

# Stokes 파 중의 인장계류식 해양구조물의 운동응답해석 A Motion Response Analysis of a Tension Leg Platform in Stokes Waves

이승철\* · 하영록\*\* · 구자삼\*†

Seung-Chul Lee\*, Young-Rok Ha\*\* and Ja-Sam Goo\*†

(Received 27 March 2020, Revision received 17 December 2020, Accepted 17 December 2020)

**Abstract :** In recent years, the main areas of oil and gas production in the ocean have been expanded to sea level deeper than 500 meters. A tension leg platform (TLP) is one of the representative offshore structures that has excellent work performance even in rough seas. Since the tension leg platform is required to perform work in extreme marine conditions, precise motion analysis is required to ensure the stability and continuous operation of the structure. The Stokes wave representing the sea waves is expressed as a superposition of linear waves. The fifth-order Stokes waves are expressed as a superposition of five linear waves. Therefore, the motion responses of the tension leg platform in Stokes waves would be expressed as a superposition of the motion responses in each linear waves. In this paper, We evaluate and compare behaviors of tension leg platform in the fifth-order Stokes waves and in linear waves with the same wave height.

**Key Words :** Tension leg platform, Stokes waves, Linear waves

## 1. 서 론

21세기의 석유와 가스 생산의 주력 지역이 수 십 500 m 이상의 심해에서 이루어지고 있는데, 심해의 석유자원의 시추 및 생산을 위한 구조물 중 대표적인 것이 거친 해상 환경에서도 우수한 작업 성능을 가지는 인장계류식 해양구조물(TLP;

Tension Leg Platform)이다. 따라서 TLP는 극심한 해상상황에서 작업을 수행하므로, 구조물의 안정성과 더불어 연속적인 가동성 확보를 위해 정확한 운동해석과 구조해석이 필요하다. 심해역에서의 TLP의 운동을 정확하게 평가하기 위해서는 실험역 파를 잘 표현하는 5개의 선형파의 중첩으로 이루어진 5차 Stokes 파<sup>1,2)</sup> 중에서의 운동을 평가할 필요가 있다.

\*† 구자삼(<https://orcid.org/0000-0002-1317-1883>) :  
교수, 부경대학교 조선해양시스템공학과  
E-mail : jsgoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6615  
\*이승철(<https://orcid.org/0000-0001-9282-9593>) :  
강사, 부경대학교 조선해양시스템공학과  
\*\*하영록(<https://orcid.org/0000-0003-1782-8878>) :  
교수, 거제대학교 조선해양공학과

\*† Ja-Sam Goo(<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(<https://orcid.org/0000-0001-9282-9593>) :  
Lecturer, Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University.  
\*\*Young-Rok Ha(<https://orcid.org/0000-0003-1782-8878>) :  
Professor, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Koje College.

국내외적으로 TLP의 실용화 기술개발을 위한 많은 연구와 해양실험이 진행되었으며, 특히, Goo 등<sup>3,4)</sup>은 탄성응답 해석법을 개발하였으며, 이 해석법을 기초로 항력과 조류력이 작용하는 상태에서의 동적구조응답연구도 진행되었으며,<sup>5,6)</sup> Lee 등<sup>7)</sup>은 구조물의 굽힘강성이 구조응답에 미치는 영향을 평가하였고, Ha 등<sup>8)</sup>은 TLP의 유탄성응답에 관한 연구도 진행된 바가 있지만, 이는 선형 규칙과 중에서의 연구였다.

본 연구에서는 실해역에서의 운동응답을 평가하기 위해 Stokes 파 중에서의 응답을 평가하였다. 선형 규칙과 Stokes 파 중에서의 고주파수대의 고유주파수를 갖는 TLP의 운동응답 및 인장각의 변동장력을 비교·검토함으로써, 실해역에 설치될 해양구조물의 초기설계에 주요 수치해석 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 이론해석

### 2.1 기본 가정 및 좌표계

기본가정으로서 유체는 이상유체이고, 유체의 운동은 비회전인 것으로 한다. 또, TLP의 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.<sup>9),10)</sup>

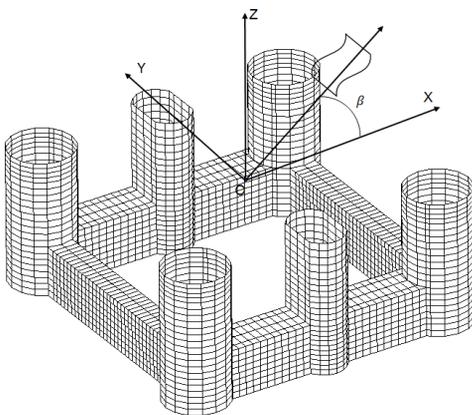


Fig. 1 Coordinate system

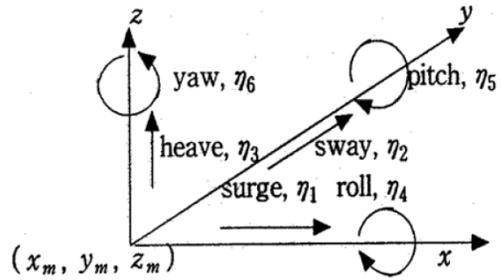


Fig. 2 Coordinate of motions

TLP는 자유표면에서 입사주파수  $\omega$ 로 운동하며, 좌표계로서는 Fig. 1에 보는 바와 같이 우수계의 기준좌표계 O-XYZ를 취하고, XY평면은 평균수면에 두고, Z축은 평균수면에 대하여 연직상방으로 향하고 있는 것으로 한다. 입사파는 X축의 음의 방향에서 양의 방향으로, X축과  $\beta$ 의 각을 이루며 진행하는 것으로 한다.

입의의 운동기준점  $(x_m, y_m, z_m)$ 의 각 축방향의 병진운동 및 각 축둘레의 회전운동을 Fig. 2와 같이 정의한다.

### 2.2 운동 응답

TLP의 운동이 입사파의 주파수와 조화인 것으로 가정하고 있으므로, 어떤 입의의 운동 기준점의 좌표  $(x_m, y_m, z_m)$  주위의 선형운동 방정식은 다음과 같이 표시된다.

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

여기서,  $M_{jk}$ 는 TLP의 관성력 계수,  $\mu_{jk}$ 는 부가 질량계수,  $\nu_{jk}$ 는 조파감쇠 계수,  $K_{jk}$ 는 정수압에 의한 복원력 계수,  $K_\omega$ 는 계류력에 의한 복원력 계수이고,  $F_j^W$ 는 파강제력벡터이다.

### 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. 계수값은  $k\lambda^{(1)}$  또는  $\epsilon (= kH/2)^{(1)}$ 를 파라미터로 표현되어 지는데, 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.

$$\begin{aligned} B_{22} &= \coth(kd)(1+2S)/(2C) \\ B_{31} &= -3(1+3S+3S^2+2S^3)/(8C^3) \\ B_{42} &= \cosh(kd)(6-26S-182S^2-204S^3-25S^4 \\ &\quad + 26S^4)/[6(3+2S)C^4] \\ B_{44} &= \cosh(kd)(24+92S122S^2+66S^3+67S^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\quad + 34S^4)/[24(3+2S)C^4] \\ B_{53} &= 9(132+17S-2216S^2-5897S^3-6292S^4 \\ &\quad - 2687S^5+194S^6+467S^7+82S^8) \\ &\quad /128(3-2S)(4+S)C^6] \\ B_{55} &= 9(300+1579S+3176S^2+2949S^3+1188S^4 \\ &\quad + 645S^5+1326S^6+827S^7+130S^8) \\ &\quad /384(3-2S)(4+S)C^6] \end{aligned}$$

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.

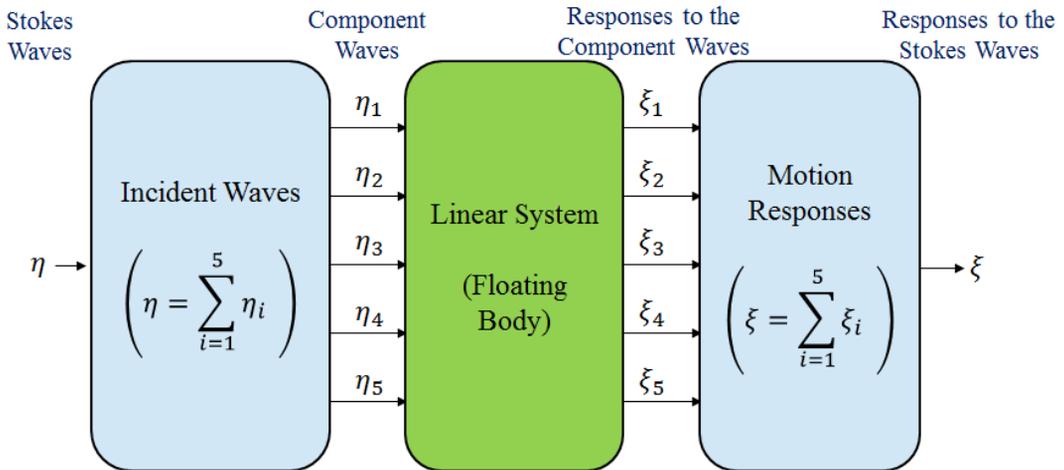


Fig. 3 Diagram of calculation

### 2.4 Stokes waves 파 중의 운동응답

5차 Stokes 파의 입사파에 대한 TLP의 운동 응답은 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 운동 응답들을 파형표현식인 식 (3)과 같이 선형 중첩하여 다음과 같이 Stokes 파 중의 TLP의 운동 응답을 표현하는 것으로 하였다.<sup>12,13)</sup>

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

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

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

### 3. 수치계산 결과 및 고찰

Table 1은 수치계산을 위한 모델의 주요사항을 나타내고 있다. 구조물에 작용하는 유체력 및 파강제력을 계산하기 위해 Fig. 1에 보인 바와 같이 TLP 계산 모델의 침수표면을 4864개의 평면 panel로 분할하였다.

Table 1 Particulars of the TLP model

Length	72	cm
Breadth	72	cm
Height	59	cm
Draft	30	cm
Center of gravity above base	36.28	cm
Transverse radius of gyration	36.23	cm
Weight	27.7	kgf
pretension	11.7	kgf
Displacement	39.4	kgf

Fig. 4-5는 입사각  $\beta = 0.0^\circ$ 일 때 Heave 운동과 Pitch 운동응답을 보이고 있다. 실선은 Stokes 파 중에서의 응답을 나타내고, 점선은 선형 규칙파 중에서의 응답을 나타내고 있다. Heave 운동의 경우 Stokes 파의 영향이 크게 나타나고 있지 않지만, Pitch 운동의 경우는 파주파수  $\omega = 10$  rad/sec에서 Stokes 파의 영향이 크게 나타나고 있다. 이는 TLP 특성상 고주파수대의 Pitch 고유진동수를 가지므로 인해 모델의 Pitch 고유진동수와 Stokes 파의 고주파수 성분파와의 공진에 의한 것으로 사료된다.

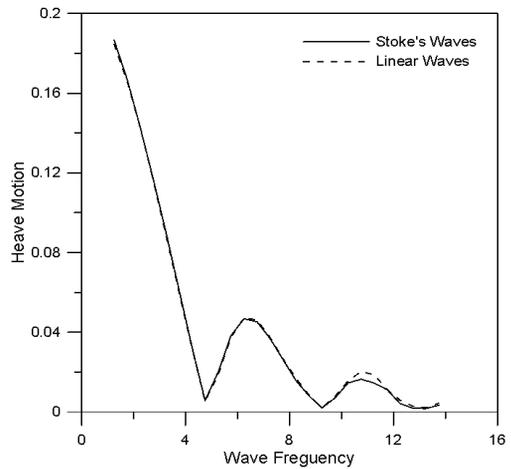


Fig. 4 Heave Motion of the TLP at  $\beta = 0.0^\circ$

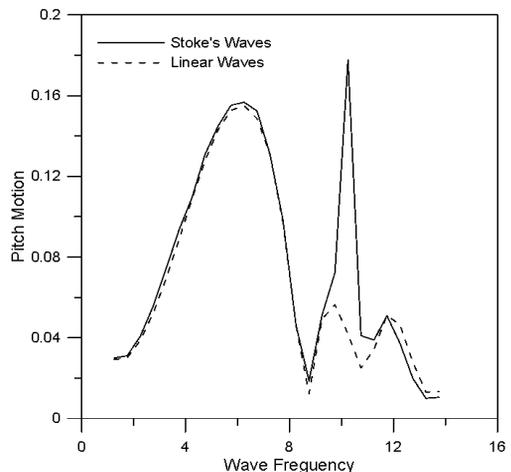


Fig. 5 Pitch Motion of the TLP at  $\beta = 0.0^\circ$

Fig. 6-7은 입사각  $\beta = 90.0^\circ$ 일 때 Heave 운동과 Roll 운동응답을 보이고 있다. 실선은 Stokes 파 중에서의 응답을 나타내고, 점선은 선형 규칙파 중에서의 응답을 나타내고 있다. Heave 운동의 경우 Stokes 파의 영향이 크게 나타나고 있지 않지만, Roll 운동의 경우는 파주파수  $\omega = 9$  rad/sec 부근에서 Stokes 파의 영향이 크게 나타나고 있다. 이는 TLP 특성상 고주파수대의 Roll 고유진동수를 가지므로 인해 모델의 Roll 고유진동수와 Stokes 파의 고주파수 성분파와의 공진에 의한 것으로 사료된다.

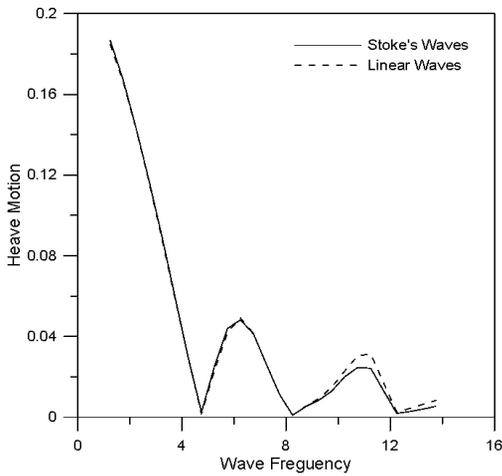


Fig. 6 Heave Motion of the TLP at  $\beta = 90.0^\circ$

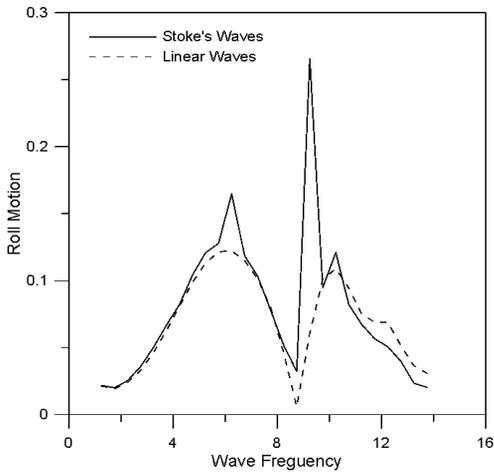


Fig. 7 Roll Motion of the TLP at  $\beta = 90.0^\circ$

Fig. 8-9는 입사각  $\beta = 0.0^\circ$ 일 때 파상측과 파하측의 변동장력을 각각 보이고 있다. 실선은 Stokes 파 중에서의 응답을 나타내고, 점선은 선형 규칙파 중에서의 응답을 나타내고 있다. 파상측 (Weather Side) 계류삭들과 파하측(Lee Side) 계류삭들은 유사한 변동장력 응답을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히, 파주파수  $\omega = 10$  rad/sec 부근에서 Stokes 파의 영향이 크게 나타나고 있으며, 파하측의 응답이 파상측보다 크게 나타나고 있다.

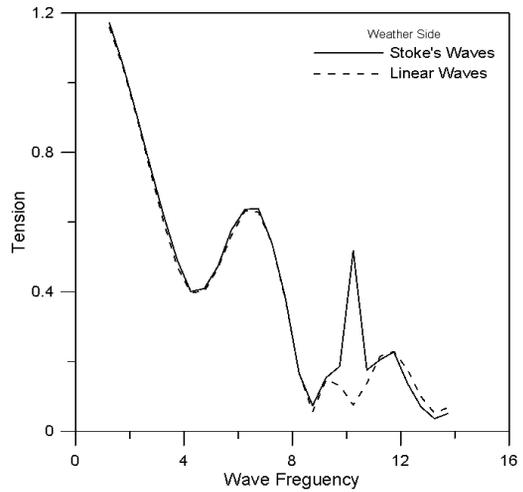


Fig. 8 Tension response variations on weather side at  $\beta = 0.0^\circ$

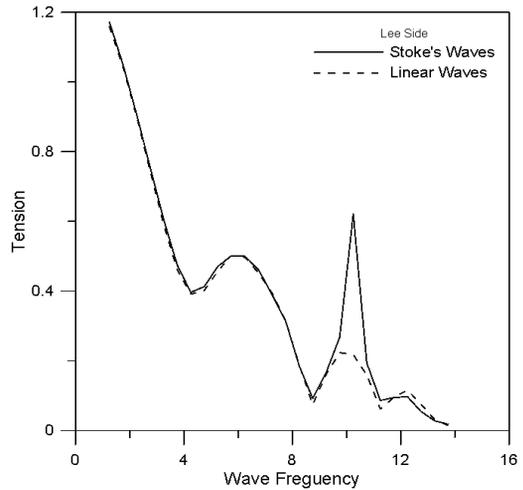


Fig. 9 Tension response variations on lee side at  $\beta = 0.0^\circ$

Fig. 10-11은 입사각  $\beta = 90.0^\circ$ 일 때 파상측과 파하측의 변동장력을 각각 보이고 있다. 실선은 선형 규칙파 중에서의 응답을 나타내고, 점선은 선형 규칙파 중에서의 응답을 나타내고 있다. 파상측 계류식들과 파하측 계류식들은 유사한 변동장력 응답을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히, 주파수  $\omega = 9 \text{ rad/sec}$  부근에서 stokes 파의 영향이 크게 나타나고 있다.

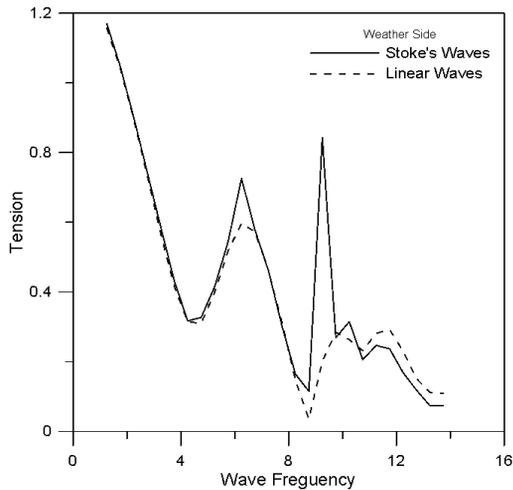


Fig. 10 Tension response variations on weather side at  $\beta = 90.0^\circ$

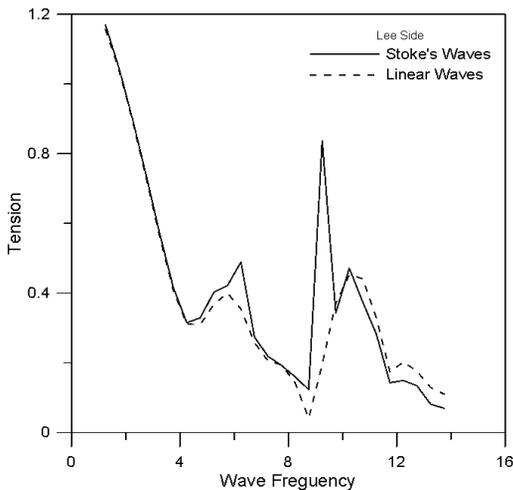


Fig. 11 Tension response variations on lee side at  $\beta = 90.0^\circ$

## 4. 결 론

Stokes 파 중에서의 인장계류식 해양구조물의 운동응답을 계산해 본 결과는 다음과 같다.

1) 인장계류식 해양구조물은 고주파수대의 고유진동수를 가지므로 선형파에서는 나타나지 않는 고주파수 파의 영향이 Stokes 파에서 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 고주파수대의 고유진동수를 가지는 해양구조물의 응답은 stokes 파를 고려하여 해석할 필요가 있다.

2) 파주파수 9-11 rad/sec에서 수직방향의 상대변위를 유발하는 Pitch 응답 및 Roll 응답에서 stokes 파의 영향이 크게 나타났는데, 이러한 운동의 상대변위 증가는 인장각의 장력의 변화에 영향을 주어, 장력의 증가를 유발하였다.

3) 운동응답의 증가 및 장력의 증가는 구조물의 안전성뿐만 아니라, 작업자의 안전성 및 작업환경에도 큰 영향을 미치기 때문에 선형과 해석보다 stokes 파를 고려한 본 해석법이 더욱 유효함을 알 수 있다.

4) 본 연구결과는 실해역에 설치될 해양구조물의 초기설계단계에서부터 해상 상황, 구조물의 가동수심 및 인장각의 제원 등에 따른 주요 수치계산자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2019년)에 의하여 연구되었음.

## Author contributions

J. S. Goo; Conceptualization, Methodology, S. C. Lee; Data curation, Software, Writing-original draft, Investigation, Y. R. Ha; Resources, Visualization, 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.
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. J. S. Goo, J. H. Kim and C. H. Lee, 1995, "A Dynamic Response Analysis of Tension Leg Platforms in Waves (I)", *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 9, No. 1, pp. 161-172.
  4. J. S. Goo, C. H. Park and C. H. Lee, 1996, "A Dynamic Response Analysis of Tension Leg Platforms in Waves (II)", *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 10, No. 1, pp. 25-35.
  5. Y. R. Ha, 2008, "A Dynamic Response Analysis of Tension Leg Platforms Including Drag Forces in Regular Waves", *The Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 45, No. 3, pp. 229-237.
  6. S. C. Lee, J. S. Goo, Y. R. Ha and H. J. Jo, 2012, "A Dynamic Structural Response Analysis of Tension Leg Platforms in Current and Waves", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 65-71.
  7. C. H. Lee and S. L. Lee, 2007, "Effects of the Flexibility on the Structural Responses of a Tension Leg Platform", *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 21, No. 4, pp. 38-44.
  8. 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.
  9. J. N. Newman, 1985, "Algorithms for the Free-Surface Green Function", *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 19, pp. 57-67.
  10. J. G. Telste and F. Noblesse, 1986, "Numerical Evaluation of the Green Function of Water-Wave Radiation and Diffraction", *Journal of Ship Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 69-84.
  11. L. Skjelbreia and J. Hendrickson, 1960, "Fifth order gravity wave theory", *Proceedings 7th Conference of Coastal Engineering*, pp. 184-196.
  12. 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>)
  13. 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>)