

## 스트로크 포화를 고려한 가변이득 피드백제어

### Variable Gain Feedback Control considering Stroke Saturation

황 성 호\*  
Hwang, Seong-Ho

고 철 수\*\*  
Ko, Chul-Soo

민 경 원\*\*\*  
Min, Kyung-Won

정진욱\*\*\*\*  
Joung, Jin-Wook

---

#### ABSTRACT

This paper deals with the compensation method of AMD stroke by adopting variable gain feedback control strategy. The gains, generally known to be constant, are designed to have variable values according to the structural responses and the AMD stroke. This strategy has the advantage of compensating AMD stroke under any kind of loadings, on the other hand the conventional strategies work only under the specific loading. The strategy shows that the AMD stroke is compensated to prevent the stroke saturation and the control force is found not affected by the compensating operation while the control force is reduced and the control efficiency is decreased during the compensating operation in the conventional strategies.

---

#### 1. 서론

능동제진 방식이 수동제진 방식보다 응답제어에서는 뛰어나나<sup>1)</sup> 별도의 동력기를 이용을 하기 때문에 전원 공급이 갑자기 중단될 경우나 동력기의 한계를 초과하는 상황이 초래하면 능동제진이 정지하게 되어 제어의 효율은 물론 포화(Saturation)문제가 발생하여 구조물의 안정성을 해치게 되며 정지 후에는 제진을 전혀 못하게 되는 단점이 있다. 여기서 말하는 포화란 일반적으로 제어력 포화, 스트로크(Stroke) 포화, 보드 포화를 말한다.<sup>2)</sup> 제어력 포화란 제어장치가 발휘할 수 있는 동력기로써의 한계 때문에 발생하는 문제이며 스트로크 포화란 능동제어장치의 하나인 질량형 제어장치(Active Mass Driver, AMD)의 질량이 움직일 수 있는 거리의 한계를 말한다. 마지막으로 보드 포화란 보드에서 내보낼 수 있는 전기 신호의 한계를 말한다. 최근에는 이러한 AMD와 같은 능동제어장치의 한계를 극복하고자 수동제어장치를 결합시킨 복합형 질량 감쇠기(Hybrid Mass Driver, HMD)에 대해서 연구가 진행되고 있다.<sup>3,4)</sup> HMD란 수동제어장치와 능동제어장치를 결합하여 평시에는 두 종류의 제어장치가 작동하여 제어의 효율성을 높이며 정전이나 포화 현상에 의해 능동제어장치가 작동을 멈추어도 수동제어장치가 작동하여 지속적인 제어를 하는 형태이다.

---

\* 유일산업 연구소 연구원

\*\* 유일 산업 연구소 부장

\*\*\* 인천대학교 건축공학과 교수, 공학박사

\*\*\*\* 인천대학교 건축공학과 석사과정

본 논문에서는 HMD의 능동질량체의 스트로크 포화를 가능한 범위 내에서 일어나지 않도록 능동제어이득(Active Control Gain)을 조정하여 지진과 같은 외란에 대하여 능동과 수동이 항상 작동하는 제어 알고리즘의 타당성을 검증하도록 한다. 스트로크 포화에 관한 보상연구는 Linder에 의해서 연구가 되어왔지만 Linder가 제안한 비선형 보상식에 의하면 특정한 입력하중에 대해서는 스트로크 포화를 보상할 수 있지만 불특정한 입력하중에 대해서는 항상 보상을 할 수가 없다.<sup>5)</sup> 설계자가 입력하중에 따라 제어력에 반대적인 힘 즉 복원력의 크기를 결정짓는 제한사항이 있기 때문이다. 이러한 단점을 보완하고자 본 논문에서는 Nagashima<sup>6)</sup>가 제시한 가변제어이득(Variable Gain Feedback Control)방법을 적용하여 제어력을 구할 때 실시간으로 스트로크를 고려하여 스트로크 포화문제를 해결하였다. 제어력을 생성하기 위해서는 먼저 제어이득을 구해야 하는데 이때 그 제어이득을 고정된 상수값이 아닌 건물의 응답과 스트로크의 변화에 따라서 다른 제어이득 값을 사용하게 하였다. 그 결과 모든 입력하중에 대해서 항상 스트로크 보상을 할 수가 있었다. Nagashima의 연구와는 달리 본 논문에서는 제어이득의 시간별 분석과 기존방법인 복원력의 개념을 이용하여 스트로크 포화를 보상하는 Linder방법과의 비교를 통하여 가변제어이득 방법의 타당성을 분석하였다.

## 2. 해석 모델

### 2.1 가변이득 제어방법

제어이득은 제어력과 제어대상 구조물의 응답에 관한 가중치를 설정한 후 성능지수의 최적화를 통하여 구하게 된다. 일반적으로 가중치는 상수로 가정하기 때문에 제어이득은 상수가 된다. 그러나 구조물의 거동과 동력기의 능력에 따라 가중치가 상수가 아닌 변수로 설정하여 제어이득을 상황에 맞추어 바꿀 수가 있다. 예를 들면 AMD 질량체의 스트로크가 제한 상황에 도달하려고 하면 스트로크를 줄이기 위하여 다른 제어이득을 이용하여 질량체의 스트로크를 감소시켜야 한다. 본 논문에서는 Eq. (2.1)과 같이 성능지수  $J$  에서 가중치  $Q$ 와  $R$ 를  $\alpha$ 에 의한 함수로 정하여 제어이득이 변화하도록 설정하였다. 여기에서  $\alpha$ 란 구조물의 응답과 스트로크의 변화에 따른 설정된 함수를 의미한다. 그러므로 Eq. (2.2)와 같이 리카티 방정식이  $\alpha$ 에 의한 함수가 되어 Eq. (2.3)에서와 같이 제어이득 $G(\alpha)$ 이 고정된 하나의 값이 아닌 시간 단계별로 변화하는 함수값이 된다. 따라서 Eq. (2.4)와 같이 제어력 $u(t)$ 도  $\alpha$ 의 응답에 따라 크기가 변하게 된다.

$$J(\alpha) = \int_0^{\infty} (z^T Q(\alpha)z + u^T R(\alpha)u) dt \quad (2.1)$$

$$P(\alpha)A + A^T P(\alpha) - P(\alpha)BR^{-1}(\alpha)B^T P(\alpha) - Q(\alpha) = 0 \quad (2.2)$$

$$G(\alpha) = -R^{-1}(\alpha)B^T P(\alpha) \quad (2.3)$$

$$u(t) = G(\alpha)z(t) \quad (2.4)$$

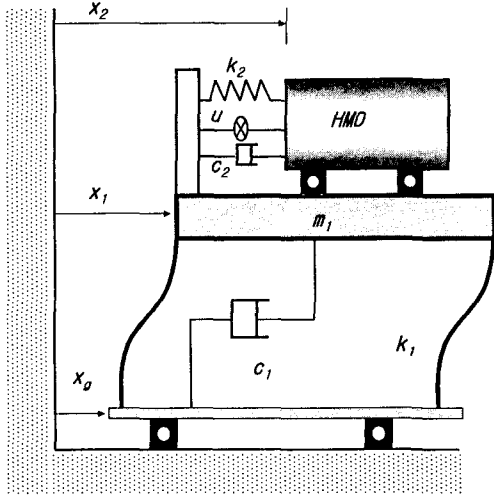


Fig. 2.1 Building Model Installed with HMD

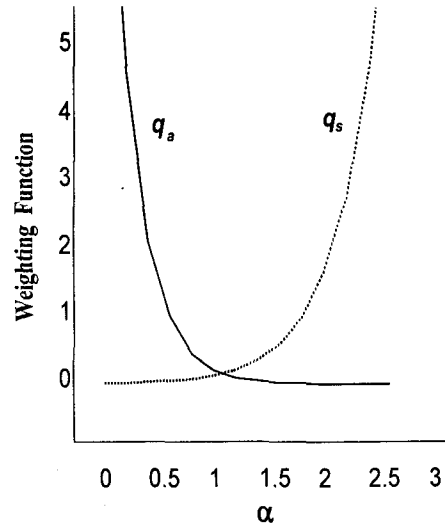


Fig. 2.2 Weighting Function

본 논문에서는 HMD 질량체의 스트로크의 제한이 중요하므로 구조물의 응답에 관한 가중치  $Q(\alpha)$ 에 스트로크를 포함시키기로 하여 행렬을 이용하여 다음 Eq.(2.5)와 같이  $Q(\alpha)$ 와 같이 쓰기로 한다. Fig. 2.1과 같이 1층의 건물 위에 수동제어장치의 역할을 하는 TMD(Tuned Mass Damper)와 제어력으로 능동제어의 역할을 하는 HMD가 설치되어 있다. 응답은 1층과 HMD의 변위 및 속도로서 이에 관한 가중함수  $q_s(\alpha)$ 와 스트로크에 관계된 가중함수  $q_a(\alpha)$ 를 이용하여 전체 가중함수를 정의한다. AMD의 제어력은 질량체의 관성력으로 표현되기 때문에 스트로크와 밀접한 관계가 있다. 따라서 스트로크가 커지게 되면 큰 제어력이 발휘된다. 그러나 큰 스트로크는 스트로크의 포화문제를 가져오기 때문에 제어력과 건물 응답의 상관관계는 스트로크와 건물 응답의 관계로 연결된다. 제어력을 좌우하는 여러 변수 중에서 스트로크 문제만을 고려하면 Eq.(2.5)에서의 가중함수  $Q(\alpha)$ 에 제어력에 관한 가중함수가 포함되어 있다고 할 수 있다.

$$Q(\alpha) = \begin{bmatrix} q_s(\alpha)Q_{s4 \times 4} & 0_{4 \times 1} \\ 0_{1 \times 4} & q_a(\alpha)Q_{s1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

위의 식에서  $Q_s$ 와  $Q_a$ 는 각각 건물의 응답과 스트로크에 관계된 고정된 가중행렬로 정의할 수 있으며 크기는 각각  $4 \times 4$ ,  $1 \times 1$  행렬이다. 가중함수  $q_s(\alpha)$ 와  $q_a(\alpha)$ 는 각각 건물의 응답과 스트로크에 해당되는 함수이므로 함수의 특성이 Fig.2.2와 같이 변수  $\alpha$ 에 따라 서로 대비되는 값을 나타낸다. 따라서 적절히  $\alpha$ 의 값을 택하면 가중치가 변화하게 되어 설계자의 의도대로 제어력과 스트로크 등을 조정할 수 있다. 다음과 같이  $q_s(\alpha)$ 와  $q_a(\alpha)$ 의 최대값과 최소값이 주어졌다고 가정을 한다.

$$\begin{aligned}
q_s(\alpha_{\max}) &= q_{s\max} & q_a(\alpha_{\max}) &= q_{a\min} \\
q_s(\alpha_{\min}) &= q_{s\min} & q_a(\alpha_{\min}) &= q_{a\max}
\end{aligned}
\tag{2.6}$$

$q_{s\max}$ ,  $q_{s\min}$ ,  $q_{a\max}$ ,  $q_{a\min}$  는 각각 건물의 응답을 줄이기 위한 함수의 최대, 최소값, 스트로크를 방지하기 위한 함수의 최대, 최소값이다.

Fig.2.2와 같은 가중함수를 지수함수로 설정을 하면 Eq.(2.6)의 최대 및 최소값을 이용하여 다음과 같이 가중함수를  $\alpha$ 의 함수로 나타낼수 있다.

$$q_s(\alpha) = c_s \exp\left(\frac{\alpha}{d_s}\right) \quad q_a(\alpha) = c_a \exp\left(\frac{\alpha}{d_a}\right)
\tag{2.7}$$

$$\begin{aligned}
c_a &= q_{a\max} \left(\frac{q_{a\max}}{q_{a\min}}\right)^{\alpha_{\min}/(\alpha_{\max}-\alpha_{\min})} & d_a &= \frac{\alpha_{\min} - \alpha_{\max}}{\ln(q_{a\max}/q_{a\min})} \\
c_s &= q_{s\min} \left(\frac{q_{s\min}}{q_{s\max}}\right)^{\alpha_{\min}/(\alpha_{\max}-\alpha_{\min})} & d_s &= \frac{\alpha_{\min} - \alpha_{\max}}{\ln(q_{s\min}/q_{a\max})}
\end{aligned}
\tag{2.8}$$

위와 같이 가중함수의 식이 변수  $\alpha$ 로만 표현이 되었으며  $q_s$ ,  $q_a$ 의 상한과 하한치 그리고  $\alpha$ 의 범위를 설계자가 정하면 적절히  $\alpha$ 의 값을 선택하여 스트로크 한계를 보상할 수 있다. 다음 Fig.2.3은 이러한 가변제어이득 알고리즘을 이용하여 스트로크 포화를 보상하는 과정을 순서도로 나타낸 것이다. 기본 개념은 AMD의 스트로크를 실시간으로 측정하여 설정한 스트로크의 값에 가까워지면  $\alpha$  값을 변화시켜 스트로크를 보상해주는 즉 감소시켜주는 제어력을 발휘하는 것이다.

#### ■ 변수 요약

- $\alpha_{init}$  : 초기치  $\alpha$  값 (설계자가 지정)
- $\alpha_i$  :  $i$ 스텝에서의  $\alpha$  값
- $x_{ai}$  :  $i$ 스텝에서의 AMD스트로크
- $x_{aT}$  : AMD스트로크 한계의 위험위치 (설계자가 지정)
- $\Delta\alpha$  :  $\alpha$ 의 증가량
- $\beta_i$  : AMD위험위치와  $i$ 스텝에서의 스트로크 차이

■ 단계별 요약

- 1단계 : AMD 스트로크에 따른  $\beta$  값 계산
- 2단계 :  $\beta$  값에 따른  $\alpha$  값 변화
- 3단계 : 최대  $\alpha$  값에서 최소  $\alpha$  값 사이의  $i$  스텝에서의  $\alpha$  값 결정
- 4단계 : 최대 제어력 범위 안에서의 제어력 계산

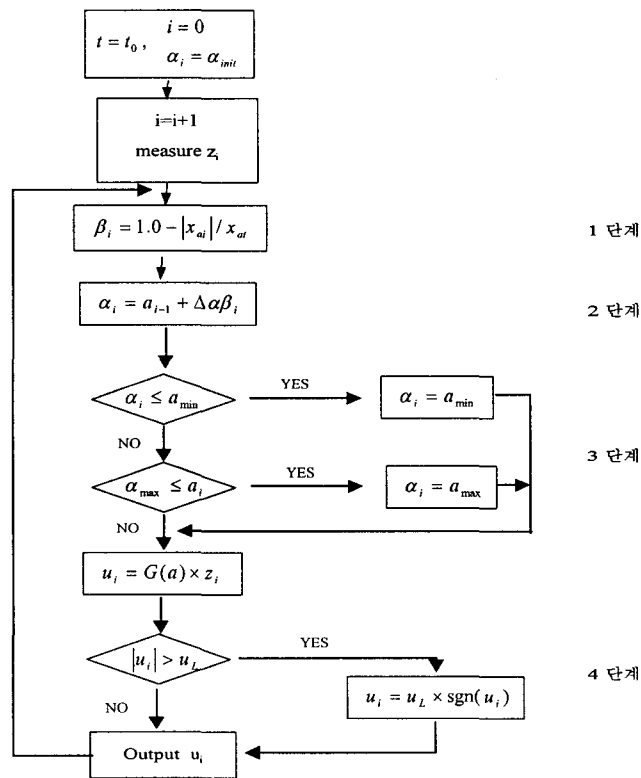


Fig. 2.3 Flowchart of The Variable Gain Algorithm for On-Line Control

2. 2 가변제어이득 방법에 의한 해석

$\alpha$  와 가중함수의 설계값은 각각  $\alpha$  는 1이상 2이하, 건물의 가중함수는 0.2이상 1이하, 스트로크의 가중함수는 0.2이상 1.4이하로 정하였다. Fig. 2.1과 같이 1층 건물에 HMD가 설치되어 있고 지반에 특정한 지진(PGA 381gal의 El Centro 지진)을 가하였을 때 가중함수의 변수인  $\alpha$  의 변화와 가중함수  $q_s(\alpha)$ 와  $q_d(\alpha)$  가 Fig.2.4에 나타나 있다.  $\alpha$  는 초기에 값이 증가하여 이후 2 이하에서 값이 변화한다. 이러한 사실은 AMD의 스트로크가 제한치로 접근하기 때문에 이것을 보상하여

주기 위한 것이다. 이에 따라 가중함수의 값이 변화하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2.5는 제어이득에 관련된 함수들의 변화에 따른 건물 1층과 AMD의 변위 및 속도에 관계된 제어이득 값이 시간에 따라 변화하는 것을 보여주고 있다. 초기에는 큰 값의 제어이득이 작용하여 건물의 응답이 감소되나 그 이후에는 AMD의 스트로크가 작은 구간에서는 작은 제어이득 값을 사용하고 있다. 이는 스트로크 한계를 보상하기 위하여 작은 제어력을 사용하여 응답이 좋지 않게 되는 현상들을 방지하기 위한 방법으로써 같은 제어력을 발휘하더라도 필요에 따라 제어이득 값을 골라서 사용하는 현상을 보여주고 있다.

Fig. 2.6과 Fig. 2.7은 El Centro지진의 PGA를 변화시켰을 때 고정된 제어이득 값을 사용했을 때와 가변제어이득방법에 의한 건물의 변위응답과 AMD의 스트로크를 비교하고 있다. 이 두 그림에서 고정된  $\alpha$  중 수치가 클수록 응답이 작아지고 스트로크는 커지는 걸 알 수가 있으나 가변제어이득방법에 의하면 건물의 응답에는 큰 차이가 없고 스트로크는 제한치 이내로 보상되는 것을 알 수가 있다.

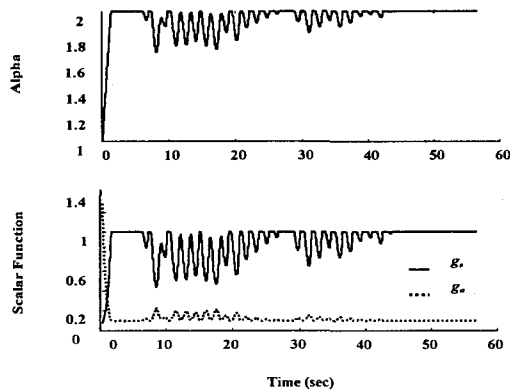


Fig. 2.4 Weighting Function and  $\alpha$

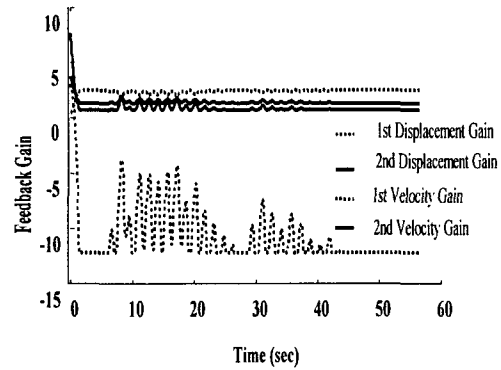


Fig. 2.5 Feedback Gain

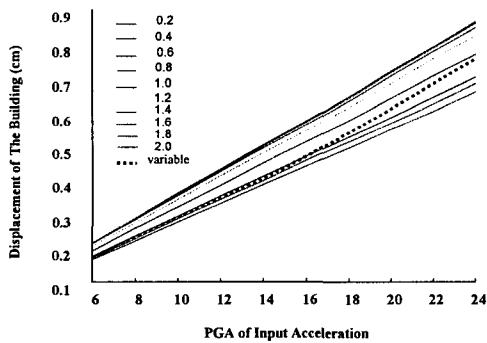


Fig. 2.6 Maximum Displacement of Building

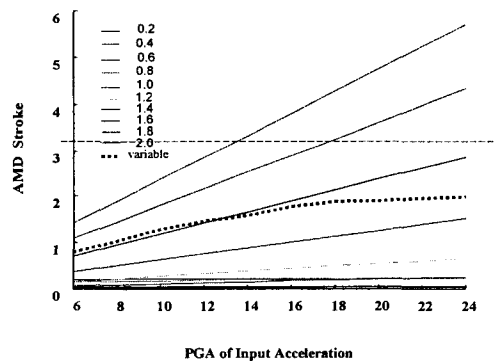


Fig. 2.7 Maximum Stroke of AMD

Fig. 2.8와 Fig. 2.9는 고정된 제어이득을 이용하여 복원력을 작용시켜 스트로크를 보상하는 Linder의 방법과 가변제어이득 방법에 의한 제어력을 비교한 것이다. Linder에 의한 제어력은 보상 후 더 작아져서 실제 제어력을 필요로 하는 부분에서는 제어력이 작아 비효율적인 경향을 보인다. 그러나 가변제어이득 방법은 스트로크 보상을 하면서 필요한 부분에서의 제어력도 작아지지 않는 현상을 보이고 있다. 따라서 가변제어이득방법이 제어면 에서도 좋은 효과가 있음을 알 수 있다.

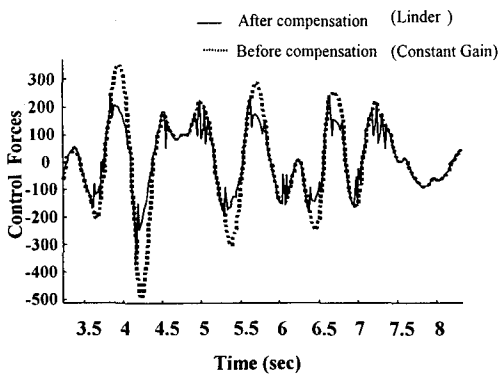


Fig. 2.8 Linder Method

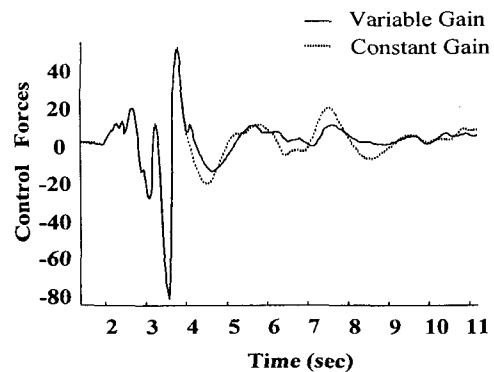


Fig. 2.9 Variable Gain Method

#### 4. 결론

능동제어시 문제가 되어왔던 포화 현상 중 스트로크 포화를 가변제어 기법을 이용하여 불특정한 입력하중에 대해서도 스트로크 포화를 보상하였다. 일반적인 제어알고리즘에서 제어이득은 고정된 값을 사용하나 본 논문에서는 건물의 응답과 스트로크를 고려하여 각각의 시간단계에서 가장 적당한 제어이득을 선택하여 사용하게 하였다. 그 결과 Linder가 제안한 비선형 보상기법에서 문제가 되었던 두 부분에 대해서 만족할만한 결과를 얻었다.

첫째, 특정입력하중에 대해서만 보상이 되고 다른 입력하중에 대해서 설계자가 복원력의 크기와 관련된 상수값을 다시 조정해주어야 하나 가변제어이득 방법에서는 모든 단계의 스트로크 상태를 파악하여 포화상태가 되면 자동으로 이득이 변화하여 보상을 하게 하였다.

둘째, 제어력을 가장 많이 필요로 하는 구간에서는 제어력이 더 작아지나 가변제어이득 방법에서는 제어력의 변화가 거의 없어서 응답제어 면에서도 효과적임을 알 수가 있었다. 따라서 불특정한 입력하중을 받아도 항상 능동제어기가 작동하여 제어 효율성 및 제어력의 안정성을 높일 수가 있었다.

#### 참고 문헌

- 1) T.T. Soong , M.C. Costantinou, *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*, *Wiel-New York*, 1993, pp.271~318
- 2) 구정모, “능동질량 감쇠기의 포화 효과 보상 기법에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 건축학과 공학석사학위논문, 1999년 2월
- 3) 고현무, 박관순, 박원석, 박규선, 풍하중에 의한 인천국제공항 관제탑의 진동 제어 및 사용성 평가
- 4) 민경원, 황성호, 김성춘, 스트로크 포화를 고려한 직렬 복합형 감쇠기의 비선형 제어, 대한건축학회 논문집 구조계, 2000년 12월
- 5) Linder, D. K. "Performance and Control of Proof-Mass Actuators Accounting for Stroke Saturation", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 17. No. 5, 1994.
- 6) Nagashima, I. and Shinozaki, Y., "Variable gain feedback control technique of active mass damper and its application to hybrid structural control", *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 26, 1997, pp. 815~838.