

배관의 진단(I)

김영환
대한검사기술주식회사, 부설연구소장

Inspection of Pipeline

Young H. Kim
R & D Center, Korea Inspection & Engineering Co., Ltd., Seoul 137-060

1. 서론

배관은 가스나 유류와 같은 많은 양의 유체를 빠르고 안전하게 수송하는 수단으로 현대 산업에서 혈관과 같은 존재이다. 석유화학공장과 같은 장치산업 내의 배관, 화력발전소의 증기관, 가스관은 물론이고 난방용 열배관, 상수도관, 하수도관 등 배관은 우리 일상생활과 직·간접적으로 매우 밀접한 관계를 지닌다. 배관은 그 기능상 가스나 석유 등의 유체를 먼거리까지 운반하기 위한 장거리 배관과 석유화학공장과 같은 장치산업 설비에서 공정의 흐름을 연결시켜주는 배관으로 나눌 수 있다. 유류와 가스를 운반하기 위한 장거리 배관이 전세계적으로 이미 수백만 km가 설치되어 있으며 나날이 증가하는 추세이다. 한 예로 시베리아에서 대규모 가스전이 발견되어 이를 효과적으로 이용하기 위해서 시베리아-중국-인도 및 시베리아-중국-한국-일본의 수천 km에 이르는 가스라인이 구상되고 있다.

국내의 경우에 70년대 후반부터 송유관, 가스, 난방, 급배수 등의 배관 시설이 설치되기 시작하였고 약 20년이 경과한 이 시점에서 배관이 노후화하여 부식 및 결함 등이 나타나기 시작하였다. 현재 국내에 건설되어 있는 대형 건물, 각종 석유화학설비, 발전플랜트, 지하매설물 등의 배관라인은 지난 급속한

경제성장기에 목표지향적으로 조급하게 시공되어 이들 각종 구조물의 배관 및 배관 라인에 설비 전체의 안정성에 직·간접적으로 문제가 되어 왔다. 최근 국내에서 일어난 대구가스 폭발사고, 성수대교 및 삼풍백화점 붕괴사고 등을 계기로 국내 기간 시설물 전반에 걸친 안전 문제가 사회적 문제로 심각하게 대두되고 있다. 특히 석유화학설비에 있어서 배관라인 및 도시가스 공급관인 고압 매설관의 누설 및 파열시에는 화재에 의한 대형 폭발로 이어지게 되며, 또한 대기 오염에 의한 환경 피해로 사회 전체의 문제로까지 확대된다. 최근에는 이들 구조물들의 상당수가 노후되었고 사후 관리가 소홀하여 대형사고가 계속 발생되고 있으며 앞으로도 이러한 가능성이 매우 농후하다. Marsh & McLennan Protection Consultants의 통계에 의하면 미국의 경우에 30년간 석유화학 공장에서 발생한 100대 대형사고로 인해 발생한 순수한 재산손실은 약 70억 달러로 한 사고 평균 700억원 정도가 되며, 인명보상, 고액보상 및 기회상실 등을 합치면 그 피해액은 더 커진다.

우리나라의 가스공사, 송유공사의 장거리 배관의 대부분이 지하 매설 배관이고 그 길이가 수 km에서 수백 km에 이르기 때문에 일단 파손으로 인해 누출이 발생되면 누출 지점을 알아내는 것이 매우 어렵고 뿐만 아니라 누출 여부 자체를 알아내는 것도 쉬

운 일은 아니다. 더구나, 배관 내외부에 부식이 발생했는지, 했다면 위치와 크기는 얼마나 되는지를 알아내는 것은 매우 어려운 일이다. 한 예로, 한국가스안전공사가 완공된지 3년 이상이 된 아파트를 대상으로 실시한 가스기밀시험에 의하면 도시가스를 공급하는 지선의 40%에서 가스가 새고 있는 것으로 밝혀졌다. 96년부터 97년 8월까지 서울에서 도시가스 사고 284건, 고압가스 사고 9건이 일어났으며, 97년 9월에는 부산에서 가스 누출 지점을 제대로 찾지 못해서 가스 공급을 중단한 사례도 있다¹⁾.

시설물의 수명에 따라서 파손이 일어날 가능성은 Fig. 1과 같은 bathtub 곡선을 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시설물들은 건설 초기에 사용 재료 자체의 결함, 용접결함, 적절치 못한 시공 등으로 인한 조기 파손 가능성이 많은데 이러한 결함들을 찾아내고 적절한 조치를 취한다면 파손율이 낮아 긴 기간동안 안정적으로 사용할 수 있게 된다. 시설물 사용시간이 길어지면 마모, 부식, 침식, 재질 열화, 피로 등으로 인해서 구조물에 결함이 발생될 가능성은 점차 높아져 안전진단이 필요하게 된다. 따라서, 비파괴검사는 사용전에 설치 공사는 물론이고 시일이 지남에 따라서 주기적인 검사가 필요하다.

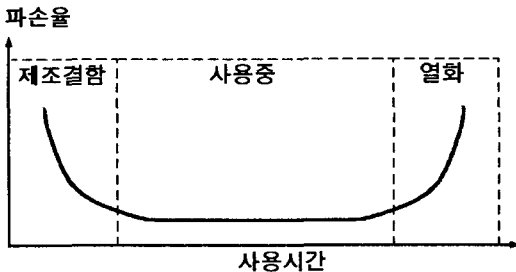


Fig. 1. 시설물 수명에 따른 파손율

배관의 경우도 마찬가지로 건설 공사시에 용접 결함 등을 찾아내야 함은 물론이고, 사용중에도 일정한 주기로 결함의 발생 여부를 점검해야 할 필요가 있다. 일례로, 배관을 주요 설비 장치로 이용하고 있는 석유, 화학공장과 같은 장치산업의 경우 매년 일정 기간 동안에 배관의 이상 유무를 사전에 점검하고 이를 보수 또는 교체하는 작업을 한다²⁾. 이러한 진단 보수 작업이 허술하게 이루어질 경우 대형 사고로 이어질 가능성이 높고 그에 따른 인적·물적 손실을 피할 수 없다. 석유화학업계의 배관 설비의

진단 및 보수는 주로 봄, 가을의 shut-down기간에 집중적으로 실시된다. 국내의 경우 비파괴검사는 주로 방사선투과검사에 의존하고 있는 30여개의 비파괴검사 전문용역업체와 대기업들이 자체 기술진을 이용하여 15일에서 45일에 이르는 단기간(shut-down 기간)동안에 실시한다. 따라서, 정해진 단기간에 이들 각종 구조물 배관 및 배관라인의 안정성 및 잔존 수명평가 기술을 확보하기 위하여는 먼저 고감도, 고정밀도의 결함 평가 기술이 필수적이며, 특히 가동 중인 구조물의 배관 및 배관라인에 대한 내부손상 평가를 위해서는 비파괴검사기술의 향상이 필요하다. 또한 지하 매설관과 같은 경우는 설치시에 이루어지는 검사외에는 그 특성상 검사가 어려운 실정이며 이에 대한 검사기술 및 시험장비 등도 선진국에 비하면 열악한 실정이다. 따라서 본문에서는 우리나라 산업체에서의 배관 및 배관라인의 안정성 확보 및 건전성 평가를 위하여 국내의 비파괴검사기술에 대한 성찰 및 향후의 방향에 대해 언급하고자 한다.

2. 국내 배관의 설치 현황

배관은 용도 및 적용 기준에 따라 여러 가지로 분류할 수 있으나 산업 플랜트의 배관과 운송용 장거리 배관으로 나눌 수 있다. 가스관이나 송유관과 같은 운송용 장거리 배관은 주로 매설 배관으로 지하에 매설되어 있으며, 비매설 배관의 경우는 여러 장치산업 현장에서 주로 지상에 노출된 상태로 설치되어 있다. 운송용 배관은 그 기능에 따라서 수송용 배관과 분배용 배관으로 구별된다. 수송용 배관은 주로 도시가스, 석유 등을 수송하며 일정 거리마다 (대략 16km) 밸브가 연결되어 있어 가스 배관의 경우는 compression station, 액체 배관의 경우 pumping station이 연결되어 있다. 고압 배관에 걸리는 압력은 최대 6895kPa에 이르며 배관의 연결은 거의 모두 용접에 의해 이뤄지고 있다. 분배용 배관의 경우는 수송용 배관으로부터 이송받은 가스 등을 도시 지역에 분배하는데, 걸리는 압력은 일정하지 않다. 따라서 주로 문제가 되는 배관은 고압의 수송용 배관이지만 최근 국내에서 발생한 사고들은 안전관리 및 시방서를 무시한 공사 등으로 도시 지역의 분배용 배관도 주요 관심을 받고 있다. 배관에 주로 사용되는 강재의 항복 강도는 207MPa (API, grade A의 경우)에서 483MPa (API 5L-X70)에 이른다. 일반적으로 배관의 두께는 배관에

결리는 압력과 허용 후프 응력에 의해 결정되는데 허용되는 최대 후프 응력은 명시된 최소 항복 강도의 72%이다. 배관은 보통 사용 전에 압력시험을 거치도록 되어 있는데 일반적으로 명시된 최소 항복 강도의 90~105%의 후프 응력 수준에서 수압시험을 한다. 이 시험에 의해 배관이 실제로 사용될 때 받게 되는 응력 수준에서 파괴를 초래할 수 있는 결함의 존재 여부를 확인할 수 있다. 대개 이러한 시험에서 소성 변형과 손상이 발생하거나 잔류응력이 생기지 않도록 배관의 설계가 이루어진다.

2.1. 장치산업 플랜트 배관

정유 또는 화학공장과 같은 장치산업에 있어서의 배관은 반응로와 더불어 중요한 구성요소이다. 배관은 냉각수는 물론이고 공정중에 생산된 물질을 다음 공정이나 저장용기로 안전하고 신속하게 운송한다. Fig. 2에는 화학플랜트내에 배관들이 거미줄처럼 얽혀 있는 모양을 나타내었다.

이들 배관의 사용 환경은 대개의 경우에 고온·고압이며 취급유체가 부식성이 강한 경우가 많아서 부식이나 침식의 가능성이 높다. 또한 이들 배관의 파손은 장치 자체의 손실, 생산의 중단과 같은 일차적인 피해는 물론이고, 인명사고나 환경오염과 같은 부수적인 피해는 엄청나다. 장치산업 설비에서 배관에 사용되는 재료비 및 하청비 및 현장 노무비는 Fig. 3에 나타낸바와 같이 각각 23%와 47%에 달한다. 용도 및 환경에 따라 사용되는 배관의 재질의 종류도 다양하며, 매설배관의 경우와는 달리 직관뿐만 아니라 곡관으로 설치되는 경우도 상당히 많으며 보온재로 싸여 있는 경우도 많다. 재질에 있어서는 현재 산업 현장에서 대부분을 차지하는 페라이트계



Fig. 2. 화학공장에 설치된 내부 배관시설 예

탄소강뿐만 아니라, 오스테나이트계 스테인리스강, 티타늄 등으로 다양화되고 있으며, 증설 및 교체 등으로 점점 설치량이 증가하고 있다. 특히, 정유공장의 경우에는 유조선으로부터 원유를 인수하는 배관은 대개의 경우에 수 km의 해저배관으로 바다물에 의한 부식 가능성이 매우 높으며 이들의 파손은 해양오염의 문제를 불러일으킬 수 있다.

2.2. 장거리 매립 배관

장거리 매립배관은 취급 유체의 종류에 따라서 크게 가스라인, 유류라인, 상하수도관 등으로 나눌 수 있다. 가스라인은 우리나라의 에너지원으로 천연가스를 사용하기 시작함에 따라서 급속히 증가하기 시작하였는데, 천연가스 인수기지 및 주요 도시까지의 운송라인은 한국가스공사가 맡고 도시내의 분배라인은 지역별로 도시가스회사들이 담당하고 있다. 가스 배관은 보통 수십 기압에 달하는 고압이어서 누출 사고가 발생한다면 그 위험도는 매우 높다. 정유된 유류를 운송하는 배관은 대부분 해안에 위치한

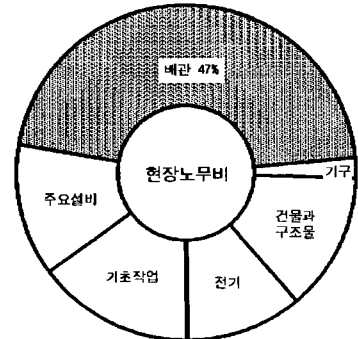
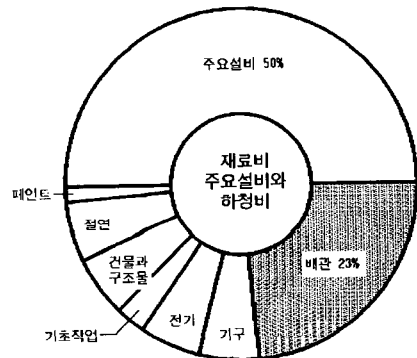


Fig. 3. 배관이 산업설비에서 차지하는 비중

정유소에서 만들어진 유류들을 소비지인 도시까지 운송하는 라인으로, 대한 송유관공사에서 운영하고 있다. 이 배관망의 파손은 토질오염을 유발할 수 있다. 이외에도 비교적 관심도가 낮은 지역난방 및 상하수도관도 지하매립 배관이다. 최근 들어서 수질 오염으로 인하여 상수원이 도시에서 점점 멀어져가면서 상수도 원수를 끌어오기 위한 배관이 급속히 늘어가고 있다. 이 배관은 직경이 수 m에 이르는 대형 배관이다. Fig. 4에 매립 배관 건설 장면을 나타내었다. 이들 지하 매립 배관들의 공통적인 특징은 직경이 크고 시공 후에 사후 관리가 매우 어렵다는 점이다. 누출이 일어나는지 여부와 누출 지점의 위치 파악이 매우 어렵다. 이 글에서는 가스공사, 도시가스사, 송유관공사, 지역난방 배관의 현황을 고찰해 본다.

2.2.1. 한국가스공사

한국가스공사는 청정에너지인 천연가스를 국내에 원활히 공급하기 위해서 82년도에 회사가 설립되었고 액화천연가스(LNG) 인수기지와 배관망 확장 사업을 계속하여 왔다. 평택인수기지에 이어 97년에 인천인수기지의 1차공사가 완공되어 천연가스의 사용이 급증할 것으로 예견되며 이에 맞추어 한국가스공사에서는 총 연장 2,150km의 배관망을 건설할 계획이다.

이미 완성된 주요 배관망은 수도권의 약 200km, 경인권의 98km, 호남권의 233km이며, 현재 공사중인 배관망으로는 영남권 462km, 남부권 260km, 서해권 198km, 수도권 환상망 주배관 337km과 강원권 200km 등으로, 수도권과 중부권의 운영 및 보강 설치중인 배관은 659km에 이르고 있다. Fig. 5는 전



Fig. 4. 지하 매립 배관 건설 현장이 주배관망은

국의 주 배관망의 현황을 나타낸다.

이 주배관망은 모두 지하 매설 배관이며 고압의 연소성 가스를 취급하기 때문에 누출이 발생한다면 대형 사고로 이어질 가능성이 높다. 따라서, 한국가스공사에서는 97년 5월에 평택인수기지에서부터 목감기까지의 65km 구간에 대하여 지능형 피그를 사용한 부식검사를 시범적으로 실시하여 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.

2.2.2. 도시가스

한국가스공사의 주 배관에 의해 공급된 천연가스는 지역별로 도시가스회사들에 의해서 수요자들에게 분배된다. 우리나라의 도시가스에 대한 배관라인은 정해진 구역만을 전담하는 도시가스사들에 의하여 관리 및 설비의 확장이 이루어지고 있다. Table 1은 수도권에 도시가스를 공급하는 도시가스사의 현황을 나타낸다. 이들 도시가스 배관은 인구밀집지역을 통과하기 때문에 누출사고는 대형 참사를 불러온다는 것은 아현동과 대구의 가스폭발사고가 잘 입증하고 있다. 최근 몇년간의 대형사고들로 인하여 공기지연 등의 계획변경으로 정확한 배관라인의 길이를 아는 것

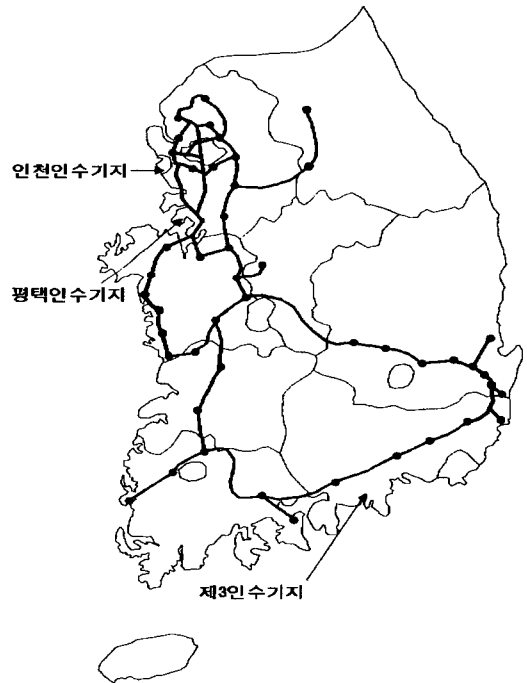


Fig. 5. 가스공사 전국 주배관망

은 쉽지 않지만, 매년 지속적으로 확장해 가고 있다.

2.2.3. 한국지역난방공사

수도권의 대규모 아파트 단지의 효율적인 난방을 위하여 복합 에너지 시설인 열병합발전이 시작되었다. 한국지역난방공사는 열배관을 통하여 난방용 에너지를 각 가정에 공급하는 회사이다. 열배관은 지난 10년 동안 매년 꾸준히 확장 설치되어 현재 총 1260km에 이르고 있다. 설치후 오랜 기간이 지난 배관에 대해서 1994년 11월 열배관 유지보수 지침을 만들어 시행하고 있다³⁾. 서울 및 수도권의 열배관의 설치 현황은 Table 2와 같다.

Table 1. 도시가스회사 현황(수도권)

회사명	도시가스 공급지역
강남 도시가스(주)	(서울) 구로구, 양천구 일부
극동도시가스(주)	(서울) 중, 중랑, 성동, 동대문구, 종로, 용산, 서대문, 성북구 일부 (경기) 구리시
대한도시가스(주)	(서울) 송파, 강동, 강남구, 서초구 일부 (경기) 과천, 성남, 하남시
(주)삼 천 리	(인천) 중, 동, 남구, 남동구 일부 (경기) 안양, 수원, 광명, 부천, 안산, 시흥, 의왕, 군포, 평택, 송탄시, 용인, 화성군 일부
서울도시가스(주)	(서울) 강서, 영등포, 동작, 마포, 관악, 은평구, 종로, 용산, 서대문, 서초, 양천구 일부
인천도시가스(주)	(인천) 북, 서구, 남동구 일부 (경기) 김포군 일부
한 일 개 발(주)	(서울) 도봉, 노원구, 성북구 일부 (경기) 의정부시 일부

2.2.4. 대한송유관 공사

송유관은 정유공장에서 생산된 유류를 소비지까지 빠르고 안전하게 수송하는 배관라인이다. 1968년 미 8군이 포항에서 서울까지 건설한 송유관이 우리나라 장거리 송유관의 시작으로 매년 지속적으로 확장하여 왔다. 보다 안전하고 저렴한 석유 수송 체계

Table 2. 서울 및 수도권의 열배관의 설치 현황

지 점	열배관 (km×2열)	맨홀(개소)	누수감지선 (개소)	열공급 (개시년도)
중앙	70	507	159	1987
강남	85	489	187	1991
분당	166	940	551	1991
안양	122	736	326	1991
고양	136	660	430	1992
부천	50	380	166	1991
계	629	3,712	1,819	

구축을 위해 정부에서 3차에 걸쳐 타당성을 조사하여, 제 5차 경제개발 5개년 계획 수정시에 송유관 건설 계획을 수립하여 현재에 이르고 있다. 주요 배관라인으로는 '90. 12~'92. 12의 2년여에 걸쳐 건설된 인천에서 고양시와 김포공항을 잇는 55km의 경인 송유관 라인, '91. 12~'95. 3의 기간에 걸쳐 건설된 여천과 온산에서 수도권 남부의 성남까지 이어지는 900km의 남북 송유관 라인이 있다. 한편 수도권 남부 저유소에서 영종도 신공항에 이르는 72km와, 인천에서 수도권 남부 저유소에 이르는 44km를 신규로 건설할 계획이다. Fig. 6은 전국의 송유관 설치 현황을 나타낸다.

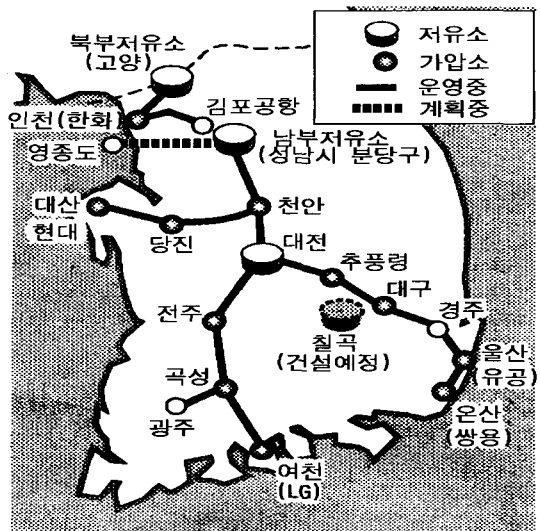


Fig. 6. 전국 송유관 현황도

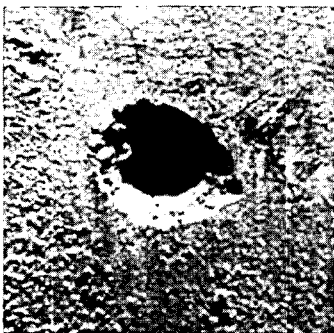
3. 배관 파손의 원인

구조물의 파손(failure)은 대개 결함으로부터 비롯된다. 배관에 발생할 수 있는 결함은 부식, 침식, 박리 등이 있는데 대표적인 결함의 모습을 Fig. 7에 나타내었으며 Table 3에 배관 파손을 초래하는 결

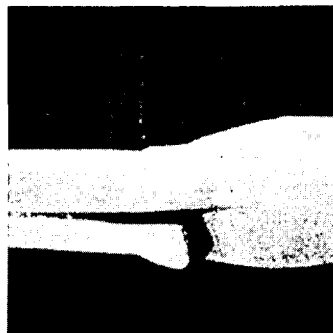
함의 종류들을 수록하였다⁴⁾. 결함들은 크게 사용전 시험(preservice test)에서 파손을 가져오는 결함과 사용 중에 파손을 가져오는 결함들로 나눌 수가 있다. 사용전시험에서 이미 존재하고 있는 결함들은 시험 압력이 충분히 높으면 시험에 의해 검출 가능하므로 제거할 수가 있다.

Table 3. 배관 파손의 원인이 되는 결함들

Cause of preservice test failure	Cause of service failure
Defect in the pipe body - Mechanical damage - Fatigue cracks - Material defects Longitudinal weld defects - Submerged arc welds Weld area cracks Incomplete fusion Porosity Slag inclusion Inclusion at skelp edge Off seam Repair welds Incomplete penetration - Electric welds Upturned fiber cracks Weld-line inclusion Cold weld Excessive trim Contact burns Field weld defects	Defect in the pipe body - Mechanical damage - Environmental causes Corrosion(external or internal) Hydrogen-stress cracking External stress-corrosion cracking Internal sulfide-stress cracking Hydrogen blistering - Fatigue - Miscellaneous causes Secondary loads Weldments to pipe surface Wrinkle bends Internal combustion Sabotage Longitudinal weld defects - High hardness region



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. 배관에 발생하는 대표적인 결함. (a) 외벽 부식(pitting), (b) lamination, ending in longitudinal seam (c) 내벽 부식(channeling)

Table 3에서 볼 수 있듯이 압력시험에서 파괴의 원인이 되는 결함은 발생 위치에 따라 세 종류로 나눌 수가 있는데, 배관의 몸체에서 발생한 결함, 종방향 용접부에 존재하는 결함, 그리고 현장 거스(girth) 용접부에 존재하는 결함으로 나눌 수가 있다.

3.1. 사용전 수압시험에서 파괴의 원인

3.1.1. 배관 몸체에 발생하는 결함의 원인

이 경우 크게 기계적 손상과 피로 균열, 그리고 재료 자체의 결함으로 나눌 수가 있다. 먼저 기계적 손상은 선적시에 굴착 장비 등의 취급 장비에 의해 일어날 수 있으며 주로 찌그러짐(gouge, ovality) 혹은 찍힘(dent) 등이 이에 속한다. 재료 자체의 결함에 속하는 것으로는 층간박리, 겹침, 심, 홀, 고온균열 등이 있다. 이러한 결함들은 배관의 두께를 국부적으로 감소시키거나 완전히 관통되는 결과를 초래하는데 사용 전시험에서 검출 가능하다. 피로균열은 주로 배관의 모재와 종방향 용접부의 인접 지역에서 주로 발생한다. 피로균열이 모재에서 발견되는 경우도 있는데, 이는 배관의 선적과 운반 과정에서 기계적 손상을 입은 부위가 운반 과정에서 정하중과 차량의 진동에 의한 수직 방향의 반복 하중을 받아서 생긴 경우일 수도 있다. 미국에서는 배관의 운반을 위한 선적시에 API의 권고 조항을 적용하고 있으며 이의 적용으로 파손율을 상당히 줄였다고 보고하고 있다.

3.1.2. 종방향 용접부에서 파손의 원인

배관의 용접부는 주로 다-단극 잠호(submerged arc)용접, 전기저항용접, 노내 맞대기용접, 접치기용접에 의해 이뤄지고 있으며 현재 다극잠호용접과 전기저항용접을 가장 많이 사용하고 있다. 국내에서 생산되는 배관의 경우 90%가 전기저항용접에 의한 것이며 세계적으로는 오일 및 가스 수송용 배관에는 일본에서 생산되는 심레스 배관이 많이 사용되고 있다.

다-단극 잠호용접부는 용접균열, 토우균열, 용입부족이 파손의 일반적인 원인으로 알려져 있다. 균열은 용착 금속과 열영향부에서 생길 수 있으며 용착 금속의 가운데에서 주로 생기는 균열은 주상 조직에 평행하며 이들은 대개 용착 금속이 고화되는 동안 고응력 혹은 구속응력에 의해 발생하게 된다. 열영향

부에서의 균열은 대개 용접부 덧살의 가장자리에서 나타나기 때문에 토우균열이라 불리운다. 용입불량 역시 주요한 결함중의 하나이다. 이로 말미암아 배관의 실질적인 두께가 줄어드는 결과가 된다.

전기저항용접부 파손의 일반적인 원인으로 상향 섬유균열, 냉간용접, 불완전가압 등이 있다. 이 용접법은 단조(forging)온도까지 냉각처리된 강판의 용접될 부위를 국부적으로 가열하고 두께부를 가압시켜 접합이 이뤄지도록 한다. 가압전에 황화망간과 같은 개재물이 존재하면 가압 과정에 의해 균열이 발생하게 되어 상향섬유균열이 생긴다. 전기저항 용접에 의한 용접부의 경우는 모서리에 흠을 만들어 용접기를 통과하면서 만들어진다.

접치기용접부는 오버랩된 판의 모서리 사이를 단조하여 만들어 진다. 이 경우 파손의 원인이 될 수 있는 용접부 결함은 접합부에 존재하는 산화물과 지나치게 낮은 온도와 낮은 가압 압력에 의한 용융 부족이다. 이러한 결함들은 용접부의 두께를 실질적으로 감소시키는 효과를 가져온다.

3.1.3. 현장 거스 용접부의 파손 원인

상대적으로 이 부위에 걸리는 내부 압력이 낮으므로 파괴율은 낮은 것으로 보고되고 있다. 수동에 의한 금속아크용접에 의해 생길 수 있는 결함들은 용입부족, 얇은 비드, 기공, 용접부 균열, 비드하 균열 등이며 이들로 인해 용접부의 누설, 파괴가 일어난다. 이 중에서 비드하 균열은 열영향부가 급격하게 냉각되어 경화 부위가 생길 때 발생한다. 경화된 부위는 두께가 다른 두 배관을 용접할 때도 발생하며 혹은 적절한 예열없이 두께의 치수를 맞추는 과정에서도 발생한다. 이 경우 배관의 내면에도 용접 비드를 만들어 완전한 용접이 되도록 해야 한다. 그러나 구조적으로 이러한 작업이 곤란하여 내부까지 예열이 이뤄지기가 매우 어렵다. 이런 상황에서 열영향부가 급냉으로 인해 마르텐사이트 조직으로 변하게 된다. 따라서 수소응력균열에 의한 균열이 발생하기 쉬우며 비드하 균열은 이렇게 해서 발생된다.

3.2. 사용중 파손의 원인

3.2.1. 기계적인 손상

먼저, 몸체의 경우 기계적 손상이 사용중파손의

주요 원인이다. 이는 배관에 우연하게 닿게 되는 굴착 장비 등에 의한 것이며 따라서 배관 표면에 찍힘과 흠이 생기게 된다. 파손이 일어나고 난 뒤에 폭발 원인이 되었던 찍힘을 찾아내는 것은 거의 불가능하다. 기계적 손상이 배관을 관통시켜 즉각적인 누설을 가져오기도 하지만 찍힌 영역이 고온·고압에 의한 크리프로 계속 변형이 일어나 향후 잠재적 파손의 위험을 내포하게 된다. 대개 흠은 비교적 얇아 보이지만 구속응력에 의해 균열을 유발할 수도 있다. 기계적 손상에 의한 파손은 미세조직적 관점에서 보면 대부분 입계면을 가로질러 일어나는 입내(transgranular) 파괴라고 알려져 있다. 그러나 수소응력균열에 의한, 입계면을 따라서 파괴가 일어나는 입계(intergranular) 파괴에 의한 것도 보고되었다. 기계적 손상을 입은 부위의 파손엔 여러 원인이 있을 수 있으며 손상을 입는 순간에 일어날 수도 있다. 가능한 원인으로서는 손상 부위의 변형에 의한 균열 발생, 배관에 작용하는 압력 유동에 의한 저주기 고응력에 의한 피로 파괴, 음극 방식(cathodic protection)관련의 수소응력균열등이 있다.

따라서 기계적 손상을 입은 부분이 발견되면 잘라내거나 슬리브를 입혀 보강 처리를 해야 한다. 슬리브에 의한 보강 처리를 할 경우에는 슬리브와 파이프 사이의 틈을 에폭시나 폴리에스테르와 같은 것으로 채워넣어 손상 부위가 더 이상 변형되지 않도록 하여야 한다.

3.2.2. 환경적 원인에 의한 배관 파손

주요한 원인으로 일반부식(general corrosion), 경화된 부위에서의 수소응력균열, 배관 외면에서의 응력부식균열(SCC), 배관 내면에서의 설피응력균열, 그리고 수소 부풀음 등이 있다. 파손은 크게 배관의 내면에서 일어나는 것과 바깥에서 일어나는 것, 두 가지로 나눌 수가 있다. 대개 내면에서 시작되어 파손이 되는 것은 수분, 황화수소, 이산화탄소 혹은 다른 부식매질을 지닌 환경에 연관되어 있다. 내면에서 시작되어 파손이 일어나는 것은 내부 부식, 설피응력균열, 그리고 수소 부풀음에 관련이 있다.

수소응력균열은 고강도, 고경도의 강이 배관에 작용하는 압력에 의해 후프인장응력을 받는 조건에서 음극방식용 전류에 의한 수소와의 결합에 의해 발생한다. 파단된 표면의 특징으로, 극미세한 입도(grain)

를 지닌 취성의 파단면을 볼 수 있고 파괴의 시작이 대개 배관의 외부나 표면직하에서 일어난다. 수소응력균열이 의심되면 경도 시험으로 확인할 수 있다. API, grade X52, steel의 경우 30 - 50 HRC의 경도이면 파손의 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 이렇게 높은 경도를 지니는 부위는 금속 조직이 열간 압연 과정에서 담금질에 의해 베이나이트에서 마르텐사이트로 상변태가 일어나거나 혹은 합금 편석에 의해 일어난다. 여태껏 이 기구에 의한 파손이 일어난 배관의 경도는 30 HRC가 넘는 것으로 알려져 있다. 따라서 경도 측정으로 위험을 예측할 수 있다. 응력부식균열에 의한 파괴는 가스 배관의 경우 수송라인에서 가압소에 인접한, 온도가 가장 높은 배관에서 자주 발생한다. 배관의 외면에서 시작되어 일련의 타원형의 모양을 하고 있는 균열이 특징이다. 금속조직적으로는 입계파괴이며, 2차 파괴가 가지를 치고 나가면서 이뤄진다. 배관에서 SCC의 주요 원인으로 탄산-중탄산 환경이 될 수 있다. 이 역시 음극방식과 연관이 있는 것으로 알려져 있다. 배관의 온도를 가능한 한 낮추는 것이 균열을 억제한다고 알려져 있으며, 또한 슛 피이닝에 의한 밀 스케일을 없애 코팅처리가 잘 되면 억제 효과를 볼 수 있다.

지하 매설 배관에서 부식에 의한 파손은 거의 토양과 연관되어 있고, 미주(stray) 전류에 의한 전식이 주요 원인이 되고 있다. 매설 배관의 경우 조성이 다른 흙에 의한 갈바닉 부식이 일어날 수 있다. 즉 전해질의 역할을 하게 되는 상이한 토양에 의해 동일 배관의 갈바닉 포텐셜이 토양에 의해 지역적으로 달라지는데 이는 미소하게 일어날 수도 있고 대규모로 일어날 수도 있다. 배관을 덮고 있는 토양이 동일하더라도 토양내의 산소 농도(aeration)의 차이에 의해 부식이 일어난다. 흔히 이를 농담 전지(concentration cell)에 의한 부식 활동이라고 하는데 산소 농도가 낮은 부위가 양극이 되어 부식이 된다. 다음으로 탄소강 배관과 상이한 재료의 밸브 등과 같이 상이한 재료가 접촉하게 되면 역시 갈바닉 부식의 원리에 의해 아주 가혹한 부식이 진행하게 된다. 이 경우 배관의 재료보다 이산화 경향이 큰 재료들, 예를 들면 배관의 재료가 탄소강이면 마그네슘 합금이나 알루미늄 합금과 같은 재료들을 희생양극으로 사용하면 방식이 가능하다. 한편, 재료가 동일한 배관일지라도 전해질과 접촉하고 있는 배관의 표면 상태에 따라 갈바닉 준위(potential)가 달라진다. 즉, 깨끗한 표면

의 배관과 녹이 슨 표면의 배관이 서로 접촉하게 되면 갈바닉 포텐셜의 차이로 말미암아 깨끗한 새 배관이 상대적으로 양극이 되어 부식이 일어나게 된다. 토양에 존재하는 박테리아들도 부식에 직·간접적으로 영향을 미친다. 먼저 공기없이도 살 수 있는 혐기성 박테리아의 경우 황산염을 환원시키는 역할을 하는데 이로 인해 음극방식을 어렵게 만드는 것으로 알려져 있다. 그리고 공기가 있는 곳에서만 존재하는 박테리아의 경우 산소를 취하고 황화물을 황산과 같은 황산염으로 산화시키는데 이에 의해 농도가 10%에 이를 수도 있다. 이 경우 배관에 아주 치명적인 부식을 가져오게 된다.

미주 전류 부식은 흔히 전식이라고도 불리우는데 토양에 흐르는, 의도한 회로를 벗어난 전류 혹은 외부에서 들어온 전류가 배관을 타고 흐르다가 다시 토양 및 물로 나가는 배관의 부위에서 부식을 발생시키게 된다. 일반적으로 토양에 자연적으로 존재하는 미주 전류는 그 크기가 적으며 체류 기간도 짧기 때문에 부식성의 관점에서 보면 별로 중요하지 않다. 또한 교류보다는 직류에 의한 부식이 더 심하며 주파수가 낮을수록 부식 속도가 빠르다. 미주 전류가 발생하는 곳은 주로 전철레도, 전기 용접기계, 음극방식계, 전기도금 공장 및 땅 속에 묻혀 있는 동력선 등이다.

4. 배관에 대한 비파괴검사방법

비파괴검사법, 혹은 비파괴시험법이라고 불리워지는 것은 소재, 또는 부품에 존재할 가능성이 있는 결함, 재질의 이상 또는 열처리 이상 등을 파괴하지 않고 조사하는 방법이다. 비파괴시험법은 압연품, 단조품, 주조 등의 소재 및 기계 부품, 용접부 등의 검사에 널리 쓰인다. 비파괴시험에서는 그 목적 달성을 위해서, 각종 물리적 에너지 혹은 현상이 이용된다. 즉, 전자파(X선, 감마선, 자외선, 가시 광선, 적외선, 마이크로파) 중성자선, 기계적 진동(진동, 음향, 초음파), 자기, 열, 전기 등 거의 대부분의 물리적 에너지 및 전자유도, 침투, 누설 등의 물리적 현상이 이용된다. 비파괴시험에서는 검사 목적에 따라 한가지 혹은 몇가지 방법이 함께 사용된다. 가장 대표적인 것으로 방사선투과검사(radiographic test), 초음파검사(ultrasonic test), 자분탐상검사(magnetic particle test), 액체침투탐상검사(liquid penetrant test), 와전류

탐상검사(eddy current test) 등이 있고 이 외에 누설시험, 음향방출시험과 열적시험 등이 있다. 이들 대부분이 배관에 적용할 수 있는 검사 방법들이다.

이러한 방법들은 배관재의 사용 환경이나 조건에 따라 적용 코드의 기준이 각각 다르며, 비파괴검사에 관련있는 주요 코드들은 대략 다음과 같다.

- 고압가스안전관리법
- 도시가스사업법
- 액화석유가스안전 및 사업관리법
- 에너지이용합리화법
- 전기사업법
- 소방법
- 산업안전관리법
- 집단에너지사업법
- 한국선급협회규칙
- 한국산업규격

위에서 예를 든 적용 코드들에 따라 검사 기준이나 평가가 달라지나 대부분의 코드가 유사한 내용이 많다.

4.1. 방사선투과검사

이 시험법은 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 시험법이다. 배관 생산 공장에서 갓 생산된 배관의 품질검사에서부터 배관 건설 현장에서의 용접부위의 검사에 이르기까지 가장 폭넓게 적용하고 있다⁵⁶⁾. 이는 시험재 내부의 결함을 주변 재질과의 밀도 차이에 의해 확인하는 시험법이다. 그러나 결함의 형태에 따라 검출이 곤란한 것도 있다. 즉 방사선 빔에 평행하지 않은 균열은 검출하기가 어려운데 적절한 방향이라고 해도 두꺼운 시험체 내에 밀착균열(tight crack)의 경우 전혀 검출되지 않을 수 있다. 마이크로 기공(microprospity), 마이크로 터짐(microfissure) 등의 미세불연속도 때때로 검출되지 않으며 라미네이션은 방향성으로 인해 거의 검출할 수 없다. 반면에 용입부족, 블로우 홀이나 개재물, 보이드 등 그 크기가 단면 두께에 비해 현저히 작지 않은 경우 쉽게 검출할 수 있다. 방사선투과검사는 크게 필름 RT와 실시간 RT로 둘로 나눌 수 있다. 그리고 방사선투과검사에 관련된 KS 코드를 소개하면 다음과 같다.

- KS B 0845 (강용접부의 방사선투과시험방법 및 투과사진의 등급분류방법)

- KS D 0242 (알루미늄 용접부의 방사선투과시험방법 및 투과사진의 등급분류방법)
- KS D 0237 (스테인레스강 용접부의 방사선투과시험방법 및 투과사진의 등급분류 방법)
- KS D 0243 (알루미늄관의 원주용접부 방사선투과 시험방법)

4.1.1. 필름 RT

필름 RT는 전통적인 방사선투과검사법으로 X-ray 혹은 동위원소와 필름을 사용하여 촬영된 필름을 현상처리하여 시험 결과를 판독하는 것으로 현재 현장에서 가장 많이 사용되고 있다. 즉 균일한 강도의 방사선을 물체에 조사하고, 그 대상체의 후방에 필름을 놓으면 내부의 결함에 의해 X선 및 γ 선의 흡수에 차가 생겨서 필름에 상이 비친다. 이 때 조사하는 방사선의 에너지 및 그 분포 상태에 의해 투과선량에 변화를 가져온다. 따라서 검사해야 할 재료의 종류 및 두께에 따라 방사선의 에너지 및 종류를 바꾸어야 한다. 그러나 필름의 종류에 따라서도 방사선에 대한 감도가 다르며, 필름의 감도를 올리기 위해서 사용하는 증감지의 종류에 따라서도 다르다. 또 한편 감도가 커질수록 필름의 해상력이 저하하므로 사용하는 목적에 따라 선원의 종류, 에너지, 필름 및 증감지를 선택해야 한다. 한편 로봇에 방사선원을 장착하여 원거리 제어 및 자체 센서에 의해 거리를 이동하여 검사 부위를 자동촬영하는 시스템이 있다. 그러나 이 시스템은 필름 부착의 문제 때문에 지상으로 노출된 배관에만 적용할 수 있다.

4.1.2. 실시간 RT

실시간 RT는 방사선을 감지하는데 필름 대신에 형광스크린을 사용하여, 실시간으로 조사되고 있는 시험체의 방사선 영상을 실시간으로 관찰할 수 있다. 이 시험법들은 강관 등의 대규모 자동생산라인에서 생산된 배관의 품질 검사에 적용하고 있다.

4.1.3. Radiography를 이용한 배관 두께 측정

부식(corrosion)이나 침식(erosion)에 의한 배관의 잔존 두께 측정에는 대개 초음파를 이용한 두께측정기

(thickness gage)를 많이 사용하고 있으나 배관이 보온재로 입혀진 경우에는 시험할 때마다 보온재를 제거해야 할 뿐더러 시험 적용이 매우 제한된 영역에 국한되므로 실질적인 배관의 보수 관리가 어려운 점이 많다. 따라서 산업체에서는 방사선투과검사를 이용하여 설비 가동중에 보온재를 제거하지 않고 비교적 넓은 영역에 걸쳐 배관의 잔존 두께를 측정하고 있다. 이러한 방사선투과검사법에는 필름에 맺힌 상의 농도를 읽어 두께를 계산해 방법과 두께 측정용 대비시편을 이용하거나 배관의 외경을 이용하여 비례식으로 배관의 잔존 두께를 결정하는 Tangential RT가 있다⁷⁾.

4.2. 초음파시험

초음파시험은 방사선투과시험과 더불어 내부의 결함을 찾는 데 아주 효과적인 시험법이다. 가장 많이 사용되는 펄스반사법의 경우, 시험체에 입사한 초음파가 불연속부에서 반사되어 되돌아오는 초음파 에코에 의해 불연속부의 위치나 깊이 등을 알 수 있다⁸⁾. 초음파로 탐상 가능한 결함의 종류는 균열, 개재물, 라미네이션 등의 소재 고유의 불연속에서부터, 기공, 가공 중 불연속 및 피로균열과 같은 사용 중 불연속에 이르기까지 대부분의 결함들이 검출 가능하다. 단점으로는 표면 직하의 얇은 결함은 검출이 어렵고, 내부 조직의 입도가 크고, 기포가 많은 부품 등은 탐상이 곤란하다. 시험 결과의 표시 방법으로 분류되는 A-scan은 시간에 대한 증폭을 나타내는 표시 방법으로, 재료의 불연속부의 깊이와 대략적인 크기를 알 수 있다. B-scan은 시험체의 단면을 표시하는 방법으로, 시험체안의 불연속부의 깊이와 길이를 알 수 있다. C-scan은 X-ray 사진과 비슷하게 나타나는 평면 표시 방법으로, 불연속부의 윤곽을 알 수 있다. 최근 이 C-scan에 의한 시험 결과의 영상화 처리로 검사 결과에 대한 신뢰도를 높이고 있다. 많이 적용되는 초음파시험 관련 KS 코드로는 KS B 0896 (강용접부의 초음파탐상시험방법 및 시험 결과의 등급 분류방법) 등이 있다.

한편 배관의 부식 잔존 두께 측정에 종파를 이용한 두께측정기를 많이 적용하고 있다. 초음파 두께 측정기에 의한 배관의 두께 측정은 산업현장에서 현재 가장 간편하고 간단한 방법으로 광범위하게 사용되고 있다. 이 방법은 초음파 원리에 의하여 배관의 실제 두께나 열화에 의하여 감소되고 남은 잔존두께

를 정성적으로 나타내주는 정도이다. 그러나, 배관에 대한 최소허용 두께 관련 코드(ANSI 31.3) 및 엔지니어링사의 설계 데이터 등을 고려하여 배관의 건전성 및 열화정도를 상당히 정량적으로 평가할 수 있다. 이를 위해서는 배관재의 실제 두께를 측정하여, 부식 여유, 가공 오차, 최소 두께, 인장강도와 허용 응력 등을 고려하여야 한다.

4.3. 자분탐상검사

철강 재료와 같은 강자성체, 즉 자석이 붙는 재료는 자계에 의해 강하게 자화되고 비자성 재료에 비해 수십배 내지 수천배의 자속을 낳는다. 자기탐상 시험은 강자성체의 시험체를 자화시켰을 때 표면 또는 표면 직하에 결함이 있으면 거기에서 자속선의 흐름이 혼란되고 표면에 누설자속이 보이게 되는 원리를 이용한 방법이다. 이것을 검지하여 표면 및 표면 직하의 결함을 검출할 수가 있다. 따라서 표면에 있는 길이 1 mm의 균열을 확실하게 검출할 수 있다⁹⁾. 그러므로 강의 표면결함 검출용으로 많이 이용하지만 검출한 결함의 깊이는 알 수가 없는 단점이 있다. 대부분의 배관 재료가 탄소강이므로 이 시험법의 적용이 가능하다. 관련 KS 코드로 KS D 0213(철강재료의 자분탐상시험방법 및 결함 자분 모양의 등급분류) 등이 있다.

4.4. 액체침투탐상검사

침투탐상시험은 시험체 표면에 열려있는 결함을 눈으로 보기 쉽게 하기 위해 붉은색의 염색침투액, 또는 황록색으로 발광하는 형광침투액에 의해 결함 지시 모양을 나타내는 방법이다¹⁰⁾. 이 시험법은 표면이 열린 결함에만 적용할 수 있으며 표면 결함 검출 능력은 자분탐상시험보다 다소 뒤지지만 금속, 비금속을 불문하고 표면결함을 검출할 수 있는 것이 큰 특징이다. 검출할 수 있는 결함의 최소 크기는 길이 1mm, 깊이 20 μ m, 폭 1 μ m 정도이다. 관련 KS 코드로는 KS B 0816(침투탐상시험 및 결함지시 모양의 등급 분류) 등이 있다.

4.5. 와전류시험법

와전류시험법은 도체에 와전류를 발생시켜 재료의

여러가지 특성을 검사하는 방법으로 시험 원리는 전자기 유도에 의한 것이다¹¹⁾. 이 시험법은 철강, 비철 금속 등의 전도체에 적용할 수 있으며 유리, 플라스틱 등의 전기적 부도체에는 적용할 수 없다. 이 시험법으로 결함의 검출 뿐만 아니라 금속의 합금 성분과 열처리 상태 및 도체 위의 코팅 두께 등도 검사 가능하다. 특히 이 시험법은 원자력발전소의 증기발생기의 튜브검사와 석유화학공장 등의 열교환기, 혹은 콘덴서 등의 튜브검사에 많이 사용되며 자동화된 튜브 및 배관 생산 공장에서 갓 생산된 제품들의 품질검사에 많이 이용되고 있다. 그러나 유도 전자기파의 침투력 한계로 표면 및 표면직하의 결함 검출에 제한된다. 따라서 두께가 두꺼운 배관의 경우는 검사가 곤란하다. 관련 KS 코드로는 KS D 0251(강관의 와류탐상검사방법) 등이 있다.

4.6. 표면복제법(Replication)

이 시험법은 설비 재료의 미세조직(metallurgical microstructure)을 설비로부터 잘라내지 않고 비파괴적으로 관찰할 수 있는 시험법이다^{12,13)}. 60년대부터 진행된 공업화에 따라 건설된 발전소나 석유화학 플랜트 등은 노후화되어 설비들의 잔여 수명과 상태 진단에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 이러한 설비 및 구조물들의 파괴 원인은 재료 열화가 동반된 피로파괴가 주요 원인이 되고 있으며, 열화가 진행될수록 재료는 조직의 조대화, 탄화물 석출, 그리고 불순물의 입계 편석 등과 같은 미세조직의 변화가 일어나며 재료의 기계적 성질은 떨어지게 된다. 따라서 이 시험법에 의해 재료 열화 평가가 가능하지만 재료 표면의 정보에 제한되는 단점이 있다.

4.7. 육안검사

보강덧붙임(reinforcement of weld), 언더컷(under-cut), 균열, 아아크 스트라이크(arc-strike), 지그(jig)의 흔적, 오우버랩(overlap), 피트(pit), 비이드(bead)형상, 슬래그(slug), 스파터(spatter) 등에 대해 코드 기준에 맞는지를 대상으로 한다.

4.8. 누출 관리 시스템

송유관을 비롯한 가스관, 수도관 등 각종 지하 매

설물에 대한 철저한 관리가 요구되고 있는 가운데, 누출 방지를 위한 관리시스템 및 검출 장비의 개발·도입이 필요하게 되었으며 현재 사용되고 있는 방법들을 몇가지 예로 들면 다음과 같다¹⁴⁾.

질소 모니터링 시스템(nitrogen monitoring system)은 배관 내에 고압의 질소 가스를 충전하고 압력을 측정하는 방법으로 배관에서 누출이 발생하면 압력이 떨어진다. 간단히 누출 여부를 판별할 수는 있지만 검사하는 동안에 모든 밸브를 잠가야 하므로 주유소와 같은 작은 단위의 배관망을 진단하는데에 사용될 수 있다.

컴퓨터 관리시스템을 이용하여 배관라인 전 구간의 압력, 유량, 온도변화는 물론 누유방지 및 누유구간 자동 차단 등의 관리가 24시간 동안 이루어지고 있으며, 누출이 발생할 경우, 이에 대한 정확한 위치 파악도 가능하다.

지하 매설물 관리시스템은 배관내의 케이블에 센서를 연결, 중앙제어를 가능하도록하여 배관내에 누수 및 누액이 발생될 경우, 모니터를 통한 위치파악은 물론 유체흐름을 자동으로 차단시키는 기능을 갖추고 있어 각종 송유관 및 저장탱크, 반도체 업체내의 배관로 등의 탐지에 이용되고 있다.

지난 85년부터 일본 코스모스社의 누출탐지시스템을 국내에 공급해오고 있는 우진계기의 컴퓨터 모니터 시스템은 배관내에 검지기를 설치하여 이와 연결된 그래픽 보드와 경보램프 등을 통해 종합감지를 가능하게 하고 있다. 그동안 주로 가스 배관쪽에 주력해 온 동사는 향후 액체류의 배관 관리에도 동 시스템을 공급할 예정이다. (다음호에 계속)

참고 문헌

- 1) "매설배관, 파지 않고 진단할 수 있을까? 국내 매설 배관의 현황 및 문제점," 배관기술 11월, (1996) pp. 88-90.
- 2) "화학 플랜트의 장수명화와 메인テナンス," 화학장치 11월, (1996) pp. 37-55.
- 3) "열배관 유지 보수," 한국지역난방공사 10년사, (1995) pp. 337-338.

- 4) "Failure Analysis and Prevention", Metal Handbook, 9th Edition, Vol. 11, pp. 697, Am. Soc. Metals, (1986)
- 5) T. F. Perrone, "Principles of Radiographic Film Interpretation of Pipeline Welds," J. Am. Soc. Nondestr. Test., Vol. 50, pp. 1268-1273, (1992)
- 6) R. P. Krolicki, "Gamma-Radiographic of high-Temperature and Corroded Objects," Mater. Eval., Vol. 43, pp. 1008-1012
- 7) W. S. Burkle, "Applications of the Tangential Radiographic Technique for Evaluating Pipe System Erosion Corrosion," Mater. Eval., Vol. 47, pp. 1184 -1188, (1989)
- 8) J. Krautkrämer and H Krautkrämer, "Ultrasonic Testing of Materials," Springer-Verlag, Berlin (1990)
- 9) "Standard Practice for Liquid Penetrant Inspection Method," ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. V, pp. 455-472, (1995)
- 10) "Magnetic Particle Examination," ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. V, pp. 151-156, (1995)
- 11) H. L. Libby, "Introduction to electromagnetic Nondestructive Testing," R. E. Krieger Publishing Co., Huntington, NY (1971)
- 12) N. L. Loh, "Nondestructive Replica Metallography," Br. J. NDT, Vol. 31, pp. 437 (1989)
- 13) G. Kerzner, I. Sprung and V. Zilberstein, "Field Metallography for Life Extension Studies of High-Temperature Components," Mater. Eval., Vol. 47, pp. 1008-1018 (1989)
- 14) "누설탐지기술, 어디까지 왔나? 매설배관 누설탐지기술 및 업체현황," 배관기술 11월, (1996) pp. 91-95.