

.....
論 文
.....

SiC 휘스커로 강화한 6061 Al 합금 복합재료의 기계적 특성에 미치는 열간압출의 영향

金俊洙*, 林水根**

Effect of Hot Extrusion on the Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy composites Reinforced with SiC whisker

Jun-Su Kim* and Su-Geun Lim**

Abstract

Both cast and extruded composites of SiC whisker reinforced 6061 Al alloy matrix were fabricated by high pressure infiltration of the alloy melt into the SiC preform and subsequent hot extrusion of the composite ingots. The micro structures, age hardening behavior and mechanical properties have been examined on the both cast and extruded composites of SiCw/6061.

The cast composites of SiCw/6061 were obtained in which SiC whiskers were randomly oriented. Hot extrusion of these cast composites lead to alignment of the whisker in the direction of extrusion. Strengthening effect of whisker in the extruded composites is lower than that of the cast composites. The cast composites of SiCw/6061 showed higher tensile strength and lower elongation than extruded composites of SiCw/6061 at all testing temperatures. Lower tensile strength and higher elongation of the extruded composites were attributable to fine grain structures in which grain boundary sliding occurred preferentially at elevated temperatures.

1. 요약

섬유강화복합재료의 탄성계수, 강도 등의 기계적 특성과 열팽창계수 등의 물리적 특성은 강화섬유의 체적율, 형상 및 분포상태 등의 구조적인 요소에 크게 의존되고 있으므로 탄화규소(SiC), 질화규소(Si₃N₄) 등의 휘스커와 알루미나(Al₂O₃), 티산산칼륨(K₂O·6TiO₂) 등의 단섬유강화 복합재료에 있어서도 강화섬유에 방향성을 부여함으로써 강화효율을 향상시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1-5]. 불연속섬유를 배열시키는 방법으로는 정전기를 이용하는 예[6]도 있지만,

압연, 단조, 압출 등의 소성가공에 의한 기지금속의 소성유동을 이용하는 방법[7,8]이 일반적이다. 한편, 기지금속의 소성유동을 이용해 강화섬유에 방향성을 부여하는 경우, 섬유의 상당량이 파손되므로 강화섬유로서의 효율이 저하되는 우려도 있다.

본 연구에서는 SiC 휘스커가 3차원적으로 배열되어 있는 예비성형체의 공간에 Al-Mg-Si계의 6061 합금을 기지금속을 고압침투시켜 휘스커가 3차원적으로 배열된 주조복합재료를 제작했으며, 이들 주조복합재료를 열간압출 가공하여 휘스커가 한 방향으로 배열된 압출복합재료를 제

*현대자동차(주) 승용제품 1연구소 재료기술부(Material Engineering and Test Department, Passenger Car Engineering Center 1, Hyundai Motor Company, Ulsan 681-791)

**경상대학교 공과대학 금속재료공학과(Department of Metallurgical & Materials Engineering, Gyeong-Sang National University, Chin Ju 600-701)

조했다. 이들 주조복합재료와 압출복합재료에 대해서 조직관찰, 제조과정에서의 휘스커의 파손정도, 시효경화거동 및 상온, 고온에서의 인장특성을 비교해 열간가공이 주조복합재료의 재료특성에 미치는 영향을 비교 평가하였다.

2. 복합재료 제조와 시험방법

2.1 사용재료

강화섬유로서는 입방정구조의 β -SiC 휘스커 (TOUKAI Carbon Co.製)를 사용했다. 평균직경이 0.5~0.1 μ m, 길이가 30~100 μ m 정도인 SiC 휘스커를 12×48×100(mm)의 사각주형과 ϕ 35×90mm의 원주형으로 성형한 것을 각각 주조복합재료와 압출복합재료용의 예비성형체로 사용했다. 예비성형체중에는 SiO₂가 약 1.5wt% 함유되어 있으며, 공간체적율을 13%(단, 원주형은 10%), 20%, 30%로 조절하여 복합재료중의 SiC 휘스커 체적율(Vf)을 3단계로 변화시켰다.

기지금속은 시효경화형 알루미늄합금인 Al-Mg-Si계의 6061합금을 이용했으며, 이들 합금 지금의 화학조성은 Table 1과 같다.

2.2 복합재료 제조

Fig. 1은 고합주조와 열간압출에 의한 복합재료의 제조공정으로서, 용융 6061합금을 1083K으로 가열하여, 1133K으로 예열한 예비성형체중의 공간에 100MPa의 압력으로 가압침투시켜 복합재료를 제조했다. Fig. 2는 고압주조용 금형의 개략도로서 금형은 내형과 외형의 분할형으로 구성되어 있으며, 12×48×100(mm)의 사각주형 예비성형체를 금형의 중심부에 위치시킨후 runner를 통해 용탕을 주입, 가압 plunger를 3mm/s의 속도로 이송시켜 응고가 완료될 때까지 약 120s간 가압을 유지했다. 이때, 금형의 내형은 673K으로, 외형은 523K 예열했다. 또한, ϕ 35×90mm의 원주형 성형체를 사용해 상기와 동일한 조건으로 제조한 복합재료를 빌렛으로 673K에서 열간압출가공해, 직경 10mm의 압출복합재료(압출

비는 12:1)를 제조했다. ram의 이동속도는 0.9m/s로 했으며, 기지금속인 6061합금에 대해서도 상기의 조건하에서 고압주조, 열간압출 가공하여 비교재로 사용했다.

2.3 시험방법

각각의 압출복합재료의 비중을 측정한 후, 내부결함이 없는 것으로 가정하여 복합재료 중의 휘스커 체적율을 복합칙(rule of mixtures)에 의해 계산했다[9]. Vf10%와 Vf30%의 주조 및 압출복합재료의 기지금속의 일부를 10%의 NHO₃ 수용액으로 부식시킨 후 휘스커의 배열상태를 주사전자현미경(SEM)을 이용해 조사했으며, 추출한 휘스커의 aspect ratio를 측정했다.

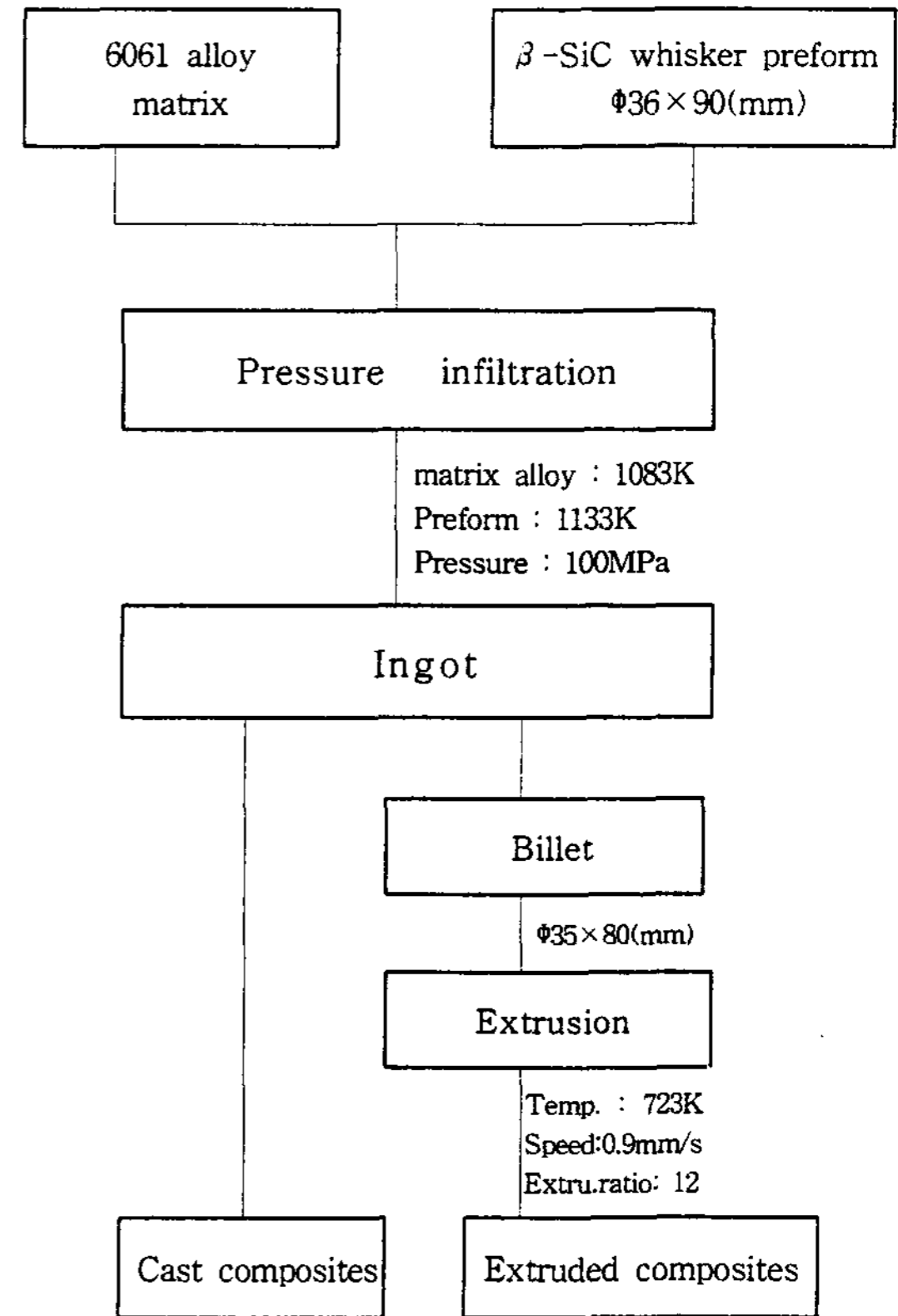


Fig. 1. Flow chart of fabrication process of SiC_w/6061 Al composites.

Table 1. Chemical composition of 6061 alloy used for matrix alloy(wt.%).

Element	Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
Amount	0.88	0.63	0.31	0.27	0.09	0.05	0.04	Bal.

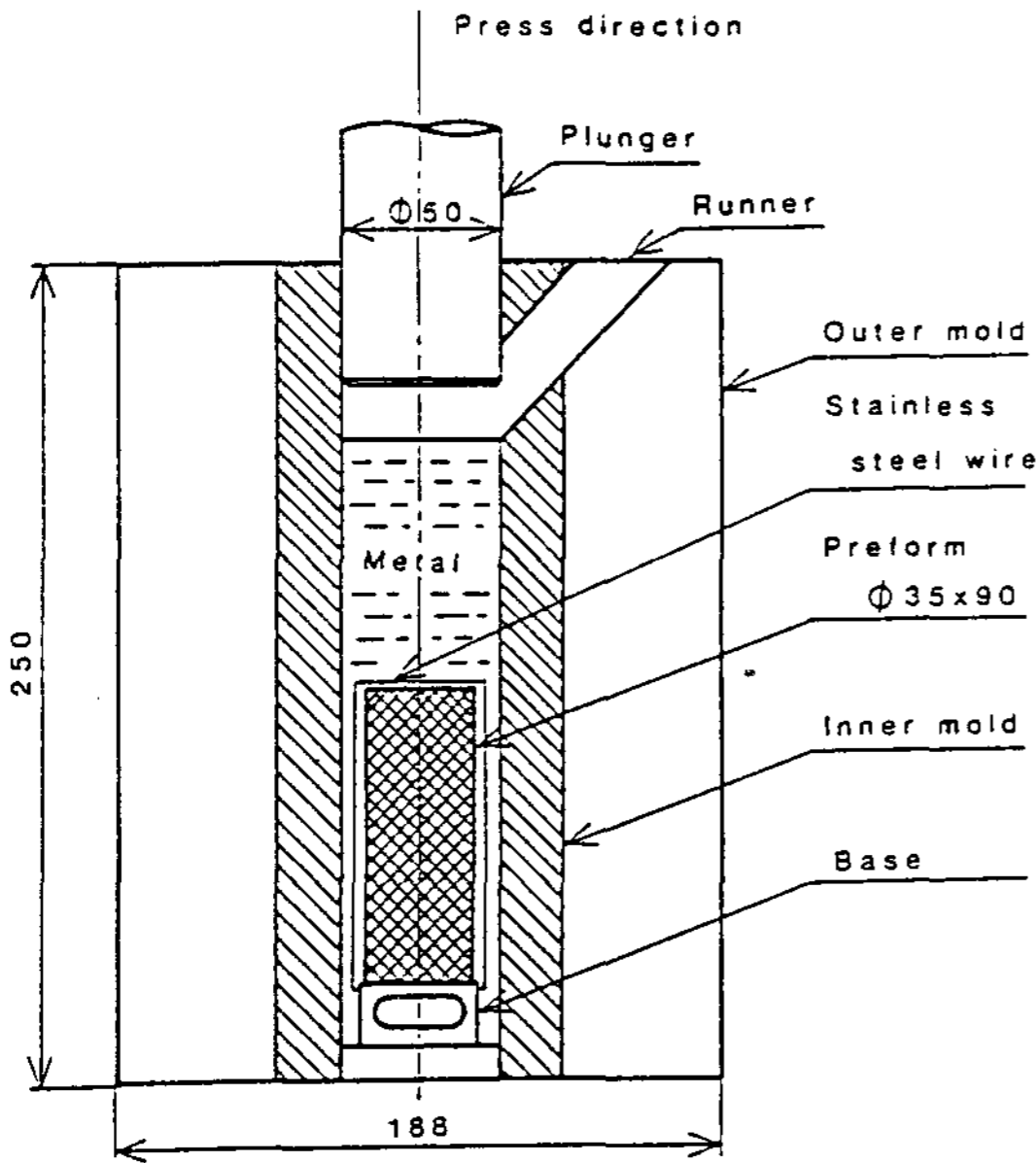


Fig. 2. Metal mold and SiC whisker preform for pressure infiltration.

또한, 가속전압 200kV의 투과전자현미경(TEM)을 이용해 복합재료의 기지금속의 조직을 조사했다. 각 복합재료를 803K의 염욕에서 7.2ks 용체화처리한 후, 443K의 유욕에서 등온시효처리하면서 시효경과 거동을 조사했다. 최고 경도상태로 시효처리한 시료(T6)에 대하여 실온 및 고온(473K, 573K)에서 인장특성을 시험편 5개의 평균치로 구했다. 인장시험편은 평형부의 직경 5mm, 표점간거리 20mm가 되도록 제작하였으며, cross head 이동속도를 0.05mm/s로 했다. 상온에 있어서는 표점거리 10mm의 clip gauge를 사용해서 탄성계수를 측정했다. 고온에 있어서는 소정의 시험온도에서 300s유지시킨 후 인장시험을 행했다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 복합재료의 조직

Fig. 3은 고압주조에 의해 제작한 SiC_w/6061 (Vf20%) 주조복합재료와 이들 복합재료를 열간 압출가공한 압출복합재료에 있어서 휘스커의 분포상태이다. 주조복합재료 (a)에서의 휘스커는 3차원적으로 배열되어 있으며, 이들 휘스커의 평균 aspect ratio는 38정도이다. 반면, 압출복합재

료에서의 휘스커 대부분은 기지금속의 소성유동에 의해 압출방향으로 균일하게 배열되어 있으나, 휘스커의 평균 aspect ratio는 12정도로 압출전과 비교해 상당히 짧으며, 압출가공에 의해 휘스커가 파손되었음을 알 수 있다. 소성가공중 강화섬유의 파손정도는 전보[5]에서 이미 보고한 바와 같이 강화섬유의 Vf가 증가되거나, 압출압력이 높아짐에 따라 증대되는 경향을 나타내고 있다.

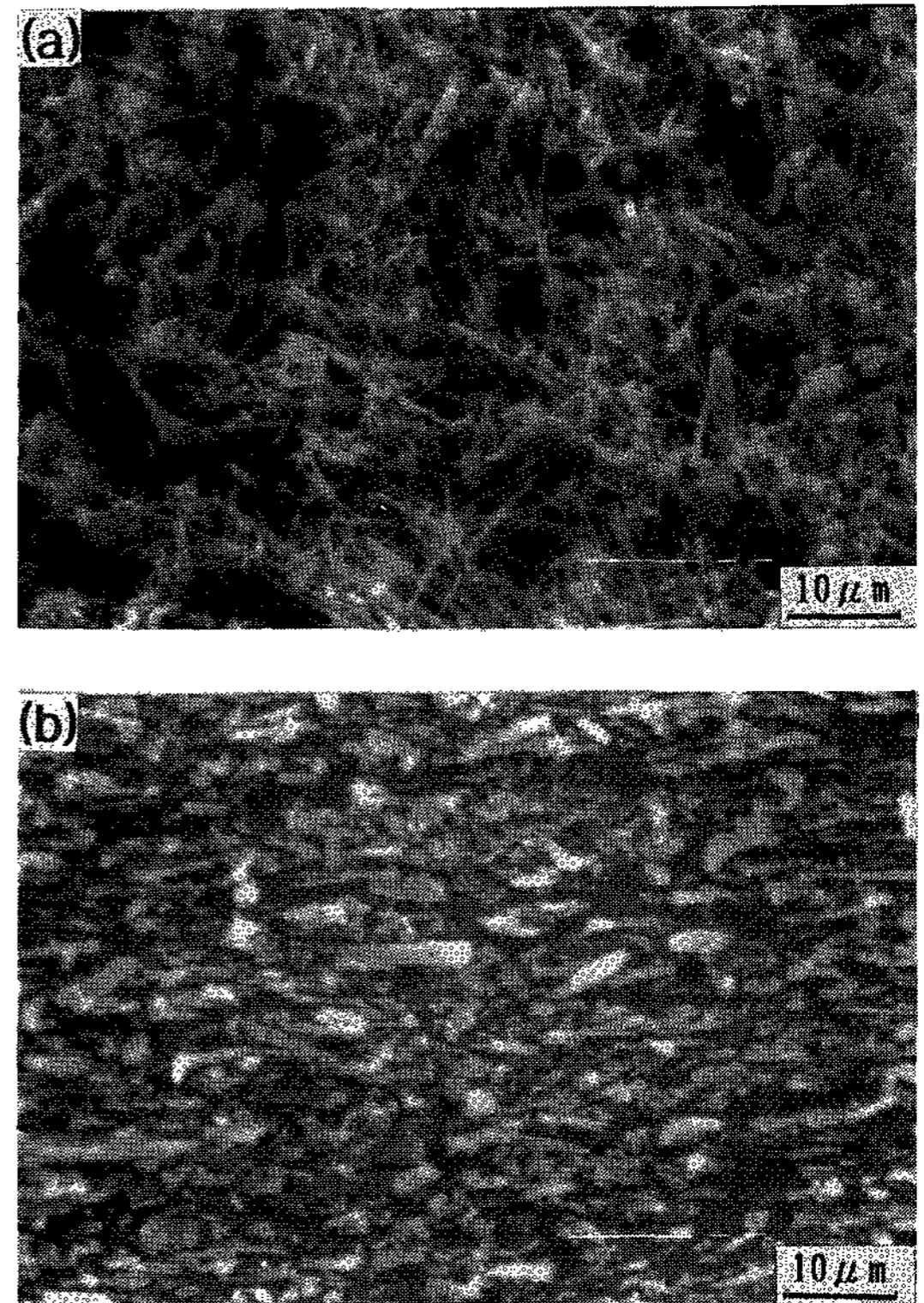


Fig. 3. SEM micrographs of SiC whiskers in (a) pressure infiltrated SiC_w/6061 Al cast composite(Vf 30%) and (b) SiC_w/6061 extruded composite(Vf 30%) on section parallel to the extruding direction.

3.2 비중

Table 2는 SiC_w/6061 주조복합재료의 실측 밀도와 이로부터 산출한 휘스커의 체적율을 예비성형체중의 휘스커의 공간체적율과 비교한 것으로서, 주조복합재료의 Vf는 예비성형체의 휘스커 공간충진율보다 다소 높아져 있다. 이는 용융기

Table 2. Measured density and volume fraction (Vf) of SiC whisker in SiC_w/6061 cast composites.

Materials	Vf of whisker in preform (vol.%)	Density of composites (Mg/m ³)	Estimated Vf of whisker in composites (vol.%)
6061	—	2.703	—
Vf13%	13.23	2.779	16
Vf20%	21.27	2.815	23
Vf30%	31.24	2.865	33

지금속을 예비성형체내에 고압침투시킬때 예비성형체가 압축변형되기 때문이라고 생각되며, 본 연구의 고압주조 조건하에서는 예비성형체가 약 10~30% 정도 압축변형되고 있으며, 압축변형되는 비율은 Vf가 낮을수록 커짐을 알 수 있다. 한편 본 논문중에서는 SiC 휘스커의 Vf가 예비성형체의 공칭충진율로 표기되어 있다.

3.3 시효경화 거동

Fig. 4의 (a)와 (b)는 각각 SiC_w/6061 주조복합재료와 압출복합재료를 443K에서 등온시효 처리한 시효경화 곡선이다. 6061 주조재 (a)는 약 90ks에서 최고경도(Hv100)를 나타내고 있으나, Vf13%, Vf20% 주조복합재료에서는 30ks에서 각각 Hv170, Hv200을, Vf30% 주조복합재료에서는 20ks에서 Hv250을 나타내, 최고경도에 도달하는 시간이 Vf가 증가됨에 따라 기지합금보다 단축되고 있다. 이러한 경향은 주조복합재료를 재차 열간압출가공한 압출복합재료 (b)에서 현격하게 나타나고 있다. 즉, SiC_w/6061 복합재

료의 기지금속인 Al-Mg-Si계 합금의 시효과정은 과포화고용체 → G.P zone → β(Mg₂Si) 중간상 → β'(Mg₂Si) 안정상의 순으로 이루어진다[10]. 압출복합재료의 기지조직은 전보[11]에서 보고한 바와같이 전위밀도가 높으며, 미세한 결정립(혹은 아결정립)등이 형성되어 있다. 이와같은 격자결함에 과시효 완화를 초래하는 중간상과 안정상이 우선적으로 불균일 석출되기 때문에 주조복합재료를 열간압출가공한 압출복합재료의 최고경도 도달시간이 기지금속 혹은 주조복합재료보다 단축된다고 생각한다.

3.4 기계적특성

Fig. 5는 휘스커의 Vf변화에 따른 SiC_w/6061 (a)주조복합재료(T6)와 (b)압출복합재료(T6)의 탄성계수를 휘스커의 Vf에 대해서 표기한 것이다. 6061합금의 탄성계수는 65GPa인 반면, 복합재료의 탄성계수는 휘스커의 Vf가 증가됨에 따라 높아지는 경향이였으며, Vf30% 주조복합재료에서는 기지합금의 약 2.2배인 140GPa 정도를 얻을 수 있었다. 압출복합재료(b)에 있어서도 주조복합재료의 탄성계수와 유사한 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 6는 SiC_w/6061 (a)주조복합재료(T6)와 (b)압출복합재료(T6)의 상온에 있어서 인장강도를 휘스커의 Vf에 대해서 표시한 것이다. 두 종류의 복합재료 모두 Vf가 증가함에 따라 인장강도는 향상되고 있으나, 강도증가율에 있어서는 다소의 차이를 보이고 있다. 즉, Vf30% 주조복합재료의 인장강도는 6061 기지합금의 약 1.8배

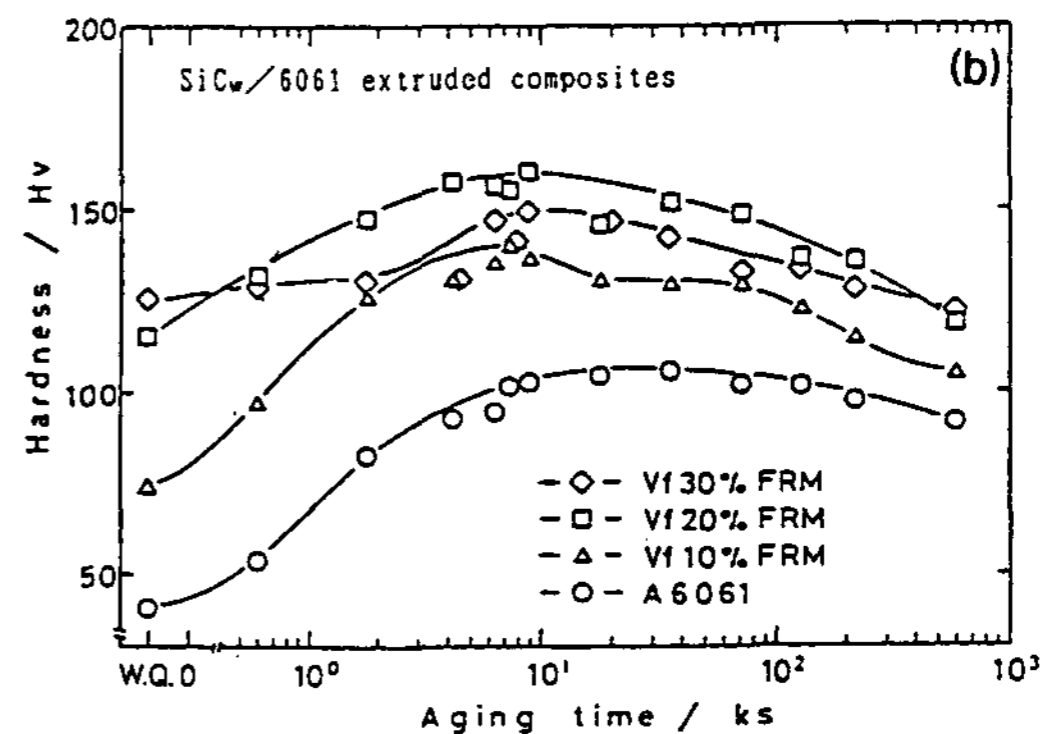
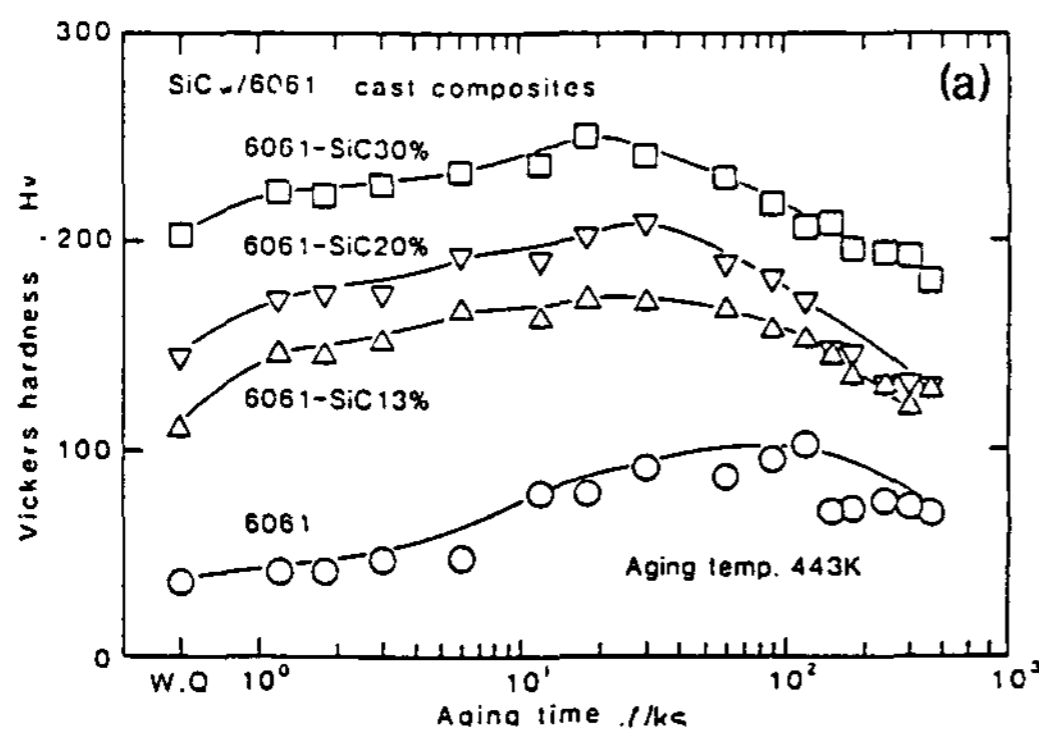


Fig. 4. Age hardening curves at 443K of (a) SiC_w/6061 cast composites and (b) SiC_w/6061 extruded composites.

인 645MPa을 얻을 수 있는 반면, 이를 열간압출 가공한 Vf30% 압출복합재료에서는 570MPa 정도를 나타내고 있어, 휘스커의 Vf증가에 의한 인장강도의 향상효율은 구조복합재료보다 낮음을 시사하고 있다.

불연속섬유가 일방향으로 배열되어 있는 복합재료에 있어서 강화섬유가 인장변형중 파단되기 위해 필요한 임계 aspect ratio를 다음의 Kelly-Tyson의 식[12]에 의해 산출할 수 있다.

$$a_c = l_c / d_w = \sigma_w / 2\tau_{im}$$

여기서 l_c 는 휘스커의 임계길이이며, d_w 는 휘스커의 직경이다. σ_w 은 휘스커의 파단강도이며, τ_{im}

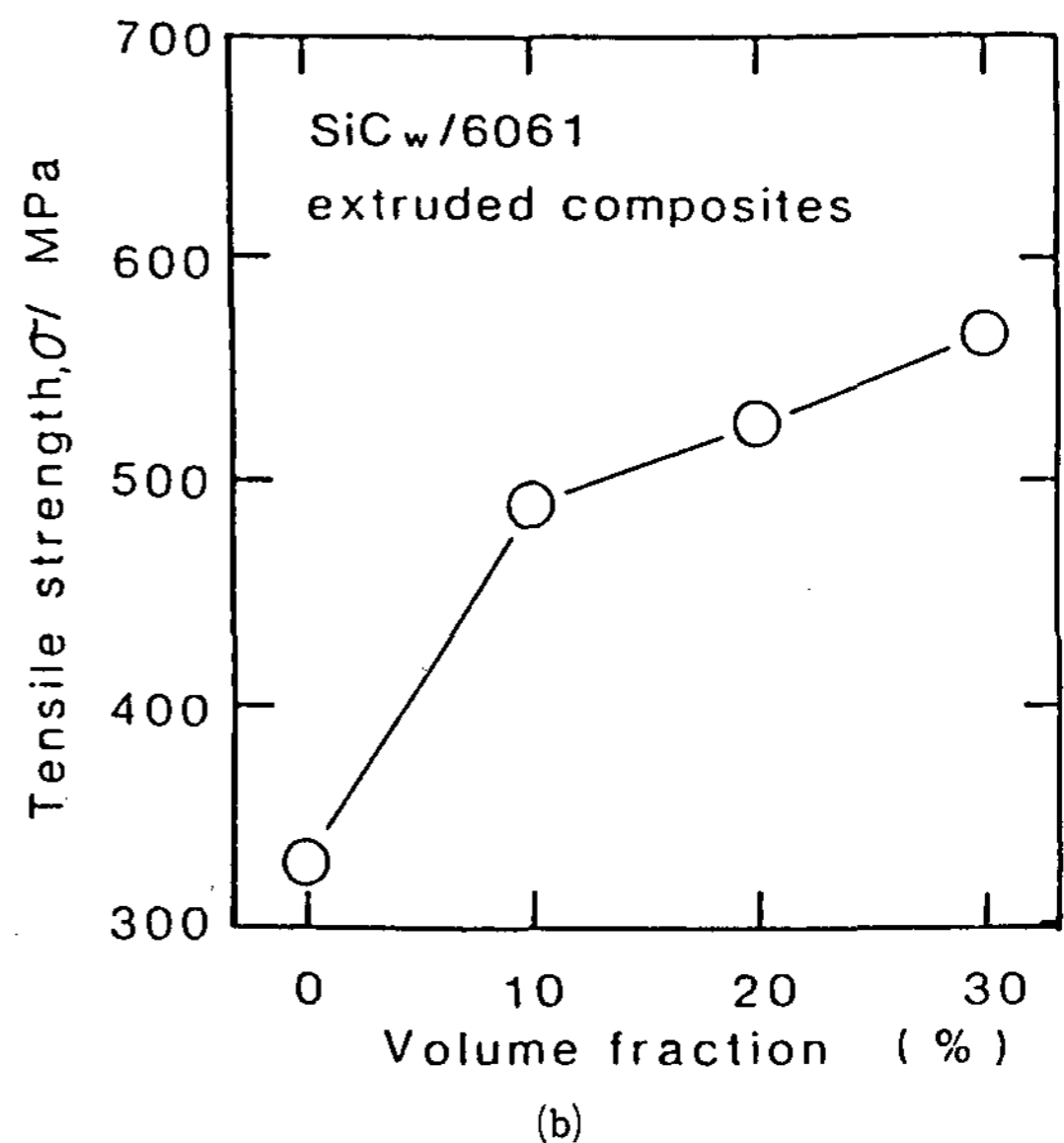
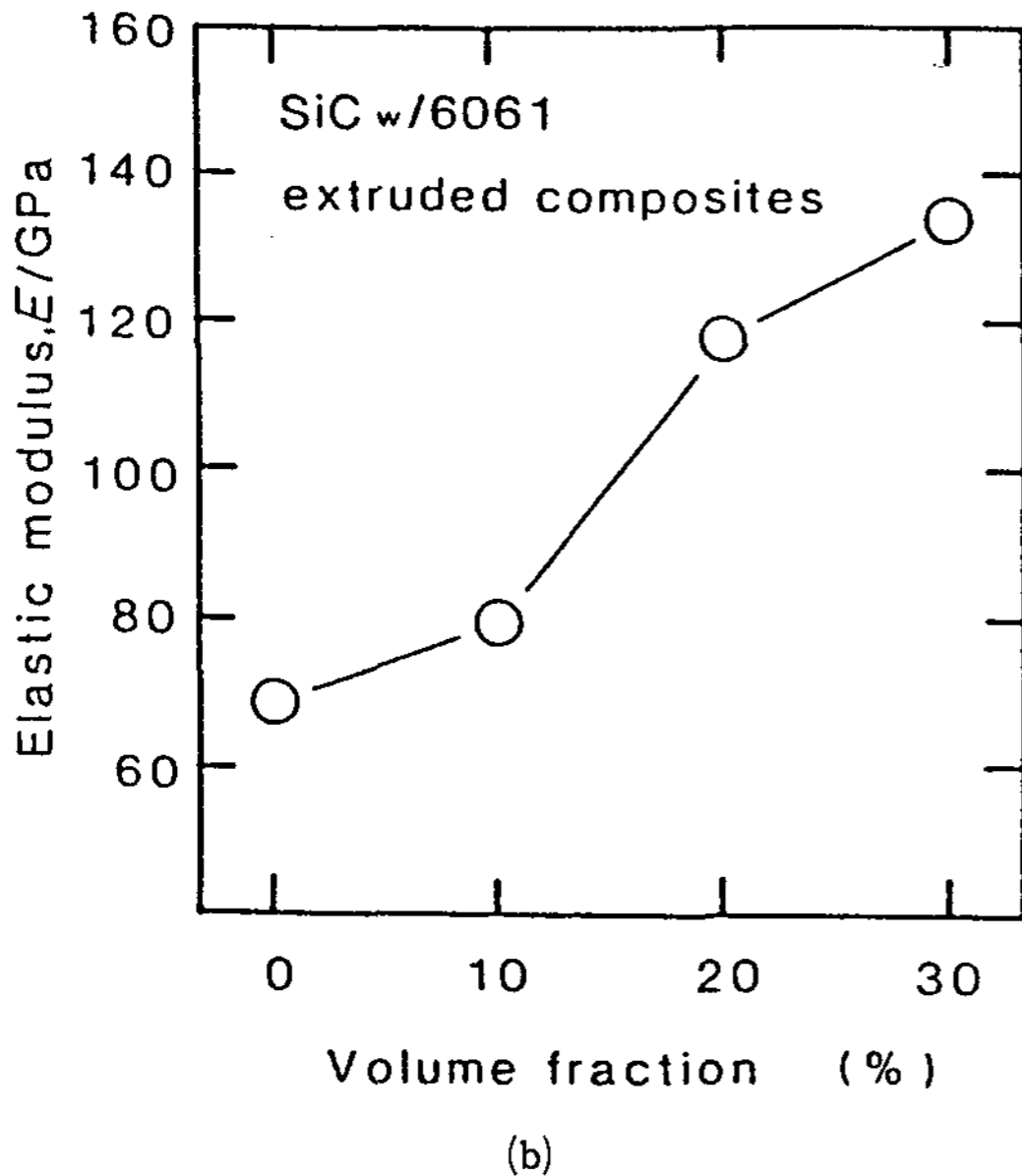
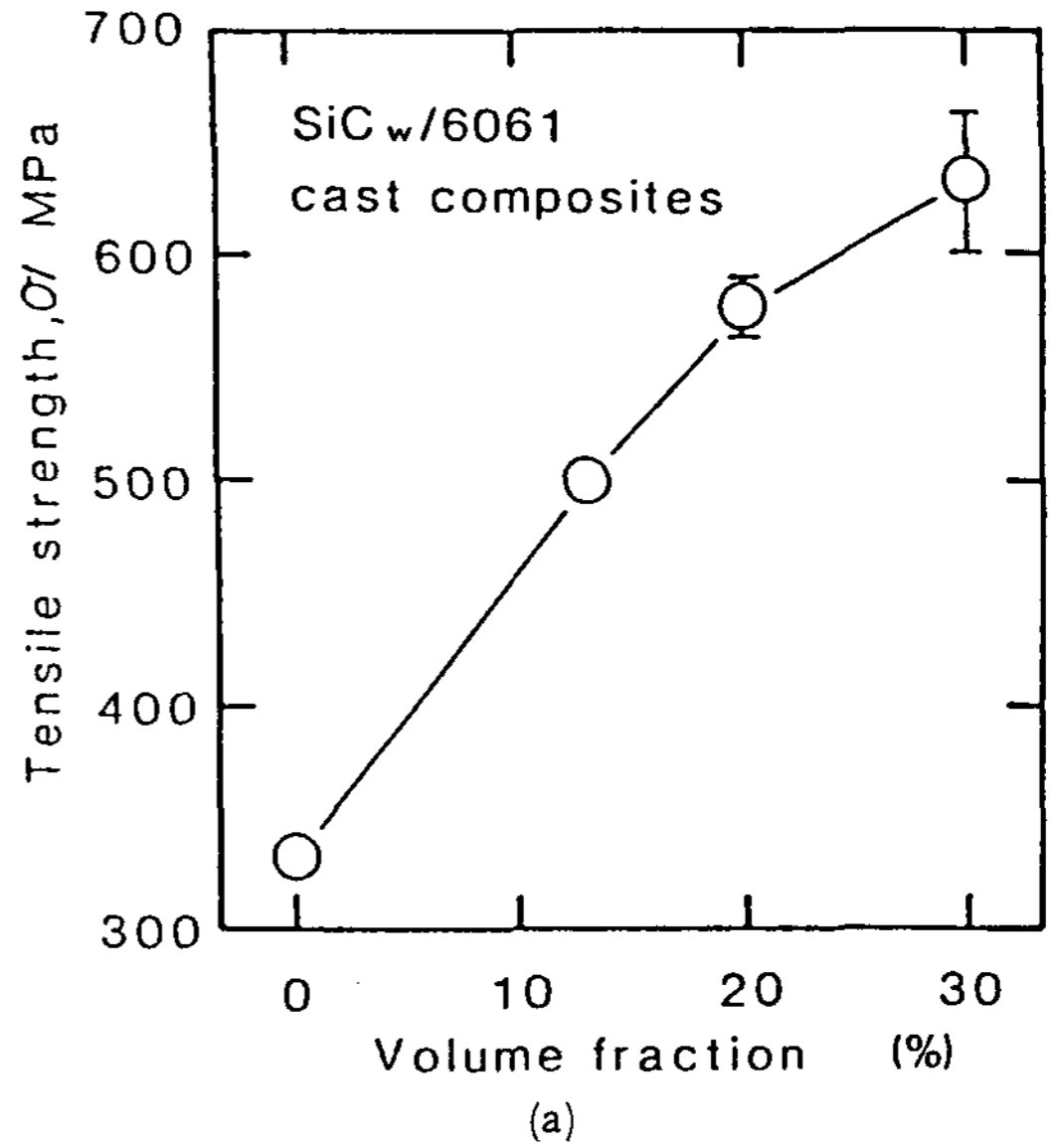
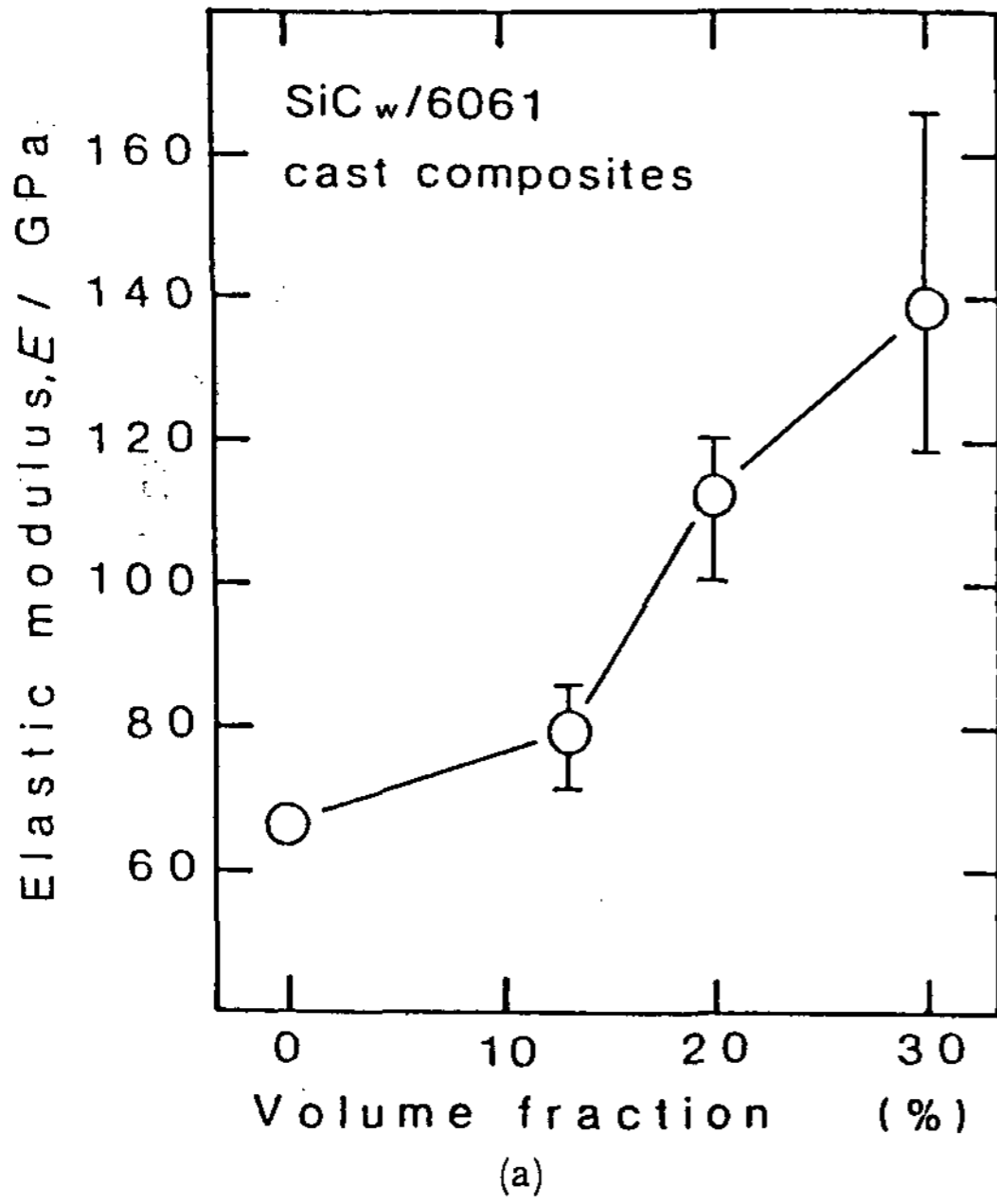


Fig. 5. Elastic modulus of (a) SiC_w/6061 cast composites(T6) and (b) SiC_w/6061 extruded composites(T6) at room temperature.

Fig. 6. Tensile strength of (a) SiC_w/6061 cast composites(T6) and (b) SiC_w/6061 extruded composites(T6) at room temperature.

은 휘스커와 기지금속간의 계면에 있어서 전단항복응력이다. 상기의 식은 본래 항복조건에서 주어진 식이지만, 복합재료에 있어서는 전단항복응력과 전단강도는 동일하다고 가정하여, τ_m 에 기지금속의 전단강도(τ_m)을 적용했다. τ_m 은 $\sigma_m/2$ 로 하였으며, σ_w 는 카다로그의 평균치(8GPa)을 이용했다. 즉, 상기의 식을 이용해 산출한 임계 aspect ratio는 약 25정도로서, 주조복합재료를 열간압출한 압출복합재료 중의 휘스커 aspect ratio (Fig. 3 참조)는 임계 aspect ratio 이하임을 알 수 있다. Shear log 모델에 기초한 불연속섬유강화 이론식에[12] 의하면 휘스커의 실측길이(l_w)가 임계길이(l_c)보다 작은 경우 ($l_w < l_c$)에는 인장변형 중 휘스커의 대부분이 pull out됨을 시사하고 있다.

열간압출가공은 휘스커를 파손시키면서 이들에게 방향성을 부여한 것이 되며, 이들 압출복합재료중의 휘스커 대부분은 인장변형 중에 pull out된다. 한편, 주조복합재료에서의 휘스커는 random하게 분포되어 있으며, 이들 평균길이는 38정도(Fig. 3 참조)로 휘스커의 대부분이 인장변형 중 파단됨을 유추할 수 있다. 즉, 상기의 실험결과로부터 휘스커의 대부분이 pull out되는 압출복합재료에서의 휘스커 강화효과가 주조복합재료의 그것보다 낮음을 알 수 있었으며, 휘스커의 파손에 의한 강도의 저하가 일방향 배열에 의한 강도증가를 상회하고 있음을 시사하고 있다.

Fig. 7은 $SiC_w/6061$ 주조복합재료(T6)의 고온 인장강도(a)와 연신율(b)을 온도에 대해서 표시한 것이다. 473K에 있어서 6061합금의 인장강도는 220MPa 정도인 반면, Vf13% 주조복합재료는 330MPa, Vf30%에서는 6061합금의 2배인 430MPa정도를 얻을 수 있다. 또한, 573K에서도 Vf13%, Vf30% 주조복합재료의 인장강도가 200MPa 정도로 고온에서도 휘스커의 강화효과가 인정되고 있다. 한편, 6061합금의 연신율은 시험온도가 상승됨에 따라 저하되는 경향을 보이고 있는 반면 주조복합재료의 연신율은 시험온도의 상승과 함께 다소 증가되는 경향을 나타내고 있으나, 이는 측정오차범위내의 변화로서 온도에 의한 연신율의 변화는 매우 적은 것으로 생각된다.

Fig. 8은 $SiC_w/6061$ 압출복합재료(T6)의 고온

인장강도와 연신율을 온도에 대해서 표시한 것이다. 6061합금 압출재의 인장강도는 전 시험온도

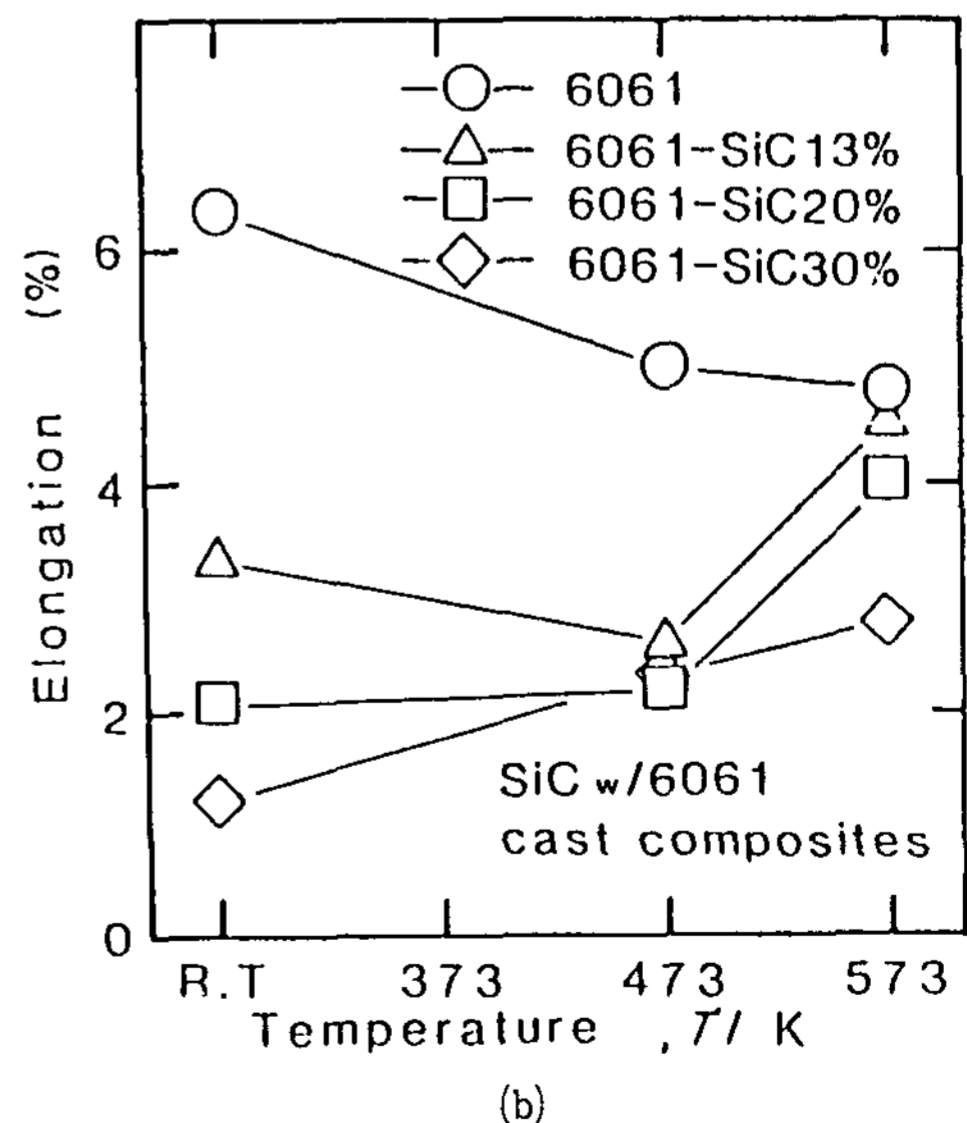
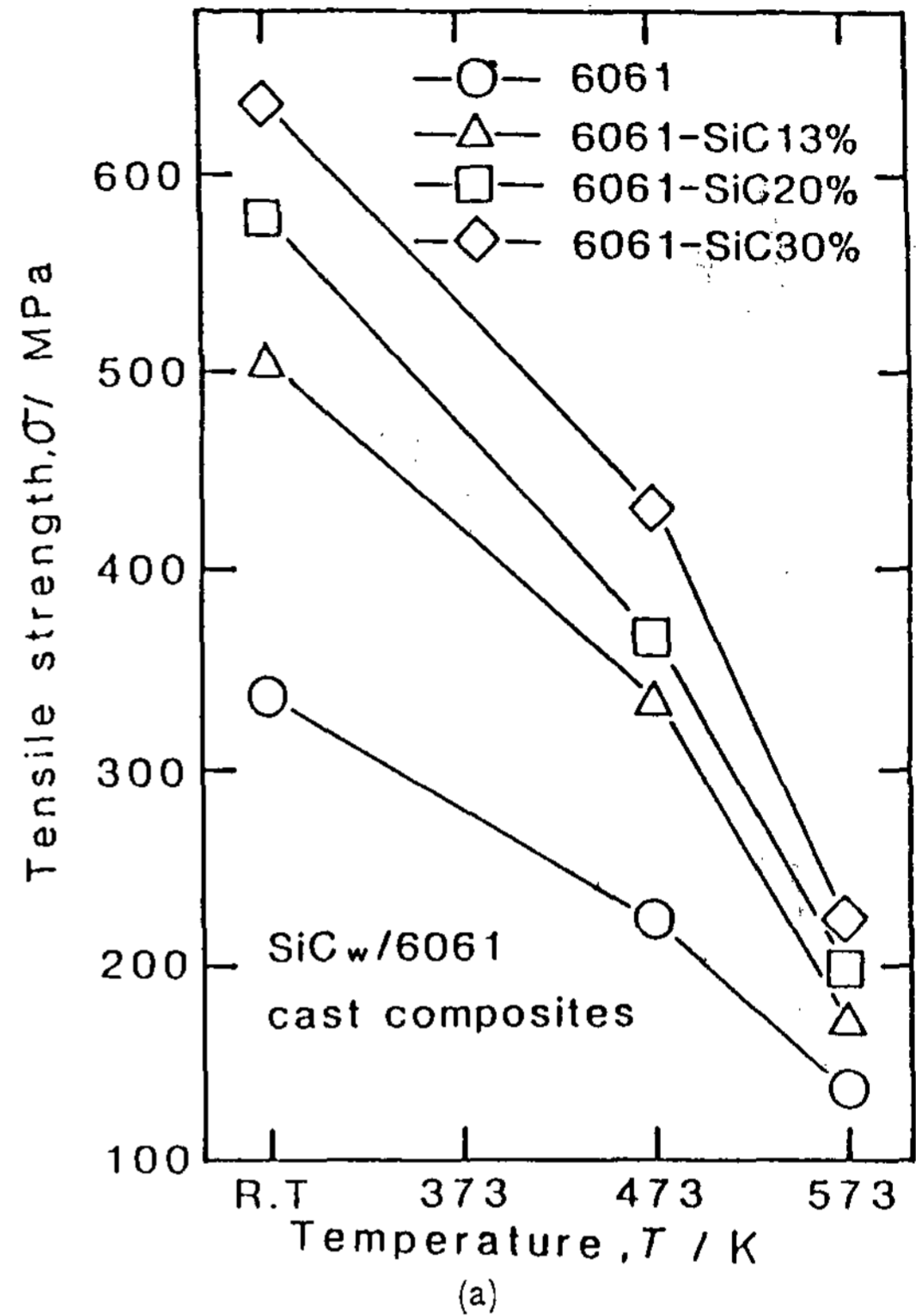


Fig. 7. Temperature dependence of (a) tensile strength and (b) elongation of $SiC_w/6061$ cast composites(T6).

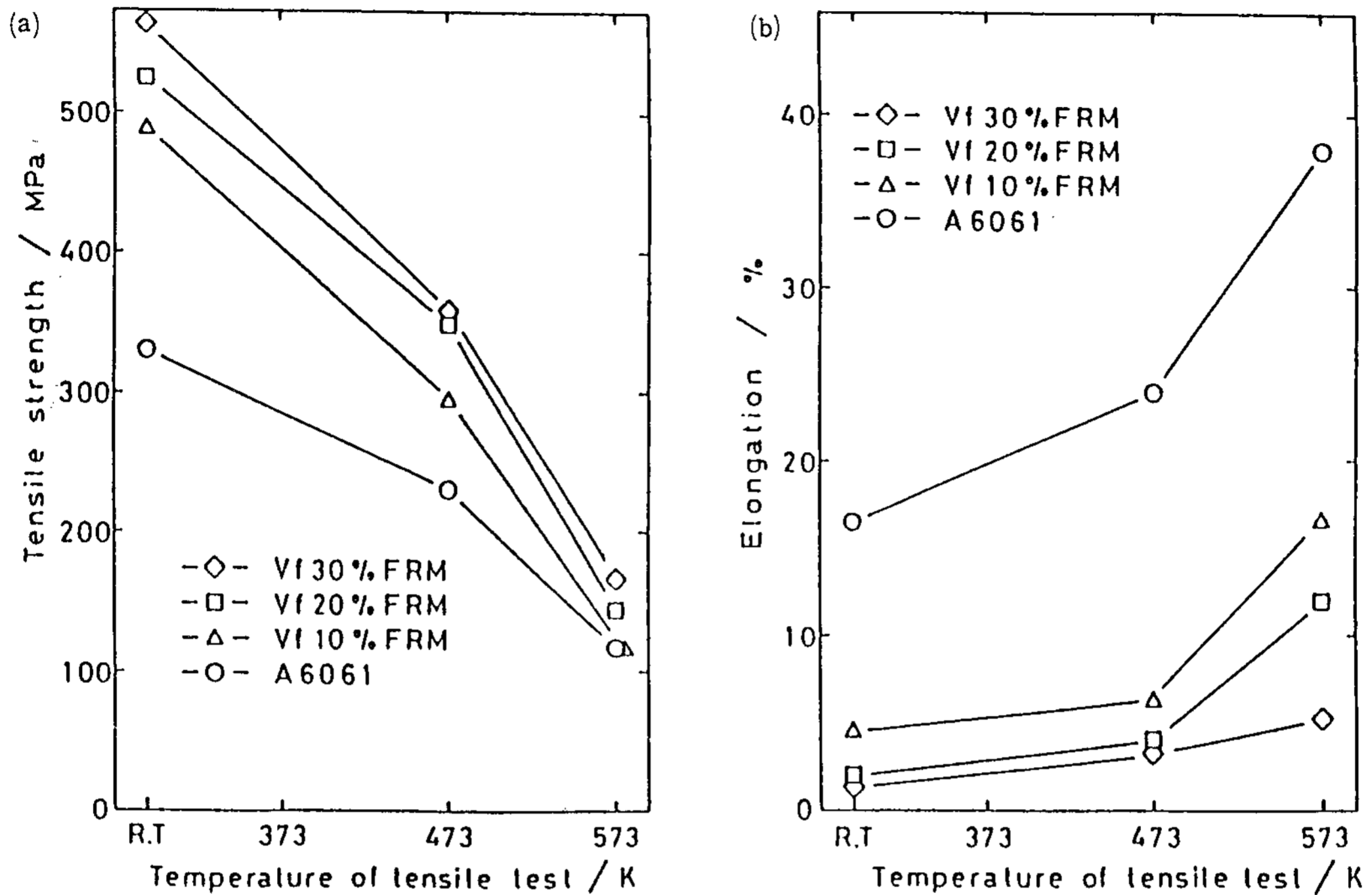


Fig. 8. Temperature dependence of (a) tensile strength and (b) elongation of SiC_w/6061 extruded composites(T6).

범위에서 주조복합재료(Fig. 7 참조)와 대등한 수준이지만, 압출복합재료의 인장강도는 대체적으로 주조복합재료보다 낮은 수준에 머무르고 있다. 특히, 573K에서의 Vf30% 압출복합재료는 주조복합재료의 1/2수준인 100MPa정도로써 주조복합재료의 온도의존성은 압출복합재료의 그것보다 월등히 낮음을 나타내고 있다. 한편, 연신율에 있어서는 Vf10%, Vf20% 압출복합재료에 있어서도 10% 이상을 나타내고 있어, 시험온도가 상승함에 따라 압출복합재료의 연신율은 증가하는 경향을 나타내고 있다.

3.5 조직관찰

Fig. 9는 SiC_w/6061주조복합재료(T6) 및 압출복합재료(T6)의 TEM조직의 예로서, (a)는 6061합금의 주조재(T6), (b)SiC_w/6061(Vf13%)주조복합재료(T6), (c)SiC_w/6061압출복합재료(T6)의 조직이고, (d)는 (c)조직의 일부를 고배율로 관찰한 것이다. 6061합금(a)과 주조복합재료(b)의 기지조직에서는 명확하지는 않지만 β(Mg₂Si)상이 석출되어 있는 것을 관찰할 수 있으며, 기지조직

은 비교적 깨끗함을 알 수 있다. 압출복합재료(c)에서는 열간압출 가공중에 형성된 미세결정립을 관찰할 수 있다. 이들 미세 결정립은 용체화처리 및 시효처리 과정에서도 소멸되지 않으며, 그 직경은 약 2~3μm정도이다. 또한, 입내에는 조대한 석출물이 불균일 석출되어 있으며 고밀도의 전위조직이 관찰되고 있다. 즉 주조복합재료를 열간 압출한 압출복합재료(T6)에서는 가공조직의 상당량이 잔존되며, 고온에서는 이들 미세결정입계에서 미끄럼변형이 비교적 용이하게 일어날 수 있으므로 주조복합재료보다 변형저항이 저하되고 연신율은 증가된다고 유추할 수 있다.

Fig. 10은 SiC_w/6061(Vf20%) 주조복합재료(T6)와 압출복합재료(T6)의 파단면 예로서, (a)와 (b)는 상온과 573K에서의 주조복합재료 파단면이고, (c)와 (d)는 압출복합재료의 파단면이다. 6061합금의 주조재와 압출재의 파단면 조직은 생략했지만, 주조재에서는 상온과 고온에 있어서 입계에서의 파괴된 흔적을 비교적 명확히 관찰할 수 있었다. 압출재에서는 파단면 전체에 dimple이 형성되는 입내파괴를 나타내며, 이들 dimple

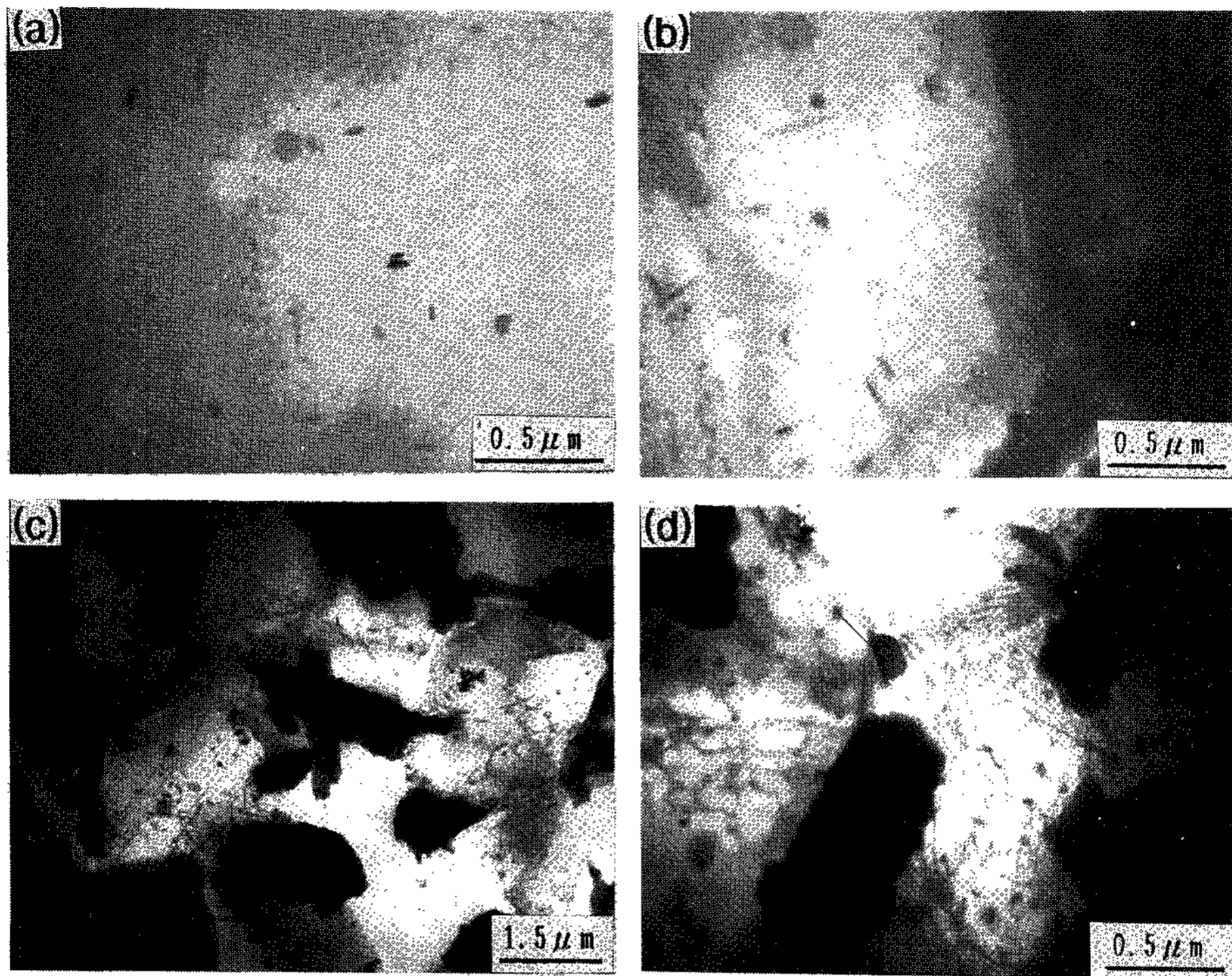


Fig. 9. TEM micrographs of (a) 6061 alloy, (b) SiC_w/6061(Vf 13%) cast composite(T6), (c) SiC_w/6061(Vf 10%) extruded composite(T6) and (d) high magnification for (c).

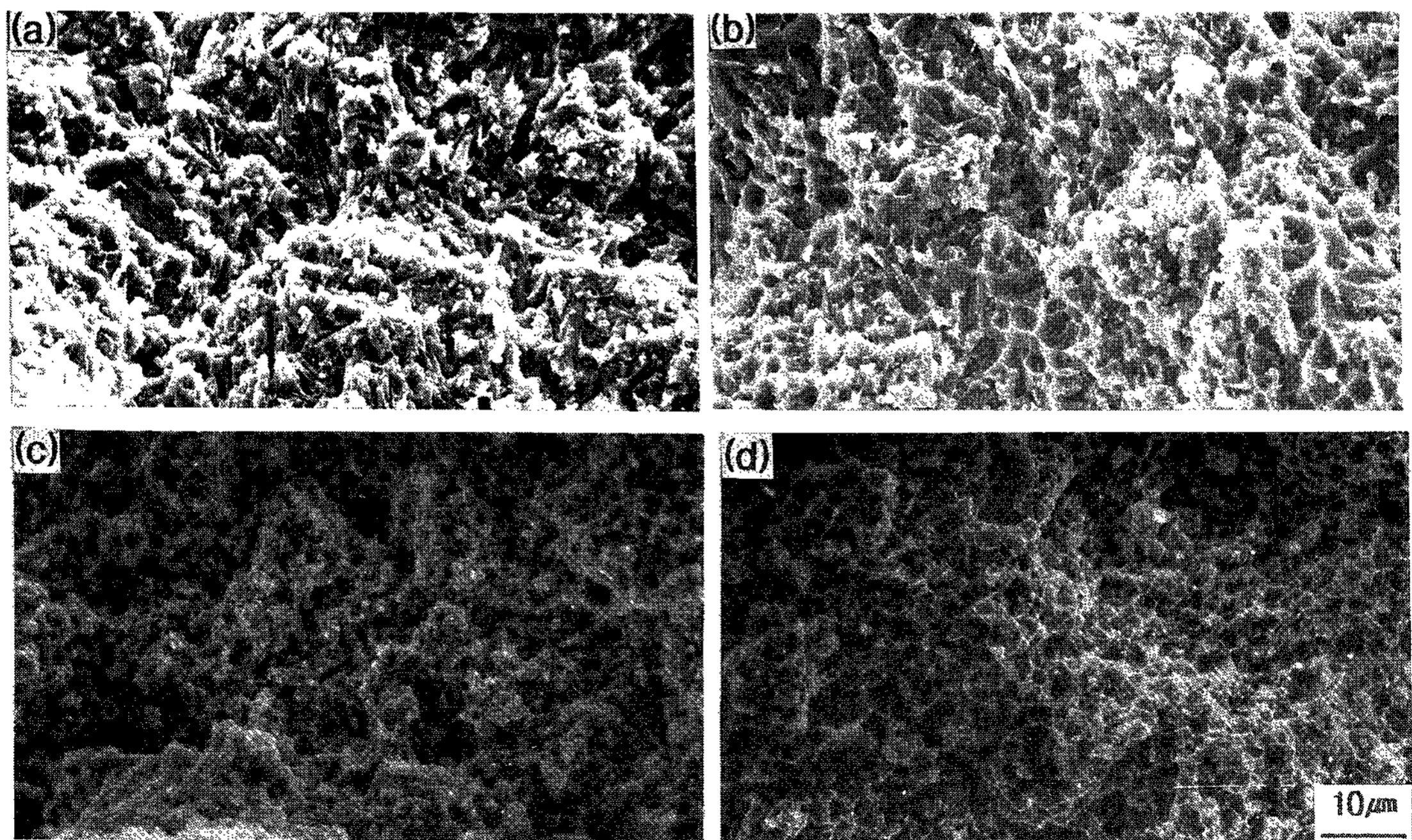


Fig. 10. Tensile fractographs of SiC_w/6061 cast composites(10) tested at room temperature (a) and at 573K (b), SiC_w/6061 extruded composites(T6) tested at room temperature (c) and at 573K (d).

의 깊이는 온도가 상승됨에 따라 깊어지는 경향을 보였다. 반면, 주조복합재료에서는 주조재의 특징이라 할 수 있는 입계파괴는 불분명하며, random하게 분포되어 있는 휘스커의 대부분이 인장변형 중에 파단되거나, 기지금속과의 계면에서 휘스커가 박리된 흔적을 관찰할 수 있다. 573K에 있어서는 휘스커의 대부분이 pull out되거나, 휘스커의 주위에 매우 미세한 dimple이 형성되어 있음을 알 수 있다. 압출복합재료에서는 휘스커의 대부분이 파란면에 수직해 있으며, 이들 휘스커의 대부분이 pull out되어 있음을 알 수 있다. 또한 잔존 휘스커의 주위에는 매우 미세한 dimple이 형성되어 있으며, 온도상승과 함께 휘스커는 pull out은 현저해 지고 dimple의 크기는 확대되는 경향을 나타내고 있다.

4. 결 론

고압주조에 의해 SiC 휘스커 3차원적으로 random하게 분산되어 있는 주조복합재료와 이를 열간압출가공한 압출복합재료를 제조, 이들 복합재료의 조직관찰, 시효경화 거동 및 상온, 고온에서의 기계적특성을 요약하면 다음과 같다.

(1) 주조 복합재료를 열간압출 가공한 압출 복합재료 중의 휘스커는 기지조직의 유동방향으로 대부분 배열되나, 열간압출 과정에서 휘스커가 매우 파손됨을 알 수 있었다.

(2) 최고경도에 도달하는 복합재료의 시효시간은 Vf가 증가됨에 따라 단축되는 경향을 나타내고 있으며, 이러한 경향은 주조복합재료를 열간압출가공한 압출복합재료에서 현저하게 나타났다.

(3) 복합재료의 탄성계수는 휘스커의 Vf가 증가됨에 따라 높아지는 경향을 나타내고 있으며, 주조복합재료나 이를 열간압출가공한 압출복합재료에서 유사한 값이었다.

(4) 복합재료의 상온 및 고온인장강도는 Vf가 증가함에 따라 향상되고 있으나, 주조복합재료의 인장강도가 이를 열간압출가공한 압출복합재료

의 강도보다 우수하므로, 휘스커의 파손에 의한 강도저하가 일방향배열에 의한 강도증가 요인을 상회함을 알 수 있었으며, 주조복합재료의 온도 의존성이 압출복합재료의 그것보다 낮음을 알 수 있었다.

(5) 또한, 주조복합재료의 연신율은 상온과 고온에서도 수% 정도였지만, 압출복합재료에서는 열간압출가공 중에 형성된 미세결정립과 가공조직이 열처리과정에서도 소멸되지 않고 잔존되므로, 온도상승과 함께 연신율이 증가되는 경향을 나타냈다.

참 고 문 헌

- [1] T. W. Clyne, M. G. Bader, G. R. Cappelman and P. A. Hubert : J. Met. Sci., 20(1985), 85
- [2] T. G. Nieh : Metall. Trans., 15A(1984) 139
- [3] 福永秀春, 合田公一, 田端伸雄 : 材料, 34 (1985) 64
- [4] 菅沼克昭, 藤田輝昭, 新原皓一鈴木信幸 : 鐵と鋼, 75(1989) 1634
- [5] 金塚洙, 金子純一, 菅又信 : 日本金屬學會誌, 55(1991) 521
- [6] 伊藤友仁, 平井秀敏, 磯村廉一 : 輕金屬, 38 (1988) 620
- [7] T. Iseki, T. Kamedo and T. Maruyama : J. Mater. Sci., 19(1984), 1692
- [8] 猪瀬康之, 金子純一, 菅又信 : 輕金屬, 40 (1990) 221
- [9] J. E. Schouteus : J. Mater. Sci., 19(1984) 957
- [10] 輕金屬學會 : アルミニウムの組織と性質, (1991) 280
- [11] 金塚洙, 金子純一, 菅又信 : 日本金屬學會誌, 56(1992) 819
- [12] A. Kelly : Strong Solids, 1966, Oxford Univ. Press, P.136