

경사냉각관에 의한 반응고금속의 제조

임수근, 김권섭

경상대학교 재료공학부, 항공기부품기술연구센터

1. 서론

1970년대초 미국 M.I.T의 M. C. Flemings에 의해 개발된 레오캐스팅법(Rheo-casting method) [1] 을 시작으로 현재에도 많은 사람들이 반응고가공법(Semi-solid processing)을 통한 미세조직과 기계적 성질의 향상에 대하여 연구하고 있다. [1-5] 최근의 이러한 기술적 동향은, 주조재가 가지는 기공과 같은 주조결함과 단조재에 있어서의 성형시 높은 응력이 필요하고 복잡한 형상의 부품제조가 힘들다는 두 공정의 단점을 최소화하고 또한, 양공정의 장점을 극대화하는데 있다고 할 수 있다. [6]

종래의 용융상태에서 주조하는 방법으로는 결정립이 조대화하며 또, 응고수축에 의한 수축공, 주조균열등이 일어나기 쉽고 주조결함이 발생하기 쉽다. 이에 반하여 반응고금속 가공법은 미리 고상입자가 존재하고 있는 상태이기 때문에 이들 결함을 해소할 수 있고, 더욱이 용탕과 비교하여 slurry의 온도가 낮기 때문에 금형의 수명 연장도 가능하며, 반응용상태 가공은 용융상태로 하기 위한 에너지의 약 65%만이 필요한 등의 잇점이 있다. 또한, 수입대체로 인한 제조원가절감이 가능하고 용해로가 없는 주조공장의 실현이 가능하기 때문에 작업환경개선 및 에너지절약등의 장점이 있다. 따라서 반고체금속제조 및 가공은 주물 및 주강업계의 고품질, 고생산성에 있어서 그 가능성이 클것으로 기대된다.

현재, 외국에서는 반응고로 제조된 빌렛을 판매하고 있으며 실정이지만 국내에서는 반응고금속 제조품이나 성형품이 제조되었다는 보고는 없으나, 여러곳에서 반응고금속 제조 [7] 또는 성형가공 [8] 에 관한 기초 연구를 수행하고 있는 실정이다.

그러나, 이러한 연구개발은 주로 교반을 이용한 기계적 교반법과 전자기적 교반법 등을 이용하여 반응고금속을 제조하고 있는데 기존의 방법들은 교반중의 금속산화를 방지하기 위한 분위기 조절, 입상으로 만들기 위한 긴 시간 교반, 고액공존상태를 유지하기 위한 온도조절 등 많은 부대장치와 시간이 필요함으로 인한 제조단가가 고가인 단점이 있다.

따라서, 본 연구실에서는 기존의 방법이 아닌 무교반을 이용한 반응고금속 주괴의 제조 조건을 확립하기 위하여, 독자적으로 설계·제작한 장치로 연속적으로 반응고금속을 제조함으로써 반응고 성형용 소재 제조기술을 개발하기 위한 기초적인 실험을 하였다.

2.배경과 기초연구 동향

2-1. 반응고 · 반응용금속의 개념

본 강연에서는, 반응고 금속과 반응용 금속을 구별하여 사용하는 것은 제조법 및 사용법이 다르기 때문이다. 그러나, 두 금속의 근본적인 내부 구조의 차이점은 없다고 생각되기 때문에, 제조 및 사용법에 상관없이 고 · 액 공존상태로 되어 있는 금속을 반고체 금속이라고 지칭하기로 한다.

반응고 금속이란 고 · 액 공존상태의 용탕에 생긴 초정 덴드라이트를 교반 · 파쇄하여, 미응고의 액체에 분산시킨, 액상과 고상 입자의 혼합상태를 지칭한다. 이것은 냉각 및 교반의 정도에 따라 고상률 및 고상의 크기, 형상이 다르다.

반응용 금속은 반응고 금속 또는 일반의 주괴를 가열하여, 내부의 결정입계가 부분적 용해와 미용해의 결정립(고상입자)이 혼합상태를 이룬 것을 말한다. 이것은 가열 정도에 따라 액상성분이 결정입계의 한정된 부분에 존재하는 경우(고 고상률 상태), 고상성분이 액상성분 중에 부유하고있는 듯한 경우(저 고상률 상태)가 있다.

2-2. 반응고 · 반응용금속의 제조법

2-2-1. 반응고금속 제조법 [3-5]

1) 기계적 교반법

- 액상금속내에 교반자를 넣어 회전하는 상태에서 응고시키는 방법
- 간단한 원리로 높은 전단력을 낼수 있고 구형화 조식을 쉽게 얻는 장점이 있음.
- 교반자의 마모, 불순물의 개입, 품질의 저하, 공정 제어의 난이성.
- 결정립의 크기는 알루미늄 합금의 경우 100~400 μm 정도.

2) 전자기적 교반법

- 수냉 모울드 주위에 유도전류를 흐르게 하여 이로 인한 전자기력으로 용탕을 교반하는 방법.
- 연속주조를 통하여 직경 약 30 μm 의 합금봉을 생산.
- gas, 불순물 및 산화물 등의 개입을 억제할 수 있고, 정확한 전단력이 예측 가능.
- 막대한 양의 전력 소모와 제조 원가가 고가.

3) Passive법

- 냉각되는 금속관 속에 구형 세라믹볼을 채워놓고 액상금속을 강제적으로 통과시키는 방법.
- 교반자에 의한 마모 및 이물질 오염 제거, 장비의 단순화.
- 전단속도를 조절하지 못하는 단점.

4) 전단냉각 roll법

- 빠른 냉각속도, 높은 고상율의 반응고 금속 제조.
- roll표면에 생성된 응고 cell의 두께 제어기술이 중요.

- roll회전수를 변화하여 고상율을 조절, 제어.

5) 영구자석에 의한 교반

- 교반을 위해 단순히 영구자석만 회전시킴.
- 전력소모가 적음. 장치가 간단. 다양한 형태로 변형이 용이.

6) 냉각판을 이용한 반응고금속 제조법

- 결정유리설을 이용
- 초정의 크기를 $40\mu\text{m}$ 까지 가능

2-2-2. 반응용금속 제조법 [9-14]

1) SIMA법

- 고체상태의 합금을 가공을 통하여 충분히 소성가공을 가해준후 고액공존온도로 가열하여 구형화된 조직을 얻는 방법.
- 고상합금에서 직접 반응고 금속을 제조.
- 조직이 미세하고 균일.

2) 가열 교반법

- 피가공재를 가열하여 교반 가능한 반응용상태 → 약간의 기계적 교반 → 거시적인 평형상태
- 교반(저속의 교반)은 가열온도의 불균일에 기인하는 고상율의 불균일 제거가 목적
- 교반으로 안정한 반응용상태로 하기 용이 → 광범위의 소재 적용가능
- 높은 고상률이 요구되는 가공법에 적용 불가

3) 균일가열법 [14]

- 반응고금속 혹은 일반주조재를 균일가열하여 평형의 반응용상태
- 다원계 합금에서는 평형상태 유지곤란 → 적용가능소재 한정
- 피가공재의 균일가열 및 온도분포 유지가 필요
- 용해 → 580°C 에서 30~120분간 유지 → 수냉

3. 경사냉각판법의 국내외 기술동향

3-1. 냉각판을 이용한 반응고금속제조 장치 [15]

그림. 1은 지금 현재 본 실험실에서 이용하고 있는 수직형 반응고금속제조장치의 개략도이다. 장치는 크게 용해로, 경사냉각판, 연속주조부로 나뉘어진다. 용해로에서 용융온도 이상으로 가열된 시료가 급탕관을 통하여 냉각판으로 흘러나오면 초정 α 상의 많은 seed가 냉각판 위에서 생성되고 용융금속과 함께 주형으로 흘러 내린다. 이 초정 α 상의 seed가 연속주조되는 동안 구형으로 성장한다. 용융합금은 냉각판에서 흘러내려 주형에서 수초가 유지시킨 후 연속주조가 이루어진다. 용탕안에 있는 결정 seed는 냉각판상에서 거의 비슷한 크기로

생성되기 때문에 구형의 결정도 거의 비슷한 크기로 만들어진다. [16]

3-2. 냉각판의 형상

그림. 2에 냉각판의 형상을 나타내었다. 냉각판은 두께 5mm의 Cu를 이용하여 만들었고, 냉각판의 밑부분은 직경 5mm의 Cu파이프를 부착시켜 냉각수를 흘러주게 하였다.

3-3. 미세조직의 비교

그림. 3는 일반 금형주조, 전자교반법, 냉각판으로 제조된 Al합금의 미세조직을 비교해 놓았다. 냉각판을 이용함으로써 미세한 구형의 초정입자를 생성함이 입증되었다.

3-4. 냉각조건에 따른 조직의 변화

그림. 4에 빌렛을 냉각하는 조건에 따른 초정 α 의 크기, 고상율, 경도값의 변화를 전자교반법으로 제조된 제품과 비교를 하였다.

3-5. 조직제어 인자

경사냉각판을 이용하여 반응고금속을 제조하는 방법은 결정유리설 [17] 을 이용한 것인데 이는 “주벽상에 핵생성한 결정이 용질의 편석에 의해 근원의 성장이 억제되고 안정한 응고각이 형성되기 이전의 단계에서 유리를 시키게 되는 것이다.”라는 이론이다. 그림.5 에 결정이 유리되는 모양을 나타내었다.

초정의 형상이나 크기를 결정하는 인자는 크게 3가지로 나뉘어질수 있다. 주조시의 온도, 냉각판의 각도, 그리고 냉각판과 용탕이 접촉하는 길이이다. 그림. 6에 냉각판을 이용하여 수직형연속주조와 수평형연속주조 [14] 의 적정조건에서의 미세조직을 비교해 놓았다. 표. 1 에 그 조건을 나타내었다.

3-6. 냉각판상태에 따른 형상

그림. 7에 냉각판상에 B.N(boron nitride)를 도포한 경우와 도포하지 않은 경우의 냉각판상에서의 슬러리의 형상을 나타내었다. 냉각판에 B.N을 도포하지 않으면 냉각판에서 그 일부가 굳어버리는 현상이 발생하였다.

3-7. 초정입자의 성장

그림. 8에서는 턴디쉬내에서 유지시간에 따른 초정의 미세조직과 그림. 9에 그 크기와 구형도를 나타내었다. 실험은 턴디쉬내에서 5, 10, 15, 20, 25, 30초 유지후 급랭을 하였다. 유지시간이 증가할수록 초정의 크기는 조대해지고 턴디쉬내에서 입상화하면서 성장한다.

3-8. 반응고 strip casting에 의한 Al-6%Si 합금판의 제작 [18]

경사냉각판을 이용하여 strip casting하기 위한 조건은 주조온도 640℃, 냉각판의 각도 60°, 냉각판의 길이를 100mm로 하였다. 그림. 10에서와 같이 롤의 속도는 30~90m/min의 고속도로 박판을 제작하였다. 노즐내의 용탕온도는 약 615~620℃이다. 유동성이 있는 물을

사용함으로써 옹고한 박판을 용탕으로 부터 제조하는데는 무리가 없다.

그림. 11에는 위의 방법으로 제조한 박판의 두께를 나타내었다.

그림. 12에서는 각 조건에 따른 인장강도와 파단연신을 나타내었다. 경사냉각판을 이용하여 주탕하여 반응고상태로 수냉한 것의 조직은 입상화 하고 있고 또, 용탕을 금형주조한 것보다 인장강도와 연신율이 향상됨을 알수 있었다.

4. 결론

최근 선진각국에서 반응고성형기술을 이용한 제품의 실용화를 위하여 집중적인 투자와 기술개발이 이루어지고 있는 실정이다. 이에 반응고용 소재를 제조할수 있는 방법으로 경사 냉각판을 이용함으로써, 경사진 냉각판에 용탕을 통과시킴으로 간단하게 균질미세한 입상의 초정이 생성됨을 입증할수 있었다. 주조온도, 냉각판의 각도 그리고 냉각판과 용탕이 접촉하는 길이를 변화시킴으로써 초정의 크기를 40 μm 대까지 미세화시킬수가 있었다. 이 방법을 반응고성형가공기술에 접목시켜 strip casting으로 박판을 제조한 경우에도 인장강도와 연신율이 향상됨을 알수 있었다.

5. 참고문헌

1. M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young, Mat. Sci. Eng., 25 (1976) 103
2. D. B. Spencer, R. Mehrabian and M. C. Flemings, Metall. Trans., 3 (1972) 1925
3. 木内 學, 日本金屬學會會報, 21 (1982) 687
4. 市川 洵, 鐵 と 鋼, 74 (1988) 51
5. 難波明彦, 市川 洵, 金屬, 79 (1989) 54
6. S. B. Brown and M. C. Flemings, Advanced Mat. & Process 1/93 (1993) 36
7. 김기배, 이호인, 윤의박: 반응고가공용 소재제조기술, 금속학회회보 Vol. 12, No. 2 (1997) 113
8. 박형진, 강충길, 김병민, 최재찬: 반응용단조품의 제조 공정 및 금형설계, 주조, Vol. 19, No. 2 (1999) 50
9. D. G. Backman, R. Mehrabian and M. C. Flemings, Metall. Trans. B, 8 (1977) 471
10. S. D. e. Ramati, G. J. Abbaschian and R. Mehrabian, Metall. Trans. B, 9 (1978) 241
11. C. Y. Chen, J. A. Sekhar, D. G. Backman and R. Mehrabian, Mater. Sci. Eng. 40 (1979) 265
12. V. Laxmanan and M. C. Flemings, Metall. Trans. A, 11 (1980) 1927
13. D. H. kirkwood and P. Kapranos : Proc. 4th Int. Conf. on Semi-solid processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield (1996) 193

14. 엄정필, 장동훈, 이수근, 김득규, 윤병은: 무교반 반고체 금속의 제조기술, 주조, Vol. 17, No. 6 (1997) 538
15. 엄정필, 장동훈, 이수근, 김득규, 윤병은 : 97고액공존금속의 성형기술 심포지움 (1997) 148
16. T. Motegi, K. Kondou, R. Chi, S. Aoyama : SP⁹⁷ Proceedings of the 4th Decennial International Conference on Solidification Processing (1997) 14
17. Atsumi Ohno: The Solidification of Metals, Japan (1976)
18. T. Haga, S. Yamamoto : 일본 경금속학회 춘계대회 강연 개요집 (1998) 15

표 1. 수평형 연속주조와 수직형 연속주조의 비교

	합금 종류	주조온도	냉각판의 길이	냉각판의 각도	조정 α 의 크기	고상율
수 평 형	AC4C	624℃	160mm	60°	47 μ m	60~70%
수 직 형	AC4CH	630℃	200mm	50°	53 μ m	60~70%

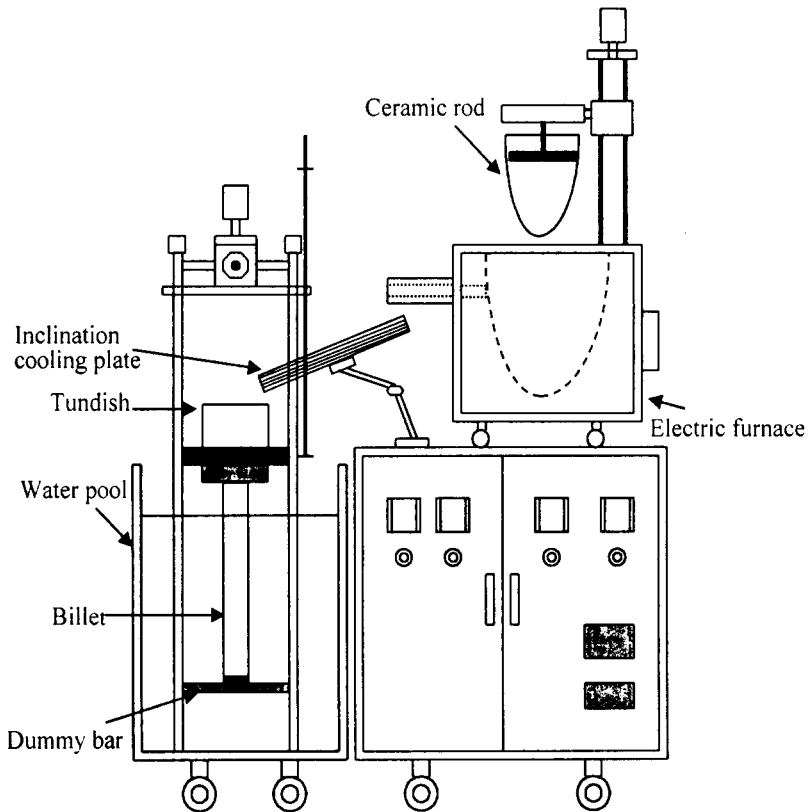
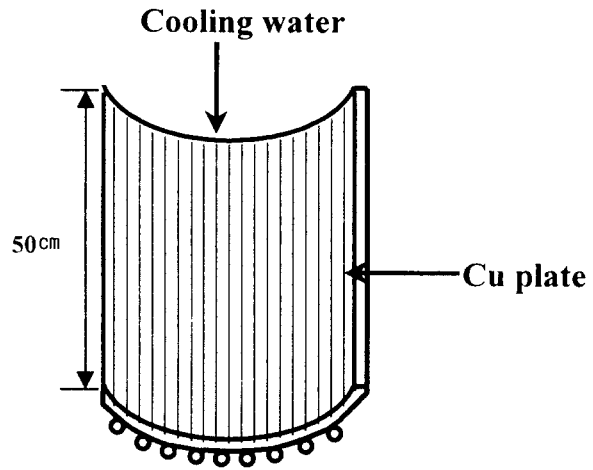
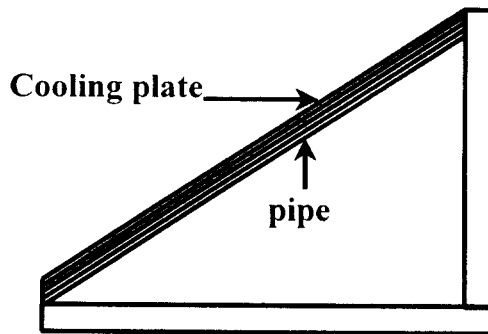


그림 1. 수직형 연속주조장치



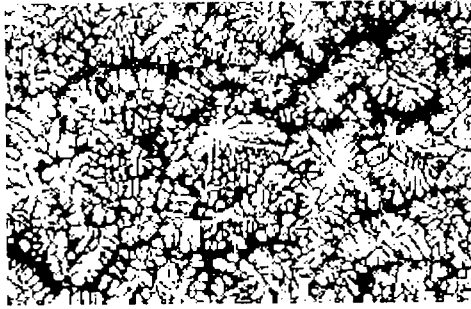
(a)



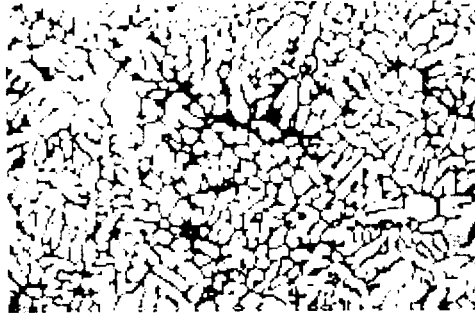
(b)

그림. 2. 냉각판의 형상

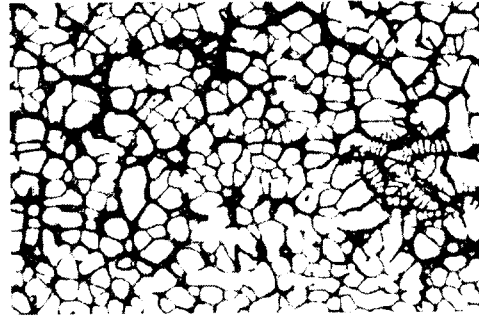
(a) front view (b) side view



(a)



(b)



(c)

그림. 3. 미세조직의 비교

(a) 금형주조법 (b) 전자교반법 (c) 경사냉각관법

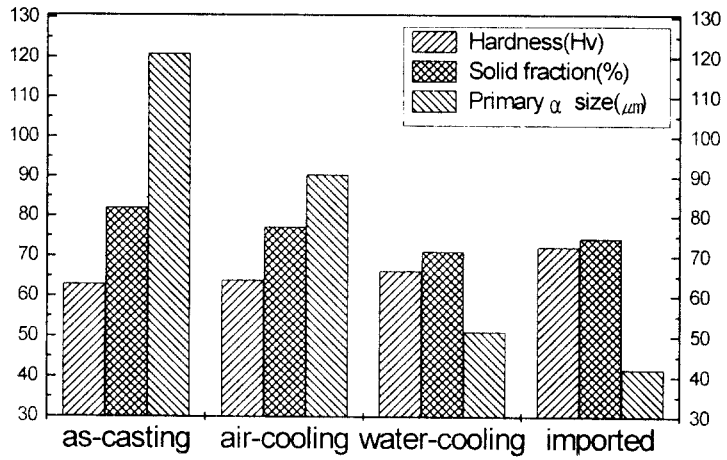


그림. 4. 냉각조건에 따른 비교

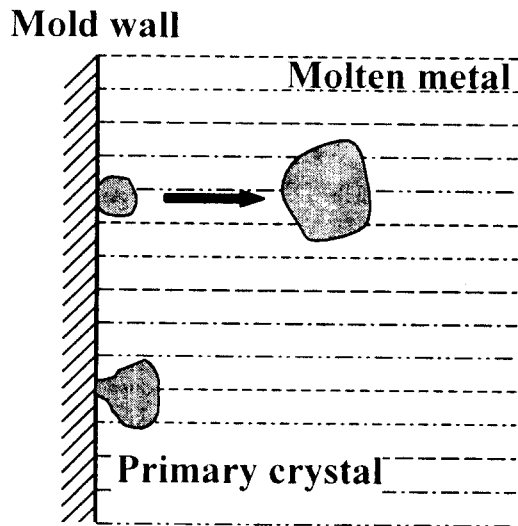
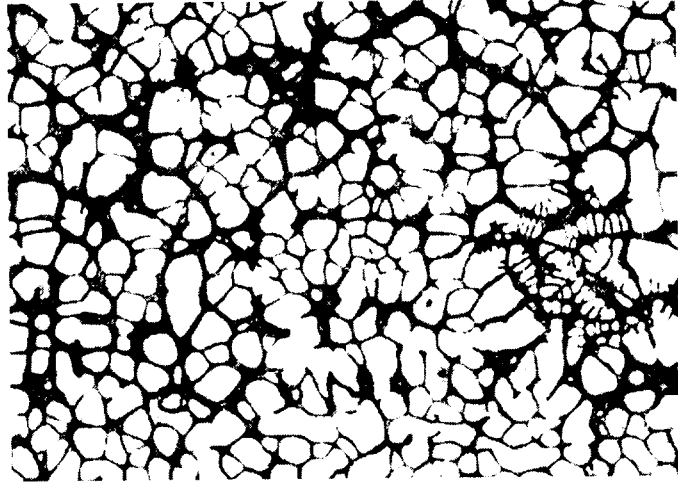
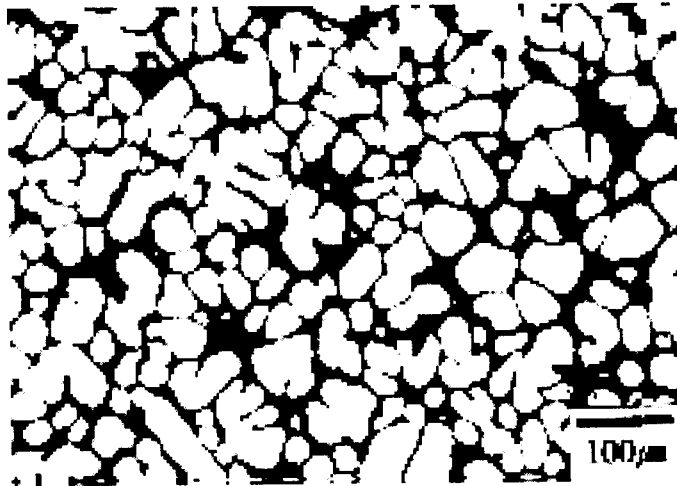


그림. 5. 주벽면상에서 결정의 유리



(a)



(b)

그림. 6. 냉각판을 이용한 수평형연속주조와 수직형연속주조의 비교
(a) 수평형 (b) 수직형

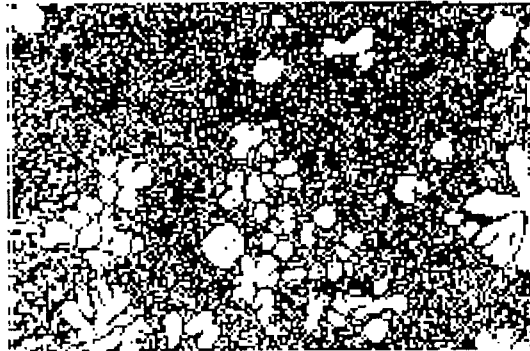


(a)

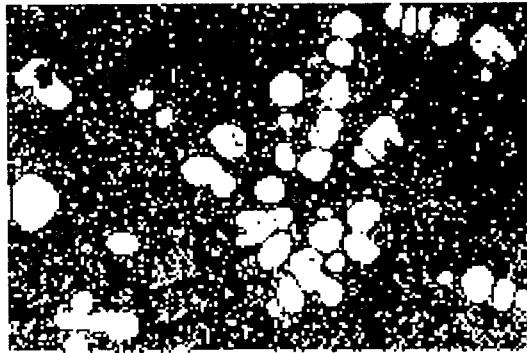


(b)

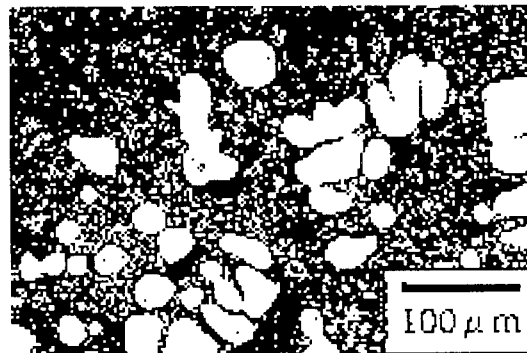
그림. 7. 냉각판상에서의 슬러리의 형상
(a) B.N도포하지 않음 (b) B.N도포



(a)



(b)



(c)

그림. 8. 텀디쉬내 유지시간에 따른 미세조직 변화

(a) 5min (b) 15min (c) 25min

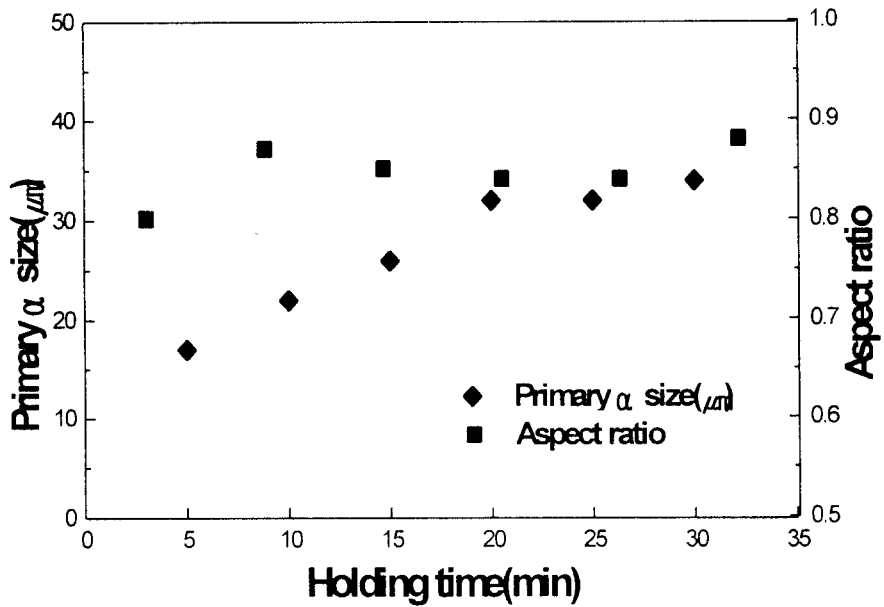


그림. 9. 텀디쉬내 유지시간에 따른 초정 α 의 크기 및 구형화도의 변화

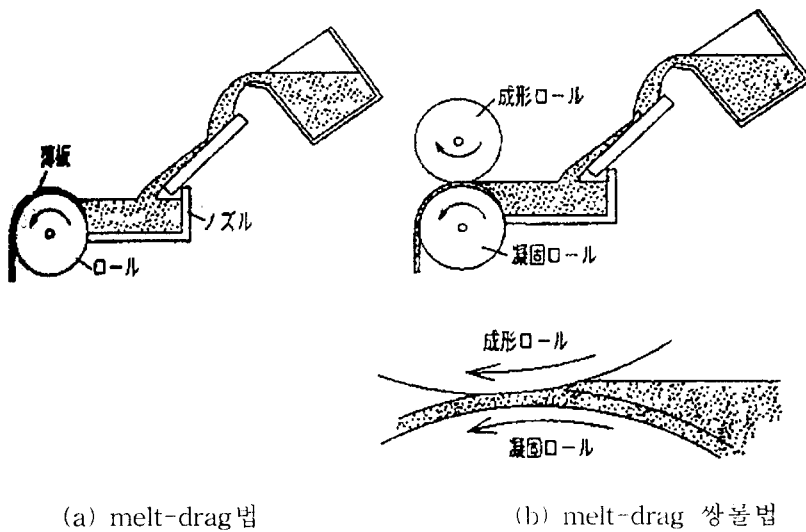


그림. 10. 경사냉각관을 이용한 melt-drag법과 melt-drag 쌍롤법

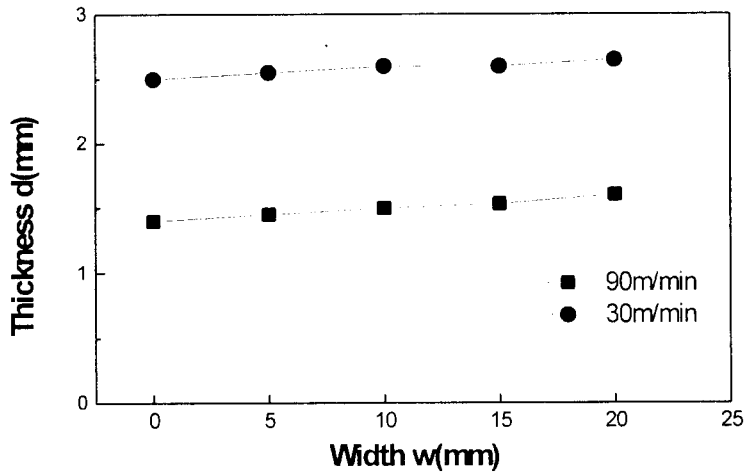


그림. 11. 박판의 두께 분포(melt-drag 쌍롤법)

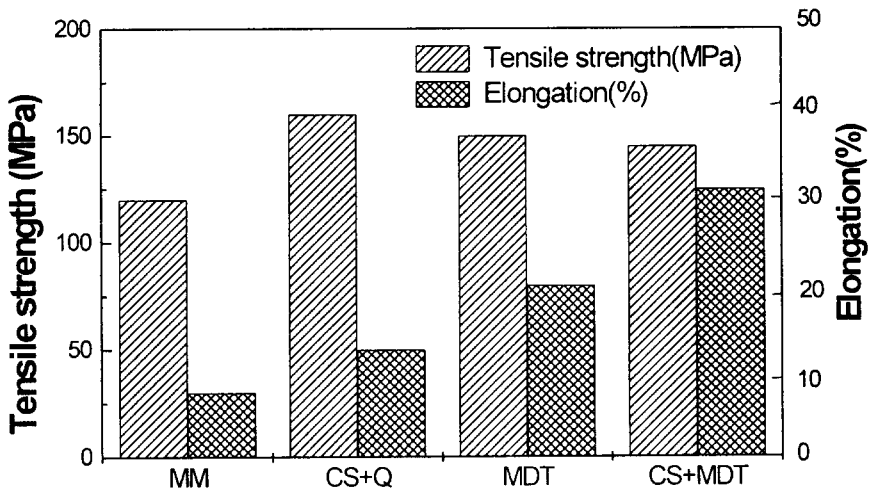


그림. 12. 기계적 성질의 비교

MM : 금형주조, CS+Q : 경사냉각판 사용, 반응고상태에서 수냉,

MDH : melt-drag 쌍롤법, CS+MDT : 냉각판을 이용한 melt-drag 쌍롤법