Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 24(8) : 621~627, 2014
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2014.24.8.621

한국소음진동공학회논문집 제 24 권 제 8 호, pp. 621~627, 2014
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

다층 TLD를 적용한 부유식 풍력 발전기 축소 모형의 운동에 대한 수치적 고찰

Numerical Investigation on Motion of the Scale Model of a Floating Wind Turbine Using Multilayer TLDs

하 민 호*·정 철 웅†
Minho Ha and Cheolung Cheong

(Received June 9, 2014 ; Revised August 4, 2014 ; Accepted August 4, 2014)

Key Words : Sloshing(슬로싱), Floating Wind Turbine(부유식 풍력 발전기), Tuned Liquid Damper(동조액체댐퍼), Wave(파동), Wave Maker(조파기)

ABSTRACT

In this paper, a possibility of controlling the motion of a floating wind turbine with the tuned liquid damper(TLD) is numerically investigated. First, motion of the scale model of a floating wind turbine without the TLD is predicted and its results are compared to the measured data. There are reasonably good agreements between two results, which confirms validity of the present numerical methods. Then, the effect of TLD is quantitatively assessed by comparing the prediction results for the floating wind turbine with and without the TLD. It is shown that the motion of the scale model derived by external forces can be reduced by using the TLD. On a basis of this result, a multi-layer TLD is proposed to generate larger reaction force of the TLD at the fixed target frequency. The motions of the scale model with the multi-layer TLDs are computed and compared with that of the single-layer TLD. It is shown that the multi-layer TLD generate stronger reaction force and thus more reduce the motion of the floating body than the single-layer TLD.

1. 서 론

신재생에너지원에 대한 관심의 증대와 더불어 풍력발전기 시장은 육상에서의 발전을 중심으로 매년 고성장을 거듭하여 왔다. 하지만 육상에서는 소음 및 경관훼손 등의 환경 문제로 인하여 점차 설치가 제한되고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 일환으로 해상풍력발전이 최근에 급속히 성장하고 있다. 해상풍력발전은 근해의 고정식 풍력발전기를 중심으로 성장하여 왔는데 차세대 풍력발전기로써 심해의 부유식 해상 풍력발전기를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 부유식 해상 풍력발전기는 부유식 해상 구조물 위에 풍력발전기를 설치한 것을 말한다. 최근에 몇몇 부유식 해상 구조물의 종류에 의한 발전기에 대하여 실증이 진행 중에 있다.

해상에서는 지상보다 지속적이고 강한 풍력자원을 가지고 있다는 장점이 있는 반면에, 해상에 설치하면 풍력발전기의 자유도 운동에 영향을 줄 수 있는 요인

† Corresponding Author ; Member, Pusan National University
E-mail : ccheong@pusan.ac.kr
Tel : +82-51-510-2311, Fax : +82-51-514-7640
* Pusan National University

‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

들 즉 바람, 파도 및 해류 등의 외부환경이 훨씬 많이 존재하고 이러한 운동은 풍력발전기의 효율에 악영향을 줄 수 있다. 따라서 부유식 해상풍력발전의 광대한 보급을 위해서는 이러한 운동을 효율적으로 제어할 수 있는 방법을 개발하는 것이 필요하다. 이 논문에서는 동조액체댐퍼(tuned liquid damper, 이하 TLD)를 이용한 부유식 해상 풍력발전기의 운동제어 가능성을 고찰하고자 한다.

TLD란 수동형 댐퍼 중 한 종류로써 내부의 일부가 액체로 채워진 수조를 말한다. 현재 고층 건물에서 지진에 의한 진동을 제어하는데 많이 사용되고 있다[1]. TLD가 설치된 구조물에 외력이 들어올 경우 내부에서 슬로싱 현상이라고 하는 액체의 운동이 일어나게 된다. 이 액체의 운동은 관성으로 인해 외력에 대한 반력을 생성한다. 이 반력으로 인하여 구조물에 대한 외력의 영향이 줄어들게 되어 구조물의 운동을 줄여주게 된다. 이러한 원리에 대한 이해를 바탕으로 TLD를 부유식 해상풍력발전기에 설치하여 외부 영향에 의한 운동을 제어할 수 있는 가능성을 수치적으로 고찰하고자 한다.

TLD의 내부 슬로싱 현상과 내부 슬로싱 현상에 의한 부유체의 운동에 대한 선행연구[2-4]를 바탕으로 TLD를 부유식 해상 풍력발전기에 설치하여 외부 영향에 의한 운동을 줄이는 현상을 수치적으로 해석하였다. 수치해석방법의 검증을 위하여 부유식 해상풍력발전기의 축소모형을 사용하여 대형 조파수조에서 실험을 수행하였고 이를 예측결과와 비교하였다. 검증된 수치방법을 사용하여 동일한 축소모형에 단층 및 다층 TLD를 설치한 모델의 운동을 해석하였다. 다층 TLD는 고정된 목적 주파수에서 보다 큰 감쇠를 주기 위하여 이 논문에서 제안한 모델이다. 다층 TLD를 적용한 결과와 단층 TLD, TLD를 적용하지 않은 모델의 해석결과를 비교하여 다층 TLD의 효율성을 제시하였다.

2. 지배방정식과 수치해석기법

이 장에서는 유체에 대한 지배방정식과 수치해석방법에 대해서 기술한다. 또한 해석에 사용된 구조물의 운동방정식과 조파수조의 조파생성 경계조건에 대한 이론식에 대해서도 기술한다.

2.1 유체의 지배방정식과 수치해석방법

수치해석에서 사용된 유체의 지배방정식은 식(1)과 같이 Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes equations(URANS)를 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_i U_j\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\tau_{ij}-\rho\overline{u_i u_j}\right) \tag{1}$$

비압축성 유체로 가정하여 연속방정식으로 $\partial U_j/\partial x_j=0$을 사용한다. 수치해석방법 중 자유표면을 가지는 문제를 해석하기 위해서는 다상(multiphase) 모델을 설정하여 해석을 진행해야 한다. 그 중에서도 많이 쓰이는 volume of fluid(VOF) 방법[5]을 사용하였다.

생성하려는 표면파의 진폭과 파장의 비가 작기 때문에 선형파동이론이 성립한다고 가정하여 난류모델을 층류(laminar) 모델로 설정하였다. Anant Lal & Elangovan의 연구[6]에서도 다른 난류모델을 사용하여 해석한 결과와 층류모델로 해석한 결과 사이에 차이가 없다고 보고하였다.

2.2 강체의 운동방정식

수치해석에서 부유식 해상 풍력발전기의 축소모형은 변형이 없는 강체로 가정하였다. 따라서 표면파와 강체의 운동을 같이 해석해야 하기 때문에 유체-구조 연성해석(fluid structure interaction, FSI)을 사용하였다. 여기서 사용된 강체의 운동방정식을 다음에서 기술한다.

(1) 선형 운동

유체-구조 연성해석에서 강체의 선형 운동은 다음 식을 이용하여 해석한다.

$$m\ddot{x}=F=F_{air}+mg-k_{spring}\left(x-x_{so}\right)+F_{ext} \tag{2}$$

여기서 F_{ext}는 강체에 작용하는 모든 외력을 나타낸다.

(2) 회전 운동

강체로 가정하였기 때문에 회전 운동도 선형 운동과 비슷한 다음 식을 이용하여 해석한다.

$$\dot{\theta}\times\dot{\theta}+\ddot{I\theta}=m=m_{air}-k_{rotate}\left(\theta-\theta_{so}\right)+m_{ext} \tag{3}$$

여기서 m은 전체 모멘트를 말하며 m_{ext}는 강체에 작용하는 모든 외부 토크를 말한다.

2.3 표면파 및 조파 경계 이론

(1) 표면파

비점성, 비회전 그리고 비압축성 유체라고 가정하면 표면파의 이론은 경계조건 문제로 생각할 수 있다[7]. Fig. 1은 x방향으로 진행하는 반복되는 파 중 한 파장을 그림으로 나타내었다. Fig. 1에서 나타낸 경계조건과 지배방정식은 다음 식으로 표현된다.

$$\nabla^2\phi = 0 \tag{4}$$

$$w = 0 \tag{5}$$

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{\partial\eta}{\partial t} - \frac{\partial\phi}{\partial x}\frac{\partial\eta}{\partial x} \tag{6}$$

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)^2\right] + g\eta = C(t) \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\phi(x,t) &= \phi(x+L,t)\\ \phi(x,t) &= \phi(x,t+T)\end{aligned} \tag{8}$$

식 (4)~(8)의 지배방정식과 경계조건들을 이용하면 표면파에 대한 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\phi = H\frac{g}{\sigma}\frac{\cosh k(k+z)}{\cosh kh}\sin(kx-\sigma t) \tag{9}$$

여기서

$$\sigma^2 = gk\tanh kh \tag{10}$$

식 (10)을 이용하여 표면파의 주파수와 파장을 결정할 수 있다

(2) 조파 경계 이론

수치해석적으로 표면파를 생성하는 방법은 유체에 속도를 주거나 조파경계를 설정하여 변위를 주는 방법이 있다[7]. 이 논문에서는 후자의 방법을 사용하였으며 그중 피스톤(piston) 방식을 사용하였다. 조파경계의 변위방정식은 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{H}{S} = \frac{2(\cosh 2kh - 1)}{\sinh 2kh + 2kh} \tag{11}$$

여기서 H는 생성하고자 하는 표면파의 진폭이고 S는 조파경계의 변위크기이다. 따라서 원하는 표면파의 진폭을 결정하면 조파경계에 적용할 변위크기를 설정할 수 있다.

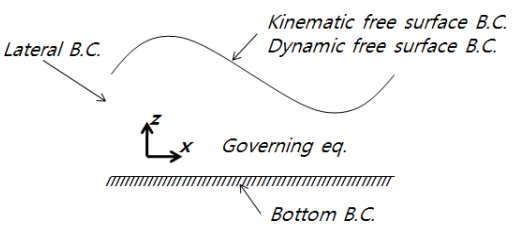

Fig. 1 Boundary conditions of water wave

3. 축소모형 해석

3.1 축소모형 실험

(1) 축소모형

수치해석 방법을 검증하기 위해 길이 100 m, 폭 8 m 그리고 깊이가 3.5 m인 조파수조에서 수행한 축소모형 실험데이터를 사용하였다. Fig. 2는 실험에서 사용된 축소모형의 치수를 나타내었다. 그리고 Table 1에 수치해석에 필요한 축소모형의 모멘트, 무게중심 등을 나타내었다.

(2) 실험 결과

실험 데이터로 사용한 표면파의 진동수는 6.28 rad/s이고 진폭은 4.2 cm이다. Table 2에 생성된 표면파에 의한 축소모형의 실험결과를 나타내었다. 실험결과 피치 운동이 히브 운동에 비해 크게 나타나는

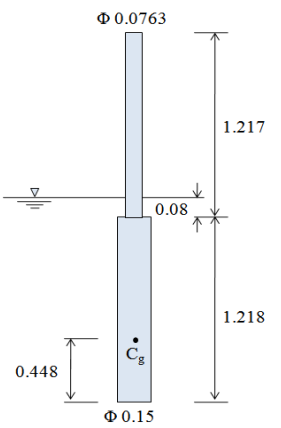

Fig. 2 Dimension of scale model

것을 확인할 수 있다. 이 데이터를 이용하여 수치해석 방법을 검증하였다.

3.2 축소모형 수치해석

(1) 축소모형 모델링

Fig. 3은 수치해석에 사용된 축소모형 모습을 나타내며 실험에서 사용된 축소모형과 동일하게 설정하였다. 치수는 Fig. 2의 실험 모델과 동일하게 설정하였으며 무게중심, 회전 모멘트 등도 Table 1의 실험 모델과 동일하게 설정하였다.

Table 1 Parameters of the scale model in experiments

Total mass		21 kg
Number of mooring spring		3
Spring pretension		4.8 N
Spring constant of each mooring spring		7.25 N/m
Fairlead location		0.615 m
Center of mass (from the bottom of platform)		0.448 m
Inertia	Roll	9.23735 kgm^2
	Pitch	9.24018 kgm^2
	Yaw	0.06466 kgm^2

Table 2 RAO of scale model in experiments

f_w (rad/s)	H_w (cm)	RAO(response amplitude operator)		
		Pitch (°/m)	Surge accel. (m/s^2/m)	Heave accel. (m/s^2/m)
6.28	4.2	19	31	5.4

f_w : Wave frequency
H_w : Wave height

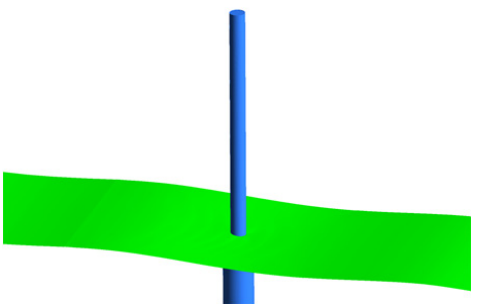

Fig. 3 Numerical model of scale model

(2) 축소모형 수치해석 전체계산영역

표면파를 생성하기 위해서 식(11)의 조파 경계조건을 사용하였고 표면파의 반사파에 대한 영향을 없애기 위해 격자간격을 급격하게 증가시키는 감쇠구간을 설정하였다[8]. 해석 도메인은 Fig. 4에 나타내었다.

3.3 실험 및 해석 결과 비교

Table 3은 축소모형의 히브운동과 피치운동에 대한 실험 및 해석 결과를 비교하여 보여주고 있다. 축소모형의 실험과 거의 동일하게 설정하였기 때문에 히브운동이 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 피치운동의 경우 히브운동에 비해 크게 나타나며 실험데이터보다 해석결과가 약간 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 무어링(mooring)을 정확하게 모델링하기가 어렵기 때문에 그에 따른 오차로 생각할 수 있다. 하지만 히브 및 피치 운동에 대한 수치해석 결과가 실험결과와 대체적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

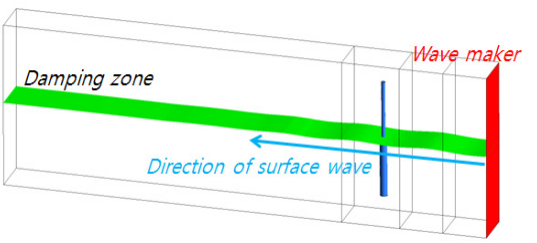

Fig. 4 Entire computation domain for a scale model of floating wind turbine: the red surface in the righthand side represents the moving piston and the leftmost box domain is the damping zone

Table 3 RAO of scale model in experimental and numerical results

	f_w (rad/s)	H_w (cm)	RAO(response amplitude operator)		
			Pitch (°/m)	Surge accel. (m/s^2/m)	Heave accel. (m/s^2/m)
Exp.	6.28	4.2	19	31	5.4
Num.	6.28	4.46	13.4	22.6	5.6

f_w: Wave frequency
H_w: Wave height

4. 다층 TLD 적용한 축소모형 해석

4.1 TLD 및 축소모형 모델링

(1) TLD 모델링

TLD는 수조의 길이와 내부 액체의 높이에 따라 내부 슬로싱 고유진동수가 변하게 된다[9]. 따라서 줄이고자 하는 외력의 진동수에 맞추어 수조의 길이와 내부 액체의 높이를 조절하게 된다. Fig. 5는 축소모형에 설치할 단층의 TLD를 나타내고 있다. 축소모형은 원통형이기 때문에 설계한 TLD도 원통형으로 설계하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 TLD의 길이 즉 원주길이가 고정되어서 외력의 진동수에 맞추어 슬로싱 고유진동수를 설정하려면 내부 액체의 높이를 조절하여 고정시키게 된다. 따라서 내부 액체의 질량도 고정되고 질량에 비례하는 감쇠량도 고정된다. 따라서, 목적 주파수에 맞추어 고정된 TLD의 크기 내에서 감쇠량을 증가시키기 위해서는 질량을 증가시켜야 하는데, 이를 위해서 Fig. 6과 같은 다층 TLD를 이 논문에서 제안하였다. 다층 TLD의 효율성을 정량적으로 평가하기 위하여 TLD가 없는 경우, 단층, 이층, 삼층 구조의 TLD를 장착한 축소모형에 적용하여 축소모형의 운동을 예측하고 비교한다.

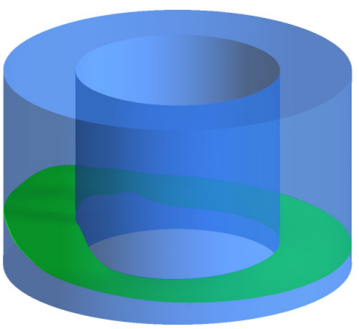

Fig. 5 Modelling of 1-layer TLD

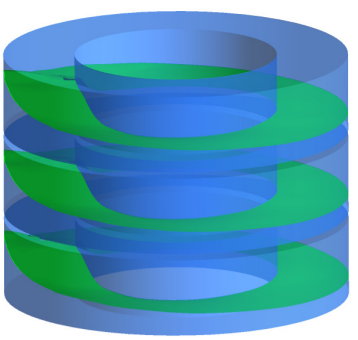

Fig. 6 Modelling of 3-layer TLD

(2) TLD를 적용한 축소모형 모델링

Fig. 7은 TLD를 적용한 축소모형을 나타내고 있다. TLD는 초고층 건물에 설치되는 방법과 같이 축소모형의 제일 위쪽에 설치하였다. 다층 TLD도 동일한 위치에 설치하여 해석하였다. 축소모형의 설정도 동일하게 하였으며 질량만 수정하였다. 질량을 수정한 이유는 TLD 내부 액체의 무게로 인하여 전체 질량이 증가하기 때문이다. 이때 증가한 질량으로 인하여 축소모형의 운동에 영향을 줄 수 있기 때문에 이러한 질량변화로 인한 운동 변화를 없애기 위해 축소모형의 질량을 수정하여 다단층 TLD가 설치된 모델과 TLD가 없는 모델 모두 전체 질량은 동일하게 유지하였다.

(3) TLD를 적용한 축소모형 수치해석 전체계산 영역

해석 도메인은 이전의 축소모형을 해석한 도메인과

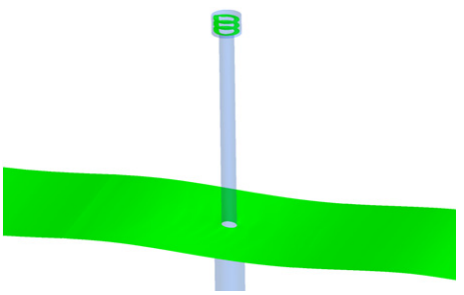

Fig. 7 A scaled model with a multi-layer TLD

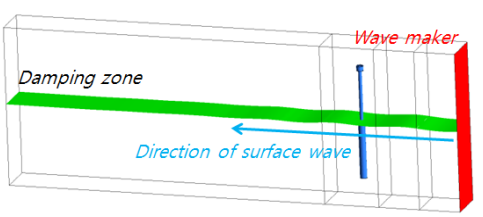

Fig. 8 Entire computation domain for a scale model of floating wind turbine with the TLD

동일하게 설정하였다. 또한, 동일한 주파수와 진폭의 표면파를 조파 경계조건을 이용하여 생성하였다. 즉 상대비교를 위해 TLD를 장착한 축소모형을 제외하고 다른 조건들은 동일하게 설정하였다.

4.2 기존 해석 및 해석 결과 비교

(1) 히브(heave) 운동

Fig. 9에서 나타내는 것처럼 다층 TLD 설치 유무에 상관없이 히브방향의 운동은 동일하게 나타나고 있다. 이는 다층 TLD가 축소모형의 히브운동에 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

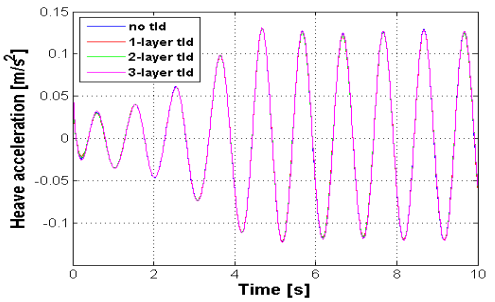

Fig. 9 Heave motion of scale model with and without the TLD

(2) 피치(pitch) 운동

히브운동과는 다르게 피치운동의 경우 Fig. 10과 같이 TLD를 사용하면 운동의 진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 TLD 내부의 층을 증가시킬수록 슬로싱 현상에 참여하는 물의 질량이 커져 이 축소모형의 피치운동을 좀 더 크게 감소시키는 것을 확인할 수 있다. 3층 TLD의 경우 TLD가 없는 축소모형의 경우에 비해 약 12 %의 피치운동 진폭을 줄이는 것을 Fig. 11에서 확인할 수 있다. 따라서 제시한 TLD는 축소모형의 피치운동을 감소시킬 수 있다는 것과 다층 TLD는 단층 TLD에 비해 좀 더 큰 감쇠 작용을 일으켜 보다 효율적으로 피치운동을 감소시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 이 논문에서 비교한 다층 TLD는 Figs. 5와 6에서 확인할 수 있는 것처럼 단층 TLD와 동일한 부피의 환형구조에서 실현하였다는 것을 고려할 때, 매우 중요한 설계적 이점을 제공한다.

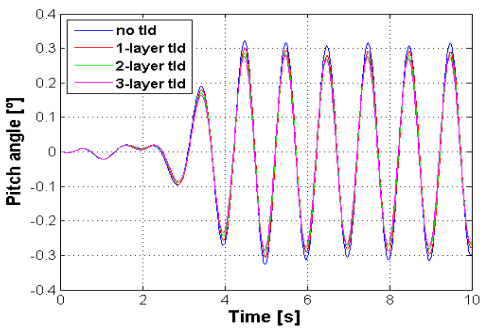

Fig. 10 Pitch motion of a scale model with and without the TLD

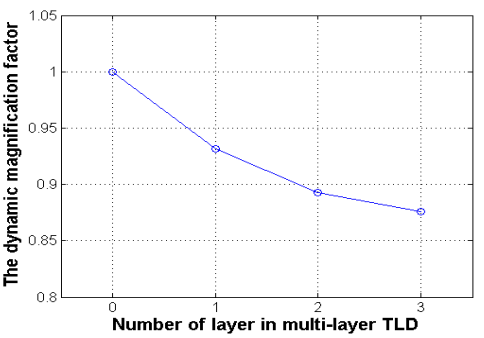

Fig. 11 Reduced motion rate of multi-layer TLD

5. 결 론

부유식 풍력발전기의 외력에 대한 강제운동의 제어를 위하여 다층 TLD의 적용 가능성을 수치적으로 확인하였다. 먼저 논문에서 사용한 FSI 수치해석 방법을 대형조파수조에서 수행한 부유식 풍력 발전기 축소모형의 운동에 대한 실험결과를 이용하여 비교/검증하였다. 수치해석에서 실험과 동일한 축소모형을 모델링하였고 동일한 표면파를 생성하였다. 그 결과 히브, 피치 운동의 가진 주파수에서의 응답 진폭이 거의 동일하게 나옴을 확인하였다.

이렇게 검증한 수치방법을 사용하여 다단층 TLD를 설치한 경우와 TLD를 설치하지 않은 경우 각각에 대해서 부유식 풍력발전기의 운동을 예측하고 상호 비교하였다. 이를 통해 TLD를 적용한 경우 히브운동은 변화가 없었으나 피치 운동이 감소하는 것을 확인하였다. 또한 TLD의 층을 증가시킬 경우 표면파에 의한 축소모형의 히브운동에는 영향이 없지만 피치 운동은 좀 더 감소시킴을 확인하였다. 3층 TLD의 경우 TLD를 설치 안한 경우에 비해 피치운

동이 약 12 % 가까이 감소되는 것을 확인하였다.

다층 TLD가 단층 TLD와 비교하여 차지하는 부피의 변화 없이 동일한 목적주파수에 작용하면서도 좀 더 큰 감쇠를 나타낼 수 있다는 면을 고려할 때, 실제 적용가능성에서 매우 큰 장점을 가지고 있다고 판단한다. 또한 추후 각 층간 물의 양을 조절할 수 있는 능동제어개념을 적용시키면 좀 더 다양한 목적주파수에 보다 능동적으로 작용하는 TLD를 개발할 가능성을 가지고 있다.

후 기

이 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (No. 201100390003, 20134030200290) 입니다.

References

(1) Kareem, A. and Kijewski, T., 1999, Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications, Wind and Structures, Vol. 2, No. 3, pp. 201~251.

(2) Ha, M. H., Kim, D. H., Choi, H. I., Cheong, C. U. and Kwon, S. H., 2012, Numerical and Experimental Investigations Into Liquid Sloshing in a Rectangular Tank, Advances in Wind and Structures 2012, Seoul, Korea.

(3) Ha, M. H., Kim, D. H. and Cheong, C., 2012, Numerical Parametric Study on Liquid Sloshing in a Rectangular Tank, Advances in Wind and Structures 2012, Seoul, Korea.

(4) Ha, M. H. and Cheong, C., 2013, Numerical Investigation on Surge Motion of a Rectangular Floating Body due to Inner Sloshing Phenomena, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 7, pp. 662~668.

(5) Hirt, C. W. and Nichols, B. D., 1981, Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics 39, pp. 201~225.

(6) Anant Lal, M. Elangovan, 2008, CFD Simulation and Validation of Flap Type Wave-maker, WASET, 46, pp. 76~82.

(7) Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., 2000, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientiscts, World Scientific.

(8) Maguire, A. E., 2011, Hydrodynamics, Control and Numerical Modeling of Absorbing Wavemakers, University of Edinburgh.

(9) Seo, M. W., Jeong, W. B. and Cho, J. R., 2012, Experiment on Sloshing of Annular Cylindrical Tank for Development of Attitude Control Devices of Floating Offshore Wind Turbines, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 25~33.

Minho Ha received his B.S. and M.S. degree in Mechanical Engineering from Pusan National University in 2011 and 2013. He then continued his study as a Ph.D. in Pusan National University. His main research interest is on coupled motion of a floating body and sloshing liquid such as a tuned liquid damper.

Cheolung Cheong received his B.S. in Aerospace Engineering from Seoul National University in 1997. He received his M.S. and Ph.D. degrees in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University, Korea, in 1999 and 2003. He is now an associate professor at the School of Mechanical Engineering, Pusan National University in Busan, Korea. Dr. Cheong's current research interests include fan broadband noise, wind turbine noise, and computational aeroacoustics.