

(論 文)

토목 구조 제어 시스템의 현황

The State of Art of Structural Control Systems

김 기 봉* · 홍 창 국**

Ki Bong Kim and Chang Kook Hong

〈1992년 12월 8일 접수 ; 1993년 3월 15일 심사완료〉

ABSTRACT

The structural control systems for civil engineering structures have got considerable attention in recent years, since they become effective protective systems. The key idea behind structural control is to keep the response of a structure within certain bounds dictated by serviceability, structural safety, and reliability. Recent activities in control algorithm development and control system design and practical aspects of their applications are summarized, followed by a discussion on possible future directions.

1. 서 론

구조물이 대형화 되면 될수록 그것으로 인하여 수반되는 구조공학적 문제점들은 훨씬 증가한다. 또한 최근에 전세계적으로 발생하고 있는 자연하중은 관련학자들이 예측한 빈도주기의 최대강도보다 큰 경우가 발생하여 엄청난 인명과 재산상의 피해를 입히고 있다. 이러한 두가지 문제에 대한 구조물의 안정성 이외에도 인간은 질적으로 보다 편리하면서도 윤택한 삶을 영위하기 위해서 그들의 모든 활동공간을 첨단과학을 동원하여 개선해 가고 있다.

이들 세 가지 영역을 합리적으로 해결하기 위해서는 재료감쇠나 고유주기의 변화를 통해 구조계의 응답을 제어시킨 종래 방식에는 한계가 있다. 따라서 이미 전자·전기·기계분야에서 응용되고 있는 제어이론을 도입하여 대형 토목 구조물의 제반 문제점들을 해결하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그

러나 전기나 기계 분야에서 개발된 제어이론을 그대로 토목 구조물의 응답제어에 사용할 수는 없는 것이다. 왜냐하면 토목 구조물은 크고 중량이 무겁기 때문에 상대적으로 큰 제어력과 제어장치가 필요하게 된다. 따라서 토목구조물에 적합한 제어 알고리즘을 개발하는 것은 쉬운 일이 아니다.

토목구조물의 구조거동 중에서 안정성과 쾌적성의 주 검토대상이 되는 진동문제에 대한 기본적인 관점을 정리하면 다음과 같다.

(1) 구조계의 고유진동수를 입력기진력의 주진동수와 겹치지 않게 한다.

(2) 복원력의 특성을 가급적 비선형화하여 공진상태를 피한다.

(3) 점성에 의해 진동에너지를 감쇄성을 증가시킨다.

(4) 입력되는 진동에너지를 작게 한다.

(5) 뚜렷한 고유진동수가 드러나지 않는 구조계를 만든다.

본 논문의 목적은 제어원리에 입각하여 지금까지 연구발표된 토목구조물의 구조제어에 관한 문헌을 주제별로 분류 검토하여 우리나라에서도 구조제어에

*중앙대학교 건설대학

**중앙대학교 대학원 토목공학과

대한 관심과 체계적인 연구수행에 필요한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 제어계의 구조거동

제어계를 가지는 토목구조물의 구조거동에 관한 연구는, 첫째 제어이론의 적용절차를 개괄적으로 살펴보는 개념적인 연구, 둘째 제어계에 의해 작동되는 구조계의 해석방법과 제어알고리즘, 셋째 이상화된 제어모델과 실제 구조제어계의 응답사이에 발생하는 오차의 규명과 보정에 관한 연구, 넷째 실용 목적을 위한 각종 구조제어계의 축소 및 실험실험, 그리고 마지막으로 구조물에 대한 제어장치의 실용성을 목적으로한 각종 제어장치의 개발등이 주 연구분야이다.

제어계 연구자나 설계자들이 지니고 있는 설계철학에 따라 차이가 있지만 일반적으로 제어계의 기본 구성을 도식적으로 표시하면 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 I는 feed forward 방식, II는 feed back 방식, 그리고 I과 II를 함께 사용하게 되면 병용방식이라 한다.

외부기진력이나 구조응답변수 혹은 두가지 모두를 측정하기 위해서 제어 구조물의 주위에 설치한 감지장치, 입력된 제어알고리즘에 입각하여 제어에 필요한 힘을 계산하거나 측정된 정보를 처리하는 제어장치, 그리고 외부에너지로 계산된 제어력을 일으키게 하는 동력공급장치가 구조제어계의 주요 장치가 된다⁽¹⁻³⁾.

이상적인 조건하에서 제어력이 구조계에 미치는 영향을 알아보기 위하여 지진지반가속도 $\ddot{X}(t)$ 가 작용하는 질량, dashpot, 스프링으로 구성된 단자유도계의 운동방정식을 고려해 보자.

$$m\ddot{Y}(t) + c\dot{Y}(t) + kY(t) = -m\ddot{X}(t) + U(t) \quad (1)$$

여기서 $Y(t)$: 지반에 대한 질량 m 의 상대변위, c, k : 각각 감쇠계수와 강성계수, $U(t)$: 제어장치에서 공급되는 제어력이다. 구조계를 페루프제어계

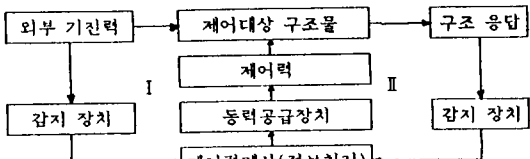


Fig. 1 제어계의 기본구성

라 가정하고 제어력 $U(t)$ 를 측정된 상대변위 $Y(t)$, 속도 $\dot{Y}(t)$, 그리고 가속도 $\ddot{Y}(t)$ 에 의해 선형 함수식으로 나타내면 아래식과 같다.

$$U(t) = K_1 Y(t) + C_1 \dot{Y}(t) + M_1 \ddot{Y}(t) \quad (2)$$

이 식에서 K_1, C_1 , 그리고 M_1 을 각각 변위감지장치, 속도감지장치, 그리고 가속도 감지장치와 관련된 제어이득(control gain)이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$(m - M_1) \ddot{Y}(t) + (c - C_1) \dot{Y}(t) + (k - K_1) Y(t) = -m\ddot{X}(t) \quad (3)$$

식 (3)은 제어력에 의해 구조계의 동적특성, 즉 질량, 감쇠, 그리고 강성을 변화시킬 수 있음을 보여주고 있다. 그리고 제어이득은 선택된 제어 알고리즘에 의한다.

2.1 수동 구조제어계

수동구조제어계에 관한 최근의 연구는 지반분리계(base isolation)가 주종을 이루고 있다. 일반적으로 지반분리계는 수평적으로 구조계의 지배진동수(fundamental frequency)보다 더 낮은 진동수를 가지는 유연한 장치로 설치하여야 한다. 그러나 분리계의 유연성 때문에 지반변위는 오히려 더 커지게 된다. 따라서 설계기준에 의해 제한된 범위내로 변위를 제어하기 위해서는 부가적인 감쇄장치나 에너지 소멸장치를 분리계에 추가시켜야 한다.

(1) Elastomeric Bearing Isolation System⁽³⁻⁵⁾

Elastomeric bearings은 고무판에 얇은 보강판을 접착시켜 만드는 것으로 베어링은 수직방향으로 구속되어 있고 수평방향으로는 활동할 수 있다. 이러한 장치들 중에서 가장 많이 사용되고 있는 것은 납-고무베어링계(lead-rubber bearing system)로 elastomeric bearing 중심에 원통형 납심(lead core)을 설치한 것이다.

(2) 활동 분리계(sliding isolation system)⁽³⁾

이 계는 상부구조의 진동수 변경보다는 활동경계면의 마찰에 의한 에너지 감쇄를 이용하여 지반분리계 효과를 얻는 것으로, 지반운동에 따른 진동수특성에 민감하지 않아 지역특성에 관계없이 널리 사용되고 있으며 특히 안정성이 뛰어나 핵발전소의 지반분리계에 이용된다. 일반적으로 이 계의 활동면의 마찰계수는 0.2로 하며, 지반가속도는 지역에 관계없이 0.2g를 기준으로 설계한다.

(3) 복원력 장치가 있는 활동분리계

이 방법은 활동분리계의 단점을 보완하여 개량한

것으로, 복원력장치가 활동계에서 발생할 수 있는 큰 영구변위를 제어하기 위하여 설치된다. 이들 장치로는 나선형스프링, 고무블록등 여러가지가 이용될 수 있다.

(4) 기타 지반분리계

앞의 세가지 방법 이외에 나선형 강스프링, 점성 감쇄장치⁽⁷⁾, 그리고 뉴질랜드에서 개발되어 사용되고 있는 슬리브관 말뚝계 (sleeved pile system) 등이 있으며 유연성과 에너지 소멸분야가 여기에 포함된다.

일반적으로 지반분리계의 응용은 교량구조계에서 성공적으로 사용되고 있지만^(8,9) 빌딩구조계에서는 체계적인 설계절차와 실험적인 연구등이 뒷받침되어야 한다.

2.2 능동 구조제어계

토목공학에서도 능동제어계 도입의 중요성은 1970년대 초 Yao에 의해서 소개되었고, 1976년부터 실용가능성에 관한 연구가 활발하게 진행되었다. 그들에 관한 연구자들 중에서 Yang, Soong, Abdel Rohman, Yao, Roorda, Reinhorn, Chung, 그리고 Leipholz 등이 주목할 만하며 이들 이외에도 많은 연구자들이 있다^(10~12). 능동구조제어에 관한 연구는 자기 다른 제어설계기준에 따라 다양한 제어알고리즘이 존재할 수 있으며, 지금까지 연구발표된 중요 알고리즘에 따른 분류는 대략 다음과 같다.

(1) 최적 선형제어(optimal linear control)

최적선형제어는 제어기간동안에 구조응답과 제어력이 함께 포함되는 2차평가지수(quadratic performance index)를 최소화시키는데 기초를 둔다^(13~15).

$$J = \int_0^{t_f} [\underline{Z}^T(t) \underline{Q} \underline{Z}(t) + \underline{U}^T(t) \underline{R} \underline{U}(t)] dt \quad (4)$$

이 식에서 상첨자 T 는 전치행렬, $\underline{Z}(t)$ 는 구조응답 상태벡터, $\underline{U}(t)$ 는 제어력벡터이고, 제어시간 간격 $[0, t_f]$ 는 구조물에 작용하는 외부 기진력보다 더 길게 잡아야하며, 가중행렬 \underline{Q} , \underline{R} 은 구조응답량과 제어력 사이의 상대적 중요성에 따라 그들의 크기가 결정된다. 이 분야의 최근연구는 제어이득에 대하여 시불변 행렬의 이용이고^(16,17), 실험적인 연구도 함께 진행되고 있다^(18,19).

(2) Pole Assignment^(20~23)

폐루프제한에 의해 제어력이 결정되며 기존 구조계의 modal damping비와 고유치를 변경시키는데 이 방법이 사용된다.

(3) Independent Modal Space Control^(22,24)

제어계설계는 modal space에서 일어난다. 특히 이 방법은 몇가지 임계모우드만 제어할 필요가 있을때 효과적인 방법이다. 그러나 이 방법의 최적성을 위해서는 적어도 제어장치의 수가 제어된 모우드수와 같게해야 한다.

(4) Instantaneous Optima Control^(16,17,25)

제어공학에서 instantaneous system이란 제어계가 시간 t 에서의 출력은 그 시간에 작용하는 입력에만 영향을 받는 제어이다. 이 제어계는 식 (4)의 평가지수는 식 (5)와 같이 시변으로 표시되며 모든 시간중분에서 최소화시켜야 한다.

$$J(t) = [\underline{Z}^T(t) \underline{Q} \underline{Z}(t) + \underline{U}^T(t) \underline{R} \underline{U}(t)] \quad (5)$$

이 제어계는 다시 페루프계, 개루프계, 그리고 폐개루프계로 분류될 수 있고, 비선형 구조계에 적합하다.

(5) Bounded State Control^(26~29)

이 알고리즘은 계의 구조적 안전성이나 인간의 안락감을 위해서 허용할 수 있는 응답변수들의 절대값을 미리 결정하여 외부기진력에 의한 응답상태변수를 항상 결정된 경계범위 이내로 제한하고자 할때 사용된다. 그러므로 계의 상태변수는 계속적으로 감시되어야 한다. 문헌에서 발표된 pulse 제어기법들이 이 분야에 귀속된다. 비용함수를 최소화하기 위한 pulse의 크기가 해석적으로 결정되며, 비탄성 구조물을 다룰 때 적합한 제어계이다.

(6) 기타 제어 알고리즘

위에서 언급된 5가지 제어 알고리즘 이외에도 계의 특성에 따른 여러가지 독특한 알고리즘이 존재할 수 있다. 그들 중 몇가지 흥미있는 논제로는 predictive control⁽³⁰⁾, fuzzy control,^(31,32) simultaneous control, 그리고 structural parameter optimization 등이 연구되고 있다.

2.3 하중제어

가능하다면 구조물의 응력과 변위를 제어하는데 있어 가장 이상적이고 확실한 방법은 구조물에 작용하는 외부기진력을 사전에 적절한 수준으로 제어시키는 것이다. 그러나 구조물에 작용하는 모든 외력을 직접적으로 완벽하게 제어하는 것은 불가능하기 때문에, 제어할 수 있는 힘은 직접제어방법을 이용하고, 제어할 수 없는 힘은 간접제어방법이 사용되고 있다.

(1) 간접하중제어⁽³³⁾

간접하중제어는 제어할 수 없는 힘, 즉 대기온도,

지진, 풍하중, 그리고 발파에 의해 야기되는 충격과 같이 자연적으로 발생하는 외력에 사용된다. Fig. 2와 같이 외력과 구조물 사이에 간접하중제어장치나 시설물을 설치하여 외력의 위치에너지나 운동에너지가 그대로 구조물의 내부에너지로 전환되는 것을 어느정도 차단시켜 주구조물의 치명적인 손상을 피하게 하는 것이다.

(2) 직접하중제어⁽³³⁾

직접하중제어는 제어할 수 있는 힘에 응용되며 하중의 크기와 분배형태를 직접제어하는 것이다. Fig. 3(a)의 흐름과 같이 제한하중을 두어 외력을 직접 조절하거나 제한하는 방법과 Fig. 3(b)와 같이 부가력계를 이용하여 하중분배를 변화시키는 방법이 있다.

2.4 제어력 도입 방법에 의한 분류

구조계의 제어력을 도입하는 방법에 따라 다음과 같이 분류되어진다.

(1) 능동텐던 제어장치(active tendon control)

이 방법은 전기수력제어장치(electrohydraulic servomechanisms)와 같은 동력공급장치와 제어위치를 연결시키는 텐던이나 케이블로 구성되어 있다. 구조계의진동을 줄이기 위해서 hydraulic rams의 운동으로 텐던을 당기거나 늦추어서 제어력을 발생시키게 된다. 이러한 hydraulic rams의 운동은 감지장치와 제어알고리즘에 의해 조절된다. ACT의 실용가능성의 연구는 주로 가느다란 구조⁽³⁴⁾, tall building^(20,35~38), king post truss^(20,35,39), 해양구조물⁽³³⁾ 등에 관한 이론적인 연구와 실험적인 연구가 주종을 이루고 있다.

(2) 능동질량감쇠장치(active mass damper)

제어력을 도입하는 방법 중에서 실용 가능성이 높

아 가장 많이 연구되고 있으며, 기존구조물의 진동제어를 목적으로 사용되어지고 있다. 초기에는 수동제어체인 동조질량감쇠장치(tuned mass damper)^(40,41)에 관한 연구가 많으며, 그 원리는 구조계의 지배진동수와 일치시킨 질량감쇠장치의 관성력을 이용하는 것이다. 그러나 구조계의 첫번째 모드를 제어시키는데는 효과적이지만 두번째 모드이상은 제어시키지 못한다. 이들에 관한 실제 적용예는 CN Tower(1975), John Hancock Tower(1981), Citicorp Center(1978), Sydney Tower(1981), 千葉 Bost Tower(1986) 등이 있다.

TMD의 단점을 보완하여 보다 능동적으로 진동을 제어하는 능동동조질량감쇠장치^(42,43)가 개발되었다. AMD의 특징은 풍하중에 의한 진동을 억제시키기 위해 주로 사용되며, 이들에 대한 실험적인 연구와 함께 최근에는 유지 관리가 쉽고 설치비용이 저렴한 동조액체감쇠장치(tuned liquid damper)^(44~46)에 관한 연구도 진행되고 있다. 진동제어에 획기적인 전환점이라 볼 수 있는 세계 최초의 능동질량감쇠장치를 이용하여 진동을 제어시킨 건물이 일본의 京橋成和 빌딩(1989.10)이다⁽⁴⁶⁾. 실제로 이 건물은 중소 지진이나 태풍으로 인하여 발생된 진동을 거의 완벽한 수준으로 억제시키고 있음을 입증시켰다.

(3) 기체 동력학적 부가장치(aerodynamic appendages)^(47~49)

이 장치는 강풍 하에서 빌딩의 상층 거주자의 안락감을 저해하는 과도한 진동을 억제시키는데 이용될 수 있다. 이 방법의 특징은 제어력을 얻기 위하여 풍력 그자체를 이용하며, 부가장치의 조절은 측정된 구조응답에 의해 능동적으로 조절된다. 풍하중하에 3가지 각기 다른 제어장치, 즉 AMD, ATC, 그리고 기체 동력학적 부가장치를 상호 비교한 연구도 있다⁽⁴⁷⁾.

(4) Gas Pulse Generator^(28,50~53)

순간적인 공기분사장치를 이용하여 제어력을 발생시키는 방법으로 제어 알고리즘으로 펄스제어가 적합하다. 축소모델에 의한 실용가능성을 연구한 논문도 발표되었다⁽⁵⁰⁾. 또한 최근에 개발된 cold gas generator는 상당히 고무적인 것이다.

(5)복합 제어장치(hybrid control)^(53~59)

수동제어계는 높은 진동수영역의 진동에너지를 효과적으로 흡수할 수 있는 반면 낮은 진동수 영역을 제어하고자 할 때 아주 큰 용량의 제어장치가 필요하게 된다. 능동제어장치는 외부에너지 공급장치를 이용하여 낮은 진동수영역을 능률적으로 처리할 수

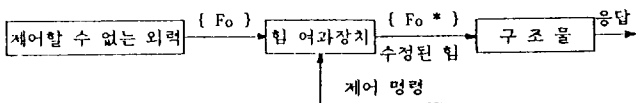


Fig. 2 간접하중제어의 흐름선도

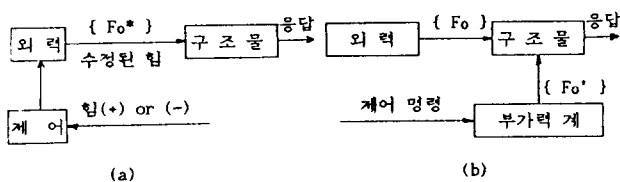


Fig. 3 직접하중제어의 흐름선도

있다. 결과적으로 능동제어장치와 수동제어장치의 조합은 경제적인 이득과 함께 구조 안전성 측면에서도 유리하다. 왜냐하면 능동제어계는 급작스러운 정전이나 예상하지 못한 제어장치의 고장으로 제어계 작동이 불가능할 경우 수동제어계가 제어기능의 일부를 수행하는 것도 바람직할 것이다.

일반적으로 연구되고 있는 복합제어계는 TMD와 ATC, 지반분리계와 동력공급장치, 지반분리계와 AMD, 물과 기압, 그리고 서로 다른 능동제어계의 상호 위치에 따른 제어응답효과에 관한 연구가 있다⁽⁵⁵⁾.

(6) 기타 제어장치

이상의 장치 이외에 현수교의 진동을 줄이기 위하여 사용된 회전기(gyroscope), 능동구조부재와 절점^(60,61), 공기실(air chambers), 점성감쇠장치^(7,62,63), 체인, 한정변위장치^(64,65), 플라스틱힌지, 그리고 구조계의 기하학적 조건등이 이용될 수 있다.

구조제어계의 입력하중으로는 결정론적하중이나 불규칙하중의 표본을 사용할 수도 있으며, 지진지반 가속도, 불규칙 풍하중과 같은 비정상 불규칙 하중에 대한 구조계의 추계학적 해석에 관한 연구, 그리고 보다 어려운 문제이지만 토목구조물은 분포 파라미터계(distributed parametric system)^(66,67)이므로 이들에 대한 더 많은 관심이 있어야 할것 같다.

3. 현실 적용을 위한 문제점

2장에서 언급된 제어알고리즘을 현실적으로 적용하는대는 리얼타임시스템(real time system)이 바람직하다. 그러나 이 계의 현실적용을 위해서는 다음 사항에 대한 연구가 뒷받침되어야 한다.

3.1 모델오차와 과잉효과(Modeling Errors and Spillover Effects)

앞에서 언급한 바와 같이 토목 구조물은 연속적인 분포 파라미터 계이다. 그러나 그 계의 정확한 운동방정식의 유도과 계산상의 어려움등 여러가지 이유

때문에 일반적으로 Fig. 4와 같이 이산화된 구조계를 이용하여 2단계 축소모델절차가 이루어진다^(68~70). 그러므로 ROS모델로 제어설계를 하였을때 필연적으로 모델오차와 과잉효과가 생기게 된다. 이에 대한 여러가지 보정방법들이 제시되었지만 그것이 대한 더 정확한 연구가 있어야 한다.

3.2 시간지연(time delay)

Fig. 1에서 보여준 제어계와 관련된 모든 동작은 순간적으로 이행되어야 한다. 그러나 실제로는 응답감지에서 제어력작동까지는 측정된 정보의 처리, 온라인 계산수행, 그리고 필요한 제어력을 일으키는데 걸리는 시간간격이 존재한다. 이같은 시간지연은 구조제어계에서 제어에 꼭 필요한 시간과 불일치되어 제어력의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 계를 불안정하게 만들 수도 있다. 시간지연에서 발생하는 오차를 보정할 수 있는 방법에 관한 논문도 발표되고 있다^(19,71).

3.3 한정된 감지장치와 제어장치^(14,69,72,73)

연속구조에 대한 감지장치와 최적화, 제어장치의 최적위치와 분배는 경제적인 관점에서도 중요한 문제가 되며 제어결과에도 영향을 미칠 것이다. 특히 구조계의 고유기능에 적합한 제어장치와 감지장치의 선택은 중요할 것이다. 이들 문제에 대한 몇편의 연구가 있지만 여전히 미해결문제가 산적해 있다.

3.4 파라미터의 불확실성과 계의 인식^(26,74,75)

최근 구조제어계에서 파라미터의 불확실성에 대한 제반문제가 제기되고 있다. 이러한 파라미터의 불확실성으로 인한 제어의 민감성문제는 제어알고리즘, 감지장치와 제어장치의 위치, 하중기록, 그리고 주어진 상황속에서 이용된 제어장치등에 의존한다.

강한 외부기진력을 받으면 구조계는 비선형거동과 함께 시불변계에서 시변계로 구조거동을 일으키게 된다. 그러므로 시변파라미터값이 생길 것이고, 온라인 인식(on-line identification)과 제어는 현실적인 생점이 될 것이다.

3.5 이산 시간제어^(30,76)

제어알고리즘을 적용하는데 있어 이산 시간특성이 리얼타임이행의 중요한 원인을 제공하게 된다. 그러므로 디지털컴퓨터는 제어의 실용성, 신뢰성, 그리고 속도적인 면에서 더 적합하고, 특히 이산시간문제는 시간지연문제와 연계시켜 연구되고 있다.

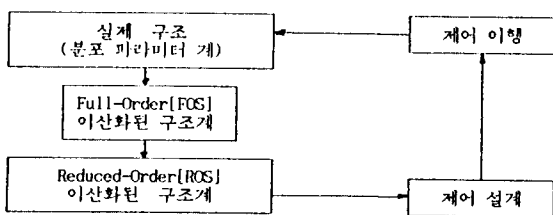


Fig. 4 모델축소와 제어과정

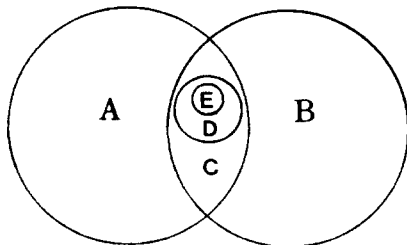
3.6 신뢰성

잘못 설계된 제어계는 제어계를 도입하지 아니한 경우보다도 구조안전성측면에서 역효과를 가져올 수도 있다^(1,21,77), 신뢰성은 구조해석, 설계 및 시공등을 포함하여 모든 분야에서도 가장 중요할 뿐만 아니라 기술적인 면과 심리적인 면이 함께 연관되어 있는 복잡성이 내포되어 있다. 따라서 신뢰성 문제에서 상관있는 모든인자를 고려하려고 하면 상당히 폭넓은 분야일 것이다. 예를 들면 고층건물의 상층거주자나 핵 발전소의 주변 거주자들은 구조물의 붕괴나 사고위험성이 전혀 없는 미소한 흔들림이나 사고에 정신생리학적·심리학적 불안감으로 그 구조물에 대한 신뢰성은 상실될 것이다. 따라서 진동문제에 대한 인간의 반응문제⁽⁷⁸⁾를 심도있게 연구하여 진동제어를 위한 한계 기준 자료로 이용하면 가치가 있을 것이다.

이상 6가지 요소 이외에도 제어계설치로 인한 미학적인면, 비용문제의 최소화, 유지관리적인 면등의 상호비교이외에도 하드웨어개발, 새로운 동력공급장치의 개발, 대형제어력을 얻을수 있는 기술의 개발 등 많은 연구과제들이 있을 것이다^(79,80).

4. 결 론

지금까지 기술된 제어계의 구조는 전통적인 구조개념과 비교할때 혁명적이라 할 수 있기 때문에 토목기술자나 건설전문가들은 제어기술의 개발과 수용에 주저하였다. 그러나 주요구조물, 핵발전소, 병원, 슈퍼 초고층빌딩(200층 이상), 장대교량, 위성안테나, 우주계획등에서 진동제어의 필요성이 점점적으로 인정하고 있으며, 본문에서 언급한 바와 같이 극소수 구조물에서 이미 사용되고 있다.



- A : 적응구조(adaptive structure)
- B : 지각구조(sensory structure)
- C : 제어된 구조(controlled structure)
- D : 능동구조(active structure)
- E : 지능구조(intelligent structure)

Fig. 5 구조계의 분류⁽⁸¹⁾

미래시대의 모든구조는 Fig. 5와 같이 적응구조(adaptive structure)와 지각구조(sensory structure)로 건설될 것이다. 두 구조중에서도 가장 정교한 지능구조(intelligent structures)의 출현을 예상하고 있으며 사소한 분야는 이미 적용되어지고 있다. Fig. 5에서 적응구조란 제어된 방법으로 계의 상태나 특성을 변경할 수 있는 동력공급장치를 갖고 있는 구조이고, 지각구조는 계의 상태나 특성을 결정하거나 감시할 수 있는 장치를 소유하고 있는 구조이다.

능동제어기술의 개발과 연구는 현실적용을 위한 문제점 분석과 함께 컴퓨터, 전자·기계, 평가기술, 계기, 재료연구등 여러 관련분야에 대한 연구가 종합적으로 이루어지면 더욱 효과적일 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Howward L. Harrison, and John G. Bollinger., 1970, "Introduction to Automatic Controls," International Textbook Company.
- (2) Silva de, C. W., 1989, "Control Sensors and Acutators," Prentice-Hall.
- (3) Stephen P. Banks., 1990, "Control Systems Engineering," Prentice-Hall Interna.
- (4) Tsopelas, P. C., Nagarajaiah, S., Constantinou, M. C., and Reinhorn, A. M., 1991, "3D-BASIC-M: Nonlinear Dynamic Analysis of Multiple Building Base Isolated Structures," Technical Report, NCEER-91-0014.
- (5) 長谷川 金二, "橋梁の免震 制震技術," 土木技術, Vol. 44(8), pp. 80~86.
- (6) Shinozuka, M., 1991, "土木工學における免震および制震技術," 土木學會誌, pp. 15~19.
- (7) 河田寛行 外 6人, 1992, "幸魂橋の施工と制振對策," 橋梁と基礎, pp. 11~16.
- (8) 川島一彦, 1991, "道路橋における免震設計技術の現狀と課題," 橋梁, pp. 2~11.
- (9) 横山功一, "澤田憲文, 岩津守昭, 澤登善誠, 1992, "動吸振器(TMD)による高架橋の交通振動軽減效果," 土木技術資料, 第34卷 3號, pp. 48~54.
- (10) Basharkhah, M. A., and Yao, J. T. P., 1984, "Reliability Aspects of Structural Control," Civil Engng Syst. Vol. 1, pp. 224~229.
- (11) Basharkhah, M. A., 1983, "Reliability Aspects of Sturctural Control," Ph. D. Dissertation Purdue University.

- (12) Chi-Tsong, Chen., 1984, "Linear System Theory and Design," Holt, Rinehart and Winston.
- (13) Abdel-Rohman, M., Quintana, V. H., and Leipholz, H. H. E., 1980, "Optimal Control of Civil Engineering Structures," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 106, No. 1, pp. 57~73.
- (14) 金己奉, 洪昌國, 1991, "長支間 單純橋의 最適制御," 大韓 土木學會 學術發表會 概要集, pp. 256~260.
- (15) Sato, T., Toki, K., and Sugiyama, K., 1990, "Optimal Control of Seismic Response of Structures," 日本土木學會論文集, No. 416/I-13, pp. 191~200.
- (16) Yang, J.N., Akbarpour, A., and Ghaemmaghami, P., 1987, "New Optimal Control Algorithms for Structural Control," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 113, No. 9, pp. 1369~1386.
- (17) Yang, J. N., Akbarpour, A., and Ghaemmaghami., 1987, "Optimal Control Algorithms for Earthquake-Excited Building Structures," (ed. H. H. E. Leigholz), Proc. Second Int. Symp. on Structural Control, University of Waterloo, Canada, July 15~17, 1985, Martinus Nijhoff, Amsterdam, pp. 748~761.
- (18) Chung, L. L., Lin, R. C., Soong, T. T., and Reinhorn, A. M., 1988, "Experimental Study of Active Control of MDOF Structures Under Seismic Excitations," Technical Report, NCEER-88-0025.
- (19) Chung, L. L., and Soong, T. T., 1988, "Experiment on Active Control of Seismic Structures," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 114(EM2), pp. 241~256.
- (20) Abdel-Rohman, M., 1979, "Contributions to Automatic Active Control of Civil Engineering Structures," Ph. D. Dissertation, University of Waterloo.
- (21) Abdel-Rohman M., and Leipholz, H. H. 1978, "Structural Control by Pole Assignment Method," J. Engrg. Mech, Div., ASCE, Vol. 104(EM5), pp. 1159~1266.
- (22) Meirovitch, L., and Ghosh, D., 1987, "Control of Flutter in Bridges," (ed. H. H. E. Leipholz), Proc. Second Int. Symp. on structural Control, University of Waterloo, Canada, July 15~17, 1985, Martinus Nijhoff, Amsterdam, pp. 458~472.
- (23) Wonham, W. M., 1967, "On Pole Assignment in Multi-Input Controllable Linear System," Transactions on Automatic Control, Vol. AC-12, No. 6, pp. 660~665.
- (24) Meirovitch, L., and Oz, H. 1979, "Active Control of Structures by Modal Synthesis," Structural Control, H. H. E. Leipholz, ed., North Holland SM Publishing Co., pp. 505~522.
- (25) Akbarpour, A., 1987, "Optimal Control Theory for Seismic Excited Structures," Ph. D. Dissertation, George Washington University.
- (26) Lee, S. K., and Kozin, F., 1986, "Bounded State Control Structures with Uncertain Parameters," Dynamic Response of Strut., G. C. Hart and R. B. Nelson, Eds., ASCE, New York, N. Y., pp. 788~794.
- (27) Lee, S. K., and Kozin, F., 1987, "Bounded State Control of Linear Structures," (ed. H. H. E. Leipholz), Proc. July 15~17, 1985, Martinus Nijhoff, Amsterdam, pp. 387~407.
- (28) Masri, S. F., Bedey, G. A., and Caughey, T. K., 1981, "Optimum Pulse Control of Flesible Structures," J. Applied Mechanics, Vol. 48, pp. 619~626.
- (29) Masri, S. F., Bekey, G. A., and Safford, F. B., 1975, "Optimum Response Simulation of Multidegree Systems by Pulse Excitation," J. Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol. 97, pp. 46~52.
- (30) Rodellar, J., Barbat, A. M., 1987, "Predictive Control of Structure," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol 113, No 6, pp. 797~812.
- (31) Yao, J. T. P., and Abdel-Rohman, M., 1987, "Reserch topics for Practical Implementation of Structural Control," (ed. H. H. E. Leipholz), Proc. Second Int. Symp. on Structural Control, University of Waterloo, Canada, July 15~17, 1985, Martinus Nijhoff, Amsterdam, pp. 762~767.
- (32) 英三郎, 1990, "最適制御·퍼지제어에 의한 制振構造," 建築과 社會, jp. 75.
- (33) Roorda, J., 1975, "Tendon Control in Tall Structures," J. Structural Div., ASCE, Vol. 101, No. 3, pp. 505~521.
- (34) Hassibi, J., 1975, "Control and Synthesis of Structutes," Ph. D. Dissertation, University of Waterloo, Canada.
- (35) Abdel-Rohman M., and Leipholz, H. H. 1980,

"Automatic Active Control of Structures." J. Stru. Div., ASCE, Vol. 106(ST3), pp. 663~677.

(36) Samali, G., 1984, "Control of Coupled Lateral-Torsional Motion of Buildings under Environmental Loads," Ph. D. Dissertation, George Washington University.

(37) Yang, J. N. 1982, "Control of tall Buildings Under Earthquake Excitation," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 108(EM5), pp. 833~849.

(38) Yang, J. N., and Samali, B. 1983, "Control of Tall Buildings in Along-Wind Motion," J. Stru. Div., ASCE, Vol. 109(ST1), pp. 50~68.

(39) Leipholz, H. H. H., "On the Occurrence of Non-Selfadjointness in the Control of Elastic Structures," ACTA Mechanical, Vol. 73, pp. 95~119.

(40) Chang, J. C. H., and Soong, T. T., 1980, "Structural Control using Active Tuned Mass Dampers," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 106, No. 6, pp. 1091~1098.

(41) Chowdhury, A. H., Iwuchukwn, M. D., and Garske, J. J., 1987, "The Past and Future of Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers," (ed. H. H. E. Leipholz), Proc. Second Int. Symp. on Structural Control, University of Waterloo, Canada, July 15~17, 1985, Martinus Nijhoff, Amsterdam, pp. 105~127.

(42) Davorin, H., Pinhas, B., and Michael, R., 1983, "Semi-Active Versus Passive or Active Tuned Mass Dampers for Structural Control," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 691~705.

(43) Soong, T. T., and J. Chang, 1980, "Structural Control using Active Tuned Mass Dampers," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 106(EM6), pp. 1091~1098.

(44) Xu, Y. L., Kwok, K. C. S., and Samali, B., 1992, "The Effect of Tuned Mass Dampers and Liquid Dampers on Cross-Wind Response of Tall/Slender Structures," J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 40, pp. 33~54.

(45) Xu, Y. L., Samali, B., and Kwok, K. C. S., 1992, "Control of Along-Wind Response of Structures by Mass and Liquid Dampers," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 118, No. 1, pp. 20~39.

(46) "特集：制御は建物をこう變える," 建築技術, 1991.

(47) Abdel-Rohman, M., 1987, "The Feasibility of Active Control of Tall Buildings," (ed. H. H. E. Leipholz), Proc. Second Int. Symp. on Structural Control, University of Waterloo, Canada, July 15~17, 1985, Martinus Nijhoff, Amsterdam, pp. 1~17.

(48) Chang, J. C. H., and Soong, T. T. 1979, "The Use of Aerodynamic Appendages for Tall Building Control," Structural Control, H. H. E. Leipholz, ed., North Holland SM Publishing Co., pp. 199~210.

(49) Soong, T. T., Skinner, G. T., 1981, "Experimental Study of Active Structural Control," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 107, No. 6, pp. 1057~1067.

(50) Miller, R. K., Masri, S. F., Dehghanyar, T. J., and Caughey, T. K., 1988, "Active Vibration Control of Large Civil Structures," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 114(EM9), pp. 1542~1570.

(51) Reinhorn, A. M., Manolis, G. D., and Wen, C. Y., 1987, "Active Control of Inelastic Structures," J. ENgrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 113, No. 3, pp. 315~333.

(52) Reinhorn, A. M., Manolis, G. D., and Wen, C. Y., 1987, "An On-Line Control Algorithm for Inelastic Structures," (ed. H. H. E. Leipholz), Proc. Second Int. Symp. on Structural Control, University of Waterloo, Canada, July 15~17, 1985, Martinus Nijhoff, Amsterdam, pp. 564~579.

(53) "水と空氣壓を利用した高層建築物向け制振システム," 建築技術, 1992, 2月, p. 59.

(54) Abdel-Rohman, M., and Nayfeh, A. H., 1987, "Active Control of Nonlinear Oscillations in Bridges," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 113, No. 3, pp. 335~348.

(55) Cheng, F. Y., and Pantelides, C. P., 1988, "Combining Structural Optimization and Structural Control," Technical report, NCEER-88-0006.

(56) Yang, J. N., Li, Z., Danielians, A., and Liu, S. C., 1992, "Aseismic Hybrid Control of Nonlinear and hysteretic Structures II," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 1441~1456.

(57) Yang, J. N., Danielians, A., Liu, S. C., 1991, "Aseismic Hybrid Control Systems for Building Structures," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 117, No. 4, pp. 836~853.

(58) Yang, J. N., and Danielians, A., 1990, "Two

Hybrid Control Systems for Building Structures under strong earthquakes," Technical Report, NCEER-90-0015.

(59) 能勢 卓, 芋田口勝生, 1991, "Development of Hybrid Mass Damper," 土木學會誌, 2月號, pp. 12~13.

(60) Zuk, W. 1979, "The Past and Future of Active Structural Control Systems," Structural Control, H. H. E. Leipholz, ed., North Holland SM Publishing Co., pp. 779~794.

(61) Zuk, W. 1968, "Kinetic Structures," Civil Engineering, ASCE, December, pp. 62~64.

(62) "特集: 土木 構造物の 振動制御," 国土와 建設, 第9卷 3號, 1992.3., pp. 66~79.

(63) 米田昌弘, 前田研一, 1991, "斜長橋ヶーフルの風による振動とその制御法," 橋梁, pp. 27~35.

(64) 金己奉, 洪昌國, 1991, "構造物の 制御概念과 通用現況," 韓國 鋼構造學會誌, 第3卷, 第4號, pp. 94~103.

(65) 朴建淳, "連繪보에 對한 制御모델의 適用에 關한 研究," 中央大學校 建設大學院 碩士學位論文.

(66) Abdel-Rohman, M., 1986, "Active Control of Distributed Parameters Structures by Pointwise Control Action," Dynamic Response of Struct., G. C. Hart and R. B. Nelson, Eds., ASCE, New York, N. Y., pp. 756~763.

(67) Burke, S. E., 1989, "Shape and Vibration Control of Distributed Parameter Systems-extension of Multivariable Concepts using Spatial Transforms," Ph. D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

(68) Balas, M. J. 1979, "Active Control of Large Civil Engineering Structures: A Naive Approach," Structural Control, H. H. E. Leipholz, ed., North Holland SM Publishing Co., pp. 107~126.

(69) Soong, T. T., and Chang, M. I. J. 1979, "On Optimal Control Configuration in Theory of Modal Control," Structural Control, H. H. E. Leipholz, ed., North Holland SM Publishing Co., pp. 723~738.

(70) Yang, J. N., and Lin, M. J. 1982, "Optimal

critical-Mode Control of Building Under Seismic Load," J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 108(EM6), pp. 1167~1185.

(71) Reinhorn, A. M., Soong, T. T., Lin, R. C., Wang, Y. P., Fukao, Y., Abe, H., and Nakai, M., 1989, "1:4 Scale Model Studies of Active Tendon Systems and Active Mass Dampers for Aseismic Protection," Technical Report, Nceer-89-0026.

(72) Abdel-Rohman, M., Leipholz, H. H. E., and Quintana, V. H. 1979, "Design of Reduced-Order Observers for Structural Control Systems," Structural Control, H. H. E. Leipholz, ed., North Holland SM Publishing Co., pp. 57~78.

(73) Cheng, F. Y., and Pantelides, C. P., 1988, "Optimal Placement of Actuators for Structural Control," Technical Report, NCEER-88-0037.

(74) Yao, J. T. P. 1979, "Identification and Control of Structural Damage," Structural Control, H. H. E. Leipholz, ed., North Holland SM Publishing Co., pp. 757~778.

(75) Yao, J. T. P., 1981, "Structural Identification, Control, and Reliability in Wind Engineering Research," Technical Report, CE-STR-81-9, Purdue University.

(76) 馬場俊介, 二官公紀, 梶田建夫, 1987, "鋼構造物の 디지털 最適自動制御," 土木學會論文集, 第380號/I-7, pp. 375~381.

(77) Benjamin C. Kuo., 1991, "Automatic Control Systems," Prentice-Hall, Sixty Edit.

(78) Farah, A., 1977, "Human response: A Criterion for the Assessment of Structural Servceability," Ph. D. Dissertation, University of Waterloo.

(79) 島一彦, 1991, "道路橋の免震設計技術の開發," 土木學會誌, pp. 19~21.

(80) 池田 弘, 1991, "構造物の振動制御技術の開發," 土木學會誌, pp. 14~15.

(81) Rogers, C. A., 1990, "An Introduction to Intelligent Material Systems and Structures," ed. Chong, K. P., Liu, S. C., and Li, J. C., Intelligent Structures, Elsevier Applied Science., pp. 3~41.