

반응고 성형된 A357 Al 합금 성형품의 후열처리 특성

최원호* · 신평우* · 이상용

*창원대학교 재료공학과, 한국기계연구원 재료공정연구부

Post-heat Treatment Properties of Thixoformed of A357 Al Alloy Product

W. H. Choi*, P. W. Shin* and S. Y. Lee

*Dept. of Material Science and Engineering, Changwon National University, Changwon, 641-773, Korea
Dept. of Materials Processing, KIMM, Changwon, 641-010, Korea

Abstract Recently, semi-solid forming (SSF) process has been applied in many automobile parts for improved weight reduction, better environmental protection and energy savings. SSF process was well developed for high volume production of light weight aluminum components. In this paper, knuckle has been manufactured by SSF and then the microstructures and mechanical properties were investigated followed by various heat-treatment conditions. It was found that the examined microstructure was equiaxed at the whole cross-section area.

(Received December 11, 2002)

Key words: Semi-solid Forming (SSF), Thixoforming, Aluminum, Automobile, Knuckle, Heat-treatment

1. 서 론

산업화에 의해 에너지부족과 환경파괴의 심각성이 대두됨에 따라 전세계적으로 환경보호와 에너지절약이 함께 요구되어지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 경량소재인 Al합금 및 Mg합금과 같은 소재를 이용한 반응고 성형품 개발 및 응용이 다양하게 진행되고 있다. 내기밀성이 요구되는 소형부품에 대한 연구 개발은 활발하게 진행되고 있으나, 구조용 부품에 대한 연구는 미흡하다[1,2]. 특히 전륜의 인쪽에 위치하여 전륜으로부터 전달되는 노면 하중을 차체에 전달하는 control arm이나 knuckle과 같이 높은 정적 및 동적강도를 요하는 승용차 부품은 개발은 되었으나 아직 그 신뢰성이 확보되지는 않고 있다.

무공해, 저소음, 높은 에너지 효율과 수송에너지의 다변화 등 많은 장점을 가진 전기자동차에 있어서 경량화는 필수 조건이다. 알루미늄은 주철이나 강판에 비해 가볍고 강도가 떨어지는 단점이 있지만 일반적으로 고속 주행하는 승용차에 비해 더 낮은 기계적 특성을 요구하므로, 강 부품에서 알루미늄을 대체함으로 약 40%의 무게감소 효과를 이룰 수 있

다[1-3].

Knuckle은 전기 자동차의 전륜에 위치한 현가장치 부품으로서 차체무게를 지지하고 조향부와 연결되어 있는 정적·동적지지 구조를 갖는 중요 부품이다(Fig. 1). 현재 철계 소재의 단조로 대량생산하여 일반 차량에 체결되어 있는 부품이며 형상의 복잡함으로 인해 여러단계의 단조공정을 거치는 부품이다. 지금까지의 경량화연구 대상은 브레이크 실린더, 연료 레일, 그리고 에어컨 압축기 하우징과 같은 내기밀성이 요구되는 소형부품은 상업적으로 활발하였으나, 고강도 구조용 자동차 부품인 현가장치 및 조향장치의 부품에 대한 연구는 미흡하였다. 본 연구에서는 전기자동차의 고강도 및 경량화를 위하여 반응고 성형법을 이용하여 자동차 사시 현가장치 부품인 knuckle을 개발하였으며, 반응고 성형후 열처리에 따른 미세조직과 기계적 특성 변화를 관찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 반응용성형시 고·액 공존구간에서 저용점합금의 액상기지내에 구형의 고상입자들이 균일

하게 분포되어 있어야 하며, 따라서 어느 정도의 잔류 미세편석이 존재하여 액상과 고상의 용접이 다르게 되어야 하기 때문에 전자기교반법으로 A357소재를 제조하였으며, 그 조성은 Table 1에 나타내었다. 전자기교반법은 수평식 연속주조장치의 수냉금형 주위에 전자기교반장치를 설치하여, 텀디쉬의 정지상태인 표면 맨 아래쪽에 여과 및 탈가스 처리용탕을 수냉금형속으로 흘러보내어 금형벽 주위에 설치된 수냉통에 의해 열전달되어 응고가 일어나며, 응고점 근처에 있는 합금은 금형속에서 필요한 전단작용을 발생시키는 이동자계에 의해 강력하게 교반되도록 하는 제조법이다(Fig. 1). 반응고 성형용 빌렛 제조후 직경 76 mm의 원소재를 직경 65 mm, 길이 100 mm 가 되도록 가공하였다. 그리고 성형시 정확한 온도를 측정하기 위해 중심부와 표면부위에 2 mm 크기의 구멍을 가공하여 K-Type 열전대를 장착하였다. 반응고 합금 성형시 반응고 온도 영역에서 빠르고 정밀한 온도제어가 용이하고 가능한 빠른 시간에 균일하게 빌렛을 성형하는 것이 필요하다. 따라서 직경 최대 76 mm, 높이 100 mm의 빌렛을 구상의 초정입자를 유지하며 가열 및 성형 충전 완료시까지 부위

별 온도편차를 10°C 이내를 유지할 수 있도록 용량이 25 KW, 1 KHz로 출력이 제어되고 유도가열기와 투입되는 빌렛이 평행하게 위치하고 상·하부가 동시에 급속가열이 가능한 수평식 유도가열기를 이용하여 반응용가열을 하였다. 빌렛은 실린더를 통해 자동으로 유도가열장치 안으로 이송 및 배송이 가능하며 모든 것은 컴퓨터에 의해 제어된다. A357합금의 반응용 영역은 560-630°C(Fig. 2)이고, 적절한 고상율(60~80%, Fig. 3)을 갖는 온도에서 비수지상조직을 가진다[4,5]. 본 연구에서 가열조건은 590°C±10°C의 범위로 성형품을 제조하여 확인한 결과 580°C 온도에서는 완전한 성형품을 보여주지 못하였고(Fig.

Table 1. Chemical composition of A357

Al	Mg	Si	Fe	Ti	Cu	Zn
rem.	0.5	7.0	0.15	0.15	0.05	0.05

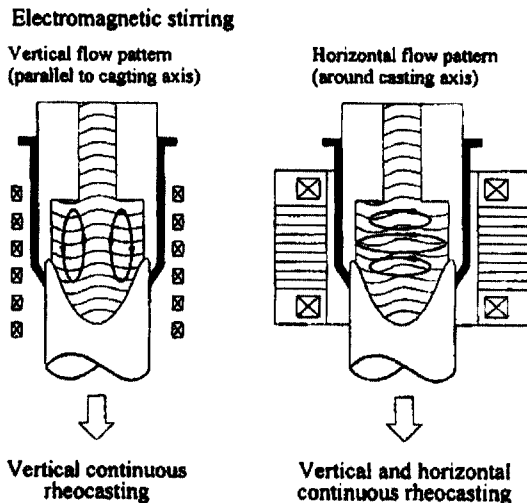


Fig. 1. The schematic diagram of MHD.

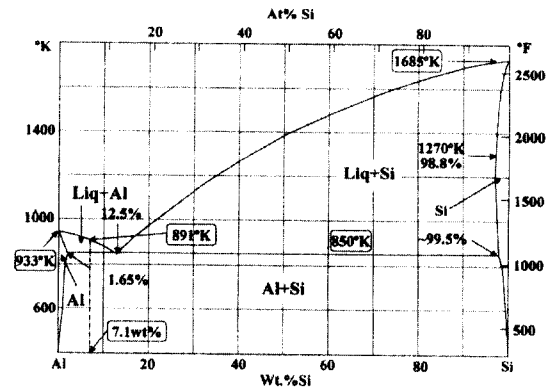


Fig. 2. The Aluminium-Silicon binary equilibrium diagram.

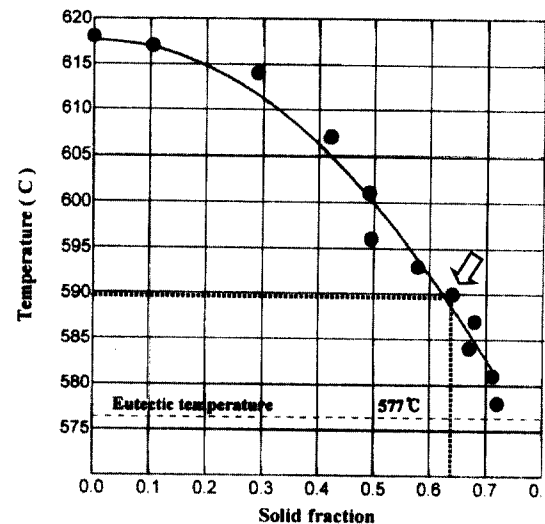


Fig. 3. A plot showing variations in the solid fraction as a function of holding temperature.

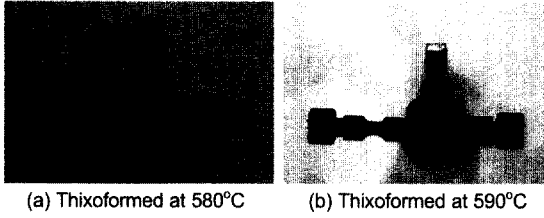


Fig. 4. Thixoformed knuckles.

Table 2. Re-heating conditions of A357 MHD billet

Materials	Heating Time (sec)	Temp. (°C)	Billet Size (mm)
A357	450	590	L: 100 ϕ : 65

4), 600°C 이상의 온도에서는 성형품 내에 수지상조직이 생성되기에 Table 2에서 보여지는 가열조건을 정하였다. 실험시 유도가열기에서 열처리후 금형으로의 이송시간은 10여초 걸렸다.

반응고 성형시 ram speed는 약 600 mm/sec이며, 성형후 2-3분 유지하고 금형에서 성형품을 추출하여 상온에서 공냉하였다. 반응고 성형직후 외관상으로 큰 결함은 발견되지 않았다.

반응고 성형된 성형품은 균질화처리와 T6 열처리를 하였다. 균질화처리는 500°C에서 30분과 8시간동안 각각 유지한 후 상온까지 공냉하였고, T6 열처리는 540°C에서 8시간동안 용체화 시킨후 상온으로 퀴칭한 성형품을 175°C에서 6시간 유지한 후 상온까지 공냉하였다[4].

Knuckle의 미세조직 관찰을 위해 성형품의 중앙 단면을 절단한 후 광학현미경으로 분석했다. 또한 성형직후와 후열처리(균질화처리, T6열처리)후 시편의 기계적 특성을 알아보기 위해 Instron Series IX 인장시험기를 사용하여 인장시험을 수행하였다. 성형품에서 부위별로 3개의 시편을 채취하여 시험하였다. 미시적인 내부 원소들의 변화를 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM/EDS)를 사용하여 분석하였다.

반응고 성형시 소재의 금형내 유동거리에 따른 기계적, 조직적 특성을 알아 보았다. 유동거리가 가장 멀고 상대적으로 액상율이 높은 Fig. 5의 A부위와 상대적으로 고압을 받아 액상이 밀려 나간 F부위를 비교대상으로 하여 성형직후와 T6 열처리 후의 상태를 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Knuckle 성형품의 미세조직 분석

반응고 성형된 knuckle의 절단된 단면의 매크로상 조직을 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 결함은 거의 관찰되지 않았다.

Knuckle 성형품의 절단된 단면에서 각 부위의 미세조직을 살펴보면(Fig. 5), α 상은 성형전 원소재를 전자기 교반법에 의해 구상으로 만든 것이 반응고 성형후에도 유지하고 있었으며 α 상을 둘러싸고 있는 검은 부분은 반응고 성형시 액상에서 성형후 고상으로 변한 Al+Si의 공정상이다. 표면부위에서의 α 상은 중심부에 비해 상대적으로 불규칙적이며 중심부로 갈수록 α 상의 양이 많고 균일하게 분포되어 있어 소재의 충전 거리에 따라 α 상들의 분포율이 차이가 남을 알 수 있다. 특히 양쪽 끝단부((a), (i))와 중앙부위(f)에서 α 상의 분포가 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 이러한 현상은 끝 부위로 갈수록 금형표면과의 마찰력이 발생하며, 금형으로의 열손실에 의해 (a)나 (i)부위에서 제대로 압력이 전달되지 못한 것으로 여겨진다. 따라서 가장 압력을 많이 받는 F부위는 반응고 상태에서 액상이 쉽게 다른 부위로 이동하여 공정조직이 적고 α 상이 많은 반면(f), 양쪽 끝 부위(A, I)로 갈수록 F부위에서 밀려나온 액상이 중앙보다 많아져 공정상의 범위가 넓고 불균일한 구상입자 분포를 보인다((a), (i)).

한편 기하학적 형상이 급격히 변하는 부위(G)에서는 액상의 와류에 의해 대부분 공정상으로 형성되어 조직이 다른 곳에 비해 양호하지 않았으며(g), 액상 영역의 증가는 응고시 수축량이 증가하게 되므로 수축에 의한 결함의 발생률이 증가하게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 유동속도를 감소시키거나 기하학적 형상을 좀더 완만하게 하여 소재의 와류로 인한 불균일한 조직과 균열을 방지 할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2. EDS 분석

성형품 내부의 성형직후와 균질화처리 및 T6열처리의 조직 변화를 관찰하기 위하여 SEM으로 관찰하고 EDS를 이용하여 선분석을 하였다(Fig. 6, 7). 성형직후에서는 어두운부분이 Al-rich α 상이며, 공정

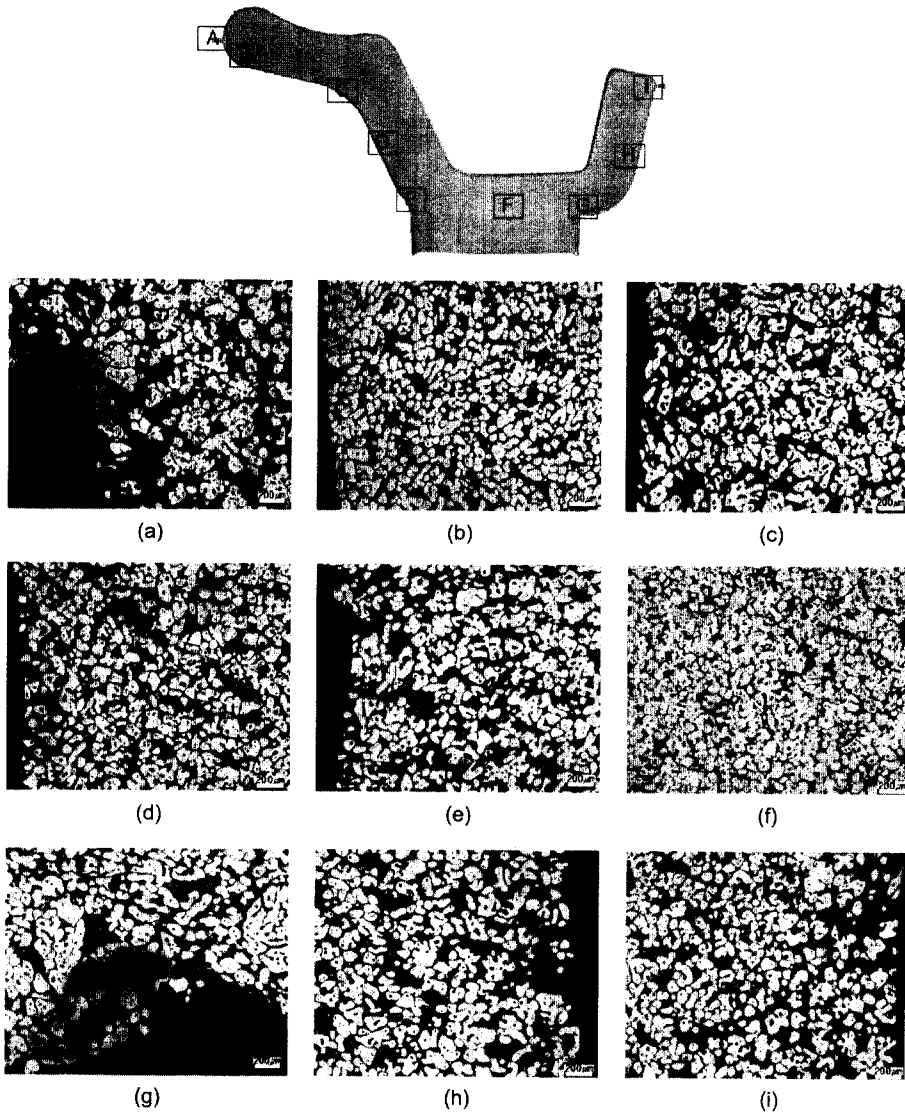


Fig. 5. Microstructure of different position in the thixoformed knuckle.

조직은 밝은색 부분이고 Si 함량이 α 상보다 상대적으로 많았다. α 상 내에 Si의 고용도가 낮아 소량의 Si이 존재하며, α 상 내에 Si입자들이 결정으로 분포되어 있는 것을 Fig. 6(a)에서 볼 수 있다. 밝은 흰색을 띄는 공정조직에 Si의 함량이 높은 것은 선분석에서 확인할 수 있다. Mg의 양도 α 상보다는 공정조직에 그 양이 많음을 알 수 있다.

반응고 성형후 30분간 균질화처리를 한 성형품에서 Si가 공정Si(밝은부분)를 이루거나 α 상 내에 Si결정들(흰색점)이 분포되어 있으며 편석도 존재한다. 공

정조직 내에는 Mg_2Si (검은색)상이 석출되어 있다 (Fig. 7(a))[6]. 균질화 처리를 통해 합금의 성분이나 조직의 균질화, 정출물의 미세화 등을 알아보려 하였으나 균질화 처리시간이 짧기 때문에 α 상내에 Si입자들이 확산되지 못하고 있으며 공정상도 변화가 없어 보인다. 이러한 현상을 선분석을 통해서도 확인할 수 있다. 균질화처리 시간을 장시간 하였을 경우를 알아보기 위해 반응고 성형품을 8시간 균질화처리하였을 때의 미세조직은 Si들이 α 상 내에 고용되거나, 확산을 통해 병합하여 α 상 내에 30분에

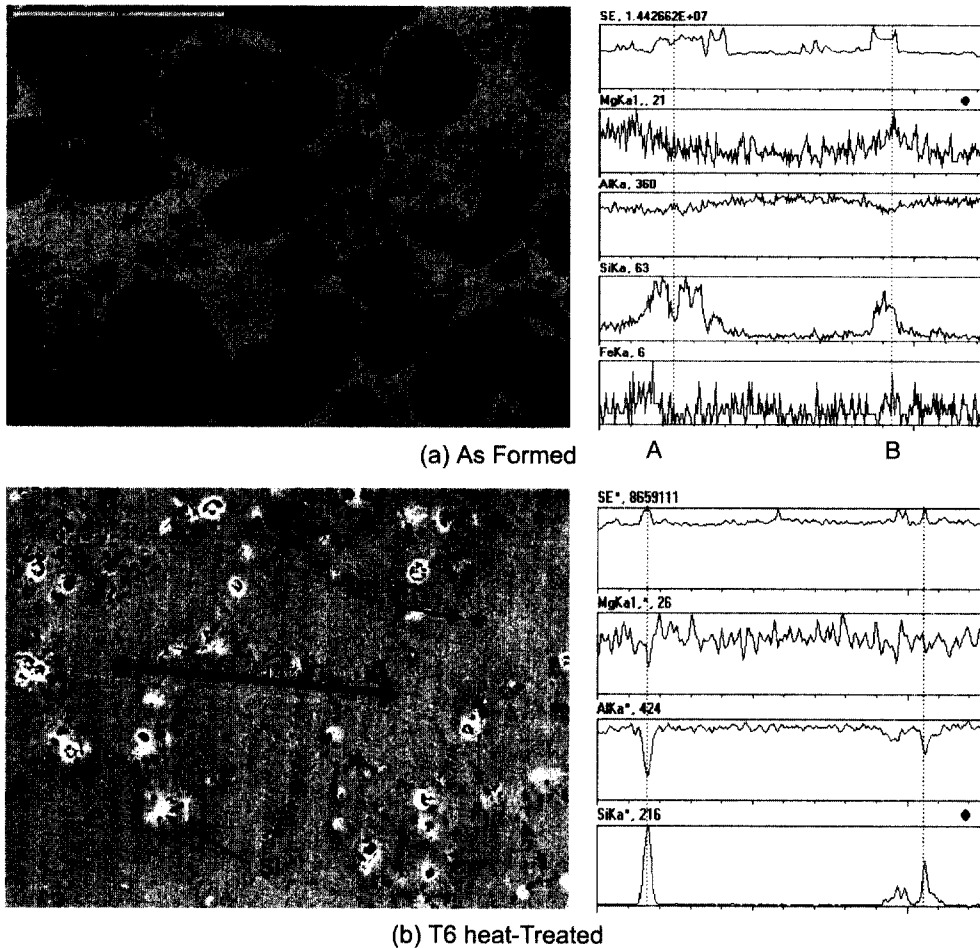


Fig. 6. SEM micrographs & line scan of as the T6 treated microstructures.

비해 조대화된 Si결정을 이루거나 일부는 Mg와 결합하여 Mg_2Si 를 형성하고 α 상 내의 Si편석물들은 Si의 확산에 의해 크기가 작아졌고 α 상은 조대화되어 T6 열처리와 같은 경향을 보이는 것을 미세조직과 선분석을 통해 확인할 수가 있다(Fig. 7(b)). T6열처리후와 균질화 8시간 처리한 것의 SEM 조직을 살펴보면 기공으로 보이는 것들이 있는데 열처리 과정에서 잡철에 의해 석출물이 빠져나간 공간으로 생각된다.

T6열처리후 α 상에 있던 Si 및 첨가 원소들이 용체화 및 시효 과정을 통해 Al과 Si 입자가 확산하였음을 Fig 6(b)에 나타낸다. T6 열처리의 경우 성형직후에 비해 용체화 과정에서 공정상의 Si를 비롯한 첨가원소들이 고용되었다가 인공시효후 Si이 정출

되어 군집을 형성하고 Mg는 Si와 결합하여 Mg_2Si 상(Black)을 석출함을 알 수 있다. 공정상에서 Si 입자(진회색)들은 군집 형상으로 존재한다(Fig. 6(b)). T6 열처리 성형품에서 성형직후 A와 B 사이의 α 상에 존재하던 Si입자들이 확산에 의해 공정조직에서 석출하였고 공정조직에 있던 Al입자들이 α 상으로 확산하였음을 알 수 있다.

3.3. 기계적 특성분석

Knuckle은 특히 차량의 구조용 부품으로 여러 가지 기계적 강도가 요구된다. knuckle 성형품의 성형직후와 균질화처리 및 T6열처리 후의 인장시험 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

인장시편은 knuckle의 각각의 부위에서 채취하여

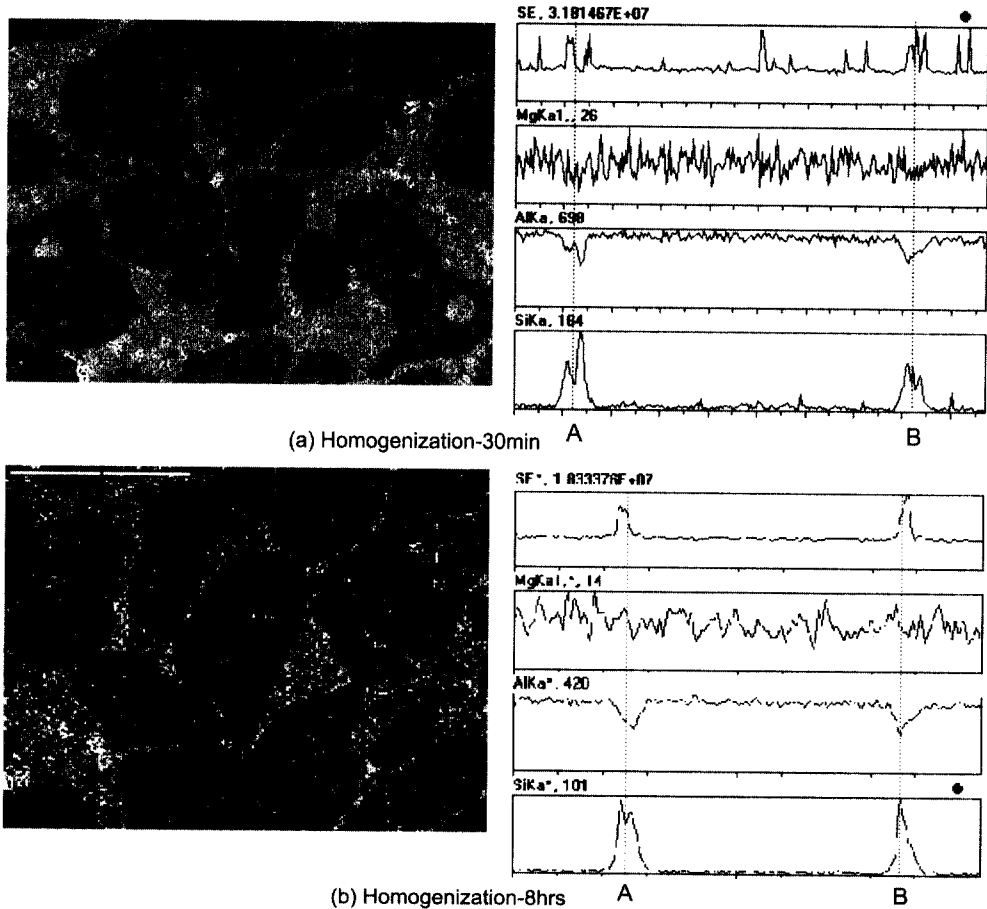


Fig. 7. SEM micrographs & line scan of the homogenized microstructure.

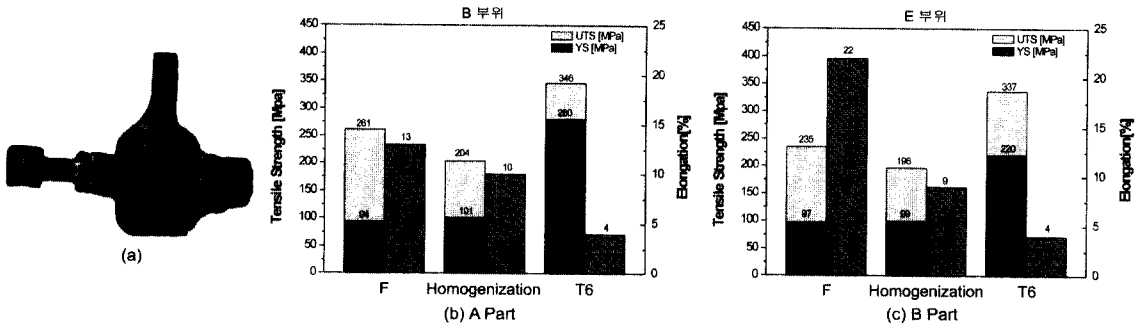


Fig. 8. Tensile strength and elongation of thixoformed knuckle.

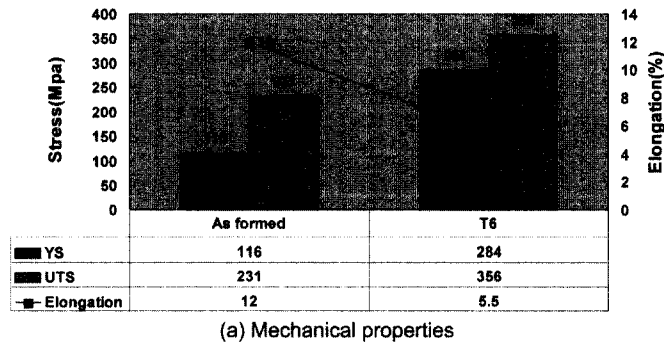
실험한 결과 전반적으로 모든 부분이 A부분과 같은 값을 나타내었으나 B부분이 편차가 있어 A와 B 부위를 비교하였다. 반응고성형 직후의 항복강도는 94-97 MPa로 비슷한 수치를 나타내었으며, 인장강도는 A가 261 MPa, B는 235 MPa로서 B가 약10%정도

낮게 나타났다. 연신율은 A부분이 14%, B는 22%로 B가 다른 부위보다 높게 나타났다. 강도는 낮고 연신율이 높게 나타난 B부위는 액상이 밀려나간 부위로서 조직상으로 다른 부위에 비해 α상이 많다. α상에는 공정상에 비해 강도에 영향을 주는 Si, Mg

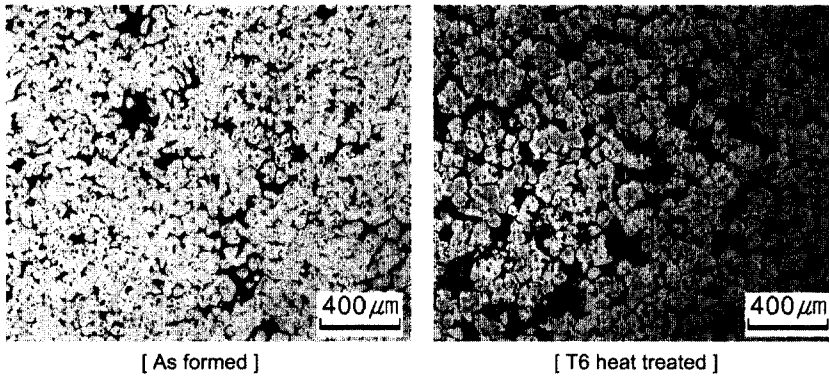
Table 3. Comparison with various processes in T6 heat-treatment

Process	Temper	YS [MPa]	UTS [MPa]	Elongation %
SSF*	As Formed	110 [110]	220[220]	14 [13]
SSF**	As Formed	100	260	15
SSF*	T6	240 [276]	320 [345]	12 [8-12]
SSF**	T6	260	345	4
Sqz***	T6	250	330	8
Forged*	T6	280	340	9

Note) *: Chiarmetta data(1996)[4]; bracked, [] - AEMP data; **: KIMM data; ***: John L. Jorstad, Formcast Inc. [5]



(a) Mechanical properties



(b) Microstructure

Fig. 9. Comparison of mechanical properties and microstructure of section A.

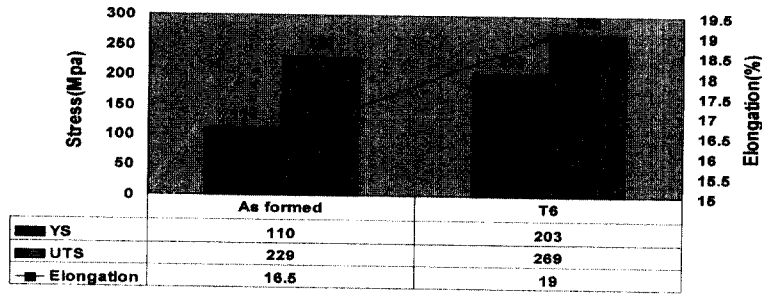
등과 같은 첨가 원소들이 작기 때문에 연신율은 높고 강도는 떨어진 것으로 판단된다.

균질화처리를 30분, 8시간으로 한 성형품에서 균질화처리 시간에 따른 기계적 특성은 거의 비슷한 값을 나타내었다. 항복강도는 A부위와 B부위에서 101~99 MPa, 인장강도는 196~204 MPa, 연신율은 9~10%로 대체적으로 일정한 값을 가지고 있다.

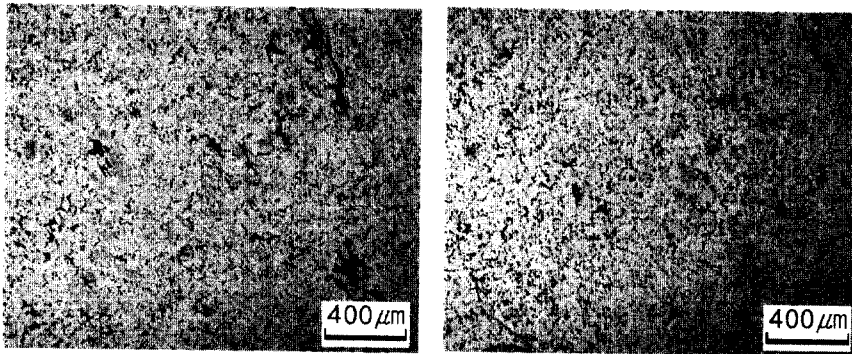
기계적 특성의 큰 변화는 편석에 의해 크게 좌우된다. 균질화 열처리를 통하여 성형품 내에 존재하는 편석의 양이 현저히 줄어든 것에 기인한 것

으로 사료된다. 성형직후의 성형품보다 강도와 연신율이 줄어든 것은 조직 내에 존재하는 Si입자의 조대화와 함께 미소 기공의 합체에 의한 것으로 생각된다.

T6열처리 후의 기계적 특성은 항복강도는 A부위는 280 MPa, B부위는 220 MPa으로 B가 다소 낮게 나타났다. 인장강도는 A부위는 346 MPa, B부위가 337 MPa로 비슷한 수치를 보이고 있으며 연신율은 4%를 나타내었다. T6 열처리후 Si입자들이 확산을 통해 균집을 형성하고 Mg₂Si석출상들이 공정상에 존



(a) Mechanical properties



(b) Microstructure

Fig. 10. Comparison of mechanical properties and microstructure of section B.

재함으로 인해 공정상이 많은 A에서 석출상들이 생성되어 큰 차이는 아니지만 A의 강도가 더 높게 나타났다. 전체적으로 T6 열처리한 성형품이 성형직후에 비해 강도가 상당히 높아졌고 반면 공정조직이 강화됨으로써 석출상들에 의해 인장특성은 저하되어 연신율은 떨어졌다.

성형직후와 균질화처리 및 T6열처리후의 인장시험을 통한 각각의 항복강도, 인장강도 및 연신율을 비교한 결과 성형직후에 비하여 균질화처리를 함으로써 인장강도, 항복강도, 연신율에서 모두 기계적 성질이 떨어졌다. T6열처리한 성형품은 강도가 상당히 증가한 반면 연신율은 많이 떨어졌다. 이러한 현상은 균질화처리후 Si입자들이 α 상 내로 고용되거나 서로 병합하여 조대화되고 편중된 Si 결정들과 잠열에 의해 빠져나간 석출물들의 빈 공간이 점결합이 되어 강도 및 연신율이 낮아진 것으로 판단되며, T6 열처리후는 고용되어 있던 첨가원소들이 시효를 통해 석출되면서 석출물들에 의해 강도는 증가하고 연신율은 감소하였다.

Squeeze cast, 단조 및 반응고 성형법을 이용한

공정에서의 기계적 성질을 Table 3에 나타내었다 [4,5]. 본 연구에서 인장시험 자료와 비교해 볼 때 반응고 성형의 경우 성형직후는 항복값은 약간 떨어지나 인장강도는 15~40 MPa 정도 높게 나타났다. T6 열처리 후에는 항복 및 인장값이 20 MPa 정도 높게 나타났다. 다른 자료에는 T6열처리 후에 항복 강도 290 MPa, 인장강도 345 MPa, 연신율 10%로 보고된 것도 있다[6]. 반응고 성형된 부품의 인장강도는 squeeze casting에 비해 약간 우수하며, 단조품에 비해 약간 떨어졌다.

3.4. 반응고 성형품의 유동특성 비교

반응고 성형 소재의 유동거리에 따른 기계적, 조직적 특성을 알아보기 위해 Fig. 5의 A와 F부분의 중심부에서 비교해 보았다(Fig. 9 & 10). 전체 너클에서 A부위는 상대적으로 액상이 고르게 분포하며 Fig. 9(b)의 미세조직으로 확인 할 수 있다. 그러나 F부위는 고압으로 인해 액상이 많이 밀려 나갔다(Fig. 10). 공정상과 α 상이 고루 분포되어 있는 A부위에서 T6 열처리 후 기계적 특성은 성형직후에 비

해 Mg_2Si 석출물과 Si입자들의 균집으로 인한 석출강화로 전형적인 Al-Si-Mg계 Al 합금의 열처리 후 특징을 보여준다(Fig 9(a)). 반면 F부위는 액상영역이 적게 존재하기 때문에 다른 부분처럼 인장강도에 영향을 줄 정도의 석출경화를 유발할 수 있는 고용원소들이 적어 T6 열처리후에도 인장강도에선 큰 증가를 보여주지 못하였고, 오히려 연신율이 다른 부분에 비해 증가함을 알 수 있다(Fig 10(a)).

4. 결 론

A357합금의 반응고 성형 적용에 있어 450초, 590°C의 가열조건을 찾은 후 knuckle 반응고 성형품에 대해 반응고 성형을 하고 후열처리로서 T6 열처리와 균질화 처리를 한후 기계적 특성실험과 미세조직 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 소재의 금형 내 유동거리에 따라 미세조직은 압력을 많이 받는 중심부를 제외하고는 거의 비슷한 구상의 조직을 갖고 있었으며, 소재 주입구 근처의 중심부위는 고상입자의 분율이 다른 부위보다 높았으며 양쪽 끝단부위에는 다른 곳보다 조직이 불균일하였다. 이것은 금형의 형상과 소재 주입속도에 의해 와류유동이 발생하고, 공급거리가 먼 곳으로 액상이 밀려 먼저 차기 때문에 발생한다. 따라서 성형중 소재의 유동 및 압력제어를 통해 조직의 균일성을 확보하는 것이 필요한 것으로 나타났다.

(2) 균질화 처리시간이 길수록 α 상 내에 있던 Si 편석들이 확산을 하여 α 상 내에 고용되거나 일부 서로 병합되어 공정 Si가 커지고 공정상은 얇아졌다. 열처리중 미소 가공의 합체로 점결함을 유발하여 항복강도와 인장강도 연신율은 성형직후보다 오히려 낮았다.

(3) T6 열처리를 함으로써 α 상 내에 있던 Si와 Mg 입자들과 액상영역에 있던 Al입자들이 서로 확산을 통해 액상영역에 공정Si입자들이 균집을 형성하고 Mg_2Si 석출물이 석출되었으며 액상영역의 Al입자들은 α 기지 내로 확산한 결과 성형직후에 비해 높은 강도를 가지고 연신율은 낮아졌다.

(4) 성형직후 기계적특성은 기존 squeeze casting과 단조에 비해 연신율은 높으나 인장강도는 많이 낮았다. t6 열처리후 인장강도는 squeeze casting보

다 약간 높고 단조보다 약간 낮게 나타났다.

(5) 강한 압력을 받는 주입구와 주입거리가 먼 끝단부의 유동특성은 주입거리가 먼 곳의 표면부는 α 상과 공정상이 불균일하나 내부에선 균일한 조직적 특성을 가지며 T6 열처리에 대해 Mg_2Si 석출물과 Si 입자들의 균집으로 인한 석출강화로 전형적인 Al-Si-Mg계 Al 합금의 열처리 후 특징을 보여준다. 반면 주입구에서는 강한 압력으로 인해 액상이 밀려나기 다른 부위에 비해 적은 공정상이 존재하기 때문에 T6 열처리에 석출상의 석출이 적어 인장강도는 비슷하고 오히려 연신율이 증가하였다.

(3) 본 연구 결과 반응고성형 knuckle의 강도를 높이기 위해서는 T6열처리를 적용하고, 높은 연신율을 요구할시에는 반응고성형상태가 가장 적당하다.

후 기

이 논문은 2001년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 김채원: 차세대 자동차의 경량화 기술, 대한금속재료학회, 제7회 철강기술심포지엄 논문집, (2000) p.3.
2. 임성기 외: 전기자동차 개발현황 및 전망, 대한기계학회지, 제32권, 제9권, (1992) p.765.
3. 조세형: 알루미늄을 적용한 경량 사시 부품 개발, 대한금속·재료학회, 제7회 철강기술심포지엄 논문집, (2000) p.333.
4. 전재일: 석사학위논문, SIMA 공정에 의한 고강도 Al 7075 합금의 미세조직 및 성형 특성 연구 (1998).
5. 고영진: 석사학위논문, 반응고 Al 합금의 유변학적 거동 및 열유동해석에 관한 연구 (1998).
6. ASM Metal handbook, atlas of microstructures of industrial alloys.
7. W. L. Winterbottom : Semi-solid Forming Applications-High Volume Automotive Products, Semi-solid Processing of Alloys and Composites, 6th International Conference, (2000) p. 73.
8. John L. Jorstad: Semi-solid Metal Processing - A Cost-competitive Approach for High Integrity Aluminum Components, Semi-solid Processing of Alloys and Composites, 6th International Conference, (2000) p. 227.
9. M. Garat: State of the Art of Thixocasting, Semi-

- solid Processing of Alloys and Composites, 6th International Conference, (2000) p. 187.
10. D.H. Kirkwood: International Materials Reviews, vol. 39, (1994).
 11. M. C. Flemings: Matallurgical Transaction, B, 22B (1991), p.269-293.
 12. 김기배, 이호인, 윤의박, “반응고가공용 소재제조기술” 금속학회회보 vol. 10. 2, (1997) p. 113.
 13. 한국과학기술연구원, 보고서 97C015 “철강의 반응고 가공기술 개발에 관한 연구(III)”, (1998), p.17-36.