

# 인공용승장치의 수평거동특성

홍남식\* · 강석욱\*

\*동아대학교 토목해양공학부

## Horizontal Behavior of Artificial Upwelling Device

HONG, NAMSEEG\*, SEOKWOOK KANG\*

\*School of Civil and Ocean Engineering, Dong-A University

**KEY WORDS:** 인공용승장치, 심층수, Hamltton의 원리, 물기둥의 상대속도, Artificial Upwelling Device, Deepwater, Relative of water column

**ABSTRACT:** *Mathematical and numerical modeling is proposed to evaluate the horizontal behavior of a wave-driven upwelling device and then, the horizontal behavior and the structural ability are inspected for the regular and irregular waves in East sea. Analysis results indicate that the buoy moves with the water particle and the pipe behaves cantilever beam. Also, it is found that the strength of pipe is sufficient to resist the internal moment*

### 1. 서 론

천연적인 용승현상이 발생하는 지역은 청결하고 풍부한 염양염류와 낮은 수온을 가진 심층수에 의해 좋은 어장을 형성한다. 이러한 심층수를 인공적으로 끌어올리기 위해 파랑에너지를 이용하는 인공용승장치에 관한 연구가 최근에 시도되고 있다. 파랑에너지를 이용한 인공용승장치는 일종의 펌핑(pumping)현상을 응용한 것으로 용승효과가 상대적으로 크며 경제성도 있는 것으로 보고되고 있다. 우리나라 동해안의 경우 계절풍의 영향으로 파랑에너지가 비교적 풍부한 편에 속하며 수심경사도 급하여 육지로부터 멀지 않은 곳에 적절한 수심이 존재하기 때문에 파랑에너지를 이용한 인공용승의 적지라고 사료된다. 또한, 해양연구원 조사에 의하면 고성 앞 바다 수심 150m 지점에서 양질의 심층수가 존재하는 것이 확인된 바 있다. 인공용승장치는 Issacson(1976)에 의해 처음 고안되었으며, 용출량 산정을 위한 몇 가지 이론적 해석모델이 제시된바 있다. Vershinsky(1987)가 흑해(Black Sea)를 대상으로 수리모형실험을 해본 결과 기존의 해석치 보다 더 많은 용출량(upwelling flow rate)을 얻을 수 있음을 알게 되었고, 기존 해석모델을 개선할 필요성을 주장하였다. Liu(1995)가 해석모델을 개선하여 하와이 근해의 규칙 및 불규칙파에 적용하여 용승장치가 높은 효율성을 가지고 있음을 증명하였다. 또한, 박 등(2001)은 Liu가 사용한 장치 제원을 이용하여 고성지역에 적용해 봄으로써 가능성을 검토하였으며, 홍 등(2002)은 규칙파에서의 용승장치의 효율성에 관한 영향인자 분석을 하였으며, 영향인자분석 결과를 토대로 동해안 고성근처해역에서 효율성을 극대화시킬 수 있는 제원을 산정하여 Bretcheider spectrum을 이용한 불규칙파랑에 대해 그 효율성을 조사하였다.

그러나, 기존의 해석모델은 수직방향운동만을 고려한 해석 모델이므로 수평방향운동을 고려할 필요가 있다. 특히, 용승 구조물이 긴 파이프를 가지고 있으므로 그 파이프가 마치 내민보처럼 운동을 하게 될 것이므로 buoy부분과 파이프의 연결 부분이 구조적으로 취약한 것으로 사료된다. 본 연구의 목적은 수직운동의 거동결과를 이용하여 수평운동에 대한 모델을 개발하여 해석함으로써 수평거동 및 언급된 구조적 취약성 여부를 검토하는데 있다.

본 연구에서는 먼저 수직운동과 수평운동간의 상호작용으로 인한 결합성에 대해 단지 파이프내의 물기둥의 상대속도( $U$ )만을 사용한다. 즉, 수직운동에 의한 물기둥의 상대속도를 파이프의 수평운동에 결합하여 모델링 한다.

### 2. 해석 모델

#### 2.1 수직운동

인공용승장치는 일종의 펌핑(pumping) 현상을 응용한 것으로서, Fig.1에서 보듯이 buoy와 흐름제어용 valve를 포함한 길이가 긴 수직 파이프(tail pipe)로 이루어진다.

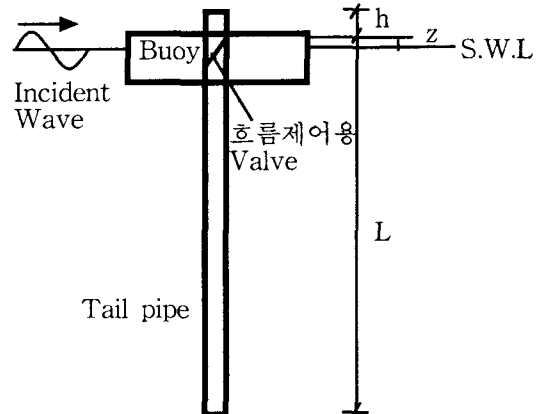


Fig. 1 인공용승장치의 개략도

제1저자 홍남식 연락처: 부산시 사하구 하단동 840

동아대학교 051)-200-6876 hns0817@mail.donga.ac.kr

수직운동에 대한 Liu의 수학적 모델은 밸브의 개폐여부에 따라 2분류의 연립미분방정식으로 이루어져 있다. 첫째, 밸브가 닫혀있을 때 구조물에 대한 파이프 내 물기둥의 상대속도는 0이다. 즉,

$$U=0 \quad (1)$$

이며, 구조물의 운동방정식은 아래와 같다.

$$(m+m_w)\ddot{z} = -m_a\dot{z} - b\dot{z} - \beta|\dot{z}|z - \rho g S_w z + F_e \quad (2)$$

여기서,  $m$ 은 용승구조물의 질량,  $m_w$ 는 파이프내 심층수의 질량,  $m_a$ 는 부가질량(added mass),  $z$ 는 S.W.L.로부터 buoy의 상하 움직임,  $b$ 는 파랑감쇄계수,  $F_e$ 는 연직 방향으로의 파랑에 의한 가진력,  $\rho$ 는 해수의 비중,  $S_w$ 는 buoy 단면적, 그리고  $\beta$ 는 점성계수이다.

두 번째는, 밸브가 열려있을 경우로 구조물에 대한 파이프 내 물기둥의 운동은 압력차이에 대해서 물기둥의 상대속도로 표현되며 다음과 같이 결정된다.

$$U + \dot{z} + \frac{z+h}{L+h}g = 0 \quad (3)$$

여기서,  $U$ 는 구조물에 대한 파이프내 물기둥의 상대가속도를 나타내며 장치의 운동 방정식은 아래식과 같다.

$$m_1\ddot{z} = -m_a\dot{z} - b\dot{z} - \beta|\dot{z}|z - \beta U^2 - \rho g S_w z + F_e \quad (4)$$

여기서,  $\beta$ 는 파이프내의 물기둥의 움직임에 대한 점성계수이다.

식(2)와 식(4)에서 가진력( $F_e$ )의 계산은 Froude-Krylov force식을 적용하였다. 즉,

$$F_e = C\rho g S_w \frac{H}{2} \sin(\omega t) \quad (5)$$

여기서,  $C$ 는 파력계수,  $H$ 는 파고를 나타낸다.

## 2.2 수평운동

수평운동 해석모델은 Hamilton의 원리를 적용하여 얻어진 다. fig.2에서 보듯이 임의의 시간에서의 움직임  $x$ 와 파이프내의 물기둥속도  $U$ 를 결합한 파이프내 물입자의  $x$ 방향의 속도는  $\dot{x} + Ux'$ 이다.

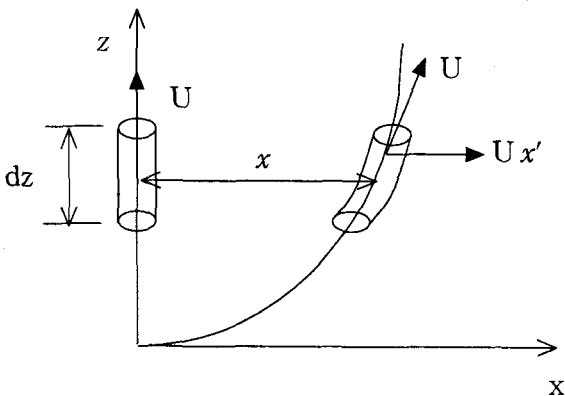


Fig. 2 Pipe의 운동

미소거리  $dz$ 에 대한 kinetic energy는 식(6)과 같다.

$$dT = \left\{ \frac{1}{2}(m_t - m_f)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m_f[U^2 + (\dot{x} + Ux')^2] \right\} dz \quad (6)$$

여기서,  $m_t$  : total mass

$m_f$  : water mass in pipe

식(6)에서 첫 번째 부분은 pipe에 대한 kinetic energy이고 다음 부분은 파이프 내부의 물의 흐름에 대한 kinetic energy이다.

수평방향 변위로 인한 Strain energy는 다음과 같이 표현된다.

$$dV = \left[ \frac{1}{2}EI(x'')^2 \right] dz \quad (7)$$

위 식(6)과 식(7)을 Hamilton의 원리를 적용하면 다음과 같다.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \int_{z_1}^{z_2} \left[ \frac{1}{2}(m_t - m_f)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m_f[U^2 + (\dot{x} + Ux')^2] - \frac{1}{2}EI(x'')^2 \right] dz dt = 0 \quad (8)$$

식(8)에 first variation을 취하여 정리한 후 경계조건을 적용하여 정리하면 다음과 같은 파이프의 수평운동에 대한 연속자유지배방정식(9)을 얻을 수 있다.

$$m_t \ddot{x} + 2m_f U \dot{x}' + m_f U^2 x'' + (EIx''')' = 0 \quad (9)$$

본 연구에서는 buoy부분에 작용하는 외력은 buoy부분이 파이프에 비해 상당히 큰 구조물이므로 Froude-Krylov fore를 적용하였고 파이프 부분은 모리슨식(Morison equation)을 적용하였다.

자유운동방정식(9)에 외력부분을 결합시키면 수평방향의 강제 진동(Forced vibration)운동에 관한 지배방정식을 얻을 수 있다.

buoy부분의 지배방정식은 식(10)와 같이 표현되며

$$m_t \ddot{x} + 2m_f U \dot{x}' + m_f U^2 x'' + (EIx''')' = \pi H \rho g r \frac{J_1(kr) \sin \sigma t}{\cosh kh} \cosh ks \quad (10)$$

여기서,  $J_1(x)$  : Bessel function of 1st kind of order one

$$J_1(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m x^{2m+1}}{2^{2m+1} m! (m+1)!} \quad (11)$$

파이프부분의 지배방정식은 식(12)과 같이 표현된다.

$$m_t \ddot{x} + 2m_f U \dot{x}' + m_f U^2 x'' + (EIx''')' = \rho A \dot{u}_w + \rho C_a A (\dot{u}_w - \dot{x}) + \frac{1}{2} \rho C_D D |u_w - \dot{x}| (u_w - \dot{x}) \quad (12)$$

## 2.3 수치해석

앞에서 살펴본 운동방정식을 수치적으로 해석하기 위해 수직운동은 Runge-Kutta method를 적용하였으며, 수평운동은 Galerkin의 유한요소해석법을 적용하여 matrix운동방정식을 유도한 후 해석하였다. 용승구조물을 모델링 하기 위해서 Buoy부분을 한 요소로 결정하고 나머지 부분을 30개의 요소로 나누었다. Buoy와 파이프의 연결 부분에서의 좀 더 정확

한 내력을 계산하기 위해서 연결 부분에서 20m 거리를 10개의 요소로 나누고 나머지 280m를 20개의 요소로 나누어 모델링 한다.

### 3. 해석결과 및 분석

본 연구에서 개발된 프로그램을 적용하여 제안된 용승구조물의 수평거동특성 및 구조적 안정성도 검토한다. 여기서 구조적 안정성은 용승 구조물중 파이프가 Buoy보다 상대적으로 긴 구조물이므로 파이프가 얼마나 물속에서 힘을 받으며 견딜수 있는가를 검토하며 특히 Buoy부분과 파이프 연결 부분에서의 구조적 취약성여부를 검토한다.

해석은 규칙파와 불규칙파로 구분하여 실시한다. 규칙파에 대해서는 Liu가 적용했던 파장 및 장치 제원을 이용하여 구조적 거동을 분석한 후, 홍 등(2002)의 기존연구결과 즉 영향인자 연구분석을 통해 얻은 최적효율성을 갖는 제원에 대해 구조적 안정성을 고려하여 불규칙파에 적용한다. 불규칙파는 우리나라 고성 앞 바다에서의 동해안 파랑 자료를 참고하여 적용한다.

#### 3.1 규칙파

규칙파에서의 해석을 위한 장치의 제원 및 파랑의 성격은 Liu가 하와이 근해에 적용한 용승 구조물의 제원을 우선 적용하였다. 정리하면 Table 1과 같다.

수직운동에 대한 해석 결과로 부터 파이프 내의 물기둥의 상대 속도와 상대 가속도를 계산하며 Fig. 3에서와 같이 나타난다. Fig. 3에서 보듯이 밸브가 열려 있을 때는 파이프내의 물 입자가 상대속도를 가지고 운동하여 물을 내뿜고 밸브가 닫혀 있을 때는 속도가 0이 되어 용승구조물과 같이 운동하는 것으로 나타난다. Fig. 3에서 얻는 물기둥의 상대속도를 수평운동에 결합하여 수평운동의 거동 및 구조적 안정성을 조사한다.

Table 1 용승구조물의 제원 및 파랑의 성격

용승 구조물	직경	단면적	단면 2차 모멘트
Buoy	$D_b = 4.0 \text{ m}$	$S_w = 12.5 \text{ m}^2$	$I_b = 12.4646 \text{ m}^4$
파이프	$D_p = 1.2 \text{ m}$	$S_p = 1.16 \text{ m}^2$	$I_p = 0.0272 \text{ m}^4$
	길이	$L = 300 \text{ m}$	
	탄성계수	$E \cdot 2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$	
파랑	파고 (Wave height)	$H: 1.9 \text{ m}$	
	주기 (Wave period)	$T: 12 \text{ sec}$	

규칙파(파고 1.9m, 주기 12sec)에서의 300m길이를 가진 용승구조물의 상부 buoy의 거동은 Fig 4에서 보여준다. 대략 300sec에서 안정적으로 약 2m의 진폭범위로 거동을 하며 이

는 수치 해석적인 안정성을 찾아가는 과정으로 이해된다.

용승구조물의 깊이에 따른 거동을 살펴보면 다음 Fig. 5와 같이 나타난다.

용승구조물의 깊이에 따른 거동은 Fig. 5에서 보여주듯이 대략 깊이 80m, 150m와 240m 부근에서 변곡점이 생기는 것을 볼 수 있다. 이는 적용파랑의 주기와 구조물 자체의 수평 운동방향이 제4차 모드(mode)의 주기와 유사하기 때문인 것으로 사료된다.

즉, 용승장치의 거동은 Pipe의 유체저항력에도 불구하고 Buoy는 파랑에 의한 물 입자의 움직임과 유사하게 나타나며, Pipe의 거동은 내민보의 일반적인 거동특성을 나타내는 것으로 판단된다.

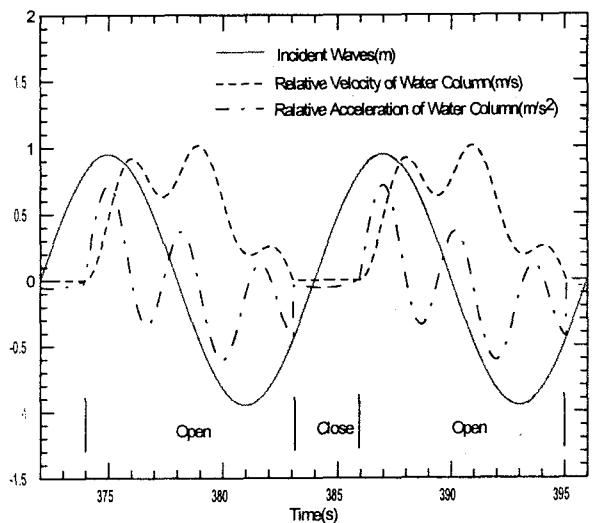


Fig. 3 정상파에서의 파이프내의 물기둥의 운동

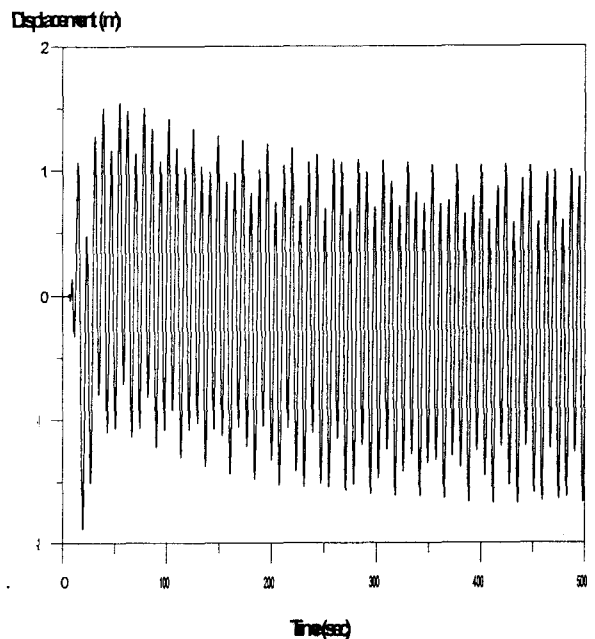


Fig. 4 용승구조물의 수평방향의 거동 (buoy)

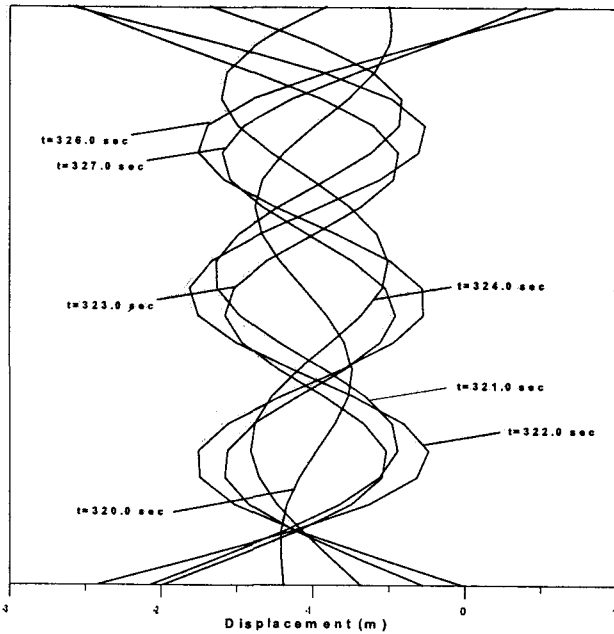


Fig. 5 용승구조물의 깊이에 따른 거동

구조적 안정성 계산은 수평운동결과로부터 파이프 각 절점에서의 최대 휨 모멘트(Bending Moment)와 파이프와 Buoy의 연결부분에서의 휨 모멘트를 계산하여 응력을 계산한다.

파이프 전체에서 각 절점에서 발생하는 최대 휨모멘트는 Fig. 6과 같이 나타난다.

앞의 Fig. 6과 같이 파고 1.9m, 주기 12sec에서의 최대 휨 모멘트는 205219.84 N·m이고 Buoy와 파이프의 연결부분에서의 휨 모멘트는 97664.336 N·m로 강재가 충분히 견딜 수 있는 것으로 사료된다.

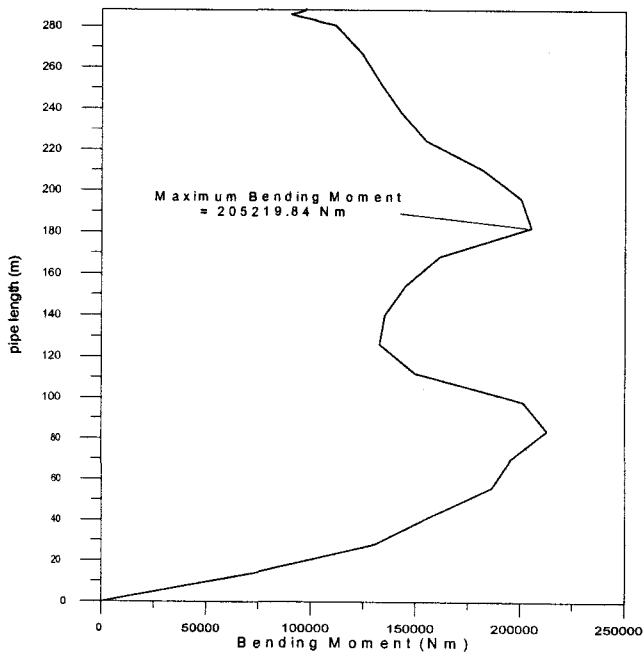


Fig. 6 정상파에서의 각절점에서의 최대휨모멘트

### 3.2 불규칙파

본 연구에서 적용한 불규칙파는 Fig. 7에서 보듯이 동해안의 고성 앞 바다인 No. 63지역이며, 본 연구에서는 고성 앞바다 이외의 지역 No. 61, 62, 64도 포함하여 구조적 안정성을 검토하였다. 해양연구원 관측 자료에서 참고하면 No. 61에서 No. 64지역의 평균 유의 파고( $H_s$ )와 유의 주기( $T_s$ ) 그리고 50년 빈도 극치 파고는 Table 2에서 알 수 있다.

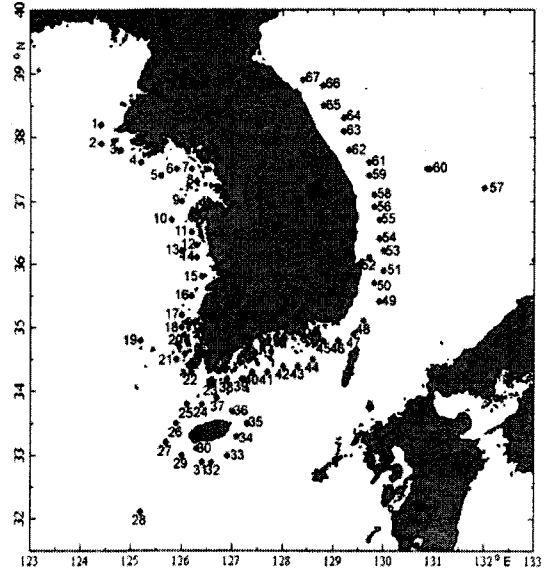


Fig. 7 파고자료의 위치

Table 2 고성앞바다부근의 유의파고유의주기, 극치파고

관측지점	유의 파고 (m)	유의 주기 (sec)	50년 빈도 극치파고 (m)
No. 61	0.96	4.6	9.10
No. 62	0.83	4.4	6.72
No. 63	0.87	4.5	6.72
No. 64	0.89	4.5	7.91

해양연구원의 관측지점 No. 61에서 No. 64지점의 각각의 평균 유의 파고와 유의 주기를 가지고 스펙트럼(Spectrum) 얻은 후 매 시간 마다의 불규칙파를 추출하여 본 프로그램에 적용함으로써 구조적 안정성을 조사한다. 불규칙파를 추출하기 위해서 Bretschneider spectrum(1959,1969)을 적용하였다.

$$S(w) = 0.1687H_{1/3}^2 \frac{w^{4/3}}{w^5} e^{-0.675(w_{1/3}/w)^4} \quad (13)$$

여기서,  $w_{1/3} = 2\pi/T_{1/3}$

$T_{1/3}$ : 유의파고

$H_{1/3}$ : 유의파고

스펙트럼의 주파수를 임의로 N등분한 다음 각주파수 성분

의 스펙트럼 높이로부터 해당 주파수의 파고를 결정하고 위상차는 임의로 랜덤하게 주어 정한 다음 모든 주파수 성분을 합하여 불규칙 파랑의 시간이력 성분을 다음과 같은 식을 이용하여 재현한다.

$$\zeta(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_n t + \theta) \quad (14)$$

여기서,  $a_n$  은 파랑의 진폭을  $\omega_n$  는 파수, 그리고  $\theta$  는 위상차를 나타낸다.

불규칙파에 대한 구조적 안정성의 계산은 No. 61에서 No. 64지점 각각에 대해 파이프의 최대휨모멘트와 buoy와 파이프의 연결부분에서의 휨모멘트를 계산한다. 각 지점에 대한 최대 휨모멘트와 연결부분에서의 휨모멘트를 정리하여 Table 3에 정리하였다.

**Table 3** 불규칙파에서의 휨모멘트의 변화

관측지점	최대휨모멘트 (Nm)	연결부분에서의 모멘트 (Nm)
No. 61	1650468	87092
No. 62	1348013	62321
No. 63	1707975	89853
No. 64	1511443	72572

Table 3로부터 각 지점에서의 내력은 강재가 충분히 견딜 수 있는 범위내에 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론 및 향후연구

파랑에너지를 이용하여 양질의 심층수를 끌어 올리는 인공 용승구조물의 수평운동에 대한 수학적, 수치적 모델을 개발하고 규칙파와 동해안에서의 불규칙파를 적용하여 수평거동 및 구조적 안정성을 검토해 보았다.

검토결과 용승구조물의 Buoy는 파랑에 의한 물 입자의 움직임과 유사한 거동을, Pipe는 내민보의 거동특성을 따르는 것으로 사료되며, 파이프내의 내력이 강재가 충분히 견딜 수 있는 범위 내에 있는 것으로 판단되었다.

본 연구에서 파랑의 비선형성 및 조류에 의한 수평 Drift를 막기 위한 계류라인을 고려하지 않았으나, 이는 용승장치의 효율성에 중요한 영향을 미칠 것으로 사료되는바 향후에 연구되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

박기정, 홍남식, 2001. 불규칙파랑하에서의 인공용승구조물의 효율성. 동아대 건설기술연구소 논문집 25(2),99p  
 홍남식, 박기정, 2002. 용승구조물의 효율성 분석. 동아대 해

양자원연구소 논문집 14, 9p  
 홍남식, 강석욱, 김정운 2002. 인공용승장치의 동해안에서의 효율성 조사. 한국해안 해양공학회 논문집 13, 270p  
 Chen H., Liu, C. and Guo, F., 1994. Hydraulic modelling of wave-driven artificial upwelling, *Proceeding of Oceanology International*, Brighton, U.K., 8p  
 Issacs, J.D., Castel, D. and Wick, G.L., 1976. Utilization of the energy in ocean waves., *Ocean Engineering* 3, 175  
 Issacs, J.D. and Seymour, R.J., 1973. The ocean as a power resource, *Int. Jour. Environmental Studies* 4, 201p  
 Liu, C.C.K, and Qiao J., 1995. Artificial Upwelling in Regular and Random Wave, *Journal of Ocean Engineering* 22(4) 337p  
 Liu, C.C.K, and Lin, H. and Guo., 1999. F. Hydrodynamic Performance of Wave-Drive Artificial Upwelling, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol.125, 728p  
 Vershinsky, N.V. Pserichnvyvy, B.P. and Solovyev, A.V., 1987. artificial upwelling using the energy of surface waves *Oceanology* 27(3), 400p