

실린더에 작용하는 파력 및 조류력에 관한 연구

박광동* · 조효제** · 구자삼***

*(주)한진중공업 기본설계부, **한국해양대학교 해양시스템공학부, ***부경대학교 조선해양시스템공학과

A Study of Wave and Current Forces on Cylinders

KWANG-DONG PARK*, HYO-JAE JO** AND JA-SAM GOO***

*Basic Design Dept., HanJin Heavy Industries & Construction Co. Ltd, Korea

**School of Ocean System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

***Department of Naval Architecture & Marine System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

KEY WORDS: Morison equation 모리슨방정식, Diffraction theory 산란파이론, Multiple cylinders 복수실린더, Semisubmersible structure 반잠수식구조물, Wave forces 파력, Current forces 조류력

ABSTRACT: In this paper, the wave and current forces acting on cylinders are investigated by theoretical and experimental methods. The models used are one-cylinder, four-cylinder and semi-submersible types. The theoretical investigations are carried out by the Morison equation and three dimensional source distribution method to calculate exciting forces in waves with and without currents. The experimental investigations are carried out in the wave tank which can generate currents in both directions. In these tests, the models have been exposed to the regular waves with and without currents. It is shown that the exciting forces acting on the one-cylinder or four-cylinders can be approximately estimated by the Morison equation and also by the diffraction theory. However, the Morison equation seems to be not appropriate to estimate the exciting forces on the present type of semi-submersible.

1. 서 론

오랜 역사를 가지고 많은 경험과 연구를 바탕으로 발전되어 온 선박에 비해, 본격적으로 해양구조물을 건조하고 설치한 것은 1950년대에 이르러 해양석유 생산을 위한 구조물에서부터 시작이 되었다. 특히, 해저유전이 점점 심해로 옮겨감에 따라, 새로운 개념들의 부유식 해양구조물들이 연구 개발되어 오고 있다. 부유 해양구조물들에 관한 연구는 해양 석유개발을 위한 석유시추선 뿐만 아니라, 해상공항, 해양플랜트, 해양레저시설 등에도 핵심적인 연구분야의 하나이다. 따라서, 각 주어진 기능을 성공적으로 수행할 수 있고 안전하게 가동될 수 있는 부유 해양구조물의 설계를 위해서는 부유 해양구조물에 작용하는 외력을 정확하게 평가하는 것이 중요한 연구과제이다.

본 논문에서는 파와 조류가 공존할 때에 실린더부재로 구성되어 있는 반잠수식 해양구조물을 대상으로 하여 이에 작용하는 외력을 추정하는데 그 목적을 두었다. 파와 조류가 공존할 경우 운동학적 측면에서는 Peregrine(1976)가 여러 가지의 조건하에서 파와 조류 상호간의 간섭효과를 체계적으로 정리하였고, Mei(1983)는 WKB방법을 사용하여 파동방정식을 유도함으로써 파장, 파속, 파진폭 변화 등에 관하여 논하였다. 그리고 역학적인 측면에서는 Grue(1986)가 특이점 분포법을 이용하여 완전 잠

수된 원형 실린더에 대하여 압력, 부가질량력, 감쇠력, 기진력 등을 계산하였고, Zhao와 Faltinsen(1988)은 자유수면을 가진 임의 형상의 물체에 대하여 경계요소법을 이용하여 외력을 계산한 결과 조류가 표류력에 크게 영향을 미친다는 것을 보고하였다. Kim 등(1997)은 시간 영역에서 고차경계요소법을 사용하여 임의 형상의 물체에 작용하는 외력 및 런업(run-up)을 계산하여 조류가 표류력 및 런업에 많은 영향을 미친다고 보고하였다.

본 논문에서는 반잠수식 구조물의 주된 부재인 실린더에 작용하는 외력의 산정을 위하여 관성력과 항력으로 표현되는 Morison 방정식과 산란파이론을 적용한 3차원 특이점분포법을 적용하였다. 그리고 이들을 수조실험으로 얻어진 실험결과와 비교 검토하였다. 계산 및 실험모델은 단독 실린더, 4개로 구성된 복수실린더 그리고 하부폰툰(pontoon)을 부착한 반잠수식 구조물을 채택하였다. 실린더에 작용하는 파력에 대해서 조사한 결과 구조물의 직경에 대한 파장비(D/L)가 비교적 작은 경우에도 산란파이론이 잘 일치하고 있고, 특히 실린더가 복수로 있거나 하부폰툰을 가지고 있는 복합구조물의 경우에는 부재간의 상호 간섭효과가 고려된 산란파이론을 적용하는 것이 타당함을 알 수 있다. 그리고 파와 조류가 공존할 때의 파력을 조사한 결과 파의 진행방향과 조류의 방향이 같을 때 보다 반대 방향일 경우 더 크게 작용하는 것으로 나타난다.

2. 파력 및 조류력의 이론적 계산

본 논문에서는 심수역에서 규칙파와 조류가 공존하고 있을 때, 해양구조물에 작용하는 파력 및 조류력을 계산하였다. 반점수식 구조물의 경우 실린더 부재로 구성되어 있어, 직경 파장비 (D/L)가 작지만 KC수 역시 작은 값을 가져 관성력항이 지배적 이므로 일반적으로 Morison방정식이나 산란파 이론 어느 쪽을 적용시켜도 무방하다. 따라서 본 논문에서는 두가지 계산법에 의거하여 계산을 수행하여 실험치와 비교함으로서 계산법의 적용성을 검토한다. 여기서는 본 계산에 사용된 Morison방정식과 산란파이론에 의한 파력 계산법을 간단하게 소개한다.

2.1 Morison 방정식

본 논문에서는 유체입자의 상대가속도와 상대속도를 이용한 일반화된 Morison방정식을 도입하여 구조물에 작용하는 힘을 계산하였다. 실린더의 미소 부분에 대한 힘을 관성력과 항력항으로 표현하면 다음과 같다.

$$dF = \rho C_M \Delta \dot{u} + \frac{1}{2} \rho C_D A (u \pm U) |u \pm U| \quad (1)$$

여기서,

A : 미소 요소의 투영면적

Δ : 미소 요소의 배수용적

u : 파에 의한 유체 입자의 수평 방향 속도

\dot{u} : 파에 의한 유체 입자의 수평 방향 가속도

C_M : 질량력계수

C_D : 항력계수

U : 조류의 속도

위에서 얻어지는 힘을 실린더 전체에 걸쳐 적분함으로서 전체에 작용하는 힘을 얻을 수 있다. 그리고 복수 실린더의 경우에는 각 실린더의 위치에 따라 파력의 위상을 고려해야 하고 이를 선형파이론을 적용하여 파력을 나타내면 다음과 같이 된다.

$$F = \frac{C_D \rho D}{4k} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 (1 - e^{2kz}) \cos(kx - wt) | \cos(kx - wt) | + \frac{C_M \rho \pi^3 D^2 H}{2 T^2 k} (1 - e^{kz}) \sin(kx - wt) \quad (2)$$

여기서, T : 파주기

k : 파수

H : 파고

그리고 구조물이 복합부재로 구성되어 있을 때 조류만에 의한 힘은 각 부재에 작용하는 힘을 중첩하여 다음과 같이 나타낸다.

$$F_C = \frac{1}{2} \rho \sum_i C_{D,i} A_i |U| U \quad (3)$$

여기서, $C_{D,i}$: 구성부재의 항력계수

A_i : 구성부재의 투영면적

2.2 산란파 이론에 의한 파력

일반적으로 임의형상의 대형구조물에 작용하는 파랑강제력의 계산은 산란파이론을 적용하여 계산하고 있다. 본 논문에서도 반점수식 구조물에 대해서 3차원 특이점분포법(이, 1998; Greenberg, 1971)을 적용하여 파력을 계산하고 결과를 실험치 및 Morison방정식에 의한 결과와 서로 비교하여 적용성을 검토한다. 물체표면에 특이점을 분포하였을 때 유체 영역내에서의 속도포텐셜은 특이점의 강도와 Green함수를 이용하여 다음식과 같이 표현된다.

$$\phi(P) = \int \int_{S_H} \sigma(Q) G(P, Q) dS \quad (4)$$

본 논문에서 사용한 Green 함수는 다음식과 같이 표현된다. (일본조선학회, 1974)

$$G = G_c + iG_s \quad (5)$$

여기서,

$$G_c = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \pi k e^{k(z+\xi)} \times [H_o(kR) + Y_o(kR)] + 2 k e^{k(z+\xi)} \int_0^{(z+\xi)} \frac{e^{-ks}}{\sqrt{s^2 + R^2}} ds$$

$$G_s = 2 \pi k e^{k(z+\xi)} J_0(kR)$$

단,

$$R = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$H_o(kR)$: 0차의 제1종 Hankel function

$Y_o(kR)$: 0차의 제2종 Bessel function

$J_0(kR)$: 0차의 제1종 Bessel function

3차원 임의형상에 대한 파력 계산을 위해서는 물체표면을 유한개의 panel로 분할하고, 각 panel에서의 특이점의 강도를 일정하게 하여 이산화 적분방정식을 수치적으로 풀도록 하였다.

3. 실험방법 및 모형

3.1 실험방법

본 논문에서는 이론계산의 결과를 비교 검토하기 위하여 조파수조를 이용하여 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용된 조파수조는 길이 25m, 폭 1m, 높이 1.1m이며, 퍼스톤형 조파장치와 조류발생 장치를 겸비하고 있다. 조류의 방향은 파진행 방향과 반대 방향으로 발생시킬 수 있다. 파력 및 조류력은 2성분 Load cell로서 측정하였고 수면의 변화량은 servo식 파고계로 유속은 프로펠러식 유속계를 이용하여 계측하였다. 그리고, 대상으로 하는 모형구조물을 load cell에 고정시켜 힘을 계측하고, 구조물의 중심위치에 파고계를 설치하여 파면변위를 측정하였다. 측정된 데이터 값들은 증폭기를 거쳐서 적절한 데이터 값으로 변형된 뒤에 A/D 변환기를 거쳐서 디지털로 변환된 신호가 컴퓨터에 저장된다.

본 실험에서는 수심을 0.8m로 하고 심해조건에 해당하는 파

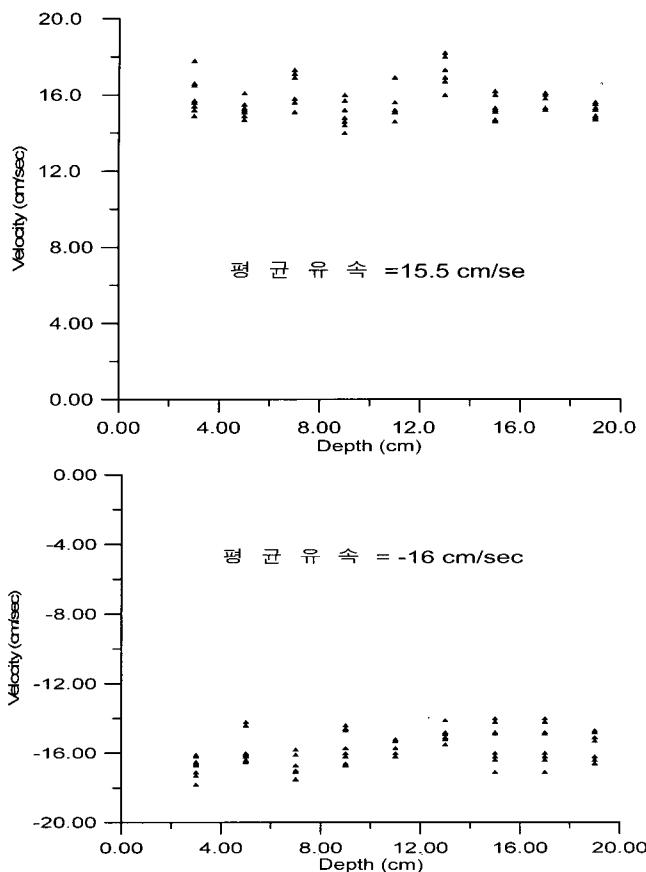


Fig. 1 Variance of current velocity distribution



Fig. 2 Model 1

주기의 범위안에서 실험을 수행하였다. 그리고 파의 진행방향과 조류의 진행방향이 다를 경우의 영향을 조사하기 위하여 조류는 파의 진행방향과 반대방향으로 흐르게 하여 힘과 파면을 계측하였다. 또한 파고의 영향을 조사하기 위하여 동일한 주기의 파에 대하여 파고 즉 최대 파경사각을 달리하면서 파력을 계측하였다.

Fig. 1은 본 실험을 수행한 조파수조에서의 조류속도의 분포를 나타내고 있다. 여기서 임펠러의 회전속도를 같게 하여 양의 값은 파의 진행방향과 같을 경우, 음의 값은 반대의 경우를 나타내고 있다. 이에 따르면 본 실험에 사용된 조류발생 장치는 같은 회전속도로 임펠러를 구동시키더라도 역방향의 경우가 유

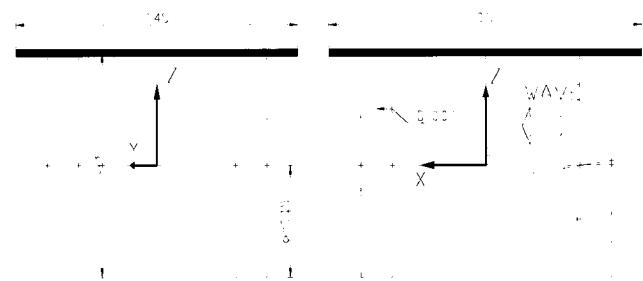


Fig. 3 Model 2

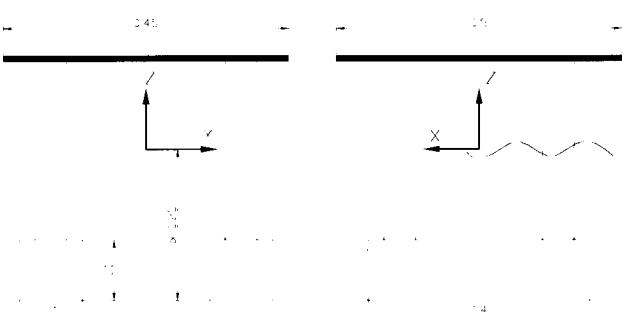


Fig. 4 Model 3

속이 조금 크지는 반면 속도의 분산도 약간 크지는 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

3.2 실험 및 계산 모형

본 논문에서는 실린더의 직경 파장비(D/L)와 KC수가 동시에 작은 값을 가지는 실린더가 파와 조류속에 있을 때, 실린더 하나에 작용하는 외력을 측정하였다.

단독실린더는 Fig. 2와 같이 직경이 70mm이고 흘수가 100mm이다. 다음으로 각 실린더간의 상호간섭효과를 조사하기 위하여 Fig. 3과 같이 실린더간의 간격을 300mm 떨어뜨리고 정방형으로 배치한 모델을 선정하여 외력을 측정하였다. 그리고 마지막으로 하부 폰툰까지 갖춘 반잠수식 구조물을 채택하여 수조시험을 수행하였다. 이는 Fig. 4에 나타내었다.

4. 이론 및 실험 결과의 고찰

여기에서는 주어진 3개의 모형에 대하여 이론적 계산결과와 실험결과를 비교 검토하였다.

Fig. 5는 파랑만이 존재할 때 각 주파수에서의 Surge방향 파력을 나타낸 것으로 □와 +은 각각 파고를 달리하여 측정한 실험치, 실선이 산란파이론에 의한 계산치, 일점쇄선과 이점쇄선이 파고를 달리 했을 때의 Morison식에 의한 계산치, 3점쇄선이 Froude Krylov의 힘만을 나타내었다. 일반적으로 항력이 작으면서 산란파도 적을 경우 근사적으로 Froude Krylov의 힘을 파랑 외력으로 계산하여도 좋다고 되어 있지만(Chakrabati, 1987) 본 계산과 실험 결과에 의하면 Froude Krylov의 힘만으로는 외력을 작게 평가한다는 것을 알 수 있다. 그리고 여기서 사용된 실린

더의 경우 직경 파장비가 0.2보다 작고 KC수는 2~6의 값을 가지고 있다. 실린더하나의 경우에는 Morison 방정식이나 산란이론 어느 쪽의 계산치를 사용하여도 좋지만 산란이론에 의한 계산치가 실험치와 좀더 잘 일치하고 있다. Fig. 6에서는 4개의 실린더로 구성되어 있을 때의 외력을 나타내고 있는데, 1개인 경우와 마찬가지로 산란파이론에 의한 계산이 잘 맞는 것을 보여준다. 단 본 실험을 수행한 주파수 영역내에서는 실린더가 1개인 경우에 주파수가 증가함에 따라서 외력도 증가하는 반면 복수실린더의 경우에는 구조물간의 간섭효과로 인하여 주파수가 증가함에 따라 외력이 감소하고 있는 현상을 보여 주고 있다. Fig. 7에서 나타내고 있는 반점수식 모델인 경우는 하부 폰툰을 파 진행방향과 일치하게 놓았기 때문에 Morison 방정식에서는 Surge외력에 미치는 폰툰의 영향을 반영할 수 없기 때문에 외력 추정에 상당한 오차를 포함하고 있다. 따라서 반점수식 모델의 경우에는 하부 폰툰에 의한 외력까지 충분히 포함하고 있는 산란이론을 사용하여 외력을 추정할 필요가 있다.

Fig. 8은 실린더가 단독으로 있을 경우 파와 조류가 공진하고 있을 때 Surge방향의 외력을 나타낸다. 그림중 (a)는 파와 조류

의 진행방향이 서로 일치 할 때의 (b)는 역방향일 때의 외력의 진폭을 각각 나타내고 있다. 여기서 Morison방정식은 (1)식을 이용하여 계산을 수행하여 결과를 점선들로 나타내었고, 산란파이론의 경우에는 파력과 조류력을 각각 구하여 선형중첩하여 실선으로 나타내었다. 여기에서 이론값은 대체로 비슷한 값으로 나

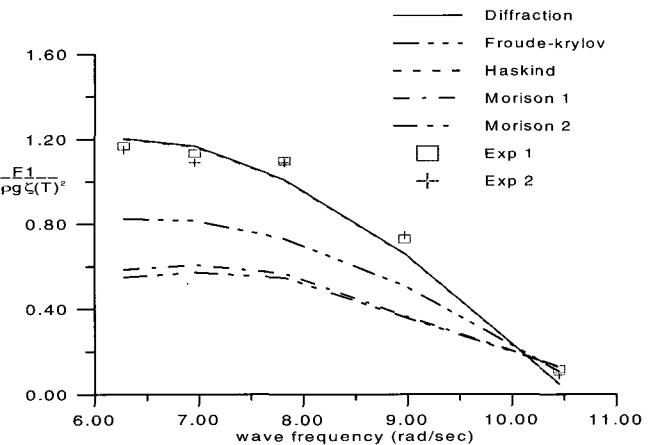


Fig. 7 Wave forces on model 3 (without current)

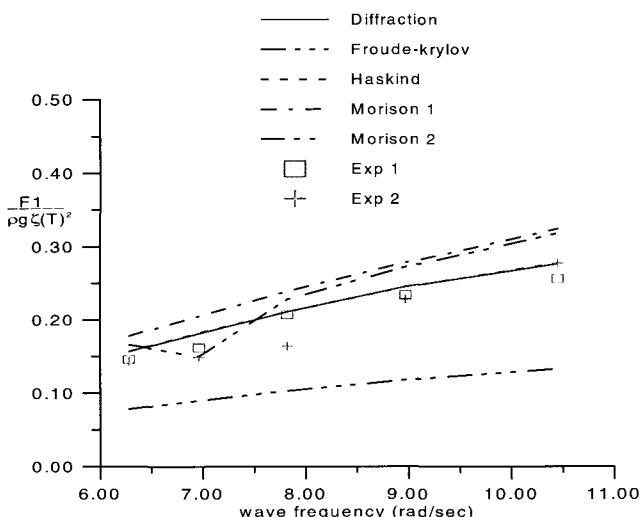


Fig. 5 Wave forces on model 1 (without current)

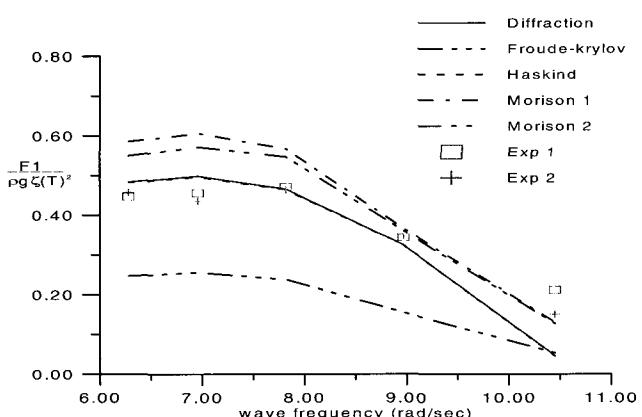
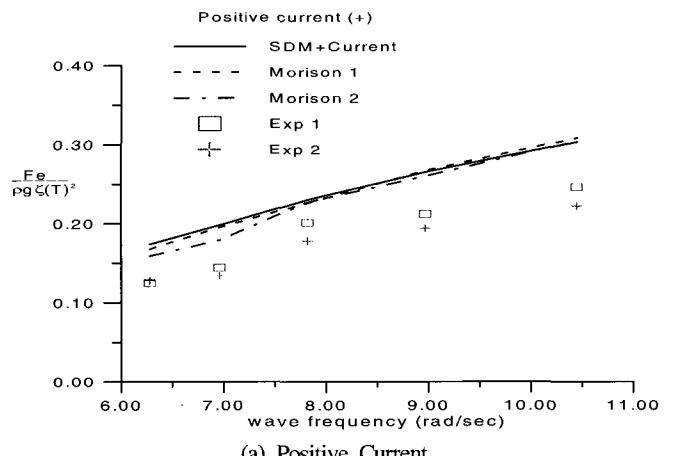
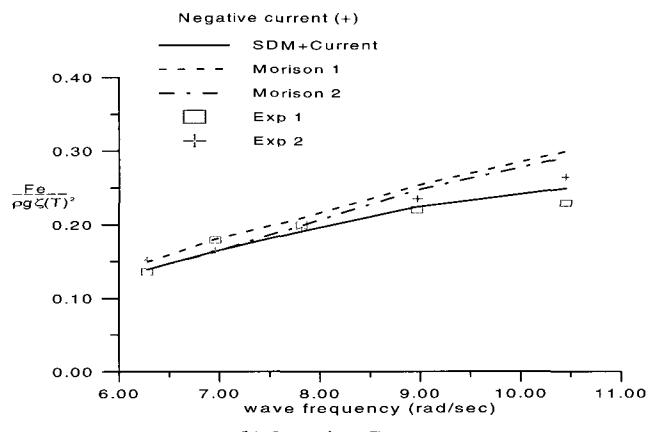


Fig. 6 Wave forces on model 2 (without current)



(a) Positive Current



(b) Negative Current

Fig. 8 Surge forces for model 1 (with current)

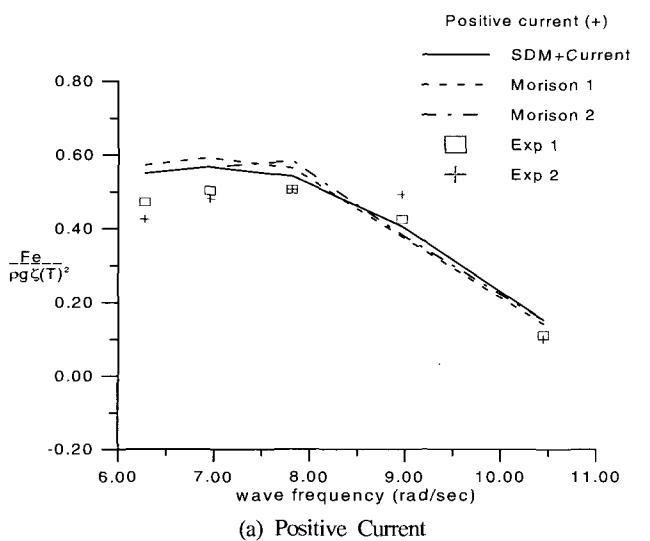
타나고 있으나, 실험치와의 비교에서 파와 조류의 진행방향이 서로 일치 할 때에 실험치가 작게 나타나는 반면, 파와 조류의 진행방향이 서로 반대일 때 실험값은 이론값에 거의 일치하는 것으로 나타나고 있다. 이는 이론 계산에서 파와 조류의 상호간 섭효과를 고려하지 않고 있지만, 실험에 있어서는 상호 간섭에 의해 동일 진행방향의 경우에는 파고가 낮아지고, 역방향의 경우에는 파고가 높아지게 되어 동적외력을 동일 방향의 경우에는 작아지고 역방향의 경우에는 크게 나타나는 것을 설명하고 있다. 단 역방향의 경우 실험값과 이론값이 거의 일치하여 나타나는 것은 이론값이 다소 크게 평가되고 있는 것으로 판단된다. 그렇지만 실린더 하나에 작용하는 복합외력의 추정에는 상호간 섭의 효과를 고려하지 않더라도 근사한 값을 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 9는 실린더 4개에 대해서 Fig. 8과 같은 방법으로 Surge방향의 외력을 나타낸다. 여기서도 실린더가 단독으로 있는 경우와 유사한 경향을 보이고 있지만, 파와 조류의 진행방향이 서로

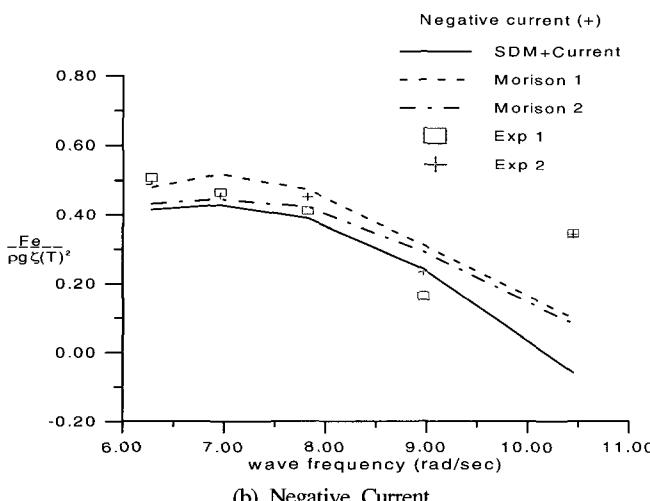
반대일 때 주파수가 증가함에 따라 이론값은 점차 감소하고 있는 반면, 실험값은 감소하다가 주파수 10.5근처에서 급격하게 증가하는 현상을 보여주고 있다. 이는 파와 조류 그리고 구조물과의 복합적인 상호간섭에 기인하는 것으로 보인다.

Fig. 10은 반잠수식 모형에 대하여 마찬가지 방법으로 Surge방향의 외력을 나타낸다. 여기서도 역시 하부폰툰의 영향이 두드러지게 나타나 Morison 방정식에 의한 계산은 실험치과 큰 차이를 보여 반잠수식 구조물의 외력산정 방법으로는 적당하지 않음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 조류와 파랑중의 구조물에 작용하는 선형 동적 외력의 산정에는 파랑중의 산란파이론에서 얻어지는 파력과 조류력을 선형중첩하여 유사값을 얻을 수 있다. 그러나 특별한 주파수에서는 상호간섭효과에 의하여 실험값이 선형 중첩이론값과는 크게 달지는 경우가 발생할 수 있다.

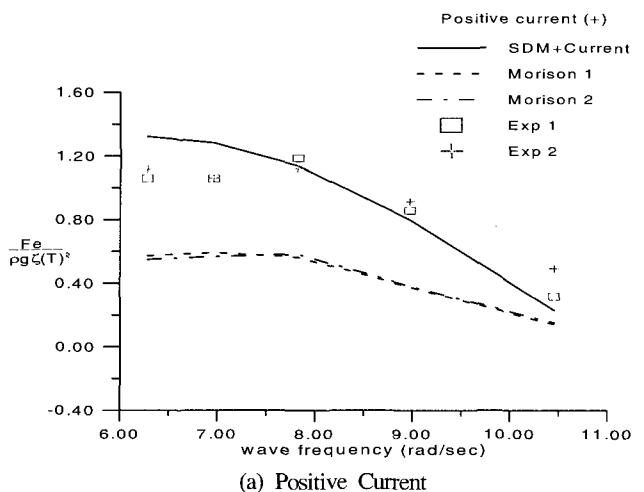


(a) Positive Current

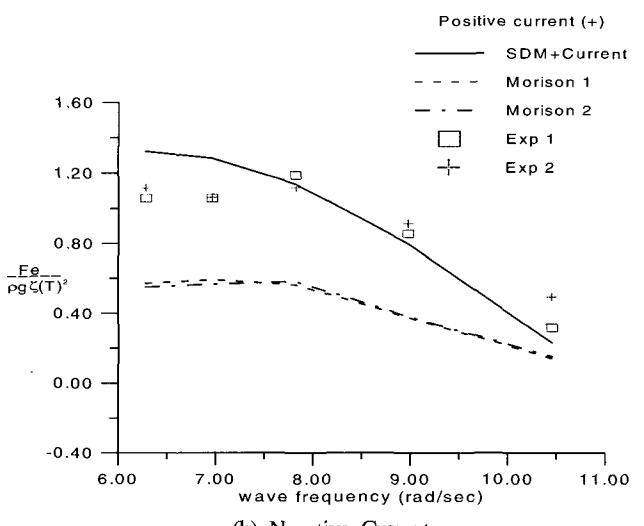


(b) Negative Current

Fig. 9 Surge forces for model 2 (with current)



(a) Positive Current



(b) Negative Current

Fig. 10 Surge forces for model 3 (with current)

5. 결 론

본 논문에서는 파와 조류가 공존할 때 각종 구조물에 작용하는 외력의 산정법에 대하여 이론 및 실험을 통하여 조사를 하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실린더의 직경과 파장비가 0.2보다 작은 경우에도 KC수가 작을 때에는 산란파 이론으로부터 유효한 파력의 추정이 가능하다. 특히 반잠수식 구조물의 경우에는 하부폰툰의 영향으로 산란파이론을 적용하는 것이 바람직하다.
- (2) 파랑과 조류가 공존하고 있을 경우 선형파력을 추정할 때에는 파력과 조류력을 선형중첩하여 계산하여도 양호한 정도의 외력을 얻을 수 있다. 다만 주파수에 따라서는 상호간섭효과에 의하여 실험값이 선형 중첩이론값과는 크게 달지는 경우가 발생할 수 있다.
- (3) 규칙파와 조류가 공존할 때 상호 간섭효과에 의해서 선형 동적외력은 파의 진행방향과 조류의 방향이 같을 때보다 역방향 조류의 경우 더 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 파와 조류가 공존할 때 산란파이론에 의한 파력과 조류력을 선형 중첩하였기 때문에 외력 산정에 서로간의 간섭효과를 이론적으로 고려하지 못했다. 그리고 표류력에 미치는 조류력의 영향에 대해서도 향후 조사할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- 이창호(1998). “불규칙파중의 인장계류식 해양 구조물의 비선형 응답해석”, 공학박사 학위논문, pp 208~224.

- 일본조선학회(1974). “선박유체역학노트(3)”, 일본조선학회지 제 536호.
- Chakrabarti S.K.(1987). “Hydrodynamics of Offshore Structures”, Computational Mechanics Publication, pp 168~231.
- Greenberg, Michael. D(1971). “Application of Green’s Functions in Science and Engineering”, Prentice-hall, pp 51~92.
- Grue, J.(1986). “Time-periodic wave loading on a submerged circular cylinder in a current”, Journal of ship research, Vol. 30, No. 3, pp 153~158.
- Kim D.J. and Kim M.H.(1997). “Wave-Current-Body Interaction by a Time-Domain High-Order Boundary Element Method”, 7th ISOPE, Vol. 3, pp 107~115.
- Mei C.C.(1983). “The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves”, John Wiley & Sons, pp 89~108.
- Peregrine D.H.(1976). “Interaction of Water Waves and Currents”, Advances in Applied Mechanics Academic press, Vol. 16, pp 9~117.
- Sarpkaya T.(1981). “Mechanics of wave forces on offshore structures”, VNR, pp 242~252.
- Zhao R. and Faltinsen O.M.(1988). “Interaction between Waves and Current on a Two-Dimensional Body in the Free Surface”, Applied Ocean Research, Vol. 10, No. 2, pp 87~99.

2001년 10월 4일 원고 접수

2001년 11월 8일 수정본 채택