

## Sloshing 현상과 제어

김 사 수 <부산대학교>

### 1. 서 언

산적화물선이나 Oil Tanker, LNG 운반선 등 유체화물 운송선박들은 운항중에 필연적으로 수반되는 각종 선박의 운동에 의하여 운송유체가 선박에 대한 상대운동을 하게 되고 이러한 상대운동, 즉 sloshing은 때때로 과도한 충격력을 발생시켜 운반용기에 구조적인 손상을 유발하게 된다. 따라서 유체화물 운송선박의 경우 운반용기의 설계 및 위치선정의 관점에서 sloshing에 의해 운반용기에 미치는 하중 및 sloshing운동과 선체운동과의 공진현상 발생 억제등이 설계단계에서 반드시 고려되어야 할 것이다.

일반적인 손상 예들을 살펴보면 각종 선박의 경우 유체가 탱크내에 적재되어 있는 정도가 10%에서부터 90%에 이르기까지 각종 손상을 입고 있다는 사실이 알려져 있다. 이것은 sloshing현상이 유체의 탱크내의 깊이 뿐만아니라 선박운동의 진폭, 주기 및 유체의 종류등과 밀접한 관계가 있기 때문이다.

최근 IMO에서 요구하는 Tanker의 이중선각화가 의무화 되면서 구조양식이나 탱크배치 등 설계상의 문제로 sloshing문제가 새로운 중요한 연구과제로 대두되게 되었다.

Sloshing현상은 정상파(standing waves), 진행파(travelling waves), 수력도약(hydraulic jumps), 쇠파(breaking waves) 및 이들의 복합적인 합성에 의한 유체의 운동으로 분류된다. 이와같은 sloshing운동 현상에 대한 분류별 실패를 들면 다음과 같은 예를 들 수 있다.

필요하는 탱크 내의 유체의 운동은 유체깊이가 얇으면서 동요주기가 sloshing의 공진주기와 거리가

있는 낮은 주기인 경우에는 정상파가 일어나게 되고, 공진주기에 가까운 경우에는 수력도약을 일으키게 된다. 주파수가 더 높아지면 고립파와 유사한 진행파가 된다. 반면 유체깊이가 깊으면서 공진주기 부근인 경우에는 비대칭 정상파로 되고, 횡운동과 회전운동이 중첩되는 경우에는 공진주기 부근에서 유체가 탱크 내를 회전하는 swirling 현상을 일으키게 된다.

이와같은 유체운동은 여러가지 조건에 의하여 비충격적 또는 충격적인 현상이 일어나게 된다. 최근에는 이와같은 유체충격압의 계산법이 제안되고 있다.

다음으로 sloshing에 관한 연구의 동향에 대하여 간단하게 고찰해 보기로 한다. 1950년대에 Tanker가 대형화 되면서 탱크구조의 장대화에 대한 검토로 탱크 동압의 설계식, 정판충격압의 추정식 등이 실험적 연구에 의하여 검토되었고, 1970년대부터 1980년대에서는 설계법의 확립을 목표로 실험적 연구가 활발해 지면서 새로운 LNG나 LPG선의 탱크 설계를 위한 sloshing에 관한 연구가 많이 다루게 되었다. 이 시기에 계산기 기술의 발전에 힘입어 수치유체해석법에 관한 연구가 활발해지면서 3차원 비선형 sloshing문제를 비로소 다루기 시작되었다.

본고에서는 선박 분야에 있어서의 sloshing 문제에 대한 수치해석 방법과 실험적 연구에 대하여 언급하기로 한다.

### 2. 수치해석법과 실험

비선형 sloshing현상에 대한 수치유체역학적 접근에는 potential류 모델과 비potential류 모델이 있는데 수치해석 방법으로는 유한요소법, 경계요소

법, 유한차분법 및 random choice법 등이 있다. 이들 각각의 수치해석방법과 실험에 대한 연구동향은 다음과 같다.

### 2.1 유한요소법

변분원리 또는 의사변분원리에 의한 해법에 의하여 정식화가 구성된다. 본 방법에 의한 연구동향으로는 중요하는 2차원 직사각형 탱크의 비선형 sloshing을 해석하여 탱크벽의 압력에 대하여는 선형계산과 비교한 바 있다. 그러나 유체충격압의 계산 구성에 대한 연구는 아직 다루어 지고 있지 않다.

### 2.2 경계요소법

해석의 대상이 되는 편미분방정식을 경계적분방정식으로 변환하여, 이를 유한요소법과 동일한 이산화방법을 사용하여 연립일차방정식으로 고쳐 풀게 된다. 본 방법은, 경계상의 값을 취급하기 때문에 data 수가 감소됨에 따라 계산시간이 대폭 감축되는 특징이 있다. 본 방법의 연구동향은

- 전후동요하는 2차원 직사각형 탱크에 대한 비선형 문제를 다루면서 해의 정도향상과 수치해석상의 불안정성을 억제하기 위해서 MAC (mark and cell)법의 오차보정항의 개념을 도입하여 안정된 해를 얻기 위한 해석
- 섭동전개법과 경계요소법에 의한 3차원 탱크의 sloshing문제에 대한 해석
- 3차원 spline요소를 사용 2차원 및 3차원 문제에 대한 해석
- 유체충격압에 대한 계산문제는 앞으로도 계속 연구가 필요한 과제임의 제안
- 원통용기 내의 sloshing문제에 적용,과의 비선형성이 sloshing현상에 미치는 영향에 대한 검토
- 수치해석결과와 실험과를 비교, 진동과 응답과의 관계에 대한 고찰
- 유체와 구조의 연성적 해석

### 2.3 Random choice법

FEM, BEM 및 FDM에 의한 수치해석법은 자유표면과의 비선형성을 고려하는데 적합하지마는 random choice법은 수력도약과 같은 불연속현상의 해석에 유리하다.

본 해석법은 국부적인 Riemann문제의 이론해를 sampling기법에 의하여 중첩하여 전체해를 구하는 방법으로서 감관상의 해수유입문제에도 적용되고 있

다. 본방법의 연구동향은

- 좌우로 동요하는 천수탱크내의 sloshing문제에 적용, 수면변위에 대하여 경계요소법 및 MAC법에 의한 계산결과와의 비교
- 수력도약과 진행과와 같은 불연속비선형과의 문제에 대한 유용성에 대한 확인
- 선저가 경사한 경우의 천수문제에 대하여 적용한 경우 MAC법에 비하여 안정된 해를 얻게됨과 동시에 계산시간이 크게 단축됨을 제안

### 2.4 유한차분법

유체영역을 mesh분할하여, 각 cell내에서 정의한 속도와 압력에 의한 유체의 운동방정식을 차분표시하여 푸는 방법이다. Hirt등에 의하여 개발된 계산 code로서 MAC법을 바탕으로한 등간격mesh를 사용한 SOLA-SURF와 부등간격 mesh를 사용한 SOLA-VOF가 실용적 code로 널리 사용되고 있다.

SOLA-VOF가 부등간격격자로 사용되는 외에, 비보존형의 운동량보존칙, 자유경계 위치 결정에 VOF함수의 보존칙을 사용하게 되는 점등이 특징으로서 과정이 자유표면에 재돌입하여도 계산이 가능한 것이다. SOLA-VOF를 개량한 Flow-2D 및 Flow-3D는 범용program으로서 널리 사용되고 있다. 본 방법의 연구동향은

- 탱크내 내구재의 영향 및 유체충격압을 고려할 수 있기 때문에 탱크 구조설계에 관한 유체충격력의 추정법으로서 많이 이용되고 그 적용범위가 확장되고 있다.
- SOLA-SURF를 확장 하여 내구재 등 경계조건을 취급이 가능하게 하였다.
- 가진방법으로서 새로운 Sloshing Excitation Spectrum법 개념을 도입하고있다.
- 유한 시간 분할에 의해 비현실적인 압력의 수력도약을 피하기 위해 완충영역의 조작에 대한 시도
- 개발program은 Lloyd의 계산code (LR FLUIDS)로서 사용되고 있다.
- Sloshing충격수압에 대한 3차원 수치해석법에 대한 해석
- 유한차분법을 사용한 MAC법으로 직사각형 탱크의 중요를 3차원문제로 풀수치해석과 실험을 통하여 해석의 실용성을 확인
- MAC법의 algorithm을 확장하여 3차원 sloshing문제를 일반좌표계에 확장한 수치해석하는 방법 제시

- 가변단면인 탱크를 강제 surging운동시켰을 때의 sloshing문제를 해석하였다. 그 결과 유체의 비충격적운동이 실험결과와 잘 일치하고있어서 해석의 타당성이 확인되었다. 충격압은 정성적으로는 계산치와 일치하지는 않는 절대치는 개량의 여지가 있음을 제안
- 탱크의 swirling에 관한 연구와 sloshing고유 주기에 관한 연구

### 3. 실험적연구

수치적계산법과 수치유체역학이 발전되기까지는 sloshing에 관한 연구는 실험적인 연구가 주류를 이루었다. 즉 Tanker의 이중선각화의 의무화로 탱크의 합리적인 설계를 하기위하여 sloshing하중의 정도높은 추정법을 얻기위한 목적으로 기본적인 data수집을 위한 조사와 실험이 다루어졌다.

그 실험으로는 모형의 크기, 내구재의 배치, 탱크형상등을 parameter로 한 2차원 및 3차원의 실험 유체운동이나 충격수압등의 계측을 통하여 실용적인 수치해석법에 대한 검토가 다루어졌다.

### 4. 방진제어 설계

Sloshing에 의한 충격파에 의하여 발생하는 용기에 대한 손상을 감소시키기 위한 방법을 대별하여 보면 다음과 같다.

- 용기내의 바닥에 유체의 흐름을 방해할 수 있는 불록등의 구조물을 설치하는 방법
- 수면의 운동을 억제하는 구조물을 설치하는 방법
- 진동흡진기의 원리를 이용한 경우
- 공기 기포 발생장치를 이용한 방법

첫번째 방법은 sloshing운동의 공진현상을 일으킬 때 용기의 바닥 부분에 설치된 구조물에 의하여 발생하는 감쇠현상을 이용한 경우이다. 이 경우 설치 구조물의 기하학적인 치수, 액체의 수위, 용기의 기하학적인 치수 등에 의하여 감쇠효과가 정해짐은 자명하다. 그러나 구체적인 설계를 위하여는 설치 예에 따라 모형실험을 통하여 검증하는 것이 바람직하다. 다음으로 sloshing운동에 의하여 발생하는 표면파를 억제 또는 소멸시키는 방법으로서 수면 근방에 평판형 외팔보나 2중 평판형 외팔보를 설치하는 방법을

생각할 수 있는데 이 경우 전자의 경우에 비하여 큰 효과가 있다. 다음으로 진동흡진기의 원리를 이용하는 방법을 생각할 수 있는데 근본적인 착안점은 sloshing운동이 공진현상을 일으킬 때 진동흡진기 역할을 할 수 있는 구조물을 액체 표면상단부로부터 용기내에까지 설치하여 공진운동에 해당하는 주기의 효과적인 이동을 시도하는 방법이다. 마지막으로 현재까지는 실용화 단계에 와 있지 않으나 흥미있는 방법으로서 공기기포 발생장치를 용기 바닥의 양쪽 끝에 설치하여 sloshing 운동의 방향에 대하여 역방향으로 유체력을 가하여 sloshing운동을 억제하는 방법이 있다. 그러나 액체에 공기기포가 허용되는 경우에만 사용이 가능한 점과 체어기 및 기포발생장치 등의 구성 등이 필요한 점과 이론적인 뒷받침의 결여등 실용화 단계는 아니다.

### 5. 결론

최근 다루어지고 있는 sloshing에 관한 연구에 대하여 고찰하여 보았다. 탱크내의 유체운동의 추정에 관해서는 수치해석법에 의한 추정에 대하여는 어느 정도의 가능성을 제시하게 되었다. 그러나 구조강도상 중요한 유체충격에 의한 충격압의 추정에 대해서는 새로운 정량적검토가 필요하다. 즉, 수치계산법으로는 한계가 있기 때문에 이를 극복하기 위해서는 경험이나 실험적인 know-how가 있어야만 기대되는 결과를 얻을 수 있을 것으로 본다. 이상에서 외국에서는 이론해석과 실험을 통한 연구가 병행되어 왔지만 국내에서는 지금까지 이론에만 의존한 연구가 되어 왔다. 따라서 앞으로는 계속 새로운 계산구성이나 algorithm과 더불어 실험적 검증을 통하여 신뢰 있는 수치유체역학의 개발이 필요하다고 본다.

### 참고 문헌

- [1] 이경중외, "유한차분법을 이용한 2차원 탱크내의 유체유동 해석", *대한조선학회지*, 제24권 3호, 1987.
- [2] 이판목외, "Lagrangian 유한요소법을 이용한 2차원 탱크내의 유동해석", *대한조선학회지*, 제27권 2호, 1990.
- [3] 이판목외, "구조물의 탄성을 고려한 2차원 탱크내 유동해석", *대한조선학회지*, 제27권 3호, 1990.
- [4] 황종홍외, "3차원 탱크내에서의 액체 slosh-

- ing의 수치해석”, *대한조선학회 논문집*, 제 28권 1호, 1991.
- [5] “The report of technical committees, II.2 Dynamic Load Effects”, *the 11th ISSC Congress*, 1991.
- [6] 한국선급, “선박진동·소음제어지침”, 문원문화사, 서울, 1991.
- [7] 김용환외, 수치기법을 이용한 sloshing문제의 해석, *대한조선학회 논문집*, 제29권 3호, 1992.
- [8] 배광준 등, “最近 10年間の 活動(I), 學術研究”, *대한조선학회지*, 제29권 제4호, 1992.
- [9] 이세창, “ISSC 하중분과 위원회 참가보고, ISSC T.C Load Meeting”, *대한조선학회지*, 제30권 제3호, 1993.
- [10] 山下誠也, “要素部材に動く衝擊力”, *日本造船學會誌*, 第669號, 1987.
- [11] 編集委員會, “わが國造船造機技術の展望, 振動および動的應答”, *日本造船學會誌*, 第744號, 1991.

## TRANSACTIONS OF THE WEST-JAPAN SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS

No. 88 AUGUST 1994

1. Numerical Simulation of Flow around a Ship Hull Including a Propeller Effect	Munehiko HINATSU Yoshiaki KODAMA Jun-ichi FUJISAWA Jun ANDO Kuniharu NAKATAKE Jun ANDO	... 1
2. A Simple Calculation Method for Thick Wing	Katsumi KATAOKA Akira YOSHITAKE	... 13
3. Numerical Analysis of Viscous Fluid Flow around a Sailing Yacht's Hull	Akiji SHINKAI Kazunori EGUMA	... 23
4. A Study on Flow Simulations around the System of Sails	Tatsuya EGUCHI	... 39
5. Calculation of Flow around a Hull in Turning Motion and Its Hydrodynamic Forces	Shiro MATSUI Jianmin YANG Masahiro TAMASHIMA Ryusuke YAMAZAKI	... 57
6. On a Influence of Thruster Performance on Dynamic Positioning System of Offshore Platform	Katsuro KIJIMA Yoshitaka FURUKAWA	... 73
7. Ocean Environment Changes due to an Offshore Airport in Ariake Bay	Yusaku KYOZUKA Kazutoyo YOKOYAMA	... 83
8. Numerical Analysis of Shallow Water Wave Propagation in a Three Dimensional Rectangular Tank	Seiji IWAMOTO	... 95
9. Statistical Predictions of Jerk Induced on a High Speed Craft	Akiji SHINKAI Shuntao WAN Tetsuya MORI	...109
10. Power Generation System Utilizing the Liquefied CO <sub>2</sub> before Ocean Injection	Yoshihiro KOBAYASHI Hiroyuki ISA	...121
11. Trial Design of Liquefied CO <sub>2</sub> Carrier	Yoshihiro KOBAYASHI Hiroyuki ISA	...127
12. Study on the Real Time Trajectory Planning of the Underwater Manipulator by the Neural Network based on a Minimum Control Energy Criterion	Eiji SHINTAKU Yoichi OGAWARA	...135
13. A Study on the Optimum Design for Midship Segment of Double Hull Tanker	Mitsuru KITAMURA Hisashi NOBUKAWA Guoqiang ZHOU Kimio KONDO Tetsuya YAO	...145
14. Sensitivity Analysis and Reanalysis of Geometrically Nonlinear Structural Response	Masahiko FUJIKUBO Koichi TANIGUCHI Daisuke YANAGIHARA	...157

(Continued)