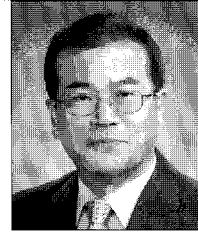


지능형 구조 기술을 적용한 스위칭 제어 시스템에 대한 소개

Introduction to the Switching Control System Incorporating Smart Structural Technology



정진욱*



정란**

* 단국대학교 건축공학과 박사후연구원

** 단국대학교 건축공학과 교수

1. 서론

구조물(structure)이란 하중을 효과적으로 전달하고 견딜 수 있도록 만들어진 시스템을 말한다. 즉, 예상 수명 내에서 발생할 수 있는 하중에 의한 심각한 구조적 손상을 방지하기 위해서 위와 같은 기능을 수행하도록 설계된 것이 구조물이다. 구조물에 작용하는 하중은 중력과 같은 정적 하중과 바람, 지진과 같은 동적 하중으로 나뉘며, 구조물의 성능은 이러한 하중에 의해 발생하는 변형이나 진동을 정해진 기준 내에서 충족시켜야 한다. 구조설계란 구조물의 성능이 정해진 기준을 만족시키기 위해서 구조물의 형태, 재료, 부재의 크기, 그리고 각 부재간의 연결을 결정하는 것이라 할 수 있다.

구조물을 설계하는데 있어서 가장 일반적인 접근법은 작용하는 하중에 대해 구조물이 견딜 수 있도록 충분한 강도를 확보하는 것이다. 하지만, 일반적인 접근법으로 설계된 구조물은 바람, 지진과 같은 동적 하중에 대한 에너지 소산 능력의 한계와 대응력의 미비라는 문제점을 가지고 있다. 동적 하중에 대한 적극적인 대응을 목표로 연구자들은 지능형 구조물(smart structures)이라는 혁신적인 개념을 도출하게 되었다.

지능형 구조물이란 시스템의 성능, 안정성, 그리고 사용

성 등을 향상시키기 위해서 외부환경 변화요인에 따른 구조물의 상태를 감지하고 필요한 조치를 취할 수 있는 능력을 가지고 있다. 이러한 지능형 구조물은 항공기의 크랙을 모니터링하는 시스템이나 자동차의 충격 완화장치 등의 항공산업이나 기계산업 쪽에 적용되었으며, 토목·건축에서는 풍하중이나 지진하중에 의해 발생하는 구조물의 응답을 효과적으로 제어하기 위해 도입되었다.

건물, 교량, 타워 등과 같은 토목·건축 구조물의 경우, 구조물에 작용하는 강력한 바람이나 지진은 구조물에 진동을 발생시키고 급기야는 붕괴로 이르게 할 수도 있다. 이러한 외부 동적하중에 의한 구조물의 손상을 최소화시키기 위해서 규준(code) 개발이나 시공방법 개선 등의 다양한 노력을 기울였음에도 불구하고, 구조물은 여전히 강한 풍하중이나 지진하중에 취약함을 보여준다. 구조물이 동적하중에 취약함을 보이는 이유는 구조물이 자체적으로 가지는 에너지 소산능력의 한계와 단순히 구조물의 보유 강성만으로 외부 동적하중에 저항하려는 이유 때문이라고 할 수 있다.

1970년대 일반적인 내진설계와 내풍설계가 가지는 비효율성을 극복하기 위해서 토목·건축 구조물에 지능형 구조 기술이 적용되었다. 지능형 구조 기술이란 특정 장치나 시스템을 구조물에 설치하여 구조물이 외부 동적하중에 효과적으로 저항할 수 있는 능력을 증대시키는 것이다. 이러한

장치나 시스템은 외부 동적하중에 의한 입력 에너지를 소산시킬 수 있으며, 동시에 구조물 자체가 보유한 강도를 통해 동적하중에 저항할 수 있다.

건축·토목 분야에 적용되는 지능형 구조 기술은 크게 능동형 제어 시스템(active control system), 수동형 제어 시스템(passive control system), 그리고 준능동 제어 시스템(semi-active control system)의 세 가지로 분류할 수 있다. 능동형 제어 시스템은 구조물을 효과적으로 제어하기 위해 필요한 제어력을 외부전원 공급으로 작동하는 액츄에이터를 이용하여 발생시킨다. 제어력은 센서를 통해 측정된 구조물의 응답 정보를 이용하여 제어알고리즘으로부터 계산된다. 따라서, 다양한 동적하중에 대한 다양한 제어력 생성이 가능하며, 능동형 제어 시스템의 이러한 특성은 구조물을 외부환경 변화에 효과적으로 적응시킬 수 있는 장점을 가지고 있는 반면, 제어알고리즘에 의해 결정되는 제어력은 구조물의 안정성을 위협하는 제어력을 발생시킬 수도 있는 단점을 가지고 있다. 수동형 제어 시스템은 구조물에 감쇠기라 불리는 에너지 소산형 장치를 설치하여 구조물의 응답을 제어하는 시스템으로서, 이 때 특정 장치로부터 발생하는 제어력은 구조물의 변위나 속도에 비례하여 발생한다. 능동형 제어 시스템과 달리 응답 측정을 위한 센서 및 외부전원 공급이 불필요한 대신, 사용하는 장치의 동특성을 변화시킬 수 없는 단점이 있으므로 구조물을 외부환경 변화에 효과적으로 적응시킬 수는 없다. 하지만, 감쇠기는 구조물의 입력 에너지를 소산시키는 역할만 할 뿐 구조물에 부가적으로 에너지를 입력시키지는 않으므로 구조물의 안정성을 항상 확보할 수 있는 장점이 있다. 준능동 제어 시스템은 제어력 변화가 가능한 감쇠기를 사용하여 능동형 제어 시스템과 같이 구조물을 외부환경 변화에 효과적으로 적응시킬 수 있다. 하지만, 사용하는 감쇠기가 보유한 용량 내에서 제어력이 생성되므로 능동형 제어 시스템과 비교하여 외부환경 변화에 대한 적응성은 약간 떨어진다고 할 수 있다. 준능동 제어 시스템에 적용되는 제어 가능한 감쇠기는 지능형 감쇠기라고도 불리며, 지능형 감쇠기의 최적 제어력은 센서를 통해 측정된 구조물의 응답 정보를 이용한 제어 알고리즘으로부터 결정된다.

이러한 지능형 구조 기술은 구조물의 안정성과 사용성을 확보함과 동시에 구조물의 내진 또는 내풍 성능을 향상시킴으로써 현재는 새로운 대안으로서 활발히 적용되고 있으며, 강력한 바람이나 지진이 발생할 수 있는 지역에 건축된 구조물이나 높은 구조적 안정성이 요구되는 병원, 소방서, 플랜트 등에 적용되어 왔다. 또한 고층건물이나 장대교량에서와 같이 사용성이 요구되는 구조물에 활발히 사용되고 있다. 보고

에서는 준능동 제어 시스템 중 AIC(active interaction control) 시스템과 AVS(active variable stiffness) 시스템에 대하여 소개해 보고자 한다.

2. AIC(active interaction control) 시스템

AIC 시스템은 제어 대상 구조물과의 결합-분리가 가능한 보조 구조물을 결합-분리 스위칭 알고리즘을 이용하여 실시간으로 구조물과 결합-분리 시킴으로써 구조물의 지진응답을 효과적으로 감소시키는데 그 목적이 있다. AIC 시스템은 Hayen과 Iwan이 제안하였으며, 제어 대상 구조물과 보조 구조물의 결합-분리 최적 시점을 결정하는 다양한 스위칭 제어 알고리즘이 지속적으로 발전되어 왔다.

AIC 시스템은 제어 대상 구조물인 PS(primary system)와 보조 구조물인 AS(auxiliary structure), 그리고 두 구조물의 상호 결합과 분리를 담당하는 IE(interaction element)로 구성된다. AIC 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

최적의 지진응답 효과를 구현하기 위해서 AS는 PS와 비교하여 높은 강성과 적은 질량을 가지도록 설계된다. IE의 결합과 분리 상태는 스위칭 제어 알고리즘으로부터 결정되며, IE의 종류는 PS와 AS간의 강체결합을 제공하는 Type 1과 쿨롬 마찰 감쇠장치의 역할을 수행하는 Type 2의 두 종류가 있다.

AIC 시스템의 동적 모델은 PS와 AS가 결합된 상태를 표현하는 결합 구간과 PS와 AS가 분리된 상태를 표현하는 분리구간의 두 구간으로 표현될 수 있다. 결합 구간을 표현하는 구간 ON에서는 PS와 AS가 IE에 의해 서로 결합된 상태이므로 제어력이 발생하며, 분리 구간을 표현하는 구간 OFF에서는 PS와 AS가 IE에 의해 서로 분리되어 자유롭게 움직이는 상태이므로 제어력이 발생하지 않는다. 지진하중이 AIC 시스템에 작용할 때, Type 1 IE를 사용한 AIC 시스템의 각 구간 ON, OFF에서의 운동방정식은 다음과 같다.

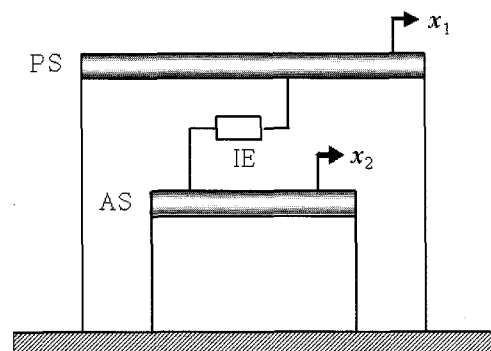


그림 1 AIC 시스템

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = -m_1 \ddot{x}_g - u_q(t) \quad q(t) \in \{ON, OFF\} \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = -m_2 \ddot{x}_g + u_q(t)$$

각 구간 ON, OFF에서의 제어력 $u_q(t)$ 는 다음과 같다.

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

여기서 x_1 과 x_2 는 각각 PS와 AS의 상대변위이며, m_1, c_1, k_1 와 m_2, c_2, k_2 는 각각 PS와 AS의 질량, 강성, 감쇠를 나타낸다. PS와 AS에 작용하는 제어력 $u_q(t)$ 의 크기는 같고 방향은 반대이다. \ddot{x}_g 는 지반가속도를 나타낸다. AIC 시스템의 결합-분리를 조정하는 스위칭 시그널 $q(t) \in \{ON, OFF\}$ 는 일정 간격을 가지는 매 스위칭 시간마다 스위칭 제어 알고리즘에 의해 결정된다. 매 스위칭 시간 사이의 일정한 시간 간격은 컨트롤 샘플링 $T = t_{k+1} - t_k$ 주기로 나타낸다. 샘플링 주기로 표현되는 시간간격 사이에서는 ON에서 OFF나 OFF에서 ON으로의 스위칭이 일어날 수 없다.

현재까지 개발된 제어 알고리즘 중 가장 초기에 개발된 AID(active interface damping) 알고리즘의 결합-분리 조건식은 다음과 같다. PS와 AS가 결합상태라는 가정 하에 계산된 제어력 $u(t)$ 와 PS의 변위 $\dot{x}(t)$ 로 구성된 결합 조건식과 분리 조건식은 각각 $u(t)\dot{x}_1(t)|_{t=t_k} \geq 0$ 과 $u(t)\dot{x}_1(t)|_{t=t_k} < 0$ 과 같다. 분리 조건식은 결합 조건식과 역의 관계가 성립되도록 설계된다.

최근에 개발된 OSS(optimally selected switching), FLC (fixed limit-value constraint), 그리고 ALC(adjustable limit-value constraint) 알고리즘은 기존 AIC 시스템에 도입된 스위칭 제어 알고리즘의 문제점을 개선하기 위해서 제안되었으며, 그 효용성이 입증되었다. 각 알고리즘은 기존 스위칭 제어 알고리즘의 설계방법과는 달리 결합-분리 조건식에 의해 결정되는 스위칭 활성화(결합 → 분리, 분리 → 결합) 영역과 스위칭 비활성화(결합 → 결합, 분리 → 분리) 영역을 분리 표현하였다. 각 영역을 분리 표현하기 위해서는 AIC 시스템이 현재 결합 상태인지 분리 상태인지에 대한 정보가 필요하다. 각 알고리즘의 설계방법 및 결합-분리 조건식은 참고문헌을 참고하기 바란다.

자유진동 수치해석에 사용한 PS와 AS의 특성은 다음과 같다. PS의 고유주기와 감쇠비는 각각 1s와 2%로 설정하였으며, PS의 질량 $m_1 = 1kg$ 으로 가정하였다. AS 구조물의 특

성은 다음 변수에 의해 지정된다.

$$\alpha = \frac{k_2}{k_1} \quad \psi = \frac{w_2}{w_1} \quad \gamma = \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \quad (3)$$

변수 α, ψ, γ 는 각각 PS에 대한 AS의 강성 비율, 고유주기 비율, 그리고 감쇠비 비율을 나타낸다. 각각에 대한 값은 2, 20, 그리고 1을 사용하였다. 컨트롤 샘플링 주기는 0.004초가 사용되었으며, PS와 AS의 초기조건은 $x_{10} = 1cm, x_{20} = 0$ 그리고 $\dot{x}_{10} = \dot{x}_{20} = 0$ 으로 설정하였다. 그림 2는 PS와 AS가 항상 분리된 상태를 유지하는 비제어시의 초기 60초 동안 PS의 변위응답을 나타낸다. 그림 3은 각 제어 알고리즘에 따른 PS 변위응답과 시간에 따른 누적된 스위칭 횟수를 나타낸다. 그림 4는 각 알고리즘에 의해 생성되는 시간에 따른 결합-분리 스위칭 시그널을 나타낸다. 그림 5는 각 알고리즘에 의해 생성되는 스위칭 시그널 및 제어력 변화를 나타낸다. 그림 2로부터 각 스위칭 제어 알고리즘은 비제어시와 비교하여 PS의 변위응답을 평형점 0으로 5초 이내의 빠른 속도로 수렴시키는 것을 알 수 있다. 그 중 FLC와 ALC 알고리즘에 의한 변위 수렴 속도가 AID와 OSS 알고리즘에 비하여 더욱 우수함을 알 수 있다.

OSS 알고리즘의 개발 목적은 AID 알고리즘에 의해 발생

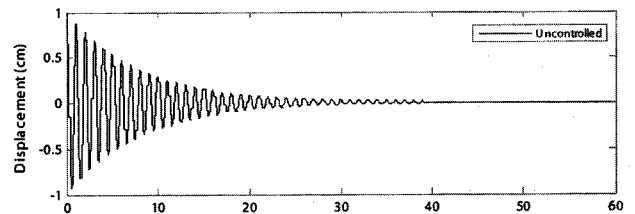


그림 2 비제어시 PS 변위응답

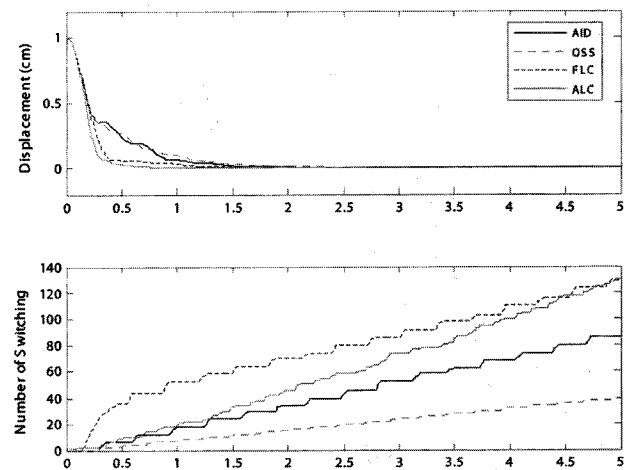


그림 3 PS 변위응답과 시간에 따른 누적된 스위칭 횟수

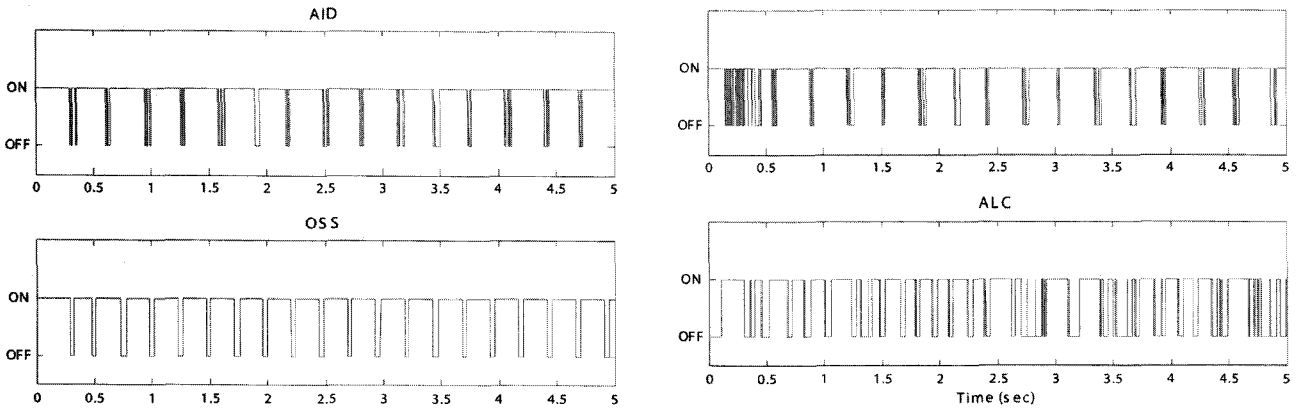


그림 4 결합-분리 스위칭 시그널

하는 불필요한 스위칭 횟수를 감소시키는데 있다. 그림 3의 누적된 스위칭 횟수에서 나타나는 바와 같이 OSS 알고리즘은 AID 알고리즘에 의해 발생하는 불필요한 반복변환을 효과적으로 억제시켜줌으로써 총 스위칭 횟수를 AID 알고리즘에 비해 53% 줄여주었다. AID 알고리즘은 총 86회의 스위칭 횟수를 발생시키며, OSS 알고리즘은 총 40회의 스위칭 횟수를 발생시킨다.

FLC 알고리즘의 개발 목적은 AID 알고리즘에 의해 발생

하는 불필요한 제어력을 감소시키는데 있다. 그림 5로부터 FLC 알고리즘은 AID 알고리즘에 의해 발생하는 제어력의 50%정도 만을 필요로 하는 것을 알 수 있다. 하지만, 결합-분리를 빠른 속도로 반복시키면서 제어력을 특정 경계 내에 위치시키려는 FLC 알고리즘의 특징은 AID 알고리즘에 비해 총 스위칭 횟수를 51% 증가시킨 130회를 요구하는 단점이 있다.

ALC 알고리즘은 FLC 알고리즘과 달리 제어력 한계치를

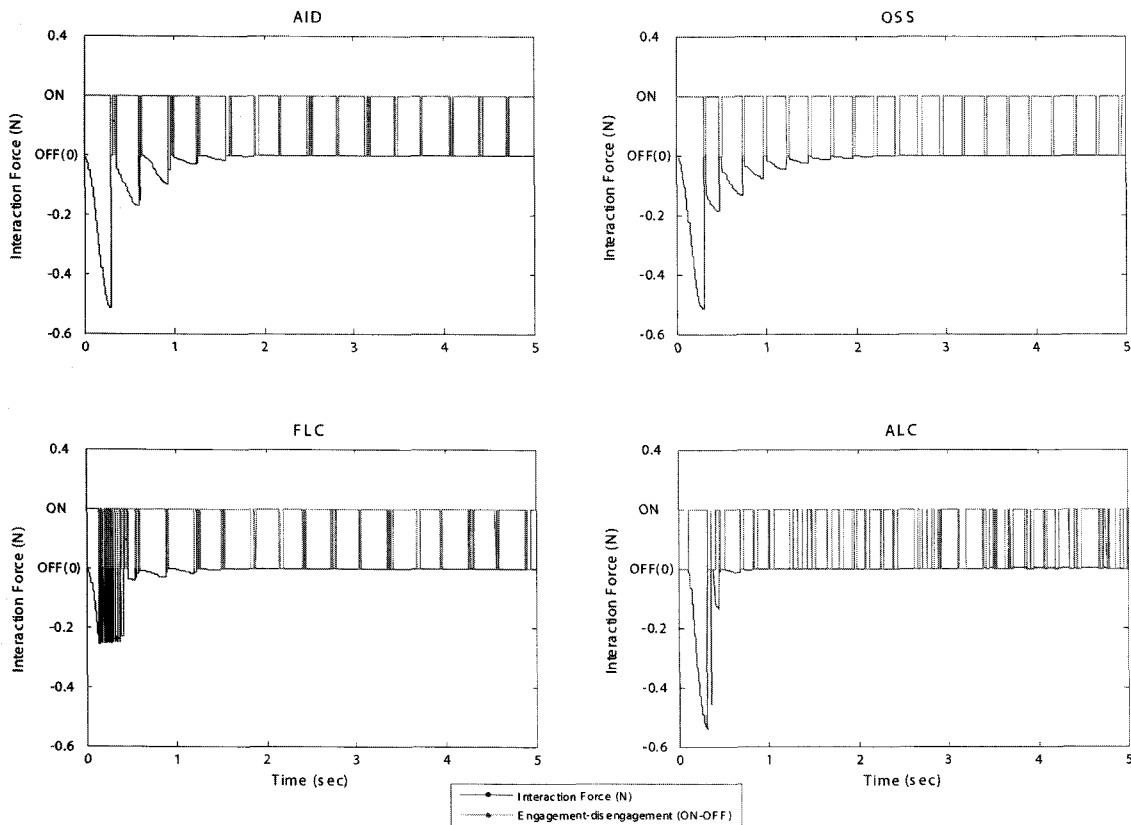


그림 5 제어력 및 결합-분리 스위칭 시그널

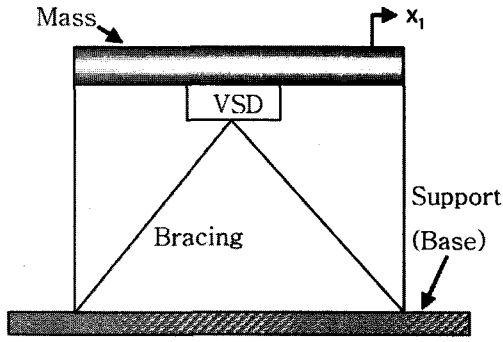


그림 6 AVS 시스템

변화시켜 가면서 AIC 시스템을 제어한다. 이 방법은 고정된 제어력 한계치를 설정해 AIC 시스템에서 발생하는 제어력을 특정 범위 내에 위치시키는 방법과는 다르다고 할 수 있다. ALC 알고리즘은 PS의 변위응답을 평형점 0으로 수렴시킨 후에 발생하는 스위칭 횟수가 AID 알고리즘에 비해 증가함을 그림 3으로부터 알 수 있다.

3. AVS(active variable stiffness) 시스템

AVS 시스템은 Kobori 등이 제안한 시스템으로 제어 대상 구조물과의 결합-분리가 가능한 가새를 on-off 스위칭

제어 알고리즘을 이용하여 실시간으로 구조물과 결합-분리 시킴으로써 구조물의 지진응답을 감소시키는데 목적이 있다. AVS 시스템은 제어 대상 구조물, 가새, 그리고 구조물과 가새의 결합-분리를 담당하는 VSD(variable stiffness device)로 구성된다. VSD의 결합-분리 상태는 스위칭 제어 알고리즘으로부터 결정된다.

AVS 시스템의 동적 모델은 구조물과 가새가 결합된 상태를 표현하는 결합 구간과 구조물과 가새가 분리된 상태를 표현하는 분리 구간의 두 구간으로 표현될 수 있다. 지진하중이 AVS 시스템에 작용할 때, AVS 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = -m_1 \ddot{x}_g - u_q(t) \quad q(t) \in \{ON, OFF\} \quad (4)$$

각 구간 ON, OFF에서의 제어력 $u_q(t)$ 는 다음과 같다.

$$u_q(t) = \begin{cases} k_b(x_1(t) - x_r(t)) & \text{if } q(t) = ON \\ 0 & \text{if } q(t) = OFF \end{cases} \quad (5)$$

여기서 x_1 은 제어 대상 구조물의 상대변위이며, m_1, c_1, k_1, k_b 는 각각 제어 대상 구조물의 질량, 감쇠, 강성, 그리고 가새의 강성을 나타낸다. 기준 변위인 $x_r(t)$ 는 구조물과 가

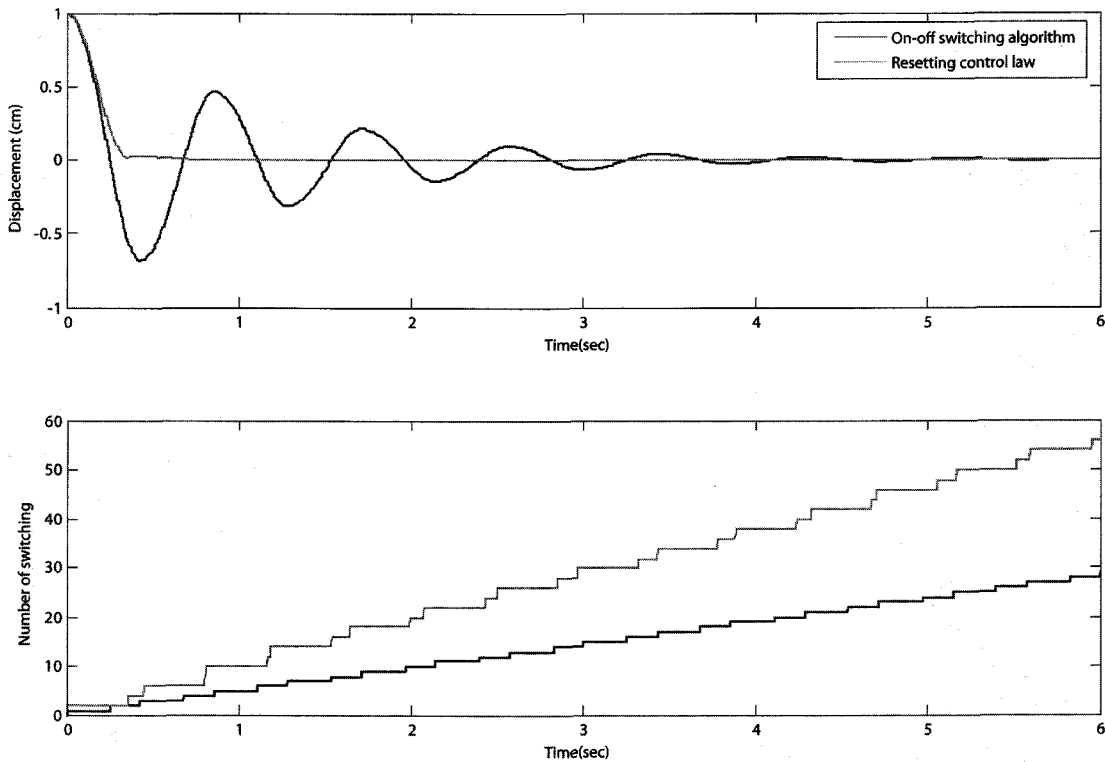


그림 7 구조물 변위응답과 시간에 따른 누적된 스위칭 횟수

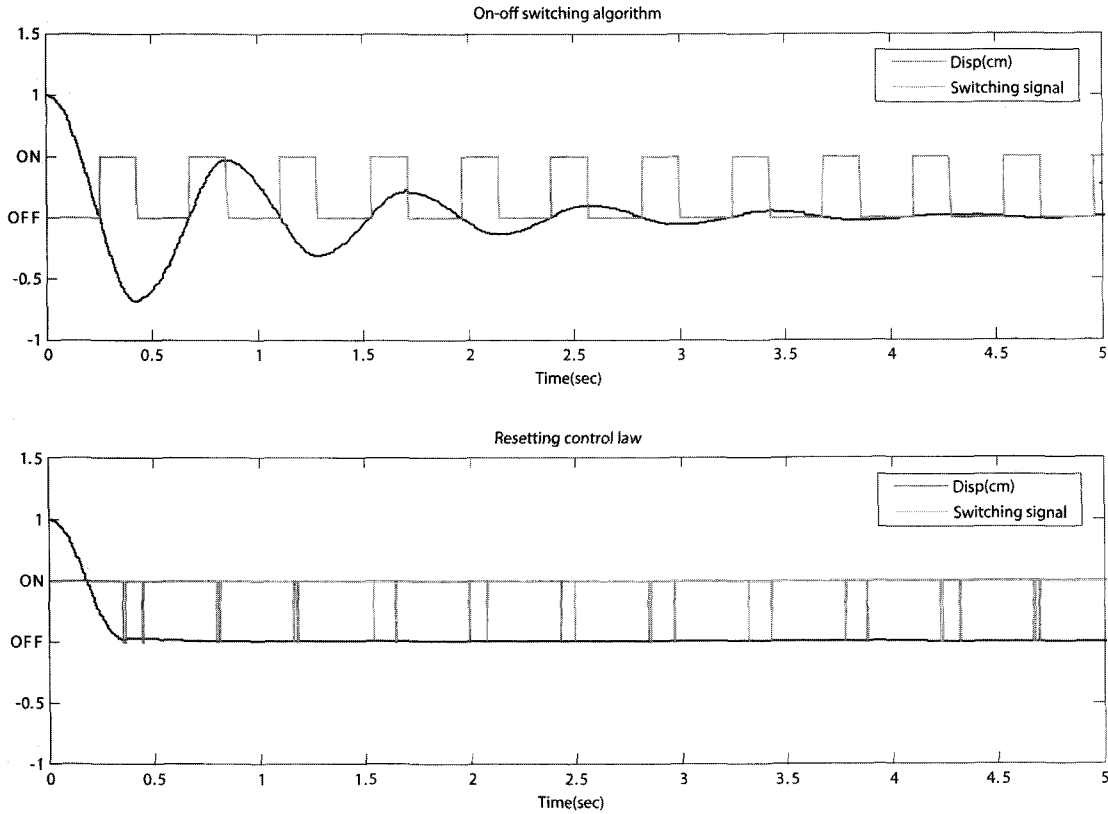


그림 8 구조물 변위응답과 결합-분리 스위칭 시그널

새 결합시 발생하는 제어력이 0이 되도록 하는 기준점을 나타낸다. \ddot{x}_g 는 지반가속도를 나타낸다. AVS 시스템의 결합-분리를 조정하는 스위칭 시그널 $q(t) \in \{ON, OFF\}$ 는 일정 간격을 가지는 매 스위칭 시간마다 스위칭 제어 알고리즘에 의해 결정된다. 매 스위칭 시간 사이의 일정한 시간간격을 컨트롤 샘플링 주기 $T = t_{k+1} - t_k$ 로 나타낸다.

본 장에서는 Kamagata와 Kobori가 제안한 on-off 스위칭 제어 알고리즘과 Yang 등이 제안한 resetting control law의 제어 성능을 비교한다. On-off 스위칭 제어 알고리즘의 결합 조건식과 분리 조건식은 각각 $x_1 \cdot \dot{x}_1 \geq 0$ 과 $x_1 \cdot \dot{x}_1 < 0$ 이다. 여기서 x_1 은 제어 대상 구조물의 변위를 나타낸다. On-off 스위칭 알고리즘의 결합-분리 조건식은 구조물의 매스가 평형점 0을 지날 때 구조물과 가새를 결합시킨 후 구조물이 최대변위에 도달했을 때 구조물과 가새를 분리시키도록 설계되었으며, 다음 결합은 구조물의 매스가 또 다시 평형점 0을 지날 때 발생한다. Resetting control law는 구조물이 최대변위에 도달한 후 아주 짧은 순간 동안만 구조물과 가새를 분리하고, 그 외에는 구조물과 가새가 항상 결합상태를 유지하도록 한다. 여기서 정의한 아주 짧은 순간은 컨트롤 샘플링 주기인 0.004초를 나타내며, 컨트롤 샘플링 주기는 분리 상태가 지속되는 시간과 일치한다.

On-off 스위칭 제어 알고리즘과 resetting control law의 제어 성능을 비교하기 위하여 자유진동 수치해석을 수행하였다. 자유진동 수치해석에 사용한 제어 대상 구조물과 가새 특성은 다음과 같다. 구조물의 고유주기와 감쇠비는 각각 1s와 2%로 설정하였으며, 질량 $m_1 = 1kg$ 으로 가정하였다. 가새 강성 k_b 는 구조물 강성 k_1 과 일치하도록 하였다. 컨트롤 샘플링 주기는 0.004초를 사용하였다. 구조물의 초기조건은 $x_1 = 1cm$ 과 $\dot{x}_1 = 0$ 으로 설정하였다. 그림 7은 각 제어 알고리즘에 따른 구조물 변위응답과 시간에 따른 누적된 스위칭 횟수를 나타낸다. 그림 8은 각 알고리즘에 따른 구조물의 변위응답 및 시간에 따른 결합-분리 스위칭 시그널을 나타낸다. 그림 7로부터 resetting control law에 의한 구조물의 변위 수렴 속도가 on-off switching algorithm에 비해 우수함을 알 수 있다. 하지만, resetting control law의 경우 on-off switching algorithm에 비해 총 스위칭 횟수가 93% 증가한 56회를 요구하는 단점을 가지고 있다. 그림 8로부터 각 제어 알고리즘에 의해 결정되는 결합-분리 스위칭 시그널의 특징을 확인할 수 있다. On-off 스위칭 제어 알고리즘 결합-분리 조건식은 위의 설명에서와 같이 구조물의 매스가 평형점 0을 지날 때 구조물과 가새를 결합시키며, 구조물이 최대변위에 도달했을 때 구조물과 가새를 분리시킨다. Resetting control law는 항상 결합상태를 유


지한 채, 구조물이 최대변위에 도달한 후 아주 짧은 순간 동안만 구조물과 가새를 분리시킨다. 이상에서와 같이 AVS 시스템의 제어성능은 결합-분리 조건식에 의해 현저한 차이를 보임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 고에서는 준능동 제어 시스템 중 스위칭 제어 시스템인 AIC(active interaction control) 시스템과 AVS(active variable stiffness) 시스템에 대하여 소개하였다. AIC 시스템은 제어 대상 구조물과 보조 구조물간의 실시간 결합-분리를 통해서 제어 대상 구조물을 제어하게 되며, AVS 시스템은 제어 대상 구조물과 가새(bracing)의 실시간 결합-분리를 통해 시스템의 강성을 전환(low stiffness \Leftrightarrow high stiffness)시킴으로써 구조물을 제어한다. 결합과 분리를 담당하는 장치의 실시간 변환은 스위칭 제어 알고리즘의 결합-분리 조건식에 의해 제어된다. 준능동 제어 시스템인 AIC나 AVS시스템의 경우, 제어목적에 따라 결합-분리 조건식의 다양한 설계가 가능하다. 기존 스위칭 제어 알고리즘 설계시 제어 대상 구조물의 응답만을 감소시키는데 그 목적을 두었으나, 과도한 스위칭 횟수의 발생은 결합-분리를 담당하는 장치의 내구성에 영향을 미치며 결국 비경제적인 제어 시스템을 만들게 된다. 따라서, 구조물의 응답 감소 목적뿐만 아니라 스위칭

횟수를 효과적으로 조절할 수 있는 스위칭 제어 알고리즘의 개발이 필요하다고 할 수 있겠다.

참 고 문 헌

1. 정진욱, 정란, “컨트롤 샘플링 주기가 스위칭 시스템의 결합-분리 횟수에 미치는 영향을 고려한 제어 알고리즘 개발”, 한국지진공학회 논문집, 제13권 4호, 67-76, 2009
2. Koberi, T. et al., “Seismic Response Controlled Structure with Active Variable Stiffness System,”Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 22, 925-941, 1993
3. 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
4. Yang J. N. et al., “Resetting semi-active stiffness damper for seismic response control,” Journal of Structural Engineering, 126(12), 1427-1433, 2000
5. 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 

[담당 : 박재균, 편집위원]