[논문] 한국소성가공학회지, 제 16 권 제 5 호, 2007
*Transactions of Materials Processing, Vol.16, No.5, 2007*

# 자동차 휠용 6061 Al합금의 단조 및 T6 열처리 전후의 미세조직과 기계적 특성 평가

이지혜[1]· 이동근[#]· 정헌수[2]· 염종택[1]· 김정한[1]· 박노광[1]· 이용태[1]

# Evaluation of Mechanical Property and Microstructure of Forged and T6-treated 6061 Aluminum Alloy Wheel

**J. H. Lee, D-G. Lee, H. S. Jeong, J. T. Yeom, J. H. Kim, N. K. Park, Y. T. Lee**
(Received May 9, 2007)

**Abstract**

Effects of forging and mechanical properties of 6061 aluminum alloy wheel for automobiles were investigated in the present study. Microstructural and tensile characteristics of automobile wheel after hot forging process using dynamic screw press were analyzed to evaluate effect of metal flow on mechanical properties. The results showed advanced mechanical properties of 6061 alloy wheel because of $Mg_2Si$ precipitation by T6, elongated grain by forging, and work hardening by dense metal flow, etc. Hot compression tests were conducted in order to characterize high temperature compression deformation behaviors and microstructural variation in the range of 300~450℃, in the strain rate range of $10^{-3}$~$10^{1}$ $sec^{-1}$. As strain rate increased, maximum compression stress increased but it was shown the reverse linear relation between temperature and maximum stress irrelevant to strain rate variation. On the other hand, temperature and yield stress didn't have any linear relation and its relation showed big deviation by a function of strain rate and test temperature.

**Key Words :** Automobile Forged Wheel, 6061 Aluminum Alloy, Hot Compression Deformation Behavior

## 1. 서 론

자동차산업의 발전과 함께 연비향상의 한 방안인 알루미늄 휠의 수요가 크게 증가하고 있다. 알루미늄합금은 철합금계에 비하여 비중이 1/3 정도로 작고, 비강도가 높기 때문에[1~2] 휠을 제작할 경우 중량기준으로 20~30%정도 무게를 줄일 수 있다. 자동차의 경량화 등에 의한 여러 이점 때문에 사용되는 알루미늄합금은 크게 주조품과 단조품으로 구분되는데, 주조품의 경우 조직이 치밀하지 못하여 소재의 강도가 낮고, 유지보수가 어려우며 디자인이 제한적이다. 단조품의 경우는 중형세단용 휠을 중심으로 사용되고 있으며, 조직 치밀도, 강성 및 연성, 충격과 지속적인 피로에 대한 저항력 등이 우수하고[3] 디자인의 다양화 및 보수의 편리성 등이 부각되면서 수요가 급증하고 있는 추세이다. 한편, 중·대형 규격인 20 인치 이상의 SUV, RV 차와 고성능 승용차 휠이 저압주조법, 용탕단조법, 반응고단조법 등으로 소재의 물성 특성을 개선한 기술개발이 한창 이루어지고 있으나, 현재의 기술로는 기계적 강도를 맞추는데 한계가 있는 것이 현실이다. 또한, 아직까지 국내에서는 고급세단용 알루미늄 단조휠의 제작 및 적용이 활발하지 못한 상황이며, 품질보증 및 신뢰성 확보 등이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 자동차 알루미늄 휠용으로

1. 한국기계연구원
2. 세명전기공업주식회사
# 교신저자:한국기계연구원, E-mail: leechodg@kims.re.kr

사용되고 있는 6061 합금을 이용하여 기계식 스크류 프레스(모델; LVH 4000)를 이용한 형단조 공법을 활용하여 고강도 알루미늄 합금휠을 제작하였으며, 이 단조휠의 부위별 미세조직 특성 및 기계적 물성을 평가하고 분석하였다. 단조성형시 휠의 부위에 따라 변형속도 및 온도가 변화하고 그에 따라 미세조직 및 기계적 특성이 변하므로, 이를 분석하기 위해 변형속도와 압축온도의 함수로 6061 알루미늄합금의 고온 압축변형거동을 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 알루미늄 합금은 Mg 과 Si 이 함유된 6061 주조합금으로, 그 화학조성은 Table 1 과 같다.

**Table 1 Chemical composition of Al6061 used in this work (wt. %)**

| Al | Mg | Si | Fe | Cu |
|---|---|---|---|---|
| Bal. | 0.8-1.2 | 0.4-0.8 | ≤0.7 | 0.15-0.40 |
| Mn | Cr | Zn | Ti | etc |
| <0.15 | 0.04-0.35 | <0.25 | 0.15 | <0.15 |

여기서 Mg 와 Si 의 함량은 6063 합금에 비해 상대적으로 많으며, 인성과 피로강도를 개선하기 위해 Mn, Cr, Cu 첨가량이 상대적으로 높은 편으로, 이들 첨가원소는 재결정을 억제하는 역할을 한다 [1]. 단조의 영향을 평가하기 위하여 6061 알루미늄합금의 원소재와 다이휠의 최대운동에너지가 400kJ 인 4000 톤 용량의 기계식 screw press(모델명 LVH 4000)를 이용하여 열간단조한 6061 알루미늄 소재를 사용하였다. 자동차용 휠을 제작하는 공정과정에 대해서는 Fig. 1 에 도식적으로 나타내었다. 열간단조 후 알루미늄 휠을 530℃에서 3 시간 용체화처리한 후 수냉하고, 이를 다시 175℃에서 8 시간 인공시효한 후 수냉하는 T6 열처리를 시행하였다.

사용한 6061 알루미늄합금을 기계적으로 연마한 후 $CH_3OH$ 50ml, HCl 30ml, $HNO_3$ 20ml, HF 1 drop 용액으로 에칭하여 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였으며, 모델명 DTB-500인 브리넬경도 시험기로 10mm 텅스텐 카바이드볼을 이용하여 500kg

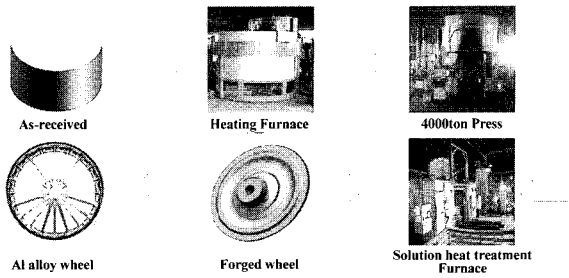


**Fig. 1 Flow chart showing forging process of 6061 alloy wheel**

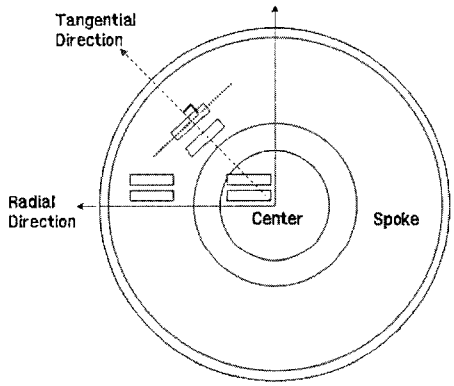


**Fig. 2 Tensile direction of test specimens of 6061 aluminum alloy**

하중에서 경도를 측정하였다. 또한, 상온인장시험은 INSTRON 사의 INSTRON 4206 시험기를 이용하여 표점거리 30mm, 직경 6mm 인 봉상시편으로, $1.0\times10^{-3}sec^{-1}$ 의 변형속도하에서 실시하였다. 인장시편은 Fig. 2 에 도식적으로 나타내었듯이 단조에 의한 metal flow 방향에 따라 크게 3 가지 방향, 즉 center, radial, tangential 등으로 구분하여 가공하였다.

6061 알루미늄합금의 고온변형특성을 알아보기 위해 ThermacMaster-Z 장비를 이용하여 고온압축시험을 실시하였다[4]. 사용한 시편은 직경 8mm, 높이 12mm 의 원통형으로, 압축시험은 $10^{-3}$~$10^{1}sec^{-1}$ 의 구간에서 변형속도를 $10^{1}sec^{-1}$ 간격으로 변화시켰으며, 압하량은 60%로, 온도는 300℃~475℃의 구간에서 25℃간격으로 각 온도에 대한 각각의 변형속도 조건에서 실시하였다. 실험시 시편과 금형 사이에 운모판을 삽입하여 마찰 및 열손실을 최소화하였고, 압축시험 후 질소가스를 시편에 직접 분사하여 급냉하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미세조직

6061 알루미늄합금은 Mg 와 Si 이 첨가되어 있어 Fig. 3 에서와 같이 $Mg_2Si$ 상 등과 같은 여러 상들이 생성되었음 확인할 수 있었다.

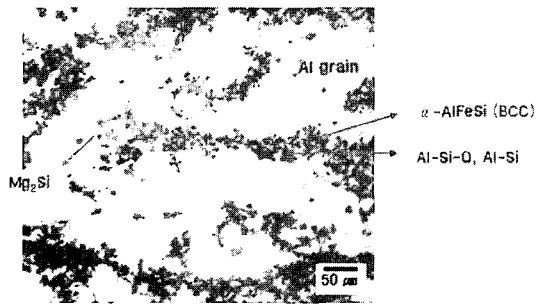


**Fig. 3 Microstructure of forged and T6 heat-treated 6061 aluminum alloy**

Fig. 4(a)-(b)는 6061 알루미늄합금을 단조한 후 T6 열처리를 수행한 알루미늄휠의 중앙부위와 스포크(spoke) 부위를 절단하여 3 차원적으로 미세조직을 관찰한 광학현미경 사진이다. 단조품의 압축된 방향과 연신된 방향의 미세조직을 비교하기 위하여 ST(short transverse), LT(longitudinal transverse), L (longitudinal)방향으로 나누어 미세조직을 관찰하였다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 단조한 후에도 알루미늄휠의 중앙부위는 단조에 의한 압하율이 작고 비교적 정수압적 압력을 받기 때문에 결정립에 큰 변화없이 원소재와 거의 동일한 미세조직을 갖는 것을 확인할 수 있다. 휠 중앙부위의 미세조직은 단조 후에도 단조방향에 따라 각 방향별 미세조직에 큰 변화없이 거의 일정하며, 단조에 의한 metal flow 의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있었다.

반면에 알루미늄휠의 스포크 부위는, 단조방향에 수직인 방향(ST)의 미세조직은 원소재의 미세조직과 거의 같은 미세조직을 나타내지만, LT 방향 및 L 방향의 미세조직은 소성변형이 심하게 발생하여 결정립이 길게 연신된 층상구조와 같은 미세조직을 갖는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4(b)). 즉, 단조휠의 중앙부위는 단조에 의한 metal flow 의 영향이 미미하여 방향에 따른 조직의 변화는 거의 없으나 스포크 부위는 metal flow 에 의한 심한 방향성을 나타내게 된다.

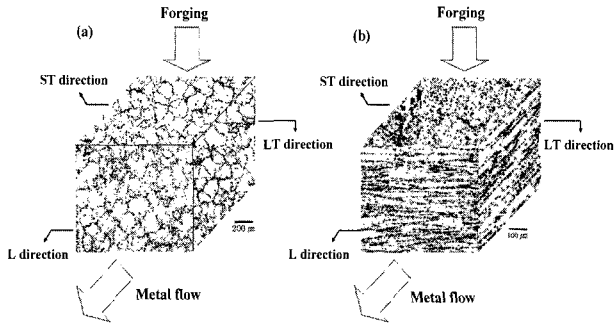


**Fig. 4 Optical 3-D micrographs of (a) Center part and (b) Spoke part of forged wheel**

### 3.2 기계적 특성

알루미늄 단조휠의 중앙부위와 스포크 부위의 평균 경도변화는 스포크 부위의 경도값이 89HB 로 중앙부위 84HB 보다 더 높게 나타났다. 이것은 두께 및 형상의 차이로 인해 부위별 단조 효과가 상이하기 때문으로, 중앙부위는 단조에 의한 압하량이 적은 반면, 스포크 부위는 단조에 의한 결정립의 연신 및 치밀화, 그리고 metal flow 에 의한 가공경화 효과가 혼합되어 경도가 향상되기 때문이다.

6061 알루미늄합금을 이용해 단조한 후 T6 열처리한 단조 휠에 대해 각 방향별로 상온 인장특성을 알아보았다. Radial 방향은 metal flow 에 나란한 방향으로 인장방향과 결정립의 연신방향이 일치하며, tangential 방향은 metal flow 에 대해 수직한 방향으로 결정립의 연신방향이 인장응력방향과 수직을 이루게 된다. 중앙부위는 압하율이 비교적 작은 부위로 스포크 부위의 인장특성과 비교하였으며, 그 시험결과를 표 2 에 나타내었다.

스포크 부위의 인장강도, 연신율 등 인장특성이 중앙부위보다 우수한 결과를 보여주고 있으며, 특히 Radial 방향의 인장특성이 가장 우수하게 나타났는데, 이것은 앞서 설명한 바와 같이 단조 영향에 의한 강화 및 소성변형 효과를 뒷받침해주는 것이라 할 수 있다.

한편, 인장시험한 후 시험편의 파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하여 파면 양상을 Fig. 5 에 나타내었다. 전체적으로 딤플이 관찰되는 연성파괴 형태를 보이고 있다. 중앙부의 인장파단형태는 파단면 전체에 걸쳐 작은 크기의 딤플이 형성되어 있으며, 이것은 수많은 미세한 공동들이 생

**Table 2 Room temperature tensile properties of forged 6061 aluminum wheel**

| Direction | Yield Stress (MPa) | UTS (MPa) | Elongation (%) |
|---|---|---|---|
| Center | 250 | 312 | 17 |
| Radial | 285 | 346 | 20 |
| Tangential | 277 | 340 | 20 |

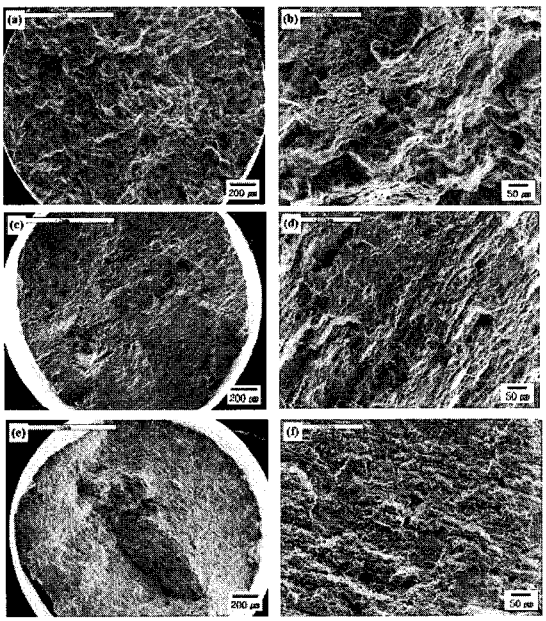

**Fig. 5 SEM fractographs of each tensile specimens; (a)-(b) Center, (c)-(d) Radial, (e)-(f) Tangential direction**

성되고 병합하면서 파괴가 일어났음을 의미한다[5](Fig. 5(a)-(b)). 스포크 부위에서 인장시편을 채취한 radial 방향의 인장파면은 중앙부의 인장 파단면에 비해 파면이 보다 평탄한 것을 확인할 수 있다(Fig. 5(c)-(d)) 물론, 딤플 형상의 연성파괴 거동을 보이는 것은 동일하지만, 단조에 의한 심한 소성 변형과 그에 따른 metal flow 의 영향으로 결정립이 심하게 연신되고 치밀화된 미세조직을 갖게 되기 때문에 중앙부위에 비해 강화된 기계적 특성을 나타내게 된다. Table 2 에서 확인할 수 있듯이 중앙부위의 인장특성에 비해 스포크의 radial 방향의 항복강도, 인장강도, 연신율 등이 보다 높은 값을 나타냈다. Tangential 방향의 인장 파단면도 radial 방향의 인장 파단면과 거의 동일하게 중앙부위와 비교해 평탄한 파단면을 나타낸다. 인장응력 방향이 단조에 의한 metal flow 방향과 수직인 tangential 방향으로 작용할 경우 연신된 결정립의 방향성을 고려할 때 radial 방향보다 미소하나마 낮은 인장특성을 나타낸다고 할 수 있다. 인장파괴형태는 앞의 경우와 마찬가지로 연성파괴거동을 나타냈다.

### 3.3 고온 압축변형 거동

재료의 고온압축변형거동은 시험온도와 변형속도에 따라 다양하게 나타내는데, 실제 단조성형공정시 효과적인 변형영역을 선택하고, 최적의 성형조건을 제시함으로써 최종 미세조직을 제어할 수 있는 기준을 제시할 수 있다[6]. Fig. 6(a)-(d)는 각각의 온도에서 서로 다른 변형속도 하에서 고온압축시험하여 얻은 고온유동곡선들이다. 각각의 온도에 따라 조금씩 정도의 차이는 있으나 모든 시험온도 조건하에서 비슷한 경향을 보이고 있다. 전체적으로 유동응력곡선의 형태는 고온압축시 변형초기 국부적인 집중소성변형이 일어나면서 유동응력이 증가하여 최대유동응력(peak flow stress)에 달한 후 변형이 계속되면서 유동응력은 점차 감소하는 가공연화(work hardening) 현상이 나타나고, 일정 기간이 지나면 정상상태응력(steady state stress)을 나타내는 경향을 나타냈다. 동일 온도 하에서는 변형속도가 증가할수록 변형속도경화(strain rate hardening) 효과에 의해 유동응력이 증가하는 경향을 나타냈다. 변형속도가 빠르면 축적변형에너지는 증가하나 계속되는 빠른 변형으로 인해 전위를 포함한 결함들이 확산할 충분한 시간적 여유가 없기 때문에 연화가 억제된다[7~8].

시험온도가 증가할수록 재료는 열적연화가 되기 때문에 유동응력은 감소하는 일반적인 경향을 보이며, 온도 상승에 의한 연화효과와 변형속도 증가에 의한 강화효과를 동시에 고려하여 적절한 고온단조성형조건을 찾는 것이 무엇보다 중요하다고 하겠다. 변형속도가 $10^{1}sec^{-1}$ 의 경우 300℃에서 450℃ 전 온도구간에 걸쳐 최대응력지점을 지난후 변형량이 0.3 정도될 때까지 유동응력이 뚜렷이 감소하는 영역이 존재한다. 이것은 소성변형에너지의 약 90%가 열에너지로 변환된다고 할 때, 변형이 빠르게 일어날 경우 재료의 고유특성인 열전도도에 의한 열의 확산이 충분히 이루어질 시간적 여유가 없기 때문에 재료 내부의 국부적인 일정영역이 단열조건을 형성하게 되고, 이에

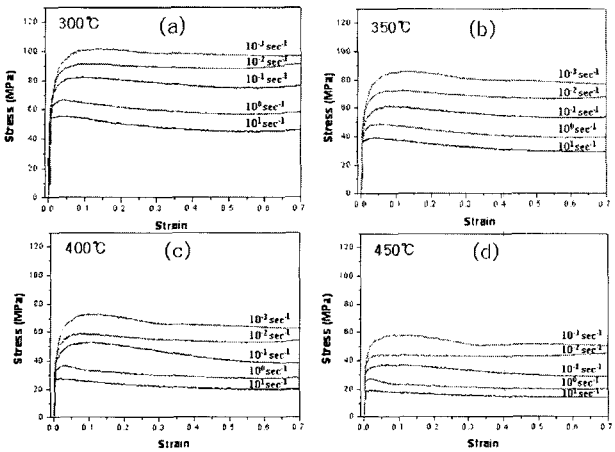


**Fig. 6 Flow stress-strain curves showing high temperature compression behaviors as a function of strain rate under constant temperature; (a) 300℃, (b) 350℃, (c) 400℃, (d) 450℃. strain rate; $10^{-3}$~ $10^{1}$sec$^{-1}$**

국부영역에서 단열가열(adiabatic heating)이 발생함으로써[9] 연화가 발생하여 유동응력이 감소하기 때문으로 판단된다.

$10^{-3}$sec$^{-1}$, $10^{-2}$sec$^{-1}$ 등 변형속도가 느린 경우도 변형속도가 빠른 경우와 마찬가지로 300℃에서 450℃ 전 온도구간에 걸쳐 최대응력지점을 지난 후 유동응력이 뚜렷이 감소하는 영역이 존재한다. 하지만, 이 현상의 원인은 빠른 변형속도의 경우와는 다른 메카니즘에 의해 발생되는 것이다. 고온에서 변형속도가 느린 소성변형의 경우 충분한 시간적 여유를 가지고 변형이 발생하기 때문에 미세조직의 동적 구상화(dynamic globularization), 또는 동적 회복(dynamic recovery) 등이 일어나 비교적 큰 변형연화 현상이 발생하게 된다. 이후 변형량이 계속 증가함에 따라 소성변형에너지의 열에너지 변환에 의한 연화효과 및 압축에 의한 재료의 비변형 영역(dead metal zone)의 상충에 따른 강화효과 등에 의해 상호 보완적인 관계를 유지하며 완만한 유동곡선을 나타내게 된다. 동적 회복 및 동적 구상화의 경우 높은 온도일 때 전위 및 확산 거동 등이 더욱 활발하게 발생하기 때문에 300℃보다는 450℃에서 보다 빠른 유동응력의 감소현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7 은 6061 알루미늄합금의 압축시험온도에 따른 최대압축응력값의 변화경향을 나타낸 것으

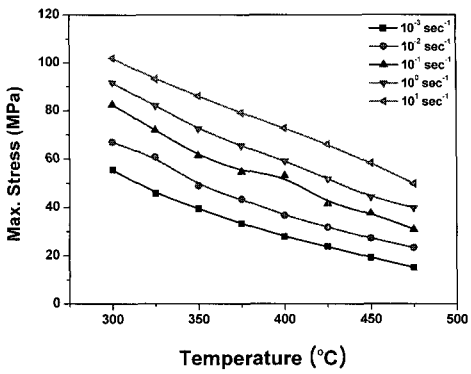


**Fig. 7 Temperature-maximum compression stress relation at various strain rate**

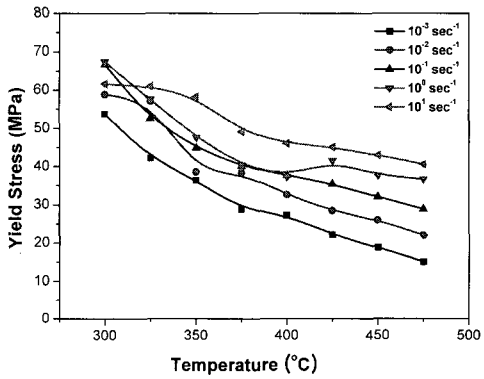


**Fig. 8 Temperature-yield compression stress relation at various strain rate**

로, 시험온도가 증가함에 따라 최대압축응력값은 점차 감소하는 경향을 나타내며, 온도의 증가분에 대한 최대압축응력의 증가분은 거의 일정하여 역관계를 갖는 직선형태의 경향을 나타내고 있다. 또한 변형속도의 증가에 따라 변형속도경화 효과에 의해 점차 최대압축응력값이 상승하는 것을 알 수 있으며, 변형속도의 변화와 무관하게 온도와 최대압축응력이 직선적 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 이 직선적 관계의 기울기가 변형속도가 변화함에도 불구하고 거의 일정한 것을 알 수 있으며, 이것은 변형속도가 온도에 따른 최대압축응력의 직선적 역관계(감소경향)에 거의 영향을 주지 못한다는 것을 의미한다.

Fig. 8 은 압축항복응력값에 미치는 압축시험온도의 영향을 나타낸 곡선으로, 항복응력값도 최대압축응력의 경우와 마찬가지로 온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내기는 하지만 그 경

향에서 차이가 크다. 변형속도가 증가함에 따라 항복응력은 점차 증가하는 경향을 나타내나, 300~350℃부근에서는 그 경향이 크지 않으며, 오히려 400℃이상에서 변형속도에 의한 항복응력의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 또한, 직선적 역관계를 이루지 못하고 시험온도에 따라 편차가 크며, 변형속도의 증가에 따라 항복응력값이 증가하기는 하지만 최대압축응력값의 경향처럼 그 관계에 일정한 규칙성을 형성하고 있지는 못하다. 이것은 변형속도와 온도의 복합적 함수에 의해 항복응력값이 변화할 수 있다는 것을 보여준다.

## 4. 결 론

본 연구는 자동차 휠용으로 개발되고 있는 6061 알루미늄합금의 고온 단조성형에 따른 미세조직의 변화와 기계적 특성을 고온압축변형거동과 연계하여 고찰하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고온 단조한 휠의 스포크(spoke) 부위는 중앙부위와 달리 metal flow에 의해 소성변형이 심하게 발생하여 결정립이 길게 연신된 층상구조와 같은 미세조직을 갖는 것을 확인할 수 있었으며 심한 방향성을 나타내었다.

(2) T6 열처리에 의해 소재 내부에 균일하게 석출된 $Mg_2Si$ 석출상과 단조에 의한 결정립의 연신 및 치밀화, 그리고 metal flow에 의한 가공경화 효과가 혼합되어 6061 알루미늄휠의 기계적 특성이 향상되었다.

(3) 시험온도와 변형속도에 따라 고온 압축변형거동을 평가한 결과, 변형속도의 증가에 따라 최대압축응력값은 상승하며, 변형속도의 변화와 무관하게 온도와 최대압축응력이 직선적 관계를 나타냈다. 이 직선적 관계의 기울기는 변형속도가 변화함에도 불구하고 거의 일정하였으며, 따라서 변형속도가 온도에 따른 최대압축응력의 직선적 역관계에 거의 영향을 주지 못함을 알 수 있었다.

(4) 반면, 압축항복응력값에 미치는 시험온도의 영향을 평가한 결과, 온도와 항복응력값이 직선적 역관계를 이루지 못하고 시험온도에 따라 편차가 크게 나타났으며, 이는 변형속도와 온도의 복합적 함수에 의해 항복응력값이 변화할 수 있다는 것을 보여준다.

## 후 기

본 연구는 중소기업청의 국가연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 대한 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

[1] 이호인, 한요섭, 김도향, 김원태, 2005, 알루미늄 응용기술의 이해와 활용, 한국철강신문, pp. 14~38

[2] N. K. Park, S. S. Kim, Y. N. Kwon, Y. S. Lee, J. H. Lee, 2004, Mechanical and Corrosion Properties of Cast/Forged A356-T6 Alloy, J. of The Korean Inst. of Met. & Mater., Vol. 42, No. 6, p. 464.

[3] K. J. Kim, Y. N. Kwon, Y. S. Lee, M. H. Bae, J. H. Lee, 2004, Tensile Behavior of Cast-Forged Al-Si-Mg Alloy, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 329~332.

[4] E. J. Jung, J. T. Yeom, J. H. Kim, D. G. Lee, N. K. Park, C. S. Lee, 2006, Evaluation of High Temperature Workability of A350 LF2 Using the Deformation Processing Map, Transactions of Materials Processing, Vol. 15, No. 4, p. 334.

[5] B. Hu, I.M. Richardson, 2006, Microstructure and mechanical properties of AA7075(T6) hybrid laser /GMA welds, Materials Science and Engineering, Vol. 459, pp. 99~100.

[6] J. T. Yeom, D. H. Kim, Y. S. Na, N. K. Park, 2001, Hot Workability Characterization of Ti Alloys Using Dynamic Material Model, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 301~304.

[7] S. H. Cho, Y. S. Kim, Y. C. Yoo, S. H. Rhim, S. I. Oh, 1998, The Prediction of Deformation Resistance of Al6061 during Hot Deformation, J. of The Korean Inst. of Met. & Mater., Vol. 36, No. 4, pp. 503~504.

[8] Y. C. Yoo, J. S. Jeon, H. I. Lee, 1997, The effect of SiC whiskers on the hot-deformation behavior of $SiC_w$/AA2124 composites, Composites Science and Technology, Vol. 57, pp. 651~654.

[9] G. M. Owolabi, A. G. Odeshi, M. N. K. Singh, M. N. Bassim, 2006, Dynamic shear band formation in Aluminum 6061-T6 and Aluminum 6061-T6/$Al_2O_3$ composites, Materials Science and Engineering, Vol. 457, pp. 114~119.