

◎ 論 文

大形海洋構造物에 作用하는 波浪荷重에 관하여⁺

洪道天* · 洪思榮* · 李尚武*

On the Wave Loads on a Large Volume Offshore Structure

Do Chun Hong, Sa Young Hong and Sang Moo Lee

Key Words : Radiation Wave(방사파), Diffraction Wave(산란파), Linear Wave Theory(선형파 이론), Green Integral Equation(Green 적분방정식), Wave Loads(파랑하중), Wave Drift Force(파랑표류력)

Abstract

The first order motion responses of a floating structure and the hydrodynamic forces in regular waves are obtained by means of the linear potential theory. The first order potential is obtained directly from the numerical solution of the improved Green integral equation which is characterized by the combined surface distribution of sources and normal doublets. The mean second order wave drift force is also calculated by means of the near field method.

It seems that the present method gives more accurate numerical results than other methods and the agreement between numerical and experimental results appears to be satisfactory.

기 호 설 명

ϕ_I : 입사파의 속도포텐셜
 ϕ_0 : 산란파의 속도포텐셜
 ϕ_R : 방사파의 속도포텐셜
 ω : 입사파의 원 주파수
 k_0 : 입사파의 파수
 g : 중력가속도
 a : 입사파의 진폭
 β : 입사파의 진행방향이 X축과 이루는 각
 λ : 입사파의 파장
 a_q : 물체의 q방향의 복소운동 진폭
 θ_q : 물체의 q방향 좌표축 물체의 복소회전운동 진폭
 CI_{p0} : 물체의 무차원 inertia 계수
 CM_{p0} : 무차원 부가 질량 계수
 CA_{p0} : 무차원 조파 감쇠 계수
 CS_{p0} : 무차원 복원력 계수

CF_p : 무차원 파기진력 계수
 p : p축 방향성분
 q : q축 방향 운동
 O_1 : 물체의 회전중심
 W_0 : 물체의 수선면
 WL : 물체의 수선
 S_0 : 물체의 침수 표면
 η_r : 수선에서의 상대좌표
 D : 유체영역
 \vec{n}_0 : 물체표면에서 유체영역으로 향한 법선벡터
 L : 물체의 특성길이

1. 서 론

대형 해양구조물에는 반잠수식 platform과 같은 부유형과 중력식 platform과 같은 착저형이 있고 최근에는 TLP(tension leg platform)라 하여 taut mooring에 의해 고정된 부유형 해양구조물도 출현하였다.

⁺ 1986년도 한국해양공학회 추계 학술대회 발표(1986년 12월)

* 정회원, 한국 기계연구소, 대덕선박 분소

이들에 작용하는 설계의력으로는 파랑하중, 풍력, 조류력, 지진력 및 얼음에 의한 하중등이 있으나 파랑하중의 영향이 가장 중요하다고 말할 수 있다. 파랑하중은 구조물이 설치될 대상해역에서 강기간에 걸쳐 측정된 파랑자료를 사용하여 design wave method와 wave-energy spectral-density method의 양자를 사용하여 추정되고 있다. 상기 2가지 방법중에서 전자는 특정파고 및 특정주기를 갖는 파랑에 대한 하중계산을 요하며 후자는 다수의 주기에 대하여 주기별로 수행할 것을 요구하고 있다.

한편 대형해양구조물의 특성장은 보통과장의 5분의 1을 넘고 있으며 이러한 경우에는 선형 diffraction 이론에 의한 파랑하중의 계산이 필요하며 본고에서는 이에 관한 계산방법과 선형운동응답 및 시간평균표류력에 관한 계산예를 소개하기로 한다.

2. 이 론

해양구조물이 강제이고 입사파가 Airy wave로 나타낼 수 있을때 구조물에 작용하는 파랑하중은 입사파와 입사파가 구조물에 의해산란된 산란파 및 입사파에 의해 기진된 구조물의 강제운동에 의해 생성되는 방사파의 세가지 파에 의해 생긴다. 여기서 유체는 비점성, 비압축성이고 유동은 비회전성이라고 가정하였다. 좌표계는 구조물의 수신면 내에 원점을 둔 직각좌표계(x, y, z)로서 z 축의 양의 방향이 중력의 작용방향과 반대방향이고 xy 평면은 정지시의 자유표면과 일치한다.

이러한 가정하에서 유체입자의 속도 \vec{V} 는 속도포텐셜

$$\Phi = R_e\{\phi(x, y, z)EXP(-i\omega t)\}$$

의 gradient로 나타낼 수 있다. ω 는 Airy wave의 원진동수이며 구조물은 이에 의한 조화운동을 하게된다. 여기서 다루는 문제는 주파수 영역에서의 선형경계치 문제로서 결국 복소수로 나타내는 ϕ 를 구하는 것이며 ϕ 는 다음과 같은 세가지 포텐셜의 합으로 나타난다.

$$\phi = \phi_I + \phi_0 + \phi_R \quad (1)$$

윗 식의 ϕ_I 는 입사파의 포텐셜이며 다음식으로 주어진다.

$$\phi_I = \frac{-a\omega}{k_0} e^{k_0 z} EXP[ik_0(x\cos\beta + y\sin\beta)] \quad (2)$$

여기서 a 는 입사파의 진폭이고 β 는 입사파의 진행방향과 x 축과 이루는 각이며 k_0 는 파수로서 다음과 같은 무한수심에서의 dispersion relation을 만족시킨

다.

$$k_0 = \frac{\omega^2}{g} \quad (3)$$

또한 입사파의 파장 λ 는 다음식으로 주어지며

$$\lambda = \frac{2\pi}{k_0} \quad (4)$$

a 는 λ 에 비하여 미소하다고 가정하며 식(2)로 주어지는 입사파는 수심이 유한하더라도 λ 가 수심의 두배가 넘지 않는 한 유효하다.

(1)식에서 ϕ_0 와 ϕ_R 은 각각 산란파 및 방사파의 포텐셜이며 ϕ_R 은 다시 다음과 같이 구조물의 운동속도의 6개 성분에 대응하는 요소 포텐셜과 복소운동변위의 곱의 합으로 나타낸다.

$$\phi_R = -i\omega a \sum_{q=1}^6 A_q \cdot \phi_q \quad (5)$$

여기서 A_q 는 다음과 같이 무차원화된 복소운동변위이고 q 는 강제운동의 성분을 나타낸다.

$$A_q = \begin{cases} a_q/a, & q=1, 2, 3 \\ \theta_{q-3}L/a, & q=4, 5, 6 \end{cases} \quad (6)$$

a_1, a_2 및 a_3 는 x, y 및 z 축에 평행한 왕복운동 변위이고 θ_1, θ_2 및 θ_3 는 x, y 및 z 축에 평행한 회전축에 대한 각 변위이고 L 은 물체의 특성장이다.

속도 포텐셜 $\phi_i (i=0, 1, 2, 6)$ 는 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

$$\nabla^2 \phi_i = 0 \quad ; \text{유체영역 } D \text{내에서} \quad (7)$$

$$-k_0 \phi_i + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} = 0 ; z=0 \text{인 } F \text{상에서} \quad (8)$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \frac{\partial \phi_i}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial n_0} = \begin{cases} n_i, & i=1, 2, 6 \\ -\frac{\partial \phi_I}{\partial n_0}, & i=0 \end{cases} \quad ; \text{침수표면 } S_0 \text{상에서} \quad (10)$$

여기서 n_0 는 S_0 에서 D 쪽으로 향한 법선 벡터이고 n_i 는 다음과 같다.

$$n_i(M) = \begin{cases} \vec{e}_i \cdot \vec{n}_0(M), & i=1, 2, 3 \\ \vec{e}_{i-3} \cdot [(\vec{O}_1 \vec{M})/L] \times \vec{n}_0(M), & i=4, 5, 6 \end{cases} \quad ; M \in S_0 \quad (11)$$

여기서 $\vec{O}_1 \vec{M}$ 은 물체의 회전중심 O_1 에서 S_0 상의 한 점 M 으로 향한 벡터이고 $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ 는 각각 x, y 및 z 방향의 단위 벡터이다. $\phi_i (i=0, 1, 2, \dots, 6)$ 는 또한 산란파 및 방사파의 진행 방향은 물체로 부터 무한원 방향으로 향해야 한다는 방사경계 조건을 만족시켜야 한다.

이러한 문제는 (7), (8), (9) 및 방사경계 조건을

만족시키는 Green 함수를 사용한 개량된 Green 적분 방정식을 사용하여 쉽게 풀릴 수 있다.^{1,2,3)}

$$\begin{aligned} & \frac{\phi_i(\rho)}{2} + \iint_{S_0} \phi_i(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} dS_M \\ & = \iint_{S_0} \frac{\partial \phi_i(M)}{\partial n} G(P, M) dS_M, P \in S_0 U W_0 \end{aligned} \quad (12)$$

윗식에서 $G(P, M)$ 은 Green 함수로서 부록에 나타낸 바와 같이 표현되며 M 은 source point, P 는 field point이다. 유체역학적으로 $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ 와 ϕ 는 각각 물체표면에 분포된 source와 normal doublet의 단위면적당의 강도이다. W_0 는 물체내부의 교환되지 않는 자유 표면에 해당되는 수선면을 나타내며 식에서 보는 바와 같이 수선면 상에 doublet를 분포시키면 종래의 Green 적분 방정식의 취약점이었던 특이파수 현상이 제거된다.

(12)식을 풀면 물체 표면에서의 ϕ_i 가 얻어지므로 물체의 운동이 없는 경우, 즉 입사파와 산란파만 있는 경우에는 물체 표면에 작용하는 동압력은 Bernoulli 공식을 사용하면 다음과 같이 얻어진다.

$$P_s = -\rho(-i\omega\phi_s + \frac{1}{2}|\vec{\nabla}\phi_s|^2) \quad (13)$$

윗식에서 ϕ_s 는 ϕ_i 와 ϕ_0 의 합이며, 속도자승은 미소하다고 가정했으므로 이를 무시하면 구조물에 작용하는 힘과 모멘트는 다음과 같이 얻어진다.

$$F_p = -i\rho\omega \iint_{S_0} \phi_s \cdot \vec{n}_0 \cdot \vec{e}_p dS, p=1, 2, 3 \quad (14)$$

$$M_p = -i\rho\omega \iint_{S_0} \phi_s (\vec{O}_1 M \times \vec{n}_0) \cdot \vec{e}_p dS, p=1, 2, 3 \quad (15)$$

한편 물체의 운동이 있는 경우에는 (12)식의 해를 사용한 주파수 영역에서의 물체의 운동방정식으로 부터 $A_q (q=1, 2, \dots, 9)$ 를 구하여야 한다.

$$\begin{aligned} & \sum_{q=1}^6 \left[\frac{V}{L^3} CI_{pq} + CM_{pq} - \frac{CS_{pq}}{k_0 L} + iCA_{pq} \right] A_q \\ & = -CF_p, p=1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,

$$CF_p = \begin{cases} F_p / \rho a \omega^2 L^3 \\ M_{p-3} / \rho a \omega^2 L^4 \end{cases} \quad (17)$$

$$CM_{pq} = \frac{-1}{\rho L^3} \iint_{S_0} R_s \phi_q \cdot \vec{n}_p dS \quad (18)$$

$$CA_{pq} = \frac{-1}{\rho L^3} \iint_{S_0} I_m \phi_q \cdot \vec{n}_p dS \quad (19)$$

CI_{pq} 와 CS_{pq} 는 부록에 나타나 있으며 V 는 물체의 배수용적이다.

(16)식의 해로부터 A_q 를 구하면 (5)식으로 부터 ϕ_R 을 얻게 되고 먼저 구한 ϕ_s 와 ϕ_R 의 합이 전체 포텐셜이 된다. 이로부터 표면에 작용하는 전체 등압력 분포를 알게 된다.

$$P = -\rho(-i\omega\phi + \frac{1}{2}|\vec{\nabla}\phi|^2) \quad (20)$$

윗식에서 속도자승은 미소하므로 이를 무시하나 입사파의 진폭이 큰 경우나 물체의 운동이 큰 경우에는 이를 처음부터 고려한 비선형경계조건을 사용하여 문제를 풀어내야 한다.

한편 전술한 바와 같은 선형문제의 해로부터 구조물에 작용하는 시간평균표류력을 구할 수 있다. 이는 원래 비선형 문제이나 비선형 포텐셜은 시간평균 표류력에 영향을 주지 않으므로 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \frac{\rho}{4} g \int_{WL} \eta_r \eta_r^* \vec{n}_0 dl + \frac{\rho}{4} \iint_{S_0} \vec{\nabla}\phi \cdot \vec{\nabla}\phi^* \vec{n}_0 dS \\ &+ \frac{\rho}{2} \iint_{S_0} R_s \{-i\omega\vec{E}^* \cdot \vec{\nabla}\phi\} \vec{n}_0 dS \\ &- \frac{1}{2} \omega^2 \rho V R_s \{ \vec{\theta}^* \times \vec{a} \} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \vec{M} &= \frac{\rho}{4} g \int_{WL} \eta_r \eta_r^* (\vec{O}_1 M \times \vec{n}_0) dl \\ &+ \frac{\rho}{4} \iint_{S_0} \vec{\nabla}\phi \cdot \vec{\nabla}\phi^* (\vec{O}_1 M \times \vec{n}_0) dS \\ &+ \frac{\rho}{2} \iint_{S_0} R_s \{-i\omega\vec{E}^* \cdot \vec{\nabla}\phi\} (\vec{O}_1 M \times \vec{n}_0) dS \end{aligned} \quad (22)$$

윗식에서 O_1 은 물체의 회전중심이며 *표는 공액복소수를 뜻하고 WL 은 수선이다. η_r 은 수선에서의 상대 파고를 의미하며 다음식으로 나타낸다.

$$\eta_r = \frac{i\omega}{g} \phi(M) - \vec{E}(M) \cdot \vec{e}_3, M \in WL$$

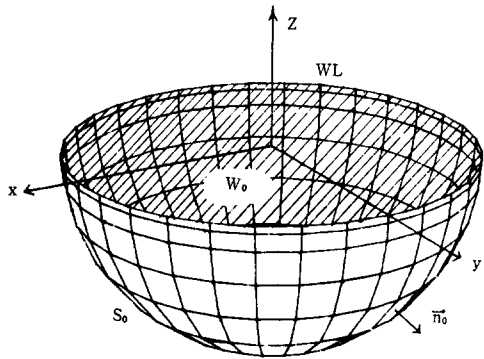
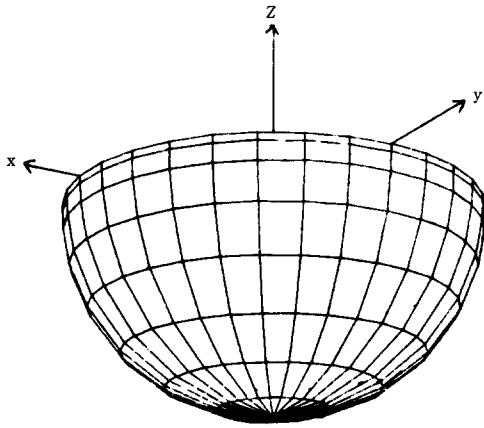
\vec{a} , $\vec{\theta}$ 및 \vec{E} 는 다음과 같다.

$$\vec{a} = \sum_{q=1}^3 a_q \vec{e}_q, \quad \vec{\theta} = \sum_{q=1}^3 \theta_q \vec{e}_q$$

$$\vec{E} = \vec{a} + \vec{\theta} \times \vec{O}_1 M$$

3. 수치계산결과

수치계산은 한국기계연구소에서 개발된 전산 프로그램인 DIFFRAN에 의해 수행되었다. DIFFRAN은 유한수심에서의 계산도 수행하고 있으나 여기서는 무한 수심에서의 계산결과를 우선 소개한다. 이문



$N_F=256$: total number of facets on hull
 $N_W=32$: total number of waterline line elements
 $L=1\text{ m}$: radius of sphere

Fig.1 Distribution of facets on the sphere and the coordinate system

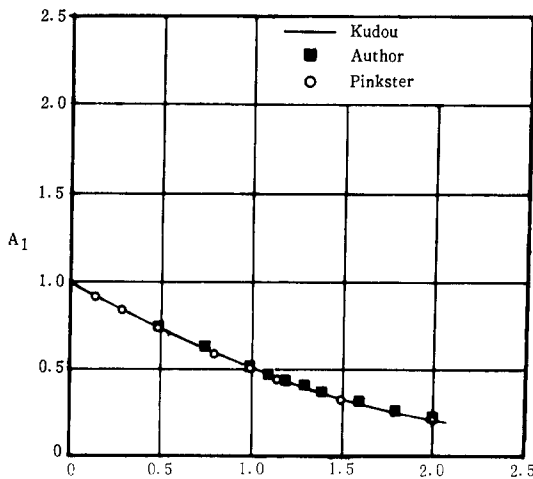


Fig.2 First order surge motion response

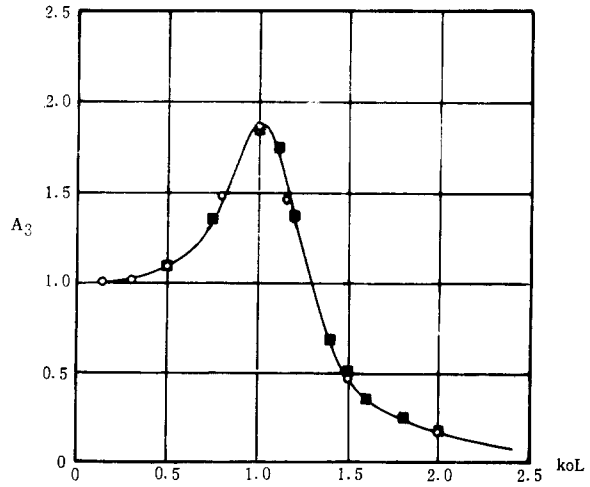


Fig.3 First order heave motion response

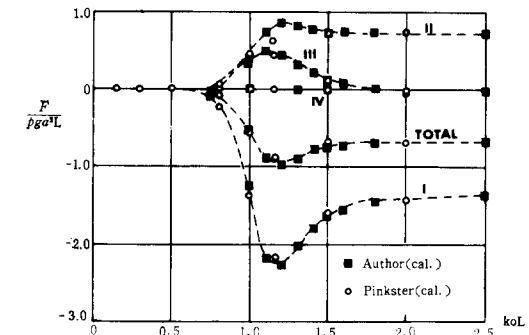
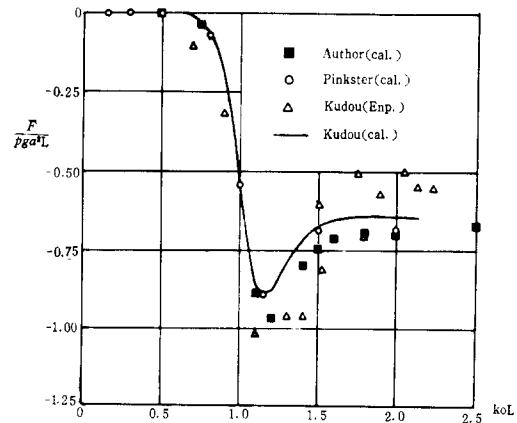


Fig.4 Mean second order horizontal drift force and its components

및 전산 프로그램의 성능을 확인하기 위해 반구형의 부유구조물에 대한 운동응답 및 시간평균표류력의 koL 계산치를 Kudou와 Pinkster의 계산결과 및 Kudou의 실험결과와 비교하였다.^{4,5)}

Fig.2와 Fig.3에서 보는 바와 같이 운동응답은 다른 계산치와 잘 일치하고 있으나 Fig.4에서 보는 바와 같이 수평방향 시간평균표류력은 약간의 차이를 보이고 있다. 여기에서 I, II, III, IV는 (21)식에 나타난 4가지 성분을 표시하며 특히 II로서 나타난 (21)식 중의 2번째 성분이 무차원 파수가 1.2인 부근에서 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 이는 Fig.3에서 보는 바와 같이 상하 동요의 공진무차원파수가 1부근이므로 공진점 부근에서의 물체 표면에서의 방사파에 의한 속도 계산의 정확도의 차이에 기인한다고 생각된다.

그런데 본 논문의 방법이 Fig.4에서 보는 바와 같이 Kudou의 실험결과와 가장 좋은 일치를 보이고 있다.

Pinkster의 계산은 source 적분방정식에 의한 것이고 Kudou의 계산은 Kochin함수를 이용한 것이다.

4. 결 론

본 논문의 방법을 사용하여 3차원 해양구조물에 작용하는 동유체압력분포 및 시간평균표류력을 구할 수 있다. 종래의 source 적분방정식보다 본 논문의 개량된 Green 적분방정식에 의한 계산결과가 보다

실험치에 접근함을 보였고 따라서 배수량이 큰 입의 형상의 복잡한 3차원 해양 구조물에 작용하는 파랑 하중을 보다 효과적으로 추정하리라 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) John, F., "On the Motion of Floating Bodies", Communicatons on pure and Applied Mathematics, Vol. 3, 1950
- 2) Guevel, P. et al., "Oscillations des corps flottants soumis aux actions de la houle", Bulletin de l'ATMA, Vol. 78, 1978
- 3) Hong, D.C., "On the Improved Green Integral Equation applied to the Water-Wave Radiation-Diffraction Problem", 대한조선학회지 제24권 1호, 1987.3
- 4) Kudou, K., "The Drifting Force acting on a Three-dimensional Body in Waves", 일본조선학회 논문집 제141호
- 5) Pinkster, J.A., "Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures", NSMB Publication No.650

부 록

Green함수는 다음과 같이 나타낸다.

$$G(P, M) = -\frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{1}{|PM|} + \frac{1}{|PM_1|} + [1 - \delta(z_p - 0) \cdot \delta(z_m - 0)] H(p, m) \right\}$$

$$H(P, M) = \frac{2k_0}{\pi} \mathbf{R}_p \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \xi_1(\xi) + i\pi d\theta + 2ik_0 \mathbf{R}_m \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{t\theta} d\theta$$

$$|PM| = \sqrt{(x_p - x_m)^2 + (y_p - y_m)^2 + (z_p - z_m)^2}$$

$$|PM_1| = \sqrt{(x_p - x_m)^2 + (y_p + y_m)^2 + (z_p + z_m)^2}$$

$$\xi = k_0 \{ z_p + z_m + i[(x_p - x_m) \cos\theta + (y_p - y_m) \sin\theta] \}$$

$$\xi_1(\xi) = \begin{cases} E_1(\xi), & \mathbf{I}_m(\xi) > 0 \\ E_1(\xi) - 2i\pi, & \mathbf{I}_m(\xi) < 0 \end{cases}$$

$E_1(\xi)$ 는 complex exponential integral 이다.

한편 $CI_{\rho\rho}$ 와 $CS_{\rho\rho}$ 는 무차원 inertia 계수 및 무차원 복원력 계수이며 그 중 영이 아닌 계수들은 다음과 같다.

$$CI_{99} = 1, \quad \rho = 1, 2, 3$$

$$CI_{44} = \frac{1}{ML^2} \int_M (y'^2 + z'^2) dM$$

$$CI_{55} = \frac{1}{ML^2} \int_M (x'^2 + z'^2) dM$$

$$CI_{66} = \frac{1}{ML^2} \int_M (x'^2 + y'^2) dM$$

$$CI_{15} = CI_{51} = \frac{z_G - z_{O1}}{L}$$

$$CI_{16} = CI_{61} = \frac{-(y_G - y_{O1})}{L}$$

$$CI_{24} = CI_{42} = -CI_{15}$$

$$CI_{26} = CI_{62} = \frac{(x_G - x_{O1})}{L}$$

$$CI_{34} = CI_{43} = -CI_{16}$$

$$CI_{35} = CI_{53} = -CI_{26}$$

$$CI_{45} = CI_{54} = -\frac{1}{ML^2} \int_M x' y' dm$$

$$CI_{46} = CI_{64} = -\frac{1}{ML^2} \int_M x' z' dm$$

$$CI_{56} = CI_{65} = -\frac{1}{ML^2} \int_M y' z' dm$$

윗식에서 G 는 무게중심이고 모우멘트는 회전중심 O_1 을 지나고 x, y, z 축에 평행한 축을 기준하였고 x', y', z' 은 다음과 같다.

$$x' = x - x_{O1}$$

$$y' = y - y_{O1}$$

$$z' = z - z_{O1}$$

$$CS_{33} = \frac{A_w}{L^2}, \quad CS_{34} = \frac{1}{L^3} \iint_{W_0} y' dW_0$$

$$CS_{35} = -\frac{1}{L^3} \iint_{W_0} x' dW_0, \quad CS_{43} = CS_{34}, \quad CS_{53} = CS_{35}$$

$$CS_{44} = \frac{1}{L^4} [V(z_B - z_G) + \iint_{W_0} y'^2 dW_0]$$

$$CS_{55} = \frac{1}{L^4} [V(z_B - z_G) + \iint_{W_0} x'^2 dW_0]$$

$$CS_{45} = -\frac{1}{L^4} \iint_{W_0} x' y' dW_0, \quad CS_{34} = CS_{45}$$

윗식에서 A_w 는 수선면의 면적이고 V 는 배수용적이며 z_B 는 부심의 z 좌표이다.

<p. 48에서 계속>

GEOTECHNICAL ENGINEERING

Marine Soil and Soil Mechanics
Arctic Soil
Water-Soil Interactions
Structure-Soil Interactions
Modeling
Foundations

Concrete Materials

Special Steels
Welding and Inspection
Low Temperature Welding
Tubular Goods
Stress Concentration
Fatigue and Fracture Control
Corrosion Control

OFFSHORE AND ARCTIC PIPLINES

Arctic Pipelines
Design/Laying
Materials
Welding/Inspection
Coating
Deepwater Flowlines
Transportation and Monitoring
Pipeline-Soil Interactions
Loads and Vibrations
Scouring
New Trenching Methods

COMPUTER TECHNOLOGY

CAD, CAE and CAM, and Automation
CAD for Weldment
Graphics Applications
Robots for Offshore Manufacturing
Underwater Robotics
Artificial Intelligence
Expert Systems
Rig Managements
Simulation and Control
Micro-Computers in Engineering

MATERIALS ENGINEERING

Arctic and Offshore Materials
Weldability
Composite Materials

OCEAN ENERGY TECHNOLOGY

OTEC
Waves, Currents and others

Send two copies of abstracts in 300-400 words for review to:
Dr. Jin S Chung, OMAE Conference Committee, Colorado School of Mines, 1500 Illinois Street,
Golden, CO 80401 U. S. A: (303) 273~3673; Telex 910-934-0190 CSM GLDN or directly mail
to: Organizer