

산업 Plant의 안전진단 기술현황



張 洪 根

(KIMM 시험평가부장)

- '58. 4-'63. 2 한양대학교 공과대학 원자력공학과 (학사)
- '85. 3-'87. 2 국립부산수산대학교 공과대학 기계공학(석사)
- '63. 5-'69. 2 원자력연구소 보건물리화학연구소, 연구원
- '69. 2-'79. 8 한국공업검사(주), 상무이사
- '79. 9-'90. 4 한국기계연구소 비파괴시험실장, 시험평가부장
- '90. 5-'91. 8 과학기술정책연구소 기술평가위원
- '91. 9-현재 한국기계연구원 책임연구원



조 경 식

(KIMM 비파괴시험그룹장)

- '73-'78 서울대학교 공과대학 공업교육과(학사)
- '90-'93 창원대학교 공과대학 기계공학과(석사)
- '78-현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

1960년대초 정부의 경제개발 계획에 의한 중화학공업 입국정책에 따라 석유화학공장 건설을 비롯하여 발전소건설, 1970년대 조선공업, 방위산업, 원자력발전소 건설 등 우리나라 공업은 가속도로 성장하여 왔다. 산업의 규모가 확대된 1970년대에 건설된 장치산업인 화학 plant들은 고온, 고압, 고능률화를 지향, 대형화 되어 왔으나 설계 engineering 기술, 생산성 향상을 위한 설비의 보전기술 등은 아직까지도 해외 의존도를 탈피하지 못하고 있는 실정이다.

화학공업에서 사용되는 반응로(reactor), 압력용기(pressure vessel), 저장탱크(storage tank), 배관(pipeline)등의 시설물은 장기간 사용함에 따라 고온, 고압, 부식성분위기, 열응력, 피로 등 여러 가지 요인으로 경년열화되어 강도의 저하와 함께 안전도와 운전효율도 떨어지게 된다. 일반적으로 이들 설비에서 유체나 gas의 누출은 화재나 폭발과 같은 재해뿐만 아니라 주위환경을 오염시켜 공해를 유발하게 되며, 이들 시설물에 대한 신뢰성 및 안전성 확보는 국가기간 산업에서 매우 중요한 비중을 차지하고 있어 이와 관련된 장치의 설계, 시공뿐만 아니라 시험, 검사 및 평가기술도 또한 중요시되고 있다.

2. 구조용 금속재료의 손상

금속재료는 전면 부식, 공식, 응력부식균열, 크리프 균열 등에 의하여 손상이 발생되며, 그 발생원인도 환경인자의 영향이나 재료 인자의 영향 등에 기인되는 것으로 알려져 있다. 1991

년도 일본 과학기술청에서는 발전 프랜트, 화학 프랜트, 철강교량 설비 등 구조물의 안전성 확보와 신뢰성 향상의 관점에서 구조재의 신뢰성 평가 기술에 관한 연구, 개발의 중요성이 대두되어 연구 테마를 선정하기 위하여 1) 석유정제 2) 석유화학 3) 섬유, 수지, 고무, 플라스틱 4) 종이, 펄프 5) 소다 6) 화학약품 제조 7) 비료 8) 요업, 시멘트 9) 식품제조 10) 의약품 제조 11) 유지, 향료, 안료 제조 12) 배연탈황 13) 가스제조 14) 철강제조

15) 비철정련 등의 프랜트 전체를 대상으로 15 개분야로 분류하여 1978년 부터 1983년까지 사용 재료의 손상실태에 대한 각종공개된 손상 사례를 조사하였다. 이 조사 내용을 토대로 분석, 요약하면 손상형태와 재료별 손상사례를 그림 1 에 표시 하였다. 그림 1 에 나타난 바와 같이 공개된 사례 건중 응력 부식 균열(28.6%)과 국부 부식(16.0%)이 가장 높은 빈도를 보이고 있다.

손상형태와 재료와의 상관 관계를 표1 에 나

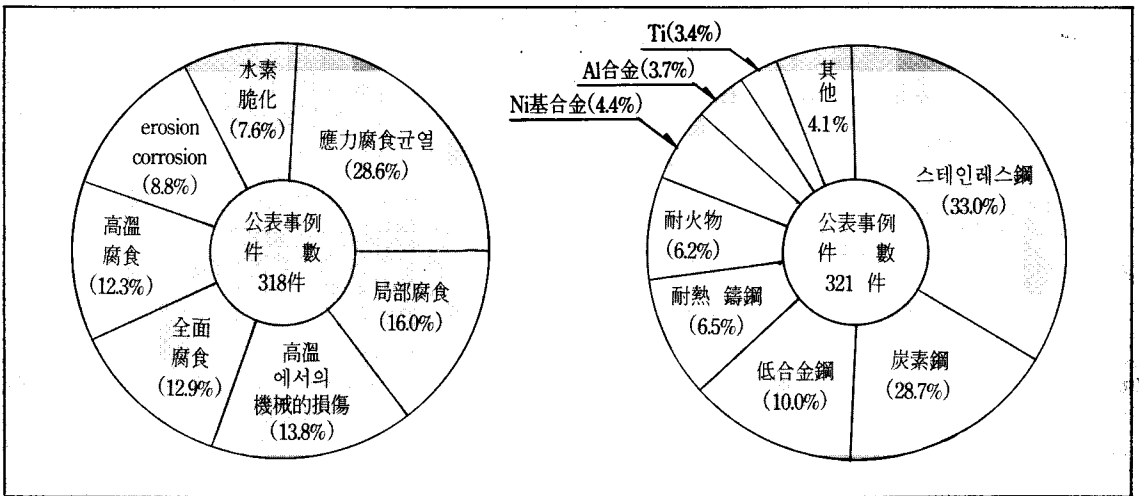


그림 1. Plant 전체의 손상형태별 및 재료별 손상 빈도

표 1. Plant 전체의 손상형태와 재료의 상관성

損耗 溶損			1	1					20	
機械的 損傷·破壞·剝離	3	3	9				3	1		
其他 腐食	3		1	1						
侵炭·窒化	2		1	1			5			
高温酸化·熔融鹽腐食	1	1	6	2						
creep, creep 균열	1		2	1			4			
erosion, corrosion	11		6	6	3			1		1
水素 侵害	6	11								
HE, 水素 induced lister	11	3						1		1
SCC	11	2	62	1	5	7				
局部 腐食	26	1	19		4			6		
全面 腐食	17	1	6	1	1					
		鐵鋼·鑄鋼	低合金鋼	스테인레스鋼	Ni基合金	Al合金	H K 40	Ti	耐火物	其他

약 60%로 운전중 발생된 사례의 약 92%가 누설, 파열분출 및 기능불량에 기인된 것으로 밝혀져 가동중 검사(inservice inspection)의 중요성이 입증되고 있다. 정기검사중의 검사 방법은 육안검사와 같은 간단한 방법으로 부터 고도의 기술이 요구되는 검사방법도 이용되나 한정된 기간내에

수행하여야 하는 시간적 제약 때문에 일반적으로 고도의 기술이 요하는 검사 방법은 이용 빈도가 낮다.

그랜트의 사용년수에 따른 손상형태별 발생건수를 그림 4에 표시하였다. 금속재료의 손상이 사용년도가 2-3년인 초기단계에서 다발적으로

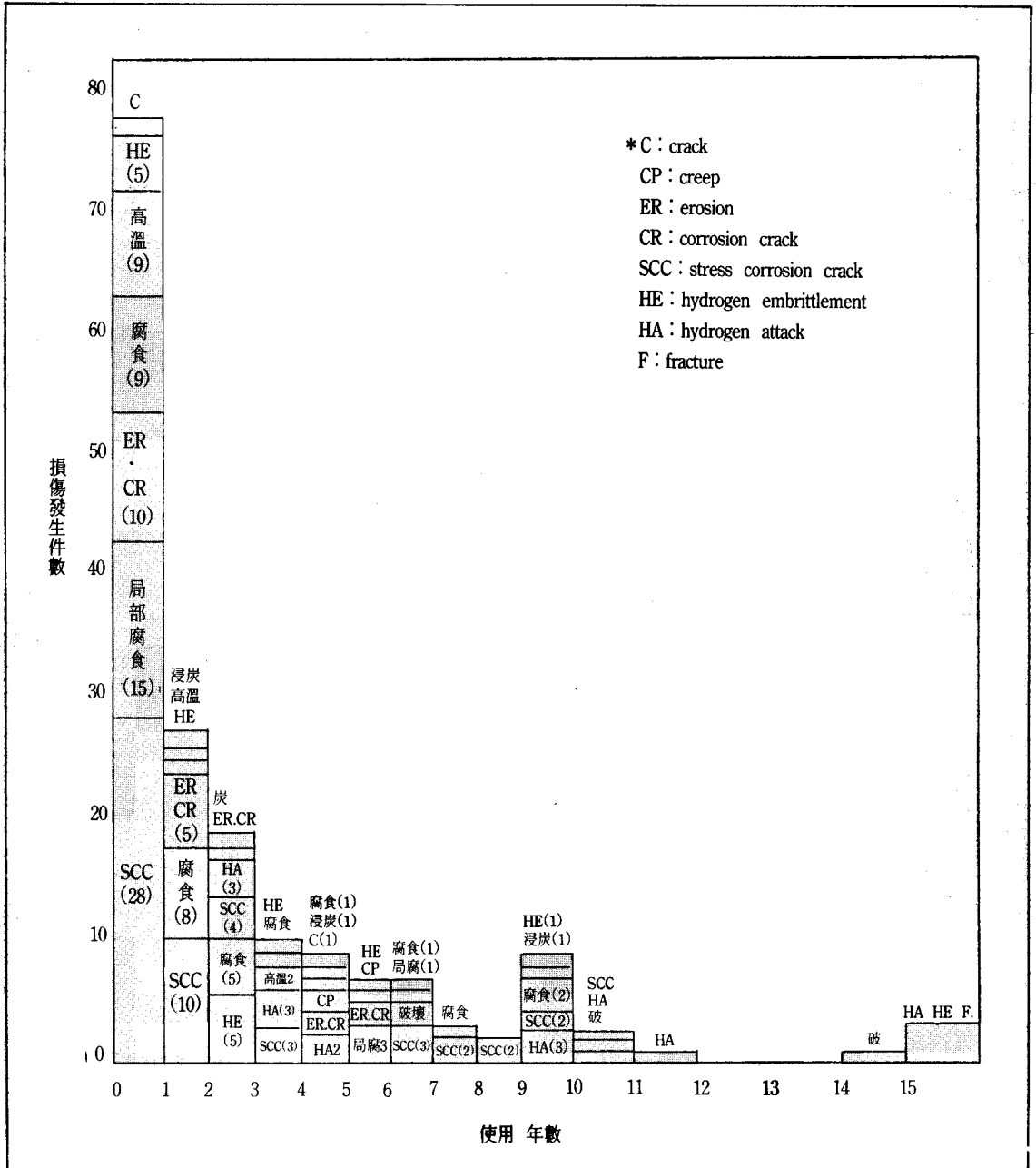


그림 4. Plant의 사용년수에 따른 손상형태별 발생 건수

발생된 것으로 나타난 것은 습한 환경하에서 국부 부식, 응력부식 균열 등과 같은 국소적 손상이 많은 것으로 밝혀져 환경조건의 정확한 파악, 적절한 사용재료의 선택, 정확한 방식 설계 및 시공의 실시로 초기단계의 국소적 손상을 방지하여야 할것이다.

3. 금속재질의 열화(劣化, degredation)

발전소나 중화학공장 등의 대형 설비들이 파손되면 큰 인명피해와 경제적 손실을 유발하게 되며 장기간 사용된 설비에 대해서는 급작스러운 파손을 막기 위해 잔존수명을 예측하고 적절한 보수와 관리에 세심한 주의를 기울여야 한다. 이러한 설비의 수명 예측은 사용된 재료의 기계적 성질과 사용조건에서 응력해석을 바탕으로 파괴역학에 의해 추정하게되는데, 여러가지 요인에 의해 실제의 수명은 예측된 수명보다 짧아지는 경우가 많다. 그 한가지 요인이 재료의 열화이다.

재료가 고온에서 장기간 사용되면 열과 가동시에 발생하는 응력 등에 의해 점차적으로 미세조직이 변하고 기계적 강도가 저하되는 등의 經年劣化 현상이 나타난다. 이러한 열화현상은 화력발전소의 보일러나 터빈의 회전축(rotor), 고온에서 사용되는 내열강 등에서 많이 나타나며 예상치 못한 파손의 원인이 될 수 있기 때문에 이러한 열화정도를 비파괴적으로 측정하여 상태를 진단하고 잔존수명을 예측하는 것은 매우 중요하다.

재료의 열화 정도를 비파괴적으로 측정하는데는 여러가지 방법이 적용될 수 있는데, 일반적으로 재료의 비파괴평가에 사용되는 방법은 초음파, 자기, 와전류 방법 외에 전기저항측정, 전기화학적 분극측정 및 표면 replica 방법등이 사용되고 있다.

고온의 증기 분위기 하에서 작동되는 터빈 등에서는 가동과 정지의 비정상 운전시 발생하는 열응력 등의 반복에 의한 피로(fatigue)와 정상운전시 고온의 일정 응력 하에서 발생하는 creep에 의한 재질변화가 진행된다. 이와 동시에 탄화물의 석출과 조대화가 진행되어 원소재의 기계적 성질이 열등하게 변화하게 된다.

경년열화의 미시적인 기구는 크게 결정입내에서의 균열 발생 또는 연화에 의한 강도저하 현상과 결정입계에서의 균열, 공동(cavity)발생 및 탄화물 석출에 의한 취화로 나눌 수 있다. 결정입내에서는 피로의 반복에 의해 slip band가 형성되고 이곳에서 균열이 발생하여 성장함과 동시에 고온강도를 증가 시키기 위해 미세하게 분산, 석출시킨 탄화물들이 조대화하여 연화되는 경년 열화가 나타난다. 한편, 결정입계에서는 고온에서 응력이 작용하여 slip이 일어나며 micro crack이 발생하여 성장하거나, 공동이 발생하고 성장하여 파손에 이르는 creep 손상이 발생한다. 또 다른 입계의 경년열화는 탄화물이 입계에 석출하여 조대화하거나 불순물 원소들이 입계로 확산하여 편석이 일어남으로써 입계가 취화되는 현상이다. 재질열화는 재질의 미세조직 변화를 수반하는데, 재질열화 정도를 측정하고 평가하려면 미세조직의 변화를 측정한다. 실제로 plastic replica 방법은 열화되고 있는재질의 미세조직을 직접 볼 수 있는 방법이므로 많이 쓰이고 있으며 그 이외의 방법으로는 경도측정, 전기저항 측정 및 전기화학적 분극측정방법 등도 열화와 관계되는 미세조직 변화를 간접적으로 측정하는 방법이다.

4. 기계·구조물의 파손

파손이 일어나는 기구(mechanism)에는 여러가지 요인이 있으나 일반적으로 알려진것으로는 파괴, 피로, 부식, 마모, 크리프(creep), 수소 취성 등이 있다. 파괴에는 연성파괴와 취성파괴로 구분되며, 특히 취성파괴는 순간적으로 일어나므로 주의를 요한다. 피로는 균열이 눈에 보이지 않을 정도로 서서히 성장하여 급격히 파괴를 일으키는 것이 특징이다.

부식에는 단순한 부식 뿐만 아니라 pitting, 응력부식, galvanic 부식등으로 이중 응력부식은 취성 파괴와 마찬가지로 파괴가 순간적으로 일어난다. 마모기구에는 응착, 굽힘, fretting 등이 있으며, 수소취성은 수소가 금속 내부에 침투하여 그 결과 금속이 취성파괴를 나타내는 것으로서 그기구는 확실히 밝혀지지 않았으나, 파손이 일어난 뒤에

수소가 남아있지 않고 또 수소 자체를 감지하기 어려운 점이 있어 수소취성에 의한 파괴는 그 원인분석이 쉽지 않다.

크리이프는 고온에서 일어나는 파손기구이다. 파손기구에 의해 파손이 일어날 수 있는 요인으로서는 단조, 주조 등과 같은 제조 과정에서 발생한 결함, 열처리, 용접, 표면처리 등과 같은 가공과정에서 생긴 결함 및 과부하, 부식분위기, 고온, 고압 등의 사용조건이나 사용환경에서 기인 된다.

기계나 구조물의 파손은 설계, 재료 선택, 제조, 가공, 조립, 사용 중의 어느 한과정에서 잘못이 있어 일어나며 대부분 사람의 경험부족, 지식부족, 주의부족이 파손의 근본 원인이다.

기계나 구조물의 사용중 파손을 방지하기 위한 측정기술은 크게 상태진단 기술, 결함탐지 기술 및 파손분석 기술로 나눌수 있다.

사람이 건강을 유지하기 위하여 주기적으로 건강진단을 받는 것처럼 기계나 구조물도 결함의 발생으로 인하여 생기는 이상을 주기적으로 또는 계속해서 감시(monitor)함으로써 파손을 예방할 수 있는데, 이러한 기술을 상태진단 기술이라고 한다. 병의 증세가 확인되면 그 원인을 알아내고 이상 부위를 정확하게 찾아내기 위하여 방사선 투과 검사, 초음파 탐상 검사 등 비파괴적 정밀 검사를 하는 것처럼 기계나 구조물의 경우에도 결함의 위치, 크기와 모양을 정확하게 탐지해야 당장 보수를 해야할 지 또는 다음 검사시까지 안전할지를 판단할 수 있다. 상태진단 기술과 결함 탐지 기술의 구분이 애매한 경우도 있으나 일반적으로 상태진단은 기계의 가동중 이상 유무를 측정하는 것이고 결함탐지는 가동을 정지시키고 결함을 직접 탐상하는 것을 의미한다.

위에 열거한 세가지의 기술 중 가장 오래된 기술이 파손분석기술이다. 처음에는 육안검사에 그 치던 것이 간단한 강도 시험방법을 고안해 내게 되었고 오늘날에는 각종 비파괴시험, 기계적 시험, 금속 조직 시험, 전자 현미경을 이용한 파면 검사, 화학분석, 그리고 경우에 따라서는 실물 모의 시험을 하는등 여러가지 고도의 측정기술이 동원 되고 있다.

1900년대에 들어와서 모든 재료에는 결함이 존재하고 있어 거의 모든 파손은 이 결함에서 균열이 발생, 성장하여 일어난다는 사실이 알려 지면서 재료나 제품에 손상을 주지 않고 내부 또는 외부에 있는 결함을 찾아 내려는 기술이 비파괴 시험이라는 이름으로 개발되기 시작하였다. 이 비파괴시험은 재료를 만들때나 기계나 구조물을 제작할 때 품질관리의 일환으로 널리 활용되고 있다.

1960년도 이후 파괴역학의 발달로 구조물 내에 있는 결함의 영향을 정량적으로 해석하여 구조물의 안정성을 평가하고 수명을 예측하는 것이 가능해지면서 결함 탐지 기술을 사용 중인 구조물의 정기 검사에 활용하게 되었다. 최근에 와서는 수동 방법을 자동 방법으로, 2차원 방법을 3차원 방법으로, 접촉 방법을 비접촉 방법으로 개선하려는 연구와 더불어 결함의 위치, 크기, 모양을 탐상하여 정밀도를 높이려는 연구가 활발이 진행되고 있다.

파손을 방지하기 위한 측정 기술로써 최근에 나타난 것이 상태 진단 기술이며, 대부분의 기술이 아직도 개발 단계에 있다. 기계나 구조물의 상태를 진단 하려면 그 상태를 나타내는 이상의 변화를 측정하여야 하는데 일반적으로 재료의 노후화나 결함의 발생과 성장은 아주 마지막단계에 이르기 전까지는 천천히 일어나기 때문에 그이상이 역시 천천히 변하므로 발생하는 신호를 정밀하게 측정하는 기술이 요구된다. 또한 이상의 변화는 일반적으로 여러가지 원인이 복합적으로 작용하여 일어나기 때문에 좋은 결과를 얻으려면 상당히 진보된 신호처리 및 해석기술이 요구된다. 효과적인 상태 진단 기술이 개발되면 기계나 구조물을 사용하는 동안에 파손되는 과정을 감시할 수 있어서 검사주기 이전에 예기치 못한 파손을 막을 수있고 또한 필요 이상으로 자주 가동을 중지하고 검사하는데 따르는 경제적 손실을 줄일 수 있기 때문에 첨단 측정 기술로서 각광을 받을 것이다. 현재 개발되어 있고 일부 적용되고 있는 기술로는 진동해석, 윤활유분석, 음향방출시험, 잔류응력측정, 열방사해석 등이 있다.

5. Plant 시설의 진단 기술

대부분의 석유화학 plant는 위험물과 가연성 gas류도 다량 보유하고 있어 재해가 발생하게 되면 피해의 양상도 다양할 뿐만 아니라 규모도 커질 가능성은 항상 잠재하고 있으므로 이들 장치나 설비의 제조 과정이나 plant 건설중 건전성을 확보하기 위하여 관련규격에 따라 철저한 시험, 검사를 실시하게 된다.

Plant의 안전성은 최종 사용자에게 의하여 확인되어야 하며, 이를 위한 품질보증(quality assurance)의 일환으로 제작검사, 가동전검사(pre-service inspection), 가동중검사(in-service inspection) 및 개방검사(shutdown inspection)를 실시하게 된다. 제작검사와 가동전검사는 설비 제조자 또는 공급자측이 행하는 것으로 사용 목적에 따라 건전성을 확인하여 신뢰성을 향상시키기 위함이며, 가동중 및 개방검사는 사용자측이 행하는 것으로 설계시 예측할 수 없었던 응력, 환경조건 등의 요인에 의하여 발생된 결함을 검출하여 사용상 설비의 유지, 보수 측면에서 예방보전(preventive maintenance) 및 수명예측(life prediction)을 위한 수단으로 실시한다.

Plant 시설물에 대한 가동중 주기적인 안전진단은 현상 파악 뿐만 아니라 인명과 재산의 손실을 미연에 방지하고 경제적이고 효율적인 운영계획의

수립에 필수적인 것이다.

Plant의 안전성을 진단하는데 사용되는 시험, 검사 방법에는 특수한 visual aid를 사용하는 경우도 있지만 대개는 육안검사 후 여러가지 비파괴적인 시험방법중 최적 시험방법을 선택 적용하며 필요에 따라서는 다른 비파괴시험법 또는 시편채취에 의한 파괴시험 등을 병행하여 수행하기도 한다.

일반적으로 비파괴시험법은 surface inspection과 volumetric inspection으로 구분되는데 전자는 표면 및 표층에 존재하는 불연속(discontinuity)을 탐상하는 시험방법으로 육안검사(visual testing : VT)를 포함하여 자분탐상시험(magnetic particle testing : MT), 액체침투탐상시험(liquid penetrant testing : PT) 및 와류 탐상시험(eddy current testing : ET)이 이에 속하며, 후자는 내부에 존재하는 불연속을 탐상하는 방법으로 방사선투과시험(radiographic testing : RT)과 초음파 탐상시험(ultrasonic testing : UT)등이 이용되고 있다. 현재 사용되고 있는 비파괴시험법의 종류와 그 특징을 분류하면 표 2 와 같다.

Plant 시설물의 가동중 및 정기보수시의 설비 진단에 있어서 손상형태에 따른 결함의 탐상방법과 사용환경에 따른 각종별 손상형태 및 결함 검출 또는 손상측정 방법을 요약하면 표 3 과 같다.

표 2. 비파괴시험법의 분류

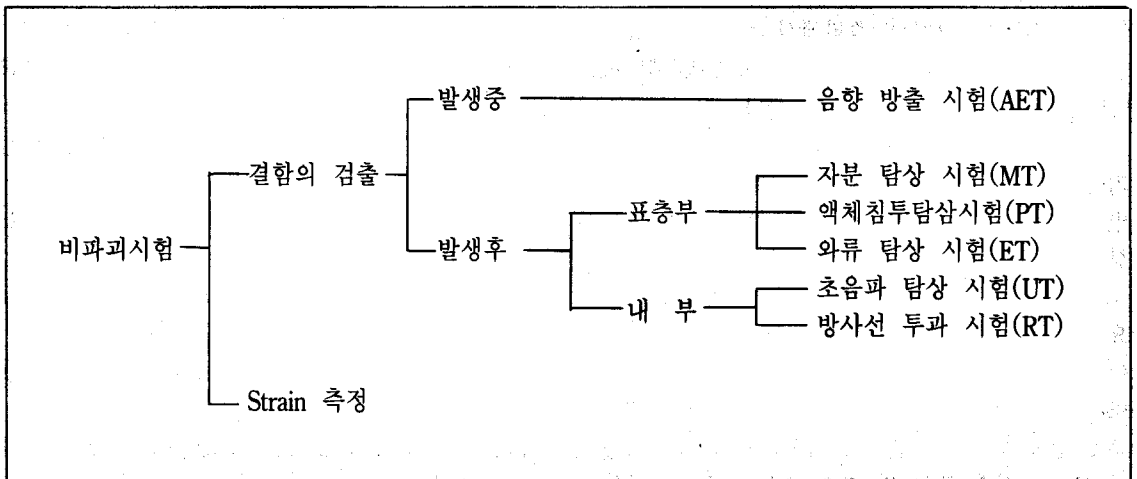


표 3. 가동중 및 정기보수시 설비의 시험방법

손상 형태	검출 방법	검출시기	정 보	목 적
누 설	육안검사 누설검사	ISI SDI	누설위치의 확인	누설방지
결합(제작시 또는 가동중)	UT, RT(내부결합) MT, PT(표면결합) AET	ISI SDI ISI	결합의 존재 및 위치 탐상 결합의 거동 감시	재료의 기계적성질을 고려하여 조치여부를 결정 진전하는 결합이면 가동을 정지· 보수
진동(피로)	진동측정	ISI	진동용력 레벨의 계산	피로수명의 추정
국부과열	thermo-paint thermal viewer tempel stick	ISI SDI	재료의 연화 열용력 검토	조직검사결과 변질이 확실한 경우 재료교체 허용용력의 한계를 초과하는 개소에 대해서는 항시 감시
열피로	열용력해석	-	감시부위의 지적	피로손상 발생의 감시
재질변화	시편채취 파괴시험	SDI	기계적 성질의 변화 (인장강도, bending, 충격치, 파괴인성치등)	용력해석의 기본 Data
계 내의 퇴적물	RT, 육안검사	SDI	· 퇴적물의 상황 · 계 내의 편류	· system flow의 정상화 · thermal balance의 정상화

UT : Ultrasonic testing RT : Radiographic testing MT : Magnetic particle testing
 PT : Liquid penetrant testiong ET : Eddy current testing AET : Acoustic emission testing
 ISI : In-service inspection SDI : Shutdown inspection

6. 결 론

1970년대 설치된 중화학공업의 대부분위 시설 들은 20여년이 지남에 따라 점차 노후화 되고 있어 설비의 사용상 안전성 측면에서 사고의 예방과 시설의 보전 및 수명예측에 기업 자체에서의 지 대한 관심과 투자가 뒤따라야 한다.

재질의 열화, 손상의 nondestructive evaluation 기술은 아직은 초보 단계에 있어 앞으로 이 기술의 발전을 위해서 전문분야의 기술자나 연구자와의 상호기술 교류도 중요한 것으로 사료된다.

장치산업의 설비에 대한 수명예측은 매우 중요하지만 정확히 예측하기는 대단히 어려운 일 이며 최근에는 computer를 이용하여 보다 실제적인 조건하에서 파괴역학적인 계산을 통하여 수명예 측을 정확히 하려는 연구가 계속되고 있으며 또한 상태진단, 결합 측정 및 파손 분석 기술 등 시험,

평가 기술 개발에도 더 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 構造用金屬材料의 劣化 損傷의 實態と 非破壞檢査技術. 日本 非破壞檢査協會, 1984
- [2] 鋼 構造物의 非破壞試驗と 殘存 壽命의 推定. 日本技術檢査協會. 1984
- [3] ふうん트損傷 事例と 經年劣化 壽命 豫測法. (株) 綜合 技術センター
- [4] 非破壞計測技術. 日本機械學會, 1985
- [5] 設備診斷技術 シンポジウム, 1993
- [6] Ammonia Plant #1의 安全診斷. 韓國機械(研), 1987
- [7] R.D. Barer and B.F. Peter, Why Metals Fail, 1974