종 방향 버트 용접으로 제작된 고망간강 라이저 파이프의 잔류응력 연구 (2) : 파라메트릭 스터디 통한 잔류응력 예측식 도출

이 명 수^{*,†} · 서 정 관^{**,***}

^{*}조선대학교 스마트이동체융합시스템공학부

^{**}부산대학교 조선해양공학과

^{***}선박해양플랜트기술연구원

Residual Stress Study of High Manganese Steel Riser Pipe Manufactured by Longitudinal Butt Welding (2) : Equation for Predicting Welding Induced Residual Stresses Established through Parametric Study

Myung-Su Yi^{*,†} and Jung-Kwan Seo^{**,***}

^{*}Faculty of Smart Vehicle System Engineering, Chosun University, Gwangju, 61452, Korea

^{**}Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

^{***}The Korea Ship and Offshore Research Institute (The Lloyd's Register Foundation Research Centre of Excellence), Pusan National University, Busan, 46241, Korea

[†]Corresponding author: true413@chosun.ac.kr

(Received April 4, 2021; Revised April 13, 2021; Accepted April 20, 2021)

Abstract

In recent years, the deep and ultra-deep seas are recognized as the last remaining regions on the planet where oil and natural gas resources are discovered and produced. In order to develop such natural resources in an environmentally safe and cost-effective method, various engineering systems and technologies are being developed. In keeping with this direction of development, there is significant worldwide interest among major offshore structural and system operators in examining the possibility of using high-strength steel for long-distance gas transmission pipelines and risers. In particular, riser pipes using high manganese steel are often made by longitudinal butt welding, but studies related to the prediction of residual stresses for this are insufficient.

In general, it is known that in a cylindrical structure such as steel catenary risers (Hereafter, 'SCRs'), residual stress in the through-thickness direction can be decomposed into a membrane component and a bending component. In this paper, a parametric study through nonlinear finite element analysis was performed to predict the residual stress for each direction of a longitudinal butt-welded riser by considering the main parameters (r/t) of the pipe that can affect the actual residual stress. A new predicting equation for estimating the residual stress profile was proposed using the results of a number of parametric precision numerical analysis derived through this process.

Key Words: Riser, High manganese steel, Longitudinal butt welding, Residual stress, FEA, Parametric study, Through-thickness, Membrane stress, Bending stress, Self-equilibrium stress, Empirical formulae

1. 서 론

앞선 논문에서 고 망간강으로 만들어진 파이프 및 라

이저 제작과 관련된 종 방향 버트 용접(Longitudinal butt welding)의 잔류응력 예측과 정밀한 열-탄소성 해석을 이용한 각 방향별 잔류응력 예측에 대한 내용을 논의하였다. 일반적으로 기존 코드 및 표준에서 종 방

Table 1 Analytical case studies for parametric method

r/t		Outer diameter (mm)		
		203.2	254.0	304.8
Thickn ess (mm)	16.51	6.15	-	-
	25.40	4.00		
	35.56	2.86		
	16.51	-	7.69	
	34.29		3.70	
	45.72		2.78	
	22.86	-	-	6.67
	31.75			4.80
	48.26			3.16

(a) Production SCRs

r/t		Outer diameter (mm)		
		406.4	508.0	609.6
Thickn ess (mm)	25.40	8.00	-	-
	31.75	6.40		
	39.37	5.16		
	27.94	-	9.09	
	35.56		7.14	
	48.26		5.26	
	25.40	-	-	12.00
	35.56			8.57
	48.26			6.32

(b) Export SCRs

구조물에서 용접에 의한 잔류응력은 그 구조물의 내에서 자체 평형조건을 충족해야 한다. 특히 SCRs과 같은 두께가 일정 정도 있는 구조물의 경우, 두께 방향의 잔류응력 분포는 두께 방향의 멤브레인 응력, 굽힘 응력 그리고 자기 평형분포 또는 이것들의 조합으로 나타낼 수 있다고 알려져 있다. 이것에 대한 도식화가 아

Fig. 3 Residual stress decomposition in terms of through-thickness **Fig. 2** Representative FE analysis model

래의 Fig. 3에 잘 나타나 있다.

이전 연구^{7,8)}에 따르면, 구조물 파단 평가시 파단 구동력은 주로 막 성분 (σ_m)과 굽힘 성분 (σ_b)으로 구성된다고 논의되었다. 따라서 용접잔류응력에 의해 발현되는 두께 방향의 멤브레인 성분과 굽힘성분에 대한 파이프의 각 방향별(Hoop, axial direction) 잔류응력을 분석하고 예측하는 연구는 매우 중요하다고 볼 수 있다. 이 잔류응력에 의해 두께 방향으로 발현되는 막 성분, 멤브레인 성분 그리고 자기 평형분포 성분을 다음의 식 (1)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{1}{t} \int_0^t \sigma(x) dx \\ \sigma_b &= \frac{6}{t^2} \int_0^t \sigma(x) \left(\frac{t}{2} - x \right) dx \\ \sigma_{s.e.} &= \sigma(x) - \sigma_m - \sigma_b \left(1 - \frac{2x}{t} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

종방향 버트 용접된 고 망간강(X120)의 SCRs에 대한 각 방향(Hoop and axial direction)에 따른 r/t의 예측 공식은 비선형 FE 해석에서 계산된 막 및 굽

힘 응력을 사용하여 구현하였다. 일반적으로 파이프 Girth 용접의 경우 r/t 비율은 관통 두께에서 잔류 응력 분포의 막/굽힘 응력 구성 요소를 제어하는 반경 방향 굽힘 강성을 나타낸다고 알려져 있다⁵⁾. 이 논문에서 관심을 가지는 Fig. 2 와 같은 중 방향으로 버트 용접된 파이프 요소의 경우, r/t 비율은 원주 용접 수축으로 인한 후프 방향의 잔류 응력 분포에서 두께방향의 굽힘 강성부분을 제어를 함에 있어 유사한 역할을

한다고 볼 수 있다. 실제 사용하며 사용 가능한 SCRs 범위 내에서 총 18 개의 라이저 시스템을 선택하고 Table 1 (a), (b)에 나열된 케이스로 매개 변수 연구를 수행하였다.

2.2 파라메트릭 연구 및 공식화 결과

Fig. 4는 파라메트릭 연구에 의해 도출된 잔류응력

Fig. 4 Specimen after longitudinal butt welding

해석결과이다. 본 연구에서 사용된 r/t 파라미터의 범위가 2.86에서 12.0 사이이며 그 결과는 아래의 Fig. 4와 같이 후프 및 축 방향의 잔류 응력의 전형적인 분포를 보여준다.

본 논문에서 잔류응력의 특성을 잘 모사하기 위한 기하학적 파라미터를 r/t 의 비율로 정의하고 이 값에 대한 잔류응력의 영향을 분석하였다. 이 파라미터의 영향을 정량적으로 평가하기 위해 파이프 혹은 라이저 두께 방향 잔류응력 분포를 막 응력 및 굽힘 응력값으로 분해하여 분석하였다. 용접 중심선 (WCL, Welding Center Line)에서 추출된 분해된 잔류 응력은 Fig. 5에 표시되어 있으며 전술한 바와 같이 막 및 굽힘 응력으로 분해될 수 있다. 분석된 잔류응력 예측식은 사용된 재료의 항복 값 (약 540 MPa)으로 정규화하여 나타내었다. 이 결과를 바탕으로 식.(2)~(4)가 도출되었다.

- 용접중심에서 원주(Hoop) 방향 막응력 성분

$$\frac{\sigma_{m,h}(x)}{\sigma_Y} = 0.1512 \times \ln\left(\frac{r}{t}\right) + 0.1471 \quad (2)$$

at $2 < r/t < 12$

- 용접중심에서 원주(Hoop) 굽힘응력 성분

$$\frac{\sigma_{b,h}(x)}{\sigma_Y} = -0.348 \times \ln\left(\frac{r}{t}\right) + 0.902 \quad (3)$$

at $2 < r/t < 12$

- 용접중심에서 축(Axial) 방향 굽힘응력 성분

$$\frac{\sigma_{m,a}(x)}{\sigma_Y} = -0.198 \times \ln\left(\frac{r}{t}\right) + 0.4859 \quad (4)$$

at $2 < r/t < 12$

전반적으로, 원주방향의 굽힘성분과 축방향의 굽힘성분의 잔류 응력은 r/t 비율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 반대로, 원주방향의 막응력 성분은 r/t 비율이 증가할수록 미소하게 증가하는 경향이 있는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 원주 방향의 굽힘 성분은 축 방향 굽힘 성분에 비해 r/t 비율에 더 크게 의존하는 것으로 관찰되었다. 이는 r/t 비율의 영향을 받는 반경 방향 굽힘 강성으로 인해 주로 굽힘형태에서 자기 평형 형태로 원주 방향 잔류 응력이 이동했을 것으로 추정된다. 반대로 축 방향 굽힘 잔류응력 성분은 r/t 비율에 관계없이 축 방향의 기하학적 제약에 상대적으로 작은 의존성을 갖는 것으로 나타났다.

(a) Hoop membrane stress component at WCL

(b) Hoop bending stress component at WCL

(c) Axial bending stress component at WCL

Fig. 5 Decomposed normalized residual stresses at WCL in the form of through-thickness membrane and bending as a function of r/t ratio

3. 결 론

본 연구에서는 용접 열원의 정밀 모델을 이용한 열-탄소성 해석을 수행하고 이 해석분석 결과의 정확성을 확인하기 위해 앞선 논문에서 홀 드릴링 방법을 사용한 잔류 응력 측정을 수행하였다. 이를 통해 제안된 해석 기법의 타당성을 확인하였으며 이 해석방법을 활용하여 구조물 파단 평가시 중요한 의미를 가지는 원주 및 축

방향 잔류응력 성분을 예측할 수 있는 예측식을 제안하였다. 잔류응력 예측은 실제 적용되는 라이저의 두께 및 반경을 활용한 파라메트릭 스터디를 통해 제안된 해석기법을 적용하여 도출되었다. 최종적으로 r/t 라는 파이프 혹은 라이저의 기하학적 변수를 통해 아래의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 해양구조물 라이저 형태의 원통형 구조물 파단 평가시 중요한 의미를 가지는 잔류응력의 경험적 공식을 도출하기 위하여 실제 사용되는 라이저의 사이즈 분석을 통해 총 18건의 매개 변수 연구가 수행되었다.

2) 매개 변수 연구를 통해 원주방향의 막응력, 굽힘응력 성분의 잔류응력 예측식을 도출하였으며 더불어 축방향의 굽힘응력 성분의 잔류응력 예측식을 결정할 수 있었다. 도출된 잔류응력 예측 공식은 향후 종방향 버트 용접된 라이저의 구조 안정성 및 적합성을 결정하기 위한 자료로 많은 도움을 줄 것이라 판단된다. 이를 통해 해양구조물에서 고망간강이 적용된 심해 파이프 및 라이저 시스템의 설계 및 운영에 있어 훨씬 더 넓은 범위의 r/t 에 대한 잔류응력 프로파일 정보 생성 시 효과적인 프레임 워크를 제공할 것이다.

ORCID: Myung-Su Yi: <http://orcid.org/0000-0002-6984-5146>
ORCID: Jung-Kwan Seo: <http://orcid.org/0000-0002-3721-2432>

References

1. P. Dong, S. Song, J. Zhang, and M. H. Kim, On residual stress prescriptions for fitness for service assessment of pipe girth welds, *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 122 (2014) 6-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2014.07.006>
2. S. Song, P. Dong, and J. A. Zhang, Full-field residual stress estimation scheme for fitness-for-service assessment of pipe girth welds: Part I: identification of key parameters, *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 126-127 (2015) 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.01.002>
3. S. Song, P. Dong, and J. A. Zhang, Full-field residual stress estimation scheme for fitness-for-service assessment of pipe girth welds: Part II: a full-field estimation scheme, *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 128 (2015) 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.01.005>
4. S. Song and P. Dong, A framework for estimating residual stress profile in seam-welded pipe and vessel components part I: Weld region, *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 146 (2016) 74-86. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.07.009>
5. S. Song and P. Dong, A framework for estimating residual stress profile in seam-welded pipe and vessel components part II: Outside of weld region, *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 146 (2016) 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.07.010>
6. Egenevich, Elost, Hany, Kudla, and Shan, Shiliang. Sustainable Seabed Mining: Guidelines and a new concept for Atlantis II Deep, University of Southampton, Southampton, UK (2003). <https://doi.org/10.13140/2.1.3623.5206>
7. P. Dong and J. K. Hong, Recommendations on residual stresses estimate for fitness-for-service assessment, WRC Bulletin No.476. *Welding Research Council*, New York (2003).
8. N. Saglar, B. Toleman, and R. Thethi, Frontier deep-water developments - The impact on riser systems design in water depths greater than 3,000m, *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA (2015) OTC-25840-MS. <https://doi.org/10.4043/25840-MS>