

# 산업용 보일러 Tube의 Sinking 공정에 관한 연구

권일근\*·강경필\*·이원재\*

## A Study on the Tube Sinking Process of the Industrial Boiler Tube

I. K. Kwon, K. P. Kang, W. J. Lee

**Key Words:** flare-shape defect(플레어 형상 결함), multi-step tube sinking process(다단 튜브 싱킹 공정), friction(마찰), die geometry(금형 형상)

### Abstract

Theoretical analysis using finite element method are performed in order to clarify the formation of the flare-shape defect for multi-step tube sinking process. The parameters of concern were the friction between the tube and the die, and geometrical parameters, such as the die inclination angle, the diameters of the die entrance and exit, and the curvature at the corner of the die exit. The effect of the curvature at the corner of the die exit is dominant for determining the flare-shape defect. In order to minimize the flare-shape defect the curvature at the corner of the die exit should be increased up to a certain level(120mm). Using three-step tube sinking die sets which have different curvatures at the corner of the die exit, several numbers of tests were performed and its results are compared with that of theoretical analysis.

### 1. 서론

연속적인 인발에 의해서 봉의 직경을 감소시키는 방법을 봉 혹은 선 인발이라 부르고, 맨드렐을 사용하여 튜브의 직경을 줄이는 방법을 튜브 인발이라 하며, 맨드렐 없이 튜브의 직경을 줄이는 방법을 튜브 싱킹(tube sinking)이라 부른다. 튜브 싱킹 공정은 원추모양의 구멍이 파여진 금형을 소재에 밀어 넣어 원하는 단면의 파이프의 형상을 얻는 공정으로서 주로 튜브의 지름을 줄이는데 이용된다. 튜브 인발 공정에서 흔히 과도한 두께 감소에 의해 변형 부위에 인장에 의한 파단이 일어나는 것과 달리 튜브 싱킹 공정에서는 튜브의 길이 방향으로 압축을 가하여 성형하

므로 변형 부위의 두께가 증가하고 성형 압력이 과할 경우 금형 입구와 클램프 사이에서 소재의 좌굴이나 소성 변형이 발생할 수 있다. 일반적으로, 목표로 하는 직경 감소가 큰 경우 한번에 점차적으로 직경을 감소시키는 다단 공정을 이용하여 성형 압력을 낮추게 된다[1]. 또 다른 문제점으로 성형된 튜브의 끝단부가 나팔 형태로 벌어지는 플레어 형상(flare-shape) 결함이 발생하여 결함 부위가 되는 제품 끝단의 직경이 원하는 공차를 만족하지 못하는 경우가 발생한다. 이는 소재 유동이 금형의 기하학적 형상에 의해서 주로 결정되므로 여러 가지 인자를 고려한 금형 형상의 선정이 요구된다.

본 연구에서는 선박 용 보일러 튜브의 싱킹 공정에 있어서 이론 해석을 통하여 성형 하중과 밀접한 관계를 가지는 튜브 싱킹 금형의 내부 경사 각과 마찰의 영향을 고찰하고 그것을 금형 형상

\* 현대중공업 산업기술연구소

선정에 반영한다. 튜브 싱킹 공정 후 제품의 끝단에서 흔히 발생하는 플레어 형상 결함의 원인을 규명하기 위해 금형 내부에서의 소재 유동을 파악하고 플레어 형상 결함에 관계되는 인자를 고찰한다.

끝으로, 앞의 이론 해석을 통해 얻어진 단단 금형 형상에 따라 실제 금형을 제작하여 시험 성형을 수행하여 이론 해석 결과와 비교 검증하고, 끝단부 플레어 형상 결함의 주요 인자의 영향을 확인하고자 한다.

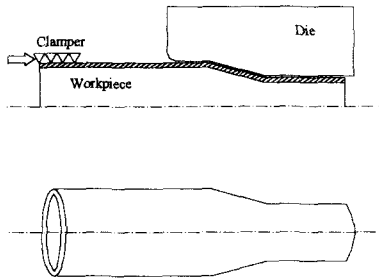


Fig. 1 Schematics of tube sinking process

## 2. 본 론

대형 보일러의 스팀용 튜브를 제한된 면적의 보일러 본체에 결합하기 위해서는 튜브의 끝단부 직경을 감소시켜 결합 면적을 줄일 필요가 있다. 스팀용 튜브의 작동 조건은 주로 고온 고압 상태이므로 성형시 튜브의 두께가 얇아지지 않는 싱킹 공정이 이용된다. 본 연구에서는 초기 직경이  $\phi 76.2$  mm인 튜브를 단단 튜브 싱킹에 의해 최종 직경  $\phi 50.9$ mm로 성형하기 위한 냉간 튜브 싱킹 공정에 대해 다룬다.

### 2.1 성형 하중

얇은 원관을 원추형 다이를 통하여 내부 지지물 없이 압출하는 튜브 싱킹의 경우 Fig. 1과 같은 외반경  $D$ 의 원관을 외반경  $D_1 (> D)$ 까지 지름을 줄이는 가공에 있어서 압출력  $P$ 는 튜브의 지름감소율( $D_1/D$ )에 비례한다[2][3]. 동일한 지름 감소율일 때 압출력  $P$ 는 일반적으로 슬래브 법에 의하여

$$P \propto \frac{1}{\cos \alpha}$$

로 표현되므로 튜브 싱킹 시 성형압력은 금형의 경사각의 크기에 비례한다고 할 수 있다[4]. 또한

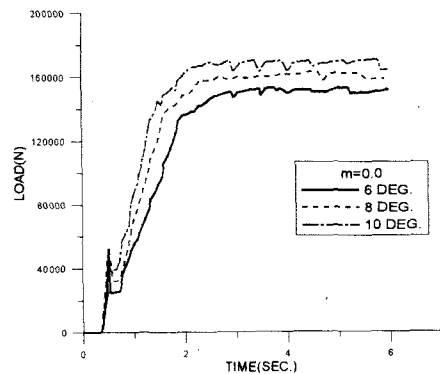
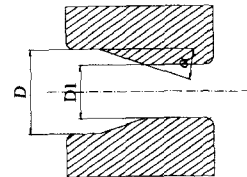
, 동일한 지름감소에 있어서 마찰에 따른 성형 하중의 변화를 상계해석으로 유도하면

$$P \propto m$$

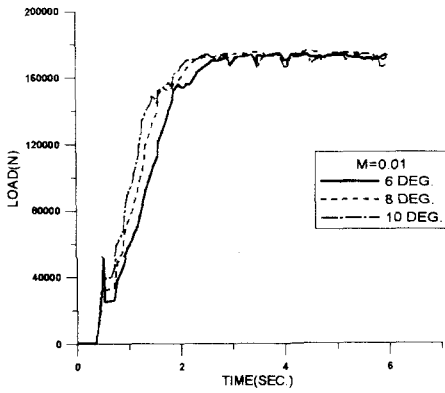
으로 표현된다[5].

튜브 싱킹에 의해서  $\phi 76.2$ mm인 튜브를  $\phi 66.0$  mm의 관으로 압출하는 공정을 생각할 때 Fig. 2에서는 전단 마찰 조건을 이용하여 강소성 유한 요소법으로 해석한 경우 마찰 계수( $m$ )가 0.0, 0.01, 0.03로 두었을 때 금형의 경사각에 따른 성형 하중을 나타내었다.

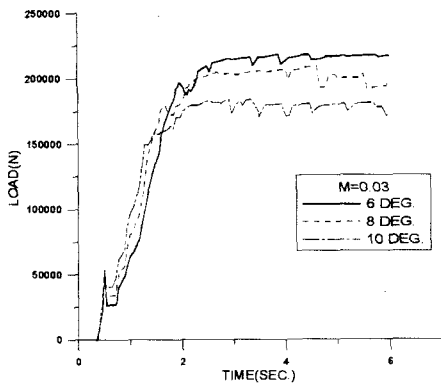
마찰 계수( $m$ )가 0.0인 경우, 금형의 경사각이 증가할수록 성형 하중이 증가함을 알 수 있다. 그러나, 마찰 계수가 0.01일 때 성형 하중은 금형의 경사각에 무관하게 일정한 값을 보인다. 마찰 계수를 더욱 증가시켜 0.03으로 설정한 경우 슬래브 법에 의하여 얻어진 결과와는 반대로 경사각이 증가할수록 압출력은 오히려 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 위의 결과로 동일한 입구 외반경과 출구 외반경을 가지는 튜브 싱킹 공정에 있어서 마찰이 작은 경우는 금형의 경사각이 압출력에 지배적인 영향을 미치나 마찰이 큰 경우는 금형의 경사각이 작을수록 금형의 내면과 소재의 접촉면적이 커지므로 상대적으로 큰 압출력이 소요된다고 할 수 있다.



(a)  $m = 0.0$



(b)  $m = 0.01$



(c)  $m = 0.03$

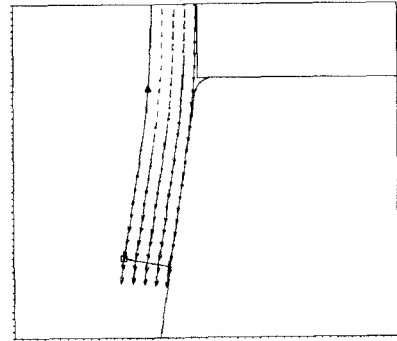
Fig. 2 Forming load with respect to friction and die angle ( $\alpha$ )

### 2.2 끝단부 플레어 형상(flare-shape) 결함

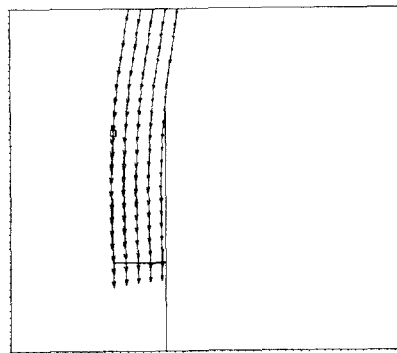
Fig. 3은 속도형 평형방정식을 이용한 강소성 유한 요소해석 결과 얻어진 소재의 속도장을 나타낸다. 금형의 입구를 통과할 때 외경쪽의 속도장이 크던 것이 소재가 금형 출구를 통과 할 때는 튜브 외경부의 속도가 내경부의 속도보다 커지게 되고 이로써 튜브의 지름이 감소하는 방향으로 재료가 유동하는 것을 관찰할 수 있다.

한편, 지름이 감소하는 방향으로 유동하던 재료가 다이의 출구 측에 도달해서는 내경부의 속도가 더 커져서 유동방향을 바꾸게 되고 금형의 출구를 빠져 나온 재료가 일정한 지름을 유지하면서 유동하게 된다. 이 과정에서 다이 내에서 경사각을 가진 속도벡터가 출구를 통과하고 난 뒤 소재의 내경측 속도가 외경측 속도 보다 커지게 된다. 이 때문에 튜브 끝

단부에 Fig. 3 (b)와 같이 플레어 모양의 벌어짐 현상이 발생한다고 할 수 있다. 소재가 출구의 코너를 통과할 때 금형의 벽면과 어느 정도의 간격을 유지하며 진행하므로 금형 출구의 내부 지름과 얻어진 소재의 싱킹 지름 ( $D1$ )은 다소 차이를 가지는 것도 관찰 할 수 있다.



(a) Entrance



(b) Exit

Fig. 3 Vector plots of nodal velocities

Table 1은 마찰 계수가 0.03인 경우 금형의 경사각에 따른 끝단부 벌어짐 현상의 정도를 보여준다. 금형의 경사각이 클수록 싱킹 지름은 금형의 내부 지름보다 작아지므로 금형의 경사각이 큰 경우 금형 출구의 지름을 목표 싱킹 지름보다 약간 크게 설계할 필요가 있다. 소재 끝단부의 플레어 형상 결함의 척도인 튜브 끝단 부분의 지름과 싱킹 지름의 차이( $D2-D1$ )는 금형의 경사각이 클수록 증가하는데 이는 경사각이 클수록 튜브 끝단부의 플레어 형상 결함이 심각해짐을 의미한다. 앞의 해석 결과에

의거하여 보일러 용 튜브의 경우 결합 시 요구되는 홀 공차와 싱킹 튜브의 공차와 튜브 클램프부분과 금형 사이의 소재의 소성변형이나 좌굴을 피할 수 있는 적절한 금형의 경사각은 8-9° 정도로 볼 수 있고, 지름  $\Phi 76.2$  mm인 튜브를 지름  $\Phi 50.9$  mm로 싱킹하는 경우 안전율을 고려하여 성형공정을 3단계로 나누는 것이 적절하다.

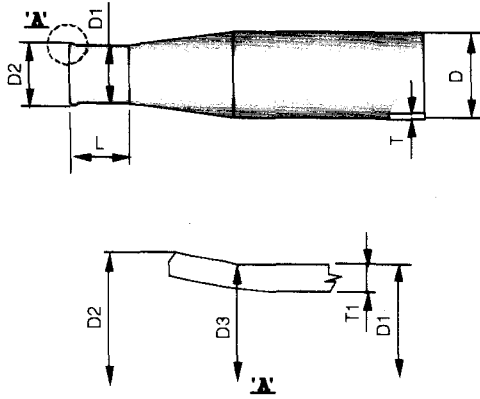


Fig. 4 Flare-shaped cut end

Table 1 Diameters of cut ends with respect to die angles ( results of FEM analysis )

Unit: mm

Die angle \ Dia.	D1	D2	D3	D2-D1
6°	65.14	65.40	64.94	0.26
8°	64.98	65.36	64.72	0.38
10°	64.86	65.42	64.60	0.56
12°	64.84	65.48	64.50	0.64

### 2.3 .금형 출구의 곡률반경

튜브 싱킹에 의해서  $\Phi 76.2$  mm인 튜브를  $\Phi 50.9$  mm의 성형 공정을 때 3단계로 나눌 때 각 단계별 금형의 지름감소를 각각  $\Phi 76.2 \rightarrow \Phi 66.0 \rightarrow \Phi 57.0 \rightarrow \Phi 50.9$ 로 선정하였다..

전술한 바와 같이 튜브 끝단부의 플레어 형상 결함은 소재의 끝단부가 출구를 통과할 때 금형 형상의 기하학적인 영향으로 인해 발생한다. 금형의 경사각이 클수록 플레어 형상 결함이 심각해지는 것과 반대로 출구 코너 부분의 곡률 반경을 증가시키면 소재가 출구를 통과할 때

완만한 커브를 그리며 변형할 수 있으므로 플레어 형상 결함을 감소시킬 수 있다.

금형 출구의 곡률 반경의 영향을 알아보기 위해 Fig. 5에 나타난 것과 같이 3단계 성형공정에 대하여 탄소성 유한 요소 해석을 수행하였다.

금형 출구의 곡률 반경을 증가시키면 끝단부의 지름과 싱킹 지름의 차이(D2-D1)가 감소하므로 튜브 끝단의 플레어 형상 결함은 줄어드는 것으로 판단할 수 있다. 소재의 싱킹 지름(D1)은 금형 출구의 곡률 반경이 클수록 금형의 내부 지름에 근접하게 된다. 금형 출구의 곡률 반경을 과도하게 증가시켜 소재가 금형의 벽면에 완전히 밀착하게 되면 소재와 금형 사이의 윤활막이 깨어져서 성형 하중이 급격히 증가하고 제품의 표면이 불량할 가능성이 있다.

소재의 끝 부분이 금형을 완전히 빠져나오면 Fig. 6에서와 같이 금형의 벽면에 의해 구속되어 있던 끝단부가 지름이 증가하는 방향으로 탄성복원과 유사한 변형을 하게 되는데 이것도 역시 튜브 끝단의 플레어 형상 결함을 유발하는 원인이라고 할 수 있다. 대체로 금형의 곡률 반경이 증가하면 변형량도 증가하는데 이때 발생하는 탄성복원량은 정밀한 허용 공차를 요구하는 제품의 경우 성형불량을 초래할 수 있다.

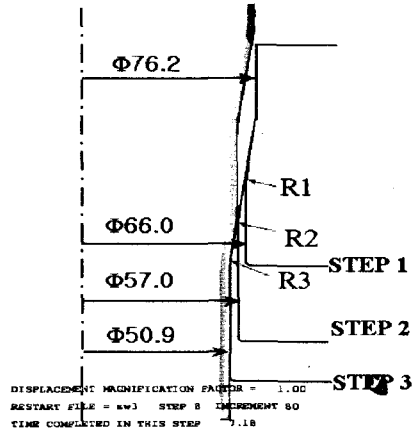


Fig. 5 Die geometry of three-step sinking process and deformed workpiece at the step 3

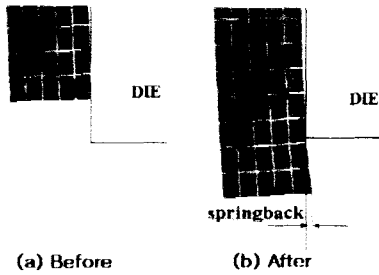


Fig. 6 Springback at the free end

Table 2 Results of FEM analysis

CASE	STEP0)	R1	→ after springback (Unit:mm)			Springback at cutend
			D2	D1	D2-D1	
A	1	30	→ 66.02	65.406	0.614	0.186
			66.208	65.558	0.65	
	2	30	→ 58.942	58.268	0.674	0.182
			57.104	56.28	0.824	
	3	30	→ 49.02	48.42	0.6	0.14
			49.16	48.46	0.7	
B	1	80	→ 66	65.558	0.444	0.208
			66.208	65.642	0.566	
	2	80	→ 57	56.774	0.226	0.202
			57.202	56.838	0.364	
	3	80	→ 49.1	48.92	0.18	0.16
			49.26	48.96	0.3	
C	1	130	→ 66	65.876	0.124	0.258
			66.258	65.966	0.292	
	2	120	→ 57	56.886	0.114	0.22
			57.22	56.96	0.26	
	3	110	→ 49.1	49	0.1	0.18
			49.28	49.06	0.22	

### 3. 실험 결과

Table 3 Results of test

CASE	TEST NO.	DIMENSION					D2-D1
		L	D	T	D1	D2	
A	1	145	φ76.4	4.30t	φ50.75	φ51.10	0.35
	2	145	φ76.4	4.30t	φ50.40	φ51.10	0.70
	3	454	φ76.4	4.30t	φ50.50	φ51.00	0.50
	4	454	φ76.4	4.30t	φ50.45	φ51.10	0.65
C	1	145	φ76.3	4.35t	φ50.95	φ51.15	0.20
	2	145	φ76.3	4.35t	φ50.85	φ51.10	0.25
	3	454	φ76.3	4.35t	φ50.90	φ51.15	0.25
	4	454	φ76.3	4.35t	φ50.90	φ51.15	0.25

앞에서 얻어진 금형의 형상을 금형 제작에 도입하여 3단계 튜브 싱킹 금형을 제작하고 Fig. 7에 나타난 수평형 유압식 성형장치를 이용하여 시험 성형을 수행하였다. CASE A의 경우 각 단

계의 금형의 곡률 반경은 유한요소해석의 경우와 동일하게 R30, R30, R30이고 CASE C는 전체적으로 곡률 반경을 증가시켜 R130, R120, R110으로 하였다. 또한, 각 CASE 별로 압출 길이를 145mm, 454mm로 바꾸어가며 각각 4차례씩 실험을 수행하였다. 실험에서 얻어진 튜브 끝단의 형상은 Fig. 7에 나타나 있다. CASE C에서 얻어진 제품의 경우 플레어 형상 결함이 감소하였고 동시에 제품의 경사진 부분의 표면이 CASE A보다 양호하게 나타났다. Table 3에 나타난 실험결과에 따르면 압출 길이에 따른 제품의 차이는 그다지 크지 않은 것을 알 수 있다. CASE C의 경우 CASE A에 비해 튜브 끝단의 지름과 싱킹 지름의 차이(D2-D1)가 작게 나타남으로서 금형 출구의 곡률 반경이 증가할수록 튜브 끝단의 플레어 형상 결함이 감소하는 이론 해석의 결과와 동일한 경향을 나타내었다. 또한, 해석에서 얻어진 결과와 비교해보면 Fig. 8의 그래프에 나타난 것과 같이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

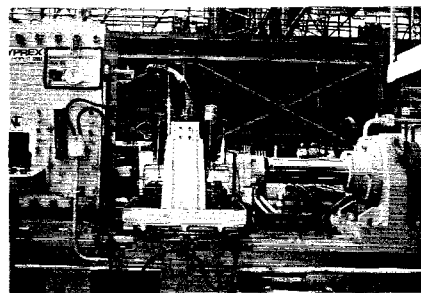
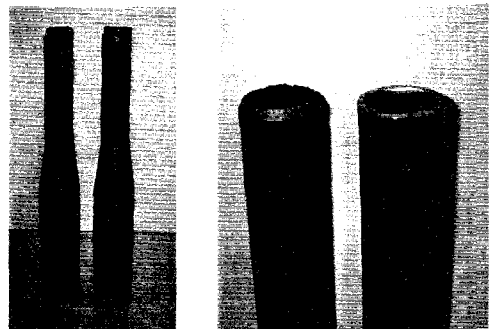


Fig. 7 End parts cut from the products(a) and the hydraulic former for tube sinking process(b)

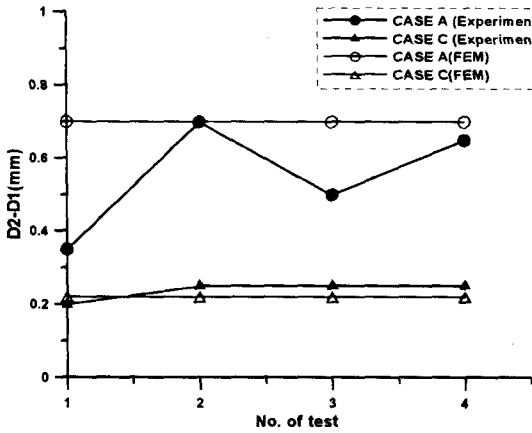


Fig. 8 Comparison between test results and FEM results

#### 4. 결론

본 연구에서는 정밀한 결합 공차를 요구하는 보일러 튜브의 싱킹 공정에서 있어서 목표로 하는 지름감소를 구현하기 위해 필요한 단단 성형 공정의 금형 형상의 영향에 대해서 고찰하고 이론 해석을 통하여 튜브 싱킹 시 소요되는 압출 하중과 끝단부 발생하는 플레어 형상 결합에 영향을 미치는 금형의 형상적인 인자를 찾아 적절한 금형 형상을 제시하였다. 또한, 이론 해석의 타당성을 검증하기 위하여 이론 해석 결과 얻어진 제작된 금형을 이용하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마찰 계수( $\mu$ )가 0.0인 경우, 금형의 경사각이 증가할수록 성형 하중이 증가하고, 마찰 계수가 0.01일 때 성형 하중은 금형의 경사각에 무관하게 일정한 값을 보인다. 마찰 계수 0.03이 되면 금형의 경사각이 증가할수록 압출력은 오히려 감소하나 경사각이 클수록 끝단의 플레어 형상 결합은 심해진다.

2. 강소성 유한요소 해석에서 얻어진 금형 내의 소재유동에 따르면 소재 끝단의 플레어 형상 결합의 원인은 금형 형상의 기하학적 측면에 기인하며 출구를 통과하는 튜브의 내경부 속도가 외경부 속도보다 커지면서 발생한다.

3. 금형 출구의 곡률 반경을 증가시키면 소재가 금형 곡면을 따라 밀착되어 성형됨으로써 플레어 형상 결합을 줄일 수 있다. 금형과 소재가 밀착되기 때문에 소재의 외경 치수와 금형의 내경은 같게 설정할 수 있다. 그러나, 금형 출구의 곡률 반경이 클수록 소재와 금형 간의 밀착에 의해 윤활막이 손상을 입어 마찰이 급격히 증가할 가능성이 있다. 소재를 금형에서 꺼내었을 때 탄성 회복에 의해 약 0.2mm 정도의 오차는 근본적으로 발생하게 된다.

4. 이론 해석을 통해 얻어진 3단계 튜브 싱킹 금형을 이용해 시험 성형을 수행한 결과 튜브 끝단의 플레어 형상 결합은 금형 출구의 곡률 반경이 큰 경우 작게 나타나고 그 값은 이론 해석 결과에 근접한다.

#### 참고문헌

1. "Forming and Forging", Metal hand book 9th edition, vol 14, p336-338.
2. Moore, G. G., and Wallace, J. F. "Theoretical Study of Tube Sinking through Conical Dies," J. Mech. Eng. Sci., 3, 1961, pp.225-235.
3. Woo, D. M., "The Analysis of Axisymmetric Forming of Sheet Metal and Hydrostatic Bulging Process.", Int. J. Mech. Sci., 6, 1974, pp. 303-317.
4. 이동녕, 소성학, 청문각, p159-163.
5. K. K. Um, K. N. Lee, " An upper bound solution of the tube drawing", Journal of Materials Processing Technology, 63, p43-48, 1997