

## Recent Developments in Seismic Structural Research at UMR

Franklin Y. Cheng\*    황    재    승\*\*    민    경    원\*\*\*

건물이 고층화되면서 발생하는 여러가지 문제 중 구조적인 관점에서 가장 큰 난제가 횡력에 대한 안전성일 것이다. 보통 이러한 안전성을 고려하여 최상층의 수평변위와 층간변위를 설계 하중이 작용했을 때 허용범위 내에 들도록 설계해야 하는 데 이 규제된 변위만을 만족시키기 위해서 첨가되는 횡력저항요소의 양은 중력저항요소에 비해 구조물의 시스템 특징에 따라 달라지겠지만 거의 층의 증가에 따라 기하급수적으로 늘어나게 된다. 이러한 막대한 물량을 횡력저항을 위해서 사용하는데는 경제적인 면에 비추어 문제점이 있다. 즉 구조물이 실제로 위험한 설계하중에 접하게 되는 것은 그 수명에 비해 극히 미미한 시간에 지나지 않는데 그러한 한 순간의 위험을 보장하기 위해서 건물의 수명이 다할 때까지 횡력 저항요소를 영구히 구조물이 가지고 있다는 것이 상당한 낭비라고 볼 수 있기 때문이다. 물론 이러한 낭비를 최소화하기 위해서 최적화 기법 등을 통하여 물량을 줄이기도 하지만 근본적인 대안으로써 문제 해결에 큰 도움이 안된다고 볼 수 있다. 그러므로 경제적인 면으로 볼 때 건물의 사용성이나 안전성에 큰 부담이 되는 하중이 발생했을 때만 작동하는 새로운 개념의 횡력저항시스템이 어느 정도 타당성 있게 받아들여질 수 있다.

기존의 횡력저항요소는 이와 같은 경제적인 측면에서의 단점뿐만 아니라 설계하중의 부정확한 예측으로 인한 '적극적 안전의 결여'라고 하는 단점을 가지고 있다. 즉 설계하중은 설계 당시에 일률적으로 정하게 되는데 건물의 수명 동안에는 이러한 예측된 설계하중을 초과함으로써 건물에 막대한 영향을 미치는 수도 있으므로 불확실하게 예측된 하중에 의해 산정된 횡력저항요소가 이에 적극적으로 대처할 수 없기 때문이다. 그러므로 변동하는 하중에 대해서 그때마다 건물의 안전성을 보장하도록 적극적으로 대처하는 횡력저항 시스템의 등장이가 요구되고 있다.

이와 같이 임의의 하중조건에 능동적으로 대처하는 인위적인 조작을 통하여 횡력에 대한 건물의 안전성을 보장하기 위하여 구조물의 거동을 조절하는 저항시스템을 구조물의 능동제어 시스템이라고 한다. 기존의 횡력저항 요소는 안전성이라는 측면과 경제적인 측면이 서로 상반되는 관계로 볼 수 있지만 능동제어의 등장은 이러한 안전성과 경제성을 동시에 향상시킨다고 볼 수 있다.

이러한 안전성과 경제성을 가지는 구조물의 능동제어에 관한 연구는 60년대 활발히 연구되었던 전기, 제어분야의 이론을 답습하는 형태로 80년대 부터 적용하기 시작하였는데 국내에서는 90년대 들어 활발한 연구가 진행 중이다. 이러한 때에 능동제어에 대해서 다방면으로 많은 연구를 한 Missouri-Rolla 대학의 토목공학과와 Franklin Y. Cheng 교수가 내한하여 능동제어의 개념과 지금까지의 연구 결과, 그리고 국외의 능동제어에 관

\* Professor, University of Missouri-Rolla

\*\* 서울대 건축학과 박사과정

\*\*\* 인천대 건축공학과 전임강사

한 연구 진행 상황과 앞으로 연구해야 할 과제에 대해서 강의하였다.

구조물의 능동제어는 외란(disturbance)에 의해서 생긴 구조물의 변형이 안정성과 사용성에 피해가 가지 않도록 인위적으로 건물에 힘을 가하는 방식이다. 바람 또는 지진과 같이 구조물에 가해지는 외력을 외란이라 하고 이러한 외란에 의해 발생한 과도한 변형을 조절하기 위해서 다시 구조물에 가하는 힘을 제어력이라 하는데 이러한 제어력을 산정하는 방식에 따라 다양한 알고리즘이 있다.

알고리즘의 차이는 있지만 제어력 산정에 가장 기본은 폐회로제어(closed-loop control)이다. 즉 구조물의 가해진 제어력에 의해 제대로 제어가 되는지를 센서로 알아내어 이 센서에 의해 얻어진 구조물의 응답을 다시 제어력 산정에 쓰게 되는 state-feedback을 말하는데 이때 구조물의 응답 중 어느 것을 쓰느냐에 따라 제어 효과가 달라지게 된다.

이번 Cheng 교수가 강의에 사용한 알고리즘은 LQR(linear quadratic regulator)이라고 하는 최적제어의 일종으로 목적 함수를 미리 설정하고 이를 최소화하는 제어력을 산정하는 것인데 이 목적

함수의 형태가 선형 이차형태로 주어져 있기 때문에 LQR이라고 한다. 이때 최소화 할 것이 무엇인가에 따라 목적함수의 형태도 달라지게 된다. 강의에서 소개한 두 가지 알고리즘 중 state feedback control은 LQR의 목적함수를 상태변수로 불리는 구조물의 속도와 변위를 최소화하도록 하는 것인데 이 경우 제어력은 이 상태변수에 일정한 상수 즉 gain matrix를 곱하여 구하게 된다. 이렇게 구해진 제어력은 결국 원래 구조물의 강성과 감쇠 행렬을 변화하게 된다. 이 변화는 제어기의 위치에 따라 달라지겠지만 강성과 감쇠가 커지게 됨으로서 구조물의 응답이 조절되는 것이다. 이 변화된 강성 감쇠 행렬은 비대칭으로 물리적인 의미는 없지만 이 행렬을 이용하여 구한 고유값의 실수부가 커지게 됨으로써 응답 감쇠 효과가 있는 것으로 표현된다. 구조물 응답의 감쇠효과를 지배하는 것은 구조물의 고유값의 실수부인데 이 실수부는 구조물의 감쇠비와 고유진동수로 나타낼 수 있다. 이 실수부가 커지기 위해서는 구조물의 감쇠비와 고유진동수가 커져야 하는데 실제로 state feedback을 이용한 능동제어에서 강성의 변화는 매우 작아서 제어 전의 고유진동수는 거의 변화가 없는 반면 감쇠 행렬의 증가로 인한 건물의 각 모

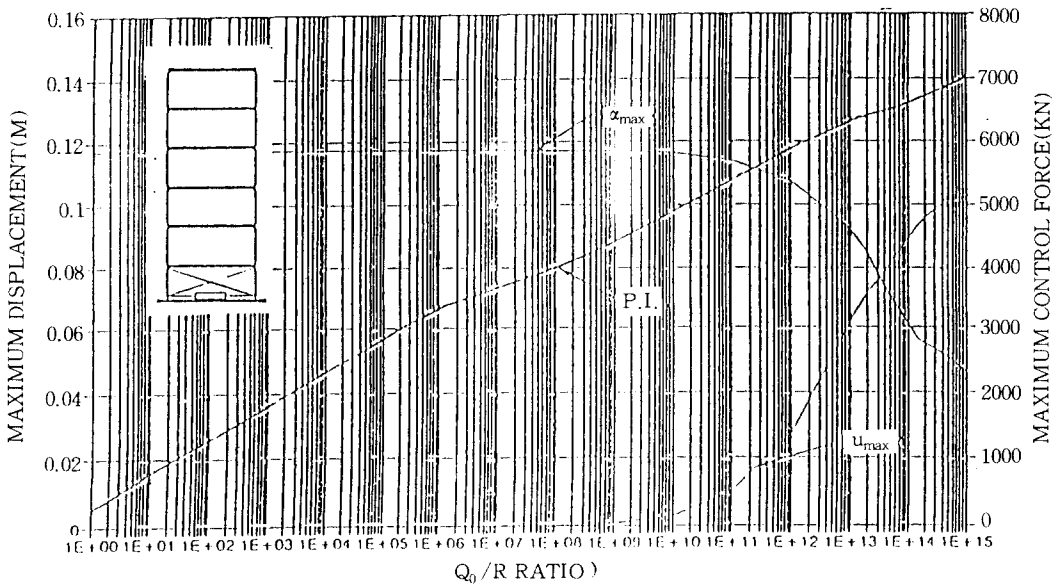


그림 1. Influence of  $Q_0/R$  on  $x_{max}$ ,  $u_{max}$  and P.I. for R.A.

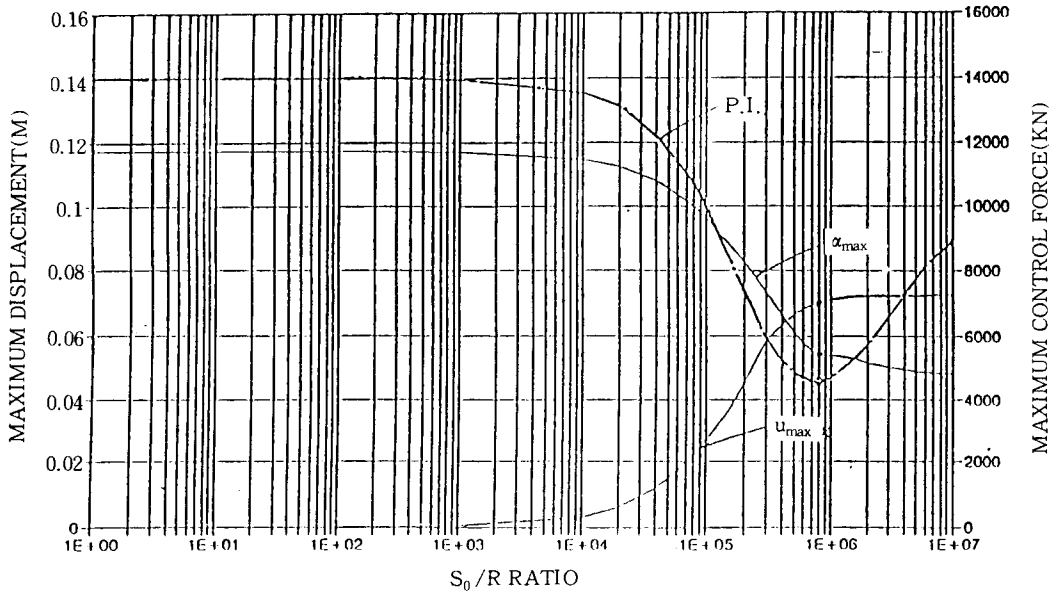


그림 2. Influence of  $S_0/R$  on  $x_{max}$ ,  $u_{max}$  and P.I. for G.A.

드의 감쇠비는 매우 많이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 LQR이라고 하는 알고리즘의 특징이기도 하지만 이 LQR에서 주어지는 가중치행렬 Q, R값에 따라 얼마든지 융통성 있는 설계가 될 수 있다. 이처럼 센서에서 얻어진 속도와 변위가 제어력에 산정에 사용되더라도 변위가 기여하는 제어력은 매우 미진하므로 센서의 수를 줄이기 위해 속도만을 제어력 산정에 쓰기도 한다. 그러나 이것은 LQR이라고 하는 특수한 알고리즘에 한해서 그렇다는 것이지만 약 고유값 지정제어(pole assignment)와 같은 알고리즘을 사용하여 공진이 일어나는 구조물의 진동수를 변경할 필요가 있을 때에는 강성의 증가를 위해서 구조물의 변위가 제어력 산정에 주된 요소로 작용할 수 있다.

두번째로 소개된 알고리즘은 state-slope feedback control인데 최소로 하기 위한 목적함수를 정하는데 있어서 상태변수가 아니라 상태변수의 미분치 즉 가속도와 속도를 사용하였다 하여 붙여진 이름으로 제어력 산정에 가속도와 속도를 쓰기 위해 의도적으로 목적함수를 변형한 것이라고 볼 수 있다. 구조물의 속도와 가속도는 변위와는 달리 시스템의 진동수와 매우 밀접한 관계가 있다. 변위가 작더라도 진동수가 큰 경우에는 이

때의 가속도와 속도는 커지게 된다. 그러므로 slope-state feedback control에서 속도와 가속도를 작게 하기 위해서는 진동수가 작아져야 한다. 이렇게 하기 위해서는 강성을 줄이거나 질량을 키워야 하는데 변위를 feedback을 하지 않기 때문에 강성을 조절할 수 없는 slope-state feedback control에서는 질량이 상대적으로 커져야 한다. 이러한 질량은 물리적인 의미가 없기 때문에 실제로 불필요한 질량을 구조물에 첨가하지는 않기에 기존의 횡력저항시스템의 단점을 피할 수 있다. 즉 이 알고리즘은 state feedback control이 구조물의 강성과 감쇠 행렬을 증가시킨 것과는 달리 구조물의 질량행렬과 감쇠행렬이 커지는 것을 볼 수 있다.

이 두 가지 알고리즘이 가지는 시스템의 변화는 물리적으로도 타당성이 있다. 기존 고층건물의 횡변위를 조절하기 위해서 사용한 방법들이 위와 유사하기 때문이다. 예를 들어 횡변위를 줄이는 방법으로 가장 일반적인 것이 강성을 키우는 것인데 이것은 능동제어에서 변위를 제어력 산정에 사용하는 것이고 점성댐퍼를 구조물의 접합부나 층간에 연결하는 것은 건물의 감쇠비를 키우는 것인데 이것은 속도를 제어력의 산정에서 사용했던 것과

같은 효과를 나타내게 된다. 실제로 강성과 감쇠를 키워 건물을 제어하는 것 외에 질량을 첨부해서 건물을 제어하기도 하는데 이것은 쓸데없는 질량을 첨가함으로써 구조재의 부담을 증가시키는 단점이 있어서 사용하지 않지만 이론적으로 질량이 증가하면 건물의 응답이 줄어든다. 이것이 바로 slope-state feedback control에서 가속도를 제어력 산정에 사용함으로써 얻어지는 효과와 동등한 것으로 기존 횡저항시스템의 단점을 극복할 수 있게 된다.

이 두 가지 알고리즘은 모두 LQR의 범주에 속하는 것으로 목적함수를 정할 때 state와 slope-state를 모두 사용하는 일반적인 형태에서 state와 slope-state만을 따로 추려 낸 아주 특수한 경우라 할 수 있다. 이 LQR에서 목적함수는 가중치 행렬 Q, R에 따라 달라질 수도 있다. 이때 사용되는 가중치행렬 Q는 목적함수에 사용된 state나 slope-state를 조절하기 위해서 사용되는 것이고 R은 이때 작용하는 제어력의 크기를 조절하기 위해 사용되는 것인데 state와 제어력은 Q, R 값에 반비례한다. 그러나 일률적으로 가중치 행렬을 결정할 수 없기 때문에 현재로는 시스템의 특징을 잘 알고 있는 전문가가 몇 번의 시행착오로 알아내는 수밖에 없으므로 그 결정에 있어서 주의가 필요하다. 이와 같이 목적함수에 사용되는 변수에 따라 시스템이 외란에 대응하는 방식은 달라지게 된다. 효율적인 구조물의 제어를 위해서는 state나 slope-state에 사용된 모든 변수는 순간적으로 모두 이용되어야 하는데 실제로 신호처리시간 등으로 인하여 이 모든 변수가 제시간에 사용되지 못하여 시스템의 제어효과가 떨어지는 시간지연 문제를 일으키게 된다. 시간지연은 시스템의 안정성을 손상하여 오히려 제어 효과가 더욱 떨어지게 되는 단점이 있으므로 반드시 보정해야 한다.

이러한 능동제어와 더불어 실제적으로 건물의 변위조절에 많이 쓰이는 것이 수동제어와 준능동 제어이다. 이 세 가지 제어방식은 신호처리에 사용되는 센서의 유무, 제어력을 직접 구조물에 가하는 동력기의 유무로 구분된다. 능동제어는 구조물의 응답을 feedback하기 위한 센서, 이 센서의 응답을 제어력 산정에 사용하여 이 제어력을 다시

구조물에 가하는 동력기가 있는 것을 말하며 준능동제어는 센서는 있으나 실제로 구조물에 힘을 가하는 동력기 대신 형상기억 합금 등과 같은 신소재 또는 가새와 같은 구조 요소가 시간에 따라 부착되거나 분리됨으로써 힘을 가하는 방식이다. 이 모두가 없는 것을 수동제어라고 하는데 본 강연에서 소개된 수동제어기는 보통 동조질량감쇠기로 알려진 spring damper와 spring damper에 사용된 질량체를 액체로 대체한 liquid-mass damper가 소개되었다.

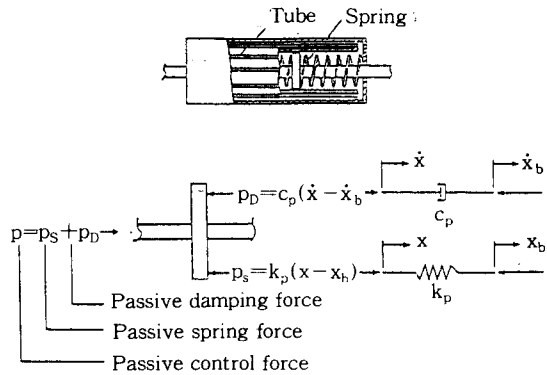


그림 3. Spring Damper

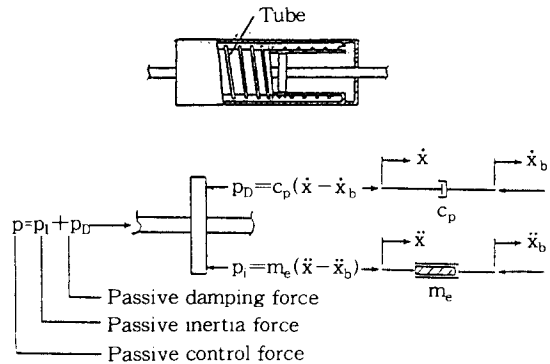


그림 4. Liquid Mass Damper

이렇게 이질적인 제어요소를 혼합하여 사용하는 것은 hybrid-control-system(HCS)이라 하는데 각각의 단점을 보완할 수 있다. 즉 수동제어는 어느 한계 이상의 제어효과는 기대하기 힘든 반면 동력원이 필요없기 때문에 그 유지 관리가 수월하

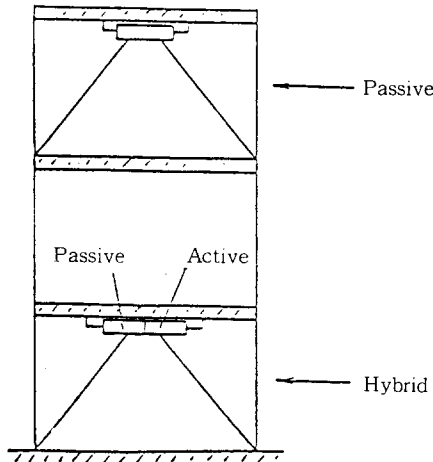


그림 5. Hybrid Control System

다. 그러므로 두 가지 제어요소를 설치한 경우 그리 크지 않은 외력에 대해서는 수동제어기만을 사용하고 구조물의 제어할 수 있고 더 큰 외력에 대해서는 능동제어를 사용함으로써 제어비용을 절감할 수 있으며 능동제어가 제대로 수행되지 않는 경우에는 대응으로 수동제어를 사용함으로써 구조물의 외력에 대한 영향을 최소화할 수 있다. 특히 기술수준으로 인하여 동력기의 최대 발생력이 제한되어 있을 경우에는 미리 수동제어를 통하여 그 이상으로 필요로 하는 제어력을 줄이는데도 사용된다. 실제로 수동제어중 TMD(Tuned Mass Damper)를 LQR 알고리즘을 사용하는 능동제어와 혼용할 경우 어느 가중치값 내에서는 수동제어기를 사용하지 않았을 때보다 40~50%의 제어력 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

한편 지반과 구조물과의 상호작용을 고려하게 되면 시스템의 특징이 아주 달라지기도 한다. 제어효과 또한 시스템의 특징에 따라 달라지게 되므로 지반과 구조물의 상호작용을 고려하게 되는 경우는 시스템의 변화를 명확히 예측해야만이 효율적인 제어를 보장할 수 있다. 그러나 그 예측 방법 또한 제어와 또 다른 학문분야이고 그 예측 또한 명확하게 규명할 수 없을 때가 있다. 이러한 경우는 일정한 margin을 두어 이 허용 범위 내에서 제어를 수행해야 한다. 이것은 명확하게 모델링이 되어 있지 않은 구조물의 제어라고 볼 수 있는데

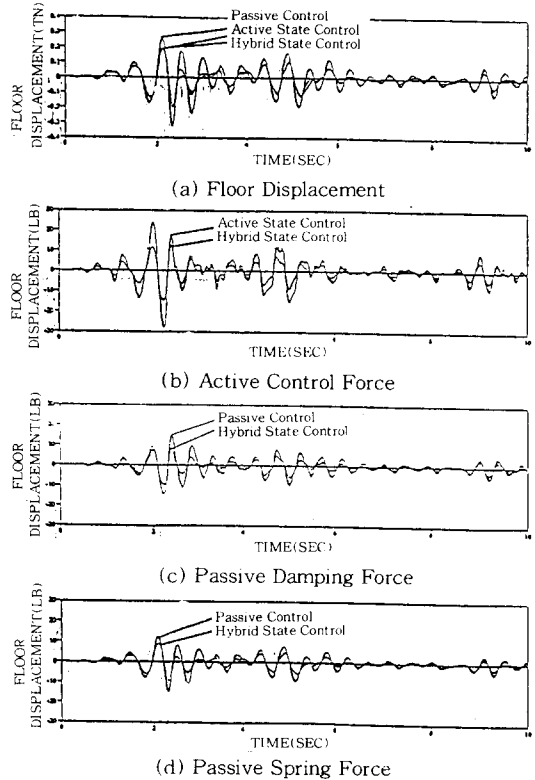


그림 6. Effectiveness of Hybrid State Control

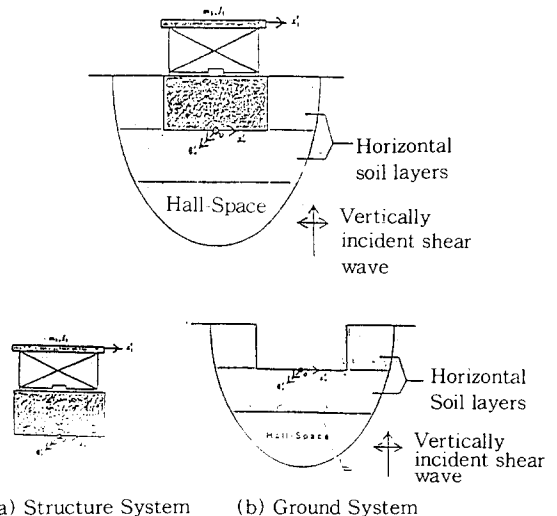


그림 7. Soil-structure Interaction Model

이 경우 매 시간마다 시스템의 특징을 파악하여 이에 대처하는 적응제어(adaptive control)를 할 수 있으며 약간의 시스템 정보를 알 수 있을 때는 앞서 언급한 적당한 margin을 주어 이내에서 안정한 제어가 되도록 하는 견실제어(robust control)를 할 수 있다.

능동제어에서 주어진 목적함수는 서로 상반될 경우가 있다. 즉 어느 한 가지 목적을 만족하게 되면 다른 목적은 퇴보할 수 있으므로 여러 가지 목

적을 한번에 만족하는 제어방식을 찾기는 어려운 일이다. 이것은 목적함수를 최적화하려는 최적제어의 문제이기도 하다. 한 목적함수를 최적화하려면 다른 것은 오히려 퇴보할 수밖에 없는데 이것은 모든 여건을 고려하는 목적함수가 없기 때문이다. 그러므로 이러한 단점을 극복하기 위해서는 모든 목적을 동시에 만족할 수 있는 multi-objective 함수에 대한 연구가 있어야 한다.

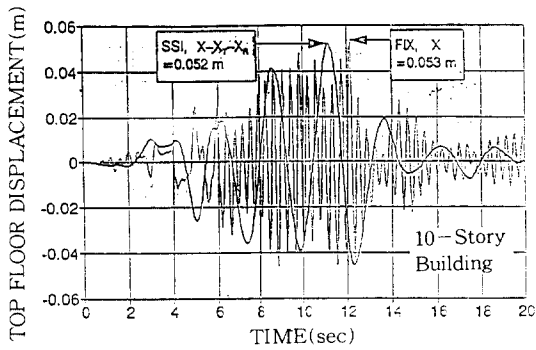


그림 8. Effect of Soil-structure Interaction

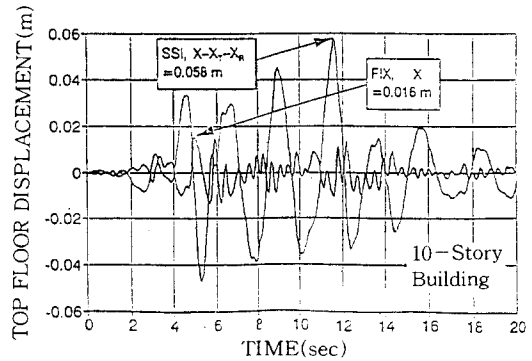


그림 9. Active Control Effects on Soil-structure Interaction System