

# 지반특성에 따른 동조질량감쇠기의 지진응답특성 및 최적설계변수

강경수<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>동명대학교 건축공학과

## Investigation on Seismic-Response Characteristics and Optimal Design Parameters of Tuned Mass Damper Considering Site Effects

Kyung-Soo Kang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Tongmyong University

**요 약** 기존 동조질량감쇠기의 최적설계변수에 관한 연구는 풍하중과 같은 조화하중을 받는 구조물을 대상으로 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 수치해석을 통하여 지진하중이 작용하는 건축물에 설치되는 동조질량감쇠기의 최적 감쇠비와 동조진동수비를 구하였다. 지반특성을 단단한 지반, 연약지반, 단층 근처 지반으로 분류하고, 이들 지반특성을 고려한 수치해석을 통해 구한 동조질량감쇠기의 설계변수값을 기존 연구 결과와 비교하였다. 수치해석결과 본 연구로부터 구해진 동조질량감쇠기의 설계변수값을 적용한 경우 지진하중에 의한 응답제어에 기존 연구를 통해 얻어진 변수값을 적용한 경우에 비해 더 나은 제어효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

**Abstract** Most previous studies for finding optimal design parameters of a tuned mass damper(TMD) have been focused on the harmonic excited single-degree-of freedom system. In this study, optimal values of damping ratio and tuning frequency ratio of a TMD applied to control a seismically excited structure are investigated through numerical analyses. Considering that the structural responses due to earthquake loads are strongly dependent on the soil condition, the site effects on the optimal parameters of the TMD are studied and compared to those presented by previous studies. Numerical analyses results indicate that better control performance can be obtained by using the parameters proposed by this study in the seismic application of the TMD.

**Key Words** : Tuned Mass Damper, Optimal Design, Numerical Analysis, Performance Index, Soil Condition

### 1. 서론

지진이나 바람에 의해 발생하는 구조물의 진동을 제어하는 감쇠장치 중, 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)는 질량체, 강성, 그리고 감쇠로 구성되며, 구조물의 특정 진동수(통상 구조물의 1차모드 진동수)에 동조시켜 감쇠기의 관성력에 의하여 구조물의 에너지를 소산시키는 장치로서, 선박의 흔들림 거동을 감소시키기 위해 주로 적용되었으며, 이 후 건축 및 토목 구조물의 풍응답 제어를 목적으로 적용되고 있다[1].

건축 및 토목 구조물의 풍응답 제어를 위한 TMD의 설계변수에 관한 연구는 최초 Hartog가 조화하중을 받는

비감쇠 단자유도 시스템의 최적동조진동수와 감쇠비에 대해 제안하였고[2], Warburton이 하중의 종류와 작용위치에 따른 최적설계변수를 제시하였다[3]. 이는 대상 구조물의 감쇠를 고려하지 않은 경우로, 구조물의 감쇠를 고려하는 경우 최적진동수비와 감쇠비 등은 닫힌 형태의 해를 구할 수 없으므로, 수치해석을 통해 산정해야만 한다.

Tsai와 Lin은 TMD가 설치된 구조물의 최대 유효 감쇠비 도출을 위해 회귀분석을 통한 설계변수를 도출하였고 [4], 이후 Kareem과 Kline[5], Verdirame와 Nayfeh[6], Zuo와 Nayfeh[7], Li와 Ni[8] 등에 의해 다자유도 구조물에 설치된 TMD에 대한 최적설계변수 도출을 위한 연구가 수행되었다. Sadek 등은 지진하중을 받는 TMD가 설

\*교신저자 : 강경수(koosin@tu.ac.kr)

접수일 11년 10월 31일

수정일 11년 11월 08일

계재확정일 11년 11월 10일

치된 구조물에 미 서부 지역에서 계측된 52개의 지진하중에 대한 통계해석을 통해 일정한 조건하에서는 TMD가 지진응답제어에 효과적임을 증명하였다[9]. 이러한 TMD의 최적설계변수에 관련한 연구들의 대부분은 조화하중(풍하중)을 받는 구조물에 대한 것으로, 지진하중에 대한 최적설계변수 도출을 위한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 미국의 강진지역에서 계측된 지진데이터를 입력하중으로 수치해석을 수행하여, 변위응답 및 가속도응답에 대한 최적설계변수를 산정하고, Hartog의 최적설계변수와의 검토를 통해 제어성능을 비교하였다.

## 2. TMD의 최적설계변수

일반적으로 Hartog[2]와 Soong[1,10] 등의 기존 연구를 통해 파악된 최적설계변수로 TMD 설계를 수행하고 있으나, 지진하중에 대한 응답저감을 위해서는 TMD 설계변수인 동조진동수비, 질량비, 감쇠비 등에 따른 응답 제어효과를 파악하여, 기존에 제안된 최적설계변수와의 고찰 및 성능비교가 필요하다.

설계변수인 동조진동수비는 구조물의 1차 고유진동수와 TMD의 진동수의 비를 나타내며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{\omega_d}{\omega_s} \quad (1)$$

여기서,  $\omega_s$ 는 주구조물의 1차 고유진동이고,  $\omega_d$ 는 TMD의 고유진동수를 나타낸다.

질량비는 구조물의 1차 모드질량과 TMD의 질량의 비로 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{m_d}{m_s} \quad (2)$$

여기서,  $m_s$ 와  $m_d$ 는 각각 구조물과 동조질량감쇠기의 질량을 나타낸다.

Hartog[2]는 조화하중 형태의 지진하중에 의한 변위응답에 대해서 동조진동수비와 감쇠비에 대해 각각 식 (3)과 식 (4)와 같은 최적변수를 제안하였다.

$$f_{TMD} = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{2-\mu}{2}} \quad (3)$$

$$\xi_{TMD} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \sqrt{\frac{2}{2-\mu}} \quad (4)$$

그러나 Hartog가 제안한 최적동조진동수비와 최적감쇠비는 조화하중에 대한 최적변수이므로 실제 지진하중에 대한 최적변수로 사용하기에는 검증이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 지반조건을 단단한 지반(Stiff soil), 연

약지반(Soft soli), 그리고 단층 근처 지반(Near fault)등 세 가지로 분류하고, 이들 지반에서 계측된 실제 지진하중을 사용하여 지진응답감소를 위한 최적진동수비와 최적감쇠비를 질량비별로 도출하기 위한 수치해석을 수행하였다.

## 3. 수치해석

본 연구에서는 수치해석을 위해 10~15층 구조물의 1차 모드 고유주기를 1~2초 사이로 가정하고, 0.2초 간격의 지진하중을 입력하중으로 하여 해석을 수행하였으며, 그에 따른 최적 진동수비와 감쇠비 산출을 위해 분류한 지반들에서 계측된 지진기록을 사용하여, 시간이력해석을 수행하였다. 해석에 사용된 지진하중은 SAC Steel Project[11]의 지진기록을 사용하였다. 강진 지역의 단단한 지반(Stiff soil)과 연약지반(Soft soil)에서 계측된 각각 20개의 지진하중과, 단층 근처 지반(Near fault)에서 계측된 18개의 지진기록을 사용하여 해석을 수행하였다[7].

해석모델은 5%의 감쇠비를 갖는 질량 정규화된 단자유도 모델을 사용하였으며, 구조물의 질량에 대해 각각 1%, 2%의 질량비를 갖는 TMD에 대해 동조진동수비를 0.8~1.2 범위에서 0.01씩, 감쇠비는 1~14% 범위에서 0.002% 씩 증가하여 해석을 수행하였다.

TMD 설치 전·후에 대한 상태공간방정식을 구성하고, 각각의 지진하중에 대해 응답별 설계변수별 시간이력해석을 수행하였으며, 해석 결과를 검토하였다.

해석을 통해 각각의 질량비를 갖는 TMD가 설치된 구조물의 응답을 파악하여, TMD의 최적진동수비와 최적감쇠비를 도출하였으며, 대상구조물 변위와 가속도의 최대 및 RMS 응답의 감소효과를 평가하기 위하여 식 (5)와 식 (6)을 사용하여 성능지수로 나타내었다.

$$J_1 = \max_{i=1,\dots,n} \left\{ \frac{\max |x_{di}(t)|}{x_0^{\max}} \right\}, \quad J_2 = \max_{i=1,\dots,n} \left\{ \frac{\max |\ddot{x}_{di}(t)|}{\ddot{x}_0^{\max}} \right\} \quad (5)$$

$$J_3 = \max_{i=1,\dots,n} \left\{ \frac{\sigma_{x_{-di}}}{\sigma_{x_{-0}}^{\max}} \right\}, \quad J_4 = \max_{i=1,\dots,n} \left\{ \frac{\sigma_{\ddot{x}_{-di}}}{\sigma_{\ddot{x}_{-0}}^{\max}} \right\} \quad (6)$$

여기서,  $J_1, J_2$ 는 각각 최대 상대변위와 최대 절대가속도에 대한 성능지수를 나타내며  $x_0^{\max}, \ddot{x}_0^{\max}$ 는 각각 제어 전의 최대 상대변위, 최대 절대가속도이고,  $x_{di}(t)$ 와  $\ddot{x}_{di}(t)$ 는 각각 제어후의  $i$ 층의 상대변위와 절대가속도이다.  $J_3, J_4$ 는 각각 RMS 상대변위, RMS 절대가속도에 대한 성능지수이며,  $\sigma_{x_0}^{\max}, \sigma_{\ddot{x}_0}^{\max}$ 는 각각 제어 전의 상

대변위, 절대가속도값의 최대 RMS이고,  $\sigma_{x_{di}}$ ,  $\sigma_{\ddot{x}_{di}}$ 는 제어 후의 상대변위, 절대가속도의 최대 RMS이다. 이들 성능지수 값이 작을수록 제어성능이 우수하다는 것을 의미한다.

### 4. 해석 결과

#### 4.1 지반 특성별 최적지수

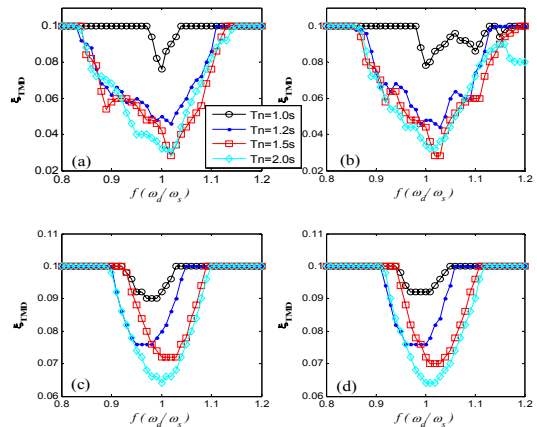
지반특성별로 계측된 지반가속도를 사용하여 특정한 진동수비와 감쇠비로 설계된 TMD가 설치된 구조물에 대한 시간이력을 수행하였다. 각각의 지반가속도에 따른 성능지수를 계산하고 이를 지반특성별로 평균값을 계산한 후, 이 평균값이 가장 작은 경우의 진동수비와 감쇠비를 최적값으로 산정하였다.

##### 1) 단단한 지반

그림 1은 1%의 질량비를 갖는 동조질량감쇠기의 응답성능지수별 최적진동수비와 최적감쇠비를 각각의 성능지수인 최대변위, 최대가속도, RMS 변위, RMS 가속도로 구분하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 구조물의 주기( $T_n$ )에 따라 최적진동수비( $f$ )와 최적감쇠비( $\xi_{TMD}$ )가 다른 값으로 존재하는 것을 알 수 있다. 최대변위 및 최대가속도의 경우 진동수비에 따른 최적진동수비값은 1보다 큰 값을 나타내며, 이에 따라 최적감쇠비도 달라지는 것을 알 수 있고, 이는 주기가 길어질수록 TMD의 주기를 대상구조물의 고유진동수보다 크게 산정해야 한다는 것을 의미한다. RMS 변위와 RMS 가속도는 대상 구조물의 고유주기와 거의 일치할 때, 가장 낮은 최적감쇠비를 나타내고 있다.

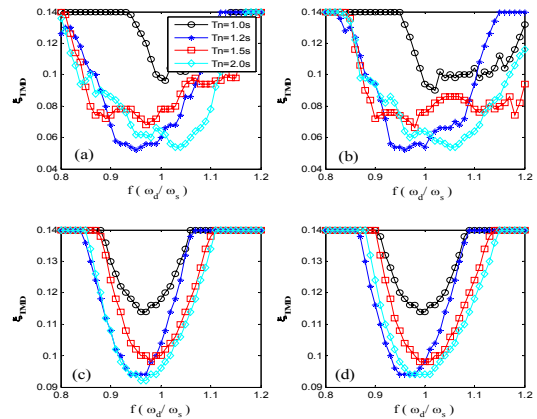
TMD와 구조물간의 고유주기의 차가 증가할수록 응답 제어를 위한 감쇠비가 증가하게 되고, TMD의 진동수와 구조물의 진동수의 차가  $\pm 0.1$  초과하는 경우에는 큰 값의 감쇠비를 가져야 하는 것으로 나타났다.

이러한 경향은 TMD의 질량을 2%로 증가시킨 그림 2에서 더욱 확연하게 나타난다. 최대변위와 최대가속도에 대한 최적값은 특정진동수비값을 갖지 못하고 넓게 분포하고 있으며, 설치대상 구조물의 주기에 따라 각각 다른 경향을 보이고 있다. 또한 RMS 응답에 대한 최적진동수비값도 질량비 증가에 의해 분포 경향이 달라지며, 진동수비 1 이하에서 최적값을 보임을 알 수 있다.



[그림 1] 동조진동수에 따른 감쇠비변화(단단한 지반, 질량비:1%)

[Fig. 1] Variation of damping ratio by tuned frequency ratio(stiff soil,  $\mu$ :1%); (a) Peak displacement, (b) Peak acceleration, (c) RMS displacement (d) RMS acceleration



[그림 2] 동조진동수에 따른 감쇠비변화(단단한 지반, 질량비:2%)

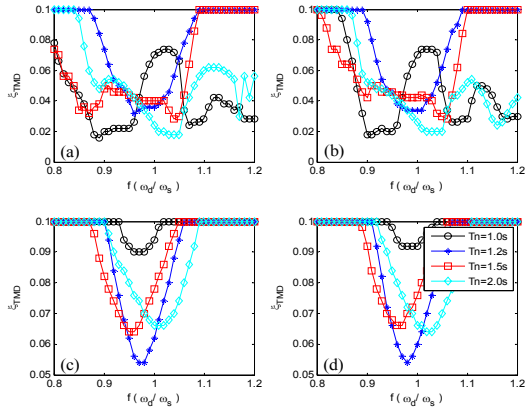
[Fig. 2] Variation of damping ratio by tuned frequency ratio(stiff soil,  $\mu$ :2%); (a) Peak displacement, (b) Peak acceleration, (c) RMS displacement (d) RMS acceleration

##### 2) 연약지반

그림 3과 같이, 최대변위 및 최대가속도 응답에 대한 진동수비별 감쇠비의 분포는 단단한 지반과 다르게, 진동수비가 불규칙하게 분포하는 것을 알 수 있다.

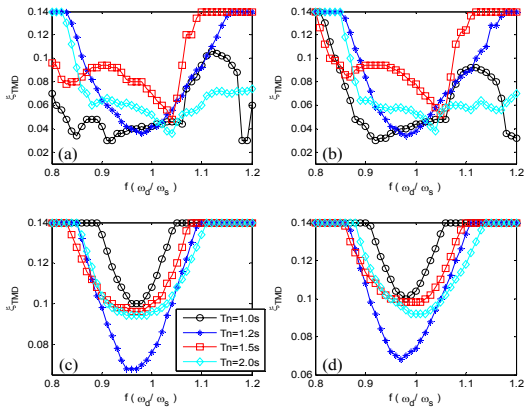
RMS 응답에 대한 각 구조물의 주기에 따른 최적진동수비는 0.95~1.05사이에서 나타나며, 주기가 1초보다 큰 범위에서는 최적감쇠비가 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 동조질량감쇠기의 질량비가 2%인 경우도 유사하게 나타나고 있다. 변위 및 가속도의 최대응답은

주기 1.2초에서만 특정진동수비 0.97~0.98에서 가장 작은 값을 가지고 그 외의 구간에서는 증가하는 2차함수 형태의 분포를 보이고 있다. RMS 응답에서는 진동수비 0.95~0.98 사이에서 최적값을 나타내며, 1.2초주기 외에서는 10% 이상의 감쇠비가 필요한 것으로 나타나고 있다.



[그림 3] 동조진동수에 따른 감쇠비변화(연약지반, 질량비:1%)

[Fig 3] Variation of damping ratio by tuned frequency ratio(Soft soil,  $\mu$ :1%); (a) Peak displacement, (b) Peak acceleration, (c) RMS displacement (d) RMS acceleration

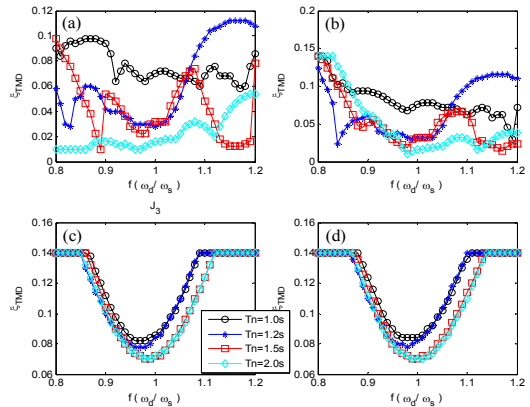


[그림 4] 동조진동수에 따른 감쇠비변화(연약지반, 질량비:2%)

[Fig. 4] Variation of damping ratio by tuned frequency ratio(Soft soil,  $\mu$ :2%) (a) Peak displacement, (b) Peak acceleration, (c) RMS displacement (d) RMS acceleration

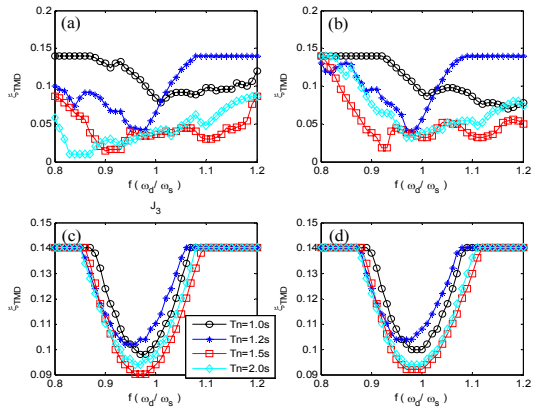
### 3) 단층 근처 지반

단층 근처 지반에 대한 해석결과는 그림 5와 그림 6에 나타내었다.



[그림 5] 동조진동수에 따른 감쇠비변화(단층 근처지반, 질량비:1%)

[Fig. 5] Variation of damping ratio by tuned frequency ratio(Near fault,  $\mu$ :1%); (a) Peak displacement, (b) Peak acceleration, (c) RMS displacement (d) RMS acceleration



[그림 6] 동조진동수에 따른 감쇠비변화(단층 근처지반, 질량비:2%)

[Fig 6] Variation of damping ratio by tuned frequency ratio(Near fault,  $\mu$ :2%); (a) Peak displacement, (b) Peak acceleration, (c) RMS displacement (d) RMS acceleration

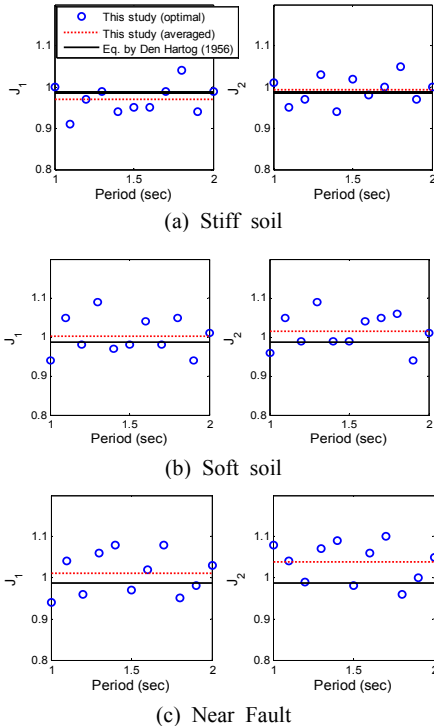
그림 5에서와 같이 최대변위 및 최대가속도에 대한 최적감쇠비 분포는 불규칙하게 나타나고 있으며, RMS 응답에 대한 최적진동수값의 분포는 최대응답의 감쇠비 분포와 다르게 주기별로 특정 진동수와 감쇠비에서 뚜렷하게 최적화되는 형태를 나타내는 것을 알 수 있다. 2% 질량비에서의 결과는 1% 질량비 결과와 거의 유사한 경향을 보이고, RMS 응답에서 최적감쇠비의 크기만 달라지는 것을 알 수 있다.

### 4.2 최적설계변수 비교

4.1 절에서 기술한 바와 같이 각 지반특성에 따른 지진하중 해석을 통해 파악된 설계변수의 최적값을 바탕으로 Hartog가 제안한 값과 비교하였다. Hartog가 제안한 최적값은 주기에 관계없이 질량비에 따라 결정되므로 일정한 값을 나타내고 있지만, 본 연구에서는 분류한 3개 지반에 따른 주기별 진동수비의 최적값을 개별 산정하였고, 그 값들의 평균값을 구하여 Hartog가 제안한 값과 비교하였다.

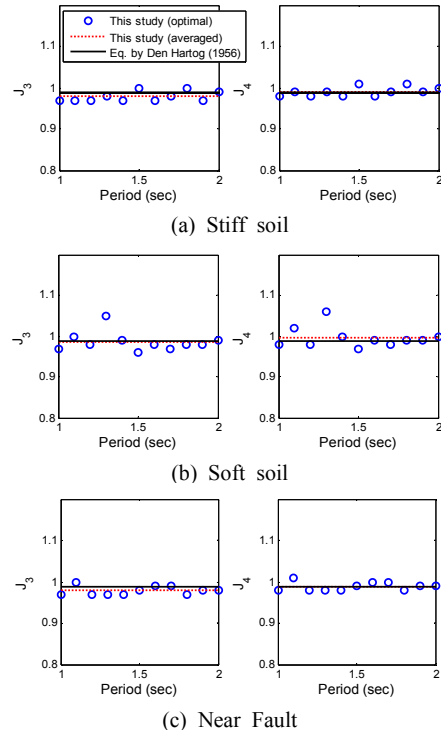
#### 1) 최적진동수비

최대변위 및 최대가속도에 대한 최대응답 성능지수인  $J_1$ ,  $J_2$ 에 대하여 그림 7에 나타내었다. (a)는 단단한 지반에 대한 결과로 Hartog의 최적값과 해석결과의 평균값은 각각 0.98과 0.97로 거의 유사함을 알 수 있으며, 연약지반과 단층 근처 지반의 최적값도 편차가 크지 않음을 알 수 있다. 단단한 지반을 제외한 연약지반 및 단층 근처 지반은 Hartog의 최적값이 1보다 작은 값인 것에 비해, 연구 수행결과는 1보다 큰 최적값을 나타내고 있다. 이는 기존 결과와 매우 상이한 결과이며, 지진응답에 대한 최적진동수비를 결정할 경우 고려되어야 할 사항이다.



[그림 7] 최적진동수비의 분포( $J_1$ ,  $J_2$ )  
 [Fig. 7] Distribution of Optimal frequency ratio( $J_1$ ,  $J_2$ )

그림 8은 RMS 변위, RMS 가속도 응답에 대한 성능지수인  $J_3$ ,  $J_4$ 에 대한 결과를 나타낸 것으로, 그림 7의 최대응답에 대한 해석결과와의 차이를 확인할 수 있다. 이는 4.1에서 설명한 RMS 응답의 최적값의 분포가 거의 일정하게 나타난 것과 같은 결과를 나타내었으며, Hartog의 최적값과 편차도 거의 없는 것을 알 수 있다. 따라서 지진하중에 대한 구조물의 RMS 응답 제어를 목적으로 동조질량감쇠기를 설계할 경우, 진동수비는 Hartog의 최적값을 사용하여도 무방할 것으로 판단된다.

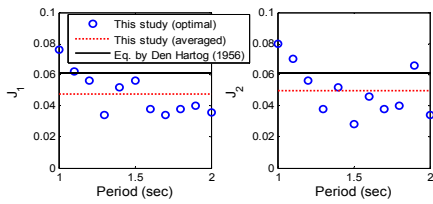


[그림 8] 최적진동수비의 분포( $J_3$ ,  $J_4$ )  
 [Fig. 8] Distribution of Optimal frequency ratio( $J_3$ ,  $J_4$ )

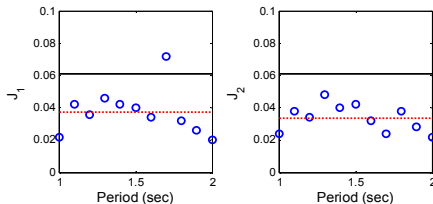
#### 2) 최적감쇠비

최대응답 제어를 위한 동조질량감쇠기에 요구되는 최적감쇠비에 대한 지반특성별 분포를 그림 9에 나타내었다.

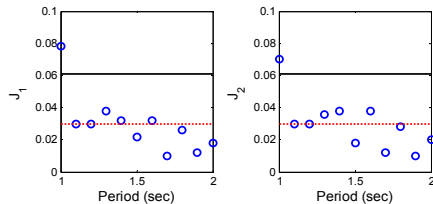
해석을 통해 확인된 최적값은 지반특성에 따라 다르게 분포하는 것을 알 수 있다. 특히 단단한 지반의 경우 기존 최적값과 1% 정도의 차를 보이나, 연약지반과 단층 근처 지반에서는 편차가 2%와 3%로 증가한다. 이는 기존 최적감쇠비가 다소 크게 산정되어, 지진응답제어를 위한 동조질량감쇠기 설치 시 제어성능을 저하시킬 수 있음을 의미한다. 또한 작은 값의 감쇠비로도 일정한 제어 성능을 발휘할 수 있어 동조질량감쇠기의 구성요소인 점성댐퍼의 용량을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Stiff soil



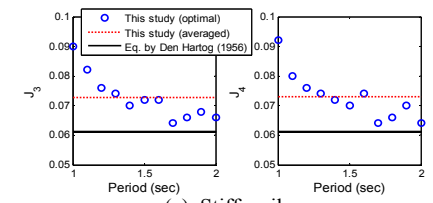
(b) Soft soil



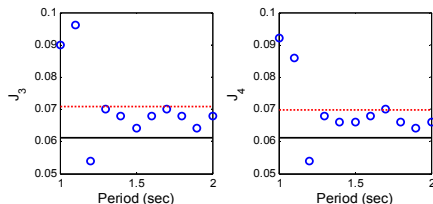
(c) Near Fault

[그림 9] 최적감쇠비의 분포( $J_1, J_2$ )

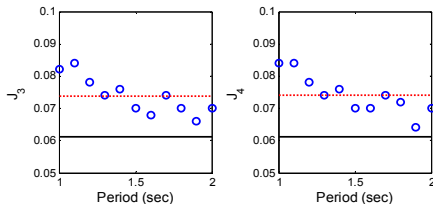
[Fig. 9] Distribution of Optimal damping ratio( $J_1, J_2$ )



(a) Stiff soil



(b) Soft soil



(c) Near Fault

[그림 10] 최적감쇠비의 분포( $J_3, J_4$ )

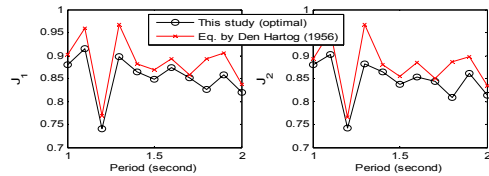
[Fig. 10] Distribution of Optimal damping ratio ( $J_3, J_4$ )

그림 10은 RMS 응답에 대한 최적감쇠비를 비교한 것으로 최대변위응답 및 최대가속도응답에 대한 결과와 달리, 최적감쇠비는 지반에 관계없이 Hartog의 최적값보다 1%이상 큰 값을 갖는 것으로 나타났다

이상의 결과로부터 동조질량감쇠기를 설계할 경우, 입력하중특성과 지반특성을 고려하여야 함을 알 수 있다.

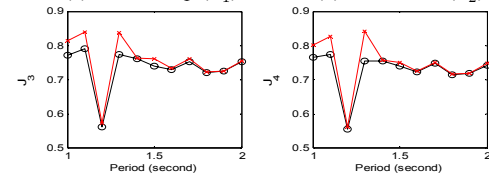
### 4.3 최적설계변수에 따른 제어성능 비교

4.2절에서 산정된 최적진동수비와 최적감쇠비를 적용하여 단자유도 구조물에 대한 제어성능 해석을 수행하였다. Hartog의 최적값과 본 연구에서 도출한 결과를 식 (5), 식 (6)의 성능지수 값으로 비교하였다.



(a) Peak Disp.( $J_1$ )

(b) Peak Acc.( $J_2$ )



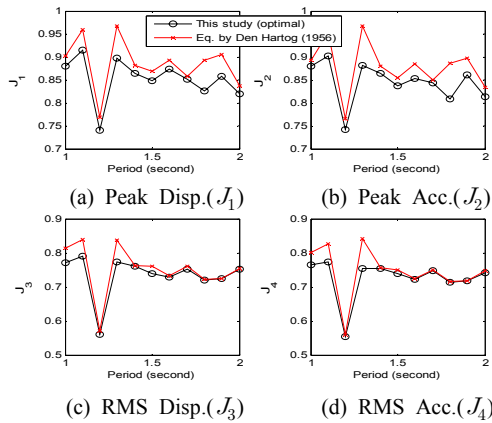
(c) RMS Disp.( $J_3$ )

(d) RMS Acc.( $J_4$ )

[그림 11] 성능지수분포(단단한 지반)

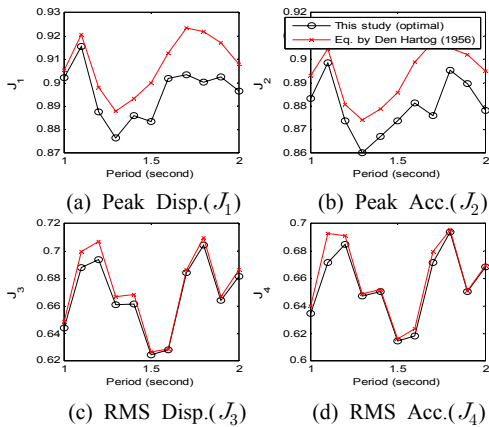
[Fig. 11] Distribution of performance index (Stiff soil)

그림 11은 Hartog의 최적설계변수를 적용한 경우와 본 연구방법을 통해 파악된 성능지수 값을 비교하여 나타난 것이다. 그림 11의 (a), (b)는 최대응답 성능지수인  $J_1$ 과  $J_2$ 에 대해서는 응답제어성능의 차이는 크지 않으나, 본 연구방법의 결과는 모든 주기에서 Hartog의 최적설계변수를 적용한 경우보다 나은 제어성능을 보임을 알 수 있다. 또한 RMS 응답에 대한 성능지수인  $J_3$ 과  $J_4$ 는 주기가 1.7초 이하에서 상당한 제어성능차이를 나타냄을 알 수 있다. 그림 12는 연약지반에서의 성능지수별 응답제어성능을 나타낸 것이다. 최대변위와 RMS 변위, RMS 가속도의 응답이 Hartog가 제시한 최적설계변수에 의한 성능지수보다 각 주기별로 5%정도 작은 값을 보이는 것으로 나타났다. 최대가속도의 경우 20%이상의 성능차이를 보이고 있어 최대 변위 뿐 아니라 최대 가속도 제어에도 효과적인 것을 알 수 있다.



[그림 12] 성능지수분포(연약지반)  
[Fig. 12] Distribution of performance index (Soft soil)

RMS 응답은 단단한 지반의 결과와 동일하게 Hartog의 최적값을 사용한 해석과 거의 동일한 제어성능을 나타내는 것으로 나타났다.



[그림 13] 성능지수분포(단층 근처 지반)  
[Fig. 13] Distribution of performance index (Near fault)

그림 13은 단층 근처 지반에 대한 해석결과를 나타낸 것으로, Hartog의 최적설계변수보다 본 연구를 통한 최적설계변수를 적용한 경우가 우수한 제어성능을 나타낼 수 있었고, RMS 응답은 Hartog의 최적값을 사용한 해석과 거의 동일한 결과를 나타내었다. 이러한 경향은 기존의 제안된 최적설계변수가 지진하중에 대한 구조물의 최대변위 감소를 위한 것이 아닌, 조화하중에 의해 발생하는 변위와 가속도를 감소시키는 것을 제어목적으로 하고 있기 때문이다. 제어목적에 따라 Hartog의 제안식이 본 연구에서 제시한 RMS 최적설계변수와 거의 동일한

성능을 발휘하게 되는 것이다.

따라서 본 연구에서 목적으로 하고 있는 구조물의 지진응답 제어를 목적으로 동조질량감쇠기를 설치하는 경우에는 기존 제안을 대체하여 대상 구조물의 주기와 지반특성에 따라 설계변수를 적용하여야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

동조질량감쇠기 설계를 위해 Hartog가 제안한 최적설계변수는 조화하중(풍하중)을 입력하중으로 구해진 것이다. 본 연구에서는 최적의 지진응답제어를 위하여, 구조물주기특성을 고려하여, 단단한 지반, 연약지반, 단층 근처 지반에서 계측된 실제지진하중을 입력하중으로 한 수치해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 TMD설계변수를 도출하였고, 기존 제안식과 비교하여 제어성능을 검토하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 단단한 지반에서의 진동수비에 따른 최적감쇠비의 분포는 최대응답과 RMS 응답 모두 특정진동수에서 최적화되는 것으로 나타났으나, 연약지반과 단층 근처 지반에서는 최대응답의 경우, 일정한 경향을 갖지 못하고 불특정하게 분포하는 것으로 나타났다.
- (2) 각 주기별 최적진동수비는 Hartog가 제시한 최적진동수식과 수치해석을 통해 파악된 결과는 매우 유사한 것으로 나타났다. 최대변위응답과 최대가속도응답의 경우, 최적감쇠비는 기존 최적감쇠비보다 작은 값을 가지며, RMS 응답의 경우 큰 값을 나타냄을 알 수 있었다. 이러한 결과에 따라 설계자는 하중특성과 제어하고자 하는 목적응답의 종류에 따라 동조질량감쇠기의 감쇠비를 결정하여야 할 것으로 판단된다.
- (3) 수치해석을 통해 파악된 각 지반특성별 최적설계변수를 최대 및 RMS 변위, 가속도에 대해 주기별로 응답성능지수를 분석한 결과, Hartog가 제안한 최적설계변수보다 낮은 지수를 나타내고 있으며, 최대가속도의 경우 20%이상의 성능차를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 지진하중에 대한 응답을 저감시키기 위해서는 각 주기별 최적진동수비와 최적감쇠비를 개별적으로 산정하여야 하며, 그에 따른 동조질량감쇠기의 설계가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구는 실측된 지진자료만을 사용하였으나, 지반의 강도에 따른 최적설계변수 도출을 위해서는

지반의 강도에 따른 지진파의 생성이 필요하며, 추 후 연구를 통해 수행할 예정이다.

## References

- [1] T.T. Soong and G.F. Dargush, "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", New York, John Wiley & Sons, 1997.
- [2] D. Hartog, "Mechanical Vibrations", McGraw Hill: New York, pp. 93-106, 1956.
- [3] G.B. Warburton, "Optimal Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, pp. 381-401, 1982.
- [4] H.C. Tsai and G.C. Lin, "Optimum tuned mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 22, pp. 957-973, 1993.
- [5] A. Kareem, S. Kline, "Performance of multiple mass dampers under random loading". Journal of Structural Engineering, Vol.121, No.2, pp. 348-360, 1995.
- [6] J.M. Verdirame and S.A. Nayfeh, "Design of multi degree of freedom tuned mass dampers based on eigenvalue perturbation". In 44th AIAA/ASME/ASCE /AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA 2003-1686, 2003.
- [7] L. Zuo, and S.A.Nayfeh, "The two-degree-of-freedom tuned-mass damper for suppression of single-mode vibration under random and harmonic excitation", Journal of Vibration and Acoustics, Vol.128, No.1, pp. 56-65, 2006.
- [8] H.N. Li and X.L. Ni, "Optimization of non-uniformly distributed multiple tuned mass damper", Journal of Sound and Vibration, Vol.308, No.1-2, pp. 80-97, 2007.
- [9] F. Sadek, B. Mohraz, A.W. Taylor and R.M. Chung, "A Method of Estimating The Parameters of Tuned mass Dampers for Seismic Application", Earthquake Engng and Struct. Dyn, Vol. 26, pp. 617-635, 1997.
- [10] R. Rana, T.T. Soong, "Parametric study and simplified design of tuned mass dampers", Engineering Structures, Vol. 20, No. 3, pp. 193-204, 1998.
- [11] SAC Steel Project, Development of Ground Motion Time Histories for Phase 2 of the FEMA/SAC Steel Project, Report No. SAC/BD-97/04, 1997.

강 경 수(Kyung-Soo Kang)

[정회원]



- 1992년 2월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학박사)
- 1997년 10월 ~ 2000년 2월 : 삼성물산건설부문 기술연구소
- 2000년 2월 ~ 현재 : 동명대학교 건축공학과 부교수

<관심분야>  
구조물진동, 철근콘크리트구조