



세장 구조물의 와류진동 및 제진 방법

황재승*

(전남대학교 건축학부)

1. 머리말

구조물에 바람이 작용하게 되면 구조물 후면에 공기 흐름의 박리(separation)가 일어나면서 후류역을 형성한다. 후류에 주기적으로 회오리가 발생, 소멸되는 현상을 와류(vortex shedding)이라고 하고 이로부터 구조물에 발생하는 진동현상을 와류진동이라고 한다. 풍하측에서 발생된 와류는 주기적으로 생성, 소멸되면서 유체 운동방향에 90°의 각을 이루는 주기적인 힘을 구조물에 가하게 된다. 주기적으로 발생하는 힘의 진동수가 구조물의 진동수 부근에 근접하게 되면 공진현상이 발생되어 구조물의 진폭이 매우 커지게 된다.

와류진동은 주로 원형실린더와 같이 매우 세장한 구조물에 발생하며, 각형, H형강과 같은 다른 형태의 단면 형상을 가지는 구조물에도 발생한다. 실제 구조물에서 와류에 의한 진동이 발생하는 경우는 가로등, 원형 기둥, 케이블, 굴뚝, 교량의 독립주탑과 같이 단면이 단순하며 매우 세장한 경우이다. 그러므로 건축물과 같이 대규모 구조물 보다는 이 구조물을 구성하는 국부적인 부재-인장형 케이블, 장식용 기둥, 최상층 옥외 안테나 등에서 발생하기 쉽다.

와류진동은 구조물의 설계풍속보다 작은 저 풍속영역에서 발생하기 때문에 반복된 진동에 의한 피로현상에 의해 부재가 국부적으로 파손되는 경우가 대부분이며, 경우에 따라 피로손상에 의하여 전체 구조물의 안전성에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 평가와 보강이 필요하다.

여기에서는, 세장한 구조물에 발생하는 와류진동의 특성에 대해 알아보고 이러한 진동현상에 의해 구조부재나 세장 구조물에 발생하는 피해사례 및 제진방안을 제시하여 구조물 설계단계에서 와류진동에 대한 이해와 검토의 필요성을 기술하였다.

2. 와류진동

2.1 와류진동발생 풍속예측

세장한 구조물에 평균풍속 U인 바람이 작용하면, 구조물 표면을 따르는 공기흐름이 풍하측에서 박리되어 와류가 발생한다. (그림 1) 이러한 와류는 주기적으로 발생, 소멸하면서 풍 직각 방향에 하중을 가하게 되며 하중의 주기가 구조물의 진동수에 도달하면 공진현상에 의해 구조물의 진폭이 커진다. 와류의 방출 진동수는 풍속에 의해 달라지며, 구조물의 고유진동수가 같아져 구조물의 진폭이 커지게 되는 풍속을 임계풍속이라고 한다. 와류진동을 발생시키는 임계풍속은 단일 풍속으로 나타나지 않고 일정한 범위를 가지는데 이를 lock-in 현상이라고 한다. (그림 2)

와류에 의한 진폭이 아주 커지면 주기적인 와류의 발생을 방해하여 구조물의 진동이 다시 줄어드는 현상을 보이기 때문에 진폭이 어느 정도 이내로 제한되는 특성을 가지고 있다. 이때 진폭의 크기는 구조 감쇠율과 구조물 단면의 기하학적 형상에 따라 달라진다. 진동이 제한되기 때문에 구조부재의 파괴를 일으키지 않는 범위 안에서 진동의 발생은 허용할 수 있는 현상이다. 그

*E-mail : jshwang@jnu.ac.kr / Tel : (062) 530-1641

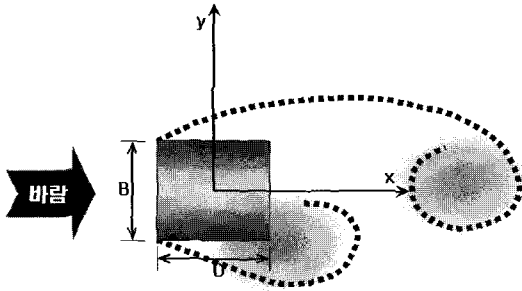


그림 1 후류의 와류발생 원리

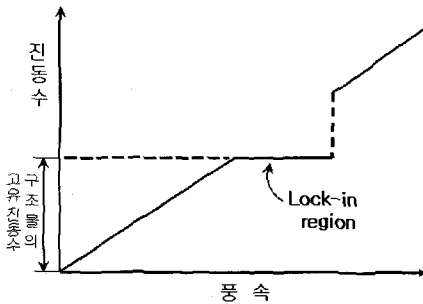


그림 2 와류 발생 풍속

표 1 기본 단면 형상에 따른 스트로우할 수

단면 형상	B/D	S(스트로우할 수)
	0.50	0.115
	0.75	0.120
	1.00	0.135
	0.50	0.085
	0.75	0.115
	1.00	0.125
	1.25	0.123
원형단면	1	0.200

러나 이 진동이 일상적인 저풍속에서 발생하는 경우에는 진동의 반복에 의한 부재의 피로문제가 발생하고, 진동가속도가 과도한 경우 시공효율이 떨어져 공사가 지연될 수도 있다.

와류진동이 발생하는 임계풍속은 다음과 같은 스트로우할 수(Strouhal number)에 의해 예측이 가능하다.

$$\text{스트로우할 수} : S = \frac{n_e B}{U_{cr}} \quad (1)$$

$$\text{임계 풍속} : U_{cr} = \frac{n_e B}{S} \quad (2)$$

스트로우할 수는 탁월한 와류의 발생진동수 n_e 를 건축물의 대표적인 폭 B와 대표적인 풍속 U로 무차원화시킨 것으로서 주로 구조물의 단면 형상에 따라 고유한 값을 갖는다. 표 1은 기본 단면 형상에 따른 스트로우할 수를 나타낸다.

와류진동을 발생하는 풍속은 lock-in 현상에 의해서 임계풍속으로부터 약간 벗어나도 발생하므로 와류진동 발생 풍속범위는 다음과 같이 나타낸다.

$$U_{cr} - \frac{\beta B}{2S} < U < U_{cr} + \frac{\beta B}{2S} \quad (3)$$

여기서, β 는 와류진동이 발생하는 진동수 폭으로 사각형의 단면의 경우 0.25 Hz이다.

2.2 구조물의 응답예측

와류에 의하여 구조물에 전달되는 단위 길이당 풍직 각방향 풍하중은 와류진동이 발생했을 때 임계풍속과 와류 방출 진동수에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} \rho U_{cr}^2 D C_L \sin(\omega_s t) \quad (4)$$

여기서, ρ 는 공기밀도, U_{cr} 은 임계풍속, D 는 풍직각 방향의 폭, C_L 은 양력계수로 레이놀즈 수(Reynolds number)에 따라 다르지만 약 0.6의 값을 가진다.

단면이 일정한 세장한 구조물의 응답은 다음과 같은 구조물의 운동방정식을 이용하여 구할 수 있다.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{1}{2} \rho U_{cr}^2 D C_L \sin(\omega_s t) \quad (5)$$

여기서, E, I, \bar{m} 은 각각 탄성계수, 단면이차 모멘트, 단위길이당 질량을 나타내며, x 는 기준점에서부터 구조물 길이방향의 거리, y 는 구조물의 처짐을 나타낸다. 이때 구조물의 감쇠는 수식의 단순성을 위해서 무시한 것이다. 원형단면의 경우 와류진동에 의한 최대 응답은 Van der Pol 방정식을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\frac{y_{\max}}{D} = \frac{1.29}{[1 + 0.43(8\pi^2 S^2 S_{cr}^2)]^{3.35}} \quad (6)$$

여기서, D 는 원형단면의 지름이며 S_{cr} 은 다음과 같이 구조물의 감쇠비 ξ 를 이용하여 나타내어지는 스크루턴 수(Scruton number)이다.

$$S_{cr} = \frac{\xi \bar{m}}{\rho D^2} \quad (7)$$

와류진동에 의한 구조물의 최대 응력은 최대의 처짐이 발생할 때의 등가의 모멘트로부터 구할수 있으며, 이 최대응력이 세장 구조물의 피로응력보다 작아야 하며, 그렇지 않은 경우에는 적절한 보강방법이 이용하여 이를 만족하도록 한다.

2.3 와류진동에 의한 제진대책

와류진동에 의한 구조물의 최대응력이 피로허용응력을 초과하는 경우에는 이에 대한 보강이 필요하다.

설계단계에서 와류진동에 의한 피로현상이 나타나면, 구조물의 동적특성을 변경하는 방안을 우선적으로 검토한다. 임계풍속은 구조물의 고유진동수와 비례하여 증가하는 경향이 있으므로 구조물의 강성을 증가시켜 와류발생 풍속을 증가시키므로써 설계풍속이상에서 와류진동이 발생할도록 유도할 수 있다. 식 (6)에서와 같이 구조물의 감쇠, 질량을 증가시켜 와류진동에 의한 진폭을 줄임으로써 피로허용응력 이내로 구조물을 설계할 수 있다. 스크루턴 수는 구조물의 단위길이당 질량, 감쇠에 비례하여 증가하며 스크루턴 수가 증가하면 발생 진폭이 상대적으로 작아지므로 때문이다. 구조물의 동적이 특성을 변경하는 방법 외에 공기역학적으로 구조물의 단면을 변경하여 스트로할 수를 변화시킬 수도 있으며, 표면을 거칠게 하거나 중공형식으로 만들 수 있다.



그림 3 장식용 기둥접합부의 와류진동에 의한 균열

시공 중이나 준공 후 와류진동이 발생하는 경우는, 질량동조감쇠기(TMD), 점탄성 감쇠기, 슬라이딩 블록과 같은 진동제어장치를 이용하여 와류진동에 의한 진동을 효과적으로 저감함으로써 구조물의 진동가속도를 줄여 사용성을 개선하고, 피로허용응력 이내로 구조물 응력이 발생하도록 보강할 수 있다.

3. 와류진동 사례

3.1 장식용 기둥의 와류진동사례

구조물의 형식, 용도에 따라 많은 와류진동 사례가 보고되고 있다. 특히 세장한 구조부재를 사용하는 교량에서 많이 발생하고 있으며, 이 중에서는 구조적으로 심각한 손상을 일으키는 경우도 있다. 건축 구조물의 경우, 구조물 자체보다는 구조물의 구성하는 일부 세장한 부재에서 와류진동이 발생하고 있으며, 여기에서 소개하는 사례는 비구조재로 사용된 장식용 기둥의 경우이다. 다음 사진은 장 스펠을 지붕을 케이블로 지지하는 기둥 위에 8.25 m의 장식용 기둥을 용접하여 접합한 것으로 장식용 기둥이 와류진동에 의해 용접 접합된 부분에 균열이 발생한 것이다. 용접부분에 덧판을 대어 보강한 후에도 다시 균열이 발생하는 것을 알 수 있다.

와류진동이 발생하는 풍속을 예측하기 위한 구조물의 체 계수로서 기둥의 외경은 0.2674 m, 두께는 0.006 m, 단위길이당 질량은 38.66 kg, 감쇠비는 0.1 %로 가정하였다. 기둥의 길이변화에 따른 와류발생풍속이 표 2에 나타나 있으며 구조물 감쇠비에 따른 기둥상부의 진폭이 표 3에 나타나 있다.

장식용 기둥의 길이가 8.25 m 인 경우 와류발생 풍속이 5.3 m/sec로 일상에서 자주 발생하는 풍속이다. 길이를 3 m로 줄이는 경우 와류발생 풍속이 39.7 m/sec로 설

표 2 길이변화에 따른 와류발생 풍속

기둥의 길이(m)	고유진동수(Hz)	와류발생 풍속(m/sec)
3	29.7	39.7
4	16.7	22.4
5	10.7	14.3
6	7.4	9.9
7	5.5	7.3
8.25	3.9	5.3

표 3 감쇠비 변화에 따른 변위

기둥의 감쇠비(%)	최대변위(mm)
0.1	79.9
0.2	40
0.5	16
0.76	11
1	8
2	4

계풍속보다 큰 곳에서 와류진동이 발생하는 것을 알 수 있다. 감쇠비를 1%로 증가시키는 경우 변위가 8mm로 감쇠비 0.1%일 때보다 1/10로 감소한다. 장식용 기둥의 경우 기둥의 길이를 감소시키고 감쇠를 증가시킴으로써 와류에 의한 피로허용능력 이내로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

3.2 독립주탑의 와류진동 제진사례

사장교의 주탑은 가설공사나 상판에 케이블이 설치되기 전 독립적으로 서있는 경우가 있다. 독립 주탑은 세장한 구조물로 외부하중에 매우 민감하며, 특히 와류진동에 의하여 진동이 쉽게 발생할 수 있다. 이러한 와류진동에 의한 진동은 구조적으로 치명적인 영향을 미치지 않지만 국부적인 손상이나 공기지연 등 가설공사에 영향을 미치기 때문에 이에 대한 진동저감 대책이 필요하다. 이 사례는 제 2 진도대교로써, 기존 진도대교와 인접하여 해남과 진도를 연결하는 484m의 사장교로 주탑의 높이는 해발 89m이다. 해상에 위치하여 바람의 영향을 크게 받으며, 풍동실험에 의하면 약 19m/sec의 풍속에서 와류진동이 발생하는 것으로 보고되었다. 와류에 의한 진동을 저감하고 사용성을 개선을 위하여 슬라이딩 블록(sliding block)을 적용하였다.

독립주탑의 와류진동을 위하여 사용된 제진장치는 슬라이딩 블록이다. 슬라이딩 블록은 그림 4에서와 같이 경사진 받침위에 자유롭게 움직일 수 있는 질량 장착하고 이를 주탑과 케이블로 연결한 시스템으로 주탑의 진동이 케이블을 통하여 전달되고 다시 질량과 받침 사이의 마찰에 의하여 주탑의 진동에너지가 소산시도록 고안된 장치이다. 경사각, 블록의 질량, 케이블의 직경 및 주탑과 슬라이딩 블록 사이의 거리등을 조정하여 최적의 제어효과를 가지도록 설계한다.

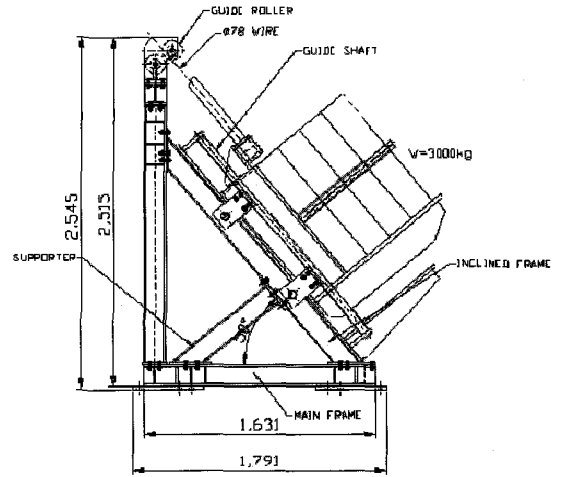


그림 4 슬라이딩 블록의 형상

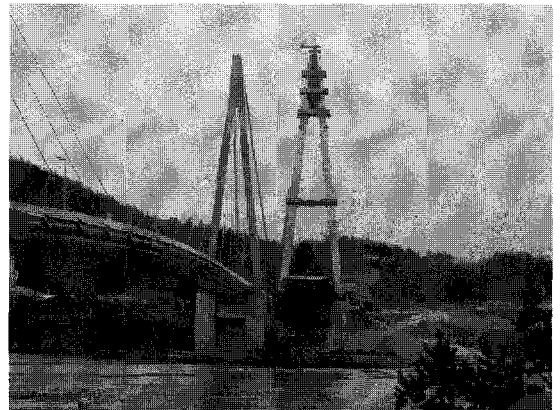


그림 5 제 2 진도대교 독립 주탑

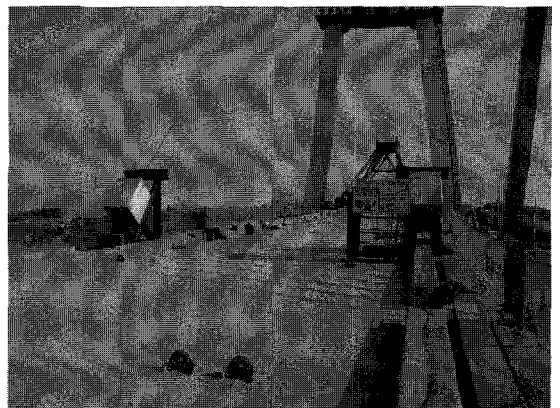


그림 6 슬라이딩 블록 설치

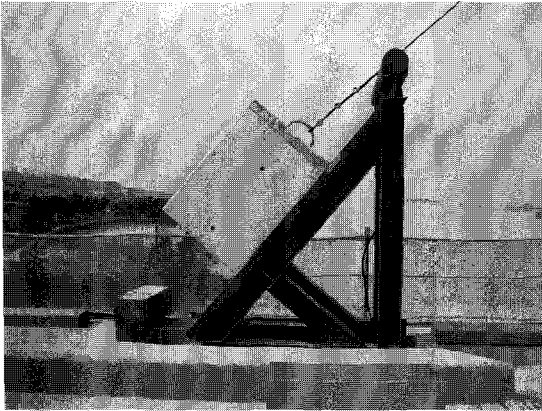


그림 7 슬라이딩 블록 측면

제 2 진도대교 독립주탑과 슬라이딩 블록이 그림 5, 6, 7에 나타나 있다. 상판 시공 등의 이유로 슬라이딩 블록이 교량 단면 중심에 놓일 수 없어, 2개를 제작하여 교량 인도에 설치하였다.(그림 6참조)

제 2 진도대교에 설치된 슬라이딩 블록의 성능은 수치 해석결과 와류에 의한 주탑의 변위가 ±50 cm에서 약 ±15 cm로 줄어들어 약 1/4의 진동저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 이때 슬라이딩블록의 변위는 ±10 cm로 설계된 최대 스트로크 ± 38.5 cm 내에서 거동하는 것으로 나타났다. 또한 직경 2 cm의 케이블에 재하되는 장력을 충분히 지지하는 것으로 나타 나타났다.

4. 맺음말

단순 단면 형상을 가지는 구조물에 발생하는 와류진동의 특성, 발생 사례 및 제진대책에 대하여 간략히 살

펴보았다. 최근에는 장 스패ن 지붕 등에 케이블과 같은 구조재, 옥외에 세장한 시설물의 사용이 많아지고 있으나 설계단계에서 와류진동에 대한 고려가 이루어지지 않아 완공 후 진동에 의한 피해가 발생하고 있다. 저 풍속에서 발생하는 와류진동은 구조물의 사용성을 저하시키며, 피로 허용응력을 초과하는 경우에는 국부적인 파손뿐만 아니라 구조적으로 치명적인 손상을 발생시킬 있으므로 설계단계에서 이를 평가하고, 이에 대한 개선방안을 고려하는 설계가 이루어져야 할 것으로 사료된다. ■

참고문헌

- (1) Emil Simiu, Robert H. Scanlan, 1996, *Wind Effects on Structures*, 3rd Edition, Wiley Interscience.
- (2) John D. Holmes, 2001, *Wind Loading of Structures*, Spon Press.
- (3) Mario Paz, William Leigh, 2004, *Structural Dynamics Theory and Computation*, 5th Edition, Kluwer Academic Publishers.
- (4) 권순덕, 2001, “세장 구조부재의 와류진동 평가방법”, 한국 풍공학회지, 제 5 권, 제 1 호, pp. 66~74.
- (5) 황재승, 주석준, 김윤석, 2004, “슬라이딩 블록 제진장치를 이용한 구조물의 진동제어”, 한국 풍공학회 학술발표논문집, 통권 제 7 호, pp. 105~111.