

|||||||
論 文
|||||||

저압주조품의 미세조직과 기계적성질에 미치는 금형온도의 영향

이정근 · 박종성 · 김명호

Effects of the Mold Temperatures on the Microstructure and Mechanical Properties of Low Pressure Die-Cast Product

Jeong-Keun Lee, Chong-Sung Park and Myung-Ho Kim

Abstract

Microstructure and mechanical properties of the low pressure die-cast Al wheels were investigated by microscope, image analyzer, NDT (non-destructive test), and tensile test. The variation of SDAS (secondary dendrite arm spacing), porosity per unit area, quality grade, and tensile properties with the mold temperatures were examined. SDAS was gradually decreased with a decrease in temperature. However, the lowest value of porosity per unit area was observed at the mold temperature of 405°C and the optimum mold temperature was found to be 405°C. Besides, from the observation of pore morphology, it was also found that the pore formation was mainly caused by shrinkage during solidification. The tensile strength, elongation, and impact toughness were markedly decreased, however the yield strength was nearly constant. The decrease of mechanical properties is attributed to the increase of porosity. (Received January 23, 1998)

1. 서 론

저압주조법은 die cavity를 채우기 위해 항상 3~5 psi의 압력범위인 최소압력을 유지하면서 주조하는 제조법이며, 현재 국내에서는 양질의 주물품이 요구되는 모든 적용분야에서 널리 보급되어 이용되고 있다. 특히 기술적·경제적인 면에서 중력주조법과 고압주조법의 중간적인 위치를 차지하고 있는 저압주조법은 국내에서 알루미늄 합금계의 적용에 대한 기술적인 확립이 안정화되어 가고 있으며, 불량률의 감소와 주물의 질적인 개선을 위한 노력이 끊임없이 시도되고 있다[1-3]. 한편 저압주조법으로 제조되고 있는 알루미늄 주조품에 있어서 건전한 주물품을 얻기 위해서는 지향성응고가 이루어질 수 있는 최적의 냉각조건을 설정하는 것이 가장 기본적인 과제이다. 그러나 단순한 형상의 주조에 있어서는 그 형상에 따른 냉각조건 설정이 비교적 쉽게 이루어지나, 알루미늄 휠과 같이 비대칭 복잡형상에 있어서는 ① 주조조건 변경이 어려우며, ② 다변수에 의한 해석적용이 어렵고, ③ 적절한 냉각라인과 냉각조건 설정이 힘들다[4].

그러므로 저압주조 시 지향성응고에 문제가 되어 수반되는 기공의 형성으로 인한 주물의 품질저하 및 불량률의 증가 등이 문제시되고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해서 저압주조품의 각 부위별 금형온도에 따른 미세조직 및 이차수지상간격(SDAS) 측정을 통하여 주조품의 응고양상을 고찰하고, 기공도 변화에 따른 기계적성질을 평가하여 보았다.

2. 실험방법

2.1 시편제조

A356.2 잉고트(ingot)를 용해로에 장입하여 770°C의 온도로 용해한 후 750 kg 용량의 레들(ladle)에 용탕을 급탕받아 질소가스를 이용하여 8분동안 탈가스를 실시하였다. 탈가스후 TiB₂를 이용하여 미세화처리 및 Na을 이용하여 공정 Si의 개량처리를 행하였으며, 이때 용탕온도는 730°C이었다. 용탕을 저압주조기의 보온로에 주탕한 후 주조 사이클(cycle) 동안 개량처리제의 손실(fading)을 보상해주기 위하여 2차 개

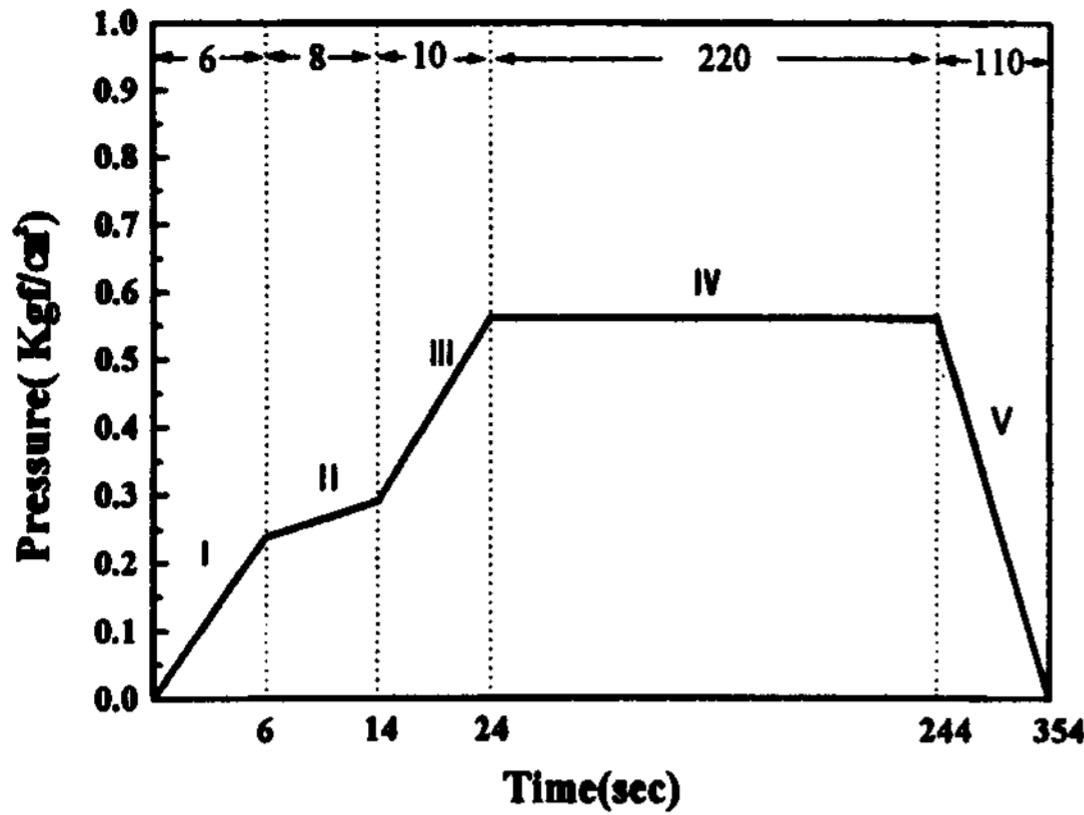


Fig. 1. Cycle-time diagram of LPDC process.

량처리제를 투입한 후 하형을 기준으로 금형온도를 353°C, 405°C, 420°C, 470°C로 변화시켜 시편을 제조하였다.

Fig. 1에 시편제조시 저압주조 싸이클(cycle) 동안의 가압력변화를 나타내었다.

2.2 금형온도 변화

시편제조시 주물품의 부위별 금형온도 변화를 알아보기 위하여 금형의 cavity직하 5 mm 부근에 4개의 열전대(K-type thermocouple)를 설치하고 온도변화기록계(Pen recorder; Model LR4210, Yokogawa, Japan)

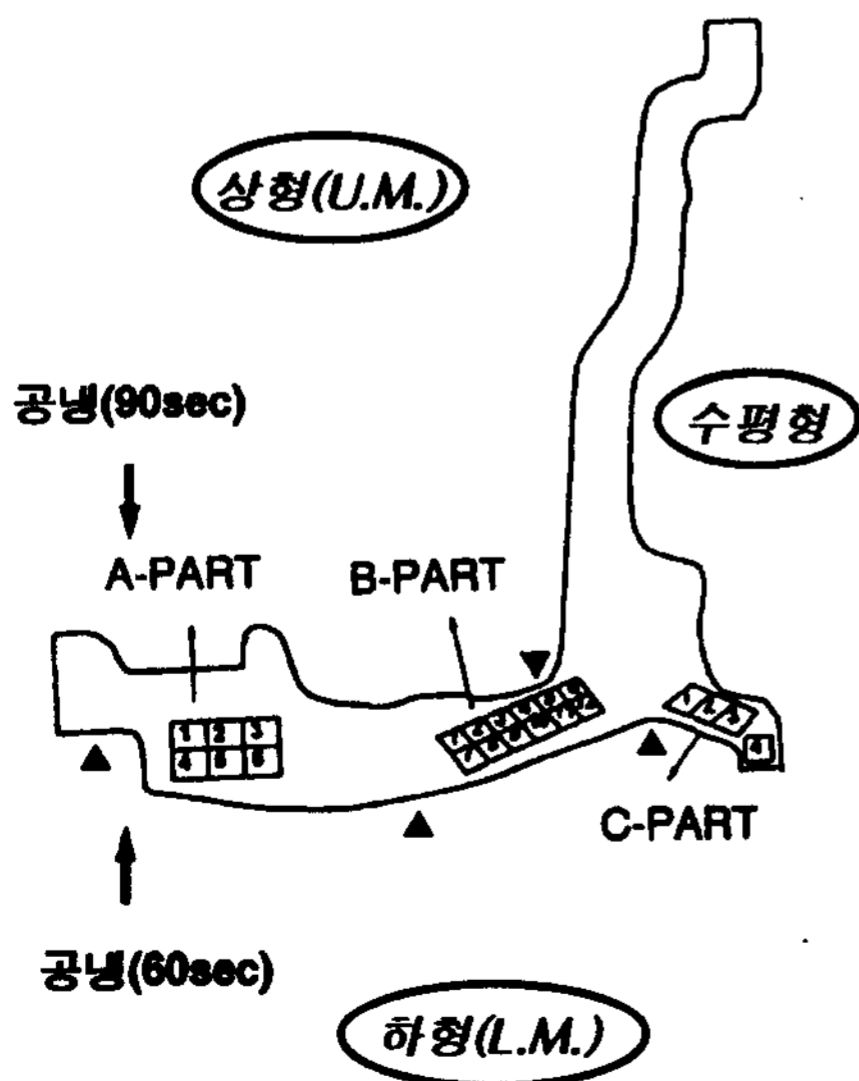


Fig. 2. Diagram of transverse section of specimen and experimental position ; U.M.=upper mold and L.M.= lower mold.

를 이용하여 시편제조 시 금형온도 변화를 연속적으로 측정하였다.

Fig. 2는 제조한 시편의 단면형상과 금형의 각부에 설치한 열전대 및 기공도 측정위치를 나타낸 것이다. 시편은 용탕이 주탕되는 압탕부로부터 A, B, C-part로 구분하였으며, 금형은 용탕이 주탕되는 아래쪽을 하형, 위쪽을 상형, 옆쪽(측면부)을 수평형으로 나타내었다. 또한 본 실험에 이용된 저압주조기는 저압주조 시 압탕부 과열방지를 위하여 강제적으로 국부적 금형냉각을 실시하도록 설계되어 있으며, 금형냉각은 가압 시작 60초, 90초, 120초 후에 하형 A-part, 상형 A-part, 압탕부 순으로 진행 되었다.

2.3 열처리

저압주조한 주물품을 540°C에서 6시간 용체화처리를 실시하였으며, 약 80°C의 물에 10분간 쿨칭 후 140°C의 온도에서 6시간 시효처리를 실시 하였다.

2.4 성분분석 및 미세조직 관찰

성분분석은 스펙트로미터 및 I.C.P분석기로 분석하였고, 이때 제조한 시편의 조성은 Table 1과 같다. 광학현미경(Model HFX-II A, Nikon, Japan) 및 주사전자현미경(Model X-650, Hitachi, Japan)을 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 미세조직 관찰시편은 1 μm diamond paste로 연마한 후 modified Keller's solution 으로 상온에서 약 10초 동안 에칭하였다. 그리고 시편에서 서로 다른 금형온도에 따른 주조결함의 대부분을 차지하고 있는 수축기공의 위치 및 상대적인 양을 알아보기 위하여 영상분석을 행하였으며[5], 이차수지상간격(SDAS)을 측정하였다[6-7]. 또한 단위면적당 기공율(P_{AO})은 계산식 (1)을 이용하여 산출하였다.

$$P_{AO} = \frac{\sum A_{pore}}{A_0} \times 100 = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

2.5 기계적특성 평가

Fig. 3은 인장 및 충격시편의 형상을 나타낸 것으로

Table 1. Chemical composition of L-P die cast product in the present study (wt.%).

Si	Mg	Fe	Ti	Ni	Cr	Na	Al
6.9	0.35	0.12	0.11	0.003	0.001	0.015	Bal.

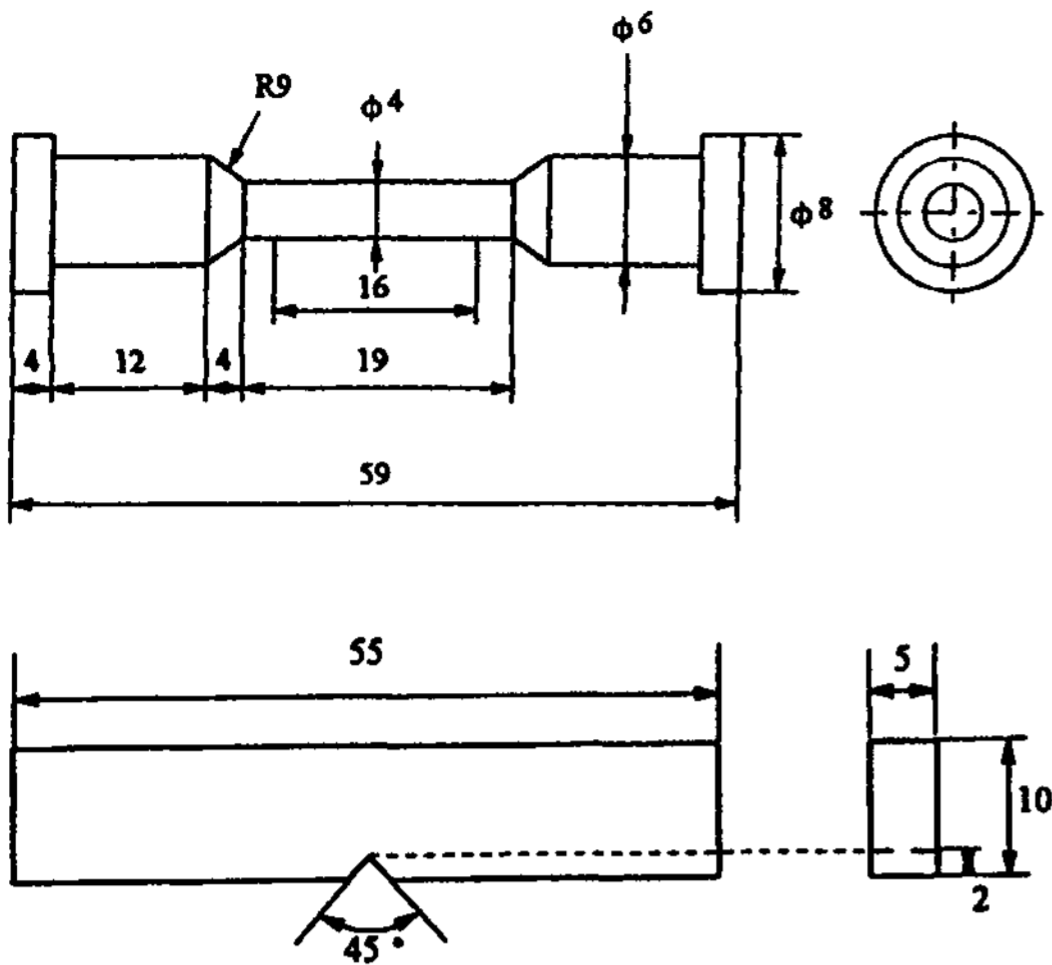


Fig. 3. The shape of tensile and impact test specimens (Dimension in mm).

써 ASTM규격[8-9]에 따라 subsize로 가공후 50 ton 용량의 Instron 1342 모델의 만능시험기를 이용하여 최대인장강도, 항복강도, 연신율을 측정하였으며, 150 kgf · cm의 용량을 갖는 Charpy 충격시험기를 이용하여 충격시험을 실시하였다. 또한 Brinell 경도시험기 (Model NBH-3, Nakai Seiki, Japan)를 이용하여 10 mm steel ball, 500 kg load, 유지시간 30초의 조건에서 경도시험을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 금형온도

알루미늄 합금의 경우 저압주조시 적당한 금형온도는 300~400°C이고 금형 하부쪽이 열원에 가까이 있으므로 자연히 50~100°C 정도 더 높고 지향성응고를 시키는데 좋은 온도기울기(상형 330~350°C, 수평형 340~360°C, 하형 360~400°C, 탕구부근 380~420°C)를 가져야한다[10]. 금형온도 변화를 측정하기 위하여 금형의 cavity 직하 5 mm 부근에 4개의 열전대를 설치하고 이중 하형 B-part의 온도를 기준으로 353°C, 405°C, 420°C, 470°C로 변화하여 저압주조를 행하였으며, 이때 용탕의 주탕 및 응고시 금형온도의 변화를 살펴보았다.

Fig. 4는 시편제조시 저압주조 사이클 동안의 금형온도 변화를 나타낸 것이다. 동일한 금형온도에서 상형과 하형 B-part의 온도를 비교하여 보면 상형이 하

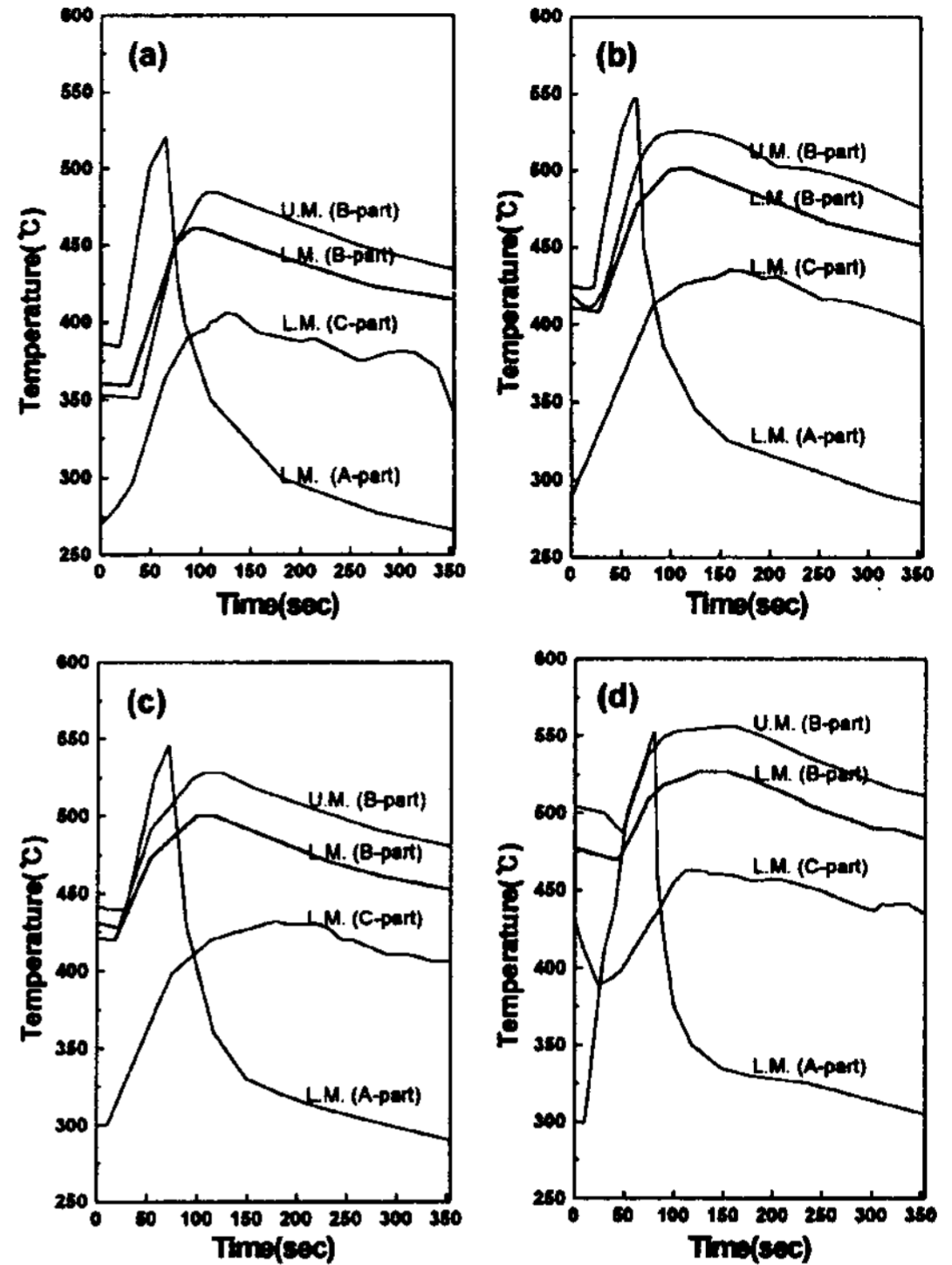


Fig. 4. Variation of mold temperatures for a cycle time measured by pen-recorder ; (a) 353°C, (b) 405°C, (c) 420°C, and (d) 470°C about L.M. B-part.

형보다 25°C 정도 높은 온도를 유지하고 있었고, C-part와 A-part에 비해서 B-part의 금형온도가 가장 높게 나타났다. 또한 압탕부(A-part)의 금형온도가 저압주조 사이클 중 크게 변화하고 있으며, 이는 가압시작 60초 후 부터 시작되는 압탕부(A-part)의 강제적 금형냉각에 의한 것으로 열전대의 설치위치와 냉각존이 근접하여 설치되었기 때문에 매우 민감하게 변화하고 있는 것으로 판단된다. C-part의 경우 금형온도의 변화가 일정하지 않게 나타났으며 온도변화 폭 또한 적음을 알 수 있다. 이러한 이유는 금형의 cavity가 적은 C-part의 경우 다른 부분보다 가압후 용탕 충전량이 적기 때문에 금형으로의 열방출량 또한 적게됨으로, 금형온도의 증가폭은 크지 않지만 응고 후 열방출량이 많은 B-part의 금형에서 온도가 낮은 C-part로 열이동이 일어나기 때문으로 생각된다. 금형온도를 470°C에서 353°C로 117°C 감소시킴으로써 온도변화 폭선이 50°C~75°C 가량 전체적으로 감소하였다. 이에 따라 수지상간격의 감소에 따른 주조품의 품질(quality)이 향상될 것으로 기대된다. 그러나 금형온도가 너무

낮을 경우 용탕충진(feeding) 및 응고양상에 문제가 되어 수축공을 발생시킬 수 있다. 따라서 가장 적은 수지상간격 및 기공도를 나타내는 부분을 알아보기 위하여 미세조직관찰, 단위면적당 기공을 변화 및 비파괴시험을 행하였다.

3.2 미세조직

Photo 1은 서로 다른 금형온도에서 제조한 열처리 시편의 부위별 미세조직을 나타내고 있다. 동일한 금형온도에서는 B-part에서 가장 조대한 수지상을 관찰할 수 있으며, 주조품의 두께가 가장 얇은 C-part에서 가장 미세한 수지상을 나타내고 있다. 또한 동일한 부분(part)에서 금형온도를 감소시킴에 따라 수지상이 점점 미세하여짐을 관찰할 수 있다. 이를 정량적으로 알아보기 위하여 각 금형온도 조건에서 부위별 이차수지상간격을 측정하였다.

Fig. 5는 주조상태의 시편단면에 대한 부위별 이차수지상간격(SDAS)을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 금형온도가 가장 높았던 B-part가 A-part와 C-part보다 동일한 금형온도 조건에서 조대한 이차수지상간격을 나타내었으며, 금형온도를 감소시킴에 따라 온도감소에 비례적으로 이차수지상간격이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 냉각속도가 증가하면 수지상이 불안정하게 되어 조성적과냉을 증가시켜 수지상간격이 짧아지는 반면, 냉각속도가 감소하면 수지상중에 비교적 늦게 성장하는 수지상이 성장을 거의 정지하게 된다. 그 결과 수지상간격이 넓어지기 때문에 냉각속도가 느릴 경우 수지상간격은 증가하게 된다 [11]. 금형온도가 470°C일때 A-part, B-part에서 50~60 μm 정도의 이차수지상간격을 보이고 있으나 금형온도가 낮은 353°C의 경우 30~40 μm 정도의 매우 낮은 이차수지상간격을 나타내었다. 이렇게 금형온도를 감

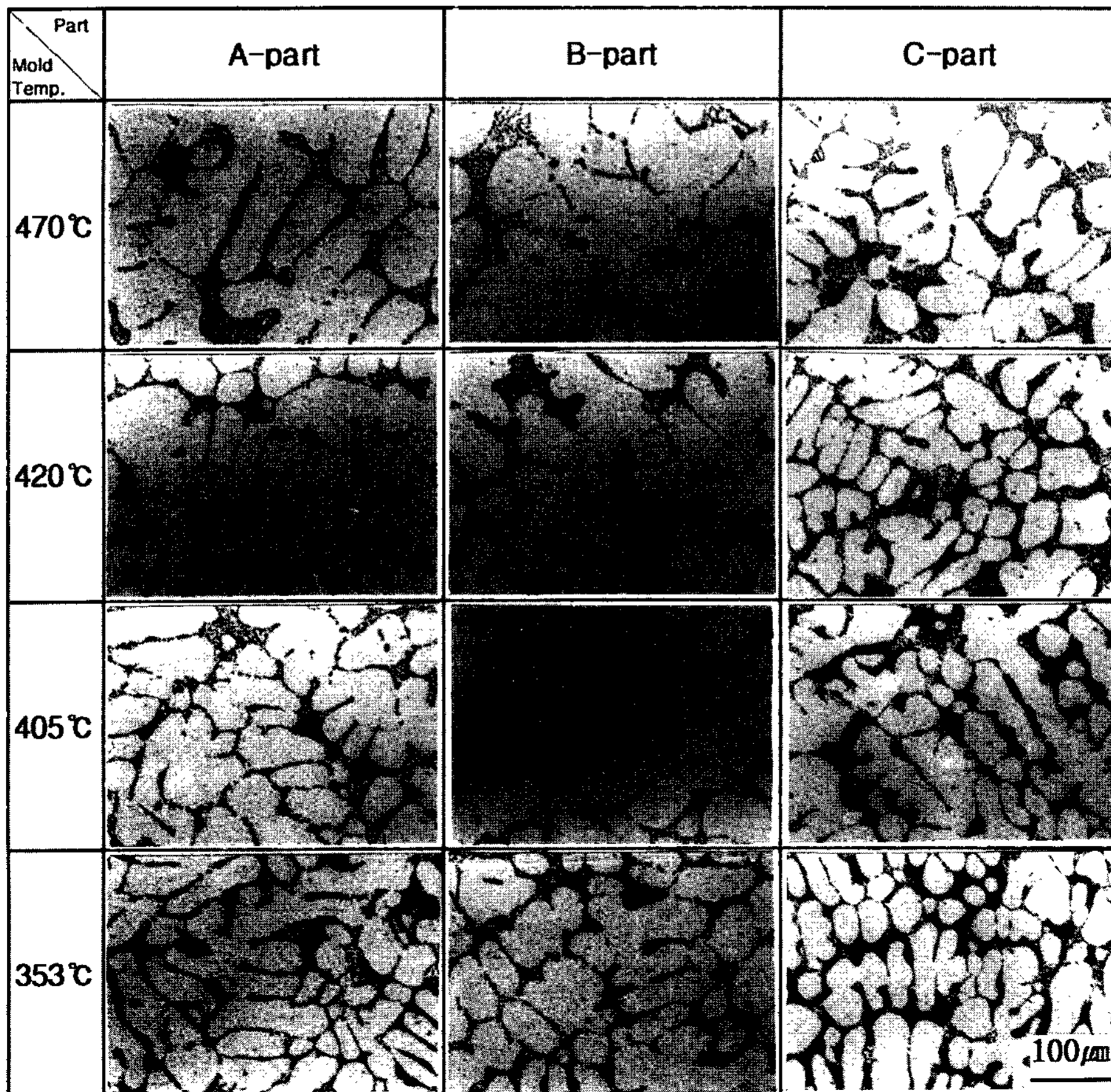


Photo 1. Microstructures showing influence of mold temperature for each part.

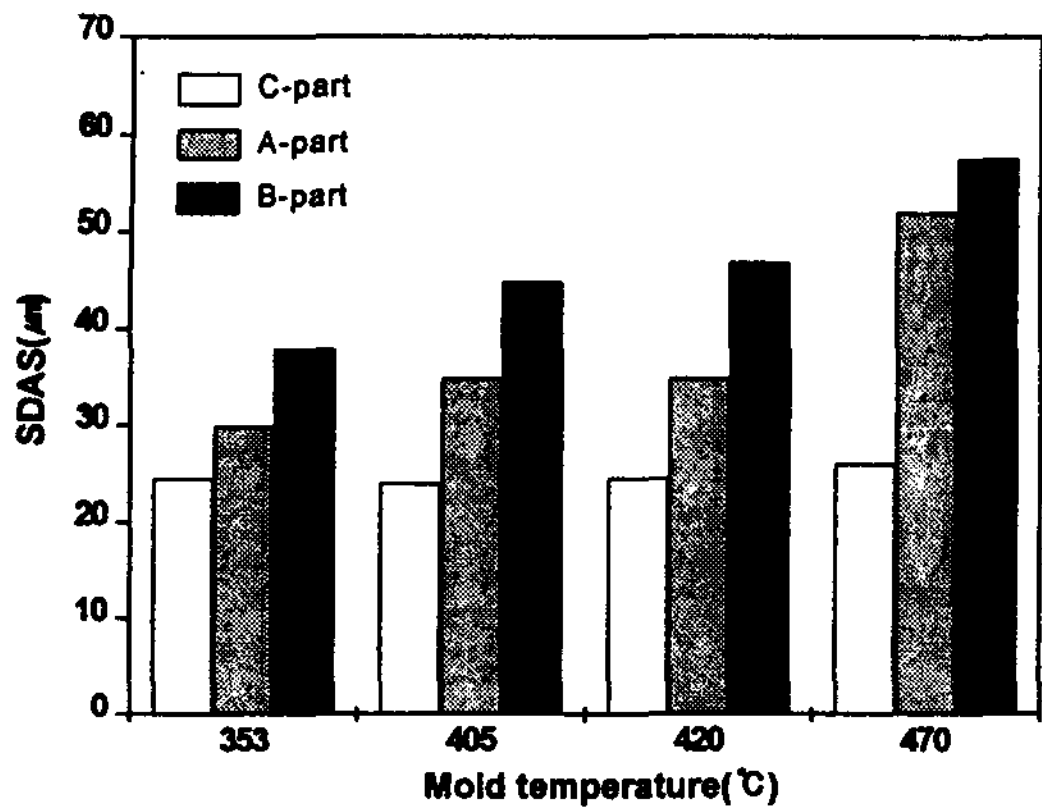


Fig. 5. Secondary dendrite arm spacing for the variation of mold temperature at A, B and C-part.

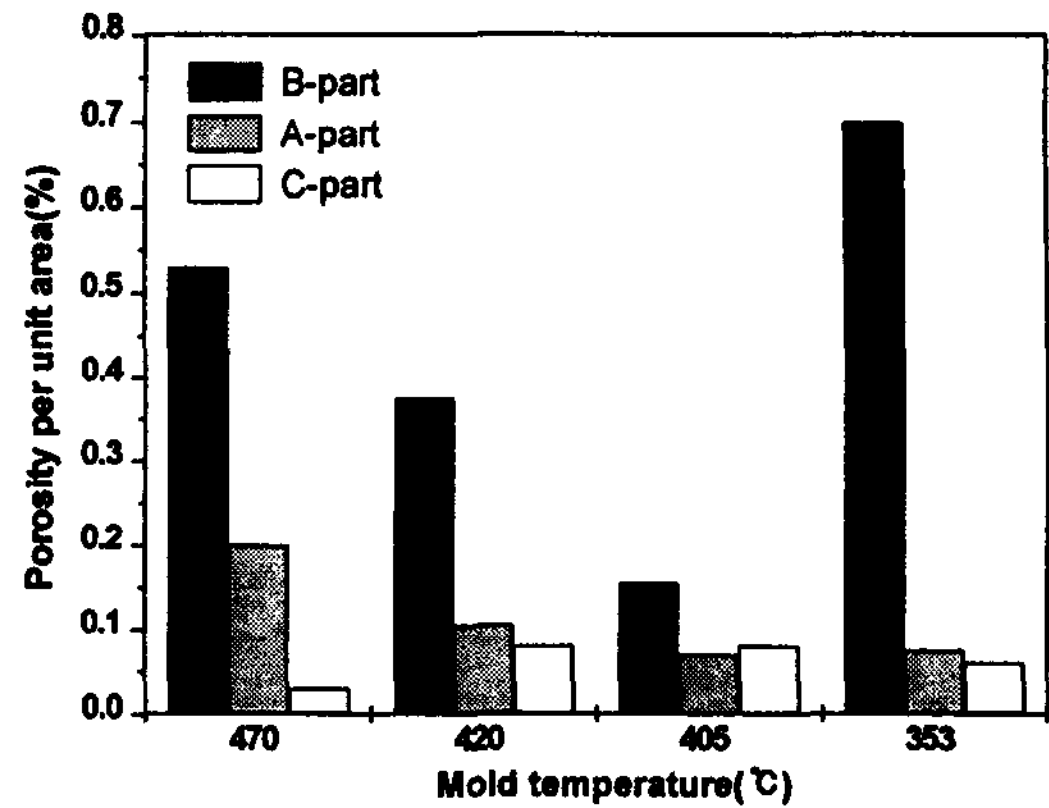


Fig. 6. The variation of porosity per unit area according to the various mold temperatures at A, B and C-part.

소시킴으로써 냉각속도의 증가에 따른 수지상간격의 감소 및 기계적성질의 향상효과가 클 것으로 생각된다[12]. 그러나 금형온도가 너무 낮을 경우 용탕유입 불량(misrun)에 의한 주조품의 외관뿐만 아니라 내부적인 결함(기공)의 발생으로 주조품의 품질(quility)에 문제가 발생함으로 적절한 금형온도를 설정하여야 할 것으로 판단된다.

3.3 기공도

기공의 양과 평균기공의 크기는 냉각속도를 증대시켜 줌으로써 효과적으로 감소시킬 수 있다. 즉, 응고속도가 증가됨에 따라 수소와 같은 가스는 수지상간의 공간으로 확산할 수 있는 시간적 여유가 적어짐으로써 내부 가스압력이 감소되어 기공형성이 감소될 수 있다. 그리고 일단 기공이 핵생성 되었을때 시간변수는 잔류가스들이 기공으로 확산해가는 것을 방해할 것이므로 그 크기는 작아지게 된다. 또한 빠른 냉각속도는 수축공 압력에 영향을 준다[13]. 즉, 용탕과의 온도구배가 커질수록 더 빨리 응고될 것이며 이들은 망상의 수지상조직의 길이를 제한하며 용탕충진(feeding)을 쉽게하여 기공의 형성이 감소될 수 있다. 이와 같이 다량의 기공은 느린 응고속도에 의해서 또는 과열된 금형에 의해서 용탕과의 온도구배가 작아져 쉽게 기공을 형성시키므로 여겨진다.

Fig. 6은 영상분석기(image analyzer)를 이용하여 금형온도 변화에 따른 단위면적당 기공도를 측정하는 것이다. 금형온도 및 이차수지상간격이 가장 높았던

B-part는 가장 높은 기공도를 보이고 있으며, 금형온도가 감소함에 따라 기공도가 크게 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 금형온도가 353°C인 경우 B-part는 기공도가 큰 폭으로 다시 증가함을 알 수 있다. 이러한 이유는 낮은 금형온도에서 지향성응고가 이루어지지 못했기 때문으로 저압주조시 B-part의 응고수축에 대한 A-part의 용탕공급 부족에 기인한 수축공 증가로 생각된다. 금형온도 405°C는 A-part와 B-part에서 모두 매우 낮은 기공도를 나타내었지만, C-part에서는 금형온도가 405°C일 경우가 다른 금형온도에서 저압주조한 경우보다 기공도가 다소 높게 측정되었다. 결론적으로 저압주조 시 기공의 분포는 응고양상과 매우 밀접한 관계가 있다. 따라서 제조한 시편의 부위별 이차수지상간격 측정을 통한 이론적 냉각속도를 계산하여 응고양상을 예측하여 보았다. 기공의 발생량이 매우 적은 C-part는 이론적 냉각속도가 3.4°C/sec였으며, 최대 0.7% 정도로 매우 높은 기공도를 보인 B-part는 0.89°C/sec로 계산되었다. 시편에서의 응고양상은 C-part에서 제일 먼저 응고가 이루어진후 A-part, B-part의 순서로 응고가 진행됨을 알 수 있다. 이렇게 지향성응고가 이루어지지 않을 경우 주조품은 내부에 많은 기공을 형성시키며 기계적성질의 큰 감소를 유발한다. 따라서 금형의 온도기울기 조절을 통한 응고양상 변화는 기공의 감소뿐만 아니라 제품의 질을 향상시킬 것으로 생각된다. 주물에 형성되어진 대부분의 미세기공은 가스와 수축공의 조합으로 이루어지며, 큰 기공은 대부분 주물품의 응고시 발생하는 수축공 때문이다. 이러한 기공의 발

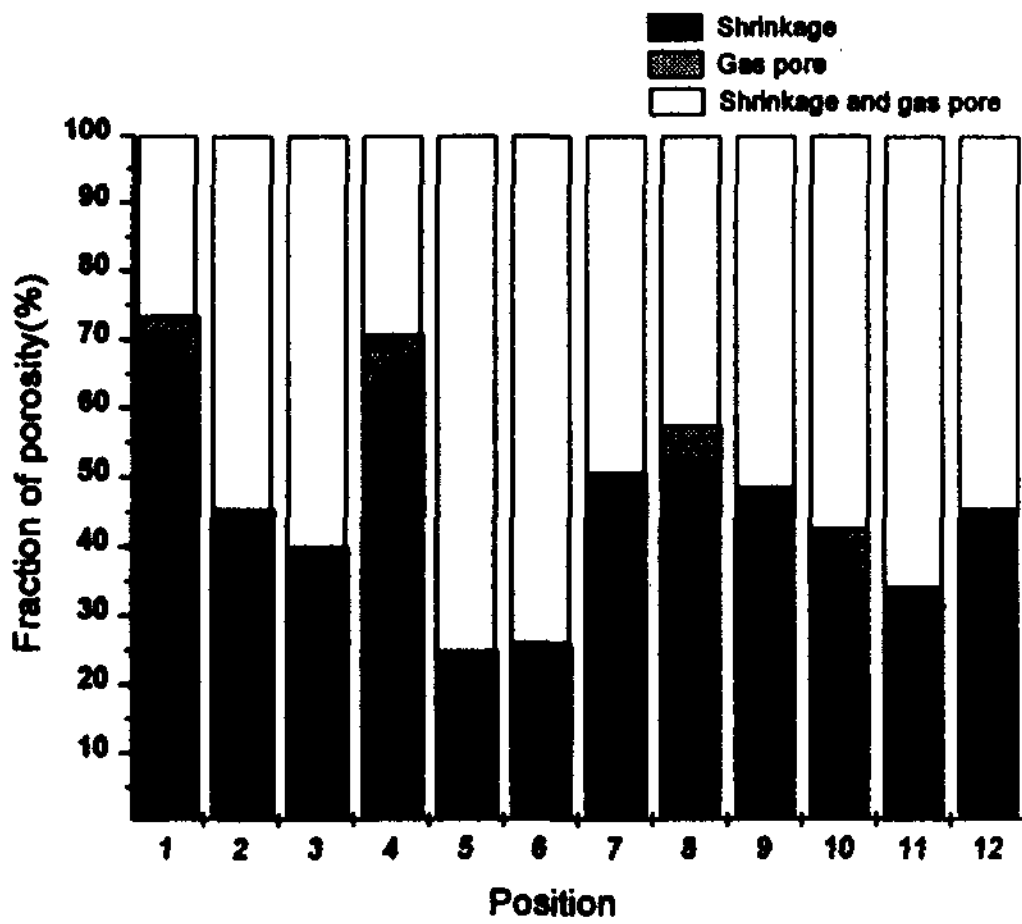


Fig. 7. Fraction of porosities classified by shrinkage, gas pore, and shrinkage & gas pore in B-part of as-cast specimen fabricated to mold temperature 470°C.

생원인을 알아보기 위하여 기공의 발생빈도수가 가장 높은 B-part를 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 5×5 mm의 크기로 나눈 후 위치별 기공의 형상에 따른 상대분율을 계산하였다.

Fig. 7은 기공의 형상에 따라 수축공, 가스기공, 수축 및 가스의 혼합형으로 분류하여 상대분율을 계산한 결과이다. 대부분 수축 및 수축과 가스의 혼합에 의한 기공[13]으로 나타났으며, 응고수축이 B-part 기공발생의 주된 원인으로 나타났다. 이때 관찰된 수축공 및 가스기공을 Photo 2에 보이고 있다.

Fig. 8은 X-선을 이용하여 비파괴시험한 결과이다.

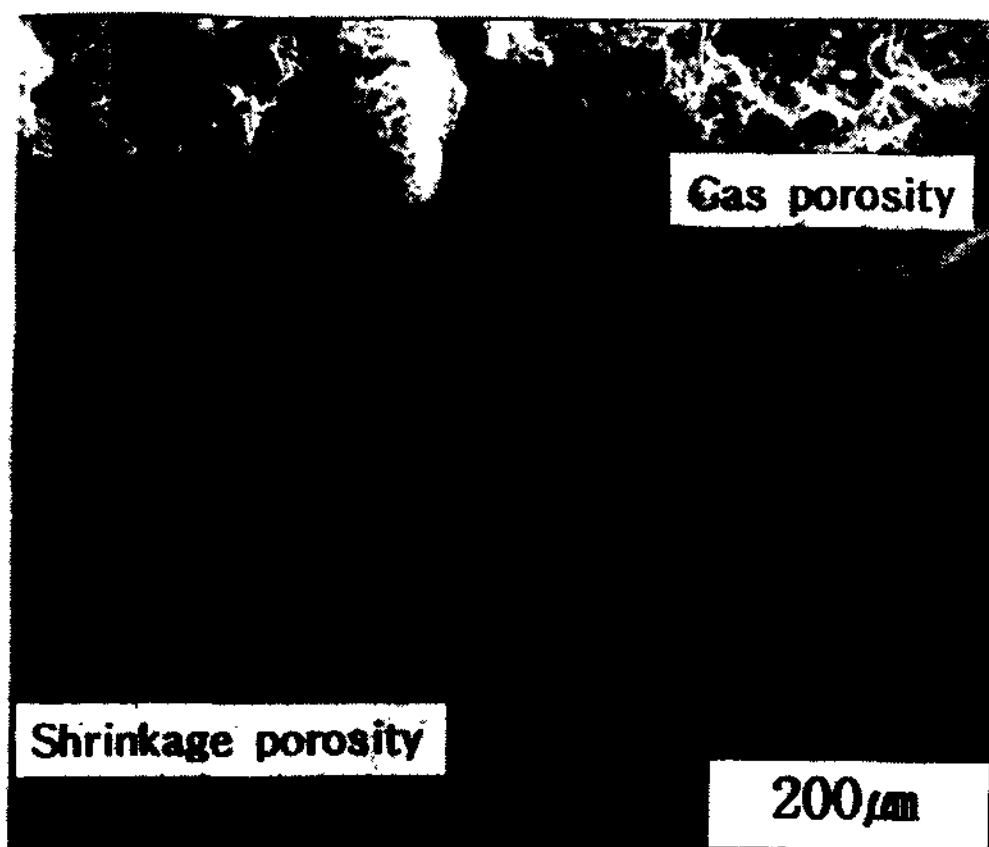


Photo 2. SEM images for the various morphology of porosity in B-part.

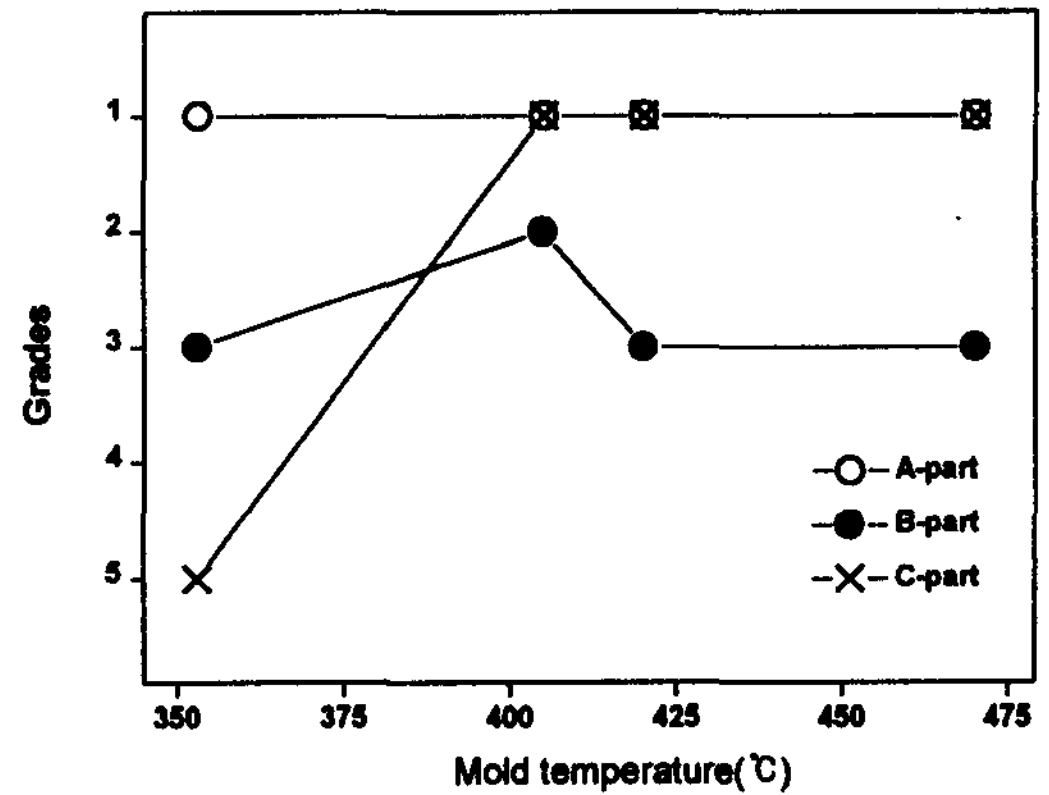


Fig. 8. The result of non destructive test for various mold temperature at A, B, and C-part.

이때 낮은 등급(grades)일수록 기공도가 적음을 의미하는 것이다. 분석결과 금형온도 405°C에서 2등급 이상의 우수한 비파괴등급이 얻어졌으며, 이러한 결과는 영상분석을 이용하여 기공도를 측정된 결과와 잘 일치하였다. A-part의 경우 모든 금형온도 조건에서 문제가 없었으나, B-part 및 C-part의 경우 낮은 금형온도인 350°C 조건에서 높은 비파괴 등급으로 주물품 내에 기공도가 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 낮은 금형온도로 인한 빠른 냉각속도에도 불구하고 오히려 기공도가 증가하는 것으로 주물 응고시 수축보상 및 용탕충진에 문제가 있었던 것으로 판단된다.

3.4 기계적 성질

기공도 및 냉각속도가 기계적성질에 미치는 영향관계를 알아보기 위하여 금형온도 470°C에서 저압주조한 시편을 T6열처리 후 금형온도가 다른 세 부위에 대해서 인장시험, 충격시험, 경도시험을 행하였다.

Fig. 9는 열처리한 시편의 이차수지상간격 변화에 따른 기공도 및 기계적성질 변화를 나타낸 것이다. 저압주조품의 인장시험결과 금형의 온도가 높은 A-part 및 B-part의 경우 최대인장강도는 248 MPa과 224.7 MPa로 나타났으며, 연신율은 5.7%과 4.8%로 나타났 다. 그러나 금형온도가 낮은 C-part의 경우 최대인장 강도는 276 MPa을 나타내었으며, 연신율은 9.7%를 나타내었다. 또한 충격강도는 금형온도가 높은 A-part 및 B-part는 0.43~0.45 kgfm/cm²로 나타났으며, 금형온도가 낮은 C-part는 0.63 kgfm/cm²로 나타났다. 인장강도, 연신율 및 충격값은 기공도 및 이차수지상간

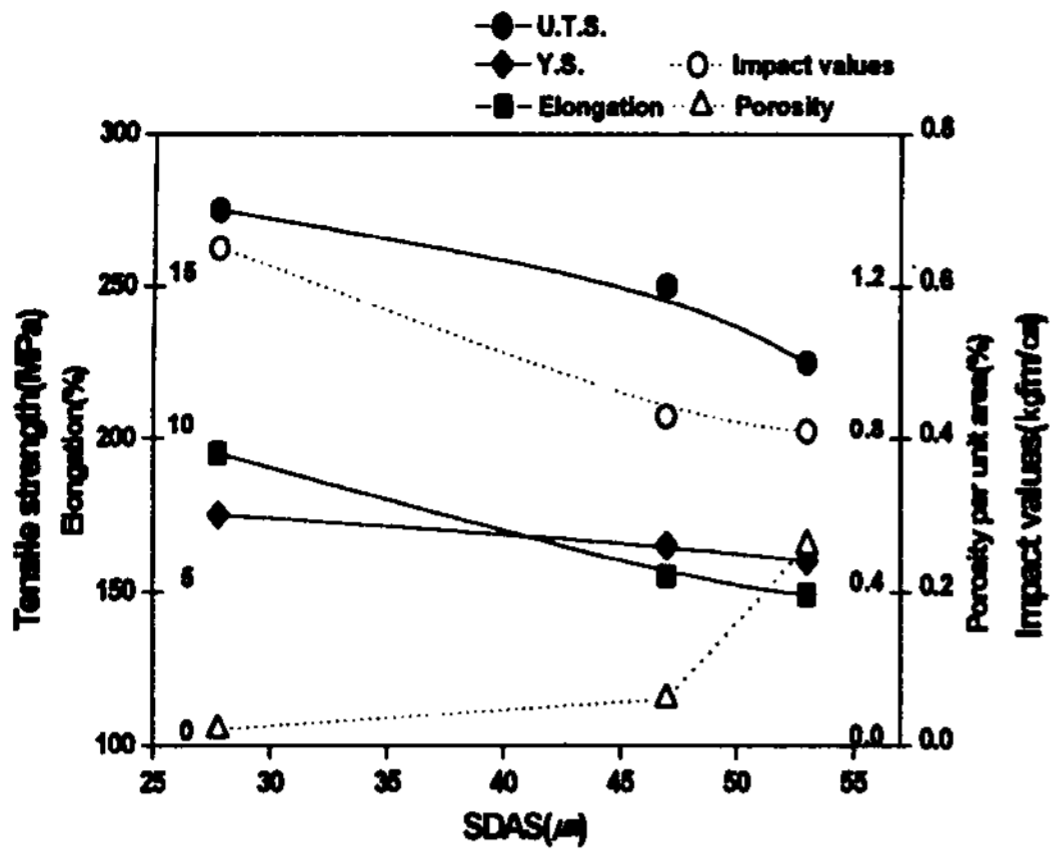


Fig. 9. Variation of porosities and mechanical properties at T_6 heat treated specimens.

격이 증가할수록 크게 감소하였으나, 항복강도는 거의 변화하지 않았다. 이는 항복강도가 조직의 결함보

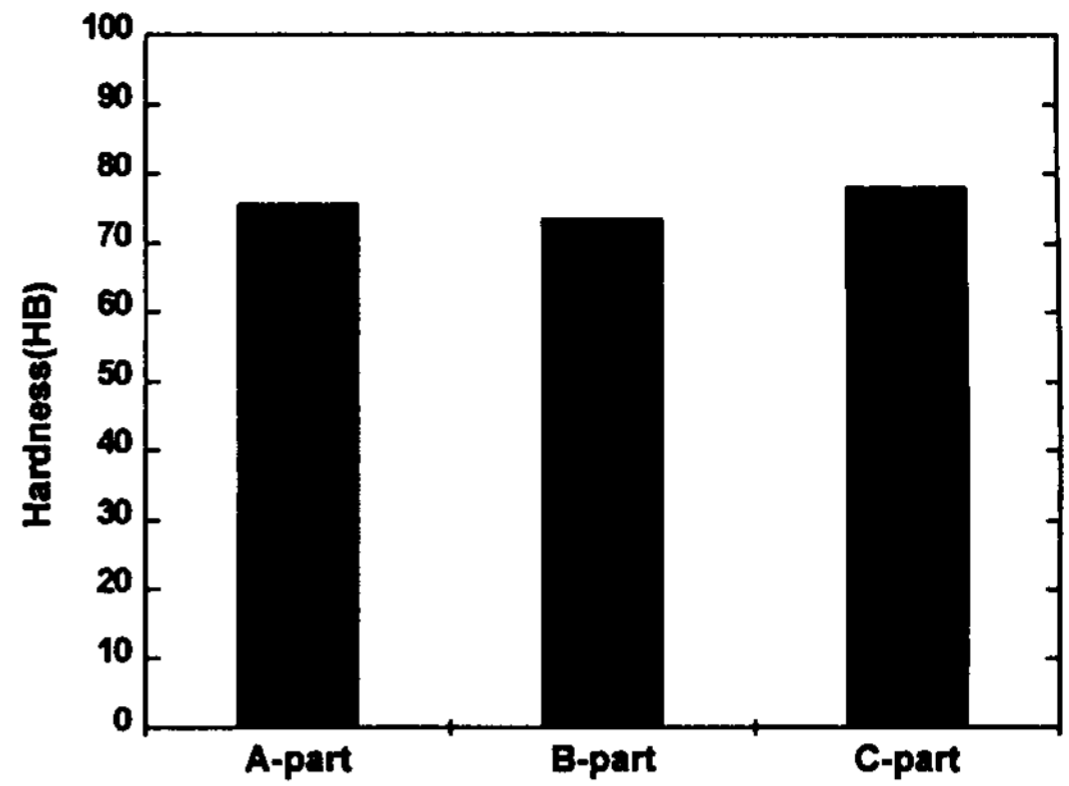


Fig. 10. Result of brinell hardness test for A, B, and C-part at T_6 heat treated specimens.

다는 알루미늄기지의 금속학적 상태에 관련이 있기 때문이다[13]. 충격시험시 표면이나 내부기공은 충격 하중을 받는 동안 응력을 집중시켜 합금의 충격강도

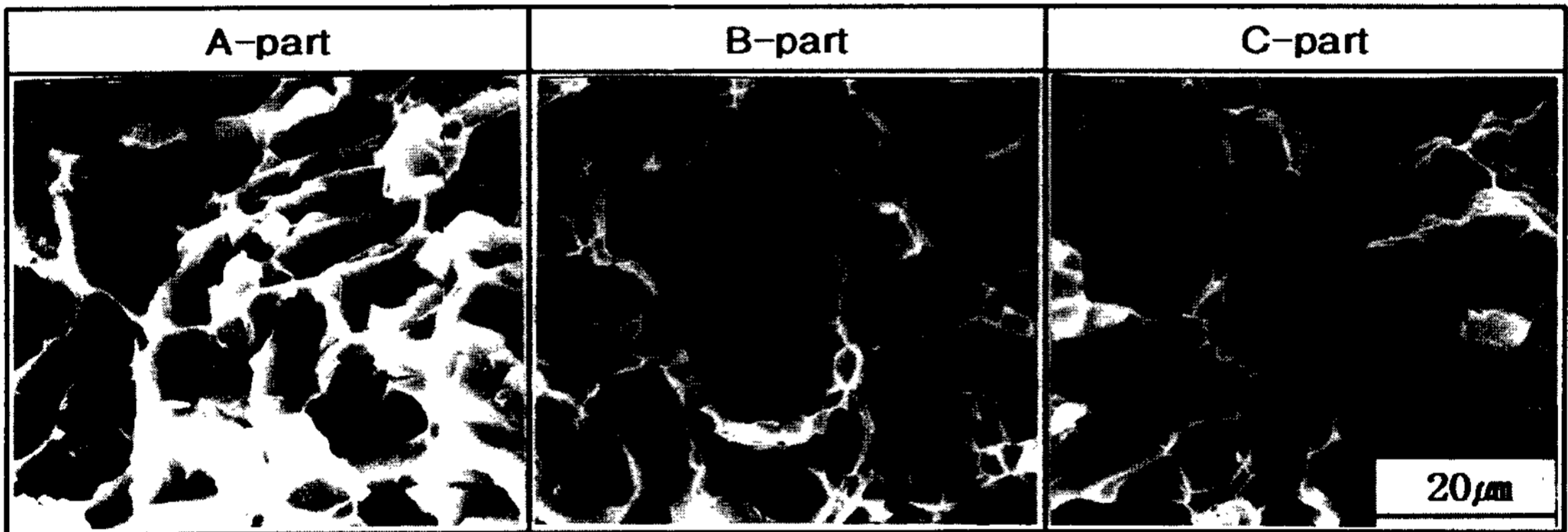


Photo 3. Scanning electron microfractographs of tensile test specimens.

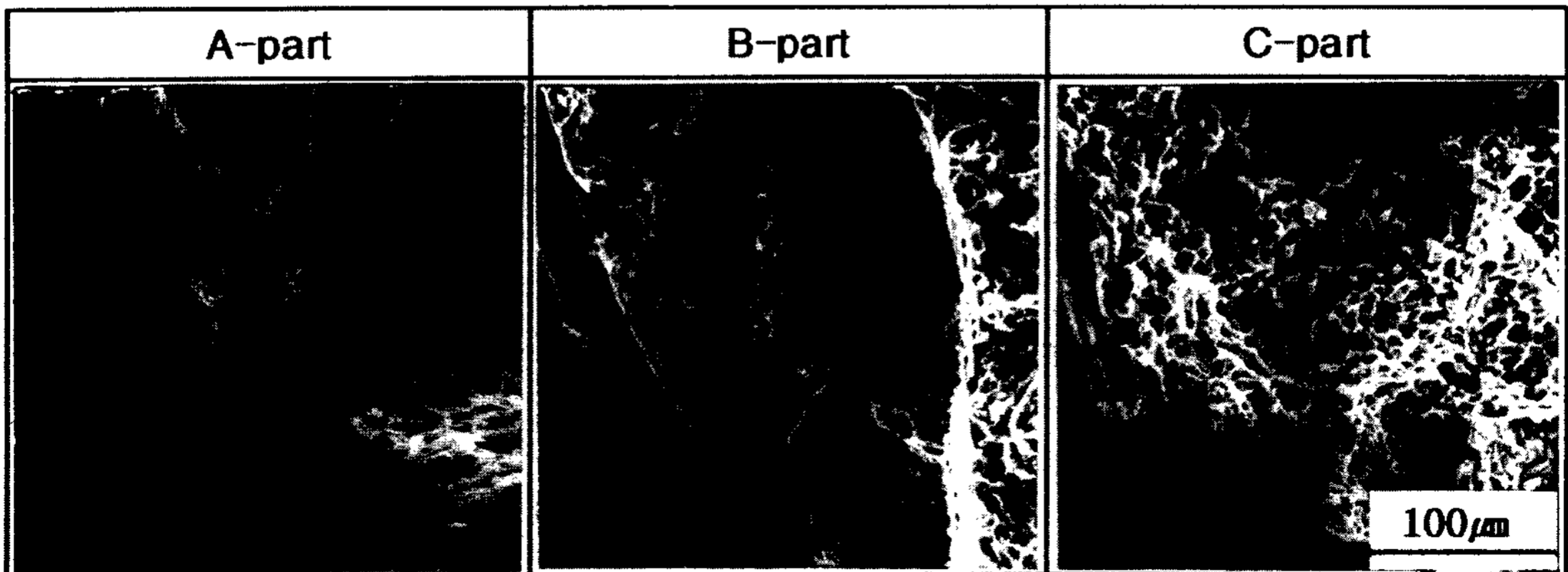


Photo 4. Scanning electron microfractographs of Charpy impact test specimens.

를 저하시킨 것으로 여겨지며, 이러한 기공은 균열의 원인이 되는 것으로 알려져 있다[14].

Fig. 10은 열처리한 시편을 경도시험한 결과이다. 부위에 따라 경도값에 큰 차이는 없는 것으로 나타났지만, 다소 변화하는 것으로 보아 공정 Si 및 Mg₂Si의 분포에 영향을 받는 것으로 판단된다.

Photo 3, Photo 4는 열처리한 시편을 인장 및 충격시험 후 파면을 관찰한 것으로, 낮은 금형온도인 C-part가 높은 인장 및 충격값을 보였으며 다른 부위의 파면에 비하여 정방형의 미세한 dimple파면을 보이고 있다.

4. 결 론

저압주조시 금형온도 문제로 수반되는 기공의 형성으로 인한 주물의 품질저하 및 불량률의 증가문제 등을 극복하기 위해서 금형온도 변화에 따른 저압주조품의 각 부위별 미세조직, 이차수지상간격(SDAS), 기공도를 측정하고 기계적성질을 평가하여 금형온도가 저압주조품에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이차수지상간격(SDAS)을 측정한 결과 금형온도를 감소시킴에 따라 점차적으로 감소하였다. 이는 금형온도를 낮춤으로서 냉각속도의 증가에 의한 것으로 판단되어지며, 이에 따른 기계적성질의 향상효과가 클 것으로 여겨진다. 그러나 금형온도가 너무 낮을 경우 용탕 유입 불량(misrun)에 의한 주조품의 외관 뿐만아니라 내부적인 결함(기공)의 발생으로 주조품의 품질에 문제가 발생함으로 적절한 금형온도 설정 및 지향성응고를 위한 금형의 온도 구배가 필요한 것으로 생각된다.

2. 금형온도를 353°C, 405°C, 420°C, 470°C로 변화하여 저압주조한 시편의 단위면적당 기공도 및 비파괴시험 결과 금형온도 405°C가 최적의 조건으로 나타났다. 405°C를 기준으로 금형온도가 높을 경우 지향성응고를 유도할 수 있는 금형의 부위별 온도구배가 필요하며, 금형온도가 낮을 경우 빠른 응고에 의한 주물품 끝부분의 용탕충진(feeding)에 문제가 있는 것으로 나타났다.

3. 금형온도 변화에 따른 기공도 및 기계적성질 변화를 측정한 결과 금형온도가 증가할수록 기공발생에 의한 인장강도, 연신율 및 충격값은 크게 감소하였으나, 항복강도는 거의 변화하지 않았다. 이는 항복강도가 조직의 결합보다는 알루미늄기지의 금속학적 상태에 관련이 있기 때문으로 생각된다.

4. 지향성응고가 이루어지지 않은 저압주조품에서 최종 응고부의 기공형성은 응고수축이 주원인으로 나타났다.

후 기

본 연구의 일부는 1997년도 인하대학교 교내연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Toshihiro CHIKADA, 輕金屬, 38 (1988), 118.
- [2] 日立金屬(株), 素形材, (1993) 11.
- [3] 최정철, 박익민, 윤의박, 남태운, JUJO, 7, 6 (1987), 179.
- [4] 김정호, 윤의박, 夏季技術講演大會(概要集), (1996), 89.
- [5] N. Roy, A. M. Samuel and F. H. Samuel, Metall. Trans., 27A (1996), 415.
- [6] R. N. Grugel, Journal of Materials science, 28 (1993), 677.
- [7] K. Radhakrishna, S. Seshan and M. R. Seshadri, AFS Trans., 87-80, 695.
- [8] ASTM E-8, Annual book of ASTM standards, (1994), 60.
- [9] ASTM E-23, Annual book of ASTM standards, (1994), 140.
- [10] 李鍾南, 普成文化社, (1993), 387.
- [11] 강효경, 천병욱, 최창욱, JUJO, 13, 5 (1993), 64.
- [12] O. Vorren, J. E. Evensen and T. B. Pedersen, AFS Trans., 84-162, 459.
- [13] John E. Gruzleski and Bernard M. Closset, The American Foundrymen's Society. Inc., (1990), 143.
- [14] W. LaOrchan, J. E. Gruzleski, AFS Trans., 92-39, 415.