

POD를 이용한 구조기본단면 주변 비정상흐름장 특성에 관한 연구

Study on Unsteady Flow Field around Rectangular Cylinders using Proper Orthogonal Decomposition (POD)

이 재 형¹⁾ · 松本 勝²⁾
Lee, Jae Hyung Matsumato, Masaru

요 약 : 본 연구에서는 구조적 기본단면인 사각단면중에서 B/D=2,3,4,5 단면을 대상으로 단면주위 흐름상태가 단면의 공기력 특성에 미치는 영향을 살펴보고, 정지/진동하는 B/D=4 사각실린더 주위의 비정상압력장에 POD해석을 도입함으로써 흐름패턴에 따른 POD해석의 고유벡터를 규정하고 실린더 주위 흐름장 안에 공존하는 서로 다른 흐름패턴의 상호간섭과 물리적 모드분해에 관하여 검토하였다. POD해석의 고유벡터 비교를 통해서 칼만와류는 박리버블에 의해서 거의 영향받지 않지만 칼만와류는 단면후류부에서 박리버블의 발달에 상당히 간섭하고 있음을 확인하였다. 변장비(B/D=2,3,4,5) 변화에 따른 $dC_L/d\alpha$, H_1^* 의 정(+)-부(-)의 차이, 즉 궤로평형현상에 대한 안정/불안정성은 박리전단층의 재부착에 깊은 관련이 있는 것으로 판단되며 B/D=3,4에서 시간평균적으로 재부착하던 주위흐름장이 칼만와류의 방출을 제어하면 재부착하지 않는 것으로 생각된다. 즉, 칼만와류의 억제제는 후류부에서 박리전단층의 곡률이 작아지도록 간섭하고 단면에 있어서 elongation효과를 나타낸다.

ABSTRACT : In this study, the effect of an unsteady flow field around a body of aerostatic/aerodynamic forces were investigated using rectangular cylinders (B/D = 2, 3, 4, 5). Proper orthogonal decomposition (POD) was introduced to the analysis of the fluctuating pressure field that was measured on the stationary/oscillatory B/D=4 rectangular cylinder, and the characteristics of the proper functions with flow patterns were identified. In addition, the physical decoupling and interactions in the different co-existing flow patterns were investigated through POD. The comparison with the identified proper function associated with a particular flow pattern revealed that the Karman vortex is almost not affected by the separation bubble, but that the Karman vortex considerably interferes in the development of the separation bubble around the trailing edge. It can be considered that the Karman vortex induces the increment of the curvature of the substantial separated flow.

핵심용어 : 구형실린더, 비정상흐름장, 비정상압력장, 칼만와류, 고유직교분해법

KEYWORD : rectangular cylinder, unsteady flow field, unsteady pressure field, Karman vortex, proper orthogonal decomposition

1. 서론

기류속에 놓인 bluff body의 공기역학적 진동현상은 일반적으로 와류진동, 궤로핑, 그리고 플러터 등으로 분류할 수 있다. 이러한 공력진동현상들은 bluff body 주위 비정상압력의 공간적 분포변화와 bluff body 운동의 상호작용에 의해서 발생한다. 즉, bluff body 전연에서 박리한 전단층(shear-layer)과 bluff body 주위에서 생성된 와류에 의한 비정상압력분포의 변화양상이 bluff body 운동과의 위상관계에 의해서 공력진동현상을 일으킨다. 공력진동현상을 유발하는 지배적 요소중에서

bluff body 주위에 작용하는 비정상압력은 기류의 박리, 재부착과 와류발생 그리고 bluff body의 운동 등에 의한 영향에 의해서 시간적, 공간적으로 복잡하게 변화하게 된다. 이러한 비정상압력분포의 변화를 유발하는 흐름패턴은 일반적으로 bluff body 단면배후에 주기적으로 생성·방출되는 칼만와류(Karman vortex), 단면의 운동에 의해 단면의 측면상에서 형성되는 MIV (Motion-induced vortex) 그리고 비정상 박리버블 등으로 분류할 수 있다. Bluff body의 공기역학적 진동현상들은 앞서 설명한바와 같이 단면주위의 비정상압력분포로부터 기인하며 그 압력장은 각각의 서로 다른 흐름장(flow

1) 교신저자. (주)티이솔루션, 공학박사
(Tel. 031-658-2906, Fax. 031-658-2908, E-mail: jhlee.badl@gmail.com)
2) 교토대학 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사(matsu@brdgeng.ge.kyoto-u.ac.jp)

본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

field)과 관련된 비정상압력의 중첩에 의해서 표현될 수 있다. 하지만 서로 다른 흐름패턴들이 bluff body 주변 흐름장 안에 공존하기 때문에 bluff body flow의 특성을 규정하는 것은 매우 어렵다. 특히, 칼만와류의 경우는 다른 흐름패턴들과 공존함으로써 칼만와류에 의한 진동현상 뿐만 아니라 다른 다양한 공기역학적 진동현상과도 관련되어 있다. 그러므로 공기역학적 간섭현상을 이해하기 위해서는 bluff body flow 안의 각각의 흐름패턴이 그 공기역학적 진동현상에 어떻게 영향을 미치는지 확인하는 것이 매우 중요하다.

공기역학적 간섭현상과 관련된 비정상압력장은 흐름패턴들의 중첩으로 고려될 수 있으며 최근에 비정상압력분포나 비정상풍속분포와 같은 불규칙한 변동데이터로부터 물리적으로 의미있는 모드분해를 통해서 흐름현상 또는 진동현상에 관한 연구에서 고유직교분해법(Proper orthogonal decomposition)이 널리 이용되고 있다. 고유직교분해법(POD) 또는 Karhunen-Loeve 분해법으로 알려진 이 방법은 랜덤과정을 포함해서 image processing, 데이터 압축, 시스템 identification 등의 광범위한 공학분야에서 적용되어지고 있다. 풍공학분야에선, Armit(1968)이 구조물주위의 풍압해석에 POD를 처음으로 적용하였고, Lee(1975)는 난류 흐름속에 놓인 사각단면의 비정상압력연구에 POD해석을 사용하였다. 또한 Kareem과 Cermak(1984) 그리고 Holmes(1990)는 빌딩 풍하중연구에 POD를 적용하였다.

일반적으로 고유직교분해법의 적용으로 얻어진 지배적 기여도를 갖는 저차모드들은 특정 물리적 현상을 대표하는 것으로 고려되고 특정 흐름패턴에 따른 POD모드의 고유벡터를 규정할 수 있다.

본 연구에서는 구조기본단면인 사각단면중에서 $B/D=2,3,4,5$ 단면을 대상으로 단면주위 흐름상태가 단면의 공기력 특성에 미치는 영향을 살펴보고 또한 단면주위의 비정상압력장에 POD해석을 적용하여 POD해석의 장점과 물리적의미를 고찰한다. POD해석은 단면주위의 랜덤한 변동압력장의 변화양상이면에 내재된 bluff body flow의 정보를 제공하고 결국, bluff body의 공력불안정현상과 주위흐름에 대한 더 나은 이해를 도울 수 있다.

2. 풍동실험

단면주위 흐름상태가 단면의 공기력특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 표1의 제원을 갖는 $B/D=2,3,4,5$ 사각단면에 대해서 층류상태에서 정적 공기력(항력, 양력, 피칭모멘트)계수와 비정상공기력계수의 측정실험이 수행되었다.

표 1. 사각단면 제원

B/D	B(mm)	D(mm)
2.0	100	50
3.0	150	50
4.0	200	50
5.0	250	50

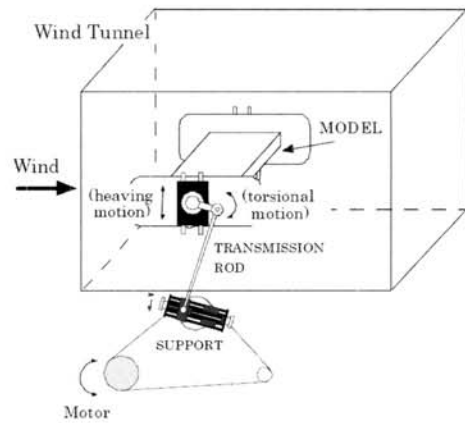


그림 1. 강제진장치

정적 공기력계수는 영각 -10° 에서 $+10^\circ$ 까지 1° 씩 변화시키며 측정하였고 영각에 대한 기울기는 다항식모형을 통해 얻어진 그래프로부터 측정되었다. 그림1과같은 강제진장치를 이용하여 휨/비틀림 1자유도에 대해서 배진폭 10mm와 2° 진폭의 조화가진상태에서 비정상공기력을 얻고 그로부터 비정상공기력계수를 계산하였다. 모든 실험은 단면배후에서 발달하는 칼만와류의 생성을 억제하기위한 splitter plate(길이, 900mm) 삽입조건에서도 수행되었다. 단면주위의 비정상압력장의 변화양상을 파악하기위해서 $B/D=4$ 압력실험모형($B=300m, D=75mm$) 주위의 비정상압력이 정지모형상태와 휨/비틀림 1자유도에 대해서 각각 배진폭 10mm와 2° 의 진폭의 조화가진상태에서 측정되었다. 압력실험모형은 모형상부/하부표면에 각각 20개의 압력공이 배치되어있는데, 본 연구에서는 상부압력공 20개로부터 얻어진 비정상압력에 POD해석을 적용했다.

3. 고유직교분해법(POD)

POD해석은 시간, 공간적으로 불규칙한 변동장을 가장 효율적으로 표현하기 위한 좌표계를 찾는 과정이다. 즉 불규칙한 데이터를 모드분해하기위한 basis를 추출하는 과정으로, 본 연구에서는 단면모형 상면에서 측정된 비정상압력분포 $\{P(t)\}$ 에 POD해석이 아래와 같이 적용되었다.

$$\{P(t)\} = \sum_{n=1}^N a_n(t) \{\phi_n\} \quad (1)$$

여기서 $\{\phi\}$ 는 비정상압력분포의 공분산행렬 $\{R\} = \langle \{P(t)\} \{P(t)\}^T \rangle$ 의 고유벡터이고 N 은 해석에 사용된 압력공의 수이다. 비정상압력에 적용한 POD해석은 결국 식(2)와 같은 고유치문제에 귀결된다.

$$\{R\} \{\phi_n\} = \lambda_n \{\phi_n\} \quad (2)$$

여기서 λ 는 고유치이고 n 번째 기준좌표는 아래와 같이 구해진다.

$$a_n(t) = \{P_n(t)\} \{\phi_n\}^T \quad (3)$$

$$\Phi^T \Phi = I \text{ and } \Phi^T \{R\} \Phi = \Lambda \quad (4)$$

여기서 $\Phi = [\{\phi_1, \dots, \phi_N\}]$, $I =$ 단위 행렬, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_N)$ 이다. 식 (4)와 같은 고유벡터간의 직교특성에 의해서 기준좌표 제곱의 시간평균이 고유치와 같음을 알 수 있다.

$$\langle a_n(t)^2 \rangle = \lambda_n \quad (5)$$

여기서 기호 $\langle \rangle$ 는 시간평균을 의미한다.

4. 공기력특성

4.1 정적공기력

정적공기력계수는 이하와 같이 항력과 양력에 대해서 각각 모형높이(D)와 폭(B)으로 정규화 되었다.

$$C_D = F_D / (0.5\rho V^2 D l), C_L = F_L / (0.5\rho V^2 B l) \quad (6)$$

$$S_t = f_s D / V, C'_L = F_L(t) / (0.5\rho V^2 B l)$$

여기서 F_D, F_L 는 시간평균된 항력과 양력이고 ρ 는 공기밀도, V 는 풍속, l 은 모형길이, f_s 는 와류방출 진동수 S_t 는 Strouhal수, C'_L 은 변동양력계수이다.

그림 2은 각 변장비(B/D)에서의 정적공기력계수의 변화를 나타낸다. 본 연구의 실험결과와 신뢰성을 확인하기 위해서 그림2와 같이 항력계수, 변동양력계수, S_t 에 대해서 과거 연구

결과와 비교한 결과, 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

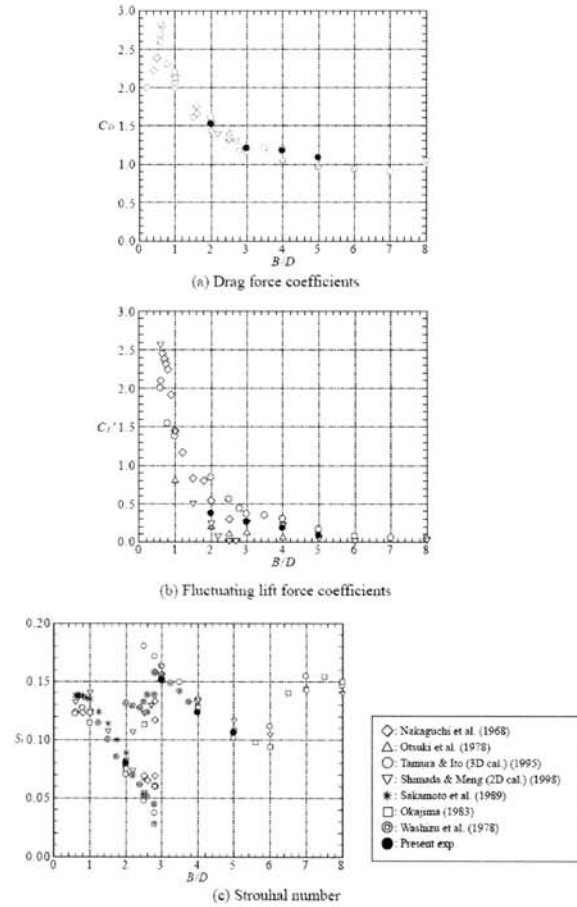


그림 2. 정적 공기력(항력, 변동양력)계수와 S_t

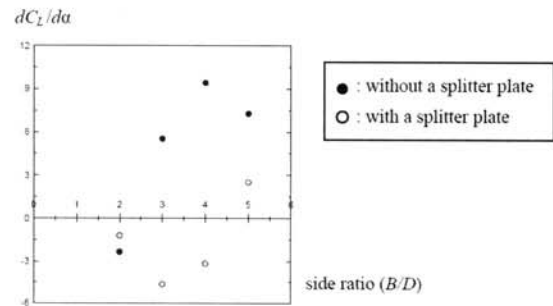


그림 3. Splitter plate 유무에 따른 $dC_L/d\alpha$

그림 2(b)에서와 같이 변장비 증가에 따른 C'_L 의 점진적 감소는 칼만와류 방출강도의 약화에 기인하며 칼만와류 방출이 단면주위의 공기력 특성에 미치는 영향이 약해지는 것으로 생각될 수 있다. 또한 S_t 는 변장비 약 2.8과 6 근처에서 불연속적인 변화가 나타나며 이것은 변장비 2.8과 6에서 단면주위의 시간평균적 흐름상태가 급격하게 변화하기 때문이다.

한편 깰로핑현상에 대한 칼만와류 간섭을 확인하기위해서 양력계수의 기울기 $dC_L/d\alpha$ 의 경우는 splitter plate유무의 조

건에서 실험이 수행되었고 그림3과 같은 결과를 얻었다. Splitter plate 비삽입조건 즉, 칼만와류의 방출이 자유로운 상태에서는 $B/D=2$ 단면에서만 $dC_L/d\alpha$ 가 부(-)였지만 칼만와류의 생성억제를 위해 splitter plate를 삽입한 조건에서는 $B/D=2,3,4$ 단면에서 $dC_L/d\alpha$ 가 부(-)값을 나타낸다. 그러므로 준정상학적 관점으로부터, 칼만와류의 생성을 억제한 경우가 더 넓은 변장비영역에서 꺾로핑현상에 대해서 불안정하다는 것을 알 수 있다.

4.2 비정상공기력

비정상양력 L_{se} , 비정상모멘트 M_{se} 은 Scanlan에 의해서 제안된 비정상공기력계수 H_i^* , A_i^* ($i=1,2,3,4$)를 이용하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$L_{se} = \frac{1}{2} \rho B V^2 \left\{ kH_1^* \frac{\dot{\eta}}{V} + kH_2^* \frac{B\dot{\phi}}{V} + k^2 H_3^* \phi + k^2 H_4^* \frac{\eta}{B} \right\}$$

$$M_{se} = \frac{1}{2} \rho B^2 V^2 \left\{ kA_1^* \frac{\dot{\eta}}{V} + kA_2^* \frac{B\dot{\phi}}{V} + k^2 A_3^* \phi + k^2 A_4^* \frac{\eta}{B} \right\} \quad (7)$$

여기서 L_{se} 과 M_{se} 은 단위길이당 양력(N/m)과 단위길이당 피칭모멘트(Nm/m)이고 η 는 휨방향변위, ϕ 는 비틀림변위를 나타낸다. ($\dot{\quad}$)은 시간미분을 정의하고 k 는 무차원진동수 ($b\omega/V$), $2b$ 는 단면폭(m) 그리고 ω 는 각진동수(rad/sec)를 나타낸다.

그림 4,5,6,7에서는 비정상양력과 관련된 $H_1^*, H_2^*, H_3^*, H_4^*$ 를 splitter plate유무에 따라 정리해보았다. 그림4(a)에서와 같이 splitter plate가 없는 상태 즉, 칼만와류의 방출이 자유로운 상태에서 꺾로핑의 발현을 의미하는 고무차원풍속에서 정(+)의 H_1^* 는 $B/D=2$ 에서만 나타나지만 칼만와류의 방출을 억제한 그림4(b)에서는 $B/D=2,3,4$ 의 단면에서 정(+)의 H_1^* 가 나타나고 이것은 4.1에서 살펴본 정적공기력계수에서 준정상학적 관점의 꺾로핑 발생을 의미하는 부(-)의 $dC_L/d\alpha$ 의 결과와 동일하다. 즉, 보다 넓은 변장비 영역에서 꺾로핑에 대해서 불안정해짐을 알 수 있다. Bearman(1972)의 지적처럼, 꺾로핑현상을 유발하는 요소중에서 단면측면의 내부순환류의 발달은 단면전연에서 박리한 박리전단층의 재부착과 깊은 관련성을 가지는데, 이것이 변장비에 따른 $dC_L/d\alpha$ 와 H_1^* 의 정(+)/부(-)의 차이로 나타난다. 즉 $B/D=3,4$ 에서 시간평균적으로 재부착하는 단면주위 흐름장에 의해서 단면측면에서 내부순환류의 발달이 어려웠지만 splitter plate설치에 의해 칼만와류의 방출이 억제됨으로써 박리전단층이 단면측면에 재부착하지 않을 가능성이 제기된다. 좀 더 명확한 칼만와류의 간섭을 조사하

기위해서 칼만와류의 생성억제를 위해 삽입한 splitter plate에 의해서 공기력진동특성에 큰 변화를 보이는 $B/D=4$ 단면에 대해서 단면주위 비정상압력장의 변화를 검토해 본다.

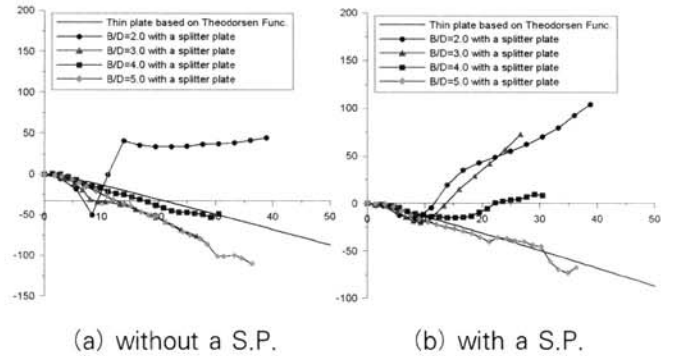


그림 4. 비정상공기력계수 H_1^* ($B/D=2,3,4,5$)

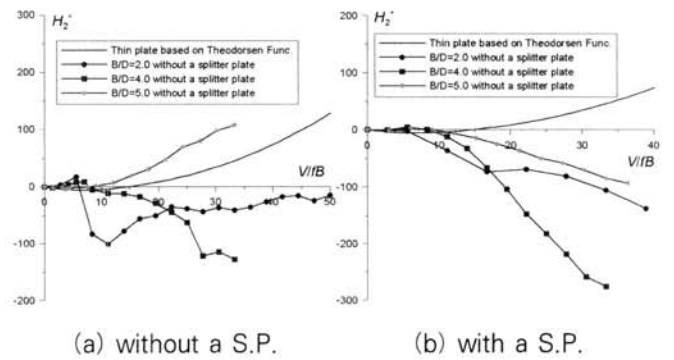


그림 5. 비정상공기력계수 H_2^* ($B/D=2,4,5$)

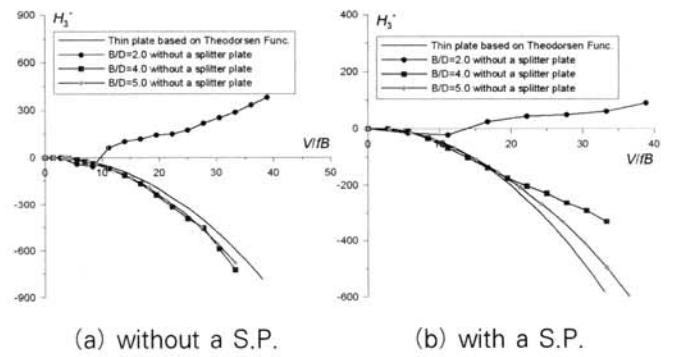


그림 6. 비정상공기력계수 H_3^* ($B/D=2,4,5$)

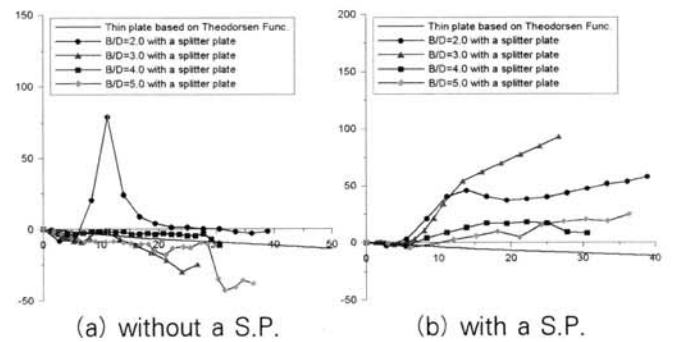


그림 7. 비정상공기력계수 H_4^* ($B/D=2,3,4,5$)

5. 단면주위의 비정상압력장

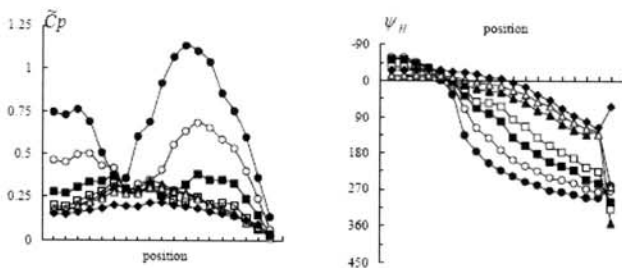
휨/비틀림 1자유도 조화운동을 하는 $B/D=4$ 압력모형 표면의 변동압력계수와 위상은 그림8,9과 같다. 모형의 휨/비틀림 진동과 동조된 비정상압력의 정규화된 진폭과 위상은 각각 \tilde{C}_p 와 ψ 로 표현한다. 변동압력계수는 비정상압력을 평균압력, $1/2\rho V^2$ 으로 정규화한 값이고 위상은 모형의 상대영각 최대시점($(\dot{\eta}/V)_{max}, \phi_{max}$)으로부터 부압최대시점의 위상지연을 의미한다.

먼저 그림8의 휨 1자유도 조화가진시의 변동압력계수와 위상그래프를 살펴보면 다음과 같다.

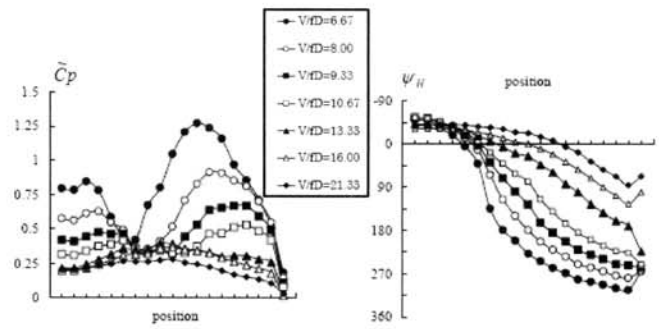
칼만와류의 방출이 자유로운 splitter plate가 없는 경우, 무차원풍속 (V/fD)이 10.67이하에서는 변동압력계수분포가 두 개의 피크를 가지며 이것은 전연에서의 박리전단층 불안정성에 기인하는 와류생성과 모형측면을 따라 흐르는 와류의 영향으로 생각된다. 또한 무차원풍속의 증가와 함께 \tilde{C}_p 는 감소하고 피크점들은 하류쪽으로 서서히 이동된다. 반면에 무차원 풍속 13.33이상에서는 측면중앙부근에서 단지 1개의 변동압력계수 피크가 관찰되며 \tilde{C}_p 는 모형측면을 따라 단조롭게 감소한다. 위상 그래프를 살펴보면 $V/fD=10.67$ 이하의 경우, 후연에서의 비정상압력은 전연에서의 비정상압력에 대해서 약 $250^\circ-360^\circ$ 의 위상지연을 가지며, 무차원풍속의 증가에 따라 위상지연은 감소한다. 반면에 $V/fD=13.33$ 이상에서는 약 180° 이하의 위상차를 확인할 수 있다.

칼만와류의 방출을 억제하기위해 splitter plate를 삽입한 경우의 \tilde{C}_p 경향은 칼만와류의 방출이 자유로운 splitter plate 비삽입경우와 거의 동일한 경향을 보여준다. 다만, \tilde{C}_p 의 크기가 splitter plate 를 삽입한 경우가 좀더 큰 경향을 나타낸다. 또한 위상차 역시 splitter plate 비삽입경우의 결과와 거의 일치하였다.

한편, 그림9의 비틀림 1자유도 조화가진시의 변동압력계수와 위상그래프를 살펴보면 다음과 같다.

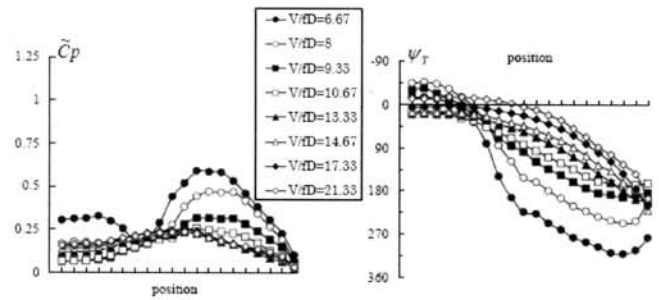


(a) without a splitter plate

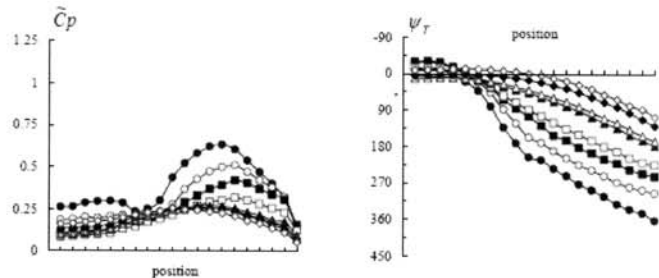


(b) with a splitter plate

그림 8. 변동공기력계수와 위상그래프 (휨1자유도 가진)



(a) without a splitter plate



(b) with a splitter plate

그림 9. 변동공기력계수와 위상그래프(비틀림1자유도 가진)

먼저 splitter plate 비삽입의 경우, \tilde{C}_p 는 휨가진시와 매우 유사한 경향을 가지며 $V/fD=9.33$ 이하의 경우에 전연과 후연에서 비정상압력의 위상은 π 이상 지연된다. 반면에 $V/fD=10.67$ 이상의 경우에는 위상차가 π 보다 작은 것이 관찰된다. 또한 splitter plate삽입의 경우에도 휨가진시와 매우 유사한 결과를 얻었으며 \tilde{C}_p 의 크기가 splitter plate를 삽입한 경우가 좀더 큰 경향을 보이는 것 역시 동일했다.

$B/D=4$ 단면주위 비정상압력장의 \tilde{C}_p 와 ψ 는 무차원풍속에 따라 대략 두 개가 패턴으로 구분할 수 있지만 흐름패턴 상호간의 간섭현상을 알수 없기 때문에 공기역학적 간섭현상과 관련된 비정상압력장의 흐름패턴에 대한 물리적으로 의미있는 모드분해와 흐름패턴간의 상호간섭에 대한 이해를 위해서 $B/D=4$ 단면주위의 비정상압력장에 POD해석을 적용한다.

6. 고유직교분해법(POD) 적용

모형주위의 비정상압력장이 특정 공기역학적 현상에 지배될 때, 비정상압력장은 그 물리적 현상과 관련된 특정 지배진동수가 존재한다. 이러한 비정상압력장에 POD해석을 적용하면, 1,2차 모드는 특별한 페어적 특성을 나타낸다. 그 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다.

첫째, 1,2차 모드의 누적 기여율이 90%이상이고 둘째, 1차 모드의 기준좌표는 2차모드에 대해서 약 90°의 위상차를 가진다. 셋째, 1,2차 모드의 고유벡터는 특정순간의 모형주위 비정상압력장의 순간 압력분포와 일치한다. 넷째, 이러한 1,2차 페어모드는 같은 물리적 현상의 동상/이상(in-phase/out-of-phase) 성분을 표현한다.

비정상압력장이 특정 물리적현상과 관련된 하나의 지배진동수를 가질때, 그 비정상압력장을 표현하는 가장 효율적인 좌표계는 sinusoidal 표현일 것이다. 그러므로 POD해석으로부터 구해지는 새로운 좌표계 역시 일종의 sinusoidal 표현이며 결과적으로 1,2차 페어모드의 특성은 sinusoidal 표현에서 기인한다. 하지만 비정상압력장에 둘 이상의 물리적 현상이 공존-간섭하는 경우에는 이러한 특성을 가진 1,2차 페어모드는 존재하기 어렵다.

6.1 정지모형

정지상태의 B/D=4 모형표면의 비정상압력장을 측정하였다. 정지모형의 경우에 모형주위 비정상압력장은 칼만외류에 의해서 지배되며 비정상압력 대부분의 에너지는 Strouhal 진동수 근처에 분포한다. 따라서 칼만외류와 관련된 Strouhal 진동수에서 90°위상차를 갖는 1,2차 페어모드를 확인할 수 있다. 그림10은 정지모형으로부터 계산된 1,2차 고유벡터를 풍속별로 보여준다.

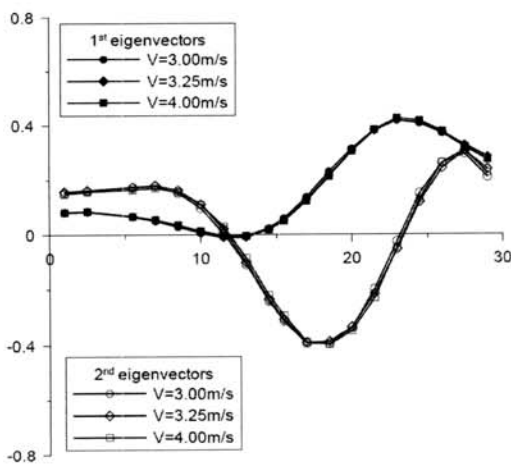


그림 10. 1st & 2nd eigenvectors in the stationary model without a splitter plate ($S_t \approx 0.136$)

표 2. POD 1, 2차모드의 기여율과 위상차(정지모형)

V[m/s]	Proportion (%)		Cumulated proportion(%)	Phase lag (1st & 2nd modes)
	1st mode	2nd mode		
3.00	79.572	18.621	98.193	91.028°
3.25	79.280	18.976	98.256	89.641°
4.00	79.228	19.158	98.386	89.981°

고유벡터의 특성이 풍속에 따라 변화하지 않으므로 정지모형으로부터 얻어진 1차 고유벡터는 모형주위 칼만외류와 관련된 비정상압력장 특성을 대표하는 것으로 생각할 수 있다.

6.2 조화진동모형 (splitter plate 삽입)

휨/비틀림 1자유도 조화진동모형 배후에 splitter plate가 삽입된 경우, 모형주위의 흐름장은 \tilde{C}_p 와 ψ 의 결과로부터 저무차원 풍속대에서 MIV흐름, 고무차원 풍속대에서 박리버블이 지배적 흐름패턴을 구성함을 알 수 있다. 그러므로 모형주위의 비정상압력에서 대부분의 에너지는 모형의 조화진동 주파수, 즉 가진진동수 (2.5Hz) 부근에 분포하게 된다. 따라서 가진진동수에서 1, 2차 모드의 기준좌표는 약90°의 위상을 가진다.

그림 11과 12에서 보이는 것처럼 $V/fD=10.67$ 이하의 고유벡터와 $V/fD=13.33$ 이상의 고유벡터가 각각 MIV흐름과 박리버블에 상응하는 비정상압력장의 특성을 대표하는 것으로 판단된다. 더욱이 휨/비틀림 1자유도 진동에서 1,2차 고유벡터의 특징이 풍속에 따라 거의 일치함을 확인할 수 있다.

6.3 조화진동모형 (splitter plate 비삽입)

모형배후에 splitter plate가 삽입되지 않은 조건에서의 모형의 휨/비틀림 1자유도 조화진동의 경우에, $V/fD=10.67$ (heaving) 9.33(torsional)이하의 비정상압력장이 가진진동수가 지배적이고 상대적으로 낮은 무차원풍속임을 감안할 때 그림13,14에서 보여지는 고유벡터를 MIV흐름을 대표하는 것으로 생각할 수 있으며 splitter plate가 삽입된 경우에 확인된 MIV흐름의 고유벡터 특징과 비교하면 서로 잘 일치함을 확인할 수 있다. $V/fD=16.00$ (heaving)과 10.67 (torsional) 이상에서 비정상압력장의 지배적 진동수는 Strouhal 진동수 (f_{st})와 가진진동수(2.5Hz)가 그림15에서와같이 함께 검출된다. 따라서 이들 무차원풍속대의 1,2차 고유벡터들을 정지모형과 splitter plate가 삽입된 조화진동 모형에서 구해진 1차 고유벡터들의 특성과 비교하면, 1,2차 POD모드가 각각 칼만외류와 박리버블흐름에 상응함을 알 수 있다. 또한 이것은 1,2차 기준좌표($a_1(t), a_2(t)$)의 PSD결과에서도 검증된다.

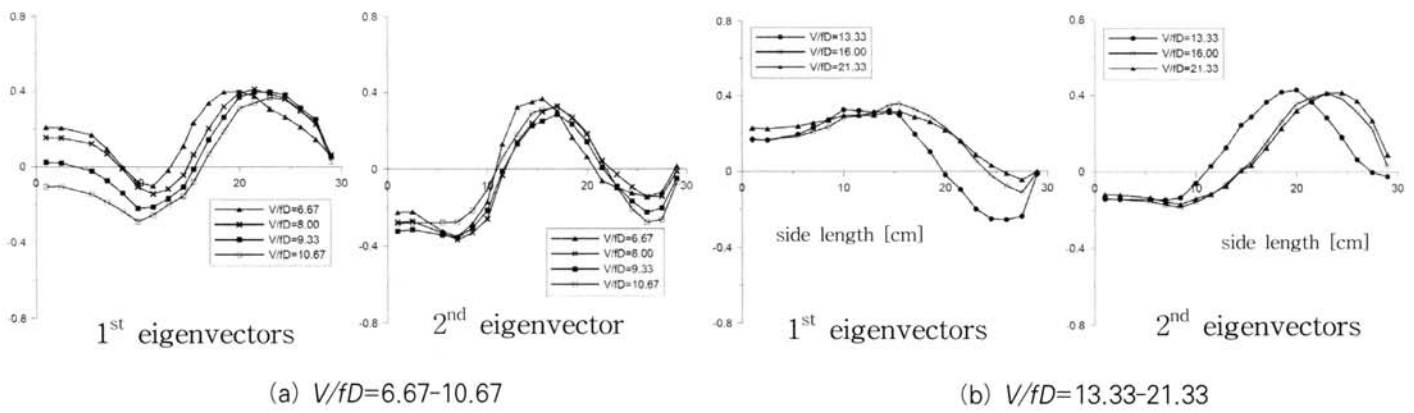


그림 11. 1st & 2nd eigenvectors in heaving oscillatory model with a splitter plate

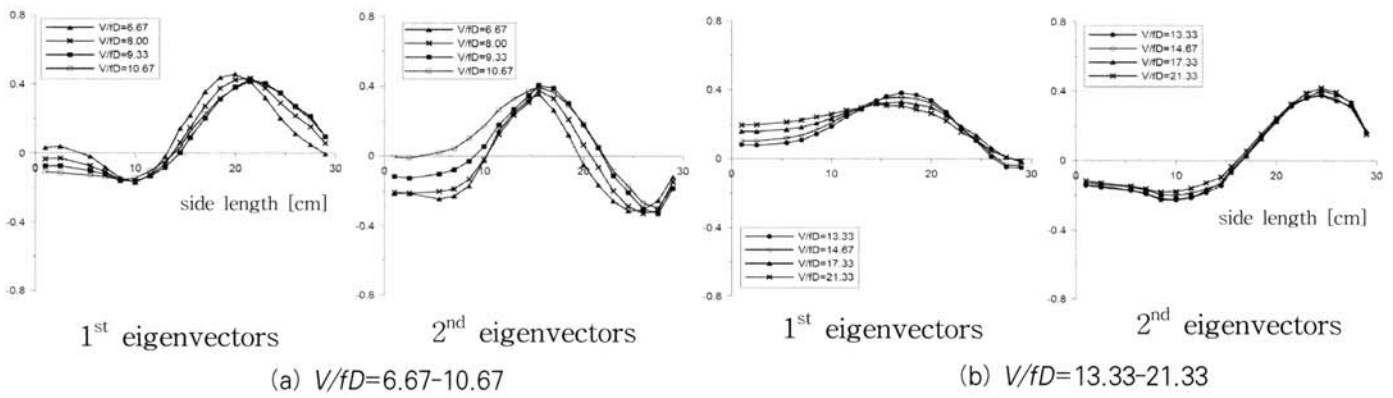


그림 12. 1st & 2nd eigenvectors in torsional oscillatory model with a splitter plate

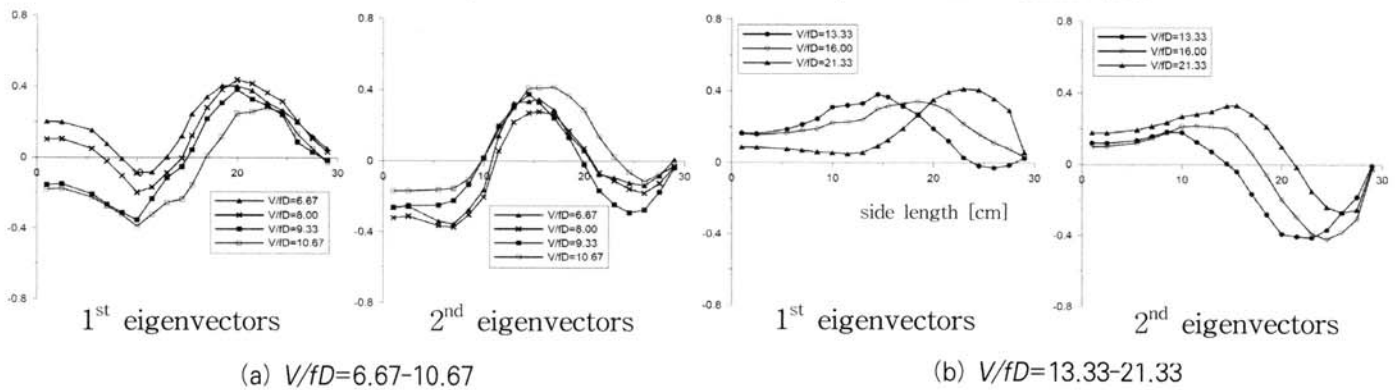


그림 13. 1st & 2nd eigenvectors in heaving oscillatory model without a splitter plate

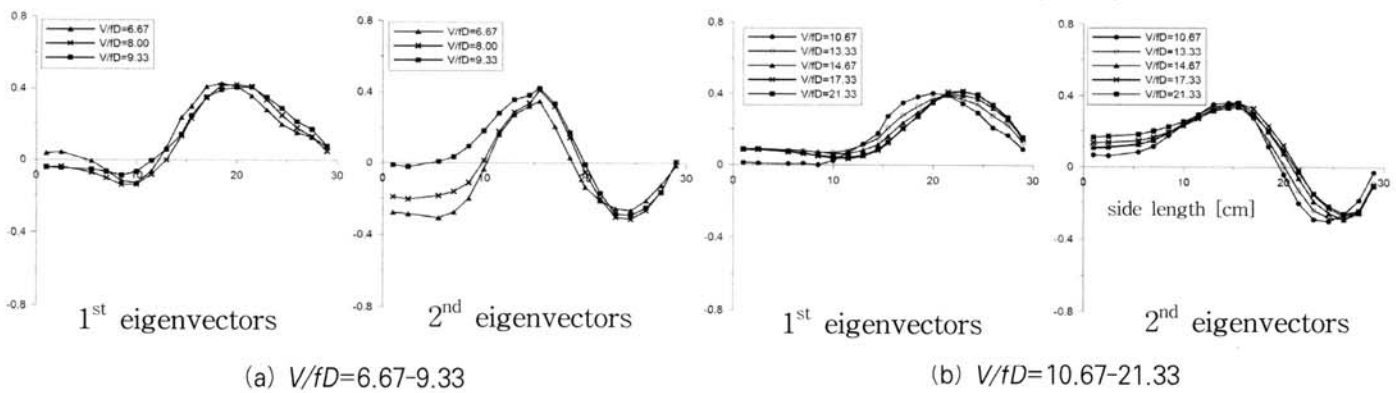
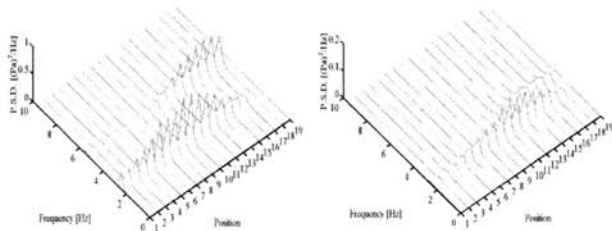


그림 14. 1st & 2nd eigenvectors in torsional oscillatory model without a splitter plate

그림 16과 17에서 보여지는 바와같이, splitter plate 비삽입의 경우에 휨/비틀림 1자유도 조화진동시 $V/fD=21.33$ (휨)과 17.33(비틀림)에서 칼만와류는 박리버블에 의해서 거의 영향받지 않지만 칼만와류는 단면후류부에서의 박리버블의 발달에 상당히 간섭하고 있음을 모드형상의 비교를 통해서 알 수 있다. 이러한 결과는 고무차원풍속대의 휨/비틀림 조화진동의 경우에 공통적으로 확인된다.

7. 결론

본 연구에서는 구조기본단면인 사각단면 중에서 $B/D=4$ 를 포함한 2,3,5단면에 대해서 칼만와류가 공력진동현상 및 정적공기력과 비정상공기력 특성에 미치는 영향을 검토하고 단면주위 비정상압력장에 POD해석을 적용하여 POD해석의 물



(a) 휨 (b) 비틀림

그림 15. PSD of fluctuating pressure field in oscillatory model without a splitter plate (a) $V/fD=16.00$, $f_{st}=5.37$
(b) $V/fD=10.67$, $f_{st}=3.66$

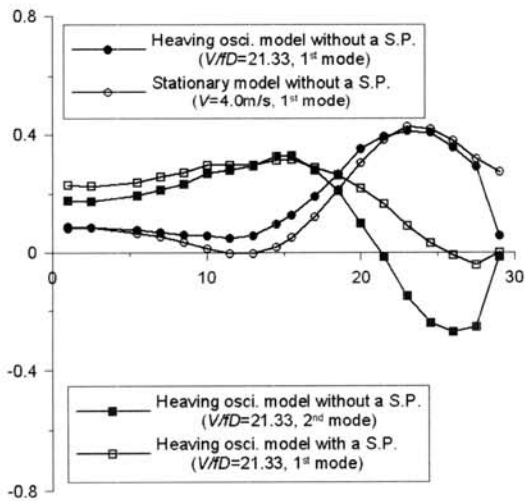


그림 16. 1st & 2nd eigenvectors in heaving oscillatory model without a splitter plate ($V/fD=21.33$)

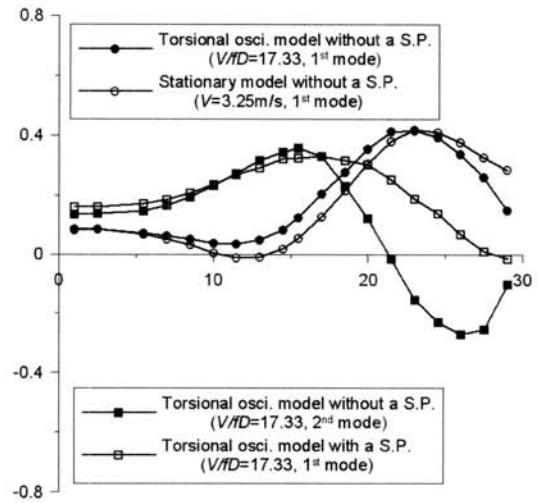


그림17. 1st & 2nd eigenvectors in torsional oscillatory model without a splitter plate ($V/fD=17.33$)

리적 의미와 bluff body 흐름속에서 칼만와류의 간섭효과에 대해서 고찰하였다. 그 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다

- (1) $B/D=3,4$ 단면에서 칼만와류의 방출을 억제하면 $dC_L/d\alpha$ 가 정(+)에서 부(-)로, H_1^* 가 고무차원영역에서 부(-)에서 정(+)으로 변화한다. 즉 꺾로핑현상에 대한 칼만와류의 간섭현상을 확인하였다.
- (2) $B/D=4$ 단면주위 비정상압력장의 \bar{C}_p 와 ψ 에 대한 결과로부터 단면주위 비정상흐름장의 특성을 무차원풍속에 따라, 모형측면에서 발달하는 MIV흐름과 박리버블이 지배적인 흐름으로 구분할 수 있다.
- (3) 단면주위 비정상압력장에 POD해석을 적용함으로써 칼만와류, MIV, 박리버블과 같은 흐름패턴에 따른 고유벡터의 규정이 가능했으며 더욱이 서로 다른 흐름패턴이 공존하는 경우에 POD해석이 제공하는 물리적 분해 특성에 의해서 고유벡터의 비교를 통한 서로 다른 흐름패턴간의 상호간섭을 확인할 수 있었다.
- (4) POD해석의 고유벡터 비교를 통해서 칼만와류는 박리버블에 의해서 거의 영향받지 않지만 칼만와류는 단면후류부에서의 박리버블의 발달에 상당히 간섭하고 있음을 알 수 있었다.
- (5) 해석결과에 근거해서, 변장비에 따른 $dC_L/d\alpha$, H_1^* 의 정(+)부(-)의 차이는 박리전단층의 재부착에 깊은 관련이 있는 것으로 판단되며 $B/D=3,4$ 에서 시간평균적으로 재부착하던 주위흐름장이 splitter plate의 설치로 칼만와류의 방출이 억제되면 재부착하지 않는 것으로 생각된다. 즉, 칼만와류의 억제는 후류부에서 박리

전단층의 곡률이 작아지도록 간섭하고 단면에 있어서 elongation효과 즉 단면비 증가효과를 나타낸다.

참 고 문 헌

- Armitt, J. (1968), Eigenvector analysis of pressure fluctuations on the West Burton instrumented cooling tower, *Internal Report RD/L/N 114/68*, Central Electricity Research Lab.
- Holmes, J.D. (1990), Analysis and synthesis of pressure fluctuations on bluff bodies using eigenvectors, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 33, pp.219~230.
- Kareem, A. and Cermak, J.E. (1984), Pressure fluctuations on a square building model in boundary layer flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16, pp.17~41.
- Lee, B.E. (1975), The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism, *Journal of Fluid Mechanics*, 69, pp263~282.
- Matsumoto, M.. (1999), Vortex shedding of bluff bodies: A Review, *Journal of Fluid and Structures*, 13, pp791~811.
- Tamura, Y.. (1999), Proper orthogonal decomposition of random wind pressure field, *Journal of Fluid and Structures*, 13, pp1069~1095.
- (접수일자 : 2008. 9. 5 / 심사일 2008. 9. 19 / 게재확정일 2008. 11. 14)