

가스배관의 건전성 평가

장재일, 김우식, 권동일

1. 서론

높은 효율을 가진 청정에너지로서의 장점 때문에 액화천연가스(이하 LNG : liquefied natural gas)의 사용은 세계적으로 꾸준히 증가하는 추세이며, 특히 국내에서는 최근 그 사용량이 폭증하고 있다. 이에 따른 결과로서 국내에서도 상당량의 천연가스 배관이 지하에 매설되어 있고, 그 길이는 매년 큰 폭으로 증가하고 있다. 이러한 배관은 배관건설공사 및 공사후 유지, 보수 관리시 배관의 파괴와 관련된 여러 가지 상황이 존재할 수 있다. 즉, 외부에서 작용하는 다양한 요인이나 배관 내부요인에 의해 배관이 완전한 파단까지는 이르지 않더라도 누설 등의 손상을 받는 경우가 생긴다. 배관에 손상이 발생하였을 때에는 그 원인을 규명하고 처리방안을 마련하는 작업이 필요하다. 본고에서는 가스배관의 실질적인 손상사례를 분석하고 현재 국내외에서 수행되고 있는 건전성 관련 기술을 소개하는 한편 장래 국내에서 요구되는 건전성

확보 방안을 제시하고자 한다.

2. 배관손상 사례분석(1-4)

국내에서 발생한 가스사고의 실태를 종합분석한 데이터는 유사사고 방지대책을 강구하고 안전관리를 강화하여 사고예방은 물론 직원교육 자료로 활용코자 한국가스공사에서 1995년에 발간한 자료가 있다. 이 자료에 기초한 가스종류별 사고발생 건수를 다음의 표 1에 나타내었다. 그러나 이러한 국내 가스사고 자료는 천연가스 배관 뿐만 아니라 LPG(액화 석유가스), 일반가스관련 여러 설비들과 가스수용가정(아파트, 단독주택포함)의 사고 데이터까지 망라되어 있는 광범위한 자료로서 외국자료에 비하여 원인규명에서 부족한 면이 많이 있고, 피상적인 사고개요만이 있어 건전성 평가자료로서의 활용이 어렵다. 또한 국내의 가스배관의 경우 매설된지 얼마 안된 상태여서 손상사례가 드물어 매설배관에 대한 손상사례 자료의 체계적인 수집 및



장 재일



김 우식*



권 동일

서울대학교 재료공학부
한국 가스 공사 연구개발원*

Table 1. Number of incidents due to gases by year in Korea.
(* Korea Gas Corporation)

Year	LPG (including LPG/Air)	Natural gas		Other gas	Total	Remarks
		City gas	KOGAS*			
1987	10	1		3	14	Other gas : Oxygen, Chlorine, Acetylene, Hydrogen, Ammonia, Carbonic acid gas
1988	14	1		1	16	
1989	18	3		2	23	
1990	48	10		6	64	
1991	69	18		4	91	
1992	89	11		3	103	
1993	76	13	1	7	97	
1994	96	28	2	10	136	
Total	420	85	3	36	544	
%	77.2	15.6	0.6	6.6	100	

분석이 아직 이루어지지 못하는 점도 있다. 이에 본고에서는 매설배관의 사용이 오래전부터 이루어져 왔고 손상사례의 원인에 대한 통계적인 분석이 비교적 잘 이루어진 미국의 가스배관 사례를 중점적으로 활용하였다.

1970년 2월, 미국 운수성산하의 배관안전사무국(OPSS-the Office of Pipeline Safety)은 미국내의 모든 가스공급회사들에게 “보고해야 할” 사고에 관하여, 사고발생시 20일 이내에 RSPA F7100.2양식으로 보고서를 제출해야할 것을 규정하였다. 1984년 7월, 이러한 규정은 20일이 30일로 바뀌고, 양식도 더욱 정리되어 개정되었는데 이때 개정된 “보고해야 할” 사고의 정의는 다음과 같다.

- 1) 배관으로부터의 가스 누설, 혹은 LNG 설비로부터의 LNG나 가스의 누설
 - 사망 또는 병원치료를 요하는 부상
 - 가스 손실을 포함하여 \$50,000이상의 재물손상
- 2) LNG설비의 비상중단을 가져오는 사건

3) 상기한 1), 2)의 조건이 아니더라도 조작자가 심각하다고 판단되는 경우

우선 개정되기 전인 1970년부터 1984년까지의 사례에서 밝혀진 현상사고와 시험시 사고의 원인을 분류하면 다음 표 2와 같다. 표에서 알 수 있듯이 실제 상황에서는 외부충돌(굴착)등의 외력이 주요원인이지만 시험상황에서는 이러

한 외력이 별로 중요하지 않으므로 배관의 결함과 부식이 주요 원인임을 알 수 있다.

개정된 사례보고는 분류를 지상과 해양으로 구분하였는데, 1984년 7월부터 1990년까지의 “보고해야 할” 사고를 원인별로 분류하면 다음의 표 3과 같다. 역시 이 기간에서도 가장 큰 원인은 “외력”이지만 해양설비 배관의 경우에는 부식이 더욱 중요한 원인으로 부각되고 있음을 알 수 있는데, 이는 상대적으로 외부로부터의 충격이 가해지는 경우가 줄어들었기 때문이라 생각된다.

한편, 유럽(British Gas, N.V.Distrigaz, Gas

Table 2. Number and percentage distribution of incidents by cause.
(1970~1984.6. in U.S.A.)

Cause	In service		In test	
	Number	Percentage	Number	Percentage
Outside forces	3,144	53.5	50	2.5
Material defects	990	16.9	1,489	73.0
Corrosion	972	16.6	285	14.2
Other	437	7.4	25	1.2
Construction Defects	284	4.8	173	8.6
Construction or material	45	0.8	11	0.5
Total	5,872	100.0	2,013	100.0

Table 3. Number and percentage distribution of incidents by cause.
(1984.7.~1990 in U.S.A.)

Cause	Onshore		Offshore	
	Number	Percentage	Number	Percentage
Outside forces	214	40	28	33
Material defects	53	10	8	9
Corrosion	115	21	38	45
Other	123	23	5	6
Construction Defects	31	6	6	7
Total	536	100	85	100

de France, N.V.Nederlandse Gasunie, Ruhrgas, SNAM 등 6개 유럽가스회사의 기록 종합)에서의 손상기록 데이터는 미국과는 약간 다르다. 외력에 의한 손상이 56.7%로 가장 많은 것은 유사하며(미국은 40%), 부식이 16.4%로 미국의 21%보다 적었는데, 이는 유럽에서 새로운 배관 건설 및 코팅적용이 많았기 때문이다. 미국의 손상사례에 대하여 각각의 원인들을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

외력에 의한 사고

1970년부터 1984년까지 기간에서 현장사고의 원인을 자세하게 분류하면, 굴착기, 불도저 등의 작업에 의한 외부충돌(67.1%), 침하와 강에 의한 흐름 등을 포함하는 지층의 이동(13.3%), 날씨(열변형, 태풍 등-10.8%), 배관 조작자에 의한 작동실수 및 사보타지 등의 고의 실수(7.3%), 기타(1.5%) 등으로 나눌 수 있다. 이러한 분류별 통계에서 볼 수 있듯이 사람에 의한 실수나 계산착오가 전체 외력에 의한 사고의 74.4%나 되는데 이는 충분히 예방이 가능한 사고이다. 즉, 이러한 요인들이 배관이나 운용·유지절차의 결합을 의미하는 것은 아니고, 인적잘못, 배관위치에 대한 부적절한 정보, 잘못된 판단, 잘못된 계산에 의한 것이다. 흥미로운 자료는 매설깊이에 따른 손상분석인데 29%가 지상배관, 13%가 매설깊이 6~12인치, 17%가 12~24인치, 41%가

24~60인치 이상으로 나타나 배관의 깊은 매설이 외력에 의한 사고에 상당한 예방효과가 있지는 않음을 알 수 있다.

1984년부터 1990년까지 기간에서도 외력에 의한 사고는 역시 전술한 원인과 거의 비슷한 요인들에 의하여 손상이 일어났는데,

주요 원인별 사고 빈도는 해마다 거의 비슷하며, 사고 발생 숫자도 비슷하였는데, 이는 배관노후화와 배관유지기술의 향상이 함께 작용한 것으로 판단된다. 각 요인별로는 환경이 쿨수룩 사고가 일어날 가능성은 적었으며, 인적손상을 유발하는 사고는 외부 충돌과 기타가 81%로 대다수를 차지하고 있었고, 재료와 부분품의 사고 유형에서는 손상의 59%가 배관본체이고 전체의 87%가 철강에서 발생하였고, 사고발생 위치별로는 배관본체가 59%로 주된 장소이었다. 전체의 84.6%가 회사나 외부계약자에 의해 운용된 건설장비에 의한 손상이었다. 이중 51%는 작업을 인지시킨 표식된 배관에서 발생하였고 이 가운데 99%가 건설장비에 의한 손상이고 1%가 지진에 의한 손상이었다. 또한 작업을 인지시키지 않고 표식이 안된 배관에서 발생한 49%의 사고중 83%가 건설장비에 의한 손상이었다. 즉 외력에 의한 손상의 대부분이 건설장비에 의한 손상이었다. 손상중 dent는 배관의 기하학적 형태를 변화시켜 고응력과 응력집중영역을 생성시키며, gouge는 강재를 냉간변형시켜 균열생성에 대한 저항을 저하시킨다.

부식에 의한 사고

부식에 의한 원인을 분석해 보면 1970년에서 1984년까지의 자료에서는 40%가 외부부식, 27%가 내부부식, 17%가 응력부식손상이었다.

또한 전체의 50%가 1939년 이전에 매설된 배관에서 발생하였다. 부식은 공식(pitting)이 내부, 외부부식의 주된 요인이었으며 부식의 76%가 양극방식배관에서 발생된 것도 공식이 한 원인이다.

1984년부터 1990년까지의 기간에서도 부식의 64%가 외부부식으로 가장 비율이 높았고, 이 중에서 88%가 공급배관에서 발생하였으며, 내부부식의 72%가 공급배관에서 발생하였다. 외부부식은 공식이나 큰 영역에서의 일반 부식에 의한 것이 89.9%로 대다수이었고, 나머지는 박테리아 부식 1.4%, 응력부식 5.8%, 기타 2.9%이었다. 또한 내부부식도 50% 이상이 공식이나 일반 부식이었다. 부식손상의 76%가 코팅된 배관에서 발생하였는데, 이는 코팅배관이 외부부식에 민감하기보다는 코팅배관의 수가 훨씬 많기 때문이다. 외부부식은 양극방식으로 보호되며, 응력부식은 배관코팅이 불완전한 부위에서 표면에 습기가 축적되면 발생할 수 있으며 균열의 입계 파괴를 유발시킨다. 상기한 기간내에 전체 사고를 파단, 누설 등 사고의 형태로서 분류할 때 62%가 파단사고이고 특히 사망, 부상사고의 79%가 파단사고이다. 상기기간내 육상배관의 전체사고의 21%이지만 파단사고의 36%를 유발시키고 있다는 것은 부식의 위험성을 상기시키고 있다. 이에 방식코팅, 음극방식체제, 예방유지기술등이 발달했지만 내외부부식이 발생될 여건이 광범위하여 완벽한 예방은 힘든 실정이다.

재료 결함 및 건설결함에 의한 사고

표 2에서 볼 수 있듯이 1970년부터 1984년까지의 재료결함 및 건설결함에 의한 사고는 현장사고와 시험사고에서 각각 21.7%와 81.6%로 높은 비중을 차지하였다. 재료결함은 길이방향의 심용접부에서 28%로 가장 많이 일어났고, 건설결함은 원주용접부에서 57%로 가장 많이 사고를 유발하였다. 이로부터 용접부가 균열발생의

중요한 위치임을 확인할 수 있고, 상대적으로 재료결함이 건설결함에 비하여 4배이상의 사고를 유발하였다.

1984년부터 1984년까지의 재료결함 및 건설결함에 의한 사고는 표 3에 나타낸바와 같이 육상사고와 해양사고에서 각각 16%씩을 차지하였는데 육상사고에서 결함발생위치를 부위별로 살펴보면 건설결함에서는 용접부가 가장 높은 결함 발생지역이었고, 다음이 배관본체였으며, 재료결함으로는 배관본체가 가장 높고 다음이 용접부, fitting 순으로 발생빈도가 높았다.

기타원인에 의한 사고

표 2와 표 3의 비교에서 알 수 있듯이 1970년부터 1984년까지의 기간에 비하여 1984년부터 1990년까지의 기간에 상대적으로 기타원인에 의한 비율이 증가하였는데 이는 보고항목의 변경등에도 영향을 받았다고 할 수 있지만 다른 중요원인들이 기술의 발달과 안전개념의 확산에 힘입어 상대적으로 줄었기 때문이라 판단된다. 그런데 이러한 기타원인에 의한 사고는 인명사고의 큰 부분을 차지하므로 역시 각각에 대한 세심한 노력이 요구된다. 기타항목을 구성하는 가장 큰 요인은 화재이고, 다음은 기계적 부분(커플링, 피팅, 플랜지, 가스켓)과 조작자 실수이다. 기타항목중 예를 들면, 고압송전선 아래에 blowdown stack가 위치하여 blow시 점화되어 송전계통이 손실된 경우가 있으며, 배관건설 직후 가압시험중 손상이 생긴 경우도 있다. 그 구체적인 분류를 표 4에 나타내었다.

앞에서 살펴보았듯이 손상사례의 주요원인은 외력에 의한 힘과 부식, 건설 및 재료의 결함의 세 가지로 크게 나눌 수 있다. 이 중에서 외력에 의한 힘은 일종의 인적 요인에 의한 예방가능한 실수가 대부분이므로, 본고에서는 건설 및 재료의 결함에 의한 손상과 부식에 의한 손상에 대한 진단기술을 주로 다루었다.

Table 4. Subdivision of other category incidents in U.S.A. gas pipelines.
(1984~1990)

Subdivision Cause	Number of Incidents	Property Total, \$1000	Number of Injures	Number of Fatalities
Branch Connection	1	160.0	0	0
Compressor Station	4	1726.0	0	0
Compressor Station-Fire	9	1019.0	4	1
Fire	25	3006.0	22	4
Rupture Due to Line Freeze	2	8.2	0	0
Girth Weld	3	195.1	0	0
Mechanical Component	14	1180.2	8	1
Operator Judgement Error	11	50.6	13	2
Pig Trap / Sphere Receiver	3	0.0	1	0
Regulator Measurement station	4	240.0	2	0
Sabotage	1	0.0	0	0
Valve	6	723.4	0	0
Unknown	5	433.6	1	2
Total	88	7933.5	43	9

3. 각종 결함 탐지 및 부식손상 진단에 대한 비파괴적 시험기술

검사 중에 재료, 부품, 구조물 등의 종류 여부를 막론하고, 시험체의 형상 혹은 기능에 변화를 주는 일없이 결함을 검출하거나, 품질이나 형상을 조사하는 것을 비파괴시험이라 한다. 가스 배관을 포함하여 용접구조물의 건전성 진단을 위해서는 일반적으로 다음과 같은 항목이 조사되어야 한다. 첫째가 사용구조재료의 강도와 판두께, 변형 정도의 추정이 가능하여야 하고, 둘째가 결함의 종류, 치수, 위치 등을 구체적으로 탐지하여야 한다. 이중에서도 앞 절에서 다룬바와 같이 가스배관에서 비파괴시험을 통하여 주로 측정되어야 할 주요 목적은 결함의 검출이다. 이러한 결함의 검출을 위한 비파괴시험법은 결함의 종류에 따라 내부결함시험법과 표면결함시험법으로 나눌 수 있다.

한편, 이러한 일반적인 비파괴 검사기술이 부식 진단에도 이용이 가능하지만, 설비의 제작시 또는 정지시의 시험만 가능하다. 하지만 가스배관과 같은 지하의 매설배관의 부식을 살펴보면 토양에 의한 부식이나 토양 중의 미생물에 의한 부식, 미주전류(stay current)에 의한 부식 등이 지속적으로 진행되게 된다. 그러므로 기존의 비파괴 시험법을 이용해서는 설비의 운전중에는 운용이 불가능하며 지속적인 검사를 행할 수 없

고, 매설배관의 경우에는 땅을 모두 제거하여야 실험이 가능하므로 적절한 진단 및 감시를 행할 수가 없다. 이에 이러한 배관의 부식진단 및 감시를 위해서 새로운 비파괴시험법들이 개발되었다. 본 절에서는 이러한 각종 결함 탐지 및 부식손상 진단에 관한 비파괴적 시험법들을 소개하였다.

3-1. 내부결함 검출을 위한 비파괴 시험(5-8)

방사선 투과 시험(Radiographic Testing, RT)

에너지가 높을수록 물질을 투과하는 능력이 뛰어난 방사선의 성질을 이용하여, 검사대상에 방사선을 조사하면 투과후에 방사선의 강도가 달라지며 이러한 방사선 강도의 변화를 관찰함으로써 결함의 상태를 감지할 수 있다. 방사선의 선원(source)로는 X-선을 이용하는 경우가 가장 많고 다음이 감마선이며 베타선, 중성자선, 알파선 등도 이용이 가능하다. 이 방사선 투과

시험은 깊숙한 결함의 검출에 유용하게 사용될 수 있으며 또, 결함의 종류, 형상의 판별력도 뛰어나다. 그러나 lamination이나 경사가 있는 균열 등은 검출할 수 없다.

초음파 탐상 시험(Ultrasonic Testing, UT)

초음파 탐상시험은 고주파수의 음파를 주사하여 재료의 표면이나 표면하의 결함을 검출하는 방법이다. 음파는 재료의 내부를 통과하거나 계면에서 반사하게 되는데 이 반사하는 신호를 분석하여 결함 여부를 판단하게 된다. 이때 탐지하는 요인을 살펴보면 재료계면이나 불연속물의 계면에서 반사되는 음파, 음파가 탐촉자에 들어가는 시간과 나오는 시간차이의 측정, 시험시편으로 인한 음파의 흡수와 산란에 의한 음파의 약해짐 현상, 전송되거나 반사된 신호의 스펙트랄 응답의 형태 등이 있다. 균열 등의 면상 결함의 검출은 방사선 투과시험보다 낫다. 그러나 균열면에 초음파가 가능한 한 수직이 되도록 하는 탐상조건을 선정할 필요가 있다. 표면직하에 존재하는 결함의 검출은 힘들고, 매우 작거나 얇고 불균질한 물질에 대해서는 조사가 힘들다는 단점이 있다.

3-2. 표면 결함 검출을 위한 비파괴 시험(5-8)

육안 시험(Visual Testing, VT)

이는 육안 또는 확대경, 망원경을 통하여 관찰하는 직접법과 거울, Boroscope 등을 이용한 간접법으로 나눌수 있는데, 이들 모두 균열, 오버랩, 피트 등의 유무 확인이나 언더컷, 차이 등의 치수측정에 이용된다.

자분 탐상시험(Magnetic Particle Testing, MT)

이는 강재 배관의 자화성질에 의존하게 되는

데, 보통 결함이 있는 부분은 자장의 방향에 횡 방향으로 나타나는 자화의 불연속부분이 나타나게 된다. 이러한 누설장(leakage field)은 아주 미세한 강자성의 자분을 이용하여 찾아내게 되는데, 그 원리는 자분들이 누설장에 모이기 때문이다. 자분이 모이는 상태를 살펴보면 결함의 형태나 위치, 크기, 형상 그리고 결함의 정도를 알아낼 수 있다. 이 시험은 표면 및 표면 직하의 결함검출에 널리 사용된다. 하지만 오스테나이트 계열의 스테인레스관과 같이 강자성체가 아닌 경우에는 당연히 사용할 수 없다.

액체 침투 탐상 시험(Liquid Penetrant Testing, PT)

이 시험은 기공이 없는 재료의 표면에 있는 개구결함(균열)을 탐지해 내는 방법으로, 침투액은 모세관 현상을 이용하여 미세한 표면 개구결함 속으로 침투해 들어간다. 이 후 침투액이 흡속에 잘 들어가면 표면에 부착된 침투액만을 물 또는 세정액을 이용하여 제거한다. 다음에 백색의 미분말 현상제를 표면에 바르거나 spray하면 흡속에 잔류하고 있는 침투액은 현상제에 의하여 빨려나와 표면에 널리 퍼져서 황록색의 형광 또는 적색의 지시 모양을 만든다. 이 지시모양은 자외선에 의하여 강한 형광을 발하는데 또는 자연광 밑에서 적색을 내든가 하여 식별하기 쉽다. 이것을 관찰함으로써 미세한 흡도 관찰이 가능한 것이다. 이러한 원리 때문에 이 방법은 표면 crack, laps, porosity, shrinkage 등의 결함을 찾는 데 매우 유용하다. 하지만, 이 방법의 가장 큰 단점은 시험의 특성상 표면에 있는 개구결함만을 검출할 수 있다는 점이다.

와전류 탐상 시험(Eddy Current Testing, ECT)

이 시험은 전도성 배관에 와전류를 발생시켜 와전류의 변화를 측정하여 탐상시험, 재질시험,

형상 치수 시험 등을 하는 방법이다. 즉, 와전류의 경로에 결함이 존재한다면 결함에 의하여 와전류가 변하게 되어 이를 측정함으로써 결함을 알아낼 수가 있다. 이러한 원리에 의하여 코일을 일정한 속도로 이동시킬 때 와전류의 변화과정으로부터 결함의 종류, 현상, 크기에 관한 정보를 구해낼 수 있다. 도체 표층부의 탐상을 비접촉으로 행하므로 시험속도가 매우 빨라서 배관재의 자동탐상에 효과적으로 사용된다. 하지만, 형상이 단순해야 적용할 수 있고, 표면 밑 깊은 위치에 있는 결함을 검출하기가 어렵다는 단점이 있다.

3-3. 피그 시험법 (9-11) (Pig Technique)

피그(pig)란 용어는 일반적으로 배관 내부를 이동할 수 있는 모든 장비를 지칭하고 이러한 장비를 사용하는 피깅(pigging)은 피그가 배관 내부로 들어가서 발생할 수 있는 여러 문제-배관내부의 물질이동을 방해하거나 운전조건을 방해하는 것 등-를 고려하여야 하므로 조심스럽게 다루어야 한다.

피그를 사용하는 시기는 크게 배관의 건설시와 배관 작동시의 두 가지로 나눌 수 있는데 전자의 경우 파편제거와 계측 등의 배관조건 최적화가 주요역할이고, 후자는 부식방지와 배관의 부산물 청소, 눈금 조정 등이 주요역할이다. 각각에 사용되는 피그는 다음과 같다.

우선 핀 휠 피그(Pin wheel pig)는 배관벽의 경한 산화막 부스러기를 제거하도록 설계되어 있다. 배관벽을 누르는 단단한 WC(tungsten carbide) 팁을 가진 핀을 이용하게 되는데, 이 핀에 의해 분쇄된 산화막 부스러기들은 배관내로 떨어지게 되어 이를 후속가동하는 일반적인 정화 피그(cleaning pig)를 사용하여 제거한다.

브러쉬 피그(brush pig)는 특수한 비금속 브러쉬를 이용하는 것으로 배관의 가벼운 청소에 이용한다. 이는 침전물이 정제된 연료를 사용가능한 수준 이상으로 오염시킬 가능성이 있는 경우에 적합하다. 자기 정화 피그(magnetic cleaning pig)는 탐지기에 손상을 주고 탐지 중에 센서에 영향을 미칠수 있는 철계 파편들(강자성 파편)등을 탐지전에 제거하기 위한 피그이다. 자기 정화 피그는 강한 자기장체를 사용하여 자화된 파편을 제거한다. 두 개의 피그가 같이 연결될 수 있으며 이는 단일 피그의 사용보다 두 배 이상의 효과를 가지게 되어 요구되는 청소횟수를 줄일 수 있다. 한편, 배관의 파편은 정화 피그앞에 축적될 수 있으며, 이는 최악의 경우 피그의 작동을 멈추게 할 수도 있다. 이때는 압력 보조관 피그(pressure bypass pigs)를 사용하여야 하는데 이 피그는 독자적인 사용외에 이러한 멈춘 피그를 회수하는데 이용할 수 있고 이는 내부 완화 밸브를 가지고 있는데 필요한 구동 압력이 요구될 때 열리게 되어있다. 결과로서 생성물은 피그를 통해 분사하고 쌓인 파편을 제거하며 피그의 운동을 계속 할 수 있게된다. 마지막으로 방식 스프레이 피그(inhibitor spray pig)는 부식으로부터 배관을 보호하기 위하여 배관을 코팅하는데 사용되는데 3개의 모듈로 이루어져 있고 하나는 스프레이 작업을 수행하고 나머지 둘은 방식액을 위한 저장탱크 기능을 수행하게 된다.

한편, 배관 내부의 dent나 buckle 뿐만 아니라 공식이나 균열을 알아낼 수 있는 요구가 커짐에 따라 지능화 피그(intelligent pig, IP)의 개발이 이루어지고 있는데 부식상태를 감시하는데 있어 가장 신뢰성있는 방법으로 주목되고 있다. 지능화 피그에는 자속 누설 피그, 초음파 피그(ultrasonic pig), 비디오 카메라 피그(video camera pig), 중성자 분산 피그(neutron scatter pig), 곡률 측정 피그(curvature detection pig)

등이 있다. 그 중에서 자속 누설(MFL-magnetic flow leakage) 피그기술은 가장 선도적인 기술이다. 이는 배관벽의 강력한 자화에 의존하는 방법이다. 배관에서 금속 손상이 일어나면 이러한 금속 손상은 배관벽의 자속이동능력을 감소시킨다. 결과적으로 어떠한 자속누설이 일어나면 탐지기에 있는 센서로서 감지될 수 있다. 이러한 MFL의 장점으로는 가스, 액체, 복합상의 배관에 모두 잘 사용될 수 있고 청소후 배관에 종종 남아 있는 파편과 먼지의 적당한 양에 대해 잘 대처할 수 있다. 예로 MFL은 피팅의 바닥에 축적될 수 있는 부식의 부산물에 의해 장애를 받지 않는다. 또, MFL은 금속 손실을 측정하는데 있어 우수한 기술이며 벽두께의 수%까지의 결함형상에 대해서도 반응하고, 상대적으로 높은 탐지속도로 작동할 수 있다. 이 MFL 탐사의 대상은 부식의 다양한 형태와 금속 손실의 조사인데, 배관에서의 일반적인 부식과 공식, 원주용접부와 심용접부, 나선용접부에서의 금속 손실, dent와 관련한 금속 손실, casing아래의 금속 손실, 계측, 제조결함의 탐지 등이 모두 가능하다.

3-4. 음향 방출법 (12-13) (acoustic emission method, AE)

음향방출이란 재료가 균열의 성장이나 소성 변형 등의 결함에 관계하여 방출하는 응력과 (stress wave)로서 이를 이용한 음향방출법은 압력을 수반하는 시스템에서 시스템을 보증하며, 결함을 찾아내는데 사용하는 기술이다. 이 방법은 적은 비용으로 결함을 찾아내고 해석할 수 있는 장점이 있으며 운전중의 배관에 대하여 주기적으로 누설을 검사하는데 적합하다. 결함과 그 위치를 찾아내기 위해서 사용하는 매체는 가스나 액체가 흐를 때 발생하는 음향 노이즈를

이용하게 되는데 이러한 노이즈는 재료의 균열 등 각종 누설에 반드시 수반되게 된다. 이 음향 방출은 배관 자체를 통해서 전파되거나 파이프 내의 물질을 통해서 전파되는데 이 전파되는 음향을 파이프라인에 접촉해 있는 시스템 탐지 장치가 감지하도록 되어있다. 음향방출법은 탐지기를 표면에 단단히 부착하여 지속적으로 검사에 이용할 수 있으며, 이동식 장치로 주기적으로 검사에 이용할 수도 있다. 탐지된 신호는 일반적인 유체나 기체의 흐름으로 생기는 노이즈와 비교하여 처리한다.

이러한 음향방출법은 다른 비파괴검사 방법과 두 가지면에서 크게 다르다. 첫째 음향방출법에서 사용하는 신호는 검사재료 자체에서 나오는 신호를 이용하는 점이다. 다른 비파괴검사 방법에서는 외부에너지원이 반드시 있다. 둘째 다른 비파괴검사 방법들은 단지 기하학적인 불연속 결함만을 탐지해 내는 반면 음향방출법은 재료의 거동을 탐지해낸다는 점이다. 음향방출법의 가장 큰 장점은 결함을 탐지하기 위해 구조물을 일일이 주사(scan)할 필요없이 단 한번의 응력을 가함으로써 구조물 전체에 대해 탐지할 수 있다는 것이다. 단, 이때에 음향 신호를 감지할 수 있는 센서를 1-6m 간격으로 설치해 주어야 한다. 이러한 장점으로 해서 큰 구조물의 탐사에는 다른 비파괴검사 방법보다 매우 유용하다고 할 수 있다. 또한 평가목적도 각종 용접·접합부의 각종 결함, 누출과 구멍 등의 검사, 부식과정, 교체/액체의 상변태 등의 검사 등으로 다양하다.

3-5. 배관 부식상태의 감시 및 평가법(14-15)

부식상태의 상시 감시를 위해서는 음극방식 감시 시스템(Cathodic Protection Monitoring

System, CPM)의 사용이 효과적이다. 금속의 부식은 금속표면에서의 전해질을 통하여 전류가 유출할 때 일어나는 현상이므로 금속표면의 수분이나 토양을 통하여 직류전류(방식전류)를 금속표면에 유입시켜 금속표면에서의 유출전류를 소멸시키면 부식은 방지되는데 이를 이용한 것이 음극방식이다. 음극방식 감시 시스템이란 수시로 배관의 여러 위치에서 음극방식 전위를 측정하여 제대로 음극방식이 되고 있는가를 확인하는 시스템으로 이 시스템을 이용함으로써 배관의 운전에 안전성을 기할 수 있고, 주기적으로 부식상태를 확인하는 일을 줄일 수 있으며 기상상태의 변화에 관계없이 측정이 가능하다는 장점이 있다.

한편, 매설배관의 부식상태를 정량적으로 나타내기 위하여 여러 가지 데이터를 통계적으로 처리하여 부식상태를 추정하는 방법으로 corrosion status index(CSI)라는 개념이 도입되었다. CSI는 1-100까지의 수치를 갖는데 100은 새로 피복시킨 가장 양호한 상태를 나타내고, 1이라는 수치는 사용불능 상태를 나타낸다. CSI는 부식도(저항, pH 등)에 대한 정보를 얻음으로서 계산이 가능하다. 또한 CSI는 예측할 수도 있는데 이렇게 하면 매설배관에 대한 관리를 여러 가지 면에서 유리하게 할 수 있다. CSI는 다음과 같이 정의된다.

$$CSI=100-100(Pav/T)$$

여기서 Pav는 검사배관의 1m 구간에서의 평균 공식깊이이고, T는 관의 두께인데 통계적으로 배관은 CSI=30일 때 최초의 누설이 일어나는 것으로 관찰되었다. CSI는 땅을 파고 직접 공식의 깊이를 측정하거나, 전기 분극화 기술을 이용하는 방법, 수학적 모델을 세워 예측값을 구하는 방법 등의 3가지 방법으로 구할 수 있는데, 이중 땅을 파고 직접 공식의 깊이를 측정하는 방법이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 검

사구간을 전부 파낼 수는 없고 표본 영역을 선별하여 이 방법을 시행한다. 수학적 모델을 이용하는 경우에는 많은 실험 데이터가 수집될수록 정확한 모델이 될 것이므로, CSI를 예상하기 위해서는 토양부식에 있어서 피복부분과 노출부분의 영향, pH와 저항이 배관에 손상을 입히는 시간에 대한 효과, 누출 발생까지의 평균 년수, 평균 공식깊이로부터 최대 공식깊이의 추정, 시간에 따른 공식성장 속도 등에 대한 자세한 데이터가 필요하다.

4. 가스배관 건전성 확보방안 검토(3, 16-18)

4-1. 배관 건전성 확보방안

전술한 바와 같이 다양한 피그사용, 음극방식 감시 시스템, 가스누설탐지 순찰, 수압시험 등 배관의 유지 및 보수기술이 상당히 발달하고 있다. 해양배관 관련사항은 유럽이나 멕시코만 등지의 가스설비에서 필요한 것이므로 본고에서는 생략하였고, 본 절에서는 미국의 사례를 중심으로 배관 건전성확보 방안에 대하여 기술하도록 한다.

천연가스가 미국의 에너지에서 차지하는 비중은 약 30%이다. 가스배관은 생산지와 소비자를 연결하는 가장 효율적인 방법으로 미국에서 생산배관(gathering line)은 약 90,000 마일로서 배관은 강과 플라스틱(100 psi이하)이 사용되고 있고, 공급배관(transmission line)은 약 280,000 마일로서 배관재료로서 주로 강(1400 psi이하)이 사용되며, 분배배관(distribution line)은 약 835,000 마일로서 강과 플라스틱이 약 0.5psi압력에서 사용된다.

매설배관의 수명은 대략 40년으로 2차 대전 전후에 건설된 배관의 경우 대체할 필요가 있

다. 이들 배관은 강도자체가 경년열화되지는 않지만, 2절에서 살펴본 바와 같이 외력에 의한 기계적 손상, 지반이동에 따른 응력, 방식코팅 퇴화, 부식, 결합성장 등은 배관건전성에 상당한 영향을 끼친다. 배관의 매설깊이는 최소 30 인치로서 강재 배관의 경우 X52~X70등급, 배관 직경 6~48 인치, 두께 0.125~1.0 인치이며 배관깊이는 40~80 피트이다. 매설 위치는 1등급(인적이 거의 없는 곳)이 전체의 85%이고 이 경우 shutoff valve가 20 마일 이내에 위치한다. 건설시에 자갈, 바위, 이물질 등이 매설배관 주위에 남아있으면 후에 배관 손상을 유발하므로 주의해야 한다.

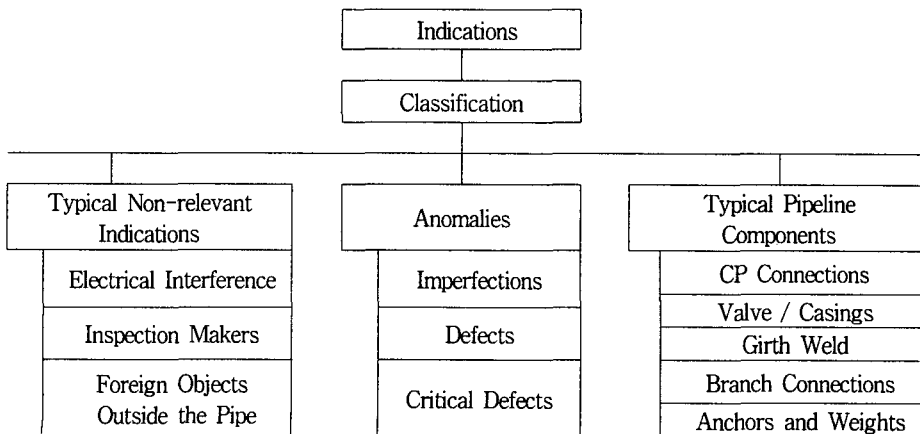
이러한 천연가스 배관의 설계, 건설, 시험, 운용에 관한 규격으로는 미국 운수성에서 제정한 "Pipe line safety regulation Title 49, Code of Federal Regulations, Part 192" 가 있다. 또한 NACE, API, ASTM, ANSI, ASME 등의 규격, 표준 등이 참고되며 각 주나 지방에서 주변 환경을 고려하여 제정한 기준, 표준, 조례 등이 있다. 공급배관의 경우 DOT-RSPA에서 최소허용작동압력(MAOP)를 배관관경, 두께, 강등급, 배관위치(도심지, 산악지대 등)에 따라 결정하며, 강재는 보통 $25,000 \leq SMYS \leq 80,000$ psi급을 사용한다. 예를들어 ANSI/ASME B31.G "손상

배관 잔류강도 결정 매뉴얼" 에는 배관이 부식되었을 경우 부식깊이, 길이에 따라 잔류강도를 평가하며 SMYS를 100% 만족시키지 못하면 보수, 대체, 감압 등의 조치를 취해야 한다.

배관운영자는 부상, 사망, \$50,000이상의 재물손상, 가스누출, 공급중지, 운용자판단으로 배관건전성에 영향을 끼치는 사고에 대해서 DOT-RSPA, OPS에 즉시 보고해야 한다. 2절에서 상술한 1984년~1990년 사고데이터를 보면 연평균 83건 사고가 발생하여 20명이 부상하였다. 그리고, 이 기간중 총 26명이 사고로 사망하였는데, 그 원인은 외부작용 힘, 건설 및 재료결합, 배관손상, 설비화재, 기계부분품 파손, 압축기, 밸브, 정압기 등의 순이다. 이는 다른 운송 산업에 비하면 극히 작은 규모지만 배관운영자의 노력, 안전보장 체계 향상, 감시기능 향상 등으로 모든 사망, 부상사고를 없애는 것이 목표로 안전관리를 수행해야 한다.

배관보수나 대체는 안전성뿐만아니라 경제성도 고려되어야 한다. 예를 들어 30인치, 500~750MMcfd(milliom cubic feet/day)배관의 경우 운송물량가치가 100만달러/일(1992년 기준)이고, 16인치 배관 대체비용은 25만~50만달러/마일이며 30인치 배관 대체비용은 60만~300만달러/마일(1991년 기준)이다. 즉 효율적인 방재프로그램

Table 5. Classification of Pipeline Indications.



은 대체시 소요되는 비용을 감소시킬 수 있다.

표 5에 배관의 불완전한 상태를 나타내는 배관손상의 분류를 나타내었다. 이 표에서 인지(Indications)는 배관에 대한 검색, 측정, 시험의 결과로서 특정기준을 넘어서 응답이 나온 것을 말한다. 특이점(Anomalies)이란 배관의 내부, 외부 또는 두께에서 생긴 어떤 불합리한 상태를 말하는 것으로 다시 3가지로 구분된다. 불완전(Imperfections)이란 이중 가장 낮은 등급으로 가스압에 의한 배관의 원주응력이 배관 SMYS의 100%이상일 때 파괴가 일어나는 상황으로 이 상태는 배관을 보수하거나 대체할 필요는 없고 계속 감시를 하면 된다. 결함은 다음 등급으로 배관파괴가 SMYS이하의 원주응력에서 발생하는 상황이며 보수를 해야하지만 즉각적인 행동여부는 각자 판단에 따른다. 심각한 결함은 특이점중 가장 심한 경우인데 배관이 MAOP에서 파괴되는 상황으로 배관의 즉각적인 보수나 대체 또는 감압이 필요하다. 이에 대한 상세한 설명은 ASME B31.G에 있다.

배관코팅, 배관재료특성, 건설공정, 수압시험 배관 안전도, 건전성, 장주기 사용성에 대한 보장 및 점검은 고객에 대한 안전보장측면뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 필요한 사항이다. 건전성보장에는 1) 신기술의 조화 2) 예방유지기술의 향상 3) 인지, 분류, 특성평가를 위한 효과적인 수단을 찾기 위한 연구가 필요하다. 이러한 배관 방재기술은 배관에 존재하는 특이성 및 상태의 이해와 특별한 상태를 직면했을 때 유지기술로 이를 해결하는 기술이 필요하다. 즉 배관특이성, 불완전을 검지하는 향상된 방법, ILI(in-line inspection) 피그, MFL 등으로 인지된 특이사항의 분류, 특성평가기술 향상, 초음파, 와전류, ILI로 배관축에서 벗어난 결함 탐지 기술, 여러 가지 ILI 피그사용이 가능한 출발 도착 설비(영구, 임시), 배관 내외부부식 탐지, 위치 및 특성평가기술, 배관파괴에 이르는 사고의 조

기 인지방법 개발 등이 필요하다.

4-2 배관손상 분석기술

가스배관 파손은 인명손상 가능성 때문에 매우 중요하다. 통계적으로 파괴는 배관 1,000마일 당 1년에 1회 꼴로 일어난다. 파손과 예상수단에 대한 연구가 가스업계에서 광범위하게 진행되고 있는데, AGA, AISI, BG 등의 협력하에 배관강재 특성향상, 제조 검사공정, 배관설계 기술 향상 등이 이루어지고 있다.

배관형상은 분석의 기하학적 양상은 단순화시키지만 파손에 따른 외양은 원인을 규정하는데 중요한 특성을 모호하게 하거나 변형시킬 수 있다. 배관 재료에 내재된 탄성변형에너지의 많은 양이 일시에 방출되면 배관은 심하게 변형된다. 이때 가스가 발화되고 배관특성도 변하게 된다. 또한 파손후의 부식이나 실험실설비에서 다루는 과정에서 미세한 규모의 파괴형태가 손실된다. 이러한 어려움을 극복하고 정확하게 원인규명을 하기 위해 많은 분석기술이 적용된다.

· 거시적 관찰 : 파단면을 거시적으로 관찰하는 것이 필요하다. 사용중인 배관의 파단은 안정된 균열성장 영역이나 외력, 부식에 의해 유발된 균열에서 성장한다. 이들의 가장 공통점은 파괴의 개시점에서 위로 평면변형 파단면에 나타나는 chevron패턴이다. 완전한 전단성장 연성 파괴의 예각모서리는 개시점에서 뒤로 톱날모양의 2차 균열을 포함하고 있다. 이 모서리를 따라 흔적(finger)이 앞뒤로 있는 것은 균열이 전파하는 과정에 거칠기 차이 때문이다. 균열의 갈라진 부위는 균열진전 방향을 나타내므로 배관파편을 모으면 파괴 개시점을 규정하는데 도움이 된다.

· 절단 및 세척 : 육안분석으로 정해진 특정 부위가 상세한 파단면 사진과 미세조직 관찰을

위해 배관에서 절단된다. 실험실적 분석을 위해 작은 부위가 절단될 때 파단면이 손상되지 않도록 주의해야 한다. 특히 토치등으로 절단할때는 파단면이 열손상을 받지 않도록 주의해야한다. 균열전파 방향과 관련된 작은 파편의 방향과 배관내부 외부표면은 미세분석시 반드시 표시해야 한다. 배관파편이나 부식생성물을 세척하는데는 연성세제, 솜, 용매, 초음파세척, 표면복제, 화학 또는 전기화학적 에칭등이 사용된다. 이들 중 분석할 특정 파단영역에 적용되는 최소한의 기술만을 사용해야 한다. 세척에 앞서 의미있는 부식생성물등은 조심히 제거해서 분석을 위해 보존해야 한다.

· 미세파단면 조직 : 투과, 주사전자현미경을 사용한 고배율의 파단면 사진은 파괴와 파괴의 원인이나 기구를 관련지우는 중요한 사항이다. 이 과정은 모르는 상태에서 생긴 파괴와 실험실

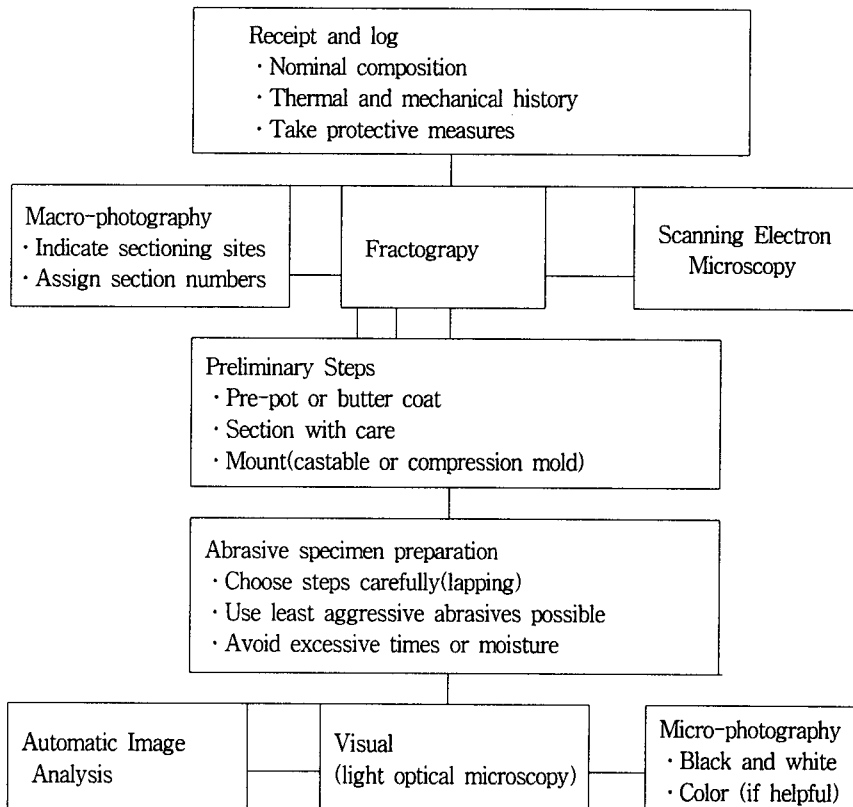
에서 응력, 변형, 변형속도와 주위환경의 조건을 아는 상태의 파단면사진 모음을 비교하는 것도 포함된다. 또한 파단면 사진은 파괴형태, 국부균열전파방향, 균열 진전등의 변화를 알 수 있다.

· 금속조직 분석 : 결정립경계, 개재물, 변태상, 2차상, 외부결함과 관련된 파괴경로는 금속조직 분석으로 알 수 있다. 파괴가 생긴 위치에서 파단면을 절단, 마운팅, 연마하여 파괴형태를 규정하는 사항을 구한다.

· 화학조성과 기계적 특성 : 화학분석과 기계적 시험은 배관이 적절한 등급, 알맞은 표준, 파괴에 이르게 한 어떤 특이점등을 조사하는데 필요하다. 파괴거동의 결정시 인장, 굽힘, 편평도 시험, 충격시험, 균열선단 개구변위시험(CTOD) 등의 기계적 시험이 사용된다.

배관제조, 시험, 검사기술의 향상에도 불구하고 파괴는 생긴다. 이들 파손의 원인을 규명하

Table 6. Work-flow chart / check-off list.



고 예방책을 마련하기 위해 파괴의 여러 형태를 특성화하는 것이 필요하다. 즉 기기나 자료의 도움으로 파괴원인 규명이 가능하다. 표 6에 사고 발생시 원인 규명절차를 나타내었다.

5. 결론

본고에서는 가스배관의 손상사례의 분석과 건전성 평가기술을 소개하였으며, 아울러 가스

배관의 건전성확보를 위한 방안을 검토하였다. 국내에서도 선진국처럼 각종 배관 사고통계 기구가 신설되어 체계적인 배관사고 조사 및 분석을 행할 필요가 있으며, 국내에서 아직까지 미진한 분야인 배관의 건전성 및 안전성관련 연구가 활성화되어 배관사고를 최대한 억제할 수 있는 방안을 도출하기를 기대한다.

참고문헌

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 국내 가스사고 분석결과”, 한국가스공사 자료(1995) 2. Kramer, G.S. et al., “An analysis of reportable incidents for natural gas transmission and gathering lines 1970 through June 1984”, A.G.A. NG-18 Report No. 158(1986) 3. Eiber, R.J. et al., “An analysis of reportable incidents for natural gas transmission and gathering lines June 1984 through 1990”, A.G.A. NG-18 Report No. 200(1992) 4. “Gas Pipeline Incidents”, Pipes and Pipelines International, July-August, 11(1988) 5. “新 非破壞檢査便覽”, 日本非破壞檢査協會編(1992) 6. 이 의중, “NDT 금속기초”, 골드출판사 (1988) 7. “溶接·接合 便覽”, (日本)溶接學會編 (1991) | <ol style="list-style-type: none"> 8. Knorr, E., AGARD Fracture Mechanics Survey AGARD-AG-176(1974) 9. 吉田正人 外, NKK 技報, 130, 43(1990) 10. 本田正春 外, (日本)溶接學會誌, 65, 168(1996) 11. Plazier, K., “Which smart pig do I choose? A comparison of MFL technology from an operators point of view”, Pipeline Rehabilitation Conference, Houston, Sept.(1993) 12. Gopal, Raj, ASTM STP 571, 200(1975) 13. Degertekin, F.L. et al., Appl. Phys. Lett, 64, 1338(1994) 14. Okamoto, K. et al., Material Performance, 15, July(1983) 15. Kumar, A. et al., CERL-TR-M-337(1984) 16. GRI Topical Report, 91/0366(1992) 17. GRI Topical Report, 91/0365(1992) 18. ASME B31.G(1991) |
|---|---|