

능동 소음, 진동 제어기술의 최근 연구동향

김석홍 박상규* 김준호*

Recent Trend of R&D on Active Noise and Vibration Control Techniques

KIM SEOK-HONG, PARK SANG-GYU, KIM JUN-HO

1. 서론

역위상의 소음, 진동을 이용하여 원래의 소음, 진동을 제어하려는 능동제어 기법의 물리학적 기본원리는 매우 오래 전부터 알려져 있었으며 특유의 형태로 본 기술이 구체화된 것은 1934년 독일의 Lueg¹⁾에 의해서였다. Lueg의 능동제어 개념 중 단일주파수음의 제거, 자유공간에 놓여진 음원 및 복잡한 파형에 대한 개념은 능동제어 분야에서 많은 연구의 기초가 되고 있다.

1980년대에 들어서는 디지털 신호처리기술의 놀라운 발전에 힘입어 계산속도의 장벽이 제거되고 능동제어에 대한 보다 나은 모델과 방법수립이 가능해짐에 따라 소음진동제어 방법으로서 능동제어기술이 더욱 실용화 되기에 이르렀으며 최근에 들어서는 실험실에서의 연구개발 단계를 벗어나 국내외적으로 본 기술을 실제 현장에 적용하려는 실용화 노력이 여러 분야에서 진행되고 있다.

본 고에서는 최근의 국내의 능동소음진동제어 기술 연구개발 동향²⁾을 살펴보고 현장적용의 문제점 등을 검토함으로써 보다 효율적이고 현실적인 본 기술의 실용화 연구에 도움이 되었으면 한다.

2. 연구 결과 발표 현황

최근의 연구동향을 파악하기 위하여 능동소음제어 및 능동진동제어에 대한 외국의 연구발표 논문수를 한국산업기술정보원(KINITI-IR)의 영문전문 검색시스템 STAIRS 데이터 베이스 중 INSP, COMP, NTIS, IMSC의 자료에서 "ACTIVE + NOISE + CONTROL", "ACTIVE + VIBRATION + CONTROL"의 각각 세 영문 단어의 조합으로 검색하였으며 각 데이터 베이스의 수록년도, 제작사 및 내용은 Table 1 과 같다.

Table 1. Data Base of KINITI-IR (Which is used to search the Number of papers)

D/B 명	수 록 년 도	제 작 사	내 용
INSP	1978-	영국 전기공학회(IEE) 지부INSPEC	전기, 전자, 물리 컴퓨터, 제어공학
COMP	1979-	미국 Engineering Information Inc.	응용과학, 공학전반
NTIS	1977-	미상부성 산하기관 NTIS	미연방정부위탁 연구보고서(과학기술, 사회과학)
IMSC	1979-	영국 Institute of Mechanical Engineers	기계공학, 생산공학

*유니슨산업주식회사 유니슨기술연구소 (정회원)

Fig. 1 은 능동소음제어 연구논문 발표수를 검색 데이터 베이스 분야별로 나타낸 것으로 전반적으로 볼 때 주로 전기, 전자, 물리, 컴퓨터, 제어공학 분야에서 많은 연구결과가 발표되어 왔으며 공학전반 및 미연방정부 위탁 연구 보고서로도 꾸준한 연구결과가 발표되어 왔다. 년도별 발표 논문수는 총 253편 중 1978년부터 1982년까지 61편, 1987년부터 1991년까지 꾸준한 증가를 보이다가 1992년도에는 91년도 20편의 2.5배나 되는 50편으로 급격한 증가를 보이고 있다.

Fig. 2 는 능동진동제어 연구논문 발표수를 년도별로 검색 하여 데이터베이스 별로 나타낸 것으로 1991년까지 꾸준한 증가를 보이다가 92년도에는 전년의 거의 2배의 증가를 보이고 있다. 능동소음제어 관련 연구발표수와는 달리 각 분야별로 지속적인 발표가 이루어져 왔으며 1992년도에는 전기, 전자, 물리, 컴퓨터, 제어공학분야와 응용과학, 공학전반이 거의 비슷한 수를 나타내며 기계공학 분야에서 많은 연구결과가 발표되고 있음을 알 수 있다.

국내에서는 1989년 이후로 한국표준과학연구원, 한국과학기술원, 한국해사기술연구소, 단국대학교 전기공학과, 한양대학교 자동차공학과 및 연세대학교 기계공학과, 전자공학과 등에서 이에 대한 연구를 수탁과제로서 이미 완료하였거나 진행중이다.

국외의 관련 업체에서는 ANWT (Active Noise and Vibration Technologies Inc.), NCT (Noise Cancellation Technologies, Inc.), LOTUS사 등에서 주로 자동차, 항공기 등 대량수요가 필요한 시장을 대상으로 제품개발을 완료하였거나 현재 개발이 진행되고 있는 단계이며 DIGISONIX사에서는 범용 Active Controller를 개발 판매중이나 아직 상용화되어 실제 장착되는 단계에는 이르지 못하고 각 회사와 관련 유력기업과 공동연구개발 상품화의 형태로 유리한 선점권을 확보하기 위하여 각축을 벌이고 있는 실정이다.

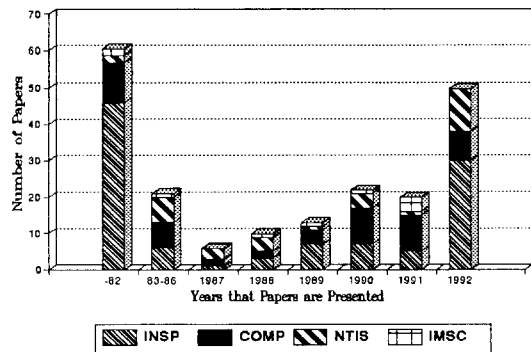


Fig. 1 Number of Papers on Active Noise Control

3. 능동소음제어기술 연구동향

질량을 갖는 물체의 진동에 비하여 소음은 비교적 적은 에너지 만으로도 원래의 소음을 줄이기 위한 제어신호의 발생이 용이하여 많은 연구개발과 함께 실용화 노력이 이루어지고 있다. 그 중 대표적인 것들을 간략히 고찰해 보기로 한다.

3.1 능동소음제어 헤드셋

기존의 방음귀덮개(Earcup) 기술과 능동 소음제어기술을 결합한 것으로 저주파수와 고주파수 대역의 소음은 능동소음제어에 의해 제거하고 대화음과 경고음은 보다 잘 들리게 하는데 목적을 두고 있다. 이는 높은 소음레벨에 노출되는 항공기, 전투기, 헬기 조종사 만이 아니라 매우 높은 소음레벨에 노출되는 작업자들에게도 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 이것의 특징은 기존의 방음귀덮개보다 개선된 소음저감, 최임압력감소에 따른 피로저감, 대화나 경고음의 명료도 증가등을 들 수 있다.

미국의 ANVT에서는 대화음이나 경고음과 같은 높은주파수의 음은 통과시키고 저주파음만을 감소시키는 Fig.3(A)와 같은 "개방형 능동헤드셋 (Open Back Active Noise Cancelling Headset)"과 저주파수와 고주파수에서 소음저감을 목표로 하는 Fig.3 (B)와 같은 "밀폐형 능동헤드셋 (Closed Back Active Noise Cancelling Headset)"을 개발하여 청력보호를 목적으로 높은 소음레벨에 노출되는 산업 분야나 항공분야에 이용을 시도하고 있다.

3.2 국부적 능동소음제어 장치

자동차, 디젤트럭, 버스, 항공기 등의 승객의 머리 부분을 국부적으로 조용하게 만들어 줌으로써 불편한 저주파음으로부터 승객을 쾌적하게 보호하기 위한 것으로 미국의 ANVT사에서는 "Active Headrests"라는 상품명으로 개발을 완료하였다. "조용한 영역 (Zones of Silence)"을 만들기 위한 이 장치는 위치이동이 거의 없는 승객좌석의 머리받침대 부분에 Fig.4와 같이 마이크로폰과 스피커가 일체로 좌우측에 설치되어 승객의 머리 좌우측에서 그 효과가 발휘되도록 설계되어 있다. 50-500Hz의 소음이 문제되는 환경에서 ANVT사의 Active Headrest System은 15-20dB(C)의 소음을 저감시켜 승객의 피로를 저감시키고 정신을 집중시킬 수 있다는 장점을 내세우고 있다.

ANVT에서는 "조용한영역"에 대한 Demonstration을 위하여 Fig.5와같은 PC 장착 능동소음제어장치인 "Activox"을 상품화하여 공급하고 있으며 Fig.6은 본 연구소에서 실험한 Activox에 의한 실제 소음저감 측정결과를 나타낸다.

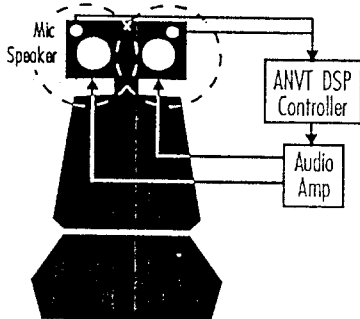


Fig.4 Active Headrests

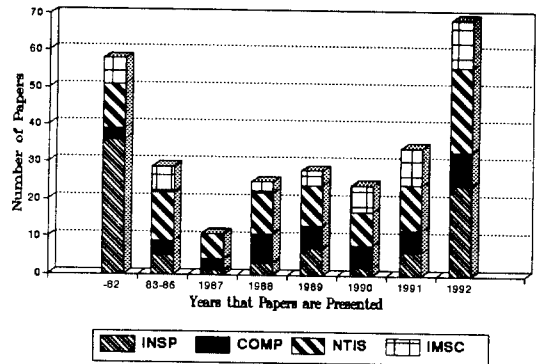


Fig.2 Number of Papers on Active Vibration Control

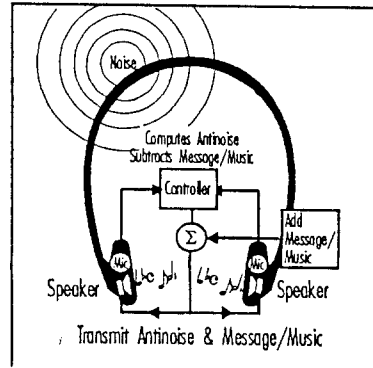


Fig.3 (A) Open Back Active Noise Cancelling Headset

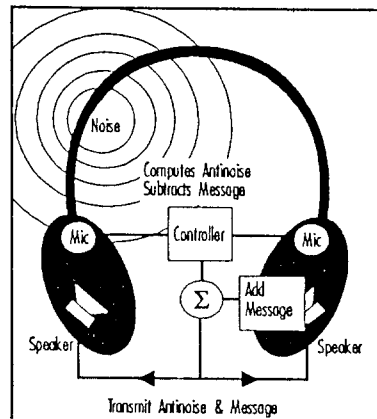


Fig.3 (B) Closed Back Active Noise Cancelling Headset

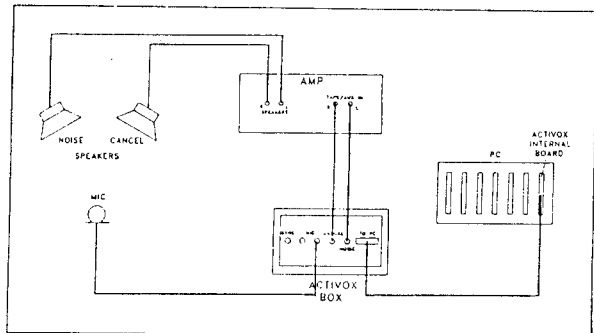


Fig.5 Activox Equipment Setup

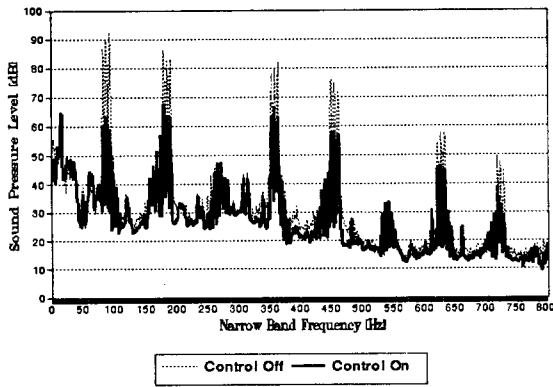


Fig.6 (A) Noise Canceling Example by Activox

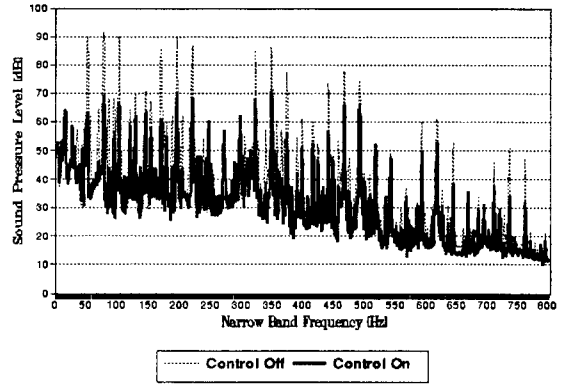


Fig.6 (B) Noise Canceling Example by Activox

3.3 실내공간 능동소음제어

현재 개발이 진행중인 기술로 자동차, 트럭, 항공기 실내에서 전반적으로 소음을 줄이기 위하여 Fig.7(A),(B)와 같이 엔진의 Synchronous Signal과 실내소음을 실내에 설치된 마이크로폰으로 감지하여 제어기를 통하여 역위상의 제어소음을 발생시키는 시스템이다.

본 기술이 실용화 되면 10-20dB의 소음저감으로 승객의 쾌적성이 증가되며 차음재로 이용되는 차량하중을 줄임으로써 결과적으로 연료소비를 줄일 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이 기술은 큰 소음원이 놓여 있는 폐쇄공간에서 실내소음을 전반적으로 줄이는 데도 응용될 수 있다.

3.4 자동차 배기가스 능동소음제어

엔진배기가스 소음을 기존의 수동형 소음기 대신에 능동소음제어장치로 제어함으로써 엔진의 배압을 크게 줄일 수 있고 엔진의 효율 및 힘을 높일 수 있는 장점 때문에 많은 연구가 이루어져 왔다.

Fig.8과 같은 "능동소음제어시스템 (Electronic Muffler Systems)"은 20dB 정도의 소음레벨 저감이 가능하며 엔진 회전수의 급격한 변화에서도 높은 감응성능을 보인다. 본 기술은 자동차회사 특히 배기시스템 제작사와 공동으로 연구가 이루어지고 있으며 고급 승용차에 적용을 시도하고 있다. 본 기술은 NCT에서도 개발되었다.

3.5 덕트용 능동소음기

덕트소음의 능동제어는 능동소음제어 분야에서 가장 오랫동안 중점적으로 연구되어 왔다. 이는 덕트의 한계주파수 이하에서는 평면파 모드가 한방향으로만 진행하므로 3차원의 진행파보다 다루기가 쉽고 한방향 모드의 제어가 가능해지면 자유공간에서도 능동소음제어가 가능하기 때문이다. 또한 능동소음제어의 중요한 장점 중의 하나는 기존의 소음기와 같은 유체저항 문제가 없다는 것으로 이것은 송풍동력절감에 의한 에너지절감이 가능함을 의미한다.

이와 같은 이유로 덕트에서의 능동소음제어에 대한 논문은 수없이 많이 발표되어 왔으며 이 논문들은 에너지절감, 고차모드제어, 비평면파, 와류, 적응능동제어 및 능동소음제어를 다루고 있다. 대부분의 경우 500Hz 주파수까지 최대 20dB 정도의 소음저감을 얻을 수 있으며 주파수한계는 신호샘플링 및 처리속도의 한계, 고주파에서 평면파 모델링의 오차 및 덕트의 첫수 등에 의해 결정된다.

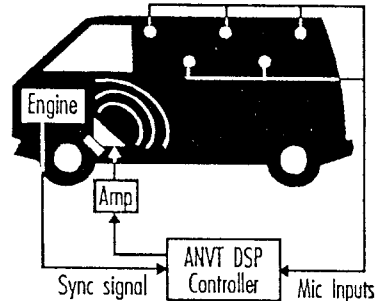
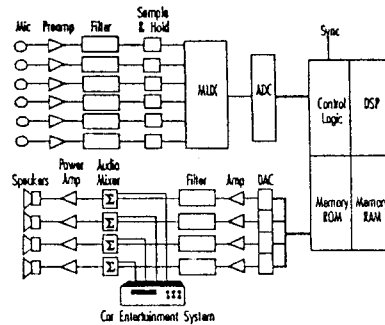


Fig.7 (A) Automotive in-Cabin Cancellation

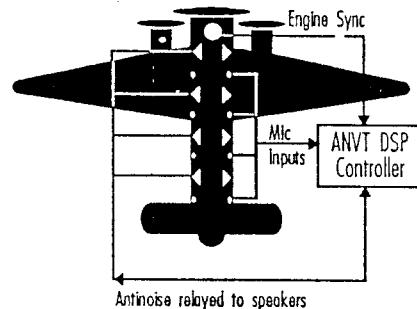


Fig.7 (B) Aircraft in-Cabin Cancellation

본 기술의 실제 제품화에는 외국의 경우 미국의 DIGISONIX사에서 개발한 "2채널 dx-57 Digital Sound Cancellation Controller"가 있으며 국내에는 ANC Tech. (주)에서 해사기술연구소와 공동개발한 "공조설비용 능동 소음제어장치 (Active Silencer)"가 있으나 구체적인 적용 사례는 거의 발표되고 있지 않다. 이는 본 제품들이 가격 경쟁력, 내구성 및 안정된 성능보장, 사후유지관리 등의 측면에서 기존의 수동형 소음기보다 특별한 장점이 인식되지 못하였기 때문이라 생각된다. Fig.9 에 DIGISONIX 사의 dx-57 Active Controller의 응용분야를 나타낸다.

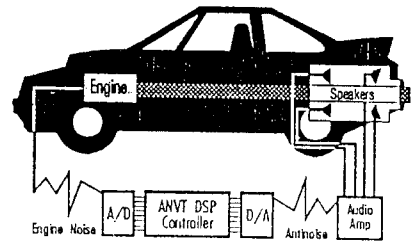


Fig.8 Electronic Muffler Systems

4. 능동진동제어기술 연구동향

4.1 능동 엔진마운트 시스템 (Active Engine Mounts)

현재 외국의 경우 ANVT 사 등에서 자동차, 항공, 해양, 산업 컴퓨터 관련 분야에 적용하기 위한 능동 진동제어 마운트 (Active Mounts)의 개발이 진행 중에 있다. 이 능동진동제어 시스템을 이용하면 기존의 수동 방진마운트보다 더욱 큰 진동저감 효과를 얻을 수 있으며 기계장치의 지지시스템에 통합 적용하여 수많은 진동관련 문제에 좋은 해결책으로 이용될 수 있다. 이 장치를 일반분야에 적용할 경우 16dB 이상의 진동저감이 가능하며 결과적으로 진동저감에 의한 소음저감효과 및 진동부재의 수명증대효과가 기대된다.

자동차에 Fig.10과 같이 본 장치를 적용할 경우 엔진 공회전수 저감에 따른 연료절약, 승객의 쾌적성 도모, 하중경감의 효과를 얻을 수 있다.

4.2 고층건물 진동제어 시스템³⁾⁻⁶⁾

고층건물에서 발생하는 지진이나 바람에 의한 진동을 제어하기 위한 목적으로 능동진동제어 개념을 응용한 제진에 대한 연구도 최근에 많이 이루어져 왔다.

제진구조는 구조물의 진동제어에 외부에너지를 필요로 하는 능동적(Active) 방식과 필요로 하지 않는 수동적(Passive) 방식으로 분류할 수 있으며 양자를 직렬적 또는 병렬적으로 조합한 Hybrid 방식이 있다. Active 방식은 건물의 내부 또는 외부에 진동측정센서를 설치하고 여기서 얻어진 진동신호 외란정보에 의한 각종 제어를 행하는 것이다. 센서를 건물 외부에 설치하고 외란을 사전에 감지하여 각종제어를 행하는 Feedforward 제어와 센서를 건물내부에 설치하고 건물의 진동응답을 감지하여 제어를 행하는 Feedback 제어가 있다. 제어시스템의 구성요소 다이어그램의 일례를 Fig.11 에 나타낸다.

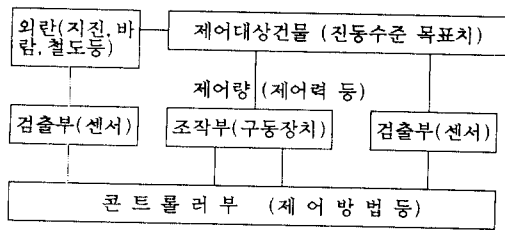
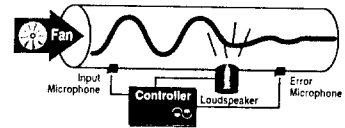


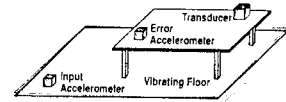
Fig.11 제어시스템의 구성요소 다이어그램 예

일반적으로 지진, 강풍등의 동적하중이 작용할 때 건물의 거동은 다음 식으로 표시할 수 있다.

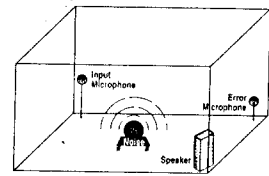
Ducted Noise from Fan or Pump



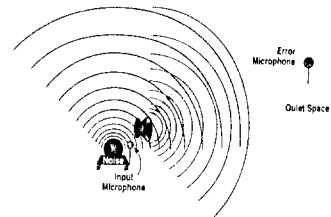
Structural Vibration Control



Enclosure Silencing



Open Field Cancellation



Communications System

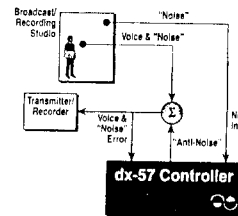


Fig.9 Applications of DIGISONIX dx-57

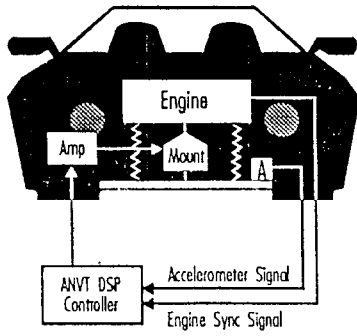


Fig.10 Active Mounts

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f + p$$

- 여기서, m : 진동계의 질량
 c : 속도에 의존하는 점성감쇠계수
 k : 변위에 의존하는 복원력
 f : 계에 작용하는 외란(바람, 지진 외력 등)
 \ddot{x} : 지반에 대한 건물의 상대응답가속도
 \dot{x} : 지반에 대한 건물의 상대응답속도
 x : 지반에 대한 건물의 상대응답변위
 p : 제진력
 이러한 각종기호는 Matrix 또는 Vector 표시이다.

이 경우 제진구조에 의하여 건물의 응답을 억제 또는 제어 (일반적으로[저감])하는 양으로는 응답가속도(\ddot{x}), 속도(\dot{x}), 변위(x) 3종류를 생각할 수 있다. 이를 위하여 질량 m , 감쇠 c , 복원력 k , 외력 f 를 제어 조정하며 또한 제어력 p 를 도입하게 된다. 이로부터 제진기구는 동력학적 분류의 관점으로부터 질량부가형(강체질량이용, 액체질량이용 등), 감쇠조정형(감쇠가변기구, 인접 건물간 설치 등), 강성조절형(강체가변기구, 기초부위 유연성기구 등), 외력부가형(분사, 반력벽이용)등으로 분류된다.

이러한 원리는 제진력을 도입하는 방법을 제외하면 종래의 내진, 내풍구조와 같은 것이며 다른 점은 종래의 내진, 내풍구조에서는 감쇠력, 복원력 등을 기둥, 보, 벽, 지주 등 구조부재의 특성을 변화시켜 조절하는 반면 제진구조에서는 종래의 구조부재 이외의 다른 어떤 종류의 장치나 기구에 의해 조절을 한다는 점이다.

현재 실용화되어 있는 제진구조는 건물최상층 또는 옥상에 부가질량을 설치하여 이것을 건물의 일차 고유진동수에 동조시키는 TMD(Tuned Mass Damper)를 이용하는 Mass Damper 방식과 건물의 각 층간에 에너지 흡수장치를 설치하는 층간 Damper 방식으로 대별할 수 있다.

동조질량 Damper (Tuned Mass Damper)는 장치동의 질량, 감쇠, 강성이 구조체의 일부로 포함되었다고 보면 질량, 감쇠 및 강성을 제어 조절하는 방식이 된다. 그러나 장치를 구조체의 계와는 별도의 것으로 보면 그 장치가 구조체에 제어력을 주는 것이 된다. 이러한 시점에서 보면 다음과 같이 분류될 수 있다.

(1) Full Active형 제진이란 외란에 직접 저항하기 위하여 제어력(감쇠력, 복원력을 포함)으로 에너지를 공급하는 것. (에너지-소비 큼)

(2) Semi Active형 제진이란 외란에 직접 저항하는 것은 아니며 건물의 특성(Parameter)등을 변화시키기 위하여 에너지를 공급하는 것. (에너지-소비 적음)

(3) Hybrid형 제진이란 Active 제진구조 시스템을 직렬 또는 병렬로 설치함으로써 Passive 제진의 효과를 높이기 위하여 에너지를 공급하는 것. (에너지-소비 적음)

현재 제진성능 향상을 목적으로 한 능동 제진기술의 연구개발도 미국과 일본에서 활발하게 진행되어 AMD(Active Mass Damper)가 실용화 되어 있다. 금후 계획되고 있는 건물에는 AMD를 채용하는 경우가 많아질 것으로 예상되며 건물주가 기대하는 것은 제진성능은 물론 최신의 제진기술을 구사한 설계라는 첨단성이 건물의 부가가치를 높인다는 사실이다.

Fig.12-Fig.14는 일본의 MITSUBISHI 중공업에서 MM21 LAND MARK TOWER에 적용한 Tuned Active Damper의 예를 나타낸다.

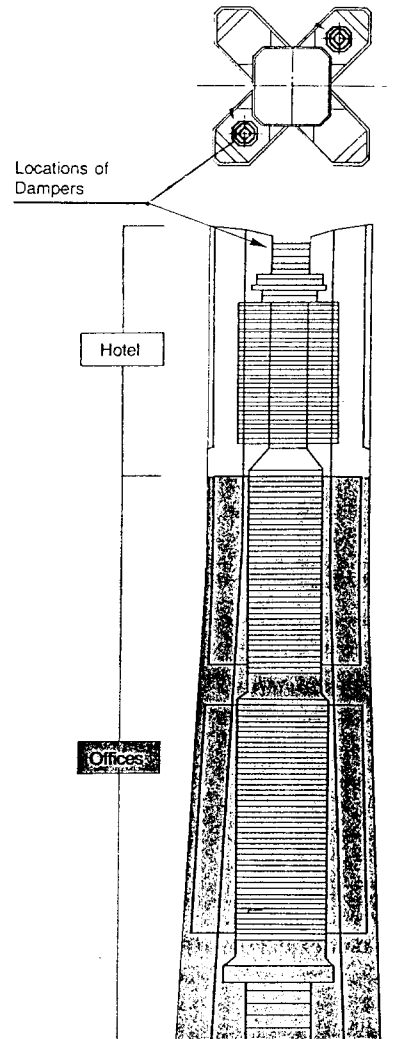


Fig.12 MM21 Landmark Tower

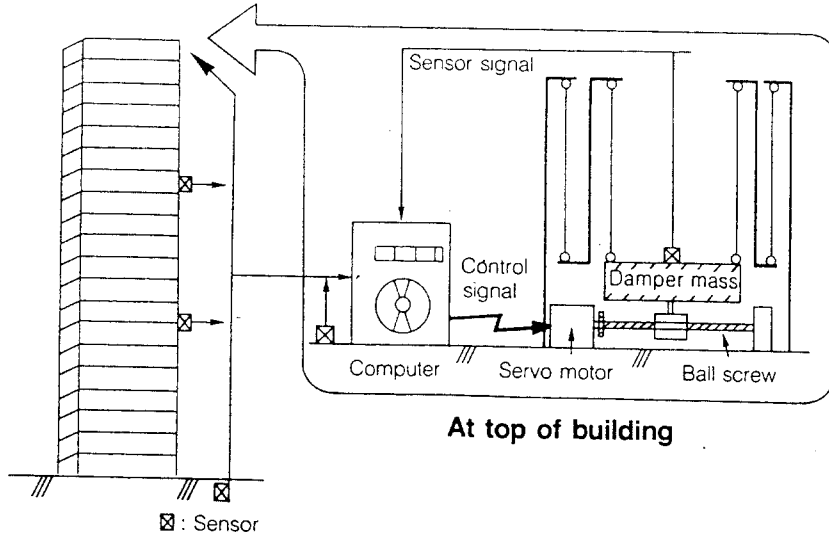


Fig.13 Outline of Tuned Active Damper

5. 결 언

이상과 같이 소음 진동 능동제어기술의 최근 연구동향을 검토한 결과 실험실 단계에서는 그 성능확인이 끝나고 실용화 단계에 접어들고 있는 것으로 판단된다. 앞으로 본 기술을 실제 현장에 적용하기 위해서는 다음과 같은 문제점에 역점을 두어 연구를 진행하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

(1) 제어신호 발생장치로 이용되는 스피커나 가진기는 제어가 이루어지고 있는 동안에는 항상 작동상태에 있게 되므로 충분한 내구성을 가지도록 해야 한다.

(2) 신호감지센서, 콘트롤러, 제어신호 발생장치는 기존의 수동형 제어장치와 같이 약간씩 변화하는 주변환경 속에서도 충분히 안정된 성능을 발휘하도록 해야 한다.

(3) 능동 제어장치를 실용화하기 위해서는 가격 및 실제적인 장점의 측면에서 기존의 수동형 제어장치와 경쟁력이 성립되어야 한다.

참고문헌

1. Lueg, p.: "Process of Silencing Sound Oscillation", U.S. Patent #2, 043, 416, 1936

2. J.C. Stevens: "Recent Advances in Active Noise Control" AIA JOURNAL : VOL. 29, NO. 7, 1991

3. 藤田: "建築免震/制振技術의 研究開發과 實用化의 現狀: 技戒의 研究 제43권제12호:1991

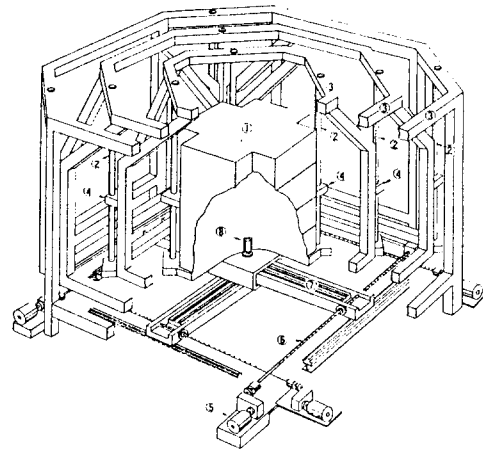


Fig.14 Structure of Damper Equipment

4. 北川良和: 건축구조물의 ACTIVE제진의 연구현장과 급후의 개발방향: 計測과 制御 VOL. 32, No. 4: 1992. 4.

5. 田村一美: 고층구조물의 제진기술: 三菱重工技報 VOL. 27, NO. 5, 1990. 9.

6. "SEISMIC ISOLATION AND RESPONSE CONTROL FOR NUCLEAR AND NON-NUCLEAR STRUCTURES": Special Issue for the Exhibition of the 11th international conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT 11), August 18-23, 1991, Tokyo, Japan