

제2진도대교의 내풍특성

현대건설(주) 엔지니어링사업본부

1. 서 론

제2진도대교에 대한 전반적인 사항과 기본설계 수행중에 대두되었던 동적거동 특성 중 내풍설계에 대해 소개하고자 하오니, 건설업에 종사하시는 여러분에게 해상 특수교량의 설계 및 시공업무에 다소나마 도움이 되기를 바랍니다. 풍동실험은 국내에서 유일한 국제수준의 교량 및 건축분야등 다목적 풍동실험이 가능한 현대건설(주) 기술연구소에서 수행하였음을 첨부합니다.

2. 사업개요

2.1 추진배경

국도 18호선 (진도-구례)상의 기존진도대교가 2등교로서 화물 차량이 통과할 수 없어 지역 경제발전에 커다란 지장을 초래하고 있는바, 그 지역 물동량 수송에 적합한 1등교를 신설하여 진도 및 전남 서남부 지역의 물동량 수송에 원활을 기하고, 장래 교통수요에 대비하여 균형있는 지역발전을 도모하고자 함.

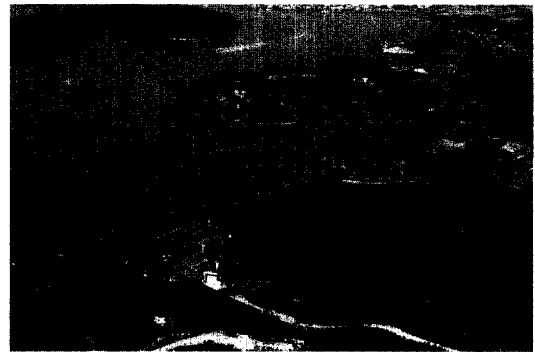
2.2 과업위치

- 시점 : 전라남도 진도군 군내면 둔전리 지내 (고군우회도로 종점, 금골 교차로)
- 종점 : 전라남도 해남군 동외리 지내 (문내-황산간 도로 시점)

2.3 주변현황 및 교량계획의 기본 착안사항

2.3.1 주변 현황

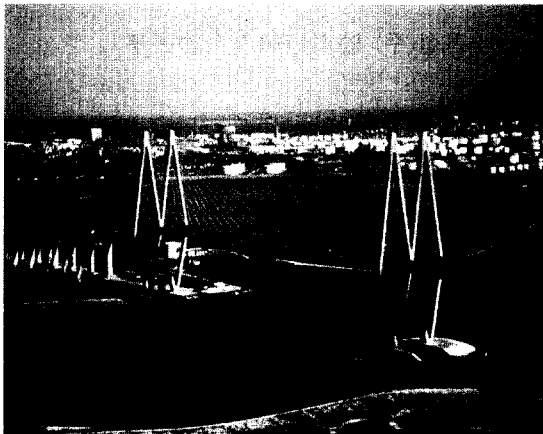
- 역사적으로 이순신 장군이 명량대첩에서 승전고를 울린 울돌목에 위치.



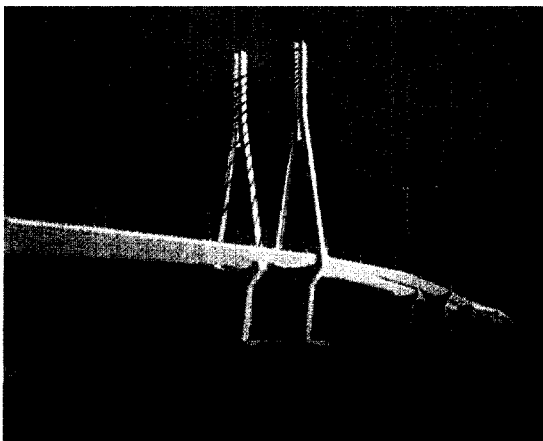
- 다도해 해상국립공원의 서쪽 연육 출발 지점에 위치.
- 기존 진도대교가 해남-진도를 잇는 최단거리에 위치하며, 제2진도대교는 기존 진도대교의 근접쌍둥이교량 계획 가능.
- 진도축 망금산 전망대, 우수영 국민관광 단지 등에서 다양한 조망이 가능.

2.3.2 기본 착안 사항

기본적으로 통과 교통의 안전하고 쾌적한 통행을



• Baytown Bridge(미국)
 • 교폭 : 24m×2ea
 • 중앙경간장 : 381m(강합성형)
 • 중심선간 이격거리 : 28.5m



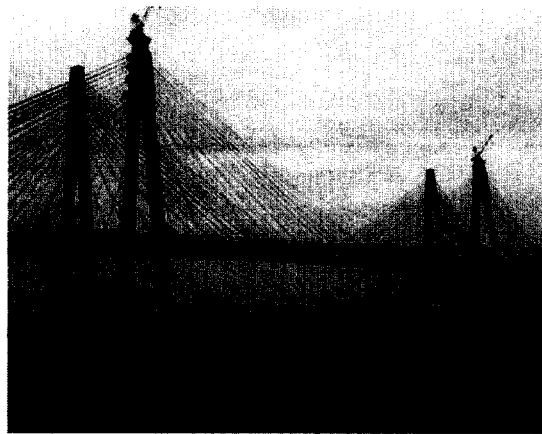
• 鶴見 연락교(Tsurumi) (일본)
 • 교폭 : 38m×2ea
 • 중앙경간장 : 510m(강상관상형)
 • 중심선간 이격거리 : 50m

확보하는 교량본연의 목적을 달성함과 동시에 현재 세계적으로 사례가 드문 병렬식 쌍둥이사장교 계획 및 주변 관광단지조성계획에 따른 BI(Brand Identity)개발로 국내 뿐만 아니라 세계적인 지역 명소로서의 가치를 제고.

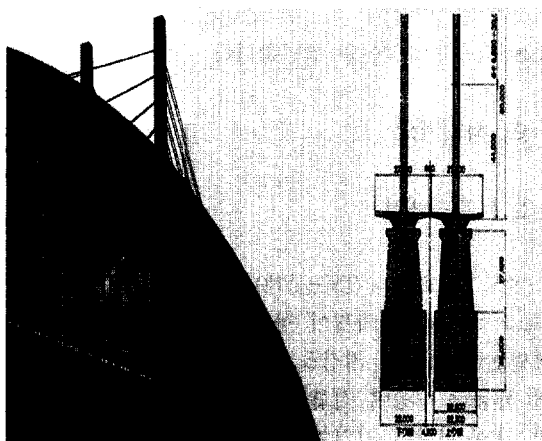
2.4 해외 유사사례 검토

2.4.1 검토목적

- 제2진도대교를 기존교량과 조화시켜 쌍둥이 사



• 名港西대교(Meiko West) (일본)
 • 교폭 : 16m, 19.4m
 • 중앙경간장 : 405m(강상관상형)
 • 중심선간 이격거리 : 50m



• 幸魂교(일본)
 • 교폭 : 27.5m×2ea
 • 중앙경간장 : 190m(강상관상형)
 • 중심선간 이격거리 : 28.1m

장교로 계획함에 있어 유사사례의 조사를 통하여 교량계획 및 내풍특성, 근접기초시공등의 설계에 참고자료로 활용.

2.4.2 사례조사 결과

사례조사 결과 해외의 병렬교량들은 거의 대부분 교량형식, 규모, 지간 등을 인접한 교량과 동일하게 시공한 것으로 조사되었으며, 제2진도대교도 중심선간 이격거리 22.25m 병렬식 근접 쌍둥이교량으로 계획 하였음.

3. 교량 세부계획(표 1 참조)

4. 풍동실험 및 내풍설계

4.1 풍동실험의 필요성

- 제2진도대교는 단독교로서는 물론, 근접 쌍둥이 사장교로서 신·구 교량의 상호간섭에 의한 내풍영향 검토가 필요하며, 특히 세장한 구조(L/B=344/12.55=27.4)로 가설시 바람에 의한 횡방향 변위에 대한 간섭 및 진동제어 대책 수립이 필요함.

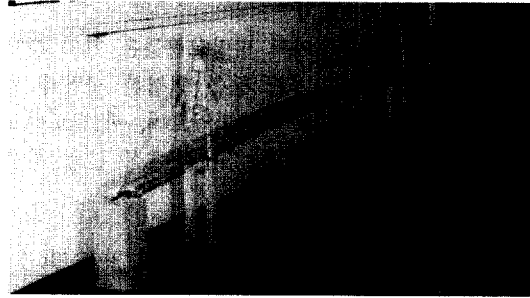
표 1 교량 세부계획

<기존교량 현황>		
구 분	기존진도대교	제2진도대교
위 치	· 해남군 문내면 학동리~진도군 군내면 녹진리	
연장 및 폭원	· L=70+344+70=484m · B=11.7m(왕복 2차로)	· L=70+344+70=484m · B=12.55m(왕복 2차로)
설계 하중	AASHTO HS-20-44 → DB-18(2등급교)에 해당	DB-24(1등급교)
설계 속도	60km/hr	80km/hr
개통 시기	1984년 10월 18일	2007년 1월 예정
상부 구조 (보강형 형식)	· 강상판 상형 · 다이아프램 : SOLID 형식	· 부분복합 강상판 상형 · 다이아프램 케이블 정착구 : SOLID 형식 일반부 : 브레이싱 형식
주탑 형식	· A-Type 강제 주탑	· A-Type 강제 주탑
cable 배치	· FAN-Type(양면 지지)	· FAN-Type(양면 지지)
cable 형식	· LCR Type(φ56~φ87)	· Pre-Fabricated Wire Cable
하부 구조	· 철근콘크리트 구조(σ _{ck} =280kgf/cm ²) · 교각 : 중공형 2주식 교각 · 교대 : 구체식 · 기초 : 직접기초(경암지지)	· 철근콘크리트 구조(σ _{ck} =350 kgf/cm ²) · 교각 : 중공형 벽체 교각 · 교대 : 구체식 · 기초 : 직접기초(경암지지)
내풍 대책	· 보강형 : Vane 설치(중앙경간) · Cable : Rubber Damper	· 가설시 TMD (Tuned Mass Damper)설치 → 주탑상단 및 보강형의 Cantilever 단부에 설치 · 완성시 보강형 : 곡면 Vane 설치 Cable 정착구 : Lead Core Damper

- 내풍특성 검토방법으로 전산유체해석(CFD)에 의한 방법과 축소 모형을 제작하여 직접 풍동 실험을 하는 방법이 있으나, 본 교량의 중요성 및 인접교량과의 상호간섭을 고려할 때 보다 확실한 내풍특성 규명이 필요하였으며, 특히 CFD로는 Buffeting현상과 Vortex shedding 진폭, Flutter등을 규명하기에는 한계가 있어, CFD해석과 축소모형 제작을 통한 직접 풍동실험을 병행하여 본 교량의 내풍대책을 수립하였음.

- 설계속도대비 한계속도 안전율 1.2 적용하였음. (Flutter 한계풍속 75m/sec)

▶ 기존진도대교 풍동모형



4.2 해외 병렬교량의 내풍특성 검토(표 2 참조)

4.3 풍동실험 계획(표 3 참조)

4.4 기존진도대교의 내풍 특성

- 단독교량의 풍동실험 1단계로서 기존진도대교의 2차원 및 3차원 풍동실험을 수행하여 기존 교량의 내풍특성을 재검증하였음.
- 풍동실험은 1/120 Model을 사용하였으며,

▶ 검토결과

와류 진동	<ul style="list-style-type: none"> • 연직 진동 : 16m/sec에서 450mm 진폭발생 • 비틀림진동 : 45m/sec에서 100mm 진폭발생 • 곡면Vane의 설치로 설계풍속내에서 와류진동을 억제시킴
항력계수	<ul style="list-style-type: none"> • Drag Coefficient=0.83

표 2 해외 병렬교량의 내풍특성 검토

<p>鶴見(쓰르미)연락교</p> <ul style="list-style-type: none"> • 풍속 6m/s부근에서 진폭 25m의 연직 와류진동이 발생하나 난류 약6%에서 진동이 소멸 • Flutter는 약 70m/s부근에서 발생(하류측의 교량이 상류측의 교량에 비해 약 2배 정도의 진폭을 나타냄) 	
<p>名港西(메이코니시)대교</p> <ul style="list-style-type: none"> • 풍속 10m/s부근에서 상호간섭에 의한 연직 와류진동이 발생하나 난류강도 10%정도의 경계층에서는 진동이 소멸 • 병렬교에서의 상호간섭에 의해 오히려 기존교량의 내풍대책인 Flap마저도 불필요한 것으로 나타나, 기 설치된 Flap을 제거함 	
<p>→ 병렬교량의 경우, 상호간섭에 의해 내풍성이 저하하는 경우(쓰르미연락교)가 발생할 수 있으며, 반대로 내풍성이 향상되는 경우(메이코니시대교)가 발생할 수도 있음. → 풍동실험 필요</p>	

표 3 풍동실험 계획

구 분		축 척	검 토 사 항
3 차원	전교실험(기존, 신설)	1/120	각각의 교량에 대한 내풍 특성 검토
	주탑실험(기존+신설, 신설)	1/70	가설중 쌍둥이 주탑에 대한 상호간섭현상 규명
	전교실험(기존+신설)	1/120	완성계 및 가설단계의 쌍둥이교량의 상호 간섭현상 규명
2 차원	보강형(기존, 신설)	1/36	각각의 내풍 특성 및 쌍둥이 교량의 내풍특성 규명, 내풍 대책 필요성 파악
	보강형(기존+신설)	1/36	

4.5 제2진도대교의 풍동실험 및 내풍설계

4.5.1 2차원 보강형 모형 실험

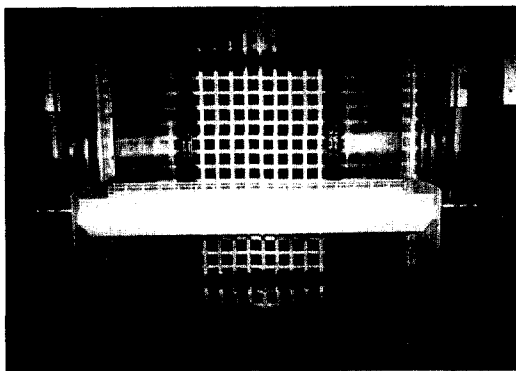
① 설계풍속

설계풍속은 도로교 표준시방서, 내풍설계편람(일본)등을 검토한 결과 비교적 안전측인 내풍설계편람기준을 적용하였음.(Flutter에 대해서는 1.2배할증)

$$V_{10} \times E_{10} = 45\text{m/sec} \times 1.41 = 64\text{m/sec}$$

② 풍동실험 모델(그림 1 참조)

- 실험모형의 축소율 : 1/36(상사법칙에 의해 동적특성을 모사)
- 공기력 진동 발생시 병렬교의 경관을 고려 기존진도대교와 동일한 곡면 Vane를 우선적으로



<제2진도대교의 2차원 실험모형>

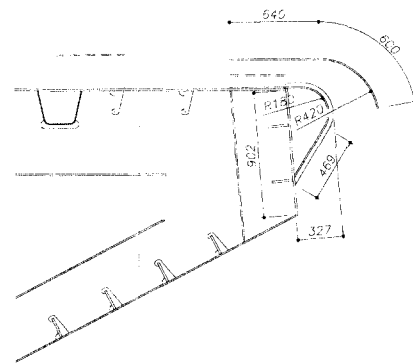
고려

③ 제2진도대교의 내풍특성 (보강형 단독 실험) (그림 2 참조)

- 기본단면과 개선단면(Vane 설치)의 내풍특성 실험결과 아래와 같이 기본단면에서는 와류진동이 발생하였으며, Vane 설치시 특히 비틀림의 와류진동에 효과가 있음을 알수 있음.

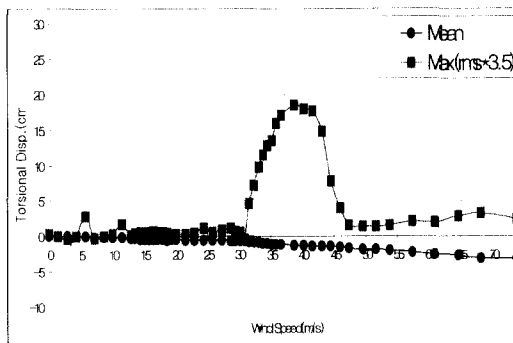
④ 병렬교량의 내풍특성 (보강형 병렬 실험)

- 병렬교의 공기력특성(그림 3 참조) 단독교량에서 항력계수는 약 0.5이나, 병렬교의 경우 하류측 교량의 항력계수는 최고 1/2이하로 감소하였으며, 병렬교량의 중심간격에 따라 항력계수는 간격이 좁아질수록 감소하였음.

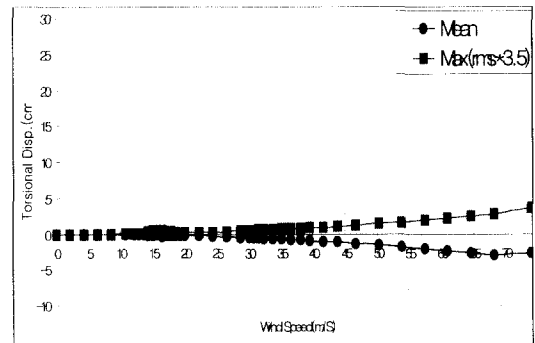


<곡면 Vane의 형태>

그림 1

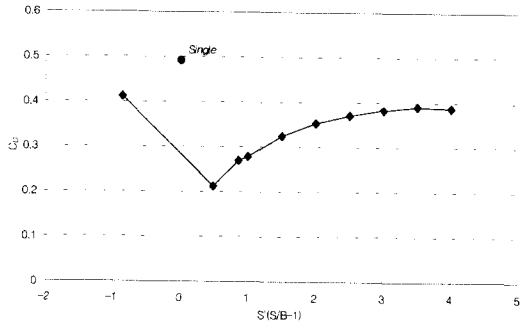


<기본단면, 등류, 영각=0°>

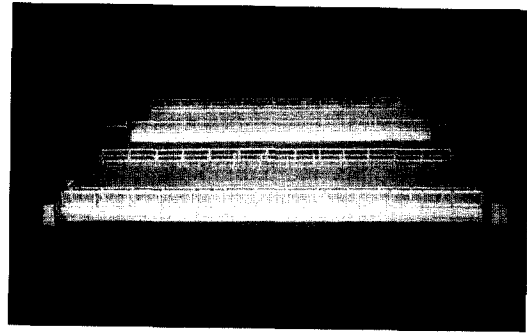


<Vane단면, 등류, 영각=0°>

그림 2

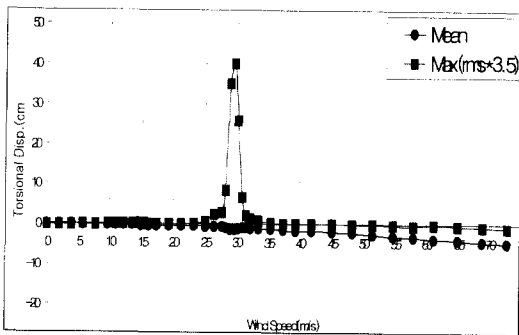


<병렬교 간격에 따른 항력계수의 변화>

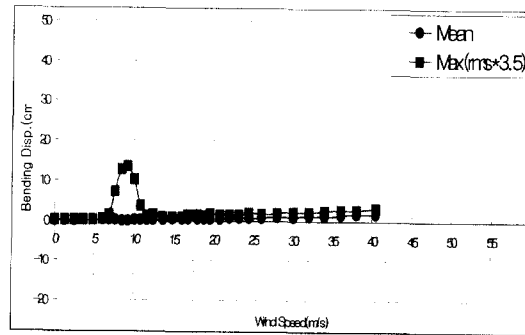


<병렬교의 공기력 측정실험>

그림 3



<상호간섭에 의한 와류진동>



<난류에서의 연직와류진동>

그림 4

- 상호간섭에 따른 평가 및 대책(그림 4 참조)
병렬교의 하류측에 위치하는 교량에서 상호간섭에 의한 새로운 와류진동(약40cm정도)이 발생하였으며, 이러한 진동은 Vane과 난류에 의해 소멸되며 최종적으로 진폭 약 13cm의 연직진동이 발생 하는데 이는 중앙경간의 1/2,600 정도이므로 내풍 안전성에 문제가 없을 것으로 판단됨.

4.5.2 독립주탑의 3차원 모형실험

① 설계풍속

- 가설상태의 독립주탑의 경우 독립주탑 유지기간을 1년으로 가정하여 설계풍속산정 (비초과율 P=0.6, 가설기간 1년에 대한 재현기대치 R=2.5를 이용)

$$V_{10} = 45m/sec \times \frac{0.61 - 0.1 \ln(\ln(R/R-1))}{1.07}$$

$$= 28.5m/sec$$

$$V_d = 28.5m/sec \times 1.925 \left(\frac{88.9}{500} \right)^{0.12}$$

$$= 42.0m/sec$$

② 실험범위(그림 5 참조)

- 제2진도대교의 독립주탑은 가설기간중 기존진도대교의 주탑과 함께 병렬주탑조건으로 검토 (제2진도대교는 탄성체모형으로 제작하고 기존진도대교는 강체모형임)
- 축소율 1/70, 모형높이 127cm
- 공기력 진동실험 구분 : '제2진도대교 단독주탑 실험', '병렬주탑실험', '등류와 경계층류에서 실험' (수평풍각은 0°~45°(5case)로 구분실험)

③ 실험결과(그림 6 참조)

- 병렬주탑의 상호간섭 (등류실험)
단독주탑(제2진도대교 단독)의 경우, 수평풍각 0°에서 진폭 19cm의 와류진동이 발생하나 그 외

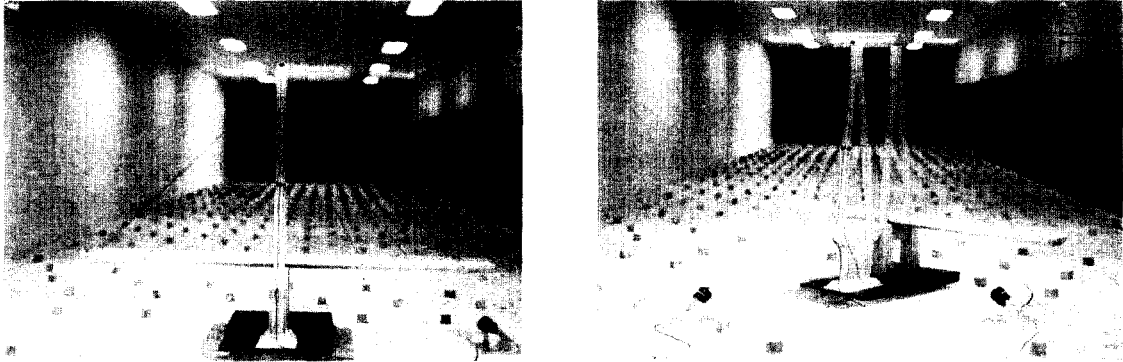


그림 5 경계층에서의 병렬주탑 실험모습

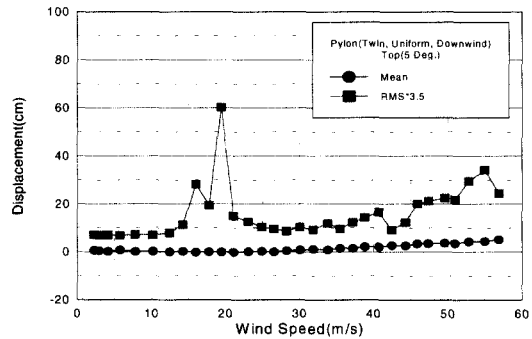
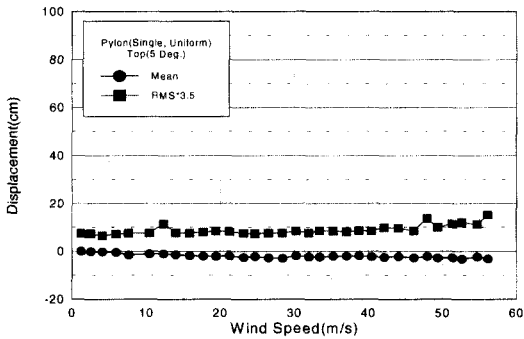


그림 6 단독주탑(좌)과 병렬주탑(우)의 공기력거동, 등류, 수평풍각 5°

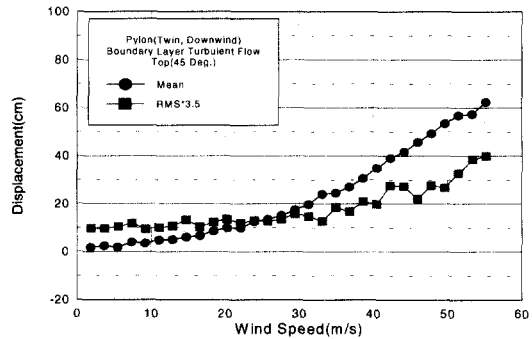
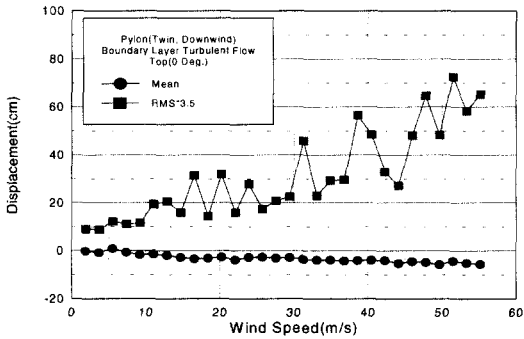


그림 7 병렬주탑의 Buffeting 거동, 수평풍각=0°(좌), 수평풍각 = 45°(우)

는 진동발생 없었으며, 병렬주탑에 있어서 하류 측 주탑은 상호간섭에 의해 와류진동이 발생하며 특히 수평풍각 5°에서 최고 60cm의 진폭을 보였음.

- 병렬주탑의 Buffeting(그림 7 참조)
대기경계층류에서는 와류진동이 소멸하나 난류에 의한 Buffeting이 발생하였고, 수평풍각 0°에서

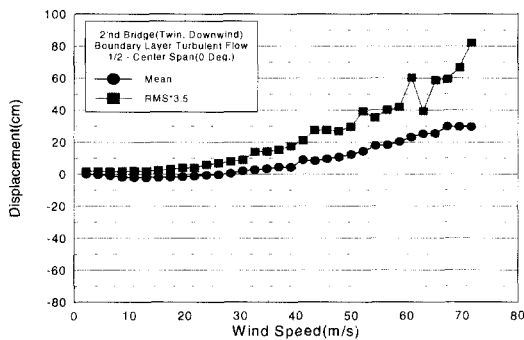
정적변위는 거의 발생치 않으나 난류작용에 의해 Buffeting이 발생하여 설계풍속 44.6m/s에서 45cm의 진폭을 보이는 반면, 수평풍각 45°에서는 Buffeting의 진폭이 50%정도로 감소하나, 정적변위는 설계풍속 44.6m/s에서 40cm를 넘어 수평풍각 0°와 상반된 경향을 나타내었음.

4.5.3 3차원 전교모형실험

① 완성계에 대한 내풍특성

두 교량의 전교모형을 탄성체로 제작하여 실험 (축소율 1/120, 수평풍각 0°~30°) 하였으며, 그 결과로부터 제2진도대교의 내풍특성을 요약하면 다음과 같다.

- 하류측에 위치할 경우(그림 8 참조)
대기경계층류(난류 15%)에서는 설계풍속 내에서 와류진동, Galloping, Flutter는 발생하지 않았고, 난류에 의한 Buffeting이 나타나며, 그 진폭은 설계풍속 약 60m/s에서 연직방향으로 약 40cm정도 발생한다. 그러나 이 진폭은 중앙경간의 약 1/860정도이며, 수평풍각의 변화에 따른 진폭 차이는 거의 없음.
- 상류측에 위치할 경우(그림 9 참조)
Buffeting의 진동변위는 하류측의 경우와 거의 비슷한 양상을 나타내며 반면에 정적변위가 하



<하류측의 실험결과>

향으로 크게 나타나 하류측에 위치할 경우와 반대 경향을 보임

② 가설단계에 대한 내풍특성

- 설계풍속 : 독립주탑과 동일한 개념으로 비초과확률 P=0.6, 재현기대치 R=4.43을 적용하면,

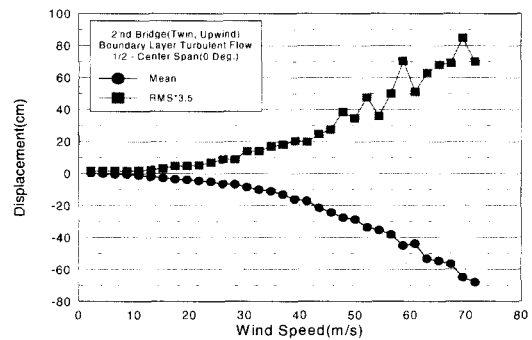
$$V_{10} = 45 \text{ m/sec} \times \frac{0.61 - 0.1 \ln(\ln(R/R-1))}{1.07}$$

$$= 31.4 \text{ m/sec}$$

$$V_d = 31.4 \text{ m/sec} \times 1.925 \left(\frac{24.1}{500} \right)^{0.12}$$

$$= 42.0 \text{ m/sec}$$

- 하류측에 위치할 경우(그림 10 참조)
정적변위의 경우 설계풍속에서는 약 60cm정도이며 수평풍각에 대해 거의 변화 없었고, Buffeting의 경우 수평풍각이 “-”의 경우가 더 크며, 진폭은 설계풍속에서 약 60cm~75cm 정도이



<상류측의 실험결과>

그림 8

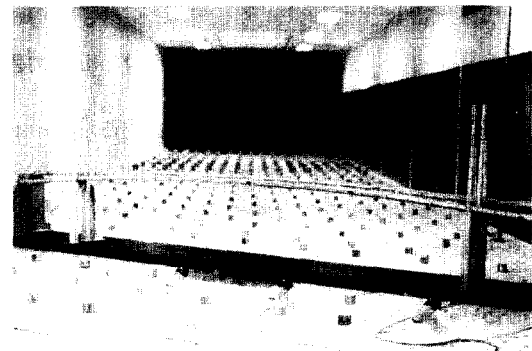
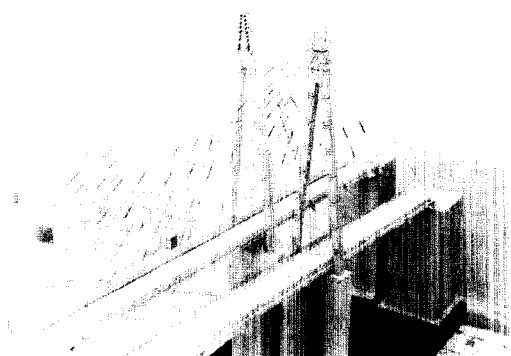
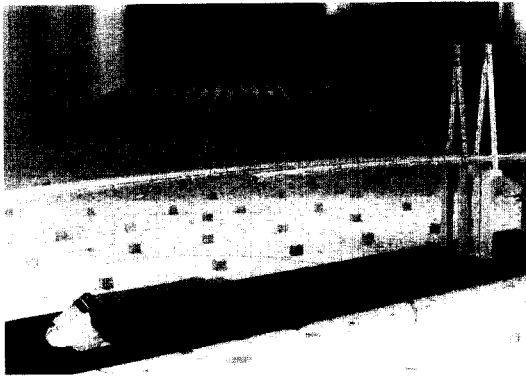
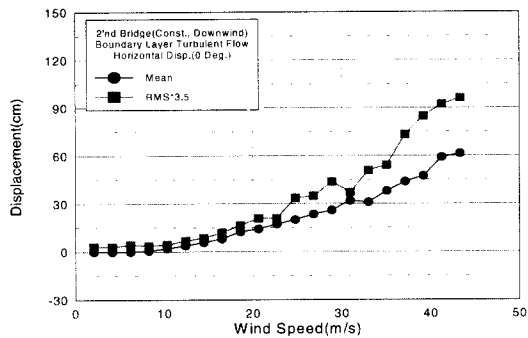


그림 9 완성계에 대한 전교모형 실험



있음. 따라서, 정적·동적변위를 합산하여 판단하면 교축직각 방향의 기류에 대해 설계풍속에서 약 120cm 정도의 변위가 예측됨.

- 상류측에 위치할 경우(그림 10 참조) 정적변위의 경우 설계풍속에서 약 50cm~75cm 정도, Buffeting의 경우 수평풍각 “-”의 경우



<하류측 실험결과>

약간 크며, 그 진폭은 설계풍속에서 약 70cm~105cm, 정적·동적변위를 합산하여 판단하면 교축직각 방향의 기류에 대해 설계풍속에서 약 150cm 정도의 변위가 예측됨.

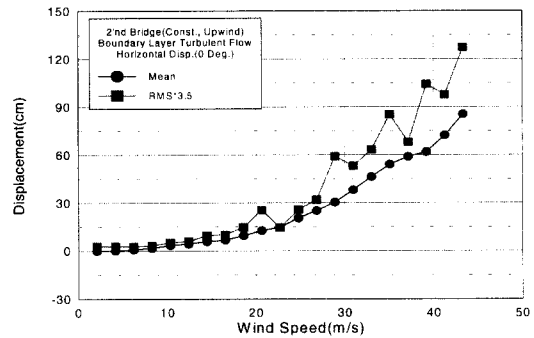
4.6 제진대책

4.6.1 TMD 적용

① 제진장치의 필요성(그림 11 참조)

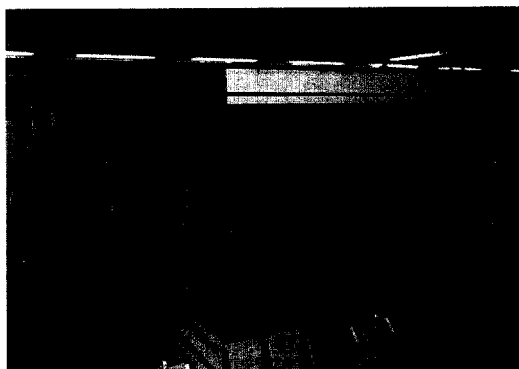
실험결과로부터 가설단계의 주형 및 독립주탑에 있어서 다음과 같은 진동발생이 예상됨

- 가설단계주형 : 풍속 약 42m/s에서 수평방향으로 최대 150cm 정도의 Buffeting
 - 독립주탑 : 풍속 약 45m/s에서 면의 방향으로 최대 40cm 정도의 Buffeting
- 비록 단기간의 가설단계지만, 기존교량과의

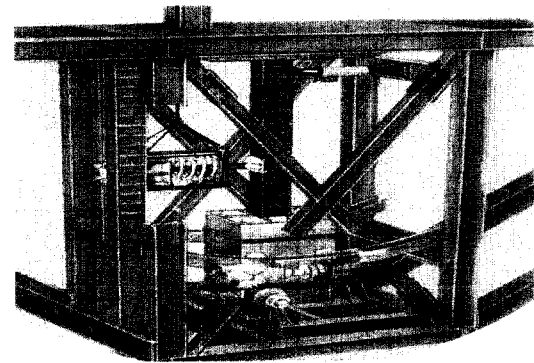


<상류측 실험결과>

그림 10



<가이드레일 형식의 TMD>



<진자형식의 TMD>

그림 11

관계 및 시공성등을 고려하여 다음과 같은 제진장치(TMD)를 설치하여 진동을 감소시킴.

② TMD 설계

• 외부 풍하중 예측

(외부 하중에 대한 개념 및 계산방법은 주탑 및 보강형에 있어서 동일함)

$$f_x = \frac{1}{M_1} \sqrt{\frac{\pi f_1 S_F(f_1)}{4\xi_1}}$$

$$P.F = \sqrt{2 \log_e(f_1 600)} + 0.5772 \sqrt{2 \log_e(f_1 600)}$$

윗 식에 의해 Peak Factor를 구하고 이로부터 변위 및 가속도의 R.M.S 값을 구한 후, 다시 풍하중 스펙트럼을 산정하였음.

• 보강형 TMD 설계

- 보강형의 동적특성(표 3 참조)

- 질량에 따른 제어효과 및 최대스트로크

본 TMD는 상판위에 진자형태로 설치되는 것이므로 시공여건을 감안 가능한 한 질량이 작아야함. 이를 위해 질량비를 0.4%(3.872ton)

에서 최대 1.5%(18.39ton)까지 변경하여 최대 스트로크를 계산함.

- TMD 진자의 길이 : 진자의 길이는 대상구조물의 고유진동수와 같은 값을 가지므로 다음식에 의하여 진자길이를 결정

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g/L}$$

$$L = \frac{g}{(2\pi f_o)^2} = 9.8 / 1.67 = 5.87m$$

여기서,

g : 중력가속도

f_o : 상판의 고유주기

L : 진자의 길이

- 제진장치 질량 및 제어효과 [질량에 따른 제어효과 및 스트로크](표 4 참조)

질량비에 따라 제어효과는 50%까지 확보하는 것으로 나타났으며, 회전각이나 변위가 크게 되면 인근 구조물이나 시공시 위험요소가 되므로 진자의 변위를 작게 할 필요가 있으며, 보강형 가설단계의 제진대책은 진자의 최대

표 3

동적특성항목	수치해석 예상값	비 고
보강형의 총질량	2,904ton	-
1차 모드 질량	9,684ton	모드형상 : 직선가정
1차 모드 진동수	0.206Hz	가 속 도 : 1.294 rad/sec
1차 모드 감쇠비	1%	-

표 4 제진장치 질량 및 제어효과

질량비 (%)	질량 (tonf)	R.M.S 변위(cm)	제어율 (%)	진자 R.M.S 회전각(radian)	회전각도 (degree)	최대 회전각 (degree)	진자 R.M.S 변위(cm)
비제어시	0.00	36.47	-	-	-	-	-
0.4	3.87	23.53	35.5	0.4013	23	69	235.18
0.6	5.81	21.90		0.3095	18	54	181.38
0.8	7.74	20.78		0.2566	15	45	150.35
1.0	9.68	19.93		0.2216	12.5	37.5	129.83
1.2	11.62	19.25		0.1964	11.3	34	115.07
1.4	13.55	18.67	49	0.1772	10	30	103.83
1.6	15.48	18.18	50.1	0.1620	9.3	28	94.92

표 5 질량 및 최대스트로크의 결정

질량비 (%)	질량 (tonf)	R.M.S 변위(cm)	제어율(%)	R.M.S Stroke(cm)
비제어시	0.00	12.5	-	-
0.4	0.51	7.95	36.5	75.67
0.6	0.77	7.40		58.50
0.8	1.00	7.00		48.54
1.0	1.28	6.70		41.91
1.2	1.54	6.47		37.15
1.5	1.92	6.16	50.7	32.01

표 6 Cable 진동현상

Cable 진동	개요	제진대책 사례
Rain-Wind Vibration (풍우진동)	• 비가 오는 상태에서 바람에 의해 Cable 표면에서의 빗물 흐름이 바람에 노출되는 Cable 단면형상을 변화시킴으로 인해 발생하는 진동현상	• Cable 표면처리 • 별도의 Damper 설치
Galloping	• 바람에 의해 Cable의 길이, 장력, 직경등의 특성에 따라 발생하는 진동현상(병렬 Cable의 경우 Wake Galloping 현상 발생가능)	• Cable 표면처리 • 별도의 Damper 설치
Vortex induced Vibration	• 저풍속 상태에서 후면와류에 의해 발생하는 '고진동수-저진폭'의 진동현상	• 특별한 경우를 제외하면 별도 대책 불필요

회전각을 30° 이내로 하여 질량비 1.4%(질량 13.55tonf)의 진자형 TMD 적용.

• 주탑의 TMD 설계

- 질량 및 최대스트로크의 결정 [질량에 따른 제어효과 및 스트로크](표 5 참조)
현장여건상 스트로크는 작을수록 좋으므로 최소한의 스트로크를 계산한다. 이를 위하여 설계 스트로크를 정하고 이 설계 스트로크가 10분동안 1회 초과하는 확률로부터 제작에 필요한 스트로크를 결정해야 하며, 해석결과 질량비가 1.5%인 TMD가 스트로크 100cm를 초과하는 확률은 10분간에 1회이므로 스트로크는 100cm로 결정 하였음. TMD를 설치하게 되면 동적진동 변위가 1/2정도로 감소될 것으로 예상됨.

4.6.2 Cable 내풍대책

① 검토배경

Cable은 휨강성이 작고 기상환경에 노출되어 있으며, 최근의 재료의 발전 및 고강도화 추세에 따라 소요단면의 규모축소 및 Cable 길이증가 추

세등으로 내풍안전성 확보의 필요성이 대두되었음. 이에 따라, 최근 국내외 Cable지지 교량들의 경우 Cable Sheath(HDPE Tube)의 먼처리 혹은 별도의 Damper설치, Interconnection Rope설치등 다양한 방법으로 Cable 제진대책을 적용하고 있는 실정임.

국내의 경우 돌산대교 등에서 Cable 진동현상이 보고되고 있으며, 또한 최근에 완공된 서해대교 및 기타 시공중인 Cable지지 교량등에서 Cable 제진방안을 적극 반영하고 있는 추세이므로 본 진도대교의 설계에 있어서도 현재 조사된 기준 및 사례에 의거하여 제진대책수립의 필요성 여부를 검토하였음.

② 검토내용

- Cable 진동현상(표 6 참조)
- 기준검토 (현재 Cable의 제진에 대한 검토기준은 정립되어 있지 않은 상태임)(표 7 참조)

③ 검토결과

- 제시된 기준을 참고하여 검토한 결과는 다음과 같음.(표 8 참조)

표 7

<ul style="list-style-type: none"> • PTI Recommendations, Draft(1998) : 원형단면(표면미처리시) 진동현상에 대한 검토기준 • Cable-Stayed Bridges-Past, Present and Future (IABSE Conference Proceedings, Malmo, 1999) 		
Rain-Wind Vibration	$S_c = \frac{m\xi}{\rho D^2} > 10$	여기서, m : Cable 단위길이당 질량 c : 형상에 따른 상수(원형은 40) ξ : 구조감쇠계수($\delta/2\pi = 0.2\%$) δ : 대수감쇠율 D : Cable 직경 N : 고유진동수 ρ : 공기밀도 0.22 : Stouhal number Sc : $m\xi/\rho D^2$ (Scruton number 또는 mass damping parameter)
Galloping	$U_{crit} = cND\sqrt{\frac{m\xi}{\rho D^2}}$	
Vortex induced Vibration	$V = \frac{ND}{0.22}$	

* PTI에서는 시공시 현장실험을 통하여 Cable 감쇠율을 측정한 후 제진대책 적용여부를 판단하도록 명시되어 있음.

표 8

검토항목	검 토 결 과	대책수립(안)
Rain-Wind Vibration	<ul style="list-style-type: none"> • Cable 규격별/위치별로 검토결과 'Sc=4.2~6.4범위' • 'Sc>10'을 만족하는 구조감쇠계수 $\xi=0.3\% \sim 0.5\%$ 	•Cable 표면처리
Galloping	<ul style="list-style-type: none"> • 장력최대 및 최소인 조건으로 검토결과 $U_{crit}=7.9m/s$임 (Normandy교 및 Elom교의 경우, 동일기준에 의해 $U_{crit}=3.62m/s, 7.76m/s$로 각각 계산되었으나 실제로는 Galloping 현상이 나타나지 않았음) 	•Damper 설치
Vortex Induced Vibration	<ul style="list-style-type: none"> • 진동발생가능 풍속은 1m/s미만인 것으로 검토 (특별한 대책수립은 불필요하나 대수감쇠율(δ)=3% 이상을 추천하고 있음) 	•상기대책으로 충분함

④ 제진대책수립

- 제진기준 : 기준이 명확히 제시되어 있지 않은 점을 감안, 사례로부터 제시된 제진 기준(요구 감쇠율) 이상을 만족하는 것을 기본으로 함.
[* 서해대교의 경우 지방기준 : $\xi=1\%$ 이상요구, 실제적용기준 $\xi=0.56\%$ 이상 요구]
- 적용방안 : 제시기준을 만족토록 적정감쇠율 확보방안을 수립하여 설계에 반영하되, 시공시 현장실측을 통하여 Cable의 감쇠기능(Intrinsic Damping)을 확인 후 적용여부를 판단함
- 제진대책 적용결과
 - Cable 표면처리(그림 12 참조)
HDPE tube 표면을 Dimple Type으로 처리.
 - Damper
구조감쇠계수 $\xi(=\delta/2\pi)=1\%$ 를 만족토록 보강형측 정착구내에 납봉의 'P- δ '특성과 에너지 흡수능력을 활용하여 규모를 최소화한 감쇠장치인 Lead Core Damper 설치.
점성 Oil Damper 및 Cable간의 Interconnection

Rope의 설치는 유지관리상의 애로점이 있고 경관상의 저해를 초래할 것으로 사료되어 배제함.

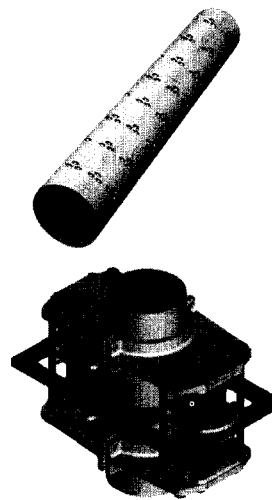


그림 12

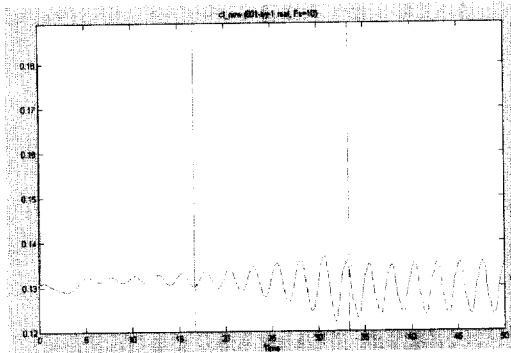
4.7 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석

① CFD 수행배경

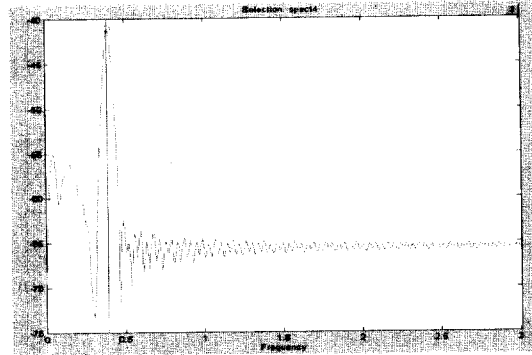
풍동실험은 풍속에 따른 모형의 거동에 주목하여 내풍특성을 평가하므로 교량주위 기류의 양상에 대한 자료 및 정보를 제공하기 위하여 CFD 해석을 수행하였음.

② 제 2 진도대교 주위의 기류특성

- 와류진동 발생풍속의 예측(그림 13 참조)
 - CFD 해석결과, 양력의 시간이력과 스펙트럼으로부터 교량단면에 작용하는 변동양력의 진동수를 정리하면, 기본단면(Vane 미설치) : 0.38Hz, 개선단면(Vane 설치) : 0.37Hz
 - Stouhal number

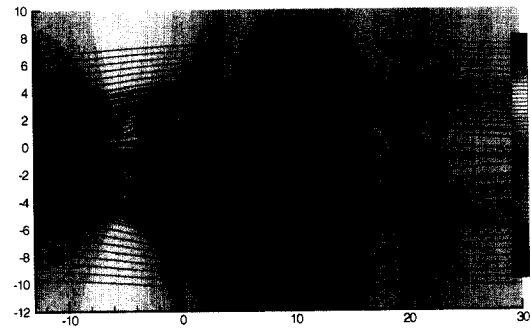
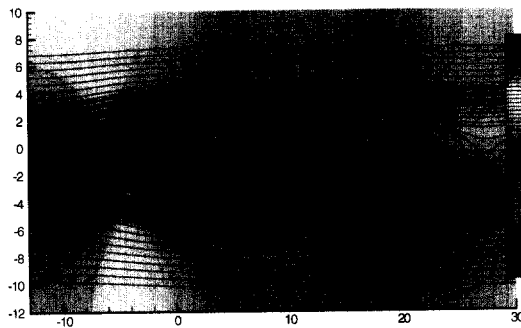


[변동양력의 시간이력]

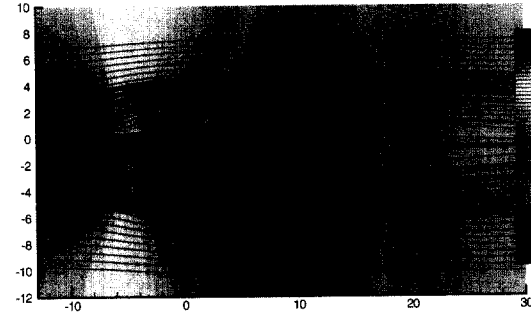
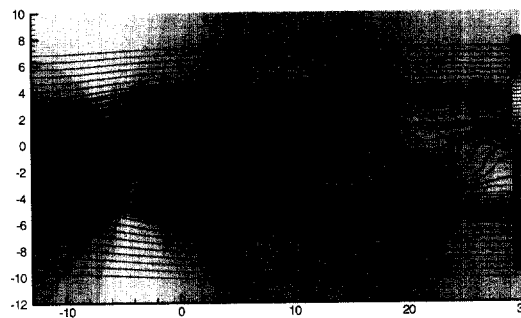


[변동양력의 스펙트럼]

그림 13



[기본단면(좌) 및 개선단면(우) 주위의 기류모습 : 30초 경과후]



[기본단면(좌) 및 개선단면(우) 주위의 기류모습 : 34초 경과후]

그림 14

$$S_i = \frac{F_v \times B}{V} = \frac{0.37 \text{ or } 0.39 \times 12.5}{10}$$

$$= 0.4625 \text{ or } 0.4875$$

- 진동발생풍속

$$V = \frac{0.4 \times 12.5}{0.4625 \text{ or } 0.4875}$$

$$= 10.81 \text{ m/s (or } 10.25 \text{ m/s)}$$

→ 앞서 설명한 제2진도대교의 연직 와류진동 발생풍속(약 10m/s)과 거의 일치함

- 개선단면(Vane)에 의한 기류안정화(그림 14 참조)

그림에서 기본단면은 시간경과에 따라서 하류측의 와류발생이 나타나며 개선단면에서는 시간경과에도 불구하고 비교적 안정된 후류(Wake)영역이 형성되었음. 따라서, Vane이 비틀림 와류진동에 효과가 있는 것이 이러한 기류안정화에 기인되는 것으로 판단됨.

③ 병렬교 주위의 기류특성 (항력계수 비교)

- CFD 해석결과, 항력계수에 있어서 제2진도대교가 상류측일 경우, 오차가 매우크며 이는 수치해석의 한계라고 볼 수 있음.

표 9

구 분	풍동실험결과	CFD 해석결과	
단독교	제2진도대교	0.49	0.45
병렬교	제2진도상류측	0.41	0.74
	제2진도하류측	0.27	0.24

- 병렬교 주위의 풍력분포(그림 15 참조)

병렬교에 있어서 상류측과 하류측의 교량에 작용하는 풍압분포는 전혀 다름 (그림에서 짙은 색이 최대정압이 작용하는 곳이며 약간 흐린색이 부압의 최대가 작용하는 곳임.)

상류측의 교량에는, 교량단면에 정상적인 항력이 작용하게 되는 반면 하류측교량에서는 단면의 상류부분의 정압이 매우 감소되어 있으며 이러한 압력 분포의 차이에 의해 하류측의 교량은 감소된 항력을 받게됨.

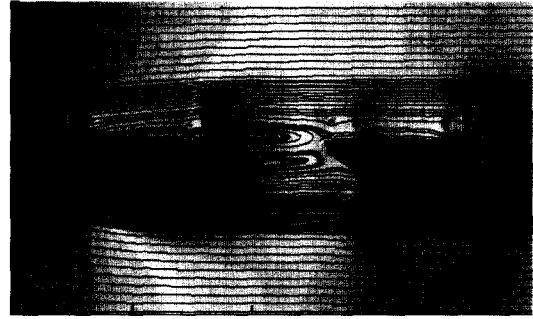


그림 15

④ CFD 평가

CFD 해석 결과, 와류진동 발생 풍속, 공기력계수는 실험결과와 대부분 일치하나, 내풍안전성 평가에서 가장 중요한 와류진동의 진폭이나 발산형 진동의 예측은 한계가 있으며 대기경계층의 조건에서의 예측이 곤란하다. 따라서 사장교등의 Cable Stayed Bridge는 정확한 내풍안전성을 평가하기 위해서 풍동실험이 필요할 것으로 판단됨.

4.8 결론

- (1) 2차원 주형 모형실험결과, 제2진도대교의 경우 기존 진도대교와 비슷한 내풍특성을 보임. 풍속 10m/s부근에서 최대 19cm의 연직와류진동과 풍속 30m/s부근에서 최대 18cm의 비틀림와류진동이 발생함. 기존 진도대교와 마찬가지로 내풍대책으로 곡면 Vane을 설치하고 난류(6%)를 작용시키면, 비틀림와류진동은 소멸하며 연직와류진동의 진폭은 최대13cm로 감소함.
- (2) 병렬교의 등류실험에 있어서 중심간격이 24m(2B)인 경우에는 하류측 교량에 새로운 비틀림 와류진동이 발생하는데 이 진동은 난류(6%)조건에서 소멸하며 중심간격 22.25m에서는 상호간섭이 나타나지 않음.
- (3) 병렬교에 있어서 하류측 구조물의 공기력은 항력의 경우, 단독교에 비해 크게 감소하며 양력 및 모멘트력도 상호간섭에 의해 공기력에 변화가 생김.
- (4) 제2진도대교의 독립주탑에 있어서는 다음과 같은 공기력진동의 발생이 예상됨.(표 10 참조)

표 10

구분	진동구분	기류조건	수평풍각	진폭 및 풍속
단독 주탑	휨 와류진동	등류	0°	19cm (12m/s)
병렬 주탑	휨 와류진동	등류	5°	60cm (19m/s)
	Buffeting	대기경계층류	0°	45cm (45m/s)

- (5) 기존 진도대교 및 제2진도대교의 3차원실험실험 결과, 난류 12%의 대기경계층에서는 설계풍속 내에서 와류진동이 발생하지 않으며 Buffeting 만이 나타남. Buffeting에 의한 진동변위는 설계 풍속(약60m/s)에서 연직방향으로 30cm~35cm 정도를 나타냄.
- (6) 중앙경간이 90% 가설된 상태에서도 난류에 따른 Buffeting만이 나타나며 하류측에 위치할 경우, 설계풍속(42m/s)에서 수평방향의 정적 변위와 동적변위를 합산하면 약 120cm 정도의 변위가 예측됨. 한편 상류측에 위치할 경우는 설계풍속에서 수평방향으로 정적변위와 동적 변위를 합하여 약 150cm 정도의 변위가 예측됨.
- (7) 주형의 가설단계 및 독립주탑의 제진대책으로 TMD를 제안하며 이를 이용하여 약50%의 제어 효과를 기대할 수 있음.
- (8) CFD해석에 의해 와류진동 발생풍속과 공기력 계수, 교량주위의 기류특성등은 가시적인 결과에 의해 예측이 가능하나 보다 중요한 와류

진동의 진폭이나 발산형 진동을 예측하기 어려움.

이상과 같이 근접 병렬배치된 기존 및 제2진도대교의 경우, 기류의 상호작용효과는 거의 나타나지 않았고 단독교량의 내풍특성과 거의 동일함. 단독교량에서는 단위중량이 큰 제2진도대교가 내풍성이 우수함을 알았으며, 제2진도대교 주형에서는 연직 및 비틀림 와류진동이 발생하는데 이는 Vane 설치 및 난류 고려시 거의 소멸되어 내풍안전성에 문제가 없을 것으로 판단됨. 또한 병렬주탑에 있어서는 기류의 상호작용에 의해 와류진동이 발생하나 난류에 의해 소멸됨이 관찰되었고, 가설단계에 주형 및 주탑에 Buffeting 진동이 발생되어 TMD 설치를 그에 대한 대처 방안으로 수립함. CFD 해석으로부터 병렬교의 항력계수의 감소, Vane의 효과등을 가시적으로 입증하는 결과를 얻었으나, 정확한 내풍특성 파악을 위해서는 반드시 풍동실험을 수행하여 보다 정확한 실측결과로 교량의 안전성을 확보해야 할 것으로 사료됨. 