



# 소재 · 부품 손상원인분석 사업 현황

조경식 | 한국기계연구원

## 1. 서론

석유화학장치, 발전설비 및 대형 산업설비와 같은 국가적 기간산업설비들은 국가의 경제력 성장의 실현을 위한 핵심기반시설이지만 일단 사고가 발생하면 막대한 인명과 재산 및 환경피해를 초래할 수 있는데, 최근에 와서 이러한 설비들의 대형화, 노후화 및 빈번한 사고로 인하여 안전성 확보에 관심이 고조되고 있다.

설비의 파손은 여러 인자들이 복합적으로 작용하여 발생하므로 파손의 원인을 정량적으로 해석하고 그 결과에 따른 근본적인 손상방지대책을 수립하는 것이 유사한 사고의 반복을 미연에 방지하는 최선의 방법중의 하나이며, 지금까지 국내외적으로 발생하였던 여러 손상사례들을 수집, 분석하고 체계화 하여 관련 산업계에서 이용할 수 있는 DB체계를 구축하는 일이 시급한 현안문제로 대두되고 있다.

한국기계연구원은 기계, 소재, 시험평가 전문연구소로서 1981년 이래 지금까지 플랜트설비의 안전성 확보를 위한 기초연구에서부터 설비의 안전진단 및 잔존수명 예측, 손상원인분석 등 300여건의 관련연구 및 진단업무를 수행해 오면서 풍부한 이론적, 실무적 경험을 확보하였고, 또 원자력발전설비의 안전성 확보를 위하여 1993년 이래 10여년 동안 50여건의 발전설비 제작, 발전소 시공, 발전설비 가동전, 가동중 공인검사를 수행해 오면서 발전설비의 안전과 관련된 많은 고급인력과 기술, 그리고 현장경험을 축적하였다.

이러한 여건을 기반으로 하여 한국기계연구원에서는 설비 및 관련부품, 소재에 대하여 가동중에 발생하는 열화, 기능저하, 손상이나 파손에 이르기 까지 체계적인 손상발생원인 분석시스템의 구축 · 운영과 손상해석기술의 고도화 연구를 통하여 산업 · 공공설비의 안전과 사고예방은 물론 국산 소재 · 부품의 생산기술과 품질향상에도 기여할 수 있도록 기본연구사업인 소재 · 부품 손상원인분석센터(FACE) 구축사업을 수행하고 있다.

이 사업을 통하여 산학연이 협력하여 국가 기간산업설비(석유화학설비, 발전설비, 에너지 비축설비 등)의 가동중 발생하는 소재 · 부품의 손상에 대하여 손상발생의 근본적인 원인분석과 이를 방지하기 위한 대책을 도출함은 물론 지금까지 국내외적으로 발생된 여러 손상사례를 수집, 분석, 체계화하여 관련기술 및 정보를 산업체에 지원하는 등, 재난관리 및 기업의 소재 · 부품의 문제점 해결을 위해 노력하고 있으며 산업체와 보다 긴밀한 협력과 지원을 위하여 본 지면을 통하여 그 내용을 소개하고자 한다.

## 2. 산업설비의 손상원인분석 개요

### 2.1 산업설비 손상의 요인

표 1. 주요설비의 손상형태

설비	고장형태	조건	손상명	현상
Furnace, Tower, Vessel, Heat Exchanger, Piping 등 기계설비	부식	수용액	전면부식	두께감소, 강도저하
			국부부식	
			선택부식	
		기체	산화	두께감소, 강도저하
			유화	
			침탄	
			질화	
		용융물	용융염부식	두께감소, 강도저하
			유회부식	
	마모	기계적 작용	Erosion	두께감소, 강도저하
			마모	
	노화	환경효과	수소취성	강도저하
			수소침식	
			액체금속취화	
		열적 변화	시효(취성), $\sigma$ 상-475°C취성 변질	강도저하
	피복	박리	내식성저하	
균열	환경효과	부식피로	강도저하, 파괴	
		응력부식균열		
		환경취성		
	기계적작용	피로	강도저하, 파괴	
		열충격		
		크립		
설비 막힘	고형물	저온취성	생산효율저하	
		유량저하		
회전기류	이상진동	회전체	균형고장	기능저하
			축정렬고장	
			샤프트불량	
			기어마모	
			유체진동	
	기초불량			
플랜지, 밸브	헐거워짐			
전기, 계량 설비	절연노화	케이블 전동기 변압기	습기	누전에 따른 과대전류
			오염	
			박리	부분방전발생
	정도, 기능불량	계측기	균열	부분방전침식
작동불량			생산설비 지장	

산업설비에서 손상을 발생시키는 근본에는 다음과 같은 요인들이 있으며 주요설비에 나타나는 손상의 형태는 표1과 같다.

- 설계 : 구조, 설계노치, 이음위치, 용접부 형상
- 재료 : 모재 및 용접재료의 선정 및 취급
- 소재결함 : 판재 및 강관재료의 제조 및 성형과정에서 발생
- 제작 : Shop 제작, 현장건조, 용접, 열처리, 후처리 등
- 조업중 : 가혹한 조업조건

기계부품의 손상분석을 통한 손상의 분류 및 그 발생원인에 대한 한 통계를 살펴보면 표 2에서 보는 바와 같이 사용부품의 부적절한 소재의 선정과 부품제조과정에서의 부적절한 열처리공정이나 소재결함에 기인되는 손상발생률이 차지하는 비중이 약 70%로 매우 높게 나타났다.

표 2. 관련 엔지니어링산업계의 조사에 따른 손상원인의 비율

Origin	%
Improper material selection	38
Fabrication defects	15
Faulty heat treatment	15
Mechanical design fault	11
Unforeseen operation condition	8
Inadequate environment control	6
Improper or lack of inspection and quality control	5
Material mixup	2

(자료 : Metallurgical Failure Analysis, McGraw-Hill)

## 2.2 손상원인분석기술의 특징

산업설비의 손상원인분석기술은 소재의 용해 및 주조, 성형, 가공, 열처리, 사용조건 분석 등을 포함하여 소재 · 부품의 손상원인을 종합적으로 분석하여 제품의 건전성과 안전성을 확보하는 기술로서 종합 엔지니어링기술에 속한다. 세부기술로서는 소재특성평가기술(소재제조, 열처리, 표면처리 등 생산기반기술 분석에 기반을 둔 특성평가 기술)과 응력해석기술(사용조건 분석에 따른 소재 · 부품의 응력평가 기술), 파손품의 직접 분석기술(파단면 분석, 마크로-마이크로 조직분석, 비파괴기술 등), 실험실적 시뮬레이션 기술(파손원인 도출을 위한 모의실험) 등을 들 수 있으며 이와 같은 기술은 어느 한쪽에 치우침이 없이 공학적인 관점에서 논리를 수반해야 하는 종합적인 기술이라고 말할 수 있다.

소재전문가에 의한 손상원인분석 행위는 의사가 환자의 병명이나 발병의 원인을 진찰하고 처방하는 진료행위에 해당하는 기술로서 당면문제 해결을 위한 배경 및 이력자료들을 수집하여야 하며 정확한 진단에 필요한 시험검사 수단을 포함한 합리적 절차와 관련기술 분야에서의 폭넓은 경험이 대단히 중요시 되는 기술분야이다.

### 2.3 손상원인분석기술의 중요성

손상원인분석기술은 금속소재 제조기술의 이해와 산업설비 핵심부품의 제조기술(주조, 단조, 열처리, 가공, 표면처리, 용접 등)분석, 부품의 요구특성에 부합하는 적정한 소재특성평가 기술, 사용에 따른 응력해석, 파손품의 손상해석기술, 실험실적 모의시험기술 등이 포함되는 일체형의 기술이고 산업설비의 핵심부품 손상원인분석을 통한 객관적인 운용체계 및 안전성을 확보할 수 있는 공공기술이라고 할 수 있다. 실제 기업으로부터 시급하고 빈도가 가장 높은 기술지원 요청중의 하나가 조립단계, 초기사용 중에 발생하는 부품의 손상 및 파손원인분석으로서, 부품을 생산하는 중소기업 규모의 전문생산업체에서는 손상원인분석기술이 기반기술의 성격이며 석유화학 플랜트를 중심으로 하는 장치산업에서는 국가기간산업의 안전성과 내구성을 확보하는 엔지니어링 성격의 기술이라고 할 수 있다.

### 2.4 손상원인분석의 전형적인 절차

손상원인분석을 수행하기 위한 단계와 순서는 손상에 따라 다를 수 있겠지만 대표적인 것으로는 다음의 8단계를 포함하며 이러한 손상원인분석의 체계를 그림1에 나타내었다.

- 1) 손상상태에 대한 기록(사진)
- 2) 육안검사
- 3) 역학적 설계검토(응력해석)
- 4) 화학성분분석
- 5) 파면분석
- 6) 조직관찰
- 7) 기계적성질 시험
- 8) 손상모사 시험

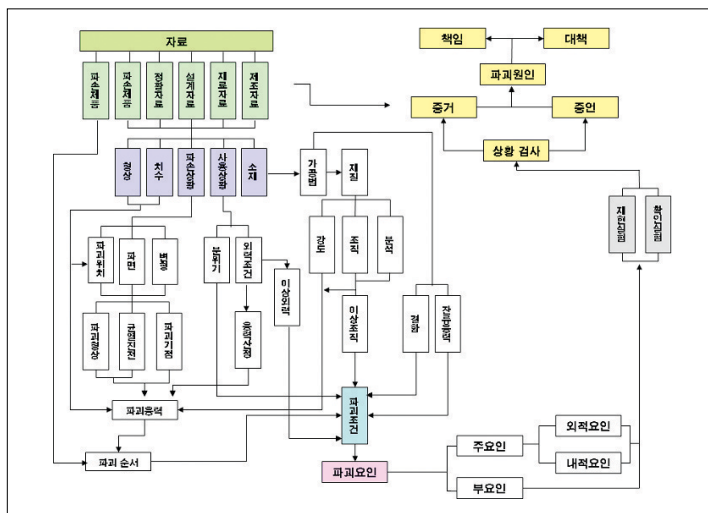


그림 1. 부품·소재의 손상원인분석 체계

### 3. 소재 · 부품 손상원인분석센터 구축사업

#### 3.1 사업의 목표

본 사업은 국가 기간산업설비(석유화학설비, 발전설비, 에너지 비축설비 등)의 가동 중 발생하는 소재 · 부품의 손상에 대하여 손상발생의 근본적인 원인분석과 이를 방지하기 위한 대책을 도출하고 관련기술 및 정보를 산업체에 지원하는 등, 재난관리 및 소재 · 부품의 문제점 해결을 위한 중추적 역할을 수행하고자 하는 것이 목적이며 세부적인 내용은 다음과 같다.

■ 소재 · 부품 손상원인분석 센터 구축

- 손상원인분석 관련 장비/시스템 및 software 도입/개발
- 결함/손상/파손/소재 · 부품 불량 원인분석을 위한 절차 및 기법 확립
- 재료손상 관련 DB구축으로 재료안전 정보 platform 기반조성

■ 소재 · 부품 손상원인분석 센터의 운영

- 소재 · 부품의 손상원인분석 기술지원 및 손상방지대책 연구
- 플랜트 사업장의 손상사례 연구 및 손상원인분석 지원업무
- 플랜트 설계/제작/운용 및 관련부품 업체를 위한 정보, 기술지원
- 손상원인분석 분야의 국내외 협동 Network 구성 및 정보 교류

또한 본 사업은 2005년 1월부터 2009년 12월 까지 5년간 수행되는 사업으로서 단계별 목표는 표 3과 같다.

표 3. 단계별 목표

Origin	단계별 목표
1단계(1년) (2005)	센터 기본업무 설계 및 구축 단계
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Infra 구축</li> <li>• Failure Analysis 체계 정립</li> <li>• 손상원인분석 기술고도화를 위한 기반 설계</li> <li>• 소재 · 부품의 손상원인분석 및 제품불량 해결을 위한 기술지원</li> <li>• 정보시스템 구축 기반정립</li> </ul>
2단계(3년) (2006~2008)	센터운영, 손상원인분석 기술지원 및 기술의 체계화, 고도화 단계
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Failure Analysis 체계 정립</li> <li>• 분석기술 고도화 연구개발</li> <li>• 소재 · 부품의 손상원인분석 및 제품불량 해결을 위한 기술지원</li> <li>• 정보시스템 구축</li> </ul>
3단계(1년) (2009)	센터구축완료/종합운영 및 자립운영 방안 수립
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 종합운영 및 문제점 보완</li> <li>• 재료안전 종합진단 인터넷 서비스 Portal 시스템 완성</li> <li>• 자립운영 방안 수립 및 시험운영</li> </ul>
2010 이후	손상원인분석센터 자립 체제로 운영

### 3.2 사업대상

본 사업의 주된 손상원인분석의 대상은 사고/손상 빈도가 높고 사고시 재해강도가 크고 넓으며 타 산업분야에 미치는 영향이 큰 국가 기간산업설비인 석유화학 플랜트 설비, 발전설비, 에너지 비축설비의 가동중 파손 또는 손상된 주요 소재·부품이다. 그리고 중소기업에서 제조하는 유관 소재나 부품의 사용중 파손이 발생된 경우의 파손 원인분석과 대책수립을 위한 기술지원도 본 사업의 수행범위에 포함되어 있다.

표 4. 주요 대상설비 및 부품

번호	대상설비	관련 부품
1	압력용기/반응기	Bellows, Flange, Expansion joint, Tee, Elbow, Thermowell, Tray Agitator, Clad, Piping 등
2	보일러	Economizer, Ligament, superheater, Header, Steam drum Expansion Joint, Separator, Steam Tube 등
3	열교환기	Heat exchanger tube, condensor tube, dashpot, Evaporator, Tube sheet, Aircooler, Piping 등
4	증기, 가스터빈	Blade, Diphragm, Compressor, Disk, Rotor, Casing, Piping 등
5	저장탱크, 기타	Evaporator, Impeller, Shaft, Bearing, Valve, Bolt, Spring, Gear Coupling, Piping 등

### 3.3 주요사업 내용

- 1) 손상해석 결과의 신뢰성향상 연구
  - 재현성평가 시스템 구축
  - 열화 가속시험 기법 및 절차개발
  - 재질열화 및 파괴모드 표준 DB 구축
- 2) 산업체의 손상원인분석 기술지원
  - 산업체 손상원인분석 기술지원 실시
  - Web site를 통한 손상사례 DB 및 기술자료 제공
- 3) 소재·부품 제품불량 해결 기술지원
  - 불량 소재·부품에 대한 원인분석 기술지원
  - DB 구축을 통한 및 기술자료 및 정보 제공
- 4) 산업체의 지원강화
 

On-line적인 관련 전문정보의 획득은 물론 문제점 해결을 위한 솔루션 제공과 off-line적인 인적, 물적 지원과 연결시켜 산업체의 애로사항을 해결하며, 현장실무진과 수시 접촉을 통해 연구실과 현장과의 괴리를 제거

  - Web site에서 KIMM 전문가 및 외부 전문가 pool 구축을 통한 Q&A 연계

- 산학연 공동 산업설비 안전진단 워크숍 개최

5) 성과확산

산업체들의 수요기술과 축적된 경험, 연구결과 및 기존의 정보를 공유화하며, 유화업체, 발전설비 운영주체, 소재 · 부품 제조업체 및 엔지니어링업체, 유관공공기관 등을 대상으로 기술교류와 web site를 통하여 연구성과 확산

- DB 공개
- Webzine 개발 및 제공
- 손상사례집 발간 및 배포
- 손상원인분석 사례발표회 개최

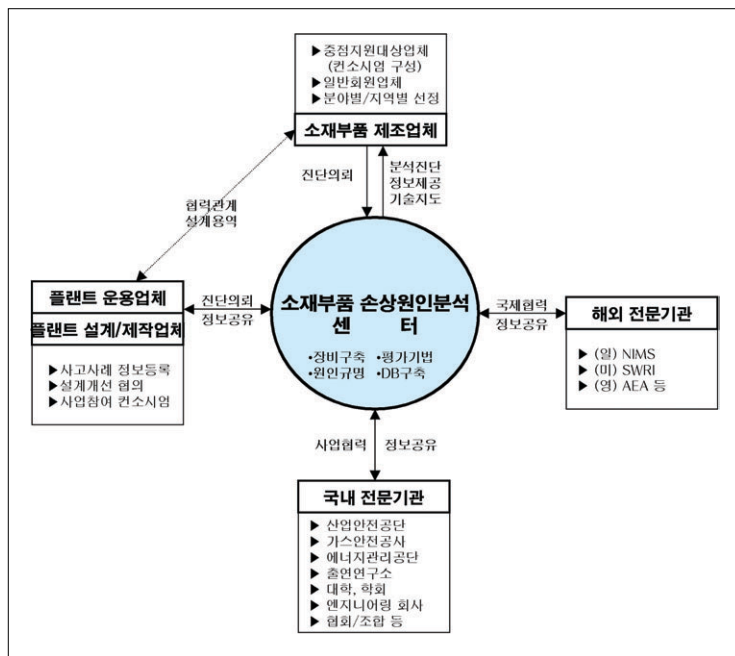


그림 2. 기술지원 및 업무 공조 체계

4. 2005년도 주요 사업실적

2005년도 사업에서는 열피로시험장비 도입, FACE사업 홈페이지 구축, 140여건의 손상사례 정보 DB 구축, 기계부품의 구조 및 피로해석 프로그램 개발, 주요강종에 대한 재질열화 및 파괴모드의 표준DB 구축, 워크숍 개최를 비롯하여 산업체 손상원인분석 기술지원을 모두 21건을 수행하였으며 지원대상은 유화업체 13곳, 플랜트 설계 제작업체 3곳, 발전소 2곳, 기타 3곳으로서 지원내용은 표 5에 간략히 정리하여 수록하였으며 본 기술지원으로 품질 및 제조공정개선과 가동율향상 및 사고예방조치수립등을 통한 많은 기술적, 경제적 성과를 이룩하였다.

표 5. 2005년도 산업체 손상원인분석 기술지원 내역

번호	손상사례	부품/설비명	손상원인	기술적 성과
1	고속전철 Coil Spring절손 원인분석지원	Coil spring	열충격에 의한 피로파괴	공정개선 및 품질개선
2	Cooling Scrubber의 Clad표면 및 용접부 이상현상 원인조사	Clad Vessel, Manhole Flange	공정상외 결함에 의한 부식	공정개선 및 생산성 향상
3	원료하역설비 Inner Hinge shaft의 파손원인 분석	Inner Hinge Shaft	표면기계가공 Notch효과에 의한 피로파괴, 구조적 응력집중	설계지원 및 구조개선
4	Stainless Steel Bellows Expansion Joint 손상원인분석	Bellows Expansion Joint	응력부식균열 (SCC)	품질개선 및 공정 개선
5	Shell Vent Valve Flange Socket Welding부위 Crack 손상 원인분석	Shell Vent Valve Flange	용접공정 결함에 의한 조기 파손	품질개선 및 가동율 향상
6	송풍용 Turbo Fan의 파손원인 분석	송풍용 Turbo Fan	용접결함에 의한 조기파손	공정개선 및 품질개선
7	Gas Turbine Hot Gas Casing & Blades 손상원인분석	Gas Turbine Hot Gas Casing & Blades	복원작업 지연에 따른 Creep및 열피로	복원작업 및 장비이상의 조기감지
8	황산공장 이코노마이저부식 원인조사	이코노마이저	SOx 및 응력에 의한 SCC	수질관리 및 제작공정개선
9	하수처리장 배관부식 원인 조사	하수관	용접공정 결함 및 해수유입에 의한 부식	공정개선 및 해수유입 방지
10	축매반응기 협착 발생원인 분석	축매반응기	부식에 의하여 내부로 설비가 협착	공정개선 및 교체시기 결정
11	열교환기 부식 발생원인 분석	열교환기	공정상외 결함에 의한 부식	공정개선
12	High Sulfur Crude Heater Convection Tubesheet 파손 원인분석	Tube Support	열화에 따른 취화발생	교체시기 결정
13	가열로의 대류부 Tube Support 열화도 평가	Tube Support	열화에 따른 취화발생	품질개선 및 교체시기 결정
14	Heating Coil Crack 발생원인 분석	Heating Coil	응력부식 (SCC)	재질교체 및 교체비용 절감
15	Process & Flow Diagram Air Pollution Abatement System 부식여부검사 기술지원	Process & Flow Diagram Air Pollution Abatement System	부식에 의한 설비 안정성 검토	정기검사 및 부식진단시기 결정



표 5. 2005년도 산업체 손상원인분석 기술지원 내역(계속)

번호	손상사례	부품/설비명	손상원인	기술적 성과
16	리포머 Tube 파손원인분석 기술지원	리포머 튜브	열 충격에 따른 파손발생	열 충격 최대억제
17	Cell 용접부 Crack 발생원인 분석 기술지원	선반용 송수관	원소재 불량에 따른 용접균열	원소재 관리 (C함량 규제)
18	SUS 튜브 용접부위의 부식 원인분석 기술지원	용수용 Tube	용접불량에 따른 부식발생	용접공정개선
19	Syn.Gas Cooler Tube 손상원인 분석 기술지원	Syn.Gas Cooler Tube	고온에서의 Tube 두께 감소발생	튜브두께 감소원인해결 (재질교체)
20	Horizontal Belt Filter Guide Bar의 파괴원인 분석	Filter Guide Bar	염분에 의한 스테인레스강의 SCC	생산설비의 구조개선
21	Potable Water 배관용 TP304 스테인레스강 파이프의 Pit 발생원인분석	용수관	PE 피복층 파손 및 산소농도차전지에 의한 공식	원인분석 및 방지대책 마련

## 5. 향후계획

앞으로 지속적으로 산학연이 공조하여 산업체의 설비보존 및 사고예방을 도모하기 위한 손상원인분석 기술지원과 손상사례 정보 DB 확충, 관련 주요 강종에 대한 재질열화 및 파괴모드 표준 DB의 구축, 그리고 사례집발간 등을 통하여 현장경험 및 정보를 제공하며, 석유화학단지(울산, 여천, 대산 등) 입주업체 및 전문검사업체, 소재 · 부품 제조업체, 플랜트 제작업체와 협력하여 워크숍, 세미나 등을 개최하여 기술정보를 공유하고자 한다. 또한 사업장의 공통애로기술은 연구소와 업체들 간의 공동연구 수행 등의 방법으로 문제해결을 할 수 있는 방안을 강구할 계획이다.

- 기간산업 플랜트설비의 손상원인분석 기술지원
- 기간산업 플랜트설비의 안전진단시 연구결과 적용 및 활용
- 플랜트 제조업체에 문제점 해결을 위한 연구결과 feed-back
- DB를 통하여 산업체에서 필요한 기술과 정보제공                      - 산업설비용 소재 · 부품생산 공정개선
- 제조자, 공급자, 사용자간의 claim중재, 보험관련 분쟁문제 조사지원



조 경 식

· 한국기계연구원 재료안전연구센터 책임연구원  
 · 관심분야 : 비파괴검사, 산업설비 안전성 평가, 재료 열화도 평가  
 · E-mail : kscho@mail.kimm.re.kr