

마그네슘 합금제 휠 제조에 관한 연구

김정구 · 신일성* · 금동화**

성균관대학교 금속재료공학부

*경원경금속(주)

**한국과학기술연구원

A Study of Manufacturing AZ91D Mg Alloy Wheel

Jung-Gu Kim, Il-Sung Shin* and Dong-Wha Kum**

Dept. of Metals and Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746

*Kyungwon Light Metal Co., Ltd.

**Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791

(1999년 1월 5일 반음, 1999년 5월 31일 최종수정본 반음)

초 록 마그네슘은 20여년간 자동차 산업에서 휠소재로 사용되어 왔다. 마그네슘 휠은 무게가 알루미늄 휠보다 25% 가벼워서 주행성이 우수하다. 이 연구의 목적은 사형주조 및 영구금형주조 공정에 의한 AZ91D 합금제 휠을 개발하는 것이다. 보호가스(SF₆+CO₂)를 사용하는 비플럭스 용해기술을 적용하여 용탕의 산화와 불순물의 유입을 배제하였다. 마그네슘 용탕은 가압식 펌프 시스템을 사용하여 가열된 파이프를 통하여 모울드에 자동으로 공급된다. 열처리 및 인코트의 조성에 따른 AZ91D 합금제 휠의 기계적 특성을 조사하였다.

Abstract Magnesium has been used as wheel materials in the automotive industry for more than 20 years. The magnesium wheels, which are lighter by 25% than aluminum wheels, provide easy controllability providing excellent road holding by the reduction of weight. The purpose of this work is to develop cast AZ91D alloy wheel by sand cast and permanent mold cast. The fluxless melting with the protective gas(SF₆+CO₂) was performed to eliminate oxidation of melt and impurity. The transfer of molten magnesium to the mold was done by using gas-pressurized pump system through the heated pipe. The mechanical properties of AZ91D alloy wheel were investigated as a function of heat treatment, ingot composition.

1. 서 론

Mg의 밀도는 1.74g/cm³로 주조용 금속중에서 가장 가볍기 때문에 14"×6"크기의 승용차용 휠의 경우, Al제품의 무게는 6.3kg인데 비하여 Mg합금화로 무게를 약 25%까지 경량화할 수 있다. 이처럼 자동차의 하부중량을 줄이는 효과는 회전체의 관성중량을 감소시켜서 회전의 가속에너지를 감소하여 승용차의 가속성을 크게 향상시킨다. 그리고 차체의 중량이 무거울수록 주행중 진동에너지가 증가하여 엔진출력을 소모하게 되는데, 가벼운 만큼 진동에너지 손실을 줄이기 때문에 엔진출력의 효율을 향상시키는 효과가 있다.¹⁾ 그리고 마그네슘 합금은 알루미늄 합금에 비해 감쇄능이 커서 진동방지 효과가 크며, 절삭성도 우수하나 강도, 연신율은 열세에 있다.

Mg합금이 자동차 등 수송기기의 경량화에 효과적이라는 사실은 오래전부터 인식되어 왔다. 여러가지 부품중에서 자동차 바퀴휠의 Mg화는 1930년대부터 시도되어 왔으며, 2차 세계대전 이후에 경주용 자동차에 사용되기 시작하였다. 60년대와 70년대에 걸쳐서 일부 스포츠용 자동차에 중력주조공정으로 제조된 Mg휠이 사용되었다. 80년대 중반 이후

에 자동차 경량화가 환경오염 등의 이슈와 연계되면서, Mg 휠에 대한 인식이 크게 변화하여 미국과 일본에서 새로운 제조공정이 다양하게 시도되고 있다. 특히, 다이캐스팅 공정으로 제조된 Mg휠이 고급 승용차에 OEM 부품으로 사용되기 시작하였다. 90년 초기에 Mg휠 수요는 Al휠 시장(즉, 경량휠 수요)의 0.1%에 해당하지만, 후시장의 수요도 점진적으로 증대되고 있다. 그리고 스포츠용 자동차와 경주용 자동차에도 그 수량은 작지만 지속적인 원래의 시장을 유지하고 있다. 주조용 Mg 합금으로는 AZ91-합금이 오래전부터 사용되어 왔으며, 세계적으로 생산량이 가장 많고 1990년에 자동차 및 전자기기 부품에 쓰이는 Mg의 90%가 AZ91D로 사용되고 있다. 현재 국내에서 개발되고 있는 Mg구조용 부품에는 모두 AZ91D를 사용하고 있고, 94년 말부터 AM60-합금이 일부 다이캐스팅에 사용되고 있다.^{2~5)}

본 연구의 목적은 Mg의 용해와 주조기술을 국내에 확립하기 위하여 중력주조법에 의하여 Al제품에 비견되는 Mg휠의 디스크와 림을 제조할 수 있는 Mg의 용해 및 주조기술을 개발하는 것이다. 자동차의 휠은 경량화의 대상부품으로 가장 큰 제품이고 동적기능과 함께 안전과 직접 관련된

다. 그리고, 형상이 복잡하고 외관품질도 중요해서 휠의 제조기술이 확립되면 다이캐스팅과 같은 Mg 기술의 핵심을 파악하고 관련기술의 기초를 확보하는 데에 가장 적당하다고 사료된다. Mg합금제 휠의 제조기술을 확립하기 위하여, 비플럭스(fluxless) 용해기술과 이미 알려진 중력주조기술을 복합하여, Mg합금제 2-피스형 휠 디스크와 림 부품에 대한 중력주조 실험을 수행하였다. 주조 방안으로는, 코팅드 샌드(coated sand)의 냉형(즉, pep set mold), 영구금형, 그리고 가스형 모우드(shell mold)의 복합금형의 적용 가능성을 시도하여 주조결과를 비교하였다.

2. 실험 방법

시험재

본 실험에는 AZ91D-합금을 사용했으며 화학적 조성은 표 1에 나타내었다. 휠 디스크의 경우에 처너지금과 처너지금에 15%의 하드스크랩(D/C 스크랩으로 불량품, 게이트 및 비스켓트 등)을 혼합하여 주조하고 그 특성을 비교하였다. 2-피스형 자동차 휠의 디스크(disc)와 림(rim)을 주조하였다. 디스크는 셀모울드의 상형과 영구금형의 하형으로 구성된 혼합 조형법으로 제조하였다. 표 2에는 본 연구에서 시도한 Mg주조 부품에 대하여 나열하였다. 셀조형을 위하여 금형으로 상형패턴과 주입구의 형상을 제작하고, 하형은 최종 면이 될 수 있도록 영구금형으로 제작하였다. 상형과 하형의 합치 및 주조 작업 후 형분리를 위하여 상하 작동식 유압장치를 사용했다. 2-피스형 휠의 림을 조형하기 위하여 목형으로 패턴을 제작하고, 림의 외부에 2개의 탕구를 설치하는 탕구방안을 시도하였다.

모우드 조형

휠디스크 상형용 셀모울드는 수지점결제인 노보락 레진(Novolac resin)을 100-200메쉬의 주물사와 배합하여 200-300℃ 정도로 가열, 경화시켰다. 셀조형 과정은 영구금형을 가열하여 이형체를 바르고 형틀에 채워 넣은 후 이를 가스버너로 150℃ 이상으로 예열시켰다. 2-피스형 림의 조형은 아쉬랜드(Ashland : 미국)사의 상품인 펍셋트법으로 행하였다. 주물사를 완전히 건조한 후에 P-3 레진(경화제)과 P-1 레진(페놀 레진)을 주물사 중량의 0.016%와 0.8%로 혼합하여 잘 섞은 다음 혼련하였다. 그리고

주물사 중량의 0.7%인 P-2 레진(이소시아네이트)을 투입하여 1-2분동안 혼련시킨 다음 즉시 형틀에 충전시켰다. 모울드가 강화되도록 10분간 방치시킨 후에 형틀에서 빼내어 조형을 완료하였다.

주조공정

본 연구에서 제작한 용해시스템은 직립식 용해로에서 최대용량은 300kg으로 전기저항 가열식 전체 도가니와, 최고 온도 1,000℃까지 용해작업을 할 수 있도록 설계하였다. 그림 1은 조립된 용해시스템의 측면도인데 전기가열식 SiC 발열체와 내화물, 용탕펌프의 배열이 나타나 있다. 불활성 개스인 SF₆에 공기 혹은 공기와 CO₂를 적정비율로 혼합하여 용탕의 보호가스로 공급하면 Mg용탕의 발화 및 산화를

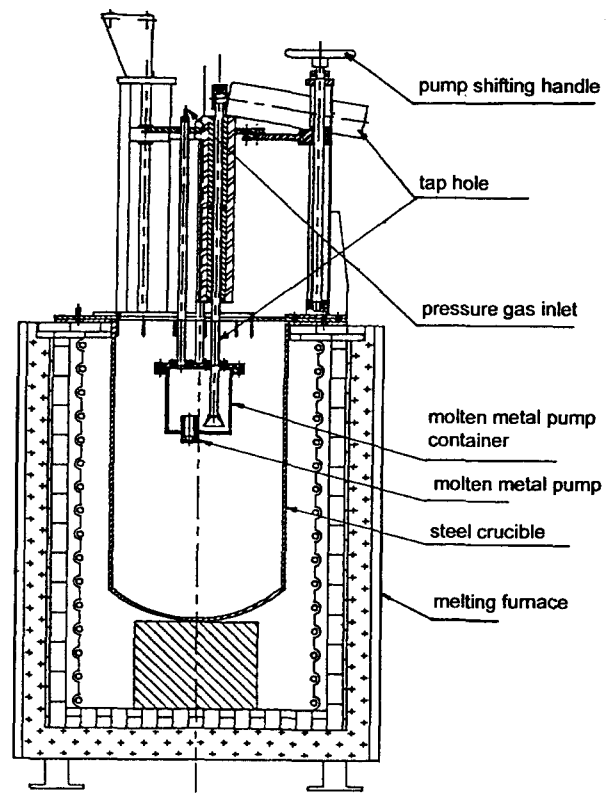


Fig. 1. Melting furnace.

Table 1. Chemical composition of AZ91D Mg ally

element	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe
wt.%	bal.	8.3-9.5	0.45-0.9	0.17	0.05	0.015	0.001	0.004

Table 2. Two-piece magnesium wheels

Component	Pattern	Molding	Remarks
wheel disc (14×5.5)	permanent metal	shell/metal mold	
wheel rim (14×5.5)	wood	Pep Set mold	outer gating system

Table 3. Cast conditions for Mg wheel disc

molten metal temperature	710°C	gas pressure	0.4kgf/cm ²
mixing ratio	0.8 % S F ₆ +CO ₂	flow velocity	3 l / min
metal mold temperature	250-280°C	tap hole temperature	595-605°C

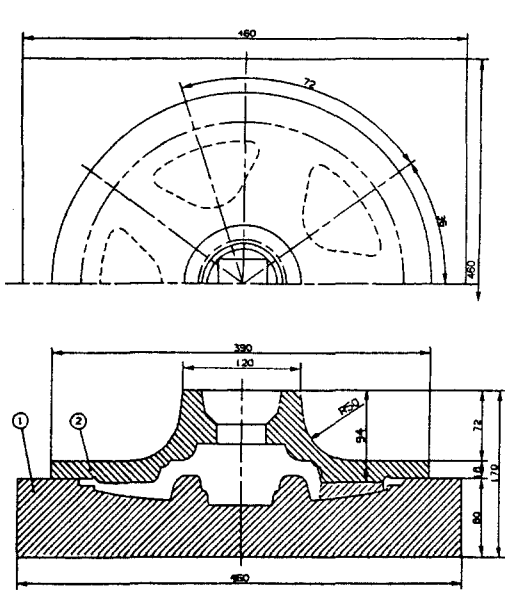


Fig. 2. Sand match-metal mold used for wheel disc ① metal mold(SS41) ② shell mold(coated sand)

방지할 뿐 아니라 용탕보호온도를 높일 수 있으며 용탕을 뒤섞을 때의 보호효과도 크다.⁶⁾ SF₆와 CO₂는 가스실린더에서 공급되고 일반 압축공기를 사용할 수 있도록 수분 필터를 부착하였다. 동일한 압력의 가스들이 혼합될 수 있도록 각 공급라인에 압력조절기를 부착하고, 조절밸브와 유량계를 통하여 적정량의 가스들이 혼합될 수 있게 하였다. 혼합된 가스는 20리터의 저장용기에 연결하여 비축되도록 하였다. 저장용기에 별도의 압력조절기와 유량계를 부착하여, 조절밸브와 유량계를 통하여 적정량의 가스들이 혼합될 수 있게 하였다. 그리고, 주물의 장입구에도 보호가스를 공급할 수 있도록 추가적인 라인을 저장용기에 설치하였다. 가스의 혼합과 공급선의 조절은 일체화하여, 한개의 캐비닛에 설치하여 용해와 주조작업에 편리하도록 하였다.

용탕펌프는 도가니와 분리식으로 부력에 의해서 펌프용기에 Mg용탕이 자동공급되고 알곤가스 압력과 유량의 제어로 필요한 양 만큼의 용탕을 단속적으로 공급할 수 있다. 지속적인 용해 혹은 주조작업 중에 용탕표면의 대기노출이 필요치 않아서, 일정하게 용탕의 온도를 장시간 유지할 수 있었으며, 용탕의 산화 가능성을 제거하여 드로쓰의 생성과 가스(fume)의 발생을 극소화시킬 수 있었다. 이런 효과는 주조환경을 크게 개선할 뿐만 아니라 원료의 손실을 극소화하는 장점도 있다. 승용차용 2-피스형 휠의 디스크로 휠규격은 14"×5.5"이고 5개의 스포크가 있다. 디스크의 외경은 340mm이고 외주면 다이부의 두께는 5mm이다. 소형 승용

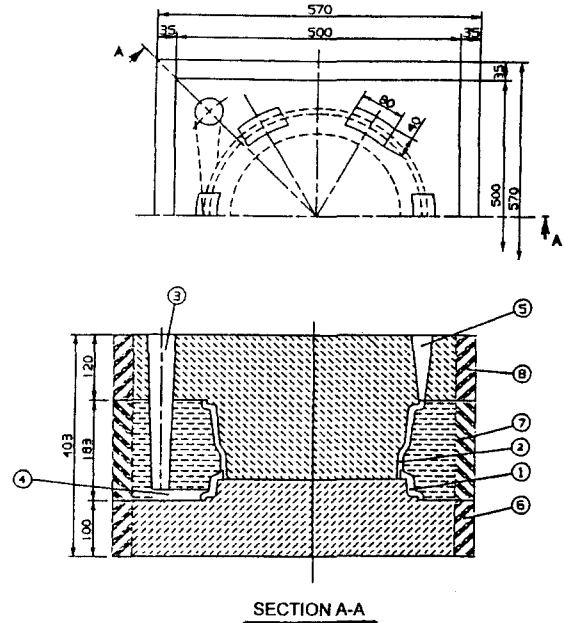


Fig. 3. Schematic of pattern for 2-piece wheel rim ① rim(top part) ② rim(bottom part) ③ spure ④ runner ⑤ riser ⑥ box (A) ⑦ box(B) ⑧ box(C)

차의 휠로, 마그네슘제 디스크를 마그네슘제 림이나 알루미늄제 림에 조립할 수 있는 형상이다. 그림 2는 휠 디스크 모듈드의 조립도이며, 그림에서 하형①은 영구금형으로 상형②는 셀모듈드로 구성된 혼합금형이다. 셀모듈드와 금형을 가스버너로 200-250°C 정도 가열시키고, 압축공기로 모듈드면을 세척한 후에 합치시켰다. 주조 후 상형과 하형의 분리를 용이하게 하기 위하여, 하형인 영구금형에 이젝트 핀을 설치하고 상형을 유압펌프로 밀어올릴 수 있도록 치구를 제작하였다. 탕구방안은 상주식으로 중앙에 탕구를 설치하여 용탕펌프를 사용하였다. 탕구의 총높이는 70mm, 상체와 하체의 직경이 각각 70mm와 50mm인 두 도막의 원주형태이다. 탕구의 아래에 50mm×50mm 크기의 철망필터 혹은 세라믹 필터를 놓았다. 압탕은 설치하지 않는 대신에 탕구를 충분히 크게하여 주물이 응고되면서 탕구자체가 압탕역할을 하도록 하였다. 표 3에 휠디스크 주조시의 주조공정 조건을 나타내었다.

승용차용 2-피스형 휠의 림은 디스크와 함께 소형 승용차의 휠로 조립할 수 있는 형상이다. 림의 밖에 서로 대칭인 위치에 높이 260mm인 탕구를 2개 설치하여 동시에 용탕을 주입하였다(그림 3). 탕구 단면적은 600mm²(60×10mm)이며 탕도를 거쳐서 비가압식 주입이 되도록 하였다. 탕도(혹은 주입구)의 길이는 150mm로, 림의 면과 10°의 각도로 용탕이 흘러서, 급격한 방향선회에 의한 와류의 형성

이 극소화도록 했다. 탕구비는 1 : 0.85이다. 프랜지의 원주에 등간격으로 5개의 개방형 직압탕을 설치하였다. 압탕 1개의 부피는 17.25cm³(밀면적 60×10mm, 윗면적 80×30mm)이고 높이는 115mm)이다. 장입원료는 100% 인고트를 사용하였다. 스크랩의 영향을 알아보기 위해서 100% 스크랩, 처너지금 + 15% 스크랩, 그리고 100% 처너지금의 세가지 종류를 주조하였다.

주조결과분석

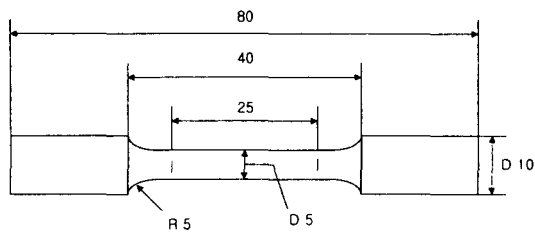
주물은 샌드 블라스트 후 외관검사를 행하여, 주조품의 외관품질을 조사하였다. 중요한 부분의 단면에서 두께의 균일성과 수축기공과 같은 주조결함 및 불순물의 혼입을 조사하였다. 단면에서 위치에 따른 H_B 경도를 측정하였다. 박육부(thin wall)와 후육부(thick wall)의 두께가 급격하게 변하는 교차부에서 현미경 관찰용 시료를 채취하여 광학현미경으로 미시적인 주조결함(기공과 수축공)을 관찰해서 내부품질을 조사하였다. 그리고, 피크랄(Picral)과 HF액으로 부식 후 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 조직관찰을 행하고 EMPA로 분석하여, Mg₁₇Al₁₂, Mg₂Si, MnAl₁₆와 MnAl₁₄ 등의 존재, 형상과 분포를 조사하였다.

열처리 및 기계적 실험

휠 디스크를 대상으로 순수 인고트 시료와 스크랩을 섞은 시료에 대하여 기계적 특성 조사와 열처리 실험을 행했다. 디스크의 스포크 부분에서 시료를 채취하여 표준 열처리(T4-용체화처리 및 T6-아닐링처리)를 하고, 표준규격의 축소형 인장시험편을 가공하여 상온에서 인장시험을 행하였다. 열처리는 100% CO₂ 가스 분위기에서 실시하였다. 용체화처리 후에 냉각초기에 발화를 막기 위하여 가열된 시료는 CO₂가스분위기에서 공냉시켰다. 디스크의 스포크에서 채취한 시료에 대하여 행한 용체화처리와 시효처리조건은 다음과 같다.⁷⁾

- 용체화처리(T4) ; 413℃에서 16시간 유지 후 공냉
- 시효열처리(T6) ; 216℃에서 각각 1, 2, 4와 6시간 유지 후 공냉과 168℃에서 16시간 유지 후 공냉

열처리 후에 시료의 경도는 브린넬경도(H_B)로 측정했다. 시료에 대한 대표값은 5번 측정하여 최대값과 최소값을 제외시키고 나머지는 평균값을 구했다. 인장시험은 표점거리 25mm, 봉상 직경 5mm인 시험편(그림 4)을 가공하여 변형률 속도 1.3×10⁻³/sec로 행하였다.



(Unit: mm)

Fig. 4. Specimen geometry for tensile test.

3. 결과 및 고찰

승용차용 2-피스 휠 디스크

그림 5는 15% 스크랩+85% 인고트의 주조시험 결과로, (a)는 셸표면이고 (b)는 영구금형 표면이다. 영구금형의 예열온도가 250℃ 이상에서는 외관으로 본 주조품질이 양호했다. 영구금형의 온도가 이보다 낮은 경우에는 용탕의 응고가 너무 빠르게 진행되어, 용탕이 전체 캐비티를 채우지 못하게 된다. 따라서, 금형을 충분히 예열시킬 필요가 있었다.

그림 6은 휠 디스크의 스포크 단면으로 (a) 100% 스크랩 용해, (b) 15% 스크랩+85% 인고트와 (c) 100% 인고트로 주조한 디스크의 스포크를 통과하는 단면이다. 후육임에도 불구하고 주물의 내부에 거시적인 주조결함은 관찰되지 않았다. 장입원료로 스크랩을 많이 사용한 경우(a)와 (b)에, 휠의 접촉표면에서 부분적으로 결함이 나타나는데, 스크랩 표면에 흡착된 수분이나 오염 등이 그 원인으로 추정된다. 100% 인고트를 사용하는 경우(c), 표면결함을 관찰할 수 없었다. 본 실험의 용탕관리 과정에서 탈가스처리

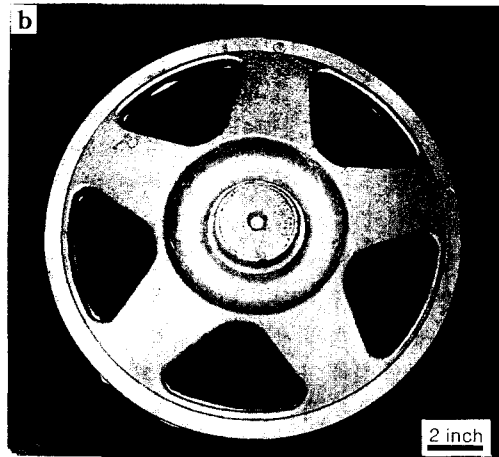
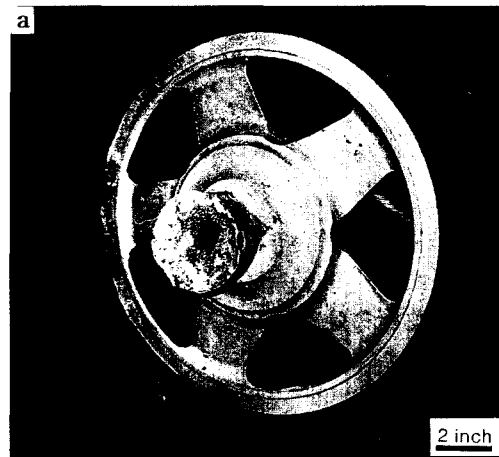


Fig. 5. Castings for 2-piece wheel disc (a) shell mold site (b) permanent metal mold site.

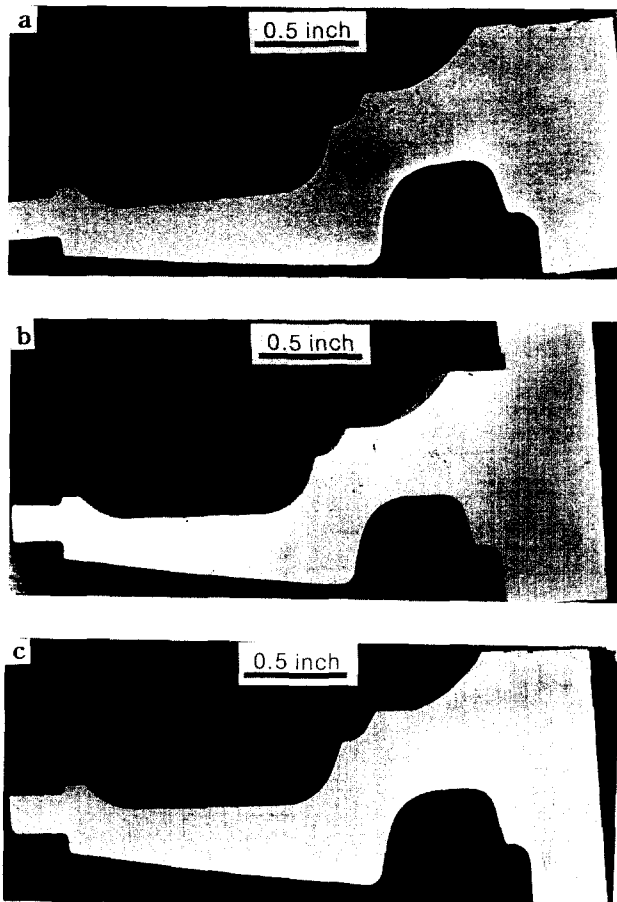


Fig. 6. Cross sections of 2-piece wheel disc (a) 100% scrap (b) 15% scrap + 85% ingot (c) 100% ingot.

를 행하지 않았는데, 스크랩의 사용량이 많아질수록 탈가스 처리가 필요하다는 것을 암시한다. 스크랩이 많을수록, 휠의 접촉표면에 응고수축 결함이 몰려 있는데, 용탕이 영구 금형표면으로부터 응고되기 시작하여 셸모ULD 방향으로 진행되었기 때문이다. 그림 7은 디스크의 중앙선에 형성된 미세기공을 보여주고 있다. 그러나 원주위와 스포크 등에서는 수축기공이 전혀 관찰되지 않았다. 이 사진에서 보면 수 지상의 응고가 끝난 부분에 많은 양의 수축기공이 존재하는데, 최종 제품의 경우에 디스크의 중앙축은 기계가공하게 되므로, 중앙선을 따라서 존재하는 수축기공은 문제가 되지 않을 것이다. 이를 완전히 없애기 위해서는 탕구의 부피를 크게 해야 한다.

그림 8은 15% 스크랩 + 85% 인고트 시료의 단면의 열처리에 따른 경도(Hv) 분포를 나타내고 있다. T6 처리로 인한 시효경화현상을 보여주고 있다. 그림 9는 그림 8에 표시된 부분의 두께에 따른 경도를 측정된 결과이다. 셸 접촉면의 경도는 Hv=54이고 금형 접촉면의 경도는 Hv=65로 금형 쪽으로 갈수록 경도가 높아진다. 이처럼 경도차이가 나타나는 이유는 미세조직의 결정립자 크기에 기인한다. 그림 10은 각각 셸 표면과 영구금형 표면의 광학현미경 조직사진으로 결정립자의 크기가 150-200 μ m와 70-100 μ m의 차이를 보여준다. 이와 같은 경도와 미세조직의 차이는

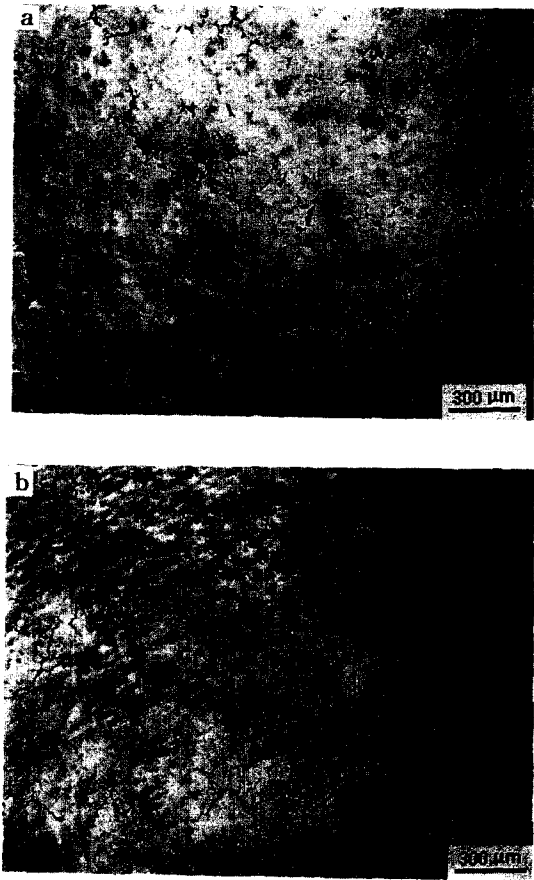


Fig. 7. Microstructures of wheel disc centerline (a) 15% scrap + 85% ingot (b) 100% ingot.

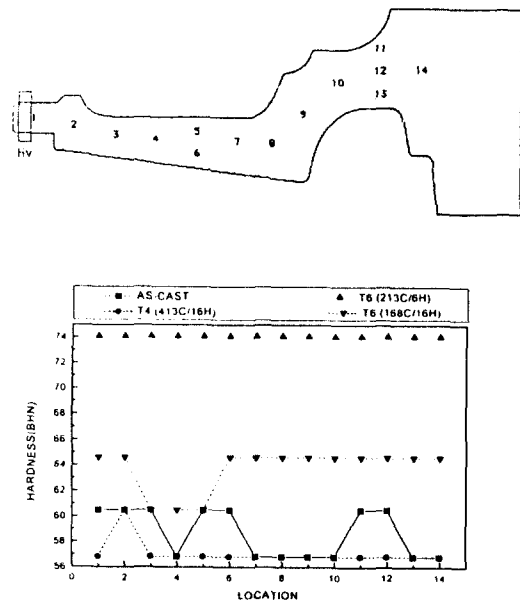


Fig. 8. Hardness distribution in the spoke.

금형표면에서 응고가 먼저 급속하게 시작하여 셸 표면에서 종료되었음을 확인해 준다.

승용차용 2-피스 휠 림

그림 11은 림의 구조상태를 관찰하기 위한 단면의 마크로 사진이다. (a)는 탕구로부터 가까운 위치의 단면이고

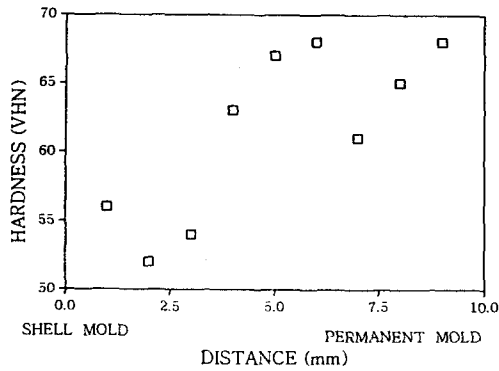


Fig. 9. Effect of mold type on hardness.

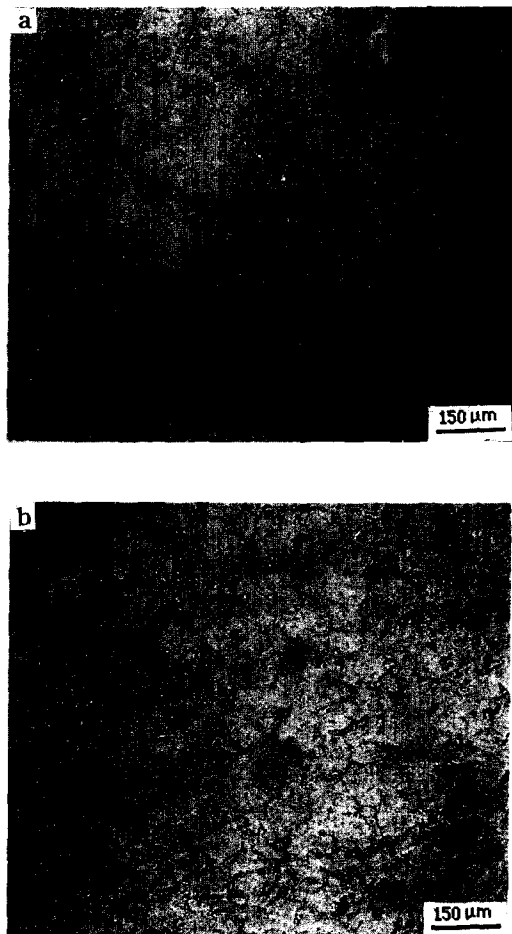


Fig. 10. Effect of mold type on microstructure (a) shell mold site (b) permanent mold site.

(b)는 가장 먼 위치의 단면이다. 그림 11의 (a)의 웰(well) 부분(B 지역)에 많은 양의 수축기공이 형성되어 있다. 이에 비하여 주입구에서 가장 먼 곳의 단면인(b)는 전체적으로 거시적 기공이 전혀 관찰되지 않는다. 이처럼 웰 부분에 수축기공이 몰려있는 이유는, Mg용탕이 한쪽에서 응고되어 압탕구쪽으로 진행되지 않고, 양 프랜지 쪽에서 응고가 시작되고(A 지역) 웰부분에서 마지막 응고가 일어났기 때문이다. 그림 12에 나타난 경도분포는 대체로 $H_n =$

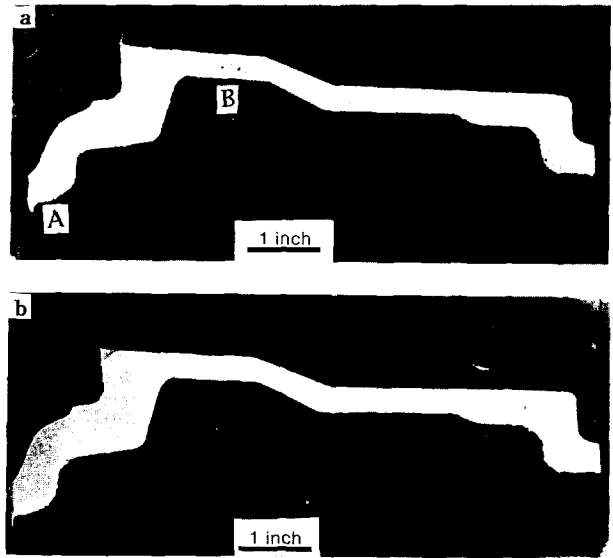


Fig. 11. Cross section of wheel rim (a) near the gate (b) far off the gate

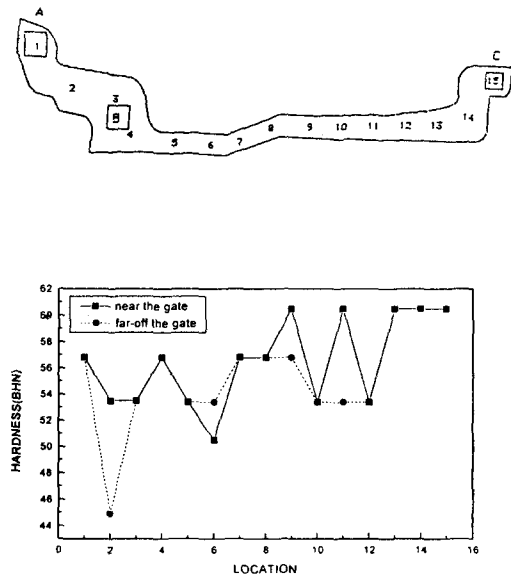


Fig. 12. Hardness distribution on 2-piece wheel rim.

54-60.5의 분포를 갖는데, $H_n = 45$ 혹은 50인 위치가 관측된다. 이처럼 경도분포가 균일하지 않은 것은 관찰면에 노출되지 않은 기공이 존재하기 때문으로 추정된다. 그림 13의 (a)와 (c)에는 미세기공이 없으나, 웰과 가까운 후육부인 (b)에는 많은 양의 수축기공이 발달되어 있다. 이 수축기공은 응고과정에서 부피수축을 공급해 주지 못했기 때문에 나타난 것이다. 즉, 응고가 먼저 시작되었거나 혹은 압탕에서 수축량을 공급할 수 있는 곳에는 수축공이 생기지 않는다.

열처리 및 기계적 성질

그림 14는 AZ91합금의 통상적인 응고조직을 광학현미경으로 관찰한 것이다. 기지조직은 α -Mg이고, $Mg_{17}Al_{12}$ 가 응고의 후단계에서 조대하게 생성되어 있다. 연속적으로 정

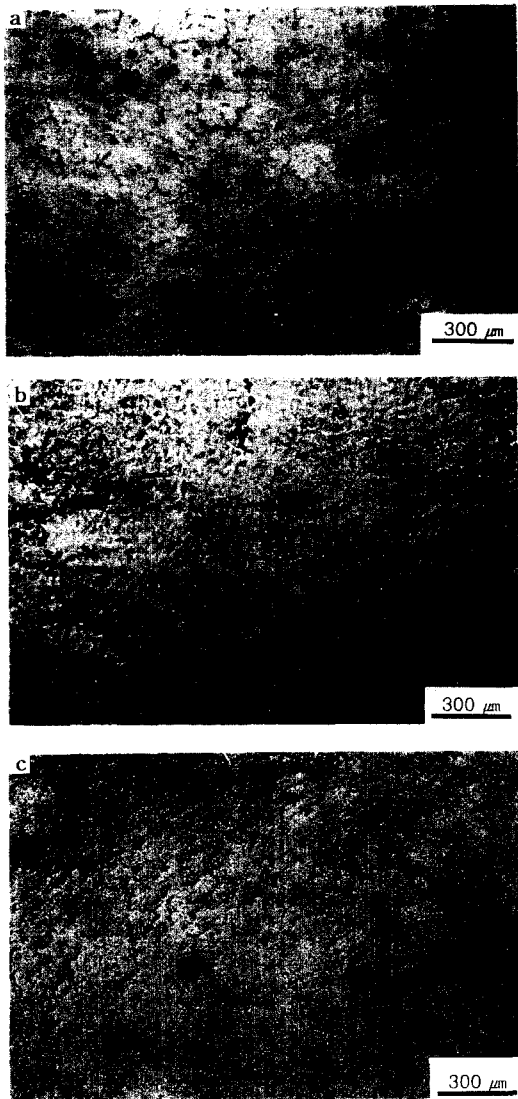


Fig. 13. Microstructures of 2-piece wheel rim. (a) A area (b) B area (c) C area in Fig. 12.

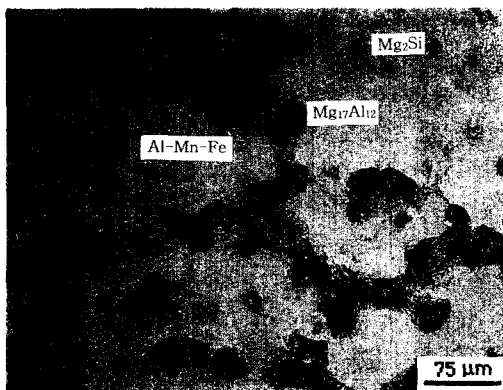


Fig. 14. Microstructure of AZ91D in as-cast condition.

출된 $Mg_{17}Al_{12}$ 의 주위에는 불연속적인 공정반응으로 입자상 혹은 라멜라상의 $Mg_{17}Al_{12}$ 가 회색의 콘트라스트로 부식되어 있다. 이외에 Al-Mn-Fe, Mg_2Si 도 검은 입자형태로 분산되어 있다. 용탕의 비평형응고 과정에서 Al이 과밀해

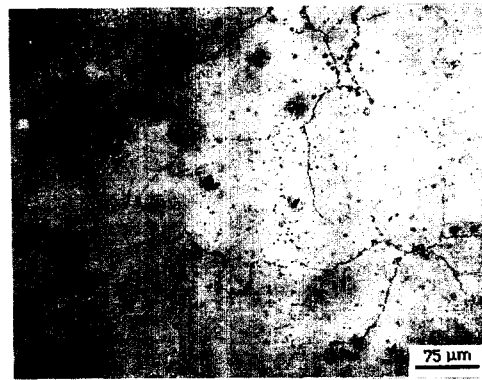


Fig. 15. Microstructure of solution treated AZ91D.

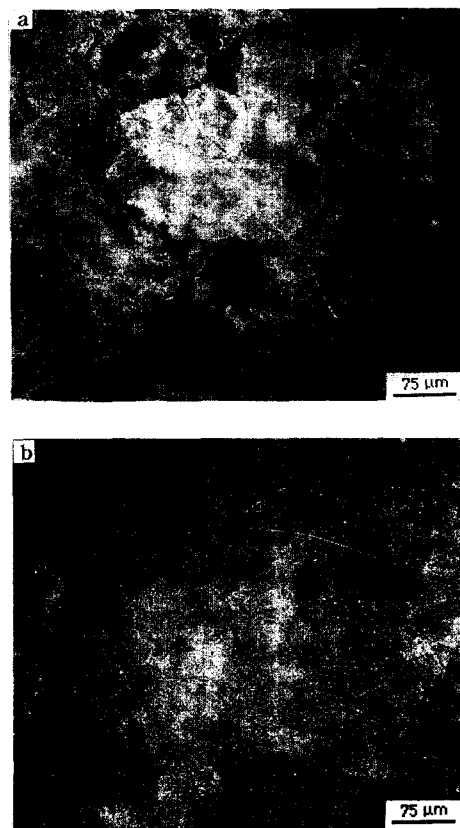


Fig. 16. Microstructures of AZ91D air cooled, then aged (a) for 6h at 216°C (b) for 6h at 168°C.

진 액상(즉, 코어링이 일어난 수지상 응고계면)에서 공정반응으로 $Mg_{17}Al_{12}$ 가 조대한 형태로 생성된다. 이를 흔히 비드만조직(Widmanstatten structure)이라 하는데 Zn가 없거나 혹은 적을때 연속적인 공정반응으로 형성된다. 응고속도가 빠르면, α -Mg만 나타나지만, 응고속도가 느려지거나 혹은 낮은 온도에서는 조대한 $Mg_{17}Al_{12}$ 가 생성될뿐만 아니라, 불연속 공정반응으로 $Mg_{17}Al_{12}$ 의 형상을 바꾸는데는 AZ91-합금에 함유된 Zn가 관여한다고 알려져 있다.⁸⁾ 디보스(divorce) 형태의 $Mg_{17}Al_{12}$ 는 290°C 이상에서는 조대화되기 시작하고, 370°C 이상에서는 분해되어 Mg에 완전히 고용된다.

Table 4. Results of mechanical tests(15% scrap)

Heat treatment	U.T.S (MPa)	Y.S (MPa)	EL. (%)	Hardness (BHN)
F	149.5	112	3.7	60.5
T4(413°C/16hr)	233	106	9.3	58.7
T6(216°C/1hr)	219	124	6.5	64.6
T6(216°C/2hr)	220.5	137	5.5	69.1
T6(216°C/4hr)	240.5	143	4.7	74.1
T6(216°C/6hr)	230.5	153	3.9	76.9
T6(216°C/16hr)	235.5	134.5	6.4	66.9

Table 5. Results of mechanical tests(100% ingot)

Heat treatment	U.T.S (MPa)	Y.S (MPa)	EL. (%)	Hardness (BHN)
F	168.5	132.7	3.7	60.5
T4(413°C/16hr)	224.8	132.7	8.8	58.7
T6(216°C/6hr)	240.3	157.6	3.3	74.1
T6(168°C/16hr)	243.6	150.3	7.8	62.6

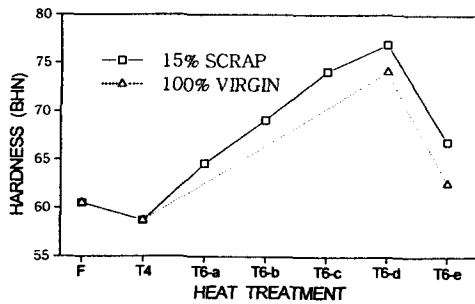


Fig. 17. Effect of heat treatment on hardness.

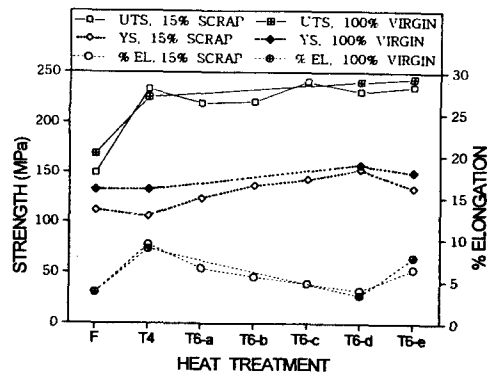


Fig. 18. Effect of heat treatment on the mechanical properties.

조대한 형태의 $Mg_{17}Al_{12}$ 는 주조물의 인장강도를 저하시키는데, AZ91-합금의 주조조직과 기계적 성질은 용속도에 의존하게 되어 사형주물과 금형주물의 기계적 성질이 차이가 난다. Zn는 Mg에 고용되고 이 합금의 인장강도를 높여주는 원인이 된다. 액상에 Zn가 많아지면 (Al : Zn = 1 : 3 이상에서), 3-상 영역으로 들어가게 되어 $Mg_{32}(Al, Zn)_4$ 금속간화합물이 형성될 수 있다. 이의 존재는 열처리 과정에서 열간취성의 원인이 되거나 기포를 형성하게 된다. $Mg_{32}(Al, Zn)_4$ 의 공정온도는 363°C로 낮기 때문이다.

그림 15는 순수 인고트로 주조한 디스크를 413°C에서 16시간 동안 용체화처리한 광학 현미경 조직사진이다. 주조상태에 정출된 $Mg_{17}Al_{12}$ 는 완전히 분해되어 Al이 α -Mg에 완전히 고용되어 Mg의 단상조직을 이루고 있다. EDS 분석결과 용해하지 못한 Mg_2Si 가 검은 석출물로 나타난다.

용체화처리 후에 석출경화시키기 위하여 다시 2-상 구간에서 가열시켜서 $Mg_{17}Al_{12}$ 가 다시 미세한 입자로 석출된 결과는 그림 16에 나타내었다. 순수한 인고트를 사용한 디스크에서 채취한 시료로 (a) 216°C에서 6시간 (b) 168°C에서 16시간 T-6 열처리한 결과이다.

열처리에 따른 인장특성과 경도 측정결과는 표 4의 15% 스크랩 AZ91D 시료와 표 5의 100% 인고트 AZ91D에

대하여 나열하고, 열처리에 따른 도식적인 비교를 위하여, 경도변화는 그림 17, 인장특성은 그림 18에 나타내었다.

그림 17에서는 T-6열처리 조건에 따른 경도변화를 15% 스크랩+85% 인고트와 100% 인고트 시료에 대하여 비교하였다. 처리에 의해서 경도변화는 거의 없고, 216°C에서 시효처리 시간이 길어짐에 따라서 경도가 점진적으로 증가하여 6시간 어닐링할 때 최대치인 $H_B=77$ 에 도달한다. 순수한 인고트의 경우도 15% 스크랩을 섞은 시료의 경향과 같다. 그림 17처럼 시효시간에 따라서 경도가 증가하는 이유는 $Mg_{17}Al_{12}$ 의 석출량이 증가하기 때문임이 이미 밝혀져 있다. 표 5에서 어닐링온도가 168°C인 경우, 석출반응의 진행이 느려져서, 시효시간이 16시간으로 길어져도, 경도는 $H_B=67$ 로 216/6hr의 경우보다 경도가 낮다. 즉, 충분히 석출경화가 완성되지 않았음을 의미한다. 이 결과는 그림 16에서, (b)의 미세조직이 (a)에 비하여 $Mg_{17}Al_{12}$ 의 석출량이 적은 관찰과 일치한다.

그림 18에 석출경화 시간에 따른 측정값을 그래프화한 결과를 살펴보면 다음과 같다. AZ91D-1 (15% 스크랩)의 주조시료의 인장강도 150MPa는 용체화처리에 의해서

233MPa로 크게 증가하며 동시에 연신율도 3.7%에서 9.3%로 증가한다. 216°C에서 시효처리에 의해서 시효시간이 길어질수록 인장강도는 크게 변하지 않고 6시간 이후에는 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 이에 비하여, 용체화처리로 약간 감소했던 0.2% 항복강도는 시효처리 시간이 길어질수록 점진적으로 증가한다. 즉, T4처리와 216°C에서 시효시간이 1시간에서 2시간, 4시간과 6시간으로 증가함에 따라서 인장강도/항복강도 비는 각각 2.2와 1.9, 1.8, 1.7과 1.6으로 감소한다. 0.2% 항복강도의 변화추세는 경도값의 변화추이(그림 17)와 동일하다. 총연신율은 시효처리 시간이 길어질수록 점진적으로 감소하여 6시간 이후에는 주조상태의 연신율과 비슷한 값이 된다.

AZ91D-2(100% 인고트를 주조한 것) 시료를 15% 스크랩을 사용한 시료와 비교하면, 인장강도 및 항복강도가 약 13% 높게 측정되었다. 두 시료의 연신율 차이는 없다. 용체화 처리와 216°C 6시간 시효처리의 경우에도 인고트 시료가 높다. 100% 인고트 시료의 특성향상은 168°C 시효처리 후에 더욱 두드러지게 나타났다.

4. 결 론

1) 주조제품의 크기와 형상에 따른 탕구방안은 비가압식이 적당하고, 제품에 적당한 탕구비가 확보되지 않으면, 박육부에서 후육부로 변하는 위치에서 주조결함이 발생할 수 있다. 따라서, 용탕의 흐름과 응고방향이 적절하도록 주조설계를 해야 하며, 탕도의 주입구의 설계와 압탕의 설치가 적절해야 한다.

2) Mg-용탕의 안전한 이송을 위한 가스압력식 용탕펌프는 지속적인 용해 혹은 주조 작업중에 용해로의 용탕표면의 대기노출이 필요치 않아서, 일정하게 용탕의 온도를 장시간 유지할 수 있었으며, 용탕의 산화가능성을 제거하여 드로스의 생성과 가스(fume)의 발생을 극소화시킬 수 있었다. 이런 효과는 주조환경을 크게 개선할 뿐만 아니라 원료의 손실을 극소화하는 장점도 있다.

3) 압탕구의 설치없이 셸과 금형의 혼합조형으로 2-피스형 휠 디스크를 주조할 수 있었다. 특히, 금형접촉면으로부터 응고가 시작되어 휠 디스크는 금형접촉면의 경도가 셸 접촉면보다 높고 외관품질도 양호했다. 그리고, 주물의 후

육부에도 기포와 같은 결함이 거의 생기지 않았다. 따라서, 향후 저압주조방식에 의해서 휠을 제조할 수 있음을 추정할 수 있었다.

4) 100% 인고트를 주조한 시료는 15% 스크랩을 사용한 시료보다 인장강도 및 항복강도가 약 15% 높게 측정되었다. 인장강도는 용체화처리에 의해서 크게 증가하며 동시에 연신율도 크게 증가한다. 216°C에서 시효처리에 의해서 시효시간이 길어질수록 인장강도는 크게 변하지 않으나 용체화처리로 약간 감소했던 0.2% 항복강도는 시효처리 시간이 길어질수록 점진적으로 증가한다. 총연신율은 시효처리 시간이 길어질수록 점진적으로 감소하여 6시간 이후에는 주조상태의 연신율과 비슷한 값이 된다.

참 고 문 헌

1. T. Suzuki & K. Ozaki : New Magnesium Alloy Wheel, Kobe Steel Engineering Report, **34**, 118 (1989)
2. L.T. Barnes : Rolled Magnesium Products : What Goes Around, What Comes Around, 49th IMA Proceedings, IMA 39 (1991)
3. H. Shima : Wheels for Vehicles, Light Metal, **41**, 136 (1991)
4. N. Fantetti, J. Ranaud & T. Huschilt : Magnesium Sand-Cast Wheels Development Program, in Magnesium Properties and Applications for Automobiles, SP-962, SAE 7 (1993)
5. J. Davis : The Potential for Vehicle Weight Reduction Using Magnesium, SAE Technical Paper No. 910551, SAE 56 (1991)
6. S.L. Couling : Improved Protection of Molten Magnesium with Air/CO₂/SF₆ Gas Mixtures, IMA Proceedings, IMA 87 (1980)
7. ASTM Standard Specification B661 : Practice for Heat Treatment of Magnesium Alloys
8. C.R. Brooks : Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys, ASM, 253 (1982)