풍하중에 대한 구조진동의 예측제어

Predictive Control of Structural Vibration Subject to Wind Loads

최 창근* 권 대건** 이 은진***

Choi, Chang Koon Kwon, Dae Kun Lee, Eun Jin

ABSTRACT

A procedure for the predictive control for structural vibration control in building subject to wind loads is presented. The building motions are modeled by the first mode of the response. Wind velocities are generated by the simulation using power spectral density function. Predictive control algorithm is the discrete-time formulation and that is developed as a control strategy that computes the control signal which makes the predicted process output equal to a desired process output. Results on the reduction of the dynamic response and control effectiveness of the algorithm are presented and discussed.

1. 서 론

최근 국내·외에서 교량 및 건물 등의 건설에 있어 현수교나 사장교와 같이 장지간을 가지는 장대교량 및 초고층 건물 등 그 규모가 점점 커지고 있는 실정이다. 이는 교량의 경우 해안, 도서, 산간지방 등의 개발로 장대교의 수요가 증대되었으며 건물의 경우 인구의 도시집중화 현상과 대지의 한정성 등의 이유로 제한된 구역내에서 효과적으로 공간을 활용하기 위하여 전세계적으로 고층 내지 초고층의 건물을 선호하는 경우가 점점 늘어나고 있는 추세이다. 또한 주요 구조재인 강재의 재료적 특성의 발달 및 컴퓨터를 이용한 구조해석기술의 발달에 힘입어 설계 및 시공기술이 급격히 향상된 것도 이를 선호하는 경향을 보이고 있는 실정이다. 하지만 교량이나 건물 등의 규모가 커질수록 여러가지 문제점이 발생할 수 있는데 이 경우 정적하중보다는 동적인 하중 - 바람, 지진 등에 의한 문제가 심각히 고려되어야 한다. 가까운 일본의 경우 지진이나 태풍에 의하여 그 손실은 이루 말할 수 없으며 우리나라와 같이 지진이 거의 발생하지 않는 경우라도 매년 태풍에 의한 피해는 엄청난 손실을 가져오기 마련이다. 또한 과도한 진동에 의하여 구조물의 사용성(serviceability)을 떨어뜨릴 수 있으므로 이에 대한 적절한 고려가 필요하다.

이러한 동적하중에 의한 구조물의 진동을 효율적으로 제어하기 위하여 많은 연구들이 수행되

* 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*** 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

었으며, TMD, TLD 나 구조부재의 damping 을 크게 하기 위한 방안 등 여러 진동제어기법들이 제안되었다. TMD 제어기법은 사장교와 같은 장대교량의 시공 중 주탑의 변위 감소, 고층건물 등의 토목구조물에 적용되어 왔다. 특히 사장교 및 현수교와 같이 장지간을 가지는 교량의 수동제어로 공기역학적 제어 방법인 fairing, flap, grating, spoiler, extension 등을 교량의 거더에 일원화 시켜 구조물의 진동을 제어하는 방법은 풍동실험을 통하여 이미 널리 우리나라에서도 사용되고 있는 방법이다.

최근에는 이러한 수동제어 기법보다는 더욱 효과적인 제어를 하기 위해서 TMD 에 제어력을 가하는 방법이나, 가부재를 설치하여 이 부재에 제어력을 가함으로서 구조물의 거동을 제어하는 방법이 연구되고 있다. 또한, 능동제어기법들에 있어서 중요한 요소인 computer 와 측정장치, 제어기기, actuator 등의 기술적인 발달과 함께 여러 방향으로 급속도로 발전하였으며, 이러한 기술의 발달로 실험을 통한 제어효과를 입증할 수 있게 되었다.

따라서 본 연구에서는 동적하중인 풍하중에 대한 시뮬레이션을 수행하여 풍하중을 산정하고 구조물의 진동에 대하여 효율적으로 제어할 수 있는 능동제어 방법으로 예측제어 알고리즘 (predictive control algorithm)을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

2. 풍속의 시뮬레이션

풍속의 경우에 있어서는 지진하중과 같이 명백하게 실측된 기록에 의한 값을 얻기 어려우므로 수치적으로 시뮬레이션하여 구한 값을 사용하였다. 일반적으로 풍속의 power spectral density 는 다음과 같은 관계를 가지는 것으로 알려져 있다.

$$S_{uu}(\omega) \propto \left(\frac{\omega}{U}\right)^{-\frac{5}{3}} \tag{1}$$

이러한 관계식을 이용하여 Davenport 와 Kaiman 은 각각 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\frac{\omega S_{uu}(\omega)}{kU^2} = \frac{4\xi^2}{(1+\xi^2)^{\frac{4}{3}}} \qquad \text{Davenport(1967)} \tag{2}$$

$$\frac{\omega S_{uu}(\omega)}{kU^2} = \frac{200 f^2}{(1+50f)^{\frac{5}{3}}} \qquad \text{Kaiman(1972)} \tag{3}$$

여기서,

$\xi = \dfrac{\omega\lambda}{2\pi U} \qquad 0 < \xi < \infty$

λ : length scale

k : ground surface drag coefficient (0.03 ~ 0.05)

$U = U_{10}\left(\dfrac{z}{z_{10}}\right)^{\alpha}$

α : roughness coefficient

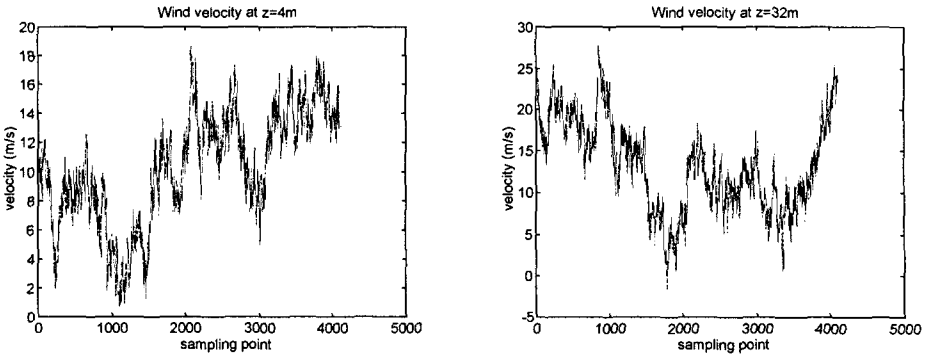
$$f = \frac{\omega z}{2\pi U}$$

이 식을 이용하여 주파수 영역에 대한 시뮬레이션은 다음 식과 같이 구해진다.

$$H = \sqrt{2}\sum_{n=0}^{N-1}\{\sqrt{2S_{nn}(\omega)d\omega}\cdot e^{j2\pi\Omega}\} \tag{4}$$

Ω : independent random phase angle uniformly distributed in the angle [0, 2 π]

실제로 구하고자 하는 시간이력 시뮬레이션(time history simulation)은 위의 식을 역 FFT(inverse fast fourier transform)하면 시간에 대한 풍속이 구해지게 된다. 이처럼 발생한 풍속은 각 높이마다 서로 상관성(correlation)을 가지는 것이 아니라 각각 독립적으로 작용하는 풍속이다. 또한 랜덤한 값이 들어가기 때문에 시뮬레이션 할 때마다 각각 다른 풍속이 발생하게 되지만 그 풍속의 평균은 항상 기본풍속 U_{10}이 된다. 기본적으로 높이가 다를 경우에 있어서는 높이 z가 변수이므로 각 높이를 대입하여 구해진다. 그림 1은 높이가 각각 4m, 32m일 경우에 있어서의 풍속 시뮬레이션을 나타낸 것이다.



(a) 높이 4m (b) 높이 32m

그림 1 풍속 시뮬레이션

이 방법을 이용하여 구해진 풍속에 대한 시간이력값을 이용하여 일반적으로 풍속을 기준으로 풍하중을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{1}{2}\rho C_D|U(t)-\dot{y}(t)|(U(t)-\dot{y}(t)) \\ &= \frac{1}{2}\rho C_D|\overline{U}(t)+u(t)-\dot{y}(t)|(\overline{U}(t)+u(t)-\dot{y}(t)) \end{aligned} \tag{5}$$

여기서,

p(t) : 풍압(wind pressure)

U(t) : 풍속(wind velocity)

$\overline{U}$: 시간에 독립적인 평균풍속(time independent mean wind velocity)

u(t) : 변동풍속(stationary fluctuating component of wind velocity)

ρ : 공기밀도(1.23 kg/m^3)

C_D : 항력계수

위의 식에서 구한 p(t)는 단위 면적당 작용하는 풍압이므로 실제로 하중으로 계산을 하려면 구조물의 단면적(A)을 곱하여 계산하여야 한다. 그러면 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = f(t) \quad \Leftarrow \quad p(t) \cdot A \tag{6}$$

실제로 풍하중을 구조물에 작용시키는데 있어 사용한 방법은 풍속을 산정하는 식이 높이의 함수이므로 각 층의 높이에 따라 동시에 시뮬레이션을 시켜서 나온 시간이력값을 동시에 작용시키는 것으로 하였다.

3. 예측 제어 알고리즘(Predictive Control Algorithm)

일반적으로 능동제어에 있어서는 상태-공간(state-space) 접근방식을 이용하게 된다. 상태-공간 방정식은 구조물의 운동을 나타내는 식을 1차 미분방정식의 형태로 표현하는 것으로 기존의 제어이론이 대부분 1차 미분 방정식에 대해 기술되고 있으며 연속시간에서의 식을 이산화된 식으로 표현할 수 있다.

토목구조물을 제어할 경우 구조물의 거동을 작게하는 것이 목적이므로 구조물의 거동으로 함수를 구성하여 이를 최소화하도록 할 수도 있다. 그러나 이에 필요한 제어력이 매우 커지므로 제어력도 포함된 목적함수를 구성하여 이 함수를 최소화하는 구조물의 거동과 이 때의 제어력을 구해야 한다. 따라서 일반적인 능동제어 알고리즘은 구조응답과 제어력이 함께 포함되는 목적함수 J를 최소화시키는데 기초를 둔다. 이 목적함수의 구성형태에 따라서 제어 알고리즘이 다양한 형태를 가지게 된다. 본 연구에서 사용하는 알고리즘은 예측에 근거한 제어알고리즘(예를 들어, k+j 시간에서의 상태를 최적화)으로 목적함수를 최적화하려는 시간단계에서의 상태로 표현하는 방법으로 k 시간의 상태는 기지의 값, 제어력은 미지의 값으로 한다. 이 제어 알고리즘의 특징은 일반적으로 널리 사용되는 최적제어에서 사용되는 연속시간제어식과는 달리 이산시간제어식으로 유도가 되어서 컴퓨터를 이용하여 쉽고 간편하게 적용할 수 있고, 실험과 병행하기 편리한 알고리즘이며 선형에서 비선형으로의 확장도 가능하게 된다. 그리고 최적제어의 경우와 달리 리카티 방정식(riccati equation)을 풀지 않아도 되면서도 최적제어와 같이 구조응답의 감소효과가 좋다. 이 알고리즘은 크게 driver block, predictive model, process 로 구성된다(그림 2).

Driver block 은 기본적으로 설정된 설정점(set point)을 기준으로 목적함수를 만족하는 desired output trajectory 를 생성한다. 그 결과 생성된 desired output 에 대하여 제어수열(control sequence)의 함수로써 process 의 출력을 예측하는데 예측모델(predictive model)이 이용된다.

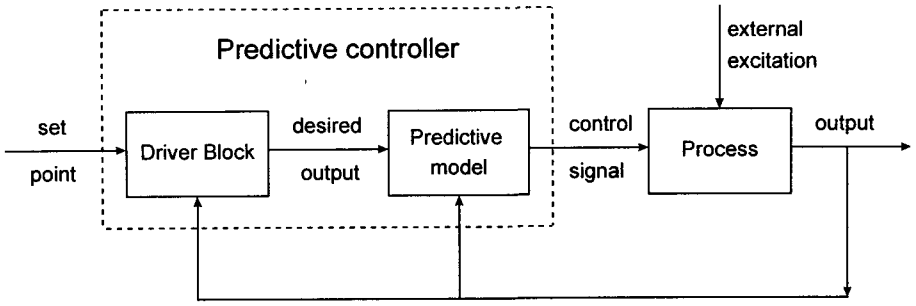


그림 2 Predictive control algorithm 의 구성

이 예측제어 알고리즘의 정식화는 다음과 같다.

① 이산시간 상태 모델(discrete-time state model)

$$\hat{x}(k+j|k) = A\hat{x}(k+j-1|k) + B\hat{u}(k+j-1|k)$$
$$\hat{y}(k+j|k) = H\hat{x}(k+j|k)$$
$$where, \quad j = 1,\cdots,\lambda$$

② 각 시점 k에서의 재정의(redefined at each instant k)

$$\hat{x}(k|k) = x(k); \qquad \hat{u}(k|k) = u(k)$$

③ 목적 함수(performance criterion)

$$J = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{\lambda}\left[\hat{y}(k+j|k) - y_r(k+j)\right]^T Q(j)\left[\hat{y}(k+j|k) - y_r(k+j)\right]$$
$$+\frac{1}{2}\hat{u}(k|k)^T R\hat{u}(k|k)$$

④ 최소화 조건(minimization by using this condition)

$$\hat{u}(k+j|k) = u(k|k); \qquad j = 1,\cdots,\lambda-1$$

⑤ 예측된 출력(predicted process output)

$$\hat{y}(k+j|k) = HT(j)x(k+j|k) + HZ(j)u(k)$$
$$where,$$
$$T(j) = A^j$$
$$Z(j) = (I + A + A^2 + \cdots + A^{j-2} + A^{j-1})B$$

⑥ 목적함수의 최소화(minimize the performance index)

$$\frac{\partial J}{\partial u(k)} = 0$$

⑦ 제어력(control force) u(k)

$$u(k) = -\beta^{-1}\alpha x(k) + \beta^{-1}\mu(x)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^{\lambda} Z^T(j)H^T Q(j)HT(j)$$

$$\beta = \sum_{j=1}^{\lambda} Z^T(j)H^T Q(j)HT(j) + R$$

$$\mu = \sum_{j=1}^{\lambda} Z^T(j)H^T Q(j)y_r(k+j)$$

$$y_r(k+j) = \theta_1 y_r(k+j-1) + \theta_2 y_r(k+j-2); \quad j = 1,\cdots,\lambda$$

$$y_r(k) = y(k); \qquad y_r(k-1) = y(k-1)$$

4. 수치해석

본 연구에서 사용한 예측제어 알고리즘에 대한 평가를 위하여 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 대상 구조물로는 그림 3에 나타낸 높이 32m인 8층 건물 구조로 해석의 간편성을 위하여 각 층당 1자유도만을 가지는 전단모델(shear building model)로 해석을 수행하였으며 구조물의 제원은 표 1에 나타내었다. 구조물의 고유진동수는 처음 8개 모드에 대하여 구한 결과 각각 5.79, 17.18, 27.98, 37.83, 46.39, 53.37, 58.53, 61.70Hz 였다.

예측제어의 특징은 시스템을 이산화시켜 유도한 이산상태방정식을 이용하여 구조계의 거동을 미리 예측하여 능동 제어력을 결정하는 방법이다. 본 알고리즘은 일반적으로 reference 값(y_r)을 이용하여 해석을 수행하면 구조계의 변위는 그 값을 전혀 사용하지 않는(null reference) 경우에 비하여 변위는 좀 더 크게 나타나나 제어력이 적게 산정되는 것으로 알려져 있다. 그리고 예측하려는 범위(λ)를 크게 설정하면 역시 같은 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 간편하게 사용하기 위하여 null reference를 사용하였고 λ값도 1로 설정하여 계산시간을 줄여 사용하였다. 그리고 Q, R matrix의 경우에 있어 R matrix는 0으로 설정하고 Q matrix는 Q(λ)에서만 상수 Q를 가지고 나머지 범위에서는 0으로 설정한다. 그러면 앞에서 구한 제어력은 다음과 같이 변형되어 유도된다(식 7).

$$\begin{aligned} u(k) &= -\beta^{-1}\alpha x(k) \\ \alpha &= Z^T(\lambda)H^T Q(j)HT(\lambda) \\ \beta &= Z^T(\lambda)H^T Q(j)HZ(\lambda) \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)을 이용하여 대상 구조물에 대한 수치해석 결과를 시간 영역에 대하여 나타내었다(그림 4). 구조물의 변위는 최상층이 가장 크다고 보아 8층에서의 변위를 측정하였다. 그림에서 제어를 하지 않았을 경우(가는 실선)보다 능동제어를 하였을 경우(굵은 실선) 구조물의 변위가 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 지진과 같이 여러가지 주파수 성분을 가지고 있는 하중에 대해서는 일반적으로 잘 제어가 되는 것을 알 수 있으나 풍하중과 같이 상당히 적은 주파수에서 하중

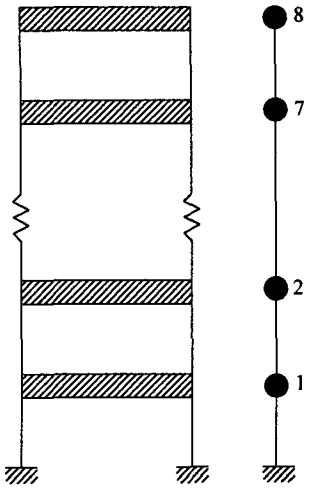


그림 3 해석 대상 구조물

표 1 구조물의 제원

각 층의 질량(mass, M)	345.6 tons
각 층의 감쇠(damping, C)	2937 tons/sec
각 층의 강성(stiffness, K)	3.404×10^5 kN/m

의 진동수가 결정되는 경우에 있어서는 그 제어가 상당히 힘들게 된다. 따라서 변위를 예측하여 제어력을 가하는 방식인 예측제어 알고리즘을 이용하였을 경우에 있어서 풍하중에 대한 결과도 잘 나올 것이라고 생각 되었고 결과도 예상한 바와 같이 나타났다. 만약 시간간격을 더 작게 하여 수치해석을 하면 더욱 좋은 결과를 나타낼 것이라고 판단된다. 수치해석에 이용된 시간간격은 0.002 초이고 sampling point 는 4096 개로 제어에 있어 컴퓨터의 비약적인 발달에 힘입어 일반 PC 에서 능동제어가 가능한 시간을 10^{-4} 초 정도라고 생각할 때 이 예측제어 알고리즘은 풍하중에 대한 제어실험을 수행하는데 적합한 알고리즘이라고 판단된다.

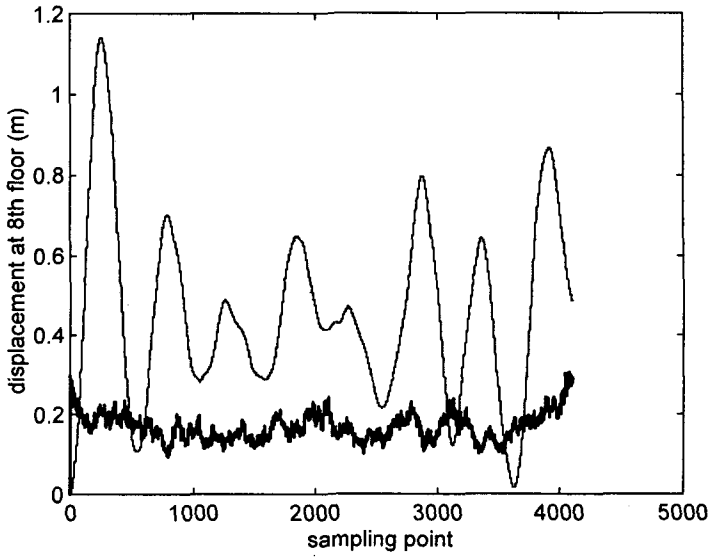


그림 4 8 층 구조물에 대한 최상부 변위의 시간영역해석

5. 결 론

본 연구에서는 풍하중에 대하여 예측제어 알고리즘에 대한 이론 및 수치해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 사용한 풍하중의 경우에 있어서는 기록에 의한 값을 얻기 어려우므로 수치적으로 시뮬레이션하여 구한 값을 사용하였다. 풍속의 power spectral density에 의하여 제시된 식에 의하여 역 FFT 과정을 통하여 풍속을 발생시켰고 이에 의하여 풍하중을 산정하는 방식을 이용하였다.
2. 예측제어 알고리즘의 특징은 구조계의 출력에 대한 예측을 통하여 적절한 능동제어력을 가하여 그 효과를 좋게 하는 것으로 실제 해석 결과 시간간격이 작을 수록 제어 효과는 잘 나타났다. 풍하중에 대한 수치해석에 있어 알고리즘을 간편화시켜 사용하였음에도 구조물의 변위는 상당히 줄어드는 뛰어난 결과를 나타내었다. 이 알고리즘은 비교적 쉽게 비선형으로의 확장이 가능한 것으로 알려져 있으므로 여러 분야에 대해서도 사용이 쉬울 것으로 판단된다.
3. 제어에 있어 컴퓨터의 비약적인 발달에 힘입어 현재 능동제어가 가능한 시간을 10^{-4}초 정도라고 생각할 때 이 예측제어 알고리즘은 풍하중에 대한 제어실험을 수행하는데 적합한 알고리즘이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 재단측에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. T.T.Soong, "Active Structural Control:Theory and Practice", 1990, Longman Scientific & Technical
2. Facioni, K.C.S. Kwok and B.Samali, "Wind Tunnel Investigation of Active Vibration Control of Tall Buildings", Third Asia-Pacific Symposium on Wind Engineering, December 13-15, 1993, Hong Kong
3. J.N.Yang,"Application of Optimal Control Theory to Civil Engineering Structures", ASCE Journal of Engineering Mechanics, 101, pp818-838
4. Abdel-Rohman and H.H.E.Leipholz,"Active Control of Tall Buildings", 1983, ASCE Journal of Structural Engineering, 109, pp628-645
5. J.Rodellar, A.H. Barbat and J.M.Martin-Sanchez,"Predictive Control of Structures", ASCE Journal of Engineering Mechanics, 113, pp797-812,1987
6. J.Rodellar, L.L.Chung, T.T.Soong, and A.M.Reinborn, "Experimental Digital Predictive Control of Structures", ASCE Journal of Engineering Mechanics, 115, pp1245-1261,1989