[논문] 한국소성가공학회지(2002), 제11권 제4호
Transactions of Materials Processing **Vol. 11, No. 4, (2002)**

반용융 다이캐스팅 공정에 있어서 플런저 팁의 형상이 성형성에 미치는 영향

서판기*· 손영익*· 강충길**

(2002년 1월 21일 접수)

The Effect of Plunger Tip Shape on the Formability in Semi-Solid Die Casting Process

P. K. Seo, Y. I. Son and C. G. Kang

Abstract

In this study, an innovative semi-solid die casting technology to replace heavier cast iron compressor parts with lightweight aluminum castings was proposed, and the application possibility for home-appliance component was investigated. The most important factors regarding the semi-solid die casting process are the reheating process of the raw materials to the semi-solid state, specifications of the forming machine, the optimal injection conditions and die design. Materials used in this study were A357 and A390 alloys fabricated by the electromagnetic stirring process. The optimal injection conditions for semi-solid die casting process were presented with the reheating conditions of the semi-solid materials. To investigate the effect of plunger tip shape on the formability and mechanical properties in semi-solid die casting process for complicated shape part, two kinds of plunger tip shape with long and short plunger tip taper are proposed.

Key Words : Semi-Solid Die Casting, Reheating, Optimal Injection Condition, Plunger Tip Shape

1. 서 론

반용융다이캐스팅은 소재가 금형에 충전될 때 고상과 액상이 공존하기 때문에 응고시간이 감소하므로 내부기공을 줄이는 데 있어서 유리하다. 또한, 반용융 성형시 소재의 점성이 액체상태보다 크므로 충전시 유동형태가 난류로 발달하지 않기 때문에 용탕의 흐름에 기인하는 가스 결함, 탕회 불량이 적어지고 응고시 수축공이 적어지는 등 여러 가지 장점들을 가지고 있다.

Vinarcik 등[1]은 반용융 공정을 통하여 두 개의 자동

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
** 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소

차 연료장치 시스템을 설계·제작하여 각각의 경우에 대하여 가공성에 미치는 영향을 파악하였다. Idegomori 등[2]은 T6 열처리한 86S를 소재로 자동차 공기조절 장치를 성형하였는데 내열성이 뛰어나고 스크롤(scroll)의 모든 기계적 성질을 만족한다고 보고하였다.

Giordano 등[3]은 A356(T5)재료로 반용융 공정을 이용하여 커넥팅로드를 제작하였으며, 기존 다이캐스팅 제품에 비하여 기계적 성질과 용접성이 우수한 것을 증명하였다. Wendinger[4]는 반용융 AlSi7Mg0.3재료를 이용하여 두께 3㎜, 길이 670㎜의 자동차용 사이드 도어 프레임 제작에 적용한 결과, 두께차가 큰 부품에서 다이캐스팅, 스퀴즈캐스팅, 중력주조, 고압진공다이캐스팅 공법의 대안책이 될 수 있다고 보고하고 있다. Hirt[5]는 디젤 인젝션 펌프, 스페이스 프레임 노드, 스티어링 너클의 제작에 AlSi7CuMg, AlMg5Si2Mn, AlMgSi1 합금을 사용해서 반용융 공법을 적용한 예를 들고 있다.

Bonollo 등[6]은 엔진 브라킷의 제작시 레오로지 모델을 이용하여 시뮬레이션을 하였고, 이를 실험과 비교분석하여 금형설계에 적용한 사례를 들고 있다.

Chiarmetta[7]는 서스펜션, 엔진 브라킷, 스티어링 너클 등의 자동차 부품에 반용융다이캐스팅 적용시 기존공법에 대하여 우수한 경량화 효과를 가져올 수 있다고 보고하고 있다.

지금까지 발표된 연구들은 반용융 재료의 유동현상과 미세조직의 상태가 전단응력에 미치는 영향과 소재의 특성을 파악한 것이 대부분이다. 반용융다이캐스팅을 이용하여 가전용 주요 부품에 효과적으로 적용할 수 있는 기술과 내마모계 가전용 부품들에 있어서 Al합금으로 대체하려는 부품개발에 관한 연구결과는 발표되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 반용융다이캐스팅에 있어서 압력과 속도 사이의 관계를 설정하여 내마모계 가전용 압축기 부품을 성형하는데 필요한 공정조건과 기계적 성질 사이의 관계를 규명하였다. 또한 소재와 금형온도의 변화에 따른 기계적 성질을 파악하였으며, 기존 회주철 소재의 압축기 부품을 반용융다이캐스팅에 적용하여 기계적 성질을 비교·조사하여 부품개발 가능성을 검토하였다.

2. 실험방법 및 조건

2.1 재가열실험

반용융 성형 공정에서 가열 시간의 단축 및 빌렛을 균일하게 재가열하기 위해서는 유도 코일의 설계가 중요하다. Dantzig 등[8]은 빌렛의 유도 가열에 의한 온도분포 연구에서 빌렛의 중앙보다는 가장자리가 훨씬 온도가 높음을 보였다. Hirt 등[9]은 온도에 따른 열적, 전기적 물성치와 대류와 복사에 의한 표면 열전달을 정확히 파악한다면 시뮬레이션한 온도와 실험한 온도가 정확히 일치하는 결과를 얻을 수 있다고 발표하였다. Kapranos 등[10]은 시뮬레이션을 통해 유도가열 시 균일한 가열에 필요한 사항을 요약하고 있다.

코일과 빌렛을 구성하는 시스템에서 빌렛 전체 길이에 걸쳐서 유도 열량이 균일하지 않기 때문에 온도 분포가 균일하지 않다. 빌렛의 온도가 낮은 곳은 충전시 충분한 유동성을 갖기 힘들고, 온도가 높은 곳은 액상이 고상으로부터 유출되는 액상편석 현상이 발생하여 기계적 성질이 균일하지 못한 제품이 된다. 반용융 소재의 종류와 크기에 따라서 재가열 조건이 다르기 때문에 반용융 성형 공정을 위해서는 구상화된 조직이 극히 중요하다.

전자기 유도가열은 짧은 시간 동안에 빌렛의 온도를 정확히 제어할 수는 있지만 재가열된 빌렛에 온도편차가 발생할 수 있다. 빌렛의 온도가 균일하지 못하면 고상률이 다르게 되어 온도가 낮은 부분은 충분한 유동성을 갖기 힘들고, 온도가 높은 부분은 액상이 고상으로부터 유출되어 슬리브에 주입하기가 곤란하다.

따라서, 수직형 유도가열 시스템의 액상유출, 자중에 의한 좌굴, 전자기 끝단 효과 등의 결점을 보완하고, 재가열의 시간단축 및 균일한 온도분포를 얻기 위해서 수평형 유도가열 시스템을 설계, 제작하였다.

재가열실험에 관한 구체적인 조건은 박상문 등[11]이 연구한 내용을 참고로 하였다. 본 연구에서 사용한 다단 고주파 유도가열장치의 주조작화면에서는 제어를 위해 입력한 3단 재가열 설정값을 그래프로 나타내고 가열시 생성된 출력결과를 실시간으로 화면에 표시하도록 하였다. 최대 가열 알루미늄 소재의 규격은Ψ×h =76㎜×150㎜이고 용량은 50㎾, 주파수는 350㎐이다. 이 시스템은 시간-출력, 시간-온도를 단계별 개별 동작 및 제어가 가능하며 시간, 출력, 온도에 대한 제어결과를 실시간으로 받아서 연구·분석자료로의 활용을 위해 소재가열을 위한 고주파 전원장치, 연속적인 소재 공급을 위한 다단가열 장치로 구성되어 있다.

본 실험에서 사용된 반용융 소재는 일반적으로 자동차 부품개발에 많이 이용하는 주조용으로 프랑스 페시니(Pechiney)社에서 전자기 교반으로 제조되어진 A357과 A390을 이용하였다. 소재의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of ALTHIX[11]

		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn
A357	Min(%)	6.5	-	-	-	0.50	-	-	-	-	-
	Max(%)	7.5	0.15	0.03	0.03	0.60	0.03	0.05	0.20	0.03	-
A390	Min(%)	16.0	-	4.0	-	0.5	-	-	-	-	-
	Max(%)	17.0	0.4	5.0	0.1	0.65	0.01	0.05	0.20	0.03	-

2.2 반용융다이캐스팅 성형실험

반용융 합금을 재가열할 때는 가열되는 빌렛의 표면에 산화층이 생성되고, 빌렛 단면의 외측면과 중심부분의 온도가 일정하지 않다. 따라서 재가열되는 소재인 빌렛의 내부 및 외측표면을 균일하게 처리하는 것이 중요하다. 또한, 재가열 중 빌렛의 표면에 생성된 산화층도 금형의 내부로 유입되지 않도록 하여야 한다.

성형 실험에 사용된 장비는 Buhler 42N type이며 성형조건은 고정 및 이동 금형의 온도, 소재의 온도, 플런저의 이동거리 및 속도, 시간에 따른 가압력의 변화 등을 고려하여 성형을 하였다.

반용융다이캐스팅을 위한 조건은 초기에 재가열된 소재가 슬리브 내로 주입되고, 플런저 팁의 전진으로 소재가 게이트까지 도달할 때는 속도와 변위가 주된 변수이다. 또한 소재가 금형 내부로 충전되면 오버플로우와 에어벤트까지 완전한 충전을 위하여 시간에 따른 가압력의 변화가 중요한 변수가 된다.

따라서, 플런저의 변위에 따른 속도는 0.0~2.0m/s로 설정하였으며, 시간에 따른 가압력의 변화는 0~1200bar에서 설정하였다. 입력데이터(압력, 속도, 스트로크)와 출력데이터의 오차를 측정하여 충전에 필요한 입력데이터의 조건을 재설정하였다.

고정 및 이동 금형의 온도와 재가열된 소재의 온도가 설정되면 플런저의 이동거리와 속도, 시간에 따른 가압력의 변화 등을 고려하여 성형하였다.

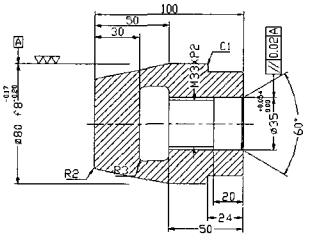
3. 실험결과 및 고찰

3.1 플런저 팁의 형상에 따른 성형성

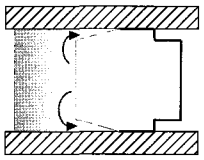
3.1.1 플런저 팁의 길이가 긴 경우(δ_p=50mm)

Fig. 1(a)는 최초 플런저 팁의 형상으로서 소재의 절감, 재가열 소재의 산화층 제거 및 슬리브과 플런저 팁의 소착을 방지하기 위하여 테이퍼 가공을 한 것이다.

Fig. 1(b)는 슬리브 내에서 플런저 팁의 전진에 따른 소재의 유동양상을 나타낸 것이다. 플런저 팁의 길이가 긴 경우, 성형시 슬리브 내에서 소재가 플런저 팁에



(a) Over taper plunger



(b) Direction of metal flow with taper plunger

Fig. 1 Plunger tip and flow direction of semi-solid material during moving initial plunger tip

접촉된 다음 플런저 팁의 테이퍼 부분에 반용융 소재가 충전된 후 다시 캐비티 내부로 유입된다. 따라서, 적절한 테이퍼를 가진 플런저 팁이 설계되지 않으면 반용융 소재가 캐비티 내부에 완전한 충전이 되지 않음을 알 수 있었다. 제품 성형에 있어서 Fig. 1(a)의 경우에는 성형시 캐비티에 유입된 소재에 가압력이 전달되지 않았고 동시에 소재의 응고 현상이 일어나 제품의 최종 충전 부분은 미성형이 발생하였다. 따라서, 소재가 제품부에 완전한 충전을 하기 위해서 충분한 가압력과 플런저 팁의 적절한 테이퍼가 요구된다.

Fig. 2는 가전용 압축기 부품인 실린더 블록(cylinder block)의 반용융다이캐스팅을 위한 런너와 게이트 형상을 나타낸 것이다. 런너의 두께는 25㎜, 게이트의 두께는 10㎜로 설계하였다.

게이트와 런너의 크기는 일반적인 다이캐스팅 금형의 게이트두께에 비하여 2배 이상 증가함을 알 수 있다. 게이트 통과시 반용융 소재의 비산으로 인한 가스 혼입과 액상편석을 방지하고, 재가열시 발생하는 빌렛의 표면에 생성된 산화층이 금형 내부로 유입되지 않도록 설계되어야 한다.

Table 2 Initial experimental conditions for casting cylinder block with A357

Exp. No	T_d(℃) Fixed	T_d(℃) Moving	T_m(℃)	Injection Condition s(mm)		v(m/s)		t(s)		p(bar)	
1	Max:220	Max:223	581	120	360	1.1	1.1	0.0	0.010	600	600
	Min:187	Min:158		420	471	0.7	0.7		0.015		1200
2	Max:204	Max:242	585	120	360	1.1	1.1	0.0	0.010	500	500
	Min:187	Min:172		417	420	1.1	0.6		0.015		1100
					471		0.6				

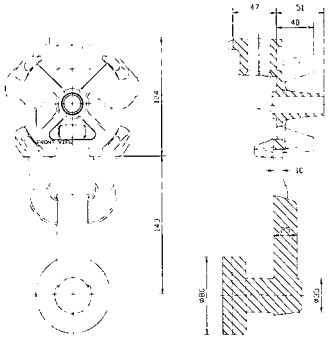


Fig. 2 Geometry of gate and runner systems

반용융 소재가 오버플로우 부분까지 도달하기 전에 유동을 방해하는 부분이 많기 때문에 압력을 가하기 전에 응고현상이 일어나 소재가 충분히 충전하지 못하는 경우가 많다. 위와 같은 문제를 해결하기 위하여 산화피막이 제거되고 압력전달이 용이한 런너 방안을 채택하여야 한다.

Table 2는 성형 가능성의 유무를 판단하기 위하여 Fig. 1(a)에서 제시한 플런저 팁을 이용하여 금형의 온도(T_d), 소재의 온도(T_m), 플런저의 이동거리(s), 플런저의 속도(v), 시간(t)에 따른 가압력(p)을 변화시킨 실험조건을 나타낸 것이다. Table 2의 Exp. No. 1의 경우 고정금형의 최대, 최소 온도는 각각 220℃와 187℃이며, 이때 반용융 소재의 온도는 581℃로 설정하였다. 플런저의 변위(δ)가 120~360mm 구간에서는 재가열 빌렛의 급속한 온도 감소를 방지하기 위하여 1.1m/s의 고속으로 플런저를 전진시켰으며, 제품부로 유입된 420~471㎜의 구간에서는 층류유동을 유발하고 액상편석을 방지하기 위하여 0.7m/s로 속도를 감소하여 성형을 완료하였다. 충전이 완료된 순간에서의 최대 압력은 1200bar로 하여 응고조직이 치밀하도록 하였다.

Fig. 3은 Table 2의 Exp. No. 1과 2의 실험조건을 반용융다이캐스팅 공정에서 플런저 속도와 변위 사이의 관계를 도식적으로 나타낸 것이다. Exp. No. 1의 실험 결과 최종 충전부위에서 미성형 부분이 관찰되어 런너에서

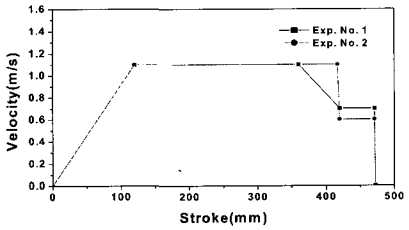


Fig. 3 Velocity variation to plunger placement

의 반용융 소재의 급격한 온도감소를 방지하기 위하여 게이트 통과 직전의 속도를 0.7m/sec에서(Table 2의Exp. No. 1) 1.1m/sec로 상승시켜 실험을 수행하였다.(Table 2의 Exp. No. 2)

Fig. 4는 Table 2의 Exp. No. 2의 조건으로 반용융 다이캐스팅 실험을 했을 때 속도, 압력 및 변위의 관계를 측정한 결과이다. Table 2의 Exp. No. 2 실험조건에서 고정금형과 이동금형의 최고온도는 각각 204℃와 242℃이며, 소재의 온도는 585℃이다. 반용융 소재는 유동성을 증가시키기 위하여 최적의 재가열 조건보다 4℃ 정도 높게 설정하였다.

플런저의 속도가 0.0m/s가 되는 순간에는 시간에 따른 가압력이 제품의 성형성에 중요한 변수가 된다. 속도에 의한 제어가 끝나고 압력에 의한 제어가 시작되는 시점을 0.0초라고 설정하였다. Table 2의 Exp. No. 2에서 보여주는 바와 같이 초기에 550bar로 설정하고(반용융 소재가 캐비티에 충전되기 직전의 압력), 최종적으로 0.015초 후의 가압력(반용융 소재가 캐비티에 완전히 충전되는 순간의 압력)은 1100bar로 설정하였다. 충전 완료와 동시에 압력전달이 이루어지는 것이 중요하다. 최종 충전이후에 가압력의 전달이 지연되는 동안 충전되어진 부분의 소재가 금형 벽면으로부터 수축하게 된다. 이후에 압력이 가해지면 잔류 액상이 응고층 사이로 유출되어 수축된 부분을 채우게 되어 용체화 처리시 블리스터(blister)를 발생하게 된다. 따라서, 최종 충전과 동시에 압력을 전달해야 공정편석을 방지할 수 있다.

Table 3 Experimental condition for casting cylinder block with A357

Exp. No.	T_d(℃) Fixed	T_d(℃) Moving	T_m(℃)	Injection Condition s(mm)		v(m/s)		t(s)		p(bar)	
	Max:207	Max:213	581	120	360	1.4	1.4	0.0	0.010	550	550
1	Min:186	Min:161		417	420	1.4	0.7		0.015		1100
					471		0.7				
	Max:213	Max:223	581	120	360	1.2	1.2	0.0	0.010	550	550
2	Min:183	Min:170		417	420	1.2	0.6		0.015		1100
					471		0.6				
	Max:199	Max:226	581	120	370	0.7	0.7	0.0	0.010	550	550
3	Min:184	Min:187		420	445	1.2	1.2		0.015		1100
					471		2.0				

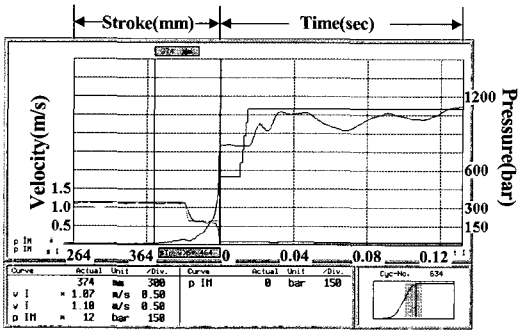


Fig. 4 Injection curve for semi-solid die casting with A357 (Exp. No. 2 in Table 2)

Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 반용융 소재가 캐비티에 충전되는 도중 설정압력과 실제로 측정되어진 압력은 상당히 차이가 있음을 보여주고 있다. 본 연구에서의 측정압력은 플런저에 가해진 압력을 의미한다. 반용융 소재가 금형 캐비티 내에 충전이 완료된 시간(t=0.015sec)부터 최종 충전부인 오버플로우 내에 소재가 충전이 일어나는 시간 동안에(t=0.015~0.12sec) 측정되어진 압력분포는 설정치 값보다 적은 압력 분포를 가지고 있음을 보여주고 있다. 위와 같은 원인은 플런저 팁의 과도한 테이퍼로 인하여 압력 전달이 잘 되지 않은 것으로 사료된다.

또한, 반용융 소재가 슬리브 내부에서 오버플로우 충전 직전까지(δ=464)는 플런저 행정거리의 증가에 따라서 압력이 점차적으로 증가됨을 보여주고 있다. 이러한 현상은 사출 공정 중 반용융 소재가 슬리브 내부에서 응고현상이 발생하여 캐비티 내부로 소재를 주입시키기 위해서는 초기 설정 압력(500bar)보다 높은 압력이 요구됨을 의미한다. 결과적으로 초기설정 가압력 500bar에서 성형이 되지 않고 약 800bar 정도로 가압이 되고 있다는 것을 알 수 있다.

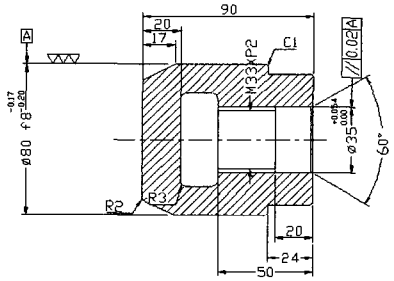


Fig. 5 The shape of modified plunger tip

3.1.2 플런저 팁의 길이가 짧은 경우(δ_p=20mm)

Fig. 5은 성형 중 금형 내에 충분한 압력이 전달되도록 하기 위하여 수정한 플런저 팁의 형상이다. 소재의 완전충전을 위해서 테이퍼진 부분의 길이를 50mm에서 20mm로 감소시키고, 플러저 팁의 전체길이도 10mm정도 줄여 소재가 충전된 후 가압력이 충분히 전달될 수 있도록 Fig. 1의 플런저 팁을 Fig. 5와 같이 수정하였다. 끝단부분에서 재가열된 소재의 산화층을 제거하고 소재의 소착을 방지하기 위해 라운드 처리를 하였다. 슬리브에 소재를 쉽게 주입하기 위하여 플런저 팁의 전체길이를 90mm로 설계하였다.

Table 3은 A357 소재를 적용한 경우의 금형온도(T_d), 소재온도(T_m), 플런저 이동거리(s), 플런저 속도(v), 시간(t)에 따른 가압력(p)의 변화를 나타낸 것이다. 반용융 소재의 온도는 581℃로 설정하였다.

Fig. 6은 반용융다이캐스팅의 사출조건을 도출하기 위한 Table 3의 조건에 따른 슬리브 내에서의 플런저 이동거리와 속도의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6의 (1) 위치는 일반 다이캐스팅 성형에서 용탕이 슬리브 내로 주입될 때, 충전 테스트를 거쳐 슬리브 내에 외부공기가 들어가지 않게 설정되는 초기값으로 성형부품의 기공이

Table 4 Experimental conditions for casting cylinder block with A390

Exp. No.	T_d(℃) Fixed	T_d(℃) Moving	T_m(℃)	Injection Condition s(mm)		v(m/s)		t(s)		p(bar)	
1	126	134	570	120	360	0.7	0.7	0.0	0.010	600	600
				422	445	1.2	2.0		0.015		1200
2	143	145	570	120	360	0.7	0.7	0.0	0.010	550	550
					417		1.4		0.015		1100

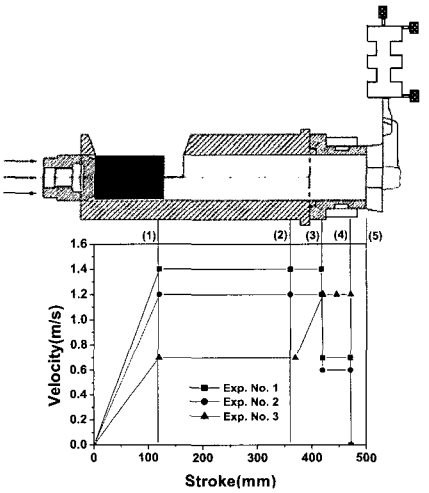
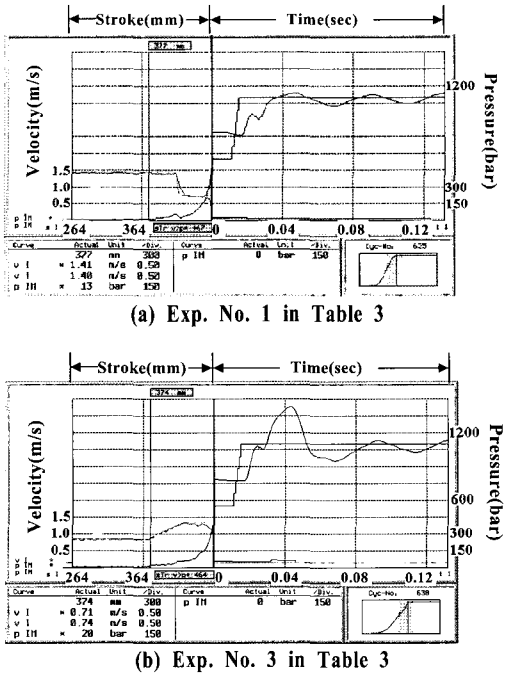


Fig. 6 Velocity variation as a function of displacement for semi-solid die casting with A357 (Exp. No. 1 and 3 in Table 3) and A390(Exp. No. 1 Table 4)

나 난류유동 발생을 방지하기 위한 가장 중요한 부분이다. 그러나, 반용융다이캐스팅에서는 슬리브 내로 주입되는 소재가 편석 및 기공 등의 결함을 발생하지 않기 때문에 상대적으로 큰 의미를 가지는 위치는 아니다.

Fig. 6의 (2)위치는 슬리브 내부로 반용융 소재가 완전히 충전되는 위치이며, Fig. 6의 (3)위치는 금형의 게이트까지 소재가 충전되는 플런저의 위치이다. 최종 충전 단계인 오버플로우가 성형될 때까지 플런저의 변위를 나타내고 있는 위치는 (4)이며 (5)위치는 슬리브의 전체 길이를 나타낸다.

Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 Exp. No. 1(Table 3)에서 플런저의 속도는 슬리브 내로 주입된 소재가 게이트 지점에 도달할 때까지 고속(1.4m/s)으로 설정하였다. 게이트 통과 시에는 반용융 소재의 층류유동을 위하여 저속(0.7m/s)으로 하였다. Fig. 6의 Exp. No. 2(Table 3)의 성형조건이며, Exp. No. 1에 비하여 고속구간에서는 속도를 0.2m/s 감소시키고, 저속구간에서는 0.1m/s 감소시켰다. Fig. 6의 Exp. No. 3(Table 3)은 Exp. No. 1과 2



(a) Exp. No. 1 in Table 3

(b) Exp. No. 3 in Table 3

Fig. 7 Injection curve for semi-solid die casting of cylinder block components with A357

와는 달리 반용융 소재가 게이트 입구에 도달하기 전까지는 저속(0.7m/s)으로, 게이트에 도달한 이후로는 고속(1.2m/s)으로 설정하였다.

Fig. 7 (a), (b)는 Table 3의 Exp. No. 1과 3의 조건에서 성형하였을 때 플런저 이동거리-속도와 시간-압력의 관계를 나타낸 것이다. 플런저 팁의 모양은 Fig. 5를 이용하여 반용융다이캐스팅 실험을 하였지만 초기 입력데이터에 해당하는 압력과 실제 측정된 압력 사이에 차이가 있음을 보여주고 있다. 그러나, Fig. 4와 Fig. 7을 비교했을 때 설정된 압력이 동일한 1100bar일지라도 플런저 팁의 테이퍼가 긴 경우에는 설정된 압력에 미치지 못하는 반면에 플런저의 테이퍼 길이가 짧은 경우에는 ±의 파형이지만 설정압력과 비슷하거나 높은 압력을 나타냄을 알 수 있다. 따라서, 플런저 팁의 길이가 짧은 경우

Table 5 Defect phenomena for variation of semi-solid casting conditions

Material	Exp. No.	Defect Phenomena	Fig	Plunger tip	
A357	1	Defective filling		Fig. 1	Table 2
	2	Defective filling	Fig. 5	Fig. 1	
	1	Surface defect	Fig. 10	Fig. 6	Table 3
	2	Surface defect		Fig. 6	
	3	Good surface	Fig. 11	Fig. 6	
A390	1	Defective filling & cracks	Fig. 12		Table 4
	2	Defective filling & cracks			

반용융다이캐스팅에서의 압력전달이 보다 용이함을 알 수 있다.

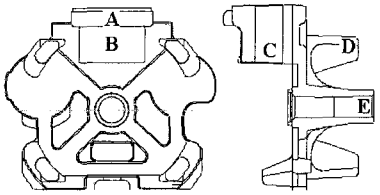
Fig. 7 (a)와 (b)를 비교했을 때, 저속에서 고속으로 속도를 변경시킨 Exp. No. 3(Fig. 7 (b))에서 가압력이 작용한지 0.04초 후에는 입력값보다 330bar 정도 높게 가압되고 있으나, 0.06초 후에는 Exp. No. 1과 3의 차이는 작음을 알 수 있다. 또한 0.06초 후에는 Exp. No. 1과 3 모두 설정압력과 비슷함을 관찰할 수 있다.

Table 4는 Si 성분이 16~17% 포함되어 있는 A390 재료에 관한 실험조건을 나타낸 것이다. Table 3의 A357 재료와의 성형조건과는 달리 A357에 비하여 11℃ 정도 낮게 재가열온도를 설정하였으며, 충전이 완료될 때 최종속도가 1.4~2.0m/s로 되어 있음을 알 수 있다. A390은 A357과 달리 과공정(hyper-eutectic)합금으로서 Si의 함유량이 높으므로 내마모성이 뛰어나고 반용융 상태에서 유동성이 좋기 때문에 변위에 따른 속도의 변화를 3단계로 설정하였다.

3.2 성형조건의 변화에 따른 제품의 결함

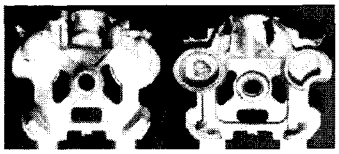
Fig. 4와 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 반용융다이캐스팅 성형조건에서 설정한 값과 실제 출력값의 차이가 관찰되었다. 과도한 금형의 온도 차이로 런너를 통해 주입된 소재가 게이트를 통과하여 제품부에 도달하기 전에 응고가 먼저 일어나 최종 충전 부분이 충전되지 않음을 알 수 있었다. 또한, 게이트와 제품부에서 압력손실이 많아 가압력이 충분히 전달되지 못하였다. 복잡한 제품의 형상 때문에 금형 내부에서 소재의 유동에 간섭을 받으므로 끝단 부위가 미성형 상태로 남는 현상을 관찰할 수 있었다. Table 5는 Table 2~4의 성형조건으로 성형했을 때 나타나는 대표적인 결함현상을 정리한 것이다.

Fig. 8은 실린더 블록을 성형한 후 주요 결함부위를 조사하기 위한 위치를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 보여주는 [A]와 [B] 부위는 사출 방향의 평행한 방향으로의 최종충전부위를 나타낸 것이며, [C]와 [E] 부위는 수직방향의 위치로서 코어가 삽입되는 부분으로 조립시 축이 연

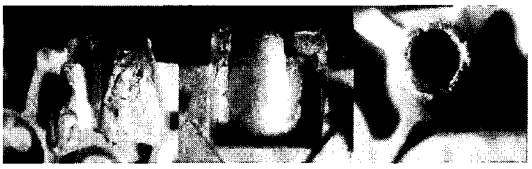


(a) front view (b) side view

Fig. 8 Positions of cylinder block product to investigate the defect phenomena and microstructures



(a) Photos of cylinder block with A357

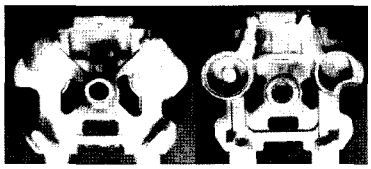


(b) Point [A] (c) Point [B] (d) Point [E]

Fig. 9 Defect phenomena of cylinder block parts with A357 for the conditions of experiment 2 In Table2

결되는 부분이다. [D] 부위는 사출시 압력전달이 가장 어려운 부분이기 때문에 미충전이 일어나기 쉬운 위치를 나타낸 것이다.

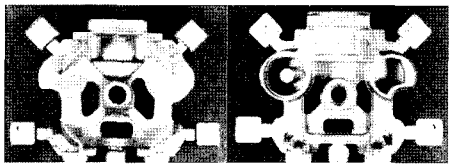
Fig. 9는 Table 2의 Exp. No. 2의 조건으로 Fig. 1의 플런저 팁을 사용하였을 때의 제품이며, 성형시 충분한 가압력이 전달되지 못하여 최종 끝단부위에 도달하기 전에 응고현상이 먼저 발생하여 미성형 상태를 보이고 있다. 또한, 고정금형 및 이동금형의 온도 차이가 성형성 및 충전율에 영향을 미쳐 액상편석이나 크랙을 발생시키는 것을 알 수 있다.



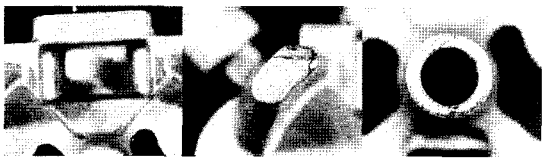
(a) Photos of cylinder block with A357

(b) Point A (c) Point C (d) Point D

Fig. 10 Defect phenomena of semi-solid die cast cylinder block components with A357 for the conditions of Exp. No. 1 in Table 3

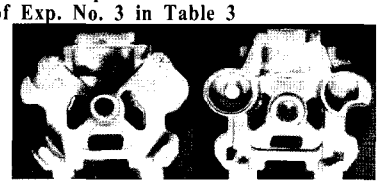


(a) Photos of cylinder block with A357



(b) Point B (c) Point D (d) Point E

Fig. 11 Defect phenomena of semi-solid die cast cylinder block components with A357 for the conditions of Exp. No. 3 in Table 3



(a) Photos of cylinder block with A390

(b) Point B (c) Point C (d) Point C

Fig. 12 Defect phenomena of semi-solid die cast cylinder block components with A390 for the conditions of Exp. No. 1 in Table 4

Fig. 10~Fig. 12는 A357, A390 소재로 성형할 때 발생하는 결함부위를 나타낸 것이다. Fig. 10은 Table 3의 Exp. No. 1의 조건으로 Fig. 5의 플런저 팁을 사용하였을 때의 제품이다. 플런저 팁의 형상에 따른 성형성 및 충전 상태는 Fig. 1의 플런저 팁을 사용하여 성형한 제품(Fig. 9)보다 Fig. 5의 플런저 팁을 사용하여 성형한 제품이 현저히 개선되어 충분한 가압력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 성형성은 개선되어 완전한 충전을 보였지만, Fig. 10 (c) 와 (d)에서 보여주고 있는 것처럼 끝단부위에 국부적인 표면결함현상을 관찰할 수 있었다.

Fig. 11은 Table 3의 Exp. No. 3의 조건일 때의 제품(Fig. 5의 플런저 팁 사용)이며, Fig. 9 (c)와 (d)에서 보여주고 있는 결함현상이 현저히 개선된 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 A390의 소재로 Table 4의 Exp. No. 1의 조건일 때의 제품(Fig. 5의 플런저 팁 사용)이며, Fig. 8의 C위치에서 미충전현상과 표면 결함이 집중되고 있음을 알 수 있었다. A357의 경우에는 최종 응고위치에서 미성형이 일어나 미충전과 액상편석 현상이 발생하였다(Fig. 9, Fig. 10). A390의 경우에는 과공정 합금으로 17%Si의 높은 함유량으로 인한 취성과 과도한 가압력 때문에 미세한 크랙이 최종 충전 위치에서 관찰되었다.(Fig. 12)

3.3 금형온도에 따른 성형성

플런저 팁의 수정을 통해서 성형성과 미충전 현상을 해결하였지만 Table 2, 3에서 나타낸 것처럼 고정 및 이동 금형의 온도 차이가 최고 50℃이상인 것을 알 수 있다. 제품 형상 때문에 고정 및 이동 금형 내에서도 60℃ 이상 차이가 발생함을 알 수 있다. 가압력이 충분하더라도 런너 부분과 최종 충전이 일어나는 부분에서의 과도한 금형온도 차이 때문에 응고속도가 다르므로 끝단부분에서는 충전이 되지 않음을 알 수 있었다.

3.4 실린더 블록의 기계적 성질

반용융다이캐스팅 공정 중 가압력의 증감현상은 제품의 표면결함과 구상화 조직제어에 중요한 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5에서 보여주는 플런저 팁을 이용하여 성형한 제품의 기계적 성질을 조사하였다. 또한, 초기속도와 최종속도의 변화가 기계적 성질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 플런저의 속도를 변수로 하였다. 완전한 충전을 보인 Table 3의 Exp. No. 3의 조건은 고정 및 이동금형의 최고온도가 각각 199℃, 226℃이고 소재온도는 581℃였다. 반용융다이캐스팅 후 열처

Table 6 Heat treatment condition for A357

Material	Type	Solutionizing	Cooling	Ageing	Cooling
A357	T6	10 hour-540℃	Water quenching	6 hour-170℃	Air cooling

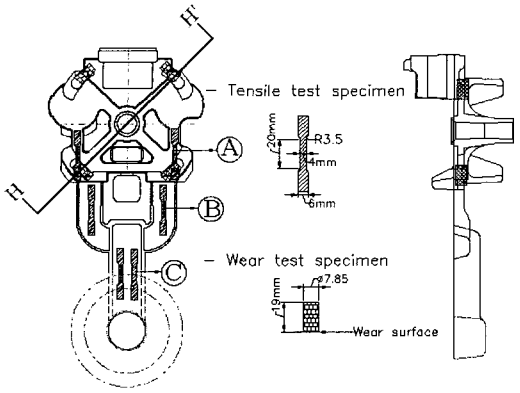


Fig. 13 Specimen dimension and positions for tensile and wear tests

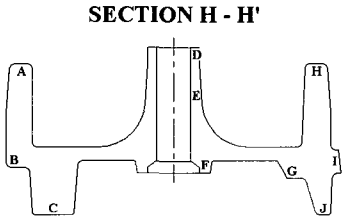


Fig. 14 Positions for hardness test

리를 하여 기계적 성질을 조사하였다. 성형된 제품은 Ta-ble 6에 나타낸 것처럼 T6 열처리를 하였다.[11]

각 사출조건 별로 제품의 인장실험, 경도실험, 마모실험을 실시하였다. Fig. 13에서 나타난 바와 같이 인장시편과 마모시편을 채취하였다. A357의 경우 Table 3의 Exp. No. 1, 3의 조건과 A390의 경우 Table 4의 Exp. No. 1의 조건으로 성형한 제품을 열처리를 하여 비교·검토하였다.

Fig. 14는 경도시험 및 조직사진의 위치를 나타낸 것이다. 성형조건 중 속도변화를 달리한 제품을 대상으로 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 시험을 실시하였다.

Fig. 15는 경도시험 결과를 나타낸 것이다. A357의 경우는 T6 열처리를 하였으며, A390의 경우는 과공정 합금으로 열처리를 하지 않았다. 측정위치에 관계없이 비교적 균일한 경도를 나타내었지만, A357(T6) Exp. No. 1의 조건에서는 Exp. No. 3의 조건보다 최대 20(HV)정도 높은 경도값을 나타내었다.

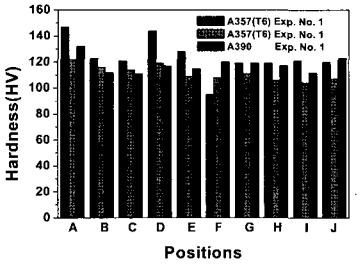


Fig. 15 The hardness distribution of cylinder block accoriding to casting conditions and heat treatment conditions

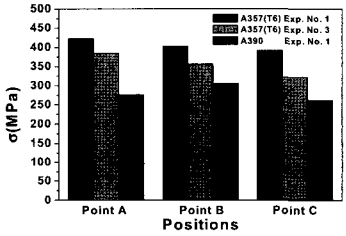


Fig. 16 Ultimate tensile strength distribution of cylinder block with various semi-solid die casting conditions and heat treatment conditions

특히, A357(T6) Exp. No 1의 경우 Fig. 14의 A, D 위치의 경도값이 평균값보다 25(HV)정도 높게 나타났다. 위의 원인은 금형의 불균일한 온도분포 때문에 끝단부위까지 충전이 되지 않고 먼저 응고가 발생하면서 과도한 가압력이 집중되어 다른 부위와는 달리 경도값이 상승한 것으로 생각한다.

제품에서 가장 중요한 부위인 축이 결합되는 위치의 경도은 비교적 양호하지만, Fig. 14의 F 위치에서는 평균값보다 30(HV)정도 낮게 측정되었다. 위의 원인은 성형성이 개선되어 완전히 충전되었지만, 가압력을 충분히 받지 못했기 때문으로 생각한다.

실린더 블록에 요구되는 경도는 100HV 이상이므로 본 연구결과에서 얻은 경도는 Exp. No. 1 (Table 3의 실험조건)의 성형 조건에서 실험한 제품의 F지점(Fig. 14의 최종충전위치)의 경도를 제외하고는 요구조건을 만족하고 있다. 그러나 제품의 특성상 100HV 이상을 요구하는

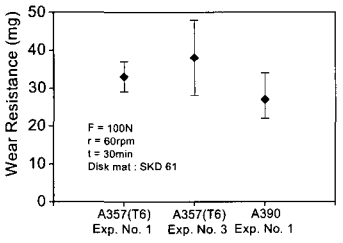


Fig. 17 The wear resistance of cylinder block according to the casting conditions and heat treatment conditions

부위는 Fig. 14에서 보여주는 바와 같이 A, C, H, J이며 내마모성을 요구하는 부위는 D, E, F이기 때문에 Fig. 15는 제품의 요구특성을 만족하는 경도를 보여주고 있다.

Fig. 16는 인장시험 결과를 나타낸 것이다. A357과 A390의 소재로 성형을 했으며 성형조건은 Table 3, 4와 같다. 인장시험은 10 Ton MTS를 사용했으며, 인장속도는 10㎜/min이다. T6 열처리한 A357의 조건에서 인장응력이 평균 100MPa 정도 높게 측정되었다. 인장강도의 요구치는 300MPa 이상으로써 A390 소재를 제외하고는 요구 특성치를 만족하고 있다.

Fig. 17은 마모시험의 결과를 나타낸 것이다. 마모성능을 시험하기 위하여 Fig. 13에 나타낸 것처럼 시편을 제작하여 TE 92 마모시험기로 시험을 수행하였다. 디스크의 재료는 SKD 61종이며 시편 및 디스크의 마찰면은 6-S의 거칠기로 제작하여 시험하였다. 디스크와 시편을 압착력 100N, 회전수 60rpm으로 10분간 3회씩 마찰시켜 마모된 양을 측정하여 마모량을 나타내었다. 열처리한 A390과 A357의 경우 실린더 블록의 성능을 요구하는 높은 마모저항(50mg 이내)을 나타내는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 15~17에서 알 수 있듯이 Exp. No. 1(Table 3)과 같이 플런저가 금형 슬리브 내부로 이동하기 전까지 고속으로 이동하여 반용융 재료가 금형 내부에 충전될 수 있도록 하고, 금형 슬리브 내에서는 저속으로 가압하여 최종끝단 부위까지 완전히 충전되게 해야 설계치의 물성치를 얻을 수 있다.

4. 결 론

반용융다이캐스팅 공정을 이용한 내마모계 가전용 압축기 부품의 성형실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 금형 내부에서 소재의 유동현상이 간섭을 일으켜 압력을 가하기 전에 응고현상이 일어나는 결함을 해결하기 위해 런너의 접촉면을 개선하였으며, 오버플로우 부분과 산화피막이 걸러지는 홈을 수정한 금형 방안을 제시하였다.

(2) 고정 및 이동 금형의 온도 차이에 기인한 소재의 응고가 성형성 및 충전율에 영향을 미쳐 액상편석이나 크랙을 발생시키고, 제품의 끝단 부위에서 양호한 충전이 되지 않음을 알 수 있었다.

(3) 반용융 다이캐스팅 공정 중 플런저 팁의 테이퍼가 사출압력과 제품의 표면결함에 미치는 영향을 조사한 결과 테이퍼의 길이가 과도하게 길면 사출압력이 설정치보다 적게 측정되었으며, 또한 제품의 표면상태도 양호하지 못함을 알 수 있다.

(4) A357 소재를 이용하여 실린더 블록을 제조하는 경우, 고정금형의 최고온도 207℃, 이동금형의 최고온도 213℃, 소재의 온도 581℃일 때 플런저 변위가 417mm일 때까지 초기속도는 1.4m/s이고, 417mm~471mm에서의 최종속도는 0.7m/s에서 균일한 고상 분포와 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있었다.

(5) 인장실험시 T6 열처리된 A357의 최대인장강도는 열처리를 하지 않은 A390보다 약 100MPa 높은 것으로 관찰되었다.

(6) 가전용 압축기 부품인 실린더 블록이 요구하는 기계적 성질을 얻을 수 있는 금형의 구조와 반용융 다이캐스팅 조건을 제시하였으며, 위의 조건은 향후 자동차 및 가전제품의 압축기 부품을 개발하는 데 활용되어질 것이다.

참 고 문 헌

(1) E. J. Vinarcik, J.D Taylor, and K. Farris, 1998, "Automotive Fuel System Component Design for Manufacturing Using the Semi Solid Process", Proc. of 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 105~113.

(2) T. Idegomori, H. Hirono, O. Ito, S. Kimishima, and K. Mizoue, 1998, "The Manufacturing of Automobile Parts Using Semi-Solid Metal Proces -sing", Proc. of 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 71~77.

(3) P. Giordano, G. Boero, and G. Chiarmetta, 2000, "Thixoformed spacd-frames for series vehicles.

Study, development and applications", Proc. of 6th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 29～34.

(4) B. Wendinger, 2000, "Serial production of net shaped and weldable structural components by processing THIXOALLOY®", Proc. of 6th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 103～108.

(5) G. Hirt, 2000, "The thixotec research project", Proc. of 6th Int. Conf. on the Semi-Solid Process -ing of Alloys and Composites, pp. 55～60.

(6) F. Bonollo, G. Ghiarmetta, N. Gramegana, and P. Parona, 2000, "Numerical simulation of semi-solid casting of an automotive component", Proc. of 6th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 137～142.

(7) G. Chiarmetta, 1998, "Thixoforming and weight reduction - Industrial aplication of SeSoF", Proc. of 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 87～95.

(8) J. A. Dantzig and S. P. Midson, 1992, "Billet Heating for Semi-Solid Forming", Proc. of 2nd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 105～118.

(9) G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski, and M. Zillgen, 1994, "Semi-Solid Forming of Aluminium Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion", Journal of Material Processing Tech., 45, pp. 359～364.

(10) P. Kapranos, D. H. Kirkwood and C. M. Sellars, 1996, "Induction Heating and Partial Melting of High Melting Point Thixoformable Alloys", Proc. of 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 148～152.

(11) 박상문, 강충길, 2001, "Thixoforming을 위한 연주 Billet의 수평형재가열", 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 12～123.

(12) Althix Billets, 1996, Aluminium Pechiney.