

3차원 유한요소법을 이용한 T형 가지관의 용접자리 성형 방법에 관한 연구

홍대훈* · 황두순* · 신동필* · 홍성인**

(2000년 6월 30일 접수)

A Study on the T-branch Forming with 3-D Finite Element Method

D. H. Hong, D. S. Hwang, D. P. Shin and S. I. Hong

Abstract

In this study, the optimized initial hole shape for T-branch forming was proposed to obtain effective welding region. Design variables were determined by approximation analysis using volume constant condition. We performed 3D elastic-plastic FEM(Finite Element Method) analysis to simulate T-branch forming process. The variation of height and thickness of T-branch with various hole shapes was investigated. The optimized initial hole shape equation was obtained by using results for the numerical analysis.

Key Words : T-branch, Elastic-Plastic Finite Element Method

1. 서론

관재의 2차가공 가운데, dieless 가공 및 관단부의 성형가공은 관의 굽힘가공에 이어서 가장 많이 이용되는 주요한 가공법이다. 따라서, 최근에는 이들 가공에 대한 공학적인 해석의 요구가 높아지고 있고, 가공법의 신속성과 경제적인 면의 검토를 통하여 튜브가공(tube forming)에 대한 기대가 증대하고 있다.

종래의 파이프 배관방법은 규격품의 T관을 이용하며, 분지관의 수가 많을 경우 T관이 연결되는 부분을 모두 절단하여 선삭가공한 다음 용접을 하여야 한다. 따라서

T형의 가지관을 형성하기 위하여 3방향 모두 가공하고 용접을 해야되므로 공정시간이 많이 소요하고 절단에 따른 재료의 손실이 수반되는 등의 문제점을 가지고 있었다. 이러한 문제점을 해소하기 위하여 T형 연결관을 사용하지 않고 T형 가지관을 형성하는 방법이 제시되었다. 이는 종래의 가공방법과 비교하였을 때, 부품을 일체화하고, 냉간성형에 의하여 구조강도와 강성을 개선할 수 있고, 용접면이 줄어들어 이음효율을 향상시킬 수 있으며 다수의 T형관을 형성할 경우 정렬(alignment)이 좋아 정확한 위치에 T형 가지관을 연결 할 수 있다. 그리고 규격화된 T관을 구입, 관리, 연결하는데 필요한 소요경

* 충남대학교 기계공학과 대학원

** 충남대학교 기계공학과

비와 작업시간을 절감할 수 있는 장점이 있다.

그러나, 만약 펀치의 형상을 원형으로 하여 가공을 하게 되면 플러그를 뽑은 후의 관 돌출부 두께가 일정하지 않고 응력분포가 균일하지 않아 집중하중을 유발할 수 있으며, 이러한 성형과정중의 문제점들은 가지관과의 용접 시 중대한 결함을 야기할 수 있다.

이와같이 T형 가지관 성형방법에서는 펀치(punch)와 플러그(plug)의 형상과 크기, 플러그(plug) 경사면의 각도, 파이프(pipe)의 크기와 두께 등이 중요한 설계변수로 작용하게 되는데 본 연구에서는 재질과 예비성형체의 형상과 크기에 따른 설계변수를 찾고 이와 관련하여 판재와 파이프의 저속관통 근사해석을 통하여 그 변수들을 수식화 하였다. 그리고 실제의 관통형상과 유사한 원형과 타원의 2가지 모델(Model)을 3차원 유한요소해석(FEM Simulation)으로 각각 해석하였다.

2. T-가지관 성형공정

급속파이프 T형 가지관 용접자리 성형방법⁽¹⁾은 Fig. 1과 같은 4단계로 구성된다.

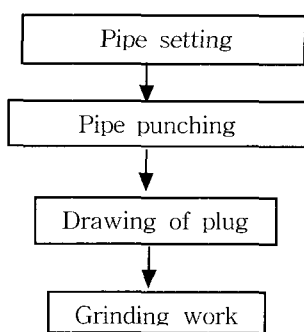


Fig. 1 Sequence of T-branch forming

먼저 유압실린더에 의해 움직이는 펀치다이를 파이프 속에 들어가도록 하여 파이프를 V형 블록위에 올려놓고 T형 가지관의 위치를 잡은후 유압프레스의 펀치로 파이프에 구멍을 뚫는다.

다음으로 Fig. 2와 같이 파이프 내부에 플러그(plug)를 집어넣고 유압프레스와 체결한후 프레스를 상승시키면 펀치 작업에 의해 뚫려 있던 구멍이 소성변형을 일으켜 위로 돌출되면서 원형의 T형 가지관 용접자리가 생기는 단계이다.

마지막으로 성형된 T-Branch의 자리를 연삭기로 평면 연삭하여 T형 가지관 맞대기 용접자리를 만들어 준다.

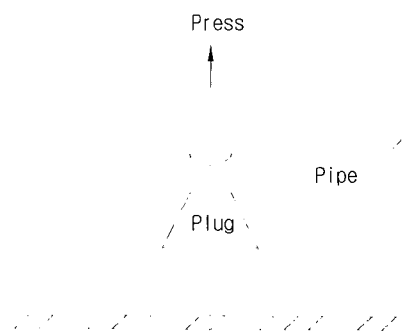


Fig. 2 Step2-Drawing of plug

3. 근사해석

T-가지관의 변형에 대한 해석⁽²⁾에서 체적일정조건(incompressibility)을 이용하여 가공 전 초기 구멍의 형상 및 크기와, 가공 후 변형되는 부분의 높이 및 두께변화의 관계를 다음과 같이 근사적으로 구할 수 있다.⁽³⁾

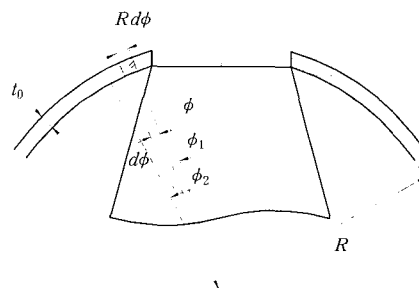


Fig. 3 Undeformed pipe (2D)

Fig. 3은 가공전의 형상으로 파이프의 가공부위를 ϕ_1 부터 ϕ_2 라고 하고 임의의 지점 ϕ 에서의 미소각도를 $d\phi$ 라고 정의하였다. Fig. 4는 가공후의 형상을 나타낸다.

3.1 변형전의 체적(변형될 부분)

변형전의 체적 V_u 은 변형이 일어나는 영역에서 초기 구멍이 있는 곳의 체적을 제거하여 구할 수 있으므로, 변형이 일어날 영역인 바깥쪽 원부분 체적 V_2 에서 가공전의 초기 구멍에 해당하는 안쪽 타원 부분 체적 V_1 을 뺀 것이므로 다음과 같은 관계를 세울 수 있다.

$$V_u = V_2 - V_1 \quad (1)$$

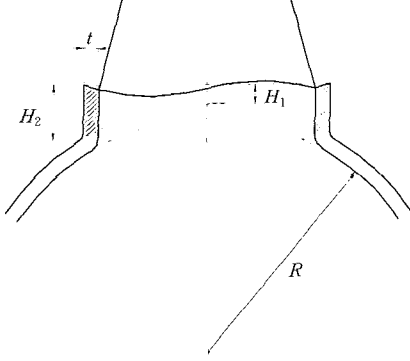


Fig. 4 Deformed pipe (2D)

체적 V_2 은 미소체적 dV_2 를 적분하여 식(2)과 같이 구할 수 있다.

$$dV_2 = t_0 \cdot R d\phi \cdot 2R \sqrt{\sin^2 \phi_2 - \sin^2 \phi}$$

$$\therefore V_2 = \int_0^{\phi_2} t_0 \cdot R^2 \cdot 2 \sqrt{\sin^2 \phi_2 - \sin^2 \phi} d\phi \quad (2)$$

(R : 관의 반지름, t_0 : 변형전 관의 두께)

초기 구멍의 체적 V_1 은 구멍의 형상이 타원이라고 생각할 경우 그 타원구멍의 면적과 두께의 곱으로 생각할 수 있다. 타원형상은 사각형과 반원 2개의 조합으로 나누어 생각할 수 있으므로, 직사각형 단면에 해당하는 부분의 체적 V_C 는

$$V_C = \int_{\theta_0}^{\theta_1} t_0 \cdot R \cdot 2 \sqrt{a^2 - R^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (3)$$

반원 2개에 해당하는 체적은

$$dV_R = t_0 \cdot b \cdot R d\phi$$

$$\therefore V_R = \int_0^{\phi_1} t_0 \cdot b \cdot R d\phi \quad (4)$$

(a : 타원에서 단축방향의 길이,
 b : 장축방향의 직사각형의 길이)

따라서, 변형전의 체적은 다음과 같다.

$$V_u = V_2 - V_1 = V_2 - (V_R + V_C)$$

$$= \int_0^{\phi_1} 2 t_0 R^2 \sqrt{\sin^2 \phi_2 - \sin^2 \phi} d\phi \quad (5)$$

$$- \left(\int_0^{\phi_1} b t_0 R d\phi + \int_{\theta_0}^{\theta_1} 2 t_0 R \sqrt{a^2 - R^2 \sin^2 \theta} d\theta \right)$$

3.2 변형후의 체적

플러그가 진행되는 방향의 정면에서 바라본 부분의 원주방향 각도와 관재 단면의 원주방향 각도를 각각 γ 와 ξ 라고 하면 그 관계는 다음과 같다.

$$R \sin \phi_2 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) = R \sin \xi$$

$$\therefore \sin \xi = \sin \phi_2 \sin \gamma \quad (6)$$

그리고, 가공후의 높이 H 는 다음과 같다.

$$H = (R + H_1) - R \cos \xi$$

$$= (R + H_1) - R \sqrt{1 - \sin^2 \phi_2 \sin^2 \phi} \quad (7)$$

따라서, Fig. 4에 나타난 변형후의 체적(V_d)은 마찬가지로 미소체적을 적분함으로써 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$dV_d = t H R \sin \phi_2 d\gamma$$

$$= t \{ (R + H_1) - R \sqrt{1 - \sin^2 \phi_2 \sin^2 \phi} \} R \sin \phi_2 d\gamma$$

$$\therefore V_d = 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} t \{ (R + H_1) - R \sqrt{1 - \sin^2 \phi_2 \sin^2 \phi} \}$$

$$\times R \sin \phi_2 d\gamma \quad (8)$$

여기서, 변형전과 변형후의 체적은 일정(incompressibility)하다는 조건으로부터 $V_u = V_d$ 이므로

$$\int_0^{\phi_2} 2 t_0 R^2 \sqrt{\sin^2 \phi_2 - \sin^2 \phi} d\phi$$

$$- \left[\int_0^{\phi_1} b t_0 R d\phi + \int_{\theta_0}^{\theta_1} 2 t_0 R \sqrt{a^2 - R^2 \sin^2 \theta} d\theta \right]$$

$$= 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} t \{ (R + H_1) - R \sqrt{1 - \sin^2 \phi_2 \sin^2 \gamma} \} \times R \sin \phi_2 d\gamma \quad (9)$$

(9)의 식으로부터, 관의 단면부분의 지름, 두께, 가공될 구멍의 크기와, 플러그(plug)의 지름이 정해지면, 높이 H_1 를 일반적인 기준에 맞춰 가정하여, 타원형상(a, b)의 조정에 따라 변하는 두께 t (단, t 가 균일하다고 가정)를 구할 수 있다.

식(9)는 유한요소해석을 수행하는데 있어서 각 설계변수를 정하는데 사용되었다.

4. 해석조건

T형 가지관 가공을 수치해석적으로 시뮬레이션하기 위하여 상용 프로그램인 Abaqus⁽⁴⁾를 사용하여 3차원 탄소성유한요소해석을 수행하였으며 Table 1은 입력값인 파이프의 물성치이다.

Table 1 Material properties of pipe

Young's Modulus(E)	207 GPa
Poisson's Ratio (ν)	0.292
Yield Strength (σ_Y)	417 MPa
Friction coefficient (m)	0.1

Table 2에서는 실제 현장에서 가공되어지는 T형 가지관을 모델로 설정된 기본 형상치수를 나타내고 있다.

Table 2 Dimensions of pipe shape

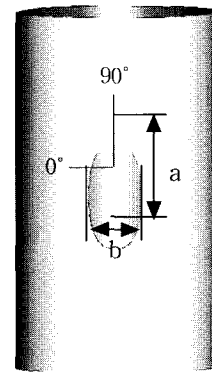
d	30 mm	D_i	106 mm
P_f	30 mm	D_o	114 mm
P_w	70 mm	L	40 mm

- d : Initial diameter
- D_i : Inner diameter of pipe
- D_o : Outer diameter of pipe
- P_f : Upper diameter of plug
- P_w : Lower diameter of plug
- L : Length of plug

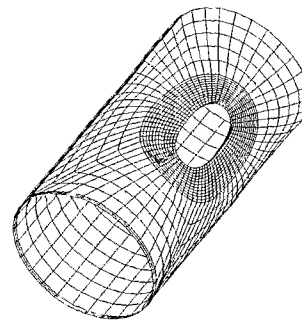
이 기준 데이터를 바탕으로 T형 가지관의 보다 나은 가공성과 적용성을 보장하는 최적형상을 유추하기 위하여 용접자리의 형상을 Table 3과 같은 각각의 경우에 대하여 해석하였다.

Table 3 Cases for analysis

Parameters		Dimensions (mm)
Diameter of hole		30, 35, 40, 45
Ellipticity (a/b)		1.5, 1.67, 1.83, 2
Diameter of plug	b, D	P_w
	30, 90	60, 70, 80
	40, 100	60, 70, 80
	50, 110	60, 70, 80



(a) Preform of pipe



(b) Meshed pipe for analysis

Fig. 5 Undeformed pipe(3-D)

Fig. 5는 상기 데이터들을 사용하여 모델링한 전모델 (Preform)중 하나를 보여주고 있다. Fig. 5(a)에서 0° 와 90° 는 각각 폭방향과 길이방향지점을 나타내며 a와 b 는 각각 길이방향과 폭방향의 길이를 나타낸다. Fig. 5(b)는 유한요소해석을 위한 모델이며 변형이 집중되는 구멍의 주위부분은 세밀하게 요소를 나누었다. 실제로 해석에 사용된 모델은 파이프가 대칭이라는 조건을 사용하여 1/8의 모델이 사용되었다.

5. 결과 및 고찰

유한요소해석을 통하여 T형 가지관 가공에 있어서 설계변수 및 형상의 변화가 돌출부의 두께와 높이에 미치는 영향을 알아보았다.

5.1 설계변수 및 형상에 따른 영향

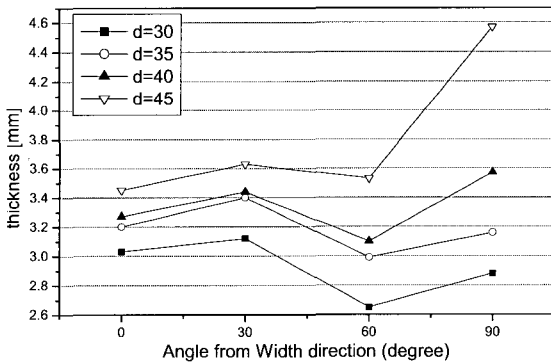


Fig. 6 Thickness of deformed pipe for circle

Fig. 6은 파이프 구멍의 초기형상이 원형일 때 편칭된 구멍의 크기에 따른 가공후 두께변화를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 좌측은 파이프의 폭방향(0°)이며 우측은 길이방향(90°)의 두께를 나타낸다. 폭방향으로부터 60° 인 지점에서 급격한 두께의 감소를 확인할 수 있는데 이것은 변형시 상대적으로 변형량이 많은 길이방향의 높이 변화와 폭방향의 관의 기하학적 형상으로 인한 구속에 의해 형상적으로 편중된 지점에서 집중 인장응력이 발생하여 두께감소를 야기한다고 생각된다.

Fig. 7은 초기 편칭형상을 타원으로 설계하였을 때, 타원의 형상비(a와 b의 비)에 따른 두께변화를 조사한 것이다. 형상비가 1, 즉 완전한 원인 경우에는 60° 지점에서 급격한 두께의 감소가 나타나지만 형상비가 1.33인

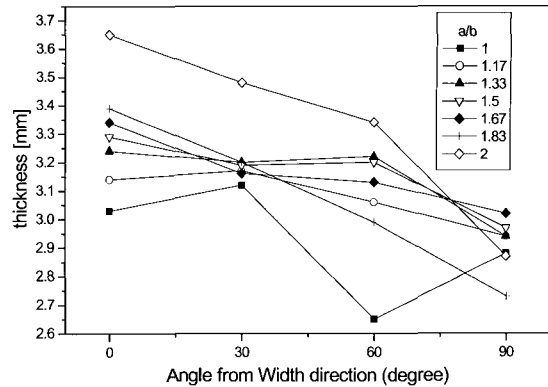


Fig. 7 Thickness of Deformed Pipe for ellipse

타원의 경우에는 그 두께의 차가 작아지는 경향을 볼 수 있다. 이로부터 타원형상이 원형의 급격한 두께변화를 보완할 수 있는 형상임을 알 수 있으며, 적절한 형상비를 가진 초기 형상의 설계를 통해 좀더 일정한 두께의 용접부를 얻을 수 있을 것으로 사려된다.

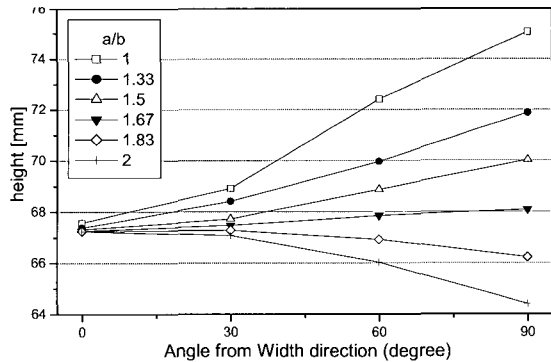


Fig. 8 Height of deformed pipe for ellipse

Fig. 8은 폭방향길이(b)를 고정시키고 길이방향지점(a)의 길이를 변수로하여 형상비를 변화시킨 경우 파이프의 중심으로부터 각지점 돌출부끝단까지의 수직높이를 나타낸다. 형상비에 따라서 폭방향지점의 높이는 거의 일치하나, 길이방향지점은 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 타원의 형상비에 따라서 길이방향지점에서의 가공면적이 달라지기 때문이다. 따라서 용접전 평면 연삭단계에서 높이가 일정할수록 재료의 손실이 적고 가공의 경제성이 증대되며 두께가 일정할수록 정밀한 가공에 유리하다는 점을 감안하면 약 1.33의 형상비근방에서 최적의 초기형상을 얻을 수 있다고 할 수 있다.

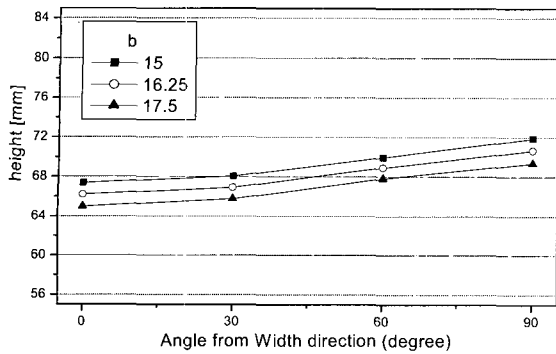


Fig. 9 Height for ellipse (ratio=1.33)

Fig. 9은 타원비(a/b)는 1.33으로 일정하며 b를 변수로 전체 초기구멍의 크기를 변화시켰을 때 파이프의 중심으로부터 각지점 돌출부의 끝단까지 수직높이를 보여준다. T형 가지관 가공에서는 가공효율측면에서 초기구멍의 타원비와 함께 그 크기도 고려되어야 한다. 그러나 연삭 후 용접하기에 충분한 높이의 돌출부를 얻기 위해서는 폭방향지점의 돌출부높이가 길이방향지점의 외경반지름 이상이 되어야하기 때문에 초기구멍이 일정크기 이하로 가공되어야 한다. 그 최적의 값은 식(9)로부터 얻을 수 있다. 각 지점 높이의 변화는 구멍의 크기에 상관없이 일정한 경향을 나타낸다.

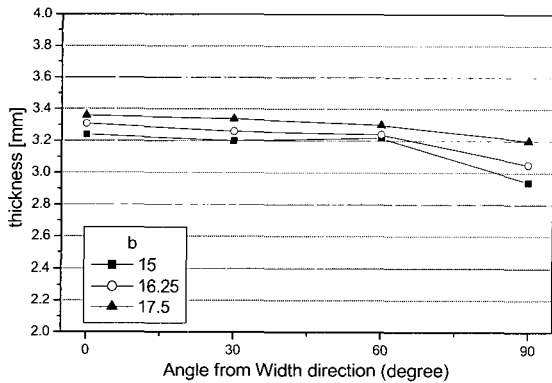


Fig. 10 Thickness for ellipse (ratio=1.33)

Fig. 10에서는 타원비(a/b)는 1.33으로 일정하며 b를 변수로 전체 초기구멍의 크기를 변화시켰을 때 돌출부의 각지점 두께를 나타낸다. 전체적으로 균일한 형상을 보이고 있으나 구멍의 크기가 클수록 더욱 일정한 두께를 나타냄을 알 수 있다. 특히 초기구멍의 크기가 작은 경우 길이방향지점에서 두께가 다소 얇아지는 현상을 볼

수가 있는데 이것은 타원의 기하학적인 특성과 각 지점에 따라 파이프의 곡률이 변함으로 인하여 타원의 크기가 클수록 길이방향지점에 발생하는 인장력이 증가하기 때문이다.

이로부터, 특정한 타원비에서는 초기구멍의 크기가 변화하여도 거의 균일한 두께와 높이를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5.2 최적 초기형상 설계

유한요소법을 통한 해석결과를 일반화하기 위하여 수치해석적 방법을 사용하였으며 그것으로 최적의 초기형상을 설계할 수 있는 수식을 제시하면 다음과 같이 나타낸다.

$$b = h^{-3.17} \cdot D^{2.79} \cdot P^{0.86} \quad (10)$$

수식(10)에서 수치해석 방법으로는 최소자승법(least square method)이 사용되었으며 이 수식을 사용하여 요구되는 폭방향높이(h)에 대한 초기 편칭될 구멍의 단축방향의 크기(b)를 결정할 수 있다.

Fig 11.은 유한요소해석을 통하여 설계변수인 파이프와 플러그의 지름, 초기구멍의 단축방향 크기에 따른 파이프의 최종성형높이를 나타낸 것이며 수식(10)의 결과와 근사한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

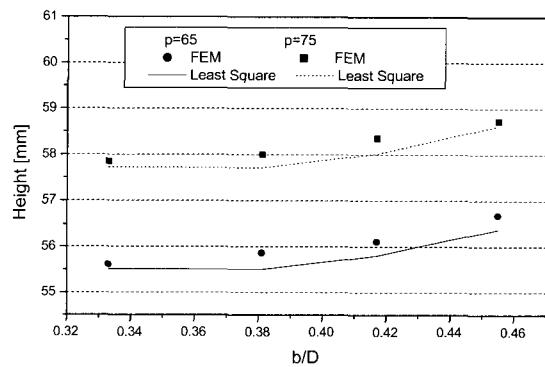


Fig. 11 Variation of height with b/D

설계변수 중 플러그지름의 크기(P)는 용접자리의 최종 지름을 결정하는 요소이다. Fig.11은 타원비가 1.33인 경우이며 플러그의 크기가 증가할수록 변형량은 증대되고 따라서 높이도 증가함을 알 수 있다. 파이프의 직경(D)과 초기구멍의 크기의 비가 증가할수록 높이가 증가함을

알 수 있는데, 이는 관의 직경크기에 비해 초기 구멍이 클수록 변형량이 적기 때문이다.

초기 편칭될 구멍의 폭방향의 크기가 결정되면, 가공후 두께 균일도를 고려한 형상비에 대해서 함수로 표현이 가능하며 다음과 같이 식을 세울 수 있다.

$$a = kb \quad (k=1.33) \quad (11)$$

식(10), 식(11)를 통해 요구되는 균일도 범위내의 설계변수의 값과 최적 형상비를 갖는 초기구멍의 형상을 결정할 수 있다.

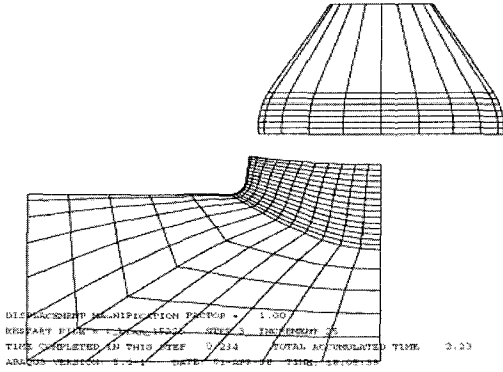


Fig. 12 Deformed body

Fig. 12는 수식을 통하여 얻어진 최적의 초기구멍 형상비를 사용하여 해석한 형상이며 폭방향과 길이방향의 높이차이가 근소한 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 T형 가지관의 용접을 위한 돌출부에서, 두께와 높이의 균일성을 보장하는 설계변수들과 형상비에 대하여 고찰하였다. 또한, 해석을 통하여 최적의 초기 punch의 형상을 설계하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 초기 구멍의 형상이 원형일 경우 구멍의 둘레방향의 편중된 지점(약 60°)에서 급격한 두께의 감소가 발생함을 보였고 이로 인하여 응력의 집중과 두께의 불균일성으로 인한 용접성의 감소를 야기할 수 있다.

(2) 폭방향과 길이방향의 변형을 고려하여 초기구멍의 형상으로 적절한 타원을 선택함으로써 두께의 불균일성을 감소시킬 수 있으며 평면연삭될 부분의 높이가 일정하게 유지됨으로써 가공경제성과 효율을 향상시킬 수 있다.

(3) 용접부의 두께와 높이에 영향을 미치는 설계변수로는 구멍의 지름과 형상비, 플러그의 지름이라는 것을 알 수 있었다.

(4) 이러한 설계변수를 고려하여 용접성의 저하를 방지하는 최적의 형상을 얻을 수 있는 수식을 제안하였다.

참 고 문 헌

- (1) 株式会社 チューブフォーミング, “パイプ材のビード成形装置”, 日本國特許廳 特許出願公開番號 特開平 7-51755, 1995. 2. 28
- (2) B.Avitur, 1983, “Drawing of Heavy Wall Tubing with Floating Plugs”, J. Applied Metalworking, Vol. 2, No.4, pp. 258~263.
- (3) W. Johnson, P.B.Meller, 1972, “Engineering Plasticity”, Ellis Horwood Limited, pp. 563~564, 589~590.
- (4) Abaqus theory manual Ver 5.6