
 論 文

大韓造船學會論文集
 第29卷 第1號 1992年 3月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 29, No. 1, March 1992

제한수역에서의 동유체력에 대한 고찰

조일형*, 최항순**

On the Characteristics of Hydrodynamic Forces in a Restricted Water

by

I. H. Cho* and Hang S. Choi**

요 약

본 논문에서는 선형포텐셜이론을 이용하여 제한수로에 놓인 2차원 주상체에 작용하는 동유체력과 운동응답의 특성을 고찰하였다. 유체영역을, 수로입구영역 그리고 수로영역으로 구분하여 우선 각 영역에서 해를 독립적으로 구한 다음 이를 인접영역의 해와 정합시켜 완전해를 구하였다. 수로의 길이보다 대략 4배가 긴 파장의 입사파는 수로내 유동을 공진시킨다. 이때 주상체에 작용하는 부가질량은 음의 값을 갖게 되며 동유체감쇠력은 급격한 변화를 보이고 주상체의 수평운동은 최대가 됨을 밝혔다.

Abstract

A study has been made on the hydrodynamic forces on and the motion response of a sliding block in a bay within the framework of linear potential theory. To simplify the problem, following assumptions are made : The configuration of the bay is a long channel with narrow width, constant depth and straight coastline. Incident waves are long compared to the depth.

We applied matched asymptotic expansion techniques. The fluid domain is subdivided into three regions : ocean, bay entrance, bay regions. Boundary-value problems are solved first in each region. Then unknown coefficients are determined by matching individual solutions at the intermediate region between two neighboring regions.

발표 : 1991년도 대한조선학회 춘계연구발표회('91. 4. 13)

접수일자 : 1991년 4월 18일, 재접수일자 : 1991년 7월 22일

* 정희원, 해사기술연구소

** 정희원, 서울대학교 조선해양공학과

大韓造船學會論文集 第29卷 1號 1992年 3月

It is found that the motion of the block is greatly amplified at the resonant frequencies, in particular at the quarter wavelength mode. We examined the mechanism of negative added mass, which results from the localized hydrodynamic resonance.

1. 서 론

세계의 교역량이 증대되면서 해상 교통량이 꾸준히 증가하고 있으며 후발공업국의 경우에는 새로운 항만의 건조가 활발하게 이루어지고 있다. 우리나라의 경우에도 연안공업 단지의 개발과 서해안개발의 일환으로 기존 항만의 확충은 물론 신항만 건설이 계속 추진되고 있다. 그러나 항만 공진과 항만내에 계류된 부유체의 운동특성을 밝히는 이론이 아직 정립되어 있지 못하여 이에 대한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다(조인형, 1991).

항만과 같은 제한유체영역에서의 동유체력은 무한유체영역과는 달리 공진이라는 물리적 특성을 내포하고 있다. 이와 같은 공진이 유발하는 여러 가지 경우가 알려져 있다. 첫번째 예로 안벽에 계류된 선체운동을 들 수 있다. (Oortmerssen, 1976). 이 경우 유체동역학적 공진은 선박과 안벽사이의 유체영역에 존재한다. 두번째 예는 mool-pool를 지닌 추선에서 살펴볼 수 있다(Lee & Day, 1986). 이때 선체운동의 주파수와 mool-pool의 고유진동수가 일치하면 공진이 발생한다. 세번째 예는 조선공학 분야에서 많이 연구해온 쌍동선 문제에서 찾을 수 있다(Lee, Jones & Curphy, 1973). 마지막으로 2차원 수중 사각형 모델이 자유표면과 가까운 위치에서 운동을 할 때 공진이 발생할 수 있다(Newman, 1984). 위에서 언급한 예들의 공통된 유체동역학적 특징으로는 공진점부근에서 부가질량이 갑자기 음의 값을 가지며, 감쇠력은 극값을 보인다(Vinje, 1989).

본 연구에서는 파장이 매우 긴 파들이 밀려올때 직사각형 수로안에 계류된 간단한 형상의 주상체에 작용하는 동유체력과 운동응답을 고찰하였다 (Fig. 1 참조) 또한 항만과 같은 제한유체영역에서의 동유체력의 특징을 위해서 언급한 예들과

비교하여 검토하였다.

2. 동 유체력 해석

2.1 문제의 정식화

본 논문에서는 아래와 같은 가정을 도입하였다.

- 1) 유체유동은 선형포텐셜 유동이다.
- 2) 입사파의 파장은 수심에 비하여 아주 길다.
- 3) 제한수역의 폭은 입사파에 비하여 아주 작다.
- 4) 안벽은 수직벽으로 완전반사가 일어난다.
- 5) 입사파는 해안선에 수직인 각도로 입사하며 해안선에서 완전반사가 일어난다.

이러한 가정하에서 속도포텐셜을 도입하고 유동은 시간에 따라 조화운동을 한다고 가정한다. 또한 위의 가정에 적합한 입사파는 장파이며, 점성과 박리에 따른 에너지 손실은 무시한다. 선형장파이론(Linear Long Wave Theory)의 기본 성질에 따라 수심방향의 속도변화를 무시하면 속도포텐셜, 자유표면식 및 유동은 아래와 같이 표시할 수 있다.

Φ(x, y, t) = Re{φ(x, y) e^{iωt}}, (1)

ζ(x, y, t) = Re{η(x, y) e^{iωt}}, (2)

η(x, y) = iωφ(x, y) / g, (3)

u(x, y, t) = -ig ∇η/ω, (4)

여기서 (x, y)평면은 정수면을 뜻하며, g는 중력가속도이다. 주파수 ω는 아래와 같은 선형 분산관계식(dispersion relation)을 만족한다.

ω^2 = gk^2 h. (5)

여기서 h는 수심을 뜻한다. 선형장파이론에서 질량보존방정식은 다음과 같으며

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot (h \vec{u}) = 0, \quad (6)$$

선운동량 보존식은 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -g \nabla \zeta. \quad (7)$$

위의 두식에서 속도항을 소거하면 쌍곡선형태의 편미분방정식을 얻는다.

$$g \nabla \cdot (h \nabla \zeta) = \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}. \quad (8)$$

파가 주파수 ω 를 갖고 조화운동을 할 때, 파진폭함수 η 는 다음식을 만족한다.

$$\nabla \cdot (h \nabla \zeta) + \frac{\partial^2 \zeta}{g} \eta = 0. \quad (9)$$

수심이 일정하면 위식은 잘 알려진 2차원 Helmholtz방정식이 된다.

$$\nabla^2 \eta + K^2 \eta = 0. \quad (10)$$

2.2 파 기진력

제한수역은 길이가 L 이고 폭이 $2a$ 인 직사각형이며, 길이가 폭에 비하여 매우 길다고 가정한다. 바닥까지 닿은 질량 M 인 주상체가 제한수로의 한쪽끝에 계류되어 있다. 바닥면에서의 마찰은 없다고 가정한다. 이 모형에 대한 자세한 기하학적 형상은 Fig. 1에 도시하였다. 이러한 형상의 제한

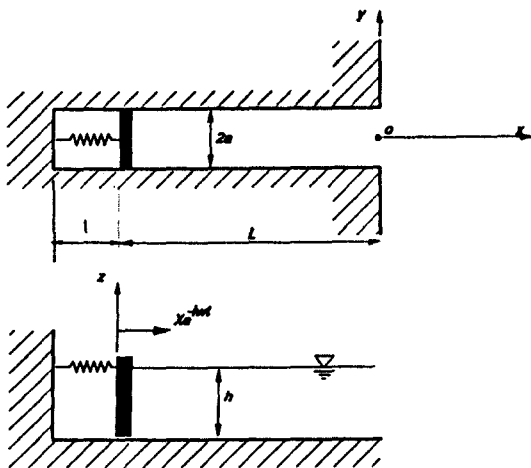


Fig. 1 Definition sketch

수로는 항만의 경우에서 찾아볼 수 있으므로 앞으로는 제한수역을 항만이라 부르기로 한다. 주상체에 작용하는 파 기진력을 구하기 위해 항만에 의한 입사파의 산란문제를 풀어야 한다. 해석방법으로 정합점근전개법 (Matched Asymptotic Expansion Method)을 이용하였다. 유체영역을 해양과 항만 그리고 항만입구등 3가지 영역으로 나누어, 각 영역에서 경계치 문제를 독립적으로 풀고 부족한 경계조건때문에 생기는 미지수를 인접한 영역의 해와 정합시켜 구한다. 항만안에서의 파형은 다음식으로 표현된다(Mei, 1983).

$$\eta^h = \frac{2A \cos k(x+L)}{\cos kL + (2ka/\pi) \sin kL \ln(2\gamma ka/\pi) - ika \sin kL} \quad (11)$$

여기서 A 는 입사파의 진폭을 나타내며, $\ln \gamma$ 는 Euler 상수이다(=0.5772157). 주상체에 작용하는 압력과 기진력은 아래와 같다.

$$p = \rho g \eta^h |_{x=-L} \quad (12)$$

$$F_d = 2ahp. \quad (13)$$

파기진력의 절대값을 $2a\rho ghA$ 로 나누면 무차원화된 파 기진력을 얻는다.

$$\zeta = \left| \frac{2}{\cos kL + (2ka/\pi) \sin kL \ln(2\gamma ka/\pi) - ika \sin kL} \right|. \quad (14)$$

2.3 동 유체력

주상체의 운동에 의하여 해양쪽으로 나가는 파는 항만입구에서 멀리 떨어진 해양영역에서 관찰할 때 원점에 소오스를 놓아 표현할 수 있다. 이 해를 항만입구로 내부전개하면 다음과 같다.

$$\eta^o = \frac{i\omega}{g} q \left(-\frac{i}{2} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{\gamma k}{2} \right) + i \frac{\omega}{g\pi} q \ln r + O(kr \ln kr), \quad (15)$$

여기서 q 는 해양쪽으로 빠져나가는 유량으로 아직은 미지수이다.

항만입구영역문제의 최저차항만 고려하면 지배 방정식은 2차원 Laplace 방정식이 된다. 따라서 항만입구영역에 있는 관찰자는 파를 느끼지 못하며, 이는 2차원 수로문제를 푸는 것으로 대치시킬 수 있다. 해석 방법으로는 실제방법을 Schwarz-Christoffel 변환으로 간단한 복소평면으로 사상시켜 구하는 방법을 사용한다. 항만입구영역의 해(η^e)를 외부영역으로 외부전개하면 각각 아래와 같다 (Mel, 1983)

$$\eta^e = m \ln \frac{\pi r}{2a} + c \quad x > 0, \quad (16)$$

$$\eta^e = m \frac{\pi}{2a} X - m \ln \frac{e}{2} + c \quad x < 0. \quad (17)$$

항만의 길이는 폭에 비해 길므로 항만안에서의 파는 1차원으로 근사시킬 수 있다. 항만안에서 해(η^h)를 다음과 같이 가정한다.

$$\eta^h = b e^{-kx} + d e^{ikx}. \quad (18)$$

윗식에 적용할 물체 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta^h}{\partial x} = \frac{i\omega}{g} U, \quad U = -i\omega X \quad (x = -L), \quad (19)$$

여기서 U와 X는 주상체의 속도와 변위를 나타낸다. 경계조건을 식(18)에 대입하여 정리한 뒤 이를 항만입구로 내부전개하면 아래 식과 같다.

$$\eta^h = (de^{-2ikL} + \frac{i\omega^2}{gk} X e^{-ikL}) (1 - ikx) + d(1 + ikx) + 0(kx)^2. \quad (20)$$

해양영역의 해를 항만입구로 내부전개한 식과 항만입구 영역의 해를 해양영역으로 외부전개한 식이 같다는 정합조건은 다음과 같다.

$$\frac{i\omega}{g} q \left(\frac{i}{2} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{\gamma k}{2} \right) = m \ln \frac{\pi}{2a} + c, \quad (21)$$

$$\frac{i\omega}{g\pi} q = m. \quad (22)$$

마찬가지로 항만내부의 해를 항만입구로 내부전개한 식과 항만입구영역의 해를 항만안으로 외부전개한 식이 같다는 정합조건으로부터 다음식을 얻을 수 있다.

$$d e^{-2ikL} + \frac{i\omega^2}{gk} X e^{-ikL} + d = -m \ln \frac{e}{2} + c, \quad (23)$$

$$-ik(de^{-2ikL} + \frac{i\omega^2}{gk} X e^{-ikL} - d) = m \frac{\pi}{2a}. \quad (24)$$

위의 정합조건식들로부터 미지수를 구하면 완전한 해가 얻어진다. 항만안에서의 해를 정리하면 아래와 같다.

$$\eta^h = d (e^{-ikL(x+2L)} + e^{ikx}) + \frac{i\omega^2}{gk} X e^{-ik(x+L)}, \quad (25)$$

$$d = \frac{-\frac{i\omega^2}{gk} e^{-ikL} X [1 + i \frac{2ka}{\pi} (-\frac{i\pi}{2} + \ln \frac{2a\gamma k}{\pi e})]}{(1 + e^{-2ikL}) - i \frac{2ka}{\pi} (1 - e^{-2ikL}) (-\frac{i\pi}{2} + \ln \frac{2a\gamma k}{\pi e})}. \quad (26)$$

$x = -L$ 에서의 동압력은 다음과 같고,

$$p = \rho g \eta^h \quad \text{at } x = -L, \quad (27)$$

동유체력은 압력에 면적을 곱하여 표현된다.

$$F_r = 2ah p. \quad (28)$$

이렇게 구한 동유체력의 실수부가 부가질량항이 되며, 허수부는 감쇠항을 나타낸다. 편의상 주상체 뒤의 유체질량($2a\rho h$)으로 무차원시킨 부가질량과 감쇠계수는 다음과 같다.

$$\mu = \text{Re} \left\{ \frac{F_r}{2a\rho h} \right\} \quad (29)$$

$$\nu = \text{Im} \left\{ \frac{F_r}{2a\rho h\omega} \right\} \quad (30)$$

주상체의 운동응답변위를 구하기 위해 아래와 같은 운동방정식을 풀어야 한다.

$$-M \omega^2 X + K X = F_r + F_0 \quad (31)$$

여기서 K는 계류삭의 강성계수이다.

3. 계산결과 및 고찰

주상체가 매우 긴 직사각형 항만에 선형 계류된 경우를 생각한다. 주상체의 질량 M은 편의상 주상체 뒤의 유체질량($2a\rho h$)으로 잡았다. 또한 계류삭의 강성계수 K는 $2agh\rho h$ 로 선택하였다. 입사파는 해안선에 수직으로 들어온다. Fig. 2는 항만

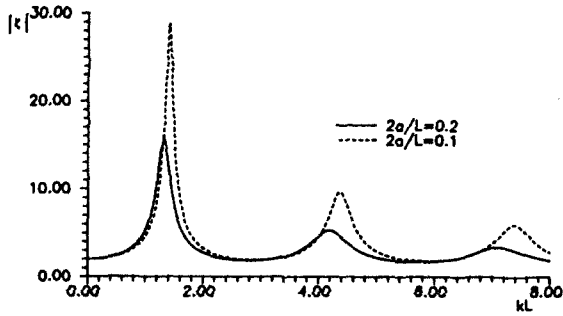


Fig. 2 Wave exciting force($l/L=0.5$)

끝에 위치한 주상체에 작용하는 파 기진력을 보이고 있다. 그림에서 x축은 입사파의 파장과 항만길이의 비(KL)이며, 횡축은 $2agh\phi$ 로 무차원시킨 파 기진력이다. $2a/L=0.2$ 와 $2a/L=0.1$ 인 2가지 경우의 결과를 도시하였다. 이 그림으로부터 항만 폭이 작은 경우에 공진주파수가 조금 커지며, 공진값은 훨씬 커짐을 알 수 있다. 여기서 첫번째 공진점은 파장이 항만길이의 4배가 되는 음향학의 1/4파장에 해당한다.

Fig. 3는 $2a/L$ 이 0.1일때 무차원된 부가질량과 감쇠력의 주파수에 따른 변화를 보여주고 있다. 그림에서 점선은 $2aph\omega$ 로 무차원시킨 부가질량을 뜻하며, 실선은 $2agh\phi\omega$ 로 나눈 감쇠력을 나타낸다. 그림에서 보듯이 공진점에서 부가질량은 양에서 음으로 부호가 갑자기 변하며, 이때 감쇠력은 극값을 갖는다.

Fig. 4는 KL이 0부터 8까지 변할때 주상체의 수평운동응답비를 나타내고 있다. 여기서 수직은

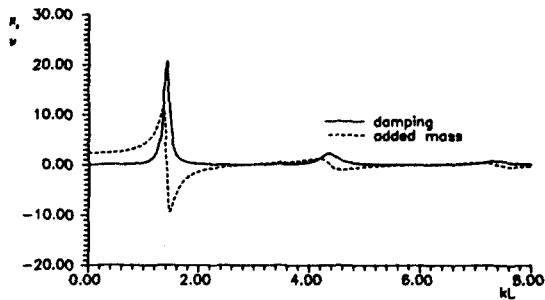


Fig. 3 Hydrodynamic forces ($2a/L=0.2, l/L=0.5$)

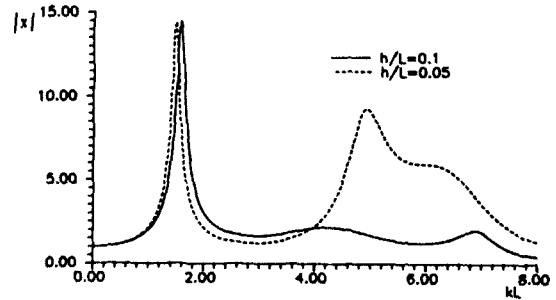


Fig. 4 Motion amplitude ratio ($2a/L=0.1, l/L=0.5$)

항만길이의 0.1과 0.05인 2가지 경우를 채택하였다. 그림에서 실선으로 표시한 $h/L=0.1$ 인 경우의 운동응답은 주상체에 작용하는 기진력(Fig. 2 참조)에 비례함을 보여주고 있다. 그러나 $h/L=0.05$ 일때 $KL=5.0$ 근반에서 운동응답이 커지는 데, 이는 계류사과의 공진에 기인한다.

4. 결 론

이상의 계산결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1) 항만에 놓인 주상체에 작용하는 파 기진력은 공진점에서 큰 값을 갖는다. 특히 입사파의 파장이 항만 길이의 4배가 될때 기진력은 가장 크다.

2) 항만과 같은 제한유체영역에서의 동유체력은 무한유체영역과는 다른 특징들을 보여준다. 즉, 공진점 부근에서 부가질량이 갑자기 음의 값을 가지며 감쇠력은 극값을 보인다.

3) 주상체의 운동을 제한시키기 위해 설치한 계류사는 공진을 유발시킬 수 있으므로 부유체를 계류시킬 때 계류사의 강성을 적절히 선택하여야 한다.

본 연구에서는 선형포텐셜이론을 토대로 간단한 해석해를 유도하고 그 결과에 따르는 물리적 특성들을 논하였다. 그러나 실제 적용을 위하여는 비선형 효과나 불규칙파의 영향 또한 항만입구에서의 박리나 항만의 바닥이나 벽에서의 마찰 등 점성에 의한 에너지 손실을 고려해야 한다.

후 기

본 연구는 한국해사기술연구소가 지원한 1990년도 연구과제 “항만에 계류된 선박의 적정배치 기법에 관한 연구”의 일부 결과임을 밝히며 상기 기관에 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

- [1] 조일형, 1991. “항만내 파도응답과 계류선박의 운동해석”, 서울대학교 박사학위 논문
- [2] Collin, R. C., “Field Theory of Guided Waves”, McGraw-Hill, 1960.
- [3] Morse, P. M. & Feshbach, H., *Methods of Theoretical Physics*, McGraw-Hill, 1953.
- [4] Lee, B. S., & Day, A. H., “The water column oscillating in a duct between two half ship section barriers”, *J. Ship Research*, Vol. 30, 1986.
- [5] Lee, C. M., Jones, H. D & Curphy, R. M., “Prediction of motion and hydrodynamic loads of catamarans”, *Marine Technology*, 1976.
- [6] Lee, J. J., “Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary geometry”, *JFM*, Vol. 43, 375-394, 1970.
- [7] Mei, C. C., *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, John Wildy & Sons, 1983.
- [8] Miles, J. & Munk, W., “Harbor paradox”, *J. Waterways and Harbors Div. ASCE*, Aug., 111-130, 1961.
- [9] Newman, J. N., Sortland, B. & Vinje, T., “The added mass and damping of rectangular bodies close to the free surface”, *J. Ship Research*, Vol. 28, No. 4, 1984.
- [10] Oortmerssen, G. V., “The motion of a moored ship in waves”, NSMB Publication, No. 510, 1976.
- [11] Üntüata, Ü. & Mei, C. C., “Long wave excitation in harbors-analytic study Dept.” of Civil Engineering, M.I.T. Technical Report 171, 1973.
- [12] Üntüata, Ü. & Mei, C. C., “Effects of entrance loss on harbor oscillations”. *J. Waterways Harbors and Coastal Eng. Div. ASCE*, Vol. 101, 161 - 180, 1975.
- [13] Vinje, T., “On the significance of negative added mass”. *Proc. of the 8th International Conference on OMAE*.