

논문

알루미늄 합금 소실모형주조재의 밀도 및 기계적 성질

김기영[†] · 오돈석 · 최경환^{*} · 조규섭^{*} · 이경환^{*}

Density and Mechanical Properties of Aluminum Lost Foam Castings

Ki-Young Kim[†], Don-Suk Oh, Kyeong-Hwan Choe^{*}, Gue-Serb Cho^{*}, and Kyung-Whoan Lee^{*}

Abstract

Gas porosity which is a common defect in aluminum alloy casting, is also thought to be severer in aluminum alloy castings produced by lost foam process due to the pyrolysis of the polystyrene foam pattern during pouring. Fundamental experiments were carried out to evaluate the effect of process variables such as the melt treatment, the cooling rate and pouring temperature on the density and mechanical properties in A356.2 castings with simple bar shape. The density of grain refined specimen was slightly lower than that of degassed one, but was higher than that of no treated one and that of shot ball packed specimen was higher than the other specimens. The tensile strength and elongation were in the ranges of 200~230MPa and 0.5~1.5% respectively. The density and hardness of lost foam cast specimens decreased with increase in pouring temperature.

Key words: Lost foam casting, Mold packing material, Porosity, Density

(Received December 7, 2003 ; Accepted April 10, 2004)

1. 서 론

소실모형주조법은 비교적 새로운 주조기술이며, 현재 점차 제조업 관련자들 사이에 신뢰가 쌓여 가고 있는 주조공법이다[1]. 특히 최근에는 수송기계의 경량화 추세에 발맞추어 알루미늄합금 부품의 소실모형주조에 의한 생산량이 증가하고 있는 추세이다. 알루미늄합금 주조 시 가장 큰 문제는 바로 기공의 존재인데, 기공은 기계적 성질에 큰 영향을 미치고, 특히 신율 및 피로 강도에 미치는 영향은 매우 크다고 알려져 있다[2].

소실모형주조법에서는 모형으로 사용되는 발포 폴리스티렌이 용융금속으로 치환되는 과정에서 발생하는 액상 생성물 및 가스로 인하여 특히 기공의 발생이 많고 따라서 기계적성질에 직접 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 이러한 연소분해로 인하여 생기는 결함으로는 내부기공, 블리스터, 탕주름, 이중충전 및 표면 박리 현상 등을 들 수 있다[3].

내부기공은 주입 중 용탕에 갇힌 액상 발포 폴리스

틸렌 때문에 생긴다. 금속이 응고하기 전에 이 액상생성물이 모두 주형 밖으로 빠져나가면 결함이 생기지 않으나, 연소분해로 인하여 생긴 가스가 부분적으로 응고된 금속 안에 갇히기 때문에 결과적으로 결함이 남게 된다[4].

통상의 주물에서도 기공은 많이 발생하는데 이의 주된 원인으로는 용탕 주입 중의 난류 때문에 주변의 가스가 탕류에 휘말려 들어가기 때문이다. 소실모형주조에서는 주형공간이 비어 있지 않고 발포 폴리스티렌으로 채워져 있으므로 통상의 주조법과 용탕 충전 양상이 달라서 용탕 주입 시의 난류는 통상의 주조법보다 덜할 것으로 보이지만, 발포 폴리스티렌의 연소 가수량이 많으므로 통상의 주조법에 비하여 기공량이 많을 것으로 생각할 수 있다.

본 연구에서는 용탕의 처리, 주형 충전재 및 주입온도 등을 달리하여 알루미늄합금의 소실모형 주조 시에 발생하는 기공의 정도와 경도 및 인장강도 등의 기계적성질을 살펴보았다.

한국기술교육대학교(Dept. of Materials Engineering Korea University of Technology and Education, Chonan, 330-860, Korea)

*한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 404-817, Korea)

†E-mail : simha@kut.ac.kr

2. 실험 방법

소실모형 주조장치의 개략은 전보와 같다[5]. 주조시편의 크기는 30×60×250 mm인데, 탕구봉은 주입도관을 이용하였고, 도형은 알루미늄 합금 소실모형용 시판 도형재를 이용하여 침지 도형한 후 상온에서 24시간 동안 건조시켰다.

사용한 EPS 폼의 밀도는 20.0~25.0 kg/m³이었고, 비교를 위하여 CO₂ 주형도 준비하였다. 냉각속도의 영향을 보기 위하여 주형충전재로 규사, 지르콘사, 쇼트볼의 3가지를 사용하였다. 각각의 입도는 규사가 AFS 입도지수 66, 지르콘사가 111, 쇼트볼이 54이었는데, 입형은 Fig. 1과 같다.

사용한 주조재료는 A356.2합금이고, 15 kg 용량의 흑연도가니 중에서 용해 후, 탈가스처리 또는 미세화처리를 하였다. 탈가스 및 미세화처리는 플런저를 이용하여 시판 탈가스 정제 및 미세화제를 용탕 중에 찻러 넣어 행하였다. 주입은 주로 710°C에서 하였고, 주입온도의 영향을 보기 위한 실험에서는 700°C에서 820°C까지 변화시켰다. 용해 후 주입까지 소정의 시간 별로 용탕 중의 가스량을 감압응고법을 이용하여 평가하였다. 이 때 압력은 6.7 kPa이었고, 약 150g의 용탕시료를 채취하였다. 탈가스 후 용탕을 일정시간 유지한 후 가스량이 목표하는 값 이상이 되었을 때 주입하였다. 용탕 주입 시에 플라스크의 진공흡인은 하지 않았다.

시편은 냉각 후 일정 크기(30×60×25 mm)로 절단하여 Archimedes법으로 밀도를 측정하였고, 미세조직상의 기포 점유율은 화상분석기를 이용하여 측정하였다. 또한 경도 및 인장시편을 제작하여 경도 및 인장시험을 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용탕처리의 영향

Fig. 2는 용탕처리에 따른 주물 밀도의 변화를 나타낸다. 용탕은 무처리, 탈가스 그리고 미세화처리한 것이고, EPS 폼의 밀도는 20 kg/m³이다. CO₂ 주형으로 주입한 경우도 비교를 위하여 같이 나타내었다. 미세화처리한 시편은 탈가스한 시편보다 낮은 밀도를 나타내었지만, 무처리한 시편보다는 높은 밀도를 나타내었다. 알루미늄 주조품에서 기공은 결정립 미세화제에 의

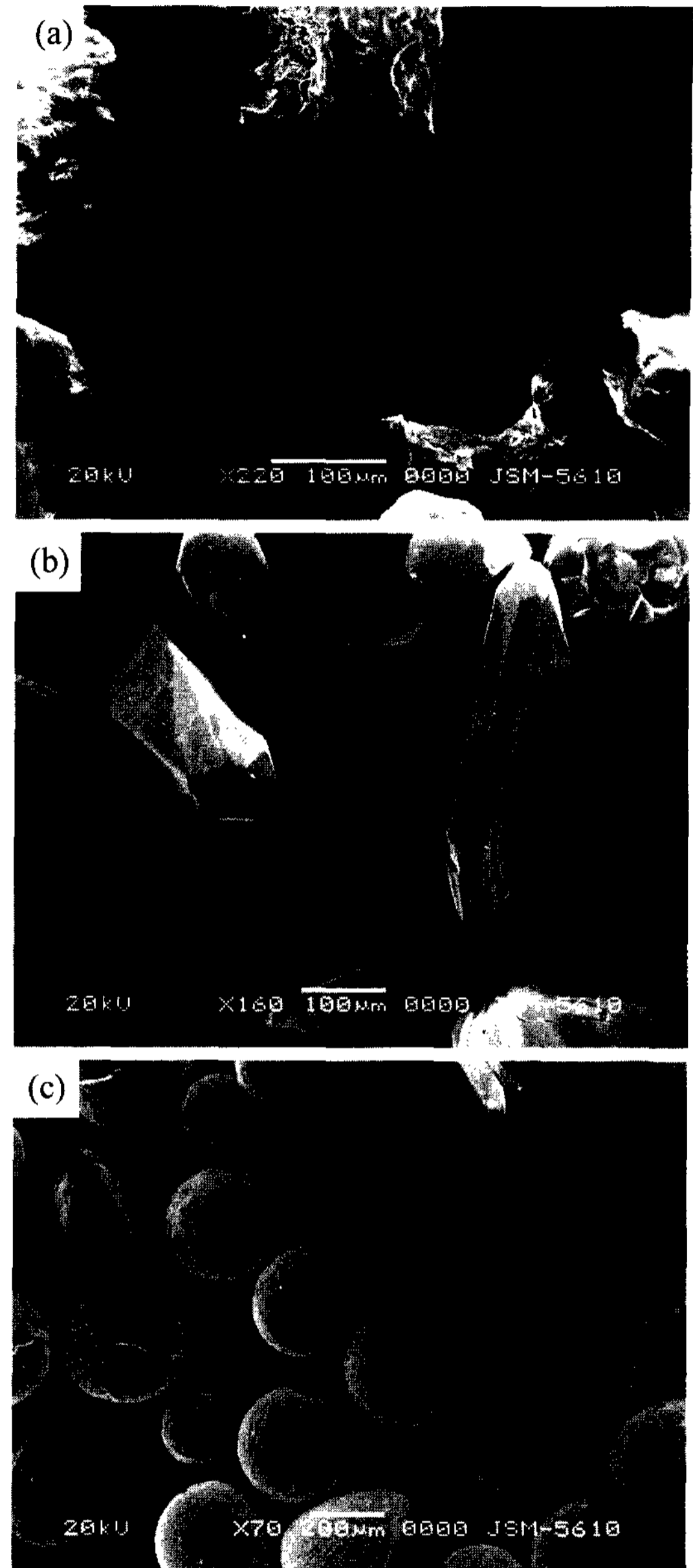


Fig. 1. Shape of mold packing materials. a) silica sand b) zircon sand c) steel shots

하여 영향을 받는다. 즉 기공이 미세하게 분산되는 효과가 있다[6]. 그러나 결정립 미세화제가 기공을 미세하게 분산시키는 효과는 있으나, 전체적인 기공을 감소시키지는 않는다. 소실모형주조에서는 미세화처리가 열분해생성물의 생성량에는 그다지 영향을 미치지 않고 또한 미세화처리하면 탈가스 처리만 한 경우보다

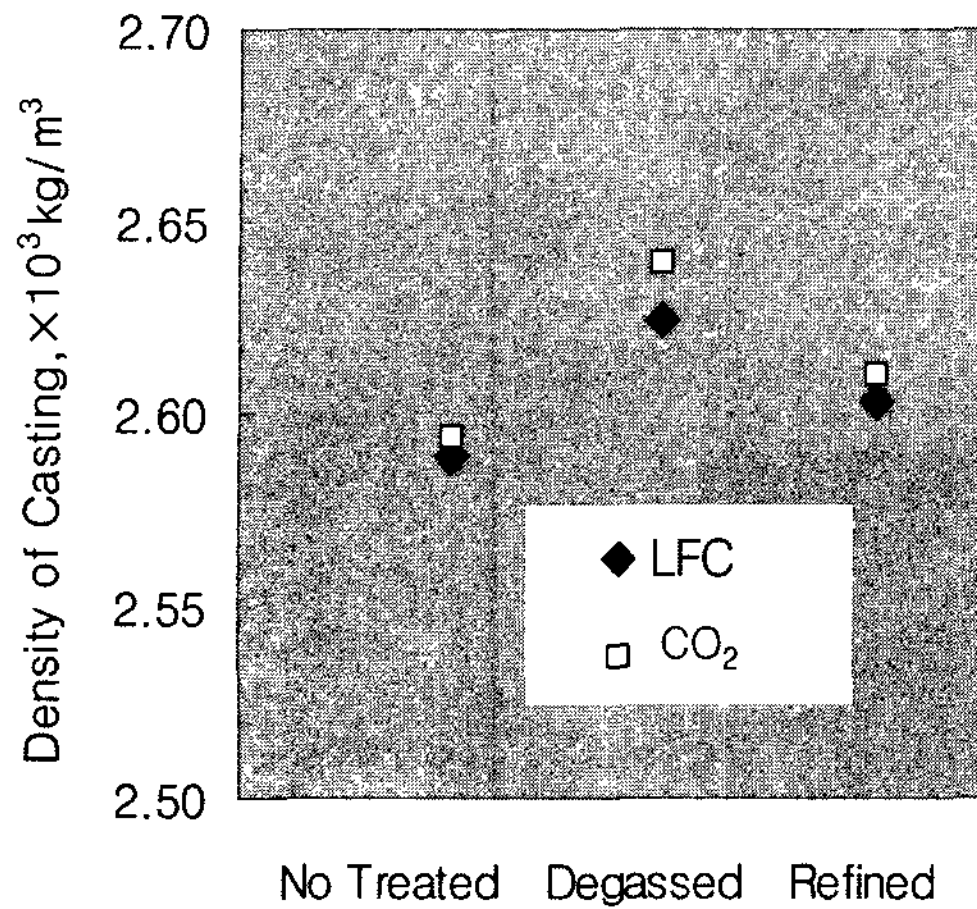


Fig. 2. Variations in density with melt treatment.

반응생성물이 많고 용탕의 유동성이 떨어지기 때문에 미세화처리한 시편이 탈가스한 시편보다 낮은 밀도를 나타낸 것으로 보인다.

주물의 기공율은 주물의 밀도와 밀접한 관련이 있는데 밀도와 화상분석으로 측정된 기공면적율과의 관계는 약간의 데이터의 흠어짐이 있으나, 주물 밀도가 증가하면 기공면적율이 감소한다. 가스함유량 및 기공면적율 측정은 시간이 많이 걸리므로, 이러한 관계를 이용하면 비교적 측정이 간단한 밀도 측정만으로 주물 내의 기공량을 평가할 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 3은 EPS 폼의 밀도가 20 kg/m³인 경우 충전재로 규사를 사용하였을 때 주물 높이에 따른 경도변화를 나타낸 것이다. 미세화처리 및 탈가스처리한 경우가 약간 경도가 높게 나타나고 있는데, 용탕처리방법에 관계없이 모두 중간부분의 경도가 가장 낮게 나타나고 있다. 이는 본 연구의 시편에서 응고시간을 측정하여 보면 아래 부분의 응고시간은 약 300초, 중간부분은 450초, 윗부분은 250초 정도로, 중간부분의 응고가 가장 늦고 따라서 최종응고부위에 기공 및 수축공이 몰리므로 중간부분의 밀도가 가장 낮기 때문으로 보인다. 실제로 중간부분의 절단면에서는 육안으로도 다수의 기공이 확인되었다.

Fig. 4는 이 부분의 기공을 SEM으로 관찰한 것으로 내부를 보면 포도송이 같은 형태를 나타내는 덴드라이트의 최종응고부위의 흔적을 볼 수 있다. 즉 중간부분이 최종응고부위이어서 기공 및 수축공이 몰리는 것을 확인할 수 있다. 이 부위를 WDS로 면분석한 결과가

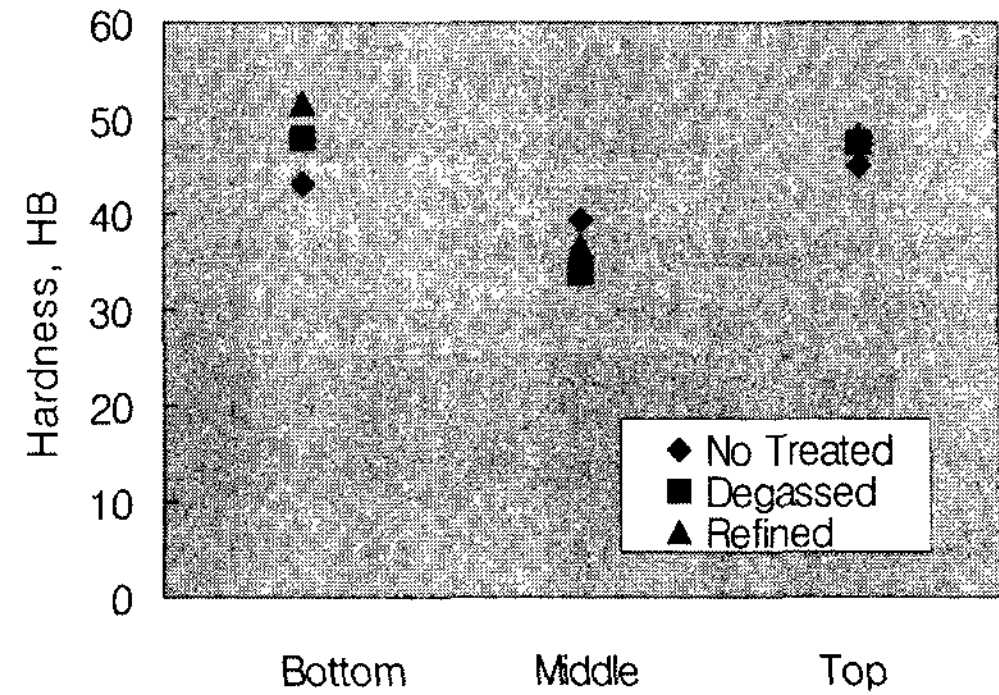


Fig. 3. Variations in hardness along the height of the casting with melt treatment.

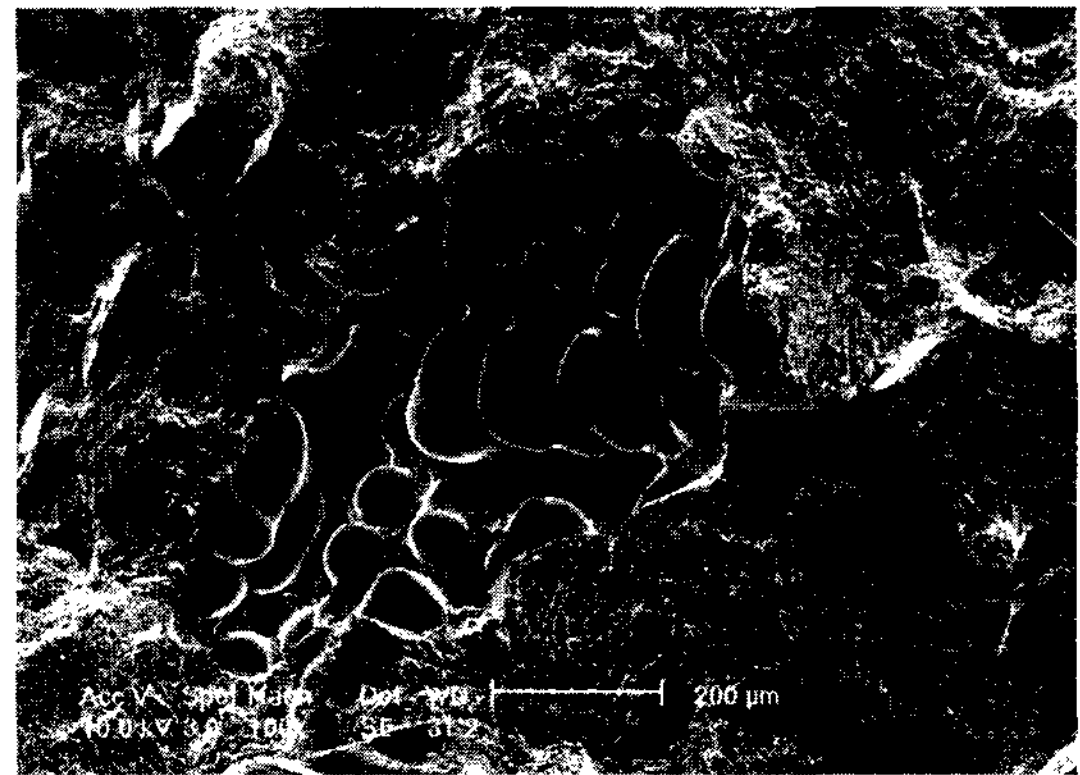


Fig. 4. Microstructure of the pore.

Fig. 5이다. CO₂ 주형에 주입한 경우에는 기공 부위에서 탄소 성분이 검출되지 않았으나, 소실모형주조한 경우에는 기공부위에서 탄소가 검출되는 것으로 보아 소실모형주조품의 기공 형성에는 발포 폴리스티렌의 연소생성물의 영향이 있음을 알 수 있다. 소실모형주조에서 주물이 성형되는 것은 기본적으로 발포 폴리스티렌 패턴의 열분해에 의하여 지배된다[7]. 열분해생성물의 생성속도와 방출속도가 소실모형주조품의 품질을 좌우하게 되는 것이다. 따라서 주입 중 응고가 진행되는 데 이 사이에 가능한 한 빨리 많이 열분해생성물이 주형 밖으로 빠져나가야만 한다.

3.2 주형충전재의 영향

Fig. 6은 EPS 폼의 밀도가 20kg/m³인 경우 충전재로 규사, 지르콘사, 쇼트볼을 사용하였을 때 주물 높이에 따른 밀도변화를 나타낸 것이다. 모든 경우에 상부

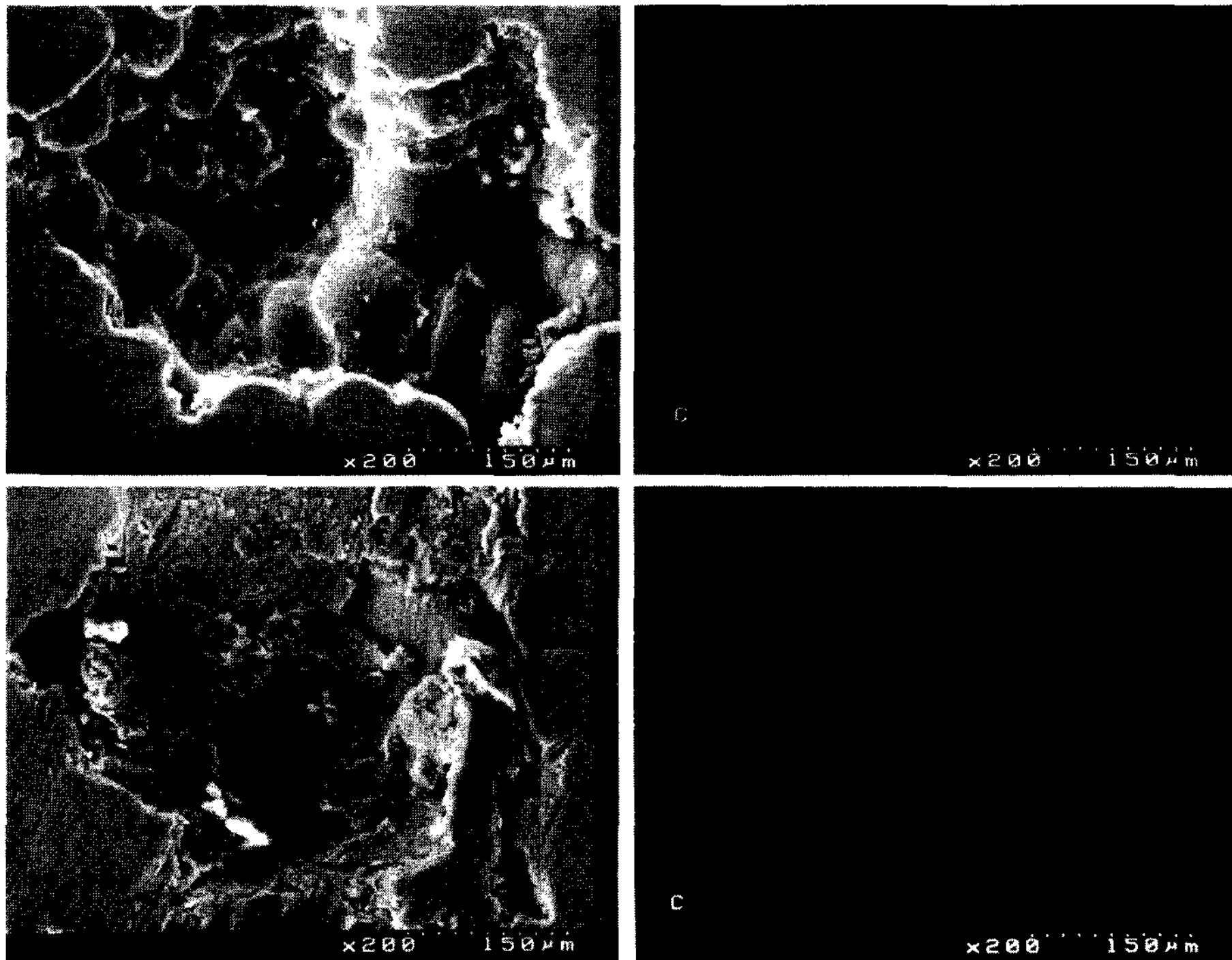


Fig. 5. WDS results for pores(top: lost foam casting, bottom: CO₂ mold casting).

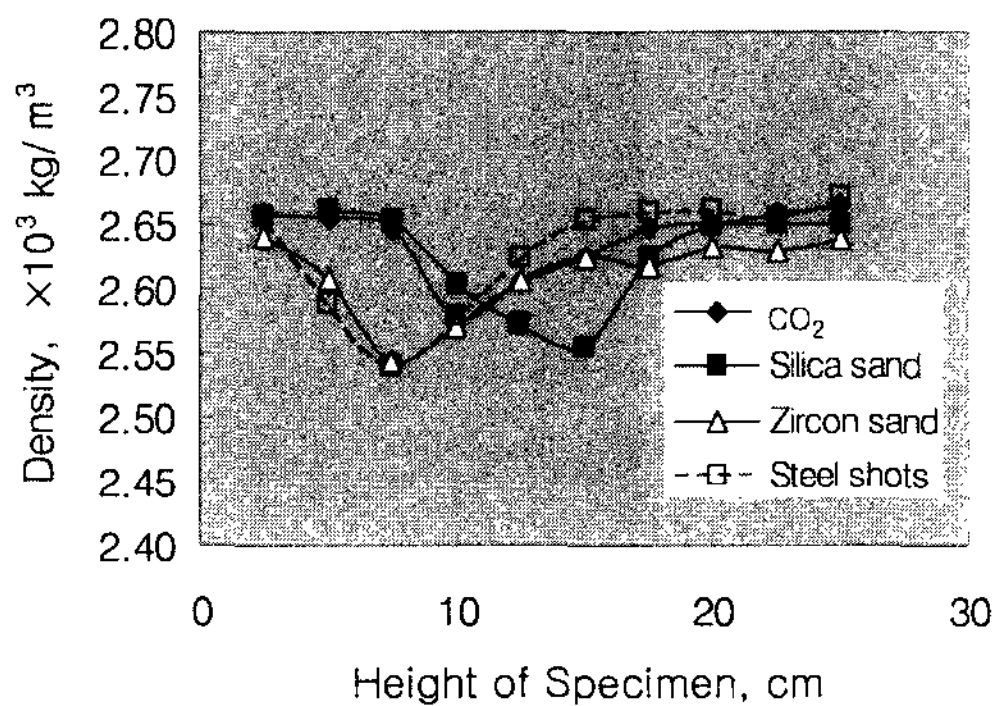


Fig. 6. Density distributions along the height of the bar castings.

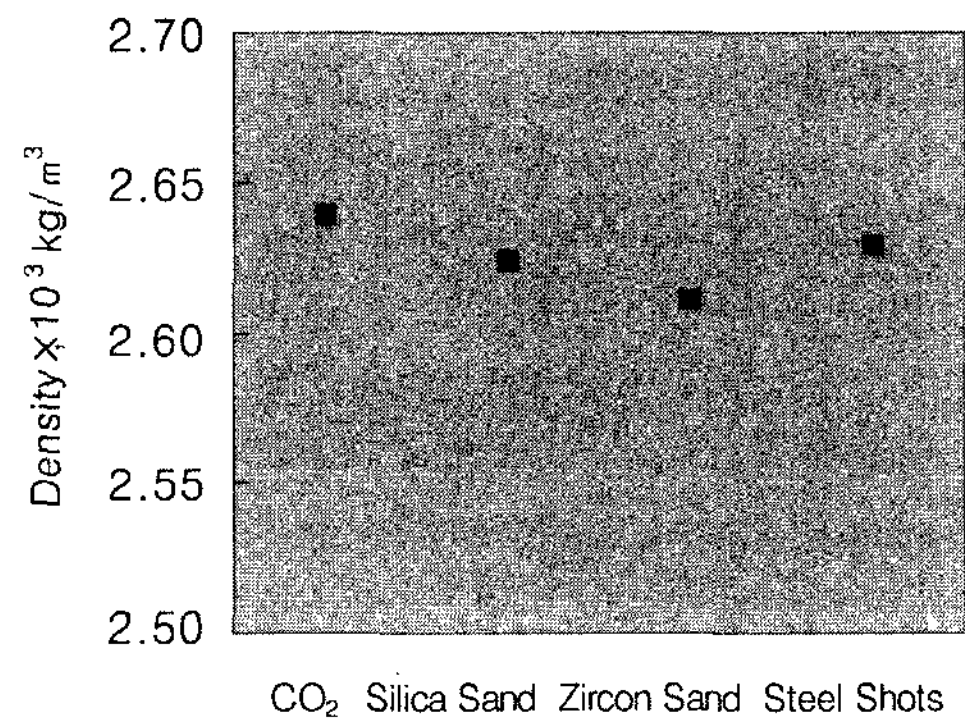


Fig. 7. Variation in density with mold packing materials.

의 밀도가 높고 중하부의 밀도가 가장 낮게 나타나고 있는데, 같은 주물 내에서도 1.7~5% 정도의 밀도 차를 보이고 있다. EPS 폼의 밀도가 다른 경우에도 역시 같은 경향을 나타내었다.

Fig. 7은 EPS 폼의 밀도가 20 kg/m³ 인 경우 충전재에 따른 시편의 밀도변화를 나타낸 것이다. 용탕은 탈가스 처리하였고, CO₂ 주형으로 주입한 경우도 비교를 위하여 같이 나타내었는데, CO₂ 주형에 주입한 경

우가 밀도가 높고, 소실모형주조한 경우는 쇼트볼 충전재로 주입한 시편의 밀도가 가장 높게 나타나고 있다.

충전시간은 소실모형주조 시편의 경우는 약 8초, CO₂ 주형은 약 3초이었다. 소실모형주조의 경우는 발포 폴리스티렌이 용탕흐름에 대한 저항으로 작용하므로 충전시간이 늦어지게 된다. 본 실험에서 주입구에서의 용탕의 선속도는 0.018 m/sec이었다. 이 속도는

소실모형주조에서 주물의 품질에 크게 영향을 주는 요소인데, 알루미늄 소실모형주조에서는 0.015~0.02 m/sec의 속도가 미충전, 기포, 탕 겹침, 블리스터 등의 결함이 가장 적게 나타난다는 보고가 있다[8].

주형충전재의 냉각능은 응고시간, 덴드라이트 암 간격(DAS), 열확산율 또는 단위 체적 당 비열의 평방근으로 추정할 수 있다. 이 중에서 규사충전재의 열확산율을 1로 보면 지르콘사의 열확산율은 1.15, 쇼트볼의 열확산율이 1.4 정도로 쇼트볼 충전재의 냉각능이 가장 크다. 또한 DAS는 CO₂ 주형이 93~99 μm, 규사충전재가 92~98 μm, 지르콘사 충전재가 88~91 μm, 쇼트볼 충전재가 80~82 μm 이었고 미세화 처리한 것이 탈가스만 한 것보다 약간 미세하였다.

열분해생성물의 생성은 세 가지 충전재 모두 같을 것으로 보이므로, 기공의 생성은 열분해생성물의 방출 속도에 좌우될 것으로 보인다. 이런 관점에서 보면 쇼트볼 충전재의 경우가 밀도가 가장 낮게 나타나야 한다, 왜냐하면 응고가 빨라서 표면 응고층이 이른 시간 내에 강도를 가지므로 열분해생성물이 빠져나갈 시간적 여유가 가장 적기 때문이다. 그러나 실제로는 쇼트볼 충전재 시편의 밀도가 가장 높게 나타났다. 따라서 소실모형주조에서는 냉각속도보다는 열분해생성물의 방출속도의 차이가 중요할 것으로 보인다. 이 방출속도는 주형 중에서 가스가 빠져나가는 공간의 면적에 의하여 좌우되므로 충전재의 충전율, 충전재의 입도, 입형 등에 의하여 영향을 받게 된다. 규사충전재, 지르콘사 충전재, 쇼트볼 충전재의 겉보기 충전 밀도는 각각 1.49×10^3 , 2.54×10^3 , $4.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 이었다. 이 밀도를 각각의 충전재의 벌크재의 밀도와 비교하면 충전율을 알 수 있는데, 규사충전재, 지르콘사 충전재, 쇼트볼 충전재의 충전율은 각각 57.0, 60.1, 55.6%가 된다. 규사충전재, 지르콘사 충전재, 쇼트볼 충전재의 각각의 평균 입경은 0.25, 0.1, 0.3 mm 이다. 그리고 입형은 규사충전재가 구형에 가깝고, 지르콘사 충전재는 각형이 많으며, 쇼트볼 충전재는 거의 구형이다(Fig. 1 참고). 이것은 지르콘사로 충전된 경우가 충전재 사이의 빈 공간이 가장 적고, 쇼트볼 충전재가 가장 이 공간이 크다는 것을 뜻한다. 따라서 쇼트볼 충전재의 경우가 열분해 생성물의 방출이 원활한 만큼 주물의 밀도가 높은 것으로 짐작할 수 있다. 또한 CO₂ 주형에 주입한 경우가 밀도가 높은 것은 발포 폴리스티렌을 사용하지 않으므로 가스결함의 원인이 되는 열분해생성

물이 없기 때문이다.

Fig. 8은 용탕을 미세화처리한 경우 충전재에 따른 T6 열처리한 시편의 인장강도 및 연신율을 나타낸 것이다. 인장강도 및 신율 모두 쇼트볼이 약간 높게 나타나고 있다. 전반적으로 기공이 많은 편이므로 파단면이 길이방향에 수직으로 끊어졌고, 연신율도 낮게 나타났다. 이는 하중곡선에서도 거의 모든 시편이 강도가 최대인 곳에서 파단이 일어나는 양상을 나타내었다. 일반적으로 연신율은 기공량 또는 밀도와 비례하는 관계가 있으나, Fig. 8을 보면 시편의 평균 밀도가 높은 CO₂ 주형 시편이 소실모형 시편보다 낮는데, 이는 평균밀도의 차이가 $0.01 \sim 0.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 정도로 크지 않고, 기공의 크기 및 분포에 차이가 있기 때문으로 보인다. Fig. 9는 쇼트볼 충전재에 주입한 경우의 인장시편 파단면의 SEM관찰 결과이다. 파면을 보면 기공이 다수 관찰되는데, 연신이 거의 없는 상태에서 파단이 일어난 것임을 알 수 있다.

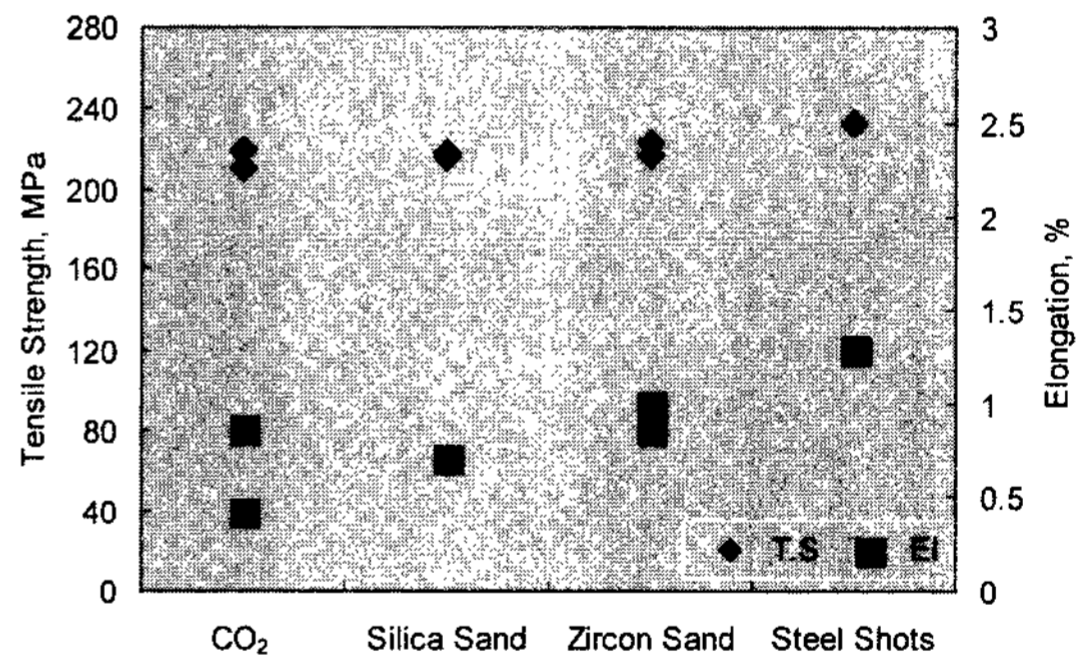


Fig. 8. Tensile strength and elongation with mold packing materials.

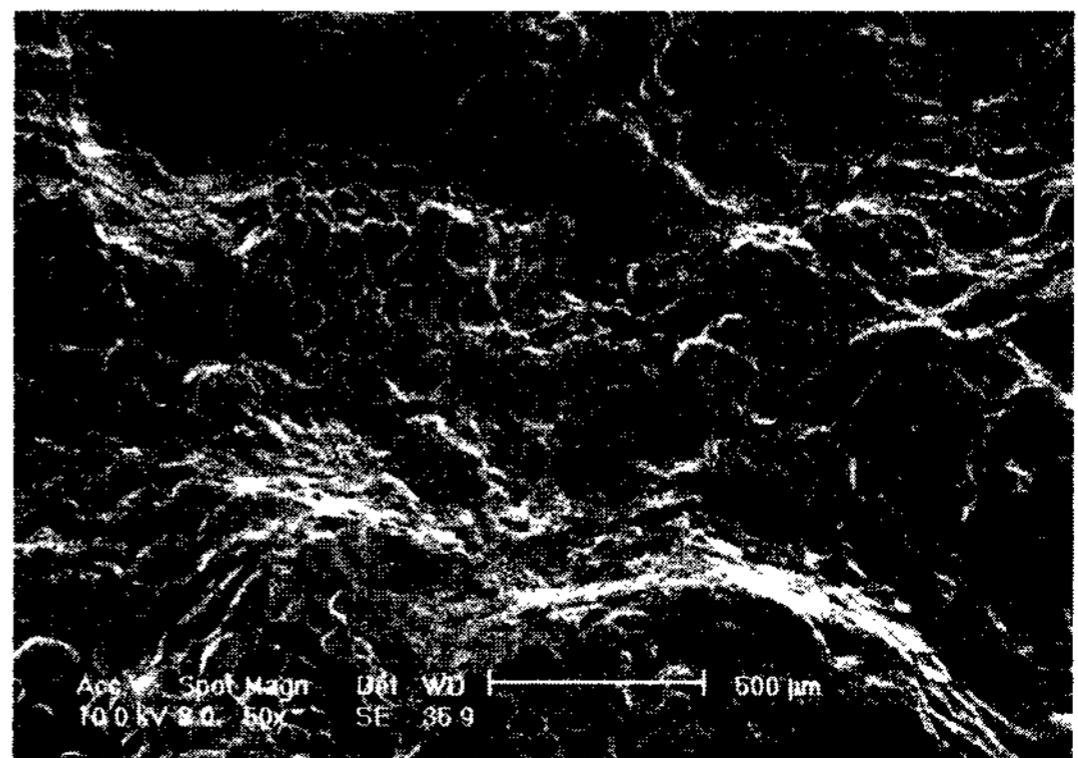


Fig. 9. Fractured surface of tensile specimen.

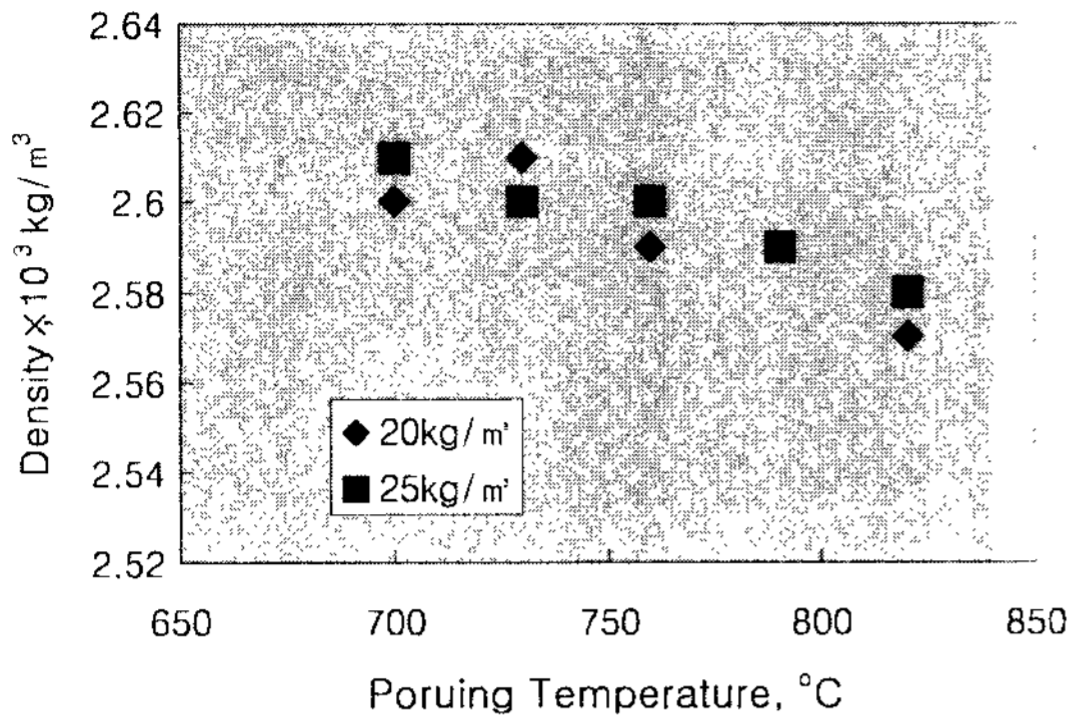


Fig. 10. Variations in density with pouring temperature.

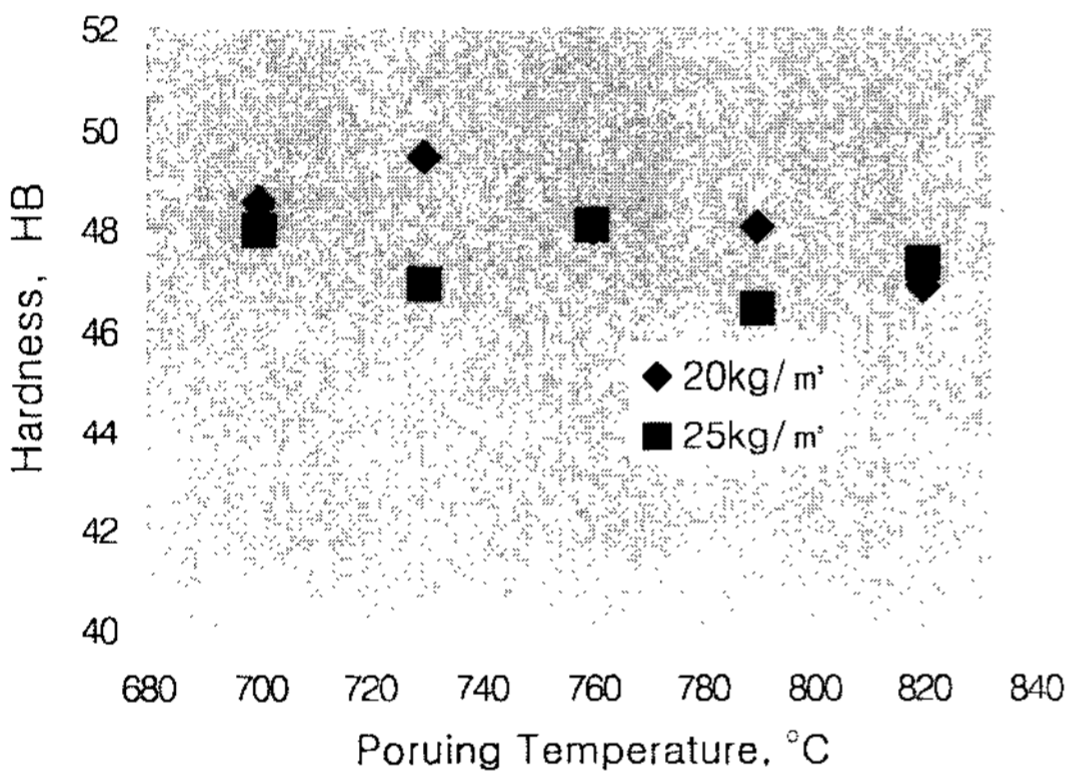


Fig. 11. Variations in hardness with pouring temperature.

3.3 주입온도의 영향

Fig. 10은 무처리한 용탕을 주입온도를 700°C에서 820°C까지 변화시켰을 때의 밀도의 변화를 나타낸 것이다. EPS 폼의 밀도는 20.0 kg/m³와 25.0 kg/m³이고, 충전재로 규사, 지르콘사 및 쇼트볼을 사용한 경우이다. 밀도는 주입온도가 높을수록 2.61×10³ kg/m³에서 2.57×10³ kg/m³로 감소하고 있는데 이는 주입온도가 높으므로 그만큼 용탕 중의 가스량도 증가하고 또한 발포 폴리스티렌의 열분해생성물이 증가하기 때문으로 보인다. Fig. 11은 주입온도에 따른 경도의 변화를 나타내어 주입온도가 높을수록 감소하는 경향을 나타내고 있다.

이상의 결과로부터 건전한 알루미늄 합금의 소실모형주조품을 얻기 위한 주조공정변수로, 냉각속도, 용탕 처리 및 주입온도의 영향을 살펴 본 결과, 이러한 공

정변수의 조절만으로는 알루미늄 합금 주조품의 최대 약점인 내부 기공의 제거가 원활하지 못함을 알 수 있다. 따라서 이의 보다 효율적인 제거방법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

- 1) 용탕을 무처리, 탈가스 그리고 미세화처리한 경우, 미세화처리한 소실모형주조 시편은 탈가스한 시편보다 약간 낮은 밀도를 나타내었지만, 무처리한 시편보다는 높은 밀도를 나타내었다.
- 2) CO₂ 주형에 주입한 경우가 소실모형주조한 경우보다 밀도가 높았고, 소실모형주조한 중에서는 쇼트볼 충전재로 주입한 시편의 밀도가 가장 높게 나타났다.
- 3) T6 열처리 후의 소실모형주조 시편의 인장강도는 200~230 MPa, 연신율은 0.5~1.5%의 범위에 있었으며, 냉각능이 큰 주형 충전재를 사용한 경우가 인장강도가 약간 크게 나타났다.
- 4) 소실모형주조 시편의 밀도 및 경도는 주입온도가 높을수록 감소하였다.

후 기

본 연구는 2002년도 국가청정기술과제의 일부로 수행되었으며, 연구비지원과 연구수행에 도움을 준 김용선, 이기우 두 사람에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Pletka and J. Drelich, Minerals & Metallurgical Processing, "Recovery of expanded polystyrene from coated patterns rejected from lost foam casting", 19(2002), 25.
- [2] X. Chen and J. E. Gruzleski, Int. J. Cast Metals Res., "Influence of melt cleanliness on pore formation in aluminum-silicon alloys", 9(1996), 17.
- [3] S. Bennett, T. Moody, A. Vrieze, M. Jackson, D. R. Askeland and C. W. Ramsay, AFS Transactions, "Pyrolysis Defects in Aluminum Lost Foam Castings", 108(2000), 795.
- [4] T. V. Molibog and H. Littleton, AFS Transactions, "Degradation of Expanded Polystyrene Patterns", 110(2002), 1483-1484.
- [5] K. Y. Kim, K. W. Lee and K. H. Rim, J. of KFS, "Investigation on Characteristics of Various Mold Packing Materials in Lost Foam Casting of Aluminum Alloy", 22(2002), 137.
- [6] A. Samuel and F. Samuel, AFS Transactions, "Porosity

- Factor in Quality Aluminum Castings", 100(1992), 657
- [7] X. Yao and S. Shivkumar, Materials Science and Technology, "Mould filling characteristic in lost foam casting process", 13(1997), 841.
- [8] C. Bates, H. Littleton, B. McMellon and P. Stroom, AFS Transactions, "Technological Developments and Worldwide Market Growth in Lost Foam Casting Production", 109(2001), 1563-1565.