



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

내압이 작용하는 감육 배관의
파괴거동 평가



2011년 8월

부경대학교 대학원

재료공학과

권 효 성

공학석사 학위논문

내압이 작용하는 감육 배관의
파괴거동 평가

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2011년 8월

부경대학교 대학원

재료공학과

권 효 성

권효성의 공학석사 학위논문을 인준함

2011년 6월



주 심 공학박사 문 창 권 (인)

위 원 공학박사 김 진 욱 (인)

위 원 공학박사 남 기 우 (인)

목 차

Abstract

1. 서 론	1
2. 이론적 배경	3
2.1 유한요소해석	3
2.2 유한요소해석의 일반적인 절차	3
2.2.1 해석 계획의 수립	4
2.2.2 유한요소모델의 생성	4
2.2.3 하중의 적용 및 해석	5
2.2.4 해석결과의 출력 및 검증	5
2.3 스트레인 게이지(Strain gage)	6
2.3.1 스트레인 게이지의 구조	6
2.3.2 스트레인 게이지의 원리	7
2.4. 스트레인 게이지 데이터 처리방법	9
2.4.1 Amplifier	9
2.4.2 A/D Converter	10
3. 재료 및 실험 방법	13
3.1 배관 실험 재료	13

3.2 감육부 도입	14
3.3 실험방법	14
3.4 해석방법	15
4. 결과 및 고찰	21
4.1 감육 깊이에 따른 과열압력	21
4.2 감육 깊이에 따른 변형률	23
4.3 감육부 면적에 따른 과열압력	28
4.4 감육부 두께비에 따른 배관의 안전성	36
4.5 감육부 배관의 음향방출 특성	39
4.6 감육부의 과열형상	41
5. 결론	44
참고문헌	46

Evaluation of Behavior of Failure on wall thinned pipe under internal pressure

Hyo seong Gwon

Department of Material science & Engineering

Graduate School

Pukyong National University

Abstract

Fracture behavior and pipe strength are very important to the integrity of energy plants, and ocean structures. The pipes of energy plants and ocean structures are subject to local wall thinning, resulting from severe erosion-corrosion damage. Therefore, evaluation of failure pressure and fracture behavior of pipes in energy plants, ocean structures must be needed for getting integrity of them. In this study, the pipe failure tests were performed on carbon steel pipe with various local wall thinning shapes, wall thinning length, wall thinning depth. The tests were conducted under internal pressure. The results of tests showed that failure mode of wall thinned pipe depended on magnitude of internal pressure and wall thinning length as well as wall thinning depth. The circumferential strain of wall thinned pipe was measured by using strain gage and compared with that estimated by using finite element analyses(FEA). FEA could estimate the precise elastic circumferential strain but could not estimate the precise plastic circumferential strain. When circumferential strain was over 0.2%, failure of wall thinned pipe began. And twice of pressure at 0.2% circumferential strain was needed to burst pipe with $t/T=0.1$, $L=102$ mm. When the pressure was reached at failure pressure, wall thinned area of STS370 pipe burst as a result of plastic behavior with large plastic deformation. Acoustic emission

has been widely used in various fields because of its extreme sensitivity, dynamic detection ability and location of growing defects. In this study we also investigated Acoustic emission signal by burst test. The AE signals began to be detected when circumferential strain was over 0.2% at yield region, plastic deformation region, except elastic region and the frequency range of AE signals was 78 to 351 kHz at that time. The 78~195 kHz signals and 292~351 kHz signals concentrated yield region, plastic deformation region, respectively. The results of the dominant frequency range would be expected to be basic data that can inspect energy plant in real-time.



1. 서론

발전소 및 해양 구조물의 배관은 주로 고압용 탄소강 배관 또는 스테인리스 배관으로 되어 있다. 이와 같은 배관은 사용기간 중에 수질, 고온, 고압 및 고압 증기와 같은 유동조건하에 항상 노출되어 있다. 이들 배관은 부식과 침식(erosion-corrosion)에 의한 내벽에서 두께감소(이하 감육이라 한다)가 발생한다. 이러한 감육은 배관의 안전성에 심각한 영향을 미치며 배관의 변형 및 파열로 이어질 수 있다.

2004년 8월 9일 일본 후쿠이현 미하마 원전 3호기 2차 냉각수 계통의 파이프가 파열되는 사고가 발생하였다. Fig. 1은 미하마 원전 사고 당시 파열된 파이프의 모습을 보여주고 있다. 이 사고는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 복수관내에 2차 냉각수의 난류가 발생하여 탄소강관 내부가 감육되었고, 이로 인하여 일시에 파단이 발생하게 된 것이다. 원자력 발전소의 설계와 시공은 100% 안전성을 도모하지만, 운전 시에는 온도, 압력, 모멘트 등 여러 가지 변수가 있다. 설비의 가동 및 점검에서 100%의 기계적 확실성을 기대할 수 없다. 그러므로 배관의 안전을 유지하기 위하여 감육이 발생한 배관들에 대하여 강도와 파괴거동을 평가하는 것은 아주 중요하다.^(1,2)

본 연구에서는 STS370 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for high Pressure Service; JIS Standard G3455)을 사용하여, 장기간 사용에서 발생하는 배관의 감육을 고려하였다. 감육 깊이 및 감육 길이는 기계적인 가공으로 도입하였고, 이들 감육 배관의 내면에 내압을 부하하여 감육 형상에 따르는 파괴 거동을 평가하였다. 이 때 부하한 내압은 원자력 발전소 2차 냉각수 배관의 운전압력(Operating Pressure)과 설계압력(Design Pressure)을 적용하였다. 내압이 작용하는 감육 배관의 변형률은 감육부 중앙에 스트레인 게이지(Strain gage)를 부착하여 측정하였다. 실험에서 얻어진 파괴거동 및 변형률은 ANSYS를 통한 유한요소 해석과 비교하였다.

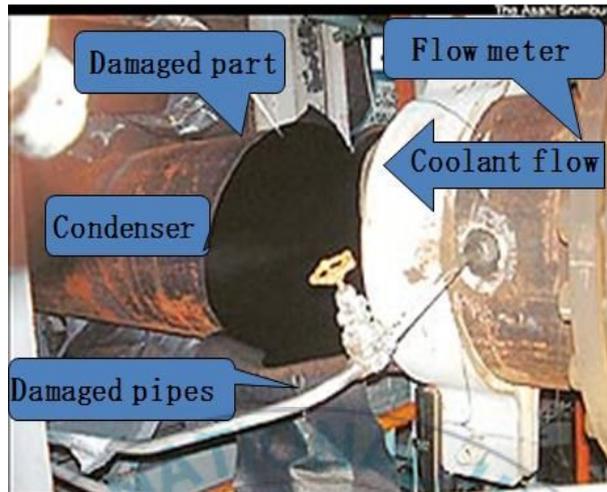


Fig. 1 Failure case of nuclear power plant at Mihama

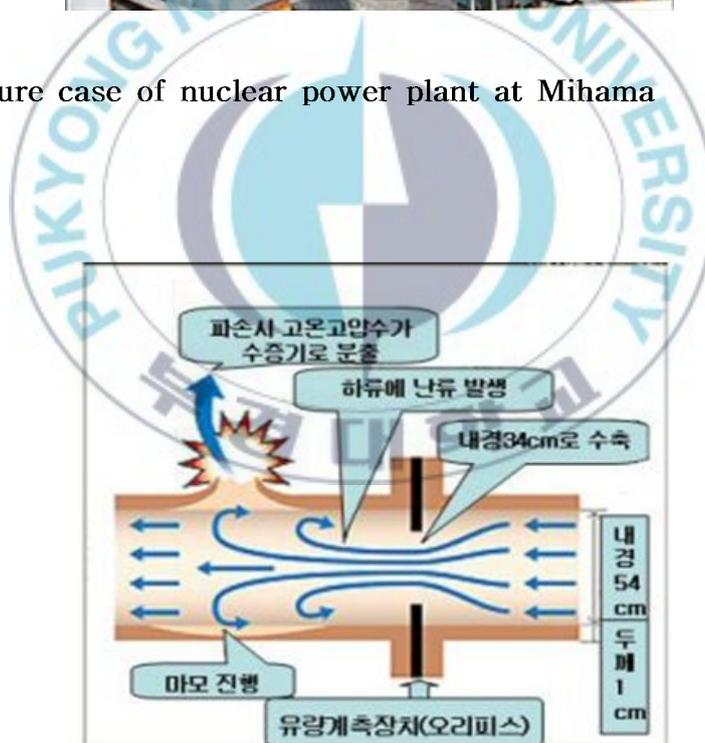


Fig. 2 Schematic diagram of failure on condenser-tube

2. 이론적 배경

2.1 유한요소해석(FEA; Finite Element Analysis)

유한요소해석(FEA; Finite Element Analysis)이란 구조물내의 무한개의 미지수점들을 유한개의 이산화 된 위치들의 절점(node)으로 나타내고, 서로 유기적인 관계를 가진 절점들로 요소(element)를 만든다. 그 다음, 전체 구조물이나 실제의 물리적 시스템을 절점들의 변위를 미지수로 하는 연립방정식으로 나타내고, 이를 계산하여 각 절점에서의 변위를 구함으로써 구조물 내의 임의의 점에서의 변위, 응력, 변형률 등의 결과 값을 수치적인 근사화를 통해 얻어내는 것을 말한다. 요소라는 것은 도식적으로는 Fig. 2.1과 같이 절점과 절점들을 연결하는 블록의 형태를 가지고 있지만 실제로는 각 절점들 간의 관계를 나타내는 정보의 집합이라고 할 수 있다. 즉 구조물 내부의 절점들과 그 절점들간의 관계를 나타내는 요소를 이용하여 각 절점의 변위를 계산한 뒤 이 값들로부터 각 요소에서의 변형률과 응력을 구하는 것이 선형 탄성 유한요소해석의 기본 개념이라 할 수 있다.⁽³⁾

2.2 유한요소해석의 일반적인 절차

유한요소해석의 절차는 반드시 선행되어야 하는 순서가 있으며 이 순서를 제외한 다른 세부적인 절차는 개인적인 성향, 사용하는 해석 프로그램 등에 따라 다소 변경될 수 있다. 유한요소해석의 전반적인 절차는 다음과 같이 크게 네 단계로 나누어진다.

1. 해석 계획의 수립
2. 유한요소모델의 생성
 - ① 기하모델의 생성

- ② 재료의 성질 정의
- ③ 요소망(절점, 요소)의 생성
- 3. 하중의 적용 및 해석
- 4. 해석결과의 출력 및 검증

2.2.1 해석 계획의 수립

유한요소해석을 위한 첫 번째 선행단계를 꼽으라고 하면 주어진 대상을 어떻게 간략화 할 것인지 등의 해석 계획을 세우는 것이라고 볼 수 있다. 실제 문제에 있어서 구조물을 있는 그대로 해석할 필요가 있는 경우는 거의 없으며 해석의 목표를 달성할 수 있는 가장 간단한 모델이 바로 최적의 유한요소모델이라 할 수 있다. 따라서 해석 작업에 들어가기 전에 간략화된 유한요소모델을 스케치하고 이 유한요소모델에 상응하는 경계조건 등을 찾아 두어야 한다. 해석계획을 세우는 단계에서 수행해야 하는 일들은 앞에서 언급한 모델의 간략화 외에도 여러 가지 값들의 단위를 환산하는 일도 여기에 포함된다. ANSYS뿐만 아니라 대부분의 유한요소해석 프로그램이 단위를 자동으로 환산해 주는 기능을 제공하고 있지 않으므로, 사용자가 해석에 들어가기 전에 직접 모델의 치수, 재료 물성치 등이 데이터 값을 임의의 단위로 통일하여 환산해 놓아야한다. 이 때 주의할 점은 모델의 크기가 너무 작아지지 않는 방향으로 단위를 환산하여야 한다는 것이다. 해석에서 사용되는 값들이 작게 되면 그만큼 해석결과의 정확도가 떨어지게 되므로 모델의 치수를 기준으로 재료 물성치를 환산하여 사용하는 편이 나을 것이다.

2.2.2 유한요소모델의 생성

유한요소해석에 사용되는 데이터는 구조물 경계와 내부의 절점들과 요소 데

이터들이다. 그러나 임의 구조물의 경계와 내부에 절점들을 생성하고 이 절점들을 직접 연결하여 요소를 생성하는 방법은 모델이 약간만 복잡해져도 매우 힘들어진다. 따라서 근래에는 기하모델이라는 것을 이용하여 구조물의 형상을 생성한 뒤 기하모델의 내부에 자동으로 절점과 요소들을 생성하는 방법이 주로 사용된다. 따라서 일반적으로 구조물의 형상을 정의하는 기하모델의 생성이 유한요소모델 생성단계의 첫 번째 단계라 할 수 있다. 다음은 탄성계수, 포와송비 등의 재료 물성치를 설정한다. 요소상수 및 재료 물성치는 해석에 사용되는 값이고 실제로 절점과 요소의 생성과는 아무런 관계가 없기 때문에 해석 수행 직전에만 입력하면 되지만 구조물이 여러 가지의 재료로 이루어져 있다면 구조물의 각 영역별로 각각의 재료가 어떤 것인지 설정하여야 한다.

2.2.3 하중의 적용 및 해석

원하는 유한요소모델이 완전히 생성되었다면 이제 생성된 유한요소모델에 적합한 구속조건과 하중을 적용하고 해석을 수행한다. 구속조건과 하중조건은 절점, 선, 면, 파트에 대하여 X, Y, Z축 방향, 그리고 X, Y, Z축 방향으로의 회전에 대하여 적용이 가능하다.

2.2.4 해석결과의 출력 및 검증

해석이 종료되고 나면 해석이 제대로 되었는지 검증하는 것이 필요하다. 해석은 프로그램에 입력해준 값에 대해 온전히 계산만을 수행하는 것이기 때문에 해석종료 후 나온 결과 값을 검증하는 것은 매우 중요하다. 해석 종료 후 응력 특이해 또는 과도한 변형이 발생했는지 반드시 확인해 보아야 하며 큰 응력이 발생할거라고 예상되는 부분에는 좀 더 메쉬를 조밀하게 생성하는 것이 더 정확한 결과를 얻을 수 있다. 만약 응력 특이해가 관심영역 밖에서 발생했다며 응력 특이해가 발생한 지점을 제외시키고 관심영역만을 확인할 수도

있다. 해석 도중 또는 해석 종료 후 발생하는 경고 및 에러가 발생할 수도 있다. 에러가 발생할 경우에는 메쉬 또는 구속조건을 다시 설정한 후 해석을 다시 실시해야 한다. 반면 경고만 발생한 경우에는 결과와 상관없는 에러일 경우에 해석을 다시 실시하지 않아도 된다. 하지만 에러와 경고는 최대한 발생하지 않는 것이 좋다.

2.3 스트레인 게이지(Strain gage)

스트레인은 변형도 또는 변형률을 나타내며 어느 물체가 인장 또는 압축을 받을 때 원래의 길이에 대하여 늘어나거나 줄어든 길이를 비율로 표시한 값을 일컫는다. 따라서 스트레인은 단위를 갖지 않으며 굳이 단위를 표시하려면 mm/mm 등으로 표시할 수 있다. 이 스트레인은 주로 토목공학, 기계공학, 건축공학, 항공공학, 조선공학 등 구조물이나 기계요소의 해석과 설계를 다루는 분야에서 이들 구조요소가 외부의 힘을 받아 변형이 발생할 때에 사용되는 용어이다. 스트레인게이지는 전기식으로 측정하는 전기식 스트레인게이지와 기계식으로 측정하는 기계식 스트레인게이지의 2종류로 구분할 수 있다. 전기식 스트레인 게이지는 구조체가 변형을 일으킬 때에 부착된 스트레인게이지의 전기적 저항이 변하여 이로부터 변형률을 측정하는 것이며, 기계식 스트레인 게이지는 두 점 사이의 미소한 거리변화를 기계적으로 측정하여 구조체의 변형률을 측정하는 것이다. 이 스트레인게이지의 개발로 인하여 구조체의 변형 상태를 정밀하게 측정할 수 있게 되었으며 이 변형률에 의하여 응력을 구할 수 있다. ^(4,5)

2.3.1 스트레인게이지의 구조

스트레인 게이지는 크게 Strain Sensing Alloys부와 Backing부, Tab부로 이

루어져 있으며 그 기능은 다음과 같다.⁽⁶⁾

① Strain Sensing Alloys

실제적인 변형량을 감지하는 부분으로 여러 가닥의 저항선으로 구성되어 있어 변형량을 증폭할 수 있도록 되어 있으며 감지부의 저항선은 Wire 방식이나 Foil 방식으로 되어 있다. 그 재질은 용도에 따라서 Constantan(Ni+Cu), Nichrome(Ni+Cr), Karma(Ni+Cr+Al+Fe), 순수 Nickel, Platinum, Soft Iron, Copper 등이 있으며 보편적으로 Constantan을 많이 쓰고 있다. 최대 변형률은 6% 정도이고 Gage factor는 2.0~2.1 정도이다.

② Backing

Strain Sensing Alloys부의 형상을 유지시켜주고, 측정대상에 접촉하기 용이하도록 하며 측정물과의 절연 기능을 맡고 있다. 재질은 Polyimide나 Epoxy 등이 있고, 두께는 12~50 μm 정도이다.

③ Tab

터미널부에 결선을 용이하게 할 수 있도록 저항선보다 넓은 면으로 되어 있으며 납땀을 하는 곳이다

④ 기타

게이지를 붙일 때 수평 수직방향을 가늠할 수 있도록 Triangles grid center alignment marks가 있으며 45° 각도를 유지하는 Alignment marks가 있다.

2.3.2 스트레인게이지의 원리

스트레인을 측정하고자 하는 물체의 표면에 스트레인 게이지를 부착하고 하중을 가하여 저항의 변화를 측정하면 스트레인을 구할 수 있다. 게이지 상수(F)는 게이지의 감도로써 식(1)로써 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

스트레인게이지 원리와 응용

$$F = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}}, \frac{\Delta R}{R} = F \cdot \varepsilon \dots\dots\dots(1)$$

전기저항의 변화율은 스트레인 ε 에 비례하며 비례상수 F가 게이지 상수이고, 1.75~3.5범위의 값을 취한다. 스트레인 게이지의 출력전압은 식(2)와 같고 전기저항의 미소변화에 대하여 검류계의 전류 I_g 는 식(3)으로 표시된다.

$$e = \frac{a}{4} F \cdot V \cdot \varepsilon \dots\dots\dots(2)$$

$$I_g = \frac{\Delta R \cdot V}{R(R + R_g)} = \frac{F \cdot \varepsilon \cdot V}{R + R_g} \dots\dots\dots(3)$$

(R:게이지의 전기저항, R_g :검류계의 전기저항)

스트레인 양이 미소하기 때문에 전기저항의 변화나 검류계의 전류는 아주 작은 양이다. 그러므로 이것을 확대하기 위하여 4개의 스트레인 게이지를 이용하여 휘스톤 브리지를 구성한다. 휘스톤 브리지는 그림(휘스톤브리짓 그림번호는 미정)과 같이 저항 R_1, R_2, R_k, R_x 를 연결하고 점 a와 b사이에는 검류계 G로 연결하여 두 점 사이의 전위차를 알아볼 수 있게 한 장치이다.

이 휘스톤 브리지는 저항을 적당히 조절하여 검류계 G에 전류가 흐르지 않게 하여 평형조건을 찾는 영점법(Null-comparison Method)을 사용한다. 검류계를 a와 b점 사이에 달았을 때 검류계의 지침이 0이 된다는 것은 a와 b점 사이에 전류가 흐르지 않는다는 것을 말하며, a점과 b점은 등전위점이 되었다는 뜻이다. 이것은 $V_{ac} = I_k R_k$ 와 $V_{bc} = I_1 R_1$ 이 같다는 뜻이므로 $I_k R_k = I_1 R_1, I_x R_x = I_2 R_2$ 가 성립된다. R_1 과 R_2, R_k 와 R_x 는 서로 연결되어 있다. 검류계를 통하는 전류가 0이므로 $I_1 = I_2, I_x = I_k$ 가 되어 식(4)를 얻는다 즉 휘스톤 브리지에서 R_1

$$\frac{R_x}{R_k} = \frac{R_2}{R_1} \dots\dots\dots(4)$$

과 R_2 는 단면적이 A이고 비저항이 ρ 인 균일 저항선으로 되어 있다. 따라서 단위길이당 저항은 일정하다. 각 선분의 저항 R_1 과 R_2 는 그 길이에 비례한다. R_1 에 해당하는 선분의 길이는 l_1, R_2 에 해당하는 선분의 길이를 l_2 라 하면 $R_1,$

R_2 는 $R_1 = \rho I_1/A$, $R_2 = \rho I_2/A$ 이다. 따라서

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{(\rho I_2/A)}{(\rho I_1/A)} = \frac{I_2}{I_1} \dots\dots\dots(5)$$

식(5)를 식(3)에 대입하면 R_x 는 식(6)과 같이 된다.

$$R_x = R_k \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \dots\dots\dots(6)$$

따라서 I_1 과 I_2 를 측정하고 R_k 의 값을 이용하여 R_x 를 정확히 알 수 있다.

2.4 스트레인 게이지 데이터 처리방법

스트레인을 측정하고자 하는 구조물에 스트레인 게이지를 부착한 후 스트레인 게이지에 전원을 공급하고 회로를 구성하여 물리적인 변화를 전기적 신호로 바꾸어 변형을 측정할 수 있게 해주는 앰프(Amplifier)를 스트레인게이지와 연결한다. 그리고 앰프로부터 나오는 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸어 주는 A/D Converter를 앰프와 연결하여 이러한 디지털 신호를 디스플레이 하거나 저장할 수 있는 PC나 오실로 스코프를 A/D Converter와 연결하여 스트레인을 계측한다.

2.4.1 Amplifier

스트레인 게이지로부터 측정대상의 변형을 감지하여 저항의 변화로 바꾸어 주면 이를 전압의 변화로 바꾸어 주는 Gage Bridge 회로와 Bridge 회로에서 출력되는 미소한 전압 신호를 증폭해주는 증폭 회로로 구성되어 진다. 또한 Gage Bridge 회로에 공급되는 전원에 따라 직류 전원(DC)을 공급하는 직류 방식과 고주파수를 갖는 교류 전원(AC)을 공급하는 반송파 방식이 있다.

반송파 방식의 회로의 경우 회로가 복잡하고 Capacitance balance를 잡아야 하는 문제와 주파수 대역에 대한 제한 문제, 선형성(Linearity)이 떨어지지만

S/N 비(신호대 잡음 비)가 좋아 작은 변형률의 측정에 적합합니다. 반면 직류 방식은 회로가 간단하고 사용도 편리하며, 기술의 발달로 드리프트 특성도 좋다.

2.4.2 A/D Converter

A/D Converter는 앰프로부터 들어오는 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸어 주는 장치로 보통 PC용의 경우 내장형을 쓰고 있다. 이러한 A/D Converter는 처리속도와 채널 수, 분해능(Resolution)이 성능을 좌우한다. 처리속도는 Hz단위로 높을수록 좋고, 채널수는 동시 측정가능한 수를 말하며, 분해능은 bit 수(16bit, 32bit, 64bit)로 나타낸다. 보통의 경우 처리속도는 MHz 단위로 채널수에 반비례하고 PC용의 경우 사양에 명시된 처리속도는 디스플레이 기능을 포함하는 처리속도일 경우가 많다. 하지만 기계 시스템의 진동에너지를 갖는 주파수 영역이 보통의 경우 10~ 1KHz 정도의 범위 내에 있고, 특별한 경우도 10KHz 범위 내에 있으므로 독립된 A/D Converter 당 채널수가 제한되어 있다면 측정에 큰 문제가 되지 않겠고, 분해능의 경우 bit수가 높을수록 데이터의 로스를 낮출 수가 있어 높을수록 좋다.

데이터 측정 시 Sampling Rate와 Sampling 되는 데이터 수는 밀접한 관계를 가지고 있으며 주파수의 높낮이에 따라 고주파수와 저주파수로 나누어 측정해야 한다. 고주파수 영역을 측정하고자 한다면 동일한 조건의 사양으로 Sampling Rate를 높이고, 반면 Sampling 개수는 낮추어야 하며 또 저주파수의 영역을 측정하는 경우에는 고주파수 영역을 측정할 경우 반대의 방법으로 측정하면 된다. 만약 고주파수 영역 측정 시 Sampling Rate가 낮으면 Sampling Rate 이상의 주파수의 데이터가 잘려 나가게 되고, 저주파수 영역 측정 시 Sampling 데이터 개수가 작으면 임팩트 하중과 같은 불연속 데이터들이 잘려 나간다. 이러한 특성을 감안하여 측정하고자 하는 데이터 영역을 감안하여 처리속도와 분해능을 결정하여야 한다.

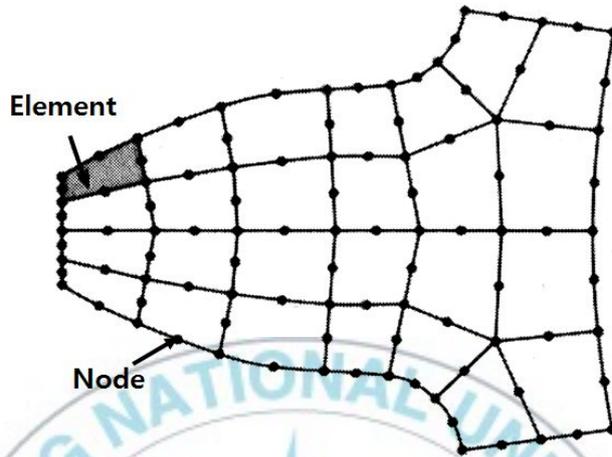


Fig. 2.1 Node and element

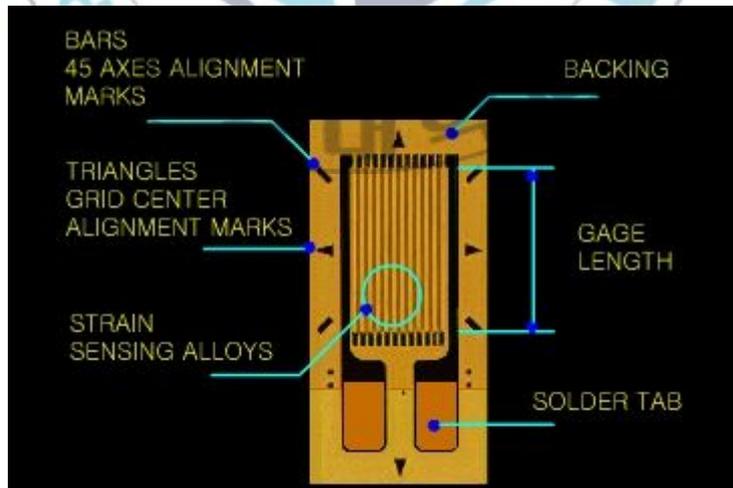


Fig. 2.2 Schematic diagram of strain gage

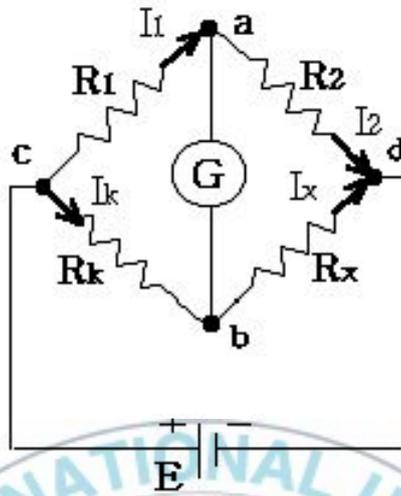
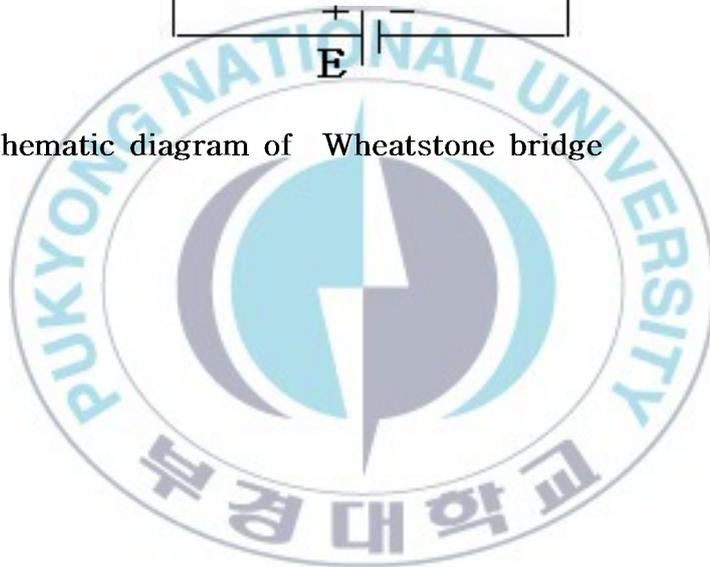


Fig. 2.3 Schematic diagram of Wheatstone bridge



3. 재료 및 실험 방법

3.1 배관 실험 재료

본 연구에서 사용된 재료는 직경 48.6 mm, 두께 5.1 mm의 STS370 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service)이다. STS370의 기계적 성질 및 화학성분은 각각 Table 3.1 과 3.2에 나타내었다. 기계적 성질은 배관에서 절취한 인장시험편을 사용하여 인장시험으로부터 얻어진 것이다.^(8,9)

Table 3.1 Mechanical properties of STS370

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation
	σ_u [MPa]	σ_y [MPa]	[%]
STS370	402	273	28

Table 3.2 Chemical composition of STS370[wt.%]

Material	C	Si	Mn	P	S
STS370	0.25	0.17	0.5	0.035	0.035

3.2 감육부 도입

감육은 내부 유체의 영향으로 부식과 침식에 의하여 배관의 내부에 발생한다. 본 연구에서는 감육의 내부 가공이 어렵고, 가공비가 비싸므로 외부에 기계가공을 통하여 인공적으로 감육부를 만들었다. 이것은 외부 감육과 내부 감육의 파괴거동이 거의 동일한 결과를 나타내기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 시험편의 형상은 Fig. 3.1에 나타낸다. Table 3.3은 감육 시험편의 치수와 시험 후의 파열 압력을 나타낸다. 여기서 d 는 감육 깊이, L 은 감육 길이, R 은 배관의 외부반경, t 는 감육부의 두께이다. 감육부의 두께는 초음파 두께 게이지를 이용하여 측정하였다.⁽¹¹⁾

3.3 실험방법

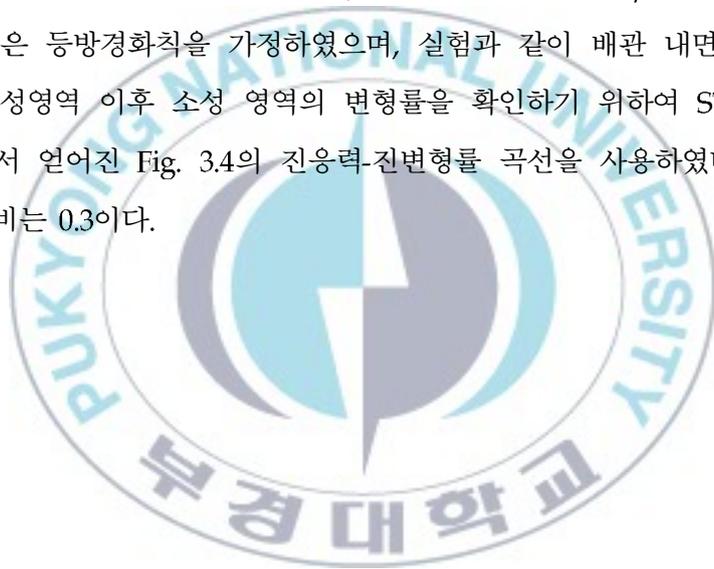
본 연구에서는 원자력 2차 냉각수 계통의 운전압력과 설계압력을 각각 6.2 MPa, 15 MPa로 가정하였다. Fig. 3.2는 배관 시험 장치의 개략도를 나타낸다. 감육배관의 양단은 나사홈을 만들어서 테프론 테이프와 함께 덮개를 이용하여 밀봉하였다. 가압은 유압용 기름을 매질로 하여 핸드펌프를 이용하여 설계압력인 15 MPa까지 가압하였다. 감육부의 변형률을 측정하기 위하여 감육부의 중앙에 스트레인 게이지를 부착하였으며, 변형률과 내부 압력은 1초당 10의 데이터를 계측하여 저장하였다.⁽¹²⁾ 그리고 배관 실험 중 발생하는 AE 신호를 실시간적으로 검출하였다.

탄성과 신호를 얻기 위해 사용된 Fracture Wave Detector(FWD; Model FM-1, Digital Wave Corp., Englewood, co.) 시스템 개략도를 Fig. 3.2에 나타내었다. 탄성과 검출을 위한 센서는 지그에 고정시킨 후 접촉매질을 바른 후, 시험편에 부착하였다. 탄성과 검출시의 Trigger와 Event 지속시간은 각각 약 8

μsec 와 $102.4 \mu\text{sec}$ 로 하였다. 얻어진 탄성과 신호는 Wavelet을 통하여 해석하였다.^(13,14)

3.4 해석방법

해석은 유한요소법 소프트웨어인 ANSYS ver.11.0을 이용하여 비선형 해석을 실시하였다. 메쉬 모델링은 육면체 20절점 요소로서 Solid 186을 사용하였다. Fig. 3.3 에는 배관유한요소 모델의 예를 나타내었으며, 대칭성을 고려하여 1/8 배관 모델을 작성하였다. 해석은 등방경화칙을 가정하였으며, 실험과 같이 배관 내면에 설계압력을 부하였다. 탄성영역 이후 소성 영역의 변형률을 확인하기 위하여 STS 370 배관의 인장 시험에서 얻어진 Fig. 3.4의 진응력-진변형률 곡선을 사용하였다. 영률은 206 GPa, 포아송비는 0.3이다.



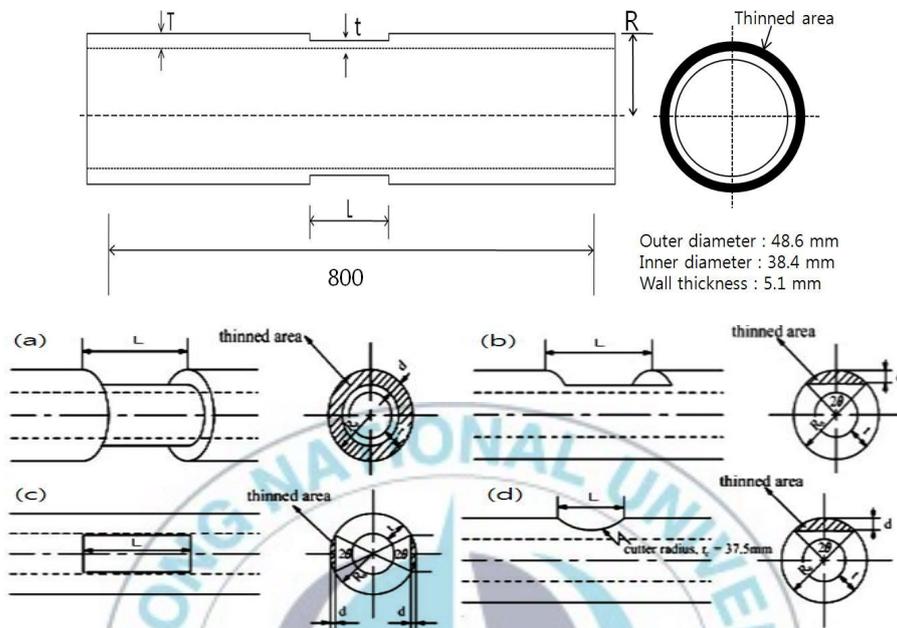


Fig. 3.1 Shape and dimensions of a pipe specimen with wall thinning
 (a) LWT-1~8, (b) LWT-10, LWT-12, (c) LWT-14, LWT-16 (d)
 LWT-18

Table 3.3 Specimen geometries and burst pressure

Specimen No.	Wall thickness T (mm)	Thinned depth d (mm)	Thinned length L (mm)	Rest of thickness t (mm)	t/T	Burst pressure P _b (MPa)	Thinned shape
LWT-1	5.1	4.54	102	0.56	0.11	8.16	360°
LWT-2	"	4.50	102	0.6	0.12	8.14	360°
LWT-3	"	4.36	102	0.74	0.15	11.6	360°
LWT-4	"	4.28	102	0.82	0.16	11.2	360°
LWT-5	"	4.10	102	1.00	0.20	(19)	360°
LWT-6	"	4.81	25	0.29	0.05	3.71	360°
LWT-7	"	4.79	25	0.31	0.06	3.82	360°
LWT-8	"	4.73	25	0.37	0.07	5.54	360°
LWT-10	"	4.79	25	0.31	0.06	6.85	1 plane
LWT-12	"	4.59	102	0.51	0.10	13.02	1 plane
LWT-14	"	4.59	102	0.51	0.10	14.55	2 plane
LWT-16	"	4.8	25	0.30	0.06	7.65	2 plane
LWT-18	"	4.76	18.53	0.34	0.07	(19)	Round

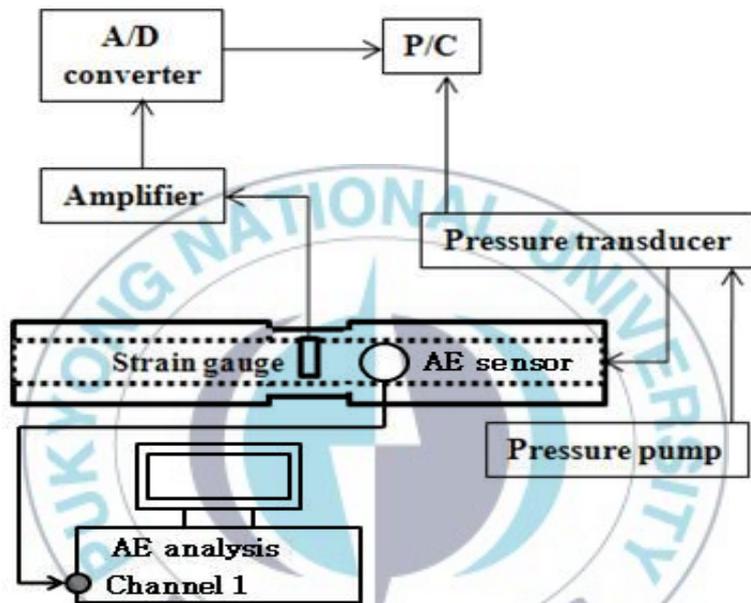
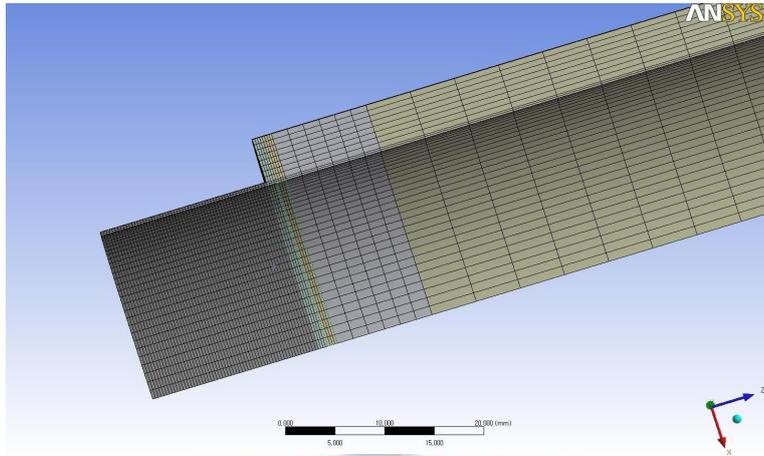
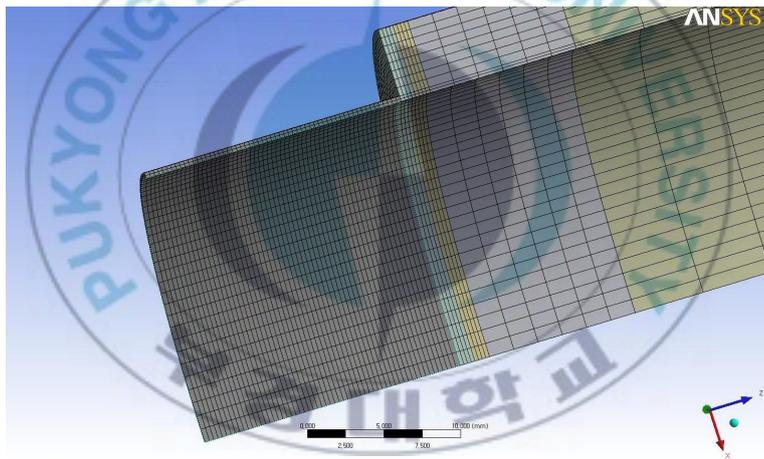


Fig. 3.2 Schematic diagram of internal pressure tester



(a) 1/8 modeling



(b) Detail of thinned area

Fig. 3.3 An example of the FEM analysis model

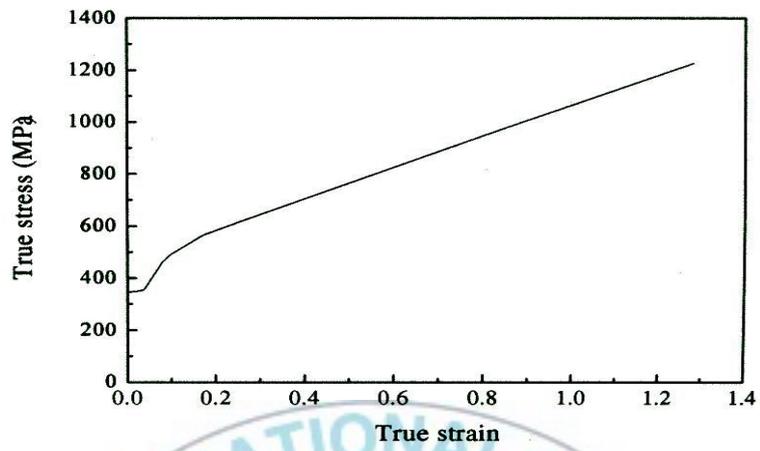


Fig. 3.4 True stress-true strain curve used in FE analysis



4. 결과 및 고찰

4.1 감육 깊이에 따른 파열압력

유체가 흐르는 배관은 유체의 흐름에 의한 압력을 받게 되고, 이 압력은 배관에 원주방향의 응력과 축방향의 응력을 발생시킨다. 본 절에서는 배관 시험장치를 이용하여 원자력 2차 냉각수 배관의 설계압력인 15 MPa를 각 시험편에 부하하였다. Fig. 4.1은 감육 깊이에 따른 파열압력의 변화를 나타내고 있다. 여기서 t/T 는 배관 두께(T)에 대하여 감육 후 남은 두께(t)의 비를 말한다. 감육 길이 $L = 25$ mm인 시험편의 경우, 감육 깊이가 깊어짐에 따라 배관의 파열압력이 점점 작아지는 것을 볼 수 있다. 감육 길이 $L = 102$ mm인 시험편의 경우에도 감육 길이 $L = 25$ mm와 마찬가지로 파열압력은 감육 깊이에 비례하여 작아지는 것을 볼 수 있으며 감육 길이 $L = 25$ mm인 경우보다 파열압력의 감소가 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 감육 깊이가 깊어질수록 배관의 두께는 감소하게 되는데, 바로 이와 같은 배관의 두께 감소로 인하여 배관의 감육부에는 비감육부에 비하여 더 큰 원주방향 응력과 축방향의 응력이 작용하게 된다. 이로 인하여 설계압력보다 더 낮은 압력에서도 배관은 파열하게 된다. 그러나 Fig. 4.1에서 “()”인 부분은 감육된 배관임에도 불구하고 설계압력 (15 MPa)에서 파열되지 않은 것을 나타낸다. 이와 같은 결과로부터 배관에 감육부가 존재할 때, 감육부의 형상에 따라서 더 큰 원주방향 응력과 축방향의 응력이 작용하기 때문에 배관의 파열압력은 감소하지만, 설계압력에서도 파열되지 않는 한계두께가 존재한다는 것을 알 수 있었다.

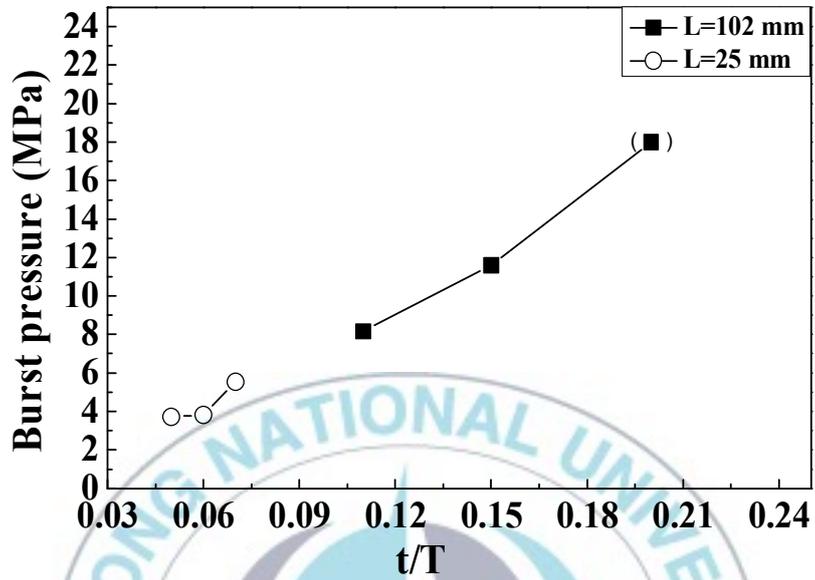


Fig. 4.1 The relationship between wall thinning depth and burst pressure under design pressure (15 MPa)

4.2 감육 깊이에 따른 변형률

본 절에서는 배관 시험 장치를 이용하여 원자력 2차 냉각수 배관의 설계압력인 15 MPa를 감육 시험편에 부하 하였을 때, 감육 배관의 압력과 변형률의 관계에 대하여 조사하였다. Fig. 4.2는 설계압력 15 MPa까지 압력을 부하하였을 때, 원주방향 변형률의 거동을 나타낸 것이다. 감육 길이 $L = 102 \text{ mm}$, 두께비 $t/T = 0.1$ 인 LWT-1과 LWT-12는 설계압력 15 MPa 이내에서 파열이 발생하였고, LWT-5와 LWT-18은 파열되지 않았다. 파열된 시험편 LWT-1과 LWT-12의 변형률의 거동을 살펴보면, 변형률이 0.2%가 될 때까지는 선형성을 유지하면서 증가하고 있다. 하지만 변형률이 0.2%를 넘어서게 되면, 그 때부터 변형률은 급격하게 증가하기 시작하며 변형률 5% 이상에서 LWT-1과 LWT-12 배관이 파열되었다. 급격한 변형률의 증가는 배관에 항복이 발생하기 시작하는 것을 의미하는 것으로 탄성영역을 넘어서 항복이 발생했기 때문에 구조물로서의 안전성과 신뢰성을 잃고 파손이 시작되었다고 판단된다. 따라서 본 실험에서는 변형률 0.2%에서 배관이 파손되었다고 가정하였다.

배관의 파손이라 판단되는 변형률 0.2% 지점의 압력은 LWT-1과 LWT-12에서 각각 6.4와 4.8 MPa이었다. 그리고 변형률 0.2% 이후 급격한 변형과 함께 각각 8.16 및 13.0 MPa에서 파열되었다. 그러나 두께비 $t/T = 0.2$ 인 LWT-5는 설계압력인 15 MPa까지 압력을 부하하였을 때, 변형률이 탄성 범위 이내인 0.1% 변형률을 보였으며 파손이 발생하지 않았다. 이것으로부터 $L = 102 \text{ mm}$, $t/T = 0.1$ 일 때 파손이 시작되는 변형률은 0.2%이고, 배관이 파열되기 위해서는 파손 압력의 약 1.2 ~ 2.5배의 압력의 필요하다는 것을 알 수 있다. 그리고 감육 길이 $L = 18.53 \text{ mm}$, 두께비 $t/T = 0.07$ 인 감육형태가 라운드형인 LWT-18은 두께비 $t/T = 0.1$ 인 LWT-1과 LWT-12보다 감육 깊이가 깊다. 그러나 감육 길이가 짧기 때문에 파손이라 가정한 0.2% 변형이 발생하였지만, 설계 압력인 15 MPa에서 파열은 발생하지 않았다. 따라서 내압이 작용하는 배관의 파열은 감육 깊이와 감육 길이에 의존하는 변수라 판단된다.

Fig. 4.3은 설계 압력에서도 파열이 발생하지 않은 LWT-5의 압력-변형률 선도로서 실험과 해석에서 얻어진 것을 비교하여 나타내었다. Fig. 4.3에서 실험에서 얻어진 변형률은 압력의 증가와 함께 선형성을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 선형성은 해석에 얻어진 결과와 같은 경향을 나타내고 있으며, 실험과 해석은 탄성 범위 내에서 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 탄성범위를 넘어선 소성영역에서는 해석과 실험결과가 차이를 나타내었다.

Fig. 4.4는 전주 감육 시험편 중 감육 길이가 $L = 102 \text{ mm}$ 로 동일하며 두께비가 각각 $t/T = 0.11, 0.15$ 및 0.2 인 시험편 LWT-1, LWT-3, LWT-5의 감육부의 원주방향 변형률에 대한 실험과 해석 결과를 나타내었다. 각각의 시험편은 실험과 해석에서 모두 감육이 많을수록 항복까지의 압력이 낮으며, 감육부의 변형률은 동일한 압력 하에서 크게 증가함을 알 수 있었다. 그리고 감육이 많은 LWT-1은 변형률 약 0.1%에서 소성이 발생하였으나, LWT-3와 LWT-5는 약 0.2%에서 발생하였다. 그러나 3개의 시험편은 파단시의 원주방향 변형률이 0.5% 이상 되었을 때 배관의 파열이 발생하였다. 실험과 해석의 오차는 두께비 0.2일 때는 10% 이내의 오차를 보이지만, 두께비 0.2 이하 일 때는 10% 이상의 오차를 보였다. 이것은 실험에서는 두께비가 0.2 미만일 때 소성변형이 발생하여 감육부가 국부 좌굴 등의 변수가 발생하지만, 해석에서는 고려되지 않았기 때문이라고 판단된다.

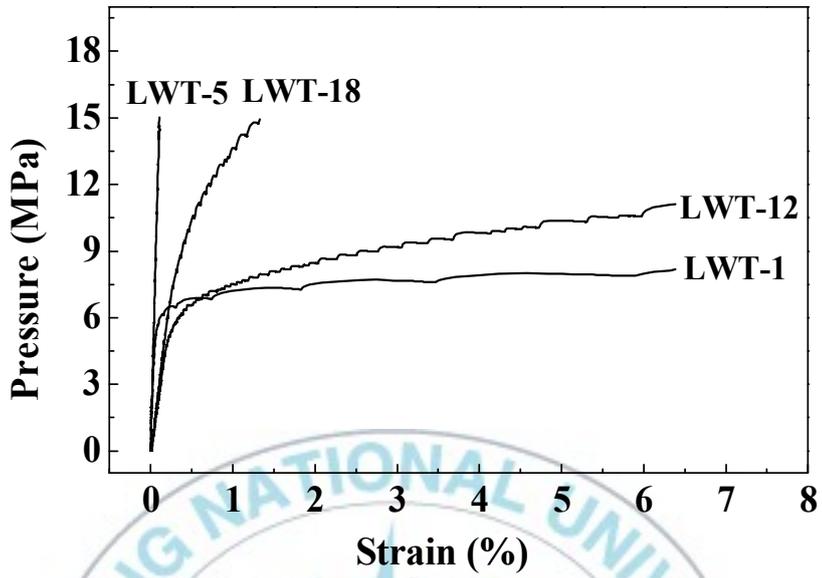


Fig. 4.2 The relationship between strain and pressure under design pressure

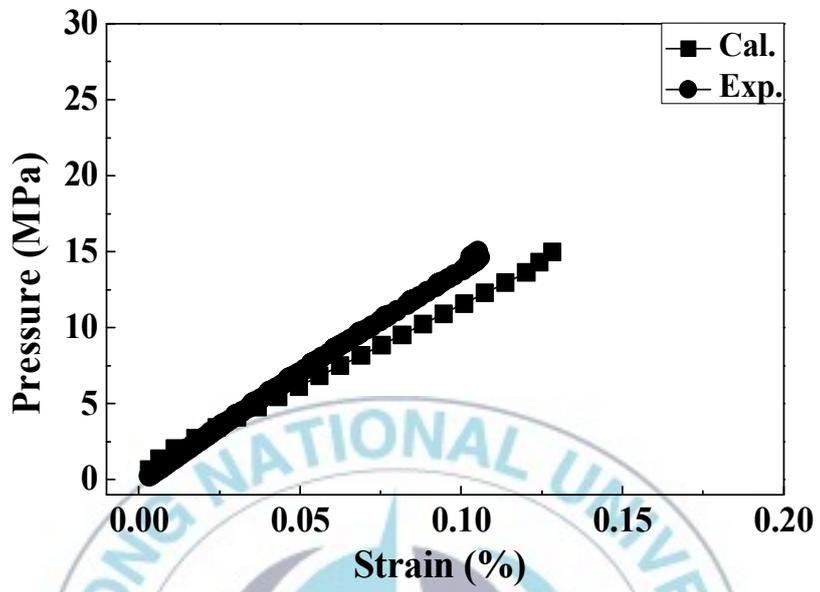


Fig. 4.3 Comparison of experimental and analysis on LWT-5

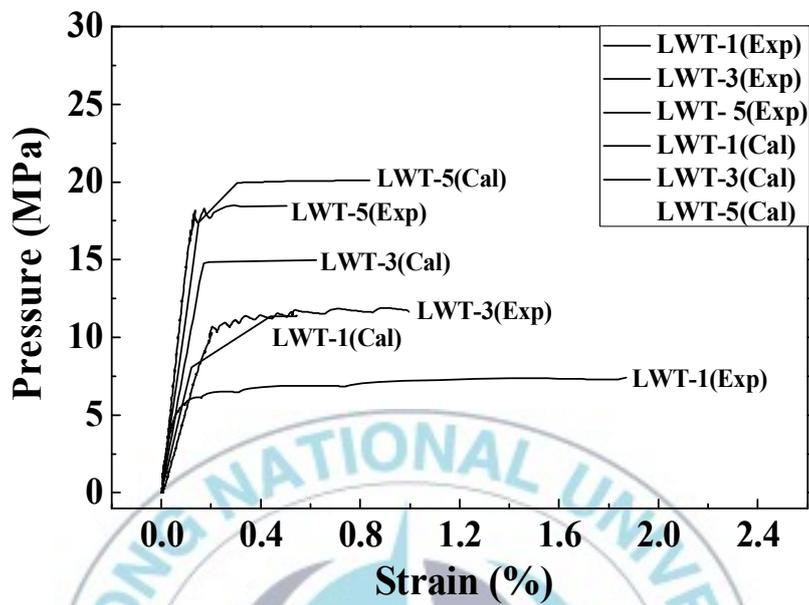


Fig. 4.4 The comparison of pressure and strain from experimental and analysis

4.3 감육부 면적에 따른 파열압력

본 절에서는 감육부의 면적에 따른 파열압력을 비교하였다. 두께비 $t/T = 0.06$ 때 전주 감육(Fig. 3.1(a))과 1면 감육 시험편(Fig. 3.1(b)), 2면 감육 시험편(Fig. 3.1(c))의 감육 면적을 비교하면, 감육 면적의 크기는 전주 감육 > 2면 > 1면이다. 감육 면적이 클수록 내압이 작용하는 면적이 커지므로 감육 면적이 커짐에 따라 파열압력은 더 낮아질 것이라 예측된다. 즉, 감육 면적에 따른 파열압력의 크기는 1면 감육 > 2면 감육 > 전주 감육이 될 것이다. 그러나 Fig. 4.5의 실험 결과는 예측과는 다르게 나타났다. 동일한 감육 길이와 두께비를 가질 때, 파열압력의 크기는 2면 감육 > 1면 감육 > 전주 감육을 나타내었다. 2면 감육 시험편의 감육 면적이 1면 감육 시험편의 감육 면적보다 더 크기 때문에 더 낮은 압력에서 파열이 되어야 하지만, 실험에서 1면 감육 시험편은 2면 감육 시험편보다 낮은 압력에서 파열하게 되었다. 이러한 경향은 두께비 $t/T = 0.06$ 뿐만 아니라 $t/T = 0.1$ 에서도 같은 현상이 발생하였다. 이것은 실험에서 뿐만 아니라 해석에서도 확인할 수 있었다.

Fig. 4.6은 LWT-12와 LWT-14에 대한 등가응력과 상당변형률의 관계를 나타낸 것이다. LWT-12는 1면 감육 시험편이며 LWT-14는 2면 감육 시험편이다. 해석 시 배관의 내면에 설계압력인 15 MPa를 LWT-12와 LWT-14에 각각 부과하였으며, 해석결과 LWT-12보다 LWT-14에서 더 낮은 응력이 발생한 것을 볼 수 있다. LWT-14의 감육 면적이 LWT-12보다 더 많음에도 불구하고 더 낮은 응력이 발생하는 것은 LWT-12보다 더 큰 응력의 분산이 발생하기 때문이라고 생각한다. 이러한 응력의 분산은 Fig. 4.7에서도 확인할 수 있다. Fig. 4.7은 LWT-12와 LWT-14에 대한 압력과 상당변형률의 관계를 나타낸 것이다. 감육 면적이 LWT-14보다 더 작은 LWT-12는 더 낮은 압력에서 LWT-14보다 더 큰 변형이 발생한다. 이러한 현상들로 미루어 볼 때, 2면 감육 시험편의 경우가 1면 감육 시험편의 경우보다 응력의 분산이 더 많이 발생하며, 이러한 응력의 분산으로 인하여 2면 감육 시험편이 1면 감육 시험편보다 더 높은 내압의 부

하에도 파열하지 않는 것이라 판단된다.

Fig 4.8 ~ 4.11은 1면 감육 시험편과 2면 감육 시험편에 대한 해석결과로서, 1면 감육 시험편과 2면 감육 시험편에 대한 감육부의 상당 응력(Equipment stress) 및 상당 소성 변형률 (Equivalent plastic strain)을 각각 나타낸다. 전주 감육 시험편의 경우에도 응력의 분산은 발생하겠지만, 1면 감육 및 2면 감육 시험편의 경우보다 원주방향의 응력이 감육부 전체에 더 지배적으로 작용하게 될 것이다. 이로 인하여 1면 감육 및 2면 감육 시험편의 경우보다 더 낮은 압력에서 파열되는 것이라고 판단된다.

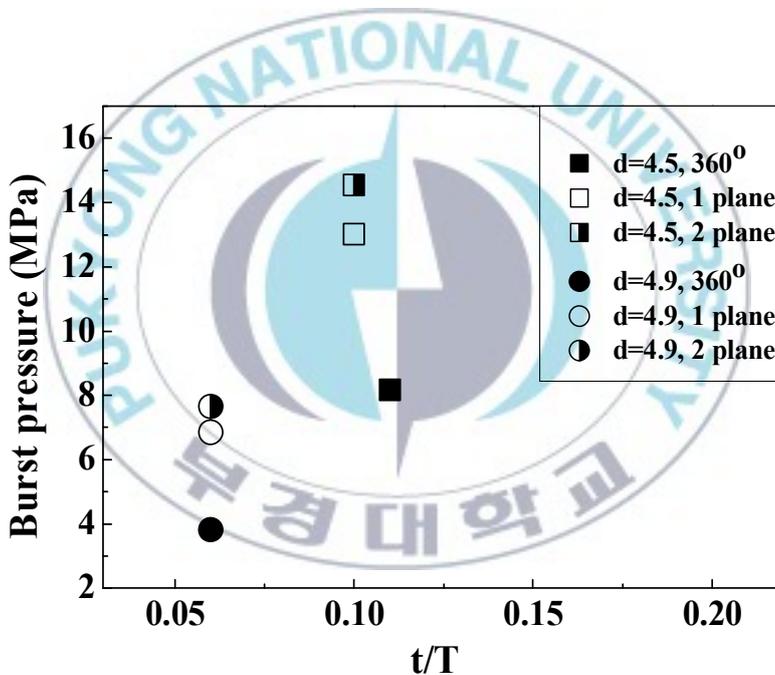


Fig. 4.5 The relationship between burst pressure and wall thinning shape

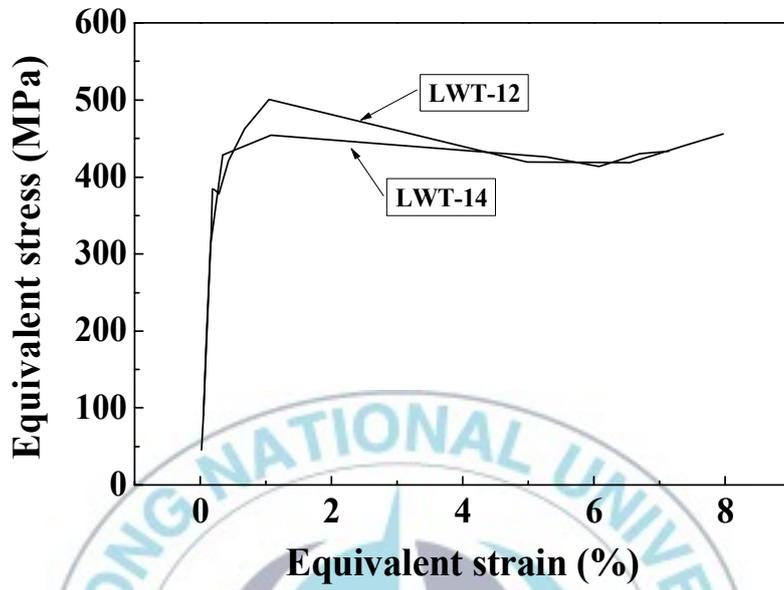


Fig. 4.6 Relationship between equivalent stress and equivalent strain by analysis

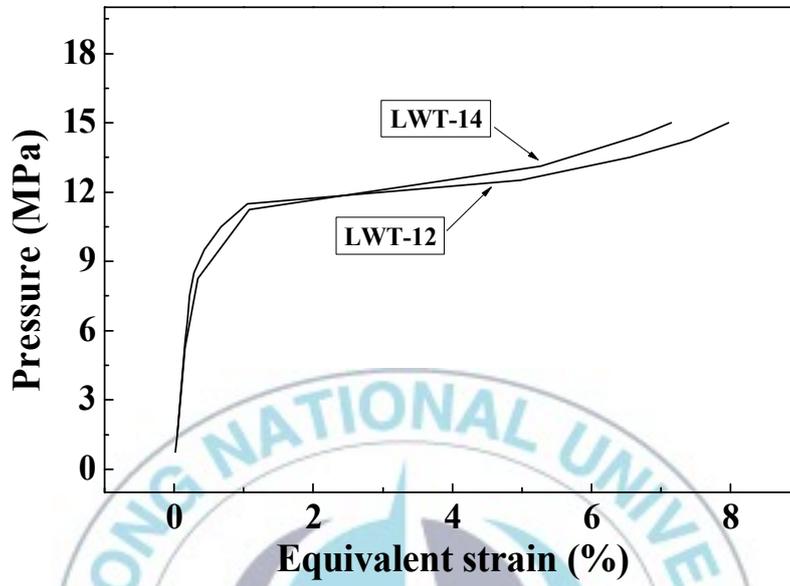
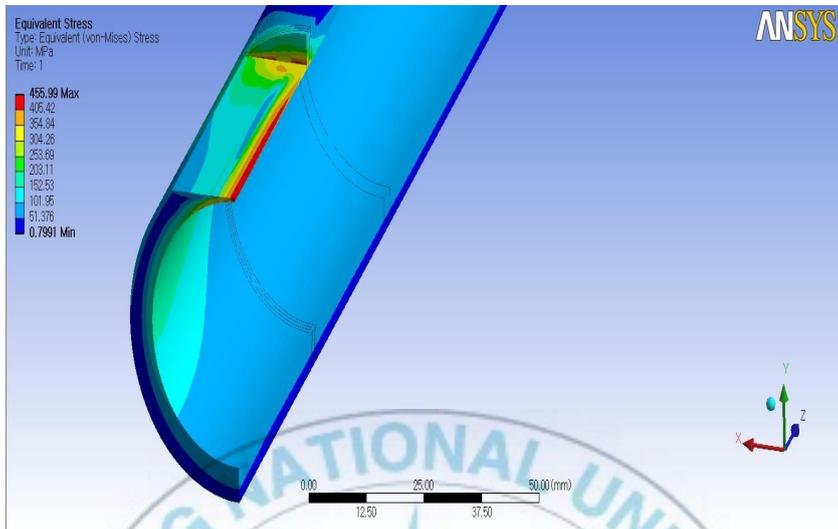
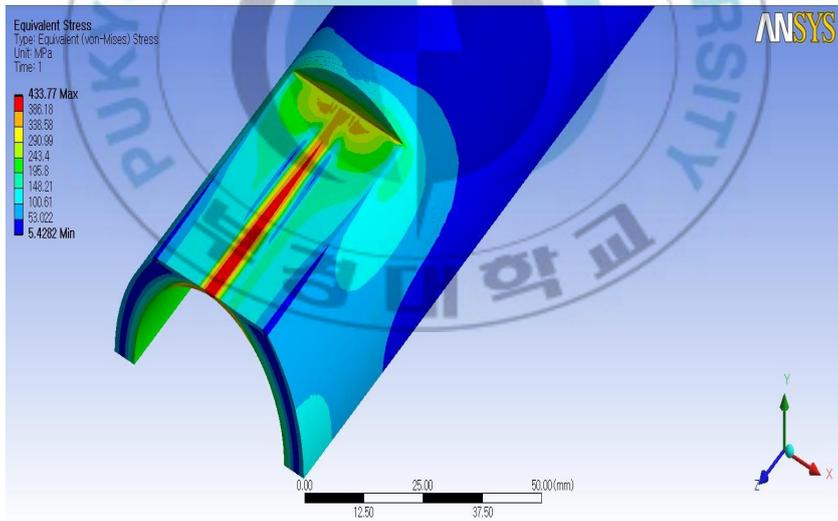


Fig. 4.7 Relationship between equivalent strain and pressure by analysis

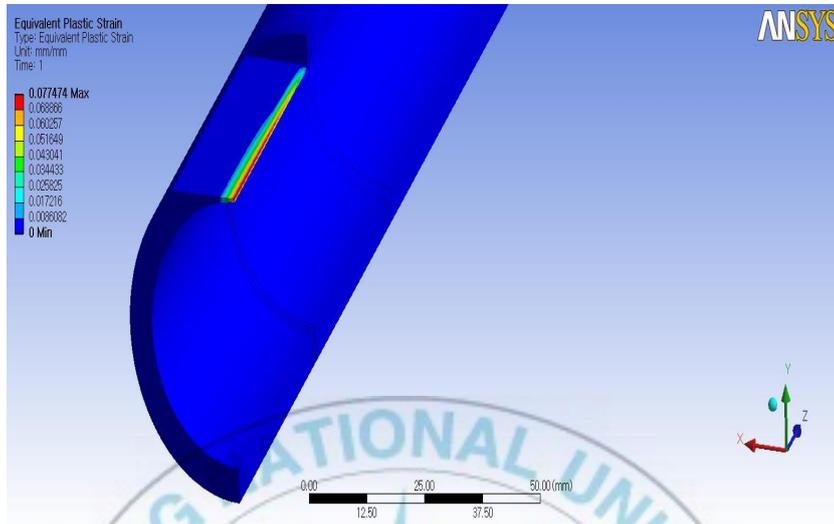


(a) 1 plane wall thinning

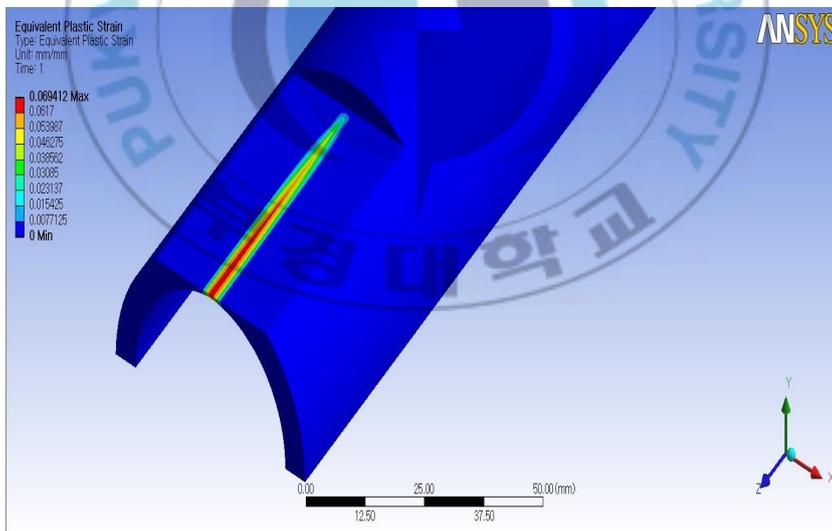


(a) 2 plane wall thinning

Fig. 4.8 Comparison of equivalent stress according to wall thinned shape at $t/T=0.06$

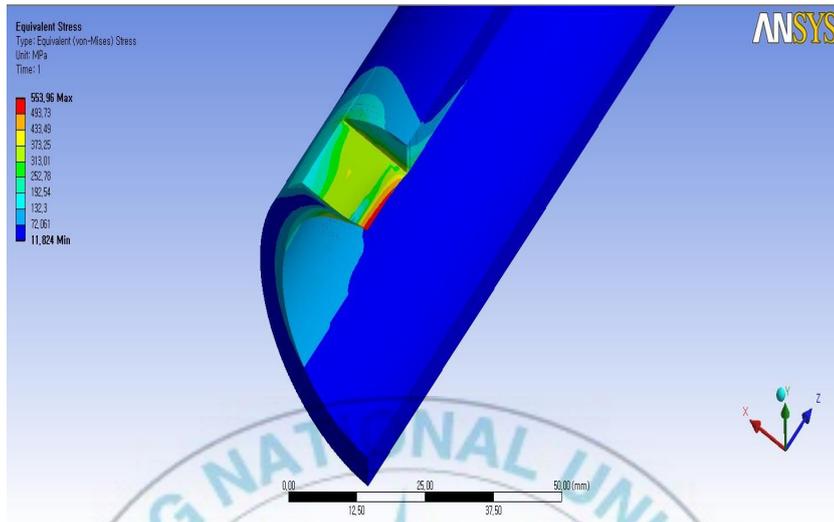


(a) 1 plane wall thinning

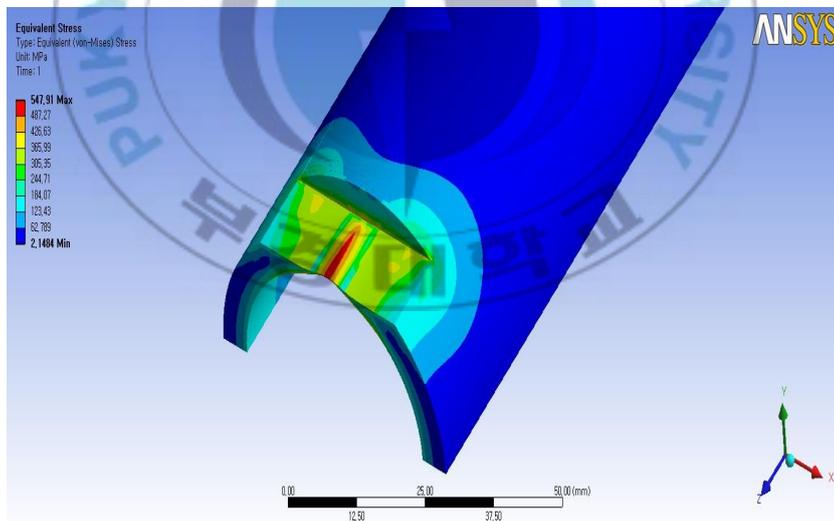


(a) 2 plane wall thinning

Fig. 4.9 Comparison of equivalent plastic strain according to wall thinned shape at $t/T=0.06$

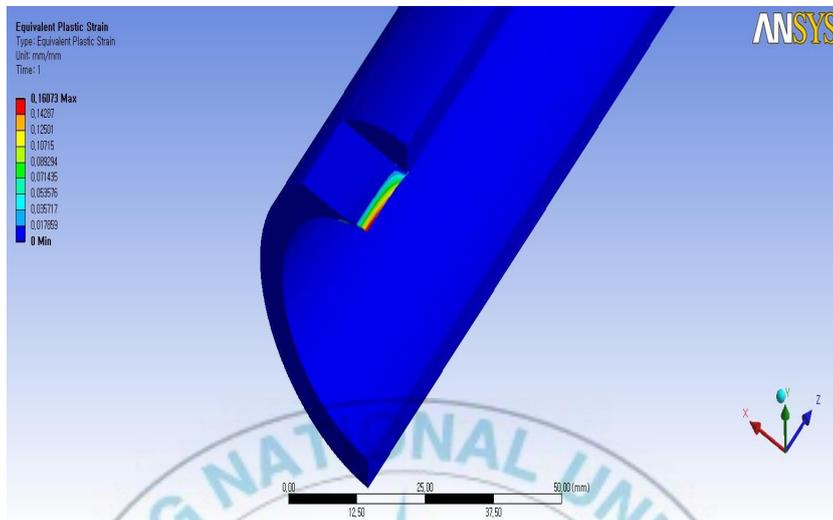


(a) 1 plane wall thinning

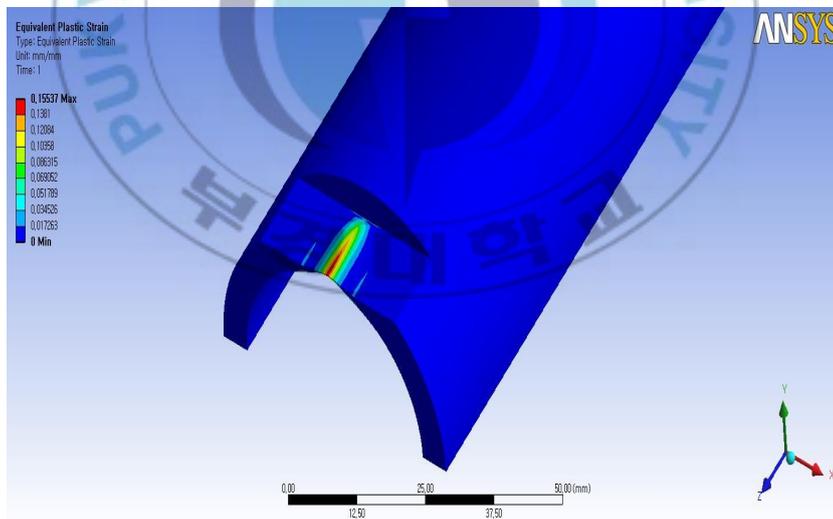


(a) 2 plane wall thinning

Fig. 4.10 Comparison of equivalent stress according to wall thinned shape at $t/T=0.1$



(a) 1 plane wall thinning



(a) 2 plane wall thinning

Fig. 4.11 Comparison of equivalent plastic strain according to wall thinned shape at $t/T=0.1$

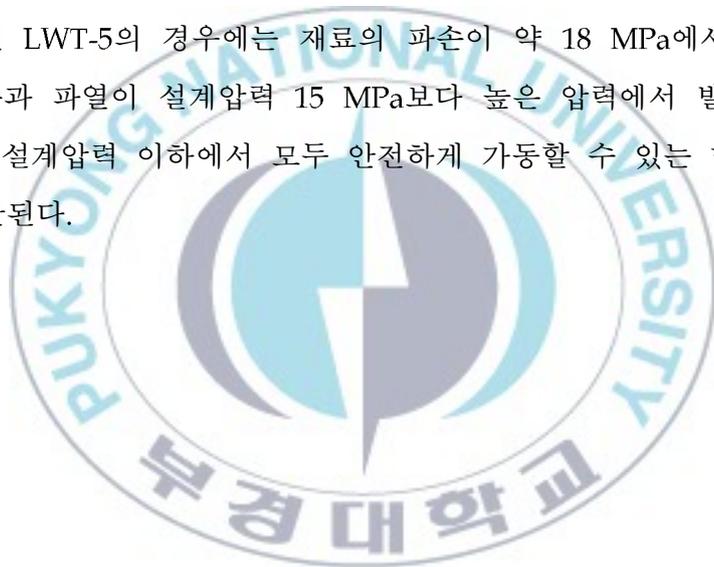
4.4 감육부 두께비에 따른 배관의 안전성

앞 절에서 설명한 감육 깊이에 따른 파열 압력의 변화와 변형률과의 관계를 통하여, 감육된 배관의 안정성과 신뢰성을 확보할 수 있는 기준을 만들 수 있을 것이다. 감육 깊이가 깊어짐에 따라 파열압력은 점점 작아지게 된다. 파열 압력이 설계압력보다 더 낮을 때, 배관은 안전성과 신뢰성을 잃게 된다. 그러나 배관의 파열압력이 설계압력보다 더 높다고 하여 배관의 안전성과 신뢰성이 100% 확보되는 것은 아니라 판단된다. 배관의 파열압력이 설계압력보다 더 크다고 할지라도, 그 배관에 발생한 변형률이 항복점의 변형률보다 더 크다면 그 배관은 이미 소성변형이 발생한 것으로서 파손이 발생했다고 볼 수 있으며 구조적으로도 안전하다고 볼 수 없다. 그러므로 본 절에서는 파열 압력과 원주방향 변형률의 관계에서 설계압력 이하에서 파열되지 않으며, 소성변형 되지 않는 한계두께에 대한 연구를 진행하였다. Fig. 4.12는 감육부의 두께비와 파열압력과의 관계를 나타낸 것이다. 실선은 설계압력 15 MPa를 나타내고, 점선은 운전압력 6.2 MPa를 나타낸다. 감육 길이 $L = 25$ mm인 전주 감육 시험편(●)의 경우, 두께비 $t/T < 0.08$ 일 때 운전압력 이하에서 모두 파열하였다. 그리고 감육 길이 $L = 102$ mm인 전주 감육 시험편(■)의 경우, $0.08 < t/T < 0.18$ 일 때는 설계압력 이하에서 모두 파열하였다. 그러나 두께비 $0.2 < t/T$ 일 때는 운전압력의 2.5배 이상에서 파열하지 않는 안전성을 보였다.

감육 길이 $L = 25$ mm인 1면 감육 시험편(○)과 2면 감육 시험편(●)의 경우 두께비 $t/T < 0.08$ 일 때 전주 감육 시험편(●)과는 다르게 운전압력 이하에서 파열하지 않았다. 감육 길이 $L = 102$ mm인 1면 감육 시험편(□)과 2면 감육 시험편(■)의 경우, 두께비 $0.08 < t/T < 0.18$ 일 때 전주 감육 시험편(■)과 마찬가지로 운전압력 이하에서는 파열하지 않고 설계압력 이하에서 파열하였다.

두께비 $t/T = 0.1$ 인 LWT-1의 원주방향 변형률과 파열압력을 비교하여 보면, LWT-1의 파열압력은 8.16 MPa로써 운전압력인 6.2 MPa보다 높은 압력에서 파열하였다. 그러나 LWT-1은 6.4 MPa에서 이미 항복점에 도달하였으므로 운

전압력에서 안전하게 가동되기 어렵다. LWT-2의 경우도 파열압력은 운전압력보다 높지만 재료의 파손이 운전압력 근처에서부터 발생하기 때문에 운전압력에서 안전하게 가동 할 수 없다고 판단된다. 두께비 $t/T = 0.15$ 인 LWT-3의 경우는 배관의 파손이 발생하는 압력이 10.5 MPa로써 운전압력보다는 높은 압력에서 재료의 파손이 발생하였다. 그러므로 두께비 $t/T = 0.15$ 이상일 경우에는 운전압력에서 안전하게 가동할 수 있다고 판단된다. 그러나 설계압력인 15 MPa이내에서 재료의 파손이 발생하므로 설계압력이하에서 안전하게 가동할 수 없다. 이것은 두께비가 비슷한 LWT-4의 경우도 마찬가지이다. 두께비 $t/T = 0.2$ 인 LWT-5의 경우에는 재료의 파손이 약 18 MPa에서 발생하였다. 배관의 파손과 파열이 설계압력 15 MPa보다 높은 압력에서 발생하였으므로 운전압력과 설계압력 이하에서 모두 안전하게 가동할 수 있는 한계 두께비는 0.2라고 판단된다.



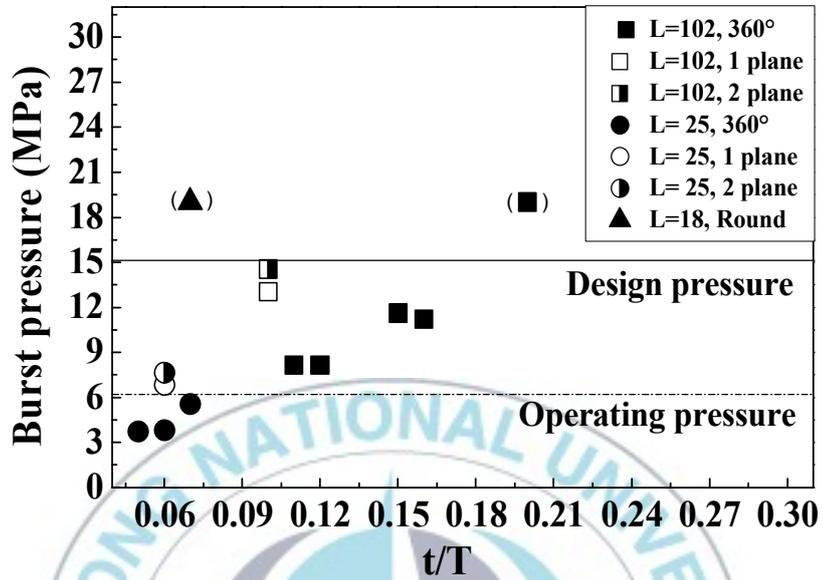


Fig. 4.12 Limitation of burst pressure depending on wall thinned ratio

4.5 감육 배관의 음향방출 특성

Fig. 4.13은 배관 실험 시 시간에 따른 원주방향 변형률과 중심 주파수와의 관계를 나타낸다. 배관에 내압이 작용함에 따라 배관의 원주방향 변형률이 점차 증가하는 것을 볼 수 있다.

배관의 파손이 발생하기 시작하는 0.2% 변형이 발생할 때까지, 탄성영역에서는 AE 신호가 검출되지 않았으며, 항복영역을 지나 변형률이 급격하게 증가할 때 AE 신호가 검출되기 시작하였다. 항복영역을 지나면서 78 ~ 195 kHz와 292 ~ 351 kHz의 중심 주파수가 검출이 되었다. 이것은 78 ~ 195 kHz의 중심 주파수는 전위가 이동함에 따라 발생하는 것으로 판단되며, 292 ~ 351 kHz의 중심 주파수는 소성영역에서 전위가 이동할 때 전위들이 집적하여 전위의 장벽을 이룬 곳이나 개재물, 결정립계를 통과할 때 발생하는 것으로 판단된다. 전위가 개재물 또는 결정립계를 통과하기 위해서는 큰 에너지가 필요하며 전위가 개재물 또는 결정립계를 통과할 때 이와 같은 큰 에너지가 방출된다. 바로 이러한 큰 에너지의 방출로 인하여 300 kHz 이상의 고주파수가 나타나게 되는 것이라 판단된다. 그리고 항복영역 근처에서보다 항복영역 이후 소성영역에서 AE 신호의 발생빈도가 더 적는데 이는 전위의 장벽 또는 결정립계, 개재물들로 인하여 전위의 이동이 방해받기 때문인 것으로 판단된다.

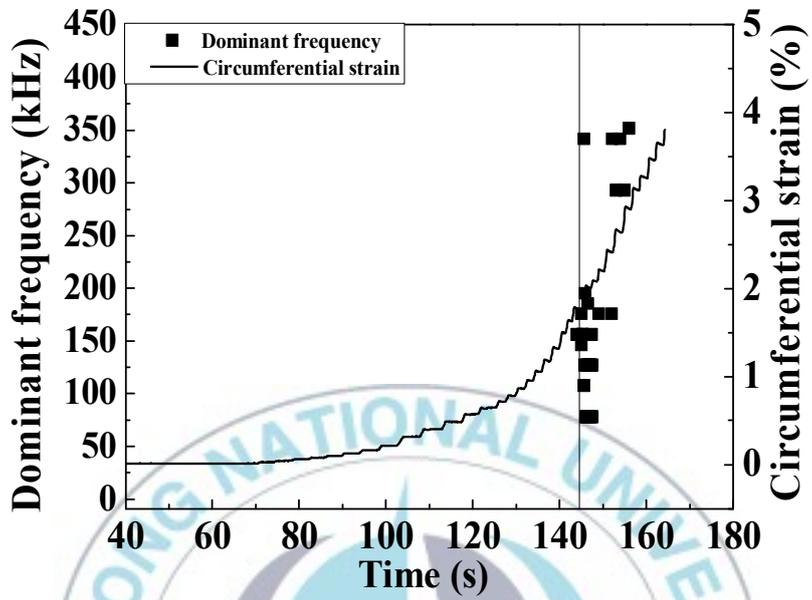
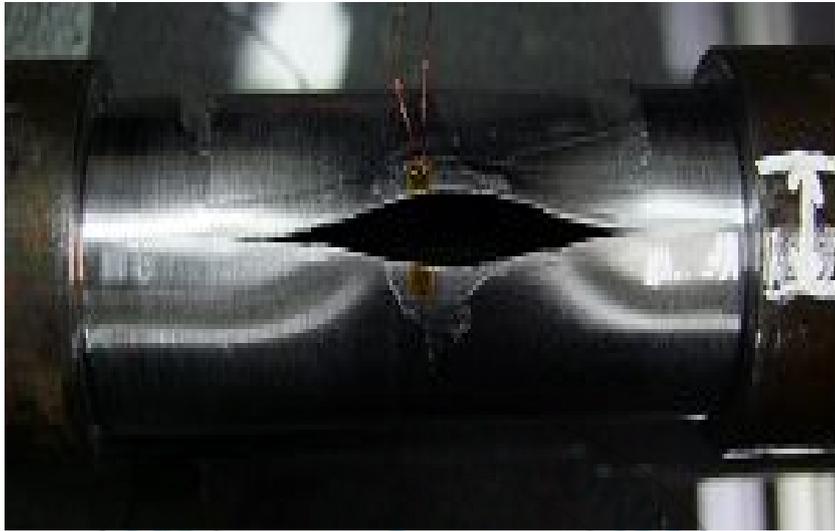


Fig. 4.13 Relationship between circumferential strain and dominant frequency

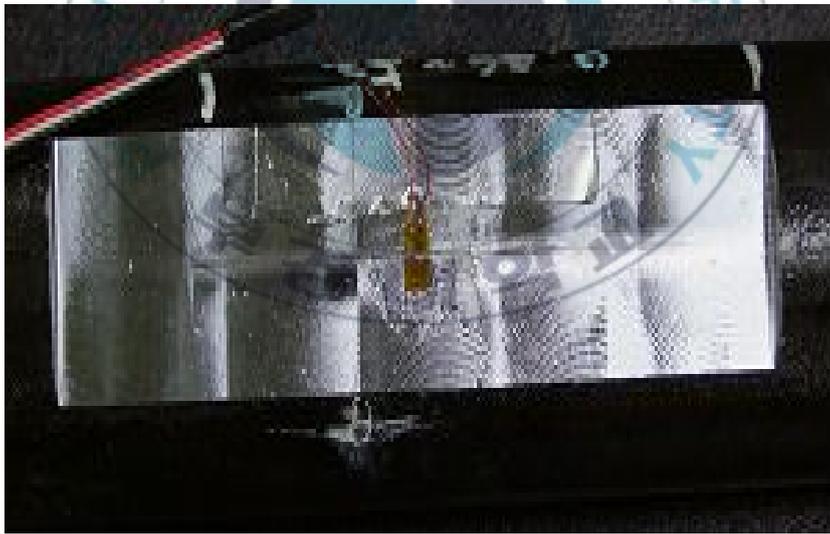
4.6 감육부의 파열형상

Fig. 4.14는 LWT-1, LWT-7, LWT-10 및 LWT-12 배관의 파열 외관을 나타낸 것이다. 감육부의 형상에 따라서 파열된 외관이 다른 것을 볼 수 있다. LWT-1과 LWT-12는 감육 길이 $L = 102 \text{ mm}$ 이며, 두께비(t/T)가 각각 0.11과 0.10으로 비슷하지만, 전주 감육 시험편인 LWT-1은 큰 파구를 이루며 길이 방향으로 파열하였다. 반면 1면 감육 시험편인 LWT-12는 가느다란 파구를 형성하면서 길이 방향으로 파열하였다. 감육 길이 $L = 25 \text{ mm}$ 이며, 두께비(t/T)가 0.06인 전주 감육 시험편 LWT-7과 1면 감육 시험편 LWT-10의 경우는 LWT-1과 LWT-12에 비하여 파구는 크지만, LWT-1과 LWT-12와 마찬가지로 급격한 변형률의 증가와 큰 소성변형을 동반하였다.

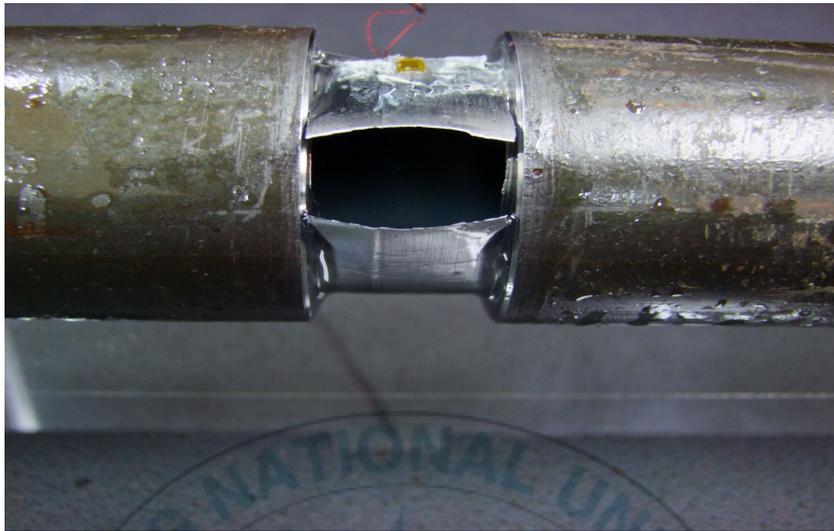
이들 시험편은 앞선 Fig. 4.2에서 급격한 변형률의 증가를 보인 점과 배관 파열시 감육부의 파열형상이 크게 부풀어 있고 길게 찢어진 점으로 보아 STST370 배관의 감육부는 큰 소성변형을 동반한 소성붕괴로 인하여 파열된 것으로 판단된다.



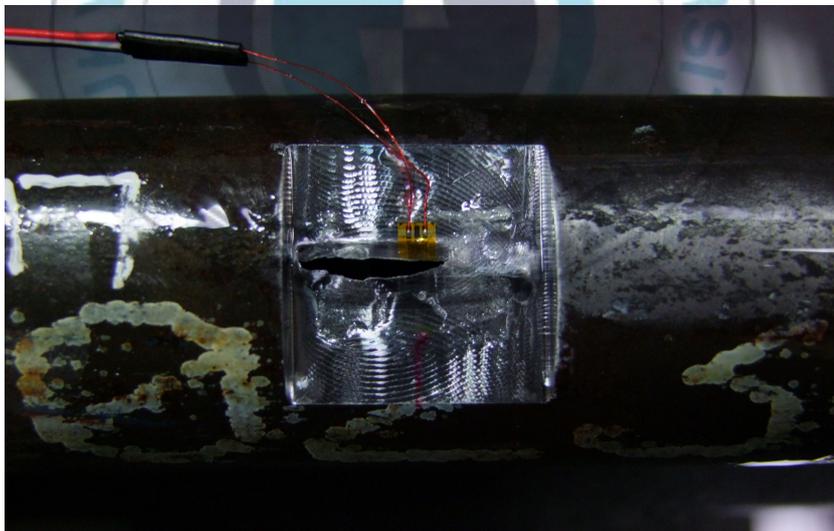
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.14 Pipe appearance after test, (a) LWT-1, (b) LWT-12, (c) LWT-7, (d) LWT-10

4. 결 론

본 연구에서는 장기 사용에서 발생하는 배관의 감육을 고려하여, 내압이 작용하는 STS370 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service)에 감육 깊이 및 감육 길이를 달리하여 기계가공을 하였다. 감육 형상에 따른 파괴거동을 연구하였으며, 이들 거동은 해석과 비교하였다. 그리고 STS370 고압탄소강배관의 탄소성변형 시 발생하는 음향방출신호를 검출하여 변형률에 따른 음향방출특성에 대해서도 연구하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 내압이 작용하는 감육 배관의 파열압력은 감육 깊이와 감육 길이에 반비례하여 작아지며, 동일한 감육 깊이와 감육 길이를 가질 때에는 감육 면적에 반비례하여 작아진다.
- 2) STS370 배관의 파손이 시작되는 항복점은 원주방향 변형률이 급격하게 증가하기 시작하는 약 0.2%지점이며 감육부의 중심이 항복에 도달하는 압력의 1.2~2.5배의 압력을 받을 때 STS370배관은 파열된다.
- 3) STS370 배관은 배관 두께의 90%까지 감육이 되었을 때에는 운전압력 이하에서는 파열되지 않지만 설계압력 이하에서 파손이 발생한다. 그리고 85%까지 감육 되었을 때 역시 운전압력 이하에서는 파열되지 않지만 설계압력 이하에서 파손이 발생한다. 그러나 80%까지 감육이 되었을 때에는 운전압력의 2.5배까지 견디며 설계압력 이하에서도 파손되지 않는 높은 안전도를 가지는 것으로 나타났다.
- 4) 탄성구간 이후 변형률이 급격한 증가를 보인 점과 파열 형상이 큰 파구를 이루는 것으로 보아 STS370 배관은 큰 소성변형을 동반하는 소성붕괴로 인하여 파괴된다는 것을 알 수 있다.
- 5) AE 신호는 항복점 부근에서는 낮은 저주파수대역(78 ~ 195 kHz)이 검출되었고, 소성영역에서는 고주파수대역(292 ~ 351 kHz)이 나타났다. 이를 통해

현재 사용 중인 발전소의 배관에 대한 안전성을 실시간으로 평가할 수 있을 것이라 판단된다.

- 6) 전위가 개재물 또는 결정립계를 넘기 위해서는 큰 에너지가 필요하며 이러한 결함을 극복할 때 큰 에너지가 방출된다. 이러한 큰 에너지의 방출로 인해 300 kHz 이상의 고주파수가 나타나는 것이라고 판단된다.



참 고 문 헌

1. Nam, K. W. and Ahn, S. H., 2004, "Fracture Behaviors and Acoustic Emission Characteristics of Pipes with Local Wall Thinning" Key Engineering Material, Vol. 270~273, pp. 461~465
2. Kim, J. W., Nam, K. W. and Ahn, S. H., 2004 "Nondestructive Evaluation of Pipes with Local Wall Thinning by Wavelet Analysis of Elastic Wave," Key Engineering Materials, Vol. 270~273., pp. 954-958
3. 태성에스엔이., 2010, 유한요소 입문과 선형해석
4. Lee, B. O., 2006 "The newest mechanical engineering lab"
5. 황석렬., 2001 “기계공학실험실습”
6. 한응교., 1986 “스트레인 게이지의 이론, 응용”
7. 한응교, 고준빈., 2001 “스트레인 게이지를 위한 계측방법”
8. Ahn, S. H., Nam, K. Woo, 2005 "Effect of Wall Thinning on the Failure of Pipes Subjected to Bending Load" KSME(A) Vol. 29, No. 4, pp. 606~613.
9. Ahn, S. H., Lee, S. S., Kim, J. W., Y, J. M., Nam, K. W, 2002 "Evaluation of Deformation and Strength of Wall Thinned Pipes by Finite Element Analysis" KSOE Vol. 19, No. 5 pp. 65~75
10. Ahn, S. H., Nam, K. W., Yoo, Y. S., Ando, K., Ji, S. H., Ishiwata, K. and Hasegawa, K. 2002, "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning," Nuclear Engineering and Design, Vo. 211, pp. 91~103
11. Kamay, M., Suzuki, T., Meshii, T., 2007 "Failure pressure of straight pipe with wall thinning under internal pressure" Pressure Vessels and Piping.

12. Kim, Y. P., Baek, J. H., Kim, W. S., K. Y. T., 2002 "The Evaluation of Burst Pressure for Corroded Pipeline by Full Scale Burst Test" KSME(A) Vol. 26, No. 1, pp. 203~210
13. Ahn, S. H., Nam, K. W., Kim, S. J., Kim, J. H., Kim, H. S., Park, I. D., 2002, "Acoustic Emission Characteristics according to Failure Modes of Pipes with Local Wall Thinning" KSOE vol. 16, No. 5, pp 66~72
14. Kim, J. H., Kim, H. S., Park, I. D., Ahn, S. H., Nam, K. W., 2002, "Acoustic Emission Properties of Pressure Vessel Pipes" KSME pp. 249~254
15. Kim J. W. and Park C. Y 2001, "An Evaluation of Failure Behavior of Pipe with Local Wall Thinning by Pipe Experiment", KSME(A) Vol. 26, No. 4, pp. 731~738
16. Sim, D. J., Im, H., Choi, J. B., Kim, Y. J., Kim, J. W., Bak, C. Y., 2003 "Effect of Wall Thinned Shape and Pressure on Failure of Wall Thinned Nuclear Piping Under Combined Pressure and Bending Moment", KSME(A) Vol. 27, No. 5, pp. 742~749

감사의 글

군대를 전역하고 무엇이든 열심히 해보자는 생각을 가지고 연구실 문을 두드린 것이 엇그제 같은데 어느새 학부를 졸업하고 석사학위논문이라는 결실을 맺게 되었습니다. 이 글을 통해 지금의 제가 있도록 많은 가르침을 주시고 격려해주신 분들에게 감사의 인사를 드리고자 합니다.

가장 먼저 저를 배움의 길로 이끌어주신 남기우 교수님께 감사의 인사를 드리고 싶습니다. 흔히들 인생의 터닝 포인트가 있다고 한다면 저의 제 1 터닝 포인트는 교수님을 뵈게 된 것이라고 생각합니다. 학부 2학년이 되어 전공을 선택 한 후 공부를 더 해보고 싶다는 욕심도 들었지만 빨리 돈을 벌어야 한다는 생각을 하고 있었습니다. 하지만 교수님 연구실에 들어온 뒤로 여러 가지 실험을 하게 되면서 연구와 공부에 매력을 느끼게 되었고 교수님께서 “다른 부분은 생각하지 말고 하고 싶은 일이 있다면 그 일을 해라”라고 말씀해 주신 뒤에 마음 속에 한 가지 뜻이 생기게 되었습니다. 이 일을 계기로 배움의 길을 선택하게 되었고 석사과정을 하는 동안 교수님의 많은 관심과 지도, 큰 격려 덕분에 이렇게 무사히 석사과정을 마치게 되었습니다. 교수님의 큰 은혜에 깊이 고개 숙여 감사드립니다.

바쁘신 와중에 시간을 내어 저의 졸업논문을 심사해 주신 문창권 교수님, 김진욱 박사님께 감사의 인사를 드립니다. 또 저에게 많은 관심 가져 주시고 조언을 해 주신 최희락 교수님께도 감사드립니다. 그리고 잘못된 길을 바로 잡아 주고 조언해 준 인생의 선배님이자 연구실 선배님인 제환일 선배님, 박승원 선배님, 박상현 선배님, 서임술 선배님, 문희준 선배님, 강봉규 선배님, 이현재 선배님, 문찬희 선배님, 그 때는 선배님들의 고마운 마음을 몰랐었습니다. 같이 연구실 생활 하는 동안 미처 전하지 못했던 미안한 마음과 고마운 마음을 지금에서야 이렇게 전합니다. 선배님 감사 합니다.

그리고 잔소리만 많고 버럭쟁이 선배가 석사과정을 마치기까지 많은 실험을

하는 동안 싫은 내색 없이 도와준 후배들 김은선양, 이장원군, 김동권군, 김정량양, 황진량양, 서유경양, 정아름양에게 진심으로 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

학부생때부터 석사때까지 실험뿐만 아니라 대학교를 다니면서 같이 지내고 많은 조언을 해주었으며 힘이 되어준 대학교에서 만난 진짜 멋진 친구인 황석환군에게 고마운 마음을 전하고 싶습니다. 그리고 나이는 저보다 어리지만 더 어른스럽고 선배의 투정을 다 받아준 가슴이 넓은 남자들인 장석현군, 박세영군, 홍지웅군, 안지섭군, 김성수군, 임득혁군, 김성관군에게 고마운 마음을 전하고 싶습니다. 그리고 타 연구실이었지만 내 연구실 일처럼 굶은 일 마다 않고 도와주고 조언해준 윤상호군, 이영근군, 황승하군, 이우철군, 하유성양, 오보라미양에게 고맙다는 인사를 하고 싶고 특히 김태군 선배님에게 꼭 감사의 인사를 전하고 싶습니다.

연구실 생활을 한 뒤로 자주 만나지는 못했지만 나에게 힘이 되어주고 용기를 북돋아 주는 소중한 친구들에게 이 자리를 빌어서 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 도원아, 기윤아, 유청아, 선강아, 정덕아, 태성아, 우태야, 학주야 고맙다. 너도 변하고 나도 변하겠지만 우리는 절대 변하지 말자!!!

마지막으로 누구보다 사랑하고 지금의 저를 있게 해준 저의 가족들에게 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 표현은 잘 하지지 않지만 누구보다 가족을 사랑하고 아버지, 제가 공부를 더 하겠다고 말씀드렸을 때 아무 걱정 말라고 하시며 저의 등을 힘껏 밀어주신 아버지와 짜증쟁이 아들의 투정을 묵묵히 다 받아주시고 가게일과 집안까지 모두 하시면서 불평 한마디 없으신 어머니의 도움이 없었다면 제가 이렇게 무사히 석사과정을 마칠 수 없었을 것입니다.

지금 보다 더 높이 날아올라 아버지와 어머니의 아들로서 부끄럽지 않은 남자가 되도록 하겠습니다. 아버지 어머니의 은혜에 깊은 감사의 인사를 드립니다. 그리고 아버지, 어머니만큼이나 저를 아껴주시고 사랑해주신 우리 큰 할머니, 작은 할머니, 작은 아버지, 작은 어머니 정말로 감사합니다. 그리고 연구실

에 나가고 공부한다는 핑계로 아버지일을 도와드리지 못할 때, 바쁜 시험기간에도 대신 아버지를 도와 드린 누구보다 착하고 마음 여린 내 동생들 효진아, 효수야 고맙고 또 많이 미안하다. 시험기간에 공부하면서 힘들어 하는 모습을 보면 괜히 나 때문에 더 힘들어 하는 것 같아 항상 마음이 좋지 않았다. 하지만 지금 열심히 하고 있으니깐 곧 좋은 결과가 있을 거라고 생각한다. 못난 형 때문에 잠시 힘들었겠지만 앞으로 있을 탄탄대로에 항상 행복과 웃음이 가득하길 기원한다.

비록 이 글에는 다 쓰지 못했지만 저에게 많은 도움을 주시고 격려를 해 주신 모든 분들께 감사의 마음을 전합니다. 학교를 졸업하고 다가올 인생의 제 2 터닝 포인트에서 저를 아껴주고 사랑해 주는 모든 분들의 마음을 항상 생각하면서 지금 보다 더 발전하는, 권효성이 되도록 하겠습니다. 감사합니다.

