

## 다중 회귀 분석을 활용한 Tee-Pipe 버링 공정에서 찢어짐 방지를 위한 피어싱 펀치 형상 최적 설계

이영섭<sup>1</sup> · 김준영<sup>1</sup> · 강정식<sup>2</sup> · 홍석무<sup>#</sup>

### Multiple Regression Analysis for Piercing Punch Profile Optimization to Prevent Tearing During Tee Pipe Burring

Y. S. Lee, J. Y. Kim, J. S. Kang, S. Hong

(Received January 25, 2017 / Revised May 25, 2017 / Accepted May 26, 2017)

#### Abstract

A tee is the most common pipefitting used to combine or divide fluid flow. Tees can connect pipes of different diameters or change the direction of a pipe run. To manufacture tee type of stainless steel pipe, combinations of punch piercing and burr forming have been widely used in the industry. However, such method is considerably time consuming with regard to performing empirical work necessary to attain process conditions to prevent upper end tearing of the tee product and meet target tee height. Numerous experiments have shown that the piercing profile is the main cause of defects mentioned above. Furthermore, the mold design is formed through trial and error according to pipe diameters and changes in requirements. Thus, the objective of this study was to perform piercing and burring process analysis via finite element analysis using DYNAFORM to resolve problems mentioned above. An optimization design method was used to determine the piercing punch profile. Three radii of the piercing punch (i.e., large, small, and joined radii) were selected as design variables to minimize thinning of a tee pipe. Based on results of correlation and multiple regression analyses, we developed a predictive approximation model to satisfy requirements for both thickness reduction and target height. The new piercing punch profile was then applied to actual tee forming using the developed prediction equation. Model results were found to be in good agreement with experimental results.

**Key Words:** Burring, Optimization, TEE-pipe, Coefficient of Correlation, Multiple Regression Analysis

## 1. 서 론

1990년 이후, 가스 사용 가구는 1,004만 가구에서 2015년 현재 2,200만 가구로 대폭 증가하였다. 이에 따라, 전국적인 배관망 구축으로 이음매 없는 용기, 용접 용기, LPG 용 복합재료 용기 등 제품 생산 현황은 1억 5천만개에서 2015년 통계 기준 3억 7천만개로 증가하였다[1]. 이에 따른 가스 수요의 증가로

인해 가스 배관의 대량 생산이 요구되고 있다. 가스 배관의 연결을 위해서는 T형 파이프(tee type pipe)가 필요하다. 정밀부품의 경우 하이드로 포밍 공법으로 제조되지만, 양산라인을 갖출 경우 초기 투자비가 상당히 많이 드는 단점이 있어, 가격이 저렴하고 대량 생산에 적합한 금형을 사용하여 tee-pipe 성형을 진행하였다[2]. tee-pipe 성형은 2공정으로 진행이 된다. 1공정은 모서리가 둥근 직사각형 형태로 피어싱을

1. 공주대학교 금형설계공학과

2. ㈜서원기술 연구소

# Corresponding Author : Department of MetalMold Design Engineering, Kongju National University, E-mail:smhong@kongju.ac.kr

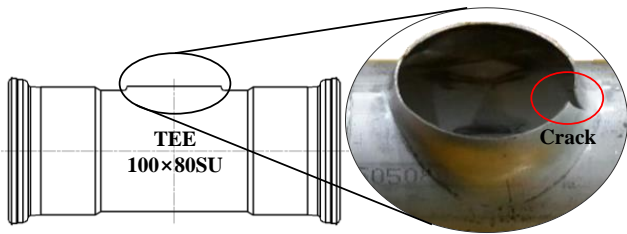


Fig. 1 Section of TEE-pipe and crack after burring process

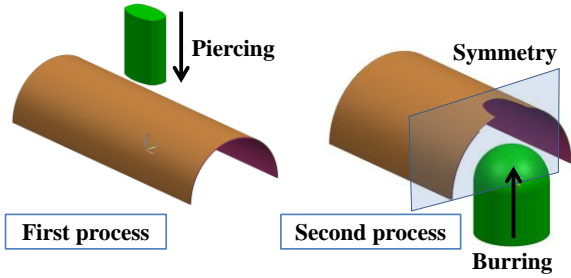


Fig. 2 Manufacturing process of TEE-pipe

한 후 2공정에서 구(球) 형의 버링 펀치를 위로 밀어 올려 제작하고 있다[3]. 그러나 제품 상단부에서 찢어지는 현상이 발생하거나, 목표 높이를 만족시키지 못하는 문제점이 발생한다(Fig. 1). 기존에는 찢어짐 문제를 해결하기 위해 현장에서의 경험을 통해 피어싱 형상이 결함의 주된 원인임을 파악하였으나, 파이프 형상과 요구 조건이 바뀔 때마다 시행착오를 통해 금형 설계를 하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 tee-pipe의 상단부 찢어짐을 막기 위해 tee-pipe 성형 공정을 모델링하고, 유한 요소 해석 프로그램인 Dynaform ver. 5.9.2.1을 사용하여 2단계의 피어싱(piercing)-버링(burring) 성형공정 해석을 수행하였다[4]. 피어싱 공정에서 tee-pipe의 두께 감소를 최소화 시키기 위하여 피어싱 펀치를 장변 R, 단변 R, 장변과 단변을 연결하는 R을 설계 변수로 설정하고, 실험계획법에 따라 해석적 실험 결과를 기반으로 다중 회귀 분석(multiple regression analysis)을 활용하여 두께 감소와 tee-pipe 상단부 높이를 동시에 만족시키는 최적의 형상을 결정하였다. 결정된 최적 형상을 기반으로 피어싱 금형 제작을 수행하였고, 해석 결과와 비교 검증을 수행하였다.

## 2. Tee-pipe 유한 요소 해석

tee-pipe는 이형관의 일종으로 T자 모양의 배관 사이의 연결 관이다. tee-pipe 성형은 2공정으로 진행이

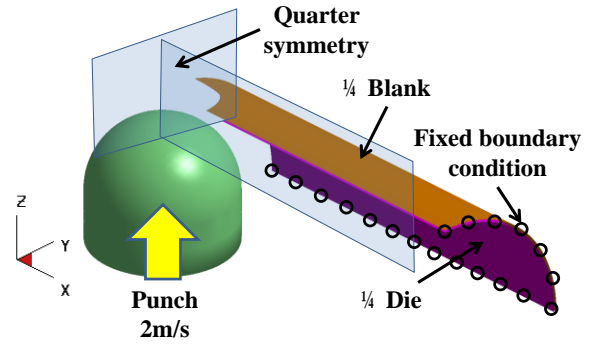


Fig. 3 Finite element modeling for burring

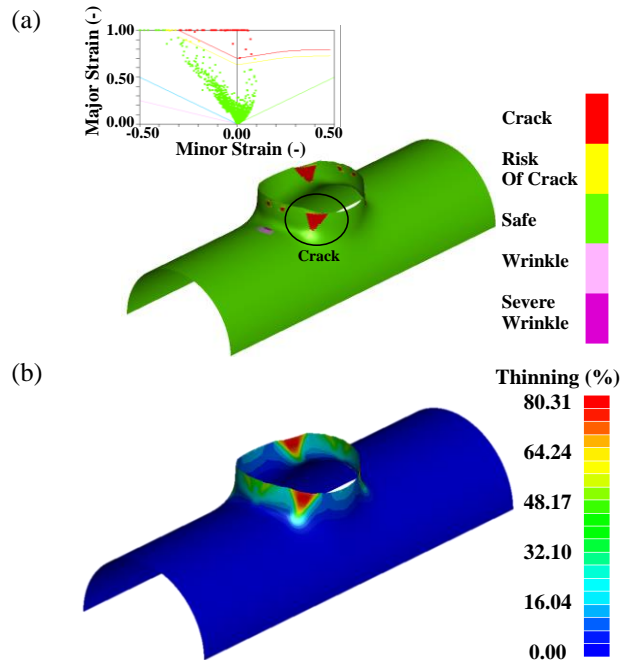


Fig. 4 Burring simulation result (a) FLD and (b) Thinning

된다. 1공정은 모서리가 둥근 직사각형 형태로 피어싱을 한 후 2공정에서 구(球) 형의 버링 펀치를 위로 밀어 올려 제작하고 있다. 이 공정 중 성형성에 영향을 미치는 버링 공정만 성형 해석을 진행하였다(Fig. 2).

tee-pipe 성형을 위해 해석 s/w Dynaform를 사용하여 4절점 쉘 요소를 사용하였고 메쉬 사이즈는 1mm에 요소수는 13,389개이다. 소재(blank)는 높은 연신율을 갖는 냉연 강판인 SUS304를 사용된다. 소재의 물성 및 유동응력은 Dynaform에서 제공되는 database를 사용하였으며, Table 1에 나타내었다. 초기 블랭크의 두께는 2.0mm이며, 해석에 사용된 마찰계수는( $\mu$ ) 0.125이다. 성형 해석 시간을 줄이고자 1/4(quarter symmetric) 모델을 적용하였으며, 해석에 사용된 재료의 유동응력 (flow stress) 커브는 식 (1)

의 swift model을 사용하였다.  $\bar{\sigma}$ 는 유동응력,  $K$ 는 강도계수,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형률,  $n$ 은 가공경화지수,  $\epsilon_0$ 는 초기 변형률이다. 양쪽 파이프 끝단에는 xyz축 방향의 움직임을 고정함으로써 경계조건을 설정하고 버링 성형 해석을 수행하였다(Fig. 3). 문제가 되었던 피어싱 펀치 형상은 long R : 47.248, short R : 20.909, edge R : 5이다. 이 형상의 버링 성형 해석 결과 두께 감소(thinning)가 80.31%로 SUS304의 연신을 71%보다 높아 찢어지는 현상이 발생하게 된다(Fig. 4)[5].

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (1)$$

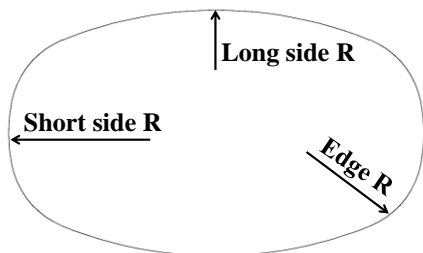
**Table 1 Mechanical properties of SUS304**

Parameters	SUS304
$K$ (MPa)	1426
$\epsilon_0$	0.029
$n$	0.502
Young's Modulus $E$ (GPa)	207
Poisson's ratio (-)	0.28
Yield Stress (MPa)	215
Tensile Stress (MPa)	505

### 3. 두께 감소를 위한 최적 설계

#### 3.1. 최적 설계 인자 설정

제품 상단부 찢어짐 문제와 제품 목표 높이 달성을 위해 최적 설계를 진행하였다. 최적 설계를 진행하기 위해서는 목적 함수(design variables), 설계 변수(objective function), 구속 조건(constraints)이 필수적인 요소이다. tee-pipe 최적 설계를 위해서 설계 변수를 short R, long R, edge R로 설정하였다(Fig. 5), 목적함수는 두께 감소 thinning의 최소화와 목표 제품 높이 height의 최대로 설정하였다(Table 2). Table 3는 세 개의 설계 변수에 대해 3레벨의 완전 요인 설계법 ( $3^3=27$ )에 따라 해석을 수행하고 그 결과를 정리하였다.



**Fig. 5 Definition of Design Variables**

**Table 2 Design variables, objective functions and constraints**

design Variables	short R, long R, edge R
objective Functions	min F(x) = thinning
	max F(x) = height
constraints (mm)	$68 < \text{long R} < 74$
	$32 < \text{short R} < 38$
	$5 < \text{edge R} < 10$

**Table 3 Full factorial simulation result**

case	long R (mm)	short R (mm)	edge R (mm)	thinning (%)	height (mm)
1	68	32	5	39.28	11.41
2	68	35	5	37.31	11.44
3	68	38	5	34.33	9.70
4	68	32	7.5	35.38	11.41
5	68	35	7.5	32.71	11.44
6	68	38	7.5	29.56	9.73
7	68	32	10	30.74	11.59
8	68	35	10	30.31	11.43
9	68	38	10	28.09	9.77
10	71	32	5	35.13	8.23
11	71	35	5	32.68	8.35
12	71	38	5	29.42	8.23
13	71	32	7.5	31.58	8.18
14	71	35	7.5	29.51	8.19
15	71	38	7.5	25.86	8.33
16	71	32	10	29.17	8.18
17	71	35	10	26.59	8.32
18	71	38	10	23.79	8.22
19	74	32	5	28.77	5.33
20	74	35	5	26.91	5.00
21	74	38	5	24.74	5.29
22	74	32	7.5	26.69	5.09
23	74	35	7.5	24.83	5.04
24	74	38	7.5	22.15	5.24
25	74	32	10	22.79	4.87
26	74	35	10	23.43	4.90
27	74	38	10	18.03	4.90

### 3.2. 상관분석을 활용한 민감도 분석

상관분석이란 두 개 이상의 연속적인 변수 사이에 상관되는 인자가 서로 어떠한 관련성을 가지고 있으며, 그 관련성이 어느 정도인지를 수치적으로 조사하여 분석하는 것이다[6]. 상관분석 결과는 Table 4에 나타났다. thinning에 대한 상관관계는 long R이 가장 높고 edge R, short R 순서이다. thinning과 각 변수들이 음의 상관관계가 있는 것으로 보아 thinning은 선형적인 관계가 있는 것으로 파악된다. height에 대한 상관관계는 long R이 -0.9759로 거의 -1에 수렴하는 강한 음의 상관관계를 보이고, short R과 edge R는 모두 0에 수렴하는 수평적인 결과를 가진다. 상관분석은 변수들의 관계를 나타내는 수학적 관계식 보다 두 변수가 관련된 정도에만 초점을 맞춘 것이기 때문에 회귀분석 식에서는 상관분석에서 값이 낮게 나온 short R과 edge R이 수학적 관계식에서는 사용될 수 있다.

### 3.3. 회귀분석을 활용한 예측식 개발

회귀분석이란, “Y”와 “X” 간의 관계를 설명하는 통계적 방법이다[7]. 본 논문에서는 다중 회귀 분석을 사용하였다. 다중 회귀식은 식(2)와 같이 설정할 수 있다. (X : 독립변수, Y : 종속변수, β : 회귀계수, β<sub>0</sub> : Y절편, β<sub>1</sub>~β<sub>k</sub>: 독립변수의 기울기) 본 연구에서는 종속변수가 1개 독립 변수가 3개인 식을 사용한다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (2)$$

다중 회귀분석의 기본적인 목표는 식(2)에서 상수 및 계수를 구하는 것이다. Table 3의 데이터를 사용하여 다중회귀분석을 시행한 결과 식(3), 식(4) 같은 예측식을 개발했다. height에 대한 예측식에서 edge R에 대한 p-값이 0.05 이상의 값이 나와 예측식에서 제외하였다. (X<sub>L</sub>: 장변 R, X<sub>S</sub>: 단변 R, X<sub>E</sub>: 장변과 단변을 연결하는 R)

$$Y_{\text{thinning}} = -1.46981X_L - 0.80667X_S - 1.23622X_E + 170.74259 \quad (3)$$

$$Y_{\text{height}} = -0.96778X_L - 0.09037X_S + 80.07556 \quad (4)$$

식(3), (4)에 Table 3의 long R, short R, edge R을 대입하여 나온 예측값과 해석 데이터와 비교하였다 (Fig. 6).

Table 4 Correlation analysis result

	long R	short R	edge R	thinning	height
long R	1				
short R	-0.0658	1			
edge R	-0.1363	-0.0658	1		
thinning	-0.7023	-0.3522	-0.4323	1	
height	-0.9759	-0.0303	0.1298	0.7327	1

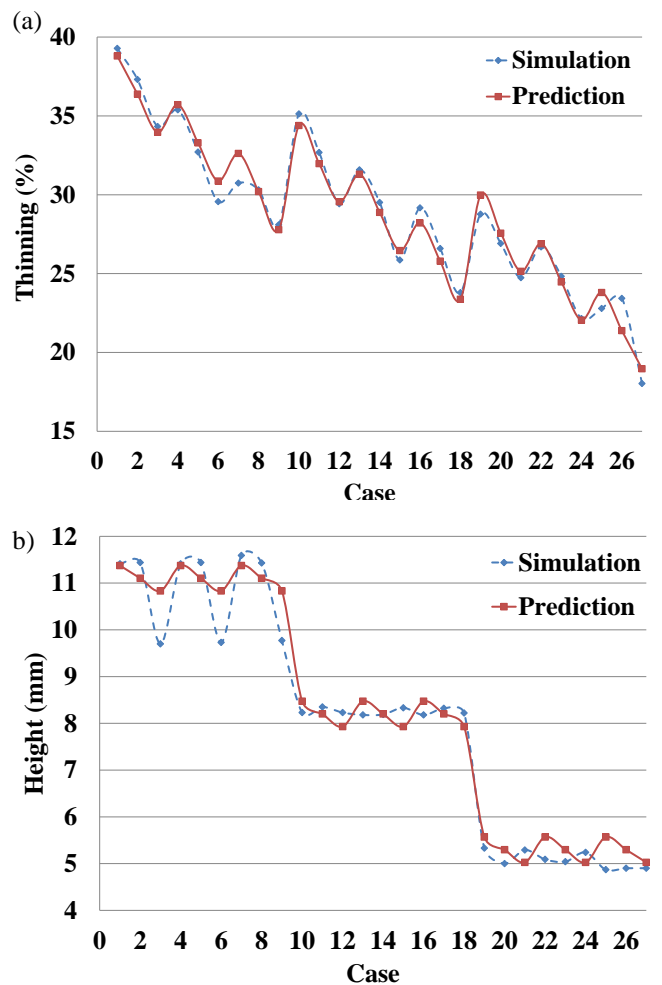


Fig. 6 Comparison of results between prediction and simulation (a) thinning (b) height

성형 해석 데이터와 예측값이 대체로 비슷한 것을 확인하였다.

예측식으로 long R는 68~74mm, short R는 32~38mm, edge R는 5~10mm의 구속 조건을 설정하고, 제품의

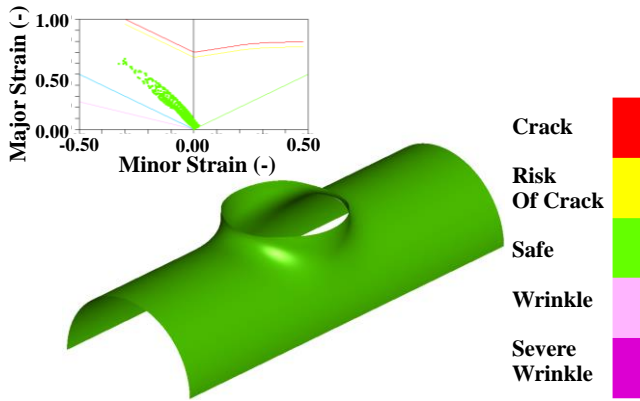


Fig. 7 Simulation results after optimal design FLD

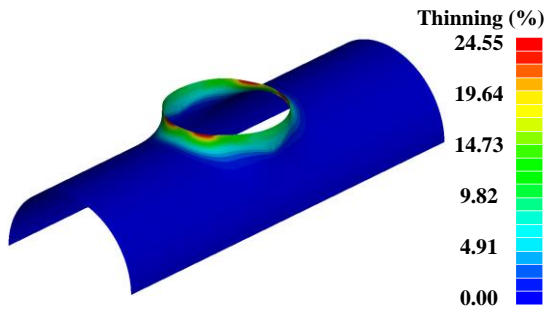


Fig. 8 Simulation results after optimal design (thinning)

높이는 8.5mm 이상이며, thinning은 최소의 값을 갖는 최적값을 도출해보니 장변 R는 70.22mm, 단변 R는 38mm, edge R는 10mm일 때 thinning은 24.51%, height는 8.68mm로 예측되었다. 이 예측식으로 구한 최적의 피어싱 펀치 형상으로 성형 해석 결과 FLD는 FLC 이내로 안전한 구역에 있는 것으로 보아 최적 성형에서는 crack이 발생하지 않는다(Fig. 7). 두께 감소는 24.56%로 상대오차는 0.2%로 아주 근사하게 나왔고, 목표 높이는 8.83mm로 상대오차 1.73%로 예측식이 해석 실험값과 유사한 것으로 확인되었다(Fig. 8).

### 3.4. 해석 정확도 검증

성형 해석 정확도 검증을 위해서 비접촉 3차원 측정 장비인 GOM-ATOS를 사용하여 3D 측정을 수행하였다[8]. GOM-ATOS는 3D 측정 장비로 제품 높이, 제품 두께의 측정이 가능하다. Fig. 9과 Fig. 10에서는 최적화된 제품의 3D 측정 결과와 성형 해석 결과를 각각 thinning과 제품 최소 높이를 비교하였다. 두께 감소의 최댓값은 25.00%로 성형 해석 결과인 24.56과 유사하였고, 최소 높이도 목표 높이인 7mm 이상을

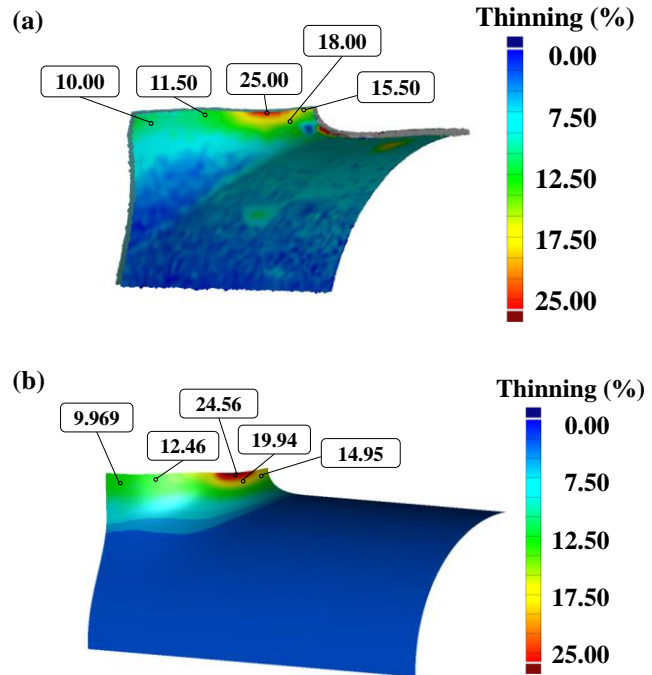


Fig. 9 Thinning distribution (a) 3D measurement result, (b) simulation result

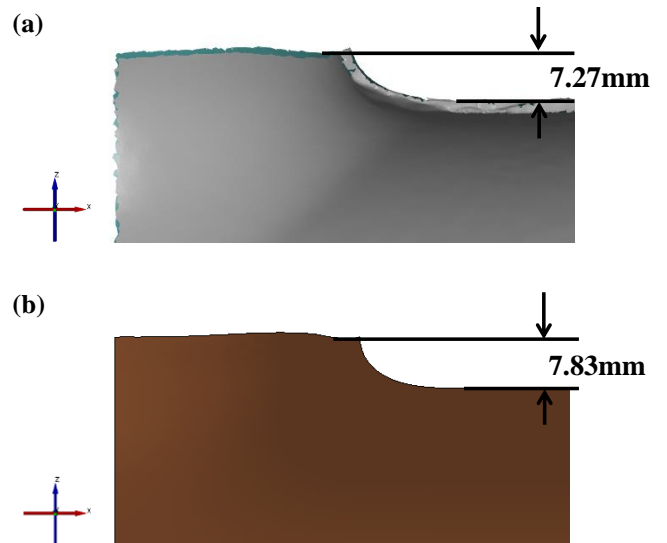


Fig.10 Minimum height (a) 3D measurement result, (b) simulation result

만족하였다. Fig. 10 (b)에서 성형 해석 결과 값은 8.83mm이 나오지만 성형 해석은 소재의 중립면이 기준이기 때문에 두께의 절반인 1mm를 제외하여 표기하였다. tee-pipe 버링 공정에서 본 연구에서 활용한 예측식을 사용한다면 보다 효율적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 tee-pipe 성형공정에서 상단부의 찢어짐 문제 해결을 위해 버링 공정의 유한 요소해석 모델링을 수행하였고, 주요 공정 설계 변수인 장변 R과 단변 R, 장변과 단변을 연결하는 R을 최적 설계 기법을 활용하여 결정하였다. tee-pipe의 최적의 피어싱 형상을 개발하고 그 해석과 실험을 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) tee-pipe 버링 공정에서 찢어짐 문제를 두께 감소 70% 이상으로 정량화하였다.

(2) 유한 요소 해석을 통해 찢어짐 문제를 구현하였고, 버링 시 찢어짐은 피어싱 공정의 펀치 형상이 주 영향을 미침을 확인하였다.

(3) 피어싱 펀치의 long R과 short R, edge R을 설계 변수로 설정하여 완전 요인 설계법으로 유한 요소 해석을 수행하였다.

(4) 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 활용한 예측식을 개발하여 long R : 70.22mm, short R : 38mm, edge R : 10mm인 최적의 피어싱 펀치 형상을 도출하였다.

(5) 해석 정확도 검증을 위해 3차원 측정장비를 활용하여 최적화된 tee-pipe의 두께 분포와 최소 높이를 측정하였다. 그 결과 성형 해석 결과와 매우 유사함을 알 수 있었다.

## REFERENCES

- [1] Korea Gas Safety Corporation, 2015, Gas Statistics for 2015, [http://www.kgs.or.kr/publish/Board.do?method=list&board\\_id=main\\_13](http://www.kgs.or.kr/publish/Board.do?method=list&board_id=main_13).
- [2] G. Liu, J. Peng, S. Yuan, B. Teng, K. Li, 2015, Analysis on Critical Conditions of Side Wall Wrinkling for Hydroforming of Thin-walled Tee-joint, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 97, pp. 42~49.
- [3] T. Teramae, K. Manabe, K. Ueno, K. Nakamura. H. Takeda, 2007, Effect of Material Properties on Deformation Behavior in Incremental Tube-burring Process using a Bar Tool, *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 191, No. 1, pp. 24~29.
- [4] DYNAFORM-PC User's Manual, Version 1.0, 2011, Engineering Technology Associates Inc.
- [5] A. Saungsai, Y. Otsuka, Y. Mutoh, 2014, Fretting Fatigue Behavior of SUS304 Stainless Steel Under Pressurized Hot Water, *Tribol. Int.*, Vol. 79, pp. 52~58.
- [6] E. S. Kim, J. M. Lee, B. M. Kim, 2008, Selection of the Optimum Seaming Condition for Spin Drum Using Statistical Method, *Kor. Precis. Eng. Soc.*, Vol. 25, No. 1, pp. 99~107.
- [7] R. H. Myers, 2009, Response Surface Methodology Process and Product Optimization using Designed Experiments, Third Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 13~62.
- [8] ATOS, GOM mbH, <http://www.gom.com>.