

## 석유화학설비의 안전진단 기술 현황

### The Technical State of Diagnosis in the Petrochemical Plants

김성문

Sung-Moon Kim

#### 1. 서론

국내 석유화학산업은 그동안 국내외 수요 증가에 힘입어 지속적인 설비투자를 추진한 결과, 현재 에틸렌 기준 연간 720만톤의 시설 능력을 보유하는 세계 3위의 석유화학 생산국으로, 아시아 시장에서는 최대수출국의 위상을 자리잡고 있다. 하지만, 기술능력, 산업구조의 효율성, 환경·안전문제에 대한 대응, 미래 성장산업으로서의 육성전략 등 질적인 면에서는 부족한 부분이 많은 것 같다. 우리나라 석유화학산업에 대해 관심을 가지고 있는 사람이라면 많은 부분 동감하리라고 본다. 근래에 들어서서 범용 석유화학제품의 수요 한계 등으로 선진 해외기업들은 집약화·전문화를 위한 사업재편에 박차를 가하고 있고, 중동 및 동남아 등 전통적인 수입국들은 지속적인 증설로 오히려 수출국으로 전환되어 국내 석유화학산업의 입지가 위축되고 있는 추세이다.

우리나라는 1970년대 초 원유정제 및 석유화학 플랜트 장치산업이 시작된 이래 그다지 짧지 않은 기간 동안 다양한 사고를 경험하였다. 그러나, 이러한 사고발생 현상은 출간된 문헌을 보아도 외국과 큰 차이는 없다고 생각된다. 즉, 석유화학 플랜트와 같은 위험성이 내포된 설비의 가동은 언제나 사고를 유발할 가능성이 항상 존재한다는 것을 의미한다. 이러한 가능성은 국내 장치산업의 노후화에 따라 압력용기의 사용빈도가 많아질수록 그에 따른 사고횟수 및 피해 정도도 점차 커져가고 있

는 실정이다. 이처럼 산업현장에서의 사고는 근로자의 안전뿐만 아니라 지역주민에 대한 안전성 논란, 보험, 생산과 같은 경제적 과장이 매우 크다고 할 수 있다. 사고의 발생률을 감소시키고 사고로 인한 피해를 감소시키는 것이 바로 제품의 생산성 및 기업의 이미지 제고에 직접적으로 연관된다는 사실을 인식하여야 할 때이다. 따라서, 본고에서는 석유화학산업의 최근 동향 및 전망과 함께 석유화학설비의 안전관리를 위해 사용되는 기술들에 대해 다루고자 한다.

#### 2. 석유화학산업

##### 2.1. 석유화학산업의 특성

석유화학이란 석유제품(납사 등) 또는 천연가스를 원료로 에틸렌, 프로필렌, 벤젠 등 기초유분과 이를 원료로 합성수지, 합성섬유원료, 합성고무 및 각종 화합물을 생산하는 기초 소재산업을 말한다. 석유화학제품은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 자동차, 건설, 전자, 통신, 생활용품을 비롯하여 의류, 고무, 염·안료, 페인트, 세제 등 인간생활과 연관을 맺고 있는 거의 모든 분야에 직·간접적인 원료로 제공되고 있다.

석유화학은 기초유분을 생산하는 납사 분해 공장을 모체로 하여 관련 유도품 공장들이 계열화되는 전형적인 콤비나트(단지)형 산업으로 신규단지 건설에 최소한 3년 이상의 기간이 소요된다. 그리고,

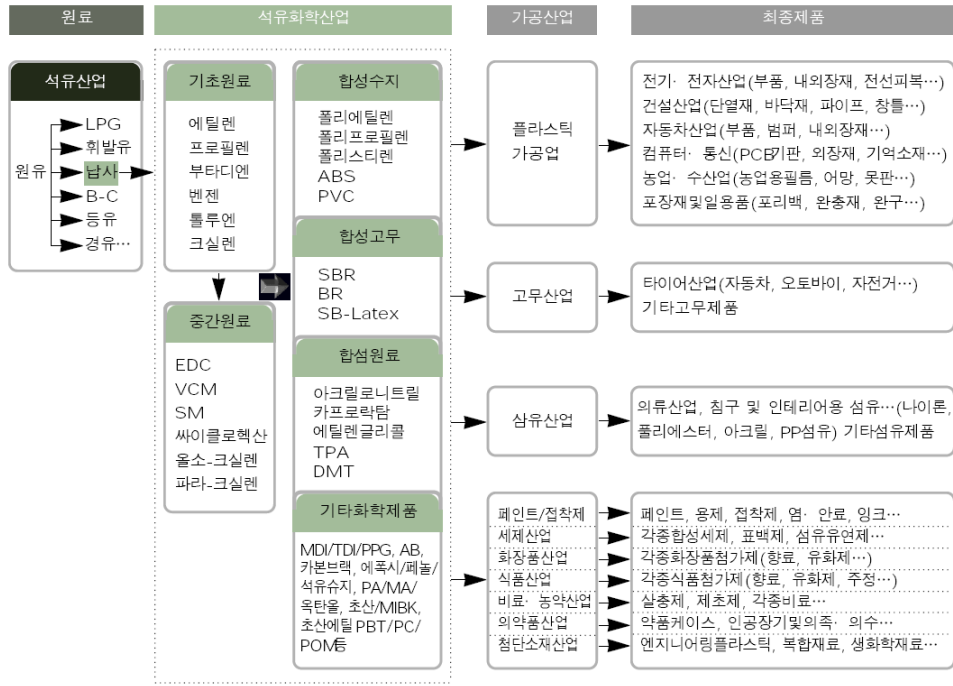


Fig. 1 A Scope of the petrochemical industry (Source: Korea Petrochemical Industry Association)

1개의 석유화학단지 건설에 15~20억\$ 정도 소요되는 자본집약형 산업이자, 공장건설 및 효율적인 공장가동에 상당한 기술 수준이 요구되는 기술집약형 산업이다. 석유화학단지를 신규로 건설할 때에는 생산공장 뿐만 아니라 공업용수, 전력 등 각종 유틸리티 설비와 SOC(육상운송시설, 부두 등)과 함께 건설되어야 하기 때문에 투자비와 투자기간이 더욱 크고 길게 소요된다. 따라서, 대부분의 개발도상국가에서는 산업화 초기에 국영자본을 활용하여 산업 건설을 주도하고 있다.

### 2.2. 국내 석유화학산업의 역사

국내 석유화학산업은 '68년 울산 석유화학단지의 건설을 시작으로 약 40여년의 역사를 가지고 있으며, 건설 초기에는 수출 진흥이라는 목표하에 주요 산업원료의 자급화를 위하여 정부주도로 추진되었다.

석유화학산업은 초기투자비가 큰 장치산업이고, 여러 기업이 함께 투자하여 단지화를 이룰 때, 효율적으로 운영될 수 있기 때문에 국가적 뒷받침과 잘 짜여진 계획 없이는 성공하기 어려운 산업이다.

따라서, 산업화 초기에 정부의 적극적인 육성정책은 우리나라 석유화학산업의 기반을 구축하는 역할을 충실히 수행하였다.

울산단지 건설 이후 '70년대 말에는 울산단지의 확장과 여천단지의 건설이 실현되었고, 그로부터 약 10년 뒤인 '80년대 말 석유화학 투자 자유화가 시작되면서, 다시 한 번 대규모 투자가 추진되어 현재의 울산·여수·대산단지라는 석유화학산업의 기반이 확고히 구축되었다. 이러한 3개단지에 대한 투자가 어느 정도 완료된 '90년대 초 이후 한국은 석유화학제품의 순수입국에서 수출국으로 전환하였으며, 국내 산업에 충분한 기초 원료의 제공은 물론, 주요 수출산업으로까지 성장하였다.

### 2.3. 국내 석유화학산업의 현황

국내 석유화학산업의 총생산액은 26조원 (2000년 기준)으로서 지난 '95년 14조원에서 5년 만에 2배 가까이 증가하는 등 매우 빠른 성장세를 실현하고 있다. 수출은 2000년 말 기준 84억불로 우리나라 총 수출의 5.6%를 점유하고 있고, 수입은 45억불로 무역수지는 39억불의 흑자를 기록하여 반도체, 자동

차, 컴퓨터, 조선 등에 이어 우리나라를 대표하는 6대 수출산업의 하나로서 위상을 견지하고 있다.

### 3. 석유화학설비의 안전관리 중요성

#### 3.1. 국외 석유화학설비의 사고 유형

국외에서 발생한 원유정제 및 석유화학플랜트에서의 대형사고는 자료수집이 시작된 1964년부터 1997년까지 33년 동안 약 115건의 사고가 발생하였다. 주요 국가로는 71건의 사고가 발생한 미국을 비롯하여 24개국에서 크고 작은 사고가 발생하였다. 플랜트 단위공정별로 살펴보면, 저장탱크(13건),

FOC공정(9건), HCU(8건), 에틸렌(7건), 배관(6건), 알킬 유니트(4건), crude 유니트(4건), EO(3건), HDU(2건), fluid cocking(2건), isoprene(2건), LNG(2건), 기타가 53건이었다. 운전별로는 정유플랜트가 55건, 화학플랜트가 40건이며, 손상형태는 폭발과 화재가 주류를 이루고 있었다. 주요 손상기구는 파단이 24건, 배관손상이 17건 등이었고, 특히 배관계통의 파손으로 인한 사고는 발생원인도 매우 다양하며 엄청난 인적과 물질 손해를 가져왔다.

Fig. 3, 4는 2002년도 미국 National Board에서 발행한 자료를 인용한 것으로 최근 10년간 발생한 사고를 배관계통, 저장탱크, 반응기, 드럼, 펌프/압축기, 열교환기, 탑조류, 히터, 보일러 등으로 각각

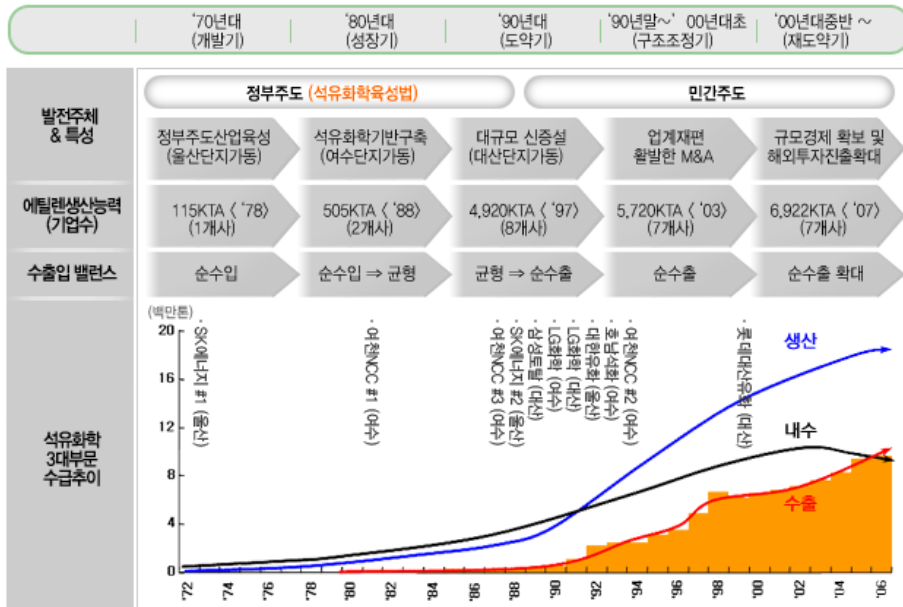


Fig. 2 The Process of development in petrochemical industry (Source: Korea Petrochemical Industry Association)

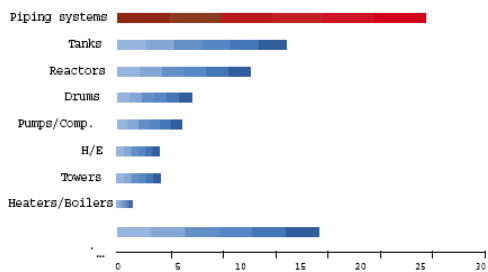


Fig. 3 Number of accident of major equipments in petrochemical facilities (Source: 2002 USA National Board Report)

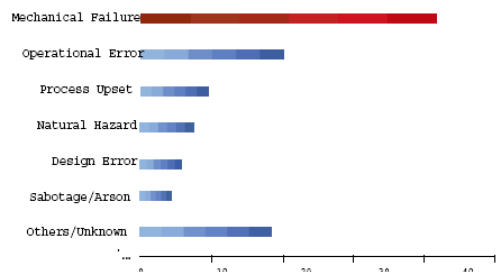


Fig. 4 Causes of the accidents (Source: 2002 USA National Board Report)

의 장치별로 도표화한 것이다. Fig. 3과 같이 적색 부분으로 기록된 배관계가 약 30건에 이를 정도로 주요 사고발생 설비임을 나타낸다.

Fig. 4는 미국내 석유화학플랜트에서 대형사고를 일으킨 주요 원인을 크게 기계적 파손, 운전 미숙, 공정 이상, 자연재해, 설계오류, 태업/파업, 기타 등으로 구분한 도표이다. 그림에서 알 수 있듯이 기계적 파손으로 사고가 발생한 경우가 운전 미숙이나 공정 이상 등에 비해 큰 차이를 보이고 있다. 기계적 파손은 파손기구에 의존하게 되며 이미 규명되어 알려진 파손 기구가 대부분이지만 파손모드는 일정 혹은 단순하게 이루어지지 않고 각각의 파손기구가 복합적으로 형성되는 경우가 더 일반적이라고 볼 수 있는데, 이는 기계적 파손은 금속학적인 요소도 포함되어 있기 때문이다. 실제로 임의의 설비가 장시간 가동으로 일반부식 또는 국부부식이 진행되어 금속적으로는 재질의 잔여수명이 남지 않은 가운데 반복적으로 압력이 가해져 기계적 요소인 피로가 가해진다면 더욱 빨리 설비가 파손되도록 작용하는 가속인자가 될 것이다.

이 경우는 부식과 피로 두 가지 인자가 복합적으로 작용하는 예이다. 또한 기타가 차지하는 사고원인도 무시하기 어렵다. 왜냐하면 기타로 정의하는 것은 아직도 파괴기구가 규명되지 않거나 정확히 사고원인을 모르기 때문이다. 기타가 차지하는 비중을 보아도 사고는 어떻게 발생할지 아무도 모른다. 이는 의학적으로 발전했다고 자부하는 인간에게 치료하지 못하는 불치병이 존재한다는 것과 같다고 할 수 있다.

### 3.2. 국내 석유화학설비의 사고 유형

1993년 대형 안전사고가 잇달아 발생하면서 석유화학공장의 대규모 증설 및 노후화에 따른 문제점을 개선하기 위하여 중간검사와 안전진단제도가 도입되었고, 1994년 한국화인케미칼 독성가스 누출 사고, 1995년 대구 지하철공공장 도시가스 폭발사고를 계기로 단순검사 또는 점검만으로 복잡한 시설을 관리 할 수 없으므로 경영을 포함한 종합적인 안전관리체계로의 전환을 위해 SMS(safety management system)와 외부관리를 강화한 수시 검사제도가 신설 도입되었다.

또한 대규모 석유화학공장은 정기검사 외에 안전성향상계획서를 제출하도록 의무화되어 있는 점

을 감안하여 종전의 매 1년마다 실시하던 정기검사를 매 4년마다 실시하도록 가스 관련 법령을 개정하였다.

석유화학시설은 1996년 이후 SMS제도의 시행으로 사업장내의 안전관리시스템이 크게 개선되었지만 사업소의 배관에 대한 유지관리 미흡 등으로 인한 사고발생우려가 상존하고 있는 실정으로 이러한 문제를 해결하기 위하여 지상 파이프라인 및 지하 시설물에 대한 위치 등 각종 정보시스템과 각 업체의 정보시스템과 연계하여 시설물에 대한 신속하고 효과적인 유지보수 및 예방 점검체계를 구축하고, 대형사고 예방과 미래 예측에 대한 정보제공 할 수 있도록 지리정보시스템(GIS: geographical information system)이 석유화학공단을 운영중인 지방자치단체에서 구축중에 있으며, 특히 매설배관에 대해서는 시공 감리 및 정기적인 검사를 시행하여 사고 수습이 가능토록 개선되었다.

또한 국내의 많은 석유화학공장이 건설된지 20~30년이 지났고, 근래에 지어진 공장도 생산성을 높이기 위한 기술발달에 따라 고온·고압 등 보다 가혹한 조건에서 운전됨으로써 종래의 석유화학시설 검사방식인 육안이나 간단한 측정기기를 이용한 단순 검사 방법으로는 한계가 있으므로, 노후화되고 위험성이 높은 설비에 대해서는 설비의 잔류수명을 평가, 교체시기를 예측하여 사고 위험성을 최소화하는 잔류수명 평가기법 활용을 확대하고, 시설의 위험성을 정량적으로 평가할 수 있는 기법 등을 적극 활용하며, 위험성이 높은 설비에 대하여는 장치의 전반적인 위험도를 정량적 혹은 정성적으로 분석하여 검사 및 교체시기의 우선순위를 결정하는 선진기법인 RBI(risk based inspection)기법을 도입하였다.

국내·외적으로 안전, 환경, 보건관련 법규나 협약 등이 강화되고 있으며, 무역과도 연계되는 추세로 화학업계가 자발적으로 추진하고 있는 RC(responsible care)활동과 자율안전관리체계인 SMS(safety management system) 및 품질·환경·안전시스템(ISO 9000, ISO 14000, KGS 18000)을 연계하는 방안으로 안전·환경관리시스템을 통합 관리하여 모든 정보를 한데 묶어 관리하며 정보를 공유할 수 있는 SEHIMS(safety environment health information & management system) 구축을 추진하고 있다.

현재, 국내 원유정제 및 석유화학플랜트는 크게

울산(141개), 여수(158개), 대산(61개), 기타지역(60개) 등에 분포되어 있으며, 우리나라는 그동안 장치산업으로 아시아내 선두그룹에 속해 있었으나, 근래에 들어서는 환경 안전의 강화와 3D 기피현상이 부각되어 점차 더디게 발전하고 있다.

Fig. 5에 나타난 연도별 사고분포를 보면, 1990년과 1991년도에 가장 많은 사고가 발생하였고, 점차 하향세를 보이다 1997년 최고치를 보였다. 이는 1990년과 1991년의 사고는 플랜트 유지 보수 미숙 또는 운전 미숙에 의한 사고가 대부분을 차지하며, 1997년도 우리 경제가 극도로 나빠져 IMF에 의존하던 기간으로서 플랜트 유지관리에 드는 비용의 축소가 사고로 이어진 것으로 생각된다. 즉, 1990년대 초의 사고는 유지관리 기술의 미흡이 사고로 이어졌고, 1997년부터는 유지관리 기술의 향상에 필요한 투자비용 축소가 사고와 밀접한 관계가 있는 것이다. 이는 기술과 비용이 사고의 중요한 인자로 작용함을 시사하는 대목으로 볼 수 있다.

또한, 국내 석유화학공업의 급속한 성장에 비해 석유화학공장의 사고는 1990~2004년 동안 총 28건이 발생하여 같은 기간의 가스사고(총 2953건)에 비하여 미미(0.95%)하다. 사고원인은 관리 미비가 24.2%, 작업 부주의가 55%, 보수 미비가 20.8%이며, 지역별 사고는 여수, 울산, 대산 순으로 나타났다. 석유화학공장은 다량의 고온·고압 및 유독가스를 포함하는 공정들이 유기적으로 연결된 복잡 다양한 시설이다.

일반적으로 가스를 사용하는 시설에서의 화재·폭발, 누출 등의 사고는 대형사고로 이어지는 경우가 많으며 이러한 사고가 발생할 경우 그 직접피해는 공장 내에서는 인명·재산손실과 운전중지에 의한 막대한 생산손실을 가져오고 공장 밖으로는 지역사회의 인명·재산손실뿐만 아니라 환경에도 나쁜 영

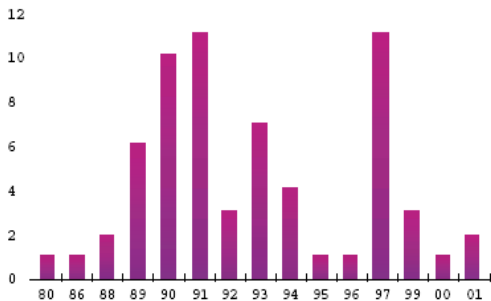
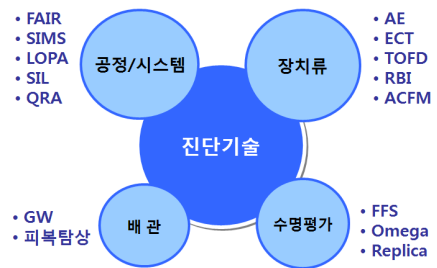


Fig. 5 Distribution of accident by year(1980~2001)

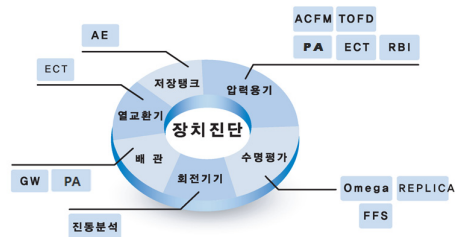
향을 미치며, 또한 산업의 특성상 국가의 에너지 수급 불균형, 석유화학 기초원료 수급 차질 등으로 인해 국가경제를 위태롭게 할 수 있다.

#### 4. 석유화학설비의 안전진단 기술

정유 및 석유화학플랜트의 각종 구조물 및 설비는 대형화, 고압화, 고속화되고 있어 그 품질과 규모에 큰 변화를 가져오고 있으며, 특히 압력용기나 배관 등의 안전성에 대한 신뢰성을 확보하는 일이 매우 중요하다. 이처럼 석유화학설비의 안전성 확보를 위한 핵심기술은 대부분 비파괴진단 기술을 활용하고 있다. 비파괴진단 기술은 설비의 성능과 사용성을 해치지 않으면서 설비에 발생한 결함을 찾아내는 기술로서 현재 다양한 기법들이 활용되고 있으며, 지금도 국내외에서 많은 연구자들에 의해 새로운 진단 기술들이 매우 활발하게 개발되고 있다. 현재 국내 석유화학플랜트 현장에서 사용되는 진단기술은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 공정/시스템, 배관, 장치류, 수명평가 등에 다양한 진단기술들이 활용되고 있으며, 본 장에서는 국내외 정유·석유화학설비에 주로 사용되고 있는 진단기술인 음향방출(AE) 기술과 유도초음파(GW) 기술에 대해 소개하고자 한다.



(a)



(b)

Fig. 6 Introduce of diagnosis technology, (a) diagnosis technology, (b) equipment diagnosis

#### 4.1. 음향 방출(AE) 기술

AE(acoustic emission) 기술은 다른 비파괴검사법에 비해 상대적으로 넓은 영역의 검사가 가능하며 설비나 구조물의 사용중 감시, 실시간 계측이 가능하고 결함의 위치를 탐지할 수 있다는 등의 장점이 있어 가동중검사가 가능한 비파괴기법으로 최근 관심이 모아지고 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 결함의 진전이나 누출 등으로 인해 에너지의 순간적 방출이 발생하면 그 중 일부가 탄성파로 변환되어 부재를 타고 전파하는데 바로 이러한 탄성파를 AE라고 하며 이를 센서로 취득하여 취득된 신호를 근거로 결함의 위치를 추정하고 결함의 상태를 평가하는 기술을 AE기술이라고 한다.

이 기술의 특징은 발신 측에서 특정에너지를 보내어 그에 대한 변화를 취득하는 대부분의 비파괴 시험법과는 달리 구조물 사용중 자연 발생하는 결함신호를 취득하는 비가역적 방법이다. 또한 부재를 타고 전파하는 탄성파를 취득하는 것이기 때문에 센서가 결함과 어느 정도 거리를 두고 있어도 결함을 탐지해낼 수 있으므로 다른 비파괴기술에 비해 상대적으로 넓은 범위의 감시가 가능하다는 장점이 있다. 한국가스안전공사에서는 AE기술을 이용하여 석유화학플랜트의 압력용기 및 저장탱크의 가동중진단을 실시하고 있으며, 조선업계와 토목업계에서도 동 기술을 활용하여 설비의 건전성을 평가하고 있다.

#### 4.2. 유도 초음파(GW) 기술

석유화학설비에 활용되는 배관은 가스 등을 운송하기 위한 중요한 설비이지만, 안전성 확보에 어려움이 큰 설비중 하나이다. 배관은 그 구조는 매우

단순하지만, 수많은 용접 이음부를 가지고 있을 뿐 아니라 대부분의 경우 보온·보냉되어 있거나 지하에 매설되어 있기 때문에 안전성을 확인하기가 매우 어려운 실정이다. 이러한 배관에 발생한 결함을 검출하기 위해 최근 석유화학플랜트에서는 GW(guided wave) 기술을 도입하여 현장 적용을 실시하고 있다. GW 기술은 기차가 철로를 따라 달릴 때, 기차에서 아주 멀리 떨어진 지점에서도 철로를 따라 전해오는 소리를 들을 수 있는 것과 같은 원리를 가지고 있다. 공기중으로 전파되는 파는 모든 방향으로 퍼져 나가기 때문에 그 세기가 전파거리에 따라 급격히 저하되어 원거리에서는 탐지가 불가능하지만, 철로를 따라 전해오는 파는 그 에너지가 철로(파 유도체)에 갇혀있기 때문에 멀리 전파해도 에너지가 소실되지 않는다. 이처럼, GW 기술은 배관을 따라 전파하다가 배관에 존재하는 결함으로부터 반사되어 반대방향으로 전파하고, 이 반사가 초음파 탐촉자에 부딪혀 결함신호를 생성하면 이 결함신호로부터 결함의 위치, 종류, 크기 등의 특성을 판단하는 기술이다.

GW 기술은 배관의 원거리 탐상에 적합하여 작업자가 접근하기 힘든 고소(高所), 매물, 해저배관이나 단열재로 덮인 배관 등에 활용이 가능하지만, 하나의 결함에서 다수의 유도초음파 신호가 발생하여 모드 분석이 필요하므로 신호 해석이 어렵다는 단점이 있다. 현재, 한국가스안전공사를 비롯한 정유·석유화학 회사에서는 배관에의 GW 기술을 활용하여 가동중 배관의 건전성을 평가하고 있다.

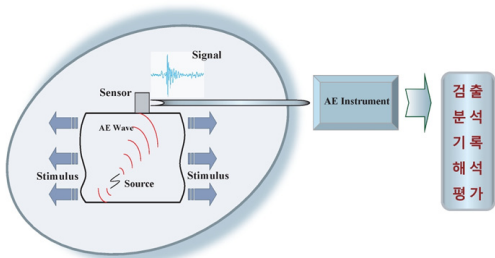


Fig. 7 Conceptual drawing of acoustic emission technique

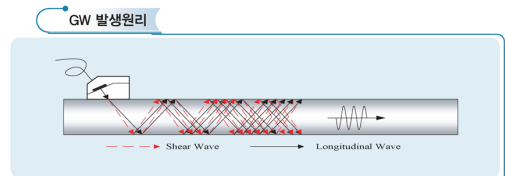


Fig. 8 Conceptual drawing of guided wave technique

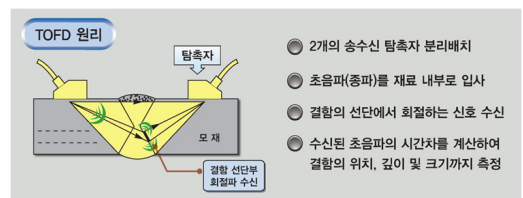


Fig. 9 The concept of TOFD technique

4.3. 초음파 회절 시험(TOFD) 기술

금속 내부를 진행하는 초음파는 균열 표면에서 반사되지만, 한편으로 균열의 모든 부위에서 구면파가 발생하는 현상(회절)이 발생한다. 이 회절파는 반사파에 비해 신호의 크기가 매우 약한 형태이며, TOFD(time of flight diffraction)는 송신자와 수신자 두 개의 탐촉자를 이용하여 균열의 양 끝에서 발생한 회절파를 수신하여 나타난 결함신호로 평가한다.

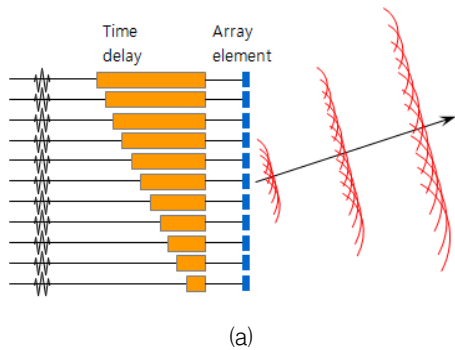
TOFD 기술은 높은 결함 검출능과 정확한 크기를 측정할 수 있고, 방사선투과시험에서 검사가 어려운 200 mm 이상의 두꺼운 판에 대해서도 정밀한 검사가 가능하다. 그리고 압력용기, 배관 등 장치류는 내부 접근성과 내용물에 의한 간섭 때문에 사용 중에 방사선투과검사가 불가능한 경우가 많으며, 플랜트 운전 조건에 따라서는 동위원소 자체를 반입하지 못하는 경우도 있는데, TOFD 기술은 이러한 제한 없이 사용중검사가 가능하다. 또한 빠른 검사속도와 영상화된 검사 결과를 전자파일로 저장하여 언제라도 파일을 열어 재확인이 가능하므로 검사의 객관성과 신뢰성을 부여할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면에, 용접 크라운 부위의 결함과 같이 검

사체 표면으로부터 수 mm 이내에 존재하는 표면결함은 검출이 곤란하다는 단점을 가지고 있다.

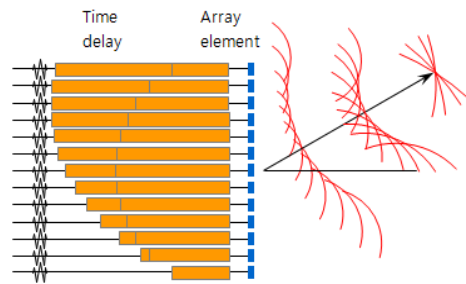
4.4. 위상 배열 초음파(PAUT) 기술

PAUT(phased array ultrasonic testing) 기술은 여러 개의 작은 탐촉자로 구성된 배열탐촉자를 사용하여 시편 내부로 진행하는 초음파를 전파 각도와 집속 위치를 전자적으로 조절하고, 초음파 신호의 수신시 각각의 탐촉자가 받아들이는 신호를 전자적으로 처리하여 시험편 내부의 영상도 실시간으로 획득할 수 있다. 따라서 재래식 초음파탐상시험으로는 검사가 어려운 복잡한 형상의 시험편도 PAUT 기술을 이용하면 쉽게 검사를 할 수 있을 뿐만 아니라 디지털화된 영상을 저장할 수 있으므로 정밀검사를 위한 자료로 활용할 수 있다.

PAUT는 초음파를 원하는 부위에 전자적으로 집속시킬 수 있는데, Fig. 10는 위상배열기법을 이용한 초음파 빔의 조향 및 집속을 보여주는 개념도이다. 각각의 배열탐촉자는 서로 다른 시간에 전기 펄스에 의해 초음파를 발진하는데, 각 소자의 발진 시간을 적절히 조절함으로써 배열탐촉자에서 나오는 초음파 빔의 집속위치나 전파각도를 변화시킬 수 있다. 이러한 전자적 조향과 집속 기능은 시편의 내부를 여러 가지 입사각으로 검사할 경우 매우 유용하며 전자적으로 집속 위치를 신속히 변화시킬 수 있기 때문에 여러 점에서 돌아오는 신호를 조합하여 시험편 내부의 2차원 영상을 실시간으로 획득할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 10 The concept of PAUT technique, (a) focusing, (b) steering

4.5. 교류장 측정(ACFM) 기술

ACFM(alternative current field measurement) 기술은 ACPD(alternative current potential drop) 기법을 근간으로 1980년대부터 개발되어져 왔다. ACFM 기술은 검사 표면과의 기계·전기적인 접촉 없이 작업할 수 있는 와전류탐상시험(ECT: eddy current testing)의 장점과 calibration을 수행하지 않고도 결함크기를 측정할 수 있는 ACPD의 장점을 통합한 기술이며 압력용기, 저장탱크, 배관 등에 널리 사용되고 있다. 기존의 비파괴기법인 ECT와 MT 전자장을 시험체에 가하여 유지시켰을 때, ECT의 경우에는 발생하는 시험편 표면전압을 측정하지만, ACFM은 자기장을 측정하여 결함을 검출

한다. 또한, 이 기술의 장점으로서는 표면의 페인트와 스케일을 통과하여 검사가 가능하므로 표면을 따로 처리할 필요가 없고, 고온(100 °C)·저온에서의 사용과 가동중검사가 가능하여 검사시간을 단축할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면에 표면 코팅 두께에 따라 검출 감도가 변화하고, 표면 결함에 대해서만 검출감도가 뛰어나며, 미리 결함의 방향을 예상하여 스캔 방향을 선정해야 하는 점은 단점으로 꼽을 수 있다.

#### 4.6. 사용 적정성 평가(FFS) 기술

국외 및 국내의 원유정제 및 석유화학플랜트 내 설치되어 운전되는 압력설비(압력용기, 배관, 저장탱크 등)들은 주로 미국의 설계·제작 코드인 ASME(American Society of Mechanical Engineers) 또는 API(American Petroleum Institute) 코드를 이용하여 제작된다. API RP 579 코드는 FFS (fitness for service)라고 한다. 이 코드들은 각 기준별로 압력용기와 배관시스템의 설계·접합·검사를 주관하는 안전법칙(안전율)을 설정하고 있지만, 장치가 가동됨에 따라 열화되는 것은 고려하지 않고, 단지 설계개념에만 국한하고 있다. 하지만, 석유화학 설비들은 가동시간의 증가에 따라 점차 열화되어 가며 열화의 흔적으로 재질에 균열, 부식, 피팅 등 치명적인 영향을 주는 현상으로 나타난다. 따라서, 건설 중 개념이나 건설 후 개념이 조합된 기준의 필요성이 요구되었다.

즉, 운전중인 압력용기에 발생한 결함 또는 손상을 입은 설비의 구조적 건전성을 정량적으로 평가하는 절차인 FFS가 ASME와 API의 공동프로젝트로 작성되었다. 이 기준은 원유정제와 석유화학 플랜트 설비들에 대해 특별히 준비된 방법론을 이용하여 FFS를 실시하는 지침을 제공하고 있으며, “가동-보수-교체”를 결정하는데 이용된다.

#### 4.7. 표면 복제(Replica) 기술

설비의 크리프 손상은 고온에서 시간이 경과함에 따라 변형률이 누적되어가는 손상이며 현저한 변형이 생기지 않더라도 크리프 손상에 따른 기공의 발생, 성장, 결함과정으로 진행하면 기공의 관찰로 크리프 손상을 직접 평가할 수 있다. 표면 복제 기술은 금속 조직의 열화 상태와 함께 기공을 플라스틱

필름에 전사(복사)시켜 관찰함으로써 크리프 손상 상태를 판단하는 방법이다.

표면 복제의 유용성은 가동중 기기의 자체하중, 고압으로 인한 팽창 및 고온으로 인한 열팽창 등으로 시스템 응력이 발생되는데 이러한 시스템 응력은 반드시 최대압력이 작용하는 곳에서 존재하는 것은 아니지만 이 응력으로 인해 조기 재료손상, 파손 등이 굴곡부, 용접부 및 열영향부 등에서 발생하게 된다. 시스템 응력이 심각한 곳은 예측하기 용이하지만, 작용하는 응력을 계산하기는 매우 어렵다. 하지만, 표면 복제 기술은 이러한 상태평가가 가능하며, 또한 검출이 가능하고 열화도 및 잔여수명을 적기에 평가할 수 있는 장점이 있다.

#### 4.8. 위험도 기반 검사(RBI) 기술

압력용기, 배관 등 전체 장치시설을 자세히 검토해보면, 상대적으로 큰 위험도를 안고 있는 장치류는 전체 장치들 중에서 불과 10~20% 이내라고 할 수 있다. 이러한 경향에도 불구하고 각종 코드 및 표준 등에서는 전체 장치류에 대하여 일정 주기에 따라 일률적으로 검사하도록 규정되어 있다. 하지만, RBI(risk based inspection) 기술을 이용하면 위험도가 적은 장치류들은 검사주기를 연장하여 검사 경비를 줄일 수 있을 뿐 아니라 위험도가 큰 장치류에는 예산을 더 많이 투입하여 검사주기를 줄이거나 검사장비 및 검사수준을 높여서 사고발생 확률을 줄일 수 있다. 또한, 손상 메커니즘(failure mechanism) 들을 예측하여 그에 적절한 검사나 예방책을 미리 취함으로써 안전도를 향상시킬 수 있다. 즉, RBI 기법은 장치류에 대해 언제 어느 부위에 무엇을 검사해야 이 장치들의 위험도를 최소화할 수 있는가 하는 방향을 제시하는 기법으로서 Fig. 11과 같이 장치의 손상확률(likelihood of failure)과 피해결과(consequence of failure)를 체계적으로 종합하고 장치의 전반적인 위험도를 정량적 혹은 정성적으로 분석하여 검사 및 교체시기의 우선순위를 결정하는 방법이다.

RBI기술을 활용하면 석유화학공장 등의 위험설비에 대한 검사 우선순위 결정에 의해 정기보수 기간 단축이 가능하고, 촉매 교체 등 특별한 경우를 제외하고는 정기 보수 기간의 연장이 가능하여 생산성 향상 및 경비 절감에 도움을 줄 수 있다. 또한 장치 관리자 등의 의사결정에 유용하게 사용할



수 있으며, AE 등과 같은 압력용기 수명평가 기법들과 연계하여 장치 위험도 평가 기술의 발전을 도모할 수 있다.

4.9. 설비의 건전성 평가(FAIR) 기술

FAIR(focused asset integrity review) 기술은 미국 Shell 사에서 수 십년간 구축한 데이터베이스 및 노하우를 활용하여 석유화학설비에 대한 자체 건전성 관리방법을 통해 장·단점을 분석하여 세계 우수 기업들과의 시스템 수준 비교 및 벤치마킹을 실시한 후 보유 설비를 효율적으로 관리하기 위한 종합 진단기법이다. 정유·석유화학공장의 기본자산인 압력기기, 회전기기, 동력장치, 전자·전기·계기장치, 소방설비 및 저장탱크 등의 안전·자산관리 체계와 방법을 객관화시켜 국제 수준에 비해 어느 정도 수준인지 측정하고, 설비의 문제점과 개선방향을 확인하여 효율적인 투자방향 설정에 활용하는데 유용하게 활용할 수 있다. Fig. 12는 FAIR 기술의 분석 절차를 보여준다.

5. 결론

국내 석유화학플랜트 시설이 복잡·다양화됨에 따

라 석유화학설비의 건전성 확보를 위하여 이를 관리할 수 있는 기술이나 전문 인력이 더 많이 필요함에도 불구하고 석유화학산업의 불황과 기업의 구조조정으로 인해 오히려 안전관리 인력은 감소되는 추세에 있어 안전진단 인력의 전문화가 점차 필요한 상황이다. 따라서 국가적인 차원에서 이들 안전진단 인력을 전문화시킬 수 있는 방안을 강구하여야 하며, 석유화학공장에 종사하는 인력에 대하여 위험설비의 관리기법, 안전성 평가기법, 검사·진단 기법을 향상시키기 위한 각종 기술적인 지원이 필요하다. 이와 더불어 석유화학플랜트의 안전성 향상을 위하여 가장 기본적이며 시급히 요구되는 것이 관계기관 및 사업자, 종사자 그리고 사용자의 안전에 대한 의식의 전환이 필요하다.

또한, 정보화·지식기반의 사회로 전환하면서 미래사회는 산업구조의 혁명적 변화가 예상되고 있다. 석유화학산업에서 생산되는 제품의 부가가치는 줄어드는 반면, 몇몇 선진국에서 보유한 지식집약형 기술인 전문적인 엔지니어링 기술이나 안전진단 기술 등은 투자비용에 비해 오히려 많은 부가가치를 창출하고 있는 실정이다. 국내 석유화학설비에 적합한 맞춤형 진단기술의 개발에 많은 노력을 기울이는 것이 미래사회의 산업화에서 경쟁력을 유지하는 필수요소가 될 것이다.

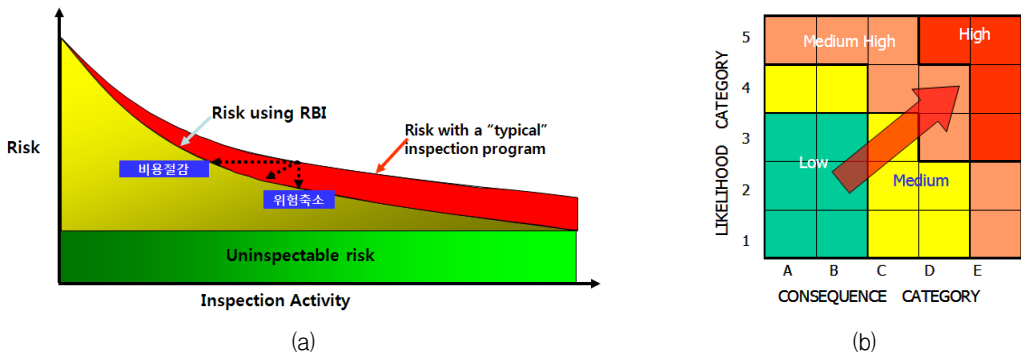


Fig. 11 The concept of RBI technique, (a) risk evaluation, (b) RBI matrix

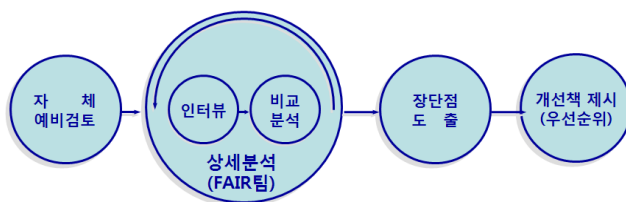


Fig. 12 The procedure of FAIR technique

## 참고문헌

- [1] 김평중, "석유화학산업의 최근 동향 및 전망", 가스안전, (2002)
- [2] 나홍기, "TOFD 탐상 기술 소개", 가스안전, (2009)
- [3] 송성진, 신현재, 장유현, "강 구조물의 비파괴 검사를 위한 위상 배열 초음파 기술", 한국소음진동학회지, 제 10권, 제 5호, (2000)
- [4] 송성진, 윤동진 외, "가스안전을 위한 국내 비파괴진단 신기술", 가스안전, (2007)
- [5] 윤석정, "석유화학산업 안전관리 실태와 관리 방안", 가스신문, (2005)
- [6] 윤인섭, 김구희, "에너지 화학산업단지의 안전 현황 및 대책", 가스안전, (2004)
- [7] 이승훈, "교류장을 이용한 금속의 결함 측정 기술", 가스안전, (2005)
- [8] 이일재, "장치산업에서의 설비 위험도 평가", 가스안전, (2001)
- [9] 최재봉, "지식정보사회에서의 장치산업설비의 관리", 가스안전, (2007)
- [10] 한상인, "국내 원유정제 및 석유화학플랜트 사고 유형 및 위험 관리", 가스안전, (2003)