

# 내부재가 설치된 직육면체 화물창 내의 Sloshing 고유주기 산정

신장룡\* · 최경식\*\* · 강신영\*\*  
\*대우조선해양(주) 해양특수선신체설계팀  
\*\*한국해양대학교 해양개발공학부

## An Analytic Solution to Sloshing Natural Periods for a Prismatic Liquid Cargo Tank with Baffles

JANG-RYONG SHIN\*, KYUNG-SIK CHOI\*\* AND SIN-YOUNG KANG\*\*

\*Offshore and Special Ship Hull Design Team, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co. Ltd., Geoje, Korea

\*\*Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Sloshing Natural Periods 슬로싱 고유주기, Prismatic Tank with Baffles 내부재가 설치된 직육면체 화물창, Effective Fill-Depth Concept 유효적재깊이 개념, Analytic Solution 해석해, Lloyd's Register Regulations 로이드선급규정

**ABSTRACT:** In the design of super tankers or LNG carriers, which transport a large amount of liquid in the cargo tanks, the structural damage due to liquid sloshing is an important problem. The impact pressure from sloshing is most violent when the liquid motion of a partially filled tank is in resonance with the motion of a ship. In this study, the sloshing natural periods of a baffled tank, often installed to reduce liquid motion, is analyzed. A variational method is adopted to estimate the sloshing natural periods for a prismatic cargo tank with baffles of arbitrary filling depth of liquid; the results are compared with Lloyd's Register regulations on sloshing periods. In this study, using an effective liquid-fill-depth concept, sloshing periods for a baffled tank can be expressed by the same form as rectangular prismatic tanks without baffles. In contrast to Lloyd's Register regulations, which can be applicable only to cargo tanks with constant baffle size and distribution, the present results can be applicable to cases of variable baffle size and distribution.

### 1. 서 론

액체화물을 운반하는 탱크 내의 슬로싱(sloshing) 문제는 트럭이나 철도차량뿐만 아니라 최근 건조되는 초대형 유조선이나 LNG 운반선 등에서 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 현재 슬로싱 해석을 위하여 이론적, 실험적, 수치해석적인 방법이 모두 동원되고 있으나 아직까지도 슬로싱 현상을 정교하게 해석할 수 있는 포괄적인 방법은 제시되지 못하고 있다. 이론적인 방법은 대부분 선형해석에 그치고 있으며 작은 진폭과 주기의 가벼운 슬로싱에 적용이 가능하다(Faltinsen, 1974). 하지만 액체가 탱크의 천정까지 솟구치는 충격파를 수반하는 비선형 해석은 대단히 어려운 것으로 알려져 있어 설계에 필요한 기초자료들은 대부분 실험에 의존하거나 FDM, BEM 등 수치해석방법을 사용하고 있다 (Cox et al., 1979; Arai, 1984; Su and Kang, 1986; 이경중과 이기표, 1987; 김용환, 1990). 하지만 최근에는 정교한 3차원 실험장치의 이용과 수치해석기법의 발전으로 슬로싱 문제의 접근이 좀더 현실에 가까워지는 경향이다 (Bass., 1985; Lee et al., 1995; Lee, 1997; 배승욱, 2004).

액체 화물창 내의 슬로싱 현상은 부분적인 적재상태에서 선체의 동요주기와 슬로싱 고유주기가 일치될 때 특히 심하게 발생한다 (BV, 1976; 이관목 등, 1990). 더욱이 탱크의 대형화는 이러한 공진(resonance)의 가능성을 증대시킨다. 지금까지 예를 보면 슬로싱에 의한 탱크의 손상은 주로 10-30% 적재깊이에서 발생했고 95% 적재깊이에서도 손상된 기록이 있다. 액체화물을 적재한 탱크의 공진 시 거동으로 인해 탱크벽 및 탱크 내 구조물이 손상될 가능성이 커짐에 따라 탱크의 형상과 크기, 액체화물의 적재깊이를 변경하여 슬로싱 고유주기를 적절히 조절해야 할 필요가 있다.

슬로싱을 억제하는 방법으로 탱크 내부에 제수판 혹은 내부재(baffle)를 설치하는데 고정된 baffle은 액체의 유동을 억제하고 슬로싱에 의한 충격하중을 감소시켜 준다. Baffle로 인한 전체 중량의 증가는 아주 적어서 슬로싱 억제용으로 유효하게 사용되고 있는데, baffle의 효과는 부착위치, 크기, 형상에 따라 달라지며 따라서 슬로싱 고유주기도 baffle의 설치에 따라 변한다. 탱크 바닥에 수직으로 설치된 baffle은 적재깊이가 작을 때 유효하며 탱크 벽에 수평으로 설치된 제수판은 적재깊이가 클 때 유효하다.

본 연구에서는 직육면체 탱크의 바닥에 baffle이 설치된 경우에 대하여 슬로싱 고유주기를 산정하였다. 탱크의 바닥에 baffle을 설치하면 단면변화로 인하여 액체의 유동특성이 바뀌

제1저자 신장룡 연락처: 경상남도 거제시 아주동 1

055-680-4705 jrshin@dsme.co.kr

게 된다. 고유주기는 한 계가 보유한 운동에너지와 위치에너지의 상호 교환속도를 의미하므로 탱크의 단면변화로 인한 운동에너지와 위치에너지를 구해서 그 비를 구하면 변화된 슬로싱 고유주기를 계산할 수 있다.

본 연구는 내부재가 설치된 직육면체 탱크의 슬로싱 고유주기에 대한 선행연구(신장용 등, 1994)를 보완하는 것으로서 변분법을 이용한 당시의 해석에서 유효적재깊이 개념을 좀더 자세하게 분석하였고 그 검증자료로서 Lloyd 선급에서 제시하고 있는 고유주기 산정식(Violette, 1990)을 이용하였다. 본 연구의 해석하는 Lloyd 선급의 고유주기 산정식과 비교할 때 유효적재깊이를 사용하는 유사한 형태라는 것을 확인할 수 있었고 더욱이 Lloyd 선급에서는 동일 크기의 baffle이 등간격으로 배치된 경우에만 적용되는데 비해 본 연구의 결과는 그러한 제한이 없어서 등간격이 아닌 경우에도 사용할 수 있다는 점도 확인하였다.

## 2. Baffle이 설치된 탱크의 Sloshing 해석

### 2.1 Sloshing 고유주기

직육면체 탱크의 슬로싱 고유주기는 선형이론을 적용하여 유도할 수 있다. 진폭이 작고 조화적이라 가정하면 탱크 내 유체 속도포텐셜  $\Phi$  는 Laplace 방정식을 만족한다. 여기에 더하여 강체벽과 자유표면에서의 경계조건을 만족한다.

탱크 내 액체의 유동이 시간에 대해서 조화적이라고 가정하면 Hamilton 원리에 따라 전 포텐셜에너지는 다음과 같다.

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_S (\nabla \Phi)^2 dS - \frac{\lambda}{2} \int_F \Phi^2 dF \quad (1)$$

여기서 경계조건을 만족하는 적절한 속도포텐셜  $\Phi$  를 선택하고 범함수(전 포텐셜에너지)  $\Pi$  가 극값을 갖도록 1차 변분을 취하여  $\delta\Pi=0$  으로 놓으면 내부재가 없는 화물창 내 슬로싱에 대한 다음과 같은 결과를 유도할 수 있다.

$$\omega^2 = gkG, \quad G = \tanh(kh) \quad (2)$$

파수(wave number)는  $k = m\pi/L$ ,  $m = 1, 2, 3 \dots$  이고  $g$ 는 중력가속도,  $\lambda = \frac{\omega^2}{g}$  는 고유진동수 파라미터이다. 그리고  $L$ 는 탱크의 길이이고  $h$ 는 화물의 적재깊이이다. 따라서 내부재가 없는 화물창 내 슬로싱 고유주기는 다음과 같다.

$$T\sqrt{\frac{g}{L}} = \frac{2\pi}{\sqrt{m\pi G}}, \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

$$\text{또는 } T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{gk \tanh(kh)}} \quad \text{for } m = 1 \quad (4)$$

한편 탱크 내에 유동을 억제하기 위한 baffle을 설치하거나 보강의 목적으로 corner 부분을 경사지게 하면 단면변화로 인하여 탱크 내 액체 유동특성이 바뀌게 된다. 여기서는 단면형상의 변화로 인한 에너지 변화를 고려하여 직육면체 탱크의 바닥에 baffle 이 설치된 경우 슬로싱 고유주기를 계산하였다.

탱크의 바닥에 baffle을 설치한 경우 변화된 유동특성은 baffle 주변과 baffle 깊이 아래쪽 영역에서 주로 나타난다. 여기서 Fig. 1과 같이 동일한 크기의 baffle이 바닥에  $n$  개 설치된 경우를 생각해 보자.  $b_i$  는  $i$  번째 baffle의 위치를 나타내고,  $S_i$  는  $i-1$  번째 baffle과  $i$  번째 baffle에 의해서 분할된 영역을 나타낸다. 그리고  $l_i$  는 영역  $S_i$  의 수평 길이이다. Fig. 1의 영역을  $n+2$  개로 분할하여 각각의 개별 영역에서 지배방정식과 경계조건을 만족하는 속도포텐셜  $\Phi_i$  를 정의하고 이들을 전체영역에서 조합함으로써 고유주기를 구할 수 있다.

즉, 영역  $S_0$  에서

$$\nabla^2 \Phi_0 = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi_0}{\partial x} = 0 \quad x = 0 \text{ and } x = L \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi_0}{\partial y} = \lambda \Phi_0 \quad y = 0 \quad (7)$$

그리고 영역  $S_i$  에서는

$$\nabla^2 \Phi_i = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial x} = 0 \quad x = b_{i-1} \text{ and } x = b_i \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial y} = 0 \quad y = -h \quad (10)$$

한편 각 영역의 경계면을 따라 속도포텐셜은 연속이어야 하므로  $y = -h + a$  에서

$$\Phi_0 = \Phi_i, \quad i = 1, 2, \dots, n+1 \quad (11)$$

를 만족해야 한다.

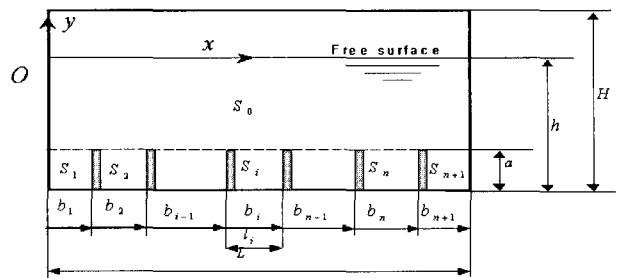


Fig. 1 Geometrical arrangement for a rectangular prismatic tank with baffles at bottom

각 영역에서의 지배방정식과 경계조건을 만족하는 속도포텐셜은 다음과 같이 선택한다.

$$\Phi_0 = -A \cosh k(h+y) \cos(kx) \quad (12)$$

$$\Phi_i = -B_i \cosh k_i(h+y) \cos k_i(x-b_{i-1}) \quad (13)$$

속도포텐셜  $\Phi_i, \Phi_0$  가  $y = -h + a$  에서 연속이어야 하므로  $b_{i-1} \leq x \leq b_i$  에서 다음 식을 만족해야 한다.

$$A \cosh(ka) \cos(kx) = B_i \cosh(k_i a) \cos k_i(x - b_{i-1}) \quad (14)$$

액체의 적재깊이  $h$  가 baffle의 높이  $a$  보다 작을 경우, 각 각의 영역  $S_i$  에 있는 유체는 서로 독립적이므로 각 영역  $S_i$  에서는  $G = \tanh(k_i h)$  이고 고유주기는 식 (4)와 같다. 하지만 적재깊이가 baffle의 높이보다 큰 경우에는 일반적으로  $k \neq k_i$  이므로 모든  $x$  에 대해서 식 (14)를 만족하지 못한다. 그러나 주어진 속도포텐셜에 대한 연속조건에 대하여 가중평균을 통해 가장 작은 오차의 미정계수를 찾을 수 있다. 즉 식 (14)의 양변에  $\cos k_i(x - b_{i-1})$ 를 곱하여  $b_{i-1}$  에서  $b_i$  까지  $x$  에 대해서 적분한다.

$$\begin{aligned} & \int_{b_{i-1}}^{b_i} A \cosh(ka) \cos(kx) \cos k_i(x - b_{i-1}) dx \\ &= \int_{b_{i-1}}^{b_i} B_i \cosh(k_i a) \cos^2 k_i(x - b_{i-1}) dx \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{따라서 } \frac{B_i}{A} = \frac{\cosh(ka)}{\cosh(k_i a)} f_i$$

$$f_i = \frac{2}{\pi} \frac{(l_i/L)}{1 - (l_i/L)^2} \{ \sin(kb_i) + \sin(kb_{i-1}) \} \quad (16)$$

$$k_i = \frac{\pi}{l_i} \text{ 이다.}$$

이 결과와 식 (12), 식 (13)으로 주어지는 속도포텐셜을 이용하여 탱크 내 액체의 위치에너지와 운동에너지를 계산하면 다음과 같다. 위치에너지는,

$$\begin{aligned} P.E. &= \frac{\lambda}{2} \int_F \Phi^2 dF = \frac{\lambda}{2} \int_0^L \Phi_0^2 dx \\ &= \lambda \frac{A^2 L}{4} \cosh^2(kh) \end{aligned} \quad (17)$$

운동에너지는 각 영역에서의 운동에너지의 합으로서,

$$\begin{aligned} K.E. &= \sum_{i=0}^{n+1} (K.E.)_i \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n+1} \int_{S_i} (\nabla \Phi_i)^2 dS_i \end{aligned} \quad (18)$$

따라서

$$K.E. = \frac{A^2 k L}{8} \left\{ \sinh(2kh) - \beta \sinh(2ka) \right\} \quad (19)$$

여기서 적재깊이 감소계수  $\beta$  를 다음과 같이 정의한다.

$$\beta = 1 - \sum_{i=1}^{n+1} f_i^2 \frac{\tanh(k_i a)}{\tanh(ka)} \quad (20)$$

따라서 전 포텐셜에너지는

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{A^2 k L}{8} \left\{ \sinh(2kh) - \beta \sinh(2ka) \right\} \\ &\quad - \lambda \frac{A^2 L}{4} \cosh^2(kh) \end{aligned} \quad (21)$$

$A$  에 대해서 1차변분을 수행하면 다음 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} \lambda &= k G \\ G &= \tanh(kh) - \frac{\beta}{2} \frac{\sinh(2ka)}{\cosh^2(kh)}, \quad h > a \end{aligned} \quad (22)$$

식 (20)으로부터 보면 baffle을 중간에 하나 설치할 때 적재깊이 감소계수  $\beta$ 가 가장 작으며 baffle의 개수가 많아질수록 증가한다. 극한의 경우 무한히 많은 baffle을 설치한다면 이것은 탱크의 높이가 baffle의 높이만큼 감소한 것을 의미하므로  $\beta$ 는 1로 수렴한다. 즉  $\beta$ 는 탱크바닥에 baffle이 있음으로 인하여 마치 적재깊이가 감소된 것과 동일한 효과를 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 baffle의 영향은 baffle의 높이보다 조금 큰 적재깊이에서 현저하게 나타난다.

식 (22)를 사용하여 탱크바닥에 baffle이 설치된 경우 슬로싱 고유주기를 계산해 보았다. Fig. 2는 폭이 48 m 높이가 28 m 인 직사각형 탱크의 바닥에 크기가 7 m 인 baffle을 바닥 중앙에 한 개 설치한 경우를 보여주고 있다. 그림에서 실선은 이론해의 계산결과이며 점선은 baffle이 없을 때의 결과이고  $\Delta$ 표는 수치 시험결과(신장룡 등, 1994)를 나타내고 있다. 7 m baffle 하나를 설치했을 때 고유주기가 약 12 % 증가하였다.

그리고 Fig. 3은 2 m 크기의 baffle을 2 m 간격으로 촘촘히 설치한 경우의 결과이다. 이 경우 적재깊이 감소계수  $\beta = 0.553$  이다.

## 2.2 유효적재깊이(effective fill-depth)

탱크의 바닥에 baffle이 설치된 경우, 고유진동수 파라미터  $\lambda$  표현식인 식 (22)는 다음과 같이 정리된다.

$$\lambda = k G$$

$$G(kh) = \tanh(kh)$$

$$- \beta [1 - \tanh^2(kh)] \frac{\tanh(ka)}{1 - \tanh^2(ka)} \quad \text{for } h > a \quad (23)$$

한편 이 식을 간략히 표현하기 위하여  $\theta = \tanh(kh)$  와  $\eta = \tanh(ka)$  라 정의하면 식 (23)은

$$G(kh) = \theta - \beta(1 - \theta^2) \frac{\eta}{1 - \eta^2} \quad \text{for } h > a \quad (24)$$

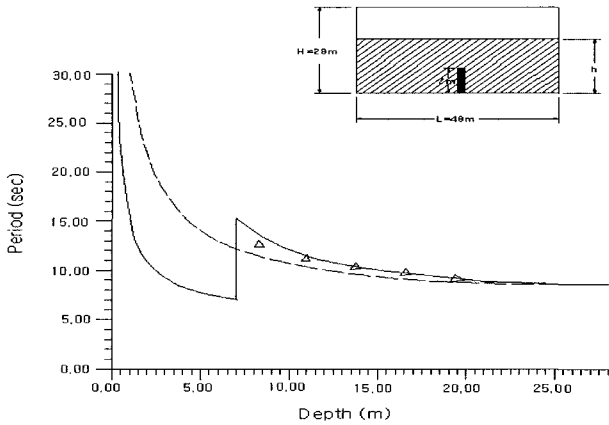


Fig. 2 Natural period vs. fill-depth for a rectangular prismatic tank. Solid line is for one baffle in the middle of bottom. Dashed line is for an un baffled tank and triangles are the numerical results.

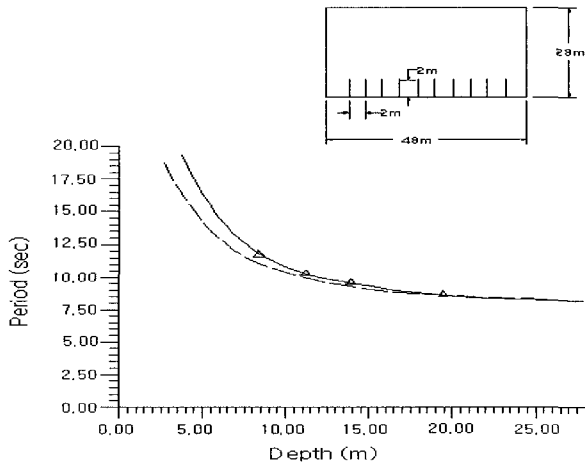


Fig. 3 Natural period vs. fill-depth for a rectangular prismatic tank. Solid line is for 2 m baffles at interval of 2 m. Dashed line is for an un baffled tank and triangles are the numerical results.

여기서 함수  $G$  를 대신하여 나타낼 수 있도록 다음과 같이 근사함수  $\bar{G}$  를 도입하고자 한다.

$$\bar{G}(kh) = \tanh(kh - \beta ka) \quad (25)$$

$\bar{G}$  는  $\beta ka \ll 1$  일 때  $\tanh$  함수 특성을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{G}(kh) = \frac{\tanh(kh) - \beta \tanh(ka)}{1 - \beta \tanh(kh) \tanh(ka)} \quad (26)$$

그리고  $\theta = \tanh(kh)$  와  $\eta = \tanh(ka)$  를 사용하면 다음 식을 얻는다.

$$\bar{G}(kh) = \frac{\theta - \beta \eta}{1 - \beta \theta \eta} \quad (27)$$

여기서 근사함수  $\bar{G}$  를 함수  $G$  와 서로 비교할 수 있도록 함수  $\bar{G}$  를 Maclaurin series 로 전개하면

$$\bar{G}(kh) = \theta - \beta(1 - \theta^2)\eta + \dots \quad (28)$$

이식은 식 (24)와 비교해 첫째 항은 같고 둘째 항에서 곱수  $1/(1 - \eta^2)$  만큼 차이가 나는데,  $\eta < 1$  이기 때문에 셋째 항 이상의 고차 항을 무시하면 식 (23)과 (25)는 근사적으로 같다고 말할 수 있다. 한편 근사함수  $\bar{G}$  와 함수  $G$  와의 차이는 적재깊이(fill-depth)  $h = a$  에서 가장 커지는데 그 차이를  $\epsilon$  라 하면

$$\epsilon = G(ka) - \bar{G}(ka)$$

$$= (1 - \beta)\tanh(ka) - \tanh[(1 - \beta)ka] \quad (29)$$

이 차이가 Fig. 4에 나타나 있다. 가로축은 적재깊이 감소계수  $\beta$  이고 세로축에 두 함수 사이의 차이  $\epsilon$  를 baffle 의 상대크기  $ka$  에 따라 나타내었는데  $ka$  가 커짐에 따라 함수 사이의 차이도 커지지만 그 크기는 대략  $10^{-2}$  의 아주 작은 수준이다.

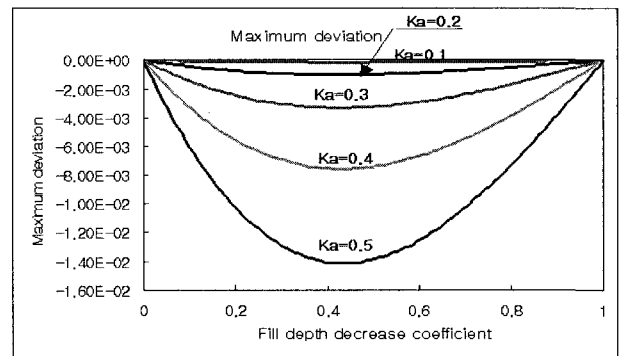


Fig. 4 Maximum deviation of  $\bar{G}(kh)$  from  $G(kh)$

따라서 함수  $\overline{G}$  와 함수  $G$  는 아주 근사한 것임을 알 수 있고, 근사함수  $\overline{G}$  를  $G$  대신 사용하면 유효적재깊이(effective fill-depth)의 개념을 적용할 수 있게 된다. 즉

$$\overline{G}(kh) = \tanh(kh_e) \quad (30)$$

여기서  $h_e = h - \beta a$  는 유효적재깊이이다. 앞서  $\beta$  를 적재깊이 감소계수라 정의한 것도 이와 같은 맥락이다.

### 2.3 Lloyd 선급 고유주기 산정식과의 비교

직육면체 탱크의 슬로싱 고유주기를 계산하는 식으로 Lloyd 선급에서도 이론해인 식 (4)를 사용하고 있다.

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{gk \tanh(kh)}} \quad (4)$$

이식은 탱크 내부에 아무런 부가물이 설치되지 않은 경우에 적용되는 것인데 Lloyd 선급에서는 탱크 내부에 baffle이 등간격으로 여러 개 설치된 경우에 대한 슬로싱 고유주기로 식 (4)와 유사한 아래 경험식을 사용하고 있다 (Violette, 1990).

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{gk \tanh(kh_e)}} \quad (31)$$

여기서  $h_e$ 는 유효적재깊이로서  $h_e = h - \beta a$ 로 정의되는데, 이 형태는 본 논문의 2.2절에서 유도한 결과와 동일한 것임을 알 수 있다. 그리고 Lloyd 선급에서는 적재깊이 감소계수  $\beta$ 를 등간격으로 배치된 baffle의 개수  $n$ 만의 함수로 다음과 같이 정의하고 있다.

$$\beta = \sqrt{\frac{n}{n+1}} \quad (32)$$

하지만 일반적으로 슬로싱 고유주기는 탱크의 형태나 액체의 적재깊이 그리고 내부재의 개수 및 배치형태 등의 영향을 받게 된다. 탱크바닥에 설치된 높이  $a$ 인 baffle이 등간격으로  $n$ 개 배치된 경우 본 논문의 2.1절의 유도과정에 따르면 baffle 사이의 거리와 각 baffle의 위치는 다음 식으로 표시된다.

$$l_i = \frac{L}{n+1} \text{ for } i=1, \dots, n+1 \quad (33)$$

$$b_i = \frac{L}{n+1} i \text{ for } i=1, \dots, n+1 \quad (34)$$

그리고  $k_i = k(n+1)$ 이다. (35)

식 (34)를 식 (16)에 넣어 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$f_i = \zeta \sin\left[\frac{\pi}{2(n+1)}(2i-1)\right] \quad (36)$$

여기서

$$\zeta = \frac{4}{\pi} \frac{n+1}{n^2+2n} \cos\left[\frac{\pi}{2(n+1)}\right] \quad (37)$$

따라서 식 (20)의 적재깊이 감소계수  $\beta$ 는 다음으로 표현된다.

$$\beta = 1 - \zeta^2 \frac{\tanh[(n+1)ka]}{\tanh(ka)} \times \sum_{i=1}^{n+1} \sin^2\left[\frac{\pi}{2(n+1)}(2i-1)\right] \quad (38)$$

그리고 위의 sine 함수에 대하여 삼각함수 관계식을 이용하면

$$\sum_{i=1}^{n+1} \sin^2\left[\frac{\pi}{2(n+1)}(2i-1)\right] = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{2} \left\{1 - \cos\left[\frac{\pi}{(n+1)}(2i-1)\right]\right\} \quad (39)$$

여기서  $i$ 와  $n$ 이 모두 정수인 것을 이용하면 최종적으로 다음 결과를 얻는다.

$$\sum_{i=1}^{n+1} \sin^2\left[\frac{\pi}{2(n+1)}(2i-1)\right] = \frac{n+1}{2} \quad (40)$$

그러므로 탱크바닥에 높이  $a$ 인 baffle이 등간격으로  $n$ 개 배치된 경우에 대하여 적재깊이 감소계수  $\beta$ 는 식 (41)으로 표현되는데, Lloyd 선급에서 사용하는 경험식과는 달리 여기서는 baffle의 개수뿐만 아니라 baffle의 크기에 따라서도  $\beta$ 와 고유주기가 변하는 것을 알 수 있다.

$$\beta = 1 - \zeta^2 \frac{n+1}{2} \frac{\tanh[(n+1)ka]}{\tanh(ka)} \quad (41)$$

한편 식 (41)의  $\tanh$  함수는 임의의 baffle 개수와 크기에 대하여 다음 식을 만족하므로

$$\frac{\tanh[(n+1)ka]}{\tanh(ka)} \geq 1 \quad (42)$$

따라서 적재깊이 감소계수  $\beta$ 는 항상 다음 값보다 작게 된다.

$$\beta_{cr} = 1 - \zeta^2 \frac{n+1}{2} \quad (43)$$

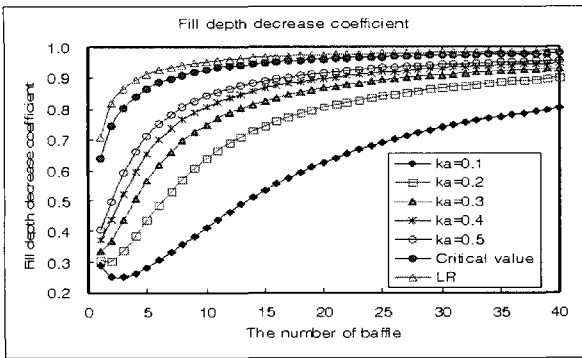


Fig. 5 Fill-depth decrease coefficient

여기서 알 수 있는 것은  $\beta$ 의 임계치인  $\beta_{cr}$ 가 Lloyd 선급에서는 적재깊이 감소계수  $\beta$ 에 해당한다는 사실이며 따라서 Lloyd 선급에서 사용하는 경험식이란 본 연구에서 얻은 해석해(baffle 개수와 크기의 함수)의 극한값에 해당하며 이는 baffle의 개수에만 좌우된다는 점이다. Fig. 5에 본 연구의 해석해와 Lloyd 선급에서 사용하는 경험식의  $\beta$ 를 계산하여 서로 비교해 보았다. 가로축은 baffle의 개수  $n$ 를 나타내고 있고 baffle의 크기( $ka$ )를 변화시켜가면서  $\beta$ 를 계산하였다. Baffle의 크기가 점점 커지면서 Lloyd 선급의 경험식이 본 연구의 해석해에 일치하는 것을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 공진시 슬로싱으로 인한 액체 화물창의 손상 가능성을 피하기 위한 관점에서 탱크바닥에 baffle이 설치된 경우의 슬로싱 고유주기를 계산하였다. 본 연구는 내부재가 설치된 직육면체 탱크의 슬로싱 고유주기에 대한 선형연구(신장용 등, 1994)를 보완하는 것으로서 변분법을 이용한 당시의 해석에서 유효적재깊이 개념을 좀더 자세하게 분석하였고 그 검증자료로서 Lloyd 선급에서 제시하고 있는 고유주기 산정식(Violette, 1990)을 이용하였다.

본 논문에서 유도한 해석해는 Lloyd 선급의 고유주기 산정식과 비교할 때 유효적재깊이를 사용하는 유사한 형태라는 것을 확인할 수 있었고 더욱이 Lloyd 선급에서는 동일 크기의 baffle이 등간격으로 배치된 경우에만 적용되는데 비해 본 연구의 결과는 그러한 제한이 없어서 등간격이 아닌 경우에도 사용할 수 있다는 점을 확인하였다.

현재까지 baffle의 크기나 설치 위치가 슬로싱 고유주기 변화에 미치는 영향을 정량적으로 기술한 이론식이나 실험자료가 별로 없다는 것을 볼 때 본 연구의 결과는 액체 화물탱크의 설계와 관련해서 매우 유용하게 사용할 수 있다고 본다.

### 후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 첨단조선공학연구센터(ASERC)

의 연구비 지원으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

### 참 고 문 헌

김용환 (1990). "유한차분법을 이용한 Tank 내의 Sloshing 해석", 대우조선기술, 제25호, pp 60-74.

백승우 (2004). 3차원 슬로싱에 관한 실험적 연구, 부산대학교 석사학위논문.

신장용, 최경식, 강신영, 김현수 (1994). "액체 화물창내의 SLOSHING 고유주기 산정에 관한 연구", 한국해양공학 회지, 제8권, 제2호, pp 93-104.

이경중, 이기표 (1987). "유한차분법에 의한 2차원 탱크내의 유체유동해석", 대한조선학회지, 제24권, 제3호, pp 9-19.

이판목, 홍석원, 홍사영 (1990). "구조물의 탄성을 고려한 2 차원 탱크 내 유동해석", 대한조선학회지, 제27권, 제3 호, pp 107-116.

Arai, M. (1984). "Experimental and Numerical Studies of Sloshing Pressure in Liquid Cargo Tanks", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No 155, pp 114-121.

Bass, R.L. (1985). "Modeling Criteria for Scaled LNG Sloshing Experiments", Journal of Fluids Engineering, Vol 107, pp 272-280.

BV (1976). Study of Partial Fillings in Ship Holds, Bureau Veritas Report.

Cox, P.A., Bowles, E.B. and Bass, R.L. (1979). Evaluation of Liquid Dynamic Loads in Slack LNG Cargo Tanks, Southwest Research Institute Report No. SR-1251.

Faltinsen, O.M. (1974). "A Nonlinear Theory of Sloshing in Rectangular Tanks", Journal of Ship Research, Vol 18. pp 224-241.

Lee, D.Y. (1997). A Study on the Sloshing of Cargo Tanks Including Hydroelastic Effects, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.

Lee, S.H. et al. (1995). "Simulation of 3-D Sloshing and Structural Response in Ship's Tanks Taking Account of Fluid-Structure Interaction", SNAME Transaction, Vol 103, pp 321-342.

Su, T.C. and Kang, S.Y. (1986). "Analysis and Testing of the Large Amplitude Liquid Sloshing in Rectangular Containers", ASME PVP Conference, Vol 108, pp 145-154.

Violette, F.L.M. (1990). Sloshing Loads and Scantling Assessment for Tanks Partially Filled with Liquids, Report No. TPDD 90/11, Lloyd's Register & Clients.

2005년 10월 25일 원고 접수

2005년 12월 1일 최종 수정본 채택