

## 마그네슘 로드 휠의 유동성형 가공에 관한 연구

김정호<sup>#</sup> · 이종주<sup>1</sup> · 박수민<sup>1</sup> · 윤형석<sup>1</sup>

### A Study on Flow Forming Process of Magnesium Road Wheel

J. H. Kim, S. M. Park, J. J. Lee, H. S. Yoon

(Received November 15, 2013 / Revised February 17, 2014 / Accepted February 20, 2014)

#### Abstract

Low pressure die casting and flow forming have been successfully used to produce sound road wheels from magnesium alloy AM80. In the current study, high speed compression testing was initially conducted to simulate the flow forming of a Mg wheel. Subsequently the flow forming was simulated with “Forge<sup>TM</sup>”, an FEM software package. On the basis of flow forming simulations, the flow forming of the Mg wheel was performed under different conditions. For the flow forming experiments, the preform castings were made by low pressure die casting from AM80, a commercial magnesium alloy. In flow forming of the magnesium preform wheel, the flow forming of the Mg wheel was successfully accomplished when the feed rate was less than half that for the forming of an aluminum road wheel. The reduction in feed rate was 52%. Finally, a comparison with the flow forming simulations was made.

**Key Words :** Magnesium Road Wheel, Flow Forming, Low Pressure Die Casting

### 1. 서론

전세계적으로 자동차의 생산 및 수요가 크게 증대되고 있다. 자동차에서 발생하는 배기가스(CO<sub>2</sub> 외)가 환경오염 및 지구온난화에 크게 영향을 미치는 것으로 지목되어, 자동차의 연비향상 및 배기가스 저감에 대한 요구가 주요 이슈로 등장하였다. 자동차의 연비향상을 위해서는 고효율 전장부품 개발, 주행시의 타이어 구름저항 및 차체 공기저항 개선, 차체 경량화 및 엔진, 구동부의 효율향상 등이 중점 기술개발 대상으로 부상되어 활발하게 연구가 진행되고 있는 추세이다. 이러한 기술 중에서도 차체경량화 및 엔진, 구동계의 효율향상에 의한 연비개선 효과가 전체의 60% 이상을 차지하고 있다. 최근 Volkswagen 社의 대표 모델인 golf 차량을 대상으로

실험한 결과에 의하면 핵심구동 부품인 휠과 타이어 무게를 1kg 감소 시(1set 기준) 연비는 약 2.4% 증가하는 경향을 나타내며 이러한 연비향상은 17 inch 이상의 고인치 사양에서 더욱 큰 것으로 나타났다[1].

본 연구에서는 핵심 구동부품인 로드 휠의 경량화를 위해 최근 경량 소재로 크게 대두되고 있는 마그네슘 합금 소재와 낮은 제조원가를 지닌 저압주조 공법을 적용하고자 하였다.

마그네슘 합금은 비강도, 치수안정성, 기계가공성, 진동흡수능 및 전자파 차폐성이 우수하여 수송기계 및 전자부품 산업에 주목을 받고 있다[2~4]. 현재, 거의 모든 승용차량에 적용되고 있는 알루미늄 로드 휠은 저압주조 공법으로 제조되고 있으며, 휠의 중심부 주입방식(Center gate)과, 이를 보다 경량화하기

1. 현대성우오토모티브코리아(주) 기술연구소  
# Corresponding Author : HYUNDAI SUNGWOOT AUTOMOTIVE KOREA CO., LTD. R&D CENTER, E-mail: jhkim0827@swa.co.kr

위하여 주입시간 및 냉각속도를 빠르게 한 측면주입방식(Side gate)에 의한 저압주조 기술이 현재 양산에 적용되고 있다. 또한, 기존의 주조 단품을 제조하여 가공하는 제조방식에서 보다 경량화를 위하여 휠 프리폼(Preform)을 저압주조방식으로 주조한 후 유동성형(Flow forming) 소성가공에 의하여 휠의 림부의 강성을 증대시켜 보다 얇게 제조하는 공법 또한 양산에 적용되고 있다[5, 6].

알루미늄 주조 휠을 마그네슘 주조 휠로 대체할 경우, 소재 비중으로 계산하면 약 30% 이상의 경량화 효과를 얻을 수 있지만 알루미늄 합금과 비교하여 낮은 기계적 특성 때문에 제품 설계 시 응력 집중 부위의 체적을 높지게 되어 현실적으로 알루미늄 대비 약 20~25% 수준의 경량화[7]가 가능한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 마그네슘의 낮은 강도를 극복하고 경량화를 동시에 이루기 위해 저압주조 공법으로 마그네슘 주조 프리폼(Preform)을 제조하고 유동성형에 의한 소성가공을 적용하고자 실험을 진행하였다. 또한 유동성형 해석을 통하여 최적의 성형조건을 미리 예측하고자 하였다.

## 2. 마그네슘 휠의 고온압축시험

### 2.1 유동성형을 위한 마그네슘 합금 선정

본 연구에서 선정한 마그네슘 소재는 AM80 합금으로 Table 1에 조성을 나타내었다. 알루미늄과 망간의 함량이 각각 8wt.%, 0.29wt.%로 주조성과 연성을 확보하여 저압주조 및 유동성형에 유리하도록 선정되었다. Table 2는 선정된 AM80 합금을 적용한 로드 휠 preform 일부를 채취하여 T6 열처리한 기계적 특성을 나타낸다. 기계적 특성 중 신율이 12.5%로 열처리를 행한 후에도 상당히 높게 나타나 소성변형에 보다 유리한 소재로 판단된다.

### 2.2 유동성형해석을 위한 고온압축시험

마그네슘 주조 휠의 보다 정확한 유동성형해석을 위하여 고온압축시험을 시행하였다. 시험에 사용한 시편은 마그네슘 프리폼(preform) 금형으로 저압주조한 소재의 림(Rim)부에서 채취하였으며, 시편 형태는 ASTM E9-09 sub-size 형태인 원통형으로 제작하였다.

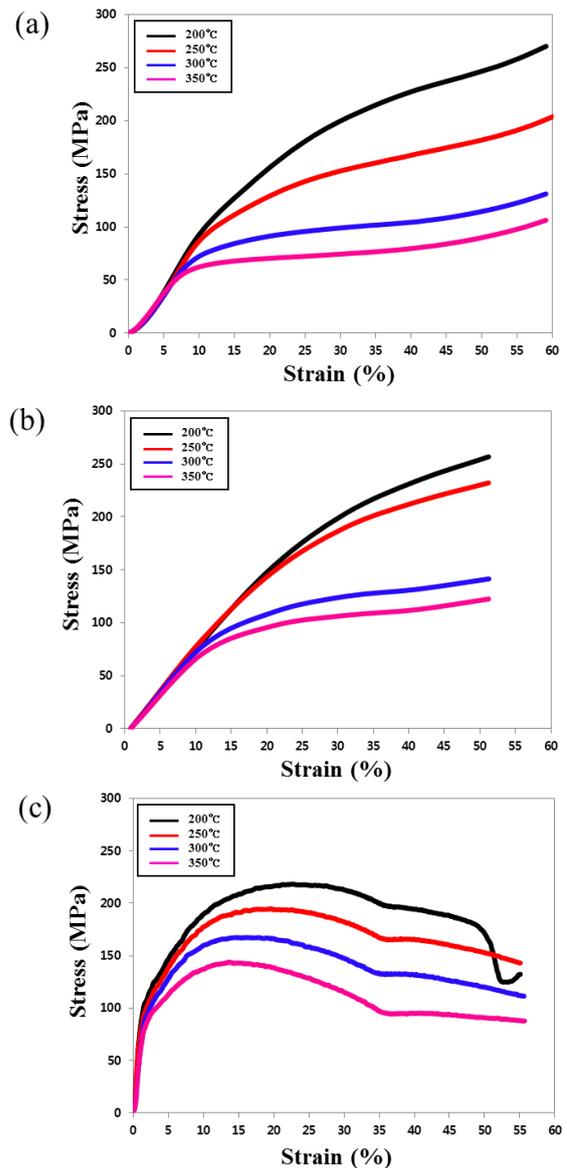
고온압축시험은 R&B CERT-RB304 시험기를 이용

**Table 1 Chemical composition of AM80 ingot (wt.%)**

Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
8.0	0.29	0.1	0.03	0.002	0.001	0.002	Bal.

**Table 2 Mechanical properties of AM80 wheel casting**

Yeild Strength, 0.2% offset	Tensile Strength	Elongation (%)	Remark
122 MPa	250 MPa	12.5 %	T6 Heat treated



**Fig. 1 Stress-strain curve with various temperatures on high temperatures compression test, (a) Strain rate 0.1mm/s, (b) 1mm/s and (c) 10mm/s**

하였으며, 온도 조건은 200~350℃ 범위에서 50℃ 간격으로 시행하였다. 저속 및 고속의 변형속도에서 응력분포를 조사하기 위해 변형속도 0.1, 1, 10mm/s의 3가지 조건으로 실시하였다.

Fig.1은 온도 및 변형속도에 따른 고온압축시험을 통하여 얻어진 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. Fig.1(a)에 나타낸 바와 같이, 저속의 변형속도 0.1mm/s의 경우, 변형률 약 7% 이내에서는 온도에 따른 응력변화가 거의 없으나, 그 이상의 변형률에서는 온도가 낮을수록 압축응력이 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 1(b)의 보다 빠른 변형속도 1mm/s에서는 Fig. 1(a)의 변형속도 0.1mm/s의 결과와 비교하여 전반적으로 높은 응력분포를 나타내었다. 또한, 시험온도 300℃ 이상의 경우, 변형률 약 20% 이상에서는 응력분포가 완만한 증가 경향을 나타내나, 300℃ 이하의 시험조건에서는 변형률이 증가함에 따라 응력도 지속적으로 증가하였다. Fig. 1(c)의 변형속도 10mm/s의 고속 조건하에서는 (a), (b)에서의 저속 조건과는 다른 양상을 나타낸다. 변형률 약 15~ 20% 까지는 저속 조건 결과와 같이 변형률이 증가함에 따라 유동응력 또한 비례적으로 증가하였으나 변형률 15~20% 범위에서 유동응력의 최대치를 나타내었다. 변형률이 20% 이상에서는 응력이 감소하는 경향을 나타내었다.

따라서, 모든 온도조건에서 변형속도 10mm/s의 고속 조건의 경우, 20% 이상의 변형률을 얻기 위해서는 약 140~ 230MPa의 유동응력이 필요함을 알 수 있었다. 또한, 300℃ 이상의 조건에서는 약 160MPa 이하의 낮은 응력으로도 높은 변형률을 획득할 수 있음을 알 수 있었다.

### 3. 유동성형 해석

#### 3.1 해석조건

마그네슘 로드 휠 Preform의 유동성형 해석은 상용 해석프로그램인 TRANSVALOR社의 FORGE™ (Ver. 2011, 64bit)를 이용하였으며, 소재의 물성은 고온압축시험을 통해 얻어진 AM80 마그네슘 합금의 S-S curve를 DB로 적용하였다.

유동성형 해석 모델은 마그네슘 소재인 Preform과 금형인 Tailstock, Mandrel 및 A,B,C 3가지 형상의 롤러가 순차적으로 총 3Path 유동성형이 이루어지도록 하였으며 Fig. 2에 도식화 하였다.

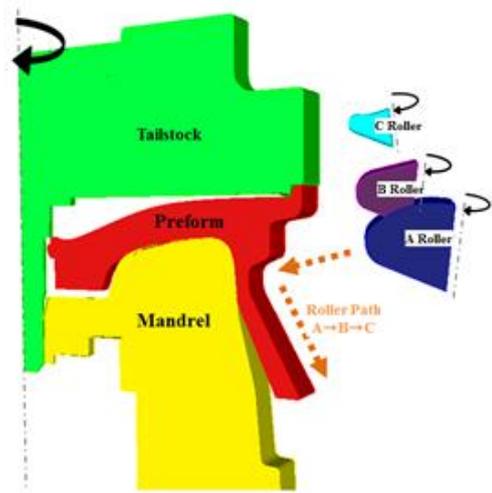


Fig. 2 Schematic drawing of wheel flow forming model for FE simulation

Table 3 Process specification of flow forming of Mg wheel

Classification	Process variables	
Model	17inch, 6.5J Mg wheel	
Material	AM80 Mg Alloy	
Mandrel	Initial temperature	250℃
	Rotation speed	500 rpm
Roller	Entry angle	3.8°
	Rotation speed	550 rpm
	Roller size	1 step : Φ360*R15
		2 step : Φ360*R10
3 step : Φ360*R06		
Roller feed rate	30, 21, 15mm/s	
Product initial temperature	250, 300, 350℃	

유동성형 해석시 Mandrel의 RPM, 온도, 형상 등의 여러 공정 변수들은 고정값으로 설정하고, 유동성형 대상인 Preform 예열 온도를 변수로 두어 250, 300, 350℃의 3가지 조건으로 온도에 따른 성형성을 먼저 평가하였다. 상기 해석 결과에서 최적 온도 조건을 설정 한 후 롤러의 이송 속도에 따른 성형성을 평가하기 위해 이송속도를 30, 21, 15mm/sec 3가지 조건을 적용하여 해석하였다.

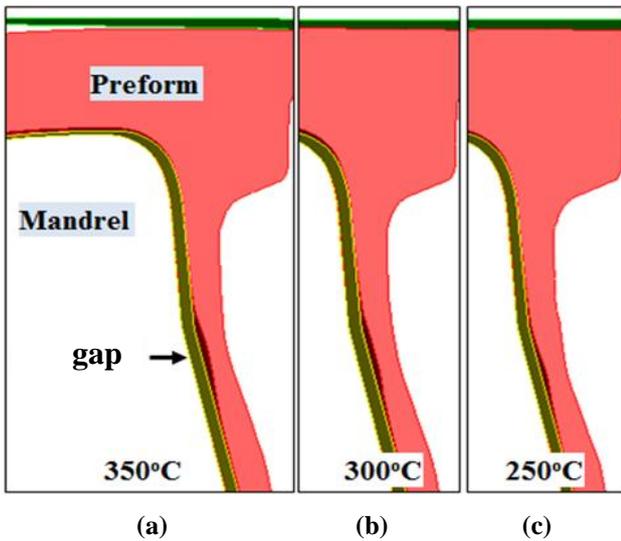


Fig. 3 Shape of flow forming part with initial preform temperatures, (a) 350 °C, (b) 300 °C and (c) 250 °C

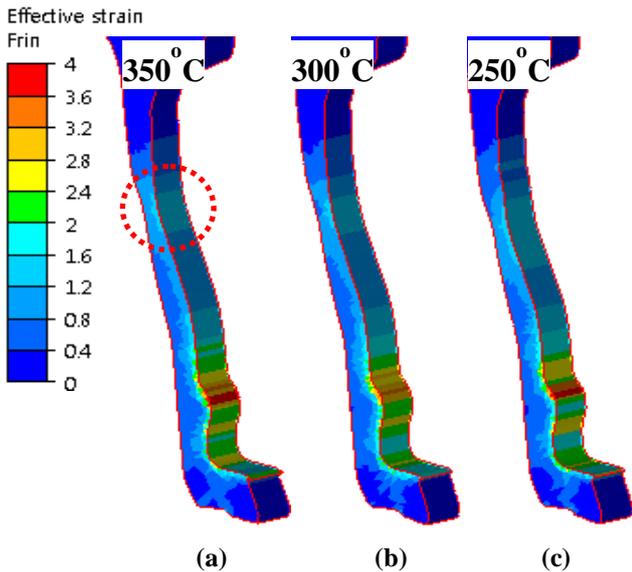


Fig. 4 Strain profile after flow forming with various initial part temperatures, (a) 350 °C, (b) 300 °C and (c) 250 °C

### 3.2 해석결과

Fig. 3은 유동성형 하고자 하는 Preform 온도에 따른 유동성형 형상을 나타낸 것이다. 모든 온도 범위에서 Mandrel과 제품 사이의 gap이 발생하였다. Preform 온도가 350°C에서 gap size는 2.3mm였으며 250°C에서 유동성형 해석결과 gap size가 1.6mm로 감소하는 경향을 나타내었다.

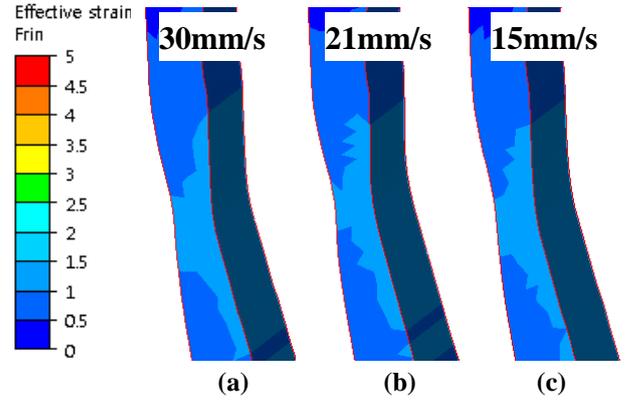


Fig. 5 Strain profile at gap area after flow forming with various roller feeding rate, (a) 30mm/s, (b) 21mm/s and (c) 15mm/s

Fig. 4는 Preform 온도에 따른 유효 변형률 해석 결과를 나타내었다. 모든 온도 범위에서 gap 발생부의 유효 변형률이 0.8~1.6으로 높게 나타났다. Preform 온도가 350°C에서 300°C로 낮아질 경우 유효 변형률 분포가 미세하게 낮아지는 경향을 나타내었으나, 300°C에서 250°C로 온도가 낮아질 경우 유효 변형률이 0.8~1.6인 영역이 확장되어 있음을 알 수 있다. Preform 온도에 따른 gap 발생 경향 측면에서는 250°C 조건이 gap 발생량이 작아 안정적인 성형이 예상되지만 유효 변형률 측면에서 300°C에서의 성형성이 더 안정적으로 예상되어 Preform 온도를 300°C로 설정하였다.

Fig. 5는 gap 발생부에서의 롤러 이동속도에 따른 유효 변형률 해석결과를 나타내었다. 모든 롤러 이송속도 조건에서 유효 변형률 분포는 gap 발생부 주변으로 1~1.5의 높은 유효 변형률이 관찰된다. 롤러 이송속도 감소에 따른 유효 변형률 분포는 30mm/s의 속도보다 21mm/s의 속도가 높은 변형률 영역이 줄어들어 안정적인 성형이 가능 할 것으로 예상되나 15mm/s로 속도가 더 낮아질 경우 높은 유효 변형률 영역이 확장되어 불안정 성형이 될 것으로 예상된다.

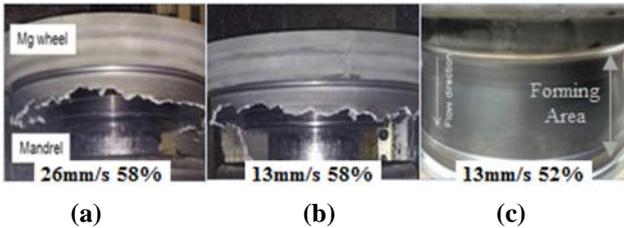
## 4. 유동성형 시제품 제작

### 4.1 유동성형 공정조건

유동성형 해석결과를 검증하기 위하여 저압주조 공법으로 제조한 AM80 마그네슘 휠 Preform을 대상으로 하여 실제 유동성형 실험을 행하였다. Table 4는

**Table 4 Process conditions in Mg wheel flow forming test**

Classification	1 <sup>st</sup> flow forming test	2 <sup>nd</sup> flow forming test	3 <sup>rd</sup> flow forming test
Preheating temperature	350 °C	350 °C	350
Product initial temperature	300 °C	300 °C	300
Roller feed rate	26mm/s	13mm/s	13mm/s
Reduction rate	58%	58%	52%



**Fig. 6 Photos of Mg road wheel after flow forming with test conditions, (a) 1<sup>st</sup>, (b) 2<sup>nd</sup> and (c) 3<sup>rd</sup> flow forming test**

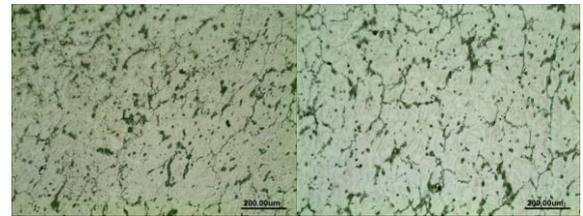
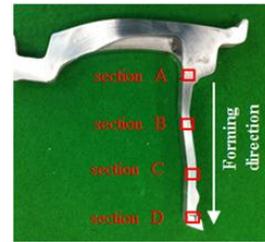
마그네슘 휠 유동성형 실험의 실제 조건을 나타낸다.

현재 알루미늄 휠의 유동성형시 롤러의 성형속도 (feeding rate)는 약 20~30mm/s로 진행되기 때문에 1차 실험에서는 알루미늄 휠의 유동성형 공정조건과 유사한 26mm/s의 속도로 실험을 행하였다. 2차 실험에서는 유동성형 해석결과 및 마그네슘 소재의 낮은 기계적 특성을 고려하여 롤러의 이송속도를 1차 실험 대비 2배 낮은 속도인 13mm/s로 유동성형 하였으며, 3차 실험에서는 압하율 변화에 따른 성형성 확인을 위해 Preform 온도 및 롤러 이송속도를 2차 실험과 동일하게 설정하고 압하율을 58%에서 6%를 감소한 52%를 적용하여 실험을 행하였다.

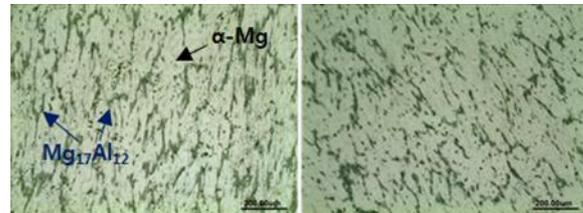
**4.2 유동성형 공정조건에 따른 성형결과**

Fig. 6은 Table 4에 나타난 바와 같이 3가지 조건에서의 유동성형 후의 마그네슘 로드휠의 외관을 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)와 (b)에서와 같이 롤러의 이송속도(feeding rate) 26mm/s와 13mm/s의 롤러 이송속도 변화에 따른 유동성형 실험 결과, 유동성형 진행 초기에 파단이 발생하였다. 이는 Fig. 5의 해석 결과, 유동성형 초기에 높은 유효 변형률을 나타내는 영역과 실제 실험에서의 파단 영역이 일치함을 알 수 있다. Fig. 6(c)는



**(a) section A (b) section B**



**(c) section C (d) section D**

**Fig. 7 Optical microstructure images with the part of Mg wheel after flow formed. (a) section A, (b) B, (c) C and (d) D**

제품에 미치는 유동응력을 낮추어 파단이 일어나지 않도록 압하율을 58%에서 52%로 낮추어 적용한 성형 후의 제품 사진을 나타낸 것이다. 사진에서와 같이, 압하율을 낮추었을 경우 유동성형이 완전히 이루어졌음을 알 수 있다. 이것은 롤러의 이송속도와 같은 공정 변수와 함께 성형한계 예측을 위한 압하율을 고려해야 한다고 판단된다.

**4.3 유동성형 미세조직 분석**

Fig. 7은 Table 4의 3차 실험조건으로 유동성형 후의 부위별 미세조직을 나타낸다.

유동성형 시작점인 A 영역의 조직은 일반적인 AM80 마그네슘 주조조직을 나타내고, 성형이 약 25% 진행된 영역인 B 영역에서도 큰 소성 영역을 나타나지 않고 있으며, 국부적으로 미세한 조직변형이 관찰되었다. C 영역에서는 가장 많은 소성변형이 이루어진 미세조직을 나타내며 α-Mg과 어두운색의 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 공정상이 소성된 형태로 존재하였고, 유동

성형의 최종 부위인 D 영역에서의 미세조직은 다소 소성변형이 줄어든 경향을 나타내었다. 이러한 부위별 미세조직 분석결과를 통하여 Fig. 4의 유효 변형률 분포 해석 결과와 실제 유동성형 후의 결과가 일치함을 알 수 있었다.

### 5. 결론

저압주조 공법에 의해 제조된 마그네슘 로드 휠의 유동성형에 관하여 해석 및 시제작을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) AM80 마그네슘 합금을 이용하여 저압주조 공법에 의한 유동성형용 프리폼 주조품을 제작할 수 있었다.

(2) 유동성형해석을 위한 고온압축시험을 행하였으며, 실제 유동성형 조건과 유사한 변형속도 10mm/s 조건의 경우 변형률 약 15~20%까지는 유동응력이 비례하여 증가하였으나, 그 이상에서는 더 이상 응력증가가 없었다.

(3) “Forge” 프로그램을 이용한 마그네슘 로드휠의 유동성형해석에서는 3path 롤러 성형에 따른 해석을 수행하였다. Preform 초기 온도에 따른 유동성형 해석 조건 중 300℃에서 가장 안정적인 유효 변형률 분포를 나타내었으며, 롤러 이송속도에 따른 유동성형 해석 조건 중 21mm/s에서 가장 안정적인 유효 변형률 분포를 나타내었다.

(4) 마그네슘 로드휠의 유동성형에 의한 시제품 제작에서는 26mm/s와 13mm/s 롤러 이송속도에서는 파단이 일어났으며, 이송속도 13mm/s와 압하율을 52% 적용한 조건에서는 전체적으로 균일한 유동성형이 가능하였다.

본 연구를 통하여 마그네슘 로드휠의 유동성형 해석을 통하여 유동성형 공정 변수에 따른 유동성형 경향을 예측할 수 있었으며 보다 안정적인 유동성형 한계 예측을 위해 Preform의 압하율에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다. 실제 실험을 통해 마그네슘 저압 주조품에 유동성형을 응용한

마그네슘 로드 휠의 제조가 가능함을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 WPM(World Premier Materials) 국책 연구 과제인 “수송기기용 초경량 마그네슘 소재 개발”(과제 번호 : 10037928) 사업의 연구 결과의 일부입니다. 본 연구를 위하여 협조해 주신 여러분들에게 감사드립니다.

### REFERENCES

- [1] T. Quiroga, 2010, Effects of Upsized Wheels and Tires Tested, <http://www.caranddriver.com>.
- [2] H. S. Kim, D. H. Ye, M. C. Kang, 2011, Development Trend of Magnesium Casting Technology, J. Kor. Foundrymen's Soc., Vol. 31, No. 5, pp.243~248.
- [3] P. Fu, A. A. Luo, H. Jiang, Y. Yu, C. Zhai, A. K. Sachdev, 2008, Low-pressure Die Casting of Magnesium Alloy AM50: Response to Process Parameters, J. Mater. Process. Technol., Vol. 205, No. 1, pp. 224~234.
- [4] S. H. Park, Y. M. Kim, H. S. Kim, C. D. Yim, B. S. You., 2012, Microstructure and Yield Asymmetry Behavior of Indirect-extruded Mg-Sn-Al-Zn Alloys, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 5, pp. 324~329.
- [5] M. H. Parsa, A. M. A. Pazooki, M. N. Ahmadabadi, 2009, Flow-forming and Flow Formability Simulation, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 42, No. 5~6, pp. 463 ~473
- [6] Q. Wang, Z. Zhang, X. Zhang, G. Li, 2010, New extrusion process of Mg alloy automobile wheels, Trans., Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 20, pp. s599~s603.
- [7] J. G. Kim, I. S. Shin, D. W. Kum, 1999, A Study of Manufacturing AZ91D Mg Alloy Wheel, Kor. J. Mater. Research, Vol. 9, No. 7, pp. 715~723.