

技術資料

## 가열주형식 연속주조법

임수근, 허보영

### Continuous Casting with Heated Mold

S. G. Lim and B. Y. Hou

#### 1. 서 론

금속의 주조시에 발생하는 결함은 주조금속이 그대로 주물로서 사용되는 경우는 물론이며, 소성가공, 열처리 등을 하는 주괴에 있어서도 최종가공공정까지 재료에 남아서 제품의 성능, 신뢰성 등을 해치는 큰 원인이다. 특히, 용질편석, 기포, 수축공 등은 일단 형성되면 어떠한 방법으로도 완전히 제거하는 것은 어렵다. 따라서 주조결함이 발생하지 않는 새로운 주조법의 개발은 금속재료의 고성능화, 고기능화에 극히 중요하다고 생각된다.

주괴의 내부결함의 발생을 방지하기 위하여 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔으며, 이것을 대별하면, 미세한 결정을 다수 생성시켜 균질한 응고조직을 얻는 방법, 이것과는 반대로, 다수 결정의 생성을 억제하여 단결정 조직을 얻는 방법으로 나눌 수 있다.

전자의 응고조직의 미세화법으로는 주조시에 주형의 진동 또는 용탕을 교반하는 방법[1-3], 용탕에 결정립 미세화제를 첨가하는 방법[4,5] 등이 있다. 후자의 단결정 조직 또는 일방향 응고조직의 주괴 제조법에는, 주형을 사용하지 않고 용탕에서 주괴를 직접 끌어 올리는 Czochralski process[6], 주형 내에서 용해하여 일방향 응고시키는 Bridgman process[7], 가열주형을 사용한 연속주조법의 OCC process[8,9] 등이 있다.

Czochralski process와 Bridgman process는 내부결함 및 결정입계가 없는 단결정 조직의 주괴 제조가 가능하며 반도체용의 Si 단결정, 젯트 엔진용의 turbine blade 등의 제조에 이용되고 있

다. 그러나, 이러한 방법으로 제조된 주괴는 재료의 조성, 주조 가능한 치수 및 형상 등에 많은 제약이 있으며, 또한 응고에 긴 시간이 필요하여 생산성이 극히 낮기 때문에 대단히 고가의 제품이 된다. 이 때문에 이들의 방법으로는 일부 특수한 기능재료의 제조에 주로 사용되며, 구조재료의 제조에는 극히 미미하게 이용되고 있다. 따라서 금속재료의 품질을 향상시키기 위해서는 주괴의 고품질화 뿐만 아니라 생산성이 높은 방법이 필요하다. 최근 Czochralski process에 냉각장치를 설치하여, 생산성을 높인 無鑄型 連續鑄造法[10]이 연구되고 있으나, 주괴의 치수 및 형상 또는 표면상태 등의 문제로 인해 실용화에는 도달하지 못하고 있다.

千葉工業大學의 大野篤美 박사는 자신의 등축정(equiaxed crystal)생성의 응고이론인 「결정유리설」[11]을 응용하여 고기능, 고성능 금속재료 제조법인 가열주형식 연속주조법 즉, OCC process(Ohno Continuous Casting process)를 개발하여 제품의 실용화가 이루어지고 있다. 본 해설에서는 이 프로세스의 원리, 방식, 소재특성 및 개발동향을 간략히 소개하고자 한다.

#### 2. OCC process의 원리

OCC process는 종래의 연속주조에서 사용하는 냉각주형 대신에 주조금속의 응고온도(액상선온도) 이상으로 가열한 주형을 이용하여 주형의 벽면에서의 용탕의 응고를 방지하는 것이 특징이다. 그림 1은 이 방법과 종래의 연속주조법의 원리를 비교한 것으로서 (a)와 같은 종래의 연속주

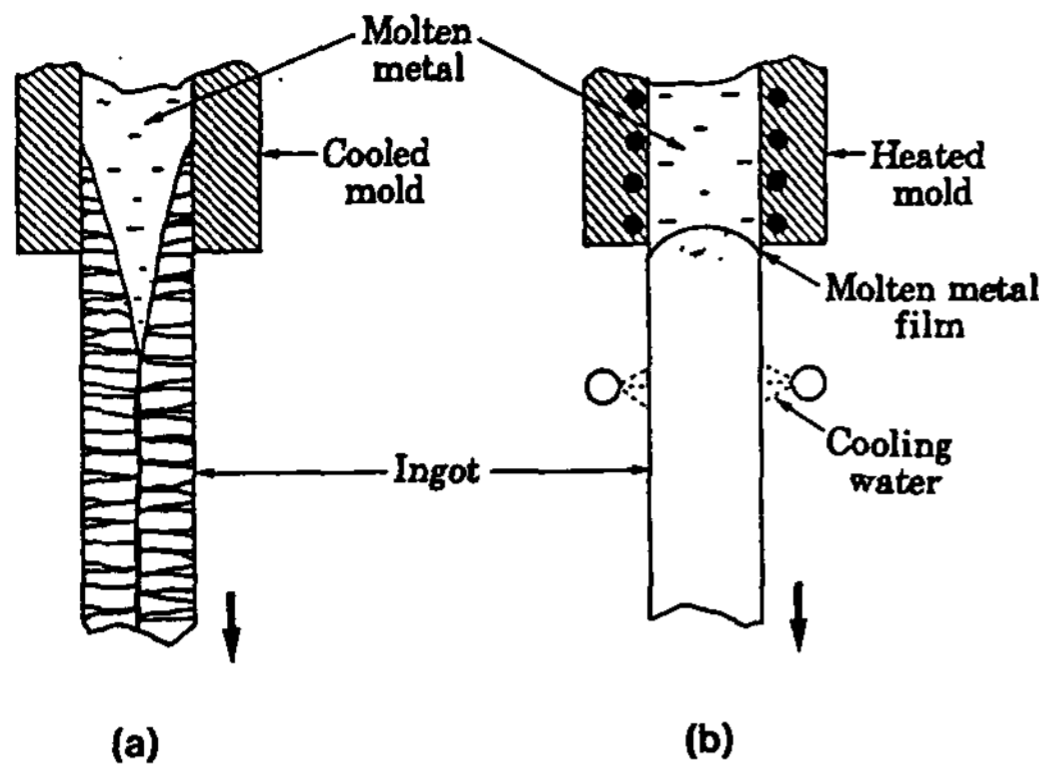


그림 1. Comparison of conventional casting process and the OCC process.

조에서는 냉각주형내에 용탕을 공급하여 주형벽에서 응고를 진행시켜, 용탕의 break out이 일어나지 않도록 주형내에서 응고층을 형성시킨 후 주괴를 주조하는 방식을 취하고 있다. 반면에 OCC process는 (b)와 같이 종래의 연속주조에 사용되는 냉각주형 대신에 가열주형을 이용하여 용탕이 접하는 주형 벽면의 온도가 항상 용탕의 응고 온도 이상으로 되도록 유지함으로써 주형면에서의 결정의 핵생성을 저지하여 주괴를 주형의 밖에서 냉각하기 때문에 주괴 표면은 완전히 응고된 상태가 아니고 얇은 용탕막으로 피복된 상태이다. 그러므로 하향식 및 수평식 연속주조법에 이 process를 응용하기 위해서는 주형 출구끝에서 용탕의 break out가 어떻게 방지할 것인가가 대단히 중요한 점으로 생각된다.

용탕의 break out을 방지하기 위해서는 주형 출구에 걸리는 용탕압력을 되도록 낮게 하고, 주괴표면의 응고계면 위치를 주형출구 끝으로 하여 주형출구 외에서의 용탕 부분을 되도록 작게 하는 것이 필요하다. 응고계면 위치는 주형온도, 냉각조건, 주조속도 등을 정밀하게 제어함으로써 일정하게 유지될 것으로 생각된다. 그러나 주형출구에 걸리는 용탕압력은 주괴의 주조방향, 주형의 설치 등에 크게 영향을 받기 때문에 주조장치의 설계단계에서부터 고려하여야 한다.

### 3. OCC process의 방식

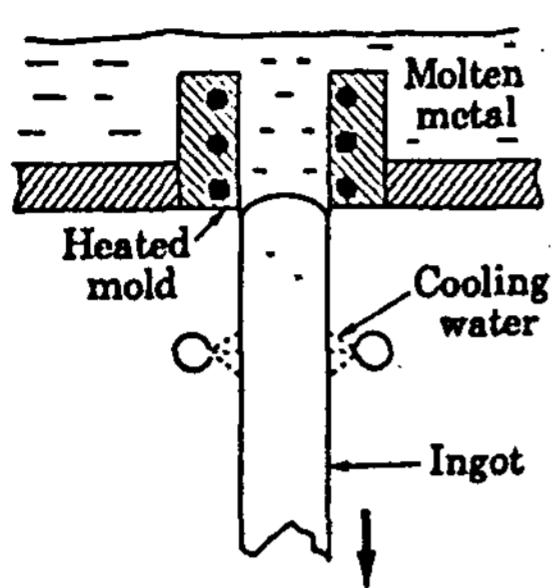
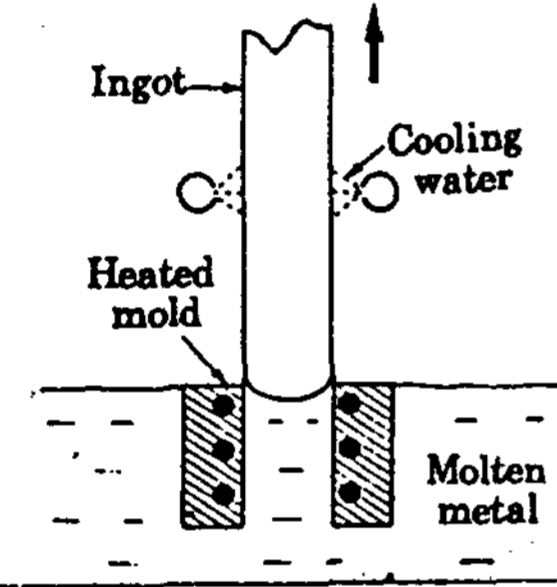
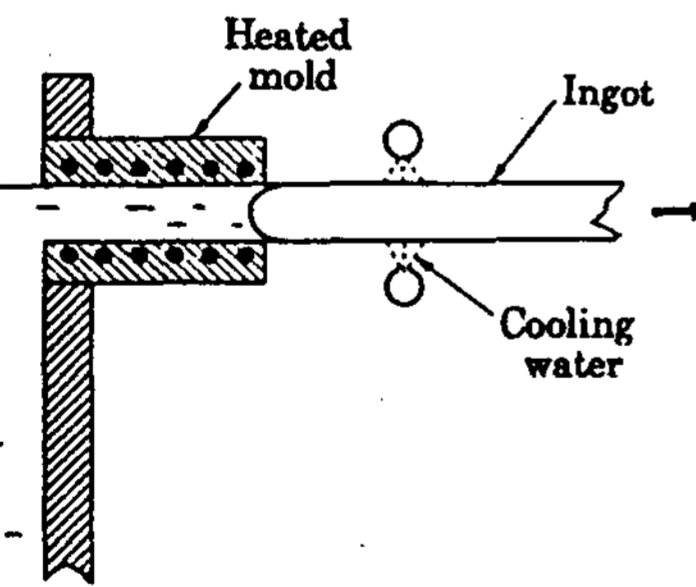
OCC process에는 주조방향이 서로 다른 하향

식, 상향식 및 수평식의 3방식이 있으며, 표 1은 각각의 특징을 나타낸 것이다[12]. 하향식 OCC process는 수직으로 설치한 중공의 가열주형의 상부에서 용탕을 공급하여 하부로 주괴를 주조하는 연속주조법이다. 이 방식은 주형하단에서 용탕이 유출되는 break out가 일어나기 쉽고, 이것을 방지하기 위해서는 주형내 용탕의 용탕면 높이를 낮게 하며 주형하단에 걸리는 용탕압력을 낮추며, 또한 주괴의 진동, 주형내 용탕의 탕면 높이 및 주형온도의 급격한 변화를 방지하기 위하여 정밀한 주조조건이 제어 필요하다.

상향식 OCC process[13]는 용탕의 break out를 일으킬 위험이 없이 주괴를 연속주조하는 방식으로서, 가열주형의 상단이 용탕유지로의 탕면과 거의 같은 높이로 되도록 침적하여 주괴를 위로 주조하는 방식이다. 그러나 이 방식은 주조장치의 구조적인 문제로 설치위치, 주괴가이드의 위치조절이 어려우며 용탕도가니와 냉각위치가 가깝기 때문에 열영향으로 인해 주괴의 냉각이 방해되며 또한 주형 바로 위에서 주괴를 직접 물로 냉각하는 것이 어렵기 때문에 빠른 속도의 주조는 어렵다. 상향식 OCC process의 냉각장치는 다른 방식의 장치보다 구조가 복잡하기 때문에 주괴를 직접 수냉할 수 있는 위치가 주형 상단에서 어느 정도 떨어져야 하는 단점이 있다. 또, 냉각수를 밀어 올리기 위해서 주괴에 공기를 불어주기 때문에 주괴표면이 요철 및 단면 형상변화에 의해 주괴가 진동을 받기 쉬운 문제점이 있다. 이러한 문제점은 그림 2와 같이 가열주형과 용탕도가니를 분리한 방식을 취하면 해결될 것이다.

수평식 OCC process는 주괴를 수평방향으로 연속주조하는 방식이다. 이것은 가열주형을 용탕유지로 측벽의 용탕면 바로 아래에 수평으로 설치하여 주형출구 하단에 걸리는 용탕압력을 낮게 함으로써 용탕의 break out를 억제하는 방식이다. 이 방식은 횡방향으로 유지로, 주형, 냉각장치, 주괴인출기 등이 배치되기 때문에 장치설계가 간단하며 주조조건이 제어가 용이하다고 할 수 있다. 안정한 주조를 위해서는 주형을 주조급속의 응고온도 이상으로 가열, 유지하는 것은 물론이며, 주조속도의 정밀제어, 용탕면의 높이제어, 주괴가이드의 위치 및 냉각위치의 조절이다.

표 1. 3 types of OCC process.

방 식	특 징
 <p>하향식 OCC process</p>	<p>장 점</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 주괴에 가스, 불순물이 혼입안됨.</li> <li>2. 균일한 냉각이 가능.</li> <li>3. 주물의 치수제한이 없다.</li> </ol> <p>단 점</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 장치설계가 어렵다.</li> <li>2. break out의 위험성 높다.</li> </ol>
 <p>상향식 OCC process</p>	<p>장 점</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 주물의 치수제한이 없다.</li> <li>2. break out의 위험성이 없다.</li> <li>3. 주조의 온도제어가 용이</li> </ol> <p>단 점</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 주괴에 가스, 불순물이 혼입되기 쉽다.</li> <li>2. 냉각수가 용탕내 또는 주형위에 낙하할 위험성이 있다.</li> </ol>
 <p>수평식 OCC process</p>	<p>장 점</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 장치설계가 쉽다.</li> <li>2. 주형의 온도제어가 쉽다.</li> </ol> <p>단 점</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 주조물의 치수제한이 있다.</li> <li>2. 주괴에 가스, 불순물이 혼입되기 쉽다.</li> <li>3. 냉각이 불균일하기 쉽다.</li> </ol>

이 장치는 가열주형을 용탕도가니로부터 떨어진 위치에 설치되어 있기 때문에 주형온도는 도가니의 온도의 영향을 받지 않고, 또 주형의 발열체 용량을 조절하여 주형온도를  $\pm 2 \sim 3^{\circ}\text{C}$  유지할 수 있다. 냉각은 주괴와 냉각수의 각도를 조절하

여 주형으로 냉각수의 유출을 방지할 수 있다. 따라서 본 방법은 주형온도, 주조속도의 제어가 용이하며 주형출구에 가까운 위치에서 냉각수로서 주괴를 직접 냉각할 수 있기 때문에 비교적 빠른 속도로 연속주조가 가능하다.

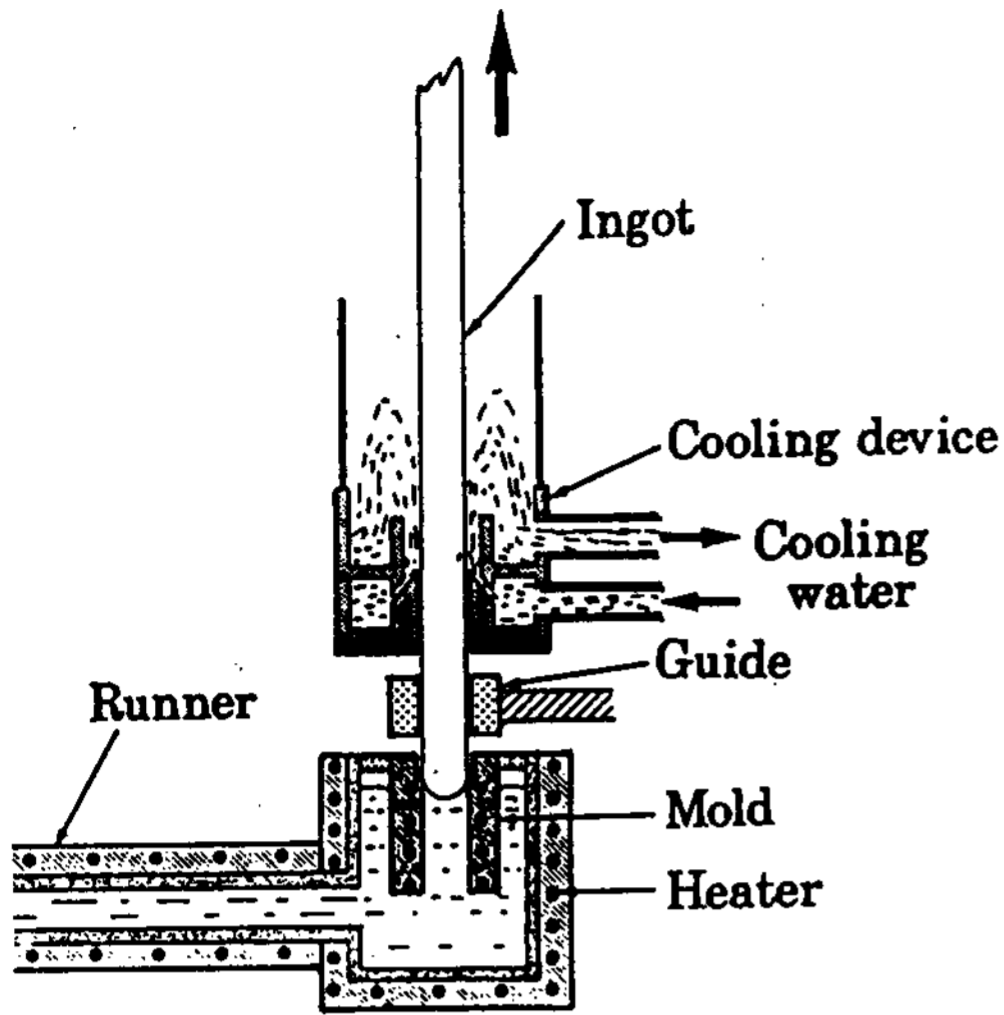


그림 2. Schematic diagram of the upward OCC equipment.

이상과 같이 OCC process는 통상의 연속주조법의 1차 냉각에 상당하는 주형에서의 냉각은 전혀 일어나지 않고 오히려 주형으로 용탕을 가열하고 있기 때문에 응고는 전부 주형출구 끝의 외부에 설치한 냉각장치에 의존할 수 밖에 없다. 따라서 주괴의 주조속도, 다시 말하면 용탕의 응고속도를 빠르게 하기 위해서는 냉각장치에 의한 주괴의 냉각효과를 높일 필요가 있다. 이 때문에 냉각은 물로 하며 가열주형의 출구에서 되도록 가까운 위치에서 효율높게 냉각하여야 한다. 그러나 냉각장치에서 조금이라도 냉각수 또는 수증기가 주형쪽으로 유출되면 이들이 가열주형의 출구 끝에 접촉하여 주형온도를 저하시키는 원인이 된다. 그리고 주형온도 저하에 의해 주형과 주괴가 고착되어 연속주조가 불가능하게 된다. 이러한 점 때문에 냉각수 또는 수증기가 주형쪽으로 유출되는 것을 완전히 방지할 수 있는 장치를 고안하여야 한다.

최근에 OCC process를 개량하여 그림 3과 같은 OSC(Ohno Strip Casting) process[14]를 개발하여 스트립의 연속주조를 실용화하기 위한 연구개발이 활발하다. 또, 코어가 내재된 clad재를 연속주조하여 코어 및 clad가 일방향 응고 조직으로 된 주괴를 그림 4와 같은 방법으로 제조 가능하다[15].

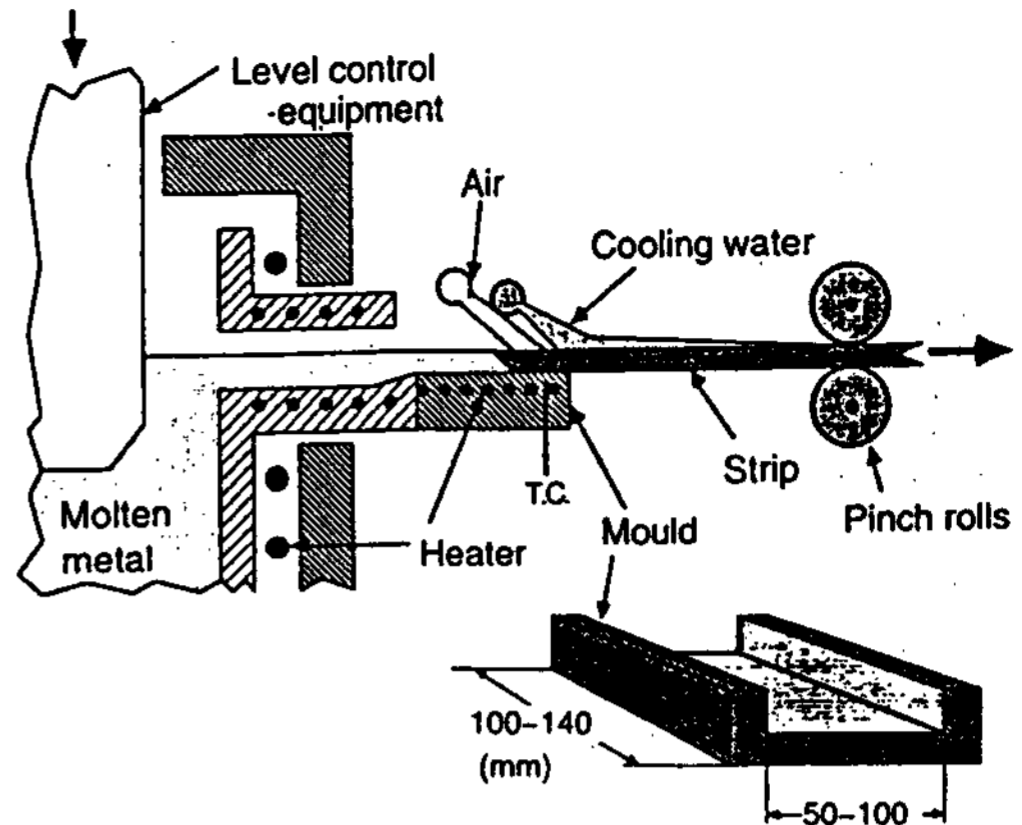


그림 3. Schematic diagram of the OSC equipment.

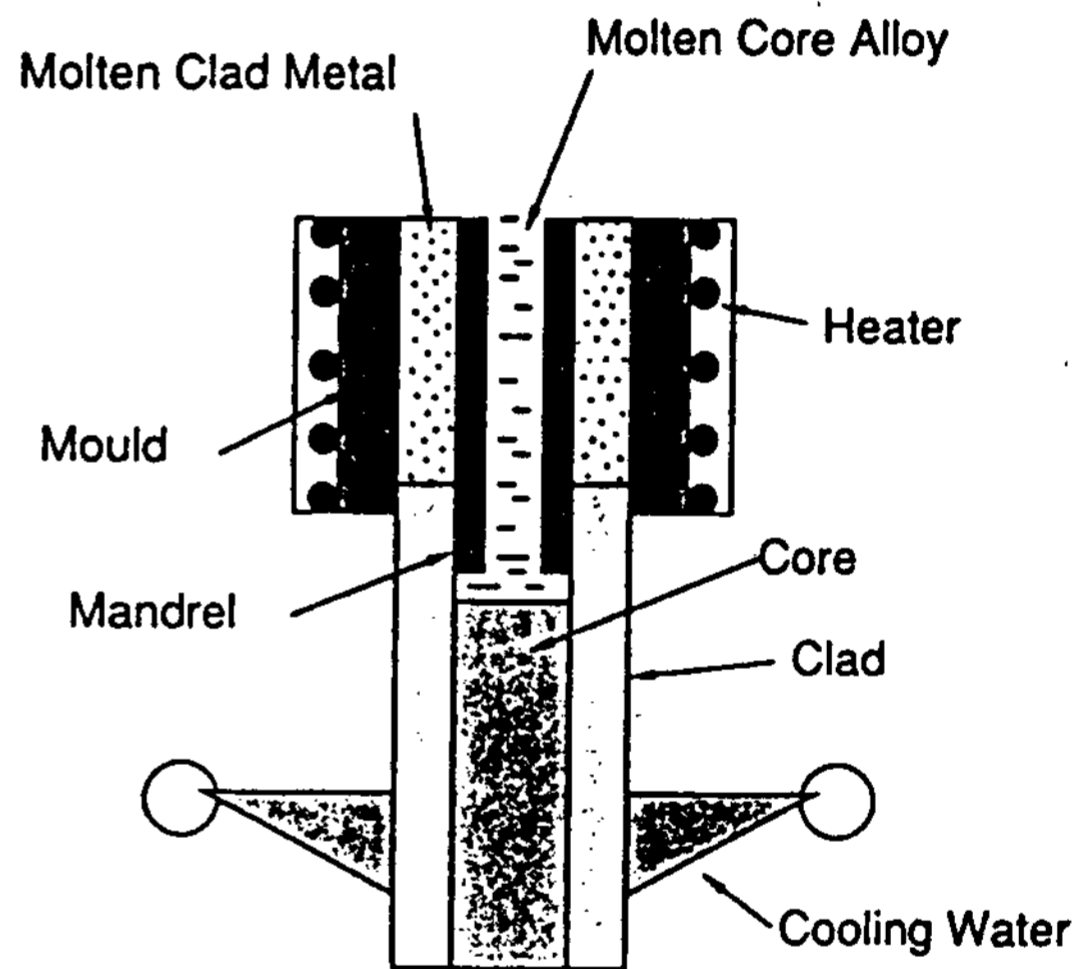


그림 4. Schematic of double-channel mold for cored rod.

#### 4. OCC process에 의한 소재의 특징

##### 4.1 Net shape casting process이다.

주괴와 주형내 벽면과의 마찰이 없기 때문에 0.5mm 정도의 소경 또는 박육의 미려한 표면의 주괴를 얻을 수 있다. 그림 5는 표면 및 내면이 미려한 8mmφ의 복잡 단면형상을 관이다[12]. OCC process는 Net shape casting process[16]로써 소성가공이 곤란하였던 합금 또는 화합물 등의 선, 판, 관의 제조가 가능하므로 에너지 절약형의 제조법이라고 할 수 있다.

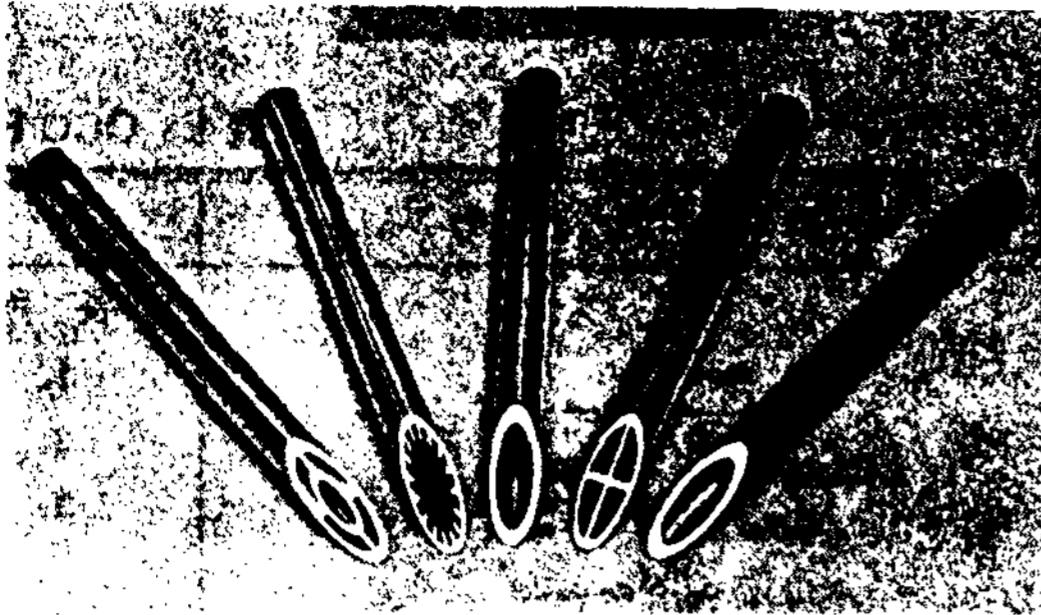


그림 5. A complicated section of tube type.

4.2 표면이 평활미려한 주괴를 얻을 수 있다.

주형내부면이 응고온도 이상으로 유지되기 때문에 주형에서 나온 주괴의 표면은 얇은 액막으로 피복된 상태이며 그 액막은 주형의 바로 바깥에서 응고되기 때문에 그림 6과 같이 표면이 매려하다[6].



그림 6. 15mmφ aluminum wire by OCC process.

4.3 단결정 제조가 용이하다.

주괴 dummy의 끝부분에 생성된 결정은 경쟁성장하여, 결정 우선 성장방향이 주조방향에 가까운 것을 남기고, 다른 결정은 차츰 소멸하여 단결정으로 된다. 그 예를 그림 7에 나타낸다. 이와 같이 OCC process에서는 핵생성이 일어날 주형벽이 응고온도 이상으로 가열되어 있기 때문에 응고진행중에 새로운 결정이 핵생성할 기회가 없어져서 결정은 경쟁성장에 의해 자연적으로 단결정으로 된다. 이와 같이 하여 얻어진 알루미늄 및 동의 단결정선은 그림 8과 같이 오디오, 비디오용 signal cable[17,18]로서 널리 이용되고 있으며, 또 알루미늄 결정판은 sputtering target 재료로서 주목받고 있다.

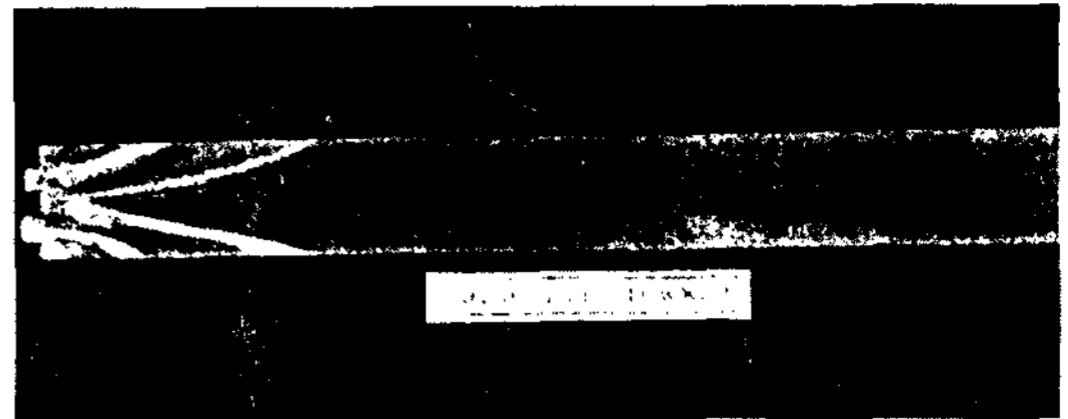
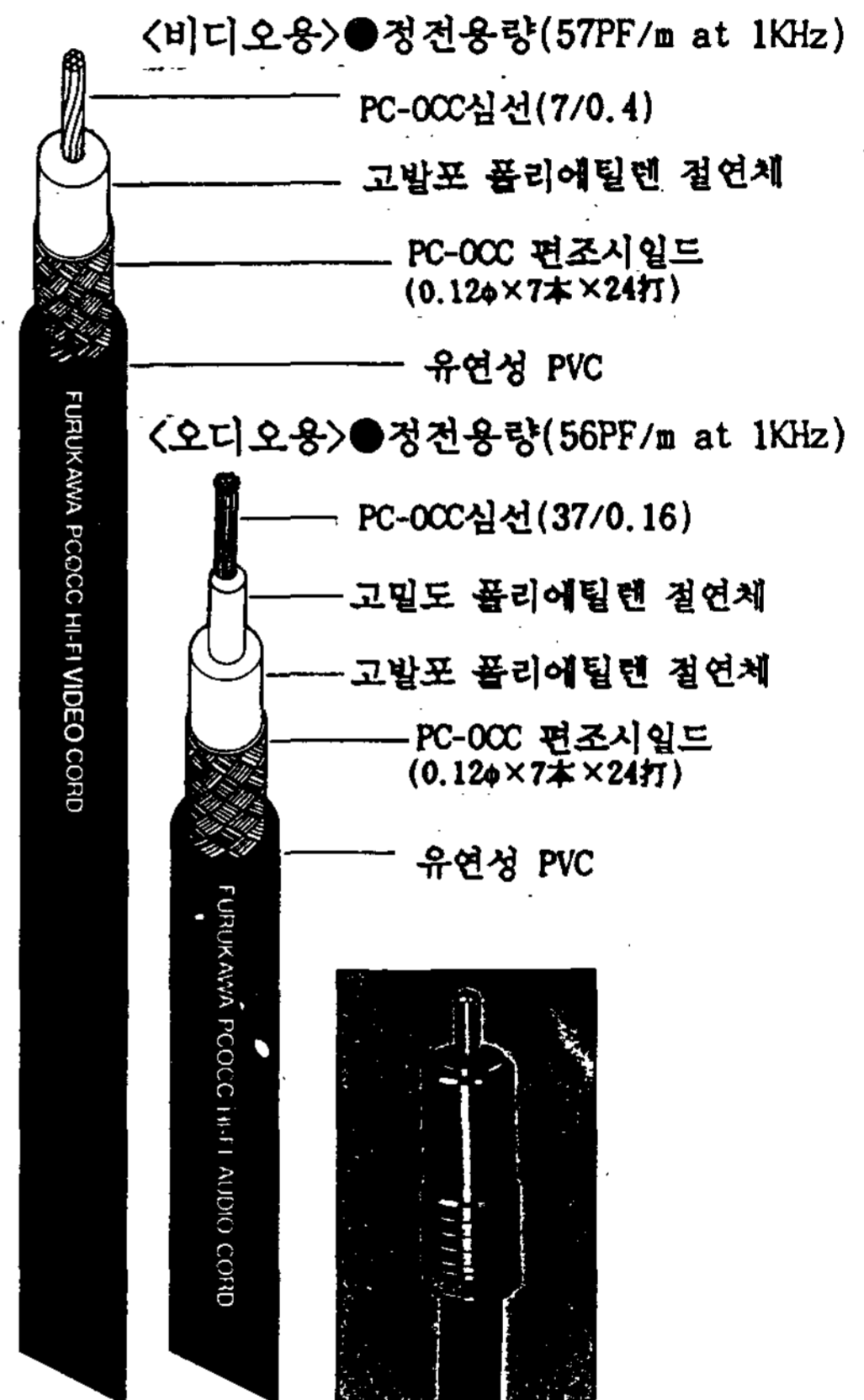


그림 7. The formation of a single crystal.



PC-OCC: Pure copper by Ohno continuous casting process의 약어

그림 8. Signal cable for audio and video.

4.4 가공성이 대단히 우수하다.

그림 9는 전자제품의 직접회로에 이용되고 bonding wire로서 실온에서 20mmφ의 Al-1%Si 주괴를 25μmφ의 와이어로 인발한 것이다.[10, 16] 또한 전자공업에 없어서 안될 IC용의 연납 재료의 제조에는 내부결함 없는 것은 물론이며 세선으로 가공하기 위해 소성가공성이 우수한 소

재가 요구된다. 납땜재료 중에서 연납인 Sn-Zn 계 합금은 연납특성이 우수한 것이 알려져 있으나 가공성이 나쁘기 때문에 세선 또는 박막으로 제조하기 힘들어서 실용화가 되어있지 않았으나, OCC process에 의해 제조한 주괴는 그림 10과 같이 가공성이 아주 뛰어나므로 반도체와 기판의



그림 9. 25 $\mu$ m Al-1%Si alloy wire drawn down from 20mm $\phi$  billet without intermediate annealing.

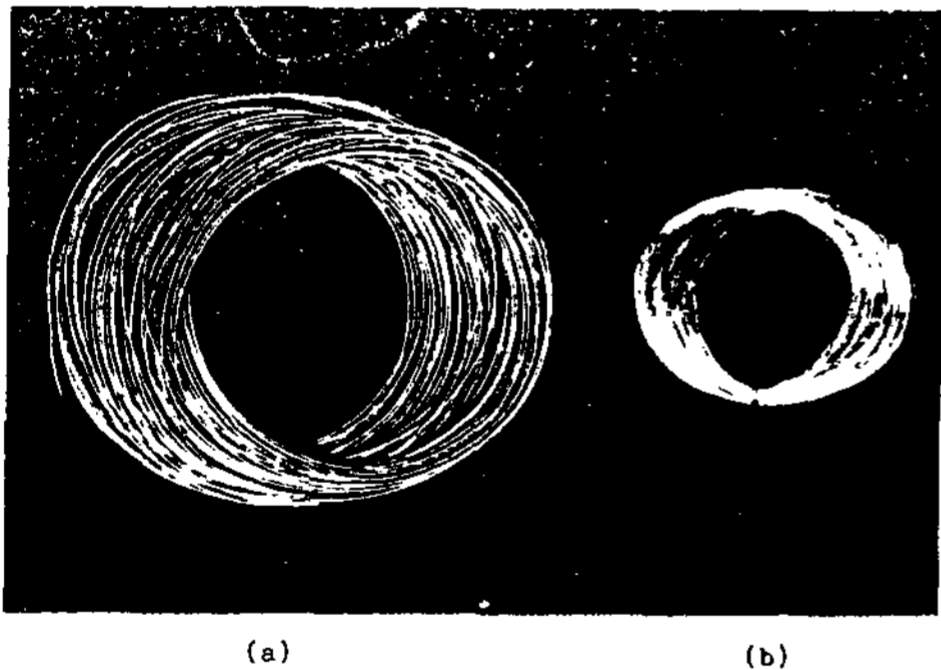


그림 10. (a) Single crystal of 4mm $\phi$  Sn-30%Zn cast wire (b) 0.1mm $\phi$  wire of same alloy drawn directly from 4mm $\phi$  cast wire

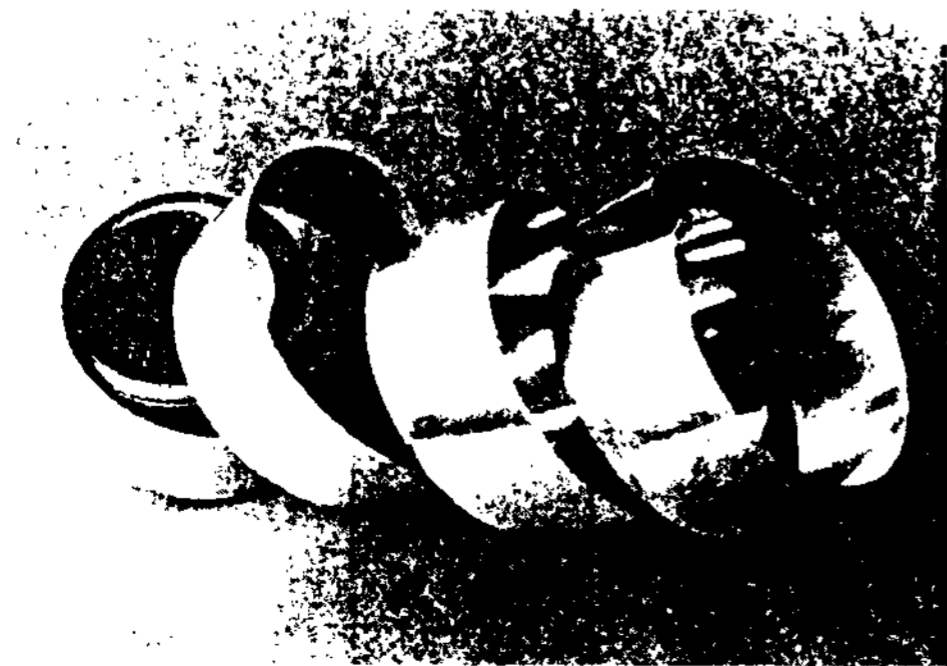


그림 11. Pure magnesium foil 0.05mm in thickness.

접착용 박막 납땜재료로서도 유망하다[19].

또 두께 5mm의 인칭동판을 100 $\mu$ m로 냉간압연도 가능하다. 그림 11은 순 Mg호일(0.05mm)이며[19], 그림 12는 스피커용 Dome형 진동판[12]으로서, 가공성이 우수함을 알 수 있다.

4.5 편석을 저하시킨다.

그림 13의 (a)는 금형에 주조한 160mm $\phi$ 의

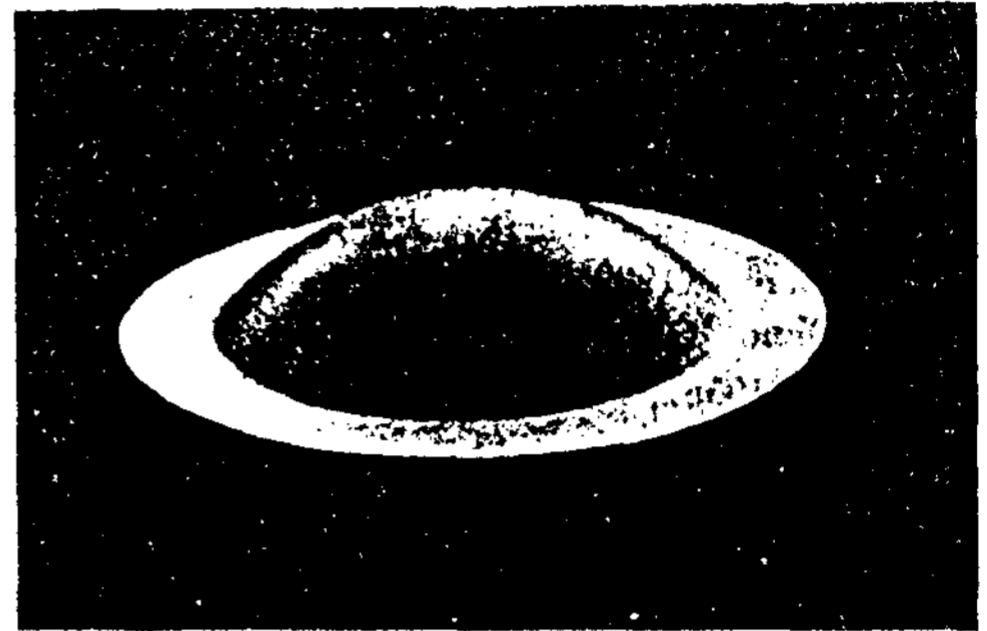


그림 12. Pure magnesium speaker diaphragm formed from foil of 0.05mm in thickness.

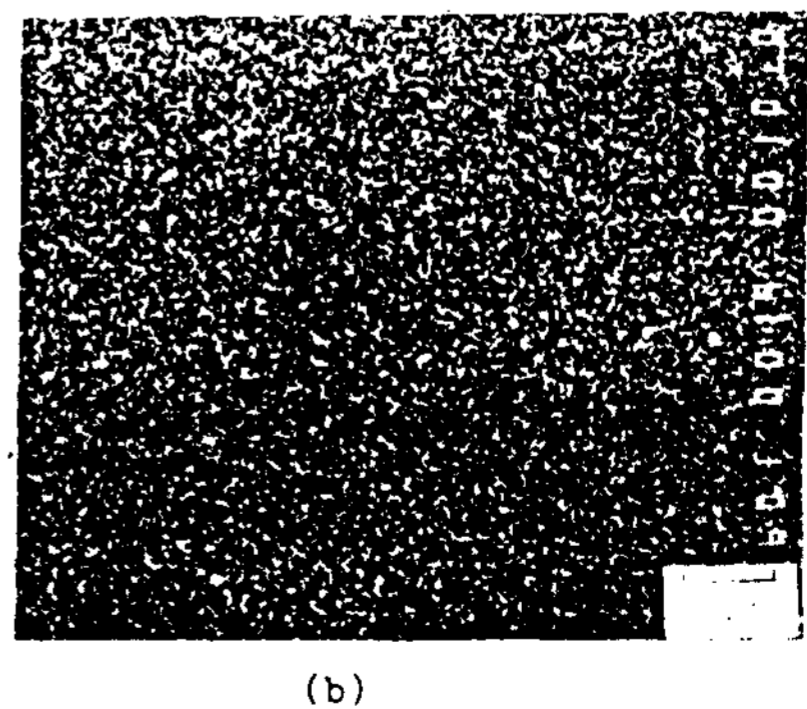
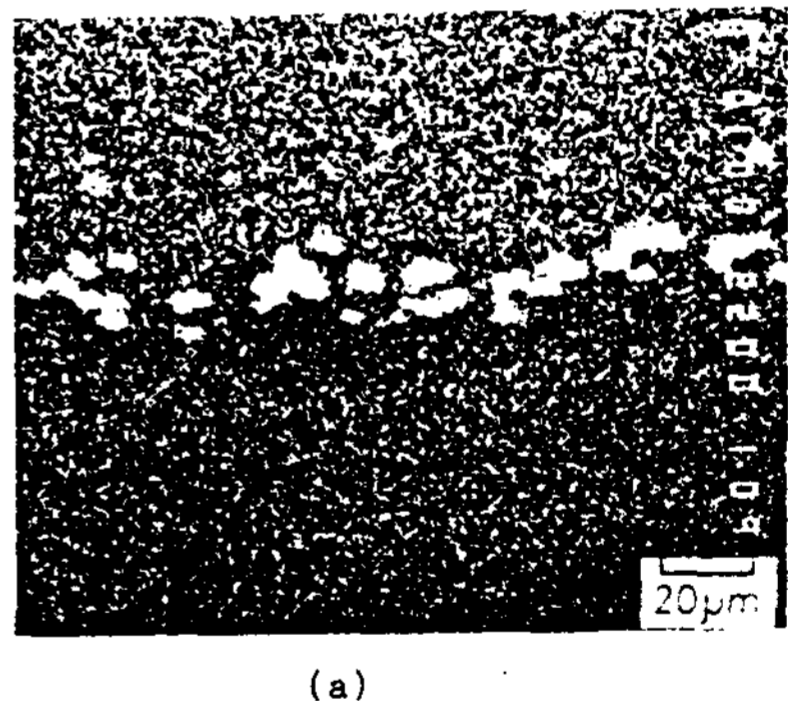


그림 13. Examination of segregation of Al in AZ31 alloy by EPMA.  
(a) cast conventionally extruded  
(b) directly cast



AZ31 Mg합금을 6mmφ로 압출했을 때의 (b)는 OCC process에 의한 6mmφ로 주조했을 때의 Al의 분포 EPMA로 분석한 것으로서 (b)가 균질한 조직임을 알 수 있다[19].

4.6 내식성이 개량된다.

그림 14 참조[20].

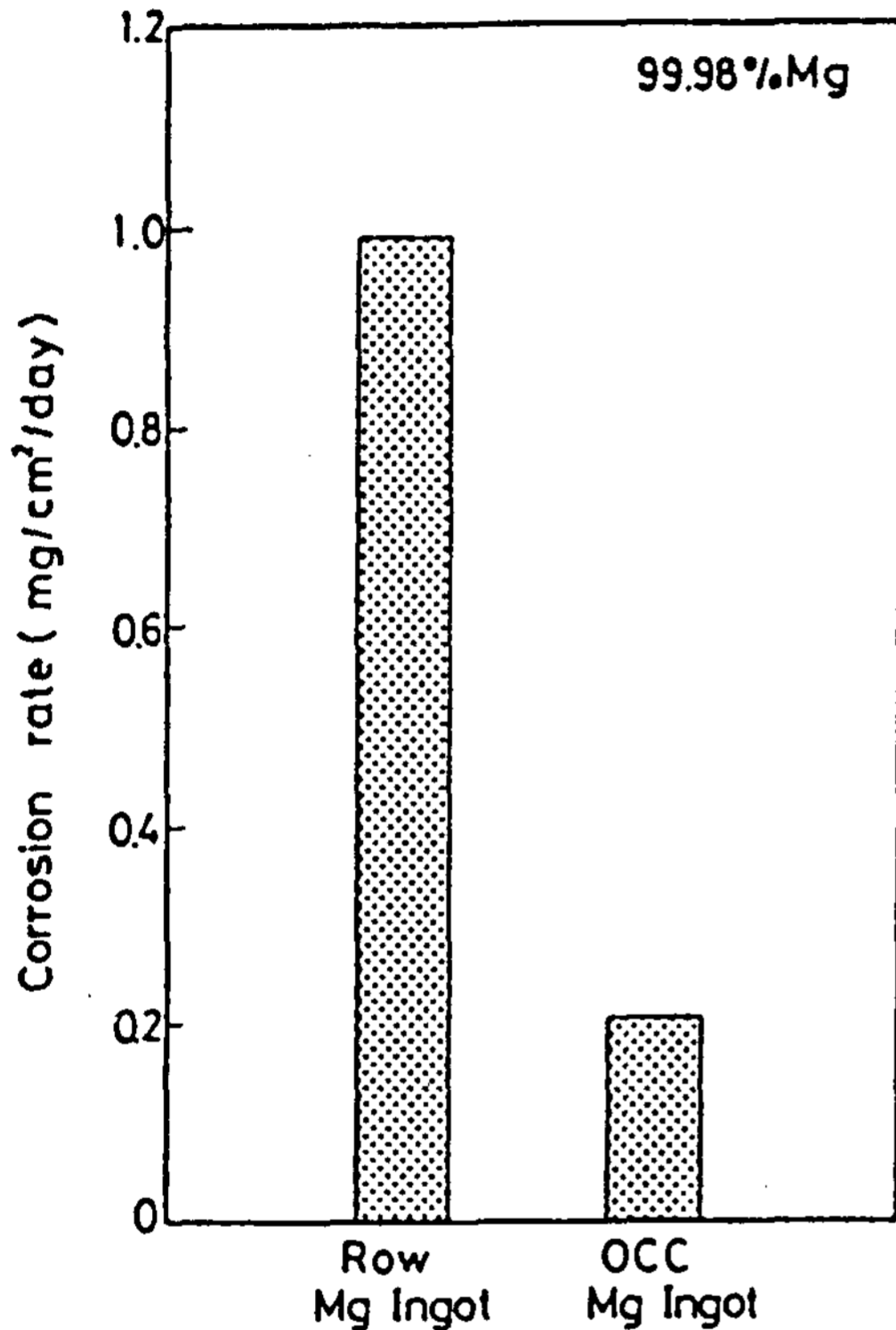


그림 14. The result of 5% salt solution spray test of pure magnesium.

4.7 피로강도가 높다(그림 15) [20].

이상과 같이 OCC process를 이용하여 고부가가치성의 제품이 실용화되고 있고, 스테인리스강, stellite, permalloy 등의 고융점 합금제조에도 많은 연구가 이루어지고 있으며 앞으로도 많은 제품이 개발될 것으로 예상된다.

5. 결 언

大野박사가 자신의 결정유리설을 응용하여, 주형을 가열하여 주형벽에서 결정이 생성 유리하지

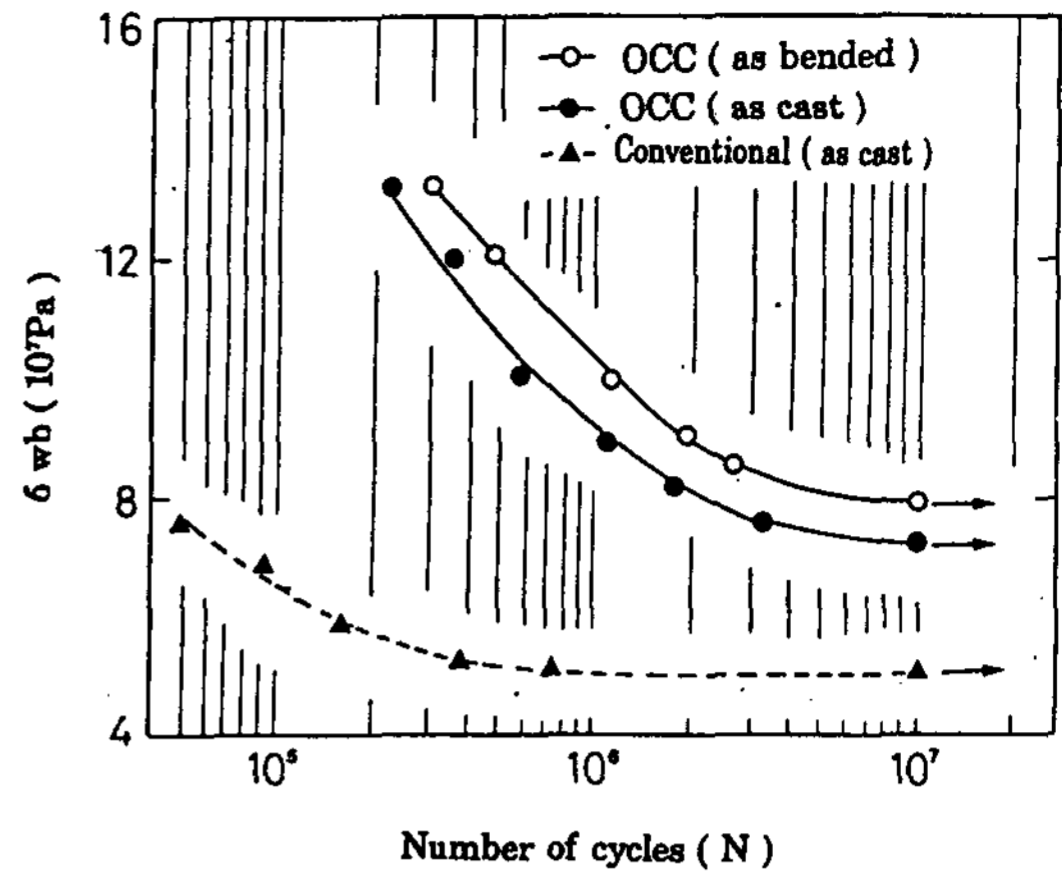


그림 15. Relationship between  $\sigma$  and cycles of Al-4.5wt% Mg alloy.

않도록 하여 단결정을 제조하는 방법인 OCC process의 원리, 방법, 특징 등을 기술하였다.

OCC process의 발전 가능성은 소단면의 주괴를 연속적으로 제조가능할 뿐 아니라 표면상태가 양호하기 때문에 net shape process로서 종래, 취약하여 소성가공이 곤란하였던 합금재료를 용탕에서 직접 여러 형상으로 주조하여 표면처리할 필요없이 최종제품이 제조가능할 것으로 생각된다.

또, 수축공, 편석이 없는 일방향 응고조직의 균질한 주괴가 얻어지기 때문에 방향성을 필요로 하는 자성재료 및 공정 복합재의 제조법으로서도 유용하며, 결합 및 입계가 없어야 할 전자재료의 제조법으로서 응용될 것으로 생각한다. 더욱이 냉간가공성이 우수하므로 극세선, 극박막의 제조도 가능할 것이며, 내피로성이 우수한 신뢰성 높은 재료로서 항공기 등의 구조재료에도 응용될 것으로 믿는다.

참 고 문 헌

[1] T. Z. Kattamis and M. C. Flemings : Trans. AIME, 233 (1965) 992  
 [2] 大野篤美, 茂木徹一, 石橋健司 : 日本金屬學會誌, 42 (1977) 545  
 [3] 茂木徹一, 大野篤美, 林水根 : 日本金屬學會誌, 51 (1987) 370  
 [4] G. H. Crouch, J. G. Monck and J. C. Hoff

- : Modern Metals, 4 (1965) 56
- [ 5 ] A. Ohno and H. Soda : Trans. ISIJ, 9 (1969) 13
- [ 6 ] J. Czochralski : Z. Physik. Chem., 92 (1918) 219
- [ 7 ] P. W. Bridgman : Proc. Amer., Acad. Sci., 58 (1923) 165
- [ 8 ] 大野篤美 : 特許 1049146號
- [ 9 ] A. Ohno : USA Patent, No. 4515204
- [10] 佐藤彰, 大澤嘉昭, 荒金吾郎 : 日本金屬學會誌, 51 (1987) 370
- [11] 大野篤美 : 新訂金屬凝固學(地人書館), (1982) 44
- [12] 大野篤美 : 輕金屬, 39 (1989) 735
- [13] 大野篤美, 本保元次郎 : 實用新案出願番號 昭61, 87642
- [14] A. Ohno : USA Patent, No. 5074353
- [15] H. Soda, A. Ichinose, G. Motoyasu, A. Ohno and A McLean : Cast Metals, 5 (1992)
- [16] A. Ohno : Casting of Near Net Shape Products, TMS, (1988) 177
- [17] ○原正秀, 中野耕作, 山崎明, 柴田光義 : 古河電工時報, 79 (1986) 177
- [18] 住友電氣工業(株) : Newsletter, 119 (1987)
- [19] A. Ohno : Metallurgical Process for the Year 2000 and Beyond, The Minerals, Metals and Society, (1988) 55
- [20] 大野篤美, 本保元次郎, 河合秀信 : 輕金屬, 40 (1990) 817