

공학석사 학위논문

지부재에 축하중을 받는 내부
환보강 K형 관이음부의 수치해석



2011년 2월

부경대학교 대학원

해양공학과

임동주

공학석사 학위논문

지부재에 축하중을 받는 내부
환보강 K형 관이음부의 수치해석

지도교수 류 연 선

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2011년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 공 학 과

임 동 주

임동주의 공학석사 학위논문을 인준함

2011년 12월 17일



주 심 공학박사 김 정 태 (인)

위 원 공학박사 나 원 배 (인)

위 원 공학박사 류 연 선 (인)

목 차

List of Figures	iii
List of Tables	vi
List of Symbols	viii
ABSTRACT	x
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 방법	2
2. K형 관이음부의 특성과 환보강재	4
2.1 K형 관이음부의 특성	4
2.2 관이음부의 설계기준	6
3. K형 관이음부의 유한요소 모델	7
3.1 재료적 특성	7
3.2 K형 관이음부의 기하학적 특성	7
3.3 유한요소모델링	8
3.4 하중조건	10

4. K형 관이음부의 수치해석	11
4.1 비보강 관이음부의 수치해석	11
4.2 단일 환보강 이음부	13
4.2.1 환보강재 폭의 영향	13
4.2.2 환보강재 두께의 영향	17
4.3 이중 환보강 이음부	20
4.3.1 설치 위치에 따른 보강효과 검토	20
4.3.2 환보강재 폭의 영향	23
4.3.3 환보강재 두께의 영향	27
4.4 환보강 이음부의 접합부 응력변화	30
4.5 환보강재의 배치효과 - 동일질량 보강재 평가	34
4.5.1 단일 환보강 이음부	34
4.5.2 이중 환보강 이음부	37
4.5 수치해석 결과 및 고찰	40
5. 요약 및 결론	43
참고문헌	45

List of Figures

Figure 2.1 Single and double ring-stiffened tubular K-joints.

Figure 2.2 Ring-stiffener.

Figure 3.1 Shape of single and double ring-stiffened K-joint.

Figure 3.2 Geometry of 8-node shell element.

Figure 3.3 Shape of finite element model.

Figure 3.4 Loading condition(C-C, T-T, C-T).

Figure 4.1 Stress contour of unstiffened K-joint(C-C).

Figure 4.2 Stress contour of unstiffened K-joint(C-T).

Figure 4.3 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint with various ring height(C-C).

Figure 4.4 Stress contour of single ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$,
 $T_r=16mm$, C-C).

Figure 4.5 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint with various ring height(C-T).

Figure 4.6 Stress contour of single ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$,
 $T_r=16mm$, C-T).

Figure 4.7 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint with various ring

thickness(C-C).

Figure 4.8 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint with various ring thickness(C-T).

Figure 4.9 Location of installation for ring-stiffeners.

Figure 4.10 Stress contour of double ring-stiffened K-joint(crown toe, C-T).

Figure 4.11 Stress contour of double ring-stiffened K-joint(in between, C-T).

Figure 4.12 Stress ratio of unstiffened joint to ring stiffened joint.

Figure 4.13 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint with various ring height(C-C).

Figure 4.14 Stress contour of double ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$, $T_r=5mm$, C-C).

Figure 4.15 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint with various ring height(C-T).

Figure 4.16 Stress contour of double ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$, $T_r=5mm$, C-T).

Figure 4.17 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint with various ring thickness(C-C).

Figure 4.18 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint with various

ring thickness(C-T).

Figure 4.19 Stress variation along attached line between chord and
brace(C-C).

Figure 4.20 Stress variation along attached line between chord and
brace(C-T).

Figure 4.21 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint(C-C, T-T).

Figure 4.22 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint(C-T).

Figure 4.23 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint(C-C, T-T).

Figure 4.24 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint(C-T).

Figure 4.25 Arrangement effect of internal ring-stiffener.



List of Tables

Table 2.1 Definition of non-dimensional parameters

Table 3.1 Geometric parameters of ring-stiffened K-joint

Table 4.1 Numerical result of unstiffened K-joint

Table 4.2 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint($T_r=16mm$, C-C,
T-T)

Table 4.3 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint($T_r=16mm$, C-T)

Table 4.4 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$, C-C,
T-T)

Table 4.5 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$, C-T)

Table 4.6 Maximum value and location of hot spot stress

Table 4.7 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint($T_r=8mm$, C-C,
T-T)

Table 4.8 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint($T_r=8mm$, C-T)

Table 4.9 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$, C-C,
T-T)

Table 4.10 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$,
C-T)

Table 4.11 Stress along attached line between chord and brace(C-C)

Table 4.12 Stress along attached line between chord and brace(C-T)

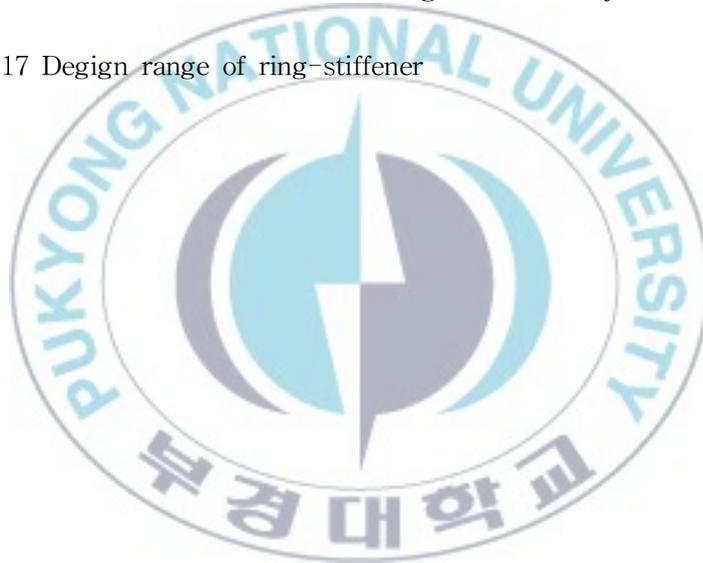
Table 4.13 Numerical result of single ring-stiffened K-joint(C-C, T-T)

Table 4.14 Numerical result of single ring-stiffened K-joint(C-T)

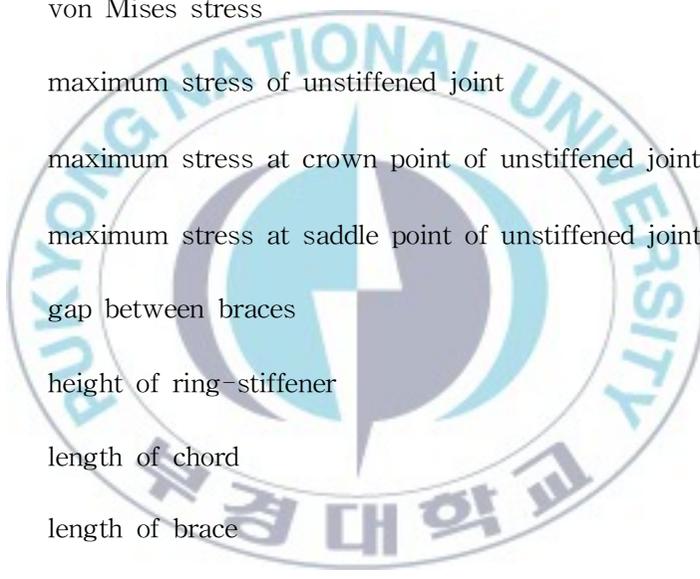
Table 4.15 Numerical result of double ring-stiffened K-joint(C-C, T-T)

Table 4.16 Numerical result of double ring-stiffened K-joint(C-T)

Table 4.17 Design range of ring-stiffener

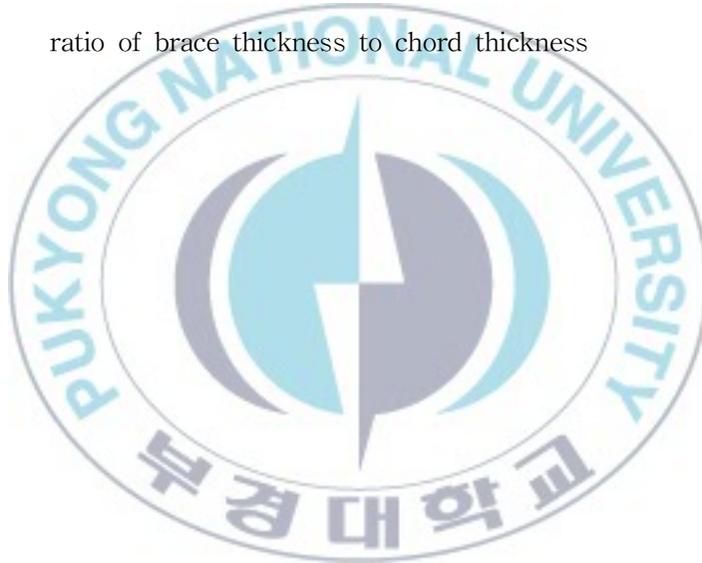


List of Symbols



D	chord diameter
d	brace diameter
e	eccentricity
E	modulus of elasticity
f	von Mises stress
f_u	maximum stress of unstiffened joint
f_{uc}	maximum stress at crown point of unstiffened joint
f_{us}	maximum stress at saddle point of unstiffened joint
g	gap between braces
H_r	height of ring-stiffener
L	length of chord
l	length of brace
R_f	stress ratio
T	thickness of chord
t	thickness of brace
T_r	thickness of ring-stiffener
β	ratio of brace diameter to chord diameter
γ	ratio of radius to thickness of chord

ζ	ratio of gap between brace to chord diameter
η	ratio of chord diameter to ring-stiffener height
θ_1	angle of left brace to chord
θ_2	angle of right brace to chord
ν	Poisson's ratio
ξ	ratio of ring-stiffener thickness to chord thickness
τ	ratio of brace thickness to chord thickness



Numerical Analysis of Internal Ring-stiffened Tubular K-joints with Axially Loaded Braces

Dong-Joo Lim

*Department of Ocean Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

ABSTRACT

In order to increase the capability of load resistance, the tubular joint is usually reinforced with lots of structural system. A reinforcement method with internal ring stiffener is effectually used of the steel tubular joint in large offshore structures. The effect of internal ring stiffener are numerically evaluated for reinforcement of tubular K-joints. Finite element analysis are performed to compute maximum stress of unstiffened and ring-stiffened K-joints subjected to axial loading.

The effect of loading condition and geometrical parameter of ring stiffener of joint behavior is assessed to determine the installation effect of single and double ring stiffeners. The arrangement effects of ring stiffener are evaluated using quantitative analysis compared single ring with double ring stiffener. Base on the numerical results, practical size of ring stiffener is proposed for stiffener design of tubular K-Joints.

1. 서 론

1.1 연구배경

강관구조는 해양구조물과 육상구조물, 심지어 우주공간 등에서도 널리 사용되는 형식으로 다른 단면부재에 비해 구조적인 장점이 많아 다양한 분야에서 사용되고 있다[Dutta, 2002; Graff, 1981]. 이러한 관형부재(tubular member)로 구성된 구조물에서 관이음부의 구조적 성능을 증가시키기 위한 다양한 보강법이 연구되고 있다. 이음부의 형태로는 T형, X형, K형, TK형, KK형 등이 흔히 사용되며, 관이음부의 구조강도를 증가시키는 보강방법에는 중첩(overlapping), 칼라판(collar plate), 거셋판(gusset plate), 내·외부 환보강재(ring-stiffener) 등이 있다[Kang 등, 1998; Marshall, 1992; Wardenier 등, 1991; Woghiren 등, 2009; Zhao 등, 2005]. 거셋판과 중첩 등의 방법을 사용할 경우 국부적 최대응력(hot spot stress)을 증가시켜 구조물의 피로수명을 단축시키는 경향이 있고, 외부 환보강재를 선택할 경우 흐름장에서의 저항을 크게 만들고, 미관상 좋지 않으므로 사용 시 제약이 있다. 자켓 구조와 같은 해양구조물의 경우 대형 관형재를 사용하므로 외부 형상을 유지하면서도 보강효과를 높일 수 있도록 내부 환보강재를 적용하는 사례가 늘고 있다. 특히 이와 같은 대형 강관구조시스템의 경우 내부 환보강재의 시공 또한 용이하여 널리 사용되고 있다[Graff, 1981]. 조 등 [2004; 2005]은 관이음부 내부에 환보강재를 배치시키는 방법이 X형, T형 관이음부의 구조강도를 증가시키는데 효과가 있음을 이미 입증하였고, 강도산정식을 제안한바 있다. 하지만 실제로 내부에 환보강 시스템을 적용하는 구조물을 설계할 경우 참고할 수 있는 국내·외 기준은 많지 않고, 이에 관한 연구 또한 미흡한 실정이다. 따라서 K형 관이음부의 내부에 한 개 또는 그 이상의 환보강재를 배치시키고 그에 따른 보강효과를 검토할 필요가 있다.

1.2 연구목적 및 방법

본 연구의 목적은 수치실험을 통해 두 지부재(brace)가 축방향으로 인장 또는 압축하중을 받는 내부 환보강 K형 관이음부의 구조적 거동을 평가하고, 단일(single) 및 이중(double) 환보강재(ring stiffener)에 대한 보강효과와 배치위치에 따른 영향을 파악하는 것이다. 환보강 관이음부의 구조적 거동을 평가하기 위한 방법에는 모형을 이용한 실험적 방법, 유한요소법과 같은 수치해석을 이용한 수치적 방법, 그리고 수학적 모델을 이용한 수학적 방법이 있다. 본 연구에서는 내부 환보강 관이음부의 평가를 위해 수치적 방법을 수행하고자 한다. 이를 위해 비보강(unstiffened) K형 관이음부의 유한요소모형을 구성하여 수치계산을 수행한다. 보강되지 않은 상태의 주부재와 지부재의 접합면 응력분포가 보강 후 어떻게 변화하는지 검토한다. 그리고 환보강재의 기하학적 형상의 변화에 따른 응력변화의 민감도를 분석하고자 한다. 이를 위해 환보강재의 두께와 폭을 각각 변화시켜 단일 환보강재와 이중 환보강재를 적용한 관이음부의 응력을 산출하여 분석하고자 한다. 또한 환보강재의 두께와 폭을 동시에 변화시킴으로써 환보강재의 질량을 일정하게 유지하여, 환보강재의 기하학적 특성이 보강이음부에 미치는 영향을 분석함으로써, 보강재의 설계 시 참고할 수 있는 자료를 제시하고자 한다.

연구의 목적을 달성하기 위해 2장에서는 K형 관이음부와 환보강재의 구조적 특성과 보강법 및 국내 설계기준을 제시하고, 관이음부의 거동을 표현하기 위해 사용되는 기하학적 무차원계수에 대해 알아본다.

3장에서는 관이음부의 해석을 위해 수행되는 유한요소해석의 개요와 재료적 특성, 하중과 경계조건 등 유한요소모형을 정의하고 구축한다.

4장에서는 비보강 이음부와 단일 환보강재 및 이중 환보강재를 적용한 이음부의 수치해석을 수행한다. 수치해석 결과를 바탕으로 단일 및 이중 환보강재의 폭과 두께와 같은 기하학적 파라미터와 이음부의 국부최대응력의 관계를 규명한다. 또한 환보강재 설치 시 나타나는 이음부의 응력분포 변화를 알아보고 이중 환보강재의 최적위치를 산정한다. 또한 동일 질량의 재료를 가지고 단일 및 이중 환보강재 모델을 구성하여 최적화가 되는 보

강제의 규격을 제시하고자 한다.

5장에서는 본 연구의 결과를 요약하고 결론을 제시한다.



2. K형 관이음부의 특성과 환보강재

2.1 K형 관이음부의 특성

Fig. 2.1은 내부에 환보강재가 설치된 K형 관이음부의 대표적 형상이다. 관이음부의 특성은 재료적 성질과 기하학적 특성으로 나타낼 수 있다. 기하학적 성질은 교차부재의 크기, 형상, 위치, 방향을 고려하여 표현할 수 있다. K형 관이음부의 기하학적 치수는 주부재의 직경(D)과 두께(T), 지부재의 직경(d)과 두께(t), 지부재의 경사각(θ)과 간격(g), 주부재의 길이(L), 그리고 두 지부재의 교점과 주부재의 중심축 간의 간격인 편심 등으로 표현할 수 있다. K형 관이음부의 무차원 계수에는 주부재의 길이와 직경비와 주부재와 지부재의 직경비, 주부재의 직경과 두께비, 주부재와 지부재의 두께비, 지부재의 간격계수 등이 있다[Karamanos, 2000; Marshall, 1992].

본 연구에서 요구되는 관이음부의 기하학적 무차원 계수에는 아래의 Table 2.1과 같이 직경비(β), 반경-두께비(γ), 두께비(τ), 직경-간격비(ζ)가 있고, K형 관이음부에 내부 환보강재를 이용한 보강법을 다루기 위해 도입한 주부재와 보강재의 두께비(ξ)와 폭비(η)가 있다. 여기서 H_r 은 환보강재의 폭이고, T_r 은 환보강재의 두께다.

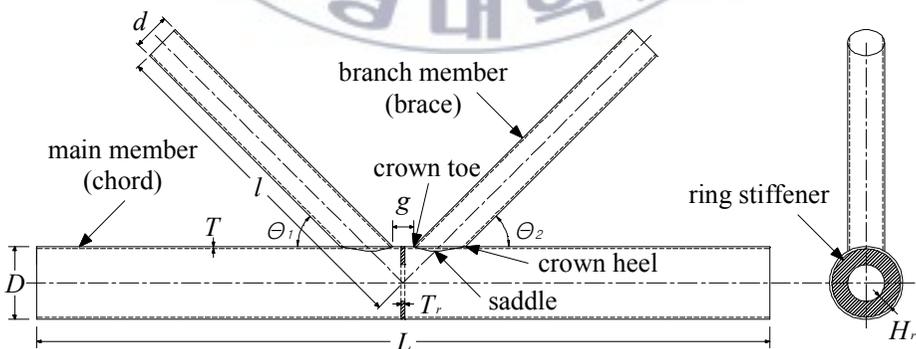


Fig. 2.1 Single and double ring-stiffened tubular K-joints.

Table 2.1 Definition of non-dimensional parameters

Symbol	Definition
β	$\frac{d}{D}$ (Ratio of brace diameter to chord diameter)
γ	$\frac{D}{2T}$ (Ratio of radius to thickness of chord)
τ	$\frac{t}{T}$ (Ratio of brace thickness to chord thickness)
ζ	$\frac{g}{D}$ (ratio of gap between brace to chord diameter)
η	$\frac{H_r}{D}$ (Ratio of chord diameter to ring-stiffener height)
ξ	$\frac{T_r}{T}$ (Ratio of ring-stiffener thickness to chord thickness)

2.2 관이음부의 설계기준

국외의 환보강 이음부에 대한 설계규정을 살펴보면 Wadernier 등[1991]이 2차원 평면트러스의 중공 원형단면 K형 및 Y형 이음부에 대한 설계기준을 제시하였지만, 보강재에 대한 기준보다는 주부재와 지부재의 두께와 직경에 대한 기준만을 제시하고 있다.

국내의 경우에는 도로교설계기준 해설[2008]에서 보강재의 최대간격과 환보강재의 강도에 대해서만 기준을 제시하고 있다. 강관부재에는 전단 및 비틀림에 의한 좌굴 또는 국부적인 변형을 방지하기 위하여 환보강재 또는 다이아프레임을 설치하는 것을 원칙으로 하며, 그의 최대간격은 바깥지름의 3배로 한다. 다만 $D/T_r \leq 30$ 의 범위에 있는 경우에는 보강재를 생략할 수 있다. 또한, 환보강재의 강도는 환보강재의 폭과 두께에 대한 식(2.1)을 만족하여야 한다. 여기서 환보강재는 Fig. 2.2와 같다.

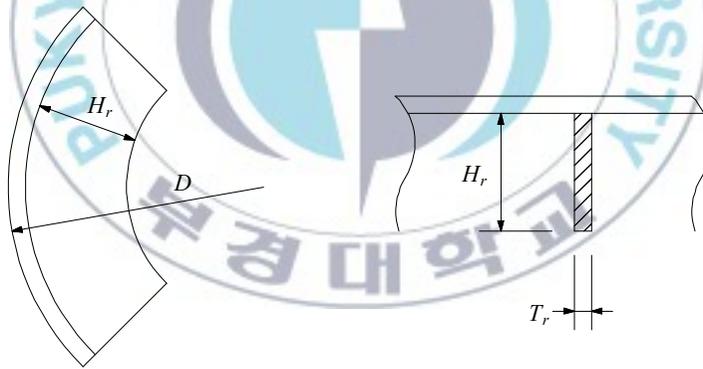


Fig. 2.2 Ring-stiffener.

$$\left. \begin{aligned} H_r &\geq \frac{D}{20} + 70 \\ T_r &\geq \frac{H_r}{17} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

3. K형 관이음부의 유한요소 모델

3.1 재료적 특성

내부 환보강 K형 관이음부를 구성하는 모든 부재는 동일한 재료를 사용한다. 환보강재와 주부재 단부의 격벽 또한 동일한 재료를 적용한다. 탄성계수(E)는 $2 \times 10^5 \text{ MPa}$, 프와송비(ν)는 0.3이며, 모든 재료는 균질(homogeneous)하다고 가정한다.

3.2 K형 관이음부의 기하학적 특성

본 연구에서 다루어질 대상모델인 K형 관이음부의 주부재와 지부재 및 보강재의 기하학적 특성은 Table 3.1과 같다. 주부재의 길이(L)는 $8m$, 지부재의 길이(l)는 $3m$ 다. 그리고 지부재 중심선의 교차점이 주부재의 중심선 상에 위치하므로 편심 e 는 0이다. 단일 및 이중 환보강재의 형상은 Fig. 3.1과 같다.

Table 3.1 Geometric parameters of ring-stiffened K-joint

Main member (mm)		Branch member (mm)		g	θ_1	θ_2	Non-dimensional parameter			
D	T	d	t				β	γ	τ	ζ
600	10	300	7	175.7	45°	45°	0.5	30	0.7	3.43

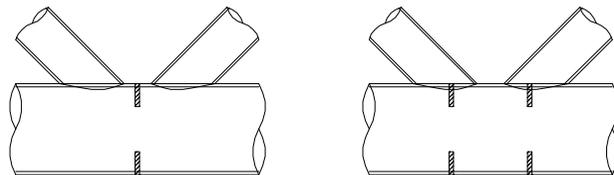


Fig. 3.1 Shape of single and double ring-stiffened K-joint.

3.3 유한요소모델링

관이음부의 거동을 수치적으로 해석하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. ANSYS는 150개 이상의 요소 라이브러리가 있고 전처리 과정과 해석과정 그리고 후처리 과정의 모듈(module)을 포함하고 있다. ANSYS에서 관이음부와 같은 관형부재를 모델링할 때 사용 가능한 유한요소에는 3차원 고체요소(solid element)와 쉘요소가 있다. K형 관이음부의 모델은 편의성과 계산시간에 대한 경제성을 고려하여 Fig. 3.2와 같은 구조용 8절점 3차원 쉘요소(3D Shell element)인 SHELL93을 이용하여 모델링한다[조, 2002; ANSYS, 2002]. SHELL93은 곡면 쉘구조의 모델에 적합하고, 기본적인 형태는 4변형이며 각 변의 중간에 위치한 중앙절점(mid-node)을 포함하여 총 여덟 개의 절점으로 구성된다. 각 절점은 이동과 회전에 대한 자유도(degree of freedom)를 각각 3개씩 가지므로 총 6개의 자유도를 갖는다. 이 요소의 변형 형상은 평면방향으로 2차형식이 된다. 보강 이음부의 내부에 설치하는 환보강재도 동일한 요소유형인 쉘요소를 사용하여 모델링한다.

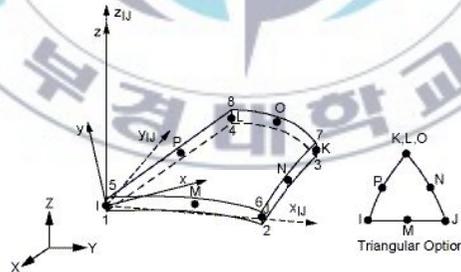


Fig. 3.2 Geometry of 8-node shell element.

유한요소망 제작 시에는 기하학적 대칭성을 이용하여 전체 구조체의 절반만을 모델링하였고, 대칭면에 존재하는 절점에는 대칭경계조건을 적용하였다. 주부재의 단부변형을 방지하고, 연속적인 효과를 나타내기 위하여 격벽과 같은 임의의 부재를 각 단부에 배치하였고, 주부재의 양단은 단순지지의 변위구속조건을 설정하였다. 또한 응력집중현상이 예측되는 부분은

유한요소를 대체적으로 조밀하게 생성하였다. 비보강 관이음부의 경우 한 개의 요소 당 48개의 자유도를 갖는 5579개의 요소와 16755개의 절점으로 유한요소망을 생성하였고, 그 형상은 Fig. 3.3과 같다.

기존 연구결과에서는 용접비드의 효과는 약 10% 내외의 강도 상승을 나타낸다고 발표되어 있다[조, 2002]. 하지만, 본 연구에서는 비보강이음부에 대한 보강이음부의 상대적인 응력변화를 조사하는 것이 주목적이므로 유한요소모델의 경제성을 고려하여 용접부 모델을 무시한다.

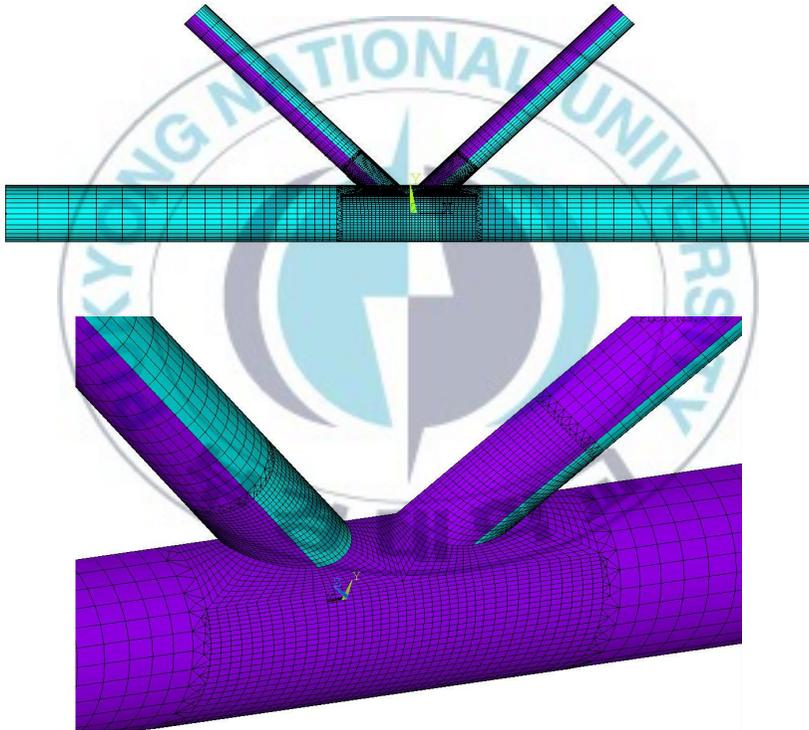


Fig. 3.3 Shape of finite element model.

3.4 하중조건

K형 관이음부의 구조해석을 위하여 각 지부재의 단부에 축방향 하중을 적용하였다. 각 단부에 압축력을 적용한 경우(C-C)와 인장력(T-T)을 적용한 경우, 그리고 압축력과 인장력을 각 지부재의 단부에 적용한 경우(C-T)로 설정하였으며, C-T 하중조건은 Fig. 3.4와 같다. 일반적으로 유한요소해석을 수행할 때 하중을 적용하기 위해 주로 하중제어방법(load control method)과 변위제어방법(displacement control method)이 사용된다 [Morgan 등, 1998; Makino 등, 1995]. 하중제어방법은 절점에 직접 하중을 가하는 방법이고, 변위제어방법은 절점에 변위를 발생시킴으로써 하중을 제어한다. 변위제어방법에서는 절점의 변위로부터 구한 해당 절점의 반력이 계산되고, 이 절점 반력의 합력이 외력으로 계산된다. 본 연구에서는 하중 모델링을 위해 변위제어방법을 사용하였으며, 지부재의 단부에 단위변위를 적용하였다.

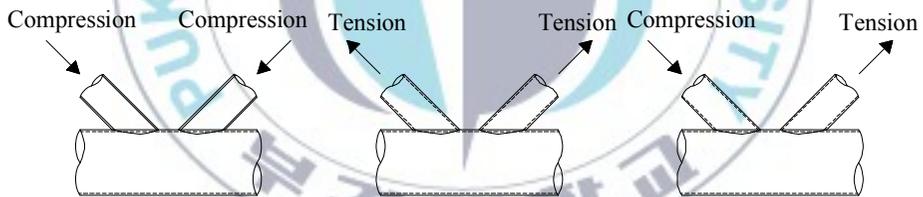


Fig. 3.4 Loading condition(C-C, T-T, C-T).

4. K형 관이음부의 수치해석

4.1 비보강 관이음부의 수치해석

일반적으로 관이음부의 국부최대응력은 새들점과 크라운점에서 발생한다. 본 연구에서 비보강 관이음부의 수치해석 결과, 하중제하에 따른 최대 von Mises 응력의 발생 위치는 C-C 또는 T-T의 경우 새들(saddle)점, C-T의 경우 크라운(crown)점이며, Table 4.1과 같다. 그리고 C-C와 T-T 하중조건 하의 경우, 각 응력의 부호만 다를 뿐 절대값은 서로 같으므로 한 번에 표시하고자 한다. Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 비보강 K형 관이음부에 각각 C-C와 C-T 하중조건 하의 변형을 나타내며, 실제 스케일에 비해 100배 과장하여 표시하였다.

Table 4.1 Numerical result of unstiffened K-joint

Loading condition	Max. von Mises Stress (MPa)	Location of max. Stress
C-C (T-T)	9.202	In between near saddle
C-T	27.745	Crown toe

비보강 K형 관이음부가 C-C 하중과 C-T 하중을 받는 경우 최대응력의 발생위치는 각각 새들점과 크라운토우(crown toe)점이다. C-C하중 하의 관이음부의 변형형상은 좌우 대칭이다.

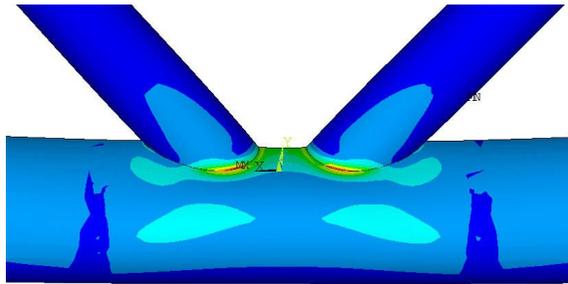


Fig. 4.1 Stress contour of unstiffened K-joint(C-C).

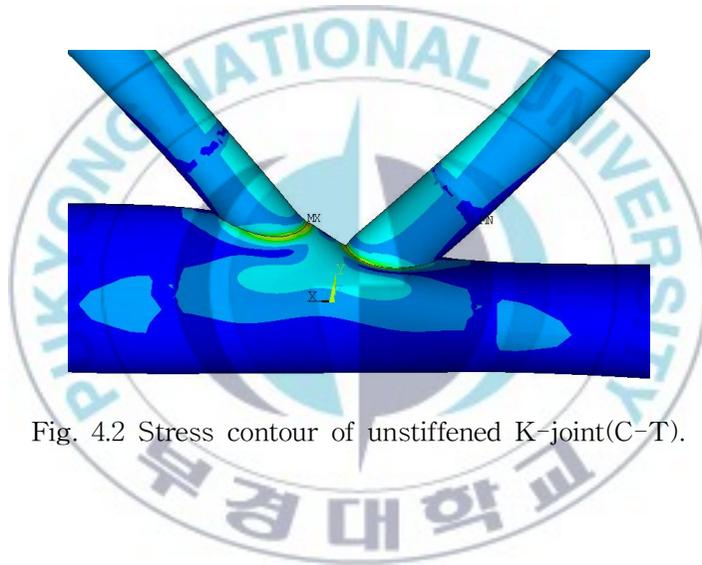


Fig. 4.2 Stress contour of unstiffened K-joint(C-T).

4.2 단일 환보강 이음부

비보강 K형 관이음부의 최대응력과 내부 환보강 K형 관이음부의 응력을 상대적으로 평가하기 위하여 응력비(R_f)를 식(4.1)과 같이 구성하였다.

$$R_f = \frac{f}{\max\{f_{us}, f_{uc}\}} \quad (4.1)$$

여기서, f_{us} 와 f_{uc} 는 각각 비보강 이음부 새들점과 크라운점에서의 최대 응력이고, f 는 새들점과 크라운점에서 발생하는 응력이다.

4.2.1 환보강재 폭의 영향

단일 환보강재의 폭이 이음부 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해, 환보강재의 두께(T_r)를 16mm로 고정하고, 환보강재의 폭(H_r)을 50mm에서 200mm까지 50mm 간격으로 변화시켰다. 두 지부재의 단부에 압축력만을 받을 경우의 주부재의 직경과 보강재의 폭비(η)의 변화에 대한 새들점과 크라운점에서의 응력비(R_f)는 Table 4.2와 Fig. 4.3과 같고, 환보강재의 폭과 두께가 각각 100mm, 16mm인 경우의 단일 환보강 관이음부의 응력 분포 형상은 Fig. 4.4와 같다.

C-C 하중 하의 단일 환보강 관이음부에서 비보강 관이음부의 최대응력 발생위치인 새들점에서의 응력은 주부재의 직경과 보강재의 폭비인 η 의 값이 증가할수록 감소한다. 비록 크라운점에서의 응력이 증가하는 경향이 있지만 전체 구조물에서의 응력은 최대응력보다 작으므로 보강효과가 발생한다. 특히 η 의 값이 0.1 미만일 때 보강효과가 좋으며, 비보강 관이음부의 최대응력에 비해 약 30% 정도의 응력 감소효과가 발생하였다. 선형탄성해석을 수행하므로 압축-압축과 인장-인장의 해석결과는 동일하게 나타났다.

Table 4.2 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint($T_r=16mm$, C-C, T-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	Stress ratio(R_f)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	1.000	0.555
50	0.08	16.0	1.60	0.558	0.747
100	0.17	16.0	1.60	0.419	0.936
150	0.25	16.0	1.60	0.404	0.966
200	0.33	16.0	1.60	0.402	0.972

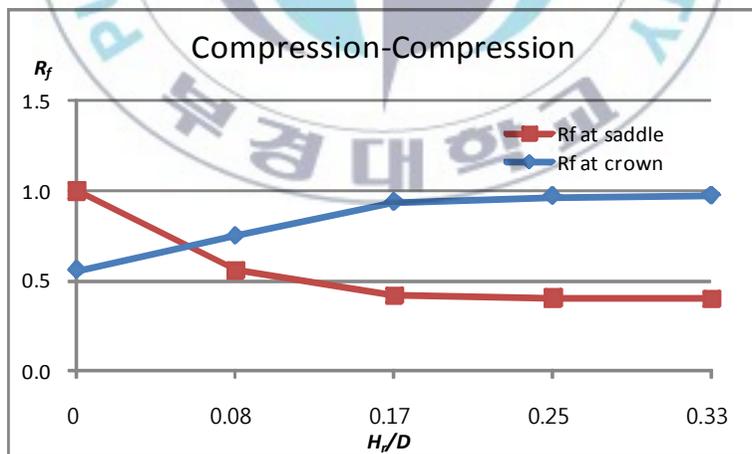


Fig. 4.3 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint with various ring height(C-C).

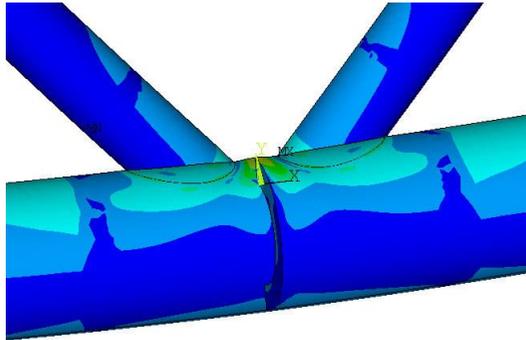


Fig. 4.4 Stress contour of single ring-stiffened K-joint
 $(H_r=100mm, T_r=16mm, C-C)$.

두 지부재가 각각 압축하중과 인장하중을 받는 경우도 단일 환보강을 적용하며, 환보강재의 두께를 $16mm$ 로 고정하고, 폭을 $50mm$ 에서 $200mm$ 까지 $50mm$ 간격으로 변화시켰다. 각 지부재의 단부에 압축력과 인장력을 받을 경우의 주부재의 직경과 보강재의 폭비(η)의 변화에 대한 새들점과 크라운점에서의 응력비는 Table 4.3과 Fig. 4.5와 같고, 환보강재의 폭이 $100mm$, 두께가 $16mm$ 인 경우의 단일 환보강 관이음부의 변형형상은 Fig. 4.6과 같다.

Table 4.3 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint($T_r=16mm, C-T$)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	Stress ratio(R_f)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	0.888	1.000
50	0.08	16.0	1.60	0.882	1.025
100	0.17	16.0	1.60	0.880	1.038
150	0.25	16.0	1.60	0.879	1.042
200	0.33	16.0	1.60	0.879	1.043

C-T 하중 하의 단일 환보강 관이음부는 주부재의 직경과 보강재의 폭비인 η 의 값이 증가함에 따라 새들점에서의 응력은 비보강 이음부의 최대응력에 비해 약 1% 정도 응력의 감소효과가 발생하지만, 비보강 관이음부의 최대응력 발생지점인 크라운점에서의 응력은 오히려 약 4% 정도 증가한다. 이러한 경우 보강효과가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

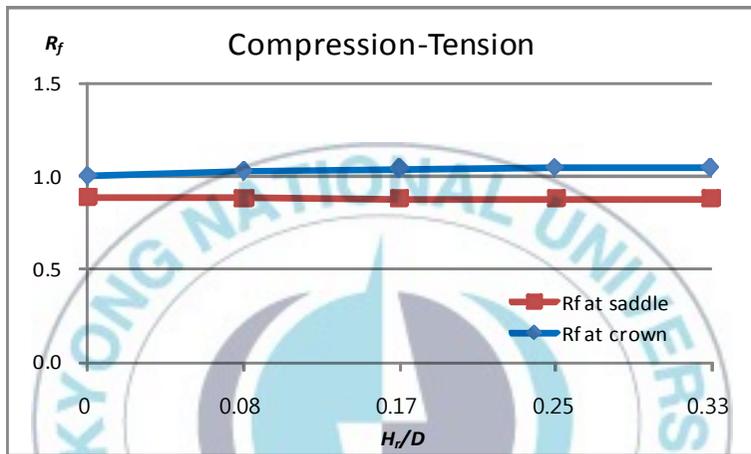


Fig. 4.5 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint with various ring height(C-T).

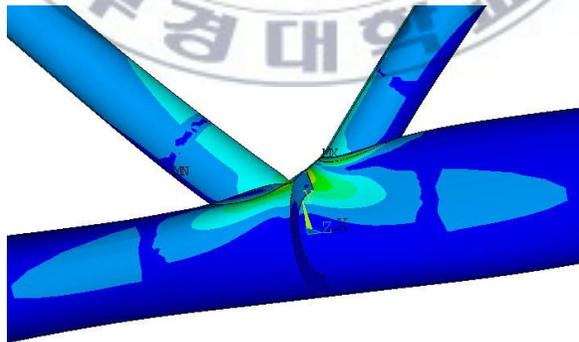


Fig. 4.6 Stress contour of single ring-stiffened K-joint ($H_r=100mm$, $T_r=16mm$, C-T).

4.2.2 환보강재 두께의 영향

환보강재의 두께가 이음부 응력에 미치는 영향을 알아보기 위해, 환보강재의 폭을 100mm로 고정하고, 환보강재의 두께를 5mm에서 20mm까지 5mm 간격으로 변화시켰다. 두 지부재의 단부에 압축력만을 받을 경우 주부재와 보강재의 두께비(ξ)의 변화에 대한 새들점과 크라운점에서의 응력비는 Table 4.4와 Fig. 4.7과 같다.

Table 4.4 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$, C-C, T-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	Stress ratio(R_f)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	1.000	0.555
100	0.17	5.0	0.50	0.476	0.866
100	0.17	10.0	1.00	0.436	0.915
100	0.17	15.0	1.50	0.421	0.934
100	0.17	20.0	2.00	0.414	0.943

C-C 하중 하의 단일 환보강 관이음부에서 비보강 관이음부의 최대응력 발생위치인 새들점에서의 응력은 주부재와 보강재의 두께비인 ξ 의 값이 증가할수록 감소한다. 비록 크라운점에서의 응력이 증가하는 경향이 있지만 전체 구조물에서의 응력은 최대응력보다 작으므로 보강효과가 발생한다. 특히 ξ 의 값이 0.5 미만일 때 보강효과가 좋으며, 비보강 관이음부의 최대응력에 비해 약 27% 정도 응력의 감소효과가 발생하였다. 그러나 ξ 의 값이 0.5를 넘어서는 영역에서는 보강효과가 더 이상 증가하지 않는다.

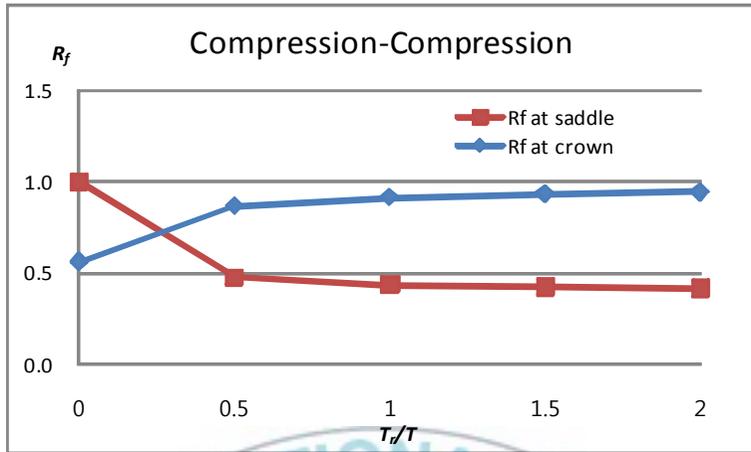


Fig. 4.7 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint with various ring thickness(C-C).

두 지부재가 각각 압축하중과 인장하중을 받는 경우도 단일 환보강을 적용하며, 환보강재의 폭을 100mm로 고정하고, 두께를 5mm에서 20mm까지 5mm 간격으로 변화시켰다. 주부재와 보강재의 두께비(ξ)의 변화에 대한 새들점과 크라운점에서의 응력비는 Table 4.5와 Fig. 4.8과 같다.

Table 4.5 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$, C-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	Stress ratio(R_f)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	0.888	1.000
100	0.17	5.0	0.50	0.887	1.002
100	0.17	10.0	1.00	0.884	1.015
100	0.17	15.0	1.50	0.881	1.034
100	0.17	20.0	2.00	0.877	1.051

C-T 하중 하의 단일 환보강 관이음부는 주부재와 보강재의 두께비인 ξ 의 값이 증가하더라도 보강효과가 발생하지 않는다. 새들점에서의 응력은 비보강 이음부의 최대응력에 비해 약 1% 정도 응력이 감소하지만, 비보강 관이음부의 최대응력이 발생한 크라운점에서의 응력은 오히려 약 5% 정도 증가한다. 이 경우 단일 환보강재를 이용한 보강법은 효과적이지 않다.

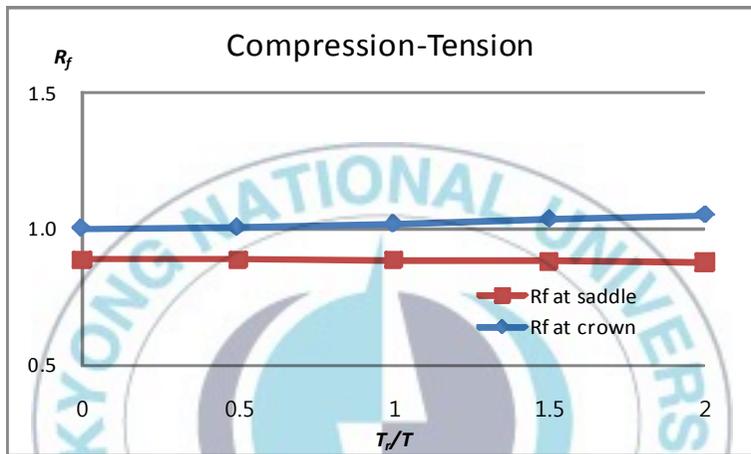


Fig. 4.8 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint with various ring thickness(C-T).

4.3 이중 환보강 이음부

4.3.1 설치 위치에 따른 보강효과 검토

본 절에서는 이중 환보강재의 최적 위치를 결정하기 위하여 세 가지 경우의 수치해석을 수행하였다. 지부재 중심축을 회전축으로 하여 크라운토크우점으로부터 0° (crown toe), 45° (in between), 90° (saddle)의 위치에 환보강재를 배치하였으며 Fig. 4.9와 같다.

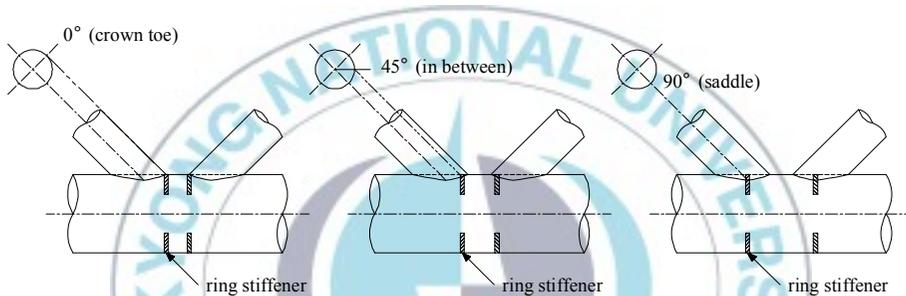


Fig. 4.9 Location of installation for ring-stiffeners.

환보강재의 크기는 폭 100mm , 두께 8mm 이고 재료의 성질은 주부재와 동일하며, 하중조건은 압축-압축과 압축-인장의 두 가지 경우에 대해 해석하였다. 수치해석결과로부터 환보강재의 설치위치에 따른 국부최대응력의 크기와 발생위치를 검토하였다. 압축-압축의 하중조건에서 비보강 이음부의 국부최대응력은 새들에서 발생하였으나 환보강 이음부에서는 크라운점으로 이동함을 알 수 있다. 또한 국부최대응력의 크기는 환보강재를 설치함으로써 감소하였고, 이들 중 환보강재가 새들에 위치할 때 응력감소량이 가장 컸다. 압축-인장의 하중조건에서는 환보강재를 설치함으로써 국부최대응력이 평균 24% 정도 감소하였고, 최대응력의 발생위치는 보강재의 설치위치별로 다르게 나타났다. 국부최대응력의 크기는 보강재의 위치에 상관없이 거의 유사하게 나타났다. Fig. 4.10과 4.11은 설치 위치에 따른 접합부 주위의 등가응력분포를 나타낸 것이며, 보강재 설치위치별 국부최대응력의 크기와 발생위치를 Table 4.6과 같이 정리하였다. 또한 비보강 이음

부와 보강이음부의 국부최대응력의 비를 Fig. 4.12에 나타내었다. 여기서, f_u 는 비보강 이음부의 최대응력값이고, f 는 해당 이음부의 최대응력이다. Fig. 4.12에서 보면 이중 환보강이음부의 경우 환보강재의 최적위치는 새들 접임이 확인되었다.

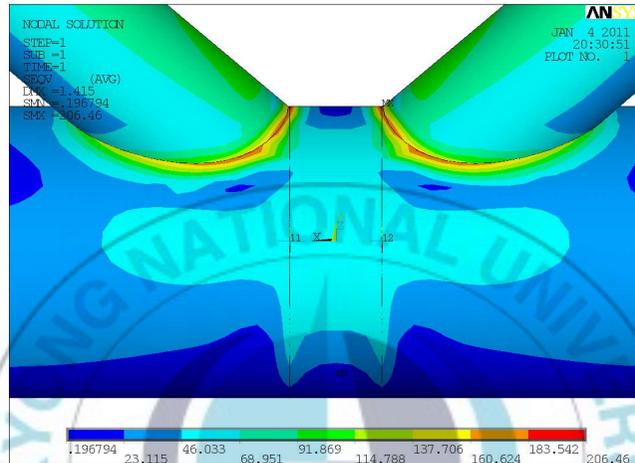


Fig. 4.10 Stress contour of double ring-stiffened K-joint(crown toe, C-T).

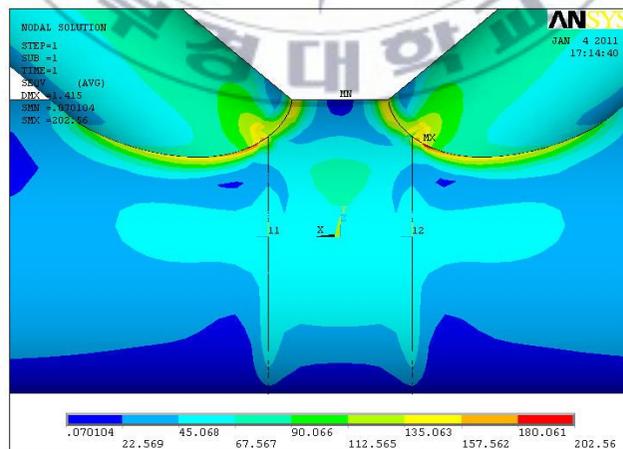


Fig. 4.11 Stress contour of double ring-stiffened K-joint(in between, C-T).

Table 4.6 Maximum value and location of hot spot stress

Location of ring stiffeners	Max. stress(MPa)		Location of max. stress	
	C-C	C-T	C-C	C-T
Unstiffened	9.202	27.745	Saddle	Crown
Crown toe	7.035	21.067	Crown	Crown
In between	7.300	20.669	Crown	Saddle
Saddle	6.737	21.182	Crown	Saddle

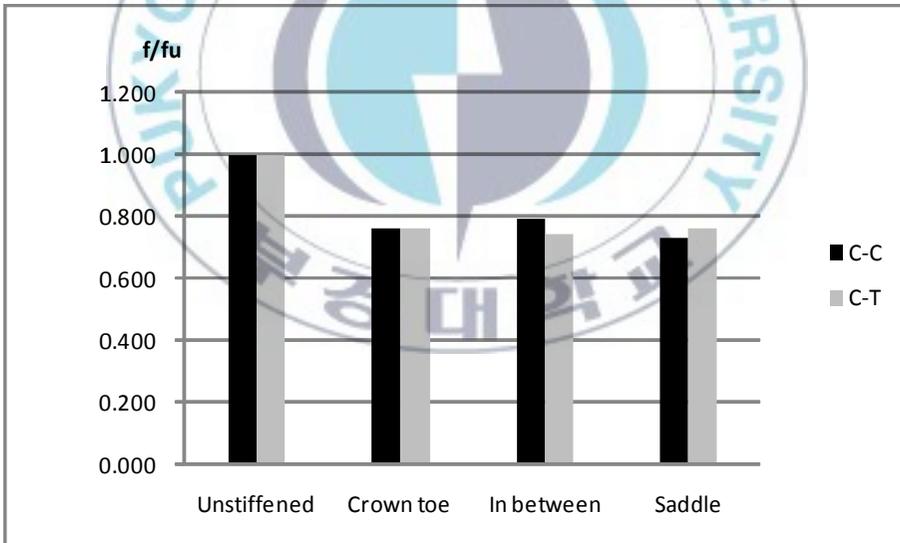


Fig. 4.12 Stress ratio of unstiffened joint to ring stiffened joint.

4.3.2 환보강재 폭의 영향

본 절에서는 관이음부에 환보강재의 두께를 8mm로 고정하고, 환보강재의 폭을 50mm에서 200mm까지 50mm 간격으로 변화시키면서 이중 환보강을 적용하였다. 두 지부재의 단부에 압축력만을 받을 경우 주부재와 보강재의 두께비(ξ)의 변화에 대한 새들점과 크라운점에서의 응력비는 Table 4.7과 Fig. 4.13과 같고, 환보강재의 폭과 두께가 각각 100mm, 8mm인 경우의 이중 환보강 관이음부의 변형형상은 Fig. 4.14와 같다.

Table 4.7 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint($T_r=8mm$, C-C, T-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	Stress ratio(R_f)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	1.000	0.555
50	0.08	8.0	0.80	0.719	0.630
100	0.17	8.0	0.80	0.449	0.703
150	0.25	8.0	0.80	0.443	0.713
200	0.33	8.0	0.80	0.450	0.715

C-C 하중 하의 이중 환보강 관이음부는 주부재의 직경과 보강재의 폭비인 η 의 값이 증가할수록 비보강 관이음부의 최대응력 발생지점인 새들점에서의 응력은 감소한다. 크라운점에서의 응력은 22% 정도 증가하지만, 전체적인 응력변화를 고려하면 보강효과가 증가한다고 할 수 있다. 특히 η 의 값이 0.1 미만일 때 보강효과가 매우 좋으며, 비보강 관이음부의 최대응력에 비해 약 38% 정도 응력의 감소효과가 발생하였다. 그러나 η 가 0.1 이상

인 경우에는 응력 감소가 크게 발생하지 않으므로 보강효과가 더 이상 증가하지는 않음을 알 수 있다.

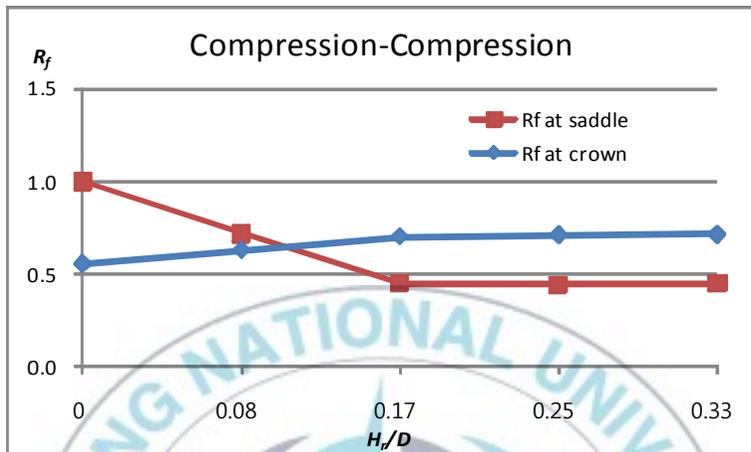


Fig. 4.13 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint with various ring height(C-C).

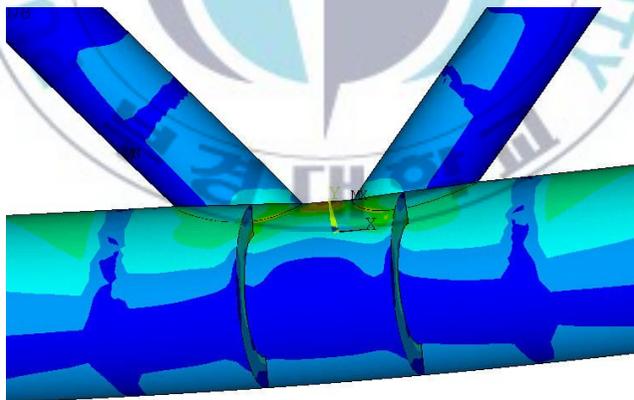


Fig. 4.14 Stress contour of double ring-stiffened K-joint ($H_r=100mm$, $T_r=5mm$, C-C).

두 지부재가 각각 압축하중과 인장하중을 받는 경우도 이중 환보강을 적용하며, 각 환보강재의 두께를 8mm로 고정하고, 폭(H_r)을 50mm에서 200mm까지 50mm 간격으로 변화시켰다. 주부재와 보강재의 두께비(ξ)의 변화에 대한 새들점과 크라운점에서의 응력비(R_f)는 Table 4.8과 Fig. 4.15와 같고, 환보강재의 폭과 두께가 각각 100mm, 5mm인 경우의 이중 환보강 관이음부의 변형형상은 Fig. 4.16과 같다.

Table 4.8 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint($T_r=8mm$, C-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	Stress ratio(R_f)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	0.888	1.000
50	0.08	8.0	0.80	0.835	0.816
100	0.17	8.0	0.80	1.060	0.664
150	0.25	8.0	0.80	1.257	0.715
200	0.33	8.0	0.80	1.339	0.705

C-T 하중 하의 이중 환보강 관이음부는 주부재의 직경과 보강재의 폭비인 η 의 값이 증가할수록 비보강 관이음부의 최대응력 발생지점인 크라운점에서의 응력은 감소하는 경향을 보인다. 특히 η 의 값이 0.1 미만일 때 보강효과가 비교적 좋은 것으로 판단되며, 비보강 관이음부의 최대응력에 비해 약 18% 정도 응력의 감소효과가 발생하였다. 그러나 η 의 값이 0.15 이상이 되면 최대응력이 비보강 관이음부의 최대응력을 초과하게 되며, 새들점과 크라운점에서의 응력이 증가하는 경향을 보인다. 따라서 C-T 하중 하의 이중 환보강 관이음부의 경우 보강효과가 환보강재의 폭에 비례하지 않음을 알 수 있다.

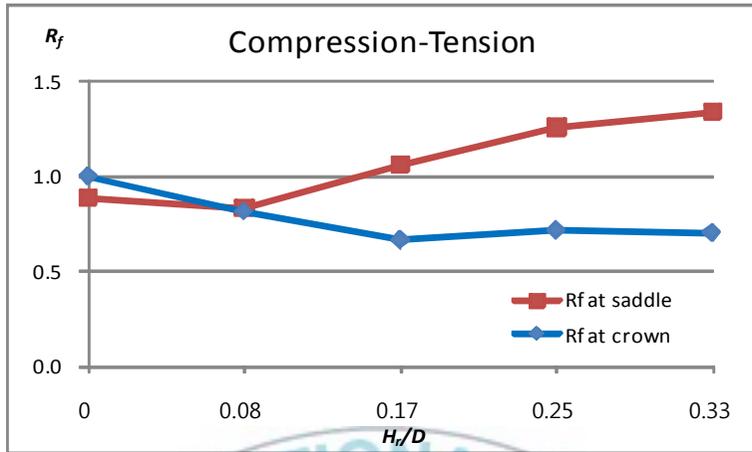


Fig. 4.15 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint with various ring height(C-T).

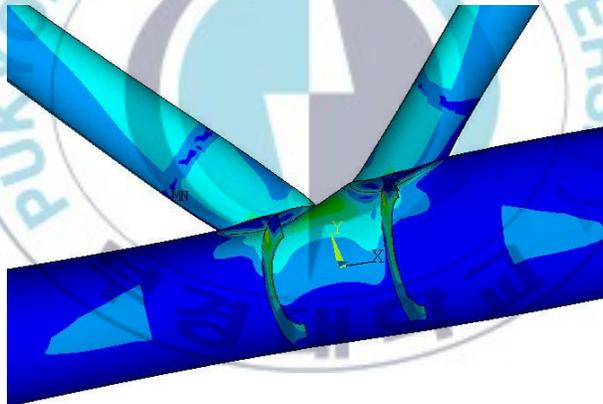


Fig. 4.16 Stress contour of double ring-stiffened K-joint ($H_r=100mm$, $T_r=5mm$, C-T).

4.3.3 환보강재 두께의 영향

본 절에서는 관이음부에 환보강재의 폭을 100mm로 고정하고, 환보강재의 두께를 2.5mm에서 10mm까지 2.5mm 간격으로 변화시키면서 이중 환보강재를 적용하였다. 두 지부재의 단부에 압축력만을 받을 경우 주부재와 보강재의 두께비(ξ)의 변화에 대한 새들점과 크라운점에서의 응력비는 Table 4.9와 Fig. 4.17과 같다.

Table 4.9 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$, C-C, T-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	Stress ratio(R_f)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	1.000	0.555
100	0.17	2.5	0.25	0.648	0.669
100	0.17	5.0	0.50	0.476	0.691
100	0.17	7.5	0.75	0.453	0.701
100	0.17	10.0	1.00	0.439	0.707

C-C 하중 하의 이중 환보강 관이음부는 주부재와 보강재의 두께비인 ξ 의 값이 증가할수록 비보강 관이음부의 최대응력 발생위치인 새들점에서의 응력이 56% 가량 감소한다. 비록 크라운점에서의 응력이 21% 정도 증가하지만, 전체적인 구조물을 볼 때 보강효과가 뛰어남을 알 수 있다. 특히 ξ 의 값이 0.5 미만일 때 보강효과가 매우 좋으며, 비보강 관이음부의 최대응력에 비해 전체적으로 약 36% 정도 응력의 감소효과가 발생하였다. 그러나 ξ 의 값이 0.5를 넘어서는 영역에서는 보강효과가 더 이상 증가하지 않는다.

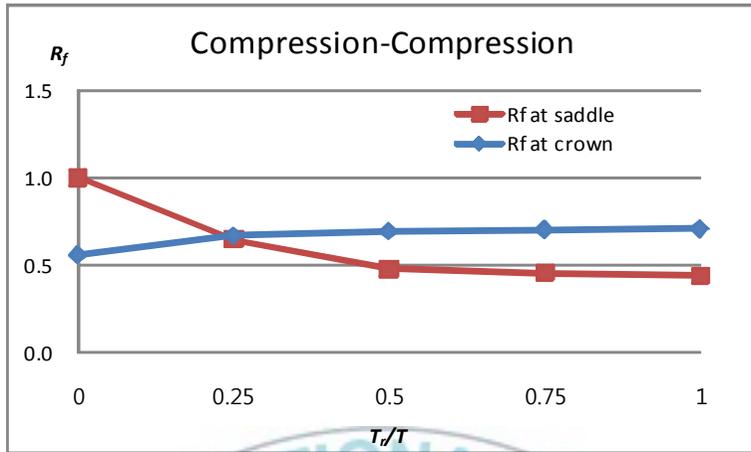


Fig. 4.17 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint with various ring thickness(C-C).

두 지부재가 각각 압축하중과 인장하중을 받는 경우도 이중 환보강을 적용하며, 환보강재의 폭을 100mm로 고정하고, 각 환보강재의 두께를 2.5mm에서 10mm까지 2.5mm 간격으로 변화시켰다. 두 지부재의 단부에 각각 압축력과 인장력을 받을 경우 주부재와 보강재의 두께비(ξ)의 변화에 대한 새들점과 크라운점에서의 응력비는 Table 4.10과 Fig. 4.18과 같다.

C-T 하중 하의 이중 환보강 관이음부는 주부재와 보강재의 두께비인 ξ 의 값이 증가할수록 보강효과가 증가하지는 않는다. 특히 ξ 의 값이 0.04 미만일 때 보강효과가 나타나지만, 이는 내부 환보강재 설계기준에서 제시한 규격에 부합하지 않으므로 무시한다. 오히려, ξ 의 값이 0.75 부근에서 비보강 관이음부의 최대응력에 비해 3.6% 정도 높지만 최대응력 발생위치인 크라운점에서의 응력이 약 25% 정도 감소하였다.

Table 4.10 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint($H_r=100mm$,
C-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	Stress ratio(R_f)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	0.888	1.000
100	0.17	2.5	0.25	1.492	0.810
100	0.17	5.0	0.50	1.206	0.770
100	0.17	7.5	0.75	1.036	0.748
100	0.17	10.0	1.00	1.144	0.735

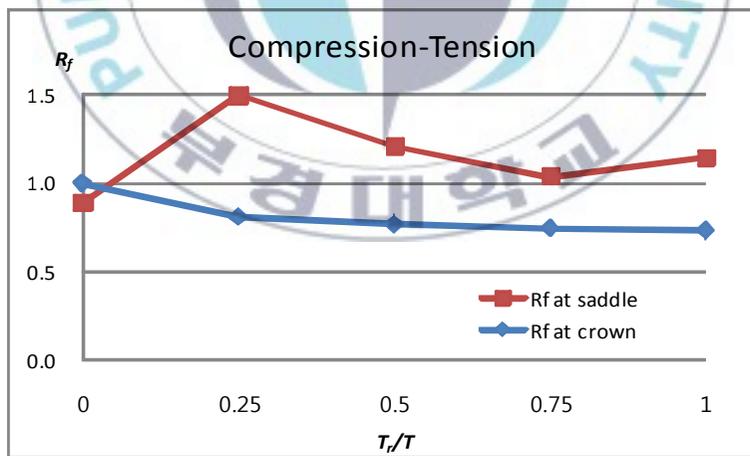


Fig. 4.18 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint with various ring thickness(C-T).

4.4 환보강 이음부의 접합부 응력 변화

보강재를 사용하지 않은 경우에 주부재와 지부재의 접합부를 따라 발생하는 응력이 단일 환보강재와 이중 환보강재를 각각 설치함으로써 어떻게 변화하는지를 검토하였다. 단일 환보강재와 이중 환보강재 각각의 총 질량이 $0.005m^3$ 이 되도록 하였고, 이 경우의 환보강재의 폭은 $100mm$, 단일 보강 시와 이중 보강 시의 두께는 각각 $15.92mm$ 와 $7.96mm$ 로 설정하였다.

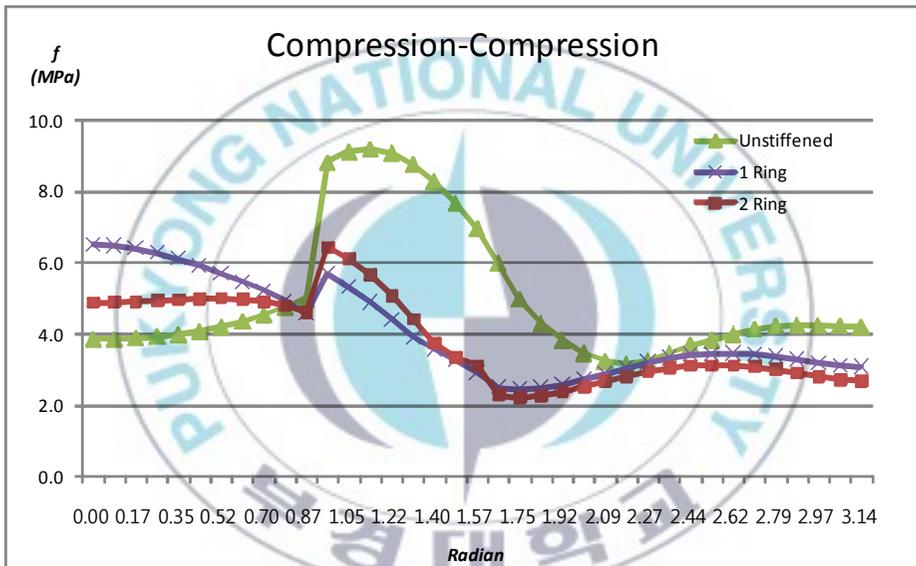


Fig. 4.19 Stress variation along attached line between chord and brace(C-C).

Fig. 4.19와 Table 4.11은 크라운토크우점에서 시작하여 새들점을 거쳐 크라운힐점까지의 반원주 상의 응력을 나타내었다. C-C의 경우 비보강 이음부에 비해 단일 또는 이중 환보강 이음부의 응력이 전체적으로 감소함을 확인할 수 있다. 비보강 시 최대응력이 발생하는 위치의 응력 또한 현저히 감소하며, 특히 단일 환보강재를 적용하는 것이 이중 환보강재를 적용할 경우에 비해 최대응력의 감소폭이 크다는 것을 알 수 있다.

Table 4.11 Stress along attached line between chord and brace(C-C)

Angle (Rad)	von Mises Stress (MPa)			Remarks
	Unstiffened	1 Ring	2 Ring	
0.000	3.861	6.515	4.891	Crown toe
0.087	3.869	6.487	4.897	
0.175	3.893	6.409	4.918	
0.262	3.935	6.287	4.949	
0.349	3.995	6.119	4.977	
0.436	4.083	5.923	5.001	
0.524	4.203	5.705	5.007	
0.611	4.361	5.467	4.986	
0.698	4.551	5.204	4.922	
0.785	4.763	4.917	4.808	
0.873	5.015	4.560	4.619	
0.960	8.813	5.701	6.443	
1.047	9.109	5.324	6.120	
1.134	9.202	4.889	5.656	
1.222	9.084	4.410	5.077	
1.309	8.768	3.911	4.420	
1.396	8.284	3.591	3.752	
1.484	7.667	3.259	3.349	
1.571	6.961	2.921	3.130	Saddle
1.658	5.989	2.512	2.304	
1.745	4.991	2.462	2.216	
1.833	4.296	2.493	2.271	
1.920	3.837	2.590	2.383	
2.007	3.469	2.729	2.520	
2.094	3.239	2.892	2.671	
2.182	3.173	3.058	2.822	
2.269	3.267	3.214	2.958	
2.356	3.458	3.333	3.053	
2.443	3.681	3.428	3.128	
2.531	3.834	3.445	3.129	
2.618	4.005	3.463	3.131	
2.705	4.150	3.442	3.094	
2.793	4.225	3.378	3.018	
2.880	4.258	3.289	2.920	
2.967	4.251	3.191	2.813	
3.054	4.235	3.114	2.729	
3.142	4.210	3.078	2.691	Crown heel

위와 같은 조건에서 하중조건을 C-T로 변화시켰다. 보강재를 사용하지 않은 경우에 주부재와 지부재의 접합부를 따라 발생하는 응력이 단일 환보강재와 이중 환보강재를 각각 설치함으로써 어떻게 변화하는지를 검토하였다. 단일 환보강재와 이중 환보강재 각각의 총 질량이 $0.005m^3$ 이 되도록 환보강재의 폭은 $100mm$, 단일 보강 시와 이중 보강 시의 두께는 각각 $15.92mm$ 와 $7.96mm$ 로 설정하였다.

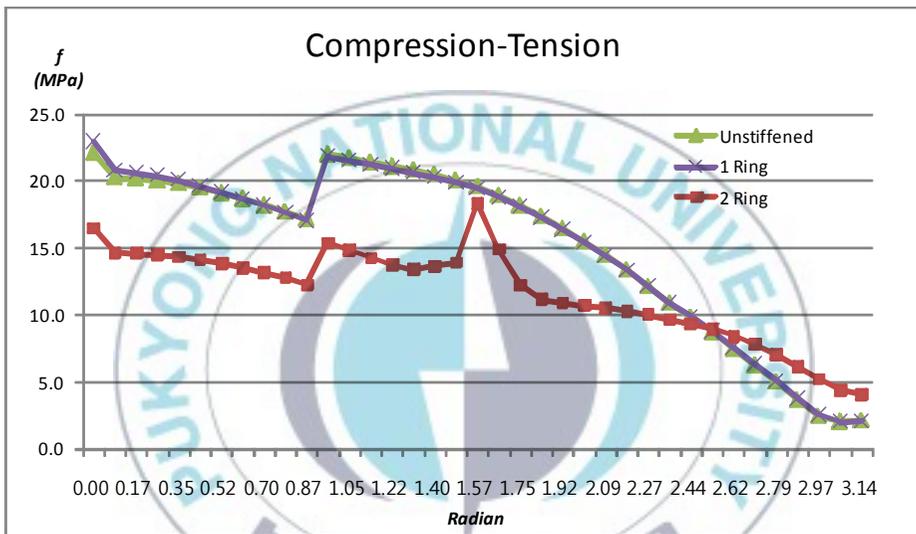


Fig. 4.20 Stress variation along attached line between chord and brace(C-T).

Fig. 4.20과 Table 4.12는 크라운토우(crown toe)점에서 시작하여 새들점을 거쳐 크라운힐(crown heel)점까지의 반원주 상의 응력을 나타내었다. C-T 하중 하의 이음부 응력은 두 개의 보강재를 배치하였을 시에만 응력 변화가 관찰되었다. 이중 환보강재를 적용한 경우, 전체적인 응력이 작아짐을 알 수 있지만, 이중 환보강재가 배치된 위치인 새들점의 응력은 국부적으로 증가하였다. C-T 하중상태에서 단일 환보강재가 적용된 경우의 응력 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 이로써 C-T 하중을 받는 경우에는 하나의 환보강재를 설치하는 것은 효율적이지 않음을 알 수 있다.

Table 4.12 Stress along attached line between chord and brace(C-T)

Angle (<i>Rad</i>)	von Mises Stress (<i>MPa</i>)			Remarks
	Unstiffened	1 Ring	2 Ring	
0.000	22.109	22.945	16.483	Crown toe
0.087	20.258	20.774	14.669	
0.175	20.185	20.637	14.611	
0.262	20.049	20.408	14.508	
0.349	19.815	20.066	14.342	
0.436	19.504	19.647	14.130	
0.524	19.123	19.171	13.865	
0.611	18.689	18.663	13.554	
0.698	18.210	18.134	13.186	
0.785	17.755	17.647	12.791	
0.873	17.169	17.043	12.240	
0.960	22.008	21.859	15.358	
1.047	21.711	21.550	14.832	
1.134	21.422	21.251	14.265	
1.222	21.130	20.948	13.744	
1.309	20.842	20.655	13.392	
1.396	20.490	20.303	13.658	
1.484	20.085	19.902	13.906	
1.571	19.627	19.452	18.318	Saddle
1.658	18.958	18.799	14.911	
1.745	18.199	18.059	12.231	
1.833	17.363	17.246	11.170	
1.920	16.459	16.365	10.910	
2.007	15.488	15.419	10.716	
2.094	14.450	14.407	10.526	
2.182	13.342	13.324	10.305	
2.269	12.160	12.167	10.041	
2.356	10.879	10.909	9.687	
2.443	9.805	9.853	9.343	
2.531	8.731	8.794	8.974	
2.618	7.490	7.567	8.423	
2.705	6.254	6.343	7.806	
2.793	4.973	5.069	7.053	
2.880	3.649	3.748	6.152	
2.967	2.427	2.525	5.219	
3.054	2.049	2.004	4.406	
3.142	2.093	2.059	4.057	Crown heel

4.5 환보강재의 배치효과 - 동일질량 보강재 평가

4.5.1 단일 환보강 이음부

단일 보강재 폭을 0에서 250mm까지 50mm 간격으로 증가시키고, 동시에 보강재의 두께를 점차 감소시킴으로써, 단일 환보강재의 체적을 0.005 m³로 동일하게 하여 세 가지 하중조건별로 각각 다섯 가지의 기하학적 형상 케이스를 구성하였다. 수치해석을 수행한 결과는 Table 4.13과 같다.

Fig. 4.21은 지부재에 압축력 또는 인장력이 작용하는 경우, 주부재와 보강재의 폭비(η)에 대한 각 점에서의 응력비(R_f)를 보여준다.

Table 4.13 Numerical result of single ring-stiffened K-joint(C-C, T-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	von Mises Stress(MPa)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	9.202	5.181
50	0.08	28.95	2.90	5.728	5.943
100	0.17	15.92	1.59	4.889	8.675
150	0.25	11.80	1.18	4.782	8.912
200	0.33	9.95	1.00	4.768	8.980
250	0.42	9.10	0.91	4.770	9.002

새들점에서의 응력은 단일 환보강재를 적용함으로써 꾸준히 감소하지만 크라운점에서는 증가한다. 이는 보강된 이음부의 응력이 비보강인 경우와 다르게 분포하기 때문이다. 비록 크라운점의 응력이 서서히 증가한다 하더라도 보강하지 않은 경우의 최대응력에 비해 전체적으로 낮다는 것을 알

수 있다. η 의 값이 0.17 미만일 경우 보강효과가 좋으며, 0.17 이상인 경우에는 보강효과를 크게 기대하기 힘들다.

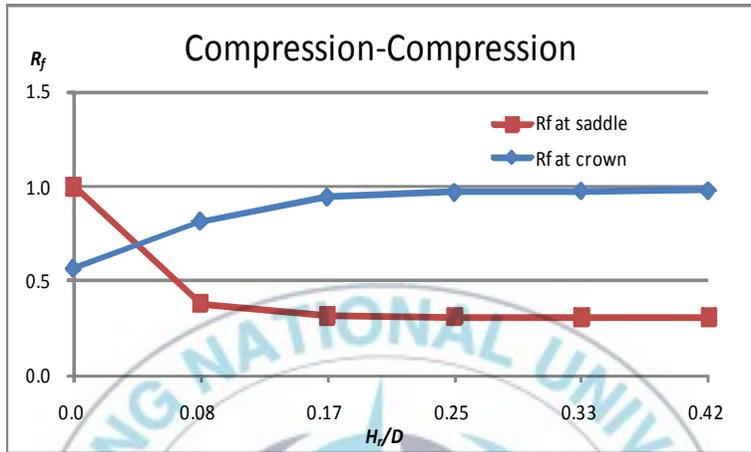


Fig. 4.21 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint(C-C, T-T).

Fig. 4.22는 두 지부재에 각각 압축력과 인장력이 작용하는 경우, 주부재와 보강재의 폭비(η)에 대한 각 점에서의 응력비(R_f)를 나타낸다.

Table 4.14 Numerical result of single ring-stiffened K-joint(C-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	von Mises Stress(MPa)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	21.423	27.745
50	0.08	28.95	2.90	21.186	28.828
100	0.17	15.92	1.59	21.251	28.494
150	0.25	11.80	1.18	21.310	28.239
200	0.33	9.95	1.00	21.343	28.097
250	0.42	9.10	0.91	21.357	28.035

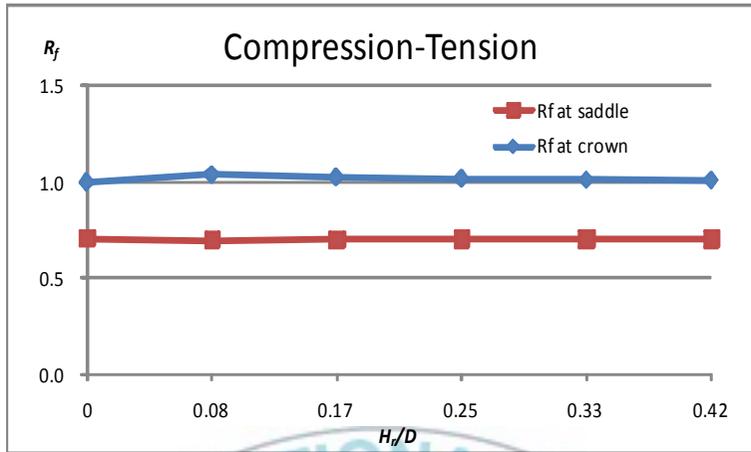


Fig. 4.22 Stress ratio of single ring-stiffened K-joint(C-T).

비보강 시 크라운점에서의 최대응력과 비교하여 새들점에서의 응력은 전반적으로 낮게 나타난다. 그러나 두 점에서의 응력은 거의 변화가 없음을 관찰할 수 있다. 그러므로 각 지부재에 압축력과 인장력을 각각 받고 있는 경우, 이음부 중심에 단일 환보강재를 배치시키는 것이 구조적 성능을 향상시킬 수 없다고 할 수 있다.

4.5.2 이중 환보강 이음부

이중 보강재 폭을 50에서 250mm까지 50mm 간격으로 증가시키고, 동시에 보강재의 두께를 점차 감소시킴으로써, 이중 환보강재의 체적을 0.005 m³로 동일하게 하여 세 가지 하중조건별로 각각 5가지의 기하학적 형상 케이스를 구성하였다. 수치해석을 수행한 결과는 Table 4.15와 Table 4.16과 같다.

Fig. 4.23은 지부재가 압축력 또는 인장력을 받고 있는 경우, 주부재와 보강재의 폭비(η)에 대한 각 점에서의 응력비(R_f)를 보여준다.

Table 4.15 Numerical result of double ring-stiffened K-joint(C-C, T-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	von Mises Stress(MPa)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	9.202	5.18
50	0.08	14.48	1.45	6.237	6.256
100	0.17	7.96	0.80	5.656	6.737
150	0.25	5.90	0.59	5.554	6.812
200	0.33	4.98	0.50	5.527	6.827
250	0.42	4.55	0.45	5.519	6.831

단일 환보강 이음부의 경우와 마찬가지로 새들점에서의 응력은 감소하지만, 크라운점에서의 응력은 반대로 증가한다. 하지만 전체적인 응력분포를 볼 때, 단일 보강재를 적용한 경우에 비해 보강효과가 높다. η 의 값이 0.17 미만일 경우에 보강효과가 뛰어나지만, 그 이상인 경우는 응력 감소폭이 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 C-C 하중 하의 관이음부에 이중 환보강재를 배치하는 것이 단일 환보강재에 비해 효율적이다.

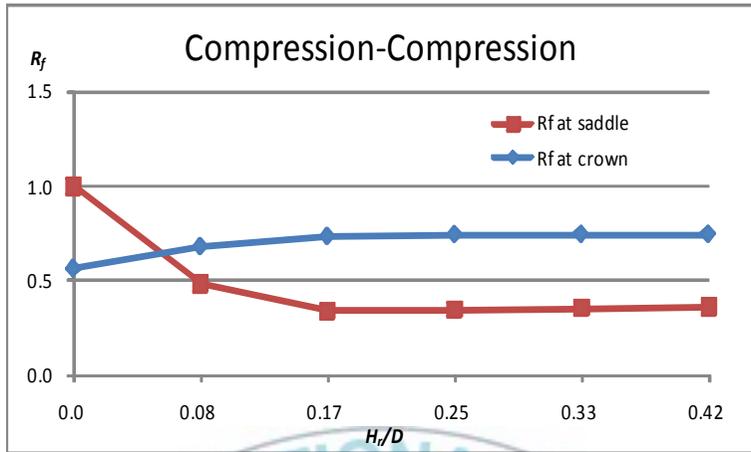


Fig. 4.23 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint(C-C, T-T).

Fig. 4.24는 두 지부재가 각각 압축력과 인장력을 받고 있는 경우, 주부재와 보강재의 폭비(η)에 대한 각 점에서의 응력비(R_f)를 보여준다.

Table 4.16 Numerical result of double ring-stiffened K-joint(C-T)

H_r (mm)	η	T_r (mm)	ξ	von Mises Stress(MPa)	
				Saddle	Crown
0	0	0	0	19.627	27.745
50	0.08	14.48	1.45	20.140	24.149
100	0.17	7.96	0.80	23.400	21.182
150	0.25	5.90	0.59	27.430	20.008
200	0.33	4.98	0.50	30.211	19.594
250	0.42	4.55	0.45	31.666	19.442

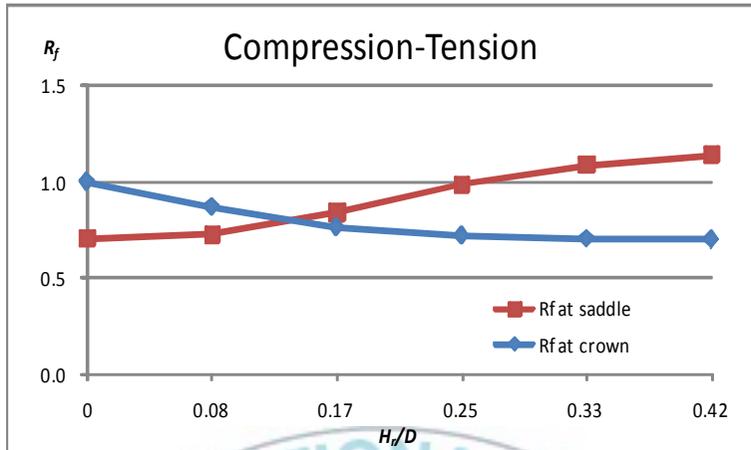


Fig. 4.24 Stress ratio of double ring-stiffened K-joint(C-T).

단일 환보강 이음부의 경우와는 다르게 크라운점에서 서서히 응력이 감소한다. 그러나 새들점에서의 응력 증가폭이 더 크므로, η 의 값이 0.15 이하가 되도록 환보강재를 배치한다면, 보강효과를 기대할 수 있다. 이로써 K형 관이음부의 지부재에 압축력과 인장력이 각각 재하되는 경우에는 이중 환보강재의 사용이 효율적임을 알 수 있다.

4.5 수치해석 결과 및 고찰

비보강 K형 관이음부의 결과 최대응력의 발생위치는 새들점과 크라운점이고, 이 최대응력과 수치해석 결과를 비교하여 환보강재가 전체 관이음부 시스템에 어떠한 영향을 미치는지 분석해 보았다.

먼저, 내부 환보강재의 기하학적 형상, 즉 환보강재의 폭과 두께를 각각 변화시키면서, 새들점과 크라운점에서의 응력을 구해본 결과, C-C 하중조건에서는 단일 환보강재를 적용하였을 때 보강효과가 발생하였다. 특히 단일 환보강 효과는 환보강재의 두께보다 폭의 변화에 민감하게 작용하였다. C-T 하중조건에서는 환보강재의 두께나 폭의 증가에 따른 보강효과 개선이 이루어지지 않았다.

이중 환보강 효과를 검토하기 전에 보강재를 설치하는 위치를 결정하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 동일한 조건 하에 세 가지 후보점에서의 응력을 검토하였으며, 그 결과 새들점에서의 이중 환보강 효과가 좋은 것으로 나타났다. 따라서 이중 환보강재의 설치 위치는 새들점으로 결정되었다.

단일 환보강 관이음부의 응력 검토와 마찬가지로 환보강재의 폭과 두께의 증가에 대한 이중 환보강 관이음부의 응력을 검토한 결과, C-C 하중조건에서 보강효과가 뛰어났으며, 특히 환보강재의 두께보다 폭의 변화에 민감하게 작용하였다. 그러나 C-T 하중조건에서는 환보강재를 선택할 수 있는 범위가 한정적이었다. 특히, 환보강재의 두께를 증가시킨 경우 ξ 가 0.75 부근, 환보강재의 폭을 증가시킨 경우 η 가 0.1 미만인 경우에 보강효과를 기대할 수 있었다.

보강재를 적용하였을 때 주부재와 지부재의 접합부 응력이 전체적으로 어떻게 변화하는지 관찰하기 위하여, 크라운토우점에서 시작하여 새들점을 거쳐 크라운힐점까지의 반원주 상의 응력을 비보강, 단일 환보강 및 이중 환보강에 대해 계산하였다. 단일 환보강 관이음부의 경우 전반적인 응력은 C-C 하중조건에서 비보강 관이음부의 응력에 비해 대체로 감소하였고, 특히, 최대응력 발생위치에서의 하중 감소가 두드러졌다. C-T 하중조건에서는 비보강 관이음부의 응력에 비해 변화폭이 미미하였으며, 이 경우의 보강효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

이중 환보강 관이음부의 경우 전반적인 응력은 C-C 하중조건에서 비보강 관이음부의 응력에 비해 감소하는 경향을 나타내었고, 특히 단일 환보강의 경우보다 더 나은 결과를 보였다. C-T 하중조건에서는 전반적인 응력은 비보강 관이음부의 응력에 비해 감소하는 경향이 나타났다. 다만 이중 환보강재의 설치 위치인 새들점에서의 응력집중 현상으로 국부적인 증가가 관찰되었다.

내부 환보강재에 의한 분산효과를 검토하기 위해 일정 질량의 환보강재를 적용하였고, 세 가지 하중조건별로 각각 5가지의 케이스를 구성하였다. C-C 하중조건에서는 단일 환보강을 적용하는 것보다 이중 환보강을 적용하는 것이 보다 효율적임을 알 수 있었고, 공통적으로 주부재의 직경과 보강재의 폭비가 0.08에서 0.17의 범위 내에서 보강효과가 탁월하였다.

C-T 하중조건에서는 단일 환보강을 적용한 경우, 응력감소가 거의 나타나지 않으므로 보강효과가 없는 것으로 판단된다. 이중 환보강을 적용한 경우는 주부재의 직경과 보강재의 폭비가 0.08에서 0.25의 범위 내에서 전체적으로 응력이 감소하였다.

일정 보강량에 대한 단일 환보강재와 이중 환보강재의 배치효과를 평가하였다. Fig. 4.25에서 보는바와 같이 C-C의 경우에는 보강재의 개수에 관계없이 응력감소가 나타났고, C-T의 경우에는 이중 환보강재가 단일 환보강재에 비해 20% 정도의 추가적인 응력감소가 나타남을 알 수 있었다.

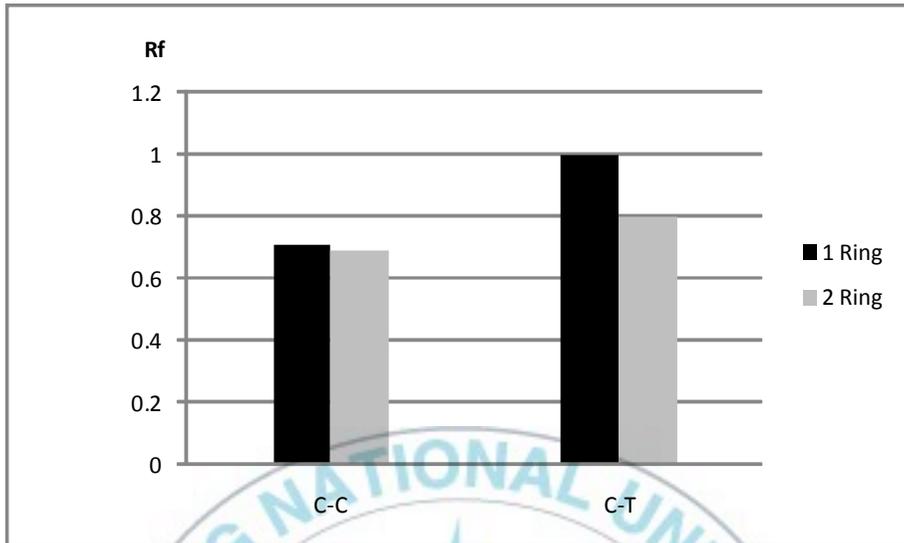


Fig. 4.25 Arrangement effect of internal ring-stiffener.

4.2절과 4.4절의 수치해석 결과를 바탕으로 이음부 응력을 약 20% 감소 시키고자 할 경우 환보강재의 효율적인 규격(최대값), 즉 보강재 폭비의 범위를 Table 4.17과 같이 제시하였다.

Table 4.17 Design range of ring-stiffener

1 Ring		2 Ring	
C-C	C-T	C-C	C-T
$H_r/D \leq 0.08$	-	$H_r/D \leq 0.17$	$H_r/D \leq 0.15$

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 내부에 환보강재를 적용한 K형 관이음부의 구조적 거동을 수치실험을 통해 평가하고, 내부 환보강재의 보강효과를 검토하였다. 기하학적 대칭성을 고려하여, 전체 구조체의 1/2만을 모델링하였으며, 이를 위해 8절점 3차원 쉘요소를 이용한 유한요소모델을 구축하여 수치해석을 수행하였다. 보강효과를 확인하기 위해 비보강 이음부에 대한 검토를 선행하였고, 내부 환보강재의 폭과 두께를 변화시켜 각 하중조건별로 응력을 산출하였다. 그리고 보강재를 적용함에 따라 주부재와 지부재의 접합부에 발생하는 응력의 변화를 검토하였고, 총 질량이 모두 같도록 설정한 단일 및 이중 내부 환보강재를 적용한 모델의 보강효과를 분석하였다. 수치해석 및 결과분석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 비보강 K형 관이음부의 최대응력 발생위치는 새들점과 크라운점이고, 환보강재를 적용한 경우 최대응력의 발생위치가 변화하였다.
- (2) 단일 환보강재를 적용한 경우, 지부재가 압축하중 또는 인장하중을 동시에 받을 때 보강효과가 나타나며, 최대 30% 정도의 응력이 감소되었다.
- (3) 단일 환보강재를 적용한 경우, 두 지부재에 각각 압축하중과 인장하중을 받을 때의 보강효과는 거의 없다.
- (4) 이중 환보강재의 설치 위치를 결정하기 위해 세 가지 위치에 대한 최대응력을 검토하였고 이들 중 새들점이 보강효과가 가장 높게 나타났다.
- (5) 이중 환보강재를 적용한 경우, 지부재가 압축하중 또는 인장하중을 동시에 받을 때 최대 38% 정도의 응력이 감소하여 보강효과가 발생되었다. 단일 환보강재를 사용하는 경우보다 효율적이다.
- (6) 이중 환보강재를 적용한 경우, 두 지부재가 각각 압축하중과 인장하중을 받을 때 응력이 집중되는 부분에 대한 보강이 효율적으로 이루어지며, 최대 18%까지 응력이 감소되었다. 이 경우 단일 환보강재의 보강효과가 거의 없는 것과는 대조적으로 보강효과가 발생하였다.

- (7) 이중 환보강재를 적용한 경우, 환보강재의 설치 위치인 새들점에서 국부적인 응력집중이 발생한다.
- (8) K형 관이음부의 경우에는 환보강재의 사용 물량보다 배치에 대하여 더욱 민감하게 보강효과가 변화한다.

도로교설계기준 해설에서 제시한 보강재의 두께와 폭에 대한 시방은 최소 치수에 대한 기준만을 제시하고 있으므로 본 연구에서는 현실적인 경제성을 고려하여 일정 수준으로 응력을 감소시키고자 할 경우 유용하게 사용될 수 있는 주부재 직경-보강재 폭비를 제안하였다. 이로써 K형 관이음부의 내부에 환보강재를 설치할 경우, 환보강재에 작용하는 하중상태에 따른 최적 크기와 보강 관이음부 설계에 대한 기초자료로 활용이 가능하리라 사료되며, 향후 주부재와 지부재의 접합 각도와 보강재의 배치 위치를 변화시키는 등의 연구가 필요할 것으로 사료된다.



참 고 문 헌

- 대한토목학회 (2008) 도로교설계기준 해설, 기문당.
- 조현만 (2002) 환보강 관이음부의 정적강도 산정에 관한 연구, 박사학위논문, 부경대학교 해양공학과.
- 조현만, 류연선 (2004) 내부 환보강 T형 관이음부의 정적강도, 한국해양공학 회지, 18(6), pp. 70-74.
- 조현만, 류연선 (2005) 환보강 X형 관이음부의 정적강도에 관한 수치적 연 구, 한국전산구조공학회 논문집, 18(3), pp. 265-275.
- ANSYS (2002) ANSYS-User Manual, Swanson Analysis Inc., Houston, USA.
- Dutta, D. (2002) Structures with Hollow Sections, Ernst & Sohn, Berlin.
- Kang, C. T., Moffat D. G, Mistry, J. (1998) Strength of DT tubular joints with brace and chord compression, Journal of Structural Engineering, ASCE, 124(7), pp. 775-783.
- Karamanos, S. A., Romeijn, A., Wardenier, J. (2000) Stress concentrations in tubular gap K-joints: mechanics and fatigue design, Engineering Structures, 22, pp. 4-14.
- Morgan, M. R., Lee, M.M.K. (1998) Prediction of stress concentrations and degrees of bending in axially loaded tubular K-joints, J. Construct. Steel Res, 45(1), pp. 67-97.

- Graff, W. J. (1981) Introduction to Offshore Structures: Design, Fabrication, Installation, Gulf Publishing Company, Houston.
- Makino, Y., Kurobane, Y., Ochi, K., Vegte, G. J. V. D., Wilmshurst, S. R. (1995) Database of test and numerical analysis results for unstiffened tubular joints, Kumamoto University.
- Marshall, P. W. (1992) Design of Welded Tubular Connections, Basis and Use of AWS Code Provision, Elsevier Science Publishers.
- Wardenier, J., Kurobane, Y., Packer, J. A., Dutta, D. (1991) Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading, Verlag TUV Rheinland GmbH, Koln.
- Woghiren, C. O., Brennan, F. P. (2009) Weld toe stress concentrations in multi-planar stiffened tubular KK joints, International Journal of Fatigue, 31, pp. 164-172.
- Zhao, X .L., Wilkinson, T., Hancock, G. (2005) Cold-Formed Tubular Members and Connections: Structural Behaviour and Design, Elsevier, Amsterdam.