



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

스피닝 가공법을 이용한 표준규격 엘보
성형공정 개발에 대한 연구

A Study on the Development of Standard Elbow Forming
Process using Spinning Manufacturing Method

지도교수 조 종 래



2017년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

이 창 준

본 논문을 이창준의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 정 재 현 (인)

위 원 조 종 래 (인)

위 원 손 동 우 (인)

2016년 12월 22일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
 1. 서론	 1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 내용	2
 2. 강소성 유한요소해석의 이론적 배경	 4
 3. 엘보 치수와 제작 공차	 8
 4. 기존 프레스 성형공정 분석	 10
4.1 프레스 성형공정 개요	10
4.2 4인치 90도 엘보 치수 분석	10
4.3 모델링 및 경계조건	12
4.4 파이프 소재 물성치	15
4.5 결과 분석	17
 5. 외부금형이 없는 스피닝 성형공정 연구	 23
5.1 외부 금형이 없는 스피닝 성형공정 해석	23
5.1.1 성형공정 방법	23
5.1.2 모델링 및 경계조건	26
5.1.3 결과 분석	28
5.2 외부 금형이 없는 스피닝 성형공정 시험	35
5.2.1 장비 구성	35

5.2.2 엘보 시험 성형 과정	36
5.2.3 엘보 시험 성형 분석	37
6. 직관부 가이드를 추가한 스피닝 성형공정 연구	39
6.1 성형공정 방법	39
6.2 모델링 및 경계조건	39
6.3 결과 분석	41
7. 결론	48
참고문헌	50



List of Tables

Table 1 Dimension of long radius elbows	8
Table 2 Tolerance of fittings	9
Table 3 Boundary condition of press forming process	14
Table 4 Chemical compositions of SUS 304	15
Table 5 Material property of SUS 304	15
Table 6 Boundary condition of spinning process	27
Table 7 Die movement step for analysis of spinning process	28
Table 8 Die movement step for analysis of spinning process	41



List of Figures

Fig. 1 Conventional manufacturing process for elbow	3
Fig. 2 Modeling of 4" Sch. 10 90° elbow	11
Fig. 3 Product of 4" Sch. 10 90° elbow	11
Fig. 4 Cutting process of initial pipe workpiece	12
Fig. 5 Shape and dimension of initial pipe workpiece	12
Fig. 6 Shape and dimension of dies (model of tolerance 0.25 mm)	13
Fig. 7 Shape and dimension of dies (model of tolerance 0.3 mm)	13
Fig. 8 Die shapes for elbow forming	13
Fig. 9 Flow stress curve (SUS 304)	16
Fig. 10 Deformed shape of elbow	18
Fig. 11 Thickness distribution of deformed elbow ($t_0=3.05$ mm)	18
Fig. 12 Comparison of forming load	19
Fig. 13 Comparison of resultant force	20
Fig. 14 Detail analysis of forming mechanism	22
Fig. 15 Comparison of roller and ring	24
Fig. 16 Rotational movement of roller and ring	24
Fig. 17 Forming step of spinning process	24
Fig. 18 Dimension of dies	26
Fig. 19 Characteristics of deformation of pusher extension of 20 mm	29
Fig. 20 Characteristics of deformation of pusher extension of 40 mm	29

Fig. 21 Deformed shape and thickness variation	30
Fig. 22 Location of tracking point	32
Fig. 23 Variation of elbow thickness with feeding distance	32
Fig. 24 Comparison of forming load	33
Fig. 25 Comparison of resultant force	34
Fig. 26 Elbow forming machine	35
Fig. 27 Movement of circumferential and longitudinal rotation	36
Fig. 28 Elbow Prototype	38
Fig. 29 Variation of elbow thickness	38
Fig. 30 Shape of initial pipe workpiece	39
Fig. 31 Dimension of outer mold	40
Fig. 32 Die shape for elbow forming	40
Fig. 33 Strain distribution of feeding distance 110 mm	43
Fig. 34 Strain distribution of feeding distance 185 mm	44
Fig. 35 Strain distribution of feeding distance 290 mm	45
Fig. 36 Thickness distribution of deformed elbow	46
Fig. 37 Forming load distribution with time	47
Fig. 38 Resultant force distribution with time	47

A Study on the Development of Standard Elbow Forming Process using Spinning Manufacturing Method

Lee, Chang Joon

Department of Mechanical Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Fittings are parts used for piping direction and flow control and widely used in various industrial fields such as petrochemical and plant. Elbow is a kind of fitting that changes the length and direction of pipes and are widely used as core parts of pipe system. Elbow is in various standards for different angles and dimensions. In the conventional press forming process, the pipe material is produced to insert into the inner and outer mold and extruded with hydraulic cylinder. However, press forming process is required to high load due to extrusion forming, therefore, a new forming process should be required. This paper introduces spinning manufacturing method as the elbow forming process which minimize the molds and reduce the forming load for world's first. Elbow was selected by a 4" 90° elbow that is commonly used in the field. First, it was performed reverse design and analysis of the conventional press forming process, and confirmed the maximum load value, the change in thickness of the forming elbow, and

the satisfaction of the minimum and maximum thickness values. And through the analysis of the elbow mechanism, it was confirmed the straightness of the pipe to maintain its original shape when it was formed curved shape. It was confirmed that elbow forming is possible by using spinning process without outer mold, and verified that the maximum forming load is reduced compared with conventional forming press. However, both the analysis and the test results have confirmed that the elbow cannot be formed up to 90° due to buckling in the straight part. It was carried out the research by applying a guide on the straight part to prevent the buckling, and succeeded in forming the aimed 90° elbow. The deformation according to pipe feeding length was investigated. It is shown that large strain are generated at the inner curved region. And it was measured the thickness and confirmed that it meets the reference thickness value. The maximum forming load value is 113 tons, which means that it can be formed to 19.9% of the conventional press forming process.

KEY WORDS : Elbow 엘보; Spinning 스피닝; Forming 성형; Mandrel 맨드렐

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

피팅(Fitting)은 관이음쇠를 총칭하는 것으로 유체의 이송에 사용되며 배관의 방향이나 직경의 변경, 분기, 마감, 연장, 유체의 흐름제어 등에 사용되는 부품이다. 피팅의 종류에는 배관의 방향을 바꾸는 엘보(Elbow), 배관의 분기에 사용되는 티(Tee), 지름이 서로 다른 배관을 연결하는 리듀서(Reducer), 배관을 마감하는 캡(Cap), 유체의 흐름을 개폐 또는 조절하는 밸브(Valve), 같은 배관을 연장하여 연결하는 플랜지(Flange), 유체의 압력을 일정하게 유지하는 레귤레이터(Regulator) 등이 있다. 용도별로는 액체나 기체의 운송을 목적으로 하는 주배관에 연결되는 용접용 피팅(Butt weld fitting)과 주배관의 상태를 계측, 제어하거나 시료를 채취하는 용도로 사용되는 계장용 피팅(Instrumentation fitting)으로 분류할 수 있다. 피팅의 재료로는 주로 탄소강, 스테인레스강, 합금강 등이 사용된다.

피팅은 석유화학, 해양, 조선, 발전, 세일가스, 건설 등 다양한 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 일반적으로 건설 및 플랜트 산업에서는 프로젝트 예산의 약 2% 내외를 피팅 구매(용접용 피팅 2%, 계장용 피팅 0.5~1%)에 사용하고, 해양은 2%, 발전은 1~2% 수준의 예산을 사용하는 것으로 추정한다.[1] 피팅 시장에서 저가의 범용 대량 밸브는 중국과 인도를 중심으로 생산되고, 부가가치가 높은 고압용 배관에 사용되는 피팅은 미국, 독일, 일본 등 선진국에서 세계 생산량의 80%를 차지한다. 국내에서는 1990년대 까지 정밀기계용 피팅을 수입에만 의존하여 사용했으나, 1990년대 이후 국내 피팅 제조업체들의 꾸준한 연구개발과 투자의 결과로 생산기술의 향상되어 수입 대체 효과를 유발하고 있다.[2]

피팅산업 중에서 용접용 피팅산업은 대규모의 부지와 대형 기계설비를 필요로 하는 장치산업이다. 피팅의 종류, 규격별로 각각의 금형이 요구되기 때문에 대규모의 부지와 대형 기계설비 및 수 천종의 금형이 기술이 요구된다. 계장용 피팅도 마찬가지로 다품종 소량생산 및 수 천종의 제품 라인업이 필요하다. 그리고 피팅이 손상될 경우 해당 부위뿐만 아니라 플랜트 전체의 폭발을 야기할 수 있으므로 피팅은 구조적으로 충분한 강도를 가져야 하고 하중에 의한 손상으로부터 안전해야 한다. 그러므로 피팅의 안전 및 구조상의

결합을 검토하기 위해 장기간의 경험을 필요로 한다.[3,4]

최근 중국 및 동남아의 피팅 제조업체들은 낮은 인건비를 바탕으로 피팅 제품의 가격 경쟁력을 확보하여 국내 피팅 제조업체들을 위협하고 있다. 이러한 경쟁에서 우위를 점하기 위해서는 보다 많은 연구개발이 필요하다.[5]

1.2 연구목적 및 내용

엘보는 배관의 길이, 방향을 변경하는 역할을 하는 관이음쇠로, 석유, 화학, 천연가스, 물, 전기, 기계제작, 건축, 그리고 압력용기 산업의 파이프 시스템의 핵심 부품으로 널리 사용된다.[6] 엘보의 종류는 각도 및 치수별로 분류하며, ASME B16.9 기준으로 각도별로는 45도, 90도, 180도로 분류하고, 치수별로는 1/2 인치부터 48 인치 엘보로 분류한다. 용접용 엘보는 Fig. 1에서 나타낸 것처럼 크게 10가지의 공정을 거쳐서 제작된다. 그 중에서 성형공정은 엘보의 크기에 따라 2가지 방법으로 분류할 수 있다.

중소형 엘보는 파이프를 절단공정으로 가공한 후 내부 금형에 장착하고, 외부 금형으로 소재를 감싼 후 유압실린더로 가압하여 압출성형 한다. 대형 엘보는 2개의 후판을 절단공정으로 가공한 후 각각의 후판을 대형 프레스로 눌러서 엘보 절반의 형상으로 성형하고, 가공된 2개의 후판을 용접, 접합하여 제작한다. 이 때 접합된 2개의 용접선에 결함이 있는지 확인하기 위해 비파괴 검사를 실시한다.

기존 엘보 성형방법은 소재 내·외부에서 엘보 규격별 금형을 필요로 하므로 고가의 비용이 든다. 중소형 엘보는 압출성형으로 인해 고하중이 요구되므로 대용량의 유압설비가 필요하고, 대형 엘보는 용접공정 등에서 많은 공정시간을 필요로 하고, 고가의 비파괴 검사 비용으로 인해 제작단가가 상승한다.[7]

따라서 본 논문에서는 스피닝 가공법을 활용한 새로운 엘보 성형공정 개발을 통해 공정비용을 줄이고, 유한요소 해석과 시험을 통해 신 공정을 이용한 엘보 성형 가능성을 연구하였다. 엘보는 규격별로 수많은 종류가 존재하므로 그 중에서 실제 현장에서 흔히 사용되는 4인치 90도 엘보를 선정하여 연구를 진행하였다.



Fig. 1 Conventional manufacturing process for elbow

제 2 장 강소성 유한요소해석의 이론적 배경

유한요소법은 연속체를 여러 개의 적절한 크기의 유한요소(Finite element)로 나누어서 각 절점들의 값들을 변수로 하는 미분 방정식을 변분 원리(Variational principle), 가중잔류법(Method of weighted residual), 에너지 균형법(Energy balance approach)등을 적용하여 수립하고, 이 미분방정식으로 유한요소방정식을 만들어 각 절점에서의 변수 값들을 구하는 방법이다.[8,9]

유한요소법을 활용하는 금속 성형에 관한 해석방법에는 탄소성 해석(Elastic-plastic analysis), 강소성 해석(Rigid-plastic analysis), 점소성 해석(Viscoplastic analysis)등이 있다. 탄소성 해석은 비교적 정확한 응력값과 변형양상을 얻을 수 있지만, 매 변형단계마다 요소가 항복상태에 도달 하였는지 검사해야 하며, 비정상상태의 문제 해석시에는 변형증분량을 한꺼번에 많이 늘릴 수 없는 단점이 있다. 따라서 탄성 변형량을 무시 할 수 있는 단조나 압출과 같은 소성변형 문제에는 강소성 해법을 사용한다. 이 방법은 벌크(Bulk) 성형 해석에 있어서 해석 결과가 매우 정확하며 계산 효율이 우수한 것으로 알려져 있다.[10,11]

강소성 유한 요소법의 가정은 다음과 같다.

1. 재료는 강소성체이고, 탄성 변형은 무시한다.
2. 바우싱거 효과(Bauschinger effect)를 무시하며, 가공 후에도 등방성(Isotropic)을 유지한다.
3. 재료는 변형되어도 체적은 일정하다.
4. 재료는 von Mises 항복조건을 따른다.
5. 금형은 강체이며, 변형되지 않는다.

체적이 V 인 연속체는 접촉력 T_i 가 정의되는 표면 S_f , 속도 v 가 정의되는 표면 S_v 로 구성되어 있다고 생각할 수 있다. 이 물체가 준 정적상태에서 미소변형을 일으키고 관성의 효과와 체적력을 무시하면 실제의 응력과 속도장은 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

(i) 평형 방정식(Equilibrium equation)

$$\sigma_{ij,i} = 0 \quad (1)$$

(ii) 적합 방정식(Compatibility equation)

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (2)$$

$$\text{비압축성 조건 : } \dot{v}_{i,j} = \dot{\varepsilon}_v = 0 \quad (3)$$

(iii) 구성 방정식(Constitutive equation)

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\sigma} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (4)$$

여기서

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \dot{\sigma}_{ij} \dot{\sigma}_{ij}} \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} \quad (6)$$

$\dot{\sigma}_{ij}$ 은 편차 응력이며, $\bar{\sigma}$ 와 $\dot{\varepsilon}$ 은 유효 응력과 유효 변형률 속도이다.

(iv) 경계조건(Boundary condition)

$$\sigma_{ij} n_j = T_i \quad \text{on } S_f \quad (7)$$

$$v_i = U_i \quad \text{on } S_v \quad (8)$$

여기서 n_j 는 S_f 표면에서의 단위 법선벡터이다.

평형방정식(1)은 일정 체적에 대한 임의 속도 변분량과 함께 만족된다.

따라서 식(9)와 같이 표현된다.

$$\int_v \sigma_{ij} \delta v_i dV = 0 \quad (9)$$

적합방정식(2)와 경계조건(7)에 의해 가상일의 원리를 이용하여 식(10)과 같이 표현된다.

$$\int_v \sigma_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV - \int_{S_f} T_i \delta v_i dS = 0 \quad (10)$$

여기서 응력은 편차 응력 σ'_{ij} 과 정수압 응력 σ_m 을 포함하고, 식(11)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m \quad (11)$$

식(10)에 식(11)을 대입하면 식(12)와 같다.

$$\int_v \sigma'_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV + \int_v \sigma_m \delta \dot{\varepsilon}_v dV - \int_{S_f} T_i \delta v_i dS = 0 \quad (12)$$

앞선 가정에 의해 물체가 변형한 후 변형 전과 체적이 같아야 한다. 이런 양상으로 거동하는 것을 비압축성이라 하고, 이 조건을 고려하기 위해 벌칙상수를 도입한다.

식(4)와 식(6)으로부터 식(13)과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma'_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} = \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (13)$$

한편, 벌칙상수 $K = \frac{\sigma_m}{\dot{\varepsilon}_v}$ 로 표시되므로 식(13)과 K를 식(12)에 대입하면 식(14)와 같다.

$$\delta \pi = \int_v \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon}_v dV + K \int_v \dot{\varepsilon}_v \delta \dot{\varepsilon}_v dV - \int_{S_f} T_i \delta v_i dS = 0 \quad (14)$$

여기서, 벌칙상수 K는 매우 큰 값이다.

식(14)로써 벌칙함수를 사용하여 비압축성 구속조건을 범함수에 고려하였다. 금형과 소재간의 마찰을 고려하기 위하여 다음 식을 적용하였다.[12]

$$f = -\frac{2}{\pi} m^* k \tan^{-1} \frac{|v_s|}{u_o} t \quad (15)$$

여기서 m^* 는 마찰 상수, k 는 전단응력이다. 또한 u_o 는 $|v_s|$ 와 비교하여 매우 작은 양의 상수이고, v_s 는 금형에 대한 소재의 변형에 대한 상대 속도이며, t 는 v_s 방향의 단위벡터이며 식(16)으로 주어진다.

$$\vec{t} = \frac{1}{v_s} [u\vec{i} + (v+v_D)\vec{j}] \quad (16)$$

여기서 v_D 는 금형의 속도이다. 한편 v_s 는 식(17)과 같이 표시된다.

$$v_s = \sqrt{u^2 + (v+v_D)^2} \quad (17)$$

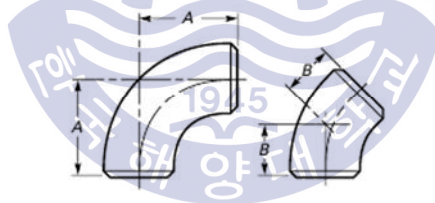


제 3 장 엘보 치수와 제작 공차

엘보의 규격은 미국기계학회에서 제시한 ASME Code B16.9-2012 (Factory-made wrought butt welding fittings)에 의거한다. 4인치 엘보의 외경은 114.3 mm 이고 sch. 10에서의 파이프 두께는 3.05 mm이며 중심에서부터 끝단까지의 반지름은 152 mm 이다.

Table 1은 90도, 45도 엘보의 사이즈별 치수를 나타낸다. 그리고 Table 2는 엘보 공차를 나타내는데 엘보는 성형공정 후 교정공정 등을 거쳐 생성되므로 명시된 평가항목 중 소재의 두께변화를 중점적으로 평가하였다. 엘보의 두께는 기준 두께를 중심으로 $\pm 12.5\%$ 의 공차를 허용하므로 최대 두께는 3.43 mm 이고, 최소 두께는 2.67 mm 임을 확인하였다.[13]

Table 1 Dimension of long radius elbows

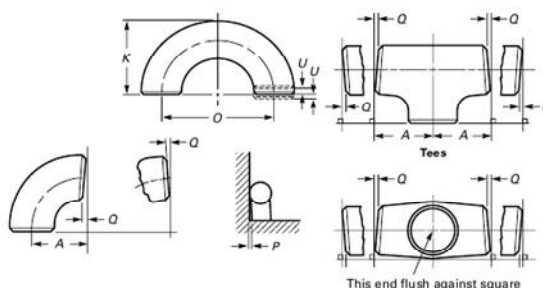


Nominal Pipe Size (NPS)	Outside Diameter at Bevel	Center-to-End	
		90-deg Elbows, A	45-deg Elbows, B
1/2	21.3	38	16
3/4	26.7	38	19
1	33.4	38	22
1 1/4	42.2	48	25
1 1/2	48.3	57	29
2	60.3	76	35
2 1/2	73.0	95	44
3	88.9	114	51
3 1/2	101.6	133	57
4	114.3	152	64
5	141.3	190	79
6	168.3	229	95
8	219.1	305	127
10	273.0	381	159
12	323.8	457	190
14	355.6	533	222
16	406.4	610	254

Nominal Pipe Size (NPS)	Outside Diameter at Bevel	Center-to-End	
		90-deg Elbows, A	45-deg Elbows, B
18	457.0	686	286
20	508.0	762	318
22	559.0	838	343
24	610.0	914	381
26	660.0	991	406
28	711.0	1 067	438
30	762.0	1 143	470
32	813.0	1 219	502
34	864.0	1 295	533
36	914.0	1 372	565
38	965.0	1 448	600
40	1 016.0	1 524	632
42	1 067.0	1 600	660
44	1 118.0	1 676	695
46	1 168.0	1 753	727
48	1 219.0	1 829	759

GENERAL NOTE: All dimensions are in millimeters.

Table 2 Tolerance of fittings



All Fittings [Notes (1) and (2)]		Center-to-End Dimensions		Overall Length of Reducers and Lap Joint Stub Ends, F, H		Overall Length of Caps, E		180-deg Returns		
Nominal Pipe Size (NPS)	DN	Outside Diameter at Bevel, D [Notes (3) and (4)]	Inside Diameter at End [Notes (3) and (5)]	90-deg and 45-deg Long and Short Radius Elbows and Tees, A, B, C, M	30 Radius Elbows, A, B			Center-to-Center Dimension, O	Back-to-Face Dimension, K	Alignment of Ends, U
1/2 to 2 1/2	15-65	+1.6, -0.8	-0.8	2	3	2	3	6	6	1
3 to 3 1/2	80-90	1.6	1.6	2	3	2	3	6	6	1
4	100	1.6	1.6	2	3	2	3	6	6	1
5 to 8	125-200	+2.4, -1.6	1.6	2	3	2	6	6	6	1
10 to 18	250-450	+4.0, -3.2	3.2	2	3	2	6	10	6	2
20 to 24	500-600	+6.4, -4.8	4.8	2	3	2	6	10	6	2
26 to 30	650-750	+6.4, -4.8	4.8	3	6	5	10	...	...	...
32 to 48	800-1 200	+6.4, -4.8	4.8	5	6	5	10	...	...	...

Lap Joint Stub Ends [Note (6)]					Angularity Tolerances		
Nominal Pipe Size (NPS)	DN	Outside Diameter of Lap, G	Fillet Radius of Lap, R	Lap Thickness	Nominal Pipe Size (NPS)	DN	Off Angle, Q
1/2 to 2 1/2	15-65	+0, -1	+0, -1	+1.6, -0	1/2 to 4	15-100	1
3 to 3 1/2	80-90	+0, -1	+0, -1	+1.6, -0	5 to 8	125-200	2
4	100	+0, -1	+0, -2	+1.6, -0	10 to 12	250-300	3
5 to 8	125-200	+0, -1	+0, -2	+1.6, -0	14 to 16	350-400	3
10 to 18	250-450	+0, -2	+0, -2	+3.2, -0	18 to 24	450-600	4
20 to 24	500-600	+0, -2	+0, -2	+3.2, -0	26 to 30	650-750	5
26 to 30	650-750	...	...	...	32 to 42	800-1 050	5
32 to 48	800-1 200	...	...	...	44 to 48	1 100-1 200	5

GENERAL NOTES:

(a) All dimensions are in millimeters.

(b) Tolerances are equal plus and minus except as noted.

NOTES:

(1) The inside diameter and the nominal wall thicknesses at ends are to be specified by the purchaser.

(2) A minimum wall thickness of 87.5% applies unless the purchaser specifies a different wall thickness tolerance. See Fig. 1, Note (1)(a).

(3) Out-of-round is the sum of absolute values of plus and minus tolerances.

(4) This tolerance may not apply in localized areas of formed fittings where increased wall thickness is required to meet design requirements of para. 2.2.

(5) Unless otherwise specified by the purchaser, these tolerances apply to the nominal inside diameter, which equals the difference between the nominal outside diameter and twice the nominal wall thickness.

(6) See Table 9 for limiting dimensions of outside diameter of barrel.

제 4 장 기존 프레스 성형공정 분석

4.1 프레스 성형공정 개요

현재 프레스 성형공정을 통해 엘보를 생산하는 곳은 많으나 공정에 대해 구체적으로 알려진 바가 거의 없다. 그래서 프레스 성형공정을 소성해석 프로그램인 Deform v11.0으로 모사하여 소재의 두께 변화와 성형 하중값, 그리고 메커니즘을 분석하여 신 공정 개발에 적용하였다.

4.2 4인치 90도 엘보 치수 분석

기존 프레스 성형공정 해석을 진행하기 이전에 먼저 실제 엘보의 치수를 파악하기 위해 4인치 90도 엘보를 모델링 하여 Fig. 2에 나타내었다. 모델링을 하기 위해 3D 캐드 프로그램인 NX6를 사용하였다. Fig. 3은 실제 용접용 4인치 90도 엘보의 제품사진이다.

모델링을 분석한 결과, 외부 곡률부의 최대 반지름의 길이는 209.2 mm로 호의 길이 공식을 적용하면 직선 길이가 328.61 mm 임을 알 수 있었고, 내부 곡률부의 최소 반지름의 길이는 94.8 mm로 마찬가지로 호의 길이 공식을 적용하면 직선 길이는 148.9 mm 임을 확인하였다. 엘보는 파이프를 굽힘 성형하여 생성하므로 소재의 길이는 외부 곡률부를 기준으로 한다. 그러므로 초기 파이프의 길이를 330 mm로 선정하였다.

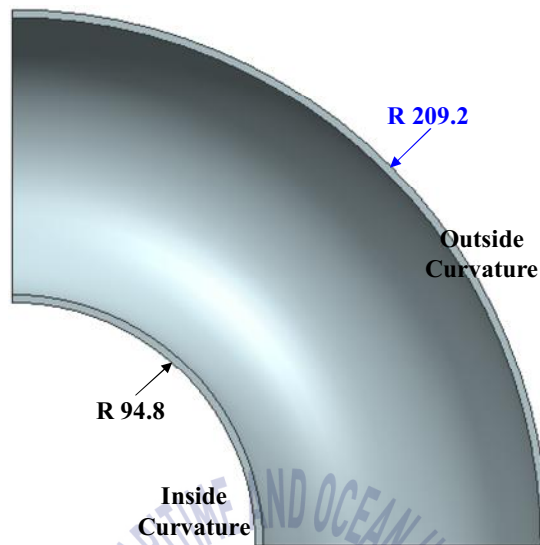


Fig. 2 Modeling of 4" Sch.10 90° elbow



Fig. 3 Product of 4" Sch.10 90° elbow

4.3 모델링 및 경계조건

프레스 성형공정은 유압 프레스로 소재를 가압하여 금형을 통해 소재가 압출 성형하는 공정으로, 압출성형 시 사용되는 부품은 파이프 소재, 소재를 가압하는 푸셔, 엘보 형태를 잡아주는 맨드릴과 외부금형으로 구성된다.

소재는 Fig. 4에서 나타난 것처럼 성형공정 이전에 2번의 절단공정을 수행한다. 그러나 절단공정에 대한 기존 연구가 없으므로 4인치 90도 엘보 치수를 분석한 결과를 근거로 파이프 소재를 45도로 1차 절단 한 후 침단 부분을 2차 절단으로 제거하여 길이가 330 mm인 초기 파이프 형상을 생성하였다. 해석에 사용하는 4인치 파이프 소재는 NX6 으로 모델링 하였고 그 후 Hypermesh v11.0을 사용하여 요소를 생성하였고 그 결과를 Fig. 5에 나타냈다.

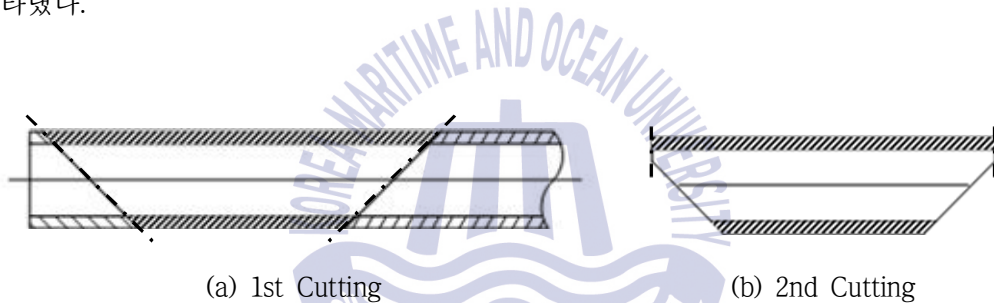


Fig. 4 Cutting process of initial pipe workpiece

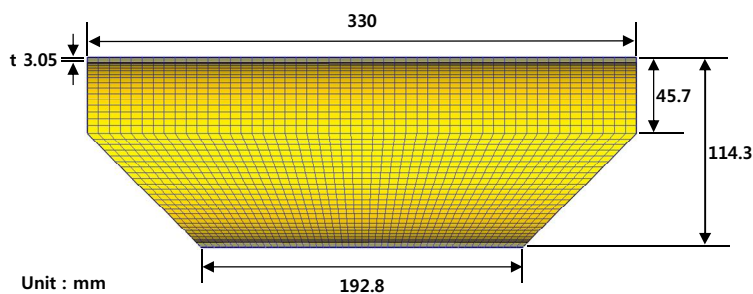


Fig. 5 Shape and dimension of initial pipe workpiece

소재 성형 시 형상을 잡아주는 맨드렐과 외부금형은 4인치 파이프의 크기에 따라 생성하였다. 실제 공정에서는 가공여유를 고려하여 공차를 적용하는데 그 값에 대한 근거를 찾을 수 없어 본 논문에서는 공차 0.25 mm 모델과, 0.3 mm 모델 2가지로 선정, 비교하였다. 금형의 구체적인 치수 및 형상은 Fig. 6 ~ 8에 나타냈다. 푸셔는 맨드렐과 외부금형 사이의 빈 공간을 꽉 채울 수 있게 모델링 하였다. 그리고 유압실린더로 소재를 가압하면 좌우 동일한 형태로 압출성형 되므로 소재와 금형에 대칭 조건을 적용하였다.

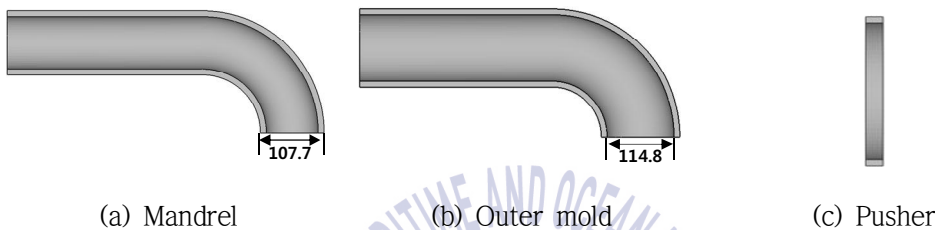


Fig. 6 Shape and dimension of dies (model of tolerance 0.25 mm)

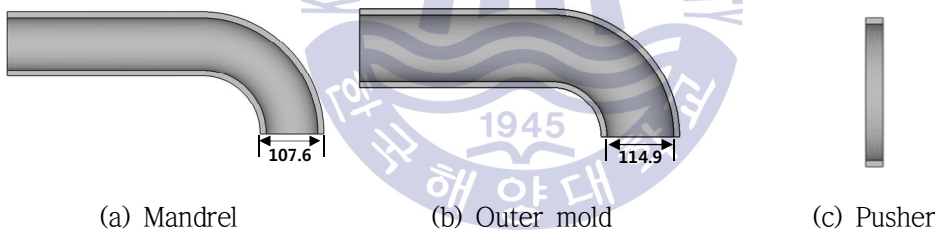


Fig. 7 Shape and dimension of dies (model of tolerance 0.3 mm)

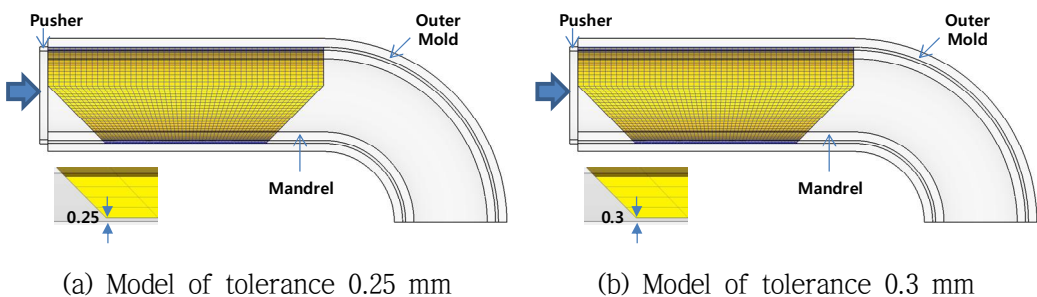


Fig. 8 Die shapes for elbow forming

유한요소해석에 적용한 경계조건은 Table 3에 표시하였다. 기존 프레스 공정은 열간가공과 냉간가공, 두 방법 중 하나를 사용하여 소재를 성형하는데 본 연구에서는 냉간가공으로 소재를 성형하는 연구를 수행했으므로 외부 온도와 금형 온도는 상온(20℃)으로 동일하게 적용하였다. 마찰계수는 맨드렐과 외부금형은 냉간 전단마찰계수 0.08을 적용하였고, 푸셔는 계속해서 가압하므로 전단마찰계수 0.7을 적용하였다. 푸셔의 이송속도는 10 mm/s로 적용하였다.

Table 3 Boundary condition of press forming process

Item	Value
Room temperature (℃)	20
Die temperature (℃)	20
Friction factor between mandrel and outer mold	0.08
Friction factor of pusher	0.7
Pusher feeding velocity (mm/s)	10

4.4 파이프 소재 물성치

엘보를 생성하는데 사용되는 파이프 소재의 재질에는 탄소강, 스테인레스강, 합금강이 주로 사용된다. 본 연구에서는 스테인레스강 중에서 흔히 사용되는 SUS 304를 선정하여 연구를 수행하였다. Table 4는 SUS 304의 화학적 조성을 나타내고, Table 5는 SUS 304의 물성을 나타낸다.[14] Fig. 9는 SUS 304의 유동응력 곡선을 나타낸다.[15]

Table 4 Chemical compositions of SUS 304

Element	C	Cr	Ni	Mn	P	S	Mo
Composition (wt%)	0.04	18	8	1.1	0.03	0.01	0.08

Table 5 Material property of SUS 304 (20)

Item	Value
Yield strength (MPa)	207
Ultimate strength (MPa)	483
Density (kg/m ³)	7850
Poisson's ratio	0.3

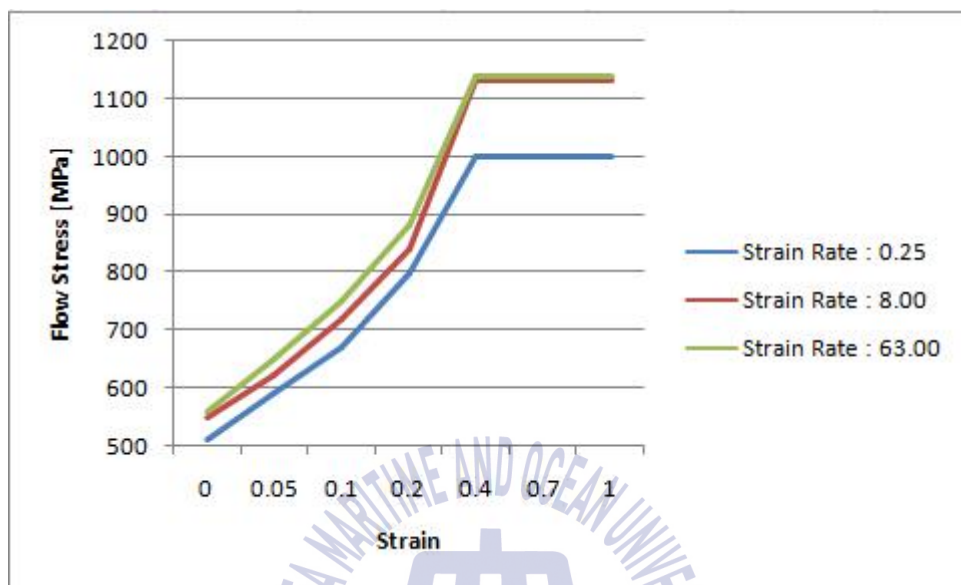
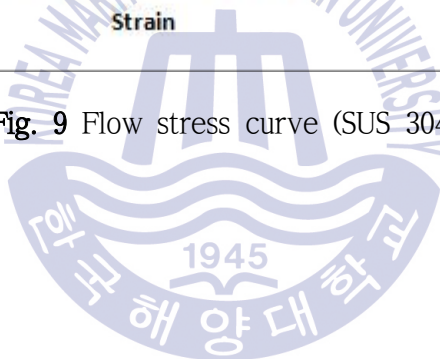


Fig. 9 Flow stress curve (SUS 304)

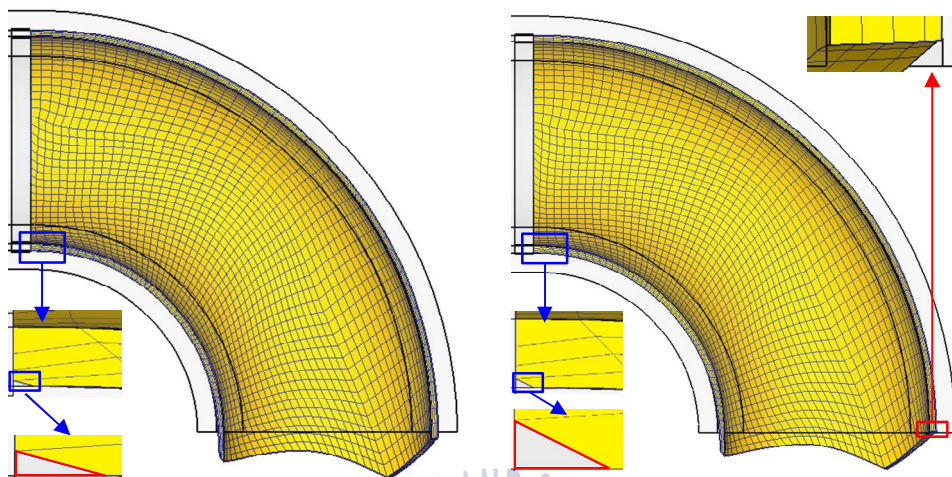


4.5 결과 분석

파이프 초기 형상을 선정한 후, 2가지 공차 값에 대한 압출성형해석을 수행하였다. Fig. 10에 나타난 소재의 성형 후 모습을 분석한 결과, 내부 곡률부에서 푸셔와 맞닿는 부분의 소재의 미충전이 두 케이스 모두에서 나타났다. 그리고 파이프 소재 길이 330 mm에서 공차 0.25 mm 모델에서는 가공여유를 고려하여 충분히 성형됨을 알 수 있었고, 공차 0.3 mm 모델에서는 엘보가 불완전하게 성형되어 파이프 소재의 길이가 330 mm 이상이 되어야 한다는 사실을 알 수 있었다.

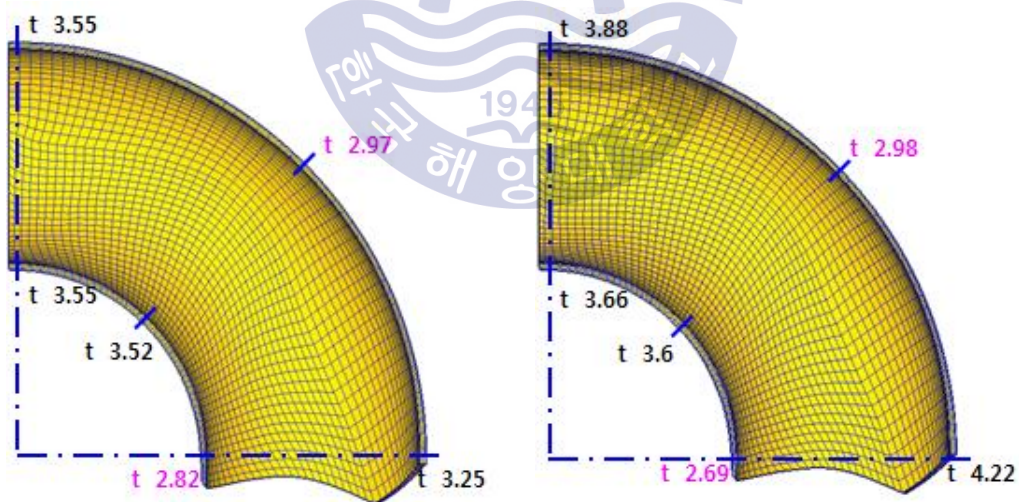
Fig. 11은 엘보의 두께 변화를 나타낸다. 두 케이스 모두 두께 변화가 동일하게 나타나는데, 외부 곡률부에서는 가운데에서 두께가 얇아지고 양 끝단에서 두께가 증가함을 볼 수 있었고, 내부 곡률부에서는 진행방향 끝단의 두께가 얇아지고 가운데와 푸셔 근처에서는 두께가 증가함을 알 수 있었다. 그리고 푸셔 근처에서는 공차와 무관하게 소재가 빈 공간을 채우는 현상을 볼 수 있었다.

엘보 두께를 비교한 결과, 두 케이스 모두 최소 기준두께 2.67 mm를 만족함을 볼 수 있었다. 엘보의 최대 두께는 두 케이스 모두 최대 기준두께 3.43 mm를 초과했으나 엘보는 성형공정 후 교정공정을 거치면서 소재를 가공하므로 무관하다.



(a) Model of tolerance 0.25 mm (b) Model of tolerance 0.3 mm

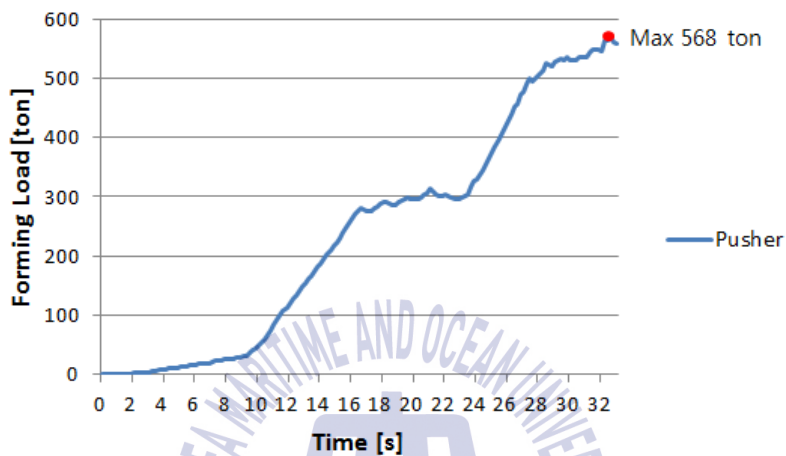
Fig. 10 Deformed shape of elbow



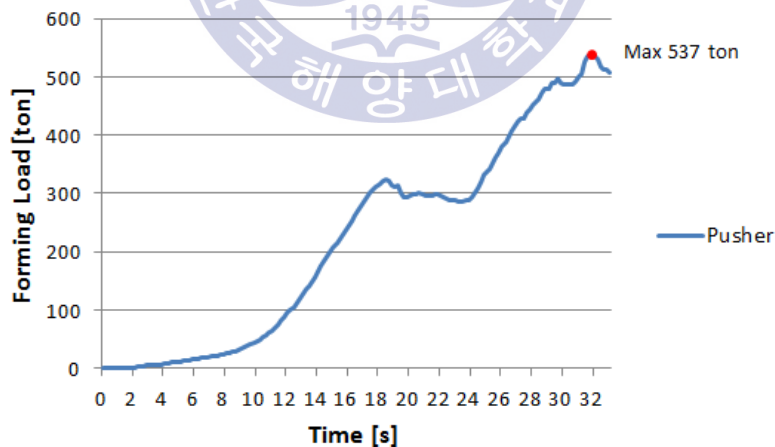
(a) Model of tolerance 0.25 mm (b) Model of tolerance 0.3 mm

Fig. 11 Thickness distribution of deformed elbow ($t_0 = 3.05$ mm)

Fig. 12는 시간에 따른 성형 하중값을 보여준다. 하중값은 대칭조건을 적용하여 해석했으므로 계산된 성형하중 값을 2배 크게 해서 그래프로 표현하였다. 공차 0.25 mm 모델은 최대 성형 하중값 568 ton 이고, 0.3 mm 모델은 최대 성형 하중값 537 ton으로 공차가 클수록 상대적으로 적은 하중으로 성형 가능함을 확인하였다.



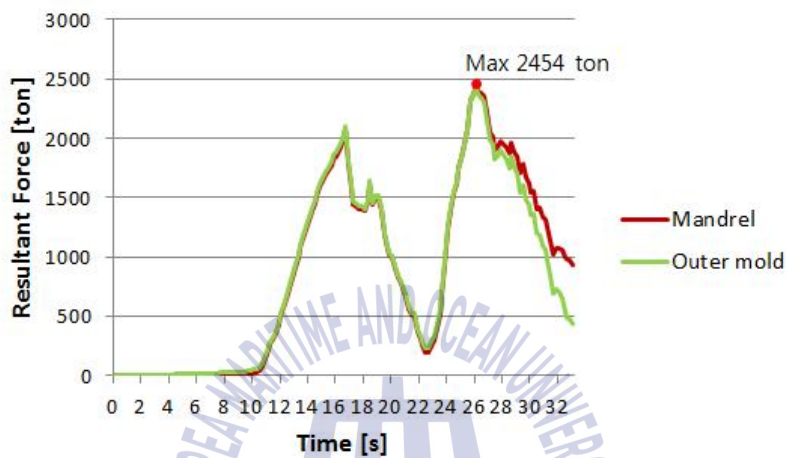
(a) Load in tolerance 0.25 mm



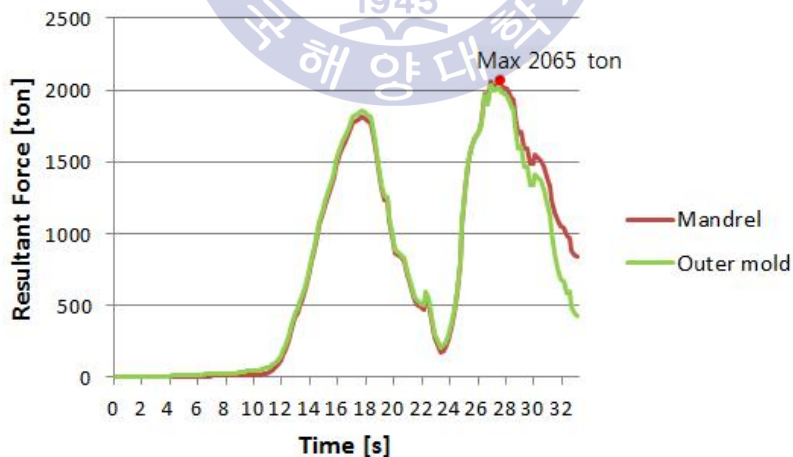
(b) Load in tolerance 0.3 mm

Fig. 12 Comparison of forming load

Fig. 13은 시간에 따른 맨드렐과 외부금형이 받는 합력을 나타낸다. 합력은 금형을 구속하는데 필요한 힘을 뜻하고, 공차 0.25 mm 모델은 금형을 구속하는데 최대 2454ton이 필요하고, 0.3 mm 모델은 최대 2065 ton이 필요함을 확인하였다.



(a) Forces in tolerance 0.25 mm



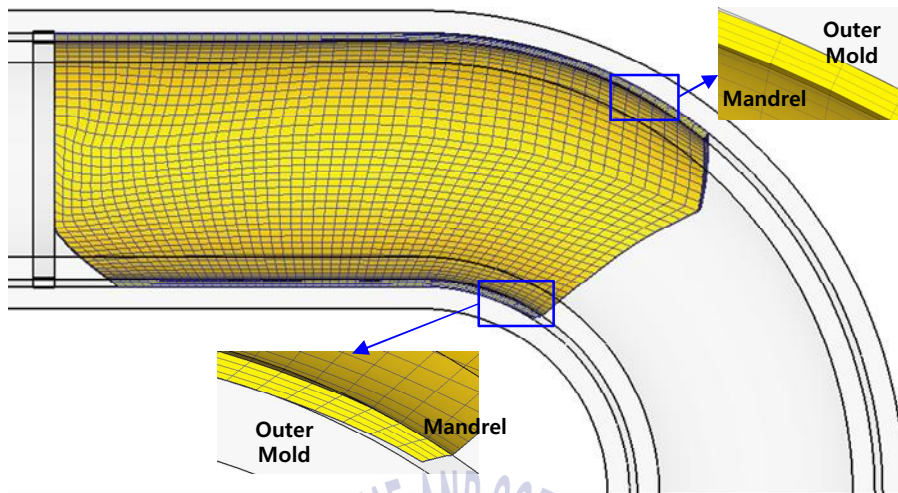
(b) Forces in tolerance 0.3 mm

Fig. 13 Comparison of resultant force

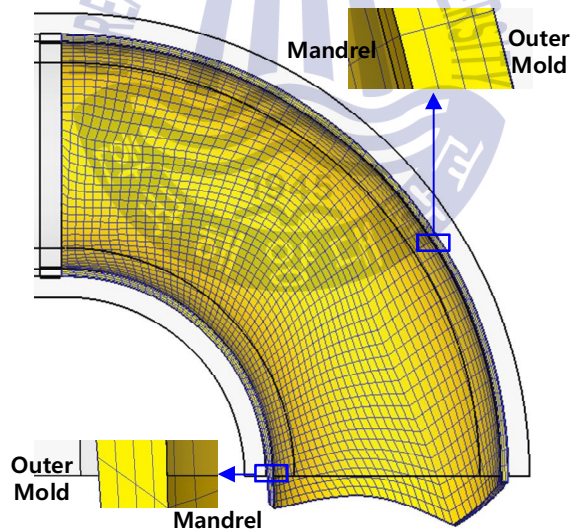
해석결과를 비교했을 때, Fig. 10에서 나타난 것처럼 두 케이스 모두 소재의 내부 곡률부 끝단에서 소재의 미충전이 발견되었다. 그리고 공차 0.3 mm 모델은 엘보를 생성하는데 필요한 소재의 부피가 부족하므로 초기 파이프 소재의 길이를 늘려야 온전한 엘보를 생성할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 성형하중을 비교했을 때, 공차 0.25 mm 모델은 0.3 mm 모델보다 성형하중은 5.8% 큰 하중을 받음을 알 수 있었다. 합력은 공차 0.25 mm 모델이 0.3 mm 모델보다 18.8% 큰 구속력이 필요함을 확인하였다.

공차 0.3 mm 인 모델은 공차 0.25 mm 모델에 비해 엘보를 생성하는데 필요한 부피가 더 많이 필요하고 공차가 커서 소재의 두께 또한 증가한다. 그로 인해 엘보를 생성하는데 필요한 소재의 양이 증가하고, ASME 코드에서 요구하는 최대두께를 맞추기 위한 교정공정에서 더 많은 비용이 요구되고, 성형하중은 거의 차이가 없이 때문에 이후 수행한 스프링 성형공정 해석에서는 공차 값을 0.25 mm로 고정하여 해석을 진행하였다.

엘보 메커니즘을 파악하기 위해 공차 0.25 mm 모델에서 45도, 90도 에서의 엘보 진행 방향 끝단의 형상을 분석하여 Fig. 14에 나타냈다. 분석 결과, 파이프의 외부 곡률부는 외부 금형과의 접촉에 주로 영향을 받고, 내부 곡률부는 내부 금형과의 접촉에 주로 영향을 받아 성형됨을 알 수 있었고 소재를 굽힘 성형해도 원래의 직관 형상을 유지하려는 직진성을 확인하였다. 본 성형공정은 소재가 압축에 의해 크게 변형하면서 성형되므로 스프링백은 거의 발생하지 않았다.



(a) 50% forming



(b) 100% forming

Fig. 14 Detail analysis of forming mechanism

제 5 장 외부금형이 없는 스피닝 성형공정 연구

기존 프레스 성형공정을 분석하여 소재 내부, 외부 곡률부는 각각 맨드렐과 외부 금형에 접촉되어 성형됨을 확인하였다. 그래서 맨드렐은 유지하고, 외부금형을 대체할 수 있는 방법을 모색하여 세계 최초로 스피닝 가공법을 엘보 성형공정에 적용, 개발하였다.

스피닝 가공법은 다품종 소량생산에 유리한 공정으로 맨드렐에 판 또는 관, 튜브 등의 형상을 가진 소재를 장착하여 회전시킨 후, 회전하는 소재의 표면을 봉이나 롤러로 눌러서 축 대칭 원형제품을 만드는 비 절삭 점진 성형공정으로 비교적 복잡한 형상도 손쉽게 성형이 가능한 우수한 공정이다. 엘보는 다품종, 소량 생산하는 제품이므로 스피닝 가공법을 사용하기에 적합하다. 또한 스피닝 가공법은 공정 특성 상 압출 성형방법에 비해 상대적으로 적은 하중으로 성형이 가능하다는 장점을 가진다.[16]

5.1 외부금형이 없는 스피닝 성형공정 해석

5.1.1 성형공정 방법

기존 프레스 성형공정은 소재를 내·외부 금형에 장착 후 유압실린더로 가압하여 압출 성형 한다. 스피닝 성형공정은 외부금형 대신 회전 롤러를 이용하여 소재의 외부 곡률부를 회전 성형한다. 회전 롤러는 3개의 롤러가 소재 원주방향을 따라 회전하는 방법과, 맨드렐의 길이 방향을 따라 롤러 전체가 회전하는 2가지의 회전을 통해 소재를 곡률 성형한다. 그러나 이 방법으로 유한요소해석을 진행하면 대칭 조건을 사용할 수 없고, 롤러가 소재의 원주방향으로 회전할 때 많은 해석시간이 필요하므로 성형공정을 단순화 할 수 있는 방법을 연구하였다. 3개의 롤러가 파이프 소재 원주방향으로 빠르게 회전하면 링 형태로 되는 부분에서 착안하여 3개의 회전 롤러를 링으로 근사화 하여 연구를 진행하였다. 이를 통해 2개의 회전 성형 공정 중에서 소재 원주방향 회전성형 공정은 생략하였고, 맨드렐 길이방향 회전성형만 남게 되었다. 그리고 소재 원주방향 회전이 없으므로 대칭 조건을 적용하여 해석시간을 크게 단축할 수 있었다. 회전 롤러와 링의 차이점은 Fig. 15에 나타내었고, 회전 롤러와 링의 회전 움직임은 Fig. 16에 나타내었다.

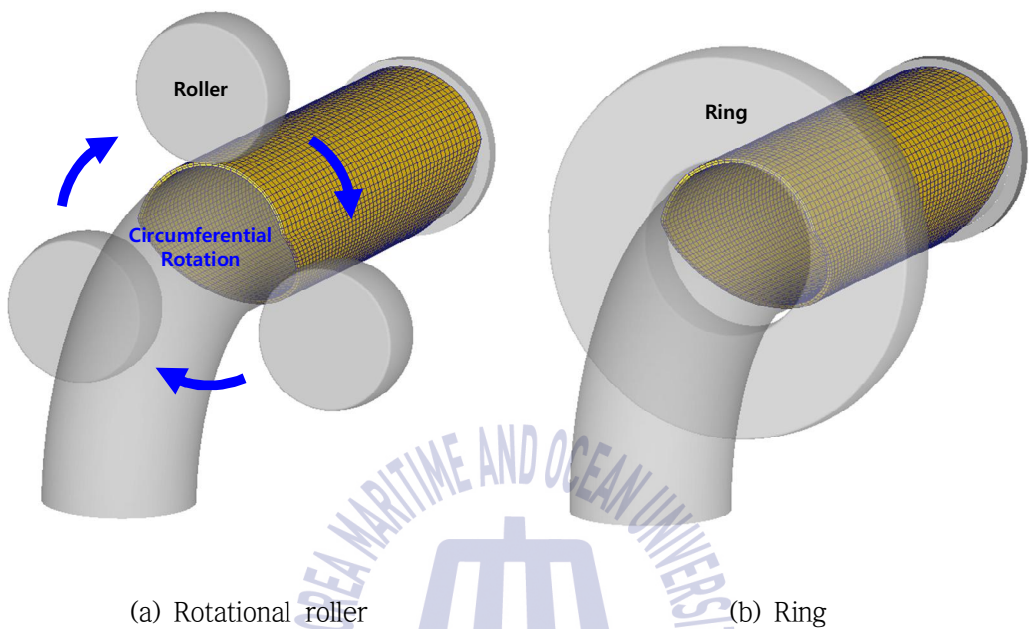


Fig. 15 Comparison of roller and ring

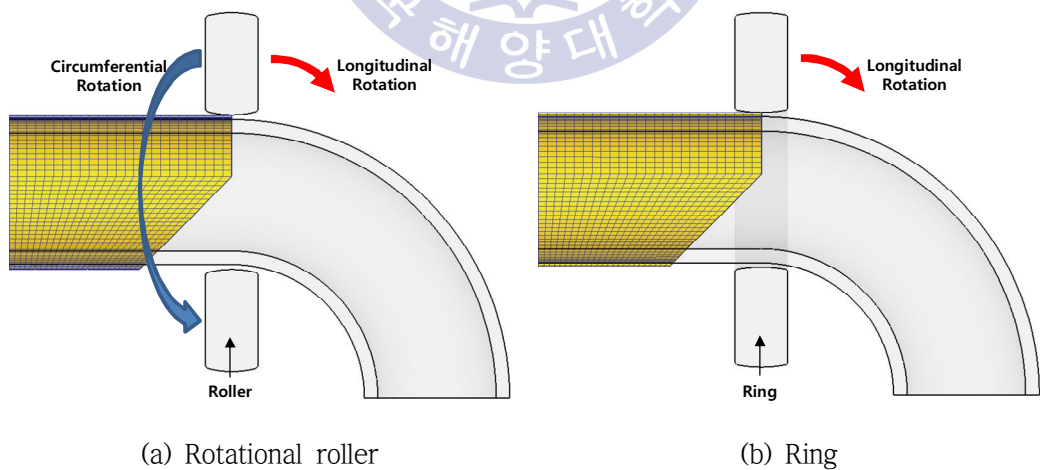


Fig. 16 Rotational movement of roller and ring

실제 스피닝 공정은 소재를 느린 속도로 연속적으로 이송하면서 롤러 회전으로 소재를 가공하여 엘보를 성형하나 이 공정을 해석적으로 적용하기가 쉽지 않기 때문에 본 연구에서는 소재 이송, 링 금형 회전을 반복적으로 수행하는 공정으로 해석을 진행하였다.

푸셔가 내부금형을 따라 소재를 일정한 길이만큼 이송하고, 링이 내부 금형의 길이 방향을 따라 회전하면서 이송된 파이프 소재를 곡률 성형하는 과정을 반복하여 엘보를 성형한다. Fig. 17은 스피닝 공정의 성형 단계를 나타낸다.

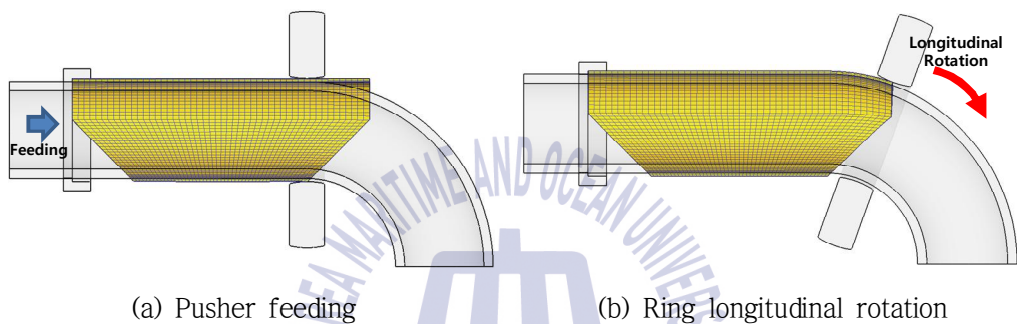


Fig. 17 Forming step of spinning process

5.1.2 모델링 및 경계조건

소재, 맨드렐은 기존 프레스 공정의 모델링 파일을 사용하였고, 링 금형은 NX6를 이용하여 모델링 하였다. 현재의 성형공정에서는 외부금형이 없기 때문에 푸셔와 맞닿는 소재의 외부 곡률부 끝단이 엘보가 곡률 성형될수록 인장에 의해 소재의 끝단이 바깥으로 이탈하는 현상이 발생하므로 이를 막기 위해 푸셔의 끝단을 맨드렐 방향으로 연장하여 모델링 하였다. 소재와 금형이 만나는 부분에는 필렛을 적용하였고, 모델링 파일은 Fig. 18에 나타났다. 푸셔 연장 길이 또한 기존에 연구된 바 없으므로 20 mm, 40 mm 2가지 연장길이를 선정하고 각각 해석을 진행하였다.

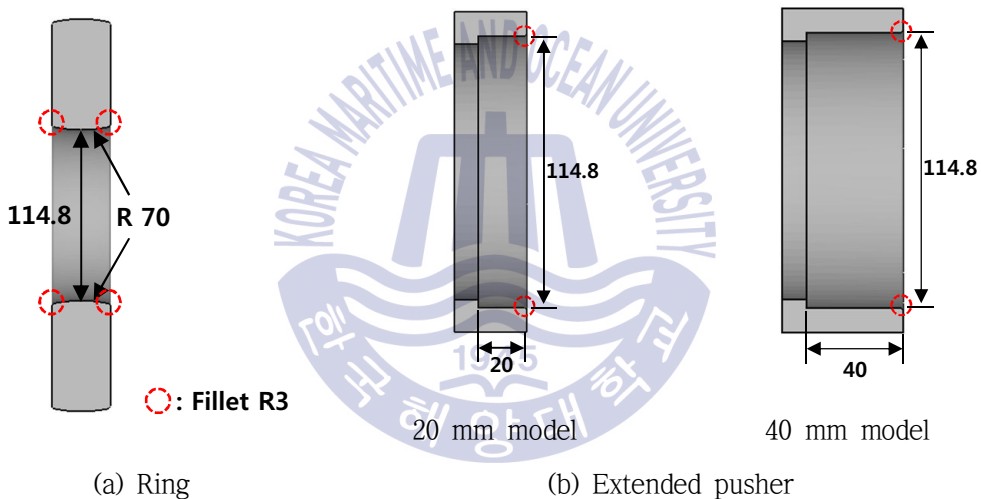


Fig. 18 Dimension of dies

유한요소해석에 적용한 경계조건은 Table 6에 표시하였다. 스피닝 성형공정도 냉간가공이므로 외부 온도와 금형 온도는 상온(20℃)으로 적용하였다. 마찰계수는 맨드렐과 푸셔는 기존 프레스 공정과 동일한 값을 사용하였다. 링은 3개의 회전 롤러를 단순화 한 금형이고 실제 회전 롤러는 원주방향과 길이방향으로 이동할 때 연속적으로 회전하면서 소재와 접촉하므로 링의 마찰계수는 0으로 적용하였다. 그리고 실제 스피닝 성형공정에서 소재는 천천히 이송하면서 회전 롤러에 의해 굽힘 성형되므로 이송속도는 2 mm/s로 적용하였다.

Table 6 Boundary condition of spinning process

Item	Value
Room temperature (℃)	20
Die temperature (℃)	20
Friction factor of mandrel	0.08
Friction factor of ring	0
Friction factor of pusher	0.7
Pusher feeding velocity (mm/s)	2

5.1.3 결과 분석

푸셔 연장길이에 따른 2개의 모델 해석을 수행하였다. 처음에 소재를 50 mm 만큼 이송한 후 링 금형을 맨드릴 길이방향으로 회전하여 소재를 곡률 성형하였고, 이 후 소재 이송, 링 회전 성형 공정을 반복하여 해석을 진행하였다. 소재의 이송거리는 소재의 직진성을 고려하여 선정하였고, 해석에 사용된 전체 공정은 Table 7에 정리하였다.

Table 7 Die movement step for analysis of spinning process

Step of process	Pipe feeding distance (mm)	Ring rotational angle (°)
1	50	18
2	40	28
3	20	34
4	20	40
5	20	45
6	20	51
7	20	57
8	20	63

푸셔를 20 mm 연장한 모델을 분석한 결과, 소재를 73 mm 만큼 이송했을 때 푸셔 연장부 근처에서 소재의 좌굴이 발생되었고 이후 소재를 이송할 때 좌굴이 성장하는 것을 확인하여 해석을 중단하였고 Fig. 17에 표시하였다.

푸셔를 40 mm 연장한 모델을 분석한 결과, 소재를 132 mm 만큼 이송했을 때 외부 곡률부와 푸셔 연장부 근처에서 좌굴이 발생하였으나 소재 이송을 진행해도 좌굴이 성장하지 않아서 계속 공정을 진행하였다. 소재를 146 mm 만큼 이송했을 때 내부 곡률부, 링과 맨드렐 직관부 경계에서 좌굴이 발생하였고 이후 소재를 이송할 때 좌굴이 성장하는 것을 확인하였고 Fig. 18에 나타냈다.

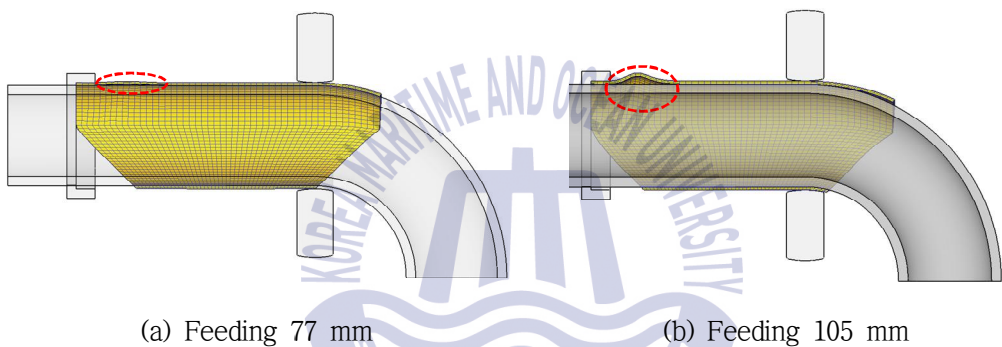


Fig. 19 Characteristics of deformation of pusher extension of 20 mm

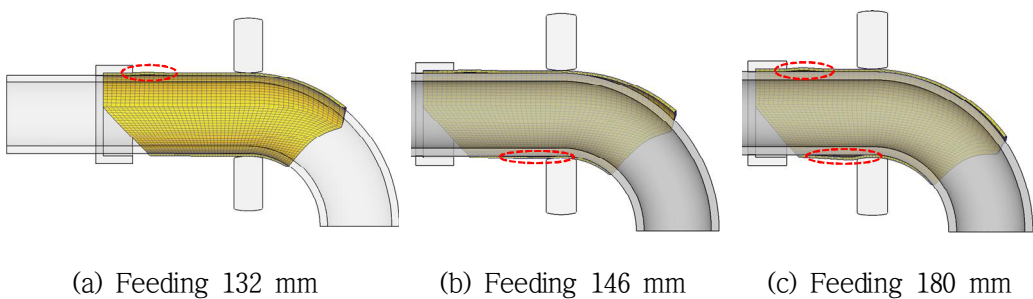


Fig. 20 Characteristics of deformation of pusher extension of 40 mm

푸서를 40 mm 연장한 모델을 계속해서 해석한 결과, 소재 이송거리 210 mm에서 좌굴이 외부, 내부 곡률부에서 모두 성장하고, 측면에서도 좌굴이 발생한 것을 확인하여 해석을 종료하였다. 원래 목표였던 90도 엘보 생성은 하지 못했으나 45도 엘보는 성형됨을 알 수 있었고, 성형된 소재의 두께변화를 분석한 결과, 변화 양상은 기존 프레스 성형공정과 동일하였다. 소재의 두께를 측정한 결과, 내부 곡률부, 소재 진행방향의 두께가 2.39 mm로 ASME 코드에 명시된 최소 두께값 2.67 mm 보다 10.5% 부족함을 알 수 있었고, 나머지 부분에서는 기준 두께를 만족하였다. 소재의 변형과 두께 변화는 Fig. 21에 나타났다.

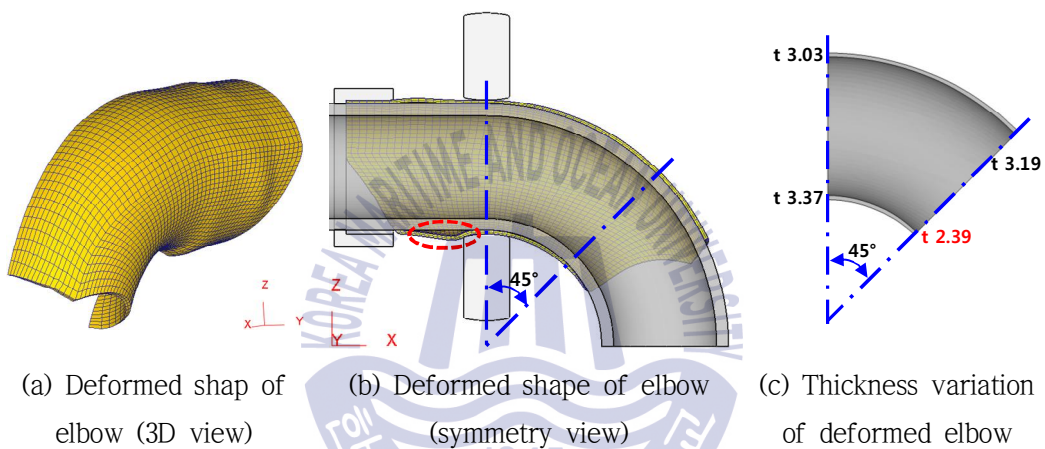
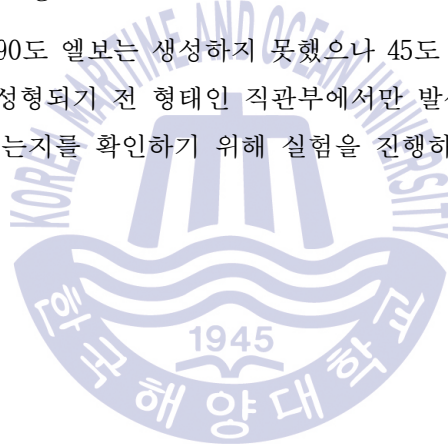


Fig. 21 Deformed shape and thickness variation

엘보의 두께 변화를 분석하기 위해 내부 곡률부, 소재 진행방향의 한 점을 선정하고 소재 이송 10 mm마다 그 부분의 두께변화를 측정하였다. Fig. 22, 23은 선정된 추적 점에서의 두께 변화를 나타낸다. 처음에 소재를 이송할 땐 두께변화가 거의 없으나 소재가 곡률 성형 될수록 두께가 계속해서 얇아짐을 확인하였다.

그리고 기존 프레스 공정과 외부금형이 없는 스피닝 공정의 성형하중을 비교하였다. 소재가 210 mm 이송되었을 때를 기준으로 하중값을 비교한 결과, 프레스 공정에서의 최대 성형 하중값은 313 ton이고, 스피닝 공정의 최대 성형 하중값은 37.8 ton으로 기존 프레스 공정의 12.1%로 성형이 가능함을 확인하였고 Fig. 24에 나타냈다. 소재가 210 mm 이송되었을 때를 기준으로 합력을 비교한 결과, 프레스 공정의 최대 합력이 2074 ton이고, 스피닝 공정의 최대 합력값은 78.3 ton으로 기존 프레스 공정의 3.78%로 금형을 구축할 수 있음을 확인하였고 Fig. 25에 나타냈다.

해석 결과를 분석하여 90도 엘보는 생성하지 못했으나 45도 엘보는 성형됨을 확인하였고, 좌굴은 소재가 곡률 성형되기 전 형태인 직관부에서만 발생함을 알 수 있었다. 실제로는 어떤 형태로 성형되는지를 확인하기 위해 실험을 진행하였다.



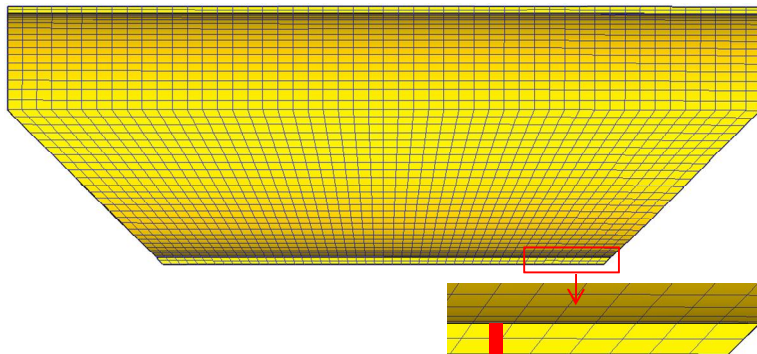


Fig. 22 Location of tracking point

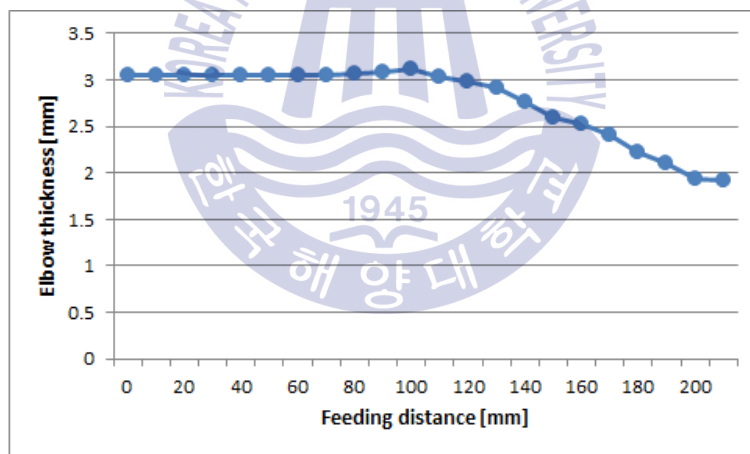
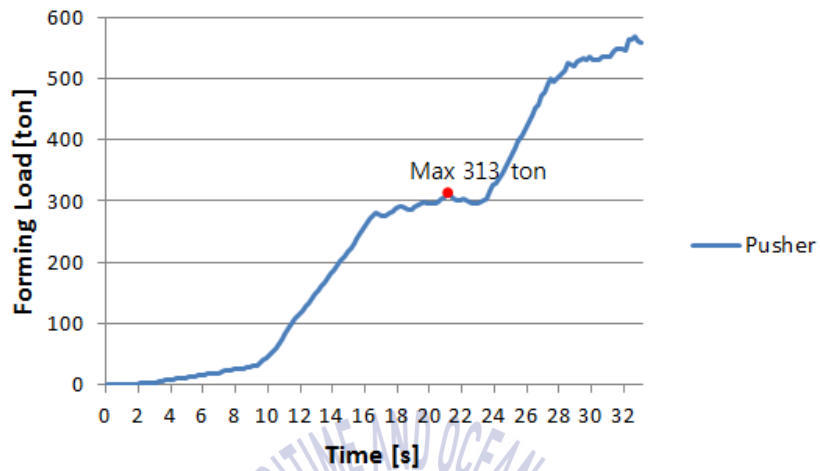
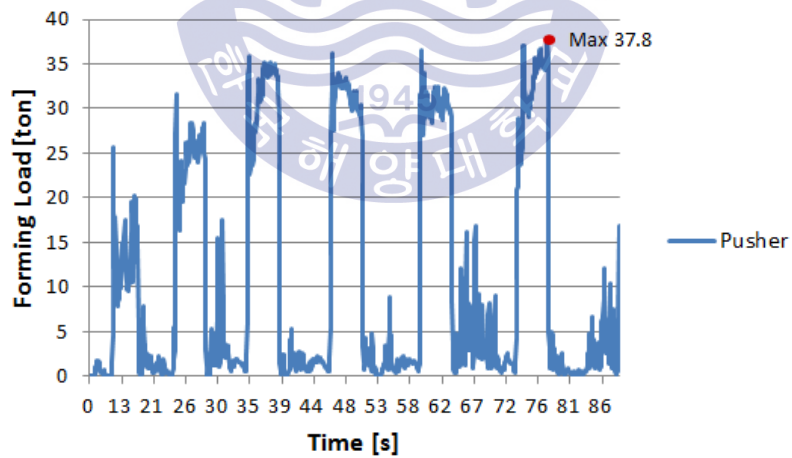


Fig. 23 Variation of elbow thickness with feeding distance

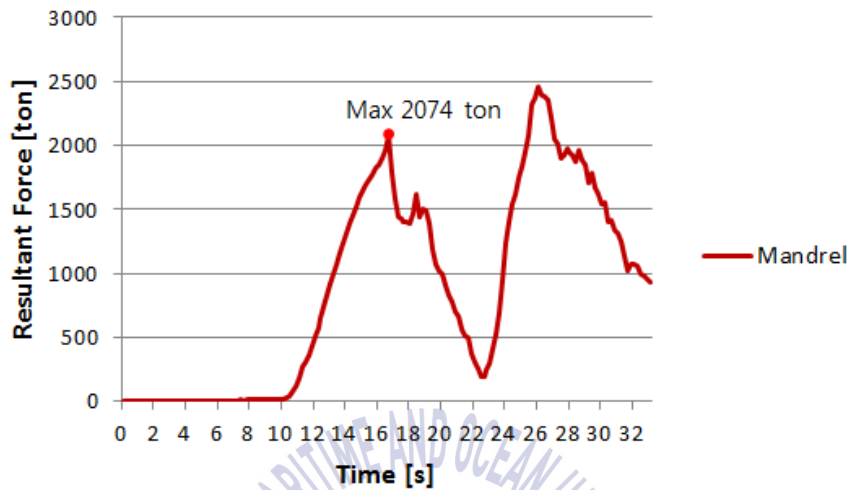


(a) Press forming process

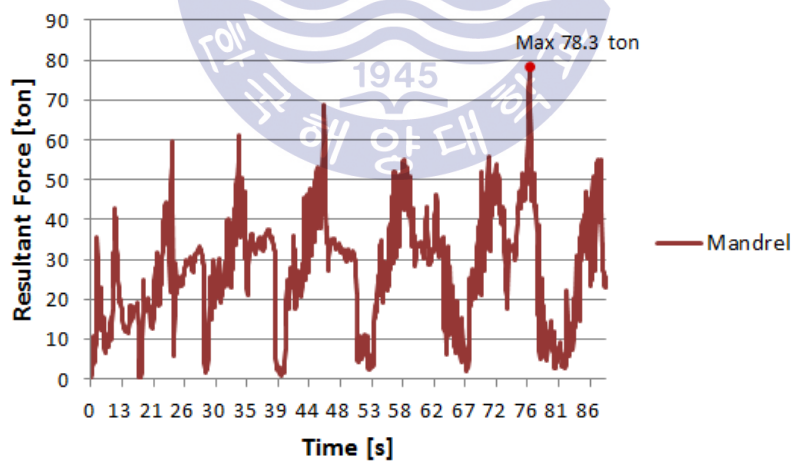


(b) Spinning process

Fig. 24 Comparison of forming load



(a) Press forming process



(b) Spinning process

Fig. 25 Comparison of resultant force

5.2 외부금형이 없는 스피닝 성형공정 시험

5.2.1 장비 구성

스피닝 성형공정을 통해 실제로 엘보 성형이 가능한지, 그리고 성형된 엘보의 두께 변화가 해석과 동일한지 확인하기 위해 실험을 진행하였다. 장비는 소재의 이송을 담당하는 유압실린더, 2가지 회전을 구현하기 위한 회전 롤러와 랙과 피니언, 기타 장치로 제작하였다. 장비의 전체구성은 Fig. 26과 같다.

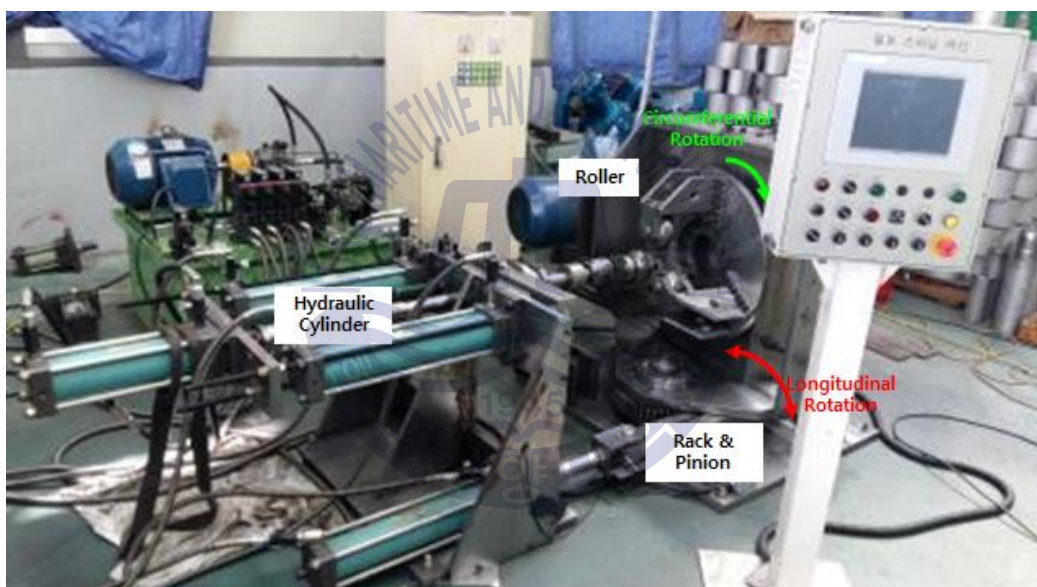


Fig. 26 Elbow forming machine

5.2.2 엘보 시험 성형 과정

엘보 성형장치를 이용하여 4인치 90도 엘보 시제품을 제작하였다. 엘보 성형공정은 다음과 같은 방법으로 수행되었다. 먼저 파이프를 맨드렐 입구 부분에 장착하고, 유압으로 파이프를 일정 길이만큼 이송한 후 3개의 회전 물러가 파이프 원주방향으로 회전하는 것과 동시에 맨드렐의 길이방향으로 회전이동을 한다. 위 과정을 반복적으로 수행하여 점진적으로 파이프를 엘보 형태로 성형하였다. Fig. 27은 원주방향 회전과 길이방향 회전 이동하는 과정을 보여준다.

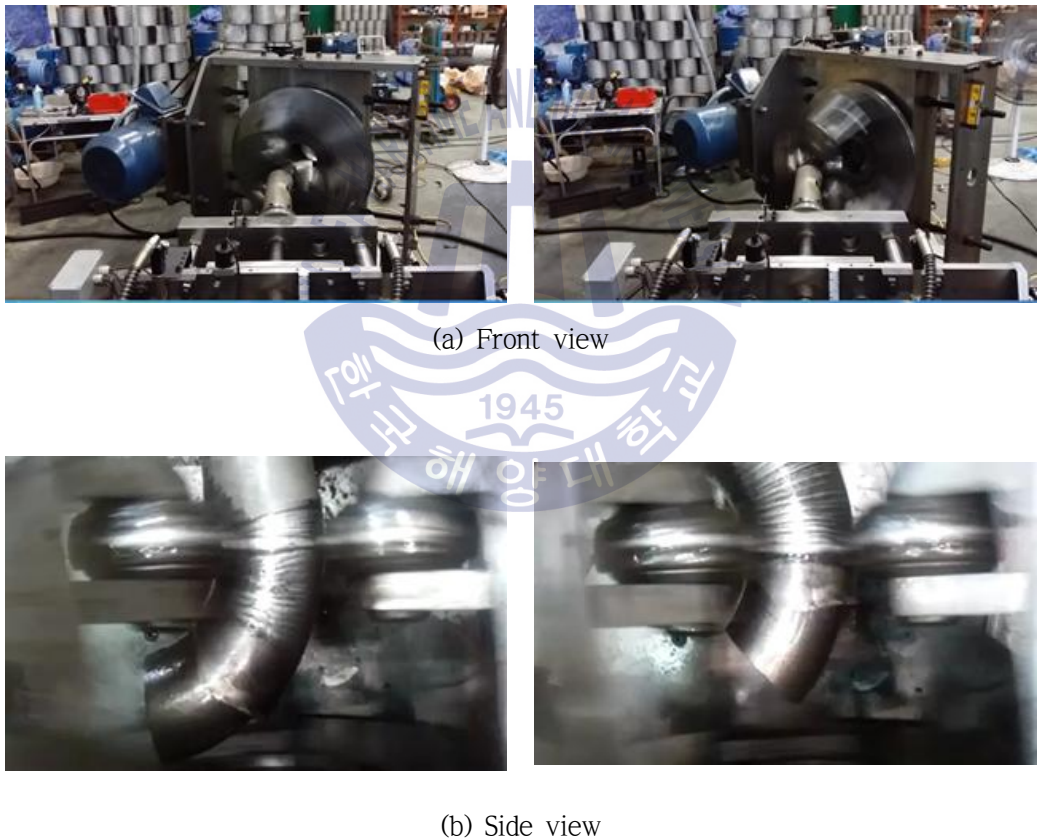


Fig. 27 Movement of circumferential and longitudinal rotation

5.2.3 엘보 시험 성형 분석

외부금형 없이 회전 롤러로 파이프 성형을 진행하였다. 실험 결과 해석과 마찬가지로 45도 이상 성형 시 좌굴 발생 및 성장을 확인 후 실험을 중단하였고, 생성된 시제품은 Fig. 28에 나타냈다. 그리고 45도 이상 성형된 후 소재를 계속 이송해도 소재가 거의 이송되지 않고 좌굴이 성장하는 현상을 확인하였다. 그 이유는 원래 유압실린더가 소재를 가압하고 소재는 그로 인해 힘을 받아 이송되는데 내부 곡률부에서 발생한 좌굴 때문에 제대로 힘을 받지 못해 좌굴만 성장하고 소재는 거의 이송되지 못하는 것으로 생각된다.

Fig. 29는 성형된 소재의 두께변화를 보여준다. 시제품을 절반으로 자른 후 두께 변형을 분석한 결과, 기존 해석 결과와 마찬가지로 외부 곡률부 가운데 부분과 내부 곡률부 소재 진행방향에서 두께가 얇아지고, 나머지 구간에서는 두께가 증가하는 것을 확인하였다.

실험을 통해 스피닝 가공법으로 소재를 엘보로 굽힘 성형이 가능함을 파악했고, 두께 변형 양상이 동일한 것을 확인하였다. 또한 링으로 성형한 해석 결과와 회전 롤러로 성형한 실험 결과가 유사한 것을 확인하여 해석의 타당성을 입증하였다. 그러나 현 공정으로는 원래 목표로 한 90도 엘보를 제작할 수 없음을 재차 확인하였으므로 추가적인 연구가 필요하다.

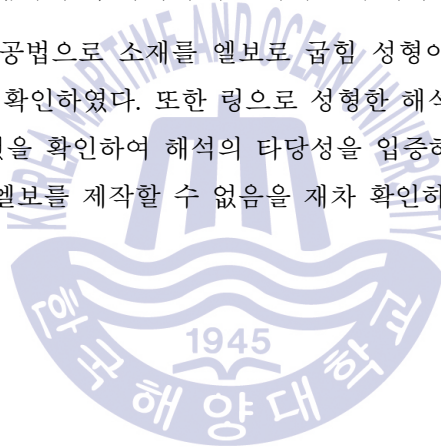




Fig. 28 Elbow Prototype



Fig. 29 Variation of elbow thickness

제 6 장 직관부 가이드를 추가한 스피닝 성형공정 연구

6.1 성형공정 방법

외부금형이 없는 스피닝 성형공정 연구를 통해 기존 방법으로는 직관 구간에서 발생하는 소재의 좌굴을 막을 수 없다는 사실과, 스피닝 가공법으로 소재의 곡률 성형이 가능함을 알 수 있었다. 직관에서 발생하는 소재의 좌굴을 방지하기 위해 직관을 감싸는 가이드를 추가하여 좌굴을 방지하고 90도 엘보를 생성할 수 있는 성형공정 연구를 진행하였다. 해석 방법은 이전과 마찬가지로 푸셔의 가압을 통한 소재의 이송과정과 링의 회전을 통한 소재의 곡률 성형 과정을 반복, 적용하였다.

6.2 모델링 및 경계 조건

기존 파이프 소재는 45도 사선절단과 침단 부분 절단, 총 2번의 절단 과정을 거쳐서 사용했으나, 이번 성형공정은 엘보 최소두께 만족과 연속공정을 고려하여 원 소재 형상 그대로 사용하였다. 파이프의 길이는 330 mm 그대로 사용하였고 Fig. 30에 나타냈다. 경계 조건은 기존 스피닝 공정과 동일한 값을 사용하였다.

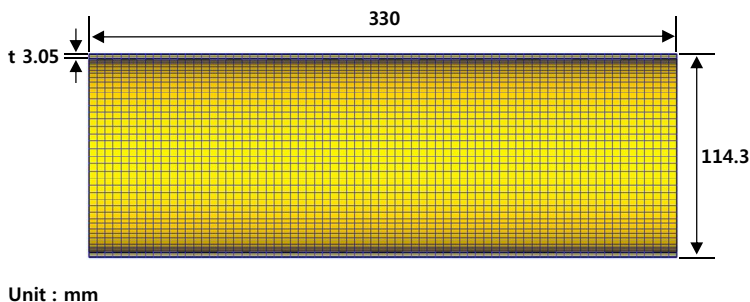


Fig. 30 Shape of initial pipe workpiece

맨드렐, 링은 기존 공정의 모델을 유지하였고, 맨드렐 직관에 들어가는 외부 금형은 NX6로 모델링 하였다. Fig. 31은 외부금형의 치수로 소재가 직관에서 곡관으로 성형되는 부분은 소재와 외부금형의 접촉을 고려하여 필렛을 적용하였다. 현재의 성형공정에서는 직관 부분에 맨드렐과 외부 금형 모두 존재하므로 기존 프레스 성형공정에서 사용한 푸셔 모델을 사용하였다. Fig. 32는 소재 및 금형의 구성을 나타낸다.

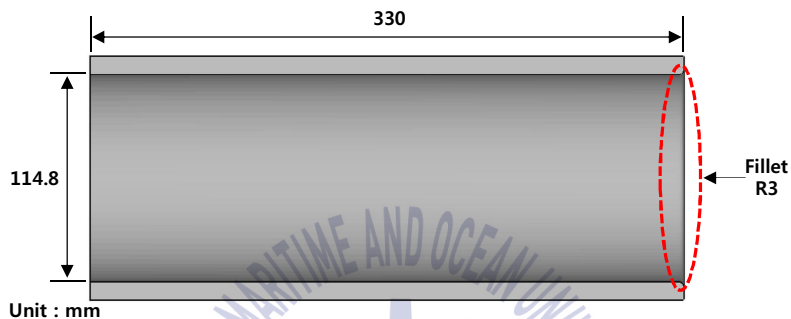


Fig. 31 Dimension of outer mold

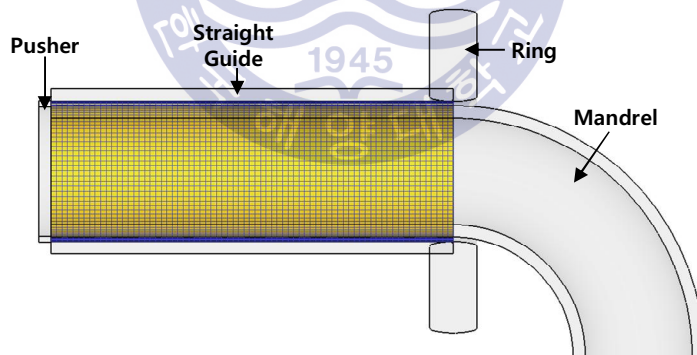


Fig. 32 Die shape for elbow forming

6.3 결과 분석

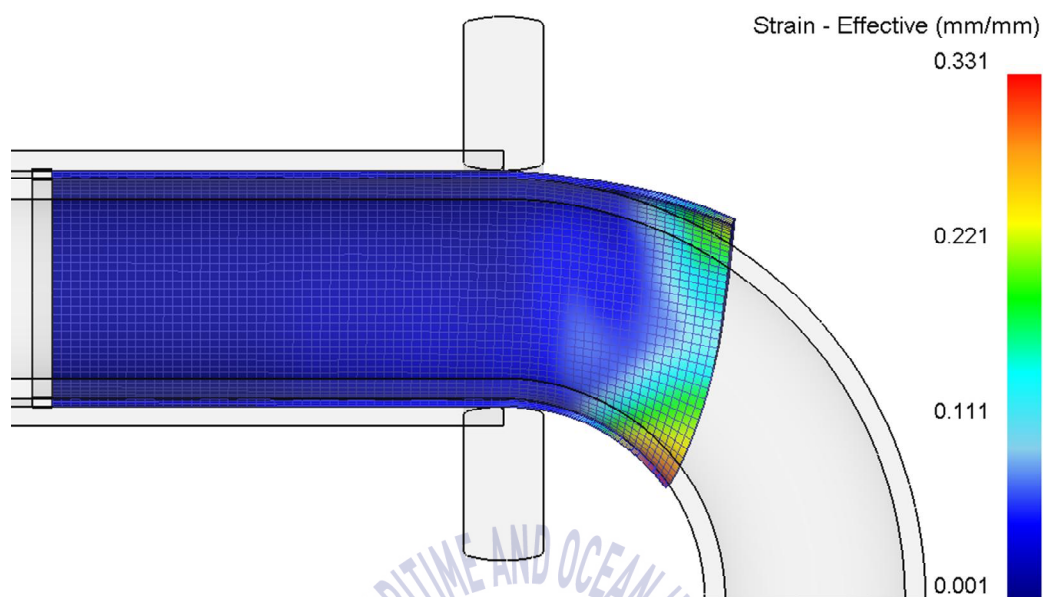
직관에 발생하는 좌굴을 막기 위해 가이드를 추가하여 해석을 진행하였다. 처음에 소재를 50 mm 만큼 이송한 후 링 금형을 맨드릴 길이방향으로 회전하여 소재를 곡률 성형하였고, 이 후 소재 이송, 링 회전 성형 공정을 반복하여 해석을 진행하였다. 소재의 이송 거리는 소재의 직진성을 고려하여 선정하였고, 해석에 사용된 전체 공정은 Table 8에 정리하였다. 해석 결과, 소재 길이 330 mm 중 290 mm 까지 소재를 이송했을 때 90도 엘보가 성형됨을 확인하여 해석을 종료하였다.

Table 8 Die movement step for analysis of spinning process

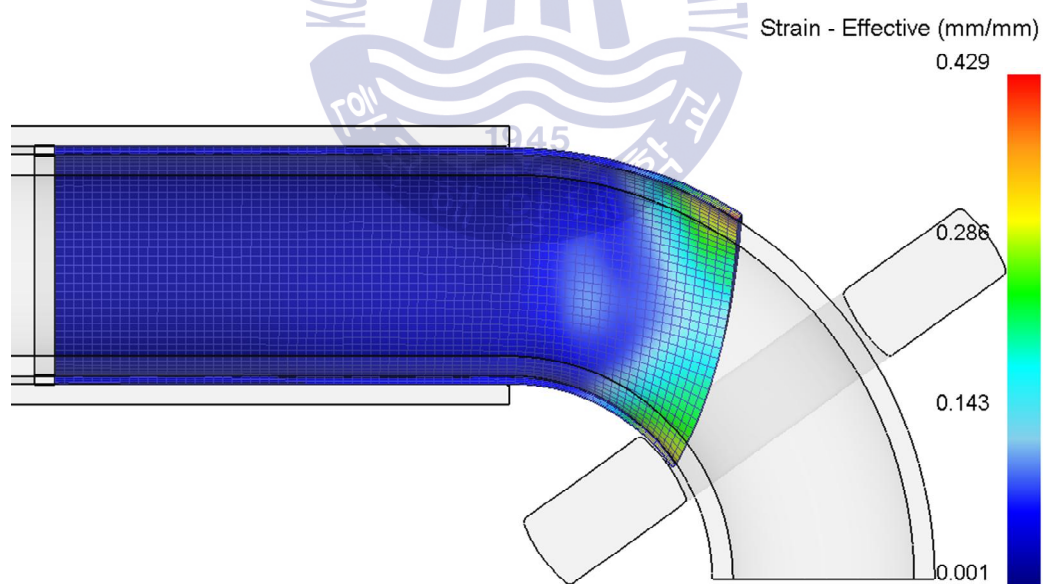
Step of process	Pipe feeding distance (mm)	Ring rotational angle (°)
1	50	27
2	30	40
3	30	52
4	30	65
5	15	73
6	30	82
7	30	90
8	30	90
9	20	90
10	5	98
11	10	105

이송거리에 따른 소재의 변형률을 분석하여 소재의 전반적인 변형 형상을 확인하였다. 소재 이송거리가 110 mm, 185 mm, 290 mm 일 때의 3가지를 선정하여 소재 이송이 종료된 시점과, 링 회전성형이 종료된 시점에서의 변형률을 비교하였고 Fig. 33 ~ 35에 나타내었다. 변형률을 분석한 결과, 소재 이송거리가 110 mm 일 때는 소재가 주로 진행방향에서 변형이 발생하는 것을 보았고 특히 내부 곡률부에서 과도한 변형이 발생하는 것을 확인하였다. 소재 이송거리가 185 mm 일 때는 소재 진행방향 부분과 곡률 성형되는 내부 곡률부에서 전반적으로 변형이 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 소재 이송거리 290 mm 일 때는 외부 곡률부에서는 변형이 거의 없고, 내부 곡률부의 가운데에서 집중적으로 소재의 변형이 발생하였다. 이를 통해 성형 초기에는 곡률 성형되는 부분에서 주로 소재의 변형이 발생함을 확인하였고, 성형이 진행될수록 외부 곡률부는 굽힘 성형된 형태가 유지되고 내부 곡률부는 여전히 소재의 직진성이 유지되어 계속해서 변형이 되는 현상을 볼 수 있었다. 또한 소재 이송이 종료되었을 때의 변형률과 링 회전성형이 종료되었을 때의 변형률의 차이는 거의 없다는 것을 확인하였고, 소재가 이송, 회전 과정을 통한 대변형이 일어나서 성형될 때 스프링백 현상이 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다.



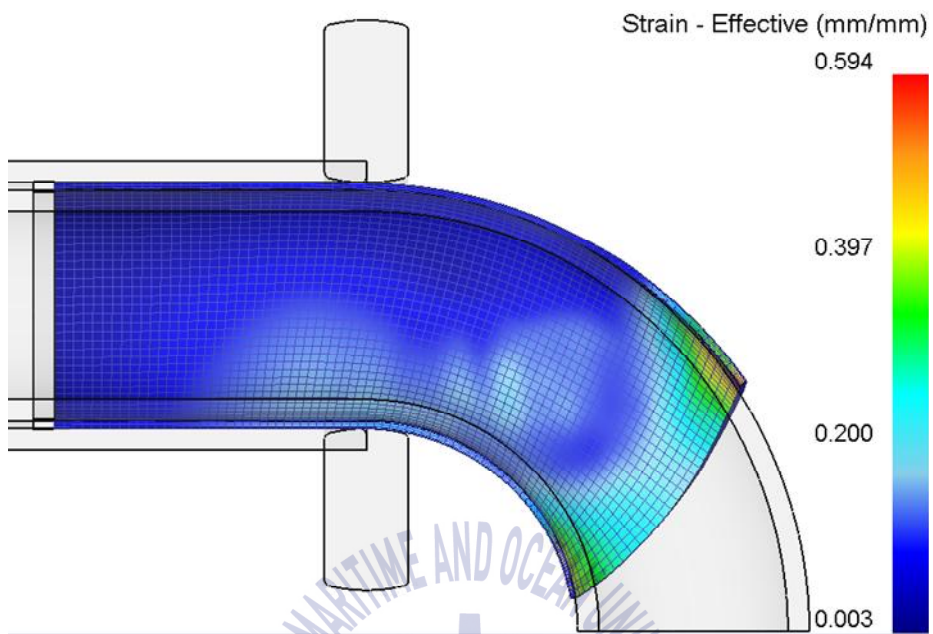


(a) Workpiece feeding

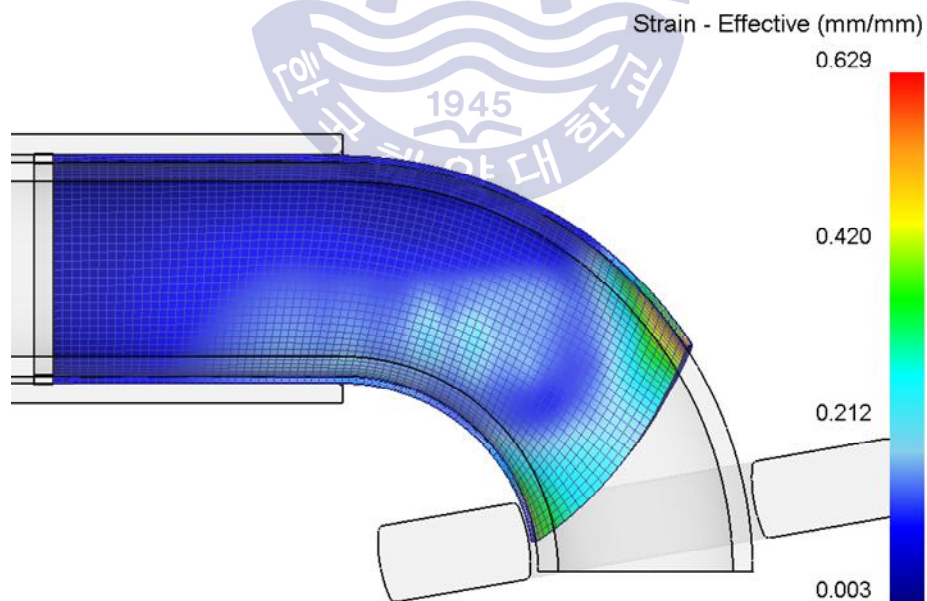


(b) Ring rotational molding

Fig. 33 Strain distribution of feeding distance 110 mm

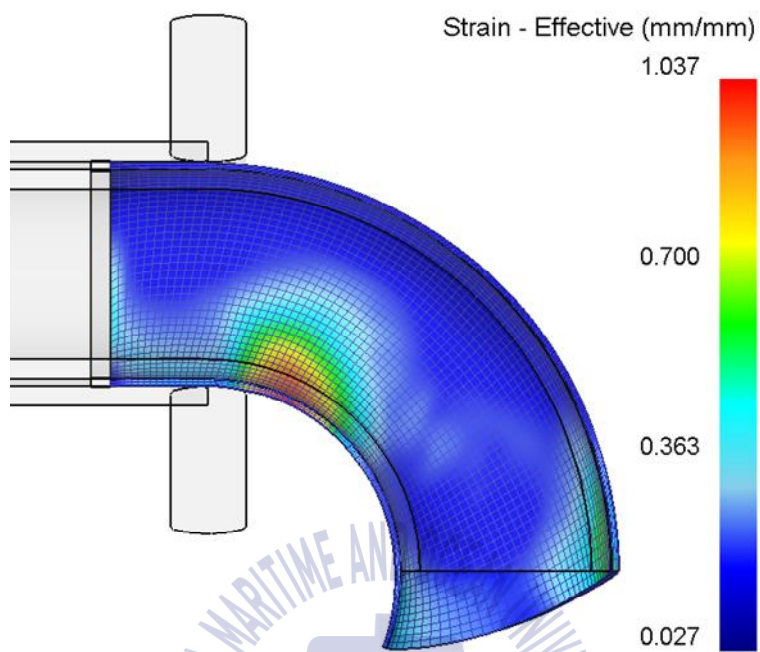


(a) Workpiece feeding

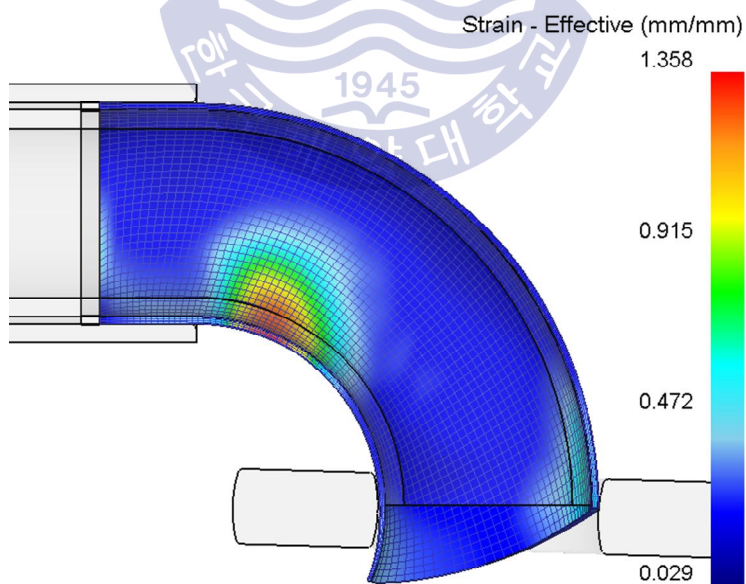


(b) Ring rotational molding

Fig. 34 Strain distribution of feeding distance 185 mm



(a) Workpiece feeding



(b) Ring rotational molding

Fig. 35 Strain distribution of feeding distance 290 mm

이전 스피닝 공정에서 내부 곡률부, 엘보 진행방향에서의 두께가 기준 최소두께를 만족하지 못했으므로 신 공정을 통해 성형된 90도 엘보가 기준두께를 만족하는지 확인하기 위해 엘보 두께를 분석하였다. Fig. 36에 나타난 엘보 두께를 확인한 결과, 소재를 290 mm 만큼 이송했을 때 생성된 90도 엘보의 최소 두께는 내부 곡률부, 엘보 진행방향에서의 2.69 mm로 기준 최소 두께 2.67 mm를 만족함을 볼 수 있었다.

그리고 스피닝 성형공정으로 90도 엘보를 생성할 때 필요한 성형 하중값을 Fig. 37에 나타내었다. 소재 이송거리가 290 mm 일 때를 기준으로 하중을 비교한 결과, 최대 하중값은 맨드렐에서 113 ton으로 기존 프레스 공정의 19.9 %로 엘보를 성형할 수 있음을 보여준다. 그리고 직관부 가이드를 추가한 스피닝 공정에서의 최대 합력값은 941 ton으로 기존 프레스 공정의 38.3%로 금형을 구속할 수 있음을 확인하였고 Fig. 38에 나타냈다..

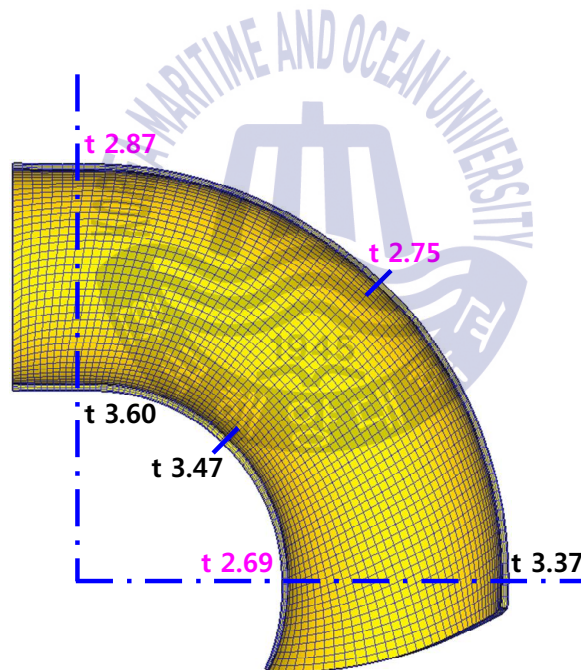


Fig. 36 Thickness distribution of deformed elbow

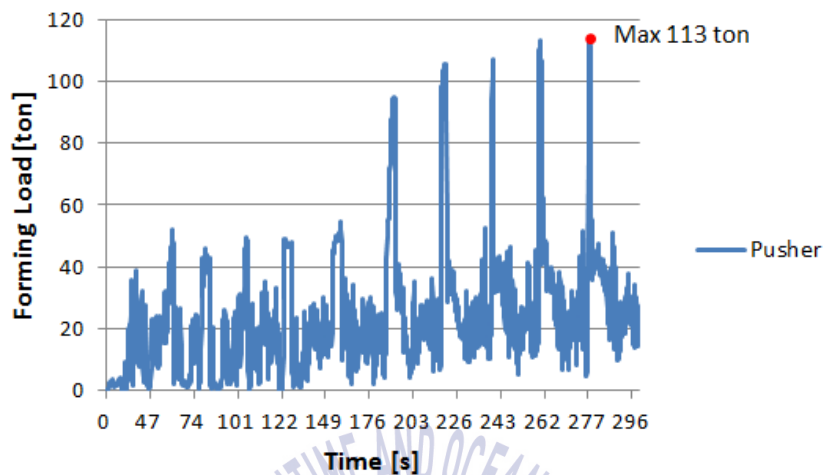


Fig. 37 Forming load distribution with time

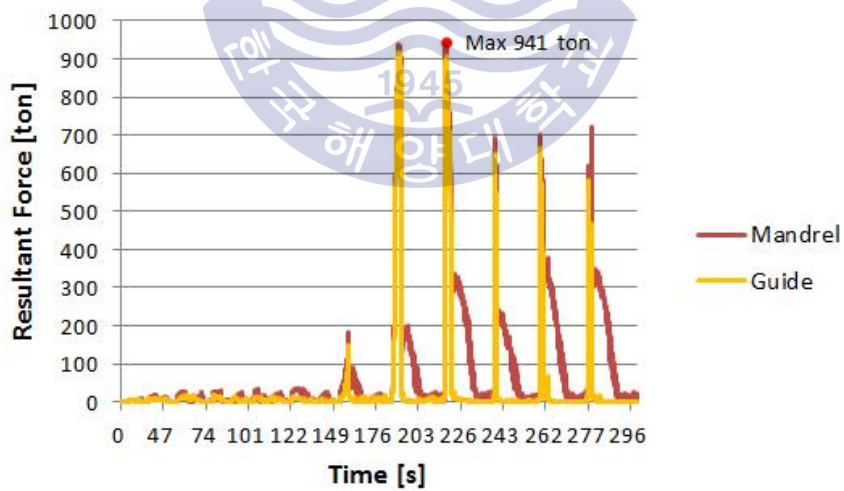


Fig. 38 Resultant force distribution with time

제 7 장 결론

본 논문에서는 세계 최초로 스피닝 가공법을 이용하여 금형을 최소화하고 엘보 성형 시 필요한 하중을 줄일 수 있는 4인치 90도 엘보 성형공정에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 스피닝 가공법을 해석에 적용하기 이전에 기존 프레스 성형공정을 유한요소해석으로 모사하여 엘보의 두께변화, 엘보를 성형할 때 필요한 하중값, 그리고 기존 공정의 메커니즘을 분석하였다. 그 결과, 엘보 두께변화 양상을 확인하였고 최대 성형 하중과 합력을 확인하였다. 그리고 메커니즘 분석을 통해 엘보 성형 시 파이프의 외부 곡률부는 외부 금형과의 접촉에 주로 영향을 받고, 내부 곡률부는 내부 금형과의 접촉에 주로 영향이 받는다는 것을 파악하였다.

2. 금형을 최소화하기 위해 스피닝 가공법을 성형공정에 적용하여 해석을 진행하였다. 실제 스피닝 공정에서는 3개의 회전 롤러를 이용하여 소재를 성형하는데, 이 과정을 그대로 해석에 적용하면 많은 시간이 요구되므로 링으로 근사화 하여 연구를 진행하였다. 해석 결과를 분석한 결과, 스피닝 성형공정을 통해 엘보 성형이 가능함을 확인하였으나 직관부에서 좌굴이 발생하는 문제가 발생하였다. 실제로 성형장비를 제작하여 엘보 성형을 실시한 결과, 해석과 동일한 결과가 나오는 것을 확인하였다.

3. 좌굴을 막기 위해 직관부에 가이드를 추가하여 스피닝 가공법을 적용하여 성형해석을 수행하였다. 해석 결과 목표로 했던 90도 엘보를 성형하는데 성공하였고, 두께 변화를 측정하여 ASME 코드 기준값을 만족함을 확인했다. 그리고 성형하중을 분석하여 기존 프레스 성형공정의 19.9 %로 성형이 가능함을 확인하였고, 합력은 38.8%의 하중으로 금형구속이 가능함을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 스피닝 가공법을 이용한 새로운 엘보 성형공정을 개발하였다. 그 결과, 엘보를 성형할 때 필요한 금형을 줄일 수 있었고, 금형에 걸리는 하중이 크게 감소되어 상대적으로 저용량의 유압실린더로 성형이 가능함을 확인하였다. 하지만 본 논문에서는 새로운 성형공정 개발과 엘보 성형성에 초점을 맞춰 연구를 진행하였기 때문에 추후 직관부 가이드의 크기를 줄여서 좌굴이 발생하는 곳에 부분적으로 적용하거나 또는 회전

롤러를 직관까지 이동시키는 방법 등의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 스피닝 공정 개발을 위해 4인치 90도 엘보에 한정하여 연구를 수행하였다. 그러나 엘보는 규격별로 크기 및 치수가 다르기 때문에 다른 종류의 엘보에 스피닝 가공법을 적용시키기 위해서는 지속적인 연구개발이 필요하다. 또한 현 성형공정은 성형성에 초점을 맞춰서 진행했으므로 공정 최적화에 대한 추가적인 연구가 요구된다. 그리고 엘보는 크기가 커질수록 제조공정의 난이도 및 비용이 증가하므로 대형 엘보를 성형할 때 스피닝 가공법을 적용하면 비용 측면에서 상당한 이득이 될 것으로 사료된다.



참고문헌

- [1] 한화증권 리서치센터, 2011. *기계산업(Fitting)* [Online] (Updated 29 August 2011) Available at: http://consensus.hankyung.com/hankyung/file_down.php?pdf=한화20110829기계.pdf [Accessed 18 October 2016].
- [2] 정호동, 2011. *역설계를 이용한 프레스 포밍 파이프의 성형 모델 선정 및 검증*. 석사학위논문. 부산: 동아대학교.
- [3] BS투자증권, 2013. *피팅산업 : Win Win - 알짜배기 업체 사자* [Online] (Updated 19 June 2013) Available at : http://www.bnkfn.co.kr/uploads/9719/1/20130619_fitting.pdf [Accessed 18 October 2016].
- [4] 김용조, 정경빈, 이선희, 최창혁, 2003. 유압시스템용 Elbow형 Fitting 부품의 강도평가를 위한 유한요소해석. *The Research Institute of Engineering & Technology*, Vol 21. No 2, pp 310-321.
- [5] Chosunbiz, 2012. *공급과잉 중국, 전 업종서 저가공세 본격화* [Online] (Updated 04 May 2012) Available at: http://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2012/05/03/2012050303196.html [Accessed 5 September 2016].
- [6] S. J. Yuan, Z. Xu, Z. R. Wang, & Wang Hai, 1998. The integrally hydro-forming process of pipe elbows. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Volume 75, Issue 1, pp.7-9.
- [7] DAEKYUNG BEND, 2015. *Prequalification Statement*.
- [8] Robert D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha, 1989. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. JOHN WILEY & SONS.
- [9] 전만수, 이형일, 2002. *연속체역학에서 유한요소법까지*. Prentice Hall.
- [10] 정호승, 2001. *금형강의 동적 및 정적 재결정 거동과 미세조직 변화에 관한 연구*. 석사학위논문. 부산: 한국해양대학교.

- [11] 김영석, 2003. *소성역학*. 시그마프레스.
- [12] Shiro Kobayashi, Soo-Ik Oh, & Taylan Altan, 1989. *Metal Forming and The Finite-Element Method*. Oxford University Press.
- [13] ASME, 2012. *ASME B16.9-2012 Factory-Made Wrought Buttwelding Fittings*.
- [14] ASME, 2012. *ASME Section II Part D-Metric*.
- [15] Scientific Forming Technologies Corporation, 2013. *DEFORM V11.0*.
- [16] 박중언, et al., 2001. 스피닝공정에 있어서 스프링백 억제방안. *한국정밀공학회지*, Vol. 18 No. 9, pp.186-191.

