

밀집 배열 부이시스템의 파랑에너지 추출 효율 추정

최윤락*

*울산대학교 조선해양공학부

Estimation of Wave Energy Extraction Efficiency for a Compact Array System of Small Buoys

Yoon-Rak Choi*

*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

KEY WORDS: Wave energy extraction 파랑에너지 추출, Compact array system of buoys 밀집 배열 부이시스템, Higher order boundary element method 고차경계요소법, Hydrodynamic interaction of multi-body system 다물체시스템의 유체역학적 상호작용

ABSTRACT: A compact array system of small buoys is used for wave energy extraction. To evaluate the performance of this system, hydrodynamic analysis is carried out in regular waves using the higher order boundary element method. The motion response of each buoy is calculated considering hydrodynamic interactions caused by other buoys. The effect of energy extraction device is modeled as a linear damping load. The efficiencies of energy conversion are compared using the various sizes and arrangements of the array system and the damping coefficients for energy extraction. The increase in size or the packing ratio of the system gives better efficiency. However, the wave condition and the cost for the system should be considered to optimize performance from the perspective of engineering and economics. The proposed nondimensionalized damping coefficient for energy extraction is 0.1~0.5.

1. 서 론

파랑에너지를 추출하여 기계적 에너지로 전환하는 다양한 시스템이 현재 개발되어 시험 운용 중에 있다. 이러한 시스템 중 파랑에 의한 부유체의 운동으로 부터 에너지를 추출하는 시스템을 가동 물체형이라 한다. 가동 물체형은 시스템이 단순하여 가장 먼저 연구되어 온 파랑에너지 추출 기구로서 현재에도 새로운 방식의 다양한 시스템이 계속 개발 되고 있다.

단일 부이의 운동에 의한 에너지 추출은 부이 운동이 공진운동을 하며 추출기구에 의한 감쇠가 동유체역학적 감쇠와 동일한 값을 가질 경우 추출 효율이 최대가 된다(Newman, 1979; Falnes, 2002). 그러나 통상적인 파랑의 주기를 고려하면 단일 부이의 공진을 위해서는 부이의 크기가 상당히 커야하고 진동수 대역도 매우 협소하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고자 다수의 작은 부이들로 구성된 시스템이 개발되고 있는데 대표적인 것으로는 노르웨이의 FO3 시스템과 덴마크의 Wave star energy 시스템이 있다. 다수의 작은 부이들로 구성된 시스템은 효율적인 에너지 추출 진동수대역이 넓고 시스템의 크기와 동일한 단일 부이보다 효율이 더 높은 것으로 알려져 있다(Garnaud and Mei, 2009).

본 연구에서는 FO3 시스템과 Wave star energy 시스템이 채

택하고 있는 다수 부이시스템의 파랑추출효율 특성에 대해 고찰하였다. 경계요소법 중 해의 정확성과 수렴성이 우수한 고차 경계요소법과 다물체 간의 유체역학적 상호간섭을 고려할 수 있는 일반화 모드법을 이용하여 사각형의 밀집 배열 원형 부이시스템의 파랑에너지 추출 효율을 추정하였다. 시스템의 최적 설계를 위해 시스템의 밀집도와 크기에 따른 효율을 비교분석하였다. 또한 최적의 에너지 추출기구의 특성치를 제시하였다.

2. 문제의 정식화

비점성, 비압축성 유체와 비회전성 유체유동을 가정하고 자유 표면의 파고와 부유체의 운동이 작다는 가정 하에 속도 포텐셜과 섭동법을 사용하여 유체 유동과 부유체의 운동을 정식화 한다. 이때 유체력은 선형 유체력만 고려하였고 원형 부이의 상하 운동만 허용하는 시스템을 가정하였다.

원진동수 ω 로 조화 진동하는 복소 파진폭 A 인 선형 입사파, 산란파 그리고 방사파 포텐셜을 각각 ϕ_0 , ϕ_s , ϕ_R 이라하면 속도 포텐셜은 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi = \text{Re} \{ [A(\phi_0 + \phi_s) + \phi_R] e^{-i\omega t} \} \quad (1)$$

정수 중 복소 진폭 ζ 로 상하 운동하는 N개의 부이를 고려하

면 방사와 포텐셜은 이들 부이들의 운동으로 야기된 포텐셜들의 선형 중첩이다(Newman, 1994).

$$\phi_R = \sum_{j=1}^N \xi_j \phi_j \quad (2)$$

산란과 포텐셜과 방사와 포텐셜의 물체표면 경계조건은 다음과 같다(Hong et al., 2005).

$$\frac{\partial \phi_S}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad \text{on} \quad \sum_{k=1}^N S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = -i\omega n_j \quad \text{on} \quad \sum_{k=1}^N S_k \quad (4)$$

여기서 S_k 는 k 번째 물체의 접수표면이며, n_j 는 일반화 방향여현 (Generalized directional cosine)으로 각 물체의 법선 방향여현의 연직성분($\vec{N}_k \cdot \vec{k}$)으로 표현된다.

$$n_j = \begin{cases} \vec{N}_j \cdot \vec{k} & \text{on } S_j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

산란과 및 방사와 포텐셜은 경계적분방정식의 해로서 구해지는데 특이함수로는 파랑 Green함수를 사용하였고 특이파수를 제거하기 위하여 변형된 경계적분방정식을 구성하였다(최윤락과 여환태, 2009).

일반화 모드에 대한 부가질량(a_{ij}), 파랑감쇠계수(b_{ij}) 그리고 단위 진폭 입사파에 대한 선형 파강제력(X_i)은 포텐셜들을 일반화 방향여현에 대해 적분하면 구해진다(Newman, 1994).

$$\omega^2 a_{ij} + i\omega b_{ij} = i\omega \rho_w \iint_S \phi_j n_i dS \quad (6)$$

$$X_i = i\omega \rho_w \iint_S (\phi_0 + \phi_s) n_i dS \quad (7)$$

여기서 ρ_w 는 유체의 밀도이다. 식 (3)에서 (7)까지의 식들을 보면 각각의 부이에 의한 유체역학적 상호 간섭이 고려되어 있음을 알 수 있다.

파랑에너지 추출기구에 의한 힘은 선형 감쇠력으로 취급하였다(Garnaud and Mei, 2009).

$$F_{Dk} = -Re \left[-i\omega \tilde{\lambda}_g \xi_k e^{-i\omega t} \right] \quad (8)$$

여기서 $\tilde{\lambda}_g$ 는 추출기구에 의한 선형감쇠계수이다.

이상의 유체 동역학적 힘과 에너지 추출에 따른 감쇠력 그리고 유체 정역학적 힘을 고려하면 N 자유도 일반화 모드에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^N \left[-\omega^2 (m_{ij} + a_{ij}) - i\omega (b_{ij} + \tilde{\lambda}_g \delta_{ij}) + c_{ij} \right] \xi_j = A X_i \quad (9)$$

여기서 m_{ij} 와 c_{ij} 는 각각 부이의 관성질량과 복원력 계수이며, δ_j 는 크로네커 델타이다. 파랑에너지 추출량은 추출기구에 의한 감쇠력과 부이의 상하운동 속도(v_k)로부터 시간평균 일률(Extracted

power, \bar{P})을 구하여 추정할 수 있다.

$$\bar{P} = -\sum_{k=1}^N \overline{F_{Dk} v_k} = \frac{\omega^2}{2} \sum_{k=1}^N \tilde{\lambda}_g |\xi_k|^2 \quad (10)$$

파랑에너지 추출 효율은 Garnaud and Mei(2009)에서 사용한 2가지의 무차원 수를 사용하여 해석하였다. 파수(k)로 무차원화된 Capture width(kW)는 에너지 추출량과 관련되는 효율이며 W/L 은 시스템의 특성 폭(L)을 통과하는 입사파의 에너지량과 추출 에너지량의 비이다. 이들 두 무차원 수는 다음과 같은 Capture width(W)를 사용하여 구할 수 있다.

$$W = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2} \rho_w g |A|^2 C_g} = \frac{\omega^2}{\rho_w g C_g} \sum_{k=1}^N \tilde{\lambda}_g \left| \frac{\xi_k}{A} \right|^2 \quad (11)$$

여기서 C_g 는 입사파의 군속도이다.

3. 수치해석

수치해석 대상으로서 Fig. 1과 같은 정사각형의 밀집 배열 원형 부이 시스템을 선택하였다. 시스템은 9개($N=9$)의 원형 실린더 부이로 구성되어 있고 밀집도 및 시스템의 크기에 따른 에너지 추출효율을 검토하기 위하여 Table 1과 같은 5개의 시스템에 대하여 해석을 수행하였다. 여기서 밀집도(Packing ratio, f)는

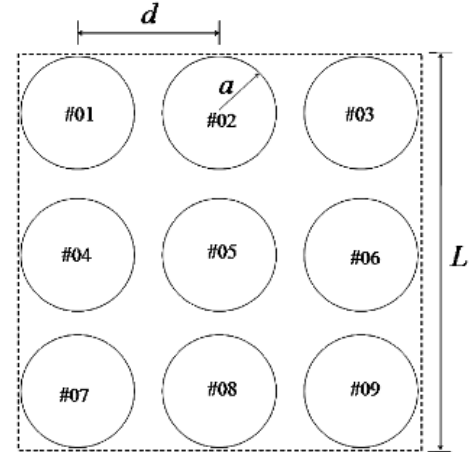


Fig. 1 Schematic diagram of a square compact array system of buoys

Table 1 Main particulars of systems

System ID	L [m]	a [m]	d [m]	Draft (H) [m]	Water depth (h) [m]	Packing ratio (f)
Sys01	12.030	2.000	4.010	4.	30.	0.78
Sys02	14.734	2.000	4.911	4.	30.	0.52
Sys03	20.837	2.000	6.946	4.	30.	0.26
Sys04	12.030	1.633	4.010	4.	30.	0.52
Sys05	12.030	1.155	4.010	4.	30.	0.26

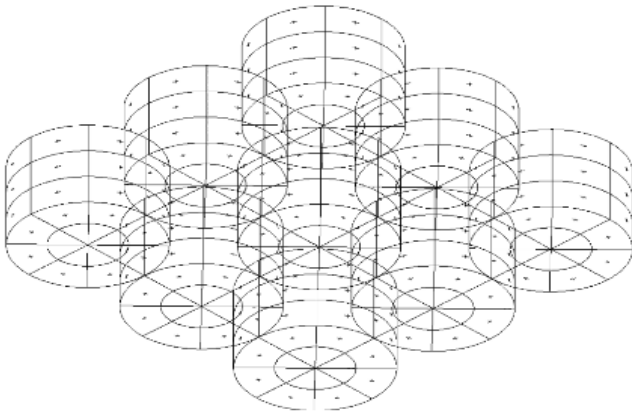


Fig. 2 Higher-order boundary elements of Sys01

시스템의 특성면적(L^2)에 대한 부이시스템의 점유면적의 비율이다.

$$f = 9\pi^2/L^2 \quad (12)$$

Table 1에서 알 수 있듯이 Sys01은 시스템이 가질 수 있는 최고의 밀집도를 가지는 시스템이며 이를 토대로 부이들의 반경을 유

지한 채 시스템의 크기를 증가시켜 밀집도를 줄여나간 시스템이 Sys02와 Sys03이다. 반면 Sys04와 Sys05는 시스템 크기가 Sys01과 동일하나 부이들의 반경을 감소시켜 밀집도를 줄인 것이다.

경계적분방정식의 해를 구하기 위해서 비교적 적은 요소 수로도 정확한 해를 주는 고차경계요소법을 사용하였다(Choi et al., 2001). 경계요소로는 9점 2차 사각형 요소와 6점 2차 삼각형 요소를 사용하였으며 Fig. 2에 Sys01에 대한 접수면 분할 형상을 도시하였다. Fig. 1의 실린더#06에서 실린더#04 방향으로 정면 입사하는 파랑에 대해서만 해석을 수행하였다.

추출기구의 감쇠계수에 따른 추출효율을 산정하기 위하여 다양한 값의 $\tilde{\lambda}_g$ 에 대하여 해석하였다. 이를 위하여 다음과 같은 무차원화 된 감쇠계수(λ_g)를 정의하였다(Garnaud and Mei, 2009).

$$\lambda_g = \frac{\tilde{\lambda}_g}{\rho_w \sqrt{gh} \pi a^2} \quad (13)$$

본 연구에서는 λ_g 가 0.1, 0.5, 1.0, 5.0인 값에 대하여 해석하였다. 이들 값 역시 Garnaud and Mei(2009)가 채택한 값으로 값이 클수록 에너지 추출을 위한 감쇠력이 큰 추출기구임을 의미한다.

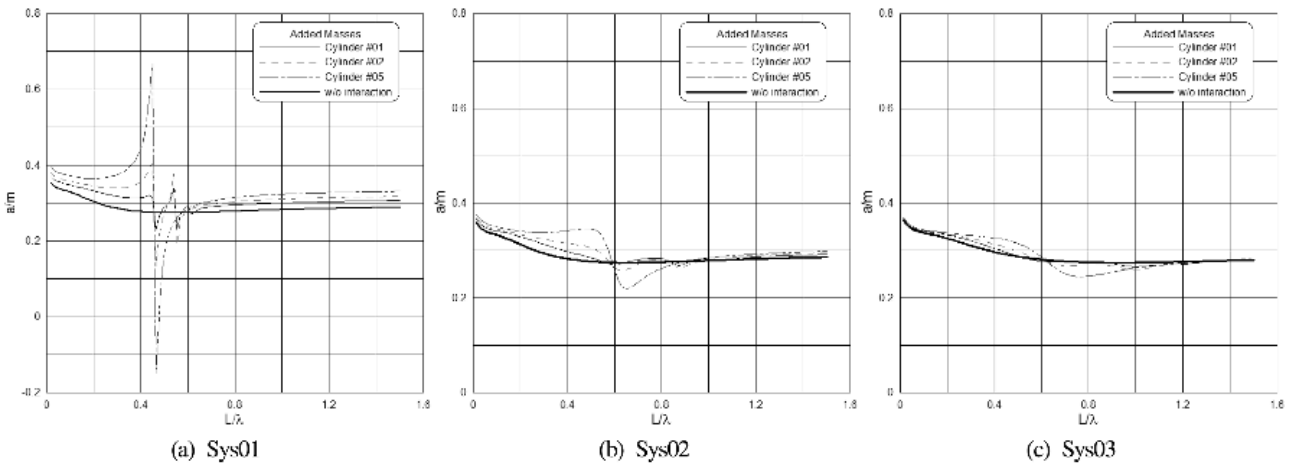


Fig. 3 Added masses of Sys01, Sys02 and Sys03

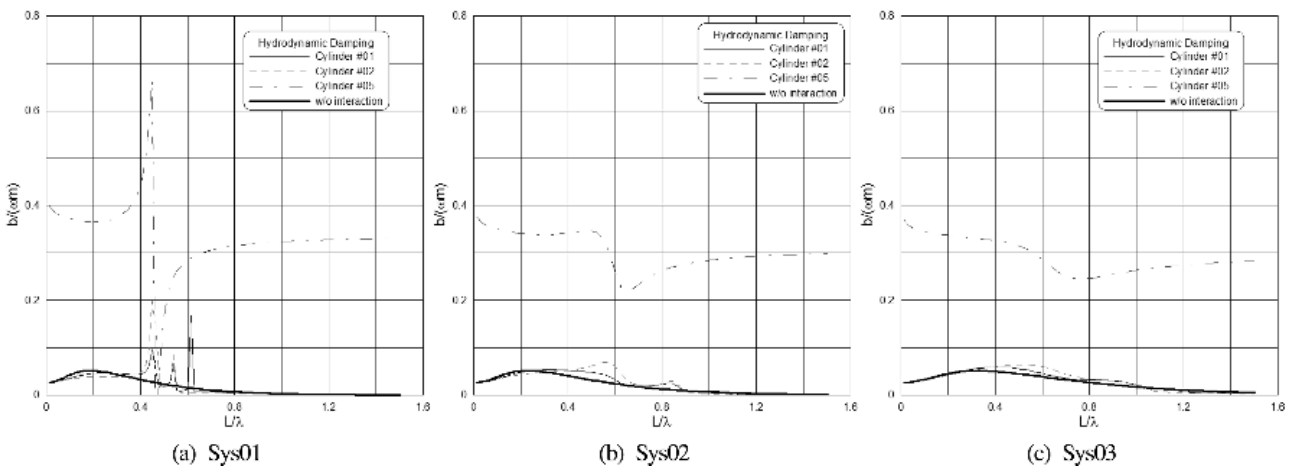


Fig. 4 Wave damping coefficients of Sys01, Sys02 and Sys03

4. 해석결과

Fig. 3과 Fig. 4에 Sys01, Sys02 그리고 Sys03에 대한 각각의 실린더의 질량으로 무차원화된 부가질량(a_{ii})과 파랑감쇠계수(b_{ii})를 도시하였고 유체역학적 상호 간섭을 무시한 경우의 부가질량과 감쇠계수도 함께 도시하였다. 이들 그림에서 횡축은 시스템의 특성길이(L)와 입사파 파장(λ)의 비이다. 그림에서 보듯이 부체간의 거리가 멀어 질수록 간섭효과가 줄어들어 있음을 알 수 있다. 다른 실린더들로 둘러싸인 실린더 #05가 간섭영향을 가장 크게 받고 있다. 그리고 특정 진동수에서 간섭효과들이 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5에 운동응답의 예로써 Sys02의 각각의 실린더 운동응답

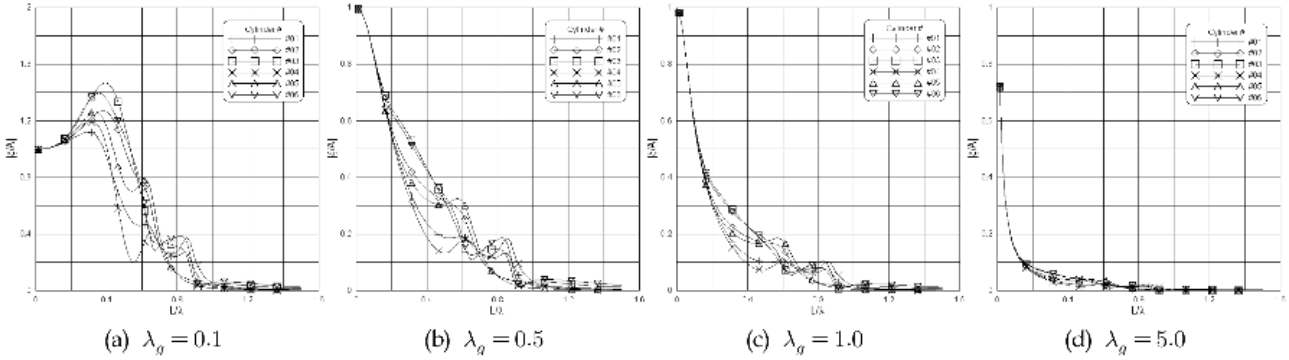


Fig. 5 Motion responses of Sys02

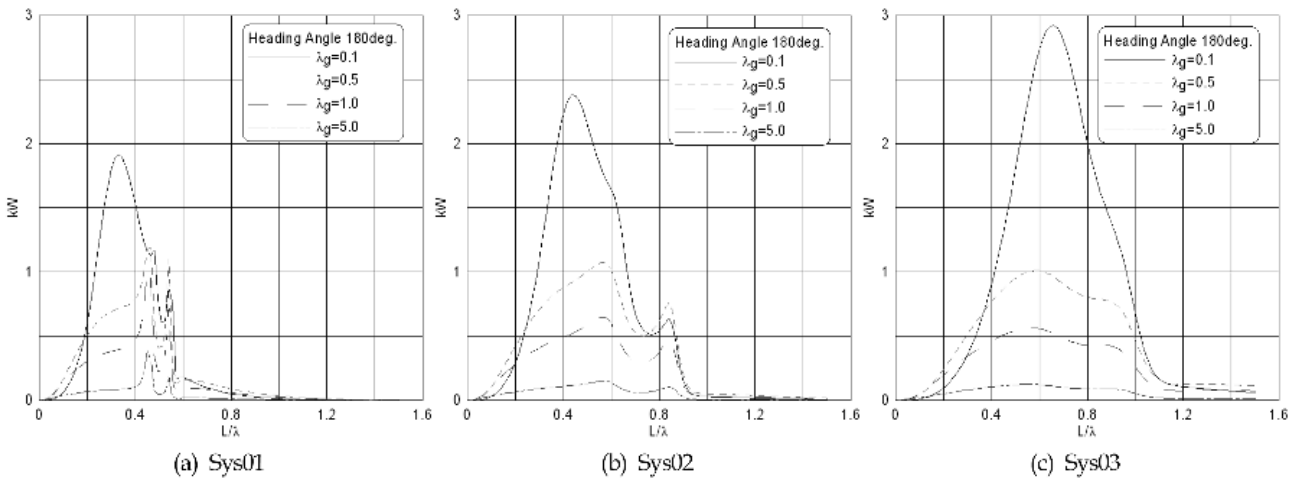


Fig. 6 Efficiencies (kW) of Sys01, Sys02 and Sys03

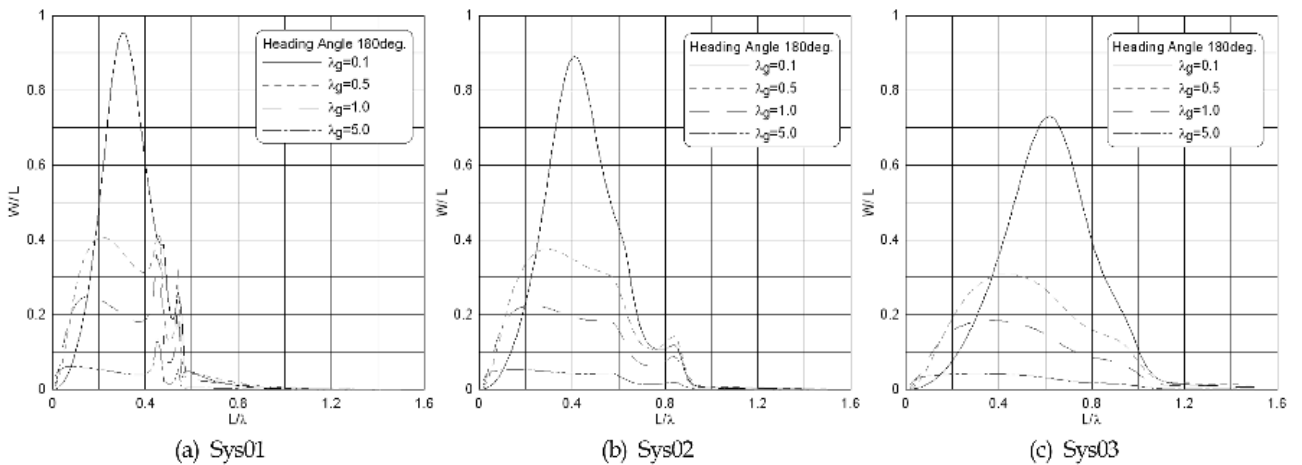


Fig. 7 Efficiencies (W/L) of Sys01, Sys02 and Sys03

을 도시하였다. 대체로 파를 받는 실린더의 운동응답이 큼을 알 수 있다. λ_g 가 증가함에 따라 운동응답이 감소함을 알 수 있으며 L/λ 값이 0.6과 0.85 부근의 작은 봉우리들은 상호 간섭의 영향을 많이 받아 형성된 것이다. $\lambda_g = 0.1$ 의 큰 봉우리 값은 공진 운동에 기인하며 상호 간섭에 의해 공진 진동수가 실린더 별로 약간씩 차이를 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에 Sys01, Sys02, Sys03에 대한 에너지 추출효율을 도시하였다. 그리고 Fig. 8과 Fig. 9에 Sys01, Sys04, Sys05에 대한 추출효율을 도시하였다. 이들 그림에서 kW는 추출에너지 총량과 관계되는 효율이고 W/L 은 가용한 파랑에너지에 대한 추출에너지의 비이다. 단일 부이인 경우 이론적으로는 λ_g 가 공진점에서의 파랑감쇠계수와 동일한 값을 가질 때 최대효율을 가지며 이 때 공진점 부근에서 kW가 최대값 1을 가진다(Newman, 1979). 그러나 다수의 부이로 구성된 시스템은 단일 부이시스템보다 훨씬 많은 에너지를 추출하며 진동수 대역도 상당히 넓음을 알 수 있다. 따라서 큰 단일 부이를 사용하는 것 보다 작은 부이 여러 개를 사용하는 것이 효과적이다.

그림들을 보면 과도한 추출기구 감쇠계수는 추출효율을 저하시키는 것으로 판단되는데 이는 부이의 운동을 과도하게 억제

한 결과이다. 매우 긴 파장영역에서의 적절한 λ_g 값은 0.5로 여겨지며 이는 Garnaud and Mei(2009)의 해석결과와 부합된다. 그러나 파장이 시스템의 길이와 비교될 만한 경우에는 λ_g 가 0.5보다 작은 값이 추출효율을 극대화한다. 이는 Garnaud and Mei(2009)의 해석 결과와 상이한 데, 파장에 대한 단위 부이의 크기가 매우 작다라는 그들의 가정이 이 경우 적용되기 어려운 영역이기 때문이다. 따라서 다양한 크기의 시스템 및 단위 부이에 대한 해석을 위해서는 본 연구에서 제시하는 직접해석법이 유용하게 사용되리라 생각된다. 실제적인 설계의 관점에서는 시스템에 입사하는 파랑스펙트럼의 주기를 분석하여 최적의 추출기구를 설계할 필요가 있다. 더 나아가서 입사파의 주기를 예측하여 추출기구의 감쇠계수를 능동적으로 조절하는 방식을 사용하면 입사파의 주기변화에 따른 추출효율을 극대화 할 수 있으리라 사료된다. 그림들에서 보여지는 가장 큰 봉우리 다음의 급격한 피크치들은 부이들의 유체역학적 상호 간섭에 기인하며 부이들 간의 상대적 거리가 멀어질수록 그 영향이 감소함을 확인할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 부이의 크기를 동일하게 하고 시스템의 크기를 증가시킬 경우 유체역학적 상호 간섭이 감소하여 kW가

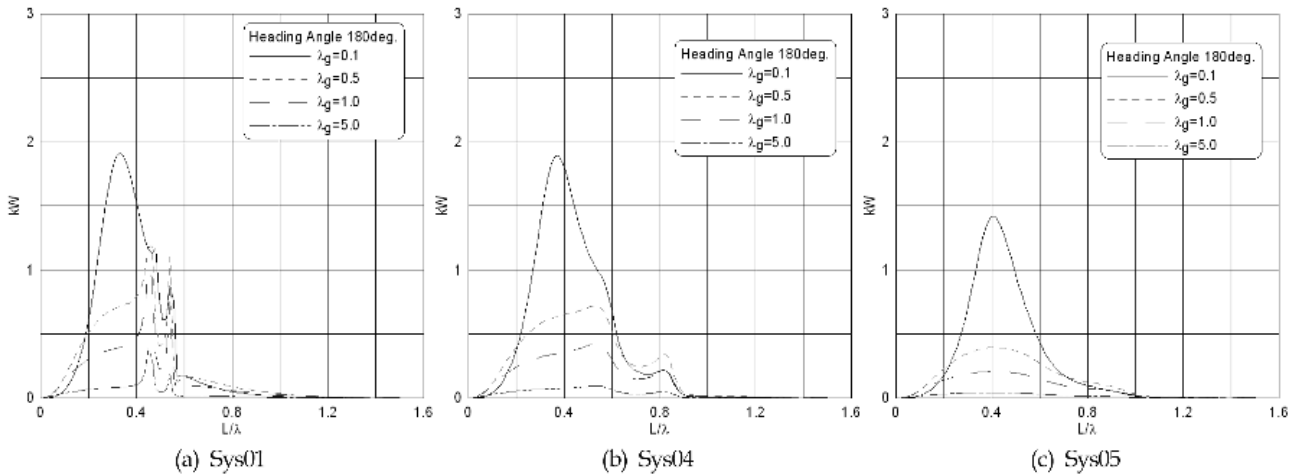


Fig. 8 Efficiencies (kW) of Sys01, Sys04 and Sys05

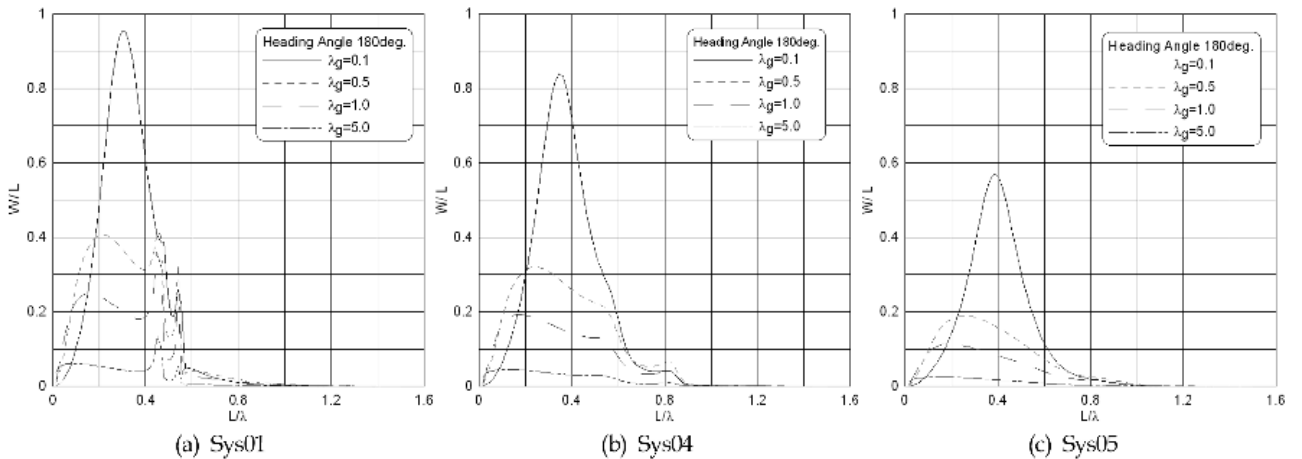


Fig. 9 Efficiencies (W/L) of Sys01, Sys04 and Sys05

증가함을 할 수 있다. 그러나 이 경우 부이시스템을 구성하기 위한 전제구조물이 커져야하는 단점이 있고 시스템 설치를 위한 공간도 증가하며 W/L 은 감소한다.

Fig. 8과 Fig. 9는 시스템의 크기를 동일하게 하고 부이의 반경을 감소시킨 경우인데 밀집도가 클수록 kW와 W/L 이 증가한다. 이는 각각의 부이가 추출할 수 있는 에너지량이 부이의 단면적이 증가할수록 커지기 때문이다. 따라서 시스템의 크기가 결정되면 밀집도를 증가시키는 것이 효율상 유리하다. 그러나 밀집도 증가를 위한 단위 부이의 제작비용 증가와 유지보수 비용을 고려하여 비용 대 효율의 관점에서 실제 설계가 수행되어야 한다.

5. 결 론

고차경계요소법과 일반화 모드법을 사용하여 정사각형의 밀집 배열 원형 부이 시스템의 파랑에너지 추출효율을 추정하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

다수의 부이를 이용하는 것이 큰 단일 부이를 사용하는 것보다 더 많은 에너지를 추출할 수 있다. 시스템의 최적 크기를 결정하기 위해서는 입사파 파랑 스펙트럼을 분석하여 설계하여야 하며 추출기구의 감쇠계수 λ_d 는 입사파의 파장에 따라 0.1~0.5 사이의 값이 적절하다. 시스템의 크기가 결정되면 밀집도를 증가시키는 것이 효율 상 유리하다.

이상의 결과를 실제적인 설계에 적용하기 위해서는 대상해역의 파랑스펙트럼 분석을 통한 시스템 및 단위 부이의 크기 그리고 부이의 배열 형태에 따른 민감도 해석 뿐만 아니라 다수 부이 및 이들을 통합하는 시스템의 제작 및 설치 비용에 대한 고려도 필요하리라 생각된다. 만약 시스템이 투입될 해역이 주어지고 시스템의 크기가 어느 정도 결정되면 본 해석법을 이용하여 최적의 효율을 가지는 단위 부이의 크기 및 배열 방법을 특정 지을 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 지원사업인 세계수준의 연구중심

대학(WCU) 육성사업의 지원(R33-10098)을 받아 수행된 결과이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 최윤락, 여환태 (2009). "부유식 가두리 양식장의 파랑중 유탄성 응답 해석", 한국해양공학회지, 제23권, 제6호, pp 7-11.
- Choi, Y.R., Hong, S.Y. and Choi, H.S. (2001). "An Analysis of Second-Order Wave Forces on Floating Bodies by Using a Higher-Order Boundary Element Method", Ocean Engineering, Vol 28, No 1, pp 117-138.
- Falnes, J. (2002). Ocean Waves and Oscillating Systems, Cambridge University Press.
- Garnaud, X. and Mei, C.C. (2009). "Wave-Power Extraction by a Compact Array of Buoys", J. Fluid Mechanics, Vol 635, pp 389-413.
- Hong, S.Y., Kim, J.H., Cho, S.K., Choi, Y.R. and Kim, Y.S. (2005). "Numerical and Experimental Study on Hydrodynamic Interaction of Side-by-Side Moored Multiple Vessels", Ocean Engineering, Vol 32, No 7, pp 783-801.
- Newman, J.N. (1979). "Absorption of Wave Energy by Elongated Bodies", Appl. Ocean Res., Vol 1, No 4, pp 13-20.
- Newman, J.N. (1994). "Wave Effects on Deformable Bodies", Appl. Ocean Res., Vol 16, No 1, pp 47-59.

2010년 6월 10일 원고 접수

2011년 1월 25일 심사 완료

2011년 1월 27일 게재 확정