

# 대형 원뿔형 알루미늄 실린더의 멘드렐 단조 공정 개발

남지원<sup>1</sup> · 조종래<sup>#</sup> · 이경훈<sup>2</sup> · 이인환<sup>3</sup>

## Development of Mandrel Forging Process for Large Conical Aluminum Shell

J. W. Nam, J. R. Cho, K. H. Lee, I. H. Lee

(Received May 31, 2018 / Revised August 23, 2018 / Accepted August 29, 2018)

### Abstract

This paper has developed a forging process for conical shells for making aluminum cylindrical large shells. An incremental forging process was applied to reduce forging loads and die cost. The preform is designed based on the cross-sectional area of the final forged shape. Inner diameter of the preform for mandrel forging is constant, and outer diameter is conical so that it matches the cross-sectional area of the product. However, simulation confirmed that the larger diameter is smaller than predicted and the length is larger than predicted because in the initial stage of forging, the large diameter portion first comes into contact with the anvil at the initial stage of forging and stretches in longitudinal direction. So, it has developed a rule to design the preform considering 3-D deformation instead of plane strain deformation at the beginning stage of mandrel forging. The developed mandrel forging process can be applied to more similar products and economic benefits may be obtained.

**Key Words** : Mandrel forging, Preform design, Incremental forging, Aluminum, Conical shell

### 1. 서론

알루미늄은 다양한 산업분야에서 경량 제품에 사용되는 소재 중 하나이다. 알루미늄 합금은 비중이 낮고, 열전도도 및 전기전도도가 뛰어나며 우수한 비강도를 가지기 때문에 차량, 항공 부품, 발사체 등에 사용되고 있다.[1~5]

대형 단조품의 제작시 형단조에 대비하여 성형하중을 줄이고 금형비를 낮추기 위해 일반적으로 자유 단조를 이용한다. 또한 대형 단조품은 다품종 소량 생산인 경우가 많기 때문에 대형 설비를 구축하고 형단조용 금형을 제작하는 것은 금형의 범용성과 더불어 경제적인 문제가 야기된다. 자유단조공정은 형단조에 비하여 목표로 하는 형상 정밀도를 달성하기 어렵지만 비교적 단순한 금형으로 다품종

소량 생산에 적합한 경제적인 공정이다.

단면이 일정한 중공 실린더 형상을 제작할 때 자유단조공정중의 하나인 멘드렐 단조(mandrel forging)를 활용한다.[6, 7] 멘드렐 단조는 소재와 엔빌(anvil), 멘드렐, 멘드렐을 지지하는 지지대(support)로 구성된다. 주요 금형은 멘드렐이며 중공 실린더 형상의 소재에 멘드렐을 삽입하고, 엔빌을 눌러 소재의 두께를 감소시킨 뒤 멘드렐로 회전하여 다시 엔빌로 성형하는 것을 반복하여 소재의 직경을 증가시켜 제품을 완성한다.

본 논문에서 개발하려는 제품은 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 절단된 원뿔형 실린더 형상을 가지고 있고, 전단면에서 두께는 일정하다. 이러한 형상은 단면적인 일정한 일반적인 멘드렐 단조와 다르기 때문에 공정설계와 예비형상 결정이 중요하다. 해석과 시제품제작을 통하여 공정의 적합성을 검증하여 원뿔 형상의 실린더 단조공정을 개발하였다.

1. ㈜ DNDE 구조파트 사원  
2. 국방과학연구소 수석연구원  
3. ㈜ 피에스엠 상무

# Corresponding Author : 한국해양대학교 기계공학부, Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 교수  
Email : cjr@kmou.ac.kr

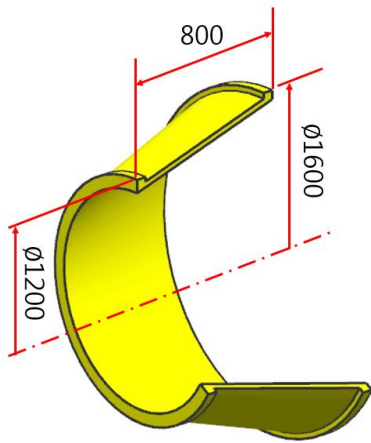


Fig. 1 Shape and dimension of conical shell

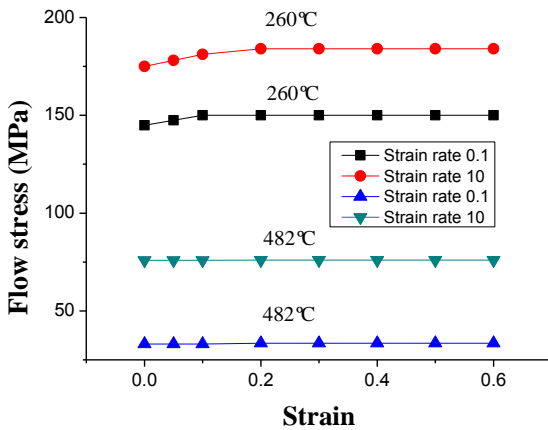


Fig. 2 Flow stress-strain curves of AL2014[8]

Table 1 Thermal properties of AL2014[8]

Thermal conductivity (N/sec/°C)	180.2
Heat capacity(N/mm <sup>2</sup> /°C)	2.433

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석조건 및 공정환경

제품의 소재는 AL2014이며 온도해석에 필요한 주요 열물성치를 Table 1에 정리하였고, 온도 및 변형률속도에 따른 소재의 유동응력을 Fig. 2에 나타내었다. 금형의 소재는 SCM440이며 강체로 가정하고 비정상상태(transient) 열전달 만을 고려하여 해석을 진행하였다.

소재의 초기 온도는 400°C, 금형은 300°C 이고, 주위 온도는 공장환경을 고려하여 20°C 로 설정하

였다. 소재와 금형간의 마찰 상수는 0.7로 일반 열간 단조의 추천값을 사용하였다. 상기 조건을 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM 3D V.11 [8]을 사용하여 해석을 수행하였다.

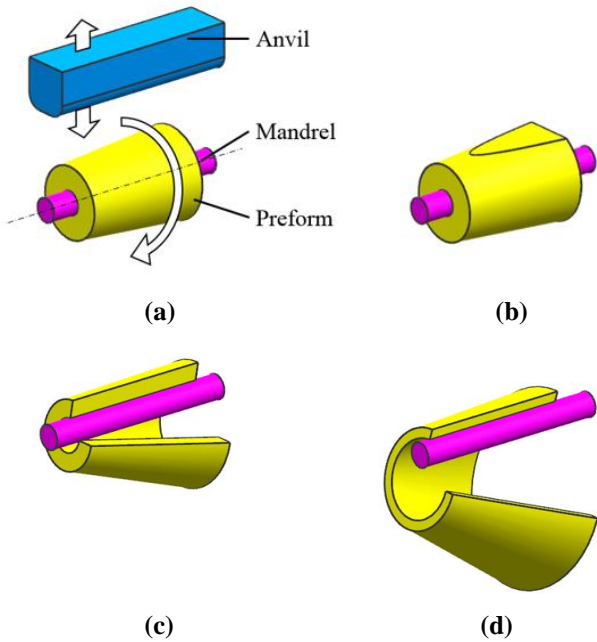
### 2.2 공정 설계

Fig. 3은 멘드렐 단조공정 과정을 나타내고 있다. 일반적인 멘드렐 단조는 좌우의 직경이 같고 직경만 늘리기 때문에 멘드렐과 엔빌사이의 소재의 거동은 평면변형(plane strain)으로 가정이 가능하다. 따라서 체적불변의 원리에 따라 변형중 단면을 결정할 수 있다. 마찬가지로 원뿔형 제품도 양단의 직경 차이로 인해 사다리꼴 단면을 갖는 절단된 중공 원뿔 형상의 예비성형체 설계가 요구된다.

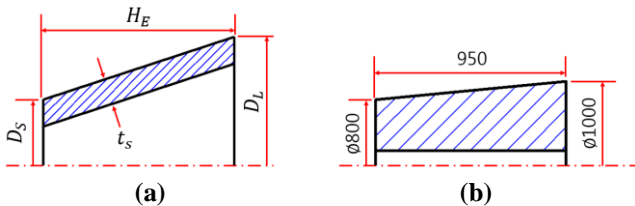
성형 전후 양단의 단순 변화비를 이용하여 Fig. 4와 같이 설계하였다. Fig. 4(a)는 단조품의 목표형상과 주요치수를 나타내고 있다.  $t_s$ 는 120mm로 셸의 두께를 나타내며,  $H_E$ 는 950 mm로 높이,  $D_s$ 와  $D_L$ 은 각각 1200 mm와 1800 mm로 각 단부의 외경이다. Fig. 4(b)는 설계된 예비성형체의 형상이다. 적용되는 멘드렐 정보와 양단 단면 변화를 기준으로 예비성형체를 설계하였다.

선정한 예비성형체 형상을 이용하여 3차원 전체 모델로 단조해석을 수행하였다. 엔빌의 압하속도는 공장 설비의 운용조건을 고려하여 30 mm/s로 하였다. 엔빌의 목표 압하 깊이는 210 mm이고 한 스텝(step)에서 20 mm씩 나누어 총 11회 압하하였다. 현장의 실제 작업에서는 엔빌로 한번 압하한 후 멘드렐을 회전시키지만, 해석에서는 소재를 일정각도로 회전하여 자중(weight)으로 자리를 잡아 접촉조건이 설정되고 다시 엔빌이 압하하는 방식으로 진행된다. 멘드렐 단조는 별도의 고정구 없이 소재가 멘드렐에 걸린 채로 성형되므로 1회 압하량이 과도한 경우 다음 압하를 위해 소재를 회전시키면 제자리로 돌아오는 현상이 발생하기 때문에 주의해야 한다.

몇번의 시행착오를 통해 대상 소재의 적절한 1회 최대 압하량을 20 mm로 정하였다. 1회 압하 후 다음 압하를 위한 소재 회전량은 엔빌과의 접촉 면적 기준 약 20~30% 겹쳐지도록 설정하였다. 공정이 진행됨에 따라 소재의 직경이 증가하므로 1회 압하당 회전량을 공정이 진행됨에 따라 변화시켜 매 압하 시 겹침량을 일정하게 유지하였다.



**Fig. 3 Schematic diagram of mandrel forging process**  
 (a) set up, (b) initial stage, (c) mid stage, (d) final deformed shape



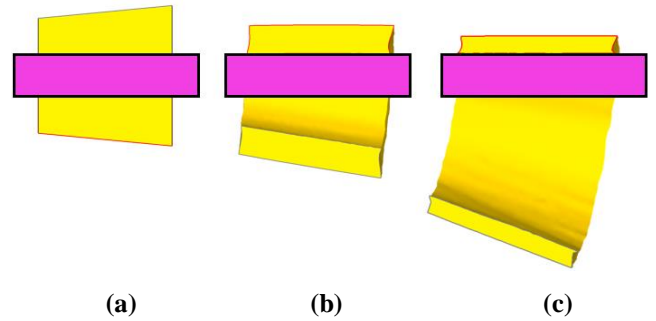
**Fig. 4 Preform design for mandrel forging process**  
 (a) final shape, (b) preform shape

2.3 공정 해석

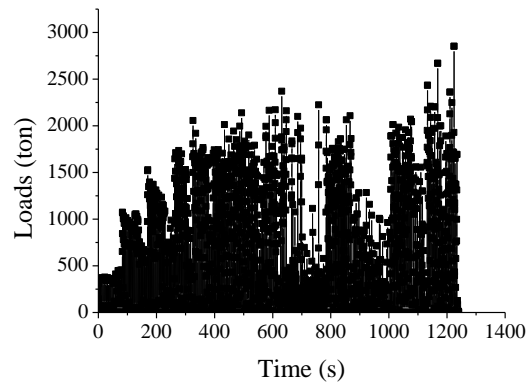
예비성형체, 공정 중반 및 공정 완료시의 변형 형상을 Fig. 5에 나타내었으며, 평면변형으로 가정하고 구한 목표치수와 해석 결과의 치수를 Table 2 에서 비교하였다. 두께 방향 목표치는 내/외측 각각 30mm, 길이 방향은 좌/우측 각각 100mm 의 가공여유를 포함하고 있다. 소재의 두께는 목표치와 일치하지만 Fig. 3(b)와 같이 공정 초반에 앤빌과 예비성형체의 기울기로 인하여 대단부가 먼저 앤빌과 국부적 접촉하여 길이방향 변형이 관찰되었다. 즉 길이방향으로 앤빌과 접촉길이가 짧아 원주 방향변형과 길이방향 변형이 동시에 발생한다. 이 때문에 평

**Table 2 Main dimension of conical shell by simulation**

Discription	Target (plane strain)	Simulation	Error
$t_s$ (mm)	123	123	0.0%
$H_E$ (mm)	942	1078	14.4%
$D_S$ (mm)	1208	1193	-1.2%
$D_L$ (mm)	1824	1493	-18.1%



**Fig. 5 Simulation result for mandrel forging (a) initial preform (b) mid stage (c) final stage**



**Fig. 6 Forging loads of mandrel forging process**

면변형으로 가정하여 예측한 목표치수에 비해 대단부의 지름은 목표 치수에 대하여 11% 미달하였고, 길이방향 치수는 14.4% 초과하였다. 원주방향으로 변형해야 할 소재량이 감소하게 되어 대단부가 목표치수를 만족하지 못하였다. 단조하중은 Fig. 6과 같이 공정이 진행됨에 앤빌과 소재의 접촉면적이 점차 증가하고 두께가 얇아져서 단조하중이 점차 증가하였다.

예비성형체를 재설계하는 방안으로 Fig.7에서 대

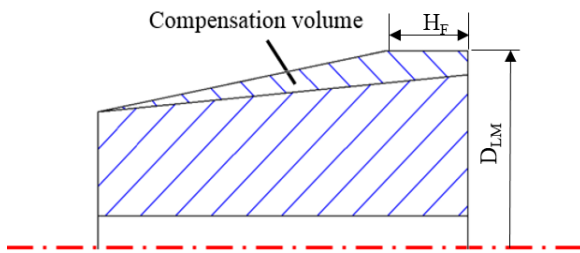


Fig. 7 Redesigned preform with compensated volume

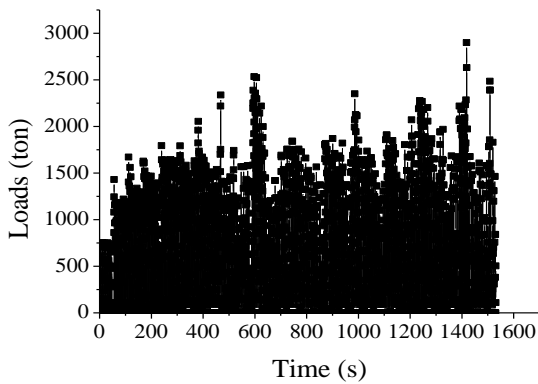


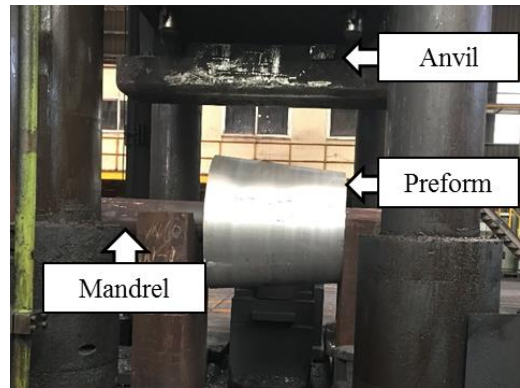
Fig. 8 Forging loads of mandrel forging process using modified preform

Table 3 Main dimension of conical shell by mandrel forging process using modified preform

Contents	Target (plane strain)	Simulation	Error
$t_s$ (mm)	123	123	0.0%
$H_E$ (mm)	942	1059	12.4%
$D_S$ (mm)	1208	1264	4.6%
$D_L$ (mm)	1824	1665	-8.7%

단부의 직경( $D_{LM}$ )을 증가시키고, 대단부의 모서리부를 엔빌과 평행( $H_F$ )하게 수정하여 공정 초반에 대단부의 모서리와 엔빌의 국부적인 변형을 적게하였다. 대단부의 면적이 10% 증가하도록  $D_{LM}=1045$  mm로 정하고 전체 체적의 증가량이 기존 예비성형체 대비 8% 증가하도록  $L_F=63$  mm를 결정하였다. 공정 초

기에 엔빌과 예비성형체가 평행하게 접촉하여 길이 방향 변형이 현저히 감소하였고, 이로 인하여 대단부 체적이 직경을 확장하는 방향으로 유동하는 것을 확인하였다. 단조 하중은 Fig. 8과 같이 기존의 예비성형체 해석보다 평균값은 증가하였으나 최대값은 큰 차이가 없었다. 목표 치수를 기준한 오차를 Table 3에 나타냈으며 대단부 직경이 목표보다 작지만 제품을 가공 할 수 있는 여유를 확보하였다.



(a) initial position



(b) mid stage



(c) forged shape of prototype

Fig. 9 Mandrel forging for prototype conical shell

### 3. 시제품 제작

시뮬레이션으로부터 설계된 예비 성형체와 공정을 바탕으로 시제품을 제작하였다. 시제품 제작시 시뮬레이션에서 가정된 공정보다 소재의 이동 및 셋업, 성형 등에 소요되는 시간이 길어져 공정 중에 2회 재가열하였다. 제작 공정을 Fig. 9에 나타내었으며 (a)는 프레스와 초기 형상, (b)와 (c)는 각각 공정의 중간과정과 제작한 시제품을 나타내었다.

제작한 시제품과 목표형상의 주요 치수를 Table 4에서 비교하였다. 재설계한 예비성형체는 대단부의 체적을 증가시켰기에 시제품의 두께가 증가했으나  $D_S$ 와  $D_L$ 은 목표한 치수를 확보하였다. Table 4에서 시제품은 실험용이지만 제품으로 활용하기 위해 제품의 길이와 대단부 직경의 변화에 초점을 맞추어 작업을 하였기 때문에 직경이 목표치보다 두꺼운 상태로 작업을 종료하였다.

**Table 4 Main dimension of conical shell by forged prototype**

Contents	Target	Prototype	Error
$t_s$ (mm)	123	136	10.6%
$H_E$ (mm)	942	941	-0.1%
$D_S$ (mm)	1208	1210	0.2%
$D_L$ (mm)	1824	1795	-1.6%

### 4. 결론

본 논문에서는 원뿔형 대형 알루미늄 구조품 제작을 위해 알루미늄 열간 단조 공정을 설계하였다. 단조하중 감소와 금형비용을 줄이기 위하여 증분 성형 공정을 적용하였으며, 유한요소해석을 통하여 공정을 검증하고 예비 성형체에 대한 설계를 보완하였다. 본 공정을 검증하기 위한 유한요소해석과 시제품 제작을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 멘드렐 단조 공정으로 대형 원뿔형 실린더 제품은 제작할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 원뿔형 실린더의 예비성형체는 평면변형으로 가정하는 직경이 동일한 실린더와 같은 방법으로 설계할 수 없음을 확인하였다.

- (3) 원뿔형 실린더의 경우 작업초기에 3차원 변형을 하기 때문에 대단부에서 길이가 늘어나고 대단부의 직경이 목표보다 작아진다. 이를 보상하기 위한 8%의 체적이 증가한 예비성형체 설계 방법이 제시되었다.
- (4) 소량의 고품질 제품을 생산하는 경우 본 공정을 적용한다면 단조설비비 및 금형제작비를 줄이는 동시에 소재 회수율까지 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### REFERENCES

- [1] K. J. Kim, J. H. Lim, J. H. Park, B. I. Choi, J. W. Lee, Y. J. Kim, 2012, Light-weight Design of Automotive AA6061 Rear Sub-frame Based on CAE Simulation, Trans. Kor. Soc. Automot. Eng., Vol. 20, No. 3, pp. 77-82.
- [2] S. W. Han, H. S. Jung, 2011, Weight Reducing of Aluminum Extrusion Profiles of a Railway-Car Body Based on Topology and Size Optimization, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., A, Vol. 35, No. 2, pp. 213-221.
- [3] Y. M. Kwon, J. I. Song, Y. S. Lee, J. H. Lee, 2000, Forging Process Design of Aluminum Alloys for Aircraft Parts, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall. Conf., pp. 90-93.
- [4] T. Dursun, C. Soutis, 2014, Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys, J. Mater. Des., Vol. 56, pp. 862-871.
- [5] B. S. Kang, T. W. Ku, 2014, Process Modification and Numerical Simulation for an Outer Race of a CV Joint using Multi-Stage Cold Forging, Trans. Mater. Process. Vol. 23, No. 4, pp. 211-220.
- [6] S.U. Lee, Y.S. Lee, M. W. Lee, D. H. Lee, S. S. Kim, 2010, Precess Design on Fabrication of Large Sized Ring by Mandrel Forging of Hollow Cast Ingot, Trans. Mater. Process. Vol. 19, No. 6, pp. 329-336.
- [7] M. W. Lee, Y. S. Lee, S. W. Lee, D. H. Lee, S. S. Kim, Y. H. Moon, 2009, Microstructure Change of Large Case-forged Product by Forging and Heat Treatment Conditions, Trans. Mater. Process. Vol. 18, No. 6, pp. 458-464.
- [8] DEFORM 3D Version 11.0 User's Manual, 2017.