육상저유탱크 및 육상가옥에 작용하는 지진해일파력의 추정 Estimation of the Tsunami Force Acting on Onshore Oil Storage Tanks and Houses

이광호* · 박보배** · 김창훈*** · 최낙훈** · 김도삼**

Kwang Ho Lee*, Bo Bae Park**, Chang Hoon Kim***, Nack Hoon Choi** and Do Sam Kim**

요 지 : 본 연구에서는 육상구조물에 작용하는 지진해일파력해석을 위하여 Navier-Stokes solver에 기초한 3차원 혼상류수치해석법을 적용하여 검토하였다. 여기서, 대상구조물을 육상저유탱크와 육상가옥으로 하여 호안과 육상구조물간의 이격거리에 따라 육상구조물에 작용하는 지진해일파력을 검토하였다. 또한 육상구조물에 작용하는 지진해일파력의 추정을 위하여 항력만을 고려한 방법과 항력 및 관성력을 동시에 고려한 방법을 각각 적용하여 얻은 결과와 수치해석결과 및 설계기준에 의한 결과치를 비교·분석하였다. 이로부터 항력 및 관성력을 동시에 고려하여 추정한 지진해일파력이 항력만을 고려한 경우 보다 수치해석결과에 더 근접하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 지진해일파력, 육상가옥, 육상저유탱크, 항력, 관성력

Abstract : This study investigated the tsunami force acting on onshore structures using a numerical program, three-dimensional one-field model for immiscible multi-phase flows, which is based on Navier-Stokes solver. In this paper, the characteristics of tsunami of oil storage tank and house structures studied to the distance between the seawall and structure. In addition, the study compared and analyzed the tsunami forces determined by considering drag force only and considering both drag and inertia forces. These numerical results were compared with the design standard. As a results, the case of considering the both forces is more close to numerical result than that of considering the drag force only.

Keywords : tsunami force, onshore house, onshore oil storage tank, drag force, inertia force

1. 서 론

일반적으로 지진해일파는 해저단층운동에 의한 해저지진, 산사태(land sliding) 및 해저화산활동 등과 같은 급작스러운 해저지반운동으로 지층의 수직운동에 의한 해수면의 변화로 형성된다. 이러한 지진해일파는 장주기파로 천해역으로 내습함에 따라 천수변형에 의해 파고가 증폭되고, 동시에 파장이 감소된다. 또한 지형적인 요소와 결부되면서 수심이 깊은 경우에는 고립파로, 수심이 얕은 경우에는 단파로 연안에 도달할 수 있다(김, 2011).

여기서, 2004년 발생한 인도네시아 슈마트라 지진해일은 약 30만명의 인명피해와 10조원의 재산피해를 가져왔으며, Photo. 1은 지진해일 당시 발생한 육상저유탱크의 피해사례들을 나타내고 있다. 이처럼 육상저유탱크의 경우 지진이 발생하게 되면 해일에 의한 1차적인 피해뿐만 아니라, 기름유출, 화재 등의 2차재해가 발생할 위험성이 있다.

현재 육상가옥에 작용하는 지진해일파력에 관한 기존의 연구는 다수 있으나, 이를 구조물의 형상이 다른 저유시설 등에

Photo 1. Oil storage tanks damaged by Indian ocean tsunami
(<http://atdr.tdmrc.org:8084/jspui/bitstream.AIWEST-DR.pdf>)

작용하는 파력의 추정에 직접 적용하기에는 파력계수 등이 상이하므로 어렵다.

한편, 육상저유탱크에 작용하는 지진해일파력에 관한 연구로 首藤(1987)는 지진해일내습시 석유관련시설에 대한 과거의 재해를 5개 종류로 분류하고 있으며, Ikeya et al.(2005)은 석유관련시설의 현지조사와 지진해일의 파력특성에 관한 Asakura et al.(2000)의 연구성과를 기본으로 저유탱크의 피해를 추정하여 피해에 관한 관계도를 작성하였다. 그리고 Ikeya et al.

* (일)나고야대학교 공학연구과 사회기반공학전공(Department of Civil Engineering, School of Engineering, Nagoya University)

** 한국해양대학교 토목공학과 (Corresponding author : Do Sam Kim, Department of Civil Engineering, Korea Maritime University, Dongsam-dong, Busan 606-791, kimds@hhu.ac.kr)

*** 현대건설 토목환경사업부 토목환경기술개발실(Hyundai Engineering & Construction, Gye-dong, Jongno-gu, Seoul 110-920, Korea)

(2005)에 따르면 지진해일에 의해 육상부가 침수되면 저유탱크는 부력에 의해 수면에 떠오르게 되어 수평압력이나 양압력을 받아 활동이나 전도되기 쉬워진다고 지적하고 있다. Fujii et al.(2006)은 首藤(1987)가 분류한 과거 지진해일의 내습시에 석유관련시설에 있어서 재해의 분류를 토대로, ① 수리실험에 의해 지진해일수위로부터 저유탱크에 작용하는 해일파력을 추정하는 방법을 제안하였고, ② 월파량에 따른 저유탱크에 작용하는 지진해일파력에 의한 피해 정도의 관계도를 작성하였으며, ③ 수치해석을 통하여 복잡한 지형조건에 있는 저유탱크에 작용하는 지진해일파력의 수면형과 시계열을 추정하였다.

또한 육상가옥에 미치는 3차원파력 혹은 수위변동에 관한 연구로 Simamora et al.(2007)은 해안선으로부터 육상가옥의 이격거리, 전면에 구조물의 존재유무, 구조물의 배치방법에 따른 지진해일파력의 변화에 대하여 수조실험을 수행하였다. 실험에서 Simamora et al.(2007)은 구조물의 전면에서 측정된 지진해일파압의 적분치에 최대침수심, 최대처오름고, 유속 및 항력계수를 적용하여 Morison 식으로부터 지진해일파력을 추정하였다. 그리고 Fujima et al.(2009)은 사각형상을 갖는 육상가옥에 작용하는 지진해일파력에 관하여 해안선으로부터의 이격거리를 변화시켜 작용파력을 수리실험으로부터 측정하였고, 구조물이 존재하지 않을 때의 최대침수심과 유속을 사용하여 Morison 식으로부터 지진해일파력을 추정하였다. 게다가 해안선으로부터의 이격거리에 따라 정수압 혹은 동수압이 지배적인 영역을 분할하여 각 영역에서 지진해일파력의 산정식을 제안하였다. 수치해석에 의한 연구로 이 등(2011)은 Simamora et al.(2007)과 Fujima et al.(2009)의 수리실험을 기초로 하여 육상가옥 군에 대한 지진해일파력을 3차원혼상류해석법으로부터 평가하여 지진해일파력에 관한 3차원수치해석의 유용성을 확인하였다.

이상의 연구에서 대다수는 육상저유탱크 및 육상가옥에 작용하는 지진해일파력의 추정에 항력만을 고려하고 있으며, 지진해일파력에 대한 보다 정도 높은 추정을 위하여 항력 및 관성력을 동시에 고려해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 육상저유탱크에 대한 연구로 Fujii et al.(2006)이 적용한 저유탱크의 제원을 적용하여 육상저유탱크에 작용하는 지진해일파의 작용파력에 항력과 관성력을 동시에 고려한 해석을 수행한다. 또한 육상가옥에 대해서도 이 등(2011)의 3차원혼상류수치해석법을 이용하여 육상가옥에 작용하는 지진해일파에 항력과 관성력 성분을 동시에 고려한 해석을 수행하였다.

2. 지진해일파력의 직접적인 산정을 위한 수치해석이론

서로 혼합되지 않는 혼상(multi-phase)의 점성 및 비압축성 유체를 고려하면 각각의 유체는 서로 다른 상의 유체와 명확한 경계면으로 식별될 수 있다. 즉, 혼상유체의 흐름운동에서 경계면의 추적이 가능할 경우 서로 혼합되지 않는 혼상유체의 운동에 대해서 단일유체모델(one-field model for immiscible two-phase

fluid)을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 해석영역내에 액체와 기체를 고려하는 이상류를 대상으로 한다. 단일유체모델은 각 상의 유체가 국소질량중심과 함께 이동하는 것으로 가정하여 식 (1) 및 식 (2)~(4)와 같이 단일의 연속방정식 (1)과 각 방향의 Navier-Stokes 운동방정식 (2)~(4)의 시스템에 의해 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (-\tau_{xx} + 2\hat{v}D_{xx}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (-\tau_{xy} + 2\hat{v}D_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\tau_{xz} + 2\hat{v}D_{xz}) + \frac{F_x}{\rho} - \frac{2\hat{v}}{3} \frac{\partial q^*}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (-\tau_{yx} + 2\hat{v}D_{yx}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (-\tau_{yy} + 2\hat{v}D_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\tau_{yz} + 2\hat{v}D_{yz}) + \frac{F_y}{\rho} - \frac{2\hat{v}}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (-\tau_{zx} + 2\hat{v}D_{zx}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (-\tau_{zy} + 2\hat{v}D_{zy}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\tau_{zz} + 2\hat{v}D_{zz}) + \frac{F_z}{\rho} - \frac{2\hat{v}}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - g - \lambda w \end{aligned} \quad (4)$$

$$q^* = \begin{cases} q(y, z, t)/\delta_x & x = x_s \\ 0 & x \neq x_s \end{cases} \quad (5)$$

여기서, t 는 시간, u, v, w 는 x, y, z 방향에 대한 각 유속 성분, p 는 압력, g 는 중력가속도, τ_{ij} 는 SGS(Sub-Grid Scale)에서 난류응력, D_{ij} 는 변위-응력에 대한 GS(Grid Scale)성분, F_s 는 표면장력에 의한 체적력, λ 는 부가감쇠영역에서의 감쇠계수, $\hat{v}$ 는 밀도, $\hat{v}$ 는 동점성계수를 각각 나타낸다. q^* 는 조파소스의 유량 밀도로, 조파소스가 위치하는 $x=x_s$ 이외의 영역에서는 0으로 주어진다. δ_x 는 $x=x_s$ 를 포함하는 x 방향의 격자폭이다. 또한 위의 식에서 밀도 및 동점성계수는 기체 혹은 액체를 결정하는 공간과 시간의 함수이다. 즉, 서로 다른 유체(여기서는 액체와 기체)는 밀도와 점성을 고려함으로써 운동방정식 (2)~(4)에 의해 표현된다. 이와 같은 단일유체모델은 계산경제내에 다상유체의 균질혼합을 가정한 혼합유체모델과 대조적인 것으로, 경계면을 통한 각 상 사이의 상호작용을 고려할 수 있는 장점이 있다(Akiyama and Aritomi, 2002). 또한 경계면에서 혼상유체의 거동을 밀도와 점성에 대하여 가중평균을 이용한 단일의 운동방정식을 적용함으로써 혼상류해석에서는 복잡한 자유수면경계조건이 필요하지 않게 되며, 구조물의 천단상으로의 월류 및 월파와 같은 복잡한 수면변동에 대한 물리현상을 용이하게 재현할 수 있고, 자유수면의 처리에 대한 수치프로그램을 보다 간략하게 구성할 수 있다는 큰 장점을 지닌다. 이상의 3차원혼상류에 의한 수치해석에 있어서 수면형추적에 VOF법(Hirt and Nichols, 1981), 이산방정식에는 SMAC법(Amsden and Harlow, 1970), 난류해석에 LES모델(Smagorinsky, 1963)을 각각 적용한다. 또한 대상파랑을 조파소스에 의해 조파하고, 파랑의 무반사에 스폰지층을 사용하는

3차원수치조파수조를 적용하였고, 이에 대한 구체적인 내용은 이 등(2011)을 참고하기 바란다.

3. Morison 식에 의한 간접적인 지진해일파력의 평가를 위한 이론

3.1 Morison 식에 의한 지진해일파력의 추정방법

3.1.1 항력만을 고려한 지진해일파력의 추정법

식 (6) 은 Morison 식에서 항력 성분에 상당하는 최대파력으로, 본 연구에서 항력 성분만을 고려하여 최대지진해일파력을 추정하는 경우에는 식 (6)을 적용하였다.

$$F_{D1\max} = \frac{1}{2} \rho C_{D1} A (h_i u_i^2)_{\max} \quad (6)$$

여기서, C_{D1} 는 항력계수, u_i 는 유속, h_i 는 침수심, ρ 는 유체의 밀도, A 는 흐름방향으로 구조물의 투영면적, 첨자 $\max$ 는 최대치이다. 항력계수에 대하여 FEMA-CCM(2005), Yeh(2006, 2007) 등은 사각형구조물의 경우에 $C_{D1} = 2.0$, 원주구조물의 경우에 $C_{D1} = 1.2$ 를 적용할 것을 제안하고 있다. 그리고 최대침수심 $h_{\max}$ 와 최대유속 $u_{\max}$ 은 구조물이 존재하지 않는 경우에 산정된 값을 적용하며, 일반적으로 $(h u_i^2)_{\max} \neq h_{\max} u_{i\max}^2$ 이다. Fujima et al.(2009)은 $(h u_i^2)_{\max}$ 을 적용하는 방법과 현장조사에서 $h u_i^2$ 의 시간이력을 추정하기 어려운 것에 착안하여 지진해일파력 추정식에 $h_{\max} u_{i\max}^2$ 을 적용하는 방법을 제시하였으나, 본 연구에서는 $(h u_i^2)_{\max}$ 의 경우에 대해서만 언급한다.

3.1.2 항력 및 관성력을 동시에 고려한 지진해일파력의 추정법

항력과 관성력을 동시에 고려한 지진해일 파력의 추정에는 아래의 식 (7)과 같은 Morison 식을 적용하였다.

$$\begin{cases} F_{D2} = C_{D2} f_D + C_M f_I \\ f_D = \frac{1}{2} \rho A (h_i) u_i^2 \\ f_I = \rho V (h_i) \frac{du_i}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, F_{D2} 는 Morison 식에 의한 예측파력, C_{D2} 는 항력계수, C_M 은 관성력계수, V 는 구조물의 배수체적, du_i/dt 는 가속도, f_D 는 항력, f_I 는 관성력이다. 항력계수와 관성력계수는 예측치와 관측치(측정치)와의 사이에 주어지는 관계식 (8)과 같은 오차의 자승을 최소로 하는 최소자승법으로부터 산정되었다. 그리고 수치해석으로 얻어진 유속의 시간이력을 Fourier변환하여 가속도의 시간이력을 산정하였다.

$$\varepsilon^2 = \sum F_M^2 (F_{D2} - F_M)^2 \quad (8)$$

여기서, F_M 은 수치해석에 의한 측정파력을 나타낸다. 그리고 최소자승법의 최소화 과정인 $\partial \varepsilon^2 / \partial C_{D2} = 0$, $\partial \varepsilon^2 / \partial C_M = 0$ 으로부터 항력계수와 관성력계수를 산정하면 식 (9)와 (10)과 같이 주어질 수 있다.

$$C_{D2} = \frac{\Sigma (F_M^2 f_D) \Sigma (F_M^2 f_I^2) - \Sigma (F_M^3 f_I) \Sigma (F_M^2 f_D f_I)}{\Sigma (F_M^2 f_D^2) \Sigma (F_M^2 f_I^2) - [\Sigma (F_M^2 f_D f_I)]^2} \quad (9)$$

$$C_M = \frac{\Sigma (F_M^2 f_D) \Sigma (F_M^2 f_I^2) - \Sigma (F_M^3 f_I) \Sigma (F_M^2 f_D f_I)}{\Sigma (F_M^2 f_D^2) \Sigma (F_M^2 f_I^2) - [\Sigma (F_M^2 f_D f_I)]^2} \quad (10)$$

3.2 육상저유탱크에 작용하는 지진해일파력의 평가

육상저유탱크에 작용하는 지진해일파의 파력을 해석하기 위하여 Fig. 1과 같은 길이 860 cm, 폭 182 cm의 3차원수치조파수조를 사용하였다. 수치해석에서는 수심(h)을 60 cm로 설정하였으며, 고립파의 천수변형을 재현하기 위하여 1 : 3의 경사면을 설치하였다. 또한 그림에서 D 는 호안과 구조물과의 이격거리로 $D = nd$ (n 은 임의상수, d 는 구조물의 직경)의 관계를 가진다. 수치해석에서 적용한 육상저유탱크는 Fujii et al.(2006)이 수리실험에 적용한 1 : 100 축척에 상당하는 크기를 적용하였으며, 그 지름(d)은 20 cm이다. 저유탱크에 작용하는 파력은 구조물의 全面에 설치된 파압계의 적분으로부터 산정되었다.

수치해석은 수심(h)에 대한 입사파고(H)의 비를 $H/h = 0.05$, 0.067, 0.083, 0.10, 0.12로 변화시켜 총 5 CASE로 수행하였다.

3.2.1 수치해석에 의한 최대지진해일파력

전술한 모든 CASE에 대하여 호안과 저유탱크간의 이격거리 변화에 따른 지진해일파력을 수치해석을 통하여 측정하였다. 지진해일파력을 산정하기 위하여 저유탱크의 全面에 압력계를 설치하였다. 다음의 Fig. 2는 측정된 지진해일파력을 바탕으로 이격거리의 변화($D/d = 0.5 \sim 4.0$)에 따른 최대지진해일파력($F_{M\max}$)을 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 전체적으로 호안으로부터의 이격거리가 증가할수록 저유탱크에 작용하는 최대지진해일파력($F_{M\max}$)은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 H/h 가 가장 낮은 CASE 1이 가장 적은 최대지진해일파력($F_{M\max}$)을 나타내었고, H/h 가 가장 높은 CASE 5에서 가장 큰 최대지

Fig. 1. Definition sketch of 3-dimensional numerical wave tank model in order to estimate tsunami forces acting on onshore oil storage tank.

Fig. 2. Maximum tsunami force as a function of the distance between the seawall and the structure.

진해일파력(F_{Mmax})을 나타내었다. 즉 최대지진해일파력(F_{Mmax})은 저유탱크가 호안에 가까울수록, H/h 가 높을수록 크게 나타났다.

Fig. 3은 본 연구에서 CASE 1의 경우 시간에 따른 수위변동을 시·공간적으로 나타낸 것으로, 고립파의 조파 후 9.50 s, 10.00 s, 10.50 s 및 11.50 s의 상황을 나타낸다.

3.2.2 지진해일파력의 추정

Morison 식 (6)과 (7)을 이용하여 지진해일파력의 추정하기 위해서는 침수심과 유속을 산정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석으로부터 모든 CASE에 대해 저유탱크가 존재하지 않을 때 저유탱크의 중점위치에서 침수심과 유속을 측정하였다. Fig 4는 전 CASE중 CASE 1에서 호안과의 이

Fig. 3. Snapshots of simulated tsunami inundation and run-up on the structure.

Fig. 4. Time variation of the computed water levels and velocities at the proposed positions in the absence of the onshore oil storage tank.

격거리에 따른 침수심과 유속을 시간의 경과에 따라 나타낸 일례이다. 그림에서 유속과 침수심은 육상부에 도달하면서 급격하게 증가하는 경향을 보이며, 호안으로부터 이격거리가 멀어질수록 유체분리현상에 의해 비정상흐름이 발달하게 되고, 복잡한 수면형을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 최대 침수심과 최대유속이 나타나는 시간은 동일하지 않으며, 위상차가 존재한다는 것을 알 수 있다.

(1) 항력만을 고려한 지진해일파력의 추정
전술한 각 CASE에서 침수심과 유속을 적용하여 항력만을

고려한 지진해일파력의 추정을 수행하였다. 항력만을 고려한 지진해일파력의 산정에는 식 (6)을 적용하였다. 수치해석에서 측정된 최대지진해일파력(F_{Mmax})과 식 (6)에 Fig. 4로부터 산정되는 $(hu_i^2)_{max}$ 을 적용한 결과를 비교하여 각 CASE에서 항력계수를 산정하였다. 그리고 각 CASE에서 이격거리 변화에 따른 항력계수와 그 평균값을 Table 1에 나타내었다. 결과를 살펴보면 산정된 평균항력계수는 CASE 1의 경우 1.05가 산정되었으며, CASE 2~5에서 각각 0.96, 0.79, 0.97, 0.90가 산정되어 전체적으로 1.0에 근접한 값을 나타내었다. 추정된 항력계수는 기존의 설계기준으로 사용되는 항력계수 ($C_{D1}=1.2$)

Table 1. Estimated drag coefficients(C_{D1})

D/d	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	average
CASE 1	1.08	1.17	1.35	1.23	0.89	0.89	0.90	0.86	1.05
CASE 2	1.25	0.95	0.95	0.94	0.89	0.88	0.89	0.85	0.96
CASE 3	0.96	0.80	0.78	0.72	0.73	0.77	0.70	0.78	0.79
CASE 4	0.96	1.04	1.10	1.03	0.88	0.83	0.80	0.99	0.97
CASE 5	-	1.08	0.76	0.79	0.90	0.90	-	0.89	0.90

보다 낮게 나타났다.

Fig. 5는 산정된 평균항력계수와 수치해석을 통해 얻은 $(hu_i^2)_{\max}$ 를 식 (6)에 의해 추정된 최대지진해일파력 $F_{D1\max}$ 을 수치해석에 의해 추정된 최대지진해일파력($F_{M\max}$)으로 나누어 무차원한 결과이다. 여기서 FEMA-CCM(2005) 및 Yeh (2006, 2007)에 의해 제안된 원주구조물에 대한 항력계수 $C_{D1}=1.2$ 를 식 (6)에 적용하여 추정된 최대지진해일파력도 같이 표기하였다. 이의 결과로부터 FEMA-CCM(2005) 및 Yeh(2006, 2007)가 제안한 항력계수 $C_{D1}=1.2$ 를 적용하여 추정한 최대 지진해일파력이 수치해석으로 측정된 지진해일파력($F_{M\max}$)을 과대평가하고 있음을 확인할 수 있다.

(2) 항력 및 관성력을 동시에 고려한 지진해일파력의 추정
다음으로 식 (7)에 나타난 Morison 식을 이용하여 수치해석으로 측정된 파력과 침수심 및 유속의 시간변화를 적용하여 지진해일파력을 평가하였다. 각 CASE에서 식(9)와 (10)으로부터 항력계수와 관성력계수를 산정하였으며, 평균항력계수와 평균관성력계수로부터 지진해일파력을 추정하였다. 각 CASE에서 산정된 평균항력계수와 평균관성력계수만을 Table 2에 나타내었다. 결과를 살펴보면 추정된 평균항력계수와 평균관성력계수는 각각 1.72와 0.34의 값을 나타내었다.

Table 2. Estimated drag and inertia coefficients

C_{D2}, C_M	C_{D2}	C_M	C_{D2}, C_M	C_{D2}	C_M
CASE 1	2.1	0.4	CASE 2	1.8	0.4
CASE 3	1.7	0.5	CASE 4	1.5	0.2
CASE 5	1.5	0.2	average	1.72	0.34

Fig. 6은 일례로 CASE 2에서 산정된 항력계수와 관성력계수, 수치해석에 의한 침수심 및 유속을 적용하여 추정된 지진해일파력과 수치해석에 의한 결과치의 시계열을 나타낸 것이다. 추정치와 Fig. 4를 비교함으로써 추정치는 관성력에 비해 항력이 지배적이며, 파가 구조물에 부딪히는 순간에는 가속도가 크게 나타나므로 관성력이 다소 큰값을 나타낼 수 있지만, 전체적으로 시간이 경과함에 따라 항력이 지배적인 것으로 판단되고, 특히 관성력계수가 적은 값을 나타내는 것으로부터 알 수 있을 것이다. 더불어 추정파력과 수치해석치의 변화양상 및 두 최대지진해일파력이 매우 일치함을 알 수 있다. D/d 가 증가함($D/d=3.5\sim4.0$)에 따라 추정된 지진해일파력에서 쌍봉형의 파력분포가 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 분포는 육상에서의 전파거리가 긴 경우에 지반과의 상호간섭 등에 의한 유체분리현상에 의한 결과로 판단되며, 이러한 현상은 H/h 가 높아질수록 감소하는 경향이 있다.

Fig. 5. Comparison between the estimated maximum tsunami forces by Morison eq. considering drag force only and the numerical ones.

Fig. 6. Time variation of the computed and estimated wave forces in onshore oil storage tank.

다음의 Fig. 7은 전 CASE에서 추정된 최대지진해일파력 (F_{D2max})을 수치해석에 의한 최대지진해일파력(F_{Mmax})으로 나누어 무차원한 결과이다. 결과를 살펴보면 F_{D2max}/F_{Mmax} 은 1.0에 근접한 값을 나타냄을 확인할 수 있으며, 이로부터 추정된 지진해일파력이 수치해석에 의한 지진해일파력을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 이상의 Fig. 5, 6 및 7에 나타난 결과를 추정치 (F_{Dmax})와 수치해석(F_{Mmax})의 관계로 나타난 것이다. 결과에 의하면 F_{D1max} 의 경우 C_{D1} 이 0.79~1.05의 값을 나타내므로 FEMA-CCM(2005) 및 Yeh(2006, 2007)가 제안한 $C_{D1} = 1.2$ 보다 다소 작은 값을 나타냄을 알 수 있다. 또한 F_{D1max} 에 비해 F_{D2max} 가 수치해석치에 더 가까운 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서 육상저유탱크에 작용하는 지진해일파력의 평가에 항력 및 관성력을 동시에 고려하여 추정하는 방법이 더 적합함을 알 수 있다.

Fig. 7. Comparison between the estimated maximum tsunami forces by Morison eq. considering both drag and inertia forces and the numerical ones.

3.3 육상가옥에 작용하는 지진해일파력의 평가

본 연구에서는 이 등(2011)의 3차원수치조파수로 및 Simamora et al.(2009)의 수리실험과 동일한 조건으로 길이 860 cm, 폭

Fig. 8. Comparison of computed and estimated maximum tsunami forces for onshore oil storage tank.

182 cm의 3차원수치조파수로를 적용하였으며, 심해역과 천해역에서의 수심을 각각 60 cm와 3 cm로 설정하였다. 심해역과 천해역 사이에 지진해일의 천수변형을 재현하기 위하여 1:3의

경사면을 설치하였으며, 심해역의 수심(h)과 입사파고(H)의 비를 $H/h=0.05$ 로 설정하였다. 그리고 육상가옥을 폭이 10 cm인 정사각형으로 구성하였고, 호안과 육상가옥 사이의 무차원거

리(D/B)를 $D/B = 1.0 \sim 8.0$ 로 변화시켜 육상가옥에 작용하는 지진해일파력을 측정하였다. 또한 이 등(2011)은 수치해석의 결과를 수리실험과 비교·분석하여 3차원혼상류수치해석법의 유용성과 타당성을 확인함 동시에 지진해일파력을 추정하기 위하여 정수압적인 방법과 동수압적인 방법을 각각 적용하였고, 동수압적인 추정법에 관한 회귀식을 제안하였다. 그의 동수압적인 추정법에서는 Morison 식에 의한 항력만을 고려하여 추정치의 정도와 파력계수를 검토하였다. 자세한 사항에 대해서는 이 등(2011)을 참조바란다.

본 연구에서는 육상가옥에 작용하는 지진해일파력을 추정하기 위하여 전술한 육상저유탱크의 경우와 동일하게 Morison 식에 의한 항력과 관성력을 동시에 고려한 추정법을 적용하여 추정치의 정도와 파력계수의 변화 등을 검토하였으며, 동시에 비교를 위하여 Morison 식에 의한 항력만을 고려한 경우의 결과치도 나타내었다. 단 이하에서 제시하는 CASE 1($H/h = 0.05$)의 결과는 이 등(2011)에 의한 결과이고, 나머지의 CASE 2~5의 결과는 본 연구에서 수행된 결과이다.

3.3.1 수치해석에 의한 최대지진해일파력

수심(h)과 입사파고(H)의 비가 $H/h = 0.05, 0.067, 0.083, 0.10, 0.12$ 인 경우에 육상가옥에 작용하는 지진해일파력을 수

치해석으로부터 측정하였다. Fig. 9는 본 연구에서 수행한 호안과 육상가옥 사이의 이격거리에 따른 최대지진해일파력(F_{Mmax})으로 전체적으로 호안으로부터 이격거리가 멀어질수록 점차 감소함을 알 수 있다. 또한 H/h 가 작은 경우 이격거리에 따른 작용파력의 감소는 매우 작으나, H/h 가 커질수록 최대 지진해일파력은 이격거리의 증가에 따라 급격히 감소하는 경향을 보인다. 여기서 이격거리가 멀어짐에도 작용파력이 감소하지 않고 증가하는 CASE 5의 $D/B = 2$ 인 경우 지진해일파의 쇄파파력이 작용하였기 때문으로 판단된다.

3.3.2 지진해일파력의 추정

육상저유탱크에서와 같이 지진해일파력을 추정하기 위하여 Morison 식 (6)과 (7)을 적용한다. 이를 위하여 구조물이 존재하지 않는 경우의 침수심과 유속을 전 CASE에 대하여 각각 측정하였다. 다음의 Fig. 10은 전 CASE 중 CASE 2에 대하여 호안으로부터의 이격거리의 변화에 따른 침수심과 유속을 시간이력으로 나타낸 것이다. 그림으로부터 유속의 경우 지진해일파가 구조물의 위치에 도달하는 순간 최고치에 이르는 반면, 침수심의 경우 구조물의 위치에 도달 후 약 0.1초 이후에 최고치에 이르렀다가 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이로부터 유속과 침수심의 최대치는 동시에 나타나지 않으며,

Fig. 9. Maximum tsunami forces.

Fig. 10. Time variation of the computed water levels and velocities at the proposed positions in the absence of the onshore house.

어느 정도의 위상차를 가진다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 전 CASE에서 유사하게 나타났으며, 여기서는 지면관계상 CASE 2의 결과만을 나타내었다.

(1) 항력만을 고려한 지진해일파력의 추정

Table 3은 각 CASE별로 식 (6)에 F_{Mmax} 과 $(h_i u_i^2)_{max}$ 를 적용하여 산정된 항력계수와 그 평균값을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 11은 식 (6)에 의해 추정된 최대지진해일파력(F_{D1max})과

FEMA-CCM(2005) 및 Yeh(2006, 2007)가 제안하는 $C_{Dl}=2.0$ 을 적용하여 추정한 결과를 수치해석결과(F_{Mmax})로 나누어 무차원화한 값을 나타낸 것이다. 결과에 의하면 CASE 2와 4는 설계기준에 의한 최대지진해일파력이 다소 과대평가하고 있음을 확인할 수 있으나, CASE 3과 5의 결과에서는 추정치가 설계기준치와 매우 유사한 값을 나타내었다. 이 등(2011)에 의한 CASE 1의 결과에서는 수치해석을 통한 결과가 Simamora et al.(2007)에 의한 항력계수의 추정치 $C_{Dl}=1.21$ 과 유사하며,

Table 3. Average estimated drag coefficients(C_{Dl})

D/d	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	average
CASE 1	1.61	1.27	1.23	1.44	1.32	1.00	0.84	1.37	1.26
CASE 2	1.97	0.95	0.92	1.86	1.97	2.03	2.14	2.00	1.73
CASE 3	2.60	2.22	1.80	1.78	1.86	1.81	1.69	1.55	2.01
CASE 4	1.78	1.66	1.61	1.58	1.57	1.49	1.31	-	1.62
CASE 5	2.08	2.20	1.82	1.73	1.69	1.67	1.65	1.62	1.90

Fig. 11. Comparison between the estimated maximum tsunami forces by Morison eq. considering drag force only and the numerical ones.

FEMA-CCM(2005) 및 Yeh(2006, 2007)가 제안하는 $C_{D1}=2.0$ 이 과대평가되고 있음을 확인할 수 있다.

(2) 항력 및 관성력을 동시에 고려한 지진해일파력의 추정
다음의 Table 4는 식(9)와 (10)을 적용하여 산정된 항력계수와 관성력계수를 전 CASE에 대하여 평균치만을 나타낸 것이다. 추정된 평균항력계수와 평균관성력계수는 CASE 1에서 $C_{D2}=2.0$, $C_M=0.4$ 이며, 이는 전 CASE에서 추정된 평균항력계수와 평균관성력계수인 1.86, 0.48과 유사하게 나타났다. 또한 육상가옥의 경우 전 CASE에서 평균값과 대체적으로 유사한 값을 보였다. Fig. 12는 Table 4에 나타난 각 CASE의 평균항력계수와 평균관성력계수를 적용하여 추정된 지진해일파력과 수치해석에 의한 결과치의 시계열을 대표적으로 CASE 3의 경우만 나타낸 것이다. 결과에서 육상저유탱크와 마찬가지로 관성력에 비해 항력이 더욱 지배적이며, 추정된 지진해일파력은 수치해석치를 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 13은 전 CASE에서 추정된 최대지진해일파력(F_{D2max})을 수치해석에 의한 최대지진해일파력(F_{Mmax})으로 나누어 무차원

Table 4. Estimated drag and inertia coefficients

C_{D2}, C_M	C_{D2}	C_M	C_{D2}, C_M	C_{D2}	C_M
CASE 1	2.0	0.4	CASE 2	1.8	0.6
CASE 3	1.9	0.7	CASE 4	1.8	0.3
CASE 5	1.8	0.4	average	1.86	0.48

한 결과이다. 결과에서 F_{D2max}/F_{Mmax} 는 1.0에 근접한 값을 나타냄을 확인할 수 있으며, 이로부터 추정된 지진해일파력이 수치해석에 의한 지진해일파력을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

다음의 Fig. 14는 11, 12 및 13의 결과를 바탕으로 추정치와 수치해석치의 관계로 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 FEMA-CCM(2005) 및 Yeh(2006, 2007)가 제안한 항력계수로 추정된 지진해일파력은 H/h 가 낮은 경우 전술한 바와 같이 다소 과대평가되어 있으나, 가 큰 경우 항력만을 고려하여 추정된 최대지진해일파력(F_{D1max})과 유사한 값을 보였다. 그리고 항력만을 고려하여 추정한 지진해일파력보다 항력 및 관성력을 모두 고려하여 추정된 지진해일파력이 수치해석의 결과를 보다 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 고정도의 지진해일파

Fig. 12. Time variation of the computed and estimated wave forces in the onshore house.

Fig. 13. Comparison between the estimated maximum tsunami forces by Morison eq. considering both drag and inertia forces and the numerical ones.

력의 평가를 위하여 항력만을 고려하여 추정된 방법보다 항력과 관성력을 동시에 고려하여 추정된 방법이 더 적절함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 대상구조물로 육상저유탱크와 육상가옥을 상정하여 호안과 육상구조물간의 이격거리에 따라 육상구조물에 작용하는 지진해일파력을 검토하였다. 지진해일파력해석을 위하여 3차원혼상류해석법(3-D one field model for immiscible two-phase flows)을 적용하였으며, 또한 수치해석의 결과를 이용하여 Morison 식(6)과 (7)의 추정식의 차이를 확인하고 기존의 설계 기준과 비교분석하였다. 이로부터 얻어진 본 연구의 주요한 사항을 아래에 기술한다.

① 육상구조물(저유탱크, 가옥)에 작용하는 지진해일파력은 모든 CASE에서 호안과 구조물과의 이격거리가 멀어질수록, H/h 가 낮을수록 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지진해일파가 육상으로 진행하면서 점차 감쇠하여 작용파력이 점차 감소하기

Fig. 14. Comparison of computed and estimated wave forces acting on the onshore house.

때문인 것으로 판단된다. 그러나 쇄파의 영향으로 지진해일 파력이 증가하는 경우도 존재하였다

② 육상저유탱크의 경우 항력만을 고려하여 추정한 지진해

일파력의 평가에서 산정된 항력계수는 전 CASE에서 1.0에 가까운 값을 나타내었으며, 추정된 최대지진해일파력을 통해서 FEMA-CCM(2005) 및 Yeh(2006, 2007)에 의한 결과($C_{D1}=1.2$)

가 다소 과대평가하고 있음을 확인하였다.

③ 육상가옥에 작용하는 지진해일파력의 평가에서 항력만을 고려하여 추정된 지진해일파력의 경우 각 CASE에서 산정된 평균항력계수는 1.7로 나타났으며, H/h 가 큰 경우 설계기준 ($C_{D1}=2.0$)과 근사한 값을 나타내었다.

④ 항력 및 관성력을 동시에 고려하여 지진해일파력을 추정한 경우 관성력에 비해 항력이 지배적이며, 이는 호안과의 이격거리가 증가할수록 더욱 확연히 나타남을 알 수 있었다.

⑤ 항력 및 관성력을 동시에 고려하여 지진해일파력을 추정한 경우 항력만을 고려하여 추정된 지진해일파력보다는 항력 및 관성력을 동시에 고려하여 추정된 지진해일파력이 수치해석에서 추정된 지진해일파력과 더 일치함을 알 수 있었다. 이로부터 지진해일파력의 평가에 항력 및 관성력을 동시에 고려한 추정법이 더 적합하다고 판단되어진다.

참고문헌

김도삼 (2011). 해안환경공학. 구미서관.

이광호, 하선옥, 이귀섭, 김도삼 (2011). 육상구조물군에 작용하는 지진해일파력의 3차원수치해석, 대한토목학회 논문집, 31(2B), 175-185.

Amsden, A.A. and Harlow, F.H. (1970). The SMAC method : numerical technique for calculating incompressible fluid flow. Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-4370, LosAlamos, N.M.

Akiyama, M. and Aritomi, M. (2002). Advanced numerical analysis of two-phase flow dynamics-multi-dimensional flow analysis, Corona Publishing Co., LTD.Tokyo, Japan.

Asakura, R., Iwase, K., Ikeya, T., Takao, M., Kaneto, T., Fujii, N. and Omori, M. (2000). An experimental study on wave force acting on on-shore structures due to overflowing tsunamis. Proc. of

Coastal Engrg., JSCE, 47, 911-915

FEMA-CCM (2005). Coastal Construction Manual. FEMA 55 Repot, Edition 3, FEMA, USA.

Fujii, N., Ohmori, M., Ikeya, T. and Inagaki, S. (2006). Evaluation of Tsunami Wave Force Acting on Oil Stotage Tanks and Predictive Method for Tsunami Damages. J. of Coastal Engrg., JSCE, 53, 271-275.

Fujima, K., Achmad, F., Shigihara, Y. and Mizutani, N. (2009). Estimation of Tsunami force Acting on Rectangular Structures. J. of Disaster Research, 4(6), 404-409.

Hirt, C.W and Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. Comput. Phys., 287, 299-316.

Ikeya, T., Akiyama, S., Fujii, N. and Ohmori, M. (2005). Evaluation of Tsunami Wave Force Acting on Oil Stotage Tanks and Predictive Method for Tsunami Damages. Journal of social safety science, 7, 307-314.

Simamora, C., Shigihara, Y. and Fujima, K. (2007) Experimental Study on Tsunami Forces Acting on Structures. J. of Coastal Engrg., JSCE, 54, 831-835.

Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations. Mon, Weath. Rev., 91(3), 99-164.

Yeh, H. (2006). : Maximum fluid forces in the tsunami runup zone. J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg, ASCE, 132(6), 496-500.

Yeh, H. (2007). : Design tsunami forces for onshore structures. J. of Disaster Research, 2(6), 1-6.

首藤伸夫(1987). 津波襲時の石油にする災害. 東北大學工學部津波防災所究報告, 第4, 42-60.

원고접수일: 2011년 8월 25일

수정본채택: 2011년 9월 27일

게재확정일: 2011년 9월 27일