

핵연료 용기의 일체형 단조공정 개발에 관한 연구

김민우¹, 조종래[#], 김동권², 김동영²

A Study on the Development of Integral Forging Process for Cask of Nuclear Fuel

M. W. Kim, J. R. Cho, D. K. Kim, D. Y. Kim

Abstract

Monolithic forging of cask is required continuously. Body-base monolithic forging of cask has advantage of an economical manufacturing process and better reliability for nuclear applications. Through the finite element analysis and parametric study of design variables, those are die angle, groove length and flange thickness, the optimal dimensions of preform and die sets are determined in order to develop a suitable forging process for body-base monolithic forging. To verify the result of finite element analysis, the physical model of 1/30 scale of actual product using plasticine was carried out. The result of this experiment, deformed shapes were very similar to the finite element analysis. As a result of this work, the special piercing method was developed using blank material consisting of a flange, groove and squared part.

Key Words : Nuclear fuel , Cask , Integral forging , Piercing , FEM , Plasticine

1. 서론

사용 후 핵연료가 재처리 될 때까지 안전하게 보관하고, 이동할 수 있는 저장용기의 제조가 필수적이다. 캐스크(cask)는 사용된 우라늄 핵연료를 안전하게 운반하고 저장하기 위해 만든 용기(container)의 일종이다. 캐스크는 셸(shell)인 몸체와 바닥과 밀폐하기 위한 상부 플랜지 부분으로 나누어져 있다. 셸의 외경은 약 2000 mm, 내경은 1500 mm 이상이고 높이는 5000 mm 에 이른다.

기존의 캐스크는 단조공정으로 셸, 바닥 그리고 플랜지의 세 부분을 각각 제작한 후, 용접하는 방법과 셸과 플랜지를 일체형으로 만들고 바닥을 용접하는 방법이 사용되었다. 핵 물질의 방사선에 의해 용접부는 시간의 경과에 따라 부식되어 제품의 안전성이 떨어지게 된다. 그러므로, 일체형 단조공정으로 제조하는 것이 경제성과 안전성 및 내구성 측면에서 보다 효과적이다[1].

본 논문에서는 유한요소해석을 통해 목표하중인 117,600 kN 이내에서 성형할 수 있는 성형공정을 제안하여 예비성형체와 다이의 형상을 결정하고 성형에 주요한 3가지 공정변수를 선정하여 그 영향을 평가하여 최적의 성형공정을 설계하였다. 또한 유한요소 해석의 타당성을 확인하기 위해 모델재료를 이용한 모의성형실험을 통해 결과를 검증하였다.

2. 유한요소해석을 통한 공정해석

2.1 경계조건 및 물성치

유한요소해석에 사용된 프로그램은 소성가공 전용 유한요소해석 프로그램인 Deform 을 사용하였다. 계산에 적용되는 경계조건은 Table 1 에 표시하였다[2].

캐스크의 재료로는 일반적으로 고강도의 단조강인 SA350-LF5 Class 1이 사용되고 있다.

1. 한국해양대학교 대학원 기계공학과

2. 두산중공업 기술연구원

교신저자 : 한국해양대학교 기계정보공학부

E-mail : cjr@hhu.ac.kr

Table 1 Boundary conditions

Blank temperature (°C)	1230
Die temperature (°C)	400
Friction factor	0.7
Contact HTC (W/m ² °C)	11000
Convection HTC (W/m ² °C)	20
Punch speed (mm/sec)	20
Punch pressing depth (mm)	5080
Maximum press load (kN)	117,600

2.2 사각형 예비성형체를 이용한 피어싱 공정

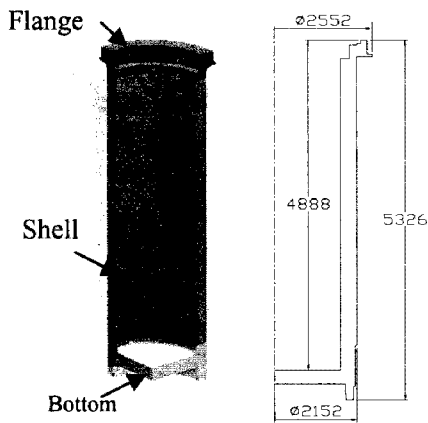


Fig. 1 Shapes and dimensions of cask

Fig. 1 은 케스크의 형상과 치수를 나타낸 것이다. 제한된 성형하중으로 제품을 성형하기 위해 펀치가 압하하면서 소재를 원심방향으로 성형하는 피어싱 공정을 사용하였다.

이 공정에서 가장 중요한 점은 펀치가 하강할 때 소재가 반지름 방향으로 유동하도록 유도하는 것이다. 이를 위해 사각형상의 예비성형체를 사용하여 성형 초기부터 소재의 모서리가 컨테이너와 접촉하고 펀치가 압하 될 때 소재모서리와 컨테이너간에 발생된 마찰력에 의해 소재가 미끌려 내려가지 못하도록 하였다. 그리하여 소재를 원심 방향으로 유동시켜 원형 컨테이너와 사각형 예비성형체간의 빈 공간으로 밀어내도록 하였다.

Fig. 2 는 사각형 플랜지와 단을 가지는 예비성형체에 대한 해석결과 성형과정을 나타낸 것이고, Fig. 3 은 그에 따른 성형 하중을 나타낸 것이다. 이 경우 약 173,460 kN 의 성형하중이 필요하다.

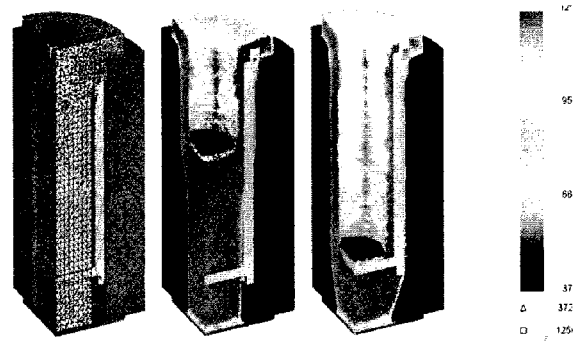


Fig. 2 Deformed shapes and temperature distributions for non-isothermal analysis

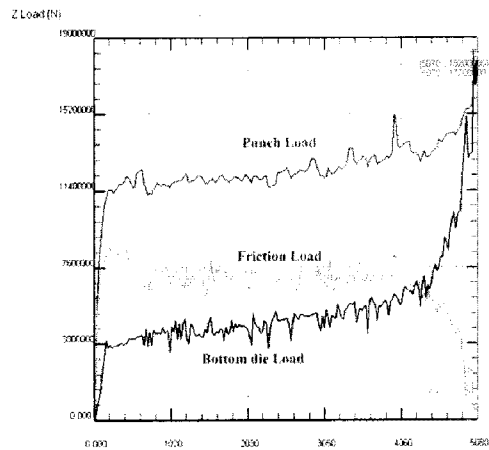


Fig. 3 Load for non-isothermal analysis with squared bar preform

펀치의 압하 하중은 컨테이너와 하부다이에 나누어 지지된다. 즉 펀치의 성형하중의 일부는 펀치가 압하하는 동안 소재와 컨테이너 벽면 간의 접촉마찰력으로 인해 발생하는 수직마찰하중으로 지지되고, 나머지는 예비성형체 하부에 압축하중으로 작용한다고 볼 수 있다. 이때 하부다이가 받는 압축하중이 컨테이너가 받는 마찰하중보다 크다는 것은 소재의 유동방향이 수직 방향으로 압축되는 방향으로 유동한다는 의미이다. 결론적으로 마찰하중이 최대한 하부다이가 받는 압축하중보다 높게 유지시키는 것이 성형에 있어서 가장 중요한 점이라고 판단된다.

3. 케스크 일체형 단조를 위한 공정변수

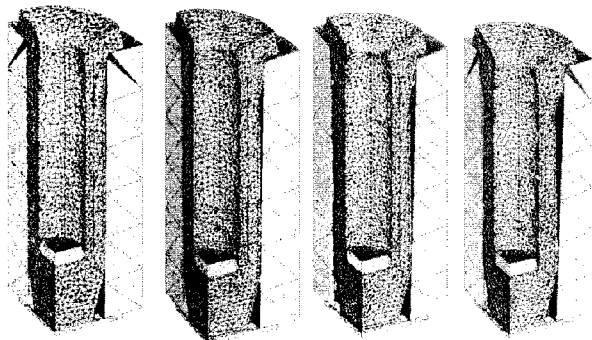
3.1 금형 기울기의 변화에 대한 영향

컨테이너 기울기는 가공 후 단조품의 취출을 위해 사용된다. 컨테이너의 기울기의 크기를

0.5° ~ 2° 까지 0.5° 단위로 변화시켜 해석하여 그 영향을 검토해 보고자 하였다.

Fig. 4 는 0.5°, 1.0°, 1.5°, 2.0° 의 금형 기울기에 대한 각각의 해석 결과이다. 해석결과 기울기가 커지더라도 성형성에는 크게 문제가 되지 않았다.

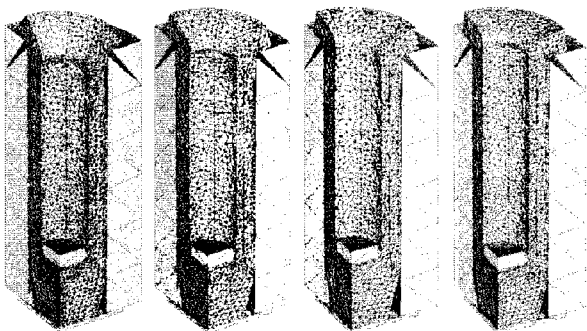
결론적으로 컨테이너에 2° 이내의 기울기를 주는 것은 성형성에 무관하지만, 무조건 기울기를 크게 할 경우 소재의 낭비가 심해지므로 취출이 가능한 최소의 기울기를 설정하여야 한다.



(a) 0.5° (b) 1.0° (c) 1.5° (d) 2.0°

Fig. 4 Deformed shapes for 0.5°~2.0° die angles

3.2 단의 길이의 변화에 대한 영향



(a) 0 mm (b) 300 mm (c) 450 mm (d) 600 mm

Fig. 5 Deformed shapes for isothermal analysis

with 0 mm ~ 600 mm groove lengths

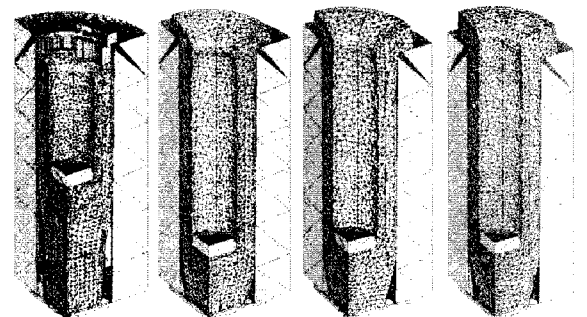
성형이 시작 될 때 소재와 컨테이너간의 접촉압력을 높여주기 위한 원형의 단의 길이 변화에 대한 성형성에 대해 검토해 보았다.

Fig 5 는 단의 길이가 0 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm 일 때의 해석 결과이다. 단이 없는 경우 비교적 많은 양이 미끌려 내려가 플랜지부위가

들러 올라간 것을 볼 수 있다. 300 mm ~ 600 mm 의 경우 안정된 성형결과를 나타내었으며 600 mm 이상의 경우에 대한 해석에서는 더 이상 성형성이 향상되지 않았다.

제품의 안정적인 성형에 있어서 상부 단은 꼭 필요하다고 볼 수 있으며, 단의 길이는 약 300 mm ~ 600 mm 범위에서 단의 길이를 선택하는 것이 적절하다고 판단된다.

3.3 플랜지 두께의 변화에 대한 영향



(a) 0 mm (b) 410 mm (c) 510 mm (d) 610 mm

Fig. 6 Deformed shapes for isothermal analysis

with 0 mm ~ 610 mm flange thicknesses

실제 완성품에서의 플랜지 형상을 일체형으로 성형하고 성형중 소재가 밀끌려 내려가는 현상을 지지해 주는 목적의 플랜지부의 두께변화에 따른 성형성을 검토해 보았다.

Fig. 6 은 플랜지 두께 0 mm 에서 610 mm 일 때의 해석 결과이다. 플랜지 두께 510 mm 이상에서 안정된 결과를 나타내고 있다. 플랜지가 두꺼워 짐에 따라 보다 안정적 결과를 볼 수 있었으나 차이는 미미하였다. 결론적으로 500 mm 에서 600 mm 범위에서 플랜지를 결정하는 것이 가장 효과적이라고 판단된다.

4. 플라스틱을 이용한 모델시험

해석을 통해 제안된 캐스크의 성형 공정을 일반적으로 열간가공성형 실험에 널리 쓰이고 있는 플라스틱을 사용하여 1:30 스케일의 축소모델로 직접 실험하여 검증해보았다[3].

Table 2 Experimental cases

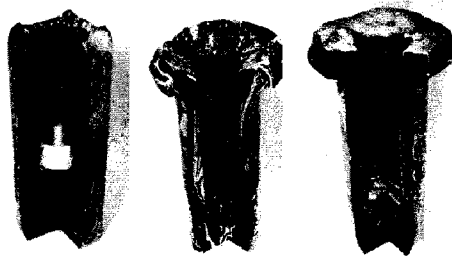
Case	Preform shapes
Case 1	Without groove and flange
Case 2	With flange
Case 3	With groove and flange

Table 2 에 각 실험경우에 대해 정리하였고, Fig. 7 은 그 형상을 나타낸 것이다. 윤활제로는 열간가공에서의 마찰상수와 유사한 값을 나타낸다고 알려져 있는 베이비파우더를 사용하였다.



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

Fig. 7 Preforms of plasticine models



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

Fig. 8 Result of experiments

Fig. 8 은 실험 후 각 케이스에 대한 변형결과를 나타낸 것이다. Case 1 의 경우, 해석결과와 같이 소재가 미끄러져 내려가 해석에서 나타난 형상과 유사한 형태의 결과를 얻을 수 있었다. Case 2 경우 플랜지 부분이 많이 빠져 내려가는 형상을 보여주고 있다. Case 3 의 결과로서 최종 형상인 플랜지와 단이 모두 있을 경우의 결과이다. 이 경우 가장 양호한 성형형상을 보여주고 있다.

플라스티신을 사용한 실험에서 나타나는 성형형상은 해석을 통해 얻었던 결과와 대체로 유사한 결과를 보여주었다.

5. 결론

(1) 피어싱에 의한 캐스크단조 공정에서, 펀치의 압하하중은 컨테이너와 하부다이에 나누어 지지되며, 이때 컨테이너가 받는 마찰하중을 하부다이가 받는 압축하중보다 높게 유지시키는 것이 중요하다.

(2) 성형 후 제품의 취출을 위해 컨테이너에 주게 되는 기울기는 2° 이내의 기울기를 주는 것은 성형성에 특별한 영향을 주지 않으므로 취출이 가능한 최소의 기울기를 현장 실정에 맞게 설정하여야 한다.

(3) 제품의 안정적인 성형에 있어서 상부의 원형 단은 꼭 필요하다. 단의 길이는 약 300 mm ~ 600mm 범위에서 단의 크기를 선택하여야 한다.

(4) 두꺼운 플랜지는 성형성에 긍정적인 영향을 미친다. 회수율 과 성형성을 고려하여 500 mm 에서 600 mm 범위에서 결정하여야 한다.

(5) 해석 결과에 대한 검증을 위해 플라스티신을 이용한 1:30 스케일의 실험을 수행하였고 실험 결과 해석과 유사한 성형형상을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] S.Kuri, Y.Funakoshi, N.Mizuno, T.Tsunezumi, T.Tomomatsu, 2003, Development of manufacturing technology on body-base monolithic cask forging, 15th International Forge Master's Meeting, pp.456-463,.
- [2] Price.S, Honeyman. G. A, 1997, The Optimization of mechanical properties for nuclear transportation casks in ASTM A350 LF5, , Steel forgings : Second volume, ASTM STP1259, E.G. Nisbett and A.S. melilli, Eds., American Society for Testing and Materials, pp.79-90
- [3] 畑村 洋 太郎, 1977, 플라스티신을 이용한 모델링 實驗法, 制11回 塑性加工學 講座 - 5, pp.1-20,