

다중공진 파력발전체의 수로 공진부 길이와 입구 깊이별 공진 효율 분석 Analysis of Resonance Efficiency According to Length and Entrance Depth of Channel Resonance Part of Multi-Resonance Wave Energy Converter

안석진* · 이창훈** · 정현철*** · 최혁진****

Sukjin Ahn*, Changhoon Lee**, Hyen-cheol Jung*** and Hyukjin Choi****

요 지 : 다중공진 파력발전체는 파랑의 공진현상을 복합적으로 이용하여 실패역의 평상과 내습시에도 파랑을 증폭시켜 효율적인 발전이 가능하다. 공진에 의해 파랑이 증폭될수록 다중공진 파력발전체의 발전 효율이 증가하며, 발전 효율이 최대가 될 수 있도록 공진부의 형상 최적화가 필요하다. 다중공진 파력 발전체는 항만 공진부와 수로 공진부에서 파랑을 증폭시키며, 본 연구에서는 수로 공진부의 길이, 위치 등 다양한 조건에서 CFD 수치실험을 수행하여 조건 별 상관성을 분석하고 수로 공진부의 최적 형상을 도출하였다.

핵심용어 : 다중공진, 파력발전체, 공진효율, 수로공진, 최적형상

Abstract : Multi-resonance wave energy converter can generate efficient power generation by complexly utilizing the resonance phenomenon of waves even when waves propagate normally. As the wave is amplified by resonance, the power generation efficiency of the multi-resonance wave energy converter increases, and the shape of the resonance part needs to be optimized to maximize power generation efficiency. The multi-resonance wave energy converter amplifies waves in the seiche resonance part and the channel resonance part. In this study, CFD numerical experiments were performed under various conditions such as the length and location of the channel resonance part to analyze the sensitivity for each condition and derive the optimal shape of the channel resonance part.

Keywords : multi-resonance, wave energy converter, resonance efficiency, channel resonance, optimal shape

1. 서 론

최근 전 세계적으로 기후변화에 대응하기 위해 화석연료의 사용을 제한하고 있으며, 에너지 수요는 증가하는 데 반해 국가별로 화석연료를 이용한 발전량을 줄이는 목표를 가지고 있어 전력수급 불안 문제가 발생하고 있다. 특히 국가적으로 원전에 대한 의존도를 낮추고 있으며, 해상풍력, 태양광 등 친환경 에너지 개발을 통해 국가 에너지 안보 강화 및 신산업 창출을 위한 노력이 지속적으로 추진되고 있다. 2019년 기준 전 세계 발전량 중 재생에너지가 차지하는 비중이 26.6%임에 반해 국내는 5%에 불과하다. 국내에서는 제5차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(Ministry of Trade, Industry and Resources, 2020)을 통해 신재생에너지 확대 장기목표를 제시하고 정책적인 노력을 집중하고 있다.

신재생에너지 중 환경에 부하가 적은 재생에너지를 개발하기 위한 각국의 관심이 높아지고 있으며, 신재생에너지 중에서 해양에너지는 친환경적이면서 무한에 가까운 잠재 발전량을 가지고 있는 장점이 있다. 삼면이 바다인 우리나라는 해역별로 조력, 조류, 파력 등 풍부한 해양에너지를 보유하고 있다. 특히 파력에너지는 높은 잠재 발전량을 가지고 있으면서도 단위 면적당 에너지 밀도가 큰 에너지원이다(Kim et al., 2014). 파력발전은 파랑의 운동 및 위치에너지를 이용하여 터빈을 구동하거나 기계장치의 운동으로 변환하여 전기를 생산하는 기술이며, 일반적으로 파고가 높고 파랑의 주기가 긴 해역이 적지로 알려져 있다.

파력발전 방식은 작동 원리에 따라 가동물체형, 진동수주형, 월파형으로 구분할 수 있으며, 설치 형태에 따라 착저식과 부유식으로 구분할 수 있다. 가동물체형은 수면의 움직임

*(주)해안해양기술 이사(Senior Engineer, Coast and Ocean Technology Research Institute)

**세종대학교 건설환경공학과 교수(Corresponding author: Changhoon Lee, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05006, Korea, Tel: +82-2-3408-3294, Fax: +82-2-3408-4332, clee@sejong.ac.kr)

*** (주)해안해양기술 대리(Assistant Manager, Coast and Ocean Technology Research Institute)

**** (주)해안해양기술 대표(Chief Executive Officer, Coast and Ocean Technology Research Institute)

에 따라 민감하게 반응하도록 고안된 여러 형태의 기구를 사용하여 파랑에너지를 물체에 직접 전달하고, 이때 발생한 물체의 움직임을 전기에너지로 변환하는 방식으로 파력발전의 가장 오래된 형태이다. 가동물체형 파력발전은 파랑에너지를 직접 흡수하므로 에너지 변환효율이 높으나 파랑에 견뎌야 하므로 구조적 안전성에 취약한 단점이 있다. 진동수주형 파력발전은 파랑에너지를 공기의 유동으로 변환하고, 공기의 유동 중에 터빈을 설치하여 전기를 얻는 파력발전 방식이다. 전면 유수실에서 공진현상을 유도하여 에너지를 증폭시킬 수 있는 장점이 있지만, 공기 흐름이 일정하지 않고 폭풍 등 고파 내습 시 발전이 어려우며, 공기 흐름으로 터빈을 작동시킬 때 에너지 손실이 커서 발전효율이 낮은 단점이 있다. 월파형 파력발전은 파랑의 전면에서 사면을 두어 월파시키고 후면에 저수하여 저수부와 외해의 수위 차를 이용한 발전 방식이다. 안전성이 우수하고 효율성은 중간수준으로 알려져 있지만, 파랑이 월파하는 조건에서만 에너지 취득이 가능한 제약이 있다.

상대적으로 파고가 높은 외해에 파력발전체를 설치하는 경우, 발전량은 증가할 수 있으나, 시설 유지보수 및 전력공급 측면에서 비효율적이다. 시설 관리에 유리한 연안에서는 파고가 감소하여 발전량이 떨어지는 문제가 있다. 또한 파랑에너지의 변동성은 파력발전 기술이 직면한 문제 중 하나이며, 파력발전의 실용화를 위해서는 발생 전력의 평활화가 필요하다. 월파형 파력발전 장치에서 월파랑이 충분하여 수위차를 지속적으로 발생시킬 수 있다면 발생 전력의 변동성 문제를 해결할 수 있으나, 파고가 작을 때 월파가 발생하지 않는 문제가 있다. 교육부(Ministry of Education, 2014)는 항만 공진 및 수로 공진현상을 복합적으로 이용한 다중공진 파력발전체에 대한 기초연구를 수행하였으며, 특허등록(복합공진을 이용한 파력발전 시스템, 10-1879483)을 통해 핵심기술을 확보한 바 있다. 당시 연구는 이상적인 조건에서 수리 및 수치실험을 통해 파랑의 항만 공진 공진 및 수로 공진이 복합적으로 발생하여 파력발전 효율이 증가할 수 있는 가능성을 확인하였으나, 기간 및 예산 등의 문제로 다양한 경우의 실험이 수행되지 못하였고, 발전량은 이론식을 이용하여 산정하였다.

다중공진 파력발전체는 1차 공진이 일어나는 항만 공진부와 2차 공진이 발생하게 되는 수로 공진부를 통해 파고가 작은 경우에도 파랑이 크게 증폭되며, 수로를 월류하는 수체는 저수부의 수위를 지속적으로 증가시켜 높은 발전효율을 유지하면서 기존 파력발전의 단점인 변동성의 제어가 가능하다.

본 연구에서는 조차가 크지 않은 동해안의 동해신항 방파제 설치 위치를 다중공진 파력발전체 설치 예비적으로 선정하였으며, 동해신항 인근의 해상조건을 고려하여 파력발전 구조물 설치를 가정하였다. 공개 프로그램인 OpenFoam(Open source Field Operation and Manipulation) 모델을 이용하여 다중공진 파력발전체의 파랑 증폭 현상을 확인

하고 수로 공진부 길이 및 위치별 상세 유동 해석을 수행하여 수로 공진부 형상별 발전효율을 검토하였다. 향후 수리모형 실험과 비교하여 파력발전체 발전량 예측 재현성을 확인할 예정이며, 실험역 발전체 설계에 기여할 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 입사파 제원

다중공진 파력발전 시스템은 조차가 작고 내습파랑이 상대적으로 큰 동해안에 설치하는 것이 유리한 것으로 판단되며, 우리나라 동해안 해상구조물 중 케이스 형식인 동해신항 방파제 설치 위치가 시스템 설치 최적지로 판단된다. “전국파랑 관측자료 제공시스템(WINK)”에서는 파랑 관측자료와 함께 520개 격자점에서 1979~2021년(43년간) 장기파랑 후측자료를 제공하고 있으며, 다중공진 파력발전체의 공진 효율 분석을 위한 입력자료 산정을 위해 Fig. 1에 도시한 동해신항 인근의 139-3 격자점의 파랑 후측 자료를 통계분석하여 파고-주기 별 및 파고-파향 별 통계분석 결과를 Table 1 및 Table 2에 제시하였다.

동해신항 인근 해역의 파랑은 NNE~SE 계열 파랑이 70% 이상이다. 대체로 NE 계열 파랑이 내습하며, 하계에는 태풍 등의 영향으로 SE 계열 파랑이 내습한다. 유의파고 1.5 m 이하가 84.4%로 대부분이며, 침두주기 7 s 이하가 88.1%이다. 가장 많이 나타난 침두주기는 4~5 s이다.

다중공진 파력발전체는 파랑의 침두주기에 따라 공진이 발생하는 구조물의 길이가 달라지기 때문에 평상시 파랑을 대상으로 하는 가장 빈번하게 나타나는 파랑을 대상으로 구조물의 제원을 설정하는 것이 효과적이다. 통계분석 결과를 고려하여 실험에 이용할 파랑 제원으로 파고 1.0 m, 주기 5 s

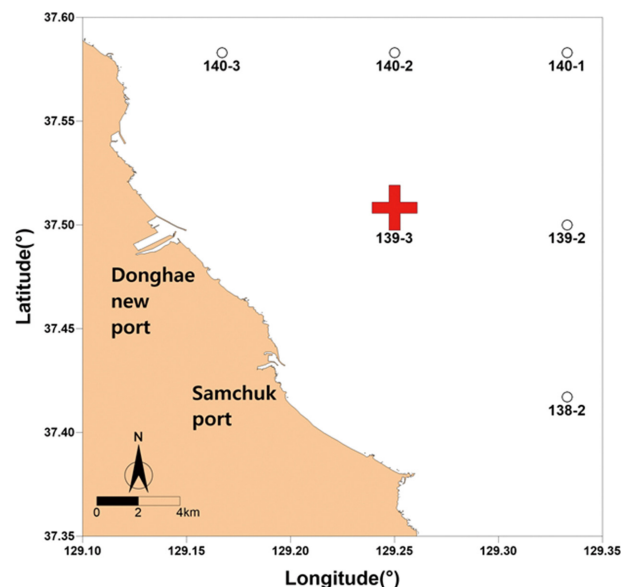


Fig. 1. Location of measured wave data point near Donghae New Port.

Table 1. Frequency of measured wave height - wave period data near Donghae New Port

Period (s)	Wave height (m)								Total	Frequency (%)
	0.0~0.5	0.5~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~		
0~3	1,968	1,326	154	-	41	273	427	967	22,656	6.0
3~4	45,290	11,649	13,810	4,576	1,060	-	-	-	76,385	20.3
4~5	29,818	14,826	20,073	13,797	14,006	1,018	15	-	93,553	24.8
5~6	4,935	8,451	21,200	14,505	23,964	8,724	1,072	60	82,911	22.0
6~7	262	912	6,671	10,398	18,674	12,510	5,889	1,291	56,607	15.0
7~8	43	87	789	2,656	10,509	6,634	4,338	3,135	28,191	7.5
8~9	5	4	71	295	3,016	3,647	2,417	2,454	11,909	3.2
9~10	-	-	6	36	446	1,401	1,174	1,660	4,723	1.3
Total	99,821	37,255	62,774	46,263	71,716	34,207	15,332	9,567	376,935	100
Frequency (%)	26.5	9.9	16.7	12.3	19.0	9.1	4.1	2.5	100	-

Table 2. Frequency of measured wave height - wave direction data near Donghae New Port

Direction	Wave height (m)								Total	Frequency (%)
	0.0~0.5	0.5~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~		
N	7,371	3,299	6,523	5,827	10,542	6,218	2,802	1,449	44,031	11.7
NNE	7,031	3,862	8,263	7,777	14,751	7,755	3,780	2,941	56,160	14.9
NE	9,065	5,100	10,954	9,497	14,673	6,505	3,067	2,412	61,273	16.3
ENE	12,104	5,463	9,388	5,679	6,518	2,108	956	537	42,753	11.3
E	13,680	4,733	6,062	3,530	3,188	842	235	164	32,434	8.6
ESE	16,804	4,407	5,438	2,462	2,128	532	144	106	32,021	8.5
SE	19,278	5,094	6,787	3,554	3,418	739	250	174	39,294	10.4
SSE	3,037	662	648	249	186	33	16	-	4,831	1.3
S	882	179	212	83	89	19	5	2	1,471	0.4
SSW	576	147	169	89	79	18	5	1	1,084	0.3
SW	515	120	199	107	107	43	4	3	1,098	0.3
WSW	735	221	369	223	234	63	26	10	1,881	0.5
W	1,257	558	882	678	937	275	76	7	4,670	1.2
WNW	1,395	642	1,038	776	1,400	532	136	61	5,980	1.6
NW	1,832	773	1,597	1,312	2,539	1,184	565	354	10,156	2.7
NNW	4,259	1,995	4,245	4,420	10,927	7,341	3,265	1,346	37,798	10.0
Total	99,821	37,255	62,774	46,263	71,716	34,207	15,332	9,567	376,935	100
Frequency (%)	26.5	9.9	16.7	12.3	19.0	9.1	4.1	2.5	100	-

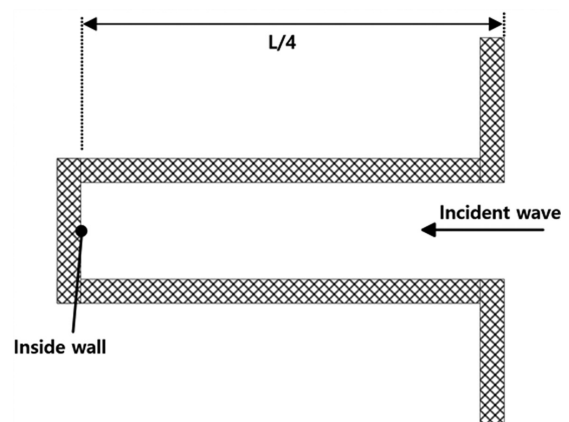
로 결정하였다.

2.2 항만 공진 이론

항만 형태의 지형은 입사하는 파랑의 주기가 고유주기와 일치하는 경우, 항 내에서 공진에 의해 파랑이 진폭이 증폭한다. 항만 공진이 발생하는 경우 항 내 벽에서 파랑의 진폭은 입사파의 진폭에 비해 2배 이상 증폭하며, 항만의 폭이 좁을수록 10배 이상 증폭하기도 한다(Raichlen, 1966). 좁고 긴 직사각형 만 형태의 구조물 내측에서 입사파와 반사파의 합성과 수면변위를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = \eta_i + \eta_r = ae^{i(\omega t + kx)} + ae^{i(\omega t - kx)} = 2a \cos(kx) \cos(\omega t) \quad (1)$$

$x = 0$ (즉, 항 내 벽면)에서 북(anti-node)이 되고, 항만의 입구에 서 마디(node)가 되는 경우 파랑에너지가 증폭하는 공진이 발생한다. $\cos(kx) = 0$ 이 되는 경우는 $x = L/4, 3L/4, 5L/4, \dots$ 이다.

**Fig. 2.** Schematic diagram of seiching.

최대 증폭이 발생하는 경우는 $x = L/4$ 이다. 즉, 항만의 길이가 파장의 1/4일 때 최대로 공진이 발생한다(Fig. 2 참조).

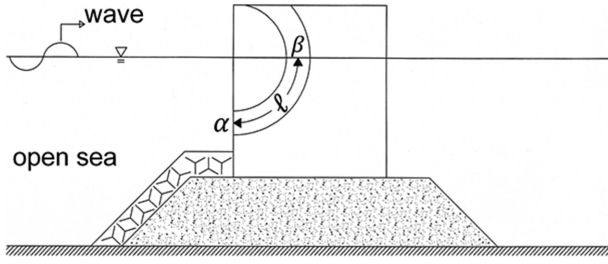


Fig. 3. Schematic diagram of breakwater cross-section.

2.3 수로 공진 이론

Lee and Lee(2003)는 항 내 오염원의 항 외 배출을 위해 방파제를 관통하는 수로를 이용한 해수교환방파제를 개발하였다. 파랑의 전파로 유체가 수로에 유입되면 위아래로 요동치는데 수로의 고유주기가 파랑의 입사 주기와 같을 때 수로 내 수면 상승과 항 내측으로 유입량이 최대가 되어 해수 교환 효과를 증가시킬 수 있다. 수로 내 고유주기를 수로 입구(α 지점)부터 수로 내 평균해수면(β 지점)까지 다음과 같이 Euler 식을 적분하여 구할 수 있다(Fig. 3 참조).

$$-\frac{P_a}{\rho} + g(\eta - z_a) + \frac{1}{2}(v_\beta^2 - v_a^2) + \int_a^\beta \frac{\partial v}{\partial t} ds = 0 \quad (2)$$

위 식에서 세 번째 항인 운동에너지는 비선형 항으로서 그 크기가 다른 항에 비해서 작고, 마지막 항을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_a^\beta \frac{\partial v}{\partial t} ds \approx \frac{\partial v_\beta}{\partial t} \int_a^\beta \frac{A_\beta}{A} ds \approx \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \int_a^\beta \frac{A_\beta}{A} ds \quad (3)$$

식(3)을 유도할 때 연속방정식 $Q = Av$ 를 사용하였다. 식(2)로부터 수로 입구에서의 압력(p_a)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_a = \rho g(\eta - z_a) + \rho \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \int_a^\beta \frac{A_\beta}{A} ds \quad (4)$$

수로 입구의 압력 p_a 와 수로 내의 수면변위 η 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = |\eta| \cos(\omega t + \epsilon_\eta), p_a = -\rho g z_a + |p_d| \cos(\omega t + \epsilon_p) \quad (5)$$

위 식에서 p_d 는 동수압이다. 식(5)를 식(4)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$|\eta| \cos(\omega t + \epsilon_\eta) = \frac{|p_d| \cos(\omega t + \epsilon_p)}{\rho g (1 - \frac{\omega^2}{g} \int_a^\beta \frac{A_\beta}{A} ds)} \quad (6)$$

주어진 압력에 수면의 진폭이 무한히 증폭되는 경우 공진이 발생하고 공진 주기는 다음과 같다.

$$T_r = 2\pi \sqrt{\frac{\int_a^\beta \frac{A_\beta}{A} ds}{g}} \quad (7)$$

수로의 단면적이 일정한 경우 식(6)은 다음과 같다.

$$T_r = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (8)$$

수로의 공진주기가 입사파랑과 동일하면 파랑의 공진이 나타나는 수로의 길이를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l = g \left(\frac{T_r}{2\pi} \right)^2 \quad (9)$$

2.4 복합공진 이론 적용

본 논문에서 개발하려고 하는 다중공진 파력발전체는 항만 형태 지형에서의 파랑에너지 증폭(항만 공진)과 수로에서의 파랑에너지 증폭(수로 공진)을 복합적으로 이용하여 파고가 작은 평상시에도 파랑에너지를 증폭시켜 상시 발전을 목표로 한다. 발전효율을 극대화하기 위해서는 항만 공진 및 수로 공진의 극대화가 필요하며, 과거 수로 공진과 관련된 Lee and Lee(2003)의 연구내용과 항만 공진과 관련된 Raichlen(1966)의 연구 결과를 참조하여 각 공진 현상이 극대화되는 조건을 실험에 이용하였다.

3. 사용 모델

본 연구에서 이용한 수치해석모델 olaFlow는 비혼합·비압축성 혼상 유체(액체 및 기체)의 해석을 위하여 식(10)의 연속방정식과 식(11)의 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 유한체적법에 기초하여 이산화한다.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{\phi} \rho \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle \right] = -\frac{\partial \langle p^* \rangle}{\partial x_i} + \phi g_j X_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right] - [CT] \quad (11)$$

여기서, x_i 는 공간좌표, ρ 는 밀도, u_i 는 속도벡터, p^* 는 Pseudo-dynamic 압력, X_j 는 위치벡터, ϕ 는 공극률, μ_{eff} 는 $\mu + \rho \nu_{urb}$ 이며, ν_{urb} 는 난류 동점성계수임. [CT]는 closure term으로 Engelund 상수를 사용하면 다음의 식(12)와 (13)으로 주어진다.

$$[CT] = A \langle u_i \rangle + B |\langle u \rangle| \langle u_i \rangle + C \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} \quad (12)$$

$$\begin{cases} A = \alpha \frac{(1-\phi)^3}{\phi^2} \frac{\mu}{D_{50}} \\ B = \beta (1 + \frac{7.5}{KC}) \frac{1-\phi}{\phi^2} \frac{\rho}{D_{50}} \\ C = 0.34 \end{cases} \quad (13)$$

여기서, α, β 는 Engelund(1953) 계수이며, D_{50} 은 유효입경, KC 는 Keulegan-Carpenter 수로 $T_0 u_M / r D_{50} \phi$ 를 나타내며, T_0 은 진

동의 주기, u_M 은 최대진동속도이다.

액체와 기체의 경계면은 계산격자 내에서 유체가 점유하는 체적 F 를 이용하는 VOF(Volume Of Fluid) 법을 적용하며, VOF 법에서는 액체 셀의 경우 $F = 1$, 기체 셀의 경우 $F = 0$, 그리고 액체와 기체를 모두 포함하고 있는 경계 셀의 경우는 $0 < F < 1$ 의 값을 갖는다. VOF 함수 F 는 식(14)의 이류방정식에 의해 계산된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \langle u_i \rangle F}{\partial x_i} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \langle u_{ic} \rangle F(1-F)}{\partial x_i} = 0 \quad (14)$$

여기서, u_{ic} 는 인공 압축항으로 $|u_{ic}| = \min[c_\alpha |u_i|, \max(|u_i|)]$ 과 같이 주어진다. 또한, 각각의 계산 셀에서 유체의 밀도와 점성계수는 VOF 함수를 가중치로 적용하여 다음과 같이 산정한다.

$$\rho = \rho_{water} F + \rho_{air} (1 - F) \quad (15)$$

$$\mu = \mu_{water} F + \mu_{air} (1 - F) \quad (16)$$

모델의 조파 경계에서 반사되는 파랑을 적절히 제어하지 못해 입사하는 파랑에 영향을 미치는 경우 계산 결과가 크게 왜곡되는 결과가 초래될 수 있다. 조파 경계에서 반사파를 제어하는 방법은 크게 수동 파랑에너지 흡수법(passive wave absorption)과 능동 파랑에너지 흡수법(active wave absorption)으로 구분할 수 있다. 다공성 물질이나 다공성 판, 인공해빈, 에너지 소산성 해빈 등이 수동 파랑에너지 흡수법을 활용한 사례이며, 최근 relaxation zone이라는 개념이 Jacobsen et al.(2012)에 의해 제시되었다. 그러나 이 방식은 파랑의 감쇠 과정에서 평균해수면의 상승을 유발할 수 있으며(Mendez et al., 2001), 감쇠 영역을 설정하기 위해 추가적인 계산이 필요하다는 단점을 가지고 있다(Wei and Kirby, 1995). 능동 파랑에너지 흡수법은 원래 수리모형실험의 조파판에서 반사파를

제어하기 위한 수단으로 개발된 방식이다. 그 원리는 조파판에서 측정된 반사파의 파고에 기초하여 다음 단계에서 조파하고자 하는 목표 파고를 조파할 수 있도록 조파 피스톤의 움직임을 제어하는 것이다. 이 방식은 수치모형실험의 조파 경계에 그대로 적용되어 반사파를 제어할 수 있다. 본 연구에서 능동 파랑에너지 흡수법을 사용하였다.

4. 수치해석

4.1 계산조건

파랑의 공진현상을 이용하는 다중공진 파력발전체는 입사 파랑이 결정되면 항만 공진부 및 수로 길이 등 구조물 제원을 결정할 수 있다. 다중공진 파력발전체 설치를 가정한 동해실험 방파제 위치의 수심은 19 m이고, 실험을 수행할 대상 파랑 제원은 파고 1.0 m, 주기 5.0 s이며, 파랑의 파장은 38.87 m이다. 파랑의 공진을 유도할 수 있는 항만 공진부의 길이(L_b)는 파장의 1/4인 9.72 m이며, 공진수로의 고유주기가 5 s가 되는 수로의 길이(L_c)는 식(8)로부터 6.21 m이다. 접근 수로의 폭(B)는 1.0 m이며, 항만 공진부 및 수로 공진부 폭을 0.2 m로 설정하였다. 공진수로의 형태는 직선부와 경사부로 구성되며, 경사부의 수평면과의 각도를 45°로 설정하였다. 공진 수로 입구의 깊이(h_c)와 공진 수로의 길이(L_c), 저수조 여유고(h_r)에 따라 수로 공진부 전체 길이가 결정된다. 항만 공진부와 수로 공진부에서 증폭되어 월류된 수체는 저수부의 수위를 높여 저수부와 저수부 바깥의 수위차로 유체의 흐름이 발생하여 수중 터빈이 작동한다. 저수부의 길이(L_r)가 긴 경우, 저수부 체적이 증가하여 수위 상승 속도는 작지만 수중 터빈을 작동시키며 배출되는 유량에 따라 저수부의 수위 변화가 작아서 안정적인 발전이 가능하다. 반면 저수부의 길이가 짧은 경우 저수부 수위 상승 속도는 크지만 배출 유량에

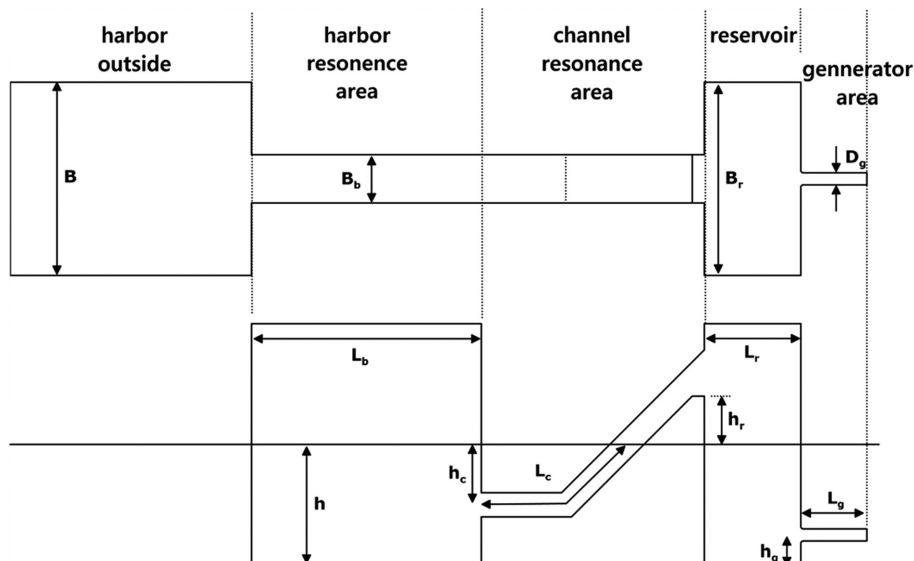


Fig. 4. Schematic diagram of multi-resonance wave energy converter.

따라 저수부의 수위 변화가 크고 발전량의 변동성이 커질 것으로 판단된다. 저수조 여유고(h_r)의 경우 다수의 해석 결과를 바탕으로 최적 여유고를 결정해야 하는 것으로 판단되며, 본 연구에서는 입사파고의 2배인 2 m로 설정하였다. 저수부의 길이(L_r)는 5 m, 발전부의 길이(L_g)는 3 m로 설정하였다.

다중공진 파력발전체의 수로 공진부 형상 및 위치에 따른 통과 유량과의 상관성 분석을 위해 공진수로 길이(L_c)와 입구 깊이(h_c) 변화에 따른 수치실험을 수행하였다. 수로 길이 및 입구 깊이에 따라 수평 수로와 경사 수로의 길이가 변하며, 수로 길이와 입구 깊이가 짧은 실험의 경우 수평 수로가 없는 경우도 존재한다. 각 조건 별로 발전부를 통과하는 유량을 비교·분석하였다.

4.2 경계조건 및 계산영역

개방경계 중 x-min 경계에는 조파경계를 설정하였고, x-max 경계에는 반사가 발생하지 않도록 방사 경계를 설정하였다. 측면 경계조건(y-min, y-max)으로 불투과 조건을 설정하였으며, z-min은 불투과 조건, z-max는 대기압 조건을 설정하였다.

다중공진 파력 발전체의 상관성 분석을 위한 계산영역은 x축 방향으로 100 m, y 축 방향으로 10 m, z 축 방향으로 35 m로 설정하였으며, 격자간격은 x 축 방향으로 0.2~2.5 m 가변 격자, y 축 방향으로 0.2 m 등간 격자, z 축 방향으로 0.1 m 등간격자로 구성하였다. 수치모델의 해석영역과 수로 부근의 격자망도를 Fig. 5 및 Fig. 6에 도시하였다.

4.3 다중공진 파력발전 기본원리

다중공진 파력발전체는 항만 공진부, 수로 공진부, 저수부, 발전부로 구분할 수 있다(Fig. 4 참조). 항만 공진부와 수로 공진부에서 평상시 파고와 주기가 작은 파랑을 증폭시켜 수로 공진부 하류에 위치한 저수조로 수체의 월류가 극대화 된다. 파랑이 전파하여 구조물에 도달하면 항만 공진부에서 1차 증폭이 발생하고, 수로 공진부에서 2차 증폭이 발생한다. 파랑에너지의 증폭으로 인해 완전반사 조건에서도 수체가 도달할 수 없었던 높이까지 쳐오름이 발생하여 저수조로 월류된다. 초기 수면에서 수로 출구 하단까지의 거리가 저수부 여유고이며, 저수부로 월류가 충분히 발생하면 저수부의 수위가 상승하여 수로 출구 하단까지 수위가 상승하고 유지된



Fig. 5. Computational domain of numerical simulation.

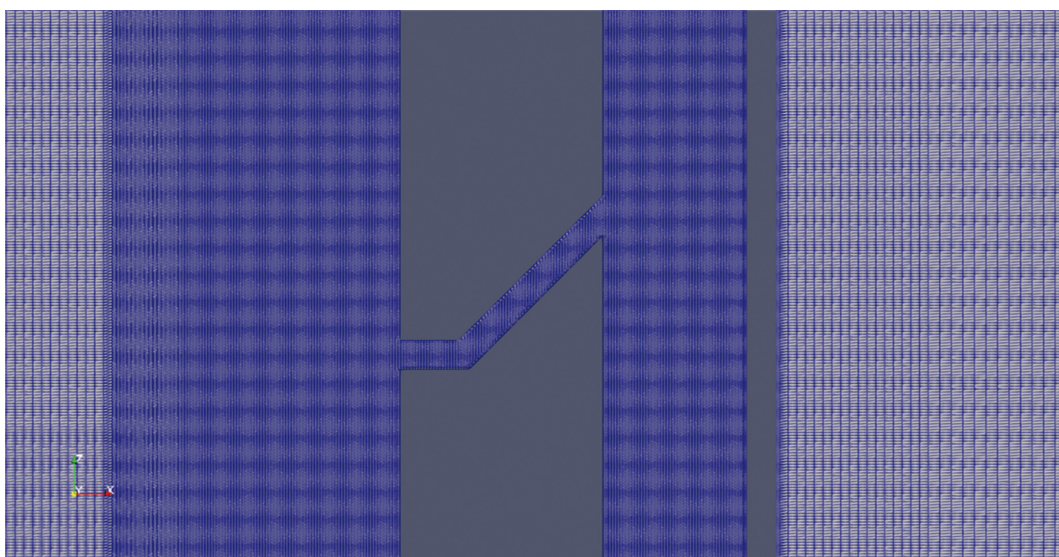


Fig. 6. Grids of numerical simulation around the channel resonance part.

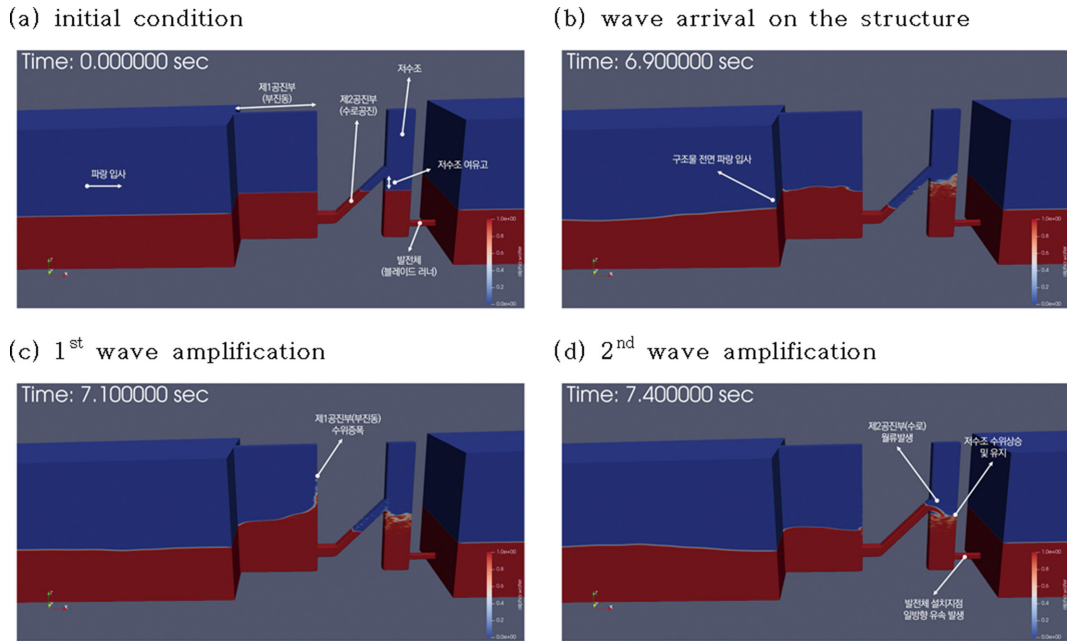


Fig. 7. Concept of multi-resonance wave energy converter.

다. 이때, 저수부와 발전부 사이에 여유고만큼 수위 차가 발생하고 수위 차에 의해 발생하는 유체의 이동으로 인해 발전부에 설치된 터빈에서 전력이 생산된다. 여유고를 크게 하면 저수부와 발전부의 수위 차를 크게 할 수 있어 발전전력이 증가할 수 있으나, 수로에서 저수조로 월류하는 수체의 월류량이 감소하여 수위 상승 및 수위 유지가 어려울 수 있으며, 여유고를 작게 하면 수로에서 저수조로 월류량을 크게 할 수 있으나, 발전을 유도하는 수위 차가 작아 최대 기대 발전량이 작을 수 있다.

평상시 파고와 주기가 작은 파랑이 전파하여 구조물에 도달할 때는 수위의 변화가 크지 않다(Fig. 7(b) 참조). 파랑의 항만 공진부로 진입하면 1차 증폭이 발생하며 수위가 크게 증가한다(Fig. 7(c) 참조). 이후 수로에서 2차 공진이 발생하며 저수부로 월류가 발생하고 수위 상승 및 유지가 된다(Fig. 7(d) 참조). 여유고만큼의 수위 차는 발전체 설치 위치에서 전력 생산이 가능하다. 평상시에도 파랑에너지가 증폭하여 발전이 가능하며, 파랑에너지의 증폭이 발생하지 않는 이상 파 내습 시에도 높은 파고로 인해 월류가 발생하여 상시 발전이 가능하다.

4.4 수로 길이 별 수치실험

다중공진 파력 발전체의 수로 길이를 달리하면서 수치해석을 수행하였다. 이론적으로 최대효율이 나타나는 수로의 길이는 6.21 m이다. 수로 입구 깊이를 $h_c = 2.5$ m로 고정하고 수로 길이가 $L_c = 4.0$ m, 5.0 m, 6.21 m, 7.0 mm일 때 발전부를 통과하는 유량을 측정하였다. 총 해석 시간은 100초이며, 해석 시작 후 50초 경과부터 100초까지의 유량을 평균하여 각 실험안 별 평균 유량으로 결정하였다. 해석 결과, 수

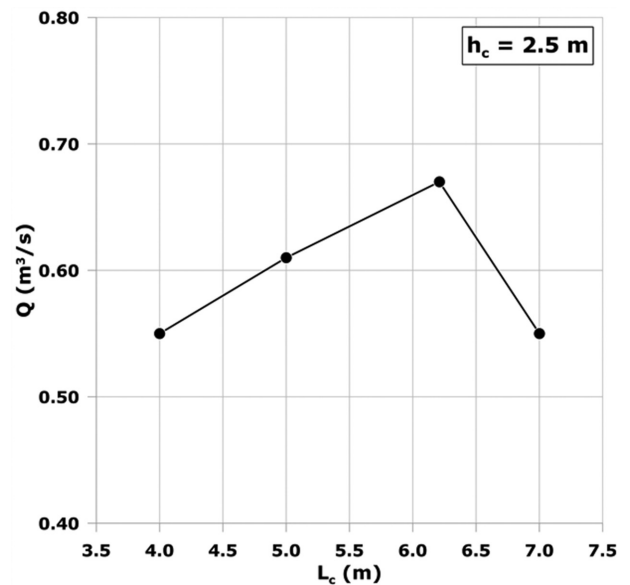


Fig. 8. Variation of flow rate with channel length.

로 길이가 $L_c = 6.21$ m일 때 발전부를 통과하는 유량이 $Q = 0.67$ m³/s로 최대가 되었고, 수로 길이가 더 길거나 짧을 때는 통과 유량이 감소하였다. 대체로 수로 고유주기와 입사 파랑의 주기가 유사한 경우에 수로 공진이 발생하는 것을 확인하였다(Fig. 8 참조).

4.5 수로 입구 깊이 별 수치실험

파랑이 내습하는 경우 수립자의 유속은 평균해면 아래로 갈수록 감소한다. 따라서 수로 입구의 깊이가 아래로 갈수록 수로 내부로의 유체의 이동량이 줄어 공진 효율이 떨어진다. 수로의 입구가 평균해면 가까이 있을수록 수립자의 유속은

크지만, 수로 내부로 공기가 유입하여 공진 효율이 떨어질 수 있다. 수로 입구 위치에 따른 공진 효율을 확인하기 위해 수로 길이를 $L_c = 6.21$ m로 정한 상태에서 수로 입구 깊이를 $h_c = 0.5 \sim 4.39$ m까지 다양하게 설정하여 실험을 수행하였다. 수로 입구의 단면은 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 인 정사각형이고, 수로 입구 깊이는 평균해면에서 수로 중앙까지의 깊이를 의미하며, 수로 입구 깊이가 $h_c = 0.5$ m인 경우는 수로 상부가 평균해면과 일치하는 경우이다. 해석 결과, 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.5$ m인 경우(즉, 수로 입구가 입사파고의 2.5배 아래에 위치한 경우) 발전부 통과 유량이 $Q = 0.67 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 최대가 되었다(Fig. 9 참조). 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.5$ m보다 깊은 경우 수로 상부 유속 감소로 발전부 통과 유량이 감소하였다. 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.5$ m보다 얇은 경우, 수로 내 공기 유입으로 인하여 발전부 통과 유량이 대체로 감소하는 경향을 보이지만, 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.25$ m인 경우보다 $h_c = 2.0$ m인 경우에 평균 유량이 다소 증가하는 등 복잡한 양상을 보였다. Figs. 10, 11, 12에 수로 입구 깊이가 각각 0.5 m, 2.5 m, 3.6 m인 경우 파랑이 접근수로 통과 후 항만 공진부와 수로 공진부에서 증폭되고 저수부로 월류하는 3차원 해석 결과를 도시하였다. 해석 결과는 수체와 공기의 공간분포를 의미하며, 공간분포의 붉은색은 수체를, 파란색은 공기를 의미하고, 수체와 공기가 혼합되는 경우 색이 얼어지거나 흰색으로 표시된다. 수로 입구 깊이가 $h_c = 0.5$ m인 경우(즉, Fig. 10인 경우) 항만 공진부 내측 벽체에 파곡이 형성되며 수로 입구가

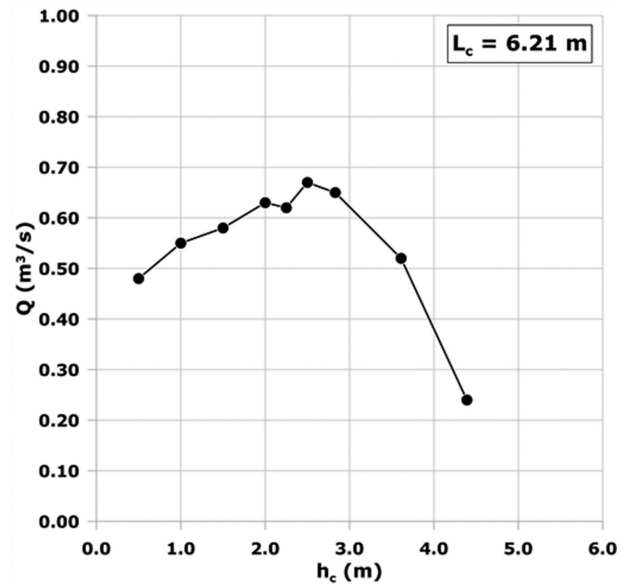


Fig. 9. Variation of flow rate with channel entrance water depth.

수면 위로 들어가는 것을 확인할 수 있으며(Fig. 10(c) 참조), 파봉이 형성된 경우에도 수로 내부에 공기가 유입되는 것을 볼 수 있다(Fig. 10(a) 참조). 수로 입구 깊이가 $h_c = 3.6$ m인 경우(즉, Fig. 12인 경우) 항만 공진부 내측 벽에 파봉과 파곡이 형성되어도 수로 입구가 수면 위로 나오지 않아서 수로 내부의 공기 유입이 상대적으로 작았다. 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.5$ m인 경우(즉, Fig. 11 경우) 항만 공진부 벽체에 파

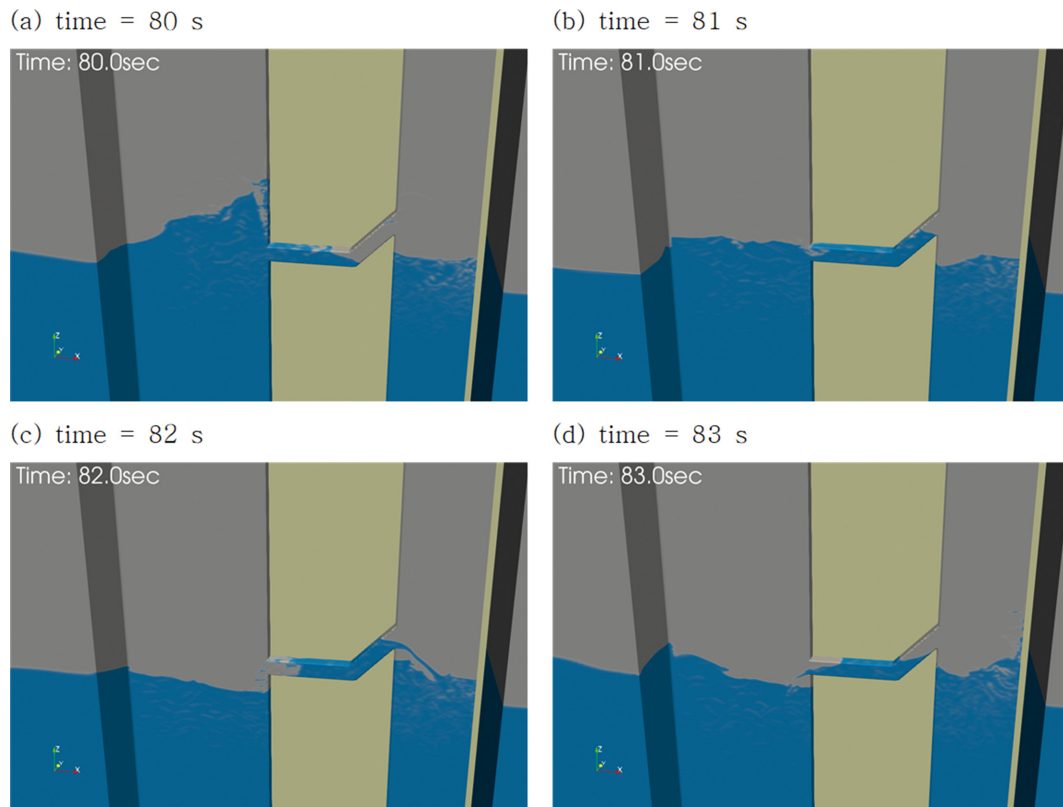


Fig. 10. Spatial distribution of water surface and air (channel length = 6.21 m, channel entrance water depth = 0.5 m).

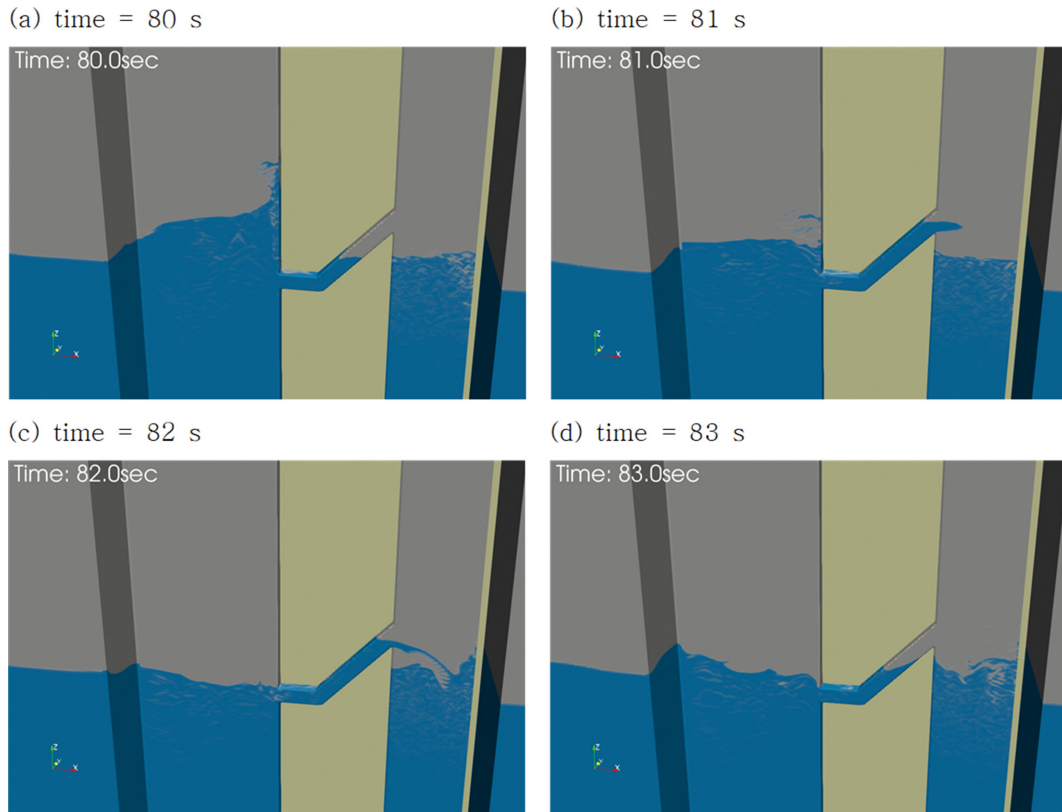


Fig. 11. Spatial distribution of water surface and air (channel length = 6.21 m, channel entrance water depth = 2.5 m).

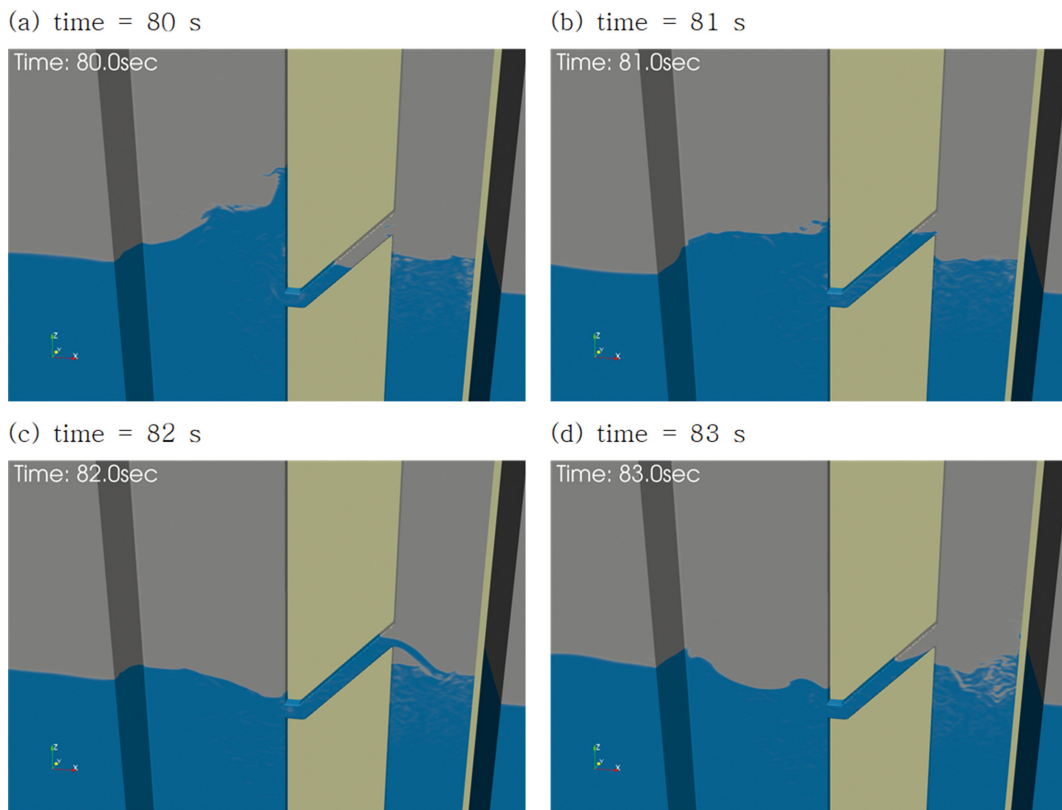


Fig. 12. Spatial distribution of water surface and air (channel length = 6.21 m, channel entrance water depth = 3.6 m).

꼭이 형성될 때 수로 입구 상단과 수면이 거의 동일하며(Fig. 11(c) 참조), 수로 입구가 더 깊은 경우보다 수로 내 공기유입

이 큰 것으로 보이지만 수립자 유속이 증가하는 등 복합적인 요인으로 발전부 통과 유량이 가장 큰 것으로 판단된다.

Table 3. Variation of flow rate with channel length and channel entrance water depth (unit: m³/s)

Channel length (m)	Channel entrance water depth (m)											
	0.50	1.00	1.50	2.00	2.25	2.50	2.83	2.54	3.61	4.39	4.95	5.66
4.00				0.46	0.50	0.55	0.58					
5.00				0.60	0.56	0.61	0.65	0.36				
6.21	0.48	0.55	0.58	0.63	0.62	0.67	0.65		0.52	0.24		
7.00				0.59	0.56	0.55	0.54				0.15	
8.00							0.39					0.10

4.6 최적 수로 형상 도출

다중공진 파력발전체의 수로 공진부 최적 길이 및 위치 결정은 특정 경우의 실험으로 판단하기 어렵다. 본 연구에서 길이 별 통과 유량 상관성 분석 결과와 수로 위치 별 상관성 분석 결과를 종합하여 수로 공진부 길이와 입구 깊이가 다양하게 조합되는 실험을 수행하였다. 수로 길이가 $L_c = 4\sim 7$ m, 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.0\sim 2.5$ m 범위에서 최대 평균유속이 나타날 것으로 기대되는 실험조건을 선별하여 수행하였다. Table 3에 공진 수로 길이 및 수로 입구 깊이 별 평균유속 산정 결과를 제시하였다. Table 3의 유량이 제시되지 않는 조건은 다른 조건에서 수로 길이 및 입구 깊이에 따른 최대 평균 유량이 확인되어 실험이 필요하지 않거나, 기하학적으로 구조물 재현이 불가능하여 실험을 수행하지 않은 조건이다. 예를 들어, 직선 수로 없이 경사 수로 4 m를 45° 경사로 설치하는 경우 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.83$ m가 되며, 수로 길이가 $L_c = 4$ m인 경우 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.83$ m 이상인 경우의 실험수행이 불가능하다. 수로 길이가 $L_c = 4.0$ m 및 $L_c = 5.0$ m인 경우에는 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.83$ m일 때 평균유속이 최대이며, 수로 길이가 $L_c = 7.0$ m인 경우에 수로 입구 깊이가 2.0 m일 때 최대가 되었다. 수로 길이가 $L_c = 5.0$ m인 경우에 수로 입구 깊이가 커지면서 평균유속의 증가와 감소가 반복하는 등 특별한 경향성이 나타나지 않았다. 이는 수로 길이에 따라 발생하는 파랑의 증가량, 수로 위치에 따라 나타나는 공기 유입 및 수립자 유속 변화 등이 복합적으로 작용하여 발생하는 것으로 판단된다. 실험안 중에 수로 길이가 $L_c = 6.21$ m, 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.5$ m인 경우, 전체 실험안 중에서 가장 큰 평균유속을 보였다. 동해신항의 방파제 위치에 다중공진 파력발전체를 설치하는 경우, 주기 5초 파랑 내습 시 수로 길이가 $L_c = 6.21$ m, 수로 입구 깊이가 $h_c = 2.5$ m로 설정하는 경우 최적의 발전 효율이 나타날 것으로 판단된다.

5. 결 론

다중공진 파력발전체는 항만 공진과 수로공진을 복합적으로 이용하여 평상시 파랑을 증폭시켜 상시발전을 목표로 개발되었다. 저수조의 수위를 상승 및 유지시켜 발전하는 방식으로 기존에 파력에너지를 이용한 발전방식의 단점인 에너

지 변동성 문제가 발생하지 않는다. 동해신항 방파제에 다중공진 파력발전체 설치를 가정하여 발전체 체원을 구성하였으며, 기초실험을 통해 저수부에 수위가 상승 및 유지되고 발전부에서 일방향 유속이 발생하는 것을 확인하였다. 또한 공진 수로의 길이 및 위치 별로 다양한 수치실험을 수행하여 공진 수로의 길이는 이론적인 파장의 1/4 길이와 유사할 때, 수로 입구 깊이는 입사파고의 2~3배 아래 위치에 있는 경우 발전부의 유속이 최대가 되는 것을 확인하였다. 향후 수로 길이 및 위치를 세분화한 실험이 필요할 것으로 생각되며, 항만 공진부 형상 및 저수부 최적 설계를 통해 발전 효율을 극대화하여 실효성 있는 다중공진 파력발전체 개발이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00239837, 유망기술 Scale-up 사업).

References

- Engelund, F. (1953). On the laminar and turbulent flow of ground water through homogeneous sand. Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences, 3.
- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70, 1073-1088.
- Kim, J.R., Bae, Y.H. and Cho, I.H. (2014). Design of wave energy extractor with a linear electric generator, Part I. Design of wave power buoy. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 17(2), 146-152.
- Lee, C. and Lee, D.S. (2003). Water surface resonance in the L-shaped channel of seawater exchange breakwater. Ocean Engineering, 30(18), 2423-2436.
- Mendez, F., Losada, I. and Losada, M. (2001). Wave-induced mean magnitudes in permeable submerged breakwaters. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 127, 7-15.
- Ministry of Education (2014). Development of highly efficient wave power generation system using combined resonances (in

Korean).

Ministry of Trade, Industry and Resources (2020). The 5th Fundamental Plan of Technology Development, Use, and Distribution of Renewable Energy (in Korean).

Raichlen, F. (1966). Harbor resonance. Chapter 7. in: Ippen A.T., Ed. Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw Hill Book Company, New York.

Wei, G. and Kirby, J. (1995). Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 121(5), 251-261.

Received 26 December, 2023

1st Revised 4 June, 2024

2nd Revised 26 July, 2024

3rd Revised 16 August, 2024

Accepted 26 August, 2024