



대형주물에는 제조가 어려웠다. 그러나 이를 개선하고자 다이캐스팅의 사출방식과 금형체결구조를 도입하고 사출 가압조건을 저속 안정충진을 함으로서 용탕단조의 기본 현상을 유지시켜 보다 양산성과 고품질화의 간접가압식 용탕단조가 현재 주요한 실용화 되고 있다. 이 경우에는 금형캐비티내로 용탕의 주조와 성형이 기계적 가압에 장치에 의하므로 유동이 주요한 요소가 된다.

따라서 용탕단조의 새로운 정의는 "금형공간에 용탕충진이 층류적으로 이루어지며 고압하에서 응고 완료시켜 열처리가 가능한 주물을 제조하는 공정" 으로 정립되고 있다. 그림 1은 용탕단조와 고압다이캐스팅의 용탕 충전거동과 압력의 변화를 개략적으로 비교하여 나타낸 것이다. 용탕단조는 탕구속도가 0.05-0.2 m/s 이지만 고압다이캐스팅은 30-50 m/s로서 큰 차이가 있다. 용융금속의 층류 한계속도를 Reynold 수로 환산하여 보면 층류의 한계는 약 0.5 m/s 정도로 고압다이캐스팅은 거의 용탕이 비산되거나 분무되는 상태에 가깝다. 그러므로 고압다이캐스팅은 박육주물의 고속사출로 인한 순간적인 충전완료에 주요 특징이 있고 용탕단조는 충전이 안정되게 완료되는 것이며 느린 충전이다.

2.2 공정기술의 구성

용탕단조에 대한 공정기술을 기본이 되는 기반기술과 실제로 주물제조 및 양산에 대한 양산기술로 구성

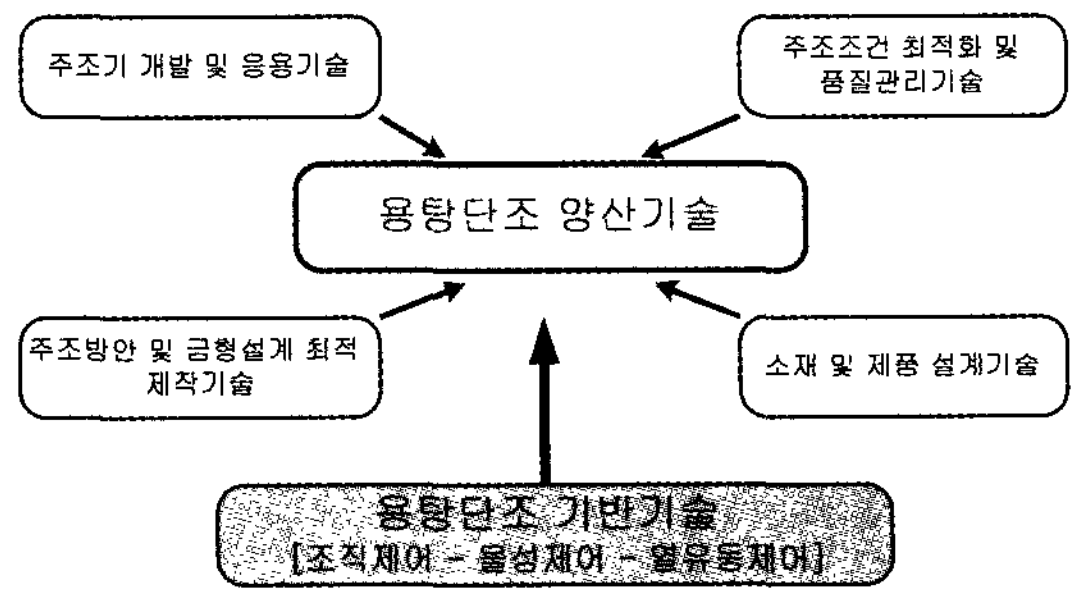


그림 2. 용탕단조 공정기술 구성.

되며 그것의 내용은 개략적으로 그림 2와 같이 구성된다. 기반기술로서는 고압응고현상과 조직제어 기술, 각종 용탕단조주물의 기계적 성질제어 기술, 용탕단조주물에서의 열 유동현상과 그 제어 기술로 나눌수 있다. 양산기술로서는 먼저 적절한 용탕단조용 주물제품의 최적 설계 기술, 용탕단조 주조기의 응용 및 개발기술, 용탕단조 주조방안 최적화 및 금형제작기술, 용탕단조 제조 조건의 최적화 및 고품질 관리기술 등으로 구분할 수 있다. 여기서 기반기술로서 언급한 조직, 물성, 열유동제어는 주로 직접가압식에서 연구 보고[4-8]된 것들이며 그들은 현장에서 양산화시에는 거의 직접적으로 적용하는데에는 한계가 있다. 즉 용탕가압이 주물 제품에 직접 가하는 것이 아니고 탕도와 탕구를 거쳐서 이루어 지므로 실제 가압효과는 감소하고 유동

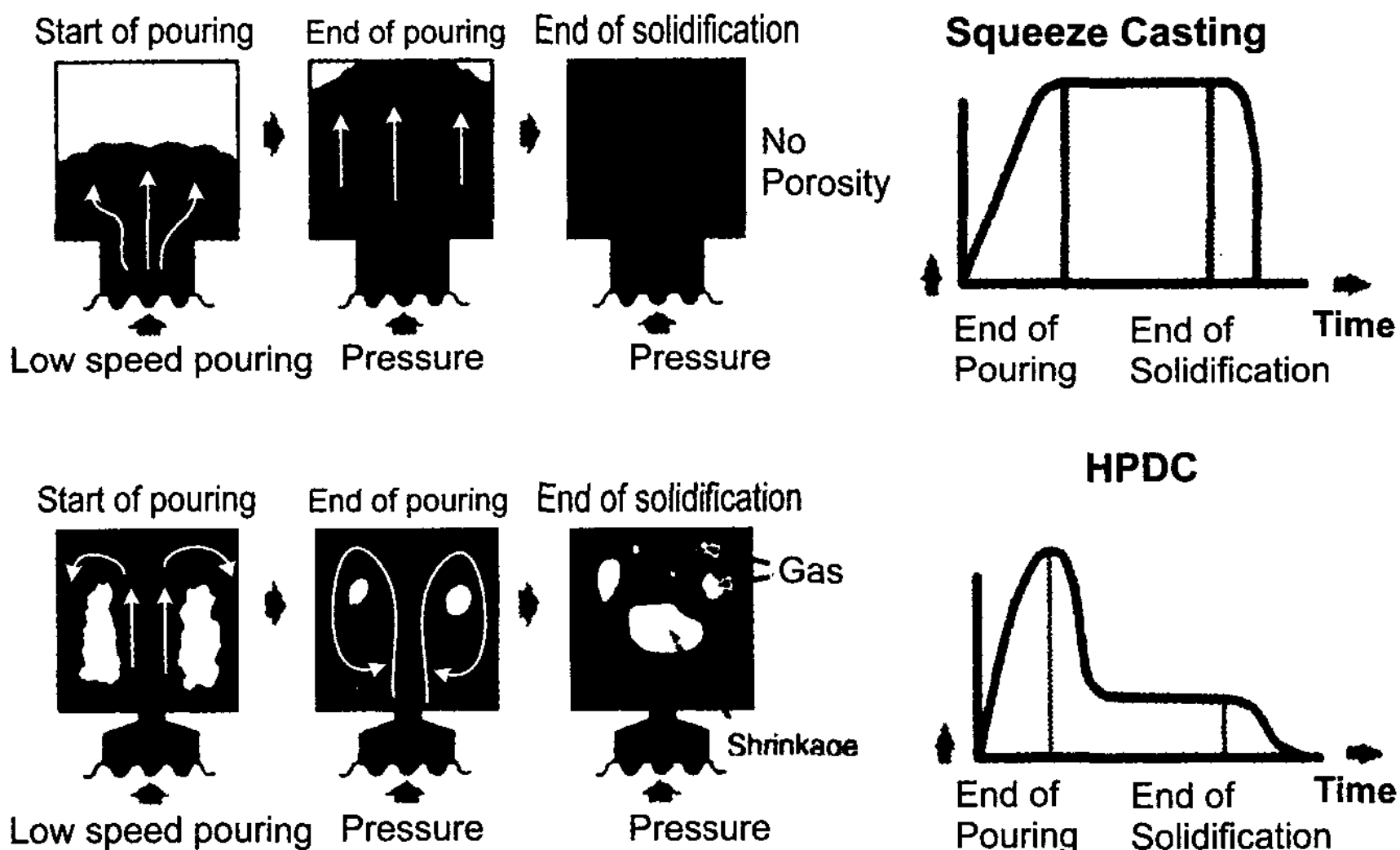


그림 1. 용탕단조와 다이캐스팅의 용탕충진과 가압력 변화.

력과 함께 속도가 적절하게 유지되어야 한다. 그러한 점은 양산화기술로서 고려되며 주조기와 금형방안 및 제품 설계와 공정조건의 최적화가 직접가압식과는 다르게 나타난다. 그러한 점은 양산기술로서 구별이 된다.

조직과 물성의 제어기술은 양산기술에 그대로 적용은 되지 않으나 기본 방향과 한계를 제시 할수 있다. 직접가압에서 나타난 조직과 물성은 가압효과가 최대화된 것이며 유동이나 주조결함이 근본적으로 적다. 그에 반하여 양산기술은 가급적 실행상으로 양산성 향상과 불량율억제, 다양한 제품화 요구에 대한 대응성을 요구하고 염가 생산, 자동화와 신속 제조가 종합적으로 고려되어야 한다. 기반기술 보고가 주로 알려져 있으나 현장에서 적용할 때에 요구되는 양산기술들과 그에 대한 설계 및 제품화의 가이드가 되는 공정기술들에 대해서는 그다지 알려져 있지 않다. 최근에 용탕 단조의 기반공정이 되는 조직과 물성의 제어에 대한 여러 보고가 있다. 또한 미국에서 자동차 경량화 주물 개발에 본 용탕단조법을 가장 최적으로 고려하면서 그 양산화공정으로서 여러 공정요소들을 연구개발하고 있다. 그러한 보고들을 다음에 소개하였다.

### 3. 용탕단조 기반기술

#### 3.1 조직 제어 기술

용탕단조에서 응고조직을 제어하는데에는 여러 가지 공정변수들이 작용한다. 그들을 구분하여 보면 다음과 같다.

- 가압조건 - 가압력 크기, 가압유지 시간, 가압개시 시기, 가압속도, 2차가압
- 소재 및 용탕 - 합금종류 및 조성, 용탕주입온도(과열도), 용탕 처리(탈가스 및 개량처리), 결정립미세화 처리, 개재물 및 불순물처리.
- 금형 및 이형제 - 금형온도, 금형재질, 이형제 종류 및 량, 주물의 형상

여기서 가압응고 조직의 제어에 가장 중요한 요소로서 가압력을 들 수 있다. 보통 가압력을 50 -130 MPa 정도를 적용하여 주조결함이 억제되고 건전한 주물이 얻어지는 것으로 여겨진다. 그러나 가압력 하나로서 건전한 조직을 제어할 수 없다. 용탕단조조직에서 주조결함의 억제가 되는 가압력의 영향을 보면 단순한 원

통형 주물에서도 아공정의 응고구간이 넓은 소재 Al-4.5%Cu, Al-7%Si(A356) 합금계에서는 중심에 공정편석이 고압에서 발생하고 있다. 이러한 마크로편석의 억제가 용탕단조에서는 주요한 관심사이며 조직제어에 주요한 과제가 되고 있다.

Okada 등은 Al-Cu, Al-Si 이원계합금들을 가지고 직접가압식 용탕단조시 건전한 조직을 얻기 위한 최소한의 가압력(P)의 크기를 합금조성의 함수로서 조사하였으며 그 값을 다음과 같다[9].

$$P_{si}(kg/cm^2) = 28Si(\%) + 270 \text{ ----- for Al-Si Alloy}$$

$$P_{cu}(kg/cm^2) = 55Cu(\%) + 270 \text{ ----- for Al-Cu Alloy}$$

최근 홍준표 등은 Al-4.5 wt%Cu 합금으로 직접가압식 용탕단조시 공정 조건에 따른 각종 응고조직의 제어 및 건전한 주물의 제조 가능성을 보고[10] 하였다. 그에 의하면 주요 용탕단조 공정변수로서 가압력크기, 금형온도, 주입온도, 가압 지체시간, 습도 등이 응고조직 즉 주조결함의 억제와 거시편석의 형성에 영향을 미치는 것이 확인되었으며 가압력의 크기도 주조결함(수축공)이 억제되는 임계압력( $P_{sc}$ )와 거시편석이 발생하기 시작하는 임계압력( $P_{ms}$ )이 존재하며 건전주물의 제조 조건을 정량적으로 도시할 수 있다고 한다. 각 조건들이 이들 두 임계압력에 영향을 미치며 무편석 무결함의 건전주물을 얻기 위하여 가압력은  $P_{sc} < P < P_{ms}$ 의 조건을 만족하여야 한다고 하였다. 그림 3은 이들의 대표적인 거시조직이며 그림 4(a), (b)는 760°C 와 680°C의 주입온도에서 금형온도와 가압력의 함수로서 조직형성 도표로 나타낸 것이다. 고온 주입시에 수축공이 억제되는 임계압력( $P_{sc}$ )은 상온금형에서 약 15 MPa 정도이고 그 이상에서는 주조결함과 거시편석이 공존하고 약 28 MPa ( $P_{ms}$ )이상에서는 거시편석만 존재하였다. 금형온도가 증가하면 각 임계 압력은 감소하는 경향을 보이며 200°C 이상에서는 일정하여 지고 있다.

한편 주입온도가 낮아져서 680°C인 경우 거시편석과 주조결함이 공존하는 구역이 없어지고 무편석 건전조직의 형성 구역이 나타났다. 상온금형상태에서 보면 주조결함이 억제되면서 바로 거시 편석발생구역이 나타나서  $P_{sc}$ 와  $P_{ms}$ 가 같이 형성되었다. 그러다가 금형온도가 180°C 이상에서 부터는 무편석 건전조직 구역

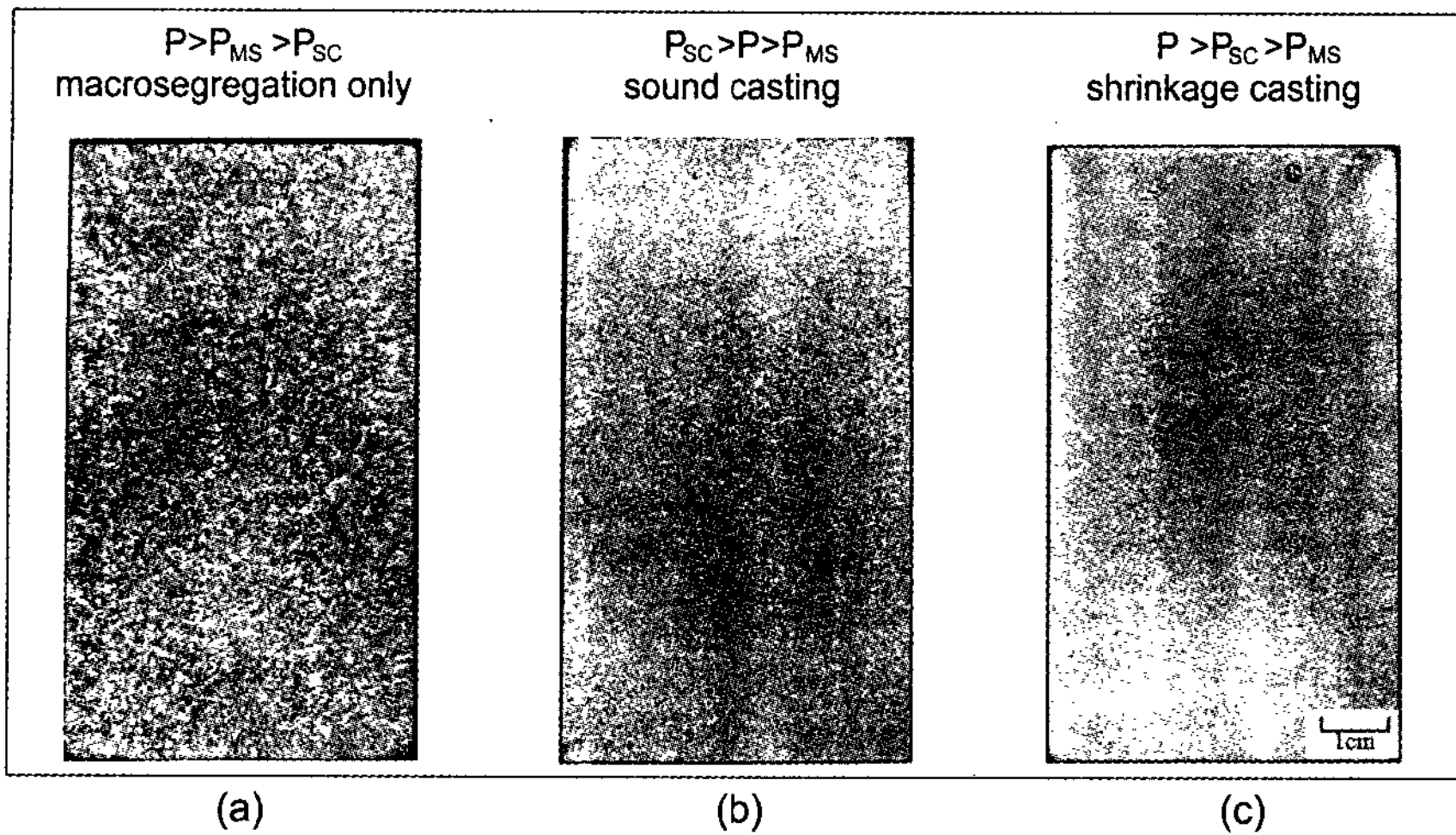


그림 3. Al-4.5%Cu 합금의 용탕단조 조직 ; 주입온도 680°C, 금형온도 300°C (a) P = 23 MPa, (b) P = 14 MPa, (c) P = 11 MPa.

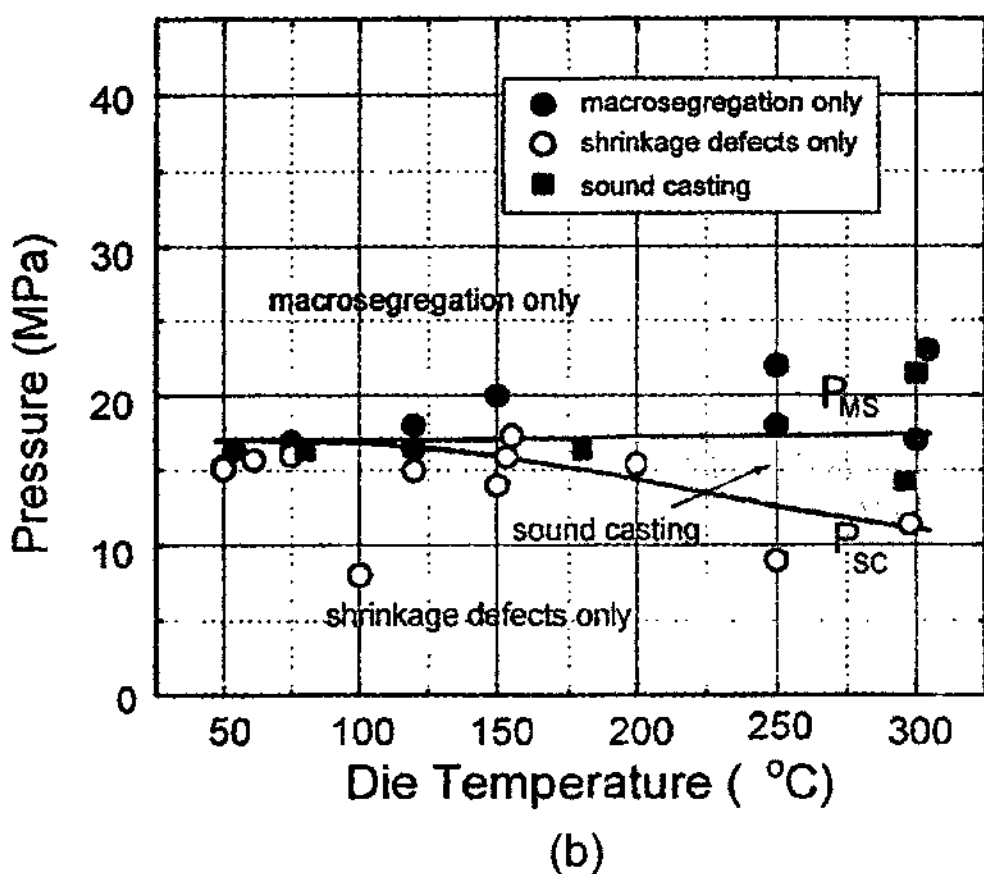
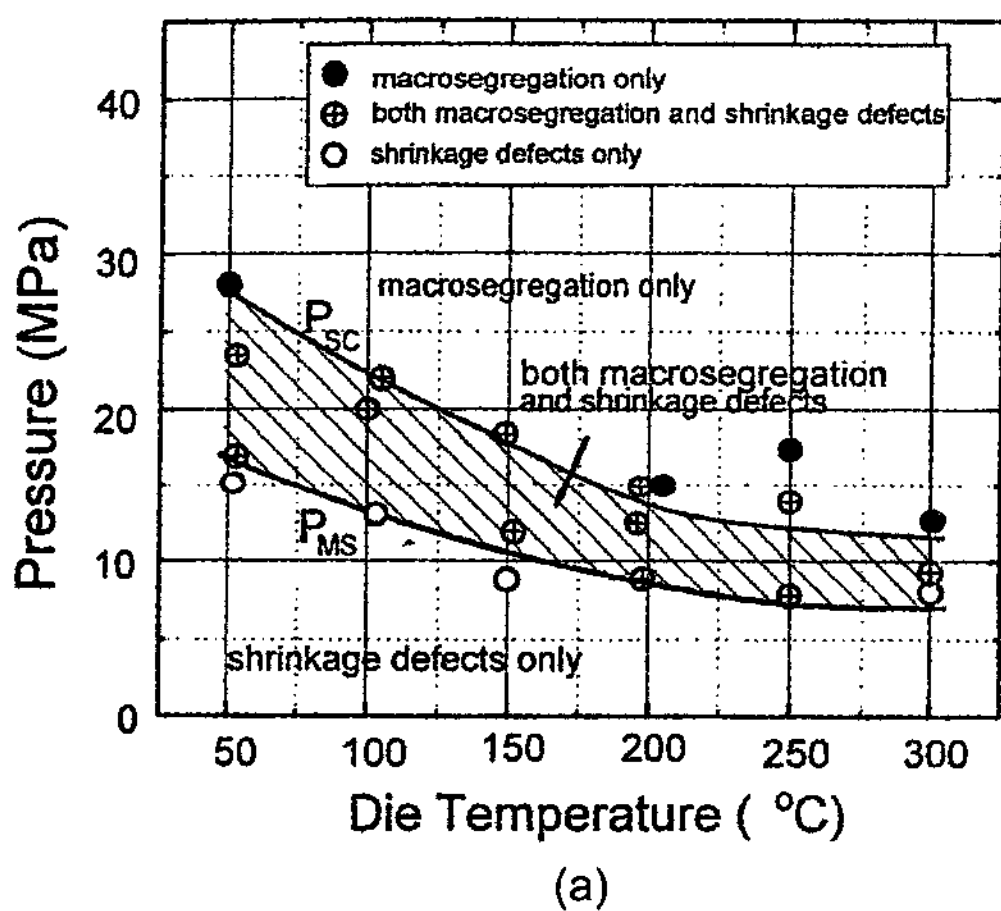


그림 4. Al-4.5 wt% Cu 합금의 용탕단조 조직형성에 대한 주조조건의 영향; (a) 주입온도 760°C, (b) 주입온도 680°C.

이 형성되고 금형온도가 높아지면서 그 구역이 확장되었다. 이 건전조직 구역( $P_{SC} < P < P_{MS}$ )은 신속한 가압개시, 낮은 습도에서 보다 안정화 및 확대가 된다고 한다.

위의 연구결과에서 보면 일반적으로 알려진 가압력의 수준에서 볼 때 홍준표의 보고는 다소 낮은 압력에서 보다 건전하고 무편석의 건전한 조직이 얻어질 수 있다는 것으로서 종래의 연구와는 다소 상이하다. 수축공이 억제되는 임계 가압력이 보통 용탕단조조건에 기준하여 약 15 MPa 내외로서 50 MPa의 일반적인 값에 비하여 적은 값이다. 이러한 가압 효과에 미치는 다른 공정 요인으로서 주입온도, 용탕가압시기에서 용탕과열도, 이형제나 열전달 변화, 가압속도 등이 변수로 작용할 수 있다.

아울러 이 연구 결과는 매우 단순한 형상에서 Plunger 가압식으로 나타난 것이며 주물의 크기나 형상, 합금 조성이나 금형 등에서 수많은 변수와 경우에서 실제 양산화에서는 전혀 다른 거동이 발생할 수 있다. 즉 가압방식이 간접가압식으로 탕도를 거쳐 전달이 되는 경우 가압효과가 크게 감소하는 것은 여러 연구에서 확인되고 그 가능성은 예상된다.

홍의 연구에서 무편석 건전조직의 형성의 조건은 수축공이 없어지는 임계압력에서 약간 높은 가압력과 용탕과열도가 적고 금형온도도 다소 높아서 가압시 주물 전반이 동시에 응고가 되는 즉 미세 등축정응고 조직이 형성되는 상태가 가장 용탕단조에서 적절한 가압조건이라는 것이다.

### 3.2 물성 제어 기술

#### 3.2.1 합금화 및 용탕처리기술

앞에서 언급한 각종 용탕단조 조건들에 따른 각종 합금별 기계적성질들에 대한 보고는 비교적 많이 보고되고 있다. 보통 용탕단조 가압력 100 MPa에서 중력금형주조나 다른 고압다이캐스팅, 사형주조 및 정밀주조에 비하여 기계적 성질이 우수함은 조직의 미세화와 치밀화에서 예상이 되었으며 단조나 전신가공재의 수준의 고강도와 연성 및 인성을 보이고 있다.

일반적으로 용탕단조에 의하여 기계적 성질이나 물성이 중력주조에 비하여 크게 향상이 되는 합금들은 주로 응고구간이 짧거나 일정온도에서 진행되는 Skin mode 보다 응고구간이 넓은 mush mode 합금계이다 [11]. 이런 합금은 응고 구간이 넓어서 보통 유동성이 다소 부족하고 주조결함이 보다 생성되기 쉬운 점도 있으며 가압에 의하여 응고 수축 보상이 지속되어서

주조결함이 효과적으로 억제되어서 충분히 제 성질을 나타내게 하는 것으로 보인다. 전신재 즉 2014, 5056, 6061, 7075 등의 경우도 용탕단조로 제품화가 가능하다고 보고되고 있으나 실제로 양산에 적용되어지는 것은 거의 없다. 이는 직접가압식과 같이 주물에 직접가압으로 주조결함이 효과적으로 감소되고 유동에 따른 결함이나 문제가 적기 때문이지만 실제로 hot tearing이 심한 Al-Cu나 Al-Mg, Al-Zn-Mg 합금계의 경우 양산용 합금으로서는 기피되고 있는 실정이다.

따라서 용탕단조용 합금의 개발이란 점에서 여러 가지가 연구되고 있지만 아직 공업적인 규격으로 인정을 받을 만큼 우수한 합금은 나타나지 않고 있다. 이러한 동향에 대해서는 저자의 다른 문헌이나 다른 자료들에 보다 자세히 나타나 있다. 여기서는 대표적으로 사용되는 주조용 알루미늄합금 A356 (Al-7%Si-0.4%Mg) 합금에서 주요 관심사가 되는 용탕처리, 개

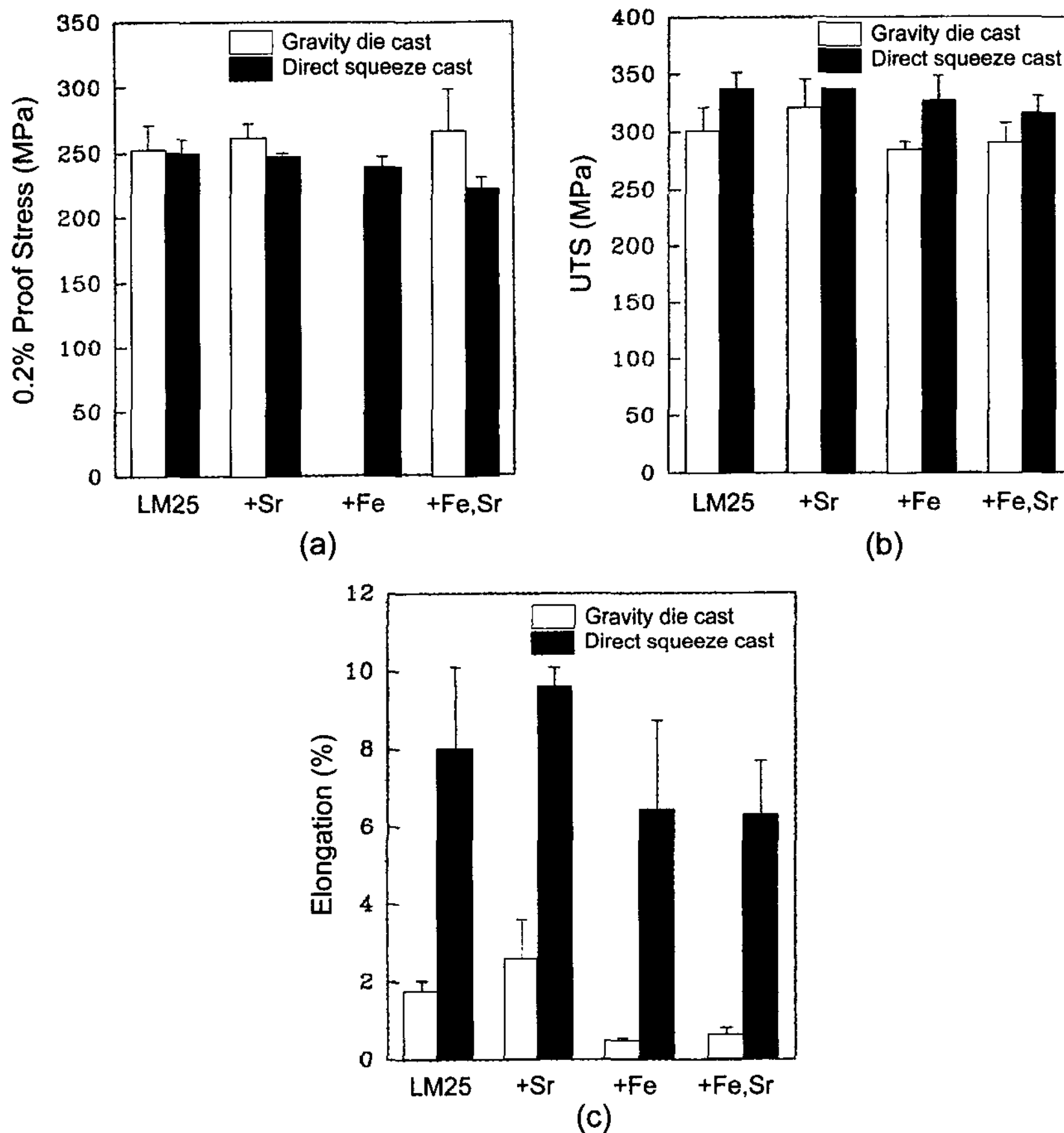


그림 5. T6-A356(LM25)의 중력주조 및 용탕단조시의 인장성질에 대한 Fe, Sr 영향.



량처리, 수소농도, 미세화처리, 불순물함량(Fe)의 영향에 대해서 살펴 보았다.

그림 5는 T6 - A356(LM25 UK규격)합금에서 Fe 영향(0.2와 1 wt%)과 Sr 처리(0.02%) 여부가 인장성질과 미세조직에 미치는 영향을 조사한 연구결과이다[12]. 중력금형주조와 용탕단조를 제조공정으로 하고 합금변수로서 Sr 처리, Fe 함량의 영향 및 복합첨가시의 거동을 알수 있다. 기본 합금에서 용탕단조시 항복강도는 거의 차이가 없으나 인장강도는 약간 증가하고 연신율은 1.7에서 8%로 크게 증가하고 있다. 이러한 연성 증가는 기포의 제거, 공정 Si 상의 미세화, Fe-Si 화합물의 미세화로서 용탕단조의 가압성형과 급냉이 작용한 결과이다.

즉 Sr 처리로 중력주조시에 연성이 2.6%로 증가한 것을 알수 있으나 용탕단조에 비하면 그 효과가 적으며 Sr 처리 용탕단조재에서도 연신율이 9.6%로 미처리재에 비하여 연성이 증가하나 그 크기가 미처리재의 8%에 비하여 비교적 적게 증가하고 있어 개량처리재의 효과는 적다. 고 Fe 함량에서는 중력주조시 거의 취성파괴를 하고 있어서 사용이 어려우나 용탕단조재에서는 6.5%로 저 Fe 중력주조재 보다 양호하다. 즉 저급소재의 용탕단조 적용이 가능함을 알수 있다. 고 Fe에서 Sr 처리는 거의 효과가 없다. 따라서 용탕단조에서는 Fe 허용도가 증가함으로써 재료비의 절감, 소착성 개선, 금형수명 증가 등에 의하여 염가 생산의 효과가 큼을 알수 있다.

그림 6(a), (b)들은 A356 합금으로 간접가압 용탕단조시 수소농도와 결정립 미세화재 Ti의 량에 따른 주물 두께별 기계적성질(품질지수 ;Quality index = 인장강도+ 150 log 연신율)로 나타낸 것이다[13]. 여기서 수소농도가 낮은 즉 탈가스처리가 잘 된 경우 우수한 기계적성질을 보이며 수소농도가 0.3 cc/100g 에서는 크게 감소하고 있다. 물론 두께가 작은 것이 급속응고가 되어 높은 기계적성질을 가지고 있다. 한편 Ti 량의 영향을 보면 약 0.15%에서 대개 품질이 22% 증가하고 있으며 두께의 영향은 적다. 결정립미세화제의 영향은 기포를 감소 및 전체적 기포발생이나 충전성을 향상시켜서 기계적성질을 개선하는 효과를 가진다. 보통 용탕단조재에서는 앞에서 언급한 바와 같이 결정립 미세화가 급냉응고로서 촉진이 되어 잘 사용하지 않으나 사용하는 것이 보다 고품질 주물 제조에 효과적임을 알 수 있다.

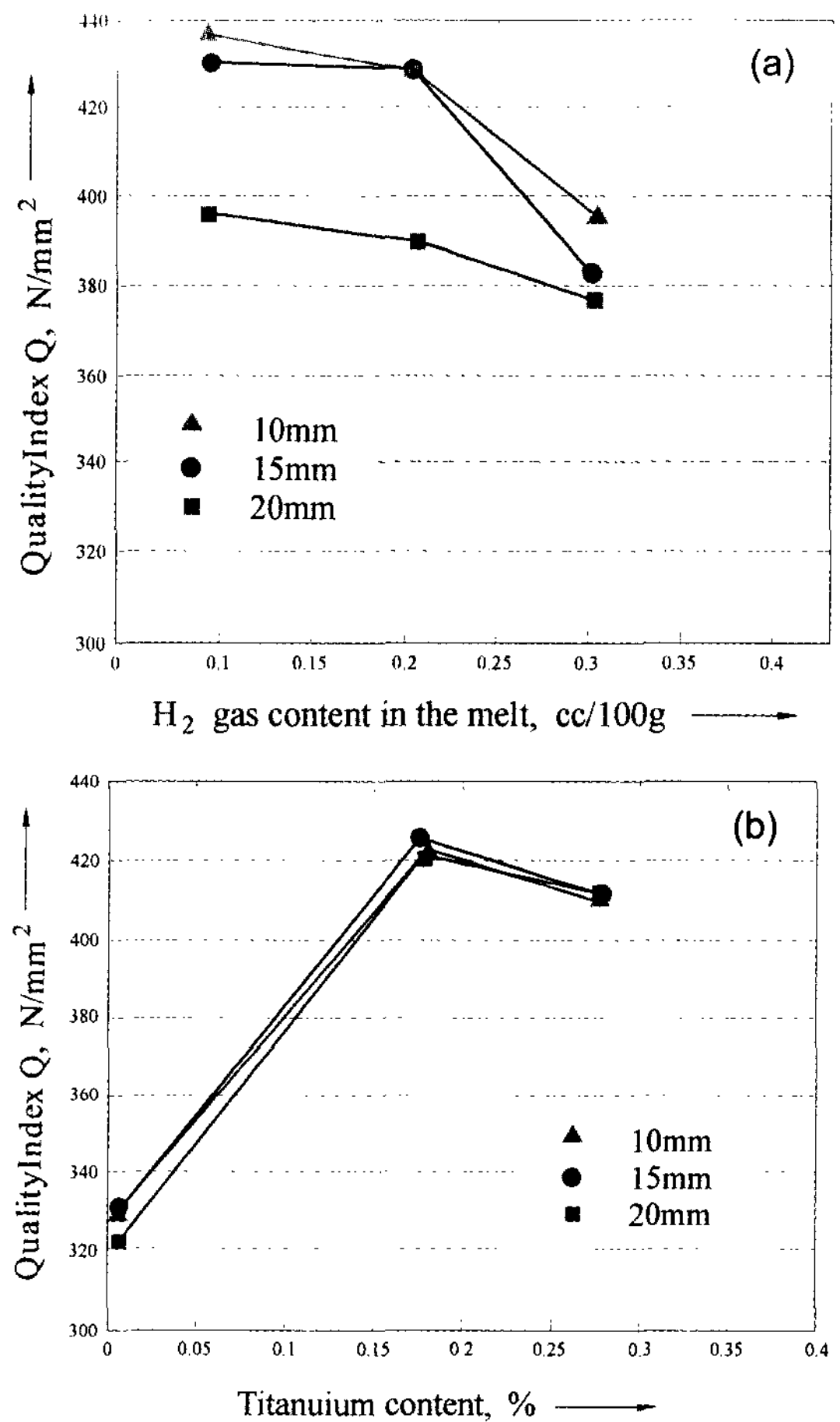


그림 6. 수소농도(a)와 Ti 량(b)이 A356-T6 주물의 품질지수에 미치는 영향.

### 3.2.2 열처리 기술

용탕단조재는 중력금형주조나 사형주조에 비하여 급냉응고로 인하여 조직이 미세하고 치밀하다. 그 결과 용체화 처리시에 빠르게 고용 및 시효강화 효과가 나타나고 있다. 이에 대하여서는 다른 문헌에 자세히 나타나고 있으므로 다음 기회에 이에 대한 보다 자세한 보고를 하고자 한다. 아직 대부분 중력금형주조의 열처리 조건을 적용하는 경우가 많고 기업체 마다 여러 가지 시행오차를 거쳐 자체 품질 기준에 따라 열처리 조건을 정하고 있다. 대개 용체화 처리 시간이 A356의 경우 8-10시간이 중력주조시에 이루어 지고 있으나 용탕단조시에는 2-4시간정도가 적정한 것으로 용체화 처리 온도는 큰 차이가 없다.

그림 7은 열처리시 급냉온도, 시효온도 및 시효시간

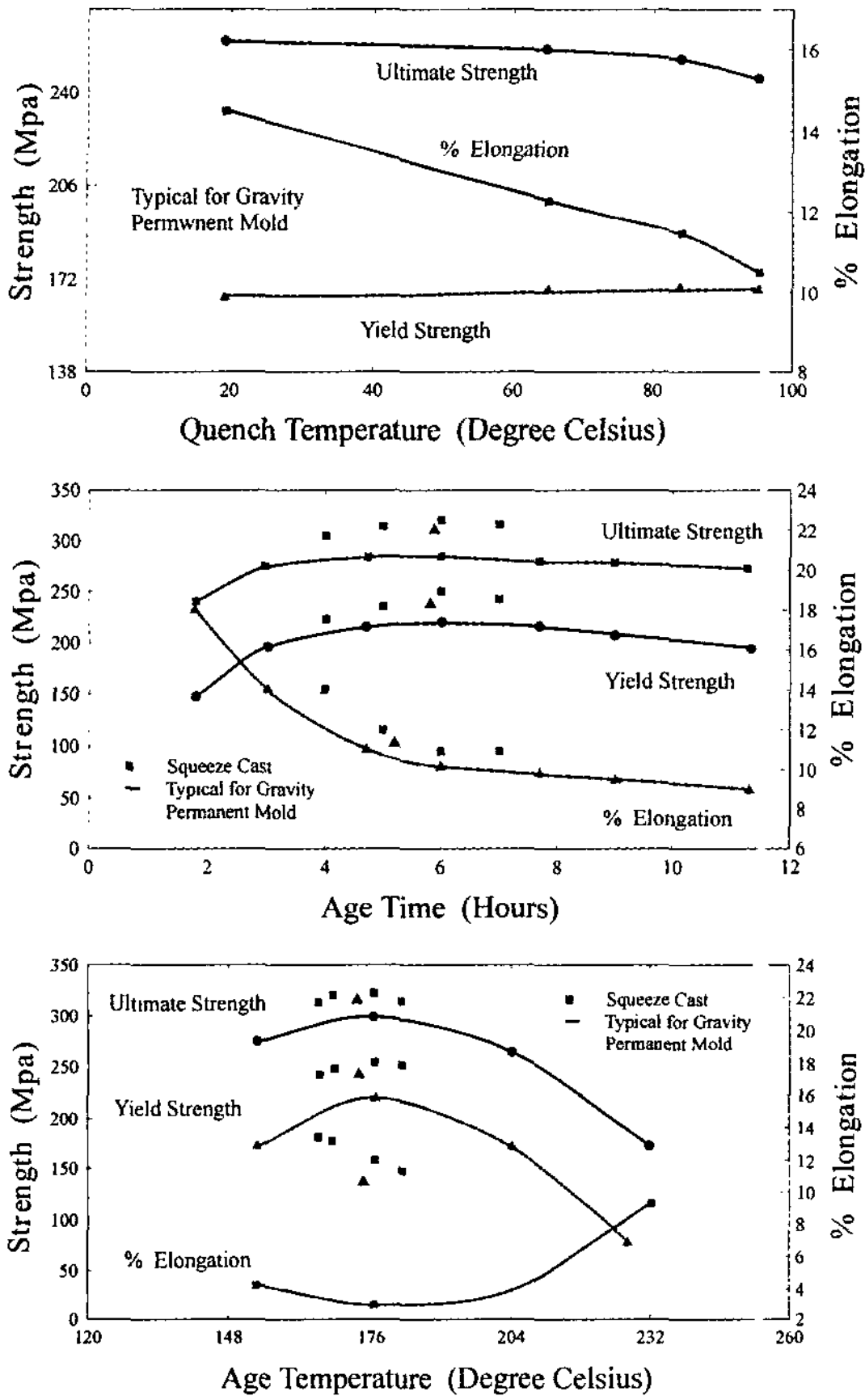


그림 7. 중력주조 및 용탕단조재의 인장성질에 대한 열처리 영향.

의 영향을 보여 주고 있다. 수냉처리온도가 낮을수록 연신율이 증가하며 고온에서는 항복강도의 감소는 적으나 인장강도는 연신율과 함께 약간 감소하고 있다. 고온수냉은 열변형을 억제하려는데 의의가 있다. 시효처리의 온도는 170°C 정도 6시간이 비교적 고강도를 보이는 조건이라 하겠다[14].

3.3 열 유동 제어 기술

주조 및 응고과정에서 용탕의 유동과 주형으로 열전달에 의한 응고가 주요 요소임은 분명하다. 유동은 주입과정과 금형공간에서 충전 성형시에 전전한 주물의 형성을 결정하는 외관적인 요소가 되며, 열전달은 실제 응고 과정에서 조직과 품질을 결정하는 주요 요소가 된다.

유동의 제어는 직접가압식 용탕단조에서는 거의 의

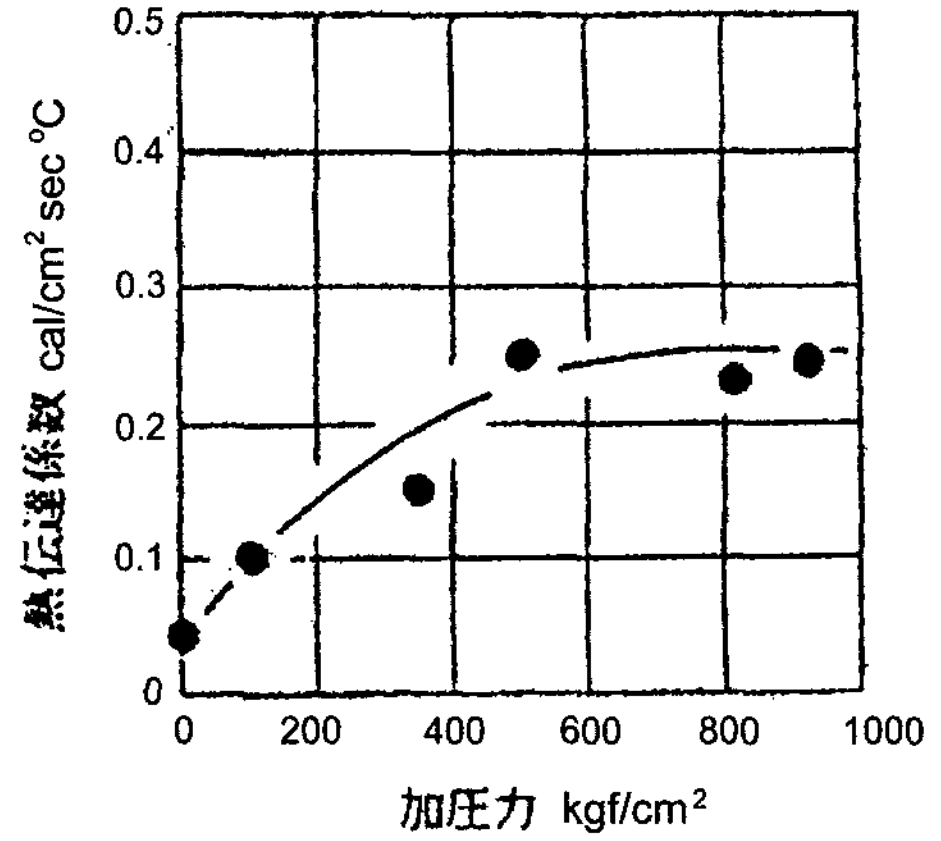


그림 8. 계면열전달계수에 대한 가압력 영향.

미가 적다. 그러나 간접가압식에서는 매우 중요한 요소이며 주조결함억제와 품질에 미치는 영향이 크다. 이는 다이캐스팅과 같은 기계적으로 사출성형을 하므로 용탕 충전해석을 거치서 적절한 주조방안 및 금형설계가 나오게 된다. 기본적으로 용탕단조의 개념에 의하여 탕구 속도가 층류 거동을 유지하게 하여야 하며 그 원리는 앞 그림 1에 나타난 바와 같다. 실제 제품에서는 형상이 단순하지 않고, 여러 주물을 주조할 경우도 있어서 유동해석을 거치는 것이 바람직하다. 그에 대해서는 다음에 논하였다. 유동이 층류를 이루도록 하되 제품에 따라서 박육이거나 형상이 복잡하고 대형일 경우 충전에 시간이 많이 지체되거나 유동성이 문제되면 다소 속도를 증가시키기도 하고 다만 제어도 한다.

온도 및 열전달 제어에서는 여러 가지 공정변수가 사용된다. 즉 온도와 관련되어서 주입온도, 금형온도, 이형제 및 금형 분무 냉각, 합금재질(응고온도 및 열적 특성) 등이 주물의 용탕단조과정에 요소가 된다. 앞에서 주입온도와 금형온도가 조직 형성에 주요 요소이며 건전조직 형성에서 가압시에 주물이 전반적으로 과냉응고가 촉진되어 미세 등축정 조직화하는 것이 바람직하나 실제 주조시에는 그러한 조건을 만족시키기는 어렵다. 보통 알려진 용탕단조시의 온도변수들은 거의 일정하게 유지하는데 주입온도는 용점이상 50-100°C 내외, 금형온도는 200-300°C이며 간접가압식에서는 200±50°C로 적용한다. 이정도에서 금형의 수명과 냉각성, 응고조직 제어가 전반적으로 만족되고 있다. 그러나 또 다른 공정 변수로서 용탕단조에서 필수적인 이형제가 보다 중요한 열제어 요소가 되고 있다. 이는 다른 열

물성치와 공정변수들은 이미 다른 조건이나 연구에서 또한 다른 방법으로 그 물성값이 알려져 있으나 금형과 주물의 계면에서 이형제나 접촉에 대한 열전달 특성 특히 열전달계수는 공정변수로서 이론적인 예측이 거의 되지 못하고 있고 실험적으로 역산하고 있다. 주물의 열전달 및 응고해석에서도 유일한 미지의 값이 이 계면열전달계수이다. 이에 대해서 여러 연구가 보고되고 있는데 전반적으로 중력 금형 구조에 비하여 2-10 배 증가가 이루어 지는 것으로 알려져 있다. 응고속도로 보면 중력구조에 비하여 약 2-3배의 증가가 되고 있다. 그림 8은 직접가압식 용탕단조시 가압력에 따른 계면열전달계수이 증가를 측정된 결과로서 ADC10 합금에서 조사된 것이다[15].

#### 4. 용탕단조 양산기술

##### 4.1 양산 공정분석

그림 9는 제품으로 용탕단조법을 적용시에 진행되는 공정과정을 도시한 것이다. 용탕단조는 그 기본 특성상 고품질의 주물을 제조할수 있으나 장치적 요소가 강하며 그 품질과 경제성 및 양산성을 만족시키기 위하여서는 제조 전과정에서 적절한 관리 및 양산화 공정기술들이 요구된다. 이 흐름도는 용탕단조 양산 적

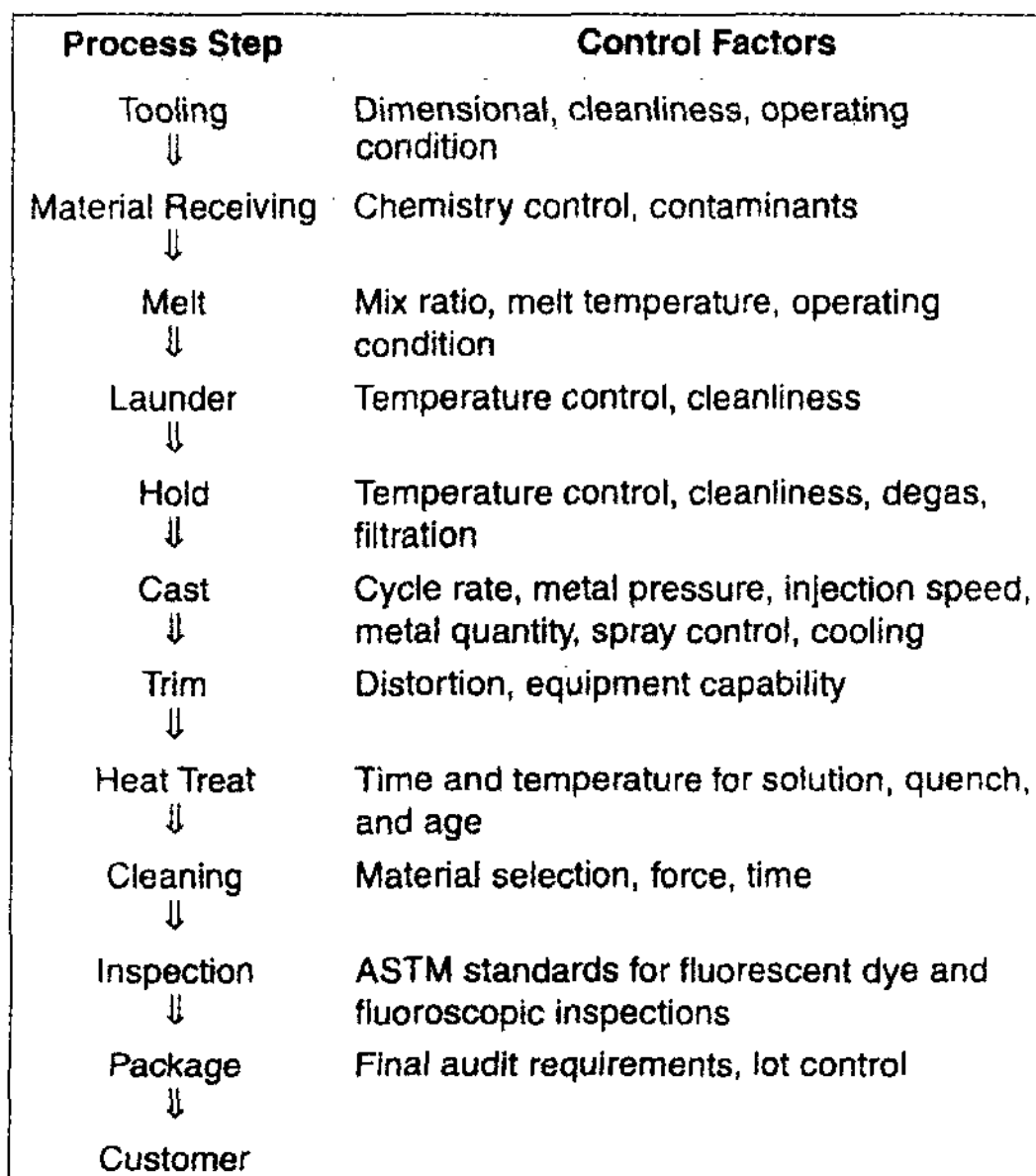


그림 9. 용탕단조 양산 공정 흐름도.

표 1. 일반적 용탕단조 금형 설계 가이드.

설계 요소	일반 적용	허용
Flash 방지 방출면적	10-20 mm	5 mm
변형<	0.05 mm	
핀배기 공차	0.03-0.05 mm	
경도	44-48 HRC	
Fillet 및 radii	R4 - R6	R1-R2

용시에 각 과정에서 고려되어야 할 요소들을 언급하였으며 그에 대한 개략적인 설명을 통하여 현장에서 보다 효과적인 응용에 도움이 되고자 한다[14].

##### 4.1.1 금형 및 Tool

이에 대한 중요성과 경비는 우선적으로 검토가 되어야 한다. 금형설계 및 제작에는 먼저 구조방안이 적절하게 제시되어 한다. 이러한 구조방안의 결정에는 용탕단조 원리가 효과적으로 적용이 되며 생산성, 품질 제어, 염가, 필요한 생산량, 주조기 사양, 주조재 재질, 등등 여러 가지를 고려하는데 일반적으로 유동충진은 다이캐스팅의 설계에 기준하고 열전달 및 응고적인 면에서는 일반 응고해석을 적용하는 것이 기본이 된다. 표 1은 기본적인 금형설계 가이드이다.

금형에서 열팽창도에 대한 여유는 mismatch 나 flash 에 큰 영향을 미친다. 그림 10은 mismatch와 flash를 야기시키는 것을 보여 주고 있다. 보다 고온의 금형이 열팽창차이가 이러한 문제를 형성한다. 따라서 열팽창에 대해 고려가 전체 금형 뿐 아니라 이동코어나 밀핀 등에도 다 적절한 여유가 있어야 한다.

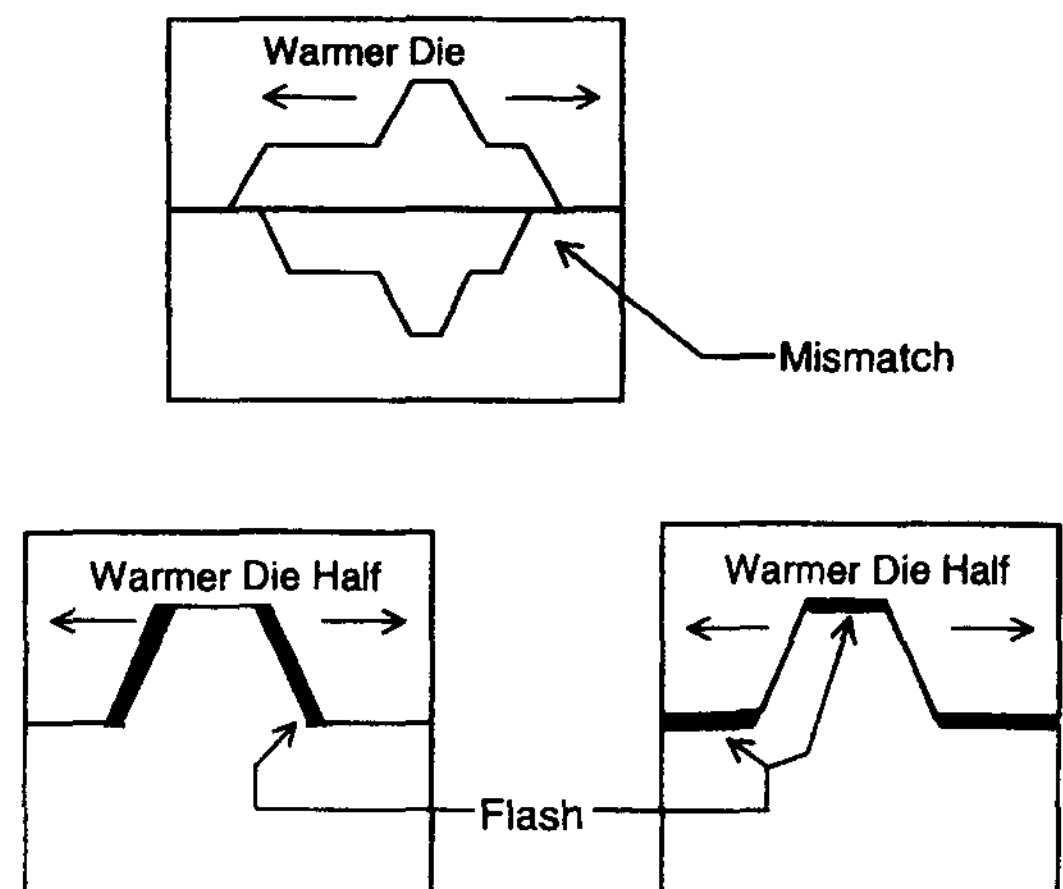


그림 10. 금형에서 열팽창에 의한 mismatch 및 flash 생성.



금형의 온도제어 즉 냉각시스템도 중요하다. 용탕단조가 중력주조에 비하여 3배 이상의 열전달이 촉진되므로 그에 대한 냉각효율도 증가되어야 한다. 한 케비티에 약 340 l/min의 수량이 요구되며 수로는 15-20개 정도를 가지게 한다. channel cooling이 효과적이며, bubbler pack을 사용하기도 한다. 수 진공처리는 보다 고품질 수냉에서 적용을 한다. 방출핀과 공기빼기 핀에서도 공기방출효과가 있다. 진공처리는 보다 공기빼기에 효과적이며 제품 설계시에도 공기빼기에 대한 고려가 필요하다.

금형재는 주로 H13(SKD61)이 주로 사용되며 적절한 열처리로 경도를 유지한다. 표면 경화로서 질화처리를 하는데 이 경우 표면에 백화층이 없어야 한다.

사용금형의 관리에는 주기적으로 이형제막의 제거 및 청소가 필요하며 이 경우 hand stone 작업을 하며 연마재로 blast 청소는 금형 손상이나 표면오염등의 원인이 되므로 억제한다. 청소후 금형의 균열이나 표면상태 및 치수 검사를 하며 용접수선은 가급적 수명상 최소화하여야 하고 열응력은 악영향을 미친다. 청소후 탈지 및 방청처리를 하여서 품질을 유지시킨다.

**4.1.2 소재 관리**

알루미늄괴의 선정 및 관리에도 주요 분야이다. 열분석과 성분 분석은 정기적으로 하며 오염이 적게 건조하고 청결하게 관리한다. 다른 소재를 같은 곳에 배치하지 않으며 한 소재는 여러 업체에서 받아 혼성하여서 성분변화를 줄 일수 있다. 각 합금은 색표시를 하여 구분하고 scrap이나 chip도 별도의 색으로 구분하여 사용한다.

**4.1.3 용탕 관리**

용해로 및 보온 유지로 급탕관로 등은 가스나 산화물 혼입을 최소화하게 하며 사출슬리브에 청정 용탕을 공급하도록 한다. 용탕의 이동시에 표면 산화물의 혼입이 없어야 하며 부적절한 용탕관리에는 수정 방안이 없다. 급탕에 앞서 필터링처리가 유지로에서 주로 적용이 되고 회전 로터 탈가스처리도 선호되고 있으며 작업시에 Mg, Ti-B, Sr 등의 용탕처리도 실시한다.

성분분석이나 수소가스 분석도 수시로 실시하여서 안정된 품질을 유지시키고 표준 시료를 만들어서 각 제품에 대한 품질 관리의 기준으로 삼는다.

**4.1.4 주조관리**

용탕단조에서의 주조관리는 다이캐스팅과 거의 같다. 특징적인 관리특징은 100% 모니터링을 하며 정확하게

변수들의 영향을 조사하며 주요 변수에 이상이 생기면 자동으로 취출이 되도록 하는 것이 최근 경향이다. 정밀시스템에서는 주요 변수들 - 주조사이클, 주조압력, 사출속도, 주입량, 사출 슬리브 온도, 용탕온도 등은 상호 연관되어 있다. 이들 변수의 측정은 주조공정을 제어하는데 의의가 있는 것이 아니라 주조시스템에 정보를 제공하여 결과를 분류하고 품질을 관리하는데 방안으로서 조업자에게 취출의 원인 설명과 사전제어에 대한 방향을 제시한다.

주조사이클 시간은 급탕시간, 사출시간, 냉각시간, 기계 조작시간, 이형제 분무 및 금형청결시간, 취출시간 등으로 구성되며 실제 제품의 응고 시간은 전체에 1/5-1/10 수준이다. 따라서 다른 시간들은 조업에 지장이 없는 한 최소화 하는 것이 생산성 향상에 중요하다.

급탕시기는 사출 크기, 장비의 특성, 오피스 설계의 함수이다. 이것이 전체 사이클의 70%를 차지하며 적은 주조량 (4-7 kg)의 경우 래들작업이 생산에 주요 요인이다. 대형주조시에는 급탕시간 변화가 변수가 된다. 앞에서 언급한 바와 같이 급탕시간은 용탕온도에 영향을 미치며 급탕사이클의 변화는 시간을 증가 즉 온도감소를 가져온다. 따라서 적절한 tap 시스템, slide, bearing이 최적 공정제어에 요구된다.

사출 시스템 제어는 사출슬리브 이동, 금형 도킹, 사출에 유압으로 작동한다. 이동과 형체결엔느 가급적 용탕혼동이 없이 최대한 신속하게 하며, 적절한 사출속도를 결정하면 안정된 사출제어는 슬리브의 냉각과 이형제 분무, 사출과 피스톤의 유지에 좌우된다.

응고시간제어는 고정된 오피스 시간제어 솔레노이드에 기초하며 금형개방시기는 응고완료에 기초한다. 따라서 금형개방 순서는 가변적 사이클속도에 주요 인자는 아니다. 부적절한 온도제어나 금형냉각회로의 실패에 의한 미응고 주물이 금형에서 나올수 있어서 응고시간을 이용한 사이클속도를 향상시키는 것은 한계가 있다. 이것은 질량, 압력, 냉각능에 좌우된다. 각 요소들은 최적의 주물 제조를 위하여 사전 조절과 분석을 거치는 것이 필요하다.

주물 취출과 이형제 분무시간은 로봇 작동 프로그램에 제어되고 개별적 상황에 맞게 설정을 한다. 각 장비가 적절하게 설계되고 유지되면 유일한 변수는 돌발적인 프로그램변화 뿐이다. 이 분무와 취출시간이 조업의 약 1/3을 차지하며 이 작업은 보다 최적화 기회가 많다. 분무시간(속도)는 직접 금형 이형제 분무장치

의 단위분무 유량에 좌우된다. 가능한 단시간에 균일하게 이형제를 분무하는 프로그램의 개발이 중요하다.

주조 사이클시간은 제조기간중 정기적으로 분석을 하여서 각 요인들의 조정을 거쳐 더욱 생산성과 품질 향상의 가능성을 높이며 조업의 안정성을 확보하는 것이 바람직하다.

주조시에 이형제는 주로 흑연계를 사용하는 것이 일반이나 이형성이 우수한 반면 표면 오염과 주조환경의 문제가 있어서 mica나 알루미늄 및 BN 등의 백색계 통도 많이 사용되고 있다. 이형제는 주로 물에 희석하여 사용하는데 흑연계에서 6:1-20:1로 희석하며 가급적 사용량을 최소화하면서 균일하게 도포 시키며 소형에서는 수작업으로 중대형에서는 자동 분무장치를 사용한다. 이경우도 적절한 분무 시간과 유량 및 노즐배치는 주물의 특성에 기준하여 조절하며 가급적 물은 탈이온수를 사용한다. 분무로서 금형온도를 조절하는 것은 한계가 있어서 가급적 금형 수냉에 의존하여야 한다. 흑연계가 이형성은 우수하지만 주물에서도 빠기 구배를 약 1°를 처리하는 것이 바람직하다.

슬리브에서 윤활제는 보다 고온 안정성과 단열성이 우수한 것을 사용하며 여기는 거의 흑연계를 사용한다. 가급적 용탕의 온도 손실을 최소화하며 오염도 적게 되어야 한다. 적절한 윤활제처리가 사출슬리브의 소착이나 마모손상의 방지에 중요한 역할을 하며 초기 고착량이 크면 흑연이형제의 오염이나 습기에서 가스 혼입 위험이 커지므로 주의하여야 한다.

용탕을 유지로에서 금형으로 이송하는 공정에는 종래 직압식이나 소형 주조기에서는 수작업으로 하였으나 중대형화 및 고품질주물에서는 자동 로봇 레들시스

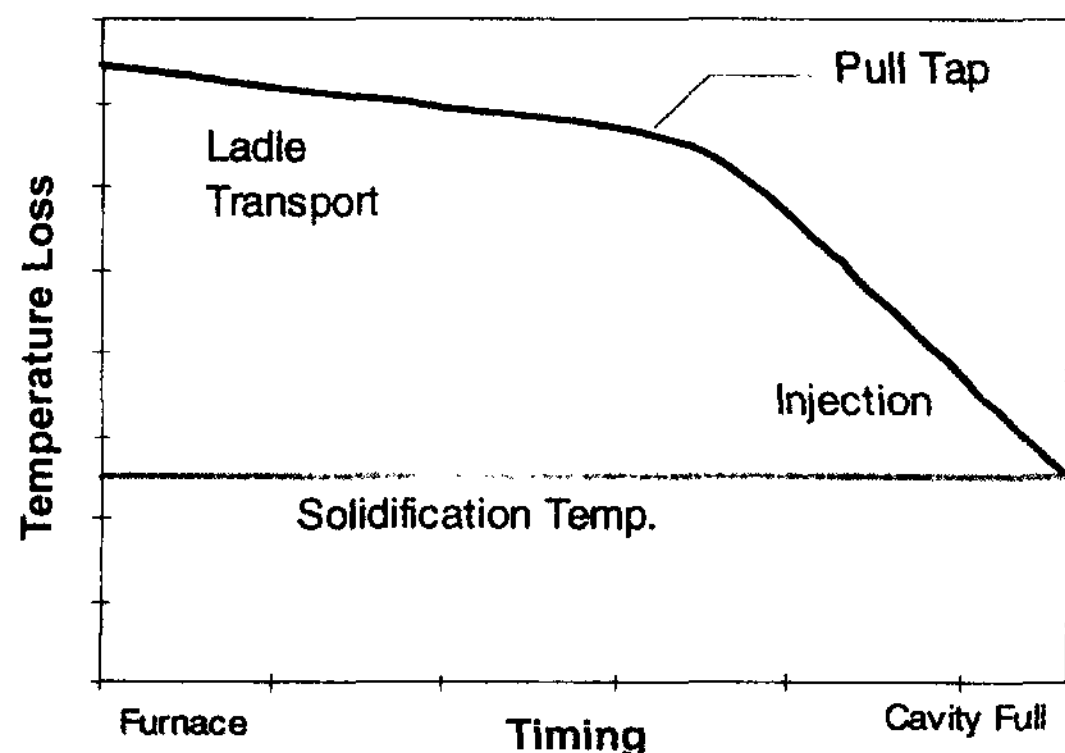


그림 11. 사출시 온도변화.

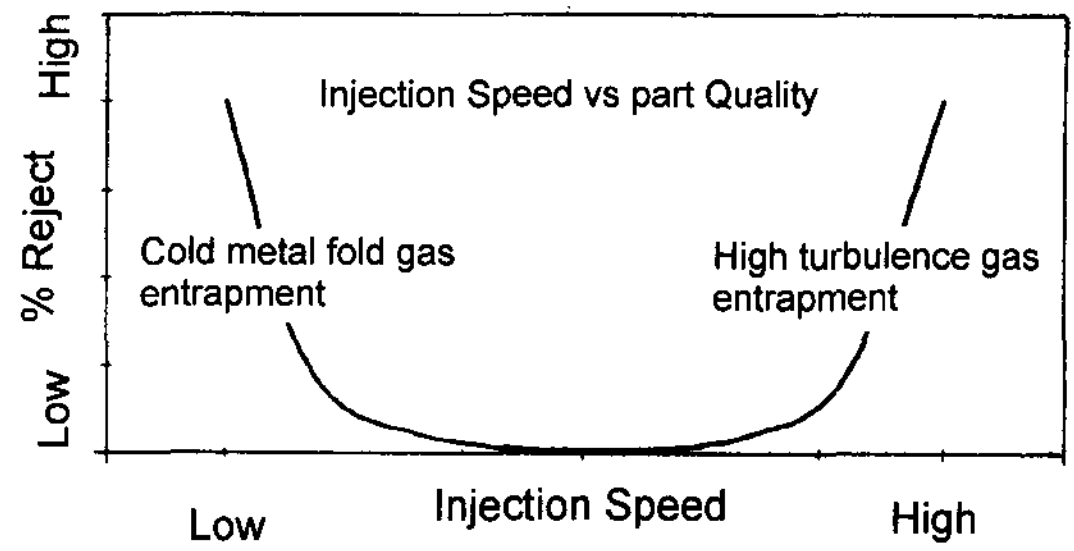


그림 12. 사출속도와 주물 품질.

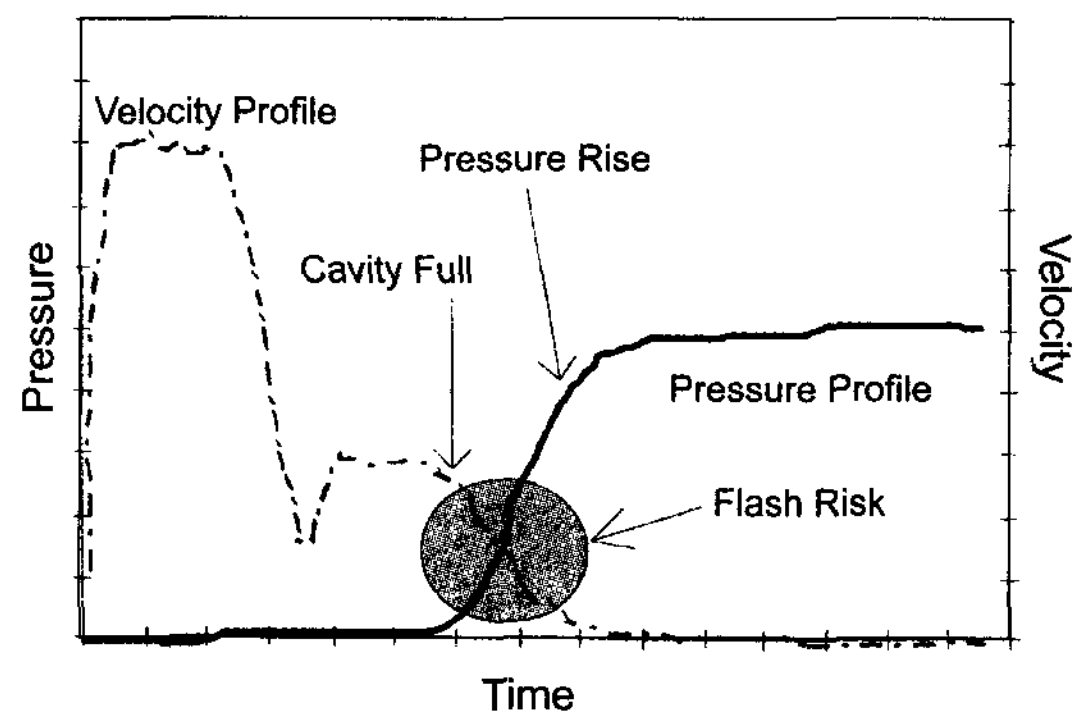


그림 13. 사출압력 및 거동 profile.

템과 나아가 공압이나 진공 및 전자급탕으로 로에서 직접 용탕을 금형이나 사출 슬리브로 주입을 하는 것이 실용화되고 있다. 이중에서 일반적으로 용탕을 사출슬리브에 급탕을 하고 사출슬리브에서 실제로 가압 충진을 하는 과정에서 용탕온도는 일부 냉각이 진행된다. 그림 11은 사출중에 용탕온도변화를 개략적으로 도시한 것이다. 보통 슬리브에 주탕까지는 약간의 온도 감소가 되고 슬리브에서 온도 냉각이 진행되고 사출완료시에 거의 응고개시가 되는 것이다. 이때 사출슬리브와 용탕의 접촉부에서 부적절한 온도 냉각이 심화되면 응고층이 혼입되어 주물의 물성과 조직의 결함을 일으킨다.

용탕단조 사출시의 속도의 영향은 그림 12와 같이 어느 정도의 구간을 가진다. 초저속은 온도감소가 심하고 응고가 진행될 위험과 가스혼입의 위험이 있고 고속은 용탕의 불균일 유동으로 가스혼입 위험이 증가한다. 그림 13은 용탕 사출시의 압력 변화도로서 사출슬리브에 급탕후 신속하게 용탕을 탕구 근처까지 이동후에 저속으로 충진을 시키며 충진후익에 압력이 증가한다. 이때에 용탕의 flash가 발생하며 적절한 금형방

안과 온도, 속도 제어가 고압응고를 가져오게 한다.

**4.1.5 Trimming**

주물의 제품부 외에 부분들 - 압탕이나 탕도, overflow 나 flash 등을 제거하는 trimming은 주조공정에 공통적 사항이다. 가공 및 절단장비를 구입하여 사용하며 수요자의 치수조건에 기준하여 작업을 한다. 용탕단조는 어느 주물보다 치수 정밀성과 재현성이 우수하고 변형도 적어서 가공불량이 적은 장점이 있다.

**4.1.6 열처리**

대개 용탕단조품은 그 자체도 중력주조에 비해 강도와 인성이 높지만 열처리에 의하여 보다 고 강도 고 물성을 제공할수 있다. 그 주요 특성은 앞에서 언급한 바와 같으며 그 열처리 장비들은 고품질의 주물의 경우 반자동 drop bottom batch 전기로를 사용하고 있다. 이 경우 신속한 급냉이 가능하며 온도와 제품의 이송이 자동제어가 되어 각 조업에서 균일성과 안정된 조업을 유지하게 한다. batch 식은 lot 조절과 부품수량의 제어가 용이하다. 여기서 대량생산시에는 초기부분이 목표온도에 도달하는 것과 최종부가 목표온도에 도달하는 것의 시간차가 적어야 한다.

이것이 품질의 안정과 균일에 크게 영향을 미친다. 용탕단조품은 다른 주조품에 비하여 미세조직으로서 고온에서도 주물의 균열이나 변형이 적은 장점이 있어 보다 신속 고용체화가 가능하다. 시효에서도 온도차이가 부문별로 적어야 하며 물성에 맞추어 시간과 온도를 설정한다.

**4.1.7 사상 및 검사**

용탕단조의 사상이나 검사과정은 다이캐스팅과 같으며 주물의 마무리에 흑연이형제를 제거하는 blasting 처리를 한다. 치수정밀도의 우수함이 용탕단조의 장점이다. 고품위 주물의 검사에는 ASTM이나 수요자 기준에 의한 형광염료와 형광검사를 거친다. 주물로서 다른 주조품과 용탕단조품의 특성을 비교하면 다음 표 2

와 같다.

**4.2 용탕단조 주조해석 사례 - Upper Bracket**

용탕단조품을 개발하는 한 사례를 소개하고자 한다. 제조하는 주물은 오토바이용 어퍼브라켓트라는 주조품으로서 종래 중력주조 알루미늄주물이었으나 용탕단조로 보다 고강도화가 가능하며 실형상의 제조로 가공공수의 생략 표면 품질의 개선의 부수적인 효과가 기대되었다. 따라서 주물의 제조공정을 용탕단조로 변경을 시도하면서 제품의 규격도 박육화 하여 주물의 무게를 15% 경량화하였다. 그림 14는 이것을 용탕단조로 시제한 주물의 모습이다. 전반적으로 두께가 4mm의 박육이면서 좌우 모서리에 후육이 있어서 중력 주조시에 결함이 많고 가공량도 많다. 여기에는 2차 가압을 실시하고 수평사출 토글시 수평형체결의 250톤 스퀴즈다이캐스팅기(KIST개발)에서 용탕단조를 실시하였다. 이러한 주물의 개발에서 주조방안 및 금형 제작에서 먼저 열유동해석을 하여 최적 주조방안의 선정과 주조조

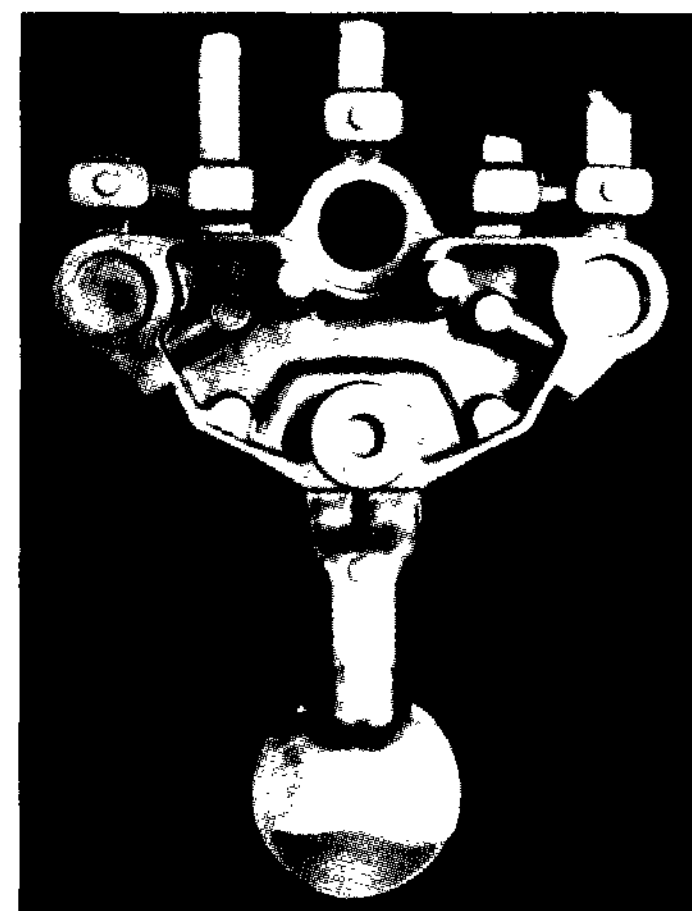


그림 14. 용탕단조 시제품.

표 2. 실형상 주물제조공정에서 특성비교.

특성	중력/저압주조	다이캐스팅	단조	용탕단조
Section Thickness	중력 - 박육불가능 저압주조 - 탕구 부근 후육	후육 불가능	다양	광범위
Undercut	양호	양호	불가능	양호
Core Hole	양호	우수	불가능	우수
Draft Angle	3°	1° - 1.5°	4°	2°
Basic Tolerance	± 0.4 mm	± 0.25 mm	± 0.4 mm	± 0.3 mm
Design Freedom	양호	우수	부족	우수

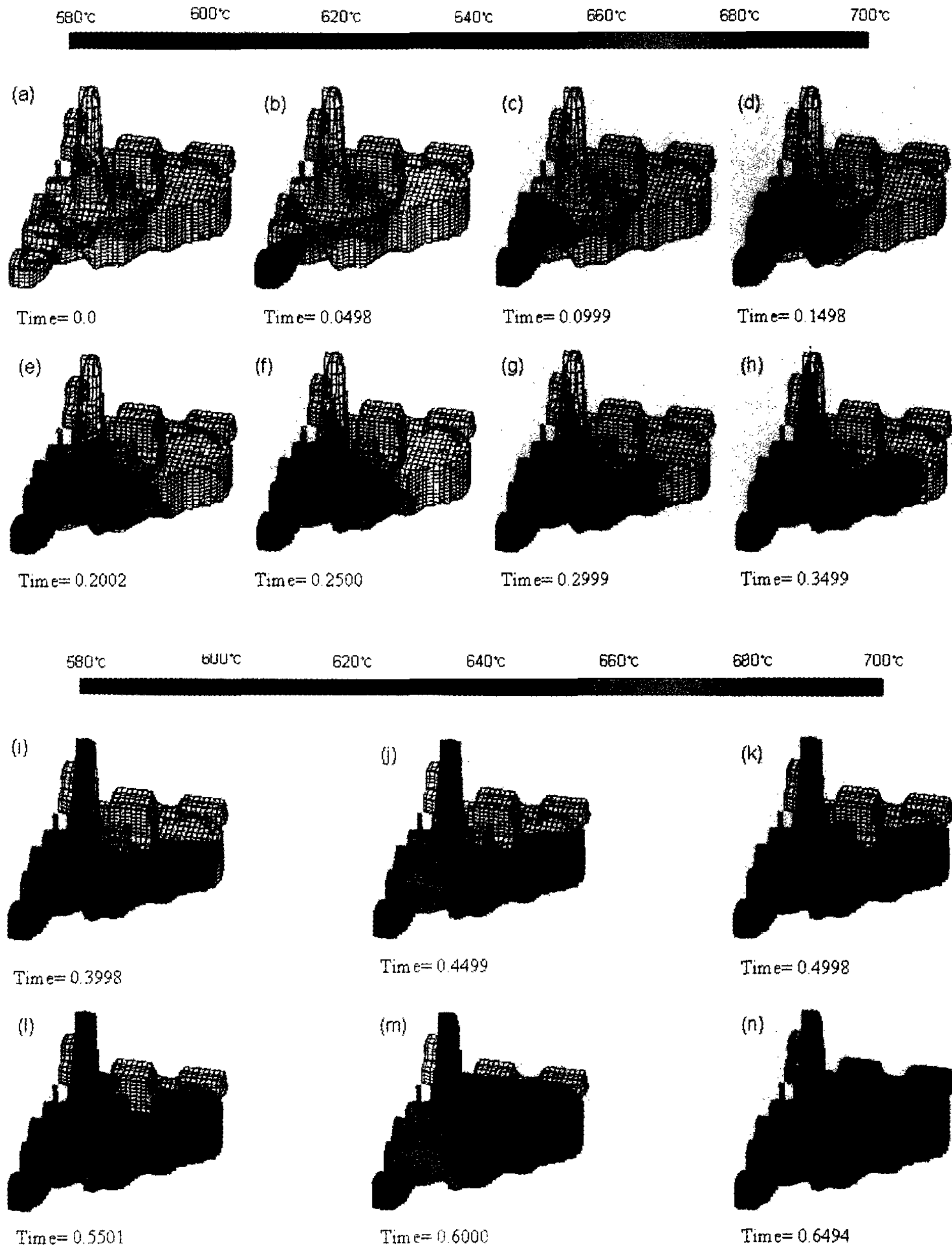


그림 15. 용탕단조시 주물공간으로 용탕 충전거동의 전산모사.

건의 검토가 이루어 졌다. 그림 15는 통상의 용탕단조 주조속도와 탕구에서 금형공간내로 용탕의 충전거동을 Flow 3D 열유동해석 프로그램을 통하여 전산모사한 결과이다. 그결과 용탕의 충전과 겹침이 일어나는 부분을 예상할 수 있었고 그것이 1차 시제에서 확인이 되어서 overflow 및 공기빼기의 적절한 설치로 주물

성형성을 개선시키고 신속하면서 최적의 금형을 제작 하고 안정한 용탕단조품을 제조할 수 있었다. 또한 주 물내 온도 분포와 금형온도도 예상 할수 있어서 수냉 회로 설치와 온도제어를 적절하게 함으로서 지향성 응 고, 2차 가압의 설치 위치 및 시기등을 예상할 수 있 다.

### 5. 결 론

현장기술 위주와 최근 보고되는 경량금속의 용탕단조 기술에 대해서 개략적으로 설명을 하였다. 그동안 주로 연구되고 알려져 있는 용탕단조 기술중에서 많은 부문이 직접가압 방식의 용탕단조시 조직과 물성 및 열유동에 대한 보고는 실제 양산에 적용되기에는 한계가 있으며 유동을 도입한 간접가압식에 대한 수정 보완이 요구되는 사항이 많다. 기반기술적 요소가 되는 공정기술을 고려하여서 현장에서는 열유동의 해석과 공정 전반적인 재검토 특히 다이캐스팅의 양산화 기술을 같이 고려한 용탕단조 양산기술의 정립이 필요하다. 이러한 점에서 NADCA 에서는 용탕단조의 고품질화 제조 가능성을 새롭게 인식하고 범국가적으로 기반기술 부터 새롭게 간접가압방식에 대한 정립과 연구개발을 추진하고 그 결과가 가시화 되고 있다. 우리는 이에 대하여 다이캐스팅의 양산기술을 용탕단조에 접목하여 독자적인 양산화 기술의 확립이 향후 과제가 된다. 각종 전용주조기를 도입하였으나 실제 그 양산기술의 부족과 산발적인 개발의 추진으로 그 효과가 미미한 것을 고려하여서 현장과 학연이 함께 머리를 맞대고 효과적인 실용화를 다시금 도모할 필요가 있다. 실제 현장에서 필요한 부분을 실용적으로 재검토하면 부가가치가 높은 경량주물의 양산화가 더욱 많이 이루어 질 수 있다고 기대한다.

### 참고문헌

- [1] North American Die Casting Association(NADCA); www.diecasting.org
- [2] W. A. Butler ; Die casting Engineer , Nov/Dec (1999) 35
- [3] Norwin. A. Merens ; Die casting Engineer, Nov/Dec (1999) 16
- [4] Mitsuru Adachi : J. of Japan Foundrymans Society (IMONO), Vol. 66. No. 12 (1994) 904
- [5] G.A. Chadwick, T.M. Yue ; Metals and Materials Vol. 5. (1989) 6
- [6] 이호인 : 대한금속학회보, 제9권 제 2호 (1996) 89
- [7] 한요섭, 김기배, 김용준 : 대한금속학회보, 제9권 제 2호 (1996) 89
- [8] 이호인 ; 한국주조공학회 창립20주년 특집호 (1996) 51
- [9] S. Okada, N. Fujii, A. Gato, S. Morimoto and T. Yasiad : AFS Trans. Vol.82 (1982) 135
- [10] C. P. Hong, H. F. Shen and I. S. Cho ; Metall. Trans. Vol. 29A, (1998) 339
- [11] H. Ishimaru, J. Kaneko and M. Sugamata ; J. Light Metals Society, Vol. 31. No.11(1981) 712
- [12] J. X. Dong, P. A. karensis, G. Durrant and B. Cantor : Metall. Trans. Vol. 30A (1999) 1341
- [13] K. Chinnathambi ; Die casting Engineer, Nov/Dec 1999 80
- [14] David T. Gerken, Craig C. Conaty and Toshio Ogiwara : SAE Transaction paper 981188, (1999), 959
- [15] N. Nishi, Y. Egoshi, Y. Takahashi, ; Diecast(Japan) , No. 86 (1987) 24