

입자분산강화 알루미늄 복합재료의 고온거동에 관한 연구

權赫天 · 尹義博

한양대학교 금속공학과

High Temperature Deformation Behaviour of Particulate Reinforced Aluminium Composites

Hyuk-Chon Kwon, Eui-Pak Yoon

Dept. of Metallurgical Eng., Hanyang University, Seoul 133-791

초 록 입자강화 알루미늄 복합재료의 고온거동을 조사하기 위하여, 온도 623K~823K에서 10^{-2} ~ 1.0 S^{-1} 변형속도로 열간 압축 가공 시험을 행하여 복합재의 고온유동응력에 미치는 강화입자의 첨가량, 강화입자의 종류 및 크기와 변형속도 및 변형온도 등의 영향을 조사하였다. 강화입자의 체적분율이 증가함에 따라서 고온유동응력은 증가하였으나 항복점에서의 차이가 변형량이 증가되어도 그대로 유지되고 있었다. 변형속도 민감도(m)로 볼때 SiCp첨가된 복합재가 Al_2O_3 p를 첨가한 복합재보다 비교적 균일하게 가공할 수 있음을 알 수 있었으며, 823K에서 최적변형속도는 0.1 Sec^{-1} 이었다. 변형에 필요한 활성화 에너지는 A6061기지금속이 290 KJmole^{-1} , A6061-20vol% SiCp = 327 KJmole^{-1} , A6061-20vol% Al_2O_3 = 531 KJmole^{-1} 이었다. 이것은 알루미늄의 자기활성화에너지 138 KJmole^{-1} 보다 큰 값으로 Al_2O_3 강화복합재료가 SiCp 강화 복합재료보다 열간가공이 어렵다는 것을 나타내는 것이다.

Abstracts The hot deformation behaviour of particulate reinforced aluminium 6061 Al composite were investigated by hot compression tests in the temperature range from 623K to 823K with strain rate of 10^{-3} ~ 5.0 S^{-1} . The effect of reinforced particulate volume fraction, mean diameter on the high temperature flow stress has also been studied. Experimental results showed that the increase in the volume fraction of reinforcement contributed to the rising of yield stress, but the stress above the yield point appeared to be steady state at all volume fractions. The apparent activation energy for deformation was 290KJ/mol for unreinforced 6061 Al, 327KJ/mol for 6061 Al-20vol.% SiC composite and 531KJ/mol for 6061 Al-20vol.% Al_2O_3 composite. It appeared that Al_2O_3 reinforced composites was more difficult to hot deform.

1. 서 론

알루미늄 복합재료(Aluminium Based Metal Matrix Composites : AMMC)는 고강도 고탄성의 세라믹 강화상을 금속기지에 강화한 재료로서 기존의 재료에 비하여 비탄성, 비강도, 내열성 및 내마모성이 뛰어나 항공우주, 방위산업, 자동차 등의 경량구조재 및 기능재료로서 각광받고 있다^{1~4)}.

그러나 이들 좋은 특성에도 불구하고 이들 복합재료의 가공성은 연약한 기지금속과 매우 경한 강화입자의 상반된 변형특성 때문에 많은 제약이 있어 왔다⁵⁾.

일반적으로 입자강화 복합재료는 분말야금

법 및 주조법으로 제조되고, 이것을 2차 가공하여 최종 제품화한다⁶⁾. 근래 양산을 위한 새로운 가공 공정들이 제안되고 있는데, 이 공정에는 양산부품의 생산원가를 낮추거나 피가공재의 재질개선, 기존재료를 생산하고 있는 생산체계를 그대로 이용할 수 있는 큰 장점의 공정들이 검토되고 있다⁶⁾. 최근 입자강화 복합재의 고온특성에 관한 연구가 많이 수행되고 있지만 대부분 Creep시험에 의한 초소성 특성 등 저가공 속도에서의 단편적인 고온특성에 관한 연구이고^{7~10)} 강화입자의 첨가 부피분율, 입자크기, 종류, 변형속도 및 변형온도 등 실제적으로 2차 열간 가공에 필요한 고온유동응력에 미치는 영향에 관한 체계적인

Table 1. Chemical composition of matrix alloy A6061 (wt%)

Element	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti	Mn	Al
wt. %	0.76	0.38	0.20	0.83	0.18	0.70	0.01	0.07	Bal.

연구는 매우 미흡한 실정이다. 특히 고온 변형시 강화입자 및 기지합금의 역할에 대한 명확한 규명이 이루어지지 않은 상태이다. 따라서 본 연구는 입자분산형 복합재의 열간변형 거동 특성을 검토하여 열간 압출가공이나 열간단조가공 등 2차 가공에 필요한 기본 자료를 제시하기 위한 기초연구의 하나로 수행하였다. 이를 위해 알루미늄 A6061합금을 기초로 열간 가공시 복합재의 고온유동응력에 미치는 강화입자의 첨가량, 강화입자의 종류 및 크기와 변형속도 및 변형온도 등의 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 기지금속은 A6061알루미늄 합금 분말을 이용하였으며 Table 1은 합금 분말의 화학적 조성을 나타낸 것이다.

강화입자는 昭和電工(株)의 순도 99.6wt% α -SiC와 순도 99.8wt% α -Al₂O₃ 두종류로, 평균입도 4 μ m, 10 μ m, 20 μ m 및 40 μ m의 입자형 분말을 이용하였다. A6061분말과 강화입자를 부피분율 10%, 20% 및 30%가 되도록 내부에 브레이드가 부착된 V형 혼합기로 기계적 교반을 행하였다. 혼합된 분말은 6000계열의 알루미늄 합금 튜브에 봉입하여 약 873K에서 가열한후 600Ton 수직형 프레스를 이용하여 100Kgf/mm² 압력으로 30sec 가압성형하여 직경 70mm, 길이 145mm의 압출용 빌렛을 제조하였다. 제조된 빌렛을 723K에서 압출비 12.5로 직경 20 ϕ mm의 봉상으로 압출을 행하였다. 압출용 시험편은 직경 15 ϕ mm, 길이 22.5mm의 원통형을 사용하였고, 압출시험은 온도 623K에서 823K까지의 범위로 하였고, 변형속도는 0.01에서 1 s⁻¹범위였다. 압출시험은 3-영역으로 제어되는 급속가열로가 부착된 인스트론 사의 유압식 압출시험기를 사용하였다. 시험편은 전체높이의 절반정도(50%)까지 압출하였고 하중-변위 곡선으로부터 유동응력-변형률을 곡선으로 전환하였다. 시험편은 시험온도에서 10분간 유지시켰으며 압출시험후 조직 관찰을 위해 즉시 수냉시켰다. 미세조직

은 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였으며 기지금속내의 석출물은 XRD로 관찰하였다. 고온 압출시험 데이터로부터 복합재료의 열간가공에 필요한 활성화 에너지는 Arrhenius방정식을 이용하여 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

열간 압축 가공시험을 하기위하여 제작된 복합재의 압출전, 후의 광학현미경 조직 사진을 Photo. 1에 나타내었다. Photo. 1의 (a)는 압출전 가압소결한 빌렛의 조직사진으로 알루미늄 6061 분말입자에 비하여 강화입자(SiC, Al₂O₃)의 평균직경이 1/10이상 작기 때문에 알루미늄입자 사이에 강화입자가 모여있는 것을 관찰할 수 있다. 사진 (b)와 (c)는 압출한 후의 압출방향의 수직단면 조직과 수평단면을 나타낸 것이다. 기지금속의 입자가 압출축 방향으로 늘어서 이로인해 강화입자도 축방향과 평행한 층상조직으로 나타났다.

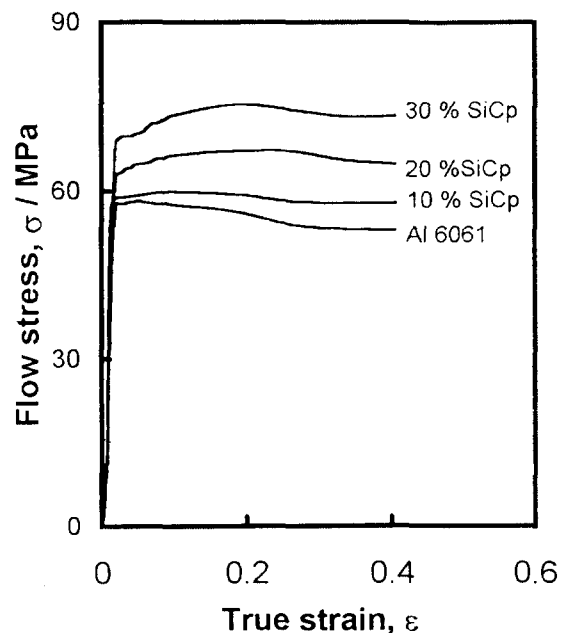


Fig. 1. Flow curves for 6061 Al-xvol% SiCp composites with various reinforcement particles volume fraction at deformation temperature 623K, mean strain rate, 0.05S.

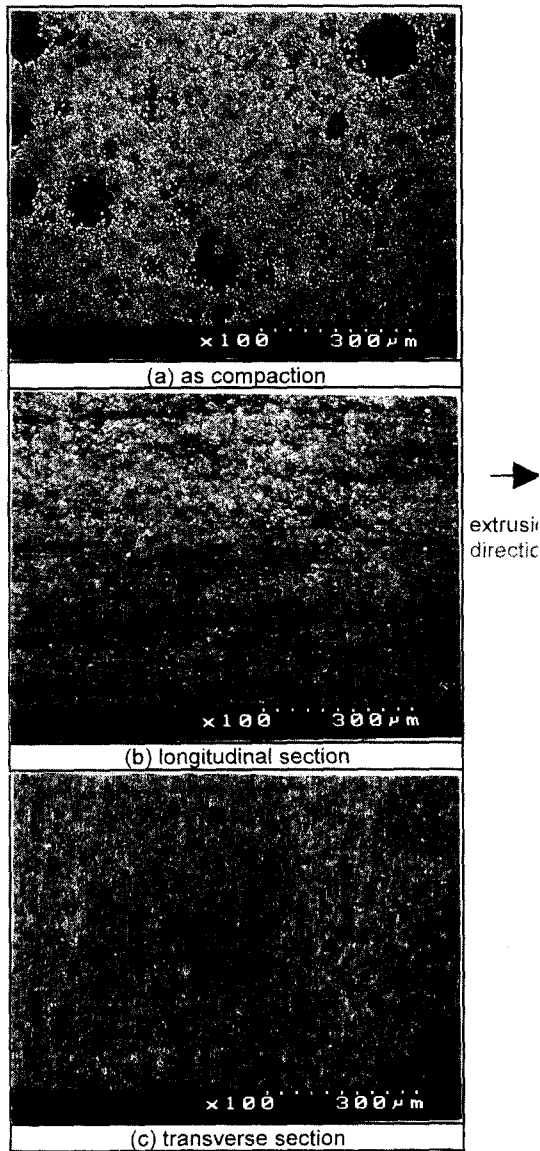


Photo. 1. SEM photomicrographs of Al6061-SiC particulate composites. (a) as compaction (b) longitudinal cross section of extrusion direction (c) transverse cross section of extrusion direction.

압출한 후의 강화입자는 알루미늄입자중으로 이동 분산하여 압출전과는 다른 양호한 분산 상태를 나타내고 있다. 이러한 조직적 차이점은 Al_2O_3 나 SiC강화입자의 종류에 따라서는 큰 변화가 없었다. Fig. 1은 SiC입자(평균입자크기: $10\mu m$) 체적 분율에 따른 유동응력-변형곡선을 나타낸 것이다. 기지금속인 A6061합금과 10% 및 20% 첨가된 복합재료는 항복

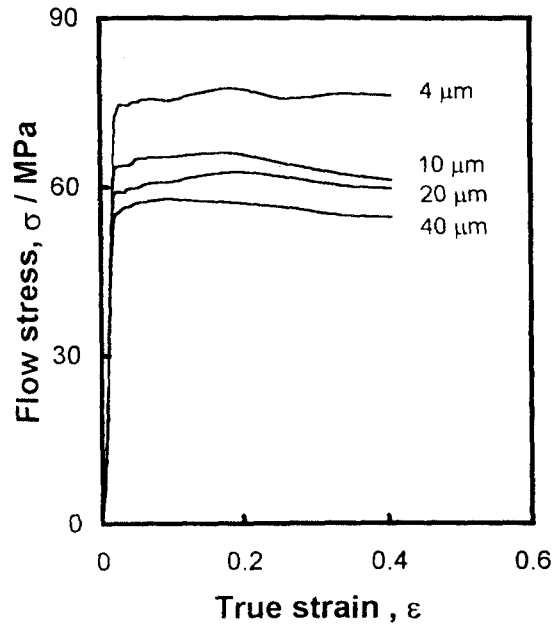


Fig. 2. Flow curves for 6061 Al 20vol% SiCp composites with various reinforcement particles mean diameter at deformation temperature 623K, mean strain rate, 0.05S.

응력 부근에서는 유사한 응력값을 나타내고 있지만 변형량이 증가할수록 유동응력의 차이는 뚜렷하였다. 산화물 분산강화 합금의 경우 임계유동응력의 증가 원인은 전위와의 상호작용에 있다. 기지금속에 소성변형을 일으키기 위해 전위를 이동시키려면 이러한 상호작용을 극복하여야 하고 전위를 이동시키기 위해 외부응력의 일부가 사용된다. 이때 전위와 산화물간 상호작용의 크기는 변형을 일으키기 위한 임계응력이 된다. 입자강화 복합재료에서 이와같이 전위 이동을 방해할 수 있는 장애물은 강화재로 들어가 SiC, Al_2O_3 입자와 분말공정법으로 제조할 때 기지 합금 표면에 산화막으로 존재하는 산화물이며, 특히 기지합금에 생성된 화합물은 성형과정에서 복합재료 내부에 분산되어 전위의 이동을 방해한다. 분말공정법에 의한 Al합금의 성형시 산화막의 재배열과 분포 등에 대해서는 Kim²⁾등이 연구결과를 보고한바 있다. SiC첨가량에 따른 XRD 분석 결과를 보면 기지에 미량의 Al_2O_3 산화물이 형성되어 있음을 Fig. 5에서 알수 있었다. 이것이 분말법으로 제조된 A6061합금과 SiC가 소량첨가된 경우(10%)의 항복응력 차이에

영향을 미쳤다고 본다. Fig. 2는 SiCp강화입자 (체적율 20vol.%) 평균입도크기에 따른 유동응력 곡선을 나타낸 것으로 입자가 미세할수록 저 변형영역 뿐만 아니라 고 변형 영역에서도 높은 유동응력을 나타내고 있다. 항복점 이후 응력-변형을 곡선의 모양은 평행하게 변화하고 있는데 이것은 입자경의 미세화에 의해 초기항복응력이 향상되고 그 후의 유동응력은 초기항복응력의 차와 같은 정도로 나타남을 알 수 있다. Ashby등은¹¹⁾ 강화입자의 첨가량과 입자크기에 따른 유동응력의 증가는 기지금속중에 SiC와 Al₂O₃같은 경한 입자가 분산되어 복합재료의 강화기구로 작용하는 것으로 기지금속의 유동응력의 증가는 다음과 같은 식으로 해석하였다.

$$\nabla\sigma_0 = K_C E_2 \sqrt{\frac{f}{1-f} \cdot \frac{b}{d} \cdot \epsilon_0^p} = K_w \sqrt{\epsilon_0^p} \quad (1)$$

여기서 $K_C, K_w =$ 정수, $E_2 =$ 복합재료의 종탄성계수, $f =$ 입자의 체적율, $d =$ 입자의 직경, $b =$ 버거스 벡터, $\epsilon_0^p =$ 기지금속의 변형을 나타낸다. 즉, 식(1)로부터, 입자가 미세할수록 그리고 입자의 체적분율이 증가할수록 기지금속의 변형저항이 증가하게 되고 따라서 고온 유동응력도 증가하게 된다는 것은 알 수 있다. 그러나 본 실험에서는 입자경의 영향은 주로 초기 항복 응력에 관계되고 있으며 Ashby의 2차 활주에 의한 가공 경화 이론은 소성변형량의 증가와 더불어 경화량도 크게 된다는 모델과는 일치하지 않았다.

Fig. 3은 20 vol% SiCp강화입자가 첨가된 재료를 723K에서 열간압축가공할 때 변형속도에 따른 유동응력의 변화곡선을 나타낸 것이다. 변형속도가 빨라질수록 유동응력은 증가하였으며 모든 변형속도에서 유동응력 곡선은 항복점 이후 더 이상의 가공경화가 진행되지 않은 정상상태를 유지하고 있었다. 즉, 변형속도는 초기 항복응력에 미치는 영향은 크지만 이후 변형이 증가 되어도 일정한 효과만을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 A6061-20vol.% SiCp복합재의 온도에 따른 유동응력 곡선의 변화를 나타낸 것이다. 이때의 평균 변형속도는 $5 \times 10^{-2} \text{sec}^{-1}$ 이었다. 압축변형온도가 증가함에 따라서 항복

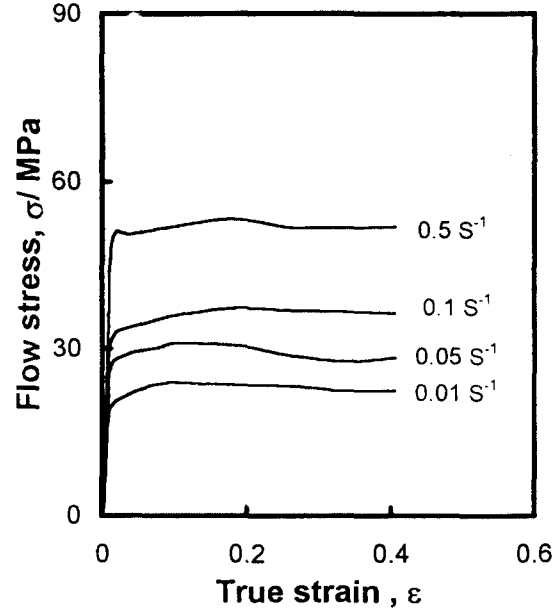


Fig. 3. Flow curves for 6061 Al-20vol% SiCp composites with various strain rates at deformation temperature 623K.

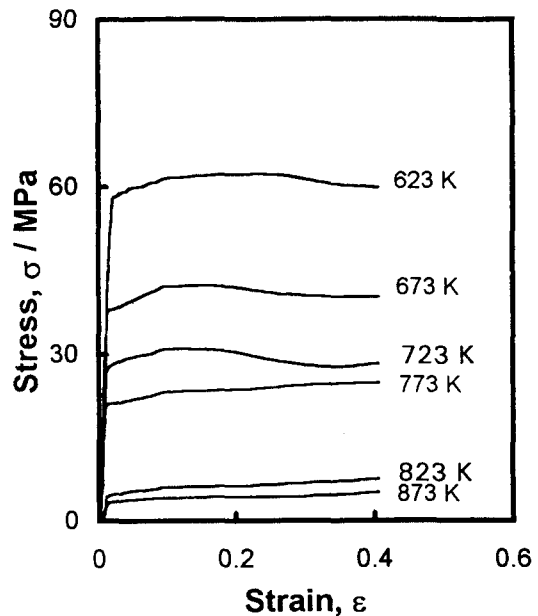


Fig. 4. Flow curves for 6061 Al 20vol% SiCp composites with various deformation temperature at a mean strain rate, 0.05S.

응력은 급격히 저하되고 있음을 알 수 있고 항복점 이후에는 정상 상태를 유지하고 있음을

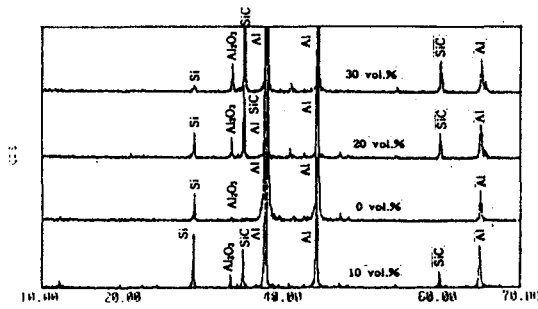


Fig. 5. X-ray diffraction patterns showing the SiCp/6061 Al composite at various volume fraction.

알 수 있었다. Fig. 6은 여러 변형속도에서 A6061 기지금속과 SiCp, Al₂O₃강화입자가 첨가된 복합재의 유동응력에 미치는 변형온도의 영향을 나타낸 것이다. (a)는 SiCp강화입자를 여러가지 부피 분율로 첨가한 경우의 유동응력의 온도 의존성을 나타낸 것으로 저온에서는 30Vol.% 첨가한 경우가 다른 재료에 비하여 월등히 높은 유동응력값을 보여주고 있으나 고온 영역에서는 거의 일정하였다. (b), (c) 및 (d)는 각각 SiCp, Al₂O₃ 및 A 6061 기지금속에서 여러가지 변형속도에 따른 온도 의존성을 나타낸 것이다. SiC를 첨가한 경우가 Al₂O₃를 첨가한 경우보다 유동응력의 저하가 크게 되고 있음을 알 수 있었다. 기지금속도 비교적 높은 유동응력을 나타내고 있는데 이것은 앞에서 지적했듯이 분말법으로 제조될때 기지금속 분말 표면에 발생한 산화물이 성형 과정에서 복합재료 내부에 분산되어 있기 때문이다. Fig. 7은 복합재료와 6061기지금속의 고온압축실험으로 부터 얻어진 자료로부터 logε-logσ의 형태로 그린것이며, 이로부터 변형효율 η와 관계되고 변형에 필요한 활성화 에너지 산출에 필요한 변형속도 민감도 m값을 구하였다. m값은 식 (2)와 같은 관계식으로 정의 된다¹²⁾.

$$\sigma_0 = C \dot{\epsilon}^m \exp \left[\frac{-Q}{RT} \right] \quad (2)$$

여기서 C=상수, T=절대온도, $\dot{\epsilon}$ =평균변형속도이다. 유동응력은 변형률 속도와 온도의 함수인데 대부분의 재료는 Fig. 7과 같이 S자 형태를 나타낸다. 또한 m값은 특정 변형 속도 구간에서 높게 나타나기 때문에 최적 변형률 조건을 찾는 것이 중요하다. Table 2는

A6061합금에 SiCp강화입자를 첨가 부피분율에 따른 최대 m값과, A6061-20vol% SiCp, Al₂O₃복합재 및 A6061기지금속의 변형률 속도 민감도 m값을 변형률 속도 10⁻³~5sec⁻¹영역에서의 최대 m값을 나타낸 것이다. SiC입자의 첨가량에 따라서는 20%첨가한 경우가 m=0.256으로서 최대치를 나타내었고 이때의 최적 변형률 속도는 10⁻¹sec⁻¹이었다. 또한 20vol% SiCp, 20 vol% Al₂O₃ 및 A6061 기지금속의 m값은 변형속도 10⁻¹sec⁻¹부근과 823K일때 최대치를 나타냈으며, 각각 m=0.256, m=0.201 및 m=0.241로 SiC입자를 첨가한 경우가 Al₂O₃보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이것은 SiCp첨가된 복합재가 Al₂O₃를 첨가한 복합재보다 비교적 균일하게 가공할 수 있음을 의미한다. 이 실험 결과는 J. Sarkar¹³⁾등이 주조법으로 제조된 A6061-18vol% SiCp복합재에서 온도에 따른 변형률 속도 민감도(m)를 구한 값, 823K에서 m=0.23으로 본 실험결과와 잘 일치하였다. 그러나 Mohony와 Ghosh¹⁴⁾, John Pilling¹⁵⁾등의 연구결과에는 SiCp/PM64계에서는 최적 변형률 조건이 10⁻⁴sec⁻¹에서 m=0.5, SiCp/7475Al, SiCp/2014Al계에서는 m=0.4라고 보고하고 있다. 이것은 재료의 유사성에도 불구하고 본 실험과 상당한 차이를 보여주고 있는데 그 이유는 creep시험에서 변형률 속도가 매우 느리기 때문이다. 본 실험에서 사용한 A6061기 입자분산강화 복합재에서는 첨가 강화재의 종류에 관계없이 최적 변형률속도는 10⁻¹sec⁻¹이었으며 이때 최적 온도는 823K였다. 그러나 이 온도는 실제 열간압출 가공에서는 표면 결함, 터짐 등을 유발시킬 수 있는 과도하게 높은 온도로 평가되고 있다. 변형에 필요한 활성화에너지(Q)는 다음과 같은 creep방정식을 이용하여 구할수 있었다¹⁶⁾.

$$\dot{\epsilon} = A \sigma_0^{\frac{1}{m}} \exp \left[\frac{-Q}{RT} \right] \quad (3)$$

여기서 R=이상기체상수이고, A=재료상수이다. 식 (3)을 대수식으로 전환하면

$$\sigma_0 = A^{-m} \left\{ \dot{\epsilon} \exp \left[\frac{Q}{RT} \right] \right\}^m \quad (4)$$

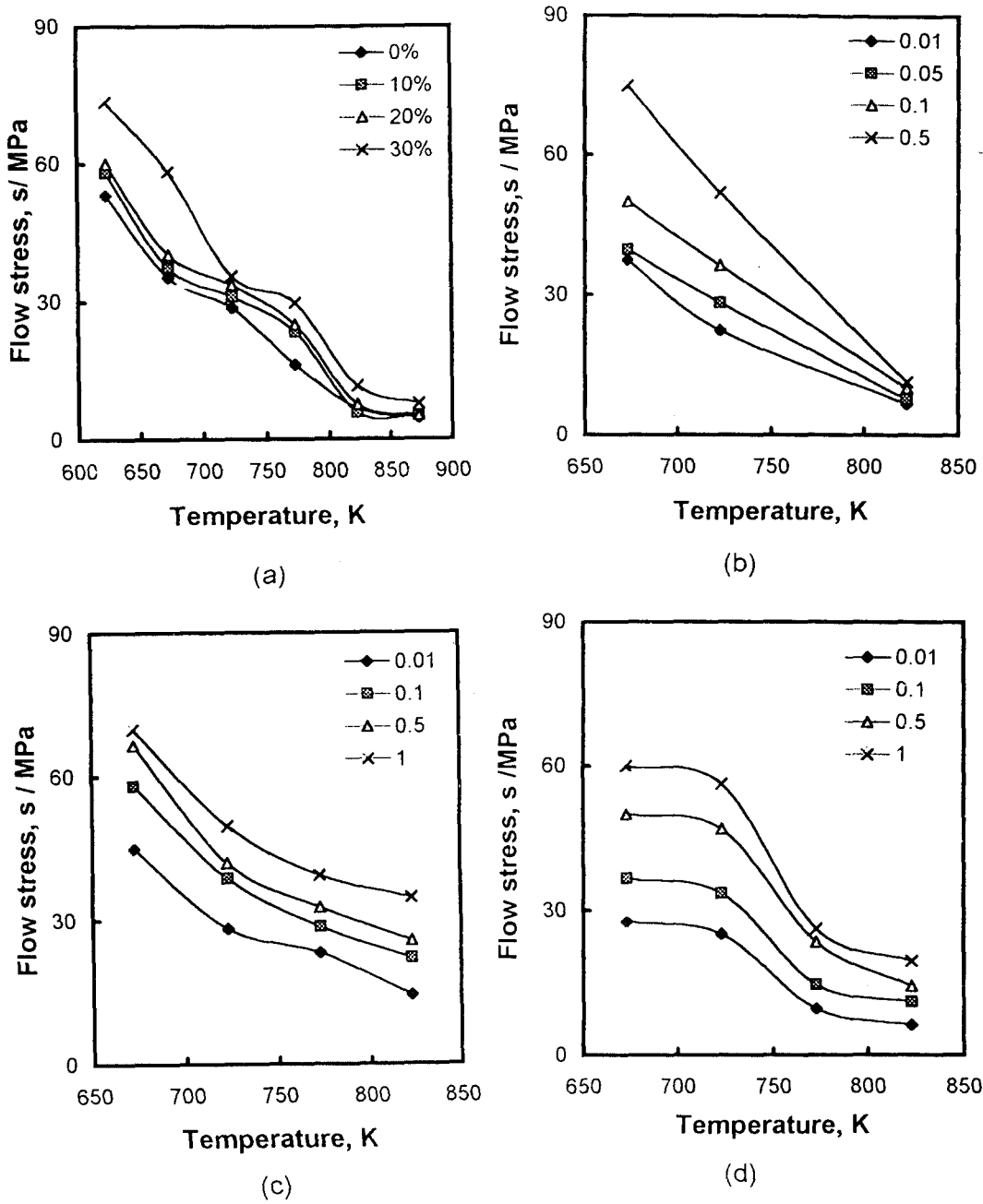


Fig. 6. Effect of deformation temperature on flow stress of A6061 alloy and particulate reinforcement composites with SiCp volume fraction (a) and various strain rates (b), (c), (d). (a) A6061-xvol% SiCp (b) A6061-20vol% SiCp (c) A6061-20% Al₂O₃p (d) A6061 matrix alloy.

이 되고 이식의 양변에 ln을 취하면

$$\ln \sigma_0 = \ln(A^{-m} \dot{\epsilon}^m) + \frac{Qm}{R} \frac{1}{T} \quad (5)$$

변형에 필요한 활성화 에너지는

$\frac{1}{m} \ln \sigma_0$ 와 $\frac{1}{T}$ 를 그려서 그 기울기를 취하면 $\frac{Qm}{R}$

이 된다. Table 3에 본 실험에서 산출한 활성화 에너지와 Creep 실험에 의해 지금까지 발표된 값을 비교하여 나타내었다. 본 실험에서

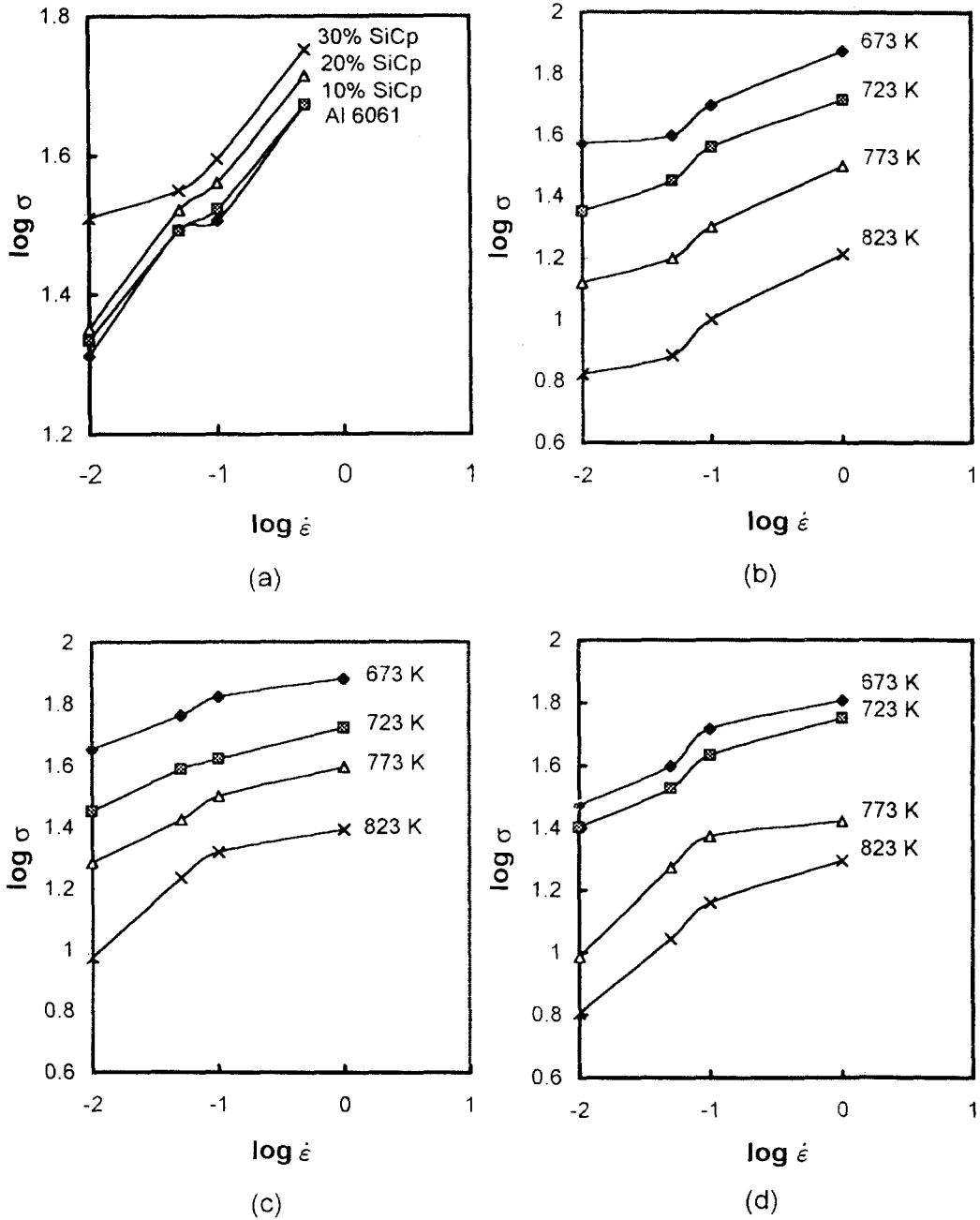


Fig. 7. The plot of $\log \sigma$ vs $\log \dot{\epsilon}$ data used to calculate strain rate sensitivity (m) of the A6061 based composites. (a) A6061 and various SiCp volume fraction (b) Al6061-20% SiCp (c) A6061-20% Al_2O_3 (d) Al 6061.

구한 분말법으로 제조한 A6061의 활성화 에너지는 290 KJmole^{-1} 로서 Pickens⁵⁾ 등이 구한 값보다 다소 높았으며 이 값은 Nowick¹⁷⁾ 등에 의해 측정된 순 알루미늄에서 자기확산에 필요한 활성화 에너지 138 KJmole^{-1} 의 2배에 해당되는 값이다. A6061 기지금속에 SiCp 입자를

첨가한 복합재에 있어서, 20vol%에서는 327 KJmole^{-1} 로서 약 1.5배 이상의 높은 값을 나타내었다. 이것은 SiCp가 첨가된 복합재가 Al_2O_3 에 의해 강화된 복합재에 비하여 보다 복잡한 가공 메커니즘에 의해 변형되고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Strain rate sensitivity(m) for A6061 Al based particulate reinforced composite material at a strain of 0.4.

Materials	Reinforcement particulate type	Volume fraction(%)	Temperature K	Strain rate sensitivity m(최대 m값)
A6061	-	-	723	0.134
A6061-SiCp	SiC particulate	10%	723	0.186
A6061-SiCp		20%	723	0.256
A6061-SiCp		30	723	0.185
A6061-20vol% SiCp		SiCp	20%	673
			723	0.186
			773	0.195
			823	0.256
A6061-20vol% Al ₂ O ₃	Al ₂ O _{3p}	20%	673	0.112
			723	0.132
			773	0.154
			823	0.201
A6061 matrix	-	-	673	0.168
			723	0.176
			773	0.208
			823	0.241

Table 3. Summary of stress exponents(n), strain rate sensitivity(m) and activation energies(Q_w).

Reinforcement (vol.%)	Matrix	T(K)	m	n	Q _w (kJ/mol)	Ref.
	A6061 P/M	723	0	7.46	290	Present work
SiC _p (20%)	A6061 P/M	723	0.19	5.26	327	Present work
Al ₂ O _{3p} (20%)	A6061 P/M	723	0.13	7.46	531	Present work
SiC _p (30%)	Al 6061	618~685	0.137	7.25	270~500	PARK[20]
SiC _w (17.4%)	Al 6061	505~644	0.047	21	390	Nieh[21]
SiC _p (10%)	6061		0.29	3.4	221	Tuler[18]
SiC _p (15%)	Al 6061		0.37	2.7	233	Sakaris[19]
SiC _p (20%)	Al 6061		0.41	2.4	252	Pickens[8]
	6061 P/M	700	0.15	6.6	142	Pickens[8]
	7090 P/M	700	0.16	6.25	116	Pickens[8]
Al ₂ O _{3p} (15%)	A6061	523~773	0.195	5.11	222	D. Yu[10]
-	A6061		0.199	5.01	204	D. Yu[10]

Table 3에 나타난 본 실험의 결과는 Tuler¹⁸⁾, Sakaris¹⁹⁾ 및 Pickens⁸⁾ 결과보다 다소 높게 나타났으나 높은 적층결합 에너지를 갖는 금속에서 갖는 금속에서 얻어진 Sarker¹³⁾ 등이 보고한 실험결과와 매우 유사하였다.

4. 결 론

A6061 기지금속과 강화입자 SiCp, Al₂O_{3p} 입자를 첨가한 복합재에서 고온 압출가공시 고온 유동 응력에 미치는 강화입자의 부피분율, 입자의 크기, 변형온도 및 변형속도의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. A6061 기지로 한 복합재에서 SiCp, Al₂O_{3p} 입자를 첨가한후 압출 가공한 조직은 압출

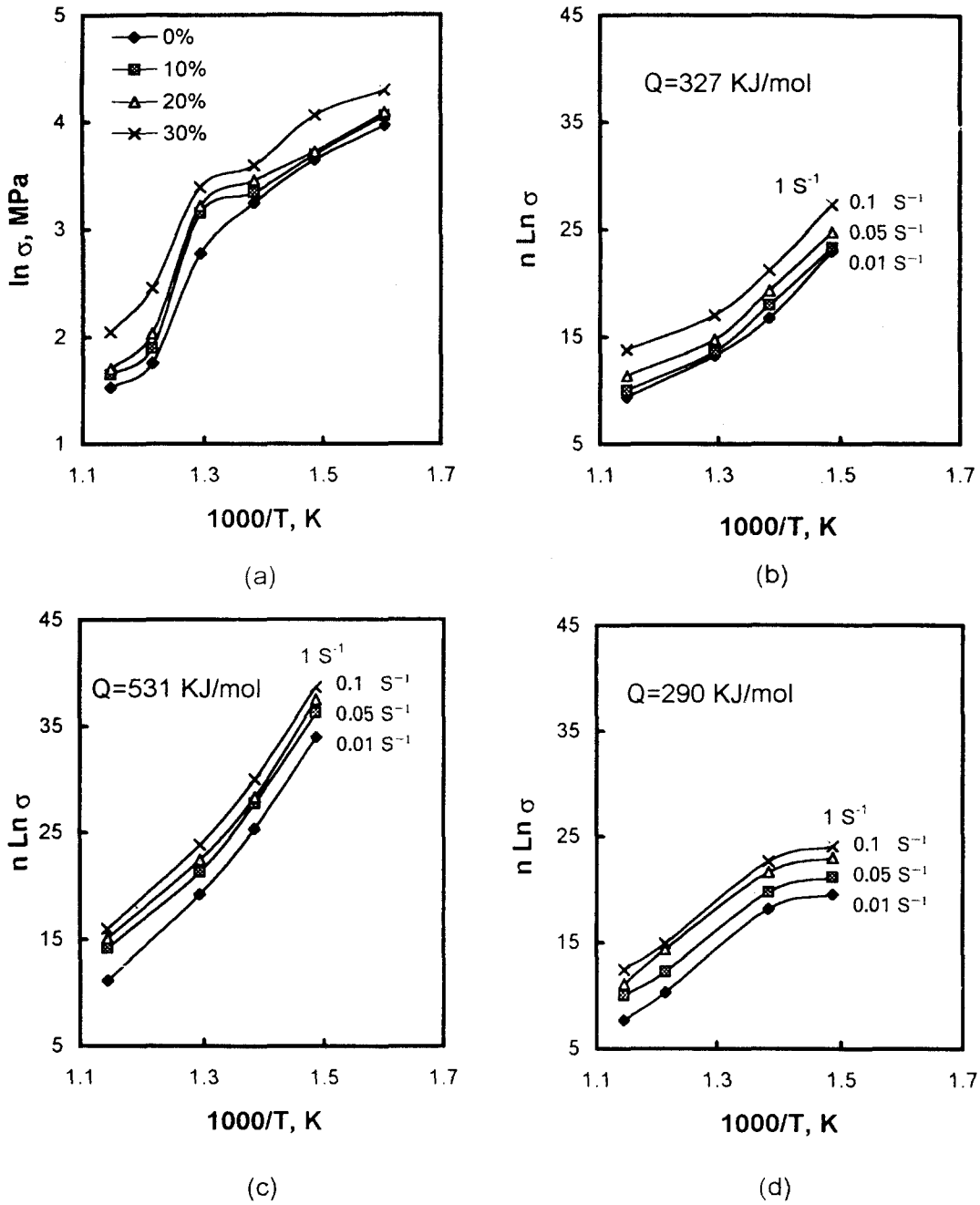


Fig. 8. Arrhenius plot showing variation of $n \ln \sigma$ with inverse of temperature and various strain rates for A6061 based composites (a) SiCp volume fraction (b) A6061-20vol% SiCp (c) A6061-20vol% Al_2O_3p (d) A6061 matrix.

방향으로 층상조직을 형성하였으며 첨가입자 종류에 따라서는 큰 변화가 없었다.

2. 강화입자의 체적분율이 증가함에 따라서 고온 유동응력은 증가하였으나 항복점에서의 차이가 변형량이 증가되어도 그대로 유지되고 있었다. 즉 체적분율이 가공경화에 미치는

영향은 작다는 것을 의미한다.

3. SiCp강화입자 평균입도 크기에 따른 유동응력의 변화는 입자가 미세할수록 모든 변형영역 범위내에서 높은 유동응력을 나타내었으나 변형량이 증가하여도 일정하게 변화였다.

4. 변형속도 민감도(m)로 볼때 SiCp첨가된 복합재가 Al_2O_3 p를 첨가한 복합재보다 비교적 균일하게 가공할 수 있음을 알 수 있었으며, 823K에서 최적변형속도는 $0.1sec^{-1}$ 이었다.

5. 변형에 필요한 활성화 에너지는 A6061 가지금속이 $290KJmole^{-1}$, A6061-20vol% SiCp= $327KJmol^{-1}$, A6061-20vol% Al_2O_3 = $531KJmole^{-1}$ 이었다. 이것은 알루미늄의 자기 활성화에너지 $138KJmole^{-1}$ 보다 큰 값으로 Al_2O_3 강화복합재료가 SiCp 강화 복합재료보다 열간가공이 어렵다는 것을 나타내는 것이다.

참 고 문 헌

1. S. Yajima, K. Okamura, J. Tanaka and H. Hayase : J. Met. Sci., 16 (1981), p.3033.
2. S. Towata and S. Yajima : J. of JIM., 47 (1983), p.159
3. K. Lasai : J. of JCIM, 5 (1976)P.26
4. K. Marden : J. of Met., June (1985) p.59
5. R.W. Hains, P.L. Morris, P. W. Jeffeey : Proc. Int. Symp. on Advanced Structural Materials CIMM 1988. AUG. p. 53
6. Rack, H.J. et al ; Light Met. Age. 42-1~2 (1984) p.27
7. Y.W. Kim, W.H. Griffith and F.H. Fores, J. Metals. 37 (1985) p.27
8. Pickens J. R., Langgan, T.J., England, R. O. and Liebson, M., Metallurgical Transactions A, vol. 18A, (1988) p.303~325
9. N. Kanetake, M. Ozaki, T. Chon : Journal of the JSTP. vol. 34 No. 395(1993-12), p. 1332
10. D. Yu., T. Chandra : Advanced '93 International Conference on Advanced composite materials Edited by T. Chandra and A. K. Dhingra. The Minerals, Metals & Materials Society, (1993). p.1073
11. Ashby, M. F. : Strengthening Method in Crystals(Ed: Kelly, A. & Nicholson, R.B), (1971), 137 Elsevier
12. I. LeMay : Principles of Mechanical Metallurgy. Elsevier North Holland, Inc., New York, NY. (1981)P.70
13. J. Sarker and M.K. Surappa : Int. Conf. on Advanced Composites Materials Edited by T. Chandra and A.K. Dhingra. The Minerals, Metals & Materials Society, (1993) p. 1051
14. M.W. Mahoney and A.K. Ghosh, Metall. TRans., 18 (1987) p.653
15. J. Pilling, Scripta Metall. 23 (1989) p.1375
16. J.J. Jonas, H.J.McQueen and W.A. Wang ; ISI Publ. No. 108 (1968) p.4
17. A.S. Nowick : J. Appl. Phys. vol. 22 (1951) p.1182
18. Tuler F. R., Beals J.T. Demetry, C. and Zhao, D. in Cast Reinforced Metal Composite, L. Fishman, S.G. and Dhingra, A.K., eds), ASM, Chicago.il.(1988) p.321~325
19. P. Sacris and H.J.H. Mcqueen, The 3rd International Conferece on Aluminum Alloy. "Hot workability of SiCp/6061 Al composite C199
20. K.T. Park, E.J. Lavernia and F.A. Mohamede, Acta. Metall. (1990) p.2149
21. T.G. Nieh, Meta. Trans. A,15, (1984) p. 139