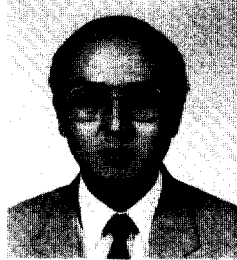


## 사장교 콘크리트 주탑의 풍동실험

### Wind Tunnel Test of Concrete Pylon for Cable-Stayed Bridge



변 윤 주\*      윤 태 양\*\*  
Byun, Yun Joo      Yoon, Tae Yang

#### 1. 서 론

사장교 주탑은 시공단계로 볼 때 주형이나 케이플의 설치이전 상태인 단독주탑(single pylon)의 시공단계가 필요하며, 그 경우 완성계 구조물보다 낮은 강성(stiffness) 및 구조감쇠(damping)로 인하여 완성계에서 보다 더 큰 진동이 발생하는 경우가 많아, 이에 대한 검토방법으로 풍동실험을 이용하는 것이 일반적이다. 특히, 현재 한국도로공사에서 시행중인 서해안 고속도로의 일부구간인 서해대교 구간중 사장교는 주경간 470m, 양측경간이 각각 200+60m의 장대교량으로서 콘크리트 주탑의 높이가 187m에 달해 시공중 바람에 의한 주탑의 동적거동에 대한 검토는 필수적이다. 따라서 서해대교 사장교 콘크리트 주탑의 풍동실험 과정을 중심으로 소개하기로 한다.

#### 2. 계 획

현재 일반적으로 사용되고 있는 모형축적(표 1)을 기준으로 경제성을 고려한 전교모형의 축적을 1/250로 정한 후, 세계적인 교량용 풍동실험실(표 2)에 대한 검토를 통하여 캐나다의 서온타리오대학 풍동실험실에서 실험을 수행하기로 하였다.

서 온타리오대학 풍동실험실은 1965년 설립되었으며, 2개의 폐회로식(closed circuit type)과 1개의 개회로식(open circuit type) 등 3개의 풍동(wind tunnel)을 보유하고 있고 각 풍동의 제원은 표 3과 같다.

풍동실험실의 운영은 국제 풍력학회장을 역임한 Davenport 박사(풍공학 전반, 교량분야)를 중심으로 Isyumov 박사(Building, 환경분야), Vickery 박사(Tower 분야), Surry 박사(Building 분야), Ramsay 박사(해양구조물 분야) 등과 King(교량분야), Mikitiuk(기상학분야), Allen(계측분야)등 약 30명의 연구, 기술진에 의해 정부의 재정지원 없이 순수 Project만으로 운영되고 있고, 특히

\* 정회원, (주) 삼우기술단 기술연구원 이사  
\*\* 정회원, (주) 삼우기술단 기술연구원 부장

표 1 기준 모형축척 비교표

지 차	참 고 도 서 명	Model Scale		비 고
		Section	Full	
Podolny, Scali	Construction and design of cable stayed bridges	1/30 -1/50	1/200 이 하	
Simiu, Scanlan	Wind effects on structure	1/25 -1/50	1/300 이 하	
Kolousek	Construction and design of cable stayed bridges	1/25 -1/50	1/50 -1/200	
Leonhardt	Cable stayed bridges	1/50 -1/100	1/50 -1/200	
Gimsing	Cable supported bridge	1/25 -1/100	-	
Trotzky	Cable-stayed bridges	1/30 -1/50	1/200 이 하	
일 본	石川大橋 風洞実験要領	1/100 이 하	-	
일 본	明石海峡大橋 風洞設計要領	1/100 이 하	1/100 이 하	
미 국	ASCE Manual and report on engineering practice No.67	1/10 -1/100	1/300 -1/500	

표 2 세계적인 교량용 풍동실험실 현황

실험실명	국 적	책임기술자	실험부 규모(M) (B×H×L)	기 타
서온타리오 대학	캐나다	Dr. Davenport	5.5×4.0×52	모형제작 살비보유
National Research Council	캐나다	Dr. Wardlaw	9×9×?	
R. W. D. I.	캐나다	Dr. Irwin	2.4×1.9×18	
Cermak/Peterka	미 국	Dr. Cermak	3.0×2.3×20	Colorado State University
P. W. R. I.	일 본		41×4.0×50	
동경대학	일 본	Dr. Fujino	16×1.9×1.9	
Mitsubishi	일 본		10×3.0×6.0	
National Maritime Institute	영 국		4.8×4.8×15	
Danish Maritime Institute	덴마크		13.6×1.7×15	
ONERA	프랑스		16×8.0×20	
C.S.T.3.	프랑스		4.0×2.5×20	

표 3 서온타리오대학 보유 풍동

실험부 크기 (W×H×L)	최대 풍속 (m/sec)	형 식 (Type)
5.5×4.0×52	28	Closed circuit
3.4×2.5×39	10	Closed circuit
2.4×2.1×33	15	Open circuit

Kager 氏를 중심으로 한 자체모형 제작소를 병행 운영하고 있다. 실험실적으로는 교량의 경우 전세계 11개국으로부터 30여개의 장대교에 대한 풍동 실험을 수행하였고, Building의 경우 현존하는 세계 최고층 건물중 2/3 이상을 이곳에서 실험한 실적을 가지고 있다.

### 3. 모형제작

그림 1의 주탑에 대한 제원으로 부터 축척 1/250의 공탄성 모형을 제작하였다. 실제 주탑의

표 4 단면값

항 목	기 호	값
단면 2차 모멘트 교축방향	$I_x$	1740~18.7m <sup>4</sup>
단면 2차 모멘트 교축직각방향	$I_y$	350~19.9m <sup>4</sup>
비틀림 모멘트	$I_z$	794~21.4m <sup>4</sup>
단위길이당 질량	m	178.5~31.0 t/m
탄성계수	$E_c$	29400 MPa

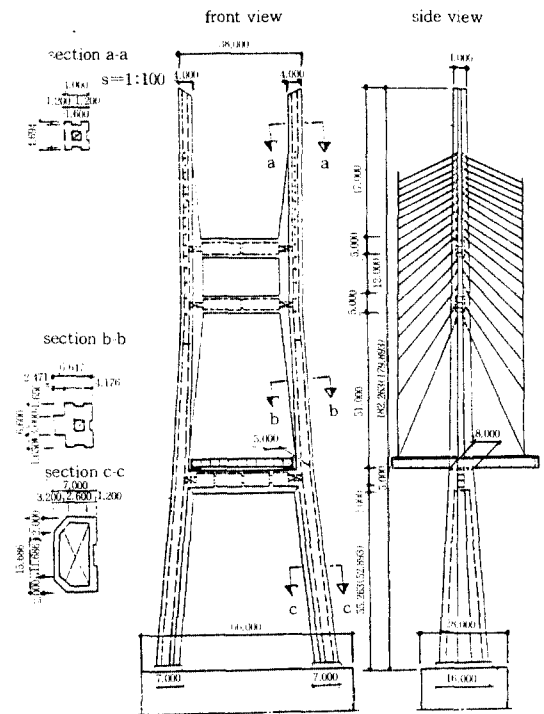


그림 1 서해대교 콘크리트 주탑 제원

표 5 공탄성 모형 Scale Parameters(Froude Scaled)

Parameter	Similitude requirement	Value
길이	$\lambda_L = L_m/L_p$	$4.00 \times 10^{-3}$
밀도	$\lambda_\rho = \rho_m/\rho_p$	1.0
속도**	$\lambda_V = V_m/V_p$	$6.32 \times 10^{-2}$
길이당 질량	$\lambda_m = \lambda_L \lambda_\rho^2$	$1.60 \times 10^{-5}$
질량	$\lambda_M = \lambda_L \lambda_m^3$	$6.40 \times 10^{-8}$
길이당 질량 관성모멘트	$\lambda_{I_m} = \lambda_L \lambda_m^2$	$2.56 \times 10^{-10}$
질량 관성모멘트	$\lambda_{I_M} = \lambda_L \lambda_{I_m}^3$	$1.02 \times 10^{-12}$
시간	$\lambda_T = T_m/T_p = \lambda_L/\lambda_V$	$6.32 \times 10^{-2}$
구조감쇠	$\lambda_\zeta = \zeta_m/\zeta_p$	1.0
강성	$\lambda_{E_I} = \lambda_{G_C} = \lambda \lambda_L^4$	$1.02 \times 10^{-12}$
	$\lambda_{E_A} = \lambda \lambda_L^2$	$6.40 \times 10^{-8}$
길이당 힘	$\lambda_F = \lambda \lambda_L = \lambda_L^2/\lambda_T^2$	$1.60 \times 10^{-5}$
힘	$\lambda_F = F_m/F_p = \lambda \lambda_L^3$	$6.40 \times 10^{-8}$
휨 및 비틀림 모멘트	$\lambda_{BM} = \lambda \lambda_L^3$	$2.56 \times 10^{-10}$
원상성	$\lambda_{WE} = \lambda \lambda_L^4$	$1.64 \times 10^{-11}$

\* 길이축척 : 1/250      \*\*  $\lambda_V = \lambda_T = \sqrt{\lambda_L}$

단면값 표 4로부터 표 5의 공탄성 모형 Scaling Parameter를 이용하여 모형을 제작하였다.

주탑의 강성은 사진 1에서와 같이 10개의 세그먼트로 나누어 4각형의 고강도 알루미늄 뼈대(spine)를 사용하여 각각 모사하였고, 기하학적 모사는 아크릴을 사용하여 단면모양과 일치하도록 하였다. 질량(mass)은 청동을 사용하여 적절히 조종함으로써 질량값은 물론 관성모멘트 값도 고려하였다. 즉, 각단면에서의 회전중심이 실제 위치와 일치하도록 하였다. 주탑과 Cross Beam 연결부(3개소)에는 강재 알루미늄 조인트(사진 2)를 사용하여 완전한 모멘트의 전달을 유도하였다. 또, 실험으로부터 얻은 단면력을 설계값과 비교검토하기 위하여 그림 2에 표시된 바와 같이 Base부, Deck 상부, Deck 하부의 6개소에 12개의 응력계(strain gauge)를 부착(사진 2)하였고, 주탑 상단부 2개소에는 3개의 가속도계(accelerometer)를 부착하여 각각의 변위(수평, 수직, 비틀림)를 측정할 수 있도록 하였다. 제작 완료된 모형에

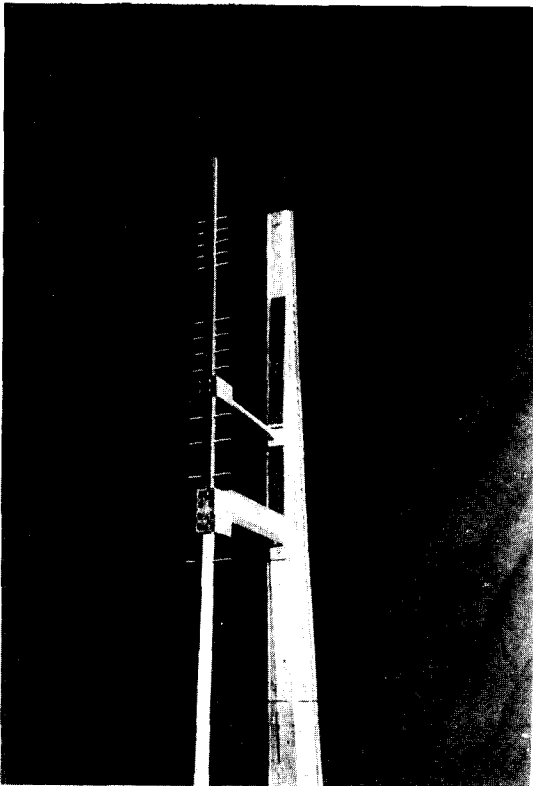


사진 1 뼈대(Spine) 및 케이블 연결부

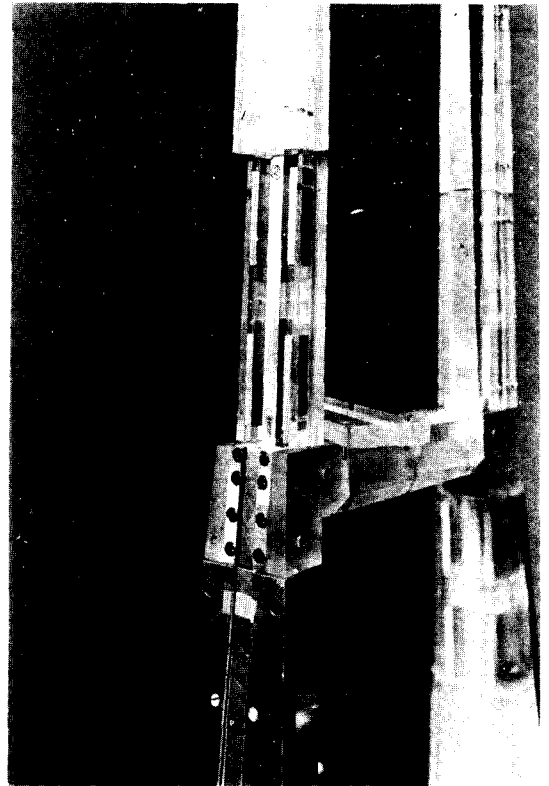


사진 2 조인트부, 응력계 부착 부위

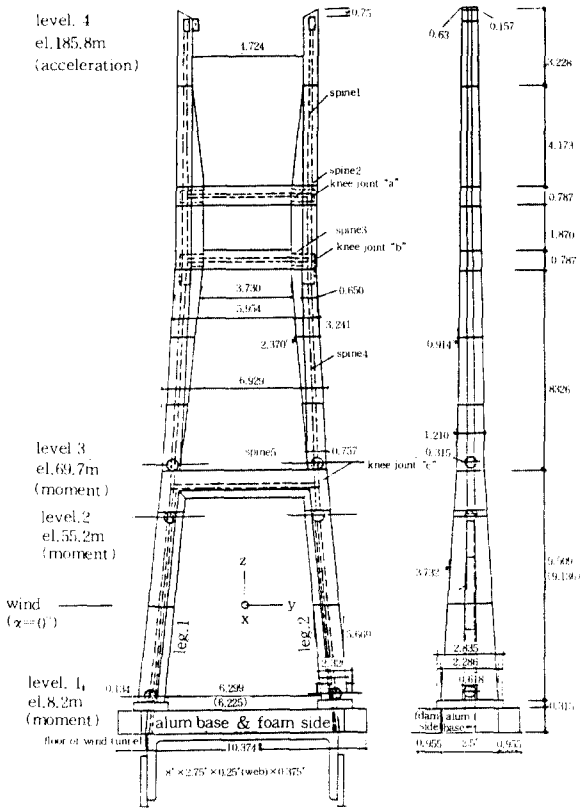


그림 2 모형제작 도면 및 응력계 부착위치

표 6 모형 실측 고유 진동수 비교

Mode	Dominant component (ALGOR File: PILON)	Computed prototype	Scaled model properties*	
			freq. (Hz)	damping %
1	Longitudinal Sway 1	0.279	0.28E	0.2
2	Lateral Sway 1	0.657	0.668	0.3
3	Torsion 1	0.669	0.668	
4	Longitudinal Sway 2	1.068	0.980	
5	Torsion 2	1.388	1.376	
6	Lateral Sway 2	1.477	1.417	
7	Lateral Tip Mode 1	1.577		
8	Lateral Sway 3	2.118	2.002	
9	Longitudinal Sway 3	2.277		
10	Torsion 3	2.836		

\*Measured Model Properties determined from:

$$f_v = f_{to} * \lambda_1$$

where:

$$\lambda_1 = 1 / \lambda_1 = \lambda_v = \sqrt{\lambda_1}$$

and:

$$\lambda_1 = 250.0$$

대한 모드형상 검증을 수행함으로써 모형제작의 정도를 확인하였는데, 표 6에서는 해석으로부터 구한 고유진동수와 모형으로 부터 실측 계산된 고유진동수의 값이 잘 일치함을 보여주고 있다.

#### 4. 실험과정

자연풍 난류상태를 재현하기 위하여 2가지 형태의 지형조건을 사용하였다. 즉, 평활지에 해당하는 난류강도 6%와 그 2배의 조도를 갖는 난류강도 12%의 2가지 형태를 사용하였다. 난류강도 12%에 대해 풍동 실험부에서 풍속의 수직분포 및 파워 스펙트럼을 실제 통용되는 자연풍의 값(engineering science data unit)들과 비교하였다(그림 3, 그림 4). 실험은 실제 풍속하에서 10분간의 바람에 대한 주탑변위에 대하여 최대, 최소, 평균 및 R M S(root-mean-square) 값을



사진 3 풍동실험 전경(Turtable 이용)

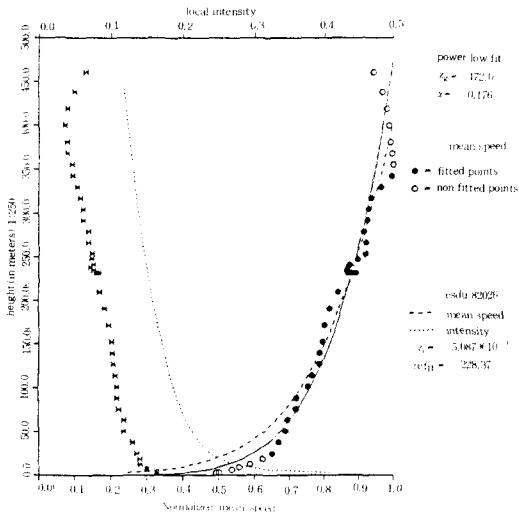


그림 3 바람의 수직분포

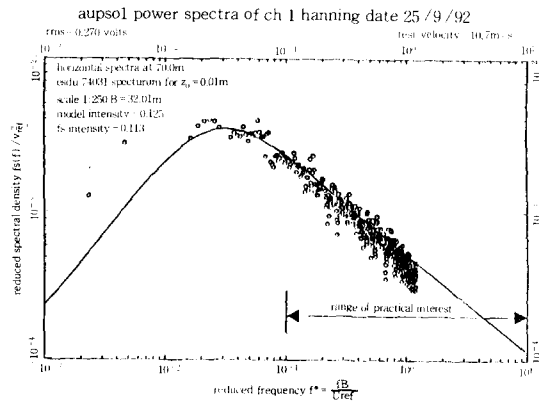


그림 4 바람의 파워 스펙트라

언을 수 있도록 하였다. 또, 바람의 방향에 대한 영향을 검토하기 위하여 모형을 회전가능한 측정기구(balance) 즉, Turntable(사진 3) 위에 설치하여 매 10°씩 0°~90°까지 회전시키면서 실험함으로써, 제일 불리한 조건에 대한 변위를 구할 수 있도록 하였다. 또, 모형자체로부터의 구조감쇠가 0.2%로 너무 작으므로 이의 영향을 검토하기 위하여 Visco-elastic 재료를 Spine 부위에 부착, 구조감쇠율을 1%로 증가시킨 후 추가 실험을 수행하였다.

## 5. 결 과

구조감쇠율 0.2%와 난류강도 6% 상태에서 교축 직각방향 풍속 25m/s의 경우, Vortex shedding 형태의 진동현상이 발견되었으나 난류강도를 12%로 증가시켰을 경우, 그 진동은 급격히 감소하였고 구조 감쇠율을 1%로 증가시키는 경우에는 진동현상이 완전히 제거되었다. 따라서, 실제 가능한 지형조건 및 구조감쇠율을 감안할 경우 Vortex shedding으로 인한 진동현상은 발생치 않는 것으로 판단되었다. 또한 풍속 60 m/s에서 2차 Vortex shedding 현상이 주탑의 상단 부분에서 발견되었으나, 구조 감쇠율을 1%로 증가시킬 경우 앞서와 마찬가지로 진동현상은 발생치 않았다. 실제 시공과정을 감안하여 상부 세그먼트 1과 2를 제거한 상태에서 실험한 결과, 주탑 상단부에서 진동현상이 발견되지 않으므로써 2차 발생 진동현상이 주로 주탑의 상부에서만 발생하는 것으로 확인되었다.

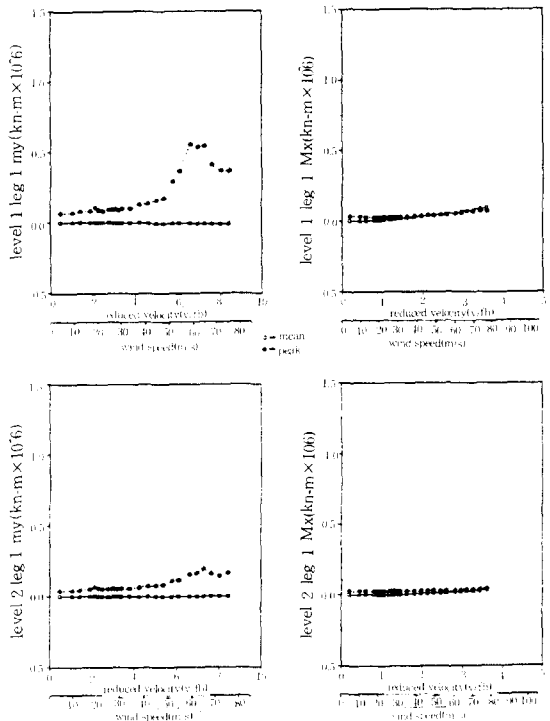


그림 5 Level 1, 2에서의 모멘트값( $\alpha=0^\circ, I=6\%, \xi=1\%$ )

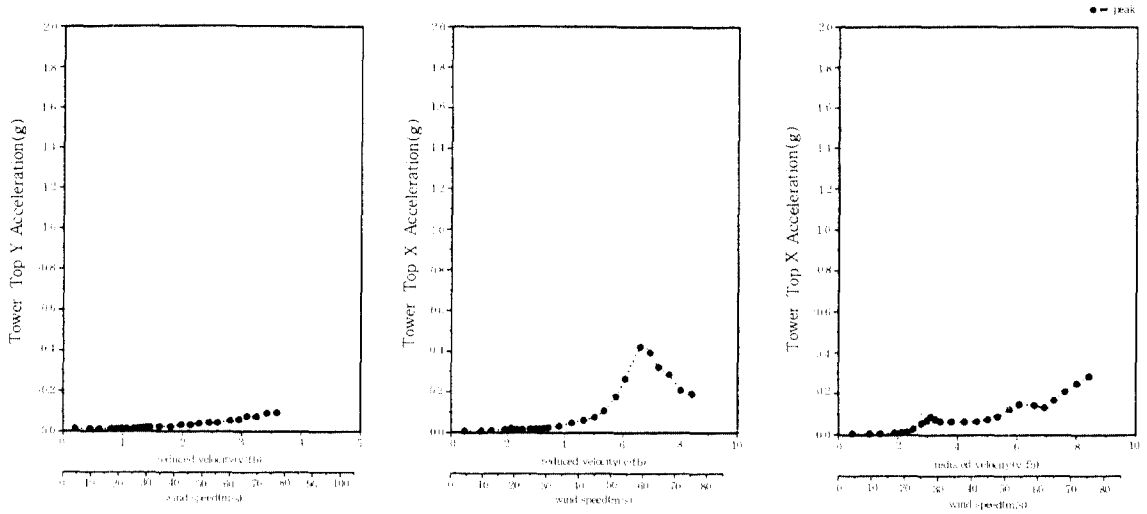


그림 6 주탑 상단부에서의 가속도값  
( $\alpha=0^\circ$ ,  $l=6\%$ ,  $\zeta=1\%$ )

풍각  $\alpha=0^\circ$ (교축 직각방향), 개활지 상태(난류강도=6%) 및 구조감쇠율 1%의 경우 Level 1과 2에서의 풍속증가에 따른 단면력 변화를 그림 5에 소개하였고, 가속도값을 그림 6에 소개하였다. 모멘트의 경우, 풍속 60m/s에서 주탑저면부에

서의 응력에 대한 안전율은 약 6.0, 주탑 상단부 변위량은 약 10cm 정도로 구조물 안전에는 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다. 바람의 방향을  $\alpha=10^\circ\sim90^\circ$ 로 변경한 경우에 단면력 및 변위값은  $\alpha=0^\circ$ 의 경우에 비하여 더 작은 값을 보였다. □