한국소성가공학회 2000년도 추계학술대회 논문집 pp.178~184

반용융 단조금형의 Gate 형상이 성형성에 미치는 영향

손영익* · 강충길**

The Effect of Gate Shape for Semi-Solid Forging Die on the Filling Limitation

Y. I. Son and C. G. Kang

Abstract

To obtain high quality component with thixoforming process, it is important that the homogeneous distribution of solid particles without liquid segregation. In closed-die semi-solid forging process, liquid segregation is strongly affected by injection velocity than any other process variables because the material has to travel relatively long distance to fill the cavity through a narrow gate before solidification begins. The optimal injection velocity and die temperature were investigated to fabricate near-net-shape compressor component called Al frame.

Key Words : Semi-Solid Forming, Liquid Segregation, Semi-Solid Materials

1. 서 론

반용융 단조법은 복잡한 형상을 가진 부품을 생산하고자 할 때 구상화 조직(결정립의 크기:60~80μm)을 가진 반용융 소재를 금형에 완전히 충전시키는 것이 가능하다고 알려져 있다. 이 때 반용융 소재의 충전시 고상과 액상이 공존하기 때문에 순수 액상만 존재하는 경우에 비해서 응고시간이 짧아지므로 수축공 결함을 줄이는 데 있어서 보다 유리한 성형방법이다. 또한 반용융 성형온도에서 slug의 점성이 액상상태 보다 더 높으므로 충전시 유동형태가 난류로 발달하지 않기 때문에 속도장이 균일한, 순탄한 충전을 시킬 수 있다. 따라서 충전시 용탕의 흐름에 기인하는 가스 결함이 적어지는 등 여러 가지 장점들을 가지고 있다.

반용융가공은 구상화 조직상태에서 성형하므로 편석, 기공등을 감소시킬 수 있고 변형저항이 작아 적은 하중으로도 가공한계성을 증대시킬 수가 있어 최근 새로운 가공법으로써 각광을 받고 있다[(1)~(4)].

반용융 성형기술은 알루미늄을 100% 재활용 할 수 있는 환경친화적 성형기술로 자동차 산업뿐만 아니라 다

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
** 부산대학교 기계공학부

양한 산업분야로 그 적용영역이 넓어지고 있다.

가전용 냉동공조 분야에 있어서도 냉동기의 사용대수의 증가와 대용량화에 따른 소비전력의 증대와 함께 압축기의 부품에 대한 경량화, 내마멸성이 절실히 요구되고 있다.

이러한 요구에 부응하기 위해서 본 연구에서는 기존 회주철 소재의 압축기 부품을 반용융 성형기술을 적용하여 알루미늄 부품을 개발하기 위하여 공정변수에 따른 성형한계성과 게이트형상에 대한 유동특성을 파악하였다. 전자교반법에 의하여 생산되고 있는 A357, 86S, A390과 같은 소재를 이용하여 부품을 성형 할 때 캐비티 내부의 재료유동특성을 파악하였으며, 또한 성형되어진 제품의 열처리 전후의 기계적 성질을 조사하여 부품으로써의 사용가능성을 검토하였다.

2. 실 험

2.1 재가열 실험

반용융 성형을 위해서는 소재가 원하는 온도에서 적절한 구상화 조직을 가지도록 재가열하는 기술이 중요하다. 반용융 소재는 전자교반 또는 기계교반을 통해 수지상정 조직을 파괴, 분산시켜 재가열시 적절한 구상화 조직을 가지도록 제조한 소재이다.

본 실험에서 사용한 소재는 일반적으로 부품개발에 많이 사용되는 주조용 재료로 프랑스 PECHINEY에서 전자교반(Magneto-hydro-dynamic stirring)으로 제조되어진 A357, 86S, A390을 이용하였다. 재료의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다.

A390의 경우 A357, 86S와 달리 과공정(Hyper-eutectic) 합금으로서 내마모성이 뛰어나고 반용융 상태에서 유동성이 좋기 때문에 앞으로 많은 부품개발이 기대되는 소재이다.

재가열 실험은 50Hz, 50Kw용량의 유도가열로를 사용하였다. 온도구배가 적은 균일한 가열을 위해서 계단식 3단가열의 조건에서 재가열하여 실험을 수행하였다.[5, 6]

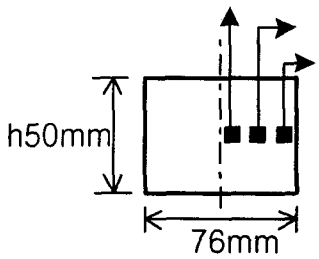


Fig. 1 Temperature measuring point of billet

소재는 h50mm×ϕ76mm로 가공하여 Fig.1 에 나타낸 것처럼 A, B, C 세지점에 K-type 열전대를 삽입하여 온도를 측정하였고 B 지점의 온도를 유도로에 연결하여 소재의 온도를 제어하였다.

2.2 반용융 성형실험

기존 주철재의 가전용 콤프레서부품을 알루미늄 소재로 대체하기위해 오리피스형 단조금형을 이용하여 반용융 성형실험을 하였다.

성형실험은 가압력 80MPa, 충진 후 가압 유지시간을 20sec로 고정시키고 사출속도와 소재의 온도 그리고 금형의 온도를 변화시켜 가면서 성형을 하여 외관상 표면결함이 없는 조건을 도출하였다.

금형을 예열하기위해 1Kw, ϕ16mm 카트리지 히터를 사용하였다. 슬리브에 6개, 상부다이2개, 하부다이 10개의 카트리지 히터를 사용하였으며 슬리브와 하부다이에 ϕ1.8mm의 홀을 가공하여 K-type 열전대를 삽입하여 금형온도를 측정하였다. 금형의 온도를 균일하게 하기위해 원하는 온도까지 가열한 후 10분동안 유지하여 성형을 실시하였다.

소착(燒附)을 방지하기 위하여 슬리브에는 열간단조용 그라파이트계 윤활제를 캐비티부분에는 다이캐스팅용 이

Table 1 Chemical composition of ATLHIX[5]

		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Pb
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
86S	Min(%)	5.5	-	2.5		0.3	-	-	-	-
	Max(%)	6.5	0.15	3.5	0.03	0.4	0.03	0.05	0.20	0.3
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

형제(Boron Nitride spray)를 사용하였고 성형이 끝난후 제품을 취출함과 동시에 퀜칭을 하였다.

성형시 완전한 충전을 위해 2번의 게이트형상을 수정하였으며 충전실험을 통해 유동양상을 파악하여 충전결함을 해결하였다.

성형이 끝난 제품의 기계적 성질을 측정하기 위하여 인장, 경도, 마모시험을 실시하였으며 T5, T6 열처리후의 기계적 성질과 비교, 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재가열 실험

3.1.1 재가열시 단면 전체의 온도편차

재가열시 빌렛 각 부분의 온도차이를 관찰하기 위해 Fig.1에 나타낸 것처럼 빌렛의 중심부(ⓐ), 표면부위(ⓒ), 및 중간위치(ⓑ)에 열전대를 삽입하여 온도변화를 측정하였다.

Fig.2은 Table 2의 조건(2)로 재가열 할 때 A357의 온도상승곡선을 나타낸 것이다. 전체 가열시간이 12분으로서 설정된 3단 가열조건을 잘 만족하고 있다.

Fig.3의 (a), (b)는 각각 A357의 중심부(ⓐ)와 표면부위(ⓒ), 그리고 중간위치(ⓑ)의 온도차이를 표시한 것이다. A357은 재가열 전 과정에서 중앙부(ⓐ)와 표면부(ⓒ)의 온도차이가 일부구간에서 최대 ±12℃정도의 온도차이를 보이나 대부분 구간에서 10℃이내의 차이를 보이고 있고 최종 유지단계에서 각 위치별 온도차는 ±1℃로서 균일한 온도분포를 나타내었다.

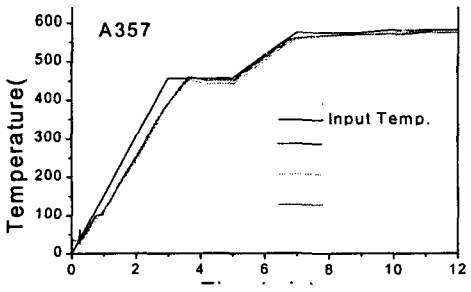
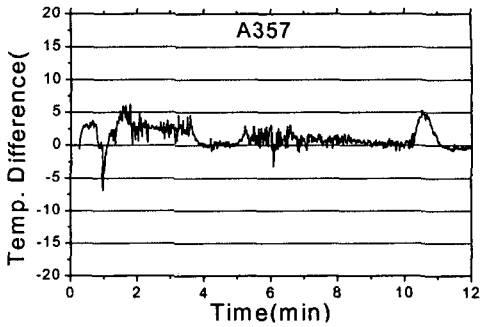
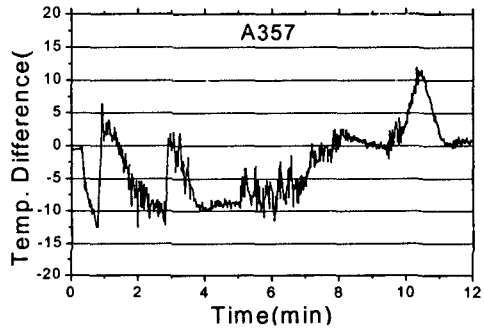


Fig. 2 Reheating condition and temperature profile during reheating of A357 to produce Al frame



(a) Between measuring point ⓐ and ⓑ



(b) Between measuring point ⓐ and ⓒ

Fig. 3 Temperature difference during reheating of A357 to produce Al frame

Fig.4는 Table 3의 조건(2)에서 86S 빌렛을 재가열할 때 온도상승곡선을 나타내고 있다. 전체가열시간이 10분으로 Fig.2의 A357의 재가열 조건보다 2분이 줄어들어 설정된 3단 가열조건과는 약간의 차이를 가지고 있다.

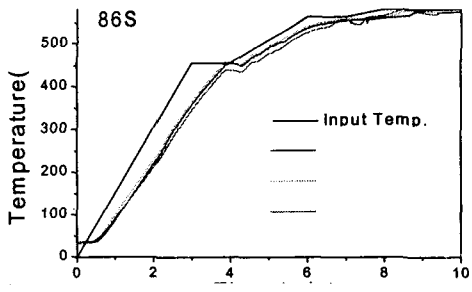


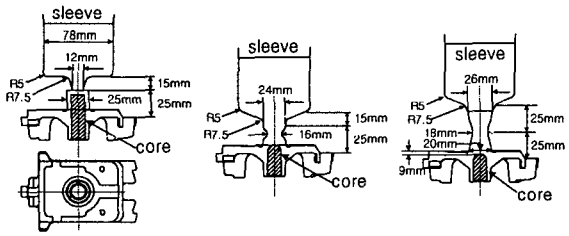
Fig. 4 Reheating condition and temperature profile during reheating of 86S

3.2 Al frame 반용융 성형실험

3.2.1 gate 형상에 따른 성형성

Fig.5 (a)~(c)는 초기설계시 게이트형상과 두 번의 수정을 통한 게이트형상을 각각 나타낸 것이다. Fig.5 (a)는 초기 게이트형상으로서 대부분 제품의 충진율이 Fig.8 (c)에서 보여주는 바와 같이 90%이상으로 충진되지 않았다. 위의 원인은 세가지 정도로 요약된다. 먼저 gate를 통과하는 소재가 곧바로 cavity에 충진되기 전에 중앙부 core에 의해 방향이 바뀌어 제품의 끝단부까지 충분한 가압력이 전달되지 못하는 것으로 생각된다. 둘째, 슬리브를 빠져나온 소재가 core를 지나면서 유동면적이 급격히 좁아지는것도 원인으로 사료된다. 마지막으로 슬리브의 주입구 주위를 제외하고 모두 수평으로 되어있어 가압력의 손실이 많이 발생하는 것으로 생각된다.

위의 문제를 해결하기 위해 Fig.5(b)에서 보여주는 바와 같이 중앙부 core의 높이를 낮추고 끝부분을 둥글게 수정하였다. 슬리브의 수평부분도 경사면으로 수정하였으며 가압력이 충분히 전달될수 있도록 gate의 직경을 크게하여 Fig.5 (b)와 같이 수정을 하여 성형실험을 하였다.



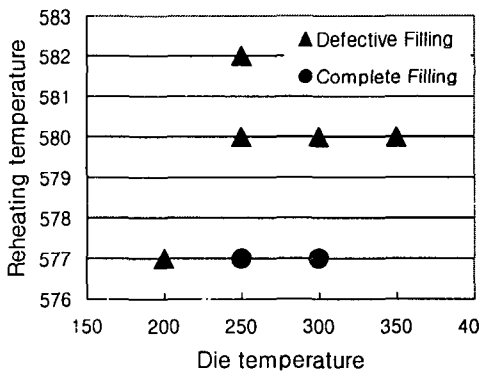
(a) initial gate Ⅰ (b) modified gateⅡ (c) modified gateⅢ

Fig. 5 Gating system and modification

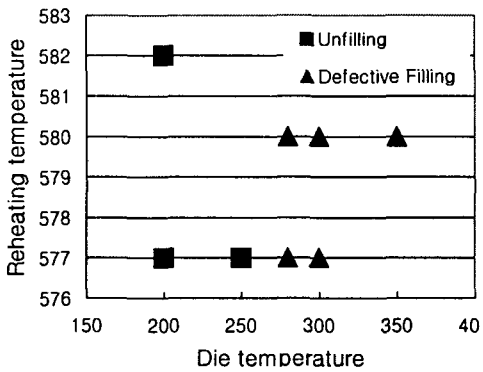
Fig.5 (b)의 게이트Ⅱ는 슬리브와 캐비티사이 상부다이의 두께(Gate의 높이)가 25mm로서 성형시 300℃의 예열이 필요하고, 금형은 항상 고온을 유지되면서 50ton 이상의 하중이 순간적으로 작용하기 때문에 변형으로 인한 flush발생의 소지가 높다. flush가 발생할 때 금형의 guide pin등으로 주입이 되어 금형이 분리되지 않거나, 금형을 분리할 때 금형 일부에 과도한 힘이 작용되어 변형이 생겨 많은 양의 flush가 발생하였다. 이러한 문제점 때문에 Fig.5(c)에서 보여주는 바와 같이 금형상판에 해당하는 게이트의 전체높이를 50mm로 수정하였다. 그러나 슬리브와 cavity사이의 거리가 멀어지므로 성형성을 유지하기위해 gate의 직경을 18mm로 확대하였으며 중앙부 core의 높이를 9mm정도 낮추어 금형을 수정하였다. 86S및 A390의 기계적 성질을 조사하기 위하여 gate Ⅲ에서 성형한 제품으로 실험하였다.

3.2.2 gate Ⅱ에서의 성형성

Fig.6 (a), (b)는 각 사출속도가 각각 300mm/sec와 160mm/sec인 경우 소재의 재가열 온도와 금형온도를 변수로 하여 반용융 단조실험을 하였을 때 성형성을 나타낸 것이다. Fig.6와 Table 4에서 나타낸 것처럼 소재의 온도가 높아지면 성형품의 끝단부에서 액상편석이 많이 발생하는데 이는 A357이 580℃이상으로 온도가 높아지면 고상율이 55%에 달하게되는데 많은 액상성분의 함유가 유동성을 증가시키는 것으로 볼수 있지만 오히려 충전 마지막 단계에서 액상편석(Liquid segregation)을 일으켜 결함발생의 원인으로 생각된다.



(a) Vp=300mm/s



(b) Vp=160mm/s

Fig. 6 Relationship between die and reheating temperature

따라서, A357의 경우 580℃미만의 온도에서 성형하는 것이 적당하다. Table 4에는 포함되지 않았지만 575℃이상이 되어야 완전한 충전이 이루어지기 때문에 Al frame성형시 A357의 재가열 온도는 575℃와 580℃사이에서 성형하는 것이 적당하다. 실험에서는 소재온도 577℃, 사출속도 300mm/s에서 가장 좋은 성형성을 보였다.

소재온도 577℃, 사출속도 300mm/s에서는 다이온도가 250℃의 경우와 300℃일 때 성형성의 차이는 별로 나타나지 않았다. 금형의 온도가 300℃가 되면 다이의 열팽창으로 가이드핀과 홀의 마찰이 커져서 금형의 개폐가 원활하지 못하였고 취출 핀 파손등의 문제들이 많이 발생하였다. 따라서 반용융 성형시 다이의 온도는 300℃이하가 바람직 하다고 생각된다.[7] 따라서 A357은 금형온도 250℃에서 제품을 성형하였다.

Table 4 Experimental Condition

* Pressing pressure:80MPa, Pressing holding time:20sec

No.	T_d (℃)	T_m (℃)	V	Filling	Defects
1	200	577	160	U.F.	
2	200	582	160	U.F.	
3	200	577	300	D.F.	Liquid segregation at @
4	250	577	160	U.F.	
5	*250*	*577*	*300*	*C.F.*	
6	250	580	300	D.F.	Liquid segregation at @
7	250	582	300	D.F.	Liquid segregation at @
8	280	577	160	D.F.	Liquid segregation at @
9	280	580	160	D.F.	Liquid segregation at @
10	300	577	160	D.F.	crack at @
11	300	580	160	D.F	Liquid segregation at @
12	*300*	*577*	*300*	*C.F.*	
13	300	580	300	D.F.	Liquid segregation at @
14	350	580	160	U.F.	
15	350	580	300	D.F.	

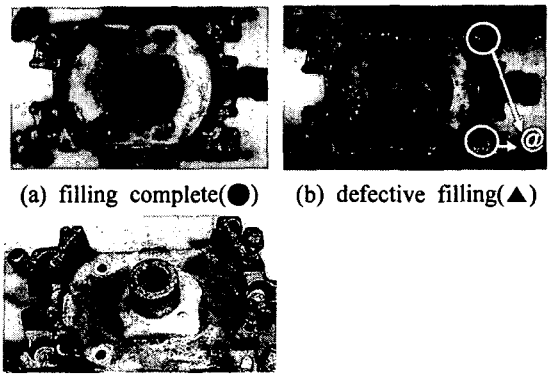
U.F.:unfilling, D.F.:defective filling, C.F.:filling complete

T_d(℃) : Die Temp.

T_m(℃) : Material Temp.

V(mm/s) : Injection velocity

Fig.7은 대표적인 각 충진 형태의 성형품을 나타내낸 것이다. 주 결함 발생부위는 @위치이며 결함의 형태는 액상의 편석현상이 주류를 이루고 있다.



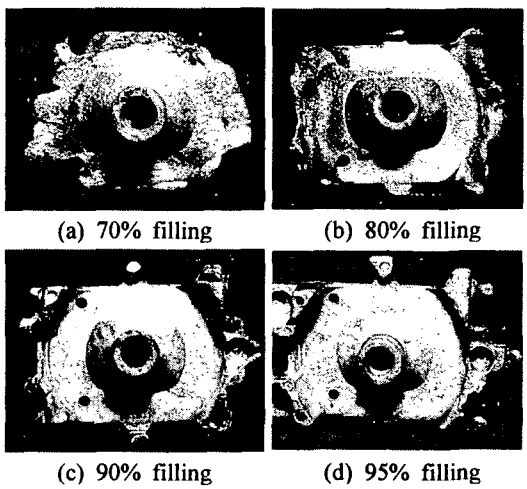
(a) filling complete(●) (b) defective filling(▲)

(c) unfilling(■)

Fig. 7 Photos of products with various filling type (modified gate II)

3.2.3 Filling test

Fig.8는 소재가 A357인 경우 사출속도 300mm/s, 소재온도 577℃, 금형온도 250℃의 조건으로 gateIII에서 실시한 filling test의 결과를 나타낸 것이다. Fig.8(c) 의 90% filling까지는 비교적 균일한 충진양상을 보이고 있다. 그러나 충진율 90%부터 충진 양상이 변하고 있다.



(a) 70% filling (b) 80% filling

(c) 90% filling (d) 95% filling

Fig. 8 Filling test for Al frame with modified gateIII (A357)

Fig.9은 충진율 90%이후의 유동 패턴을 도식적으로 표시한 것이다. Fig.9 에 나타낸 것처럼 ⓐ부분에서 양쪽 끝단부로 유동의 방향이 바뀌어지고 있으며, 또한 ⓑ부분에서는 계속적으로 직선 방향을 유지하고 있다. ⓒ부분도 경사부분에의해 유동의 방향이 자연스럽게 변화하나 ⓓ부분에서는 직선방향으로 충진이 이루어지고 난후에 유동의 방향이 바뀌는 것으로 생각된다. 따라서 Fig.8

(d)의 95% 충전현상을 보면 좌측으로 cavity가 먼저 충진이 이루어지나 우측은 직선방향의 유동에 의해 cavity보다 over flow가 먼저 충진이 이루어지고 그다음 cavity의 충진이 이루어지는 것을 알 수 있다. 따라서, 가장 늦게 충진이 이루어지는 Fig.7 (b)의 defective filling에서 표시한 @부분에서 가장많은 결함이 발생하였다. 이런 형태의 성형불량 발생은 gate II, gateIII모두 비슷한 결과를 나타내었다.

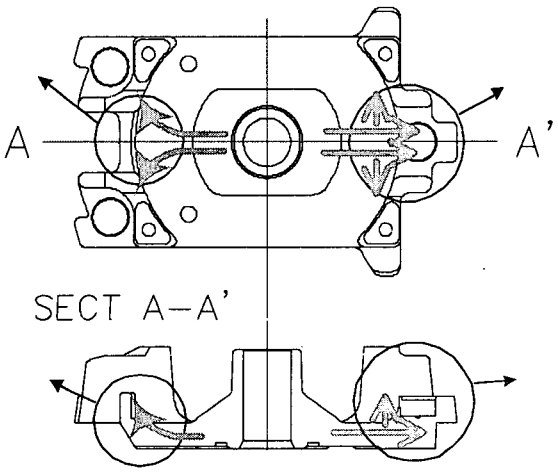


Fig. 9 Flow ofpattern Al frame at 95% filling

위와 같은 문제를 해결하기 위해 사출속도를 370mm/s로 증가시켰으나 불량율은 큰 변화를 보이지 않았다. 따라서 재료의 유동과 가압력이 over flow쪽으로 흐르지 않도록 하기 위하여 3개의 over flow를 메우고 성형을 실시한 결과 불량율을 크게 감소하였다. 위의 이유는 고속으로 성형을 하면 금형의 구조상 케비티 내부에 소재가 충전되기전에 overflow쪽으로 소재가 먼저 유동하는 현상을 억제할수 있기 때문이다. 따라서, Fig.7 (b)의 ⓐ부분이 미충전되는 현상을 방지할수 있었다.

3.2.4 소재에 따른 성형성

Fig.10은 A357의 경우 소재온도 577℃, 금형온도 250℃, 사출속도 370mm/s의 조건에서 성형하였을 때 하중의 변화를 나타낸 것이다.

구간 ①은 펀치와 슬리브를 동시에 예열하기 위해 펀치를 슬리브속에 장입한 상태에서 예열하는 구간으로 소재의 재가열이 끝날 시점에서 소재의 장입을 위해 펀치를 상사점까지 올리는 구간이 ②구간이다. ③구간에서 소재를 장입후 ④구간에서 성형이된다. 구간 ⑤는 충진이 완료된 후 20초간 가압유지하는 구간이다.

각 소재별, 사출속도별로 성형시(구간 ④) 최고하중을 Table 5에 나타내었다.

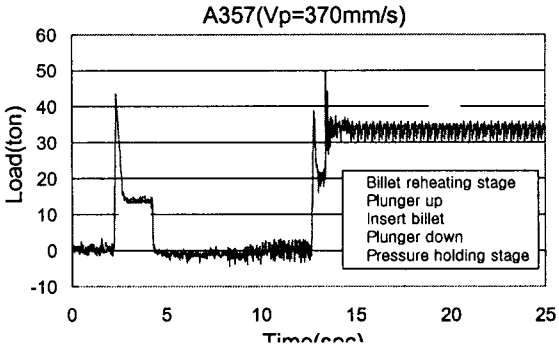


Fig. 10 Load variation as a function of time for forming Al frame with A357

Table 5 Maximum load values with various alloys and semi-solid forging conditions during filling

Material	A357		86S	A390
Velocity(mm/s)	370	120	370	120
Load(ton)	48.8	50.3	43.3	38.1
Die Temp.(℃)	250		200	100
Mat. Temp.(℃)	577		573	563

Table 4에서 보여주는 바와 같이 A357보다는 86S가 변형저항이 작았으며 A390의 성형시 변형저항이 가장 작은 것으로 나타났다. A357의 성형시 낮은속도에서 큰 변형저항을 나타내었다. 86S는 A357보다 낮은 변형저항을 나타내었으며 충진결함으로 인한 불량제품의 발생율이 A357과 비교해 아주 낮게 나타났다. 또한 flush의 발생과 소착도 현저하게 감소하였다. A390의 성형시 Table 4에 나타낸 것처럼 가장 낮은 변형저항을 보였고 A357, 86S와 달리 다량의 flush가 발생하였다. flush는 금형을 예열하지 않고 성형을 실시 하여도 계속 발생하였으며 금형 분할면에 소착되었다. 따라서 A390의 반용융 성형은 새로운 이형재의 사용에 관한 문제점이 대두되었다.

3.3 성형품의 기계적성질

3.3.1 열처리

Fig.5 (b)의 게이트II의 경우는 소재온도 577℃, 금형온도 250℃, 사출속도 370mm/s의 조건으로 성형한 A357 Al frame과 Fig.5 (c) gateIII에서 소재온도 573℃,

Table 6 Heat treatment condition for A357 & 86S

Mat.	Type	Solutionizing	Cooling	Ageing	Cooling
A357	T5	none	Water quenching on stripping	6 hour-170℃	Air cooling
	T6	10 hour-540℃	Water quenching	6 hour-170℃	Air cooling
86S	T5	none	Water quenching on stripping	10 hour-170℃	Air cooling
	T6	6 hour-505℃	Water quenching	10 hour-170℃	Air cooling

금형 온도 200℃, 사출속도 370mm/s의 조건으로 제조한 86S Al frame의 기계적 성질을 관찰하기 위하여 Table 6의 조건에서 열처리를 각각 하였다[5].

86S 소재의 경우 Table 1에 나타낸 것처럼 A357에는 포함되어 있지않은 Cu성분이 약 3%함유되어 있어 시효 및 분산강화 효과에 의한 기계적 강도의 증가가 기대되며 A357의 T6열처리와 비교해 86S소재 제품은 용체화 처리를 하지않고 시효처리 만으로도 좋은 기계적 성질을 얻을수 있어 많은 부품개발이 기대되는 소재이다[8].

4. 결 론

(1) 소재의 재가열을 3단계로 나누어 각 단계별로 온도 및 시간을 제어하여 온도분포가 균일하고 반용융 성형에 적합한 재가열 조건을 도출하였다.

(2) 반용융 성형공정을 적용하여 기존 주철재 compressor 부품을 기계적 성질이 우수한 near net-shape 부품을 제조하여 경량화 할 수 있었다.

(3) 반용융 성형시 gate부에서 유동의 방향이 바뀌는 것은 충진불량의 원인이 되며 cavity내에 가압력이 충분히 전달되지 않는 것을 알 수 있었다.

(4) A357의 경우 소재온도 577℃, 다이온도 250℃, 사출속도 370mm/s에서86S의 경우 소재온도 573℃, 다이온도 200℃, 사출속도 370mm/s에서 균일한 고상분포 및 완전충진이 이루어졌다.

참 고 문 헌

(1) R. Moschini, 1992, "Manufacture of Automotive Components by Semi-Liquid Forming Process", Proc. of 2nd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Cambridge MA, April 1992, S. B. Brown, M. C. Flemings, eds., MIT, Cambridge MA, pp.149~158.

(2) K. P. Young, R. Fitze, 1994,"Semi-Solid Metal Cast Aluminum Automotive Components", Proc. of 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Tokyo, June 1994, M. Kiuchi, eds., Institute of Idustrial Science, Univ. of Tokyo, Tokyo Japan, pp.155~189.

(3) T. Witulski, A. Winkelmann, G. Hirt, 1996, "Thixoforming of Aluminum Components for Lightweight Structures", Proc. of 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, June 1996, D. H. Kirkwood, P. Kapranos, eds., Univ. of Sheffield, Sheffield, UK, pp.242~247

(4) G. Chiarmetta, 1998, "Thixoforming and Weight Reduction", Proc. of 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Golden, CO, June 1998, A. K. Bhasin, J. J. Moore, K. P. Young, S. Midson, eds., Colorado School of Mines, Golden, CO, pp.87~95

(5) H. K. Jung, C. G. Kang, 1999, "A Study on Induction Heating Process of Al-6%Si-3%Cu-0.3%Mg Alloy for Thixoforming", Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol. 19, No. 3, pp.25~35

(6) H. K. Jung, C. G. Kang, "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al-6 Pct Si-3 Pct Cu-0.3 Pct Mg Alloy for Thixoforming", Metallurgical Transactions A, Vol. 30A, pp.2967~2977.

(7) G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski and M. Zillgen, 1994, "SSM-Forming of Usually Wrought Aluminium Alloy", Proc. of 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Tokyo, June 1994, M. Kiuchi, eds., Institute of Idustrial Science, Univ. of Tokyo, Tokyo Japan, pp.107~116

(8) Althix Billets, 1996, Aluminium Pechiney