

論 文

# Mg합금의 반용융가압주조시 주조조건에 의한 금형충전성 및 유동성 변화

정운재\*, 김기태\*, 홍준표\*\*

## A Study on Mold Filling and Fluidity of Mg Alloy in Thixocasting

Woon-Jae Jung\*, Ki-Tae Kim\* and Chun-Pyo Hong\*\*

### Abstract

Effects of process parameters during thixocasting, such as solid volume fraction, mold temperature and extrusion ratio, on the mold filling behaviour and fluidity of Mg alloy(AZ91D) have been investigated. The semi-solid ingot held for 60 minutes at the semi-solid temperature range did not contain the equilibrium volume fraction of solid as expected from the phase diagram.

Therefore, in order to obtain the desired solid fractions, and to suppress the exaggerated grain growth during heating, it was required to heat the ingot rapidly up to the temperature 10°C higher than the semi-solid temperature suggested from the phase diagram for a specific volume fraction of solid.

The experimental results show that mold filling behaviour and fluidity can be improved with the use of the higher mold temperature and the lower volume fraction of solid, but remain nearly unaffected by the change of extrusion ratio. (Received April 10, 1995)

### 1. 서론

Mg합금은 산소와의 친화력이 매우 강하여 용융상태에서 급격히 산화, 연소되기 때문에 용해 및 주조작업시 용탕 보호를 위한 분위기 조절에 세심한 주의를 기울이지 않으면 안된다. 이러한 Mg합금 용탕의 산화, 연소반응은 고온일수록 더욱 활발하게 일어나기 때문에, 온도를 낮추어 고액공존(固液共存)의 반고상(半固狀) 상태에서 Mg합금을 주조하면 산화반응을 크게 줄일 수 있다.

고액공존 상태의 반고상주조법으로는 액상에서 온도를 낮추어 가압주조하는 방법과, 고상에서 온도를 높여서 반용융 상태에서 가압주조하는 방법으로 분류할 수 있다.[1] 반고상주조법에 의

해서 균질한 미세조직, 응고수축감소에 의한 정밀도향상 및 주조불량의 감소, 응고잠열감소에 의한 금형수명연장, 점성을 이용한 새로운 복합재료 제조가능 등의 효과를 얻을 수 있기때문에 지금까지 기초 및 응용연구[2-5]가 상당히 진전되어왔다. Mg합금의 경우에도 반고상주조법과 관련된 연구가 미국 및 일본등에서 일부 이루어지고 있으나 [6-10] 아직 응용을 위한 기초실험이 많이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 Mg합금의 반고상가압주조시 금형 충전성 및 유동성검토를 위하여 고액공존의 임의의 온도에서 Mg합금 잉곳을 유지하였을때, 고상을 및 미세조직의 변화와 고상율, 금형온도 및 압출비에 따른 금형 충전성 및 유동성의 변화를 조사하였다.

\* 생산기술연구원 (Korea Academy of Industrial Technology)

\*\*연세대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Yonsei Univ.)

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험장치 제작

본 연구에서 제작한 반고상가압주조실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 이 실험장치는 잉곳을 고액공존의 임의의 온도에서 일정한 시간 유지한 후, 반고상상태에서 압출하여 임의의 온도로 유지된 금형에 가압주조할 수 있도록 설계, 제작하였다. 실험장치는 가열로, 가압장치 및 금형부로

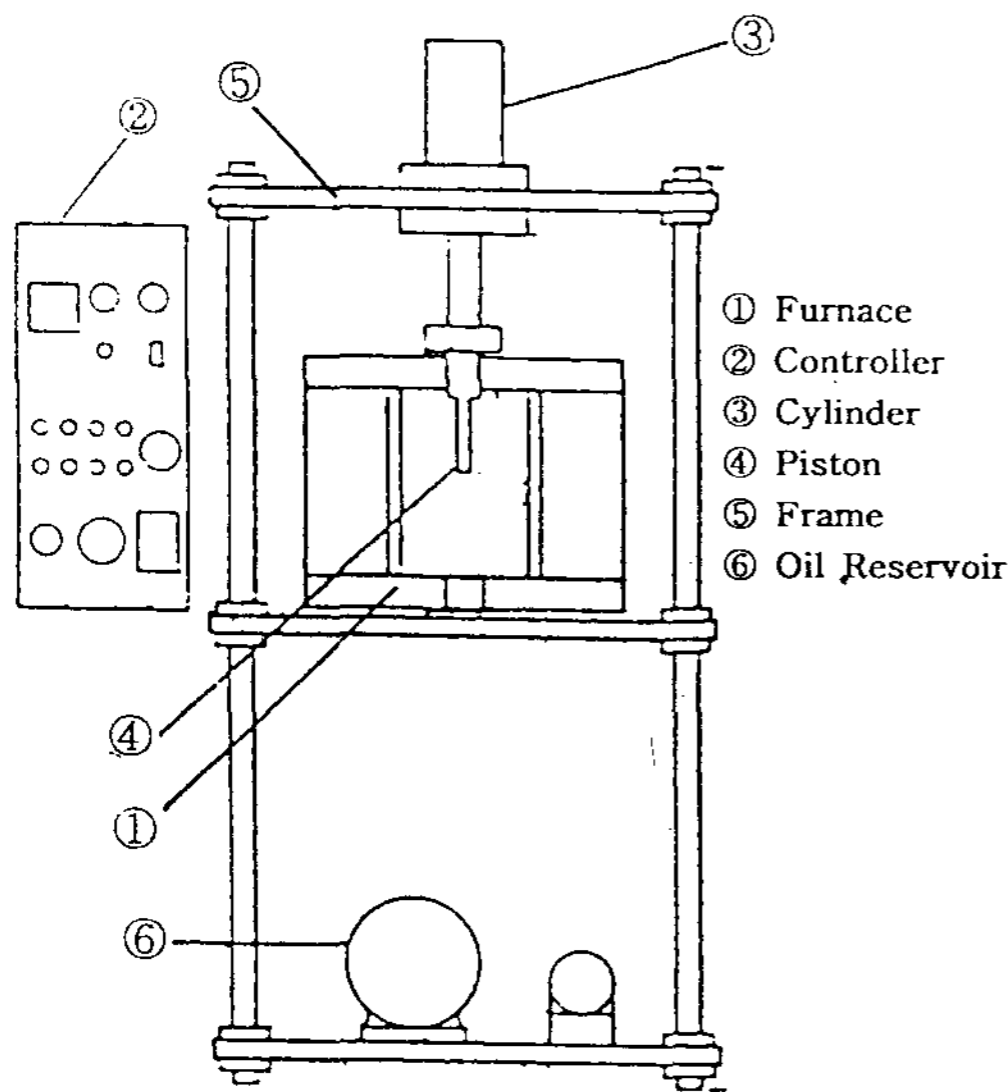


Fig. 1. Schematic diagram of a thixocasting machine.

크게 나눌 수 있다.

가열로는 칸탈로로서 가열속도는 60°C/min으로 시료의 급속가열이 가능하도록 하였으며, Mg 합금 산화방지를 위해 SF<sub>6</sub>와 CO<sub>2</sub>의 혼합 가스가 공급될 수 있도록 하였다. 가압장치는 유압식으로 가압하중은 8ton, 가압속도는 35mm/sec로 하였다. 금형부는 압출 컨테이너, 압출 다이스 및 시편주조용 금형등으로 나눌 수 있다. Fig. 2 및 3에 충전성실험금형 및 유동성실험금형의 형상을 나타냈었다. 금형의 재질은 SKD61로 하였다.

### 2.2 잉곳 제조

미세조직관찰, 금형충전성실험 및 유동성실험에 사용할 잉곳 제조를 위해 먼저 SiC로를 이용하여 철제 도가니를 적열한 후 AZ91D Mg합금을 장입하고, 용락되기 시작하면 SF<sub>6</sub>와 CO<sub>2</sub>의 혼합가스를 도가니 내부에 공급하였다.[11] 다음 용탕을 급가열하여 850°C의 온도에서 10분간 유지한 후 로에서 도가니를 꺼내어 700°C까지 용탕을 공기로 급냉, 결정립 미세화처리를 하였다. 그 다음 용탕을 금형에 주입하여  $\phi 30 \times 200\text{mm}$ 의 환봉 잉곳을 제조하였다. Table 1에 제조한 AZ91D Mg합금 잉곳의 화학성분을 나타내었다.

### 2.3 고상을 및 미세조직의 변화 관찰

고액공존의 임의의 온도에서 유지시간에 따른

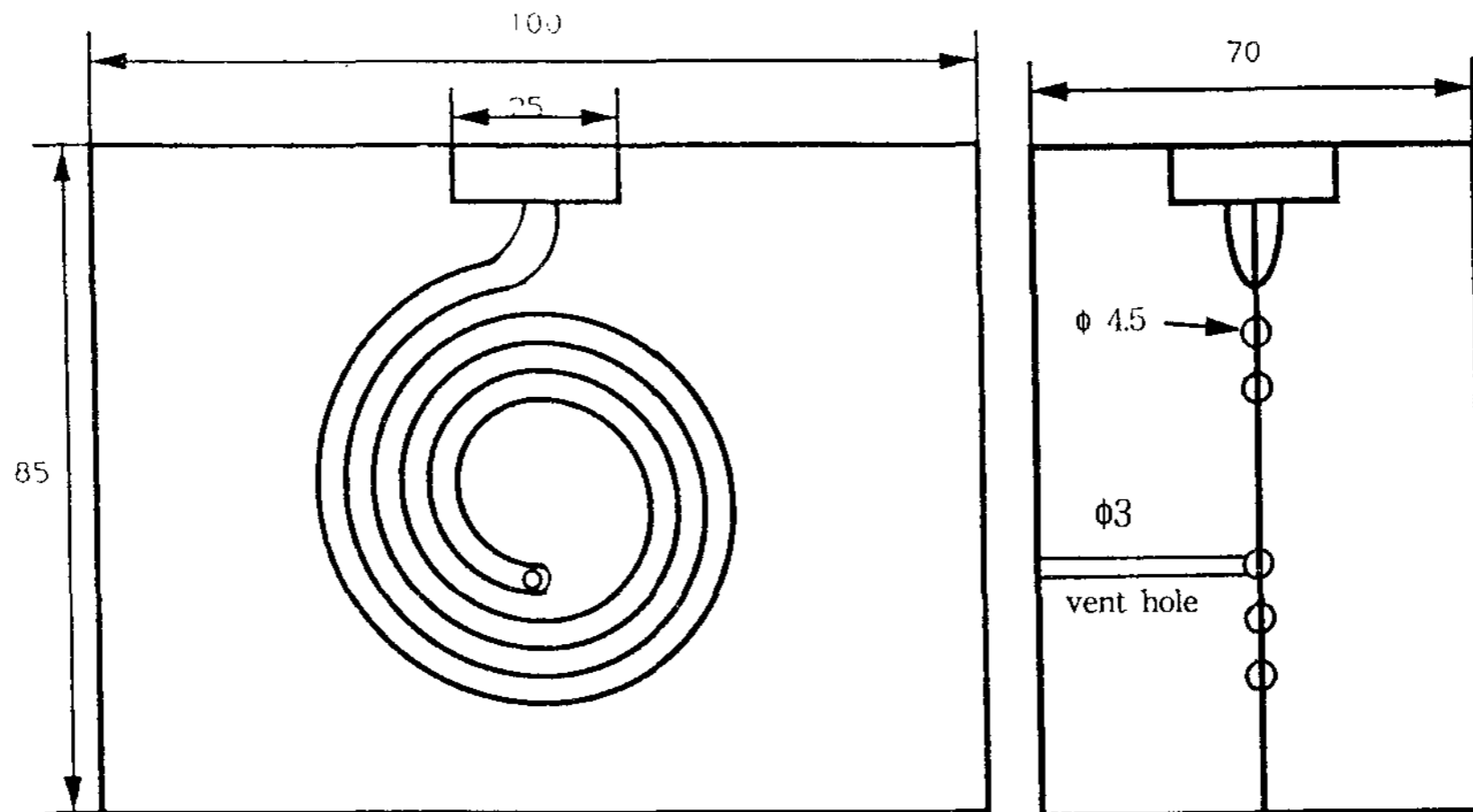


Fig. 2. Metal mold for fluidity test(unit:mm).

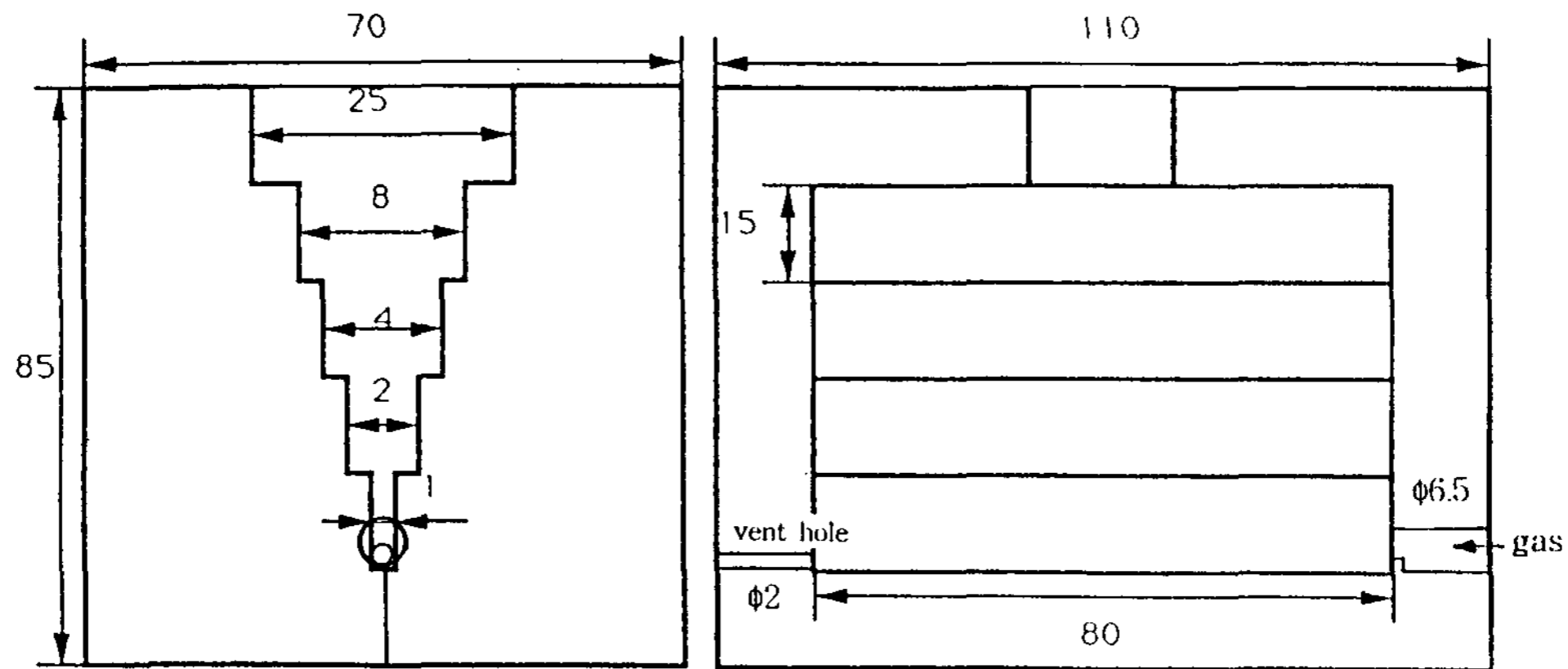


Fig. 3. Metal mold for mold filling test(unit:mm)

Table 1. Chemical composition of AZ91D Mg alloy (wt.%)

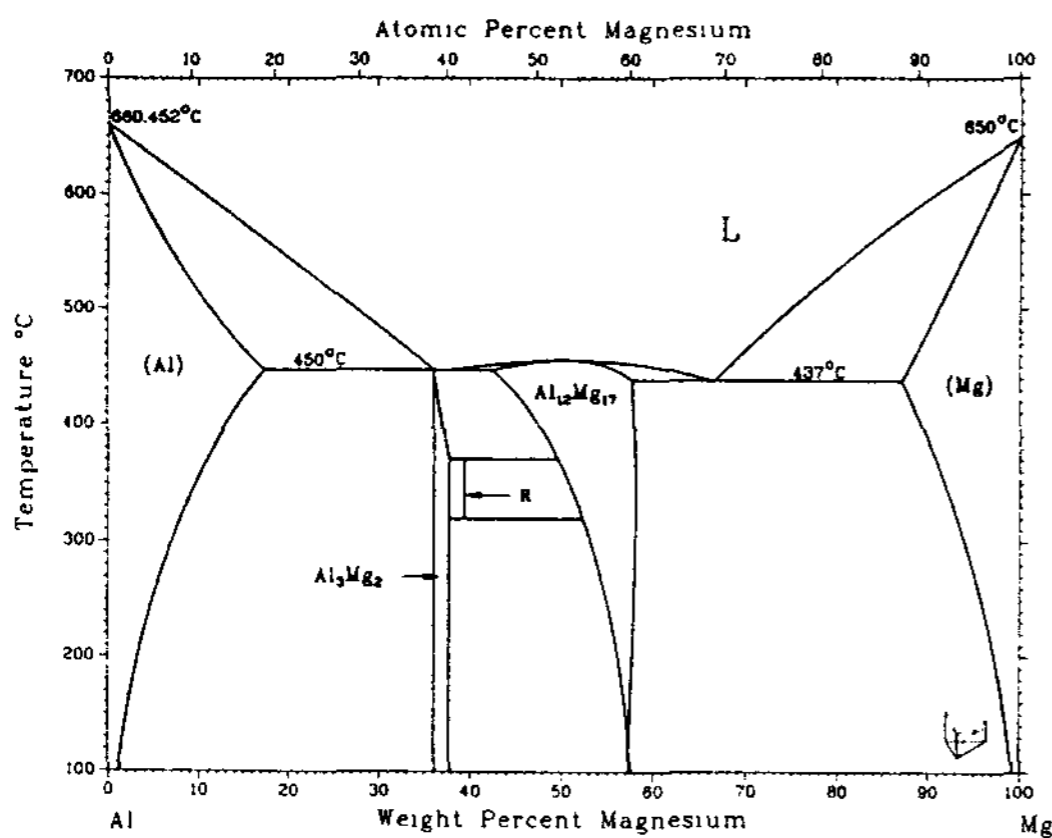
Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Mg
9.82	0.65	0.27	0.06	0.01	0.059	rem

Mg합금의 고상을 및 미세조직의 변화를 조사하기 위하여, 이곳을 Fig. 4의 Mg-Al 이원계 상태에서 평형고상율이 10%에서 40%가 되는 580°C, 585°C, 590°C, 595°C, 600°C의 온도에서 각각 15분, 30분 및 60분 유지한 후 신속히 수냉처리하였다. 수냉시편을 연마하고 5%구연산으로 에칭한 후, 각 시편의 고상을 및 결정립크기

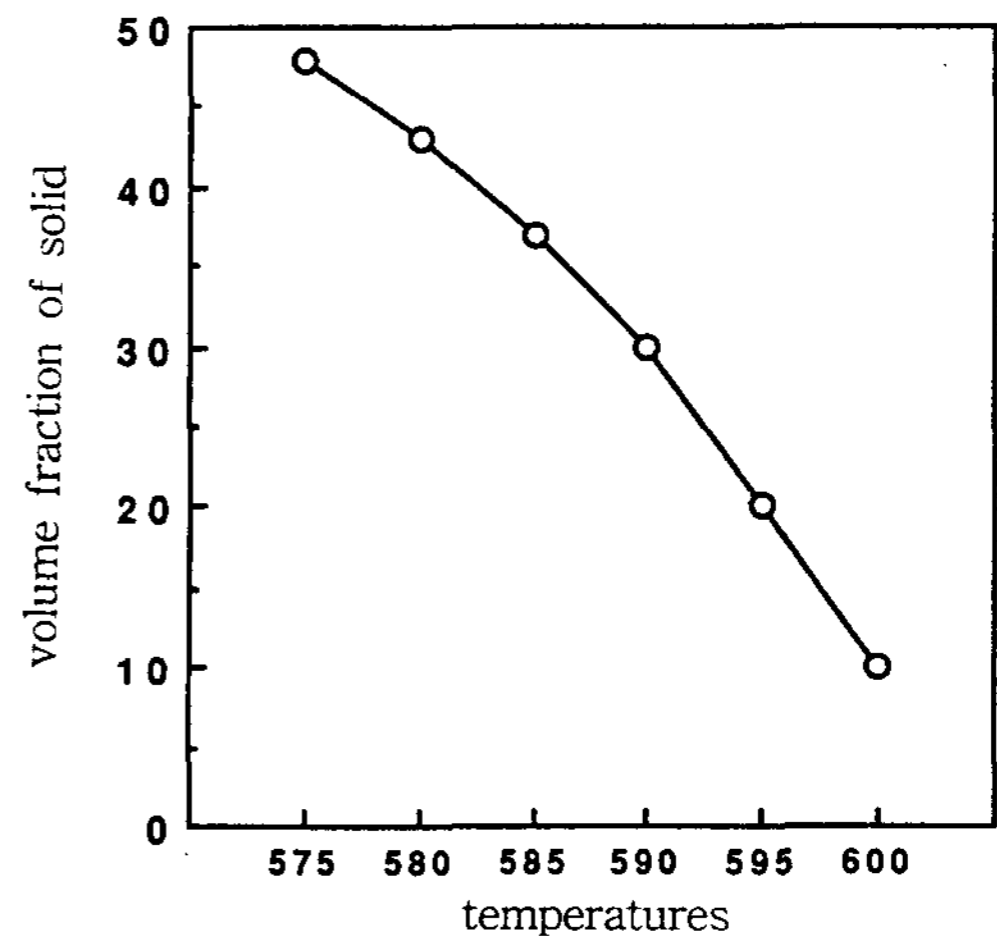
는 영상분석기를 이용하여 측정하였다.

#### 2.4 금형 충전성실험 및 유동성실험

금형 충전성실험은 계단형 시편, 유동성실험은 나선형 시편을 이용하여 일정한 고상율을 가진 반응용 Mg합금 이곳을 가압주조한 후, 고상율, 금형온도 및 압출비(다이스 단면적/콘테이너 단



(a)



(b)

Fig. 4. Mg-Al binary alloy phase diagram (a) and equilibrium volume fraction of solid with temperature in Mg-9% Al alloy (b). [8]

면적)에 따른 금형 충전성 및 유동성변화를 조사하였다. 금형온도는 400℃ 및 500℃, 압출비는 1/10, 1/100로 하였고 금형에는 도형을 하지 않았다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 고상율 및 미세조직의 변화

Photo 1은 전술한 바와 같이 결정립미세화 처리한 잉곳의 주조상태에서의 조직을 나타낸 것이고, Photo 2에서 6은 잉곳을 Fig. 4의 Mg-Al 이원계 상태도에서 평형고상율이 약 10%에서 40%가 되는 580℃, 585℃, 590℃, 595℃ 및 600℃ 온도에서 각각 15분, 30분 및 60분 유지한 후 수냉처리하여 유지온도 및 시간에 따른 미세조직의 변화를 관찰한 것이다.

주조상태의 셀조직은 각 온도에서 15분간의 유지하므로 이미 재결정이 완료되어 결정립이 다각형, 또는 구형을 나타내었다.

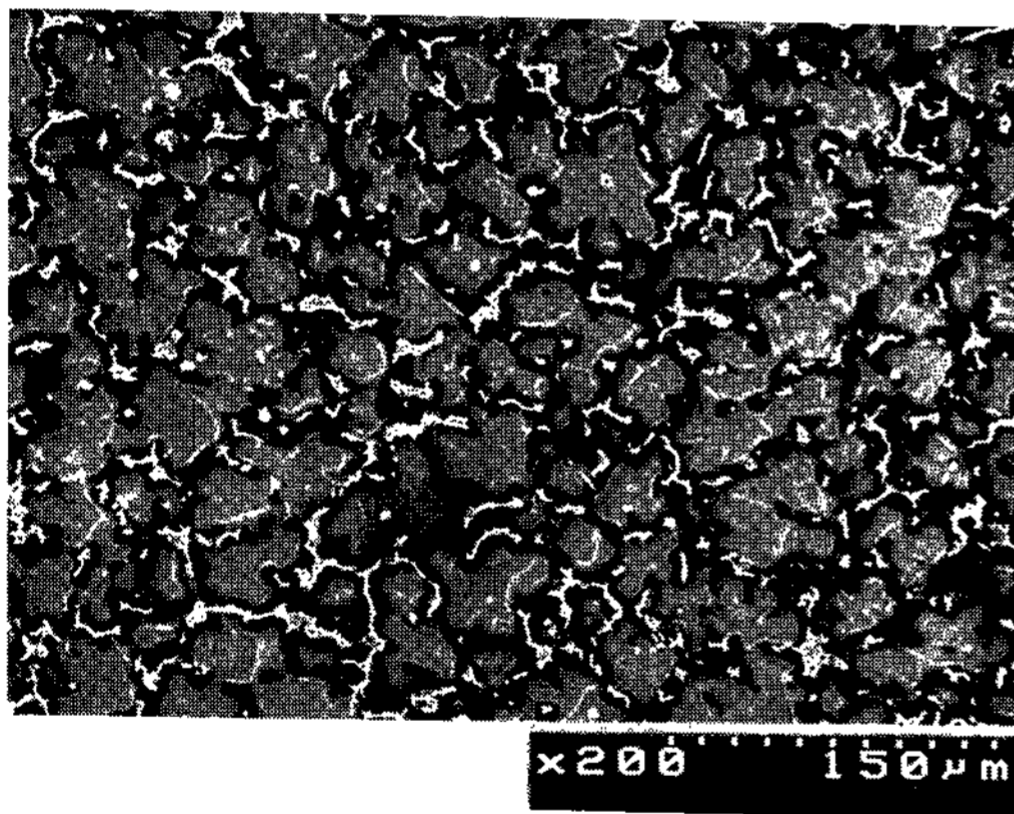


Photo 1. Microstructure of Mg alloy ingot as cast.

이 때 불안정한 결정립계가 우선 액화되기 시작하였고 유지시간에 따라서 액상이 점차 증가하였는데, 온도가 높을수록 유지시간에 따라서 액상의 증가가 빠르게 이루어진 것을 볼 수 있다.

Fig. 5 및 6에 이들 미세조직으로부터 고상율 및 결정립크기의 변화를 영상분석기를 이용하여 측정한 결과를 나타내었다. Fig.5는 일정한 유지시간에서 온도에 따른 고상율의 변화를 나타낸 것이다. 590℃ 이하의 온도에서는 온도증가에따

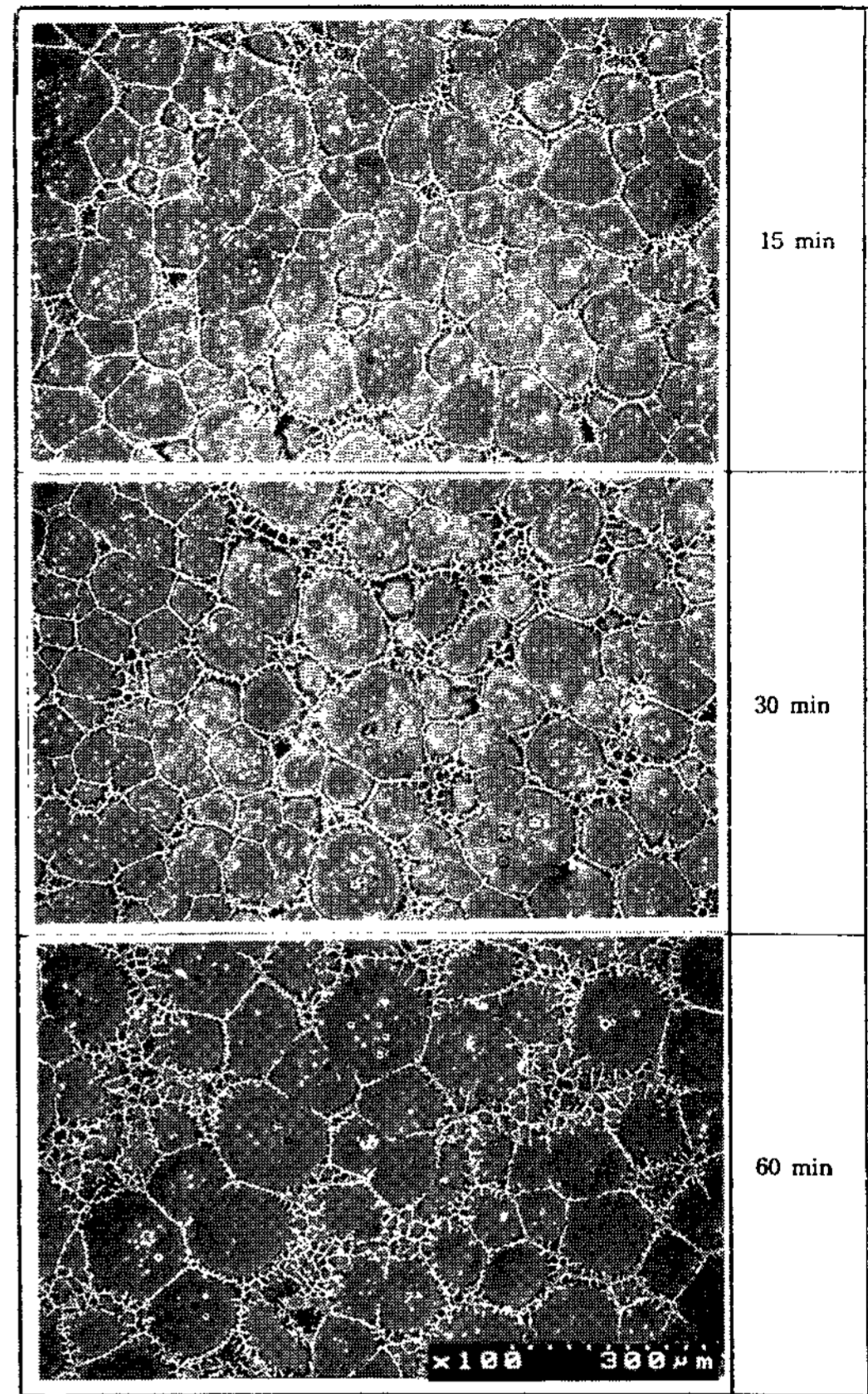


Photo 2. Microstructures of semi-solid metal held at 580℃ for different holding times.

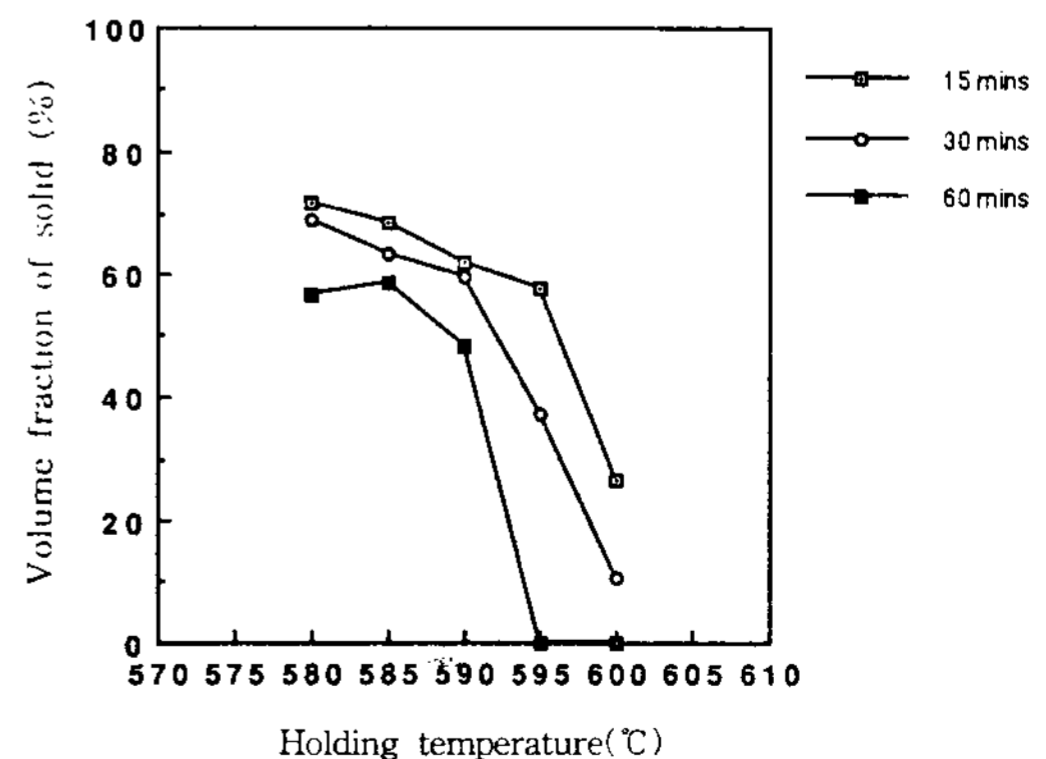


Fig. 5. Variations in volume fraction of solid with holding temperature.

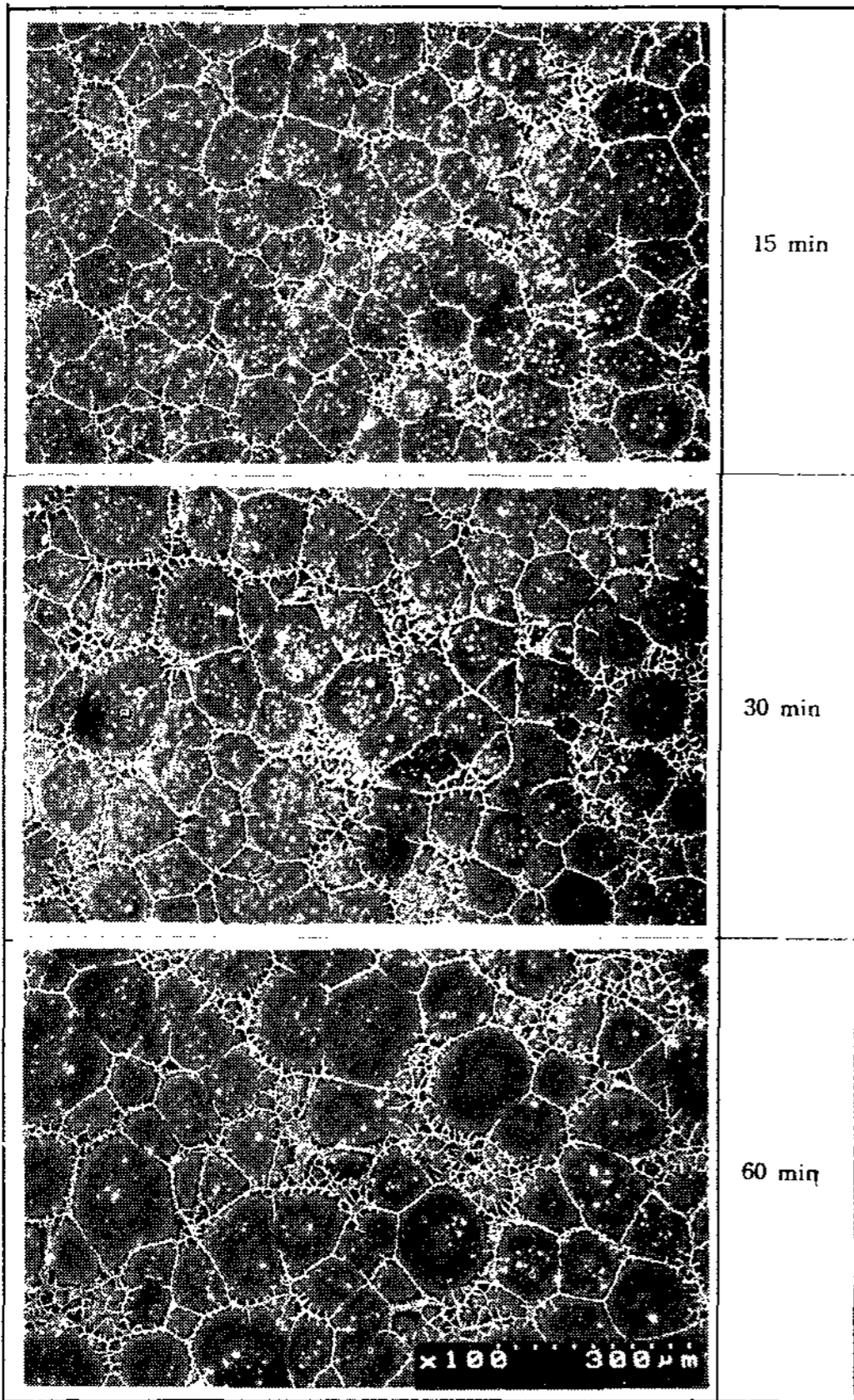


Photo 3. Microstructures of semi-solid metal held at 585°C for different holding times.

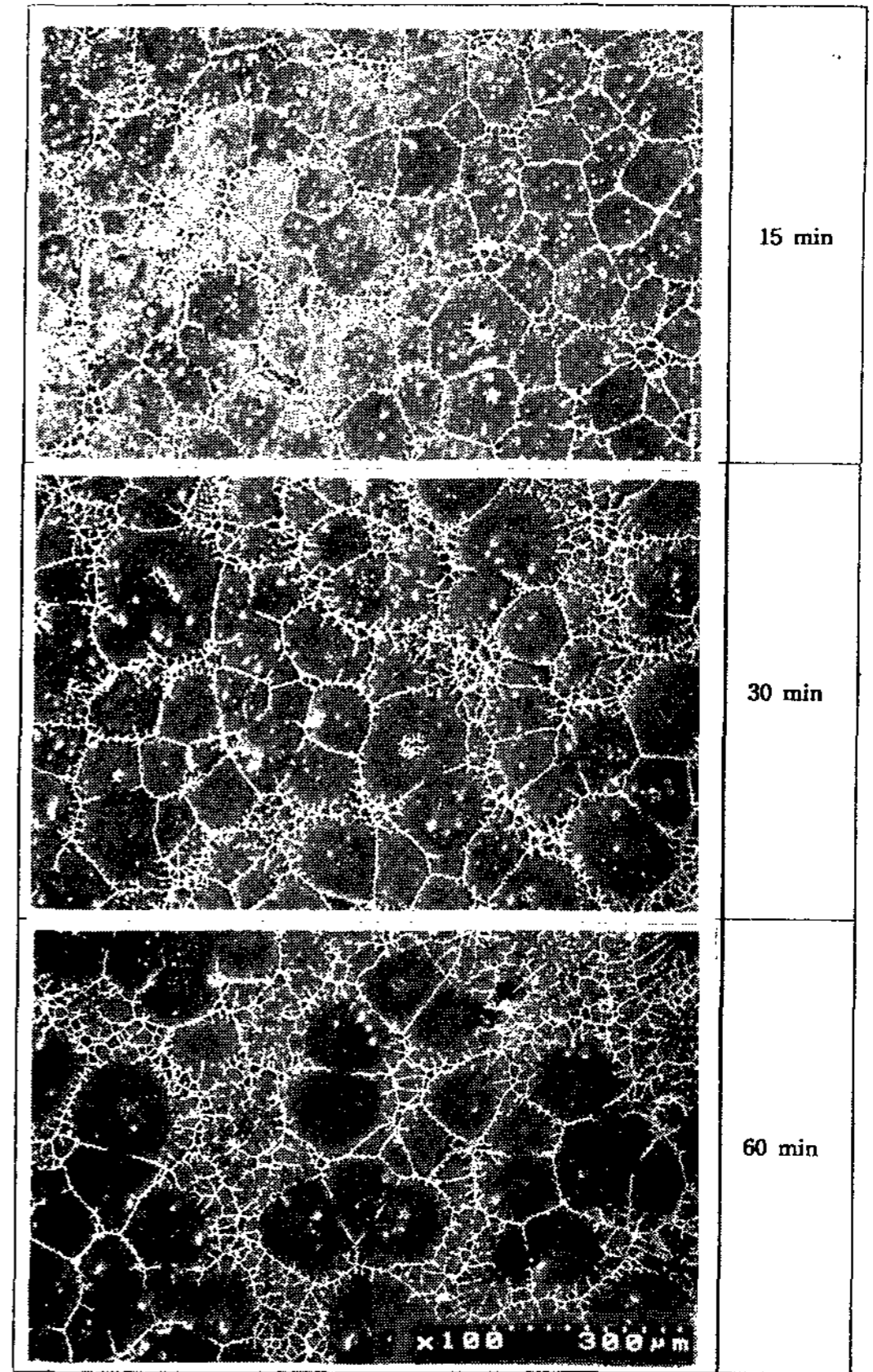


Photo 4. Microstructures of semi-solid metal held at 590°C for different holding times.

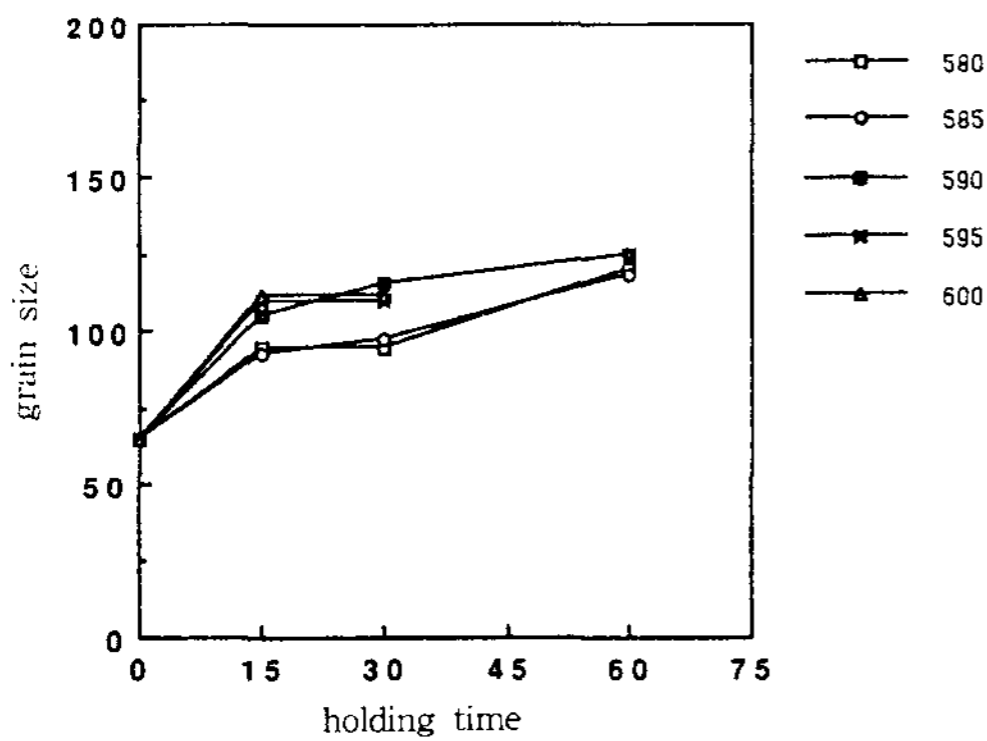


Fig. 6. Variations in grain size with holding time at different temperatures.

라 고상율이 서서히 감소하였으나 595°C 이상의 온도에서는 고상율의 감소가 뚜렷한 것을 알 수 있다. 이것은 온도증가에 따른 평형고상율의 변화와 비슷한 경향을 나타낸 것을 알 수 있다. 한편 합금성분에서 약간의 차이가 있으나 Fig. 4를 Fig. 5의 참고자료로 비교하면 본 실험범위의 모든 반고상 온도에서 30분간 유지하면 평형고상율에 도달하지 못하였고, 60분간 유지한 경우는 595°C 이하의 낮은 온도에서는 평형고상율보다 높으나 그 이상의 온도에서는 모두 액상으로 변해 오히려 평형고상율보다 낮다. 이것은 Zn 1%에 해당하는 성분차이때문이다.

Fig. 6은 임의의 고상율의 온도에서 유지시간에 따른 결정립크기의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 고온에서 유지하면 급격히 결정립

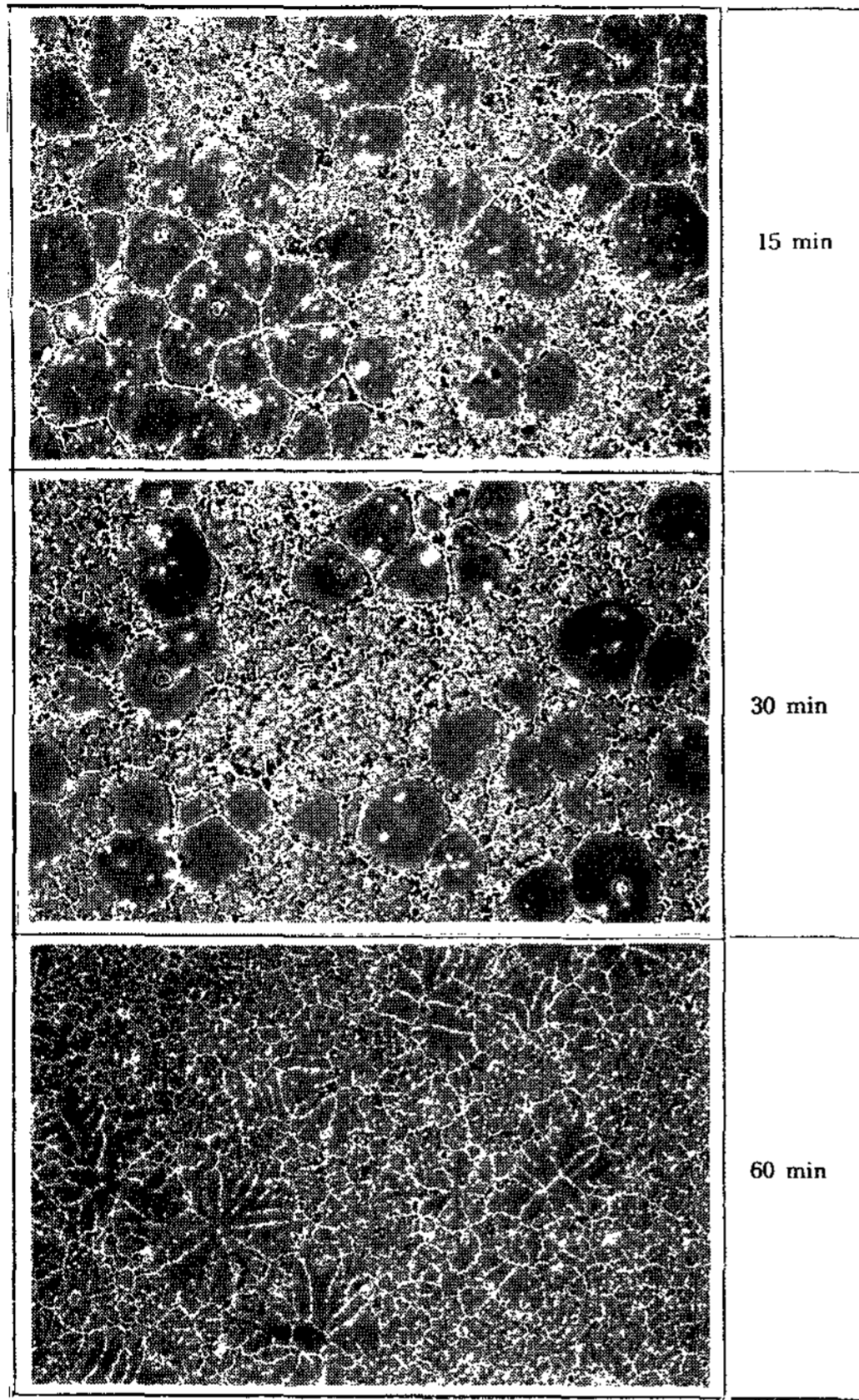


Photo 5. Microstructures of semi-solid metal held at 595°C for different holding times.

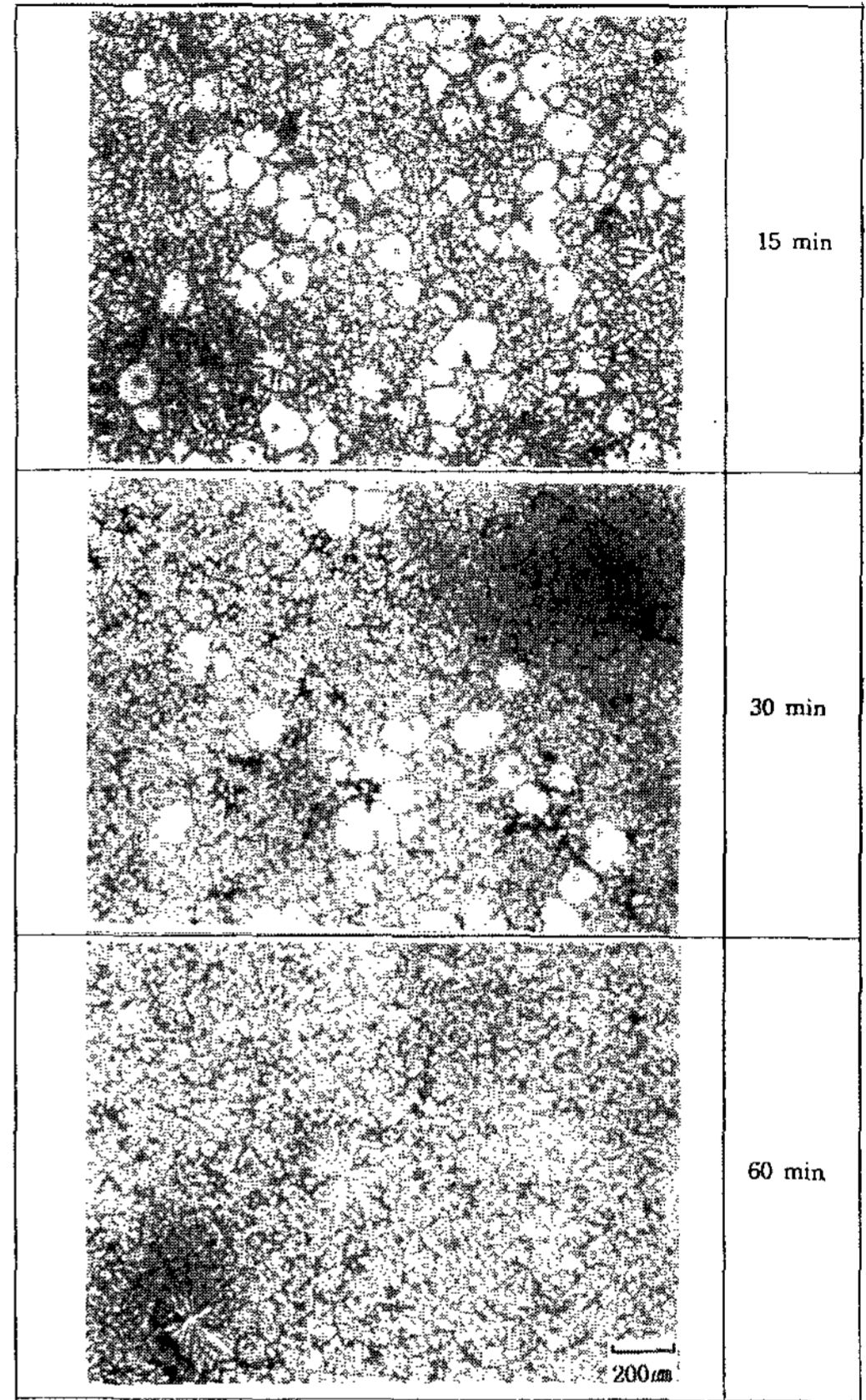


Photo 6. Microstructures of semi-solid metal held at 600°C for different holding times.

이 조대화하나 도달하는 최대결정립은 저온에서 장시간 유지했을 경우가 더 커짐을 알 수 있다. 이상의 결과를 모식도로 나타내면 각각 Fig.7 및 Fig.8과 같다.

Fig.7에서 단계1은 재결정에 의한 결정립의 다각형화가 일어나고, 단계2는 작은 결정립의 합체에 의한 결정립의 조대화와 더불어 액상의 액상 증가와 결정립의 부분적 구형화가 진행하며, 단계3은 대부분 액상으로 변함으로 인해 결정립은 거의 구형을 갖추게 되며 결정립크기는 오히려 감소하게 된다.

Fig.8에서 고온에서 유지하면 단시간에 최대결정립에 도달하고 저온에서는 장시간이 소요되나 도달하는 최대결정립은 저온의 경우가 더 크다.

따라서 일정한 고상율에서 반응용가공조건으

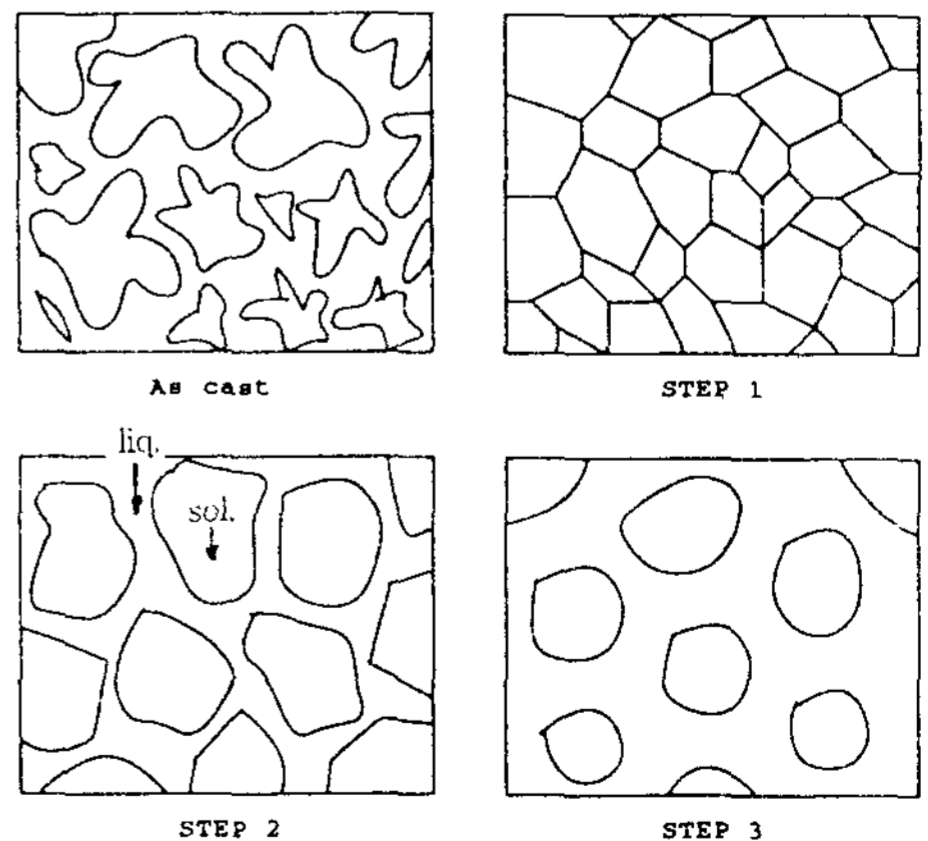


Fig. 7. Model of microstructural change of Mg alloy ingot heated at semi-solid temperatures.

Table 2. Holding temperatures and times for each volume fraction of solid

Volume fraction of solid	Holding temperature(°C)	Holding time(min)
20	598	30
30	596(600)	30(15)
40	594(598)	30(15)
50	592(596)	30(15)
60	590(593)	30(15)

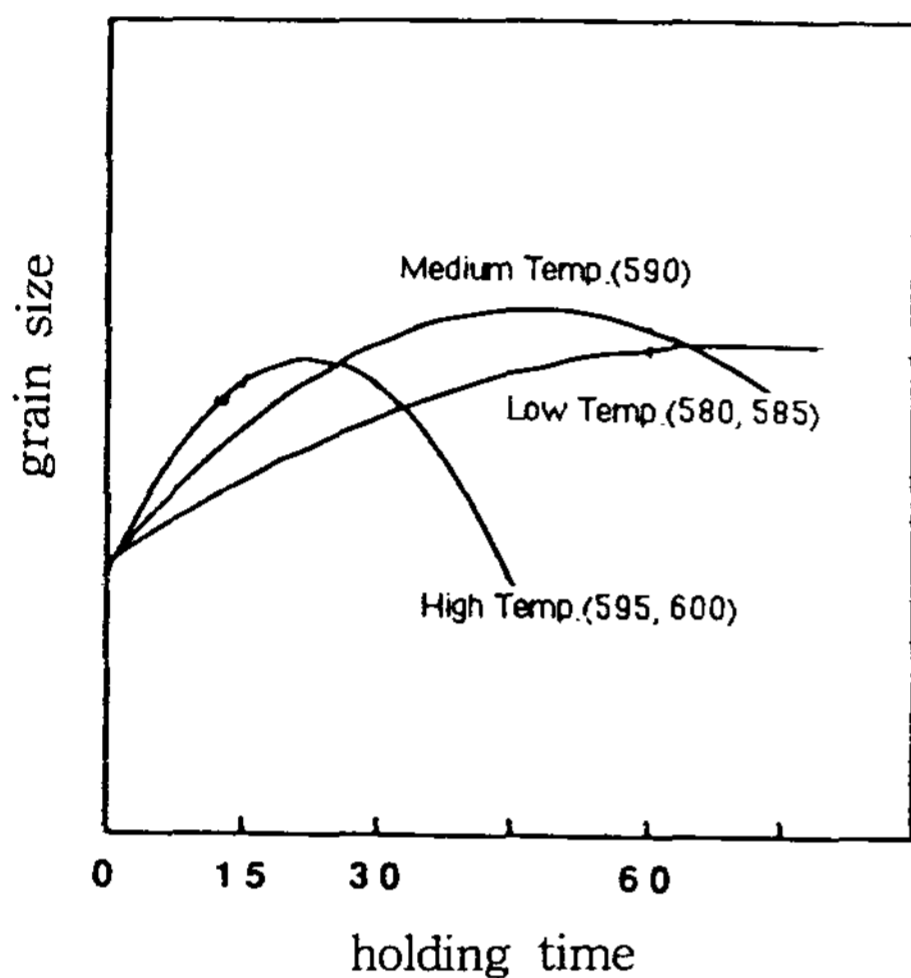


Fig. 8. Schematic illustration of grain size change of Mg alloy ingot heated at semi-solid temperatures.

로 유리한 미세한 결정립을 얻기 위해서는 고온에서 단시간 유지하는 것이 바람직하다. 실험결과 고상율 40-60% 를 얻기위해서 평형고상율은도보다 약 10°C 이상 높은 온도인 590°C-595°C의 온도에서 약 30분간 유지하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 한편 30%이하의 고상율을 얻기위해서는 약 600°C의 온도에서 15분이상 가열해야 하는 것을 알 수 있다. Table 2에 일정한 고상율을 얻기위한 유지온도 및 시간을 나타내었다.

### 3.2 고상율, 금형온도 및 압출비에 따른 금형 충전성 및 유동성 변화

임의의 고상율을 가진 반응용 Mg합금 잉곳을 금형온도 400°C 및 500°C, 압출비 1/10, 1/100로 하여 가압주조한 후, 고상율, 금형온도 및 압

출비에 따른 금형 충전성 및 유동성 변화를 조사한 결과를 Fig. 9-12에 나타내었다.

먼저 Fig. 9와 10에서의 고상율, 금형온도 및 압출비에 따른 금형 충전성의 변화를 살펴보면, 금형 충전성에 미치는 압출비의 영향은 크지 않으며, 금형온도 및 고상율의 영향이 지배적인 것을 알 수 있다. 이 중에서도 금형온도의 영향이 크고 금형온도가 약 400°C일 경우에는 금형의 두께 4mm인 곳까지만 충전되었으나 금형온도가 500°C일 경우에는 금형의 두께 1-2mm인 곳까지 충전되어 금형충전성이 크게 향상된 것을 알 수 있다. 또한 금형온도가 약 500°C일 경우에는 고상율감소에 따라서 금형충전성이 향상되는 경향이 있으나, 금형온도가 약 400°C일 경우에는 고상율감소에 따른 금형충전성의 변화가 거의 없었다. 한편 금형온도를 약 500°C로 하고 압출비를 1/100로 하였을 때, 고상율 30-40%에서 금형의 두께 1mm인 곳까지 거의 충전되었다.

Photo. 7은 고상율 30%로 금형의 두께 1mm인 곳까지 충전된 시편의 미세조직을 관찰한 것이다. 압출후의 미세조직에서 결정립크기는 고액공존의 반응용상태의 120µm정도에서 응고후 100µm정도로 미세한 결정립조직을 보여주고 있다. 압출후 반응용상태의 잉곳조직은 약 500°C의 높은 금형온도로 인해 서냉되어 상에서 분해된 층상의 상(Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>)이 뚜렷이 나타나고 있었다.[12]

Fig. 11 및 12는 고상율, 금형온도 및 압출비에 따른 유동성의 변화를 나타낸 것이다. 유동성도 금형 충전성의 경우와 마찬가지로 압출비의 영향은 크지 않으며, 금형온도 및 고상율의 영향이 지배적인 것을 알 수 있다. 금형온도가 약 400°C에서 약 500°C로 높아지면 유동성은 2배 이상 크게 증가되었다. 또한 금형온도가 약 400

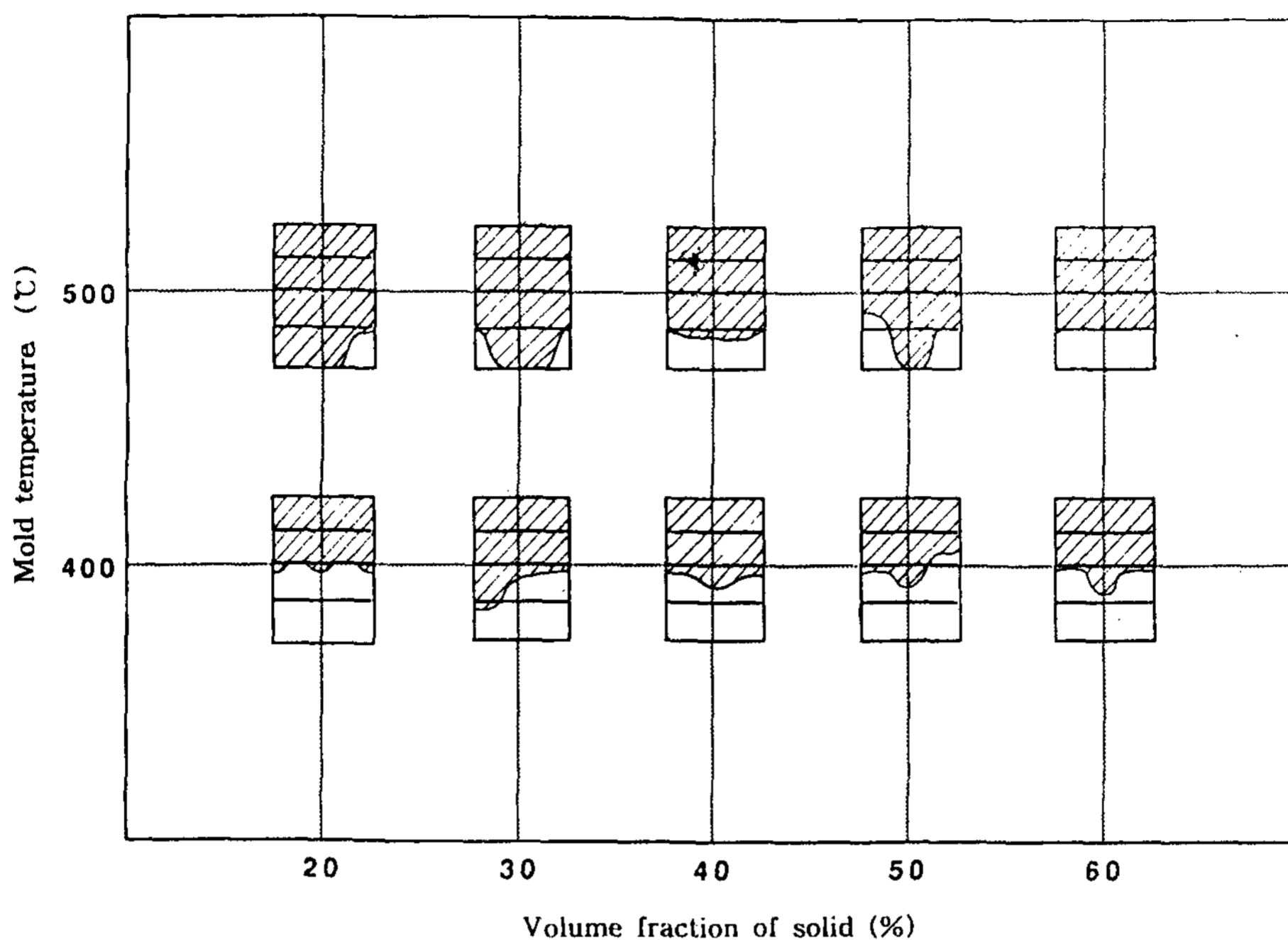


Fig. 9. Effects of mold temperature and volume fraction of solid on mold filling behaviour with an extrusion ratio of 1/10.

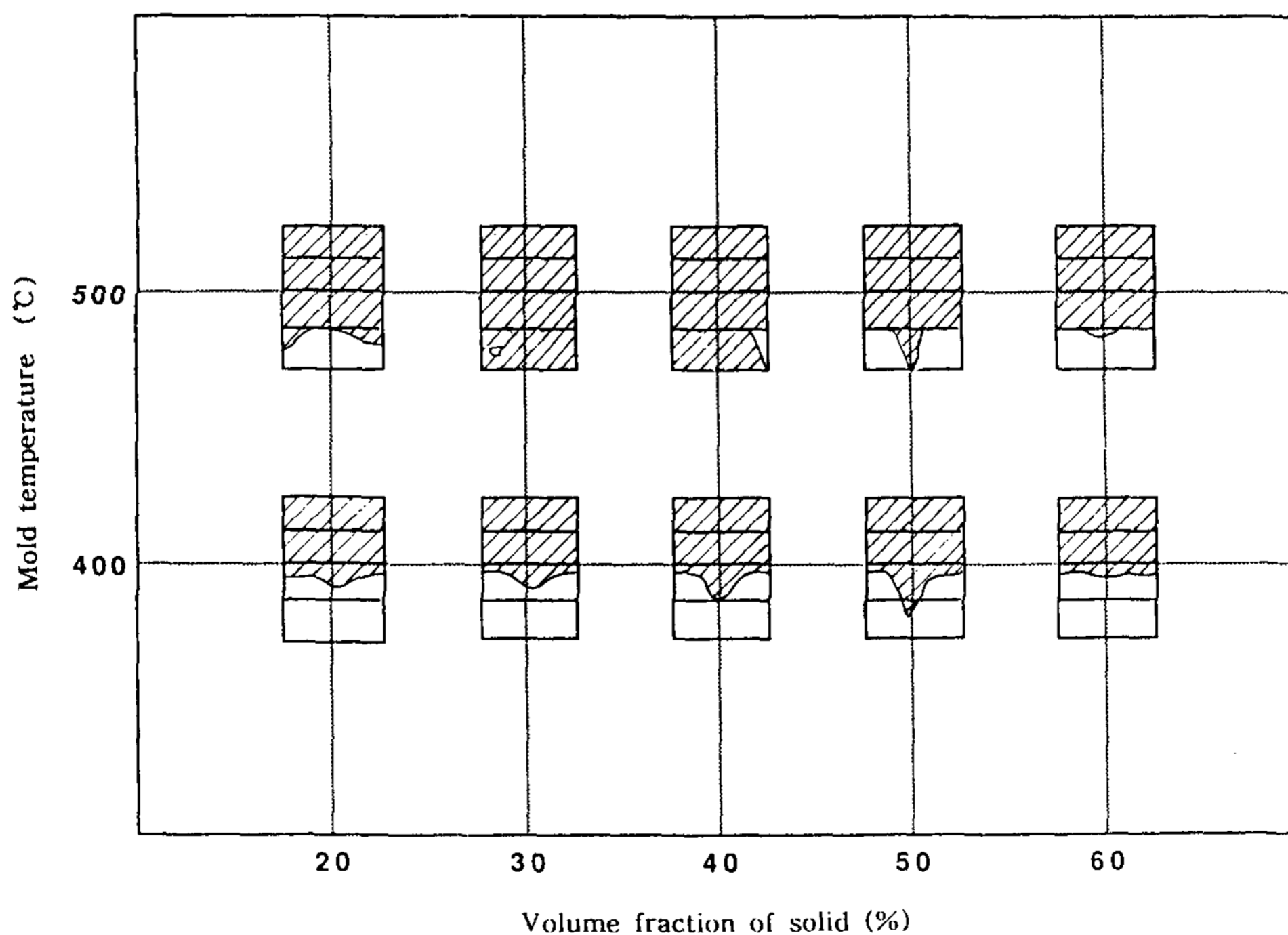


Fig. 10. Effects of mold temperature and volume fraction of solid on mold filling behaviour with an extrusion ratio of 1/100.



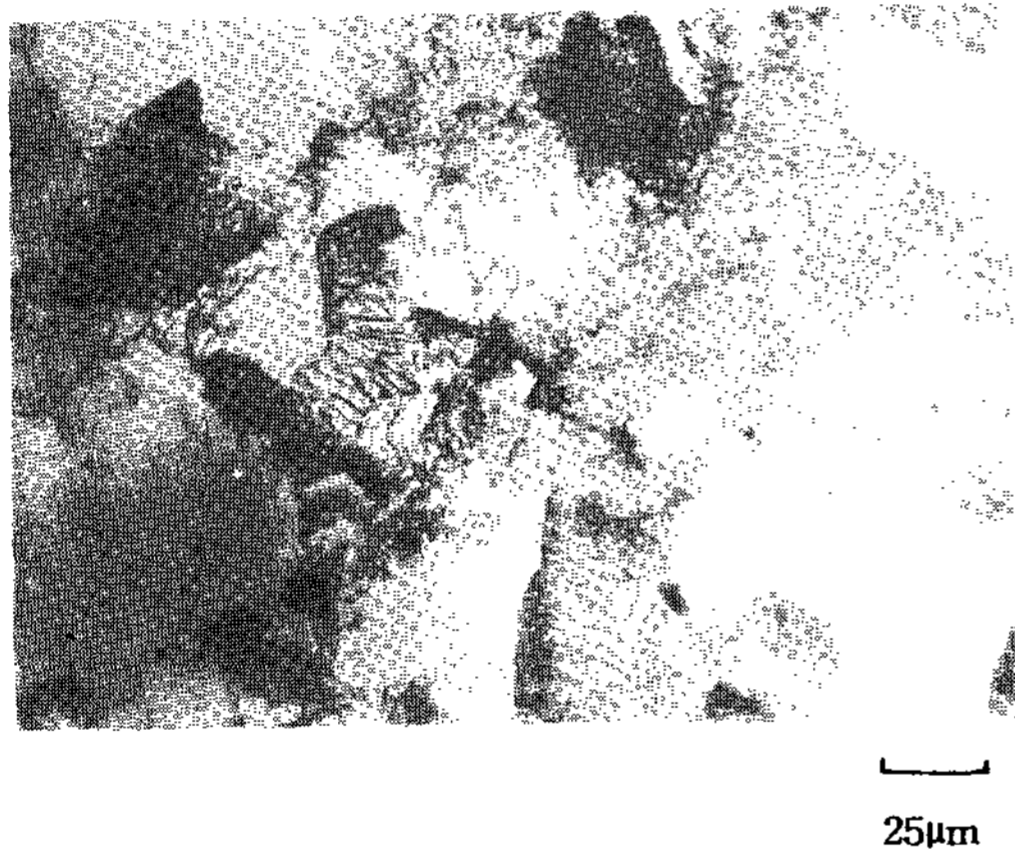
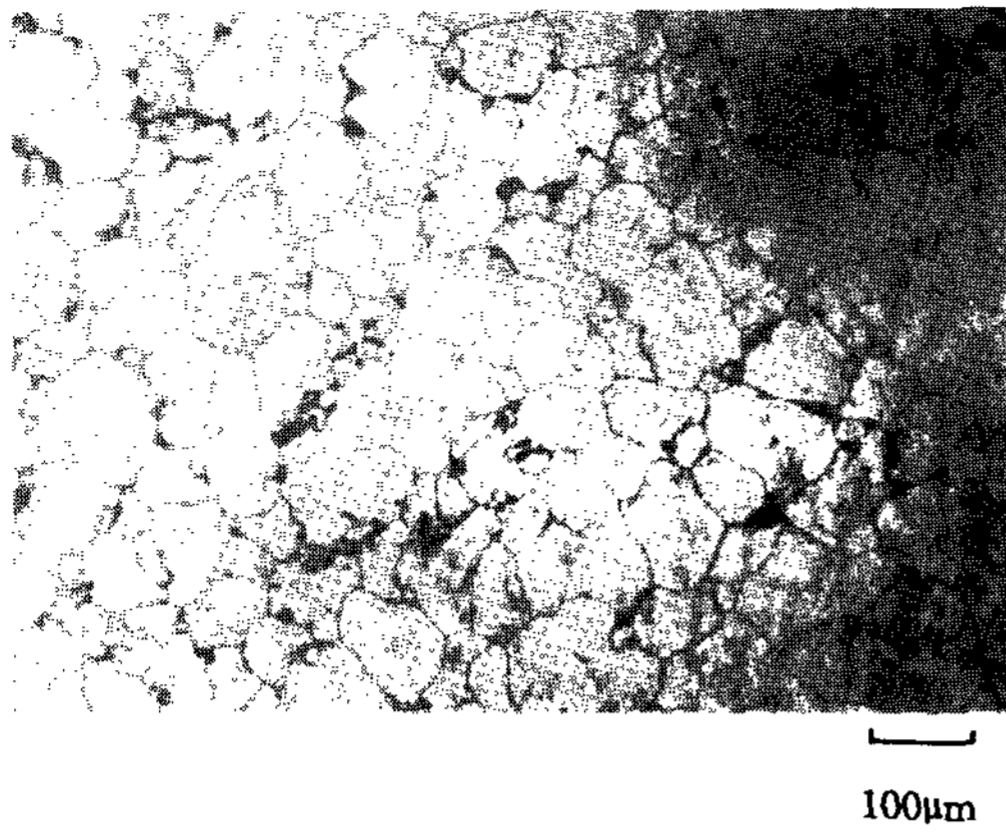


Photo 7. Microstructures of extruded semi-solid metal with volume fraction of solid of 30%, mold temperature of 500°C, and extrusion ratio of 1/100.

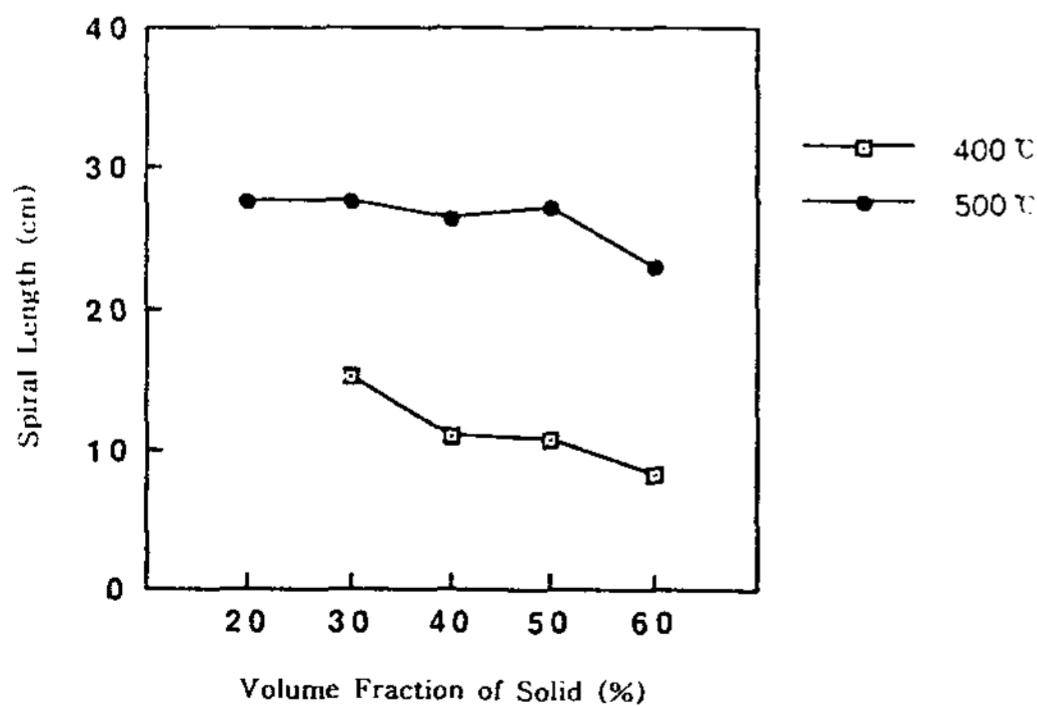


Fig. 11. Effect of volume fraction of solid on fluidity at different temperatures with an extrusion ratio of 1/10.

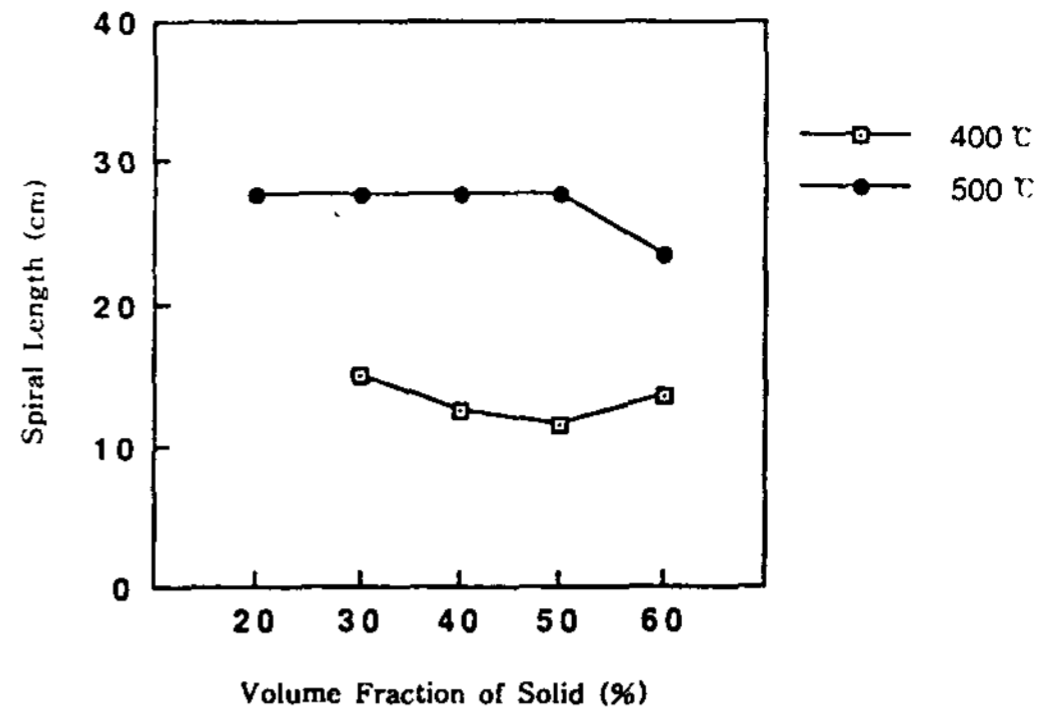


Fig. 12. Effect of volume fraction of solid on fluidity at different temperatures with an extrusion ratio of 1/100.

°C일 경우에는 고상율 감소에 따라서 유동성이 점차적으로 뚜렷이 증가하였고, 금형온도가 약 500°C일 경우 고상율이 50% 이상에서는 유동성이 현저히 감소하였으나 고상율이 50% 이하에서는 길이 27.5cm인 나선형 시편금형에 거의 충전되어 고상율감소에 따라서 유동성의 변화가 거의 없었다.

이상의 결과에서 보듯이 금형충전성과 유동성을 결정하는 요인별 영향은 압출비, 고상율, 금형온도의 순으로 커지고 특히 금형온도의 영향이 지배적이다. 압출비는 압출속도, 고상율은 전단 응력과 응고잠열, 금형온도는 열전도율과 관계됨을 고려할 때 반응용 Mg합금은 낮은 응력하에서 전단되고, 응고잠열 및 비열이 적으므로[13] 우선적으로 금형온도를 고려하여 성형조건을 검토하여야 할 것이라고 생각된다.

#### 4. 결 론

Mg합금의 반응용가압주조시 고액공존의 온도에서 잉곳을 유지하였을 때 고상율 및 미세조직의 변화와 고상율, 금형온도 및 압출비에 따른 금형 충전성 및 유동성의 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 일정한 고상율의 온도에서 평형고상율을 얻기 위해서는 60분 이상을 유지해야 하며, 고온에서 유지시 저온에서보다 최대 결정립의 크기가 작다. 따라서 일정한 고상율에서 가능한 한 미세한 결정립을 얻기 위해서는 평형고상율 온도보다 약

10°C 이상 높은 온도에서 급속히 가열하는 것이 바람직하다.

2) 가압응고후의 조직은 금형온도 500°C의 경우 서냉됨으로써  $\delta$ 상과,  $\delta$ 상의 분해에 의해 생성된 층상의  $\gamma$ 상이 혼재되어 나타났다.

3) 금형 충전성 및 유동성에 미치는 압출비의 영향은 크지 않았고, 금형온도 및 고상율이 큰 영향은 크지 않았고, 금형온도 및 고상율이 영향을 미쳤으며 특히 금형온도의 영향이 지배적이었다. 금형 충전성 및 유동성은 금형온도의 상승에 따라서 크게 증가되었고 고상율 감소에 따라서 약간 증가되었다.

4) 고상율 30-40%, 금형온도 약 500°C, 압출비 1/100에서 가장 효과적인 금형충전성, 유동성을 확보할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] M. C. Flemings, R. Mehrabian:Trans. AFS., 81(1973) 102
- [ 2 ] M. C. Flemings, R. Mehrabian:Trans. AFS., 80(1972) 47
- [ 3 ] M. C. Flemings, R. G. Riek, K. P. Young : Mater. Sci. and Eng., 25(1976) 103
- [ 4 ] P. A. Joly:J. of Mater. Sci., 11(1976) 1393
- [ 5 ] M. C. Flemings:Metall. Trans., 22A(1991) 957
- [ 6 ] N. L. Bradley, P. S. Frederick:Proceedings, World Mg Conf., (1989) 63
- [ 7 ] A. Tissier, D. Apelian, G. Regazzoni:J. of Mater. Sci., 25(1990) 1184
- [ 8 ] 日本輕金屬協會: 素形材센터 調査報告書 395, (1991)
- [ 9 ] 日本輕金屬協會: 素形材센터 調査報告書 412, (1992)
- [ 10 ] 小島 陽:素形材, (1994) 1
- [ 11 ] C. F. Baker:SAE Paper 900787, (1990)
- [ 12 ] 佐藤 英一郎:素形材 Vol.27 (1986), No. 12, 32
- [ 13 ] Butterworths:Metal Reference Book, 5th edi. (1976)