

알루미늄합금 빌렛 주조법

김병조, 신돈수, 장익상
삼선공업(주)

I. 서론

추진체에 있어서 추진기관의 성능 향상이나 추진체의 경량화로 비행거리를 연장시키는 것은 추진체의 가장 중요한 기능을 향상시키는 것으로 많은 연구와 노력이 집중되고 있는 분야다. 특히 경량화는 추진기관의 성능 향상이나 형상변경 등의 어려운 작업 없이도 추진체의 중량을 줄임으로써 비행거리를 늘릴수가 있다는 장점을 갖고 있다.

이와 같은 경량화를 위해서 사용되는 소재에는 Al합금, Mg합금 등의 금속소재와 플라스틱 및 복합재 등을 들 수 있다. 이 중에서 Al합금은 제조법이 보편화 되어 있고 꾸준한 연구개발이 이루어져 경량화 재료로 가장 널리 사용되고 있으며 적용범위도 계속적으로 확대되는 대표적인 소재다.

최근들어 추진체가 대형화, 고성능화 되는 추세에 따라 구조재에 주로 사용되는 Al합금 소재도 대형화의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 대형 Al합금 소재를 제조하는 방법에는 주괴형태의 주물을 만드는 경우와 원형의 빌렛이나 각형의 슬라브를 연속주조하는 방법이 있는데, 품질면에서 후자의 경우가 월등히 우수하다. 그러나 Al합금 빌렛의 경우 현재 국내에서 생산 가능한 최고 직경이 15인치(약 380mm)이며 주로 압출을 위한 소재로 사용되고 있어 이를 대형화하는 기술개발이 시급한 상황이다.

이에 Al합금 단조부품의 특징 그리고 단조용 소재를 생산하기 위한 Al합금 빌렛 주조법에 대해 간략한 설명을 함으로써 Al합금 빌렛의 제조방법에 대한 이해를 돕고자 한다.

II. Al단조품의 특징

Al단조품은 경량, 고강도이면서, 균일한 재질특성을 가져 신뢰성이 높은 것이 장점이며 다음과 같은 특징이 있다.

1. 비강도가 높다.
2. 응력방향에 따른 설계가 가능하다.
3. 복잡한 부품도 경제적으로 설계할 수 있다.
4. 내압강도가 높다.
5. 피로강도가 높다.
6. 양호한 표면조도를 얻을 수 있다.
7. 내충격성이 양호하다.
8. 안전성이 뛰어나다.

Al단조용으로 사용되는 소재는 주조재, 압출재, 압연재 및 인발재 등이 있으며, 일반적으로 표 1에 표시된 Al재료의 제조공정 각 단계에서 얻을 수 있다.

대형단조품의 경우 압연용 주괴(슬라브) 또는 압출용 주괴(빌렛)를 균질화처리 후 절단하여 단조용 소재로 사용한다. 그러나

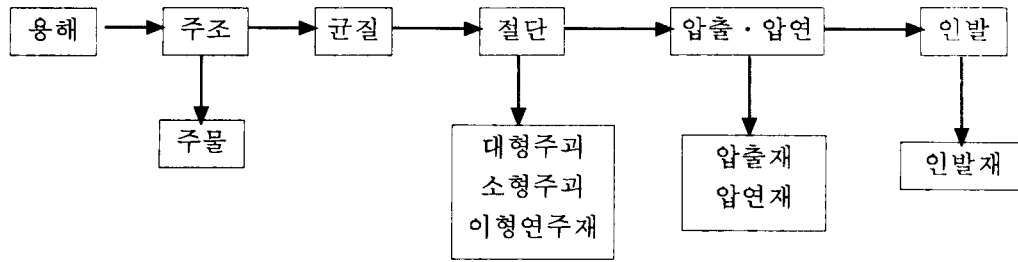


표 1. Al 재료의 제조공정

형단조의 경우에는 주로 압출재가 사용되어져 왔으며, 일단 주조된 빌렛트를 다시 압출하는데 따른 제조원가 상승요인이 있다.

압출재는 압출공정에 의해 재료가 충분히 단련되어 안정적이고 품질이 좋은 단조용 소재로 사용될 수 있다. 고력 Al합금의 경우에는 압출재 표면부에 결정조직의 이상조대화 발생하지 않도록 주의해야 하며, 압출재는 방향성을 가지므로 단조공정에서 Metal Flow와 정합성을 가질 수 있도록 유의해야 한다.

III. 단조용 소재의 조직 및 단조성

고력 Al 합금의 경우 변형저항이 커서 단조공정 중에 갈라짐이 발생하기도 한다. 단조성은 Al합금의 변형저항과 가공성능으로 평가한다.

1. Al합금의 가공성

Al합금 단조시 갈라짐이 발생하지 않는 가공한계가 문제가 된다. 역학적으로 파단이 일어나는 최대변형률이 있고, 이를 소재의 변형능 또는 가공성이라고 한다.

가공성 평가는 일반적으로 인장시험, 압축시험, 웻지시험 또는 회전단조시험 등의 방법을 사용하고 있다.

2. Al합금의 변형저항

Al합금을 소성변형시킬 때 외력에 대한 내부응력이 발생하고, 이러한 변형저항은 항복응력과 같은 것도 있지만 실제 소성가공에 사용하는 재료와 공구 사이의 마찰저항의 형태로 나타난다. 변형저항은 단조하중/접촉면적 (kgf/mm^2)로 구할 수 있으며, 단조품의 형상 및 밀폐도, 단조조건(온도, 가공속도) 등에 따라서 변한다.

변형저항 또한 인장시험, 압축시험 등을 통해 측정할 수 있다. Al합금의 기계적 성질 및 소성가공성은 소재의 조직에 따라 크게 변화한다. 예를 들면 결정립 크기, DAS, 제2상의 양과 크기, 편석의 유무, 수축공 및 기공의 정도 등의 영향을 받는다.

조직인자를 이상적인 상태로 해서 기계적 성질과 가공성이 양호한 소재를 얻을 수 있다. 단조용 소재를 주조할 때의 응고조건에 따라서 조직인자는 큰 영향을 받으며, 응고속도가 빠를수록 조직이 미세하고 균일해진다. 그러므로 미세한 조직을 얻을 수 있는 Al합금 빌렛트 주조방법 및 주조조건을 선정하는 것이 중요하다.

IV. Al합금 빌렛트 주조법의 분류

Al합금 빌렛트 연속주조법은 우선 주조된

빌렛트의 인출방향에 따라 수평주조, 수직주조로 구분할 수 있다. 수평주조(그림 1)는 수평으로 주조되는 빌렛트를 계속적으로 절단할 경우 완전히 연속적인 주조가 가능하여 연속주조법으로 분류하나, 빌렛트에 상하 온도편차가 발생하여 편석이 발생하기 쉽고 대구경의 빌렛트 제조가 어렵다는 문제점이 있다. 반면 수직주조는 길이에 제한이 있어 반연속주조법으로 분류되나 응고면이 원주방향으로 대칭적이어서 상대적으로 안정된 주조작업이 가능하다는 장점으로 일반화 되어 있는 주조방식이다. 이러한 수직주조법은 주형의 형상이나 기능에 따라 DC(Direct Chill)주조법, Hot Top주조법, 전자장 주조법으로 대별할 수 있고,⁽¹⁾⁽²⁾ Hot Top주조법은 다시 공정 개발 회사 및 공정 특성에 따라 재래식 Hot Top 주조법, Air Slip 주조법, Airsol Veil 주조법, 기체가압식 주조법등으로 세분화 된다.

1. DC주조법(Direct Chill Casting)

DC주조법은 Al합금 빌렛트를 생산하는 가장 일반적인 방법으로 이는 용융금속이 용해로에서 spout를 거쳐서 몰드를 채우는 "two-level"주조법이다. 그림 2에 DC주조법의 개략도를 나타내었는데, 이 방법은 몰드내 용탕 유입량을 spout와 float의 조합에 의해 자동적으로 조절하는 것으로 다른 방법과 비교하여 설비비가 저렴한 반면에 다음과 같은 문제점들이 있다.⁽²⁾

①여러 홀에서 주조가 진행될 경우 숙련된 주조 작업 인원이 많이 필요하며는 것과, ② 주형 높이가 높고 일정하지 못하여 주조속도가 낮고 표면 상태가 좋지 않은점, 그리고 ③ float 부에서 산화물 혼입과 가스 흡입에 의한 용탕의 오염이 생긴다는 것 등이다.

2. Hot Top주조법 (Hot Top Casting)

2.1 특징

DC주조법과 같은 "two level"주조법이 최근에는 "single level"주조법으로 대체되고 있는데, 이중 대표적인 것이 Hot Top주조법이다. 그림 3은 Hot Top주조법의 개념도를 나타내었다.⁽²⁾ 이 방법은 용탕이 수냉몰드 상부에 설치된 header라 부르는 내화 단열재로 된 통로를 거친 후 주형에 공급되는데, DC주조법과는 달리 header부위에서의 용탕교란이 없고 용탕을 청정 상태로 보존할 수 있다. 특징으로는 빌렛트의 품질이 개선되고 생산량이 증가한다는 점을 들 수 있다. 그러나 이 방법은 주형 구조상 header를 주조 주형으로부터 연장할 수가 없어서 용탕이 주조 주형에 불연속적으로 접촉하여 주괴 표면부에 header 돌출 정도에 해당하는 편석층이 발생되고, 주괴 표면에는 lapping이라는 Hot Top주조법 특유의 요철표면이 형성된다. 따라서 용질 농도가 높은 고력 Al합금에서는 주괴를 가공하기 전에 이 부분을 제거할 필요가 있다.

그림 4는 DC주조법과 Hot Top주조법에서 용융 금속내 열흐름의 상태를 나타낸 것이다.⁽³⁾ 여기서 보면 Hot Top주조법은 DC주조법에 비해 용융금속 속의 열흐름이 주형 절단면에 대해 수직이며 균일하다. 이러한 열흐름은 DC주조법에서는 불가능한 고액 계면에서의 온도 제어를 가능하게 하여 편석을 최소화한 건전한 조직을 갖는 빌렛트 제조가 가능하다.

DC주조법에 비해 Hot Top주조법의 장점으로는 아래 사항들을 열거할 수 있다.⁽⁴⁾

①주괴 표피 특성을 지배하는 인자중 하나로 주형 접촉점으로부터 냉각수가 분사되는 위치까지의 유효 주형 높이가 DC주조법에 비해 낮아 표면이 상대적으로 평활하고, 역편

석층과 같은 이상층도 얇아진다. ②산화물 혼입이 없다. ③비속련자도 작업이 가능하다. ④결정립이 균일 미세하게 되어, 주괴 내부 품질이 향상된다.

한편 Hot Top주조법의 문제점들로서는 아래 사항을 열거할 수 있다.⁽⁴⁾

①header와 주형과의 접합면에 용탕이 응착되지 않고 주형 원주상에 윤활유가 균일하게 공급되도록 해야 한다. ②header지름을 주형 지름보다 작게 제작하는 결과 주형으로부터 header가 돌출한 양에 따른 ripple현상이 발생한다. ③주조 조건 변화로 고유한 ripple현상을 방지하여도 6063과 같은 낮은 용질농도의 Al합금에서는 주괴 표피에 소돌기 형상의 “가스붕”이 발생한다. ④DC주조법에 비해 header내 용탕 수용량이 많아서 응고각의 재용융이 발생하기 쉽다. 이 현상은 응고온도 범위가 넓은 합금에서 많이 발생한다.

2.2 파단현상

Hot Top주조법에서 가장 문제가 되는 것은 주조 초기의 비정상시에 자주 발생하는 파단 현상이다. 이 현상은 액상-고상의 온도 차이가 큰 합금에서 특히 발생하기 쉽다. 그림 5에 파단 현상의 발생 기구를 도식적으로 나타내었다.⁽⁵⁾ 그림에서 보면 주형에 접촉된 용탕은 열을 빼앗기며 얇은 응고층을 형성한다.(a단계) 이렇게 형성된 응고층이 주형의 내면에 응착되어 빌렛트 하강시 그 일부에 균열을 일으킨다.(b단계) 계속적인 하강에 따라 균열은 보다 크게 되어 용탕이 유출되면서 파단이 된다.(c-e단계) 따라서 이러한 현상을 방지하기 위해서는 주조 초기에 윤활유 공급량을 정상시보다 20~30%증가시켜 공급함으로써 용융금속이 주형내면에 응착되는 것을 방지해야 한다.

2.3 Ripple 생성 기구

Hot Top주조법에서 가장 문제가 되는 것은 이 방법특유의 cold shut이 빌렛트 표면에 형성되는 것으로, 이러한 ripple생성기구에 대하여 분석을 하면 다음과 같다.^{(3),(6),(7)}

용융 금속내 열흐름은 ①몰드를 통한 열이동(high chill) ②내화물을 통한 열이동(low chill) ③용융 금속에서 응고 표층부로의 열이동으로 나눌 수 있다. 이들 세가지 유형의 열흐름이 평형을 이루는 상태에서 미세조직이 형성된다. 이러한 응고양상과 관련하여 일정한 원소의 고농도 부위가 표면 부위에 주기적으로 형성되고, 저농도 부위가 표면에 band 상태로 발생한다. 결과적으로 빌렛트 외층부 응고는 불연속적으로 되어 그림 6과 같이 ①공정 조성의 표면층 ②빌렛트 내부로 짧은 거리에 걸쳐 확장된 곡선을 따라 배열된 공정조성을 갖는 층 ③빌렛트 표면에 정상조성보다 낮은 농도를 갖는 평행한 좁은 층의 세가지 편석층으로 구분된다.

이러한 매크로 조직은 Hot Top주조법에 의해 주조되는 모든 빌렛트의 일반적인 현상은 아니지만, 기본적인 응고기구로 간주되므로 이에 대한 분석이 필요하다. 그림 7에 ripple생성기구의 과정을 나타냈다.⁽⁶⁾ 응고계면이 벽면으로부터 성장되고 응고된 빌렛트 표층부가 아래로 이동함에 따라(a,b단계), 응고 계면은 수평 header단면과 접촉된 상태에 있다. 따라서 응고 계면 상부에 빈공간이 결과적으로 형성되고, 이 공간의 크기가 계속적으로 증가한다. 주조가 계속됨에 따라 응고 계면은 돌출 header의 가장자리까지 성장하게 된다.(c단계) 일정단계에 이르면 용융금속은 모서리의 빈공간을 채우는데 방해받기 때문에 응고 계면의 내부는 빌렛트의 외부 표면이 된다.(d,e단계) 그러나 모서리의 빈공간이 일정 크기 이상이 되면 냉각효과

가 감소하고 얇은 응고층에 온도가 상승하여 터지면서(f단계), 용융금속이 빈 공간을 채워 전 과정이 다시 반복하게 된다.(g단계)

2.4 종류

위에서 설명한 바와 같이 Hot Top주조법은 DC주조법에 비해 성력화 및 주괴 품질 향상 등을 목적으로 개발된 것으로 지속적인 연구가 진행되고 있다.⁽⁵⁾ 예를들면 자동 급유 방식^{(8),(9)}, 흑연 또는 금속링을 삽입하는 방식^{(3),(10)}, 금속 주형 내면에 흑연을 삽입하는 방식^{(11),(12),(13)} 및 불활성가스 등의 기체를 주입하는 방식⁽¹⁴⁾ 등이 있다. 이렇게 Hot Top 원리로 개발된 주조법은 개발회사에서 고유한 명칭을 부여하고 생산에 적용하고 있다.

2.4.1 Air Slip

Air Slip 주조법은 미국의 Wagstaff사에서 개발한 기술로서 주형 내면에 다공성 흑연링을 삽입하고 흑연링에 윤활유, 압축가스를 주입하여 빌렛트 표면을 매끄럽게 하는 것에 주안점을 둔 주조기술이다. 이 방법으로 제조한 빌렛트는 매우 평활한 표면과 아주 얇은 액상구간과 균일한 미세조직을 갖는 특징이 있다.

2.4.2 기체가압식 주조법

기체가압식 주조법은 일본의 昭和輕金屬(株)이 개발하여 Showa Process라고도 하는데⁽¹⁵⁾ 이 주조법은 소구경의 빌렛트 주조에 유리하다. 昭和輕金屬(株)에서 이 주조법으로 생산한 제품명은 "Shotic"이라 부르며 주로 단조용 소재로 사용한다.⁽¹⁶⁾

기체가압식 주조법의 개념도를 그림 8에 나타내었다. 이 주조법은 수냉 주형상에 설치한 header와 주형 상면과의 사이에 설치한

공간을 통하여 가압용 기체와 윤활유가 공급된다. 이렇게 공급되는 기체는 압력 조절이 가능하여 용탕을 주형의 아래 부분과 접촉하게 할 수 있다.이에 따라 주형에 의한 1차 냉각보다는 냉각수에 의한 2차 냉각이 보다 효율적이 되어 빌렛트를 급냉하게 된다. 따라서 기체 가압 Hot Top 주조법은 재래식 주조법과는 달리 평활한 빌렛트 표면을 얻을 수 있다.

3. 전자장 주조법(Electromagnetic Casting)

전자장 주조법은 용탕을 주형에 접촉시키지 않고 전자력으로 지탱하면서 주조를 행하는 방법으로 표면이 평활하고, 역편석층이 전혀 없는 양호한 주괴가 얻어지지만, 아래와 같은 문제점들이 있다.

①전자력으로 용탕의 형상을 유지한 상태로 수냉 응고시키므로 주괴 형상이 불안정하다. 즉 원형을 정확히 얻을 수 없다. ②다연 주조에서느 주형 상호간 자장의 영향을 받기 때문에 주형들을 밀접시켜 배치할 수가 없다. ③용탕 공급량을 제어하기 위해 float를 사용하므로 DC주조법과 같이 용탕 교란으로 인한 산화물 혼입이 발생한다.

V. 결 론

이상에서 Al합금 빌렛트 주조법의 종류 및 특징과 같은 기초적인 부분에 대해 살펴보았다. 국내의 Al합금 빌렛트 시장이 넓은 상황이 아니고 압출의 원소재로 자급하는 수준의 소규모 생산이 대부분인 까닭에 생산 가능한 최고 직경이 15인치(약 380mm)에 불과하며 주조방식도 재래식인 경우가 많고 일부에서 외국의 기술을 도입하여 운용하는 정도의 수준으로 독자적인 주조방식의 개발은 아직 이루어지지 않고 있다.

따라서 대형 구조물등에 사용 가능한 대형 빌렛 생산기술은 아직 기초단계에 머무르고 있고 이에 대한 기술개발이 시급한 상황이다.

VI. 참고문헌

1. S. Yanagimoto and R. Mitamura :
"Application of New Hot Top Process to Production of Extrusion and Forging Billet",
Proceedings of the Third International Aluminum Extrusion Technology Seminar (ET84), Atlanta, 1984, p247
2. 右弘一郎, 高橋靖弘, 三田村良太:輕金屬
vol 35, No 2, 1985, p112
3. W.J. Bergmann : Z. Metallkde., 64(1973), 536
4. 三田村良太 : "Hot Top 鑄造法" 第19回
Symposium, Aluminum 連續鑄造 技術と
鑄塊組織 輕金屬學會, 1981
5. 城谷正人, 犬丸, 中村春 : 住友輕金屬技報,
vol 22, No.1, No.2, 1981, p53
6. W.J. Bergmann: J. Met. Trans., 1 (1970),
3361
7. W.J. Bergmann : J. Metals, 25(1973), 23
8. E. Lossack : TMS Paper, No.A70-40
TMS-AIME (1976)
9. U.S. Patent, 4057100 (1977) : 日本特開,
昭 51-148620
10. U.S. Patent, 3381741 (1968) : 日本特公,
昭 48-44607
11. 英國特許, 1389784, (1975)
12. A.G. Furness, D.D. Beattie and J.D.
Harvery : TMS Paper, No.A76-88,
TMS-AIME(1976)
13. D.A. Bennett and A.P.Titchener : Light
Metals 1979. 2, TMS-AIME(1979), 683
14. 日本特公, 昭 54-42847
15. 昭和輕金屬 "General Description, New
Hot Top Continuous Casting Process"
16. T. Sekiguchi, et.al : "Forgeability of
Cast Bar made by New Hot Top
Continuous Casting Process", 110th
AIME, Light Metals, 1981, p871

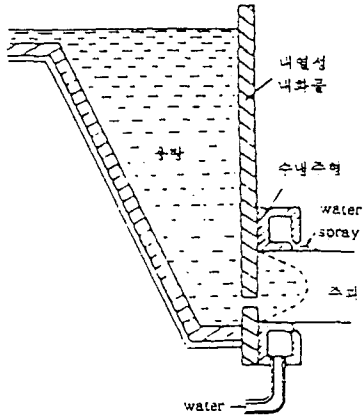


그림 1. 수평주조

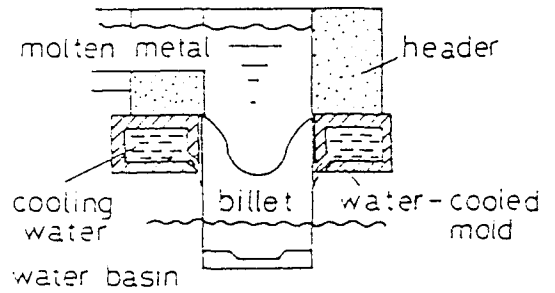


그림 3. Hot Top 주조법

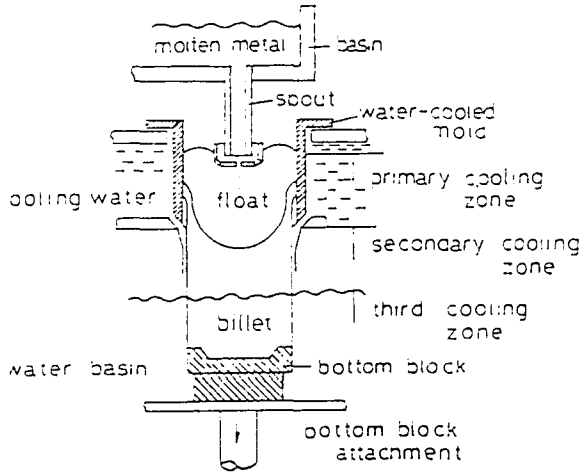


그림 2. DC주조법

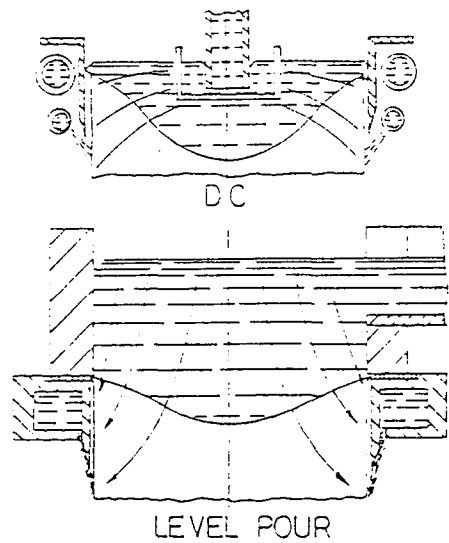


그림 4. 용탕과 주형에서의 열흐름

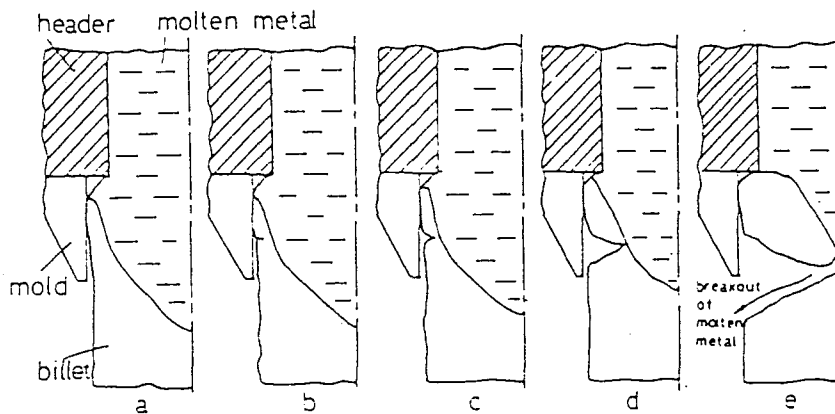


그림 5. Hot Top 주조에서 발생하는 빌렛 파단 기구

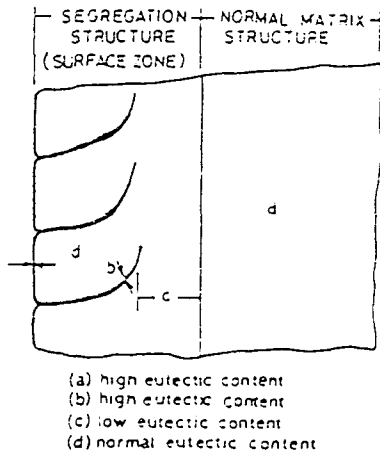


그림 6. 빌렛 표면 구조

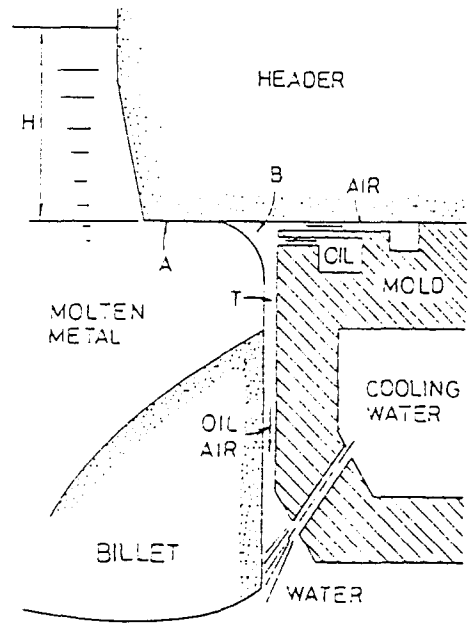


그림 8. 기체가압식 주조법

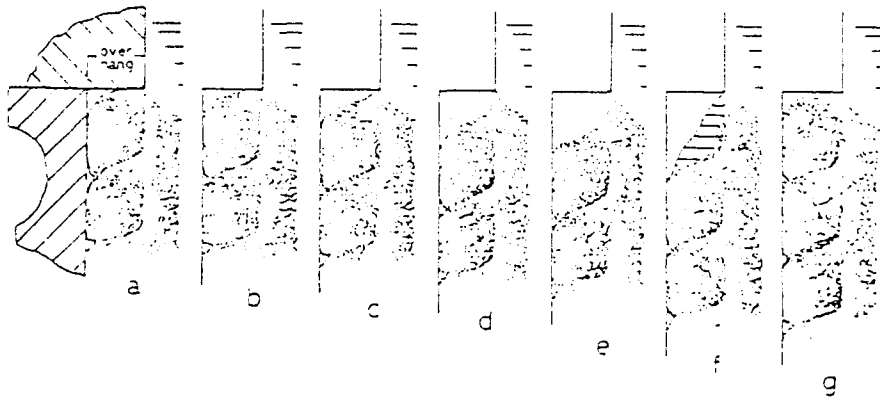


그림 7. Ripple 생성기구