

진공다이캐스팅시 국부스퀴즈 효과가 주조품질에 미치는 영향

김억수* · 김성준* · 이광학** · 문영훈***

(1999년 4월 21일 접수)

Effect of Partial Squeeze on the Quality of Casting Products in the Vacuum Die Casting

E.S.Kim, S.J.Kim, K.H.Lee and Y.H.Moon

Abstract

The effect of partial squeeze on the quality of casting products in the vacuum die casting was investigated to make defect free casting products with excellent mechanical properties. The partial squeeze and vacuum die casting process was industrially implemented in making reaction shaft support which was made of a hypereutectic Al-15%Si alloy. To combine squeezing and vacuum effects, the plunger injection system was designed and attached on the chill vent type vacuum machinery system. The combination of vacuum effect before injection and partial squeezing effect after injection resulted in defect free die casting products. The uniform distribution of fine eutectic and proeutectic Si obtained from trial process also provided excellent mechanical properties.

Key Words : Partial Squeeze and Vacuum Die Casting, Hypereutectic Al-Si Alloy, Squeeze Pressure, Plunger Stroke, Injection Pressure, Injection Speed

1. 서 론

금속가공법 중 용융합금에서 최종제품으로 가장 최단시간에 제조할 수 있는 다이캐스팅법은 용탕이 고속, 고압으로 금형 cavity 내에 충전되므로 가스의 혼입으로 인한 기공이나, 충전응고 중 cavity 보다 탕도부가 먼저 응고함으로써 발생하는 수축공 등의 내부 결함이 존재하기 쉬우므로 내압기밀성이 요구되는 부품, 용접이나 열처리가 요구되는 고강성 부품 등에는 적용에 제한을 받아왔다.

근래 이러한 결함을 제어하기 위한 수단으로 미국 GM 사에서는 Accurad법⁽¹⁾을, 일본 UBE사에서는 Gas Free

진공주조기술⁽²⁾ 및 스퀴즈(squeeze) 다이캐스팅법⁽³⁾ 등을, 일본경금속(주)에서는 Pore Free 다이캐스팅기술⁽⁴⁾ 등을 개발한 바 있다.

Accurad법은 저속충진으로 공기의 혼입을 적게하며, 넓은 탕구로 인해 최종응고부의 압탕효과로 수축공의 생성을 억제할 수 있는 주조법이나 용탕충진성이 불량하여 복잡한 형상의 주물을 제조하기는 곤란하며 생산성도 일반다이캐스팅에 비해 낮은 단점을 갖는다. Pore Free 다이캐스팅의 경우는 sleeve와 cavity 내를 활성 가스인 산소로 충전후 용탕을 주입함으로써 용탕표면과 산소와의 순간적인 반응으로 극미립(1 μm이하)의 산화Al보호피막

* 동남정밀(주) 기술연구소
** 울산대학교 금속공학과
*** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

의 형성에 따른 진공효과로 기공의 결합은 제어할 수 있으나, 메커니즘상 수축공의 형성은 제어하기 어려운 구조법이다. 진공다이캐스팅은 일반다이캐스팅과 동일한 메커니즘으로 고속사출전 cavity내의 공기를 0.3~0.5 sec내 진공펌프로 감압하여 200 mmHg 이하의 진공도하에서 주조하여 고품질을 얻을 수 있는 공법이나 진공관련설비의 고정도 관리를 요구함으로 생산성이 떨어지는 단점이 있다. 또한 저속충진법인 용탕단조법은 지속적으로 용탕에 가압을 하기 때문에 냉각속도가 증가되어 조직이 미세하며, 가압 효과로 기공이나 수축공의 결합이 생기지 않을 뿐만 아니라 기계적 성질이 우수하고 열처리와 용접이 가능하여 고품질의 구조품을 얻을 수 있으나, 이에 적합한 합금설계가 요구되며 생산성이 낮고 제조경비가 일반다이캐스팅법에 비해 최소 20%이상 높다는 단점이 있다.

이에 따라 일반다이캐스팅법의 장점인 고생산성과 용탕단조법의 장점인 고품질성을 고려하여 주물의 후속부분만을 squeeze pin으로 가압해주는 partial squeeze die casting이 개발⁶⁻⁸⁾되었으나 이 구조법은 기공에 의한 미소결합의 완전한 제거가 어려운 것이 단점이었다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 고생산성과 고품질성을 동시에 만족할 수 있는 구조법으로서 스크즈 다이캐스팅과 진공구조법을 병용한 스크즈병용 진공다이캐스팅법을 이용하여 스크즈병용 진공 다이캐스팅시 공정변수가 구조품질에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 기존의 주철주물을 대체할 수 있는 높은 비강도, 우수한 고온경도와 강도, 내식성, 내마모성을 가지며 양호한 구조성 및 높은 열전도도를 갖도록 설계된 과공정Al-15 wt%Si합금을 이용하여 실제품을 제조한 후 기존의 일반 다이캐스팅법으로 주조한 시편과 비교 분석함으로써 공정변수에 대한 Al-Si 과공정 합금의 구조품질과 기계적 성질 등의 제특성을 비교 분석하였다.⁽⁷⁻⁹⁾

2 실험방법

2.1 Al-15wt%Si 과공정 합금설계

본 연구에 사용된 합금은 Al-15 wt%Si 과공정 합금으로 내열, 내마모성 경량소재로 그 화학조성은 Table 1에 나타내었다. Al-Si합금은 Al합금중 최적의 구조성을 갖고 있으며 본 연구에서는 내마모성 및 강성을 높이기 위해 Si 함량이 15 wt%인 과공정 합금을 사용하였다. 이 합금은 구조성과 가공성이 우수하며, 특히 경질의 초정 Si에 의해 내마모성, 내열성 등이 우수하다. 이러한 기계적, 물리적 성질을 결정짓는 인자로는 초정Si와 과공정Si의 형상 및 분

Table 1 Chemical composition of Al-15 wt%Si hypereutectic alloy(wt%)

Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	P	Al
14.5-15.5	4.0-5.0	below 0.5	below 0.5	below 0.8	0.2-0.3	0.06	Val

포도로서 통상의 구조조건에서는 초정Si 입자가 불규칙적이고 조대하게 성장하여 기계적 성질과 가공성이 감소한다. 또한 개량처리되지 않은 판상의 초정Si의 경우 재료의 인성이 저하되는 문제가 있다.

따라서 본 연구에서 사용된 합금은 초정 Si의 입자크기 및 모양을 10~50 μm 정도 미세화시키고 분포도를 양호하게 하기 위하여 미세화제로 P를 첨가시켰다.

2.2 다이캐스팅 시험설비

본 연구에서의 스크즈병용 진공다이캐스팅 시험설비를 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다.

가스에 의한 기공발생을 방지하기 위한 진공장치로는 chill vent type의 진공 시스템을 적용하였으며, 후속부의 고강성 및 내마모성을 향상시키고 수축에 의한 수축공을 제어하기 위해 국부가압식의 스크즈 가압 방식을 설계제작하였다. 기존 valve type의 진공시스템⁽²⁾의 경우 용탕이 주입구 sleeve 내에서 저속사출된 후 적정시기에 진공개시하고 cavity 내부가 진공상태로 유지된 후 고속가압사출하여 성형을 하였다. 이때 진공밸브 하단에 고속가압된 선행 용탕이 도달하는 것을 감지하여야만 진공의 개폐가 이루어지므로 구조시 밸브소착, burr 침입, 막힘 등이 동반되어 지속적인 장비유지와 생산성에 문제가 되어 왔다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 밸브가 없고 cavity 내를

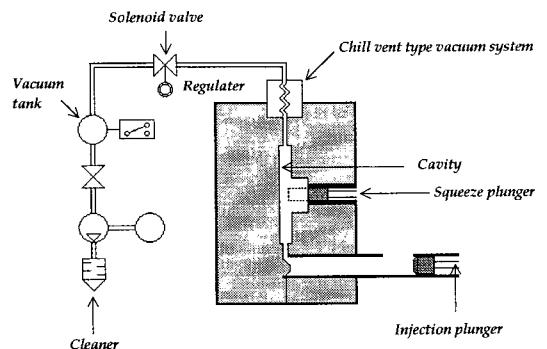


Fig. 1 Schematic drawing of partial squeeze and vacuum die casting machinery

Table 2 Experimental casting condition

Process	Conventional	Vacuum	Squeeze	Partial Squeeze
	Die Casting	Die Casting	Die Casting	and Vacuum Die casting
Pouring Temperature (°C)	700	700	700	700
Injection Pressure (kg/cm ²)	850	850	850	850
Injection Speed(m/s)	first 0.3	0.3	0.3	0.3
	second 2.5	2.5	2.5	2.5
Squeeze Pressure (kg/cm ²)	-	-	1500-3000	1500-3000
Time-Lag(sec)	-	-	0.5-2.0	0.5-2.0
well Time(sec)	13	13	13	13
Cycle Time(sec)	65	65	65	65

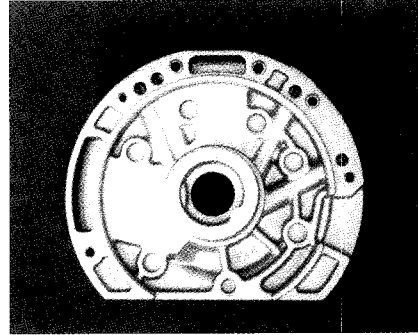


Fig. 3 Photograph of die-casted trial product of reaction shaft support

본 실험에서는 일반다이캐스팅법, 스퀴즈 다이캐스팅, 진공 다이캐스팅 및 스퀴즈병용 진공다이캐스팅법으로 Al-Si 과공정 합금 조성의 시제품을 각각 제조하여 주조품질 및 기계적 특성을 비교조사하였는데, 시험제작품으로는 Fig. 3에 나타난 Reaction shaft support 를 대상으로 하였다.

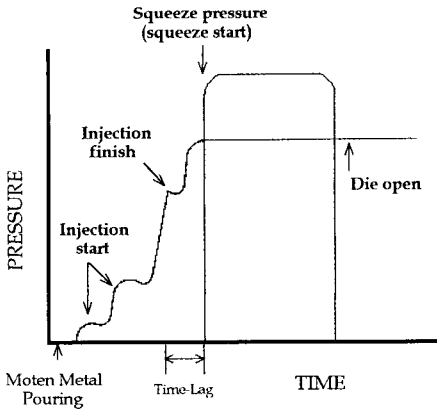


Fig. 2 Schematic drawing of injection curve

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공정변수가 주조품질에 미치는 영향

스퀴즈병용 진공 다이캐스팅시 후육부분의 결함을 방지하기 위하여 squeeze pin으로 가압하여 가압력의 변화와 가압개시시간의 변화가 주조품질(고밀도화)에 미치는 영향을 알아보기 위해 electronic densimeter(SD-120L, Japan)로 시험편의 스퀴즈된 부위(squeeze point)의 비중을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 가압력이 1500 kg/cm²인 경우에는 가압개시시간이 늦어 질수록 비중은 감소하였으며, 가압력이 3000 kg/cm²일 때는 가압개시시간이 길어 질수록 비중이 증가하나 가압개시시간이 1.5 sec보다 늦어지면 비중이 감소하는 경향을 보이고있다. 이러한 현상은 가압력이 1500 kg/cm²로 낮을 경우에는 스퀴즈의 가압력이 응고층의 변형 저항력보다 작아 가압 plunger의 전진량이 짧아지기 때문이며, 가압개시시간이 늦어 질수록 이러한 가압력이 시간의 경과에 따라 증가하는 응고층의 변형저항과 평형하는 점, 즉 가압 plunger stroke은 더욱 짧아져 가압에 의한 스퀴즈 효과가 감소되기 때문이다. 그러나 가압력이 3000 kg/cm²로 높은 경우에는 이와는 반대로 응고층의 변형 저항력보다 가압력이 지나치게 높아 가압개시시간이 빨라지면 오히려 가압 plunger가 순간적으로 squeeze

진공후 고속사출된 선행용탕이 vent에 도착시 응고되는 강제냉각식의 chill vent type의 진공시스템을 적용하였다.

본 실험에 사용된 주조설비는 다이캐스팅 주물제작에 사용되는 cold chamber type의 설비로 진공은 고속사출 직전 0.3~0.5초 이내에 60 mmHg이하의 진공도에 도달하도록 설계하였으며, 가압 plunger는 가압력과 가압개시시간의 조절이 가능토록 하였다.

Fig. 2에 본 실험에 적용한 스퀴즈병용 진공다이캐스팅의 사출시간과 압력에 따른 사출 곡선을 나타내었으며, Table 2에는 본 시험의 주조조건을 나타내었다.

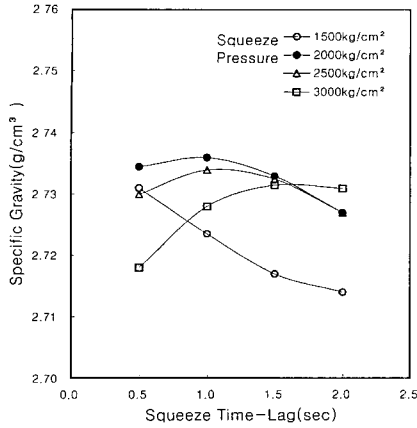


Fig. 4 Effect of squeeze pressure and time lag on the specific gravity of cast products

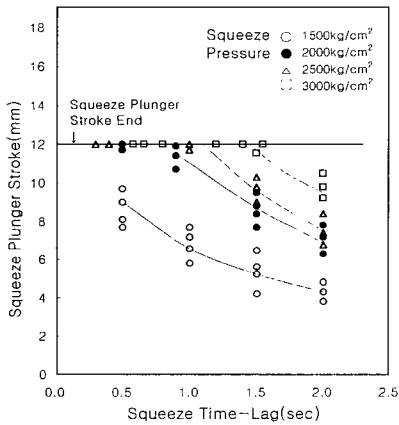


Fig. 5 Relationship between plunger stroke and squeeze pressure

stroke end point까지 도달하게 되고 그 후 응고가 진행 완료됨으로 인해 또 다른 부위에 최종 응고부를 형성하여 수축공을 유발하기 때문에 비중이 낮아지게 된다. 또 가압 개시시간이 2.0 sec로 늦어지면 응고층의 변형 저항력 때문에 stroke이 end point에 도달하지 못함으로써 가압 효과가 충분하지 않기 때문에 비중이 감소되는 것으로 판단 된다.

한편, 가압력이 2000 kg/cm² 또는 2500 kg/cm²이고 가압 개시시간이 1.0 sec일 때는 최대 밀도가 약 2.736 g/cm³으로 가장 높았으며 가압개시시간이 이 보다 빠르거나 늦은 경우에는 비중이 낮아져 가압 효과가 감소하였다. 이러한 현상은 Fig. 5에 나타난 가압조건에 따른 가압 plunger

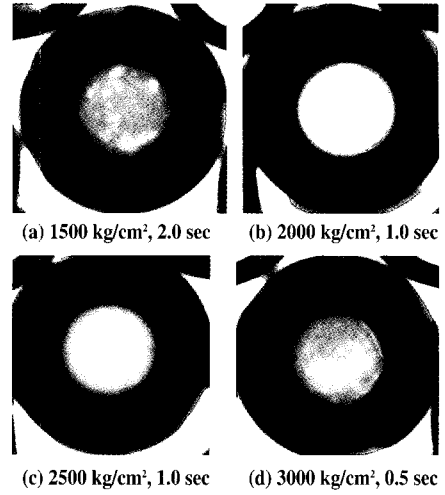


Fig. 6 X-ray photograph showing internal casting defects

의 전진거리 관계에서도 알 수 있는데, 가압 plunger의 전진거리는 가압력이 클수록, 스퀴즈 가압개시시간이 빠를수록 길어짐을 알 수 있다. 따라서 가압력은 클수록, 스퀴즈 가압개시시간은 빠를수록 가압 효과는 높아진다. 그러나 가압력이 너무 크거나 가압개시시간이 너무 빠를 경우에는 가압 과정 중에 가압 plunger를 전진시키는 유압 실린더의 stroke이 응고전에 end point에 도달하게 됨으로 스퀴즈 효과가 불충분하게 된다.

그러므로 가압조건은 가압 plunger가 가압과정중에 유압 실린더의 stroke end point에 도달하지 않는 범위 내로 설정할 필요가 있으며, 본 실험에 있어서는 가압력이 2000 kg/cm² 및 2500 kg/cm²이고 가압개시시간이 1.0 sec 일 때가 가장 적절한 조건임을 알 수 있었다. 이와 같은 squeeze 효과가 내부결함발생에 미치는 영향은 Fig. 6에 나타난 X-ray 사진에서도 확인할 수 있는데 시험편의 후육부인 중앙부분에 (a)1500 kg/cm², 2.0 sec와 (d)의 3000 kg/cm², 0.5 sec에는 기공이나 수축미세공 등의 내부 결함이 다소 존재하고 있으나 (b)와 (c)의 2000 kg/cm², 1.0 sec와 2500 kg/cm², 1.0sec일 때는 결함이 없는 양호한 상태임을 관찰할 수 있었다.

일반 다이캐스팅법 과 스퀴즈 다이캐스팅법으로 제작한 주물의 경우, 후육부분에 용탕주입시 난류로 인하여 sleeve와 금형 cavity내의 잔류가스의 혼입과 윤활제 및 수성이형제의 열분해 가스발생에 따른 가스의 혼입으로 다량의 미세기공이 발생하여 있음을 볼 수 있다. 그리고 진

공 다이캐스팅법의 경우는 일반 다이캐스팅법 및 스퀴즈 다이캐스팅법과 마찬가지로 사출응고시 탕도부가 선행 응고하여 생성된 Al수지상과 Al-Si망상조직 중에 발생하는 응고수축에 대한 용탕 보충이 어렵기 때문에 발생한 수축 공을 육안으로 확인할 수 있었다. 기공의 발생은 기공의 압력이 주위에 있는 용탕의 압력과 용탕의 응집력에 의하여 받는 압력의 합보다 클 때 발생된다. 그 결과 용탕의 가압력이 증가하면 용탕의 응집력도 증가하며, 그 결과 기공이 받는 압력도 그만큼 증가하므로 기공을 감소시킬 수 있다. 그러므로 주물의 후육부분에 발생할 수 있는 주조결함은 용탕을 직접 가압해주는 스퀴즈법을 가미하여 주물의 후육부분을 squeeze pin으로 응고 완료시까지 지속적으로 가압하여줌으로써 잔류 가스를 제거하여 기공의 생성을 억제할 수 있다. 따라서, 본연구에서 적용한 스퀴즈병용 진공다이캐스팅법의 경우에도 Fig. 6에서 보인바와 같이 사

출직전(0.3~0.5sec 전)의 cavity의 진공효과와 가압력 작용의 효과로 기포생성의 억제와 조정 Al수지상을 파괴시켜 수축 부위에 용탕보충을 용이하게 함으로써 수축미세공의 내부 결함이 없는 건전한 주물을 얻을 수 있었다.

3.2 스퀴즈병용 진공다이캐스팅 제품의 기계적 특성

스퀴즈병용 진공다이캐스팅 제품의 기계적 특성을 파악하기 위해 기계적 성질에 직접 영향을 미치는 미세조직을 다이 캐스팅 공정별로 관찰하였다. 일반 다이캐스팅법, 스퀴즈 다이캐스팅법, 진공 다이캐스팅법 및 스퀴즈병용 진공다이캐스팅법으로 제작된 시험편의 내부조직을 비교하기 위하여 시험편의 중심부인 후육부분을 동일 채취하여 미세조직을 관찰한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

일반 다이캐스팅법으로 주조한 (a)의 경우는 용탕이 고속 고압으로 사출되어 난류로 인한 공기의 포집과 gate부

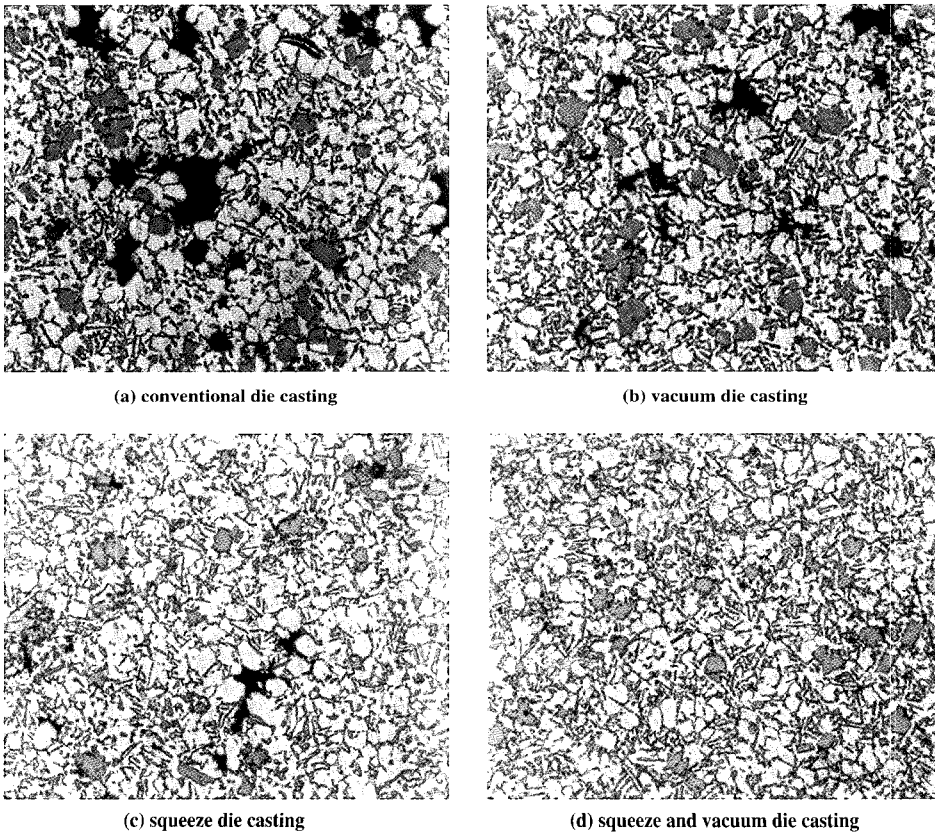


Fig. 7 Typical microstructures at various die casting processes

Table 3 Mechanical properties of die casted products

Process	Yield Strength (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)	Specific Gravity (g/cm ³)
Conventional Die Casting	10.8	16.94	0.15	123	2.715
Vacuum Die Casting	12.7	23.23	0.2	127	2.730
Squeeze Die Casting	11.5	19.74	0.19	130	2.731
Partial Squeeze and Vacuum Die casting	13.9	24.92	0.26	133	2.736

가 먼저 응고되므로 응고완료시까지 충분한 가압이 이루어지지 않아 주물의 후육부에 많은 수축공, 기공등의 내부 결함이 형성되어 있음을 볼 수 있으며, 또한 비교적 불균일한 조대 Al수지상의 형성과 편석되어 있는 침상의 Al-Si공정상이 관찰되어 불건전한 조직을 이루고 있음을 알 수 있었다. 진공다이캐스팅법으로 주조한 (b)의 경우에는 cavity내를 진공처리 함으로써 일반 다이캐스팅법에 비해 가스에 의한 내부 결함은 없었으나 수축에 의한 수축공을 관찰할 수 있었다. 그리고 스퀴즈 다이캐스팅법에 의한 (c)의 경우에는 수축에 의한 수축공은 제어할 수 있었으나 가스에 의한 기공은 관찰되었다. 본 연구의 스퀴즈 병용 진공다이캐스팅법에 의한 (d)의 경우에는 cavity의 진공효과와 고속 고압으로 용탕사출후 주물의 후육부에 고압력(2000 kg/cm², 일반 다이캐스팅법의 2.5배)으로 용탕을 직접 가압하여 결함이 없는 건전한 주물을 얻을 수 있었다. 또한 내열성 및 내마모성의 향상인자인 초정 Si의 입자크기도 다른 제조공법에 비해 미세균일한 분포를 나타내었다. 이는 고압력의 작용으로 인한 급형과 주물과의 접촉상태가 좋아져 주물의 냉각속도가 크게 증가하는 점과 가압에 의한 수지상의 파괴로 인한 핵생성site의 증가, Al중에 Si의 고용한도 증가 및 초정 Si의 미세화에 기인한 것으로 생각된다. 특히 최적 주조조건인 2000 kg/cm²의 가압력과 1.0 sec의 가압개시시간으로 주조함으로써 공정의 정출이 감소하였고, 결정입계부근에 아주 미세한 입자상의 공정 Si가 형성되어 있으며, 내마모성 및 내열성 향상 인자인 초정Si입자가 미세 균일 분포되어 있는 편석이 없는 양호한 조직이 관찰되었다. 고압력에 의한 Al 중의 Si 고용한도의 증가를 통한 입자 미세화효과는 Ransley⁽¹⁰⁾의 논문에서도 보고된 바 있다. 이와 같이 고압력

작용하에서는 대기압하의 용탕중에 수소가 과포화 되어 있더라도 응고시 강제 고용되기 때문에 일반 다이캐스팅법에서는 제거가 어려운 미세기공도 스퀴즈 가압으로 이들 기공의 생성을 억제할 수 있었던 것으로 생각된다. 또한 용탕 급탕전에 cavity내를 60 mmHg이하로 진공감압하여 순간적인 진공상태 하에서 성형이 완료되므로 기공이 없는 건전한 주물을 얻을 수 있었다.

일반적으로 합금의 강도는 결정립의 크기에 의존하며 실온에 있어서는 결정립이 미세할수록 강도는 증가한다. 각 주조공법에 따른 인장강도, 경도 및 비중 측정결과와 평균치를 Table 3에 나타내었다. 인장 특성을 비교하여 보면 일반 다이캐스팅법의 경우 인장강도가 16.94 kg/mm² 정도이지만, 스퀴즈병용 진공 다이캐스팅법의 경우에는 24.92 kg/mm² 로 인장강도가 가장 높았다. 그러나 진공 다이캐스팅법과 스퀴즈 다이캐스팅법은 스퀴즈병용 진공다이캐스팅법에 비해 인장강도가 다소 낮았다. 연신율의 경우도 일반 다이캐스팅법의 경우 0.15%에서 스퀴즈병용 진공 다이캐스팅법의 경우 0.26%정도로 향상되었다. 스퀴즈병용 진공 다이캐스팅법의 경우 주조결함이 제어되고, 공정(eutectic) Si 및 초정(proeutectic) Si이 미세균일하게 분포하고 있으므로 강도 및 연신율등의 기계적 성질이 대폭 향상됨을 알 수 있다. 따라서 고압주조법에 따른 기계적 성질의 경우, 일반 다이캐스팅법에 비해 기공이나 수축공이 비교적 적은 스퀴즈 다이캐스팅법과 진공 다이캐스팅법이 양호한 기계적 성질을 보였으며, 이러한 결함을 최대한 제어할 수 있었던 스퀴즈병용 진공 다이캐스팅의 경우에 가장 높은 기계적 성질을 얻을 수 있었다.

특히 고압력의 영향이 크게 작용하는 스퀴즈 다이캐스팅법이나 스퀴즈병용 진공 다이캐스팅법의 경우, Al 수지상의 면적을 증가와 비중의 증가를 확인할 수 있었으며, 그 결과 내부결함의 감소로 인해 연성이 크게 향상되었다.

4 결 론

Al-15 wt%Si 과공정합금을 이용하여 스퀴즈병용 진공 다이캐스팅의 공정변수가 주조품질에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스퀴즈병용 진공 다이캐스팅법의 경우, 일반 다이캐스팅법, 스퀴즈 다이캐스팅법 및 진공 다이캐스팅법에 비해 충전전 cavity 진공효과와 충전완료후 cavity 내로 작용하는 가압력의 효과가 커 내부주조결함이 없는 건전한 주물을 얻을 수 있었다.

(2) 스퀴즈병용 진공 다이캐스팅법의 경우, 가압력의 증가에 따라 최대비중치를 보이는 가압개시시간(time-lag)은 증가하였으며, 스퀴즈 가압력이 2000 kg/cm² 가압개시시간 (time-lag)이 1.0 sec일때 가장 건전한 주물을 얻을 수 있었고, 이때 주물의 비중은 2.736 g/cm³로 최대치를 나타내었다.

(3) 스퀴즈병용 진공 다이캐스팅법의 경우, 주조결함이 없고 고압력에 의한 미세조직 미세화 효과로 인해 인장강도 및 연신율등의 기계적 성질이 크게 개선되었다.

참고문헌

- (1) John L. Maclaren, 1967, Die Casting, Vol.31, p.7
- (2) 다이캐스트技術者 루드ブック, 1995, 全國다이캐스트工業協同組合連合會, p. 11.
- (3) R. F. Lynch, R.P.Olley and P.C.J. Gallagher, 1975, "Squeeze casting of aluminum", AFS Transactions Paper, No. 75-122, p. 569.
- (4) Die Casting of Aluminum Alloy, 1995, T.Kan and T. Uehara, Japan Light Metal Press Co., Japan, p. 11.
- (5) 素形材 センター: 特殊高壓鑄造法, 1991, 研究調査報告, p. 438.
- (6) 김억수, 김용현, 이광학, 김홍식, 1995, "스퀴즈병용 다이캐스팅법에 의한 Al-12%Si합금의 결합제어에 관한 연구", 한국주조공학회지, 제15권, 제4호, p. 377.
- (7) Metals Handbook, 1988, ASM, 9th Edition, Vol.15, p. 204.
- (8) I.J. Polmear, 1981, Light Alloys-Metallurgy of the light metals, Edward Arnold Co., UK.
- (9) Frank king, 1987, Aluminum and Its Alloy, John Wiley & Sons, New York.
- (10) C.E. Ransley and Neufeld, 1948, "The solubility of hydrogen in liquid and solid aluminum", J. of Inst. of Metals, Vol.74, p. 599.