

技術資料

알루미늄 수직연속주조의 기술적 발전현황과 전망

지 무 성

The Current Status and the Prospects of the Vertical Continuous Casting of Aluminum

M. S. Ji

1. 서론

Al재료의 가공소재를 생산하는데 주로 이용되고 있는 수직연속주조의 역사도 이제 약 반백년이 되었다. 그동안 여러가지 새로운 생산방법-STRIP CASTING*과 같은-들이 소개되어 왔으나 수직연속주조 또한 많은 개량을 거치면서 계속 이용되고 있다.

Al연주기를 개선, 발전시키는데 있어서의 시금석(試金石)으로는

- 기능과 작업 안전,
- 생산가 및 생산성,
- 품질 등 3가지를 들수 있으며, 여기에서는 이

들 3가지 요소를 근거로 한 Al수직연속주조의 기술적 발전에 관하여 언급하고자 한다.

2. 기능과 작업안전

일반적으로 Al수직연속주조는 매시간 당 80t까지의 용탕을 소화하며 이때 사용되는 냉각수는 대략 6000 l/min정도 된다. 따라서 용융금속과 냉각수와의 접촉에 따른 폭발의 위험이 대단히 크며, 이 때문에 연주기의 개발 초기에는 안전운행이 주된 연구과제가 되었었다.

Al 수직연주기의 주된 특징을 그림 1에 따라 설명해 보면 다음과 같다.

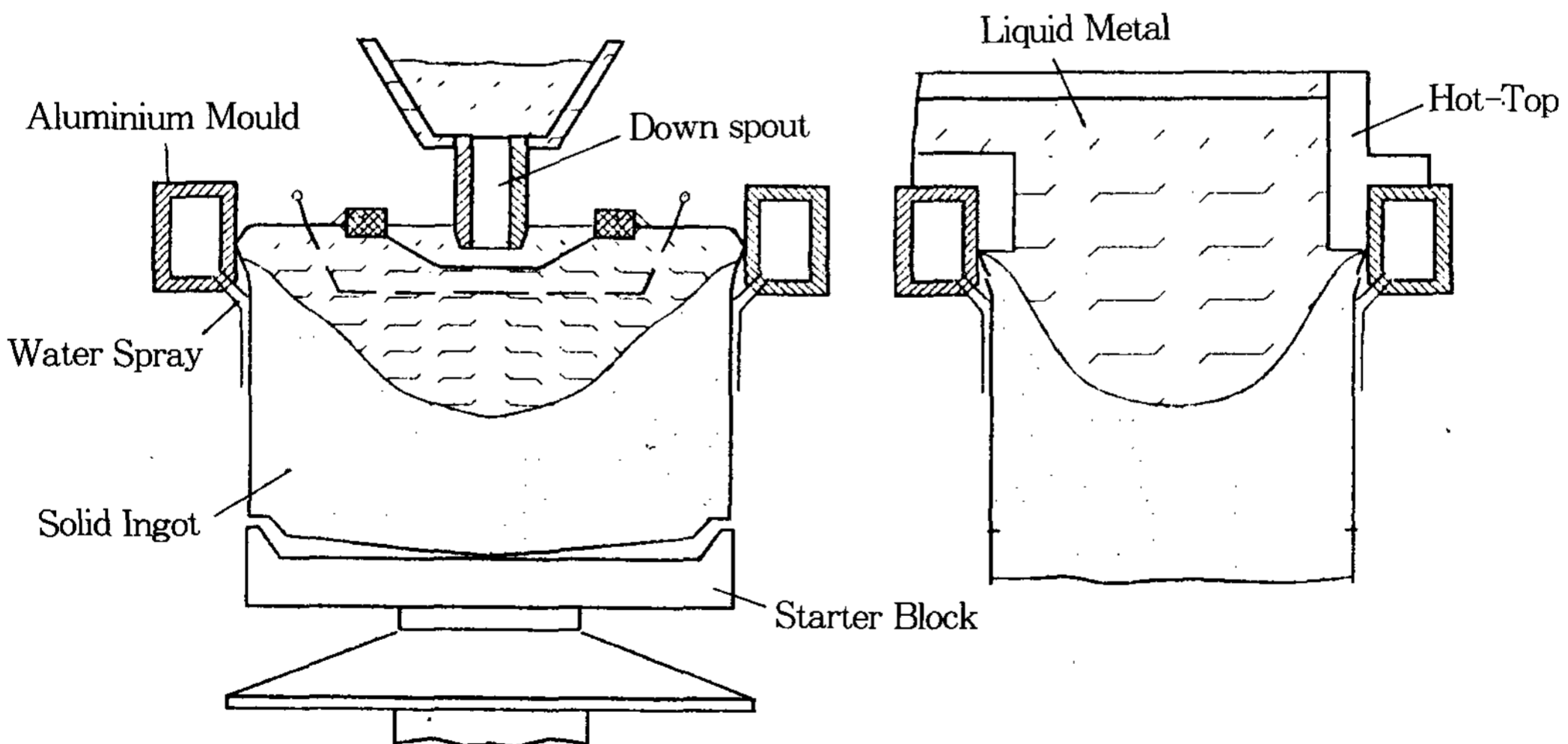


그림 1. 전형적인 Al수직연주시(왼쪽)와 HOT-TOP몰드를 이용한 연주시(오른쪽)

*strip casting은 고정식 몰드를 이용한 고전적 의미의 연속주조와는 달리 이동식 몰드를 이용한 연속주조로써 여기에서 말하는 연속주조는 전자만을 의미한다.

- AI 또는 강으로된 원판형의 이송 받침대 (starter block).
- 몰드 : 냉각장치에 의해 냉각되며 이때 몰드내의 용탕이 일부 응고되어 30-100mm 정도의 겹질층을 형성한다.
- 40-150mm/min 범위내의 주조 속도.
- 냉각수 : 50-250 ℓ /m(몰드의 둘레)

이러한 연속주조기는 지금까지 여러종류의 합금이나 각종 복잡한 형상을 갖는 제품을 생산하는데 이용되어 왔으며 근래에는 강렬한 폭발의 위험성 및 고품질, 생산성 등을 고려하여

- 작업조건의 제어 및 기타 주조준비과정 중에 검사해야 할 여러가지 목록들을 컴퓨터를 활용하여 감독, 확인함으로써, 반복생산성을 향상시키고 있으며,
- 적절한 방식처리와 감시를 통하여 용탕과 접촉함으로써 폭발할 가능성이 있는 물질을 멀리 하는등의 조치들이 취해지고 있다.

3. 생산가 및 생산성

주조공장에서의 작업인원은 일반적으로 주조라인의 수에 비례한다.

이때문에 연속주조에서는 생산라인의 수를 가능한 줄이고자 하며 대신 각 생산라인의 규모를 확대하려 한다. 즉, 주괴의 중량을 크게하거나 주조횟수를 늘리는 것인데, 실제로 압연소재(slab)의 경우 개당 무게가 100ton이나 되는 괴를 동시에 7개까지 주조하고 있으며, 봉재(billet)의 경우 200mmφ크기의 주괴를 단한번의 주조로 100개까지 동시에 생산할 수 있도록 되어있는 설비도 있다. 근래에는 그러나 다품종 소량생산의 경향에 따라, 생산가의 절감은 큰용량의 생산설비보다는 컴퓨터를 이용한 소규모 자동화설비로 작업인원을 감축함으로써 가능하다고 본다. 소규모 자동화 생산설비는 이밖에도 납기를 단축할 수 있으며 보관창고에 드는 경비 또한 절감할 수 있는 잇점을 갖게 된다.

4. 품질

연주기의 개선방향은 점점 제품의 품질을 향상시키는 쪽으로 옮겨가고 있다. 즉,

- 주괴의 품질을 최종소비자의 요구와 일치할

수 있도록 향상시키며

- 주괴를 가공함에 있어서 발생하는 스크랩 등의 양이나 가공 공정을 줄임으로써 중간 가공단계의 공정비를 절감하고자 한다.

주괴가 어떠한 품질을 갖추어야 하는가를 알기 위해서는 먼저 가공소재의 이용기술과 품질향상을 위한 금속학적 공정(열처리등)에 대한 정확한 지식이 필요하다.

아래에서는 주괴의 품질에 관계되는 가장 기본적인 요소들을 네가지(형의 균일성, 표면층의 결함, 주조 조직, 비금속 개재물)로 분류하여 이와 관계되는 주조설비의 개선에 관하여 설명하였다.

4.1 형의 균일성

잘 알려진 바와 같이 압출공정에서는 컨테이너 내벽과 billet 표면부와의 사이에 형성된 틈새로 인하여 압출재에 기공이 형성할 수 있기때문에 압출재는 가능한 요철(凹凸)이 없이 컨테이너를 꼭 채워야 한다. 이러한 요구는 특별히 간접압출이나 전기재료의 생산시에 더욱 중요시 되고있다. 이밖에도 slab의 경우에는 표면절삭이나 주괴의 밑부분을 절단하는 등의 공정을 절약하기 위하여 평활한 표면과 slab끝부분이 양호한 주괴가 요구된다. 그러나 주괴는 보통 응고-또는 냉각수축에 따른 응력의 형성에 의해 변형되거나 치수가 틀릴 수 있기때문에 앞서서와 같은 요구를 충족시키는 데는 그리 간단하지 않다. 특별히 문제가 되는 것은 주괴의 가장 밑부분의 변형이다. 밑부분의 변형은 주조 초기에 형성되는데, 이는 이송받침대와 함께 하강하는 주괴에 냉각수가 분사됨에 따라 형성된 응력이 그 원인이 된다.

몰드를 막 빠져나온 주괴에 갑작스럽게 닦친 냉각수에 의해 주괴는 수축하여, 밑바닥이 활모양으로 볼록하게(convex) 휘게되며 이에따라 주괴바닥의 양끝부분이 이송받침대로부터 100mm 정도까지 들리게된다.

그러나 주조 작업 초기의 냉각수량을 줄임으로써 피할 수 있다. 예를들면 CO₂가스를 혼합하여 분사시키든가 아니면 냉각수를 펄스 상태로 분사시켜 줌으로써 휨 정도를 보통 작업시 보다 1/2~1/4정도까지 줄일 수 있다. 이러한 분사방법은 작업의 안전을 위해서도 아주 유효하다. 즉 소재의 밑부분이 갑자기 휘게 됨으로써 응고된 얇은

표면층이 터져 용탕이 흘러 나올수 있으며 이에 따라 품질의 저하는 물론 조업의 중단이나 폭발의 위험성마저 있기때문이다. 최신연주기에서는 위와같은 주조초기 단계에서의 냉각수조절을 컴퓨터에 의해 자동조절하고 있으며, 이로써 열간압연시에 주괴의 밑부분을 절단할 필요없이 곧장 가공할 수 있는 정도의 고품질 소재를 생산하고 있다.

초기단계를 지난후부터는 응고수축에 따라 형성된 응력이 수직상정간에 형성된 틈새를 통하여 유입된 잔류용액에 의해 상당량 제거되지만 대부분 인장응력으로 작용하여 주괴를 수축하게 한다. 이러한 수축량은 주조속도등 주조조건을 변화시킴으로써 어느정도 조절할 수 있다. slab의 경우 이러한 체적수축은 긴 면의 중간부분이 모서리쪽 부분보다 심하며, 이러한 현상을 보상하

기 위해서는 몰드의 내벽이 오목하게 휘도록 크라운을 주어야만 하나 주조초기 단계에서의 수축은 계속되는 주조작업 중에서 보다 크므로, 위와같은 형태의 주형을 이용할 경우 주괴의 밑부분은 다소 볼록하게(convex 상태)될 수 있음을 고려해야 한다.

4.2 표면층의 형성

연주에 의하여 생산된 제품의 표면은 대개 매끄럽지가 못하다. 표면거칠기는 작업조건에 따라 얼마간의 차이를 보이는데 이에 대하여는 응고과정과 관계하는 다음의 2가지 요인을 들수 있다.

- 그림 2에 도시한 바와같이 몰드 내벽 모서리 부분에 존재하는 용탕의 표면부(meniscus)가 공기층과 접촉하면서 응고되기 시작한다(a-

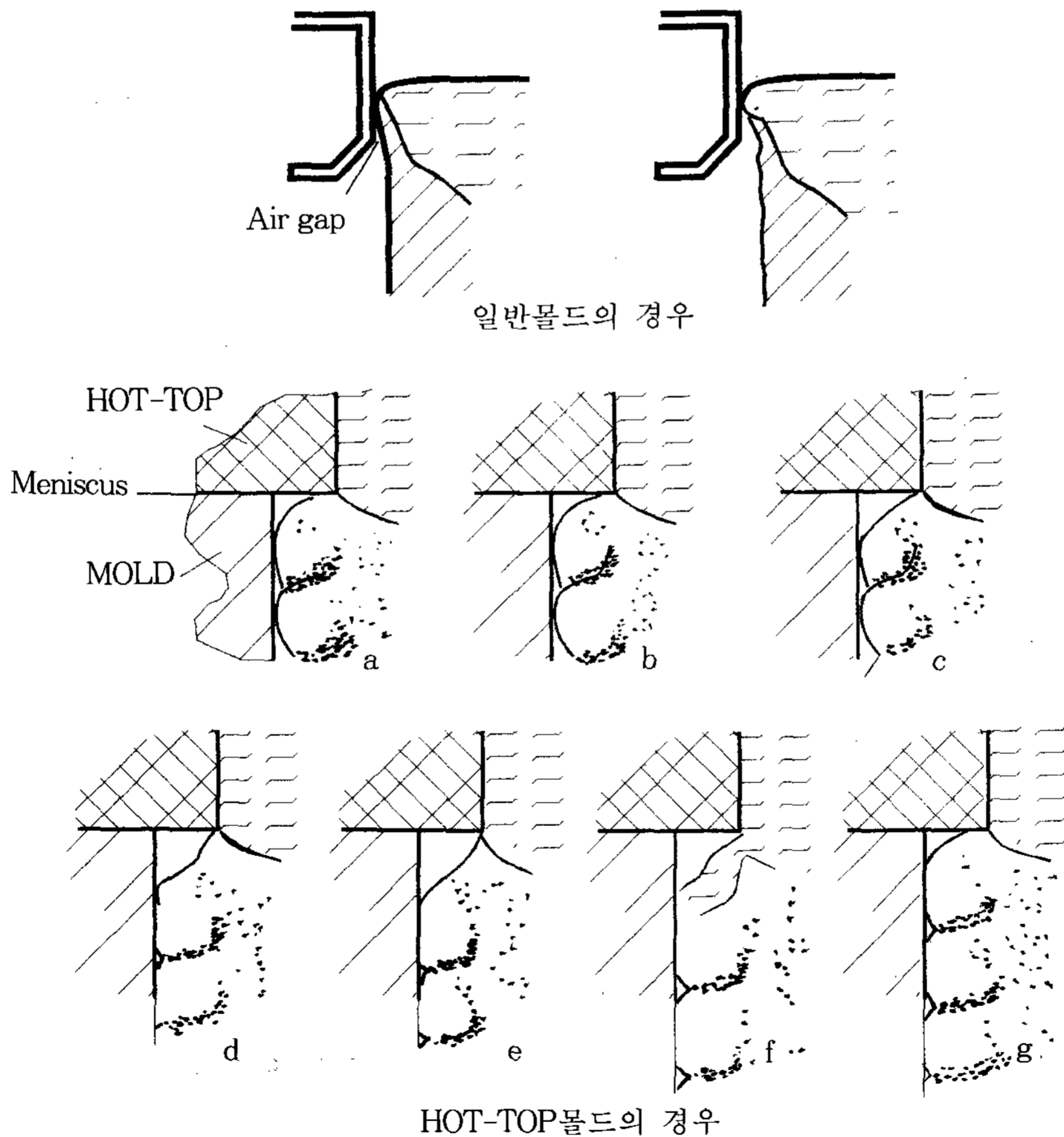


그림 2. 일반몰드와 HOT-TOP몰드에서의 coldshut 형성과정

e). 주조가 진행됨에 따라 이 부위는 연신되고, 어느 순간에 이르러 마침내 터지게 된다. 그위로 용탕이 덮쳐, 새로운 표면층을 형성하면서(f,g), 소위 'cold shut'(탕경계)를 형성하는 것과

- 그림 3에 도시한 바와 같이 고액공존대에 존재하는 잔류용액이 위에서 누르는 용탕의 압력으로 인하여 막 응고된 얇은 피막층을 뚫고 나오는 표면 편석현상을 들 수 있다^{2,3)}.

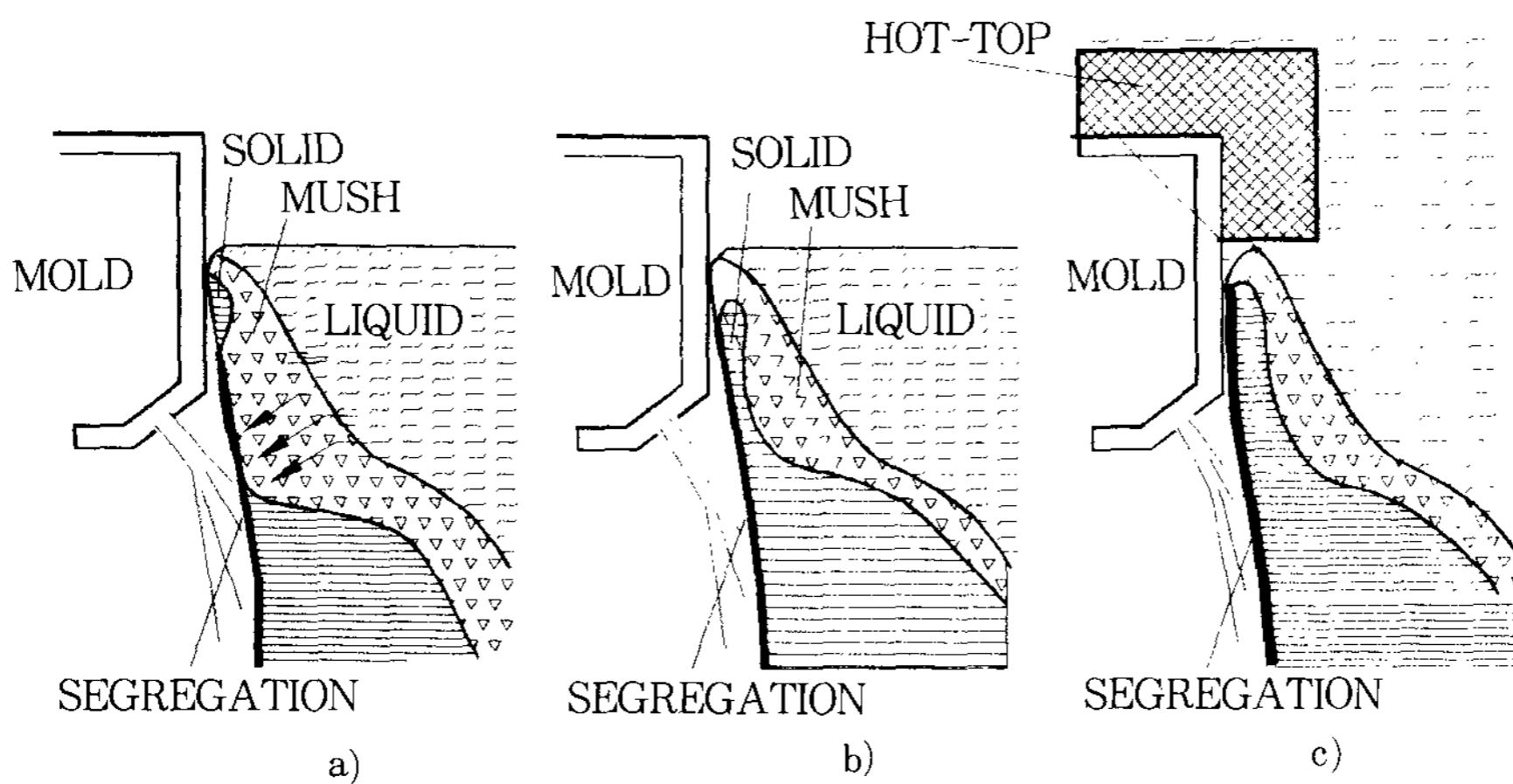
탕경계는 특히 순 Al이나 응고영역이 비교적 좁은 Al합금의 경우에 발생하기 쉽다. 이를 개선하기 위하여는 주조속도를 크게하거나 주조온도를 높이는 방법, 혹은 몰드에서의 열방출을 감소시키는 방법이 있다. 몰드 내벽을 통한 열방출을 감소시키는데는 일례로 내벽에 여러개의 가는 홈을 판 몰드를 이용하기도 한다. 이와는 반대로 표면편석현상은 응고구역이 큰 고 합금재료에서 두드러진다. 이때 저용융합금층의 두께는 약 1-2mm에 달하며 이어서 저용융합금원소가 상대적으로 적은층이 표면으로부터 5-20mm까지에 걸쳐 존재하게 되는데, 이들을 소위 겉껍질층이라고 한다. 압출봉재의 경우 보통은 이들 겉껍질층을 제거하지 않고 압출가공을 하게 되는데, 만일 편석등을 포함한 겉껍질층이 컨테이너 안에서 제거되지 못하고 제품에 들어가 제품의 표면층에 잔

류하게 되면 양극산화처리시 얼룩의 원인이 되며 심한 경우에는 소재가 압출방향으로 갈라지기도 한다. 압연시에는 이들 표면편석층을 깎아내야 하는데, 그렇지 않은 경우에는 압연가공후 비늘과 같은 모양의 불량한 표면이 나타나는 것을 보게될 것이다. 그러나 표면편석현상이 극히 적은 순 Al재료의 경우에는 제품이 허용하는 한 선삭을 하지 않고도 압연이 가능하다.

응고수축에 의하여 몰드내벽과 주괴표면 사이에 형성된 공기층의 형성으로 열방출은 감소하며, 이에따라 표면편석의 형성이 더욱 용이하게 되므로, 이를 억제하기 위해서는 몰드의 길이를 가능한 한 짧게하는 것도 한 방법이다. 이 밖에도 너무 높은 주조온도를 피하고 몰드내에 주입된 용탕의 흐름이 주형벽 쪽으로 직접 향하지 않도록 하는 것이 바람직하다.

몰드의 길이(몰드의 내벽중에서도 실제로 냉각을 담당하는 부위)를 짧게하는 방법으로는 Alusuisse에서 개발한 'ISOCAST'법과 'HOT-TOP 몰드법'이 있다. ISOCAST법에서 작업자는 몰드내에 주입되는 용탕의 높이를 기계식이나 유압식등을 이용하여 조절하는데 이때에 용탕의 높이는 가능한 한 최소의 값을 유지하도록 한다(그림 1).

주괴의 표면결함을 거의 완벽하게 제거할 수 있는 방법으로 자장(magnetic field)을 이용한 연



a) 몰드와 주괴겉껍질층 사이에 형성된 공기층의 단열효과에 의해 저용융합금이 연약해진 틈을 뚫고 나간다.
 b), c) 응고계면으로부터 농축된 저용융합금이 표면의 Meniscus를 통하여 표피층을 구성한다.

그림 3. 역편석의 형성

속주조 방법이 있다(4). 이 방법에 의하면 자장력에 의해 용탕이 몰드의 내벽으로부터 일정한 거리를 유지하기 때문에 용탕과 몰드의 접촉에 따른 표면편석이나 cold shut 등과 같은 표면결함(그림 2,3)의 형성을 피할 수 있게된다. 이때문에 자장주조에 의해 생성된 모든 Al합금의 slab는 표면선삭공정을 거치지 않고 직접 압연할 수 있으며, billet 역시 앞에서 언급한 바와 같은 표면결함에 따른 가공상의 난점들을 피할 수 있기때문에 고품질을 생산할 수 있게된다.

4.3 주조조직

주괴의 주조조직을 개선하기 위하여, 과거에는 가능한한 미세한 입상형태의 결정립을 갖는 주조조직을 목표로 노력하였다. 그동안에 Ti-B의 첨가제를 이용한 미세결정립의 제조기술이 개발되어, 이제는 특별히 고순도의 Al재를 생산하는 경우를 제외하고는 결정립의 미세화 기술은 충분히 발달되었다고 본다. 이에따라 최근에 있어서 주조조직에 관한 주된 연구과제는 가능한 미세하고, 균일하게 분포한 세포조직을 얻는데 중점을 두고 있다. 미세하고 균일하게 분포한 세포조직이라 하면 곧 금속간 화합물(중간상)이 기지조직 내에 미세하고 균일하게 분포되어 있음을 말한다.

고체 Al은 Fe나 Si등을 미소량 용해하기 때문에 보통의 공업용Al이나 이를 바탕으로한 Al합금들은 항상 중간상을 함유하기 마련이다. 이들 중간상의 미세분포도는 응고시 형성되는 2차 수지상정간 간격의 평균값으로 나타낸다. Flemings⁵⁾에 의하면 이값은 국부응고시간의 3제곱근에 비례한다. 여기에서 국부응고시간이라 하면, 단위용액이 고상으로 변태하는데 걸리는 시간을 말하는 것으로, 이 이론에 따르면 수지상정간의 거리는 그림 4에 도시한 바와 같이 고액공존영역이 두꺼울 수록 큰 값을 갖게된다. 이것으로 볼때 보통의 몰드를 이용하여-몰드의 깊이가 큰-생산된 가공재의 세포조직은 상대적으로 조대하며, 몰드에서의 용탕의 높이가 클수록 이러한 현상은 더욱 두드러진다⁶⁾.

연속주조에 의하여 생산된 주괴를 가공함에 있어서 많은경우에-양극산화처리등과 같은-주괴의 껍질층에 형성된 조대한 세포조직은 품질을

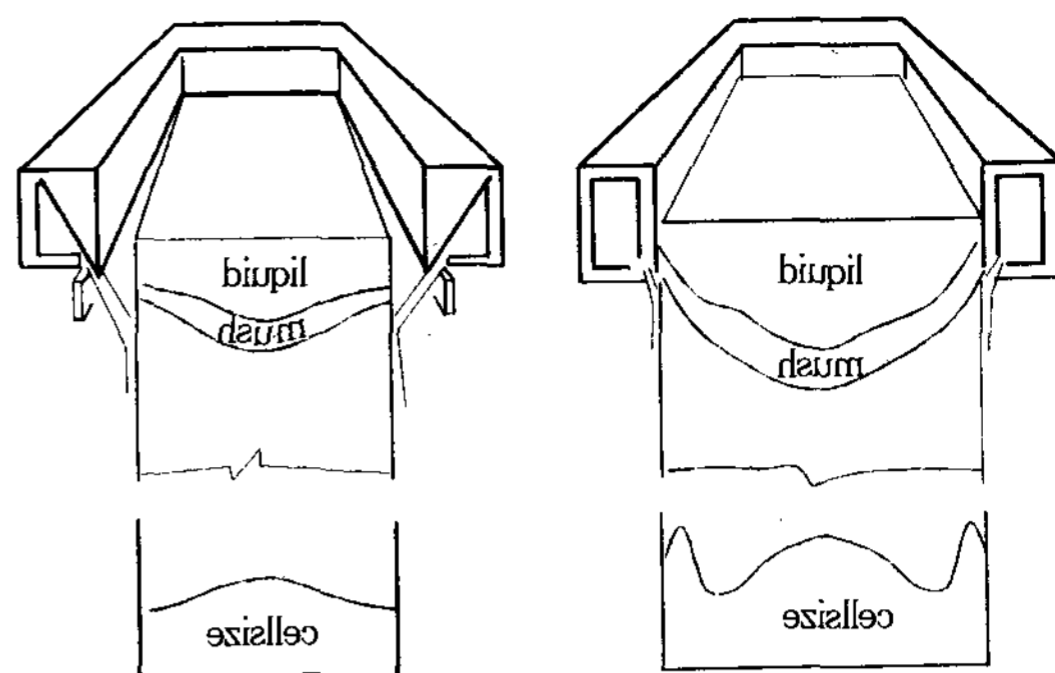


그림 4. 재래식 몰드(왼쪽)와 자장주조(오른쪽)에서 나타나는 전형적인 액상-고상면과 단면에 걸친 세포조직의 크기분포

저하시키는 요인이 된다. 이때문에 주조시 몰드의 냉각면(용탕으로부터 몰드밖으로 열을 전달하는 면)을 가능한 짧게하고자 하는데 이를 위해서는 ISOCAST법이나 HOT-TOP몰드를 이용하면 매우 효과적이다.

그림 4의 오른쪽 그림은 주조조직에 있어서도 자장주조를 이용하면 표면부위의 조대한 주조조직을 거의 완벽하게 통제할 수 있음을 보여주고 있다. 이 방법에 의해 생성된 미세조직의 크기는 대략 15-25 μm 정도인 반면, 보통의 연속주조 설비에 의해 생산된 제품의 미세조직은 30-80 μm 에 달한다. 일반적으로 미세조직을 갖는 재료는 열간가공성이 우수하여 모서리 부분에서 발생하는 균열등이 나타남이 없이 열간압연할 수 있다는 것이 자장주조에 의해 생산된 주괴의 커다란 장점이다⁴⁾.

주괴의 표면층과는 달리 주괴내부에서의 세포조직은 주괴두께에 의해 많은 영향을 받는다. 일례로, 두꺼운 주괴를 생산하기 위해서는 주조속도가 작아야 하며 이에따라 제품중심부에서의 세포조직은 조대하게 되어, 얇은주괴에서보다 상대적으로 조대한 중간상을 얻는다. 실제로 두께 50mm인 주괴의 세포조직의 크기는 10-15 μm 인 반면, 두께 500 μm 인 주괴에서는 100-150 μm 의 세포조직이 나타난다.

세포조직의 크기를 변화시킬 수 있는 또하나의 방법으로는 응고계면에서의 용탕의 유동상태를 조절하는 것이다. 응고계면에서의 유동상태는 용탕의 주입방법(spout형태)에 따라 변화한다. 일반

적으로 고온의 용탕이 응고계면위에 직접 주입되는 부분은 주변의 유동속도가 느린곳(사각지대)보다 미세한 세포조직이 나타난다. 응고계면에서 액상의 유동속도가 빠르거나, 느린가에 따라서 세포조직의 크기가 서로 다르게 되므로, 몰드내에 용탕을 와류상태로 주입하는 것은 피해야 한다.

용탕을 주입함에 있어서 응고계면에 형성되는 유체흐름을 억제시키는데는 HOT-TOP몰드를 이용하는 것이 바람직하다. 이때의 HOT-TOP은 막 주입된 용탕이 응고계면과 충분한 거리를 유지하도록 그 높이를 조정하여야 한다. 그림 1-a와 같은 주입방법에서는 용탕 흐름에 따른 미세조직의 불균일성을 고려해야만 한다.

특히 AlCuMg이나 AlZnMgCu등과 같이, 고액공존 구역이 넓은 합금에서는 주괴 중심부에 수지상정간에 형성하는 기공들이 나타난다(그림 5). 이러한 고장력 합금들은 항공 우주산업에 많이 이용되고 있는 관계로, 그림 5와 같은 기공의 형성은 강도나 피로관계에 악영향을 미치게 된다.

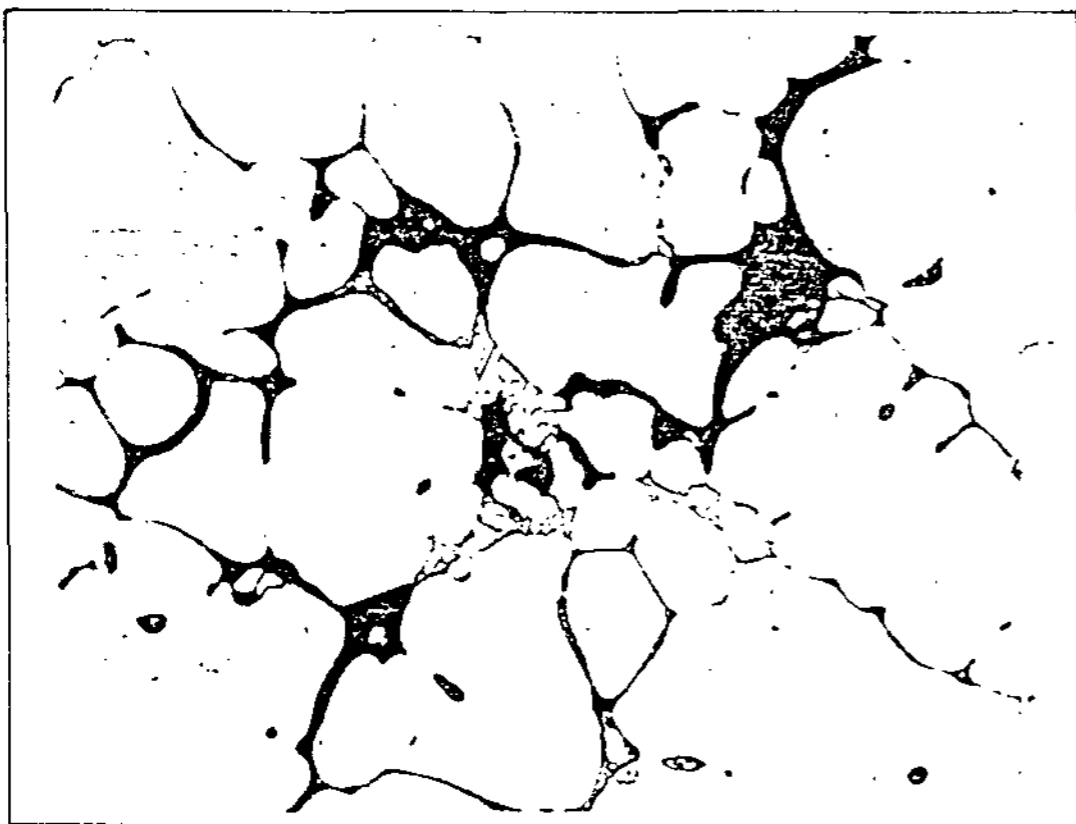


그림 5. 수지상정간에 형성된 다공질(AlZnMgCu).
배율=200X

기공의 형성원인을 살펴보면 다음과 같다.

단위체적을 갖는 Al재료는 용액상태에서 고상상태로의 응고가 진행됨에 따라 대략 7.5%의 체적 수축이 일어난다. 응고계면에서 발생하는 이들 체적수축은 수지상정간의 틈새를 통하여 유입되는 용액으로 채워지게 된다. 만일 응고 계면의 모양이 V자 모양으로 깊으며 액상선과 고상선의

거리가 상대적으로 먼 상태에서는 액상금속이 수축된 부위까지 유입되는 거리가 멀어서, 충전과정중에 이 부위의 압력상태가 수소가스의 형성 압력 이하로 낮아지게 되어 기공이 발생하게 된다. 따라서 고장력 Al 합금을 연속주조하는 경우에는 수소의 함량을 최소한으로 억제시켜야 하며 특히 응고계면이 깊숙히 파이지 않고 가능한 평탄하도록 주조속도를 아주 적게하는 것이 중요하다. 만일 일직선의 응고계면을 얻을 수 있다면 연속주조시 형성하는 역편석 현상을 최소한으로 감소시킬 수 있을 것이다.

4.4 비금속 개재물

연속주조에 있어서 비금속 개재물은 품질 저하의 최대 요인이 되는데 이들 비금속 개재물은 일반적으로 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 대략 1~20 μ m 사이의 크기를 갖는 미세한 것들로, 이들은 이미 전해(電解) Al에 산화물이나 탄화물 형태로 존재하고 있거나 결정립 미세화를 목적으로 첨가한 합금(TiB₂)이 원인이 된다.
- 중간크기의 산화물들로 주조과정중에 로내에서 발생한다.
- 200 μ m 이상의 크기를 갖는 조대한 것들로, 보통 주조 작업중에 형성된다.

이러한 조대한 비금속 개재물의 형성을 억제시키기 위한 주조기술은 앞으로도 계속 개선되어야 할 과제로 남아있으며, 이는 무엇 보다도 난류형태의 용탕주입을 피해야 하며, 주조설비는 액상의 Al에 대하여 높은 안정성을 갖는 재료를 사용함으로써 가능할 것으로 본다.

5. 결론

기계설비적 측면에서 볼때 Al의 연속주조는 지금까지는 항상 더욱 크고 효율이 높은 설비를 갖추고자 하였으나 앞으로의 경향은 가변성이 있으며 완전 자동화된 주조설비를 요구하고 있다.

기술적인 측면에서는 특히 형의 균일성, 표면 특성, 주조조직, 비금속 개재물등 주조제품의 품질에 대한 요구가 더욱 커지고 있다.

현재로서는 HOT-TOP 몰드를 이용하여 우수한 주조조직을 얻을 수 있으나 이상적인 표면층을 얻기 위해서는 자장을 이용한 연속주조에 비할

바가 못된다. 이에따라서 HOT-TOP몰드 주조법은 표면층의 품질개선을 위하여 몰드와 단열재 사이에 공기베개(Air-cushion)를 설치 함으로써 (기체가압식 HOT-TOP 주조) 탕경계나 표면편석의 형성을 감소시키는 효과를 가져왔으나^{7,8)} 이 또한 자장주조에 비해서는 표면층의 품질이 뒤떨어지며, 특히 대형의 billet나 slab의 생산에는 아직 어려움이 많다. 그러나 자장주조법 역시 여러 개의 소경 billet를 동시에 생산하는 연주설비에는 경제성이나 기술적으로 실현성이 제한되고 있다.

AI연속주조는 최근의 현대적 설비와 높은 생산성에도 불구하고 아직도 부분적으로는 수동작업으로 작동되고 있으며 고온의 용탕안에서 진행되는 과정들을 조정, 제어하는 데는 아직도 반복 생산성이 부족하다. 이는 특히 주조가 용이하지 않은 고합금재료나 크기가 극히 적은 주괴를 생산하는데 있어서 더욱 심하게 나타난다.

따라서 앞으로의 연주설비는 작업자의 안전을 신뢰할 수 있는 주조작업과 품질에 있어서의 완전한 재생산성에 초점을 두고 개선되어야 할 것이다.

기존의 현대식 자동화설비 역시, 보다더 능률적인 체재를 통하여 보다 정확한 생산공정 데이터의 파악과 최적의 작업조건등을 선택할 수 있

도록 보장되어야 할 것이다. 최근의 컴퓨터발전은 이미 충분히 효율적이어서 최신 측정설비와 함께 신뢰할 수 있는 생산공정을 예측할 수 있게 되었으며 이에따라 연속주조 생산기술의 계속되는 발전이 기대되고 있는 바이다.

*이내용은 International NE-Metall in Wien 1987 중에서 K.Buxmann의 논문을 발췌한 것임.

참 고 문 헌

1. Ho Yu : US Patent N^o 4 166 495(1979)
2. K. Buxmann : Metall 31(1977), S.163
3. K. Buxmann : Aluminium 54(1978), S.685
4. J.C. Weber : Symposium "Stranggießen" Bad Nauheim(1985)
5. T.Z. Kattamis, J. C. Couglin u. M.C. Flemings : Trans. AIME 239(1967), S.1504
6. K. Buxmann u. E. Gold : J. Metals 34(1982), S. 28
7. K. Buxmann, J-J. Theler u. M. Bolliger : paper presented at the "Aluminium Technology 1986" in London(1986)
8. F. E. Wagstaff : Light Metal Age(August 1982), S.11