

CAESAR-II를 이용한 파이프 루프의 구조 거동 특성 연구

박치모* · 윤성룡**

*울산대학교 조선해양공학부

**현대중공업(주) 해양사업본부

Study on Structural Behavior of Pipe Loops Using CAESAR-II

Chi-Mo Park* and Seong-Ryong Yoon**

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

**Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea

KEY WORDS: Pipe loop 파이프 루프, Bending stress 굽힘 응력, CAESAR-II, MSC/NASTRAN, Finite element analysis 유한요소해석, Straight-beam element 직선 보 요소, Curved-beam element 곡선 보 요소, 2-D shell element 2차원 쉘 요소

ABSTRACT: Most ships and offshore structures are equipped with a variety of pipes, which inevitably contain curved portions. The structural design of these pipes mostly relies on the commercial code, CAESAR-II, which was especially developed for the structural analysis of pipes. This study conducted stress analyses of the same pipe unit, including loops, using both CAESAR-II and MSC/NASTRAN, and compared the results to investigate the characteristics of CAESAR-II. A parametric study was then conducted of the various design variables of pipe loops using CAESAR-II to draw some useful information about the structural characteristics of the loops.

1. 서 론

선박이나 해양구조물에는 다양한 종류의 파이프가 설치되며 이들 파이프에는 여러 가지 요인에 의해 큰 축력이 발생되는데, 이들 요인의 대표적인 예로는 선박의 경우 주 선체의 중 굽힘으로부터 파이프에 전달되는 변위 하중, 해양구조물 플랫폼 간의 상대변위로 인해 연결 파이프에 발생하는 변위 하중 그리고 선박이나 해양구조물에 설치된 파이프 내의 비 상온 유체에 의한 열 하중 등이 있다. 이러한 하중들에 의해 유발되는 축력을 완화하기 위한 방법의 하나로 루프(Loop)가 흔히 도입되는데 현장에서의 루프의 설계는 이론적 기반이 취약한 경험이나 파이프 구조해석 전용 상용 소프트웨어인 CAESAR-II(2009)에 의존하고 있는 실정이다. Park and Bae(2010)는 파이프 루프의 코너 곡선부를 각각 직선 보 요소, 곡선 보 요소, 2차원 쉘 요소 그리고 3차원 고체 요소의 네 가지로 모델링하여 유한요소해석을 수행하고 이들 결과를 비교 분석함으로써, 파이프 곡선부의 곡률반경이 작을 경우 직선 보 이론은 물론이고 곡선 보 이론조차도 큰 오차를 갖는다는 연구 결과를 발표한 바 있다. 또한 Park and Bae(2011)는 파이프 루프의 코너 곡선부의 응력을 정도 높게 추정하기 위하

여 직선 보 요소를 이용한 유한요소해석을 통해 얻은 응력 값을 수정하는 방법을 제안한 바 있으나 실용적으로 사용하기에는 추가의 검증이 필요한 단계라고 할 수 있다.

본 연구에서는 현장에서 파이프의 구조해석을 위해 널리 사용되고 있는 CAESAR-II와 범용 유한요소해석 프로그램인 MSC/NASTRAN(2005)의 해석 결과를 비교하여 CAESAR-II의 특성을 살펴보고 이를 이용한 다양한 파라미터 연구(Parametric study)를 통하여 파이프 루프의 다양한 설계변수가 구조거동에 미치는 영향을 파악하여 그 구조설계에 도움이 되는 정보를 제공하고자 한다. 본 연구에서 채택한 파이프 루프의 설계 변수에는 루프 코너부의 곡률 반경, 루프의 높이와 폭, 루프들 사이에 놓인 직선 파이프 구간의 지지점 간격, 루프의 종류(평면, 직각 2단) 및 배치 등이 있다.

2. CAESAR-II의 특성 파악을 위한 시험 해석

2.1 시험 해석 모델

2.1.1 기하학적 특성

본 연구에서는 파이프 루프 코너 곡선부의 응력 계산에 있

Received 13 August 2012, revised 11 January 2013, accepted 19 April 2013

Corresponding author Chi-Mo Park: +82-52-259-2156, cmpark@mail.ulsan.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSOE 2011 in Daejeon.

Table 1 Geometrical and material properties of analyzed pipe system (IIS, 1988; ABS, 2008)

Outer diameter d_o (mm)	Thickness (mm)	Young's modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Allowable stress (MPa)
34.0	3.4	200	76.9	215	119.44

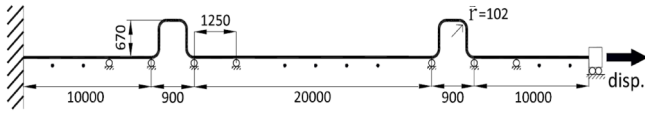


Fig. 1 Modeling of a hydraulic oil pipe with loops (unit: mm)

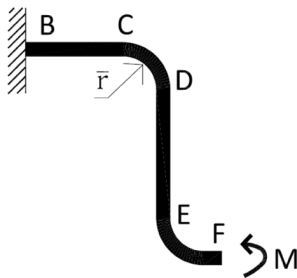


Fig. 2 Load and boundary conditions

어서의 CAESAR-II의 특성을 파악하기 위하여 이전 연구(Park and Bae, 2010)에서 사용한 것과 동일한 초대형 유조선의 상갑판 상부에 설치되어 변위 하중(Displacement load)을 받는 유압 파이프를 해석 대상으로 선정하였는데 그 제원은 Table 1과 Fig. 1에 보인 바와 같다.

그런데 본 연구의 주 관심사는 파이프 곡선부의 해석이므로 Fig. 1에 보인 파이프 유니트(Unit)에서 루프 하나를 분리한 뒤 대칭 조건을 이용하여 그 반쪽 (Fig. 2 참조) 부분을 택하였다. 원 모델의 루프 코너부의 곡률 반경(\bar{r})은 파이프 외경(d_o)의 3배($\bar{r}=3d_o$)인 102mm인데 여기서 이를 각각 $\bar{r}=1d_o, 1.5d_o, 1.7d_o, 2d_o, 3d_o, 4d_o, 5d_o$ 로 변화시켜 7개의 시험 해석 모델을 구성하였다. 이들 각각의 모델에 대하여 CAESAR-II를 이용한 해석과 각각 직선 보 요소, 곡선 보 요소, 2-D 셸 요소를 사용한 유한요소해석, 즉 모두 네 종류의 해석을 수행하였다.

2.1.2 하중 및 경계 조건

곡선 보 이론(Pytel and Kiusalaas, 2003)에 의하면 곡선 보와 직선 보 이론의 차이는 보의 단면에 일반적으로 존재하는 굽힘 응력(Bending stress), 전단 응력(Shear stress), 축 응력(Axial stress) 중 굽힘 응력에 대해서만 존재하므로 곡선 보에 직선 보 이론을 적용할 때 발생하는 최대 응력 값의 오차는 굽힘 응력에서 유발될 것이다. 따라서 본 연구에서는 굽힘 응력 부분에서의 오차를 파악하기 위하여 파이프 단면에 걸리는 축력과 전단력의 영향을 배제하고 루프 전 구간이 순수 굽힘 상태에 놓이도록, Fig. 2에 보인 바와 같이, 루프 상단 B점의 모든 변위를 구속(Fixed)시키고 하단 F점에 임의의 모멘트, $M=340,000\text{N}\cdot\text{mm}$ 를 적용하였다. 본 해석은 앞서 언급한 네 종류의 선형 응력해석을 통하여 얻은 응

력 결과 값들의 비를 알아보는 것이 목적이므로 하중의 크기는 어떤 값을 선정해도 무방함을 밝혀둔다.

2.2 시험 해석 및 결과 분석

앞서 언급한 루프 반쪽 부분(Fig. 2)에 대해 Table 2에 보인 네 가지 방법으로 응력 해석을 수행하였는데, Fig. 3은 앞서 언급한 7개의 시험 해석 모델 중 $\bar{r}=3d_o$ 인 시험 모델에 대한 보(직선 및 곡선) 요소 유한요소 모델링을, Fig. 4는 2-D 셸 요소유한요소 모델링을 나타내고 있다. 한편, 이와 같이 네 가지 방법으로 수행한 해석 결과 중 루프 코너 곡선부인 CD구간에서의 최대 굽힘 응력 값을 Table 3과 Fig. 5에 정리하였다. 이로부터, 곡률 반경이 $\bar{r}=2d_o$ 이상인 경우 CAESAR-II의 해석 결과는 MSC/NASTRAN의 직선 보 요소 해석 결과와 거의 일치하는 것을 관찰할 수 있으며 이 경우 CAESAR-II에서는 곡선 파이프를 직선 보 요소로 취급한 것으로 보인다. 그러나 곡률 반경이 $\bar{r}=2d_o$ 이하인 경우 CAE

Table 2 Four different methods of stress analysis

Analysis I	Analyzed by CAESAR-II
Analysis II	Analyzed by MSC/NASTRAN with straight beam elements
Analysis III	Analyzed by MSC/NASTRAN with curved beam elements
Analysis IV	Analyzed by MSC/NASTRAN with 2-D shell (QUAD4) elements

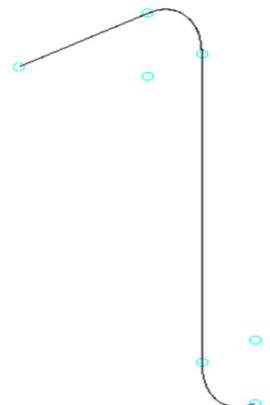


Fig. 3 Modeling of Analysis II and III: 937 elements

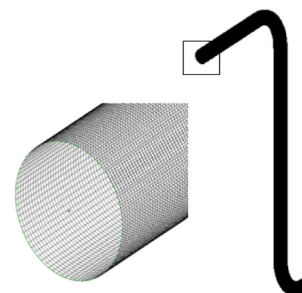


Fig. 4 Modeling of Analysis IV: 80 (circumferential) × 936 (longitudinal)=74880 elements

Table 3 Maximum bending stress in the corner of the loop

Methods	Curvature							
	$1d_0$	$1.5d_0$	$1.7d_0$	$2d_0$	$3d_0$	$4d_0$	$5d_0$	
Analysis I	214.97	164.05	150.91	149.25	149.25	149.25	149.25	
Analysis II	149.24	149.24	149.24	149.24	149.24	149.24	149.24	
Analysis III	222.13	189.14	183.71	175.64	165.76	160.84	159.66	
Analysis IV	362.39	285.64	258.79	228.02	206.02	193.79	185.70	

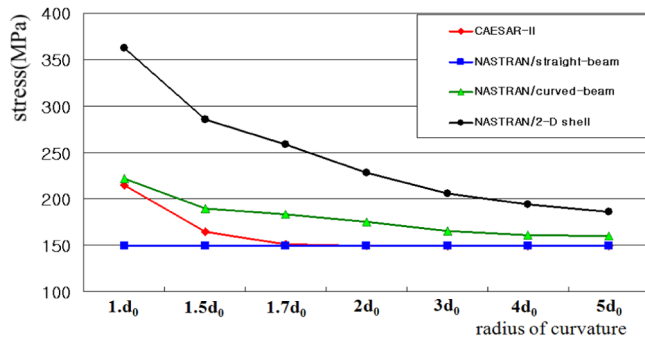


Fig. 5 Maximum bending stress in the corner of the loop

SAR-II의 해석 결과는 MSC/NASTRAN의 직선 보 요소 해석 결과와 곡선 보 요소 해석 결과의 사이 값을 갖는데 이로부터 CAE SAR-II가 곡률 반경이 작은 경우 곡률 효과를 감안하려는 시도는 하고 있으나 그 응력 값이 정해에 가깝다고 판단되는 2-D 셸 요소의 결과(Park and Bae, 2010)에 훨씬 못 미치는 물론 곡선 보 요소에 의한 값보다도 작게 나타나 곡률 반경이 작은, 즉 곡률이 큰 파이프에 발생하는 굽힘 응력의 집중 현상을 표현하는 데에는 문제가 있는 것으로 판단된다.

3. 파라미터 연구를 위한 해석

3.1 해석 모델

앞서 언급한 바와 같이 CAESAR-II는 곡률 반경이 작은 파이프 곡선부의 응력 해석에는 문제가 있어 보이지만 파이프 구조해석 전용프로그램으로서 해석이 간편하다는 점과 코너부 곡률 반경이 같고 기타 설계변수 값이 다른 루프들 간의 상대적인 응력 값의 비교에는 별 문제가 없을 것이라는 가정 하에, CAESAR-II를 이용하여 파이프 루프의 다양한 설계 변수가 최대 법선 응력에 미치는 영향을 알아보기로 한다. 이를 위하여 Fig. 1에 보인 바와 같이 2개의 루프를 갖는 길이 41.8m의 파이프 유닛을 기본으로 하고 여기에 설계 변수별로 다양한 변화를 준 해석 모델을 구성하여 CAESAR-II로 해석을 수행하였으며 설계 하중으로는 인장 변위 하중 46.88mm(Park and Yang, 2009)을 적용하였다. 본 해석 모델에서는 실제의 경우와 부합하게 축 방향 변위 하중을 적용하였기 때문에 루프상의 임의의 단면에는 단면에 걸쳐 균일하게 분포하는 축 응력과 선형적으로 분포하는 굽힘 응력이 동시에 발생하며 실제의 응력은 이들 두 응력의 조합 응력(Combined stress)으로 나타나게 된다. 따라서 이후 해석 결과를 정리함에 있어서는 이들 세 응력을 모두 표시하였으며 응력 값의 크고 작음을 논할 때에는 조합 응력을 기준으로 하였다.

3.2 설계 변수의 영향

3.2.1 루프 코너부의 곡률 반경

앞서 언급한 시험 해석 모델의 경우 루프 전 구간이 균일한 크기의 순수 굽힘 모멘트를 받는 상태여서 곡률이 굽힘 응력에 미치는 영향은 단순히 휨에 의한 국부적인 굽힘 응력 집중 현상만을 나타낼 뿐이다. 그러나 다양한 코너부 곡률을 갖는 루프가 Fig. 1에 보인 바와 같이 직선 파이프와 연결되어 사용되는 실제의 경우 루프 단면에는 굽힘 모멘트에 더하여 축력과 전단력이 함께 걸릴 뿐만 아니라 이들 내력(굽힘 모멘트, 축력, 전단력)의 크기 자체가 코너부 곡률에 따라 달라지기 때문에, 루프 코너부 곡률이 루프 코너부의 최대 응력에 미치는 영향은 코너부 곡률 변화에 따른 내력의 크기 변화에 의한 전체적인 효과와 굽힘 응력 집중이라는 국부적인 효과의 조합으로 나타난다. 따라서 CAESAR-II로 해석을 수행할 경우 이들 두 효과 중 후자의 국부적인 굽힘 응력 집중 효과를 정확히 파악하는 데에는 다소 문제가 있을 수 있으나 전자의 전체적인 효과와 조합된 효과에서 흥미로운 결과를 기대하고 루프 코너부의 곡률 반경도 파라미터 연구에 포함시키기로 하였다.

이를 위해 Fig. 1에 보인 기본 모델에 코너부 곡률 반경만을 $\bar{r} = 0.5d_0, 1.5d_0, 1.7d_0, 2d_0, 3d_0, 4d_0, 5d_0$ 의 6가지로 변화시켜 코너부의 최대 응력을 계산한 뒤 그 결과를 Table 4와 Fig. 6에 정리하였다. 이들은 곡률 반경 $\bar{r} = 2d_0$ 이하에서는 곡률 반경이 증가함에 따라 응력이 가파르게 감소하다가 $\bar{r} = 2d_0$ 이상에서는 응력이 완만하게 증가하는 현상을 보이고 있는데 이 현상은 다음과 같이 해석할 수 있다. 즉, 루프 코너부의 곡률 반경 증가에 따른 응력 변화 요인은 전체적인 형상 변화에 의한 응력 증가 효과와

Table 4 Loop-corner stresses for different radii of curvature of the loop corner

Stress(MPa)	Radius of curvature					
	$0.5d_0$	$1d_0$	$2d_0$	$3d_0$	$4d_0$	$5d_0$
Axial	1.86	1.97	2.19	2.45	2.59	2.68
Bending	212.07	140.32	106.73	119.28	128.14	133.68
Combined	213.94	142.29	108.92	121.72	130.73	136.35

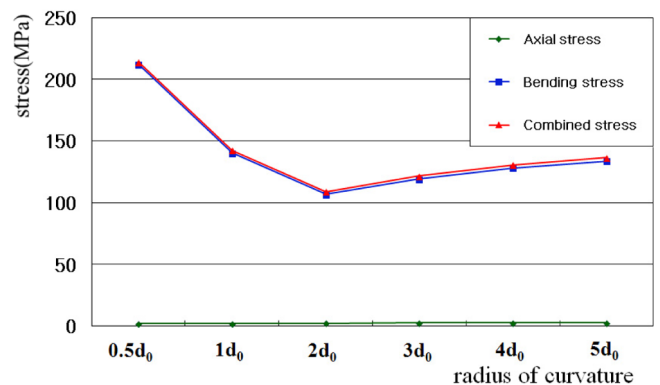


Fig. 6 Loop-corner stresses for different radii of curvature of the loop corner

국부적인 굽힘 응력 집중 완화에 따른 응력감소 효과로 구성되는데 $\bar{r}=2d_o$ 이하인 영역에서는 전자의 응력 증가 효과는 작고 후자의 응력 감소 효과는 커서 이들 두 효과가 조합되면 응력 감소 효과로 나타난다. 이에 반해 $\bar{r}=2d_o$ 이상인 영역에서는 직선 보 이론을 적용함으로써 앞서 언급한 후자의 응력 감소 효과는 무시되고 전자의 응력 증가 효과만이 표현되는 것으로 판단된다. 그러나 Table 3과 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 $\bar{r}=2d_o$ 이상인 영역에서는 어차피 곡률에 따른 응력 집중 현상이 극히 미미하여 무시된 후자의 응력 감소 효과는 큰 오차를 유발하지 않으나 이것까지 고려한다면 응력 값은 매우 완만하게 증가하거나 거의 일정한 값을 유지하는 것으로 예측할 수 있다.

3.2.2 루프의 높이

Fig. 1에 보인 기본 모델에서 루프의 높이만을 0, 300, 600, 900, 1200, 1500mm의 6 단계로 변화시켜 코너부의 최대 응력을 계산한 뒤 그 결과를 Table 5와 Fig. 7에 정리하였다. 여기서 루프의 높이 0은 루프가 없이 직선 파이프로만 이루어진 경우를 의미한다. 이들로부터 루프의 높이가 매우 낮은 초기의 경우에는 최대 법선응력 값이 루프가 없는 경우 이상으로 오히려 증가하다가 루프의 높이가 어떤 값 이상이 되어야 가파르게 감소하는 현상을 보이며 루프의 효과가 긍정적으로 나타나려면 루프가 없는 경우와 응력 값이 같아지는 어떤 임계값(h_{cr}) 이상의 루프 높이를 가져야 하는 것을 알 수 있다.

Table 5 Loop-corner stresses for different loop heights

stress(MPa)	Height Position (mm) (upper or lower corner)	Height (mm)					
		0	300	600	900	1200	1500
Axial	Upper	224.31	13.48	3.12	1.26	0.65	0.38
	Lower		13.48	3.12	1.34	0.76	0.49
Bending	Upper	0	296.17	136.34	82.39	56.43	41.55
	Lower		300.02	134.31	80.85	55.59	40.96
Combined	Upper	224.31	309.65	139.46	83.65	57.08	41.93
	Lower		313.50	137.43	82.18	56.35	41.45

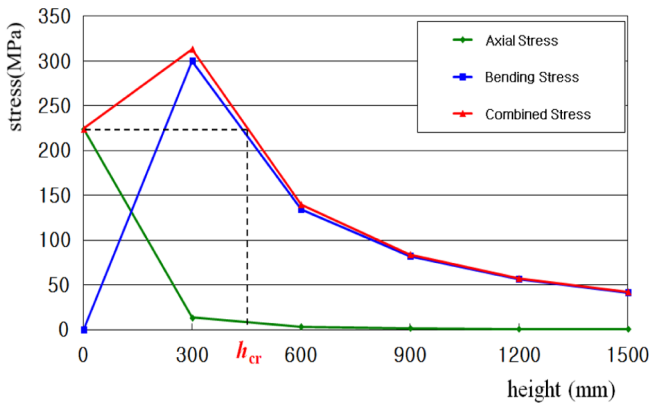


Fig. 7 Loop-corner stresses for different loop heights

Table 6 Loop-corner stresses for different loop breadths

Stress(MPa)	Breadth Position (mm) (upper or lower corner)	Breadth (mm)					
		0	500	1000	1500	2000	2500
Axial	Upper	224.31	3.12	2.34	2.01	1.64	1.51
	Lower		3.12	2.34	2.01	1.64	1.51
Bending	Upper	0	173.77	110.62	81.26	68.42	57.62
	Lower		131.06	114.88	108.42	102.03	100.41
Combined	Upper	224.31	176.89	112.96	83.25	70.06	59.13
	Lower		134.19	117.22	110.43	103.67	101.92

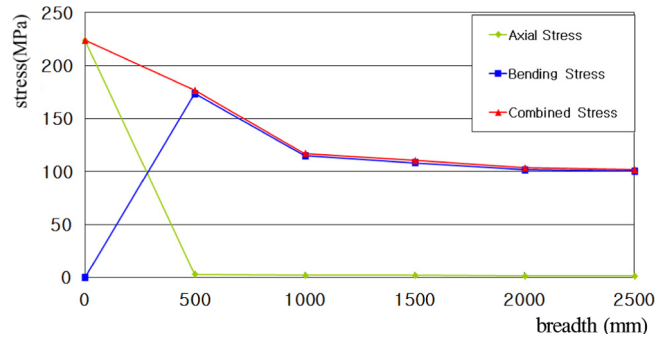


Fig. 8 Loop-corner stresses for different loop breadths

3.2.3 루프의 폭

루프의 폭의 변화가 최대 응력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1에 보인 기본 모델에서 루프의 폭만을 0, 500, 1000, 1500, 2000, 2500mm의 6 단계로 변화시켜 코너부의 최대 응력을 계산한 뒤 그 결과를 Table 6과 Fig. 8에 정리하였다. 그런데 루프의 폭을 변화시키는 경우 파이프 직선부의 길이에 변화가 발생하여 직선 구간의 지지점 간격을 유지시키는 것이 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 파이프 직선부의 전체 길이보다는 지지점 간격이 최대 응력에 더 큰 영향을 미칠 것이라는 가정 하에, 루프의 폭이 달라져서 직선부의 전체 길이가 변해도 지지점 간격이 일정하게 유지되도록 직선부의 길이를 미세 조정하면서 해석을 수행하였다.

Table 6과 Fig. 8로부터, 루프의 폭이 작은 영역에서는 최대 응력 값이 폭의 증가에 따라 급격히 감소하다가 폭이 1000mm 인 점에서 곡선에 불연속이 발생하며 최대 응력 감소율이 크게 완만해지는 것을 알 수 있는데 이때가 바로 최대 응력의 발생 지점이 루프의 위쪽 코너에서 아래쪽 코너로 이동하는 시점임을 Table 6에서 확인할 수 있다. 따라서 루프의 폭의 변화에 대한 최대 응력의 민감도는, 루프의 폭이 작은 영역에서는 다소 큰데 반해 루프의 폭이 큰 영역에서는 매우 작아지는 현상을 보이고 있다.

3.2.4 루프 사이 직선 파이프 구간의 지지점 간격

루프 사이 직선 파이프 구간의 지지점 간격이 파이프 단위의 최대 법선응력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1에 보인 기본 모델에서 루프 사이 직선 파이프 구간의 지지점 간격만을

500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000mm의 7 단계로 변화시켜 코너부의 최대 응력을 계산한 뒤 그 결과를 Table 7 과 Fig. 9에 정리하였다.

Table 7과 Fig. 9에서 보듯이 지지점 간격 500, 750, 1000mm의 경우 최대 범선응력이 루프의 아래쪽 코너에서 발생하며 크기는 지지점 간격의 증가에 따라 급격히 감소하다가 지지점 간격이 1250mm를 넘으면서 최대 범선 응력 발생점이 루프 위쪽 코너로 이동하게 되고 여기서부터 지지점 간격의 증가에 따른 응력 값의 감소는 이전보다 다소 완만해짐을 알 수 있다. 이것은 루프의 구조 특성상 파이프 직선부의 지지점 간격이 좁을수록 루프 아래쪽 코너부에 구속을 강화하여 큰 굽힘 응력을 유발시킴으로써 이곳에 최대응력을 발생케 하고, 지지점 간격이 어떤 값 이상으로 넓어지면 최대 응력 발생 지점이 루프 위쪽 코너로 이동하게 되며 이 지점의 응력은 지지점 간격에 덜 민감하기 때문인 것으로 분석된다. 어쨌거나 최대 응력 값은 전반적으로 지지점 간격의 증가에 따라 감소하므로 불필요하게 과다한 지지점을 두는 것은 피할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.2.5 루프의 종류 및 배치

루프는 형상에 따라 평면 루프와 직각 2단 루프로 나눌 수 있는데 이들 종류와 루프의 배치 등을 고려하여 파이프 단위를 Fig. 10에 보인 바와 같이 7개의 타입으로 나누고 이들 모두가 동일한 하중 상태에 놓인다는 가정 하에 최대 범선응력을 계산하여 Table 8 및 Fig. 11에 정리하였다. 여기서 Type 1은 루프가 없이 직선 파이프로만 구성된 모델이고 Type 2는 루프 2개를

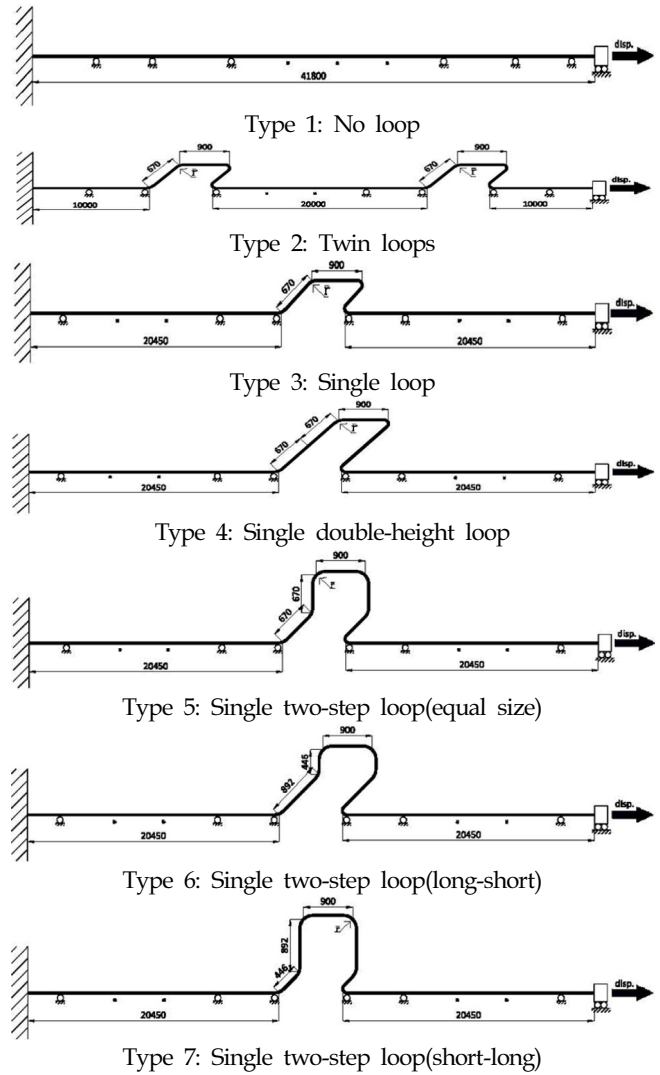


Fig. 10 Seven different types of pipe units

Table 7 Loop-corner stresses for different support spaces within a straight pipe zone

SupportPosition space (upper mm) or Stress (MPa)	lower corner)	500	750	1000	1250	1750	2000	2500								
		Axial	Upper 3.35	2.95	2.66	2.45	2.28	2.15	2.04	Lower 4.98	3.53	2.81	2.45	2.28	2.15	2.04
Bending	Upper	135.20	128.11	123.04	119.28	116.28	113.93	112.05	Lower	178.44	152.34	131.90	116.94	105.99	96.76	88.96
	Combined	Upper	138.55	131.06	125.71	121.94	118.56	116.08	114.09	Lower	183.42	155.88	134.71	119.39	108.27	98.91

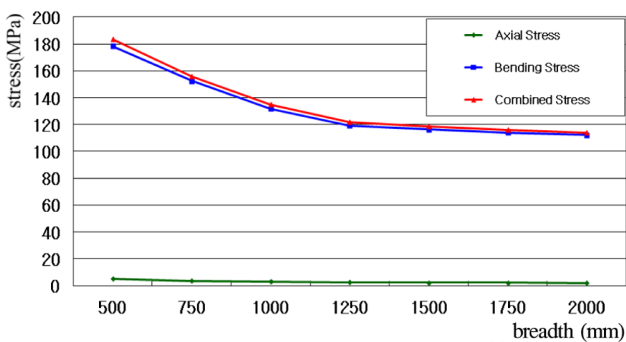


Fig. 9 Loop-corner stresses for different support spaces

Table 8 Loop-corner stresses for different types of pipe unit

Type Position (upper or Stress (MPa)	lower corner)	1	2	3	4	5	6	7							
		Axial	Upper 224.31	2.45	4.85	1.00	1.59	1.50	1.45	Lower 2.45	4.85	1.00	1.59	1.50	1.45
Bending	Upper	0	119.28	236.08	96.93	114.61	102.42	118.08	Lower	116.94	231.46	95.54	102.90	118.94	100.79
	Torsional	Upper	0	0	0	0	2.14	1.75	1.64	Lower	17.47	0.59	1.42		
Combined	Upper	224.31	121.72	240.93	97.93	116.28	103.98	119.58	Lower	119.39	236.30	96.54	110.25	120.45	102.28

갖는 원 모델, Type 3은 Type 2에서 루프 하나를 직선 구간으로 대체한 모델, Type 4는 Type 2의 두 개의 루프를 높이 방향으로 하나로 통합한 모델, Type 5는 Type 2의 두개의 루프를

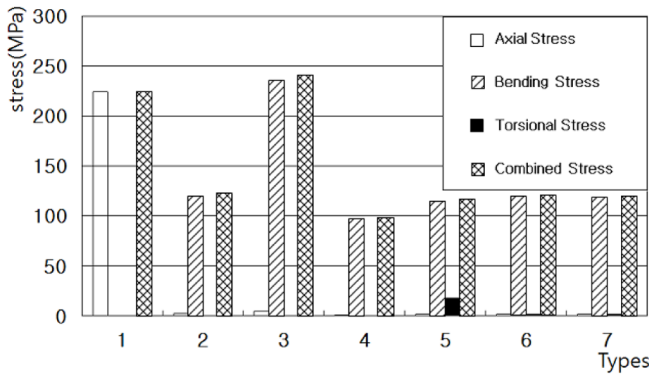


Fig. 11 Loop-corner stresses for different types of pipe unit

수평 구간과 연직 구간의 높이를 동일하게 직각으로 꺾어 형성한 직각 2단 루프, Type 6은 Type 5의 직각 2단 루프에서 수평 구간과 연직 구간의 높이 비가 2:1이 되도록 조정된 모델, Type 7은 Type 5의 직각 2단 루프에서 수평 구간과 연직 구간의 높이 비가 1:2이 되도록 조정된 모델이다.

Table 8과 Fig. 11로부터 Type 2(원 모델)의 경우 Type 1(No loop)의 약 54%의 응력을 발생시키며 Type 3(One-standard loop)의 경우 Type 1보다 다소 큰 응력을 발생시켜 루프가 없는 것 보다 강도상 불리함을 보이며, Type 4(루프 두 개를 높이 방향으로 통합)의 경우 Type 2에 비해 약 80%로 응력이 감소함을 알 수 있다. Type 5(균일 2단 루프)의 경우 Type 4(Double-height single loop)에 비해 약 119%로 응력이 증가하며, Type-6, 7(차등 2단 루프)의 경우 Type 5(균일 2단 루프)에 비해 다소 응력이 증가함을 알 수 있다.

4. 해석 결과의 요약

2장의 시험해석 및 3장의 파라미터 연구로부터 파이프 루프 설계에 유용한 지침이 될 수 있는 주요 특성을 요약하면 다음과 같다.

(1) CAESAR-II는 파이프 곡률 반경이 큰 부분에서는 직선 보 이론을, 파이프 곡률 반경이 작은 부분에서는 부분적으로 곡선 보 이론을 사용하고 있는 것으로 판단되며 특별히 곡률이 큰 파이프를 해석할 경우 굽힘 응력 집중 현상을 반영하도록 별도의 고려(Park and Bae, 2011)가 필요한 것으로 사료된다.

- 루프 코너부의 곡률 반경이 증가함에 따라 루프 코너부의 최대 응력 값은 가파르게 감소하다가 완만하게 증가하거나 거의 일정한 값을 유지하는 것으로 볼 수 있으며 루프 설계 시 코너부의 곡률 반경은 가파른 응력 감소가 멈추는 점 이후의 적절한 값을 선택하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

- 루프의 높이는 임계값 이상이 되어야 루프의 긍정적 효과를 기대할 수 있으며, 이 조건만 만족된다면 높이 증가는 최대 응력 감소에 매우 효과적이거나 폭의 증가는 전반적으로 높이 증가의 효과에는 미치지 못한다.

(2) 파이프 직선 구간의 지지점 간격이 좁을수록 즉, 지지점 수가 많을수록 최대 응력이 증가하므로 파이프 지지의 파이프의 중량을 지탱하는 범위 내에서 최소화할 필요가 있다.

(3) 루프의 종류 및 배치에 있어서, 루프는 가급적 높이를 크게 하고 공간상의 제약이 있을 경우에는 중간에서 꺾어 직각 2단 루프로 만들어도 루프의 효과는 크게 감소하지 않는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 논문에서는 파이프 루프의 설계 시 현장에서 주로 사용하는 파이프 구조해석 전용 소프트웨어인 CAESAR-II의 특성을 파악하기 위해 CAESAR-II와 MSC/NASTRAN의 해석 결과를 비교 검토하는 시험 해석과 CAESAR-II를 이용하여 파이프 루프의 다양한 설계 변수의 구조특성에 대한 영향을 파악하기 위한 파라미터 연구 해석이라는 두 종류의 해석을 수행하고 그로부터 얻은 주요 결과를 요약하여 제시함으로써 CAESAR-II를 이용한 파이프 루프 설계에 유용한 지침을 제시하였다. 특히 CAESAR-II는 파이프 루프 코너부 곡률의 영향을 제대로 반영하고 있지 못하기 때문에 곡률 반경이 작은 경우의 해석을 위해서는 향후 이에 대한 보완이 이루어질 필요가 있음을 지적하고자 한다.

참고문헌

- American Bureau of Shipping (ABS), 2008. Rules for Building and Classing Steel Vessels. Part 4, Chapter 6, Section 2, 389.
- CAESAR-II, 2009. User's Manual. Version 5.2, COADE/Engineering Physics Software, Inc.
- Japanese Industrial Standard (JIS), 1988. JIS G 3454-1988; Carbon Steel Pipes for Pressure Service.
- MSC.Nastran, 2005. Quick Reference Guide: Volume 1, 2, MSC Software Corporation.
- Park, C.M., Bae, B.I., 2010. A Study on the Structural Analysis of Curved Portions of Pipe Loops Used in Ships. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(5), 88-93.
- Park, C.M., Bae, B.I., 2011. Stress Analysis of Curved Portions of Pipe Loops Used in Ships and Offshore Structures. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(5), 52-57.
- Park, C.M., Yang, P.D.C., 2009. Development of Design Formulas for Pipe Loops Used in Ships Considering the Curvature of Corners. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(4), 91-99.
- Pytel, A., Kiusalaas, J., 2003. *Mechanics of Materials*. Thomson Learning Academic Resource Center, 407-411.