

|||||||
論 文
|||||||

내마모계 Al-Si 재료의 레오로지 성형기술 개발 (I) - 충전거동 및 결함분석 -

정홍규 · 강성수 · 문영훈 · 강충길*

Development of Rheology Forming Technology of Wear Resistance Al-Si Materials (I) - Filling Behavior and Defect Evaluation-

Hong-Kyu Jung, Sung-Soo Kang, Young-Hoon Moon and Chung-Gil Kang*

Abstract

Rheology forming technology has been accepted as a new method for fabricating near net shaped products with lightweight aluminum alloys. The rheology forming process consists of reheating process of billet, billet handling, filling into the die cavity and solidification of rheology formed part. The rheology forming experiments are performed with two different die temperatures ($T_d = 200^\circ\text{C}, 300^\circ\text{C}$) and orifice gate type. The filling behavior and various defects of Al-Si materials with wear resistance (A357, A390 and ALTHIX 86S) fabricated in rheology forming process are evaluated in terms of alloying elements and surface non-uniformity. Finally, the methods to obtain the rheology formed products with high quality are described by solutions for avoiding the surface and internal defects.

(Received January 18, 2000)

1. 서 론

레오로지 성형기술은 고체와 액체가 공존하는 상태에서 성형을 하기 때문에 빌렛의 온도를 균일하게 하기 위해 전자기 유도가열 방법을 이용하지만, 짧은 시간 동안 가열함으로써 온도 구배가 발생할 수 있다. 따라서 소재 단면에 있어서 고상율 분포의 불균일 현상으로 인하여 성형 공정 중 액상이 유출되어 균일한 기계적 성질을 얻을 수 없다. 레오로지 성형의 문제점으로 는 균일한 고상율을 얻을 수 있는 재가열 공정 시스템 과 임의 형상에 대한 알루미늄 합금별 재가열 D/B 구축이 시급하다. 성형시 표면의 산화층(oxide film)과 불순물 제거 등의 제조 공정과 관련한 금형 설계 및 성형시 제품에 발생하는 문제점등을 예측하여야 한다.

레오로지 성형에 관한 연구 동향으로서는 Kumar 등 [1,2]은 레오로지 성형공정에서 반응용 슬러리 내의 고상 결정립들간에 응집과 분리가 비평형적으로 일어날

경우 shear rate thickening 현상이 나타남을 관찰하였다. Suery 등[3]은 레오로지 성형 중 액상 편석 현상이 발생하는 데, 수직상 조직들의 틈새가 구상화 조직보다 더 넓음으로 인하여 액상의 유출이 상대적으로 쉽게 일어나기 때문에 구상화 조직보다 액상 편석 현상이 더 심하게 발생한다고 제안하였다.

강 등[4-5]은 레오로지 성형공정에 있어서 다이 캐비티의 형상이 오리피스형(orifice type)인 경우가 양호한 조직을 얻는 데 적합함을 실험 및 수치 해석을 통해 검증하였다. 정 등[6-8]은 알루미늄 합금(A356, ALTHIX 86S, Al2024)에 대하여 3단 재가열 과정을 통해 양호한 구상화 조직을 얻을 수 있는 조건을 실험과 해석을 통하여 검증하였으며, 유도가열을 위한 새로운 FEM 해석모델을 제안하였다.

지금까지 대부분의 연구내용은 레오로지 성형공정을 이용해 제조된 부품의 구상화 분포 및 고액간의 분리 현상 등을 연구하였다. 충전거동 파악 및 결함분석을

부산대학교 대학원(Graduate School, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea)
*부산대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

수행한 연구결과는 보고되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 전자기 교반법에 의해 제조된 A357, A390 및 ALTHIX 86S를 3단 재가열한 후, 임의 형상의 금형을 이용하여 레오로지 성형을 수행하여 시험편을 제조하였다. 이 때 발생하는 칠층(chill zone) 및 각종 결함의 원인을 규명하였다.

2. 실 험

2.1 재가열 실험

레오로지 성형공정은 일반적으로 소재의 재가열 및 성형, 가압유지, 추출의 순서로 구분되며, 이 과정에서 특히 양호한 구상화 조직(globular microstructure)을 얻을 수 있는 재가열 조건의 설정이 중요하다. 따라서 본 실험에서는 일반적으로 자동차 부품 개발에 주로 이용되는 프랑스 PECHINEY사에서 전자기 교반으로 제조된 주조용 합금인 A357, A390 및 ALTHIX 86S를 사용하였다. Table 1에 각 알루미늄 합금의 화학 성분을 나타내었다.

실제 소재의 체적(재가열시의 재료 손실, 다이 캐비티, 탕구, 탕구와 펀치와의 스트로크 차이 및 버어(burr)의 체적 합)을 고려하여 빌렛 크기를 $d \times l = 76 \times 30(\text{mm})$ 로 설정하였다. 최대 출력이 50 kW이고, 주파수가 60 Hz인 유도 가열로를 이용하여 재가열 실험을 수행하였다. 저자가 제안한 재가열용 유도코일 설계법을 이용하여 구상화된 조직을 얻을 수 있는 합금별 코일의 크기를 이론적으로 제안하여 설계 및 제작된 코일을 이용하였다[7,8].

빌렛의 직경과 높이가 각각 75 mm, 30 mm인 경우 코일의 내경과 높이가 각각 100 mm와 (114~130)mm인 경우가 적합함을 알 수 있었다.

제작된 코일을 유도 가열로에 설치하고, $d \times l = 76 \times 30(\text{mm})$ 인 빌렛의 표면으로부터 20 mm의 위치에 직경 2.4 mm로 드릴링 하여 $\phi 1.6 \text{ mm}$ 의 K-Type CA

열전대를 삽입해서 재가열시 시편 각 부분의 온도를 측정하였다. 빌렛의 전체적인 온도 분포와 미세조직을 관찰하여 온도구배가 작고 미세한 구상화 조직을 갖는 최적의 재가열 조건을 찾기 위해 유도로의 출력(Q), 재가열 온도에 도달하는 시간(t_d), 재가열 온도(T_h), 재가열 온도에서의 유지 시간(t_h) 등을 변화시켜 가면서 재가열 실험을 실시하였다.

2.2 레오로지 성형실험

실험에 사용된 금형의 도면을 Fig. 1에 나타내었다. 고온 공구강인 STD 61종(ASTM: H13, JIS: SKD 61)을 HRC 55~60으로 열처리하여 금형과 펀치를 제작하였다. 금형의 가열을 위하여 고온(400°C)에서 견딜 수 있는 400W 용량의 열선을 상부에 8개, 하부에 6개를 장착하였다. 금형의 온도를 제어하기 위하여 상하부 각각 열전대를 측면에 삽입하여 좌우 분할 금형의 온도를 균일하게 제어하였다.

온도 측정을 위하여 $\phi 1.6 \text{ mm}$ 의 K-Type 열전대를 사용하였으며, 좌·우 금형의 용량이 각각 2.8 kW가 되도록 균일하게 금형을 예열하였다. 또한 금형 예열시 그래페이스 이형재를 사용하여 금형 캐비티와 소재의 소착 현상을 방지하고 성형 후 해체가 용이하도록 하였다. 가압시 금형의 온도 변화에 따른 충전현상을 파악하기 위하여 금형온도를 $T_{\text{die}} = 200^\circ\text{C}$ 와 300°C 로 하여 실험을 하였다.

실험을 위해서 200 ton 복동식 고속 유압 프레스를 이용하였으며, 가압속도는 최대 200 mm/sec이다. 성형이 이루어졌을 때, 오리피스형 탕구의 윗면과 펀치의 밑면의 스트로크 차이가 10 mm가 되도록 소재의 체적을 계산하였다. 펀치가 10 cm까지 움직이는 지점까지는 재가열된 소재의 열손실을 최소화하고 양호한 성형성을 얻기 위해 고속 구간에서(펀치속도 $V_p = 200 \text{ mm/sec}$) 실험을 하였으며, 단조가 완전히 이루어지기 직전부터는 저속으로 실험을 수행하여 응고조직을 제어하였다.

Table 1. Chemical compositions of ALTHIX (A357, 86S, A390) billets

Alloys	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb+Sn	Ti	Sr
A357	6.5				0.50					0.01
	7.5	0.15	0.03	0.03	0.60	0.03	0.05	0.03	0.20	0.05
ALTHIX 86S	5.5		2.5		0.30					0.01
	6.5	0.15	3.5	0.03	0.40	0.03	0.05	0.03	0.20	0.05
A390	16.0		4.0		0.50					
	18.0	0.40	5.0	0.10	0.65	0.10	0.05	0.03	0.20	-

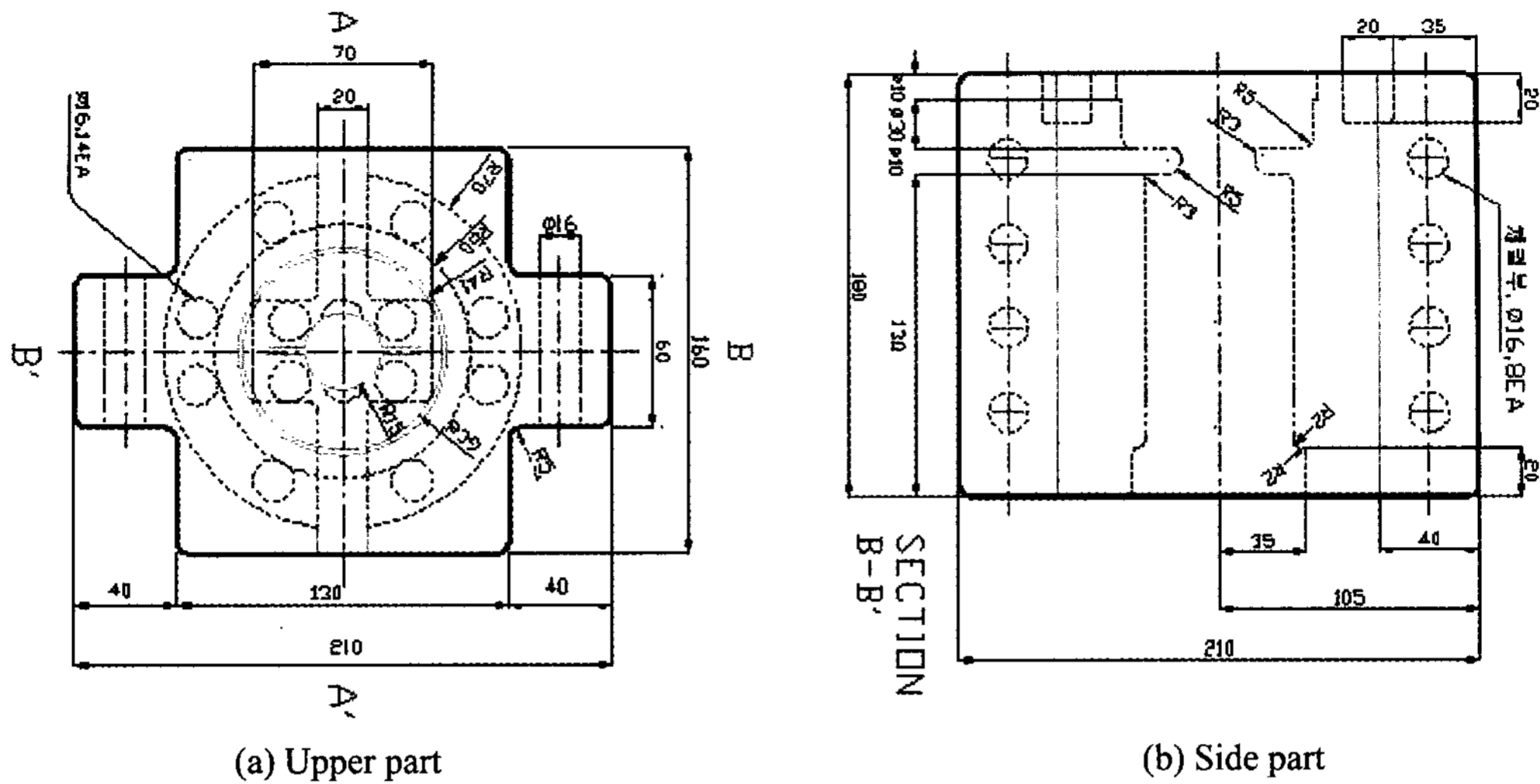


Fig. 1. Drawing of die set used for surface sample forming by rheology forming technology.

저속 충전이 이루어진 이후에 20초 동안 가압 유지하였다. 가압 후 분할 금형을 열어 제품을 해체하고 성형품의 각 단면에 있어서 충전거동 및 각종 결합을 분석하기 위해서 신속히 수냉시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재가열 실험 결과

레오로지 성형에 필요한 가열 온도를 결정하기 위해 소재의 고상율 계산은 다음과 같은 Scheil의 방정식을 이용하였다[9].

$$f_L = \left(\frac{T_M - T}{T_M - T_L} \right)^{\frac{-1}{1-k}} \quad (1)$$

여기서, T_M 과 T_L 은 각각 순금속의 용점온도와 액상 온도이다.

이 식은 고상율과 온도와의 관계식을 보여주는 것으로 본 연구에서 Al2024의 경우는 시험편의 온도를 측정하여 고상율을 식(1)에 의하여 산출하였다. A356 및

Table 2. Melting temperature, liquidus temperature and distribution coefficient for Al2024[9, 11]

Melting Temperature TM (°C)	Liquidus Temperature TL (°C)	Distribution Coefficient k
502	638	1.22

ALTHIX 86S의 온도와 고상율의 관계는 문헌[9,10]에서 도입한 것을 사용하였다.

과공정 합금(hypereutectic alloy)인 A390의 경우에는 아공정 합금(hypoeutectic alloy)인 A356, A357 및 ALTHIX 86S와는 달리 공정 조직의 완전 용해가 불가능하며, Si의 함량 증가에 따라 빌렛 표면의 과열(overheating) 및 고상액상의 편석현상이 발생하기 쉽다[7,8]. 따라서 A390의 경우, 허용 온도 영역(working domain)인 566°C[12,13] 부근(565°C)에서 재가열 실험을 수행하였다.

발표된 연구 결과와 예비 실험을 통해서 알루미늄 합금별(A357, A390, ALTHIX 86S) 최적의 재가열 조건을 설정하여 Table 3에 나타내었다[7].

Table 3. Reheating conditions for rheology forming using Al-Si materials (A357, A390, ALTHIX 86S), Test specimen size : $d \times l = 76 \times 30$ (mm)

Alloys	Reheating Time t_a (min)			Holding Time t_h (min)			Holding Temperature T_h (°C)			Total Time (min)	Capacity Q (kW)
	t_{a1}	t_{a2}	t_{a3}	t_{h1}	t_{h2}	t_{h3}	T_{h1}	T_{h2}	T_{h3}		
A357	4	3	1	1	2	1	350	570	576	12	5.128
A390	4	3	2	1	2	1	350	558	565	13	4.582
ALTHIX 86S	4	3	1	1	3	1	350	567	578	13	5.544

$D_0 \times H = 120 \times 180$ (mm)인 유도 코일을 이용하여 실험한 경우와 $D_0 \times H = 120 \times (114 \sim 130)$ (mm)같이 설계 및 제작한 코일을 이용하여 실험한 경우를 비교하였다. 코일 크기가 $D_0 \times H = 120 \times 180$ (mm)인 유도 코일을 이용하여 실험한 경우는 전자기 끝단 효과 (electromagnetic end effect)에 의한 빌렛의 끝단 부분의 과열 및 액상 유출 현상이 발생하였다. 특히 Si의 함량이 많은 A390은 액상 유출의 정도가 심하였다. $D_0 \times H = 120 \times (114 \sim 130)$ (mm)으로 설계, 제작한 코일을 이용하여 실험한 경우는 A357, ALTHIX 86S 소재의 중앙 부위와 표면 부위의 온도차가 2°C 내외의 균일한 재가열이 이루어졌으며, A390은 4°C정도의 온도차를 보였다.

레오로지 성형공정에서 가열시간 단축과 균일하게 빌렛을 재가열하기 위해서는 유도 코일의 설계는 실제로 중요하다. 코일과 빌렛을 구성하는 실제 시스템에서는, 빌렛의 전체 길이에 걸쳐서 유도 열량은 등분포하지 않으며, 그 결과로 비균일 온도 분포가 생긴다. 따라서 코일 설계의 최적화를 위한 중요한 점이 코일 길이와 빌렛 길이 사이의 정확한 관계를 규정하는 것이다[6-8].

본 연구를 통하여 유도 코일 설계가 빌렛의 균일 재가열에 중요한 영향을 미친다는 사실을 파악하였으며,

반응용 소재의 종류와 크기에 따라서 구상화된 조직을 얻을 수 있는 상용 유도 가열 시스템(반응용 성형용: 60 Hz)의 코일 크기와 빌렛 크기 사이의 관계를 이론적으로 제안하여 설계한 후 재가열 실험을 통하여 코일 설계의 타당성을 검증하였다. $d \times l = 76 \times 30$ (mm)인 반응용 소재에 대해서도 Garat 등[12]과 정 등[7, 8, 14]이 제안한 다출력 유도 가열(multi-power induction heating) 방법을 적용하여 생산비용 및 가열시간을 단축한다면 유도 가열 D/B 구축 및 생산 자동화에 크게 공헌할 것으로 사료된다.

3.2 충전거동 및 결함분석

Fig. 2는 Table 3의 재가열 조건을 이용하여 성형한 샘플의 결함부위와 모양을 나타낸 것이다.

A390, A357 및 ALTHIX 86S를 소재로 하여 성형한 Fig. 3~Fig. 6의 개략도를 Fig. 2에 나타낸 것이며, 빗금친 부위는 재가열시 유출된 액상부위와 유동시 와류에 의한 최종 응고 부위를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)~(d)는 고상율이 30%일 때 제품의 하단부에서 관찰되어진 결함을 나타낸 것이다. 위의 원인은 성형시 고상과 액상이 공존하는 반응용 재료가 금형 내부에 충전될 때 금형의 캐비티 내측에 완전히 충전이 이루어지기 전에 고상과 액상이 분리되어 액상 편석을 유발하

Defect	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)
	Vp=200 mm/sec fs=30 %				Vp=200 mm/sec fs=55 %				Vp=200 mm/sec fs=55 %					
Alloys														
A390														
A357														
ALTHIX 86S														

Fig. 2. Schematic diagram of various defects occurring in the rheology forming process with Al-Si materials.

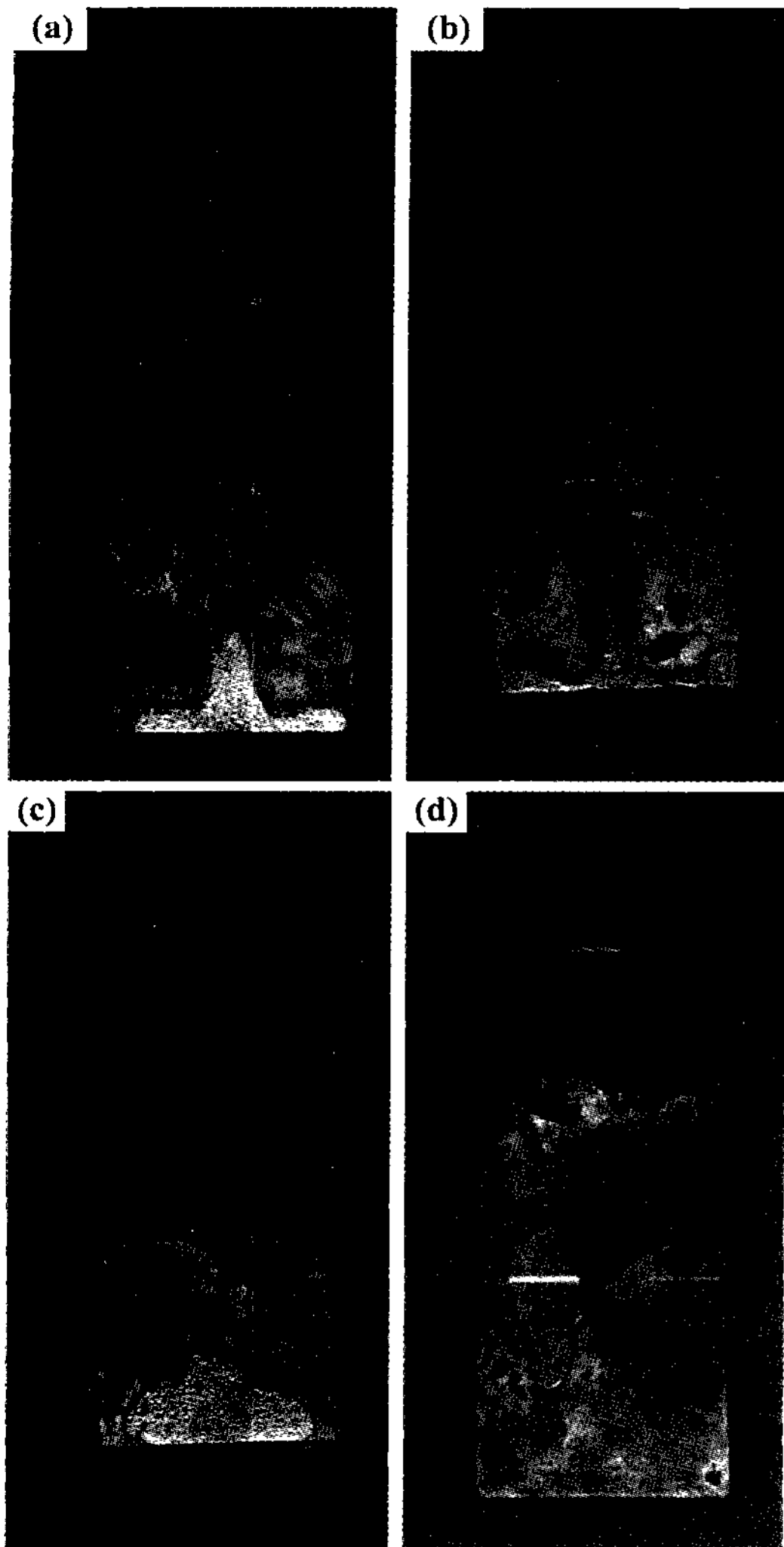


Fig. 3. Various defects occurring in the rheology forming process of an A390 alloy in defects (a)~(d)th of Fig. 2.

기 때문이다.

Fig. 2(a)~(d)에서 보여 주는 바와 같이 반응용 빌렛으로부터 유출된 액상 편석은 소재 밀면에 모임으로 최종제품으로 이용되어질 때에는 편석 영역을 제거하거나 제품의 기계가공에 의해 소실되는 부위에 액상 편석 현상이 위치하도록 하는 러너(runner) 및 오버플로우(overflow)의 설계가 필요하다[15]. Fig. 2(e)~(h)의 경우는 고상율이 55%의 경우 제품 표면에서의 결함형태와 위치를 나타낸 것이다. Fig. 2(e)~(h)에서 보여 주는 바와 같이 제품 표면의 중앙부분근처에서 관찰되고 있는 결함은 성형 공정 중 재료의 유동현상으로 인하여 성형시 최종적으로 금형 캐비티 내에 충전됨과 동

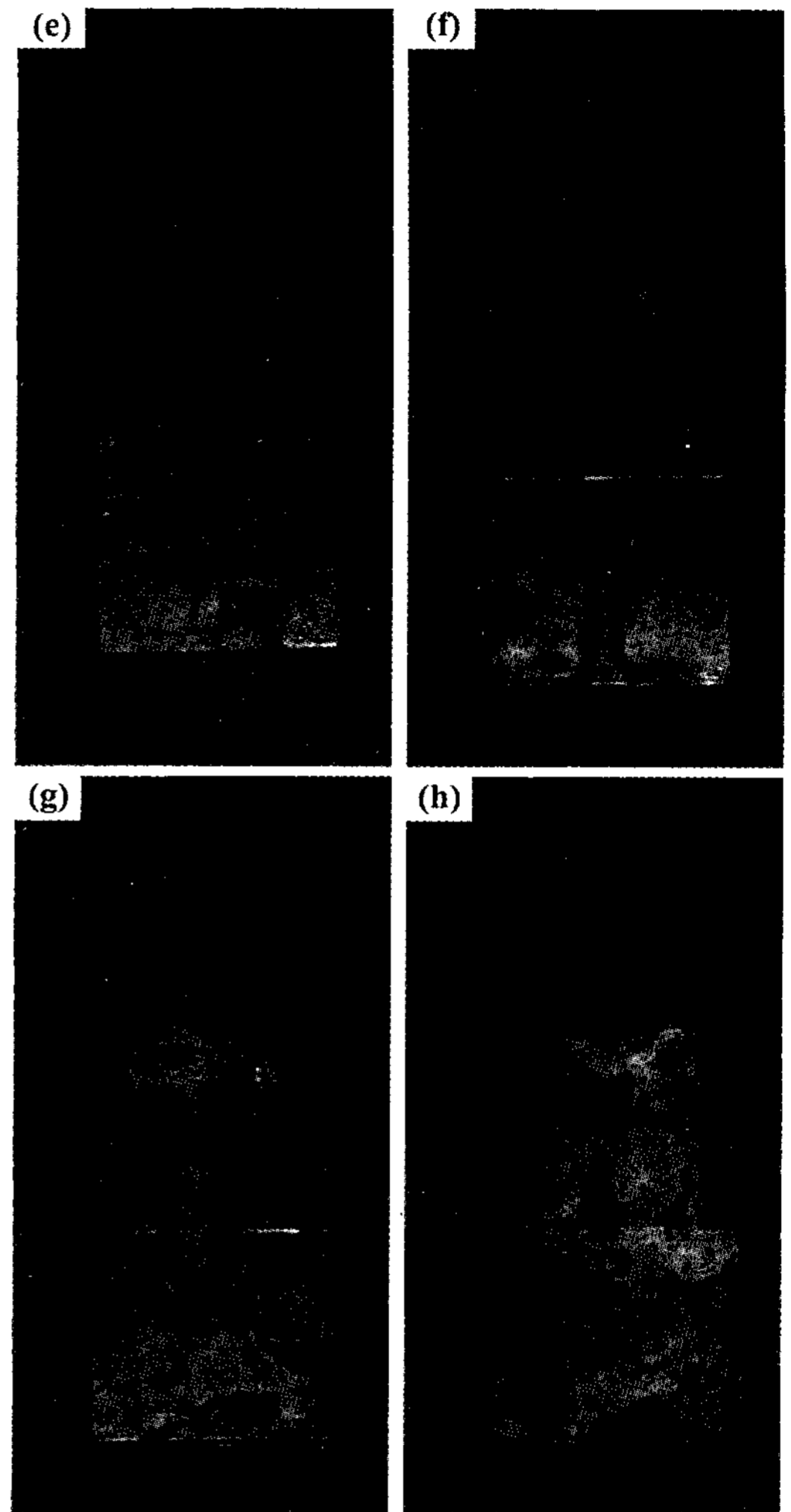


Fig. 4. Various defects occurring in the rheology forming process of an A390 alloy in defects (e)~(h)th of Fig. 2.

시에 와류가 형성되어 응고속도가 지연되기 때문이다. 과공정 조성의 A390은 유동응력이 낮아 온도에 민감하며, 재가열중에 액상 편석 및 재료 손실율(metal loss)이 높다. 따라서 유출된 액상이 표면 장력, 응집현상에 의해서 양호한 구상화 조직을 가지는 부위와 함께 다이 캐비티 내로 성형됨에 따라 발생한 결함으로 사료된다.

본 실험에서는 재가열된 소재를 석면과 유리섬유로 단열된 집계를 이용하여 금형 내로 이송후 레오로지 성형하였으며, Fig. 2(i), (j) 경우 이송 시 소요시간의 증가에 따른 열손실에 의한 응고가 진행되어 미충전된 것으로 사료된다. Fig. 2의 (k), (l)은 양호하게 재가열

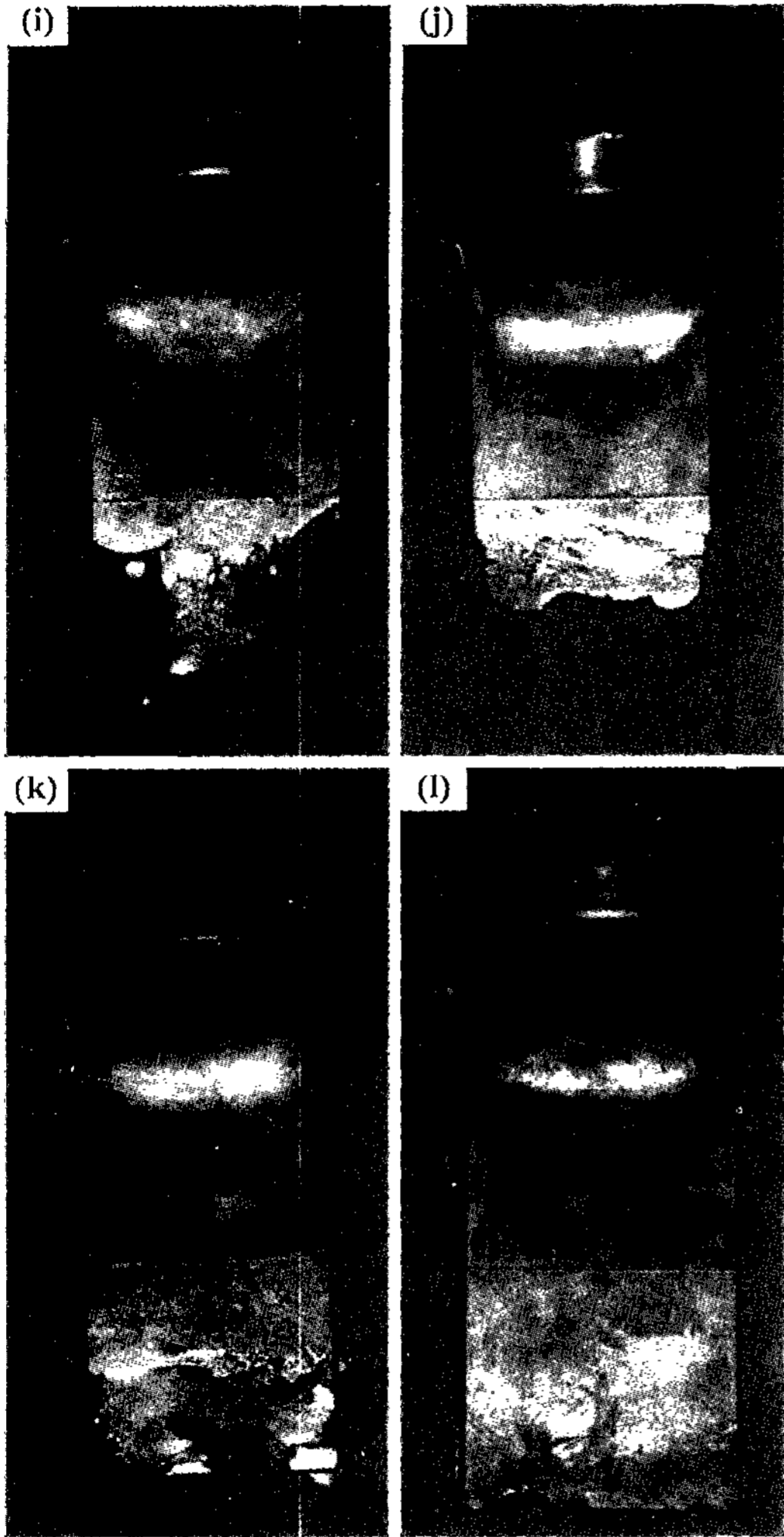


Fig. 5. Various defects occurring in the rheology forming process of A357 and ALTHIX 86S alloys in defects (i)~(k)th and (l) of Fig. 2.

된 A357, ALTHIX 86S 소재를 이용하여 성형하였으나, 미충전된 경우이다.

Fig. 2(m)에 나타난 결함의 원인은 탕구에 소재가 정확히 놓여지지 않아 고속 가압시 재가열된 소재의 표면 산화층이 다이캐비티로 직접 들어가 성형되어 생긴 결함이다. Fig. 2(n)은 표면 정도가 매끄럽지 않은 결함을 가지는 경우이다.

Fig. 7은 Fig. 3~Fig. 6에 나타난 결함에 대하여 결함 부위가 없는 (a), (b), (c) 부위와 결함 부위가 있는 Fig. 7(g), (h), (i)에 대하여 미세조직을 관찰하기 위한 위치를 나타낸 것이다. 합금별로 결함부위가 차이

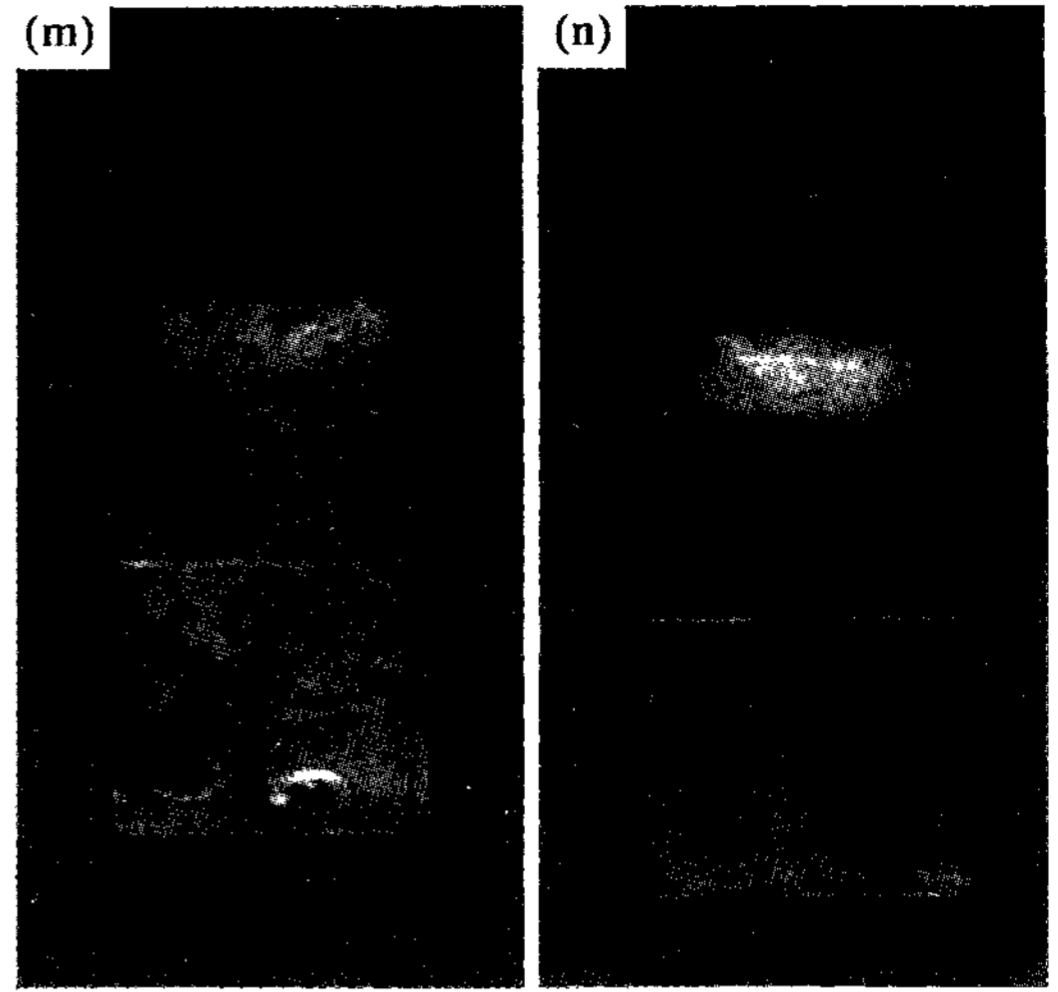


Fig. 6. Various defects occurring in the rheology forming process of A390 and A357 alloys in defects (m) and (n)th of Fig. 2.

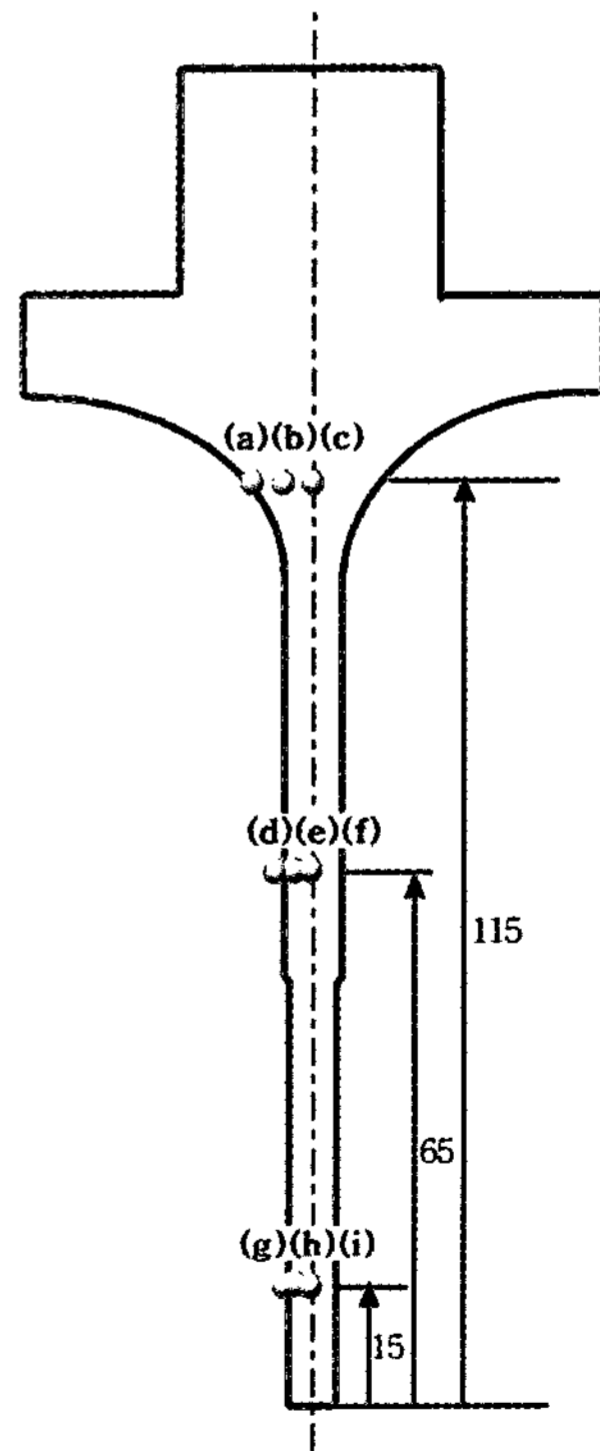


Fig. 7. Schematic diagram for the position of microstructure observation in the direction of the thickness and width

가 나는 원인은 과공정 조성의 합금인 A390의 경우는 높은 Si 및 Cu의 함유율로 인하여 유동성이 좋은 반면에 아공정 조성의 A357은 낮은 Si의 함유율로 인하

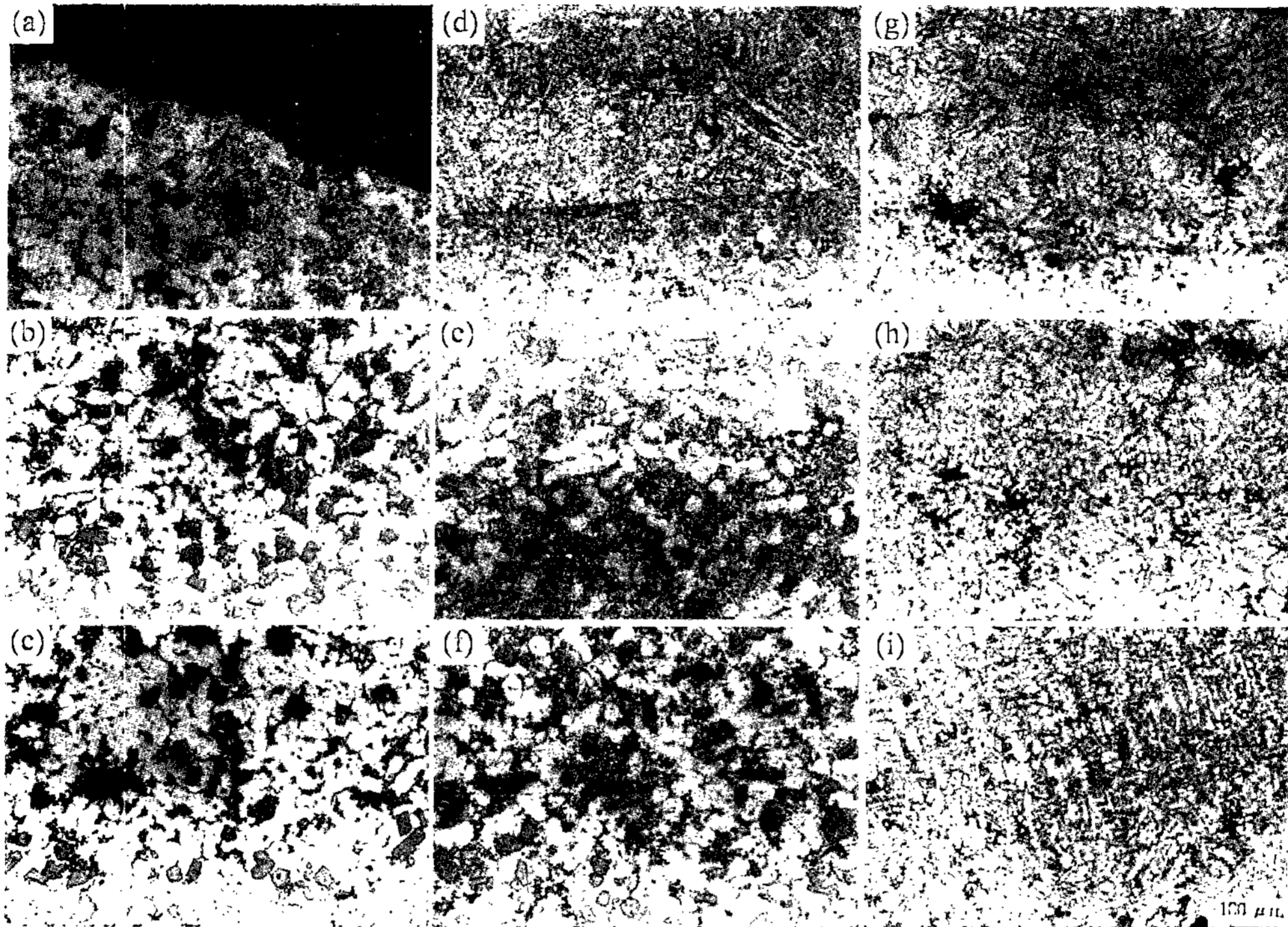


Fig. 8. Microstructures in the direction of the thickness for sample (a) of Fig. 3 with defects occurring in the rheology forming of an A390 alloy

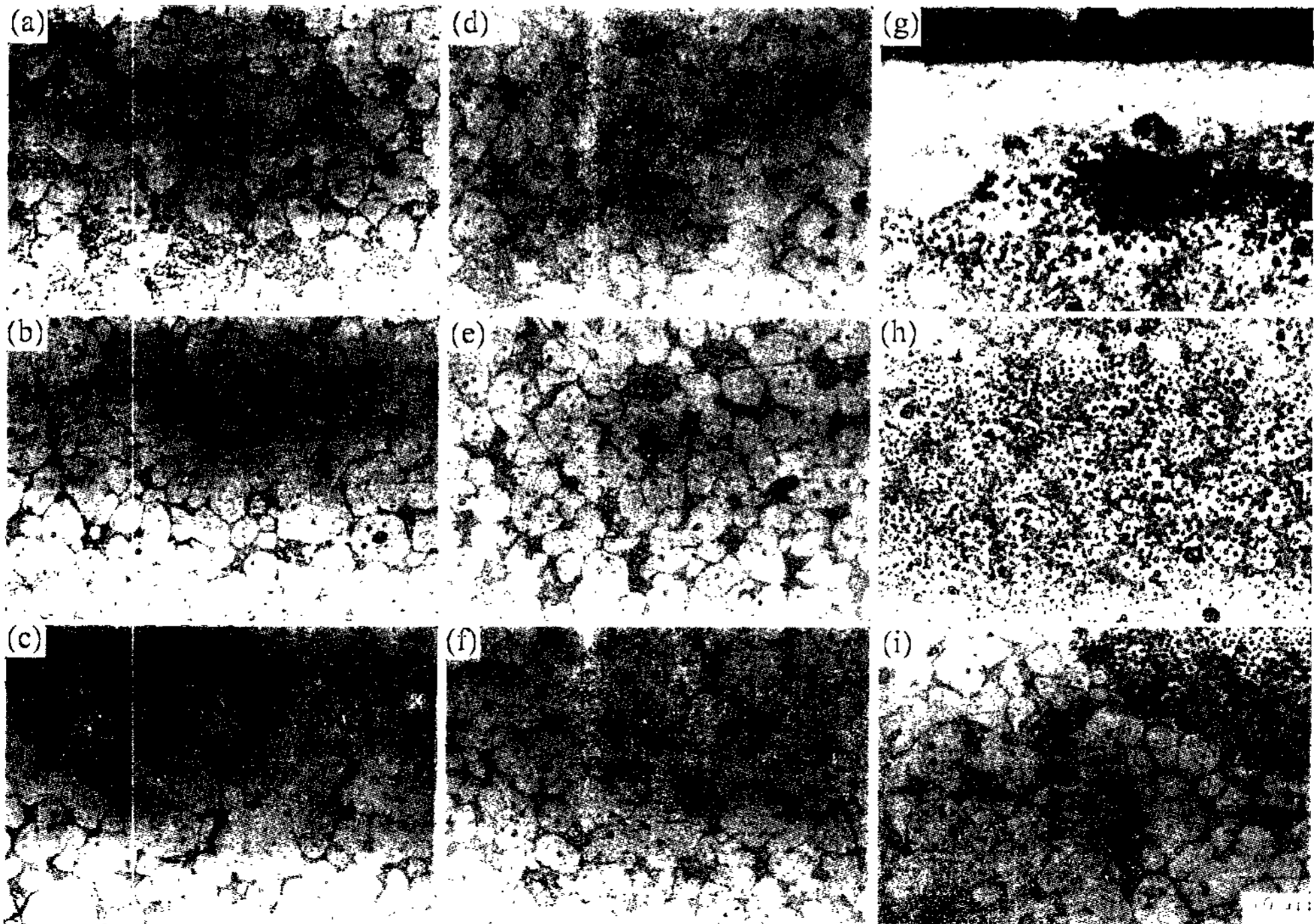


Fig. 9. Microstructures in the direction of the thickness for sample (l) of Fig. 5 with defects occurring in the rheology forming of an ALTHIX 86S alloy

여 유동성이 감소하기 때문이다[16].

Fig. 8은 Fig. 3(a) 시험편에 대하여 Fig. 7서 보여준 관찰 위치 (a)~(i) 부위의 조직사진이다. Fig. 8의 (a), (b), (c)에서는 결함이 없는 구상화 조직이 관찰되었으나 표면 부위인 (a)에서부터 중앙 부위인 (c)로 갈수록 고상의 응집 현상 및 조대화가 증가되었다. Fig. 8(d)에서는 표면으로부터 300~400 μm 크기의 칠층 및 양호한 구상화 조직과의 경계부가 관찰되었다. Fig. 8(e), (f)에서는 결함 부위가 없으며, 가압을 직접적으로 받는 부위인 Fig. 8(b), (c)에서 보다 고상간의 응착현상이 감소되었다. Fig. 8(g), (h), (i)에서는 수지상 조직이 전체적으로 분포되어 액상 편석이 관찰되었다.

Fig. 9는 Fig. 5의 (l) 시험편에 대한 미세조직을 관찰한 것이다. Fig. 9(a), (b), (c)에서는 Fig. 8(a), (b), (c)와 같이 표면 부위에서 중앙 부위로 갈수록 고상의 응집 및 조대화가 관찰되었다. Fig. 9(d), (e), (f) 조직은 유사하였다. Fig. 9(g), (h), (i)는 결함 부위의 미세조직을 나타낸 것이다. Fig. 9(g)에서는 표면 부위에서 100~150 μm 범위의 구상화된 조직과 기공이 관찰되었으며 Fig. 9(h), (i)에서는 전체적으로 구상화된 초정

(primary) 조건에서 결함이 관찰되었다.

Fig. 10은 A357을 소재로 한 Fig. 6(n) 시험편에 대한 미세조직을 관찰한 것이다. 전체적으로 결함 부위는 관찰되지 않았으며, 고상의 조대화나 응집 현상도 관찰되지 않았다.

이상의 성형실험을 통하여 레오로지 성형품의 표면 칠층과 조직 불균일의 크기는 각각 300~400 μm 및 200~300 μm 정도로 관찰되었으며, Si 및 Cu의 함량이 많은 A390 에서 두드러진 양상을 보였다.

성형중 빌렛 전체에 걸쳐서 고상과 액상영역이 고르게 분포하기 위해서는 200 mm/s 이상의 사출속도가 필요하다. 합금의 유동성과 수축을 고려한 건전한 부품 제조를 위해서는 충전중 고상과 액상의 편석을 포함한 재료의 유동거동을 모델링하는 기술이 선결되어야 할 것으로 사료된다. 다이 캐비티로 충전되는 동안에 형성된 산화막들은 유동 교차부에 큰 오버플로우를 설치하거나 충분한 벤팅(venting)에 의해서 제거되어야 한다. 레오로지 성형공정에 있어서 제품의 표면 및 마무리 치수의 향상을 위해서는 윤활막이 가능한 최소화되어야 하며, 또한 소착 방지를 위하여 마찰력은 감소시킬 수

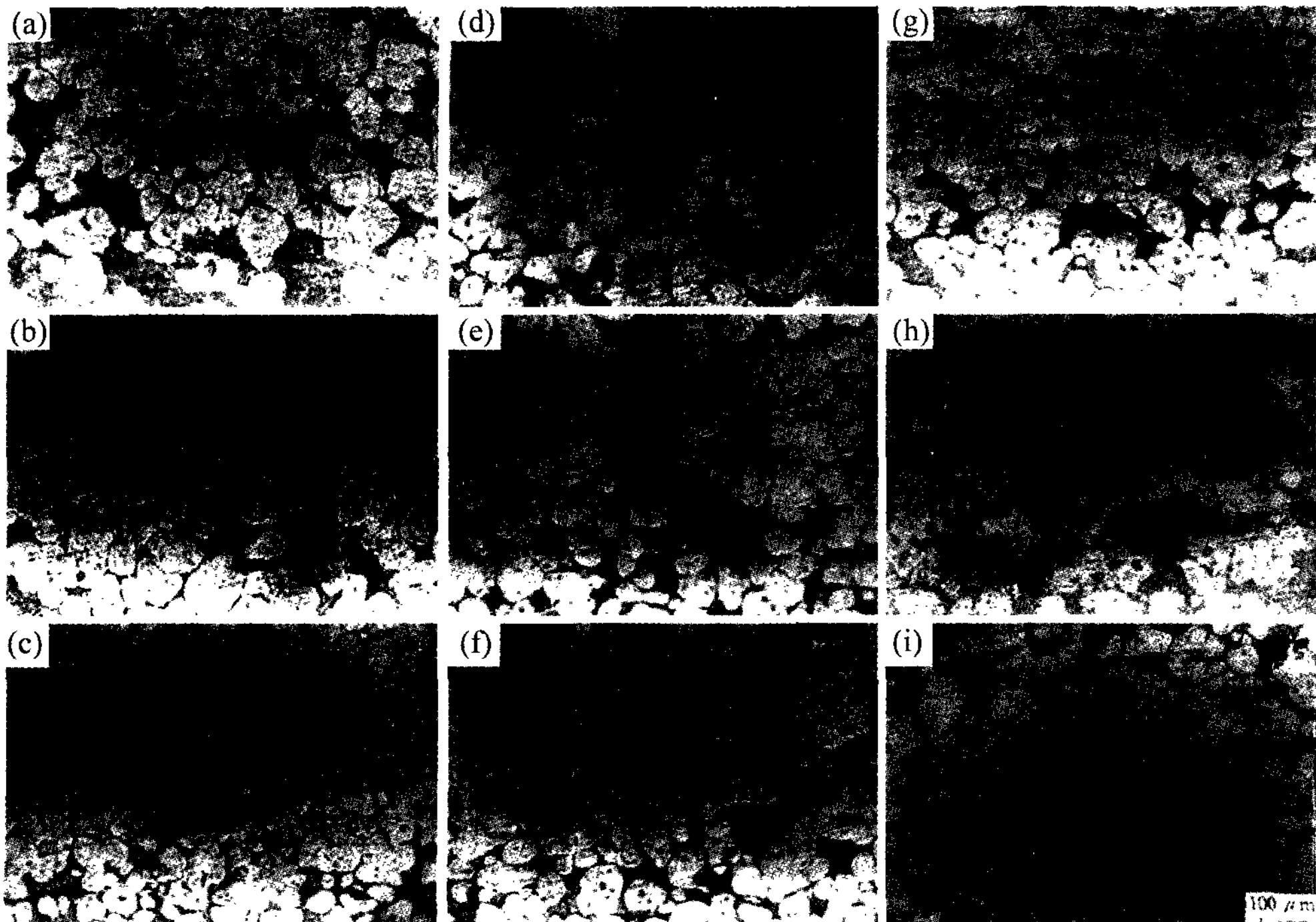


Fig. 10. Microstructures in the direction of the thickness for sample (n) of Fig. 5 with defects occurring in the rheology forming of an A357 alloy.

있는 인염계 첨가제 배합유의 개발 및 성능 분석이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

$d \times l = 76 \times 30$ (mm)인 A357, A390 및 ALTHIX 86S 소재를 이용한 레오로지 성형실험에 있어서 충전 거동 및 결함분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 레오로지 성형시 발생하는 표면 및 내부결함의 원인을 규명하였으며, 결함이 없는 레오로지 성형품을 얻을 수 있는 방안을 제안하였다.

2) 과공정 조성인 A390의 경우 높은 Si 및 Cu의 함유율로 인하여 유동성이 좋은 반면에 아공정 조성의 A357은 낮은 Si의 함유율로 인하여 유동성이 감소하였다. ALTHIX 86S의 경우는 아공정 조성이지만 Si와 Cu의 복합적인 작용으로 인하여 과공정 성향을 나타내기 때문에 합금별 결함부위의 위치가 다르게 나타났다.

3) 레오로지 성형품의 표면 칠층과 조직 불균일의 크기는 각각 $300 \sim 400 \mu\text{m}$ 및 $200 \sim 300 \mu\text{m}$ 정도로 관찰되었으며, Si 및 Cu의 함량이 많은 A390에서 두드러진 결함을 보였다.

후 기

이 논문은 1998년도 학술진흥재단의 연구 지원금 (1998-018-E00186)에 의하여 연구한 내용입니다.

참 고 문 헌

[1] P. Kumar, C. L. Martin and S. B. Brown : 3rd Int. Conf. on

Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 13-15, June, (1994) 37.

[2] P. Kumar, C. L. Martin and S. B. Brown : Metall. Trans. A, Vol. 24A (1993) 1107.

[3] M. Suery and M. C. Flemings : Metall. Trans. A, Vol. 13A (1982) 1809.

[4] C. G. Kang and D. W. Kang : J. of the Korean Soc. of Mech. Engineers, Vol. 21, No. 9 (1997) 1400.

[5] C. G. Kang and D. W. Kang : 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, Sheffield, UK, 19-21, June, (1996) 142.

[6] H. K. Jung and C. G. Kang : Key Eng. Mater., Vol. 177-180 (2000) 571.

[7] H. K. Jung and C. G. Kang : Metall. and Mater. Trans. A, Vol. 30A, No. 11 (1999) 2967.

[8] H. K. Jung and C. G. Kang : J. of the Korean Foundrymen's Soc., Vol. 19, No. 3 (1999) 225.

[9] M. Kiuchi and S. Sugiyama : 42th JSTP Conf., Tokyo University of Technology, Tokyo, Japan, 14-15, May, (1991) 647.

[10] G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski and M. Zillgen : J. Mater. Processing Tech., Vol. 45 (1994) 359.

[11] Metals Handbook : Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, Vol. 2, 10th Edition, (1990) 70.

[12] M. Garat, S. Blais, C. Pluchon and W. R. Lou : 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, Colorado, USA, 23-25, June, (1998) xvii.

[13] M. Garat : Symp. on Forming Technology of Semi-Solid Metals, Pusan National University, Pusan, Korea, 14, November, (1997) 105.

[14] H. K. Jung and C. G. Kang : J. of the Korean Institute of Metals and Materials, Vol. 38, No. 7 (2000) 951.

[15] C. G. Kang and H. K. Jung : J. of Mater. Eng. and Performance, Vol. 9, No. 5 (2000) 530.

[16] H. K. Jung and C. G. Kang : Key Eng. Mater., Vol. 177-180 (2000) 565.