 전반적으로 기지금속의

Al의 경도값(70Hv)보다 SiCp로 강화된 복합재료의 경도가 2배 이상 높게 나타났으며 이런 경도증가^{14,15)}원인은 SiCp 자체의 높은 경도와 복합재료 제조시 SiCp와 기지금속의 열팽창계수의 차이에 의한 전위밀도의 증가때문이다. 또한 가압력이 증가하므로써 냉각속도가 빠르게 되어 결정립이 미세화 되고 가압력에 의해 Al에 Si의 고용한이 증가되어 기지자체도 고용강화현상으로 강화되므로 경도가 가압력에 따라서 증가됨을 알 수 있었다. 또한 경도의 증가는 가압에 의한 금형과 주물의 접촉이 개선되어 열전달향상 효과에 따른 과냉현상으로 결정립이 미세화되었기 때문이다. 가압온도가 640 $^{\circ}$ C일 때가 620 $^{\circ}$ C일 때 보다 높은 경도값을 얻을 수 있었는데 이는 640 $^{\circ}$ C에서는 계면반응이 620 $^{\circ}$ C보다 잘 일어나 $4Al + 3SiCp \rightarrow Al_4C_3 + 3Si$ 반응이 진행하므로 Al_4C_3 등의 금속간화합물의 형성¹⁶⁾으로 인해서 경도가 향상되었음을 알 수 있었다.

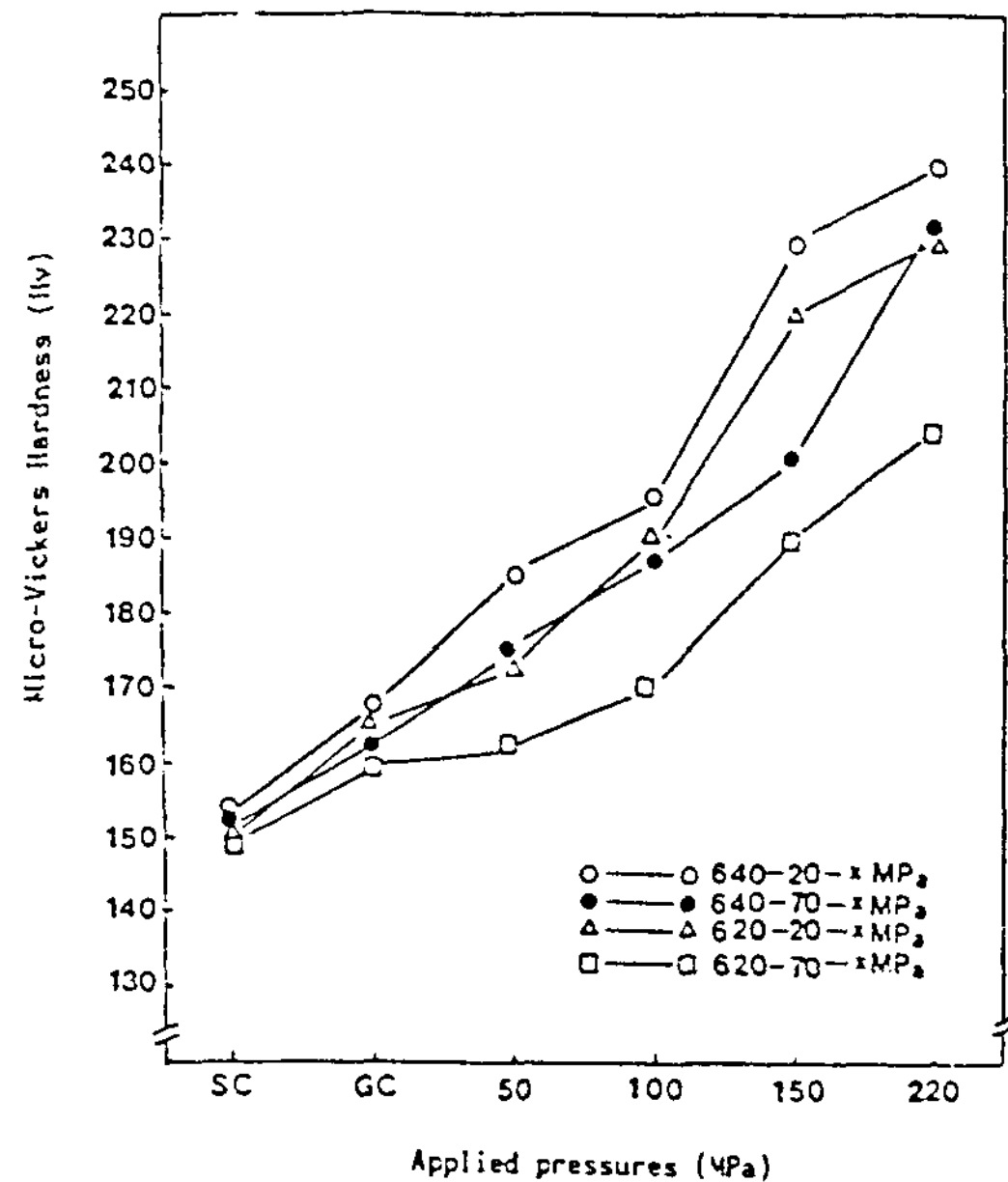


Fig. 1. Micro-vickers hardness vs. various applied pressure in Al-2%Mg-15%SiCp squeeze castings

Fig. 2는 인장강도 및 연신율의 가압력과 관계를 나타낸 것으로 가압력이 증가하므로써 인장강도는 증가되고 연신율은 저하하고 있음을 알 수 있었다. 인장강도의 증가원인은 가압력이 증가되므로

입자와 기지금속과의 계면반응이 일어나고 계면접촉강도가 향상되었기 때문이다. 가압력이 100MPa 일 때 큰 폭의 인장강도가 증가하나 100MPa 이상에서는 증가가 둔화되어 나타난다. 이 원인은 100MPa에서 부터는 주조상의 시편에 기공이 거의 나타나지 않았기 때문이라고 생각된다.

또한 연신율도 100MPa에서 급격히 저하됨을 알 수 있는데 이는 SiCp가 서로 인접해 있고 SiCp상호간의 가압력으로 인해서 SiCp의 파괴가 일어나 이 영향이 크게 작용되었을 것으로 생각된다.

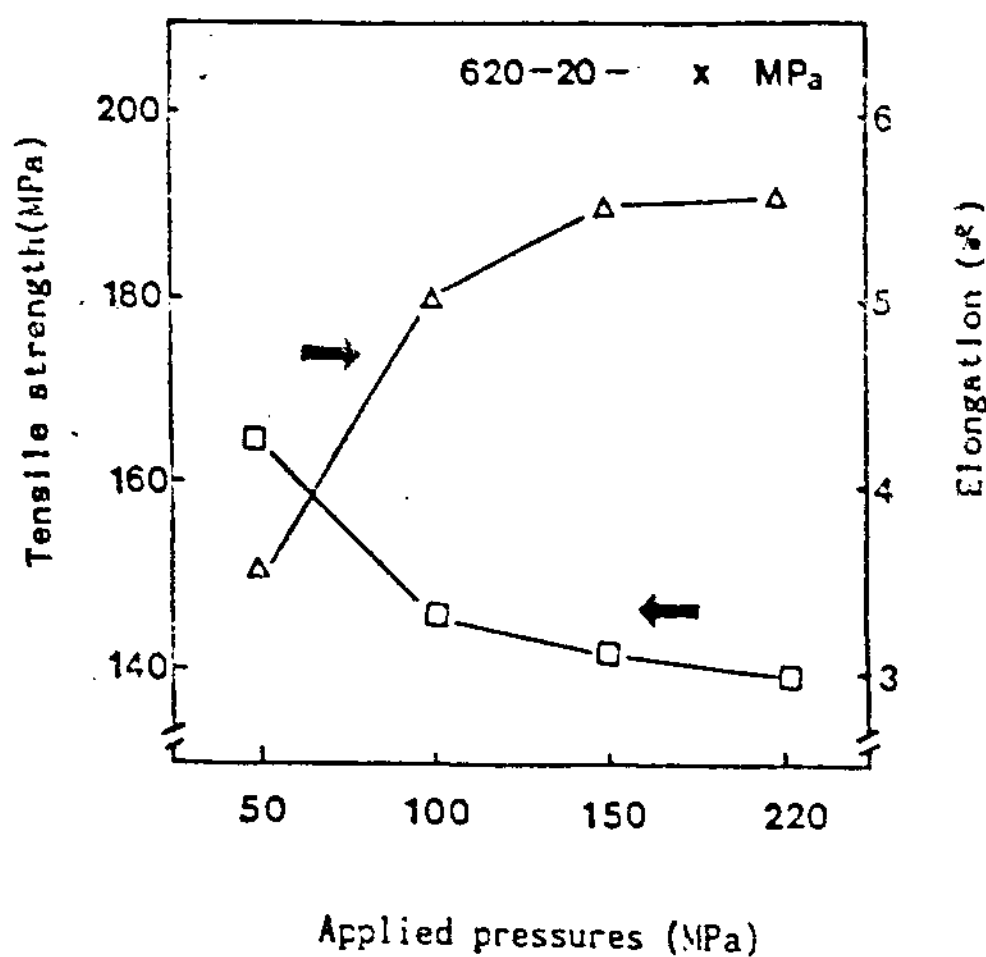


Fig. 2. Changes of tensile strength and elongation of Al-2%Si-2%Mg-15%SiCp squeeze castings with various applied pressures.

Fig. 3에는 금형의 중심과 금형벽부분에서의 sand casting, 100MPa 및 220MPa가압주조시의 경도의 변화를 나타낸 그림이다. sand casting에서는 중심과 wall부위와의 경도가 큰 차이가 있으나 100MPa 가압주조시는 그 차이가 둔화되었고 220MPa가압주조시는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 sand casting에서는 중심과 wall부분은 냉각속도의 차이가 크고 가압하였을 때는 차이가 없이 냉각되었기 때문이라고 생각된다. 이로써 sand casting보다 squeeze casting하였을 때 균질한 기계적성질을 갖는 재료를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 4와 5는 가압력에 따라서 어떠한 계면반응물이 생성되었는지 알기 위해서 X선 회절시험한 결과를 나타낸 그림으로 가압에 의하여 냉각

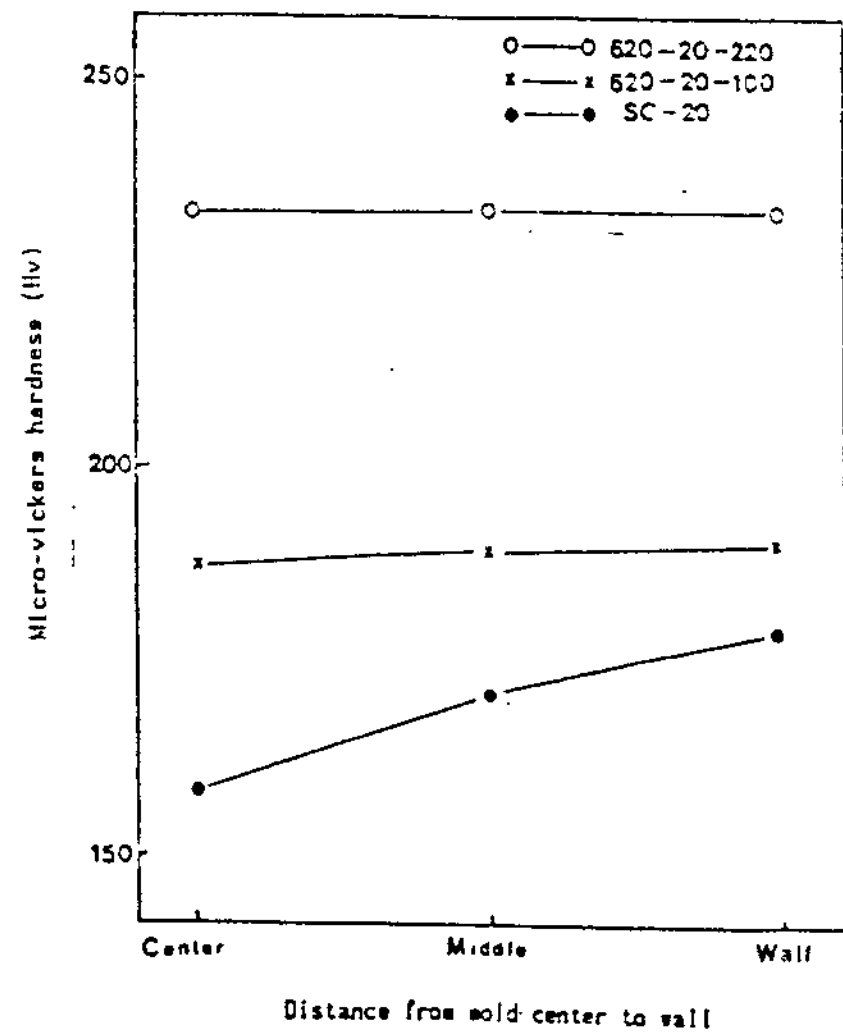


Fig. 3. Relation between micro-vickers hardness (Hv) and distance from mold center to wall.

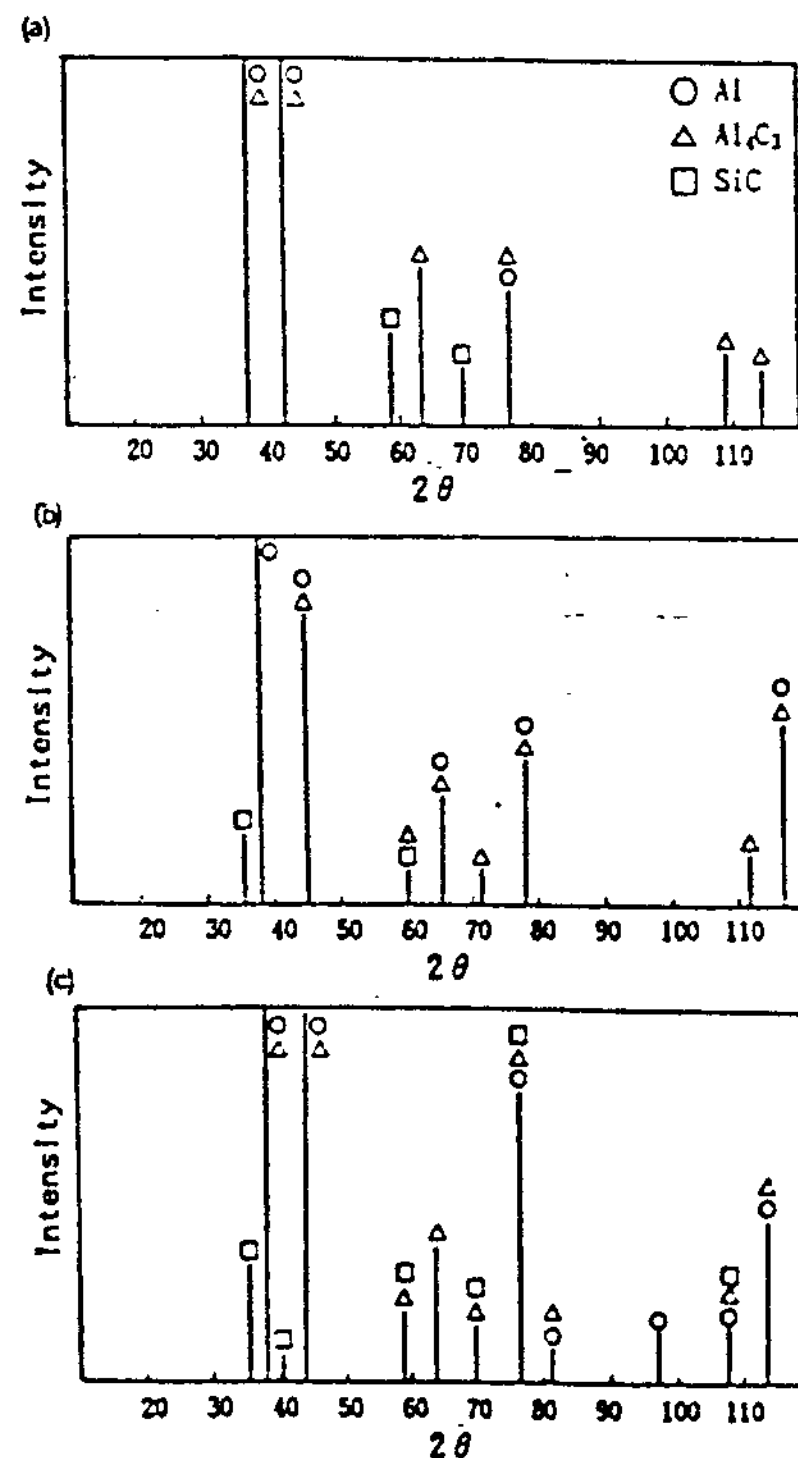


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of Al-2%Si-15%SiCp composite with various squeezing pressure.

- (a) 620°C-20μm-50MPa,
- (b) 620°C-20μm-100MPa, and
- (c) 620°C-20μm-220MPa

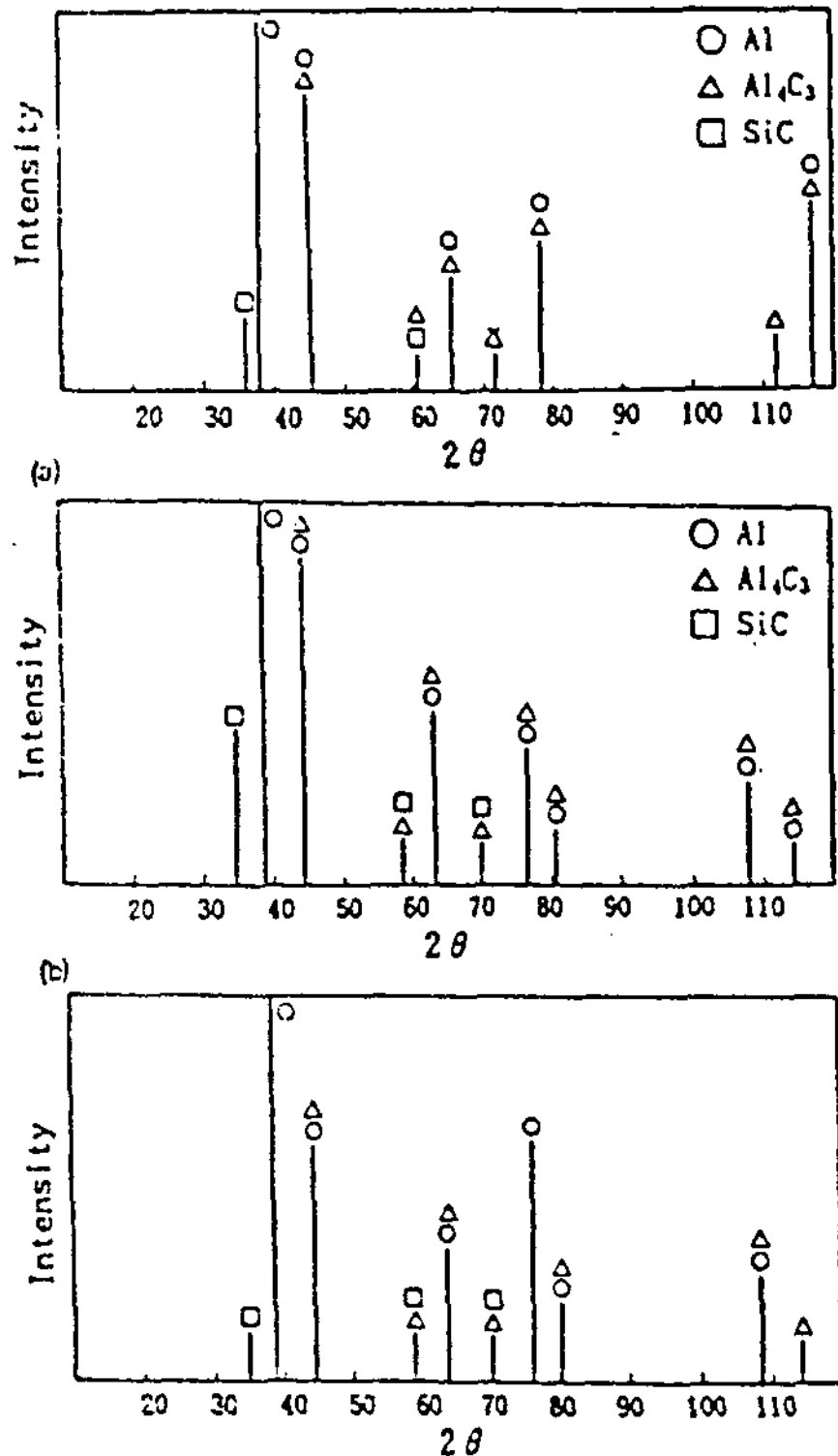


Fig. 5. X-ray diffraction pattern of Al-2%Si-15% SiCp composite with various SiCp particle sizes(b and c) and squeezing temperature(a and b).

- (a) 620°C-20µm-100MPa,
- (b) 640°C-20µm-100MPa, and
- (c) 640°C-70µm-100MPa

속도가 빨라지므로 Mg가 균일하게 분포되어 Mg화합물은 나타나지 않았으며 Mg는 SiCp와는 반응하지 않고 SiCp의 표면에 부착되어 있는 산소를 없애는 동시에 Al합금의 용탕의 표면장력을 저하시키는 작용에 의하여 입자 젖음성을 향상시키는 역할¹⁶⁾을 한 것으로 생각된다.

그러나 X-ray결과 복합재료의 기계적 성질을 크게 저하시키는 Al₄C₃의 생성은 가압력(Fig. 4)과 가압온도(Fig. 5)가 증가할수록 또 입자크기(Fig. 5)가 작을수록 많이 생성되었다.

Fig. 6는 SiCp와 matrix의 계면을 분석하여 EDS결과를 관찰한 것을 나타낸 것으로 가압력에 따라서 Mg의 peak는 일정하고 Al peak에 대하여 Si의 peak의 강도가 점점 크게 나타났음을 알 수 있다. 이런 현상은 SiCp중의 Si의 peak와

중복되어 나타났다고도 생각되지만 SiCp중의 Si의 강도는 대개 일정하다고 생각할 때 가압력에 따라서 SiCp계면에서 계면반응(4Al+3SiC→Al₄C₃+3Si)에 의하여 생긴 Si량이 점차 증가되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 7은 가압온도와 입자크기가 서로 다를 때 계면에 나타난 Si의 분석결과로써 가압온도가 증가될 때와 입자크기가 작을 때 Si peak는 크게

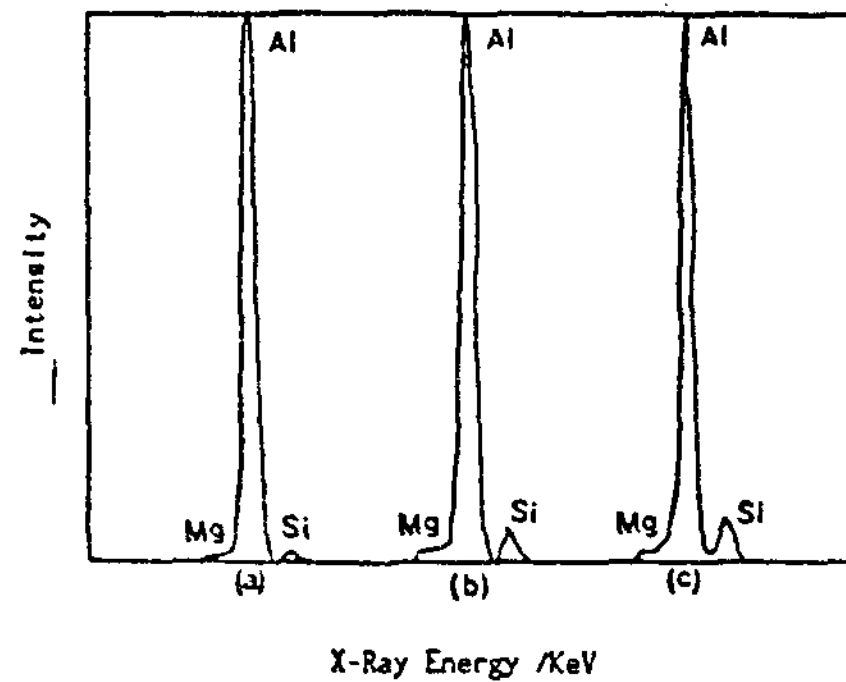


Fig. 6. EDX point analysis pattern Mg, Al and Si in Al-2%Si-2%Mg-15%SiCp composite with various squeezing pressure at interface between matrix and SiC particle
(a) 620°C-20µm-50MPa,
(b) 620°C-20µm-100MPa, and
(c) 620°C-20µm-220MPa

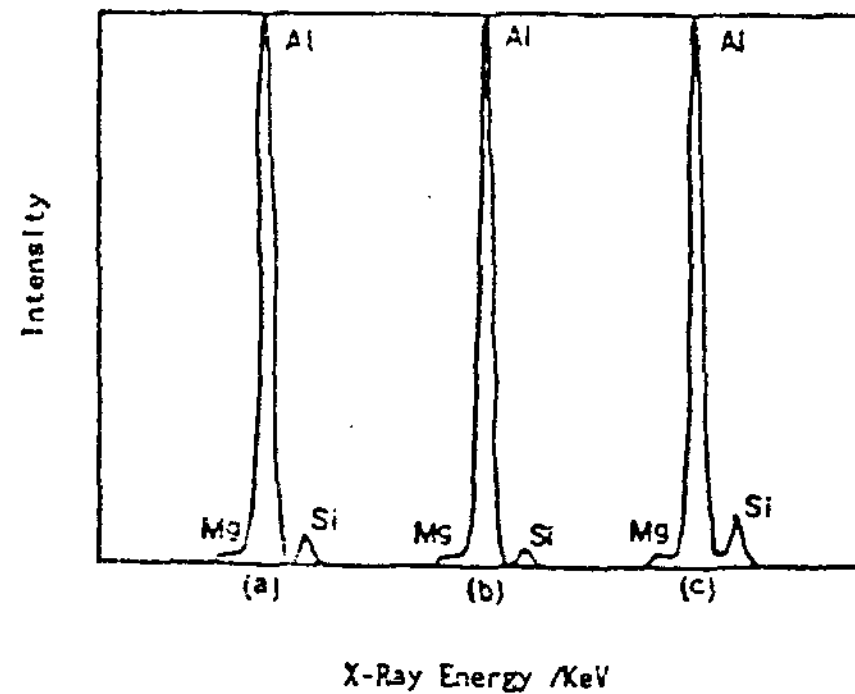


Fig. 7. EDX point analysis pattern Mg, Al and Si in Al-2%Si-2%Mg-15%SiCp composite with various squeezing temperature(b and c) and SiC particle size(a and b) at interface between matrix and SiCp.
(a) 620°C-20µm-100MPa,
(b) 620°C-70µm-100MPa, and
(c) 640°C-70µm-100MPa

나타났다.

Fig. 4-7에서 알 수 있듯이 가압에 따라서 반응상으로 생각되는 Al_4C_3 의 peak가 점차 크게 증가하였다. 특히 여러 θ 값에서도 Al_4C_3 가 나타났다. 이것은 가압력의 증가에 따라서 계면반응이 활성화되었음을 뜻한다. 계면반응이 가압력에 따라서 증가되었으면 계면반응의 두께도 다를 것으로 생각된다. 가압에 의해서 모상의 용융점의 증가에 의해 모상에서 SiCp의 용해도는 증가될 것으로 생각된다.

강화입자 복합재료에서 중요한 것은 기지금속과 강화입자와의 사이에 젖음성이 양호해야 한다는 것이다. 그러므로 계면접착을 위해서는 어느 정도의 계면반응은 필수적으로 일어나야 된다고 생각된다. 그러나 계면반응이 오히려 많이 일어나면 반대로 복합재료의 기계적 특성을 저하시키는 결과를 초래하므로 과도한 계면반응을 방지하기 위해서는 제조온도, 응고속도, 제조시간 등 조건의 조절이 필요하다. 따라서 본 실험에서는 기계적 성질등을 검토하여 볼 때 100MPa의 가압력일 때 양호한 복합재료의 가능성을 알 수 있었다.

3.3 마모특성

$620^\circ C-20\mu m-XMPa$ 의 조건으로 가압주조된 복합재료의 가압력 및 마멸속도에 따른 비마멸량의 변화를 Fig. 8에 나타냈다. 가압력과 마멸속도가 증가할수록 비마멸량은 감소되었는데 이는 가압력이 증가할수록 기지금속의 경도 및 SiCp와 기지와의 계면의 경도가 증가되고 또 Al과 SiCp계면이 활성화되어 $4Al+3SiC \rightarrow Al_4C_3+3Si$ 반응결과로 생성된 Al_4C_3 의 금속간화합물의 기여, Si의 기지고용강화효과 등으로 인해 경도가 증가되어 상대재질의 마멸이 커지므로써 비마멸량이 감소한다고 생각된다.

Photo 5는 50MPa, 220MPa로 가압주조된 복합재료를 마멸속도 0.64m/sec, 2.41m/sec, 3.67m/sec로 변화시켜 마멸시험을 한 후 마멸기구 형태를 규명하기 위해서 마멸면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. (a)는 50MPa, (b)는 220MPa로 가압주조한 것으로 낮은 마멸속도(0.64m/s)에서는 마멸면에 wear debris(화살표X)가 많이 존재하며 또한 plastic flow의 현상이 일부 나타나 응착마멸현상이 지배적으로 나타나지만 마멸속도가 2.41m/s에서는 plastic flow 뿐만

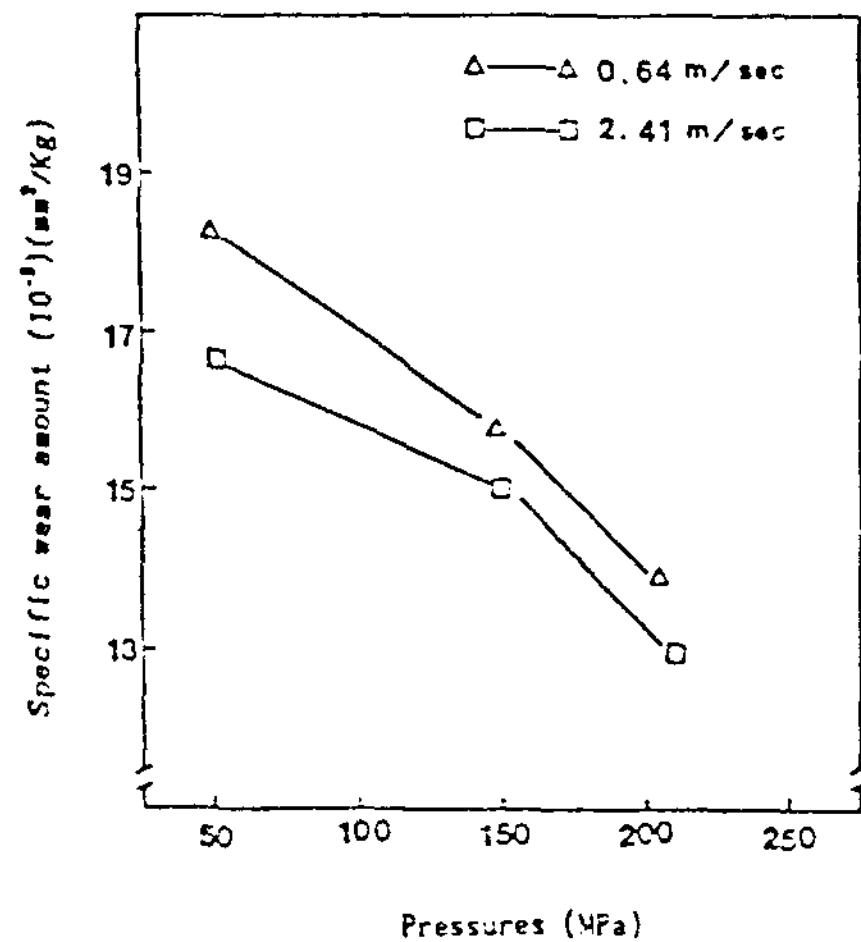


Fig. 8. Specific wear amount vs. applied pressure in $620^\circ C-20\mu m-XMPa$ composites.

아니라 ploughing 현상이 나타나고 있으며 고속마멸에서는 마멸면에 oxide층 및 경질 SiCp에 의해서 연삭마멸 형태로 바꾸어짐을 알 수 있다. 그러나 50MPa 가압주조재는 고속마멸에서도 plastic flow와 ploughing 현상이 나타나고 있으나 220MPa 가압주조재에서는 이와같은 현상이 거의 보이지 않는다. 또한 가압력의 증가에 의해서 비마멸량이 감소되는 이유는 재료내의 기공의 감소현상의 영향도 크게 작용할 것으로 생각된다.

저속마찰에서는 $70\mu m, 20\mu m$ 모두 상대시편 S45C와의 전단응력이 양 상대재료의 미시적 결합력보다 강하여 S45C에 의해서 metallic wear loss가 발생하며 마멸력과 마멸하중에 의하여 마멸면이 용이하게 소성되고 소성변형에 의한 가공경화현상으로 균열이 발생하여(화살표Y) 마멸이 일어났음을 알 수 있다. 또 $20\mu m$ 일 때가 $70\mu m$ 일 때보다 마멸면이 다소 매끄럽고 마멸도가 감소하는 이유는 분산강화에서 크기가 작을수록 강화에 기여하는 효과가 증가함에 기인한다고 생각되고 또 입자가 작을수록 상대적으로 비표면적이 커서 마멸시험중에 마찰열에 의하여 생성된 SiO_2 의 윤활작용의 효과라고 생각된다.

고속마찰이 될수록 마멸열때문에 마멸면이 활성화되어 대기중 산소와 반응하여 생성된 산화층은 윤활작용을 하여 마멸량을 감소시키고 또 양호한 내열성과 내마모성을 가지고 있는 SiCp가 기지에서 빠져나오지 않고 기지금속내로 밀려들어가 그 SiCp의 밀도가 증가되므로써 density가

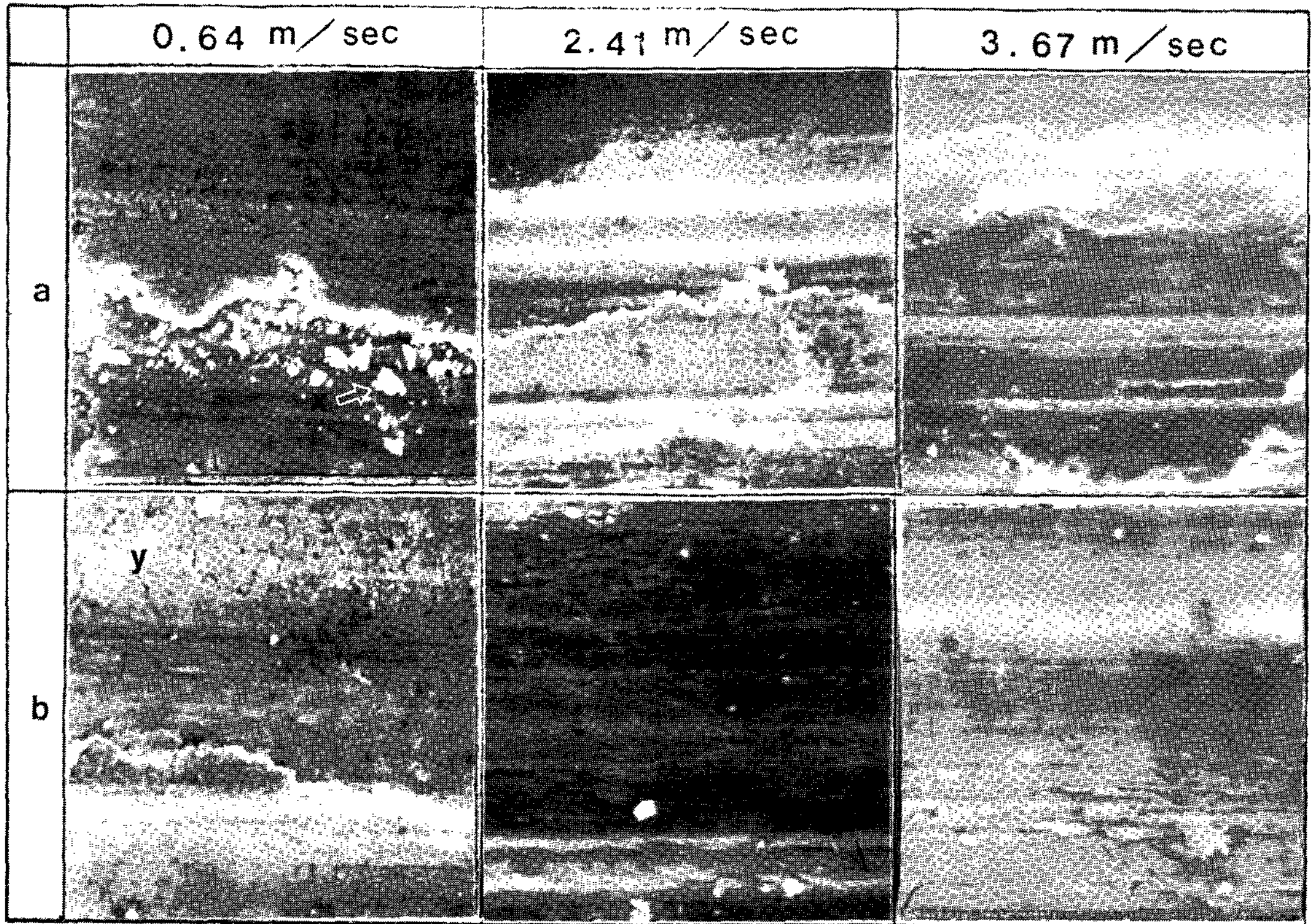


Photo 5. SEM microphotographs of wear surface on squeezing pressures. (620°C-20μm-XMPa)
(a) 50MPa. (b) 220MPa.

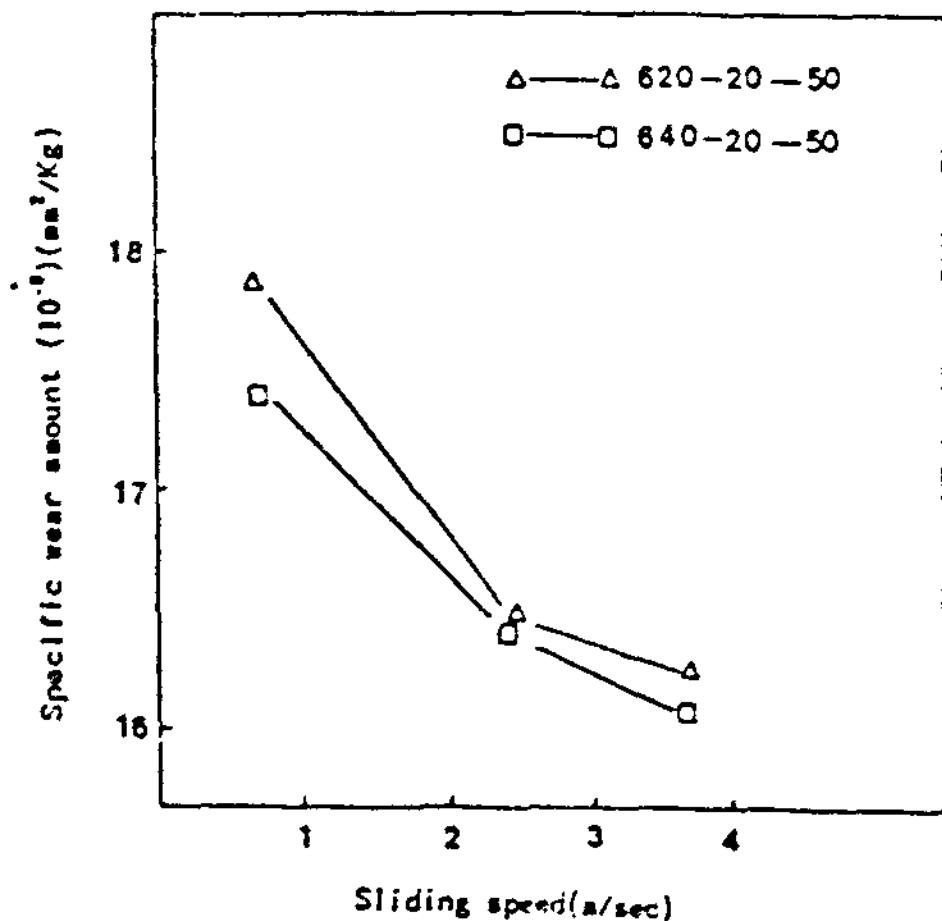


Fig. 9. Specific wear amount vs. applied sliding speed in X°C-20μm-50MPa composite.

높아지면서 연삭마모형태를 나타낸다.

Fig. 9는 입자크기와 가압(50MPa)상태가 동

일할 때 가압온도에 따른 비마멸량을 나타낸 것으로 고온일 때가 복합재료에 액상이 더 많아지게 되고 가압력에 따라서 상대적으로 핵생성수가 증가하여 미세조직을 형성하여 내마멸성을 향상시키는 것으로 생각된다.

4. 결 론

가압주조법의 제조조건 중에 가압력, 가압온도 및 입자크기 등을 변화시켜 Al-SiCp복합재료를 제조하여 이들 제조조건이 Al-SiCp복합재료의 미세조직 및 역학적 성질에 미치는 영향을 연구 검토한 결과 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 가압력이 약 100MPa일 경우에 양호한 Al-SiCp복합재료의 제조가 가능하였다.

2) 가압력이 증가될수록 과냉의 효과가 증가되어 cell size가 감소되었고 복합화부분이 비복

합화부분보다 cell size가 작게 되었다.

3) 가압력이 증가할수록, particle size가 작을수록, 가압온도가 높을수록, 기계적성질(내마멸성, 경도, 강도)이 향상되었다.

4) 가압력의 증가로 기지조직과의 SiCp 계면에서 $4Al + 3SiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Si$ 의 계면반응이 촉진되어 Al_4C_3 의 화합물이 증가되었고 SiCp주위에 Si의 양이 증가되었다.

5) 가압력이 증가할수록 응착마멸기구에서 연삭마멸기구로 마멸기구가 천이되었으며 특히 마멸속도가 증가할수록 내마멸성은 크게 증가하였다.

후 기

본 연구는 1993년 급속응고 신소재 연구소의 지원으로 행하여졌으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] M. A. Howes : J. Met., 38 (1986) 28.
- [2] F. Flogar, W. H. Krueger and J. G. Goree : Ceram. Eng. Sci. Proc., 5 (1984) 643.
- [3] J. Din Woodie : SAE Tech. Pap. Ser., No. SAE 870437 (1987) 1.
- [4] K. Marsden : J. Net., 37 (1985) 59.
- [5] R. R. Bowles, D. L. Manciri and M. W. Toan : Mamf. Eng., 98-5 (1989) 61.
- [6] 正木彰樹 : 日本 ガスタービン學會誌, 14-55 (1986) 14.
- [7] 中村敏則, 西山辛夫 : 鐵と鋼, 73-3 (1987) 662
- [8] 國各啓一, 荒川英夫, 阪上正, 御法川齊, 明山健二, 坂本達帝 : 日本金屬學會誌, 50 (1986) 583.
- [9] D. E. Bowles and D. R. Tenney : SAMPLE Tech. Conf., 18 (1986) 414.
- [10] 洩沼博, 廣橋光治 : 金屬, 57 (1987) 12, 35.
- [11] 文越諄外 : 回速摩耗試驗機考察とそりしによる摩耗試験の検討, 日本機械學會論文集, 21 (1955) 55.
- [12] K. C. Russel, J. A. Cornie and S. Y. Oh : Proc, Conf., New Orleans (1986) 69.
- [13] P. K. Rohatgi, R. Asthana and S. Das : Int. Met. Real, 31, 3 (1986) 69.
- [14] A. Saigal : AFS Trans., 43 (1986) 219.
- [15] B. Derby and J. R. Walker : Scr. Met., 22 (1988) 153.
- [16] 전우용 : 석사학위논문, 전북대학교 (1993).