

◆ 특집 ◆ 입력성형기법의 응용

액체 슬로싱 제어를 위한 입력성형

Input Shaping for Control of Liquid Sloshing

김동주^{1,✉}, 홍성욱², 김경진³Dongjoo Kim^{1,✉}, Seong-Wook Hong² and Kyoungjin Kim³

1 금오공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

2 금오공과대학교 기전공학과 (Department of Mechatronics, Kumoh National Institute of Technology)

3 금오공과대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

✉ Corresponding author: kdj@kumoh.ac.kr, Tel: 054-478-7301

Manuscript received: 2011.7.18 / Accepted: 2011.8.1

Liquid sloshing occurs when a partially filled liquid tank is subjected to undesirable external forces or acceleration/deceleration for positioning control. Installation of baffles is still the most popular way to suppress the sloshing, but recent successes of input shaping in reducing structural vibrations may give a possible alternative. We aim at investigating the applicability of input shaping to sloshing suppression by numerically solving fluid motions in a rectangular tank. The tank is partially filled with water and it is suddenly put into a sequence of horizontal motions of acceleration and constant speed. The flow is assumed to be two-dimensional, incompressible, and inviscid, and a VOF two-phase model is used to capture the free surface. Results show that the sloshing can be successfully suppressed by shaping the input, i.e., the velocity or acceleration profile of tank. Three different input shapers (ZV, ZVD, and two-mode convolved ZV shapers) are tested and compared in this study. Among them, the convolved ZV shaper shows a best performance to eliminate the sloshing almost completely.

Key Words: Liquid Sloshing (액체 슬로싱), Input Shaping (입력성형), Input Shaper (입력성형기), Rectangular Tank (사각 용기)

기호설명

A = magnitude of shaper impulse

g = gravitational acceleration

 h_0 = initial (or averaged) height of water

h = water height at left tank wall

H = height of tank

L = width of tank

p = pressure

 Δ, δ = time difference between two shaper impulses

1. 서론

액체가 부분적으로 채워져 있는 용기에 외부 가진이 가해짐으로써 액체가 출렁거리는 현상을 슬로싱(sloshing)이라 한다.¹⁻³ 슬로싱 현상이 발생하는 대표적인 예로는 지진에 의한 액체 저장탱크의 진동, 파도에 의해 발생하는 LNG 수송선의 진동, 항공기 및 자동차 등의 가속과 감속에 따른 연료탱크 내부 액체의 진동, 용기에 액체를 채우고 이송시키는 자동화 공정 등이 있다. 외부의 가진이 유체운동의 공진주파수와 가까워지면, 슬로

싱 현상은 더욱 심해지고 유체를 포함한 구조물의 구조적 안정성 및 조정 안정성에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서, 슬로싱 현상을 물리적으로 정확히 이해하고 효과적으로 억제 및 제거시키는 것이 매우 중요하다.

슬로싱에 대한 이전 연구를 외부 가진의 성격에 따라 다음과 같이 두 가지 경우로 구분할 수 있다. 첫 번째는 지진이나 파도와 같이 외부의 가진을 제어할 수 없는 경우로 대부분의 연구가 이 범주에 해당한다. 이 경우 많은 연구가 외부 가진의 주파수에 따른 유체 진동의 특성, 특히 유체의 고유진동수 근처에서 발생하는 공진 현상에 초점을 맞추었다.^{4,6} 반면, 액체용기를 이송시키는 자동화 공정이나 운송체의 가속 및 감속에 따른 연료탱크 슬로싱의 경우에는 시스템의 위치를 제어하는 과정에서 발생하는 가진이다. 따라서 후자의 경우에는 외부 가진이라기 보다는 시스템 입력에 더 가깝기 때문에 가진을 제어할 수도 있다. 본 연구에서 알 수 있듯이 후자의 슬로싱은 제거법을 이용하여 가진 및 입력을 적절히 변형시키면 슬로싱을 효과적으로 억제할 수 있다.

지금까지 슬로싱을 감소시키기 위해 다양한 수동 및 능동제어 방법이 연구되어 왔다. 가장 대표적인 방법은 배플(baffle)⁶⁻⁸ 이나 블록(block)⁹ 과 같은 구조물을 용기 내부에 설치하는 것으로 구조물의 크기와 위치 등에 따른 제어 효과에 대한 연구가 주를 이룬다. 이 방법은 제어를 위한 센서나 에너지의 입력이 필요 없다는 장점이 있는 반면, 액체용기에 질량을 부가적으로 추가해야 한다는 것이 단점이다. 반면, 능동 제어¹⁰⁻¹² 의 경우에는 제어를 위해 액추에이터 및 에너지의 입력이 필요하고, 특히 피드백(feedback) 제어를 할 경우에는 센서 또한 필요하다. 피드백 제어의 경우에는 일반적으로 시스템이 복잡해지고 비용이 많이 드는 것이 단점이다.

여러 능동제어 방법 중 입력성형기법^{13,14} 이 최근 많은 관심을 받고 있다. 이 방법은 원래 크레인(crane)과 같은 연성 구조물을 이송할 때 발생하는 잔류 진동을 감소시키기 위해 개발된 것으로, 배플과 같은 구조물을 추가할 필요가 없고 피드백 제어가 아니기 때문에 센서도 필요없다. 이러한 장점과 구조진동 분야의 성공적인 연구결과에도 불구하고 입력성형을 슬로싱 제어에 응용하려는 노력이 아직까지 많지 않았다. 또한, 거의 모든 선행연구가 유체역학보다는 시스템 제어의 관점에서

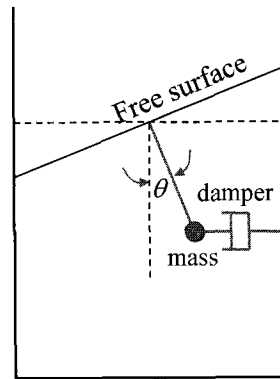


Fig. 1 pendulum model for dynamic behavior of liquid

연구가 수행되었고, 유체의 진동에 대해 지배방정식의 해를 구하는 대신 Fig. 1 과 같이 매우 단순화된 진자 운동을 가정한 동역학적 모델(pendulum model)^{11,12} 을 사용하였다. 하지만, 유체 유동은 일반적으로 비선형성이 강하기 때문에 자유표면을 단순한 진자 운동으로 묘사하기에 한계가 있고, 정확성을 확보하기 위해서는 전산유체역학(CFD) 및 실험적 연구를 수행하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 수치해석적 방법으로 입력성형기법이 슬로싱 억제에 효과가 있는지 우선 검증하고자 한다. 또한, 다양한 입력성형기에 대해 슬로싱 억제 효과를 비교하고, 그 원인을 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 수치해석 방법

수치해석 모델은 Fig. 2 와 같이 2 차원 사각탱크이며, 탱크에는 물이 부분적으로 채워져 있고 탱크의 윗면은 공기 중에 개방되어 있다. 해석을 위해 직교 좌표계(x,y)를 사용하였고, x 와 y 는 각각 수평방향과 중력의 반대방향을 의미한다. 계산영역의 크기는 L=0.5 m, H=0.75 m로 물과 공기를 포함하는 탱크 내부에 해당되며, 물의 초기(평균) 깊이 h_0 는 0.5 m 이다. 사용된 격자의 수는 x 와 y 방향으로 각각 100 개와 200 개이다.

본 연구에서는 정지해 있던 탱크를 수평방향으로 위치를 제어할 때 발생하는 슬로싱을 연구 대상으로 하였다. 즉, 정지해 있던 탱크가 3 초 동안 2 m/s^2 의 크기로 가속된 후 계속해서 우측으로 등속 운동하는 경우를 가정하였고, Fig. 3 에 탱크의 속도를 시간의 함수로 나타내었다.

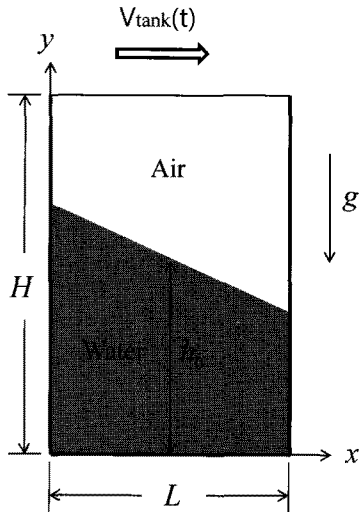


Fig. 2 Coordinate system and computational domain

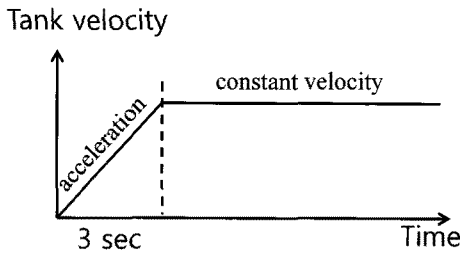


Fig. 3 Tank velocity for positioning control

탱크의 가속 및 등속 운동에 의해 발생하는 유체 유동은 2 차원, 비점성, 비압축성이라고 가정하였다. 비정상(unsteady) 유체 유동을 해석하기 위해 상용 CFD 프로그램인 Fluent 를 사용하였고, 탱크와 함께 움직이는 좌표계(moving coordinate system)를 이용하였다. 또한, 물과 공기로 이루어진 이상 유동 및 자유표면을 해석하기 위해 VOF(Volume of Fluid) 모델을 사용하였다.

2.2 입력성형기(Input Shaper)

입력성형기법은 기준 입력(reference command)을 그대로 시스템에 적용하는 대신 여러 개의 임펄스(impulse) 쌍과 convolution 을 취하여 구한 성형 입력(shaped command)을 사용하는 방법으로 시스템의 고유진동 모드를 적절히 이용하면 잔류 진동을 제거시킬 수 있다.^{13,14} Fig. 4는 입력성형 과정을 나타낸 것으로 성형을 위한 여러 개의 임펄스 쌍을 입력성형기라고 부른다. 시스템의 진동을 제거하기

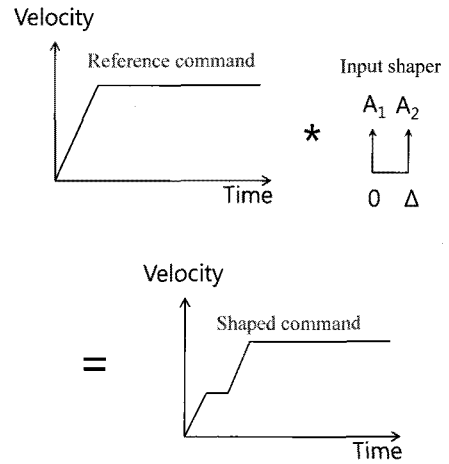


Fig. 4 Input shaping procedure with ZV shaper

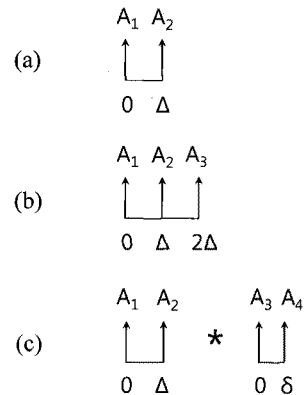


Fig. 5 Three different input shapers: (a) ZV shaper; (b) ZVD shaper; (c) two-mode convolved ZV shaper

위해서는 임펄스의 강도(A_1, A_2)와 임펄스 간의 시간차(Δ)를 잘 정해야 하는데, 이를 위해 시스템의 고유 진동수와 감쇠비(damping ratio)를 정확히 알아야 한다. 본 연구에서는 비점성 유동을 가정하였으므로 시스템에 감쇠가 없으며, 그림의 ZV(Zero Vibration) 입력성형기의 경우 두 임펄스의 크기가 같아야 한다($A_1 = A_2 = 1/2$). 한편, 임펄스 간의 시간차는 1 차 고유 진동주기의 절반이어야 한다.

본 연구에서는 슬로싱의 효과적인 제어를 위해 Fig. 5와 같이 세 가지의 입력성형기를 고려하였다. 두 개의 임펄스로 구성된 ZV 입력성형기는 가장 간단하며, 단일 모드를 갖는 시스템에 많이 사용되고 있다. 한편, ZVD(Zero Vibration and Derivative) 입력성형기는 3 개의 임펄스로 구성되어 있고, ZV 성형기에 비해 조금 더 강건한(robust) 것으로 알려

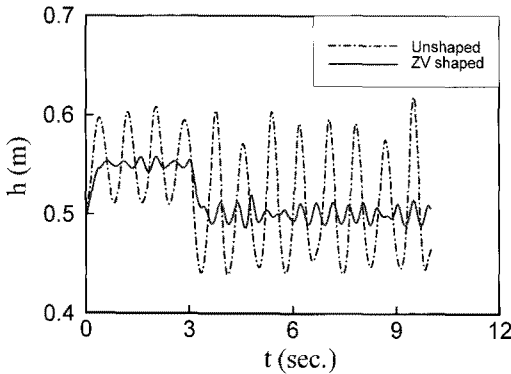


Fig. 6 Comparison of water level at the left tank wall between unshaped and ZV shaped cases

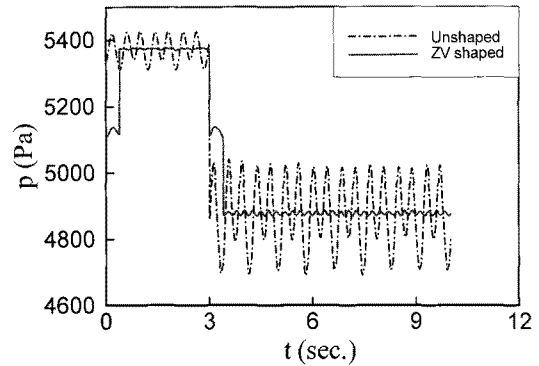


Fig. 7 Comparison of pressure at the left corner of tank between unshaped and ZV shaped cases

저 있다. 감쇠가 없는 비점성 유동을 가정했으므로 임펄스의 크기는 $A_1 = A_3 = 1/4$, $A_2 = 1/2$ 이 된다. 마지막으로 Convolved ZV 입력성형기는 여러 개의 ZV 성형기를 convolution 을 취하여 구하는데, 다중 모드를 갖는 시스템을 제어하는 데 유용하다. 본 연구에서는 가장 중요한 두 개의 모드만을 사용하는 2 모드 성형기를 사용하였다. 이 경우 임펄스의 크기는 모두 1/4 로 같고, 시간차 Δ 와 δ 는 각각 1 차 모드와 또 다른 중요 진동모드 주기의 절반이어야 한다.

움직이는 사각탱크 내 유체의 고유 진동수는 비점성 비압축성 유동에 대한 포텐셜 이론으로부터 구할 수 있다.

$$\omega_n^2 = gk_n \tanh(k_n h_0), k_n = \frac{n\pi}{L} \quad (1)$$

여기서 n 은 모드 수, ω_n 은 n 번째 모드의 고유 진동수, g 는 중력가속도를 나타낸다. 물의 폭과 높이가 모두 0.5 m 인 경우 1, 2, 3 차 모드의 진동수는 각각 1.247, 1.767, 2.164 Hz가 된다.

3. 해석 결과

우선 입력성형을 적용하지 않은 경우에 대한 해석을 수행한 후, 앞서 기술한 입력성형기를 각각 적용해 보았다. 입력성형을 적용하지 않은 경우를 기준으로 입력성형기의 슬로싱 억제 성능을 비교 평가해 보았다. Fig. 6 는 입력성형을 하지 않은 경우와 ZV 성형기를 사용한 경우를 비교한 그

림으로, 탱크 왼쪽 벽면에서의 수위를 시간의 함수로 나타내었다. 성형하지 않은 경우에는 탱크의 가속 구간인 0~3 초에서 왼쪽 수위가 크게 올라가며 약 10 cm 의 진폭을 갖는다. 또한, 가속을 마친 3 초 이후에도 수위가 계속해서 진동하며 진폭의 크기가 가속 구간보다 더 증가하였다. 이에 반해, ZV 성형기를 이용한 경우에는 가속 및 등속 구간 전체에 걸쳐 성형하지 않은 경우에 비해 수위의 진동이 크게 감소하였다. 이는 탱크 내의 슬로싱 현상이 크게 억제되었음을 의미한다.

슬로싱 현상은 탱크 벽면에 급격한 압력의 변화를 가져오고, 액체를 포함한 구조물의 안정성에 문제를 야기시킨다. 따라서, Fig. 7 과 같이 탱크 왼쪽 아래 코너에서의 압력을 시간의 함수로 살펴보았다. 입력성형의 적용에 상관없이 탱크의 운동이 가속에서 등속운동으로 바뀌는 순간에는 압력이 크게 변한다. 하지만, ZV 성형기를 사용한 경우에는 슬로싱이 억제됨에 따라 대부분의 시간에서 압력의 섭동이 크게 감소한다.

탱크 내에서 발생하는 슬로싱 현상을 보다 가시적으로 확인하기 위해 물과 공기의 경계면이 시간에 따라 변하는 과정을 살펴보았다. Fig. 8 은 VOF 값을 이용하여 자유표면을 나타낸 것으로 $t = 3 \sim 7$ s 구간에 대해 1 초 간격으로 변화를 도시하였다. 가속이 끝나는 $t = 3$ s에서는 큰 차이를 발견할 수 없지만, 4 초 이후에는 ZV 성형기를 사용함으로써 슬로싱이 크게 억제된 것을 명확히 알 수 있다. 하지만, 여기서 주목할 것은 ZV 성형기를 사용했음에도 불구하고 슬로싱이 완전히 제거되지 못하고 잔류 진동이 남아있다는 사실이다. 이는 탱크

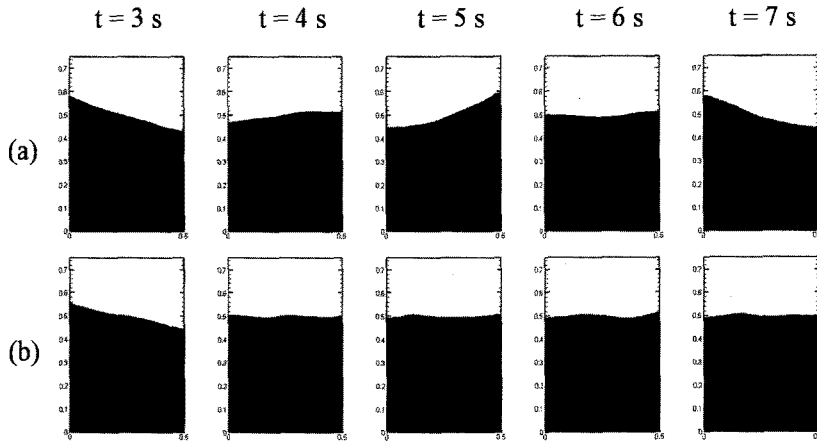


Fig. 8 Time sequence of water-air interface: (a) unshaped case; (b) ZV shaped case

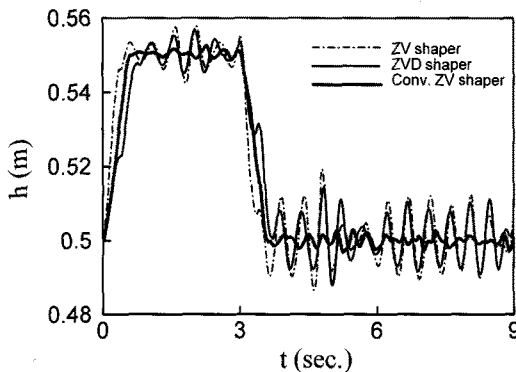


Fig. 9 Comparison of water level at the left wall among three different input shapers

내 유체 유동이 하나의 주파수(모드)만을 갖지 않고, 비선형성으로 인해 여러 주파수 성분을 가지고 있기 때문이다. 한편, Fig. 8을 살펴보면 자유표면이 하나의 직선으로 나타나지 않고, 다소 복잡한 형상을 띠는 것을 알 수 있다. 이는 기존에 흔히 사용되었던 진자 모델이 자유표면을 모사하기에 한계가 있으며, 따라서 CFD 해석을 통한 정확한 해석이 필요하다는 것을 시사한다.

ZV 성형기를 사용한 결과에서 관찰된 잔류 진동을 완전히 제거하기 위하여 ZVD 성형기와 2 모드 Convolved ZV 성형기를 사용해 보았다. 본 연구에서는 1 차 고유진동수와 3 차 고유진동수를 이용하여 Convolved ZV 성형기를 설계하였다. 즉, Fig. 5(c)에서 Δ 는 0.401 초, δ 는 0.231 초를 사용하였다. 그 이유는 ZV 성형기를 사용한 결과의 스펙트

럼 분석을 해 본 결과, 3 차 모드가 다른 2 차 이상의 고차 모드에 비해 큰 에너지를 가지고 있기 때문이다.

Fig. 9는 세 가지 입력성형기의 슬로싱 억제 성능을 비교하기 위해 탱크 왼쪽 수위의 변화를 나타낸 것이다. ZVD 성형기가 예상대로 ZV 성형기에 비해 슬로싱 억제 능력이 약간 우수하지만 그 차이가 크지는 않다. 하지만, 2 모드를 고려한 Convolved ZV의 경우에는 ZV 성형기에 비해 성능이 월등히 우수하다. Fig. 10은 자유표면의 시간 변화를 가시화한 것으로 Convolved ZV 성형기를 사용할 경우 슬로싱이 거의 제거된 것을 알 수 있다. 이는 다모드 특성을 갖는 액체 슬로싱의 억제에는 Convolved ZV 성형기가 가장 효과적임을 의미한다.

4. 결론

가속 후 등속 운동을 하는 사각탱크에서 발생하는 슬로싱 현상에 대한 수치해석적 연구를 수행하여 입력성형기법을 이용한 슬로싱 억제가 가능한지 살펴보았다. 또한, 세 가지의 입력성형기(ZV, ZVD, 2 모드 Convolved ZV)를 적용하여 슬로싱 억제 성능을 비교 분석하였다. 그 결과 세 가지 성형기 모두 슬로싱을 효과적으로 감소시키지만, 2 모드 Convolved ZV 성형기가 가장 효과적임을 밝혔다. 입력성형의 슬로싱 억제에 대한 실험적 검증 및 물의 깊이, 탱크의 가속도 등의 영향에 대한 연구가 현재 진행 중이며, 일부 결과는 학회발표논문^{15,16}을 참고할 수 있다.

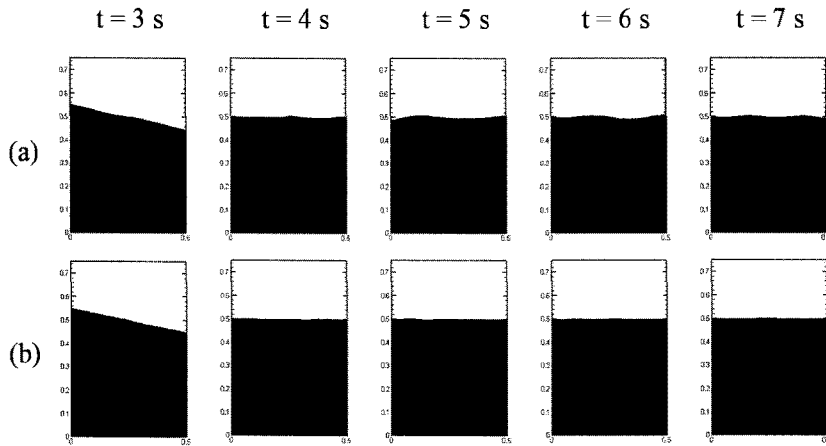


Fig. 10 Time sequence of water-air interface: (a) with ZVD shaper; (b) with two-mode convolved ZV shaper

후 기

본 논문은 금오공과대학교 교수연구년제(제 1 저자)에 의하여 연구된 실적물입니다.

참고문헌

1. Ibrahim, R. A., "Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications," Cambridge University Press, 2005.
2. Faltinsen, O. M. and Timokha, A. N., "Sloshing," Cambridge University Press, 2009.
3. Rebouillat, S. and Liksonov, D., "Fluid-Structure Interaction in Partially Filled Liquid Containers: A Comparative Review of Numerical Approaches," Computer & Fluids, Vol. 39, No. 5, pp. 739-746, 2010.
4. Frandsen, J. B. and Borthwick, A. G. L., "Simulation of Sloshing Motions in Fixed and Vertically Excited Containers Using a 2-D Inviscid σ -Transformed Finite Difference Solver," J. Fluids Struct., Vol. 18, No. 2, pp. 197-214, 2004.
5. Chen, B.-F. and Nokes, R., "Time-independent Finite Difference Analysis of Fully Non-linear and Viscous Fluid Sloshing in a Rectangular Tank," J. Comput. Phys., Vol. 209, No. 1, pp. 47-81, 2005.
6. Cho, J. R. and Lee, H. W., "Numerical Study on Liquid Sloshing in Baffled Tank by Nonlinear Finite Element Method," Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol. 193, No. 23-26, pp. 2581-2598, 2004.

7. Kwack, Y. and Ko, S., "Computational Fluid Dynamics Study on Two-Dimensional Sloshing in Rectangular Tank," Trans. of the KSME B, Vol. 27, No. 8, pp. 1143-1149, 2003.
8. Lee, S. H. and Hur, N., "A Numerical Study on Flows in a Fuel Tank with Baffles and Porous Media to Reduce Sloshing Noise," J. Kor. Soc. Comput. Fluids Eng., Vol. 14, No. 2, pp. 68-76, 2009.
9. Mitra, S. and Sinhamahapatra, K. P., "Slosh Dynamics of Liquid Filled Containers with Submerged Components Using Pressure-Based Finite Element Method," J. Sound Vib., Vol. 304, No. 1-2, pp. 361-381, 2007.
10. Sira-Ramírez, S. and Fliess, M., "A Flatness Based Generalized PI Control Approach to Liquid Sloshing Regulation in a Moving Container," Proceedings of the American Control Conference, Vol. 4, pp. 2909-2914, 2002.
11. Terashima, K. and Yano, K., "Slosh Analysis and Suppression Control of Tilting-Type Automatic Pouring Machine," Control Eng. Pract., Vol. 9, No. 6, pp. 607-620, 2001.
12. Hubinský, P. and Pospiech, T., "Slosh-Free Positioning of Containers with Liquids and Flexible Conveyor Belt," J. Elec. Eng., Vol. 61, No. 2, pp. 65-74, 2010.
13. Singhose, W. and Seering, W., "Command Generation for Dynamic Systems," Lulu.com, 2007.
14. Hong, S. W., Park, S. W. and Singhose, W., "Input

Shaping for Vibration Reduction in Precise Positioning System,” J. KSPE, Vol. 25, No. 4, pp. 26-31, 2008.

15. Bae, G. H., Kim, D., Kim, K. and Hong, S. W., “Experimental Study on Suppression of Liquid Sloshing in Rectangular Tanks,” Proceedings of KSPE Autumn Conference, pp. 859-860, 2010.
16. Kim, D., Hong, S. W. and Kim, K., “Numerical Study on Suppression of Liquid Sloshing in Rectangular Tanks,” Proceedings of KSPE Autumn Conference, pp. 617-618, 2010.