

## 성형 가공 차이에 의한 에너지 소비량 비교

윤철호<sup>1</sup> · 장아징<sup>1</sup> · 채명수<sup>1</sup> · 박병철<sup>2</sup> · 김영석<sup>#</sup>

### Comparison of Energy Consumptions for Various Forming Processes

Z. H. Yin, Y. J. Zhang, M. S. Chae, B. C. Park, Y. S. Kim

#### Abstract

There are many different kinds of forming processes to make a tubular product such as hydroforming and tube drawing. However, we should consider a better forming process in view point of energy consumption and CO<sub>2</sub> emission to save our earth. In this paper we have conducted FEM simulations to the various forming processes for sheet and tubular products to compare their energy consumptions. One example is tubular product and the other for drawn cup. From the comparisons of total energy for hydroforming and tube sinking processes, hydroforming is consumed more energy than tube drawing. Also the cup drawing from sheet metal and tube sinking for the cup with flange indicate that the tube sinking is better than cup drawing of sheet metal in energy consumption.

**Key Words:** Energy (에너지), FEM (유한요소법), Hydroforming (하이드로포밍), Tube sinking (튜브 싱킹), Cup drawing (컵 드로잉).

#### 1. 서론

최근의 지속적인 경제발전과 품질향상에 따른 기업생산규모 확대에 의하여 사회적으로 에너지 소비가 급격히 증가하는 추세가 되고 있다. 에너지 자원은 유한하므로 전 세계적으로 각 분야에서 대체 에너지 개발추진하며 에너지 절약을 강조하고 있다. 에너지 자원은 무한한 것이 아니므로 그 효율적 이용이 중요한 과제로 되고 있다. 이에 따라 자동차산업과 같은 제조기술분야에 있어서도 특정 제품을 생산하는데 필요한 에너지의 양을 최소화할 수 있는 기술과 공정의 개발이 많이 진행되고 있다[1~3].

관재 하이드로포밍(tube hydroforming)기술은 경량화 및 안전성 확보에 대한 요구를 충족시키면서 가격 경쟁력이 있는 제품을 생산하기

위한 기술로서 선진 자동차업계에서 널리 사용되고 있다. 그리고 관재 컵 드로잉 공정(cup drawing)은 관재의 대표적인 가공공정으로 원형 컵 형상 제품가공에서 널리 사용되고 있다. 위 두 공정에 대하여 유한요소해석을 이용한 성형 해석 연구가 많이 이루어졌으나 에너지 소비량을 고려한 성형 공정 해석은 부족한 상황이다 [4~8].

본 연구에서는 하이드로포밍 및 튜브 싱킹 가공 방법 그리고 컵 드로잉 및 튜브 싱킹 가공 방법으로 각각 동일한 형상의 제품을 성형하는 경우에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 그리고 해석 결과를 통하여 제품 성형에 필요한 에너지 소비량을 비교하였다. 이를 통해 제조 공정에서 제품 제작 시 공법에 대한 에너지 소비량을 검토해야 되는 필요성을 제시하였다.

1. 경북대학교 기계공학과 대학원

2. ㈜ 화신

# 교신저자: 경북대학교 기계공학부

E-mail: caekim@knu.ac.kr

## 2. 성형 공정 유한요소 해석

### 2.1 튜브 성형 해석

#### 2.1.1 모델링

튜브 성형 해석에서는 Fig. 1 과 같은 원형 봉형상의 제품을 대상으로 하였다. 동 제품을 성형하기 위해 하이드로포밍 및 튜브 싱킹 공법으로 해석을 수행하여 성형 가공 차이에 따른 에너지 비교를 실시하였다.

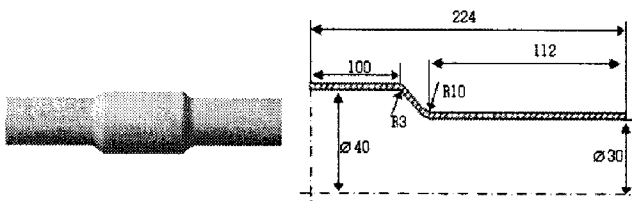
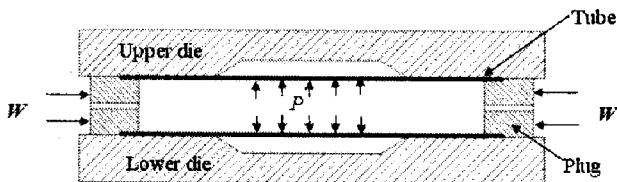


Fig. 1 Final model of tube forming

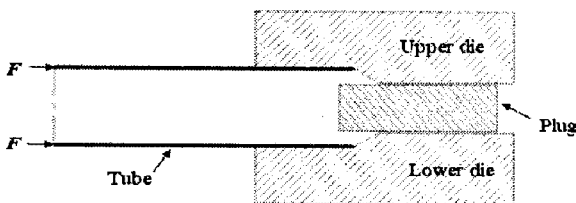
#### 2.1.2 성형 방법

하이드로포밍 공정에서는 Fig. 2(a) 와 같이 상하 금형을 프레스 가압에 의해 체결한 후에 양쪽 플러그 (plug)를 관재의 양쪽 끝 단이 봉인되도록 전진시킨다. 관재 내부의 잔류공기를 배기시킨 후 유압펌프 장치를 통해 내압이 지속적으로 관내에 작용하여 관재 벌징(bulging)가공이 일어나면서 성형된다.

튜브 싱킹 공정에서 Fig. 2(b) 와 같이 상하 금형에 플러그를 삽입한 후에 고정시키고 튜브에 외면에 압력을 가하여 튜브가 금형에 의해 압축 가공 되면서 성형된다.



(a) Hydroforming process



(b) Tube sinking process

Fig. 2 Schematic drawing of forming process

#### 2.1.3 유한요소해석

유한요소 해석은 ABAQUS v6.5(Standard)을 이용하였고 Fig. 2 와 같이 모델을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 SS304[10] 재료 기계적 성질을 Table 1 에 나타내었다. 재료 두께는 2mm 이고 사각 형 4 절점 쉘 요소(S4R)로 구성하여 해석하였으며, 금형과 소재의 접촉면에서의 전단마찰계수는 0.1 로 하였다.

Table 1 Material data used in tube simulation

density	7.8 ton/m <sup>3</sup>
Young's modulus	210 GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield stress	450 MPa
Tensile strength	1357 MPa

#### 2.1.4 성형 에너지 비교

에너지 비교는 ABAQUS 해석결과에서 ALLWK 에너지 그래프를 이용하였고 에너지 소비량 계산은 아래 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$E_p + E_{FD} = E_w \quad (1)$$

여기서  $E_p$  는 재료 소성변형 에너지,  $E_{FD}$  는 마찰 변형 에너지로 나타내고  $E_w$  는 외부 작용 힘 에너지로 정의되고 있다. 해석 결과 성형 에너지 소비량을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Result of energy comparison

Process	Energy (J)
Hydroforming	$4.3 \times 10^7$
Tube sinking	$3.0 \times 10^7$

하이드로포밍 공정에서 관재가 벌징가공 되면서 축 방향 길이가 짧아지므로 이를 보상하기 위해 양쪽 플러그가 안쪽으로 전진하게 된다. 따라서 플러그 이동 및 튜브 액압 성형으로 인하여 튜브 싱킹 성형에 비교하여 에너지 소비가 많은 것으로 나타내고 있다.

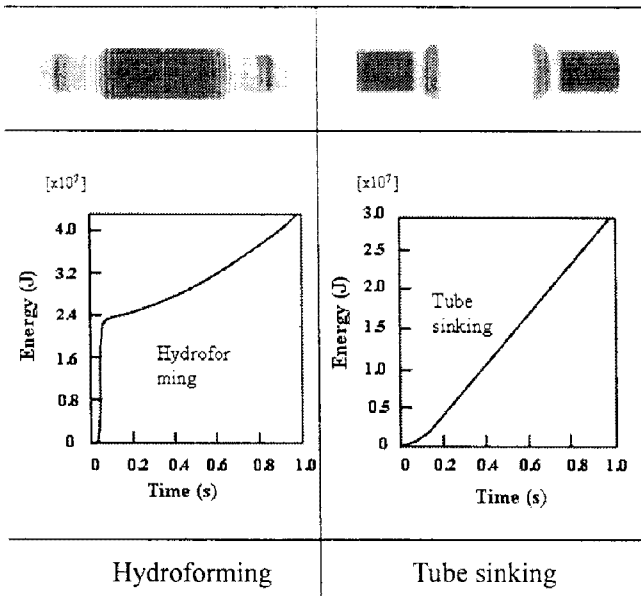


Fig. 3 Energy results of two simulations

## 2.2 컵 성형 해석

### 2.2.1 모델링

컵 성형 해석에서는 Fig. 4 과 같은 원형 컵 형상의 제품을 대상으로 하였다. 컵 드로잉 및 튜브 싱킹 공법으로 해석을 수행하여 성형 가공 차이에 따른 에너지 비교를 실시하였다.

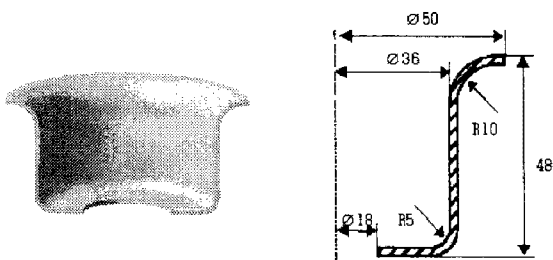


Fig. 4 Final model of cup forming

### 2.2.2 성형 해석 방법

컵 드로잉 공정에서 원형 블랭크(blank) 판재는 Fig. 5(a) 과 같이 편치하강에 따라 플랜지(flange) 부에서 원주 방향의 압축과 반경방향으로 드로잉 변형을 받아 원형 컵이 성형된다.

튜브 싱킹 공정에서 튜브 재료는 편치하강에 따라 튜브 끝 부분이 안쪽으로 드로잉 되면서 밑바닥부분이 먼저 성형되고 후 공정에서 다른 편치하강에 따라 플랜지 부분이 생성된다. 컵 드로잉 공정에서는 한 공정으로 완료되지만 튜브 싱킹 공정에서는 두 공정으로 성형이 완료된다.

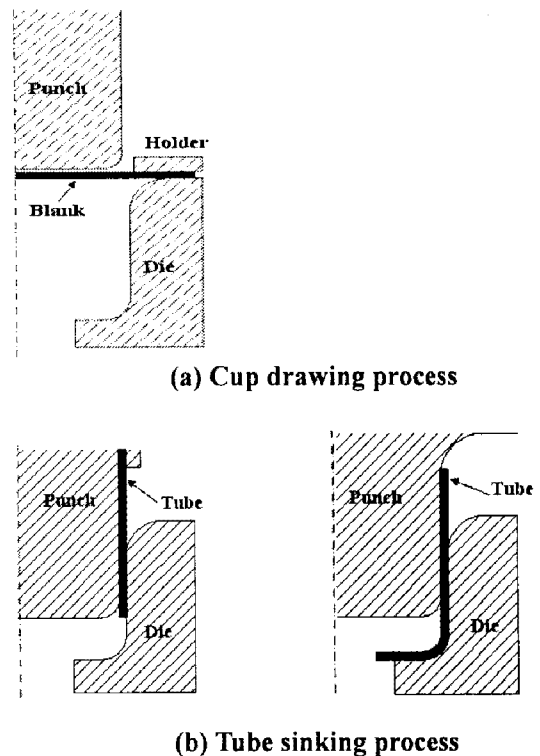


Fig. 5 Schematic drawing of forming process

### 2.2.3 유한요소 해석

유한요소 해석은 앞에서 언급하였듯이 ABAQUS v.6.5 (Explicit)에서 Fig. 5와 같이 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 FB590[9] 재료 기계적 성질을 Table 3에 나타내었다. 재료 두께는 2mm 이고 8 절점 사각 형 솔리드(solid) 요소(C3D8R)로 구성하여 해석하였으며, 금형과 소재의 접촉면에서의 전단마찰계수는 0.1로 하였다.

Table 3 Material data used in cup simulation

density	7.8 ton/m <sup>3</sup>
Young's modulus	210 GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield stress	400 MPa
Tensile strength	600 MPa

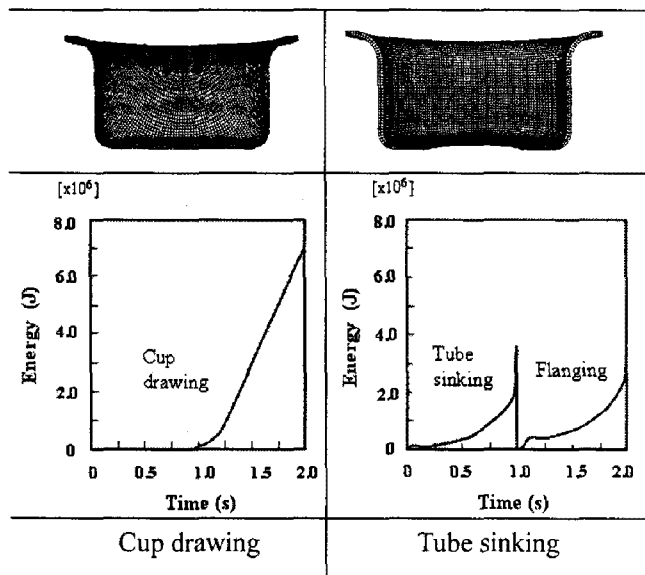
### 2.2.4 성형 에너지 비교

에너지 소비량 계산은 위 식 (1)을 이용하여 구하고 에너지 비교는 앞에서 언급하였듯이 해석 결과에서 ALLWK 에너지 그래프를 이용하였다. 성형 에너지 소비량을 Table 4에 나타내었다.

**Table 4 Result of energy comparison**

Process	Energy (J)
Cup drawing	$7.5 \times 10^6$
Tube sinking	$5.8 \times 10^6$

컵 드로잉 에너지 그래프에서 0~1초는 펀치와 블랭크가 접촉하는 시간이기 에너지 변화가 없는 것으로 나타나고, 튜브 싱킹 에너지 그래프에서 0~1초는 컵 밑바닥 부분 성형하는 에너지를 나타내고 1~2초는 컵 형상 플랜지 부분 성형하는 에너지를 나타낸다.



**Fig. 6 Energy results of two simulations**

### 3. 결론

본 연구에서는 관 제품의 가공을 위한 하이드로포밍 및 튜브 싱킹 그리고 컵 형상 제품의 가공을 위한 컵 드로잉 및 튜브 싱킹에 대한 유한요소 해석 결과를 바탕으로 공정 상 에너지 소비량을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 튜브 형상 성형 해석결과를 바탕으로 튜브 싱킹 공정이 하이드로포밍 공정에 비교하여 에너지 소비량 30% 정도 절감되는 것을 알게 되었다.
- (2) 컵 형상 성형 해석결과를 바탕으로 튜브 싱킹 공정이 컵 드로잉 공정에 비교하여 에너지 소비량이 23% 정도 절감되는 것을 알게 되었다.

(3) 유한요소해석을 통한 제조 공정 상에서 성형 가공 방법에 대하여 에너지 소비량에 대한 비교가 성형공정의 선택 시에 고려되어야 할 것으로 생각된다.

(4) 단, 본 연구에서는 재료 원가와 성형된 제품 단면의 치수정밀도 등에 대한 검토를 수행하지 않았음을 밝혀준다.

### 후 기

본 연구는 경북대학교 BK21사업의 일환으로 (주)화신 기술연구소 자동차부품연구그룹지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] S. R. Reid, Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers, *Int. J. Mech. Sci.*, 35, (1993), 1035.
- [2] 21세기 에너지 절약, <http://www.21cenergy.co.kr>.
- [3] 에너지와 인간생활, <http://seph.com.ne.kr>.
- [4] P. A. R. Rosa, J. M. C. Rodrigues and P. A. F. Martings, external inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation, *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, 43, (2003), 787.
- [5] 오수익, 전병희, 1999, “Tube hydroforming을 위한 성형인자 연구”, 한국소성가공학회’ 98추계학술대회 논문집, pp. 32~36
- [6] 김성태, 임성연, 이택근, 김영석, 2000, “판재 하이드로포밍에 의한 성형공정의 실험적 연구”, 한국소성가공학회지, Vol. 9, No.6, pp. 35~42
- [7] R. Kergen and P. Jodogne, 1992, “Computerized control of the blank holder pressure on deep drawing presses”, SAE 920433 – SP – 897, Detroit, Feb. 24-28, pp. 51~56.
- [8] G. S. Sekhon, N. K. Gupta and P. K. Gupta, An analysis of external inversion of round tubes, *J. Mat. Proc. Techn.* 133, (2003), 243.
- [9] ABAQUS Version 6.5 Document “Getting Started with ABAQUS.
- [10] W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, Experimental and analytical evaluation on flow stress of tubular material for tube hydroforming simulation, *J. Mat. Proc. Techn.* 191, (2007), 368~371.