

진동수주형 파력발전시스템을 탑재한 공기주입식 부유식방파제의 동적거동해석 Dynamic Response Analysis of Pneumatic Floating Breakwater Mounted Wave-power Generation System of Oscillating Water Column

이광호* · 김도삼** · 정익한***

Kwang-Ho Lee*, Do-Sam Kim** and Ik-Han Jung***

요 지 : 단독의 파력발전변환장치를 설치하는 경우 경제성이 떨어지는 문제점이 있으므로 기존 혹은 신설의 방파제에 적용하여 파랑제어와 파랑에너지의 이용을 동시에 도모하는 방식이 많이 추진되어 왔다. 본 연구는 전편의 연구(Lee et al., 2014)에서와 같이 부유식방파제로 연구 · 개발된 공기주입식 부유식방파제에 진동수주형 파력발전시스템을 탑재한 경우를 대상으로 부유식방파제로의 기능과 파력발전장치로의 기능을 병행하여 검토하였다. 여기서, 전편의 연구(Lee et al., 2014)에서는 공기실내에서 공기의 동적거동에 단일변화에 따른 압축성을 고려한 반면에 본 연구에서는 비압축성의 경우에 구조물의 고정시 혹은 부유시에 각각에 대한 파랑변형율, 공기흐름속도 및 구조물의 운동을 검토하였으며, 공기의 동적거동에 대한 압축성의 고려여부에 따른 결과의 차이를 논의하였다. 수치해석법으로는 선형속도도텐셜이론에 기초한 경계요소법을 적용한다. 얻어진 모든 해석결과에 따르면 공기압축성을 고려한 전편의 연구와 거의 동일한 결과를 나타내었으며, 따라서 공기실내에서의 공기거동해석에 압축성을 고려하지 않는 본 해석이 보다 효율적이고, 유용한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 공기주입식 부유식방파제, 진동수주형 파력발전변환장치, 파랑변형, 공기흐름속도

Abstract : Ocean wave energy harvesting is still too expensive despite developing a variety of wave energy converter (WEC) devices. For the cost-effective wave energy harvesting, it can be an effective measure to use existing breakwaters or newly installed breakwaters for both wave control and energy harvesting purposes. In this study, we investigated the functionality of both breakwater and wave-power generator for the oscillating water column (OWC)-type wave energy converter (WEC) installed in a pneumatic floating breakwater, which was originally developed as a floating breakwater. In order to verify the performance of the breakwater as a WEC, the air flow velocity from air-chamber to WEC has to be evaluated properly. Therefore, air flow velocity, wave transformation and motion of floating structure was numerically implemented based on BEM from linear velocity potential theory without considering the compressibility of air within the chamber. Air pressure, meanwhile, was assumed to be fluctuated by the motions of structure and the water level change within air-chamber. The validity of the obtained values can be determined by comparing the previous results from the numerical analysis for different shapes. Based on numerical model results, wave transformation characteristics around OWC system mounted on the fixed and floating breakwaters, and motions of the structure with air flow velocities are investigated. In summary, all numerical results are almost identical to the previous research considering air compressibility. Therefore, it can be concluded that this analysis not considering air compressibility in the air chamber is more efficient and practical method.

Keywords : pneumatic floating breakwater, OWC typed WEC, wave transformation, air flow velocity

1. 서 론

전편의 연구(Lee et al., 2014)에서는 고정방파제 혹은 부유식방파제의 공기실내에서 상단부의 공기유출구를 통한 공기흐름으로부터 파동에너지를 전기에너지로 변환하는 진동수

주(OWC; Oscillating Water Column)시스템과 더불어 구조물 상부에 Fig. 1에 나타내는 풍력발전시스템을 탑재한 복합발전시스템을 구상하였다. Kim and Iwata(1991)에 따르면 방파제 내부의 공기실에 공기를 주입한 형태를 갖는 구조물은 내부공기압의 조절로부터 파랑제어기능의 향상과 다변화를 기

*가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과(Dept. of Energy and Plant Eng., Catholic Kwandong University)

**한국해양대학교 건설공학과(Corresponding author: Do-Sam Kim, Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 49112, Korea, Tel: +82-51-410-4463, Fax: +82-51-403-0656, kimds@kmou.ac.kr)

***한국해양대학교 대학원 토목환경공학부(Dept. of Civil and Environmental Eng., Korea Maritime and Ocean University)

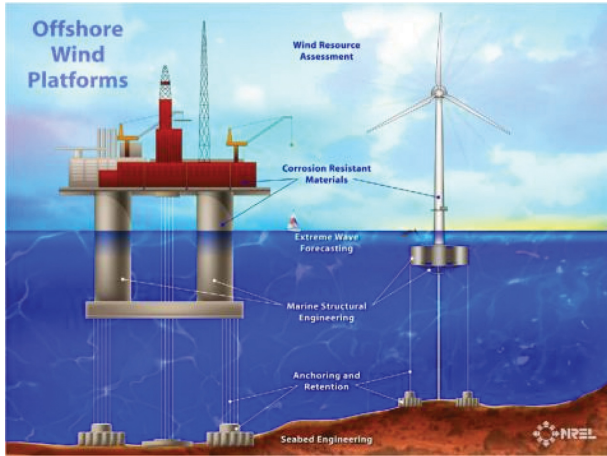


Fig. 1. Floating wind turbine concept (<https://oldbristolhistorical-society.wordpress.com/power/demonstration-projects/>).

하려고 고안된 것으로, 공기주입식 방파제에서는 공기실에서 공기흐름이 발생되지 않지만 파력발전변환장치(WEC; Wave Energy Converter)로 적용되기 위해서는 구조물의 상단에 공기흐름의 유출 · 입구가 구비되어야 하고, 동시에 유출 · 입구에서 터빈의 구동력인 공기흐름속도가 정확히 평가되어야 한다.

한편, 다수의 연구에서는 공기실내에서 수면변동과 구조물의 운동에 의해 발생하는 공기압변동을 공기압축성에 관한 상태방정식을 적용하여 산정하고 있지만 실제로 공기실내의 압축공기흐름속도를 직접적으로 평가한 연구는 전편의 연구(Lee et al., 2014)를 포함한 Lee et al.(2011a, 2011b)의 연구를 제외하면 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 진동수주형 파력발전시스템을 탑재한 부유식방파제에 대해 방파제로서의 파랑제어기능과 발전시스템로

서의 공기흐름속도를 해석하기 위하여 공기실내의 공기압축성을 고려한 전편의 연구(Lee et al., 2014)와 달리 공기의 비압축성을 고려한다. 실제 수치해석에서는 고정식을 포함하여 진동수주형 파력발전시스템을 구비한 연직진장계류의 부유식 방파제를 대상으로 파랑변형율과 공기흐름속도, 그리고 구조물의 운동 등의 특성을 규명하며, 공기거동에 대한 압축성의 고려여부에 대한 두 결과의 차이를 논의한다. 수치해석법으로는 전편의 연구(Lee et al., 2014)에서와 같이 선형속도포텐셜이론에 기초한 경계요소법을 적용한다.

2. 공기흐름속도의 추정

다음의 Fig. 2에 나타내는 부유식방파제에서 공기실내의 수면변동, 부유체의 연직운동 및 본체 상단의 공기유출 · 입구를 통한 공기량에 대해 압축성을 고려하지 않으면 다음의 연속방정식이 성립된다.

$$i\sigma \int_{-l_1}^{l_1} \{ \eta_a(x) - \beta \} dx = A_a u_a \quad (1)$$

여기서, $i = \sqrt{-1}$, x 는 수평좌표, t 는 시간, σ 는 각주파수, $2l_1$ 은 공기실의 폭, β 는 부유식방파제의 연직운동의 복소진폭, A_a 는 공기유출 · 입구의 단면적, u_a 는 공기유출 · 입속도의 복소진폭, η_a 는 공기실내에서 공간수면변동량으로 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\eta_a(x) = -\frac{i\sigma}{g} \phi(x) \quad (2)$$

여기서, g 는 중력가속도, ϕ 는 속도포텐셜이다. 식(2)를 (1)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

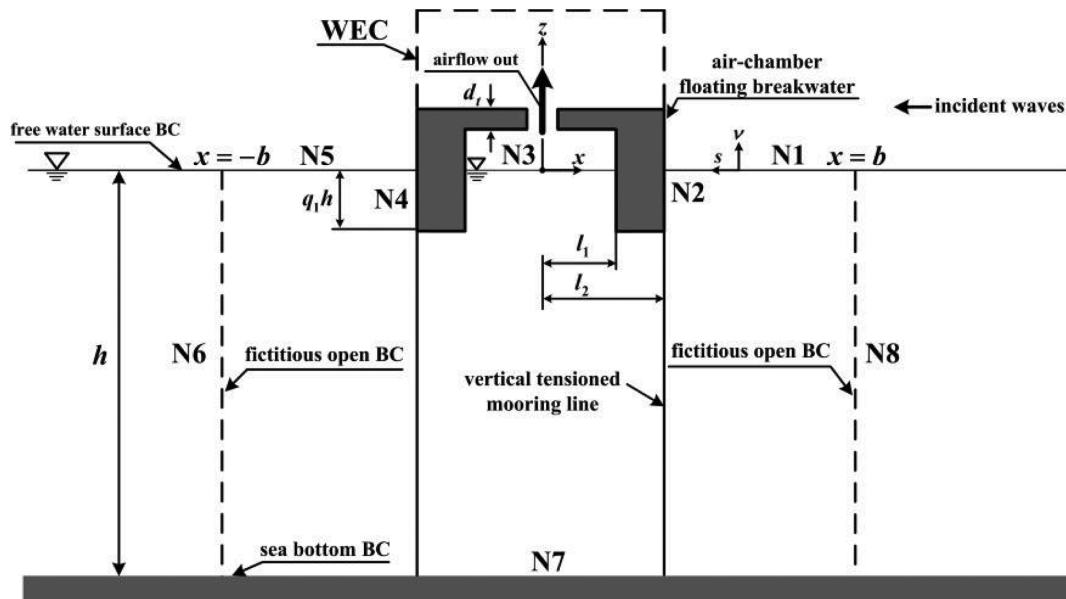


Fig. 2. Systematic sketch of pneumatic floating breakwater equipped with wave-power generation system.

$$u_a = \frac{\sigma^2}{gA_a} \int_{-l_1}^{l_1} \phi(x) dx - \frac{2l_1\sigma^2}{gA_a} \left(\frac{ig}{\sigma} \beta \right) \quad (3)$$

위의 식(3)을 이산화하여 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$u_a = \frac{\sigma^2}{gA_a} \sum_{j=1}^{N3} \phi_j \Delta s_j - \frac{2l_1\sigma^2}{gA_a} \left(\frac{ig}{\sigma} \beta \right) \quad (4)$$

여기서, j 는 경계면에서 절점, $N3$ 는 공기실내에서 절점의 총 개수, Δs 는 절점간 선요소의 길이이다.

이상에서 제시되지 않은 기초방정식과 경계조건 및 경계요소법에 대한 이론적인 전개과정, 이산화과정, 운동방정식의 구성 등은 전편의 연구(Lee et al., 2014)에서와 동일하므로 반복적인 기술을 생략하며, 보다 자세한 사항은 전편의 연구를 참조바란다.

3. 수치해석결과의 검증

전편의 연구(Lee et al., 2014)에서 (1) 폰툰형 고정방파제, (2) 자유부체구조물, (3) 폰툰형 부유식방파제, (4) 압축공기주입식 고정방파제 등에 있어서 다른 연구자에 의한 추정된 전달율과 반사율을 비교·검토하여 본 수치해석결과의 타당성을 충분히 검증하였다. 여기서는 공기흐름속도에 대해 Navier-Stokes solver 및 VOF법에 기초한 혼상류해석법 TWOPM-3D(Lee et al., 2011c)으로부터 추정된 수치해석결과와 본 연구의 수치해석결과를 다음의 Fig. 3에 제시한다. 이는 Fig. 2에서 부유식방파제가 고정된 경우 수심 $h = 15$ m, $l_2 = 10$ m, $l_1 = 7$ m, $d_a = 4$ m, $A_a = 0.7$ m²/m, $H/L = 0.01$ (H 는 입사파고, L 은 입사파장)에 대해 흘수심을 $q_1h = 5, 6, 7$ m로 변화시켜 무차원공기흐름속도 $2|u_a|/H\sigma$ 와 실공기흐름속도 $|u_a|$ 를 각각 나타낸 것이다.

Fig. 3(a)에 보인 무차원공기흐름속도를 살펴보면 $1.0 < kh < 1.5$ 범위에서 최대치가 발생하고, 최대치는 흘수심이 깊을수록 장주기측으로 이동함과 동시에 그 크기가 증대되는 경향을 나타낸다. 여기서, $kh < 0.5$ 의 장주기측에서는 흘수심의 변화에 따른 공기흐름속도의 차이가 크지 않고, 대략 20 정

도의 일정치를 나타낸다. 또한, 최대치를 나타낸 kh 이후의 단주기측에서는 kh 의 증가에 따라 공기흐름속도가 점차 감소하는 경향을 보이고, 흘수심이 깊을수록 그의 경향은 심화된다.

Fig. 3(b)에 제시하는 실제의 공기흐름속도에서 수평축은 공기실폭 $2l_1$ 과 파장 L 과의 비를 나타낸다. 전반적인 경향은 무차원공기의 흐름속도의 경우와 동일하다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 공기흐름속도의 두 추정치를 비교하면 피크치를 중심으로 좌우의 장주기측과 단주기측에서 TWOPM-3D(Lee et al., 2011)에 의한 결과가 본 연구보다 약간 큰 값을 나타내지만 전체적으로 주기의 변화에 따른 두 결과의 변동경향이 합리적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

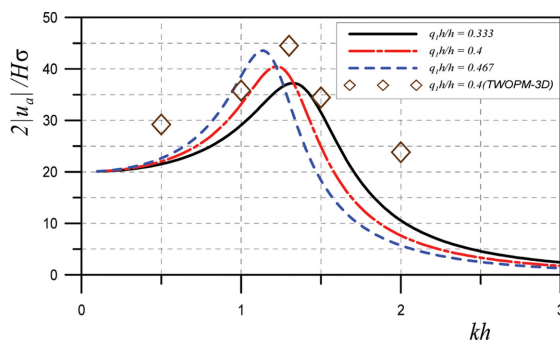
4. 수치해석결과

이하에서 나타내는 결과는 Fig. 2에 제시한 OWC형 WEC 시스템을 탑재한 부유식방파제에서 고정시 반사율 $|K_R|$, 전달율 $|K_T|$ 및 상부 WEC로 유출·입되는 무차원공기흐름속도 $2|u_a|/H\sigma$ 와 실공기흐름속도 $|u_a|$, 그리고 계류시 반사율 $|K_R|$, 전달율 $|K_T|$, 상부 WEC로 유출·입되는 무차원공기흐름속도 $2|u_a|/H\sigma$, 실공기흐름속도 $|u_a|$, 무차원수평운동 $2|\alpha|/H$, 무차원 연직운동 $2|\beta|/H$ 및 무차원회전운동 $4|l_2|\omega/H$ 의 변동특성을 검토한다. 특히, 공기실내에서 공기의 동적거동에 단열변화의 압축공기모델을 적용한 전편의 연구(Lee et al., 2014) 결과와의 비교·검토를 통해 본 연구에서 적용한 비압축성공기모델의 유용성과 적용성을 동시에 논의한다. 여기서, 계류시스템은 연직긴장계류를 적용한다.

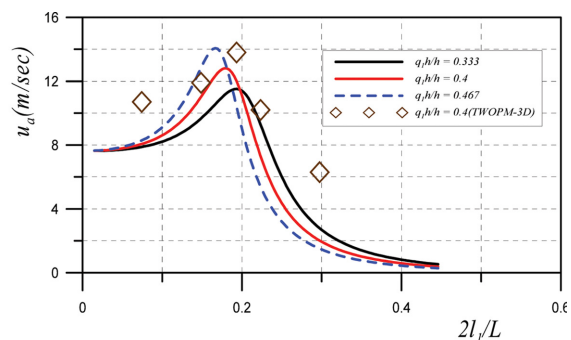
4.1 고정식

4.1.1 흘수심의 변화

Fig. 4에 나타내는 결과는 $h = 15$ m, $l_2 = 10$ m, $l_1 = 7$ m, $d_a = 4$ m, $A_a = 0.7$ m²/m, $H/L = 0.01$ 에 대해 흘수심을 $q_1h = 5, 6, 7$ m로 변화시킨 경우에 파랑변형율 $|K_R|$ 과 $|K_T|$ 및 무차원공기흐름속도 $2|u_a|/H\sigma$ 와 실공기흐름속도 $|u_a|$ 를 각각 제시한 것이다. 반사율은 $0.5 < kh < 1.0$ 의 범위에서 극대치를, $1.0 < kh < 1.5$ 의 범위에서 극소치를 나타낸 후에 급격하게 증



(b) Non-dimensional air flow velocity



(c) Real air flow velocity

Fig. 3. Air flow velocity outflowing from air-chamber.

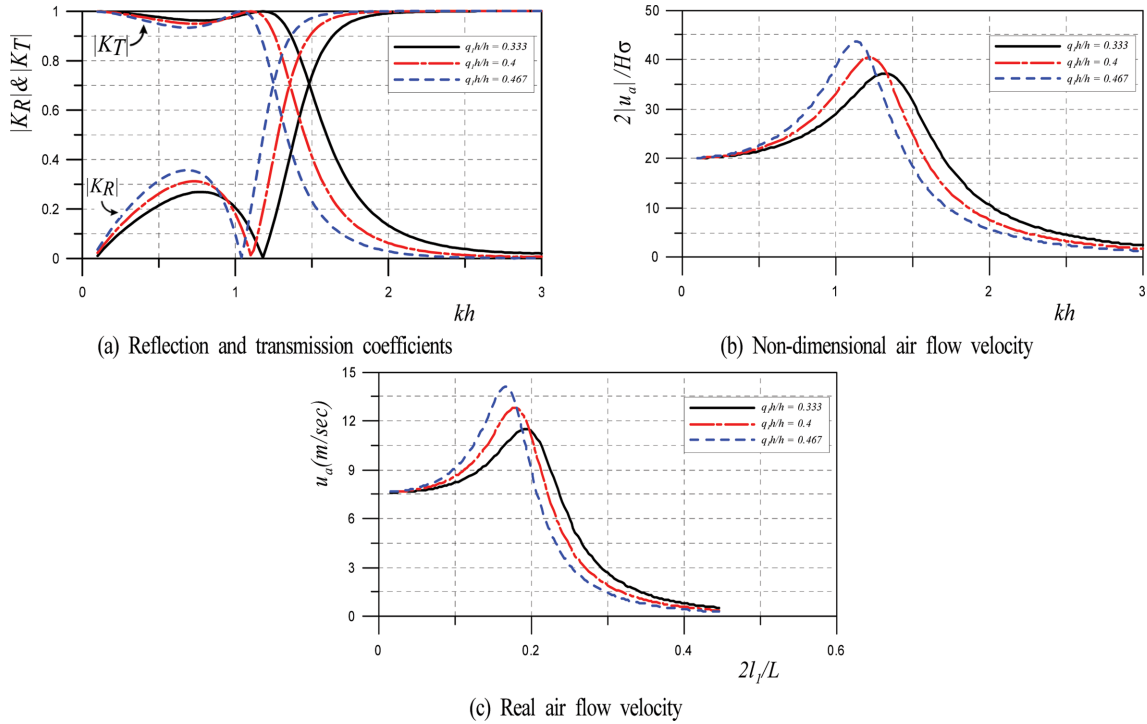


Fig. 4. Wave transformation and air flow velocity according to the change of q_1/h in this case not considering compressibility of air in air-chamber ($l_1/l_2 = 0.7$, $l_2/h = 0.667$, $d_d/h = 0.267$, $A_d/2l_2 = 0.035$, $H/L = 0.01$).

가하고, $kh > 2.0$ 에서는 거의 전반사를 나타낸다. 전달율은 반사율과는 반대의 경향을 나타내며, 반사율과 전달율 모두 $kh \approx 1.3$ 에서는 급변하는 것을 알 수 있다. 여기서, 흡수심이 증가할수록 kh 에 따른 파랑변형율의 변화추이가 장주기측으로 이동되는 양상으로부터 흡수심이 깊을수록 보다 장주기파랑의 제어효과가 우수하다는 것을 알 수 있다.

다음으로, 무차원공기흐름속도를 살펴보면 파랑변형율이 급변하는 $1.0 < kh < 1.5$ 에서 최대치가 발생하고, 최대치는 흡수심이 깊을수록 장주기측으로 이동되며, 동시에 그 크기가 증대되는 경향을 나타낸다. 구체적으로 $q_1/h = 0.333$ 의 경우 $kh = 1.32$ 에서 $2|u_{a,max}|/H\sigma = 37.28$; $q_1/h = 0.4$ 의 경우 $kh = 1.22$ 에서 $2|u_{a,max}|/H\sigma = 40.54$; $q_1/h = 0.467$ 의 경우 $kh = 1.14$ 에서 $2|u_{a,max}|/H\sigma = 43.63$ 의 값을 각각 나타낸다. 여기서, $kh < 0.5$ 의 장주기측에서는 흡수심의 변화에 따른 값의 차이가 크

지 않고, 대략 20 정도의 일정치를 나타낸다. 또한, 최대치를 나타낸 kh 이후의 단주기측에서는 kh 의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고, 더불어 흡수심이 깊을수록 그 경향은 심화된다. Fig. 4(c)는 실제의 공기흐름속도를 나타낸 것으로, 수평축은 공기실폭과 파장과의 비를 나타낸다. 전반적인 경향은 무차원공기흐름속도의 경우와 동일하다는 것을 알 수 있고, 그의 최대치는 $q_1/h = 0.333$ 의 경우 $2l_1/L = 0.193$ 에서 $|u_{a,max}| = 11.53$ m/s; $q_1/h = 0.4$ 의 경우 $2l_1/L = 0.178$ 에서 $|u_{a,max}| = 12.82$ m/s; $q_1/h = 0.467$ 의 경우 $2l_1/L = 0.166$ 에서 $|u_{a,max}| = 14.09$ m/s를 가진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5의 결과는 4의 조건과 동일하지만 공기실내 공기거동에 단열변화의 압축성을 고려한 경우에 파랑변형율과 무차원공기흐름속도를 나타낸 것으로(Lee et al., 2014), 무차원공기흐름속도분포에서 그의 최대치는 $q_1/h = 0.333$ 의 경우 $kh =$

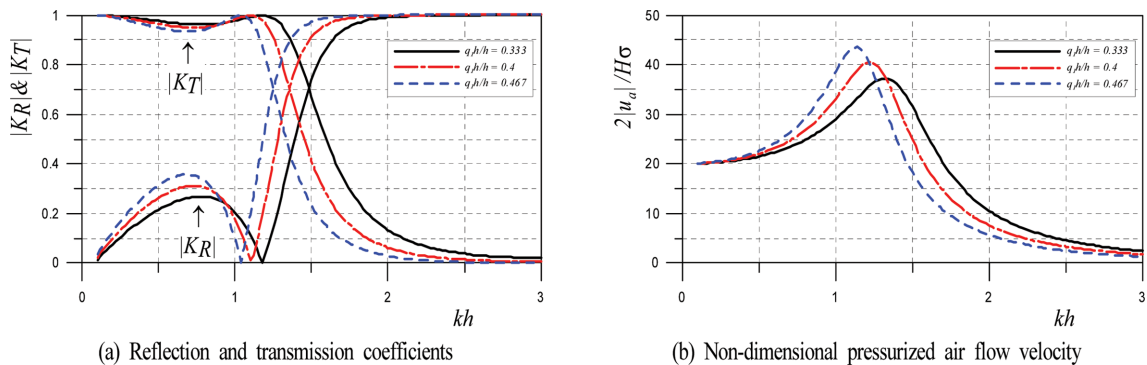


Fig. 5. Wave transformation and non-dimensional pressurized air flow velocity according to the change of q_1/h in case considering compressibility of air in air-chamber ($l_1/l_2 = 0.7$, $l_2/h = 0.667$, $q_2/h = 0.0$, $c_a = 1.0$, $d_d/h = 0.267$, $A_d/2l_2 = 0.035$, $H/L = 0.01$, $\gamma = 1.4$).

1.32에서 $2|u_{a|_{max}}/H\sigma = 37.23$; $q_1 h/h = 0.4$ 의 경우 $kh = 1.22$ 에서 $2|u_{a|_{max}}/H\sigma = 40.49$; $q_1 h/h = 0.467$ 의 경우 $kh = 1.14$ 에서 $2|u_{a|_{max}}/H\sigma = 43.58$ 의 값을 각각 나타낸다. 따라서, Figs. 4(a)와 5(a) 및 Figs. 4(b)와 5(b)의 결과를 비교하면 변동과정 및 크기에서 차이를 거의 알 수 없을 정도의 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 이상의 파랑변형을 및 공기흐름속도에서 공기압축성의 고려유무에 따른 계산결과에서 차이는 거의 없다는 것을 확인할 수 있고, 따라서 공기실내에서의 공기거동해석에 비압축성을 고려하는 본 이론 및 수치계산이 압축성에 대한전편의 연구(Lee et al., 2014)보다 훨씬 효율적이고, 동시에 간편하기 때문에 그의 유용성이 넓을 것으로 판단된다.

4.1.2 공기실폭의 변화

Fig. 6은 $h = 15$ m, $l_2 = 10$ m, $q_1 h/h = 6$ m, $d_a = 4$ m, $A_a = 0.7$ m²/m, $H/L = 0.01$ 에 대해 공기실의 폭을 $l_1 = 5, 7, 9$ m로 변화시킨 경우 파랑변형을 $|K_R|$ 과 $|K_T|$ 및 무차원공기흐름속도 $2|u_a|/H\sigma$ 와 실공기흐름속도 $|u_a|$ 를 나타낸다. 그림으로부터 공기실의 폭 l_1 의 값이 증가할수록 $kh < 1.3$ 의 범위에서 나타나는 파랑변형의 극대치 및 극소치는 장주기측으로 이동되고, $kh < 1.0$ 에서의 극대치는 작아지고, 극소치는 커지는 현상을 볼 수 있다. 무차원공기흐름속도의 변화를 살펴보면 그의 최대치는 $l_1/l_2 = 0.5$ 의 경우 $kh = 1.30$ 에서 $2|u_{a|_{max}}/H\sigma = 39.48$; $l_1/l_2 = 0.6$ 의 경우 $kh = 1.22$ 에서 $2|u_{a|_{max}}/H\sigma = 40.54$; $l_1/l_2 = 0.7$ 의 경우 $kh = 1.20$ 에서 $2|u_{a|_{max}}/H\sigma = 40.33$ 의 값을 각각 나타내는 것을 확인할 수 있다. 최대치를 나타내는 kh 보다 장주기측에서는 공기실폭이 넓을수록 상대적으로 매우 큰 무차

원공기흐름속도를 나타내며, 최대치를 나타내는 kh 보다 단주기측에서는 기본적으로 공기실폭이 넓을수록 약간 큰 흐름속도를 나타내지만 그 값의 차이는 크지 않고, kh 가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 공기실폭이 넓을수록 수면변동량폭이 넓어지고, 이로부터 공기실내에 보다 많은 양의 공기가 유입되기 때문이다. 이에 따라 공기흐름속도가 증가되며, 이러한 현상은 장주기측에서 보다 현저하게 나타난다는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 6(c)는 실제의 공기흐름속도를 나타낸 것으로, 수평축은 공기실폭과 파장과를 나타낸다. Fig. 6(b)의 경우와 다르게 보이는 것은 수평축이 공기실폭 $2l_1$ 과 파장 L 과의 비를 취하므로 l_1 이 작아지면 실제의 공기흐름속도는 전체적으로 수평축의 좌측으로 이동되기 때문이다. 구체적으로 그의 최대치는 $l_1/l_2 = 0.5$ 의 경우 $2l_1/L = 0.136$ 에서 $|u_{a|_{max}} = 12.26$ m/s; $l_1/l_2 = 0.7$ 의 경우 $2l_1/L = 0.178$ 에서 $|u_{a|_{max}} = 12.82$ m/s; $l_1/l_2 = 0.9$ 의 경우 $2l_1/L = 0.222$ 에서 $|u_{a|_{max}} = 12.85$ m/s의 값을 각각 나타내는 것을 확인할 수 있다. 여기서, l_1/l_2 의 비가 커지는 경우 l_2 가 일정하므로 결국 부력체의 폭이 좁아진다는 의미를 나타내며, 이의 경우 최대실공기흐름속도의 발생위치 $2l_1/L$ 의 값은 부력체폭이 0일 때 공진발생조건인 $2l_1/L = 0.25$ 에 접근한다는 것을 나타낸다.

4.2 계류식

계류식에서는 공기주입식 부유식방파제의 상단에 파력발전시스템을 탑재하는 경우에 그에 상당하는 중량과 관성모멘트를 고려하여야 하지만 현 단계에서는 정확한 값을 추정하기

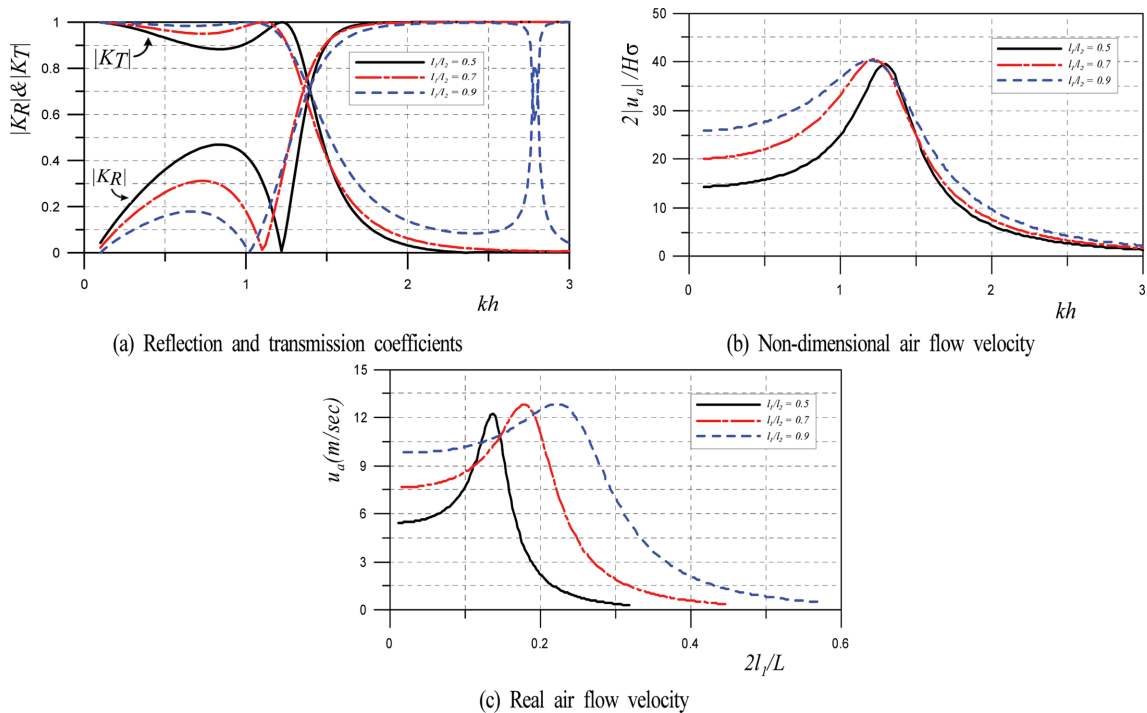


Fig. 6. Wave transformation and air flow velocity according to the change of l_1/l_2 ($l_2/h = 0.667$, $q_1 h/h = 0.4$, $d_a/h = 0.267$, $A_a/2l_2 = 0.035$, $H/L = 0.01$).

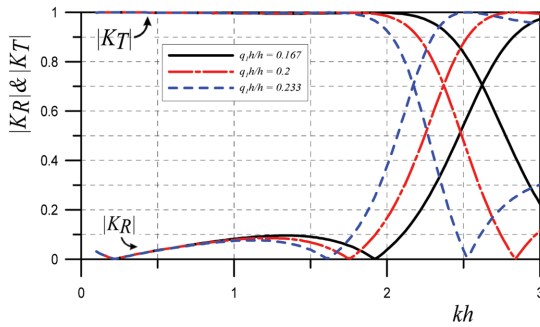
어려우므로 본 계산에서 $\rho'/\rho = 0.9$ (ρ 는 파력발전시스템을 탑재한 경우 구조물의 밀도로, 전단면에 걸쳐 균등하며, 구조물의 단면형상은 Fig. 2의 경우와 동일한 것으로 간주된다)를 가정하여 수치계산을 수행한다. 여기서, 본 연구의 계류시스템은 모두 연직긴장계류로 가정되고, 따라서 계류삭의 저항은 연직운동(Heave)에 대해서만 고려된다.

4.2.1 흡수심의 변화

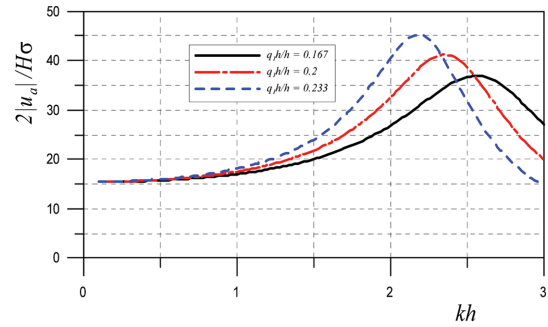
Fig. 7은 $h = 30$ m, $l_2 = 10$ m, $l_1 = 7$ m, $d_a = 4$ m, $d_l = 0.5$ m, $A_a = 0.7$ m²/m, $H/L = 0.01$, $\rho' = 0.9$ g/cm³에 대해 흡수심 $q_1 h$ 를 $q_1 h = 5, 6, 7$ m로 변화시킨 경우 kh 의 변화에 따른 파랑변형율 $|K_R|$ 과 $|K_T|$, 무차원공기흐름속도 $2|u_a|/H\sigma$, 실 공기흐름속도 $|u_a|$, 무차원수평운동 $2|\alpha|/H$, 무차원연직운동 $2|\beta|/H$ 및 $4l_2|\omega|/H$ (ω 는 부유식방파제의 회전운동에 대한 복소진폭)의 변동결과를 나타낸다. 그림으로부터 $kh < 2.0$ 의 장주기측에서 1.0 근방의 큰 전달율과 0.1 정도의 작은 반사율을

을 나타내지만 $kh > 2.0$ 의 단주기측에서는 파랑변형율이 크게 변동되는 것을 알 수 있고, $kh < 2.0$ 의 장주기측에서 반사율의 극대치를 나타내는 kh 의 값은 흡수심이 깊을수록 작아지므로 장주기측으로 이동된다. 전술한 고정시 Fig. 4의 경우와 비교하면 흡수심이 클수록 파랑변형율과 무차원공기흐름속도의 변화과정이 장주기측으로 이동되는 현상은 동일한 반면, 전체적인 그의 변화과정은 단주기측으로 이동되는 결과를 볼 수 있다.

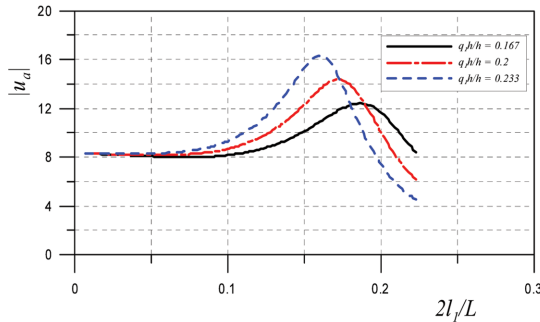
Fig. 7(b)에 나타난 무차원공기흐름속도를 살펴보면 그의 최대치는 $q_1 h/h = 0.167$ 의 경우 $kh = 2.56$ 에서 $2|u_{a|max}|/H\sigma = 36.92$; $q_1 h/h = 0.2$ 의 경우 $kh = 2.36$ 에서 $2|u_{a|max}|/H\sigma = 41.17$; $q_1 h/h = 0.233$ 의 경우 $kh = 2.18$ 에서 $2|u_{a|max}|/H\sigma = 45.30$ 의 값을 가지므로 전체적으로 전술한 고정시의 Fig. 4와 비교하여 약간 작은 공기흐름속도를 나타내며, 특히 최대치가 단주기측으로 이동됨에 따라 장주기측에서 상대적으로 매우 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이의 원인으로 파랑에너지가 분포하



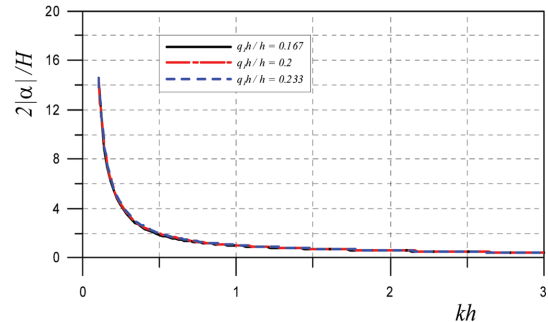
(a) Reflection and transmission coefficients



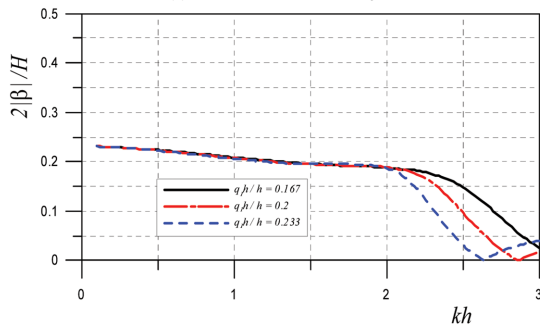
(b) Non-dimensional air flow velocity



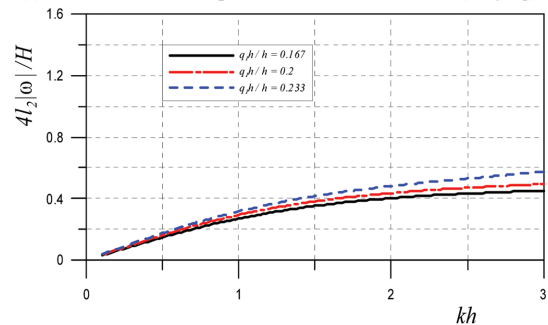
(c) Real air flow velocity



(d) Non-dimensional amplitude of horizontal motion (swaying)



(e) Non-dimensional amplitude of vertical motion (heaving)



(f) Non-dimensional amplitude of rotational motion (rolling)

Fig. 7. Wave transformation, air flow velocity and non-dimensional motion amplitudes of structure according to the change of $q_1 h/h$ in this case not considering compressibility of air in air-chamber ($l_1/l_2 = 0.7$, $l_2/h = 0.333$, $d_a/h = 0.133$, $d_l/h = 0.0167$, $A_a/2l_2 = 0.035$, $H/L = 0.01$, $\rho'/\rho = 0.9$, $K_{\beta\beta}/\rho g l_2 = 1.0$).

는 수심이 2배로 깊어졌고, 부유식에 따른 연직운동이 발생되기 때문이다. 하여튼, 최대치를 중심으로 장·단주기측으로 갈수록 무차원공기흐름속도가 작아지는 것이 전반적인 경향이다. 여기서, 공기흐름속도는 공기실내에서 수위변동 및 구조물의 연직운동과 연계되어 있기 때문에 그림으로부터 공기흐름속도의 변화과정에 파랑변형율과 연직운동의 변동특성이 크게 반영된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 공기실내에서 수면변동이 구조물 하부를 통과하는 파랑에너지와 연직운동에 직접적인 영향을 받기 때문인 것으로 여겨진다. 흘수심이 증가하는 경우 최대공기흐름속도는 증가하고, 발생위치는 장주기측으로 이동되는 경향을 나타낸다. 여기서, 최대실공기흐름속도는 $q_1 h/h = 0.167$ 의 경우 $2l_1/L = 0.186$ 에서 $|u_{dmax}| = 12.41$ m/s; $q_1 h/h = 0.2$ 의 경우 $2l_1/L = 0.172$ 에서 $|u_{dmax}| = 14.37$ m/s; $q_1 h/h = 0.233$ 의 경우 $2l_1/L = 0.160$ 에서 $|u_{dmax}| = 16.35$ m/s의 값을 가지며, 흘수심이 깊을수록 최대치가 증가하면서 발생위치가 장주기측으로 이동되는 현상 및 최대치의 발생위

치를 중심으로 장·단주기측으로 갈수록 값이 감소하는 현상은 무차원공기흐름속도의 경향과 동일하다. 그리고, 전술한 바와 같이 수심이 다르기 때문에 고정시의 Fig. 4와의 직접적인 비교는 어렵지만 고정시보다 약간 큰 최대 실공기흐름속도를 가진다.

다음으로, 구조물의 운동을 검토한다. 무차원수평운동은 $kh \approx 0.5$ 까지의 장주기측으로 갈수록 완만한 증가를 나타내며, $kh < 0.5$ 이후의 장주기측에서는 급격한 증가를 나타내지만 흘수심의 변화에 따른 차이는 거의 나타나지 않는다. 수평운동에서 큰 운동진폭을 나타내는 것은 본 연구의 구조물이 연직 긴장계류되어 수평운동에는 거의 저항력을 가지지 않기 때문이다. 무차원연직운동의 경우 전체적으로 단주기측으로 갈수록 감소하는 운동진폭을 나타내며, $kh < 2.0$ 의 장주기측에서는 흘수심의 변화에 따른 값의 차이는 거의 없지만 $kh > 2.0$ 에서는 흘수심의 변화에 따라 각각 극소치를 나타내며, 이의 값은 흘수심이 증가할수록 보다 장주기측에서 나타난다. 본

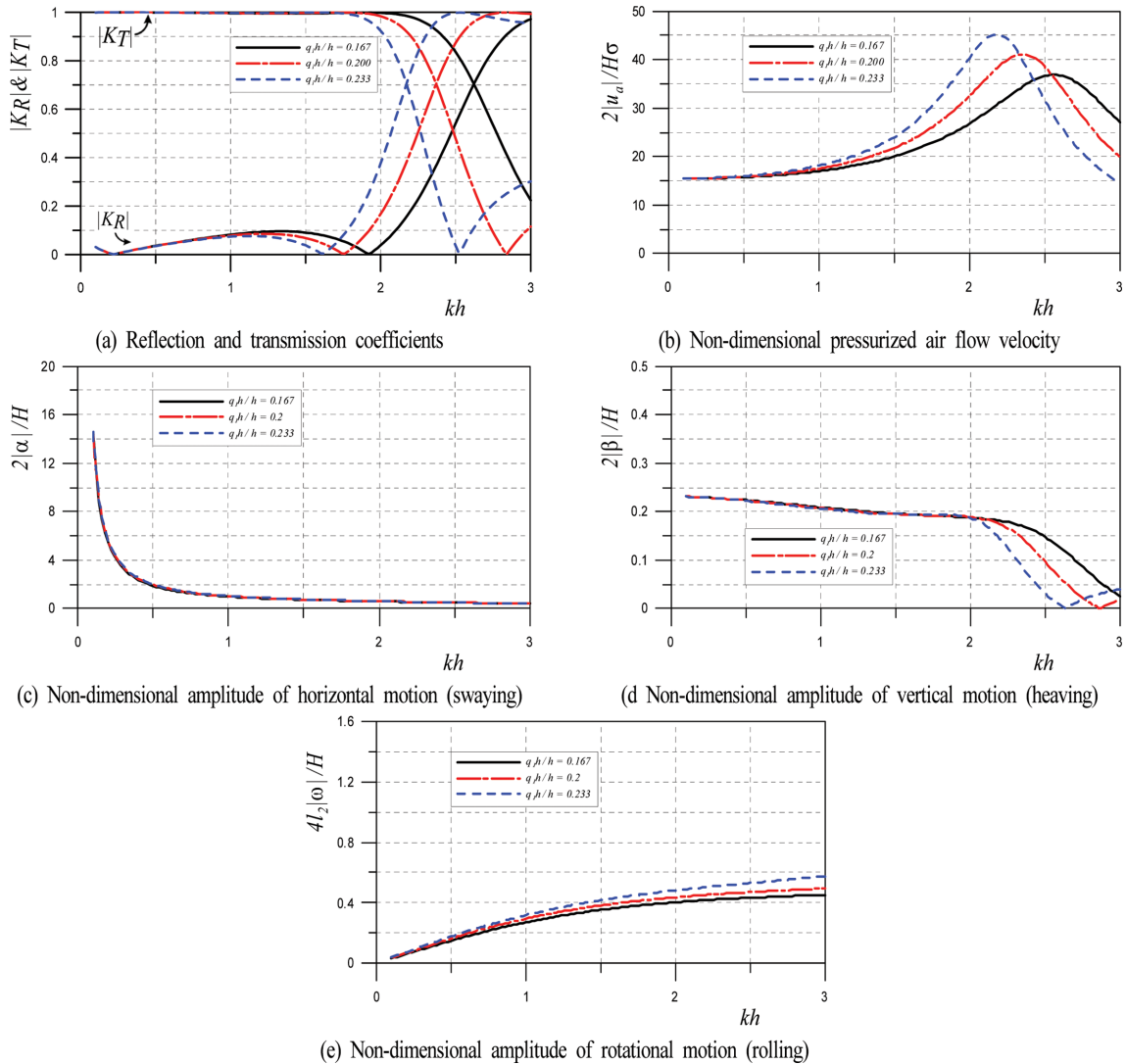


Fig. 8. Wave transformation, air flow velocity and non-dimensional motion amplitudes of structure according to the change of $q_1 h/h$ in case considering compressibility of air in air-chamber ($l_1/l_2 = 0.7$, $l_2/h = 0.333$, $q_2 h/h = 0.0$, $c_a = 1.0$, $d_a/h = 0.133$, $d_l/h = 0.0167$, $A_d/2l_2 = 0.035$, $H/L = 0.01$, $\gamma = 1.4$, $\rho_l/\rho = 0.9$, $K_{pg}/\rho g l_2 = 1.0$).

수치계산범위 내에서 무차원회전운동은 단주기측으로 갈수록 운동진폭이 증가하고, 흡수심이 깊을수록 커지면서 또한 차이도 커지는 경향을 나타낸다.

Fig. 8은 7과 동일한 조건하에 공기실내의 공기거동에 단열변화의 압축성을 적용한 경우의 결과를 나타낸다(Lee et al., 2014). 두 결과를 비교하면 파랑변형율, 공기흐름속도 및 구조물의 각 운동에서 차이를 알 수 없을 정도로 거의 동일한 결과를 나타낸다는 사실을 확인할 수 있다. 대표적으로 Fig. 8에서 무차원공기흐름속도의 최대치를 살펴보면 $q_1 h/h = 0.167$ 의 경우 $kh = 2.56$ 에서 $2|u_{a|_{\max}}/H\sigma = 36.86$; $q_1 h/h = 0.2$ 의 경우 $kh = 2.36$ 에서 $2|u_{a|_{\max}}/H\sigma = 41.10$; $q_1 h/h = 0.233$ 의 경우 $kh = 2.18$ 에서 $2|u_{a|_{\max}}/H\sigma = 45.21$ 의 값을 가지므로 Fig. 7의 경우와 비교하여 차이를 알 수 없을 정도이며, $O(10^{-2})$ 의 오차에서 차이를 나타낸다. 이상으로부터 전술한 고정시에서와 같이 파랑변형율을 포함하여 공기압축성의 고려유무에 따른 계산결과에서 차이는 거의 없다는 것을 확인할 수 있고, 따라서 계류시에도 공기실내에서의 공기거동해석에 비압축성을

고려하는 본 이론 및 수치계산이 압축성에 대한 전편의 연구(Lee et al., 2014)보다 훨씬 효율적이고, 동시에 간편하기 때문에 그의 유용성이 넓을 것으로 판단된다.

4.2.2 공기실폭의 변화

Fig. 9에 나타내는 결과는 $h = 30$ m, $l_2 = 10$ m, $q_1 h = 6$ m, $d_a = 4$ m, $d_i = 0.5$ m, $A_a = 0.7$ m²/m, $H/L = 0.01$, $\rho' = 0.9$ g/cm³에 대해 $l_1 = 5, 7, 9$ m로 변화시킨 경우 파랑변형율 $|K_R|$ 과 $|K_T|$, 무차원공기흐름속도 $2|u_a|/H\sigma$, 실공기흐름속도 $|u_a|$, 무차원수평운동 $2|\alpha|/H$, 무차원연직운동 $2|\beta|/H$ 및 $4l_2|\omega|/H$ 를 나타낸다. 결과에서 공기실폭이 넓을수록 반사율에서 극소치가 장주기측으로 이동되고, 파랑변형율이 급변하는 $kh > 2.0$ 에서는 공기실폭이 넓을수록 파랑변형율의 변화과정이 약간 완만해지는 경향을 나타낸다.

다음으로, 무차원공기흐름속도를 살펴보면 그의 최대치는 $l_1/l_2 = 0.5$ 의 경우 $kh = 2.46$ 에서 $2|u_{a|_{\max}}/H\sigma = 36.71$; $l_1/l_2 = 0.7$ 의 경우 $kh = 2.36$ 에서 $2|u_{a|_{\max}}/H\sigma = 41.17$; $l_1/l_2 = 0.9$ 의 경우

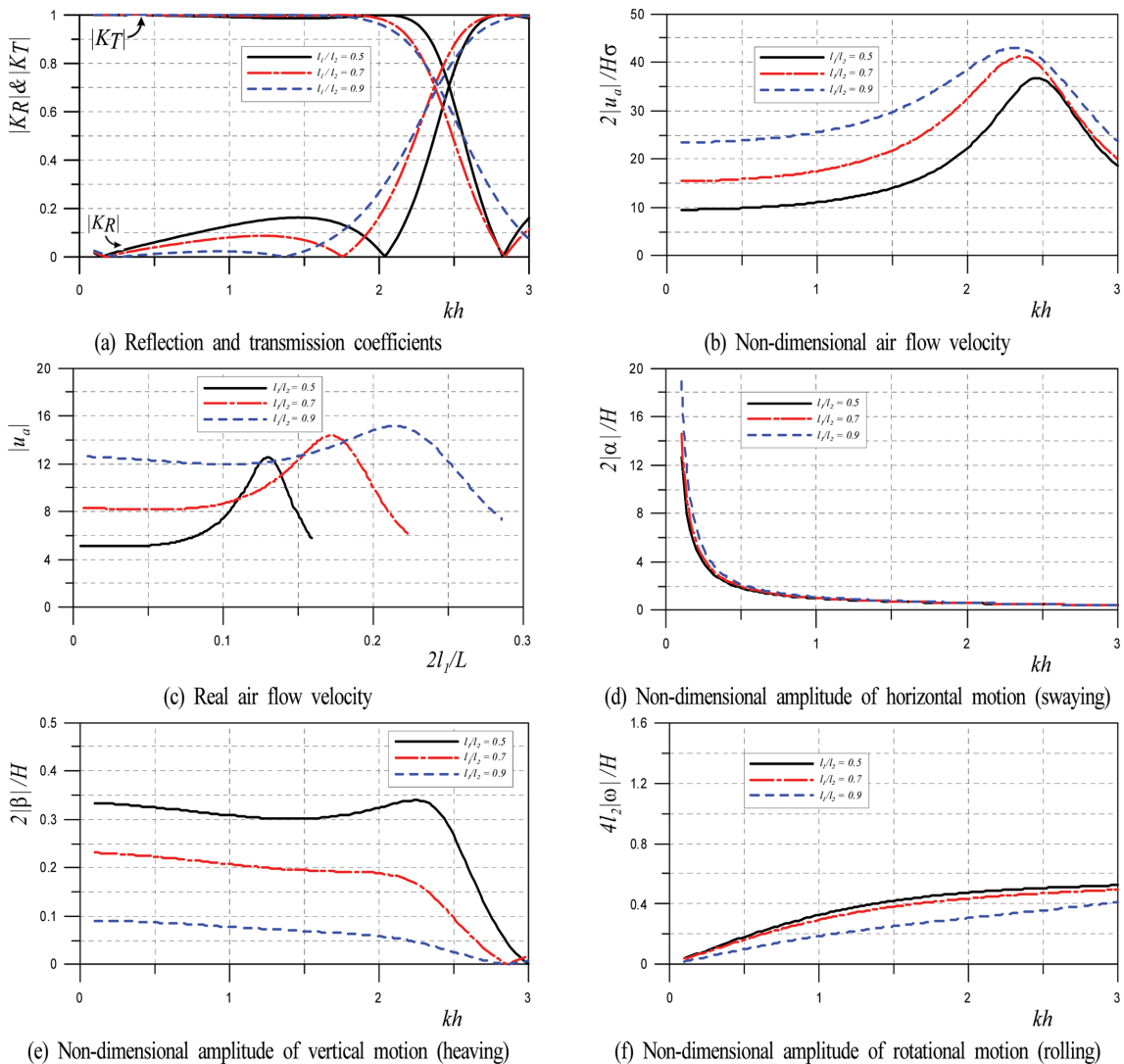
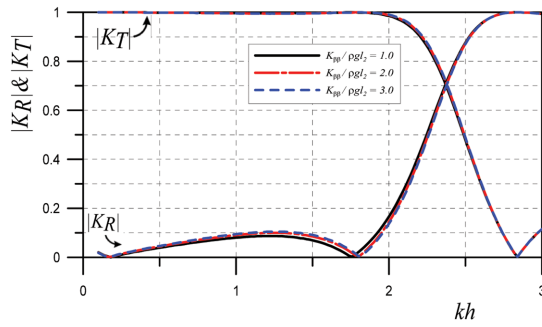


Fig. 9. Wave transformation, air flow velocity and non-dimensional motion amplitudes of structure according to the change of l_1/l_2 ($l_2/h = 0.333$, $q_1 h/h = 0.2$, $d_a/h = 0.133$, $d_i/h = 0.0167$, $A_a/2l_2 = 0.035$, $H/L = 0.01$, $\rho'/\rho = 0.9$, $K_{\beta\beta}/\rho g l_2 = 1.0$).

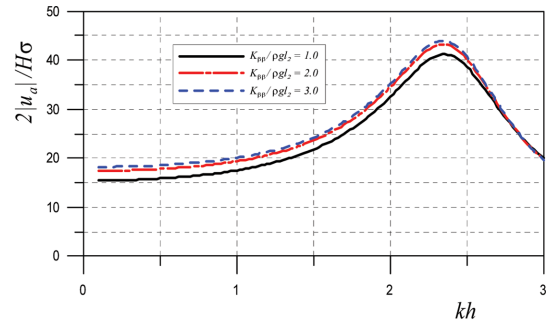
$kh = 2.32$ 에서 $2|u_{a|_{max}}/H\sigma = 42.94$ 의 값을 나타내므로 공기실 폭이 넓을수록 $kh > 2.0$ 의 단주기측에서 발생하는 최대치의 값이 커지고, 그의 kh 값이 작아지므로 장주기측으로 이동된다는 것을 알 수 있다. 특히, 최대치의 kh 를 중심으로 장 · 단 주기측으로 갈수록 감소하는 경향은 고정시 Fig. 6의 경우와 동일하며, 또한 최대치 kh 보다 장주기측에서는 공기실폭의 영향을 크게 받지만 단주기측에서는 상대적으로 작은 영향을 받는다. 이러한 결과는 실공기흐름속도를 나타낸 Fig. 9(c)에 그대로 반영되어 있지만 Fig. 9(b)의 경우와 다르게 보이는 것은 수평축이 공기실폭 $2l_1$ 과 파장 L 과의 비를 취하므로 l_1 이 작아지면 실제의 공기흐름속도는 전체적으로 수평축의 좌측으로 이동되기 때문이다. 여기서, 실공기흐름속도에서 최대치는 $l_1/l_2 = 0.5$ 의 경우 $2l_1/L = 0.129$ 에서 $|u_a|_{max} = 12.53$ m/s; $l_1/l_2 = 0.7$ 의 경우 $2l_1/L = 0.172$ 에서 $|u_a|_{max} = 14.37$ m/s; $l_1/l_2 = 0.9$ 의 경우 $2l_1/L = 0.214$ 에서 $|u_a|_{max} = 15.15$ m/s의 값을 가진다. 한편, l_1/l_2 의 비가 커지는 경우 l_2 가 일정하므로 결국 부력체의 폭이 좁아진다는 의미를 나타내며, 이의 경우 고정시

Fig. 6에서 언급된 바와 같이 계류시에도 최대실공기흐름속도의 발생위치 $2l_1/L$ 의 값은 부력체폭이 0에 접근할 때 공진 발생조건인 $2l_1/L = 0.25$ 에 접근한다는 것을 알 수 있다. 하여튼, Fig. 9(c)로부터 부력체의 폭이 넓을수록 공진이 발생하는 $2l_1/L$ 의 값은 작아진다는 것을 확인할 수 있다.

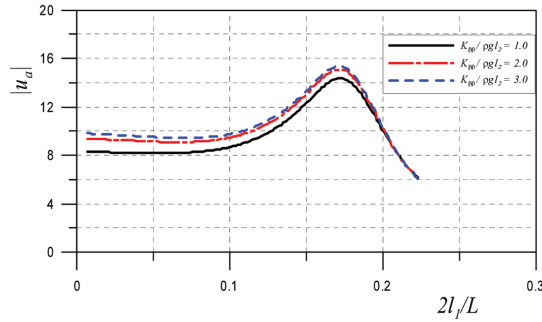
구조물의 운동을 검토한다. 무차원수평운동이 Figs. 7 및 8과 동일하게 장주기측으로 갈수록 급격한 증가하는 현상은 동일하지만 공기실폭이 넓을수록 장주기측에서 약간 큰 운동진폭을 보인다. 무차원연직운동의 경우는 전체적으로 단주기측으로 갈수록 작은 운동변위를 나타내며, 다른 경우와 달리 $l_1/l_2 = 0.5$ 의 경우는 $kh = 2.24$ 에서 극대치를 나타낸다. 여기서, 다른 운동에 비하여 연직운동이 공기실폭의 영향을 가장 크게 받는 것을 알 수 있고, 공기실폭이 작을수록 연직방향으로 작용하는 파압의 작용면적이 커지는 관계로 상대적으로 큰 연직운동을 나타낸다. 한편, 무차원회전운동은 연직운동과 달리 단주기측으로 갈수록 큰 운동변위를 나타내고, 공기실폭이 넓을수록 작은 진폭을 나타낸다.



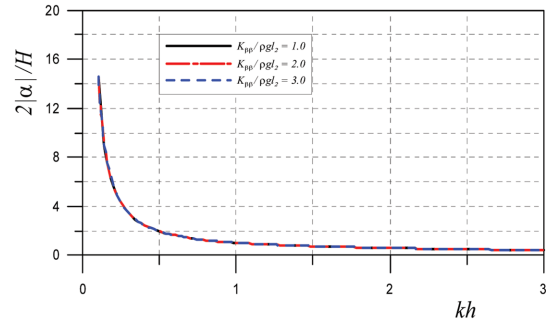
(a) Reflection and transmission coefficients



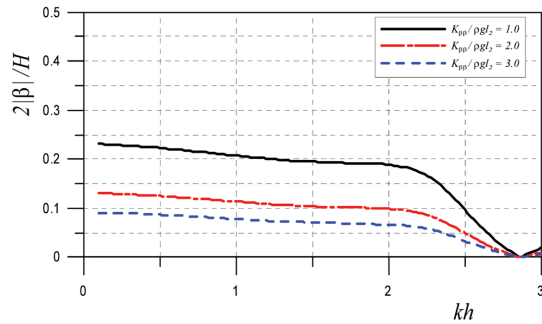
(b) Non-dimensional air flow velocity



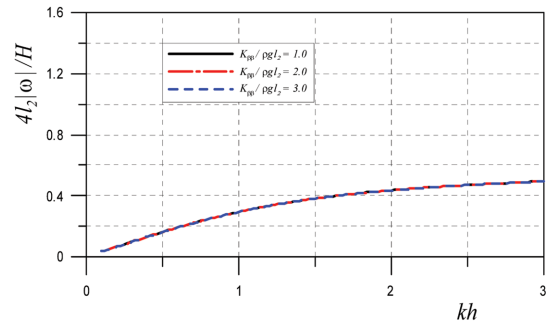
(c) Real air flow velocity



(d) Non-dimensional amplitude of horizontal motion (swaying)



(e) Non-dimensional amplitude of vertical motion (heaving)



(f) Non-dimensional amplitude of rotational motion (rolling)

Fig. 10. Wave transformation, air flow velocity and non-dimensional motion amplitudes of structure according to the change of $K_{\beta\beta}/\rho g l_2$ ($l_1/l_2 = 0.7$, $l_2/h = 0.333$, $q_1 h/h = 0.2$, $d_a/h = 0.133$, $d_r/h = 0.0167$, $A_d/2l_2 = 0.035$, $H/L = 0.01$, $\rho'/\rho = 0.9$).

4.2.3 계류삭에서 저항계수의 변화

다음의 Fig. 10에 나타내는 결과는 $h = 30 \text{ m}$, $l_2 = 10 \text{ m}$, $l_1 = 7 \text{ m}$, $q_1 h = 6 \text{ m}$, $d_a = 4 \text{ m}$, $d_i = 0.5 \text{ m}$, $A_a = 0.7 \text{ m}^2/\text{m}$, $H/L = 0.01$, $\rho' = 0.9 \text{ g/cm}^3$ 에 대해 계류삭의 무차원저항계수를 $K_{\beta\beta}/\rho g l_2 = 1, 2, 3$ 으로 변화시킨 경우 kh 의 변화에 따라 파랑변형율 $|K_R|$ 과 $|K_I|$, 무차원공기흐름속도 $2|u_a|/H\sigma$, 실공기흐름속도 $|u_a|$, 무차원수평운동 $2|\alpha|/H$, 무차원연직운동 $2|\beta|/H$ 및 $4|l_2|\omega/H$ 를 나타내고 있다. 그림의 결과로부터 계류삭에서 저항계수의 변화는 파랑변형율과 수평운동 및 회전운동에 미치는 영향은 거의 없지만 연직운동과 공기흐름속도에는 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 먼저, 무차원공기흐름속도에서 그 최대치는 $K_{\beta\beta}/\rho g l_2 = 1.0$ 의 경우 $kh = 2.34$ 에서 $2|u_{a\max}|/H\sigma = 41.17$; $K_{\beta\beta}/\rho g l_2 = 2.0$ 의 경우 $kh = 2.34$ 에서 $2|u_{a\max}|/H\sigma = 43.22$; $K_{\beta\beta}/\rho g l_2 = 3.0$ 의 경우 $kh = 2.34$ 에서 $2|u_{a\max}|/H\sigma = 43.94$ 로 주어지므로 계류삭에서 저항계수의 변화에 따른 최대치의 발생위치의 변동은 없다는 것을 알 수 있다. 또한, 실공기흐름속도의 경우도 동일한 경향을 나타내며, 최대실공기흐름속도는 $K_{\beta\beta}/\rho g l_2 = 1.0$ 의 경우 $2l_1/L = 0.172$ 에서 $u_{a\max} = 14.37 \text{ m/s}$; $K_{\beta\beta}/\rho g l_2 = 2.0$ 의 경우 $2l_1/L = 0.172$ 에서 $u_{a\max} = 15.11 \text{ m/s}$; $K_{\beta\beta}/\rho g l_2 = 3.0$ 의 경우 $2l_1/L = 0.172$ 에서 $u_{a\max} = 15.37 \text{ m/s}$ 를 갖는다. 다음으로, 연직운동의 경우는 단주기적으로 갈수록 무차원운동진폭이 감소하는 경향을 나타내며, 동시에 계류삭의 무차원저항계수가 클수록 작은 운동진폭을 나타낸다. 그리고, 연직운동의 커질수록 공기흐름속도는 작아지며, 이것은 제2장의 이론으로부터 쉽게 이해되는 현상이다.

5. 맺음말

본 연구에서는 부유식방파제로 연구·개발된 공기주입식 부유식방파제에 진동수주형 파력발전시스템을 탑재한 경우 방파제로의 기능과 파력발전장치로의 기능을 선형속도포텐셜이론에 기초한 경계요소법에 의한 수치해석으로부터 검토하였으며, 동시에 공기실내에서 공기거동에 대해 압축성을 고려한 전편의 연구(Lee et al., 2014)와는 달리 압축성을 고려하지 않은 경우를 대상으로 연구를 수행하였다. 해의 타당성은 전편의 연구(Lee et al., 2014)에서 여러 형태의 구조물에 대한 기존의 수치해석결과 및 실험결과와의 비교로부터 검증되었으며, 또한 고정시에 TWOPM-3D(Lee et al., 2011c)에 의한 수치해석결과와의 비교·검토로부터 검증되었다. 실제의 수치해석에서는 여러 파라미터(흘수심, 공기실폭 및 계류삭에서 저항계수 등)의 변화에 대해 고정시 및 계류시 부유식방파제에서 파랑변형율, 구조물의 운동 및 공기흐름속도 등의 변동특성을 논의하였다. 이로부터 얻어진 모든 해석결과는 공기압축성을 고려한 전편의 연구(Lee et al., 2014)와 2차오더에서 값의 차이를 나타낼 정도로 거의 동일한 결과를 나타내

는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 공기실내에서의 공기거동 해석에 압축성을 고려하지 않은 본 이론 및 수치계산이 압축성을 고려하는 전편의 연구(Lee et al., 2014)보다 훨씬 효율적이고, 동시에 간편하기 때문에 그의 유용성이 넓은 것으로 판단된다. 또한, 이러한 결과들은 진동수주형 파력발전시스템을 갖는 부유식방파제의 계획 및 설계에서 방파제로써의 가능성, 파력발전구조물로서의 가능성 및 그들의 평가 등에 중요한 기초자료로 제공될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 해양수산부 미래해양산업기술개발사업 해양수산기술사업화지원사업(No. 20170020)에 따른 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 사업임.

References

- Floating wind turbine concept. <https://oldbristolhistoricalsociety.wordpress.com/power/demonstration-projects/>.
- Kim, D.S. and Iwata, K. (1991). Dynamic behavior of tautly moored semisubmerged structure with pressurized air chamber and resulting wave transformation. *Coastal Engineering in Japan*, 34(2), 223-242.
- Lee, K.H., Park, J.H., Baek, D.J., Cho, S. and Kim, D.S. (2011a). Discussion on optimal shape for wave power convertor using oscillating water column. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(5), 345-357 (in Korean).
- Lee, K.H., Choi, H.S., Kim, C.H., Kim, D.S. and Cho, S. (2011b). Numerical analysis of pressurized air flow and acting wave pressure in the wave power generation system using the low-reflection structure with wall-typed curtain. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(2), 171-181 (in Korean).
- Lee, K.H., Ha, S.W., Lee, K.S. and Kim, D.S. (2011c). Numerical analysis for three-dimensional tsunami force acting on multi-onshore structures. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, 31(2B), 175-185 (in Korean).
- Lee, K.H., Kim, D.S., Yook, S.M., Jung, Y.H. and Jung, I.H. (2014). Dynamic response analysis of pressurized air chamber breakwater mounted wave-power generation system utilizing oscillating water column. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(4), 225-243 (in Korean).

Received 13 November, 2017

Revised 7 December, 2017

Accepted 10 December, 2017