

회전체 진동 연구 소개

이 중 원

(한국과학기술원 기계공학과)

1. 회전체 역학의 태동

회전체 역학에 대한 초기의 연구 기록은 1869년 The Engineer에 투고된 스코틀랜드 공학자인 Rankine의 논문으로 거슬러 올라가는데 유감스럽게도 그는 임계속도를 넘지 못할 한계속도로 오해했다. 이 논의에 대한 수정은 1889년에 스웨덴의 공학자 Laval이 가스터빈을 실제로 초임계속도에서 운전해 보임으로서 결말이 났고 단순한 회전체 모형을 통한 이론적인 해명은 1895년 독일의 Föppl과 1919년 영국의 Jeffcott에 의해서 독립적으로 이루어졌다. 이러한 연유로 해서 회전체 역학의 가장 기본이 되는 단순회전체를 전통적으로 미국과 영국에서는 'Jeffcott 회전체', 유럽지역에서는 'Laval 회전체', 일부학자들은 'Föppl 회전체'라고 칭함으로 하여 다소 혼동을 야기시키고 있다.

여하튼 초기에는 단순회전체 모형을 이용한 임계속도 문제와 불균형에 의한 응답특성에 대한 연구가 주를 이루었지만 모형이 임계속도가 2개인 강성회전체로 발전하면서 자연 2면 밸런싱과 초임계속도 운전에 대한 연구가 필요하게 되었다.

2. 단순 회전체 역학의 음미

그림 1에 보인 단순회전체에 대한 운동방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + ky &= m\epsilon\Omega^2 \cos\Omega t \\ m\ddot{z} + kz &= m\epsilon\Omega^2 \sin\Omega t \end{aligned} \quad (1a)$$

또는 복소좌표계 $r = y + jz$ 를 도입하면

$$m\ddot{r} + kr = m\epsilon\Omega^2 e^{j\Omega t} \quad (1b)$$

여기서 m 은 회전체(강체 원판)의 질량, k 는 질량이 무시되는 축의 등가 강성, e 는 원판의 편심, Ω 는 회전속도이다

윗식은 일반 진동책에서 다루는 불균형 질량을 갖는 계의 거동을 나타내는 식과 동일하나 두가지 점

에서 유의할 필요가 있다. 첫째는 회전체의 운동 방정식은 평면 운동을 나타내고 있으며, 둘째는 가진력(이 경우는 불균형력)이 두 방향에서 연성되어 있다는 점이다. 여하튼 회전 속도 Ω 가 계의 고유진동수 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 와 일치될때 무한대 크기의 조화응답을 주게 되며 이 속도를 임계속도라 부른다.

가진력이 없는 경우 계의 운동방정식, 즉 식(1a)의 등식의 좌측을 살펴보면 y 와 z 두 방향의 운동이 독립적이라는 것을 쉽게 알 수 있으며 더구나 회전속도 Ω 에 무관함으로 특별히 회전체의 운동방정식으로서의 특징이 없게 된다. 다시 말해서 Jeffcott이나 Föppl이 다룬 단순회전체에 관한 계의 운동방정식은 본질적으로는 회전체의 특성

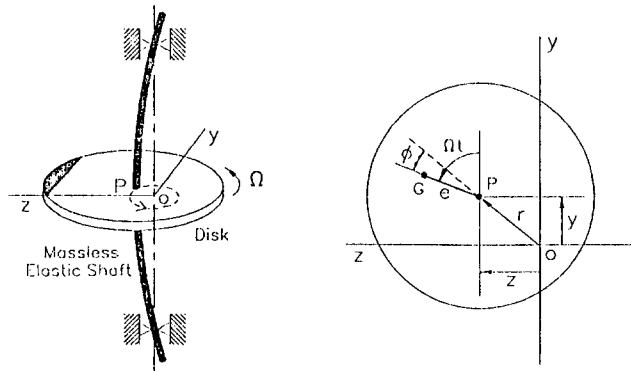


그림 1 단순 회전체 모형

을 갖고 있지 못하며 연성된 평면 운동과 회전속도에 종속된 응답특성은 불균형력과 같은 회전력에 의해 발생한다고 보아야 한다. 일례로 중력에 의한 외력만 있을 경우 (그림 1의 회전축을 수평으로 했을 때)

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + ky &= -mg \\ m\ddot{z} + kz &= 0 \end{aligned} \quad (2a)$$

또는

$$m\ddot{r} + kr = -mg \quad (2b)$$

로 되어 식 (2a)에서 알 수 있듯이 두 방정식이 완전 독립이 되고 평면운동도 연성되어 있지 않다.

지금까지의 논의를 정리하면, 초기의 운동 방정식들은 엄밀한 의미에서 회전체의 특성을 전혀 반영하고 있지 않았지만 불균형력과 같은 전형적인 회전에 의해 발생하는 외력을 도입함으로써 회전체 역학을 이해하고자 시도했고 상당히 성공적이었다고 볼 수 있다. 특히 식 (1b)나 식 (2b)에 보였듯이 복소좌표를 도입함으로써 운동방정식이 단순화되었을 뿐 아니라 $e^{j\omega t}$ 와 같은 외력의 복소표현을 통해 정방향으로 Ω 의 속도로 동기되는 외력임을, $-mg$ 와 같이 중력이 $-y$ 방향으로 늘 작용하고 있음을 일목요연하게 보여줄 뿐 아니라 일반 진동학 교재에서 제대로 해명하지 못하는, “왜 경우에 따라 조화력을 $\cos\omega t$, $\sin\omega t$, $\cos(\omega t + \phi)$, $e^{j\omega t}$, $Re\{e^{j\omega t}\}$ 등으로 일관성 없이 취급해야 하나?”하는 문제를 해소시키게 된다.

3. 회전체 역학의 발달

Crandall[Rotordynamics, unpublished manuscript, 1993]에 의하면 회전체 역학에 대한 연구가 활발했던 첫번째 시기는 1차 세계대전후 10년간으로 이 시기엔 왕복동 기계

의 비틀림동, 회전기계의 선회 진동, 회전원판의 진행파(전진 및 후진), Holzer의 비틀림동계의 공진에 관한 연구등이 이루어졌고 내부 감쇠 및 윤활에 의한 회전축의 불안정성이 관측되었다. 특히 오늘날 까지 회전계의 설계단계에서 많이 활용되는 Campbell diagram이 1924년경 발표되었다.

두번째 시기는 대략 1960년 중반부터 다른 공학 분야와 마찬가지로 실험장비 및 자료습득 장치의 고성능화, 컴퓨터의 출현 및 보급으로 섬세하고 정밀한 실험, 방대한 수치적 계산이 가능해짐에 따라 새로운 연구뿐 아니라 과거 연구에 대한 재평가 작업등이 활발해졌다. 특히 터빈, 발전기등의 대형화, 고출력화뿐 아니라 우주항공 분야등 특수 응용분야에서 회전기계의 고속화에 따른 초임계속도 회전체의 등장은 연구 영역을 크게 확대하게 되었다.

회전체 역학의 발달과정을 먼저 이론적인 측면에서 살펴보면 다음과 같다. 앞서 지적했듯이 단순회전체 모형은 두가지 측면, 즉 y 와 z 방향에서 연성되어 있지 못하다는 점과 회전속도 종속항이 없다는 점에서 회전체로서의 특성 반영이 제대로 되고 있지 못하다. 학문이 발달하면서 회전체의 모형도 자연이 이를 보완하는 방향으로 전개되었다. 연성에 관한 연구로는 베어링 (특히 저널 베어링), 시일, 내부 감쇠, 크랙, 구조물과 작동유체의 상호작용등을 모형에 반영함으로써 이에 따른 동특성의 변화, 특히 불안정성의 규명에 관한 연구가 이루어졌고, 회전속도 종속항의 도입과 관련해서는 무엇보다도 회전축의 고속화에 따른 자이로 효과, 저널 베어링의 감쇠 및 강성효과 등의 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이외에 회전축의 탄성을 고려한 탄성

회전체의 밸런싱 및 해석, 회전체의 비대칭성 영향, 비보존력계 해석, 마그네틱 베어링, 스퀴즈 필름 감쇠등도 중요한 연구 과제가 되어 왔다. 연성의 문제는 회전체 역학에서만 볼 수 있는 독특한 현상인 후진 및 전진 모드의 분리(이는 응답특성으로서의 후진 및 전진 선회 현상과는 다름)를 야기시킬뿐 아니라 진동학에서 골치거리로 여기는 Non-self-adjoint 고유치 문제를 피할 수 없게 된다. 회전속도 종속성은 동일회전체라 하더라도 회전속도가 바뀌면 회전체의 동특성이(안정성을 포함하여) 변함을 의미하며 따라서 근본적으로는 별도의 회전체로 취급되어야 함을 의미한다. 회전체에 가해지는 외력은 불균형 처럼 회전과 종속되어 있으나 회전체의 응답과는 무관한 보존력인 경우도 있지만 고출력, 고속 펌프나 발전기등에서 처럼 응답에 종속되는 비보존력계의 경우와 응답에 종속되지 않으면서도 비보존력계가 되는 경우등 계의 불안정성 해석 연구의 좋은 소재를 제공하는 사례가 많다.

수치해석 측면에서는 전통적으로 전달행렬법이 많이 개발되어 이용되고 있었기 때문에 타분야 보다는 비교적 늦은 1972년 Booker와 Ruhl에 의해 유한요소법이 이용되기 시작했고 근래에는 회전계 뿐 아니라 지지대, 기반 구조물 등을 포함한 해석이 요구됨에 따라 자연 유한요소법의 적용 범위가 넓어지고 있다.

앞서 예시했듯이, 복소좌표 표현법을 활용할 경우 회전체의 운동방정식이 단순화되고 해석도 편리해짐에 따라 전통적으로 이 분야에서 많이 애용되어 왔다. 특히 복소좌표는 본질적으로 공간상의 평면 운동을 표현하기 때문에 선회운동의 모양뿐 아니라 축 회전 방향에 상대

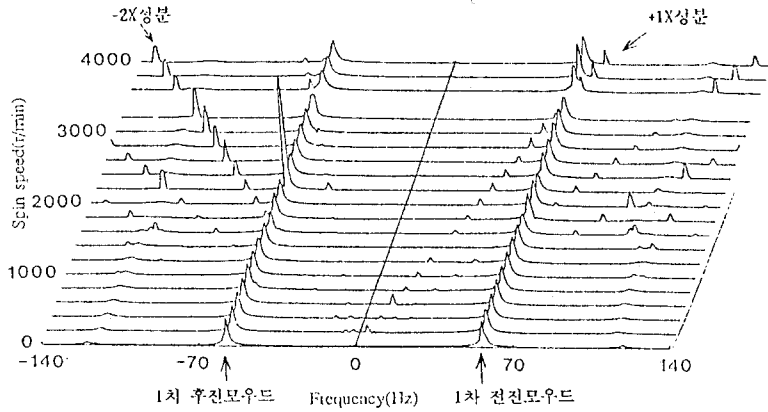


그림 2 새로운 개념의 waterfall 선도

적으로 선회방향을 나타낼 수 있게 된다. 이러한 논리에서 출발하면 각 모드에게도 전진과 후진의 방향성(실제 응답 방향과는 다른 고유 특성으로서의)을 인가시킬수가 있게 되며, 그림 2에 보인 바와 같이 전진 및 후진 선회응답과 마찬가지로 전진 및 후진 모우드도 주파수 영역에서 방향성별로 분리가 가능해져서 계의 규명, 특성해석, 진단 및 모니터링등의 분야에서 큰 장점을 갖게 된다.

4. 동역학인가? 진동인가?

외국에서는 흔히 회전체 동역학(rotordynamics)이라 불리우는데 비해 국내에서는 무슨 이유에선지는 몰라도 회전체 역학이라고 번역되고 있다. 우선 동역학 강의에서 다루는 내용중 해당사항은 강체의 공간운동 부분 중 회전체에서 찾을 수 있으나 대부분 자유 물체의 자이로 현상에 국한되어 있다. 진동도 물론 광의의 동역학에 포함되기는 하지만 1920년대 초기, 회전체 역학이 처음 진동 교과서에서 취급되기 시작한 이래 전통적으로 진동의 일부로서 인식되어 온것이 사실이다. 그러나 앞서 언급했듯이 1960년대 들어 회전체 역학연구가 크게 활성화되고 특히 현장과 직결

된 응용이 강조되면서 별도의 학문 분야로 독립하게됨에 따라 기존의 진동 교재에서도 그 흔적이 거의 사라지게 되었다. 근래에는 기계역학(machine dynamics)강좌등에서 일부 강의가 되고 있으나 이 강좌도 국내외를 따질것 없이 별도 개설의 기회가 미미한듯이 보인다. 한편으로는 학문의 현장성과 실용성으로 인하여 복잡한 진동이론 보다는 간단한 모형을 통한 현장의 이해와 응용에 치중한 나머지 독자적인 스타일의 회전체 역학 저서들이(특히 일부저서는 현장 엔지니어 대상) 출간되면서 기존의 진동에 관한 저서와 그 류(類)를 달리 하게 됨에 따라 오히려 교실밖으로 나가는 아쉬움을 남기게 되었다.

5. 관련 서적 소개

회전체 진동에 대한 연구중 가장 전통적이고 실용적인 분야라면 밸런싱을 들 수 있는데, 회전체 역학 또는 진동학을 다루는 서적에는 대개 한두 장에서 다루고 있다. 비교적 전문적으로 다루고 있는 서적은

1. H. Schneider, Balancing Technology, 2nd ed., Carl Shenck Ag., 1977.
2. M. S. Darlow, Balancing of High-Speed Machinery,

Springer-Verlag, 1988.

등이 있다. 다만 오랫동안 연구되어 온 연구 분야인 만큼, 최근에는 다소 이 분야 연구 활동이 저조한 편이다. 역사적으로 보면 강성회전체의 2면 밸런싱 경우는 1934년에 Den Hartog에 의해 정리되었고, 탄성회전체의 모드 밸런싱 이론은 1959년 Bishop과 Gladwell에 의해서 처음 제기 되었으며, 영향계수법은 1964년 Goodman에 의해 실용화되었다. 이후 후자의 두 방법을 통합한 통합이론(Unified Approach)이 나왔고 2개의 강체 모드를 고려한 'N+2면 밸런싱'과 고려하지 않는 'N면 밸런싱'에 대한 토론이 열을 띄기도 했다. 최근에는 주로 탄성회전체에서 시도 질량(trial mass)없이 밸런싱하는 기법등이 제안되고 있다.

고전적인 회전체 진동에 관한 저서로는

3. A. Tondle, Some Problems of Rotor Dynamics, Chapman & Hall, 1965.
4. R. G. Loewy, V. T. Piarulli, Dynamics of Rotating Shafts, The Shock and Vibration Information Center, 1969.
5. R. Gasch, H. Pfützner, Rotor-dynamik : Eine Einführung, Springer-Verlag, 1975.
6. N. F. Riger, J. F. Crofoot, Vibrations of Rotating Machinery, Rochester Institute of Technology, 1977.
7. A. D. Dimarogonas, S. A. Paipetus, Analytical Methods in Rotor Dynamics, Applied Science Publishers, 1977.
8. J. S. Rao, Rotor Dynamics, Wiley Eastern, New Delhi, 1983.

등을 들 수 있는데 주로 단순모형의 회전체를 기본으로 회전 비대칭성, 내부감쇠, 저널 베어링등에 의한 불안전성 문제를 흥미있게 다루고 있으며 일부 전달행렬법 등을 이용한 수치계산 문제도 소개하고 있다.

1980년대 후반부터 최근까지는 회전체 역학 저술활동이 가장 활발한 시기로, 크랙, 불베어링/저널 베어링의 모형화, 시일 동력학, 유동관련 진동, 비보존력에 의한 불안정성 문제등 현대적인 주제를 많이 다루고 있으며 FEM등의 수치예도 예시하고 있다. 또한 현장 엔지니어 및 설계자의 관심이기도 한 시스템 규명 및 진단 기법등 다양한 분야도 소개되고있다. 예를 들면

9. O. Mahrenholtz(ed.) Dynamics of Rotors: Stability and System Identification, Springer-Verlag, 1984.
10. N. F. Rieger(ed.), Rotor-dynamics 2: Problems in Turbomachinery, Springer-Verlag, 1988.
11. J. M. Vance, Rotor-dynamics of Turbomachinery, John Wiley & Sons, 1988.
12. T. Someya(ed.), Journal-Bearing Databook, Springer-Verlag, 1988.
13. M. J. Goodwin, Dynamics of Rotor-Bearing Systems, Unwin Hyman Ltd., 1989.
14. M. Lalanne, G. Ferraris, Rotordynamic Predictions in Engineering, John Wiley & Sons, 1990.
15. F. F. Ehrich(ed.), Handbook of Rotordynamics, McGraw-Hill, 1992.
16. D. W. Childs, Turboma-

chinery Rotordynamics: Phenomena, Modeling and Analysis, John Wiley & Sons, 1993.

등이 있는데 다자유도 모형의 고유치 문제를 다루기는 하지만 주로 복잡한 계에 대해서는 수치해석이나 실험결과에 의존하고 있다.

회전체 역학의 순수한 고급 이론서로서는

17. F. M. Dimentberg, Flexural Vibrations of Rotating Shafts, Butterworths, London, 1961.

과 최근에 필자가 저술한

18. C. W. Lee, Vibration Analysis of Rotors, Kluwer Academic Publishers, 1993.

등이 있는데 [18]은 Dimentberg [17]의 이론을 발전시키고 회전체 역학을 진동학 입장에서 재조명, 새롭게 전개한 순수이론서이다.

6. 관련 학술대회 소개

회전체 역학을 주요 주제로 다루는 국제 학술대회로는 먼저 1976년부터 매 4년마다 영국기계학회 (IMEch) 주최로 영국 국내에서 개최되는 International Conference on Vibrations in Rotating Machinery로서 유럽의 산업체 전문가의 적극적인 참여가 돋보이는 대회로 지난 1992년 Bath에서 개최된 제 5회 대회의 경우 회전익 계(8편), 능동제어(10편), 계규명 및 안정성(6편), 현장사례(10편), 시일과 베어링(11편), 상태 모니터링(10편), 동적해석(12편), 비선형효과(4편) 등의 분야에서 77건의 논문이 발표되었다. 차기 6회 대회는 1996년 역시 영국의 Oxford에서 열릴 예정이다.

세계적인 학술대회로는 4년마다 (최근은 1991년에 제 8차 대회 개최됨) 개최되는 IFToMM(국제 기계 및 기구 이론 연맹)의 학술대회에서 회전체 역학 session이 비교적 크게 운영되고는 있으나 이보다는 IFToMM의 회전체 역학 기술분과에서 독립적으로 매 4년마다 개최하는 International Conference on Rotor Dynamics가 중요한 행사로 여겨지고 있으며, 제 4회 대회가 최근(1994년 9월) Chicago에서 개최된 바 있다(제 1회 대회는 이태리 Rome에서 1982년에, 제 2회 대회는 일본 Tokyo에서 1986년에, 제 3회 대회는 불란서 Lyon에서 1990년 개최됨). 계규명, 회전익 계, 모니터링 및 진단 등에서 50여편의 논문이 발표되었으며, 특히 회전체의 모드 시험법, 비선형 회전체 역학, 기계진단 등이 주요 관심사였다. 차기 제 5회 대회는 독일에서 개최될 예정이다.

미국과 일본이 주도권을 갖고 개최하는 학술대회로 ISROMAC (International Symposium on Transport Phenomena, Dynamics, and Design of Rotating Machinery)가 있는데 1985년 제 1차 대회 때는 Transport Phenomena에만 국한 했었으나 1988년 제 2차 대회부터는 Dynamics와 Design 분야를 별개의 session으로 통합 운영하는 방식으로 확대되었으며 이후 매 2년마다 봄에 하와이에서 개최되고 있다. 특징은 회전기계에서 열유체 분야와 동역학 분야를 조화롭게 융합하고자 하는것인데 본격적인 협력관계가 모색되기 까지는 다소 시일이 걸릴 것으로 보인다. 대회 규모는 동역학 session의 경우 약 60여편의 논문이 발표된다.

이 외에 특기할 만한 학술대회로는 매 2년마다 개최되는 ASME

Biennial Conference on Vibration and Noise로 1967년 이래 미국 국내에서 홀수년에 개최되며 비교적 다른 session에 비해 회전체 역학 관련 session의 규모가 큰 편으로 1991(13차)년 및 1993(14차)년 대회의 경우 평균 40편 정도의 논문이 발표된 바 있다. 다소 규모가 작고 폐쇄적인 학술대회이긴 하지만 주목을 받는 대회로 NASA와 Texas A & M 대학의 Turbomachinery Lab이 1980년 이래 2년정도 주기로 공동 후원하는 'Rotor-dynamic Instability Problems in High-Performance Turbomachinery'의 워크숍을 꼽을 수 있는데 주제도 한정되어 주로 동작유체, 시일, 베어링 및 댐퍼 등과 관련된 안정성 문제를 다루며 논문발

표 규모는 1993년 경우 30편 정도이다.

또한 수많은 동역학, 진동 관련 학술대회에서도 활발히 논문이 발표되고 있으나 일일이 열거할 수는 없고 다만 필자가 관심을 갖고 있는 학술대회중 회전체 동역학 및 제어 이론의 응용으로서 최근 각광을 받고 있는 전자기 베어링에 관한 학술대회를 빼놓을 수 없다. 이 대회는 스위스, 독일, 불란서 등 유럽국가와 일본, 미국이 주축이 되어 1988년 제 1회 이후 매 2년마다 열리는 대회로 정식 명칭은 International Symposium on Magnetic Bearings이다. 최근 1994년 8월 제 4차 스위스 대회서는 96편의 논문이 발표되는 성황을 이루었는데 전자기 계의 해석, 증폭기 및

액츄에이터, 초전도체 이용 등의 다소 생소한 주제 이외에도 순수 회전체 계의 모형화 및 규명, 터보기계, 펌프, 관성차, 동작기계 스피들 등 회전기계에의 응용 등 회전체 역학과 관련이 많은 논문도 다수 발표되고 있다.

7. 후 기

아직 학문의 경지가 일천한 필자로서 짧은 기간에 다소 방대한 소재를 대상으로 하여 글을 쓰다보니 아쉬운점이 많습니다. 특히 본격적인 자료조사가 미흡하다보니 본의 아니게 누락된 주제나 자료가 있을 것으로 믿습니다. 후일을 기약하는 뜻에서 널리 양해 있기를 바랍니다.

WESTPRAC V 94 Proceeding 보급 안내

제5차 서태평양지역 음향학술대회(WESTPRAC V)가 한국소음진동공학회와 한국음향학회가 공동 주최로 8월 23일부터 25일까지 3일간 서울 스위스그랜드호텔에서 국내외 200여명이 참석한 가운데 성황리에 개최 되었다.

본 국제학술대회에서는 기초연설 2편과 논문으로는 일반음향 2, 물리음향 19, 초음파 13, 수중음향 36, 건축음향 17, 소음진동 37, 전기,통신기술 8, 음성신호 34, 신호처리 3편 등 총 170여편이 발표되었다. 아울러 학술대회 발표 논문들이 게재된 Proceeding을 회원 여러분께 보급코자 하오니 필요한 회원께서는 학회로 연락주시기 바랍니다.

* 연락처 : TEL (02) 563-4851-2, FAX : (02) 563-4853

* 보급가 : 1SET에 5만원(1권은 3만원) : 송료 포함
(Vol. 1, 2로 되어 있으며 각권 600면 정도임.)