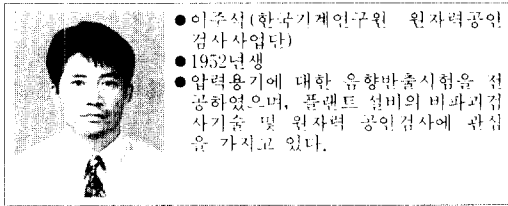


# 비파괴검사에 의한 석유화학설비의 안전진단

이 주 석

## Safety Analysis for Petrochemical Plant by Nondestructive Test

Joo-Suk Lee



### 1. 머리말

1960년대 초 정부의 경제개발 계획에 의한 중화학공업 입국정책에 따라 석유화학공장 건설을 비롯한 발전소 건설 그리고 1970년대 조선공업, 방위산업 및 원자력발전소 건설 등 우리나라 공업은 급속도로 성장하여 왔다.

이들 중 산업규모가 확대된 70년대에 건설된 석유화학플랜트들은 고온, 고압 및 고능율화를 지향하여 그 규모가 대형화되어 왔으나 이와 관련된 설계기술, 엔지니어링 기술, 생산성 향상을 위한 설비 보전기술 등은 상대적으로 낙후되어 있는 실정이다.

석유화학플랜트에서 운용되는 반응로, 저장탱크, 열교환기 등의 압력용기 그리고 배관 등의 시설물은 장기간 사용함에 따라 고온, 고압, 부식성 분위기, 열응력, 피로 등 여러가지 요인으로 경년열화되어 노후화 된다. 일반적으로 이들 설비들에서 작용하는 유체나 가스의 누출은 화재나 폭발과 같은 재해 뿐만아니라 주위 환경을 오염시켜 공해

를 유발하게 되며, 이들 시설물에 대한 신뢰성 및 안전성 확보는 국가기간 산업에서 매우 중요하며 이와 관련된 장치의 설계, 시공 뿐만아니라 시험검사 및 평가기술 측면에서도 중요시되고 있다. 플랜트 시설물에 대한 가동중 주기적인 안전진단은 현상의 파악 뿐만 아니라 인명과 재산의 손실을 미연에 예방하고 경제적이고 효율적인 운영계획 수립에 필수적인 것이다.

이 글에서는 국내 석유화학플랜트의 검사 현황을 알아보고 앞으로 플랜트의 효율적 운영 및 안전 운전을 위한 가동중검사 기술 및 개선대책에 대하여 기술하고자 한다.

### 2. 국내 석유화학 플랜트의 현황

국내 석유화학플랜트는 이미 장기간 가동되어 노후도가 증대되고 있는 실정이다. 또 생산성 증대를 위하여 가혹한 운전조건에서 운용되거나 화학적으로 공정을 변경하여 운전함으로써 비정상적인 결합이 발생하는 경우가 있으며 이는 설비의 수명을 단축시키는 결과로 나타나는 경우가 많다.

- (1) 울산석유화학플랜트는 약 25년 정도 가동되어 일반적 사용수명인 20년을 상회하고 있으며 이에 따른 노후도가 심각한 실정이다. 즉, 제작당시 승인된 불연속이 성장하여 결함으로 진전되었거나, 가동중 열응력, 피로 등의 운전조건에 기인한 새로운 결함이 발생하거나, 재료의 내식성 저하에 의한 부식 등의 결함이 발생하고 있는 상황이다.
- (2) 여천 공단도 가동연수가 약 20여 년이 경과되어 울산단지보다 다소 정도는 약하나 비슷한 형태 즉, 노후화에 의한 결함발생 형태를 보이고 있다.
- (3) 서산 석유화학플랜트는 가동연수가 약 5년정도로 울산이나 여천단지에 비하여 노후정도가 경미한 상태이다. 그러나 대부분 국내 기술로 제작되어 제작과정에서의 취급부주의 및 부적절한 제작공정에 기인한 결함 발생의 양상을 보이고 있다.

### 3. 석유화학설비의 사고 원인

- (1) 석유화학플랜트에서의 사고는 균열이나 부식 또는 두가지 복합적으로 작용하여 발생하는 것이 대부분이고 그 중에서도 균열은 사고를 유발시키는 가장 큰 요인이 되고 있다.  
 이와 같은 균열을 유발시키는 요인을 간추려 보면 대략 다음과 같다.
  - 가) 구조적인 결함 및 기계적인 불균질성 (inhomogeneity)
    - 나) 소재결함 및 그 불균질성
    - 다) 가동중 소재에 유발된 결함
- (2) 또 가동시 유발되는 결함의 요인은 여러가지가 있겠으나 그중 주요한 요인은 다음과 같은 것들이 있다.
  - 가) 부적합한 설계
  - 나) 부적당한 소재의 선정 및 처리

- 다) 현장에서의 건설, 조립, 용접 또는 열처리 등의 미숙
- 라) 비정상적인 가동조건
- 마) 장기간 가동에 의한 정상적 설비의 노후

### 4. 석유화학플랜트에 대한 비파괴검사 방법

가동중에 실시되는 진단기술로는 주로 비파괴검사기술이 적용된다. 비파괴검사란 대상을 파괴하지 않고 대상에 존재하는 결함 또는 불연속을 판단하는 기술로서 석유화학플랜트에서 적용되고 있는 기법에는 다음과 같은 것들이 있다.

#### 1) 육안검사(VT : Visual Test)<sup>(1)</sup>

정기검사의 가장 기본이 되는 검사법으로서 대상의 전체적인 상태를 파악하고 취약부를 선정하며, 비교적 큰 불연속을 탐지하는데 적용된다. 필요시 보조수단으로 내시경이나 거울 등의 이용하여 접근이 용이하지 못한 부위에 대한 관찰이 가능하다.

#### 2) 두께 측정(WT : Wallthickness Measurement)<sup>(1)</sup>

초음파를 이용하여 대상에 대한 벽두께 확인 및 일반부식의 정도를 평가한다.

#### 3) 자분탐상시험(MT : Magnetic Particle Test)<sup>(1)</sup>

대상에 존재하는 표면 및 표면직하(表面直下)의 불연속을 탐지하기 위한 기법으로 검사대상을 자화시키면 불연속부에 누설자속이 형성되어 이 부위에 자분을 도포할 때 자분이 집속되는 현상을 이용하며 강자성체의 대상에 적용한다. 자화방법, 자분의 종류 등에 따라 여러가지 기법이 있으나 플랜트에서는 요크(yoke)법이 주로 적용된다.

#### 4) 액체침투탐상시험(PT : Liquid Penetrant Test)

표면으로 열린 결함을 탐지하는 기법으로서 대상의 표면개구부로 침투액이 모세관 현상에 의하여 침투하도록 하여 현상함으로써

실제 육안으로 식별 가능하지 못한 불연속을 가시화하는 기법이다. 침투, 현상 및 사용재료에 따라 여러가지 기법이 있으며 플랜트에서는 주요 용매제거성 염색침투탐상기법이 적용된다.

5) 초음파탐상시험(UT : Ultrasonic Test)<sup>(1)</sup>

초음파가 물체의 내부를 직진하며 또 음향 임피던스가 다른 경계면에서 반사, 굴절하는 현상을 이용하여 대상의 내부에 존재하는 불연속을 탐지하는 기법이다. 방사선투과검사와는 내부결함의 탐지가 가능한 점에서는 유사하지만 방향성이 다른 특징이 있다.

6) 방사선투과시험(RT : Radiographic Test)<sup>(1)</sup>

방사선이 물체의 내부를 투과하여 필름을 감광할 수 있는 특성을 이용하여 대상의 내부에 존재하는 불연속을 탐지하는데 적용한다.

7) 와전류탐상시험(ET : Eddy Current Test)<sup>(1,3)</sup>

코일에 교번전류를 통하면 코일 주위로 교번자장이 형성되며 이 교번자장이 도체 표면에 와전류를 형성하는 특성을 이용하여 주로 재료의 표면에 존재하는 결함의 탐상에 적용한다. 고속의 탐상이 가능하기 때문에 플랜트에서는 주로 열교환기 튜브 및 파이프류의 대상에 적용한다.

8) 누설시험(LT : Leak Test)<sup>(1,4)</sup>

내외면의 압력차이를 이용하여 대상의 기밀성을 평가하는 기법이다.

9) 음향방출시험(AET : Acoustic Emission Test)<sup>(1,5)</sup>

대상에 하중을 가하면 결함부에서 응력과 발생하며 매질을 타고 전파하는 응력파를 센서를 이용하여 수신함으로써 소스(source) 즉, 결함의 위치 및 동적특성을 평가하는 기법으로 대형 구조물의 위치표정 및 전체적인 상태를 파악할 수 있는 장점이 있다.

5. 가동중 및 정기보수시의 설비검사법

가동중 및 정기보수시의 설비검사에 있어서 손상형태에 따른 결함의 검사 방법과 사용환경에 따른 강종별 손상형태 및 결함검출 및 손상측정방법을 간략하게 요약하면 표 1~표 4와 같다.<sup>(6)</sup>

6. 플랜트에서의 실제 검사 순서

석유화학플랜트에서의 설비진단은 어떤 대상에 대하여 검사기법이 지정된 경우도 있으나 검사 대상의 특성에 따라 검사부위, 검사 방법 등을 효과적으로 선정하여야 하며 플랜트에서의 가동중검사는 일반적으로 다음과 같은 절차를 거친다.

1) 검사대상 부위(취약부)의 선정

가) 도면 검토에 의한 취약부의 선정(용접 구조, 티(T) 이음 등)

나) PSI 자료, 정기검사 자료 등 과거 점검이력 검토

다) 육안검사에 의한 취약부 선정 — 부식이 심한 부위, 퇴적물 부착 부위, 구조적으로 응력집중이 예상되는 부위 등

라) AE에 의한 위치표정을 통하여 event가 집중적으로 발생한 부위를 취약부로 선정하는 방법도 있다.

2) 대상부에 대한 표면 처리 — 석유화학 플랜트의 경우에는 공정특성상 공정물이 견고하게 부착되어 있어 미세한 결함을 탐지하기 위해서는 이들의 완전한 제거가 요구된다. 표면의 공정물 부착이나 부식 등을 표면의 불균일로 인한 거짓지시 및 무관련지시를 유발하여 검사의 신뢰성을 저하할 수 있으므로 브러시 연마, 연삭 또는 화학 세척 등의 방법이 적용되며 검사의 신뢰성에 치명적인 영향을 끼치는 중요한 공정이다.

3) 점검대상부의 특성에 따라 예상되는 결함을 탐지할 수 있는 비파괴검사 방법 및

표 1 사고현상별 가동중 및 정기보수시 설비 검사법

손상형태	검출방법	검출시기	정 보	평가 또는 대책
누 설	육안검사 누설 감지기	OS	누설위치의 확인	누설방치
결 합 (제작시 또는 운전중 발생)	UT, RT(내부결합) MT, PT(표면결합)	SDM SDM	결합의 존재 및 위치	재료의 기계적 성질을 고려하여 조치여부를 결정
	AET	OS	결합의 거동 감시	진전하는 결합이면 장치운전을 정지, 보수
진 동 (피 로)	진동계	OS	진동응력 레벨의 계산	피로수명의 추정
국부과열	thermo-paint thermal viewer temper stick	OS	재료의 열화	조직검사결과 변질이 확실한 경우 재료교체
			열응력 검토	허용응력의 한계를 초과하는 곳에 대해서는 항상 감시
열 피로	열응력 해석	-	감시부위의 지적	피로손상 발생의 감시
재질변화	시험편을 채취하여 파괴 시험 실시	SDM	기계적 성질의 변화(인장강도, 굽힘강도, 충격치, 파괴인성치)	응력해석시 해석의 기본자료
계 내의 퇴적물	RT, Fiberscope	OS SDM	퇴적물의 상황 계 내의 편류	system flow의 정상화 thermal balance의 정상화

OS : 가동중, SDM : 정기보수시, UT : 초음파탐상시험, RT : 방사선투과시험, MT : 자분탐상시험, PT : 액체침투탐상시험, AET : 음향방출시험

표 2 재료별(탄소강)가동중 및 정기보수시 설비검사법

사용환경	손상형태	검출방법	검출시기	정보	평가 또는 대책
일 반	두께감소	두께측정(UT)	OS SDM	현재의 두께	설계상의 필요두께와의 비교로 합부판정
		시험편에 따른 두께 감소량 계측	SDM 기기개방	두께 감소율	두께감소량의 측정 → 기기수명의 추정
부식성	부 식	두께측정(UT) Corroso-meter	OS SDM	현재의 두께	설계상의 필요두께와의 비교로 합부판정
		부식량 측정(DT)	SDM	부식정도	두께감소의 추정
		시험편에 따른 부식량계측	기기개방	부식율	→ 기기수명의 추정

	응력부식 균열	PT 또는 MT (용접 잔류응력이 높은 부위)	SDM 기기개방	균열의 검출	균열거동 감시
	점부식	VT UT	SDM	균열발생의 가능성	균열검출을 위한 검사
수소	수소손상	UT	SDM	결합의 발생	결합거동의 감시 또는 응력검토

DT : 치수검사, VT : 육안검사

표 3 재료별(저합금강) 가동중 및 정기보수시 설비검사법

사용환경	손상형태	검출방법	검출시기	정보	평가 또는 대책
일반	두께감소	탄소강과 동일			
부식성	부식	두께측정(UT) Corroso-meter	O S SDM	현재의 두께	설계상의 필요두께
		부식량의 측정(DT)	SDM 기기개방	부식율	두께감소량 추정 → 기기수명의 추정
		시험편에 따른 부식량의 계측			
	응력부식 균열	PT	SDM 기기개방	균열의 검출	검열거동 감시
수소	수소취화	파괴시험	-	기계적 성질 변화	필요한 기계적 성질을 비교, 검토
	수소손상	UT	SDM	결합의 발생	결합거동의 감시 또는 응력검토
고온	temper embrittlement	파괴시험	-	기계적 성질의 변화	필요한 기계적 성질과 비교, 검토
	크리프	변형측정	SDM	변형률	한계변형량의 초과한 경우에는 교체

세부기법을 선정하여 검사를 실시한다.

4) 불연속(결합)이 발견되는 경우에는 정밀측정(종류, 길이, 깊이, 방향 등)을 통하여 결합에 대한 정보를 파악한 후 설계자료와 비교 검토하여 대략 다음과 같은 세 가지 방법으로 처리한다.

가) 연마처리(grind out)

결합의 상태가 경미하여 보수용접, 교체 등의 조치가 필요없이 단지 새로운 결합의 발생을 방지하기 위하여 응력집중의 요인인 노치를 제거하는 방법이다.

나) 보수용접

결합의 상태가 심각하여 장치의 안전운전에 치명적인 영향을 끼칠수 있다고 판단될

표 4 재료별(스테인리스강)가동중 및 정기보수시 설비검사법

사용환경	손상형태 응력부식 균 열 (오스테나이트계)	검출방법 PT ET(열교환기 튜브)	검출시기 SDM 기기개방	정 보 균열의 검 출	평가 또는 대책 균열거동 감시
부식성	점부식	VT UT	SDM	균 열 발생의 가능성	균열검출을 위한 검사
수소	수소취하	파괴검사	-	기계적 성질의 변 화	필요한 기계적 성질과 의 비교, 검토
고 온	탄화물 석 출 (오스테 나이트계)	SUMP법	SDM	기계적 성질의 변 화 내식성 저 하	충격적인 부하의 방지
	$\sigma$ 취하(오스테 나이트계)	SUMP법	SDM	기계적성질 의 변화	충격적인 부하의 방지
	475°C 취하 (페라이트계)	파괴시험	-	기계적 성질의 변 화	충격적인 부하의 방지
	침 탄	파괴시험	SDM	침 탄 깊 이	침탄깊이의 정도로부 터 수명추정
	크리프	변형계측	SDM	변형률	한계변형량을 초과할 경우에는 교체

SUMP법 : Suzuki's universal micro print method의 약자로서 Replica 복제조직검사를 뜻함.

때는 적절한 절차에 따라 보수 요점을 실시한다.

다) 지속적 감시

결함부에 대한 보수용접이 불가능하거나 여러가지 여건에 의하여 연삭 등의 처리가 용이하지 못할 때는 결함의 성장여부를 지속적으로 감시하면서 장치를 운전한다.

7. 결함탐지 시기의 중요성

1) 결함을 조기에 발견할 경우에는 그 상태가 경미하여 연삭 등의 간단한 방법으로

조치가 가능할 수 있다.

2) 그러나 결함을 조기에 발견하지 못하고 그 정도가 상당히 진전된 후 발견할 경우에는 보수용접 등의 조치가 필요하게 되며 보수 용접에 의한 새로운 결함의 발생 가능성에도 대비해야 한다.

따라서 석유화학플랜트에서는 주기적인 안전진단이 필수적이다.

8. 석유화학플랜트에서의 비파괴검사의 특성

플랜트의 가동중검사에 적용되는 비파괴검

사는 병원에서 환자를 진단하는 것과 아주 유사하다. 초음파, 방사선 등의 물리적 현상을 이용한다는 점에서 같으나 실제 플랜트에서는 진단대상의 특성에 따라 아래 기술한 바와 같은 크게 다른 점들이 있다.

1) 병원의 경우에는 환자가 병원을 방문하여 진단에 필요한 기본적인 조치를 환자가 직접 수행하는데 비하여 비파괴검사는 진단을 위한 준비를 검사자(의사)가 직접 수행해야 하는 차이가 있다. 즉, 진단장비를 진단대상부위로 이동해야 하며, 진단부위에 대한 세척 작업을 수행하고, 환자의 도움없이 검사자가 모든 평가를 수행해야하는 어려움이 있다.

2) 석유화학플랜트는 공정특성상 원료를 분해(cracking) 하거나 합성(reforming)하는 두공정의 조합이라고 할 수 있으며, 따라서 고온, 고압, 부식의 환경조건에서 운전되며, 그 공정물은 대부분 유독하며, 부식성이 강하고, 가연성 등의 특성을 가지고 있으며, 비파괴검사가 수행되는 장소는 일반적으로 위험한, 유독한 공정물의 부착으로 인한 열악한 작업조건을 가진 경우가 많다. 따라서 진단의 기본이 되는 초기 자료를 얻는 작업은 매우 어려운 공정이라 하겠다.

3) 비파괴검사는 그 특성상 검사의 신빙성이 대부분 검사자의 기량에 전적으로 의존한다고 할 수 있다. 제작당시의 검사와는 달리 가동중검사에서는 그 기법이 대부분 육안시험, 자분탐상시험, 침투탐상시험, 초음파탐상시험 등이므로 검사자의 주관적 판단이 검사의 전체적 신뢰성을 좌우하게 된다.

## 9. 맺음말

이상에서 기술한 바를 토대로 국내 석유화학플랜트의 안전운전을 위한 앞으로의 대책을 구상해보면 다음과 같은 것들이 있겠다.

- 1) 초기결함의 존재를 방지하기 위한 제작검사 제도의 강화

석유화학설비는 제작시에 완벽하게 검사하여 초기 결함이 존재하지 않도록 하는 것이 설비의 안전운전을 위하여 최선인 것으로 평가된다. 제작당시의 부적절한 검사는 가동중 검사비용의 증대 및 설비의 가동정지로 인한 가동효율 감소 등의 결과를 유발하게 된다. 또 제작시에 여러가지 검사가 용이하지만 가동중에는 검사에 많은 제약이 따르는 것이 일반적이다. 그리고 검사의 다중성 확보, 공인검사 제도의 강화 등이 요구된다.

- 2) 전문검사 요원의 확보

국내 석유화학플랜트에서는 장치검사와 조직을 가지고 직접 검사를 수행하는 업체는 별로 없다. 조직을 가지고 있는 회사도 전문용역업체를 고용하여 검사업무를 수행하는 것이 보통이다. 특히 비파괴검사 분야는 대부분 전문 용역업체에 업무를 의뢰하고 있는 실정이다. 그러나 정확한 진단을 위해서는 실제 비파괴검사 업무를 지시·관리하고 판단할 수 있는 전문가를 보유하는 것이 필요하다. 또, 어떤 설비를 담당하는 요원은 가능한 한 설비의 수명까지 그 설비를 관리하는 것이 바람직할 것이다.

- 3) 가동중 진단기술에 대한 연구개발 투자 확대

관련 산업체는 설비진단 및 보수분야에 대한 지속적인 연구개발투자를 통하여 선진기술을 국산화해야 할 것이다. 또 시험평가 기술분야는 제조업체에서 중점적으로 연구개발하기 어려운 만큼 기간산업의 안전운전을 위하여 정부차원의 연구개발에 대한 투자가 필수적이다.

- 4) 유관기관간 각종 정보교환 제도 구축

가) 사고사례에 대한 정보교환을 통하여 유사사고의 예방

나) 발생된 결함의 처리사례

다) 선진진단 기술의 이용사례

라) 각종 시험자료 교환

- 5) 가동중검사 전문요원의 양성

제작당시에는 코드에 의한 통상적인 검사

의 수행이 비교적 용이하나 가동중검사시에는 소재, 역학, 비파괴검사기술, 용접기술 등 다양한 지식이 요구되며, 또 검사환경이 열악한 만큼 전문가 양성을 위한 교육훈련 및 전문자격제도의 도입이 바람직할 것이다.

6) 관련 기술기준 및 제도의 제정비

설비의 효과적인 보전을 위하여, 다양한 기술기준을 일원화할 수 있는 국내 고유의 기술기준의 개발이 필요하다. 그리고 국제적인 기술동향을 적극적으로 파악하고 검사제도에 적극적으로 반영하여 경제적이고 실질적인 설비의 보수유지가 될 수 있도록 해야 할 것이다.

참고문헌

- (1) ASME, 1992, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. V.
- (2) ASNT, 1986, Nondestructive Testing Handbook Vol. 2.
- (3) ASNT, 1986, Nondestructive Testing Handbook Vol. 1.
- (4) ASNT, 1986, Nondestructive Testing Handbook Vol. 4.
- (5) ASNT, 1987, Nondestructive Testing Handbook Vol. 5.
- (6) (주)종합기술센터, 1984, 플란트의損傷事例と 經濟老化, 壽命豫測法. 