

고정 부유식 구조물의 유동 및 난류구조 해석에 관한 연구 A Study on Analysis of Flow Structure and Turbulence for rectangular floating Fixed barge

윤중성¹, 서승철², 정광효³, 김명규⁴

Yoon Jung Sung, Seo Seung Chul, Jung Kwang Hyo, Kim Myoung Kyu

1. 서 론

방파제는 대표적으로 케이슨식 방파제나 경사식 방파제 같은 중력식 방파제를 들 수 있으나 이들 중력식 방파제는 뛰어난 방파기능으로 항만 내의 시설을 보호하는 점은 탁월한데 비해 만내의 해수유동의 저하로 인한 수질의 악화 및 해빈 침식 등의 영향이 항내에 발생하는 것 또한 사실이다. 중력식 방파제의 단점을 해결하고 해저지만이나 수심에 제약이 없고 수질악화의 문제가 없는 부유식 방파제에 대한 필요성이 대두되었고, 그 이후 여러 형태의 부유식 방파제가 개발되었으며 이에 대한 연구가 지금까지 진행되고 있다. Fugazza and Natale(1988)는 실험치와 선형모델을 비교하여 에너지 손실과 부유식 방파제의 반응을 나타내었다. Williams and Abul-Azm(1997)과 Williams 등(2000)은 직사각형 단면의 부유식 방파제의 동수역학적 특성을 나타내기 위해 선형 포텐셜 이론을 적용하였다. Chen 등(2002)은 영역분해법(domain decomposition approach)을 결합한 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 이용하여 부유식 구조물의 와동구조와 흐름분류 형태에 대한 수치해석을 실시하였다.

기존 연구에서는 하나의 case에 대하여 연구하였지만, 구조물이 크기, 파고와 주기에 따른 구조물 주변의 유동 및 난류구조를 해석하였다. 그러나 부유식 방파제의 설치 시의 유동에 관한 연구,

특히 PIV를 이용한 유속 및 난류구조, 와의 특성 등과 관련된 연구는 국내·외를 통틀어 거의 없는 실정이다. 그리고 파동장에서의 구조물의 설치에 따른 유동 및 파동특성의 해석을 위해 VOF법을 이용한 상용프로그램인 CADMAS-SURF(沿岸開發技術研究Center, 2001 이하 CADMAS-SURF)가 개발되어 널리 사용되고 있다. 하지만 CADMAS-SURF를 이용하여 난류 구조를 포함한 유동장을 모의할 경우에 기존 난류모델의 부정확성과 불안정성으로 인해 계산이 불가능한 경우 많았다.

한편 지금까지 부유식 방파제 대한 연구는 주로 반사-투과율에 대한 문제와 파랑변동 및 구조물의 안전성에 중점을 두고 진행되고 있다. 그러나 해역의 수질이나 환경적인 측면이 강조되는 부유식 방파제의 설치 목적을 고려할 때 부유식 방파제의 유동 및 난류 구조에 관한 해명은 부유식 방파제의 설치에 따른 영향을 규명하기 위해서 매우 중요한 점으로 지적할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 PIV(Particle image velocimetry) 시스템을 이용하여 부유식 방파제의 설치에 따른 유동 및 난류구조에 대한 특성을 파악하고, RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) 방정식에 기초하여 VOF법과 $k-\epsilon$ 난류모델을 결합한 수치모델을 이용하여 5가지 Case의 수리모형 실험과의 비교를 통해 고정 부유식 방파제 설치시의 유동 및 난류구조에 대한 메커니즘의 해석을 시도하는 것을 목적으로 한다.

1 인제대학교 토목공학과 부교수

2 인제대학교 토목공학과

3 부산대학교 첨단조선공학연구소 연구교수

4 발표자: 인제대학교 토목공학과

표 1. 수치계산 Case

Case	T(s)	파장(m)	파고(m)
1	0.8	1.00	0.029
2	0.93	1.35	0.016
3			0.027
4	1.2	2.22	0.060
5	2.0	5.05	0.059

2. PIV 시스템을 이용한 수리모형실험

2.1 실험조건

부유식 방파제 설치시의 유동구조를 해석하기 위해 Texas A&M University의 조파수조를 사용하여 수리모형실험을 실시하였다. 그림 1과 같이 수리모형실험에 사용된 수조는 길이 36m, 폭 0.9m, 높이 1.2m이고, 1:5.5 기울기의 감쇠대를 수조 끝에 설치하였으며 이 감쇠대 위에 horsehair 한 층을 설치하여 파의 에너지를 흡수하고 반사를 감소시켰다. 구조물은 길이(L) 0.9m, 폭(B) 0.3m 높이(T_B) 0.01m의 구형 구조물을 사용하였다. 구조물의 위치는 조파기로부터 20m 지점에 수조 폭에 딱 차게 설치하였다. 흡수는 0.05m이고 수심은 실험하는 동안 0.9m를 유지하였다. 또한 2개의 wave gage를 구조물 전·후 4cm에 각각 설치하였고, 다른 2개의 wave gage는 각각 구조물 전면의 10m 지점에, 구조물 후면의 2m 지점에 설치하여 반사 및 전달된 파를 측정하여 wave gage로부터 얻어지는 신호를 컴퓨터로 전송하여 데이터로 전환하였다.

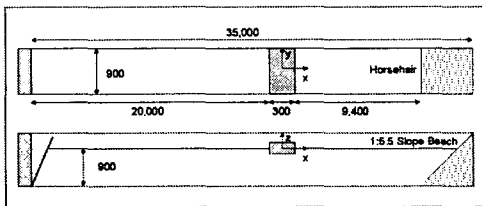


그림 1. 수리실험 수조의 모식도

2.2 PIV 시스템

본 수리모형실험에서는 유속을 측정하기 위해 PIV 시스템이 사용되었다. PIV 시스템의 유속측정방법은 점을 기준으로 한 것이 아닌 입자를 수조에 살포하여 입자가 이동하는 거리를 측정하여 유속을 측정하므로 한 공간의 전체적인 유속측정이 가능하다. 또한 이 유속측정방법이므로 실험

중에 유체의 흐름을 방해하지 않는 것이 가장 큰 장점이다. 따라서 측정을 하는 동안 입자살포로 인한 수천 개의 유속 벡터를 얻을 수 있다.

그림 2에 나타낸 것과 같이 A 컴퓨터에서 조파기와 PIV 시스템의 제동장치를 조정하고, B 컴퓨터에서 wave gage의 데이터와 회전 위치센서, 압력계로부터의 데이터를 취하고, C 컴퓨터에서 레이저와 CCD 카메라를 컨트롤한다.

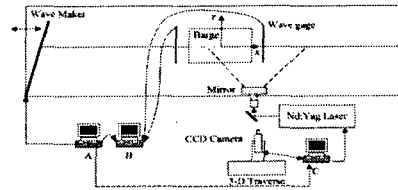


그림 2. PIV 시스템의 구성

3. 수치모델

자유표면을 갖는 흐름장에 대한 수치계산법으로는 Macker입자를 추적하는 MAC법(Harlow 등, 1965), Lagrange좌표계에 의한 ALE법(Hirt 등, 1972)등이 널리 알려져 있지만 Hirt and Nichols(1981)가 제안한 VOF법(Volume Of Fluid)법이 범용성이 높고, 복잡한 자유표면을 표현하는데 매우 우수한 방법으로 알려져 있다. 이 VOF법은 岩田 등(1994)이 잠체에 의한 쇠파해석을 위해 처음으로 적용하였고 그 이후에 CADMAS-SURF가 여러 연구자들의 공동연구로 개발되었다. 본 연구에서는 기존의 연구에서와 마찬가지로 2차원 비압축성 점성유체에 대한 Navier-Stokes방정식과 자유표면 해석모델인 VOF을 결합한 기초방정식을 채용하였다. 아울러 유동장 및 난류장의 계산을 보다 정확하게 하기 위해 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하여 난류 및 와동점성계수의 계산을 실시하였다. 이하에서는 본 수치모델의 기본이론에 대해 간략히 기술한다.

3.1 기초방정식

유체를 2차원 비압축성의 점성유체로 가정하면 기초방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 운동방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = S_p \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - g \quad (3)$$

여기서, t 는 시간, x, z 는 수평, 연직좌표, u, w 는 x, z 방향의 유체입자의 속도, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, g 는 중력 가속도를 나타낸다. 그리고, D_x, D_z 는 에너지 감쇠대를 위한 계수이며, S_ρ, S_u, S_w 는 조파소스항을 나타낸다. 또한, 항력항 R_x, R_z 를 항력계수 C_D 를 적용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (4)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (5)$$

여기서, $\Delta x, \Delta z$, 는 수평, 연직방향의 격자간격이다.

3.2 VOF 함수의 이류방정식

본 연구에서는 자유표면을 추적하기 위해 현재 까지 가장 유용한 방법으로 알려져 있는 VOF법 (Hirt and Nichols, 1981)을 이용하고 있다. VOF 함수 F 는 일정 물리량인 유체의 체적율로서 $0 \leq F \leq 1$ 의 범위를 가진다. $F=1$ 일 경우는 유체셀로, $F=0$ 일 경우는 기체셀로, $0 < F < 1$ 일 경우는 표면셀로 각각 판단하여 자유수면을 추적하게 되며, 다음의 이류방정식에 의해 VOF함수가 이류된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial uF}{\partial x} + \frac{\partial wF}{\partial z} = S_F \quad (6)$$

여기서, $S_F = Fq(z, t)$ 는 조파소스를 위한 소스항이다.

3.3 난류모델

본 연구에서는 부유식방파제의 유동구조 및 난류구조를 보다 상세하게 해석하기 위해 실용성이 높고 여러 분야에서 사용되고 있는 $k-\epsilon$ 난류모델

을 채용하여 난류항의 완결(closure)을 실시하였다. 난류모델의 기초방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial wk}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_k \left(\frac{\partial k}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_k \left(\frac{\partial k}{\partial z} \right) \right\} + G_s - \epsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\epsilon}{\partial x} + \frac{\partial w\epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_k \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_k \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_s - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (11)$$

$$G_s = \nu_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (12)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (13)$$

$$\nu_k = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \quad (14)$$

$$\nu_\epsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \quad (15)$$

이고, 난류방정식에서 포함되어 있는 경험정수는 표준 $k-\epsilon$ 난류모델에서 일반적으로 적용되는 $C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.00, \sigma_\epsilon = 1.30, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$ 값을 이용하였다.

한편, 이상의 기초방정식에 의해 유동 및 난류장의 계산을 위해 벽면 및 수면부근에서의 전단류는 일반적으로 대수분포식을 채용하고 있다. 그러나 $k-\epsilon$ 난류모델은 고 Reynolds형 모델이기 때문에, 점성의 영향이 큰 벽면과 수면부근에는 벽법칙(Law of the wall)를 직접 채용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 대수분포식에서 구해지는 무차원량

$$y^+ = u^* y / \nu \quad (16)$$

에 기초하여 벽면 및 수면부근에서의 k, ϵ 에 대해서는 Patel 등(1985)의 실험적 함수형을 채용하여 수치모델을 구성하였다.

특히, 난류모델의 구성에 있어서 난류량 k, ϵ 에 대하여 초기조건과 유입 경계조건을 설정하는 데에는 특별한 주의가 필요하다. 난류방정식에 따

참고문헌

르면, k 가 0일 때, ε 에 대한 생성항과 소산항은 singular가 된다. 또한, 식 (10)에서 난류생성항은 k 에 비례하므로, 만약 초기에 난류 에너지가 없다면 수치모델은 난류 에너지를 생성시키지 못하여 계산이 불가능하게 되는 문제점이 발생한다. 즉 초기조건과 유입 경계조건에 대한 적절한 도입이 필요하게 된다.

따라서 본 연구에서는 Lin 등(1998)의 연구에 대한 공부를 통해 난류량에 대한 초기조건 및 유입 경계조건에 대한 함수를 도입하여 적절히 수치모델을 구성하였다. 이에 대한 자세한 내용은 그들의 연구를 참조하기 바란다.

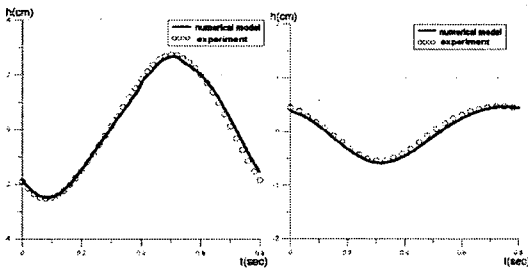


그림 3. 구조물 전·후면의 시간과형_주기 0.8(0.029)

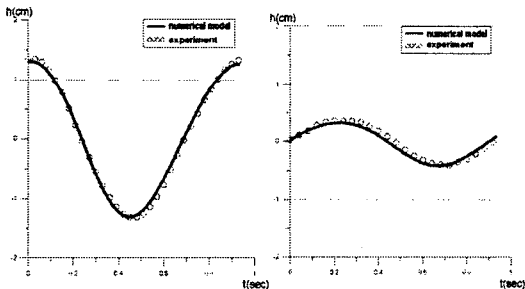


그림 4. 구조물 전·후면의 시간과형_주기 0.93(0.016)

4. 결 과

PIV를 통한 수리실험과 CADMAS-SURF를 이용한 수치실험을 비교한 결과 구조물 전·후면에서 시간과형이 잘 일치하는 것을 볼 수 있고, 난류 거동의 형태 역시 대부분의 위상에서 유사하게 나타났다.

감사의 글

본 연구에 있어 좋은 테마를 주신 정광호 박사님께 감사드립니다.

- 1) Chen, H.C., Liu, T, Chang, K.A., and Huang, E.T. (2002). Time-domain simulation of barge capsizing by a Chimera Domain Decomposition Approach, *12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, KitaKyushu, Japan, May 26-31, pp. 314-321.
- 2) Fugazza, M. and Natale, L. (1988). Energy losses and floating breakwater response, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 114, No. 2, pp. 191-205.
- 3) Lin, P. & Liu, P. L.-F. (1998). A numerical study of breaking waves in surf zone, *J. Fluid Mech.* Vol. 359, pp. 239-264.
- 4) Patel, V. C., Rodi, W. and Scheuerer, G. (1985). Turbulence models for near-wall and low Reynolds number flows : *A review, AIAA J.*, Vol. 23, No.9, pp. 1308-1319.
- 5) Williams, A.N. and Abul-Azm, A.G. (1997). Dual pontoon floating breakwater, *Ocean Engineering*, Vol. 24, pp. 465-478.
- 6) 沿岸開発技術研究センター, (2001). CADMAS-SURF 數値波動水路の開発・研究, 5-16.
- 7) Hirt, C. W., A. Amsden, and J. Cook (1972) : An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds, *J. Comp. Phys.*, Vol. 14, pp. 227-253.
- 8) C. W. Hirt and B. D. Nichols (1981) : Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of computational Physics*, Vol.39, pp. 201-225
- 9) 岩田好一郎・川崎浩司・金度三 (1994) : 水中構造物による碎波の數値計算、*海岸工學論文集*, 第42巻, pp.781-785
- 10) Harlow, F. H. and J. E. Welch (1965) : Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, *physics of Fluid*, Vol.8, No 12, pp. 2182-2189