

10 MW급 해양온도차발전을 위한 라이저 개념설계

정동호[†] · 권용주 · 김현주
선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구부

Conceptual Design of a Riser for 10 MW OTEC

Dongho Jung[†], Yongju Kwon and Hyeonju Kim
Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering

요 약

본 연구에서는 10 MW 용 라이저의 개념설계를 수행하며, 수치해석을 통하여 개념설계안에 대한 동적거동 특성을 분석한다. 전체 시스템은 크게 두 가지 개념으로 제안하며, 라이저가 자유롭게 매달린 형상을 가지는 경우에 대하여 라이저의 단면 설계를 수행한다. 라이저의 단면계수를 증가시키고, 비중을 조절하기 위하여 라이저 두께에 따라 중공을 형성하는 설계안에서는 라이저 아래 끝단에 중량체를 설치한다. 중공 없이 균일한 FRP 재질로 이루어진 라이저는 끝단 중량체 없이 자유롭게 매달린 형상으로 설계된다. 두 가지 설계 개념에 대하여 거동 특성 분석과 안전성 평가를 위하여 동적 거동해석을 수행한다. 끝단 중량체가 설치된 중공을 가지는 라이저의 응력은 중량체의 중량에 지배되는 것을 알 수 있다. 중량체 없이 자유롭게 매달린 라이저는 강한 조류가 작용하는 환경에서 파랑 및 부유체 가진이 작용하는 경우에, 해수면 부근에 응력이 집중되는 것을 알 수 있다. 자유롭게 매달린 대구경 라이저의 설계에서 조류는 매우 중요한 설계 요소라는 것을 알 수 있으며, 라이저 하부 끝단에 중량체를 설치함으로써 응력을 일부 줄일 수 있다는 것으로 나타났다.

Abstract – The concept design of a riser for Ocean Thermal Energy Conversion in 10 MW is proposed and its dynamic behaviour characteristics is analyzed with numerical method. A riser pipe with a hollow along its thickness in the cross-section to increase the effective modulus of its cross-section is designed considering the manufacture. The riser pipe without hollows along its thickness needs a lumped weight at the bottom end of a riser in order to keep its vertical hanging configuration from large buoyancy and the strong current. The riser is designed to control its density by inserting materials in high or low density into a hollow. The dynamic behaviour characteristics of the two designed risers is evaluated with the developed numerical analysis tool. The combined stress of the riser with a lumped weight is showed to be dominated by weight of a lumped mass. The riser with no hollow shows large combined stress near sea surface by strong current. Local structural analysis for the cross-section of a hollow riser is needed in detail.

Keywords: OTEC(해수온도차발전), Large diameter riser(대구경라이저), Conceptual design(개념설계), Numerical study(수치해석 연구), Hollow pipe(중공파이프)

1. 서 론

해수온도차발전(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC) 시스템은 심층수의 저온열원과 표층수의 고온열원을 이용하여, 작동 유체를 연속적으로 응축과 기화시키면서 터빈을 구동시켜 발전하는 장치이다(Kim *et al.*[2012], Vega and Michaelis[2010]). 해수온도

차발전 시스템의 가장 큰 특징은 연속적인 심층수와 표층수의 공급을 통하여, 매우 안정적인 발전을 이룰 수 있다는 것이다. 반면, 많은 양의 표층수와 심층수를 공급해야 하는 단점이 있으며, 특히 심층수는 해역에 따라 수심 수백~수천 m로부터 해수를 취수해야 하기 때문에 발전을 위한 기술적인 어려움이 있다. 해수온도차발전 시스템을 개발하기 위해서는 대량의 심층수를 취수하여 해수면 부근의 발전 시스템까지 이송하는 것이 필요하며, 이를 위한 구조물이 라이저이다. 따라서, 대구경 라이저의 개발이 필수적이다.

일반적으로 해양자원 개발을 위하여 라이저는 다양한 형태로 개

[†]Corresponding author: dhjung@kriso.re.kr

본 연구는 2013년 ‘한국해양과학기술협의회 공동학술대회’ 발표 내용에 근간을 두고 있음을 밝힙니다.

발되어 활용되고 있다. 개발해역의 수심 및 구조물의 특징에 따라, 강성라이저(top tension riser)와 유연라이저(flexible riser) 등이 있다. 강성라이저는 대부분 강재파이프를 라이저 재질로 사용하는데, 강재 파이프는 대구경 라이저로 만들기 위해 기술적, 경제적 어려움이 있다. 유연라이저는 매우 유연하며 복합재료 구성되는데, 가격이 매우 높으며 대구경 라이저로 만들기에는 기술적 한계가 있다. 최근에는 해양자원 개발 수심이 깊이짐에 따라, 다양한 형태의 라이저가 개발되고 있다. Eom *et al.*[2014] 등은 대수심에서 경제적인 SCR (steel catenary riser)에 관한 연구를 수행하여, 안전성 평가를 위한 국부적 좌굴 해석을 수행하였다. 상부체와의 상호연성 해석을 수행하였으며, 국부적 좌굴이 치명적인 부위에 관한 집중적인 분석을 수행하였다. Kim[2013]은 상부 끝단에서 인장력이 가해지는 강성 라이저에 조류가 작용하는 조건에서 와류유기진동 해석을 수행하였다. 수심에 따라 유속이 다르게 나타나는 전단류 흐름 조건에서 와류유기진동의 효과를 분석하였다. Min *et al.*[2012]은 라이저의 손상도 추정을 위한 연구를 수행하였으며, 수치해석적 방법을 이용하여 손상의 정도와 위치를 추정하였다. Shi *et al.*[2012]는 Lockheed Martin에서 설계한 100 MW 해수온도차발전 시스템의 거동 특성을 분석하기 위하여 부유체와 라이저의 연성 해석을 수행하였다. 새로운 개념의 부유체 설계안을 적용하여 부유체와 라이저의 거동 해석을 수행하였다.

라이저 안전성 평가를 위하여 다양한 분야의 수치해석적 및 실험적 연구가 수행되어 왔는데, 라이저의 설계에 관한 연구는 흔하지 않다. 그 이유는 라이저 설계 기술은 기관의 중요한 노하우이기 때문에, 외부 기관으로 기술 노출을 경계하기 때문이다. 특히, 상용화되지 않은 라이저파이프에 관한 설계 기술은 참고문헌을 구하기 어려운 현실이다. 1 MW급 해수온도차발전용 라이저는 상용화된 파이프 재료를 적용할 수 있으나, 10 MW급 라이저는 직경이 매우 크기 때문에 재료 선정부터 구조적 안전성 문제까지 다양한 사항을 검토해야 한다. 따라서, 해수온도차발전 시스템 개발을 위해서는 새로운 개념의 재료와 형상을 가지는 라이저의 설계에 관한 연구가 필요하다.

해수온도차발전의 발전사이클에 관한 연구는 오랜 세월이 걸쳐서 많이 수행되어져 왔다. 그러나, 해수온도차발전의 상용화를 위한 라이저에 관한 연구는 비교적 최근에 연구가 진행되고 있다(Miller and Ascari[2011]). Lockheed Martin[2010]는 100 MW급 해수온도차발전용 직경 10 m 대구경 라이저파이프 개발을 위하여 FRP(유리강화섬유, Fiber Reinforced Plastic) 재료를 바탕으로 단면설계를 수행하였다. 또한, 단면설계 내용을 검토하기 위하여 직경 4(m)급 파이프를 연속 공정으로 제작할 수 있는 시제품을 생산하였다. 국내에서는 대구경라이저에 관한 연구는 전무한 실적이다. 라이저는 극한 해양환경에서 구조적 안전성을 확보하는 것이 필수적이며, 또한 와류유기진동에 의한 피로파괴에 대한 안전성도 확보되어야 한다.

본 연구에서는 10 MW급 해수온도차발전용 대구경 라이저에 관한 개념 설계를 수행한다. 대구경 라이저를 제작할 수 있는 단면형상에 대하여 고안하며, 고안된 단면에 대하여 라이저의 거동해석을

통한 거동 특성을 분석하여 안전성을 평가한다. 단면형상은 두가지 경우에 대하여 고려하여, 단면 구성에 따른 거동 특성을 비교 분석한다.

2. 라이저 전체 형상 개념설계

2.1 10 MW 해수온도차발전용 라이저의 기초 제원 결정

해수온도차발전은 표층수와 심층수가 가지는 열원을 이용하여 전기를 생산하기 때문에, 대량의 표층수와 심층수를 필요로 한다. 심층수와 표층수의 양은 발전용량에 따라 결정되며, 표층수와 심층수의 수온차에 따라 취수량이 결정된다. 현재 지구상의 전 해역을 고려할 때, 표층수와 심층수의 수온차가 연중 일정하게 크게 유지되는 해역은 적도 인근의 태평양 해역으로 알려져 있다(Kim, *et al.* [2011]). 태평양 적도 해역은 표층수와 심층수의 수온차가 연중 약 24 °C가 발생하는 것으로 조사되었다.

표층수는 해수면 부근에서 취수되기 때문에 라이저의 제원 결정에 큰 어려움은 없으나, 심층수는 수심 1000 m 이상의 심해에서 취수하기 때문에 취수 중 관내 마찰손실 등을 고려하여 라이저의 제원을 결정하게 된다. 또한, 취수 중 관내에 에어(air) 생성으로 인한 캐비테이션(cavitation)이 발생하지 않도록 펌프의 위치도 중요하다. 펌프의 용량에 따라 라이저의 내경은 일정 범위 내에서 다르긴 하지만, 관내 유속이 2~3 m/s 정도로 발생하도록 내경을 결정해야 한다. 관경이 클수록 취수유량은 일정부분 증가될 수 있지만, 라이저 제작 비용이 증가하여 경제성이 낮아진다. 반대로 관내경이 너무 작은 경우 관내 유속이 증가하여 취수 중 캐비테이션이 발생하여 취수 효율이 저하되는 문제가 발생한다. 10 MW급 해수온도차발전 시스템에서 충분한 심층수를 취수하기 위해서는 내경 4 m의 취수관이 필요하다 (Miller and Ascari[2011]). 태평양 적도 인근 해역에서 연중 4 °C 이하의 안정적인 심층수 취수를 위해서 라이저의 길이는 1000 m로 구성된다. 일반적으로 라이저의 두께는 내압과 외압의 차이로 인하여 발생하는 압력에 저항할 수 있도록 결정된다 (DnV[2001]). 그러나, 심층수 취수용 라이저는 해저면 끝단이 해수 환경에 노출되어 있으며, 라이저 내부에는 큰 압력이 발생하지 않게 된다. 따라서, 라이저 두께를 결정하는 설계인자는 압력이 아니며, 해양환경 하중에서 안전성을 확보할 수 있는 라이저의 두께가 결정된다. 본 연구에서는 라이저의 최적 두께 결정을 위한 상세 설계까지 수행되지 않으며, 단면 형상 고안에 대한 거동 특성 분석을 통한 개념 설계를 수행한다.

2.2 라이저 시스템 전체 형상

해수온도차발전용 라이저는 일반 라이저에 비하여 직경이 매우 크며, 라이저의 직경이 상부 부유체의 제원에 비하여 작지 않기 때문에 라이저와 부유체의 상호 연성효과가 중요할 수 있다. 일반적으로 파랑에 의하여 부유체가 운동하며, 부유체의 운동이 라이저에 대하여 가진력으로 작용한다. 그러나, 라이저의 직경이 부유체의 제원에 비하여 작지 않은 경우에는 라이저의 운동이 부유체의 거동에

영향을 미치게 된다. 이 경우에는 부유체와 라이저의 상호작용 영향을 충분히 검토하고 안전성을 평가하거나, 부유체와 라이저가 상호 연성현상이 최소화 될 수 있도록 전체 시스템 형상에 관한 설계가 필요하다.

10 MW 급 해수온도차발전용 라이저는 내경 4 m를 가지는 비교적 대규격 파이프로 구성된다(Miller and Ascari[2011]). 그들은 10 MW 해수온도차발전 시스템에서 필요한 침중수량을 계산하였는데, 해수온도차발전 사이클 해석을 수행한 후 펌프 수두 등을 고려하여 직경 4 m 라이저로 결정하였다. 부유식 상부구조물의 형식에 따라 상이하기는 하지만, 라이저의 직경이 부유체의 제원에 비하여 작지 않기 때문에 라이저의 거동이 부유체의 운동에 영향을 최소화하기 위한 설계가 고려되어야 한다. Fig. 1에서는 라이저의 전체 형상에 관한 두 가지 개념을 보여주고 있다. 본 연구에서는 대구경라이저의 제작성을 고려하여, 라이저는 FRP 재질로 고려된다. 직경 4 m 라이저는 적용될 수 있는 재료가 매우 제한적이다. 고밀도폴리에틸렌(High Density Poly Ethylene, HDPE) 파이프는 생산 가능한 파이프의 최대 직경이 약 1.6 m 이므로 적용이 불가능하다. 강관은 용접 등의 제작이 어려울 뿐 아니라, 전체 중량이 매우 크기 때문에 부력재를 따로 설치하는 등 경제성이 떨어진다.

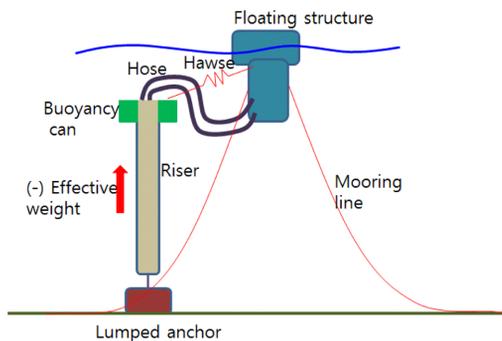
Fig. 1(a)는 라이저의 비중이 1보다 작은 단면의 설계안에 대한 전체 형상이다. 라이저는 양성부력이 작용하여 연직으로 서 있는 형상을 유지하게 되며, 라이저의 상부 끝단에 추가 부력재를 설치하여 조류 등의 하중에 의하여 라이저가 기울어지는 것을 방지할 수 있다. 이 설계안의 경우 라이저의 상부 부분은 부유체와 완전 분리

되어 서로 거동이 영향을 미치지 않도록 고려되며, 라이저 상부 끝 부분이 일정 수심 이하로 잠기도록 하여 파랑에 의한 직접적인 외력으로부터 영향이 최소화되도록 한다. Fig. 1(b)의 경우 라이저는 비중이 1보다 크거나, 혹은 1보다 작은 경우에는 라이저 끝단에 중량체를 설치한 경우로서, 자중에 의하여 자유롭게 매달린 경우이다. 라이저의 상부 끝단 부분은 부유체에 의해 지지되기 때문에, 부유체와 라이저는 직접 연결된다. 라이저의 단면 설계 특성상 비중이 1보다 작은 경우, 혹은 거동에 의한 안전성을 높이기 위하여 라이저 하부 끝단에는 중량체를 설치한다.

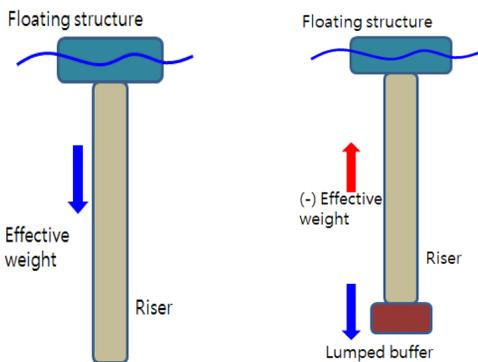
Fig. 1와 같은 라이저의 전체 형상 설계 중, (a) 모델은 파랑 및 상부체의 가진에 의한 효과가 미비하기 때문에 동적 거동에 의한 안전성은 충분히 확보될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 조류가 작용하는 경우 라이저의 상단부분이 기울어질 수 있기 때문에, 이에 대한 검토 및 조치가 필요하다. 본 연구에서는 라이저의 전체 형상에 대한 두 가지 개념 설계 중에서, (b)와 같은 전체 형상을 가지는 라이저의 거동 특성을 분석한다. 라이저 하부 끝단에 설치되는 중량체의 효과를 분석하여, 효율적인 라이저의 전체 형상을 설계한다.

2.3 라이저의 단면 형상 설계

본 절에서는 라이저의 단면형상에 대한 설계를 수행한다. Fig. 1(b)와 같이 전체 형상을 가지기 위해서 라이저는 두 가지 개념으로 설계된다. 첫째는 라이저 비중이 1보다 큰 경우로서, 자중에 의해서 부유체에 자유롭게 매달린 경우이다. 라이저는 두께에 따라 동일한 복합재 FRP 재료로 구성되며, 본 연구에서는 균일한 재질의 FRP 재료로 구성된다고 가정한다. 둘째는 라이저의 비중을 조절할 수 있는 단면 형상이다. Fig. 2는 라이저의 비중을 조절할 수 있는 개념의 라이저 단면 형상을 보여주는데, 그 값은 Table 1로 나타낸다. 라이저는 복합재 FRP로 구성되며, 단면 계수를 증가시키면서 전체 중량을 조절할 수 있도록 여러 층으로 구성된다. 가장 안쪽과 바깥쪽은 FRP로 구성되며, 가운데 층은 공극을 형성하거나 비중 조절용 재료로 보강하도록 구성된다. 공극을 구성함으로써 라이저 단면 전체의 재료를 절감하면서 높은 굽힘강성값을 얻을 수 있으며, 공극에 비중



(a) Concept A : Self-standing riser with buoyancy can



(b) Concept B : Freely hanging riser with self weight or lumped buffer

Fig. 1. Concept design of large diameter riser for 10 MW OTEC.

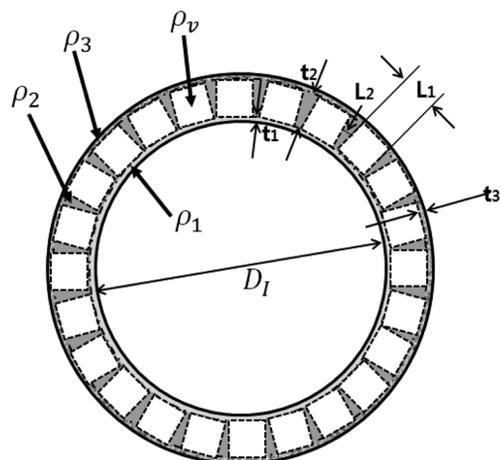


Fig. 2. Cross-section of riser pipe.

Table 1. Basic properties of riser pipe

| Name | Symbol | Unit | Size |
|--------------------------|----------|------------------|--------|
| Inner Diameter | D_1 | m | 4.0 |
| Thickness of 1st layer | t_1 | m | 0.015 |
| Thickness of 2nd layer | t_2 | m | 0.10 |
| Thickness of 3rd layer | t_3 | m | 0.015 |
| Length of void | L_1 | m | 0.100 |
| Length between void | L_2 | m | 0.01 |
| Density of 1st material | ρ_1 | N/m ³ | 1800 |
| Density of 2nd material | ρ_2 | N/m ³ | 2000 |
| Density of 3rd material | ρ_3 | N/m ³ | 1800 |
| Density of vent material | ρ_v | N/m ³ | 100 |
| E of 1st material | E_1 | N/m ² | 2.1E10 |
| E of 2nd material | E_2 | N/m ² | 2.1E11 |
| E of 3rd material | E_3 | N/m ² | 2.1E10 |
| E of void material | E_v | N/m ² | 1.0E6 |
| Riser length | L | m | 1000 |

Table 2. Calculated equivalent properties of riser pipe

| Axis Stiffness | EA | N | 3.274E+10 |
|------------------------|------------|------------------|------------|
| Bending Stiffness EI | EI | N·m ² | 6.987E+10 |
| Equivalent Eeq. | E_{eq} | N/m ⁴ | 6.464E+10 |
| Unit weight in air | W_{Ua} | N/m | 1.031E+04 |
| Unit weight in water | W_{Uw} | N/m | -6.540E+03 |
| Total weight in air | W_{Ta} | N | 1.031E+07 |
| Total weight in water | W_{Tw} | N | -6.540E+06 |
| Second moment of area | I_{eq} | m ⁴ | 1.081E+00 |
| Outer Diameter of Equ. | D_{o-eq} | m | 4.083E+00 |

조절을 위한 물질을 쉽게 추가할 수 있다는 장점이 있다.

Table 1에서는 Fig. 2에서 보여지는 단면의 기본 제원을 나타내고 있다. Table 2에서는 Table 1에서 제시되는 기본 제원에 대하여, 계산된 등가굽힘강성, 등가축강성, 단위길이당 중량, 그리고 직경 등을 보여주고 있다. 중공 부분에는 다른 재료를 넣지 않은 빈공간이 형성된 경우로써 모두 부력으로 작용되기 때문에, 라이저파이프의 유효중량은 음의 값을 가지며 수중에서 부상된다. 따라서 라이저가 연직 형상을 유지하기 위해서는 전체 유효중량보다 큰 중량체를 라이저 아래 끝단에 설치해야 한다. 현재 설계된 라이저는 끝단에 최소 700 ton 이상의 중량을 가지는 중량체가 설치되어야 한다는 것을 알 수 있다.

3. 라이저 거동해석 및 결과 분석

본 연구에서는 설계된 라이저의 전체적인 거동특성을 파악하기 위해서 라이저의 동적거동해석을 수행한다. Fig. 1(b)와 같이 설계된 라이저가 극한해양환경에서 안전성을 확보할 수 있을지에 관한 검토를 수행한다. 라이저의 동적거동에 관한 지배방정식을 수립한 후, 유한요소법에 기초하여 거동특성을 파악하였다(Jung[1999]). 다자유도 시스템의 운동 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$M\ddot{D} + C\dot{D} + KD = F \tag{1}$$

여기서, M : 질량행렬식

C : 구조감쇠행렬식

K : 강성행렬식

D : 절점변위행렬식

F : 외력벡터

유한요소해석에서 M 은 집중 질량법을 사용하였으며, C 는 Rayleigh 감쇠행렬을 이용하였다.

위 식에서 외력 F 는 파랑과 조류에 의한 힘으로 나타내어진다. 수치적분은 뉴마크-베타법을 이용하여 풀이하였으며, 포트란 프로 그래밍을 활용하여 전산해석하였다. 뉴마크-베타법은 미분방정식을 풀기 위한 수치적분 기법의 하나이며, 시간 간격 및 길이 간격의 크기에 관계없이 수치적분이 안정적인 것으로 알려져 있다.

라이저의 거동특성해석은 크게 두 분야로 나누었다. 첫째는 라이저 단면을 Fig. 2과 같이 구성하는 것으로, 라이저 파이프 내부에 중공을 두는 경우이다. 이 경우는 10 MW 급 라이저 뿐만 아니라, 향후 상용화를 위한 100 MW 급 라이저 설계를 위한 예비 연구이다. 두 번째는 Fig. 2와 동일한 값의 굽힘강성을 가지나 중공이 없는 경우에 대한 해석이다. 이 경우에는 라이저 재질이 비중 1.8을 가지는 FRP 재료로 구성되는 경우이다. 라이저 파이프의 내경은 동일하게 하고 외경을 계산하는 것으로 Table 2에서 제시하는 값을 사용하였다. 해석에 사용된 해양환경자료 및 라이저 상부에 가해지는 수평가진 조건은 Table 3과 같다. 상부가진은 부유체가 운동함으로써 라이저 상부에 가해지는 수평 운동을 의미한다.

3.1 중공을 가지는 라이저의 거동 특성

라이저가 중공을 가지는 경우에는 유효중량이 (-)값을 가지므로, 연직 형상을 유지하기 위해서는 라이저 하부 끝단에 중량체를 설치

Table 3. Ocean environmental condition

| | |
|--|-----|
| Wave period, s | 15 |
| Wave height, m | 10 |
| Current, m/s | 1.0 |
| Lateral period in top excitation, sec | 15 |
| Lateral amplitude in top excitation, m | 5 |

Table 4. Natural frequencies in surge (second)

| Mode number | Lumped weight (ton) | 1000 (ton) | 2000 (ton) | 3000 (ton) |
|-------------|---------------------|------------|------------|------------|
| 1 | | 223.3 | 141.8 | 117.1 |
| 2 | | 61.1 | 43.6 | 36.6 |
| 3 | | 32.3 | 24.4 | 20.6 |
| 4 | | 20.0 | 15.9 | 13.6 |
| 5 | | 13.4 | 11.1 | 9.7 |
| 6 | | 9.4 | 8.2 | 7.3 |
| 7 | | 7.0 | 6.2 | 5.6 |
| 8 | | 5.3 | 4.8 | 4.4 |
| 9 | | 4.2 | 3.8 | 3.6 |
| 10 | | 3.3 | 3.1 | 3 |

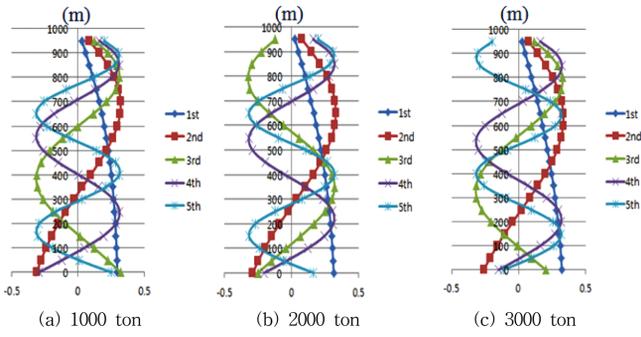


Fig. 3. Mode shapes of a riser with hollow along thickness.

해야 한다. Table 4에서는 중공을 가지는 라이저 끝단에 붙는 중량체의 중량에 따른 고유주기값을 보여주고 있다. 중량이 큰 중량체가 설치될수록 고유주기가 짧아지는데, 이것은 중량체에 의하여 전체 질량이 증가하지만 인장력이 증가하여 강성의 증가 효과가 크기 때문이다.

Fig. 3에서는 라이저 끝단에 붙는 중량체의 중량체 크기에 따른 모드형상을 보여주는데, 각각 1차에서 5차까지의 고유주기에 대한 결과이다. 중량체의 크기가 3000 ton을 증가하면서 라이저 아래 끝단의 거동 모드가 약간 다르게 나타나지만, 거동의 패턴은 큰 변화가 없을 것으로 예상된다. 즉, 라이저의 하부 끝단에 3,000 ton의 중량체를 설치하는 경우에도, 라이저의 하부 끝단은 안정적인 거동을 나타내지 않는다는 것을 알 수 있다. 반면, 큰 중량으로 인하여 라이저의 전체 길이에 걸쳐 큰 인장력이 작용하여 응력은 크게 나타날 것을 예상할 수 있다.

Fig. 4에서는 해양환경하중이 작용하는 조건에서, 라이저 끝단에 중량체가 설치되었을 경우, 중량체의 중량에 따른 라이저에 분포하는 결합응력(combined stress)을 보여주고 있다. 응력 분포는 길이에 따라 거의 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있으며, 끝단 중량체의 중량에 의해 지배되는 것을 알 수 있다. 즉, 라이저 단면에 작용하는 응력은 굽힘변형의 효과보다는 중량체의 중량에 의한 인장력의 효과가 지배적이라는 것을 알 수 있다. 단, 여기서 응력은 라이저 단면의 맨 가장자리에서의 최대 응력을 나타내며, Fig. 1의 라이

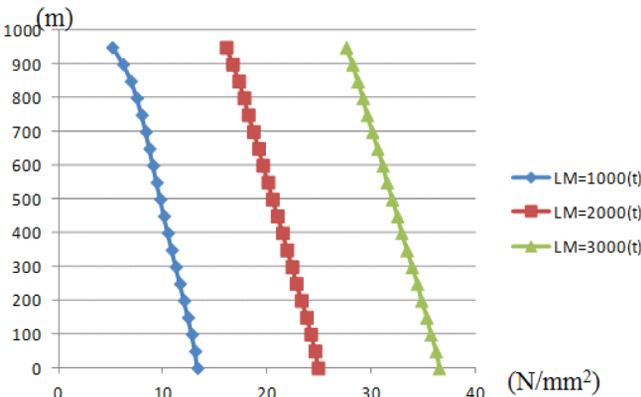


Fig. 4. Combined stresses of a riser with hollow.

저 단면의 인쪽과 바깥쪽을 연결하는 가운데층에 대해서는 자세한 국부구조해석을 통한 안전성 평가가 이루어져야 한다.

3.2 균일한 단면을 가지는 라이저의 거동 특성

라이저 끝단에 중량체를 설치하는 경우에는 조류가 작용하더라도 라이저가 거의 연직형상을 유지할 수 있으나, 중량체 없이 자중으로만 구성된 경우에는 해수면 부근의 강한 조류에 의하여 라이저 아래부분 끝단이 밀려서 이동하는 현상이 발생한다. 따라서, 조류가 강한 조건에서 라이저에 발생하는 응력분포를 살펴볼 필요가 있다.

Fig. 5에서는 라이저 단면은 균일한 FRP로 구성되어 끝단에 중량체가 없는 조건에서 조류속도에 따른 복합응력을 나타낸다. 해수면 부근에서 응력이 크게 분포하는 것을 알 수 있는데, 이것은 해수면 부근에서 파랑 효과가 크게 작용하기 때문이다. 파랑효과와 더불어 부유체의 거동에 의한 가진 효과도 해수면 부근에서 크게 나타나기 때문이다. 특히, 예제해석 조건에서 부유체의 가진 효과를 과도하게 설정했기 때문에, 해수면 부근에서 라이저의 응력이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 한편, 조류의 크기에 따라 응력의 크기는 매우 다르게 나타나는 것을 알 수 있는데, 조류가 2.0 m/s인 조건에서는 조류가 없는 조건에 비하여 약 2배의 응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 결과로 볼 때, 직경이 큰 라이저는 조류에 대한 설계가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 조류가 작용하면 해수면 부근에서 라이저는 곡률이 발생하게 되며, 이 조건에서 파랑하중과 강제가진 하중이 작용하여 응력이 크게 발생한다. 따라서, 라이저 하부 끝단에 중량체를 설치하여 조류가 작용하는 조건에서 곡률이 발생하지 않도록 하면, 조류에 의한 응력을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 6에서는 조류에 의한 변형 효과를 줄이고자 라이저 끝

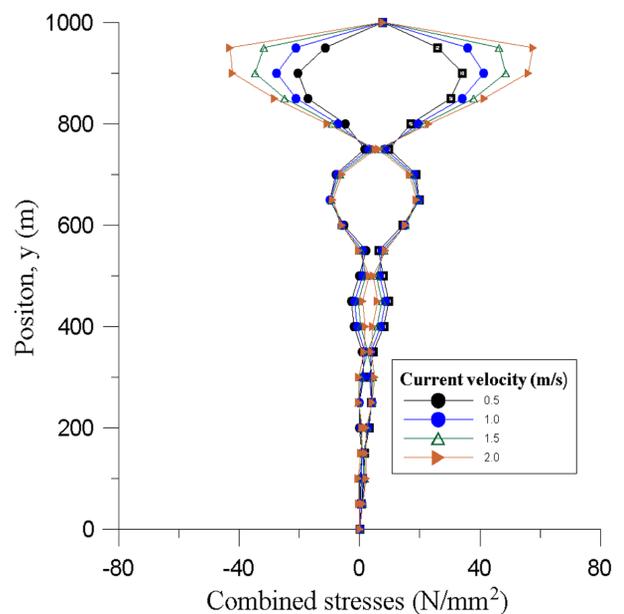


Fig. 5. Combined stress distribution along riser length under wave and top excitation with current velocity (lumped mass=0).

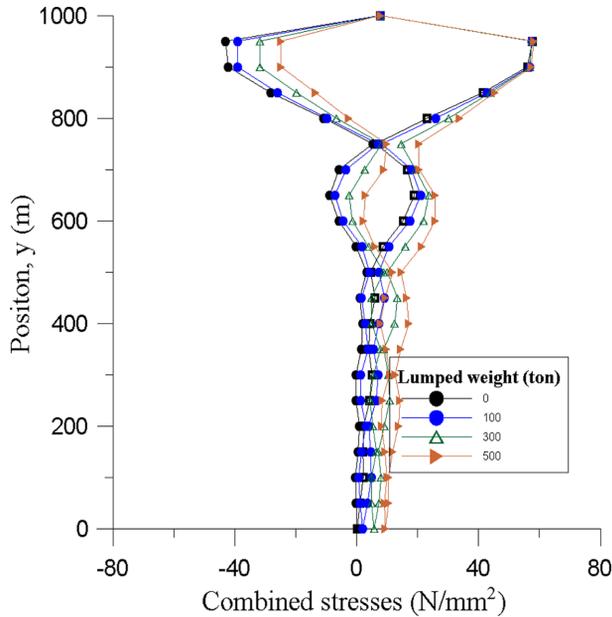


Fig. 6. Stress distribution along riser length with lumped weight (current velocity=2.0).

단에 중량체를 설치한 경우에 대한 해석결과를 보여준다. 조류가 1 m/s 인 조건에서 중량체의 중량을 0, 100, 300, 500 ton으로 변화시키면서 해석하였는데, 응력의 절대 최대값은 크게 다르지 않으나 최대와 최소값의 차이는 많이 줄어든 것을 볼 수 있다. 중량체가 없는 조건에 비하여 500 ton의 중량체를 설치하는 경우에, 응력의 최대와 최소값 차이는 약 87%로 낮게 나타났다. 중량체해수면 부근에서 강한 조류가 발생할 때 형상 변화로 인하여 크게 발생하는 응력을 줄이기 위해서는 보다 큰 중량체가 설치되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 6 결과를 Fig. 5 결과와 비교해 볼 때, 두 조건 모두 FRP 소재의 허용응력(97 N/mm²)을 초과하지 않는 것으로 나타났으며, 안전율은 두 결과 모두 약 1.7임을 알 수 있었다. 최대응력은 중공이 없고 중량체도 설치하지 않는 설계조건에서 크게 나타났다. 그러나, 중공을 가지면서 중량체가 있는 조건에서는, 라이저 안쪽과 바깥쪽을 연결하는 부재에서 안전성에 대하여 보다 자세히 평가할 필요가 있다고 판단된다. 또한 중량체의 중량으로 인하여 과도한 인장력이 지속적으로 작용하기 때문에, 피로파괴 측면에서 위험할 수 있으므로 향후 상세 설계 과정에서 자세한 검토가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 10 MW 급 해수온도차발전용 라이저의 개념설계를 수행하였으며, 설계된 내용에 대하여 기초적인 거동특성 분석을 수행하였다. 부유체와의 연성 효과를 고려하기 위한 초기연구로서, 두 가지의 전체 시스템에 대한 개념을 고안하였다. 각 설계안에 대하여 적합한 라이저의 단면 형상을 검토하였다. 첫 번째 설계안에서는 부유체와 라이저가 완전히 분리되며, 라이저는 양성부력에 의해서 직립

형상을 유지되도록 설계되었다. 두 번째 설계안은 라이저가 지중 혹은 라이저 끝단에 설치된 중량체에 의해 부유체에 매달린 경우이다. 두 번째 설계안에서는 파랑 하중 및 부유체 강제가진에 의해 라이저의 안전성이 문제될 수 있으므로, 동적거동 해석을 통한 안전성 평가를 수행하였다. 라이저 내부에 중공이 설치되어 하부 끝단에 중량체가 있는 경우와 중공 없이 자중에 의해 매달린 경우에 대하여 안전성을 평가하였다. 중량체가 있는 경우에는 굽힘에 의한 효과보다 끝단 중량체에 의해 응력이 지배된다는 것을 알 수 있었으며, 중공이 고려된 라이저의 극부응력을 검토하여 안전성을 평가해야 할 것으로 검토되었다. 끝단 중량체 없이 자중에 의해 매달린 라이저에 대한 해석결과, 해수면 부근에서 응력이 크게 발생하였다. 특히 조류가 강한 경우에는 라이저 상부 부근에서 곡률이 발생하며, 이 경우 파랑 및 부유체 가진이 작용하면 큰 응력이 발생한다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 조류는 자유롭게 매달린 대구경 라이저 설계의 중요한 인자임을 알 수 있었다. 자중에 의해 매달린 라이저도 하부 끝단에 중량체를 설치함으로써 해수면 부근에서 응력을 감소시킬 수 있기 때문에, 상세 설계 과정에서는 정밀한 설계와 분석이 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 ‘해양심층수 에너지 이용 기술 개발’ 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] DNV, 2001, “Offshore standard DNV-OS-F201, Dynamic Riser”.
- [2] Eom, T.S., Kim, M.H., and Bae, Y.H., 2014, “Local dynamic buckling of FPSO steel catenary riser by coupled time-domain simulations”, *Ocean Systems Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp.215-241.
- [3] Jung, D.H., 1999, “3-D Dynamic analysis of a rigid riser with Finite Element method”, Thesis in Master, Korea Maritime University.
- [4] Lockheed Martin, 2010, “NAVFAC OTEC System Design Report”, CDRL A003.
- [5] Kim, H.J., Lee, H.S., Jung, D.H., Moon, D.S. and Hong, S.W., 2011, “Implementation Plan to Commercialize OTEC Power Plant”, *Proceedings Korean Society for Marine Environmental Engineering 2011 fall conference*, pp.233-240.
- [6] Kim, J.H., Kim, G.T., Park, S.H., Oh, W.Y. and Kim, H.J., 2012, “A Feasibility Study on Thermal Energy Resource in Deep Ocean Water”, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp.9-18.
- [7] Kim, K.H., 2013, “Dynamic Response Analysis of Top-tensioned Riser Under Sheared Current Load”, *Journal of ocean engineering and technology*, Vol. 27, No. 4, pp.83-89.
- [8] Min, C.H., Choi, J.S., Hong, S., Kim, H.W. and Yeu, T.K., 2012,

- “Damage Detection Using Finite Element Model Updating”, *Journal of ocean engineering and technology*, Vol. 26, No. 5, pp.11-17.
- [9] Miller, A.K. and Ascari, M., 2011, “OTEC advanced composite cold water pipe:Final Technical Report”, Lockheed Martin.
- [10] Shi, S., Halkyard, J., Kurup, N. and Jiang, L., 2012, “Coupled analysis approach in OTEC system design”, *Proceedings of OMEA2012-83978*, July 1-6, Rio de Janeiro, Brazil.
- [11] Vega, L.A. and Michaelis, D., 2010, “First generation 50MW OTEC plantship for the production of electricity and desalinated water”, OTC20957.

Received 28 November 2014

1st Revised 27 January 2015, 2nd Revised 16 February 2015

Accepted 17 February 2015