

|||||
論 文
 |||||

일방향응고시킨 Al-CuAl₂ 공정복합재료의 인장성질

洪英煥*, 洪鍾徽**

Tensile Properties of Unidirectionally Solidified Al-CuAl₂ Eutectic Composite

Young-Hwan Hong* and Jong-Hwi Hong**

Abstract

The effect of interlamellar spacing on tensile behavior and fracture mode at high temperatures has been studied for unidirectionally solidified Al-CuAl₂ eutectic composite.

The tensile properties at room temperature in Al-CuAl₂ eutectic composite improved as the interlamellar spacing decreased due to the constraint effects of closely spaced lamellae, while the opposite behavior was observed at high temperatures due to the annihilation of the constraint effects by phase boundary sliding.

The Al-CuAl₂ eutectic composite exhibited brittle fracture mode below the temperature at which the reinforcing phase softened but ductile fracture mode above the temperature.

상경계의 거동과 관련하여 조사하였다.

1. 서 론

고온구조용 재료로서 활용할 수 있는 공정복합 재료는 상온에서의 기계적성질 뿐만 아니라 고온에서의 기계적성질이 매우 중요하리라 생각된다.

현재까지 Al-CuAl₂ 공정복합재료의 상온 기계적 성질은 여러 연구자에 의하여 많이 발표되었다. 즉 C. J. Davidson 등¹⁾은 시효석출시 상경계에 인접한 Al기지상에 무석출물대(PFZ)가 존재하며, 그 넓이는 용체화처리후의 냉각속도가 클수록 작아진다고 발표하였다. 또한 상온에서 항복응력은 층상간격에 반비례한다고 하였는데, 이는 상경계에서의 구속효과(constraint effect) 때문이라고 보고하였다.²⁾ 이 이외의 연구보고에서도 층상간격이 감소함에 따라서 인장강도가 증가한다고 발표하였다.^{3) 4)}

이와같이 상온에서의 기계적성질에 관한 연구보고는 비교적 많이 발표되었으나, 고온에서의 기계적성질에 관한 연구는 별로 활발치 못하였다.⁵⁾ 따라서 본연구에서는 Al-CuAl₂ 공정복합재료에 있어서 상온과 고온에서 층상간격에 따른 인장성질을

2. 실험방법

2.1 시편준비

인장시험에 사용된 시료는 일방향응고(성장속도 ; 1, 2 및 10Cm/hr)시킨 것으로 층상간격은 각각 4.50, 3.74, 및 2.61 μ m이었다. 이 시료로 부터 Fig.1과 같은 형상의 상온 및 고온인장시편을 가공하였다.

2.2 인장시험

인장시험은 20, 150, 325 및 450 $^{\circ}$ C의 4가지 온도에서 행하였다. 고온인장은 시편과 그림을 모두 로 내에 설치하고 대기하에서 행하였는데, 이때 Crosshead speed 는 0.2mm/min로 일정하게 유지시켰다.

2.3 상경계 sliding 및 파면관찰

고온인장시 상경계 sliding의 발생여부를 확인하기 위하여 인장시험 전에 잘 연마된 시편에 횡방향으로 미세한 scratch를 새겨서 인장시험 후에 이

* 수원전문대학 열처리과 (Dept. of Heat Treatment, Suwon industrial College.)

** 고려대학교 금속공학과 (Dept. of Met. Eng. Korea University.)

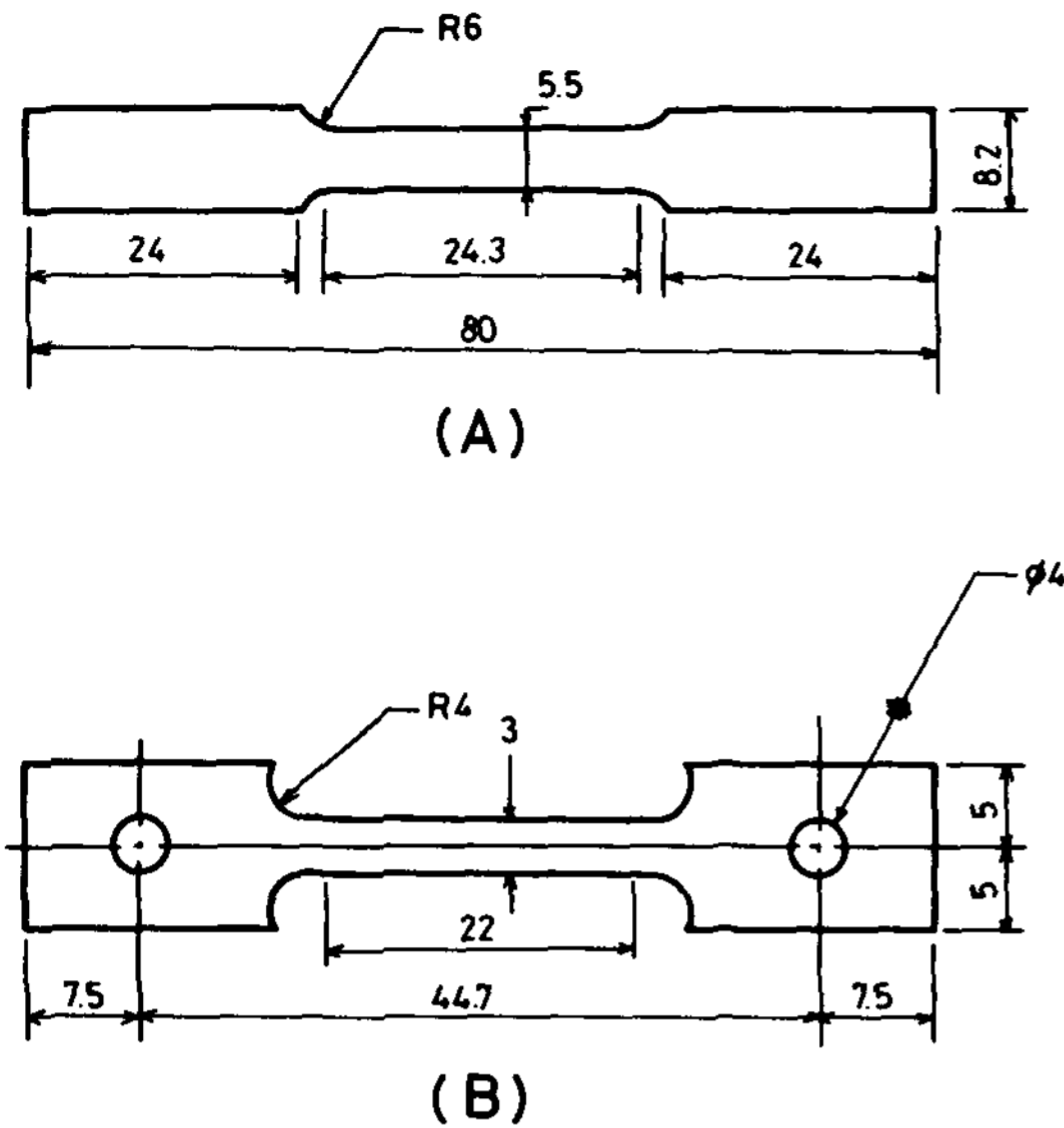


Fig. 1. The shape of tensile test specimens.
 (a) Room temperature
 (b) High temperature

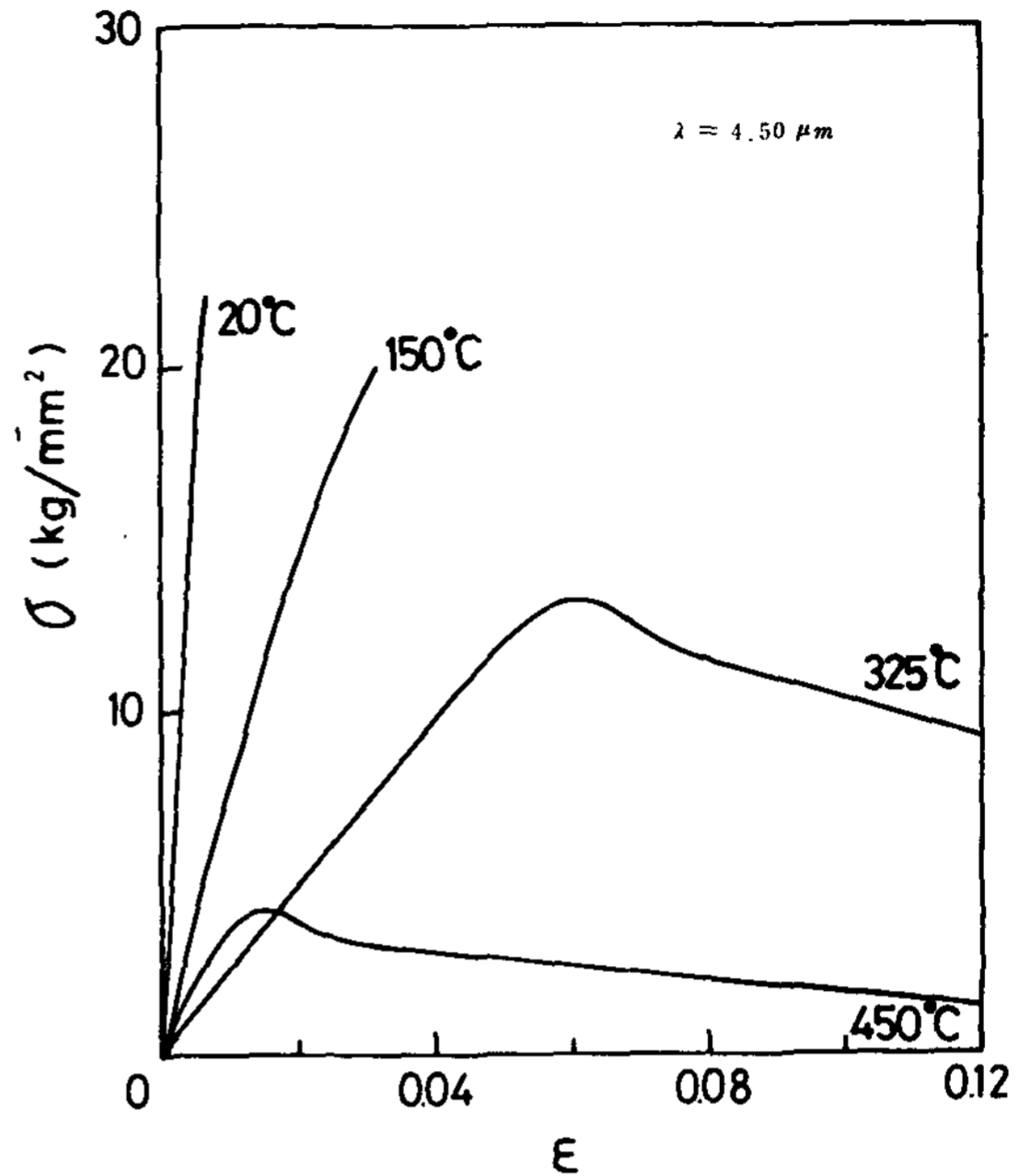


Fig. 2. Stress-strain curves tested at various temperatures.

scratch의 형상이 어떻게 변화하였는지를 확인하므로써 상경계 sliding의 여부를 조사하였다. 한편 각 시편의 파단면을 주사전자현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장성질

층상간격이 4.5 μ m인 시편을 20, 150, 325 및 450 $^{\circ}$ C에서 각각 인장시험할 때 얻어진 응력-변형 곡선을 Fig. 2에 나타냈다. 20 $^{\circ}$ C에서 인장할 때에는 거의 소성변형이 일어남이 없이 탄성영역에서 파단되었고 150 $^{\circ}$ C에서는 아주 적은 소성변형을 나타냈는데 변형은 3.0%까지 일어났다. 보다 높은 온도에서는 소성변형량이 급격히 증가하였으며, 325 $^{\circ}$ C 및 450 $^{\circ}$ C에서 모두 응력이 서서히 감소하면서 파단되었다.

Fig. 3은 4.50, 3.74, 및 2.61 μ m의 층상간격을 갖는 시편을 각 시험온도에서 인장할 때 얻어진 최대 인장응력을 나타낸 것이다. 여기서 보면 20 $^{\circ}$ C와 150 $^{\circ}$ C의 시험온도에서는 층상간격이 작을수록 최대인장강도가 크게 나타났지만, 325 $^{\circ}$ C와 450 $^{\circ}$ C에서는 층상간격이 클수록 강도가 크게 나타났다. 즉 최대인장강도는 층상간격과 함께 시험온도에 따라 변화됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 4에 나타낸 바와

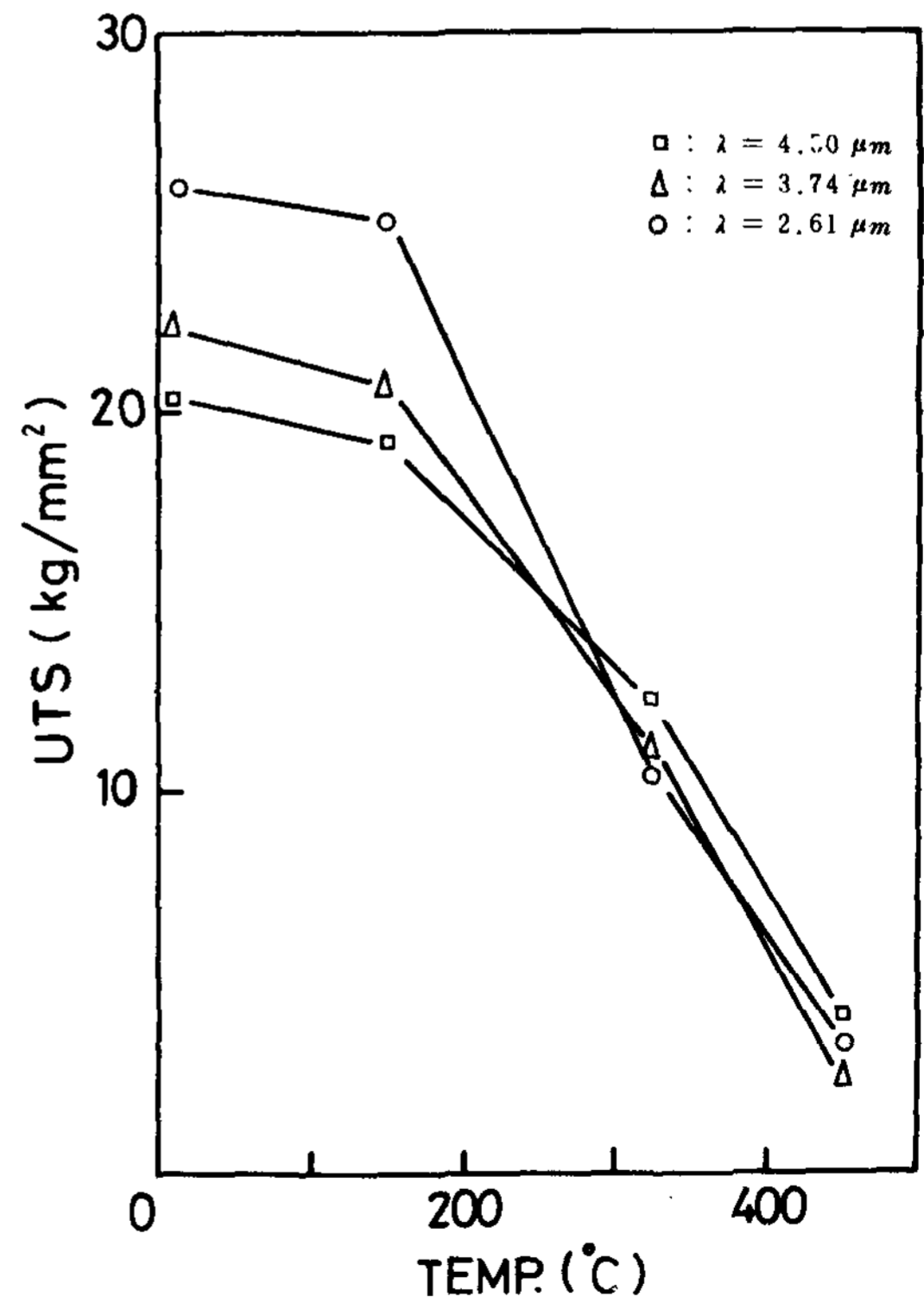


Fig. 3. Variation of ultimate tensile strength with temperature for different inter-lamellar spacing.

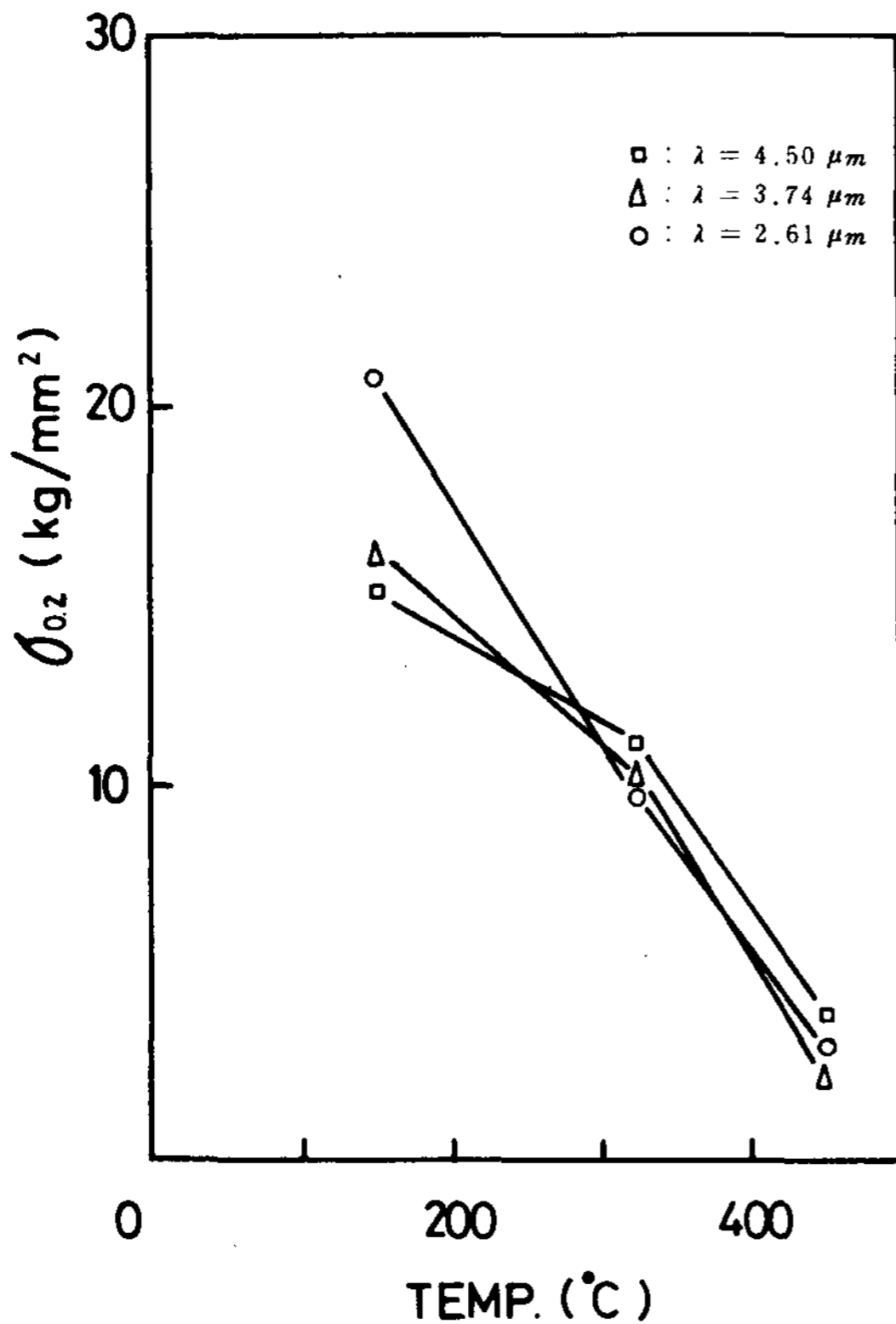


Fig. 4. Variation of yield strength with temperature for different interlamellar spacing.

같이, 항복강도의 변화도 최대인장강도와 같은 경향을 나타내고 있는데, 150°C에서는 층상간격이 증가함에 따라 항복강도는 작았으나 그이상의 온도에서는 층상간격이 큰 4.50μm의 시편이 가장 큰 항복강도를 나타냈다. 한편 20°C에서는 연신율이 너무 작아서, 즉 탄성영역에서 파단되었기 때문에 0.2% offset 항복응력을 구할 수가 없었다. 이와같이 최대인장강도 및 항복강도가 20°C 및 150°C에서는 층상간격이 작을수록 높게 나타나고, 반대로 325°C, 450°C에서는 작게 나타나는 현상은 다음과 같이 고찰할수 있다. 즉, 150°C까지는 상경계에서 구속효과가 작용하여 강화에 기여했으나, 그 이상의 온도에서는 구속효과의 소멸로 인하여 상경계가 전위이동의 장애물 역할을 담당하지 못했기 때문이라고 사료된다. 다시 말하면 150°C까지의 비교적 저온에서는 상경계가 매우 안정하여 상경계에서 Al기지의 전위이동을 방해하는 image stress가 작용하게 될것이다.⁶⁾ 따라서 층상간격이 작아

지면 전위이동에 장애물역할을 하는 상경계의 면적이 커지므로 강도는 증가하게 된다. 또한 기지상에서 활주하고있는 전위와 계면전위와의 상호작용에 의해서 부가적인 강화효과가 일어날 것이다. 즉 공정복합재료의 상경계는 일반적으로 반정합(semi-coherent) 계면을 이루고 있기 때문에 두상간의 격자상수 차이에 따른 misfit전위가 존재하게 된다. 따라서 이러한 계면전위와 슬립전위와의 상호작용에 의해서 강화가 일어난다. 또다른 부가적인 강화효과는 slip system incompatibility이다.⁶⁾ 즉 기지상에 존재하는 전위가 상경계를 거쳐서 강화상으로 이동할 때 슬립계를 바꿔야만 한다. 그런데 외부응력에 대하여 우선적으로 대응하는 슬립계의 분해전단응력 또는 Schmidt factor가 두상에서 서로 다르게 된다. 따라서 기지상에서의 국부적인 유동응력이 기지상의 임계상의 임계분해 전단응력을 넘어섰다 할지라도 강화상의 우선적인 슬립계의 Schmidt factor가 작다면 전위이동이 불가능하여 결국 계면에서 변형을 방해하는 구속효과가 작용하게 될 것이다.

한편 비교적 고온인 325°C 및 450°C에서는 층상간격이 작을 수록 강도가 작게 나타났는데, 그 이유는 결국 상경계의 불안정에 기인하기 때문이라고 사료된다. 이 사실을 Photo 1에 나타냈다. 즉 450°C의 시험온도에서 최대응력을 나타낸후, 하중을 제거했을 때의 상경계 sliding을 나타낸 것이다. 인장 시험 전에 lamellae에 수직하게 그어졌던 scratch가 인장시험 후에는 상경계를 가로질러서 계단식으로 sliding된 흔적을 나타낸 것이다.

이와같이 상경계가 sliding을 일으키면 상경계에서 응력과 변위가 연속적이어야 한다는 image stress의 경계조건⁹⁾을 만족시키지 못하므로 image stress가 Al기지에 존재하는 전위에 대하여 척력을 나타내지 못하게 된다. 따라서 상경계가 전위이동의 장애물 역할을 하지 못하고 오히려 변형에 가담하므로써 층상간격이 작을수록, 즉 상경계면적이 클수록 강도는 감소하게 될것이다. 그리고 위의 부가적인 강화효과들도 상경계가 sliding하면 그 효과를 나타내지 못하게 된다.

Fig. 5는 여러 층상간격을 갖는 시편에 대하여 시험온도에 따른 연신율의 변화를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 고온에서는 연신율의 갑작스런 증가가 일어났는데, 이것은 상경계가 sliding하므로써 변형에 참여하게 되고, 또 Al-Cu공정합금이 초소성재료이기 때문에 나타나는 현상이라고 사료

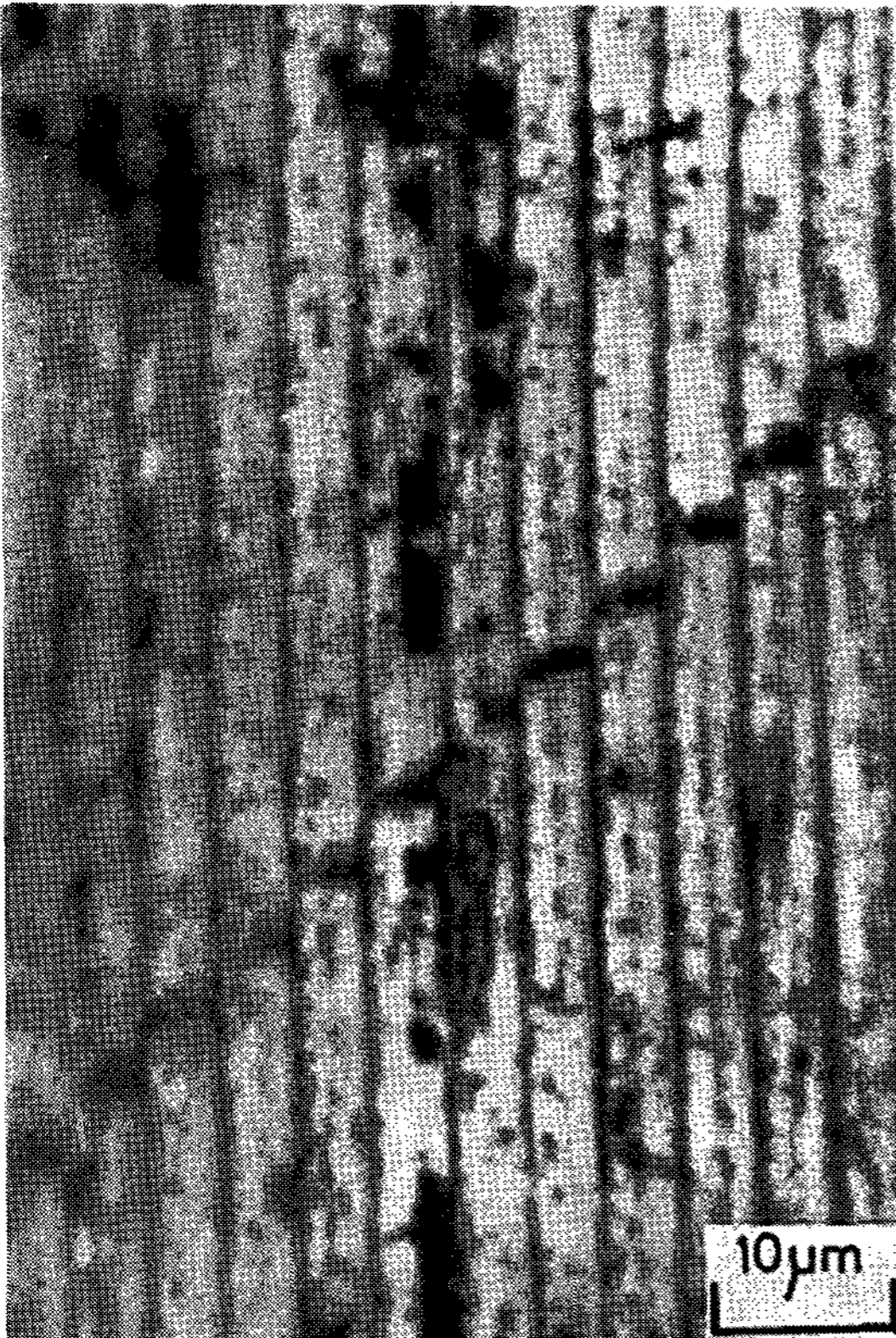


Photo. 1. Microstructure showing phase boundary sliding for a specimen tested at 450°C.

된다. 그러나 각각의 시험온도에서 층상간격에 따른 연신율의 변화를 확인할 수 없었는데, 이것은 시편의 파괴가 일어나기 전에 θ 상에 국부적인 균열이 발생하므로서 연신율을 제어했기 때문이라고 사료된다.

Table 1은 본 연구에서 행한 인장시험결과를 정리한 것이다.

3.2 파단양상 및 파면관찰

Photo 2는 150, 325, 및 450°C의 시험온도에서 인장시편의 거시적 파단양상을 나타낸 것이다. 여기서 보면 150°C에서는 인장축과 거의 90°의 각도로 파단이 진행되었으나, 시험온도가 높아짐에 따라서 점점 인장축과 어느각도를 이루면서 파단되는 것을 볼 수 있다. 그리고 20°C에서는 150°C에서의 파괴양상과 유사하였다.

Photo 3은 20, 150, 325, 및 450°C에서 인장시험한 시편의 파면을 주사전자현미경으로 관찰할 것이

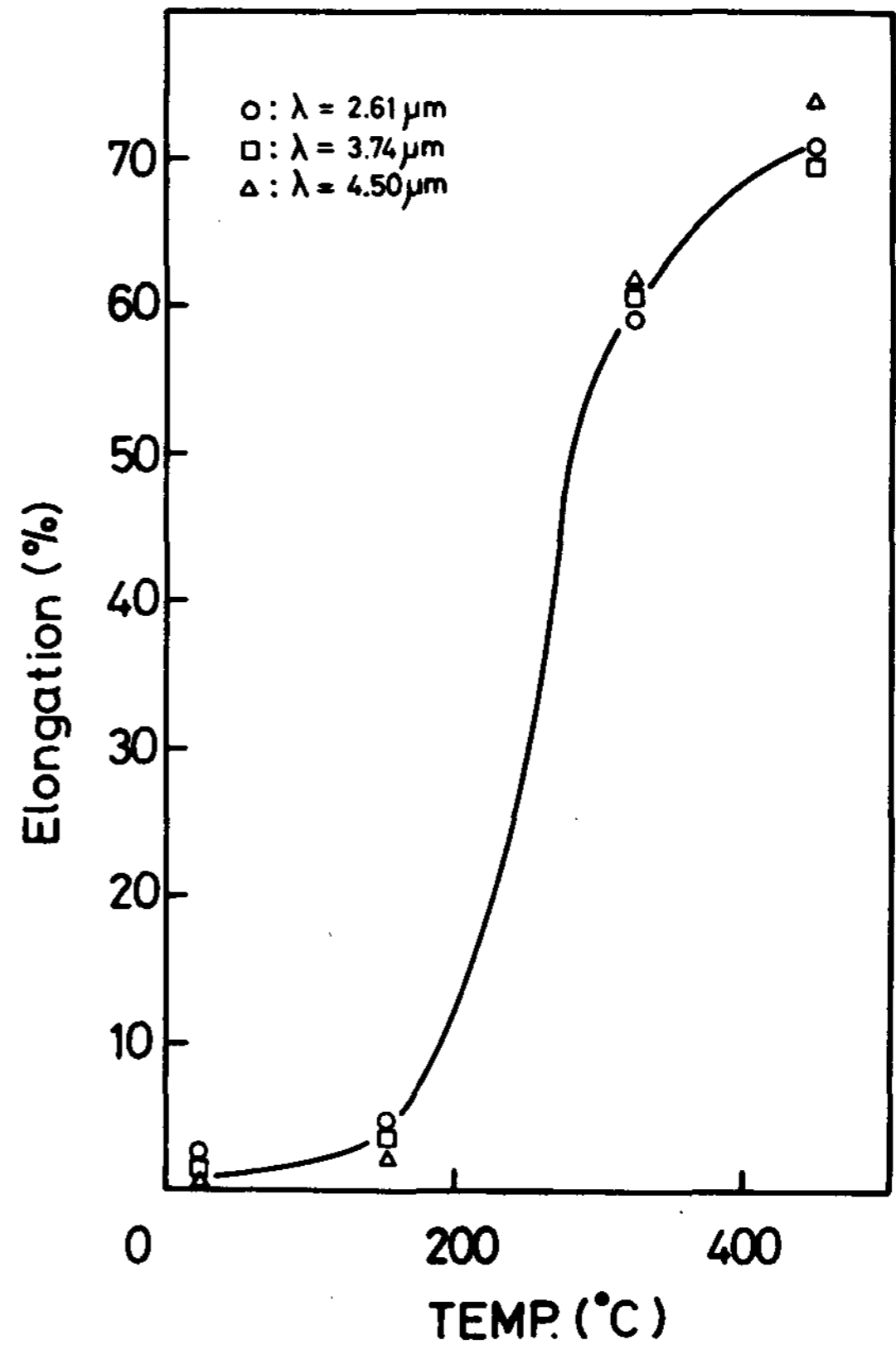


Fig. 5. Variation of elongation at various testing conditions.

Table 1. Tensile test results

T(°C)	Properties $\lambda(\mu\text{m})$	UTS (kg/mm ²)	Y. S. (kg/mm ²)	Elongation (%)
20	26.1	26		0.39
	3.74	22.4		0.36
	4.50	20.4		0.30
150	2.61	25	20.9	4.3
	3.74	20.7	16.1	3.5
	4.50	19.3	15.2	3.1
325	2.61	10.4	9.7	59
	3.74	11.2	10.2	60
	4.50	12.5	11.1	61
450	2.61	3.4	3.1	71
	3.74	2.5	2.2	74
	4.50	4.1	4.0	69

다. 20°C와 150°C에서는 $\theta(\text{CuAl}_2)$ 상이 취약하기 때문에 평면적 취성파괴양상을 나타내고, Al기지는 상당한 연성을 가지므로 모서리에서 뿔혀진

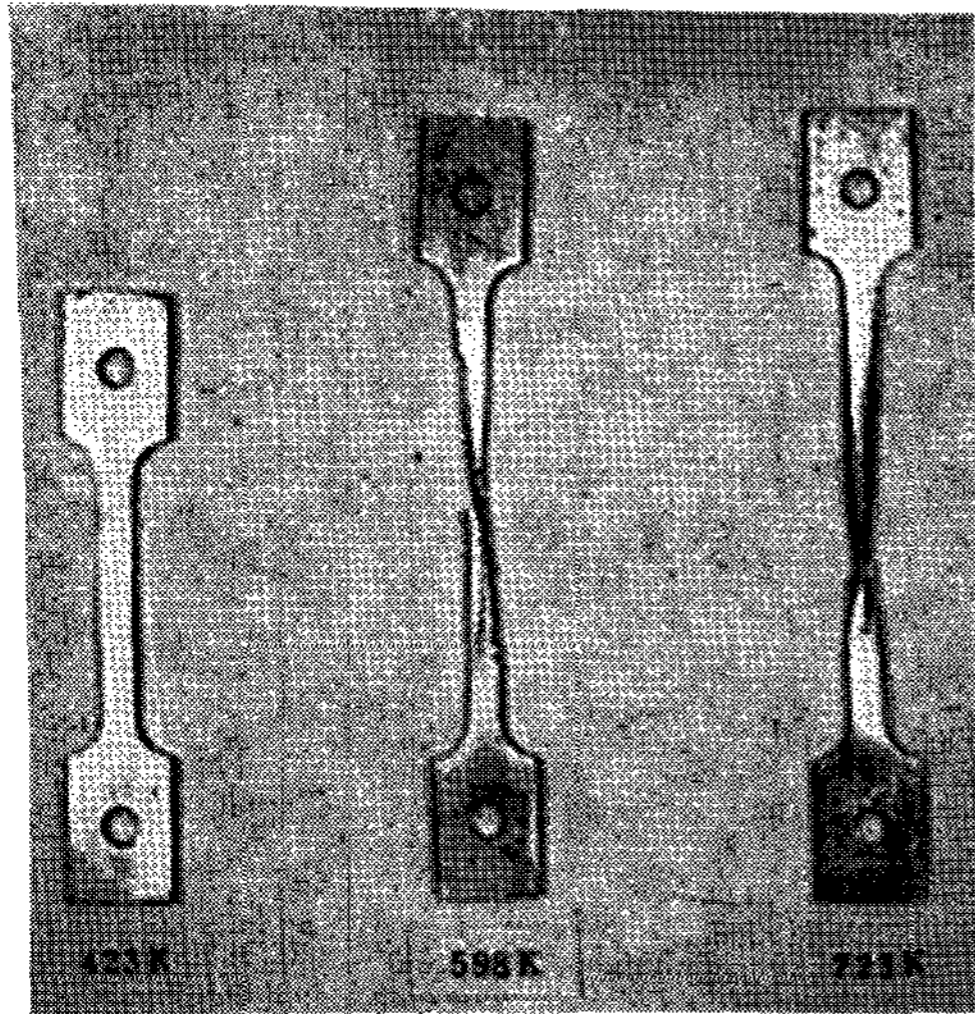


Photo.2. Micrographs of specimens fractured at several temperatures.

“knife edge”모양의 파면양상을 나타내므로써 돌출된 edge 부분이 사진에는 밝은 색의 선으로 보여지고 있다. 한편 325℃의 경우에는 응력축에 수직하게 놓여있는 파면을 촬영한 것이 아니고 응력축에 비스듬한 파면에 수직하게 촬영한 것이다, 여기서 보면 두 상이 계단식으로 파단되어가는 양상을 볼 수 있는데 이것은 Photo 2에서도 나타낸 바상경계 θ 의 전단에 의해서 파단이 일어나는 것이라 생각된다.

그리고 450℃의 경우에는 파단에 둥근 모양의 돌출부들이 나타나는데 이러한 부분은 층상조직의 국부적인 조대화에 기인한 것이라 생각된다. 물론 450℃의 경우 이와같은 파면이 전부를 차지하는 것이 아니라 325℃의 경우와 같은 계단식 파면이 주로 많이 나타나고 있으며, 국부적으로 둥근 돌출부 모양의 파면들이 존재하였다.

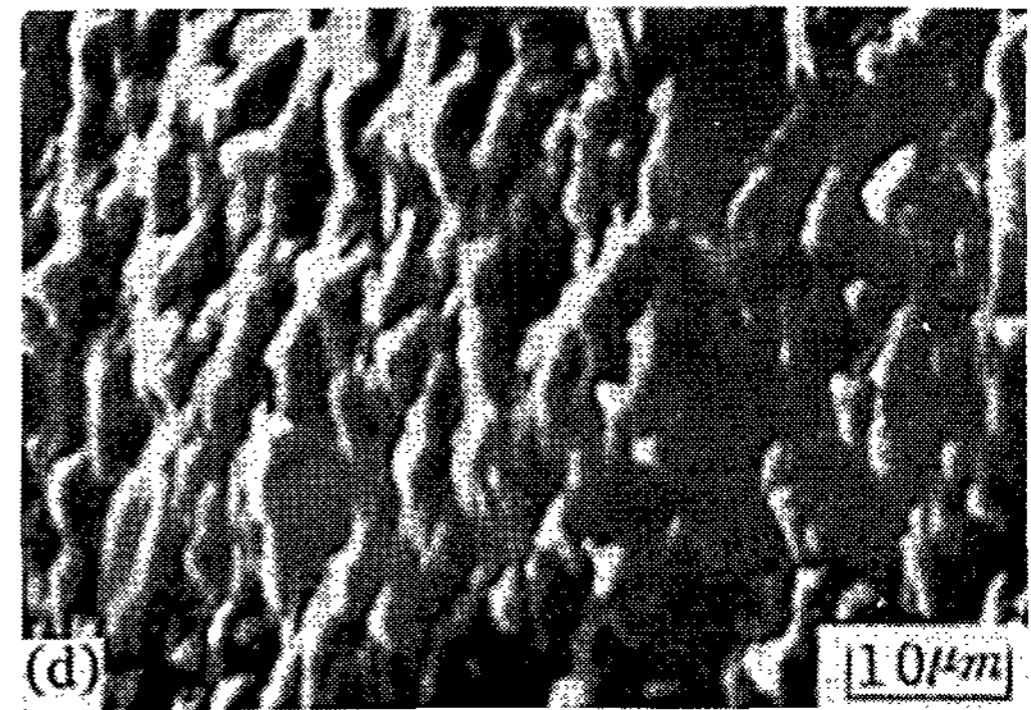
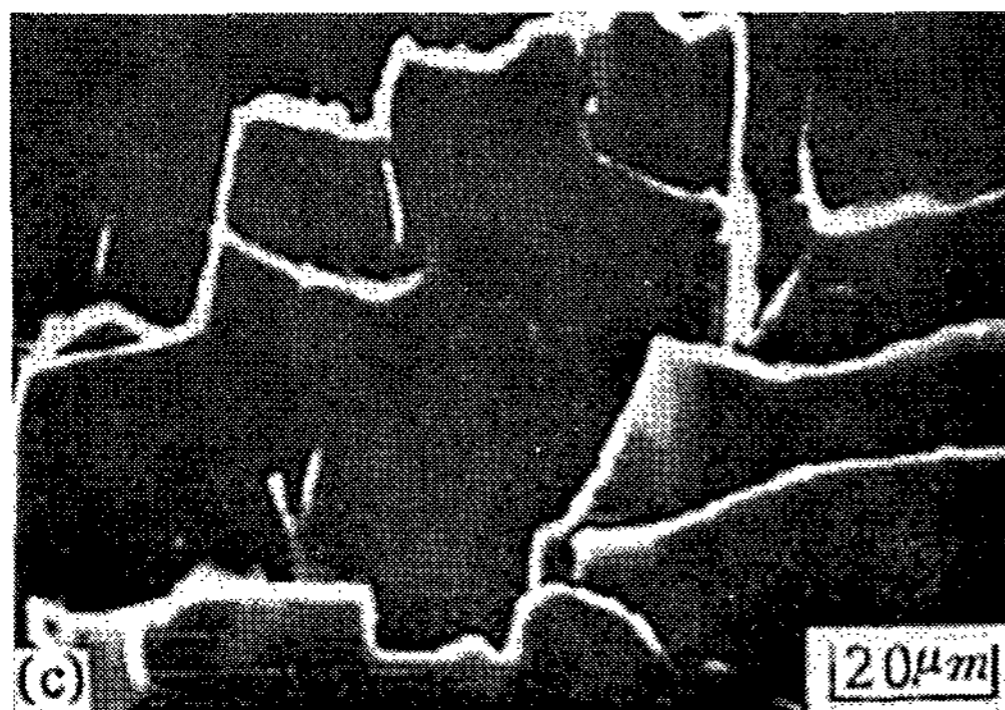
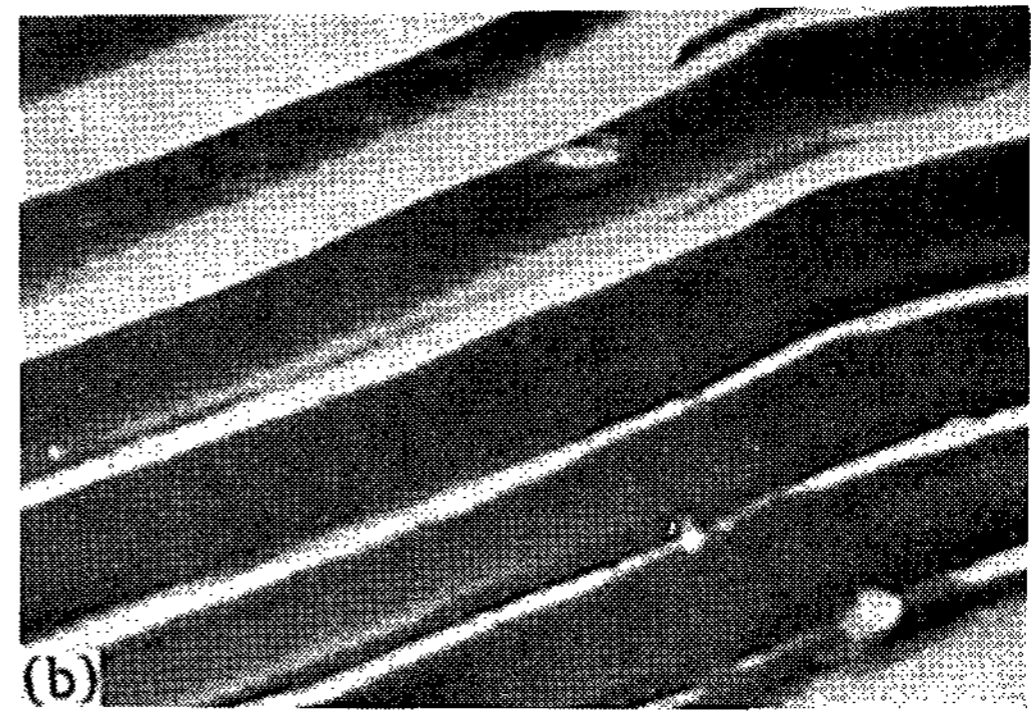
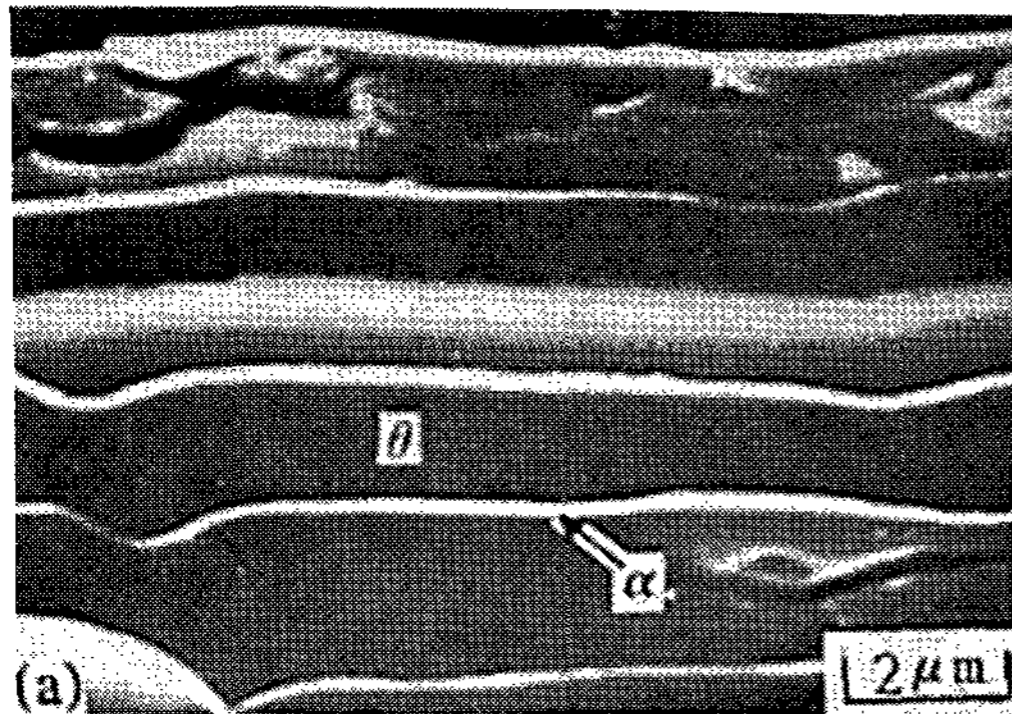


Photo.3. Scanning electron micrographs of the fracture surfaces tested at various temperatures.

- (a) 20℃ (×5000) (b) 150℃ (×3500)
- (c) 325℃ (×500) (d) 450℃ (×1000)

4. 결론

일방향응고시킨 Al-CuAl₂ 공정복합재료에 있어서 고온 및 상온에서 인장시험하여 파면을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 20℃ 및 150℃에서 인장시험한 경우에는 상 경계에서 전위이동에 대한 구속효과가 작용하여 층상간격이 작을수록 항복강도 및 최대인장강도가 높게 나타났다.
2. 325℃ 및 450℃에서 인장시험한 경우에는 상 경계 sliding에 기인하여 층상간격이 작을수록 항복강도 및 최대인장강도가 적게 나타났다.
3. 30℃와 150℃에서 인장시험한 경우 파단면에는 θ 상의 취성파괴가 나타났으나 325℃ 및 450℃에서는 상경계 전단 및 θ 상의 소성변형을 수반하는 연성파괴가 나타났다.

참 고 문 헌

1. C. J. Davidson, I. O. Smith and G. A. Chadwick; Met.Sci., 12(1978)12
2. C. J. Davidson, I. O. Smith and G. A. Chadwick; Acta met., 28(1980)61
3. W.H.S.Lawson and H.W.Kerr; Met.Trans., 2(1971)2853
4. G.A.Chadwick; Acta Met., 24(1976)1137
5. M.Ignat and R.Bonnett; Acta met., 31(1983) 1991
6. J.P.Hirth; Met.Trans., 3(1972)3047
7. H.E.Cline and D.F.Stein; Trans.AIME, 245 (1969)841
8. H.E.Cline and D.Lee; Acta Met., 18(1970) 315
9. J.P.Hirth and J.Lothe; "Theory of Dislocations", John Wiley & Sons, (1982)60