



Stokes 파 중의 바지형 부유체의 굽힘강성변화에 따른 유탄성 응답 해석

A Hydroelastic Response Analysis of a Floating Body of Barge-type Based on Variation of Bending Stiffness in Stokes Waves

이승철* · 하영록** · 구자삼*†
 Seung-Chul Lee*, Young-Rok Ha** and Ja-Sam Goo*†

(Received 06 March 2017, Revision received 22 August 2018, Accepted 31 August 2018)

Abstract: Stokes waves representing the deep sea waves are expressed as superposition of several linear waves. To evaluate the motions of floating bodies in the deep seas, it is necessary to evaluate the motions of the bodies in the Stokes waves. The fifth-order Stokes waves are expressed as superposition of five linear waves. Therefore, the motion responses of the bodies in the Stokes waves would be expressed as superposition of the motion responses of the bodies in each linear wave. In this research, the experimental results were compared with the numerical results in linear waves and Stokes waves.

Key Words : Hydroelastic Responses, Stokes waves, Linear waves, Fluid-Structure Interaction

1. 서 론

선박이 파랑 중을 항해할 때, 초대형선의 경우 탄성응답을 유발하게 되고, 이는 선박의 구조적 안정성과 피로파괴 등에 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 실해역에서의 부유체의 유탄성 응답을 정확히 평가할 필요가 있다. 이러한 실해역의 해양 파를 잘 표현하는 파로서 5개 선형파의 중첩으로 표현되는 5차 Stokes 파이다.^{1,2)} 실해역에서의 부유체의 탄성응답을 정확히 평가하기 위해서는

Stokes 파 중에서의 응답을 평가할 필요가 있다.

Lee 등³⁾은 강체에 대해 stokes vk 중의 응답을 실험과 계산을 비교 검토하여, stokes 파중에서의 응답해석법의 타당성을 검증하였다.

본 연구에서는 Lee 등의 방법론을 이용하여 유탄성응답을 평가하였다. 계산모델로 강(steel)으로 탄성보를 만들고, 아크릴로 외각요소인 8개의 부분모형(길이 0.2 m×폭 0.5 m×흘수 0.15 m)을 만들어 탄성보와 외각요소를 결합한 길이 1.95 m×폭 0.5 m×흘수 0.15 m인 탄성보 모델을 사용했다. 탄

*† 구자삼(교신저자) : 부경대학교 조선해양시스템공학과
 E-mail : jsgoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6615

*이승철 : 부경대학교 조선해양시스템공학과

**하영록 : 거제대학교 조선해양공학과

*† Ja-Sam Goo(corresponding author) : Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University.

E-mail : jsgoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6615

*Seung-Chul Lee : Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University.

**Young-Rok Ha : Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Koje College.

성보 모델에 대해 동일한 파고($H=0.12$ m)를 갖는 선형파와 Stokes 파 중에서의 굽힘강성변화에 따른 유탄성응답을 계산하였다. 굽힘강성변화는 먼저, 탄성보의 치수는 변화시키지 않고, 탄성보의 종탄성계수(E)를 변화시켜 강성변화를 주었고, 두 번째는 탄성보의 종탄성계수를 고정시키고, 탄성보의 치수(I)를 변화시키기에 의해 강성변화를 주었다. 선형파에 대한 계산결과와 Stokes 파에 대한 계산결과를 비교·검토하여, 고주파수 영역에서의 굽힘강성변화에 따른 응답의 특성을 평가했다.

진동으로 하고, Roll 점성감쇠력은 외력으로 고려한다.

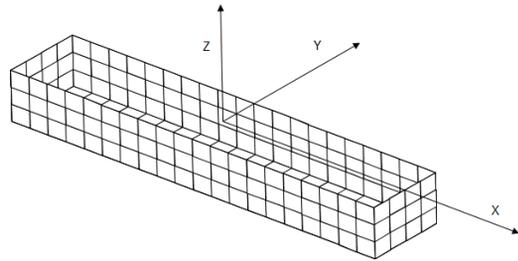


Fig. 1 Coordinate system

2. 이론해석

2.1 기본 가정 및 좌표계

기본가정으로서 유체는 이상유체이고 유체의 운동은 비회전인 것으로 한다. 또, 부유체의 운동과 입사파의 유체운동은 유한진폭의 주기운동을 하는 것으로 하고, 각각의 정상상태를 논하기로 한다. 또한 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한의 경우에는 수심을 일정으로 한다.

부유체는 자유표면에서 입사주파수 ω 로 운동하며, 좌표계로서는 Fig. 1에 보는 바와 같이 우수계의 기준좌표계 $o-xyz$ 를 취하고, xy 평면은 평균수면에 두고, z 축은 연직상방으로 향하고 있는 것으로 한다.

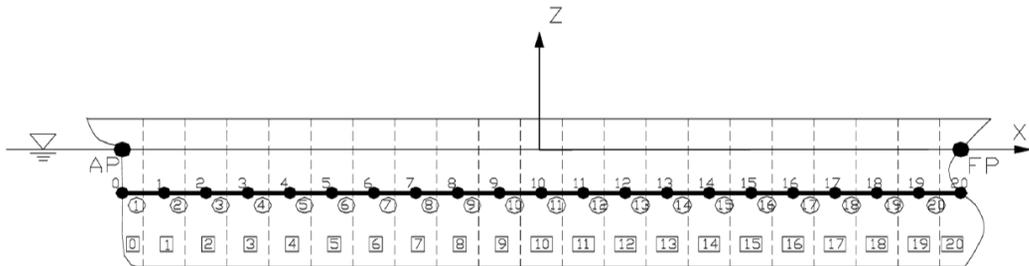
상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 하고, 각각의 평형위치에 대한 응답은 미소진폭의 조화

전체구조를 Fig. 2와 같이 요소로 분할하고, 각 요소는 역할에 따라 (1) 형상, 크기, 질량을 가지고, 외력을 받으며 강체로서 거동하는 외각요소(hull element)와 (2) 탄성체로서 외각요소의 절점을 연결하는 보요소(beam element) 등 2종류로 분류한다.

2.2 유탄성응답

외각요소에 작용하는 유체압력은 그 외각요소의 절점에서의 힘과 모멘트로 평가한다.

각 절점에서 평가한 힘과 모멘트는 변위, 속도, 가속도의 미지량을 포함하기 때문에, 구조전체의 절점 변위벡터를 $\{\eta\}$ 라 하고, 각 절점에 작용하는 힘과 모멘트를 결합해 줌으로써 구조 전체에 대한 다음과 같은 유탄성응답 방정식을 얻을 수 있다.



- 0,1,... : Node No.
- ①,②,... : Beam Element No.
- ⓪,①,... : Hull Element No.

Fig. 2 Element discretization of a ship

$$[-\omega^2([M_S] + [\mu]) - i\omega([C_S] + [\nu] + [\nu^V]) + ([K_S] + [K_P])]\{\eta\} = \{F^W\} \quad (1)$$

여기서,

$[M_S]$: 전체 질량행렬

$[\mu]$: 유체에 의한 전체 부가질량행렬

$[C_S]$: 전체 구조감쇠행렬

$[\nu]$: 전체 조파감쇠행렬

$[\nu^V]$: 전체 Roll 점성감쇠행렬

$[K_S]$: 전체 강성행렬

$[K_P]$: 정수압에 의한 전체 복원력행렬

$\{F^W\}$: 파강제력 벡터

$\{\eta\}$: 구조전체의 절점 변위 벡터

식 (1)의 연립방정식을 푸는 것에 의해, 절점 변위 벡터 $\{\eta\}$ 가 구해진다.^{4,6)}

2.3 Stokes waves

5차 Stokes 파형은 선형파의 중첩으로 다음과 같이 표현되어진다.

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 \\ &= K_1 \cos \theta + K_2 \cos 2\theta + K_3 \cos 3\theta + K_4 \cos 4\theta \\ &\quad + K_5 \cos 5\theta \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서, $\theta = kx - \omega t$ 이고, K_n 은 각 선형파의 계수값이다. 이러한 계수값은 $k\lambda^7$ 또는 $\epsilon (= kH/2)^1$ 를 파라미터로 표현되어지는데, 본 연구에서는 $\epsilon (= kH/2)$ 를 파라미터로 하는 Fenton의 표현식을 사용한다.

$$\begin{aligned} k\eta &= [\epsilon + \epsilon^2 B_{31} - \epsilon^5 (B_{53} + B_{55})] \cos \theta \\ &\quad + (\epsilon^2 B_{22} + \epsilon^4 B_{42}) \cos 2\theta \\ &\quad + (-\epsilon^3 B_{31} + \epsilon^5 B_{53}) \cos 3\theta \\ &\quad + \epsilon^4 B_{44} \cos 4\theta + \epsilon^5 B_{55} \cos 5\theta \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, B_{ij} 값은 다음과 같다.

$$B_{22} = \coth(kd)(1 + 2S)/(2C)$$

$$B_{31} = -3(1 + 3S + 3S^2 + 2S^3)/(8C^3)$$

$$B_{42} = \cosh(kd)(6 - 26S - 182S^2 - 204S^3 - 25S^4 + 26S^4)/[6(3 + 2S)C^4]$$

$$B_{44} = \cosh(kd)(24 + 92S + 122S^2 + 66S^3 + 67S^4 + 34S^4)/[24(3 + 2S)C^4]$$

$$B_{53} = 9(132 + 17S - 2216S^2 - 5897S^3 - 6292S^4 - 2687S^5 + 194S^6 + 467S^7 + 82S^8)/[128(3 - 2S)(4 + S)C^6]$$

$$B_{55} = 9(300 + 1579S + 3176S^2 + 2949S^3 + 1188S^4 + 645S^5 + 1326S^6 + 827S^7 + 130S^8)/[384(3 - 2S)(4 + S)C^6]$$

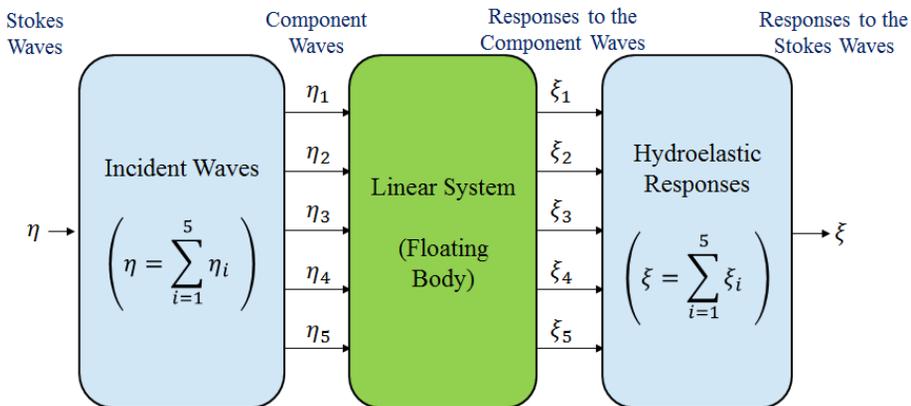


Fig. 3 Diagram of calculation

여기서, $S = \text{sech}(2kd)$, $C = 1 - S$ 이다.

각 계수계산에서 필요한 파수 k 의 계산을 위한 분산관계식은 다음과 같다.

$$C_0 + \epsilon^2 C_2 + \epsilon^4 C_4 = \frac{2\pi}{T\sqrt{gk}} \quad (4)$$

여기서, $C_0 = \sqrt{\tanh(kd)}$

$$C_2 = C_0(2 + 7S^2)/(4C^2)$$

$$C_4 = C_0(4 + 32S - 116S^2 - 400S^3 - 71S^4 + 146S^5)/(32C^5)$$

식 (4)를 반복법을 통해 파수 k 를 계산하였으며, 계산된 파수 k 를 이용해서 파형을 계산할 수 있다.

2.4 Stokes waves 파 중의 운동응답

5차 Stokes 파의 입사파에 대한 부유체의 유탄성응답은 선형으로 가정하였다. 따라서 Fig. 3에서 보듯이 먼저, Stokes 파를 형성하기 위한 5개의 성분파가 부유체에 입사했을 때 각각 계산을 수행하여 응답을 구한 후, 5개의 성분파에 대한 유탄성 응답들을 파형표현식인 식 (3)과 같이 선형중첩하여 다음과 같이 Stokes 파 중의 부유체의 유탄성 응답을 표현하는 것으로 하였다.

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 + \xi_5$$

$$= \left(\frac{1}{k}\right) \{ [\epsilon + \epsilon^2 B_{31} - \epsilon^5 (B_{53} + B_{55})] \zeta_1 + (\epsilon^2 B_{22} + \epsilon^4 B_{42}) \zeta_2 + (-\epsilon^3 B_{31} + \epsilon^5 B_{53}) \zeta_3 + \epsilon^4 B_{44} \zeta_4 + \epsilon^5 B_{55} \zeta_5 \} \quad (5)$$

여기서, ζ_n , ($n=1 \sim 5$)는 $\cos n\theta$, ($n=1 \sim 5$)의 규칙파에 대한 유탄성응답이다.

상기 식의 각 계수들은 파형식의 계수 및 식 (4)에 의해 계산된 파수를 이용하였다.

3. 수치계산 결과 및 고찰

3.1 계산모델

계산 모델은 Fig. 4와 같이 강으로 탄성보를 만들었고, 아크릴로 외각요소인 8개의 부분모형을 만들어 탄성보와 외각요소를 결합한 탄성보 모델로 사용했다. 이 모델은 탄성거동을 강의 탄성보로 재현하고, 유체력을 외각요소가 받는 형식으로 모델링한 것이다. 강의 종탄성계수는 $2.1 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$ 이다.

본 계산에서는 먼저, 강의 탄성계수(E)를 원래 탄성계수의 50%, 75%, 125%에 대해 계산을 수행하였다. 그리고 강의 탄성계수를 원 종탄성계수(E)로 고정을 하고, 강의 치수(두께, I)를 변화시키며 계산을 수행하였다. 그 계산 조건은 Table 1과 같다.

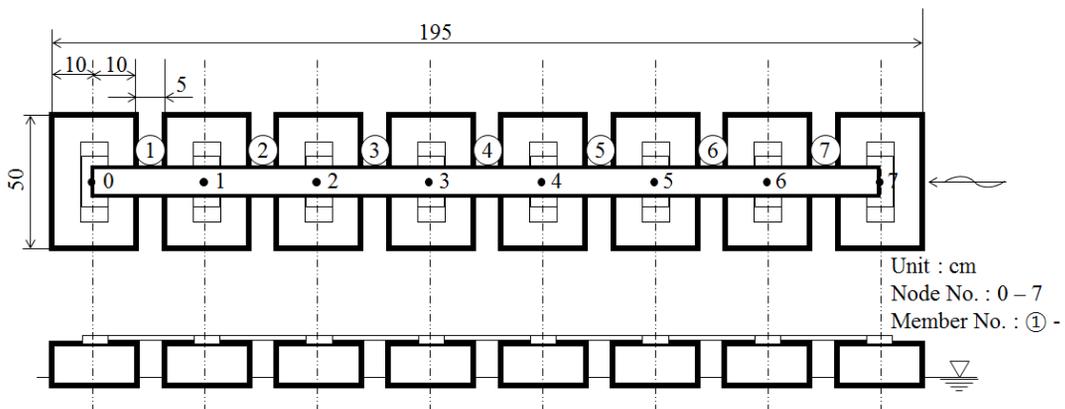


Fig. 4 Sketch of an large type floating body and the beam elements for the upper structure

Table 2 Condition of calculation

Wave height		0.12 m
Wave period		0.6~1.3 sec.
Case 1	E	$1.575 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$
		$2.1 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$
		$2.625 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$
Case 2	Thickness of steel	0.004 m
		0.006 m
		0.008 m
		0.009 m

4. 결과 및 고찰

4.1 수치계산

Fig. 5는 유체력 계산을 하기 위해 모델의 외각 요소의 침수표면을 3,061개의 요소로 분할한 것이다.

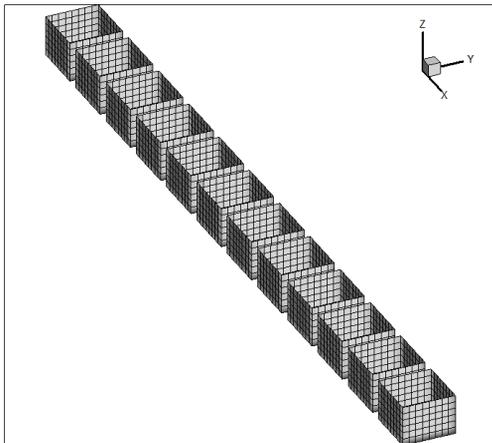


Fig. 5 Submerged surface of a model represented 3061 panels

4.2 계산결과 비교

4.2.1 탄성계수 변화에 따른 응답 비교

Fig. 6~8은 탄성보의 절점 0, 3, 7에서의 탄성계수값의 변화에 따른 수직 회전 변위를 보이고 있다. 도형이 없는 선(실선, 점선, 일점쇄선)은 파고 0.12 m의 Stokes 파에 대한 계산결과이고, 도형

(△)을 포함한 선은 동일한 파고를 갖는 선형파에 대한 계산결과를 나타내고 있다. 그리고 실선은 원 탄성계수에 대한 응답이고, 점선은 회색은 원 탄성계수의 75%, 일점쇄선은 원 탄성계수의 125%를 나타내고 있다.

Fig. 6은 파상측에 위치한 부체(절점 0)의 수직 회전 변위를 보이고 있다. 파주기 0.775초 부근을 기준으로 이전의 파주기에서는 Stoke 파에 대한 응답이 선형파의 응답보다 높게 나타나지만, 그 이후에는 선형파의 응답이 약간 높게 나타나지만 거의 비슷하게 나타는데, 이는 고주파수대의 응답의 영향으로 나타나는 것으로 사료된다. 탄성계수가 증가함에 따라 응답이 감소하는데, 75%에서의 응답과 원 탄성계수의 응답의 감소률에 비해, 원 탄성계수에서의 응답과 125%의 응답의 감소률이 작음을 알 수 있다.

Fig. 7은 중앙부에 위치한 부체(절점 3)의 수직 회전 변위를 보이고 있다. 중앙부에서도 고주파수 영역에서 Stoke 파에 대한 응답이 높게 나타남을 알 수 있다. 파주기 0.85초 이후의 장주기 파에 대한 응답에서는 탄성계수의 영향이 나타나지 않으며, Stokes 파에 대한 응답과 선형파에 대한 응답 또한 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

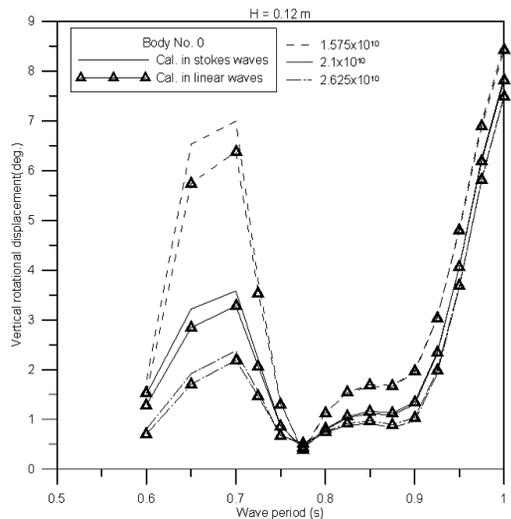


Fig. 6 Vertical rotational displacement at the node No. 0

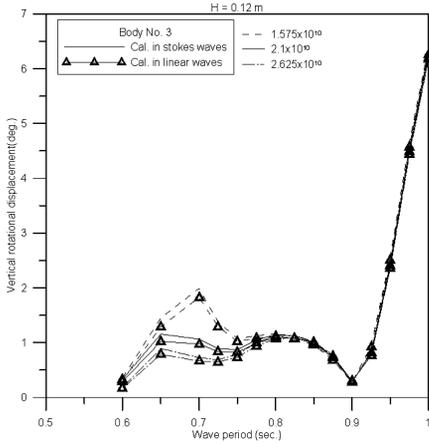


Fig. 7 Vertical rotational displacement at the node No. 3

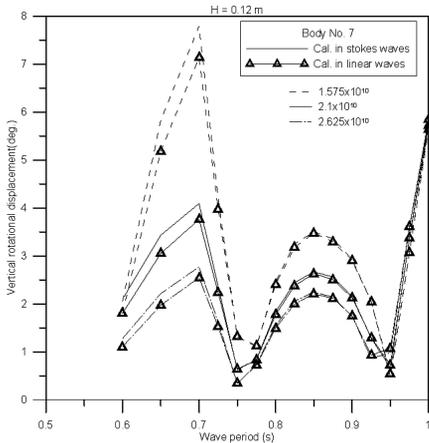


Fig. 8 Vertical rotational displacement at the node No. 7

Fig. 8은 좌측에 위치한 부체(절점 7)에 대한 수직 회전 변위를 보이고 있다. 전반적으로 좌측측의 결과와 유사한 경향을 보이지만, 파주기 0.75초 이후에는 탄성계수와 입사파에 따른 응답이 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

4.2.2 탄성보의 두께변화에 따른 응답 비교

Fig. 9~11은 탄성보의 두께 변화에 따른 수직 회전 변위를 보이고 있다. 도형이 없는 선(실선, 점선, 일점쇄선)은 파고 0.12 m의 Stokes 파에 대한 계산결과이고, 도형(△)을 포함한 선은 동일한

파고를 갖는 선형파에 대한 계산결과를 나타내고 있다. 그리고, 실선은 탄성보의 두께가 0.004 m, 점선은 0.006 m 그리고 일점 쇄선은 0.008 m에 대한 응답을 나타내고 있다.

Fig. 9는 좌측측에 위치한 부체(절점 0)의 수직 회전 변위를 보이고 있다. 파주기 0.775초 부근을 기준으로 이전의 파주기에서는 Stokes 파에 대한 응답이 선형파의 응답보다 높게 나타나지만, 그 이후에는 선형파의 응답이 약간 높게 나타나지만 거의 비슷하게 나타내는데, 이는 고주파수대의 응답의 영향으로 나타나는 것으로 사료된다. 탄성보의 두께가 증가함에 따라 관성모멘트가 변화하게 되는데, 0.002 m의 두께 변화가 탄성계수의 25% 변화보다 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 탄성보의 두께가 0.008 m의 경우, Stokes 파에 대한 결과와 선형파에 대한 결과가 거의 비슷하게 나타나고 있다. 이는 강성이 증가함에 의해 탄성체보다는 강체에 가까운 상태가 되면서 고주파수에서의 응답의 영향이 거의 나타나지 않기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 10은 중앙부에 위치한 부체(절점 3)의 수직 회전 변위를 보이고 있다. 중앙부에서도 고주파수 영역에서 Stokes 파에 대한 응답이 높게 나타남을 알 수 있다. 파주기 0.85초 이후의 장주기 파에 대한 응답에서는 탄성보의 두께변화에 따른 관성모멘트의 영향의 나타나지 않으며, Stokes 파에 대한

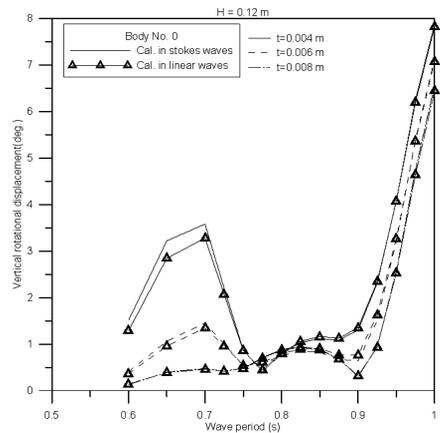


Fig. 9 Vertical rotational displacement at the node No. 0

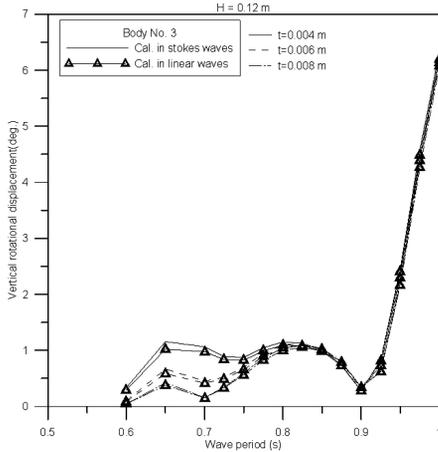


Fig. 10 Vertical rotational displacement at the node No. 3

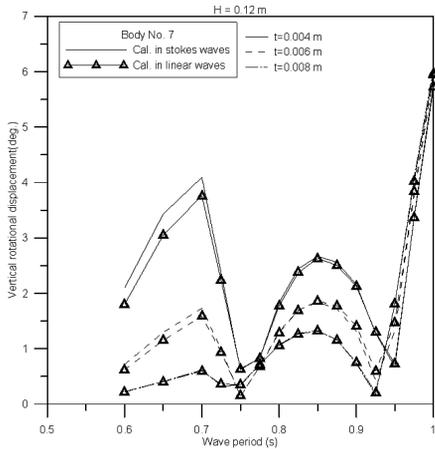


Fig. 11 Vertical rotational displacement at the node No. 7

응답과 선형파에 대한 응답이 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 탄성보의 두께가 0.008 m일 때는 파상측에서의 결과와 유사하게 나타나고 있다.

Fig. 11은 파하측에 위치한 부체(절점 7)에 대한 수직 회전 변위를 보이고 있다. 전반적으로 파상측의 결과와 유사한 경향을 보이지만, 파주기 0.75초 이후에는 탄성보의 두께 변화에 따른 관성 모멘트의 영향이 나타나지만 큰 차이를 보이지 않으며, Stokes 파와 선형파에 따른 응답이 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

5. 결론

Stokes 파중에서의 바지형 부체의 유탄성운동응답을 굽힘강성변화에 따라 계산해본 결과는 다음과 같다.

1) 피크가 발생하는 파주기 0.67초 부근에서는 Stokes 파에서의 유탄성 응답이 다소 크게 나타났지만, 파주기 0.8초 이후에는 선형파에서의 유탄성 응답과 Stokes 파에서의 유탄성 응답이 비슷하게 나타났는데, 이는 고주파수의 영향이 단주기의 파에서 나타남에 따라 장주기 파로 갈수록 그 영향이 나타나지 않았다.

2) 강성값의 변화에도 불구하고, 고주파수 영역에서는 Stokes 파중에서의 유탄성 응답이 선형규칙파에서의 유탄성 응답보다 다소 높게 나타났다. 이는 1, 2차 항의 저주파수에서의 유탄성 응답에 3차 이상이 되는 고주파수에서의 유탄성 응답의 영향이 나타남에 의한 것으로 사료된다.

3) 현재 계산모델은 고주파수에서의 응답이 크게 나타나는 구조물이 아니었음에도 불구하고, 고주파수에서 응답의 영향을 확인할 수 있었다. 따라서, 고주파수에서의 응답이 크게 나타나는 구조물의 경우, 고차항의 영향이 크게 나타날 것이므로 Stokes 파에서의 응답이 크게 나타날 것으로 예상된다. 이에 대한 연구는 앞으로 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

References

1. J. D. Fenton, 1985, "A Fifth-order stokes theory for steady waves", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 111, No. 2, pp. 216-234.
2. J. D. Fenton, 1990, "Nonlinear Wave Theories", *The Sea*, Vol. 9 : *Ocean Engineering Science*, Eds. B. Le Mehaute and D.M. Hanes, Wiley,

- New York.
3. S. C. Lee and J. S. Goo, 2017, "A motion response analysis of a floating body of barge-type in stokes waves", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 50-55.
 4. S. C. Lee, Y. R. Ha, D. H. Doh and J. S. Goo, 2010, "A Hydroelastic Response Analysis of Barge Type Ships in Rrgular Waves", Journal of the Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 24, No. 2, pp. 34-40.
 5. Y. R. Ha, S. C. Lee and J. S. Goo, 2010, "Hydroelastic Response Analysis of TLPs in Regular Waves", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 48-54.
 6. S. C. Lee, D. H. Doh and J. S. Goo, 2010, "Analysis of Wave Loads of Ships with Advancing Speed in Regular Waves", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 53-58.
 7. L. Skjelbreia and J. Hendrickson, 1960, "Fifth order gravity wave theory", proceedings 7th Conference of Coastal Engineering, pp. 184-196.