대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 53, No. 4, pp. 258-265, August 2016
eISSN:2287-7355, http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2016.53.4.258

# 유연식 라이저에 대한 유한요소법과 이론적 방법에 의한 구조 거동의 비교 연구

임기호[1] · 장범선[2,†] · 유동현[2]
서울대학교 공과대학 협동과정-해양플랜트엔지니어링전공[1]
서울대학교 공과대학 조선해양공학과[2]

# A Comparison Study of Structure Behavior of Flexible Riser Using Numerical and Theoretical Methods

Ki-Ho Yim[1] · Beom-Seon Jang[2,†] · Dong-Hyun Yoo[2]
Interdisciplinary Program in Offshore Plant Engineering, Seoul National University[1]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University[2]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A flexible riser consists of several layers which have different materials, shapes and functions. The layers designed properly can take the design load safely, and each property of layer provides a complexity of flexible riser. Such complexity/unit-property is an input for global analysis of flexible riser. There are several approaches to calculate the complexity of flexible riser, those are experimental, numerical and theoretical methods. This paper provides a complexity from numerical and theoretical analysis for 2.5 inch flexible riser of which details and the experimental data are already produced under tension, external pressure, and bending moment. In addition, comparison of stiffness and stress are also provided. Especially, analysis of stress could lead to researches on ultimate strength or fatigue strength of flexible risers.

**Keywords :** Flexible riser(유연식 라이저), Numerical method(수치 해석적 방법), Theoretical method(이론적 방법), Axial stiffness(축강성), Stress(응력), Bending stiffness(굽힘 강성), Hysteresis curve(이력 곡선)

## 1. 서 론

해상 유전에서 파이프 라인을 따라 운송된 유체는 최종적으로 라이저를 통해 수면 위로 올라와 topside에서 처리과정을 거친다. 고정식 플랫폼 또는 TLP 등의 경우, 플랫폼의 움직임이 아주 작기 때문에 SCR(Steel Catenary Riser)을 주로 사용하나, 플랫폼의 움직임이 큰 부유식 플랫폼(FPSO)의 경우 유연식 라이저가 적합하다.

국내의 경우, 다물체 동역학을 통한 라이저의 전체 운동해석은 많이 이루어져 왔으나, 국부적 구조해석 또는 강도 평가에 대한 연구는 상대적으로 활성화되지 못하였다.

반면 외국의 경우, 라이저의 국부 구조해석을 위한 연구가 오래 전부터 시행되어 왔다. Witz (1996)는 라이저 제조사, 선급, 오일메이저 등과 협력하여 여러 가지 수치 해석법에 의해 라이저의 구조 거동 해석을 수행하였다. 또한 이를 실험 결과와도 비교하여 유사함을 보였다. Bahtui, et al.(2009)는 이론적 방법을 사용하여 기존의 수치해석 결과와의 유사성을 보여주었다. 이 연구에서 inner carcass 및 pressure armour의 복잡성을 줄이기 위해 Timosenko and Gere (1961)의 이론을 적용하여 원기둥 형태의 상사모델을 사용하였다 (Bahtui, et al., 2009; Sousa, et al., 2012). 원기둥 상사모델은 일정 범위의 변형 내에서 실제 모델을 잘 모사하는 경향을 보인다 (Neto & Martins, 2012). 그리고, 수치해석에 필요한 각 레이어 간의 마찰 계수는 실험을 통해 (Seavik & Berge, 1995) 구한 값을 적용한 사례가 있다 (Bahtui, et al., 2009; Ren, et al., 2013).

최근 연구 동향을 살펴보면 보다 복잡하고 새로운 형태의 라이저를 개발하는 데 많은 노력을 기울이고 있다. 이론적 방법은 많은 가정을 통하여 간략화한 라이저를 대상으로 하므로 복잡한 형태의 새로운 라이저를 해석하는 데 적합하지 않다. 또한 실험적 방법 은 값비싼 설비와 많은 시간을 요구한다. 그러므로 수치해석적 방법의 개발이 필요하다.

Received : 15 January 2016 | Revised : 26 May 2016 | Accepted : 7 July 2016
† Corresponding author : Beom-Seon Jang, seanjang@snu.ac.kr

유한요소 해석 툴이 개발된 이후로는 유한요소법을 이용한 연구가 많이 진행되었다. Sousa, et al. (2012)는 ANSYS를 이용하여 레이어 간의 접촉을 고려한 비선형 유한요소 해석을 수행하였고, Bahtui, et al. (2009)와 Ren, et al. (2013)은 ABAQUS를 이용하였다.

위의 논문들은 주로 라이저의 복잡성을 중심으로 이론적 방법과 수치해석적 방법을 비교하였으며, 이를 통해 수치해석적 방법의 타당성을 입증하였다. 그러나 두 방법으로 구한 응력까지 비교하지는 않았다.

본 연구에서는 물성치가 공개된 2.5 인치 유연식 라이저에 대해 유한요소법 및 이론적 방법으로 구조 거동 해석을 수행할 것이다. 인장력, 외압, 굽힘 모멘트에 대한 강성과 응력을 구하고, 이 결과를 실험 데이터와 비교하여 수치해석적 모델의 정확성과 유효성을 검증하는 것을 목표로 하고 있다.

또한 응력 값을 비교하는 데 초점을 맞추었다는 점에서 추후 새로운 모델에 대한 최종 강도 및 피로 강도 해석의 밑거름이 될 수 있을 것으로 기대된다.

# 2. 2.5 인치 라이저 모델

## 2.1 일반적인 라이저의 특징

일반적인 유연식 라이저의 형태는 Fig. 1과 같다. Tensile armours와 anti-wear tape이 각각 한 쌍이 있으므로 총 8개의 층으로 구성되어 있다. Inner carcass 는 라이저의 제조 과정에서 뼈대와 같은 역할을 하고, 압력에 의해 라이저가 붕괴되는 것을 막아준다. Pressure armour는 주로 Z 모양의 와이어 1개 또는 2개가 감긴 형태로, 반지름 방향의 압력에 대해 지지하는 역할을 하는 층이다. Tensile armours는 여러 개의 와이어가 와선 형태로 감긴 형태로 한 층을 이루고, 인장력 및 비틂 모멘트에 대한 강성을 가진다. 보통, tensile armour layer는 서로 반대되는 방향으로 구성되어 짝수 개의 층으로 이루어진다.

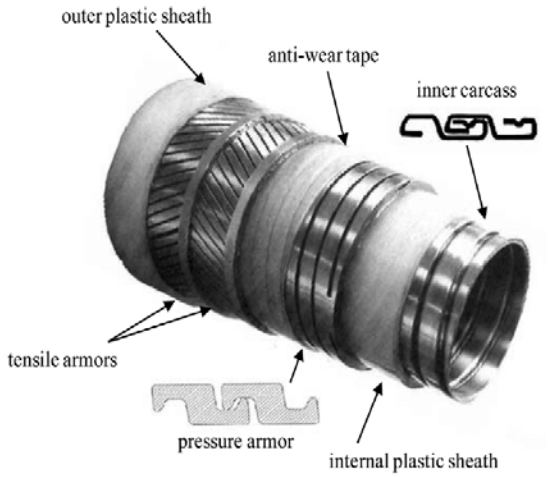


Fig. 1 Typical flexible riser (Sousa, et al., 2012)

위에서 언급된 층과 같이 금속성의 재질로 이루어진 층이 있는가 하면, anti-wear tape, internal plastic sheath, outer plastic sheath는 플라스틱 재질의 층도 존재한다. Anti-wear tape은 금속 간 마찰을 피하는 목적과 함께, tensile armours의 반지름 방향의 팽창(bird-caging 현상)을 억제한다. Internal plastic sheath와 outer plastic sheath는 내 외부의 유체를 격리시키고, 내 외부의 온도 차이로 인한 열 손실을 막아주는 역할을 한다. 이렇게 라이저의 각 층의 역할은 다르며 요구 조건에 따라, 두께, 재질, 층의 개수를 달리하여 설계된다.

## 2.2 2.5 인치 라이저 모델

Witz (1996)에 2.5 인치 라이저의 각 층별 물성치가 상세히 기술되어 있다. 뿐만 아니라, 해당 모델의 실험 결과도 발표되어 있기 때문에, 2.5 인치 라이저를 해석 대상으로 사용하였다. 해석에 사용된 2.5 인치 라이저 또한 Fig. 1과 같은 전형적인 유연식 라이저이며, 각 층별 재원과 물성치는 Table 1에서 볼 수 있다.

Table 1 Material property of each layer of 2.5 inch riser

| No. | Layer | OD (*mm*) | Material | t | E(*MPa*) | ν |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Inner carcass | 70.2 | AISI 304 | 3.5 | 205000 | 0.3 |
| 2 | Pressure sheath | 80.0 | Nylon 12 | 4.9 | 284 | 0.29 |
| 3 | Pressure armour | 92.5 | Steel AFNOR FI 15 | 6.2 | 205000 | 0.3 |
| 4 | Anti-wear layer | 95.5 | Nylon 11 | 1.5 | 301 | 0.29 |
| 5 | Inner tensile armor | 101.5 | Steel AFNOR FI 41 | 3 | 205000 | 0.3 |
| 6 | Anti-wear layer | 104.5 | Nylon 11 | 1.5 | 301 | 0.29 |
| 7 | Outer tensile Armour | 110.5 | Steel AFNOR FI 41 | 3 | 205000 | 0.3 |
| 8 | Outer sheath | 111.5 | - | 0.5 | 600 | 0.29 |

# 3. 이론적 해석 방법

이론적 해석 방법을 연구한 Feret and Bournazel (1987)는 일반적인 해를 풀기 위한 방정식과 간략화한 방정식을 이용하여 유연식 라이저의 거동을 계산하는 방법을 소개하였다.

Kebadze (2000)에서는 각 층의 특성을 고려한 구성방정식을 구하는 방법이 소개되었다. 각 층의 강성 행렬을 조합하여 라이저 전체의 강성 행렬을 구할 수 있으며 층 사이의 간격이 없다는 일명 no gap condition과 압력의 평형이라는 적합방정식을 더하면 최종적으로 각 층의 구조 거동을 구할 수 있다.

이론적 방법과 수치해석적 방법으로 각각 구한 결과 비교가

Bahtui, et al. (2009)에 의해 수행되었고, 이론적 방법으로 근사해를 구하는 과정이 소개되어 있다.

Inner carcass 와 pressure armour의 경우, 그 단면 형상이 복잡하고(Fig. 1 참조), 일명 interlocking이라고 불리는 동일 재료 간 접촉(self-contact)이 발생하여, 실제 모습 그대로 이론적 방법에 적용하는 데에 어려움이 있기 때문에, 직교 이방성(orthotropic)의 원기둥 상사모델로 바꿔 적용하였다 (Bahtui, et al., 2009; Sousa, et al., 2003). 이론적 방법에 적용하기 위한 각 층의 재료적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Property of each layer for constitutive equation

| No. | Layer | Type | Material |
|---|---|---|---|
| 1 | Inner carcass | Thin tube | Orthotropic |
| 2 | Pressure sheath | Thin tube | Isotropic |
| 3 | Pressure armour | Thin tube | Orthotropic |
| 4 | Anti-friction layer | Thin tube | Isotropic |
| 5 | Inner tensile armor | Helix | Isotropic |
| 6 | Anti-friction layer | Thin tube | Isotropic |
| 7 | Outer tensile armor | Helix | Isotropic |
| 8 | Outer sheath | Thin tube | Isotropic |

Fig. 2은 이론적 방법을 통해 해를 구하는 과정을 보여준다. 먼저 각 층의 재료적, 기하학적 특성을 기반으로 강성 행렬을 계산한다. 그리고 각 층별 강성행렬을 조합하여 전체 라이저의 강성 행렬을 구성한다. 여기에 층 사이에 간격이 존재하지 않으며 압력이 평형을 이룬다는 조건을 추가하여 해를 구할 수 있다.

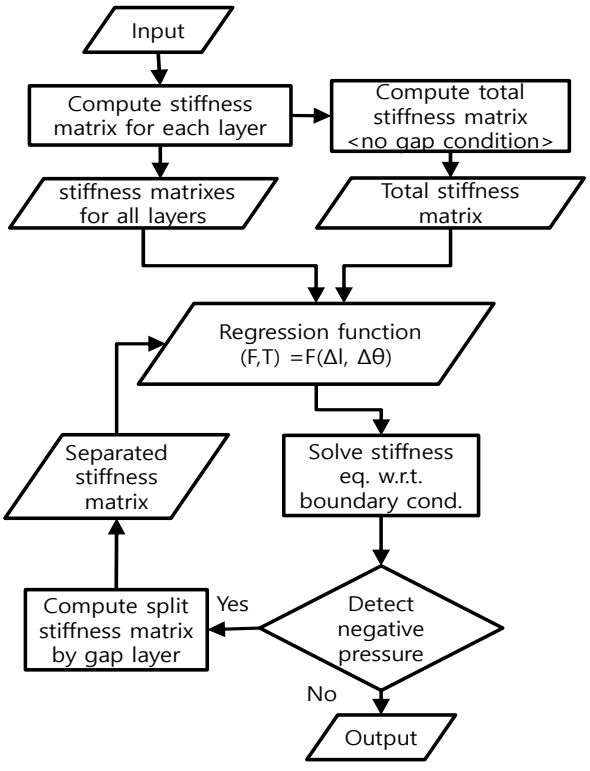


Fig. 2 Process of program (PiFlexX®) for the theoretical analysis of flexible riser

# 4. 유한요소 해석

## 4.1 유한요소법의 특징

유연식 라이저의 구조 거동 해석을 3차원 유한요소 모델을 이용하여 수행하는 데는 많은 어려움 있다. 우선 inner carcass와 pressure armour는 단면 형상이 복잡하고 동일 재료 간 접촉이 발생한다. 이 복잡한 형상을 그대로 모델링하면 요소의 개수가 많아져 계산량이 증가할 뿐만 아니라 수렴성이 떨어진다는 문제도 생긴다. 이러한 문제를 해결하기 위해 이론적 해석 방법과 마찬가지로 직교 이방성의 원기둥 상사모델로 치환하여 해석을 수행하였다.

한편 여러 층 사이의 접촉, 마찰, slip 등 복잡한 상호 작용을 구현하는 것도 어려운 일이다. 이를 모두 반영하기 위해 비선형 해석이 수행되어야 하며 수렴성을 높이기 위해서는 적절한 요소의 개수와 적절한 하중의 증가폭을 설정해 주어야 한다.

또한 좀 더 정확한 구조 거동을 보기 위해서는 모델의 길이가 길수록 좋은데, 너무 긴 모델을 대상으로 삼으면 요소의 개수가 많아서 계산량이 증가하고, 수렴성이 떨어진다. 그러므로 적절한 수준의 모델의 길이를 택하여 계산의 정확성과 양을 적정 수준으로 만들어야 한다. 본 연구에서는 tensile armours의 2-pitch 만큼의 모델 길이를 설정하였다.

## 4.2 유한요소 모델(1) 접촉

유연식 라이저의 3차원 유한요소 모델은 ANSYS를 사용하여 만들었다. 여러 개의 와이어로 구성된 층인 tensile armours는 beam 요소(Beam188)를 사용하였으며 inner carcass와 pressure armour는 직교 이방성의 shell 요소(Shell181)로 만들었다. 나머지 층은 모두 solid 요소(Solid186)를 이용하여 구성하였다.

비선형 접촉 문제를 풀기 위해서 Conta174, Conta175, Targe170 요소가 사용되었다. Conta175/Targe170 요소는 tensile armours와 원기둥 형태의 층 사이의 접촉을 나타내고, Conta174/Targe170 요소는 원기둥 형태의 층 간의 접촉을 구현하기 위해 사용되었다. 전체 유한요소 모델은 Fig. 3에 도시하였고, 각 층을 이루는 요소의 정보는 Table 3에 정리하였다.

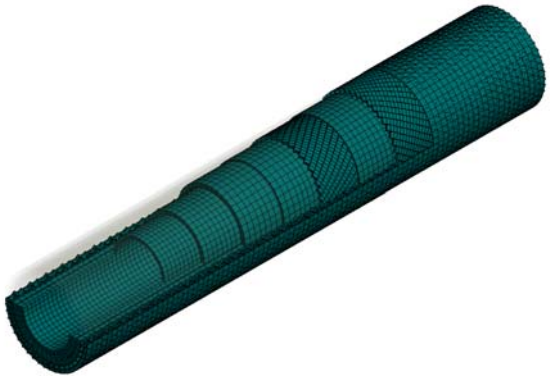

Fig. 3 Finite element model for 2.5 inch flexible riser

Table 3 Property of each layer for constitutive equation

| No. | Layer | Type | Material | Element No. |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Inner carcass | Shell 181 | Orthotropic | 4550~6720 |
| 2 | Pressure sheath | Solid 185 | Isotropic | 8800~13200 |
| 3 | Pressure armour | Shell 181 | Orthotropic | 4700~6720 |
| 4 | Anti-friction layer | Solid 185 | Isotropic | 8000~12000 |
| 5 | Inner tensile armor | Beam 188 | Isotropic | 3360~6720 |
| 6 | Anti-friction layer | Solid 185 | Isotropic | 3360~3480 |
| 7 | Outer tensile Armor | Beam 188 | Isotropic | 4000~6720 |
| 8 | Outer sheath | Solid 185 | Isotropic | 3360~4560 |

층을 구성하는 요소의 개수는 수치해석적 방법의 수렴성에 의해 조절하였다. 예를 들어 굽힘 모멘트와 외압을 함께 가한 경우는 수렴성이 떨어지므로 요소의 개수를 조절하여 수렴성을 높였다.

또한 층 사이의 접촉 문제를 푸는 알고리즘으로 Pure Penalty Method를 사용하였는데 아래의 수식 (1)과 같다.

$$F_n = k_n x_p \tag{1}$$

여기에서 $F_n$은 접촉력, $K_n$은 강성 계수, 그리고 $x_p$는 침투한 두께를 의미한다. 쉽게 말해, 층 사이의 침투하는 정도는 접촉력과 강성 계수에 의해서 결정된다. 물론 물리적으로 층 간의 침투는 발생하지 않는다. 하지만 접촉 문제를 푸는 알고리즘에서 침투는 피할 수 없다. 침투의 정도를 줄이기 위해서는 높은 강성 계수를 설정하는 것이 좋으나 이는 수치해석적 해의 수렴성을 낮추는 문제가 있으므로 적절하게 선택하는 것이 좋다.

Table 4 Property of each layer for constitutive equation

| Contact pair | Contact | Target | FKN | Penetration tolerance |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Pressure sheath | Inner carcass | 0.1~1 | 1% of thickness |
| 2 | Pressure sheath | Pressure armour | 0.1~1 | 1% of thickness |
| 3 | Anti-friction layer | Pressure armour | 0.1~1 | 1% of thickness |
| 4 | Inner tensile armor | Anti-friction layer | 0.1~1 | 1% of thickness |
| 5 | Inner tensile armor | Anti-friction layer | 0.1~1 | 1% of thickness |
| 6 | Outer tensile Armor | Anti-friction layer | 0.1~1 | 1% of thickness |
| 7 | Outer tensile Armor | Outer sheath | 0.1~1 | 1% of thickness |

ANSYS에서는 FKN의 값을 이용하여 강성 계수를 결정하는데 ANSYS Documentation (2013)에 의하면 축 대칭의 하중을 가할 때에는 FKN은 1.0을 사용하며, 굽힘 모멘트를 가할 때에는 0.1~0.01으로 사용할 것을 권고하고 있다. 본 연구에서는 인장력과 외압을 가할 때에는 FKN을 1.0으로, 굽힘 모멘트를 가할 때에는 0.1로 사용하였다. 한편 침투가 라이저 모델의 거동에 미치는 영향을 줄이기 위해 침투의 허용량은 층 두께의 1%로 제한하였다.

한편 모든 접촉면의 마찰계수 값은 0.1을 사용하였다 (Seavik & Berge, 1995). 다만, tensile armours 간의 접촉 과 마찰은 없는 것으로 가정하였다. 층 사이의 접촉에 내용은 Table 4에 정리하였다.

## 4.3 유한요소 모델(2) 하중 및 경계 조건

실제로 운용되는 유연식 라이저에는 다양한 종류의 하중(인장력, 압축력, 굽힘 모멘트, 외압 및 내압)이 다양한 방향에서 작용할 것이다. 그러나 본 연구에서는 주로 3가지 종류의 하중(인장력, 외압, 굽힘 모멘트)를 각각 유한요소 모델에 가하여 해석을 수행할 것이다.

일반적으로 외압과 인장력(또는 압축력)에 대한 각각의 구조적 거동을 알면 둘의 복합하중에 대한 거동도 구할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 외압과 인장력에 대해 개별적으로 해석을 수행하였다. 한편 외압과 굽힘 모멘트에 관해서는 이러한 추산이 불가능 하므로 다양한 케이스의 외압과 굽힘 모멘트의 조합에 대해 해석을 수행하였다.

경계 조건을 부여하기 위해 모델의 끝 단에 위치하는 모든 요소들을 하나의 점(RP)와 rigid하게 연결시켜, RP를 기준으로 요소들이 움직이도록 조건을 설정하였다(Fig. 4). 한편 Fig. 5~7과 Table 5~7은 3 가지 하중 (인장, 외압, 외압 + 굽힘 모멘트) 을 주는 경우에 대해 하중 조건 및 경계 조건을 보여준다.

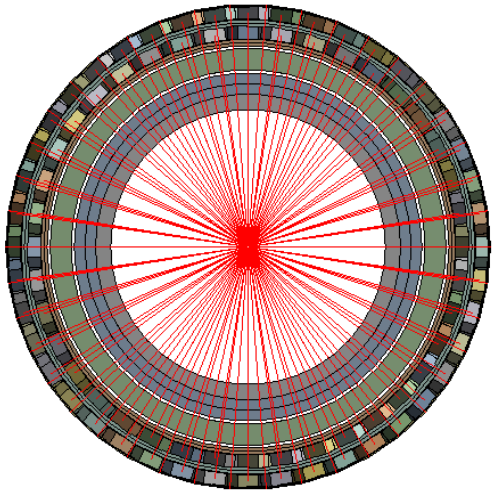

Fig. 4 Remote point connection

Fig. 5 Tension load schematic figure

Table 5 Boundary conditions for tension only

| DOF | Constraints to nodes on the xy-plane of | | Remote point constraints | |
|---|---|---|---|---|
| | RP2 | RP1 | RP2 | RP1 |
| X | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |
| Y | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |
| Z | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |
| Rot X | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |
| Rot Y | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |
| Rot Z | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |

Fig. 6 Pressure loads schematic figure

Table 6 Boundary conditions for pressure only

| DOF | Constraints to nodes on the xy-plane of | | Remote point constraints | |
|---|---|---|---|---|
| | RP2 | RP1 | RP2 | RP1 |
| X | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |
| Y | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |
| Z | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Fixed |
| Rot X | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |
| Rot Y | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |
| Rot Z | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free |

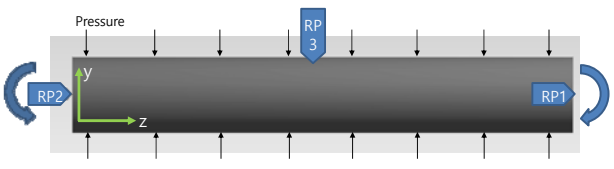


Fig. 7 Bending moment with external pressure schematic figure

Table 7 Boundary conditions for bending

| DOF | Constraints to nodes on the xy-plane of | | | Remote point constraints | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | RP2 | RP3 | RP1 | RP2 | RP3 | RP1 |
| X | Rigidly connected | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free | Fixed |
| Y | Rigidly connected | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free | Fixed |
| Z | Rigidly connected | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free | Free |
| Rot X | Rigidly connected | Rigidly connected | Rigidly connected | Free | Free | Free |
| Rot Y | Rigidly connected | Rigidly connected | Rigidly connected | Free | Free | Free |
| Rot Z | Rigidly connected | Rigidly connected | Rigidly connected | Fixed | Free | Fixed |

# 5. 결과 및 논의

## 5.1 인장력을 가했을 때 결과 비교

### 5.1.1 축 강성(axial stiffness)

Fig. 8에서는 2.5 인치 라이저 모델의 인장력에 대한 신장량을 이론적 방법과 수치해석적 방법(유한요소법)으로 구한 결과를 Witz (1996)의 실험 결과와 수치해석적 방법의 결과와 비교하여 보여준다. Reference(Mean)은 Witz (1996)에서 언급된 10개의 기관에서 내놓은 계산 결과의 평균을 나타낸다. 특별히 Table 8에서는 위의 방법을 통해 구한 축 강성을 보여주고 있다.

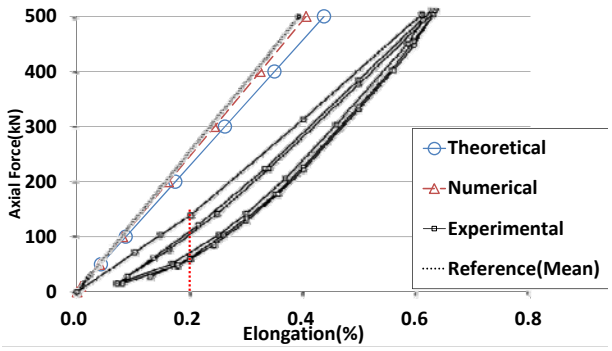


Fig. 8 Comparison of tension - elongation curve

Table 8 Comparison of axial stiffness

| | Theo-retical | Nume-rical | Experi-mental | Ref.1 (Witz,1996) | Ref.2 (Ren,2013) |
|---|---|---|---|---|---|
| Axial Stiffness (MN) | 114.5 | 123.4 | 92 | 128 | 117 |

결과를 살펴보면 이론적 방법과 수치해석적 방법에 의한 축

강성 값은 Reference(Mean)와 상당히 유사함을 보인다. 그러나 Witz (1996)의 실험 결과와는 모양과 크기가 조금 다름을 확인할 수 있다.

여기에서 주목할만한 사실은 실험 결과 곡선의 기울기가 신장량이 0.2% 이후에 증가한다는 것이다. 그 이유는 실험에 사용된 시편에 포함된 제조 과정에서 만들어진 초기 gap의 영향이라 유추된다 (Kebadze, 2000). 실제 수치해석 모델에 일정한 간격을 주고 해석을 해보면 gap이 닫히는 동안에는 축 강성이 거의 없다가 간격이 없어지고부터 강성이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

한편 실험 결과에서 hysteresis가 발생하는 이유는 실제 riser가 제작되는 과정에서 pretension이 생기고, 이로 인해 초기 접촉 압력 및 초기 마찰이 발생하기 때문이다. 이는 5.3의 굽힘 모멘트 결과에서 더욱 두드러진다.

### 5.1.2 응력(stress)

2.5 인치 라이저에 대한 응력의 실험 값은 공개되지 않았으므로 응력의 경우, 이론적 방법과 수치해석적 방법간의 비교만 수행하였다. Fig. 9는 inner tensile armours와 outer tensile armour에 걸리는 응력을 보여주고, 이론적 방법과 수치해석적 방법에 의해 구한 값이 거의 유사함을 확인할 수 있다.

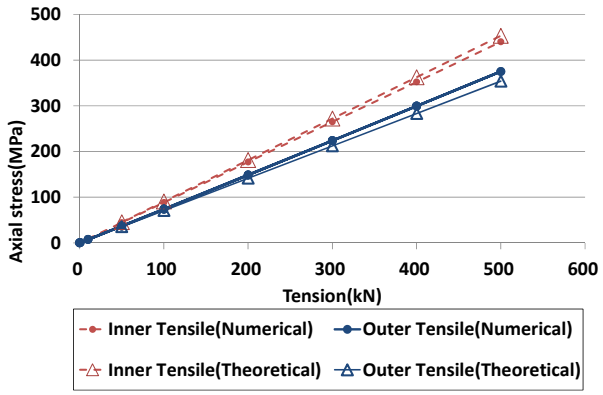


Fig. 9 Comparison of axial stresses of both tensile armour vs. tension

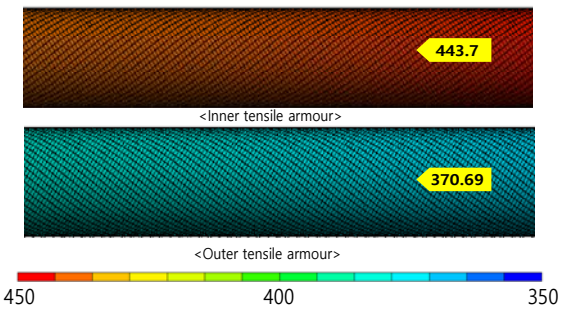


Fig. 10 Stress distribution @ 500kN tension from numerical analysis, (a)inner tensile armour, (b)outer tensile armour

한편 Fig. 10은 인장력이 500kN 걸렸을 때에 inner/outer tensile armours에 작용하는 응력 분포를 나타낸다. 경계 조건의 영향을 무시하기 위해 Fig. 10에서는 중심부의 응력 분포를 보여주고 있으며 분포가 상당히 고르게 되어 있음을 확인할 수 있다. 비교 결과, 두 방법을 이용하여 계산된 응력 값이 매우 유사함을 확인할 수 있다.

### 5.1.3 비틀림 각(torsional angle)

다음으로 Fig. 11은 인장력에 따른 비틀림 각을 이론적 방법과 수치해석적 방법을 통한 결과를 비교하고 있다. 이론적 방법으로 구한 인장에 따른 비틀림 강성은 104.5 MNm이고 수치해석적 방법으로 구한 값은 109.2 MNm로 유사하였다.

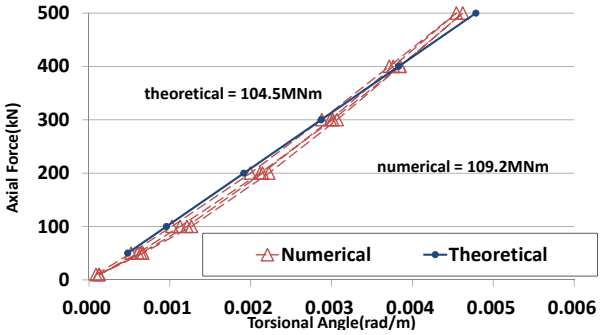


Fig. 11 Comparison of tension – torsional angle curve

## 5.2 외압을 가했을 때 결과 비교

5.2에서는 라이저 모델의 가장 바깥쪽 층인 Outer sheath 면에 수직한 방향으로 외압을 가했을 때 inner/outer tensile armours가 받는 축방향의 응력을 이론적 방법과 수치해석적 방법으로 구한 결과를 비교하여 보여준다. Witz (1996)에는 이와 관련한 결과가 없으므로 본 연구에서 구한 결과로만 비교하였다.

Fig. 12를 보면 두 방법을 사용하여 구한 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 13은 가장 바깥쪽에 외압이 20 MPa이 걸렸을 때, 각 층에 걸리는 압력을 보여준다. 이론적 방법과 수치해석적 방법에 약간의 차이가 존재했지만, 가장 큰 압력을 견뎌내는 것은 Pressure armour(zeta layer)임을 확인할 수 있다. 이는 층 사이의 압력 차이로 알 수 있다.

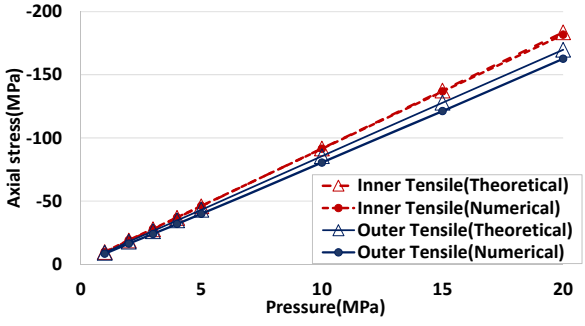


Fig. 12 Comparison of axial stresses of both tensile armour vs. external pressure

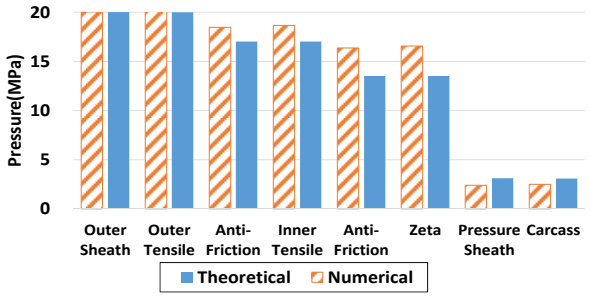


Fig. 13 Comparison of interlayer pressures @ 20 MPa of external pressure

### 5.3 굽힘 모멘트를 가했을 때 결과 비교

5.3에서는 굽힘 모멘트와 외압을 동시에 가했을 때 굽힘 강성과 각 tensile armour가 받는 응력을 이론적 방법 및 수치해석적 방법으로 비교하여 보여주고 있다. Witz (1996)에는 오직 굽힘 모멘트만을 가했을 때의 결과만을 비교하므로 이 경우에 대해서는 본 연구에서 구한 결과를 Witz의 실험 결과와 비교할 수 있다. 그러나 나머지의 경우에 대해서는 Witz의 결과가 없으므로 이론적 방법과 수치해석적 방법에 대해서만 비교를 수행할 것이다.

Fig. 14은 단지 굽힘 모멘트만 가했을 때의 결과를 보여주고, Fig.15과 Fig.16는 각각 5 MPa, 10 MPa의 외압과 함께 굽힘 모멘트를 가했을 때의 결과를 보여준다. 아울러 Fig. 17과 Fig. 18는 10 MPa의 외압과 굽힘 모멘트를 가했을 때 각각 outer, inner tensile armour가 각각 받는 응력을 보여준다.

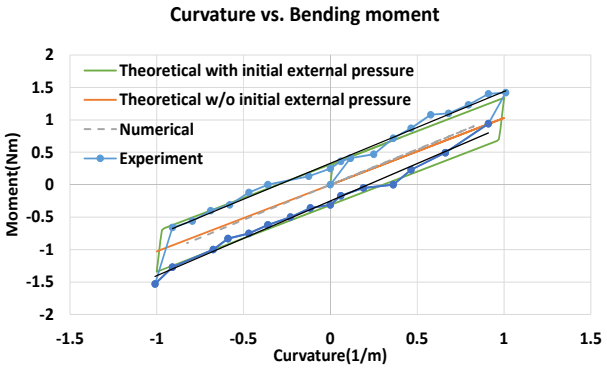


Fig. 14 Comparison of moment vs. curvature (moment only)

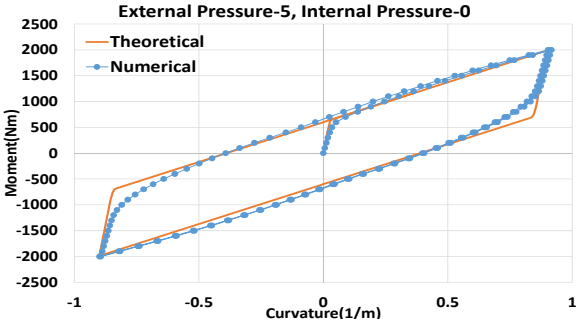


Fig. 15 Comparison of moment vs. curvature (5 MPa of external pressure)

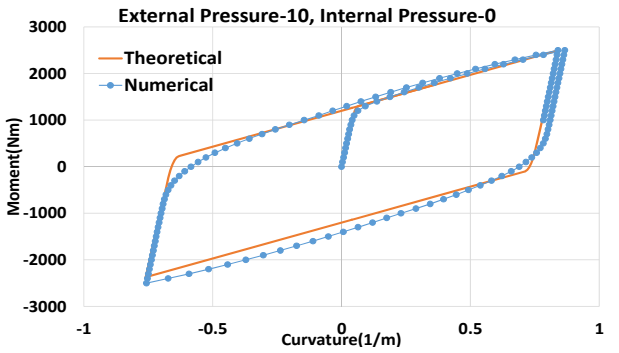


Fig. 16 Comparison of moment vs. curvature (10 MPa of external pressure)

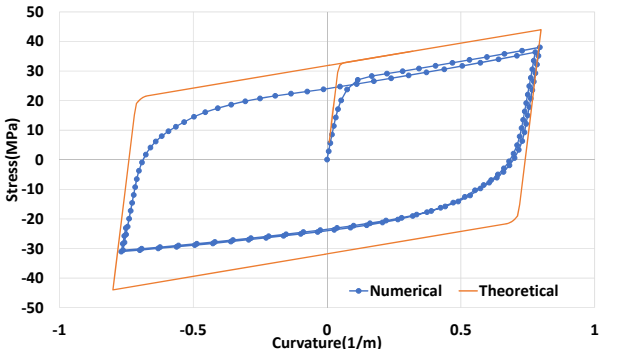


Fig. 17 Comparison of axial stresses in outer tensile armour vs. bending moment with 10 MPa of external pressure

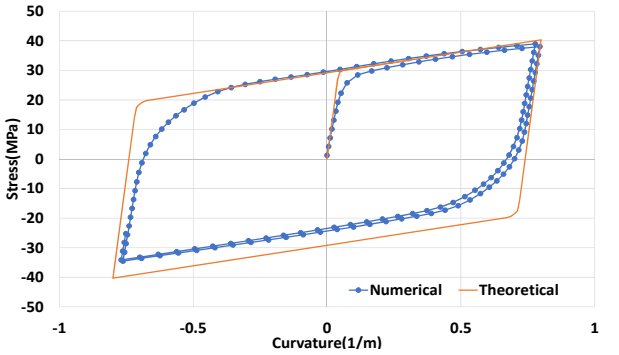


Fig. 18 Comparison of axial stresses in inner tensile armour vs. bending moment with 10 MPa of external pressure

결과를 보면 이론적 방법과 수치해석적 방법은 굽힘 강성이나 응력 곡선에서 상당히 유사함을 보여주고 있다. 그러나 Witz의 실험은 두 방법보다 hysteresis 곡선의 폭이 더 넓다는 결과를 보이는데, 이는 5.1과 마찬가지로 초기 접촉 압력의 영향으로 인한 것이라 유추된다. 이론적 방법에 초기 접촉 압력의 영향을 더하면 실험의 결과와 매우 유사한 결과를 보인다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 ANSYS를 사용하여 2.5 인치 유연식 라이저의

유한요소 모델을 만들었다. 또한 인장력, 외압 및 굽힘 모멘트를 각각 가했을 때 강성 및 응력을 구하였다. 또한 이 결과가 실험 데이터 및 이론적 방법의 결과와 유사함을 보여 수치해석적 모델의 정확성과 유효성을 입증하였다.

요약하자면 수치해석적 방법과 이론적 방법은 다음의 사항에 대해 유사성을 보였다.

1. 다음 사항에 대한 유연식 라이저의 거동
   - 축 강성
   - 인장력에 대한 비틂 응답
   - 외압 내에서 각 layers가 받는 압력
   - 굽힘 강성(외압이 있는 경우와 없는 경우에 대해)
2. 다음 하중에 대한 tensile armours가 받는 응력
   - 인장력을 가했을 때
   - 외압을 가했을 때
   - 굽힘 모멘트를 가했을 때(외압이 있는 경우와 없는 경우에 대해)
3. 굽힘 모멘트를 가했을 때의 hysteresis 곡선

결론적으로 이론적 방법과 수치해석적 방법을 통해 계산된 강성 및 응력 값은 실험값과 근사한 결과를 얻었으며, 그 오차는 유사한 참고 논문에서 보이는 수준과 비슷한 결과이다.

또한 응력 값을 비교하는 데 초점을 맞추었다는 점에서 추후 새로운 모델에 대한 최종 강도 및 피로 강도 해석의 밑거름이 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 조선해양산업 핵심기술개발사업 “수심 1500m용 내경 7인치 이상 급의 Flexible Riser 개발을 위한 구조 안전성 평가 기술 개발” 과제 (10062271)의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

## References

ANSYS, 2013. *Mechanical APDL Documentation, R15.0*. SAS IP, Inc.

Bahtui, A. Bahai, H. & Alfano, G., 2009. Numerical and Analytical Modeling of Unbonded Flexible Risers. *Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering*, 131(021401).

Feret, J.J. & Bournazel, C.L., 1987. Calculation of Stresses and Slip in Structural Layers of Unbonded Flexible Pipes. *Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering*, 109, pp.263-269.

Kebadze, E., 2000. *Theoretical modelling of unbonded flexible pipe cross-sections*. PhD. Thesis. UK: South Bank University.

Neto, A.G. & Martins, C.A., 2012. A Comparative Wet Collapse Buckling Study for the Carcass Layer of Flexible Pipes. *Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering*, 134(031701).

Ren, S.F. Tang, W.Y. & Guo, J.T., 2013. *Behavior of Unbonded Flexible Risers Subject to Axial Tension*. China Ocean Engineering, 28(2), pp.249-258.

Sousa, J.R.M. Ribeiro, E.J.B. Ellwanger, G.B. & Lima, E.C.P., 2003. On the tension-compression behaviour of flexible risers. *13th Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE, Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30, 2003, pp.105-112.

Saevik, S. & Berge S., 1995. Fatigue Testing and Theoretical Studies of Two 4 inch Flexible Pipes. *Engineering Structures*. 17(4), pp.276-292.

Sousa, J.R.M. Viero, P.F. Magluta, C. & Roitman, N., 2012. An Experimental and Numerical Study on the Axial Compression Response of Flexible Pipes. *Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering*, 134(031703).

Timoshenko, S.P. & Gere, J.M., 1961. *Theory of Elastic Stability*. McGraw-Hill International Book Company, Inc.: New York.

Witz, J.A., 1996. A Case Study in the Cross-Section Analysis of Flexible Risers. *Marine Structures*, 9, pp.885-904.

임 기 호

장 범 선

유 동 현