

프레스-브레이킹 굽힘 공정을 이용한 SAW 후육강관의 외경 예측을 위한 해석적 연구

박기범¹ · 강병권¹ · 강범수² · 구태완[#]

Numerical Prediction of the Outer Diameter for SAW Pipes Formed by Press-Brake Bending

G. B. Park, B. K. Kang, B. S. Kang, T. W. Ku

(Received November 13, 2015 / Revised December 11, 2015 / Accepted December 11, 2015)

Abstract

Press-brake bending is used to shape flat and thick plates into a targeted circular configuration without excessive localized thinning or thickening. A brake bending press called 'a knife press bending apparatus' has been widely adopted to manufacture thick, large and long pipe from initially thick plate. Submerged Arc Welded (SAW) pipes are also produced by employing press-brake bending. These pipes are mainly used for oil, natural gas and water pipelines. The principal process variables for press-brake bending can be summarized as stroke of the press-brake knife, the distance between both roll in the lower die, and the feeding length of the plate. Many combinations of these process variables are available, thus various pipe diameters can be realized. In the current study, a series of repetitive numerical simulations by feeding a thick plate with initial thickness of 25.4mm were conducted with the consideration of elastic recovery. Furthermore, an index for SAW pipe production is proposed which can be widely used in industry.

Key Words : Submerged Arc Welding Pipe, Press-Braking Bending Process, Thick Plate, Outer Diameter Prediction

1. 서 론

후육강관(pipe)은 해양 및 석유화학 플랜트, 대형 송유관 및 송수관 등의 배관재 분야 등 다양한 산업분야에서 폭 넓게 사용되고 있다. 이와 더불어, 세계적으로 플랜트 설비의 대형화 및 신규 건설, 해양 및 유전 개발 등의 기반산업 인프라 확충 프로젝트의 증가로 인해 그 수요가 매년 증가하고 있다. 이러한 후육강관의 종류로는 무계목(seamless) 강관과 접합(welding) 강관으로 크게 구분할 수 있다. 무계목 강관은 원유 시추용 및 고온고압 배관 용도로 주로 사용되고 있으나, 생산 단가가 비교적 높다는

단점이 있다. 이와는 달리 접합 강관의 경우에는 일반구조용 배관, 송유관 및 송수관 등의 다양한 용도로 적용되고 있으며, 생산 단가는 무계목 강관에 비해 다소 저렴하지만 길이 방향으로 용접공정이 적용되기 때문에 고압 배관재로는 적용이 어렵다는 단점이 있다[1~3].

대표적인 후육강관 중의 하나인 SAW(submerged arc welding) 강관은 일반적으로 약 12.5mm(약 0.5") 이상의 두께, 약 400mm~2,000mm 수준의 대구경 외경 그리고 약 12,000mm 정도의 길이를 가지게 된다. Fig. 1(a)에서와 같은 두께가 상대적으로 얇고 직경이 큰 강관을 생산하기에 적합한 롤-벤딩(roll-bending)

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 부산대학교 항공우주공학과

Corresponding Author : ERC of Innovative Technology on Advanced Forming, Pusan National University, E-mail: longtw@pusan.ac.kr

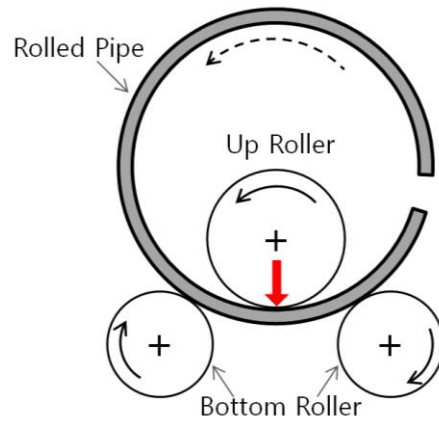
공정보다는 Fig. 1(b)에서 도시된 바와 같은 프레스-브레이킹 굽힘(press-braking bending) 공정을 적용함으로써 초기 후판재를 이용하여 SAW 후육강관을 성형하는 것이 보다 효과적인 방법으로 여겨지고 있으며[4, 5], 이러한 프레스-브레이킹 공정으로 생산된 후육강관을 JCO 강관이라고도 한다[6]. 이외에도 후판재를 U-Bending 공정과 O-Bending 공정을 거쳐 후육강관으로 생산하는 UOE 공정 등이 있으나, 성형장비의 대형화를 요구하고 있어 최근에는 제한적으로 적용되고 있다[7].

프레스-브레이킹 굽힘 공정을 적용하여 SAW 후육강관을 성형할 경우에 있어서, 성형된 후육강관의 외경(outer diameter)을 결정하는 주요 공정변수로는 Fig. 1(b)에서 알 수 있듯이 단위 공정당 후판재의 인입량(feeding length), 하부에 위치한 두 개의 회전 롤러(turning roller) 사이의 거리 그리고 프레스-브레이킹 편치(press-braking knife)의 변위(stroke) 등 3가지의 주요 공정변수가 존재함을 알 수 있으며, 이들 공정변수 조합에 따라 다양한 크기의 외경을 가지는 후육강관을 성형할 수 있다. 즉, 이들 3가지의 공정변수에 있어서, 변위가 감소할수록 그리고 두 회전 롤러 사이의 거리와 후판재의 인입량이 증가할수록 보다 큰 외경의 후육강관을 성형할 수 있음을 직관적으로 알 수 있다.

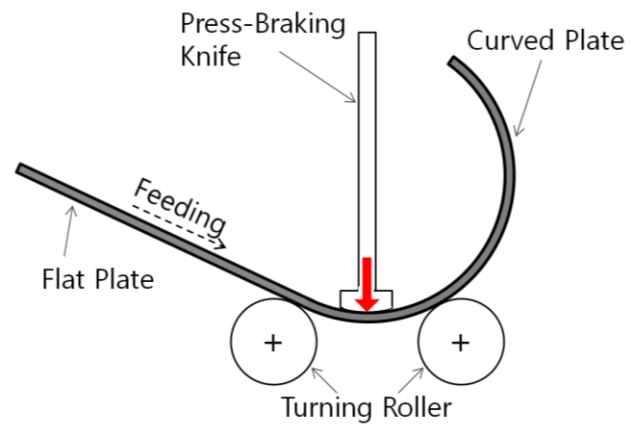
본 연구에서는 SAW 후육강관을 성형하는 과정에 있어서, 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 대한 주요 공정변수들의 영향을 분석하고 정량화하고자 하였다. 이를 위해 일정한 후판재 인입에 따라 반복적으로 수행되는 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 대한 유한요소 해석 모델을 구성하였으며, ABAQUS를 활용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 또한, 성형과정에 있어서 중간 성형품에 대한 탄성회복을 고려하였다. 본 연구에 적용된 후판재는 송유관 및 송수관 등의 용도로 주로 사용되는 두께 약 25.4mm(약 1.0")의 API 5L X70 소재를 이용하였다. 앞서 언급한 3가지 주요 공정변수들의 조합에 따라 각각의 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 대한 유한요소 해석을 수행하였으며, 이를 통해 얻어진 SAW 후육강관의 외경 분포에 대한 인덱스(index)를 도출하였다.

2. 프레스-브레이킹 굽힘 공정

Fig. 2는 프레스-브레이킹 굽힘 장치 및 성형용 주요



(a) Schematic view of roll-bending process



(b) Schematic view of press-braking bending process

Fig. 1 Comparison of operating mechanism between roll-bending and press-braking bending processes

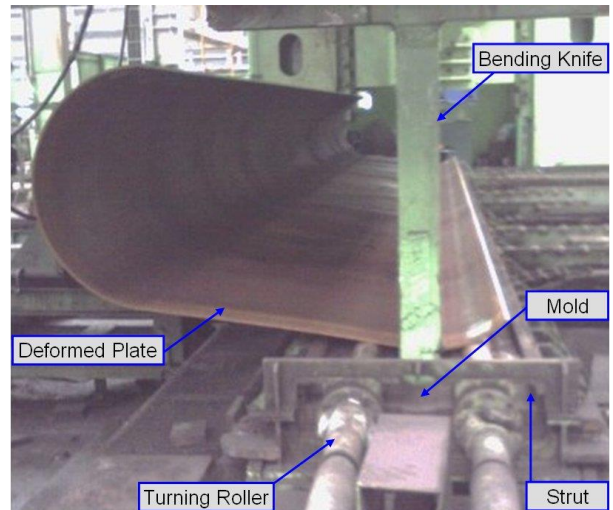
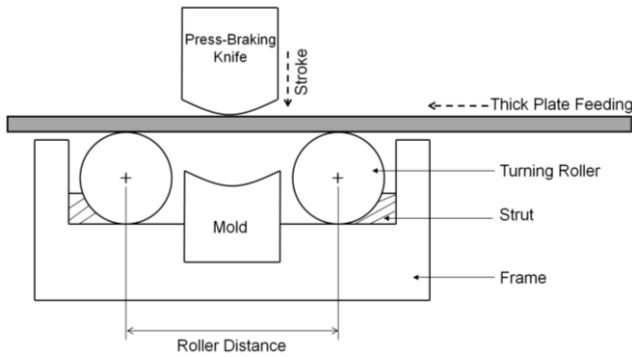
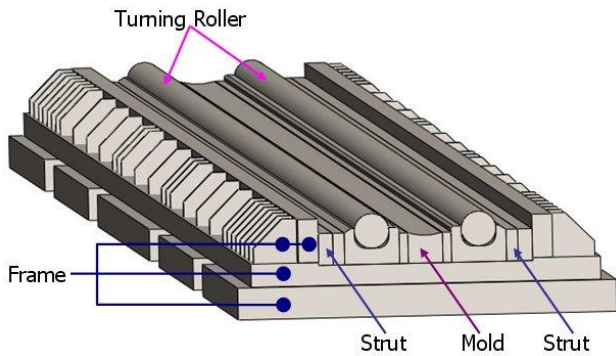


Fig. 2 Main forming structure of press-braking bending apparatus



(a) 2-dimensional schematic view



(b) 3-dimensional configuration of lower tool

Fig. 3 2D and 3D schematic geometries of lower tool for press-braking bending process

부속품을 나타낸 것이다. 프레스-브레이킹 굽힘 성형공정의 가장 큰 장점은 하나의 장치를 이용하여 다양한 외경을 갖는 후육강관을 성형할 수 있다는 점이다. 즉, Fig. 3(a)에서 제시된 개념도에서와 같이 상부에 위치한 프레스-브레이킹 펀치의 변위와 하부 구조물에 설치된 두 개의 회전 롤러 사이의 거리 (turning roller distance, TRD) 및 단위 공정당 후판재 인입량의 조합에 의해 약 400mm에서 약 2,000mm 혹은 그 이상의 외경을 가지는 후육강관을 성형할 수 있게 된다. 본 연구에서의 후육강관을 성형하기 위해 고려해야 할 주요 공정변수로는 성형 펀치의 변위, 회전 롤러 사이의 거리 그리고 단위 공정당 후판재 인입량이라는 것을 알 수 있다. 그러나, 앞서 소개한 SAW 후육강관 성형 및 생산공정에 있어 프레스-브레이킹 굽힘 공정이 가지는 장점에 비해 단점으로 부각되는 것은 과도한 시행착오와 더불어 현장 경험 및 노하우에 의존하고 있다는 것이다.

SAW 후육강관의 성형 및 생산공정은 초기 후판재를 이용하여 반복성형(repetitive bending) 공정이 포

함되는 프레스-브레이킹 굽힘 공정과 이를 통해 얻어진 원형(circular) 단면에 가까운 성형품의 양 끝단을 접합하기 위한 가접(tack welding) 및 용접공정, 그리고 일정한 외경을 갖도록 용접된 성형품을 별도의 장치에서 재성형(reforming)하는 공정 등이 주된 생산공정이다. 특히, 초기 후판재로부터 단면 형상이 원형에 가까운 후육강관을 성형하기 위해서는 일정한 공정변수를 가지면서 반복적으로 굽힘 공정이 이루어져야 한다. 이때, 프레스-브레이킹 굽힘 성형을 위한 기본적인 성형 장치로는 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에서 제시된 바와 같이 상부의 프레스-브레이킹 펀치와 하부 구조물인 성형 금형(mold), 두 개의 회전 롤러, 고정지지자(strut) 및 하부 프레임(lower frame)으로 구성된다. 또한, Fig. 3(b)는 실제 프레스-브레이킹 성형 장치에 대한 3차원 형상을 구현한 것이다.

Fig. 4는 앞서 언급한 주요 공정변수들인 성형 펀치의 변위가 약 37.0mm이고, 두 회전 롤러 사이의 거리가 약 320.0mm 그리고 단위 공정당 후판재 인입량이 약 50.0mm인 경우에 프레스-브레이킹 굽힘 공정을 적용하여 얻어진 가접 이전 단계에서의 SAW 후육강관 성형 예를 보여주고 있다. 즉, API 5L X70 규격의 후판재(두께 약 14.0mm)를 Fig. 3에서와 같이 장입시킨 후 초기 공정에 대한 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 대해 유한요소 해석을 수행한 후 탄성회복을 고려하게 된다(step 1). 그리고, 탄성회복이 고려된 성형해석 결과를 다음 단계에서의 초기 조건으로 설정한 후, 단위 공정당 소재 인입량을 고려하여 유한요소 해석과 탄성회복을 재수행하게 된다(step 2). 이러한 유한요소 해석과 탄성회복 거동을 총 14회 반복 수행하여(step 14), Fig. 4에서와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 특히, Fig. 4에서의 해석적 예측 결과는 후육강관의 전체 형상에 대하여 반원 형태에 도달할 경우까지 수행되며, 총 18회의 반복 성형이 수행되었고, 이에 전체 형상에 대해서는 총 36회의 반복 성형이 필요함을 알 수 있었다. 실험적으로는 총 36회 실험적으로 얻어진 후육강관의 반경은 약 262.5mm(외경 기준 약 525.0mm) 정도임을 알 수 있었고, 탄성회복이 고려된 유한요소 해석을 통해 얻어진 반경은 약 260.0mm(외경 기준 약 520.0mm)로 예측되었다. 이를 통해 약 1.0%의 치수 오차를 보임을 알 수 있었고, 본 연구에서의 해석적 연구를 통한 후육강관의 외경 정량화 예측이 가능함을 의미한다[8].

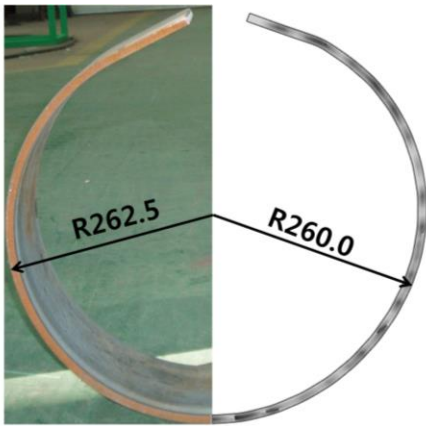


Fig. 4 Example of SAW pipe obtained by application of press-braking bending process with initial plate thickness of about 14.0mm [8]

3. 프레스-브레이킹 굽힘 공정

3.1 공정변수 정량화

Fig. 3에 제시된 바와 같이 프레스-브레이킹 굽힘 공정은 상부에 위치한 성형 펀치의 반복적 하향 이송에 의해 초기 후판재에 굽힘 변위를 일차적으로 가함과 동시에 하부 회전 롤러의 반력 작용에 의해 굽힘 변형이 이루어지는 다소 단순한 성형 과정을 거치게 된다. 이때, 해당 공정에 있어서 주요 공정 변수로는 성형 펀치의 변위, 두 회전 롤러 사이의 거리 및 단위 공정당 후판재 인입량을 들 수 있으며, 이들 공정변수의 조합에 의해 다양한 외경을 가지는 후육강관을 성형할 수 있게 된다.

프레스-브레이킹 성형장치의 기본 사양으로써 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 성형 펀치의 폭과 끝단 반경은 약 100.0mm와 약 80.0mm를 각각 적용하였으며, 하부 회전 롤러의 반경은 약 60.0mm로 설정하였다. 이와 더불어 본 연구에서는 앞서 언급한 3가지 주요 공정변수에 있어서 일정한 후판재 인입량(약 50.0mm/step)을 기준으로 하였다. 성형 펀치의 변위는 약 22.0mm를 최소 변위로 설정하고, 약 5.0mm의 변위 증분량을 가정하여, 다양한 성형 펀치의 변위 조건(최대 약 57.0mm)에 따른 후육강관의 외경 예측 연구를 수행하였다. 또한, 하부에 위치한 두 개의 회전 롤러 사이의 거리도 최소 200.0mm로 설정하였으며, 약 40.0mm의 거리 증분량(최대 약 500.0mm)을 가정하였다. 또한, 후판재의 초기 두께는 약 25.4mm(약 1.0")인 API 5L X70 소재를 사용하였다.

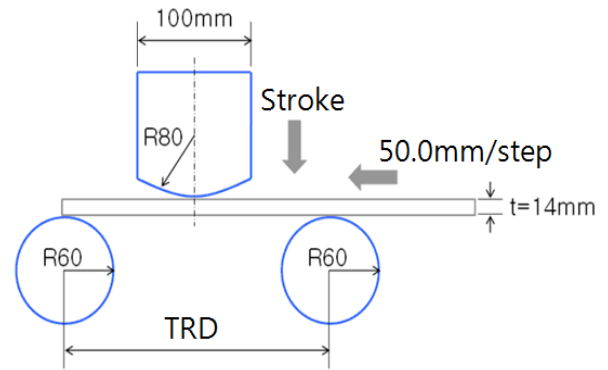


Fig. 5 Process variables in press-braking bending tool

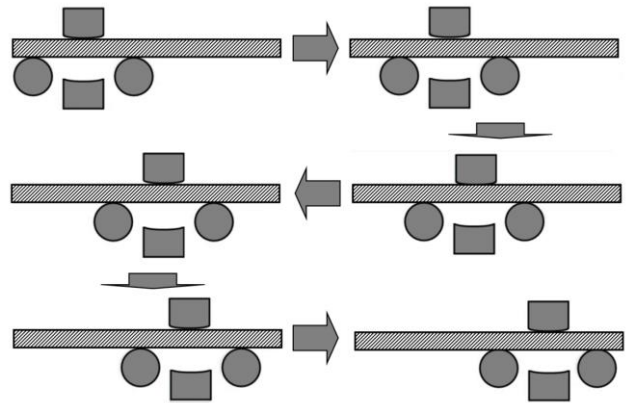


Fig. 6 Process flow of repetitive press-braking bending

3.2 유한요소 모델링

실제 프레스-브레이킹 굽힘 공정은 상부 성형 펀치가 정지된 상태에서 후판재의 일정한 길이(인입량)를 기준으로 인입되고, 이후 성형 펀치의 하향 작동에 의해 굽힘 공정이 반복적으로 수행된다. 또한, 장입된 후판재의 한쪽 끝단부터 반원에 가깝게 반복적으로 굽힘 성형을 수행한 후, 반대쪽 끝단부터 중심부로 반복 성형을 거치게 된다. 그러나, 본 연구에서는 후육강관의 외경 예측을 위한 해석적 측면에서의 편리성을 위해 Fig. 6에서와 같이 후판재(중간 성형품)의 위치를 일정하게 유지하면서 성형 펀치와 하부 회전 롤러가 소재 인입량 만큼 이동되는 것으로 가정하였다.

이와 더불어 유한요소 해석을 수행하기에 앞서 Fig. 5와 Fig. 6에 제시된 반복적 굽힘 공정을 고려하여 Fig. 7에서와 같이 2차원 유한요소 모델을 구성하였다. 해석 모델에 있어서 성형 펀치와 하부 회전 롤러는 강체(rigid body)로 가정하였으며, API 5L X70

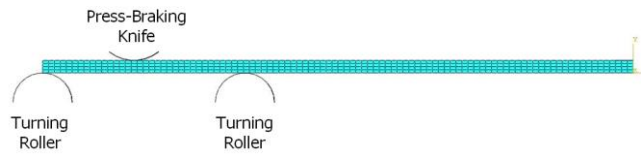


Fig. 7 Initial FE model for repetitive press-braking bending simulation

Table 1 Mechanical properties of API 5L X70

Properties	Initial Thickness : 25.4mm	
	Unit	Value
Density	Kg/m ³	7.8×10 ⁶
Young's Modulus	GPa	205
Ultimate Strength	MPa	635
Yield Strength	MPa	485
Poisson's Ratio	-	0.3

소재는 탄-소성 변형체(elasto-plastic deformable body)로 가정하였다. 또한, 사용된 API 5L X70 후판재의 초기 두께는 약 25.4mm이었으며, 해당 소재의 기계적 물성은 Table 1에 나타내었다. Fig. 7에 제시된 유한요소 해석 모델에 있어서 4-절점 요소(CPS4R)를 적용하였으며, 두께 방향으로 초기 후판재의 두께에 따라 4개의 층(4 layers)을 배열하였다. 그리고, 본 연구에서의 반복적 굽힘 공정은 ABAQUS Dynamic/Explicit를 이용하였으며, 매 1회 굽힘 공정이 수행된 이후에 탄성회복을 고려하기 위해 ABAQUS General/Static을 사용하였다.

4. 유한요소 해석 결과

4.1 성형 편치의 변위에 따른 영향

본 절에서는 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 있어서 주요 공정변수중의 하나인 성형 편치의 변위가 후육강관의 외경에 미치는 영향에 대해 해석적으로 예측하였다. 단위 공정당 후판재의 인입량이 약 50.0mm이고, 두 회전 롤러 사이의 거리가 약 320.0mm인 경우에 있어서, 대표적인 해석 및 예측 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8은 성형 편치의 변위가 약 22.0mm일 때의 탄성회복 전·후의 유효응력 분포를 보여주고 있으며, Fig. 9는 약 32.0mm의 성형 편치 변위가 적용되었을 때의 해석

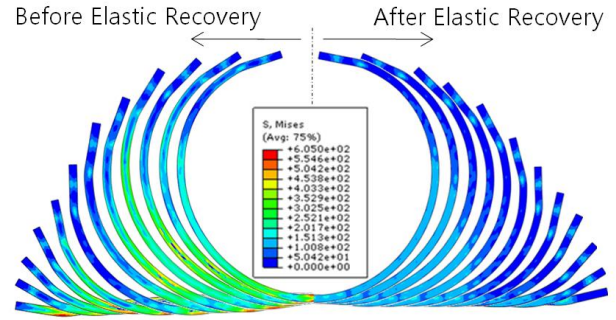


Fig. 8 Effective stress distribution of deformed SAW pipe applied stroke of 22.0mm with fixed feeding length of 50.0mm and TRD of 320.0mm

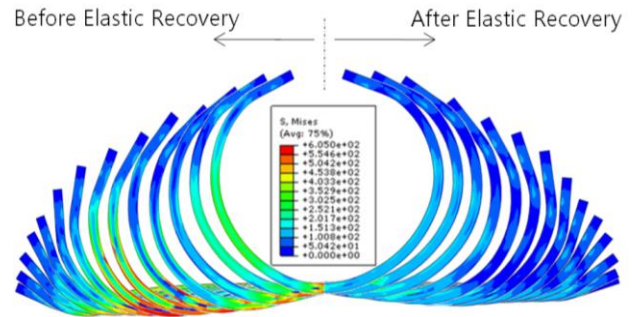


Fig. 9 Effective stress distribution of deformed SAW pipe applied stroke of 32.0mm with fixed feeding length of 50.0mm and TRD of 320.0mm

결과를 나타내고 있다. Fig. 8에서와 같이 성형 편치의 변위가 약 22.0mm일 경우에는 총 24회의 반복 성형이 필요함을 알 수 있었으며, 유효응력 분포 측면에서는 탄성회복 전에 최대 약 600MPa 수준이었으나, 탄성회복 후에는 약 200MPa 수준으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 탄성회복 전에 예측된 굽힘 반경은 약 461.7mm(외경 약 923.4mm)이었으나, 탄성회복 후의 굽힘 반경은 약 430.0mm(외경 약 860.0mm)로 조사되었다. Fig. 9는 성형 편치의 변위가 약 32.0mm인 경우의 유한요소 해석 결과를 보여주고 있으며, 약 28회의 반복 성형공정이 필요한 것으로 나타났다. 탄성회복 전의 유효응력 분포와 굽힘 반경은 최대 약 605MPa과 약 360.8mm(외경 기준 약 721.5mm)로 예측되었고, 탄성회복 후에는 약 200MPa 및 약 285.0mm(외경 기준 약 570.0mm)로 나타났다. 이와 같이 SAW 후육강관을 성형하기 위한 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 있어서, 주요 공정변수중의 하나인 성형 편치의 변위가 증가할수록 후육강관의 외경은 감소하는 것으로 조사되었다.

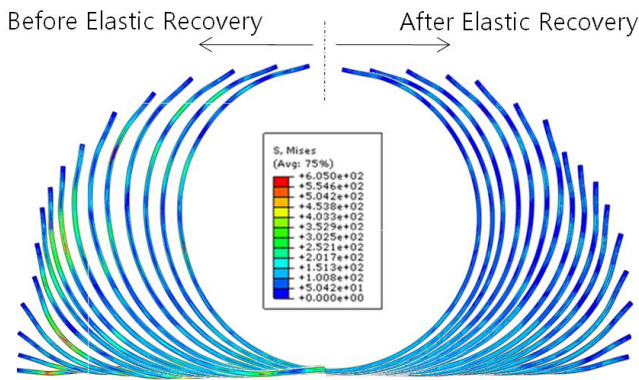


Fig.10 Effective stress distribution of deformed SAW pipe applied TRD of 500.0mm with fixed feeding length of 50.0mm and stroke of 22.0mm

4.2 회전 롤러의 거리에 따른 영향

SAW 후육강관을 성형하기 위한 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 있어서 성형 펀치의 변위만을 공정변수로 가정하여 수행된 유한요소 해석 결과를 앞서 언급하였다. 그러나, 본 절에서는 하부 구조물에 위치하는 두 개의 회전 롤러 사이의 거리 변화에 따른 후육강관의 변형과정과 더불어 외경을 예측하고자 하였다. 이에 따라, 약 50.0mm의 단위 공정당 후판재 인입량과 약 22.0mm의 성형 펀치 변위를 사전 설정한 상태에서 두 회전 롤러 사이의 거리가 약 500.0mm인 경우의 유한요소 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서의 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 대한 해석적 예측 결과를 살펴보면, 약 32회의 반복적인 성형공정이 필요한 것으로 조사되었고, 탄성회복 전의 최대 유효응력과 예측된 굽힘 반경은 약 580MPa와 약 994.4mm(외경 약 1,988.8mm)으로 나타났다. 그러나, 탄성회복이 고려된 이후에는 약 200MPa 이하의 최대 유효응력과 약 965.3mm의 굽힘 반경(외경 약 1,930.6mm)이 예측되었다.

5. SAW 후육강관의 외경 예측 결과

앞서 언급한 바와 같이 SAW 후육강관을 성형하기 위한 프레스-브레이킹 굽힘 공정은 3가지의 주요 공정변수와 이들의 조합에 의해 다양한 외경을 얻을 수 있음을 확인하였다. 실제 SAW 후육강관 제조 현장에서 후판재의 인입량은 일정하게 적용됨에 따라 본 연구에서의 해석적 유한요소 모델에 있어서도 일정한 인입량(약 50.0mm)을 적용하였으며, 이를

통해 성형 펀치의 변위 및 하부 회전 롤러 사이의 거리를 성형공정 변수로 설정하였다. 이에 따라 프레스-브레이킹 굽힘 공정의 변수조합은 총 64개로 가정하였으며, 이들 64개 조합에 대한 프레스-브레이킹 굽힘 공정 유한요소 해석을 수행하였다.

초기 두께가 약 25.4mm인 API 5L X70 후판재를 사용할 경우에 있어서, 총 64개의 변수조합을 유한요소 해석 모델에 적용한 결과로써 약 59개의 변수조합들이 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 적합한 것으로 조사되었다. 탄성회복 전의 외경 예측 결과를 Table 2에 정리하였으며, 탄성회복을 고려한 이후의 후육강관이 가질 수 있는 외경 예측 결과는 Table 3에 나타내었다. 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 의한 SAW 후육강관의 외경 예측 결과를 살펴보면, 우선 하부 회전 롤러 사이의 거리가 짧을수록 상대적으로 외경이 작게 구현되는 경향을 보여주고 있다. 이를 해결하기 위해 소재의 인입량을 증가시키게 되면 각 단위 공정간의 거리가 증가하기 때문에 불균일한 단면 형상이 나타날 수 있으며, 성형 펀치 변위를 후판재의 초기 두께보다 상대적으로 작게 적용할 경우에는 반복성형 공정수가 급격히 증가하게 된다. 이에 따라 성형 펀치의 변위는 가급적 피성형재인 후판재의 초기 두께와 비슷하거나 그 이상을 적용하는 것이 바람직하다. 이는 Fig. 9에 제시된 유한요소 해석 결과에서와 같이 약 50.0mm의 후판재 인입량이 고정변수로 설정되었을 경우에 적절한 변수조합의 예로써 후판재 두께 수준의 성형 펀치 변위와 상대적으로 큰 회전 롤러 사이의 거리가 적용될 경우 탄성회복 전·후 공통적으로 후육강관의 성형 단면이 매끄럽게 얻어질 수 있다는 것을 의미한다. 그리고, Table 3에서와 같이 음영으로 표현된 수치들은 대구경의 SAW 후육강관으로 활용가능한 약 400.0mm ~ 약 2,000mm의 외경이 구현될 수 있는 변수조합을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 초기 두께가 약 25.4mm인 API 5L X70 후판재를 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 적용하여 SAW 후육강관으로 성형하고, 성형된 후육강관의 외경을 정량적으로 예측하기 위해 탄-소성 유한요소 해석 기법과 탄성회복을 고려하였다. Table 2와 Table 3에서와 같이 도출된 각각의 외경 예측 결과는 측정 과정에서의 오차 등이 포함되어 있을 수 있다. 그러나, Fig. 4에서의 시제작된 후육강관과 해석적 예측 결과를 비교해 보면, 유한요소 해석을 통한 외경

Table 2 SAW pipe index by outer diameter prediction before elastic recovery(plate thickness : 25.4mm, unit : mm)

TRD Stroke	200.0	240.0	280.0	320.0	360.0	410.0	450.0	500.0
22.0	290.0	496.8	722.2	923.4	1,136.3	1,462.2	1,563.7	1,988.8
27.0	254.9	333.4	470.6	854.2	960.0	1,160.7	1,557.4	1,475.1
32.0	216.0	293.2	391.1	721.5	884.2	1,068.0	1,207.9	1,175.4
37.0	191.8	256.6	320.2	615.3	763.5	946.0	1,122.5	1,121.0
42.0	-	241.9	304.8	480.2	648.6	865.0	1,102.0	1,063.7
47.0	-	226.5	290.1	345.9	432.7	816.8	1,097.8	1,041.5
52.0	-	202.0	266.1	306.8	354.0	712.0	978.8	1,020.7
57.0	-	-	242.4	303.2	344.5	569.1	875.6	988.6

Table 3 SAW pipe index by outer diameter prediction after elastic recovery(plate thickness : 25.4mm, unit : mm)

TRD Stroke	200.0	240.0	280.0	320.0	360.0	410.0	450.0	500.0
22.0	310.0	480.5	654.1	860.0	1,076.8	1,360.2	1,532.7	1,930.6
27.0	264.2	360.3	482.5	787.6	878.2	1,114.7	1,340.8	1,448.1
32.0	228.4	302.1	412.9	570.0	800.9	990.3	1,144.3	1,200.2
37.0	180.5	266.8	330.5	520.0	680.1	923.2	1,050.0	1,110.0
42.0	-	248.7	294.1	394.7	583.6	832.5	992.4	1,080.8
47.0	-	220.0	268.2	350.8	456.2	720.8	940.0	1,060.3
52.0	-	211.3	260.3	332.2	381.7	621.1	900.6	1,040.9
57.0	-	-	240.4	311.8	378.0	552.4	785.5	960.3

예측 결과가 시제품의 치수와 매우 유사함을 알 수 있으므로, 본 연구를 통해 도출된 인덱스의 외경 예측 결과들도 다소간의 타당성은 가진다고 예상되며, 앞으로 진행될 실험적 연구를 통해 그 적절성은 검증할 수 있을 것으로 예상된다.

6. 결론

접합강관의 일종인 SAW 후육강관은 일반구조용 배관, 송유관 및 송수관, 그리고 발전 및 석유화학 플랜트 등의 분야에서 배관재로 폭 넓게 사용되고 있다. 이러한 SAW 후육강관은 초기 후판재를 대상으로 한 성형 및 생산방식에 따라 JCO 강관 또는

UOE 강관으로 세분화되기도 한다. 특히, JCO 강관은 일차적으로 초기 후판재를 프레스-브레이킹 굽힘 공정을 이용하여 원형 단면에 가까운 중간 성형품을 성형한 후, 길이 방향으로 존재하는 양 끝단을 접합하기 위한 잠호용접(submerged arc welding, SAW)과 용접된 후육강관의 균일한 원형 단면을 형성하기 위한 재성형(reforming) 공정을 통해 최종 제품으로 생산되게 되며, 이러한 후육강관을 일반적으로 SAW 후육강관이라 한다.

본 연구에서는 SAW 후육강관을 성형하기 위한 프레스-브레이킹 굽힘 공정에 있어서, 최종 제품의 외경과 품질에 영향을 주는 주요 공정변수들로서 프레스-브레이킹 성형 편치의 변위와 하부 회전 롤러 사

이의 거리 그리고 후판재 인입량 등을 도출하였다. 그리고, 이들 공정변수의 다양한 조합에 따라 도출가능한 SAW 후육강관의 외경을 예측하였으며, 예측 가능한 외경에 대한 정량적 인덱스를 도출하였다. 후판재는 초기 두께가 약 25.4mm인 API 5L X70 소재를 사용하였으며, 각각의 단위 공정에 대한 프레스-브레이킹 굽힘 공정 유한요소 해석은 일차적으로 ABAQUS Dynamic/Explicit를 사용하였고, 이후 탄성변형을 고려하기 위해 ABAQUS General/Static를 활용하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 SAW 후육강관의 성형을 위한 반복적인 프레스-브레이킹 굽힘 공정을 적용하였으며, 실질적인 공정변수로서 성형 편치의 변위와 하부 롤러 사이의 거리를 선택하였다.

(2) 선정된 두 공정변수들을 이용하여 구성 가능한 변수조합을 총 64개 도출하였으며, 이들 변수조합에 있어서 해석적 접근을 통해 성형가능한 조합은 총 59개로 조사되었다.

(3) 각각의 공정변수에 있어서, 성형 편치의 변위는 작을수록 보다 큰 외경의 후육강관을 성형할 수 있는 것으로 예측되었으며, 두 롤러 사이의 거리는 길수록 보다 큰 외경의 후육강관을 얻을 수 있는 것으로 조사되었다.

(4) 주요 공정변수의 조합에 의한 SAW 후육강관 성형을 위한 반복적인 프레스-브레이킹 굽힘 공정으로 해석적으로 수행하였으며, 이로부터 얻어진 외경을 정량화하였다.

(5) 향후 계획으로써 본 연구를 통해 도출된 인덱스뿐만 아니라 다양한 두께를 가지는 후판재에 대한 인덱스도 구성할 계획이다. 해석적 연구를 통해 도출된 인덱스들을 검증하기 위한 실험적 연구가 수행될 예정이며, 이를 통해 예측 및 수집된 데이터를 활용하여 통계적 분석과 정량화를 통해 단순화된 형태의 수학적 정식을 개발하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 공학분야 선도연구센

터지원사업(NRF-2012R1A5A1048294)과 2015년도 부산대학교 신입교수 연구정착금 지원으로 수행된 연구 결과입니다. 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] S. B. Li, J. X. Xie, 2007, Fabrication of Thin-Walled 316L Stainless Steel Seamless Pipes by Extrusion Technology, J. Mater. Process. Technol., Vol. 183, No. 1, pp. 57~61.
- [2] G. Yang, K. Mori, K. Osakada, 1994, Determination of Forming Path in Three-Roll Bending using FEM Simulation and Fuzzy Reasoning, J. Mater. Process. Technol., Vol. 45, No. 1, pp. 161~166.
- [3] M. Hua, D. H. Sansome, K. P. Rao, K. Baines, 1994, Continuous Four-Roll Plate Bending Process : Its Bending Mechanism and Influence Parameters, J. Mater. Process. Technol., Vol. 45, No. 1, pp. 181~186.
- [4] M. Hua, K. Baines, I. M. Cole, 1995, Bending Mechanisms, Experimental Techniques and Preliminary Tests for the Continuous Four-Roll Plate Bending Process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 48, No. 1, pp. 159~172.
- [5] Z. Fu, J. Mo, W. Zhang, 2009, Study on Multiple-Step Incremental Air-Bending Forming of Sheet Metal with Springback Model and FEM Simulation, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 45, No. 5-6, Pp. 448~458.
- [6] M. Thome, J. Vocks, 2011, High-Speed Calculation Tool for Design of the JCO® Pipe, Steel Research Int., Vol. 82, Sp. Ed., pp. 331~336.
- [7] Q. Ren, T. Zou, D. Li, D. Tang, Y. H. Peng, 2015, Numerical Study on the X80 UOE Pipe Forming Process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 215, pp. 264~277.
- [8] J. W. Park, J. W. Park, H. G. Noh, B. S. Kang, T. W. Ku, 2010, Press-Braking Bending Process of Thick Plates, Steel Res. Int., Vol. 81, No. 9, pp. 777~780.