

탱크로리에서의 유체-고체 연성거동특성연구

A Study on the characteristics of fluid-solid coupling behavior of the tanker-lorry

김현수*·이영신**

Hyun-Soo Kim and Young-Shin Lee

Key Words : Fluid-solid coupling(유체-고체연성), tanklorry(탱크로리), sloshing(슬로싱)

ABSTRACT

In this study, the fluid-solid coupling(sloshing) behavior of the tanker-lorry during turning are investigated numerically. The ALE numerical method is used as sloshing analysis algorithm and numerical simulation is conducted for the various fluid filling height, 25%, 50% and 75%. The forces for radial and vertical direction are calculated and compared for various fluid-filling heights. From the analysis results, in case of 25% filling, the sloshing effect is the most highest.

1. 서론

유체를 적재하고 있는 구조물들은 유체와 구조물 사이의 상호 간섭에 의해 유체가 채워지지 않았을 때와는 다른 동적 특성을 나타내고 있어 시스템 안정성의 측면에서 오랜 기간 동안 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 유체와 구조물 사이의 상호 간섭 현상은 구조물의 움직임이 유체에 힘을 전달하고 유체는 다시 구조물에 영향을 미치면서 발생하게 된다. 이때 외력을 받는 유체 적재 구조물내의 유체 자유표면의 주기적인 운동 즉, 출렁거리는 현상을 슬로싱(sloshing)이라 하는데 특히 이 슬로싱 현상은 유체를 적재하고 동적인 거동을 하는 항공우주, 자동차 및 선박산업등에서 활발히 연구되고 있다. 액체연료를 적재하는 항공기의 경우 연료탱크에서의 유체의 출렁거림은 비행 시 적체연료의 요동으로 인하여 발생하며, 이러한 요동이 적체연료의 공진 주파수와 가까워지면 슬로싱 현상은 심화되어 결국 유체를 포함하는 구조물은 정적인 상태와는 다른 특성을 보이게 된다^[1]. 유체의 출렁거리는 현상이 심할 경우, 항공기에서는 조종 안정성의 상실은 물론 구조파단등의 극단적인 위험까지도 초래할 수 있다. 실제로 유체체움높이가 절반정도인 탱크로리의 경우 승용차에 비해 주행 중 전복될 위험이 약 10 배 정도 더 높다는 연구결과가 있다^[2]. 이것은 탱크로리의 무게중심이 승용차에 비해 더 높다는 점도 있겠지만, 적체된 유체의 슬로싱 효과가 영향을 미치기 때문이다. 특히, 탱크로리는 위험물 질 이 나 유 독 물 질 을

적재하고 있는 경우가 많은 데 전복사고발생시 적재물질이 유출될 수 있고 이 경우 더 큰 피해를 유발할 가능성이 있다. 따라서, 이러한 사고위험을 감소시키기 위해서는 탱크로리의 주행 중 발생하는 슬로싱의 거동특성에 관한 연구가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 실제로 운행되고 있는 치수의 탱크로리에 대하여 회전주행 중 탱크내부에 적체된 유체의 출렁임 현상을 ALE 해석기법을 적용하여 전산해석을 수행하고 이때 발생하는 유체-고체 연성력의 동특성에 대해 고찰하였다.

2. 탱크로리의 유체-고체연성해석

2.1 유체-고체연성해석

본 연구에서는 탱크로리에 적체된 유체의 슬로싱해석을 수행하기 위해 ALE 전산해석기법을 이용하였다. ALE 기법은 Eulerian 기법과 Lagrange 기법의 장점만을 채용하여 유체영역과 구조물영역의 경계를 쉽게 표현할 수 있을 뿐만 아니라 유체요소의 심한 찌그러짐을 조절하여 수치해석상의 효율성과 정확성을 높일 수 있는 연계기법이다. 물질속도와 무관하게 임의로 운동이 가능한 격자재구성 알고리즘에 의해 이동경계문제, 자유표면유동, 그리고 대변형문제등에 적절하게 적용할 수 있다^[3].

Fig. 1 은 ALE 기법에서 사용되는 좌표계의 관계로서 물질좌표계(Lagrange coordinates, X), 공간좌표계(Euler coordinates, x) 그리고 참고좌표계(reference coordinates, \hat{X})의 관계이다^[3]. 공간좌표 x 와 물질좌표 X 와의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x = \phi(X, t) \quad (1)$$

따라서, ϕ 는 연속체 Ω 상의 임의 점의 시간에 따른 공간상의 위치를 나타내는 x 와 X 사이의 사

* 충남대학교 기계설계공학과 대학원
E-mail : s_khs75@cnu.ac.kr
Tel : (042) 821-7621, Fax : (042) 822-7366

** 충남대학교 기계설계공학과

상함수(mapping function)이다.

한편, 참고좌표계 $\hat{\Omega}$ 상의 좌표 \hat{X} 와 공간상의 좌표 x 와의 관계를 다음과 같이 표현된다.

$$x = \hat{\phi}(\hat{X}, t) \quad (2)$$

그러면, $\hat{\phi}$ 는 참고좌표상의 임의의 점의 시간에 따른 운동을 나타내는 사상함수가 된다. 이러한 참조좌표점의 운동은 임의이며, 물질좌표계의 운동과 일치할 필요는 없다. 하지만, 세 좌표들은 상호간의 변환상 반드시 일대일 관계가 성립해야 한다.

ALE 기법에서 임의함수 $f(\cdot, t)$ 의 시간미분은 세 좌표계에서 정의가능하다. 물질좌표계에서의 시간미분 즉, material derivative 와 참고좌표계에서의 시간미분은 다음의 관계가 성립한다.

$$\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_x = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{\hat{x}} + c_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$c_i = v_i - \hat{v}_i \quad (4)$$

여기서 c 는 물질의 속도 v 와 참고좌표의 속도 \hat{v} 간의 상대속도, 즉 대류속도(convective velocity)를 의미한다. 따라서 식 (3)의 우측 두번째 항은 물질과 참고좌표계의 상대운동에 의한 대류효과를 나타낸다. ALE 기법에서 참고좌표계의 속도(\hat{v})는 임의의 값을 가질 수 있고, 이에 따라 다음 세 가지 기술법으로 구별된다. 첫째로, $\hat{v} = 0$ 인 경우는 참고좌표계는 공간상에 고정되어 Euler 기술법으로 되고, 둘째로 $\hat{v} = v$ 인 경우는 참고좌표계와 물질좌표계가 동일하게 운동하여, Lagrange 기술법에 해당한다. 마지막으로 $\hat{v} = v \neq 0$ 인 경우가 일반적인 ALE 기술법에 해당한다.

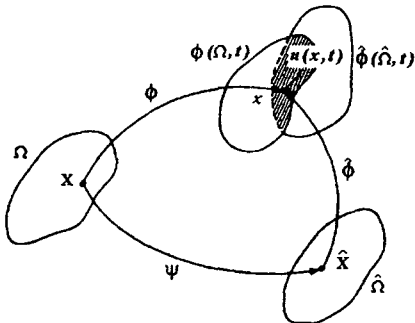


Fig. 1 Three different coordinate for ALE

2.2 해석모델 및 해석조건

본 연구에서는 3.3 ton 의 적재량을 갖는 탱크로리의 적재탱크를 해석모델로 고려하였다. 타원형 단면을 갖는 유체저장탱크는 장축의 직경, 단축의

직경, 길이가 각각 1700×880×2840 mm 의 크기를 가지며, 내부에 2000L 용적에 대해 하나의 칸막이가 설치되어 있다. 해석에서 고려한 유체적재 높이는 유체가 25%, 50%, 75% 채워진 3 가지 경우에 대해 고려하였다. 유체저장탱크의 치수 및 형상은 Fig. 2 와 같다.

저장탱크의 재질은 통상적인 강철(steel)로 그리고 적재된 유체는 물(water)로 가정하였으며 해석에 적용된 유체 및 저장탱크의 기계적 물성치를 표 1 에 제시하였다. 본 연구에서 고려한 탱크로리 회전조건은 속도 10 m/s (36 km/h)의 속도로 250 m 의 회전반경을 가지며 회전주행을 하는 속도조건을 고려하였다. 이를 위해 식(5)의 원심가속도식으로부터 탱크로리 반경 방향으로 0.4 m/s² 의 일정한 가속도가 작용하는 것으로 가정하였다.

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (5)$$

해석에서 사용된 반경방향속도경계이력이 Fig. 3 에 제시되었다. 총 해석시간은 5sec 이고 전산해석 중 해석의 정확성을 보장하기 위해 증분시간의 결정을 Courant 조건식으로부터 결정하였다. 그림 4 는 해석을 위해 생성된 탱크로리 탱크의 메쉬로서 Lagrange 기법을 적용하기 위한 탱크부와 Eulerian 기법을 적용하기 위한 유체영역부를 따로 모델링을 하고 경계부분에 ALE 접촉조건을 부여하였다. 50% 유체가 채워진 경우 총 요소수는 9,400 개이다.

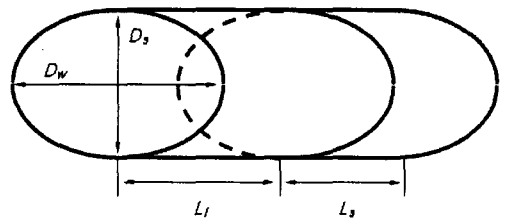


Fig. 2 Analysis model of tanklorry

($L_1 = 1,700$ mm $L_2 = 1,140$ mm
 $D_w = 1,700$ mm $D_s = 880$ mm)

Table 1. Mechanical properties of the Acrylic and Water

Material	Mechanical Property	Unit	Value
Tank	Young's modulus (E)	GPa	205
	Poisson's ratio (ν)	-	0.3
	Density (ρ)	kg/m ³	7850
Water	Bulk modulus (K)	GPa	2.07

Shear viscosity	s^{-1}	1.131×10^{-3}
Density (ρ)	kg/m^3	1000

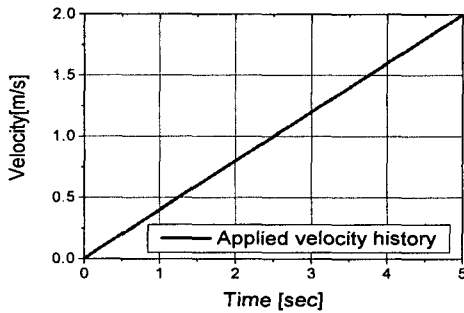


Fig. 3 Velocity history applied in sloshing analysis

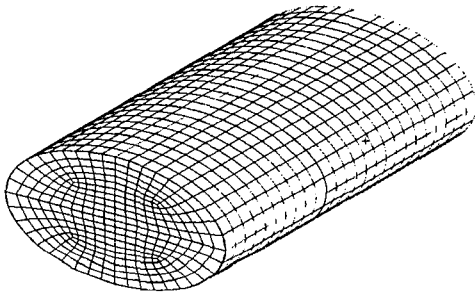


Fig. 4 Finite element model of the tanklorry

3. 유체-고체연성해석결과

본 해석을 통해 구한 시간 2.5sec 와 5.0sec 에서의 슬로싱 출렁임 형상을 Fig. 5 에 제시하였다. 출렁임 형상에서 시간이 경과될수록 유체 출렁임의 크기가 더 증가됨을 확인할 수 있다.

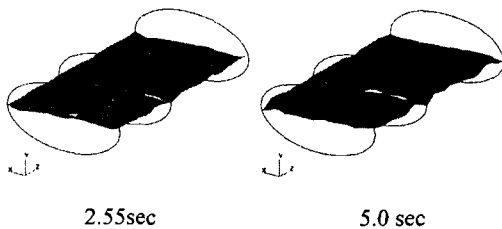


Fig. 5 Sloshing of the tanklorry for 50% water filling

Fig. 6 은 탱크에 유체가 25%의 높이만큼 채워진 경우 시간에 따라 탱크의 수직방향, 즉 자중방향과 반경방향으로 발생하는 하중의 이력이다. 발생하중의 크기는 슬로싱 효과의 크기를 효과적으로 표현하기 위해 적재된 유체 자중에 대한 비율로 무차원

화 하였다. 수직방향 하중의 크기가 반경방향하중의 크기보다 거의 모든 시간에서 더 크게 발생되며 그 크기가 최대 자중의 4 배까지 발생되는 것을 알 수 있다. 반경방향 하중은 회전주행 시 유체 출렁임이 좌우로 발생되기 때문에 +, - 기호를 가지며 발생되고 있다. 유체가 50% 채워진 경우 수직방향 최대발생하중은 유체자중의 약 3 배까지 발생하며 수평방향 최대발생하중은 유체자중의 약 0.5 배 그리고 유체가 75% 채워진 경우 수직방향 최대하중이 유체자중의 약 2.5 배, 수평방향 최대하중이 유체자중의 약 0.25%까지 발생되고 있다.

Fig. 9 는 다양한 유체채움높이에 따른 반경방향 하중이력의 비교이다. 유체채움높이에 따라 발생하중의 크기차이를 확연히 구분할 수 있는데 전체적으로 유체채움높이가 낮을수록 반경방향발생하중의 크기가 두드러짐을 알 수 있다. 물론, 발생하중의 절대크기만을 고려하면 유체채움 높이가 높을수록 그 크기가 크지만 유체자중에 대한 발생하중의 비를 고려하면 즉, 슬로싱효과를 고려하면 본 연구에서 고려된 유체채움 높이 중 그 높이가 가장 낮은 25%인 경우 슬로싱효과가 가장 크다고 할 수 있다. 다양한 유체채움높이에 따른 수직방향 발생하중이력의 비교가 Fig. 10 에 제시되었다. 수직방향 발생하중이력도 반경방향 하중이력과 마찬가지로 유체 채움높이가 낮을수록 슬로싱효과가 더 크게 발생됨을 알 수 있다.

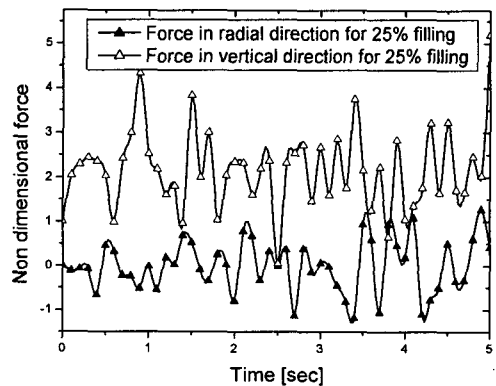


Fig. 6 Force due to sloshing of the tanklorry for 25% water filling

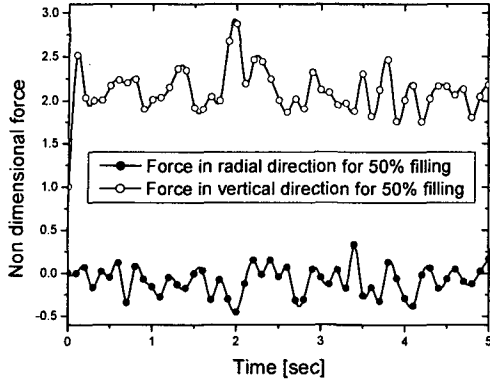


Fig. 7 Force due to sloshing of the tanklorry for 50% water filling

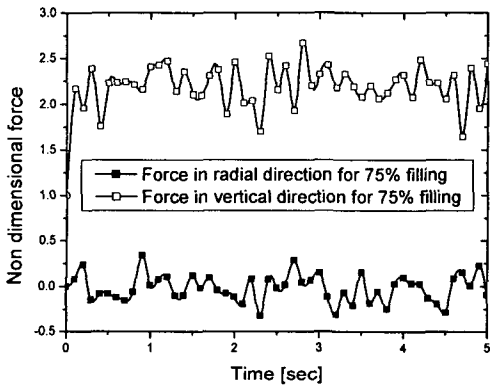


Fig. 8 Force due to sloshing of the tanklorry for 75% water filling

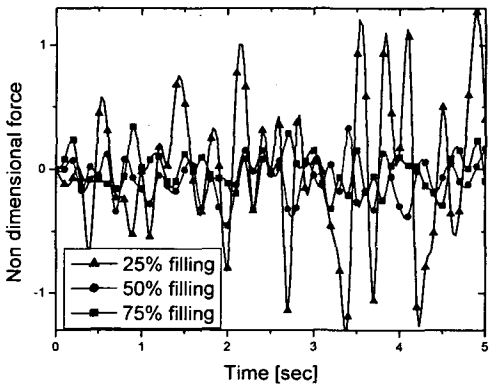


Fig. 9 Lateral force due to sloshing of the tanklorry for various water filling

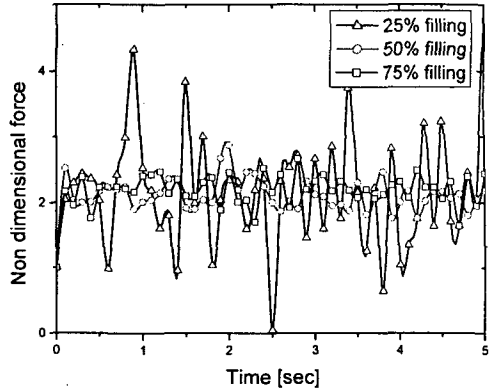


Fig. 10 Vertical force due to sloshing of the tanklorry for various water filling

4. 결론

본 연구에서는 일정한 가속도로 회전주행을 하는 탱크로리에 대해 다양한 유체채움높이에 따른 슬로싱 특성을 유체-고체연성해석기법은 ALE 알고리즘을 적용하여 전산해석을 수행하였다. 해석에서는 탱크로리의 유체저장탱크부만을 모델링하고 원심방향가속도를 적용하였으며 세 가지의 유체 채움높이, 즉, 25%, 50%, 75%에 따라 수직방향발생하중 및 반경방향발생하중특성을 고찰하였으며 그 결과로부터 유체 채움 높이가 작을수록 슬로싱효과가 더 증대됨을 확인할 수 있었다. 향후연구에서는 본 연구에서 수행한 해석결과의 타당성검증과 슬로싱에 영향을 미치는 설계변수를 추출하고 슬로싱발생을 최소화 할 수 있는 최적설계를 수행하고자 한다.

참고문헌

- (1) Bauer, H. F., and Eidel, E., 1999, "Frictionless Liquid Sloshing in Circular Cylindrical Container Configurations", *Aero Science and Technology*, Vol. 5, pp. 301-311.
- (2) Aliabadi, S., Johnson, A., and Abedi, J., 2003, "Comparison of Finite Element and Pendulum Models for Simulation of Sloshing", *Computers & Fluids*, Vol. 32, pp. 535-545.
- (3) 조진래 등, 2002, "배플개수 및 내경변화에 따른 액체 저장탱크의 동역학 효과", *한국전산구조공학회 논문집*, Vol. 15, No. 1, 2002.
- (4) Souli, M., Ouahsine, A., and Lewin, L., 2000, "ALE Formulation for Fluid-Structure Interaction Problems", *Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 190, pp. 659 - 675.
- (5) Kim, Y., 2001, "Numerical Simulation of Sloshing Flows with Impact Load", *Applied Ocean Research*, Vol. 23, pp. 53-62.