

■■■■■■■■■■
論 文
 ■■■■■■■■■■

AZ91HP 마그네슘합금의 기계적성질에 미치는 다이캐스팅 조건의 영향

안용식[†] · F.Klein^{*}

Effect of Die Casting Condition on the Mechanical Properties of AZ91HP Mg Alloy

Yong-Sik Ahn[†] and F. Klein^{*}

Abstract

Magnesium alloys have high strength to weight ratio and are extremely attractive for applications in transport industry. Most of structural magnesium alloys are manufactured by die casting process. The tensile properties of AZ91HP magnesium alloy were investigated after die casting under various die casting conditions. After die casting by using cold chamber machine, the volume porosity of specimens was examined with density method. With the increase of the volume porosity of specimens, both the tensile strength and elongation were significantly decreased, however the 0.2% offset strength was almost independent of the amount of porosity. With the increase of crystal pressure from 500 to 900 bar during die casting, the volume porosity was decreased, which resulted in the increase of the tensile strength. The mould temperature within the range of 150~250°C has not influenced the microstructure with the eutectic phase and tensile properties of specimens. The tensile strength was the highest at 90 m/sec of gate speed.

(Received March 23, 2002)

Key words: Mg-alloy, Die-casting, Porosity, Mechanical Properties.

1. 서 론

마그네슘합금은 높은 생산가격, 생산기술의 어려움 및 낮은 내식성 등의 이유로 인하여 종래에는 그 응용 분야가 넓지는 않았으나, 1990년대 이후 생산기술의 향상에 의해 생산단가가 낮아지고 많은 성공적인 노력에 의해 부식저항성도 크게 향상되어 현재는 그 적용 분야가 급속히 증가하고 있다. 특히 마그네슘합금은 경량신소재로서 철강소재 대비 22%, 알루미늄 소재 대비 66%의 밀도를 가지고 있으며, 피로강도가 알루미늄합금보다 높고 damping capacity가 우수하여 항공기 및 자동차용 구조재료로서 최적의 조건을 갖추고 있다. 또한 비강도는 이때까지 개발된 어떠한 소재보다 높고 지구상에 자원이 무궁무진하며 100% 재활용이 가능하다는 장점 등을 가지고 있다. 따라서 각 국

에서 이에 따른 연구가 활발하게 진행되고 있으며 그 연구방향은 현재 마그네슘합금이 가지고 있는 사용상의 문제점 즉 복잡한 형상의 주조기술을 비롯하여, 열악한 고온특성, 내식성, 크리프특성 등을 향상시키는 것이 연구의 목표가 되고 있다.

한편 최근의 자동차에는 steering columns, air bag 등의 부착에 의해 무게가 증가하고, 연비향상 및 공해감소 등의 요구에 의해 경량화의 필요성이 증대하여 90년대 이후 미국, 독일, 일본 등에서 cylinder head cover, transmission housing, brake pedal brackets, intake manifold cover 및 chamber 등에 마그네슘합금을 적용하고자 하는 연구를 진행 중에 있다[1-4]. International Magnesium Association (IMA)에서 나온 통계에 의하면 대부분의 자동차용 마그네슘합금은 pressure 다이캐스팅에 의하여 제조되며, pressure 다이

국립부경대학교 재료공학과(School of Materials Science & Eng., Pukyong National University)

*독일 알렌공과대학교(Aalen University of Applied Science, Aalen, Germany)

[†]E-mail : ysahn@pknu.ac.kr

캐스팅은 가장 near-net-shape에 가깝게 제조할 수 있는 특징과 함께 1 mm 이하의 얇은 판재형태로도 생산이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 마그네슘합금은 용융금속의 유동성이 우수하고 용융온도가 낮기 때문에, 알루미늄의 다이캐스팅에 비교하여 shot cycle이 짧으며 금형의 수명도 알루미늄합금의 다이캐스팅 시보다 1-2배 길어진다는 장점이 있다[5-8].

AZ91HP합금은 마그네슘합금 중 가장 널리 사용되는 합금중의 하나이다. Al합금으로 수행하였던 이전의 연구[9-12]에 의하면, 주조품의 volume porosity가 기계적 성질에 치명적인 영향을 주는 것으로 나타났으며, 최근의 연구[13]에서는 마그네슘합금에서도 유사한 영향을 가진다는 것을 알게 되었다. 다이캐스팅 중 volume porosity는 금속 melt의 form filling 또는 액상금속의 응고 동안에 발생하며, 이것의 발생을 억제하는 것은 실제 제조 공정상에서 매우 어려우며, 이러한 porosity에 영향을 주는 다이캐스팅 조건들은 gate speed, melt temperature와 pressure hold time 등으로 알려져 있다.

본 연구에서는 여러 가지 다이캐스팅 조건 하에서 제조된 AZ91HP합금을 가지고 인장성질을 조사하여 각 다이캐스팅 조건이 인장성질에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

2. 실험재료 및 방법

AZ91HP 마그네슘합금을 GDK200 cold chamber die-casting machine (Mueller-Weingarten, locking force: 250 ton)에서 고압 다이캐스팅하였다. Table 1은 사용된 AZ91HP합금의 합금성분을 나타내고 있다. 시험 시의 다이캐스팅 조건은 Table 2에 나타내고 있으며 시험결과의 신뢰성을 높이기 위하여 동일한 조건에서 5~10개의 시편을 제조하여 기계적 성질을 시험하였다. 다이캐스팅 작업 전에는 금형의 온도를 조절하

기 위하여 일정온도에 유지된 냉각유를 약 1시간 정도 금형사이에 유동시켜 금형의 표면온도가 시험온도에 도달한 후에 작업을 시작하였으며 각각의 다이캐스팅 후에도 냉각유의 온도 및 유량을 적절히 조절함으로써 금형표면부가 시험온도에 유지되도록 하였다. 금형의 형태는 두께 10 mm의 인장시험편 형상과 동일하였다.

인장시험 전 모든 시편은 X-ray 관찰에 의해서 대략적인 porosity를 조사하였으며 이 때 Porosity가 비정상적으로 많이 나타났거나 내부균열이 관찰된 시편은 시험대상에서 제외하였다. 정량적인 volume porosity 측정을 위하여 밀도 $0.99950 \pm 5.6 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ 인 mess fluid를 가지고 Archimedes의 원리에 의해 시편의 실제밀도를 측정하였으며 이러한 방법에 의한 측정오차는 약 $\pm 1.2 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ 로 알려져 있다. 측정된 밀도와 이상밀도(ideal density: 1.811 g/cm^3)를 비교하여 각 시편의 volume porosity를 계산하였다.

인장시험은 최대하중 10 ton 인 Zwick사의 인장시험기에 의해 실시되었으며 인장시편(규격: DIN 50125)은 두께 10 mm 게이지부 폭 30 mm, 길이 100 mm 판재 형태이었다. 시험 시 cross head speed는 1 mm/min로 고정하였고, 시험시의 온도는 20~200°C 범위이었다. 인장시험 동안 시편과 그립 및 extensometer를 포함하는 챔버 내부 전체가 동일한 온도가 되도록 유지하였다.

각 시편의 미세조직을 조사하기 위해 시편은 연마 후 2% nital 용액에서 수초 또는 수분간 에칭하고 즉시 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 결 과

3.1 시험온도에 따른 인장특성의 영향

Fig. 1은 동일한 다이캐스팅조건 (금형 온도:150°C, Gate speed: 90 m/s, 주조압력: 900 bar)하에서 주조된 시험편을 가지고 인장시험한 재료의 인장-변형률 곡선

Table 1. The compositions of used magnesium alloy (wt %)

Elements	Al	Zn	Mn	Ni	Fe	Cu	Si	Mg
AZ91HP	8.53	0.92	0.17	0.01	0.004	0.015	0.05	balance

Table 2. The parameters of applied high pressure die casting

Mouldtemperature (°C)	Gatespeed (m/s)	Crystal pressure (bar)	Casting Temperature (°C)	Hold time ofpressure (sec)
150 ~ 250	50 ~ 120	500 ~ 900	670 ~ 690	7

을 나타내고 있다. 곡선에서 보면 상온(R.T; Room Temperature)에서 시험한 재료의 경우에도 항복점 이후 인장곡선에서 뚜렷한 소성변형 구간 및 가공경화영역이 나타나고 있다. 인장시험온도가 100°C일 때는 연신율의 증가만 약간 나타났을 뿐 상온에서의 경우와 같이 인장강도가 약 200 MPa이고, 인장곡선의 형태 역시 상온에서의 결과와 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 그러나 시험온도 200°C에서는 강도가 약간 감소하고 연신율은 약 10%로 상온에서의 값보다 5배 정도 급격히 증가한 값을 보여주고 있다.

3.2 기계적성질에 미치는 porosity의 영향

Fig. 2는 시험된 시편 AZ91HP합금의 porosity와 인장강도 및 0.2% offset 항복강도 사이의 관계를 나타

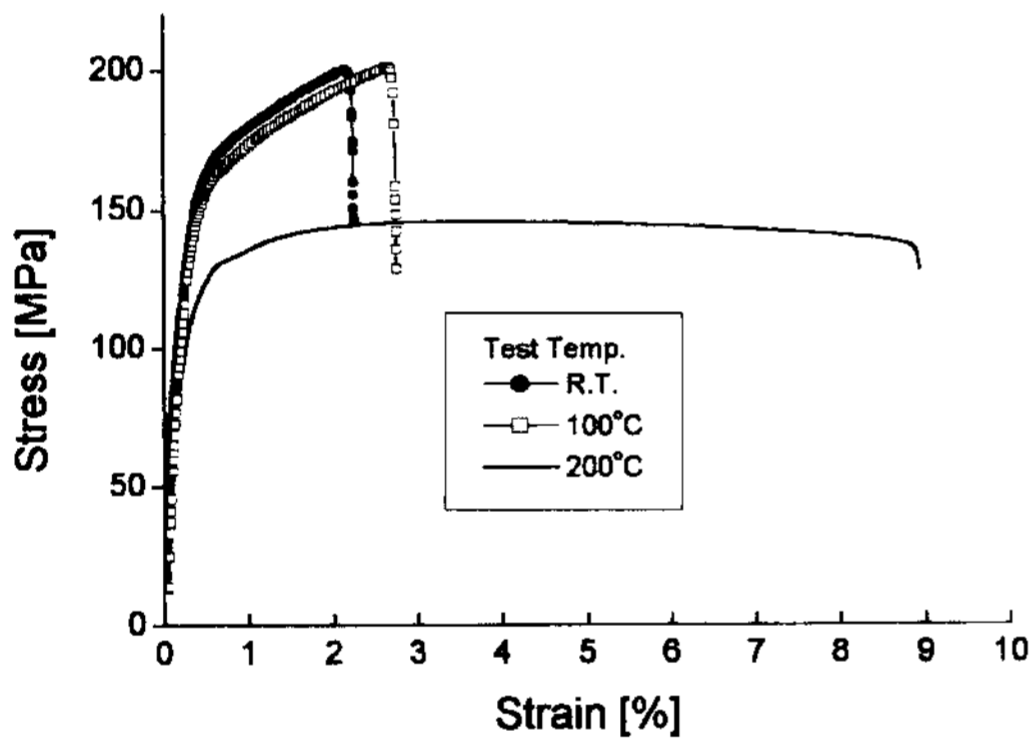


Fig. 1. The stress-strain curves of die cast AZ91HP alloy tensile tested at various temperature

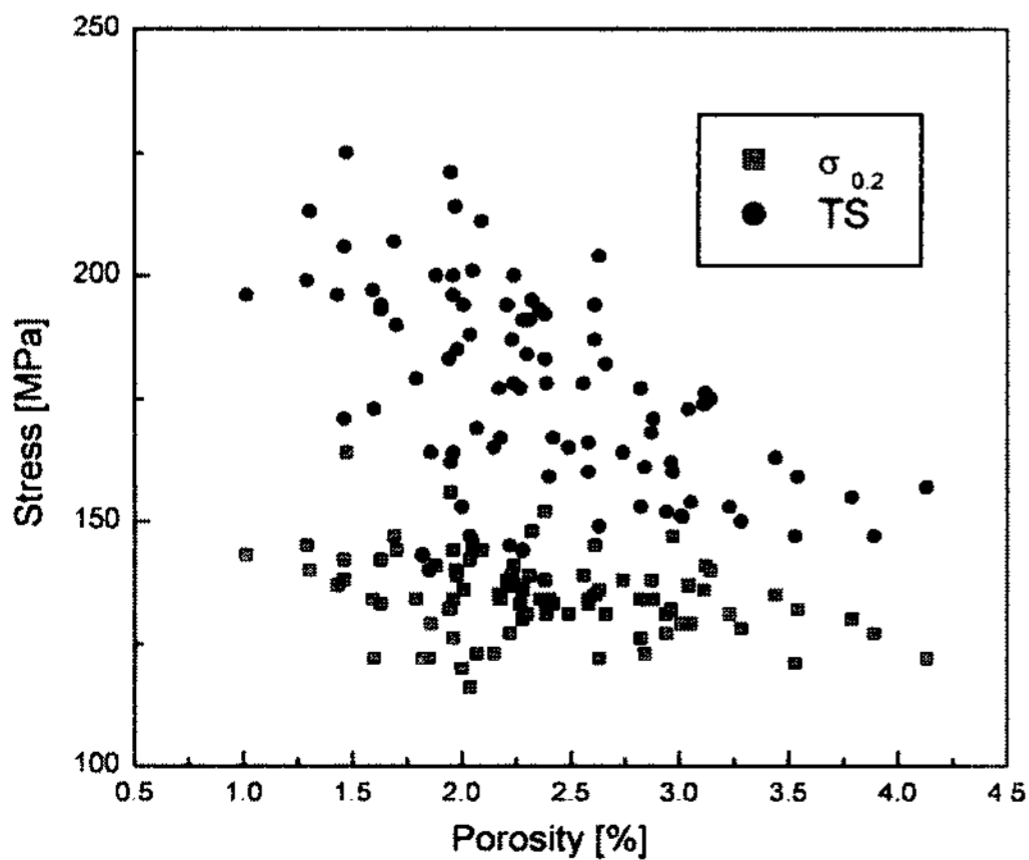


Fig. 2. The tensile strength and 0.2% offset yield strength vs. volume porosity of die cast AZ91HP alloy

내고 있다. 이 합금들은 다양한 조건에서 다이캐스팅 되었으며 20°C에서 인장시험 된 것이다. 그림에서 volume porosity는 1.0~4.0%의 범위에 있으며, porosity의 증가에 따라 인장강도는 감소하는 경향을 나타내고 있으나 0.2% offset 항복강도는 변화하지 않고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 porosity가 항복강도에 영향을 주지 않은 것은, 탄성변형 동안에 단면적의 감소에 영향을 줄 만큼 porosity의 부피분율이 전체 단면적에 비해 그다지 크지 않기 때문이며, 조직 내의 pore 및 cavity등은 탄성변형 동안에는 균열로 발전하지 않다가, 항복점 이후 소성변형 동안에 균열의 발생 지점으로 작용하였기 때문이라고 생각된다.

Fig. 3에서는 연신율과 porosity의 관계를 나타내고 있다. 연신율은 porosity의 증가와 함께 감소하고 있고 그림 2와 함께 비교하면, porosity의 증가에 따라 인장강도와 연신율이 동시에 감소하였다는 것을 알 수 있다.

그림 3에서 용융금속과 접촉하는 금형의 온도에 따른 porosity의 분포를 살펴보면 금형온도가 각각 150°C와 250°C일 때 porosity의 차이가 구별되지 않는 것을 알 수 있다. 다이캐스팅 제품에서 발견되는 volume porosity는 cavity 충전(filling) 또는 액상금속의 응고 동안에 발생하며, 이러한 porosity는 다이캐스팅 시 gate speed, melt temperature, 및 pressure hold time 등의 조건에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또한 여태까지의 많은 경험적인 결과에 의하면 금형의 온도는 주조재의 porosity에 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서 수행한 다이캐스팅이 가

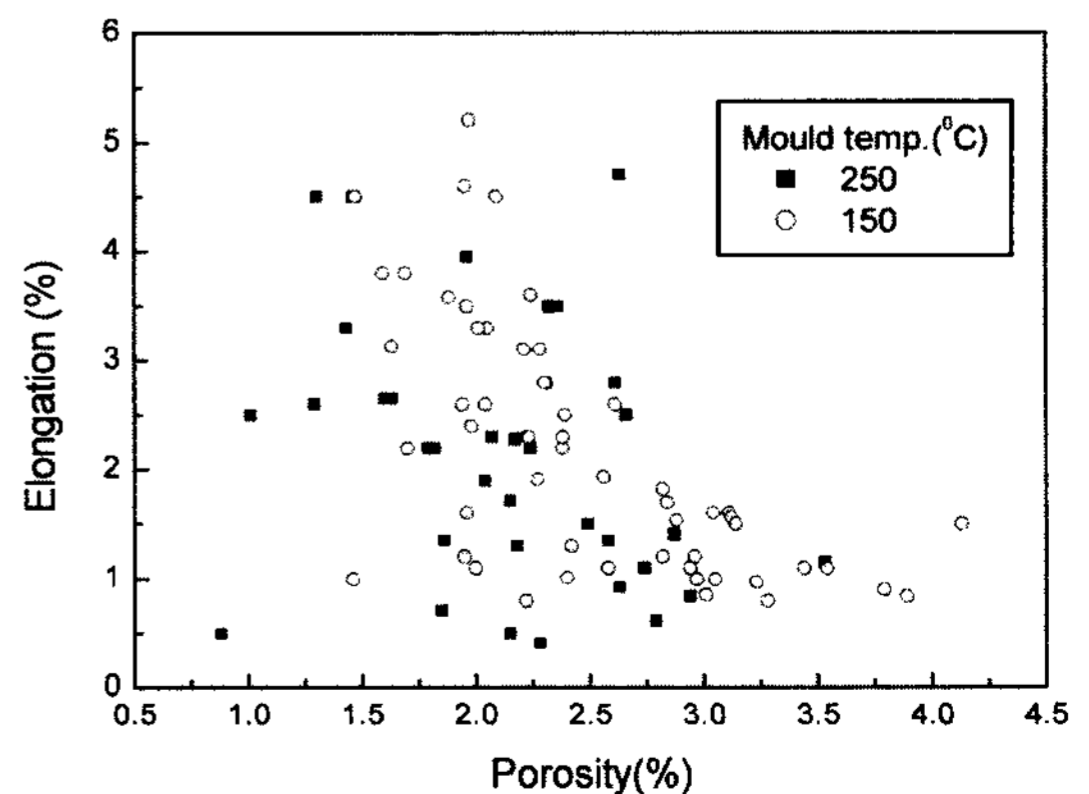


Fig. 3. Effect of porosity of the elongation of die-cast AZ91HP alloy

능한 금형의 온도범위인 150-250°C에서는 porosity의 변화가 나타나지 않았다.

3.3 인장성질에 미치는 다이캐스팅 조건의 영향

앞 장에서 인장강도는 porosity의 증가에 따라 감소하는 것을 나타내었고 이것은 다이캐스팅 조건에 따른 영향을 조사하였다. 그림 4(a), (b)에서는 각각의 금형 온도에서 주조압력(crystal pressure)이 인장강도에 미치는 영향을 나타내고 있다. 인장시편들은 동일한 온도 및 압력조건에서 각각 12~35개씩 다이캐스팅 하였고 인장강도의 범위에 따라 분류하였다. 그림에서 보면 주조압력이 900 bar일 때가 500 bar일 때 보다 금형 온도에 관계없이 평균적으로 더 높은 인장강도를 나타내고 있으며 금형 온도가 250°C일 때(a)와 150°C일 때(b)의 인장강도를 비교하여 보면 유사한 값의 분포를 나타내고 있다. 실제 금형의 온도가 낮다는 것은 주조시 용탕의 냉각속도가 더 빠르다는 것을 의미하므로 광학현미경을 이용하여 각 시편의 결정립크기를 조사

하여 보았으나 금형온도의 차이에 따른 결정립크기의 변화는 구별될 수 없을 정도로 작았고, 금속간화합물 등의 분포도 유사한 조직을 나타내었다. Fig. 5는 금형 온도 250°C에서 다이캐스팅한 재료의 미세조직을 나타내고 있으며 그림에서 결정립계는 이미 알려져 있는 바와 같이 $Mg_{17}Al_{12}$ 형태의 금속간화합물 또는 $Mg_{17}Al_{12}/Mg$ 고용체의 공정조직으로 둘러싸여 있으며 결정립의 직경은 20-30 μm 이었다. 일반적으로 금형내 cavity의 두께가 얇을 경우 냉각속도가 빨라 결정립이 미세화되어 인장강도가 상승한다고 알려져 있으나, 본 연구에서는 150°C와 250°C의 상이한 금형온도에도 불구하고 volume porosity에 영향을 미치지 못하였고(그림 3), 또한 결정립 크기 및 공정조직의 차이가 거의 발견되지 않았다. 이러한 결과가 그림 2와 4에 나타낸 바와 같이 인장강도값 및 연신율에 영향을 미치지 못하였다고 생각된다. 본 연구에서 설계된 인장시편용 금형에서 용탕의 냉각속도를 고려할 때 금형온도가 150~250°C를 벗어난 범위에서는 다이캐스팅에 의한 정상적인 주조가 불가능하다고 생각되므로, 금형온도의 변화에 의해서는 porosity의 감소 또는 인장성질의 향상 등의 효과를 기대할 수 없다고 사료된다. 한편 그림 4에서 나타내는 주조조건 중 주조압력이 높은 것이 더 높은 인장강도를 나타낸 것은 높은 주조압력이 cavity 내에서 용탕의 충전 후 작용함으로써 주조시 pore의 발생이 감소하였기 때문이며 주조압력이 900 bar 일 때가 500 bar 일 때보다 volume porosity가 평균 0.7% 더 작은 것으로 나타났다. 실제 다이캐스팅 장치의 capacity에 따라 주조압력을 증가시키는 것은 한정되어 있고, 금형의 form filling을 위해서는 금형의 온도를

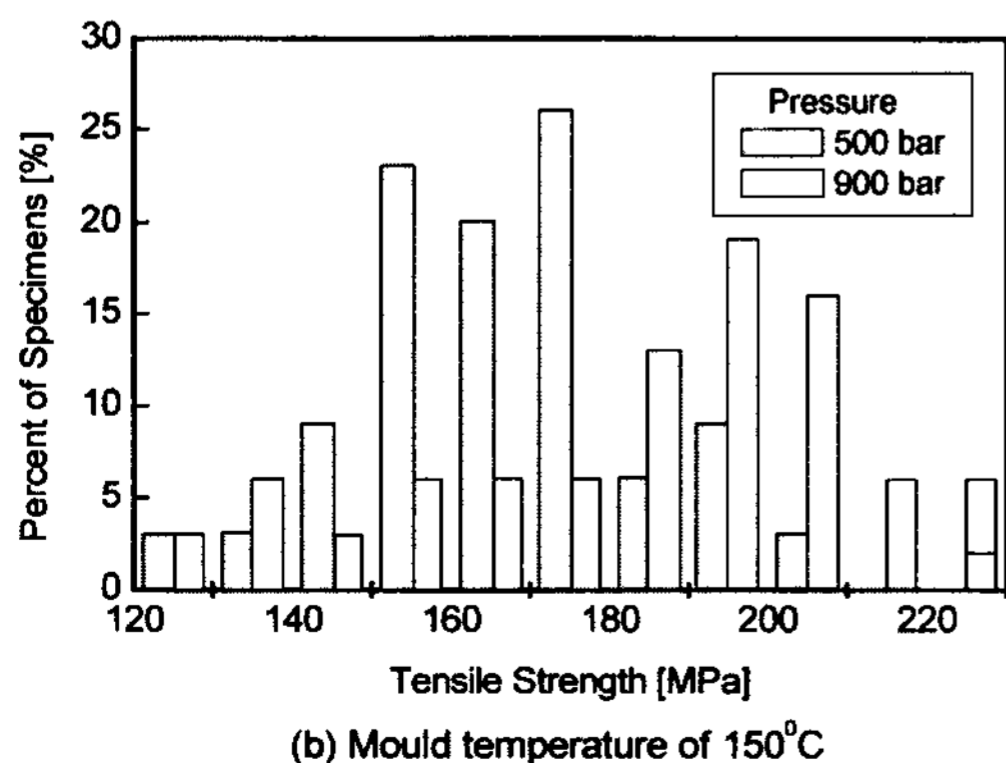
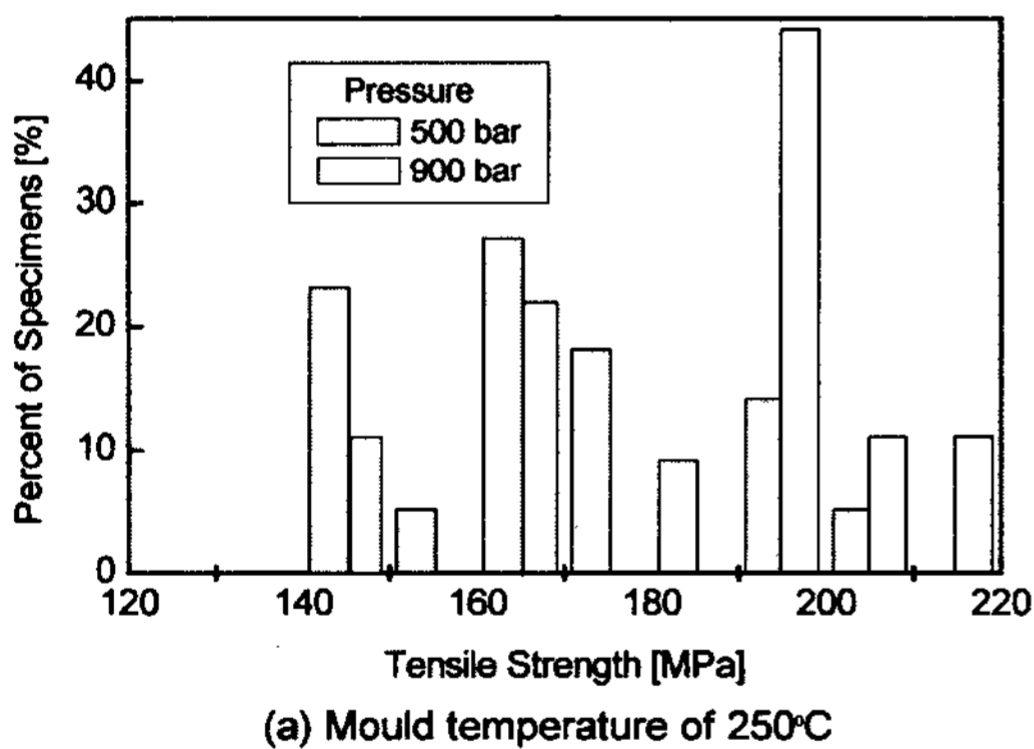


Fig. 4. The effect of crystal pressure and mould temperature on the tensile strength of AZ91HP alloy.

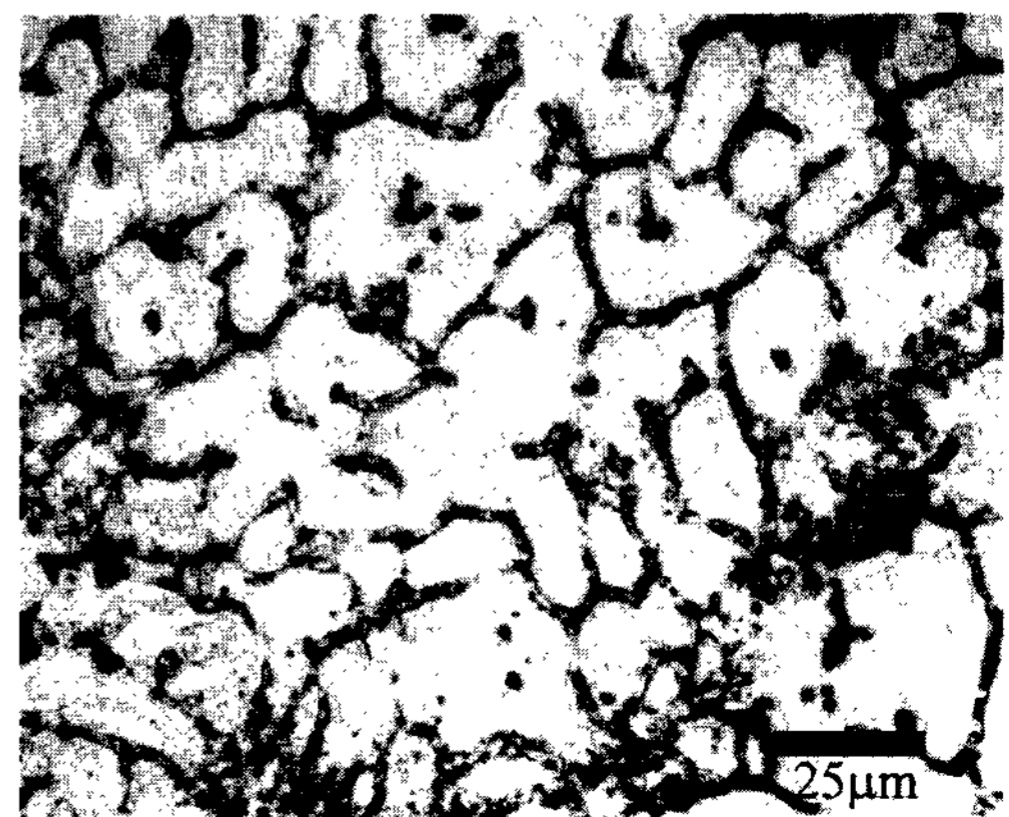


Fig. 5. The microstructure of die cast AZ91HP alloy.

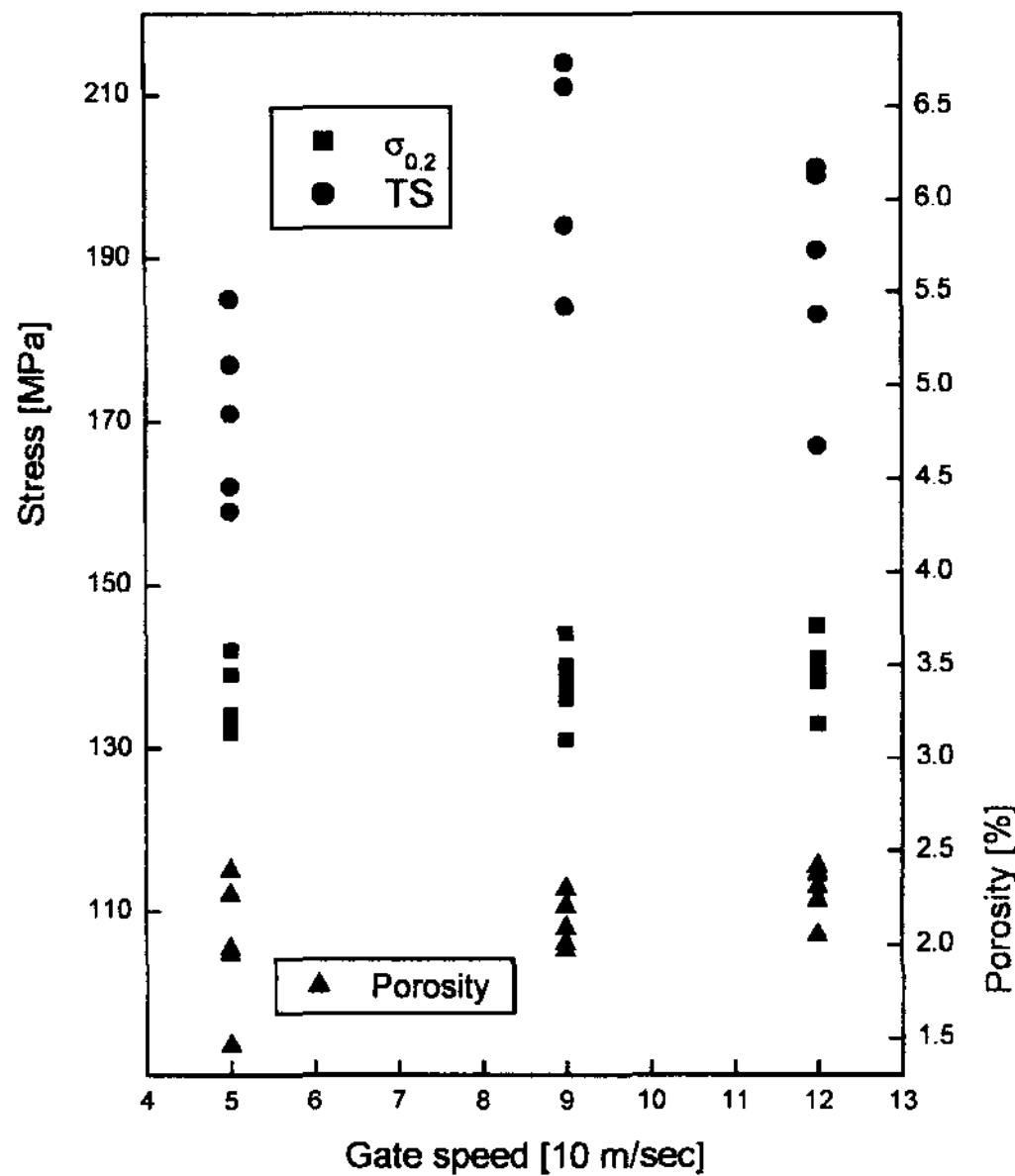


Fig. 6. Variation of strength and volume porosity of die-cast AZ91HP alloy according to the gate speed in die casting condition.

낮추는 것이 한정되어 있으므로 실제 생산시 주조품의 두께를 고려하여 이러한 조건을 설정하여야 한다고 생각된다.

그림 6에서는 gate speed에 따른 인장 및 항복강도, porosity의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보면 gate speed가 90 m/sec 일 때 porosity가 가장 작고 이 때의 인장강도가 최대인 것을 알 수 있다. 즉 gate speed가 증가하더라도 porosity의 감소가 연속적으로 나타나지 않고 어느 적정값에 이르면 porosity가 최소가 되며 이 때의 인장강도가 최대가 된다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

AZ91HP합금으로 다이캐스팅 한 후 기계적성질을 조사하여 본 결과 다음의 결론을 획득할 수 있었다.

1. 다이캐스팅 후 발생하는 volume porosity는 주조품의 기계적성질에 직접적인 영향을 미치며 인장강도와 연신율을 감소시킨다. 그러나 항복강도에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았다.

2. 다이캐스팅 조건 중 주조압력이 증가할수록 인장

강도가 상승하며 gate speed는 적정치에서 최소 porosity 및 최대의 인장강도값을 나타내며 그 이상 또는 이하일 때는 인장강도 및 연신율을 감소시킨다.

3. 본 연구에서 수행한 금형의 온도범위인 150~250°C에서는 금형의 온도가 변화하여도 주조품의 미세조직 및 결정립도의 변화가 발생하지 않았으며 또한 인장성질에도 영향을 미치지 않았다.

후 기

이 논문은 2000년도 국립 부경대학교 연구년 교수지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] "On Materials for Lean Weight Vehicles", Automotive Engineer, 23, 3 (1998) 44.
- [2] D. W. Kim, H. S. Kim and S. I. Park : "Magnesium for Automotive Applications", J. of Korean Society of Automotive Engineers, 18, 5 (1996) 53.
- [3] S. C. Park and K. S. Shin : "Mg alloys for Weight Reduction of Automobiles", Bulletin of the Kor. Inst. Met. & Mater., 9, 2 (1996) 160.
- [4] M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young : Met sci. and Eng., 25 (1976) 103.
- [5] Claude D Winandy : "Magnesium die-castings in motor vehicles", Automotive Sourcing Special Report, 1(5) (1998) 8-9.
- [6] Jo M. A. Willekens : "A Review of Global Developments in Magnesium Automotive Components", 6. Magnesium Abnehmer Seminar, 30, Sept. (1998).
- [7] M. Mabuchi, et al. : "Low temperature superplasticity in an AZ91 Magnesium alloy processed by ecae", Scr. Mater., 36 (6) (1997) 681.
- [8] Claude D. Winandy : "Magnesium die-castings in motor vehicles", Automotive Sourcing Special Report, 1(5), (1998) 1.
- [9] U. Honma and S. Kitaoka : Aluminum, vol.12, (1984) E780-783.
- [10] C. M. Sonsino and J. Ziese : In. J. Fatigue, March (1993) 75-84.
- [11] B. Skallerud : Eng. Fract. Mech., vol.44 (1993) 857-874.
- [12] B. Gieseke and V. K. Sikka: Mater. Sci. Eng., vol.A153 (1992) 520-524.
- [13] Z. Liu, L. Chen, H. Zhao, Y. Wang, Z. Wang, and F. Klein : "Solidification temperature Field of AZ91HP and Influence on Technology and Mechanical Properties of Die Castings" Metall, 54. (2000) 55.