

# 비선형진동과 고장진단

최연선

(성균관대학교 기계공학부)

어렵다고만 인식 되어온 비선형진동을 실험을 통하여 비선형 현상을 재현하고, 이를 이론해석을 통하여 기계계의 물리적, 역학적 동특성을 이해하는 데 초점을 두고 있으며, 실제 산업현장에서 발생하는 문제점, 즉 기계 및 설비의 고장을 진단하고 대처방안을 마련하고자 하고 있다.

## 1. 연구주제

성균관대학교 기계진동연구실은 진동, 특히 비선형진동에 관련한 기계계의 동적거동 해석과 진동측정에 의한 기계계의 고장진단을 연구하고 있다. 어렵다고만 인식 되어온 비선형진동을 실험을 통하여 비선형 현상을 재현하고, 이를 이론해석을 통하여 기계계의 물리적, 역학적 동특성을 이해하는 데 초점을 두고 있으며, 실제 산업현장에서 발생하는 문제점, 즉 기계 및 설비의 고장을 진단하고 대처방안을 마련하고자 하고 있다.

자연계가 근본적으로 비선형계이고 선형이론은 평형점(equilibrium point)에서의 미소변위를 가정할 때 성립되는 이론이라는 점을 전제로 한다면, 실제 공학계에서 발생하는 문제는 거의 모두 비선형 문제라 해도 과언이 아니다. 비선형진동을 이론만이 아닌 실험적 현상과 관련지어 해석하고, 이해함으로써 새로운 기계설계에 반영하거나, 기계운전 중에 발생하는 이상 현상 내지는 고장을 진단하여 원활한 운전을 도모하는 데 본 연구실의 연구목표가 있다<sup>1)</sup>.

## 2. 연구과제

### 2.1 간극

실제 기계계에서 발생하는 비선형성은 많은 경우 간극(clearance)과 관련되므로 본 연구실에서는 간극과 관련 많은 관심을 가지고 연구해 왔다. 기계계에 간극이 있으면 접촉에 의해 강성과 감쇠가 급격히 변하게 되어 편적선형(piecewise-linear) 문제로 모델링될 수 있으며 (그림 1) 편적선형 문제는 강비선형(strong nonlinear) 진동 문제가 된다. 강비선형 진동 문제는 일반 비선형진동 문제의 해법인 섭동법(perturbation method)을 적

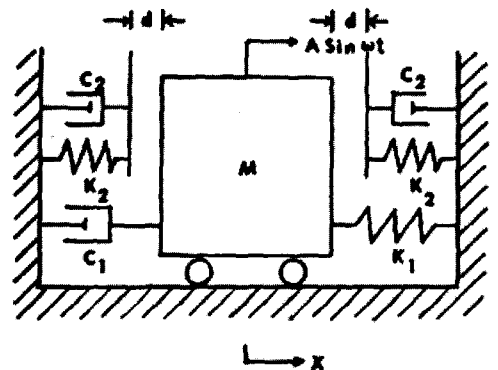


그림 1 편적선형 모델

용할 수 없어, 본 연구실에서는 강비선형 문제의 일반 해법으로 조화균형법(harmonic balance method)을 확장하여 FFT를 이용한 수치조화균형법(numerical harmonic balance method, NHB)을 개발한 바 있다<sup>2)</sup>. 수치조화균형법은 단순 수치해석에서 구할 수 없는 불안정해(unstable solution)도 구할 수 있어 비선형진동 연구자들이 많이 쓰고 있다.

간극 문제의 실제 적용과 관련하여 본 연구실에서는 링크 연결부에서의 간극 효과, 회전기계에서의 회전마멸(rubbing) 등에 대하여 연구하였다.

링크기구에서의 간극효과를 규명하기 위하여는 실험장치를 설계, 제작하고(그림 2) 조인트부에 일정 간극을 만들어 간극 내에서 링크의 충격적 접촉과 이로 인한 소음을 연구하여 간극의 크기에 따른 진동과 소음을 측정 분석하였다<sup>3)</sup>. 간극에 의해 발생하는 진동과 소음은 기계에서 발

생하는 일반적인 현상으로 진동, 소음을 저감하기 위해서 연구가 필요하고, 또한 기계 사용 기간이 증가함에 따라, 부품과 부품 사이에서 마모, 혹은 헐거움(looseness)에 의해 진동과 소음이 증가하는 바, 발생하는 진동과 소음으로부터 기계의 고장 및 수명을 예측하는 데도 의미가 있는 연구이다.

모터, 펌프, 가스터빈 등 회전기계에서는 회전자와 고정자 사이의 간극이 최대한 작아져야 회전기계의 성능을 높힐 수 있다. 회전자가 간극의 범위를 초과하는 경우 회전자가 회전하면서 고정자와 부딪히는 회전마멸(rubbing)이 발생한다. 회전마멸이 발생하면 회전기계에서는 고주파, 대진폭의 진동이 발생하여 회전기계의 파괴까지 이르게 된다. 따라서 간극을 줄이면서도 회전수를 증가시킬 수 있기 위해서는 회전마멸에 대한 물리적, 역학적 이해가 있어야 한다. 회전마멸이 발생하면 간극에 의한 충격과 더불어 접촉점에서 마찰 효과가 커져 단순 수치해석으로는 이 현상을 이해하는 데 한계가 있다. 본 연구실에서는 회전실험장치를 자체 제작하거나, Bently Nevada 사의 RK-4 rotor kit 회전실험장치(그림 3)를 이용하여 실험을 하고, 이론해석을 통하여 회전마멸의 물리를 이해하고자 하였다<sup>4)</sup>. 나아가 회전자와 고정자가 접촉하는 순간 강성과 감쇠값의 변화를 실험 데이터로부터 역추적하여 접촉에 따른 비선형 효과를 수식 형태로 유도하였다<sup>5)</sup>.

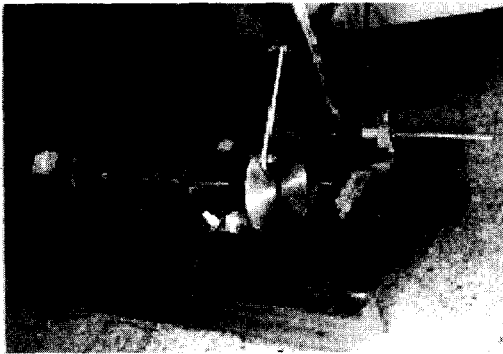


그림 2 링크기구 실험장치

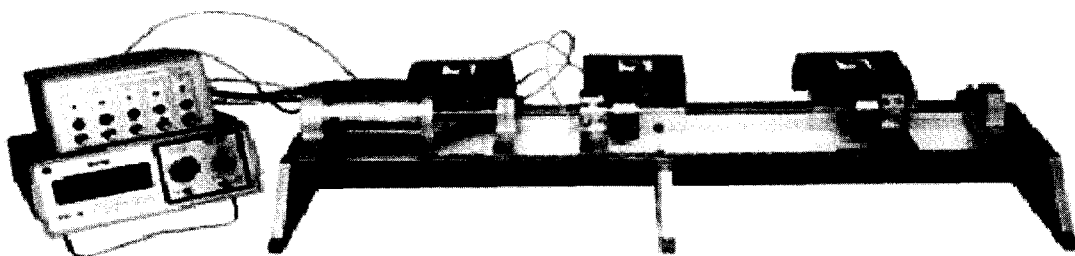


그림 3 RK-4 Rotor kit

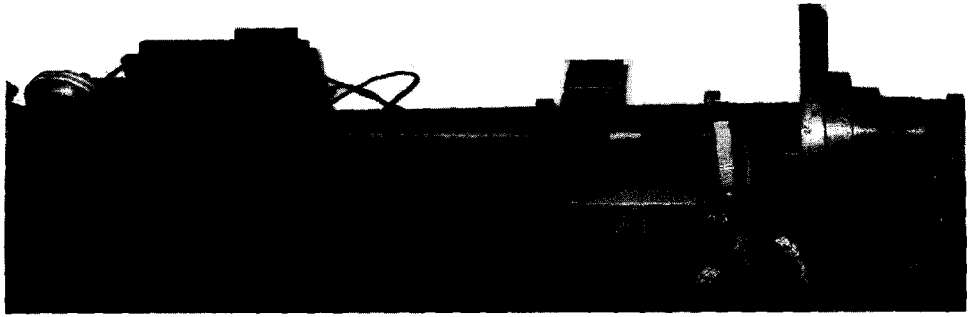


그림 4 마찰기인진 실험장치

## 2.2 마찰 기인 진동

마찰은 기계에서 발생하는 일반적이고도 광범위한 현상으로 본 연구실은 마찰에 의한 진동 현상에 대해 꾸준히 연구해 왔다. 실제 기계에서 발생하는 마찰은 쿨롱마찰(Coulomb)로 간략화시킬 수 있어, 편적선형 문제로 비선형진동 해법이 적용될 수도 있다<sup>6)</sup>. 본 연구실에서는 마찰기인 진동 실험장치(그림 4)를 설계, 제작하여 마찰기인 진동 현상을 재현하고 실험결과를 바탕으로 이론을 전개하였다<sup>7)</sup>. 마찰진동 문제는 브레이크의 스퀄(squeal) 소음의 원인으로 스퀄 소음이 마찰기인 진동의 stick-slip 현상이 아니고, 마찰패드의 마찰계수보다 브레이크의 디스크의 정렬불량에 기인한 runout이 직접적인 원인으로 디스크의 굽힘모드가 runout에 의한 비선형 진동현상으로 본 연구실은 이해하고 있다. 따라서 스퀄소음 제거를 위해서는 무엇보다도 브레이크 관련 부품이 설계도면대로 정렬불량 없이 확실히 조립되어야 한다는 점을 연구결과로 제시하는 것이다.

## 2.3 기어 진동

기어에서 발생하는 진동과 소음은 크게 기어 맞물림 과정에서 백래쉬(backlash)에 의한 래틀(rattle) 진동과 물림음에 의한 강성 변화에 의한 화인(whine) 진동이다<sup>8)</sup>. 이 모두 비선형 요인으로 기어진동은 근본적으로 비선형진동 문제이다. 일반적으로 기계는 모터, 감속을 위한 기어,

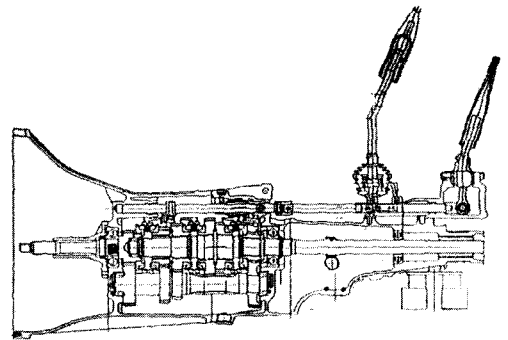


그림 5 NB-7 수동변속기

이를 지지하는 베어링, 케이스로 구성되는 바, 엘리베이터, 공작기계, 전동공구, 나아가 고속전철까지 같은 원리이다.

기어에서 발생하는 진동과 소음은 기어 맞물림 과정에서 기어의 변형, 마찰과 간극에 기인하는 문제로서 베어링, 축, 케이스 설계 모두가 관련되는 요인이다. 따라서 사용조건에 따라 기어, 축, 베어링, 케이스 설계가 정확하게 되어야 하고, 경우에 따라서는 치형도 수정되어야 하며 윤활유 선정 역시 중요한 변수이다.

자동차의 수동변속기에서 발생하는 기어 소음과 관련하여 실험실에서 기어 구동장치를 설계, 제작하여 실험한 바 있으며, 기어자동차와 공동 연구를 수행하여 산업현장에서 기어 소음을 저감하는 방법을 직접 체험하기도 하였다(그림 5)<sup>9)</sup>. 또한 본 연구실에서는 전동그라인더(그림 6), 고속절단기 등의 전동공구 설계와 관련되어

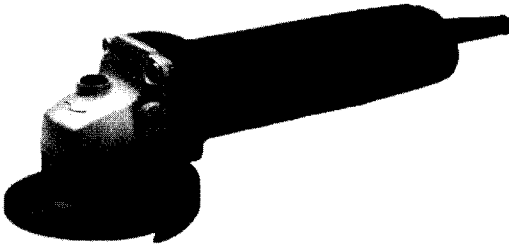


그림 6 전동그라핀더

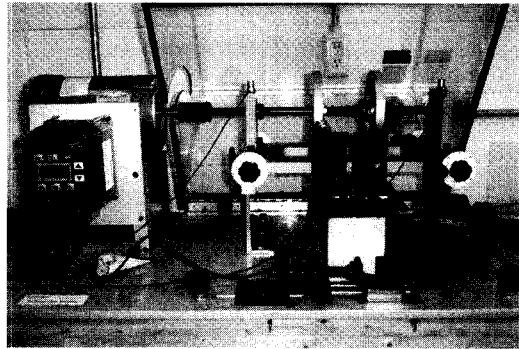


그림 7 Fault simulator

연구를 수행한 바 있다<sup>(10)</sup>.

### 2. 4 판토히라프 와 철도차량

한국형 고속전철 개발과 관련하여 본 연구실에서는 고속전철의 핵심부품의 하나인 판토히라프(pantograph)에 대해 1989년 국내 최초로 연구를 시작한 이래, 판토히라프 개발을 위한 판토히라프의 동역학을 이해하여 전산프로그램을 독자적으로 개발하였다<sup>(11)</sup>. 가선계는 고속주행에서도 전차선과 판토히라프가 접촉을 유지하여 단락 없이 전력을 공급하는 데 목표가 있으나 전차선과 판토히라프가 별개로 구성되어 있어 고속에서도 접촉을 유지할 수 있게 설계하는 것은 쉽지 않은 과제이다.

더불어 철도차량과 관련하여 서울시 지하철 1호선 노후차량 교체여부와 관련하여 실제 전동차 주행실험을 수행하여 운행년도 및 정비여부에 따른 진동, 소음레벨을 산정함으로써 전동차 정비의 중요성을 강조하기도 하였다<sup>(12)</sup>.

최근에는 경부 고속전철(KTX)과 관련동절기에 다량편성 고속전철 후미차량에서 과다 진동이 발생하여, 이에 대한 역학적 이해와 전산시뮬레이션을 수행하여 이상 진동의 원인을 밝히고 대처 방안을 마련하고자 하였다<sup>(13)</sup>.

### 2.5 고장진단

회전기계 관련 연구는 회전기계 설계와 더불어 고장진단과도 직결되는 과제로서 베어링 선

택, 기어 관련 문제까지 본 연구실에서는 연구하고 있다. 이를 위해 1997년 미국 Spectra Quest 사의 Fault Simulator를 국내 최초로 구입하여 연구에 사용하고 있다.(그림 7)

고장진단은 기계의사(mechanical doctor)로서 산업현장에서 발생하는 문제를 대학에서 공부한 공학이론을 적용하여 문제의 원인을 밝히고 대처방안을 마련하는 과정으로서 엔지니어로서의 고유의 역할과 자질이 요구되는 분야이다. 여기서 모든 자연 현상이 비선형은 아니나 고장을 유발하는 대변형, 연성(coupling) 등은 비선형 진동 특성을 유발할 수 있다. 따라서 비선형 이론을 이해하고 있다면 발생한 문제의 본질을 이해할 수 있어 보다 정확한 고장진단이 가능해질 수 있다.

본 연구실에서는 석유화학공장의 대형 팬과 덕트에서 발생하는 진동문제<sup>(14)</sup>, 전동공구의 과다진동, 대형버스의 진동원 추적, 굴삭기 선회감속기용 기어 진동문제, 섬유기계에서 실이 자주 끊어지는 현상<sup>(15)</sup> 등 다양한 경험을 한 바 있다. 최근에는 은행에서 쓰이는 자동입출금기계(ATM, Automatic Teller Machine)의 고장진단을 연구하고 있다. 한번의 오류가 치명적일 수 있는 ATM에서는 고장의 원인을 확실히 밝히고, 고장이 발생되지 않도록 설계 제작하는 것이 진정한 know-how 일 수밖에 없다.

## 2.6 기타 연구과제

본 연구실은 기계계에 존재하는 비선형 현상을 실험적으로 재현하고, 이를 비선형 적으로 해

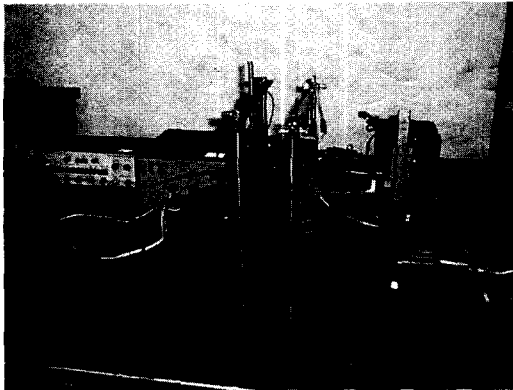


그림 8 전자력에 의한 외팔보 진동 실험장치

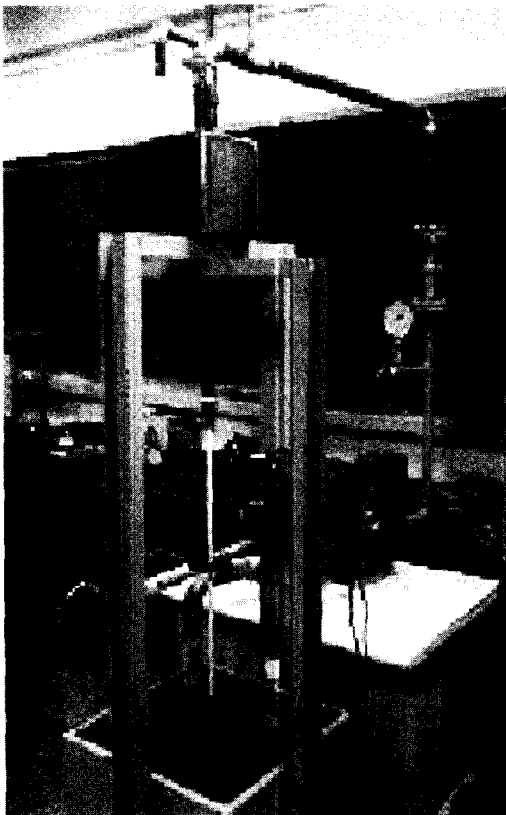


그림 9 유체송수관 진동 실험장치

석하여 물리적, 역학적 특성을 규명하자는 데 연구 목표가 있는 만큼 이상의 연구과제 이외에도 비선형 관련 연구를 추진하고 있다.

먼저, 벨트는 점탄성을 갖는 기계요소로서 변형량이 크고, 장력과 운전속도에 따라 진동이 달라지는 바, 비선형 진동 특성을 보이게 된다. 본 연구실에서는 실험장치를 제작하여 벨트의 진동을 측정하고 벨트구동에 대한 비선형 운동식을 유도 벨트의 비선형진동을 이해하고자 하였다<sup>(16)</sup>.

또한 전자석은 대상물체와 간격에 따라 자력의 크기가 제곱의 형태로 달라지는 비선형 특성을 가지고 있는 바, 전자석 사이에 외팔보를 가진 기로 가진 시켜 전자력에 의한 외팔보의 진동 특성을 연구한 바 있다. 전자석의 설계 및 제작 방법에 따라 전자력의 크기가 달라질 수 있으나 실험(그림 8)을 통해 전자력의 비선형 특성을 정확히 측정하였고 이를 근거로 외팔보의 진동을 예측할 수 있었다<sup>(17)</sup>.

더불어 유체송수관에 유체유동에 따른 파이프의 진동은 전형적인 비선형 문제로서 본 연구실에서는 실험장치(그림 9)를 만들어 유동속도 변화에 따른 파이프의 진동을 측정하고 이를 비선형 진동 이론으로 해석을 수행하여 측정된 진동을 설명하였다<sup>(18)</sup>.

자동차의 현가장치에 쓰이는 스프링과 댐퍼도 비선형성이 있고 이는 승차감에도 영향을 미칠 수 있는 바, 본 연구실에서는 실제 자동차 주행 실험데이터로 기초로 스프링과 댐퍼에 존재하는 비선형 특성을 비선형 설계변수 추적법을 이용하여 규명하고 비선형 운동방정식을 만들어 보다 실제에 가까운 자동차용 현가장치 모델을 만들었다<sup>(19)</sup>.

최근 nano 및 mems 관련 문제들이 관심 대상으로 떠오르고 있는 바, 운동방정식에서 강성보다 감쇄항의 역할이 커지는 경우이고, 특히 미소 변위에서도 비선형 특성이 문제된다. 본 연구실에서는 mems 소재로 쓰이는 pzt을 이용, 평판의 진동



제어 문제를 전자공학과 공동연구를 수행하고 있다. Piezo-electric 재료인 pzt의 비선형 특성을 찾아내고, 이를 평판 진동제어에 적용하는 문제이다.

### 3. 연구실 연혁

1987년 실험실을 개설 한 이래, 30여명의 석, 박사 졸업생을 배출하였고, 각 졸업생들은 국내 대학, 연구소, 산업체 등 요소요소에서 본 연구실에서 익힌 진동, 특히 비선형진동 관련하여 연구와 더불어 현장의 문제점을 해결하는 데 각기 계몽을 다 하고 있다. 본 연구실에서 익힌 실험기술과 비선형진동 이론은 여타 국내 진동 연구실과 차별화 될 수 있는 바, 산업현장에서 나름대로의 기여를 할 수 있는 것이다. 仁義禮智를 敎示로 하고 있는 성균관대학교의 전통과 正直, 誠實, 謙遜을 실험실 室訓으로 하고 있는 성대 기계진동연구실 출신은 사회에서도 배운바 대로 각자 맡은 일을 열심히 하고 있다.

실험을 중요시하는 본 연구실은 진동, 소음 실험을 위한 센서, signal conditioner, data acquisition system 등 필요한 각종 장비를 충분히 구비하고 있으며, software 역시 다량 보유하고 있다. 특히 유럽 쪽에서 개발한 SAMCEF<sup>200</sup>을 이용하여 응력해석, 모드해석은 물론 비선형 진동 및 회전체 역학 해석을 수행함으로써 실험과 비선형 이론 해석의 결과를 점검하고 있다.

지난 해에는 본 실험실이 주도하여 한국소음진동공학회 주관 제 2회 설비진단강습회를 성균관대학교에 유치하여, 국내 산업현장의 설비진단관련 학계, 연구소, 기업체의 설비진단 전문가와 현장의 실무자가 모여 강습회를 성대히 치룬 바 있다.

### 4. 맺음말

이상에서 본 바와 같이 본 연구실에서는 그 간

국내 기계공학 연구에서 소외되었던 비선형 진동에 주안점을 두고 연구해 왔다. 난해하고 이론적이어서 실용화와 거리가 있다는 저변의 인식과 달리, 교과서적인 비선형 현상이 실제 상황에서 어떻게 나타나며 그것이 기계 설계 및 운전에서 어떻게 반영되는지를 보이려고 노력해 왔다. 특히 실용화를 위하여 기계운전 중 발생하는 이상현상을 규명하고 대처하는 고장진단에 관심을 가져왔다. 모든 공학의 문제가 이론만이 아닌 실제 상황과 맞물려 있다고 할 때, 근본적으로 비선형인 자연계를 이해하기 위해 비선형진동 이론은 이론이 아닌 실제 문제인 것이다. 특히 경험과 실험 데이터가 요구되는 기계분야에서 비선형을 포함한 문제의 본질을 그대로 봄으로써 문제는 해결될 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- (1) 최연선, "실용 기계공학을 위한 비선형진동의 과제," 한국소음진동공학회지, 제7권, 제1호, pp. 13-19, 1996.
- (2) Choi, Y. S., Noah, S. T., "Nonlinear Steady-State Response of a Rotor Support System," ASME, J. of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability, Vol. 109, pp. 225-261, 1987.
- (3) 최연선, 배성준, 간국이 있는 링크기구의 동특성, 한국소음진동공학회지, 제 9권, 제 5호, pp. 1050-1057, 1999.
- (4) choi, Y. S., Investigation on the Whirling Motion of Full Annular Rotor Rub, J. of Sound and Vibration, Vol. 258, No. 1, pp. 191-198, 2002.
- (5) 박상문, 최연선, 부분회전마찰의 비선형설계변수 규명, 한국소음진동공학회지, 2004년도 춘계학술대회논문집, pp. 663-668.
- (6) 김현진, 최연선, 수치균형조화균형법에

국내연구실 소개

- 의한 마찰진동해석, 대한기계학회논문집, Vol. 14, No. 41, pp. 273-283, 1990.
- (7) 정성균, 최연선, 브레이크 라이닝 패드의 마찰진동, 한국자동차공학회논문집, Vol. 2, No. 5, pp. 275-283, 1994.
- (8) 최연선, 이봉현, 신용호, 전달오차와 백래쉬에 의한 기어 구동계의 비선형 동특성 해석, 한국자동차공학회논문집, 제 5권, 제 1호, pp. 69-78, 1997.
- (9) 최연선, 기어 소음 저감을 위한 NB-7수동 변속기의 공학해석, 기아자동차(주), 연구 보고서, 1996.
- (10) 조운수, 최연선, 전동드릴의 진동특성 및 전파경로 해석, 한국소음진동공학회지, 제11권, 제 9호, pp. 422-430, 2001.
- (11) 정대현, 최연선, 고속전철 Catenary/Pantograph계의 동적응답에 대한 수치해석, 1991 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 127-130, 1991.
- (12) 이봉현, 최연선, 진동신호를 이용한 전기동차 구동장치의 안전성 평가, 한국소음진동공학회지, 제 8 권, 제 5 호, pp. 929-935, 1998.
- (13) 장종기, 최연선, 고속주행을 위한 화차 한량의 사행동 해석, 한국철도학회 논문지, 제 6 권, 제 3 호, pp. 149-155, 2003.
- (14) 최연선, LG 정유 DESOX 공장의 FAN/DUCT 진동 및 소음 측정 결과 보고서, 대림엔지니어링(주), 1997.
- (15) 김영규, 최연선, 이대훈, 중저가형 Flexible Rapier 직기개발, 한국섬유공학회지, 제 35 권, 제 5 호, pp. 282-293, 1998.
- (16) 우영주, 최연선, 구동 점탄성 벨트의 비선형 진동, 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 11 호, pp. 845-851, 2003.
- (17) 최연선, 우영주, 서경석, "전자력을 받는 외팔보의 선형진동," 한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp. 283-288.
- (18) Jung, G. C., Lim, J. H, Choi, Y. S., Nonlinear dynamic analysis of cantilever tube conveying fluid with system identification, KSME International Journal, Vol. 17, No. 12, pp. 994 ~ 999, 2003.
- (19) 박주표, 최연선, 현가장치의 비선형 설계 변수 추정, 한국소음진동공학회 2003 춘계학술대회논문집, pp. 281-286.
- (20) Samtech, SAMCEF 9.1 manual 2002.