

원형실린더 부재에 대한 波力係數의 결정방법에 대한 고찰

A Study on Wave Force Coefficients for Circular Cylinder Members

김태인*, 최한규**, 최용묵**

1. 서론

해양구조물의 주부재인 원형파일 및 실린더부재에 미치는 파력은 일반적으로 Morison식(1)으로 알려진 반경험식으로부터 구하고 있다. Morison식에서의 파력계수의 결정을 위해 주로 원형단면을 가진 실린더부재에 관한 연구가 수행되어 왔다(2, 3). 연구결과 제안된 파력계수 값들은 실험조건과 유체의 유동속도를 결정하는데 이용된 파랑이론의 차이, 계수들의 결정방법의 차이때문에 서로 상당히 다른 값들을 보이고 있다. 본 연구에서는 이러한 기존자료를 해석하고 설계에 이용하는 엔지니어에게 보다 합리적인 파력계수값을 결정할 수 있게 하기 위하여 다음과 같은 세가지 연구제목을 선정하였다.

- (1) 파력계수의 세가지 결정방법에 의한 결과의 차이에 대한 비교
- (2) Morison식의 관성력항의 가속도에 전가속도(Total acceleration) 대신에 시간 가속도(Local acceleration)만을 쓰는데서 오는 파력계수 결과치의 비교
- (3) 유동장(속도 및 가속도) 계산에 있어서 세가지 파랑이론(선형파이론, Stokes고차파이론, Stream Function파이론)을 사용하는데서 오는 파력계수의 차이 비교

* 육군사관학교 토목공학과(Dept. of Civil Eng., Korea Military Academy, Seoul 139 - 799, Korea)

** 강원대학교 토목공학과(Dept. of Civil eng., Kangwon Univ., Chunchun, 200 - 019, Korea)

2. 이론적 고찰

원형실린더에 대한 Morison식 (1)의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$F = C_D \frac{\rho}{2} (D \cdot \ell) U|U| + C_M \rho \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \ell \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

여기서, D 와 ℓ 은 각각 실린더 외부직경과 길이, U 는 실린더 재축에 수직인 유체속도이다. 계수 C_D 나 C_M 은 측정된 파력과 주변의 유체운동의 측정치나 이론치로부터 결정된다. 구조물 위치에서의 유체의 운동속도와 가속도를 예측하는데 다양한 파랑이론(Wave theories)들이 사용되었다(4, 5). 어떤 파랑이론에 의하여 결정된 C_D 와 C_M 값들을 다른 파랑이론에 적용할 때는 상당한 오차가 생길 수 있다. 부정류속에 놓여진 물체에 대해 C_D 와 C_M 값을 결정하는데는 (1) 최소자승법 (2) Fourier 분해법 (3) 최대치법의 세가지 방법이 있다.

(1) 최소자승법(Least Square Method)

최소자승법은 계수 C_D 와 C_M 은 파랑의 주기동안 계산된 힘과 실제의 힘 간의 평균제곱오차를 최소화하도록 선정하는 것이다. 이와같이 구해진 파력계수들은 다음과 같다.

$$C_D = \frac{\int_0^T F_m U|U| dt \int_0^T \dot{U}^2 dt - \int_0^T U|U|\dot{U}^2 dt \int_0^T F_m \dot{U} dt}{\frac{\rho}{2} D \ell \left[\int_0^T \dot{U}^2 dt \int_0^T U^4 dt - \left(\int_0^T U|U|\dot{U} dt \right)^2 \right]} \quad (2a)$$

$$C_M = \frac{\int_0^T F_m \dot{U} dt \int_0^T U^4 dt - \int_0^T F_m U|U| dt \int_0^T F_m U|U|\dot{U} dt}{\frac{\rho}{4} \pi D^2 \ell \left[\int_0^T \dot{U}^2 dt \int_0^T U^4 dt - \left(\int_0^T U|U|\dot{U} dt \right)^2 \right]} \quad (2b)$$

여기서, F_m = 측정된 파력, U = 유체의 가속도이다.

(2) Fourier분해법(Fourier Decomposition Method)

이 방법은 파력이 주기함수이고 유속이 단순정현(simple-harmonic)함수라는 가정에 기초하고 있으며,

이 방법의 상세한 설명은 Keulegan과 Carpenter(2)에 의해 제시되었다. 3차 이상의 항들을 무시하면 계수 C_D 및 C_M 은 상수로서 다음과 같이 구해진다.

$$C_D = -\frac{3}{4} \int_0^{2\pi} \frac{F_m \cos \theta}{\rho U_{\max}^2 D \ell} d\theta \quad (3a)$$

$$C_M = \frac{2}{\pi^3} \frac{U_m T}{D} \int_0^{2\pi} \frac{F_m \sin \theta}{\rho U_{\max}^2 D \ell} d\theta \quad (3b)$$

식(3a)를 단순정현파에 대한 최소자승법의 결과식(2)와 비교하면 C_M 값은 같고, C_D 값은 상이함을 알 수 있다.

(3) 최대치법(Maximum Value Method)

항력과 관성력계수의 또다른 결정방법은 다음 사실에 기초하고 있다. 즉, 유속이 최대일때 유체의 가속도는 영(zero)이고, 유속이 영일때 가속도는 최대가 된다는 것이다. 따라서, 유체의 단순정현 운동에 대하여 항력이 최대일때 관성력은 영이고 항력이 영일때 관성력은 최대이다. 계수 C_D 와 C_M 은 유체의 속도와 가속도의 최대값과 그 값들이 발생하는 시각의 힘들을 관련시킴으로써 식(1)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$C_D = \frac{F_m(\theta_1)}{\frac{\rho}{2} D \ell U_{\max}^2} \quad (4a)$$

$$C_M = \frac{F_m(\theta_2)}{\frac{\rho}{4} \pi D^2 \ell \dot{U}_{\max}} \quad (4b)$$

여기서 θ_1 과 θ_2 는 속도와 가속도가 각각 최대값 U_{max} , \dot{U}_{max} 이 되는 시각(위상각)이고 $F_m(\theta_1)$ 와 $F_m(\theta_2)$ 는 각각 θ_1 과 θ_2 의 위상각에서 측정된 파력값이다.

3. 실험장치 및 방법

실험은 강원대학교 수리실험실에 있는 폭 0.8 m × 깊이 1.0m × 길이 20m의 조파수로시스템을 이용하였으며, 실험간 수심은 60cm와 80cm, 수로바닥으로부터 실린더 중심까지의 높이는 40cm로 유지하였다. 실험실린더는 직경 5cm와 10cm의 아크릴제 원형관을 사용하였고 실린더의 양단측은 수로의벽 상단에 고정된 좌우 파력측정판에 연결하였다. 파력측정판(spring)은 폭 30 mm × 길이 260mm × 두께 2mm의 알루미늄판을 사용하였으며 파력은 전후면에 부착된 Strain gage를 통하여 수평력과 수직력성분을 동시에 측정하도록 하였다.

실험파랑은 천해조건으로부터 심해조건을 재현하면서 미소진폭파로부터 유한진폭파까지를 생성할 수 있도록 31 Run에 대하여 자료를 분석하였다. 실험파랑의 상대수심은 $0.0154 < \frac{d}{L_0} < 0.1282$ 이었으며, 상대파고는 $0.0031 < \frac{H}{L_0} < 0.032$ 이었다. Keulegan - Carpenter수의 범위는 $6 < K - C < 32$, Reynolds수의 범위는 $5.4 \times 10^3 < R_0 < 2.9 \times 10^4$ 이었다.

4. 결론

본 연구의 결과 얻어진 결론들을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 파력계수의 결정방법에서 오는 LSM(최소자승법)과 MVM(최대치법)의 차이는 일반적으로 MVM이 LSM보다 큰 C_D 및 C_M 값을 보이며 그 차이는 선형

파이론에서 더욱 크고(C_D 에서 최대 55%, C_M 에서 최대 30%) 비선형파이론에서는 최대 30%정도이다. 선형파이론을 사용하는 경우, C_D 의 값에 있어서 LSM과 FDM의 차이는 5%미만으로서 일반적으로 FDM(Fourier평균법)이 LSM보다 낮은 값을 보인다.

- (2) C_M 의 결정에 있어서 시간가속도 대신에 전가속도를 사용하는데서 오는 차이는 최대 10%내외의 C_M 값의 증가를 가져온다.
- (3) 유동장을 계산하는데 사용된 파랑이론에서 오는 C_D 및 C_M 값의 차이는 일반적으로 비선형파이론이 선형파이론보다 높은 값을 주며, 그 차이는 C_D 값에서 최대 60%, C_M 값에서 최대 45% 정도이다. 비선형파이론들을 비교하면 Stokes 5차파이론이 Stream-Function파 이론에 비해 일반적으로 C_D 에서는 낮은 값을, C_M 에서는 높은 값을 보이나 그 차이는 5% 미만이다.
- (4) 본 연구에서 얻어진 C_D 및 C_M 값을 이전의 원형실린더에 관한 유사한 연구 결과와 비교한 결과, Sarpkaya(3)의 값과의 차이는 최대 60%로서 일반적으로 Sarpkaya(5)의 실험결과보다 작은 값을 보인다. Keulegan-Carpenter(2)의 값과의 차이는 $K-C < 10$ 에서는 두 연구가 일치하나 $10 < K-C < 60$ 의 범위에서는 본 연구의 결과가 Keulegan-Carpenter(2)의 결과보다 3% ~ 25%의 낮은 값을 보인다. 이는 파흐름(Wavy flow)에서의 파력의 생성기구가 수평진동흐름(Oscillatory flow)에서의 파력의 생성기구와 상당히 다르다는 것을 나타낸다
- (6).
- (5) 파력의 시간에 따른 연속관측치와 Morison식에 의한 계산치를 비교한 결과, 파랑이론에 있어서는 파랑조건이 천해조건에 가까와질수록, 그리고 파고 커질수록 선형파이론에 의한 계산치는 파력의 시간변화뿐 아니라 최대파력에서 실측치보다 현저히 작은 값을 보이며, Stokes 5차파이론과 Stream-Function파이론에 의한 계산치는 실측치와 잘 일치하고 있다. 따라서 파력

계수의 결정에 있어 심해영역을 제외하고는 유동장의 계산에 있어 선형파 이론을 사용하는 것은 파력의 예측치에 상당한 오차를 가져 온다는 것을 알 수 있다. 파력의 계산치에 있어서 Stokes 5차파이론과 Stream-Function파 이론과의 차이는 거의 무시할 정도이다.

파력계수 결정법에 있어서는 LSM이 MVM보다도 더 실측치와 잘 맞는 계산치를 준다. Morison식의 관성력항에 시간가속도를 사용했을 경우와 전가속도를 사용했을 경우의 차이는 무시할 정도이다. 최대파력의 계산치와 실측치와의 차이는 최소자승법에서 6%미만, 최대치법에서 15%미만이며, 일반적으로 계산치가 실측치보다 작은 값을 보인다.

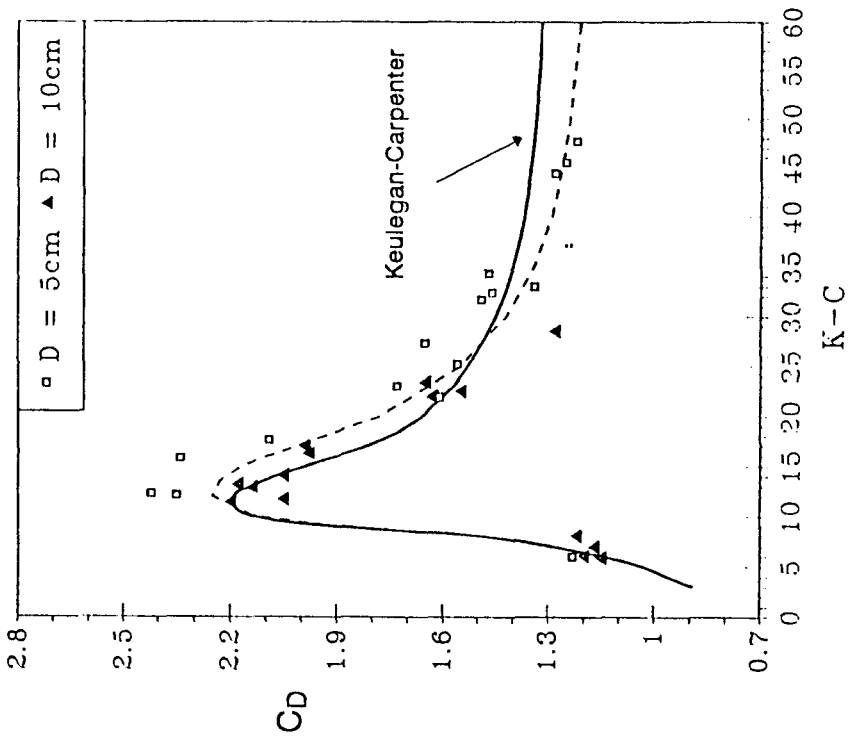
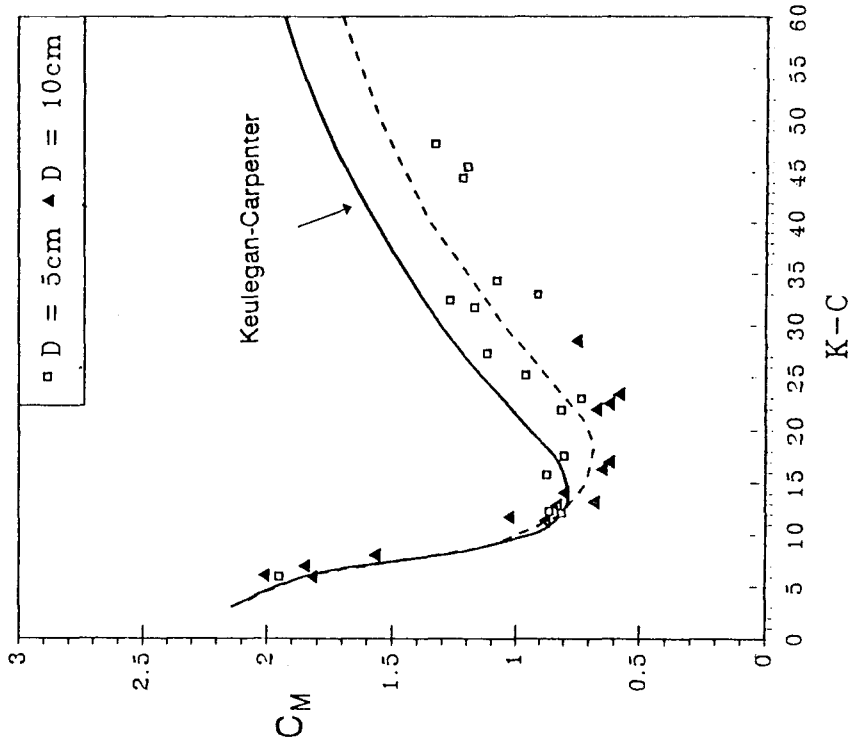


그림 1 본 연구와 Keulegan - Carpenter(2)의 연구에서의 C_D 및 C_M 값의 비교

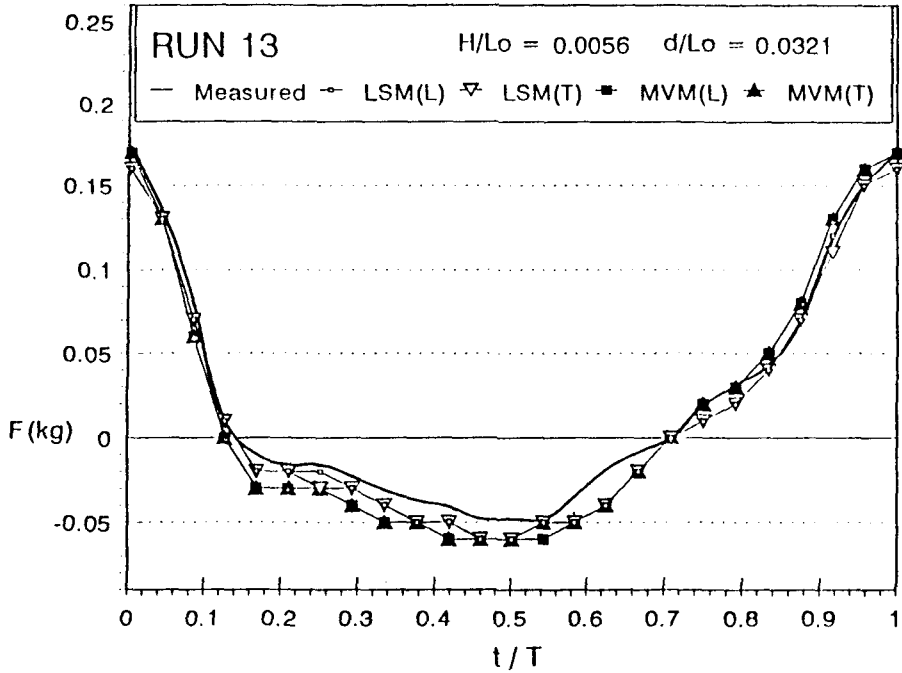


그림 2 파력계수 결정방법에 따른 파력(F_x)의 시간변화의 관측치와 계산치와의 비교 ($d/L_o = 0.0570, 0.0321$)

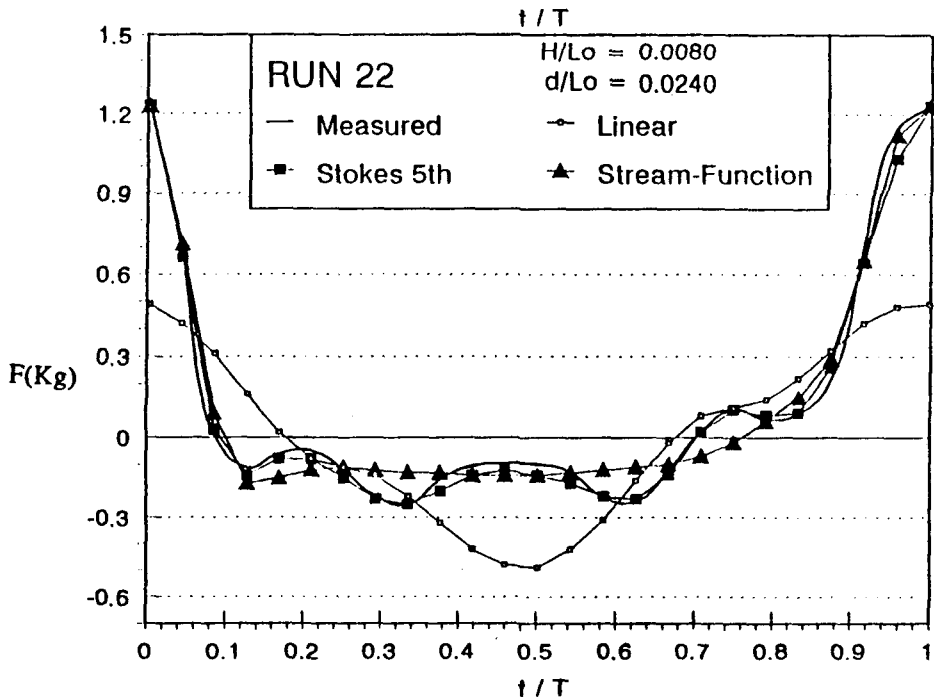


그림 3 파랑이론에 따른 파력(F_x)의 시간변화의 관측치와 계산치와의 비교 ($d/L_o = 0.0240$)

참 고 문 헌

1. Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W. and Schaaf, S. A., "The Force Exerted by Surface Waves on Piles," Petroleum Transaction, AIME, Vol. 189, 1950.
2. Keuegan, G. H., and Carpenter, L. H., "Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid," Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 60, No. 5, May 1958.
3. Sarpkaya, T., "Forces on Cylinders and Spheres in a Sinusoidally Oscillating Fluid," Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 42, No. 1, March 1975, pp. 32-37.
4. Skjelbreia, L. and J. H. Hendrickson, "Fifth-Order Gravity Wave Theory," Proceedings of the 7th Conference on Coastal Engineering, Hague, The Netherlands, 1960, pp. 184-196.
5. Dean R. G., "Evaluation and Development of Water Wave Theories for Engineering Application," Special Report No. 1 : U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Reaearch Center, Fort Belvoir, Va., Vols. I & II, November 1974.
6. 김태인, "비선형 造波이론," 대한토목학회지, 제12권 4-1호, 1992. 12, pp. 137-151.