

저속 전기자동차용 알루미늄 차체 조인트 노드의 반응고 성형

이상용[#]

Fabrication of a Joint Node for an Aluminum Frame for a Low Speed Electric Vehicle using Thixoforming Technology

S. Y. Lee

(Received April 17, 2014 / Revised May 15, 2014 / Accepted May 20, 2014)

Abstract

The thixoforming process has been applied to forming of a joint node for the aluminum frame of a low speed electric vehicle. A joint node should connect three aluminum extruded chassis showing different profiles. The MHS(magneto-hydrodynamic stirring) A357 billet was selected because homogeneous globular grains are necessary as the billet materials for thixoforming. A careful design of joint node has been performed by the considerations of structural demands and the simulation results for the thixoforming process using the MAGMASoft. Optimum heating temperature for the A357 billet was between 580 and 585 °C corresponding to the semi-solid temperatures showing 20-30% of liquid fraction. An injection speed of around 100mm/s and preheating of die at temperatures of 200 °C were also necessary conditions to obtain reasonable thixoformed parts.

Key Words : Joint Node, Aluminum Frame, Electric Vehicle, Thixoforming, A357, Simulation, Microstructure

1. 서 론

자동차의 실용화에서 경량화는 매우 중요하며 알루미늄 차체의 적용은 필연적이다. 알루미늄 차체의 구조물은 스페이스 프레임 형태의 개발 및 적용이 흐름을 주도하고 있다[1]. 높은 강성과 안정성이 요구되는 알루미늄 스페이스 프레임에는 형상이 복잡하더라도 주조보다는 단조, 압출 등의 제조 기술을 이용한 전신재 알루미늄 합금의 적용이 일반적이다. 그러나 여러 부품이 만나는 부위, 즉 용접, 압접 또는 리벳팅과 같은 접합이 이루어져야 하는 부위는 취약부가 될 수 있다[2]. 이를 방지하기 위해 여러 부가적인 설계가 필요해지며, 추가적인 생산 비용도 소요된다. 알루미늄 차체 프레임의 접합부(joint)는 두 개 이상의 압출 구조물을 연결하는 복잡한 구조

이면서 필요한 안전성을 갖추어야 한다. 압출 구조물의 접합부와 같은 복잡한 형상의 구조물은 주조를 통해 제조하는 것이 바람직하나 안전성이 떨어져 문제가 된다. 압출, 단조에 비해 형상 부여가 자유롭고 주조보다는 특성이 우수한 반응고 성형 기술의 적용이 대안이 될 수 있다. 이 기술은 자동차에서 주조의 대안으로 응용이 시작된 이후 너클, 커넥팅로드와 같은 서스펜션 부품까지 상용화 기술이 개발 되어 있다[3~5].

본 연구에서는 보통의 승용차에 비해 상대적으로 낮은 안전성이 요구되는 특수자동차, 즉, 골프장 등에서 사용할 수 있는 저속용 전기자동차를 실험 대상으로 하였다.

알루미늄 압출재를 적용한 스페이스 프레임 접합부에 반응고 성형으로 접합부를 제조하였다. 단면

[#] Corresponding Author : Dept. of Advanced Materials Engineering, Andong National University, E-mail: sylee@anu.ac.kr

형상이 서로 다른 3 개의 알루미늄 압출 재를 연결하는 조인트 구조물을 설계하고 반응고 성형에 의해 정형에 가깝게 제조하였다. 이 조인트는 필연적으로 판재와 같이 얇은 두께를 가지며 형상이 복잡한 구조물의 제조가 된다. 판재 형태 구조물의 성형으로 나타날 수 있는 결함과 강도 저하를 최소화 하면서 최종 형상에 가깝게 성형하는 것이 관건이다. 소재로는 Al-7%Si-0.5%Mg(A357)이 적용되었다. 구조를 고려한 형상 설계, 시뮬레이션을 이용한 결함 없는 성형 조건, 성형품의 조직 분석 및 기계적 특성 평가를 통해 알루미늄 스페이스 프레임의 접합용 조인트 구조물 제조에 반응고 성형 기술의 적용 가능성을 분석하였다.

2. 설계, 해석, 성형 및 결과

2.1 반응고 성형을 위한 조인트 설계

Fig. 1에는 저속 전기자동차용 알루미늄 스페이스 프레임 구조의 루프 조인트 노드(roof joint node, 이하 “조인트 노드”)를 나타내었다. 이 조인트 노드는 단면 형상이 서로 다른 압출재로 제작된 크로스 멤버(cross member), 루프 레일(roof rail) 및 에이 필러(A-pillar)의 3개의 부품을 하나의 구조물로 연결할 수 있도록 설계되었다.

형상이 다른 압출 단면이 연결되기 때문에 모든 단면의 끝부분이 열려있다. 따라서 이와 같은 부위의 구조적 강성은 취약할 수 밖에 없기 때문에 구조적 강성을 고려하여 단면을 최대한 맞추어 제작하기 위해서는 여러 개의 부품이 필요하며, 복잡한 기계가공 등을 통해 스크랩 발생과 가공 비용이 크게 증가한다. 본 설계의 조인트 노드는 이와 같은 단점을 보완하고자 하였다.

Fig. 2는 앞에 언급한 바와 같은 단면 맞춤형 연결, 구조적 강성 유지를 고려하고 반응고 성형을 이용하여 제조하기에 적합하도록 예비실험을 거쳐 설계한 조인트 노드의 형상이다. 각 연결 부위와 형상을 맞추는 것은 물론이고 충분한 내부 삽입 접합면이 존재하도록 하였다. ①과 ②는 각각 에이 필러와 루프 레일과 연결되고 ③은 크로스 멤버와 접합된다. 압출재 내부로 삽입되는 길이는 세 방향 모두 30mm로 하였다. ①과 ②의 두께는 5mm, ③의 두께는 3mm로 하였다. 이 두께는 반응고 성형에서의 유동과 각 부위에 요구되는 강성을 고려하여 설정되

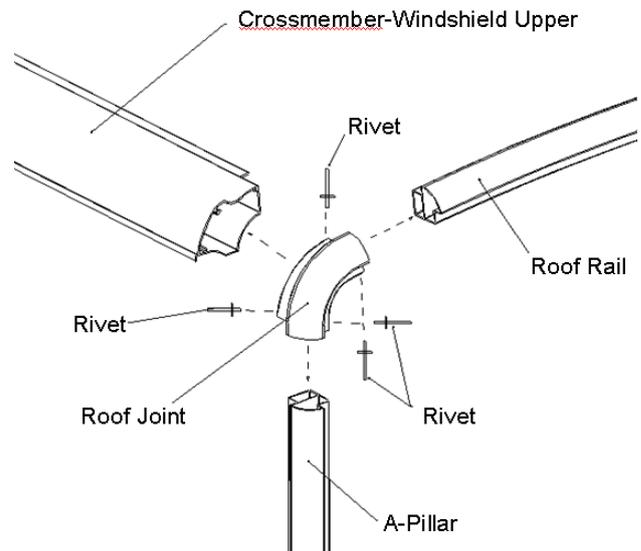


Fig. 1 Roof joint node in an aluminum space frame

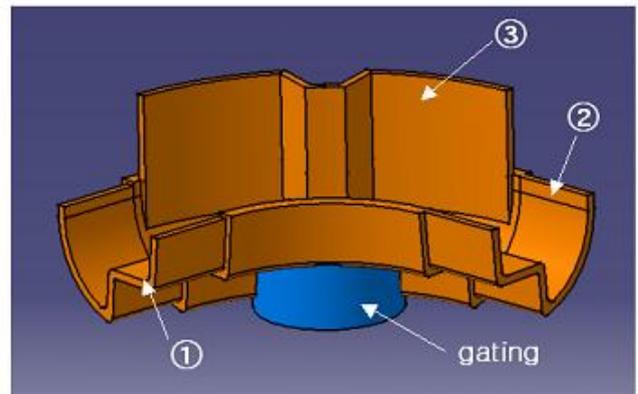


Fig. 2 Model of a roof joint node for thixoforming

었다. 이 조인트 노드와 연결되는 3개의 압출재는 단면형상이 다름에도 불구하고 두께가 모두 2mm로 되어 있다. ③에서 오목하게 튀어 나온 부위는 구조적 강성을 추가로 보완하기 위해 설계되었다. 반응고 성형에서 주입이 시작되는 주입구는 아래에 설치하였으며 넓은 박육 단면을 충분히 채울 수 있는 유동을 고려하였다.

2.2 반응고 성형을 위한 시뮬레이션

조인트 노드 설계에서 볼 수 있는 바와 같이 연결부의 형상이 서로 다르다. 무엇보다도 3~5mm의 비교적 얇으며 균일한 두께를 가지는 구조물을 결함이 없이 완전하게 충전시키는 것을 보장하는 공정 조건을 선택하는 것이 중요하다. 이를 위해 MAGMA (Thixomodule) 프로그램을 이용하여 시뮬레

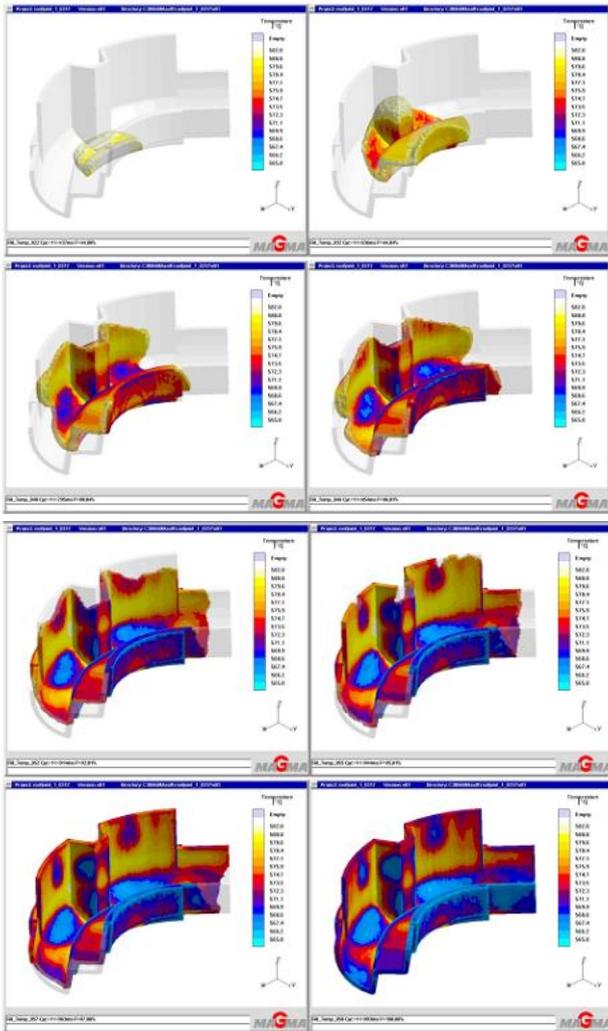


Fig. 3 Stepwise filling analysis of a roof joint node

이전을 수행하였다. 수렴성과 연산시간의 감소를 위해 FDM법을 이용하고 Ostwald-de-Waele 유동모델식을 이용하여 전산해석을 수행하였다. 재료는 A357, 주입 순간의 빌렛 가열 온도는 570~590℃, 금형의 온도는 200~250℃ 그리고 주입속도는 100mm/s를 시뮬레이션을 위한 기본 조건의 범위로 하였다.

Fig. 3 은 A357 에 대해 빌렛온도 582℃, 금형온도로 200℃, 주입속도 100mm/s 의 조건에서 반응고 성형 시뮬레이션을 했을 경우의 단계별 조인트 노드의 충전 양상을 보여 주고 있다. 설계에서 예측이 가능한 바와 같이 주입의 초기 단계에서 반응고 급속은 중심부를 채운 후에 3 개의 방향의 면을 향해 채워지고 있다. Fig.2 에서의 ①과 ②방향보다 ③ 부위가 먼저 채워지는 것을 볼 수 있다. 충진이 진행

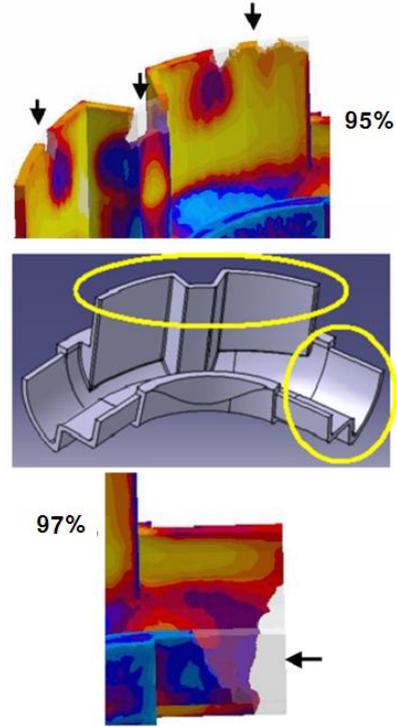


Fig. 4 Unstable flow at late stage of filling

되는 부위와 충전 후에 응고가 진행되는 부위는 온도를 나타내는 색상으로 구분할 수 있다. 박육 부품의 형상에 따라 응고 부위가 간헐적인 양상을 보이고 있다.

Fig. 4는 충전의 마지막 단계에서 ③부위의 95% 충전 상태와 ①과 ②부위의 97% 충전 단계의 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다. ③에서는 불안정 유동으로 인한 불연속적인 미충진 부위가 발생할 수 있고 ①과 ②부위에서는 아래의 끝부분이 가장 충진이 늦게 되는 부위로 나타났다. 이와 같은 양상의 불안정 유동은 주로 충전 중에 존재하는 공기의 압력에 기인한 것으로 추정된다. 기체 압력으로 인한 결함 및 불완전 유동을 방지하기 위해서는 그 위치에 통풍구(air vent)를 설치하는 것이 필요하다.

Fig. 5는 응고해석의 결과를 보여주고 있다. 응고의 방향은 상대적으로 얇은 부분인 세 연결부 쪽에서 주입구 방향으로 일방향 응고의 양상을 보이며 비교적 균일한 응고가 일어나는 것으로 해석되었다. 총 응고시간은 약 17초 정도였으며, 다소 긴 응고시간은 주입구의 형상에서 지속적인 열원을 공급받기 때문인 것으로 보인다.

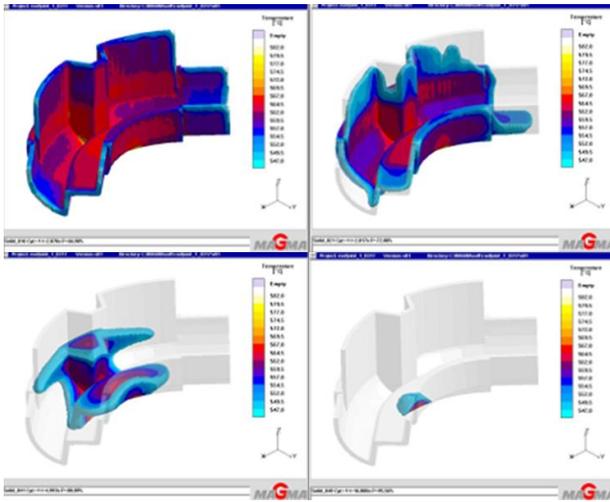


Fig. 5 Stepwise solidification analysis after thixoforming

2.3 조인트 노드의 반응고 성형

본 연구에서 설계되고 시뮬레이션으로 해석된 조인트 노드의 제조를 위해 반응고 성형 공정을 적용하였다. 실린더 형태의 Al-7%Si-0.5%Mg(A357) 빌렛의 반응고 성형을 위해 구형 입자를 가지도록 주조에서 전자기 교반으로 제조되었으며 미세조직은 Fig. 6에 나타냈다. 빌렛의 가열 및 이송에서 적절한 형상 유지와 반응고 성형 과정에서의 유동을 고려하여 약 20~30%의 입계 액상이 존재하도록 온도조건을 설정하였다. 시뮬레이션 결과 582℃ 정도가 적절한 것으로 나타났다.

빌렛을 빠른 가열속도에서 균일하게 가열하기 위해 25kW-1kHz용량의 고주파 유도가열 장치를 사용하였다. 가열에서의 빌렛의 부위별 온도 편차는 약 5℃ 이내로 유지하였다. 금형은 SKD61소재로 제작하였으며 시뮬레이션 결과로부터 빌렛의 주입 직전의 예열 온도를 200℃가 되도록 하였다. 프레스에 상부 램에 의해 고정된 금형의 하부 주입구를 통해 582℃에서 반응고 상태로 유지된 A357 빌렛을 유압에 의해 제어되는 피스톤 실린더를 이용해 약 100mm/s의 속도로 주입하여 조인트 노드를 성형하였다. 충진이 완료된 후 약 2분간 가압을 유지하며 응고되게 하였다.

Fig. 7은 반응고 성형에 의해 제조된 A357 조인트 노드를 나타내었다. Fig. 2의 설계 형상이 정형으로 1회에 제조되었다. 성형된 표면을 관찰한 결과 육안으로 관찰할 수 있는 외관 결함은 발견되지 않았다. 표면 거칠기의 수준도 주조에 비해 매우 양호한

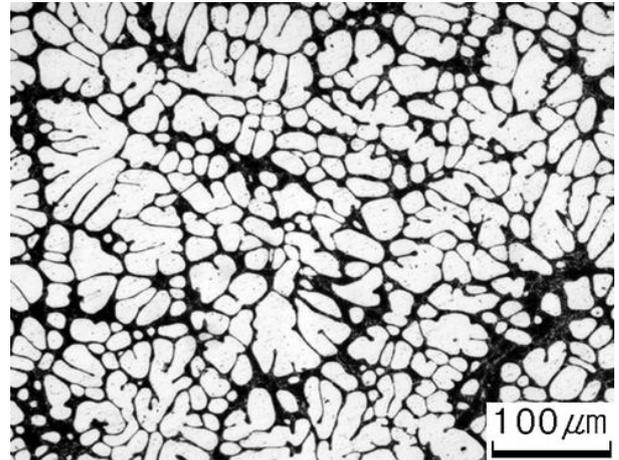


Fig. 6 Microstructure of the A357 billet (as received)



Fig. 7 Appearance of thixoformed A357 roof joint node

상태를 보인다. 이는 Fig. 6의 성형 전 미세조직과 Fig. 8에 나타낸 성형품의 바닥 중앙 부위에서 채취한 시편의 미세조직 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 구형의 균일한 입자가 성형품의 표면에도 존재하기 때문이다.

비록 성형 후의 입자 크기는 성형 전에 비해 약 2배 이상 성장한 것으로 나타났지만 성형품의 표면상태는 크게 차이가 없는 것으로 보인다. 입자의 성장은 빌렛의 반응고 성형 온도에서의 가열 및 온도 유지 과정에서 발생하는 것으로 판단된다. 입자는 α상이며 입자크기는 약 100 μm였다. 입자와 입자 사이에는 반응고 가열 및 성형 중에 액상으로 존재하다가 응고한 공정조직으로 구성되었다. OM, SEM과 X-ray를 통한 성형품의 내부 검사에서도 성형품의 특성에 영향을 미칠 결함은 발견되지 않았다.

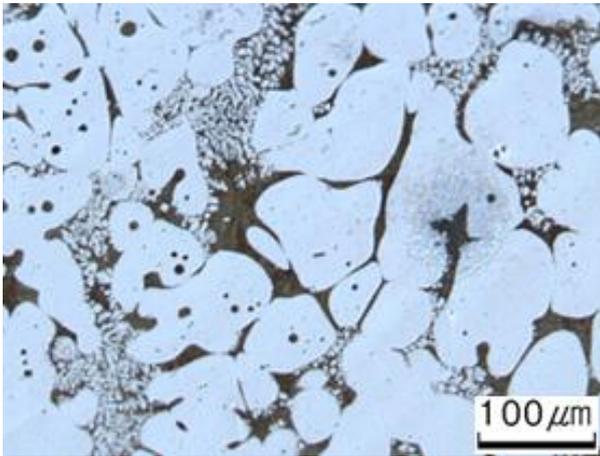


Fig. 8 Microstructure of A357 joint node after thixo-forming

3. 고찰

Fig. 9 에는 반응고 성형에 의해 제조한 알루미늄 A357 조인트 노드를 에이 필러(A-pillar), 루프 레일(roof rail) 및 크로스 멤버(cross member)를 구성하는 압출재와 조립한 상태를 나타내었다. 그림에서 각 압출재의 단면 형상도 함께 나타내었다. 압출재는 밝은 색을 띠는 반면 반응고 성형된 조립품은 표면 가공을 하지 않아 짙은 회색으로 구별된다. 조립 과정에서 성형품의 치수는 허용범위 내에 존재함을 알 수 있었다.

Fig. 10은 A357 조인트 노드의 반응고 성형된 상태와 T6 열처리 후의 인장 시험 특성을 보여준다. 인장시편의 위치는 Fig. 7에 나타낸 조인트 노드 바닥 중앙 부위에서 채취하였다. ASTM E8M 판상규격을 고려하되 성형품의 크기 때문에 축소된 치수인 두께 2mm, 폭 5mm, 표점거리 15mm인 판재형 인장시편을 가공하여 시험하였다. 성형 상태에서의 인장강도와 연신율은 각각 256Mpa, 10%이다. 열처리 후의 연신율은 약 6% 였다. 강도 특성은 비슷하였지만 연신율은 같은 A357을 이용하여 수행한 다른 반응고 성형품의 경우 보다 5~10% 낮았다[8]. 그 원인은 조인트 노드의 구조가 얇은 판재 형태여서 성형품 조직이 파단 특성에 영향을 미쳤다고 추정된다. 일반적인 구조물처럼 충분한 단면적을 가지는 경우 반응고 성형에서 입자 사이에 존재하는 액상의 양이 성형압력에 의해 스퀴즈되어 적게 존재할 수 있다. 6061 또는 7075와 같은 전신재 알루미늄에

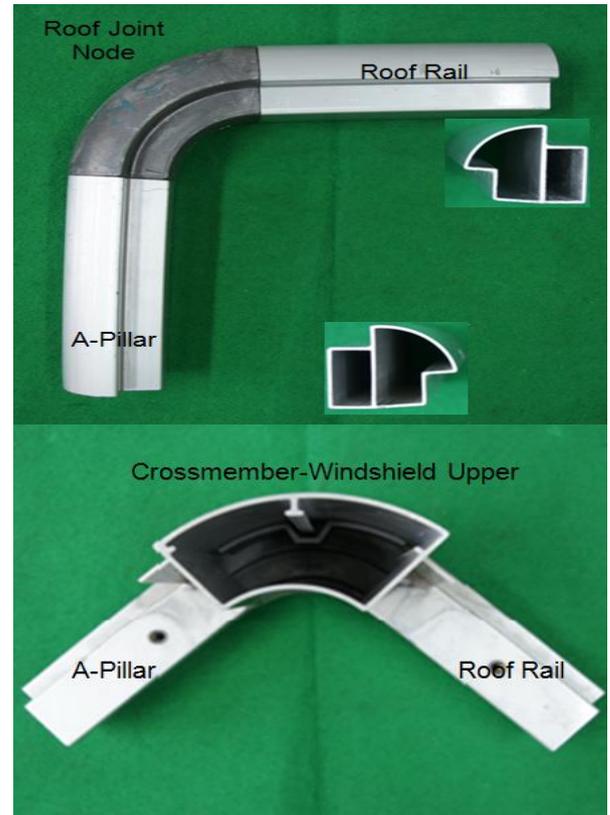


Fig. 9 Assembly of a thixoformed roof joint node with A-pillar, roof rail and cross member

비해 A357 및 A357와 같은 공정반응을 하는 주조재를 반응고 성형하는 경우는 액상의 공정조직이 응력을 감소시키는 역할을 하여 파단에 덜 민감해진다[5~7].

봉상의 형태를 가지는 너클의 반응고 성형에 비해 조인트 노드와 같은 판재 형상에서는 미소한 결합이 존재할 가능성이 커진다[7]. 이와 같은 연신율 특성은 판재 형태의 구조물의 형상을 고려한 반응고 성형 공정의 적절한 선정을 통해 입자 사이의 액상의 양을 조절하고 또한 결합의 발생도 감소시키는 방법으로 크게 개선 될 수 있는 부분이다. 또한 반응고 성형 전의 초기 조직의 입자를 미세화시키는 방법도 연신율의 개선에 효과적일 것이다. 즉, 반응고 성형용 소재의 입자 미세화 기술과 금형 및 성형 공정 기술의 정밀 제어가 필요할 것으로 판단된다.

반응고 성형된 알루미늄 A357 조인트 노드의 기계적 특성은 압출 및 단조에 의해 제조될 경우 보다 약 5% 정도의 특성 저하가 예상된다. 그러나 압출 및

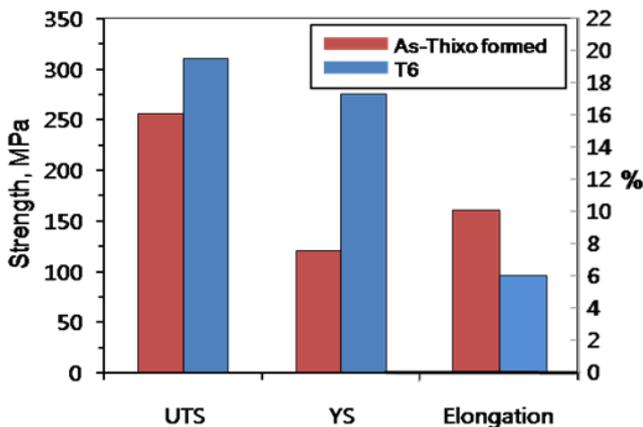


Fig.10 Tensile properties of A357 joint node (as thixoformed and after T6-heat treated)

단조로는 이와 같은 복잡한 형상, 특히 판재형태의 구조물을 제조하기 어렵다. 즉, 형상제어 측면에서의 장점이 특성에서의 단점을 보완해준다. 또한 반응고 성형품은 주조품에 비해서는 약 10% 정도 향상된 값이 예상되기 때문에 당연히 주조품은 경쟁이 되지 못한다. 본 연구 결과에서 나타나듯이 알루미늄 스페이스 프레임의 구현에 조인트 노드의 효과적인 제조는 매우 중요하다. 따라서 알루미늄 반응고 성형 기술은 자동차의 경량화를 위해 필요하며 지속적인 개발이 필요하다.

4. 결론

알루미늄 반응고 성형 기술을 저속 전기자동차의 알루미늄 스페이스 프레임 구조물 제작에 적용하였다. 단면 형상이 다른 3개의 압출재 구조물이 만나는 조인트 부위의 구조물을 조인트 노드 형태의 일체형으로 설계하고 A357 반응고 성형을 고려하여 시뮬레이션을 수행하여 적절한 최종 제품 형상과 반응고 성형을 위한 공정 조건을 결정할 수 있었

다. 반응고 성형으로 제조한 조인트 노드의 외관, 치수, 기계적 특성, 압출재와의 조립 특성 등 모든 측면에서 만족할 만한 결과가 얻어졌다. A357조인트 노드의 적정한 성형 조건으로는 빌렛 가열 온도 582°C 정도, 금형 온도 200°C, 충전 속도 100mm/s가 얻어졌다.

REFERENCES

- [1] Y. D. Chung, H. Kang, W. S. Cho, 2000, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress June 12-15, KSAE, Seoul, Korea, pp. 1~4.
- [2] F. G. Armao, 2002, Design and Fabrication of Aluminum Automobiles, Welding Innovation, Vol. 19, No. 2, pp. 1~5.
- [3] S. Engler, D. Hartmann, I. Niedick, 2000, Proc. of 6th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites. (eds, G. L. Chiarmetta and M. Rosso) Edimet, Turin, Italy, pp. 483~488.
- [4] C. I. Ma, H. D. Lee, D. U. Kim, 2006, Mechanical Microstructural Properties on Rheocast Automotive Parts using A356 Alloy, Solid State Phenom., Vols. 116-117, pp. 489~492.
- [5] S. Y. Lee, S. I. Oh, 2002, Thixoforming Characteristics of Thermo-mechanically Treated AA6061 Alloy for Suspension Parts of Electric Vehicles, J. of Mater. Process. Technol., Vols. 130-131, pp. 587~593.
- [6] K. K. Wang, R. Kopp, G. Hirt, 2006, Investigation on Fracture Mechanism of A356 during thixoforging, Solid State Phenom., Vols. 116-117, pp. 140~144.
- [7] S. Y. Lee, C. H. Kim, 2009, Measurements of Micro-Defects in the Aluminum Thixoformed Part using Computed Tomography (CT) Technology, Trans. Mater. Process., Vol.18, No.5, pp. 422~427.