



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

대형 알루미늄 실린더 및 플랜지 제작을 위한 점진 단조 공정 개발

Development of Incremental Forging Process for Manufacturing
Large Aluminum Cylinder and Flange



지도교수 조 종 래

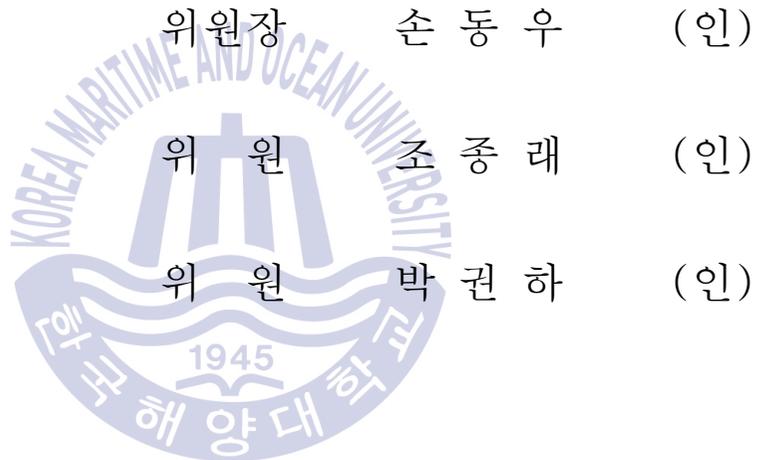
2018 년 2 월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

남 지 원

본 논문을 남지원의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2017년 12월 22일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
1. 서 론	
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적 및 내용	3
2. 강소성 유한 요소 해석의 이론적 배경	6
3. 실린더 제품의 제작 공정	
3.1 점진 단조 공정 설계	10
3.1.1 공정 설계	10
3.1.2 예비 성형체 설계	12
3.2 점진 단조 공정 해석	14
3.2.1 예비 성형체 물성치	14
3.2.2 공정 조건	17
3.2.3 유한 요소 해석 결과	19
3.2.4 대단부 체적을 증가한 해석 결과	23
3.3 납 실험을 통한 성형 가능성 검증	26
3.4 시제품 제작	31
3.4.1 시제품 제작 설비	31
3.4.2 시제품 제작	32

4. 플랜지 제품의 제작 공정	36
4.1 회전-다단 단조 공정 설계	37
4.1.1 공정 설계	37
4.1.2 예비 성형체 설계	39
4.2 회전-다단 단조 공정 해석	40
4.2.1 공정 조건 및 소재 물성치	40
4.2.2 해석 결과	43
4.2.3 콘 금형을 도입한 공정	46
4.3 시제품 제작	50
5. 결론	54
참고문헌	56



List of Tables

Table 1	Chemical compositions of AL-2014	16
Table 2	Mechanical and thermal property of AL-2014	16
Table 3	Boundary conditions of mandrel forging process	17
Table 4	Relationships of each objects	17
Table 5	Main dimensions of cone shell by simulation	21
Table 6	Main dimensions of cone shell by simulation	25
Table 7	Main dimensions of cone shell experiment	26
Table 8	Main dimensions of cone shell by prototype	35
Table 9	Chemical compositions of AL-7075	40
Table 10	Mechanical and thermal property of AL-2014	41
Table 11	Boundary conditions of mandrel forging process	41
Table 12	Relationships of each objects	41
Table 13	Main dimensions of flange by rotating-multi step forging	45
Table 14	Main dimensions of flange by forging process with cone die	49
Table 15	Main dimensions of flange by prototype	53

List of Figures

Fig. 1 Target shape of a cylinder	4
Fig. 2 Target dimensions of a cylinder	4
Fig. 3 Target shape of a flange	5
Fig. 4 Target dimensions of a flange	5
Fig. 5 Schematic diagram for cone shell manufacturing process	11
Fig. 6 Shapes of product and preform	13
Fig. 7 Preform design using equipment end sections	13
Fig. 8 Flow-stress curve of AL-2014 at each temperatures	15
Fig. 9 Simulation results of cone shell	20
Fig. 10 Main dimensions of cone shell	21
Fig. 11 Forging loads of mandrel forging process	22
Fig. 12 Compensation volume added on preform	23
Fig. 13 Simulation results of cone shell	24
Fig. 14 Forging loads of mandrel forging process	25
Fig. 15 Position setup for lead test	27
Fig. 16 Deformed shape of 1st cycle forging	28
Fig. 17 Deformed shape of mid stage	29
Fig. 18 Deformed shape of final stage	30
Fig. 19 Preform shape of prototype	31
Fig. 20 Forging press equipment	32
Fig. 21 Manufacturing cone shell prototype	35
Fig. 22 Target shape and dimensions of flange	36
Fig. 23 Schematic diagram for rotating-multi step forging	38
Fig. 24 Preform design for flange	39
Fig. 25 Flow-stress curve of AL-7075 at 250°C	42
Fig. 26 Flow-stress curve of AL-7075 at 400°C	42

Fig. 27 Simulation results of rotating-multi step forging44

Fig. 28 Main dimensions of flange45

Fig. 29 Forging loads on rotating-multi step forging45

Fig. 30 Rotating-multi step forging with upper cone die47

Fig. 31 Simulation results of rotating-multi step forging with cone die48

Fig. 32 Forging loads on rotating-multi step forging with cone die49

Fig. 33 Forging process of flange prototype52



대형 알루미늄 실린더 및 플랜지 제작을 위한 점진 단조 공정 개발

남 지 원

한국해양대학교 대학원
기계공학과

초록

4차 산업의 발달과 친환경 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 전기 자동차의 경우 내부의 배터리 무게로 인하여 차체의 경량화 기술이 요구되고 있다. 이로 인하여 차량의 연비 향상 등을 위해 경량화를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 항공 우주 및 장거리 발사체에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 경량화를 위한 많은 연구는 대부분 알루미늄과 마그네슘과 같은 비철금속을 이용한 제품을 생산하는 것에 중점을 두고 있다.

단조 공정으로 생산한 대형 단조품은 많은 이점을 가지지만, 높은 단조 하중이 요구되며 대용량 단조 프레스를 보유한 현장에서만 제작 가능하다는 단점이 있다. 이에 자유 단조 공정 중 실린더 형상을 제작하는데 이점이 있는 멘드렐 단조를 적용하였다. 이때 실린더 제품은 기울기를 가진 원뿔 실린더 형상이기 때문에 이를 고려하여 동일 체적을 가진 예비 성형체를 설계하였다. 시뮬레이션과 납 실험을 통하여 공정 초기에 큰 직경 부분이 처음 단조 되어 길이방향 변형으로 인하여 직경을 감소시키는 것으로 확인하였습니다. 이에 예비 성형체의 체적을 보상하여 설계를 수정하였다. 수정한 예비 성형체는 직경 감소 문제를 효과적으로 해결하였다. 이를 시제품 제작을 통하여 검증하였다.

플랜지 제품의 경우 회전 금형을 사용하는 점진적 단조 공정을 개발하였다. 새로 도안한 회전 금형은 단조 하중을 감소하고 열간 단조공정에서 공작물과 금형의 부착을 방지할 수 있도록 하였다.

점진적 단조 공정의 개발을 통하여 요구되는 단조 하중을 감소함으로써 대용량 단조 프레스가 없어도 보다 많은 공장에서 본 공정을 수용할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 소재 회수율을 절삭 공정에 비하여 향상시킬 수 있다.

KEY WORDS: Incremental forging 점진 단조, Forging load 단조 하중, Mandrel forging 멘드렐 단조, Preform design 예비 성형체 설계, Aluminum forging 알루미늄 단조



대형 알루미늄 실린더 및 플랜지 제작을 위한 점진 단조 공정 개발

Development of Incremental Forging Process for Manufacturing Large Aluminum Cylinder and Flange

Nam, Ji Won

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

With the fourth industrial revolution, interest in environmentally friendly energy is increasing. In the case of an electric car, there is a demand for a weight reduction technique for reducing the weight of the whole parts, and various researches are being carried out to reduce weight in various product groups such as raising the fuel efficiency. In addition, researches for lighter weight are being actively carried out in aerospace and medium-range launch vehicles. Most of the researches for lightweighting have been focused on manufacturing products using non-ferrous metals such as aluminum and magnesium.

Forged products by die forging have many advantage, but they have a disadvantage that high forging loads are required and can only be made in the factory with large capacity forging presses. For this reason, we applied the mandrel forging, which is advantageous for manufacturing the cylinder shape. In this case, since the cylinder product has a conical cylinder shape having a slope, the preform having the same volume is designed in consideration of this. Through simulations and lead experiments, it was

confirmed that the diameter was reduced due to longitudinal deformation by forging the large diameter part at the beginning of the process. The preform design was modified by compensating the volume. The modified preform effectively solved the diameter reduction problem. This was verified through prototype production.

In case of a flange product, an incremental forging process with the rotating die was developed. The novel rotating die was suggested to reduce the forging load and to prevent the sticking with workpiece and die in hot forging. Therefore, it is expected that the design process can be available in factories without large-capacity forging presses. Further, the material recovery rate can be improved as compared with the machining process.

KEY WORDS: Incremental forging 점진 단조, Forging load 단조 하중, Mandrel forging 맨드릴 단조, Preform design 예비 성형체 설계, Aluminum forging 알루미늄 단조



제 1 장 서 론

1.1 연구배경

알루미늄은 많은 산업에서 제품 경량화에 사용되는 소재 중 하나이다. 알루미늄 합금은 비중이 낮고, 열전도도 및 전기전도도가 뛰어나며 우수한 비강도를 가지기 때문에 차량, 항공기 부품, 철도 차량 등에 사용되고 있다. 알루미늄을 소재로 한 항공 부품 제작 시 우수한 강도, 인성, 균열특성, 피로등성 등이 요구된다. 따라서 이에 이점을 가진 알루미늄 합금을 사용하여 제작한다.[1-7] 제품의 특성상 용접 공정 등은 배제되어야 하기 때문에 단조 후 절삭하여 사용하는 것이 바람직하다.

단조는 오래전부터 사용된 성형 기술 중 하나이다. 크게 공구 형식과 작업 온도, 특수 단조로 나뉘며, 더욱 세분화 되어 다양한 단조 공정이 존재한다.[8] 그 중 자유 단조는 반복적인 국부적 성형을 통하여 소재 전체를 성형하는데 있어서 강점이 있기 때문에 대형 제품의 성형에 알맞은 공정이다. 소재가 형단조에 비하여 구속이 적거나 없고, 비교적 간단한 형상의 엔빌(anvil)을 사용하기 때문이다. 다만, 정밀도가 낮아 후처리 가공이 필수 불가결하며, 대량 생산에 적합하지 않은 단점이 존재한다. 생산되는 제품의 수가 적은데 비하여 대형 설비를 구축하고 형단조용 금형을 제작하는 것은 경제적인 문제가 될 것이다.

자유 단조 공정 중 중공 실린더 형상을 제작하는데 이점을 갖는 멘드렐 단조(mandrel forging)를 도입하고자 한다.[10-12] 멘드렐 단조는 링 단조(ring forging)와 유사한 형태의 단조 공정이다. 링 단조는 소재와 국부적으로 접촉하고 있는 두 개의 멘드렐이 회전하면서 두께를 감소시키고 길이를 증가시키는 공정이다. 멘드렐 단조는 소재 상부에 있는 엔빌이 소재에 삽입되어있는 멘드렐을 향해 수직으로 이동하여 국부적인 성형 한 뒤 멘드렐과 소재를 회전하며 연속적으로 수직운동에 의한 변형을 발생시켜 소재의 직경을 증가시키는 공정이다. 그러나 정밀도가 양호하지 않기 때문에

추후 가공해야한다. 따라서 멘드렐 단조를 이용할 경우 일정두께를 가진 중공 실린더 형상을 제작하고 후처리하는 것이 형상 확보에 효율적이다.

자유 단조를 이용한 공정은 설비 투자의 문제를 해소해 줄 뿐만 아니라 유사 형태의 제품 제작 시에도 금형의 범용성으로 인하여 추가적인 비용이 발생하지 않는다는 이점이 있다.

이와 같이 엔빌과 금형을 사용하여 반복적으로 소재를 국부 변형시켜 전체 공정을 완성하는 작업을 점진 단조 공정이라 한다. 점진 단조 공정은 하중이 작아 용량이 작은 장비를 사용할 수 있고, 금형비 등이 많이 들지 않아 경제적이며 범용성이 있다.



1.2 연구 목적 및 내용

대형 단조품의 경우 형단조를 위해서는 단조 제품의 크기보다 큰 형단조 금형이 필요하게 된다. 그러나 본 제품의 형단조는 자유 단조에 비하여 단조하중이 크고, 생산되는 제품의 수량이 적고, 범용성이 좋지 않기 때문에 문제가 있다. 따라서 대형 단조품은 단조 하중을 감소시키고, 범용성을 증대시키기 위하여 자유 단조 공정을 주로 이용하고 있다.

개발하고자 하는 실린더 제품의 최종 목표 형상은 **Fig. 1, 2**에 나온 바와 같이 축대칭 형상을 가지고 있다. 축대칭 형상인 것을 고려하면 멘드렐을 이용한 단조가 바람직하다. 최종 목표 형상을 확보하기 위해 회전 단조를 이용하며, 예비 성형체를 설계하여 공정을 개발하고자 한다.

플랜지 제품은 2개의 실린더 제품을 연결하는 부품으로 **Fig. 3, 4**와 같은 축대칭 형상을 가지고 있으나 실린더 제품과 다른 형상으로 인하여 멘드렐 공정과 다른 공정을 고려해야 한다. 가공 여유가 있는 형상을 고려하여 상부 금형 및 하부 금형을 설계하여야 한다. 단조 하중의 감소를 위한 공정을 개발하고자 한다.

현재 한국은 10,000 ton 이상의 대용량 단조 프레스를 보유한 공장이 많지 않다. 적게는 4,000 ton에서 많게는 8,000 ton까지 보유한 공장이 대다수 이다. 따라서 본 제품을 많은 공장에서 수용하기 위해서는 단조 하중을 3,000 ton 미만으로 낮추는 것이 필요하다. 또한, 소재에 비하여 금형의 크기가 작을 경우 압하 깊이를 점진적으로 증가시켜 단조 하중을 효과적으로 감소시키는 것이 중요하다. [13-15] 본 연구에서는 2가지 종류의 단조품에 대해서 단조 공정을 개발하는 것이 목표이다.

상용 유한 요소 해석 프로그램인 Deform 2D/3D V.11 을 이용하여 단조 공정 설계 및 설계한 예비 성형체를 검증하고, 1/10 축소된 납 실험을 수행하며, 해석 결과와 비교 하여 공정의 타당성을 확인한다. 검증한 결과를 토대로 시제품을 제작하여 공정의 적합성을 최종적으로 확인하도록 해야 한다.

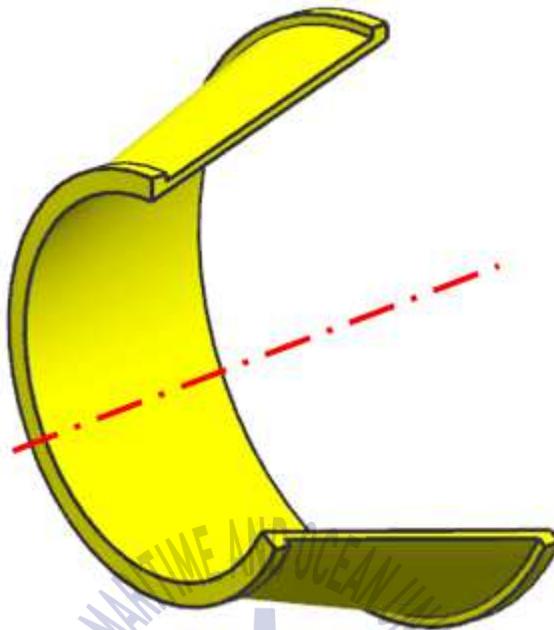


Fig. 1 Target shape of a cylinder

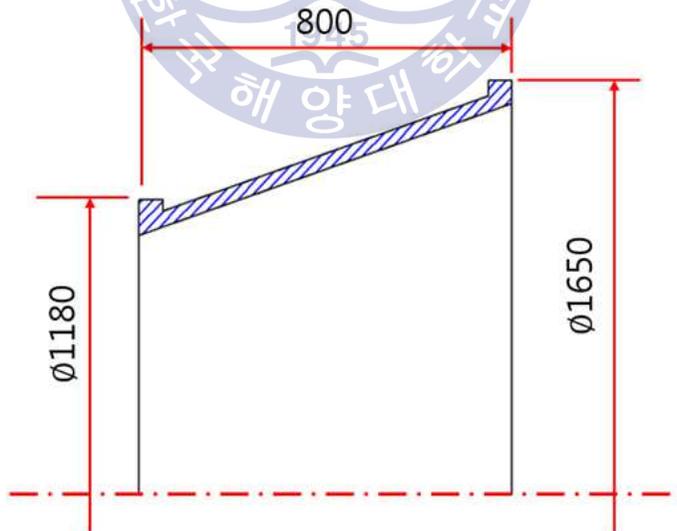


Fig. 2 Target dimensions of a cylinder

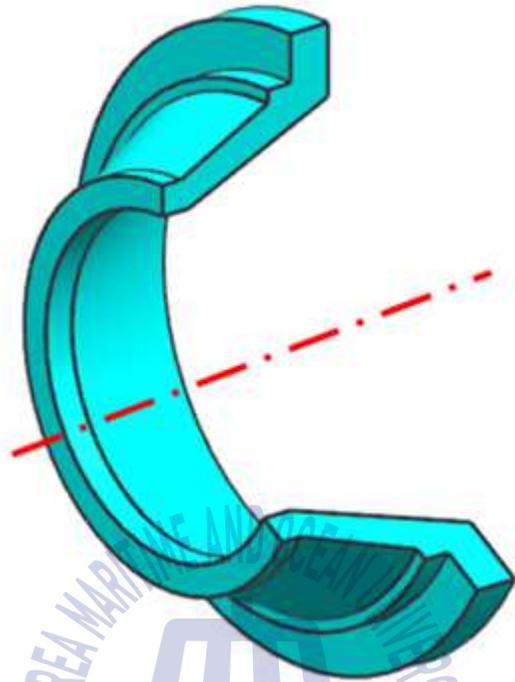


Fig. 3 Target shape of a flange

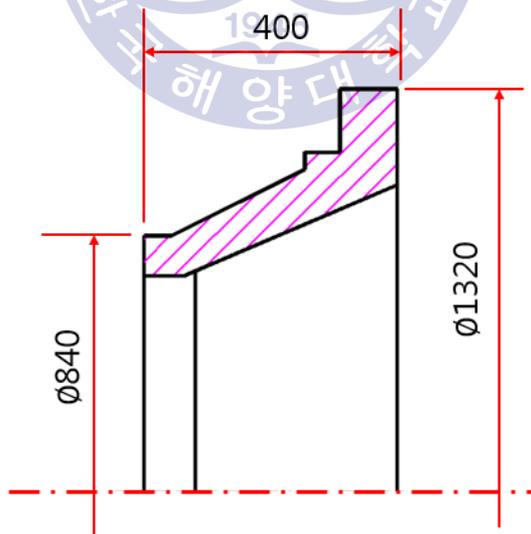


Fig. 4 Target dimensions of a flange

제 2 장 강소성 유한 요소 해석의 이론적 배경

유한요소법은 연속체를 여러 개의 적절한 크기의 유한요소(finite element)로 나누어서 각 절점의 값들을 변수로 하는 미분 방정식을 변분원리(variational principle), 가중잔류법(method of weighted residual), 에너지 균형법(energy balance approach) 등을 이용하여 세우고 이것을 이용하여 유한요소방정식을 만들어 각 절점에서의 변수 값들을 구하는 방법이다. [16, 17]

유한요소법을 이용한 금속성형 방법에는 탄소성 해석(elastic-plastic analysis), 강소성 해석(rigid-plastic analysis), 유효 변형률 속도를 고려하여 열간 가공 해석에 이용할 수 있는 점소성 해석(viscoplastic analysis) 등이 있는데 탄소성 해법은 비교적 정확한 응력과 변형양상을 얻을 수 있지만 매 변형단계마다 요소가 항복 상태에 도달하였는지 검사해야 하며 비정상상태의 문제 해석시 변형증분량을 한꺼번에 많이 늘릴 수 없는 단점이 있다. 그래서 탄성 변형량이 소성 변형량보다 무시 할 만큼의 단조나 압출과 같은 소성문제에는 강소성 해법이 쓰인다. 이 방법은 벌크 성형 해석에 있어서 뛰어난 해석 정확도와 계산 효율이 우수한 것으로 알려져 있다.

소재가 열간 변형을 거치는 동안 온도, 변형률, 변형률 속도, 유지 시간 등의 공정 변수들이 미세조직의 변화에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고 최적의 공정 변수값을 찾기 위해서는 수치 해석적인 방법이 가장 효율적이며 기계적 변수들과 미세조직과의 상관관계를 파악하기 위해 강소성 유한요소법의 이용이 요구된다.

강소성 유한 요소의 수식화에서는 다음과 같은 가정을 따른다. [19, 20]

- (1) 재료는 강소성체이고, 탄성 변형은 무시한다.
- (2) 재료는 등방성이다.
- (3) 재료는 변형동안 체적 일정조건을 따른다.
- (4) 재료는 Von Mises 항복조건을 따른다.
- (5) 다이는 강체이며, 변형하지 않는다.

체적이 V 인 연속체는 접촉력 T_i 가 정의된 표면 S_f 와 속도 v 가 정의된 표면 S_v 로 구성되어 있다고 생각할 수 있다. 이 물체가 준정적상태에서 미소변형(infinitesimal deformation)을 일으키고 관성의 효과와 체적력을 무시하면 실제 응력과 속도장은 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

(i) 평형 방정식 (equilibrium equation)

$$\sigma_{ij,i} = 0 \quad (1)$$

(ii) 적합 방정식 (compatibility equation)

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\nu_{i,j} + \nu_{j,i}) \quad (2)$$

$$\text{비압축성 조건 : } \dot{\epsilon}_{i,i} = \dot{\epsilon}_{\nu} = 0 \quad (3)$$

(iii) 구성 방정식 (constitutive equation)

$$\sigma_{ij}' = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (4)$$

여기서

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}'} \quad (5)$$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (6)$$

σ_{ij}' 은 편차 응력이며, $\bar{\sigma}$ 와 $\dot{\bar{\epsilon}}$ 은 유효 응력과 유효 변형률 속도이다.

(iv) 경계조건 (boundary condition)

$$\sigma_{ij} n_j = T_i \quad \text{on } S_f \quad (7)$$

$$\nu_i = U_i \quad \text{on } S_v \quad (8)$$

여기서 n_j 는 표면 S_f 에서의 단위 수직벡터이다.

평형 방정식 (1)은 일정 체적에 대한 임의 속도 변분량과 함께 만족된다. 그래서 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{\nu} \sigma_{ij,i} \delta \nu_j dV = 0 \quad (9)$$

적합 방정식 (2)과 경계조건 (7)에 의해 가상일의 원리를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{\nu} \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_{S_F} T_i \delta \nu_i dS = 0 \quad (10)$$

여기서 응력은 편차 응력 σ_{ij}' 과 정수압 응력 σ_m 을 포함하고, 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}' + \delta_{ij} \sigma_m \quad (11)$$

식 (10)에 식 (11)을 대입하면 아래와 같다.

$$\int_{\nu} \sigma_{ij}' \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_{\nu} \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_{\nu} dV - \int_{S_F} T_i \delta \nu_i dS = 0 \quad (12)$$

물체가 변형한 후 변형 전과 체적이 같아야 한다. 이런 양상으로 거동하는 것을 비압축성이라 한다. 비압축성 조건을 고려하기 위해서 벌칙함수를 도입하였다.

식 (4)와 식 (6)에서

$$\sigma_{ij}' \delta \dot{\epsilon}_{ij} = \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon}_{ij} \quad (13)$$

으로 표현할 수 있고, 벌칙 상수를 $K = \frac{\sigma_m}{\epsilon_{\nu}}$ 로 표현하며 식 (13)과 K를 식 (12)에 대입하면 아래와 같다.

$$\delta \pi = \int_{\nu} \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + K \int_{\nu} \dot{\epsilon}_{\nu} \delta \dot{\epsilon}_{\nu} dV - \int_{S_F} T_i \delta \nu_i dS = 0 \quad (14)$$

벌칙 상수 K는 아주 큰 수이다.

식 (14)로써 벌칙함수를 사용하여 비압축성 구속조건을 범함수에 고려하였다.

금형과 소재간의 마찰을 고려하기 위하여 다음 식을 적용하였다.

$$f = -\frac{2}{\pi} m k \tan^{-1} \frac{|\nu_s|}{u_0} \quad (15)$$

여기서 m 은 마찰 상수, k 는 전단응력, u_0 는 $|\nu_s|$ 와 비교하여 매우 작은 양의 상수이고, ν_s 는 금형에 대한 소재의 상대 속도이며, t 는 ν_s 방향으로의 단위벡터이며 다음과 같이 표현된다.

$$t = \frac{1}{\nu_s} [u_i + (\nu + \nu_D)j] \quad (16)$$

여기서 ν_D 는 금형의 속도이며 ν_s 는 크기로서 다음과 같다.

$$\nu_s = \sqrt{u^2 + (\nu + \nu_D)^2} \quad (17)$$



제 3 장 실린더 제품의 제작 공정

실린더 제품은 대형 실린더 형상 제작에 이점을 가진 멘드렐 공정을 적용하고 최종 제품의 형상을 고려하여 예비 성형체의 설계를 통하여 제작한다.

3.1 점진 단조 공정 설계

3.1.1 공정 설계

본 논문에서 다루는 실린더 형상의 제품을 제작하기 위해 자유 단조 공정 중 하나인 멘드렐 단조를 적용하고자 한다. 멘드렐 단조는 **Fig. 5**와 같이 멘드렐과 엔빌로 구성되어있는 열간 단조 공정이다. 소재 내경에 멘드렐을 삽입하고 엔빌로 단조하여 중공 실린더 형상의 직경을 증가시키고, 두께를 감소시켜 실린더를 제작할 수 있는 단조 공정이다. 단순한 형태의 엔빌을 이용하여 소재를 국부적으로 성형하고, 소재를 회전하며 소재 전체를 성형하게 된다. 그 후 압하 깊이를 증가시키며 성형과 회전을 반복하여 목표한 압하 깊이를 만족할 때까지 성형하여 제품을 생산하는 공정이다.

그러나 본 논문에서 다루는 제품 형상은 양단의 직경이 동일하지 않고 경사가 존재하기 때문에 멘드렐 단조를 이용하여 제품을 제작하기 위해서 예비 성형체의 설계가 필요하다. 최종 제품의 형상이 축대칭을 가진 사다리꼴 형상을 가지기 때문에 초기 예비 성형체 또한 축대칭을 가진 사다리꼴 형상으로 설계한다.

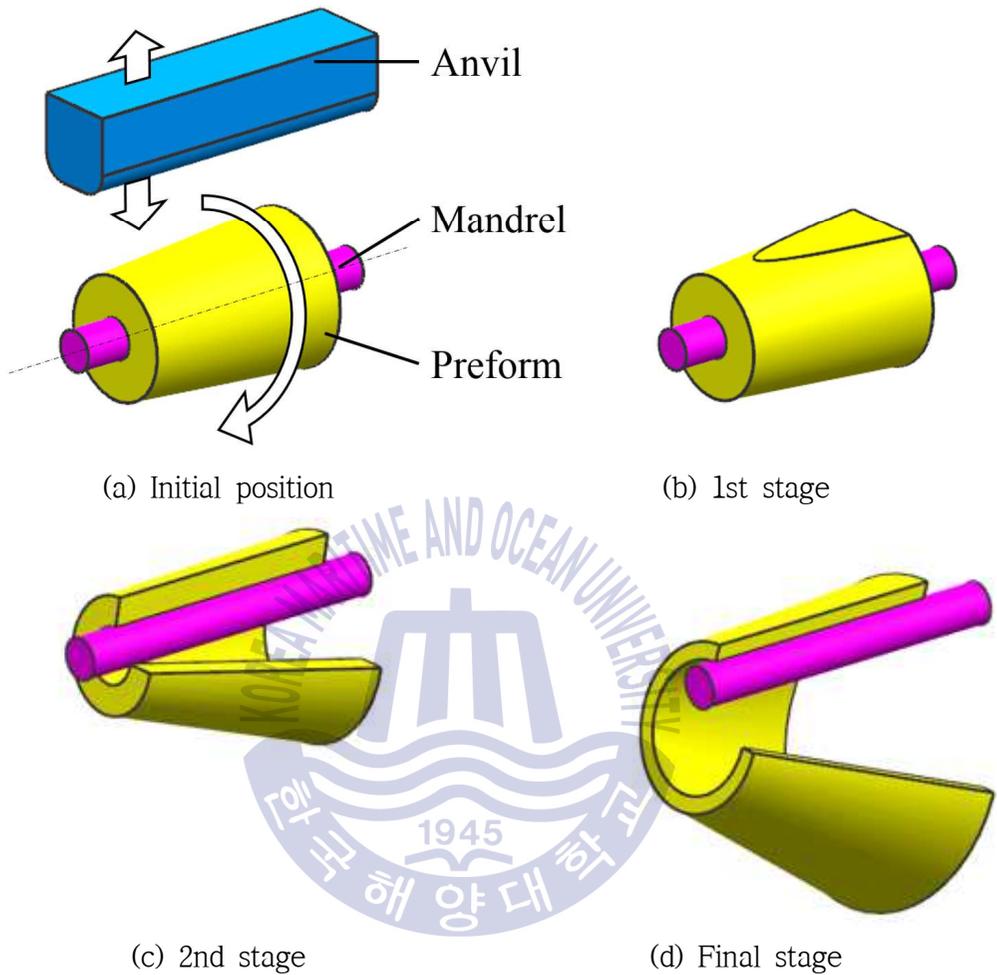


Fig. 5 Schematic diagram for cone shell manufacturing process

3.1.2 예비 성형체 설계

최종 제품의 형상을 고려하여 예비 성형체 또한 설계가 필요하다. 최종 제품 형상을 단순화 하여 단조 가능한 형상으로 수정하였다. 이때 단조 가능한 형상이란 본 제품의 성형에 사용될 멘드렐 단조를 고려하여 일정한 두께를 가진 형상으로 설계하여야 한다. 자유 단조 공정을 적용하므로 공정 완료시 소재 표면의 조도와 거칠기 등의 품질이 양호하지 않을 것으로 예상되어 길이방향과 두께방향으로 단조 가공 여유를 적용하여 단조 목표 형상을 설계하였다.

예비 성형체 양단부의 내경은 멘드렐이 삽입 될 수 있도록 멘드렐의 지름을 고려하여 설정하였다. 예비 성형체 각 단부의 외경은 단조 목표 형상의 양 단부의 체적(면적)과 동일하게 되도록 계산하여 적용하였다.

예비 성형체의 주요 치수 및 설계 방법을 Fig. 6, 7에 도시하였다. Fig. 6의 (a)는 단조 목표 형상으로 최종 목표 형상을 단순화 한 것이며, (b)는 설계한 예비 성형체 형상의 단면을 나타낸다. Fig. 7의 (a), (b)는 각각 단조 목표 형상과 설계한 예비 성형체의 각 단면으로 A'과 B'으로부터 성형되어 A와 B의 형상을 가지게 되며, 동일한 면적을 갖는다. D_S 는 소단부의 지름을, D_L 은 대단부의 지름을 나타내며, t_s 는 두께를, H_E 는 축방향 길이를 나타낸다. 멘드렐의 지름 즉, 예비 성형체의 내경은 정해져 있기 때문에 이를 이용하여 예비 성형체의 양단 외경을 각각 산출하였다.

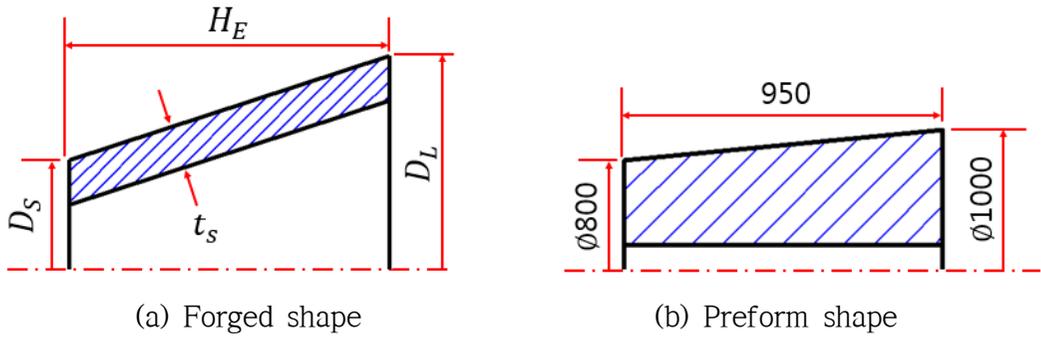


Fig. 6 Shapes of product and preform

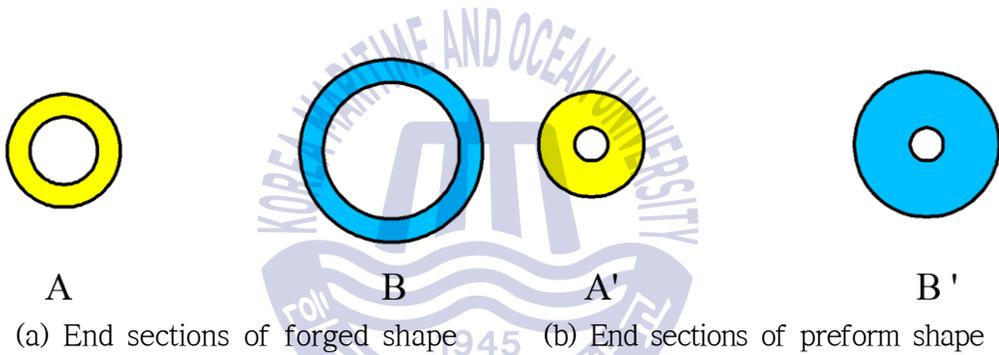
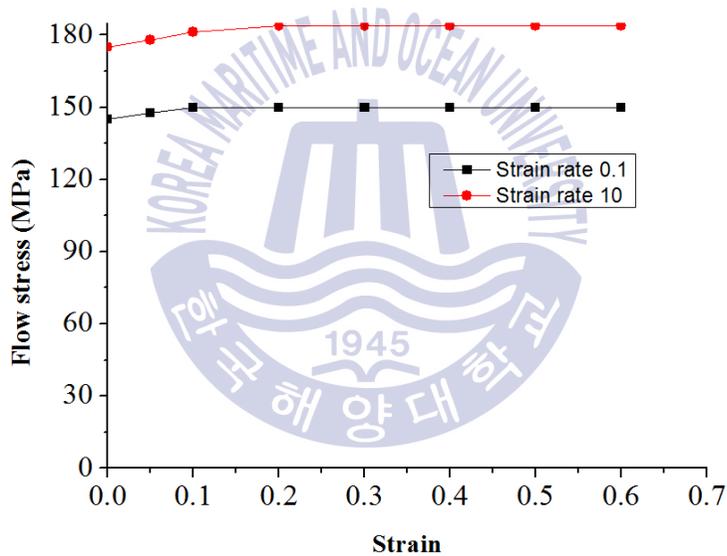


Fig. 7 Preform design using equipment end sections

3.2 점진 단조 공정 해석

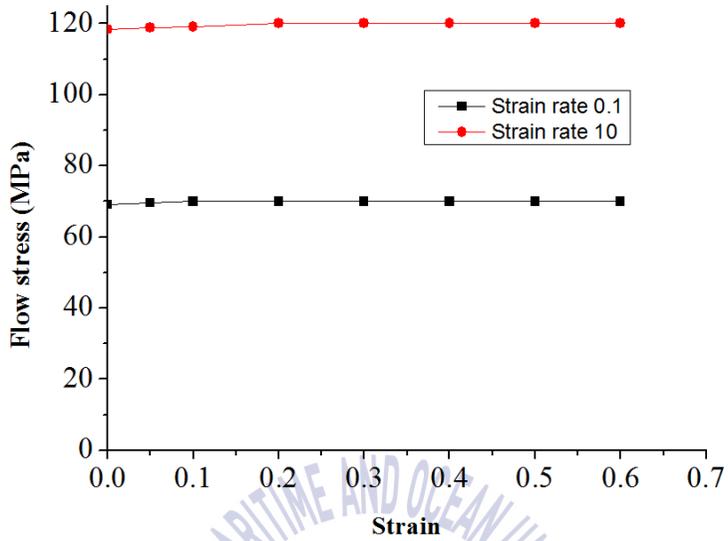
3.2.1 예비 성형체 물성치

본 제품은 열전도도가 우수하며 뛰어난 비강도를 가진 2000계열의 알루미늄 합금 중에서 AL-2014를 소재로 사용한다. 이러한 특성으로 인하여 차량, 항공기 부품, 철도 차량 등에 경량 소재로 사용되고 있다. 온도별 유동응력 그래프를 Fig. 8에 나타내었고, AL-2014의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었으며 기계적, 열적 특성을 Table 2에 나타내었으며 정리하였다.

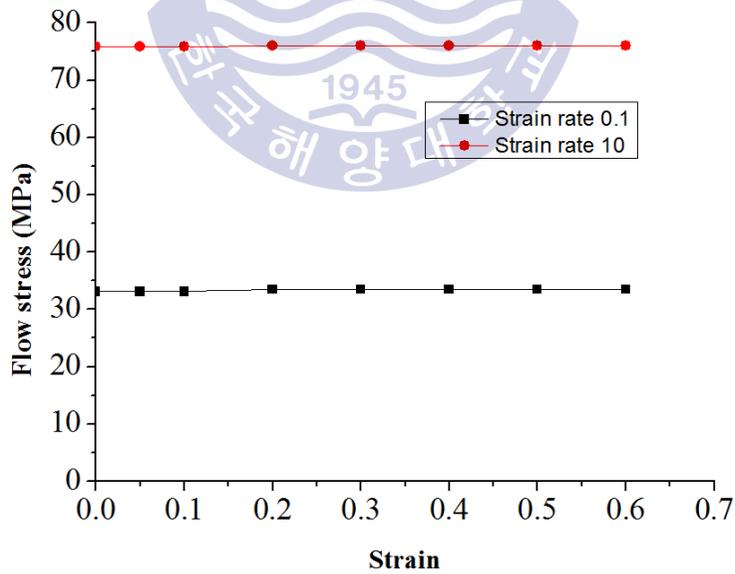


(a) Flow-stress curve of AL-2014 at 260°C

Fig. 8 Flow-stress curve of AL-2014 at each temperatures (continued)



(b) Flow-stress curve of AL-2014 at 371°C



(c) Flow-stress curve of AL-2014 at 482°C

Fig. 8 Flow-stress curve of AL-2014 at each temperatures

Table 1 Chemical compositions of AL-2014

Element	Compositions (wt. %)
Si	0.5-1.2
Fe	0.7
Cu	3.9-5.0
Mn	0.4-1.2
Mg	0.2-0.8
Cr	0.1
Zn	0.25

Table 2 Mechanical and thermal property of AL-2014

Tensile strength (MPa)	469
Yield strength (MPa)	414
Shear strength (MPa)	285
Thermal conductivity W/mK	180

3.2.2 공정 조건

멘드렐 단조는 특정한 구속 없이 멘드렐에 소재가 걸쳐진 상태로 공정이 진행된다. 멘드렐은 시제품을 제작 하게 될 공장에서 보유중인 장비를 고려하여 적용하였으며, 엔빌의 크기는 멘드렐의 지름과 모서리 블랜드를 고려하여 설계하였다. 실제 제품을 제작할 공장의 운용 조건을 반영하여 30 mm/s로 엔빌의 압하 속도를 설정하였고, 초기 소재온도는 400°C, 금형 온도는 300°C, 주변 온도는 20°C로 설정하였다. 예비 성형체를 단조 형상까지 단조하는데 필요한 압하 깊이는 총 210 mm 이며 여러번 나누어 목표 압하깊이 까지 성형하기로 설정하였다. **Table 3, 4**는 각각 경계 조건 및 접촉관계를 나타낸다.

Table 3 Boundary conditions of mandrel forging process

Object type	Workpiece : Plastic Anvil, Mandrel : Rigid
Initial temperature of object	Workpiece : 400°C Anvil, Mandrel : 150°C
Anvil speed	30 mm/s
Pressing depth	210 mm

Table 4 Relationships of each objects

Objects relationship	Friction factor	Heat transfer coefficient
Preform-Anvil	0.7	5 W/m ² °C
Preform-Mandrel		

멘드렐 단조에서 1회 압하 후 다음 단조를 위한 소재의 회전각은 소재와 엔빌의 접촉 면적을 기준으로 하여 20~30% 가량 겹쳐지도록 설정하였다. 이는 엔빌과 소재의 접촉 면적이 겹쳐지기 때문에 소재의 외관이 각지지 않고 보다 매끄러운 원형에 가깝게 성형

되게 하기 위함이다. 또한 공정이 초반에서 후반으로 진행 될수록 소재의 내·외경이 점차 증가하기 때문에 겹쳐지는 면적이 20~30%로 유지될 수 있도록 하였다. 멘드렐과 소재는 접촉하여 회전하기 때문에 회전하게 되는 길이는 같지만, 멘드렐의 지름은 일정한데 반하여, 소재는 내경이 점차 증가하기 때문에 접촉 면적을 유지시키기 위하여 공정이 진행 될수록 멘드렐의 회전각은 점차 증가하게 된다.

공정 진행 중 압하량이 일정량을 초과하게 되면 소재의 내경이 국부적으로 변형되어 다음 단조를 위한 회전시 소재가 다시 제자리로 회전하여 돌아오는 현상이 발생하게 된다. 이 현상을 방지하기 위해 초동해석을 수행하여 1회 압하 깊이를 20 mm로 설정하였다. 일정한 압하 깊이로 소재를 회전해가며 1회전 단조하며, 압하 깊이는 20 mm씩 증가하여 총 11회전으로 공정을 구성하였다.



3.2.3 유한 요소 해석 결과

전술한 공정 조건을 적용하여 상용 유한요소해석코드인 DEFORM-3D V.11을 이용하여 해석을 수행하였다.[18] 공정이 진행되는 동안의 변형 양상을 Fig. 9에서 보이고 있으며, 주요 치수를 Table 5에 나타내어 Fig. 10의 단조 목표 형상 치수와 확인하였다.

외경이 큰 대단부는 공정 초기부터 엔빌과 접촉하여 성형된다. 초기에 예비 성형체와 엔빌의 접촉 면적이 작고, 접촉 면적에서 길이방향의 접촉 길이가 원주방향 접촉 길이보다 짧기 때문에 단조 시 소재가 길이방향으로 유동하는 것을 확인하였다. 공정이 진행되면서 소재와 엔빌의 접촉 면적이 점차 증가하게 되고, 길이방향의 접촉 길이가 원주방향의 접촉 길이보다 길어지게 되면 소재가 원주방향으로 유동하였다. 이 현상으로 대단부가 단조 목표 형상을 만족하지 못하였다. 이로 인하여 대단부의 형상으로 성형 되어야할 체적이 길이 방향으로 성형되어 단조 목표 형상의 길이방향 치수를 초과하게 성형 되었다. 단조 목표 형상을 초과한 길이방향 치수와 미달하게 된 대단부를 보상하기 위해서 예비 성형체의 설계가 보완되어야 할 것이다. 공정 초기에 원주 방향 접촉 길이보다 길이 방향 접촉 길이가 보다 길어지기 위해서 대단부의 모서리 부분을 엔빌과 평행하게 수정할 필요가 있다.

외경이 작은 소단부는 예비 성형체의 양단부 외경의 차이에 의한 기울기로 인하여 엔빌이 소단부에 접촉하기 시작할 때 성형되기 시작하였다. 예비 성형체의 소단부와 엔빌이 접촉하는 시점의 압하 깊이가 길이방향 변형을 발생시키지 않고 원주방향 변형을 일으키기에 충분한 엔빌과 예비 성형체의 접촉면적을 갖는다.

공정이 진행되는 동안의 성형 하중을 Fig. 11에 나타내었다. 공정 초기에는 약 400 ton의 비교적 적은 성형 하중으로 진행되지만 공정이 진행 될수록 점차 증가하여 최대 약 2,700 ton 의 성형 하중이 요구되어진다. 이후에도 공정이 종료 될 때까지 최대 성형 하중이 유지된다. 이는 엔빌과 소재와의 접촉 면적이 공정 후반으로 갈수록 점차 넓어지게 되고, 접촉 면적이 넓어지는데 한계가 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 시제품을 제작할 공장은 단조 하중이 3,000 ton인 단조 프레스를 보유하고 있기에 공장에서 수용할 수 있다.

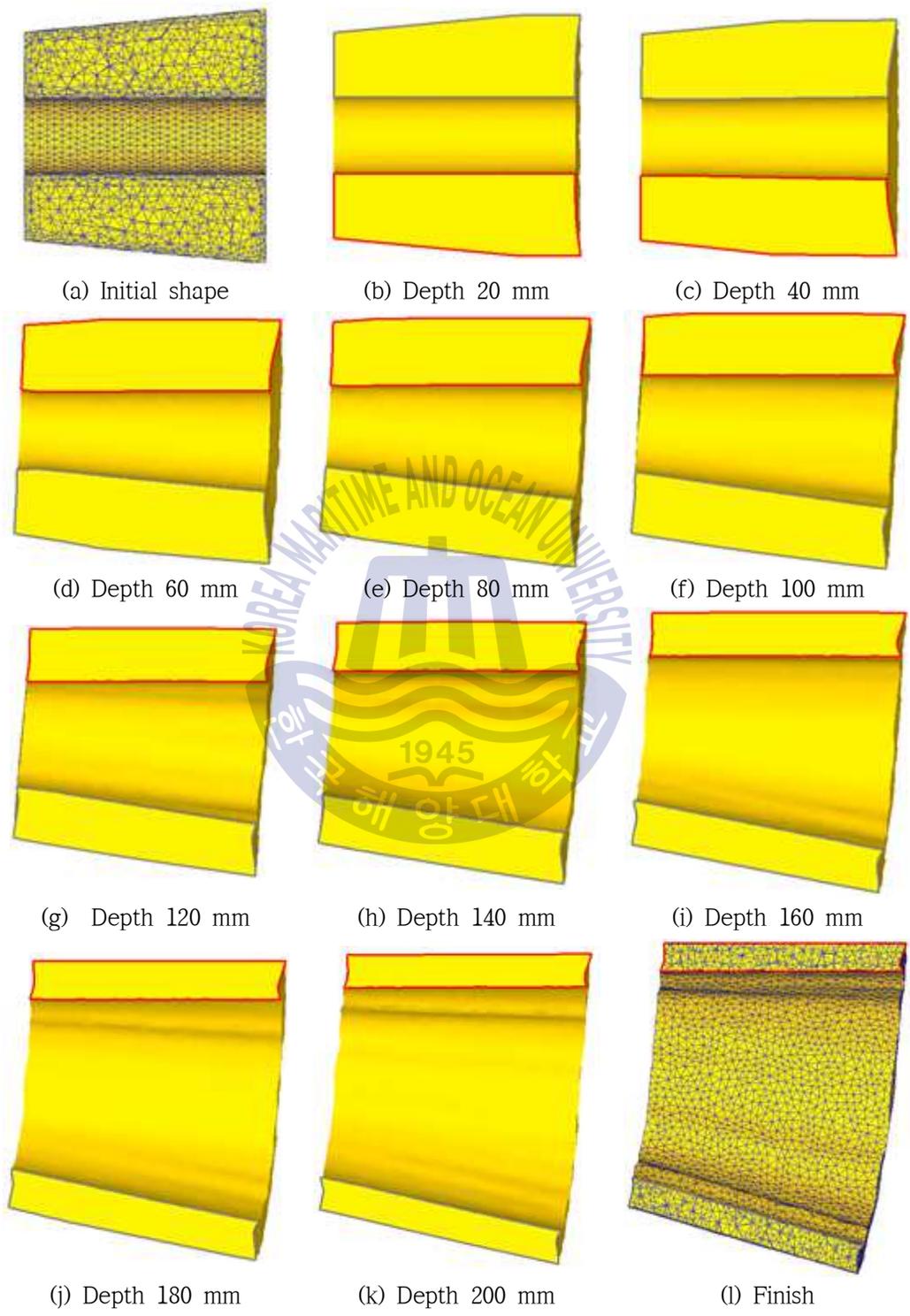


Fig. 9 Simulation results of cone shell

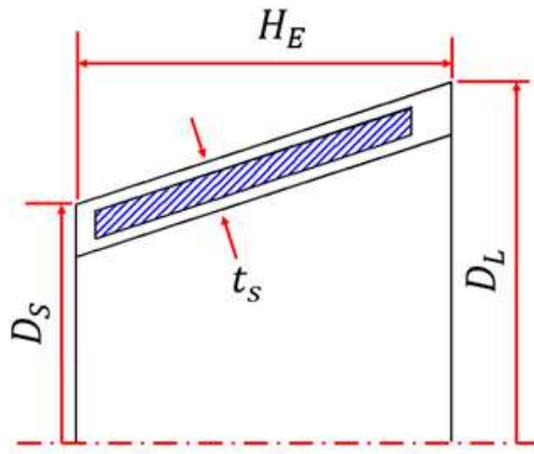


Fig. 10 Main dimensions of cone shell

Table 5 Main dimensions of cone shell by simulation

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

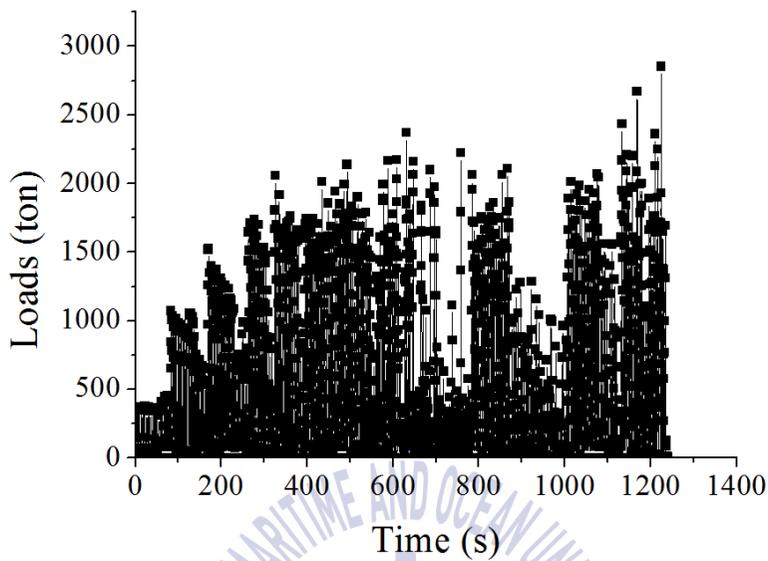


Fig. 11 Forging loads of mandrel forging process

해석을 통하여 대단부의 지름 확장에 사용되어야 할 체적이 길이방향으로 유동하여 단조 목표 형상을 확보하지 못하는 것을 확인하였다. 따라서 이를 보완하기 위하여 예비 성형체 설계에 수정이 필요함을 확인하였다. 예비 성형체의 소단부는 단조 목표 형상을 확보하였으나, 대단부는 목표형상에 미치지 못하였고 길이방향은 초과하였다. 그러므로 대단부에 대하여 길이방향으로 성형된 체적을 보상하기 위하여 대단부 체적을 증가시킬 뿐만 아니라 공정 초기에 예비 성형체와 엔빌의 접촉 면적을 증가하기 위하여 대단부의 모서리를 엔빌과 평행하게 수정하는 것이 바람직하다고 판단 된다.

3.2.4 대단부의 체적을 증가한 해석 결과

예비 성형체 설계를 대단부의 체적을 보상하고자 Fig. 12와 같이 수정하였다. 이전의 공정과 동일한 조건으로 해석을 수행하였다. 공정 중의 변형 양상을 Fig. 13에 나타내었으며 Table 6에 주요 치수와 목표치를 비교하였다. 단조 하중은 Fig. 14와 같이 예비 성형체에 평형부가 없는 해석과 유사한 결과가 확인되었다.

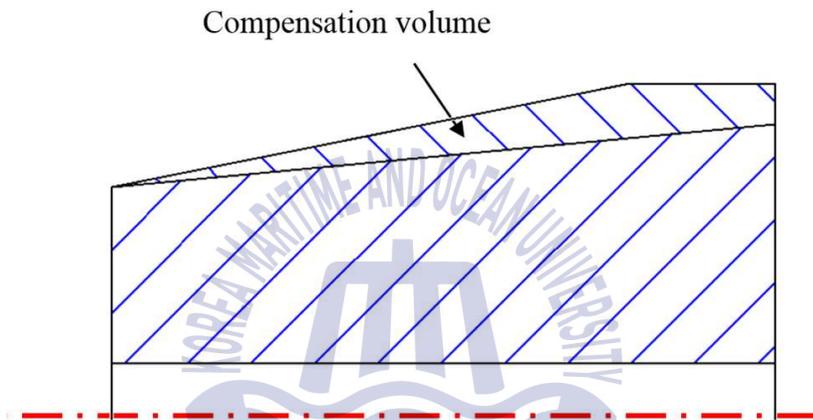


Fig. 12 Compensation volume added on preform



Fig. 13 Simulation results of cone shell

Table 6 Main dimensions of cone shell by simulation

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

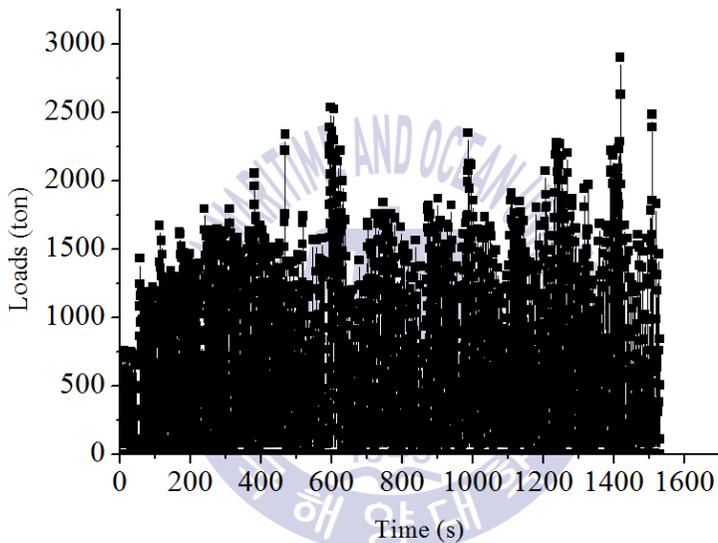


Fig. 14 Forging loads of mandrel forging process

대단부의 체적을 보완한 예비 성형체는 공정 초기 엔빌과 평행하게 접촉하여 길이방향 변형이 현저히 감소하였고, 이로 인하여 대단부의 체적이 직경을 확장하는 방향으로 이동하는 것을 확인하였다. 목표 치수에 대해 오차가 존재하지만 문제없이 제품을 가공할 수 있는 여유를 확보 하였다.

3.3 납 실험을 통한 성형 가능성 검증

설계한 예비 성형체가 점진 단조로 목표 형상을 확보 할 수 있는지 유한 요소 해석을 통하여 검증하였다. 그러나 실제로 제품을 제작하는 것은 해석 결과와 다른 양상을 보일 수 있으므로 축소 실험을 선행 하는 것이 바람직하다. 인장 시험기를 이용하여 1/10 축소 비율의 납 실험을 진행 하였다. 인장 시험기와 설계된 예비 성형체 1/10 비율의 납 소재, 멘드렐과 지지대를 사용하여 납 실험을 진행 하였다. 멘드렐과 지지대는 일반 구조용 소재인 SCM440을 사용하였다.

납 실험의 진행 양상을 Fig. 15-18에 나타내었으며 실험 결과를 Table 7에 정리하였다. 전반적인 실험 결과는 해석 결과와 동일하게 길이 방향 치수가 증가하고 대단부의 직경이 목표한 단조 형상보다 작게 성형되었다. 그러나 소단부의 직경은 해석 결과와 달리 목표 단조 형상보다 작게 성형 된 것을 확인 하였다. 이는 해석 조건과 실제 실험에서 멘드렐의 거동이 차이가 났기 때문이라고 판단되어 진다. 해석 조건은 멘드렐이 강체로 인식되어 엔빌과의 간격이 공정을 진행하는 동안 평행하게 유지 되었지만, 납 실험에서는 단조 하중을 받는 동안 멘드렐에서 굽힘이 발견되었다. 이로 인하여 소단부에서 직경을 확장해야하는 체적이 멘드렐의 굽힘에 의해 소재의 중심부에 잔류하였을 것으로 예상 된다.

Table 7 Main dimensions of cone shell experiment

Position	Target (mm)	Pb test (mm)	Error (%)
t_s	12	12	0.0
H_E	100	105	5.0
D_S	120	116	-3.3
D_L	180	160	-11

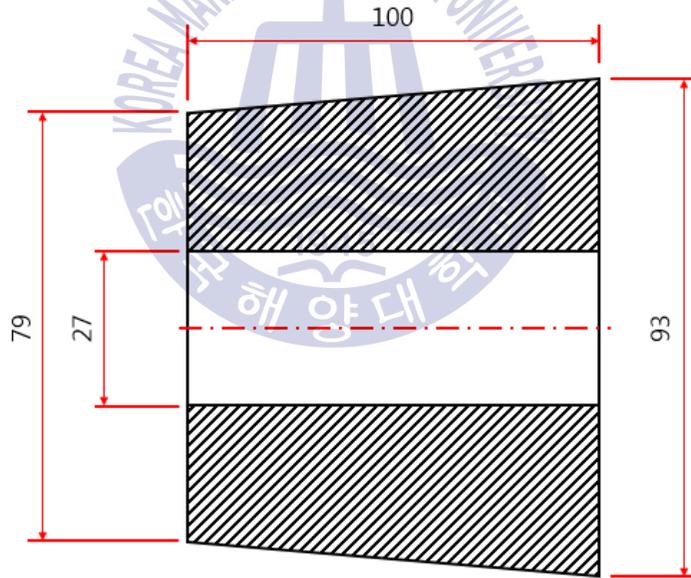


Fig. 15 Position setup for lead test



Fig. 16 Deformed shape of 1st cycle forging



Fig. 17 Deformed shape of mid stage



Fig. 18 Deformed shape of final stage

3.4 시제품 제작

3.4.1 시제품 제작 설비

유한 요소 해석과 납 실험을 통하여 설계된 예비 성형체와 공정을 바탕으로 실제 사이즈 시제품을 제작하였다. 제작에 사용된 장비 및 예비 성형체 형상은 **Fig. 19-20**과 같이 3,000 ton 단조 프레스와 예비 성형체에 삽입하는 멘드렐, 멘드렐을 지지하는 지지대로 구성 되어 있다. 예비 성형체의 이동 및 멘드렐의 회전은 현장에서 보유한 지게차를 이용하여 공정을 진행 하였다.

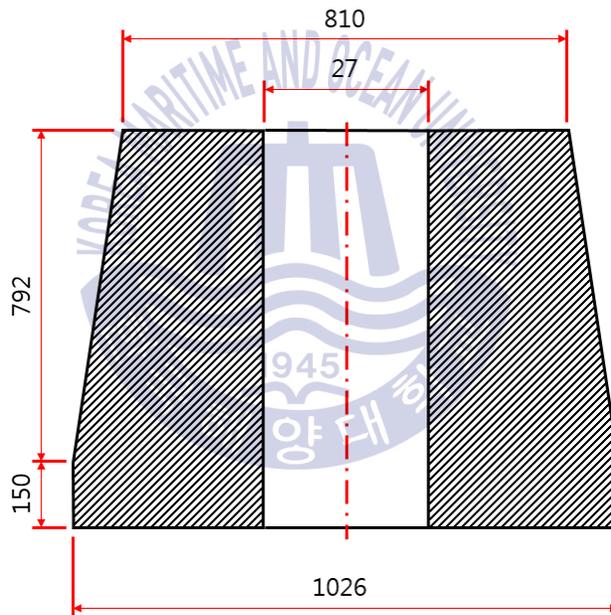


Fig. 19 Preform shape of prototype

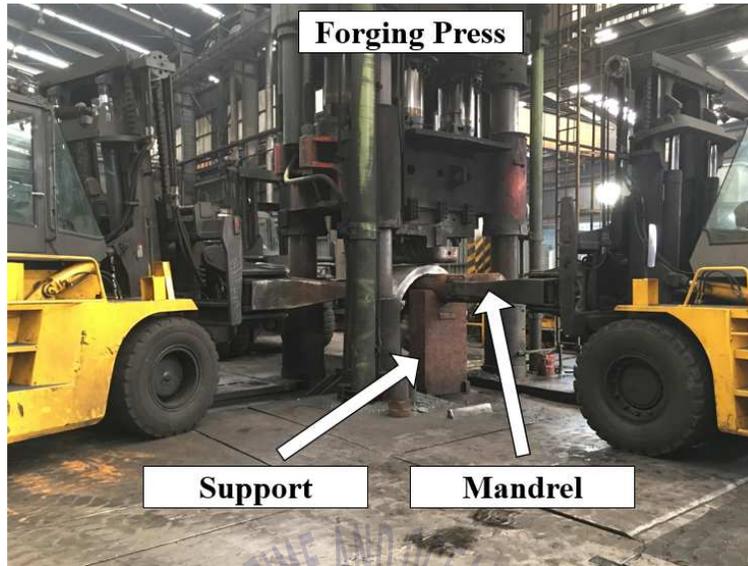
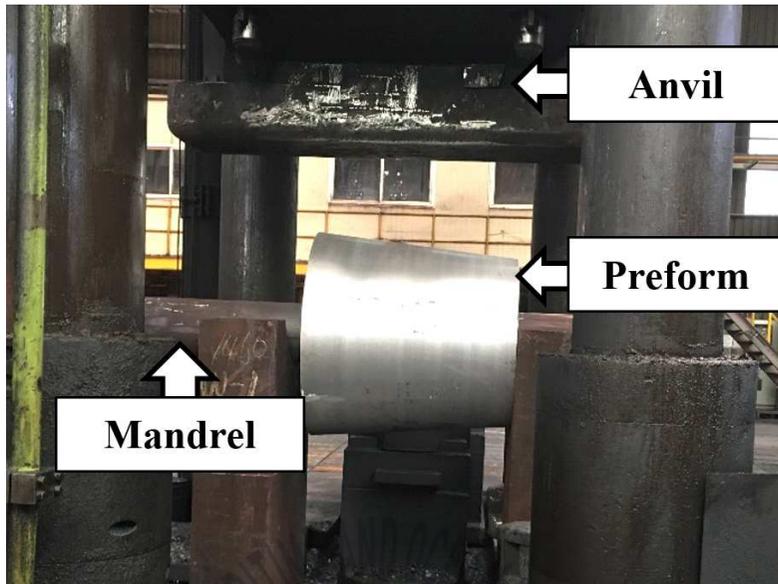


Fig. 20 Forging press equipment

3.4.2 시제품 제작

시뮬레이션에 적용한 공정에 비하여 실제 시제품 제작은 소재의 이동 및 셋업, 단조 공정에 소요되는 시간이 길었기 때문에 냉각되어 공정 중간 재가열하며 공정을 진행하였다. 시제품 제작 과정을 Fig. 21에 나타내었다. (a)는 소재와 각 공구의 위치를 나타내고 있고, (b)는 공정 중간의 형상을 나타내었으며 (c)와 (d)는 공정이 완료된 시점의 소재의 형상이고 (e)에서 완료 형상을 도면으로 나타내고 최종 목표 형상을 겹쳐서 확보한 가공 여유를 확인 할 수 있다. 단조 완료 후 측정된 주요 치수를 Table 8에 정리하여 나타내었다. 시뮬레이션과 납 실험으로부터 확인된 대단부 직경의 치수 미달을 보완한 예비 성형체는 시제품의 두께가 증가하였으나 소단부와 대단부는 목표한 치수를 잘 만족하였다.



(a) Initial position



(b) Mid stage

Fig. 21 Manufacturing cone shell prototype (continued)

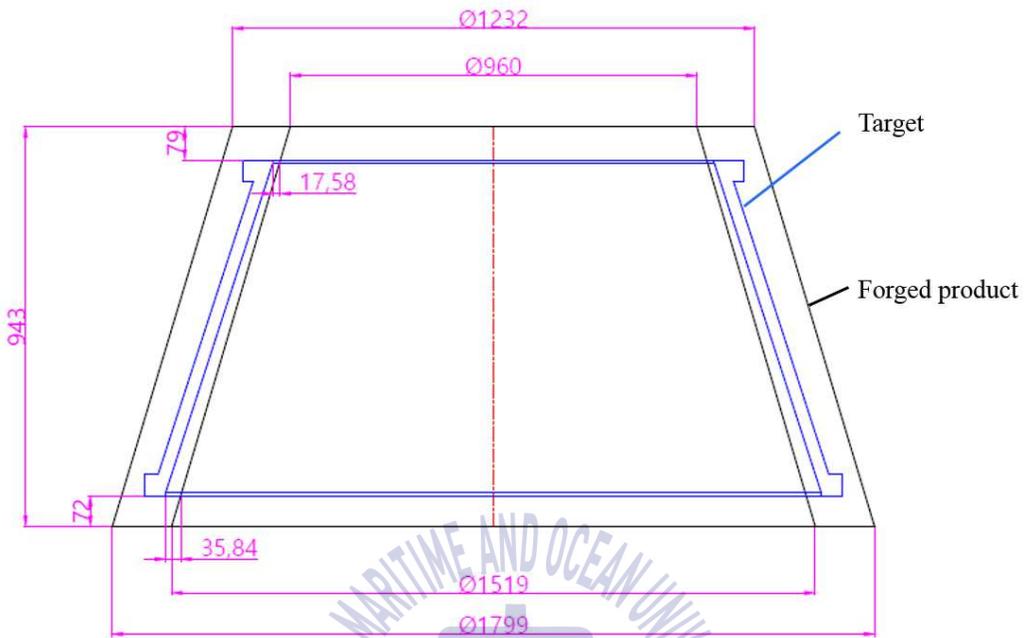


(c) Side view of cone shell final shape



(d) Bottom view of cone shell final shape

Fig. 21 Manufacturing cone shell prototype (continued)



(e) Dimensions of cone shell final shape

Fig. 21 Manufacturing cone shell prototype

Table 8 Main dimensions of cone shell by prototype

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

제 4 장 플랜지 제품의 제작 공정

플랜지 제품은 최종 제품의 형상은 Fig. 22과 같이 앞에서 다루었던 실린더 형상과 상이하므로 멘드렐 단조를 적용할 경우 목표형상을 얻기 힘들고 소재 낭비도 상당할 것으로 예상된다. 이에 따라, 제작 현장의 운용 장비 등의 환경을 고려하여 회전-다단 단조 공정을 적용하였다.

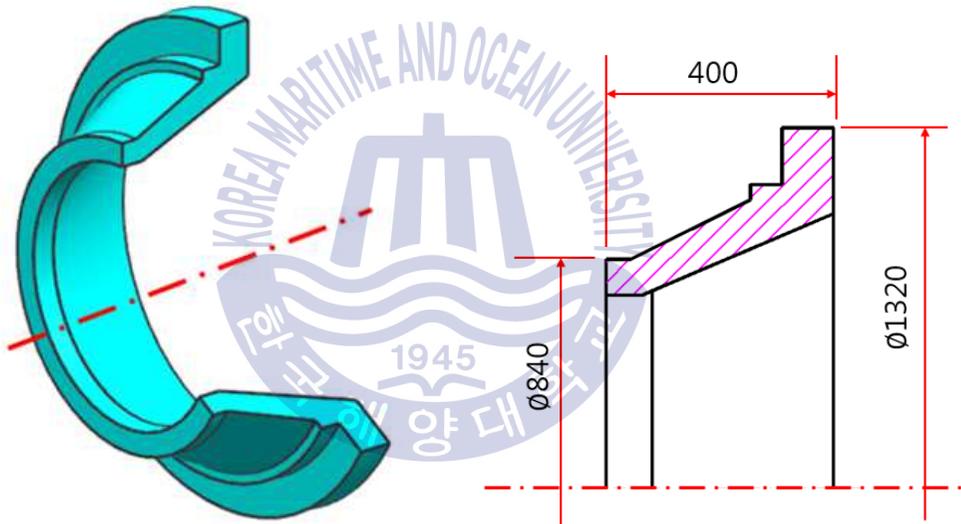


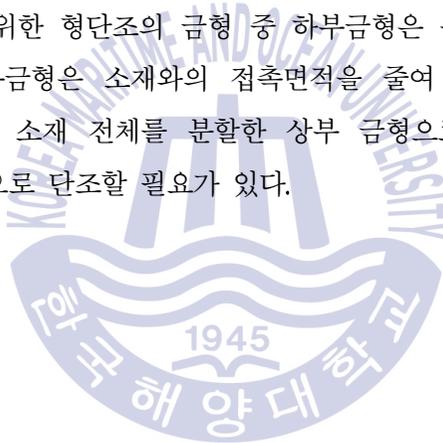
Fig. 22 Target shape and dimensions of flange

4.1 회전-다단 단조 공정 설계

4.1.1 공정 설계

대형 플랜지 형상의 제품을 제작하는데 있어서 형단조는 정확도 측면에서 효과적이다. 그러나 형단조를 적용할 경우 요구되는 단조 하중은 10,000 ton을 상회한다. 제작 현장 설비는 약 3,000 ton까지 수용할 수 있기에 단조 하중의 감소가 요구된다. 단조 하중을 감소하고자 회전-다단 단조 공정을 적용하였다. 회전-다단 단조의 개략도를 Fig. 23에 나타내었다. 회전-다단 단조는 성형 하중을 감소할 수 있으며, 국부적인 변형을 반복하여 전체를 성형하는데 있어서 강점이 있는 단조 공정이다. [21]

본 제품을 성형하기 위한 형단조의 금형 중 하부금형은 유지한 상태로 상부금형을 분할하였다. 분할한 상부금형은 소재와의 접촉면적을 줄여 단조 하중을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 다만 소재 전체를 분할한 상부 금형으로 성형하기 위해서 상부 금형을 회전하며 부분적으로 단조할 필요가 있다.



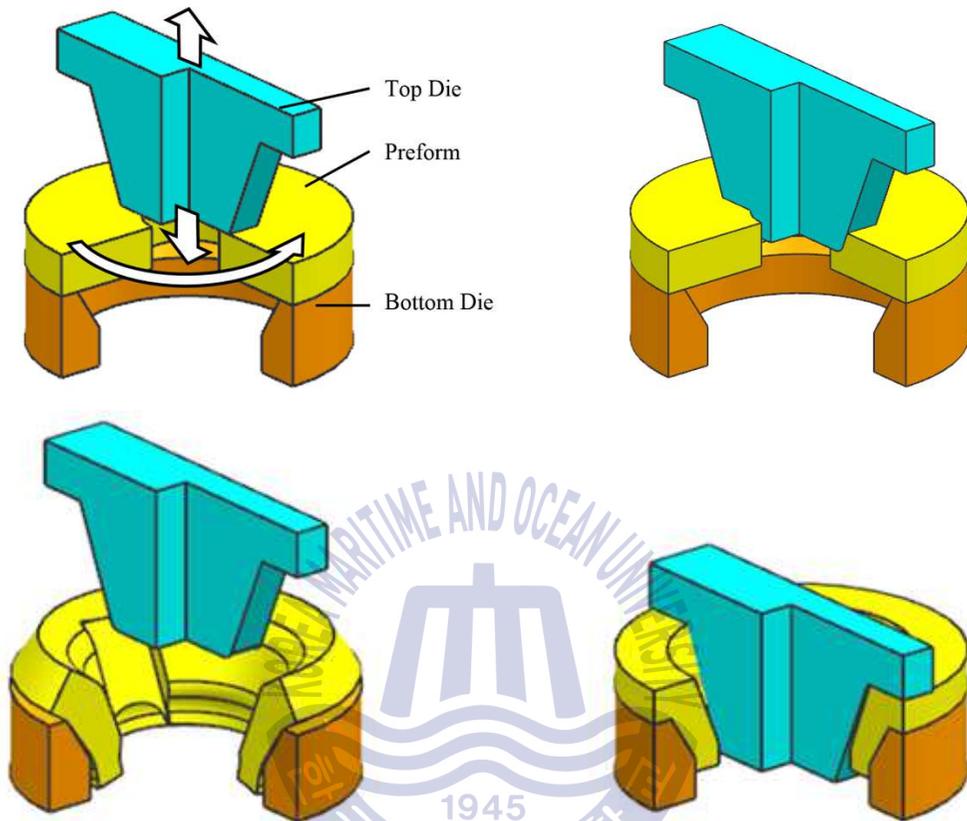


Fig. 23 Schematic diagram for rotating-multi step forging

4.1.2 예비 성형체 설계

소재 회수율과 가공 여유를 고려하여 체적을 설계하였다. 최종 목표 형상을 단조 가능한 형상으로 단순화 하고, 가공 여유를 적용하여 단조 목표 형상을 설계하였다. 그 후 단조 목표 형상을 기준으로 하여 플랜지 두께와 관부 두께의 성형비를 고려하여 Fig. 24와 같이 디스크 형상의 단순한 형태로 예비 성형체를 설계하였다.

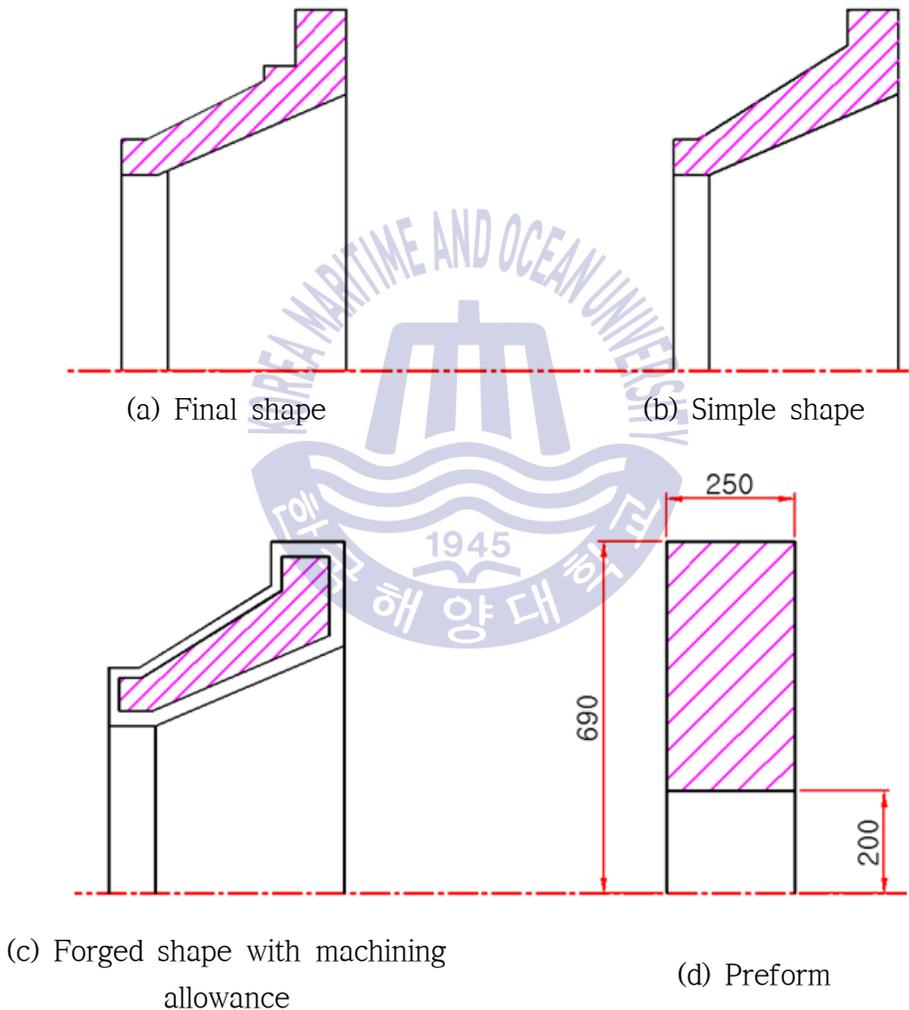


Fig. 24 Preform design for flange

4.2 회전-다단 단조 공정 해석

4.2.1 공정 조건 및 소재 물성치

회전-다단 단조는 별다른 구속 없이 하부금형에 소재가 얹어진 상태로 상부금형이 압하하며 진행된다. 하부금형 및 상부금형은 단조 목표 형상을 고려하여 설계되었으며 금형의 모서리 찌힘 방지를 위해 모따기 처리하였다. 실제 제품을 제작할 공장의 환경을 고려하여 상부금형의 압하 속도는 30 mm/s로 설정하였고, 초기 소재온도는 400℃, 금형온도는 150℃, 주변 온도는 20℃로 설정하였다. 총 압하 깊이는 305 mm이며, 50 mm씩 나누어 6번에 나누어 공정을 진행하였다. 한 번의 단조 이후 소재의 회전각은 예비 성형체와 상부금형의 접촉면적을 약 20% 겹치게 설정하였다. 해석 조건 및 접촉 관계를 Table 11, 12에 나타내었다. 플랜지 제작에 사용된 소재는 AL-7075이며 화학적 조성을 Table 9에 나타내었고 기계적, 열적 물성치를 Table 10에 정리하였다. 소재의 온도 별 변형율에 따른 응력을 Fig. 25-26에 나타내었다.

Table 9 Chemical compositions of AL-7075

Element	Compositions (wt. %)
Cu	1.20 - 2.0
Mg	2.1 - 2.9
Mn	0.3
Si	0.4
Fe	0.5
Cr	0.18 - 0.28
Zn	5.1 - 6.1
Ti	0.20

Table 10 Mechanical and thermal property of AL-2014

Tensile strength (MPa)	524
Yield strength (MPa)	462
Shear strength (MPa)	317
Thermal conductivity W/mK	130

Table 11 Boundary conditions of mandrel forging process

Object type	Workpiece : Plastic Anvil, Mandrel : Rigid
Initial temperature of object	Workpiece : 400°C Anvil, Mandrel : 150°C
Anvil speed	30 mm/s
Pressing depth	305 mm

Table 12 Relationships of each objects

Objects relationship	Friction factor	Heat transfer coefficient
Preform-Anvil	0.5	5 W/m ² °C
Preform-Mandrel		

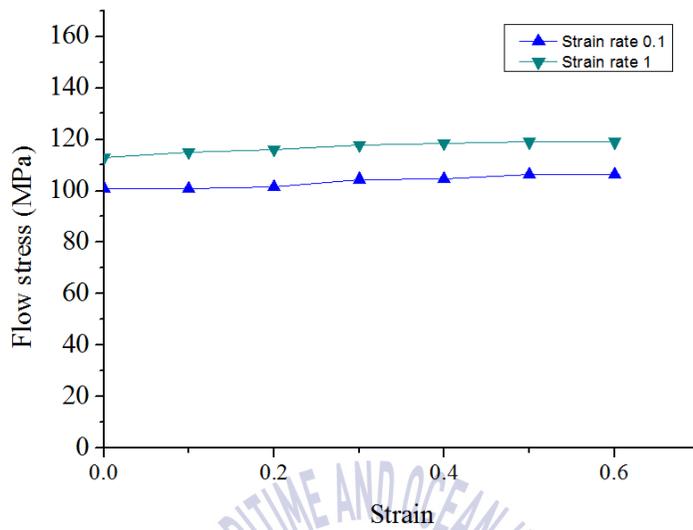


Fig. 25 Flow-stress curve of AL-7075 at 250°C

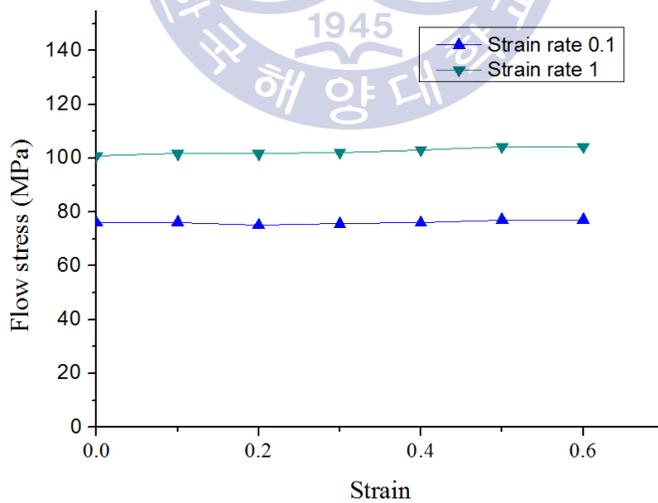


Fig. 26 Flow-stress curve of AL-7075 at 400°C

4.2.2 해석 결과

플랜지의 회전-다단 단조 공정 해석을 DEFORM-3D를 통해 수행하였다. 압하 깊이 별 성형 양상을 Fig. 27에서 보이고 있다. 주요 치수별 해석 결과를 Table 11에 정리하였으며 단조 목표 형상의 주요 치수를 Fig. 28에 나타내었다. 압하 깊이 100 mm부터 시작된 상부금형의 국부적인 변형이 공정 완료 시점까지 존재하게 되어 Fig. 27의 (h)와 같이 파이프 부의 치수 확보가 불가능하였다.

단조 하중은 Fig. 29에 나타난 바와 같이 공정 후반에 급격히 증가함을 보이며 이는 예비 성형체와 상부금형의 접촉 면적에 기인한 것으로 보인다. 공정 후반에 목표하중인 3,000 ton보다 약 10% 가량 초과하는데 이는 압하 깊이를 감소시키거나 상부금형의 회전각 등을 조절하여 현장에서 수용 가능할 것이다.

공정 초반의 국부적인 성형을 방지하기 위하여 공정을 수정할 필요가 있다. 단조 목표 형상과 동일한 기울기를 가진 콘 금형(cone die)을 이용하여 공정 초반에 디스크 형상을 가진 예비 성형체를 굽힘 성형하고 상부금형으로 교체하여 공정을 이어나가는 방식으로 수정한다. 콘 금형을 통하여 공정 초반의 국부적인 변형을 방지 할 수 있으며, 금형 교체 후 상부 금형의 성형방향 가이드 라인을 형성하기 때문에 목표 치수 확보에 이점을 가지게 될 것으로 판단된다.

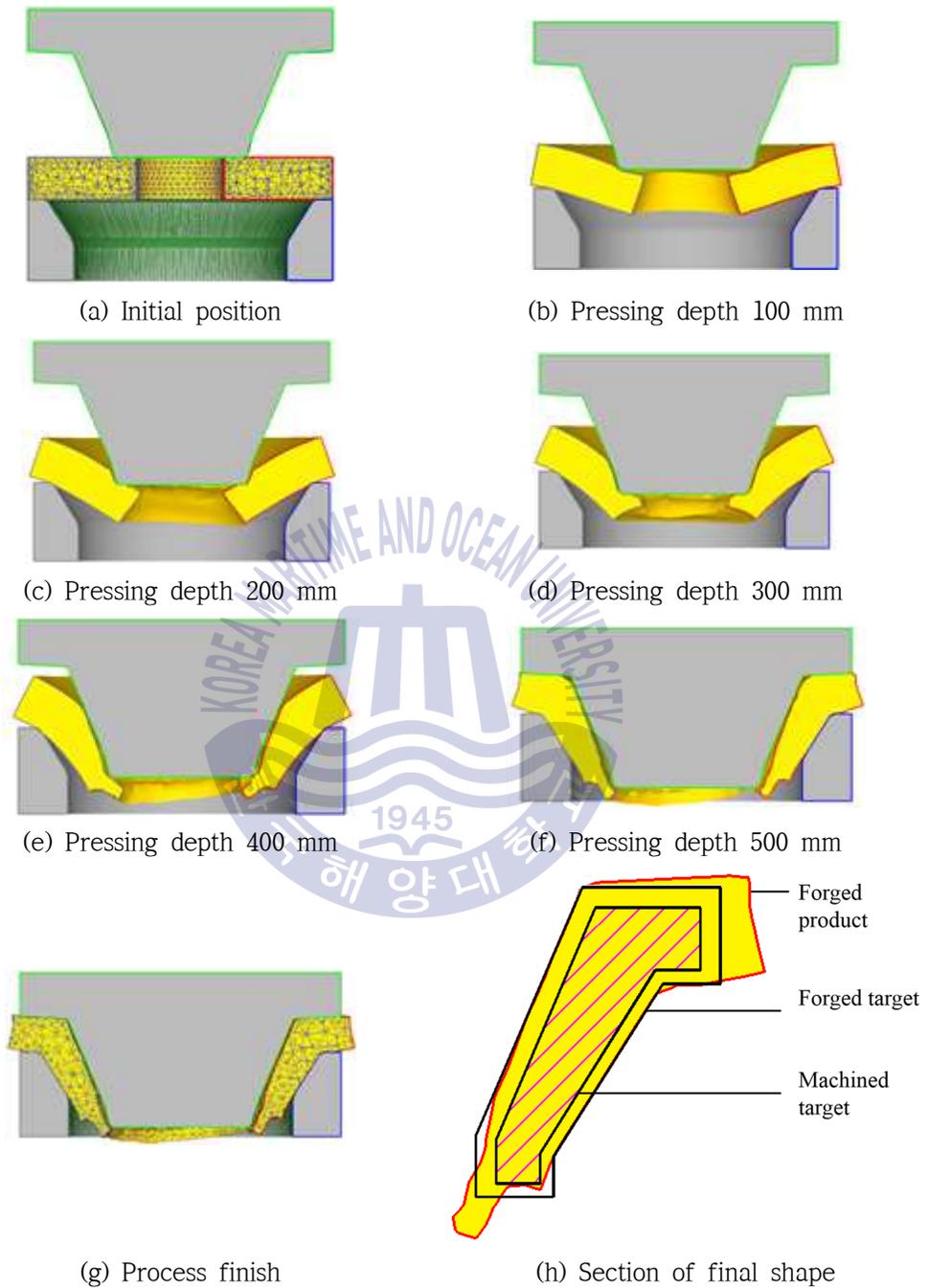


Fig. 27 Simulation results of rotating-multi step forging

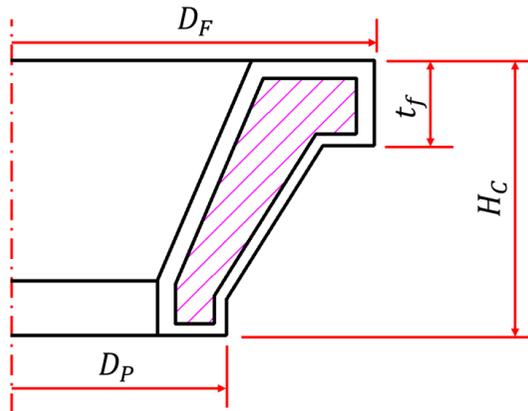


Fig. 28 Main dimensions of flange

Table 13 Main dimensions of flange by rotating-multi step forging

Contents	Target (mm)	Simulation (mm)	Error (%)
H_c	460	508.8	10.6
t_f	143	144.9	1.3
D_F	1380	1443	4.6
D_P	886	865.7	-2.3

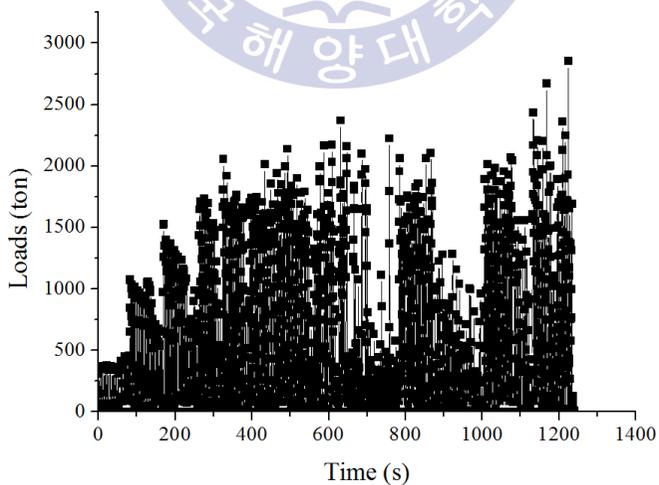


Fig. 29 Forging loads on rotating-multi step forging

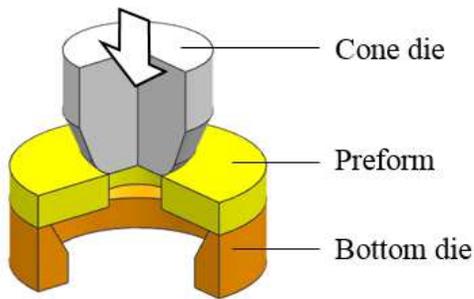
4.2.3 콘 금형을 도입한 공정

상부 콘 금형으로 공정초기에 축 방향으로 성형하여 굽힘 성형을 진행 한 후, 기존의 상부금형으로 교체하는 공정을 Fig. 30과 같이 수정하였다. 상부 콘 금형 도입 시 공정 초기의 성형 하중은 굽힘 성형만 진행하기 때문에 목표하는 성형 하중보다 낮을 것으로 예상 된다. 또한 굽힘 성형 이후 상부 콘 금형을 도입하기 전의 공정에 비하여 최종 단조 형상까지의 필요한 압하 깊이가 약 70% 정도 감소되어 공정 시간을 단축 할 수 있다.

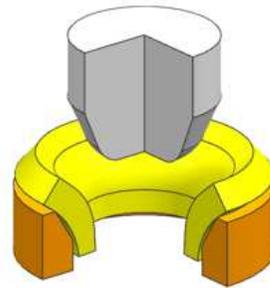
상부 콘 금형이 상부금형의 성형 방향 가이드를 만들고, 성형 초반 상부금형 모서리와의 접촉에 의한 국부적인 변형을 방지하며 단조 목표 형상으로 성형됨을 Fig. 31에서 확인할 수 있다. (c)에서 교체한 상부금형의 모서리에 의한 국부적인 변형을 효과적으로 방지함을 알 수 있으며 (g)는 성형 완료 단면에 단조 목표 형상(두꺼운 검은 실선)을 겹쳐 해석결과 형상의 가공여유가 확보됨을 보여준다. 플렌지 부는 설계한 가공여유를 확보하였으며, 파이프 부는 설계한 가공여유를 확보하지는 못하였지만 추후 가공하여 제품을 제작하는데 있어서 충분한 가공여유를 가진다.

주요 치수를 Table 12에 정리하였다. H_c 는 공정에 콘 금형을 도입함으로써 목표 치수를 확보하였고, 그 외의 주요 치수들 또한 오차 3% 이내로 성형되어 단조 목표 형상을 확보함을 알 수 있다.

성형 하중은 Fig. 32와 같이 공정이 진행 될수록 증가하는 경향을 보이며, 이는 예비 성형체와 상부 금형의 접촉 면적이 점차 증가하는 것에 기인하는 것으로 보인다. 상부 콘 금형 공정의 경우 성형 하중은 약 850 ton으로 목표하는 하중을 허용하기 때문에 시제품 제작 시 공장에서 충분히 수용 가능하다. 교체한 상부 금형 공정의 최대 성형 하중은 약 3,370 ton 이나 일부만 목표 성형 하중을 초과하기 때문에 압하 깊이를 수정하거나, 상부 금형의 회전각을 수정하는 방법을 통하여 현장에서 수용할 수 있을 것으로 예상된다.



(a) Cone die process



(b) After cone die forging



(c) Change top die

(d) Final stage

Fig. 30 Rotating-multi step forging with upper cone die

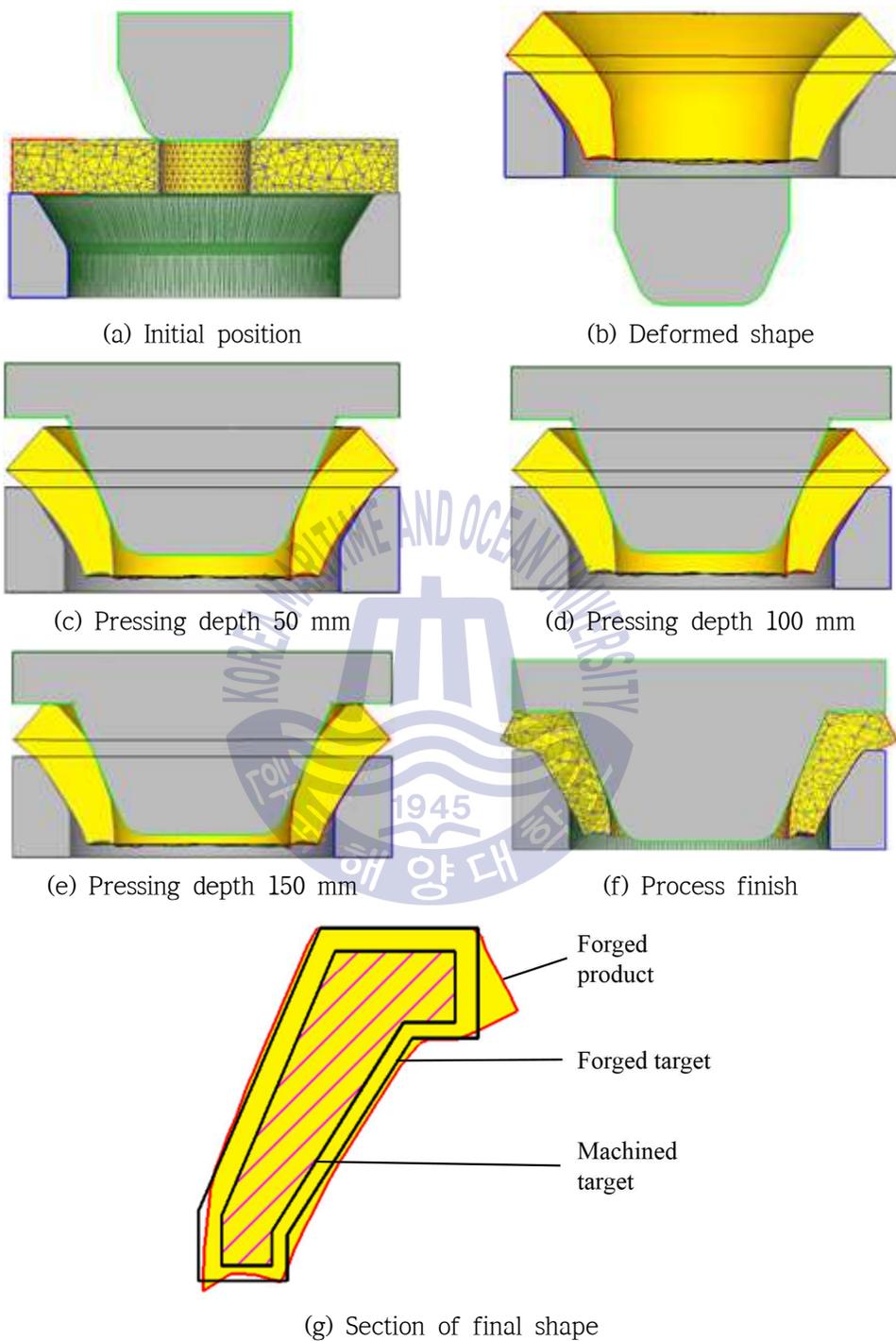


Fig. 31 Simulation results of rotating-multi step forging with cone die

Table 14 Main dimensions of flange by forging process with cone die

Contents	Target (mm)	Simulation (mm)	Error (%)
H_c	460	455.9	-0.9
t_F	143	142.7	-0.2
D_F	1380	1350	-2.2
D_P	886	860	-2.9

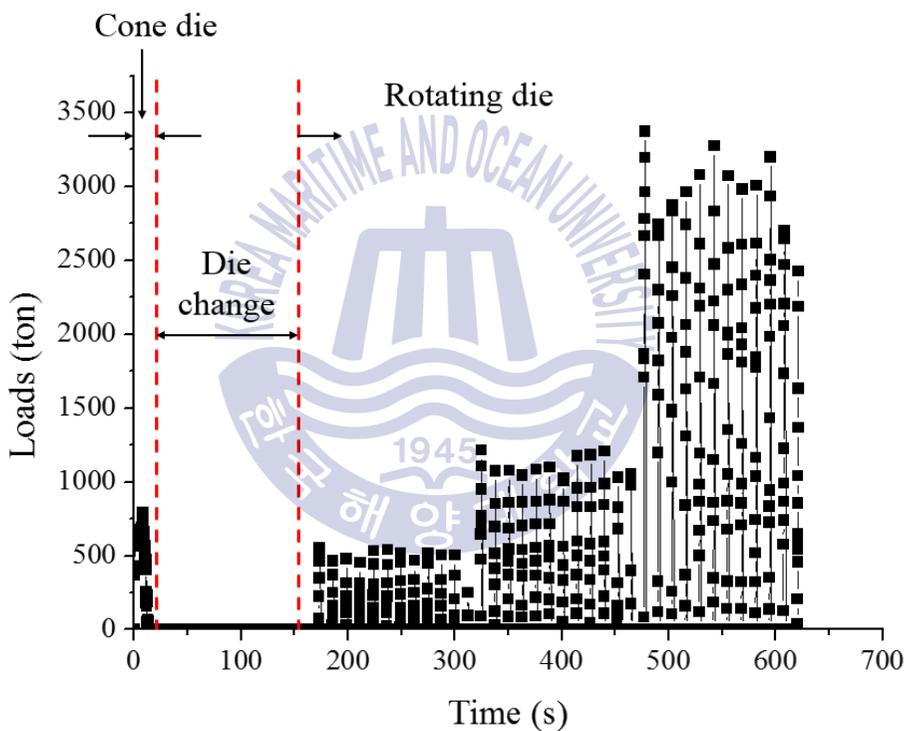
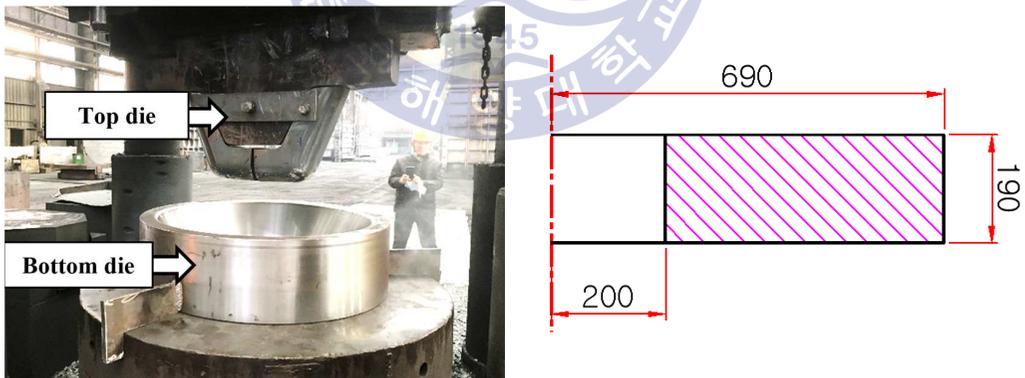


Fig. 32 Forging loads on rotating-multi step forging with cone die

4.3 시제품 제작

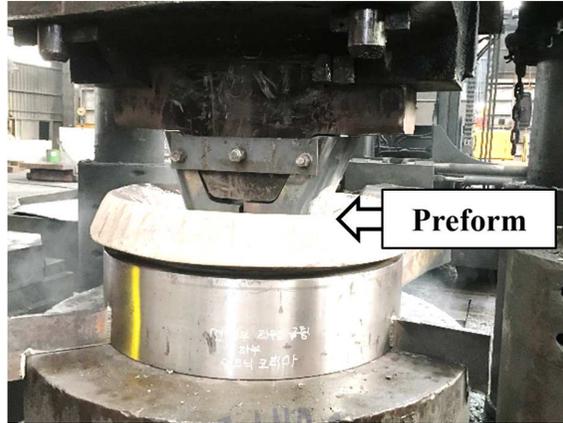
시뮬레이션을 통하여 설계된 회전-단조 단조 공정과 예비 성형체를 적용하여 시제품을 제작하였다. 제작 설비 공정 조건은 실린더 형상의 시제품 제작과 동일하다. 시제품 제작 중에 상부금형 압하 이후 상부금형과 소재의 끼임이 발생으로 인한 공정 시간이 증가되어 예비 성형체의 냉각이 예상보다 더 진행되어 공정 중 2회 재 가열하며 진행하였다. Fig. 33에서 플랜지 제품의 제작과정을 보이고 있으며, Table 13에서 시제품과 단조 목표 형상을 비교하였다. 공정의 목표는 단조 목표 형상의 확보였으나, 공정 진행 중 최종 제품으로 충분히 제작 될 수 있는 가공 여유가 확보되어 단조를 중단하였다. 이로 인하여 플랜지 부의 두께를 총 압하 깊이의 약 5%가량 압하하지 않았다. 성형 완료된 도면을 통하여 제품의 파이프부의 내경과 플랜지부의 충분한 가공 여유를 확보한 반면에 파이프부의 외경 및 플랜지부의 상부 지름은 단조 목표 치수를 확보하지 못하였으나, 최종 목표 형상을 제작하는데 있어서 문제가 되지 않을 가공 여유를 확보하였음을 보여 준다.



(a) Initial die position

(b) Preform for prototype

Fig. 33 Forging process of flange prototype (continued)



(c) Mid stage

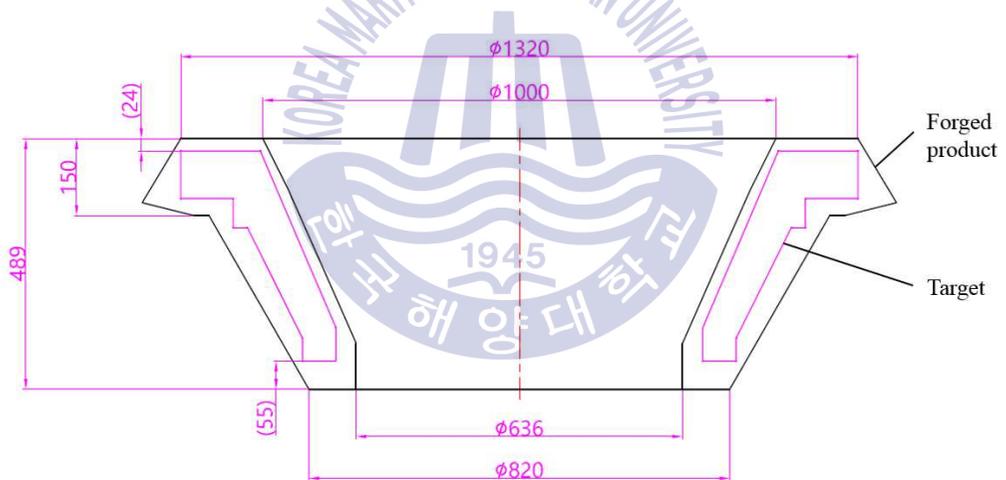


(d) Top view for flange prototype

Fig. 33 Forging process of flange prototype (continued)



(e) Bottom view for flange prototype



(f) Dimensions of forged flange prototype

Fig. 33 Forging process of flange prototype

Table 15 Main dimensions of flange by prototype

Contents	Target (mm)	Prototype (mm)	Error (%)
H_c	460	489	6.3
t_F	143	150	4.9
D_F	1380	1320	-4.3
D_p	886	820	-7.4



제 5 장 결론

본 논문에서는 대형 알루미늄 실린더 및 플랜지 제작을 위한 알루미늄 열간 단조 공정을 설계하였다. 단조하중 감소를 위하여 다단 성형 공정을 적용하였으며, 유한 요소 해석과 납 실험을 통하여 공정 과정을 검증하고, 납 실험 과정에서 소재의 유동과 맨드렐의 탄성 변형에 의한 문제점을 발견하여 예비 성형체에 대한 설계를 보완하였다. 설계된 공정을 적용하여 시제품을 제작해 목표 단조 형상 치수를 확보하였음을 확인하였다. 본 공정을 검증하기 위한 유한 요소 해석과 납 실험, 시제품 제작을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 실린더 제품 제작 시 절삭공정의 소재 회수율은 약 13%이며, 플랜지 제품은 약 25%로 낮은 수준이다. 그러나 본 공정을 적용한다면 소재 회수율을 실린더 제품은 약 33%, 플랜지 제품은 약 49%로 향상시킬 수 있다.
- (2) 납 실험을 통하여 실제 소재의 거동을 확인하였다. 실험 결과와 유한 요소 해석과의 차이점을 확인하여 예비 성형체를 보완 재설계 하였다. 대단부에서 지름 확장에 사용되어질 체적이 길이방향의 변형에 사용되어 목표하는 형상을 확보하지 못하였다. 소실된 대단부의 체적을 보상하여 문제를 해결하였다.
- (3) 단조 하중을 감소하여 대용량 단조 설비를 보유하지 않은 공장에서도 본 공정을 수용할 수 있어 보다 많은 공장에서도 본 제품을 생산할 수 있을 것으로 예상 된다.
- (4) 플랜지 제작에 사용된 회전-다단 단조 공정은 단조 하중을 감소하는데 있어서 효과적이지만 금형의 모서리로 인하여 국부적인 변형이 발생하였다. 이 문제를 제품과 동일 한 기울기를 가진 콘 금형을 도입함으로써 국부적인 변형을 방지하고, 공정 초반 콘 금형 성형 시 낮은 하중으로 예비 성형체를 굽힘 성형 하여 공정 완료시점까지의 단조 깊이를 단축할 수 있다.
- (5) 소량의 고품질 알루미늄 제품을 생산하는 경우 본 공정을 채택한다면 금형의

범용성으로 인하여 유사한 형태를 지닌 제품은 수용 가능하게 되고, 대형 단조 설비비의 부담을 덜게 되어 경제적인 효과가 있다.



참고문헌

- [1] 한순우, 정현승 (2011). 알루미늄 압출재로 이루어진 철도차량 차체의 경량화를 위한 최적설계 방안 연구. 대한기계학회 논문집 A권, 35(2), 213-221.
- [2] 임성곤 (2017). 차량 경량화를 위한 알루미늄 적용 동향 및 단조 소재기술. 단조 심포지엄, 107-115.
- [3] 강승구, 신광복, 이은규, 윤일로, 이종화 (2013). 초고속 자기부상열차의 차체 경량화 설계에 관한 연구. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 1584 - 1589.
- [4] 권영민, 송정일, 이영선, 이정환 (2000). 항공기용 알루미늄부품의 단조 공정설계연구. 한국소성가공학회 학술대회 논문집, 90-93.
- [5] 김기주, 임중환, 박준협, 최병익, 이재웅, 김윤재 (2012). CAE 해석을 이용한 자동차용 AA6061 리어 서브-프레임의 경량화 설계. 한국자동차공학회 논문집, 20(3), 77-82.
- [6] 노국일, 윤종훈, 유준태, 이호성 (2016). 발사체용 경량 알루미늄합금의 마찰교반접합. 한국생산제조학회 학술발표대회 논문집, 230-230.
- [7] 이효영, 여홍태, 김기성, 허관도 (2007). 알루미늄 요크의 열간단조공정 설계. 대한기계학회 춘추학술대회. 261-266.
- [8] 이영선, 강성훈, 권용남, 이호원, 윤은유 (2014). 단조 기술의 현재와 미래. 소성가공, 23(1), 49-59.
- [9] Sun, M., Hao, L., Li, S., Li, D., & Li, Y. (2011). Modeling flow stress constitutive behavior of SA508-3 steel for nuclear reactor pressure vessels. Journal of Nuclear Materials, 418(1), 269-280.
- [10] 이명원, 이영선, 이승욱, 이동희, 김상식, 문영훈 (2009). 단조/열처리 공정이 대형 주단조품의 조직변화에 미치는 영향. 소성가공, 18(6), 458-464.

- [11] 조재현, 박종진 (2009). 점진단조에 대한 기초 연구. 한국소성가공학회 학술대회 논문집, 341-344.
- [12] 이호진, 국대선, 안동규, 정종훈, 설상석 (2016). 일체형 중공 드라이브 샤프트 제작을 위한 점진적 열간 로터리 단조 공정 조건 예측. 한국정밀공학회지, 33(4), 287-293.
- [13] 이승욱, 이영선, 이명원, 이동희, 김상식 (2010). 중공 잉곳을 이용한 대형 링 단조품 제조공정 설계 연구. 한국소성가공학회, 소성가공 19(6), 329-336.
- [14] Dursun, T., & Soutis, C. (2014). Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design*, 56, 862-871.
- [15] 왕신일, 서명규, 조종래, 배원병 (2001). 주조/단조 기술을 이용한 대형 알루미늄 플랜지 개발에 관한 연구. 대한기계학회 논문집 A권, 25(9), 1438-1443
- [16] Robert D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha, JOHN WILEY & SONS, 1989. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*.
- [17] 전만수, 이형일, Prentice Hall, 2002. 연속체 역학에서 유한요소법까지.
- [18] DEFORM 3D V.11
- [19] T. Altan, G. Ngaile, G. Shen, 2005. *Cold and Hot Forging : fundamentals and applications*.
- [20] S. Kobayashi, SI. OH, T. Altan, 1989. *Metal forming and the finite-element method*.
- [21] 최인용, 2012, 단조공정을 이용한 증기발생기 헤드 제작 공정개발에 관한 연구, 한국해양대학교 기계공학과 석사학위 논문.