

Stokes 파 중의 바지형 부유체의 동적구조응답해석 A Dynamic Structural Response Analysis of a Floating Body of Barge-type in Stokes Waves

이승철* · 구자삼**†
Seung-Chul Lee* and Ja-Sam Goo**†

(Received 30 March 2022, Revision received 16 June 2022, Accepted 16 June 2022)

Abstract : To evaluate the response of floating bodies in the deep seas, it is necessary to evaluate the responses of the bodies in the Stokes waves. The fifth-order Stokes waves are expressed as a superposition of five linear waves. Therefore, the dynamic structural responses of the bodies in the Stokes waves would be expressed as a superposition of the dynamic structural responses of the bodies in each linear waves. In this research, for the elastic beam model, the structural strength of the linear and Stokes waves with the same wave height ($H=0.12$ m) was calculated. By comparing and reviewing the calculation results for the linear wave and the calculation result for the Stokes wave, the characteristics of the structural response in the high-frequency region were evaluated.

Key Words : Dynamic structural response, Stokes waves, Linear waves, Hydroelastic response

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.

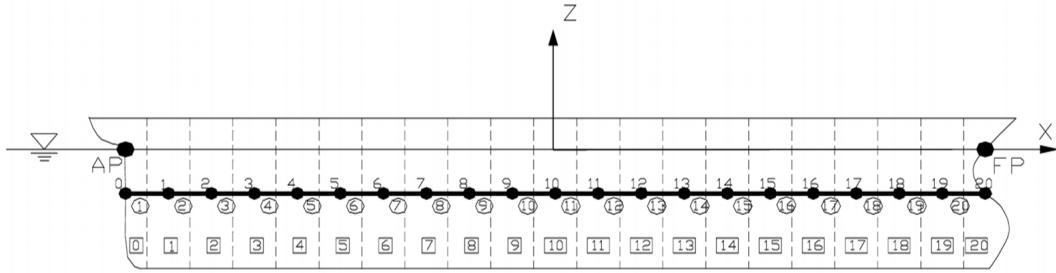
Lee 등^{3,4)}은 강체에 대해 stokes 파 중의 응답을 실험과 계산을 비교·검토하여 stokes 파중에서의 응답해석법의 타당성을 검증하였다.

파랑 중 항행하는 선박을 대상으로 하여 탄성 응답을 정도 좋게 추정하기 위해 선박을 탄성부유체로 다루어야 하고, 탄성체가 파랑 중 동적거동을 할 때에는 유체-구조 상호간섭을 고려하여 운동과 구조응답을 동시에 구할 필요가 있다.

본 연구에서는 Lee 등의 방법론^{3,4)}을 이용하여 구조응답을 평가하였다. 계산모델로 강(steel)으로 탄성보를 만들고, 아크릴로 외각요소인 8개의 부

*† 구자삼(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1317-1883) : 교수, 부경대학교 조선해양시스템공학과
E-mail : jsgoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6615
*이승철(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9282-9593) : 강사, 부경대학교 조선해양시스템공학과

*† Ja-Sam Goo(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1317-1883) : Professor, Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University.
E-mail : jsgoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6615
*Seung-Chul Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9282-9593) : Instructor, Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University.



0,1,... : Node No.

Fig. 1 Element discretization of a ship

분모형(길이 2.55 m×폭 0.52 m×흘수 0.05 m)을 만들어 탄성보와 외각요소를 결합한 길이 2.24 m×폭 0.073 m×두께 0.04 m인 탄성보 모델을 사용했다. 탄성보 모델에 대해 동일한 파고(H=0.12 m)를 갖는 선형파와 Stokes 파 중에서의 구조내력을 입사각을 변화시키며 계산을 수행하였다. 선형파에 대한 계산결과와 Stokes 파에 대한 계산결과와 Stokes 파중에서의 계산결과를 비교·검토하여 고주파수파의 영향에 따른 부유체의 동적구조응답 특성을 평가하였다.

2. 탄성응답해석

2.1 기본가정 및 좌표계

탄성응답 해석법에 의해 배의 동적 구조응답을 해석하기 위한 기본가정은 다음과 같다.

- 1) 유체는 비압축성, 비점성으로 하고, 유체의 운동은 비회전인 것으로 한다.
- 2) 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한인 경우에는 수심을 일정으로 한다.
- 3) 상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 한다.
- 4) 각각의 평형위치에 대해 응답은 미소진폭의 조화진동으로 한다.

위의 가정에도 불구하고, Roll 점성감쇠력은 외력으로 고려한다. 전체구조를 Fig. 1과 같이 요소로 분할하고, 각 요소는 그 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 보요소의 강성에 기인한 절점력

j, k 번째 2개의 절점을 연결하는 l 번째의 탄성보요소에 있어서, 국소 좌표계에서의 절점력과 절점변위를 결합하는 요소 강성행렬은 다음과 같이 전체 강성 방정식으로 변환된다.

$$\begin{Bmatrix} \{F'_B\} \\ \{M'_B\} \\ \{F''_B\} \\ \{M''_B\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [C]^T [K'_{jj}] [C] & [C]^T [K'_{jk}] [C] \\ [C]^T [K'_{kj}] [C] & [C]^T [K'_{kk}] [C] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U'_l\} \\ \{U''_l\} \\ \{U'_l\} \\ \{U''_l\} \end{Bmatrix}$$

여기서, 좌표 변환 행렬 $[C]$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$[C] = \begin{bmatrix} [C'_s] & [0] \\ [0] & [C'_s] \end{bmatrix}$$

여기서, $[C'_s]$ 는 $[C'_s]$ 와 같이 전체 좌표계를 국소 좌표계로 변환시키는 변환행렬이다.

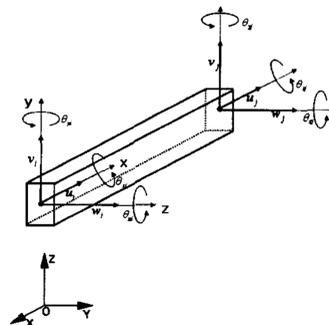


Fig. 2 Local coordinate and Beam element

2.3 운동 방정식

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 결합해줌으로써 구조 전체에 대한 다음과 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

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

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.^{5,6)}

2.4 구조내력 응답

j, k 번째 2개의 절점을 연결하는 l 번째의 탄성

보요소에 대하여, 양단의 변위를 각각 \cos 항과 \sin 항으로 나누어 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\begin{Bmatrix} \{U_l^j\} \\ \{U_r^j\} \\ \{U_l^k\} \\ \{U_r^k\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{U_{lc}^j\} \\ \{U_{rc}^j\} \\ \{U_{lc}^k\} \\ \{U_{rc}^k\} \end{Bmatrix} \cos \omega t + \begin{Bmatrix} \{U_{ls}^j\} \\ \{U_{rs}^j\} \\ \{U_{ls}^k\} \\ \{U_{rs}^k\} \end{Bmatrix} \sin \omega t$$

보요소의 국소 좌표계로 평가한 내력과 모멘트는 윗 식에 의해 다음과 같이 얻어진다.⁷⁾

$$\begin{Bmatrix} \{f_{*j}^j\} \\ \{m_{*j}^j\} \\ \{f_{*k}^k\} \\ \{m_{*k}^k\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [K_{jj}^d][C^d] & [K_{jk}^d][C^d] \\ [K_{kj}^d][C^d] & [K_{kk}^d][C^d] \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{Bmatrix} \{U_{lc}^j\} \\ \{U_{rc}^j\} \\ \{U_{lc}^k\} \\ \{U_{rc}^k\} \end{Bmatrix} \cos \omega t + \begin{Bmatrix} \{U_{ls}^j\} \\ \{U_{rs}^j\} \\ \{U_{ls}^k\} \\ \{U_{rs}^k\} \end{Bmatrix} \sin \omega t \right) \quad (2)$$

2.5 Stokes waves

5차 Stokes 파형은 선형파의 중첩으로 다음과 같이 표현되어진다.

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

여기에서, $\theta = kx - \omega t$ 이고, K_n 은 각 선형파의

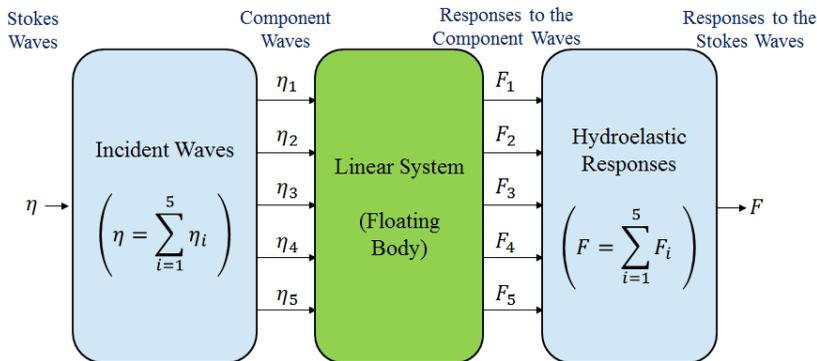


Fig. 3 Diagram of calculation

계수값이다. 이러한 계수값은 $k\lambda$ 또는 $\epsilon(=kH/2)$ 를 파라미터로 표현되어지는데, 본 연구에서는 $\epsilon(=kH/2)$ 를 파라미터로 하는 Fenton의 표현식을 사용한다.

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

여기서, B_{ij} 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 B_{22} &= \coth(kd)(1+2S)/(2C) \\
 B_{31} &= -3(1+3S+3S^2+2S^3)/(8C^3) \\
 B_{42} &= \cosh(kd)(6-26S-182S^2-204S^3-25S^4 \\
 &\quad + 26S^4)/[6(3+2S)C^4] \\
 B_{44} &= \cosh(kd)(24+92S+122S^2+66S^3+67S^4 \\
 &\quad + 34S^4)/[24(3+2S)C^4] \\
 B_{53} &= 9(132+17S-2216S^2-5897S^3-6292S^4 \\
 &\quad - 2687S^5+194S^6+467S^7+82S^8) \\
 &\quad / [128(3-2S)(4+S)C^6] \\
 B_{55} &= 9(300+1579S+3176S^2+2949S^3+1188S^4 \\
 &\quad + 645S^5+1326S^6+827S^7+130S^8) \\
 &\quad / [384(3-2S)(4+S)C^6]
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, $S = \text{sech}(2kd)$, $C = 1 - S$ 이다. 각 계수계산에서 필요한 파수 k 의 계산을 위한 분산관계식은 다음과 같다.

$$C_0 + \epsilon^2 C_2 + \epsilon^4 C_4 = \frac{2\pi}{T\sqrt{gk}} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 \text{여기서, } C_0 &= \sqrt{\tanh(kd)} \\
 C_2 &= C_0(2+7S^2)/(4C^2) \\
 C_4 &= C_0(4+32S-116S^2-400S^3 \\
 &\quad - 71S^4+146S^5)/(32C^5)
 \end{aligned}$$

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

2.6 Stokes waves 파 중의 구조응답

5차 Stokes 파의 입사파에 대한 부유체의 구조내력응답은 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 구조내력 응답들을 파형표현식인 식 (4)와 같이 선형중첩하여 다음과 같이 Stokes 파 중의 부유체의 구조내력 응답을 표현하는 것으로 하였다.

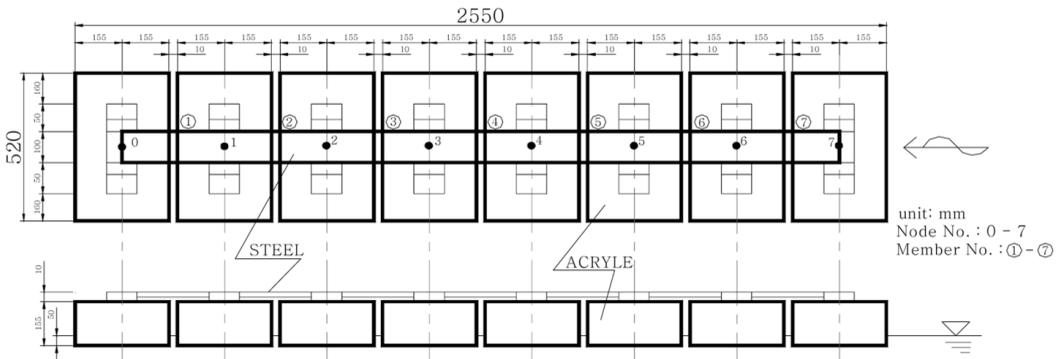


Fig. 4 Sketch of an barge type floating body and the beam elements for the upper structure

$$\begin{aligned}
 F &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \\
 &= \left(\frac{1}{k}\right) \{ [\epsilon + \epsilon^2 B_{31} - \epsilon^5 (B_{53} + B_{55})] F_1 \\
 &\quad + (\epsilon^2 B_{22} + \epsilon^4 B_{42}) F_2 + (-\epsilon^3 B_{31} + \epsilon^5 B_{53}) F_3 \\
 &\quad + \epsilon^4 B_{44} F_4 + \epsilon^5 B_{55} F_5 \} \quad (7)
 \end{aligned}$$

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

상기 식의 각 계수들은 파형식의 계수 및 식 (5)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 $1.575 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$ 이다. 계산 조건은 Table 1과 같다.

Table 2 Condition of calculation

Wave height	0.12 m
Wave period	0.84~8.4 sec
Incident angle	0.0°, 45.0°, 90.0°

4. 결과 및 고찰

4.1 계산결과 비교

4.1.1 수직전단력(Vertical Bending Moment)

Fig. 5~7은 입사각에 따른 수직전단력을 나타내고 있으며, Fig. 5는 파하측에서의 계산결과를 나타내고 있다. 전체적으로 Stokes 파중에서의 응답이 선형파중에서의 응답에 비해 10% 정도 높은 값을 나타내고 있다. 이는 고주파수대에서 영향이 나타남을 알 수 있다.

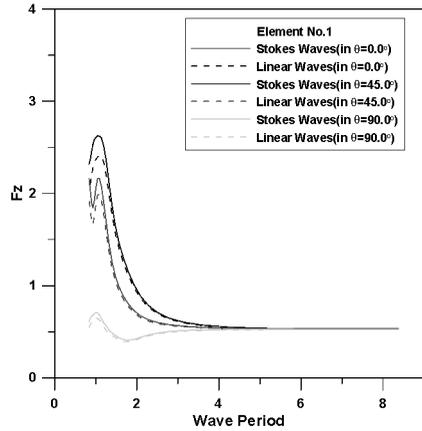


Fig. 5 Verical shear force at element No. 1

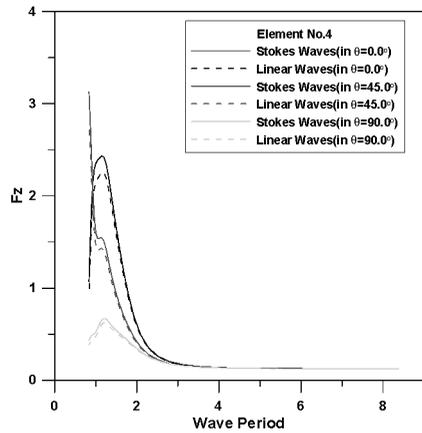


Fig. 6 Verical shear force at element No. 4

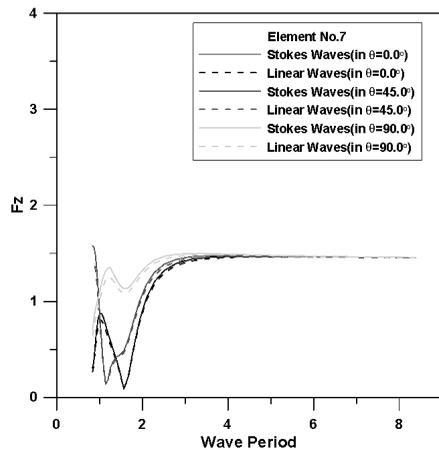


Fig. 7 Verical shear force at element No. 7

Fig. 6은 선체 중앙에서의 계산결과를 나타내고 있다. 입사각이 45°(사파)의 경우 Stokes 파중에서의 응답이 선형파중에서의 응답에 비해 12% 높은 값을 나타내고 있으며, 그 외의 입사각에 대해서는 7~8% 높은 값을 나타내고 있다. Fig. 7은 파상측에서의 계산결과를 나타내고 있다. 사파의 경우 Stokes 파중에서의 응답이 선형파중에서의 응답에 비해 7% 높은 값을 나타내고 있지만, 그 외의 입사각에 대해서는 거의 유사한 응답을 나타내고 있음을 알 수 있다.

4.1.2 비틀림 모멘트(Torsion Moment)

Fig. 8~10은 입사각에 따른 비틀림 모멘트를 나타내고 있으며, Fig. 8은 파하측에서의 계산결과를 나타내고 있다. 사파의 경우 Stokes 파중에서의 응답이 선형파중에서의 응답에 비해 10% 높은 값을 나타내고 있으며, 그 외의 입사각에 대해서는 5~6% 높은 값을 나타내고 있다.

Fig. 9는 선체 중앙에서의 계산결과를 나타내고 있다. 전체적으로 Stokes 파중에서의 응답이 선형파중에서의 응답에 비해 7~8% 높은 값을 나타내고 있다. Fig. 10은 파상측에서의 계산결과를 나타내고 있다. 사파와 횡파의 경우 Stokes 파중에서의 응답이 선형파중에서의 응답에 비해 8~10% 높은 값을 나타내고 있지만, 선미파의 경우에는 거의 유사한 응답을 나타내고 있다.

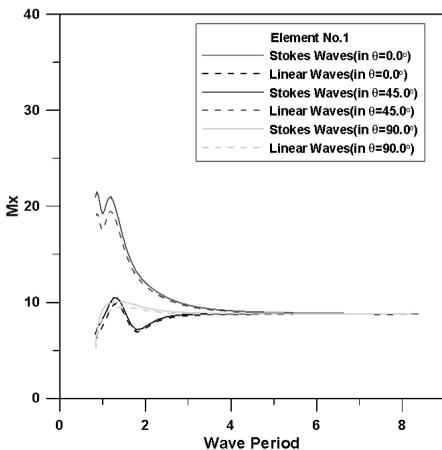


Fig. 8 Torsion moment at element No. 1

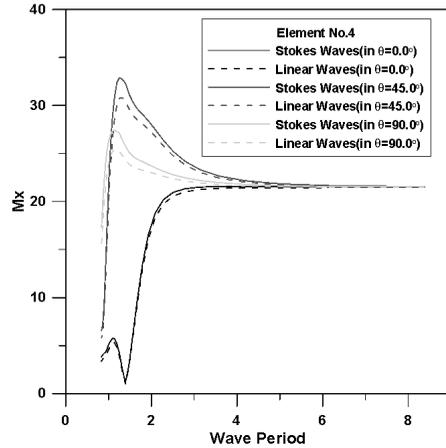


Fig. 9 Torsion moment at element No. 4

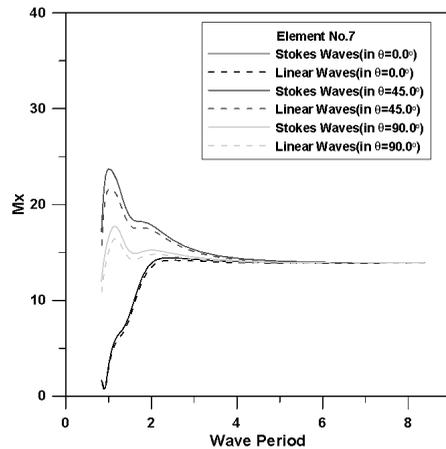


Fig. 10 Torsion moment at element No. 7

4.1.3 수직굽힘모멘트(Verticial Bending Moment)

Fig. 11~13은 입사각에 따른 수직 굽힘 모멘트를 나타내고 있으며, Fig.11은 파하측에서의 계산결과를 나타내고 있다. 전체적으로 Stokes 파중에서의 응답이 선형파중에서의 응답에 비해 10~12% 높은 값을 나타내고 있다.

Fig. 12는 중앙에서의 계산결과를 나타내고 있다. 사파와 횡파의 경우 Stokes 파중에서의 응답이 선형파중에서의 응답에 비해 12% 높은 값을 나타내고 있지만, 선미파의 경우에는 6% 정도의 차이를 보이고 있다. Fig. 13은 파상측에서의 계산결과를 나타내고 있다. 전체적으로 거의 유사한 경향을 나타내고 있다.

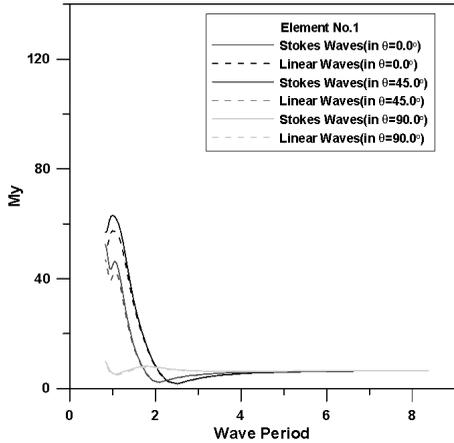


Fig. 11 Vertical bending moment at element No. 1

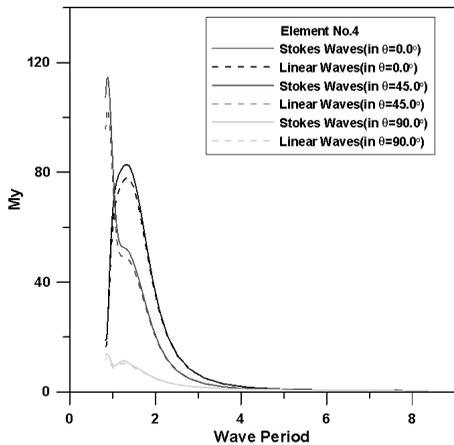


Fig. 12 Vertical bending moment at element No. 4

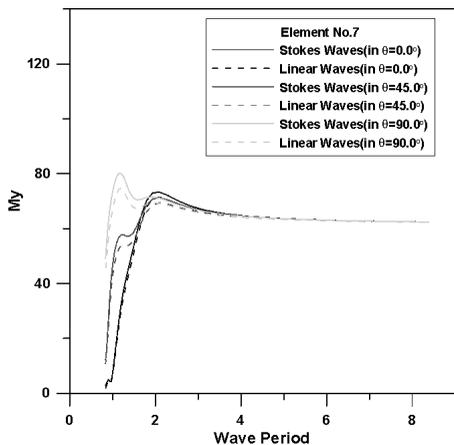


Fig. 13 Vertical bending moment at element No. 7

을 나타내고 있지만, 선미파의 경우 Stokes 파중에서의 응답이 선형파중에서의 응답에 비해 7% 정도의 차이를 나타내고 있다.

5. 결 론

Stokes 파중에서의 바지형 부체의 동적구조응답을 계산해 본 결과는 다음과 같다.

1) 피크가 발생하는 파주기 2.0초보다 짧은 파주기대에서 Stokes 파에서의 유탄성 응답이 다소 크게 나타났지만, 그 이후의 파주기에서는 선형파에서의 유탄성 응답과 Stokes 파에서의 유탄성 응답이 비슷하게 나타났는데, 이는 고주파수의 영향이 단주기의 파에서 나타남에 따라 장주기 파로 갈수록 그 영향이 나타나지 않음을 알 수 있었다.

2) 선체 중앙부에서의 수직전단력과 수직 굽힘 모멘트의 응답이 Stokes 파중에서 선형규칙파에 비해 10% 이상 높게 나타남에 따라 구조물의 강도 계산 시 충분한 강도를 가지도록 설계할 필요가 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

J. S. Goo; Conceptualization. S. C. Lee; Data curation. S. C. Lee; Formal analysis. J. S. Goo; Funding acquisition. S. C. Lee; Investigation. J. S. Goo; Methodology. J. S. Goo; Project administration. S. C. Lee; Resources. S. C. Lee; Software. J. S. Goo; Supervision. J. S. Goo; Validation. S. C. Lee; Visualization. S. C. Lee; Writing-original draft. S. C. Lee; Writing-review & editing.

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.
(DOI:10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(216))
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.
(<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2017.21.1.018>)
 4. S. C. Lee, Y. R. Ha and J. S. Goo, 2018, "A Hydroelastic Response Analysis of a Floating Body of Barge-type Based on Variation of Bending Stiffness in Stokes Waves", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 5-12.
(<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2018.22.5.005>)
 5. 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.
 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. S. C. Lee, K. C. Min and Y. R. Ha, 2018, "A Study for Dynamic Response Characteristics of Tension Leg Platforms based on the Stiffness Change of Tendon in Waves", Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, Vol. 30, No. 5, pp. 1538-1545.
(<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.10.30.5.1538>)