

심층수 취수용 해저 라이저의 3차원 흐름 응답해석 Three-Dimensional Flow Response Analysis of Subsea Riser Transporting Deep Ocean Water

황하정* · 우진호* · 나원배* · 김현주**

Hajung Hwang*, Jinho Woo*, Won-Bae Na* and Hyeon-Ju Kim**

요지 : 본 연구에서는 연결재(커플러)로 결합된 라이저의 외부흐름에 따른 3차원 유동-구조 연동해석을 수행하였다. 두 가지 연결재(평면 커플러, 곡면 커플러)를 고려하였으며 ANSYS CFX를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 유동해석에서 유동공간은 유입구, 유출구와 대칭 경계조건으로 구성되었으며 연결재의 형상에 따른 항력계수와 유속 분포 결과를 비교하였다. 구조해석에서는 라이저의 응답(최대 변위 및 최대 등가응력)을 통해 연결재의 유용성을 확인하였다.

핵심용어 : 라이저, 심층수, 에폭시, 흐름응답

Abstract : This study presents a 3-dimensional flow-structure interaction analysis of subsea risers in water flows. Two structural connectors (flat and circular couplers) were intentionally devised and numerically tested using ANSYS CFX to investigate how these couplers behave under the water flows. In the flow analysis, the water field was constructed with an inlet, outlet, and symmetric boundary conditions. As a result, the responses (drag coefficients and pressure fields) were obtained and the pressure fields were applied for the structural analysis. Finally, the structural responses (displacements and equivalent stresses) of the risers were measured to demonstrate the efficiency of the riser connectors.

Keywords : riser, deep ocean water, epoxy, flow response

1. 서 론

심층수(deep ocean water)는 햇빛이 도달하지 않는 수심 200 m 이하의 바닷물을 의미하며 밀도차이로 인해 표층수와 섞이지 않고 거대한 수괴를 형성하여 해양대류에 의해 이동하며 순환한다. 심층수는 청정성, 부영양성, 저온 안정성, 속성성을 가지며 이들 특성으로 인해 농업, 수산업을 비롯한 다양한 산업에 이용된다.

심층수를 육지로 이동시키는 과정에는 라이저(riser)가 필요하다. 라이저는 해저에서부터 심층수와 같은 매질을 수선면으로 수직이동시키는 도관 형태의 구조물이다. 라이저는 해저면의 형상, 수심 등과 같은 환경조건과 조류, 파랑 등과 같은 하중조건 그리고 인간 활동에 따른 하중을 견뎌내야 한다. 최근 라이저의 경제성과 효율을 극대화하기 위하여 대구경화가 진행되고 있으며 심해 개발을 위해서 경간도 길어지는 추세이다. 현재 라이저의 내경은 3m까지 개발되어 있다(Gong et al., 2012).

일반적으로 라이저는 수중에 수직으로 설치되는 구조물이다. 따라서 라이저를 하나의 긴 파이프로 생산하는 것은 불가능하여 짧은 관을 서로 연결하는 방식으로 제작되며 이 때

용접 또는 연결재 등의 연결방식이 사용된다. 그 중 수중 용접은 용접부 표면의 기공 또는 언더컷과 같이 구조물의 강도를 저하시키는 요소가 발생할 수 있어 라이저의 안정성을 저해할 수 있으며 경제성이나 효율성이 떨어지는 단점이 있다(Park and Kim, 2005). 반면, 연결재를 이용하는 경우 연결재와 파이프 사이에 이격으로 발생하는 해수의 유입, 내부 매질의 유출, 연결재의 산화 등이 고려되어야 한다. 현재 운용중인 라이저들은 수심 3000 m 이하에서 사용됨으로 보다 저층의 심해 자원을 개발하기 위해서는 높은 수압, 자중, 부력, 흐름을 고려한 이음부가 설계되어야 하며 연결재의 형식에 따른 안정성 해석이 수행되어야 한다.

이런 관점에서 본 연구에서는 외부 흐름에 의해 발생하는 라이저 연결부의 거동을 획득하기 위해 유체-구조 연성해석을 수행하였다. 즉, 흐름해석을 수행하여 라이저 주변의 유속 및 압력 분포를 얻었으며 이를 외력으로 재하하여 구조해석을 수행하고 라이저의 응답(응력, 변위)을 얻었다. 연결부인 커플러의 형상에 따라 단순 라이저(SR, simple riser), 평면 커플러로 연결된 라이저(FCR, flat coupler riser), 그리고 곡면 커플러로 연결된 라이저(CCR, circular coupler riser)를 제안하고 라이

*부경대학교 해양공학과 (Corresponding author : Won-Bae Na, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Yongso-ro 45 Busan 608-737, Korea. Tel : +82-51-629-6588, Fax : +82-51-629-6590 wna@pknu.ac.kr)

**선박해양플랜트 연구소 (Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering KRISO, Daejeon, 305-343, Korea)

저의 응답을 바탕으로 이들의 구조특성을 분석하였다.

2. 항력계수

특정 물체의 표면에 작용하는 항력(Total drag)은 압력항력인 F_n 과 마찰항력인 F_f 의 합으로 구성된다. 여기서 압력 항력은 식(1)로 표현되며 운동에너지 식에서 비롯된 것이다. C_n 은 압력항력계수로 레이놀즈수에 관한 함수로 나타난다. 일반적으로 라이저의 방향이 흐름의 방향과 직교하므로 F_n 이 F_f 에 비해 탁월하다. 따라서 총 항력 F_D 는 F_n 으로 나타내며 이를 통해 항력계수인 C_D 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 ρ_w 는 해수의 밀도, A_r 은 투영면적, V 는 유속을 의미한다(Hasanloo et al., 2012).

$$F_n = \frac{1}{2}\rho_w A_r C_n V^2 \quad (1)$$

$$C_D = \frac{F_n}{\frac{1}{2}\rho_w A_r V^2} \quad (2)$$

3. 수치 해석

CFD(computation fluid dynamics)는 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해결하기 위한 방법을 이르며, 본 연구에서는 요소기반 유한체적법(element-based finite volume technique)을 기반으로 하는 CFX를 사용하였다. 난류 운동 에너지와 그 손실률에 대한 수송 방정식을 포함하는 2-방정식 난류모델인 k- ϵ 난류모델을 사용하였다. 그리고 구조해석의 경우 흐름해석을 통해 얻어진 압력장을 구조물에 작용하는 외력으로 산정하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석 과정에서는 구조물의 재료를 선행 재료로 가정하여 해석을 수행하였다.

3.1 모델링

본 연구에서는 가로, 세로, 높이가 20 m인 유동공간에 거치된 라이저를 해석대상으로 선정하였다. 일반적으로 라이저의 경우 전체 형상을 고려하여 해석을 수행해야 하나 본 연구에서는 연결재의 형상을 고려한 라이저의 유체-구조 연성해석의 초기연구로 라이저의 대상길이는 20 m로 제한하여 모델링과 해석을 수행하였다. 라이저의 단면 형상은 Fig. 1과 같으며 연결부가 없이 단일하게 제작된 SR과 평면 커플러로 연결된 FCR, 곡면 커플러로 연결된 CCR을 대상으로 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 FCR과 CCR 모델 형상은 Fig. 2와 같다. 선행된 연구(Hwang et al., 2013)와 동일하게 각 라이저의 투영면적은 동일하게 모델링 되었다. Yang et al.(2010)의 연구에 따르면 해저 라이저는 고압에서 운용되는 경우가 대부분이다. 환경적 요인에 의한 수축, 팽창으로 인한 라이저의 손상을 저감시키기 위하여 라이저의 연결부에 10 mm의 이격을 두어 모델링을 수행하였다. 유동공간의 경

우 요소의 최대길이가 1.2 m이하로 선정하고 라이저 주변부의 경우 최대길이를 0.05 m로 제한하여 요소의 분할을 수행하여 해석을 수행하였다. 구조해석에서는 라이저의 두께를 최소길이하로 선정하고 최대 0.5 m로 요소의 크기를 제한하여 해석을 수행하였다.

라이저와 커플러의 접착제는 에폭시를 고려하였으며 에폭시의 도포길이는 커플러의 길이와 동일하다고 가정하였다. 사용된 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다(Bienias et al., 2012). 부력을 고려하여 사용된 모든 재료의 밀도에서 물의

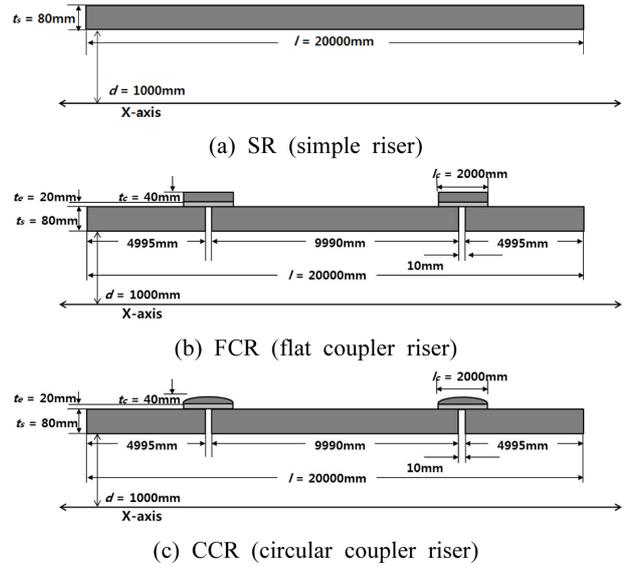
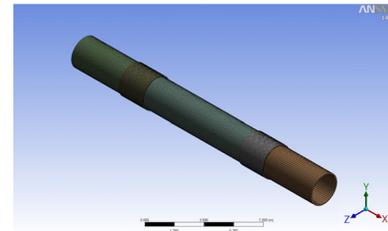
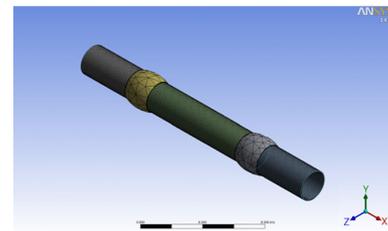


Fig. 1. Cross-section of risers.



(a) FCR



(b) CCR

Fig. 2. Meshes of models.

Table 1. Material property

	Steel	Epoxy
E [Pa]	2E+11	5.1E+09
ν	0.3	0.4
ρ [kg/m ³]	6850	186

밀도인 1000 kg/m^3 을 제하여 모델링에 반영하였다.

커플러의 형상, 곡면 커플러의 곡률과 유속에 따른 라이저의 응답해석을 수행하였다. 평면 커플러의 두께인 40 mm 를 기준으로 $\pm 10, 20\%$ 의 증감을 고려하였다. 곡면 커플러는 평면 커플러의 투영 면적과 동일하게 $4962, 5265, 5609, 6602, 10445 \text{ mm}$ 의 곡률반경으로 모델링하였다. Vega와 Nihous(1994)는 5 MW 온도차 발전 플랜트의 유속으로 1.5 m/s 를 사용하였으며 본 연구에서는 유속 2 m/s 를 기준으로 해석을 수행하였다. 유속의 차이에 따른 항력계수 변화를 알아보기 위해 $2, 4, 8, 10 \text{ m/s}$ 의 유속을 추가적으로 고려하였다. 본 연구의 경우 연결재 형식에 따른 응답해석의 초기연구로 하중은 외부 유체력만을 고려하였으며 라이저 내부의 유체압력은 고려하지 않았다.

3.2 경계조건

유동공간에서 유체의 흐름 방향은 Fig. 3(a)와 같이 $-y$ 방향이다. 정육면체의 유동공간에서 상부면은 유입구(inlet), 하부면은 유출구(outlet)로 설정하였다. 나머지 평면은 대칭(symmetry) 경계로 모델링하였다. Fig. 3(d)와 같이 유체해석을 통해 라이저에 발생한 압력을 구조해석에서 하중으로 사용하였다. 구조해석에서 Fig. 3(b), (c)와 같이 라이저의 좌측 단은 단순지지, 우측단은 대칭 경계조건을 주었으며 자중을 고려하기 위해 $-x$ 방향으로 중력가속도를 설정하였다.

4. 결 과

4.1 커플러의 형상 및 유무

흐름해석 결과에서 라이저 주변의 유속 및 압력의 분포를 알아보았다. SR의 경우 유속 및 압력분포가 Fig. 4와 같이 규칙적으로 발생하는 반면 커플러 라이저(FCR, CCR)에서는 연결재의 후면 유속 및 압력이 불규칙하게 분포하는 결과를 보인다. 특히 FCR과 CCR의 경우 연결재의 후면부에 2 m/s 이하의 속도 분포가 발생하며 후류영역이 줄어드는 현상을 보인다. FCR과 CCR의 경우 후면에 유속이 SR에 비해 증가한다. 또한 압력분포의 경우에도 연결재의 후면에 흐름에 의해

발생하는 압력이 변화하는 결과를 보인다.

Fig. 5는 SR, FCR, CCR의 투영면적에 따른 항력계수를 나타낸다. 연결재의 형상에 따라 항력계수의 변화가 발생하였으며 유속의 변화에 따른 영향은 적은 것으로 나타났다. Fox 등(2004)의 연구에 따르면 일반적인 원기둥의 항력계수는 1.0에 가까운 값을 가지며 SR의 항력계수는 1.07로 유사한 값을 나타낸다. 반면 FCR과 CCR의 경우 1.0보다 작은 0.8에 가까운 항력계수를 나타낸다. 식 (2)로부터 투영면적(A)가 동일한 경우 항력계수가 작을수록 압력항력(F_n)이 작아지는 것을 알 수 있다. Fig. 5의 결과로부터 연결재의 영향으로 압력항력(F_n)이 줄어드는 것을 알 수 있다. 특히, Fig. 4의 (b), (d), (f)의 결과에서 커플러의 유무에 따라 라이저가 받는 압력분포가 달라지는 결과를 보인다. 항력계수는 유동공간의 유속보다 커플러의 유무와 형상에 따라 확연한 차이를 보인다.

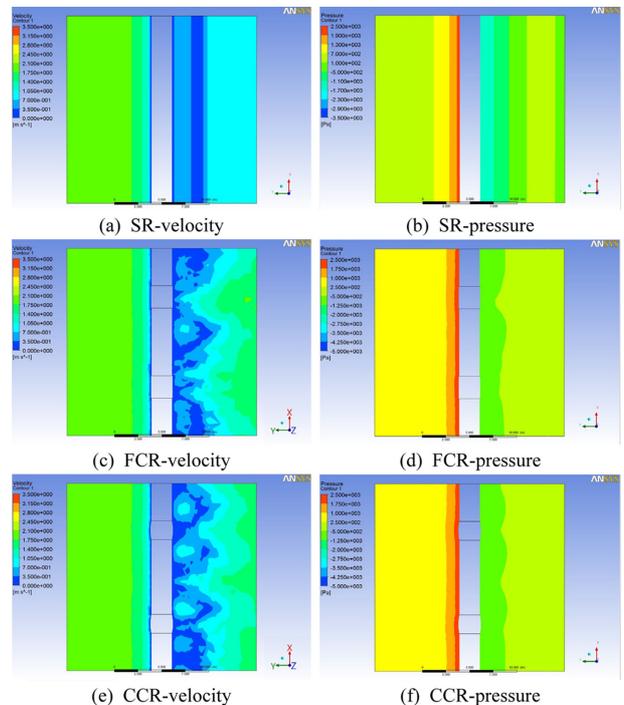


Fig. 4. Velocity and pressure of risers in flow space.

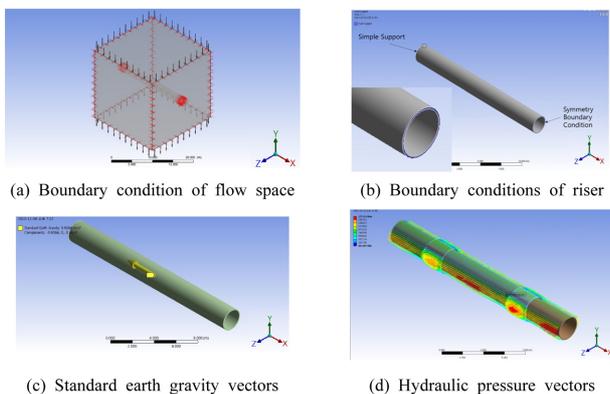


Fig. 3. Boundary and loading conditions.

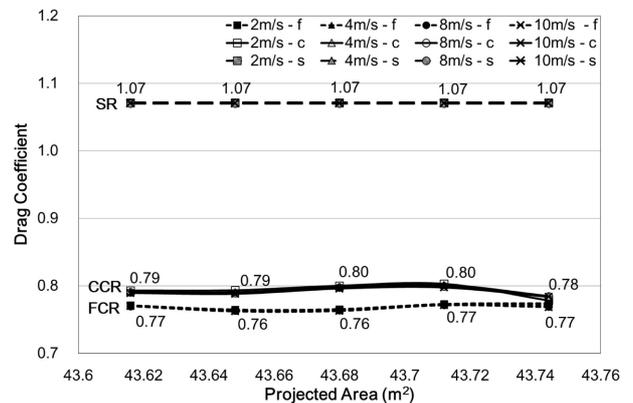


Fig. 5. Drag coefficient of risers according to coupler types.

4.2 구조 해석

4.2.1 커플러의 형상 및 유무

흐름해석(유속 2 m/s)을 통해 얻어진 결과인 유체 압력을 외력으로 산정하여 라이저의 구조해석을 수행하였다. 커플러의 형상에 따른 라이저의 거동을 확인하기 위하여 FCR과 CCR을 대상으로 커플러의 투영면적에 따라 라이저에 발생하는 최대 변위(maximum deformation)와 최대 등가응력(maximum equivalent stress)을 비교하였다. 여기서 투영면적의 변화는 단순 라이저의 두께 변화, 평면 커플러의 두께와 곡면 커플러의 곡률변화에 기인한다.

Fig. 6는 커플러의 형상에 따른 최대 응력분포도를 나타낸다. 모든 결과에서 우측단의 대칭경계부에서 최대 변위가 발생하였으며 이는 라이저가 단순지지되었기 때문에 중앙부인 대칭경계에서 최대 변위가 발생한다. 그리고 최대 등가응력은 SR의 경우 대칭경계부, FCR의 경우 연결재와 라이저의 연결부, CCR의 경우 연결재의 내부에서 각각 발생하였다. 따라서 연결형식에 따라 최대응력의 발생부위가 다르게 나타남으로 각 연결형식을 가지는 라이저의 최대응력을 기준으로 응답분석을 수행하였다.

Table 2와 3 그리고 Fig. 7과 8로부터 커플러에 의한 라이저의 투영 면적 변화는 SR과 FCR의 최대 변위, 최대 등가응력과는 무관한 것으로 판단된다. 연결재의 형태에 따라 대체적으로 CCR, SR, FCR의 순서로 높은 최대 변위 값을 가진다. 최대 등가응력은 CCR, FCR, SR의 순서로 높은 최대 응력 값을 가진다. 연결재를 고려하는 경우 FCR의 경우 SR에 비해 136~159%의 응력 증가가 발생하며 CCR의 경우 178~213%의 응력 증가가 발생한다. 연결재가 있는 라이저의 경우 CCR에

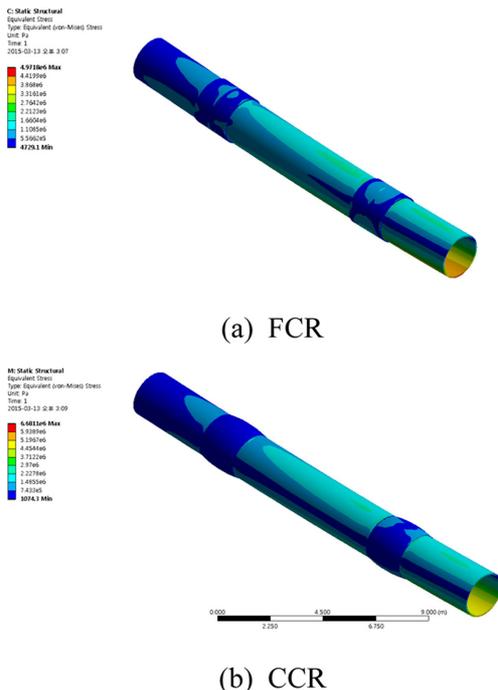


Fig. 6. Equivalent (von-Mises) stress contribution of risers.

비해 FCR에서 작은 변위와 응력이 발생하였다. 따라서 라이저 연결재의 외부 형상으로 곡면 커플러에 비해 평면 커플러가 유리한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 에폭시 접착제가 도포된 라이저를 대상으로 심층수 취수용 해저 라이저의 흐름 응답해석을 수행하였다.

Table 2. Displacements of each riser (mm)

	Projected Area (m ²)				
	43.74	43.71	43.68	43.65	43.62
SR	2.37	2.48	2.62	2.56	2.48
FCR	2.32	2.29	2.29	2.35	2.38
CCR	2.75	2.30	2.69	2.69	2.64

Table 3. Equivalent stresses of each riser (MPa)

	Projected Area (m ²)				
	43.74	43.71	43.68	43.65	43.62
SR	3.13	3.27	3.43	3.37	3.26
FCR	4.97	4.83	4.78	4.84	4.77
CCR	6.68	5.81	7.85	7.12	8.52

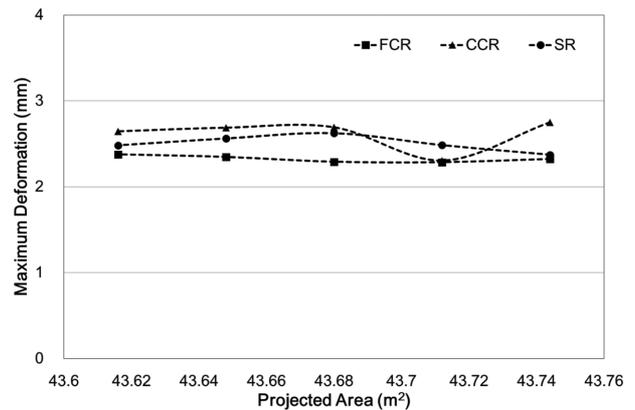


Fig. 7. Maximum deformations of risers according to projected area.

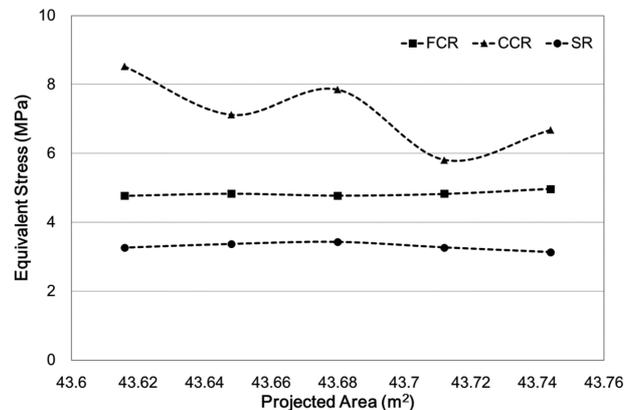


Fig. 8. Maximum equivalent stresses of risers according to projected area.

외부 유동에 의해 라이저에 발생하는 압력을 하중으로 구조물의 연결부 형상 변화에 따른 거동 해석을 수행하였다. 유속 및 연결재의 형상에 따른 변위와 등가응력을 도출하여 그 영향을 확인하였다.

커플러가 존재하는 라이저의 유체 흐름장의 경우 유속과 압력의 분포가 불규칙하게 발생한다. 연결재의 형상에 따른 해석에서 SR은 1.07, FCR과 CCR은 0.8의 항력계수를 나타냈다. 유속변화에 따른 항력계수의 변화는 발생하지 않았으며 연결재의 형식에 따라 항력계수가 달라진다.

유체-구조 연성해석에 따른 최대 변위는 커플러의 형상에 관계없이 동일한 위치에서 발생하나 최대응력의 경우 연결재의 형식에 따라 다르게 나타난다. CCR에서 최대 변위와 최대 등가응력이 발생하였다. 연결재(이음부)를 고려할 경우 최대 거동(변위, 등가응력)이 작은 FCR이 CCR에 비해 유리함을 알 수 있다. 그러나 연결재를 고려하는 경우 136~261%의 응력증가가 발생하며 이에 따라 라이저의 두께 및 재료 등을 고려하여 라이저를 설계해야 할 필요가 있다.

본 연구로부터 라이저의 유체-구조 연성해석을 통한 연결재의 형식에 따른 라이저의 응답분석이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 실질적으로 라이저의 경우 단면에 비해 길이가 긴 구조로써 이를 일정 길이로 제한하여 해석할 경우 하중 또는 경계조건을 충분히 고려하지 못하는 단점이 있다. 따라서 전체 라이저의 형상, 내부유체 및 외부 하중을 충분히 고려한 유체-구조해석이 수행될 필요가 있으며 실제 실험을 통한 수치해석의 검증 및 해석결과의 수렴정도의 판단이 요구된다.

감사의 글

본 연구결과는 선박해양플랜트연구소가 지원하는 해양 심층수의 에너지 이용 기술 개발' 성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

References

Bienias, J., Debski, H., Surowska, B., Sadowski, T. (2012). Analysis of microstructure damage in carbon/epoxy composites using FEM. *Computational Materials Science*, 64, 168-172.

Fox, R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J. (2004). *Introduction to Fluid Mechanics 6th Edition*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey

Gong, S., Sun, B., Bao, S., Bai, Y. (2012). Buckle propagation of offshore pipelines under external pressure. *Marine Structure*, 29(1), 115-130.

Hasanloo, D., Pang, H., Yu, G. (2012). On the estimation of the falling velocity and drag coefficient of torpedo anchor during acceleration. *Ocean Engineering*, 42, 135-146.

Hwang, H., Na, W.B., Kim, H.J. (2013). Two-dimensional Stress Characteristics of Pipe Cross-section According to Epoxy Bonding Length. *The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, 2013-2019 (in Korean).

Park, K.D., Kim, D.W. (2005). An experimental study on weld characteristic for piping connection part. *The Korean Society of Marine Engineering. Proceedings of annual fall conference*, 226-227 (in Korean).

Vega, L.A., Nihous, G.C. (1988). At-Sea Test of the Structural Response of a Large Diameter Pipe Attached to a Surface Vessel. *Offshore Technology Conference*, Houston, 473-480.

Yang, S.H., Jung, J.J., Lee, W.S., Do, C.H. (2010). Research on the Analysis Method of Thermal Buckling of Subsea Pipeline Structures. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), 225-232 (in Korean).

Received 27 November, 2014

Revised 15 March, 2015

Accepted 10 April, 2015