

Stokes 파 중의 바지형 부유체의 운동 응답 해석

A Motion Response Analysis of a Floating Body of Barge-type in Stokes Waves

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

(Received 27 July 2016, Revised 13 February 2017, Accepted 13 February 2017)

Abstract: The Stokes waves representing the deep sea waves are expressed as a 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 5th-order Stokes waves are expressed as a superposition of 5 linear waves. Therefore, the motion responses of the bodies in the Stokes waves would be expressed as a superposition of the motion responses of the bodies in the each linear waves. In this research, The experimental results were compared with the numerical results in linear waves and Stokes waves.

Key Words : Motion responses, Stokes waves, Linear waves

1. 서 론

21세기의 석유와 가스 생산의 주력 지역이 500 m 이상의 심해에서 이루어지고 있는데, 이러한 심해역의 해양파를 표현하기 위한 파의 표현은 다수의 파의 중첩으로 표현된 Stokes 파이다. 이 중 심해역 파를 잘 표현한 5차 Stokes 파는 5개의 파의 중첩으로 표현되어진다.^{1,2)} 따라서 심해역에서의 부유체의 운동을 정확히 평가하기 위해서는 Stokes 파 중에서의 운동을 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 먼저 미소진폭파에서의 부체의 운동을 계산결과와 실험결과를 비교하여 미소진폭파에 대한 계산 모델의 타당성을 평가하고, 5차 Stokes 파형이 5개의 선형파의 중첩에 의해 표현

되어짐에 따라 5개의 선형파에서 계산된 계산결과들을 파형 결합과 동일한 방법으로 중첩하여 얻어진 계산결과와 실험결과를 비교 검토하였다.

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.

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

*† 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

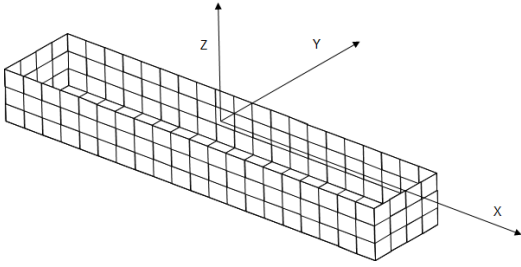


Fig. 1 Coordinate system

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.

2.2 운동응답

부유체의 운동이 입사파의 주파수로 유한진폭의 주기운동을 하는 것으로 가정하고 있으므로, 어떤 입의 운동기준점의 좌표(x_m, y_m, z_m) 주위의 선형운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\sum_{k=1}^6 [-\omega^2 (M_{jk} + \mu_{jk}) - i\omega\nu_{jk} + K_{jk}] \xi_k e^{-i\omega t} = F_j W, \quad (j = 1 \sim 6) \quad (1)$$

여기서, M_{jk} 는 선체의 관성력 계수, K_{jk} 는 정수압에 의한 복원력 계수, μ_{jk} 는 부가질량계수, ν_{jk} 는 조파감쇠계수, ξ_k 는 운동진폭이고, F_j 는 파강제력이다.³⁻⁵⁾

2.3 Stokes 파

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 $k\lambda^6$ 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.

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

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

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

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

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

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

2.4 Stokes 파 중의 운동응답

5차 Stokes 파의 입사파에 대한 부유체의 운동 응답은 선형으로 가정하였다. 따라서 Fig. 2에서 보듯이 먼저, Stokes 파를 형성하기 위한 5개의 성분파가 부유체에 입사했을 때 각각 계산을 수행하여 응답을 구한 후, 5개의 성분파에 대한 응답들을 파형표현식인 식 (3)과 같이 선형중첩하여 다음과 같이 Stokes 파 중의 부유체 응답을 표현하는 것으로 하였다.

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 + \xi_5 \\ &= \left(\frac{1}{k}\right) \left\{ [\epsilon + \epsilon^2 B_{31} - \epsilon^5 (B_{53} + B_{55})] \zeta_1 \right. \\ &\quad + (\epsilon^2 B_{22} + \epsilon^4 B_{42}) \zeta_2 + (-\epsilon^3 B_{31} + \epsilon^5 B_{53}) \zeta_3 \\ &\quad \left. + \epsilon^4 B_{44} \zeta_4 + \epsilon^5 B_{55} \zeta_5 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

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

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

3. 실험 방법

3.1 실험장치 및 실험조건

실험은 부경대학교 수조실에서 행하였다. Fig. 3은 수조에서 운동응답을 측정하기 위한 모션 캡처시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

실험에서 사용한 파는 Table 1과 같이 파주기 0.8초에서 1.1초까지 0.1초 간격으로 4개의 파에 대해, 파고 2 cm와 파고 12 cm를 갖도록 하였다.

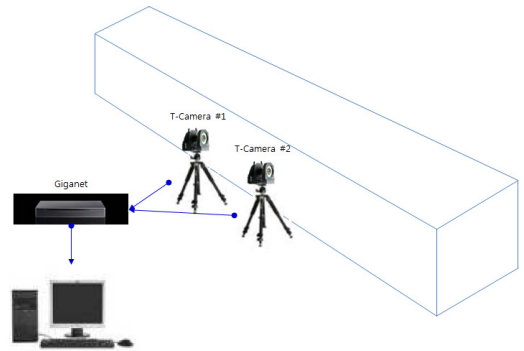


Fig. 3 Motion capture system

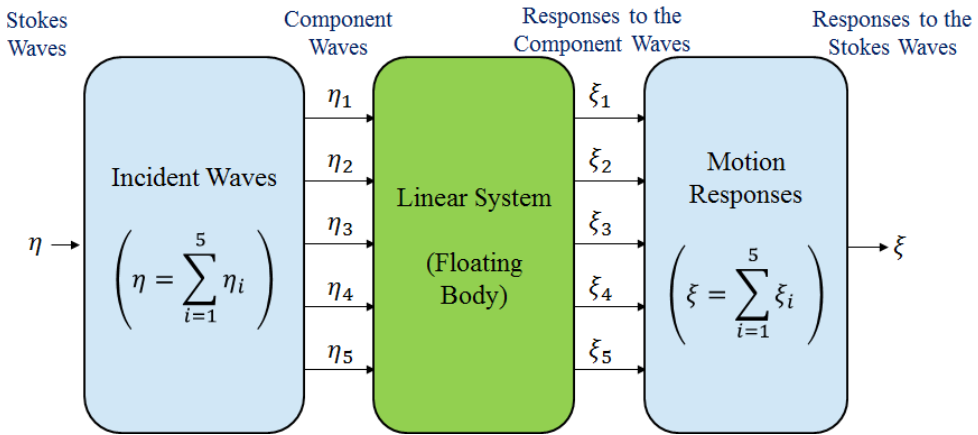


Fig. 2 Diagram of calculation

Table 1 Wave conditions

Wave period	0.80~1.10 sec (interval 0.1 sec.)
Wave height	2 cm(Airy Waves) 12 cm(Finite Amplitude Waves)

실험은 모델에 적외선 카메라(T-Camera #1, #2)가 인식하도록 마크(mark)를 설치한다. 마크는 파상측과 파하측, 그리고 중앙부에 설치를 하였다. 모델에 설치된 마크들을 두 대의 카메라가 인식하도록 카메라의 위치를 잡고, 소프트웨어를 통해 카메라에서 인식된 마크를 확인하고, 해상도를 조절해서 모델이 거동시에도 마크들을 잘 인식하도록 한다. 캘리브레이션이 제대로 완료되었으면, 원점을 지정하여서, 원점과 마크 사이의 거리를 소프트웨어 상에서 인식시킨다. 인식된 마크들은 각 마크들을 프레임으로 연결하여서, 하나의 세그먼트를 만든다.

조파기를 통해 생성된 파에 의해 모델이 운동을 하게 되면, 모든 마크들의 운동이 카메라를 통해서, 소프트웨어로 인식이 된다. 이때 마크들은 x, y, z축 방향의 변위만 측정이 된다. 따라서 회전운동에 대한 값은 중앙부의 마크의 수직변위와 파상측의 마크의 수직변위를 통해 중요 응답을 소프트웨어 상에서 계산되어 출력이 된다.

마크들은 카메라가 인식할 수 있도록 모델 상부의 파상측과 파하측에 각각 하나씩 설치하였고, 중앙부에는 정중앙에 하나, 중앙에서 양측으로 하나씩 하여 두 개를 설치하였다.

운동의 캡처는 파가 모델을 통과하고 어느 정도 정상상태가 되었다고 판단이 되었을 때 시작하여 약 30~40초 정도 캡처를 하여 운동을 평가하였다.^{3),4),7)}

3.2 실험모델

Table 2는 실험에 사용한 모델에 대한 제반사항을 나타내고 있다. Fig. 4는 모델 제작에 사용된 삼면도를 보이고 있다. 모델은 두께 2 cm의 아크릴판으로 제작을 하였다.

Table 2 Model specifications

Length (cm)	100
Breadth (cm)	20
Depth (cm)	20
draft (cm)	9.5

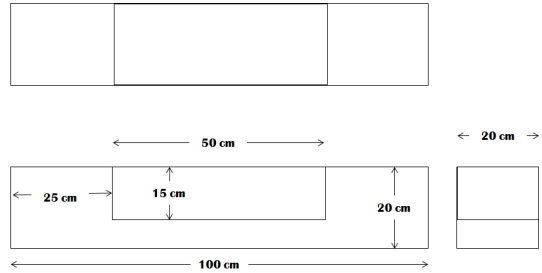


Fig. 4 Drawing of a floating body

4. 결과 및 고찰

4.1 수치계산

Fig. 5는 수치계산을 하기 위해 모델의 침수표면을 1920개의 요소로 분할한 것이다.

계산은 실험에 사용한 데이터들을 수치적으로 계산하여 입력데이터로써 사용하였다. 파 조건도 동일하게 하였다.

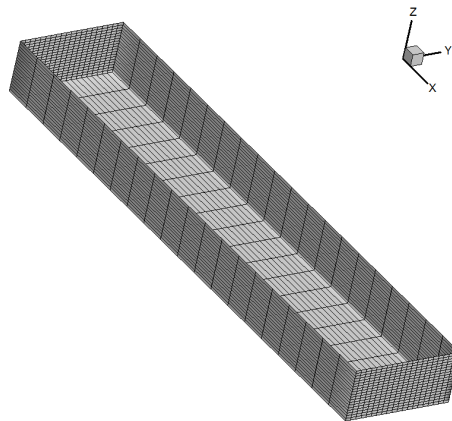


Fig. 5 Submerged surface of a model represented 1920 panels

4.2 계산결과 및 실험결과 비교

4.2.1 미소진폭선형파에 대한 결과 비교

Fig. 6은 미소진폭 선형파에 대한 중요(Pitch)의 운동응답을 보이고 있다. 흑점(●)은 실험결과이고, 실선은 계산결과를 나타내고 있다. 운동응답의 단위는 deg.이다. 실험값과 계산결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

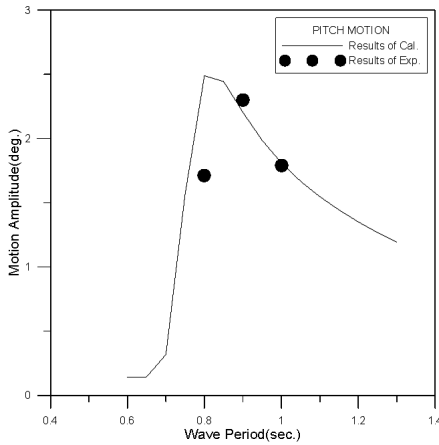


Fig. 6 Pitch Motion in Airy Waves (H=2cm)

4.2.2 유한진폭선형파에 대한 결과 비교

Fig. 7은 파고 12cm의 선형파에 대한 중요의 운동응답을 보이고 있다. ●은 실험결과이고, 실선은 계산결과를 나타내고 있다. 운동응답의 단위는 deg.이다. 미소진폭파에 대한 결과와 비교하면

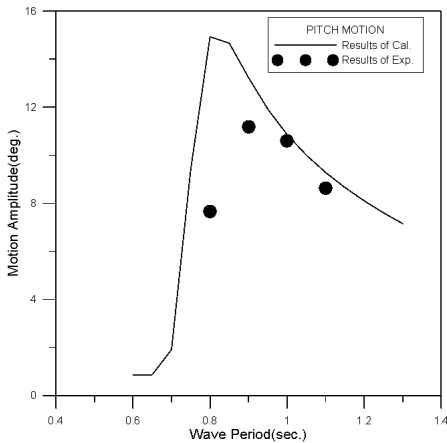


Fig. 7 Pitch Motion in Airy Waves (H=12cm)

실험결과보다 계산결과가 크게 나타나고 있다. 이는 파고가 높아지면 운동의 크기가 증가함에 따라 점성감쇠의 영향이 크게 나타나는데, 본 계산법은 중요에 대한 조파감쇠는 고려하고 있지만, 점성 감쇠를 고려하고 있지 않기 때문에 실험값보다 크게 나타나는 것으로 사료된다.

4.2.3 Stokes 파에 대한 결과 비교

Fig. 8은 파고 12 cm에서 선형파에 대한 계산결과 및 실험결과와 파고 12 cm의 Stokes 파에 대한 계산결과 및 실험결과를 보이고 있다.

실선은 Stokes 파 중의 계산결과이고, 점선은 선형파에 대한 계산결과이다. Stoke's 파에서의 계산결과가 선형파에서의 결과보다 피크치에서 약 5.6% 정도 낮게 나타남을 알 수 있다.

백점(○)은 Stokes 파에 대한 실험결과이고, 흑점(●)은 선형파에 대한 실험결과이다. 계산결과 비교와 유사하게 Stokes 파에서의 실험결과가 선형파에 대한 실험결과보다 피크치에서 약 4% 정도 낮게 나타남을 알 수 있다.

Stokes 파중에서의 운동응답이 선형파의 결과보다 작게 나타나는 것은 1, 2차 항의 저주파수에서의 응답이 주가 되며, 3차 이상의 고주파수에서의 응답이 거의 0에 가깝기 때문이다.

실험결과와 계산결과를 보면 Fig. 7에서 보였듯이 계산결과가 실험결과보다 높게 나타나고 있다.

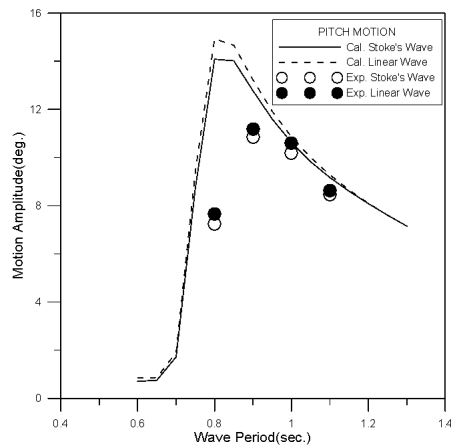


Fig. 8 Pitch Motion in Stoke's Waves & Airy waves (H=12 cm)

이는 중요에 대한 점성 감쇠를 계산에서는 고려하고 있지 않기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결 론

Stokes 파중에서의 바지형 부체의 운동응답을 실험결과와 계산결과를 비교한 결과는 다음과 같다.

1) 유한진폭파에 대한 운동 응답은 선형파보다 Stokes 파에서의 계산결과값이 작게 나타났다. 이것은 실험값에서도 동일한 경향을 보여주고 있으므로 본 수치계산법이 타당함을 알 수 있다.

2) 유한진폭파에 대한 중요 운동응답의 경우, 계산결과값이 실험결과값보다 크게 나타나고 있는데, 이는 점성감쇠의 영향으로 사료된다.

3) Stokes 파중에서의 운동응답이 선형규칙파보다 작게 나타나는 것은 1, 2차 항의 저주파수에서의 응답이 주가 되며, 3차 이상이 되는 고주파수에서의 응답이 거의 0에 가깝기 때문이다.

4) 고주파수에서 응답이 크게 나타나는 구조물의 경우, 고차항의 영향이 크게 나타날 것으로 Stokes 파에서의 응답이 크게 나타날 것으로 예상된다. 이에 대한 연구는 앞으로 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2016년)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, 2014, "Motion analysis of a VLCO for wave power generation" Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 36-41.
4. S. C. Lee and S. Y. Bae, 2014, "A study on motion characteristics of VLCO by draft(Simple floating body)", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 16-21.
5. 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.
6. L. Skjelbreia and J. Hendrickson, 1960, "Fifth order gravity wave theory", proceedings 7th Conference of Coastal Engineering, pp. 184-196.
7. S. C. Lee and J. S. Goo, 2013, "An experimental study on motions of a VLCO for wave power generation(1. Simple floating body)", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol 17, No. 2, pp. 103-107.