

파랑 중 해중철도에 작용하는 유체력 계산 및 검증 Verification of Calculated Hydrodynamic Forces Acting on Submerged Floating Railway In Waves

서승일* · 문형석 · 이진호 · 김진하

Sung-il Seo · Hyung-seok Mun · Jin-ho Lee · Jin-ha Kim

Abstract In order to rationally design a new conceptual submerged floating railway, prediction of wave forces applied to the structure is very important. In this paper, equations to calculate such forces based on hydrodynamic theories were proposed and model tests were carried out. Inertia forces and drag forces, calculated using Morison's equation and the linear small amplitude wave theory, were in good agreement with the results from model tests conducted in a wave making tank. Drag forces were negligible compared with inertia forces. Also, wave forces showed linear variation with the changing wave heights. It was revealed that the linear wave theory and Morison's equation can give a simple and useful solution for the prediction of wave forces in the initial design stage of a submerged floating railway.

Keywords : Inertia force, Linear small amplitude wave theory, Morison's equation, Wave force, Submerged floating railway

초 록 신개념의 해상 교통 인프라인 부유식 해중철도의 합리적인 설계를 위해서는 파랑 중에 해중철도 구조체에 가해지는 유체력을 추정하여야 한다. 간편하지만 정확도 높은 유체력 추정을 위해 유체동역학 이론을 이용한 계산식을 제안하고, 수조에서 상사 모형에 대해 실험을 수행하여 비교 평가하였다. Morison식과 선형 미소진폭 파이론을 이용하여 계산된 관성력과 항력은 모형 실험 결과를 통해 계측된 유체력과 양호한 일치율을 얻었다. 해중철도 구조체에 작용하는 항력은 관성력에 비해 무시할 만한 수준이었고, 파력은 파수에 따라 큰 변동을 보이지 않으나 파고에는 선형적으로 비례함을 알 수 있었다. 선형 파이론과 Morison식은 해중철도 설계 시에 간편하고 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

주요어 : 관성력, 모리슨 식, 선형 미소진폭 파이론, 파력, 해중철도

1. 서 론

해중철도는 Fig. 1과 같이 수면 하에서 중력을 초과하는 부력이 계류장치의 인장력으로 평형을 이루고 있는 튜브형 구조물로서, 내부에 열차가 운행할 수 있는 혁신적인 미래 철도 인프라이다. 해중철도의 실현을 위해 다양한 연구가 이루어지고 있으나[1,2], 해중철도의 실제 건설 및 운영을 위해서는 해중철도를 둘러싸고 있는 환경의 요인을 정확히 파악하고 적절한 대비책을 세우는 것이 필수적이다.

해중철도는 부력과 장력의 평형으로 안정된 상태를 유지하고 있으나, 해수면에서 발생하는 파도의 영향을 지속적으로 받고 있다. 해수면의 파도는 해저면의 깊이 가 깊을 때에는 지수적으로 입자의 속도가 감소하는 특성을 가지고 있으나, 해저면의 깊이가 깊지 않을 때에는 해수면의 입자의 운동이 상당한 깊이까지 영향을 미친다[3]. 또한 해중철도의 수명을 일반 철도 구조물과 같이 100년으로 잡는다면, 100년 주기 파도의 파고와 이에 따른 파랑 하중은 상당하므로

파랑 하중에 대비한 해중철도 구조체의 설계는 필수적이라 하겠다. 본 연구에서는 파도에 의한 하중을 받는 해중철도의 유체력을 평가하고, 설계에 반영하기 위해 이론적 파력 계산식을 제시하여 파력을 계산한 후, 실험을 통해 비교 분석 함으로 이론 계산식의 유용성을 확인하고, 해중철도 설계를 위한 기본 자료로 활용하고자 한다. 이를 위해, 선형 미소진폭 파이론(linear small amplitude wave theory)을 이용하여 파입자의 속도 및 가속도를 구하고 이를 기초로 해중철도 터널 단면에 작용하는 유체력을 계산 하는 방법을 제

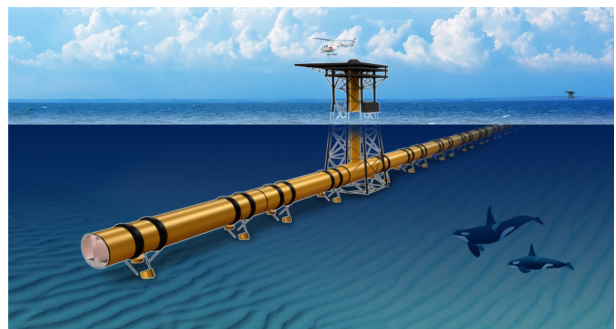


Fig. 1 Submerged floating railway

*Corresponding author:

Tel.: +82-31-460-5623, E-mail : siseo@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2014

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.6.397>

시하고, 조파수조의 모형시험을 통해 결과의 정확성을 검증하였다.

2. 파력의 계산

파도에 의해 해양구조물에 작용하는 파력(wave force)은 항력(drag force)과 관성력(inertia force)의 합으로 표현된다. 선박과 같이 구조물의 부피가 큰 경우에는 반사 하중(diffraction force)과 회절 하중(reflection force)을 고려해야 하나, 파장에 비해 구조물이 작은 경우에는 반사 하중과 회절 하중의 효과가 제한적이므로 항력과 관성력만 고려해도 구조물의 설계상에 문제는 없다[4]. 해양구조물에 작용하는 파력에 대해서는 오랜 기간 동안 많은 연구가 수행되었으며, 자켓(jacket)이나 잭업(jack-up) 등 해상 시추를 위한 일반 해양구조물의 파력에 대한 연구는 완성 단계에 이르러, 해양구조물 설계 규정에 이미 반영되어 있다. 파력의 계산을 위해 서는 특히 Morison식을 주로 사용하고 있는데, 정확 도가 입증되어 해양구조물 설계 시에 널리 사용되고 있다[5,6]. 그런데, 해중 철도와 같이 구체적으로 현실 화되지 않은 구조물에 대해서는 Morison식이 검증되지 못하여 실제 설계자가 신뢰성이 있는 설계를 하는 데에 저해 요소가 된다.

해중터널에 작용하는 파력에 대해서는 Kunisu가 먼저 이론과 실험적 연구를 수행하였다[7]. Kunisu는 BEM(Boundary Element Method)과 Morison식을 이용하여 해중터널의 파력을 계산하고 실험 결과와 비교하여 정확성을 입증하였다. Kunisu의 연구는 원형 단면과 평행한 양선 계류장치를 갖는 해중터널에 대한 실험 및 해석 결과로서 본 연구에서 제안하는 해중철도용 타원형 단면과 W형 계류장치와는 차이가 있다. Wei Lu 등은 해중터널에 작용하는 유체력을 Morison식을 이용하여 계산하고 계류장치의 인장력을 잃게 되는 슬랙(slack)이 발생하는 조건을 계산하였다[8]. Yong Li. 등은 원형 단면에 대해 해류의 효과를 고려한 파력을 수치해석적 방법으로 계산하였다[9]. 본 연구의 목적인 간편한 파력 계산식 도출을 위해 먼저 파도의 운동을 고찰한다. 파 입자의 거동은 해양구조물의 설계 시에 일반적으로 널리 활용되고 있는 선형 미소 진폭 파 이론(linear small amplitude wave theory)을 적용하여 기술한다. 선형 미소진폭 파이론은 유체의 점성을 무시한 이상유체에 대한 포텐셜 이론에 근거하고 있으며, 진폭이 미소하다는 가정하에 자유표면의 경계조건에서 고차항을 무시하고 선형화한 제한성이 있는 이론이다[3]. 그러나, 간단한 수식으로 파입자의 운동을 표현할 수 있고, 그 동안 경험적으로 타당성이 입증된 이론이므로 해양구조물의 설계 시에 파와 구조물의 상호 거동을 모사할 때 근사적인 추정 방법으로서 유용하게 활용된다.

유체의 포텐셜 이론에 따르면, Fig. 2와 같은 2차원 유동장에서 속도 포텐셜은 다음의 라플라스 방정식을 만족시켜야 한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

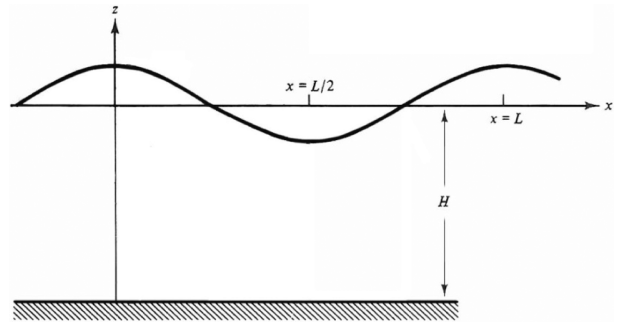


Fig. 2 Wave profile in finite depth

여기서, ϕ 속도 포텐셜(velocity potential)

자유표면에서 파의 기울기가 미소하다는 가정하에 자유표면의 경계조건은 다음 (2) 및 (3)식으로 주어진다

$$\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \xi \quad (z=0 \text{에서}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (z=H \text{에서}) \quad (3)$$

여기서, ξ = 자유표면에서 파입자의 변위

경계조건 식 (2)와 (3)을 만족시키는 식 (1)의 해는 다음 식 (4)로 주어진다[3].

$$\phi = \frac{hg \cosh(H+z)}{2\omega \cosh \kappa H} \sin(\kappa x - \omega t) = 0 \quad (4)$$

여기서, h = 파고(wave height), ω = 파도의 원진동수(circular frequency of wave), κ = 파수(wave number), H = 해저면 깊이, z = 파 입자의 깊이

속도 포텐셜로부터 파입자의 속도와 가속도는 다음 식과 같이 계산된다.

$$u = \frac{h}{2} \omega \frac{\cosh \kappa(H+z)}{\sinh \kappa H} \cos(\kappa x - \omega t) \quad (5)$$

$$w = -\frac{h}{2} \omega \frac{\sinh \kappa(H+z)}{\sinh \kappa H} \sin(\kappa x - \omega t) \quad (6)$$

$$a_x = \frac{h}{2} \omega^2 \frac{\cosh \kappa(H+z)}{\cosh \kappa H} \sin(\kappa x - \omega t) \quad (7)$$

$$a_z = \frac{h}{2} \omega^2 \frac{\sinh \kappa(H+z)}{\sinh \kappa H} \cos(\kappa x - \omega t) \quad (8)$$

여기서, u = x 방향 파 입자의 속도, w = z 방향 파 입자의 속도, a_x = x 방향 파 입자의 가속도, a_z = z 방향 파 입자의 가속도 파수와 원진동수는 다음의 관계를 갖는다.

$$\omega^2 = g \kappa \tanh \kappa H \quad (9)$$

Morison식에 따르면, 파도에 의해 해양구조물에 작용하는 파력은 다음 식과 같이 관성력과 항력의 합으로 표현될 수 있다.

$$F = C_I \rho V \bar{a} + \frac{C_D}{2} \rho A \bar{u} |\bar{u}| \quad (10)$$

여기서, F = 구조물 작용 하중(N), C_I = 관성력 계수, ρ = 물의 밀도(kg/m^3), V = 구조물의 부피(m^3), \bar{a} = 파 입자의 가속도벡터(m/sec^2), C_D = 항력 계수, A = 구조물의 투영 면적(m^2), \bar{u} = 파 입자의 속도벡터(m/sec)

3. 파력의 계측 및 검토

파도에 의해 해중철도에 작용하는 하중을 계측하기 위해 다음 Fig. 3와 같이 축소 모형을 제작하였다. 60m 깊이의 해저면 상에 위치한 해중철도가 해수면에서 40m 아래에 부유하고 있는 상황을 가정하여, 2차원 조파수조에서 시험하기 위해 실제 설계 단면을 1/148로 축소한 모형을 제작하였고, 모형의 전후에 와이어로 계류하고 바닥에 고정시켰다. 파랑 중 운동응답 특성을 개선하기 위해 수직 와이어와 함께 W형의 경사진 와이어를 추가한 모형에 대해 시험을 수행하였다. 규칙파를 조파기에서 생성하여 해중철도의 응답과 와이어 장력을 계측하였다. 해류(current)를 생성할 수도 있으나, 파 이론과의 비교를 위해 규칙파만 발생시켰다. 조파수조는 길이 26m, 폭 0.6m, 깊이 0.75m의 크기이며, 파랑 중 2차원 모델에 대해 거동 특성을 계측하기 위한 수조로서, 상사 법칙에 따라 축소된 모형에 대해 파를 발생시켜 모델의 거동을 분석한다. 생성된 파의 진폭과 주기는 자동 계측 시스템에 의해 검증한 후에 본 시험을 실시하였다.

Fig. 3 및 Fig. 4의 실험 모형에서 파력의 수평하중은 경사 와이어 장력의 수평 성분이 담당하고 수직하중은 수직 와이어와 경사 와이어의 수직 성분이 공동으로 분담하게 된다.

조파기에서 일정한 파고의 파도를 발생시켜 장력을 계측

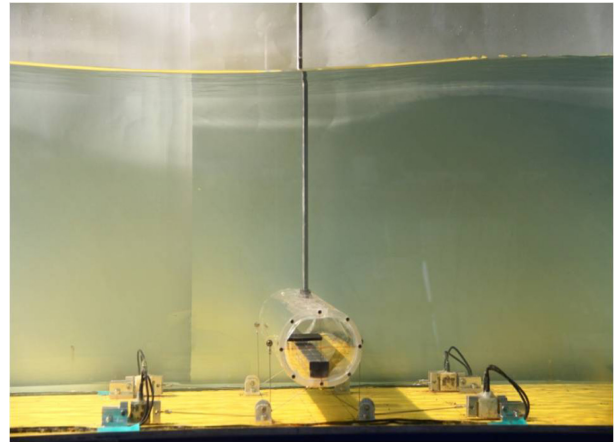


Fig. 4 Similitude model of submerged floating railway

함으로 파력을 측정하게 된다. 수평하중의 계측 결과는 Fig. 5와 같다. 음(-)의 장력은 초기인장력에서 감소하는 것을 의미한다. 실험과 동일한 자료를 활용하여 선형 파이론에 의한 속도 및 가속도 계산식 (5) 및 (7)식과 Morison식 (10)을 이용하여 수평하중을 계산한 결과도 Fig. 5에 제시되었다. 파력 계산 시에 적용된 자료는 Table 1과 같다. 관성력 계수와 항력계수는 해양구조물의 설계 시에 일반적으로 적용되는 API의 추천값인 1.6과 0.7을 사용하였다[6]. 관성력 계수는 원형 단면에 대해 이론적으로 계산하면 2.0이 되나 본 연구에서 제안한 해중철도와 같이 타원형 단면인 경우 1.6이 더 적합하다.

Fig. 5를 보면 실험 결과와 이론 결과는 최대 오차 20% 이내로 양호한 결과를 보여주고 있다. 오차의 원인은 다양하게 설명될 수 있으나, Morison식은 구조물의 크기가 파장에 비해 작다는 가정하에서 구조물의 수평 입사파의 반사

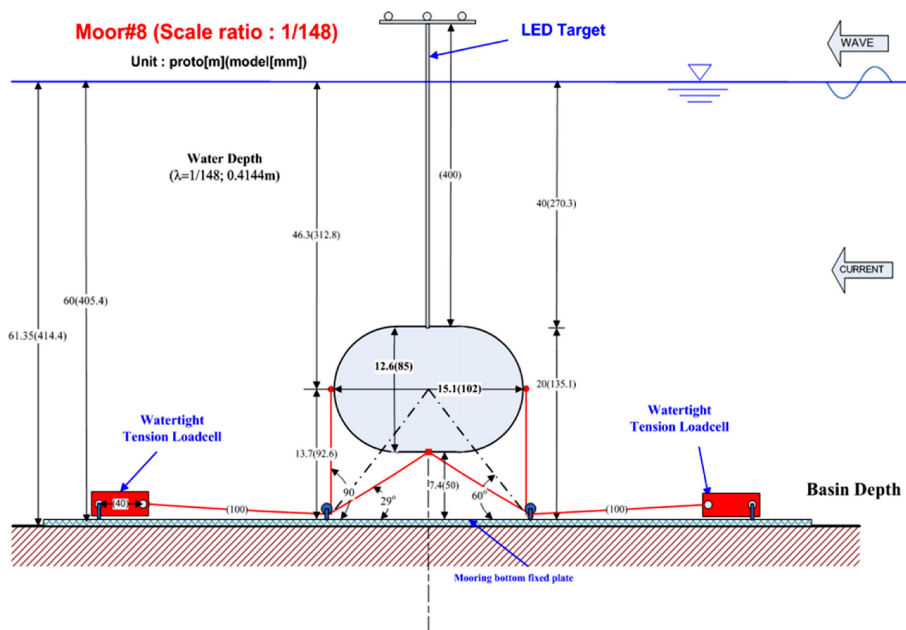


Fig. 3 Schematic diagram for measurement of wave forces

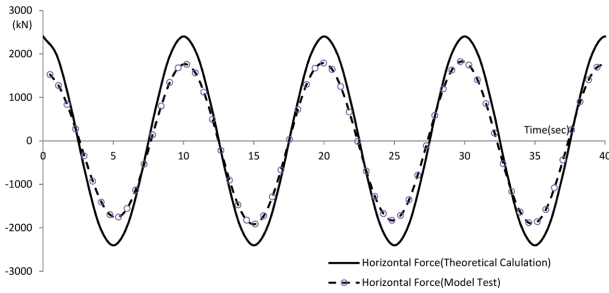


Fig. 5 Horizontal wave forces acting on structure of submerged floating railway

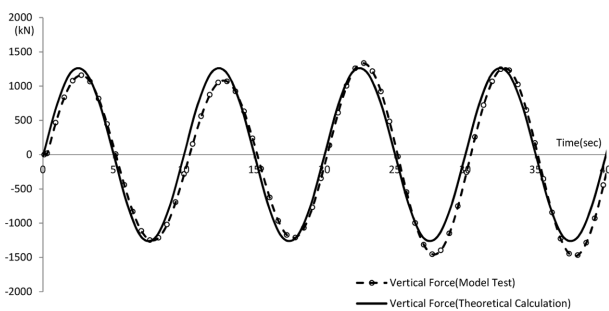


Fig. 6 Vertical wave forces acting on structure of submerged floating railway

Table 1 Wave heights and periods for test

| Description | Value | Remarks |
|----------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Volume V | 12,900m ³ | Designed section |
| Area(horizontal) A | 1,046m ² | |
| Area(vertical) A | 1,245m ² | |
| Inertia Coefficient C_I | 1.6 | Recommended coefficient[6] |
| Drag Coefficient C_D | 0.7 | Recommended coefficient[6] |
| Density ρ | 1,025kg/m ³ | |
| Wave height h | 3m | |
| Wave Period T | 10sec | |
| Wave circular frequency ω | 0.628 | |
| Wave number k | 0.0419 | Determined by Eq.(5) |
| Keulegan carpenter number | 0.14 | Wave Velocity×Wave Period/Diameter |
| Depth of sea bottom H | 60m | |
| Depth of SFT z | 40m | |

와 회절의 효과를 무시 하였으나, 실제 모형시험에는 이런 효과가 어느 정도 반영되어 오차가 발생하는 것으로 추정된다. 향후 반사 하중과 회절하중을 고려하여 정밀 해석을 수행할 필요가 있다. 그러나 실제 초기 설계 목적으로는 유용한 결과라고 할 수 있다. 수직하중 계측 결과는 Fig. 6과 같다. 수직 하중에 대해서도 실험과 이론 계산 결과는 수직

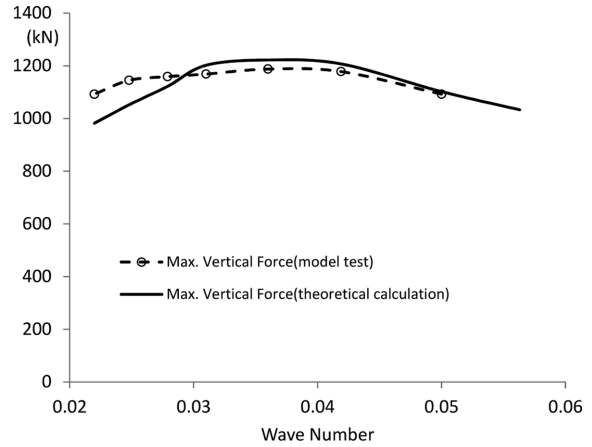


Fig. 7 Maximum vertical wave forces with changing wave numbers

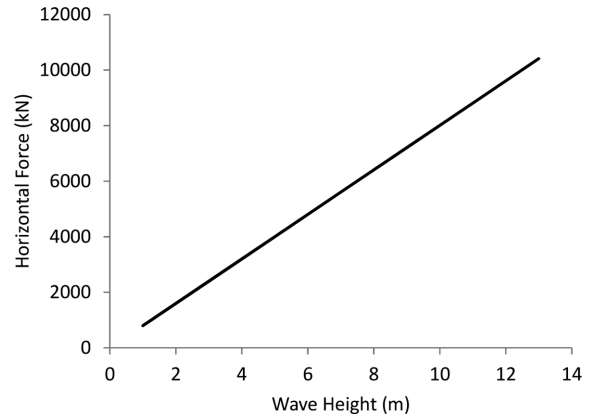


Fig. 8 Horizontal wave forces with changing wave heights

하중 보다 더 양호한 일치율을 보여주고 있다. 파고와 수심을 일정하게 하고 파주기를 변경시키는 시험도 동시에 수행하였다. 파주기가 변경되면 식(9)에서 알 수 있듯이 파수가 변하게 된다. 파수에 따라 파력을 표시해 보면 Fig. 7과 같다. 모형 시험을 통해 얻어진 결과는 선형 파이론에 의한 결과와 양호하게 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서 파수 0.03 이하에서 모형 시험 결과와 차이가 더 커지는데 이는 파수가 감소함(파주기가 길어짐)에 따라, 비선형적 거동을 보여주는 실제 파와 이론적 선형과 사이에서 가속도 값의 차이가 증가하고, 이에 따른 관성력 차이에 따라 수직하중의 차이가 다소 발생한 것으로 추정된다.

한편으로, 모형 시험에서 파수가 감소함에 따라 양력이 발생하여 이론 해석보다 수직하중 값이 크게 나타난 것으로도 해석될 수 있다. 이런 차이에도 불구하고, 모형 시험과 해석과의 오차는 초기 설계 목적으로 활용할 수 있을 만큼 용인할 만하다. 파고에 따른 파력의 변화를 계산해 보면 Fig. 8과 같다. 파고에 따라 파력은 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

식 (10)에서 제시하는 바와 같이 파력은 관성력과 항력의 합으로 주어진다. 그런데, Fig. 3의 모델에 대해 관성력과 항

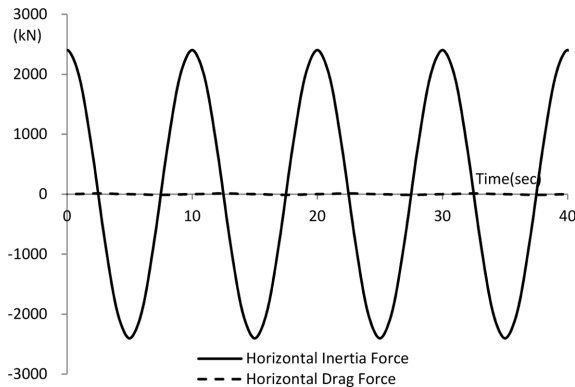


Fig. 9 Horizontal inertia force compared with drag force

력을 계산해 보면 Fig. 9와 같은 결과가 얻어진다. Fig. 9의 결과는 관성력과 항력의 최대값을 비교한 것인데, 다음 식 (11)에 의해서도 분명해 진다.

즉, 해중철도의 부피가 투영면적에 비해 크고, 관성력 계수가 항력계수보다 클 뿐 아니라 해중철도 깊이가 깊어짐에 따라 분모의 $\sinh \kappa H$ 항이 분자의 $\cosh \kappa(H+z)$ 항보다 커지기 때문이다.

$$\frac{F_{Dmax}}{F_{Imax}} = \frac{C_D A h \cosh \kappa(H+z)}{2 C_I V^2 \sinh \kappa H} \quad (11)$$

여기서, F_{Dmax} = 시간에 따라 변하는 항력 최대값, F_{Imax} = 시간에 따라 변하는 관성력의 최대값

따라서 본 연구의 해석 대상 모델에서 항력은 관성력에 비해 미미하여 무시할 만한 수준이 된다. 파력은 다음 식 (12)로 계산할 수 있다. 즉, 최대 파력은 파고에 비례하게 된다.

$$F_x \cong C_I \rho V \frac{h}{2} \omega^2 \frac{\cosh \kappa(H+z)}{\sinh \kappa H} \sin(\kappa x - \omega t) \quad (12)$$

4. 결 론

본 연구에서는 해수면에서 파도가 칠 때, 해중 철도 구조체에 작용하는 파력을 계산하기 위해 상사 모형에 대해 실험을 수행하였고, 이론적 방법을 적용하였다. 선형 파이론에 기초한 Morison식을 적용한 결과는 모형 실험 결과와 양호한 일치치를 보였다. 파력은 관성력과 항력의 합으로 주어지는데, 파고가 구조물 직경에 비해 작은 경우 항력은 관성력에 비해 무시할 만한 수준이 되어 관성력만 고려하여도 파력 계산 결과는 양호한 결과를 준다. 파력은 기하학적 형상이외에 파수와 파고에 의해 결정된다. 파수는 파주기와 수심에 의해 결정되는데, 파수에 따라 파력은 큰 변화를 보이지 않는다. 이에 비해 파력은 파고에 비례하여 변화한다. 선형 파이론을 이용한 Morison식은 파력 계산에 유용한 자료를 제공할 수 있으며, 이에 기초한 간편한 계산 식은 계류 장치의 설계에 활용될 수 있다.

References

- [1] S.I. Seo, M. Sagong, S.W. Son (2014) Simplified shock response analysis for submerged floating railway against underwater explosion, *Journal of the Korean Society for Railway*, 17(2), pp. 100-105.
- [2] S.I. Seo, J.S. Kim (2013) Simplified collision analysis method using theory of beam with elastic foundation, *Journal of the Korean Society for Railway*, 16(3), pp. 1-5.
- [3] S.I. Seo, J.S. Kim (2013) Simplified collision analysis method using theory of beam with elastic foundation, *Journal of the Korean Society for Railway*, 16(3), pp. 1-5.
- [4] J.N. Newman (1977) *Marine hydrodynamics*, MIT Press, Cambridge Massachusetts, pp. 39-42.
- [5] DNV (2010) Environmental conditions and environmental loads, Recommended Practice DNV-RP-205, *Det Norske Veritas*, pp. 52-74.
- [6] API (1993), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design, RP 2A-WSD, 10th ed., *American Petroleum Institute*, pp. 15-23.
- [7] H. Kunisu (2010) Evaluation of wave force acting on submerged floating tunnels, *Procedia Engineering*, 4, pp.99-105.
- [8] W. Lu, F. Ge, L. Wang and Y. Hong (2010) Slack phenomena in tethers of submerged floating tunnels under hydrodynamic loads, *Procedia Engineering*, 4, pp. 243-251.
- [9] Y. Li an M. Lin (2010) Hydrodynamic coefficients induced by waves and currents for submerged circular cylinder, *Procedia Engineering*, 4, pp. 253-261

접수일(2014년 8월 29일), 수정일(2014년 12월 11일),
게재확정일(2014년 12월 17일)

Sung-il Seo: siseo@krri.re.kr

New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Bangmulgwan-ro, Uuiwang-Si, Gyeonggi-Do 437-757, Korea

Hyung Seok Mun: hsmun@krri.re.kr

New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Bangmulgwan-ro, Uuiwang-Si, Gyeonggi-Do 437-757, Korea

Jin Ho Lee: ohnij2@krri.re.kr

New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Bangmulgwan-ro, Uuiwang-Si, Gyeonggi-Do 437-757, Korea

Jin Ha Kim: jhakim@kriso.re.kr

Offshore Plant Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 171 Jangdong, Yusong, Daejeon 305-343, Korea