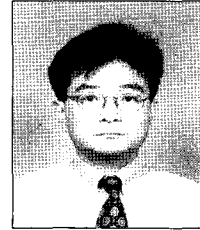


슬라이딩 블록을 이용한 구조물의 진동제어

Vibration Control of a Structure Using the Passive-Type Sliding Block



황재승*



김윤석**

*전남대학교 건축학부 교수
**(주)티이솔루션 대표이사

1. 서론

시공단계의 구조물은 타 부재나 부속구조물과 연결되기 전 완공기간에 비하여 짧은 시간이지만 독립적으로 유지되는 경우가 있다. 가설공사나 상판에 케이블이 설치되기 전 사장교의 주탑이 독립적으로 서있는 경우나 타워 크레인과 같이 매우 세장한 구조물은 그러한 예로 볼 수 있다. 독립주탑이나 타워크레인은 세장한 구조물로 외부하중에 매우 민감하며, 특히 와류진동에 의하여 진동이 쉽게 발생할 수 있다. 이러한 와류진동에 의한 진동은 구조적으로 치명적인 영향을 미치지 않는 않지만, 국부적인 손상이나 공기기연등 가설공사에 영향을 미치기 때문에 이에 대한 진동저감 대책이 필요하다. 본 연구에서는 제2진도대교의 독립주탑에 발생하는 와류진동을 억제하고자 설치된 슬라이딩 블록의 해석/설계/제작 및 설치 제시하여 최적의 진동저감효과를 구현하는 방안을 제시한다. 해석/설계에서는 독립주탑과 슬라이딩 블록이 케이블에 의하여 연결되었을 때의 운동방정식을 제시하고, 이 운동방정식의 해석결과로부터 최적의 진동저감효과를 가지는 케이블의 직경, 슬라이딩 블록의 사양을 결정한다. 슬라이딩 블록 제작/설치 부분에서는 기 설치된 진도 측 슬라이딩 블록의 제작과 설치현황에 대해서 고찰한다.

2. 슬라이딩 블록의 해석

주탑과 슬라이딩 블록이 연계된 운동방정식은 이 사이를 연결하는 케이블의 비선형성 때문에 엄밀한 의미에서, 선형운동방정식으로 치환하여 모델링할 수 없다. 그러나 케이블이 슬라이딩 블록의 자중에 의하여 매우 팽팽하게 유지되는 경우 주탑 및 슬라이딩 블록의 미소 변위사이의 관계를 선형화(linearization)할 수 있다. 그러나 이러한 모델링 기법은 주탑과 슬라이딩블록의 거동을 예측하는데 충분한 정보를 제공하지만, 케이블 자체가 바람에 의한 영향에 의하여 진동이 발생하고 이것이 다시 주탑과 슬라이딩블록에 미치는 영향을 고찰할 수 없다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 케이블을 유한요소법을 이용하여 모델링하고 케이블 양끝 단에 연결되는 주탑과 슬라이딩 블록을 구속조건으로 선정함으로써 주탑-케이블-슬라이딩 블록이 연계된 운동방정식을 제시한다.

2.1 케이블의 유한요소모델

케이블은 주탑과 슬라이딩 블록을 연결하는 부재로 사용되지만, 단순한 연결부재의 의미를 벗어나 주탑의 진동저감효과에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 케이블의 직경이 큰 경우에는 케이블의 자중에 의하여 케이블의 처짐

이 커지고 이로 인하여 주탑의 변위가 곧바로 슬라이딩블록에 전달되지 않아 진동저감효과가 작아지며, 역으로 직경이 작은 경우에는 요구되는 장력을 충분히 견뎌내지 못하여 주탑과 슬라이딩 블록의 연결재로서 충분한 역할을 할 수 없다. 본 절에서는 케이블의 직경에 따른 케이블 요소의 강성행렬, 질량행렬을 구현하고, 이를 assemble하여 케이블 전체의 강성행렬과 질량행렬을 구한다.

1) 케이블 요소의 강성행렬

케이블은 기하학적 비선형성 뿐만아니라 작용하는 하중의 방향에 따른 비선형성 때문에 유한요소모델로 치환하기 위해서는 충분한 긴장상태에 있다고 가정해야한다. 케이블의 초기변형을 알아야 하며, 이 초기변형상태에서 케이블 내에 충분한 장력이 작용하고 있다고 가정한다. 또한 추가된 하중에 의하여 케이블이 변형되는 경우 이 변형은 초기변형상태에 비하여 매우 미소하게 변형한다고 가정한다. 이러한 가정으로부터 길이 L인 케이블 부재의 강성행렬(K_e)은 다음과 같이 주어진다.

$$K_e = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} B & -B \\ -B & B \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, K_e 는 케이블부재의 강성행렬을 나타내며, L은 부재의 길이 B는 다음과 같이 주어지는 3x3행렬이다.

$$B = T_R \cdot I + (E_R A_o \lambda_R - T_R) [\theta_R] [\theta_R]^T \quad (2)$$

여기서, T_R 은 초기변형상태에서 케이블 부재에 내에 작용하는 장력, I는 3x3단위행렬, E_R 는 케이블의 영계수, A_o 는 케이블의 단면적, θ_R 는 케이블 양끝단에 대한 절대 좌표계에서의 기울기, λ_R 은 장력이 작용하는 양은 자유상태의 길이에 대한 초기변형시 늘어난 길이의 비를 나타내는 것으로 다음과 같다.

$$\lambda_R = 1 + \frac{T_R}{E_R A_o} \quad (3)$$

$$\theta_R = \begin{pmatrix} \theta_{Rx} \\ \theta_{Ry} \\ \theta_{Rz} \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

2) 케이블 요소의 질량행렬

케이블요소의 질량행렬은 다음과 같다. 이때 질량은 분포질량(consistent mass)로 가정한 것이다.

$$M_e = \frac{\rho A_o L}{6 \lambda_R} \begin{bmatrix} 2I & I \\ I & 2I \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, ρ 는 케이블의 밀도이다. 만일 질량은 노드에 집중된 질량(lumped mass)로 가정을 하면 질량행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_e = \frac{\rho A_o L}{6 \lambda_R} \begin{bmatrix} 3I & 0 \\ 0 & 3I \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 주탑-케이블-슬라이딩 블록이 연계된 통합시스템

케이블 양끝단은 각각 주탑과 슬라이딩 블록에 연결된다(그림 1참조). 주탑과 연결되는 부분은 주탑이 수평운동만을 한다고 가정하게 되면 케이블의 끝단에서의 수직변위는 구속된다. 즉 케이블이 주탑과 연결되는 수직변위의 변분은 '0'이 된다.

$$\delta u_{z0} = 0 \quad (7)$$

여기서, δ 는 변분을 나타내며, u_{z0} 는 케이블이 주탑과 연결되는 부분의 z 방향 변형성분을 나타낸다. 또한 주탑의 수평변위 u_{x0} 는 주탑의 수평변위 x와 같다.

또, 케이블이 슬라이딩 블록이 연결되는 부분을 고려해보면, 케이블의 수평변위, u_{x1} 는 슬라이딩 블록의 변위 y의 수평성분과 같으며, 케이블의 수직변위, u_{z1} 는 슬라이딩 블록의 변위 y의 수직성분과 같다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_{x1} &= yc(\varphi) \\ u_{z1} &= ys(\varphi) \end{aligned} \quad (8, a,b)$$

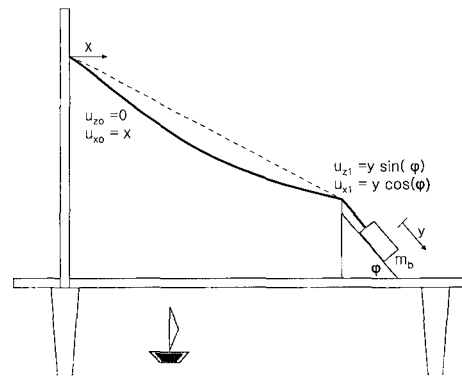


그림 1 주탑-케이블-슬라이딩 블록 연계 시스템

연계된 시스템의 운동방정식을 유도하기 위하여 Hamilton Principle을 이용한다. 이를 위하여 주탑, 케이블, 슬라이딩 블록의 운동에너지(T), 위치에너지(V)를 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_p &= \frac{1}{2} M_p \dot{x}^2 \\
 V_p &= \frac{1}{2} K_p x^2 \\
 T_c &= \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} (M_c)_k (\dot{x}_c)_k^2 = \frac{1}{2} \dot{x}_c^T M_c \dot{x}_c \quad (9, a,b,c,d,e) \\
 V_c &= \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} (K_c)_k (x_c)_k^2 = \frac{1}{2} x_c^T K_c x_c \\
 T_{s,b} &= \frac{1}{2} m_s \dot{y}^2
 \end{aligned}$$

여기서, 첨자 p, c, s는 각각 주탑, 케이블, 슬라이딩 블록을 나타낸다. M, K는 각각 질량과 강성을 나타내며, m_s 는 슬라이딩 블록의 질량이다. 여기서 주탑은 1차 모드의 질량, 강성을 나타내며 케이블이 연결되는 부분의 모드형상값이 '1'이 되도록 정규화하여 구한 것이다. 또한, n은 케이블을 유한요소모델로 변화할 때 자유도(degree of freedom)의 개수를 나타낸다.

그런데 케이블과 주탑, 케이블과 슬라이딩블록의 연결점에서의 구속조건에 의하여 주탑, 케이블, 슬라이딩블록의 거동을 표현하는 n-2개의 독립변수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi = (x, x_{3c}, \dots, x_{n-2c}, y)^T \quad (10)$$

여기서, x는 주탑의 횡변위, y는 슬라이딩 블록의 처짐 변위이며 나머지는 케이블의 자유도를 나타내며, T는 전치행렬을 나타낸다.

이러한 독립변수를 이용하여 주탑, 케이블, 슬라이딩의 변수는 다음과 같은 관계에 의하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x &= C_x^T \xi \\
 y &= C_y^T \xi \\
 x_c &= C^T \xi \quad (11, a,b,c)
 \end{aligned}$$

이 관계식을 주탑, 케이블, 슬라이딩블록의 운동, 위치에너지를 대입하고 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T &= T_p + T_c + T_s \\
 &= \frac{1}{2} \dot{\xi}^T (C_x^T M_p C_x^T + C M_c C^T + C_y m_s C_y^T) \dot{\xi} \\
 &= \frac{1}{2} \dot{\xi}^T M \dot{\xi} \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V &= V_p + V_c \\
 &= \frac{1}{2} \xi^T (C_x K_p C_x^T + C K_c C^T) \xi \\
 &= \frac{1}{2} \xi^T K \xi \quad (13)
 \end{aligned}$$

모든 시스템이 연계된 운동에너지와 위치에너지를 다음과 같은 Hamilton principle에 대입한 후 정리하면 주탑, 케이블, 슬라이딩 블록이 연계된 운동방정식을 얻는다.

$$M \ddot{\xi} + C_0 \dot{\xi} + K \xi = F(t) \quad (14)$$

여기서, C_0 는 감쇠행렬을 나타내며, F(t)는 외부에서 작용하는 하중을 나타내는 것으로, 식 유도과정을 단순히 하기 위해서 생략되었던 것이다.

3. 슬라이딩 블록 시스템의 설계

최적의 설계변수를 구하기 위하여 해석에 필요한 슬라이딩블록의 위치, 질량등이 다음 그림 2에 나타나 있다. 연계 시스템의 설계변수를 변화시키면서 최적의 응답저감효과를 가지는 설계변수값을 해석을 통하여 구하였다. 외부하중은 와류진동이 발생한다고 가정했을 때, 최대 주탑의 변위가 50cm가 되도록 하중을 산정하여 해석을 수행하였다. 해석 시간은 10분으로 하였으며, 주탑의 모달질량 및 강성은 각각 152ton, 0.576Hz이며 감쇠비는 1%로 가정하였다.

주탑의 진동저감효과에 가장 큰 영향을 미치는 설계요소는 케이블의 직경, 슬라이딩블록의 경사각, 슬라이딩 블록의 질량, 슬라이딩 블록의 마찰계수이다. 이중에서 슬라이딩 블록의 경사각은 제작 및 시공을 감안하여 50도 내외로 조정하였기 때문에 큰 변동은 없다. 슬라이딩 블록의 마찰계수 또한 강재와 강재사이의 마찰계수로 구현하기 때문에 0.25~0.35사이의 값을 사용하였다.

슬라이딩 블록의 질량은 케이블의 직경과 직접적으로 관계있기 때문에 슬라이딩의 질량이 증가할수록 비례하여 케이블의 직경이 증가하도록 하였다. 케이블은 유한요소법을 이용하여 강성행렬과 질량행렬을 구했으며, 요소의 길이에 따른 해석결과를 고찰하기 위하여 케이블의 chord 길이를 1/100, 1/50, 1/20, 1/10, 1/5, 1/2 등분하여 모델링하였다. 케이블의 요소길이는 해석결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나, 케이블고유의 진동을 예측하기 위해서는 케이블 요소의 길이를 줄여야 한다. 이러한 과정을 통하여 구한 연계시스템의 설계변수와 이러한 설계

표 1 최적설계변수 결정

구분	설계변수명	기호	공칭값	비 고
시스템형상	수평거리	L	48.822m	주탑과 S.B의 케이블 수취부의 수평거리
	수직거리	D	49.92m	주탑과 S.B의 케이블 수취부의 수직거리
	케이블 경사각	Θ [atan(D/L)]	46°	주탑 수직방향(주탑 면외방향)과 케이블수직방향과의 사이각
	케이블 수평경사각	ψ	2.4°	주탑 수직방향(주탑 면외방향)과 케이블수평방향과의 사이각
	보강형상판의 구배	δ	5%	보강형 상판이 주탑 면외방향과 이루는 각
	보강형 상판구배에 따른 높이차	ho=(L δ)	2.5m	보강형상판구배에의한 높이차
케이블	케이블의 직경	d	2cm	
	케이블의 단면적	A	3.14cm ²	최대장력= A × 2.4 ton =7.5ton
	밀도	ρ	7850kg/m ³	
	탄성계수	E	2*10 ¹¹ N/m ²	
	단위길이당 중량	q (ApG)	24.16N/m	
슬라이딩블록	S.B의 질량	mb	3040kg	슬라이딩 블록의 이동질량 concrete 블록 1개 질량: 640kg
	크기	-	-	1,781 × 1,520 × 2,545(H)mm
	stroke	St	±385mm	
	경사각	ϕ	50°	보강형상판의 구배를 고려해야함 상판의 구배 5%를 고려하는 경우 경사각은 55°임
	마찰계수	μ	0.3	

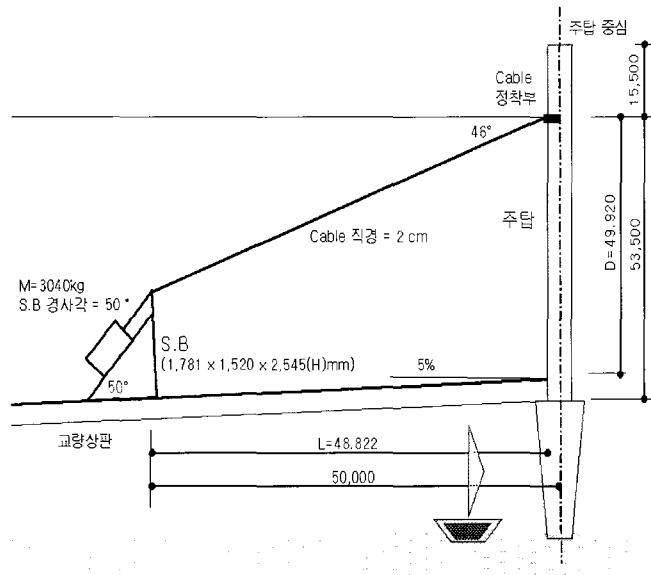


그림 2 슬라이딩블록의 위치

변수를 가지를 시스템에 대하여 최적설계변수와 해석을 통하여 구한 케이블의 장력등이 표 1, 2에 나타나 있다.

4. 슬라이딩 블록 시스템의 제작 및 설치

그림 3, 4와 같이 결정된 슬라이딩 블록 설계변수를 만족하도록 설계된 도면이 다음 그림에 나타나 있다.

설계도면을 바탕으로 진도측에 설치된 슬라이딩 블록의 형상이 다음 사진에 나타나 있다.

표 2 해석결과

구분	설계변수명	기호	공칭값	비 고
해석결과	케이블 수평장력	Ho	2.14tonf	
	주탑 케이블 정착부 수직장력	Vo	2.28tonf	정착부 장력 : To=3.14tonf 정착부 기울기 : $\theta_0=46.74^\circ$
	S.B 케이블 수취부 수직장력	V1	2.11tonf	수취부 장력 : T1=3.01tonf 수취부 기울기 : $\theta_1=44.26^\circ$
	수취부 수직분력	Rv	2.11tonf	수취부 수평분력 : Rh=2.14 tonf
	수취부 면외분력	Rz	0.9tonf	S.B가 2.4도 기울어져 발생
	S.B의 마찰력	Fr	0.52tonf	$\mu mg \cos(\phi)$
	케이블의 늘어남 총길이	S	69.83m	케이블의 길이는 주탑정착부와 S.B의 수취부의 순수길이임
	케이블의 자유길이	So	69.80m	질량체까지의 길이를 고려해야함
	케이블의 chord 길이	Lo	69.83m	$Lo=\sqrt{D^2+L^2}$

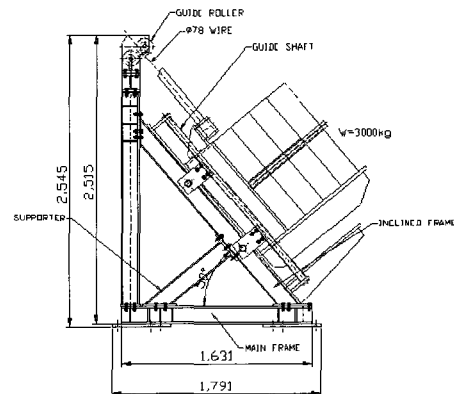


그림 3 슬라이딩 블록 입면

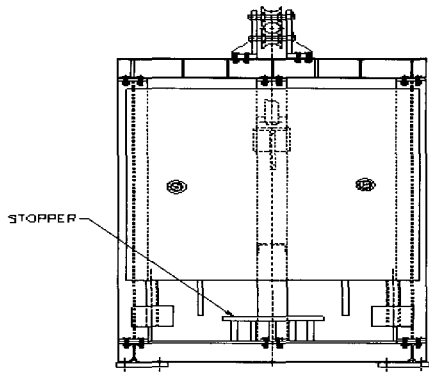


그림 4 슬라이딩 블록 평면

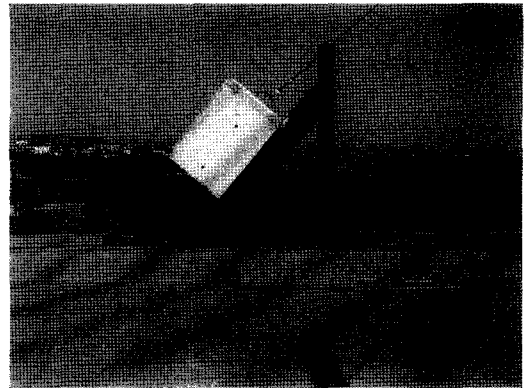


사진 4 슬라이딩 블록 입면

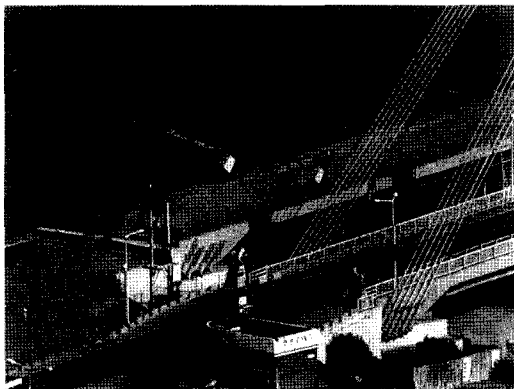


사진 1 진도측에 설치된 슬라이딩 블록 2대의 원경

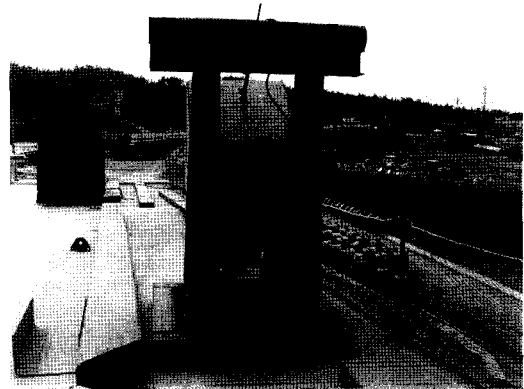


사진 5 슬라이딩 블록 전면

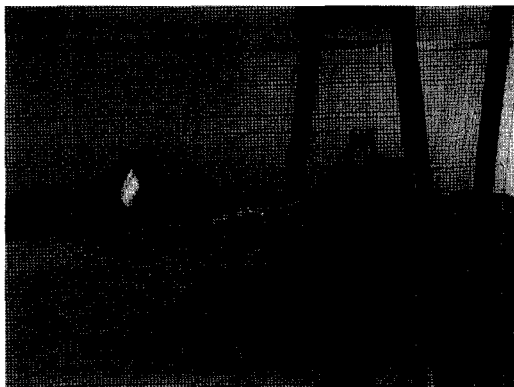


사진 2 보강판위에 설치된 슬라이딩 블록(후면)

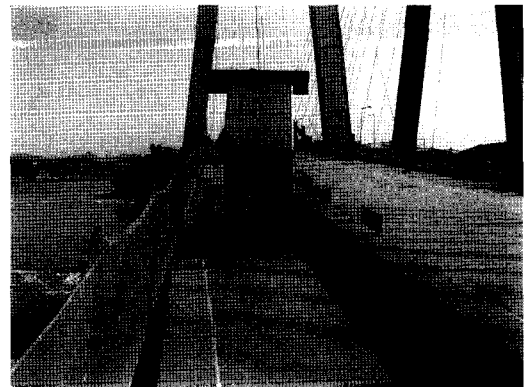


사진 6 슬라이딩 블록 후면

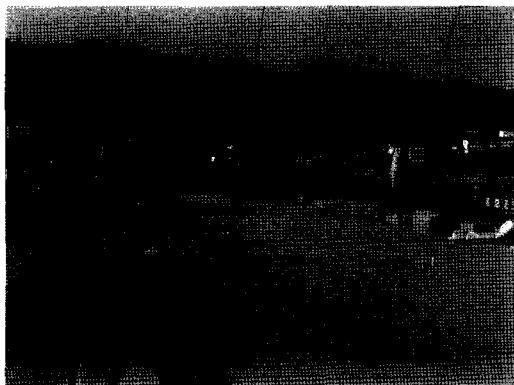


사진 3 보강판위에 설치된 슬라이딩 블록(전면)

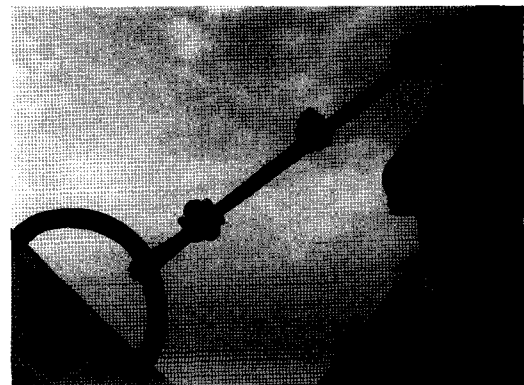


사진 7 슬라이딩 블록과 케이블의 접합부

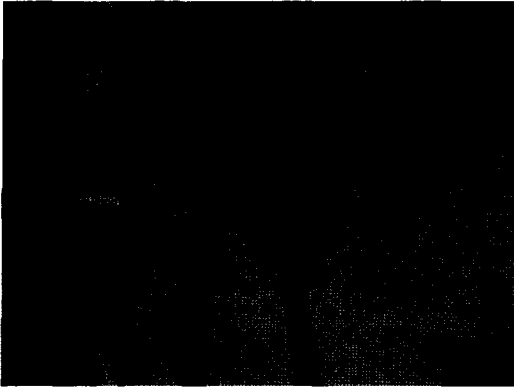


사진 8 케이블의 sag

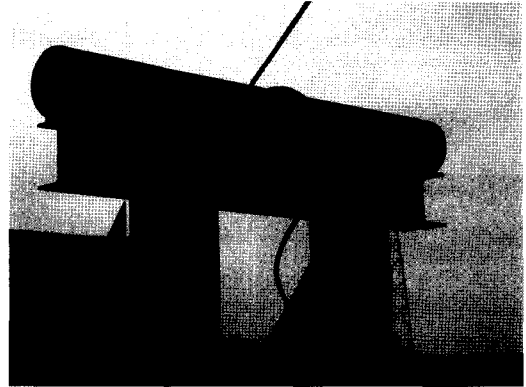


사진 12 원형 강관으로 제작된 가이드 롤러

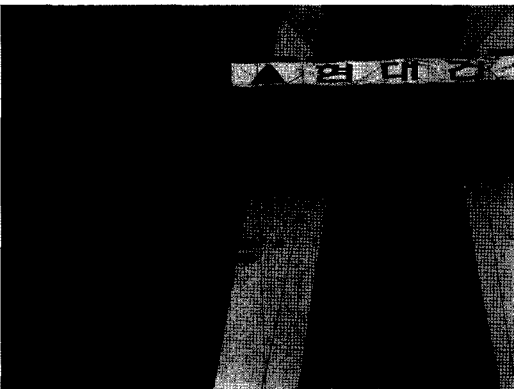


사진 9 케이블과 주탑의 접합

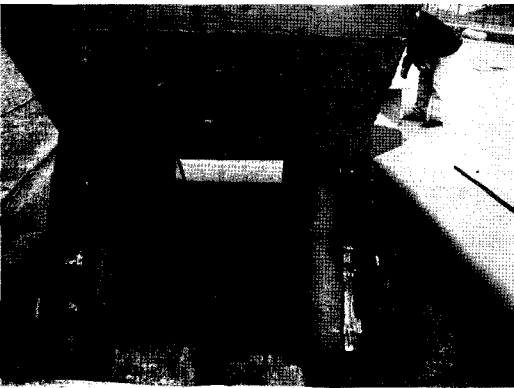


사진 10 블록과 지지대의 마찰 접촉면



사진 11 블록 이탈 방지 L형강

5. 결 론

본 연구에서는 주탑-케이블-슬라이딩블록이 연계시스템의 운동방정식을 유도하였으며 이를 이용하여 최적설계 변수를 구하고 제작/설치 및 슬라이딩블록에 의한 독립주탑의 진동저감효과를 고찰하였다. 본 해석결과 최적설계 변수가 연계시스템에 적용된 경우 주탑의 변위가 $\pm 50\text{cm}$ 에서 약 $\pm 15\text{cm}$ 로 줄어들어 약 1/4의 진동저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 이때 슬라이딩블록의 변위는 $\pm 10\text{cm}$ 로 설계된 최대 스트로크 $\pm 38.5\text{cm}$ 내에서 거동하는 것으로 나타났다. 또한 직경 2cm의 케이블에 재하되는 장력을 충분히 지지하는 것으로 나타나, 본 시스템은 성능과 안전성 측면에서 충분한 신뢰성을 가지는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. John William Leonard, *Tension Structures Behavior & Analysis*, McGraw-Hill, 1988.
2. Otto. F., *Tensile Structure*, vols. 1 and II, MIT Press, Cambridge, 1967, 1969.
3. Irvine, H. M., *Cable Structure*, MIT Press, Cambridge, 1981.
4. 권순덕, "교량 주탑의 와류진동 억제를 위한 슬라이딩 블록의 설계식", 한국 풍공학회지, 제 1권, 제 1호, pp. 116-126, 1997. 