

내압 및 온도조건을 고려한 Elbow부가 있는 원형배관의 진동해석

Vibration Analysis of Pipe with Elbow subject to Internal Pressure and Temperature

김월태* · 이현승** · 이영신** · 조택동*** · 신성기***

Woel-Tae Kim, Hyun-Seung Lee, Young-Shin Lee, Taek-Dong Cho, Sung-Ki Shin

Key Words : Elbow(굴곡), Pipe(파이프, 배관), Natural frequency (고유진동수), Internal pressure(내압), Temperature(온도)

ABSTRACT

Vibration analysis of pipe with Elbow subject to internal pressure and temperature is studied through a commercial finite element analysis tool. The natural frequency of Elbow increased very slightly as internal pressure increases. Meanwhile, the frequency of Elbow decreased as temperature increases. It is shown that frequency deviation caused by temperature was greater than that caused by pressure. As the length of Elbows increases, frequency deviation by temperature grew rapidly, but frequency deviation by pressure was not so high. It is concluded that more concern needs to be focused on temperature rather than on pressure in terms of natural frequency.

1. 서 론

금속 배관은 원자력 발전소, 유화학 공장, 상수도관 등 대부분의 산업설비에서 유체의 전달을 목적으로 설치되며 유체의 흐름 방향이 변하는 부분에 Elbow가 설치된다. 이러한 배관계의 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해 사용 유체의 온도 압력에서의 동특성 해석이 필요하다. 최근 반원형 곡선관에 대한 동적 해석⁽¹⁾, 직관 및 Elbow의 표면균열 해석방법⁽²⁾, 가압 배관에서의 비선형 변형을 Ratcheting에 관한 비선형 유한요소⁽³⁾, 가압 Elbow의 탄소성 굽힘⁽⁴⁾ 등에 관한 연구가 활발히 수행되고 있는 등 고온 고압 배관의 안전성에 관한 연구가 꾸준히 수행되어 오고 있다.

본 연구에서는 유한요소 해석 방법⁽⁵⁾을 이용하여 배관계에 설치된 Elbow가 내압 및 온도에 따라 어떤 진동 특성을 보이는 지와, Elbow에 직관이 연결되었을 경우의 내압 및 온도에 따른 진동 특성을 고찰하였다. 직선 배관과 Elbow의 연결부는 재질상의 불연속부분이 없다고 가정하였다.

2. 유한요소해석

연구 대상 Elbow는 내경이 10cm, 두께 7cm이며 45°, 90° 및 180°의 세 가지 유형의 Elbow를 선정하였다. 해석 방법은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 요소명은 10 절점 사각 구조 솔리드 요소인 Solid92를 채택하였으며, 계산에 사용된 물성치는 탄성계수 193GPa, 포와송비 0.29, 밀도는 8000kg/m³로 적용하였다.

2.1 유한요소해석을 위한 모델링

유한요소해석을 위하여 세 가지 유형의 Elbow에 대해 모델링을 하였다. <그림1>은 각 유형의 Elbow 해석을 위한 3D모델링 및 Mesh 구성결과이다. 45° Elbow는 체적이 2.81E-4 m³이며 질량은 2.25kg이고 원형관의 중심곡선의 길이는 0.12m이다. 절점수는 38,996개이고, 총 요소수는 19,988개이다. 90° Elbow는 체적이 5.28E-4 m³이며 질량은 4.22kg이고 원형관의 중심곡선의 길이는 0.22m이다. 절점수는 45,114개이고, 요소수는 23,683개이다. 180° Elbow는 체적이 10.57E-4 m³이며 질량은 8.45kg이고 원형관의 중심곡선의 길이는 0.44m이다. 절점수는 71,628개이고, 요소수는 37,441개이다.

<그림2>는 각 Elbow에 대하여 직선 배관이 연결되었을 경우에 대한 유한요소 모델링 및 Mesh 구성을 보여주고 있다.

* 한국원자력안전기술원
E-mail : wtkim@kins.re.kr
Tel: (042) 888-0226

** 충남대학교

*** (주)한빛파워서비스

해석의 편의상 직선 배관과 Elbow의 총 길이를 50cm로 정하였다. 각 Elbow의 체적 및 질량은 각각 $11.76E-4 \text{ m}^3$ 와 9.41kg로 동일하다. 45° Elbow의 유한요소 절점수는 24,139개이고 요소수는 11,968개이다. 90° Elbow의 절점수는 23,394개이고, 요소수는 11,589개이며, 180° Elbow의 절점수는 23,542개이고, 요소수는 11,666개이다. Elbow만으로 구성된 유한요소 모델과 직선 배관이 연결된 유한요소 모델의 비교 시 증가된 질량과 길이는 <표1>과 같다.

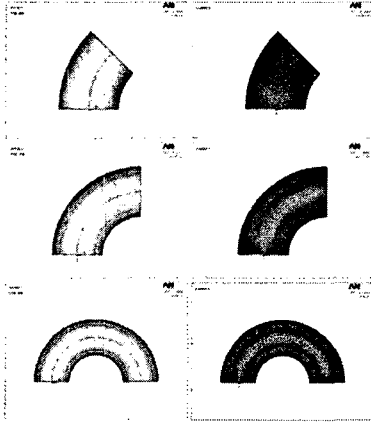


Fig. 1. FEM model and mesh with varying elbow angle (elbow only)

Table 1. Increased length and weight of pipe connected elbow when compared with elbow only model

	45° Elbow	90° Elbow	180° Elbow
length	+38cm	+28cm	+6cm
weight	+7.16kg	+5.19kg	+0.96kg

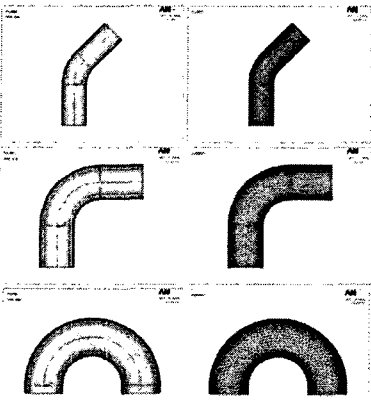


Fig. 2. FEM model and mesh with varying elbow angle (elbow with extended pipe)

2.2 형상에 따른 Elbow 진동해석

Elbow만이 있을 경우의 Free-Free 경계조건에서의 형상별 고유진동수 해석결과를 <표2> 및 <그림3>에 도시하였다. Elbow와 직선 배관이 연결된 경우의 Clamped- Clamped 경계조건에서의 형상별 고유진동수 해석결과를 <표2> 및 <그림4>에 도시하였다. 45° Elbow의 경우에 1차에서 4차 모드까지의 고유진동수는 차수가 증가함에 따라 약간씩 증가하다가 5차 모드에서 두 배 이상의 큰 폭으로 증가하고 있으며 5차에서 8차까지는 점진적으로 상승하다가 다시 9차 모드에서 큰 증가폭을 보이고 있다. 즉, 1차에서 4차까지는 1,624~1,975 Hz 범위의 진동수를 보였고, 5차에서 8차까지는 4,436~5,059 Hz의 진동수 범위를 보였으며, 9차에서 14차 모드에서는 7,878~9,042 Hz의 진동수를 보였다. 그러나 Elbow의 각도가 커질수록 이러한 큰 폭의 상승 경향이 줄어들었으며 진동 모드가 증가할수록 점진적으로 고유진동수 증가함을 보였다.

또한 직선 배관이 연결되지 않은 경우 90° Elbow에서의 1차 및 2차 모드의 고유진동수가 45° Elbow에서의 그것보다 높게 나타났다. 그러나 직선 배관이 연결된 경우에는 45° Elbow의 1,2차 고유진동수가 더 큼이 확인되었다. 직선 배관이 없는 경우에 3차 이상의 모드에서는 동일 차수에서의 고유진동수는 45° Elbow가 가장 높고 다음이 90°, 180° Elbow순으로 낮아졌다. 그러나 직선 배관이 연결된 경우에는 3차 이상의 모드에서 각도별 고유진동수의 고저는 일관성이 없음을 보였다.

Table 2. Natural Frequency of each Elbow with and without Pipe connected

Mode No.	45° Elbow		90° Elbow		180° Elbow	
	Elbow Only	Elbow w/ pipe	Elbow Only	Elbow w/ pipe	Elbow Only	Elbow w/ pipe
1	1623.9	1236.1	1695.4	958.7	1030.0	860.5
2	1624.9	1382.7	1710.1	1342.4	1431.0	1361.7
3	1937.0	1563.9	1750.7	1563.4	1566.0	1472.4
4	1974.8	1564.8	1774.6	1580.5	1666.6	1596.7
5	4435.8	1672.0	3481.5	1684.0	1911.7	1796.1
6	4437.0	1690.2	3483.2	1696.6	1965.3	1835.5
7	5059.7	2727.1	4619.8	2375.6	2861.0	2423.6
8	5059.8	2734.7	4621.9	2633.7	2924.7	2546.8
9	7878.1	2747.1	5432.1	3017.2	3498.7	3073.3
10	7879.5	2871.6	5459.7	3423.5	3875.4	3711.5
11	8648.0	2965.8	5727.7	3584.5	4137.7	3721.8
12	8652.5	4195.4	5728.8	4106.1	4157.8	3775.5
13	9041.8	4199.3	7050.8	4178.0	4169.0	3945.8
14	9042.3	4330.4	7095.7	4231.1	4651.8	4146.9

한편 배관이 연결된 경우에는 배관이 연결되지 않을 경우에 비해 질량의 증가로 고유진동수는 전반적으로 낮아짐을 보였다. 45° Elbow의 경우 직선 배관이 연결되지 않은 경우와 달리 1차에서 6차 진동 모드까지 완만한 고유진동수 증가를 보이다가 7차 모드에서 큰 상승폭을 보이고 있

고, 이후로 11차 모드까지는 완만한 상승폭을 보이다가 12차 모드에서 다시 큰 폭의 상승을 보이고 있다. 그러나 Elbow 각도가 커질수록 상승폭은 완만하였다. 이는 직선 배관이 부착되지 않은 경우와 유사한 경향임을 알 수 있었다.

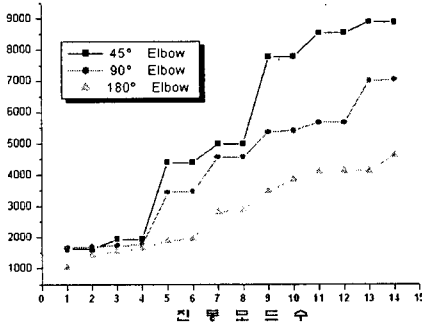


Fig. 3. Natural Frequency with varying Elbow Angle(Hz)

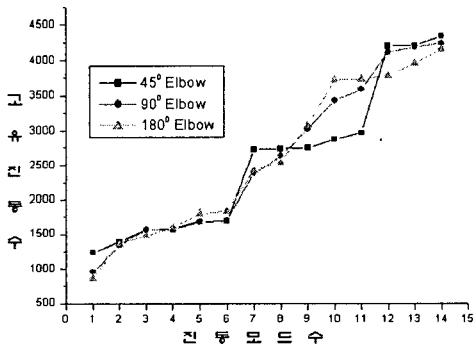


Fig. 4. Natural Frequency with varying Elbow Angle (Hz) (pipe connected)

2.3 내압을 받는 경우의 고유진동수 변화

45° Elbow에 내압이 가해질 경우에 고유진동수에 미치는 영향을 확인하기 위해 직선 배관이 연결되지 않은 경우와 연결된 경우에 대해 0MPa, 2MPa, 4MPa, 6MPa, 8MPa, 10MPa의 내압을 부가하였다. 경계조건 clamp-clamp 상태에서의 해석 수행 결과를 <표3> 및 <표4>에 정리하였다. 표에서와 같이 내압이 증가할수록 고유진동수가 증가하나 그 폭은 상당히 미미하였다. Elbow에 직선 배관이 연결된 경우에는 내압의 증가에 따른 고유진동수 증가가 배관이 연결되지 않은 경우에 비해 약간 컸으나 이 역시 내압이 0에서 10MPa로 증가한 경우에도 약 3퍼센트 정도의 작은 증가폭을 보였다.

Table 3. Natural Frequency of 45° elbow with varying internal pressure(elbow only) (Hz)

Mode No.	0MPa	2MPa	4MPa	6MPa	8MPa	10MPa
1	6293.8	6297.0	6300.1	6303.3	6306.4	6309.5
2	6395.5	6399.1	6402.7	6406.4	6410.0	6413.6
3	7643.6	7648.0	7652.4	7656.8	7661.1	7665.5
4	8014.2	8019.5	8024.9	8030.3	8035.6	8041.0
5	9193.0	9196.3	9199.6	9203.0	9206.3	9209.6
6	10372.0	10376.0	10380.0	10384.0	10388.0	10392.0
7	10489.0	10492.0	10496.0	10500.0	10504.0	10507.0
8	10538.0	10542.0	10546.0	10550.0	10554.0	10558.0
9	11104.0	11112.0	11120.0	11128.0	11136.0	11143.0
10	11308.0	11313.0	11318.0	11324.0	11329.0	11335.0

Table 4. Natural Frequency of 45° Elbow with varying internal pressure (pipe connected) (Hz)

Mode No.	0MPa	2MPa	4MPa	6MPa	8MPa	10MPa
1	1492.6	1503.3	1513.0	1522.0	1530.3	1538.1
2	2207.4	2234.5	2253.9	2267.8	2278.1	2286.0
3	2220.8	2276.4	2331.1	2384.9	2437.6	2489.4
4	2405.9	2439.3	2478.9	2522.5	2568.5	2615.7
5	2491.6	2549.5	2606.0	2661.2	2715.2	2768.1
6	2493.0	2550.8	2607.3	2662.5	2716.5	2769.4
7	3317.7	3345.2	3371.9	3397.9	3423.4	3448.3
8	3456.6	3460.3	3464.0	3467.8	3471.5	3475.2
9	3500.3	3505.6	3510.7	3515.9	3521.1	3526.2
10	3721.9	3767.7	3812.7	3856.9	3900.4	3943.2

2.4 온도의 변화에 따른 고유진동수 변화

사용 유체의 온도가 0°C에서 300°C까지의 증가할 때 45° Elbow의 고유진동수의 변화를 고찰하였다. 경계조건을 Free-Free 상태로 해석한 결과를 <그림5>에 정리하였다. 온도가 증가함에 따라 고유진동수가 감소함을 알 수 있었다. 그러나 각 온도별로는 1차 모드에서 4차모드까지 점진적으로 증가하다가 5차 모드에서 큰 폭의 상승을 나타냈으며 다시 8차 모드까지 완만한 고유진동수 상승을 보이다가 9차 모드에서 다시 다소 큰 폭의 상승을 보임을 확인하였다. 이러한 경향은 내압 및 온도가 부가되지 않은 45° Elbow 해석결과와 유사하였다. 온도가 부가되지 않았을 경우와 비교하면, 온도가 부가될 경우에 전반적으로 약 1퍼센트 정도 고유진동수가 감소함을 보였다.

1차에서 4차 모드까지는 동일 차수 모드에서 Elbow만의 고유진동수가 배관이 연결된 경우의 고유진동수보다 높게 나타났으나 5차 이상의 모드에서는 오히려 배관이 연결된 경우의 고유진동수가 Elbow만의 고유진동수보다 높

게 나타났다.

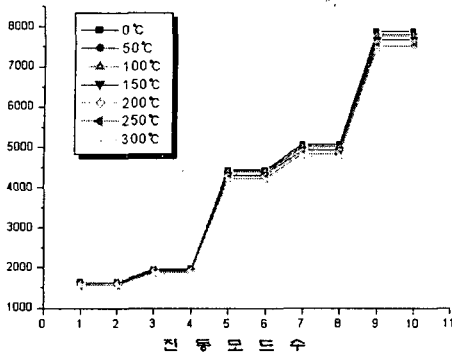


Fig. 5. Natural Frequency of 45° Elbow with varying fluid temperature (Hz)

<그림6>은 직관이 연결된 경우에 온도가 증가함에 따라 고유진동수의 감소량을 보이고 있다. 감소량의 기준은 0°C일 때의 고유진동수로 삼았다. 온도가 증가함에 따라 전반적으로 고유진동수는 낮아졌으며 감소 정도는 약 5퍼센트에서 10퍼센트 사이임을 확인하였다. 따라서 온도에 의한 고유진동수의 감소가 압력에 의한 고유진동수 약 3퍼센트보다 큰 것을 확인하였다. 압력보다 온도에 따른 변화가 큰 것은 온도에 따른 탄성계수의 변화때문으로 사료된다. 물성치를 살펴보면 0°C에서는 196GPa 정도의 탄성계수를 보이며, 300°C에서는 175GPa을 보임을 알 수 있었다.

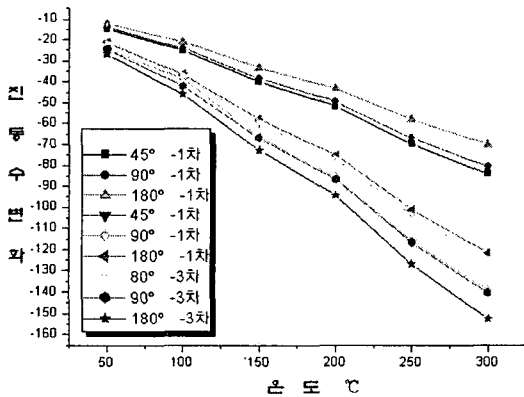


Fig. 6. Natural Frequency deviation from zero degree temperature for 45° Elbow with varying fluid temperature (Hz) (with pipe connected and clamped-clamped)

3. 결론

Elbow와 그 배관부에 대하여 내압 및 온도가 부가될 경

우의 고유진동수 변화에 대하여 고찰하였다. 연구 대상은 내경이 10cm, 두께 7cm이며 45°, 90° 및 180°의 세 가지 유형의 금속 Elbow 및 연결배관으로 정하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 내압이 증가할수록 고유진동수가 증가하나 그 폭은 상당히 미미하였다. Elbow에 직선 배관이 연결된 경우에는 내압의 증가에 따른 고유진동수 증가가 배관이 연결되지 않은 경우에 비해 약간 컸으나 이 역시 내압이 0에서 10Mpa로 증가한 경우에도 약 3퍼센트 정도의 작은 증가폭을 보였다.
- (2) 온도가 증가함에 따라 전반적으로 고유진동수는 낮아졌으며 감소 정도는 약 5퍼센트에서 10퍼센트 사이임을 확인하였다.
- (3) 따라서 Elbow를 가지는 배관계의 설계시 고유진동수 관점에서는 압력보다 온도 변화에 더 큰 관심을 기울일 필요가 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 전력산업 연구개발 사업인 공기구동밸브 성능평가 프로그램 개발사업의 위탁과제의 일부로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 정두한, 정진태, 2003, "유체를 수송하는 반원형 곡선관의 면내운동에 대한 비선형 진동해석", 한국소음진동공학회 2003년도 춘계학술대회논문집, pp. 677-682.
- (2) 김현수, 장윤석, 진태은, 1999, "직관 및 엘보우의 표면균열 해석방법 특성 및 고찰", 한국원자력학회 '99 춘계학술대회논문집, pp. 421-426.
- (3) Yang Zhao, John D. Stevenson, and H. T. Tang, 1996, "Parametric Nonlinear Finite Element Analysis of Strain Ratcheting in Pressurized Elbows Based on Random Vibration", Shock and Vibration, Vol. 3, No. 5, pp. 373-387.
- (4) D. Boussaa, K. D. Van, P. Labbe, and H. T. Tang, 1993a, "Elastic-Plastic Bending of Pressurized Elbows", ASME PVP, Vol. 264, pp. 35-44.
- (5) ANSYS, 2001, ANSYS Structural Analytical Guide, Inc., Houston.