

선박용 파이프 루프 곡선부의 구조해석에 관한 연구

박치모* · 배병일*

*울산대학교 조선해양공학부

A Study on the Structural Analysis of Curved Portions of Pipe Loops Used in Ships

Chi-Mo Park* and Byoung-Il Bae*

*School of Naval Architecture And Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

KEY WORDS: Pipe loop 파이프 루프, Curvature of corners 코너부 곡률, Finite element analysis 유한요소해석, Straight-beam element 직선 보 요소, Curved-beam element 곡선 보 요소, 2-D shell element 2차원 셸 요소, 3-D solid element 3차원 고체 요소

ABSTRACT: Many pipes that are arranged longitudinally in ships have loops at intervals to prevent the failure of the pipes as they absorb large portions of the axial load caused by the bending of the hull girder and/or thermal loads when the pipes are carrying very hot fluids. Since the loops are curved at corners, an efficient method for conducting the structural analyses of these curved portions is required. In this paper, a pipe loop was analyzed by an analytical method and by the finite-element method in four different ways, i.e., based on straight-beam elements, curved-beam elements, 2-D shell elements, and 3-D solid elements. The results of the five analyses were compared to check the validity of the current curved-beam theory. The paper includes some suggestions on how to analyze the pipe loops efficiently.

1. 서 론

선박에 종 방향으로 배치되는 파이프의 경우, 주 선체의 종 굽힘으로부터 전달되는 변위 하중 등으로 인해 큰 축 응력이 발생하게 된다. 이를 완화하기 위한 방법의 하나로 파이프 중간 중간에 루프(Loop)를 두어 이들 축 하중의 상당 부분을 흡수하는 개념이 적용되어 오고 있는데, 루프의 형성에는 파이프 제작, 설치로 인한 생산비 증가 및 추가적인 공간 점유가 수반되므로 수량 및 크기를 최소화할 필요가 있다. 이러한 반면에 관련 선급규정(Lloyd's Register, 2006)은 이에 대한 구체적인 설계 지침 없이 극히 피상적인 언급만을 하고 있어 조선현장에서는 정립된 이론적 배경 없이 경험에 의존하여 해당 설계를 해오고 있는 실정이다. 박치모 등(2009)은 각 루프를 하나의 스프링으로 간주하고 보 이론에 기초하여 그 강성과 응력을 계산하는 방법으로 루프의 설계식을 발표하여 루프의 설계가 복잡한 구조해석 없이 간단한 식에 의해 이루어질 수 있다는 가능성을 보인 바 있다. 이후 박치모와 양박달치(2009)는 루프의 구조해석 시 코너부 형상을 이전의 직선 가정에서 실제 형상인 사분원 곡선으로 변경 적용하여 해석 정도를 크게 향상시켰으나, 이는 기하학적인 고려일 뿐 강성이나 응력의 계산에는 여전히 직선 보 이론을 적용하였는데 이로 인해 상당한 오차가 존재한다는 사실을 유한요소해석을 통해 보여 주었다(박치모, 2010). 본

연구에서는 한층 더 정도 높은 파이프 루프의 코너부 처리 기법을 모색하기 위하여 이 부분을 각각 직선 보 요소, 곡선 보 요소, 2차원 셸 요소 그리고 3차원 고체 요소의 네 가지로 모델링하여 유한요소해석을 수행하고 이들 결과를 비교 분석하였다. 유한요소해석은 상용 프로그램인 MSC/NASTRAN을 사용하였다.

2. 해석 모델

2.1 기하학적 특성

파이프 루프의 유한요소해석을 수행하기 위하여 기 실적선인 318,000 DWT VLCC(현대중공업, 2007)를 대상 선박으로 선정하였으며 그 제원은 Table 1에 보인 바와 같다.

이와 같은 초대형 유조선의 여러 파이프 시스템 중에서 상갑판 상부에 설치되는 유압 파이프를 선정하여 해석을 수행하였는데 그 제원은 Table 2에 보인 바와 같다. 이와 같이 주 선체 내부가 아닌 갑판 상부에 탑재되는 파이프의 경우 Unit 별로 탑재가 이루어지기 때문에 여기서는 실제 선박에 적용된 길이

Table 1 Principal dimensions of a ship chosen for analysis

LBP (m)	B_{mid} (m)	D_{mid} (m)	N.A. above base line (m)
324	60	29.6	13.2

교신저자 박치모: 울산광역시 남구 대학로 93, 052-259-2156, cmpark@mail.ulsan.ac.kr

본 논문은 2010년 10월 목포에서 개최된 한국해양공학회 추계학술대회에서 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

Table 2 Geometrical and material properties of analyzed pipe system (JIS, 1988; ABS, 2008)

Outer diameter d_o (mm)	Thickness (mm)	Distance from N.A. (mm)	
34.0	3.4	19,940	
Young's modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Allowable stress (MPa)
200	76.9	215	119.44

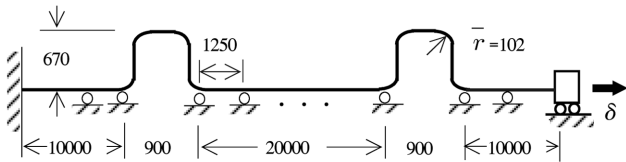


Fig. 1 Modeling of a hydraulic oil pipe [unit: mm]

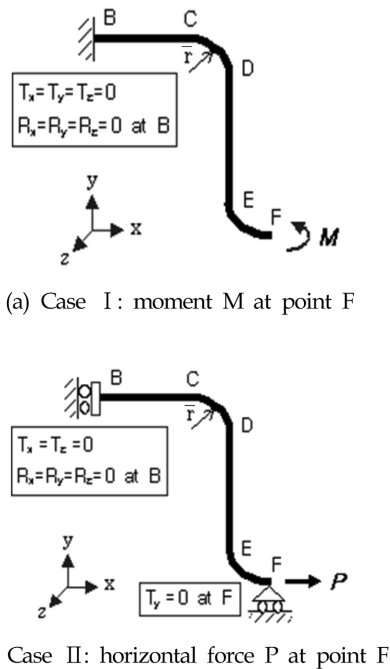


Fig. 2 Load and boundary conditions

41.8m의 한 스패 내에 두 개의 루프를 갖는 상기 유압 파이프를 약간 변형하여 Fig. 1과 같이 모델링하였다. 그런데 본 연구의 주 관심사는 루프 코너부의 해석이므로 Fig. 1에 보인 파이프 Unit에서 루프 하나를 분리한 뒤 대칭조건을 이용하여 그 반쪽[Fig. 2 참조] 부분에 대해 해석을 수행하였다.

루프 코너부의 곡률 반경은 현장의 관례에 따라 파이프 외경의 3배($\bar{r} = 3d_o$)인 102mm를 적용하였으며 5장에서는 $\bar{r} = d_o, 5d_o$ 인 두 가지 경우를 추가로 해석하여 루프 코너부의 곡률이 해석 방법 간 결과의 차이에 미치는 영향을 알아보았다.

2.2 하중 및 경계 조건

하중은 Fig. 2에 보인 바와 같이 두 가지(Case I, II)를 적용하

였는데, Case I은 파이프 단면에 걸리는 법선력과 전단력의 영향을 배제하고 루프 전 구간이 순수 굽힘 상태에 놓이도록 루프 하단 F점에 모멘트($M = 340,000\text{N}\cdot\text{mm}$)를 적용하였고, Case II는 실제의 경우에 가깝게 루프 하단 F점에 수평력($P = 1,000\text{N}$)을 적용하였다. 경계조건은 각각의 하중조건을 적절히 구현하도록 Fig. 2에 보인 바와 같이 적용하였다.

3. 보 이론에 의한 해석 해

굽힘 응력에 대해 각기 다른 해석법들이 산출하는 값들을 비교하기 위하여 순수 굽힘에 해당하는 CASE I의 굽힘 응력을 보 이론에 의해 해석적으로 구하고 그 결과를 유한요소해석 결과와 비교하기로 한다. 여기서 해석적 방법으로는 두 종류의 보 이론 즉, 직선 보 이론과 곡선 보 이론(Pytel and Kiusalaas, 2003)을 이용하였다.

3.1 직선 보 이론에 의한 굽힘 응력 계산

직선 보 이론에 의하면 관성모멘트가 I 인 보의 단면에 굽힘모멘트 M 이 작용할 때 중립축으로부터 y 만큼 떨어진 곳에서의 굽힘 응력 σ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma = \frac{My}{I} \tag{1}$$

식 (1)을 Table 2에 주어진 단면 특성을 갖는 파이프 루프에 적용하면 루프 전 구간에 걸쳐 균일한 최대 굽힘 응력 $\sigma_{max} = 149.24\text{MPa}$ 가 얻어진다.

3.2 곡선 보 이론에 의한 굽힘 응력 계산

곡선 보 이론에 의하면 단면적 A , 도심 축의 곡률 반경 \bar{r} , 중립축의 곡률 반경 R 인 곡선 보의 단면에 굽힘모멘트 M 이 작용할 때 곡선 보의 곡률 중심으로부터 r 만큼 떨어진 곳에서의 굽힘 응력 σ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma = \frac{M}{A(\bar{r}-R)} \left(1 - \frac{R}{r}\right) \tag{2}$$

여기서

$$R = \frac{A}{\int_A (1/r) dA} \tag{3}$$

식 (2)를 Table 2와 Fig. 1에 주어진 기하학적 특성을 갖는 파이프 루프에 적용하면 루프 곡선부의 최대 굽힘 응력 $\sigma_{max} = 165.78\text{MPa}$ 가 얻어진다.

4. 유한요소해석

4.1 유한요소 모델링

앞서 언급한 루프 반쪽 부분에 대해 Table 3과 Fig. 3~5에 보인 네 가지 방법으로 유한요소 모델링하였다. 여기서 Fig. 3은

Table 3 Four different finite element models

Modeling I	Entirely modeled with straight beam elements
Modeling II	Straight portions modeled with straight beam elements, curved portions modeled with curved beam elements
Modeling III	Entirely modeled with 2-D shell (QUAD4) elements
Modeling IV	Entirely modeled with 3-D solid elements

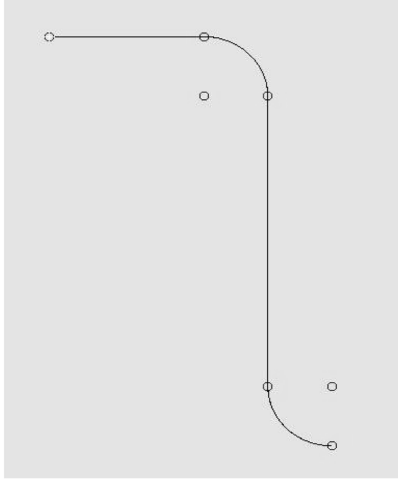


Fig. 3 Modeling I, II (937 elements)

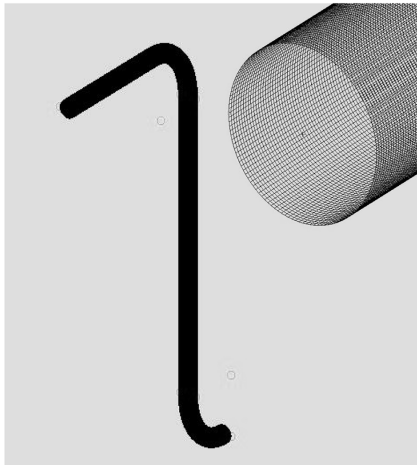


Fig. 4 Modeling III (128 × 1415 = 181,120 elements)

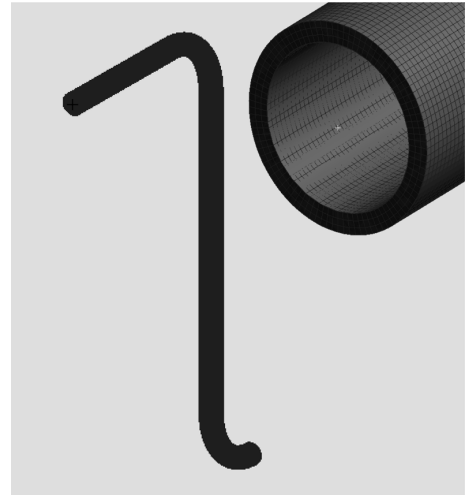


Fig. 5 Modeling IV (3 × 94 × 943 = 265,926 elements)

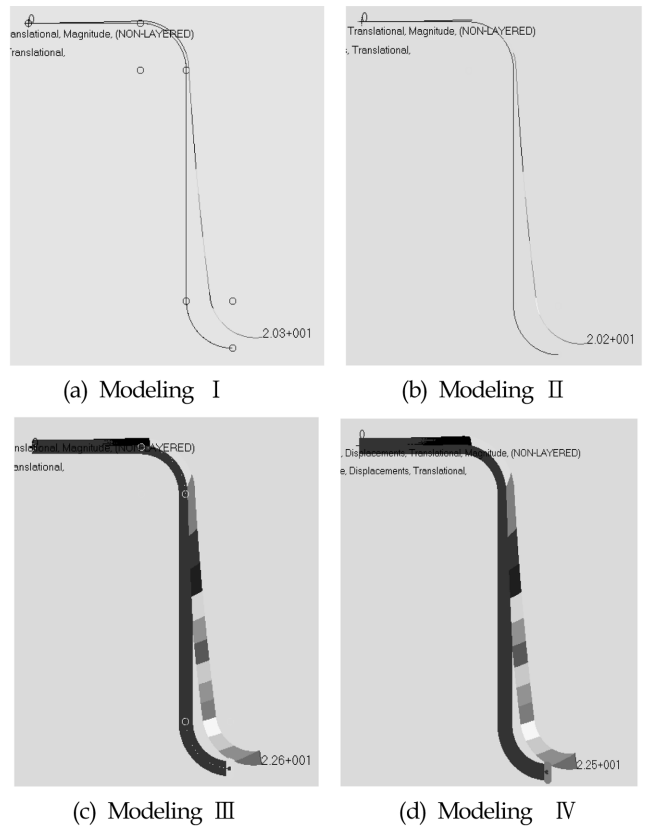


Fig. 6 Deformed shape of the models - case I

Modeling I과 Modeling II의 보 요소를 이용한 유한요소모델을 Fig. 4는 Modeling III을 Fig. 5는 Modeling IV를 보여주고 있다.

4.2 해석 결과

4.2.1 변형 형상

Case I, Case II 각각에 대하여 앞서 언급한 네 가지 모델링 방법으로 유한요소해석을 수행하고 그 결과 중 변형 형상을 각각 Fig. 6, 7에 정리하였다.

4.2.2 응력 및 변위

Case I, Case II에 대한 응력 및 변위 계산 결과를 각각 Table 4, 5, 6에 네 가지 모델링에 대하여 정리하고 이들 결과를 비교하였다. 먼저 Table 4에는 각 구간(BC, CD, DE, EF) 내 최대 응력 값을 해석적 방법과 유한요소법으로 구하여 정리하였다. Table 5, 6에는 각각 Case I, Case II의 하중 조건에 대해 루프 각 구간(BC, CD, DE, EF)의 중앙단면에서의 최대 응력 값과 F 점의 변위 값을 정리하였다. 먼저 Table 4로부터 직선 보 및 곡

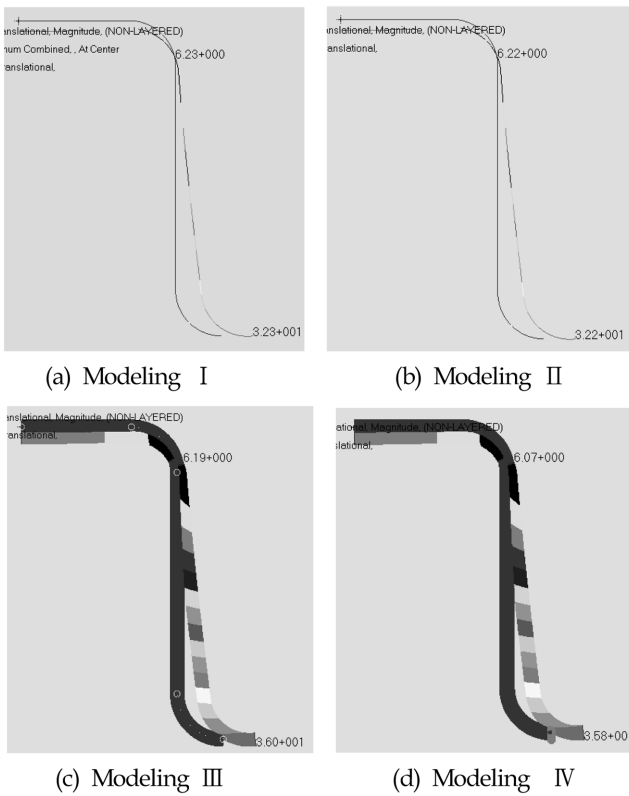


Fig. 7 Deformed shape of the models - case II

선 보 요소를 사용한 유한요소해석 결과는 직선 보 및 곡선 보의 굽힘 이론[공식]을 이용한 해석 결과와 잘 일치함으로써 보 요소를 이용한 유한요소해석이 바르게 수행되었음을 확인할 수 있었다. 또한 이들 Table 모두가 직선 구간인 BC, DE 구간에서는 네 모델링 방법에 대해 거의 일치하는 결과를 보이고 있어, 본 연구에서 2-D 셸 요소와 3-D 고체 요소를 사용한 유한요소해석이 바르게 수행된 것으로 판단할 수 있다. 그러나 곡선 구간인 CD, EF 구간에서는 해석 방법별로 큰 차이를 보이는데 우선 Table 4에서 보면, case I(순수 굽힘)의 구간별 최대 응력의 경우 곡선 보 요소가 직선 보 요소보다 11~12% 정도 큰 값을, 2-D 셸 요소와 3-D 고체 요소는 서로 비슷하게 36~38% 정도 큰 값을 보여주고 있는데 이로부터 곡선 보 이론 조차도 곡선 보에 대해서 정확한 해를 주지 못하는 것으로 사료된다. 특히 직선 보와 곡선 보 해석의 차이보다 곡선 보 해석과 2-D 셸 요소 또는 3-D 고체 요소 해석에서 차이가 더 크게 나타나는 것은 주목할 만하다.

Table 4와 5를 비교해 보면 곡선 구간 내 최대 응력이 중앙단면상의 최대 응력 보다 큰 값을 갖는 것을 알 수 있는데 이는 두 구간의 경계 근처에서 직선 보와 곡선 보 거동 간의 상호 간섭에 의한 현상으로 짐작되며 향후 면밀한 검토가 요구된다.

Table 5와 6을 비교해 보면 Case II의 경우 이들 해석 방법들 간의 결과 차이는 CD 구간에서는 Case I에 비해 근소하게 감소되고 EF 구간에서는 Case I의 경우와 반대 현상을 보이는데, 이는 단면에 발생하는 범선 응력이 Case I의 경우는 굽힘 응력만으로 이루어지는데 반해 Case II의 경우는 굽힘 응력과 축 응력

Table 4 Maximum principal stresses in each segment (case I, $\bar{r} = 3d_0$)

		Max. bending stress (σ_{max} : MPa)			
		BC	CD	DE	EF
Analytical method	Straight beam	149.24	149.24	149.24	149.24
	Curved beam	149.24	165.78	149.24	165.78
FEM	Straight beam (1)	149.24	149.24	149.24	149.24
	Curved beam (2)	149.24	166.02	149.24	166.69
	2-D shell (3)	150.62	206.02	150.54	206.07
	3-D solid (4)	149.54	203.93	149.47	205.32
Ratios	(2)/(1)	1.000	1.112	1.000	1.117
	(3)/(1)	1.009	1.380	1.009	1.381
	(4)/(1)	1.002	1.366	1.002	1.376

Table 5 Maximum principal stresses in the middle of each segment and the displacement at pt. F (case I, $\bar{r} = 3d_0$)

		Max. bending stress (σ_{max} : MPa)				Disp. at pt. F (mm)
		BC	CD	DE	EF	
FEM	Straight beam (1)	149.24	149.24	149.24	149.24	20.33
	Curved beam (2)	149.24	165.76	149.24	164.85	20.23
	2-D shell (3)	150.62	197.03	150.54	199.63	21.92
	3-D solid (4)	149.54	194.76	149.47	197.69	21.69
Ratios	(2)/(1)	1.000	1.111	1.000	1.105	0.995
	(3)/(1)	1.009	1.320	1.009	1.338	1.078
	(4)/(1)	1.002	1.305	1.002	1.325	1.067

Table 6 Maximum principal stresses in the middle of each segment and the displacement at pt. F (case II, $\bar{r} = 3d_0$)

		Max. bending stress (σ_{max} : MPa)				Disp. at pt. F (mm)
		BC	CD	DE	EF	
FEM	Straight beam (1)	310.33	296.50	153.14	14.15	32.32
	Curved beam (2)	310.33	328.49	153.14	13.10	32.25
	2-D shell (3)	313.16	390.93	154.81	13.75	35.12
	3-D solid (4)	310.94	386.70	153.36	14.08	34.74
Ratios	(2)/(1)	1.000	1.108	1.000	0.926	0.998
	(3)/(1)	1.009	1.318	1.011	0.972	1.087
	(4)/(1)	1.002	1.304	1.001	0.995	1.075

의 조합으로 이루어지는데 기인하는 것으로 보이며 그 구체적인 원인은 구간 별로 다음과 같이 설명할 수 있다. 첫째, CD 구간에서는 Case II의 경우 단면에 발생하는 범선 응력 중 굽힘 응력 부분에서는 해석 방법에 따라 차이를 보이지만 축 응력 부분에서는 차이가 없어, 즉 일부에서만 차이를 보임으로써 전체 응력에서 차이를 보이는 Case I에 비해 해석 방법 간의 결과 차

이가 감소된다. 둘째, EF 구간에서는 Case I의 경우 최대 휨선 응력이 굽힘 응력만으로 이루어져서 곡선 보 효과가 잘 나타나는 반면, Case II의 경우 오목한 쪽의 큰 압축(-) 굽힘 응력과 축 인장 응력의 조합이 아니고 볼록한 쪽의 작은 인장(+) 굽힘 응력과 축 인장 응력의 조합이 최대 응력을 형성하여 곡선 보 효과가 고려된 이 최대 휨선응력 값(Modeling II, III, IV)이 곡률을 고려하지 않은 경우의 해석(Modeling I)보다 낮아질 수도 있는데 이러한 현상이 Table 6에 잘 나타나 있다.

이상의 고찰을 종합해 보면, 파이프 곡선부에서의 최대 굽힘 응력의 경우 곡선 보 이론 보다는 2-D 셸 요소나 3-D 고체 요소를 사용한 유한요소해석이 합당한 결과를 주는 것으로 판단되며 이 값은, 현장에서 흔히 적용하는 루프 코너부 곡률인 $\bar{r} = 3d_o$ 인 경우, 직선 보 이론에 의한 최대 굽힘 응력에 1.4 정도의 수정 계수를 곱해서 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

Table 5, 6에 의하면, 루프의 강성과 관계가 있는 F점의 최대 변위 값은 곡선 보 요소 해석 결과와 직선 보 요소 해석 결과는 별 차이를 보이지 않으나 2-D 셸 요소나 3-D 고체 요소를 이용한 해석 결과는 직선 보 요소 해석 결과보다 6~9% 정도 큰 값을 주는 것으로 나타나 있다. 이는 루프의 강성을 낮추어 파이프 직선부나 루프의 응력을 감소시키는 역할을 해주는 것으로 루프의 설계에 고려할 수도 있고 추가적인 안전을 도모할 목적으로 무시할 수도 있을 것이다.

5. 루프 코너부 곡률의 영향

루프 코너부 곡률의 영향을 알아보기 위하여 코너부 곡률이 파이프 외경의 3배(102mm)인 앞의 해석에 추가하여 1배(34mm)인 경우와 5배(170mm)인 경우에 대해 case I의 하중조건을 적용하여 해석을 수행한 뒤 그 결과를 Table 7, 8에 정리하였다. Table 5, 7, 8로부터, 각각 $\bar{r} = d_o, 3d_o, 5d_o$ 인 경우, 곡선 구간인 CD 구간의 중앙 단면에서의 최대 주응력 값에 대한 modeling I과 modeling II의 해석결과 차이가 약 49%, 11%, 7%로 나타났으며, modeling I과 modeling IV의 해석결과 차이는 약 132%, 31%, 23%로 나타나, 해석 방법별 결과 차이가 코너부 곡률에 매우 민감한 것을 보여주고 있다.

Table 7 Maximum principal stresses in the middle of each segment and the displacement at pt. F (case I, $\bar{r} = d_o$)

		Max. bending stress (σ_{max} : MPa)				Disp. at pt. F (mm)
		BC	CD	DE	EF	
FEM	Straight beam (1)	149.24	149.24	149.24	149.24	13.21
	Curved beam (2)	149.24	222.13	149.24	221.95	13.14
	2-D shell (3)	150.77	362.39	150.55	351.32	15.59
	3-D solid (4)	149.69	346.51	149.47	374.57	15.35
	(2)/(1)	1.000	1.488	1.000	1.487	0.995
Ratios	(3)/(1)	1.010	2.428	1.009	2.354	1.180
	(4)/(1)	1.003	2.322	1.002	2.510	1.162

Table 8 Maximum principal stresses in the middle of each segment and the displacement at pt. F (case I, $\bar{r} = 5d_o$)

		Max. bending stress (σ_{max} : MPa)				Disp. at pt. F (mm)
		BC	CD	DE	EF	
FEM	Straight beam (1)	149.24	149.24	149.24	149.24	29.21
	Curved beam (2)	149.24	159.66	149.24	160.06	29.19
	2-D shell (3)	150.59	185.70	150.54	185.75	30.58
	3-D solid (4)	149.51	183.83	149.47	184.52	30.30
	(2)/(1)	1.000	1.070	1.000	1.073	0.999
Ratios	(3)/(1)	1.009	1.244	1.009	1.245	1.047
	(4)/(1)	1.002	1.232	1.002	1.236	1.037

F점의 변위 값에 있어서는, modeling I과 modeling II의 해석 결과 차이는 거의 없으며 modeling I과 modeling IV의 해석결과 차이는 각각 $\bar{r} = d_o, 3d_o, 5d_o$ 인 경우 약 16%, 7%, 4%로 나타나 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 파이프 루프 구조해석의 기초 연구로서 루프 코너부에 직선 보 및 곡선 보 이론을 적용하는 해석의 문제점을 파악하기 위해 파이프 루프를 네 가지로 모델링하여 유한요소해석을 수행하고 그들 결과를 비교하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 루프 곡선부의 경우 2차원 셸 요소와 3차원 고체 요소를 사용한 해석은 거의 일치하는 결과를 주는 반면, 이들 결과와 직선 보 요소에 의한 해석 결과 그리고 곡선 보 요소에 의한 해석 결과 사이에는 서로 큰 차이를 보임으로써 곡선 보 요소조차도 정확한 해를 보장하는 것이 아니라는 점을 발견하였으며 직선 보든 곡선 보든 보 이론만으로 루프 곡선부의 구조해석을 수행하는 것은 정도에 문제가 있는 것으로 판단된다.

(2) 실제 파이프 루프의 구조 거동은 루프 자체뿐만 아니라 이와 연결된 파이프 직선부의 지지 상태 등과도 연계되어 루프 설계를 위한 구조해석을 수행하려면 루프와 파이프 직선부로 구성된 전체 시스템을 대상으로 해야 하는데 이를 셸이나 고체 요소로 해석하는 것은 대단히 비효율적이다. 따라서 보 이론을 이용하여 개발한 설계식이나 보 요소를 이용한 간단한 유한요소해석으로부터 얻어진 응력 값에 적당한 수정계수를 곱하여 설계에 사용할 것을 제안한다. 그런데 본 연구의 해석 결과 직선 보 요소와 곡선 보 요소의 해석 결과 차이보다는 곡선 보와 나머지 정도 높은 두 해석 결과들과의 차이가 더욱 크므로 설계식을 개발할 때에는 복잡한 곡선 보 이론을 사용하기 보다는 비교적 간편한 직선 보 이론을 사용하고 여기에 2차원 셸 요소나 3차원 고체 요소를 사용한 결과와의 차이에 해당하는 오차를 수정 계수의 형태로 보상해주는 방법이 바람직하다는 결론을 도출하였다. 본 연구에서는 현장에서 흔히 적용하는 루프 코너부 곡률인 $\bar{r} = 3d_o$ 인 경우 직선 보 이론에 의한 최대 굽힘 응

력에 크기 1.4의 수정 계수를 사용할 것을 제안하고자 한다.

(3) 이들 각기 다른 요소를 사용한 해석들 간의 결과 차이는 파이프 단면의 외경에 대한 루프 코너부의 곡률 반경 비가 감소함에 따라 더욱 두드러지는 현상을 보여 이러한 해석 방법들 간의 결과 차이가 루프 코너부의 곡률에 매우 민감하다는 사실을 확인하였다.

후 기

본 연구는 울산대학교의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

박치모, 양박달치, 이종훈 (2009). "대형 선박의 파이프 루프 설계식 개발(II)", 한국해양공학회지, 제23권, 제1호, pp 132-137.

박치모, 양박달치 (2009). "코너부 곡률을 고려한 선박용 파이프 루프 설계식 개발", 한국해양공학회지, 제23권, 제4호, pp

91-99.

박치모 (2010). "선박용 파이프 루프의 구조해석을 위한 곡선 보 이론의 검토", 2010년도 한국해양과학기술협의회 공동 학술대회, pp 2347-2351.

현대중공업 (2007). Arr't of Outfittings on Upper Deck.

ABS(American Bureau of Shipping) (2008). Rules for Building and Classing Steel Vessels, Part 4, Chapter 6, Section 2, pp 389.

JIS (Japanese Industrial Standard) (1988). JIS G 3454-1988; Carbon Steel Pipes for Pressure Service.

Lloyd's Register (2006). Ship Piping Systems, Part 5, Chapter 13, Section 2, pp 3-4.

Pytel, A. and Kiusalaas, J. (2003). Mechanics of Materials, Thomson Learning Academic Resource Center, pp 410.

2010년 9월 24일 원고 접수

2010년 10월 7일 심사 완료

2010년 10월 11일 게재 확정