

준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템

Semi-active Outrigger Damper System



정진욱*
Joung, Jin-Wook



김대영**
Kim, Dae-Young

1. 서론

구조물 (structure)이란 중력과 같은 정적 하중이나 바람 및 지진과 같은 동적 하중을 효과적으로 전달하고 견딜 수 있도록 만들어진 시스템을 말한다. 구조물의 성능은 예상 수명 내에서 발생할 수 있는 여러 종류의 하중에 대해 구조물이 입을 수 있는 심각한 손상을 방지할 수 있어야 하며, 이러한 하중에 의해 발생하는 변형이나 진동을 정해진 기준 내에서 충족시켜야 한다.

구조물의 성능이 정해진 기준을 만족시키기 위해 구조물의 형태, 재료, 부재의 크기 등을 결정하는 것을 구조 설계라 한다. 구조물 설계 시 가장 일반적인 접근법은 작용 하중에 대해 구조물이 충분히 견딜 수 있도록 강도를 확보하는 것이다. 하지만, 이러한 접근법으로 설계된 구조물은 바람 및 지진과 같은 동적 하중에 대해 구조물의 에너지 소산능력 한계와 대응력의 미비라는 문제점을 가지고 있다. 이에 외부 하중에 대한 구조물의 에너지 소산능력 증대 및 적극적인 대응을 목표로 하는 지능형 구조

물 (smart structure)이라는 개념이 도출되었다.

지능형 구조물이란 외부 환경 변화요인에 따른 구조물의 상태를 감지하여 시스템의 성능, 안정성, 그리고 사용성이 저하되지 않도록 필요한 조치를 취할 수 있는 시스템이다. 이러한 지능형 구조물은 항공산업과 기계산업(예, 항공기 크랙 모니터링 시스템, 자동차 충격 완화 장치) 분야에 활발히 적용되어 왔다.

토목·건축 분야에서는 1970년대 바람이나 지진에 의해 발생하는 구조물의 진동을 효과적으로 제어하기 위해 지능형 구조 기술이 도입되었다. 이전에는 구조물의 진동에 의한 구조손상을 최소화하기 위해 내진·내풍 기준 (code)개발이나 시공방법 개선 등의 다양한 노력이 있었으나, 일반적인 내진설계와 내풍설계가 가지는 비효율성(예, 구조물이 자체적으로 가지는 에너지 소산능력의 한계)을 극복하고자 토목·건축 구조물에 지능형 구조 기술이 적용되었다. 지능형 구조 기술은 크게 능동형 제어 시스템 (active control system), 수동형 제어 시스템 (passive control system), 그리고 준능동형 제어 시스템 (semi-active control system)의 세가지로 분류할 수 있다¹⁾

능동형 제어 시스템은 구조물을 효과적으로 제어하기

* 대우건설기술연구원 방재연구팀, 전임연구원

** 정회원, 대우건설기술연구원 방재연구팀, 연구위원

위해 필요한 제어력을 외부전원 공급으로 작동하는 액추에이터를 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 능동형 제어 시스템과 달리 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.

준능동형 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. 준능동형 제어 시스템에 적용되는 제어 가능한 감쇠기는 지능형 감쇠기라고도 불리며, 지능형 감쇠기의 제어력은 센서를 통해 측정된 구조물의 응답 정보를 이용한 제어 알고리즘에 의해 발생된다.

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 안정성이 요구되는 병원, 소방서, 플랜트 등에 적용되어왔다. 또한 고층건물이나 장

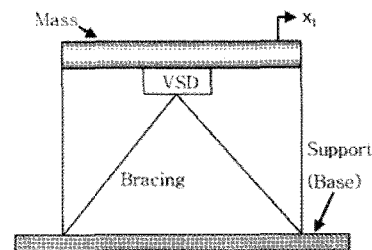
대교량에서와 같이 사용성이 요구되는 구조물에 활발히 사용되고 있다.

본고에서는 준능동형 제어 시스템 중 변환강성시스템인 준능동형 아웃리거 시스템에 대해 소개하고자 한다. 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템은 정진욱 등²⁾에 의해 제안되었으며, 일반 아웃리거 시스템에 비해 외부하중에 의한 구조물의 횡변위 제어 능력이 우수함을 단순화된 단자유도 모델에 대한 수치해석을 통하여 입증하였다. 준능동형 아웃리거 시스템에 대한 소개에 앞서 변환강성 시스템에 대한 이해를 높이고자 AVS (active variable stiffness) 시스템의 거동 특성을 우선 알아보하고자 한다.

2. 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템

2.1 AVS (Active Variable Stiffness) 시스템

AVS 시스템은 Kamagata와 Kobori³⁾가 제안한 시스템으로 제어 대상 구조물과의 결합-분리가 가능한 가새를 on-off 스위칭 제어 알고리즘을 이용하여 실시간으로 구조물과 결합-분리 시킴으로써 외부하중에 의한 구조물의 진동을 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 운동방정식은 다음과 같다.



〈그림 1〉 AVS시스템

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = -u_q(t) \quad (1)$$

$$q(t) \in \{ON, OFF\}$$

결합구간 ON과 분리구간 OFF에서의 제어력 $u_q(t)$ 는

다음과 같다.

$$u_q(t) = \begin{cases} k_b(x_1(t) - x_r(t)) & \text{if } q(t) = ON \\ 0 & \text{if } q(t) = OFF \end{cases} \quad (2)$$

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 가새 결합 시 발생하는 제어력이 0 이 되도록 하는 기준점을 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 시간간격은 컨트롤 샘플링 주기 $T = t_{k+1} - t_k$ 로 나타낸다.

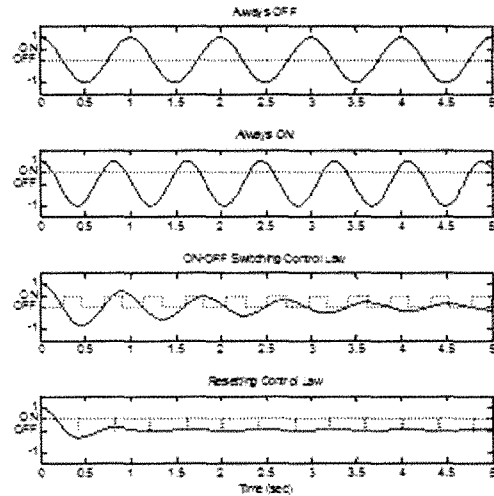
본 장에서는 Kamagata와 Kobori³⁾가 제안한 on-off 스위칭 제어 알고리즘과 Yang 등⁴⁾이 제안한 resetting control law의 제어 성능을 비교한다. On-off 스위칭 제어 알고리즘의 결합 조건식과 분리 조건식은 각각 $x_1 \cdot \dot{x}_1 \geq 0$ 과 $x_1 \cdot \dot{x}_1 < 0$ 이다.

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. 이러한 결합-분리 조건식은 AVS 시스템의 제어성능을 향상 시킴이 입증되었다.

자유진동 수치해석에 사용한 제어 대상 구조물과 가새 특성은 다음과 같다. 구조물의 고유주기와 감쇠비는 각각 1s와 0%로 설정하였으며, 질량 $m_1 = 1kg$ 으로 가정하였다. 가새 강성은 구조물 강성의 50%로 설정하였다. 컨트롤 샘플링 주기는 0.01초를 사용하였다.

그림 2는 항상 결합, 항상 분리, on-off 스위칭 제어 알고리즘, 그리고 resetting control law에 따른 구조물 변위응답 및 결합-분리 스위칭 시그널을 나타낸다. 그림 2로부터 resetting control law에 의한 구조물의 변위 수

렴 속도가 on-off 스위칭 제어 알고리즘에 비해 우수함을 알 수 있으며, 또한 각 제어 알고리즘에 의해 결정되는 결합-분리 스위칭 시그널의 특징을 확인할 수 있다.



〈그림 2〉 자유진동 시 알고리즘에 따른 시간에 대한 변위응답 및 스위칭 시그널

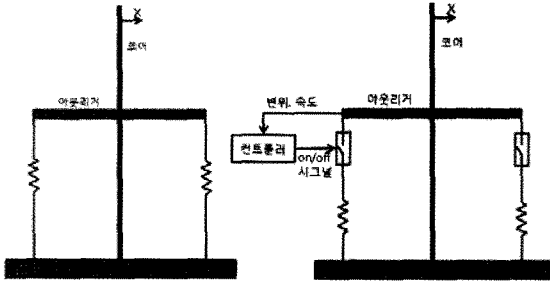
On-off 스위칭 제어 알고리즘은 앞의 설명에서와 같이 구조물의 매스가 평형점 0을 지날 때 구조물과 가새를 결합시키며, 구조물이 최대변위에 도달했을 때 구조물과 가새를 분리시킨다. Resetting control law는 항상 결합상태를 유지한 채, 구조물이 최대변위에 도달한 후 컨트롤 샘플링 주기 동안만 구조물과 가새를 분리시킨다.

2.2 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템

아웃리거 구조 시스템은 초고층 건축물의 효과적인 횡력 저항 시스템으로 최근 널리 활용되고 있는 시스템 중 하나이며, 코어가 아웃리거에 의해 외주기동에 연결된 구조 형태를 가지고 있다. 이러한 아웃리거 구조 시스템은 횡하중에 대해 구조물의 휨강성을 증가시켜 구조물의 안정성과 사용성을 확보하게 된다.

준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템은 아웃리거와 외주기동 사이에 아웃리거 댐퍼를 설치하여 외주기동과 아웃리거에 연결된 코어를 실시간 결합-분리 시킴으로써 외부하중에 의한 구조물의 횡변위를 제어하게 된다. 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템의 코어는 캔틸레버 보로 모델

링 되며 아웃리거는 무한강성을 가지며 매스는 없다. 아웃리거 댐퍼는 외주기동과 아웃리거 사이에 설치되며 컨트롤러에서 발생하는 스위칭 시그널에 의해 외주기동을 코어와 결합-분리 시킨다. 그림 3은 일반적인 아웃리거 시스템과 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템을 각각 나타낸다.



〈그림 3〉 일반 아웃리거 시스템과 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템

준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

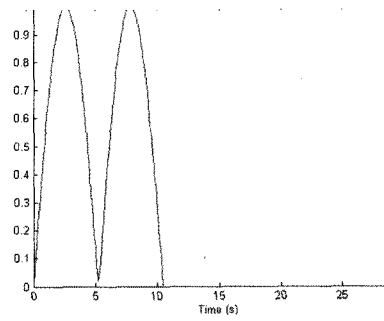
$$m_o \ddot{x}_o + c_o \dot{x}_o + k_o x_o = -u_q(t) \quad (3)$$

$$q(t) \in \{ON, OFF\}$$

$$u_q(t) = \begin{cases} k_c(x_o(t) - x_{or}(t)) & \text{if } q(t) = ON \\ 0 & \text{if } q(t) = OFF \end{cases} \quad (4)$$

여기서 x_o 은 제어 대상 구조물의 상대변위이며, m_o, c_o, k_o, k_c 는 각각 제어 대상 구조물의 질량, 감쇠, 강성, 그리고 외주기동의 축강성에 의한 추가 강성항을 나타낸다. 기준 변위인 $x_{or}(t)$ 는 코어와 외주기동 결합 시 발생하는 제어력이 0이 되도록 하는 기준점을 나타낸다.

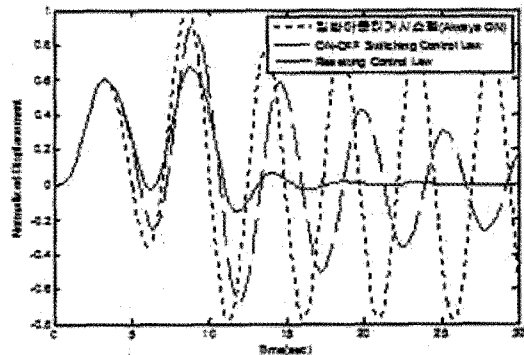
일반 아웃리거 시스템과 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템의 횡변위 제어 성능을 비교하기 위하여 그림 4와 같은 하중형태에 대한 구조물 최상층 변위 응답 수치해석을 수행하였다. 구조물의 고유주기와 감쇠비는 각각 4.8s와 0%로 설정하였다. 컨트롤 샘플링 주기는 0.1초를 사용하였다.



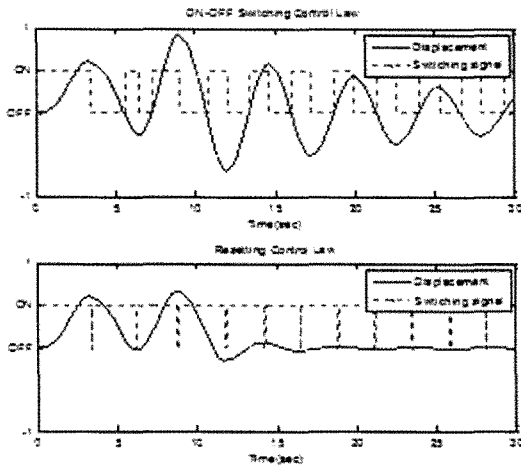
〈그림 4〉 입력 하중 형태

그림 5는 일반아웃리거시스템, on-off 스위칭 제어 알고리즘과 resetting control law를 적용한 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템의 최상층 변위 응답을 나타낸다. 각 변위 응답은 일반 아웃리거시스템의 최대변위에 대하여 정규화되었다.

그림 5로부터 resetting control law에 의한 구조물의 최상층 변위 제어 성능이 on-off 스위칭 제어 알고리즘에 비해 우수함을 알 수 있다. Resetting control law를 적용한 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템의 최상층 변위가 일반 아웃리거 시스템에 비해 40% 감소했음을 알 수 있다. 그림 6은 on-off 스위칭 제어 알고리즘, 그리고 resetting control law에 따른 구조물 변위응답 및 결합-분리 스위칭 시그널을 나타낸다.



〈그림 5〉 알고리즘에 따른 시간에 대한 변위응답



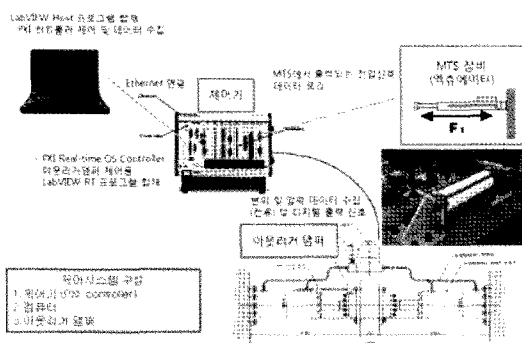
〈그림 6〉 알고리즘에 따른 시간에 대한 변위응답 및 스위칭 시그널

3. 아웃리거 댐퍼 성능실험

3.1 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템 실험 구성

본 장에서는 준능동형 아웃리거 댐퍼의 성능실험을 수행하였다. 성능실험은 준능동형 아웃리거의 댐퍼의 밸브가 열린 상태인 OFF 모드와, 밸브가 닫힌 상태인 ON 모드, 그리고 열림과 닫힘이 제어 알고리즘에 의해 제어되는 제어모드에 대하여 수행하였다.

제어시스템은 아웃리거 댐퍼 밸브 제어 신호를 결정하고 내보내는 제어기, 제어 대상인 아웃리거 댐퍼, 그리고 계측 및 제어용 메인 프로그램을 탑재한 일반 컴퓨터로 구성된다. 시스템 구성도는 그림 7과 같다.



〈그림 7〉 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템 구성도

준능동형 아웃리거 댐퍼의 성능실험을 위한 실험셋팅

은 그림 8과 같다. 아웃리거 댐퍼는 가력빔 양쪽에 설치된 액츄에이터에서 발생하는 가력 변위에 대해서 댐퍼력을 생성하게 된다. 준능동형 아웃리거 댐퍼의 최대 댐퍼력은 20톤이며, 피스톤 스트로크는 $\pm 200\text{mm}$ 이다. 본 실험에는 25mm 변위센서 1개와 압력센서 4개가 사용되었다. 압력센서는 실린더 1기당 앞쪽과 뒤쪽에 각각 1개가 설치되었다. 변위센서는 피스톤의 이동거리를 측정한다.



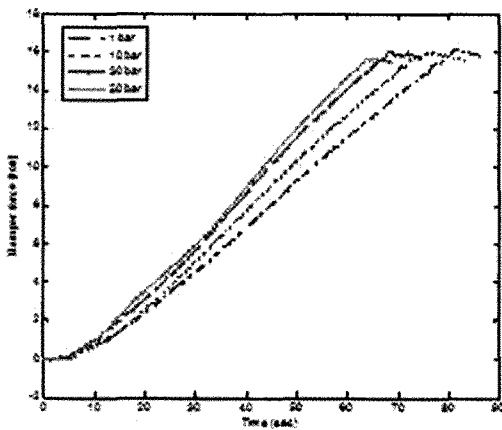
〈그림 8〉 준능동형 아웃리거 댐퍼 실험셋팅 사진

본 실험에 사용된 제어알고리즘은 두가지이다. 제어알고리즘1은 앞에서 해석에 사용된 on-off 스위칭 제어 알고리즘이고, 제어알고리즘2는 결합 조건식과 분리 조건식이 on-off 스위칭 제어 알고리즘과 서로 반대인 알고리즘으로 결합 조건식과 분리 조건식은 각각 $x_1 \cdot \dot{x}_1 < 0$ 과 $x_1 \cdot \dot{x}_1 \geq 0$ 이다. 여기서 x_1 은 변위계에서 취득된 아웃리거 댐퍼의 피스톤 변위를 나타낸다. 제어알고리즘2의 결합-분리 조건식은 피스톤 변위가 최대변위에 도달했을 때 밸브를 닫으며, 피스톤 변위가 평형점 0을 지날 때 밸브를 연다. 밸브의 열림과 닫힘은 제어기에 내장된 제어알고리즘에 의해 지속적으로 반복된다. 컨트롤 샘플링 주기는 아웃리거 댐퍼의 기구

적 특성을 고려하여 0.1초로 하였다.

3.2 실험 결과

아웃리저 댐퍼의 댐퍼력과 초기압의 관계를 알아보기 위해서 초기압 1bar, 10bar, 30bar, 50bar 각각에 대한 아웃리저 댐퍼의 댐퍼력을 측정하였다. 입력 변위는 시간에 대해 선형으로 증가하도록 설정하였다. 그림 9로부터 초기압이 증가할수록 시간에 대한 댐퍼력의 기울기가 커지는 것을 알 수 있다.



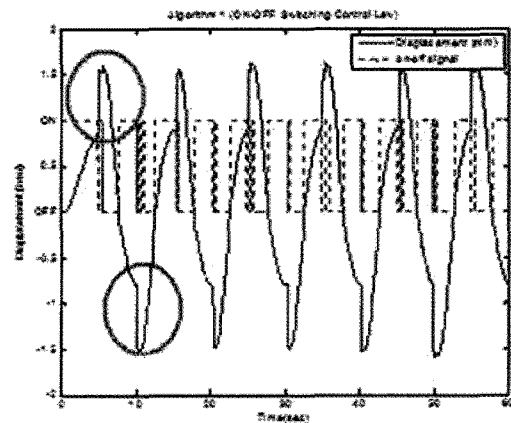
〈그림 9〉 초기압에 따른 댐퍼력

스위칭 시그널에 따른 시간에 대한 아웃리저 댐퍼의 댐퍼력을 확인하기 위하여 사인함수를 입력변위로 사용하였다. 아웃리저 댐퍼의 주파수 의존성을 확인하기 위해서 0.1Hz, 0.3Hz, 0.5Hz, 1Hz에 대한 성능실험을 각각 수행하였지만, 본고에서는 지면 관계상 0.1Hz에 대한 성능실험 결과만을 기재하였다. 그림 10과 그림 11은 제어알고리즘1의 스위칭 시그널에 대한 변위응답과 댐퍼력을 각각 나타낸다. 그림 11과 그림 12는 제어알고리즘2의 스위칭 시그널에 대한 변위응답과 댐퍼력을 각각 나타낸다.

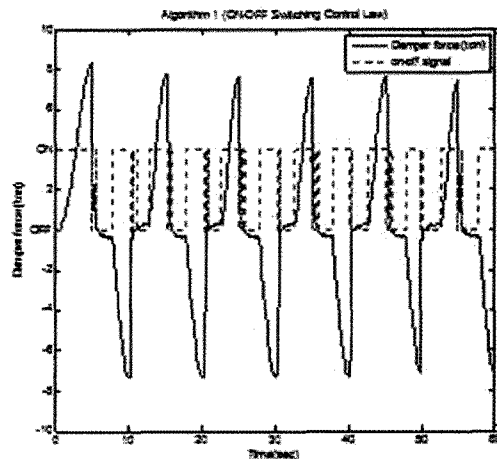
앞에서 설명했듯이 제어알고리즘1의 스위칭 시그널은 평형점 0을 지날 때 밸브를 닫고 최대변위에 도달했을 때 밸브를 여는 것을 그림 10으로부터 알 수 있으며, 제어알고리즘2의 스위칭 시그널은 평형점 0을 지날 때 밸브를 열고 최대변위에 도달했을 때 밸브를 여는 것을 그

림 12로부터 알 수 있다. 그림 11로부터 아웃리저 댐퍼의 댐퍼력은 밸브를 닫는 동안 증가하며, 밸브를 열었을 때 순간적으로 0으로 감소하는 것을 알 수 있다.

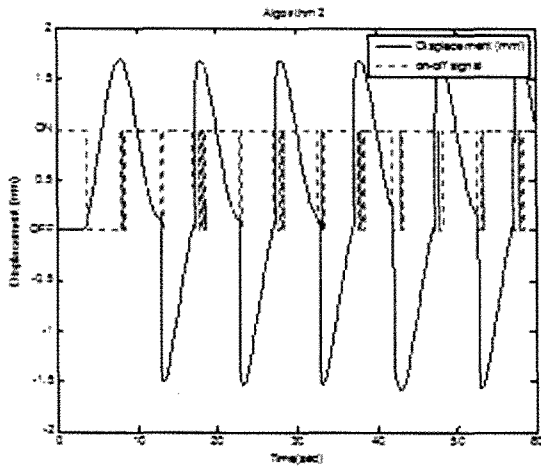
그림 10에서 결합 후 분리 시에 발생하는 순간적인 변위 증가 현상은 액추에이터와 연결된 가력빔 끝단과 댐퍼 피스톤과 연결된 가력빔 중앙부에서 발생하는 상대변위로 인한 가력빔의 복원력 때문에 발생하는 현상이다. 이는 실린더 2기가 서로 연결되는 준능동형 아웃리저 댐퍼의 형태상 성능실험을 위해 가력빔을 이용해야 하는 이유로 발생하는 현상으로 준능동형 아웃리저 댐퍼의 성능과는 무관하다. 실험 시 위의 현상을 방지하기 위해서는 가력빔의 강성을 증대시키는 방법이 있다.



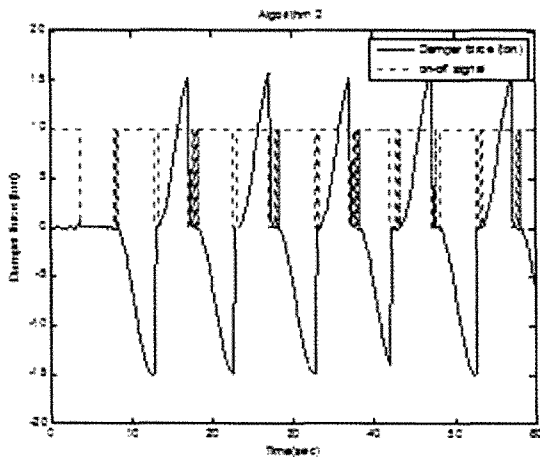
〈그림 10〉 알고리즘 1에 따른 시간에 대한 변위응답 및 스위칭 시그널



〈그림 11〉 알고리즘 1에 따른 시간에 대한 댐퍼력 및 스위칭 시그널



〈그림 12〉 알고리즘 2에 따른 시간에 대한 변위응답 및 스위칭 시그널



〈그림 13〉 알고리즘 1에 따른 시간에 대한 댐퍼력 및 스위칭 시그널

거 댐퍼 성능 실험을 통해 외주기동과 아웃리거와 연결된 코어의 실시간 결합-분리를 담당하는 장치로 적용이 가능함을 확인 할 수 있었다.

—참고문헌—

1. Spencer Jr. B. F. and Nagarajaiah S., "State of the art of structural control," Journal of Structural Engineering, 129(7), pp.845~856, 2003
2. 아웃리거댐퍼 시스템을 이용한 구조물의 준능동 제어, 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp.234~236, 2010
3. Kamagata S. and Kobori T., "Autonomous adaptive control of active variable stiffness systems for seismic ground motion," Proceedings of the 1st World Conference on Structural Control, Los Angeles., USA, 1994
4. Yang J. N., Kim J. H., and Agrawal A. K., "Resetting semi-active stiffness damper for seismic response control," Journal of Structural Engineering, 126(12), pp.1427~1433, 2000

4. 결론

본고에서는 최근에 정진욱 등²⁾이 제안한 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템의 거동 특성 및 아웃리거 댐퍼의 성능실험 결과에 대하여 소개하였다. 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템은 아웃리거와 외주기동 사이에 설치된 아웃리거 댐퍼의 밸브 제어를 통해 외주기동과 아웃리거에 연결된 코어를 실시간 결합-분리 시킴으로써 구조물의 횡변위를 제어하게 된다. 수치해석 결과 준능동형 아웃리거 댐퍼 시스템의 최상층 변위가 일반 아웃리거 시스템에 비해 40% 감소했음을 알 수 있었다. 또한, 아웃리