



조관에 의한 잔류 응력을 고려한 스파이럴 강관의 휨 거동 분석

김규원 · †김정수* · 강동윤** · 김문겸

연세대학교 건설환경공학과, *한국건설기술연구원 인프라안전연구본부, **수성엔지니어링 구조부
(2019년 4 월 8일 접수, 2019년 8월 23일 수정, 2019년 8 월 26일 채택)

Analysis on Flexural Behavior of Spiral Steel Pipe Considering Residual Stress Developed by Pipe Manufacturing

Kyuwon Kim · †Jeongsoo Kim* · Dongyoon Kang** · Moon Kyum Kim

School of Civil and Environmental engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

*Dept. of Infrastructure Safety Research, KICT, Goyang 10223, Korea

**Structure Department, Soosung Engr. and Consulting, Seoul 05836, Korea

(Received April 8, 2019; Revised August 23, 2019; Accepted August 26, 2019)

요 약

스파이럴 강관은 기존 UOE 강관에 비해 경제적이며 연속적으로 강관 제작이 가능해 수송관뿐만 아니라 구조부재로 사용이 점차 확장되고 있다. 최근 제작기술의 발달로 스파이럴 강관의 고강도 및 대형화가 가능하게 됨에 따라 대규모 장거리 수송용 파이프라인에도 적용이 시도되고 있고, 이로 인해 스파이럴 강관의 구조적 건전성과 경제성 확보를 위한 변형률 기반 설계가 요구된다. 그러나 이를 뒷받침하기 위한 스파이럴 강관의 설계 기준 전반이 제시되지 않은 실정이고, 구조적 거동에 대한 명확한 규명이 이뤄지지 못하고 있다. 본 논문은 스파이럴 파이프의 조관 과정에서 발생하는 잔류응력이 스파이럴 파이프의 휨 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 조관으로 인한 잔류응력 평가를 위해 조관 성형각, 두께, 강도를 달리하여 스파이럴 파이프의 유한요소해석을 수행하고, 해석결과를 파이프 휨 해석에 대한 초기 조건으로 반영하여 수치해석적으로 휨 거동 변화를 조사하였다.

Abstract - A spiral steel pipe has been more used widely as a structural member as well as transport pipeline because the pipe can be manufactured continuously, consequently more economical than the conventional UOE pipe. As improved pipe manufacture technology makes spiral pipes to have high strength and to have larger diameters, the spiral pipes have been recently used as long distance transport pipeline with a large diameter and strain-based design is thus required to keep structural integrity and cost effectiveness of the spiral pipe. However, design codes of spiral pipe have not been completely established yet, and structural behaviors of a spiral pipe are not clearly understood for strain-based design. In this paper, the effects of residual stresses due to the spiral pipe manufacture process are investigated on the flexural behavior of the spiral pipe. Finite element analyses were conducted to estimate residual stresses due to the manufacturing process for the pipes which have different forming angle, thickness, and strength, respectively. After that, the results were used as initial conditions for flexural analysis of the pipe to numerically investigate its flexural behaviors.

Key words : spiral pipe, residual stress, flexural behavior, strain-based design, local buckling

†Corresponding author: jeongsookim@kict.re.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

전 세계적인 에너지 수요 증가로 원유 및 천연가스 등의 에너지 자원 수송 강관은 점차 이송거리가 길어지고 대형화 되는 추세에 있으며, 이를 위한 조관기술 및 강관 성능도 진전되고 있다[1]. 강관의 제작은 판재 형태의 소재에 압력을 가하여 성형하는데, 현재까지 용접부가 견고하여 고압에서 사용이 가능한 UOE 조관법이 주로 이용되어왔다. 그러나 최근 대구경 강관에 대한 수요가 증가됨에 따라, 스파이럴 강관 조관법의 활용이 증가하고 있다. 이 방법은 롤러와 판재의 접합 각도를 변화시켜 직경을 조절할 수 있으며 서로 다른 판재를 용접하여 길이의 제약 없이 연속적인 강관 제작이 가능하기 때문에, 저렴한 비용으로 대구경 강관을 제작하는데 유리하다.

파이프의 구조적 성능은 소재 자체의 품질 뿐만 아니라 제조과정에서 가해지는 기계적 변형에 의한 변형에도 크게 의존하게 된다. 강관의 성형 및 용접 공정에서 발생하는 비선형 소성 변형과 이로 인해 생성되는 잔류응력 및 잔류 변형은 강관의 좌굴 강도와 피로 강도 등에 좋지 않은 영향을 미치며, 파이프의 건전성에 위해 요소로 작용한다. 스파이럴 파이프는 나선으로 성형 및 용접되므로, 기존 조관방법에 의해 제작된 파이프와는 다른 구조적 성능을 가진다. 그러나 스파이럴 파이프 성능에 대한 충분한 평가가 이뤄지지 않아 스파이럴 파이프에 대한 기준은 제시되지 않고 있다 [2,3]. Reinke 등[4]은 기존 설계 방법이 스파이럴 파이프 휨 성능을 올바르게 평가할 수 없음을 주장하기도 하였다.

스파이럴 파이프의 좌굴 성능[5], 용접 이음매 성능 및 영향[4]을 분석하는 여러 실험연구들이 선행되어 왔다. 또한 스파이럴 파이프의 잔류응력[6,7]을 평가하기 위한 해석적 연구들이 다수 수행되었다. 그러나 잔류응력 변화를 야기하는 성형각 및 강재 조건 등의 조관인자의 영향에 대한 충분한 연구는 이루어지지 못했다. 한편, 스파이럴 파이프에 대한 휨 거동에 대한 실험 및 수치해석 연구가 수행되기도 하였으나[8-10], 특정 조관조건에 대해

국한하여 휨 거동 분석을 분석하였다. 그러나 조관되는 강재의 강도, 두께, 성형각 등의 변화로 잔류응력 특성이 달라지기 때문에, 조관 조건은 실제 구조성능에 큰 영향을 미칠 수 있다.

이러한 이유로 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 스파이럴 파이프의 여러 조관 과정을 모사하고, 이로 인한 잔류응력과 파이프의 휨 거동 변화를 수치해석적으로 조사한다. 3차원 유한요소모델을 이용해 레벨링 및 3점 롤 벤딩 과정을 재현하였고, 접합각도 0도인 경우에 대한 잔류응력 분포를 이론해와 비교함으로써 해석모델의 검증을 수행하였다. 이후 강관의 강도 및 두께 그리고 판재 간 접합 각도를 스파이럴 파이프 성형 시의 영향인자로 고려하여 조관 후 잔류응력 변화를 비교·분석하였다. 또한 스파이럴 파이프의 성형각 조건에 따른 잔류응력 분포를 4점 휨 시험 해석모델에 적용해 성형각으로 인한 휨 거동 변화를 함께 분석하였다.

II. 스파이럴 파이프의 조관공정

스파이럴 파이프의 직경은 접합 각도를 조절하여 직경의 크기를 제어할 수 있다. 스파이럴 파이프의 제작 가능한 직경 범위는 약 6~2500mm 이고, 두께는 약 0.5~40mm 범위로 생산할 수 있다. 원유, 가스 수송용으로 조관되는 스파이럴 파이프의 경우 직경의 크기가 700~1500mm 이며, 물 수송용으로는 900~2000mm로 대구경 파이프가 주로 사용된다[11]. 최근에는 동토지역과 해저면 그리고 지반 변형이 발생할 수 있는 극한 환경에 설치되는 파이프라인이 증가함에 따라 고강도 강재에 대한 개발이 활발히 이루어지는 추세이다[12].

스파이럴 파이프의 조관 공정은 Fig. 1과 같이 크게 디코일링과 레벨링, 롤 벤딩, 용접 단계로 나눌 수 있다. 먼저, 디코일링 과정을 통해 코일 형태의 강재를 평평한 판재 형태로 변형시키고, 레벨링을 통해 판재의 편평도를 균일하게 만든다. 이후 판재 간 용접을 위해 판재 양끝을 절삭하는 작업을 거치며 맞대기 용접을 통해 판재와 판재를 잇는다. 조관을 위해

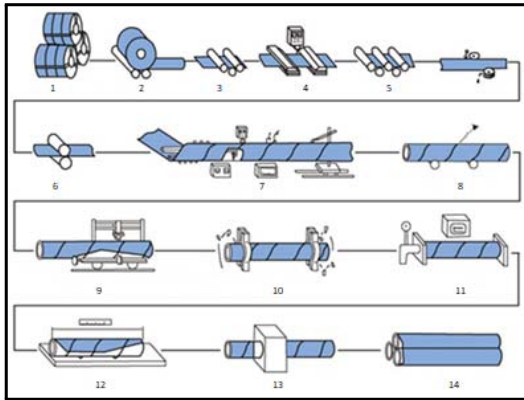


Fig. 1. Manufacture process of spiral pipe.

하부에 고정된 두개의 롤러와 상부에 위치한 하나의 롤러를 통해 판재가 목표한 곡률을 갖도록 굽힘을 가하게 되며 (롤-벤딩), 이 과정에 일정한 성형각을 부여하여 파이프를 제작한다. 롤 벤딩 과정 중에는 가용점을 통해 파이프 형태를 유지시키며, 이때 용접부의 결함을 최소화하기 위해 판재의 정렬을 정밀하게 제어한다. 가용점을 마친 스파이럴 파이프는 내부 용접과 외부 용접을 하고 제작길이에 맞춰 분절된다.

조관공정에서 알 수 있듯이, 스파이럴 파이프의 잔류응력은 기하학적으로는 강재의 두께 및 성형각과 강재의 항복 및 경화와 같은 재료적 거동 특성에 밀접한 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구는 강재 항복강도와 두께, 그리고 성형각을 매개변수로 하여 스파이럴 파이프의 성형을 수치해석적으로 수행하고, 잔류응력 비교를 통해 조관조건이 미치는 영향을 분석하였다.

III. 스파이럴 파이프의 잔류응력 분석

3.1. 조관 후 잔류응력에 대한 이론해

등방 균일성을 가정한 얇은 판재의 굽힘으로 인한 잔류응력을 평가할 수 있는 해석해가 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔다[13]. 제안 해는 강재 거동과 중립축 가정에 따라 결과의 정확성 및 적용 가능한 조관해석 범위가 한정되나, 기본적으로 판재의 탄성복원을 고

려하여 소성굽힘을 적용함으로써 조관 후의 잔류응력을 평가하고 있다.

본 연구는 강관이 완전 탄소성 거동을 한다고 가정하여, Hosfor와 Caddell[14]에 의해 제안된 식을 수정해 식(1)과 (2) 일반화를 수행하였다. 일반화된 수식을 통해 강관의 완전 소성 및 완전 탄성복원이 이뤄지지 않았을 때의 잔류응력의 평가가 가능하다.

$$\sigma = \sigma_y - E_{pl} \Delta\kappa y \quad (1)$$

$$\Delta\kappa = \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r'} = \frac{(M_0 - M')}{E_{pl} b t^3 / 12} \quad (2)$$

비록 스파이럴 파이프에 대한 잔류응력 이론해는 존재하지 않으나, 기존 이론해는 성형각이 0도인 경우에 대해 조관 후 잔류응력의 적절성을 판단할 수 있는 근거로 활용될 수 있다.

3.2. 유한요소모델

해석 모델은 ABAQUS ver.6.17을 이용해 잔류 응력의 형성에 가장 큰 영향을 미치는 레벨링 과정과 3점 롤 벤딩 과정을 재현할 수 있도록 생성되고 이는 Fig.2과 같다. 롤러는 강체로 고려하였고, 강판 모사를 위해 감차 적분 쉘 요소(S4R, 요소 길이 방향 적분점: 1개)를 사용하였다. 잔류응력 변화를 충분히 확인할 수 있도록 쉘 요소 두께방향으로 15개의 적분점이 사용되었다.

해석 방법으로는 내연적 해석(implicit method)을 사용하였으며, 조관 과정 해석에 사용된 재료는 실제 스파이럴 파이프에 사용되는 API-X65, X70, X80 강재를 대상으로 하였으며, 포아송 비는 0.3으로 탄성계수는 214GPa로 가정하였다.

해석은 단순 굽힘과 롤링 단계로 구분된다. 각해석 단계에서의 상하부 롤러에 대한 경계조건을 Table 1에 나타내었다. 참고로 롤러 속도는 강재 두께, 목표곡률 등과 함께 잔류응력 변화에 복합적으로 영향을 미친다. 해석에 적용된 롤러 속도가 충분히 작지 않으면 목표곡률보다 조관 후 목표 곡률을 증가시킬 수 있고, 이는 결과적으로 잔류응력 증가로 이어질

수 있다. 또한, 판재와 롤러 간 수직(normal)방향으로의 침투는 발생하지 않고, 접선(tangential)방향에 대해 마찰계수 1.0을 갖는 마찰저항이 발생하는 것으로 두 물체의 접촉조건을 정의함으로써, 롤러 회전에 의해 판재가 전진 및 롤링을 구현하도록 하였다.

3.3. 해석모델 검증: 잔류응력

해석모델의 타당성을 검증하기 위해 6.35mm 강판이 성형각 0도로 조관되는 경우를 상정하여 해석을 수행하였다. 해석모델은 3.2에 설명된 것과 같으며, 강재는 API-X70 재질로 완전

탄소성 거동하는 것으로 가정하였다.

해석모델의 검증을 위해 3.1의 잔류응력 이론해를 이용하였다. 이론해와 수치해의 비교를 위해 초기 휨 모멘트 (M_0)와 탄성복원 후 휨 모멘트(M')가 명시되어야 하나, 해석모델 특성상 조관을 위해 강판에 작용된 휨 모멘트의 크기를 직접적으로 확인할 수 없다. 이러한 이유로, 수치모델을 통해 얻은 초기 및 탄성복원 후 응력분포를 이용해 M_0 와 M' 를 얻어 곡률 변화량을 추정하고, 식 (1)에 적용해 이론적인 잔류응력 분포를 결정하였다. 이를 수치해석으로부터 얻은 탄성복원 후 휨 모멘트 변화와 비교하였다. 여기서 조관 중 판재의 응력 추출

Table 1. Boundary condition of rollers[15]

Constraints		Step	
		Simply bending	Rolling
Upper roller	Dx	Fixed	
	Dy	80mm	
	Dz	Fixed	
	Rx	Fixed	
	Ry	Fixed	
	Rz	Free	0.23 rad/s
Lower roller	Dx	Fixed	
	Dy		
	Dz		
	Rx	Fixed	
	Ry	Fixed	
	Rz	Free	

Table 2. Material properties

Type	Material Parameter			
	E (GPa)	K (GPa)	σ_y (MPa)	ϵ_u (m/m)
X65	214	1.85	453	0.095
X70			483	
X80			552	

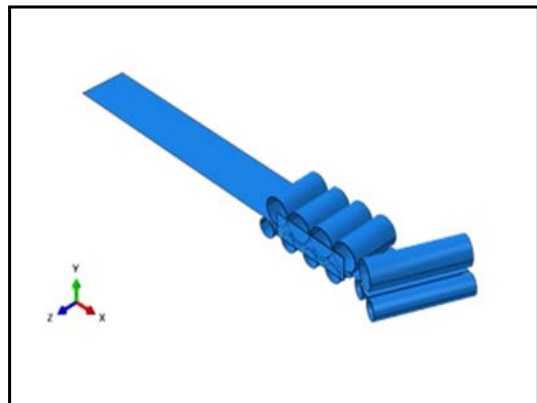


Fig. 2. Model for spiral pipe manufacture.

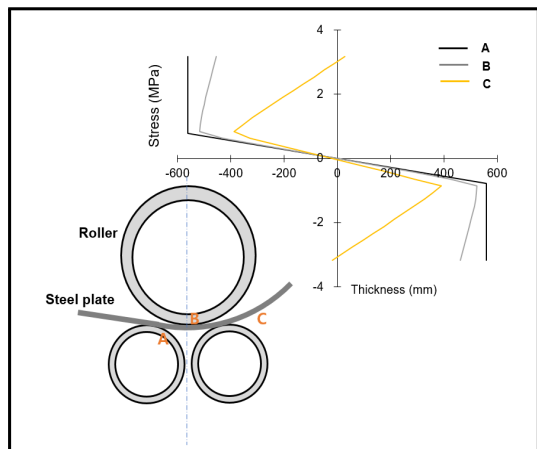


Fig. 3. Stress extraction during manufacture.

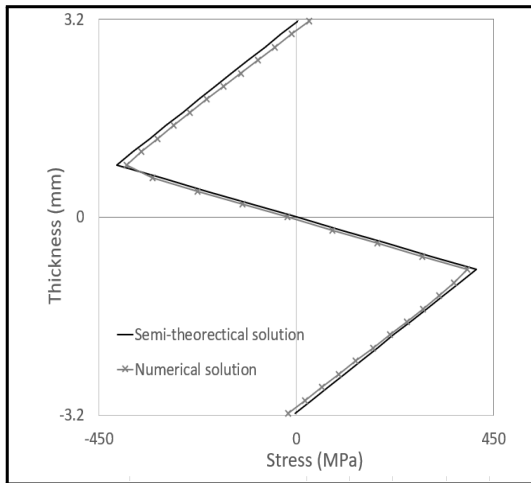


Fig. 4. Residual stress distribution comparison.

위치와 분포는 Fig.3과 같다. 판재는 롤러 초입에서 최대 소성영역을 갖게 되고, 이후 롤러에 의해 전진하면서 탄성복원과 항복을 반복하게 된다. 판재 경계면을 제외한 모든 영역에 대해 이와 같은 응력변화가 계속되므로 Fig.3의 A점과 C점의 응력분포를 통해 산정된 휨 모멘트는 각각 M_0 와 M' 에 대응한다.

수치해석 및 식 (1)과 (2)에 의해 산정된 잔류응력해의 결과를 비교하였고, 두 방법에 의한 응력분포가 유사하게 얻어졌음을 확인할 수 있다 (Fig.4). 수치 잔류응력이 이론해에 비해 작게 평가되었는데, 이는 식 (2)에 사용되는 휨 모멘트 변화가 근사적으로 이루어졌고, 이론해와 달리 판재가 롤러에 의해 전진 및 굽힘되는 과정에서 순수 굽힘상태를 유지할 수 없기 때문으로 판단된다. 이론해와 다른 제약사항에도 불구하고, 수치모델의 단면 내 수직응력 분포가 이론해와 유사하게 나타나고 있다. 따라서 제시된 해석모델은 스파이럴 파이프 조관으로 인해 발생하는 잔류응력을 적절하게 재현할 수 있음을 확인할 수 있다.

3.4. 조관 조건을 고려한 잔류응력 분석

스파이럴 강관의 강도, 두께, 성형각이 잔류응력에 영향을 미치는 영향을 분석하기 위한 매개변수 해석을 수행하였다. 해석을 통해 탄성복원 후 단면에 대한 수직응력 분포를 조사

하고, 잔류응력에 민감하게 영향을 미치는 조관 조건을 도출하고자 하였다. 해석모델에서 조관 후 파이프 직경이 1000mm가 되도록 경계조건을 적용하였으며, 강제 거동은 항복 후 선형 등방 소성 경화(linear isotropic plastic hardening) 된다고 가정하였다.

해석결과로부터 강도, 두께, 성형각 변화에 따른 잔류응력 변화 경향을 분석하였다. 모든 경우에 대해 잔류응력분포는 기본적으로 Fig.4와 같이 지그재그 형태를 가졌다.

탄성복원 후 곡률이 정해졌기 때문에, 강도가 X65에서 X80으로 증가할수록 단면 깊이방향에 대한 잔류응력 변화 곡선은 상대적으로 완만한 경사 변화를 보였고, 잔류응력의 최대값이 작아졌다 (두께: $t=10\text{mm}$, 성형각: 0°). 이는 강도가 높아질수록 단면 내 소성영역이 작아지고 선형 경화가 발생했기 때문으로 판단된다.

한편, 두께가 10mm에서 12mm로 증가됨에 따라, 잔류응력선도의 경사변화가 더 급격하게 변화하고 단면 내 잔류응력 최대값이 점차 증가됨을 확인하였다 (강종: X60, 성형각: $\Theta=0^\circ$). 이는 두께가 증가됨에 따라, 동일한 곡률을 얻기 위해 판재 단면의 변형을 변화가 크게 발생되기 때문이다. 이론해에 의하면 두께 증가에 따라 단면 내 잔류응력이 0이 되는 위치가 동일한 것으로 나오나, 수치해 결과는 그렇지 않았는데 이는 강관이 성형과정에서 추가적인 변형을 포함했기 때문으로 사료된다.

끝으로, 성형각을 변화시켜 매개변수 해석을 수행하였으나, 이에 대한 잔류응력 변화에 대한 분석은 논문에서 배제하였다 (강종: X60, 두께: 10mm, 성형각: $0\sim 30^\circ$). 이는 성형각 부여로 인해, 나선형으로 판재가 생성되기 때문에 일정한 기준으로 잔류응력 분포를 비교하는 것이 어렵다. 단순 비교가 어려운 이유는 첫째로 단면 내 잔류응력 분포가 판재 폭 방향으로 다르고, 둘째로 성형각에 따라 미소한 탄성복원 후 직경 차이가 야기되는데, 이를 제어하기 위해서는 두께 및 단순굽힘 단계에서의 시간장 변화가 수반되어 성형각을 제외한 요소를 동일하게 적용할 수 없다. 실제로 잔류응력 분포는 Fig.4의 형태를 유지하나, 성형각 증가에 따른 일관된 경향성을 도출할 수 없었다.

IV. 스파이럴 파이프의 휨 거동 분석

4.1. 휨 거동 해석모델

본 연구의 스파이럴 파이프의 휨 거동을 평가하기 위해 4점 휨 시험을 구현할 수 있는 유한요소모델을 생성하였다. 기존 연구에 따르면, 스파이럴 파이프의 나선 용접부는 전체 휨 거동에 큰 영향을 미치지 않아 무시할 수 있다고 보고된 바 있으므로 [5], 본 연구는 나선 용접부는 해석모델에서 배제하였다. 해석모델은 길이 16,500mm인 파이프를 대상으로 하였고, Fig.5와 같이 경계조건이 적용되었다. 그림에서 지지점 부근이 여러 기준 절점(reference node)에 의해 변형이 구속되어 있는데, 이는 실제 실험에서 정확한 휨 거동 평가를 위해 지지점 영역을 신축성 있는 밴드로 고정시켜 지지점 등으로 인한 외부 구속으로 인해 파이프가 타원형상으로 찌그러지는 것을 방지하는 것을 해석적으로 구현하기 위해서이다. 하중재하 위치는 파이프의 양단으로부터 600mm 이격된 지점이며, 지지점은 파이프의 양 끝으로부터 4200mm 떨어진 곳에 위치한다.

잔류응력이 휨 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해, 조관해석을 통해 얻은 잔류응력을 해석모델의 초기 응력으로 부여하고 이후 하중 재하 위치에서 변위제어를 통해 스파이럴 파이프의 휨 변형을 야기하였다. 해석모델에서 조관해석모델과 마찬가지로, 셸 요소(S4R, 요소 길이방향 적분점: 1개, 두께 방향 적분점: 15개)요소를 적용해 외연적 해석이 수행되었다 (explicit time integration scheme).

조관에 따른 잔류응력이 스파이럴 파이프의 휨 거동에 미치는 영향을 분석하기에 앞서 제시된 해석모델 및 방법에 대한 검증을 수행하였다. 이를 위해 기존 연구[10]의 API-X80 강종을 사용한 스파이럴 파이프 (D0=1066mm, D/t=65.1, $\Theta=30^\circ$)에 대한 휨 시험 조건을 재현해 휨 거동 변화를 비교하여 Fig.6에 나타내었다.

Fig. 6은 파이프 중앙 단면에서의 정규화된 모멘트-곡률 선도를 나타낸 것이다. 부재 항복이 발생되지 않는 초기 구간은 해석적으로 얻은 모든 모멘트-곡률 곡선의 기울기가 실험과 동일함을 확인할 수 있다. 곡률이 증가됨에 따라

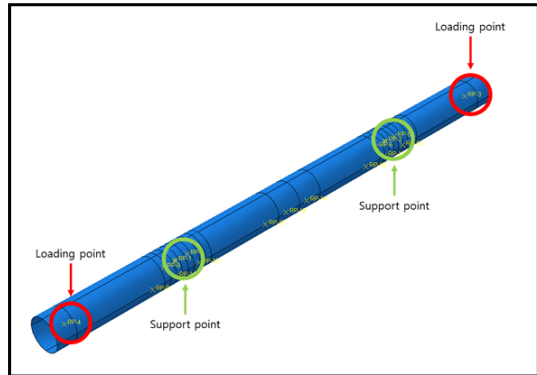


Fig. 5. Boundary conditions of flexural model.

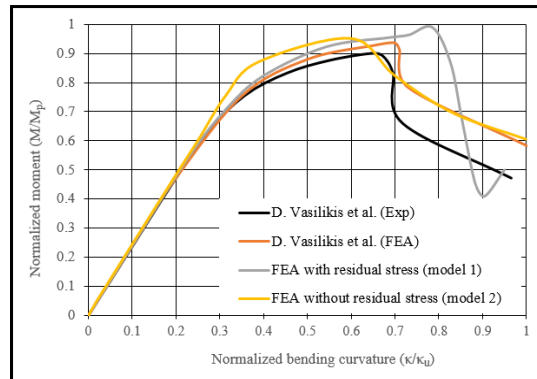


Fig. 6. Comparison of moment-curvature curves.

잔류응력을 고려한 해석결과(model 1)는 실험결과와 유사하게 급격한 휨 강성 저하를 구현하였으나, 잔류응력을 배제한 해석결과(model 2)는 곡률이 증가함에도 초기 휨 강성을 유지하였다. 이는 model 2가 잔류응력을 배제함으로써, 재료 항복에 다다르기 위해 더 많은 응력 증가가 요구되기 때문이다. 한편, 기존 연구의 수치모델은 파이프 성형 중 생긴 압축부의 초기 주름을 해석모델의 기하에 반영하였기 때문에, model 2보다 더 급한 휨 강성 감소와 좌굴이 나타난 것으로 판단되며, 결과적으로 극한 모멘트를 실험과 가장 유사하게 예측해내고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 후좌굴 및 연화(softening) 영역에서의 휨 저항력을 실제보다 과다하게 예측하고 있다. Model 2는 잔류응력만 고려하고 초기 주름 영향이 배제

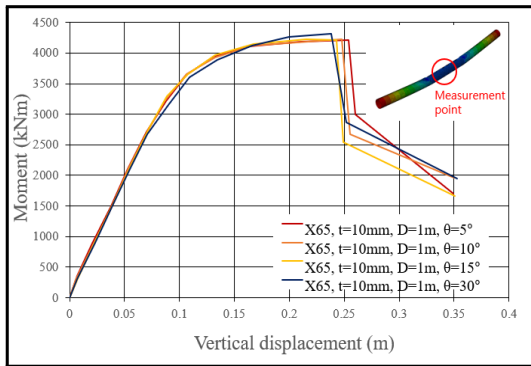


Fig. 7. Effects of manufacturing angle on flexural behaviors of spiral pipe.

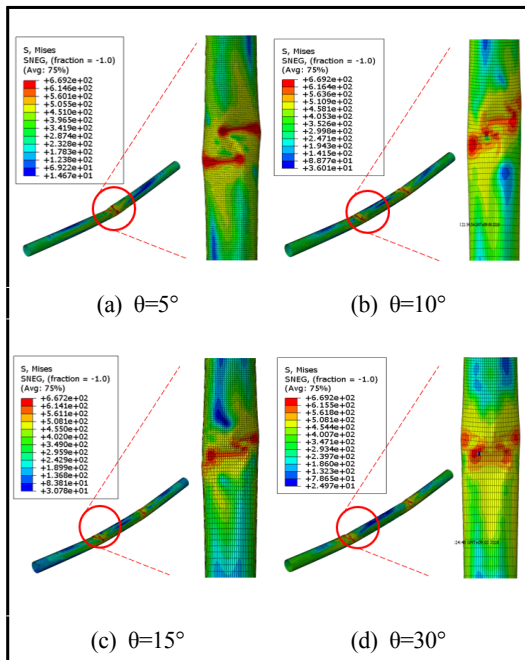


Fig. 8. Comparison of buckling shape.

되어 실험보다 파이프의 최대 휨 저항 성능을 과다하게 예측하였으나, 후좌굴 및 연화영역의 휨 성능을 근사하게 예측하였다.

4.2. 잔류응력의 휨 거동 영향 분석

스파이럴 파이프의 성형각 변화에 따른 잔류응력이 휨 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 스파이럴 파이프에 대한 휨 해석을 수행

하였다. 4.1에서 언급한 것과 동일한 조건이 해석 모델에 적용되었다. 단, 파이프는 API-X65 강종이 사용된 초기 직경 1000mm 및 두께 10mm를 단면을 대상으로 하였다. 성형각 5, 10, 15, 30°에 대한 조관해석을 수행하여 얻은 잔류응력을 Fig.5의 해석모델에 적용하고, 변위 하중을 수직방향으로 350mm 재하 하여 얻은 각 파이프의 휨 거동 변화를 고찰하였다.

Fig.7은 변위 하중 증가에 따른 파이프 중앙에서의 휨 모멘트 변화를 나타낸 것이다. 초기 선형탄성 구간에서의 모멘트-변위 곡선은 동일하게 얻어지나, 잔류응력의 크기 및 분포가 달라 휨 강성의 저하가 일어나는 시점이 모두 다를 수 있다. 성형각이 커짐에 따라 초기 경화구간에서의 휨 강성은 점차 미소하게 감소된 반면, 최대 휨 저항 모멘트의 크기는 증가하는 경향을 나타내었고 좌굴 발생시점 또한 보다 앞당겨 지는 것을 알 수 있다. 그러나 좌굴 후 파이프 중앙에서 과도한 변형이 발생하므로 (Fig.8) 연화구간의 휨 저항력이 일관된 경향을 나타내지 않는 것으로 사료된다.

성형각 변화로 인한 정량적인 경향성 변화는 나타나지 않았으나, 응력 집중 영역 및 좌굴 형상은 성형각 변화에 따라 비교적 일관된 경향성이 나타났다. 성형각이 점차 증가됨에 따라, 좌굴 발생 위치는 점차 중앙으로 이동하였고, 좌굴 형상이 비틀림에서 굽힘 형상으로 전이되었다. 따라서 큰 외력이 예상되는 구간에 대해 비틀림 및 휨 방향에 대한 추가 보강을 통해 효과적으로 좌굴을 억제할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결론

본 연구는 스파이럴 파이프의 조관조건에 따른 잔류응력 분포 및 휨 거동 특성을 수치해석적으로 분석함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 스파이럴 파이프의 조관 후 잔류응력은 강도, 두께, 성형각 변화에 영향을 받으나, 잔류응력 분포 양상은 지그재그 형상을 유지하면서 응력 크기 및 기울기 변화에만 영향을

미친다. 강도가 증가할수록 완만한 응력 기울기 변화를 보였고 잔류응력이 작아졌다. 반면, 두께가 증가할수록 응력 기울기가 급하였으며 응력이 증가하였다. 성형각의 경우, 동일한 해석조건 적용이 불가해 일관된 경향성을 도출할 수 없었다.

2. 조관 후 잔류응력을 무시한 경우, 스파이럴 파이프의 휨 강성을 실제보다 크게 예측하게 되며, 그 결과 선형 거동 영역을 과대평가함으로써 불안전축 설계를 유도할 수 있다. 따라서 잔류응력 영향을 고려해 파이프의 단면 설계를 수행할 필요가 있다.

3. API-X65 스파이럴 파이프의 조관 시 성형각이 부재 휨 거동에 미치는 영향을 조사한 결과, 성형각 증가가 극한 휨 내력 증가에 미치는 영향은 미미한 반면, 좌굴 후 거동 및 형상에 상당한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.20171510101910) 지원에 감사를 드립니다.

사용기호

- a : droplet radius [mm]
- E : linear elastic modulus [GPa]
- E_{pl} : equivalent linear elastic modulus to plane strain condition [GPa]
- K : hardening modulus [GPa]
- y : distance from neutral axis [m]
- r_0 : initial radius of curvature [m]
- r' : radius of curvature after springback [m]
- M : bending moment at the midspan of pipe [N·m]
- M_p : nominal full plastic bending moment of pipe (linear isotropic hardening) [N·m]
- M_0 : initial bending moment [N·m]
- M' : bending moment after springback [N·m]
- b : width of plate [m]

- t : thickness of plate [m]
- D_0 : initial diameter [m]
- D_m : mean diameter [m]

그리스 문자

- ϵ_u : ultimate strain [m/m]
- Θ : manufacturing angle of spiral pipe [°]
- $\Delta\kappa$: curvature increment to springback of pipe [1/m]
- κ_u : reference curvature, t/D_m^2 [1/m]
- σ_y : stress after plastic hardening [MPa]
- σ_{y0} : yield strength [MPa]

REFERENCES

- [1] Cho, W., Kim, K., and Cho, K., "Evaluation on strain capacity of pipe for strain-based design", *Trends in metals and materials engineering*, **25**, 44-56, (2012)
- [2] Det Norske Veritas, *Submarine pipeline systems*, DNV-OS-F101, (2010)
- [3] Canadian Standard Association, *Oil and gas pipeline systems*, CSA Z662-11, (2011)
- [4] Reinke, T., Sadowski, A. J., Ummerhofer, T., and Rotter, J. M., "Large scale bending tests of spiral welded steel tubes", *EUROSTEEL 2014*, (2014)
- [5] Zimmerman, T., Timms, C., Xie, J., and Asante, J., "Buckling resistance of large diameter spiral welded linepipe", *In 2004 International Pipeline Conference*, 365-373, (2004)
- [6] Kim, W., Kim, K., and Im, S., "Finite element analysis for manufacturing spiral pipes", *Proceeding of the KSME conference*, KSME, 1847-1851, (2005)
- [7] Lee, J.H., Kim, T.M., and Kim, M.K., "Finite element analysis for prediction of residual stress from manufacturing spiral pipe", *Proceeding of the KSCE conference*, KSCE, 53-54, (2015)
- [8] Rhee, J.H., Kim, T.M., and Kim, M.K., "Predict the structural performance of the spiral

- pipe through tree-dimensional finite element analysis”, *Proceeding of the KSCE conference*, KSCE, 53-54, (2016)
- [9] van Es, S.H., Gresnigt, A.M., Vasilikis, D., and Karamanos, S.A., “Ultimate bending capacity of spiral-welded steel tubes - Part I: Experiments”, *Thin-Walled Structures*, **102**, 286-304, (2016)
- [10] Vasilikis, D., Karamanos, S.A., van Es, S.H., and Gresnigt, A.M., “Ultimate bending capacity of spiral-welded steel tubes - Part II: Predictions”, *Thin-Walled Structures*, **102**, 305-319, (2016)
- [11] POSCO, *Influencing factors on structural performance of spiral pipe for energy transport*, 2015Z003, (2018)
- [12] Kim, K., Yeom, K., Oh, K., Kim, W., “Stress and displacement analysis of Arctic frost-heave with gas pipeline using finite element method”, *KIGAS*, **19**(5), 47-53, (2015)
- [13] Jeon, K., *Forming of thin metal plate: theory and practice*, Bando press, 85-116, (1993)
- [14] Hosford, W.F. and Caddell, R.M., *Metal forming*, Prentice-Hall (1983)
- [15] Ktari, A., Antar, Z., Haddar, N., and Elleuch, K., “Modeling and computation of the three-roller bending process of steel sheets”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, KSME, **26**(1), 123-128, (2012)