

논문

알루미늄 합금의 소실모형주조 중 기포 형성 기구에 관한 연구

신승렬† · 한상원 · 이경환* · 이진형

The Study on the Formation Mechanism of Gas Pore During Lost Foam Casting of Al alloys

Seung-Ryoul Shin†, Sang-Won Han, Kyong-Whoan Lee* and Zin-Hyoung Lee

Abstract

The mechanism of the hydrogen gas pore formation was investigated in Lost Foam Casting of Al-alloy by reduced pressure test and real casting. The hydrogen gas pick-up was affected by the formed gas during the decomposition of polystyrene in addition to the liquid product. It depended on pouring temperature and a proper temperature of metal front gave the minimum hydrogen pick-up. At a low pouring temperature, the hydrogen went into the melt mainly from entrapped liquid product of polystyrene but pores were formed from the gas as well as the liquid product at a high pouring temperature. The mold flask evacuation down to 710torr decreased the gas porosity down by around 0.4% vol%. The entrapped decomposition product of polystyrene in the melt was observed through the visualization of filling behavior of Al alloy-melt with the high speed camera.

(Received September 19, 2003)

Key words: Lost Foam Casting, Hydrogen pick-up, Aluminum alloy, Polystyrene, Reduced pressure test.

1. 서 론

소실모형주조(LFC; lost foam casting process)는 복잡한 형상을 가진 산업용 주물 부품들의 생산에 있어서 현재 전세계적으로 선호되고있는 주조방법 중의 하나이다.

이 주조법은 1950년 H.F. Shroyer가 발포 폴리스티렌을 이용한 주조법을 개발하여 1958년 특허화 하였고, 미술 주물제작에 활용한 것이 그 시작이었다. 그 후 많은 연구가 진행되어 1960년에 A. Witmoser가 Shroyer로부터 특허권을 인수받아 full mold process라 칭하였으며, 1960년의 H. Nellen의 특허, 비점결사를 사용한 1964년의 T.R. Smith의 특허, 1966년의 R. Hofmann의 마그네트 주조법, 1968년의 Kryzanowsky에 의한 감압 full mould 법 등이 개발되어 왔으며 그 진보가 거듭되어 왔다[1].

현재 소실모형주조에 의해서 가장 많이 생산되고 있는 Al 합금 자동차용 주물품으로는 흡기다기관(inlet manifold)을 들 수 있으며, 이외에도 brake pump housing, cylinder head, engine block(four cycle-four stroke)등이 이 주조법에 의해서 생산되고 있다. 또한 LFC는 exhaust manifold, brake caliper, brake disk 등의 자동차용 주철 주물품 생산에도 많이 활용되고 있다.

특히 LFC에 주로 사용되는 재료인 폴리스티렌은 탄소 92wt.%, 수소 8wt.%의 화합물로서 Al 합금과 같은 저용점 합금의 주조 시에는 액체 분해물에 의해 주로 주조결함이 유발되며, 고온 주조 시에는 다량의 분해가스가 주조결함을 유발시키는 것으로 알려져 있다 [2-4]. 또한, 철계 합금에 있어서는 탄소에 의한 결함이 중요하게 작용한다[1]. 그러나 Al 합금의 주조온도구간에서도 다소 다량의 가스 분해물이 발생하는데, 700°C

한국과학기술원(Dept. of Materials Science and Engineering, KAIST)
*한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology)
†E-mail : mascie@kaist.ac.kr

에서 약 40wt.%의 가스 분해물이 발생한다고 보고된 바 있다[5]. 그러므로 기포를 제어하여 건실한 주물을 얻기 위해서는 이에 대한 영향을 고찰해볼 필요가 있으며, 본 연구에서는 여러 주조조건에서 발생하는 수소가스 기포결함의 발생기구를 조사하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1의 장치는 폴리스티렌의 분해로 생성된 가스가 알루미늄 용탕의 수소 용해 정도에 어떻게 영향을 미치는 지 조사하기 위해 고안되었으며, 아래의 두 가지 실험방법이 사용되었다.

1. 석영(quartz) 플라스크 안에서 EPS(expanded polystyrene)의 부분적인 분해

석영 플라스크 안에 있는 EPS가 투명한 액체로 플라스크 바닥에 생성될 때까지 분해되었으며, 생성된 가스는 석영 튜브를 통해 용탕으로 주입되었다. 이렇게 준비된 용탕을 이용하여 감압주조시험을 수행하였다. 이때 준비된 용탕의 무게는 200 g이었으며, 석영 플라스크 안에 준비된 EPS는 용탕과 같은 부피(0.78wt.%)와 두 배의 부피(1.56wt.%)를 가지도록 각각 준비하였다. 그리고 반응 중에 로 내의 온도는 각각 650°C와 700°C로 유지 되었다.

2. 석영 플라스크 안에서 EPS의 완전분해

석영 플라스크 안에서 EPS는 완전히 기체로 분해하여 carbon black을 형성할 때까지 반응하였으며, 이렇게 준비된 용탕을 이용하여 감압시험을 수행하였다. 준비된 시편들은 Archimedes 법을 이용하여 밀도를 측정

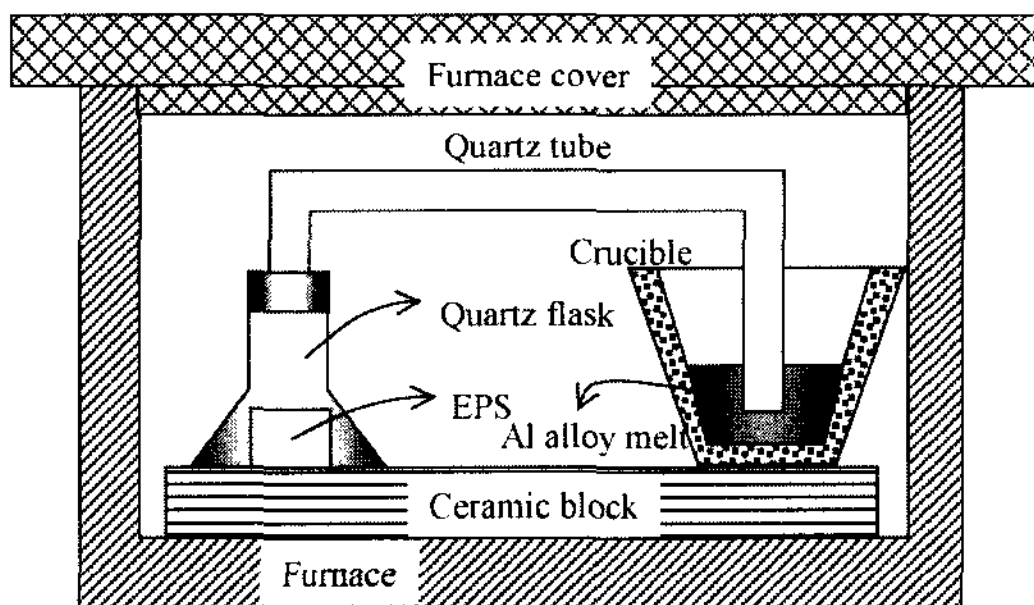


Fig. 1. Schematic apparatus of set designed to investigate the effects of gas products on the hydrogen gas pick-up in the melt.

하였고 이를 다시 수소량으로 환산하였다[6-9].

Fig. 2 (Test Casting-T)는 실제적인 소실모형주조에서 수소기포가 형성되는 정도를 조사하기 위해 만들어진 주조체의 모양을 나타낸다. 이 주조시험에 대한 패턴은 각각 다른 두께의 채널(17, 11, 7 mm)을 가졌으며, 이것은 sprue base에 hot melt를 이용하여 부착되었다. 그리고 상용 알루미늄 합금용 단열코팅(EBACOTE)으로 약 0.18 mm 두께로 패턴을 코팅하였으며, 코팅의 두께는 무게 측정법을 이용하여 결정하였다. 코팅된 패턴을 주형 플라스틱 내에 설치하고 비점결사로 채워넣으며 진동을 가하였으며 모래 충전은 약 10분간 수행되었다. 이렇게 준비한 후, 주형 플라스틱의 감압 중 감압 손실을 최소화하기 위해 상부에 비닐커버로 밀봉하고, 다시 위에 용탕이 튀어 녹지 않도록 모래로 다시 덮었다. 이렇게 준비된 몰드를 모래 내부의 압력이 93.4 kPa(710 torr)가 되도록 감압하였으며 몰드 상단의 주입컵을 통해 Al 합금 용탕 (A356)을 주입하였다. T형 주조시험에서는 주입온도를 680°C에서 830°C까지 변화시켰으며, 동시에 진공을 걸어주지 않은 경우와 진공을 걸어준 경우로 나누어 실험하였다. Fig. 2의 (b~g)는 각 조건에서 주조된 모양을 나타낸다. 주조 시 주조품의 채널은 밀도를 구하기 위해서 40 mm의 길이로 절단되었으며, 시편들의 기공량이 측정되었다. 또한, 기공형성에 대한 기구를 조사하

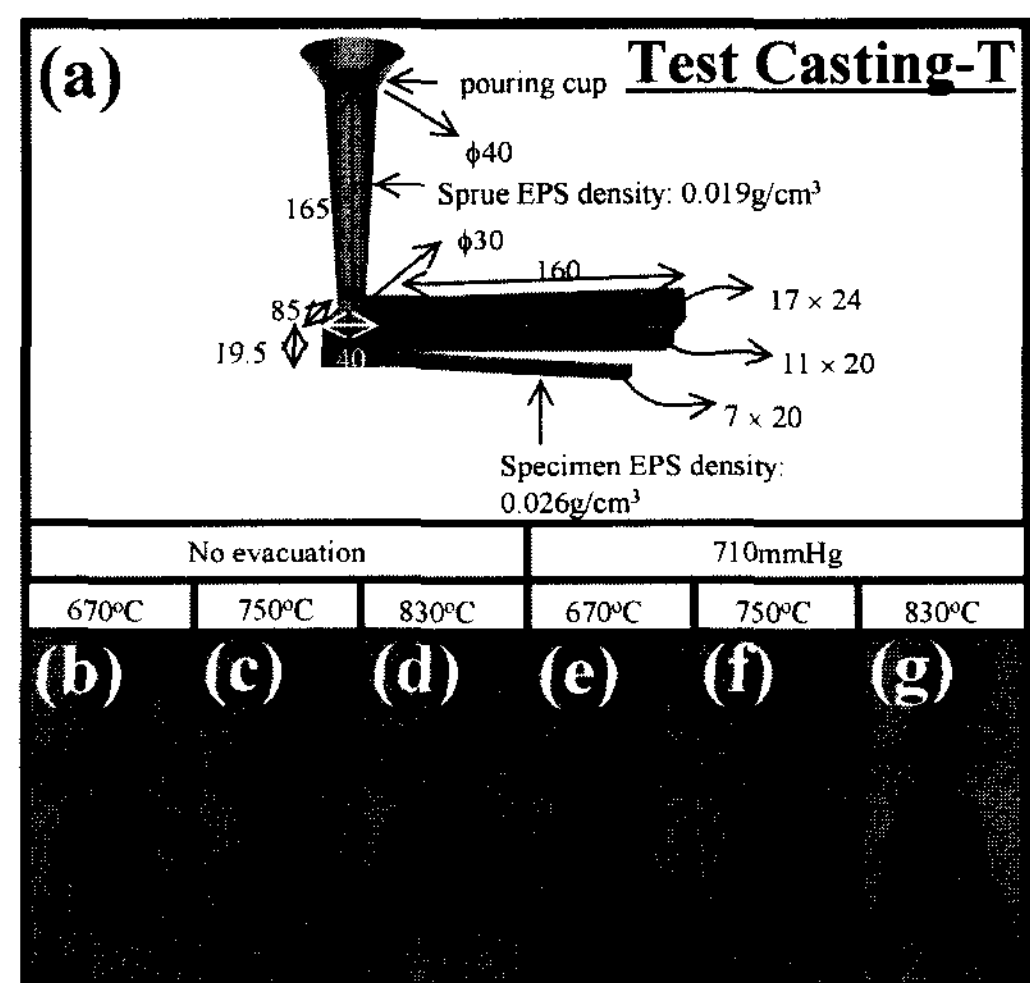


Fig. 2. Test casting-T for the investigation of effects of pouring temp., casting thickness and mold flask evacuation on the hydrogen gas pick-up in the Al alloy melt; coating thickness = 0.18 mm.

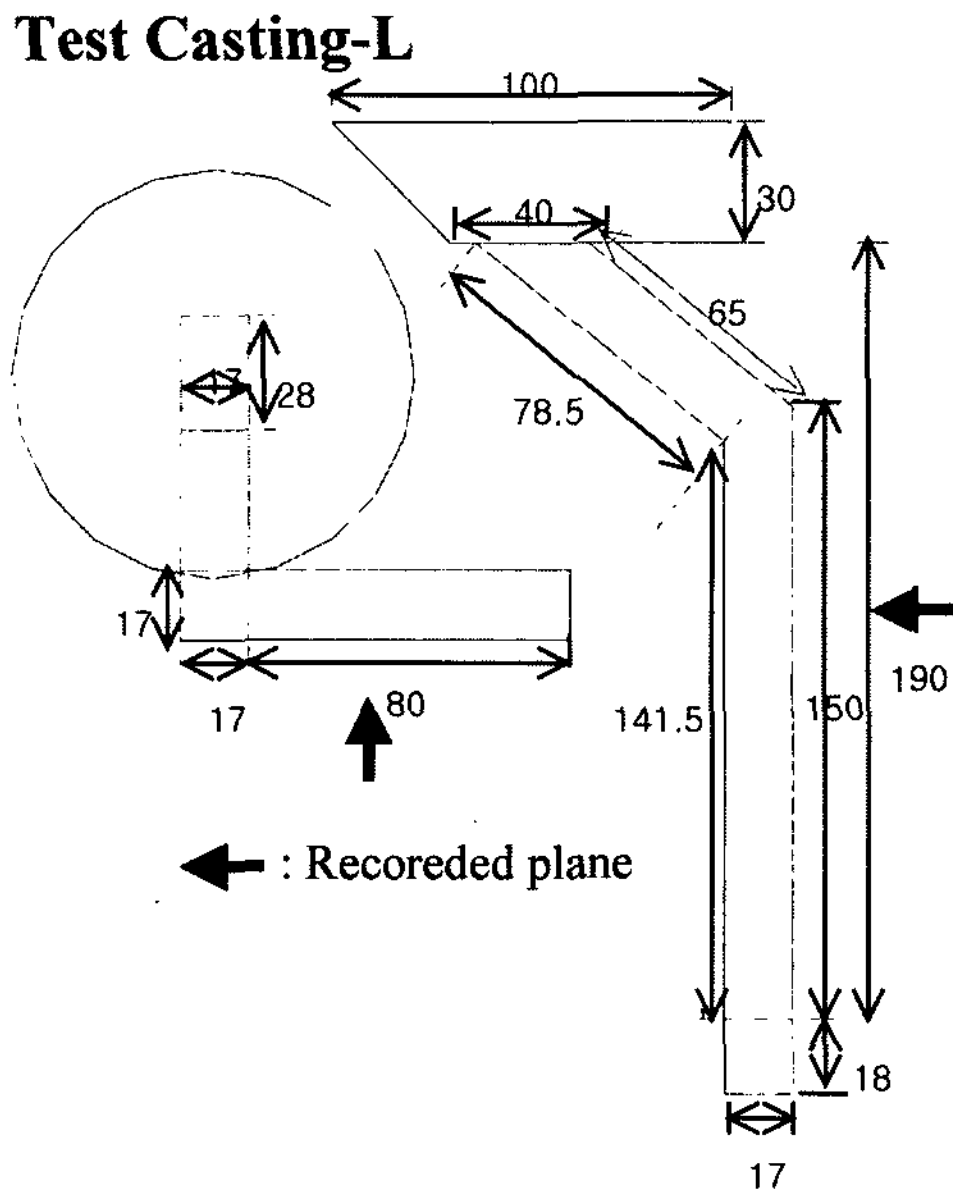


Fig. 3. The shape of test casting-L to visualize the filling behavior of the melt during LFC.

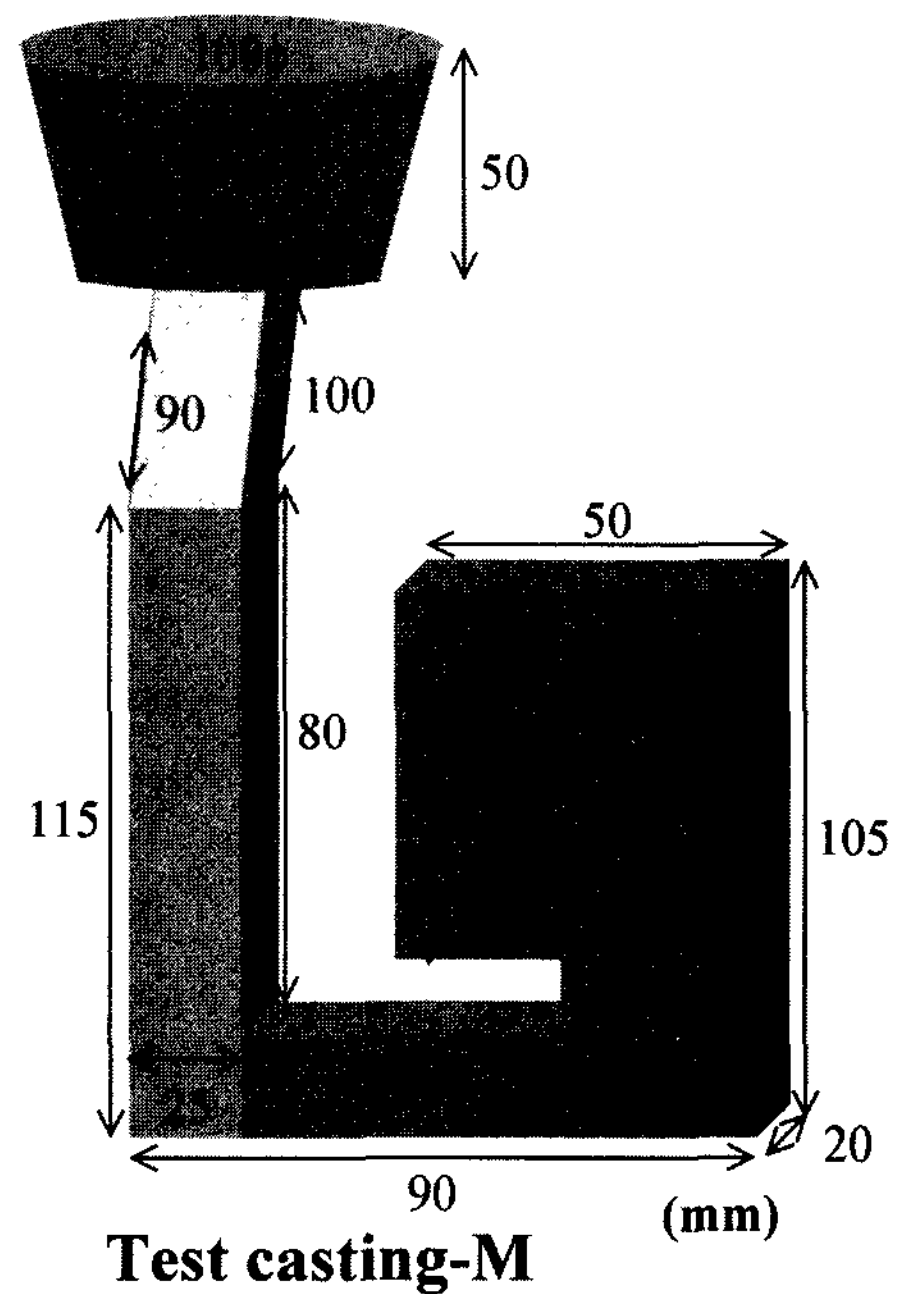


Fig. 4. Test casting-M to visualize the filling behavior of the melt.

기 위하여 기공 내부의 탄소량을 EDS 및 WDS 분석을 이용하여 측정하였다.

Fig. 3 (test casting-L)은 Al 합금 용탕의 충전 중에 EPS 몰드와 용탕선단의 반응을 가시적으로 관찰하기 위해 고안한 패턴 형태로서 패턴의 한면은 투명한 석영 윈도우를 가진 플라스틱 내에서 윈도우의 면에 부착되었고 나머지 면들은 약 0.2 mm까지 단열코팅을 하였다. 그리고 용탕의 주입과 동시에 고속카메라를 이용하여 충전 거동을 기록하였으며 주입은 770°C에서 수행되었다.

Fig. 4 (test casting-M)는 용탕 선단의 반응층이 크게 형성하도록 단면을 두껍게 하였고, 패턴, 용탕 및 반응층의 용이한 식별을 위해 패턴의 표면을 수성잉크로 도포하였으며, 잉크의 수분이 남아 있지 않도록 오랜 시간 건조하였다. 이 때 용탕의 주입은 test casting-L의 조건과 동일한 770°C에서 이루어졌고 충전 거동은 일반 동영상 카메라를 이용하여 기록하였다.

3. 실험결과 및 검토

Fig. 5는 EPS의 가스 분해물 만을 알루미늄 합금 용탕과 반응시킨 후 수소농도를 측정한 결과를 나타낸다. EPS를 부분 분해한 경우 분해시간은 약 5초 정

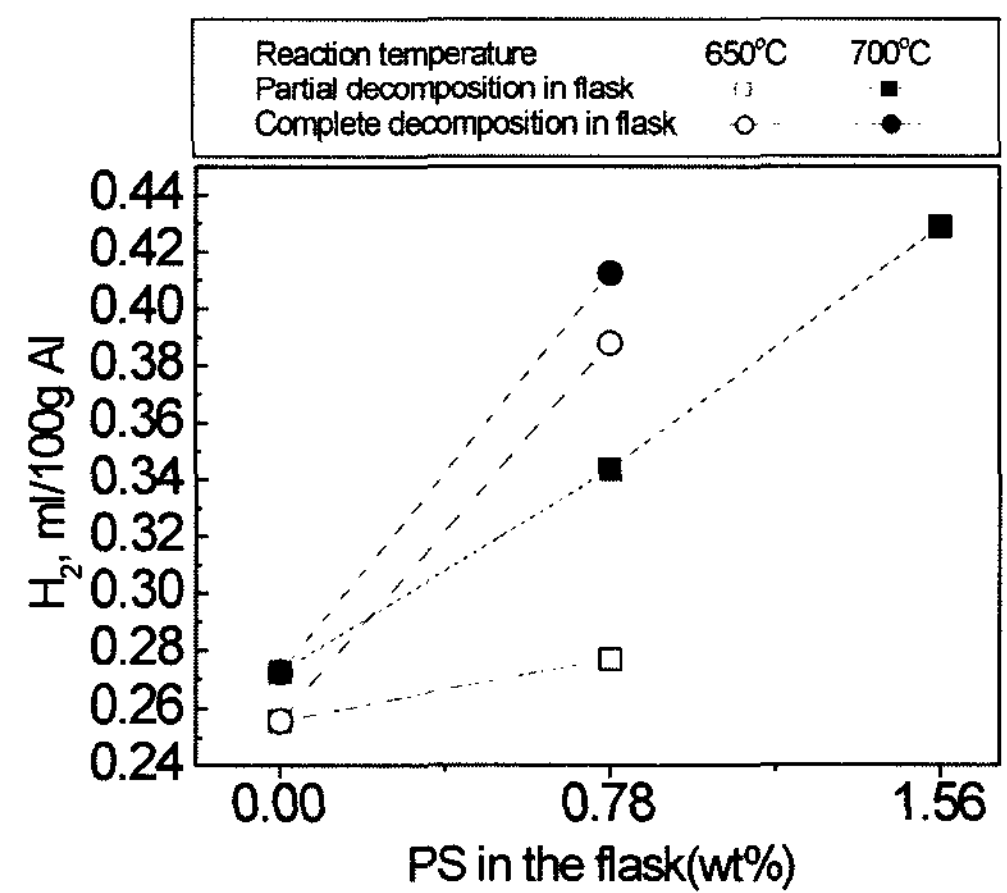


Fig. 5. Effect of the only gas products of polystyrene on hydrogen gas pick-up.

도 소요되었으며, 완전 분해한 경우 약 10초 정도의 시간이 소요되었다. EPS 자체를 직접 용탕과 반응시킨 선례의 경우에 반응량과 반응시간에 의존하여 수소량이 증가하는 것을 보인 바가 있으나[9], 단지 가스 상만을 반응시킨 경우에도 용탕의 수소가스용해가 관찰되었다. 일반적으로 소실모형주조에서 Al합금 주조체

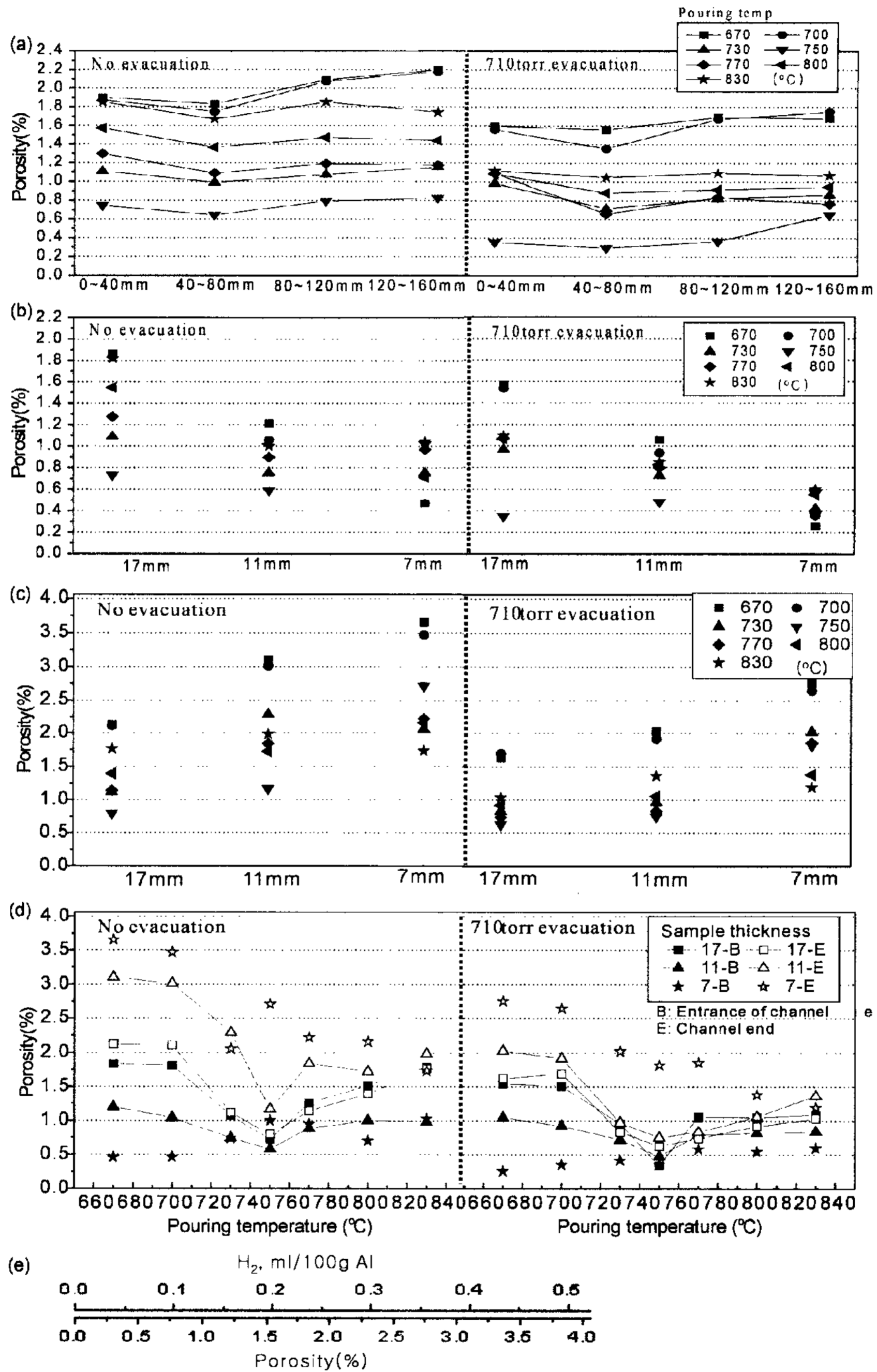


Fig. 6. Variation of porosity amount (a) in longitudinal direction of the leg with 17 mm thickness, (b) the channels with cross section of 17×24, 11×20 and 7×20 mm and the effect of flow channel entrance, (c) the effect of flow channel end (d) the effects of pouring temperature in entrance and end of channels, (e) relationships of scales between porosity and hydrogen concentration.

내의 기공결함은 EPS의 액체 분해물에 의해 생성되는 것으로 알려져 있으나[3,4] 본 실험에서는 EPS의 가스

분해물이 실제 공정 중에도 용탕의 가스용해에 영향을 줄 수 있음이 확인되었다.

Fig. 6(a)는 Fig. 2의 T형 시험주조에서 여러 가지의 주입온도에서 가장 단면적이 큰 (17×24 mm: 모듈 = 4.946 mm)채널시편에서 기공도 분포를 보여준다. 가장 적은 기공도는 750°C의 주입온도에서 감압을 한 조건에서 얻을 수 있었으며 이 때의 기공도는 대략 0.3vol.%의 값을 가졌다. 대부분의 시편의 경우에 기공도는 시편의 위치가 채널의 끝으로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며, 93.4 kPa(710 torr)의 감압은 약 0.4vol.%정도의 기공도를 감소시켰다. Fig. 6(b~c)는 모든 세 개의 채널(17, 11(모듈 = 3.537 mm), 7 mm(모듈 = 2.4 mm) 두께)의 입구 부분과 끝부분에서 기공도 분포를 각각 보여 준다. Fig. 6(b)의 채널의 입구부분에서는 채널의 두께가 증가할수록 더 많은 기공도를 나타내었는데, 이는 채널의 두께가 증가할수록 늦게 응고하여 기공형성이 용이하였기 때문으로 사료된다(sprue effect). 반면 Fig. 6(c)의 채널의 끝부분에서는 채널두께가 감소할수록 기공도가 증가하였다. Fig. 6(d)에 세 개의 채널의 입구부분(-B)과 끝부분(-E)의 기공도를 주

입온도의 함수로 나타내었다. 각각의 채널에서 최소 기공도를 나타내는 최적의 주입온도를 관찰할 수 있으며, 17 mm와 11 mm의 두께의 경우에는 750°C에서 최소 기공도를 가졌다. 그러나 7 mm 두께를 가지는 채널의 경우 최소 기공도를 보이는 최적 주조온도는 800°C로 증가하였다. 주조체 내에 최소 기공도를 나타내는 최적의 용탕선단온도가 존재하는 것은 특정 온도 구간에서 용탕선단에 형성되는 패턴분해물이 코팅을 통해 배출되는 속도와 용탕이 흘러 들어가는 속도와 거의 일치하여 용탕으로 혼입되는 패턴 분해 생성물양이 적기 때문인 것으로 사료되며, 너무 높은 용탕온도에서는 증가된 용탕의 와류와 늦은 응고 시간 등으로 높은 기공도를 보이는 것으로 사료된다. 반면에 너무 낮은 용탕온도는 더 많은 액체 EPS 분해 산물을 생성시키고 더 많은 액체 생성물을 용탕이 포획하도록 할 것이다. 이에 대한 토론은 나중에 보여질 Fig. 8의 기공 내 탄소함량의 측정결과와 기공형성 기구를 나타내는 Fig. 9로부터 다시 설명될 것이다. 주형 플라스틱의 감

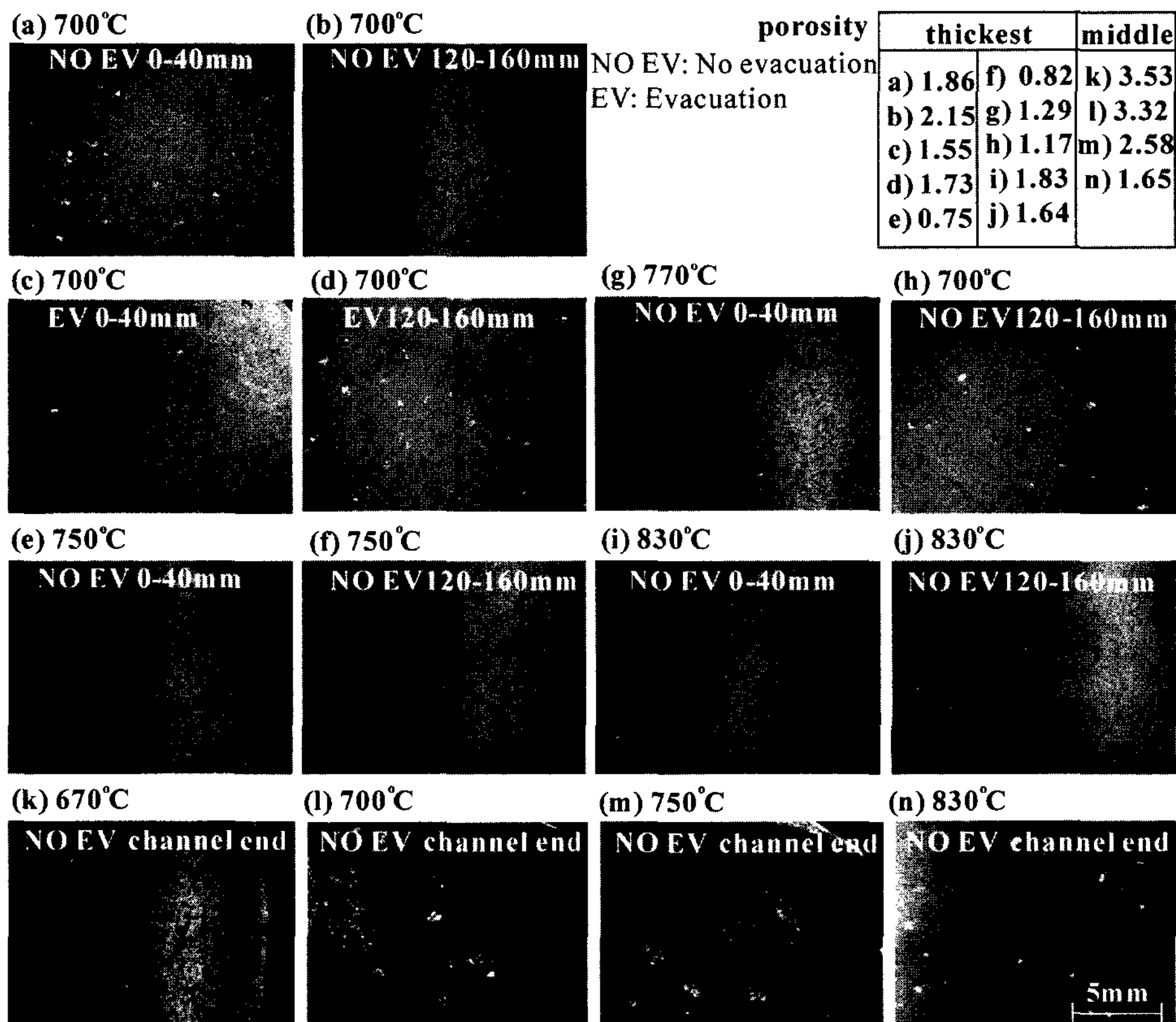


Fig. 7. Macrostructures of thickest samples (a~j) and middle thickened samples(k~m) in different casting conditions.

압은 모든 경우에 기공도를 감소시켰다. 그림 6(e)는 모든 기공이 수소가스에 의해 생성되었다는 가정 하에서 기공도와 수소농도 사이에 관계를 나타낸다.

Fig. 7(a~j)는 가장 단면적이 큰 시편(두께 17 mm)에서 각각 다른 기공도를 보이는 시편들의 기공분포 사진을 보여준다. 기공도가 크게 나타난 700°C (Fig. 7(a,b))와 830°C(Fig. 7(i,j))의 경우, 기공의 수가 많고 기공의 크기가 비교적 큰 것을 알 수 있다. Fig. 7(a,b)에 비해 동일한 주조조건에서 감압을 한 Fig. 7(c,d)의 경우에 기공의 분포도가 더욱 줄어들 것을 알 수 있다. 750°C에서 주조한 Fig. 7(e,f)의 경우에 확연히 기공의 분포가 줄어드는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 7(k~n)은 중간 크기를 가지는 채널 끝부분의 미세조직을 보여준다. 용탕이 충전 중에 채널의 중간에서 응고된 시편들의 경우(Fig. 7(k~m)) 매우 큰 기공크기와 수축결함 및 표면부위에 포획된 EPS의 기화로 생긴 덩굴(dimple)들이 관찰되었다. 그러나 완전히 채워진 Fig. 7(n)의 경우에는 기공은 비교적 크나 큰 수축결함이나 덩굴은 관찰되지 않았다. 그러므로 Fig. 7에서 용탕이 유동 도중에 응고된 경우에는 기공도가 2% 이상의 값을 갖는 반면 완전히 채워진 경우에는 2% 이내의 값을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 가스 기공들이 포획된 액체 EPS로부터 형성되었는지 아니면 용탕 내에 포획된 수소가스에 의해 형성되었는지 조사하기 위해 채널에 형성된 기공 내부를 EDS로 탄소함량을 측정 한 결과를 보여준다. 17 mm의 두께를 갖는 시편의 경우, 최대 탄소 함량은

700°C에서 주조된 시편에서 약 8wt.% 정도의 값을 가졌고, 750°C와 830°C까지의 용탕온도에서 약 3wt.%까지 감소하였다. 폴리싱 된 시편표면의 기지는 탄소함량을 거의 나타내지 않았다(0.2wt.% 이내, 그러나 대부분 0wt.%). 11 mm-또는 7 mm-두께의 채널에서의 기공들은 10-13% 정도의 높은 탄소 함량을 보였다. 이들 기공들은 얇은 채널의 끝에 존재하는 큰 기공들이었으며 기공들은 아마도 포획된 액체 EPS에 의해 생성된 것으로 추측된다(Fig. 7(k~m)). 기공이 소실모형주조 중에 형성되는 방법에는 세 가지가 있다. 첫 번째 방법은 포획된 액체 EPS의 기화에 의한 기포 형성이다. 두 번째 방법은 포획된 기체 EPS에 의한 기포형성이다. 마지막 방법은 용탕 내에 포화 용해된 수소가스에 의한 형성이다. 기공형성이 어떻게 형성되었느냐에 따라 탄소농도는 다를 수 있는데, 첫 번째 방법에 의해 형성된 기공의 경우의 탄소농도가 가장 높을 것이고, 나머지 다른 방법들에 의해 형성된 기공들은 중간 정도이거나 아주 적은 탄소 농도를 보일 것이다. Fig. 8로부터 기공들이 세 가지의 모든 방법으로부터 형성되었음을 알 수 있으며, 그래프에서 ×기호는 결과의 신빙성을 조사하기 위해 WDS로 분석한 결과이며, 대부분 EDS의 결과의 범주 내에 있음을 알 수 있다. 즉, 두꺼운 시편의 낮은 주입온도에서나 얇은 시편에서의 높은 탄소함량은 기포가 포획된 액체 EPS에 의해 생성되었고, 높은 주입온도에서의 낮은 탄소 함량은 기포가 다량의 가스 분해물과 일부 크기가 작은 액체 분해물에 의해 생성되었음을 의미한다.

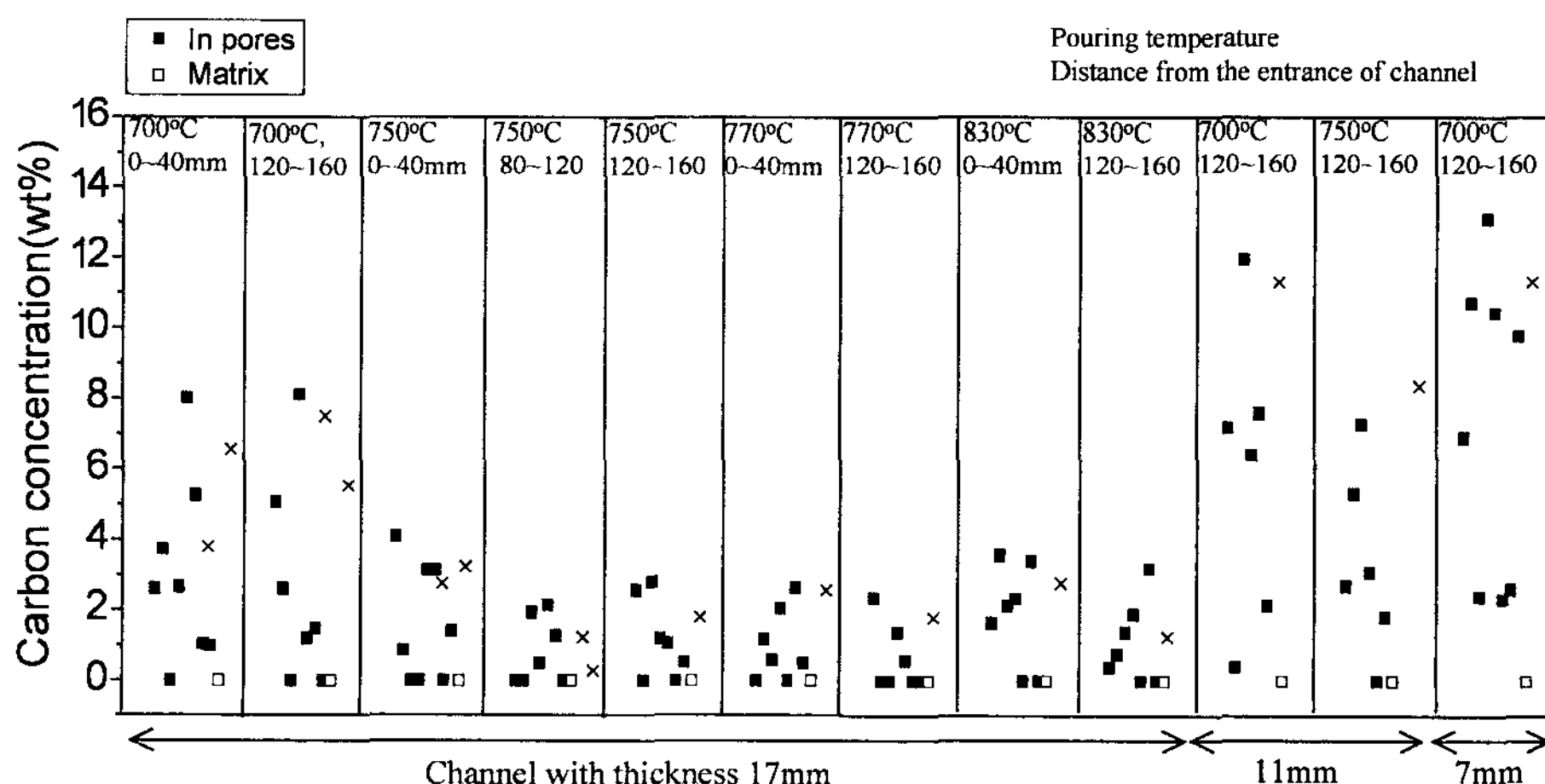


Fig. 8. Carbon concentrations in pores of test casting-T.

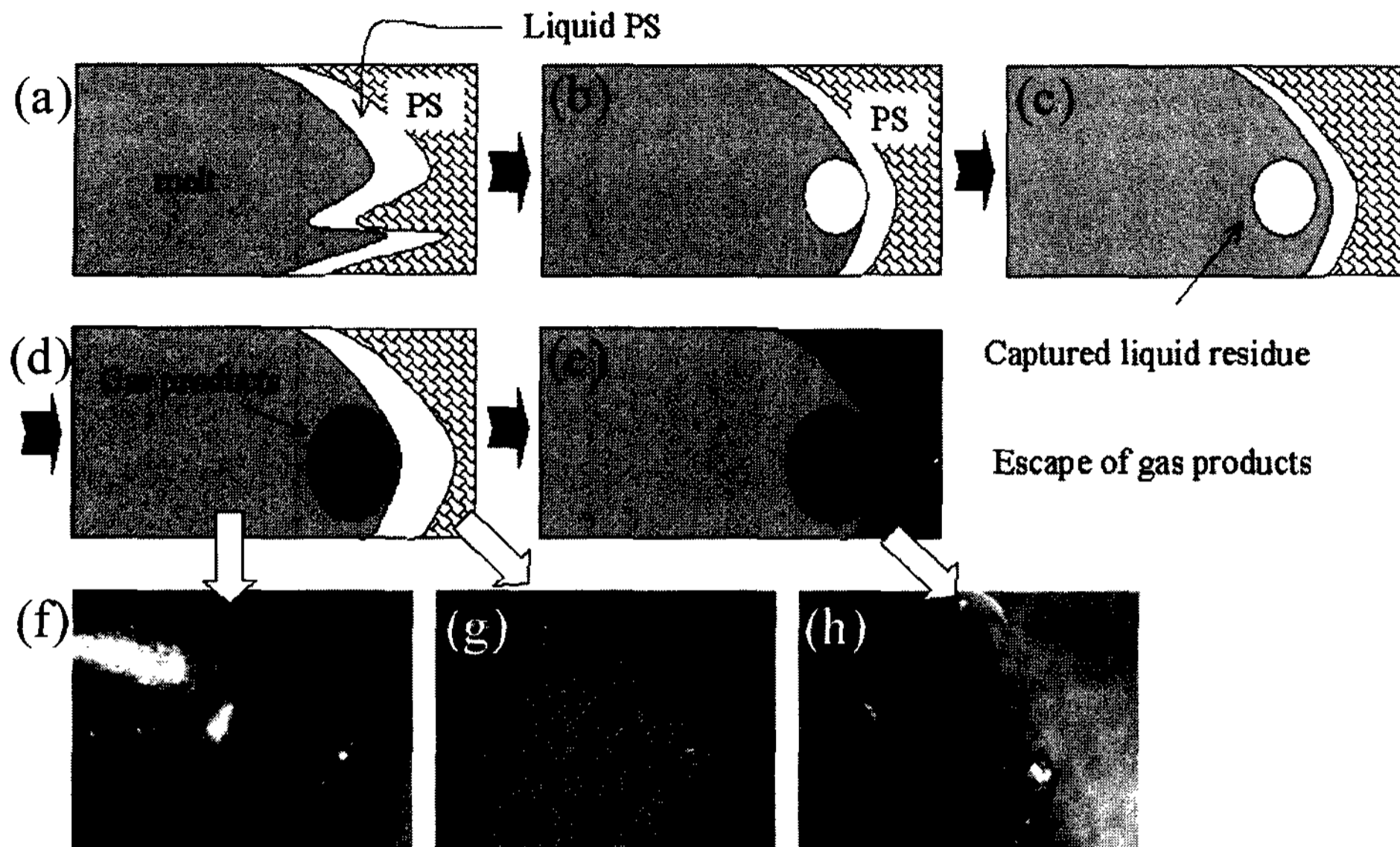


Fig. 9. Model on the pore formation of captured liquid residue.

Fig. 9는 Fig. 7(k~m)과 같은 포획된 EPS가 어떻게 주조체의 표면이나 내부에 큰 표면 덩어리나 큰 기공을 형성하는지 모식도와 그런 예를 보여주는 사진을 함께 나타내었다. 그 과정은 그림에서 볼 수 있듯이 용탕의 불규칙한 유동에 의해 (Fig. 9(a)) 용탕 내에 포획되고 (Fig. 9(b,c)) 포획된 EPS는 용탕 내에서 액화 및 기화의 과정을 겪는다(Fig. 9(d)). 기화된 EPS의 기체 압력이 용탕표면을 뚫고 나올 만큼 크지 않을 때는 Fig. 9(f,g)와 같이 주조체의 내부에 남게 된다. 그러나 압력이 크고 용탕의 선단에 근접해 있는 경우 Fig. 9(e,h)와 같이 표면에 덩어리를 형성하게 된다. 그러나 여기서 포획된 EPS는 액체 분해물로 가정을 하였으나 탄소량 분석에서 나타난 것처럼 가스 분해물일 수도 있다.

Fig. 10은 Fig. 3 (Test Casting-L)의 채널에서 용탕의 충전 거동을 보여주며, 평균 약 5 cm/sec의 용탕충진 속도를 나타내었다. 그림에서 화살표가 지시하는 흰 점으로 나타나는 부분들은 용탕선단에서부터 생기면서 용탕이 진행하였고, 이는 용탕에 의해 포획된 EPS의 분해 생성물인 것으로 추정된다. 그러나 이 경우 반응층(kinetic zone)의 구별은 용이하지 않았고, 반응층의 식별을 용이하기 위해 큰 단면적을 갖도록 설계한 패턴(Fig. 4)에서의 충전 거동을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 화살표는 용탕의 선단을 의미하며, Fig.

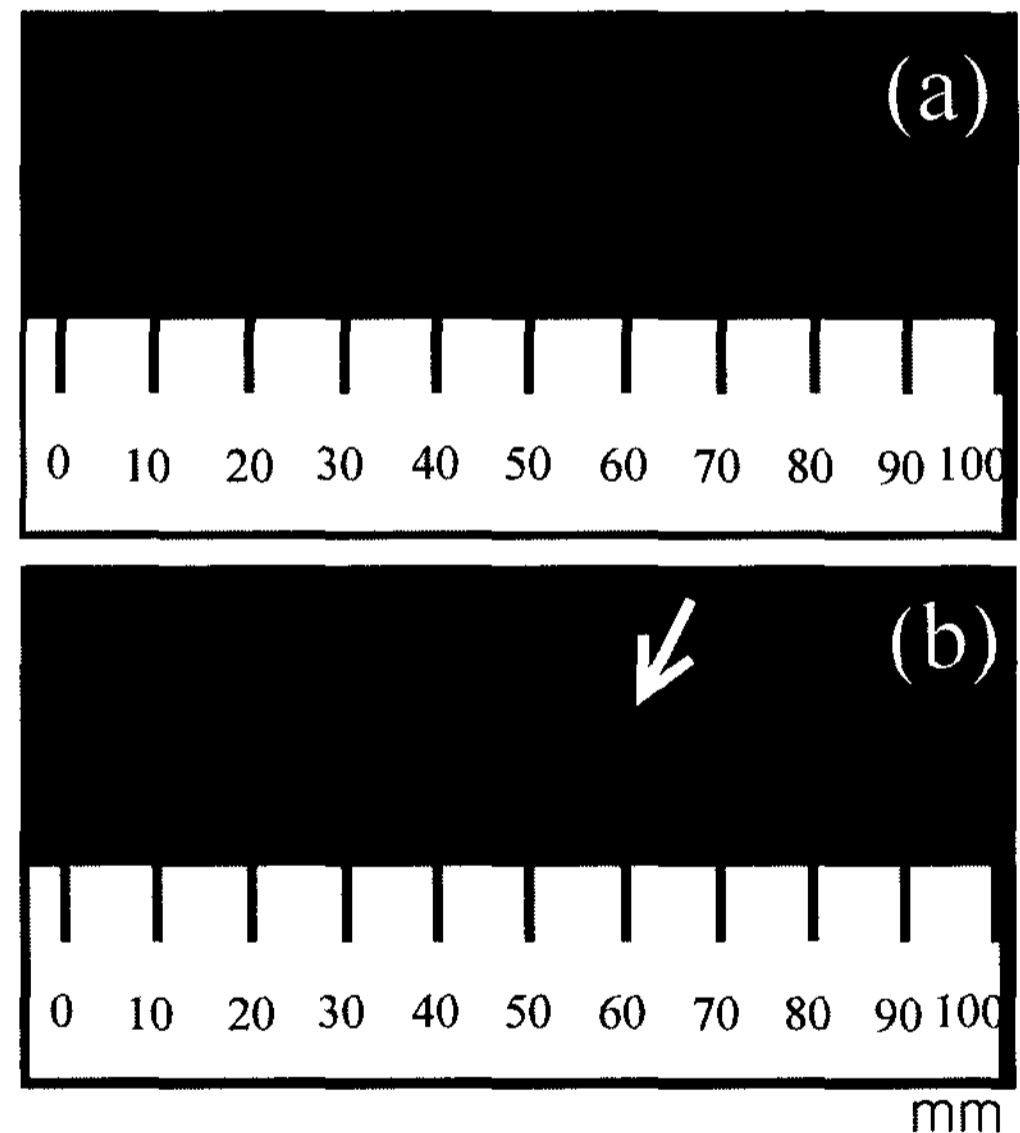


Fig. 10. The taken photographs by using high speed camera in test casting-L during the casting.

11의 (c)와 (d)의 용탕선단부분의 앞쪽으로 흰색으로 변한 부분을 관찰할 수 있었다. 750°C에서 가스층을 관찰한 S. Shivkumar et al.[5]의 결과로부터 이 부분이 반응층(kinetic zone)에 해당하는 것으로 추측되며, 액체 분해물만이 아니라 가스 분해물도 다량 포함하고 있을 것으로 사료된다. 이는 알루미늄합금에서도 주조

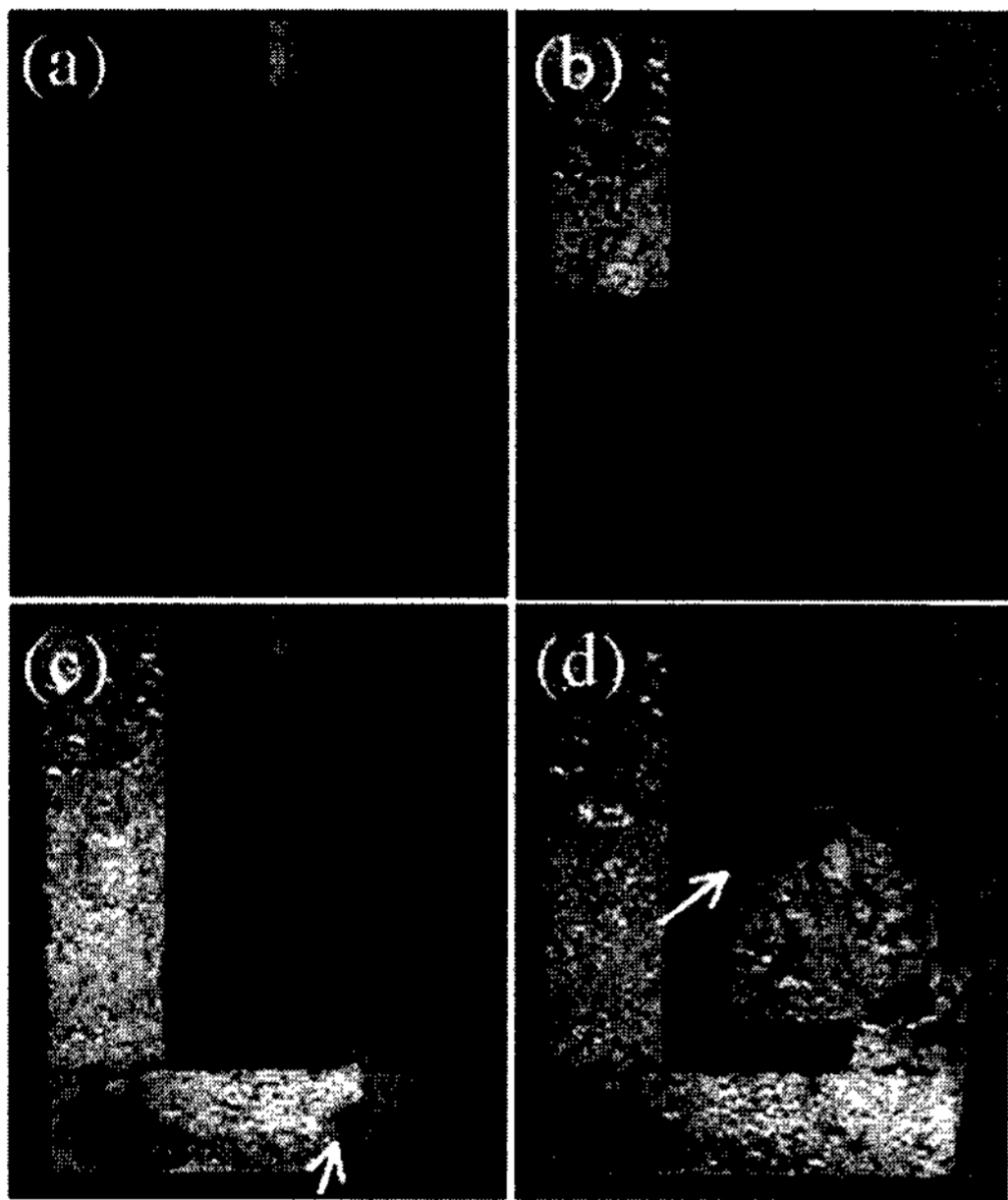


Fig. 11. Filling behavior of the melt in Test Casting-M (a) 0sec, (b) about 2sec, (c) about 5sec, (d) about 7sec.

조건에 따라 즉 높은 주입온도나 두꺼운 주조단면과 같은 조건인 경우 가스 생성물층이 용탕선단에 충분히 생성될 수 있음을 나타낸다.

4. 결 론

1) 소실모형주조에서 Al합금의 수소가스 pick-up은 EPS의 액체 분해물 뿐만 아니라 가스 분해물에 의해서도 영향을 받았다.

2) Al 합금의 수소용해는 유동길이방향에 걸쳐 증가하는 경향을 보였으며, 주형 플라스크 내 감압은 기공도를 감소시켰다.

3) 최소 기공도를 나타내는 최적의 용탕선단온도가 존재하였으며, 낮은 주입온도에서는 상대적으로 많은 액체 분해물의 용탕 내로의 포획에 의해 기포결함이 발생하였고, 높은 주입온도에서는 액체 분해물 뿐만 아니라 기체 분해물에 의해서도 영향을 받았다.

4) 용탕의 유동 중에 응고된 주조체의 경우 큰 패턴 분해물의 조각의 혼입으로 내부에 큰 기공결함을 남겼

으며, 대부분 2 vol.% 이상의 기공도를 보였으며, 패턴 분해물이 용탕 내로 혼입되는 과정이 제시되었다.

5) 패턴 재료의 분해물이 용탕 충전 중 용탕 내로 혼입되는 과정이 시각적으로 관찰되었으며, 비교적 높고 단면이 커서 가스 분해물이 많이 생성되는 조건에서는 반응층이 두껍게 발달하는 것이 관찰되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 2002년도 국가청정생산기술사업과 BK21사업 및 NRL의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] E. Y. Park and S. H. Kim : J. of the Korean Foundrymen Society, " The Influence of Casting Process Parameters on the Formation of Casting Defects in Costable Al MMC (Duralcan) Material Cast by Lost Foam Casting Process", 16 (1996) 5-10.
- [2] I. M. Park, J. C. Choe, and T. W. Nam : J.of the Korean Foundrymen Society, "Casting Defects in Evaporative Pattern Casting", 12 (1992) 285-290.
- [3] R. P. Walling and J. A. Dantzig : Transactions of the AFS, "Mechanisms of Mold Filling in the EPC Process", 102 (1994) 849-854.
- [4] L. Wang, S. Shivkumar, and D. Apeian : Transactions of the AFS, "Effects of Polymer Degradation on the Quality of Lost Foam Castings", 98 (1990) 923-933.
- [5] S. Shivkumar, X. Yao, and M. Makhlof : Scripta Metallurgica et Materialia, 33 (1995) 39-46.
- [6] Rosenthal, H. and S. Lipson : Transactions of the AFS, "Measurement of Gas in Molten Aluminum", 64 (1955) 301-305.
- [7] Sulinski, H. V. and S. Lipson : Transactions of the AFS, " Sample for Rapid Measurement of Gas in Aluminum", 67 (1959) 56-64.
- [8] Church, J. C. and K. L. Herrick : Transactions of the AFS, "Quantitative Gas Testing for Production Control of Aluminum Casting Soundness", 78 (1970) 277-280.
- [9] S. R. Shin, H. J. Choi, K. W. Lee, and Z. H. Lee : J. of the Korean Foundrymen Society, "Hydrogen gas pick-up of Al-alloy Melt during Lost Foam Casting", 22 (2002) 167-173.