

6.75L급 소형 AA6061 라이너의 후방압출 및 노우징 공정에 관한 해석적 연구

구태완¹ · 강범수[#]

Numerical Evaluation of Backward Extrusion and Head Nosing for Producing a 6.75L Small Seamless AA6061 Liner

T. W. Ku, B. S. Kang

(Received March 21, 2013 / Revised May 20, 2013 / Accepted May 21, 2013)

Abstract

As a pressure vessel, a small seamless aluminum liner with inner volume of about 6.75L is made from an initial billet material of AA6061-O. To produce the aluminum liner, warm forging including backward extrusion and head nosing was numerically simulated using a billet initially pre-heated to about 480°C. Compression tests on the billet material were performed at various temperatures and strain rates, and the measured mechanical properties were used in the numerical simulations. For the backward extrusion and the head nosing, the tool geometries were designed based on the desired configuration of the aluminum liner. Furthermore, the structural integrity of the tooling was evaluated to ensure adequate tool life. The seamless aluminum liner has an endurance limit of about 1.47MPa (15Kg_f/cm²), estimated based on the required inner pressure. The results confirm that the small seamless aluminum liner of AA6061-O can be successfully made by using the two stage warm forging procedures without any bursting failures.

Key Words : Aluminum Liner, AA6061, Backward Extrusion, Head Nosing, Forging Load Prediction, Tool Analysis

1. 서 론

고압의 가스를 저장하기 위한 압력용기(Pressure Vessel)의 제작 방법은 Table 1에서와 같이 라이너(Liner)의 재질 및 복합재(Composite) 적층 방식에 따라 크게 4가지 종류로 구분이 가능하다. 즉, 복합재를 이용한 구조적 강화 없이 금속재(Steel) 라이너 만으로 내부 압력하중을 지지하는 Type I, 금속재 라이너에 유리섬유 복합재를 원주방향으로 적층하여 구조적 강성을 향상시킨 Type II, 알루미늄 합금(Aluminum Alloy) 재료를 이용한 비철금속 라이너에 섬유강화 복합재를 원주방향 및 길이방향으로 적층하여 구조적 강성을 향상시킨 Type III,

그리고 경량화를 목적으로 폴리머(Polymer) 라이너에 섬유강화 복합재를 원주방향 및 길이방향으로 적층시킨 Type IV 등이 있다[1~4].

강재 혹은 알루미늄 합금 소재로 만들어진 라이너라 불리는 내부 용기는 원주방향으로의 용접 유무에 따라서 용접(Welded) 및 무용접(Seamless) 용기로 구분된다. 용접 용기의 경우에는 중앙 동체부와 저부 그리고 두부 부품을 각각 제작하여 용접함에 따라 가격이 저렴하고 용기의 형태 및 치수의 선택이 자유로우며 용기 두께 공차가 적다는 장점이 있지만, 원주방향 용접부에서의 균열에 의한 누설 등의 문제가 발생할 가능성이 존재한다[5,6]. 이와는 달리 무용접(Seamless) 용기는

1. 부산대학교 설계기반미래성형기술센터
Corresponding Author : Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, E-mail: bskang@pusan.ac.kr

Table 1 Comparison of measured roughness data

| Type | Liner | Reinforcement | Cost |
|------|----------------|---------------------------|-----------|
| I | Steel Liner | - | Cheap |
| II | Steel Liner | Hoop-Wrapped Glass Fiber | Expensive |
| III | Aluminum Liner | Full-Wrapped Carbon Fiber | Expensive |
| IV | Polymer Liner | Full-Wrapped Carbon Fiber | Expensive |

일체형 형상으로 인해 내압에 대한 응력 분포가 균일하여 내압성이 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 주로 고압의 액화가스를 저장하는데 적용되고 있다.

본 연구에서는 6.75L 급의 내부 용적을 가지는 소형 AA6061 라이너를 일체형으로 성형하기 위해 후방압출(Backward Extrusion)과 두부 노우징(Head Nosing) 공정을 연속적으로 수행하는 방안을 검토하였다. 다양한 온도 및 변형률속도(Strain Rate) 조건에서 적용된 소재인 AA6061-O의 재료 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 이를 후방압출 공정과 두부 노우징 공정에 적용하였다. 해석적 검토 결과로써 얻어진 하중 및 응력 분포를 이용하여 금형 해석을 수행하였고, 내부 압력 표준에 근거한 내압성능 평가를 수행하였다.

2. AA6061-O의 재료 특성

2.1 화학적 조성 및 미세조직

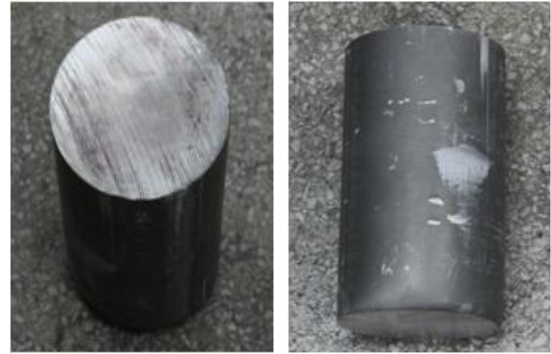
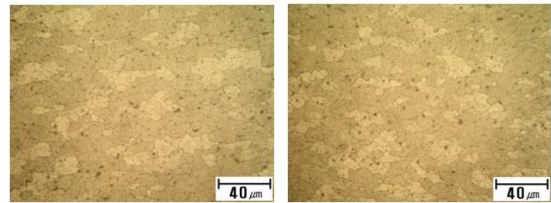
소형압력용기의 경량화를 목적으로 AA6061-O의 경량 합금소재를 적용하고자 하였다. AA6061-O 소재는 Table 2에서와 같은 화학적 조성을 가지는 특징이 있다. 본 연구에서는 Table 2에 제시된 화학적 조성에 의해 얻어진 AA6061-O 소재(Fig. 1(a))를 이용하여 초기 미세조직을 관찰하였다. Fig. 1(b)에서와 같이 상온(Room Temperature) 조건에서 AA6061-O는 약 20~30 μm 수준의 입자크기를 가지는 것으로 조사되었다.

2.2 기계적 특성

본 연구에서의 적용대상 소재인 AA6061-O는 온간 후방압출 공정에 의해 실린더 형태로 압출

Table 2 Chemical composition of AA6061(unit : wt%)

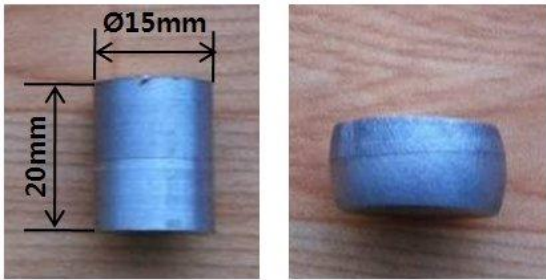
| Si | Cu | Mg | Cr | Fe | Mn | Zn | Ti |
|---------------|----------------|---------------|---------------|------|------|------|------|
| 0.40 ~0.80 | 0.15 ~0.400 | 0.80 ~0.12 | 0.04 ~0.36 | 0.70 | 0.15 | 0.25 | 0.15 |

**(a) Initial billet of AA6061-O****(b) Microstructure of AA6061-O (×500)****Fig. 1 Initial billet and microstructure of AA6061-O**

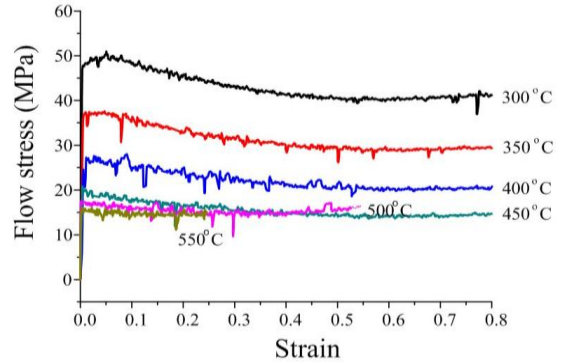
되고, 이때의 가공 온도는 약 480 $^{\circ}\text{C}$ 수준이다. 즉, 열처리되지 않은 AA6061-O의 초기 빌렛을 예비 가열한 후 후방압출 공정에 의해 그 형상을 얻는 방식으로 성형과정이 진행되게 된다. 이에 따라, 본 연구에서는 AA6061-O 초기 빌렛의 다양한 온도 및 변형률속도(Strain Rate) 조건에 따른 압축 시험(Compression Tests)을 실시하였다. AA6061-O 소재가 후방압출되는 성형 온도인 약 480 $^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 300 $^{\circ}\text{C}$, 350 $^{\circ}\text{C}$, 400 $^{\circ}\text{C}$, 450 $^{\circ}\text{C}$, 500 $^{\circ}\text{C}$ 및 550 $^{\circ}\text{C}$ 인 경우에 대해 변형률속도가 0.001/s, 0.01/s, 0.1/s, 1.0/s 및 3.0/s로 세분화하여 압축시험을 실시하였다. 본 재료시험에서 사용된 시험장비는 10Ton 용량의 MTS 재료시험기를 사용하였다. Fig. 2(a)는 ASTM E9-09 및 KS D 6759 규격에 따라 직경이 \varnothing 15mm이고 높이가 20mm인 압축시험 시편의 시험 전·후 변형 형상을 보여주고 있다[7, 8]. 또한,

Fig. 2(b)에서 Fig. 2(f)까지는 AA6061-O 소재에 대한 다양한 온도 및 변형률속도 조건의 단순압축 시험을 통해 얻어진 응력 및 변형률 선도를 도시한 것이다[9, 10]. Fig. 2에서와 같이 다양한 온도 조건에서의 압축시험 결과를 정리해보면 다음과

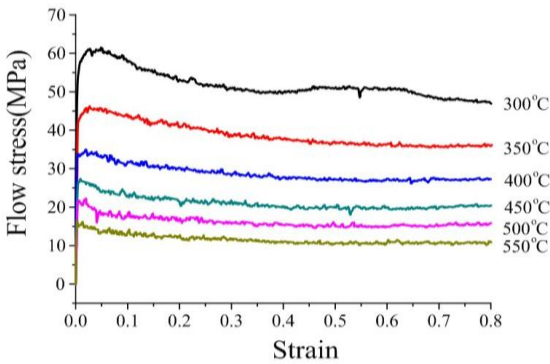
같이 요약할 수 있다. 각 압축시험 결과에 있어서, 높은 온도일수록 초기 빌렛의 Softening 현상이 두드러짐을 알 수 있다. 또한, 동일 온도 조건에서 변형률속도가 증가함에 따라 항복응력이 다소 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서의 AA6061-O 소



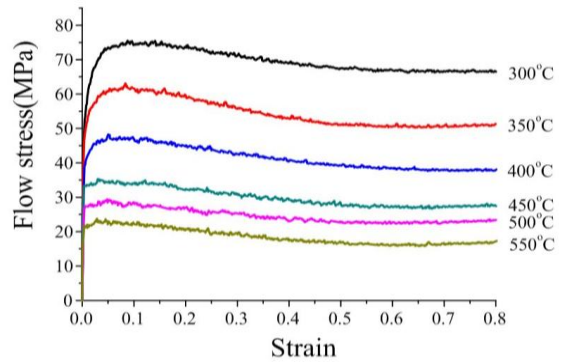
(a) Uni-axial compression test specimen



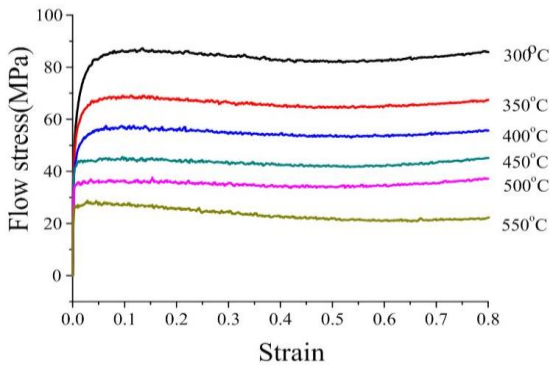
(b) Strain rate : 0.001/s



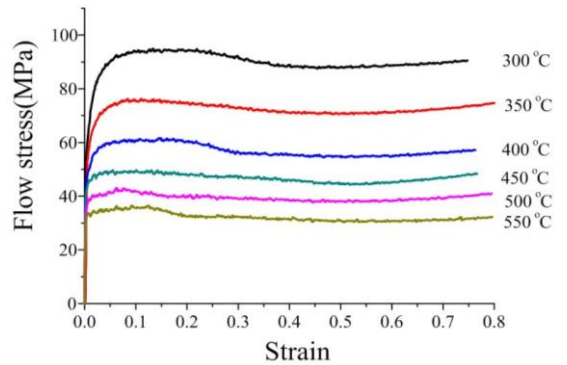
(c) Strain rate : 0.01/s



(d) Strain rate : 0.1/s



(e) Strain rate : 1.0/s



(f) Strain rate : 3.0/s

Fig. 2 Uni-axial compression test results according to various temperatures and strain rates

재에 대한 후방압출 공정에 있어서 초기 빌렛의 예비가열 온도가 약 480°C임을 고려 할 때, 초기 온도에 대해 후방압출 공정이 진행됨에 따른 재료 거동을 고려하기 위해 본 연구에서의 해석에 사용된 소프트웨어인 DEFORM 2D의 재료 물성 모듈에서 압축실험을 통해 얻어진 각 온도별 그리고 변형률속도별 실험 결과를 모두 입력하여 해석 과정에서 각 요소 및 절점에서의 변형 조건에 부합하는 재료 거동 특성을 구현할 수 있도록 하였다.

2.3 후방압출 및 노우징 공정 마찰거동

AA6061-O를 이용한 소형 Seamless Liner 후방압출 공정과 두부 노우징 공정은 약 480°C의 고온 환경에서 수행될 경우, 냉간성형 조건에서 주로 사용되는 액상의 윤활재(Lubricant)를 적용하게 되면 해당 윤활재가 제대로 마찰계면을 유지할 수 없게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 AA6061-O의 고온 후방압출 및 두부 노우징 공정을 원활히 수행하기 위해서 변형체인 초기 빌렛의 표면에 피막을 형성함으로써 윤활 기능을 담당하는 방안을 제시하였다. 일반적인 단조공정에서 주로 적용되는 피막 형태로는 몰리브덴(MoS₂) 피막과 인산염(Zn₂Fe(PO₄)₂) 피막 등이 있으며 주로 냉간단조공정에 적합한 것으로 알려져 있다. 그리고 흑연계(Graphite) 피막 등은 주로 온간 및 열간단조공정에 주로 적용되고 있다. 본 연구에서는 이들 피막 처리된 시편에 대한 마찰거동 특성을 조사하였다.

Fig. 3은 초기 빌렛의 외부 표면에 형성된 피막에 대한 마찰 특성을 시험하기 위한 링 압축시험(Ring Compression Test) 과정을 나타낸 것이다. 본 연구에서의 링 압축시험은 외경 Ø9.0mm, 내경 Ø4.5mm, 그리고 높이 3.0인 AA6061-O 시편, 몰리브덴 피막 처리된 시편, 인산염 피막 처리된 시편 및 흑연 피막 처리된 시편 각 9개씩을 준비하여 높이 감소율이 10%, 30% 및 50%인 경우에 대해 조사하였으며, 총 27개의 링 압축시험 시편을 사용하였다. 시험에 이용하였다. 몰리브덴 피막 혹은 인산염 피막처리된 빌렛 시편을 온간 및 열간단조 공정에 적용할 경우, 고온 조건에서 피막층이 탄화(Burn-out)될 가능성이 존재하며, 이에 따른 금형의 손상 및 빌렛의 표면에 흠집(Scratch) 등이 발생할 수 있기 때문에 본 연구에서는 흑연계 피막처리를 추가적으로 고려하였다.

Fig. 4는 Fig. 3에 제시된 링 압축시험으로부터

획득한 마찰 특성을 도식화한 것이다. 링 압축시험에 있어서 변형률속도는 약 0.1/s로 정하여 실험에 적용되었으며, 몰리브덴 및 인산염 피막처리된 시편의 경우에는 상온 조건에서 링 압축시험을 수행하였다. 그리고 흑연 피막된 시편의 경우에는 약 480°C로 가열된 상태에서 링 압축시험을 실시하였다. Fig. 4에서와 같이 링 압축시험을 통해 도출된 두 종류의 피막 종류에 따른 마찰계수를 살펴보면, 기준이 되는 피막처리 되지 않은 경우에 있어서는 금형과 소재 사이의 마찰계수는 약 0.28 수준으로 조사되었으나, 몰리브덴 피막의 경우 마찰계수는 약 0.18의 개선된 특성을 보이고 있음을 알 수 있었으며, 인산염 피막의 경우에는 마찰계수가 약 0.098 수준으로 나타남을 알 수 있다. 또한, 흑연계 피막처리된 경우에는 마찰계수가 약 0.15 수준으로 조사되었다. 이에 따라 본 연구에서 수행하고자 하는 AA6061-O 소재를 이용한 소형 Seamless Liner 후방압출 및 두부 노우징 공정을 위해 흑연계 피막처리가 고온 환경에서 보다 타당한 윤활처리 방법으로 고려되었다 [11, 12].



Fig. 3 Ring compression test

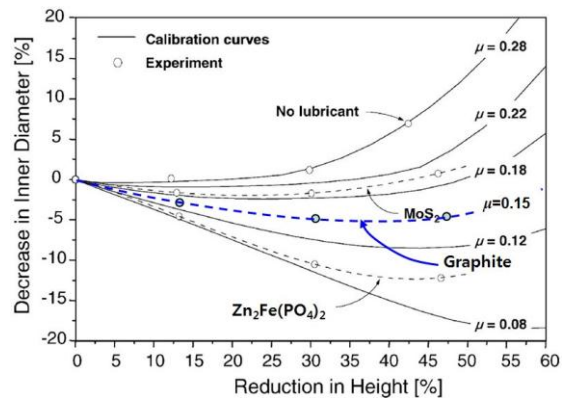


Fig. 4 Friction behavior evaluation on MoS₂, Zn₂Fe(PO₄)₂, and graphite coated AA6061-O specimens

3. 후방압출 및 두부 노우징 공정

3.1 유한요소 모델 및 해석 조건

6.75L급 내부 용적을 가지는 소형 AA6061-O 라이너의 단면 치수와 3차원 최종 형상을 Fig. 5에 도시하였다. 실제 후방압출 공정 해석 모델은 Fig. 5에서와 같이 축대칭(Axi-symmetry) 형상을 가짐에 따라 2차원 후방압출 공정을 적용하였다. 본 연구에서의 후방압출 공정은 Fig. 6(a)에서와 같이 초기 빌렛과 후방압출 펀치 그리고 하부 금형이 기본적인 요소가 되며, 후방압출 공정 유한요소 해석에서는 Fig. 6(b)와 같은 과정을 거치게 된다. 또한, 두부 노우징 공정에 있어서는 Fig. 6(c)에 제시된 바와 같이 상부 노우징 다이, 하부 노우징 다이 및 후방압출 공정으로부터 얻어진 중간 성형품으로 해석 모델을 정의하였다. 금형 요소인 상부 후방압출 펀치와 하부 금형, 그리고 두부 노우징용 상부 다이 및 하부 다이 등은 내식성 및 내열성이 우수한 SKD61종을 금형 소재로 선택하였으며, 유한요소 모델링에 있어서 이들 금형 모델은 강체(Rigid Body)로 가정하였다. 후방압출 대상 소재인 AA6061-O 재료는 강소성(Rigid-Plastic) 변형거동을 보이는 것으로 가정하였다. 후방압출 공정과 두부 노우징 공정에 대한 유한요소 격자는 4-절점 요소들로 구성하였다.

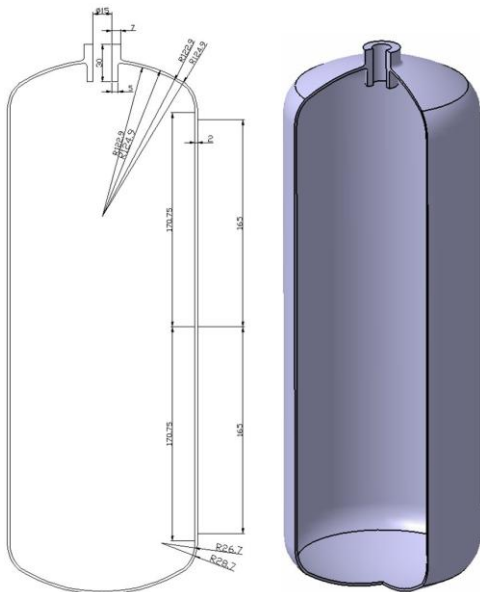
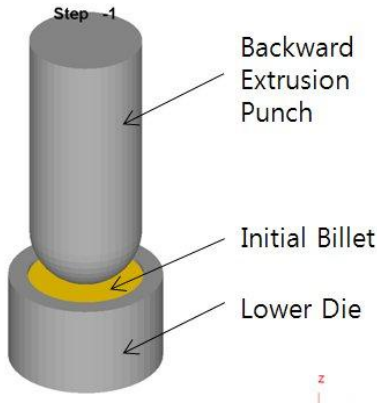


Fig. 5 2D layout and 3D configuration of small seamless AA6061-O liner

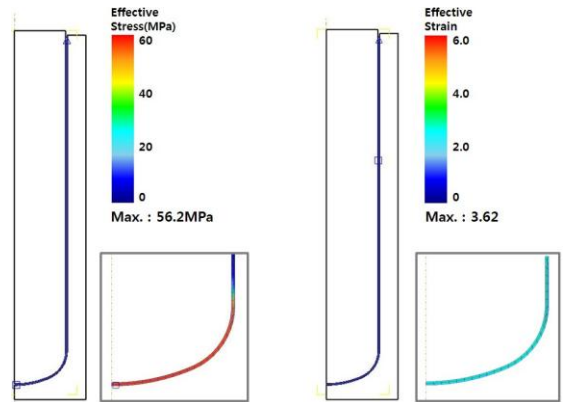
유한요소 해석을 위한 재료 물성은 Fig. 2에서의 각 온도 및 변형률속도에 따른 재료 시험결과를 적용하였다. 또한, 각 금형들과 변형소재 사이의 마찰조건은 약 480℃의 고온 조건에서 흑연계 피막 처리된 AA6061-O 소재의 적용에 따라 0.15의 마찰계수를 적용하였다. 후방압출 공정에 대한 유한요소 해석을 위해 초기 빌렛의 크기는 직경 $\varnothing 73.0\text{mm}$ 그리고 높이가 27.4mm인 것으로 정의하였으며, 초기 격자수는 약 1,000개의 요소로 구성하였다. 해석과정에서의 각 요소의 과도 변형을 억제하기 위해 DEFORM 2D에서 지원하는 자동격자재구성(Auto Remesh) 기능을 적용하였다. 후방압출 공정 및 두부 노우징 공정에 대한 유한요소 해석에 있어서, 각 금형의 온도 및 열전달 특성에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서의 금형 온도는 초기 빌렛의 온도와 동일한 약 480℃로 설정하였고, 금형과 변형 소재와의 열전달 특성은 Isothermal 조건으로 가정하였다.

3.2 후방압출 공정 유한요소 해석

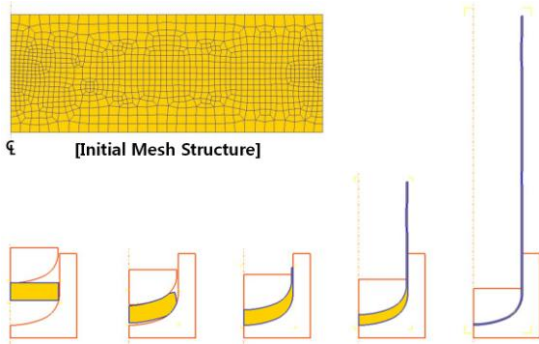
소형 압력용기용 AA6061-O 소재를 이용한 후방압출 공정에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 해석적 연구에 있어서, Fig. 2에 제시된 다양한 온도 및 변형률속도 조건에의 기계적 특성과 Fig. 4에 언급된 인산염피막 처리된 초기 빌렛을 적용하였다. 본 연구에서는 해석적 접근 대상인 Fig. 5에 제시된 AA6061-O Liner의 단면형상을 토대로 저부 및 실린더부 그리고 두부의 벽 두께가 2.0mm인 점을 고려하여 각 금형 형상을 결정하였다. 더군다나, Fig. 5에서와 같이 AA6061-O 라이너에 요구되는 2.0mm의 벽 두께 이외에도 벽 두께가 2.5mm, 3.0mm, 3.5mm, 4.0mm, 4.5mm, 5.0mm 및 6.0mm로 증가할 경우에 대한 후방압출 공정 유한요소 해석을 병행하였다. 이러한 다양한 벽 두께를 고려한 해석적 접근은 향후 다양한 요구형상의 변화에 대응하기 위한 것이다. Fig. 7(a)는 후방압출 공정에 의한 벽 두께가 2.0mm로 요구될 경우에 대한 해석적 연구 결과로써의 유효응력 및 유효변형률 분포를 나타낸 것으로, 최대유효응력은 약 56.2MPa 그리고 최대유효변형률은 약 3.62로 각각 예측되었다. 특히, 최대유효응력이 발생하는 부위는 저부의 축대칭 경계조건이 부여된 위치에서 DEFORM의 요소 자동분할(Remesh) 기능에 의해 두께 방향으로 두 개의 요소층으로 분할됨에 따른 응력집중에 기인하는 것으로 판단된



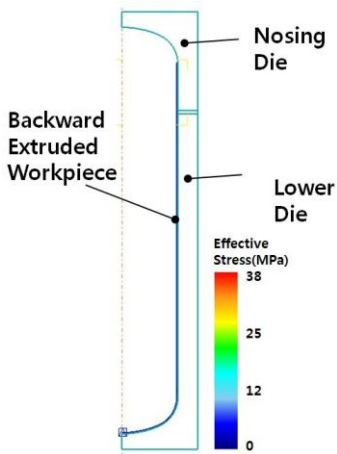
(a) 3D FE model for backward extrusion



(a) Effective Stress and strain distribution

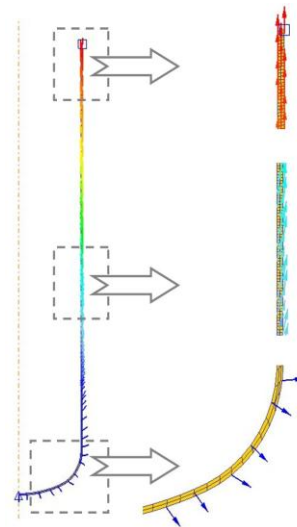


(b) Example of backward extrusion process



(c) FE model for head nosing

Fig. 6 FE models for backward extrusion and head nosing processes of small seamless Al. liner



(b) Velocity field of backward extruded workpiece

Fig. 7 FE simulation results of backward extrusion for small seamless Al. liner

다. 이러한 국부적인 응력집중 부위를 제외하고는 전체적으로 약 20MPa 이하의 유효응력 분포를 보임을 알 수 있었다. 또한, 후방압출 공정에 의해 변형소재의 재료유동을 예측하기 위해 각 절점(Node)에서의 속도장을 예측한 결과를 Fig. 7(b)에 도시하였으며, 저부에서의 속도장은 압출펀치의 이송 방향과 하부 금형의 형상에 따라 분포함을 알 수 있었으며, 이외의 부위에서의 속도장은 후방압출되는 방향에 따라 분포함을 알 수 있었다. 또한, 벽 두께가 2.0mm 이외의 경우에 대한 후방압출 공정 해석 결과는 부록(Appendix)에 요약하

Table 3 Billet dimension and results of backward extrusion for various wall thickness

| Wall Thickness (mm) | Height (mm) | Radius (mm) | Max. Stress (MPa) | Max. Strain |
|---------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|
| 2.0 | 27.4 | 73 | 56.2 | 3.62 |
| 2.5 | 34.1 | 73 | 55.8 | 3.77 |
| 3.0 | 40.7 | 73 | 55.5 | 4.01 |
| 3.5 | 47.3 | 73 | 55.4 | 4.02 |
| 4.0 | 53.8 | 73 | 55.3 | 3.80 |
| 4.5 | 60.3 | 73 | 55.0 | 4.16 |
| 5.0 | 66.8 | 73 | 55.0 | 3.97 |
| 5.5 | 73.2 | 73 | 54.9 | 4.94 |
| 6.0 | 79.5 | 73 | 54.9 | 5.48 |

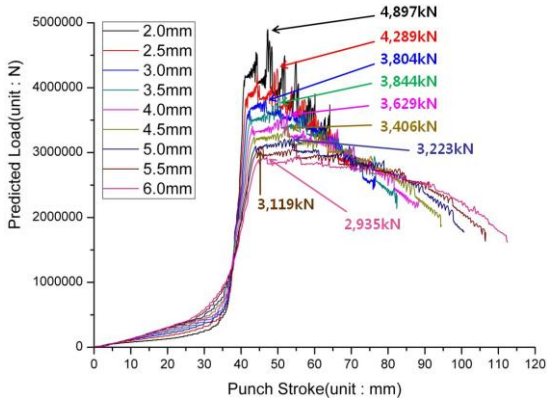
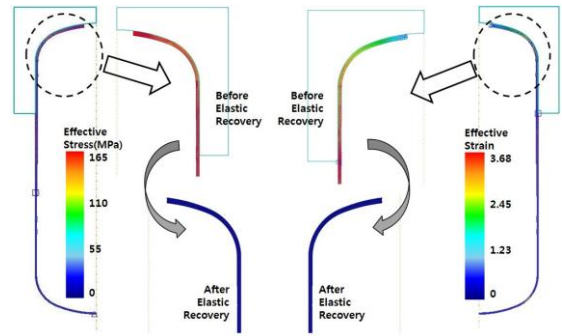


Fig. 8 Results of forging load prediction for backward extrusion

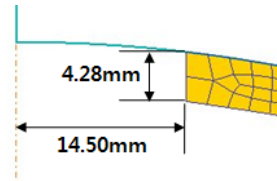
여 제시하였다. 이러한 다양한 벽 두께를 가지는 AA6061-O 소재를 이용한 후방압출 공정에 대한 해석 결과를 Table 3에 요약하여 나타내었다. Table 3에서와 같이 AA6061-O 소재를 대상으로 한 후방압출 공정에 있어서, 벽 두께가 증가할 수록 최대유효응력은 감소함을 알 수 있었으며, 이를 후방압출 공정에 필요한 성형하중 예측 결과(Fig. 8)와 비교해본 결과 타당한 결과를 보임을 알 수 있었다. 즉, 벽 두께가 2.0mm일 경우에 요구되는 성형 하중은 약 4,897kN(약 500톤)으로 예측되었다.

3.3 두부 노우징 공정 유효요소 해석

AA6061-O 소재를 이용한 6.75L급 라이너의 두부 노우징 공정에 대한 유효요소 해석을 수행하였다. 본 두부 노우징 공정은 앞서의 후방압출 공정 해석에 의해 얻어진 중간성형품의 격자구조,



(a) Effective Stress and strain distribution

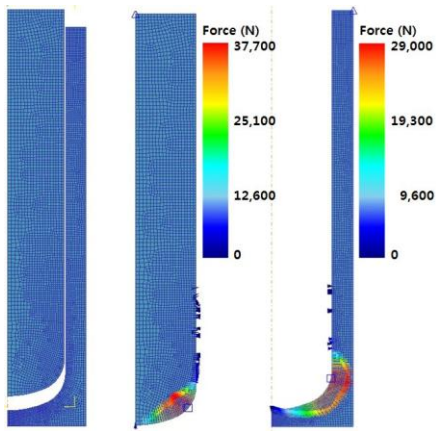


(b) Thickening at end region of heading nosing

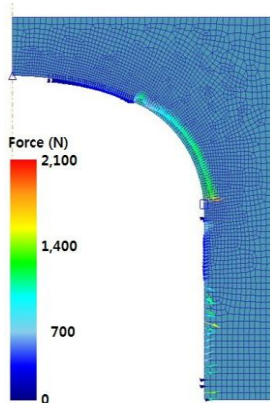
Fig. 9 Numerical simulation results for head nosing of AA6061-O seamless liner

각 절점에서의 응력 및 변형률 정보, 마찰계수 및 변형 형상을 초기 정보로 적용하였다. 즉, 후방압출 공정 해석 결과를 바탕으로 단지 두부 노우징을 위한 상부 노우징 다이만을 새로이 모델링하여 적용하였다. 또한, 두부 노우징 공정은 대칭축으로부터 거리가 14.5mm에 도달할 때까지 수행되었으며, 이는 두부 노즐(Nozzle)이 장착되기 위한 후가공 여유 공간을 고려한 것이다.

Fig. 9(a)는 두부 노우징 공정에 대한 유효요소 해석 결과를 나타내고 있으며, 최대유효응력은 약 160MPa로 다소 높은 수준의 유효응력이 발생하는 것으로 조사되었으나 탄성회복을 고려한 결과 이러한 과도한 응력분포는 적절히 완화되는 것으로 나타났다. 그리고, 최대유효변형률은 약 3.68로 예측되었다. 두부 노우징 공정에 대한 탄성회복을 고려한 결과, 전체적인 응력분포는 약 20MPa 이하임을 Fig. 9(a)에서 알 수 있다. 본 두부 노우징 공정에 의해 얻어진 AA6061-O 라이너의 두부 끝단에서 두께가 Fig. 9(b)에서와 같이 약 4.28mm로 증가하는 것으로 예측되었으며, 이는 약 480℃의 고온 조건에서 두부 금형과의 마찰거동에 기인한 것으로 파악되었다.



(a) Tool geometry and backward extrusion forging load condition



(b) Tool shape and head nosing load condition

Fig.10 Forging load conditions for tool structural integrity evaluation

4. 금형 구조건전성 평가

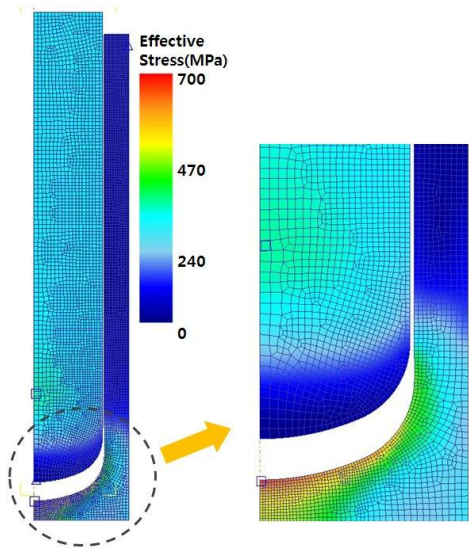
앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 AA6061-O 알루미늄 합금 소재를 후방압출 및 두부 노우징 공정에 있어서, 후방압출 상부 펀치와 하부 금형, 그리고 두부 노우징용 상부 다이 및 하부 다이 등은 내식성 및 내열성이 우수한 SKD61종을 금형 소재로 적용하였다. SKD61종은 금형 소재로서 많이 활용되고 있으며, 이의 항복강도는 약 2,500MPa 수준의 강성을 가지는 것으로 알려져 있다. 그러나, 이러한 SKD61종의 금형 소재가 실제 후방압출 및 두부 노우징 공정에 적용되기에 앞서 해석적 고려를 통해 금형의 구조건전성을

사전에 파악하는 것이 향후 실제 금형 제작 및 시제품 제작 등 일련의 실험적 검증 과정에서의 금형 마모 및 파손 등의 문제점을 사전에 방지하기 위한 방안으로 고려되고 있다. 이에 본 연구에서는 후방압출 공정에 적용된 금형과 두부 노우징 공정에 적용된 금형에 대한 구조해석을 수행하였다.

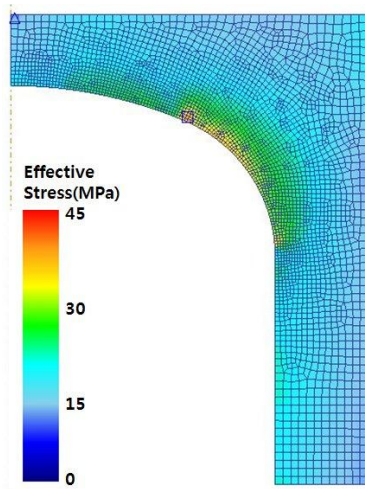
Fig. 10에서는 후방압출 공정에 적용된 금형 형상과 구조해석을 위한 요소구성 결과를 보여주고 있다. 또한, 후방압출 공정 해석 과정에 있어서 Fig. 8에서와 같이 예측된 성형 하중이 최대일 때의 후방압출 상부 펀치와 하부 다이에 가해지는 하중을 해석적으로 도출한 결과를 Fig. 10(a)에 각각 나타내었으며, 상부 펀치의 경우 약 37,700N 그리고 하부 다이의 경우 약 28,900N의 하중이 금형 코너부에 가해지는 것으로 예측되었다. Fig. 10(b)에서는 두부 노우징 공정이 수행되는 과정에서의 상부 다이에 가해지는 성형하중 예측 결과를 나타낸 것으로 약 2,050N의 하중이 코너부에 작용하고 있음을 알 수 있었다. SKD61종의 금형 소재가 적용된 각 금형 구조물에 작용하는 성형 하중을 경계조건으로 설정하여 구조해석을 수행한 결과를 Fig. 11에 제시하였다. Fig. 11(a)에서와 같이 후방압출 공정의 상부 및 하부 금형에 가해지는 성형 하중에 의한 금형에서의 최대 유효응력은 약 700MPa로 후방압출 하부 다이에서 발생하며, 상부 펀치보다 높은 수준의 응력이 나타나는 것으로 예측되었다. 그리고, 두부 노우징 공정에 있어서의 금형 해석 결과는 Fig. 11(b)에서와 같이 약 45MPa의 최대유효응력이 상부 노우징 다이 코너부에서 발생함을 알 수 있었다. Fig. 11에 제시된 후방압출 공정과 두부 노우징 공정에 대한 금형에 발생하는 최대유효응력들을 고려할 때, 적용된 SKD61 금형 소재가 가지는 약 2,500MPa 수준의 항복강도를 기준으로 평가해 본 결과로 금형 구조물에 큰 변형이나 손상은 발생하지 않을 것으로 예측되었다.

5. 내압 성능 예측

앞서 언급한 후방압출 공정과 두부 노우징 공정을 적용한 6.75L급 소형 AA6061-O 라이너의 온간 (약 480℃) 단조 공정에 의해 얻어진 소형 압력용기는 두부 노즐이 부착되고는 원주방향으로 용접과 외부에 탄소섬유강화복합재(Carbon



(a) Effective stress distribution for backward extrusion tools



(b) Effective stress distribution for head nosing tool
Fig.11 Results of tool structural integrity evaluation

Fiber Composite)을 적층하여 최종적인 소형압력용기를 제작하게 된다. 소형압력용기에 있어서, 내부의 AA6061-O 라이너는 저장되는 유체 혹은 기체의 누수를 방지하는 역할을 주로 담당하며, 외부에 적층된 복합재 구조물이 내압을 지지하는 역할을 수행한다. 이러한 소형압력용기의 경우 내압 성능평가 기준으로 내압이 약 1.47MPa(약15kg/cm²)로 가해질 경우에 누수 및 파손이 발생하지 않는 용기를 적합한 것으로 판단하고 있다[11]. 이에 따

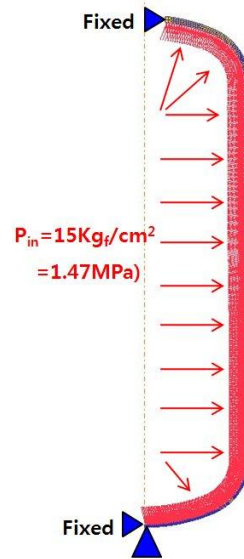
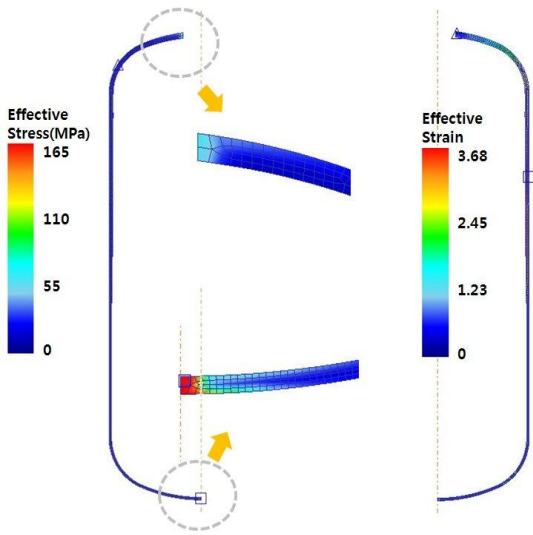


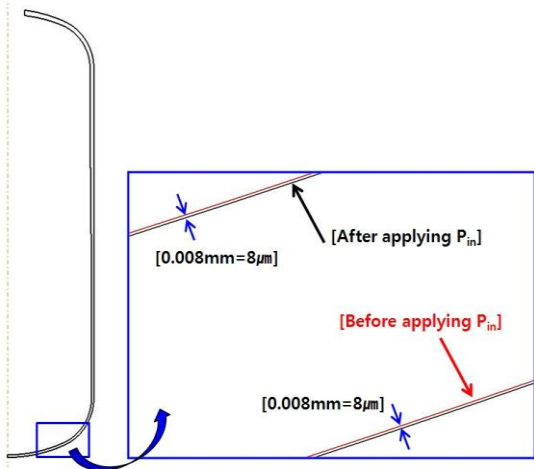
Fig.12 FE model for inner pressure condition of 15kg/cm²

라서 본 연구에서는 내압성능평가 기준인 약 1.47MPa의 내압조건에 기준으로 후방압출 및 두부 노우징된 소형 라이너에 대한 응력 및 변형해석을 수행하였다.

Fig. 12는 Fig. 9에서 얻어진 라이너 형상에 상온에서 내압이 적용된 수치해석 모델을 나타낸 것이다. 소형의 AA6061-O 라이너에 대한 해석적 내압성능 평가 결과를 살펴보면, Fig. 13(a)에서와 같이 최대유효응력은 약 165 MPa로 라이너의 저부 측대칭 경계조건 부위에서 예측되었으나, 이는 앞서 3.2절에서 언급한 방와 같이 본 해석에 사용된 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM의 요소 자동분할(Remesh) 기능에 의해 두께 방향으로 두 개의 요소층으로 분할됨에 따른 응력집중에 기인하는 것으로 조사되었다. 이러한 국부적인 응력집중 부위를 제외하고는 전체적으로 약 20MPa 이하의 유효응력 분포를 보임을 알 수 있었다 또한, Fig. 13(b)에 제시된 변위 예측 결과를 살펴보면, 약 1.47MPa의 내압이 가해질 경우 라이너의 저부에서 약 0.008mm(8μm)의 변위가 발생함을 알 수 있으나, 이 수준의 변위는 매우 작은 수준으로 무시할 수 있을 것으로 판단되었다. 즉, 본 연구에서의 연구 대상인 6.75L급의 소형 AA6061-O 라이너는 내압성능평가 기준에 부합하는 것으로 판단된다.



(a) Effective stress and strain distributions



(b) Displacement of AA6061-O small liner

Fig.13 Results of structural integrity evaluation for AA6061-O small seamless liner by applying inner pressure of 15kg/cm²

6. 결론

본 연구에서는 접시형 소형 Seamless 압력용기의 중요 금속재 단조품인 AA6061-O 라이너 성형을 위한 온간 후방압출 및 두부 노우징 공정에 관한 유한요소 성형해석을 수행하였다. 본 해석적 연구에서는 강소성 유한요소 해석 기법을 적용하여 후방압출 공정과 두부 노우징 공정에 있어서

의 목적형상 획득을 위해 성형과정에서 발생하는 유효응력과 유효변형률 분포 그리고 최대 성형하중 등을 유한요소법을 이용한 해석적 접근을 통해 예측하였으며, 약 148mm의 외경을 가지는 AA6061-O 라이너에 대해 다양한 요구 벽 두께에 대한 해석적 연구도 추가적으로 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과들을 요약하면 다음과 같다.

(1) 6.75L급의 내부 용적을 가지는 소형의 AA6061-O 라이너를 성형하기 위한 금형 및 소재간 마찰 거동은 마찰계수가 약 0.15 수준의 특성을 보이는 흑연계 피막처리된 초기 빌렛을 사용하는 것이 타당한 것으로 조사되었다.

(2) 본 연구에서는 요구 벽 두께가 2.0mm인 AA6061-O 라이너의 온간 후방압출에 있어서, 약 56.2MPa의 최대유효응력, 3.62의 최대유효변형률 그리고 4,897kN의 최대 단조하중이 예측되었다. 이를 바탕으로 후방압출 공정을 위해서 필요한 프레스 용량은 약 500Ton 수준이 필요한 것으로 예측되었으나, 현실적으로 프레스의 구조적 안전 확보 및 여유 용량 확보 등을 고려하여 통상적으로 실제 하중은 설계 하중의 약 50% 수준에서 결정됨을 고려할 경우, 벽 두께가 2.0mm인 AA6061-O 라이너를 후방압출하기 위해서는 약 1,000Ton 수준의 프레스를 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

(3) 이와 더불어, 두부 노우징 공정에 있어서는 탄성회복을 고려한 후에 최대유효응력이 약 20.0MPa, 최대유효변형률이 약 3.68 수준으로 각각 예측되었고, 두부 노우징 공정 적용 결과로써 Nozzle 장착부위에서 두께가 다소 증가함을 알 수 있었다. 이러한 두께 증가현상을 보완하고 두부 및 저부의 대칭 형상을 확보하기 위해서는 저부의 두께를 조절할 필요가 있음을 알 수 있었다.

(4) 또한, 내압성능시험 기준(약 1.47MPa)에 따른 내압 성능을 수치적으로 예측한 결과 약 20MPa 수준의 유효응력과 약 0.008mm 수준의 변형이 발생하는 것으로 나타났으며, 금형의 마모나 파손 등의 문제는 발생하지 않을 것으로 판단되었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다. 또한, 본

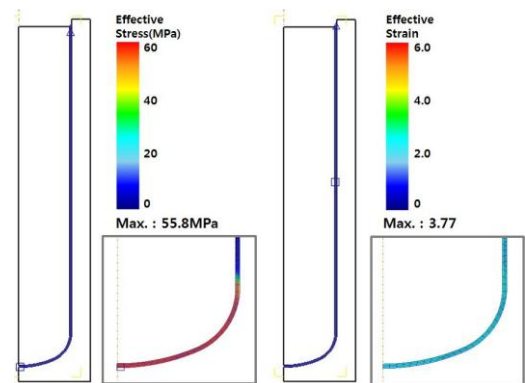
연구는 2012년도 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성지원사업(No. 20124030200020)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

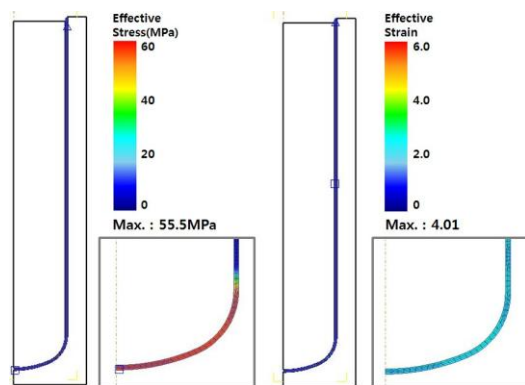
- [1] M. J. Vick, K. Gramoll, 2012, Finite Element Study on the Optimization of an Orthotropic Composite Toroidal Shell, J. Press. Vess. Technol., Vol. 134, No. 5, Article No. 051201.
- [2] J. H. Kim, K. B. Shin, T. K. Hwang, 2013, Study on Size Optimization for Skirt Structure of Composite Pressure Vessel, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 37, No. 1, pp. 31~37.
- [3] Y. B. Yoon, S. W. Cho, S. K. Ha, 2002, Optimal Design of Filament Wound Composite CNG Pressure Vessel, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 26, No. 1, pp. 23~30.
- [4] J. S. Kim, S. G. Lee, T.E. Jin, 2002, Development and Evaluation of Predictive Model for Microstructures and Mechanical Properties in Heat Affected Zone of Pressure Vessel Weld, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 26, No. 11, pp. 2399~2408.
- [5] H. S. Lee, J. H. Yoon, J. S. Park, Y. M. Yi, 2005, A Study on Failure Characteristic of Spherical Pressure Vessel, J. Mater. Process. Technol., Vol. 164, pp. 882~888.
- [6] W. C. Jiang, X. W. Guan, 2013, A Study on the Residual Stress and Deformation in the Welding Between Half-pipe Jacket and Shell, Mater. Des., Vol. 43, pp. 213~219.
- [7] ASTM International, 2009, Standard Rest Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, ASTM E9-09.
- [8] KSA, 2002, Aluminum and Aluminum Alloy Extruded Shapes, KS D 6759.
- [9] D. J. Yoon, S. Y. Hahm, Y. S. Lee, 2012, A Study on Forming of Al-Zn-Mg-Sc Aluminum Alloy Bolts, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 7, pp. 447-452.
- [10] D. H. Yoon, J. E. Jung, Y. W. Chang, J. H. Lee, K. S. Lee, 2012, Influence of High Temperature Deformation Process Variables on the Microstructure and Thermo-physical Properties of a Ni-Fe-Co Alloy, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 3, pp. 207~214.
- [11] J. H. Kang, B. H. Ko, J. S. Jae, S. S. Kang, 2005, Lubrication and Cooling Characteristics of Warm Forging Lubricants, Trans. Mater. Process., Vol. 14, No. 7, pp.619~623.
- [12] D. J. Jeong, D. J. Kim, J. H. Kim, B. M. Kim, T.A. Dean, 2001, Effects of Surface Treatments and Lubricants for Warm Forging Die Life, J. Mater. Process. Technol., Vol. 113, No. 1-3, pp. 544~550.

APPENDIX

본 부록에서는 AA6061-O 소재를 이용한 6.75L 급의 소형 라이너의 후방압출 공정에 있어서 벽 두께가 2.5mm, 3.0mm, 3.5mm, 4.0mm, 4.5mm, 5.0mm 그리고 6.0mm인 경우에 대한 유한요소 해석 결과를 정리한 것으로 유효응력 및 유효변형률 분포를 나타내었다.



A1. t = 2.5mm



A2. t = 3.0mm

6.75L급 소형 AA6061 라이너의 후방압출 및 노우징 공정에 관한 해석적 연구

