

균일 유동장내에서의 경사진 원형실린더의 유동유기진동 특성연구

⁰정태영*, 홍섭*, 문석준*, 함일배**, 이헌곤**

(Experimental Study on the Flow-Induced Vibration
of Inclined Circular Cylinders in Uniform Flow)

(Tae-Young Chung, Sup Hong, Seok-Jun Moon, Il-Bae Ham, Hun-Gon Lee)

초 록

본 연구에서는 케비테이션 터널에서의 경사진 원형실린더의 유동유기진동시험을 통하여 경사각에 따른 유동유기진동 특성규명과 아울러 유체력 계수들의 실험적 산정을 시도하였으며 도출된 주요한 결론은 다음과 같다. 경사각이 20° 이상되면 마찰저항력에 비해 수직항력이 지배적이 되며, 이 때 수직항력계수는 여러 관찰자에 의해 관측된 범위의 값(1.7-2.0)을 갖는다. 또한, 양력계수 $C_{L, rms}$ 는 유속변위 $4 < V \sin \theta / f_n D < 8$ 의 범위에서 lock-in 현상에 의해 큰 값을 갖게되며, 경사각이 커질수록 큰 값을 갖는다. 경사각이 30° 인 경우 최대값은 약 0.9, 20° 인 경우 0.4로 예측되었다.

1. 배경이론

1.1 경사진 케이블에 작용하는 유체항력

균일 유동장내의 경사진 원형실린더에 작용하는 유체력의 산출에 관해서는 아직 이론적 산정기법이 확립되어 있지 않으며, 실험데이터도 충분치 못한 상태이다. 특히 경사각 20° 이내의 축류에 가까운 경우에 대하여서는 더욱 그러하다. 이의 주요한 이유는 경사진 원형실린더의 경우 수직 원형실린더에 비하여 상대유동장내의 경계층 형성과渦(vortex)의 발생원리가 한층 더 복잡성을 띄게 되기 때문이다.

경사진 예인케이블에 작용하는 유체항력은 Hoerner[1]이래 상대유동속도를 경사에 따른 케이블의 축길이방향과 수직방향의 두 속도성분으로 나누고 그때의 각 항력성분은 그 방향의 속도성분에 의해서만 결정된다고 이상화하여 식(1), (2)와 같이 계산한다(Fig. 1 참조).

$$F_f = \frac{C_f}{2} \rho \pi D (V \cos \theta)^2 L \quad (1)$$

$$F_n = \frac{C_n}{2} \rho D (V \sin \theta)^2 L \quad (2)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, D 는 케이블의 직경, V 는 유속, θ 는 경사각, L 은 케이블의 길이, C_f 는 점성마찰저항계수, C_n 는 수직항력계수를 나타낸다. 이 때 축길이방향의 항력 성분은 주로 점성마찰에 의해 발생하는 반면에 수직방향

의 항력성분은 형상저항에 따른 것이며 케이블의 단면형상에 따라 다르다. 유체력 계산에 필요한 점성마찰저항계수 C_f 와 수직항력계수 C_n 는 실험에 의해 결정되는 데 Reynolds수, 경사각도 및 표면조도등에 따라 영향을 받으며, 넓은 영역에 걸쳐 분산된 결과를 보인다고 알려져 있다. 그러나 Bourget와 Marichal[2]은 수중예인 원형실린더에 대한 수직항력계수의 변화에 관한 일련의 실험을 통해 수직항력계수는 1.8-2.0 범위의 상수 값을 갖는다고 결론지었으며, 실제 관련 문헌상의 데이터를 살펴보면 수직항력계수로 이 범위의 값을 취하고 있음을 알 수 있다[3, 4, 5].

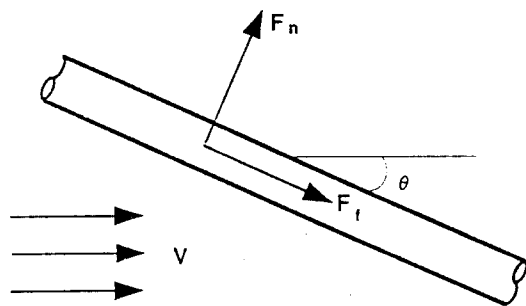


Fig. 1 Normal Drag and Tangential Drag Forces in a Inclined Cylinder

점성마찰저항계수 C_f 의 산출에는 여러가지 시험기법상의 어려움이 따르며, 정확한 값은 실험모형실험에 의해서만 기대될 수 있다. 문헌상에서 살펴보면 점성마찰저항계수는 0.0025 - 0.01의 값을 취하고 있다[3, 4, 5].

* 한국기계연구원

** 국방과학연구소

1.2 경사진 케이블의 유동유기진동현상

유체가 수직 원통형 실린더를 지나 흐를 때 물체의 후방에는 유체박리현상에 의해 Fig. 2와 같이渦(vortex)가 발생한다. 이 와는 원통형 단면의 위아래에서 교대로 시계방향과 반시계 방향으로 매우 규칙적으로 발생한다. 이러한 와를 Karman vortex라고 하는데 도출 진동수 f_s 는 원통형 구조물의 직경 D 및 유속 V 와 다음과 같은 관계가 있음을 Strouhal이 실험적으로 확인하였다.

$$f_s = S_s \frac{V}{D} \quad (3)$$

여기서 S_s 는 무차원 비례상수로서 Strouhal number라고 하며 일반적으로 Reynolds수 ($Re = VD/\nu$)의 함수이며 $300 \leq Re \leq 1.5 \times 10^5$ 의 구역에서 약 0.2의 값을 갖는다[6]. 이러한 와의 발생으로 인하여 원통형 부재단면에는 시간에 따라 변화하는 압력이 작용하고 이를 유동방향과 유동에 직각인 방향으로 적분하면 각각 항력과 양력을 구할 수 있다. 원통형 부재는 이 양력과 항력을 받아 진동하게 되는데 보통 유동에 직각인 양력방향의 진동이 항력을 받는 유동방향의 진동보다 매우 크다.

경사진 케이블의 경우에 와발생주파수는 경사각에 따라 다음 식으로 결정된다고 알려져 있으며 Horton등[7]도 꼬인 케이블의 수조예인시험을 통하여 이를 확인하였다.

$$f_s = S_s \frac{V}{D} \sin \theta \quad (4)$$

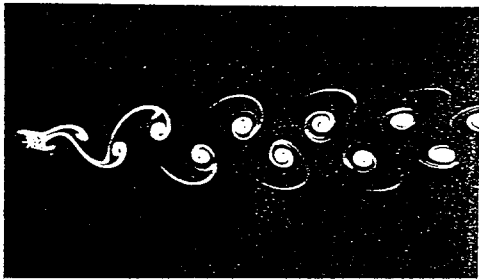


Fig. 2 Karman Vortex Street behind a Circular Cylinder

만일 와발생주파수가 실린더의 고유진동수에 가까워지면 와발생주파수가 Strouhal 관계식에 따르지 않고 원통형 구조물의 고유진동수에 동조된다. 이러한 현상을 와발생주파수가 실린더의 고유진동수에 잠혔다하여 lock-in 현상이라고 하며, 그 결과로서 원통형 구조물의 진동이 커지게 된다. 이때 와유기진동의 크기는 자기 제한의(self-limited)이나 심한 경우 진동변위가 직경의 약 2배 크기까지도 가질 수 있다고 알려져 있다[6].

2. 실험방법

실험은 한국기계연구원 선박해양연구센터에 있는 캐비테이션 터널에서 수행되었다. 이 터널은 60cm×60cm의 시험 단면을 갖고 있으며, 시험가능 유속범위는 약 10m/sec까지이다.

시험봉은 외경 2.17cm, 두께 0.22cm, 길이 1m의 철봉을 이용하여 10°, 20°, 30°의 경사각도를 갖도록 제작하였다. 시험봉의 한 끝단은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 수직으로 휘어져 캐비테이션터널의 관측창에 고정기구에 의하여 고정되었다. 관측창 하부에서 수직으로 내려온 부분은 약 5cm가량으로서 fairing으로 덮어 두어 이 부분의 유체력이 경사진 시험봉의 유체력에 더해지지 않도록 하였다.

시험의 수행은 시험봉을 터널의 윗관측창에 완벽히 고정 한 후에, 터널에 물을 채우고 임펠러의 회전수를 조정하여 원하는 유속을 얻은 다음 일정기간동안 충분한 데이터를 얻고, 다시 유속을 한 단계씩 증가시켜 가며 반복하는 방법으로 하였다. 계측 및 분석에 사용된 시스템의 구성은 Fig. 4와 같다.

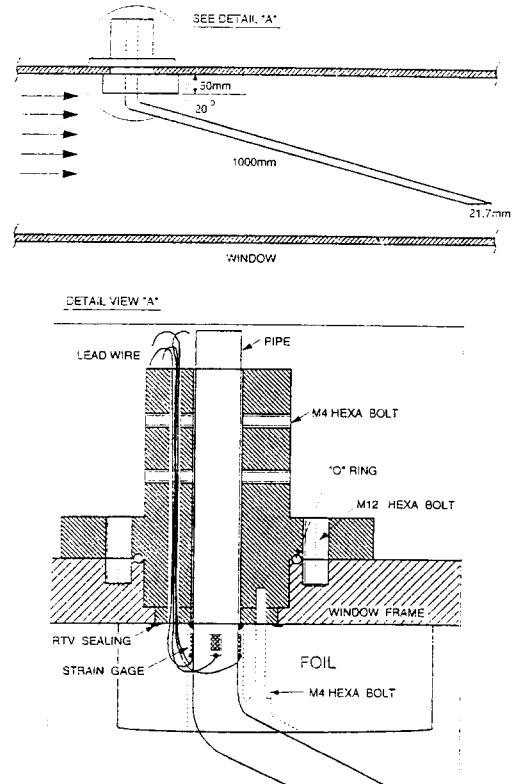


Fig. 3 Experimental Arrangement of the Inclined Cylinder

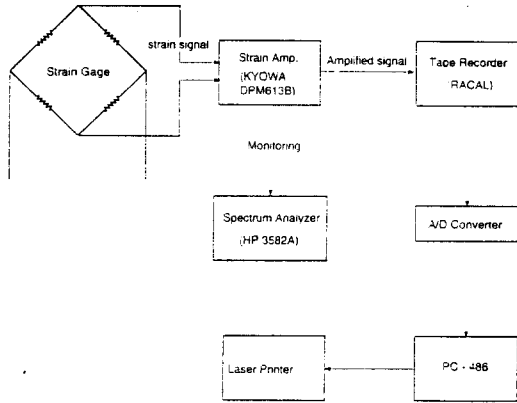


Fig. 4 Schematic Diagram of the Measuring and Signal Processing System

3. 실험결과분석

3.1 유체항력계수의 산정

시험봉은 유체흐름에 의해 항력 및 양력방향으로 움직이게 되며, 이 때 고정단 하부에는 이와 관련된 strain이 발생하게 된다. 따라서 시험봉에 걸리는 유체력은 시험봉의 고정단 하부에 strain gauge를 부착하여 strain을 계측한 후, 유체력을 계측된 strain으로부터 간접적으로 산출해낼 수 있다.

유체력과 strain계측 부위의 strain의 관계는 유한요소법을 이용하여 해석적으로 구한다. 모델링이 가장 어려운 시험봉 고정단은 경계조건을 모든방향이 고정된 것으로 모델링하고, 정하중을 시험봉 자유단에 주어가며 strain gauge 부착위치에서 strain을 계측한 후 이를 고정단의 위치를 가정한 유한요소해석결과와 비교하여 해석치가 계측치와 가장 근접한 결과를 줄때의 위치를 고정단의 위치로 결정하였다. 유한요소해석에 사용된 프로그램은 워크스테이션용 ANSYS Ver. 5.0으로서 공기중 계산에서는 elastic straight pipe element를, 유체중 계산에서는 유체의 부가수질량효과를 고려하기 위해 immersed pipe/cable element를 사용하였으며 두 경우 모두 절점수 25개, 요소수 24개로 유한요소 모델링하였다. 시험봉의 유한요소 모델링은 Fig. 5와 같다.

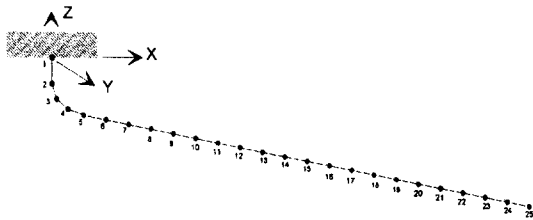


Fig. 5 Finite Element Model of the Inclined Cylinder

산정된 고정단의 위치를 이용하여 시험봉의 고유진동수를 계산한 결과와 실험계측치결과는 Table 1과 같으며 두 결과가 잘 부합되고 있음을 알 수 있다.

유체력이 시험봉의 경사부분 1m 전반에 걸쳐 균일하게 작용한다고 가정하면 단위 수직유체력이 시험봉에 작용할 때 strain gauge 부착부에서의 strain은 Table 2와 같이 계산된다. 계측된 strain은 수직항력 뿐만 아니라 점성마찰저항력도 포함하고 있으므로 수직항력계수는 점성마찰저항계수를 가정하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_n = \frac{(\epsilon_m - \epsilon_f) / \epsilon_{n,ref}}{\frac{1}{2} \rho D L V^2 \sin^2 \theta} \quad (5)$$

여기서 ϵ_m 는 계측된 strain, ϵ_f 는 가정된 마찰저항 유체력에 의해 strain gauge 부착부에서의 계산된 strain, $\epsilon_{n,ref}$ 는 단위 수직 유체력에 의한 strain gauge 부착부에서의 계산된 strain이다.

Table 1 Calculated and Measured Fundamental Natural Frequencies of the Tested Inclined Cylinders (unit : Hz)

Inclined Cylinder	Inclined Angle	Direction	In Air		In Water	
			Experi.	Analysis	Experi.	Analysis
1	10°	Transverse	15.00	15.51	-	13.62
		In-line	16.25	16.27	-	14.29
2	20°	Transverse	15.75	15.53	13.25	13.63
		In-line	16.13	16.19	13.75	14.22
3	30°	Transverse	15.50	15.62	-	13.72
		In-line	15.75	16.15	-	14.19

Table 2 Calculated Strain of the Tested Inclined Cylinders due to Unit Normal Force along the Cylinder Length

Inclined Cylinder	Inclined Angle	Strain ($\mu\epsilon$)
1	10°	3.587
2	20°	3.750
3	30°	3.882

문헌에 의하면 점성마찰저항계수는 대략 0.0025부터 0.01 사이의 값을 갖는 것으로 알려져 있으므로 이 범위 안에서 parametric study를 수행하였다. Fig. 6은 점성마찰 저항계수를 0.005로 택하였을 때에 산정된 수직항력계수값을 보여주며, Table 3에는 경사각에 따른 수직항력계수 C_n 과 점성마찰 저항계수 C_f 의 parametric study 결과가 정리되어 있다.

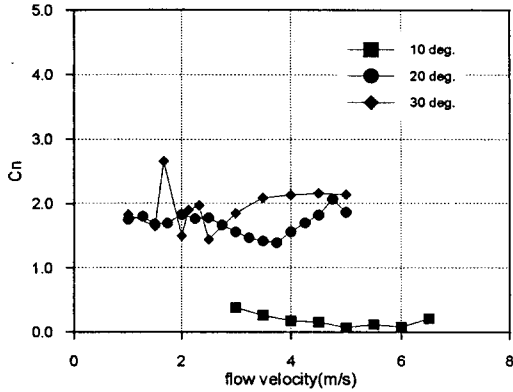


Fig. 6 Estimated Normal Drag Coefficients of the Inclined Cylinders($C_r=0.005$)

Table 3 Estimated Normal Drag Coefficients C_n vs. Inclined Angle θ

θ	C_n			
	$C_r=0.0025$	$C_r=0.005$	$C_r=0.0075$	$C_r=0.01$
10°	0.244	0.181	0.118	0.060
20°	1.706	1.693	1.680	1.667
30°	1.959	1.955	1.951	1.946

3.2 시험봉의 유동유기진동 특성

시험봉의 유동유기진동 특성을 알아보기 위하여 유동방향과 그에 수직인 방향에서 계측된 strain의 동적 특성인 주진동수, rms strain, 시험봉 하단부에서의 rms변위동을 살펴 보았다. 결과는 Table 4, 5 및 Table 6에 정리하였다. 시험봉의 하단부에서의 rms변위는 실제측치가 아니라 계측된 rms strain이 발생할 때에 시험봉 하단부에 생기는 rms변위를 유한요소모델을 이용하여 계산한 것이다.

Table 4, 5, 6의 유동유기진동 데이터로부터 양력계수 C_L 을 구하면 Fig. 7과 같다. 이때 양력계수 C_L 은 양력이 시험봉에 균일하게 작용한다고 가정하여 단위 양력이 시험봉에 작용할 때 strain gauge 부착부에서의 strain을 계산하여 다음 식으로부터 구한다.

$$C_{L,rms} = \frac{\varepsilon_{L,rms}/\varepsilon_{L,ref}}{\frac{1}{2} \rho DV^2}$$

여기서 $C_{L,rms}$ 는 양력계수의 rms 값, $\varepsilon_{L,rms}$ 는 계측된 양력

방향의 rms strain, $\varepsilon_{L,ref}$ 은 단위 양력에 의해 유발된 양력 방향의 strain 계산치를 나타낸다. Fig. 7의 x축은 무차원 유속파라미터 $\frac{V}{f_n D}$ 이며, 여기서 f_n 은 시험봉의 양력방향의

공기중 고유진동수를 나타낸다.

Table 4 Dynamic Characteristics of Measured Strains and Estimated Displacements at the End of 10° Inclined Cylinder

Flow Velocity (m/s)	In-line Direction			Transverse Direction		
	Main Frequency (Hz)	RMS Strain($\mu\varepsilon$)	RMS Displ.(mm)	Main Frequency (Hz)	RMS Strain($\mu\varepsilon$)	RMS Displ.(mm)
3.00	7.935	3.442	0.107	1.221	0.199	0.017
3.50	7.588	3.536	0.110	13.062	0.267	0.023
4.00	3.296	1.376	0.043	13.062	0.281	0.024
4.50	13.308	0.474	0.015	13.062	0.686	0.058
5.00	12.817	1.022	0.032	12.817	3.268	0.274
5.50	12.940	15.122	0.470	12.940	23.875	2.009
6.00	12.940	6.844	0.213	12.940	48.712	4.099
6.50	13.062	6.010	0.187	13.062	51.115	4.301

Table 5 Dynamic Characteristics of Measured Strains and Estimated Displacements at the End of 20° Inclined Cylinder

Flow Velocity (m/s)	In-line Direction			Transverse Direction		
	Main Frequency (Hz)	RMS Strain($\mu\varepsilon$)	RMS Displ.(mm)	Main Frequency (Hz)	RMS Strain($\mu\varepsilon$)	RMS Displ.(mm)
1.01	70.679	0.453	0.013	3.052	0.173	0.011
1.28	14.648	2.480	0.072	4.273	0.321	0.020
1.50	14.282	61.496	1.783	14.282	1.422	0.088
1.74	14.526	64.943	1.883	14.526	2.088	0.130
2.00	15.381	1.140	0.033	14.038	0.824	0.051
2.25	14.771	17.756	0.515	14.771	3.715	0.230
2.50	15.015	36.596	1.061	15.015	8.019	0.498
2.75	15.259	44.597	1.293	15.015	8.669	0.539
3.00	15.503	48.035	1.393	15.503	5.373	0.334
3.25	16.602	2.050	0.059	13.916	3.613	0.225
3.50	16.968	2.162	0.063	12.207	5.369	0.334
3.75	12.940	1.817	0.053	12.940	14.127	0.877
4.00	24.658	7.005	0.203	12.329	94.062	5.840
4.25	24.536	18.165	0.527	12.207	124.920	7.756
4.50	18.433	36.759	1.066	12.329	164.361	10.203
4.75	25.269	27.636	0.801	12.695	201.576	12.514
5.00	25.757	29.467	0.854	12.817	233.412	14.491

Table 6 Dynamic Characteristics of Measured Strains and Estimated Displacements at the End of 30° Inclined Cylinder

Flow Velocity (m/s)	In-line Direction			Transverse Direction		
	Main Frequency (Hz)	RMS Strain (μE)	RMS Displ.(mm)	Main Frequency (Hz)	RMS Strain (μE)	RMS Displ.(mm)
1.01	13.794	40.678	1.493	13.794	4.700	0.232
1.09	13.794	64.517	2.368	13.794	6.886	0.341
1.32	14.180	158.114	5.804	14.180	2.268	0.112
1.51	13.550	2.544	0.093	13.550	3.220	0.158
1.67	14.282	59.315	2.177	14.282	11.291	0.557
2.00	15.381	4.928	0.181	13.062	4.508	0.222
2.13	15.259	2.149	0.079	11.597	6.552	0.324
2.32	0.732	15.976	0.586	12.451	30.648	1.512
2.50	0.732	1.934	0.071	12.573	21.284	1.049
3.00	23.071	21.417	0.786	11.597	182.201	8.987
3.50	24.048	87.559	3.214	11.963	294.229	14.512
4.00	25.147	64.404	2.364	12.573	404.910	19.971
4.50	26.367	58.434	2.145	13.062	381.493	18.816
5.00	29.053	50.671	1.860	14.526	287.972	14.204

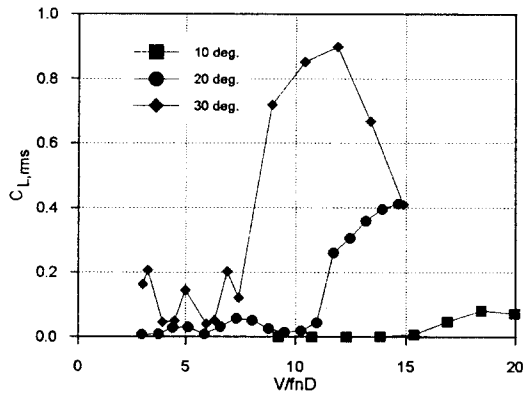


Fig. 7 Lift Force Coefficients $C_{L,rms}$ vs. Reduced Velocity $V/f_n D$

4. 실험결과 고찰 및 결론

4.1 유체항력계수

Table 3로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 수직항력계수 C_n 은 경사각에 따라 다르며 경사각이

낮아질수록 작은 값을 갖는다.

- 수직항력계수 C_n 은 경사각이 20° 이상되면 여러 관찰자에 의해 관측된 값의 범위(1.7 - 2.0)의 값을 갖는다.
- 점성마찰저항계수 $C_f=0.005$ 을 기준으로하여 식(1), (2)로부터 점성마찰력에 대한 수직항력의 상대크기를 비교하면 다음과 같다.

Inclined Angle	10°	20°	30°
$\frac{F_n}{F_f}$	0.001	14.3	41.5

따라서 경사각이 10° 근처 또는 이하가 되면 유체력으로서 마찰저항력이 지배적이나 20° 이상이 되면 수직항력이 지배적임을 알 수 있다.

4.2 유동유기진동특성

Fig. 7 및 Table 4, 5, 6의 유동유기진동 실험결과로부터 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

- 거의 모든 유속에 걸쳐 계측된 유동유기진동의 주 주파수는 시험봉의 제 1차 고유진동수에 해당된다. 이는 봉의 주위에 불규칙성을 가진 와의 발생으로 불규칙적인 유체력(random hydrodynamic force)이 발생하고, 이에 제 1차 고유진동모드가 제일 쉽게 가진되어 응답하기 때문인 것으로 판단된다.

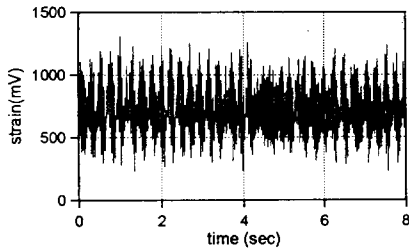
- 경사각 30° 인 경우에 양력계수 $C_{L,rms}$ 는 무차원 유속 파라미터 $V/f_n D$ 가 8정도에서 갑자기 커지기 시작하여 12 정도에서 최대치를 가진다. 이 때 최대 $C_{L,rms}$ 의 값은 0.9이다.

- 경사각 20° 인 경우에 양력계수 $C_{L,rms}$ 는 무차원 유속 파라미터 $V/f_n D$ 가 11.7에서부터 커지며 최대 $C_{L,rms}$ 의 값은 약 0.4로서 경사각 30° 인 경우의 1/2수준이다.

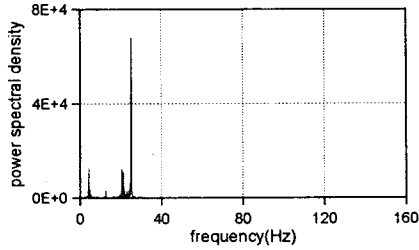
- 경사각 10° 인 경우에는 무차원 유속파라미터 $V/f_n D$ 가 20까지 증가하는 동안 양력계수 $C_{L,rms}$ 이 크게 증가하는 범위가 존재하지 않는다.

- 양력계수 $C_{L,rms}$ 값이 커지는 구역에서의 시험봉의 거동은 lock-in현상의 전형적인 모습인 8자를 그리고 있음을 해당 유속에서의 궤적도로부터 알 수 있다(Fig. 8(e)).

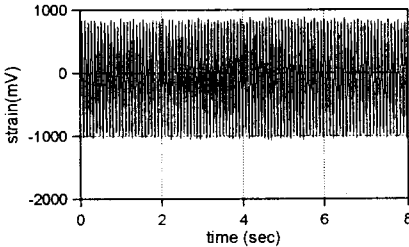
- 경사각 30° 인 시험봉의 경우 lock-in 범위에서의 양력 방향 최대변위는 Table 6에서 보는 바와 같이 rms값으로 약 20mm이며 이는 단순조화운동을 가정할 때 직경의 약 1.3배의 변위로 진동하는 것이 된다.



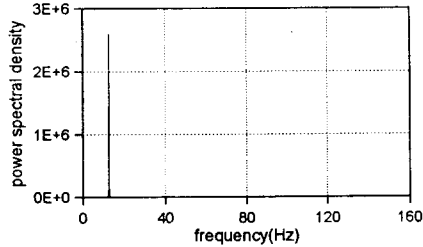
(a) Time Series of the Strain Measured in Flow Direction



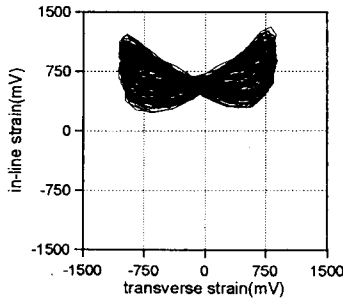
(b) Spectrum of the Strain Measured in Flow Direction



(c) Time Series of the Strain Measured in Trans. Direction



(d) Spectrum of the Strain Measured in Trans. Direction



(e) Locus of the Measured Strain

Fig. 8 Measured Strain of 30° Inclined Cylinder at $V=4.0\text{m/s}$

• 유속에 수직인 원형실린더의 경우 lock-in 구간은 질량비에 따라 다르나 대략 $4 < V/f_n D < 8$ 인 것으로 알려져 있다[8]. 경사실린더의 경우 실린더에 수직인 방향의 유속 성분은 $V \sin \theta$ 로서 경사진 실린더의 lock-in 범위가 $4 < \frac{V \sin \theta}{f_n D} < 8$ 로부터 정해질 수 있다고 하면 lock-in 현상

이 일어나는 구간은 경사각이 30° 인 경우 $8 < V/f_n D < 16$, 경사각이 20° 인 경우 $11.7 < V/f_n D < 23.4$ 이다. 계측된 유동유기진동현상은 이에 매우 양호하게 부합됨을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Hoerner, S. F., *Fluid Dynamic Drag* N. J. : Hoerner Fluid Dynamics, Brick Town, 2nd Edition, 1965
- [2] Bourget, P. L. and Marichal, D., "Remarks about Variations in the Drag Coefficient of Circular Cylinders Moving through Water", *Ocean Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 569-585, 1990
- [3] Millinazo, F., Wilkie, M., and Latchman, S. A., "An Efficient Algorithm for Simulating the Dynamics of Towed Cable Systems", *Ocean Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 513-526, 1987
- [4] Albow, C. M. and Schechter, S., "Numerical Simulation of Undersea Cable Dynamics", Vol. 10, No. 6, pp. 443-457, 1983
- [5] Sanders, J. V., "A Three-Dimensional Dynamic Analysis of a Towed System", *Ocean Engineering*, Vol. 9, No. 5, pp. 483-499, 1982
- [6] Blevins, R. D., *Flow-Induced Vibration*, Von Nostrand Reinhold, 2nd Edition, 1990
- [7] Horton, K. J., Ferrer, C. M., and Watson, K. P., "Measurements of the Hydrodynamic Characteristics of Standard Cables", *Offshore Technology Conference*, Paper No. 5221, 1987
- [8] 정태영, "원통형 부재의 질량비에 따른 와유기진동 특성 연구", *대한조선학회 논문집*, 제 28 권, 제 2 호, 1991