

가스배관의 안전성 평가방안에 대한 고찰 (II)

-손상사례 및 위험요소 평가방법에 대하여-

김우식, 고영대
한국가스공사 연구개발원

1. 서론

천연가스의 수송을 위해 사용되는 가스배관에 대한 구조적 안전성을 확보하기 위해서는 전체 시스템의 파손 및 위험요소를 효과적으로 평가할 필요가 있다. 위험요소(risk)라고 하면 보통 인명피해와 같은 바람직하지 않은 사고(undesired event)가 발생할 수 있는 가능성이나 확률로써 정의가 되어서는, 가스배관이 설치되거나 작동되어 질 때에 이러한 파손(failure)의 가능성을 매우 작게 하더라도 위험요소가 존재하게 된다. 특히, 가스배관의 경우 파손으로 인한 사고빈도는 매우 낮다고 보고되어 있지만, 일단 파손이 발생하면 인명 및 재산상의 피해가 매우 크기 때문에 파손의 원인을 분석하여 파손사고의 비율을 최소한으로 낮추는 것이 필요하다. 본 고에서는 해외 가스배관 파손사례를 통해 손상발생 원인에 대해 알아보고 지하매설배관의 위험요소를 평가하는 방법에 대해 기술한다.

2. 해외 가스배관 손상 사례

표 1은 가스배관의 파손 빈도를 나타내고 있다. 표에 나타낸 파손은 각 나라마다 정의하는 것이 달라 전체 값이 다르게 나타났다. 일반적으로 보수를 필요로 하는 배관손상이 대략 1000km당 매년 4회 정도 발생하고, 인적 피해를 가져오는 파손은 1000km당 매년 0.16회 정도 발생한다. 미국 운수성에서 1984년부터 1990년까지 가스배관 손상사례를 분석한 데이터를 보면, 천연가스 배관 손상의 주요 원인은 배관 외부 힘에 의한 손상이고 재료파괴, 부식의 순서로 나타났다. 사고원인별 통계에 대한 분석은 기발표 자료에 상세히 설명하였다. 우리 나라의 경우 전체 배관길이가 짧고 유지기간이 작으며 사고발생빈도 자체가 적기 때문에 통계로서의 의미를 가질만한 수치가 없는 상태이다.

3. 가스배관 위험요소 평가법

기존의 가스배관의 안전성을 평가하기 위한 방법으로는 육안 검사법이나 내부 검사법과 같이 가스배관을 직접 검사하는 방법이 주로 이용되었다. 하지만, 이러한 방법은 파손 가능성이 있는 부분뿐만 아니라 전체 가스배관을 대상으로 행하여지기 때문에 시간과 비용이 많이 드는 단점을 가지고 있다. 경제적인 측면에서 가스배관 손상발생에

대한 위험요소를 줄이고, 가스배관의 지속적인 안전성을 확보하기 위해서는 파손과 관련된 위험요소를 파악하고, 이를 정량적으로 평가할 필요가 있다. 현재 전세계적으로 가스배관 파손으로 인한 사고의 예방 및 가스배관의 효율적인 관리를 목적으로 각 가스회사 및 정부차원에서 위험요소 평가법 개발에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 표 2에 각 나라의 가스회사에서 주로 사용하고 있는 위험요소 평가용 프로그램을 나타내었다. 이러한 프로그램들은 각 나라마다 가스배관이 놓인 환경에 따라 위험요소 사이의 중요도를 다르게 정의하고 있으나, 일반적으로 다음과 같은 형태의 알고리즘을 유지하고 있다.

- 위험요소의 확인(risk identification)
- 위험요소의 평가(risk assessment)
- 위험요소의 관리(risk management)

이러한 위험요소의 효율적인 관리를 위한 알고리즘의 전체적인 개략도를 그림 1에 나타내었다.

3. 각국의 가스배관 위험요소 평가법

미국의 경우에는 DOT(Department of Transportation)에서 49 CFR Parts 192-195 와 Part 199 등에서 가스배관의 안전한 운전을 위해서 최소의 요구조건을 명시하고, 가스회사가 자체적으로 위험요소 평가법을 이용하여 규칙적으로 가스배관의 안전성을 확인하도록 법제화를 시도하고 있다. 현재 미국의 가스회사에서 가장 널리 사용하고 있는 위험요소 평가용 프로그램으로는 IAP(Integrity Assessment Program)를 들 수 있다. IAP의 목적은 잠재적인 파손의 위험요소를 비롯하여 파손에 영향을 줄 수 있는 모든 위험요소를 구별하고, 위험요소의 최적화를 통해서 가스배관의 안전성을 확보하는데 있다. 그림 2에 IAP에서 사용하는 알고리즘의 대표적인 예를 나타내었다. IAP는 전체적으로 가스배관 설비의 데이터베이스 구성, 위험요소 평가용 알고리즘의 정의, 위험요소의 평가 및 위험요소를 줄이는 방법 등으로 구성되어 있다. IAP에서는 위험요소를 ROF(Risk of Failure)와 COF(Consequence of Failure)로 구분하고, 다시 이를 세부항목들로 나누어 각각의 경우 위험요소에 얼마나 영향을 끼치는지를 평가하고 있다. 이 중에서 ROF는 외부부식, 내부부식, 외부 응력, 지각변동, 설계 및 재료, 동작 및 절차, 응력부식균열 등이 주된 요소로서 나타나고, COF의 경우에는 인명과 재산의 피해 등과 같은 경제적인 요소 중심으로 구분하고 있다. 그림2에 ROF의 구분을 나타내었다. IAP의 알고리즘에 따르면, 전체 위험도는 ROF와 COF의 곱으로써 나타내어진다.

$$Total Risk = Risk of Failure \times Consequence of failure$$

즉, 크게 7가지 분류의 ROF와 3가지 분류의 COF로부터 각각 다시 여러 개의 영향인자로 분리가 되므로 100여개 이상의 독립변수가 전체 위험도를 평가하는데 이용되고 있다.

멕시코의 가스회사들에서 사용되고 있는 RAMP(Risk Assessment and Management Programme)의 경우에도 미국의 IAP와 비슷하게 위험요소를 ROF와

COF로 구분하고 있는데, 멕시코의 가스배관에 맞게 위험요소의 지수를 다르게 정의하고 있다.

캐나다의 가스회사에서 사용하고 있는 위험요소 평가용 프로그램인 TRPRAM (TransCanada Pipelines Risk Assessment Model)의 경우에는 전체 위험도를 다음과 같이 정의하고 있다.

$$\text{Risk} = \text{Event Frequency} \times \text{Consequences of Failure}$$

또한, 위험요소는 배관손상의 심각성을 나타내는 사회적인 위험요소와 배관손상으로 인해 발생하는 인명 손실을 나타내는 개인적인 위험요소로 구분하고 있다. TRPRAM에서는 파손빈도로 지리적인 위험요소, 부식, 응력부식균열, 건설시의 손상, 3차 응력, 재료의 결함 등으로 구분하고 있으며, 파손결과의 경우 COF와 마찬가지로 인명 피해와 같은 경제적 요소의 영향을 고려하여 정의하고 있다. 파손빈도를 ROF와 비교하여 보면, 실제 거의 비슷한 항목이 나타나고 있는 것을 살펴볼 수 있다. 즉, 각각의 평가법의 세부사항은 달라도 전체적인 위험요소들을 분류하는 방법은 일치하고 있다.

이러한 위험요소들을 정의할 때 현장에서의 관찰, 사고사례 분석, SCC나 부식실험 등과 같은 실제환경에서 실험을 통한 데이터의 축적, 가스배관 설비나 환경의 모사를 통한 모델링, 현장 유경험자나 전문가의 조언 등으로부터 자료를 얻고 있다.

4. 위험도 평가 알고리즘 작성

가스배관의 안전성에 영향을 주는 위험요소들이 파악되면 위험유발인자 보고서(risk driver report)를 작성하게 된다. 즉, ROF와 COF의 각 세부항목 중에서 실제 가스배관의 파손과 관련된 항목을 분석하여 실제로 알고리즘을 구성한다. 모든 가스배관에 직접 적용 가능한 “표준” 알고리즘은 존재할 수 없기 때문에 대부분 다음과 같은 과정을 거쳐서 알고리즘을 작성하게 된다.

- 1). 각 가스배관에 맞는 알고리즘을 세우기 위해 배관과 관련한 전문가들로 여러 팀을 구성한다.
- 2). ROF와 COF 등의 분류에 따라 가스배관의 위험요소로 작용할 수 있는 모든 변수들을 고려하여 알고리즘 구조를 요약한다.
 - 파손이나 파손의 결과에 미치는 위험인자를 선택한다.
 - 각 위험요소의 기준을 설정한다.
 - 각 위험요소의 경향을 정의하고, 기준에 합당한 위험요소의 지수를 결정한다.
- 3). ROF, COF, 전체 위험도에 최대 영향을 주는 위험유발인자 보고서를 작성하여 이를 바탕으로 적당히 알고리즘을 수정한다.
- 4). 최근의 파손사례와 실제 환경에서의 실험결과를 바탕으로 각 가스배관에서의 파손 기대치와 실제 파손정도를 고려할 수 있도록 알고리즘을 보정한다.

이러한 알고리즘이 가스배관에 적용할 수 있도록 작성되면, 현장에서 얻을 수 있는 파손사례나 제작시 재료결합 등과 같은 데이터, 실제 full scale 시험이나 실험실에서의 모사실험 및 가스배관의 검사로 얻을 수 있는 데이터를 통해 직접 가스배관의 위험요

소를 평가할 수 있는 응용소프트웨어를 구성하는 것이 필요하다. 선진국의 경우 표 4에 나타난 바와 같이 대부분 알고리즘과 응용소프트웨어를 패키지 형태로 개발한 상태이며, 이를 통해 자국의 배관에 대한 평가를 수행하고 있다. 위험요소 평가법의 적용결과를 분석하기 위한 방법으로 여러 형태의 표나 그래프가 사용되어지고 있다. 각 가스배관에 대해 ROF와 COF의 변화폭을 나타낼 수 있는 High, Low, Average ROF 그래프, ROF, COF 및 전체 위험도를 히스토그램 형태로 나타내는 characteristic risk curve, 위험요소의 제거 등의 경제적인 영향을 함께 고려할 수 있는 benefit/cost analysis 등이 있다.

5. 요약

지하 매설가스배관의 경우 모든 위험요소를 없애는 것은 불가능한 일이므로 가능한 위험요소를 줄이도록 하거나 외부에서 컨트롤할 수 있도록 하여야 한다. 특히 가스배관의 유지 및 보수와 관련하여 경제적인 측면을 최대한 고려할 수 있도록 배관에서 어느 부분이 가장 위험요소가 큰지 확인할 수 있는 위험도평가가 필요하다. 이러한 위험도평가는 각국의 가스회사들이 처한 환경이 서로 다르기 때문에 각 회사들이 독자적인 평가방안을 보유하고 있다.

6. 참고문헌

- 1) Michael R. Acton, Phil J. Baldwin and Tim R. Baldwin, 2nd Int. Pipeline Conf. Proceedings, Vol. I, ASME (1998), p. 1
- 2) W. Kent Muhlbauer, Pipeline Risk Management Manual, 2nd Ed., (1996) Gulf Publishing
- 3) M.M. Matheson, Pipeline & Gas Industry, Feb., (1996) p. 39

Table 1. Failure figures for transmission pipeline.

| Incidents | Frequency |
|--|-------------------------|
| Any incident requiring a repair | 4.0 / 1000km / year |
| Loss of product event | 0.6-0.8 / 1000km / year |
| Failures with associated casualties or high damage costs | 0.16 / 1000km / year |

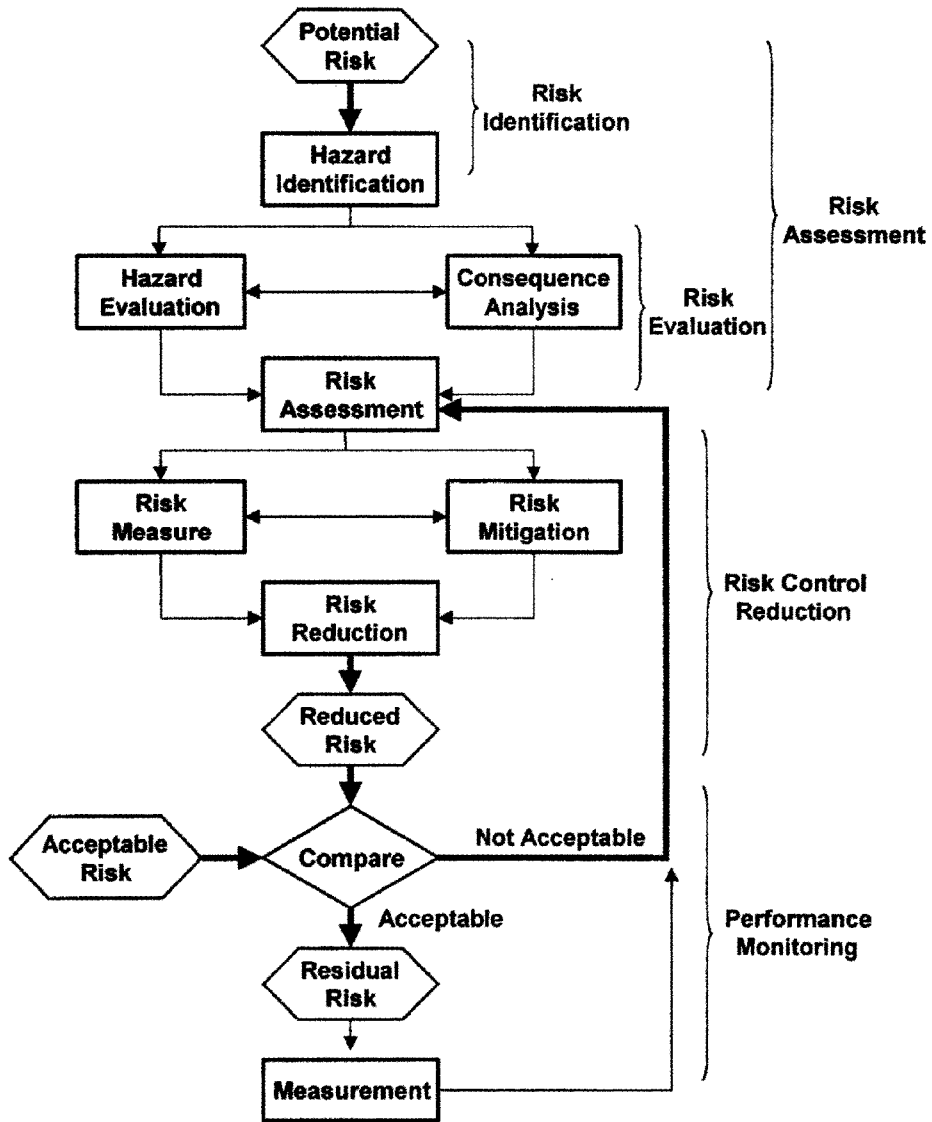


Fig. 2-9-6 Schematic diagram of risk management algorithm.

Table 2. Risk Assessment Programs of several countries.

| 국가명 | 사용 프로그램 |
|---------|--|
| 미국 | IAP (Integrity Assessment Program) |
| 캐나다 | TRPRAM (TransCanada Pipelines Risk Assessment Model) |
| 멕시코 | RAMP (Pipeline Risk Assessment and Management Programme) |
| 영국 | PIPESAFE, TRANSPIRE |
| 오스트레일리아 | AS 2885-1997 (Australian Petroleum Code) |

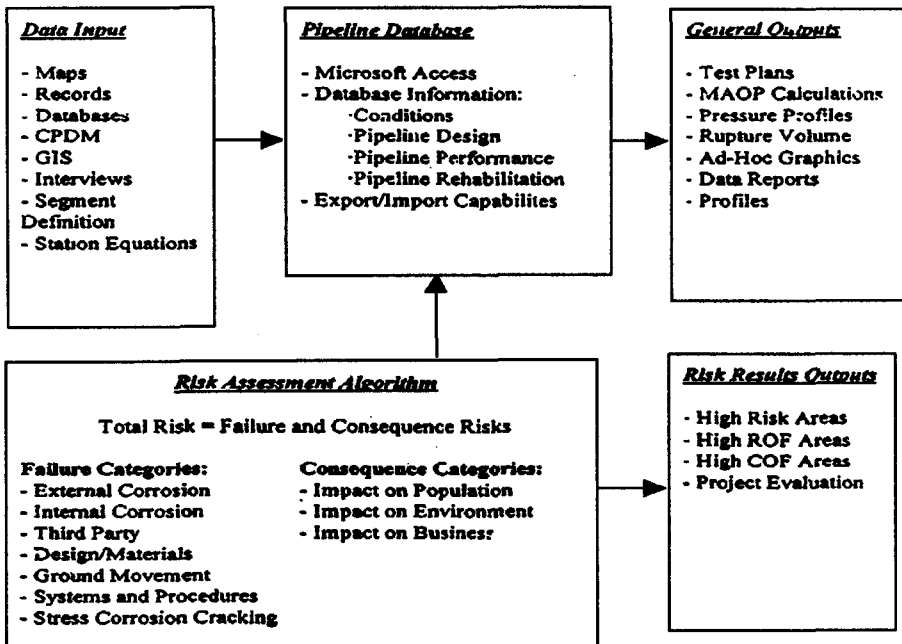


Fig. 2 IAP overview.