

지진력을 받는 구조물의 퍼지제어

Fuzzy Control of Structures Subjected to Seismic Forces

이 병 구*, 오 상 진**, 모 정 만**, 이 용**

Byoung Koo Lee, Sang Jin Oh, Jeong Man Mo, Yong Lee

ABSTRACT

In this paper, the fuzzy controls for the structures subjected to seismic forces are studied. The structural models of two and three degrees of freedom are considered in numerical examples. The related simulation results show that the technique of fuzzy control is useful for reducing the relative displacement.

I. 서론

구조물 진동제어에 관한 대부분의 연구들에서는 시스템이 복잡하여 지더라도 가능한한 진동을 작게 한다는 개념에 기초하고 있다. 그러나 구조물에 작용하는 하중 특히, 지진력은 돌발적으로 발생하며 구조물에 부가되는 순간적인 힘도 매우 크다. 따라서 이에 대한 제어시스템은 고장이 적고, 비상시에도 정확히 작동할 수 있으며, 큰 힘이 부가되어도 쉽게 파손되지 않는 점 등이 요구된다. 일반적으로 퍼지제어이론을 적용한 제어기는 시스템의 특성이 복잡하고, 얻어지는 정보가 불확실한 경우에도 신뢰할 만한 제어효과를 거둘 수 있는 것으로 알려져 있다^[1]. 이러한 관점에서 퍼지제어이론에 의한 구조물 제진시스템을 구축하는 경우 매우 신뢰성이 높은 제진효과를 거둘 수 있을 것이다.

이에 본 연구에서는 구조물 진동제어에 퍼지제어이론을 적용하여 최적은 아니지만 타당한 제진효과를 이루도록 하는데 연구목적이 있다. 이를 위하여 2, 3자유도를 갖는 구조물에 지진력이 입력된 경우 구조물응답에서 구조물과 지반사이의 변위관계를 산출한다. 이와 같이 산출된 구조물과 지반사이의 변위관계는 퍼지제어를 위한 전건부변수로 하고, 구조물과 지반사이의 상대변위를 작게 하는데 필요한 감쇠율을 후건부변수로 하는 퍼지제어규칙을 결정한다. 퍼지집합 정규화 과정을 통하여 입력변수들의 소속함수를 결정하고, 퍼지제어규칙에 따라 퍼지추론을 행하며, 퍼지추론과정에서 산출된 퍼지제어값은 비퍼지화 연산과정을 통해 하나의 제어값으로 산출한다. 여기서 결정된 제어값을 이용하여 구조물응답해석을 실시하므로써 제진효과를 검증한다.

* 원광대학교 토목환경공학과 교수

** 원광대학교 대학원

II. 다자유도계 구조물의 운동방정식

다자유도계 구조물의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$[M][\ddot{u}] + [C][\dot{u}] + [K][u] = -\ddot{y}_s[M] \quad (1)$$

(1)식에서 $[M]$ 은 질량행렬, $[C]$ 는 감쇠행렬, $[K]$ 는 강성행렬이며, $[u]$ 는 상대변위벡터, $[\dot{u}]$ 는 속도벡터, $[\ddot{u}]$ 는 가속도벡터, \ddot{y}_s 는 지반가속도이다.

감쇠는 질량비례를 채택하면 다음 식 (2)와 같다.

$$c_i = 2\omega_i \xi_i m_i, \quad i = 1 \sim n \quad (2)$$

(2)식에서 n 은 자유도수이다. 본 연구에서 고유치해석에는 Generalized Jacobi method를 이용하였으며, 동적응답해석에는 Modal Superposition method를 이용하였다^[2].

III. 퍼지제어

3.1 퍼지변수의 정의 및 소속함수

본 연구에서는 퍼지제어를 위한 전건부변수로서 구조물과 지반사이의 변위관계를 채택하였다. 먼저 k 시점에서 지반의 변위를 V_k 라 하면 $k+1$ 시점에서의 지반변위를 다음 식으로 부터 구한다.

$$V_{k+1} = V_k + (V_k - V_{k-1}), \quad (k \geq 2) \quad (3)$$

(3)식으로 부터 예측한 지반의 변위 V_{k+1} 과 k 시점에서 한 질점의 응답변위 Y_k 와의 편차 E_k 는 다음 식으로 부터 구한다.

$$E_k = V_{k+1} - Y_k \quad (4)$$

또한 $k-1$ 과 k 시점에서의 응답변위의 변화를 ΔE_k 라 하면 다음 식과 같다.

$$\Delta E_k = Y_{k-1} - Y_k \quad (5)$$

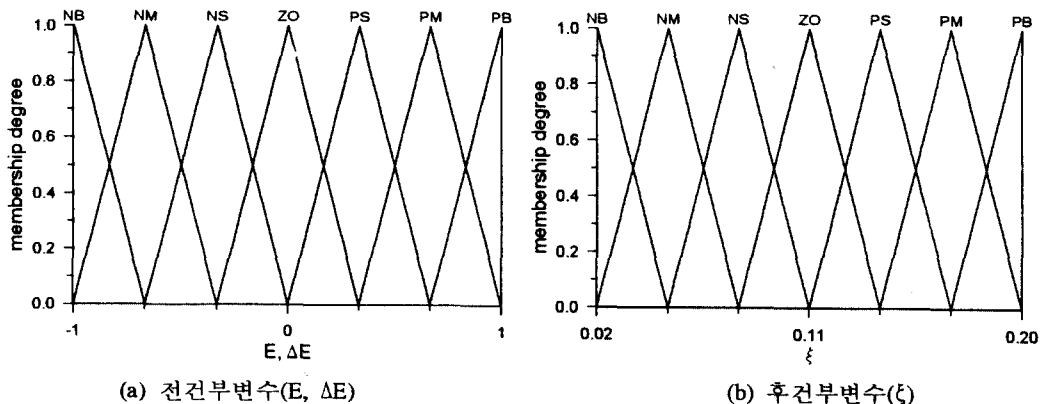


그림 1. 퍼지변수의 소속함수

식 (4), (5)에서 결정되는 E_k 와 ΔE_k 는 제어를 위한 전건부변수이며, 이들로 부터 구해지는 $k+1$ 시점에서의 감쇠율 ζ_{k+1} 을 후건부변수로 한다. 본 연구에서 전건부변수의 소속함수는 퍼지집합 정규화과정을 통해 그림 1(a)에 나타낸 바와 같이 삼각형 형태를 채택하였으며, 후건부변수 역시 그림 1(b)에 나타낸 바와 같이 삼각형 형태를 채택하였다.

3.2 제어개념 및 규칙^[3,4]

절점과 지반과의 상대변위가 적어지도록 한다면 결국 응력도 작아질 것이다. 따라서 본 연구에서의 제어개념 및 규칙은 다음과 같이 요약할 수 있다.

먼저 정지상태의 지반이 V만큼 변화한 순간에는 부재의 관성때문에 응답에 시간지연이 생기고 편차 E는 정(+)으로 매우 크고, ΔE 는 0에 가깝다. 따라서 이 상태에서는 감쇠율을 매우 작게 취하는 것이 좋으며, 이 때의 제어규칙은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_1 : \text{if } E=PB \text{ and } \Delta E=ZO \text{ then } \zeta=NB$$

E가 정(+)으로 중간정도, ΔE 는 부(-)로 조금 작으므로 이 경우에는 운동을 방해하지 않도록 감쇠율을 약간 작게 하는 것이 좋다.

$$R_2 : \text{if } E=PM \text{ and } \Delta E=NS \text{ then } \zeta=NS$$

E는 정으로 작고, ΔE 는 부로 중간정도이면, 사전에 운동을 저지한다는 의미로 감쇠율 ζ 를 조금 크게 한다.

$$R_3 : \text{if } E=PS \text{ and } \Delta E=NM \text{ then } \zeta=PS$$

E가 목표치에 도달하고 있지만 ΔE 가 최대가 되므로 감쇠율 ζ 를 크게 해야만 한다.

$$R_4 : \text{if } E=ZO \text{ and } \Delta E=NB \text{ then } \zeta=PB$$

이상과 같은 제어개념으로 제어규칙을 작성하여 표 1에 수록한 것이다.

표 1. 제어규칙표

E \ ΔE	ΔE						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	NB	NB	NB	NB
NM	PB	PB	PM	NM	NS	NB	NB
NS	PB	PS	PS	NS	ZO	PS	PM
ZO	PB	PM	PS	ZO	PS	PM	PB
PS	PM	PS	ZO	NS	PS	PS	PB
PM	NB	NB	NS	NM	PM	PB	PB
PB	NB	NB	NB	NB	PB	PB	PB

3.3 퍼지추론

본 연구에서는 그림 2에 나타난 바와 같이 퍼지추론방법으로 min-max법을 이용하였으며, 추론과정에서 산출되는 감쇠율 퍼지집합의 비퍼지화(defuzzification)는 높이법을 이용하였다.

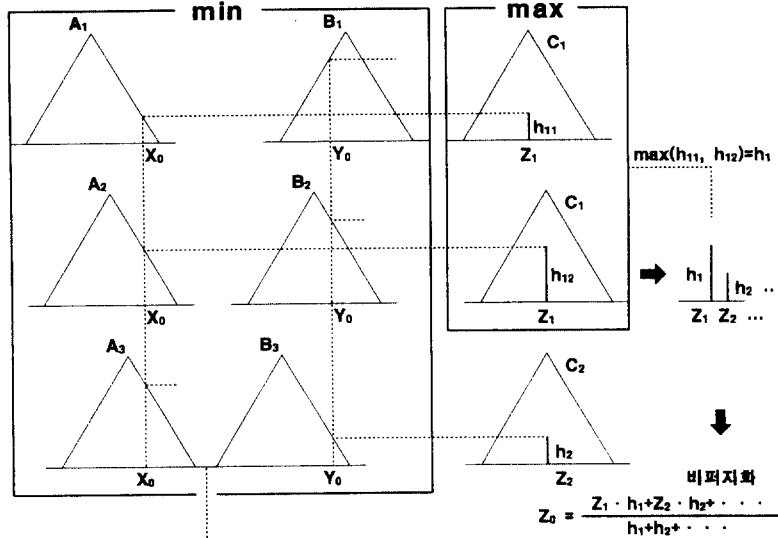


그림 2. 퍼지추론 및 비퍼지화 과정

IV. 해석대상 및 대상구조물의 자유진동특성

본 연구에서는 그림 3에 나타난 2, 3자유도계 구조물에 대한 해석예를 택하였다. 그림 4는 각각 대상구조물의 자유진동형 및 고유각진동수를 나타낸 것이다.

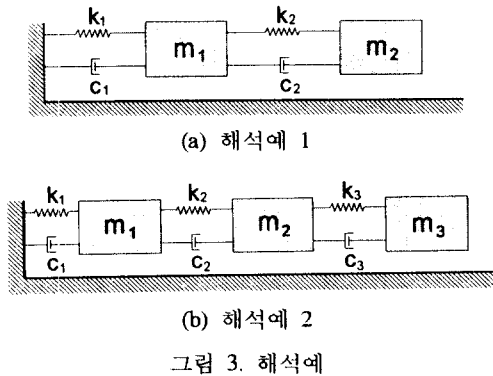


표 2. 질량 및 강성

구 분	$m(\text{lb} \cdot \text{sec}^2/\text{in})$	$k(\text{lb}/\text{in})$
해석예 1	$m_1=136.$	$k_1=30700.$
	$m_2=66.0$	$k_2=44300.$
해석예 2	$m_1=200.$	$k_1=30864.$
	$m_2=150.$	$k_2=48225.$
	$m_3=100.$	$k_2=83333.$

V. 응답해석결과

그림 5는 본 연구에서 택한 지반운동의 가속도 시간이력곡선을 나타낸 것으로 최대가속도는 315gal (0.32g)이며, 시간간격은 0.02초를 사용하였다.

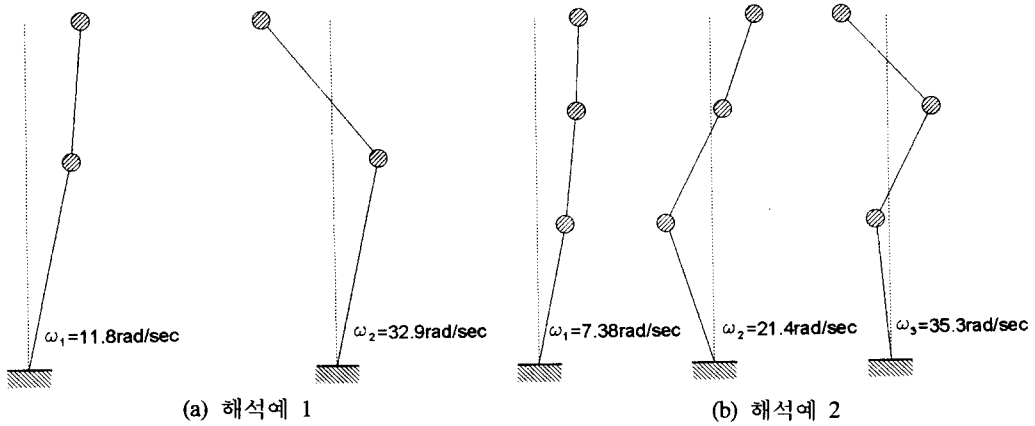


그림 4. 대상구조물의 자유진동형

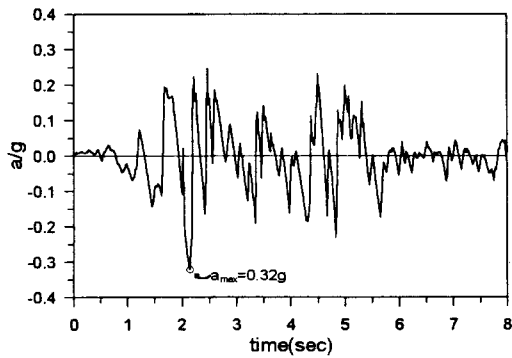


그림 5. 지반운동의 가속도 이력곡선

그림 6 및 그림 7은 최저감쇠율($\zeta=0.02$)을 갖는 경우 비제어시 각층의 상대응답변위 시간 이력곡선을 나타낸 것이다.

그림 8 및 그림 9는 최대감쇠율($\zeta=0.2$)을 갖는 경우 비제어시 각층의 상대응답변위 시간 이력곡선을 나타낸 것이다.

그림 10과 그림 11은 제어시($\zeta=0.02\sim 0.2$) 각층의 상대응답변위를 나타낸 것으로 그림 8과 그림 9에 나타낸 최대감쇠율을 적용한 경우와

유사한 응답곡선을 나타내고 있음을 관찰할 수 있으며, 최대 상대변위 역시 매우 근접하여 제어효과가 우수함을 알 수 있다.

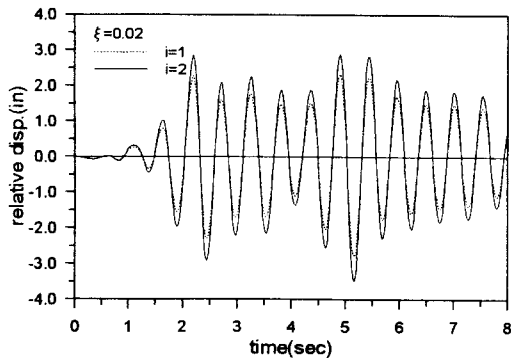


그림 6. 비제어시 상대변위($\zeta=0.02$, 해석예 1)

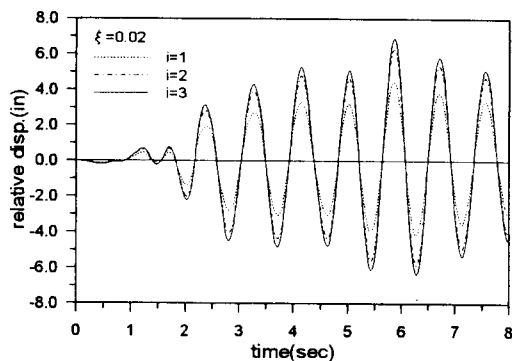


그림 7. 비제어시 상대변위($\zeta=0.02$, 해석예 2)

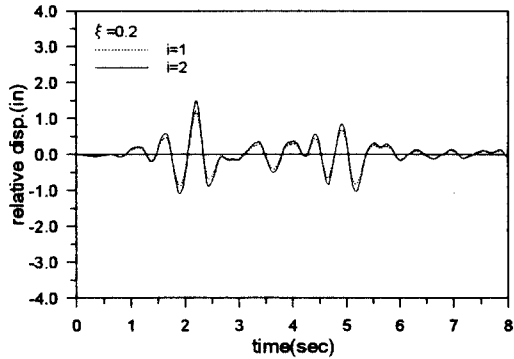


그림 8. 비제어시 상대변위($\xi=0.2$, 해석예 1)

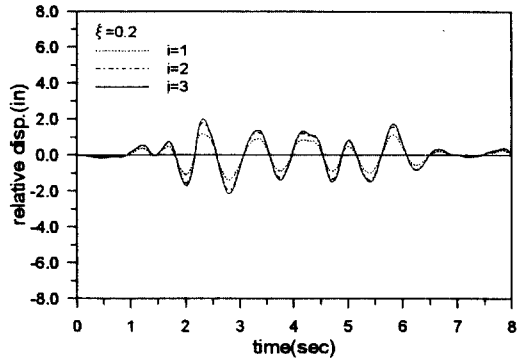


그림 9. 비제어시 상대변위($\xi=0.2$, 해석예 2)

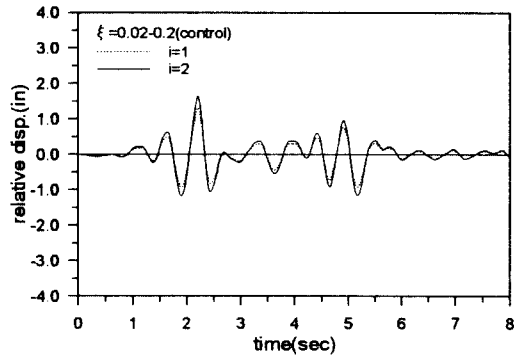


그림 10. 제어시 상대변위(해석예 1)

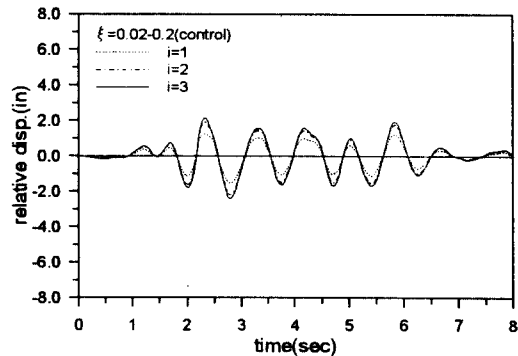


그림 11. 제어시 상대변위(해석예 2)

VI. 결론

본 연구는 지진력을 받는 구조물의 퍼지제어에 관한 연구로서 지반진동에 따른 구조물과 지반변위 사이의 관계를 퍼지제어를 위한 전건부변수로서, 구조물과 지반의 상대변위를 작게 하는데 필요한 감쇠율을 후건부변수로 택하여 퍼지추론을 행하였다. 퍼지추론과정에서 구해진 퍼지제어값은 비퍼지화 방법인 높이법을 이용하여 하나의 제어값으로 산출하였다.

시간별 제어값으로 산출된 감쇠율을 적용하여 2, 3자유도계 구조물의 상대변위를 산출한 결과 우수한 제진효과를 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. 菅野道夫, ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 1989.
2. M.Paz, Structural Dynamics, Theory and Computation, 2nd edition, Van Nostrand Reinhold, 1985.
3. 新宮清志, 福島欣哉, “地震力を受ける回転體シェルのファジィ制御にする研究, 日本ファジィ學會誌, Vol.5, No.3, pp.650-661, 1993.
4. H.Furuta, E.Watanabe, Y.Mikajiri, H.Okanan, M.Kaneyoshi and H.Tanaka, “Application of Fuzzy Set Theory to Structural Vibration Control”, 7th Fuzzy System Symposium, Nagoya, pp.39-42, 1991.