

# 비선형 특성을 갖는 파이프 연결부에 대한 안전성

조재웅\*, 한문식#

## A Safety about the Pipe Joint with Nonlinear Property

Jae-Ung Cho\*, Moon-Sik Han#

### ABSTRACT

Nonlinear property and contact matter are analyzed about the pipe applied with internal pressure through this study. The weakest part and its safety can be examined. Maximum equivalent stress is shown at the contact surface between bolt and nut. The value of contact stress with the pressure of 12MPa is increased 1.4 times as large as that with no pressure. The maximum contact pressure is shown at the clamp corner of the external surface on pipe. The value of contact pressure with the pressure of 12MPa is increased 1.4 times as large as that with no pressure. The radial deformation with no pressure is also increased greatly at the middle part of internal surface on pipe. But this maximum deformation on pipe with the pressure of 12MPa is shown at the part far away the support of pipe. This value is increased 5.7 times as large as that value with no pressure. As contact status, the sticking occurs most at the external surface of pipe. It also tends to occur at the contact surface between bolt and nut. At the external surface of pipe, the sticking in case of the pressure of 12MPa occurs more than that in case of no pressure.

**Key Words** : nonlinear property(비선형특성), contact pressure(접촉압력), maximum equivalent stress(최대 등가응력), radial deformation(반경 방향의 변형량), sticking(고착)

### 1. 서 론

일반적으로 강도상에 있어서 충분한 여유를 가지고 설계된 구조물에 있어서 파손이 일어나는 경우가 허다하다. 특히 구조물 중 파이프는 현재 토목, 건설분야, 원자력 분야 및 선박 및 수송 파이프 등 다양한 산업분야에 폭넓게 사용되고 있는 공업 부품 중의 하나이다. 원자력 압력 용기에서의 대형 폭발의 경우 그 위험성에 대한 안전 대책이 필요하다. 탱크 용기 내면

에 압력이 작용되어 탱크 재료의 결함에도 문제가 있을 뿐만 아니라 관 내부나 그 이음새에서의 높은 응력에 의한 파단의 가능성을 점검할 필요가 있다. 또한 유류의 송수 장치로서의 등과 같이 유체 기계를 포함한 회로에 있어서 파이프 부분에 있어서도 유류를 흘리는 경우에 있어서도 점검의 중요성이 요구되어지고 있다<sup>[1-4]</sup>. 또한 원통형 압력 용기 내부를 흐르는 관 주변의 연결 부위에서의 파열의 가능성이 높은 것으로 추정된다<sup>[5]</sup>. 파이프류의 기계부품에 대한 구조해석은 제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하고 최적설계를 하기 위한 기술로 선진국에서는 이미 해석을 통하여 널리 활용하고 있는 실정이나, 국내 관련 산업계에서는 이의 중요성을 인식하고는 있으나 아직까지 체계적인

\* 공주대학교 기계자동차공학부

# 교신저자 : 계명대학교 기계자동차공학부

E-mail : sheffhan@kmu.ac.kr

설계 및 해석기술이 확립되어 있지 못하고 다른 기계류 부품과 마찬가지로 압력파이프 종류도 성능 향상과 품질 고도화의 요구에 따라 부품 개발 시 고도의 설계 및 해석기술이 요구되고 있는 실정이다. 그러나 지금까지 대부분의 파이프에 대한 설계는 재료의 비선형성과 대변형의 특수한 성질로 인하여 시행착오에 의한 경험적인 수법이나 실험에 의존하여 왔으나, 근래에는 새로운 제품 개발시 대부분 실제 제품의 제작에 앞서 예비 설계된 치수를 바탕으로 전산시물레이션을 통하여 제품의 특성을 미리 예측하고 평가하는 CAE를 통하여 비선형 거동을 해석하는 것이 가능해짐에 따라 파이프류의 설계에 체계적이고 분석적인 방법을 이용하여 부품의 성능향상에도 크게 기여할 수 있게 되었다. 따라서 본 연구에서는 고압 압력을 받고 있는 파이프의 이음매에서의 파단에 대한 안전성을 컴퓨터 시물레이션하여 연구한다. 특히 파이프용 압력용기에서 유체가 흐르는 관을 클램프로 양 쪽으로 지지하는 경우에 있어서 그 접촉되는 관 이음새에서의 접촉 압력, 변형량 및 등가 응력들을 조사한다. 그리고 복잡한 형상의 변형 및 응력상태를 자세히 알 수 있는 유한요소법(finite element method)로서 파이프의 압력 또는 변위에 의한 형상 변화 특성을 예측하여 이를 검토하고 최대변형률 및 응력이 발생하는 취약 부위를 해석하여 그 안전성을 조사한다. 이러한 유한요소 해석은 비선형 및 접촉 문제 해석이 용이한 상용 유한요소 코드인 ANSYS를 이용한다<sup>[6]</sup>.

## 2. 본 론

본 연구에서의 해석모델의 유한요소분할 모양과 치수는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

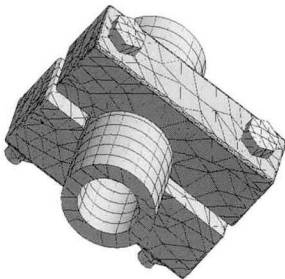


Fig. 1 Finite element discretization of the Model

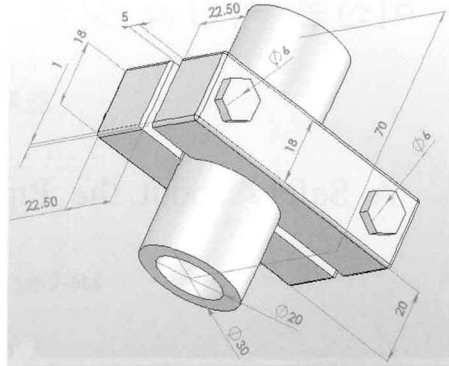


Fig. 2 Dimensions of the Model (Unit : mm)

모델의 절점 및 요소들의 개수는 각각 15752 및 7883이며 시험편의 재료로서는 파이프는 황동이고 나머지 부분은 구조용 강으로서 그 물성치는 Table 1 및 Table 2에 나타나 있다<sup>[6]</sup>. 본 연구에 있어서는 파이프 이음부에서 클램프를 조이는 볼트의 체결력과 파이프 내에 작용하는 압력으로 인한 변형량 및 등가 응력, 파이프 내부의 마찰 응력과 접촉 압력을 해석한다.

Table 1 Mechanical properties of the Structural Steel

Properties	Unit	Values
Young's Modulus	MPa	$2 \times 10^5$
Poisson's Ratio	-	0.3
Mass Density	kg/mm <sup>3</sup>	$7.85 \times 10^{-6}$
Tensile Yield	MPa	250
Compressive Yield	MPa	250
Tensile Ultimate	MPa	460

Table 2 Mechanical properties of the Brass

Properties	Unit	Values
Young's Modulus	MPa	$1.1 \times 10^5$
Poisson's Ratio	-	0.34
Mass Density	kg/mm <sup>3</sup>	$8.3 \times 10^{-6}$
Tensile Yield	MPa	280
Compressive Yield	MPa	280
Tensile Ultimate	MPa	430

Fig. 3은 모델의 구속 조건들로서 하중으로서 클램프 양쪽에 2개의 볼트들에서 체결력 1200N 으로 작용하고 파이프 한쪽 면을 고정한다. 그리고 파이프 내면에는 12MPa의 내부 압력을 받는 것으로 한다. 또한 접촉 조건으로서 Fig. 4와 같이 Contact Region 5 및 8인 파이프 바깥쪽 면과 클램프의 구멍 사이에서는 마찰계수가 0.4로 작용되고, Contact Region 1, 3, 6 및 7인 볼트축과 클램프 구멍 사이에는 접촉이 계속 유지되는 조건을 준다. 나머지 접촉 구간 즉, Contact Region 2 및 4인 너트와 클램프 및 Contact Region 9 및 10인 볼트와 너트는 결합이 되어 있는 것으로 정의한다.

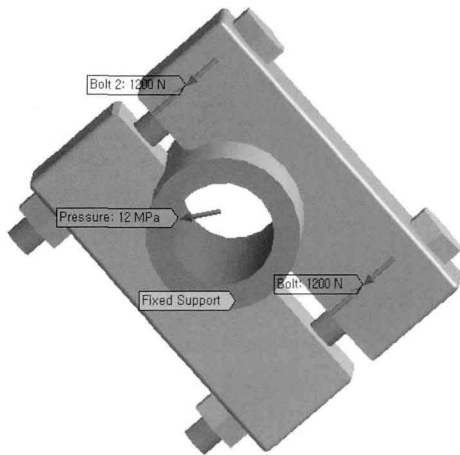


Fig. 3 Boundary conditions of the Model

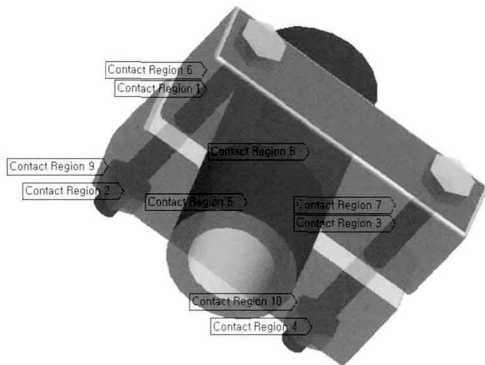
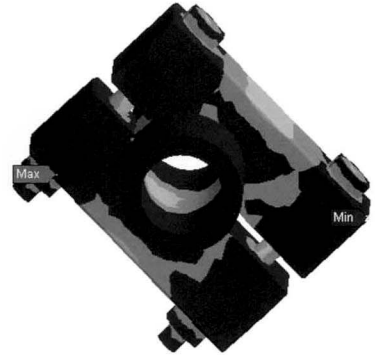
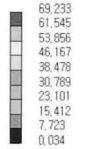


Fig. 4 Contact conditions

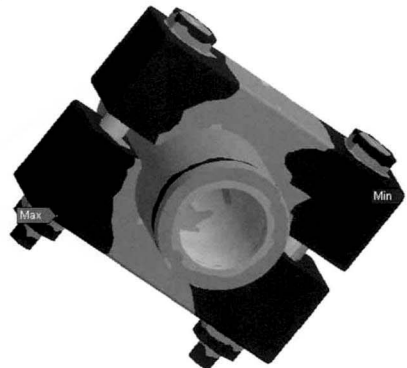
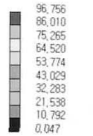
Fig. 5는 파이프 내면에 압력이 없는 경우 (a) 및 내면에 압력 12MPa이 작용하는 경우 (b)에 대하여 각 부분에서 나타난 등가응력선도들을 비교한 것이다. (a) 및 (b) 경우 공히 볼트 아래와 너트와의 접촉 부분에서 최대의 등가 응력 69.233 및 96.756MPa이 각각 작용되는 것으로 나타났고 파이프 내면에서는 23.101 및 53.774MPa이 되었다. (b)의 경우가 (a)의 경우보다 너트의 접촉 부분에서 등가응력이 1.4배 정도 증가하였다. 그리고 파이프 내면에서는 (b)의 경우가 (a)의 경우보다 2.3배 정도 증가하였다.

Equivalent (von-Mises) Stress  
MPa  
Max: 6.923e+001  
Min: 3.440e-002  
2007/3/30 20:10



(a) The pipe applied without internal pressure

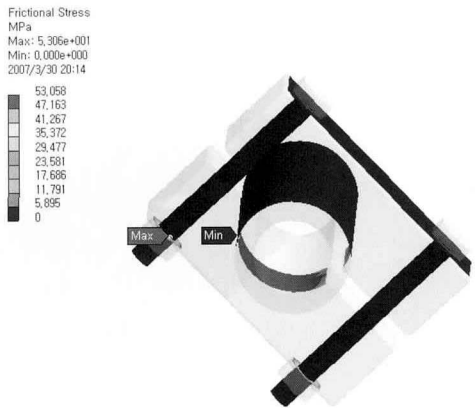
Equivalent (von-Mises) Stress  
MPa  
Max: 9.675e+001  
Min: 4.682e-002  
2007/3/30 19:58



(b) The pipe applied with the internal pressure of 12MPa

Fig. 5 Equivalent stress contour line

Fig. 6은 파이프 내면에 압력이 없는 경우 (a) 및 내면에 압력 12MPa이 작용하는 경우 (b)에 대하여 각 접촉부분에서 나타난 접촉응력들을 비교한 것이다. 역시 볼트 아래와 너트와의 접촉 부분에서 최대의 접촉 응력 53.058 및 74.532MPa이 각각 작용되는 것으로 나타났다. 그리고 (b)의 경우가 (a)의 경우보다 너트의 접촉 부분에서 접촉응력이 1.4배 정도 증가하였다. 또한 파이프 바깥쪽 면에서는 클램프 모서리의 내면 접촉 부분에서 23.581 및 33.126MPa이 되었고 (b)의 경우가 (a)의 경우보다 1.4배 정도 증가하였다.



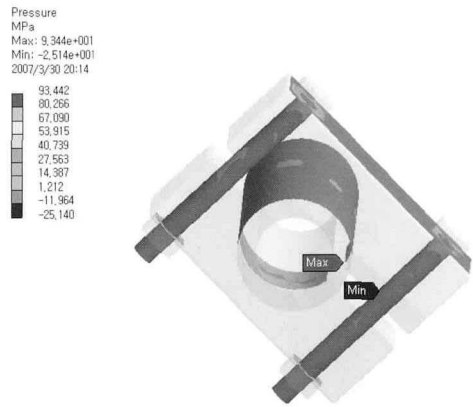
(a) The pipe applied without internal pressure



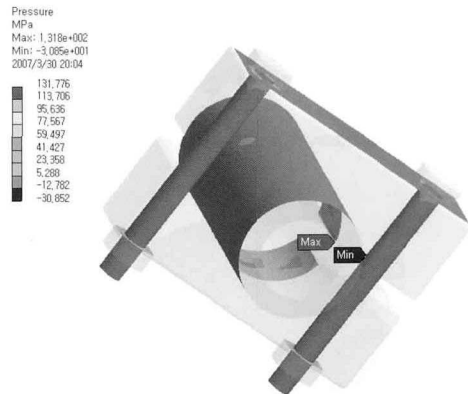
(b) The pipe applied with the internal pressure of 12MPa

Fig. 6 Contact stress contour line

Fig. 7은 파이프에서의 압력이 없는 경우 (a) 및 내면에 압력 12MPa이 작용하는 경우 (b)에 대하여 각 접촉부분에서 나타난 접촉압력들을 비교한 이다. 최대의 접촉압력은 93.442 및 131.776MPa로 각각 나타났다. (a) 나 (b)의 경우 공히 파이프 바깥쪽 면에서는 클램프 모서리의 내면 접촉 부분에서 가장 크게 나타났고, 압력을 받는 경우 (b)가 (a)의 경우보다 접촉 압력이 1.4배 정도 증가하였다.



(a) The pipe applied without internal pressure

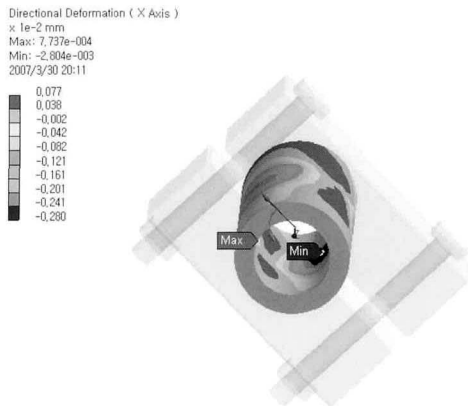


(b) The pipe applied with the internal pressure of 12MPa

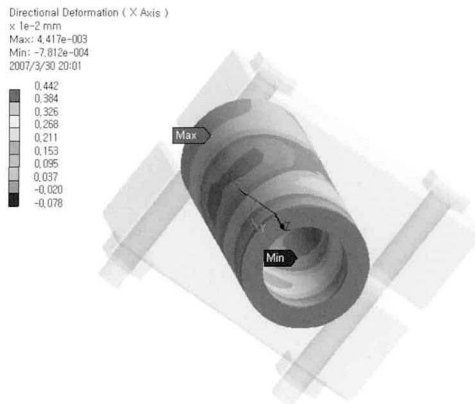
Fig. 7 Contact pressure contour line

Fig. 8은 파이프에서의 압력이 없는 경우 (a) 및 내면에 압력 12MPa이 작용하는 경우 (b)에 대하여 각 부분에서 나타난 반경 방향의 변형량들을 비교한 것

이다. 최대의 변형량은  $7.737 \times 10^{-4} \text{mm}$  및  $4.417 \times 10^{-3} \text{mm}$ 로 각각 나타났다. 압력이 없는 경우의 (a)에서는 파이프의 중간 부분에서 변형량이 크게 나타났지만, 압력을 받는 경우 (b)에서는 파이프의 지지부에서 가장 떨어져 있는 부분에서 그 변형량이 크게 나타남을 알 수 있었다. 역시 (b)의 경우가 (a)의 경우보다 변형량이 5.7배 정도 증가하였다.



(a) The pipe applied without internal pressure



(b) The pipe applied with the internal pressure of 12MPa  
**Fig. 8 Radial deformation contour line**

Fig. 9는 파이프에서의 압력이 없는 경우 (a) 및 내면에 압력 12MPa이 작용하는 경우 (b)에 대하여 각 접촉면들의 접촉 상태들을 확인하였다. 압력이 없는 경우 (a)와 압력이 있는 경우 공히 파이프 바깥쪽 면

에서 가장 고착이 많이 생기고, 볼트 아래와 너트와의 접촉 부분에서도 고착이 되는 경향이 있다. 그리고 (b)의 경우가 (a)의 경우보다 파이프 바깥쪽 면에서 고착이 되는 부분이 더 생김을 알 수 있었다.



(a) The pipe applied without internal pressure



(b) The pipe applied with the internal pressure of 12MPa  
**Fig. 9 Contact state of the contact surfaces**

### 3. 결 론

본 연구를 통하여 내압을 받는 파이프의 변위에 의한 형상 변화 특성을 검토하고 비선형 및 접촉 문제로서 해석하여 그 취약 부위를 파악하여 그 안전성을 조사하였다. 이러한 결과들을 이용하여 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

1. 볼트 아래와 너트와의 접촉 부분에서 최대의 등가

응력이 나타났고 파이프 내면에 압력 12MPa이 작용하는 경우가 압력이 없는 경우보다 너트의 접촉 부분에서 접촉 응력이 1.4배 정도 증가한다.

2. 파이프 바깥쪽 면에서는 클램프 모서리의 내면 접촉 부분에서 최대의 접촉 압력이 나타나고 내면에 압력 12MPa이 작용하는 경우가 압력이 없는 경우보다 1.4배 정도 증가한다.
3. 파이프 내면에 압력이 없는 경우에는 파이프의 중간 부분에서 반경 방향의 변형량이 크게 나타나지만, 내면에 12MPa의 압력을 받는 경우 파이프의 지지부에서 가장 떨어져 있는 부분에서 그 변형량이 압력이 없는 경우보다 5.7배 정도 더 크게 나타남을 알 수 있다.
4. 각 접촉면들의 접촉 상태는 파이프 바깥쪽 면에서 가장 고착이 많이 생기고, 볼트 아래와 너트와의 접촉 부분에서도 고착이 되는 경향이 있다. 그리고 파이프의 내면에 압력 12MPa이 있는 경우가 압력이 없는 경우보다 파이프 바깥쪽 면에서 고착이 되는 부분이 더 생김을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. 장창희, 정일석 외 3인, “원자로 압력용기의 수명 관리 건전성 확보 방안”, 98 춘계원자력학회, 한국원자력학회, pp.98, 1998.
2. 송택호, 장창희, “중수로 압력관 두께 변화 예측”, 98 춘계원자력학회, 한국원자력학회, pp. 789-794, 1998.
3. 김영진, 정해동, “원자력발전소 압력용기 및 배관 계통의 건전성 평가”, 대한기계학회, 대한기계학회지 제31권 제3호, pp.244-250, 1991.
4. 강희찬, 최규재, 유경현, 조철용, 강민철, 김환, “차량용 압력용기시스템의 내구시험 평가”, 한국자동차공학회 광주호남지부 춘계학술대회 논문집, pp.19-23, 2006.
5. 최선영, 최영환, “국내 안전등급 배관에 대한 손상 사례 분석”, 대한기계학회, 대한기계학회 춘추학술대회, 대한기계학회 2003년 춘계학술대회논문집, pp.617-621, 2003. 6. John Swanson, ANSYS Workbench, Ansys. Inc., 2007.