

技術資料

가열주형 수평식 연속주조법

김명한*, 고창호**, 조형호***

The Horizontal Continuous Casting with Heated Mold

M.H. Kim*, C.H. Ko** and H.H. Jo***

1. 서 론

가열주형 연속주조법은 기존의 냉각주형방식과는 달리 주형의 온도를 주조금속의 용융온도 이상으로 가열시킴으로써 주형벽에서의 핵생성을 방지하고 응고가 주형 끝단으로부터 표면장력에 의해 액상을 유지하고 있는 용탕의 자유표면으로부터 일어나도록 하는 것으로 이때 열이동이 한 방향만으로 일어나므로 열이동 방향과 가장 일치된 우선성장방위를 가진 결정만이 경쟁성장에서 살아남게 되어 일방향 또는 단결정 응고재를 쉽게 얻을 수 있게 된다. 이 연속주조방법은 주괴의 인출방법에 따라 상향식, 하향식 및 수평식으로 분류되며 이에 관련된 연속주조법에 관해서는 일본의 A. Ohno에 의해 특히 많은 특허가 출원되어 있는 상태이다^{1~3)}. 여기서 상향식은 용탕의 break-out 발생이 없고 비교적 복잡한 대형 응고재를 손쉽게 제조할 수 있는 장점이 있으나 주조속도가 느리고 냉각장치가 복잡 어렵다는 단점을 갖고 있고, 하향식은 break-out 발생이 쉽게 일어난다는 단점이 있으나 gas, 불순물 등의 혼입이 적다는 점에서 용탕 level을 제어하고 주형 하단의 주괴진동을 방지하는 등 기술만 개발되면 가장 우수한 방식으로 각광받을 수 있다. 수평식은 주괴직경이 커지는 경우 중력의 영향으로 인하여 편석을 일으키기 때문에 주괴직경에 제한을 받는 단점이 있으나, 주조속도가 비교적 크고, 또한 응고재를 연속적으로 생산할 수 있으며 장치의 설계가 비교적 간단한 장점이 있어 20mm이하의 소구경주괴나 박판제조에 적합한 프로세스로 알려져 있다. 이러한 가열주형 연속주

조법은 응고나 주형밖에서 용탕의 자유표면으로부터 일어나므로 주괴표면은 거울처럼 미려하고, 주괴내부의 수축공, 개재물등 결함과 편석이 제거된 다양한 형상의 일방향 또는 단결정 주괴를 쉽게 제조할 수 있으므로, 현재 audio 및 video cable용의 Al 및 Cu 극세선 기타 전자재료용의 여러 고급응고재 제조에 이용되고 있다. 현재는 주로 Cu이하의 용점을 갖는 비철재료에서만 적용되고 있으나, 추후 steel 및 stainless 등 고용점 재료를 위한 연구도 진행중에 있다. 본 기술자료에서는 상기 세가지 주조방법중 수평식 연속주조법을 대상으로 관련된 장치와 그 기능, 사용재료 및 양질의 주괴를 제조하기 위한 주조조건 및 용도에 관해 기술하고자 한다.

2. 연속주조의 세부장치 및 기능 :

가열주형 수평식 연속주조 장치는 크게 용해로, 용탕면 조절장치, 주괴인출장치, 가열주형, 냉각장치 및 계기조작단으로 구성되어 있다. 그림 1은 이러한 장치의 개략도를 보여주고 있다.

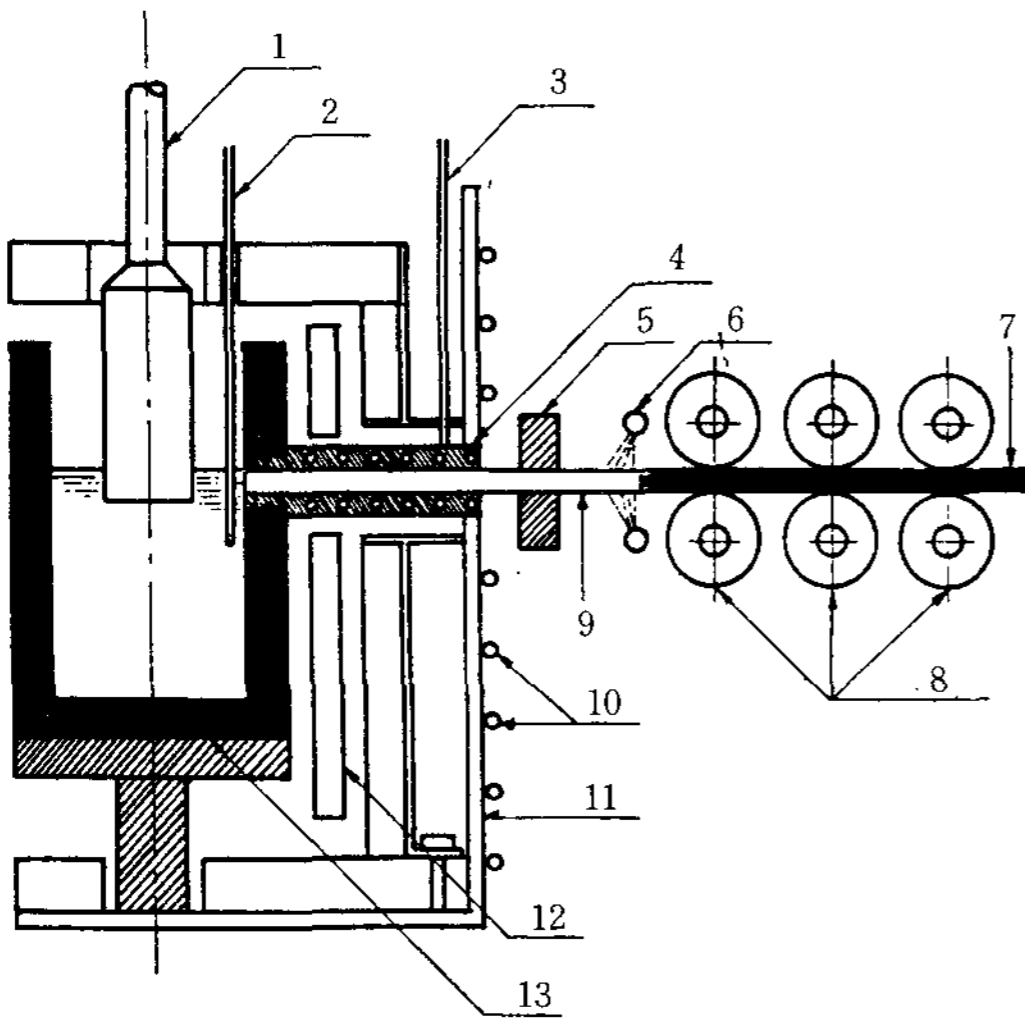
용해로 :

발열체와 복사열 방지벽, 그리고 철제외피 및 외피보호를 위한 수냉장치로 구성되어 있다. 도가니는 내열, 내마모성이 우수하고 가공성이 좋은 소재를 사용하는 것이 좋다.

용탕면 조절장치 :

Leveler로서 소정크기의 고순도 흑연봉을 용탕에 침지시켜 용탕의 탕면을 일정하게 유지시키기 위한 장치로 leveler의 상하이동은 chamber상부에

* 충북대학교
 ** 금강전원금속(주)
 *** 생산기술연구원



- 1. Level control bar 2,3. Thermocouple(K-Type)
- 4. Heating mold 5. Guide 6. Water spray
- 7. Dummy bar 8. Pinch rolls 9. Cast rod
- 10. Cooling pipe 11. Chamber 12. Heater(body)
- 13. Crucible

그림 1. Schematic diagram of the horizontal continuous casting apparatus.

motor로 설치하여 이동 시키도록 한다. 용탕의 탕면은 보통 주형의 상단부와 수평하게 일치되도록 하되 산화 개재물이 용탕위에 떠올라와 주형에 유입되는 것을 막기 위해 탕면의 높이를 주형상단부보다 약간 높게 유지시켜도 무방하다. 이와같이 용탕의 높이를 일정하게 유지시키는 것은 가열주형 수평식 연속주조법에서 가장 필수적이고 까다로운 작업중의 하나이고, 용탕면이 일정하게 유지되지 않을 시는 주괴직경의 변화나 용탕의 단락을 유발시킬 수 있다.

주형 :

가열주형 연속주조법의 명칭에서도 알 수 있듯이, 이는 가열주형 연속주조법의 가장 특징적인 부분이다. 도가니의 용탕은 용탕 leveling system에 의해 가열주형내에 흘러들어 오게된다. 이때 주형은 흘러 들어온 용탕이 응고되지 않도록 적절한 heating element를 사용하여 가열된다. 이 주형은 통상 고순도 흑연이 사용되나 이 경우 주형 끝단에서의 산화 및 마모가 심하여 이로 인한 주

괴 표면불량의 원인을 제거하기 위해서는 주형을 자주 교체해야 되는 문제점이 있으므로 대기중 산화 및 마모에 대한 저항이 큰 재료를 사용하면 좋다.

냉각장치 :

가열주형 끝단으로 부터 수mm 거리까지 표면장력에 의해 액상의 용탕이 유지되고 있고, dummy bar에 부착되어 있다. 이때 고·액 계면은 냉각수로 분무하거나 또는 냉각효과를 높이기위해 냉각수가 순환되는 욕조에 통과시켜 응고시킨다. 이때 냉각수가 주형끝단 쪽 가까이에 비산되거나 또는 주형내로 흘러 들어가는 경우 표면이 거친 주괴 얻어질수 있기때문에 장치나 작업에 있어 주의를 요한다.

인출장치 :

Dummy bar 끝단에서 응고된 응고재는 인출장치를 이용하여 수평으로 인출함으로써 연속적으로 일방향 또는 단결정 응고재의 제조가 가능하다. 이때 인출장치는 dummy bar 또는 응고된 주괴자체가 진동을 받지 않고 조용한 상태에서 주형과 완전히 수평으로 일치되어 인출되도록 하는 것이 필요하고 진동이 있거나 수평이 유지되지 못하면, 주괴표면에 심함 굴곡이 발생되거나 break-out이 발생하게 된다.

Dummy bar :

Dummy bar는 주형내의 용탕을 그 한쪽 끝단에 응고 부착시켜 인출하기 위해 사용하는 것으로, 주조금속의 용융점보다 높은 용융점을 갖는 재료이면 주괴제조 조건 및 품질이 dummy bar의 재질에 영향을 받지 않는다. Al rod를 제조하는 경우, Al, Cu 및 stainless rod 등이 dummy bar로서 사용될 수 있으며 dummy bar끝단의 형상은 dummy bar에 응고 부착된 금속이 dummy bar와 쉽게 떨어지지 않도록만 되어 있으면 형상이 또한 주괴 품질 및 제조조건에 큰 영향을 주지는 못한다.

그림 2는 Al rod제조시 사용된 dummy bar를 보여주고 있다.

온도 측정 및 조절장치 :

가열주형 연속주조법은 도가니에서의 용탕온도, 주형시 가열온도를 정밀하게 유지 및 관리하

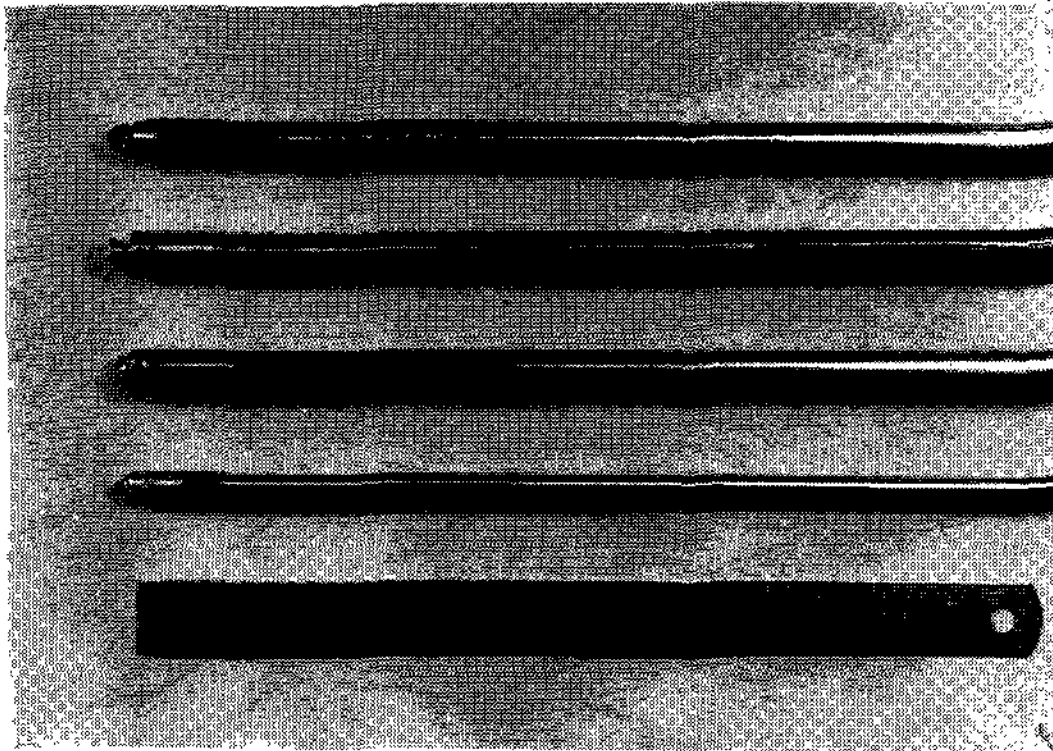


그림 2. Shapes of dummy bars

는 것이 절대적으로 필요하다. 왜냐하면 가열주형의 출구를 나가는 용탕의 온도는 이 두가지에 의해 크게 영향을 받기 때문이고, 이 용탕의 온도는 또한 다른 제조변수와 밀접하게 관련이 있기 때문이다.

3. 가열주형 연속주조의 제조변수

제조된 주괴는 주괴의 주조변수의 조건에 따라 그림3과 같은 surface tearing (a), mirror surface (b), 또는 break-out (c)이 발생된다. 여기서 surface tearing은 인출속도에 비해 상대적으로 냉각수량이 과다한 경우 발생하고, break-out은 그 반대로 냉각수량에 비해 인출속도가 큰 경우 발생된다. break-out은 주괴제조시 연속적인 제조를 불가능하게 하고, surface tearing은 주괴표면에 심한 scratch로 인해 인발공정 등에서 악영향을 미친다. 그러나 적절한 주조조건에서 주괴가 제



그림 3-a. Schematic diagram of the surface tearing
 3-b. Schematic diagram of the mirror surface.
 3-c. Schematic diagram of the break-out

조될 때는 mirror surface를 가진 주괴를 얻을 수 있으며, 이러한 주괴의 단면의 조직을 보면 그림 4와 같이 잘 성장된 일방향 또는 경우에 따라서는 단결정이 생성되는 것을 알 수 있다.



그림 4. Macrostructure of the horizontal cross-section of the cast rod with mirror surface

이러한 경면의 표면을 가진 양질의 주괴를 제조하기 위해서는 제조조건이 적절해야 하는데 주요 제조변수로는 용해로에서의 용탕온도, 주형가열온도, 주괴 직경, 냉각수량, 냉각거리 및 주조속도(인출속도)를 열거할 수 있으며 양질의 경면 주괴를 제조하기 위한 주조속도 및 그 범위와 용해온도, 주형가열온도, 주괴직경, 냉각수량 및 냉각거리와의 관계는 다음과 같다.

주형가열온도와 주조속도와의 관계 :

그림 5는 용탕온도 700°C, 냉각수량 0.6 l/min, 냉각거리 20mm 조건하에서 6mm 직경의 Al rod제조할 경우 surface tearing, mirror surface 및 break-out된 주괴를 얻어지는 주형가열온도와 주조속도와의 관계를 나타낸 것이다. 주괴를 얻기위한 주조속도는 주형 가열온도와 반비례 관계에 있고

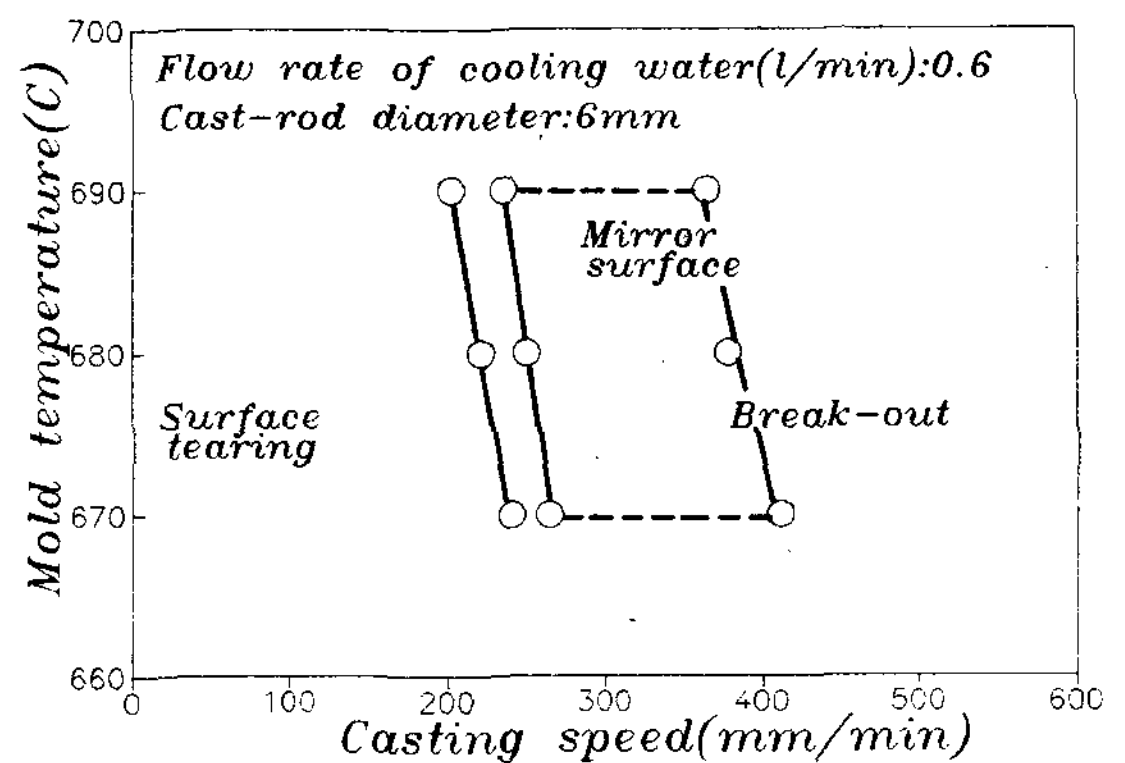


그림 5. Correlation of mold temperature and casting speed for optimum casting conditions at the flow rate of cooling water of 0.6 l/min. The cast rod diameter and mold to cooler distance was fixed to 6mm and 20mm, respectively.

주조속도 범위는 주형의 가열온도의 증가에 따라 다소 작아짐을 알 수 있다. 한편 앞서도 언급된 바와 같이 가열 주형을 흘러나가는 용탕의 온도는 직접적으로는 도가니에서의 용탕온도와 주형의 가열온도에 영향을 받고, 인출속도에도 영향을 받으리라 사려된다.

주괴직경과 주조속도와의 관계 :

그림 6은 용탕온도, 주형가열온도, 냉각수량 및 냉각거리가 각각 700°C, 690°C, 0.6 l/min 및 20 mm로 때, 주괴직경과 주조속도와의 관계를 보여주는 것으로 경면 주괴를 얻을 수 있는 주조속도 및 그 범위는 주괴직경이 작아질수록 급격히 증가됨을 알 수 있다.

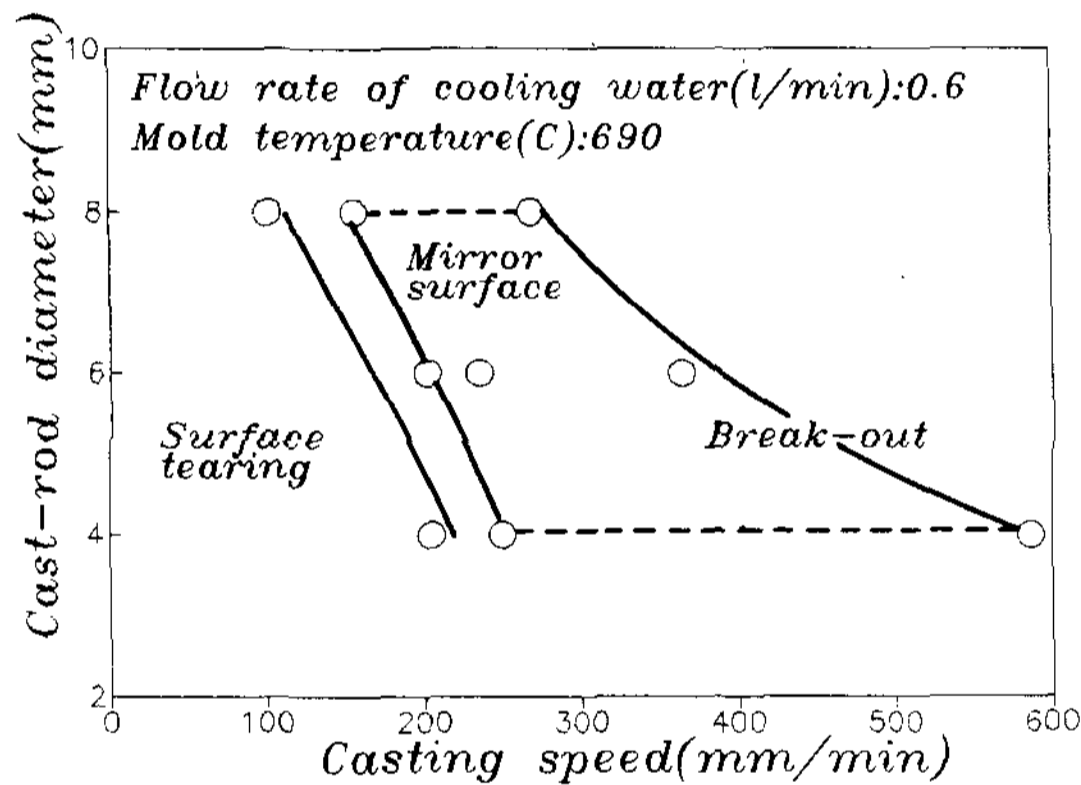


그림 6. Correlation of cast rod diameter and casting speed for optimum casting conditions at the flow rate of cooling water of 0.6 l/min. The mold temperature was 690°C

냉각수량과 주조속도와의 관계 :

그림 7은 용탕온도, 주형가열온도, 주괴직경 및 냉각거리가 각각 700°C, 690°C, 6mm 및 20mm로 하였을 때 냉각수량과 주조속도와의 관계를 나타내는 것으로 주조속도는 냉각수량의 증가에 따라 비례적으로 증가 함을 알 수 있다.

냉각거리와 주조속도와의 범위 :

그림 8은 용탕온도, 주형가열온도, 주괴직경 및 냉각수량이 각각 700°C, 690°C, 8mm 및 0.2 l/min로 하였을 때 냉각거리와 주조속도와의 관계를

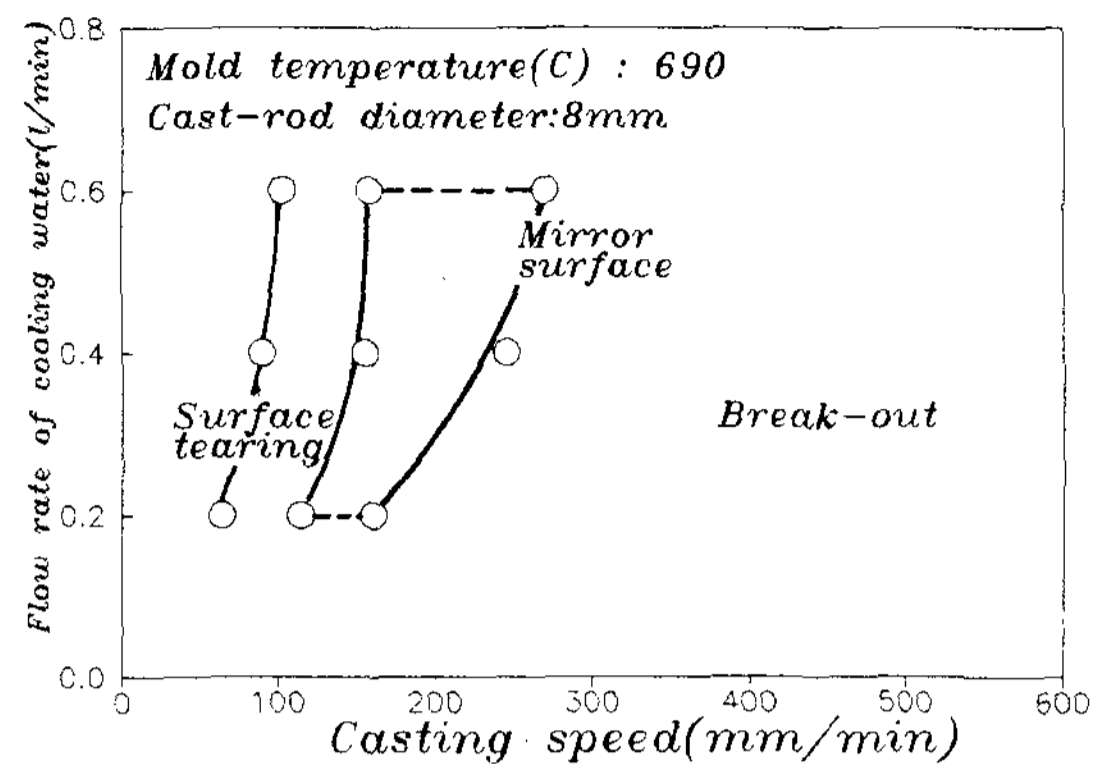


그림 7. Correlation of flow rate of cooling water and casting speed for optimum casting conditions at the mold temperature of 690°C. The cast rod diameter and mold to cooler distance was fixed to 6mm and 20mm, respectively.

나타내 주는 것으로, 냉각거리가 짧아지면, 경면 주괴를 얻을 수 있는 주조속도와 주조속도범위가 증가됨을 알 수 있다.

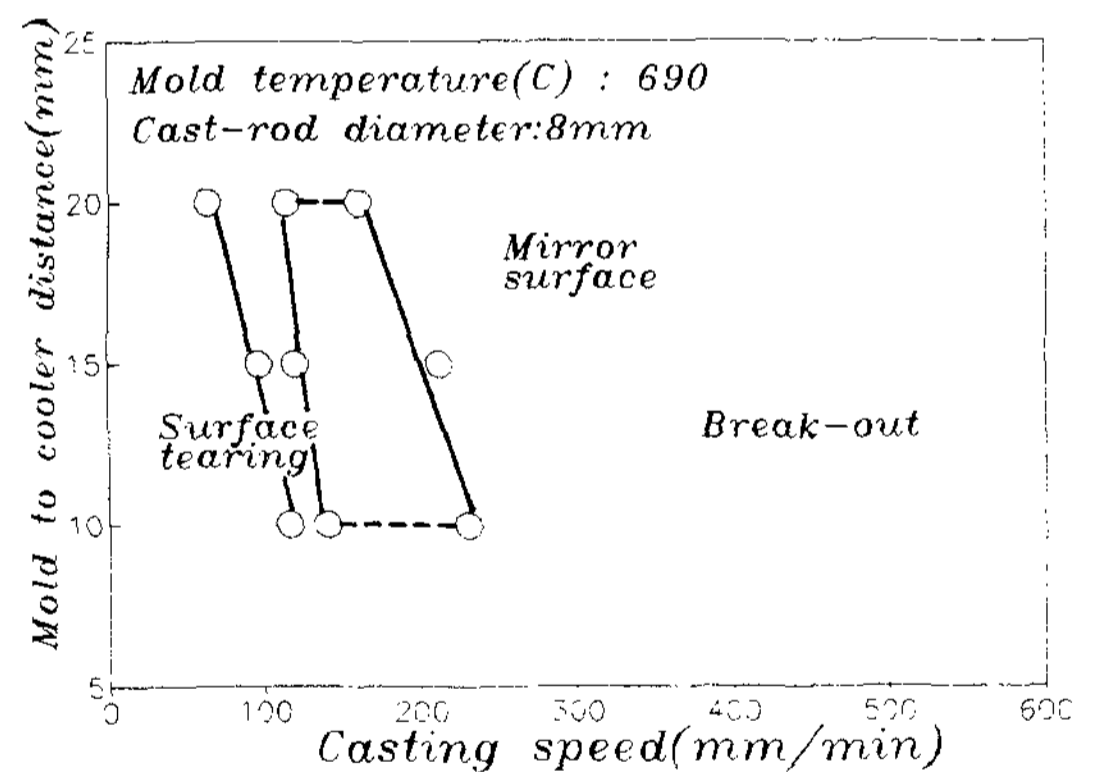


그림 8. Correlation of mold to cooler distance and casting speed for optimum casting conditions at the mold temperature of 690°C. The cast rod diameter and flow rate of cooling water was fixed to 8mm and 0.2 l/min, respectively.

이상 경면 주괴를 얻기위한 주조속도에 미치는 제조 변수와의 관계를 요약하면 다음과 같다.

case I

고정 변수	변 수	변수와 주조속도와의 관계
주 괴 직 경 용 탕 온 도 냉 각 거 리 냉 각 수 량	주 형 온 도	○ 상호 반비례관계 ○ 주형온도가 낮을 수록 mirror surface를 얻을 수 있는 인출속도는 빨라지며, 그 범위 또한 커진다.

case II

고정 변수	변 수	변수와 주조속도와의 관계
주 괴 직 경 용 탕 온 도 냉 각 거 리 주 형 온 도	냉 각 수 량	○ 상호 반비례관계 ○ 냉각수량이 많을 수록 mirror surface를 얻을 수 있는 인출속도는 빨라지며, 그 범위 또한 커진다.

case III

고정 변수	변 수	변수와 주조속도와의 관계
주 괴 직 경 용 탕 온 도 주 형 온 도 냉 각 수 량	냉 각 거 리	○ 상호 반비례관계 ○ 냉각거리가 멀어질수록 mirror surface를 얻을 수 있는 인출속도가 느려지며, 인출속도의 범위도 좁아진다.

case IV

고정 변수	변 수	변수와 주조속도와의 관계
주 형 온 도 용 탕 온 도 냉 각 거 리 냉 각 수 량	주 괴 직 경	○ 상호 반비례관계 ○ 주괴직경이 작을수록 mirror surface를 얻을 수 있는 인출속도는 빨라지며, 그 범위 또한 커진다.

상기 주조속도에 미치는 제조변수와의 관계를 살펴보면, 보다 빠른 주조속도 하에서 경면주괴를 얻기 위해서는 용탕온도 및 주형온도는 낮게 하고, 냉각수량은 크게, 냉각거리는 짧게하고, 주괴 직경은 작게 해야 함을 알 수 있다.

주조 속도와 striations의 발생 :

상기에서는 단순히 일방향응고 조직을 가진 경면 주괴를 얻을 수 있는 주조속도 및 그 범위와 제조변수와의 관계를 언급하였는데 같은 경면의 주괴라도 주조속도에 따라서는 그 품질이 다를 수 있다. 즉, 같은 표면 주괴일지라도 주조속도가 크게 되면 내부에 그림 9와 같은 인출방향과 수평으로 줄무늬(striation)가 발생된다. 이 striation은 주조속도가 증가함에 따라 쌍정결정이 성장하게 됨으로서 발생하는 일종의 결함이다. 이러한

striation의 발생은 고순도 금속일수록 쉽게 일어나 striation의 발생이 극세선등 주괴의 최종제품에 직접적으로 치명적인 영향을 미친다고 된바는 없다. 다만, striation 발생량이 증가할수록 재결정 발생이 쉽게 일어나 재결정온도를 떨어뜨리는 정도만이 알려져 있다.(4) 이러한 striation이 주괴의 최종제품과 그 제조과정에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서는 계속 연구할 필요가 있다.

4. 가열주형 연속주조법의 용도 및 우월성

연속주조법은 기존의 냉각주형 방식에 비해서, 최적주조조건을 확립하는데는 어려움이 있지만 주괴의 내부 및 표면결함이 없고, 또한 기존의 crystal pulling법이나 Chzoralski법(5) 등에 비해서

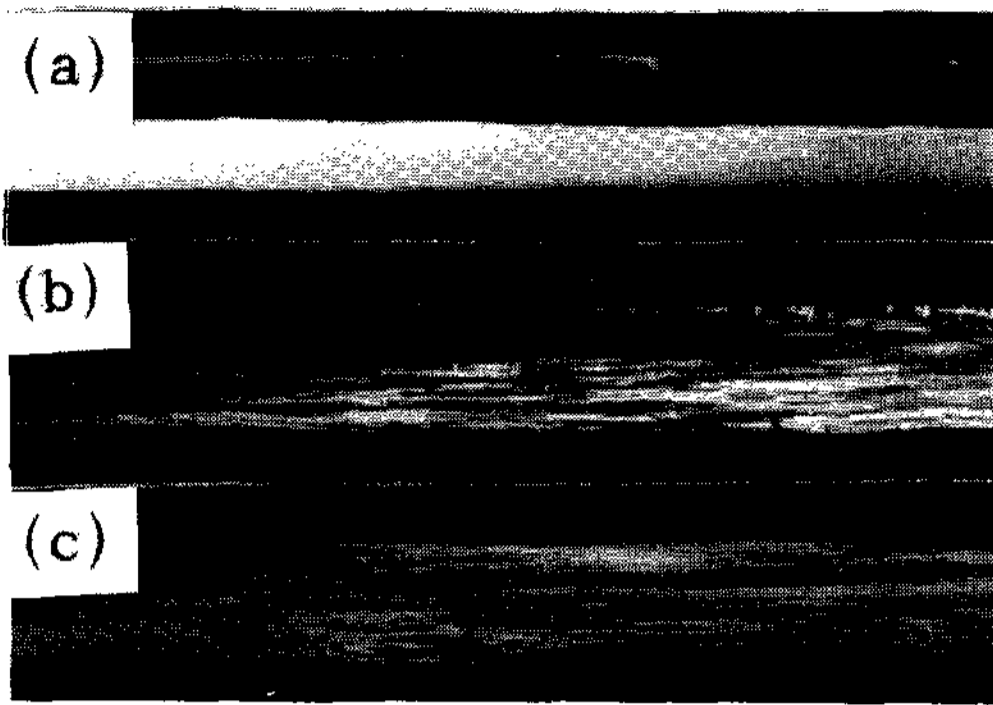


그림 9 The macrostructures of the horizontal cross-sections of 8mm Al rod showing the increase of striations when the rod was cast under the casting speed of (a) 95, (b) 130, (c) 180, and (d) 260mm/min, respectively.

비교적 자유로운 형상의 단결정 또는 일방향 고급응고재를 연속적으로 제조할 수 있다는 점에서 금후, IC 및 초 LSI lead frame, bonding wire, magnetic wire, audio 및 video cable, solder재 등 전자 기기 및 음향기기용 고급소재로 응용될 수 있으며, 우수한 가공성을 이용하여 기타 초 극세선 및 초 박막 제조에도 적용이 가능할 것이다.(6) 가공이 힘든 난 가공성 소재의 가공과 결정입계에서의 부식의 위험이 없는 내식성이 우수한 단결정 합금관 제조등에도 적용할 수 있는 한편, 일방향 응고재를 용이하게 얻을 수 있는 특성을 이용하여 방향성이 필요한 자성재료 및 공정복합재 제조법으로도 이용가능 할 것이다. 다음은 극세선 제조시 가열주형 연속주조법이 종래의 연속주조법에 비해 갖는 공정상의 특징 및 장점을 분석한 결과(7)는 4.1 및 4.2절에 나타내었다.

4.1 극세선 제조의 공정 비교

종래법 원재료	OCC법 원재료	비고
용해	용해	◎ Al-1%Si, Al-1%Cu, Au, Cu etc
주조	주조	◎ 재료의 순도 유지
압출 또는 Swaging		◎ 재료의 균질성, 결함(내부·표면 등) 관리
I - type 신선	I - type 신선	◎ 8-10mmφ까지 단면 감소
중간 소둔		◎ 8-10mmφ 1-2mmφ 단두(單頭) 신선기에 의해서도 가능
S - type 신선	S - type 신선	◎ 1-2mmφ 50-70μmφ
중간 소둔		
Z - type 신선	Z - type 신선	◎ 50-70mmφ 20μmφ
산세	산세	◎ 표면 청정도 관리
소둔	소둔	◎ 기계적 성질(강도, 연신율 등), 균질성 관리
권선	권선	
검사	검사	

4.2 종래법과 가열주형식 연속주조법상의 제특성

		종래법	O C C 법
주괴의 건전성	내부결합	내부에 기공, 수축공, 불순물 편석이 다수존재	내부결합(기공, 수축공, 불순물 편석)이 거의 없다
	표면결합	표면의 거침이 발생	표면이 평활하고, 경면 상태를 하고 있다.
주 조 조 직		다결정체	일방향 응고조직을 하고 있으며, 단결정 조직도 쉽게 얻을 수 있다
가 공 성		<ul style="list-style-type: none"> • 난가공의 ingot(예 : 인칭동 등)은 압연, 선인발 가공이 어렵다 • 30$\mu\text{m}\phi$이하의 초극세선 제조 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 난가공성의 ingot(예 : 인칭동 등)도 중간 열처리 없이 쉽게 가공 가능 • 30μm이하의 초극세선 제조가 용이하다
생 산 성		대량 생산에 적합	소량 다품종화에 적합
공 정		공정 step이 많다	공정 step이 단순하다
경 제 성		제조경비가 많이 든다	제조경비가 적게 든다
기 술 적 문 제	용해주조	기술적으로 큰문제가 없다.	용탕온도, 주형의 가열온도, 주조속도 및 냉각속도에 대한 제어가 필요하다.
	가 공	가공 step이 많아 가공조건의 설정에 어려움이 많다.	가공 step이 비교적 단순하여 가공조건을 설정하기 용이하다.

참 고 문 헌

1. A Ohno : J. of Metals, 38(1986)14
2. Japan Pat. No. 62-214851(1987.9)
3. Japan Pat. No. 62-110853(1987.5)
4. 이유재, 조형호, 김명한 : 대한금속학회지, in press.
5. J.Czochralski : Z. Physik. Chem., 92(1917)219
6. 大野篤美 : 日本金屬學會會報, 23(1984)773
7. 조형호, "가열식 연속주조법에 의한 전자재료용 알루미늄 소재부품개발"(1992년), 상공부.