

해양심층수 취수를 위한 취수관의 구조해석

정동호* · 김현주* · 박한일**

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

**한국해양대학교 해양개발공학부

Structural analysis for Riser in Floating Type for Upwelling Deep Ocean Water

*D.H. Jung, *H.J. Kim, **H.I. Park

*Ocean Development System Laboratory, KORDI / KRISO

**Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University

KEY WORDS : Deep Ocean Water 해양심층수, Flexible Riser 유연라이저, Structural Analysis 구조해석, Preliminary Design 기초설계

ABSTRACT : A basic design on a flexible riser in a floating type development system for upwelling deep ocean water is presented. In the numerical study, an implicit finite difference algorithm is employed for three-dimensional riser equations. Fluid and geometric non-linearity and bending stiffness are considered and solved by Newton-Raphson iteration. To keep 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 attached at the end point of the riser in order to keep its intake depth is designed under the strong surface current and the configuration of the riser is predicted. The results of this study can be contributed 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 구성요소와 유사한 조성을 하고 있는 해수" 자원이다. 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 풍

부한 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 200 m 영역이 육지에서 가까운 해역에 위치할 때 적용되는데, 그 한계는 현재 육지에서 약 5 km로 알려져 있다 (김현주 외, 2002). 즉, 육지로부터 5 km 이내에 수심 200 m 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 설치해

제1저자 정동호 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171

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



(a) Land type



(b) Floating type

Fig. 1 Development system for [u]welling deep ocean water

서 해저 200 m 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. 강원도 고성 해역은 육지로부터 약 3 km 떨어진 영역에서 수심이 200 m 이상 되는 지점이 나타나는 해양심층수를 개발하기에 최적의 지역이다.

이와 동시에 차후 개발 개념으로 해상부이형 개발시스템을 구상하고 있다. 육상형시스템이 파이프라인을 해저면에 매설 혹은 설치하는 반면에 해상부이형은 부이에 라이저를 매달아서 해양심층수를 취수하게 된다. 해상부이형 개발시스템은 크게 3부분으로 나누어지는데, 계류시스템, 부이시스템, 라이저이다. 여기서 라이저가 해양심층수를 취수하기 위한 가장 중요한 요소로 작용하게 된다.

본 연구에서는 해상부이형 시스템을 이용하여 해양심층수를 개발할 때 이용되는 라이저에 대한 구조해석을 수행한다. 먼저 해양심층수 취수용 라이저의 선택에 관한 사항을 간단히 설명하며, 선택된 재료의 라이저에 대하여 해석을 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 설치되

는 물체의 중량과 라이저의 무게 등을 결정할 수 있을 것이다.

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 폴리에스테르) 재료와 일반 강재의 특징을 비교하고 있다.

표에서 알 수 있듯이 강재 파이프가 강도 면에서 아주 뛰어난 장점이 있지만, 파이프의 산화 및 부식에 의한 해양심층수의 오염이 발생할 수 있으므로 강재를 선택하기에는 많은 무리가 있다. 따라서 양질의 해양심층수를 얻을 수 있는 HDPE 재료의 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 PE관에 철선을 보강한 새로운 관의 사용이 검토되고 있다. Fig. 2에서는 철선보강된 PE관의 단면을 보여주고 있는데, PE관 외부에 강도를 증가시키기 위해서 철선으로 보강된다. 다시 그 둘레로 방식도료와 폴리프로필렌으로 구성된 철선보호층을 두어서 철선이 부식에 노출되는 것을 방지하게 된다. 이렇게 철선으로 PE관을 보강한다면 강도가 훨씬 보강될뿐 아니라 중량도

Table 1 Properties of HDPE and Steel

관의특성	① 밀도 : 0.95 t/m ³ ② 인장강도 : 220 kg/cm ² ③ 최소곡률반경 : r ≒ 7.5 m	① 밀도 : 7.85 t/m ³ ② 인장강도 : 2,400 kg/cm ² ③ 최소곡률반경 : r ≒ 200 m
단점	① 인장강도가 적어서 부설시 wire 같은별도의 인장재 보강이 요구된다. ② 밀도가 적어 weight 추가가 필요하다. ③ 외부압력, 충격 등에 약하다.	① Pipe의 곡률반경이 커서 해저면의 기복에 대응하여 부설이 어렵다. ② 파이프의 산화, 부식에 의한 심층수의 오염이 발생한다.
장점	① 부설비용이 저가이다. ② 파이프의 부식이 거의 없어 심층수의 오염이 없다.	① 외부압력, 충격 등에 강하다. ② 별도의 weight 추가가 필요없다.
적용가능여부	인장재의 보강시 해저면에 기복이 심할 경우도 부설이 가능하므로 동해 심층수 취수관로 부설 공사에 적용하는데 가장 적합할 것으로 사료됨.	해저면에 기복이 심할 경우는 적용이 어렵고 파이프의 부식을 방지할 적합한 방법이 없으므로 심층수 취수관로로 채택하기엔 부적합함.

증가하게 되므로 시공 및 설치 후 구조적 안정성도 증가하게 되는 이점이 있다. 단지, 현재 우리나라에서 철선보강된 PE관을 제조한 사례가 없기 때문에 이 특수관을 따로 제작해야 한다. 또한 제작된 관에 대하여 충분한 검사를 수행하여 구조적 특성을 파악해야 할 것이다.

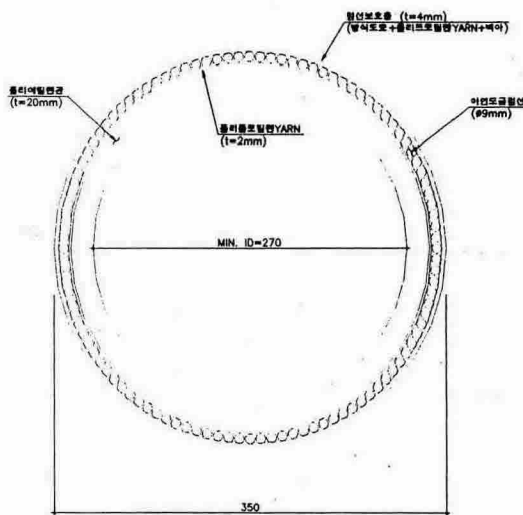


Fig. 2 Cross-section of steel-reinforced PE pipe

철심으로 보강을 할 지라도 PE관은 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.

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

$$m(\ddot{v}_t + v_b\ddot{\theta} - v_n\dot{\phi}\cos\theta) = T' + S_b\Omega_n - S_n\Omega_b - w_o\cos\phi\cos\theta + R,$$

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

$$m(\ddot{v}_b - v_n\dot{\phi}\sin\theta - v_t\ddot{\theta}) + m_a\ddot{v}_b = S_b' - S_n\Omega_b\tan\theta - T\Omega_n - w_o\cos\phi\sin\theta + 0.25\pi d^2\rho_w C_M \ddot{u}_b + R_b$$

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

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

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

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

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

$$\Omega_n = \theta'$$

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

(1)

여기서, 점('): t 의 미분, 프라임('): 공간 s 의 미분

T : 케이블의 유효장력

d : 케이블의 직경

ρ_w : 물의 밀도

θ, ϕ : 회전각도

m : 케이블의 단위길이 당 질량

w_0 : 케이블의 단위길이 당 수중 무게

m_a : 케이블의 단위 길이당 부가질량

C_M : 부가관성계수

E : 케이블의 탄성계수

A : 케이블의 단면적

S_n, S_b : n, b 방향의 전단력

u_n, u_b : n, b 방향의 유체속도 성분

Ω_n, Ω_b : n, b 방향의 곡률

v_t, v_n, v_b : 각각 t, n, b 방향의 케이블 속도 성분

R_t, R_n, R_b : 각각 케이블에 가해지는 t, n, b 방향의 외부 유체항력

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

$$[L]\vec{H}' = [K]\vec{H} + \vec{L} \quad (2)$$

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 풀이되는데, 본 연구에서는 유한차분법(중앙차분법)을 사용하였다. 지배방정식은 비선형으로 나타나는데, 비선형 해를 구하기 위하여 뉴턴-랩슨 방법을 적용하였다.

2.3 예제해석 및 분석

본 절에서는 앞 절에서 설명한 수치해석적 방법을 적용하여 지배방정식을 풀이한 결과를 여러 가지 조건에 대하여 보여준다. 수심은 300 m 로 가정하였으며, 조류는 수심에 따라서 변하는 것으로 가정하였다. 수심 150 m 이상에서는 조류가 없으며, 수심 150 m 지점에서 해수면까지는 조류속도가 점점 증가하는 것으로 가정하였다. Fig. 3에서는 수심에 따른 조류분포를 보여주고 있다.

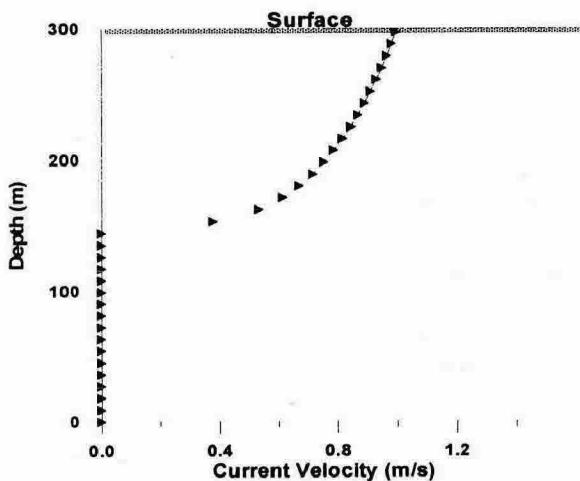


Fig. 3 Current profile

먼저 라이저와 끝단 중량체의 제원을 일정하게 지정한 후 해수면 조류속도에 따른 라이저의 전체 형상을 추정해 보았다. Table 3에서는 첫 번째 경우에 대한 해석 입력 자료를 보여주고 있다. Fig. 4에서는 첫 번째 해석조건에 대한 결과를 보여주고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 조류가 0.5 (m/s) 에서는 취수구의 수심이 200 (m)를 넘어서고 있지만, 조류속도가 0.75와 1.0인 경우에는 취수관의 끝단이 들려 올라가서 취수수심이 약 180, 120 (m)가 되어 양질의 해양심층수를 취수할 수 없음을 보여주고 있다. 현재 한국 해양연구원에서는 한국 동해안 지역에서 수심 200 (m) 이상 되는 영역에서 해양심층수를 취수할 계획을 가지고 있기 때문에 취수관 끝단의 취수심도가 수심 200 (m) 이상이 되도록 설계해야 할 것이다. 따라서 조류가 강한 경우에는 설계 인자들을 적당히 변경해야 한다는 것을 알 수 있다.

Table 3 Input for case 1

Weight of riser in water (N/m)	5
Length of riser (m)	250
Attached Weight in water (N)	2000
Current velocity in surface (m/s)	0.5
	0.75
	1.0

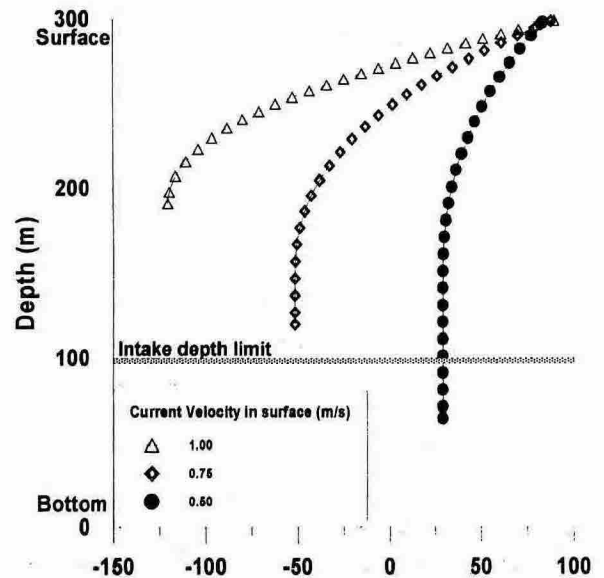


Fig. 4 Configuration of riser with current velocity in surface

앞의 결과에서 보았듯이 조류가 강하게 작용하는 경우

에 양질의 심층수를 취수하기 위해서는, 라이저 자체의 중량을 증가시키거나 혹은 라이저 끝단에 위치하는 물체의 중량을 증가시켜야 한다. 그러나, 취수 수심을 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 1 m/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 1 m/s 이고, 라이저의 단위길이당 수중중량이 5 N/m 이라면 중량체는 최소 6000 N 이상의 무게를 가져야 한다는 것을 알 수 있다.

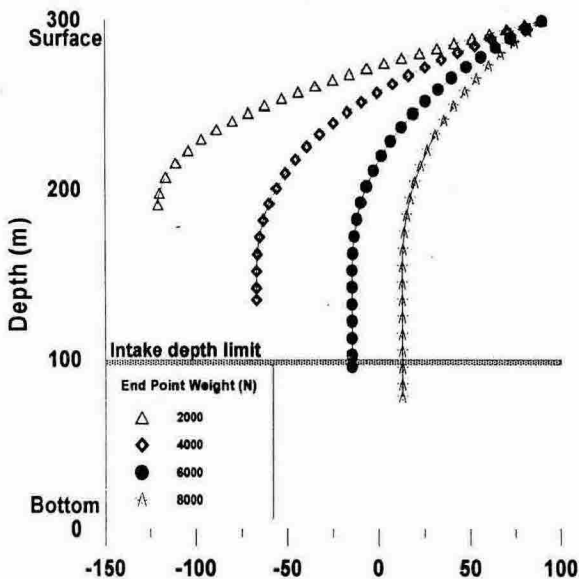


Fig. 5 Configuration of riser with attached weight at the end point of riser

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

Fig. 5와 Fig. 6의 결과를 비교해 본다면, Fig. 5에서 중량체의 무게가 8000 N 인 경우(라이저 중량 : 5 N/m)와 Fig. 6에서 라이저 중량이 20 N/m(중량체 무게 : 4000 N)

인 경우는 해석결과가 거의 유사하게 나온다는 것을 볼 수 있다. 해수면 부이를 기준으로 했을 때 취수구의 위치는 수평방향으로 약 80 m 이동했으면 취수수심은 약 223m가 된다. 이 때 장력을 비교해 본다면, 전자는 약 8221.79 N이고 후자는 8059 N로 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 증가시키면 되지만 후자와 같이 설계하기 위해서는 라이저 단면 설계에서 보강철심의 양이 증가하게 되어 경제적으로 비용이 많이 들기 때문이다. 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.

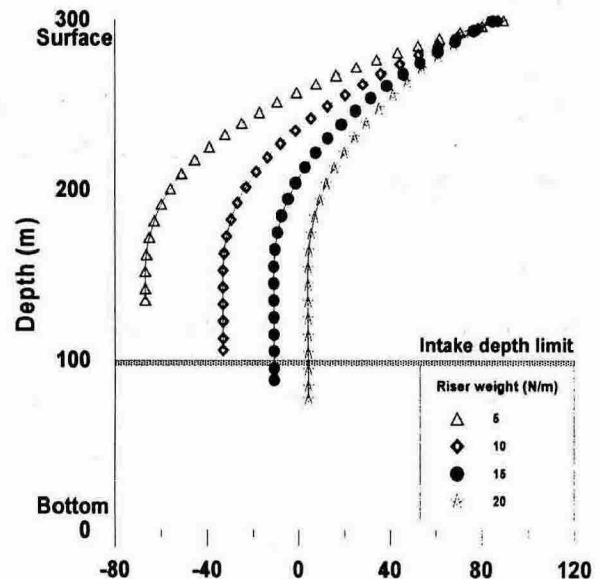


Fig. 6 Configuration of riser with riser weight

5. 결 론

본 연구에서는 우리나라 동해안 지역에서 해양심층수를 취수하기 위한 기초 연구로서, 해상부이형 개발시스템의 유연라이저에 대한 적절 재질에 대하여 알아보았으며, 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 적당히 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 효과적인 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.

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 요구되어 진다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 '해양심층수 다목적 이용 개발(3)' 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김현주 외 (2002) "해양심층수의 다목적 개발(2).
- [2] 박한일, 정동호, "유한차분법을 이용한 저장력 예인케이블의 비선형 동적해석", 대한조선학회논문집, 제39권, 1호. 2002.