

수치해석적 방법을 통한 해양심층수 취수용 유연 라이저의 거동 해석에 관한 연구

정동호* · 김현주* · 박한일**

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

**한국해양대학교 해양개발공학부

A Study on the Behavior of Flexible Riser for Upwelling Deep Ocean Water by a Numerical Method

DONG-HO JUNG*, HYEON-JU KIM* AND HAN-IL PARK**

*Ocean Development System Laboratory, KORDI / KRISO, Daejeon, Korea

**Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Deep Ocean Water 해양심층수, Flexible Riser 유연라이저, Static and Dynamic Analysis 정적 및 동적 해석, Finite Difference Method 유한차분법, Intake Depth 취수수심

ABSTRACT: Static and dynamic analyses of a very flexible and light riser, for upwelling the deep ocean water, is performed. In this numerical study, an implicit finite difference algorithm is employed for three-dimensional riser equations. Fluid non-linearity and bending stiffness are considered and solved, using the Newton-Raphson iteration. Maintaining the depth of end point of a flexible and light riser is very important for upwelling deep ocean water in a floating type development system. Weight is attached at the end point of the riser in order to maintain its intake depth. It is designed under the strong surface current and the configuration of the riser is predicted. In the dynamic analysis, the tension variation at the top point of the riser is presented. The results of this study can contribute to the design of the development system in floating type for upwelling deep ocean water.

1. 서 론

해양심층수란 "태양광이 도달하지 않는 수심 200m 이상의 깊은 곳에 존재하여 유기물이나 병원균 등이 거의 없을 뿐 아니라 연중 안정된 저온을 유지하고 있으며, 해양식물의 생장에 필수적인 영양염류가 풍부할 뿐 아니라 생물(인체)의 구성원소와 유사한 조성을 하고 있는 해수자원이다." 최근에 관심이 급증되고 있는 해양심층수는 저온성, 청정성, 안정성, 부영양성, 미네랄성 등 다양한 특징을 가지는 것으로, 우리 인간에게 많은 유용한 자원을 제공할 것으로 기대되어 진다. 해양심층수가 우리 생활에 혜택을 줄 수 있는 분야를 살펴본다면, 식수, 화장품, 각종 식품 등 다양한 분야가 있다. 이 외에도 청정하고 영양염이 풍부한 심층수를 이용한다면 양식시설에도 직접 이용할 수 있으며, 심층수를 해수면으로 끌어 올려 해수면에 뿌려 줌으로써 어장을 형성할 수 있을 것이다. 해양심층수를 개발하기 위한 시스템은 육상형과 해상형으로 대별될 수 있는데, Fig. 1에서는 두 종류에 대한 전체적인 개념적 형상을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 육상형은 해양심층수가

존재하는 수심 200m 영역이 육지에서 가까운 해역에 위치할 때 적용되는데, 그 한계는 현재 육지에서 약 5 km로 알려져 있다(해양심층수의 다목적 개발(2), 2002). 즉, 육지로부터 5km 이내에 수심 200m 영역이 존재할 경우에는 육상형 시스템으로 개발하면 보다 경제적이다 (Fig. 1 (a)). 그러나 수심 200 m 영역이 육지에서 멀리 위치할 경우에는 해상형 개발 시스템을 적용하게 된다. 해상형 시스템을 보다 세분화한다면 다시 두 가지 형태의 개발시스템으로 구분되어진다. 그 첫째는 석유 개발에서 적용되는 셔틀탱크(shuttle tanker) 개념과 유사한데, 해상에 부이를 설치해서 해저 200m 이상의 지점에서 해양심층수를 취수하여 선박으로 육상까지 운반한 후, 적당한 방식으로 산업에 이용하는 것이다. 둘째는 해양심층수를 취수하여 육상으로 운반하지 않고, 주변 해역에 그대로 방류하는 방식인데, 이 시스템은 주변 어장형성에 큰 기여를 할 수 있다.

현재 한국해양연구원 해양심층수연구센터에서는 우리나라 동해안 지역에 해양심층수를 개발하기 위한 조사를 수행하여, 강원도 고성 지역에 육상형 개발시스템을 개발함과 동시에 해양심층수 공동연구센터를 건립하기 위한 작업을 추진 중에 있다.

이와 동시에 차후 개발 개념으로 해상부이형 개발시스템을 구상하고 있다. 육상형시스템이 파이프라인을 해저면에 매설 혹은 설치하는 반면에 해상부이형은 부이에 라이저를 매달아

제1저자 정동호 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7518 dhjung@kriso.re.kr

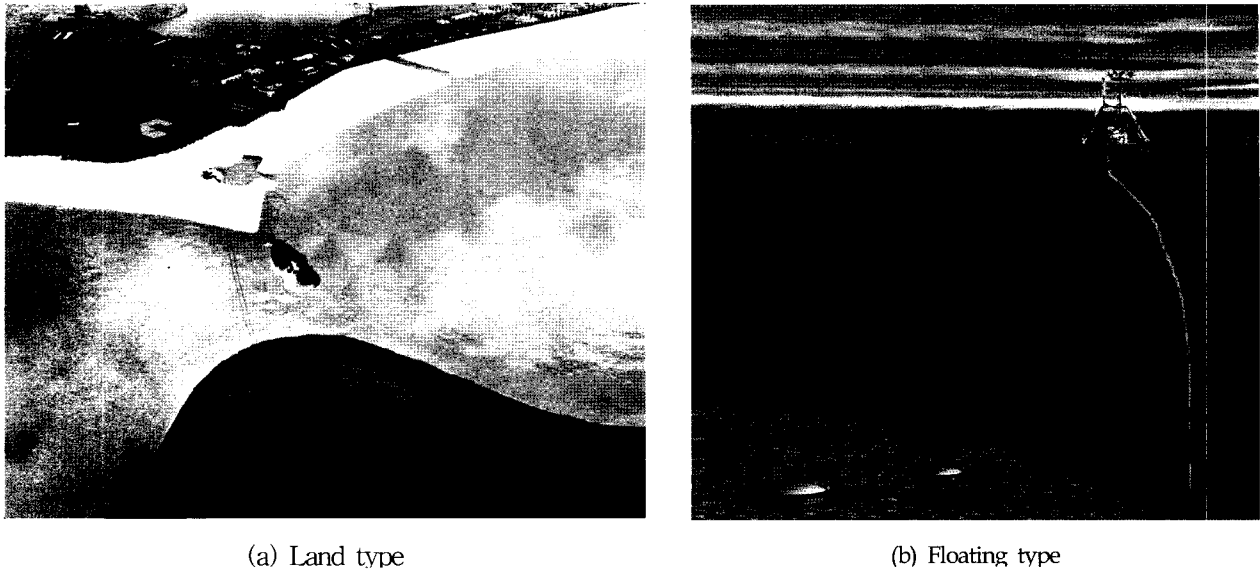


Fig. 1 Development system for upwelling deep ocean water

서 해양심층수를 취수하게 된다. 해양부이형 개발시스템은 크게 3부분으로 나누어지는데, 계류시스템, 부이시스템, 라이저이다. 여기서 라이저가 해양심층수를 취수하기 위한 가장 중요한 요소로 작용하게 된다. 한편, 해양심층수를 취수하기 위한 취수관은 일반 석유나 가스를 이송하는 파이프라인과는 다른 재질을 사용하게 되는데, 중량이 가볍기 때문에 파랑과 조류와 같은 해양환경에 의해서 쉽게 거동하게 된다. 따라서 해양환경에 의한 취수관의 정적 및 동적 특성을 충분히 파악할 필요가 있다.

일반적으로 강재로 구성된 해양라이저에 대한 연구 사례는 많이 찾아볼 수가 있다(남동호, 1999a; 남동호 1999b; 정동호 등, 1999). 그러나, HDPE로 구성된 가볍고 유연한 라이저에 대한 연구는 많이 수행되지 않았다.

본 연구에서는 해양부이형 시스템을 이용하여 해양심층수를 개발할 때 이용되는 라이저에 대한 구조해석을 수행한다. 먼저 해양심층수 취수용 라이저의 선택에 관한 사항을 간단히 설명하며, 선택된 재질의 라이저에 대하여 구조해석을 수행한다. 해석에서 부이와 계류라인에 대한 해석은 무시되며, 수심에 따른 조류의 속도분포를 고려하여 다양한 상태에 따른 라이저의 형상을 추정한다. 해석을 통하여 양질의 해양심층수를 취수하기 위한 라이저 끝단에 설치되는 물체의 중량과 라이저의 무게 등을 결정할 수 있을 것이다. 정적 해석을 통하여 취수구의 심도 예측을 한 후에는, 동적해석을 수행하여 파랑에 의한 라이저의 거동을 예측하는데 라이저 맨 뒷점에서 장력을 추정한다.

2. 본 론

2.1 해양심층수 취수용 라이저의 선정

해양심층수를 취수하기 위한 라이저는 구조적으로 안정해야 함은 물론이고, 양질의 해양심층수를 제공할 수 있는 기능성 배관이어야 한다. 따라서 일반적으로 석유나 가스를 운반하는

강관을 사용할 수 없다. Table 1에서는 해양심층수 관으로 많이 이용되는 HDPE(고밀도 폴리에틸렌) 재질과 일반 강재의 특징을 비교하고 있다.

Table 1에서 알 수 있듯이 강재 파이프가 강도 면에서 아주 뛰어난 장점이 있지만, 파이프의 산화 및 부식에 의한 해양심층수의 오염이 발생할 수 있으므로 강재를 선택하기에는 많은 문제가 있다. 따라서 양질의 해양심층수를 얻을 수 있는 HDPE 재질의 관을 사용해야 할 것이다. HDPE관은 비중이 1보다 작아서 해수 중에서 물 위에 떠 오르게 되므로, 별도의 중량체를 설치해서 안정성을 취해야 한다.

또한 인장강도가 그다지 크지 않기 때문에 사전에 충분한 구조해석을 통하여 안정성을 확보해야 한다. HDPE관의 이러한 단점을 극복하기 위해서 일반 HDPE관 바깥쪽에 등방성(isotropic) 재질의 탄소섬유 혹은 케블라가 보강된다(Fig. 2). 탄소섬유나 케블라는 축방향 강도가 뛰어나기 때문에 축방향 보강재로 사용된다. HDPE는 비중이 1보다 작기 때문에 중량을 증가시킬 필요가 있다. 따라서 철선을 보강하게 되는데, 이 철선은 코일로써 축방향과 굽힘방향으로 강성은 작용하지 않는다. 철선 바깥쪽에는 철선을 부식으로부터 보호하기 위해서 HDPE 재질로 둘러싸게 된다. 단지, 현재 우리나라에서 케블라와 철선으로 보강된 HDPE관을 제조한 사례가 없기 때문에 이 특수관을 따로 제작해야 한다. 또한 제작된 관에 대하여 충분한 검사를 수행하여 구조적 특성을 파악해야 할 것이다.

케블라와 철심으로 보강을 할지라도 HDPE관은 매우 유연하기 때문에, 라이저는 매우 유연하여 파랑과 조류와 같은 해양환경에 의해서 쉽게 변위를 일으키게 된다. 따라서 구조적인 해석을 수행하여 유연라이저의 상태를 예측할 수 있어야 한다.

2.2 라이저의 구조해석

본 절에서는 해양심층수를 취수하기 위한 유연라이저의 구조해석에 대하여 다룬다.

Table 1 Properties of HDPE and steel pipe

Classification	HDPE pipe	Steel pipe
Properties of pipe	① Density: 0.95 t/m ³ ② Tensile strength: 220 kg/cm ² ③ Minimum Curvature radius : r ≃ 7.5 m	① Density: 7.85 t/m ³ ② Tensile strength: 2,400 kg/cm ² ③ Minimum curvature radius: r ≃ 200 m
Weak points	① Reinforcement by tensile material such as wire is needed because of poor tensile strength. ② Addition of weighting material is required due to low density. ③ It is weak against pressure and impact from outside.	① Because curvature radius of pipe is large, it is difficult to install adjusting to the undulating bottom of the sea. ② Contamination of deep water due to oxidization and corrosion of pipe is occurred.
Strong points	① Installation expense is low. ② Contamination of deep water is not occurred because pipe is almost never corroded.	① It is strong against the pressure and impact. ② Additional weighting material is not needed.
Application	It is most applicable to the installation of intake pipeline of East Sea because we can install to the undulating bottom of the sea if we strengthen it by using of tensile material	It is difficult to apply to the undulating bottom of the sea and there is no proper method to prevent corrosion of pipe. So it is not suitable for an intake pipe.

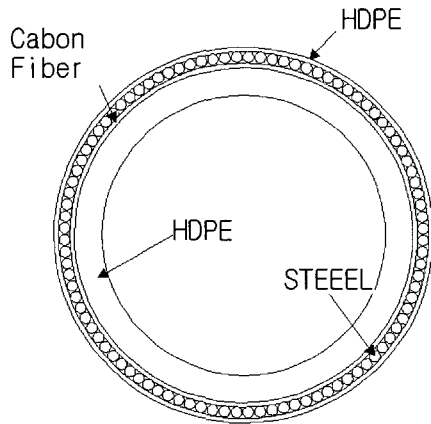


Fig. 2 Cross-section of steel-reinforced HDPE pipe

지배방정식은 뉴턴의 제2법칙, 모멘트 평형, 적합조건, 그리고 국부적 곡률관계를 이용한다 (박한일과 정동호, 2002). 아래의 식은 미소요소의 국부좌표계 t, n, b 상에서 결정되어진다.

$$\begin{aligned}
 & m(\dot{v}_t + v_b\dot{\theta} - v_n\dot{\phi}\cos\theta) \\
 & = T + S_b\Omega_n - S_n\Omega_b - w_o\cos\phi\cos\theta + R_t \\
 & m(\dot{v}_n + \dot{\phi}(v_t\cos\theta + v_b\sin\theta)) + m_a\dot{v}_n \\
 & = S_n' + \Omega_b(T + S_b\tan\theta) + w_o\sin\phi^2 \\
 & + 0.25\pi d^2\rho_w C_M\ddot{u}_n + R_n
 \end{aligned}$$

$$EI\Omega_n' = -EI\Omega_b^2\tan\theta + S_b(1 + T/EA)^3$$

$$EI\Omega_b' = EI\Omega_n\Omega_b\tan\theta - S_n(1 + T/EA)^3$$

$$v_t' + \Omega_n v_b - \Omega_b v_n = T/EA$$

$$v_n' + \Omega_b(v_t + v_b\tan\theta) = (1 + T/EA)\dot{\phi}\cos\theta$$

$$v_b' - \Omega_b v_n \tan\theta - \Omega_n v_t = -(1 + T/EA)\dot{\theta}$$

$$\Omega_n = \theta'$$

$$\Omega_b = \phi' \cos\theta$$

(1)

여기서, 점(·)은 시간 t 의 미분, 프라임(′)은 공간 s 의 미분이다. 그리고 나머지 변수는 아래와 같이 정의된다.

- T : 파이프의 유효장력
- d : 파이프의 직경
- ρ_w : 물의 밀도
- θ, ϕ : 회전각도
- m : 파이프의 단위길이 당 질량
- w_o : 파이프의 단위길이 당 수중 무게
- C_M : 부가관성계수
- E : 파이프의 탄성계수

- S_n, S_b : n, b 방향의 전단력
- u_n, u_b : n, b 방향의 유체속도 성분
- Ω_n, Ω_b : 방향의 곡률
- v_t, v_n, v_b : 각각 t, n, b 방향의 파이프 속도 성분
- R_t, R_n, R_b : 각각 파이프에 가해지는 t, n, b 방향의 외부 유체항력

위 식에서 유체항력 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 R_t &= -0.5\rho_w d\pi C_{dt} v_{tr}|v_{tr}|(1+e)^{0.5} \\
 R_n &= -0.5\rho_w dC_{dn} v_{nr}|v_{nr}^2 + v_{br}^2|^{0.5}(1+e)^{0.5} \\
 R_b &= -0.5\rho_w dC_{db} v_{br}|v_{nr}^2 + v_{br}^2|^{0.5}(1+e)^{0.5}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서, C_{dt}, C_{dn}, C_{db} 는 각각 파이프의 접선 및 두 법선 방향의 점성항력계수, v_{tr}, v_{nr}, v_{br} 는 각각 t, n, b 방향의 유체속도에 대한 파이프의 상대속도이다.

따라서 총 10개의 지배방정식을 얻을 수 있으며 한 요소에 대해 미지변수는 총 10개가 된다. 지배방정식은 행렬로 표현하면 아래와 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$[J]\vec{H}' = [K]\vec{H} + \vec{L}
 \tag{3}$$

여기서 $\vec{H} = (T, S_n, S_b, v_t, v_n, v_b, \phi, \theta, \Omega_n, \Omega_b)^T$

위의 행렬식은 수치해석적 방법을 적용하여 풀 수 있는데, 본 연구에서는 유한차분법(중앙차분법, 음해법)을 사용하였다. 지배방정식은 비선형으로 나타나는데, 비선형 해를 구하기 위하여 뉴턴-랩슨 방법을 적용하였다.

2.3 예제 해석 및 분석

본 절에서는 앞 절에서 설명한 수치해석적 방법을 적용하여 지배방정식을 풀이한 결과를 설명하고자 한다. 해석은 크게 조류만 작용하는 정적해석과 조류와 파랑이 동시에 작용하는 동적해석으로 구분하였다.

라이저와 부이는 힌지로 연결된 것으로 가정하였으며, 부이는 해수면에 따라 움직이는(wave-following buoy) 것으로 가정하였다. 정적해석에서는 라이저의 맨 윗점이 힌지점으로 수평이동이 없는 것으로 가정하였고, 동적해석에서는 해수면 부이에 의해서 일정주기와 진폭을 가지는 조화함수로 강제 가진된다고 가정하였다.

수심은 300 m, 조류는 수심에 따라서 변하는 것으로 가정하였다. 수심 150 m 이상에서는 조류가 없으며, 수심 150 m 지점에서 해수면까지는 조류속도가 점점 증가하는 것으로 가정하였다. Fig. 3에 수심에 따른 조류분포를 나타내었다.

Table 2 Input for case 1

Weight of riser in water (N/m)	5
Length of riser (m)	250
Attached Weight in water (N)	2000
Time increment (Δt , sec)	0.1
Tolerance	0.0001
Element length (m)	10
Added mass coefficient	1.0
Tangential drag coefficient	0.01
Normal drag coefficient	1.5
Current velocity in surface (m/s)	0.5
	0.75
	1.0

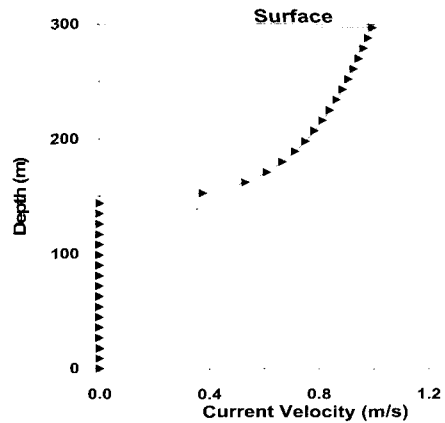


Fig. 3 Current profile

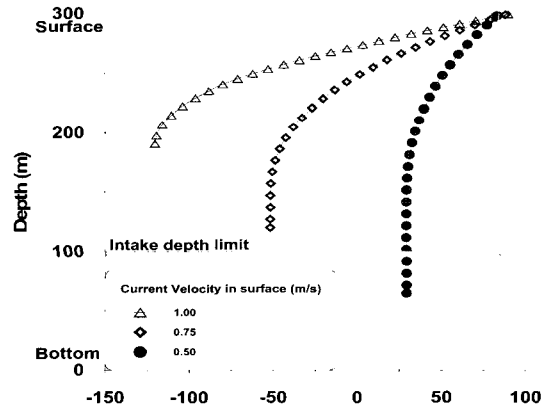


Fig. 4 Configuration of riser with current velocities

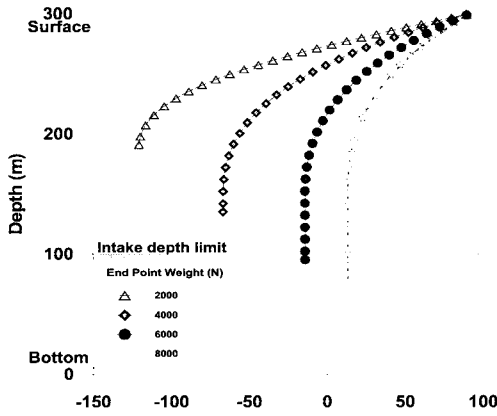


Fig. 5 Configuration of riser with attached weight at the end point of riser

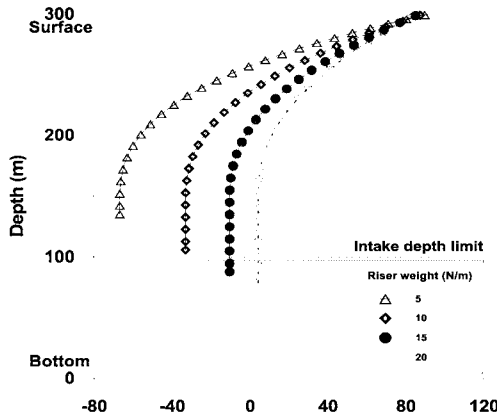


Fig. 6 Configuration of riser with riser weight

먼저 라이저와 끝단 중량체의 재원을 일정하게 지정한 후 해수면 조류속도에 따른 라이저의 전체 형상을 추정해 보았다.

Table 2에서는 첫 번째 경우에 대한 해석 입력 자료를 보여주고 있다. Fig. 4에서는 첫 번째 해석조건에 대한 결과를 보여주고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 조류가 0.5m/s 에서는 취수구의 수심이 200m를 넘어서고 있지만, 조류속도가 0.75m/s와 1.0m/s인 경우에는 취수관의 끝단이 들려 올라가서 취수수심이 약 180, 120m가 되어 양질의 해양심층수를 취수할 수 없음을 보여주고 있다. 현재 한국해양연구원에서는 한국 동해안 지역에서 수심 200m 이상 되는 영역에서 해양심층수를 취수할 계획을 가지고 있기 때문에 취수관 끝단의 취수수도가 수심 200m 이상이 되도록 설계해야 할 것이다. 따라서 조류가 강한 경우에는 설계 인자들을 적당히 변경해야 한다는 것을 알 수 있다.

앞의 결과에서 보았듯이 조류가 강하게 작용하는 경우에는 취수구의 끝단이 들려 올라가서 양질의 심층수를 취수할 수 없으므로, 라이저의 취수구를 일정 위치에 유지시키기 위해서는 라이저 자체의 중량을 증가시키거나 혹은 라이저 끝단에 붙이는 중량체의 중량을 증가시켜야 한다. 그러나, 취수 수심

을 유지하기 위해서 너무 무거운 물체를 라이저 끝단에 매달면 라이저와 부이 연결부(라이저 끝단), 혹은 라이저와 같이 결합된 가이드라인 부분에 큰 장력이 발생하게 되어 구조적으로 위험하게 된다. 또한 라이저 자체의 중량을 증가시키고 강도를 강화하기 위해 철심을 과도하게 많이 설치할수록 경제적으로 비용이 증가하기 때문에 두 설계인자들을 적절히 조정해야 한다.

따라서 다음은 해수면에서의 조류가 1m/s 인 경우에 라이저의 중량은 고정시킨 상태로 끝단 중량체의 무게를 변화시키면서 라이저의 형상을 살펴보았다. 중량체의 무게는 각각 2000, 4000, 6000, 8000 N로 하여 해석하였다. Fig. 5는 그 결과를 보여주는데, 조류가 1m/s 이고, 라이저의 단위길이당 수중중량이 5N/m 이라면 중량체는 최소 6000N 이상의 무게를 가져야 한다는 것을 알 수 있다.

다음은 해수면 조류가 1m/s, 끝단 중량체의 무게는 4000N 인 조건에서 라이저의 단위길이당 수중무게를 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 6은 해석결과를 보여주는데 라이저의 수중중량이 15N/m 이상일 경우에 양질의 해양심층수를 취수할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6의 결과를 비교해 본다면, Fig. 5에서 중량체의 무게가 8000N 인 경우(라이저 중량 : 5N/m)와 Fig. 6에서 라이저 중량이 20N/m(중량체 무게 : 4000N)인 경우는 해석결과가 거의 유사하게 나온다는 것을 볼 수 있다. 해수면 부이 기준을 했을 때 취수구의 위치는 수평방향으로 약 80m 이동 했으면 취수수심은 약 223m가 된다. 이 때 장력을 비교해 본다면, 전자는 약 8721.79N이고 후자는 8009N 로 해석되었다. 두 경우를 비교해 볼 때, 발생 장력이 라이저의 장력 허용치 이내에 있다면 전자와 같이 설계하는 것이 보다 효율적이라는 것을 알 수 있다. 전자와 같이 설계하기 위해서는 라이저 끝단에 중량만 증가시키는 것으로 간단하게 설계될 수 있다. 그러나, 후자와 같이 설계하기 위해서는 라이저 단면 설계에서 보강철심의 양이 증가하게 되어 경제적으로 비용이 증가할 뿐만 아니라, 철심의 양이 증가될 때에는 계획중인 취수관을 제작하기도 복잡해지게 된다. 하지만 이것은 두 경우를 서로 비교한 경우에 불과하며, 앞서 언급한 바와 같이 중량체의 무게를 계속 증가시키는 것은 라이저에 작용하는 장력의 증가로 이어지기 때문에 해석을 통하여 장력의 허용치 이내에 들 수 있도록 해야 할 것이다. 즉, 중량체 무게, 라이저 무게, 라이저에 발생하는 장력, 그리고 경제적 효과 등을 잘 고려하여 설계해야 할 것이다.

Table 3 Dimension of Umiyakara of Japan

	Diameter (m)	Length (m)	Weight (N/m)
Part I	0.13	50	56
Part II	0.13	810	4.8
Part III	0.13	760	2.76
End point			3800 (N)

Table 4 Environmental conditions

Ocean current + tidal current in surface (Kts)	3.6
Wave height (m)	13
Wave period (s)	15

조류에 의한 취수구의 위치 변화에 대한 해석을 수행한 후에는, 파랑에 의한 라이저의 거동을 파악하기 위하여 동적해석을 수행하였다. 조류와 해류에 의해서 라이저가 일정 위치까지 이동한 후에는 부이에 의해서 강제 가진된다.

동적해석에서는 먼저 일본에서 해상부이형으로 처음 건설되었던 Umiyakara에 대한 해석을 수행하였다. 그 이유는 일본에서 해상부이형 구조물을 설치한 후에 폭풍에 의해서 라이저 상단 부분의 일부분이 파손된 사례가 발생하였기 때문에, 파랑에 의한 라이저의 장력변동 상태를 알아보기 위해서이다.

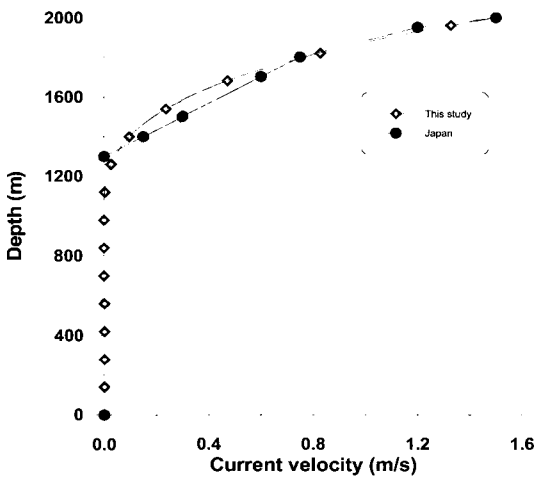


Fig. 7 Current profile with water depth

Table 3에서는 Umiyakara의 제원을 보여준다. 전체 길이는 약 1,600m이며, 세 부분으로 나누어서 부분별 중량은 다르게 설정되었다. Table 4에서는 태풍이 발생했을 당시의 환경조건을 보여주는데, 조류는 최대 2.5kts이며 해류는 1kts로써 두 성분을 선형중첩 시켰다. Fig. 7에서는 중첩된 성분의 수심에 따른 분포를 보여주고 있다. Fig. 8에서는 조류와 해류에 의한 라이저의 전체 형상을 보여주는데, 라이저 끝단의 수심이 약 1000m에 위치하고 있음을 알 수 있다. 초기 설치 수심에 비하면 약 600m 정도가 들려 올라갔다는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서는 조류가 작용한 상태에서 파랑이 작용했을 때, 라이저의 맨 윗 부분에서 발생하는 장력을 시간이력으로 보여주고 있다. 장력의 평균치가 약 11,000N 인데 비하여, 장력의 변동치는 약 4,000N을 넘어서고 있다는 것을 알 수 있다. 이 값은 평균 장력값의 약 1/3에 해당하는 것으로 라이저에 구조적 결함을 발생시킬 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

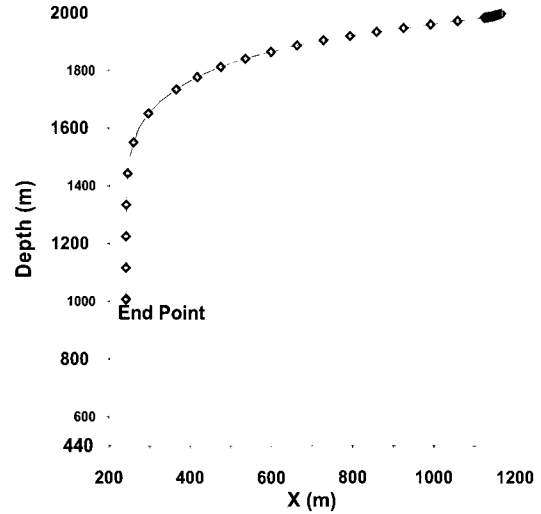


Fig. 8 Configuration of Umiyakara

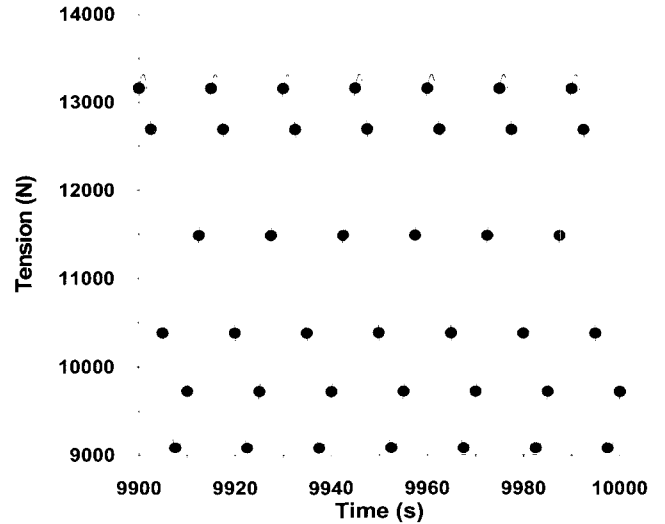


Fig. 9 Tension variation at top point of Umiyakara

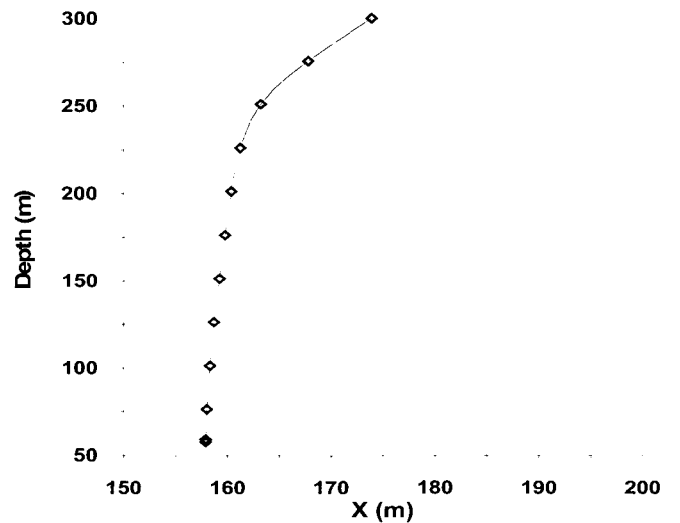
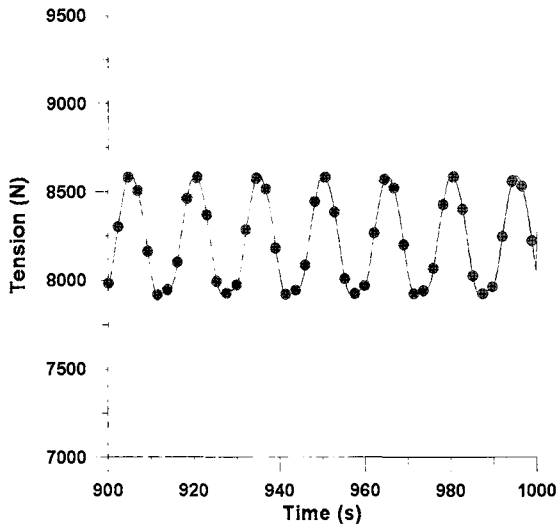
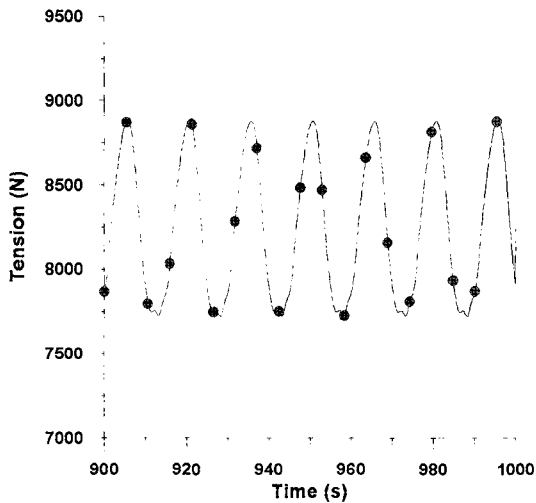


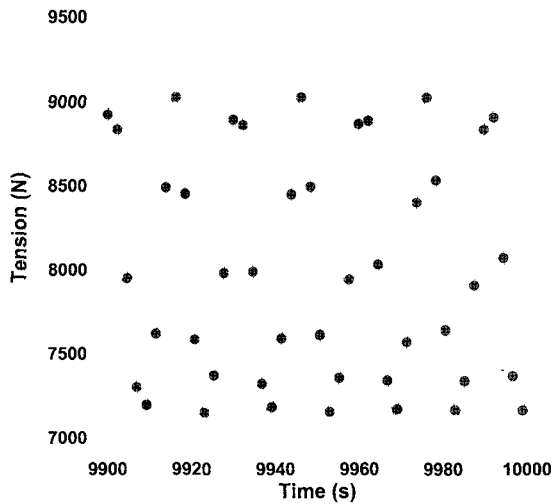
Fig. 10 Riser configuration of our model



(a) 90 degree wave angle



(b) 135 degree wave angle



(c) 180 degree wave angle

Fig. 11 Tension variation for the different wave angel at top point of our model

다음은 같은 환경조건으로 하여, 우리나라 동해안에 계획 중인 구조물에 대한 해석을 수행하였다. 라이저의 단위 길이 당 중량은 20N/m으로 하였으며, 끝단 중량체의 무게는 4000N으로 가정하였다. Fig. 10은 정적해석 결과인데, 라이저의 끝단은 수심 200m 이하로 유지되고 있음을 알 수 있다. 동적해석 결과를 보여주는 Fig. 11은 시간에 따른 라이저 윗 점에서 장력 변동을 보여준다. 조류와 파랑이 작용하는 각도에 따른 효과를 보기 위해서 조류는 180도로 작용하는 것으로 가정하였고, 파랑은 각각 90도, 135도, 180도에서 작용하는 것에 대하여 해석하였다. 해석결과를 보면 파랑이 180도로 작용하는 경우에 장력 변동이 가장 크게 나타났다. 즉, 파랑과 조류가 같은 방향에서 작용할 때 장력의 변동치가 가장 크게 나타난다는 것을 알 수 있었다. 장력의 변동치가 가장 큰 경우는 장력의 평균치가 약 8,000N이며, 변동치는 약 2,000N으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 변동치는 평균치의 약 1/4에 해당하는 값으로, 일본 경우에 비하여 작은 값이지만 라이저 단면(cross-section) 설계에 따라서 응력을 초과할 수도 있다. 따라서, 라이저에 대한 실시 설계를 할 때, 이와 같은 동적 성분을 잘 고려하여야 할 것이다.

3. 결 론

본 연구에는 우리나라 동해안 지역에서 해양심층수를 취수하기 위한 기초 연구로써, 해상부이형 개발시스템의 유연라이저에 대한 적절 재질에 대하여 알아 보았으며, 예상되는 취수 시스템에 대한 구조해석을 수행하였다. 구조해석에서는 라이저에 대한 3차원 지배방정식을 얻었고, 유한차분법을 적용하여 해를 구하였다. 양질의 해양심층수를 취수하기 위해서 조류속도, 라이저의 수중중량, 그리고 중량체의 무게에 따라서 라이저의 형상 및 취수구의 수심을 얻을 수 있었으며, 취수구의 수심이 적정영역에 들지 않을 경우에는 설계조건을 적절히 조절하여 양질의 심층수를 취수할 수 있었다.

취수구의 적정수심을 맞출 수 있는 방법은 라이저의 무게를 증가시키거나, 혹은 중량체의 무게를 증가시키는 방법이 있는데 경제적인 관점에서 볼 때 후자가 보다 효과적일 것으로 판단된다. 하지만 중량을 무조건적으로 증가시킨다면 장력이 크게 작용하여, 연결선의 불안정 요인이 될 수 있으므로 중량체 무게, 라이저 무게, 라이저에 발생하는 장력, 경제적 효과 등을 충분히 고려하여 설계해야 할 것이다.

악천후 시의 동적해석에서는 라이저 맨 윗 지점에서 장력의 변동을 살펴보는데, 파랑과 조류의 작용 각도가 다른 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과에서는 파랑과 조류가 같은 방향으로 작용하는 경우에 가장 큰 장력이 발생하였으며, 장력 변동치가 평균치에 비하여 약 1/4로 나타났다. 이 값은 라이저의 구조적 안정성에 영향을 미칠 수도 있으므로, 라이저에 대한 실시 설계에서 반드시 고려되어야 할 것이다.

본 연구의 결과는 향후 취수용 유연라이저를 실시 설계할 때 좋은 자료로 이용될 수 있을 것이다.

향후 연구 내용을 살펴보면, 첫째는 라이저 관 내부흐름을

고려한 연구가 필요하다. 둘째는 펌프에 의한 흡입작용으로 발생하는 취수관 끝단에서의 반력을 고려한 동적해석이 요구되어진다. 셋째는 와류유기진동(vortex induced vibration)에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 "해양심층수의 다목적 개발" 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

해양심층수의 다목적 개발(2) (2002). 해양수산부 최종보고서

남동호 (1999a). "적응제어에 의한 대수심 라이저의 리엔트리", 한국해양공학회 논문집, 제10권, 제1호, pp 108-118.

남동호 (1999b). "장대 유연한 해양구조계의 능동제어", 한국해양공학회 논문집, 제13권, 제3호, pp 83-90.

박한일, 정동호 (2002). "유한차분법을 이용한 저장력 예인케이블의 비선형 동적해석", 대한조선학회논문집, 제39권, 제1호, pp 28-36.

정동호, 박한일, 조효제 (1999). "수치해석에 의한 심해용 라이저의 와동방출 응답해석", 한국해양공학회 논문집, 제13권, 제2호, pp 65-72.

2004년 1월 16일 원고 접수

2004년 7월 15일 최종 수정본 채택