

열간가스성형용 알루미늄 개발 합금 공정 조건에 관한 연구

이경민¹ · 고건영¹ · 이현철¹ · 김동욱¹ · 이윤교² · 김정섭² · 송종호[#]

Study on an Aluminum Modified Alloy and Manufacturing Conditions for Hot Metal Gas Forming

G. M. Lee, G. Y. Go, H. C. Lee, D. O. Kim, Y. K. Lee, J. S. Kim, J. H. Song

(Received May 26, 2017 / Revised July 3, 2017 / Accepted July 17, 2017)

Abstract

In order to respond to environmental regulations and increased demand for fuel economy, the demand for lightweight car bodies has grown. Hydroforming of aluminum is one possible solution as it eliminates the need for additional welding to develop closed cross-sectional parts. However, the low formability of aluminum is a limitation of its application. On the other hand, the ductility of materials can be improved at higher temperatures, and hot metal gas forming has been widely applied in the production of lightweight vehicle parts. In this study, aluminum alloy for pipe extrusion was developed by controlling the Mg:Cr:Mn ratio based on AA5083. Mechanical properties of the developed material were examined by tensile test and were applied to a forming simulation. Cold forming simulation for preforming and non-isothermal hot forming simulation for hot metal gas forming were carried out to validate process conditions. A prototype of the sidemember was manufactured under the given process condition. Finally, thickness distribution was compared with finite element analysis results.

Key Words : Hot Metal Gas Forming, Hydroforming, Blow Forming, Side Member, Aluminum Forming

1. 서론

최근 자동차 산업은 환경 및 연비 규제에 대응하기 위하여 차체 및 샤시 등 부품 경량화를 통한 연비 향상을 목적으로 연구 개발을 진행하고 있다. 특히 샤시 부품의 경량화는 타 부품에 비해 약 2~3배의 연비 향상을 기대할 수 있어 효율적인 경량화 방안을 위해 이에 대한 지속적인 연구가 필요한 실정이다[1].

기존의 경량화 방안으로 고강도화를 통한 부품의 박육화, 설계 능력의 향상에 의한 경량 부품 최적 설계 및 선진 공법을 적용한 부품의 통합화 등의 다양한 기술들이 연구 및 채용되고 있다. 알루미늄

은 철계 부품에 비하여 중량 대비 우수한 강도를 지녀 경량화에 효과적인 재료이다. 서브프레임과 같은 샤시 부품에 적용 시 기존 알루미늄 튜브와 스탬핑으로 제작한 알루미늄 판재를 용접하여 생산되었기 때문에 공정비용 절감 및 생산성을 향상시킬 방안이 필요하다. 일체화를 통해 상기 문제를 해결할 수 있는 하이드로포밍 기술이 부품 제작에 적용되었으나, 상온에서 알루미늄의 낮은 성형성으로 복잡한 형상의 부품 제작에 한계가 있다. 열간가스성형은 고온 알루미늄의 높은 연신율을 이용하여 알루미늄 튜브를 가스 압력으로 성형시키므로, 기존 공법에 비해 공정수 감소 및 추가적인 기계 가공비용 절감이 가능하다[2~6].

1. 자동차부품연구원

2. 서진산업

Corresponding Author : Korea Automotive Technology Institute, E-mail: jhsong@katech.re.kr

본 연구에서는 열간가스성형으로 알루미늄 적용 리어서브프레임을 개발하기 위해 알루미늄 개발소재 물성 평가 및 유한요소해석 모델을 구성하고 주요 공정 인자의 영향을 파악하여 실제 부품에 적용하였다. 기존 알루미늄 5083과 같은 상용소재의 경우, 고온 가공 시 미세조직의 결정립 조대화에 의해 확장성의 한계가 나타나므로 이를 해결하기 위해 Mn, Ti 첨가량을 최적화하여 결정립을 미세화함으로써 고온 성형성을 향상시킨 소재를 개발하였다. 또한 변형률 속도 별 소재의 기계적 물성을 확보하여 열간가스성형 유한요소해석 모델의 정확성을 향상시켰다.

2. 실험 방법

2.1 소재 물성 평가

열간가스성형 공정에 적용할 소재는 알루미늄 5000계열 합금으로, 두께 4t의 튜브형태로 압출 성형하여 리어서브프레임의 사이드 멤버 제작에 적용하였다. 열간가스성형 공정에 적합한 특성의 소재를 개발하고 상온, 고온 인장시험과 확장성형성 시험을 실시하여 최적 성형 온도와 압력 조건을 도출하였다. 기존 상용화된 알루미늄 5000계열 합금은 첨가 원소인 Mg의 고용강화에 의해 스탬핑 공정에 적합한 소재이지만, 압출 성형 시 고온에서의 유동 응력이 높아 낮은 압출 생산성을 가지는 단점이 있다. 그러므로 Mg의 함량을 감소시키고, Cr과 Mn 함량을 제어하여 고온 안정성을 확보하였다. 또한 결정립 미세화를 통한 기계적 물성 개선을 위해 Ti의 첨가량을 증가시켰다. 개발합금의 조성은 아래 Table 1과 같다.

2.1.1 상온 인장 시험

소재의 물성 평가 및 해석 기초 데이터 활용을 위해 KS B 0801 규격에 따라 상온 인장시험을 실시하였다. Fig. 1과 같이 13 B호 시편으로 제작하여 10ton 만능재료시험기(MTDI 100T)로 실험을 진행 하였으며 인장 속도는 1.5mm/min 으로 적용하였다.

Table 1 Chemical compositions of modified aluminum 5XXX alloy

Alloy	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Ti	Al
Al Mod.	0.15	0.15	0.10	3.7	0.10	0.3	0.1	Bal.

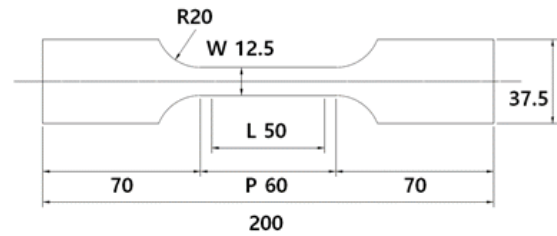


Fig. 1 Dimension of tensile test specimens (KS B 0801 13type)

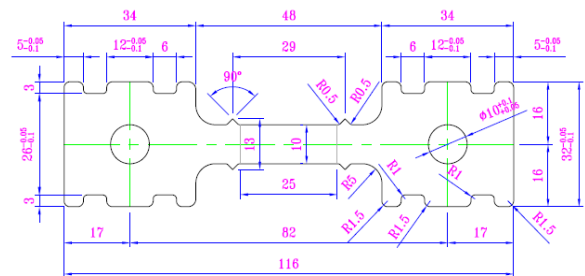


Fig. 2 Dimension of high temperature tensile test specimens (ASTM E8/E8M-15a)

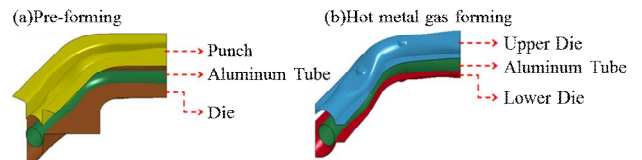


Fig. 3 Modeling of tube and mould for hot metal gas forming, (a) Pre-forming, (b) Hot metal gas forming

2.1.2 고온 인장 시험

열간가스성형 해석에 적용하기 위한 물성 모델 확보를 위해 온도 및 변형률 속도 조건 별 고온 인장 시험을 실시하였다. 시험 규격은 ASTM E8/E8M-15a를 따랐으며 Fig. 2와 같은 형태로 시편을 제작하여 고온 인장시험을 실시하였다. 온도 조건은 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500℃, 변형률 속도는 0.1, 0.01, 0.001/s로 시험을 진행하였다. 또한 열응력 및 잔류 응력 계산을 위해 Al 5000계열 합금의 열팽창계수 27.6μm/mK, 열전도도 220W/mK를 적용하였다[7].

2.2 열간가스성형 해석 기법

알루미늄 튜브재를 열간가스성형 공정을 적용하여 사이드 멤버를 제작하기 위해 열간가스성형 해석을 진행하였다. 사용한 유한요소해석 프로그램은

LS-Dyna 이고 비등온 해석 시 상당한 해석 시간이 소요되므로 해석 시간 단축을 위해 튜브재 및 금형은 Shell 요소로 모델링을 진행하였다.

2.2.1 열간가스성형 주요인자

사이드 멤버 제작 시 제품 품질에 영향을 미치는 주요 인자는 튜브재와 금형의 온도, 가압력, 가압 시간 등이 있다. 물성평가를 통해 온도 조건을 정립하고, 해당 온도에 따른 최적 가압조건을 확산시험을 통해 도출하였다. 초기 가압조건을 선정하여 확산시험 해석을 통해 온도에 따른 가압력과 가압 시간을 선정하였다.

2.2.2 열간가스성형 전산모사 조건

성형해석에 적용한 물성카드는 프리포밍 해석의 경우 Mat 24(piecewise linear plasticity), 열간가스성형 해석은 소재의 온도변화와 변형을 속도를 동시에 고려할 수 있어 주로 고온 성형해석에 사용되는 Mat 106(elastic viscoplastic thermal)을 사용하였다. LS-dyna 해석에는 진응력-진변형률 선도는 Fig. 5, 6과 같이 인장시험을 통해 도출한 진응력-진변형률 선도를 적용하였다.

2.3 시제품 제작 및 분석

알루미늄 튜브재를 열간가스성형을 통해 사이드 멤버를 제작하고 각 시제품 두께분석을 진행하였다. 열간가스성형 해석을 통해 도출한 조건을 기반으로 시제품을 제작하였으며, 해석 결과와 시제품의 비교 분석을 통해 해석 정확도 검증은 실시하였다.

2.3.1 시제품 제작

알루미늄 튜브재는 벤딩 파이프 형태로 프리포밍하여 곡선부 최적 성형에 유리하도록 하였고, 가열로 내에 500℃에서 15분 간 가열하였다. 금형 온도는 400℃로 유지하였고, 가압력 및 가압 유지 시간은 70bar 까지 90초 동안 승압시키고, 90초 동안 유지하였다.

2.3.2 성형 및 두께 측정

열간가스성형으로 제작한 사이드 멤버와 해석 결과의 비교 분석을 위해 시제품의 두께 측정을 진행하였다. 사이드 멤버의 두께 감소 허용율은 25% 이내로 해당 조건에 대한 만족 여부도 확인하였다. 두

께 측정부는 Fig. 4와 같이 절단하여 절단면의 각 두께를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 소재 물성 평가

상온 및 고온 인장시험을 통해 측정된 기계적 물성 값을 토대로 변형률 및 온도에 따른 진응력-진변형률을 도출하였다.

3.1.1 상온 물성 평가

알루미늄 개발 합금의 상온 인장 시험 결과, 탄성계수 90.5GPa, 최대인장강도 237.1MPa, 파단변형률 0.29로 측정되었고, Fig. 5와 같이 진응력-진변형률 선도를 도출하여 비선형 구간의 응력 선도를 사이드 멤버의 프리포밍(pre-forming) 해석에 적용하였다.

3.1.2 고온 물성 평가

알루미늄 개발 합금의 고온 인장 시험 결과, Fig. 6과 같이 온도 및 변형률 속도 별 진응력-진변형률 선도를 도출하였다. 일정한 온도에서 변형률 속도가 낮을수록 유동응력은 감소하는 것으로 나타났고, 일정한 변형률 속도에서는 온도가 높을수록 유동응력이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 조건에 따른 변형률 속도 민감도 지수와 강도계수, 가공경화지수를 계산하여 공정에 적합한 온도 조건을 도출하였다.

식 (1)과 (2)에서 변형률 속도 민감도지수 m 을 도출하기 위해 변형률 속도를 모두 고려하여 각각의 변형률에 대응하는 변형률 속도 별 응력값에 자연로그를 취해 그 기울기 값으로 계산하였다. 소재에 네킹이 발생한 이후의 거동을 나타내는 변형률 속도 민감도 지수 m 값이 증가함에 따라 네킹 이후의 연신율이 높아지는 경향을 보이며 이는 변형집중을 억제시켜 균일한 성형이 가능하게 한다. 강도계수 K 는 진변형률이 1일 때의 응력 값으로 온도가 상승할수록, 변형률 속도가 늦을수록 낮은 값을 나타내며 이를 이용하여 값의 크기로 소재의 가공성을 판단할 수 있다. 가공경화 지수 n 은 항복점 이후 네킹 이전의 거동을 나타내는 지수로 가공경화 지수가 클수록 네킹의 발생을 억제시킨다. 온도가 증가함에 따라 가공경화 지수는 0에 수렴하는 경향을 보이며 300℃ 이상이 가장 적합하나, 변형률 속도 민감도



Fig. 4 The thickness measurement of sidemember for hot metal gas forming

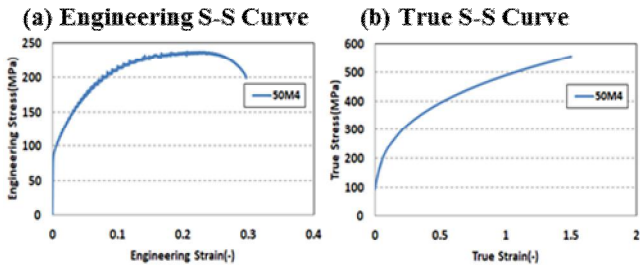


Fig. 5 Stress – strain curves of Aluminum modified alloy with room temperature

지수 m 을 적용하여 소재의 균일한 변형을 고려하면 400~500℃가 가장 적합한 성형 온도로 판단하였다.

$$\sigma = K \times \varepsilon^n \times \dot{\varepsilon}^m \quad (1)$$

$$m = \frac{\ln(\sigma_2/\sigma_1)}{\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)} \quad (2)$$

3.2 사이드멤버 성형 해석

물성평가를 통해 도출한 소재의 진응력-진변형률 선도를 적용하여 사이드멤버의 프리포밍과 열간가스성형 해석을 진행하였다.

3.2.1 프리포밍(Pre-forming) 해석

사이드멤버의 성형 공정을 모사하기 위해 상온에서 프리포밍을 진행한 뒤 열간가스성형을 실시하였다. 프리포밍 해석 결과, Fig. 8과 같이 두께 감소 손실이 크지 않고 형상에 문제 없이 성형이 완료되었다. 튜브재의 온도는 500℃, 금형 온도는 400℃로 설정하여 열간가스성형 해석을 진행하였다.

3.2.2 열간가스성형 해석

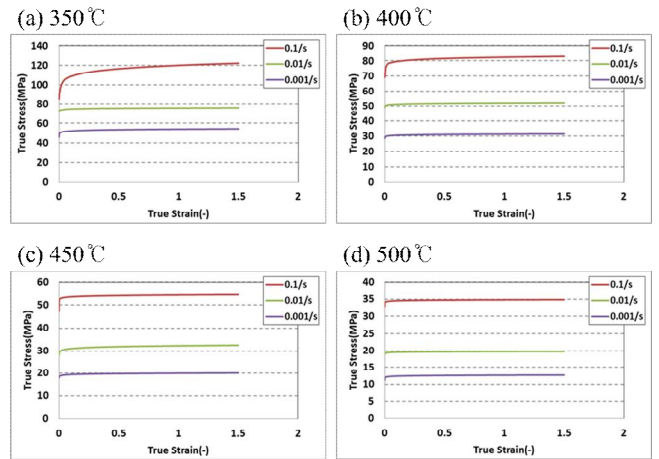


Fig. 6 True Stress-true strain curves with various temperature

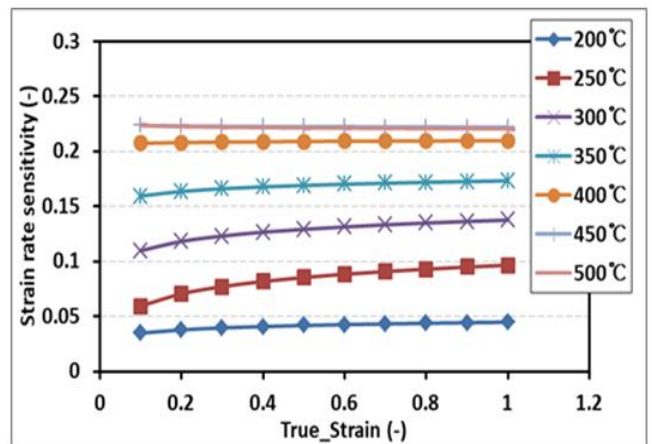


Fig. 7 Strain rate sensitivity with various temperature

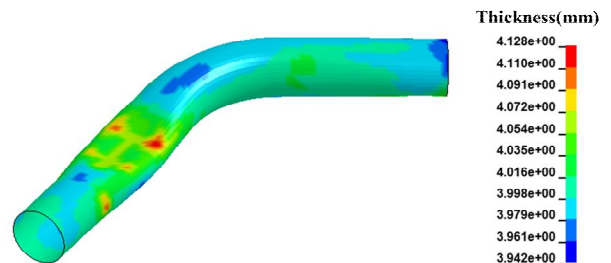


Fig. 8 Thickness of pre-formed aluminum tube

열간가스성형 해석 조건은 고온 인장시험 결과를 토대로 소재 온도와 성형 압력을 결정하여 진행하였다. 소재 및 금형 온도 조건은 Fig. 9와 같이 소재 온도 500℃, 금형 온도 400℃로 설정하였고, 성형

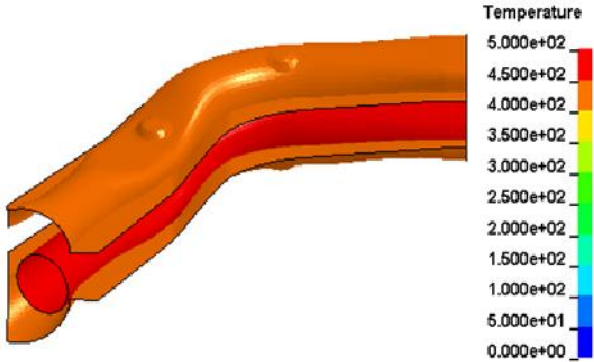


Fig. 9 Temperature of pre-formed aluminum tube for hot metal gas forming

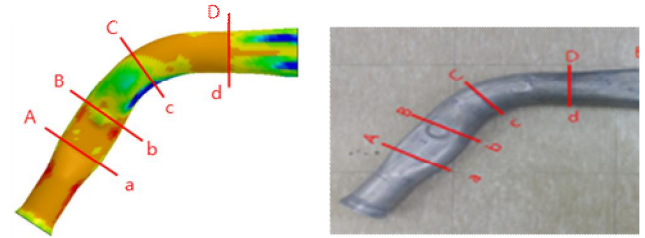


Fig.11 Thickness measurement position of sidemember for analysis



Fig.10 Prototype of sidemember with hot metal gas forming

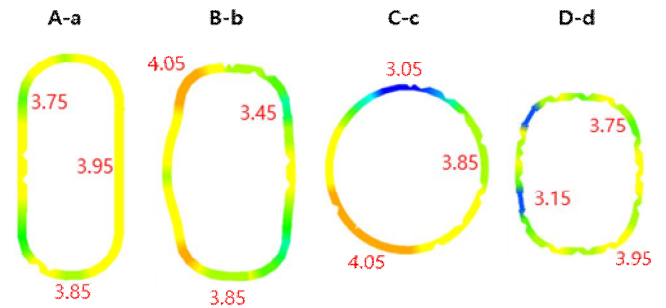


Fig.12 Thickness of sidemember with FE-Analysis

압력은 70bar로 90초간 상승, 90초간 유지하였다. 성형 해석을 통해 제품의 두께 감소율을 측정하고 시제품과의 비교 분석을 실시하였다.

3.3 시제품 제작

프리포밍 된 튜브재를 500℃에서 15분간 가열 후, 400℃ 금형으로 튜브재를 이송하여 성형을 진행하였다. 성형 압력 조건은 해석과 동일하게 적용하였고 터짐이나 주름과 같은 결함이 발생하지 않음을 확인하였다. Fig. 10은 성형이 완료된 시제품의 부위별 형상을 나타내고 있다. 육안으로 확인 시 형상과 결함 문제는 발생하지 않은 것으로 나타났다. 제품의 두께 감소율은 향후 내구성에 영향을 미칠 수 있으므로, 부위 별 단면 관찰을 위해 와이어 커팅 가공을 실시하였다. 또한 성형 해석과의 결과를 비교하여 해석/시제품 정확도를 검증하였다.

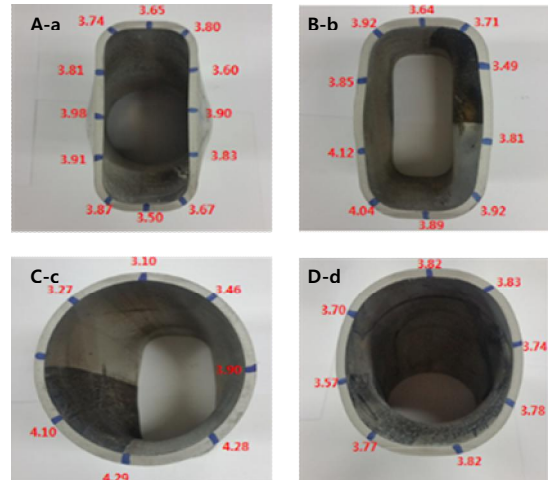


Fig.13 Thickness of prototype with hot metal gas forming

3.4 해석/시험 비교 분석

열간가스성형 해석의 정확도 검증 및 제품 품질 확인을 위해 해석과 시제품의 두께 감소율을 측정하여 비교 분석하였다. Fig. 11과 같이 해석 완료된 모델링과 시제품의 동일한 위치에서 두께를 측정하여 성형 전 튜브재의 두께인 4t 대비 감소율을 비교하였다. 제품의 내구성을 고려하여 두께 감소율의 허용치는 25% 이내로 설정하였다.

Fig. 12는 성형 해석의 두께 측정 결과, Fig. 13은 시제품을 절단하여 측정된 두께를 나타낸 것이다. 동일 구간에서 성형 형상과 두께는 대체로 유사하게 나타나는 것을 확인하였고, 해석/시험 모두 기존 두께 대비 25% 감소된 크기인 3t 이상임을 확인하였다. C-c 구간은 제품 중 곡률이 가장 큰 위치로, 3.05mm로 가장 큰 두께 감소가 나타났다. 시제품도 마찬가지로 동일 위치에서 3.10mm로 가장 큰 두께 감소를 보이나 두께 감소율 허용치를 만족함을 확인하였다.

4. 결론

본 과제에서는 열간가스성형용 알루미늄 압출재를 개발하여 상온 및 고온 물성 평가를 통해 최적 성형 온도 조건과 압력을 도출하고 이를 해석에 적용하여 동일 조건으로 제작한 시제품과 비교하였다.

(1) 고온 인장시험을 통해 도출한 가공경화지수와 변형률속도 민감도지수를 고려할 때 400~500℃가 성형에 최적화된 온도로 도출 되었다.

(2) 성형 해석은 비등온 해석을 위해 변형률 속도 및 온도에 따른 진응력-진변형률 선도를 적용하였다.

(3) 공정의 효율성을 높이기 위해 상온에서 프리포밍을 통해 1차적인 성형을 실시하였고, 고온에서 열간가스성형을 진행하여 형상을 최적화 하였다.

(4) 시제품 제작은 해석과 동일한 조건으로 진행하였고 주름 및 파단과 같은 결함은 발생하지 않았다.

(5) 해석 결과와 시제품의 두께를 각각 측정하여 두께 감소율 허용치 25% 이내를 만족하는지 확인하였고, 비교 분석을 통해 정확도를 검증하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 창의산업거점기관지원 사업으로 지원된 연구입니다(R0004102).

REFERENCES

- [1] T. Kwon, J. Kim, J. Jeon, K. Jang, W. Lee, 2006, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf. Gumi, Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 292~294.
- [2] Y. Joo, J. Lee, B. Kim, C. Kim, D. Shin, 1999, Microstructural Evolution during Superplastic Deformation of a 5083Al Alloy, Journal of Engineering Technology Hanyang Univ., Vol. 8, No. 1.
- [3] H. Kim, H. Lim, S. Hwang, K. Lee, W. Lee, D. Kim, 2007, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp.116~119.
- [4] J. Carpenter, M. T. Smith, 2002, Superplastic Forming of Aluminum Sheet Metal for Automotive Applications, Department of Energy U.S.
- [5] P. A. Friedman, S. G. Luckey, W. B. Copple, R. Allor, C. E. Miller, C. Young, 2004, Overview of Superplastic Forming Research at Ford Motor Company, J. Mater. Eng., Vol. 13, No.6, pp. 670~677.
- [6] K. Saito, 2009, Superplastic Forming and Fine Grain Material Technology Transition in Honda, International Conf. on Superplasticity in Advanced Materials, Seattle, Washington, June 29-July 2.
- [7] P. T. Summers, Y. Chen, C. M. Rippe, B. Allen, A. P. Mouritz, S. W. Case, B. Y. Lattimer, 2015, Overview of Aluminum Alloy Mechanical Properties during and after Fires, Fire Sci. Rev., Vol. 4, No. 3, pp. 1~36.