

# 드로잉 공정을 이용한 대형 반구 형상 제작에 관한 연구

이성욱<sup>1</sup>, 조종래<sup>2</sup>, 양동열<sup>#</sup>

## Use of a Drawing Process to Manufacture a Large-Size Dome Shaped Forging-Products

S. U. Lee, J. R. Cho, D. Y. Yang

### Abstract

A new forming process of the large-size forging within the limit of forming loads is developed by introducing the drawing process, which usually used to apply to sheet forming. For the development of the forming process, corresponding numerical simulation are carried out. The approach is based on the Taguchi method, and utilize the DOE for design of FEM analyses. In this study, the important factors are chosen at first, and then the concept of signal-to-noise(S/N) rate is applied to evaluate the formability of large size forging-products, and each value of the design parameter is determined.

**Key Words** : Drawing, Hot-forming, Dome-Shaped Forging-Product, Design Parameters

### 1. 서론

항공우주산업 및 발전소 등의 고부가가치 산업 분야에서 반구(Dome)형상의 대형 단조품이 많이 사용되고 있다. 기존의 대형 강구조물의 경우 일반적으로 주조 공정을 통해 제작하거나 열간 단조공정과 기계적 가공등을 이용하여 제작하여 왔다. 현재, 대형 강구조물이 가혹한 조건에도 견딜 수 있도록 구조물의 기계적/금속적 성질을 향상 시키기 위해서 주조 공정대신 단조 공정을 이용한 제작 방법이 요구되고 있다. 그러나 대형 단조품의 경우, 성형 면적이 넓어짐에 따라 성형하중이 급격하게 증가하므로 허용 하중능력이 큰 장비를 보유해야 한다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 적은 하중으로 대형 단조품을 성형하기 위해서는 일반적인 단조공정이 아닌 새로운 단조공정이 요구되어진다. 이에 새로 제안된 공정중 하나가 점진적 단조 공정이다. 이 공정은 전체 성형면적을 나누어서

성형함으로써 성형하중을 감소 시키는 역할을 하고 있다.[1] 그 밖에도 대형 반구형 헤드 형상을 가지는 구조물을 만드는 공정으로는 기존의 박판 성형 공정에서 사용되는 드로잉 공정이 있다[2,3]. 그러나 드로잉 공정을 이용한 대형 단조품 제작의 경우, 주요 공정변수에 대한 분석이 활발히 진행 되지 않고 있다.

본 연구에서는 실험계획법과 FEM 해석을 통해 대형 반구형 형상의 구조물을 드로잉 공정으로 제작하기 위한 공정변수를 분석하고, 또한 이 공정변수가 목적함수에 미치는 영향력을 검토 하였다.

### 2. 유한요소해석

#### 2.1 강소성 유한 요소법의 수식화

소재의 변형이 전체적으로 일어나는 소성문제에서는 탄성 변형이 작기 때문에 강소성 유한

1. KAIST 기계항공시스템학부 대학원

2. 한국해양대학교 기계·정보공학부

# KAIST 기계항공시스템학부, E-mail : dyyang@kaist.ac.kr:

요소법이 효과적으로 사용될 수가 있다. 강소성 재료(Rigid-Plastic material)의 평형 방정식과 비 압축성 조건은 식 (1),(2),(3)과 같이 주어진다.[4-6]

$$\sigma_{y,j} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\sigma_{y,j} n_j = f_i \quad \text{on } \Gamma_f \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_v = 0 \quad (3)$$

위의 결과로부터 강소성 재료의 변분식은 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.[6]

$$\sum_{m=1}^M \left[ \int_{V^{(m)}} (\bar{\sigma} + \alpha \Delta t \dot{\epsilon} H') \delta \dot{\epsilon}_v dV + K^* \int_{V^{(m)}} \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_j^{(m)}} (f_j + \alpha \Delta t \dot{f}_j) \delta V_j dS \right] = 0 \quad (4)$$

여기서,  $H'$ 은 가공 경화 계수로서 응력-변형률 관계식에서 유효 응력을 유효 변형률에 관하여 미분한 값이다.  $K^*$ 는 벌칙상수(Penalty constant)이고,  $\alpha$ 는 미소 증분내에서 가공경화를 고려하여 해석시 수렴성을 개선하기 위해 도입한 변수이다[7].

## 2.2 유한 요소법에 의한 온도 해석

소성 변형으로 발생하는 에너지의 85~95%는 변형열로 전환되고, 나머지는 전위밀도(Dislocation Density)를 증가시키는 에너지로 소모된다는 실험 결과와 열역학 제 1법칙을 이용한 열평형 방정식은 식 (5)과 같다[8]

$$kT_{,ii} - \rho c \dot{T} + \dot{\kappa} = 0 \quad (5)$$

식 (5)에서 첫 번째 항은 열 전달을, 두 번째 항은 내부 에너지의 증가, 그리고 세 번째 항은 변형에너지가 열로 변환된 양을 나타낸다.

$$\dot{\kappa} = \alpha \bar{\sigma} \bar{\epsilon} \quad (6)$$

식(6)에서  $\alpha$ 는 변형에너지가 열로 변화되는 비율을 나타내며, 탄소강의 경우 약 0.9의 값을 가진다. 자유 표면과 금형 접촉면에서의 열 전달은 다음과 같이 주어진다. 먼저 자유 표면과의 경계조건은 식(7), (8)으로 표현되는데,

식(7)는 대류 열전달을 나타내고, 식 (8) 복사 열전달을 나타낸다.

$$q_n^c = h(T_e - T_s) \quad (7)$$

$$q_n^r = \phi v(T_e - T_s) \quad (8)$$

여기서  $\phi$ 는 스테판-볼츠만 상수,  $v$ 는 표면확산계수를 의미한다. 금형과 소재의 접촉면적에서의 경계조건은 식 (9),(10)으로 표현 되는데 식 (9)은 전도 열유량을 나타내고, 식 (10)은 마찰 유량을 나타낸다.

$$q_n^d = h_{\text{sub}}(T_d - T_w) \quad (9)$$

$$q_n^f = \phi \frac{m_f k_y v_{dw}}{J} \quad (10)$$

$h_{\text{sub}}$ 는 윤활로 인한 열전달 계수,  $k_y$ 는 재료의 전단항복계수,  $v_{dw}$ 는 금형과 소재의 상대속도 이고, 끝으로  $J$ 는 열의 일당량이다. 따라서 온도해석을 위한 경계치 문제의 해는 경계  $\Gamma$ 에서 임의의 함수  $\xi$ 에 대하여 식(11)을 만족함으로써 얻어진다.

$$\int_{\Omega} k T_{,j} \xi_{,j} d\Omega + \int_{\Omega} \rho c \dot{T} \xi d\Omega - \int_{\Omega} \dot{\kappa} \xi d\Omega - \int_{\Gamma} q_n \xi d\Gamma = 0 \quad (11)$$

## 3. 해석 모델 및 공정변수

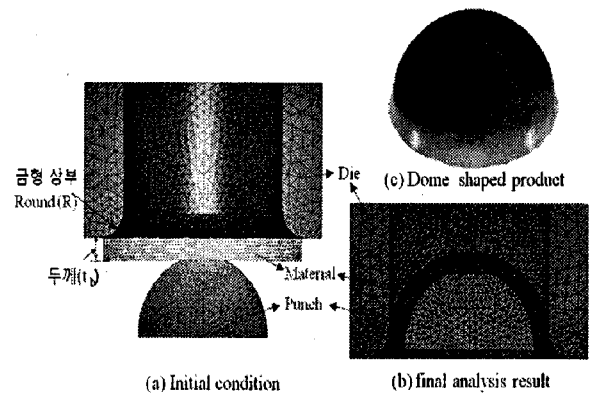


Fig. 1 Geometrical factors on FEM simulation

해석 모델은 Fig. 1과 같이 원판형 초기소재를 드로잉 공정에 적용한 모델이다. 이 때 금형은 일반적인 폐쇄 금형이 아닌 개방형 금형을 이용한다. 개방형 금형을 이용하는 이유는 성형

하중을 줄이기 위해서이다. 소재와 금형이 접촉하는 면적이 작을수록 성형하중은 감소하게 된다. 그러나 개방형 금형을 이용함으로써 성형 후 소재의 치수 정밀도가 나빠진다는 단점을 가지고 있다. 이를 고려해 볼 때, 주요 공정 변수의 변화에 따라 성형 결과를 판단할 수 있는 목적 함수는 성형 하중과 치수 정밀도가 된다. 여기서 치수 정밀도는 모든 영역에서 고려하기 힘들기 때문에 성형품의 최소 두께를 기준으로 치수 정밀도를 판단한다.

반구형 헤드 성형 시뮬레이션의 주요 공정 변수로 초기 Blank disk 두께( $t_b$ ), 금형 상부 라운드(R), 금형과 소재의 마찰 상수(m)를 선정 하였으며, 인자의 수준수는 각각 3수준으로 하였다. 그 이외의 설계인자들은 고정인자로 취급하였다. 따라서, 압하량의 경우 모두 일정 하게 하였으며, 열간 단조 공정시 소재의 온도는 초기에는 1200℃ 시작하여 최종적으로는 900℃ 까지 하강하도록 설계하였다. 그 밖에 다른 고정인자는 소재의 부피이다. 이를 통해 초기 소재 두께가 변화함에 따라 소재의 직경을 상대적으로 변화시켰다. 이렇게 분류되어진 주요 인자와 각 인자별 수준을 고려해서 직교 배열법을 이용한 해석 계획을 작성 하였다(Table 1).

Table 1. DOE(Design of Experiment)

	Thickness of material ( $t_b$ )	Round value of die (R)	Friction factor (m)
1	A1(13mm)	B1(5mm)	C3(0.5)
2	A1(13mm)	B2(10mm)	C2(0.3)
3	A1(13mm)	B3(20mm)	C1(0.1)
4	A2(15mm)	B1(5mm)	C2(0.3)
5	A2(15mm)	B2(10mm)	C1(0.1)
6	A2(15mm)	B3(20mm)	C3(0.5)
7	A3(16mm)	B1(5mm)	C1(0.1)
8	A3(16mm)	B2(10mm)	C3(0.5)
9	A3(16mm)	B3(20mm)	C2(0.3)

해석 프로그램은 FORMSYS 3D를 이용하였으며, 강소성 유한 요소 해석 프로그램이다 해석의 편의를 위해 실제 대형 모델이 아닌 축소모델로 해석을 진행하였다. Size effect를 무시한다면,

상사의 법칙에 의해 축소모델에서도 실제 모델의 주요 공정 변수의 영향력을 판단할 수가 있기 때문이다. 또한 여기서 사용되는 소재는 열간 단조용강으로, 각 온도에 따른 물성값이 해석 프로그램 내부에 주어진 상태이다. 그 밖의 해석 조건으로는 모델링 형상이 반구형의 중심축을 기준으로 1/4 대칭형상이므로, 해석의 편의를 위해 1/4 대칭으로 해석 하였다.

#### 4. 해석 결과

##### 4.1 해석 결과 분석

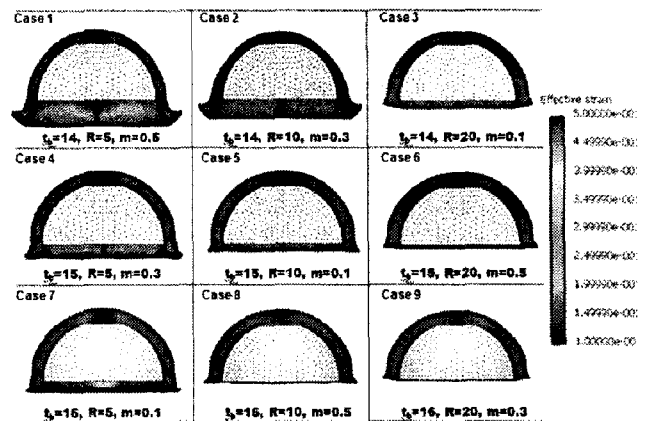


Fig. 2 FEM results of DOE (Effective Strain)

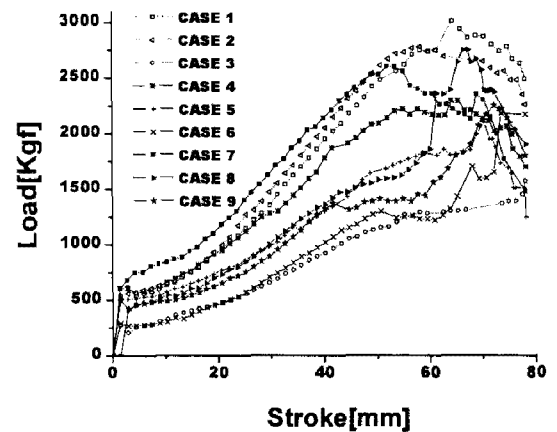


Fig. 3 Forming load in the drawing process

해석결과를 비교해 보면, 각 금형의 라운드가 작을수록 소재의 변형량이 많아지고, 성형하중 역시 커진다는 것을 알 수가 있다 또한 소재의 두께 감소는 반구형상의 상단부분과 금형의 라운드 부분에서 주로 일어난다는 것을 알 수가 있다.

## 4.2 S/N비에 따른 영향력 분석

성형시 고려해야할 목적함수에 주요하게 영향을 미치는 인자가 무엇 인지를 평가하기 위해서 S/N 비로 각 해석 결과 값을 다시 재평가 해보았다. 이를 통해 얻은 결과가 Fig. 5이다.

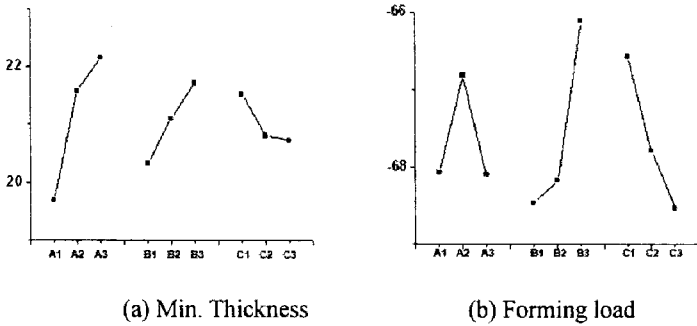


Fig. 5 Main effect plots for the S/N ratios

Fig. 5 (a),(b)를 살펴보면, 최소 두께측면에서 가장 영향을 많이 미치는 인자는 A( $t_b$ )인자임을 알 수가 있다. 그 다음이 B(R), C(m)순이다. 최적 조건으로 예측된 수준은 각각 A인자가 3수준, B인자가 3수준 그리고 C인자가 1수준으로 나타났다. 또한 성형 하중 측면에서 따져 볼 때 B 인자가 주요하게 영향을 미친다는 것을 알 수가 있으며, 그 다음이 C, A순이다. 다시 말해 성형하중이 금형의 라운드 값에 따라 상대적으로 변화가 크다는 것을 알 수가 있다

Fig 5에서 나온 결과를 토대로 각 목적함수에 대하여 주요하게 영향을 미치는 변수들을 Table 2로 정리하여 보았다.

Table 2. Analysis of forming factors

	Design Parameter		
	A	B	C
Min. Thickness	Level 3	Level 3	Level 1
Forming Load	Level 2	Level 3	Level 1

## 5. 결론

본 논문에서는 드로잉 공정시 적용할 수 있는 공정 변수를 정리하고 각 공정간의 실험계획법에 의해 열간 단조공정을 시뮬레이션 하였다.

(1) 소재 두께와 금형의 라운드 그리고 마찰 계

수를 공정 변수로 정하고 실험계획법에 따른 해석을 수행하여 압하량에 따른 하중 선도와 최종 성형 결과 형상을 획득하였다.

(2) 성형 결함으로 고려될 수 있는 성형품의 최소 두께에 가장 영향을 많이 미치는 인자는 초기 소재의 두께이다.

(3) 성형 하중을 감소시키는데 가장 크게 작용하는 인자는 금형의 라운드 값이다.

## 참고 문헌

- [1] 박치용, 양동열, 이경훈, 은일상, 1994, 점진적 복합성형법을 이용한 대형 돔형 단조품의 공정개발, 대한기계학회논문집, Vol. 18, No. 7, pp 1685~1696
- [2] 김동권, 김동영, 김영득, 2005, 원자로용 대형 단강품의 자유단조, 한국소성가공학회, Vol. 14, No. 6, pp 565~569
- [3] H. Nagasako, K. Tokuno, J.Ozaki, Y. Funakoshi and H. Saiki, 1995, Development of Manufacturing Techniques of Forged Primary Head with Integral Support Lugs, 3rd Conference on Nuclear Engineering.
- [4] C.H. Lee, S. Kobayashi, 1973, New solution to rigid-plastic deformation problems using a matrix method, Transactions of the ASME, Journal of engineering for Industry, Vol. 95, pp. 865~873
- [5] O.C. Zienkiewicz, P.N. Godbole, 1975, A penalty function approach to problems of plastic flow of metals with large surface deformation, The Journal of strain Analysis, Vol. 10, No.3, pp. 180~185
- [6] K. Osakada, J. Nakano, and K. Mori, 1982, Finite element method for rigid-plastic analysis of metal forming-formulation for finite-deformation, International journal of mechanical sciences, Vol. 24, pp. 459~469
- [7] Y.J. Kim, D.Y. Yang, 1985, A formulation for rigid plastic finite element method considering work hardening effect, International journal of mechanical Science, Vol. 27, pp. 487~495, 1985
- [8] 조종래, 박치용, 천명식, 윤정호, 양동열, 1990 2차원 열간 단조에서의 변형과 온도의 연계 해석과 비연계 해석 비교, 대한기계학회논문집, 제 14권 제 4호, pp. 839~849