

技術講座

수평연속주조에 의한 동합금 선재 및 극세선 제조

박원욱†

Manufacturing of Cu Alloy Wires and Fibers via Horizontal Continuous Casting

Won-Wook Park†

1. 서론

수평식 연속주조기술은 일반적으로 생산속도가 느리고 상하조직 편차 및 첨가원소의 편석 등의 문제점을 갖고 있지만 복잡한 형상의 동 합금을 near net shape 성형 할 수 있는 장점과 그 제조공정의 정밀성 등으로 인하여 최근에 특히 관심의 대상이 되고 있다.

수평연속주조는 사용하는 주형방식에 따라 냉각주형식과 가열주형식의 두가지로 구분된다. 냉각주형식에서의 주조설비는 용융금속의 주형, 냉각시스템, 응고재의 불연속 추출(withdrawal)장치 등으로 이루어져 있는데, 이러한 제조공정은 매우 간단하지만 냉각시스템(cooling system) 내에서의 정확한 온도 분포 및 응고조건을 아는 것이 중요하며, 제조되는 선재의 미세조직, 특성 및 품질 등에도 큰 영향을 미친다. 한편, 가열주형을 사용하는 방법은 주형 내부를 합금의 용점 이상으로 가열해 주어 용탕이 주형내에서 응고하지 않고, 주형의 끝에서 고압수를 뿜어 주어 냉각됨으로써 일방향응고에 의해 단결정 또는 극세선(금속섬유)을 제조하는 방법이다.

본고에서는 대부분의 수평연속주조를 차지하는 냉각주형식 기술과 앞으로 미래산업기술로 유망한 가열주형식 수평연속주조에 관하여 대별하여 기술하고자 한다.

2. 냉각주형식 수평연속주조

2.1. 개요

비철합금에 있어 주편의 품질을 결정짓는 중요한 요

인은 응고주편의 추출이동 형태이다. 즉, 이론적으로는 일정한 주조 속도를 유지하며 연속적으로 추출하는 것이 가능하지만 실제에는 응고주편의 이동시간이 필요하므로 일반적인 추출형태는 간헐적인 인발을 도입하고 있으며, 부분적으로 응고된 주편이 mould와의 마찰로 인하여 끊어지지 않는 한계 내에서 추출되어지기 때문에 적정주조속도가 존재하게 된다. 주기적인 추출 이동은 부분 응고된 주편이 용융상태에서 서로 연속적으로 용접되게 해주며, 이로 인해 주편 표면에는 surface mark가 나타나게 된다. 또한 대형의 제품 생산시 표면결함을 제거하기 위해서는 간헐적인 인발이 상당히 효과가 있다. 간헐인발이 시도되는 경우에는 mould내 응고계면의 형성 위치가 중요하며 냉각상태와 추출이동형태에 따라서 응고계면은 변화되므로 mould와 냉각자켓(cooling jacket)의 설계가 매우 큰 변수이다.

연속주조시 응고주편을 추출하는 힘은 적정주조조건에서는 매우 작지만 이러한 조건에서 벗어나면 매우 크게 증가한다. 이는 주조 cycle이 적합하지 않게 됨에 따라 mould내의 응고주편과 mould 내면과의 접촉마찰에 인한 것이며, 추출힘이 커짐에 따라서 응고주편의 표면에 결함이 발생하기 시작하여 결국 파단될 가능성이 있다. 따라서 원활한 연속주조를 위해서는 추출 cycle과 추출력을 최적조건으로 조정해야 한다.

2.2. 장치 및 제조공정기술

냉각주형식 수평연속주조공정이란 용융금속이 mould

인제대학교 나노공학부(Inje University, School of Nano-Engineering)

†E-mail : wwpark@inje.ac.kr

내부로 유입되어 원하는 형태의 내부공간을 채워 형상화되는 공정 전반을 일컫는다. 이러한 용융금속의 응고공정은 특수하게 제작된 냉각장치와 열방출속도 등을 고려해서 설계된 mould 및 각종 부속물과 이들을 내재하고 있는 각종 부속품 등에 의해 이루어진다. 이때 mould의 용융금속측 끝 부분의 온도는 용융금속의 온도와 거의 같아야 하며 mould 내부에서 일정한 응고계면을 형성해야만 한다. 응고 완료된 금속은 간헐적으로 추출할 수 있게 설계된 pinch roller에 의해 응고공정과 적절한 조화를 이루며 추출된다.

이상에서 간략히 언급한 주요공정에서와 같이, 수평연속주조설비의 제작시에는 합금의 조성을 제어하면서 균일한 미세조직을 갖는 형상재를 단락없이 연속주조할 수 있도록 가열·냉각·응고재의 추출 등이 정밀 조정되도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 이 항에서는 수평연속주조설비의 제작에 필요한 일반적 사항과 함께 제조기술 및 요구특성에 부합되는 소재의 선정, 합리적 공정기술에 대해 부분별로 기술하여 이해를 돕고자 하였다.

#### 1) 도가니 및 Mould Insert용 소재선정

수평 연속주조공정에서는 mould(또는 die)의 한 쪽 끝부분이 용융금속과 항상 접촉하고 있기 때문에 mould소재는 화학적으로 침식되지 않아야 한다. 또한, 공정의 특성 상 우수한 열적 특성, 열충격 저항특성, 용융금속에 대한 비부착(non-wetting)특성 등이 요구된다. 이러한 관점에서 흑연은 동합금을 비롯한 비철합금소재의 연속주조에 매우 유용하게 사용되고 있으며, 실제적으로 탄소가 석출되는 주철의 연속주조에도 사용된다. 그러나 흑연은 비교적 산화저항이 작고 내부 기공이 존재하며, 제조공정상의 특성으로 인해 소재가 방향성을 갖게 되어 이에 따른 불균일성을 나타내는 등의 결점을 갖고 있다. 특히, 동합금 중 Ni, Fe등을 많이 함유되어 용융온도가 높고 용융금속의 유동도가 나쁠 때는 이러한 흑연의 결점과 함께 용융금속과의 반응 및 심한 마모 등으로 도가니 및 mould용 소재로 흑연을 적용하는 것은 불가능하게 된다. 따라서 용융금속과 직접 접촉하는 부분에는 세라믹재료가 일부 사용된다. 그런데 세라믹재료는 보편적으로 알려져 있는 바와 같이 흑연에 비해 취약하고 열충격저항이 낮은 결점을 갖고 있다. 최근 이러한 근본적인 구조적 결함에도 불구하고 이들을 제어할 수 있는 기술이 개발됨

으로써 인성을 갖는 세라믹 재료도 제조가 가능하게 되었다. 다음에 도가니 및 die insert용으로 적용될 수 있는 재료로서 흑연 외에 가장 많이 쓰이는 세라믹재료의 종류 및 특성에 대해 간략히 언급하고자 한다.

#### ※ 세라믹재료의 종류 및 특성

##### ① 상용 알루미늄 세라믹

$Al_2O_3$ 의 함량이 85~99%의 범위로, 알루미늄의 함량이 증가함으로써 특성은 향상되고, 가격도 상승한다. 또한, 동일한 알루미늄의 함량을 갖는 제품도 원료분말, 제조방법 등에 따라 현저히 다른 특성을 나타낸다. 알루미늄은 용도에 맞는 다양한 등급의 제품을 경제적으로 제조할 수 있기 때문에 가장 널리 적용되고 있는 세라믹재료이다.

##### ② 지르코니아

지르코니아는 온도에 따라 단사정, 정방정 및 입방정 상으로 변태하는 다상의 세라믹재료이다. 이러한 동소변태(특히, 단사정, 정방정 변태)는 약 4%의 체적변화를 가져오기 때문에 열적 안정성을 해치게 된다. 따라서 MgO, CaO 및  $Y_2O_3$ 와 같은 산화물을 첨가하여 상변태가 일어나지 않게 하거나(완전 안정화), 기계적 특성을 향상시키기 위해 상변태를 제어하고 있다(부분 안정화). 주로 상용되는 지르코니아 세라믹은 입방정구조를 갖는 완전 안정화 지르코니아이며, 인성을 갖는 지르코니아 세라믹은 안정화 산화물로 MgO나  $Y_2O_3$ 가 약 5 mol% 정도 첨가된다. 지르코니아 세라믹은 대부분의 알루미늄과 비교하여, 인성, 열충격저항 및 마찰특성이 현저히 우수하며, 따라서 이러한 특성을 향상시킬 목적으로 알루미늄에 부분 안정화시킨 지르코니아 입자를 첨가하기도 한다.

##### ③ 육방정 질화붕소(BN)

육방정 질화붕소는 고온가압 동안에 흑연과 동일한 구조로 배향하게 되며, 따라서 등방적으로 가압된 치밀한 질화붕소는 근본적으로 이방성을 갖는다. 순도나 제조방식에 따라 대부분의 상용제품은 불활성분위기 중에서 1600°C까지 사용이 가능하며 특수 복합체 제품은 1600°C 이상에서도 무리없이 사용할 수 있다. BN은 무기물로서, 많은 종류의 용융금속 및 슬래그와도 반응하지 않으며 또한 wetting되지 않는 장점을 갖고 있다. 뿐만 아니라 열팽창이 작고 열전도도가 높으며 우수한 열충격저항성을 갖고 있기 때문에 강의 수평연속주조용 break ring 소재로 현재 적용되고 있다. 그러

나 BN은 단면적이 큰 제품의 수평 연속주조용으로는 사용이 극히 제한되며, die insert로 적용될 경우에는 많은 점에서 흑연과 유사하지만 내마모성은 오히려 떨어지기 때문에, 상대적인 가격(10~25:1)을 고려할 때 부적합한 소재이다.

이러한 결점을 보완하기 위해 현재 유럽 및 미국에서 제조되고 있는 새로운 BN계 소재는 BN을 주로 하여 지르코니아, SiC 등이 혼합된 복합체로서, 등방성이 향상되고, 흡습성이 개선되었으며, 경도가 10배정도 증가되는 등 주형(mould) 재료로서도 매우 매력적인 특성을 나타내고 있다.

이 외에 사용되는 재료로서는 Cu합금, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 등이 있는데 General Motors가 1969년에 copper mould를 냉각부에 적용시키고 용융금속영역에서는 보온과 단열 효과가 좋은 Zirconia, 접합부(Break Ring)에는 Boron-Nitride를 사용한 예가 있으며, 최근에는 Davy-Loewy와 NKK가 접합부에 Boron-Nitride를 5~15% 첨가한 반응소결형 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 사용한 예가 있다.

2) 용탕정제 및 탈산공정

고품질 동합금(무산소동 또는 특수동 등)을 수평연속주조하기 위해서는 초기 원재료로 전기동을 사용하지만, 불순물을 제거하는 용탕정제와 함께 용해·용탕의 이동 및 주조과정에서의 산화를 막고, 일부 산화된 용탕을 탈산하는 공정이 필수적이다. 그러나 관련기술은 공정을 개발한 회사에 따라 차이가 있으며 대외적인 유출을 극히 회피하는 분야이기도 하다. 그림 1의 무

산소동 및 특수동 제조공정에 나타낸 바와 같이 공정 순서에 따라 관련기술을 살펴보면, 수평연속주조공정에는 용해로에서의 용탕 탈산 및 불순물 제거를 위한 Ar 및 N<sub>2</sub> 가스 버블링이 있으며, 용해된 동합금의 주조기 이송을 위한 과정에서 환원성 분위기를 이용하는 탕도에서의 탈산공정이 있다. 탕도에서의 환원성 분위기는 CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 등의 가스를 일정비율로 혼합하여 주입하며 이동중인 용탕은 요동(fluctuation)에 의해 표면 반응하여 탈산된다. 이때 환원성 분위기는 대기압보다 높게 하여 공기(O<sub>2</sub>)의 혼입을 방지한다. 최종 주조가 시작되는 주조기에서는 용탕을 2차 탈산시키는 공정을 거치게 되는데 이 과정에서의 탈산공정은 know-how로서 공개되어 있지 않지만, 일반적으로 주조기에서 용탕의 적당한 필터링에 의해 소정의 탈산 효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

3) 동합금 연속주조시 열전달 및 응고제어

근본적으로 연속주조공정은 열방출공정(Heat Extraction Process)이라고 할 수 있으며, 용융금속이 주형(Mould) 내에서 응고될때는 다음과 같은 열량이 손실되어야 한다.

첫째, Mould내로 유입되는 용융금속의 과열(Superheat)정도

둘째, 용융금속이 응고될 때 응고계면에서의 응고잠열

셋째, 응고된 후 응고주편으로부터 냉각되는 열량

이러한 열량들은 다음과 같은 열방출기구의 조합에 의해서 손실되어진다

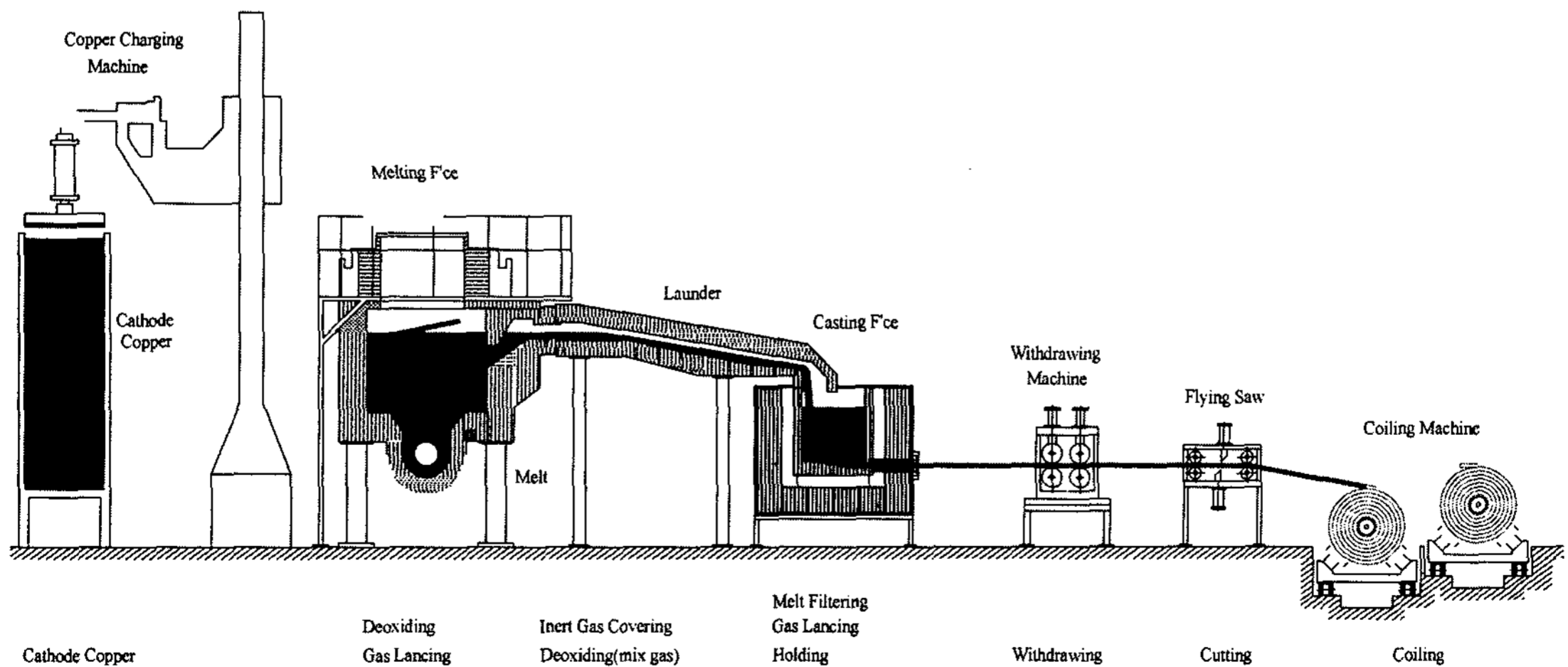


Fig. 1. Schematic view of horizontal continuous casting process for OFC and specialty copper alloys.

- 첫째, 용융금속의 열대류
- 둘째, 응고계면에서의 열전도
- 셋째, Air gap, Mould와 냉각수 사이에서 일어나는 외적인 열방출

그러므로, 수평 연속주조공정의 완전한 에너지 균형은 그림 2와 같이 3가지 중요한 부분으로 나뉘어진다.

- 첫째, 용융금속의 Mould내로 유입과정
- 둘째, Mould내에서의 응고계면 형성과정
- 셋째, 완전히 응고후 응고주편이 Mould로부터 추출되는 과정으로 구별할 수 있다. 일반적으로 용융금속이 Mould내로의 유입되는 과정에서 열방출은 비교적 적으며 이때의 용융금속은 항상 일정한 온도를 유지해야만 한다. 이 영역에서 평형상태를 얻기 위해서는 추가적인 열원을 공급하는 것이 필요하게 된다.

또한, 순환하는 냉각수에 의한 냉각시스템의 용량과 열전달되는 열량을 정확하게 맞추어 공정을 확립하는 것이 중요하다. 즉, 냉각능이 너무 큰 경우에는 도가니 출구 부근의 용탕이 굳어 추출이 불가능하게 되며, 냉각능이 너무 작은 경우에는 Mould 내에서 응고가 되지 않은 용탕이 외부로 흘러나오게 되므로 위험하게 된다. 따라서, 용탕의 온도, 추출속도, 순환되는 냉각수의 양, 열전달 정도에 대한 최적조건의 확립이 필요하며, 이러한 공정변수에 따르는 응고조직의 분석과 자료축적이 안정한 연속주조에 필요한 전제조건이 된다.

한편, 응고완료 후 응고주편이 추출되는 과정에서의 냉각속도가 최종 주편의 결정립 구조뿐만 아니라 물리적 성질 등에 영향을 미치기 때문에 질소가스를 mould와 응고주편 사이의 틈새에 불어넣어 주는 등의 새로운 냉각기술 등이 활용된다.

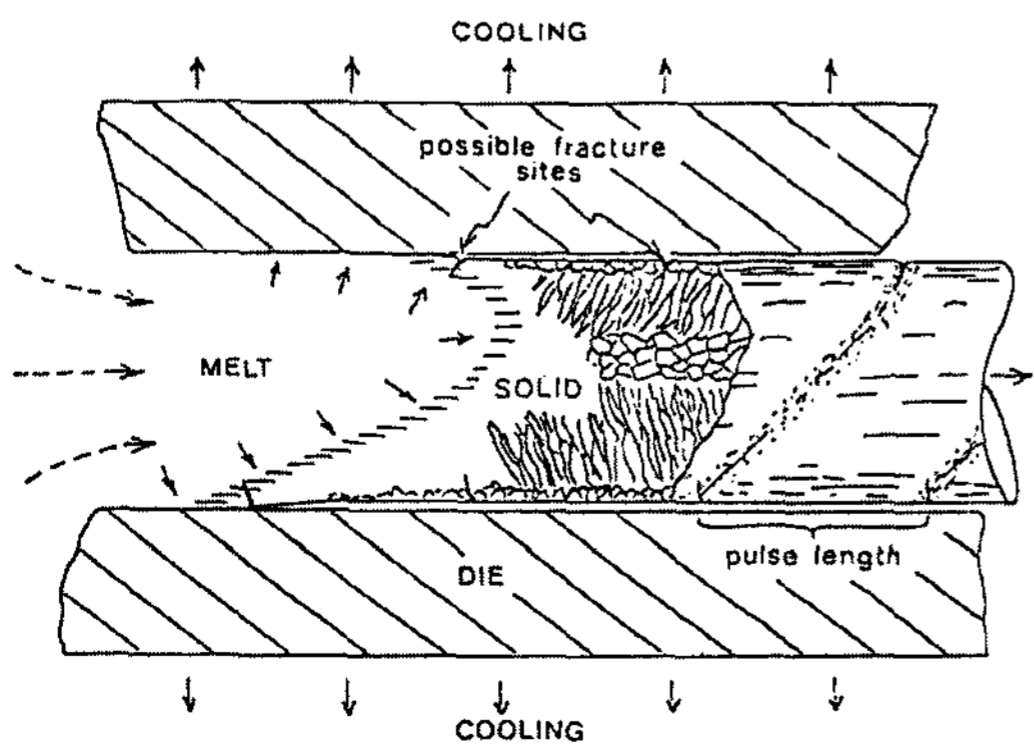


Fig. 2. Solidification mode of horizontal continuous casting in graphite mould.

이와 같이, 연속주조공정의 효율성은 실제의 에너지 균형과 용융금속의 응고와 추출이동으로부터 얻어지는 이론적인 에너지균형의 비교로 판단되어 진다.

4) 동합금의 추출기구(Withdrawal Mechanism)

동합금의 연속주조공정에서는 연속적으로 응고주편이 추출되어지는 않으며, 일반적으로 동합금은 다음의 추출 cycle에 의해 연속주조가 진행된다.

- 첫째, 정지 → 전진
- 둘째, 정지 → 전진 → 정지 → 후진
- 셋째, 진동 및 초음파 진동

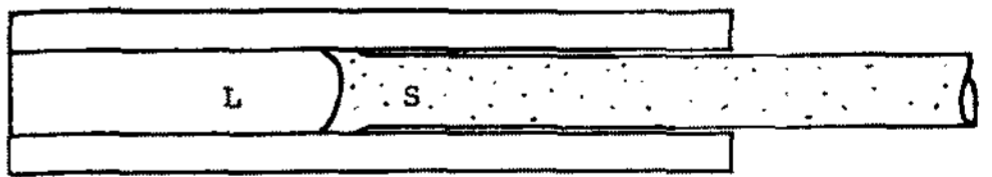
이러한 상대적인 추출이동은 상호 복합적인 cycle의 조합에 의해 결정되는데, 응고주편의 파단 및 품질 등을 좌우하기 때문에 매우 중요하며 응고형태에 따라 각각 적절히 적용되어야 한다. 동합금의 응고형태는 그림 3에서 나타낸 3가지로 분류된다.

Type A는 순동/공정합금 등이 Mould내에서 응고되는 형태를 나타내고 있으며 용융금속과 응고금속사이에 1개의 계면이 존재하게 된다.

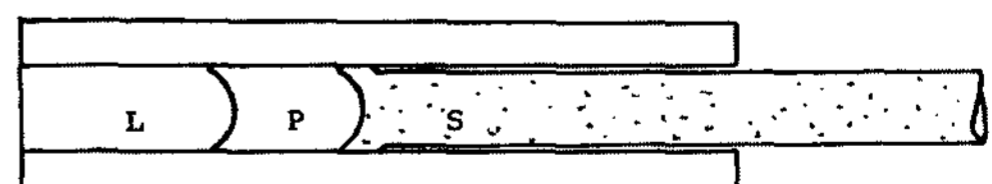
Type B에서는 황동과 같이 액상과 고상의 공존영역이 작은 동합금의 경우를 나타낸다. 여기서는 용융금속영역/액상-고상공존영역(pasty)/응고금속 영역으로 나누어지며 용융금속과 응고금속사이에 2개의 계면이 존재한다.

Type C에서는 청동과 같이 액상과 고상의 공존영역이 매우 큰 동합금을 나타내고 있으며 용융금속영역/액상 - 고상공존(pasty)영역/반응고(Semi-Solid)상태/응고금속영역으로 나누어진다. 이것은 액상온도이하에서 액

Type A. : Pure copper / Eutectic alloy



Type B. : Brass (Small solidification range)



Type C. : Bronze (Large solidification range)

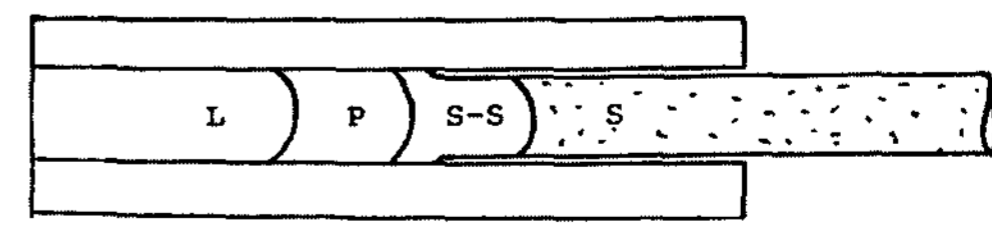


Fig. 3. Typical solidification mode in copper-based alloys.

상 - 고상 공존영역과 결정립계는 아직 액체상태인 반응고 상태(Semi-Solid)가 존재하기 때문에 용융금속과 응고금속사이에 3개의 계면이 존재하게 된다.

일반적으로 이러한 3가지 분류가 동합금들의 Mould 내 응고형태를 잘 나타내주고 있으며 이에 따라 주기적인 추출형태가 달라진다. 그림 3에서 Type A, B는 쉽게 이해할 수 있으나, Type C에서는 청동과 같이 응고구간이 매우 큰 경우를 나타내고 있으며, 응고 시에는 초정  $\alpha$ -수지상(순동)이 액상선 온도에서 나타나기 시작하며 이때를 액상-고상 공존(Pasty)영역으로 분류한다. 응고가 진행되면서 고상선까지  $\alpha$ -수지상 사이에 Sn, P의 량이 증가하게 되고 아직 응고되지 않은 결정립계가 관찰되어진다. 이때 Sn과 P의 량은 Sn = 20~25 wt.%, P = 2.0~2.4 wt.% 정도이며 이러한 부분은 645°C에서 응고가 시작되고, 거의 공정점과 같다. 이러한 현상을 반응고상태(Semi-Solid)로 분류하여 설명되어진다.

실제 응고에 있어 정지 → 전진으로 추출방법을 액상 - 고상 공존영역이 매우 큰 청동에 적용하게 될 경우, 정지시간을 충분히 해주지 않으면 표면결함이 발생할 확률이 매우 크다. 반면에 정지 → 전진 → 정지 → 후진 방법을 적용시키면 제품의 표면결함은 거의 없어지게 된다. 이와 같이 실제로 연속적인 추출방법은 제품의 품질을 보장할 수 없으며 표면이 급격히 나빠져서 파단 될 수 있기 때문에 앞에서 설명한 3가지 방법으로 추출하게 된다.

또한 정지 → 전진 방법인 경우에는 전진 추출 작동 이후 용융금속이 응고할 수 있는 충분한 시간이상 정지되어 있지 않으면 응고주편의 표면이 파괴되기 시작한다. 그러므로 최근의 간헐적인 추출형태는 정지 → 전진 → 정지 → 후진 추출방법을 채택하고 있으며 4가지 cycle 각각이 서로 독립적으로 취급되어진다.

다음은 제조공정상의 추출기술을 예시한 것이다.

첫째, 백동(Cupro-Nickel)이나 양백(Nickel-Silver Alloy)의 경우처럼 흑연 Mould와 용융금속과 반응이 일어날 때에는 전진이동후의 정지시간과 후진 이동후의 정지시간을 전체이동 시간의 절반으로 해야한다.

둘째, 그림 3의 응고구간이 매우 큰 Type C가 주조될 때는 Mould내에 있는 용융금속량 만큼 전진이동해 준 후 액상 - 고상 공존상태(Pasty) 및 반응고상태(Semi-Solid)가 완전히 응고되도록 정지시간을 길게 해 주고, 응고수축량(≈2.5 Vol.%)만큼 후진 이동시키며 이

때 압축력에 의해서 응고주편과 Mould와의 접촉이 증가되기 때문에 응고할 수 있는 짧은 정지시간을 주게 되면 표면 결함이 거의 없는 응고주편을 얻게 된다. Mould내에서 용융금속이 응고수축하게 되면, 응고주편은 Mould와 접촉이 없어지며 오랜 기간 정지하게 되면 냉각능력은 떨어지게 되지만 이러한 후진 이동에 의해 응고 수축에 의한 표면파단이 일어나지 않고 응고주편과 Mould 벽면과의 접촉을 증가시키기 때문에 냉각이 매우 빨리 일어나게 되어 주조속도를 어느 정도 빠르게 할 수 있다.

셋째, 응고구간이 작은 Type B의 경우에는 Mould내에 용융금속만큼 전진되어진 다음 액상 - 고상공존영역이 작기 때문에 매우 빠르게 고상으로 되어 정지시간을 짧게 해주어도 되고 응고수축량 만큼 후진이동시킨 후 응고가 충분히 일어나도록 정지시간을 길게 해주면 표면이 매우 양호한 응고주편을 얻게 된다.

실제로, 똑같은 연속주조장치를 이용해서 정지 → 전진의 추출방법 대신 정지 → 전진 → 정지 → 후진의 추출방법을 사용하게 되면 초기 주조속도의 2배까지 증가시킬 수 있으며, 진동추출의 방법도 이와 비슷한 효과를 나타낸다. 이러한 원인은 Mould 벽면과 응고주편 사이에 접합이 일어나지 않게 하며, 후진 이동으로 인하여 냉각이 잘 일어나 주조속도가 높아지게 된다.

5) Cu-Alloy의 연속주조시 주편결함 분석

연속주조되는 제품의 표면상태는 많은 요인들에 의해서 달라지며, 표면결함의 주요원인은 주로 표면장력(Surface Tension)과 용융금속의 점성(Viscosity)에 의한 것으로 이것들은 빈번히 발생하는 균열의 크기에 영향을 미친다. 용융금속의 온도가 증가하게 되면 표면장력은 감소하게 되므로 균열은 감소되지만 고온에서 산화와 가스 흡수 같은 다른 결함요인 들은 증가하게 된다.

동합금의 점성은 Si, Al, Sn등의 합금원소첨가에 의해 증가되며 나머지 다른 원소에 대한 효과는 아직 연구되어 있지 않다. 용융금속의 온도가 고온이면서 높은 주조속도에서는 표면상태가 훨씬 좋아진다. 또한 표면상태에 영향을 미치는 부수적인 요인들은 윤활형태와 Mould벽면의 온도이다. 균열 이외에도 표면에 나타나는 것은 역편석(Inverse Segregation)에 의한 것으로 표면 거칠음과 표면기포 등을 들 수 있다. 이러한 현상을 제거하는 데에는 다음과 같은 방법이 있다. 즉 재용해되지 않도록 초기 응고될 때 응고표피를 두



접게 하면 용융금속이 중심부에서 표피로 빠져나오지 않게 된다. 또한 Mould에 주조방향으로 경사를 만들어서 공기틈(Air Gap)을 제거하여 사용하는 경우도 있다.

표면상태에 영향을 주는 그밖의 다른 요인들은 길이 방향으로의 파임, 추출 Roller에 의한 표면자욱 등으로 일반적인 형태의 결함 등이다. 황동의 연속주조시에는 Zn량이 많아질수록 표면결함이 증가하며 양백 등 합금에서는 약간의 역편석이 관찰되기도 한다. 균열이외의 결함으로는 기공과 파이프 등을 관찰할 수 있는데, 이들은 연속주조주편의 내부에 존재하는 결함의 형태이지만 외부환경과 밀접한 관련이 있다. 따라서 이러한 결함을 제거하기 위해서는 열응력과 응고수축을 최소화하기 위한 냉각속도제어, Mould와 용탕의 균일한 접촉과 열전달, 추출 cycle의 최적공정 확립 등이 요구된다.

### 3. 가열주형식 수평연속주조

#### 3.1. 개요

가열주형식 수평연속주조 프로세스는 종래의 연속주조에서 사용하는 냉각주형 대신에 주조 금속의 응고 온도(액상선온도)이상으로 가열한 주형을 이용하여 주형의 벽면에서의 용탕의 응고를 방지하는 것이 특징이다. 이 방법은 일본 지바공업대학의 명예교수인 A. Ohno 박사에 의해 창시된 것으로서, 등축정이 응고초기의 안정한 응고 각이 형성되기 이전의 단계에서 주형벽에서 생성, 유리한다는 결정유리설로부터 발전되었다. 가열주형식 수평연속주조는 주형 벽면의 온도가 항상 용탕의 응고 온도 이상으로 되도록 유지함으로써 주형면에서의 결정의 핵생성을 저지하여 주괴를 주형의 밖에서 냉각되도록 하여 열이동이 한방향으로만 일어나므로, 열이동 방향과 일치된 우선성장 방향을 가진 결정만이 경쟁성장에서 살아 남게 되어 주상정 또는 단결정인 소재를 얻을 수 있다. 응고 계면위치는 주형 온도, 냉각조건, 주조속도 등을 정밀하게 제어함으로써 일정하게 유지될 것으로 생각된다. 그러나 주형 출구에 걸리는 용탕압력은 주괴의 주조 방향, 주형의 설치 위치 등에 크게 영향을 받기 때문에 주조 장치의 설계 단계에서부터 고려하여야 한다.

#### 3.2. 기술적 특성

가열주형 일방향응고에 의한 선재 및 극세선 제조공

정기술은 기존의 제조기술이 billet을 다단계 신선하는 복잡한 방법인데 비해 원가절감이 기대될 뿐만 아니라, 선재내부의 미세조직을 원활히 조절할 수 있어 주조선재로부터 극세선의 신선이 가능하므로 기술수요가 점점 증되는 추세이다.

특히, 냉각 mould 또는 가열 mould를 사용하여 순동, 특수동, 황동 및 청동합금을 일방향응고법으로 연속 주조한 선재는 결정입계가 길이 방향으로 배열되므로, 양산화된 기초소재로부터 직경 30  $\mu\text{m}$  이하의 세선을 중간 열처리 없이 단일공정으로 제조할 수 있는 장점이 있다. 또한 극세선의 grain size가 100 nm 이하인 나노구조를 가진 경우에는 고강도와 연신률을 동시에 보유하게 되어 금속섬유로서의 응용범위가 금속필터와 본딩와이어 등으로 확대될 수 있다.

#### 3.3. 산업적 특성

최근 전자산업의 급속한 발전에 따라 전자기기가 더욱 정밀화, 고품질화, 소형화되고 있으며, 이에 사용되는 재료의 요구 조건도 점차 까다로워지고 있다. 재료 내부에 수축, 기포, 비금속개재물 등의 주조결함뿐만 아니라 결정립계가 전혀 없는 고순도 무산소동 및 특수동에 있어서는 단결정 소재나 일방향입계로 제어된 방향성 나노결정합금이 컴퓨터 집적회로의 bonding wire, 고급 음향기기의 cable 등 핵심전자기기 부품소재로 그 사용량이 급격히 증가하고 있다. 또한, 용융금속으로부터 직접 선재를 연속제조함으로써 에너지 소비를 줄이고 회수율을 향상시켜 생산성이 높을 뿐만 아니라, 전자기 특성이 우수하여 첨단전자기기, 음향기기 등 고부가가치 제품 개발에 큰 영향을 미칠 것으로 기대한다. 또한, 최근 극세선 제조기술은 전세계 선진국들이 많은 연구비를 투자하여 개발에 박차를 가하고 있기 때문에 상업적 가치가 매우 높은 기술이며, 금속섬유를 이용하여 고기능 항공필터와 반도체 본딩와이어 등을 산업화할 경우 그 파급효과는 클 것으로 전망된다.

### 4. 향후 산업화 추이분석

동합금은 전자부품의 다기능화 추세에 따라 기능성 동소재의 다양하고 복잡한 형상제어 및 박판화가 요구되고, 절대강도를 유지하기 위하여 고강도·고탄성화가 강력히 요구되고 있다. 따라서, 베릴륨 동, 티타늄 동,

인칭동, 백동(큐프로 니켈), 양백 등의 잘 알려진 합금 생산기술 위주에서, 현재에는 세계적으로 전기전도도는 약간 감소하더라도 사용범위가 넓은 고강도형 기능성 동합금이 냉각주형 수평연속주조법으로 연구개발 되고 있다. 한편, 순수한 일반 도전성 재료분야(강도 300~350 MPa, IACS: 85~95%)는 국내에서도 거의 제조기술이 완료되어 생산되고 있지만, 고부가가치를 가지는 고강도 도전성 합금의 경우, 주조기술과 가공열처리 기술이 부족하여 중요부품소재는 거의 수입에 의존하고 있는 실정이다. 현재까지의 가공열처리기술은 주조후 용체화 처리와 냉간압연에 의한 생산만을 추구하였지만, 고강도 기능성 동제품(인장강도 800 MPa 이상,

IACS: 30% 이상)의 생산과 고부가가치를 극대화하기 위해서는 균질화 처리기술, 시효 및 가공경화 등의 새로운 가공열처리 기술도입이 필수 조건이다. 한편, 가열주형식 수평연속주조에 의한 극세선제조에 있어서는 일본의 Furukawa Co., 오사카 후지공업 등을 중심으로 반도체용 본딩와이어, 저항선, 고기능 케이블와이어 등이 산업화되리라 전망된다. 이러한 추세에 따라 국내의 경우에도 인력과 기술, 그리고 장비 등이 이미 확보되어 있으며, 산업계의 수요도 점증하는 추세에 있으므로, 활발한 기술교류와 함께 실용화를 위한 연구 투자지원이 병행한다면 조만간 대부분의 기능성 동합금의 산업화가 가능할 것으로 예상된다.