

복합 원형 실린더군의 저진폭 동위상 진동에 의한 점성유동 및 동유체력에 관한 연구

김성균*

A Research on the viscous flow and the hydrodynamic force
 due to the small-amplitude in-phase oscillation of multi-cylinders

by

Sung Kyun Kim*

요 약

복합원형 실린더군의 미소진폭 동위상 진동유동에 대해 수치해석적 및 실험적으로 연구하였다. 유동장은 내부와 외부로 분리하여 해석되어진다. 1차 비선형해는 스톡스 진동해로서 해석적으로 구해지며, 경계층 외부의 2차 정상유동은 경계적분법(Panel Method)와 유한체적법(Finite Volume Code)에 의해 구하였다. 수치해석해와 정성적·정량적으로 비교하기 위하여, 전유동장 측정기법의 하나인 입자영상유속계(PIV)기법을 사용하였으며, 계산시간 단축을 위해 영상압축 및 코드화기법에서 개발된 삼단계추적 알고리즘을 도입하였다. TLP등 저 댐핑 시스템에 있어서 작지만 0 아닌 항력계수의 정확한 시스템 거동 및 공진에 의한 파괴문제에 있어서 중요한 과제이다. 본 논문에서는 실린더의 갯수와 배열, 간격의 변화에 따른 항력계수 값들을 계산하여 도표화하였다.

Abstract

Small amplitude in-phase oscillations of multi-cylinders are considered both numerically and experimentally. Flow field is separated into inner and outer regions. The basic unsteady solution is obtained analytically and the secondary flow, termed as steady streaming flow, can be obtained numerically by using Finite Volume Code with Panel Method. The Particle Induced Velocimetry, one of whole field measurements, is introduced for comparison with numerical flow visualization quantitatively. Among the algorithms for PIV, the Three Step Vector Searching Technique is applied to reduce CPU time. Small but non-zero damping coefficient, that is important in lightly damped system, can be obtained with varying number of bodies and distances.

접수일자 : 1999년 1월 18일, 재접수일자 : 1999년 4월 23일

* 정회원, 건국대학교 기계공학과 교수

1. 서론

해양 구조물인 Tension Leg Platform(TLP)이나 핵반응로 내부의 코아 및 냉각 파이프 번들 등 여러 개의 실린더 복합체의 구조 진동(저진폭 고진동수 진동)에 의한 점성 유동장은 두 가지 특징적인 문제를 내포한다. 대류 열전달에서 중요한 2차 정상 유동, Steady Streaming 문제와 점성저항 계수의 선형 변화구간의 존재이다. 특히, 작지만 0이 아닌 점성저항계수의 정확한 추정에는 구조물-유동간의 간섭에 의한 공진 문제에 있어서 중요하다.

본 논문에서는 비정상 경계층 내부의 유동은 실린더 수와 배치에 상관없이 유사성을 지니며, 실린더들 간의 상호간섭은 포텐셜 속도분포에 의한 압력구배항으로만 특징 지워진다는 가정하에 1개 실린더의 진동에 의한 동유체력을 구하는 방법론 [1]을 임의의 숫자, 배열의 실린더군의 진동의 경우로 확장하여 동유체력을 구하였으며, 난류의 경우 유효 와점성계수를 이용하여 추정하였다. 또한 2차 정상 유동장에 대한 수치해석적, 실험적 해석을 통하여 위의 가정이 성립함을 보였다. Panel Method와 유한체적법(FVM)을 이용하여 2차 정상 유동의 수치해석해를 구하고, 유동가시화 실험의 영상데이터를 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry : PIV) 기법을 이용하여 정량화하여 비교한 결과, 전체적 유동패턴은 잘 일치하였다.

PIV 기법은 전유동장 동시 측정 방법의 하나로서, 중립 미세 입자를 유동장에 첨가한 후 실린더 렌즈로 편광된 레이저 면에 의해 조명된 짧은 시간 간격의 연속된 2개의 화상을 디지털화하여 화상 처리한 후, 전체 유동장의 속도 벡터를 동시에 결정하는 방법으로서 Adrian[2], Willert & Gharib[3] 등에 의해 발전되어 왔다. 광학, 화상처리, 레이저공학, 화상패턴분석 등 여러 방면의 기술을 요하며, 최근에는 액정입자를 이용한 속도-온도장 동시 측정, 3차원 유동장 측정 등으로 발전되고 있다. 본 논문에서는 화상 압축기법 및 코드화분야에서 개발된 삼단계추적법[4]과 국소중간치필터검증을 도입하여 개선된 벡터추적 알고리즘을 이용하였다.

실린더간의 숫자 및 거리변화에 따른 점성계수를 Panel Method를 이용하여 계산하여 도시하였고, 난류 유동의 경우 1개의 실린더의 저항 측정 실험 결과로부터 얻은 유효 와점성계수[1]를 이용하여 근사적으로 추정하도록 하였다.

2. 유동해석 및 동유체력

여러 개의 원형 실린더(직경 d)가 미소 진폭 A_0 , 고진동수 Ω , 동위상으로 조화단진동할 때 발생하는 유동장은 진동 유동장속에 실린더들이 정지하고 있을 때 발생하는 유동과 운동 역학적으로 상사하며, 편의상 수치해석의 경우 후자를, 실험의 경우 전자를 선택하였다. 1차 비정상 유동은 일반화된 Stokes 진동해로 해석적으로 구할 수 있으며, Stokes 경계층 내의 2차 정상 유동은 Matched Asymptotic Expansion에 의해 구해진다. 유동함수로 표시된 해는 다음과 같다[5].

$$\begin{aligned} \overline{\psi}_0 = u_p \frac{du_p}{d\xi} & \left(\frac{13}{8} - \frac{3}{4} \eta - \frac{1}{8} e^{-2\eta} \right. \\ & - e^{-\eta} \sin \eta - 3e^{-\eta} \cos \eta \\ & \left. - \frac{1}{2} \eta e^{-\eta} \sin \eta \right) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ξ 는 접선방향 η 는 수직방향 좌표, u_p 는 실린더표면에서의 포텐셜 접선속도이다.

식(1)에서 괄호안의 양은 경계층내의 수직방향 변수 η 만의 함수이며, 포텐셜 압력구배항과 분리되어있다. Stokes 경계층 두께가 실린더 간격에 비해 작다고 가정하면 실린더간의 간섭효과는 압력구배항을 통해서만 나타난다.

2.1 스트리밍유동의 수치해석

Stokes 경계층 외부의 2차 정상유동의 속도벡터 \vec{V} 에 대한 경계치 문제는 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

$$(\vec{\nabla} \cdot \nabla) \vec{V} = \frac{1}{Re_s} \nabla^2 \vec{V} \quad (3)$$

$$u_s = -\frac{3}{4} u_p(\xi) \frac{du_p(\xi)}{d\xi}, \quad u_n = 0$$

on inner and outer cylinder (4)

$$u_n = 0, \quad \frac{\partial u_s}{\partial n} = 0 \quad \text{on symmetry}$$

여기서 2차 유동의 레이놀즈수 $Re_s = A_o \Omega^2 / \nu$, 아래첨자 n, s 는 각각 경계면에 수직, 접선 방향을 의미한다. $u_p(\xi)$ 는 실린더 표면에서의 포텐셜 접선속도로서 Panel Method로 구하며, 식(2)와 (3)

은 FVM Code인 Phoenix를 이용하여 수치해석해를 구하였다[6].

2.2 동유체력 계산

여러 개의 실린더간의 간격 변화에 따른 유동의 특징으로 보아, Stokes 경계층 내의 유동은 상사성을 가지며, 다른 실린더들의 영향은 압력 구배를 통해서만 감지된다. 따라서, Stokes 경계층 두께에 비해 실린더간 간격이 클 경우 1개의 원형 실린더에 대한 동유체력(F_{BL})공식은 다음과 같이 확장될 수 있다[7].

$$F_{BL} = \frac{1+i}{(i\beta)^2} \rho \Omega d \oint u_p dz \quad (5)$$

여기서 $\beta (= f d^2 / \nu)$ 는 무차원 진동수이고, 실수항은 관성력, 허수성분은 점성력이다. 1개의 원형실린더의 진동에 의한 무차원 점성계수는 [7]

$$(C_d)_{single} = 2\sqrt{2} S \beta^{-0.5} \quad (6)$$

임의 개수의 원형실린더들의 복합진동에 있어서 1개당 점성계수는

$$(C_d)_{multi} = (C_d)_{single} \times \text{Ratio} \quad (7)$$

여기서 스트로할수 $S = 2\pi A_0/d$ 이며, Ratio는 원형 실린더 1개만의 진동에 의한 점성계수 (Ratio = 1)와의 비를 나타낸다. 식 (5)의 적분은 포텐셜 접선속도만 필요하며, Panel Method에 의해 계산된다. 난류 유동의 경우, 1개의 원형 실린더에 대한 실험 결과로부터 구한 유효 와점성계수 (동점성계수의 20배 정도)[1]를 이용하여 근사적으로 구할 수 있다.

3. 유동가시화 실험 및 PIV 해석

가시화 실험 장치의 구성은 Fig.1과 같으며, 직

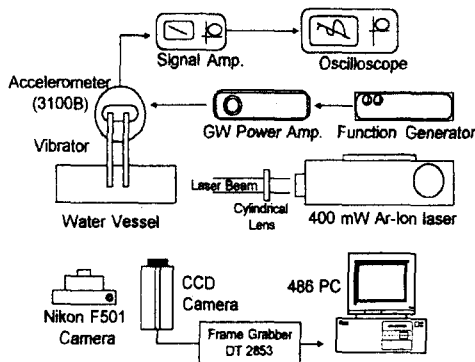


Fig. 1 Experimental apparatus

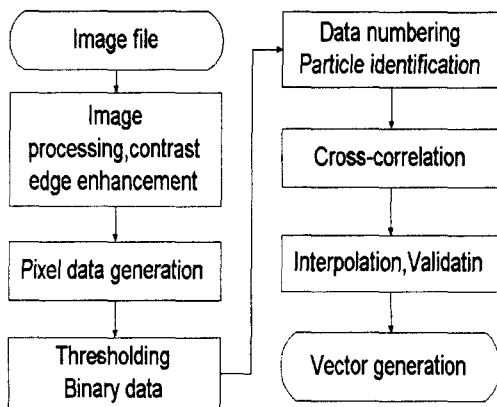


Fig. 2 PIV flow chart

경 100 μm , 비중 1.02인 폴리비닐계 구형 입자를 첨가하였으며, 35 mm 카메라와 640×480 해상도의 CCD 카메라를 이용하여 화상을 획득하였다.

PIV 해석에 필요한 과정은 Fig.2와 같으며, 획득한 화상으로부터 해석의 예로서 사각공동유동의 경우에 대한 결과를 Fig.3에 나타내었다.

PIV 해석 알고리즘 중 상호상관계수(Cross-correlation, C.C)에 의한 속도벡터추적 과정에 있어서 가장 많이 사용되어진 전영역 추적법(Full Search Block Matching, FSBM)은 방대한 계산량을 필

요로 한다. 본 논문에서는 고화질 TV나 화상회의 등에 사용되는 화상압축 및 코드화기법 중 하나인 삼단계 추적법(Three Step Search, TSS)을 도입하여 계산시간을 단축하였다. FSBM이 예상최대 이동거리(L_{max} 픽셀) 내의 모든 픽셀점을 대상으로, $(2 \times L_{\text{max}} + 1)^2$ 번의 C.C 연산을 수행함에 비해, Fig.4에서와 같이 추적 반경을 줄여 나가며 C.C 계산을 하는 TSS의 경우 25번만의 연산을 하게 되므로, L_{max} 가 커짐에 따라 계산시간 단축 효과는 증가하게 된다.[4]

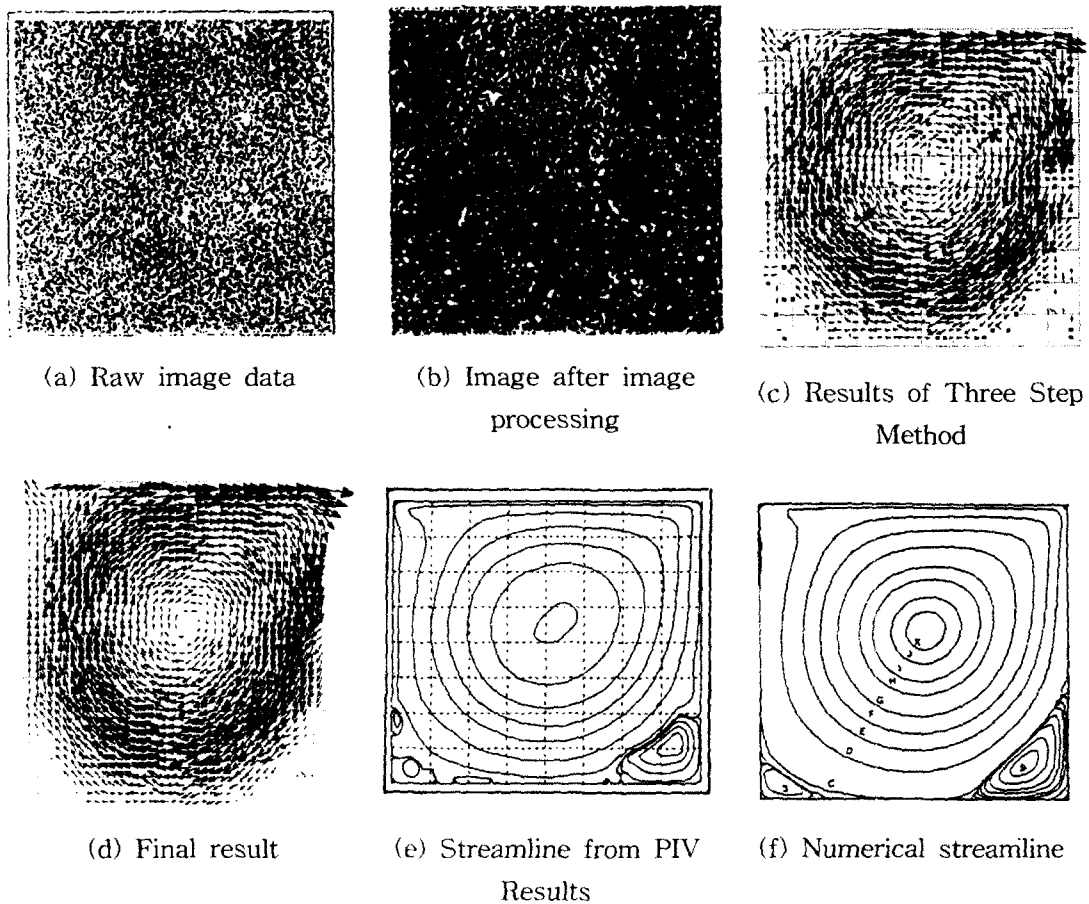


Fig. 3 PIV Procedure by synthetic data

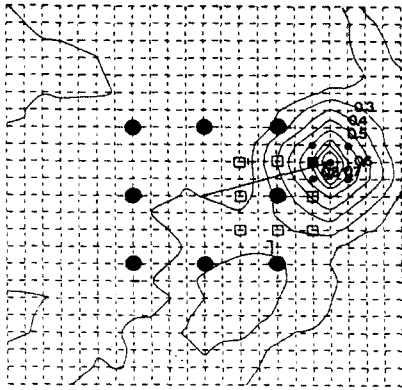


Fig. 4 Three step method

4. 결과 및 토론

2개, 3개, 4개의 실린더군의 진동에 의한 2차 유동장의 외부유동에 대한 수치해석해는 Fig.5-7에 나타내었다. 각각의 실린더 주위에는 다른 실린더와 공유하는 와동을 포함하여 4개의 와동을 갖고 있으며, 이는 실린더 1개만의 진동에 의한 유동장과 상사함을 알 수 있다. 이를 실험적으로 검증하기 위하여 유동가시화 결과와 PIV해석 결과를 Fig.8-9에 도시하였다. Fig. 10-11은 2개, 4개의 원형 실린더의 경우에 대한 결과로써 실린더군 부근 유동의 수치해석 및 PIV해석의 정성적 일치성을 보여 주고 있으며, 정량적 불일치는 실험이 유한 영역인데 반해 수치해석은 무한 영역임에 기인한다. 또한 다른 실린더들의 영향은 포텐셜 속도분포만의 함수란 식(4)의 가정이 실제 유동에 잘 맞음을 알 수 있다.

2,3,4개의 실린더의 복합진동에 대해 실린더 간격과 배치에 따른 점성계수(식(6)의 Ratio)의 변화를 Fig.10-11에 도시하였다. 거리가 증가함에 따라, 1개의 실린더의 경우로 점근적으로 수렴함을 볼 수 있다. 이 방법은 임의 개수, 임의 배치된 실린더군의 복합진동의 경우로 일반화 될 수 있다.

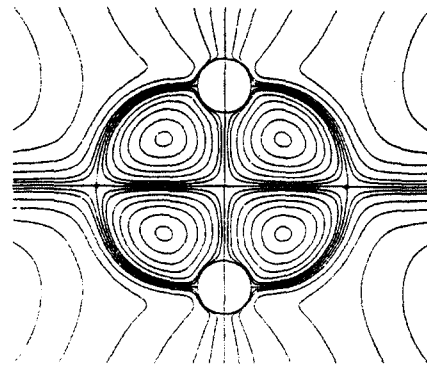


Fig.5 2-Circle cylinder case numerical result

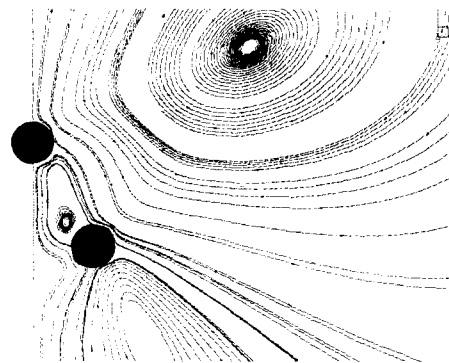


Fig.6 3-Circle cylinder case numerical result

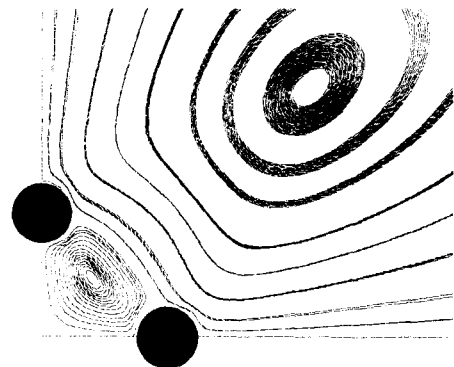
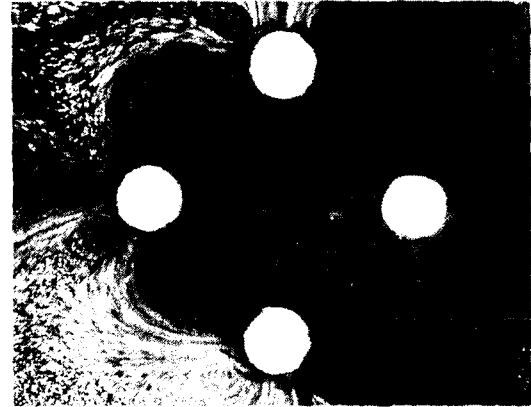


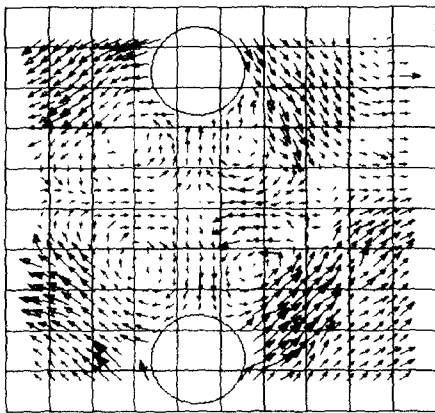
Fig.7 4-Circle cylinder case numerical result



(a) Flow visualization photo

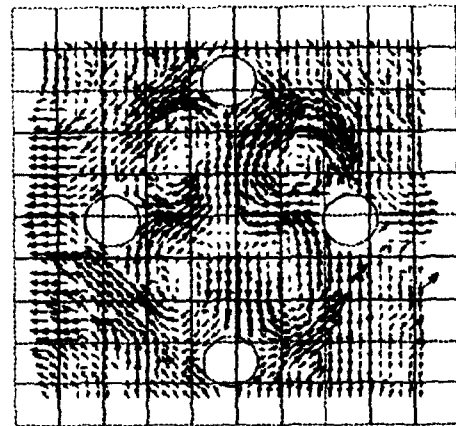


(a) Flow visualization photo



(b) PIV result

Fig.8 PIV result for 2-circle cylinder case



(b) PIV result

Fig.9 PIV result for 4-circle cylinder case

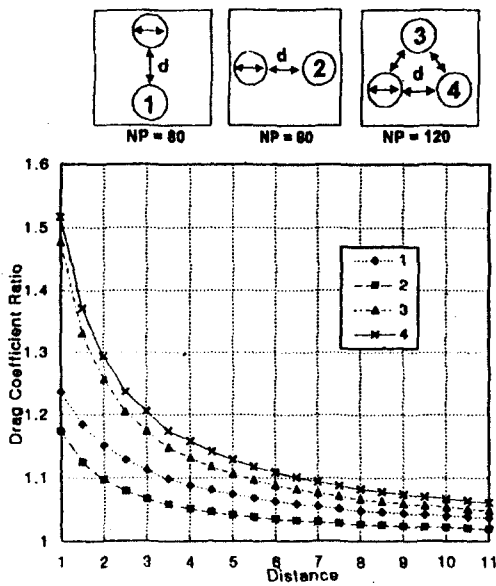


Fig. 10 The drag coefficient ratio between multi-cylinders

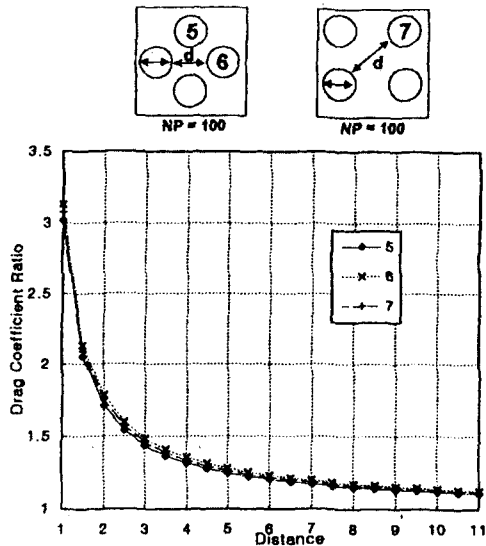


Fig. 11 The drag coefficient ratio between multi-cylinders

5. 결론

경계적분법과 유한체적법을 이용하여 복합 실린

더군의 저진폭 동위상 진동에 의한 점성유동장을 해석하기 위한 수치해석 방법론을 일반화하였다. 몇가지 경우에 대한 수치해석 결과들을 유동가시화 실험과 비교한 결과, 정성적으로 잘 일치하였다. 실험결과를 정량화하기 위하여, 전유동장 측정 기법의 하나인 PIV를 도입하였다. PIV의 벡터추적단계에 영상압축 및 코드화에서 개발된 삼단계 추적법을 도입하여 계산시간을 단축시킬 수 있었다. 또한, 구조물-유동 간섭에 의한 동유체력 추정을 위한 수치적 방법론을 제시하고, 여러 가지 경우에 대해 결과들을 계산하여 도표화하였다. 앞으로, 동유체력 측정실험에 의한 검증이 요망된다.

참 고 문 헌

- [1] Troesh, A.M. and Kim, S.K., "Hydrodynamic Forces Acting on Cylinders Oscillating at Small Amplitudes" J. Fluid & Structures, 5, pp. 113-126, 1991
- [2] Adrian R.J. "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics." Annu. Rev. Fluid Mech. 23: pp. 261-304, 1991
- [3] Willert, C.E. and Gharib, M., "Digital Particle Image Velocimetry", Experiments in Fluids, 10, pp. 181-193, 1991
- [4] A.K. Jain, "Image compression : A Review", Proc. IEEE. Vol. 69. pp. 349-389, 1981
- [5] Kim, S.K. and Troesh, A.M., "Streaming Flows Generated by High-frequency Small Amplitude Oscillations of Arbitrarily Shaped Cylinders" Phys. Fluids A, 1, pp. 975-985, 1989
- [6] Kim, S.K., "Numerical and Experimental Flow Visualization of the Secondary Flows due to Multibody Oscillation", Proc. Third Asian Pacific Conference on Computational Mechanics, Vol.3, pp. 1667-1672, 1996
- [7] Bearman, P.W., Downie, M.J., Graham, J.M.R and Obasaju, E.D., "Forces on Cylinders in viscous Oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter numbers." J. Fluid Mech., Vol. 154, pp. 337-356, 1985