

원형 세장 실린더의 와 유기 진동; 수조 실험 결과

Vortex induced vibration of circular pipes; the experiment in a water tank

⁰김 양 한*, 박 주 배**

Yang-Hann Kim, Joo-Bae Park

홍 섭***, 최 윤 락***

Sup Hong, Yoon-Rak Choi

ABSTRACT

We experimentally attempted to understand the vibration characteristics of a flexible pipe excited by vortex shedding. This has been extensively studied in the past decades (For example, see [2-9]). However, there are still areas that need more study. One of them is to study the relation between spatial characteristics of a flow induced vibrating pipe, such as its length, the distribution of wave number, and frequency responses. A non-linear mechanism between the responses of in-line and cross-flow directions is also an area of interests, if the pipe is relatively long so that structural modal density is reasonably high. In order to investigate such areas, two kinds of instrumented pipe were designed. The instrumented pipes, of which the lengths are equally 6m, are wound with rubber and silicon tape in different ways, having different vortex shedding conditions. One has uniform cross-section of diameter of 26.7mm, and the other has equally spaced by 4 sub-sections, which are composed of different diameters of 75.9, 61.1, 45.6 and 26.7mm. Both pipes are towed in a water tank (200m x 16m x 7m) so that they experienced different vortex shedding excitations. The towing pipe experiments exhibit several valuable features. One of them is that the natural frequencies and their corresponding strain mode shapes dominate the strain response of the uniform pipe. However, for those of non-uniform pipe, the responses are more likely local and many modes participate in it.

1. 서론

탄성 구조물(elastic structure) 주위를 유체가 흘러가는 경우, 일반적으로 구조물은 와(vortex)의 발생으로 인한 와 유기 진동(vortex induced vibration)을 경험하게 된다[1]. 유동의 변화와 와의 발생으로 야기된 주위의 압력 변화로 인해 구조물이 진동하게 되는 것이다. 이러한 구조물의 진동은 다시 유체의 유동에 영향을 미치게 되며, 이 때문에 유체 유동과 구조물의 진동이 서

로 연성(coupling)되어 나타나게 된다. 이러한 와 유기 진동을 연구하기 위한 실험은 그 동안 많은 사람들에게 의해 수행되어 왔다. 참고 문헌 [2]에서 [9]까지는 그 중의 일부 예이다.

와 유기 진동의 특성을 연구하기 위해 널리 사용되는 실험 방법은 측정장치가 부착된 줄(instrumented cable)을 사용하는 것이다[7]. 참고문헌 [7],[8],[9]에서는 길이가 긴 줄의 경우 널리 알려진 '잠김(lock-in)' 현상의 발생이 가능함을 밝히고 있다. 이러한 잠김 현상의 발생은 줄의 모드 밀도(modal density)와 관련이 있다. 참고문헌 [8]에서는, 이러한 구조물의 잠김 현상과 모드 밀도간의 관계를 관찰하기 위하여 2가지의 실험이 수행되었다. 이 2가지 실험의 결과로부터,

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 대학원 기계공학과

*** 한국해양연구원

전단 유동장에서의 원형 세장 실린더(pipe; circular sectioned long cylinder)의 와 유기 진동을 분석함에 있어, 가진 주파수 구간이 중요한 변수가 되리라는 것을 알 수 있다. 그리고, 길이가 긴 원형 세장 실린더의 와 유기 진동이 공진에 의한 실린더의 모드로 나타나거나, 외부 가진에 의해 직접적인 영향을 받는 형태로 나타날 수 있음도 알 수 있다. 그러나, 참고 문헌 [8]의 실험은 609m의 긴 줄에 2개의 가속도계만을 사용한 실험이다. 따라서, 보다 세밀한 측정을 통해 유동장에서의 구조물의 와 유기 진동을 관찰할 필요가 있다. 가진 주파수의 폭은, 특히 구조물에 입사 되는 유동의 속도가 구조물의 길이 방향에 대하여 일정하지 않은 경우(sheared flow) 넓어지는 경향이 있으며, 이러한 영향을 고려한 구조물 응답의 예측 또한 필요하다. 참고 문헌 [9]는 이러한 예측 방법을 제시하고 그 타당성을 보여 주고 있다.

본 연구에서는, 이러한 목적을 달성하기 위하여, 수조(water tank)에서 원형 세장 실린더 형상의 철제 파이프(pipe)를 견인하는 실험을 수행하였다.

2. 수조 실험

서로 다른 두 가지의 와 유기 진동 조건을 구현하기 위하여, 두 가지 형태의 실험용 파이프를 제작하였다. 한 개의 파이프는 파이프의 길이 방향으로 균일한 와가 생성될 수 있도록 균일한 크기의 단면적을 갖도록 제작되었다. 반면에, 다른 한 개의 파이프는, 길이 방향으로 불 균일한 와가 생성될 수 있도록 단면의 크기를 변화시켜 제작하였다. 두 개의 파이프를 각각 균일 파이프(uniform pipe)와 불균일 파이프(non-uniform pipe)로 부르기로 한다. Fig.1은 균일 파이프와 불균일 파이프를 나타낸 그림이다.

균일 파이프와 불 균일 파이프는, 길이가 6m, 외경(outer diameter)이 21.7mm인 철제 파이프에(stainless steel pipe) 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착한 후, 고무 테이프(tape)와 실리콘(silicon) 테이프를 감아서 제작하였다. Fig.1에 표시된 5곳의 위치에(station #1~#5) 굽힘(bending), 인장(tension), 뒤틀림(torsion)을 측

정하기 위한 스트레인 게이지들을 설치하였으며, 이들로부터 16개의 스트레인 신호(signal)를 측정하였다. 5 곳의(#1~#5) 측정 위치에서 유동 방향(in-flow)과 유동 직각 방향(cross-flow)으로의 10개의 굽힘 신호를 측정하였으며, 3 곳의(#1, #3, #5) 측정 위치에서 3개의 인장 신호와 3개의 뒤틀림 신호를 측정하였다. 스트레인 게이지의 부착 후에는 고무 테이프와 실리콘 테이프를 감아 파이프 표면을 마감하였는데, 균일 파이프의 경우에는 최종 외경이 26.7mm가 되도록 하였다. 불균일 파이프는 길이 방향으로 4개의 구역으로 분할하여 서로 다른 외경을 갖도록 고무 테이프를 감아 주었다. 불균일 파이프의 경우, 4개의 분할 구역에 대한 최종 외경은 각각 75.9 mm, 61.1 mm, 45.6 mm, 26.7 mm가 되도록 제작하였다(Fig. 1 참조). 테이프를 감아준 후, 균일 파이프와 불균일 파이프의 최종 질량은 각각 7.18 kg, 19.6kg이다.

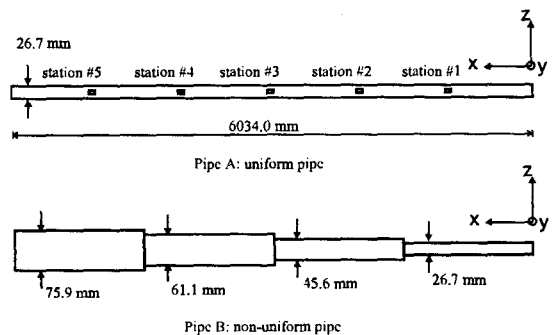


Fig.1 Schematic views of uniform and non-uniform pipes.

실험(균일/불균일) 파이프들의 고유 주파수(natural frequency)를 알아 보기 위해, 수조의 이송 장치에 각각의 파이프를 장착한 상황에서 충격 실험(impact test)을 수행하였다. 유동 직각 방향에서 가진한 경우, 균일 파이프의 물속에서의 고유 주파수는 3.6, 8.5, 16.1, 23.6, 35.5 Hz로 나타났으며, 불균일 파이프의 경우는 2.1, 4.9, 8.5, 14.3, 20.5 Hz로 각각 나타났다. 그리고, 유동 방향에서 가진한 경우, 균일 파이프의 물속에서의 고유 주파수는 3.5, 8.8, 16.1, 23.5, 34.4 Hz로 나타났으며, 불균일 파이프의 경우는 2.0, 5.0, 8.7, 14.3, 20.4 Hz로 각각 나타났다. 이러한, 가진 방향에 따른 고유 주파수 값 차이는, 스

트레인 게이지의 부착 및 감겨진 테이프의 영향으로 판단된다.

수조 실험은, 균일 파이프와 불균일 파이프를 길이가 200 m, 폭이 16 m, 깊이가 7 m인 한국해양연구원의 해양공학 수조에서 수중 견인함으로써 수행되었다. 각각의 파이프는 수조의 이송 장치에 양단 고정(fixed-fixed) 경계 조건을 만족하도록 설치하였으며, 추가적으로 1960 N의 인장력을 인가하였다. Fig.2는 이송 장치에 실험 파이프를 장착한 상태를 나타내는 그림이다. 양 단에 지름이 450 mm인 판을 부착하여, 파이프 주위의 유동을 2차원 유동이 되도록 하였다. 균일 파이프와 불균일 파이프는 모두 수면으로부터 600 mm로 그 깊이를 고정된 상태로 견인되었다. 균일 파이프는 0.1 m/s에서 2.1 m/s로 0.1 m/s씩 이송 장치의 속력을 증가시키면서 견인되었다. 불균일 파이프의 경우도 균일 파이프와 같은 속력 조건으로 견인할 계획이었다. 그러나, 견인 속도 2.0 m/s에서 불균일 파이프의 가장 두꺼운 부분(외경 75.9 mm)과 이송장치 사이의 연결 부위가 부러지는 일이 발생하여 그 이상의 실험은 불가능하였다.

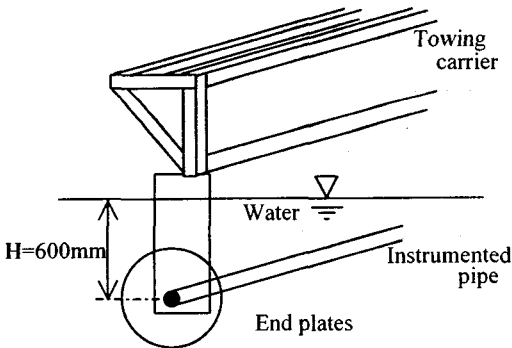


Fig.2 Left half section of the combined system of a carrier and an instrumented pipe.

각각의 견인 속도에 대한 16개 스트레인 신호는 256 Hz의 검출 주파수(sampling frequency)에서 48초의 길이로 측정되었다. 검출 주파수와 스트레인 측정 시간은, 최고 견인 속도인 2.5 m/s에서의 이송 소요시간과 와 유기 주파수를 고려하여 결정하였다. 측정된 16개의 신호중, 인장과 뒤틀림에 관련된 6개의 신호는 굽힘 신호에 비해 그 크기가 매우 작았다. 이 때문에, 실험 결과의 분

석 과정에서는 제외되었다.

3. 수조 실험 결과

3.1 균일 파이프

균일 파이프는 0.1 m/s에서 2.5 m/s의 속력으로 견인되었다. 이 속력 구간은 레이놀즈 수(Reynolds number)로 $Re=2.65E+03 \sim Re=6.63E+04$ 에 해당한다. 이 레이놀즈 수 구간에서는, 파이프의 후류(wake)부에서 완전 난류의 와가 주기적으로 생성되게 된다[10]. 후류부에 발생한 와는 파이프 주위의 압력을 주기적으로 변화시키게 되고, 이 주기적인 압력 변화는 특정 주기를 갖는 가진력으로 파이프에 작용하게 된다.

Fig.3은 측정 위치 #1에서의 유동 직각 방향의 스트레인을 나타낸 그림이다. 현재 나타낸 결과는 0.1m/s 간격으로 측정된 이산적(discrete)인 결과이며, 다른 4곳의 측정 위치(#2-#5)에서도 이와 유사한 결과를 나타낸다. Fig.3-(b)는 Fig.3-(a)의 그림에 결과 분석을 위한 지시선들을 추가한 것이다. 실선은 스트로홀 관계(Strouhal relation)를 나타내며, A,B,C 일점쇄선은 각각 1 m/s, 1.25 m/s, 2.1 m/s 를 나타낸다. 그리고, f_1, f_2, f_3, f_4 의 점선은 각각 파이프의 고유 주파수를 나타낸다. Fig.3-(a)를 보면, 파이프의 진동 주파수가 불 연속적으로 다른 주파수로 변화하는 주파수 도약(frequency jump) 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. J.Dale, H.Nenjel, J.McCandless도 길이가 3 ft이고 지름이 0.1 inch인 줄을 견인하는 실험에서, 이러한 주파수 도약 현상을 보이는 결과를 얻었다[10].

Fig.3-(b)의 A-C 속력 구간을 살펴 보면, 속력이 증가함에 따라 15 Hz~20 Hz로 변화하는 진동 성분이 있음을 볼 수 있는데, 이는 실제적인 유동 직각 방향의 진동 성분이 아니다. 이는 스트레인 게이지에서 측정된 유동 직각 방향의 굽힘 변형 신호에, 유동 방향의 굽힘 변형 신호가 포함되었기 때문이다. 와 유기 진동의 한가지 특징으로, 유동 방향의 진동은 유동 직각 방향의 진동에 대해 2배의 주파수로 나타나게 된다. Fig.4는 균일 파이프 견인 실험에서 나타난 주파수 배가(frequency doubling) 현상을 나타낸 그림이다. 이 주파수 배가 현상 때문에, Fig.3-(b)에 나타낸

것처럼 15 Hz-20 Hz 구간에서 유동 방향의 진동 성분이 측정되게 된다.

Fig.3은 와 발생 주파수와 구조물 진동 주파수 간의 관계를 보여준다. 그러나, 측정 결과는 잘 알려진 스트로홀 관계를 그대로 따르지 않고 있다.

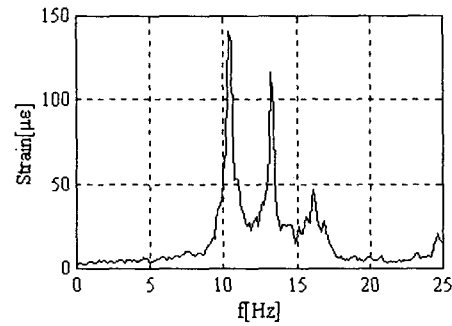
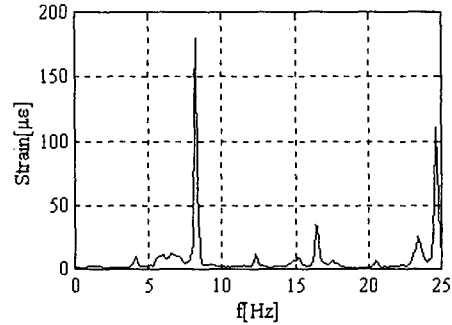
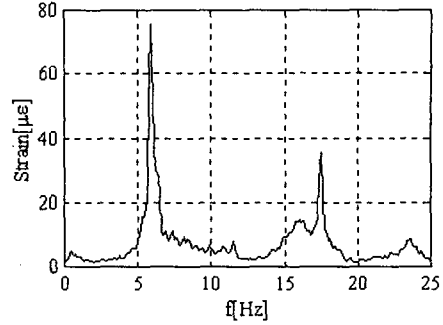
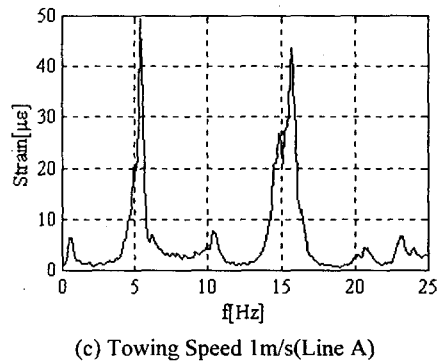
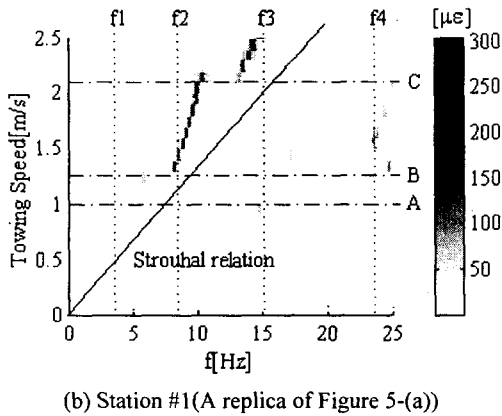
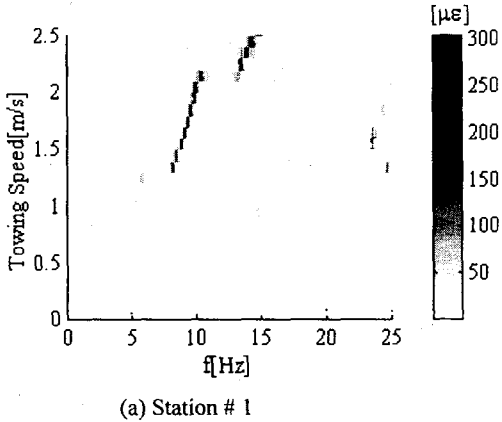


Fig.3 Strain (rms) response at the station #1 of the uniform pipe in the cross-flow direction. (The towing speeds ranges from 0.1 m/s to 2.5m/s with an increment of 0.1m/s)

$$f_s = S_t \frac{V}{D} \quad (1)$$

식 (1)은 스트로홀 관계를 나타내는 식이다. f_s 는 와 발생 주파수를, S_t 는 스트로홀 수를, V 는 유동의 속도를, D 는 파이프의 외경을 각각 나타낸다.

이렇듯 실험 결과와 스트로홀 관계식으로 예

측되는 결과간의 차이가 나타나는 이유는 두 가지가 있다. 첫째, 실험에 사용된 파이프는 강체가 아닌 탄성체이기 때문에, 강체 실린더에서 유도된 스트로홀 관계를 따르니 않는다. 둘째, 공진으로 인한 높은 응답이 와 발생 주파수를 파이프의 공진 주파수와 일치하도록 하기 때문이다. 이 때문에, 와 발생 주파수가 스트로홀 관계식의 형태로 변화하지 못하고 공진 주파수 근처의 값으로 나타나게 된다[11,12].

Fig.3-(c),(d),(e),(f)는 특정 견인 속력 값에서의 파이프의 응답을 나타내는 그림들이다. Fig.3-(d)와 (e)로부터, 견인 속력 1.2 m/s와 1.3 m/s 사이에서 주파수 도약 현상이 나타났음을 유추해 볼 수 있다. 그리고, Fig.3-(f)로부터, 견인 속력이 2.1 m/s일 때 주파수 도약 현상이($f_2 \rightarrow f_3$) 나타나고 있음을 볼 수 있다.

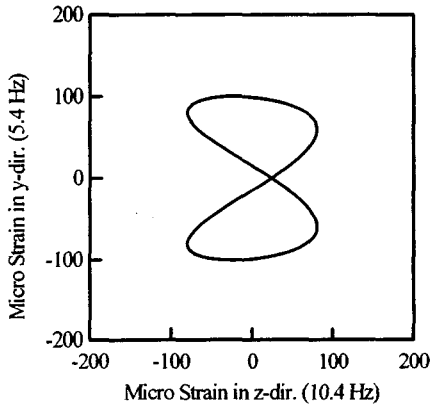


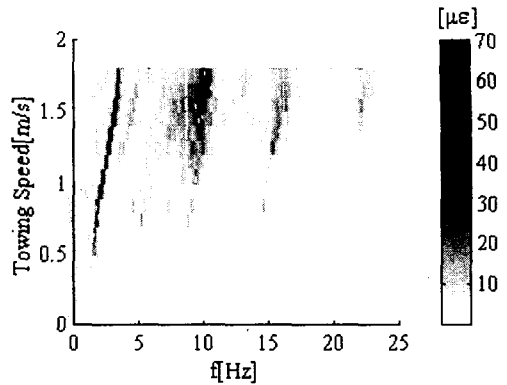
Fig.4 Y-Z plane trajectory of micro stains when the uniform pipe is towed at 1.0m/s. Two dominant modes in the y and z directions show the '8' shape.

3.2 불균일 파이프

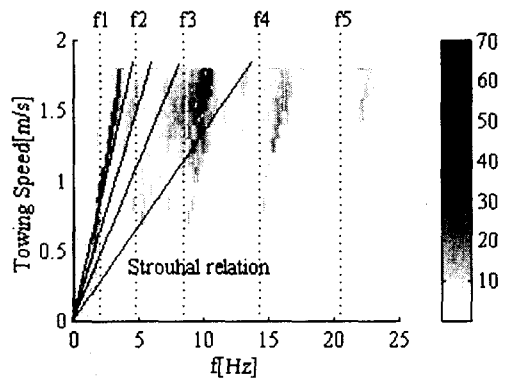
불균일 파이프는 0.1 m/s에서 1.8 m/s의 속력으로 견인되었다. 이 속력은 레이놀즈 수 (Reynolds number) $Re=2.65E+03 \sim Re=1.36E+05$ 의 영역으로, 파이프의 후류(wake)부에서 완전 난류의 와가 주기적으로 생성되는 구간이다[10].

Fig.5는 측정 위치 #1에서의 유동 직각 방향의 스트레인을 나타낸 그림이며, Fig.3-(b)는 Fig.5-(a)의 그림에 분석을 위한 지시선들을 추가한 것이다. Fig.5-(b)에 추가된 4개의 실선은, 불균일 파이프의 서로 다른 단면에서의 스트로홀 관

계를 각각 나타낸다. 단면의 지름이 가장 큰 곳에서의 스트로홀 관계가 가장 큰 기울기로 나타나고 있음을 볼 수 있다.



(a) Station # 1



(b) Station #1(A replica of Figure 9-(a))

Fig.5 Strain(rms) response at the station #1 of the non-uniform pipe in the cross-flow direction(The towing speeds ranges from 0.1 m/s slowest to 1.8m/s fastest with an increment of 0.1m/s)

불 균일한 단면적으로 인해, 각 분할 부분에서 나타나는 와 발생 주파수는 서로 다른 값을 갖게 된다. 따라서, 균일 파이프의 경우와는 달리 불균일 파이프는 여러 개의 가진 주파수로 가진되게 된다. Fig.5의 결과를 살펴 보면, 견인 속력이 0.5 m/s~1.5 m/s의 구간에서는 가장 낮은 와 유기 주파수에 의한, 즉 단면 지름이 가장 큰 곳에서 발생한 와에 의한 영향이 가장 크게 나타남을 볼 수 있다. 이러한 경향은 1.5 m/s 이상의 구간에서는 다르게 나타나는데, 견인 속력이 증가함에 따라 두번째로 두꺼운 분할부에서 발생하는 와의 영

향이 보다 지배적으로 나타나고 있음을 볼 수 있다.

5. 결론

균일한 단면적을 갖는 균일 파이프와 불균일한 단면적을 갖는 불균일 파이프에 대한, 균일 유동 속에서의 와 유기 진동 현상을 살펴보기 위해 수조에서의 견인 실험을 수행하였다.

수조에서의 견인 실험을 통해, 균일 파이프와 불균일 파이프의 와 유기 진동이 서로 다른 형태로 나타남을 발견할 수 있었다. 균일 파이프의 경우 단일 가진 주파수에 의한 영향이 지배적으로 나타나며, 잠김 현상에 의한 비 연속적인 주파수 도약 현상이 관찰되었다. 불균일 파이프의 경우, 두께가 다른 4개의 분할부에서 발생하는 서로 다른 주파수의 와 유기 가진력이 파이프의 진동에 참여하게 된다. 다시 말해, 불균일 파이프의 경우가 균일 파이프에 비해 넓은 구간의 가진 주파수로 가진되게 된다. 그러나, 가장 두꺼운 부분의 와 유기 가진력이 지배적으로 파이프의 진동에 영향을 미치게 된다.

균일 유동속에서의 불균일 파이프의 와 유기 진동은, 균일 파이프의 전단 유동 속에서의 와 유기 진동과 같다. 따라서 불균일 파이프의 견인 실험 결과로부터, 균일 파이프의 전단 유동 속에서의 와 유기 진동 현상을 살펴 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행되었으며, 균일/불균일 파이프의 수조 견인 실험은 한국 해양연구원의 해양공학 수조에서 수행되었습니다.

References

1. T. Sarpkaya 1979 *ASME Journal of Applied Mechanics* **46**, 241-258. Vortex-Induced Oscillations, A selective Review.
2. S. J. Price, M. P. Paidoussis, B. Mark and W. N. Mureithi 1989 *8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, The*

Hague-March 19-23 447-454. Current-Induced Oscillations and Instabilities of a Multi-Tube Flexible Riser : Water tunnel experiments.

3. D. R. Yoerger, M. A. Grosenbaugh, M. S. Triantafyllou and J. J. Burgess May 1991 *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Trans. ASME* **113**, 117-127. Drag Forces and Flow-Induced Vibrations of a Long Vertical Tow Cable-Part I: Steady-State Towing Conditions.
4. M. A. Grosenbaugh, D. R. Yoerger, F. S. Hover and M. S. Triantafyllou and J. J. Burgess May 1991 *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Trans. ASME* **113**, 199-204. Drag Forces and Flow-Induced Vibrations of a Long Vertical Tow Cable-Part II: Unsteady Towing Conditions.
5. D. Brika and A. Laneville 1992 *J. Fluid Mech.* **250**, 481-508. Vortex-Induced Vibrations of a Long Flexible Circular Cylinder.
6. S. K. Chakrabarti, D. C. Cotter and P. Palo 1993 *Ocean Engng.* **20**, NO 2, 135-162. Shear Current Forces on a Submerged Cylinder.
7. J. Jong 1983 *Ph.D. Dissertation, Dept. of Ocean Engr., M.I.T.* The Quadratic Correlation between In-line and Cross-Flow Vortex-Induced Vibration of Long Flexible Cylinders.
8. Y.-H. Kim, J. K. Vandiver and R. Holler 1986 *J. of Energy Resources Technology, Trans. ASME* **108**, 77-83. Vortex-Induced Vibration and Drag Coefficients of Long Cables Subjected to Sheared Flow.
9. J. K. Vandiver and T. Y. Chung 1988 *ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Vortex-Induced Vibration, Chicago.* Predicted and Measured Response of Flexible Cylinders in Sheared Flow.
10. Robert D. Blevins 1990 *Flow-Induced Vibration.* (2nd Edition) New York: VAN NOSTRAND REINHOLD, 43-102.
11. G. H. Koopmann 1967 *J. Fluid Mech.* **28**, part3, 501-512, The vortex wake of vibrating cylinders at low Reynolds numbers.
12. P. K. Stansby 1976 *J. Fluid Mech.* **74**, part 4, 641-665, The locking-on of vortex shedding due to the cross-stream vibration of circular cylinders in uniform and shear flows.