

|||||
 論 文
 |||||

Al-Cu 합금의 일방향 응고조직과 기계적 성질에 미치는 냉간압연의 영향

吳 明 煥* · 羅 亨 用**

A Study on the Changes in Microstructures and Mechanical Properties of Unidirectionally Solidified Al-Cu Alloys due to Cold-Rolling

Myung Hwan OH* · Hyong Yong RA**

Abstract

The influence of columnar dendrites on the mechanical properties of Al-1% Cu alloys as unidirectional alloy solidified under the conditions of controlled crystal growth rate (R) and temperature gradient (G) was investigated. And the change of metallography and mechanical properties when unidirectional alloy solidified alloys and cast alloys were cold-rolled from 10% to 90% in reduction ratio was studied.

The results are as follows:

1. The elongation and yield strength of unidirectional alloy solidified alloy are higher than those of cast alloy, but there is a little decrease in ultimate tensile strength.
2. The metallography and mechanical properties are changeable with the primary arm spacings when the unidirectional alloy solidified alloys were cold-rolled from 10% to 90% in reduction ratio. An alloy with larger primary arm spacings was easily changeable in metallography and mechanical properties when it was cold-rolled.
3. The tensile strength of transversely cold-rolled to 90% in reduction ratio was higher than that of longitudinal alloy cold-rolled to 90% in reduction ratio. In the case, the fractographs of fractured surface showed that the cast alloy and the unidirectional alloy solidified alloy was ductile-fractured, but the surface of transversely cold-rolled to 90% reduction of unidirectional alloy solidified was slip plane fracture.

I. 서 론

합금의 응고조직은 거시적으로 chill 정, 주상정 (columnar grains) · 입상정 (equiaxed grains) 으로 나타나고, 이 macro-structure 를 구성하는 각 결정립은 수지상 조직 (dendritic structure) 으로 성장된 것이다. 이 수지상 조직의 성장은 합금의 비평형 응

고에 있어서 가장 일반적인 현상으로서, 이 조직이 주물품이나 주괴 (ingot) 의 기계적 성질 등에 영향을 미친다. 따라서 오늘날에 이르기까지 수지상 조직의 성장 mechanism 에 관한 연구가 많이 행해졌으며, 수지상 조직의 중요한 지표의 하나인 dendrite arm spacing 에 대한 폭넓은 연구도 많이 이루어졌다.

Kattamis와 Flemings 에 의하면⁽⁴⁾ 금속이 응고할 때 dendrite 가 액체중에 돌출하고, 뒤이어 이에 수직으로 arm 이 생성된다고 한다. 그리고 arm 과 arm 사이는 이들이 나타난 직후에 고상으로 메꿔져서

*서울대 대학원 금속공학과 (Graduate School, Dept. of Met. Eng. Seoul National University)
 **서울대 공대 부교수 (Associate professor, College of Eng. Seoul National University, Seoul, Korea)

마치 판상으로 성장한 것 같이 보인다. 최초에 성장하는 판상의 용질농도는 액체의 평균용질농도보다 다소 낮기 때문에 dendrite arm spacing의 크기는 응고 후 편석 (segregation)의 균일화 및 기계적 성질에 영향을 미친다. (14,15)

dendrite 형상에 영향을 미치는 중요한 요소는 용질량 · 결정성장속도 (crystal growth rate) · 온도구배 (temperature gradient) 및 부분응고시간 (local solidification time)이다. 이러한 요소들이 dendrite 형성조건에 맞게 되면 주조조직이 dendrite로 된다.

본 실험에서도 dendrite가 형성되는 범위내에서 응고조건을 변화시킬 때, 나타나는 dendrite 조직을 관찰하였고, 또 그 주조조직이 기계적 성질에 어떠한 영향을 미칠 것인가를 조사하였으며, 냉간압연시켰을 때의 조직 및 기계적 성질의 변화도 아울러 비교 · 검토하였다. 우선적인 것은 응고조직이 완전히 dendrite만을 함유한 조직이 되게 하는 것인데, 鋼이나 기타 공업용 합금에서의 dendrite와 거의 유사하며 전형적인 二元합금인 Al-Cu 합금 (16)을 택하여 초정 Al만이 석출되도록 조성을 낮추고, 낮은 온도구배와 약간 빠른 결정성장속도 조건하에서 시편을 만들었다.

근간의 많은 연구에 의하면, (17,18) 결정립 크기 (grain size)와 dendrite arm spacing을 줄이는 것이 주피의 가공성 (workability)을 좋게 하므로 주피 제조과정에 대한 전반적인 구조적 특성의 조절에 관심을 보이고 있는데, 본 실험에서도 이러한 견지에서 일방향 응고에 의하여 생성된 柱狀의 dendrite 조직이 기계적 성질에 어떠한 영향을 미치는 가를 조사하고, 또한 단면감소비를 10%에서 90%까지 변화시켜가며 냉간압연한 경우의 dendrite 조직 변화 및 기계적 성질 변화를 조사 · 검토하였다.

II. 실험방법

II-1. 시료의 제작

본 실험에서 사용한 시료는 순도 98% 이상의 국산 Al塊에 전해 Cu塊를 중량비로 20%가 되도록 秤量한 후 40KVA Kryptol 전기로에서 용해시켜 직경 20mm, 길이 500mm의 봉상 ingot를 만든 후, 원하는 조성에 맞게 적량의 Al을 더하여 재용해시켜 합금을 만들었다.

즉 조성이 0.5%, 0.1%, 1.5%, 4.5% Cu가 되도록 재용해한 후 직경 10mm, 길이 120mm의 금형에 鑄造하여 棒狀의 Al-Cu모합금을 만들었다.

한 조성당 약 30개의 시료를 위와 같이 만들어 결정 성장속도를 5 ~ 120 cm/hr 까지 변화시켜가며 일방향 응고시켰다.

II-2. 실험장치

일방향응고 실험장치의 첫째 요건은 爐內에서의 열의 수평적 유동이 없고 오직 결정성장방향으로의 열유동 (heat flow)이 있어야 한다는 것이다. 본 실험에서 사용한 장치는 "floating zone" 방법과 (20) 비슷하게 수직로의 중앙부분에서 모합금을 용해시킨 후, 위에서 아래로 강하시키면서 일방향 응고되도록 하였다. 이때 사용한 도가니는 전극용 탄소 막대를 drilling하여 fig. 2와 같이 만들었으며, 주어진 온도구배와 결정성장속도하에서 일방향 응고시켜 시편을 제작하였다. fig. 1은 본 실험장치를 나타낸 것이다. 이 爐의

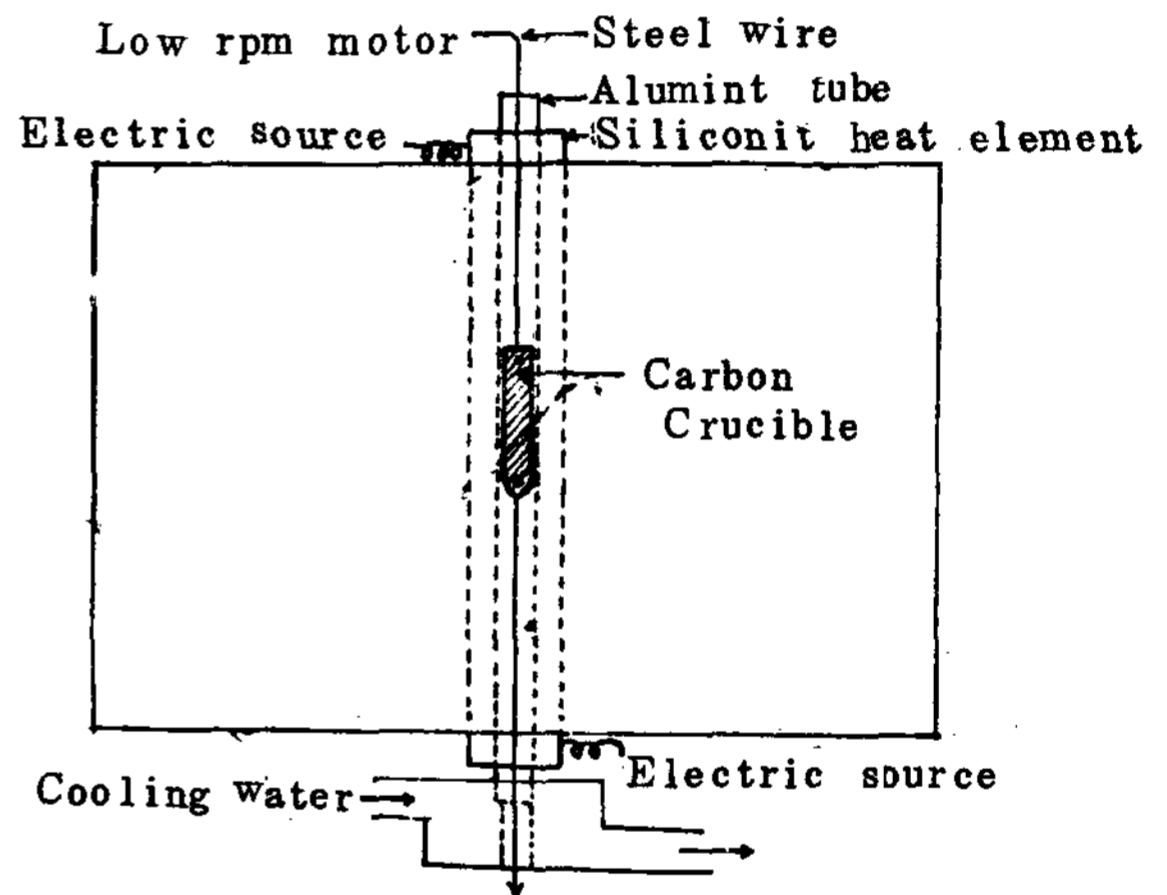


Fig. 1 Schematic diagram for unidirectional solidification

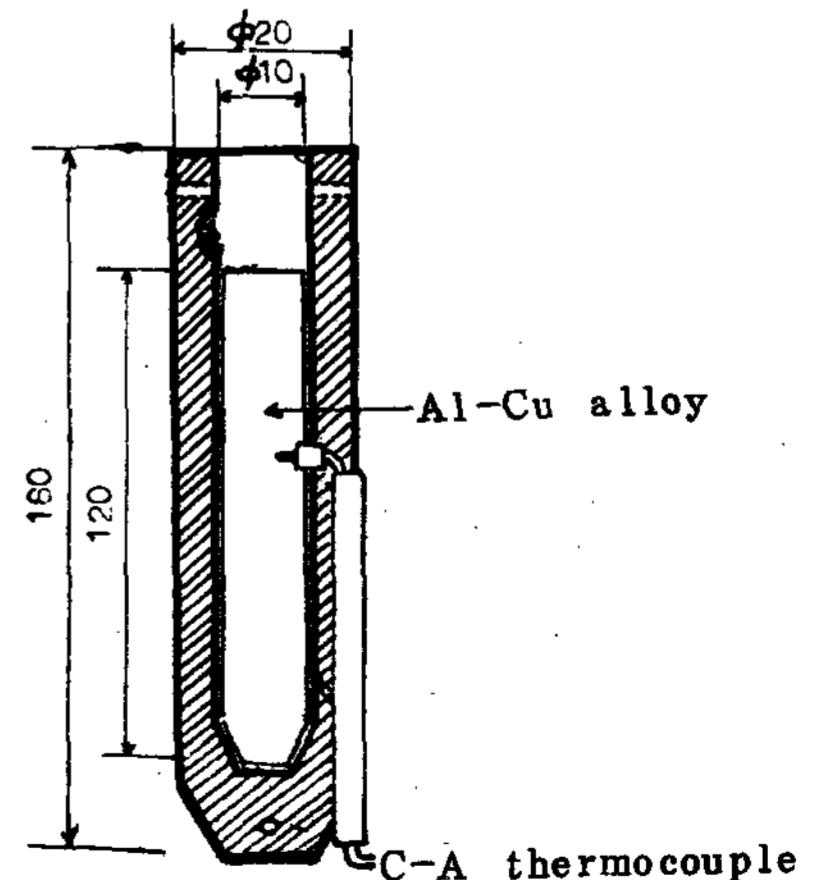


Fig. 2 The shape and dimensions of carbon crucible for melting and solidification of Al-Cu alloys

중심부는 항상 800°C가 되도록 controller로 조정하여 온도구배를 고정시킴과 동시에 과열에 의한 Al의 氣化를 방지하였다.

일방향 응고시의 결정성장속도 (R)는 하단부의 기어에 연결된 직류모터의 회전수를 조절하여 흑연도가나가 강하되도록 조정하였고, 도가니 내부의 시편은 爐온도가 응고온도가 되는 부분에 도달했을 때부터 서서히 일방향 응고가 되도록하였다. 이러한 장치로 결정성장속도를 5 ~ 120 cm/hr 까지 변화시킬 수 있었고 고-액계면의 온도구배 (G)는 16 °C/cm로 고정시킬 수 있었다. 이 온도구배 측정을 정확히 하기 위하여 흑연도가니 옆 중앙부에 지름 6.7 mm의 구멍을 뚫어 열전대보호관이 시편내부에까지 끼워지도록 하였다. 시편이 용해됐을 때 열전대를 끼운틈으로 용탕이 새나오지 않게 하기 위하여 물유리와 알루미늄 분말을 적당히 혼합하여 단단히 접착시켰다.

한편 강하되는 흑연도가니가 충격에 의하여 흔들리지 않게 하기 위하여 흑연도가니의 하단에 중량 300 g의 추를 달아서 응고가 진행되는 동안 흑연도가니가 항상 일정하도록 유의하였다.

II-3 일방향 응고시의 온도구배 (G) 및 결정성장속도 (R)의 측정

일방향 응고시 시편의 중앙부에 위치한 열전대로부터 흑연도가니내의 합금이 고-액계면에 도달했을 때의 온도차를 측정하여 아래 (1)식에 의하여 온도구배를 구하고, 흑연도가니의 강하속도를 결정성장속도로 결정했다. 고-액계면에서는 대부분 잠열방출로 인하여 시간-온도의 냉각곡선상에 기울기변화가 비교적 완만하게 나타나는 데 이때의 고상과 액상의 냉각곡선을 외삽법으로 연장한 후 계면온도와 시간을 결정하였다.⁽¹⁹⁾

$$G = \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = (T_2 - T_1) (^\circ C/cm) \dots\dots (1)$$

T₂ : 열전대가 응고지점보다 1 cm위에 있을 때의 측정온도

T₁ : 고-액계면에서의 온도

R = 고-액계면의 이동속도 = 시편강하속도 = 모터속도 (2)

II-4 Primary arm spacing의 계산방법

일방향 응고된 합금의 transverse면에 primary dendrite arm이 정육각형내에 내포되는 수를 N이라 하면, 이 면적을 A라 할 때 6개의 최인접 이웃점을 갖는다.

i = 1, 2, 3 을 i = 0 (중심부) 주위의 정육각형 증가수라 하고 λ₁을 이웃점들간의 거리라 하면,

$$A = \frac{3\sqrt{3}}{2} i^2 \lambda_1^2 \text{ 이 된다.}$$

이 때 점의 총수는 3i(i+1)+1만큼 변할 수 있으므로 N = 3i(i+1)+1이다. 따라서 A와 N으로부터 λ₁을 구하면 다음과 같다.

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{4A}{\sqrt{3}(2N - \sqrt{2N-3+1})}}$$

그러나 이 정육각형 model보다는 정사각형 model을 쓰면, 최인접점이 4개이므로 i = 1, 2, 3 이라면 A = 2i²λ²이다. 이때의 점의 총수는 2i(i+1)+1만큼 변할 수 있으므로 A와 N으로부터 다음과 같이 λ₁을 더 간단히 구할 수 있다.

즉,

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{A}{N - \sqrt{2N-1}}}$$

II-5 일방향 응고시편의 압연시험

봉상의 일방향 응고시편을 정밀 cutter로 두께가 5 ~ 6 mm 정도가 되도록 잘라내 판상으로 만든 후, 단면 감소비로 10%, 15%, 30%, 50%, 70%, 80%, 90%까지 냉간압연시켰다. 압연시 시편 전체가 고르게 압연되게 하기 위하여 윤활유를 고르게 발랐으며, 모든 시편이 동등한 압연조건이 되게 하기 위하여 0.5 mm씩 roller폭을 좁혀가며 longitudinal방향 및 transverse 방향으로 압연시켰다. 압연후 길게 늘어난 시편을 길이가 100 mm가 되게 잘라내 인장시편가공을 했고, 조직점사용 시편은 가능한한 시편의 중앙부를 택하였다

한편 모합금도 위와 똑같은 조건하에서 압연시켜 같은 규격으로 시편을 만들었다.

II-6 인장시험

압연하기 전의 일방향 응고합금과 모합금과의 기계적 성질차이를 알고, 또 단면감소비를 각각 다르게 압연시켰을 때의 기계적 성질변화를 알기위하여, 압연시편을 가공하여 인장시편을 만들었다.

Longitudinal 방향으로 압연한 경우에는 ASTM subsize 규격으로 인장시편을 만들었고, transverse 방향으로 압연했을 때는 90%까지 압연을 시켜도 전

장이 너무 짧아 같은 규격으로 만들 수가 없어서 90% 압연시킨 경우에만 British standard 의 최소 규격으로 만들었다.

인장시험은 10 ton Instron 을 사용하여 인장속도 (cross head speed) 1 mm/mm 로 시험하였다.

각 인장시험편은 동일한 재질, 동일조건일 경우에라도 각 두께에 따른 load 의 차이를 보다 정확히 나타내 고자 하중범위를 0.1~1 ton 으로 변화시켜가며 인장 시험하였다.

단면감소비가 70~90%가 되는 압연시험편은 10~50%까지 압연시킨 것에 비하여 상당히 두께가 얇은 편이나, 두께변화가 변형량에만 영향을 미친다는 전제 하에⁽²²⁾ 인장강도 및 항복강도·연신율을 측정하였다.

II-7 조직관찰

일방향 응고시킨 시험편의 조직 및 압연했을 때의 조직변화를 모합금과 비교 관찰하기 위하여, 일방향 응고시험편의 중앙부에서 시험편을 잘라내 호마이카에 mounting 한 후 연마지로 (#220~#1200) 粗연마하고 0.3 μm 크기의 알루미나 분말을 사용하여 미세연마한 후 Keller 시약 (5% HF, 10% HCl, 15% HNO₃, 나머지 70%는 증류수) 에 etching 시켰다. 이 시험편을 광학 현미경에서 50~200 배까지 배율을 조정하며 조직변화를 관찰하였고, 인장시험후의 파단면 조직은 JEOL model 35 주사전자현미경으로 배율을 200~1000 배로 변화시켜가며 대표되는 부분의 사진을 찍으면서 그 변화를 관찰하였다.

III. 실험결과 및 고찰

III-1 결정성장속도에 따른 primary arm spacing 의 변화

결정성장속도를 5~120 cm/hr 로 변화시켰을 때의 primary arm spacing 을 구하였다. 이때 온도구배는 16 °C/cm 로 고정시켰고 조성은 0.5%, 1%, 1.5%로 변화시켰다.

일반적으로 알려져있는 온도구배, 성장속도와 primary arm spacing (λ₁) 의 관계식

$$\lambda_1 = K \cdot$$

$$G_L^{-a} \cdot R^{-b} \text{ (k, a, b 상수) 의 관계식 }^{(20)}$$

이 잘 들어맞았다. log(λ₁) 과 log(G_L·R) 과의 관계도표는 Fig. 3에 있다. 이 도표에서의 각 점들을 대략적으로 연결한 직선의 기울기값이 약 -0.5 이므로 λ₁ 값이 (G_L·R)^{-0.5} 에 비례함을 알 수 있다.

Table 1. Primary arm spacing (λ₁) at different compositions of Cu at different crystal growth rate(R).

growth rate (cm/hr)	composition (%)	λ ₁ (x 10 ³ mm)
15	0.5	480
	1.0	485
	1.5	487
30	0.5	275
	1.0	341
	1.4	448
60	0.5	325
	1.0	323
	1.5	241

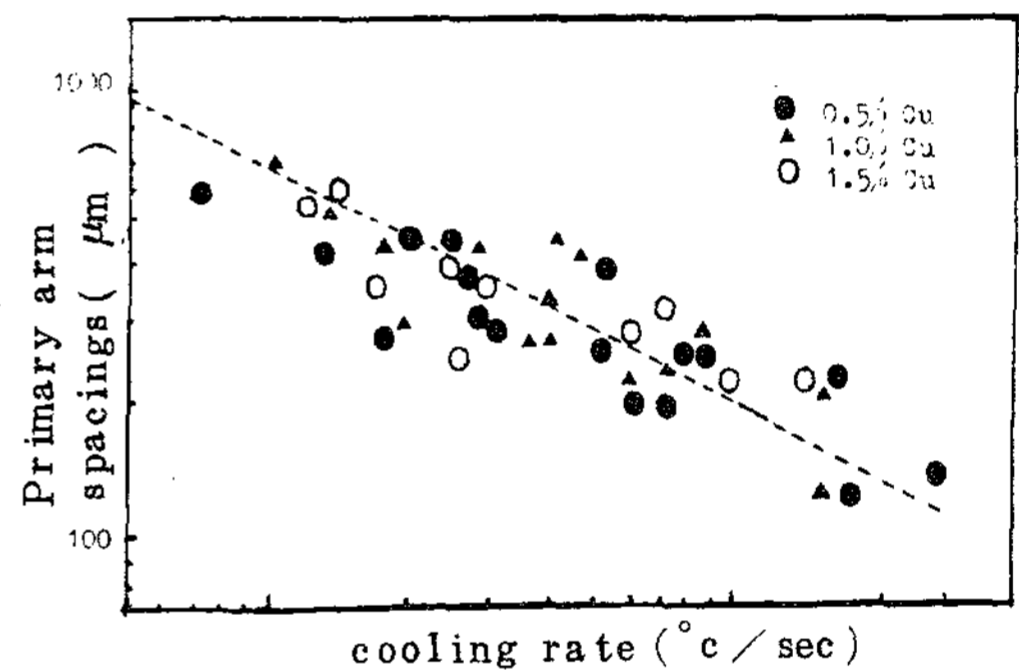


Fig. 3 Experimental data on primary arm spacings for Al-Cu alloy.

각 조성에서의 λ₁ 값을 λ₁ = K · G_L^{-a} · R^{-b} 식에 대입하여 얻은 k, a, b 값은 다음의 Table. 2와 같다. 1.0%, 1.5% Cu 인 경우에는 상수 b 값이 0.5 가 약간 안됐지만 Fig. 3 를 보면 (G_L·R)^{-0.5} 와 λ₁ 의 비례관계를 볼 수 있다.

Table 2. Constants for empirical equation λ₁ = kG_L^aR^b (G_L in °C/mm, R in μm/sec)

CU (%)	a	b	k
0.5	0.5	0.5	5.65 × 10 ³
1.0	0.5	0.38	3.03 × 10 ³
1.5	0.48	0.41	4.62 × 10 ³

III-2 냉간압연에 따른 조직 및 기계적 성질의 변화

결정성장속도를 각각 다르게 일방향 응고시킨 시편과 금형에서 주조한 상태의 모합금과의 기계적 성질을 조사하고 또한 압연에 따른 조직 및 그에 따른 기계적 성질의 변화를 연구한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

가. 압연하기전의 일방향 응고합금과 모합금의 경우

비평형 응고에 의하여 粗大한 결정립을 지니며 방향성있게 성장한 柱狀의 dendrite 조직을 함유한 일방향 응고조직은 Photo. 1에서 볼 수 있듯이 equiaxed한 모합금에 비하여 규칙적이고, 성장속도가 증가함에 따라 미세한 조직이 됨을 알 수 있었다. 이들의 기계적 성질 변화를 조사한 결과 Fig. 4와 같이 연신율의

급격한 증가와 항복강도(yield strength)의 점진적 향상 및 결정립의 粗大化에 의한 인장강도(ultimate tensile strength)의 감소경향을 알 수 있는 데, 특히 모합금에 비하여 현저하게 연신율(elongation)이 좋아진 것은 일방향을 가지고 규칙적으로 성장한 柱狀의 α -Al相 dendrite에 의한 것이다. 성장속도가 증가함에 따라, 즉 dendrite가 미세해져 primary arm spacing이 감소할 수록 연신율과 인장강도 및 항복강도가 향상되어진 것은 α -Al相의 柱狀 dendrite 수가 단위면적당 증가하는 까닭이라 여겨진다.

모합금에 비하여 인장강도가 현저히 감소한 것은 일방향 응고에 의하여 粗大한 결정립을 갖게 된 때문이다. 이것은 Photo.1과 모합금을 대조해 보아도 쉽게 이해할 수 있다. 또한 脆性を 나타내는 수지상간(inter dendritic) 영역의 불균일적 편석(segregation)에 의한 영향도 인장강도의 모합금에 비한 감소화 因子로서 작용하리라 판단된다. 조직상의 변화를 보면 알 수 있듯이 일방향 응고에 의하여 형성된 dendrite는 수지상간 영역보다 용질함량이 다소 낮기 때문에 자연히 dendrite 주위에는 용질의 확산이 심하게 야기된다. 따라서 비교적 편석집중이 적고 불순물이 고루 분포해 있는 모합금에 비하여 수지상간 사이에 부분적 편석집중이 심한 일방향 응고합금의 인장강도는 낮아지는 것이다.

이들의 인장파단면을 보면, Photo.5와 같이 미세한 모합금의 전형적 연성파괴와 일방향 응고 합금의 粗大한 연성파괴를 알 수 있고, 파괴가 수지상간 사이로 일어났음을 볼 수 있다.

나. 냉간압연에 따른 변화

압연비를 10%~90%까지 변화시켰을 때, 일방향 응고조직은 柱狀의 dendrite가 압연방향에 線化경향을

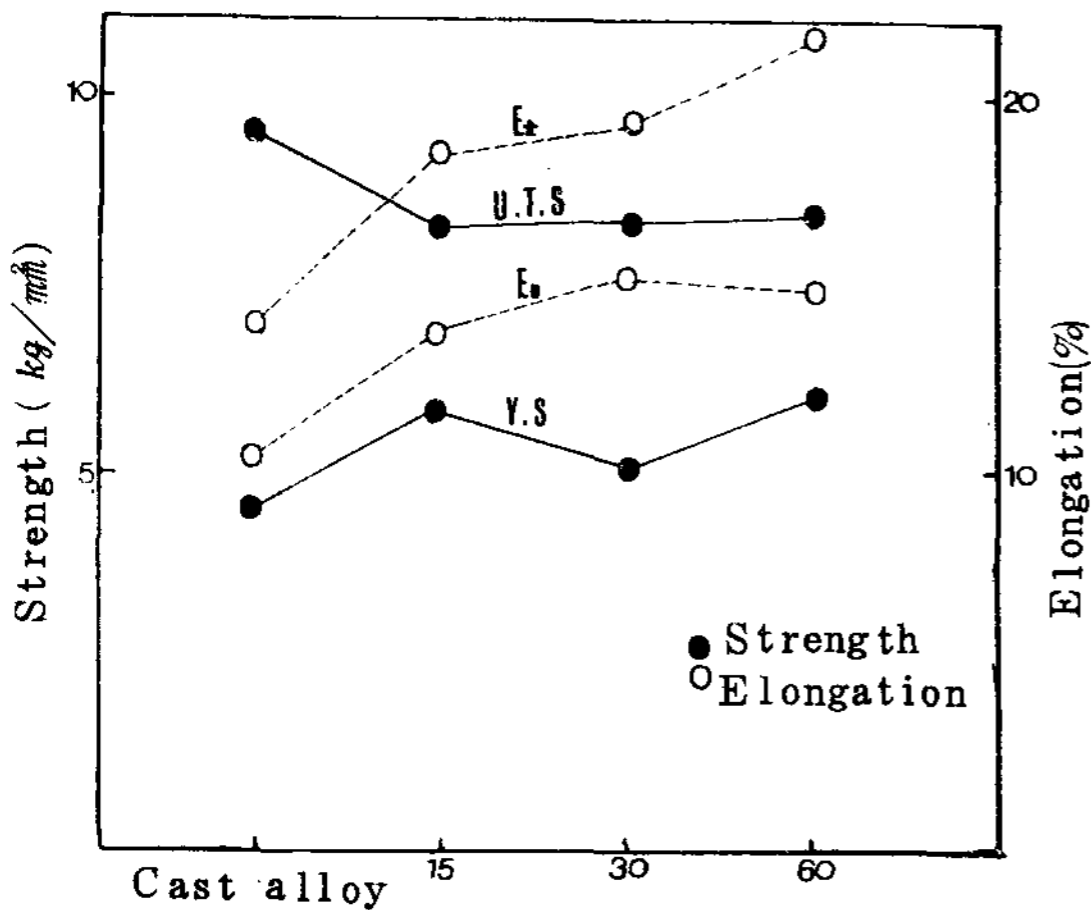


Fig.4 The variance of mechanical properties as a function of crystal growth rates for Al-1%Cu alloy as cast and unidirectionally solidified.

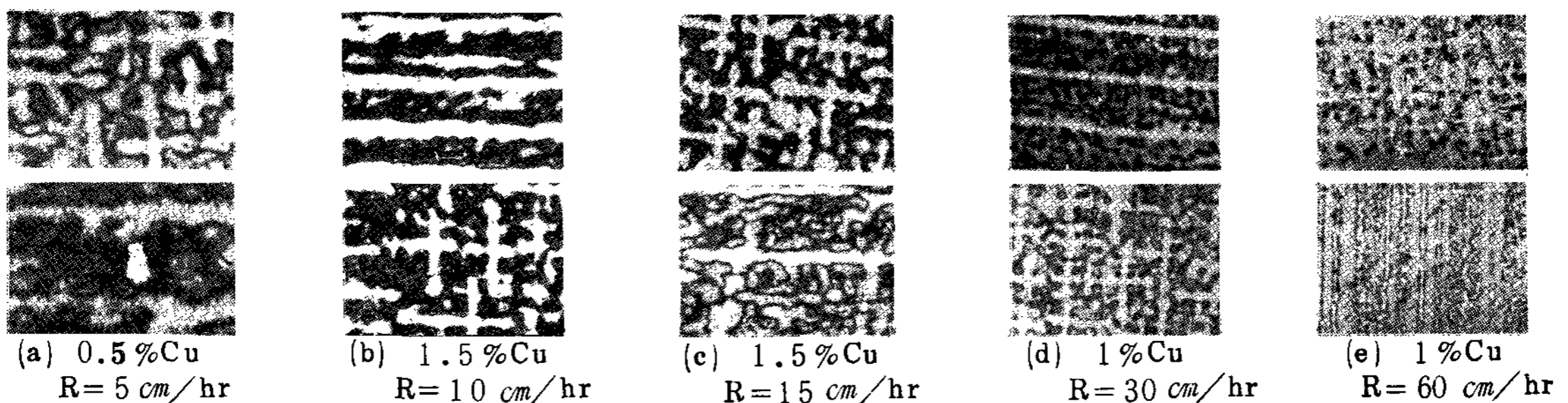


Photo.1 The change of primary arm spacings for Al-Cu alloy as unidirectionally solidified at different compositions of Cu at different crystal growth rate (R), ($\times 50$) (GL is fixed at $16^\circ\text{C}/\text{cm}$)

보여 주었는데, transverse 면의 변화과정은 Photo. 3에서와 같이 +자형의 dendrite 斷面이 압연 방향으로 압축되어지면서 압연비를 90% 정도 했을 때는 서로 통합·연결된 섬유상의 層狀을 이룸을 볼 수 있다. 즉 α -Al 相의 dendrite 이기 때문에 수직상간 영역 (interdendritic region) 보다 훨씬 좋은 연신율을 지니므로 압연을 시키면 脆弱한 interdendritic 영역으로 dendrite 가 外延되어지는 것이다.

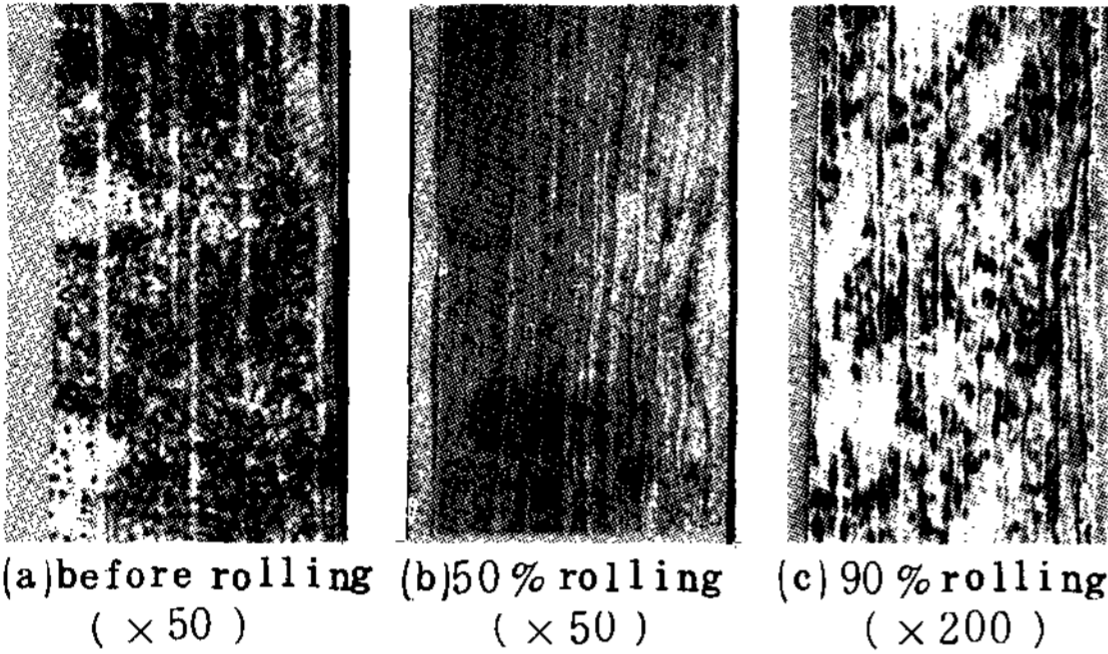


Photo. 2 Microstructural changes in longitudinal section for Al-1%Cu alloy as unidirectionally solidified at $R=60\text{ cm/hr}$, $G_L=16\text{ }^\circ\text{C/cm}$

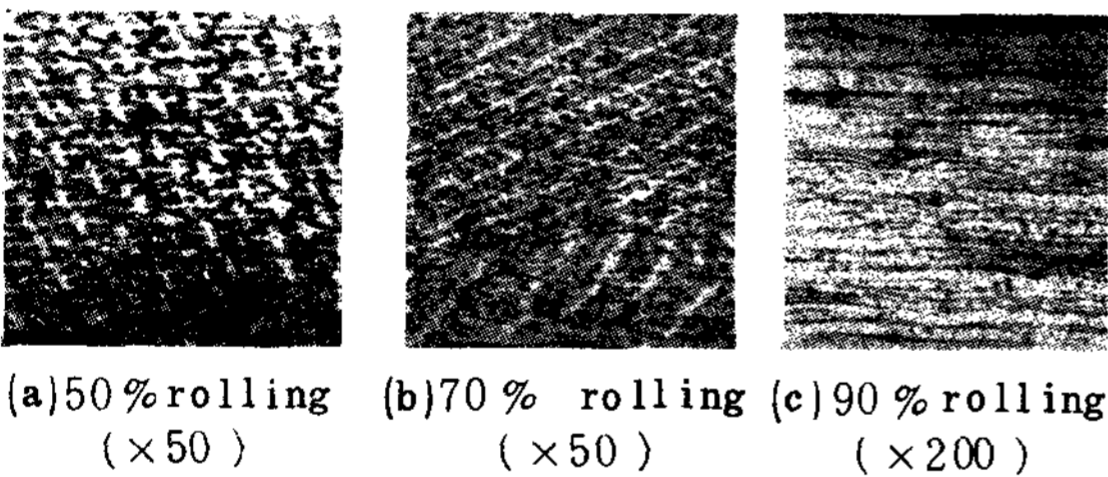


Photo. 3 Microstructural changes in transverse section for Al-1%Cu alloy as unidirectionally solidified at $R=60\text{ cm/hr}$, $G_L=16\text{ }^\circ\text{C/cm}$

photo. 2와 3은 압연비를 점차 증가시켰을 때의 transverse 면과 longitudinal 면의 변화과정을 잘 나타내주고 있다. 특히 성장속도가 60 cm/hr 인 경우에는 70% 압연시켰을 때 transverse 면이 photo. 3(b)와 같이 압연방향을 따라 dendrite 간의 상호통합해 가면서 線化되어지는 과정임을 알 수 있고 따라서 이 때의 기계적 성질변화는 Fig. 5~8과 같이 인장강도 및 항복강도·연신율이 상대적 감소가 야기되었다. 즉 70% 압연시에는 다른 경우에 비하여 dendrite 狀이 불규칙적으로 배열되어진 상태이기 때문에 조직이 불안정하게 되어 다른 조직에 비하여 상대적인 기계적 성질의 감소가 초래된 것이다. 이와같이 den-

drite 의 형태에 따라 기계적 성질이 영향을 받게 되는데, 압연비를 10%, 15%, 30%, 50%, 70%, 80% 까지 변화시켰을 때 기계적 성질의 변화는 조직의 불규칙적 변화에 의하여 서로 불규칙적으로 변화해 갔다. 즉 primary arm spacing 의 長短에 따라 같은 압연비로 압연을 시켜도 조직이 서로 다르게 변화해 갔고 이것에 의하여 기계적 성질도 각각 다르게 변화해 간 것이다.

조직변화와 기계적 성질과의 상관관계를 분석해보면, primary arm spacing 이 큰 것이 수록 작은 압연비에 의해서도 쉽게 dendrite 의 변형 및 fault 가 생겼고 따라서 그때의 기계적 성질은 primary arm spacing 이 작은 것보다 나빠졌다. 반면에 primary arm spacing 이 작은 것은 큰 것보다 더 큰 압연비에서 dendrite 조직의 변화가 심하게 일어났고 그에 따라 기계적 성질이 변해가는 데 압연비가 50% 가 되면 primary arm spacing 과 거의 무관하게 기계적 성질이 비슷해지다가 그 이상 압연을 시키면 압연에 의하여 서로 단절된 柱狀의 dendrite 가 밀집된 層狀을 이루며 새롭게 재배열되어가므로 기계적 성질은 Fig. 5~8과 같이 primary arm spacing 이 작은 것이 더 좋게 된다.

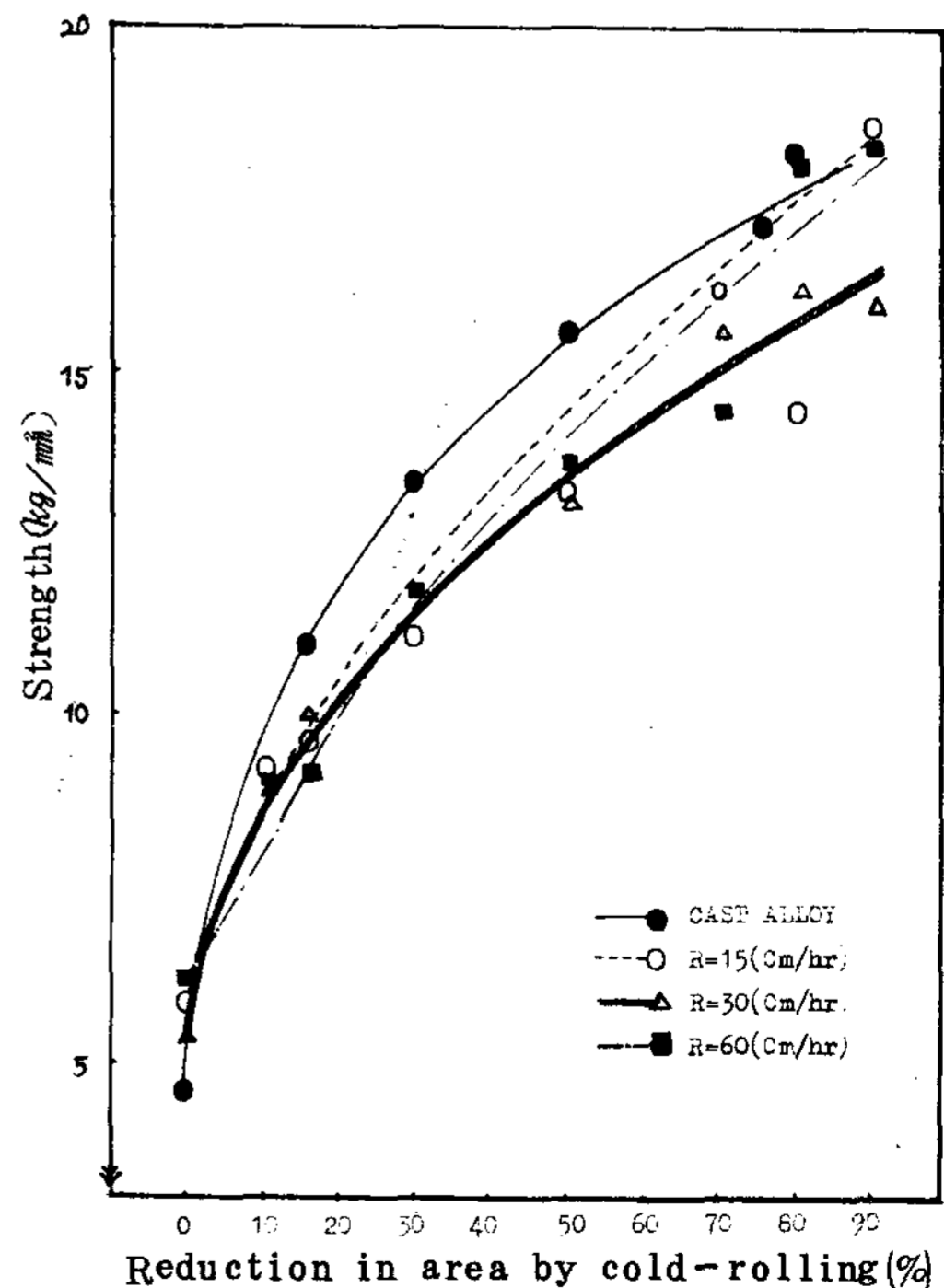


fig. 5 The change of yield strength due to cold-rolling for Al-1%Cu alloy as cast and unidirectionally solidified.

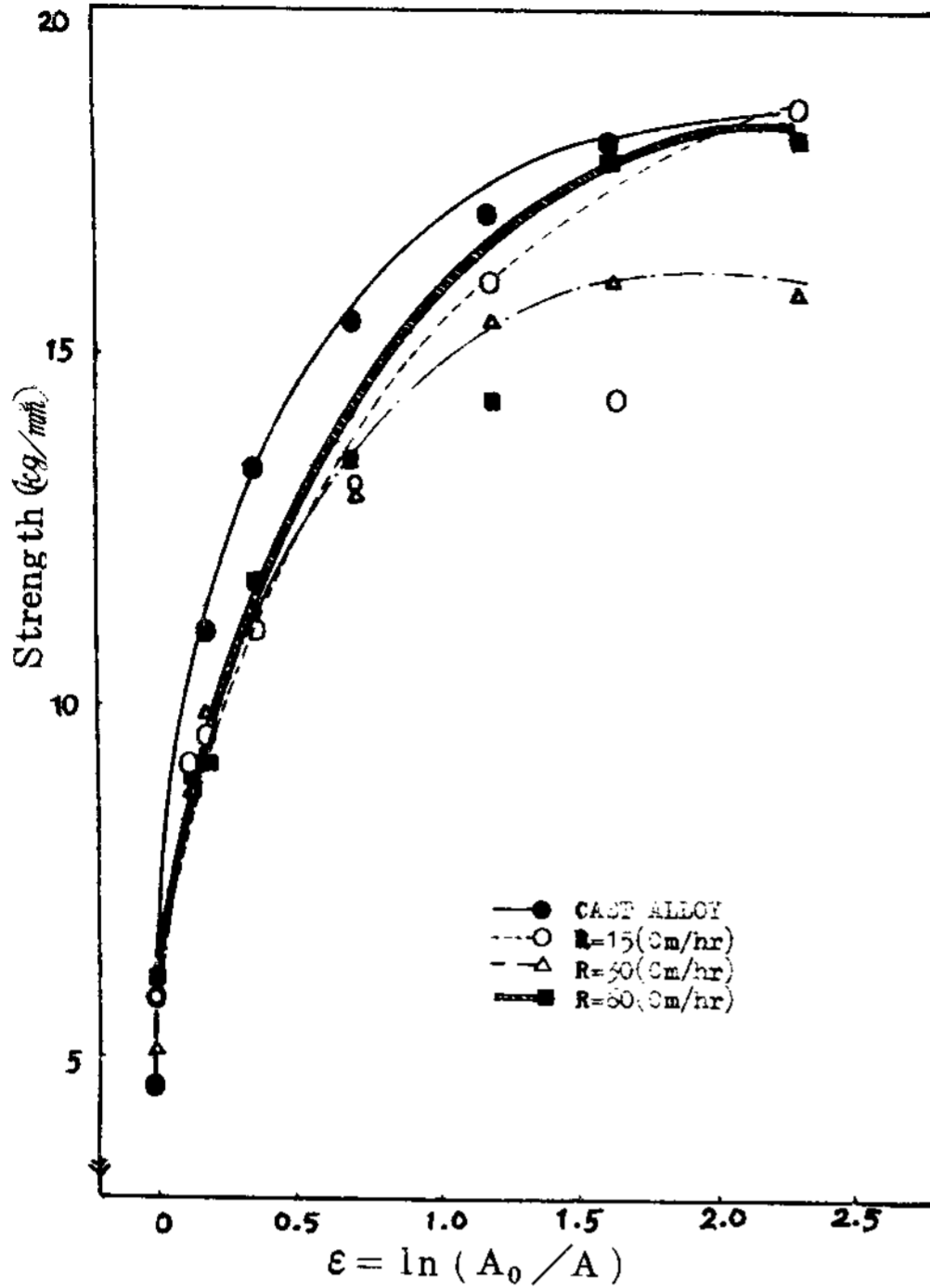


Fig. 6 The change of yield strength vs. $\epsilon = \ln(A_0/A)$. A_0 : area before rolling, A : area after rolling

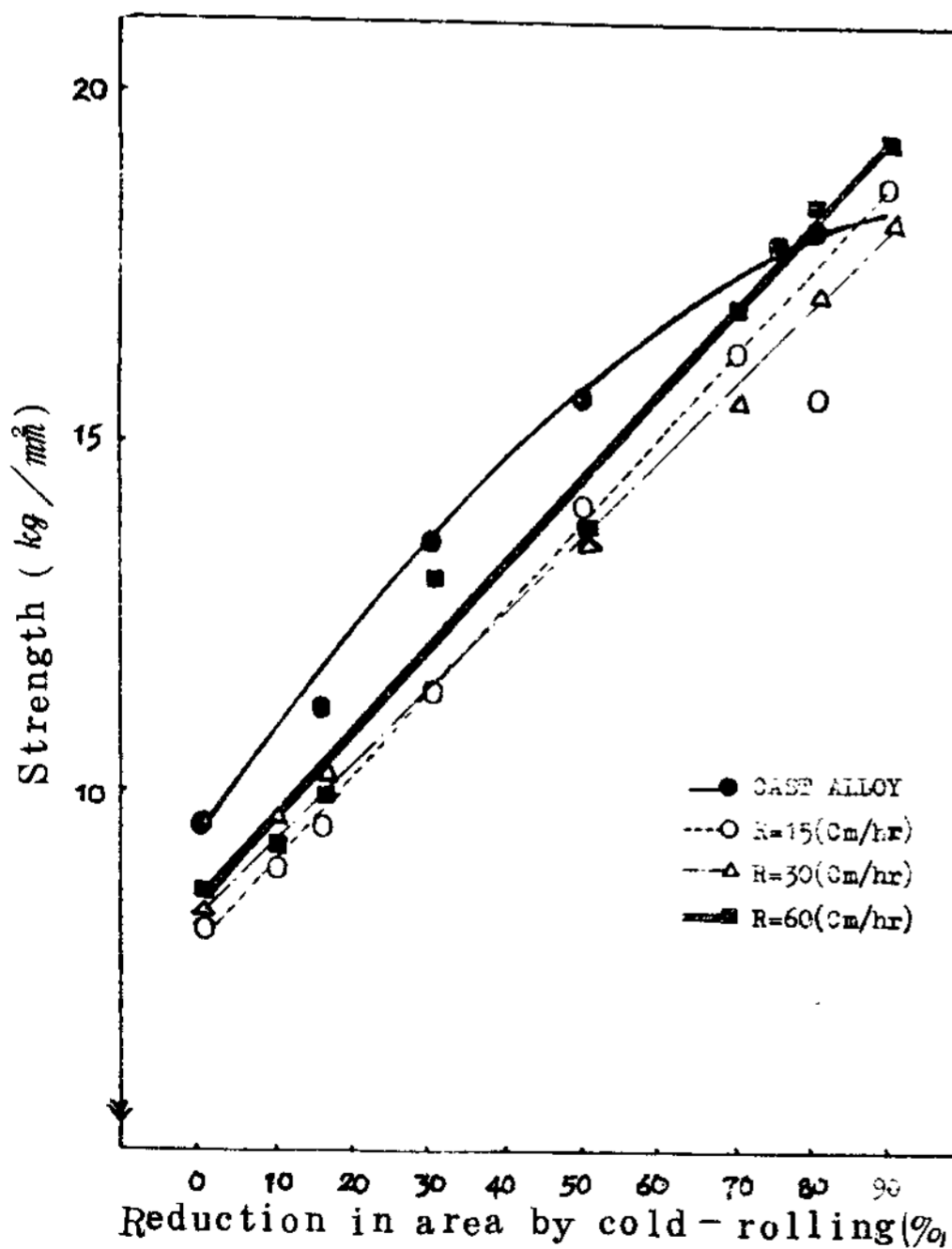


Fig. 7 The change of ultimate tensile strength due to cold-rolling for Al-1%Cu alloy as cast and unidirectionally solidified.

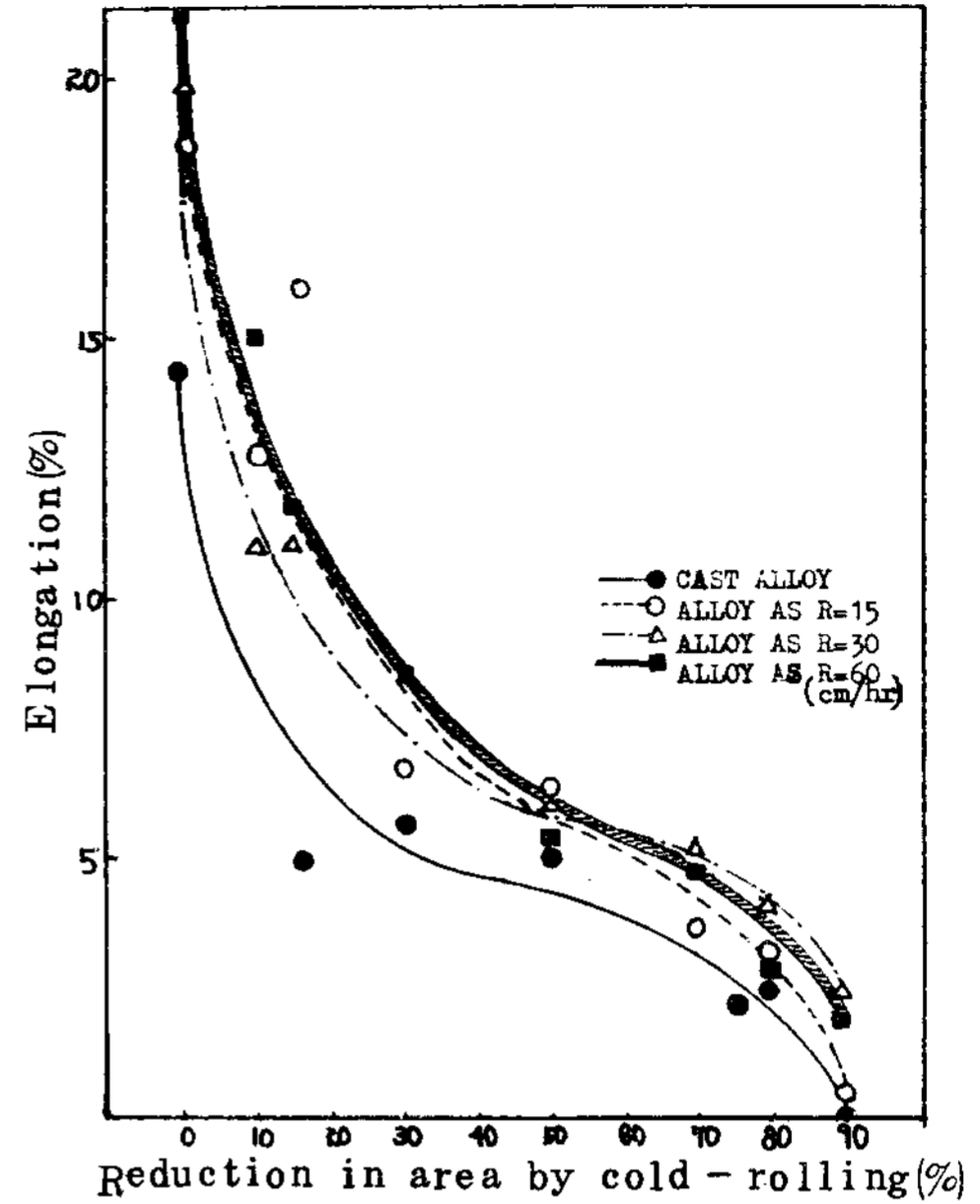


Fig. 8 The change of elongation due to cold-rolling for Al-1%Cu alloy as cast and unidirectionally solidified.

90% 압연시킨 경우에는 primary arm spacing 이 가장 큰 $R = 15 \text{ cm/hr}$ 일때에 다른 것에 비하여 상대적인 인장강도의 증가 현상을 볼 수 있는데, 이것은 본래 가장 粗大한 dendrite 를 가졌던 $R = 15 \text{ cm/hr}$ 의 합금조직이 심하게 압축되어지면서 가장 밀집된 dendrite 層狀을 가지게 된 때문이다. 이때의 조직을 보아도 알 수 있듯이 arm spacing 이 가장 큰 경우이므로 90% 압연시에 수지상간 영역을 점유하는 dendrite 가 상대적으로 넓어져서 다른 경우에 비해 상대적인 기계적 성질의 향상을 나타냈다.

압연비에 따른 모합금 및 일방향 응고합금의 기계적 성질변화는 Fig. 5에 항복강도와 압연비 관계를 Fig. 6에 항복강도와 $\epsilon = \ln(A_0/A)$ 의 관계 및 Fig. 7~8에 인장강도와 연신을 변화를 도시하였다.

다. longitudinal 방향으로 압연한 경우와 transverse 방향으로 압연한 경우

transverse 방향으로 압연비를 증가시키면 Photo. 4와 같이 +자형 dendrite 단면이 압연방향을 따라 延伸되며 粗大化되어진다.

이때의 longitudinal section 을 보면, 柱狀 dendrite 가 압연방향으로 굽어지기 시작하여 90% 비로 압연시켰을 때에는 photo. 4 (c)와 같이 농축된 섬유상의 상호통합된 dendrite 群이 형성된다. 이때의 기계적 성질변화는 Fig. 9에 나타나 있듯이 성장속도와

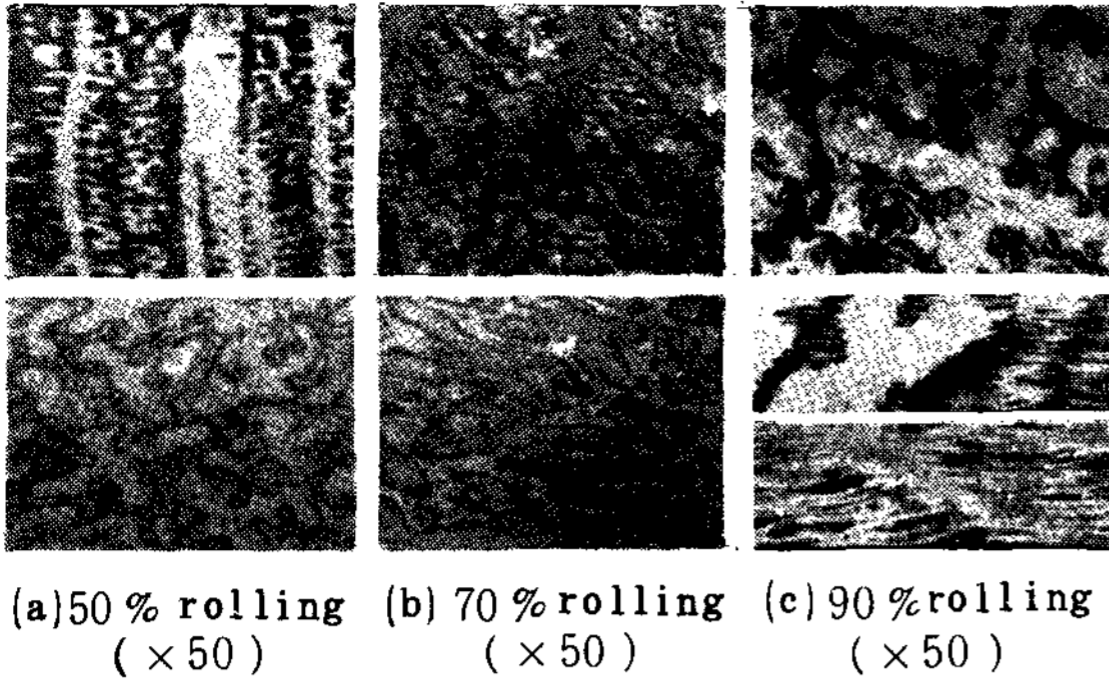


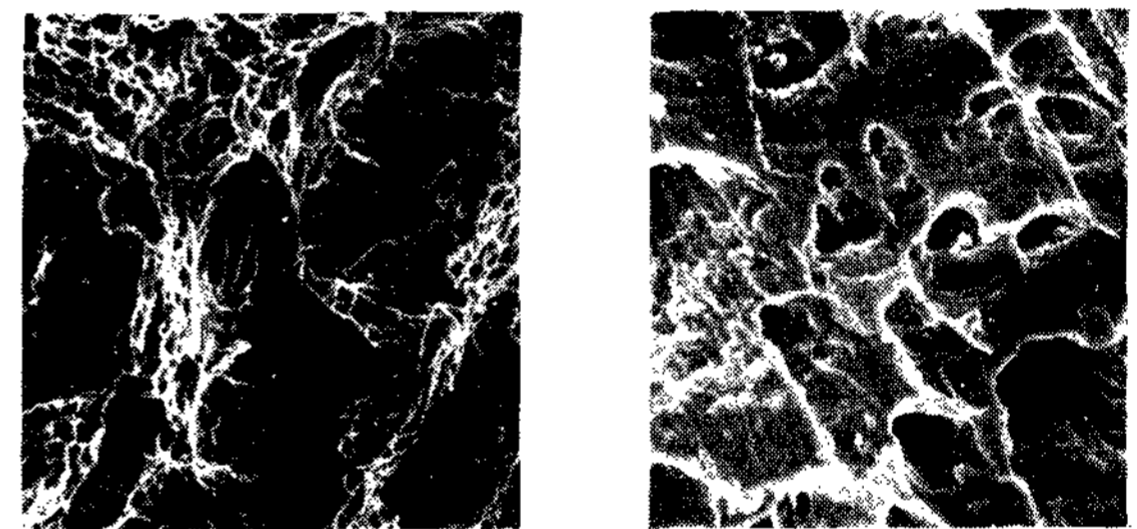
Photo. 4 Microstructural changes due to transverse cold-rolling for Al-1% Cu alloy as unidirectionally solidified at $R=30$ (cm/hr), $G_L=16$ (°C/cm) (On the left-side are transverse sections and the right-side longitudinal sections)

전혀 무관하게 변했음을 알 수 있는데, 이것은 Photo. 4에서 보듯이 $R=30$ cm/hr 인 경우에 粗大화된 dendrite 단면이 가장 적당한 크기로 수지상간 영역을 점유하기 때문에 가장 큰 인장강도를 가진 것이라 판단된다. 한편 항복강도는 결정성장속도의 증가에 따라 점차 증가하였는데, 이것은 결정성장속도의 증가에 따라 primary arm spacing이 작아져서 조직이 미세해지므로 압연을 90% 까지 시킨 후에도 압연

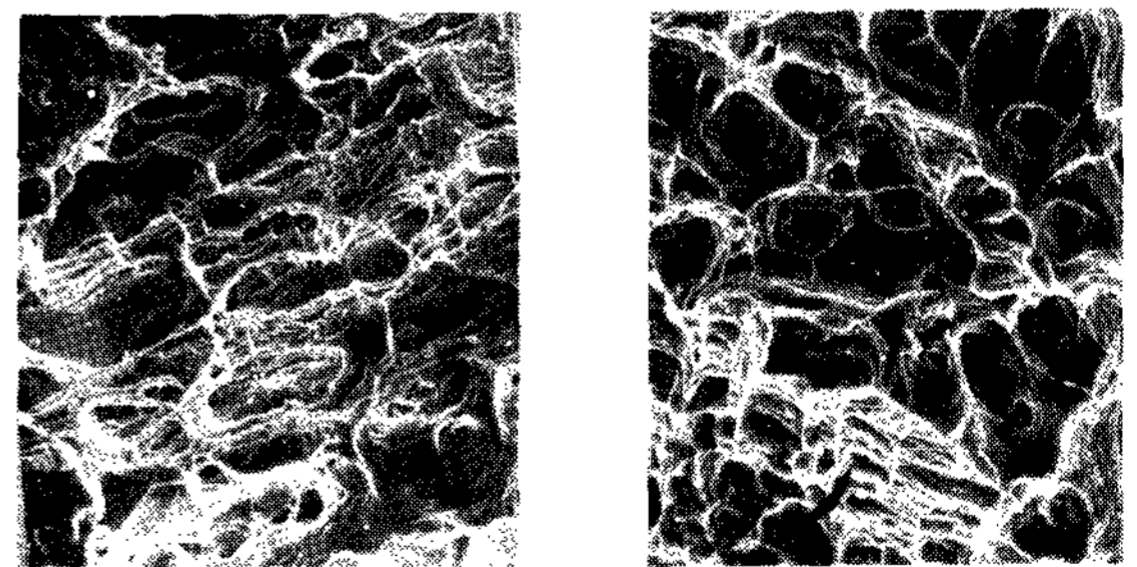
전에 지냈던 (Fig.4) 결정성장속도에 비례하는 항복강도를 가진 것이라 생각된다.

longitudinal 방향으로 90% 압연한 경우에는 transverse 방향으로 압연한 경우와는 대조적으로 $R=30$ cm/hr 인 경우가 상대적으로 가장 낮은 인장강도와 항복강도를 나타내고 있는데, 이때의 파단면 조직은 Photo.6과 같이 전형적 연성파괴형태를 띠었다. 특히 90% 압연했을 때 모합금의 연신율은 거의 0에 가까웠지만 일방향응고 합금은 2.4%까지 나타내 주었다. 이것은 photo.2와 3에서 볼 수 있듯이 압연비가 높아지더라도 압연방향으로 최대한 농축된 주상의 dendrite 群에 의한 것이다.

transverse 방향으로 압연한 경우의 파단면 조직은 Photo.6(d)와 같이 섬유상의 농축된 미세한 dendrite 들의 상호통합(coalescence)을 볼 수 있으며, 또한 파괴가 수지상간 영역으로 일어났음을 잘 볼 수 있다.



(a) as cast ($\times 200$) (b) as unidirectionally solidified at $R=15$ cm/hr ($\times 300$)



(c) as unidirectionally solidified at $R=30$ cm/hr ($\times 200$) (d) as unidirectionally solidified at $R=60$ cm/hr ($\times 270$)

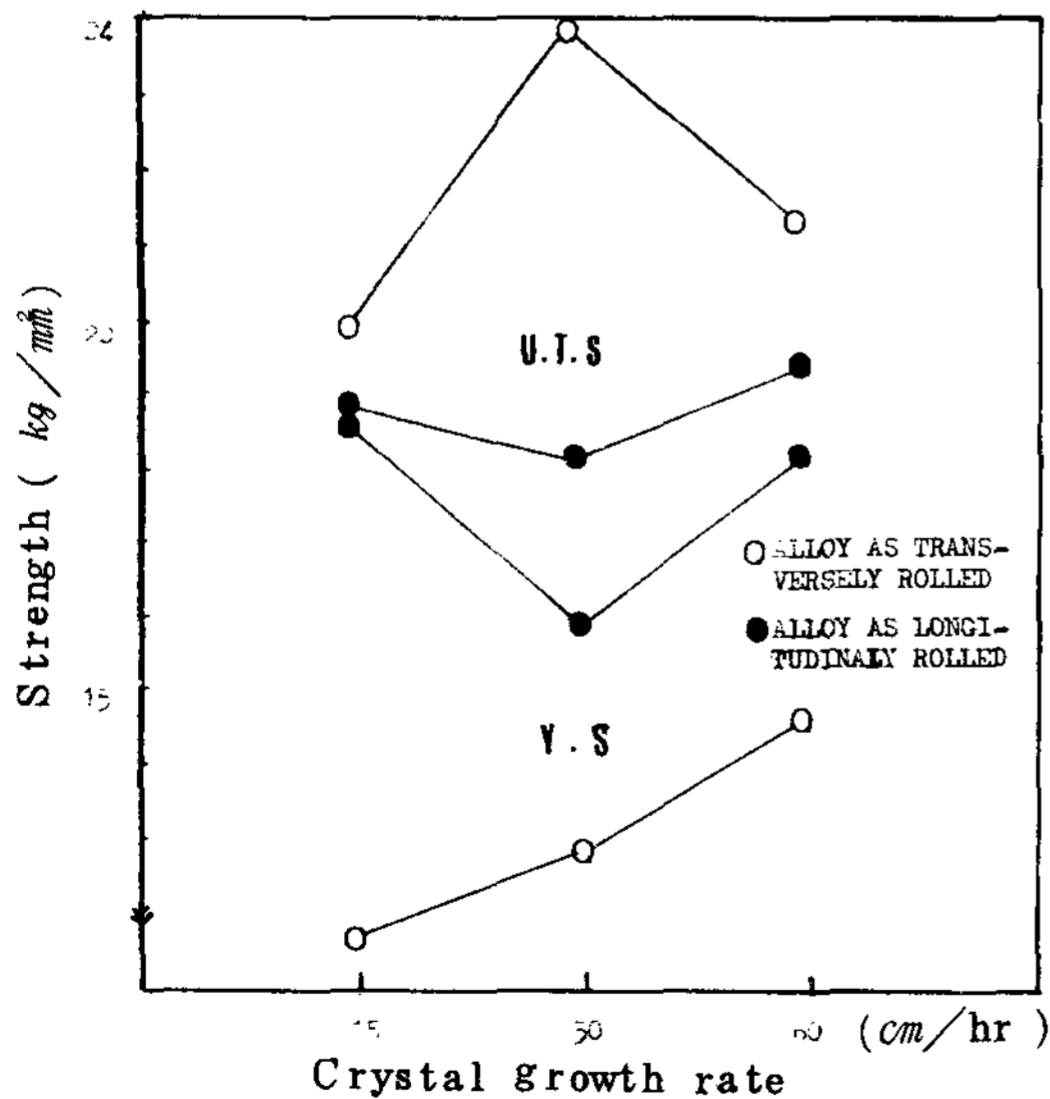
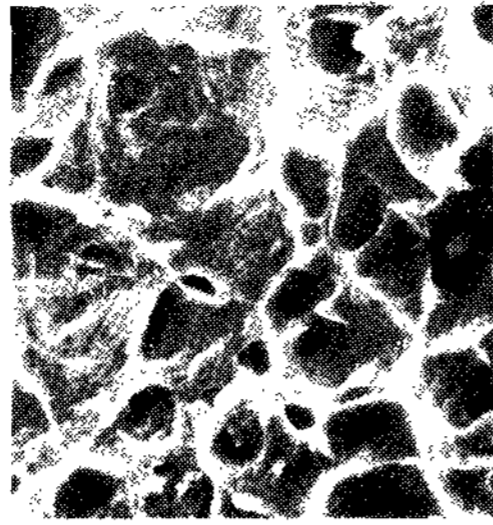


Fig. 9 The difference of mechanical properties due to longitudinally cold-rolling and transversely cold-rolling in 90% reduction ratio for Al-1%Cu alloy as unidirectionally solidified.

Photo. 5 SEM of fractographs for Al-1% Cu alloy as cast and unidirectionally solidified at different crystal growth rate.



(a) as cast and 90% rolled ($\times 800$)



(b) as unidirectionally solidified at $R=60\text{ cm/hr}$ and 90% longitudinally rolled ($\times 600$)



(c) as unidirectionally solidified at $R=30\text{ cm/hr}$ and 90% longitudinally rolled ($\times 550$)



(d) as unidirectionally solidified at $R=30\text{ cm/hr}$ and 90% transversely rolled ($\times 500$)

Photo.6 SEM of fractographs for Al-1% Cu alloy as cast, unidirectionally solidified and 90% rolled.

IV. 결론

Al-Cu 합금을 0.5 ~ 1.5% Cu 함량 범위에서 G/R 값을 약 $10^3 \sim 10^4\text{ }^\circ\text{C/cm}^2/\text{sec}$ 로 변화시켜가며 일방향 응고시킨 뒤, 냉간압연에 따른 조직 및 기계적 성질변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. dendrite의 primary arm spacing이 작아짐에 따라 연신율은 증가하였으며, 전반적으로 일방향 응고합금이 주조상태의 모합금에 비하여 좋은 연신율과 항복강도를 가졌다. 반면 인장강도는 결정립의 粗大化에 의하여 약간 감소하였다.

2. 단면감소비로 10~90%까지 압연시켰을 때, primary arm spacing의 長·短에 의하여 조직 및 기계적 성질의 변화가 달라졌다. 즉 primary arm spacing이 큰 경우가 낮은 압연비에 의하여 쉽게 dendrite의 변형이 일어났고 그에 따라 기계적 성질은 나빠졌다.

3. 90% 압연비로 longitudinal 방향으로 압연한

것보다 transverse 방향으로 압연한 것이 더 좋은 인장강도를 나타냈고, 항복강도는 그 반대였다.

4. 주조상태의 모합금을 90% 압연한 경우의 인장파단면은 전형적인 ductile-fracture를 보여주었지만, 일방향 응고시킨 합금을 transverse 방향으로 압연하면 slip plane fracture를 나타낸다.

References

1. F. Weinberg and B. Chalmers; *Canad. J. Phys.* 29(1951) 383-392
2. E. A. Feest and R. D. Doherty; *Met. Trans.* 4(1973) 125-136
3. M. C. Flemings; *Modern Castings* (1964) 353-362
4. T. Z. Kattamis and M. C. Flemings; *Trans. AIME* 233(1965) 922-999
5. P. E. Brown and C. M. Adams Jr.; *Trans. American Foundrymen's Soc.* 69(1961) 879
6. P. K. Rohatgi and C. M. Adams Jr.; *Trans. AIME* 239(1967) 1737-1746
7. T. E. Bower, H. D. Brody and M. C. Flemings; *Trans. AIME* 236(1966) 624-634
8. L. Backerud and B. Chalmers; *Trans. AIME* 245(1969) 309-318
9. J. A. Horwath and L. F. Mondolfo; *Acta Met.* 10(1962) 1037-1042
10. G. R. Kotler, K. W. Casey, G. S. Cole; *Met. Trans.* Vol. 3(1972) 723-726
11. Machmoud M. Farag, Roberto Matera, M. C. Flemings; *Met. Trans.* Vol. 10B(1979) 381-388
12. 김명호, 윤종규, 한봉희; *대한금속학회지* 제 13권 제 3호(1975) 282-289
13. M. C. Flemings; "Solidification Processing", McGraw-Hill Book Co. (1974) 149
14. M. C. Flemings; *Mod. Cast.* 46(1964) 383
15. H. Jacobi and K. Schwerdtfeger; *Met. Trans. A.* 7A(1976) 811
16. M. Hansen; *Constitution of Binary alloys*, McGraw-Hill Book Co. (1958)
17. A. P. Haar; *Development of Aluminum Base Alloys*, pts. 1 to 3, Alcoa. Res. Labs. New Kensington(1961-1965)
18. T. F. Bower, S. N. Singh, M. C. Flemings; *Met. Trans.* 1(1970) 191

19. J. E. Gruzelski and W. C. Winegard; The plane to cell transition in the Sn-Cd eutectic, J. Inst. Metals, 96(1968) 304
20. M. C. Flemings; Solidification Processing, McGraw-Hill Book Co. (1974) 2
21. M. C. Flemings, D. R. Poirer, V. R. Barone, H. D. Brody; J. Iron Steel Inst. 208 (1970) 371
22. 박수훈; 공학석사학위논문(서울대학교 공과대학 금속공학과) (1981) 46