

브래킷 결합형식에 따른 용접 구조물의 파이프에서 발생하는 응력분포와 응력집중에 관한 연구

전형용*, 성낙원**, 한근조**

A Study on the Stress Distribution and Stress Concentration of Pipe with Respect to Attached Shape and Method of the Bracket in a Welding Structure

Hyung-Yong Jeon*, Rak-Won Sung**, and Geun-Jo Han**

ABSTRACT

This investigation is the result of the structural analysis by finite element method and test for considering stress distribution and stress concentration to be generated according to the change of attached shape and method of the bracket to pipe in welding structure.

Generally, members that consist structures are subjected to various forces and are jointed each other with a number of bracket. In this case, circular pipe was adapted in order to weld these members easily and to study the optimal design which is used a beam with shape section as main components of the structure, According to attached shape and method, distributed stress on circular pipe is appeared so differently. This may result deeply effects with respect to thickness, material properties. So a study on attaching shape and method of bracket to circular pipe is needed. In this paper, to obtain the maximum equivalent stress or stress concentration was used experimental and F.E.M analysis. First five parameter was defined with respect to attached a shape and method to circular pipe i.e. the variation of the attached area, the variation of the attached shape, the variation of the attached length, the variation of both direction angles, the variation of the upper angle. Afterward the experimental analysis was practiced as the variation of the both direction angel and the finite element analysis was practiced as each parameters. We can discover stress distribution and stress concentration according to the change of form of bracket. And the result can be referenced for a design of similar structure.

Key Words : Circular pipe (원형 파이프), Stress concentration (응력집중), Design parameter (설계변수), Rectangular bracket (사각형 브래킷)

* 정회원, 한진중공업

** 동아대학교 기계공학과

1. 서론

국내 노동환경 변화로 인하여 생산성을 향상 시키고자 많은 노력을 기울이고 있으며, 최근에는 설계단계에서 최적설계개념을 도입하여 경쟁력을 강화시키는 것이 가장 효과적이라고 판단하고, 이를 다양하게 응용하고 있다. 이러한 경향에 따라 평판을 절단하여 제작하는 종래의 제작방식을 지양하고, 철강회사에서 쉽게 제작할 수 있는 단면형상을 그대로 구조물의 주요 요소로 사용하는 방식을 채택하는 최적설계연구가 진행되고 있다.

일반적으로 구조물에서 하중을 지탱하는 주요 부재에는 1~2개의 하중만이 작용하지 않고, 다양한 하중이 작용하며, 또한 각종 기계요소들을 결합 시키기 위하여 여러 개의 브래킷을 결합하는 수가 많다. 이러한 구조물은 브래킷을 원만하게 용접하기 위하여 일반적으로 원형 단면의 부재를 채택하게 되는데, 이런 경우, 이들 브래킷 결합 방식에 따라 원형 파이프에 발생하는 응력은 다르게 나타나 재질 및 두께 등의 선정 및 응력집중현상으로 최적설계에 악 영향을 끼칠 수 있으므로, 원형 파이프에 결합되는 브래킷의 결합방식에 대한 연구가 필요하다고 할 수 있다.^{(1)~(3)}

원통 구조물을 설계하는 과정에서 일반적으로 브래킷을 원통 파이프에 결합하는 면적과 형상에 의한 응력분포의 변화와 응력집중 현상과의 관계를 고려하지 않고, 이를 쉽게 결합할 수 있도록 임의로 그 형상과 면적을 결정하는 경우가 많다. 이런 원통 구조물은 응력집중 발생으로 인하여 최악의 경우, 원통 파이프에 균열이 발생, 파괴되기도 한다.

이렇게 응력분포에 지대하게 영향을 끼치는 결합형태 변화에 따른 최대상당응력과 응력집중변화를 정량적으로 평가할 수 있다면, 설계단계에서 불필요한 손실을 방지하여 원통 구조물의 최적설계를 완성할 수 있을 것이다. 이를 위하여, 본 연구에서는 원통 부재에 여러 가지 하중을 지탱하는 브래킷이 결합될 때, 브래킷의 형상과 면적이 최대상당응력 및 응력집중 변화에 어떻게 영향을 끼치는가를 구조실험 및 유한요소법으로 분석하여 이와 유사한 원통 구조물 설계시 기초자료로 활용하고자 하였다.⁽⁴⁾

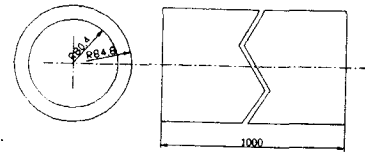
본 연구는 원통 파이프에 결합되는 브래킷의 형상변화에 따른 상당응력과 응력집중을 분석하여

최적설계를 이루고자 전체 5개의 설계 파라미터(부작 면적의 양방향 각도변화, 부작 면적의 상부각도 변화, 폭변화, 형상변화, 위치변화)를 설정하였고, 구조실험은 양방향 각도변화 파라미터(30°, 60°, 90°, 150°)모델에 대하여 수행하였다. 그리고, 유한요소해석은 5가지 설계 파라미터에서 각각 세분화하여 보다 많은 모델에 대하여 응력해석을 실시하여 각 모델에 대한 상당응력 및 응력집중관계를 연구하였다.

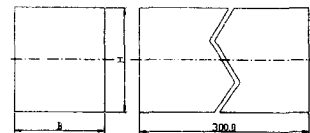
2. 실험적 해석

2.1 실험 재료와 치수

본 연구는 동일 하중조건에서 원형 파이프에 결합되는 브래킷의 형상변화에 따라 나타나는 응력집중현상을 고찰하기 위하여 원형 파이프 중심에서 브래킷의 끝까지 거리를 일정하게 유지하여 동일한 모멘트가 작용되도록 하였고, 파이프 양단의 구속 조건의 영향을 최소화시키기 위하여 원형 파이프 길이 방향의 중심에 브래킷의 중심을 일치시켜 좌우, 상하대칭구조로 제작하여 파이프 양단을 완전 구속시켰다. 본 실험에 사용된 원형 파이프와 브래킷의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 또한, 시험편에 사용된 재질은 일반 기계 구조물에 널리 사용되는 일반 기계구조용 강판 SS 400(KS D 3503)과 고압용기 및 배관에 사용되는 탄소강관 STPG 370(KS D 3562-84계열)를 사용하였으며, 이들의 기계적 성질은 Table 1과 같다



(a) circular pipe



(b) rectangular bracket

Fig. 1 Dimensions and shape of the circular pipe and the rectangular bracket

Table 1. Mechanical properties of materials

Materials	Tensile strength (σ_t) : MPa	Yield strength (σ_y) : MPa	Elastic modulus (E) : MPa	Elongation (%)	Poisson's ratio(ν)
STPG 370	370	215 이상	2.06×10^4	25 이상	0.3
SS 400	400 - 510	245 이상	2.07×10^4	17 이상	0.28

2.2 실험 장치

본 연구는, 각각의 시험편에 동일 모멘트를 부과시켜야 하므로, 무엇보다도 하중작용점과 시험편 지지점까지의 간격유지, 견고한 지지방법, 정량적인 부하하중의 크기가 중요하다. 이런 실험 조건을 만족시키기 위하여 사용된 장치는, Fig. 2에서 나타낸 바와 같이, 시험편 지지용 JIG, 만능시험기(Shimadzu : 50ton) 및 UCAM-70A와 단축 스트레인 게이지를 사용하였다. JIG를 Fig. 2와 같이 만능 시험기(UTM)에 고정 장착하여 하중작용점과 파이프 중심까지 거리를 일정하게 유지하고, JIG 양단에 플랜지와 볼트를 사용하여 모든 방향의 변위가(u_x , u_y , u_z , rot_x , rot_y , rot_z) 0이 되도록 완전 구속시켰다. 그리고, 만능 시험기(UTM)을 사용하여 정량적인 하중을 단계적으로 부과하여 실험을 수행하였다. 이후 원형 파이프의 주요 부분에 부착된 strain gauge를 통해 변형률과 응력을 data logger인 UCAM-70A를 사용하여 측정하였으며, 응력분포가 사각형 브래킷을 중심으로 좌우로 1/2 대칭이고, 또한 상하로 발생하는 응력의 절대값은 동일하나 부호는 반대이므로, strain gauge는 전체의 1/4부분에 취약한 부분으로 예상되는 곳에 4개를 부착하였다. 실험장치, 시험편의 형상 및 strain gauge의 취부 위치는 Figs. 2~3에 나타나 있다.

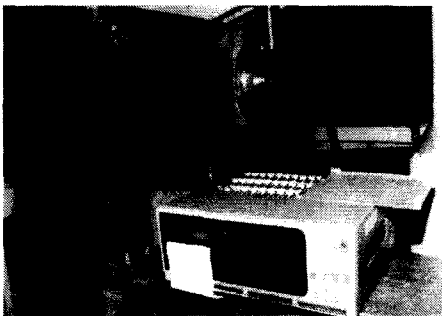


Fig. 2 Universal testing machine and the jig for fix of specimen



Fig. 3 Location of the strain gauge on the circular pipe

2.3 실험방법

본 실험에서는 원형 파이프에 부착되는 사각형 브래킷의 각도 변화에 따른 응력집중효과를 실험적으로 분석하고자 하였다. 따라서, Fig. 4에서와 같이 사각형 브래킷이 원형 파이프에 부착되는 각도(ψ)의 변화 30° , 60° , 90° , 150° 의 4가지 경우에 대해서 실험을 수행했으며, 이때, 180° 경우는 실제적으로 사각형 브래킷을 부착하기 위한 용접이 대단히 곤란하므로, 본 실험에서는 제외시켰다. 시험편의 초기상태는 용접으로 인하여 강제구속과 잔류응력이 존재하며 이러한 요인들이 시험결과에 미치는 영향을 제거하기 위하여 최대 하중을 부과한 상태로 4시간 경과시켜 구조물을 안정화시켰다.

실험에서 사각형 브래킷에 가해지는 최대하중은 $1000\text{N}(102\text{kgf})$ 이고, 하중속도는 약 0.3mm/sec 로 단계적이고 일정하게 부과하여 만능시험기(UTM)의 지침이 1000N 이 될 때, 하중 증가를 정지하였다. 이후에 각 부분에 부착된 strain gauge를 통하여 변형률과 응력을 측정하였고, 본 실험에서 얻은 결과값과 유한요소해석에서 구한 결과값을 비교·분석하고자 하였다.

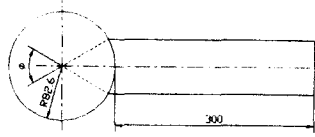


Fig. 4 Shape of specimen with respect to variation of the angle for attached area (parameter ψ)

3. 이론적 해석

본 연구에서 사용된 부재를 간단하게 나타내면 모두 사각형단면과 원형단면의 보로 생각할 수 있다. 이것은 Fig. 5에서처럼 원형단면 보가 양단 고정되고, 또한 사각형단면 보는 외팔보와 같이 일단 고정되는 것으로 간단하게 표현할 수 있으며, 이때 원형 단면 보에서 발생하는 처짐량과 굽힘 응력을 재료역학의 식을 이용하여 간단하게 구할 수 있다. 그리고, 실린더 보에서 발생하는 응력은 사각형단면 보로 인하여 발생하는 비틀림 모멘트도 함께 고려하여 최대조합응력을 구하였다.

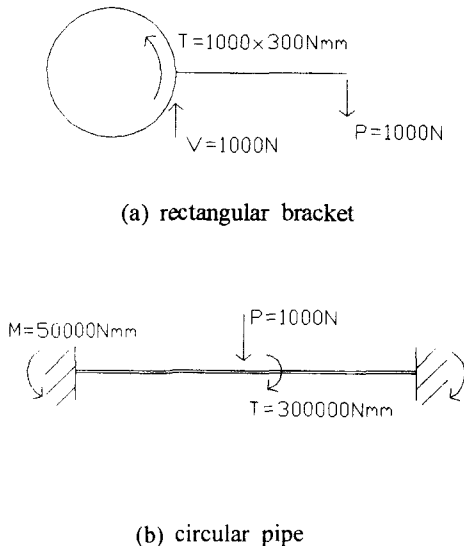


Fig. 5 Simplified specimen shape and conditions of force

4. 유한요소해석

4.1 모델링

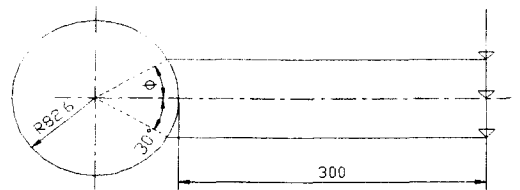
본 연구는 원형 파이프에 사각형 브래킷이 부

착되는 면의 각도와 형상변화에 따른 응력집중효과를 다양하게 분석하기 위하여 전체 5개의 설계파라미터(부착면의 양방향 각도변화, 부착면의 상부각도 변화, 폭변화, 형상변화, 위치변화)를 설정하였다. 우선, 부착면의 각도변화에 대하여 실험에 의해서 그 값을 구하고, 유한요소해석을 이용하여 실험 모델보다 많이 변화시켜(10° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , 180°) 다양한 각도변화에 대한 변위와 응력 값을 구하였다. 그리고, 원형 파이프 두께 변화에 대한 영향을 고찰하기 위하여 파이프 두께를 $\pm 1.1\text{mm}$ 만큼 변화시켜 동일한 각도변화에 대한 응력의 변화를 계산하였다. 또한, Fig. 6에서 나타낸 4종류 설계 파라미터의 형상변화에 대한 응력집중효과도 상기와 같은 방법으로 설계 파라미터를 미소 변화 시켜 정밀하게 분석하고자 하였다.

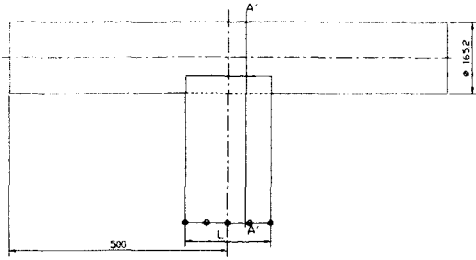
응력해석은 최대변형에너지를 기본으로 한 최대상당응력 값으로 시험 결과값과 비교·분석하였다. 모델에 사용된 요소는 6개의 자유도(u_x , u_y , u_z , rot_x , rot_y , rot_z)를 가진 쉘 요소(shell element)와 3개의 자유도(u_x , u_y , u_z)를 가진 솔리드 요소(solid element)를 사용하였으며, 보다 더 정확한 해석을 위해 파인 메쉬(fine mesh)로 분할하였다.^{(6)~(8)}

4.2 경계조건

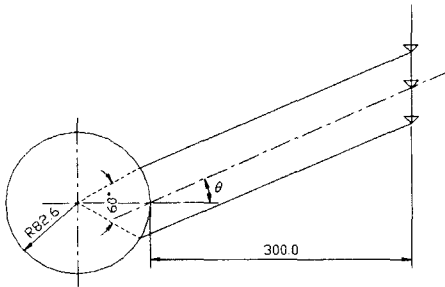
구조실험과 유한요소해석에서 나타나는 응력집중효과와 비교·분석하기 위하여, 실험조건과 동일하게 모델링하고 구속하였다. 구속조건은 원형 파이프 양단에 있는 모든 절점에 회전변위(rot_x , rot_y , rot_z)와 병진변위(u_x , u_y , u_z)를 0으로 구속하였으며, 하중은 파이프 중심에서 하중작용점까지 거리(382.6mm)를 일정하게 유지하여 동일 모멘트가 작용하도록 그 위치의 브래킷 끝단에 있는 절점에 집중하중 1000N을 부과하였다.



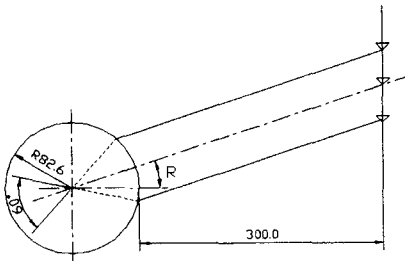
(a) parameter(ψ) : the variation of upper angle(ψ)



(b) parameter(L) : the variation of the width(L) of the bracket



(c) parameter(theta) : the shape variation of the bracket according to the change of angle



(d) parameter(R) : the rotation of attached angle

Fig. 6 Shape variation of the analysis model with respect to attached methods

5. 결과와 분석

5.1 이론적 해석의 결과

원형 파이프에 가해지는 하중 조건은 Fig. 5에 나타나 있으며, 이때 원형 단면의 보에 분포되는 응력은 수직하중에 의한 굽힘응력과 비틀림모멘트에 의한 전단응력을 함께 고려한 조합응력으로 계산하기 위해서 재료역학에서 사용되는 기본적인 공식을 도입하였다.⁽⁹⁾

수직하중 $P = 1000N$

사각형 단면 보에 의해 원형 파이프에 작용하는 비틀림모멘트 $T = 300,000Nmm$

수직하중에 의해서 원형 파이프의 양 고정단에 작용하는 굽힘 모멘트 $M = 500,000Nmm$

수직하중에 의한 굽힘응력

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{500,000}{94,311.1} = 5.302 N/mm^2$$

비틀림에 의한 전단응력

$$\tau = \frac{T}{Z_P} = \frac{300,000}{188,622.1} = 1.590 N/mm^2$$

최대 조합응력

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= \frac{\sigma_b}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2} \\ &= 5.742 N/mm^2 (MPa) \end{aligned}$$

5.2 실험과 유한요소해석의 결과

유한요소해석을 수행하여 얻을 수 있는 결과값은 여러 가지가 있으며, 도출된 각각의 결과값은 여러 가지 항복조건을 기본으로 하고 있다. 이러한 항복조건중에서 평면 응력상태와 연성재료에 가장 잘 일치하고 보편화되어 있는 최대변형에너지설을 이용하기 위하여 결과값은 상당응력분포를 구하였고, 또한 최대상당응력값은 채택된 재료가 가지고 있는 항복응력과 비교하여 안전율을 구한다. 다음 식은 최대변형에너지설을 기본으로 하는 최대상당응력을 구하는 공식이다.

$$\begin{aligned} \sigma_e^2 &= \frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \\ &\quad + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \} = 2(1 + \nu)\tau^2 \end{aligned}$$

5.2.1 사각형 브래킷의 결합되는 각도 변화 (parameter ψ)

원형 파이프 중심에서부터 일정 거리(382.6mm) 떨어진 곳에 동일하중이 작용될 때, Fig. 4에서 나타낸 바와 같이, 일정한 폭의 브래킷이 원형 파이프에 결합되는 각도(ψ)가 양방향으로 변화하므로서 나타나는 응력집중효과를 분석하고자 결합각도(Ψ)를 $10^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 로 변화시켜 동일조건에서 해석하였다.

실험에서 구해진 최대상당응력을 나타내기 위해서, 본 연구에서는 사각형 브래킷이 원형 파이프에 부착되는 길이에 대한 원형 파이프의 반지름 비

로 부차원화하여 Fig. 7에 나타내었다. 이때 각도의 변화는 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{\text{attached length}}{\text{radius}} = \frac{l}{r}$$

$$= \frac{r \cdot \theta}{r} = \theta$$

Fig. 7에 나타낸 바와 같이, 부착되는 사각형 브래킷의 각도가 증가함에 따라서 발생하는 최대상당응력 값은 이론해석에서 구한 값에 근접되고 있음을 알 수 있다. 또한 유한요소해석과 실험에서 구한 최대상당응력 값의 경향은 매우 잘 일치하고, 실험 값이 유한요소해석에서 얻은 값보다 더 크게 나타나고 있다. 이는 실제 실험에서는 재료의 결함이나 용접된 곳에서 응력집중효과가 해석보다 크게 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

응력분포도를 분석해 보면, 동일 모멘트를 받는 브래킷이 수직면에 결합될 경우, 브래킷을 지탱하는 수직면의 반력은 결합길이에 반비례하여 선형적으로 감소한다. 그러나 본 모델은 브래킷이 원형 파이프의 수평축을 중심으로 원주면을 따라 대칭적으로 결합되어 있으므로 반력의 크기를 결정하는 결합각도의 수직길이는 원형 파이프를 투영한 수직 길이(y축 변위)와 같다.

그러므로 원주면의 반력이 사인함수의 특성을 가지고 2차 곡선으로 감소하게 된다. 즉, 브래킷의 결합각도가 작은 수평축(0°)부근에서는 수직길이가 작고 각도변화에 대하여 수직길이 변화률이 크므로 최대반력과 최대반력감소률이 나타나고, 각도가 증가함으로써 반력감소률이 저하되면서 최대결합각도 180°에서는 수직길이가 최대이고 감소률이 최소이므로 최소반력과 최소감소률이 생긴다. 따라서 원주면에 발생된 응력 역시, 반력과 같이 2차 곡선으로 저하한다. 그리고, 이런 응력 특성을 변화시키는 요인으로 결합각도가 증가함으로써 결합되는 용접길이가 증가할 뿐만 아니라, 모멘트를 지탱하는 원주면의 반력 성분이 원주면의 법선과 접선방향으로 분력되어 원주의 수직방향으로 작용하는 전단응력 성분이 감소하고, 원주접선방향으로 작용하는 압축응력 성분이 증가한다. 따라서 각도 증가에 따라 최대상당응력 구배는 사인함수 구배보다 완만하게 나타나 결국 180° 일 경우 이론적 해석 값에 접근된다고 판단된다.

응력분포도에서 결합면적이 적은 10°의 경우에는 용접선의 모서리 부분보다는 사각형 브래킷의

용접선 바로 윗 부분에서 최대상당응력 128.1MPa이 나타났고, 결합각도 증가에 따라 용접선에서 최대상당응력이 나타났다. 이것은 모멘트를 지탱하는 원형 파이프가 브래킷과 결합되어 있으므로 브래킷의 강성으로 인하여 결합각도가 적을수록 용접선의 바로 윗쪽의 원형 파이프에서 좌굴이 발생되어 이런 현상이 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 그리고, 브래킷이 용접된 상하부 4개의 모서리 부분에서도 상당히 큰 상당응력이 발생되고 있다. 또한, 각도가 가장 큰 (180°)경우에서는 10.7MPa이 산출되어 결합각도가 증가함에 따라 최대상당응력은 브래킷이 용접된 상하부에서 발생하였으나, 그 값은 감소한다. 이것은 사각형 브래킷에 의해서 국부적으로 응력이 집중되어 발생한 것이 아니고, 원형 파이프가 굽힘 변형에 의한 영향을 지배적으로 받고 있어 응력이 분산되었기 때문이라고 생각된다.

또한, Fig. 9에서 보여 주듯이 원형 파이프의 두께변화에 따른 응력집중영향을 파악하기 위하여 응력해석을 수행했을 때에도 최대상당응력 변화곡선은 거의 유사하게 나타나고 있고, 단지 두께가 얇을수록 최대상당응력은 급격하게 커져 큰 응력구배를 나타내고 있다. 그러나, 그래프에서 나타내는 변수의 차원을 원형 파이프의 반지름 변화에 무관한 차원으로 변환하였으므로 유사한 형상을 가진 제품의 설계에 적절하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

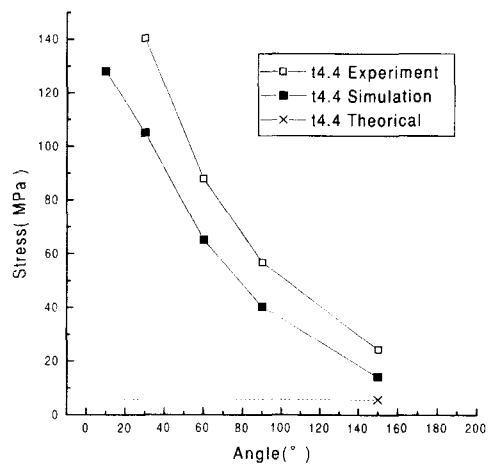


Fig. 7 Relationship between the variation of the attached area and the equivalent maximum stress

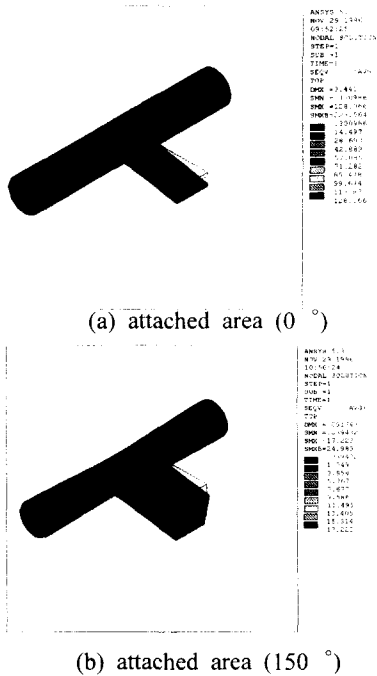


Fig. 8 Distribution of equivalent stress on the hollow pipe with respect to the variation of the attached area

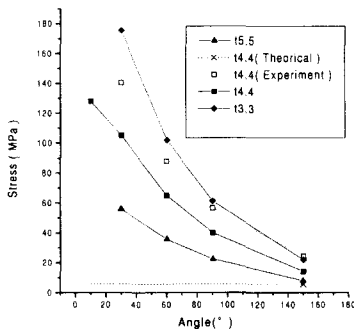


Fig. 9 Relationship between the variation of the hollow pipe thickness and the equivalent maximum stress

5.2.2 사각형 브래킷의 상부각도변화 (parameter : ψ)

본 해석 모델은 Fig. 6(a)에서 나타낸 바와 같이, 일정 폭의 브래킷이 원형 파이프의 수평축을 중심으로 결합되는 하부각도는 -30° 로 고정시키고 상부 각도만 ($10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$)

변화시켜 응력집중효과를 분석하고자 총 8개의 모델에 대하여 동일조건에서 해석하였다

Fig. 10에서 나타나는 것과 같이, 사각형 브래킷의 상부 각도가 증가함에 따라서 최대상당응력 값은 2차 곡선의 형태로 감소함을 알 수 있으며, 그 값은 각도가 10° 일 때, 93.5MPa 이 발생하고, 최대 각인 80° 일 때는 35.2MPa 이 발생한다. 최대상당응력이 발생하는 부분은 상부 각(ψ)이 하부 각보다 작을 때는 인장을 받는 부분의 용접된 모서리부분에서 발생하고, 상부 각(ψ)이 하부 각보다 점차 커질 때는 압축을 받는 부분의 모서리 부분에서 발생하는 것을 알 수 있다. 그러므로, 브래킷이 부착되는 상, 하부각을 가능한 한, 파이프의 수평축에 대하여 어느 한 쪽으로 편심되지 않고, 원형 파이프에 작용하는 하중이 상, 하부에 동일하게 분산되는 형상으로 하거나, 부득이 하계 상, 하부각이 다르게 요구될 때, 원형 파이프에 결합되는 브래킷의 결합 각이 하중작용방향에 대하여 수직방향으로 부착되는 것을 피하고, 원주에 접선이 되도록 설계하는 것이 최대상당응력을 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 왜냐하면, 원주면과 브래킷이 하중작용방향에 대하여 수직방향으로 부착되면 수직면에 작용하는 모든 모멘트가 전단력으로 변화되어 원주면을 찍는 효과를 주어 고응력이 산출되고, 각도가 증가됨에 따라, 반력이 감소할 뿐만 아니라, 응력성분이 분산되므로 응력이 저하된다고 판단된다.

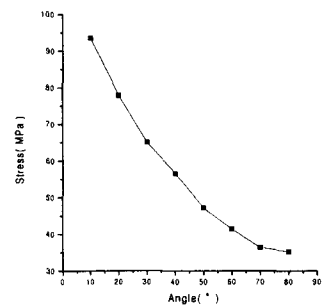


Fig. 10 The relationship between the variation of the attached angle and the equivalent maximum stress

5.2.3 사각형 브래킷의 결합되는 길이 변화 (parameter : L)

Fig. 6(b)에서 나타낸 바와 같이, 일정 폭의 브

래킷이 원형 파이프에 결합되는 각도는 파이프 수평축을 중심으로 $\pm 30^\circ$ 로 일정하게 유지하고, 브래킷 상하부의 폭(L)이 변화하므로써 나타나는 응력집중효과를 고찰하고자 브래킷 상하부의 폭(L)를 80mm에서 280mm까지 20mm 간격으로 모델링하여 총 11개의 모델에 대하여 동일조건에서 해석을 수행하였다

Fig. 11은 각 해석 모델에 대한 최대상당응력을 나타낸 것이다. 최대상당응력은 폭이 가장 작은 모델에서 84.7MPa이 발생하고, 폭이 가장 큰 경우에는 50.6MPa이 결합되는 네 모서리에서 발생함을 알 수 있었다. 전반적으로 사각형 브래킷의 결합 길이가 증가함에 따라서 발생하는 최대상당응력 값은 감소하고 있으나, (L/R) 값이 1~2 근처에서는 감소되는 구배가 매우 큼을 알 수 있다. 그리고, 2보다 큰 경우에는 감소되는 구배가 완만하게 나타나고 있다. 즉, 사각형 브래킷의 폭은 원형 파이프의 지름보다 크게 설계하는 것이 강도 향상에 잇점이 있음을 알 수 있다. 이는 브래킷 상하부의 폭이 감소하므로써 최대상당응력과 변형이 생기는 4개의 모서리부분에서 수평과 수직 방향의 전단응력의 집중으로 인하여 변형에너지가 증가되어 국부좌굴이 발생하고, 이때 발생된 응력집중효과가 브래킷 폭의 크기에 대하여 2개의 분리된 기울기를 가진 선분으로 나타나며 응력구배의 변곡점이 원형 파이프 직경에 근사함을 알 수 있다.

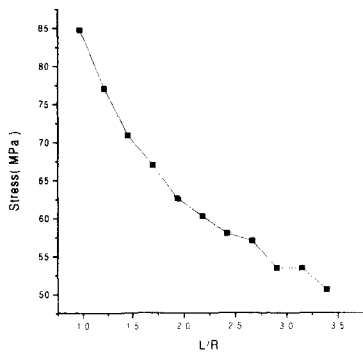


Fig. 11 Relationship between the variation of the attached length and the equivalent maximum stress

5.2.4 부착되는 브래킷의 형상의 변화 (parameter θ)

본 해석 모델은 결합각도 고정, 브래킷의 형상 변화로서 Fig. 6(c)와 같이 브래킷이 원형 파이프에 결합되는 각도는 파이프의 수평축을 중심으로 $\pm 30^\circ$ 로 고정시키고, 브래킷의 하중작용점이 수직방향으로 상승되어 브래킷의 형상이 변화하므로써 나타나는 응력집중효과를 고찰하기 위하여 각도(ψ)를 $10^\circ \sim 60^\circ$ 까지 10° 간격으로 증가시켜 총 6개의 모델에 대하여 동일조건에서 해석하였다.

이런 경우의 형상은 사각형 브래킷이 원형 파이프에 위치를 고정시킨 후, 사각형 브래킷의 부착되는 각도만을 변화시킴으로서 각도변화에 따라서 하중이 부가되는 형상이 변화되는 것으로 예상할 수 있으며, 응력해석에 구한 결과는 Fig. 12에 나타나 있다. 각도의 증가가 40° 까지는 최대상당응력이 68.4MPa의 근처에서 나타나고 있으며, 그 이상으로 증가하여 60° 일 때는 최대상당응력이 798.3MPa로, 상당응력의 값이 갑자기 크게 나타나고 있다. 그리고, 최대상당응력은 사각형 브래킷이 부착되는 모서리 상부에 발생하고 있으며, 압축보다는 인장을 받는 부분, 즉 사각형 브래킷의 상부에서 찢어지는 것으로 예상할 수 있다. 응력분포는 Fig. 8과 유사하게 나타나고 있다.

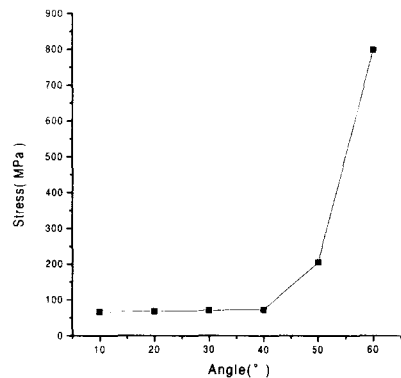


Fig. 12 Relationship between the variation of the attached shape and the equivalent maximum stress (Fixed attaching position)

5.2.5 브래킷 결합각도 회전변화 (parameter R)

본 해석 모델은 일정한 결합각도를 회전시키는 것으로서, Fig. 6(d)에서와 같이 브래킷이 원형 파이프에 결합되는 각도는 파이프 수평축을 중심으

로 $\pm 30^\circ$ 로 고정시키고 결합각도를 파이프 중심을 원점으로 회전시켜 하중작용점이 상승함으로서 나타나는 응력집중효과를 고찰하고자 파이프 수평축을 중심으로 $10^\circ \sim 60^\circ$ 까지 10° 씩 회전시켜 총 6개의 모델에 대하여 동일조건에서 해석하였다.

각 해석 모델에 대한 응력해석결과는 Fig. 13에 나타내었으며, 최대상당응력은 사각형 브래킷이 부착되는 모서리 상부에 발생되고 있다. 각도의 증가에 따라서 산출된 최대상당응력 값은 65.7MPa에서 84.4MPa로 변화되어 상당히 완만한 변화비율을 나타내고 있다. 이는 원형 파이프 원주의 접선방향과 브래킷의 결합각이 일정하고, 파이프 중심에 대하여 회전하므로써 지지점이 편심되고 작용 모멘트가 변화되기 때문이라고 판단된다. 따라서 원형 파이프에 사각형 브래킷이 결합되는 위치는 하중작용방향에 대한 수직방향을 중심으로 양방향으로 증가시켜 파이프 원주와 접선이 되도록 결합하는 것이 응력집중효과를 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다.

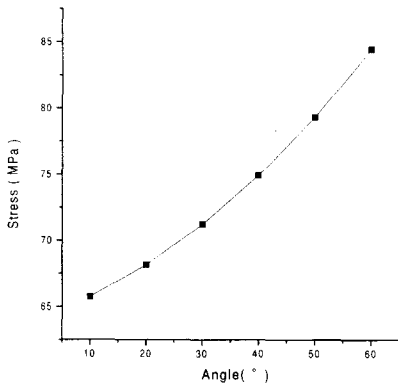


Fig. 13 Relationship between the variation of the attached shape and the equivalent maximum stress (Fixed attaching angle)

6. 결 론

1. 이론적 해석의 결과에서 구한 최대응력은 수직하중과 비틀림하중을 고려한 조합응력으로 5.742 MPa이 발생되었으며, 그리고 유한요소해석에서는 모델이 각도가 증가함에 따라 최대상당응력값은 감소하여 180° 에서는 10.744MPa이 발생하고, 이것은 이론해석에서 구한 값에 수렴하고 있으며, 이

값의 차이는 브래킷이 파이프에 부착될 때 발생하는 응력집중효과가 발생한 것으로 예상된다.

2. 사각형 브래킷의 결합각도가 양방향으로 변화하여 각도가 증가함에 따라 최대상당응력은 결합각도가 10° 일 때 128.1MPa이, 180° 일 때 10.7MPa이 결합부 모서리 부분에서 발생되어 각 모델에 대한 응력감소구배는 사인함수의 특성을 띄며 감소된다. 또한 실험에서 구한 결과값이 유한요소해석에서 구한 결과값의 경향과 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다. 따라서, 결합각도 선정은 응력감소구배가 완만한 90° 이상의 범위가 효과적으로 최대상당응력을 감소시킬 수 있다고 판단된다.

3. 사각형 브래킷의 결합각도가 상대적으로 상부에서만 증가함에 따라서 최대상당응력 값은 양방향 각도 변화에서처럼 사인함수의 특성을 띄며 감소구배를 나타내고 있으며, 최대상당응력이 발생하는 부분은 상부 각(ψ)이 적을 때 인장을 받는 용접된 모서리부분에서 발생하고, 상부 각(ψ)이 점차 커지면서 압축을 받는 곳의 모서리부분에서 발생한다. 따라서 브래킷의 결합각도는 상부각을 동일하게 하거나, 브래킷의 한쪽 끝각이 파이프 원주면에 수직방향으로 결합되는 것을 피하고 접선방향으로 결합하는 것이 응력집중을 분산시키는데 효과적이라고 판단된다.

4. 원형 파이프에 접합되는 사각형 브래킷의 폭이 증가함에 따라서 발생하는 최대상당응력 값은 감소하고 있으나, 감소되는 비율은 (L/R) 이 1~2사이 즉, 브래킷의 폭이 원형 파이프의 지름보다 적을 때는 매우 크게 발생하고, L/R 이 2보다 클 경우에는 완만하게 발생되고 있어 응력감소구배의 변곡점은 L/R 이 2인 지점에서 나타나고 있다. 따라서 브래킷의 폭 선정은 응력감소 구배가 완만한 L/R 이 2보다 큰 영역에서 선정하는 것이 응력집중을 분산시키는데 효과적이라고 판단된다.

5. 사각형 브래킷이 원형파이프에 부착되는 위치와 각도를 고정시키고 사각형 브래킷의 각도만을 변화시킨 형상에서 사각형 브래킷의 각도를 증가함에 따라 어느 한계 내에서는 최대상당응력이 큰 변화없이 68.4MPa 근처에서 발생되어 응력집중효과는 거의 없으나, 40° 이상에서는 최대상당응력이 갑자기 증가하여 60° 에서 798.3MPa 발생하여 그 비율이 크게 증가된다. 반면에 사각형 브래킷이 원형 파이프의 중심에 대하여 회전하여 부착 각도를 변화시키면 최대상당응력의 증가구배는 매우 완만

하께 나타나고 있다.

참고 문헌

1. V. N. Skopinsky and N. A. Berkov, "Stress Analysis of Ellipsoidal Shell with Nozzle under Internal Pressure Loading," J. Pressure Vessel Technology, Vol. 116, pp.431-436, 1994.
2. V. N. Skopinsky, "Numerical Stress Analysis of Intersection Cylindrical Shell," J. Pressure Vessel Technology, Vol. 115, pp.275-282, 1993.
3. Krupa, V., "Analysis for Lug and Saddle-supported Cylindrical Pressure Vessels," First International Conference on Pressure Vessel Technology, part 1, pp.491-500, 1969.
4. S. P. Timosenko and J. N. Goodier, "Theory of Elasticity," MCGRAW-HILL, pp.235-242, 1970.
5. S. P. Timosenko, S. Wolnowsky-Kriger, "Theory of Plate and Shell," MCGRAW-HILL, pp.553-554, 1970.
6. Kenneth H. Huebner, Earl A. Tornnton and Ted G. Byron, "The Finite Element Method for Engineerings," 1995.
7. Irving H. Shames and Clive L. Dym, "Energy and Finite Element Methods in Structural Mechanics," 1993.
8. O. C. Zienkiwicz and R. L. Taylor, "The Finite Element Method-Basic Formulation and Linear Problems," MCGRAW-HILL, pp.21-44, 1989.
9. Joseph H. Fraupel and Frankin E. Fisher, "Engineering Design - A Synthesis of Stress Analysis and Materials Engineering," A WILEY-INTERSCIENCE, pp.217-219, 1980.