

# 자켓 트러스 구조물 용접이음부 기하형상에 따른 응력집중계수 평가

경갑수<sup>1\*</sup> · 이준호<sup>2</sup> · 박진은<sup>3</sup> · 이성진<sup>4</sup> · 공병승<sup>5</sup>

<sup>1</sup>교수, 한국해양대학교, 건설공학과, <sup>2</sup>차장, 서영엔지니어링, 철도본부,

<sup>3</sup>연구교수, 한국해양대학교, 산학협력선도대학사업단

<sup>4</sup>박사후연구원, 한국건설기술연구원, 인프라안전연구본부, <sup>5</sup>교수, 동서대학교, 토목환경공학과

## Evaluation of Stress Concentration Factors of Jacket Truss Structure According to Geometric Shape

Kyung, Kab Soo<sup>1\*</sup>, Lee, Jun Ho<sup>2</sup>, Park, Jin Eun<sup>3</sup>, Lee, Sung Jin<sup>4</sup>, Kong, Byung Seung<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

<sup>2</sup>Senior Manager, Railroad Supervision Team, Seoyoung Engineering Co., Ltd., Seongnam, 13595, Korea

<sup>3</sup>Research Professor, Leaders in INdustry-university Cooperation+, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

<sup>4</sup>Postdoctoral Researcher, Dept. of Infrastructure Safety Research,

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

<sup>5</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Dongseo University, Busan, 47011, Korea

**Abstract** - In this study, the existing design formula for K-joint, the stress concentration factor (SCF) of Efthymiou equation were compared to validate the FEA model for the tubular point. The characteristics of the stress concentration factor (SCF) of the joint by finite element analysis were analyzed in the jacket truss structure where the actual load conditions of the existing design were applied. The structural analysis was performed on existing jacket structures considering the effects of corrosion according to the serviced time, and the tendency of hot spot stress and stress concentration factor (SCF) was analyzed.

**Keywords** - Stress concentration factor (SCF), Hot spot stress (HSS), Geometric parameter, Jacket truss structure, K-joint

### 1. 서론

해양 플랫폼은 해저면 깊은 곳에 생성된 오일 및 가스를 추출하기 위하여 만들어진 해양 구조물이다. 이러한 구조물은 수심에 따라 여러 가지 형태로 존재하며 일반적으로 상부구조 및 이를 지지하는 하부구조로 구성되어 있다. 그 중 하부구조가 해저면에 고정된 것을 고정 플랫폼이라 하며 강구조로 제작된 격자형 구조의 플랫폼을 자켓 트러스 플랫폼

이라고 칭한다. 이러한 자켓 트러스 플랫폼은 대양에서 풍하중, 파랑하중 등과 같이 자연에 의해 발생하는 다양한 외력을 구조물 사용기간 동안 지속적으로 랜덤하게 받게 되므로 이들 하중작용에 의한 피로현상이 발생하게 된다. 특히 용접이음이 집중되는 이음부는 기하학적 형상의 영향 등에 의해 공용 중에 피로에 대해 취약한 구조가 될 수 있다. 그러나 Twomey<sup>[1]</sup>에 의하면 Fig. 1과 같이 2,000년 이전에 설치된 5,862개의 해양 플랫폼 중 해체된 구조물은 1970년대 이후부터 약 1,900개에 불과하다.

해양 플랫폼의 대부분을 차지하는 자켓 트러스 구조물의 일반적인 수명이 25년인 것을 고려한다면 다수의 자켓 트러스 구조물이 피로손상에 노출되어 있을 것으로 판단된다. 특히, 자켓 트러스 구조물은 강관부재를 용접하여 제작되는데, 관형상의 코드(chord)부재와 브레이스(brace)부재가 연결되는 강관이음부는 용접지단 및 용접 플랭크각 등의 용접

Note.-Discussion open until August 31, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 04, 2019; revised January 23, 2020; approved on January 29, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-51-410-4464 Fax. +82-51-403-3762

E-mail. kyungks@kmou.ac.kr

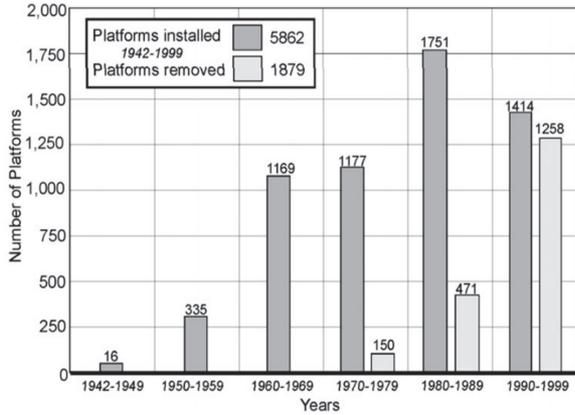


Fig. 1. Platforms installed and removed<sup>[1]</sup>

부 형상에 기인하는 국부응력, 그리고 연결부재의 기하형상 변화에 의한 구조적 응력집중이 발생하게 되어 피로에 취약한 구조상세가 된다. 따라서 이러한 강관이음부의 응력집중 평가에서는 용접품질에 의해 영향을 받는 국부응력보다는 강관 부재의 연결형태의 기하형상에 의해 발생하는 구조적 응력집중계수에 대한 평가가 선행적으로 실시되는 것이 필요하다.

이와 관련하여 국내에서는 원형강관과 관련하여 접합부의 재료 및 형상에 따른 실험 및 해석연구<sup>[2],[5]</sup>가 수행되고 있으나, 격점부의 피로강도 평가에 대한 연구는 제한적으로 수행되고 있다.

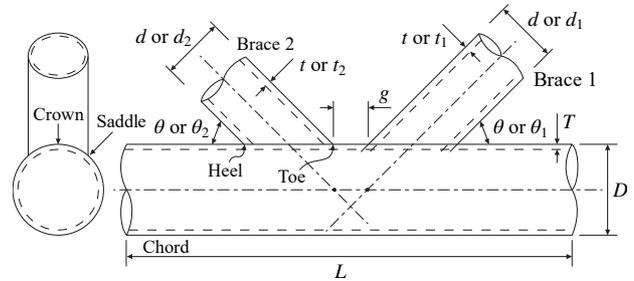
이 연구에서는 강관 내부에 다이아프래임을 보강하지 않은 코드부재와 브레이스부재가 접하는 강관이음부 구조상세를 대상으로 강관이음부의 기하학적 형상조건에 영향을 받는 구조적 응력집중계수의 평가 및 이들 평가에 대한 간편화 방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 먼저 자켓 트러스 구조물 관이음부 기본 이음 형식의 하나인 K형 이음부의 기하형상만을 반영한 frame 요소 해석 및 plate 요소 해석에 기초하여 관이음부의 기하형상에 따른 구조적 응력집중계수의 변화특성을 분석하였다. 그리고 이들 해석결과를 기존 연구(Efthymiou<sup>[6]</sup>)에서 제안된 응력집중계수 산정식인 Efthymiou식의 응력집중계수와 비교를 통하여 자켓 트러스 구조물 피로평가에 간편하게 적용할 수 있는 핫스팟 응력 평가방법을 제시하고자 한다. 다음으로 실제 자켓 트러스 구조물 연결이음부를 대상으로 기본 이음형식에서 도출한 공칭응력 및 핫스팟 응력을 기반으로 하는 구조적 응력집중계수 평가에 대한 간편화 기법의 적용성을 검토하고, 이에 대한 활용성을 자켓 트러스 구조물의 사용년수를 매개변수로 하여 평가하였다.

## 2. 관형재 이음부 응력집중계수 평가

### 2.1 응력집중계수 평가에 대한 FE 해석 모델 검증

관이음부에서의 정적강도 및 응력집중계수와 같은 구조적 거동은 기하학적 치수를 무차원화한 계수와 이음부의 종류에 따라 표현된다(Graff<sup>[7]</sup>). Fig. 2에 K-joint에 대한 기하학적 표기법의 일례를 나타내었다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 이음부의 구조적 응력집중계수에 영향을 주는 기하학적 무차원 계수는 길이계수( $\alpha$ ), 직경비( $\beta$ ), 반경-두께비( $\gamma$ ), 두께비( $\tau$ ), 간격비( $\zeta$ )로 나타낸다.

이 연구에서의 자켓 트러스 구조물의 연결부는 K형 이음부를 대상으로 하고, 기하학적 형상조건 등에 대한 비교 모델은 기존 연구(Kyung *et al.*<sup>[8]</sup>)에서의 구조상세와 실제 공용중인 자켓 트러스 구조물의 inner breasting dolphin 구조상세를 고려하였다. 또한 대상구조부의 용접이음부는 완전 용입용접이며, 이에 대한 용접품질은 충분히 확보되어 있는 것으로 조사되었다.



$$\alpha: 2L/D, \beta: d/D, \zeta: g/D, \tau: t/T, \gamma: D/2T$$

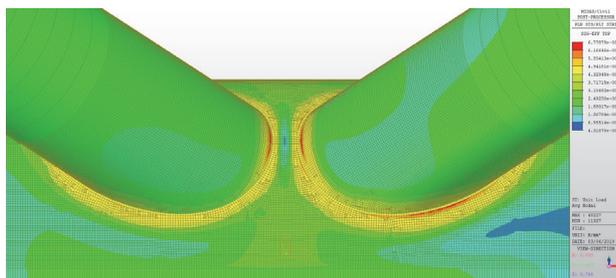
Fig. 2. Geometric notations for a K-joint

Fig. 2의 기호를 기준으로  $\beta = 0.46, \zeta = 0.073, \tau = 0.67, \gamma = 18.83, \theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ 를 적용하였으며, 코드의 직경, 두께 및 사용강재는 1,435 mm, 38.1 mm와 API Spec 2H Gr.50, 브레이스의 직경, 두께 및 사용강재는 660 mm, 25.4 mm와 ASTM A36이다.

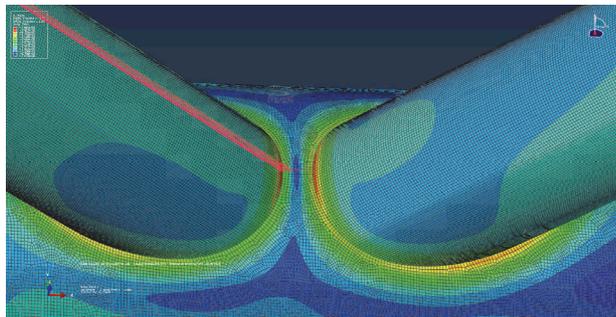
구조해석을 위한 3차원 입체 구조의 모델은 MIDAS FEA 및 CIVIL을 사용하여 구조형상을 모델링하였다. 해당 프로그램에서의 plate 요소의 적합성을 검토하기 위하여 ABAQUS의 shell 요소와의 해석결과를 비교하여 검토하였다. 모델 요소의 크기는 International Institute of Welding (IIW)<sup>[9]</sup>에서 제시하고 있는 0.4 t를 적용하여 10 mm를 적용하였으며, 경계조건은 코드의 좌측 단부에는 힌지, 우측 단

부에는 고정지점을 적용하였다. 그리고, 하중조건으로는 좌측 브레이스에 인장방향으로 1 kN, 우측브레이스에 압축방향으로 1 kN을 적용하여 해석하였다.

Fig. 3에 2가지 요소에 대한 해석결과와 응력 contour 및 Fig. 4에 요소 종류에 따른 응력 분포를 나타내었다. Fig. 4 및 이하의 figure에서의 x축의 distance는 브레이스 용접부 지단으로부터의 브레이스방향 쪽의 거리를 나타낸다. Fig. 4의 plate 요소와 shell 요소의 응력분포가 유사하게 나타나므로 MIDAS CIVIL의 plate 요소는 관형재 이음부의 응력집중부 거동을 신뢰성 있게 평가할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Plate element (MIDAS CIVIL)



(b) Shell element (ABAQUS)

Fig. 3. Stress contour according to kind of finite elements (plate, shell)

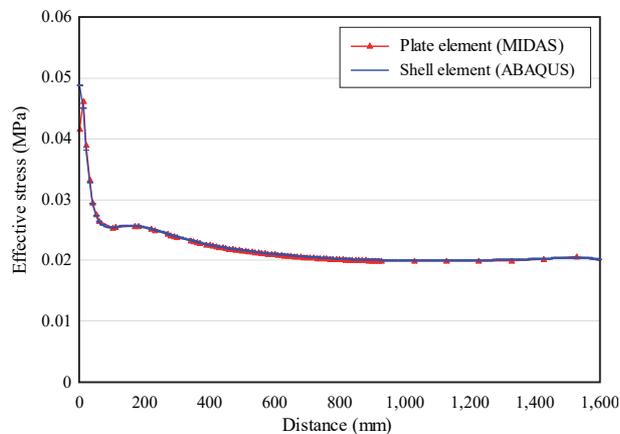


Fig. 4. Stress distribution according to kind of finite elements

또한, 요소 크기에 따른 해석결과 신뢰도 확인을 위하여 요소크기를 2.5 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm의 4가지 경우에 대해서 구조해석을 수행한 결과로부터 브레이스 크라운 부분의 응력분포 및 응력집중계수를 검토하였다.

Fig. 5에 요소크기에 따른 응력분포를 나타내었다. Fig. 5에 나타낸 것과 같이 요소 크기에 따라 응력집중부에서 peak값이 약간씩 증가하는 경향을 나타낸다. Table 1에 요소 크기에 따른 구조적 응력집중계수를 나타내었다. Table 1에서의 구조적 응력집중계수는 요소 크기 2.5 mm에서 10 mm의 경우에서 2.77로 유사한 값으로 나타났으나, 요소 크기가 20 mm 인 경우는 응력집중계수가 2.36으로 응력집중계수에 차이가 발생한다. 따라서 요소 크기 20 mm는 적절하지 않은 것으로 판단되므로, IIW<sup>[7]</sup>에서 제안하고 있는 0.4 t(10 mm)의 요소 크기로 구조해석을 수행하는 것은 적절한 것으로 판단된다.

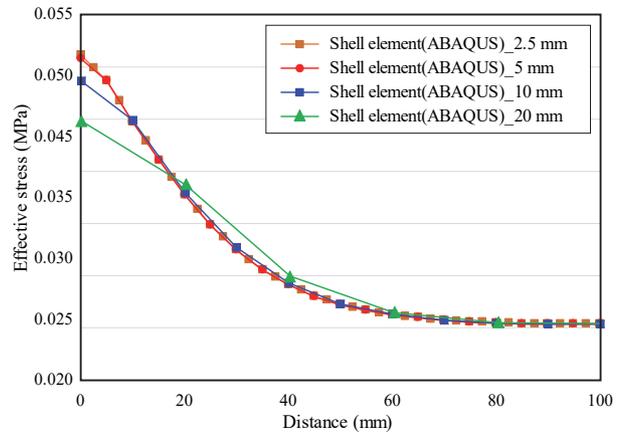


Fig. 5. Stress distribution by size of elements

Table 1. Structural SCF by size of elements

Element size	Size			
	2.5 mm	5 mm	10 mm	20 mm
SCF	2.78	2.77	2.77	2.36

## 2.2 Frame 해석에 기초한 응력집중계수 적용성 검토

해석적 방법으로 원형관 이음부의 응력집중을 분석하기 위해서는 일반적으로 plate 요소, solid 요소 등을 사용한다. 그러나 실무 설계과정에서 이들 요소를 사용하는 구조해석은 시간적인 측면이나 인력 투입의 측면에서 비실용적이다. 따라서 이 절에서는 frame 요소를 사용하여 해석결과에 응력집중계수 산정식을 적용하여 구조물의 응력집중현상을 평가하는 방법을 검토하였다.

Fig. 6에 plate 요소로 모델링한 K형 이음부를 나타내었다. 그림에 나타낸 것과 같이 각각의 경우에 대하여 브레이스에 순수 축력 조건으로 1kN, 순수 휨모멘트 조건으로 0.1 kN·m를 재하하였다. Fig. 7에 frame 요소모델을 나타내었다. 모델링에서는 plate 요소모델에서 적용한 기하 및 하중조건을 적용하였으며, plate 요소모델의 브레이스 사이의 간격을 감안한 절점의 편심을 고려하였다.

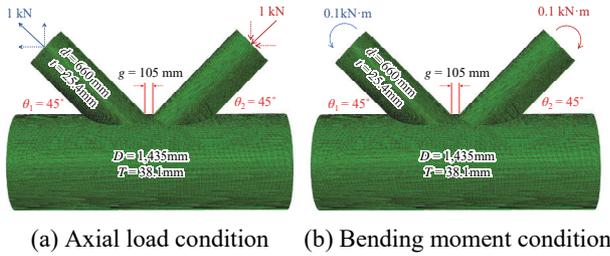


Fig. 6. Plate model

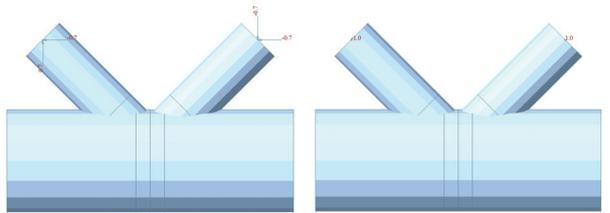


Fig. 7. Frame model

Fig. 8에 순수 축력조건과 순수 휨모멘트 조건으로 해석한 결과로부터 산정된 응력 contour를 나타내었다. Fig. 9에 축 하중이 재하되는 경우와 휨 모멘트가 재하되는 경우에 대한 브레이스 크라운부의 응력분포도를 나타내었다. 그림에 나타낸 것과 같이 응력집중에 따른 응력분포는 plate 요소 모델에만 나타나며, frame 요소 모델의 경우는 응력집중 현상이 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 그러므로 원형관 이음부를 frame 요소로 모델링하는 경우에는 응력집중계수를 고려하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

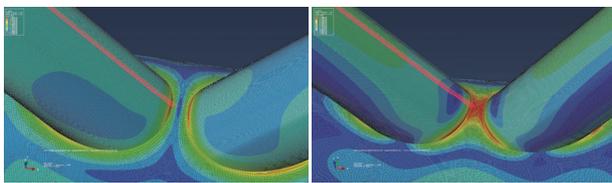


Fig. 8. Stress contour

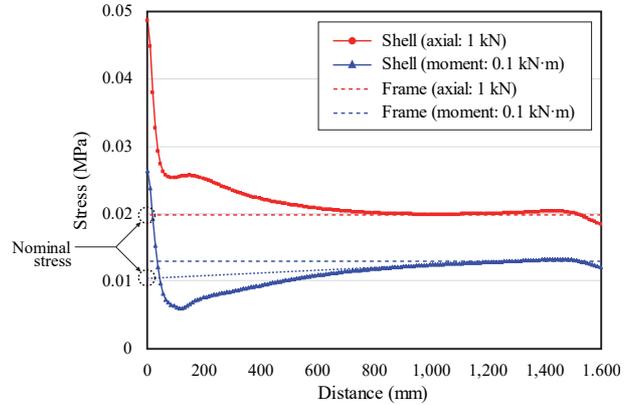


Fig. 9. Stress distribution at the K-joint

공칭응력의 값은 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 plate 요소 모델의 응력값이 수렴되는 구간의 접선과 부재 연결부의 교차점으로 가정하였다. 그 결과로부터 축하중 재하의 경우는 plate 요소 모델 및 frame 요소 모델의 해석결과에서 산정된 공칭응력이 매우 유사한 값을 나타낸다. 그러므로 frame 요소 모델의 공칭응력에 plate 요소 모델로부터 산정된 응력집중계수를 곱하면 plate 요소 모델로부터 산정된 핫스팟 응력과 유사한 값을 계산할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 휨 모멘트가 재하되는 경우, frame 요소 모델의 해석결과로부터 산정된 공칭응력은 plate 요소 모델로부터 산정된 공칭응력보다 크게 산정되므로 frame 요소 모델의 공칭응력에 plate 요소 모델로부터 산정된 응력집중계수를 곱할 경우 핫스팟 응력이 과대평가될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2에 frame 해석을 기반으로 계산된 핫스팟 응력을 나타낸다. Table 2의 (d) 핫스팟 응력은 plate 모델의 응력분포로부터 IIW<sup>[9]</sup>에서 제시된 선형 외삽법인 식 (1)을 사용하여 계산되었다. 구조적 응력집중계수(SCF)는 Fig. 9의 응력분포도로부터 계산되었다. 계산결과 Fig. 6의 기하형상을 가진 K형 이음부의 구조적 응력집중계수는 축하중 조건의 경우 2.66, 휨 모멘트 조건의 경우 2.73으로 계산된다. 2가지 조건의 경우 큰 차이는 나지 않으나 휨 모멘트의 경우에서 응력집중계수가 조금 더 크게 나타난다. frame 해석 결과로부터 계산된 공칭응력에 plate 해석으로부터 계산된 응력집중계수를 곱하여 계산된 핫스팟 응력과 plate 해석 모델로부터 산출된 핫스팟 응력을 비교한 결과, 전자의 응력값이 0% - 25% 정도 크게 나타난다. 이를 통해 해당 구조물의 계산 편의성을 고려하면, frame 해석 결과에 구조적 응력집중계수를 곱하여 핫스팟 응력을 산출하는 것이 간편하고 효율적인 설계방법이 될 것으로 판단된다.

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma(0.4t) - 0.67\sigma(1.0t) \quad (1)$$

Table 3에 frame 해석 및 공식에 기초하여 산정된 핫스팟 응력을 나타내었다. Efthymiou 공식에서의 구조적 응력집중계수에 frame 해석 결과로부터 산정된 공칭응력을 곱하여 핫스팟 응력을 계산한 결과, 핫스팟응력은 축하중이 재하되는 경우는 19%, 휨 모멘트가 재하되는 경우는 46% 크게 나타났다. 그러므로 Efthymiou 공식의 구조적 응력집중계수를 사용하는 경우의 핫스팟 응력은 유한요소해석으로부터 산출된 응력집중계수를 적용하는 것보다 더 보수적으로 평가될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 자켓 트리스 구조물 응력집중계수 평가

2절에서 검토하였던 관형재의 frame 해석결과에 응력집중계수를 적용하는 방법을 공용중인 자켓 구조물에 적용하여 타당성을 검토하였다. 연구 대상 구조물은 Fig. 10의 기존 연구에 적용된 현재 공용중인 inner breasting dolphin 구조물이며, 해석에서는 운용 중 및 폭풍 시의 하중조건 등을 고려하여 구조적 응력집중계수를 산정하였다.

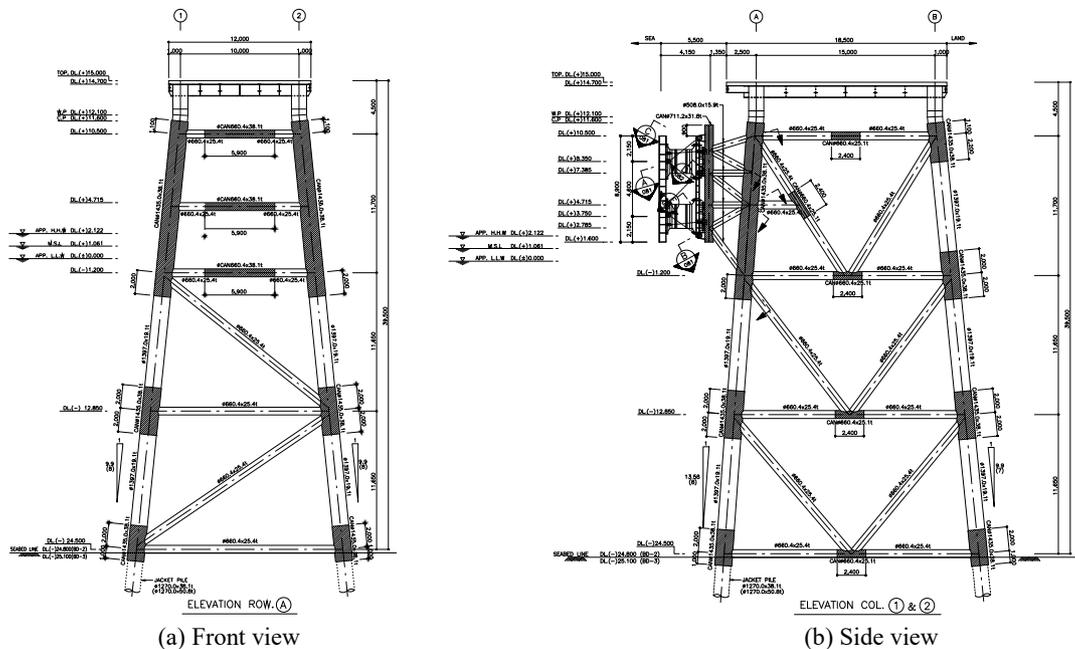
Fig. 11에 3D 해석 모델을 나타내었다. 구조해석은 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS CIVIL을 사용하여 실시하였다. Fig. 11(a)에 나타낸 것과 같이 복잡한 기하형상의 연결

**Table 2.** Hot-spot stress calculated based on frame analysis

Load case	(a) Nominal stress (MPa) (frame analysis)	(b) SCF (plate analysis)	(c) HSS ((a) × (b))	(d) HSS (plate analysis)	S.F. (safety factor) ((c) / (d))
Axial load	0.0198	<b>2.66</b>	0.053	0.053	1.00
Bending moment	0.0129	<b>2.73</b>	0.035	0.028	1.25

**Table 3.** Hot-spot stress calculated based on frame analysis and formular

Load case	(a) Nominal stress (MPa) (frame analysis)	(b) SCF (Efthymiou equation)	(c) HSS ((a) × (b))	(d) HSS (plate analysis)	S.F. (safety factor) ((c) / (d))
Axial load	0.0198	<b>3.14</b>	0.062	0.053	1.17
Bending moment	0.0129	<b>3.23</b>	0.041	0.028	1.46



**Fig. 10.** Jacket structure (inner breasting dolphin)

이음부에 대한 구조적 응력집중계수를 산정하기 위하여 3차원 frame 구조해석 및 Fig. 11(b)에 나타낸 것과 같이 3차원 frame 요소와 plate 요소를 결합한 모델로 구조해석을 실시하였다.

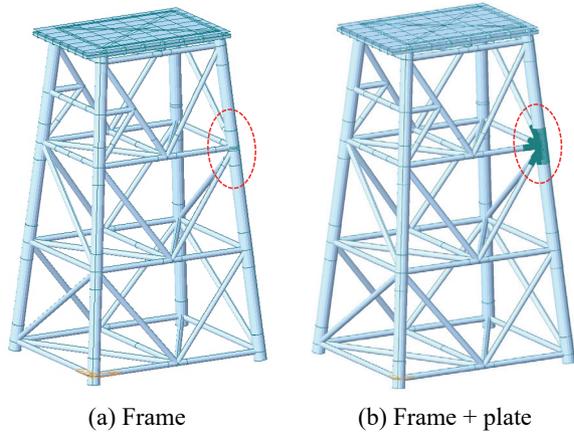


Fig. 11. 3D analysis model

3차원 frame 모델에서의 상세 구조해석 대상 이음부는 비말대 위치의 KT형 이음부와 N형 이음부가 접합되는 부분이다. 대상이음부가 비말대에 위치하고 있으므로 파랑하중 및 풍하중에 대한 영향이 크게 나타날 것으로 판단된다. 하중조건으로는 자중, 활하중, 파랑하중 및 풍하중 등을 고려하였으며, 경계조건은 고정지점으로 적용하였다. 상세 구조해석 모델에서 frame 절점과 plate의 절점은 rigid link로 연결하여 응력이 전달될 수 있도록 모델링하였다. Fig. 12 비말대구간의 해석 상세부의 브레이스 명칭을 나타내었다.

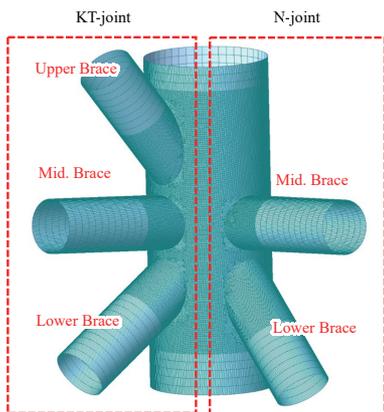


Fig. 12. Stress distribution at the K-joint

Fig. 13에 대상 이음부에서의 발생응력을 나타내었다. frame 모델 해석결과, KT형 이음부는 3개의 브레이스 가운데 중앙 브레이스에서, N형 이음부는 아래쪽 브레이스에서

인장응력이 발생하는 것으로 나타났다. frame 해석결과를 기준으로 피로 등의 영향을 고려하여 인장응력이 발생하는 KT형 중앙부 브레이스와 N형 아래측 브레이스를 대상으로 구조적 응력집중을 평가하였다.

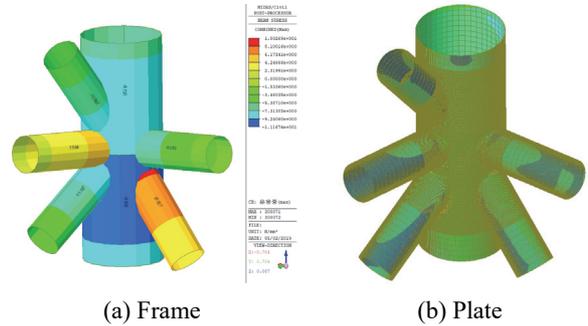
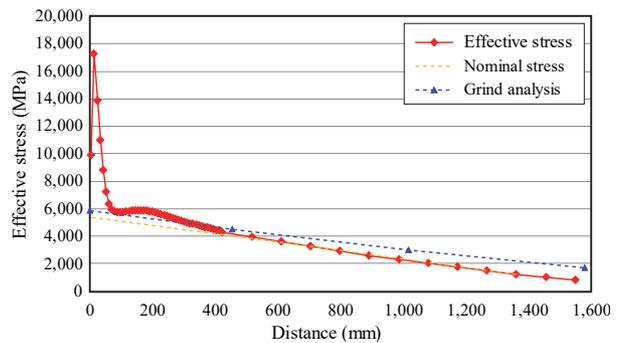
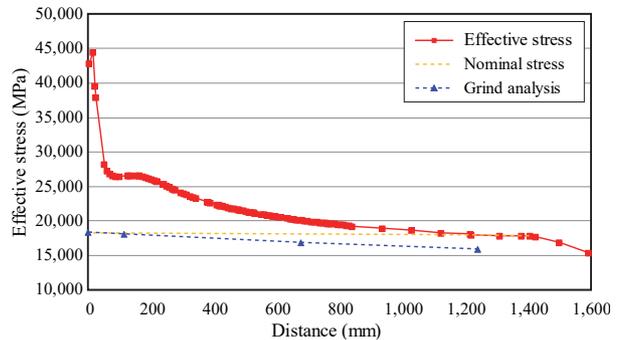


Fig. 13. Stress contour of analysis model

Fig. 14에 frame 구조해석 및 상세 구조해석에서의 KT형 이음부와 N형 이음부의 응력분포를 나타내었다. 그림에 나타낸 것과 같이 공칭응력 분포는 두 해석 모두 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 구조물 기하형상에 따른 응력집중 현상은 plate 모델에서는 확인할 수 있었으나 frame 해석에서는 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.



(a) KT-joint middle brace



(b) N-joint lower brace

Fig. 14. Stress distribution in structural analysis using frame and plate element

일반적으로 자켓 구조물 설계 시, 기하형상이 급격하게 변화하는 개소나 변형이 구속되는 개소의 구조적 응력집중의 영향을 검토하기 위해서는 plate 요소 또는 solid 요소를 사용하는 구조해석에 의해 원형강관 이음부의 응력특성을 정확하게 평가할 수 있으나, 이들 해석에서의 해석의 변잡함, 다대한 시간 소요 등의 어려움이 있다. 따라서 이 절에서는 2절에서의 K형 이음부에서 검토된 frame 해석에 기초한 구조적 응력집중평가 개념을 적용하여 자켓 트러스 구조물 이음부의 구조적 응력집중 평가를 검토하였다, 먼저 frame 해석을 통한 공칭응력에 상세해석에 의해 산정된 응력집중계수를 곱하여 이음부에 대한 응력집중을 평가하였으며, 다음으로 자켓 구조물 이음부의 다양한 기하형상에 따른 응력집중을 평가하기 위하여 Efthymiou 방정식의 구조적 응력집

중계수를 적용하여 핫스팟 응력을 계산하고 이들을 비교 검토하였다.

Table 4에 KT형 이음부와 N형 이음부에 대한 핫스팟 응력을 나타내었다. Table 4에 나타난 것과 같이 frame 해석 결과에서 계산된 KT형 이음부의 중앙부 브레이스 및 N형 이음부의 아래측 브레이스의 핫스팟 응력은 plate 요소 구조 해석에 의해 산정된 핫스팟 응력보다 0% - 22%의 범위로 유사하거나 크게 나타났다.

보다 간편하고 보수적인 핫스팟 응력산정을 위하여 Efthymiou식을 사용한 핫스팟 응력평가를 검토하였다.

Table 5에 K형, KT형 이음부에 대한 Efthymiou 방정식을 나타내었다. Table 5에 나타난 것과 같이 축하중 및 휨하중 등의 하중조건에 따라 달리 적용된다. 기존 연구(Kyung

**Table 4.** Hot-spot stress calculated based on frame analysis

Joint	Load case	(a) Nominal stress (MPa) (frame analysis)	(b) SCF (Efthymiou equation)	(c) HSS ((a) × (b))	(d) HSS (plate analysis)	S.F. (safety factor) ((c) / (d))
KT-joint mid.	Under operation	5.849	3.22	18.834	15.490	1.22
	Under a storm	5.840	3.18	18.571	17.071	1.09
N-joint lower	Under operation	7.683	2.37	18.209	17.466	1.04
	Under a storm	18.334	2.66	48.768	48.710	1.00

**Table 5.** Efthymiou equation for K, KT-joint

K-joint (Balanced axial load)	· Brace $SCF_B = 1 + [SCF_{chord}] (1.97 - 1.57\beta^{0.25}) \tau^{-0.14} \sin^{0.7} \theta_{max} + \beta^{1.5} \gamma^{0.5} \tau^{-1.22} \sin^{1.8}(\theta_{max} + \theta_{min}) [0.131 - 0.084 \arctan(14\zeta + 4.2\beta)]$
K-joint (Balanced in-plane bending)	· Brace $SCF_{BC} = 1 + 0.65\beta_A \tau^{0.4} \gamma^{(1.09-0.77\beta_A)} \sin^{(0.06\gamma-1.16)} \theta_A$
KJ-joint (Balanced in-plane bending)	· Central brace (Brace B) $SCF_C = \tau_B^{0.9} \gamma^{0.5} (0.67 - \beta_B^2 + 1.16\beta_B) \sin \theta_B \left[ \frac{\sin \theta_{max}}{\sin \theta_{min}} \right]^{0.3} \left[ \frac{\beta_{max}}{\beta_{min}} \right]^{0.3} \times [1.64 + 0.29\beta_B^{(-0.38)} ATAN(8\zeta_{AC})]$ $SCF_B = 1 + [SCF_C] (1.97 - 1.57\beta_B^{0.25}) \tau_B^{(-0.14)} \sin^{0.7} \theta_B$ · Central brace (Brace A, C) $SCF_C = \tau_A^{0.9} \gamma^{0.5} (0.67 - \beta_A^2 + 1.16\beta_A) \sin \theta_A \left[ \frac{Max(\sin \theta_A, \sin \theta_C)}{Min(\sin \theta_A, \sin \theta_C)} \right]^{0.3} \times \left[ \frac{Max(\beta_A, \beta_C)}{Min(\beta_A, \beta_C)} \right]^{0.3} \times [1.64 + 0.29\beta_B^{(-0.38)} ATAN(8\zeta_{AC})]$ $SCF_B = 1 + [SCF_C] (1.97 - 1.57\beta_A^{0.25}) \tau_A^{(-0.14)} \sin^{0.7} \theta_A$ where, $\zeta_{AC} = \zeta_{AB} + \zeta_{BC} + \frac{\beta_B}{\sin \theta_B}$ (ATAN in radius)

et al.<sup>[8]</sup>에서는 K형 이음부의 “대칭 축하중 조건, balanced axial load”로 계산하여 응력집중계수를 산출하였다. 그러나 이 연구의 공용하중 하에서의 자켓 트러스 구조물 frame 해석 결과는 휨 응력이 60 % - 80 % 정도 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그러므로 이 절에서는 Efthymiou 방정식의 “대칭 면내 휨하중(balanced in-plane bending)” 조건의 식을 적용하여 핫스팟 응력을 산정하였다. K형 및 KT형 이음부의 Efthymiou 방정식은 Table 5에 나타내었다. N형 이음부에 대한 방정식은 K형 이음부 방정식에서 중앙부 브레이스에 해당하는 각도인 85.04°를 사용하여 계산하였다.

Table 6에 Efthymiou 방정식 및 상세해석에 의해 산정된 구조적 응력집중계수를 나타내었다. Table 6에 나타낸 것과 같이 Efthymiou 방정식으로부터 계산된 구조적 응력집중계수에 frame 해석 결과로부터 산정된 공칭응력을 곱하여 핫스팟 응력을 계산한 결과, KT형 이음부의 중앙부 브레이스는 11 % - 22 %, N형 이음부의 아래측 브레이스는 27 % - 41 % 크게 나타났다. 이로부터 Efthymiou 방정식에 의해 계산된 핫스팟 응력은 plate 모델로부터 계산된 핫스팟 응력보다 더 보수적으로 평가되는 것을 알 수 있다. 이를 통해 자켓 구조물의 설계과정에서 응력집중계수를 고려하기 위한 방법으로 frame 해석에 의해 얻어진 공칭응력에 Efthymiou 방정식에 의해 산출된 구조적 응력집중계수를 곱하여 핫스팟 응력을 산정하는 방법은 효율적인 방법인 것으로 판단된다.

위의 검토 결과로부터 자켓 트러스 구조물 설계단계에서 구조적 응력집중의 영향을 효율적으로 평가하는 방법으로는 Efthymiou 방정식에 의한 응력집중계수를 frame 구조해

석 단계에 적용하여 단면을 결정하고, 상세유한요소해석에 의해 산정된 응력집중계수는 구조물 단면이 결정된 후 구조물 이음부의 피로평가 등에 사용하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

#### 4. 사용년수에 따른 자켓 구조물 응력집중계수 평가

공용중의 자켓 트러스 구조물의 부식에 따른 열화현상을 구조부재의 두께 감소로 고려하여, 사용년수에 따른 자켓 트러스 구조물의 전체 거동을 검토하였다.

자켓 트러스 구조물은 사용년수가 경과에 따라 부식 등에 의해 부재 두께가 감소되므로 10년, 20년, 30년 경과에 따른 부식에 의한 두께 감소를 Table 7과 같이 적용하였다.

이 연구에서는 준공 후부터 30년 경과 시까지의 10년 단위로 부식에 따른 단면감소를 고려하여 구조해석을 실시하였으며, 비말대 구간은 0.3 mm, 해수중 구간은 0.2 mm의 연간 단면감소를 적용하였다.

Fig. 15 및 Fig. 16에 준공 직후와 30년 경과 시의 frame 해석 결과를 나타내었다. Fig. 15(a), 15(b)의 응력 contour로부터, 사용년수 경과에 따른 frame 구조 해석 결과는 사용년수가 경과하여도 최대응력 발생위치는 변하지 않으며, Table 8에 나타낸 것과 같이 연결 이음부의 각 부재에서의 응력이 사용년수 경과에 따라 증가하며, 응력의 증가량도 점점 커지는 것을 알 수 있다. 또한 N형 이음부에서 응력이 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다.

**Table 6.** SCF by Efthymiou equation and detailed analysis

Joint	Load case	(a) Nominal stress (MPa) (frame analysis)	(b) SCF (Efthymiou equation)	(c) HSS ((a) × (b))	(d) HSS (plate analysis)	S.F. (safety factor) ((c) / (d))
KT-joint mid.	Under operation	5.849	3.236	18.927	15.490	1.22
	Under a storm	5.840		18.898	17.071	1.11
N-joint lower	Under operation	7.683	3.205	24.624	17.466	1.41
	Under a storm	18.334		58.760	48.710	1.21

**Table 7.** Thickness loss resulting from corrosion of an steel structure in seawater

Position	Atmospheric sea exposure	Splash zone	Immersed zone	Mud zone
Thickness reduction	< 0.1 mm/y	< 0.3 mm/y	< 0.1 mm/y - 0.2mm/y	< 0.03 mm/y

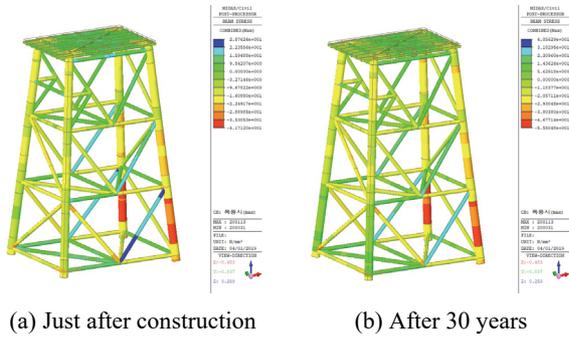


Fig. 15. Results of frame analysis according to serviced time

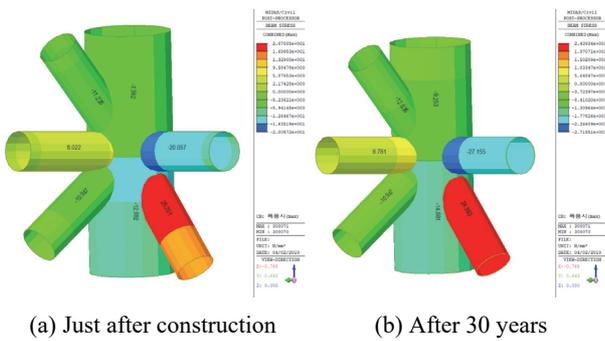


Fig. 16. Results of frame analysis for a joint according to serviced time

Fig. 17에 사용년수 경과에 따른 연결부 이음부의 각 부재에 대한 상세 구조해석 결과를 나타내었다. 코드부 이음부 사이의 gap 거리가 매우 작아 응력수렴 등의 특성을 파악하기 어려우므로 상세 구조해석에서의 구조적 응력집중 평가 및 공칭응력 산출은 브레이스 부재에 대해서 검토하였다. 연구에서는 Fig. 17의 결과에 기초하여 연구대상 연결부 이

음부에서 인장응력 및 응력이 크게 발생하는 N형 이음부를 평가 대상이음부로 하였다.

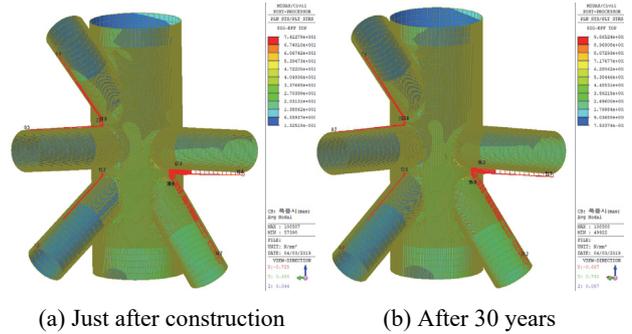


Fig. 17. Stress distribution of plate model just after construction, after 30 years

Table 9에 준공 직후, 사용년수 10년, 20년, 30년 경과에 따른 frame 분석을 기반으로 계산된 핫스팟 응력을 나타내었다. Table 9에 나타난 것과 같이 frame 해석 결과로부터 계산된 N형 이음부의 아래측 브레이스의 핫스팟 응력은 운영 시 하중조건인 경우, plate 요소로 해석하여 산정된 핫스팟 응력보다 -4% - 6%의 범위를 나타내었으며, 폭발 시 하중조건인 경우는 -29% - 0%의 범위를 나타낸다.

Table 10에 준공 직후, 사용년수 10년, 20년, 30년 경과에 따른 Efthymiou 방정식을 기반으로 계산된 핫스팟 응력을 나타내었다. Table 10에 나타난 것과 같이 Efthymiou 방정식의 구조적 응력집중계수에 frame 해석 결과로부터 산정된 공칭응력을 곱하여 핫스팟 응력을 계산한 결과, N형 이음부의 아래측 브레이스는 사용년수의 경과에 따라 0% - 41%의 큰 응력 값이 계산되는 것을 확인할 수 있다.

Table 8. Efficient stress of members according to serviced time

(Unit: MPa)

Year	Chord		KT-joint			N-joint	
	Upper	Lower	Upper	Middle	Lower	Middle	Lower
0	-7.6	-13.0	-11.2	8.0	-10.9	-20.1	20.7
	(1.000)	(1.000)	(1.000)	(1.000)	(1.000)	(1.000)	(1.000)
10	-8.0	-13.5	-11.5	8.2	-10.9	-21.8	21.7
	(1.053)	(1.038)	(1.027)	(1.025)	(1.000)	(1.085)	(1.048)
20	-8.5	-14.0	-11.9	8.4	-10.9	-24.0	22.9
	(1.118)	(1.077)	(1.063)	(1.050)	(1.000)	(1.194)	(1.106)
30	-9.3	-14.7	-12.5	8.8	-10.9	-27.2	24.4
	(1.224)	(1.131)	(1.116)	(1.100)	(1.000)	(1.353)	(1.179)

( ) : Stress ratio from the initial stress

**Table 9.** Hot-spot stress calculated based on frame analysis

Serviced time	Load case	(a) Nominal stress (MPa) (frame analysis)	(b) SCF (detailed analysis)	(c) HSS ((a) × (b))	(d) HSS (plate analysis)	S.F. (safety factor) ((c) / (d))
Just after construction	Under operation	7.683	<b>2.37</b>	18.209	17.466	1.04
	Under a storm	18.334	<b>2.66</b>	48.768	48.710	1.00
After 10 years	Under operation	8.551	<b>2.66</b>	22.746	21.430	1.06
	Under a storm	20.269	<b>2.28</b>	46.213	55.584	0.83
After 20 years	Under operation	8.660	<b>2.73</b>	23.642	23.105	1.02
	Under a storm	21.488	<b>2.31</b>	49.637	63.880	0.78
After 30 years	Under operation	8.796	<b>2.76</b>	24.277	25.182	0.96
	Under a storm	22.981	<b>2.31</b>	53.086	74.499	0.71

**Table 10.** Hot-spot stress calculated based on Efthymiou equation

Serviced time	Load case	(a) Nominal stress (MPa) (frame analysis)	(b) SCF (Efthymiou equation)	(c) HSS ((a) × (b))	(d) HSS (plate analysis)	S.F. (safety factor) ((c) / (d))
Just after construction	Under operation	7.683	<b>3.232</b>	24.831	17.466	1.42
	Under a storm	18.334		59.255	48.710	1.22
After 10 years	Under operation	8.551	<b>3.239</b>	27.697	21.430	1.29
	Under a storm	20.269		65.651	55.584	1.18
After 20 years	Under operation	8.660	<b>3.233</b>	27.998	23.105	1.21
	Under a storm	21.488		69.471	63.880	1.09
After 30 years	Under operation	8.796	<b>3.206</b>	28.200	25.182	1.12
	Under a storm	22.981		73.677	74.499	1.00

### 5. 결론

이 연구에서는 자켓 트러스 구조물의 관이음부의 기본 이음형태의 하나인 K형 이음부를 대상으로 기하형상이 구조적 응력집중에 영향을 미치는 영향의 평가 및 이들을 평가할 수 있는 효율적인 간편식을 제안하였다. 또한 3차원 기하 특성을 갖는 자켓 트러스 구조물을 대상으로 해역별(비말대) 부식영향을 고려한 구조해석을 통하여 실물 자켓 트러스 구조물 이음부에서의 구조적 응력집중에 대한 특성을 분석하였다.

- (1) 관이음부 K형 이음부에 대하여 FE 해석 모델을 검증한 결과 기존 설계식인 Efthymiou 방정식의 구조적 응력집중계수가 이 연구에서 해석한 결과 값과 유사

한 경향을 나타내었으며, Efthymiou 방정식, frame 구조해석, 상세 구조해석으로부터 산출한 구조적 응력집중계수는 Efthymiou 방정식이 가장 크게 평가하는 것으로 나타나므로 보수적인 구조물 설계 시에는 Efthymiou 방정식을 적용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

- (2) 자켓구조물의 용접 이음부에 대한 구조적 응력집중에 대한 영향을 설계 단계에서 반영하기 위한 방법으로 frame 요소를 사용한 해석 결과에 구조적 응력집중계수를 곱하여 핫스팟응력을 산정하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.
  - ① Efthymiou 방정식으로부터 산정된 기존 구조적 응력집중계수를 기준으로 산정한 핫스팟 응력은 안전율에 여유가 있어 구조 부재의 단면이 결정

되지 않은 설계 단계에 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

- ② Plate 요소 구조해석의 응력집중계수를 적용하여 산정된 핫스팟 응력은 비교적 정확한 값을 나타내므로 자켓 구조물의 단면 검토 등이 완료된 후 해당 부재의 피로 평가에 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.
- (3) Frame 해석으로부터 산정된 공칭응력과 구조적 응력집중계수를 곱하여 계산되어진 핫스팟 응력은 사용년수 경과에 따라 감소되어 상세해석으로부터 계산되어진 핫스팟 응력보다 더 낮은 값을 나타낸다.

## 감사의 글

이 연구는 (주)포스코 강건재 제품/솔루션 연구과제 (2019S045)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌(References)

- [1] Twomey, B. (2012) *Decommissioning Financial Planning & Analysis*, Presented at CCOP and EPPM Workshop on End of Concession & Decommissioning Guidelines, Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia, Thailand.
- [2] Ahn, K.S., Choi, B.J., Oh, Y.S., and Kim, J.W. (2010) An Availability Analysis on the Gap K-Joints Using High Strength Circular Hollow Section Members, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 22, No.2, pp.109-119 (in Korean).
- [3] Lee, S.J., Kim, J.W., Kim, S.S., Lee, M.J., and Yang, J.G. (2011) In-Plane Bending Moment Capacity of T-Joints in the Circular Hollow Section of New High Strength Steel Subjected to Cyclic Loadings, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.2, pp. 169-177 (in Korean).
- [4] Hosseini, A.S., Bahaari, M.R., and Lesani, M. (2019) Parametric Study of FRP Strengthening on Stress Concentration Factor in an Offshore Tubular T-Joint Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Bending Moments, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.19, No.6, pp.1755-1766.
- [5] Wang, X., Chen, T., Zhao, Q., Yuan, G., and Liu, J. (2016) Fatigue Evaluation of Grouted Connections Under Bending Moment in Offshore Wind Turbines Based on ABAQUS Scripting Interface, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.16, No.4, pp. 1149-1159.
- [6] Efthymiou, M. (1988) Development of SCF Formulae and Generalised Influence Functions for Use in Fatigue Analysis, *Proceedings of Offshore Tubular Joints Conference on Recent Developments in Tubular Joints Technology*, UEG Offshore Research, UK, pp.1-13.
- [7] Graff, W.J. (1981) *Introduction to Offshore Structures: Design, Fabrication, Installation*, Gulf Publishing, USA.
- [8] Kyung, K.S., Lee, J.H., Park, J.E., and Lee, S.J. (2018) Structural Behavior Characteristics of Jacket Structure According to Geometrical Condition, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.3, pp. 163-173 (in Korean).
- [9] Hobbacher, A. (2008) *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components* (IIW Document IIW-1823-07), International Institute of Welding, France.

**요약**: 이 연구에서는 관이음부(tubular joint) 유한요소 모델을 검증하기 위하여 K형 이음부에 대한 기존 설계식인 Efthymiou 방정식의 응력집중계수(SCF)를 비교하였으며, 기존 설계 공용하중 조건에서 실제 적용된 자켓 구조물을 대상으로 유한요소해석을 통한 연결부에 대한 응력집중계수 특성을 분석하였다. 또한, 3차원 기하학적 특성을 갖는 실물 자켓 구조물을 대상으로 해역별(비말대)에 따른 부식 영향을 고려한 구조해석을 통하여 사용년수에 따른 핫스팟 응력(HSS) 및 응력집중계수의 경향에 대한 특성을 분석하였으며, 위의 결과로부터 frame 해석 결과를 통한 핫스팟 응력 산정방법을 검토하였다.

**핵심용어**: 응력집중계수, 핫스팟응력, 기하형상계수, 자켓구조물 격점부, K-joint