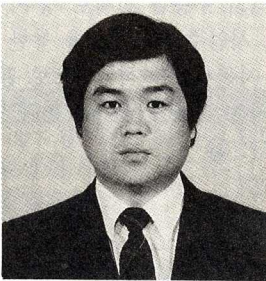


설비 진단기술(下)



권오운
(부산지부 과장)

〈전 호에 이어 계속〉

5. 개발의 현상

설비 진단기술은 1960년대의 후반에 구미 및 일본에서 산업계의 강한 요구에 의해 연구가 추진되었지만, 그 초기의 주된 응용분야는

- ① 우주개발
- ② 원자력 관계설비
- ③ 군용 특히, 잠수함과 군용기
- ④ 항공기(특히, 헬리콥터와 대형여객기)
- ⑤ 화력발전설비(특히, 가스터빈, 증기터빈 등)
- ⑥ 프로세서산업(특히, 철강, 화학, 석유분야)
- ⑦ 해상구조물
- ⑧ 선박관계

등이 있다(기타 설비 진단기술을 중점적으로 적용하고 있는 분야로서는 교통관계가 있다).

〈표1〉 설비 진단기술의 개발 현황

분 류	개 발 현 황
M1 기계요소	롤링 베어링의 진단에 관해서는 SKF사의 펄스법, MIT사의 Ringing법, 신일본제철의 고주파 진동법 등이 이미 실용단계에 있다. 기어장치의 진단에 관해서는 영국 Southampton 대학이나 미국에서의 NASA관계에서의 연구가 유명하다. 슬라이딩 베어링에 대해서는 음향법이나 전기저항법이 많다.
M2 회전체	구동축의 클랙 검출에 대해서는 진동모드법이나 AE법법이 많이 연구되고 있다. 한편, 고속회전체의 이상진동의 진단에 먼저 착수한 것은 미국 GE사이지만 현재로는 독일, 스웨덴의 연구가 많다.
M3 유체기계	수차, 펌프 등의 진단에 관해서는 압력진동법이 유효하며, 이미 실용단계에 있다. 리크의 검출에 대해서는 온도법이나 기중초음파법 등이 실용중에 있다. 또, 유압기계 등의 진단기술은 1950년대 말부터 연구가 시작되어 역사도 깊다.
M4 원 동 기	원동기의 진단에 대해서는 항공기나 선박, 차량 등의 엔진에 관한 연구가 특히 왕성해서 완전히 실용화되고 있다. 산업용 터보기계에 대한 모니터링 시스템도 전력업계 등을 중심으로 보급이 추진되고 있다.
M5 가공기계	공작기계의 성능저하 진단이나 가공성능의 진단은 이미 20년의 역사를 가지고 있지만, 최근에는 무인화 공장의 연구와 더불어 시스템화되고 있다. 용접기계 등의 모니터도 종래에는 산발적으로 되고 있었지만, 최근에는 자기진단기계를 가진 용접기도 나타나고 있다.
M6 정지기계	압력용기나 정지 구조물 특히, 해양 구조물에 대해서는 AE법의 적용연구가 활발하다. 담조류의 내압이나 부식 진단에는 종래의 NDI기술과 다른 기중초음파법이나 기계임피던스법 등의 적용도 시도되고 있다.
M7 전기기계	절연진단, 정류진단 및 고장점 표정 등의 순전기적인 이상진단은 역사도 깊고, 실용성이 높은 것이 많다. 최근 진동음향법이나 전류해석법, 회전속도변동법 등이 실용단계에 있으며, 이 분야 진단의 신뢰성을 높였다.
M8 제어장치	각종 제어계 중에서도 유압제어계 등의 고정밀도 대규모화와 더불어 본 분야의 중요성이 증대하고 있다. 전달계수법은 이미 실용중에 있지만, 보다 더 칼만필터 등이 현대제어이론의 적용에 따라 진단정밀도를 높이는 노력이 계속되고 있다.

〈표1〉은 중요한 설비에 대한 진단기술의 개발 현황을 나타낸다.

특히, 완성도가 높은 것은 M1의 기계요소 진단기술이다. 보전상 가장 문제가 많은 롤링 베어링의 진단에는 고주파 진동법이 가장 간편하고 실효성도 높지만, 일부 외륜의 변위를 광섬유(optical fiber)나 와류변위계로 측정하는 방법도 보고되고 있다.

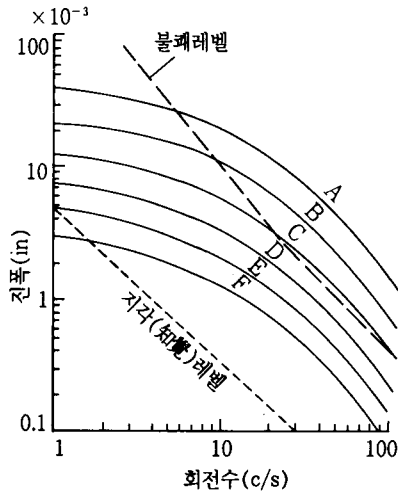
슬라이딩 베어링의 진단은 AE법, 유압변동법, 전기저항법 등이 주된 것이지만, 정밀진단을 위해서는 방사성 물질을 이용하는 것도 있다.

그러나, 트러스트(trust)베어링의 감시 등은 종래의 와류변위계법이나 온도 센서가 가장 신뢰성이 높다. 온도 센서에 의한 경우는 유온에서는 감도가 나쁘기 때문에 트러스트 칼라(trust collar)의 온도를 직접 측정할 필요가 있다.

기어의 진단에도 진동법이나 회전 속도변동법 등이 쓰이고 있지만, 롤링 베어링의 진단만큼 완성도는 높지 않다. 그래서, 주로 미군의 헬리콥터 기어 예의 진단을 위해서 개발된 진단 로직이나 데브리스 모니터가 가장 많이 이용되고 있다.

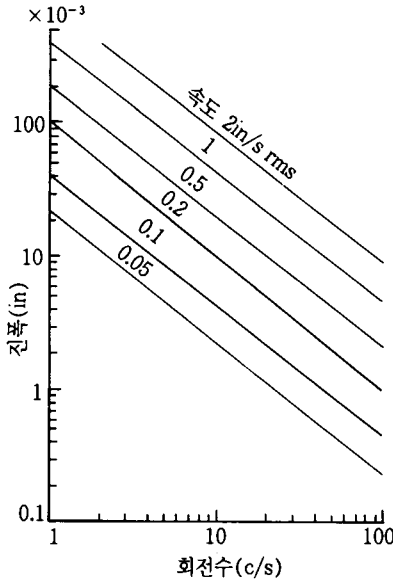
M2의 고속 회전체의 진단은 진동법이 역사도 오래되고, 가장 실효성이 높다.

고속 회전체의 불안정 현상에 관해서는, 1869년의 W. J. Rankine의 간단한 회전체에 대한 해석을 시작으로, 1930년경의 제네럴 일렉트릭(GE)사의 B. L. Newkirk나 A. L. Kimball에 따라 대체로 매듭을 보았다. 이들의 연구는 회전기계에 있어서 이상현상



범위	상 태
A	Too rough to operate
B	Rough-correct immediately
C	Rough-correct
D	Slightly rough
E	Fair
F	Good
G	Very smooth

(a) Rathbone의 한계곡선



속도	상 태
2	Immediate investigation desirable
1	Unsatisfactory
0.5	Slightly rough
0.2	Normal
0.1	Very good
0.05	Spins like a top

(b) Yates의 한계곡선

〈그림 1〉 Rathbone과 Yates의 진동 판정 기준

의 진동을 징후 파라미터로서 진단하는 경우에 귀중한 기초지식을 제공하고 있다.

또, 간이 진단시 중요한 진동한계치에 대해서는, 1936년의 T.C. Rathbone의 연구를 시작으로 많은 연구자나 기관·기업에 있어서 각종의 판정기준이 제안되고 있다.

Rathbone의 판정기준은 현장

의 기술자나 기능자의 주관적인 판단을 그래프화한 것으로, 사람의 관능감과 잘 일치하기 때문에 현재까지도 계속 사용되고 있다.

H.G.Yates는 같은 현장 기술자의 주관적인 의견을 바탕으로 하여, 진동속도 일정의 판정기준을 만들었다.

이런 방식이 VDI 2056을 시작

으로 각종 규격에 채용되고 있는 것은 주지의 사실이다(〈그림 1〉 참조).

M3의 유체기계 진단법도 근래 연구가 추진되고, 압력 파동법 등은 이미 실용화 단계에 있다.

M4의 엔진류나 터보기계의 진단기술도 잘 연구되고 있고, 선박이나 항공기용은 컴퓨터에 의한 자동진단이 실용화되고 있다.

M7의 전기설비는 고압 전력설비를 중심으로 가장 그 진단법이 연구되고 있는 분야이다.

M8의 제어계의 진단법은 이미 실용중에 있고, 칼만필터법이나 수차검정법(遂次檢定法)도 일부 실용중이다.

이외에도, 최근에는 퍼지이론이나 지식공학을 이용해서 설비진단을 자동화하는 연구가 많다. 지식공학에 의한 수법은 원자력 플랜트 등 대규모 플랜트의 진단이 효율적으로 실현되고 있는 반면, 현장의 노하우를 활용하기 쉽다고 하는 점이 흥미 깊다.

이와 같이 설비 진단기술은 과거 약 15년간의 개발이나 계몽의 기간을 종료하고, 현재 실용기에 접어들고 있다고 할 수 있다.

설비 진단기술(CDT)은 전술한 바와 같이 화력발전소, 항공기, 선박 등에 관해서는 이미 필수인 것으로 되고 있다.

또, 현재 이 방면의 연구나 적용이 일단락되고, 이들의 연구 성과나 적용 실적이 일반 산업계에 도입되는 과도기에 있다고 생각된다.

설비 진단기술이나 상태 기준보전에 관한 현재의 상황은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 15년 전까지는 이런 말조차 없었던 설비 진단기술(CDT)이나

상태 기준보전(CBM)이 설비보전을 위해 필수인 기술 및 시스템이라고 생각되어, 연구개발이나 실용화의 노력과 함께 70% 이상의 보전관계의 관리자가 장래를 지향하는 방향으로 인식하고 있다.

(2) 영국에서는 진단기술자협회(Institution of Diagnostic Engineers)가 1981년에 설립되어, 진단기술자의 지위 향상과 설비 진단기술의 연구개발 및 실용화 추진에 관한 활동을 개시하였다.

(3) 설비 진단기술 및 상태 기준보전 방식에 관한 벤처 비지네스가 속속 탄생하고 있다. 미국의 맨테크(Mantech International)사나 영국의 스투워드·휴즈(Stewart Hughes)사 등이 그 실례로, 20명 내외의 고급기술자에 의한 컨설턴트회사로서 연간 30%의 성장을 이루고 있다.

(4) 설비 진단기술은 예방보전을 위해서만이 아니고, 방재관리나 생에너지의 관점에서도 중요성이 증가되고 있다.

노르웨이의 선박기술연구소(Marine Technology Center)의 시산에 의하면, 선박엔진에 상태감지장치를 부착함에 따라 약 4%의 연료절약이 가능하다.

(5) 설비 진단기술과 상태 기준보전의 경제적 효과나 관리상의 이점에 대한 관심도 높아지고 있다.

효과 사례에 대해서는 군용시설이나 선박시설에 대한 것이 가장 많고, 다음으로 철강설비에 관한 것이 많다. 이것은 구미의 철강업이 설비진단에 대해 강한 관심을 가진다는 것을 나타내고 있다.

6. 미국의 실태

미국의 설비 진단기술의 조직적 연구로서는 1967년에 Office of Naval Research를 스폰서로 하여 개시된 '기계고장예방작업그룹'(Mechanical Failure Prevention Group : 약칭)의 활동이 가장 유명하다.

이 그룹은 대학이나 연구기관, 군, 행정기관 및 일반기업이 참여하는 자발적인 조직체이며, 매년 2회의 국제심포지엄을 열고 있다.

활동의 내용은

(1) 고장 매커니즘의 해명 및 데이터 교환

(2) 검출·진단 및 예측(Detection, Diagnosis, and Prognosis : 약칭 DDP 그룹)

(3) 신뢰성 설계

(4) 재료 내구도(耐久度) 평가이다.

이 중에서도 (2)의 검출·진단 및 예측(DDP) 그룹의 활동은, 설비진단의 입장에서는 가장 흥미가 있는 내용을 가지고 있다.

다음으로 압력용기, 보일러, 배관 등의 정지기계의 검사기술의 중심은 NBBI(National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors)이다.

NBBI는 미국 기계학회의 ASME 코드에 의한 안전관리 대행기관으로서 1919년에 설립되어 약 60년의 고장기록 등 귀중한 데이터를 축적하고 있다.

그 목적과 하는 일은 보일러, 압력용기, 파이프의 설계, 제조, 시험조사에의 ASME 코드의 적용에 의한 사고방지와 호환성의 추진이며, 그 활동 권한이 ASME에 의해 이양되고 있다.

기업관계에서는 MTI(Mechanical Technology Inc.)사가 주로 진단해석을 중심으로 한 진단기술

〈표 2〉 미국에 있어서 설비진단기술의 연구기관

연구기관·기업	연구내용
National Bureau of Standard (NBS)	(1) 고장 메커니즘의 해명 (2) 검출 진단 및 예측 (3) 신뢰성 설계 (4) 재료 내구도 평가
Ohio State University (OSU)	(1) 감시 기술 (2) 진단 (3) 진동 해석법 (4) 경향 관리법
National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors (NBBI)	(1) ASME 코드의 추진 (2) 위탁 검사원의 교육 (3) 데이터의 수집 (4) 검사원의 자격 수여
Mechanical Technology Inc. (MTI)	(1) 회전기계 진단 (2) 기어의 진단 (3) 베어링의 진단 (4) Down Time Control System(DTC)
Electric Power Research Institute (EPRI)	(1) Thermodynamics (2) Instrumentation (3) Corrosion Monitoring (4) Turbine Crack Monitoring

에 약 15년의 역사를 가지고 있다. 동사의 DTC(Down Time Control)기술은 회전기계의 보전 휴지 타이밍을 결정하기 위한 일련의 소프트웨어 패키지이다.

또, 존스·밋셀(Johns Mitchel)사는 회전기계의 모니터링 기술을 전문으로 하는 벤처비즈니스이다. LNG 플랜트의 초저온용 펌프, 콤프레샤 등의 감시기술에 많은 실적을 가지고 있다.

스파이어(Spire)사는 부식 감시나 방식(防蝕)기술에 오랜 실적을 가지고 있다. 동사는 방사선에 의한 트래서 기술을 이용하여 롤링 베어링이나 슬라이딩 베어링 또는 실린더 라이너 등의 마모를 정밀하게 진단하는 기술을 개발하여 주로 군용기계에 실용하고 있다.

설비 사용자로서는 철강회사가 1970년 초기부터 상기의 메이커와 협력하여 성과를 올리고 있다.

U.S.스틸사는 스펙트르 다이나믹스와 공동으로 압연설비의 진단기술 등을 개발하여 실용중에 있다.

베쯔레렘·스틸사는 보다 더 적극적으로 진동해석에 의한 설비진단을 미국내 6개소의 제철소에서 실용중에 있으며, 연간 약 12만달러의 보전 코스트를 절약할 수 있다고 한다. 동사는 이것을 동적 예방보전 시스템(Dynamic Predictive Maintenance : 약칭 DPM)이라 칭하고, 시판도 하고 있다.

이외 화학공업에서는 액송·케미칼사, 듀폰사, 몬샌트사 등이 많은 진단기술의 전문가를 보유하고 있다.

7. 유럽의 실태

영국

영국에 있어서의 설비 진단기술의 연구와 계몽활동은 초기(1960년대 후반~1970년대 초기)에는

레스터 공과대학(Leicester Polytechnic) R.A.Collacott박사의 '기계의 헬스 모니터링 그룹'(U.K. Mechanical Health Monitoring Group)을 중심으로 전개되어, 현저한 업적을 남겼다.

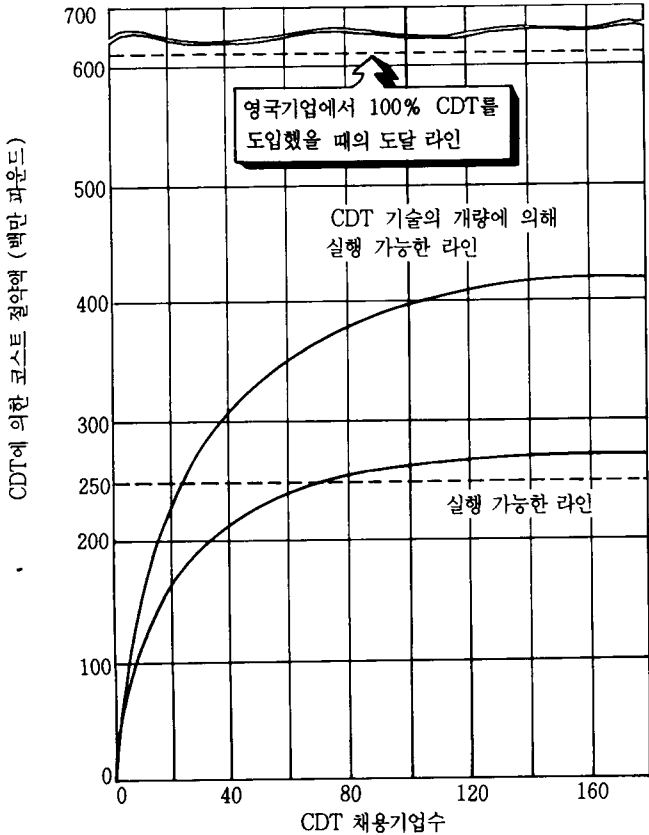
1970년에는 영국 상무성에 의해 테로 테크놀로지가 제창되고, 1972년에는 D.Parks 등에 의해서 상태 기준보전(CBM)이라고 하는 말이 만들어졌다[이에 대해 미국에서는 CBM이란 것을 예방보전(Predictive Maintenance)이라고 말하고 있다].

같은 시기에 Manchester대학의 SEL(Simon Engineering Laboratory)의 T.A.Henry, K.M.Lewis, H.Riddel 및 Southampton 대학 음향진동연구소(Institute of Sound and Vibration : 약칭 ISV)의 R.M.Stewart, A.Ray 교수 등에 의해서 설비진단기술의 연구가 개시되었다.

Henry교수의 그룹은 10년간에 걸쳐 대학에서의 연구실적을 배경으로, 1982년 5월에 Wolfson Industrial Maintenance(WIMU)라고 하는 회사를 설립하고 설비진단기술을 중심으로 한 컨설턴트나 트레이닝을 행하고 있다.

또, 마찬가지로 스튜워드·휴즈사는 Southampton대학의 음향진동연구소에서 약 10년의 연구실적을 배경으로, 상기 Stewart 및 Ray교수에 의해 설립된 벤처 비즈니스이다.

이외에 설비 진단기술 전문 컨설턴트회사로서 세계적으로 유명한 것은 마이켈 니-일(Michael Neale & Associates)사가 있다. 수명의 전문가에 의한 소기업이지만, 주로 관공서나 군관계의 설비진단기술에 관한 기획, 조사, 교



〈그림 2〉 영국의 산업계에 있어서 설비 진단기술의 도입 효과

500%의 회수율이고, 영국의 기계설비 투자액의 3%에 상당하는 막대한 이익이다. 또, 설비 진단 기술 및 운용조직을 개선하는 것에 의해 약 4억 2천만 파운드(약 1천6백8십억엔/년)의 보전코스트의 절감이 가능하게 된다.

또, UKAEA(U.K.Atomic Energy Authority)의 하부기관인 SRS(Systems Reliability Service)는 원자력발전 관계시설의 설비 진단기술 연구를 행하고 있다.

AE(Acoustic Emission)법에 의한 북해유전의 해상구조물의 감시 시스템을 개발한 것은 UIC사이다.

전력 관계에서는 CEGB(Central Electricity Geenerating Board)가 터빈이나 전력설비의 진단기술을 연구하고 있다.

〈표 3〉에 영국에 있어서의 대표적인 연구기관을 나타낸다. ㉞

수준권 등을 담당하고 있고, 조사 결과에 대하여는 세계적으로 높은 신뢰도를 얻고 있다.

〈그림 2〉는 동사가 영국 산업성(Department of Industry)의 의뢰에 의해 조사한 설비 진단기술(CDT)의 도입 효과와 예측이다.

이것에 따르면, 영국에 있어서의 CDT를 도입할 수 있는 기업은 약 2백개 사, 2천개소의 플랜트이다. 이 2천개소의 플랜트에 CDT를 도입하면, 현 시점에서 약 3억 파운드(약 1천2백억엔/년)의 보전 코스트의 절감이 가능하고, 그를 위한 투자액 5천만 파운드(약 2백억엔/년)를 들여서 2억5천만 파운드(약 1천억엔/년)의 이익이 얻어진다. 이것은 연간

〈표 3〉 영국의 설비 진단기술 연구기관

연구기관·기업	연구 내용
University of Manchester	(1) 보전 시뮬레이션 (2) 신뢰성 해석 (3) 컨디션 모니터링 (4) 스트레스 해석
Southampton University	(1) 계약 연구 (2) CDT의 Planning (3) 진단장치의 시작 (4) 교육 훈련
U.K.Atomic Energy Authority	(1) 보일러, 압력용기의 NDT (2) 부식 모니터링 (3) 신뢰성 해석
Leicester Polytechnic	(1) 교육 훈련 (2) 데이터 수집
Michael Neal & Associates Ltd.	(1) CDT에 관한 컨설턴트 (2) CDT조사, Planning (3) 기술 평가
Unit Inspection Co.	(1) 장치 제작 (2) 비파괴 검사 (3) 진동 해석 (4) AE기술