

|||||||
論 文
|||||||

일방향 응고한 Al-CuAl₂ 공정복합재료에 관한 연구
- 층상간격과 결함밀도에 미치는 응고조건과 진동의 영향 -

이길홍* · 이현규

The Study on the Unidirectionally Solidified Al-CuAl₂ Eutectic Composites
- Effect of Vibration on the Lamellar Spacing and Fault Density -

Kil-Hong Lee* and Hyun-Kyu Lee

Abstract

The effects of solidification condition and vibration on structure refinement were investigated for unidirectionally solidified Al-CuAl₂ eutectic composites. Eutectic composites were unidirectionally solidified under vibration with different growth rates (R) and thermal gradient(G). The lamellar structure was varied according to growth condition (G/R ratio). For the structure refinement the effect of G/R was found out to be greater than that of vibration. The interlamellar spacing(λ) in this materials was varied with the growth rates(R) with " $\lambda^2R=Constant$ " relationship. (Received November 7, 1996)

1. 서 론

공정복합재료 중에서 Al-CuAl₂공정 복합재료는 일반적인 전기로에 의해서 일방향응고가 가능하고, 많은 다른 층상복합재료를 대표하는 model system으로 간주되기 때문에 복합재료를 취급하는 사람들에게는 매우 흥미있는 소재이다. 공정복합재료에서는 이용할 수 있는 합금계의 상태도에 의하여 강화상의 부피분율이나 공정계 합금의 강도는 평면 고액계면을 형성시켜서 정렬조직을 얻는데 있다. Tiller[1]는 이와같은 정렬조직을 얻기 위해서는 고순도 성분 금속을 사용해야 하며 일방향응고시 불순물은 측면 확산 보다는 고액계면 전방으로 확산 하려는 경향이 크다고 지적하였다.

이러한 불순물의 장범위 확산은 조성적과냉을 야기시켜 결국 Colony 조직이나 Cellular조직을 형성시킨다. 따라서 이 공정조직의 형상이나 크기를 조절할 수 있는 유효한 수단을 발견해 내는 것은 공정계 합금의 기 따라서 이 공정조직의 형상이나 크기를 조절할 수 있는 유효한 수단을 발견해 내는 것은 공정계 합금의 기계적 성질 개선에 있어서 매우 중요한 일이라고 생

각된다. 일방향응고된 공정합금은 전형적인 복합합금으로서 응고방향으로 2상이 정렬되어 있는 층상이나 봉상으로 되며 그 체적률이나 형상은 합금계의 상태도나 응고 특성에 의존한다. 또한 이들 합금은 응고속도가 대단히 느린 열평형에 가까운 조건하에서 제조되므로 조직의 열안정성도 우수하기 때문에 공정합금에서 일방향응고 방법으로 응고속도, 온도구배, 성분금속의 순도 및 첨가 원소량을 달리하여 많은 연구[2-11]가 진행되어 왔다. 이와 같은 일방향응고에 의한 공정조성의 합금은 일반적으로 미세하고 결함이 없는 공정조직을 얻었을 경우에 층상간격(lamellar spacing)이 작을수록 기계적 성질이 우수하기 때문에 이것을 향상시키기 위한 방향과 제조 방법에 대해서 집중되어 왔다.¹²⁻¹³⁾ 또한 조직 미세화에 대한 연구로 주괴(ingot)나 casting을 응고하는 동안 조직을 제어하는 방법으로 과열이나 진동 또는 교반 이나 초음파 진동 방사에 대한 방법등이 많은 조사의 주제로 되어 왔으나 Al-CuAl₂ 공정 합금을 일방향응고시켰을 때 층상 간격을 위와 같은 방법 중 진동에 의하여 조직을 미세화시키는 연구는 거의 진행되지 않은 실정이다. 이와 같은 이유는 Al-CuAl₂ 공정복합재료에 있어서 일방향응고시 고-액 계면의 교

*조선대학교 금속공학과 (Dept. of Metallurgical Engineering, Chosun University, Kwangju, Korea)

조선대학교 재료공학과 (Dept. of Material science and engineering, Chosun University, kwangju, Korea)

란이 문제된다는 추측과 예언 때문이었다.

Cline[14], Hurle과 Jakeman[15]은 작은 파장에 의한 교란에 의하여서도 평활한 고/액 계면이 파괴될 수 있다고 가정만 하였을 뿐 실험적으로 이를 증명하거나 확인할 수 있는 문헌은 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 앞선 연구[16-18]를 통하여 진동하에서 일방향응고 시켰을 때 G/R (G : 온도구배, R : 성장속도) 값의 변화와 진동수 변화에 따른 미세조직의 층상간격과 결함밀도에 대하여 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료 제작

99.99% Al과 99.99% Cu를 Al-33.2wt/0 Cu조성이 되도록 평량하여 고주파진공 용해로에서 고순도 흑연도가니를 사용하여 10^{-2} Torr이하의 진공에서 용해하였다.

이 때 성분 금속의 증발 손실을 방지하기 위하여 Ar가스를 1/2기압이 될 때까지 주입하였다. 완전히 용해한 다음 약 5분간 유지후 미리 예열된 주철 주형에 주입하여 $45 \times 45 \times 130$ 의 잉곳트를 얻었다.

이 잉곳트를 다시 지름이 12.5, 길이가 120인 봉으로 가공하였다.

2.2 일방향응고

본 실험에 사용된 진동하에서 일방향응고 시킨 장치를 Fig. 1에 나타냈다. 이 때 사용된 로는 Kanthal 선에 의해서 가열되는 관상로였고 로내에 Pt-13%Rh 열전대를 부착하여 일방향응고 시키는 동안 로내 온도를 850°C 와 900°C 로 일정하게 유지하였다.

일방향응고 시킬 때 시료가 담겨진 관은 내경 13 mm, 길이 150 mm인 알루미나 관을 사용하였으며 이 관속에 지름이 12.5 mm, 길이가 120 mm인 시료를 장입하여 로 안에서 채용해 시킨 후 온도 균일성을 위해 1시간 동안 유지시켰다.

그 후 D.C Step moter와 RPM controller로 구성된 시료 강하장치에 의해 시료를 일정한 속도로 하강하는 순간 진동자를 작동시키면서 일방향응고 시켰다. 이 때 응고속도는 2 cm/hr, 4 cm/hr, 10 cm/hr로 변화시켰다.

2.3 진동 장치

실험에 사용된 진동수 변화는 60 Hz, 100 Hz, 150

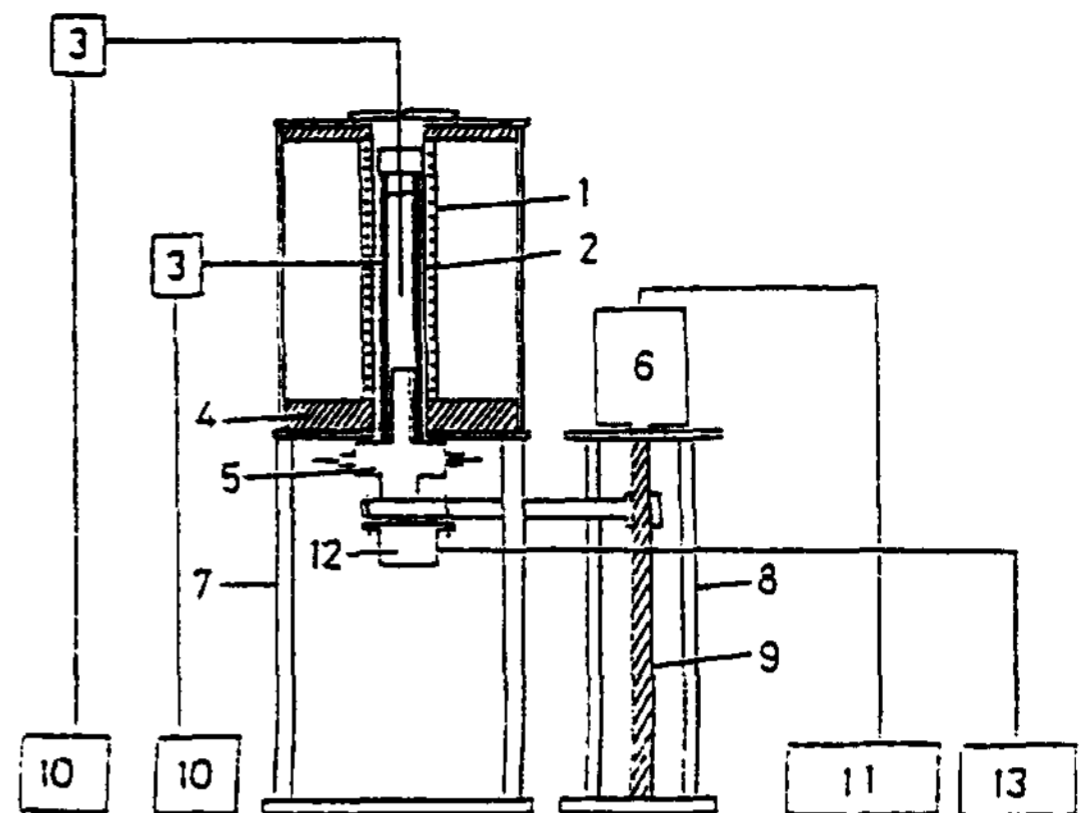


Fig. 1. Experimental apparatus for unidirectional solidification.

- 1. Furnace 2. Alumina Tube 3. Thermocouple
- 4. Insulating Material 5. Copper Chill 6. D.C Step Motor
- 7. Furnace Support 8. Shaft Support 9. Shaft
- 10. Temperature Controller 11. RPM Controller
- 12. Vibrator 13. Frequency Controller

Hz로 하였으며 진동의 진동수는 주파수 변환기에 의해서 조절하였으며, 파형(wave form)과 진동수 측정은 optical oscilloscope에 의해서 조사하였으며 진동의 파형은 Photo 1에 나타냈다.

진동자는 주파수의 진동이 최대 에너지로 고-액 계면에 연속적으로 유지하기 위하여 구리로 만들어진 냉각수 chill 밑에 직접 접촉하여 진동시켰다.

그리고 액체보다 고체 쪽에 진동을 주는 것은 고-액 계면 영역에 보다 가까운 곳에 전달되는 것이 훨씬 더 많은 효과를 주기 때문이다.

2.4 조직 관찰

조직관찰을 위해 시편을 응고방향과 그 수직 방향으로 절단하여 연마한 후 20% HNO₃용액으로 약 20초간 부식시켜 주사전자현미경(SEM)과 광학현미경으로 관찰하였다.

2.5 층상간격측정과 결함밀도의 정량적측정

결정성장속도에 따른 층상사이 간격의 측정은 응고 방향에 수직인 단면(transverse section)을 광학 현미경으로 촬영한 미세조직 사진으로부터 linear intercept method를 사용하여 층상간격을 측정하였다. 또한 결함밀도(fault density)측정은 조직사진위에 단위 면적당 안에 든 결함 수를 3번씩 20장의 조직 사진을 측정하여 평균값을 취하였다.

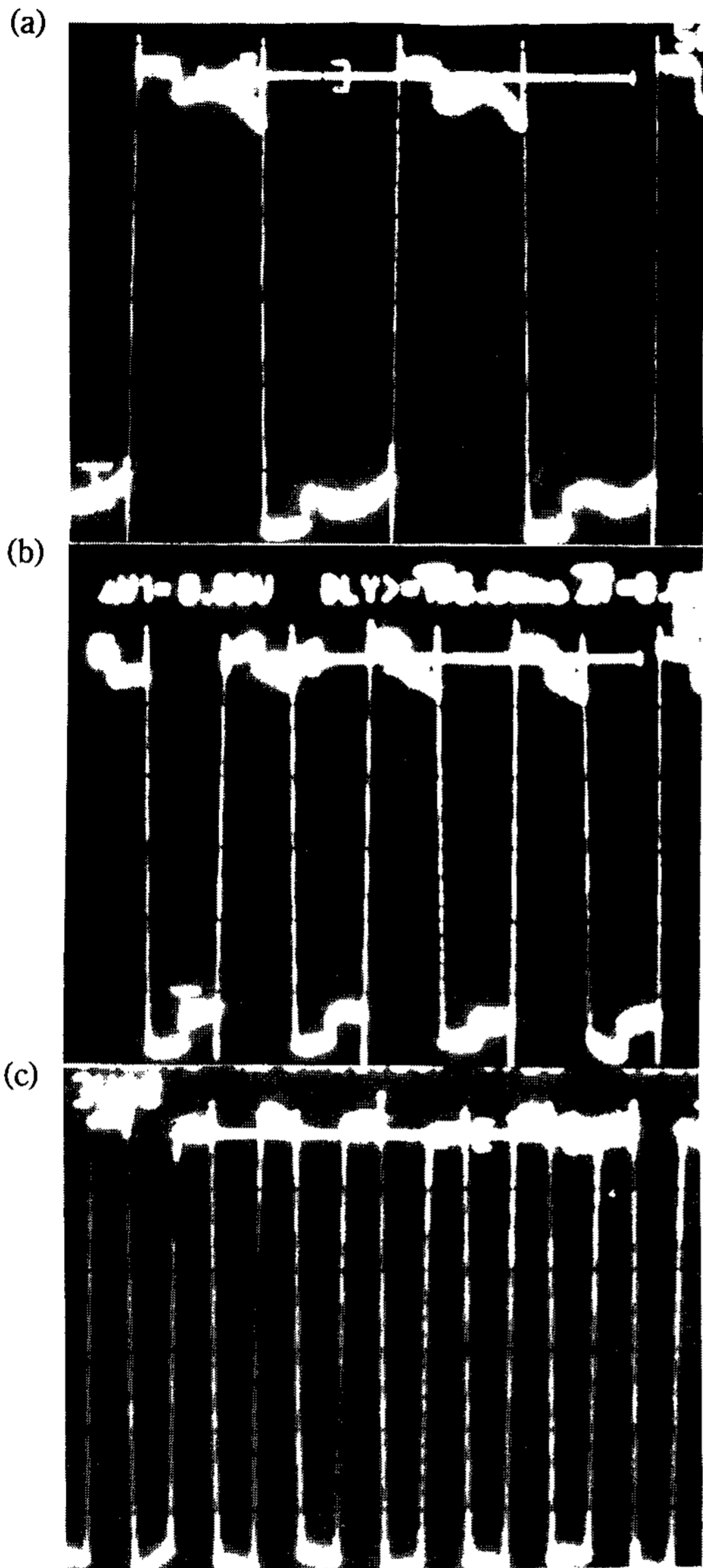


Photo 1. Wave-form of vibration with frequency variation.
(a) 60 Hz (b) 100 Hz (c) 150 Hz

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 G/R값과 진동변화에 따른 미세조직

진동하에서 행한 액상 내의 온도구배를 알기 위하여 시편에 장입된 열전대가 일방향 이동된 거리와 온도와의 관계를 Fig. 2에 나타냈으며 이때 로내 온도를 850°C로 유지시켰을 때 액상의 온도는 680°C로 32°C/cm의 온도구배를 얻었으며 900°C로 유지시켰을 때는

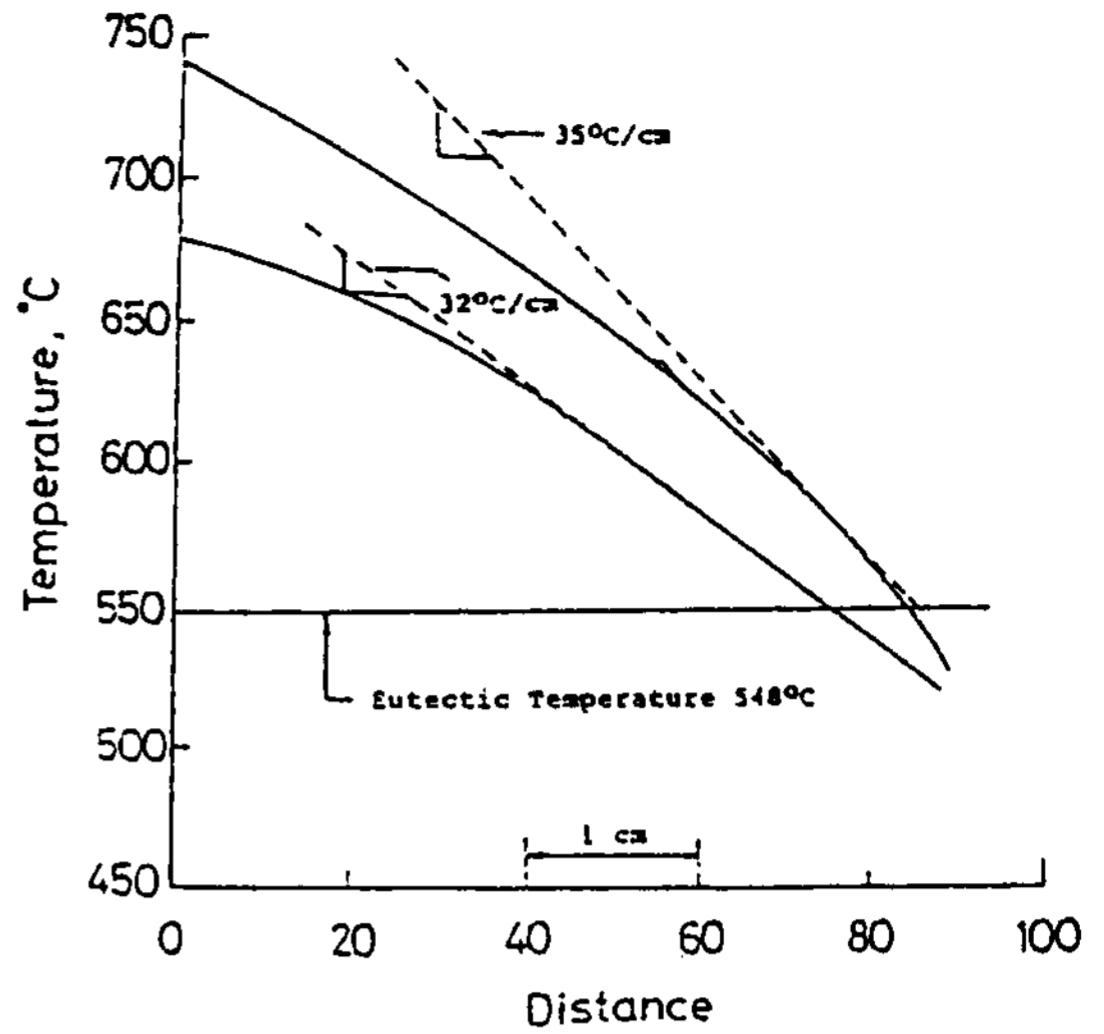


Fig. 2. Variations of liquid temperature as a function of distance from eutectic front.

Table 1. Summary of Growth conditions

G (°C/cm)	R (cm/sec)	G/R (°C/sec/cm ²)
32°C/cm	5.56×10^{-4}	5.75×10^4
	1.11×10^{-3}	2.88×10^4
	2.78×10^{-3}	1.15×10^4
35°C/cm	5.56×10^{-4}	6.29×10^4
	1.11×10^{-3}	3.15×10^4
	2.78×10^{-3}	1.25×10^4

740°C로 35°C/cm의 온도구배를 얻었다.

이 때 성장속도는 공히 10 cm/hr로 행하였다.

진동을 주지 않을 때보다 진동을 줄 때가 액상 내의 온도분포가 보다 균일하게 고온으로 유지되면서 고액 계면 앞에서는 온도 강하가 일어남을 알 수 있다. 응고시 진동은 각기 똑같이 100 Hz로 주었다. 온도구배를 32°C/cm, 35°C/cm로 하고 진동수 변화를 60 Hz, 100 Hz, 150 Hz로 한 각 경우에 응고속도를 2 cm/hr, 4 cm/hr, 10 cm/hr로 했을 때 응고 조건의 변화를 Table 1에 표시하였다. 이 때 장치 특성상 Copper Chill과의 거리에 따라 온도구배가 달라지므로 미세조직 관찰은 Chill Zone 위 2 cm와 응고된 끝 부분에서 2 cm를 잘라 낸 시편의 중앙부를 절단한 부분의 조직을 취하여 관찰하였다. 온도구배(G)가 G=32°C/cm와 G=35°C/cm인 경우와 응고속도 및 진동수 변화에 따른 미세조직의 사진은 앞선 연구에서 자세히 나타내었다.¹⁷⁾

Photo 2는 온도구배가 35°C였을 때 응고속도 4 cm/hr, 진동수 100 Hz 공정합금의 횡단면과 종단면의 조직을 나타낸 것으로 성장된 층상조직(lamellar structure)이 잘 정렬되어 있는 것과 성장 결함을 보여주고 있다.

3.2 응고속도와 진동수 변화에 따른 층상간격과 결함밀도와의 관계

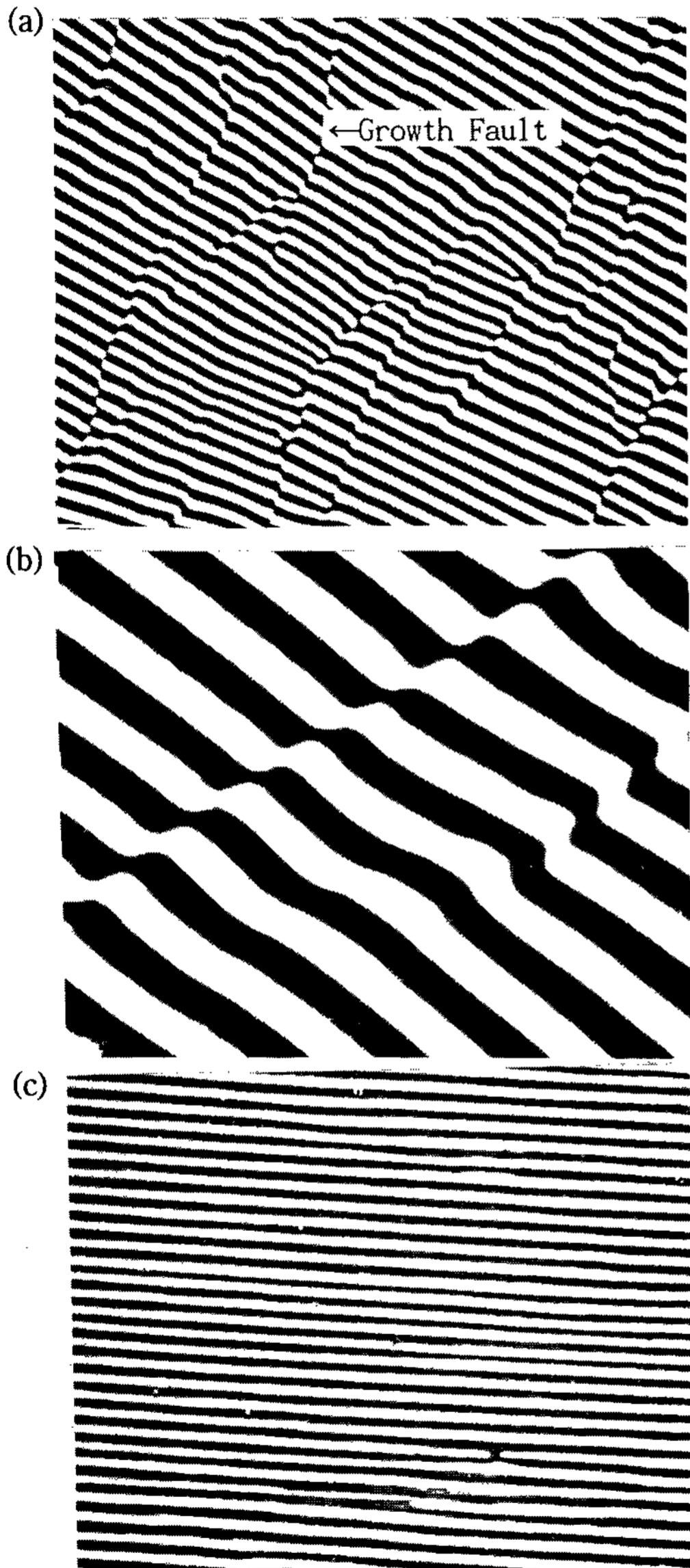


Photo 2. Microstructure of unidirectionally Solidified under Vibration of 100 Hz (R=4 cm/hr, G=35°C/hr).
 (a) Transverse ×750 (b) Transverse ×1500
 (c) Longitudinal ×750.

일방향응고의 성장속도(R)와 층상간격(λ)과의 관계를 Fig. 3에 나타냈는데 $\lambda^2 R = \text{상수}$ 라는 관계식에 잘 들어 맞는 것을 보여주고 있다. 본 실험에서 온도구배 G=35°C/cm 일때 성장속도가 1 cm/hr, 2 cm/hr, 4 cm/hr, 10 cm/hr로 증가함에 따라서 층상간격은 4.50 μm , 3.74 μm , 3.09 μm , 2.61 μm 로 감소하였고 $\lambda^2 R = 10.65 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{sec}$ 의 값이 얻어졌는데 이것은 일방향응고시 고액계면은 거의 정상상태에서 이동하고 있음을 알 수 있다. 온도구배 및 응고속도와 진동수 변화에 따른 Al-CuAl₂ 공정 복합조직의 층상간격과 결함밀도(fault density)의 변화를 Table 2에 나타냈는데 보는 바와같이 진동수와 성장속도가 증가함에 따라 층상간격은 각각 감소하여 진동을 가하지 않는 경우보다 상당히 미세해졌음을 알 수 있다. 그러나 진동수가 증가한 100 Hz까지는 층상간격이 많이 감소하였으나 150 Hz에서는 진동을 가하지 않는 경우보다는 미세하였지만 60, 100 Hz보다는 다시 증가하였음을 볼 수 있다.

또한 온도구배가 더 높은 경우에 층상간격이 더욱 미세해졌음을 알 수 있다. 이와 같이 층상간격이 확산에 의해서 미세화 되려면 넓은 범위에 걸쳐 확산이 일어나야 하므로 진동에 의해 큰 구동력(driving force)이 생겨서 얇은 층을 형성하게 되므로 층상간격이 더 미세해 졌다고 사료되나 진동수가 증가할수록 층상간

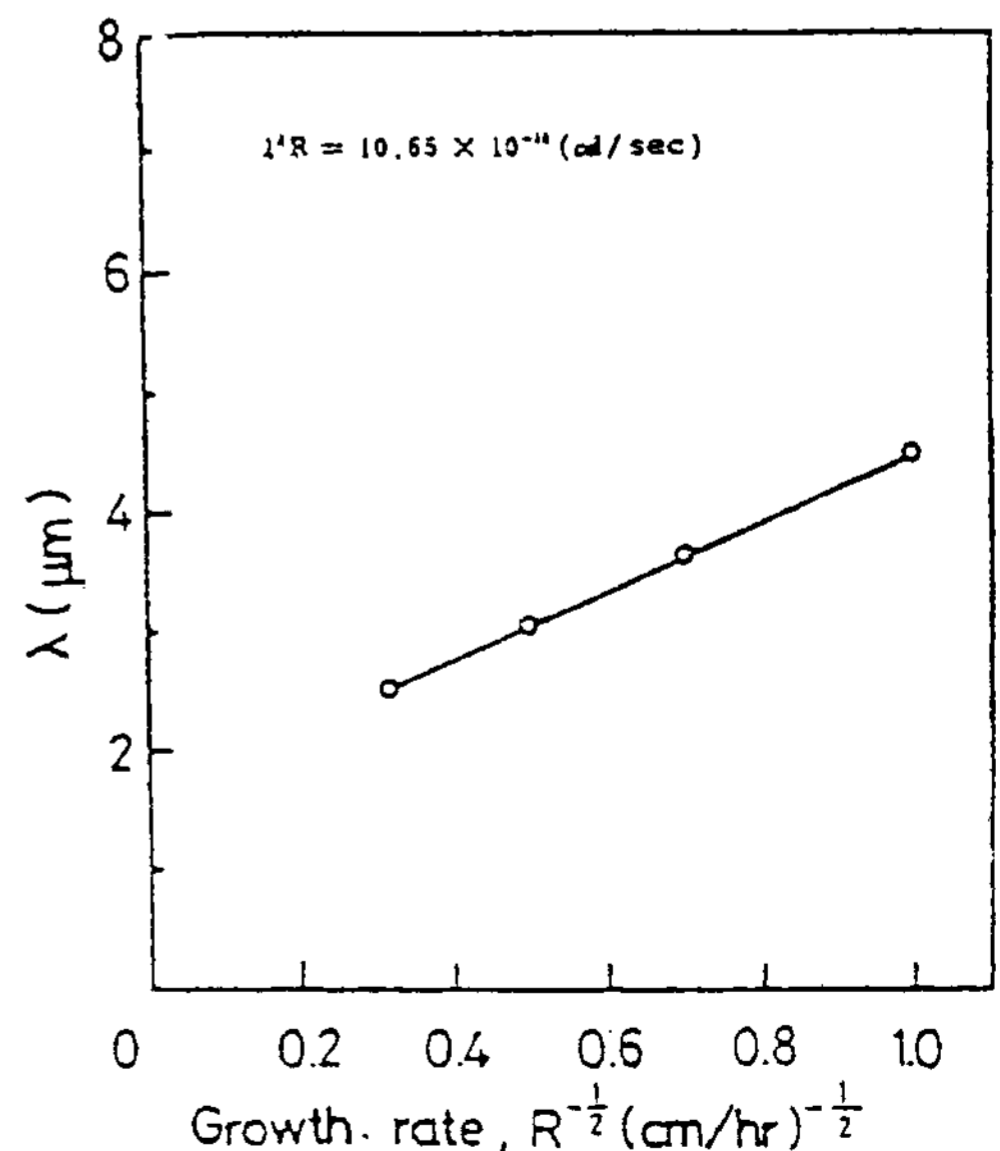


Fig. 3. Variation of interlamellar spacing (λ) with growth rate (R) in CuAl₂ eutectic composites.

Table 2. Summary of lamellar spacing and fault density with Solidification rate and Vibration frequency

Type A (G=32°C/cm)								
f (Hz) λ & F.D R (cm/hr)	As-grown		60 Hz		100 Hz		150 Hz	
	λ (μm)	F.D (cm ⁻²)	λ (μm)	F.D (cm ⁻²)	λ (μm)	F.D (cm ⁻²)	λ (μm)	F.D (cm ⁻²)
2	3.76	0.97 × 10 ⁵	3.16	1.70 × 10 ⁵	2.71	2.69 × 10 ⁵	3.26	1.16 × 10 ⁵
4	3.09	1.11 × 10 ⁵	2.75	2.01 × 10 ⁵	2.48	3.4 × 10 ⁵	2.94	1.62 × 10 ⁵
10	2.63	1.69 × 10 ⁵	1.45	3.59 × 10 ⁵	1.36	6.72 × 10 ⁵	1.96	2.89 × 10 ⁵

Type B (G=35°C/cm)								
f (Hz) λ & F.D R (cm/hr)	As-grown		60 Hz		100 Hz		150 Hz	
	λ (μm)	F.D (cm ⁻²)	λ (μm)	F.D (cm ⁻²)	λ (μm)	F.D (cm ⁻²)	λ (μm)	F.D (cm ⁻²)
2	3.74	0.95 × 10 ⁵	2.51	2.4 × 10 ⁵	2.10	3.4 × 10 ⁵	3.30	2.2 × 10 ⁵
4	3.09	1.11 × 10 ⁵	2.02	3.9 × 10 ⁵	1.72	6.4 × 10 ⁵	2.10	3.4 × 10 ⁵
10	2.61	1.70 × 10 ⁵	1.28	5.65 × 10 ⁵	1.09	8.78 × 10 ⁵	1.83	4.89 × 10 ⁵

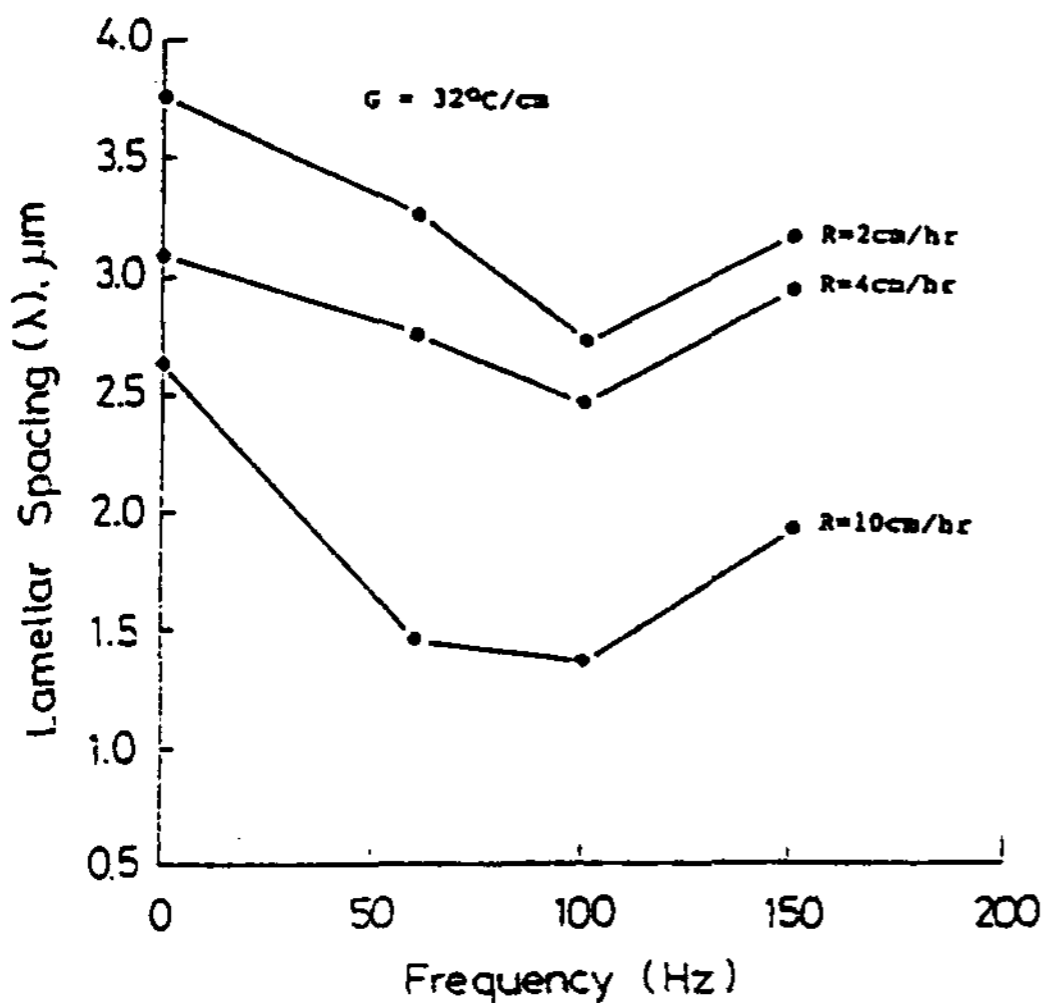


Fig. 4. Variations of interlamellar Spacing with Vibration frequency and growth rate (R) in Al-CuAl₂ eutectic composites (G=32°C/cm).

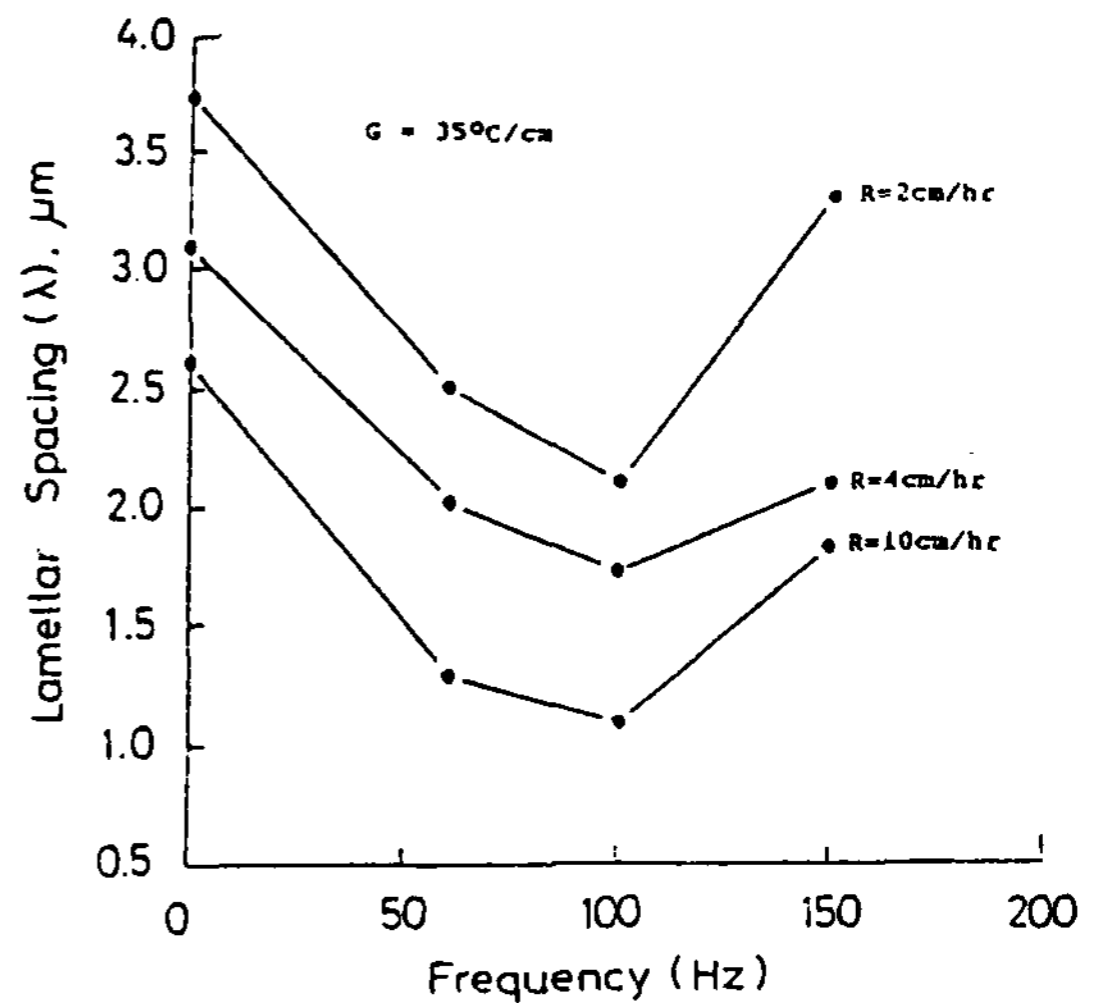


Fig. 5. Variations of interlamellar spacing with Vibration frequency and growth rate (R) in Al-CuAl₂ eutectic composites (G=35°C/cm).

격이 미세해졌는데 이 층상간격의 미세화는 진동의 영향도 컸지만 G/R의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 성장결함은 고액계면에서 밀려난 불순물이 성장속도가 클 때는 균일하게 분포할 충분한 시간이 없게 된다. 따라서 이러한 조건하에서 온도구배가 작다면 Cellular계면을 형성하게 된다. 그런데 온도구배가 Colony조직을 피할 수 있을 만큼 매우 크다면 밀려난 불순물은 잘 정렬된 층상조직내에 미세한 개재물로 석출될 수 있다. 이러한 석출물 입자들은 extra lamellar를 형성하여 결국 성장결함을 나타내게 한다

[19]. Fig. 4,5,6,7은 Al-CuAl₂ 공정복합재료의 성장속도에 따른 성장결함밀도의 변화를 나타낸 것으로서 성장속도가 증가함에 따라서 결함밀도도 증가하고 있다. 이처럼 성장속도에 따른 결함밀도의 증가가 나타난 이유는 성장속도가 커질수록 그 만큼 고액계면이 국부적으로 불안정해져서 결함이 나타날 가능성이 커지기 때문이라고 사료되고, 한편으로는 성장속도가 크면 층상간격이 작아지므로 결국 성장결함이 나타날 가능성이 같다 할지라도 당위면적당 성장결함의 수는 증가하기 때문이라고 사료된다.

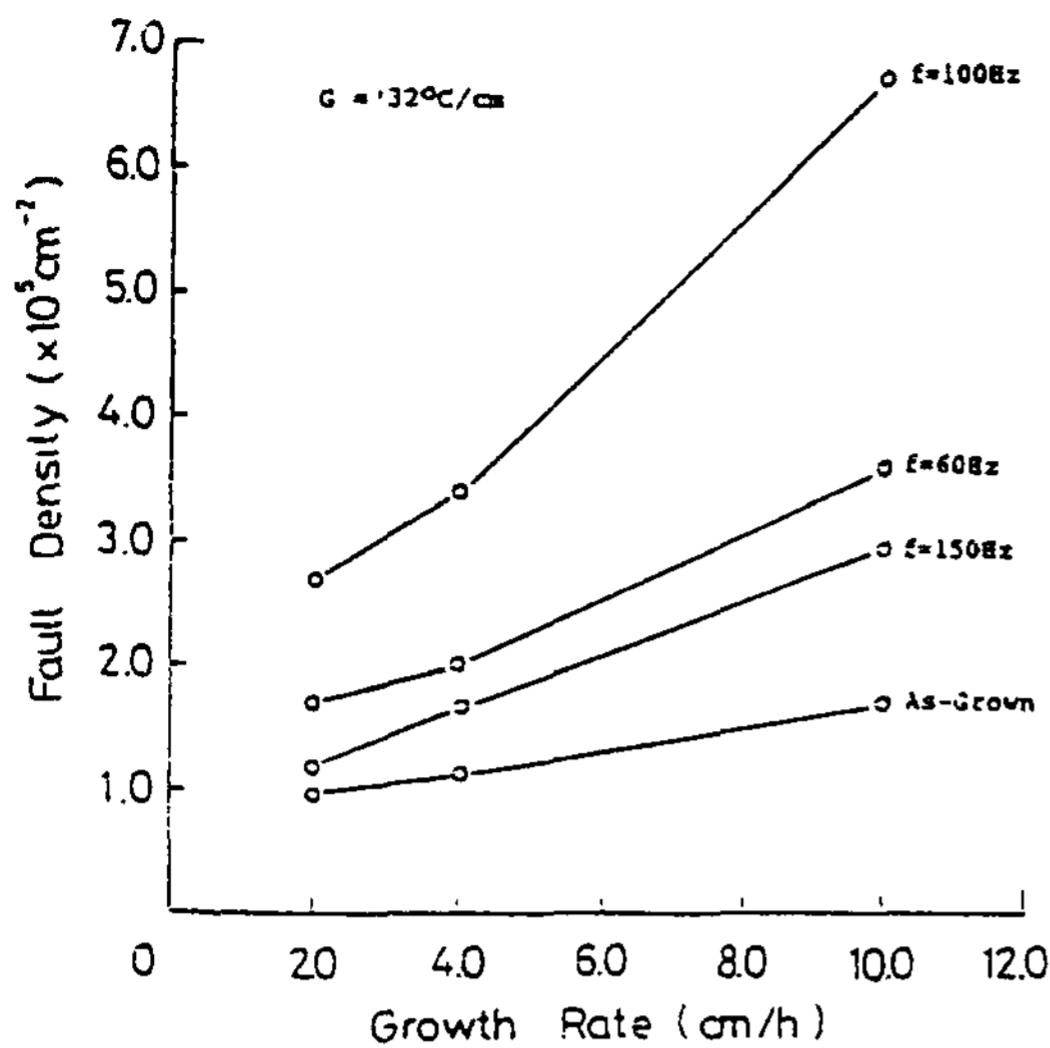


Fig. 6. Variation of fault density with growth rate and Vibration frequency in Al-CuAl₂ eutectic composites (G=32°C/cm).

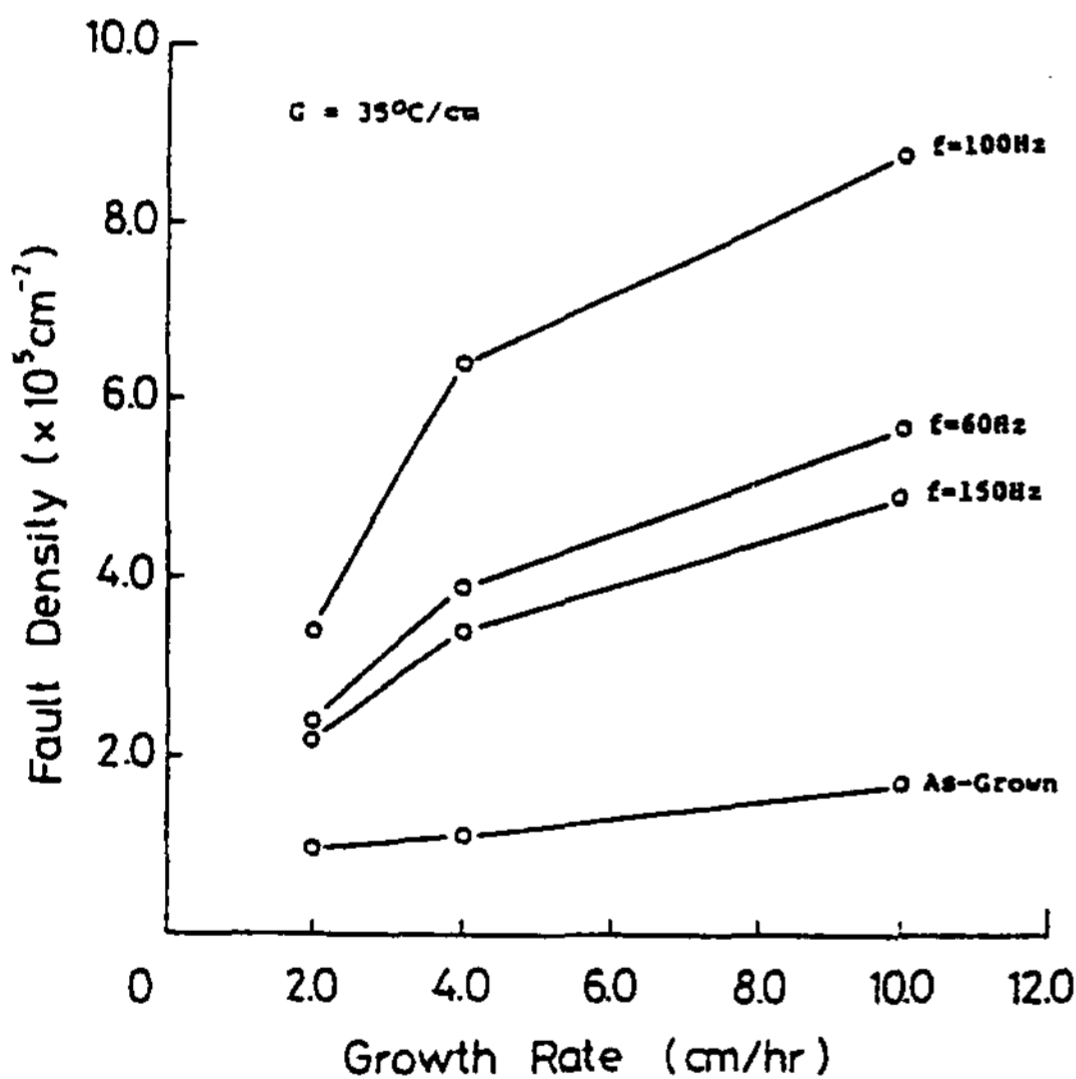


Fig. 7. Variations of fault density with growth rate and Vibration frequency in Al-CuAl₂ eutectic composites (G=35°C/cm).

Chadwick[20]는 Al-Cu, Al-Zn, Pb-Sn, Pd-Cd 계 공 정합금 연구에서 층상간격(λ)은 응고속도(R)와 다음 의 이론식이 실험오차 이내에서 성립한다고 하였다.

$$\lambda = K_3 / \sqrt{R} \quad (1)$$

층상간격(λ)과 $1/\sqrt{R}$ 의 관계를 Table 3에 나타냈으며

Table 3. Relationship between measured interlamellar spacing (λ) and growth rate ($1/\sqrt{R}$) in as-grown condition

R (cm/hr)	λ & $1/\sqrt{R}$	λ (μ m)	$1/\sqrt{R}$
1		4.52	1
2		3.78	0.7
4		3.09	0.5
10		2.63	0.3

Table 4. Relationship of measured interlamellar spacing (λ) and growth rate ($1/\sqrt{R}$) in directionally solidified Al-CuAl₂

(G=32°C/cm)

R (cm/hr)	f (Hz)		60		100		150	
	λ	$1/\sqrt{\sigma R}$	λ	$1/\sqrt{\sigma R}$	λ	$1/\sqrt{\sigma R}$	λ	$1/\sqrt{\sigma R}$
2	3.16	0.09	2.71	0.07	3.26	0.06		
4	2.76	0.06	2.68	0.05	2.94	0.04		
10	1.45	0.04	1.36	0.03	1.96	0.02		

(G=35°C/cm)

R (cm/hr)	f (Hz)		60		100		150	
	λ	$1/\sqrt{\sigma R}$	λ	$1/\sqrt{\sigma R}$	λ	$1/\sqrt{\sigma R}$	λ	$1/\sqrt{\sigma R}$
2	2.51	0.09	2.10	0.07	3.30	0.06		
4	2.02	0.06	1.72	0.05	2.10	0.04		
10	1.28	0.04	1.09	0.03	1.83	0.02		

이 값을 좌표상에 나타내면 직선으로 표시되는 것으로 볼 때 층상간격은 $1/\sqrt{R}$ 에 비례한다는 것을 알 수 있었으며 Chadwick 결과와 유사하였다.

그리고 진동하에서 응고시킨 층상간격은 실험오차 이내에서 성립한다는 Chadwick의 이론식과 유사한 다음 식으로 가정할 수 있다.

$$\lambda = K_3 / \sqrt{\sigma R} \quad (2)$$

(주) σ : 진동수 R: 응고속도

따라서 진동변화에 따라 응고시킨 층상간격과 응고 속도와 의 관계를 Table 4에 나타냈다. 진동수가 증가 함에 따라 층상간격(λ)은 $1/\sqrt{\sigma R}$ 에 비례하거나 σ/\sqrt{R} 에 반비례하였으나 어느 일정량의 진동수 이상에서는 다시 반비례한 경향을 나타내었다.

Fig. 5,6에서 본 바와 같이 결함밀도는 진동을 주지 않은 상태에서는 응고속도가 증가함에 따라 결함밀도가 감소하는 반면 진동을 주었을 때는 온도구배가 작

고 응고속도와 진동수가 증가함에 따라 결함밀도는 증가한 반면에 150 Hz 이상에서는 오히려 감소하였음을 볼 수 있었다. 따라서 층상간격과 결함밀도는 진동수가 어떤 일정량을 초과하면 그 효과가 점차로 줄어들어 조직은 조대화의 경향을 나타낸 반면 결함밀도는 감소하였음을 알 수 있었다. 이와 같이 진동을 줌으로써 온도구배가 작고 응고속도와 진동수가 증가함에 따라 결함밀도가 증가한 이유는 진동에 의해 고-액 계면이 국부적으로 불안정해져서 결함이 나타날 가능성이 크므로 단위면적당 결함밀도의 수가 증가하였거나 또는 진동수와 성장속도가 증가함에 따라 불순물들이 잘 정렬된 층상조직내에 미세한 개재물로 석출되어 이러한 석출물입자들이 여분 라멜라(extra lamella)를 형성하여 결국 성장결함을 나타나게 한다.

Photo 2에 나타난 바와 같이 여분 라멜라에 이웃한 여러 개의 라멜라들이 연속적으로 어긋남으로써 미세한 선으로 연결된다. 물론 이러한 미세한 선은 여분 라멜라의 존재에 의해서만 생기는 것이 아니라 층상조직이 어긋난 지역을 나타내기도 한다[21].

Double[22]은 위와 같은 성장결함의 존재는 층상간격을 변화시키는 수단으로 작용한다고 하였는데 이 층상간격의 변화는 부정합(mismatch)계면의 생성과 그들 서로의 상호작용에 의해서 주로 일어난다고 하였다.

4. 결 론

Al-CuAl₂ 공정복합재료를 온도구배(G)와 응고속도(R)변화에 따라 일방향응고 시켰을 때 진동수 변화가 층상조직의 층상간격과 결함밀도에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 진동하에서 일방향응고 시켰을 때 층상간격은 응고속도와 온도구배가 크고 진동수가 증가하므로써 주방향상태보다 감소하여 층상간격이 더욱 미세해졌다.
2. 층상간격(λ)은 " $\lambda^2 \cdot R = 상수$ "라는 관계식에 비교적 잘 일치하였다.
3. 층상간격의 미세화는 진동의 영향도 컸지만 G/R의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있었다.
4. 결함밀도는 응고속도와 진동수가 증가할수록 주방 상태보다 증가하였다.
5. 진동수가 어느 일정량을 초과하면 그 효과가 줄어들어 층상간격은 다시 조대화의 경향을 보이는반면 결함 밀도는 감소하였다.

후 기

본 연구는 1994년도 조선대학교 학술 연구비의 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] W. A. Tiller : In "Liquid Metals and Solidification", ASM, Cleveland, Ohio, (1958) 276.
- [2] H. W. Kraft and D. L. Albright: Trans. Met. Soc. AIME, 221 (1961), 95.
- [3] G. A. Chadwick : J. Inst. Metals91 (1962~63), 169.
- [4] G. A. Chadwick : J. Inst. Metals91 (1962~63), 298.
- [5] R. W. Hertzberg, F. D. Lemkey and J. A. Ford: Trans. AIME, 233 (1965), 342.
- [6] R. W. Kraft : J. of Metals, 2 (1966), 192.
- [7] T. S. Plaskett and W. C. Winegard : Can. J. Phys. 38 (1966), 304.
- [8] R. W. Crossman, A. S. Yue and A. E. Vidoz : Trans. AIME, 245(1969), 397.
- [9] W. H. S. Lawson and H. W. Kerr : Met. Trans., 2 (1971), 2853.
- [10] R. S. Barclay and W. C. Winegard : J. Inst. Metals 101 (1973), 135.
- [11] 三浦維四 : 금속복합재료 共立出版(1973), 135.
- [12] C. J. Davidson, I. O. Smith and G. A. Chadwick : Actamet., 28 (1980), 61.
- [13] B. Cantor and G. A. Chadwick : J. Mater. Sci., 10 (1975), 578.
- [14] H. E. Cline : J. Appl. Phys., 50 (1979), 4780.
- [15] D. T. J. Hurle and E. Jakeman : J. Cryst. Growth, 3, 4 (1968), 574.
- [16] 이현규, 김영주, 홍영환, 홍종휘 : Al-CuAl₂ 공정복합재료의 고온거동에 관한 연구 : 대한금속학회지, Vol. 26, No. 7, 1988, 670-679.
- [17] 이현규, 이주홍, 홍종휘 : Al-CuAl₂ 공정복합재료의 기계적 성질에 미치는 응고조건과 열처리의 영향 : 한국주조공학회지, Vol. 10, No. 4, 1990. 332-341.
- [18] 이현규, 홍종휘 : 일방향 응고한 Al-CuAl₂ 공정복합재료의 미세조직에 미치는 응고조건과 진동의 영향 : 한국재료학회지, Vol. 4, No. 2, 1994. 177-186.
- [19] N. S. Stoloff : In "Alloy and Microstructural Design", (J. K. Tien, G. S. Anselleds). chap. III, Composite Strengthening, Academic Press, (1976) 74.
- [20] G. A. Chadwick : J. Inst. Metals92 (1963~1964), 18.
- [21] R. W. Weart and D. L. Albright : Trans. TMS-AIME, 221 (1961), 95.
- [22] D. D. Double : Mater. Sci. Eng., 11 (1973), 325.