

인공용승장치의 동해안에서의 효율성 조사 Investigation of Efficiency of Artificial Upwelling Device in East Sea

홍남식¹ · 강석욱¹ · 김정윤¹
Namseeg Hong¹, Seokwook Kang¹, and Jungyoon Kim¹

1. 서 론

천연적인 용승현상이 발생하는 지역은 청결하고 풍부한 영양염류와 낮은 수온을 가진 심층수에 의해 좋은 어장을 형성한다. 그러므로, 전체 해양면적의 0.1%에 해당하는 천연용승 발생 지역에서 어획량은 전체의 거의 절반을 차지한다. 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.

인공용승장치는 Issacson(1976)에 의해 처음 고안되었으며, 용출량 산정을 위한 몇가지 이론적 해석모델이 제시된바 있다. Verzhinsky(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 하였다.

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 앞바다 수심 150m 지점에서 양질의 심층수가 존재

하는 것이 확인된 바 있다.

본 연구의 목적은 홍 등(2002)에 의해 수행된 영향인자 분석의 결과를 토대로 동해안 고성 근처 해역에 인공용승장치의 효율성을 극대화하는 제원을 산정한 후 그 효율성을 조사하는데 있다. 고성해역의 불규칙파랑은 Bretschneider spectrum 을 적용하여 시간이력 파랑곡선을 재현한다.

2. 해석 모델

인공용승장치는 일종의 펌핑(pumping) 현상을 응용한 것으로서, Fig.1 에서 보듯이 buoy 와 흐름제어용 valve 를 포함한 길이가 긴 수직 파이프(tail pipe)로 이루어진다. 밸브가 닫혀있는 상태에서 구조물 주위의 수면이 상승하게 되면 파랑에너지에 의해 구조물이 상승하며, 파이프내의 물기둥은 구조물과 함께 가속되고, 이 상태에서 구조물 주위의 수면이 하강하게 되면 구조물은 물기둥에 비해 더 큰 관성력을 갖기 때문에 밸브는 열리게 되고 파이프(pipe)를 따라 상승한 심층수는 파이프 상단을 통해 장치 밖으로 뿜어져 나가게 된다.

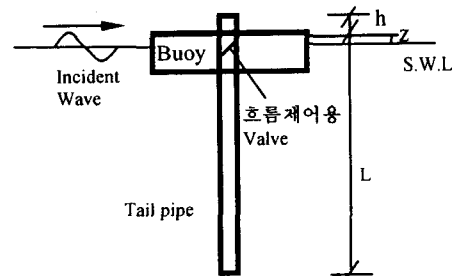


Fig. 1. 인공용승 장치의 개략도.

¹ 동아대학교 토목해양공학부(School of Civil and Ocean Engineering, Dong-A University, Busan, Korea)

Liu 의 수학적 모델은 벨브의 개폐여부에 따라 2분류의 연립미분방정식으로 이루어져 있다. 첫째, 벨브가 닫혀있을 때 구조물에 대한 파이프 내 물기둥의 상대속도는 0이다. 즉,

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

이며, 구조물의 운동방정식은 아래와 같다.

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

여기서, m 은 용승구조물의 질량, m_w 는 파이프 내 심층수의 질량, m_a 는 부가질량(added mass), z 는 S.W.L.로부터 buoy의 상하 움직임, b 는 파랑감쇄 계수, F_e 는 연직 방향으로의 파랑에 의한 가진력, ρ 는 해수의 비중, S_w 는 buoy 단면적, 그리고 β 는 점성계수이다.

두 번째는, 벨브가 열려있을 경우로 구조물에 대한 파이프내 물기둥의 운동은 압력차이에 대해서 물기둥의 상대가속도로 표현되며 다음과 같이 결정된다.

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

여기서, \dot{U} 는 구조물에 대한 파이프내 물기둥의 상대가속도를 나타내며 장치의 운동 방정식은 아래식과 같다.

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

여기서, β' 는 파이프내의 물기둥의 움직임에 대한 점성계수이다.

식(2)와 (4)는 거의 비슷하나, 식(4)에서는 파이프 내의 물기둥의 상대움직임으로 인한 점성효과를 추가적으로 포함시켰다.

식(2)와 식(4)에서 가진력(F_e)의 계산은 Froude-Krylov force 식을 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.

앞에서 살펴본 운동방정식을 수치적으로 해석하기 위해 Runge-Kutta method를 적용하여 시간에 대한 구조물 및 파이프내 물기둥의 운동을 계산하며 용출량은 벨브가 열려있을 경우의 파이프내 물기둥의 유속으로부터 유량을 계산하여 산정한다.

3. 해석결과 및 분석

본 연구의 적용대상 해역인 고성 앞바다는 대략 Fig. 2에서 보듯이 No.63 지역이며, 고성 앞바다 이외의 지역 No.61,62,64에서도 효율성을 검토한다. 해양연구원 관측자료에 의하면 No.61에서 No.64 지역의 평균 유의파고(H_s)와 유의주기(T_s) 그리고 50년 빈도 극치 파고는 Table 1.에 주어진다.

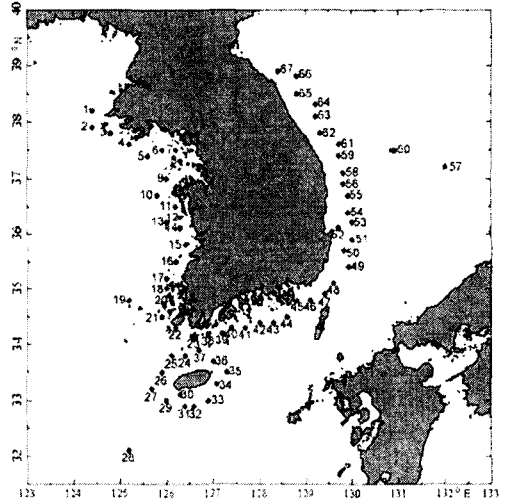


Fig. 2. 파랑자료 위치.

Table 1. 고성 해역의 파랑자료

관측 지점	유의파고 (m)	유의주기 (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

불규칙파의 시간이력 재현을 위해 아래식과 같은 Bretschneider spectrum 스펙트럼(Spectrum)을 이용한다.

$$S(w) = 0.1687 H_{1/3}^2 \frac{w_{1/3}^4}{w^5} e^{-0.675(w_{1/3}/w)^4} \quad (6)$$

여기서, $w_{1/3} = 2\pi/T_{1/3}$ 로 표시되며 $T_{1/3}$ 는 유의주기, $H_{1/3}$ 는 유의파고이다.

스펙트럼의 주파수를 임의로 N 등분한 다음 각 주파수 성분의 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.

$$\zeta(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(w_n t + \theta) \quad (7)$$

여기서, a_n 은 파랑의 진폭을 w_n 는 파수, 그리고 θ 는 위상차를 나타낸다.

영향인자 분석을 통하여 고성해역에 적절한 용승장치의 제원을 결정한다. 양질의 심층수가 있음이 확인된 바 있는 동해안 고성해역의 수심은 대략 150m 정도이므로 파이프의 길이는 150m로 결정한다. 파이프의 직경은 홍 등(2002)의 결과를 이용하여 파이프 자체의 허용응력 내에 충분히 들어갈 수 있으며 구조물의 운동안정성을 고려하여 1.2m로 선정한다. 다음으로 효율성에 중요한 영향을 미치는 Buoy의 반경에 대해서는 No.63 지점의 관측자료를 활용하여 영향인자 분석을 통해 buoy의 반경을 2.0m에서 6.0m까지 변경하면서 용출량을 예측하여 buoy의 반경을 결정한다. Fig.3은 No. 63지역에서의 buoy의 반경에 대한 용출량의 변화를 나타낸 것이다. Fig.3에서 보듯이 용출량은 buoy의 반경이 4.0m일때 최대이므로 buoy의 반경은 4.0m로 결정했다.

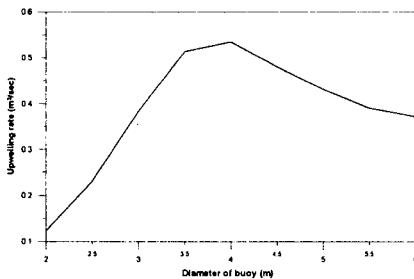


Fig. 3. Buoy의 반에 대한 용출량의 변화. 결정된 제원과 각 지점에서의 파랑자료를 이용하여

No.61에서 No.64 지점 각각의 용승구조물의 움직임과 파이프내의 물기둥의 속도와 가속도 그리고 용출량을 알아 보았다.

Fig.4는 No.62 지점에서의 용승구조물의 운동을 Fig.5는 속도와 가속도를 Fig.6은 파이프내 물기둥의 속도와 가속도를 보여준다. Fig.4에서 보듯이 입사파랑보다 장치의 운동폭이 크게 나타나는 경우가 보이는데 이는 장치의 가속도로 인한 잉여 관성력에 기인한 것으로 추측되며, 이는 Fig.5의 구조물의 가속도의 크기를 관찰해 보면 간접적으로 추론될 수 있는 것으로 사료된다. 규칙파에서의 용출량을 구하는 방법을 적용하여 Fig.6의 결과를 이용하여 고성알바다에서의 용출량을 구하였으며 그 크기는 0.7387 m³/sec로 나타났다. 이 정도량이 끊임없이 용출된다면 동해안 해당지역에서 양질의 환경을 가진 인공어장이 형성될 수 있으리라 판단된다. Table 1은 No.61-64 지점의 용출량을 나타내며 충분한 양의 심층수가 용출됨을 확인할 수 있다

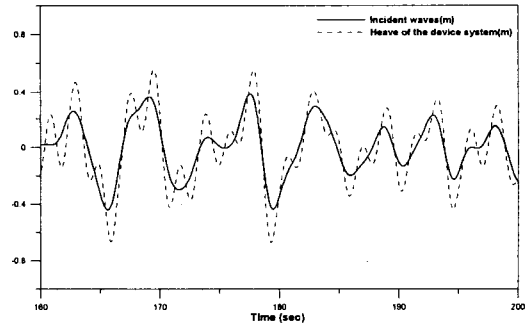


Fig. 4. No.62 지점에서의 용승구조물의 운동.

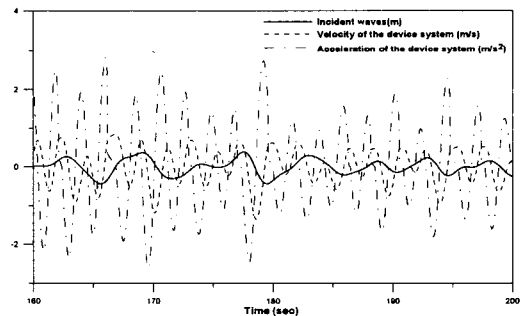


Fig. 5. No.62 지점에서의 용승구조물의 속도와 가속도.

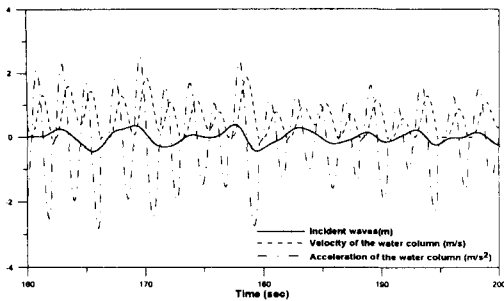


Fig. 6. No.62 지점에서의 파이프내 물기둥의 속도와 가속도.

Table 2. 고성 근처 해역에서의 용출량

지점	용출량 (m ³ /sec)
No. 61	0.6245
No. 62	0.7387
No. 63	0.7744
No. 64	0.9302

4. 결 론

본 연구에서는 불규칙파 하에서의 영향인자 분석을 통하여 동해안 고성 근처 해역에서 인공용승 장치의 효율성을 극대화하는 제원을 산정한후 그 효율성을 조사하였는바 충분한 효율성이 있는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- 박기정, 홍남식, 2001. 불규칙파랑하에서의 인공용승구조물의 효율성. 동아대 건설기술연구소 논문집, 25(2), p. 99.
- 홍남식, 박기정, 2002. 용승구조물의 효율성 분석. 동아대 해양자원연구소 논문집. p. 14, p. 9.
- Chen H., Liu, C. and Guo, F., 1994. Hydraulic modeling of wave-driven artificial upwelling, *Proceeding of Oceanology International*, Brighton, U.K., p. 8.
- Issacs, J.D., Castel, D. and Wick, G.L., 1976. Utilization of the energy in ocean waves., *Ocean Engineering* 3, p. 175.
- Issacs, J.D. and Seymour, R.J., 1973. The ocean as a power resource, *Int. Jour. Environmental Studies* 4, p. 201.
- Liu, C.C.K. and Qiao J., 1995. Artificial Upwelling in Regular and Random Wave, *Journal of Ocean*

Engineering Vol. 22, No. 4, p. 337.

Liu, C.C.K., Lin., H. and Guo., 1999. F. Hydrodynamic Performance of Wave-Drive Artificial Upwelling, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 125, p. 728.

Vershinsky, N.V. Psenichnyy, B.P. and Solovyev, A.V., 1987. artificial upwelling using the energy of surface waves, *Oceanology* Vol. 27, No.3, p. 400.