

## 장거리 가스수송 배관의 배관건전성 확보 대책

이성민\*

### 1. 서 론

국내 천연가스의 가스수송용 배관은 기본적으로 LNG를 근간으로 하고 있기 때문에 수송선으로 도입되는 LNG는 복수의 인수기지로부터 하역된후 기화되어 국내공급을 위해 비교적 지역적 네트워크 특성을 갖는 배관체계를 통하여 공급된다고 할 수 있다. 북방가스전으로부터의 가스수송은 장거리 수송배관을 통하여 이루어지게 될 것이며, 이러한 장거리 가스수송 배관의 건전성 확보를 위해서는 국내배관망 운영경험을 활용하되 장거리 배관이 갖는 특성을 고려한 다양한 부분에서의 기술적인 보완이 필요하게 될 것이다.

특별히 장거리를 여행하는 배관의 상황을 고려할 때, 배관이 매설되는 토양의 특성, 기후 특성 및 운영시 관리한계 등을 고려하여 배관의 건전성을 확보할 수 있는 종합적인 가능한 기술적 수단의 검토가 필요하다.

이러한 과정에는 배관의 부식관리를 위해 기본적으로 적용하고 있는 전기방식(cathodic protection) 기술은 물론이거니와, 운영 및 유지관리시 나타날 수 있는 제반문제점을 사전에 고려하여야 하는데 예를들어 응력부식파손(stress corrosion cracking), 타공사 관리(third party intervention), 및 지반침하에 따른 배관이동(pipeline movement) 등이 설계 단계에서부터 고려될 수 있도록 모든 하드웨어 및 소프트웨어적인 건전성 확보기술 방안을 포함한다. 단 배관재료 및 용접성에 대하여는 별도로 다루므로 여기에서는 포함하지 아니한다.

### 2. 설계 및 시공 수준

배관의 건전성뿐 아니라 모든 설비의 유지관리가 최적으로 이루어지기 위해서는 공통적으로 필요한 것

이 바로 구상 혹은 설계 수준에서의 기술적인 배려라고 할 수 있다. 운영중인 배관에 대해 비파괴 검사기술인 인라인 검사기술을 적용하기 위해 피그입출력설비(pigging launching/receiving station) 시공 및 3DR 밴드 파이프를 채택하는 것이 하나의 좋은 예이며, 전기방식기술을 적용할 때 적절히 방식범위를 한정할 수 있도록 하는 절연조인트(insulation joint) 삽입 같은 것들이 대표적인 예이다.

또한 많은 실제 운영 사례에서 보듯이 설계자의 의도대로 배관의 설치시공작업이 제대로 이루어져 추후 운영과정에서 문제가 발생하지 않도록 하는 것이 중요한데, 작업자나 감독자의 소양 및 기술교육이 포함되어야 할 것으로 보여진다.

#### 2.1. 배관피복(Protective Coating)

국내의 짧은 천연가스역사에 비하여 외국에서는 다양한 형태의 배관의 방식을 위한 피복재의 적용이 이루어지고 있다. 최근의 경향은 공장기법에 의한 주라인 도장방법으로 3층 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 피복 혹은 용융접착에폭시(fusion bonded epoxy: FBE) 등이 사용되며 이러한 피복재는 대개 배관과 피복층과의 접착력을 높인 것이 특징이다(Table 1), 현장에서 용접된 접합부의 피복을 위해서는 열수축재(heat-shrinkable sleeve) 및 콜드테이프(cold tape) 등이 사용되며, 국내에서도 이미 충분한 경험을 갖고 있다. 그러나 최근에는 주라인 도장과 비슷하게 접착력에 주안을 두어

Table 1 폴리에틸렌 피복관에서 피복재의 접착력 및 음극박리저항성

폴리에틸렌 피복공법	접착력(N/50mm) ASTM D 1002	음극박리저항성 (mm)ASTM G 8
1층 분말용착식 피복	110	22
2층 압출식 피복	970	34
3층 FBE/PE 피복	1795	5.7, 4.5

\* 한국가스공사 연구개발원 배관연구센터  
E-mail : smlee@kogas.re.kr

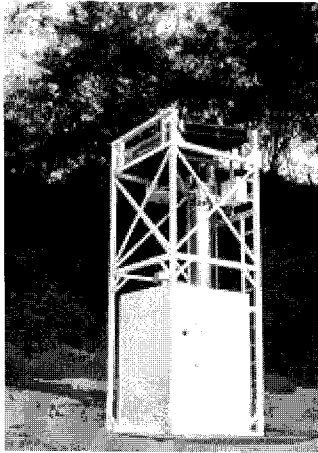


Fig. 1 정류기 전원용 CCVT

폴리우레탄타르 (polyurethane tar)나 용융접착에폭시 수지같은 열경화형 피복재를 사용하기도 하지만, 열수 축재나 콜드타이프를 사용하되 에폭시 프라이머의 도입 등으로 품질을 강화하기도 한다. 그러나 이러한 개선을 위해서는 배관에 대한 표면처리가 블래스팅과 같은 고품질 처리가 선행되어야 한다. 이들 피복재의 선정은 지역적 기후, 매립토양의 성질 및 배관의 운영 온도 등과 함께, 경우에 따라서는 현장용접부 피복재의 적용의 신속성 (speediness), 신뢰성 (reliability) 및 내구성 (durability)을 함께 고려하여야 한다.

## 2.2. 전기방식용 전원 (Cathodic Protection)

일반 정류기의 사용이 불가능한 지역에서 전기방식 전원을 공급해 줄 수 있는 설비로는 경유발전기, 풍력 발전기, 태양전지, 열전발전기 및 폐회로증기터보발전기(closed cycle vapor turbogenerator: CCVT) 등이 활용될 수 있다. 모두가 실용적으로 검증되었다고 할 수 있으나, 유연성과 신뢰성 측면에서 CCVT가 많이 사용되고 있으며, 기본 원리는 Rankine cycle을 활용한 발전시스템이다. 가스배관으로부터 직접 연료를 얻거나, 별도로 저장된 연료(등유, 경유, LNG 또는 LPG)에 의해 구동된다.

## 2.3. 인라인 검사 (In-line inspection)

배관의 관리는 정상시에 일상적으로 방식피복의 건전성 검사 및 전기방식 전원의 이상유무 관리 등으로 이루어진다고 할 수 있다. 반면에 이들 기술적인 노력

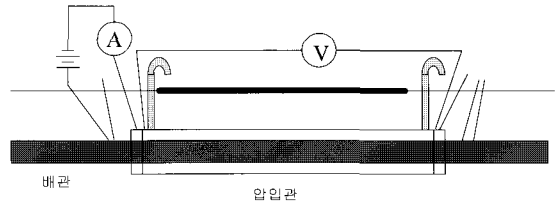


Fig. 2 압입관의 접속

에도 불구하고 피할 수 없는 모재손상의 여부는 인텔리전트 피킹기술로 잘 알려진 인라인 검사기술에 의하여 실시되고 있으며, 각종 비파괴 검사기술이 관내부에서 가능하도록 개발된 혁신기술이다. 즉 모재의 손상을 운영중인 상태에서 단시간내에 즉각적으로 파악할 수 있는 신뢰성을 갖는 기술임에 반하여, 기술적용의 조건이 까다로우며 비용이 수반된다.

이 기술의 적용을 위한 준비단계로서 피킹을 실시할 수 있는 launcher 및 receiver 설치 및 상용의 피크가 통과할 수 있도록 배관의 굴곡도 허용범위를 신중하게 결정하여야 할 필요가 있으며, 이러한 내용들은 이미 설계서에 충분히 반영되어야 한다.

## 2.4. 압입관 케이싱 (Casing)의 사용

배관이 철도 및 도로를 통과해야 하는 경우 하중이 집중되거나 지반의 특성에 따라서 케이싱관을 사용하게 된다. 재질은 주로 강관, 콘크리트 홉관 등이 사용되지만 강관적용시에는 부식방지의 관점에서 본배관과의 접촉 등이 일어나지 않도록 하는 것이 매우 중요하다 (Fig. 2). 최근에는 이러한 문제점 때문에 케이싱관 사용에 대해 신중한 제검토 작업이 이루어지기도 하지만 적절한 시공이 확보된다면 본래의 목적을 달성할 수 있다.

## 2.5. 압축기지 (Compressor Station)

장거리 수송배관의 경우 지역수요가에서 사용량이 많은 경우 이후의 관내 압력이 떨어지게 되는데, 이러한 경우 관말에서의 충분한 압력을 확보하기 위하여 적절한 위치에 가스의 압력을 상승시키는 압축기지의 설치가 필요하다. 한편 압축기지를 거치게 되면 다운스트림쪽은 가압으로 인한 온도의 상승이 초래되며, 이러한 온도의 급작스런 변화는 배관의 안정적인 운영에 상당히 치명적인 요인을 제공하게 된다. 실제 북미지역에서 일어난 배관사고인 응력부식파손 현상의 경우에 이들

압축기지 이후의 배관 10 km 이내에서 대부분이 일어났다는 사실로부터, 이들 지역에서의 특별한 대책이나 관리가 필요하다. 이러한 대책에는 그러한 온도에서 견딜 수 있는 피복재의 사용이나, 배관의 상태를 관찰할 수 있는 각종 센서의 적극적인 활용이 필요하다.

## 2.6. 과도현상 방지 (Surge Suppression System)

특히 압축기지에서는 수천 hp 이상의 펌프를 작동시키기 위하여 또한 수천 kV의 variable frequency drive (VFD)가 사용된다. 실제 현장에서는 대부분 480V 3상의 고전압 운전이 필요하며, 이때 대부분 공조기 (air conditioner) 등을 포함하게 된다. 장거리 위치에 따른 노출된 전력선에는 번개 등에 의한 손상에 가장 민감하며, 특히 폭풍이 잦은 경우 장거리에 걸쳐 문제를 일으킬 수도 있으며, 이는 원하지 않는 가동중단을 가져올 수 있다. 번개 등으로 인한 과도현상(surge)은 UPS, 계장 및 공조기를 포함한 주요설비에 영향을 주게된다. 이러한 사고로 압축운전이 안되는 경우에는 당장 배관의 운송능력 (throughput capacity)을 떨어뜨려 공급중단과 유사한 결과를 초래한다. 이를 방지하기 위하여 압축기에 과도현상 방지설비의 설치는 필수요소가 된다.

## 3. 경상운영 수준

### 3.1. Data Communication Satellite System

배관운영자는 기존의 SCADA 시스템과 같이 배관의 운영을 중앙에서 모니터링하고 통제할 수 있는 운영시스템을 활용하고 있지만, 최근 위성기술의 발달로 배관운영에 관한 정보는 저궤도위성을 통하여 이루어질 수 있다. 이러한 정보전달기법의 특징은 특히 장거리 수송배관에서 볼 수 있듯이 육상 및 해상 감시 등을 중앙통제소에 연결하는 원거리 감시 및 제어시스템에 매우 적합한 내용이다. 이러한 위성통신은 주로 저궤도위성을 사용하게 되는데, 인라인 검사시 검사장비의 추적 및 유량추정 등 가혹한 일기(weather)에도 불구하고 신뢰성있는 데이터의 송수신을 가능하게 한다는 것이 특징이다<sup>(1)</sup>.

### 3.2. 피복손상탐지기술 (Coating Fault Survey)

배관관리에서 가장 보편적이면서 선행적인 (proactive)

관리방법이라면 바로 배관 피복에 대한 손상탐지 기술이다. 이러한 손상탐지 방법에는 CIPS, DCVG와 같은 직류를 사용하는 방법 이외에도 Pearson, Woodberry 법과 같은 교류를 활용하는 방법들이 있다. 최근에 이러한 방법들은 휴대용 컴퓨터 및 PDA 등을 사용하여 적용하고 있는데, 데이터의 해석, 보관 및 교환을 용이하게 한다.

### 3.3. 전기방식 문제해결기술 (Problem Detection for Cathodic Protection)

전기방식상태에 있는 배관에는 내부로 전류가 흐르게 되는데, 이러한 전류의 흐름을 점검하여 전기방식상태의 유효성 내지 양호성을 판별하게 된다. 이러한 전류추적기술로서 pipeline current mapper (PCM)을 사용하면 토양의 간섭(disturbance)현상이 없는 지상에서 배관에 흐르는 전류의 크기와 방향이 쉽게 탐지된다. 이는 4 Hz의 교류를 사용하여 배관에 직접 접촉하는 일이 없이 지상에서 측정될 수 있는 사실을 활용한다. 기존의 clamps on ammeter 방법 및 전압분배를 이용하는 shunt resistor의 활용방법은 배관에 직접 접근해야한다는 제한점이 있는 반면 PCM은 이러한 번잡스러운 것을 고려할 필요가 없다는 장점이 있으나 운영시에 상당한 숙달을 필요로 한다.

### 3.4. 감시체계 (Surveillance System)

#### 3.4.1. Remote CP Monitoring

장거리 배관의 경우 방식전위의 측정은 여러 가지 신호값을 모으는 경우와 마찬가지로 원거리 감시시스템을 적용하게 된다. 측정지점에서의 신호전달은 유무선 형태를 활용하게 되는데, 상업적으로 유용한 방법에는 유선통신, 인터넷 환경의 무선 packet 방식 통신, TRS 방식 통신, 위성통신 등의 다양한 형태가 활용되고 있다.

#### 3.4.2. 가스누출탐지 (Gas Leak Detection)

최근의 누출조사기술은 FIU (flame ionization unit)와 CGI (combustible gas indication)로 구성된 것이 대표적이다. 그러나 FIU는 휴대용이고, 감도가 뛰어나고, 저비용이긴 하나, 누출지점에 바로 근접해야 하는 단점이 있다. 뿐만아니라 차량에 의한 것이라도 노동

력이 집중되는 경향도 있다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 최근 기술로서 OMD (optical methane detector)가 있으며, 이는 methane의 선택적인 적외선 흡수(infrared absorption)기능을 활용한 기술이다. 이는 차량속도 20 mph에서 methane 약 1 ppm이내의 민감도로 측정된다.

### 3.4.3. 타공사 감시 (Intervention Monitoring)

배관주변의 타공사로 인하여 배관에 충격을 가하게 될 때, 이를 탐지할 수 있는 기술들은 전기방식전류의 전류변화탐지법 및 가속도계에 의한 충격진동감지법 등이 있다. 이분야의 기술들은 비교적 최근 개발단계에 있는 것들로서 장거리 배관에 적용실적이 많지는 않으나, 이미 국내에서는 자체기술개발된 진동감지법이 서해권 가스공급배관에 적용되어 선박의 통행이나, 정박 등에 따른 배관에의 충격여부를 감시하고 있다.

## 3.5. 배관관리의 기본체계

### 3.5.1. Risk Management System

위험성에 근거한 검사 (risk based inspection)에서 추구하고 있는 기준을 제시할 수 있는 관리체계로서 위험의 구체적인 구분을 ROF (risk of failure)와 COF (consequence of failure)로 나누고 이들 각각은 또 다시 구체적으로 부식, 타공사, 사용환경, 기계적건전성 등과 인구밀도, 누출크기, 사고유형, 완화조치같은 상세요소로 구분되어 각 인자의 기여도를 추정한다. 정확히 위험성이란 인자는 상기 두 요인의 곱으로 표시되며, 이들 결과를 참고로 하여 배관관리 주체는 배관의 유지관리에 관한 노력과 예산을 집중투자함으로써 효율적인 배관관리가 되도록 하는 관리 체계를 의미한다.

### 3.5.2. Direct Assessment (DA)<sup>(2)</sup>

DA이란 배관의 건전성에 미치는 부식 등과 같은 위해요소의 영향을 평가하고 해소함으로써 점진적으로 배관의 안정성을 향상시키는 구조적 관리체계를 의미하는 것으로서, 앞의 RMS와 달리 배관의 손상상태 자체를 기술적 해석의 가장 근본으로 한다는 특징을 갖는다. 이러한 DA의 적용은 배관의 외부부식 (external corrosion), 내부부식 (internal corrosion) 및 응력부식

(stress corrosion)에 대하여 별도로 적용되고 있다. DA의 과정은 다음의 4개의 단계로 구성된다. Pre-Assessment, Indirect Assessment, Direct Assessment, Post Assessment.

### 3.5.3. SCC Management Program

응력부식파손 현상은 특별한 주의 및 예고없이 배관의 급작스런 파손을 일으키는 시간 의존적인 과정(time-dependent process)이므로, 이에 대한 문제를 해결하기 위하여 캐나다 보고서는 다음과 같은 몇가지 내용들을 준비할 것을 권고하고 있다. 기본적으로 배관운영자는 SCC를 제어하기 위한 프로그램을 보유하여야 한다. 그리고 가능한 경우 SCC 저항성을 갖는 배관의 설계 변경, 이를 방지하기 위한 지속적인 연구, SCC 데이터베이스의 구축, 응급조치 실시방법의 개선, 지속적인 정보교환 등이다.

## 4. 진단 및 보수 수준

### 4.1. 정수압시험 (Hydrostatic Testing)

원래 정수압(hydrostatic)이란 정적인 수압조건을 의미한다. 정수압시험을 위해서 압력은 미리 정한 크기로 유지하면서, 유속은 0으로 하고 온도는 가능한 steady하게 유지한다. 정수압시험은 배관이 시험응력에 견딜 수 있을 만큼 배관의 상태를 나타낸다고 할 수 있다. 정수압시험은 통과 또는 실패로 판정되며, 유효한 압력범위에서는 안정적으로 사용할 수 있는 승인시험으로 인정되며, 시험강도보다 실제강도가 얼마나 상회하는지는 알 수 없다.

### 4.2. 인라인 검사 (In-line Inspection)

활판검사가 특정한 인라인 검사는 소위 인텔리전트 피깅기술로 불리우며, 배관의 변형상태를 관찰할 수 있는 지오메트리 피깅(geometry pig), 부식에 의한 배관두께의 감소를 측정할 수 있는 MFL 피깅(magnetic flux leakage pig), 그리고 축방향의 균열의 존재를 탐지할 수 있는 UT 피깅 (ultrasound technique pig) 등이 있으며, 최근의 컴퓨터 관련기술의 눈부신 발달로 검사설비의 향상을 가져와 적용이 확대되고 있는 검사 체계이다.

Table 2 보수방법의 적용성

영구보수방법	가벼운 손상	중간 손상	심한 손상	극단 손상
드레싱(dressing)	*	*		
Epoxy Grout Shell			*	*
Snug Fitting Shell			*	*
Stand-off Shell			*	*
Hot-Tap Fittings			*	*
Clock Spring			*	*
Replacement				*

### 4.3. 영구보수 (Permanent Repair)

배관을 대체하지 않더라도 한번의 적용으로 영구 보수를 수행할 수 있는 방법들이 활배관 용접보수 방법을 대체할 수 있는 것들로서 개발되어 사용되고 있다. 이들 방법에는 균열 (crack), 가우지 (gouge), 부식 (corrosion), 덴트 (dent), 세로용접결함 (girth weld defect) 등 거의 모든 결함에 대해 보수방법을 제공한다. 이들 방법이 적용되면 일반배관과 같이 동등한 정도로 건전성이 확보되는 것으로 평가되고 있다. 가로 및 세로응력에 대해 모두 내력을 갖으며, 피로응력에도 상당한 저항력을 보여 피로수명을 높인다. 이들의 대표적인 방법에는 다음과 같은 것들이 있으며, 각각은 북미 및 영국에서 개발되어 사용실시되고 있는 방법이다.

### 4.4. 해양유지설비 (Offshore Vehicle)

하천이나 바다에 설치된 배관의 경우에는 육상에서와 같이 배관직상부 혹은 배관가까이에 접근하는 것이 용이하지 않다. 이러한 구간에서 배관의 관리는 remotely operated vehicle (ROV)에 의해 이루어진다. 일종의 잠수함과 유사한 것으로서 유무인의 형태가 모두 적용되고 있으며, 통상적으로는 방식전위의 측정과 같은 일상적인 일에 적용되기도 하지만, 경우에 따라 수중에서 플랜지 및 배관의 보수를 위한 작업에 활용되기도 한다.

## 5. 기타 사항

### 5.1. 해저배관

유지관리가 용이하지 않다는 이유 때문에 초기 시공단계에서 필요한 모든 수단의 강구가 필요한 바, 육

상배관에서 적용 가능한 기술 대신 해저배관에 특별히 고려해야 하는 부분이 많을 것이다.

특히 부동의 지반침하 (subsidence) 및 지진활동 (seismic activity)의 효과 등을 고려해 굽힘, 전단 및 인장/압축력 영향을 완화할 수 있어야 하는 경우 실드 터널 (shield tunnel)을 구성하는 요소중 특별히 고안된 휨세그먼트 (flexible segment)를 사용하기도 한다.

케이싱관의 사용과 마찬가지로 시공의 최종마무리 단계에서 실드터널 내부에서 사용된 배관이송장치의 금속설치물들이 배관과 서로 접촉하지 않도록 강도와 인성을 고려하여 적절한 절연물을 삽입하도록 한다.

기타 전기방식설비 설치시에도 유지보수의 가능여부에 따라 희생양극 방식과 외부전원식 방식의 음극방식 방법도 적절하게 사용할 수 있어야 한다.

### 5.2. Computer 및 Internet의 역할

배관의 음극방식체계는 이들이 적절히 작동하고 있다는 것을 확신하기 위하여 정기적으로 점검되어야 한다. 앞서 언급하였지만 점검방법 중의 하나인 CIPS의 수행을 위해 1970년대부터 마이크로프로세서를 이용한 데이터수집기가 개발되어 사용되어 왔다. 이들은 휴대용이고 배터리구동이긴 하였으나, 거대하여 배낭형태로 운용되었다. 그러나 80년대에는 보다 집약적이며 다소 거친 형태이지만 손에 잡히는 형태로서 소형화되었다. 이때부터 현장용컴퓨터를 이용한 연례점검이 시작되었다. 이러한 현장용컴퓨터의 발달은 21세기에는 단순한 데이터 로깅에서부터, 워크시트, 워드 및 데이터 전송, 이메일 및 인터넷기능까지 갖추고, GPS 기술을 활용하기 위하여 수신장치까지 장착하여 사용될 것이다. 데이터의 포착은 물론, 합성 및 분석 등이 가능하여, 배관관리자에게는 상당한 양의 유용한 정보를 끌어내고, 품질을 높이고 이해력을 높이는 필수 불가결의 장비가 될 것이다.

### 5.3. Expert의 역할<sup>(3)</sup>

지하매설된 가스수송배관은 매우 중요한 자산이며, 일반적인 자산관리와 같이 가장 적절하고도 경제적인 방법으로 유지관리 되어야 한다. 부식이나 배관의 건전성 문제는 시공자나 운영자에게 모두 핵심적인 사안이지만, 아직도 흔히 잘해서 차선처리, 못한 경우 비표준 시공 등을 하는 예는 빈번하다. 따라서 부식관리는

통상적인 배관의 설계 및 운영에 무언가 덤으로 행해지는 것 정도로 생각되어서는 안되며, 이들 기능에 무언가 당연히 내재해 있어야 할 것으로 취급되어야 한다.

실제 배관의 생산수명동안 부식 및 건전성에 대한 적절한 평가 및 관리를 하게되면 안전하고 생산적인 운영을 하든가 그렇지 않으면 매우 비싼 값을 치루는 재앙의 차이를 가져오는 결과를 초래할 수 있음을 명심하여야 한다. 이러한 관점에서 적재 적기에 이 분야의 전문가를 활용하는 것이 필요하며, 부식방지 설계, 부식 평가, 부식감시기술, 배관관리 프로그램 등에 그들의 기술수요를 필요로 하게 될 것이다.

## 6. 맺음말

장거리 수송배관의 건전성 관점에서 설계단계에서 부터 운영시 유지관리단계 등 취할 수 있는 기술적 수

단과 방법들을 종합적으로 고찰해 보았다. 장거리 배관의 국내건설에 있어 관계업무의 시급성이 되기를 바라며, 운영단계에서는 적어도 기술에 기초한 배관의 건전성을 유지하기 위한 운영철학이 필요하게 될 것이다.

## 참고문헌

- (1) E.D. Casey, T. Cooney, Low-Earth-Orbit Satellites Relay Pipe Line Operating Information, Pipe Line & Gas Industry, pp. 83-88, November, 1999.
- (2) NACE Standard RP0502-2000 Standard Recommended Practice on Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology, Item No. 21097, NACE International, 2002.
- (3) M. Simon-Thomas, When Expertise Really Counts, World Pipeline, pp. 35-38, Jan/Feb, 2002.