

컨트롤 샘플링 주기가 스위칭 시스템의 결합-분리 횟수에 미치는 영향을 고려한 제어 알고리즘 개발

Development of Control Algorithms Considering the Effect of a Control Sampling Period on the Total Amount of Switching for a Switched System

정진욱¹⁾ · 정 란²⁾

Joung, Jin-Wook · Chung, Lan

국문 요약 >> 최근에 Active interaction control(AIC) 시스템이 준능동 제어 시스템의 하나로 제안되었다. AIC 시스템은 제어 대상 구조물과 보조 구조물로 구성되며, 두 구조물간의 실시간 결합-분리를 통해서 제어 대상 구조물을 제어하게 된다. 구조물간의 결합과 분리를 담당하는 장치의 실시간 변환은 스위칭 제어 알고리즘의 결합-분리 조건식에 의해 제어된다. 기존 스위칭 제어 알고리즘의 경우, 제어 대상 구조물의 응답을 효과적으로 감소시키는 반면 불필요하게 큰 제어력과 과도한 결합-분리 횟수를 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 구조물간의 효율적인 결합-분리 조정을 위해서 스위칭 활성화 영역과 스위칭 비활성화 영역을 분리 표현하였으며, 결합-조건식에 의해 결정되는 스위칭 활성화 영역과 스위칭 비활성화 영역간의 일반적인 관계를 포괄 스위칭 틀을 이용하여 나타냈다. 과도한 결합-분리 횟수와 불필요하게 큰 제어력의 효과적인 감소를 위해서 새로운 스위칭 제어 알고리즘의 결합-분리 조건식은 포괄 스위칭 틀 안에서 설계되었다. 또한 기존 논문에서 사용된 컨트롤 샘플링 주기(Control sampling period)의 역할을 결합-분리 횟수의 관점에서 재해석하였다. 제안된 알고리즘의 효과성과 컨트롤 샘플링 주기의 역할을 검증하기 위해서 단자유도 모델을 이용하여 자유진동에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과, 총 스위칭 횟수를 감소시키기 위한 컨트롤 샘플링 주기의 인위적인 연장은 시스템의 제어 성능 향상에 필요한 구간 변환을 샘플링 주기 사이에서 억제시키는 단점을 가지고 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 알고리즘의 경우, 각각 과도한 결합-분리 횟수와 불필요하게 큰 제어력을 감소시키는데 효과적임을 알 수 있다.

주요어 AIC 시스템, 스위칭 제어 알고리즘, 컨트롤 샘플링 주기, 제어력, 결합-분리 횟수

ABSTRACT >> Recently, the active interaction control (AIC) system was proposed as a semi-active control system. The AIC system consists of a primary structure and an auxiliary structure. The objective of the AIC system is to control the response of the primary structure through engagement and disengagement between the primary and auxiliary structures. Previous switching control algorithms have been shown to be effective in reducing the response of the primary structure. However, they have the main drawback of requiring an excessive engagement-disengagement frequency and high interaction force. In this paper, the regions in which the switching is activated and the regions in which the switching is deactivated are described separately, to effectively determine the engagement or the disengagement. The general relationship between the switching regions and the deactivated switching regions selected according to the engagement-disengagement conditions is described within the newly-developed comprehensive switching framework. The proposed engagement-disengagement conditions are designed within a comprehensive switching framework, to reduce engagement-disengagement frequency and interaction force. Furthermore, the effect of a control sampling period on the AIC system is explained in terms of the engagement-disengagement frequency. The effectiveness of the proposed algorithms and the effect of the control sampling period are considered for a single degree of freedom model under free vibration. It is observed that increasing the duration of stay by using a large control sampling period prevents the AIC system from activating the possible chance of switching. The proposed algorithms are shown to be effective, both in restricting ineffective switching and in reducing interaction force.

Key words AIC system, Switching control algorithms, Control sampling period, Interaction force, Amount of switching

¹⁾ 단국대학교 건축공학과, 박사후연구원

²⁾ 정회원·단국대학교 건축공학과, 교수
(교신저자: lanchung@dku.edu)

본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 5. 28 / 수정일 : 2009. 8. 10. / 게재확정일 : 2009. 8. 10)

1. 서론

임펄스나 마찰현상을 포함하는 시스템은 비선형성과 같

은 복잡한 거동 특성을 가지며, 이러한 복잡한 거동 특성을 가지는 시스템을 효과적으로 모델링하기 위해서 스위칭 시스템이 소개되었다.⁽¹⁾ 스위칭 시스템 모델링 방법은 시스템의 전체 거동 특성을 인위적으로 연속 구간과 불연속점으로 구분하여 불연속점을 기준으로 하는 연속 구간간의 스위칭으로 표현하게 된다. 대표적인 스위칭 시스템은 쿨롬마찰 시스템이 있으며, 마찰현상으로 인한 복잡한 거동 특성을 모델링 하기 위해서 서로 다른 두 개의 운동방정식과 질량의 운동 방향에 따른 운동방정식간의 변환 즉 스위칭을 이용하게 된다.⁽²⁾

진동제어 시스템 중 두 개의 대표적인 스위칭 시스템은 준능동 제어 시스템인 AVS(Active Variable Stiffness) 시스템과 AIC(Active Interaction Control) 시스템이 있다. Kobori, et al.⁽³⁾이 제안한 AVS 시스템은 제어대상 구조물과의 결합-분리가 가능한 가새를 on-off 스위칭 알고리즘을 이용하여 실시간으로 구조물과 결합-분리시킴으로써 구조물의 지진 응답을 효과적으로 감소시켰다. Hayen and Iwan⁽⁴⁾이 제안한 AIC 시스템은 Iwan and Wang⁽⁵⁾ 그리고 Zhang and Iwan⁽⁶⁾에 의해 계속적으로 발전되었으며, 구조물의 지진 응답을 효과적으로 감소시키기 위해서 제어 대상 구조물과 보조 구조물의 결합-분리를 결정하는 다양한 제어 알고리즘을 개발하였다.

Zhang and Iwan⁽⁶⁾은 TID(Tuned Interaction Damping) 시스템을 제안하였으며, 시스템의 효율성을 기존 제어 알고리즘인 AID(Active Interface Damping) 알고리즘과 OCS(Optimal Connection Strategy) 알고리즘을 비교하여 검증하였다. TID 시스템의 경우, 제어성능을 저하시키지 않으면서 보조 구조물의 불필요한 과도한 응답을 효과적으로 감소시켰다. 하지만, 보조 구조물의 응답을 제한시키기 위해서 감쇠장치를 구조물에 설치해야 하는 단점을 가지고 있다. 또한, 제어 대상 구조물의 효과적인 지진응답 제어를 위해 AID 알고리즘이 요구하는 결합-분리 횟수에 상응하는 스위칭 횟수를 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

스위칭 횟수의 증가는 제어 대상 구조물과 보조 구조물의 결합-분리를 담당하는 IE(Interaction Element)의 내구성에 영향을 미치며, 결과적으로 비경제적인 제어 시스템을 구성하게 된다. 무엇보다 기존 제어 알고리즘의 가장 큰 단점은 스위칭을 효율적으로 조정하는데 한계가 있다는 점이다. 기존 결합-분리 조건식은 두 개의 스위칭 영역(예, 결합에서 분리, 분리에서 결합)에 대해 직접적인 제어가 가능하도록 설계되어진 반면, 두 개의 스위칭 비활성화 영역(예, 결합에서 결합, 분리에서 분리)에 대해서는 직접적인 제어가 불가

능한 단점이 있다.

본 논문에서는 위에서 설명한 기존 제어 알고리즘의 문제점을 극복하기 위해서 시스템의 현재 구간에 대한 정보를 제어 알고리즘을 구성하는데 직접적으로 이용하였다. 이러한 정보는 기존 제어 알고리즘 보다 스위칭 비활성화 영역을 직접적으로 제어 할 수 있으며, 제어 알고리즘 설계 시 다양한 접근이 가능하도록 할 수 있다. 새로운 제어 알고리즘의 개발을 위해서 포괄적 스위칭 틀이 여기서 제안되었으며, 제어 성능에 영향을 미치지 않는 불필요한 스위칭 횟수와 제어력을 효과적으로 감소시키기 위해서 새로운 제어 알고리즘을 포괄적 스위칭 틀 안에서 설계하였다. 또한, 기존 논문에서 사용된 컨트롤 샘플링 주기(Control Sampling Period)의 역할을 스위칭 횟수 관점에서 재해석 하였으며, 그 효과를 제안된 알고리즘에 적용하여 기존 제어 알고리즘인 AID 알고리즘과 비교 분석하였다. 사용된 수치해석 모델은 단자유도 건물이며, 자유진동에 대하여 수치해석을 수행하였다.

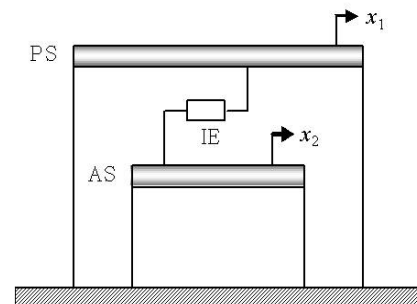
2. AIC 시스템⁽⁶⁾

2.1 AIC 시스템 모델

AIC 시스템은 제어 대상 구조물 PS(Primary Structure), 보조 구조물 AS(Auxiliary Structure), 그리고 제어 대상 구조물과 보조 구조물의 결합 및 분리를 담당하는 IE (Interaction Element)로 구성된다. 그림 1은 AIC 시스템을 나타낸다.

일반적으로, AIC 시스템은 AS가 PS와 비교하여 높은 강성과 적은 질량을 가지게 설계된다. 결합 및 분리의 상태는 제어 알고리즘에 의해 결정되며, IE는 두 가지 종류가 제안되었다. Type 1은 구조물간의 강체결합을 제공하며, Type 2는 쿨롬 마찰 감쇠 장치와 비슷한 역할을 수행한다.

AIC 시스템의 동적 모델은 특정 구간에서 선형화된 ON



〈그림 1〉 AIC 시스템

과 OFF 두 구간으로 나뉘며, ON과 OFF는 각각 결합과 분리 상태를 나타낸다. 구간 ON에서는 PS와 AS의 강제결합으로 인해 제어력이 발생하며, 구간 OFF에서는 PS와 AS가 서로 분리 되어 자유롭게 움직이므로 제어력이 발생하지 않는다.

지진하중이 PS와 AS에 가하여 졌을 때, Type 1 IE에 대한 AIC 시스템의 운동방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 &= -u_{q(t)} - m_1 \ddot{x}_g, \quad q(t) \in ON, OFF \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 &= u_{q(t)} - m_2 \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 제어력 $u_{q(t)}$ 는 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{cases} u_{ON} = \frac{m_1 k_2 x_2(t) - m_2 k_1 x_1(t)}{m_1 + m_2} + \frac{m_1 c_2 - m_2 c_1}{m_1 + m_2} \dot{x}_1(t) \\ u_{OFF} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, x_1 과 x_2 는 각각 PS와 AS의 지반에 대한 상대변위이며, m_1, c_1, k_1 과 m_2, c_2, k_2 는 각각 PS와 AS의 질량, 감쇠, 강성이다. \ddot{x}_g 는 지반가속도이며, $u_{q(t)}$ 는 PS와 AS가 결합 또는 분리 시 발생하는 제어력이다. PS와 AS에 작용하는 제어력의 크기는 같고 방향은 반대이다. 본 논문에서는 IE가 제어 알고리즘으로부터 결정되는 스위칭 시그널 $q(t)$ 에 대해 즉각적으로 반응한다고 가정한다.

2.2 제어 방법

PS의 응답을 효과적으로 감소시키기 위해서, 스위칭 시그널 $q(t)$ 는 시간에 대하여 일정한 간격을 가지는 매 스위칭 시간마다 제어 알고리즘에 의해 조정된다. 선택된 시그널 $q(t)$ 는 다음 스위칭 시간까지 일정 시간 간격 동안 선택된 구간에 머물게 되며, 스위칭 시간 간격 사이에서는 스위칭이 일어날 수 없다. 앞에서 설명한 일정하게 나뉜 스위칭 시간 간격을 컨트롤 샘플링 주기라 칭하며, $T = t_{k+1} - t_k$ 로 표시한다.

AID 알고리즘의 결합 조건식은 외부하중에 의해 야기되는 구조물의 진동으로 인한 에너지의 증가를 감소시키는데 있다. 결합 조건식, $u(t)\dot{x}_1(t)|_{t=kT} \geq 0$,은 컨트롤 샘플링 주기 T 에 대하여 구간 ON에서 PS 에너지의 시간에 대한 미분값을 최소화 시키는 조건으로부터 얻어진다. 계산된 제어력 값 $u(t)$ 는 PS와 AS가 결합상태라는 가정 하에 얻어진다. 분리 조건식, $u(t)\dot{x}_1(t)|_{t=kT} < 0$, 은 결합 조건식의 역의 관계로 성립된다.

3. 포괄 스위칭 틀 제안

3.1 일반 스위칭 틀

AIC 시스템의 전체 거동은 ON에서 OFF, ON에서 ON, OFF에서 ON, 그리고 OFF에서 OFF로 나뉜다. 각 구간 $q(t)$ 에서 제어 알고리즘에 의해 결정되는 AIC 시스템의 전체 거동은 스위칭이 활성화 되는 영역인 스위칭 영역과 시스템을 현재 상태에서 계속 머무르게 하는 스위칭 비활성화 영역으로 표현될 수 있다. 표 1은 제어 알고리즘에 의해 결정되는 AIC 시스템의 전체 거동을 나타내는 일반 스위칭 틀이다.

기존에 제안된 AID 알고리즘의 결합-분리 조건식은 표 1의 일반 스위칭 틀 안에서 표현 될 수 있으며, 분리 비활성화 영역과 결합 비활성화 영역을 결정하는 스위칭 조건식이 일반 스위칭 틀 안에서 기존의 결합-분리 조건식에 의해 분리 표현될 수 있다. 표 2는 AID 알고리즘에 의해 결정되는 AIC 시스템의 전체 거동을 나타내는 일반 스위칭 틀이다.

표 2로부터 AID 알고리즘에 의해 결정되는 AIC 시스템의 전체 거동은 다음과 같이 설명할 수 있다. AIC 시스템이 구간 ON에 있을 때, 제어 알고리즘은 AIC 시스템을 구간 OFF (예, 분리 조건식이 만족할 때)로 변환 시킬 것인지 또는 구간 ON (예, 결합 조건식이 만족할 때)을 계속 유지시킬 것인지 결정한다. 반대로 AIC 시스템이 구간 OFF에 있을 때, 제어 알고리즘은 AIC 시스템을 구간 ON (예, 결합 조건식이 만족할 때)으로 변환 시킬 것인지 또는 구간 OFF (예, 분리 조건식이 만족할 때)로 계속 유지시킬 것인지 결정한다.

〈표 1〉 AIC 시스템의 일반 스위칭 틀

스위칭 결정	영역
$q(t) = ON$	
분리 활성화	$ON \Rightarrow OFF$
분리 비활성화	$ON \Rightarrow ON$
$q(t) = OFF$	
결합 활성화	$OFF \Rightarrow ON$
결합 비활성화	$OFF \Rightarrow OFF$

〈표 2〉 일반 스위칭 틀 안에서의 AID 알고리즘

스위칭 결정	스위칭 조건식
$q(t) = ON$	
분리 활성화	$u(kT)\dot{x}_1(kT) < 0$
분리 비활성화	$u(kT)\dot{x}_1(kT) \geq 0$
$q(t) = OFF$	
결합 활성화	$u(kT)\dot{x}_1(kT) \geq 0$
결합 비활성화	$u(kT)\dot{x}_1(kT) < 0$

〈표 3〉 AIC 시스템의 포괄 스위칭 틀

스위칭 결정	스위칭 조건식
$q(t) = ON$	
분리 활성화	분리 조건식
분리 비활성화	분리 조건식의 역
$q(t) = OFF$	
결합 활성화	결합 조건식
결합 비활성화	결합 조건식의 역

위에서 설명한 것과 같이, AID 알고리즘에 의해 결정되는 스위칭 영역과 스위칭 비활성화 영역은 현재 구간에서의 정보 $q(t)$ 와 상관없이 오로지 두 개의 결합-분리 조건식에 의해 결정된다. 그러므로 AIC 시스템의 전체 거동은 두 개의 결합-분리 조건식 (예, $u(kT)x_1(kT) \geq 0$ 와 $u(kT)x_1(kT) < 0$)에 의해 결정되는 두 영역으로 구분된다.

3.2 포괄 스위칭 틀

제어 알고리즘에 결정되는 스위칭 영역과 스위칭 비활성화 영역의 관계는 표 2로부터 얻어질 수 있으며, 각 구간에서의 비활성화 영역을 결정하는 스위칭 조건식은 활성화 영역을 결정하는 스위칭 조건식과 역의 관계가 성립한다. 표 3은 각 구간에서의 활성화 영역을 결정하는 스위칭 조건식과 비활성화 영역을 결정하는 스위칭 조건식의 상관관계를 나타낸 포괄 스위칭 틀이다. AID 알고리즘의 결합-분리 조건식 관계와 같이 제어 알고리즘의 결합 조건식과 분리 조건식이 역의 관계가 성립하면, 그로 인해 생성되는 활성화 영역과 비활성화 영역을 결정하는 스위칭 조건식을 포괄 스위칭 틀 안에서 표현할 수 있다.

4. 제어 알고리즘의 제안

포괄 스위칭 틀을 이용하여 제어 알고리즘의 결합-분리 조건식을 설계하였다. 제안된 알고리즘의 결합-분리 조건식은 AID 알고리즘의 결합-분리 조건식을 기본으로 하며, 기본 조건식에 새로운 조건식을 그리고(\cap)나 또는(\cup)의 조건을 결합하여 사용함으로써 원하는 제어성능을 구현하도록 하였다. 제안된 알고리즘은 OSS(Optimally Selected Switching), FLC(Fixed Limit-value Constraint), 그리고 ALC(Adjustable Limit-value Constraint)이다.

4.1 OSS (Optimally Selected Switching) 알고리즘

OSS 알고리즘의 새로운 조건식은 스위칭 시스템의 안정

〈표 4〉 OSS 알고리즘의 스위칭 조건식

스위칭 결정	스위칭 조건식
$q(t) = ON$	
분리 활성화	$u(kT)x_1(kT) < 0 \cap V_{ON}(kT) - V_{ON}((k-1)T) \geq -p \ Z((k-1)T) \ ^2$
분리 비활성화	$u(kT)x_1(kT) \geq 0 \cup V_{ON}(kT) - V_{ON}((k-1)T) < -p \ Z((k-1)T) \ ^2$
$q(t) = OFF$	
결합 활성화	$u(kT)x_1(kT) \geq 0 \cap V_{OFF}(kT) - V_{OFF}((k-1)T) \geq -p \ Z((k-1)T) \ ^2$
결합 비활성화	$u(kT)x_1(kT) < 0 \cup V_{OFF}(kT) - V_{OFF}((k-1)T) < -p \ Z((k-1)T) \ ^2$

성을 확인하는 방법 중의 하나인 Multiple Lyapunov functions⁽⁷⁾에 근간한다. 다음 명제 1은 Lyapunov 함수를 이용한 스위칭 시스템의 안정성을 만족시키는 조건이다.⁽⁸⁾

명제 1 $i < j$ 이고 $q(t_i) = q(t_j)$ 인 스위칭 시간 t_i 와 t_j 에 대하여 상수 $p > 0$ 이 존재한다고 가정할 때

$$V_{q(t_j)}(x(t_{j+1})) - V_{q(t_i)}(x(t_{i+1})) \leq -p \| x(t_{i+1}) \|^2$$

위의 Multiple Lyapunov functions을 이용하여 구성된 OSS 알고리즘의 스위칭 조건식이 포괄 스위칭 틀 안에서 표 4에 나타나 있다. 결합-분리 조건식이 기존 AID 알고리즘과 같이 서로 역의 관계가 아니므로 AIC 시스템의 전체 거동은 네 개의 서로 다른 영역으로 나뉘게 된다. OSS 알고리즘은 각 구간에서 Lyapunov 함수 $V_{q(t)}$ 의 차로 나타나는 Lyapunov 함수의 감쇠율을 양의 값을 가지는 상수 p 에 의해 제한함으로써 AIC 시스템의 거동을 변화시킬 수 있다.

PS와 AS의 상태벡터 $z(t) = \{x_1 \ x_2 \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2\}^T$ 로 구성되는 각 구간에서의 V_{OFF} 와 V_{ON} 은 다음의 과정을 통하여 얻을 수 있다. 식 (1)의 PS와 AS의 미분방정식을 상태공간방정식으로 구성하면 다음 식 (3)과 같다.

$$\dot{z}(t) = A_q z(t) \tag{3}$$

구간 OFF에서의 A_{OFF} 는 다음 식 (4), (5)와 같다.

$$A_{OFF} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

구간 ON에서의 A_{ON} 은 다음 식 (6), (7)과 같다.

$$A_{ON} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K_{ON} & -M^{-1}C_{ON} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C_{ON} = \begin{bmatrix} c_1 + \frac{m_1c_2 - m_2c_1}{m_1 + m_2} & 0 \\ -\frac{m_1c_2 - m_2c_1}{m_1 + m_2} & c_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K_{ON} = \begin{bmatrix} k_1 - \frac{m_2k_1}{m_1 + m_2} & \frac{m_1k_2}{m_1 + m_2} \\ \frac{m_2k_1}{m_1 + m_2} & k_2 - \frac{m_1k_2}{m_1 + m_2} \end{bmatrix}$$

여기서, 행렬 C_{ON} 과 K_{ON} 은 제어력 u_{ON} 의 상태벡터 $z(t)$ 에 대한 표현을 포함한다.

각 구간 ON 과 OFF 에 대한 Lyapunov 함수는 다음 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{OFF}(z(t)) &= z(t)^T P_{OFF} z(t) \\ V_{ON}(z(t)) &= z(t)^T P_{ON} z(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, 행렬 P_{OFF} 와 P_{ON} 은 주어진 행렬 Q_{OFF} 와 Q_{ON} 에 대하여 다음 방정식 식 (9)를 만족하는 값이다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned} A_{OFF}^T P_{OFF} + P_{OFF} A_{OFF} &= -Q_{OFF} \\ A_{ON}^T P_{ON} + P_{ON} A_{ON} &= -Q_{ON} \end{aligned} \quad (9)$$

행렬 Q_{OFF} 와 Q_{ON} 은 행렬 P_{OFF} 와 P_{ON} 이 각각 positive definite symmetric 그리고 positive semi-definite symmetric 이 되도록 설계하였으며, 이 때 행렬 Q_{OFF} 와 Q_{ON} 은 다음 식 (10)과 같다.

$$Q_{OFF} = R_{OFF} \begin{bmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix}; Q_{ON} = R_{ON} \begin{bmatrix} 0000 \\ 0000 \\ 0011 \\ 0011 \end{bmatrix} \quad (10)$$

자유진동 수치해석을 위해서 양의 값을 가지는 상수 R_{OFF} 와 R_{ON} 은 각각 20과 1/500로 선택하였다. Lyapunov 함수로 구성되는 새로운 조건식을 설계하는데 있어서 R_{OFF} 의 값을 R_{ON} 의 값 보다 크게 선택한 이유는 튜닝 변수 p 가 분리 조건식의 새로운 조건식을 항상 참이 되도록 설계함으로써 결합 조건식에만 영향을 미치도록 하기 위함이다. 즉, 새로운 조건식은 항상 참이 되게 설계되었으므로 분리 조건식은 새로운 조건식에 의해 전혀 영향을 받지 않으며, 항상 기본 조건식의 참과 거짓에 의해 결정된다.

〈표 5〉 FLC 알고리즘의 스위칭 조건식

스위칭 결정	스위칭 조건식
$q(t) = ON$	
분리 활성화	$u(kT)x_1(kT) < 0 \cup u(kT) > u_{max}$
분리 비활성화	$u(kT)x_1(kT) \geq 0 \cap u(kT) \leq u_{max}$
$q(t) = OFF$	
결합 활성화	$u(kT)x_1(kT) \geq 0 \cap u(kT) \leq u_{max}$
결합 비활성화	$u(kT)x_1(kT) < 0 \cup u(kT) > u_{max}$

결합 비활성화 영역을 결정하는 스위칭 조건식은 기본 조건식과 상관없이 새로운 조건식만 만족하면 AIC 시스템이 항상 구간 OFF 에 머물도록 해준다. 기본 조건식에 또는 (U)의 조건으로 결합된 새로운 조건식이 만족하면, 기본 조건식이 만족하지 않더라도 AIC 시스템이 현재 구간 OFF 에서 머무는 것이 가능하다.

4.2 FLC (Fixed Limit-value Constraint) 알고리즘

FLC 알고리즘은 새로운 조건식을 이용하여 제어력 $u(t)$ 가 최대제어력 u_{max} 를 넘지 못하도록 설계한다. 새로운 조건식은 상수 u_{max} 로 지정된 제어력에 대한 경계를 설정함으로써 제어력 $u(t)$ 가 항상 그 경계 내에 위치하도록 한다.

표 5는 FLC 알고리즘의 스위칭 조건식을 나타낸다. AID 알고리즘과 같이 결합 조건식과 분리 조건식이 서로 역의 관계가 성립하므로 FLC 알고리즘의 결합-분리 조건식은 AIC의 거동을 두개의 영역으로 나눈다. FLC 알고리즘은 양의 값을 가지는 상수 u_{max} 를 조정함으로써 AIC의 거동을 변화시킬 수 있다.

4.3 ALC (Adjustable Limit-value Constraint) 알고리즘

ALC 알고리즘은 비선형 시스템의 제어에 효과적임이 입증된 슬라이딩 모드 제어 알고리즘⁽¹⁰⁾과 Dyke, et al.⁽¹¹⁾ 등에 의해 제안된 Clipped-optimal 제어 알고리즘을 이용한다. ALC 알고리즘은 FLC 알고리즘과 같이 제어력 $u(t)$ 를 제한함으로써 구조물을 제어하게 되지만, 다른 점은 슬라이딩 모드 제어 알고리즘으로부터 얻은 기준 제어력 $u_c(t)$ 가 고정값 u_{max} 와 달리 시간에 대한 함수로 구성된다. 기준 제어력 $u_c(t)$ 는 다음의 과정을 통하여 얻을 수 있다.⁽¹⁰⁾

다음 식 (11)은 기준 제어력 $u_c(t)$ 가 PS의 제어력으로 작용할 때의 운동방정식을 나타낸다.

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = -u_c(t) \quad (11)$$

양의 상수값 λ 를 가지는 슬라이딩 표면 $S(t) = 0$ 을 다음 식 (12)와 같이 정의한다.

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) x_1(t) \quad (12)$$

시스템이 슬라이딩 표면에 머무를 때, PS의 슬라이딩 모드 거동 (예, $\dot{S}(t) = 0$)은 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= \ddot{x}_1(t) + \lambda \dot{x}_1(t) \\ &= -\frac{c_1}{m_1} \dot{x}_1(t) - \frac{k_1}{m_1} x_1(t) - \frac{1}{m_1} u_c(t) + \lambda \dot{x}_1(t) \end{aligned} \quad (13)$$

PS의 상태변수를 슬라이딩 표면 $S(t)$ 로 보내는 슬라이딩 조건은 다음 식 (14)와 같다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2 \leq -\eta |S| \quad (14)$$

위의 슬라이딩 조건을 만족하는 제어력 $u_c(t)$ 는 다음 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_c(t) &= -[c_1 \dot{x}_1(t) + k_1 x_1(t) \\ &\quad - m_1 \lambda \dot{x}_1(t) - \eta m_1 \text{sgn}(S(t))] \end{aligned} \quad (15)$$

ALC 알고리즘의 새로운 조건식으로 사용되는 Clipped-optimal 제어 알고리즘은 제어력 $u(t)$ 와 기준 제어력 $u_c(t)$ 의 정보를 이용하여 기존 조건식과 함께 AIC 시스템의 결합-분리를 결정하게 된다. 표 6은 ALC 알고리즘의 스위칭 조건식을 나타낸다. 제어력 $u(t)$ 와 기준 제어력 $u_c(t)$ 의 값

〈표 6〉 ALC 알고리즘의 스위칭 조건식

스위칭 결정	스위칭 조건식
$q(t) = ON$	
분리 활성화	$u(kT) \dot{x}_1(kT) < 0$ $\cup (u_c(kT) - u(kT))u(kT) < 0$
분리 비활성화	$u(kT) \dot{x}_1(kT) \geq 0$ $\cap (u_c(kT) - u(kT))u(kT) \geq 0$
$q(t) = OFF$	
결합 활성화	$u(kT) \dot{x}_1(kT) \geq 0$ $\cap (u_c(kT) - u(kT))u(kT) > 0$
결합 비활성화	$u(kT) \dot{x}_1(kT) < 0$ $\cup (u_c(kT) - u(kT))u(kT) \leq 0$

이 값을 경우가 거의 없기 때문에 결합 조건식과 분리 조건식은 거의 역의 관계가 성립한다. 따라서 AIC 시스템의 거동은 ALC 알고리즘에 의해서 두개의 영역으로 구분된다. ALC 알고리즘은 식 (15)에 나타나 있는 양의 값을 가지는 상수 η 와 λ 를 조정함으로써 AIC의 거동을 변화시킬 수 있다.

5. 자유진동

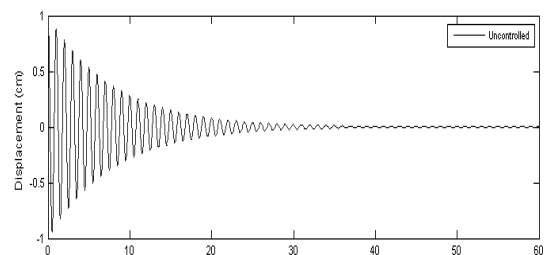
컨트롤 샘플링 주기의 역할과 제안된 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해서 자유진동에 대한 수치해석을 수행하였다. PS의 고유주기와 감쇠비는 각각 1s와 2%로 설정하였다. PS의 질량 $m_1 = 1kg$ 으로 가정하였다. AS 구조물 특성은 다음 변수에 의해 지정된다.

$$\alpha = \frac{k_2}{k_1} \quad \psi = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad \gamma = \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \quad (16)$$

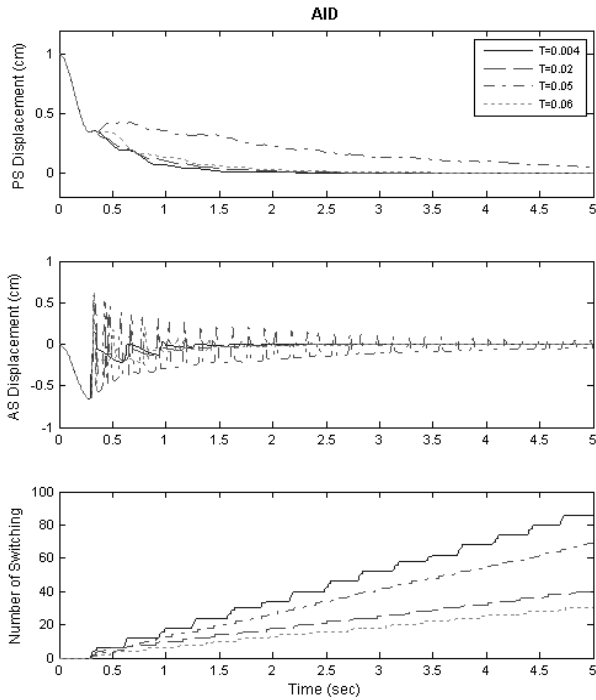
변수 α , ψ , γ 는 각각 PS에 대한 AS의 강성 비율, 고유주기 비율, 그리고 감쇠비 비율을 나타낸다. 각각에 대한 값은 2, 20, 그리고 1로 결정하였다.⁽⁶⁾ 컨트롤 샘플링 주기가 AIC 시스템의 제어성능에 미치는 영향을 파악하기 위해서 Zhang and Iwan⁽⁶⁾이 사용한 컨트롤 샘플링 주기 0.004초 외에 서로 다른 세 가지의 컨트롤 샘플링 주기를 사용하였다. 수치해석에 사용된 값은 0.004초, 0.02초, 0.05초, 그리고 0.06초이다. PS와 AS의 초기조건은 $x_{10} = 1cm$, $x_{20} = 0$ 그리고 $\dot{x}_{10} = \dot{x}_{20} = 0$ 로 설정하였다. 그림 2는 비제어시 초기 60초 동안의 PS의 변위응답을 나타낸다.

5.1 AID 알고리즘

여기서는 AID 알고리즘에 대한 컨트롤 샘플링 주기의 역할을 알아보려 한다. 그림 3은 각 컨트롤 샘플링 주기에 대한 PS, AS의 변위응답과 시간에 따라 누적된 스위칭 횟수를 나타낸다. 그림 3에서 보는 바와 같이 PS의 변위는 컨트롤 샘플링 주기 0.05초를 제외한 모든 주기에 대해서 평



〈그림 2〉 비제어시 PS 변위응답

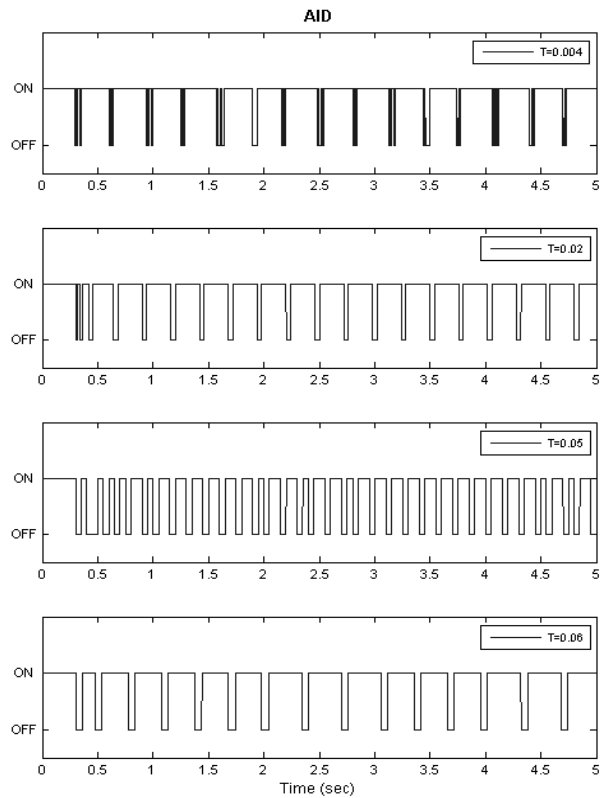


〈그림 3〉 AID 알고리즘의 PS, AS 변위응답과 누적된 스위칭 횟수

형점 0으로 5초 이내에 만족스럽게 수렴하는 것을 알 수 있다. 누적 스위칭 횟수는 컨트롤 샘플링 주기 0.004초에 대하여 특정 구간에서 가장 급격하게 증가하며, 이러한 특정 구간에서의 스위칭 횟수의 급격한 증가는 주어진 시간 내에서의 총 스위칭 횟수를 과도하게 증가시키게 된다. 컨트롤 샘플링 주기 0.004초에서 발생하는 특정 구간에서의 누적 스위칭 횟수의 증가는 그림 4에서 보는 바와 같이 AIC 시스템이 구간 ON에서 OFF로의 변환이 시작 되면서 두 구간간의 불필요한 반복 변환 때문에 기인한다. 그림 4는 각 컨트롤 샘플링 주기에 상응하는 결합-분리 스위칭 시그널을 나타낸다.

컨트롤 샘플링 주기 0.004초에서 발생하는 두 구간 사이의 불필요한 반복 변환을 억제하는 가장 쉬운 방법은 그림 3에서 보는 바와 같이 컨트롤 샘플링 주기를 인위적으로 연장하는 것이다. 선택된 구간 ON이나 OFF에서의 지속시간을 인위적으로 늘려주기 위해서 컨트롤 샘플링 주기를 0.02초, 0.05초, 0.06초로 연장하면 0.004초에서 발생하는 빠른 속도의 반복 변환을 억제할 수 있다. 컨트롤 샘플링 주기 연장으로 인해 0.004초에서 나타나는 가파른 기울기가 현저하게 줄어드는 것을 그림 3으로부터 알 수 있다.

컨트롤 샘플링 주기의 인위적인 연장은 ON-OFF 구간 사이의 반복 변환을 억제시킴으로써 총 스위칭 횟수를 감소시킬 수 있는 반면에, 시스템의 제어성능 향상에 필요한 구간 변환을 막는 단점을 가지고 있다. 0.05초의 컨트롤 샘플



〈그림 4〉 컨트롤 샘플링 주기에 따른 AID 알고리즘의 결합-분리 스위칭 시그널

링 주기에 대한 PS의 변위 수렴 속도가 다른 컨트롤 샘플링 주기에 대한 PS의 변위 수렴 속도 보다 매우 느린 것을 그림 3으로부터 알 수 있다. 또한, 5초 동안 누적된 총 스위칭 횟수가 0.05초 보다 짧은 주기인 0.02초에서의 총 스위칭 횟수 보다 많음을 알 수 있다.

컨트롤 샘플링 주기 0.05초의 경우처럼, 잘못 선택된 컨트롤 샘플링 주기는 스위칭을 선택하는 각 스위칭 시간에서의 결합이나 분리 조건이 만족된다 하더라도 시스템의 제어성능에 악영향을 미칠 수 있다. 그러한 이유는 현재의 스위칭 시그널이 과거에 구성된 스위칭 시그널에 의해 크게 영향을 받기 때문이다. 제어성능 향상에 도움이 되지 않는 스위칭 시그널의 구성은 아무리 각 스위칭 시간에서의 스위칭 조건이 만족한다 하더라도 시간에 대해 계속적으로 그 영향이 축적되므로 결국 시스템의 제어성능을 악화시키게 된다.

이와 같이 컨트롤 샘플링 주기 T 를 불필요한 스위칭 횟수의 감소를 위한 튜닝 변수로 사용하는 것은 바람직하지 않다. 컨트롤 샘플링 주기를 연장하는 것은 스위칭 시간 간격 사이에서 시스템의 제어성능을 향상시키기 위해 필요로 하는 스위칭을 제어성능과는 상관없이 억제시킴으로 효과적인 제어방법이 되지 못한다. 특히, 지진과 같은 짧은 시간 안에 진폭의 변화가 큰 하중의 경우 제어적 측면에서 컨트

를 샘플링 주기를 연장함으로써 제어성능 향상에 필요한 스위칭을 놓치는 것은 바람직하지 않다.

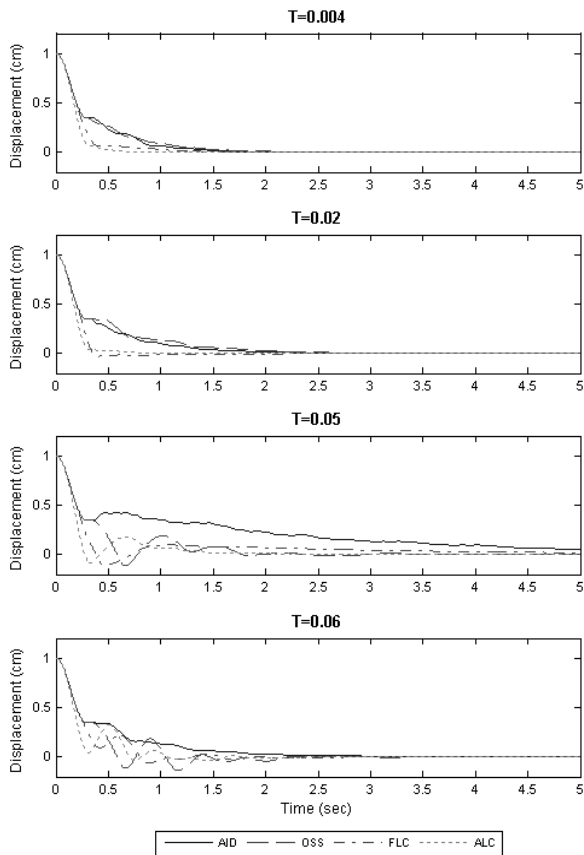
5.2 제안된 알고리즘

제안된 알고리즘 각각에 대한 튜닝 변수 값은 표 7에 나타나 있다. 각 컨트롤 샘플링 주기에 대한 AIC 시스템의 제어성능 악화를 방지하기 위해서 튜닝 변수 값은 컨트롤 샘플링 주기에 따라 선정하였다. OSS 알고리즘의 경우, Q_{OFF} 와 Q_{ON} 은 변화시키지 않고 튜닝 변수 p 를 각 컨트롤 샘플링 주기에 따라 선정하였다.

그림 5는 각 컨트롤 샘플링 주기에서의 제안된 알고리즘 OSS, FLC, 그리고 ALC 알고리즘에 대한 PS의 변위응답을 AID 알고리즘에 의한 PS 변위응답과 비교한 그림이다. 그림 5로부터 각 제어 알고리즘에 따른 PS의 변위응답이 컨

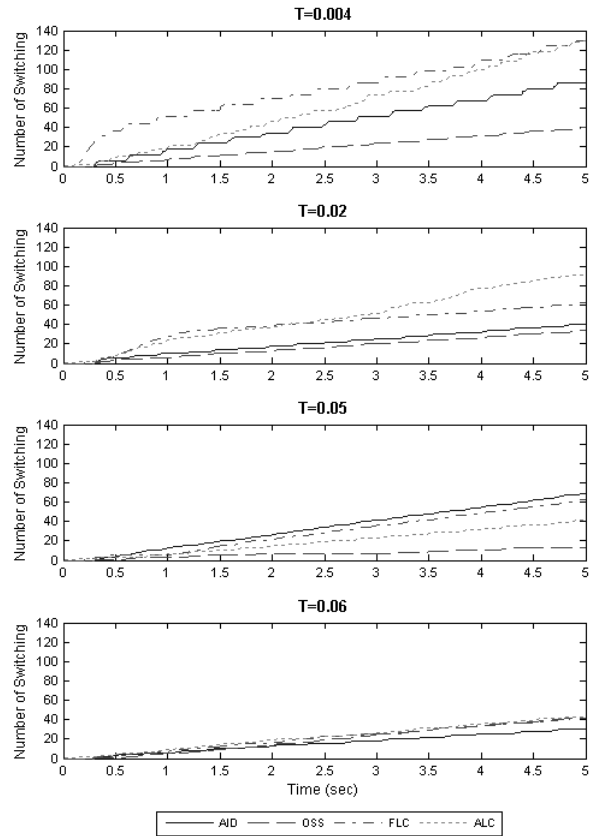
〈표 7〉 제안된 알고리즘의 튜닝변수

샘플링 주기	알고리즘 튜닝변수		
	OSS	FLC	ALC
0.004초	$p = 0.09$	$u_{max} = 0.25$	
0.02초	$p = 0.2$		$\lambda = 5$
0.05초	$p = 200$	$u_{max} = 0.4$	$\eta = 0.5$
0.06초	$p = 1$		

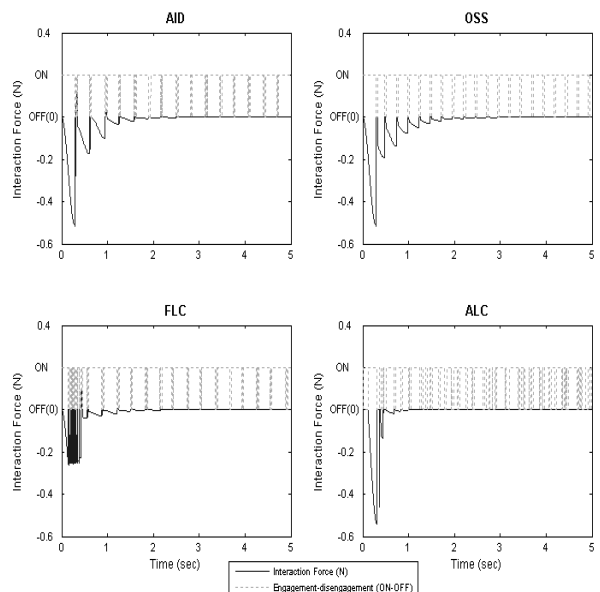


〈그림 5〉 컨트롤 샘플링 주기에 따른 AID와 제안된 알고리즘의 PS 변위응답

트롤 샘플링 주기 0.05초에서의 AID와 FLC 알고리즘을 제외하고 모두 평형점 0으로 만족스럽게 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 6은 각 컨트롤 샘플링 주기에 상응하는 시간에 따른 누적된 스위칭 횟수를 나타낸다. 그림 7은 0.004초에서의 시간에 따른 제어력 변화를 나타낸다.



〈그림 6〉 컨트롤 샘플링 주기에 따른 AID와 제안된 알고리즘의 누적된 스위칭 횟수



〈그림 7〉 컨트롤 샘플링 주기 0.004초에서의 AID와 제안된 알고리즘의 결합-분리 스위칭 시그널 및 제어력

〈표 8〉 AID와 제안된 알고리즘의 총 스위칭 횟수

샘플링 주기	총 스위칭 횟수			
	AID	OSS	FLC	ALC
0.004초	86	40	130	131
0.02초	40	34	62	92
0.05초	69	13	62	41
0.06초	30	42	42	43

OSS 알고리즘은 컨트롤 샘플링 주기를 인위적으로 연장시키지 않고 0.004초와 같은 짧은 컨트롤 샘플링 주기 하에서 AID 알고리즘에 의해 발생하는 불필요한 반복변환을 효과적으로 억제할 수 있다. 특히, 특정구간 OFF에서의 지속 시간을 튜닝변수 p 값을 조정해 인위적으로 연장시킴으로써 AID 알고리즘으로 인해 발생하는 불필요한 반복변환을 억제시켜 준다. 결과적으로 구간 ON에서 OFF로 변환이 시작되면서 발생하는 반복변환을 억제시켜줌으로써 AIC 시스템의 총 스위칭 횟수를 크게 감소시켜 줄 수 있다. 5초 동안 AID 알고리즘으로 인한 총 스위칭 횟수는 86회인 반면, OSS 알고리즘으로 인한 총 스위칭 횟수는 53%가 줄어든 40회이다. 또한, OSS 알고리즘은 튜닝 변수 p 값을 조절함으로써 컨트롤 샘플링 주기 0.05초에서 AIC 시스템의 제어 성능을 향상시킴을 그림 5로부터 알 수 있다.

FLC와 ALC 알고리즘은 그림 5에서 보는 바와 같이 다른 알고리즘에 비해서 0.004초에서의 PS 변위의 수렴속도가 매우 빠른 것을 알 수 있다. 하지만, FLC와 ALC 알고리즘 각각에 의한 총 스위칭 횟수는 AID 알고리즘으로 인한 총 스위칭 횟수에 비해 각각 51%, 52% 증가한 130회, 131회이다. 특히, FLC 알고리즘의 경우 총 스위칭 횟수의 증가는 제어력을 AID 알고리즘에 의해 발생하는 제어력의 50% 값인 $u_{max} = 0.25$ 경계 내에 위치시키게 하기 위해 요구되는 초기 0.5초 내에서의 빠른 변화 때문임을 그림 7로부터 알 수 있다. ALC 알고리즘의 경우, 컨트롤 샘플링 주기에 따른 튜닝 변수의 변화 없이 한 가지 튜닝 변수의 사용으로 모든 컨트롤 샘플링 주기에 대해서 효과적인 제어 성능을 발휘함을 알 수 있다. 표 8은 각 컨트롤 샘플링 주기에 대한 5초 동안의 총 스위칭 횟수를 정리한 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 효율적인 스위칭 조절이 어려운 기존 제어 알고리즘 설계의 단점을 보완하기 위해 현재 구간에 대한 정보를 제어 알고리즘을 구성하는데 직접적으로 이용하였다. 제어 알고리즘 구성 시 현재 구간에 대한 정보의 사용은

두 개의 스위칭 비활성화 영역에 대한 직접적인 제어가 가능하도록 하였으며, 제어 알고리즘에 의해 결정되는 스위칭 영역과 스위칭 비활성화 영역의 관계를 새로 개발된 포괄 스위칭 틀을 이용하여 얻을 수 있었다.

AIC 시스템 제어 시 불필요한 스위칭 횟수의 증가를 억제하기 위해 컨트롤 샘플링 주기를 연장하는 방법에 대한 타당성 검토가 수행되었다. 컨트롤 샘플링 주기의 인위적인 연장은 주어진 시간 내에서의 총 스위칭 횟수를 감소시킬 수 있는 장점이 있는 반면에, 시스템의 제어 성능 향상에 필요한 구간 변환을 컨트롤 샘플링 주기 사이에서 억제시키는 단점을 가지고 있음을 확인하였다. 특히, 지진과 같은 진폭의 변화가 큰 외부하중이 작용할 경우 컨트롤 샘플링 주기를 연장함으로써 놓치게 되는 스위칭은 시스템의 제어 성능을 저하시킬 수 있는 단점을 가지고 있다.

제어 성능 향상에 필요한 스위칭을 놓치지 않기 위해 0.004초와 같은 조밀한 간격을 가지는 컨트롤 샘플링 주기를 사용하면서, 동시에 불필요한 스위칭 횟수를 감소시킬 수 있는 OSS 알고리즘을 제안하였다. OSS 알고리즘의 경우, AIC 시스템의 제어 성능을 저하시키지 않으면서 효과적으로 스위칭 횟수를 감소시킴을 알 수 있었다. 하지만, 단순한 스위칭 조건식으로 구성되는 기존 AID 알고리즘과 달리 효과적인 스위칭 횟수 조절을 위해 Lyapunov함수와 튜닝변수를 선정해야하는 단점을 가지고 있다. 제안된 FLC 알고리즘은 제어력을 특정 경계 u_{max} 내에 제한시킬 수 있는 장점이 있는 반면, 이로 인해 스위칭 횟수가 급격하게 증가하는 단점을 가지고 있다. 제안된 ALC 알고리즘은 다른 알고리즘과 달리 한 가지 튜닝 변수의 사용으로 모든 컨트롤 샘플링 주기에 대해서 효과적인 제어 성능을 발휘하는 장점을 가지고 있지만, FLC 알고리즘과 같이 스위칭 횟수를 급격하게 증가시키는 단점을 가지고 있다.

추후 컨트롤 샘플링 주기에 따른 구조물의 지진응답 해석을 통한 제어알고리즘의 효율성 및 FLC 알고리즘과 ALC 알고리즘의 단점인 스위칭 횟수의 급격한 증가를 억제시킬 수 있는 제어알고리즘의 개발이 필요하다. 또한, 제어력과 불필요한 스위칭 횟수를 동시에 감소시킬 수 있는 제어 알고리즘의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업(과제번호: 05 건설핵심 D06)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Antsaklis, P.J., and Nerode A., "Hybrid control systems: An introductory discussion to the special issue," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 43, 457-460, 1998.
2. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1995.
3. Kobori, T. *et al.*, "Seismic response controlled structure with active variable stiffness system," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, 925-941, 1993.
4. Hayen, J.C., "Response control of structural systems using active interface damping," *Proceedings of the First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, USA, 1994.
5. Iwan, W.D., and Wang, L.J., "New developments in active interaction control," *Proceedings of the Second International Workshop on Structural Control*, Hong Kong, China, 1996.
6. Zhang, Y. and Iwan, W.D., "Active interaction control of civil structures. Part 1: SDOF systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, 161-178, 2002.
7. Branicky, M.S., "Stability of switched and hybrid systems," *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, 3498-3503, 1994.
8. Peleties, P.A., and DeCarlo, R.A., "Asymptotic stability of M-switched systems using lyapunov-like functions," *The American Conference on Control*, 1679-1684, 1991.
9. Chen, C.T., *Linear System Theory and Design*, Oxford University Press, 1999.
10. Slotine, J.J.E., and Li, W., *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.
11. Dyke, S.J. *et al.*, "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 565-575, 1996.