KIGAS Vol.7, No.1, March, 2003
(Journal of the Korean Institute of Gas)

도시가스 배관의 위험평가 방법론 제시

†박 교 식 · 이 진 한 · 조 영 도 · 박 진 희*
한국가스안전공사 가스안전시험연구원
*극동도시가스 주식회사
(2003년 1월 30일 접수, 2003년 3월 19일 채택)

An Approach to Risk Assessment of City Gas Pipeline

Kyo-Shik Park · Jin-Han Lee · Young-Do Jo and Jin-Hee Park*
Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation
**Kukdong City Gas Co. Ltd*
(Received 30 January 2003 ; Accepted 19 March 2003)

요 약

본 연구에서는 위험을 등급화하여 검사대상 및 주기를 결정하여 투자비용의 효용성을 높이는 기술의 접근방법을 도입하여, 위험의 정도뿐만 아니라 위험의 양(손실비용)을 평가할 수 있는 활용 방법을 제시하였다. 위험의 정량화를 위해 가스배관의 손상확률과 영향을 예측하는 방법이 필요한데 손상확률의 경우 사고원인을 굴착공사, 외부부식, 지반침하 및 장치손상으로 구분하였고, 그 각각의 원인에 대해 사고발생빈도를 구하는 방법을 제시하였으며 영향을 예측하기 위하여 가스의 누출시 주로 피해를 유발하는 화제에 대해 사망, 화상 및 건물에 피해를 줄 수 있는 경우 그 피해범위를 산정하는 방법을 제시하였다. 또한, 이 확률과 영향을 결합하여 위험비용을 예측하는 방법과 그 결과를 예시하였는데 이 기술은 경제적인 측면을 고려한 종합적 안전관리 기술로서 위험관리가 중요한 도시가스업계에 적용된다면, 위험을 줄일 수 있는 최적의 위험감소 전략 수립에 유용한 정보를 제공할 수 있다.

Abstract - In this work, a novel approach was introduced to assess cost of loss resulting from risk as well as to help deciding inspection period through quantifying risk. In order to quantifying risk of city gas pipeline, frequency and consequence analysis were required. The main causes of city gas accident were analyzed to be digging, external corrosion, ground movement, and equipment failure. Tools to evaluate frequency of each cause was also suggested. Among city gas accidents, fire damage is the dominant one and mainly discussed; fatality, burning injury, and damage to building were estimated using the consequence model suggested. By combining frequency and consequence analysis, evaluating cost of risk management together with calculating example. This work could be applicable for city gas companies to plan how to manage risk most effectively.

Key words : cost of loss, quantifying risk, causes of city gas accident, frequency, consequence

†주저자 : kspark@kgs.or.kr

1. 개 요

도시가스배관은 공정조건의 변화가 거의 없다. 따라서, 현재까지 알려진 What-If, Hazard and Operability(HAZOP), Failure Mode and Effect Analysis(FMEA), Fault Tree Analysis(FTA), Event Tree Analysis(ETA) 등의 한가지를 선택하여 위험을 적절하게 평가하는 데는 많은 제약과 한계가 있다. 종래 도시가스배관의 위험평가는 지하에 매설된 배관을 대상으로 하기 때문에 배관에 대한 진단기술을 적용하기 어려워 정량적인 평가를 시도하지 않았다. 이에 따라 엔지니어의 경험적인 판단에 의거 위험요소에 가중치를 부여하여 상대적인 위험을 평가하였는데 이 방법을 점수에 기초한 평가(Index-Based Assessment, IBA)라 한다. 지하에 매설된 도시가스배관의 경우 배관의 설계조건, 운전조건, 매설주위의 환경에 따라 위험의 정도가 다르다. 그러나 일반적인 분석방법을 사용한다면 단위 구간이 비슷한 정도의 위험이 존재한다고 분석되므로 배관계의 특성을 고려한 분석기법이 필요하다.

우리나라도 도시가스배관의 특수성을 감안하여 IBA를 이용한 도시가스배관 안전성평가기법(Scoring Pipeline Checklist, SPC)을 개발하여 도시가스업계에 보급한 바 있고[1] 현재도 많은 도시가스회사에서 이 방식을 채택하고 있으며 상용 S/W도 나와 있다.

미국의 경우를 살펴보면, 1997년 배관안전사무국(Office of Pipeline Safety, OPS)에서는 배관위험관리 절차서인 'Risk Management Program Standard'를 제정하여 배관운전회사에서 이를 따르도록 권고하였다. 배관특성에 맞는 위험확인, 위험관리, 위험 및 환경모니터링 절차서로서 12개의 배관운영회사에서 이를 받아들여 위험평가를 수행하였다. 또한, 위험에 기초한 평가방법(Risk-Based Assessment, RBA)은 미국, 유럽을 중심으로 90년대 후반부터 시작하여 최근 5년간 비용/효용분석이 가능하여 검사우선순위 등 위험감소전략 수립에 효과적으로 사용될 수 있다. RBA는 최근 Smart Pig, DCVG등 매몰배관의 결함을 직·간접적으로 진단하는 기술이 발전됨에 따라 이 결과를 활용하여 위험을 가능한 한 정량화 하여 평가하려는 노력의 시도이다. 이 평가방법은 '위험은 비용이다' 라는 관점에서 접근함으로써 비용대비 효용성이 높은 위험감소 전략을 수립할 수 있도록 유용한 정보 즉, 보수 우선순위, 최적의 검사주기 및 방법, 보수 또는 교체시기 등에 대한 정보도 제공한다. 본 연구에서는 이러한 일련의 노력의 일환으로서 위험에 기초한 평가(Risk-Based Assessment) 방법을 제시하였다.

2. 위험도에 근거한 평가(Risk-Based Assessment)

2.1. 접근방법

위험은 다음과 같이 확률과 영향의 함수로 표현된다.

$$Risk(\$/year) = Frequency(Event/year) \times Consequence(\$/Event) \quad (1)$$

여기서 위험은 손실비용의 형태로 표현된다. 한편, 전체 위험은 각 시나리오별 위험의 합계이다. 그러므로 개별위험을 표현한 식 (1)은 다음과 같이 다시 표현된다.

$$Risk_{total} = \sum_{S=1}^{\infty} (C_S \times F_S) \quad (2)$$

여기서, S = 시나리오 번호

C_S = 시나리오에 대한 영향 ($/event)

F_S = 시나리오에 대한 빈도 (event/year)

위험평가 절차의 개요는 그림 1과 같다. 먼저 시나리오(핀홀, 소누출, 파단 등)를 설정하고 각 시나리오에 대해 확률과 빈도를 계산한 다음 이를 곱하여 위험을 산정한다. 그런 다음 모든 시나리오에 대하여 계산된 위험을 더함으로써 총위험을 구한다.

2.2. 평가범위 선정

본 연구에서는 빈도분석과 영향분석을 통해 위험을 추정하기 위해 먼저 특정 도시가스회사의 실제 매설구간을 시험구간으로 설정하여 위험을 산정하였다. 평가에 필요한 데이터는 매설배관의 종류, 매설 연도, 운전조건, 위치, 관경, 매설깊이, 대지(건물)와의 거리등에 대한 정보와 각종 검사자료 및 과거의 결함자료 등이다.

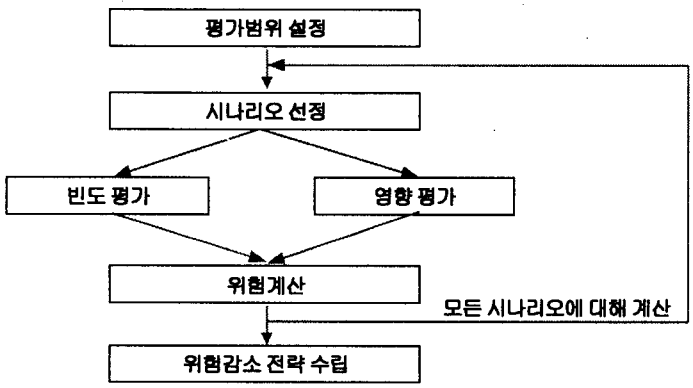

Fig. 1 Schematic diagram of procedure for risk assessment.

2.3. 시나리오 선정

기본 시나리오를 선정하기 위해서는 사고이력 데이터를 포함하여 평가에 각종 데이터의 타당성이 고려되어야 한다. 많은 시나리오를 설정하면 정밀한 평가가 가능하겠지만 데이터의 부족으로 오히려 신뢰도가 떨어질 수 있다. 영국 British Gas의 Fearnehough는 배관에서의 누출을 대표할 수 있는 홀(Hole)크기를 표 1과 같이 세 가지 경우를 고려하였다[2]. 한편, RBI(API 581)방법에서는 1/4 inch(6.4mm), 1 inch(25.4mm), 4 inch(101.6mm), Rupture의 4개의 홀 크기를 가정하였다[3]. 본 연구에서는 여러 가지 사고이력 데이터의 획득 가능성을 검토한 결과, Fearnehough의 분류방법을 선택하였다.

Table 1. Hole size of city gas pipeline by Fearnehough.

구 분	홀 크기 범 위	평 균 크 기	표 준 편 차
소누출 (Small Leak)	0~20mm	10mm	5.77mm
대누출 (Large Leak)	20~80mm	50mm	17.3mm
파단(Rupture)	파이프 직경	파이프 직경	-

또한 밸브 등 부속장치의 손상원인에 대관의 위험은 손상원인에 따라 손상확률을 가장 잘 설명할 수 있는 평가모델을 선정하는 것이 중요하다. 표 2에 본 연구에 사용될 평가모델을 나타내었다. 먼저 확률평가를 위해 선정된 모델을 살펴보면, 부식원인에 대해서는 손상확률이 시간의존성을 가지고 있으므로 구조 건전성 평가법(Structural Reliability Analysis, SRA)을 사용하였으며, 부가적으로 과거 손상자료 분석법(Historical Failure Data Analysis, HFDA)을 사용하여 검사자료가 부족하더라도 간단한 평가가 가능토록 하였다. 굴착공사로 인한 손상원인에 대해서는 배관보호를 위한 여러 손상방지대책의 실패 가능성을 분석하는 결함수목분석법(Fault Tree Analysis)을 적용하였다. 지반의 움직임으로 인한 용접부 등의 손상원인에 대해서는 분석의 어려움으로 인해 HFDA법을 적용하였다. 또한 밸브 등 부속장치의 손상원인에 대해서는 제품의 신뢰도를 평가하기 위한 방법으로 널리 알려진 고유고장율을 적용한 손상모드별 영향분석법(Failure Mode Effect Analysis)을 준용하였다.

사고영향 평가를 위해 선정된 모델을 살펴보면, 사건의 시간 진행에 따른 상황을 분석하는 방법인 사건수목분석(Event Tree Analysis, ETA)을 사용하였다. 누출모델은 배관내 유체의 마찰저항을 고려한 정상상태를 가정하였고, 화재모델은 누출지점에서 화염의 방향이 직상부인 제트화재만을 고려하였다. 피해범위는 사망, 부상, 건물착화에 대해서 고려하고 손실비용 예측은 누출손실, 공급중단, 시설복구, 인명피해, 화재피해를 고려하였다.

Table 2. List of applied models to assess risk of city gas pipeline.

확률평가 모델 설정	영향평가 모델 설정
• 부식- Structural reliability Analysis	• Event Tree Analysis
• 굴착공사 - Fault Tree Analysis	• 누출모델, 화재모델
• 지반 - Historical Failure Data Analysis	• 피해범위 예측
• 부속장치 - Fault Mode & Effect Analysis	• 손실비용 예측

2.4. 빈도(Frequency) 평가

2.4.1 부식원인

부식원인에 대해서는 검사결과를 사용하지 않는 통계적 방법과 검사결과를 사용한 피복결함+결함평가 방법을 활용하였다. 전자에 대한 내용은 이전 연구에서 구체적인 예시를 하였으며[4] 후자의 방법은 DCVG(Direct Current Voltage Gradient)검사를 수행한 후, 굴착을 시행하고 부식결함을 발견하였다고 가정하였다[5]. 실제로는 특정 도시가스에서는 DCVG 장비를 가지고 현장에 적용중이나, 축적된 데이터가 부족하므로 타 도시가스의 사례를 바탕으로 평가를 위해 위의 평가대상 배관에 가상적인 상황을 설정하였다.

본 연구에서는 계산의 편의를 위하여 다음과 같은 가정을 한다. 즉 발견된 피복결함 수는 6개소, 굴착결과 부식 결함이 발견된 곳은 1개소, 결함의 크기는 평균깊이 5mm, 최대깊이 6mm, 길이 100mm로 예상하며 부식결함 성장속도는 0.2mm/년, Pitting결함 성장속도는 0.4mm/년, 결함길이 성장속도는 무시하여 피복손상부만 부식한다고 가정하였다. 이에 따르면 Pitting Corrosion에 의한 소누출에 걸리는 시간은 다음과 같이 4.8년이다[5].

$$\tau = \left[\frac{(7.9-6)mm}{0.4mm/yr}\right] = 4.8년$$

또한 내압을 견디지 못해 파손될 시점은 다음과 같이 운전압력이 4Kg/cm^2 일 경우 13.5년으로 예측된다.

$$\tau = \left[\frac{(7.7-5)mm}{0.2mm/yr}\right] = 13.5년$$

따라서, 손상은 Pitting Corrosion으로 인한 소누출이 먼저 일어날 것이라는 것을 예측할 수 있으며 손상확률은 잔류 깊이인 1.9mm/yr 이상의 부식속도를 나타낼 확률로서 7.72×10^{-5}/yr 이다. 이때, 내압(4Kg/cm^2)에 의한 연간 손상확률은 1.24×10^{-3}/y이다.

2.4.2 굴착공사로 인한 손상

타공사로 인한 사고는 FTA로 분석할 수 있으며 각 기본사건별로 결함확률을 구하면 굴착자가 배관을 때릴 확률(Hit Probability)은 3.15×10^{-2}/km·yr이다. 이중 누출을 유발할 손상이 이루어질 확률은 1.26×10^{-3}/km·yr이다[5]. 사고 데이터를 토대로 굴착공사 등 외부간섭으로 인한 손상모드별 상대적 손상확률은 소누출 20~25%, 대누출 50~55%, 파단 20~25%범위에 있다고 했다. 여기서는 EGIS에서 알려진 대로 소누출 25%, 대누출 50%, 파단 25%로 가정했다[4].

2.4.3 지반침하로 인한 손상

배관의 길이방향 용접이 한군데 있고 지반상태가 도로 혹은 평지라면 지반침하로 인한 손상확률은 Hovey and Framer가 제안한 5.5×10^{-4} /km·yr을 사용하였다[7]. 사고 데이터를 토대로 지반영향에 의한 손상모드별 상대적 손상확률은 10~20% 소누출, 35~45% 대누출, 35~45% 파단이라 하였다. 여기서는 20% 소누출, 45% 대누출, 35% 파단을 가정하였다[4].

2.4.4 부속장치(밸브) 손상

Generic Data를 이용한 연간 손상확률은 6.66×10^{-3}/valve·yr이다[7]. 사고 데이터를 토대로 지반영향에 의한 고장모드별 상대적 손상확률을 정리하였는데 밸브, 플랜지 이음부, 분기부의 누출을 고려한 시공/재료 결함원인의

손상모드별 상대적 손상확률을 살펴보면, 55~70% 소누출, 25~35% 대누출, 5~10% 파단으로 나타나 있다[4].

2.5. 영향(Frequency) 계산

도시가스배관 누출의 경우 소누출/대누출/파단의 경우를 가정하였으며 이 경우 손실을 유발할 수 있는 상대적 확률이 ETA을 통해 연구되었다[8]. 사고로 인한 피해영향은 단순누출일 경우에는 원료누출, 보수, 공급중단으로 인한 손실이 나타난다. 그러나, 화재가 발생했을 경우에는 인명피해, 건물피해가 부가된다. 4Kg/cm^{2}로 운전되는 400A배관을 가정했으므로 소누출/대누출/파단의 경우 홀 크기를 각각 10mm/50mm/400mm로 가정하였으며 누출속도는 다음 (3) ~(5)식을 이용하면 각각 0.01Kg/s, 0.26Kg/s, 4.22Kg/s이다[6].

$$Q_p = \frac{\pi}{4}\sqrt{-\frac{\rho_0 P_0 d^5}{2 f_F L}\frac{\gamma}{\gamma+1}\left(\left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}-1\right)} \quad (3)$$

$$f_F = \frac{1}{4[1.14-2.0\log(\varepsilon/d)]^2} \quad (4)$$

여기서 P_0는 배관의 운전압력, P_e는 배관 파손부위의 압력, γ는 비열비 ≃1.036(메탄), ρ_0는 가스밀도, d는 가스배관의 직경, f_F는 Fanning의 마찰계수, 그리고 ε는 배관표면 거침도 이다.

배관 파손부위에서 음속누출속도는 다음 식과 같다.

$$Q_h = C_D A\sqrt{\gamma\rho_e P_e\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (5)$$

누출된 가스로 인해 화재가 발생했을 경우, 예측된 피해반경은 다음과 같다.

2.6. 손실비용 계산

원료손실비용은 누출속도×원료가격×누출시간으로 계산된다. 원료의 가격은 평균도매물가인 413원/m^3(2001. 12. 1)을 기준으로 하면, 소누출/대누출/파단의 경우 각각 5만 4천원/41만원/657만원이 된다.

Table 3. Estimated consequence radius by fire of released gas.

손상모드	소누출	대누출	파 단
100% 사망	0.3	1.4	5.7
50% 사망	0.3	1.7	6.7
사망시작	0.4	2.2	8.9
중간화상	0.5	2.6	10.5
경증화상	0.8	4.1	16.5
건물피해	0.4	2.1	8.7

Table 4. Estimated cost by release of gas.

손상모드	소누출 (천원)	대누출 (천원)	파단 (천원)
원료손실	54,335	410,139	6,572,742
공급중단	1,334	1,668	2,002
복구비용	4,000,000	5,000,000	10,000,000
인명피해 (Outdoor)	1,650,169	34,813,341	501,851,275
건물피해 (Indoor)	0	0	1,334
건물피해	0	0	185,407,223
계 (단순누출)	4,055,669	5,411,807	16,574,743
계 (제트화재)	5,705,838	40,225,148	705,167,427

공급중단 손실비용은 공급중단 세대수, 가구당 평균사용량, 공급중단시간, 원료가격, 이윤율의 곱으로 구한다. 공급중단시간 : 2시간~3시간, 공급중단 세대수 : 20,000세대, 가구당 사용량 : 200m3/월=0.278m3/시간, 이윤율 = (462원/413원) ≒ 12%로 가정하면 손실비용은 소누출/대누출/파단의 경우 각각 1,344원/1,688원/2,002원이 된다.

복구비용은 소누출, 대누출, 파단의 경우 각각 4백만원, 5백만원 및 1천만원의 정액비용을 가정한다. 2001년 6월말 기준, 서울의 경우 녹지를 제외한 면적은 352.61km^{2}이며, 인구는 10,371,744명이므로, 인구밀도는 29,414명/km^{2}이다. 배관이 상업지역에 위치한다고 가정하면, 건물밖(Outdoor) 존재확률은 0.342이다. 이를 토대로 피해 면적내 인명피해 예상인원을 구하

면, 여기에, 인구 1인당 사망 또는 부상에 대한 보상비용을 곱하면 피해비용을 계산할 수 있다. 계산의 편의를 위해 대지와의 거리를 평균 4m로 균일하다고 가정하면 피해영향 면적은 파단의 경우만 고려하면 되며 51.0m^{2}가 된다. 대지내 건축물의 용적률을 300%라고 가정한다면 피해영향 건축연면적은 152.9m^{2}가 되고 재건축비용과 인명피해 비용은 각각 1억 854만원과 133만원이 된다.

건물화재로 인한 2차적 인명피해는 인구밀도, 건물내 존재할 확률, 화재시 단위 인구당 사망확률(0.5%가정), 부상확률(1.5%가정)로서 구하였다. 전체 손실비용을 계산할 때 인명피해와 건물피해는 화재가 발생했을 경우에만 적용되며, 단순누출일 경우에는 제외된다.

에서는 파단(찢어짐)의 영향이 가장 크다. 이는 미국 배관사고의 사고발생에 따른 손실비용의 경우 굴착공사 등 외부간섭에 의한 위험이 가장 크다는 것을 보여주고 있어, 본 연구의 예측결과와 유사성을 보인다[9].

3. 결 론

본 연구에서는 도시가스배관의 고유 특성인 ①굴착공사 등 외부요인에 의존적인 손상특성, ②매몰배관이기 때문에 토양환경에 의존적인 부식특성, ③직접적인 결함탐지 기술(비파괴검사)을 적용하기 어려운 점, ④ 매설배관 주위의 인구밀도, 건물밀도 등 다양한 환경영향특성을 가지고 있다. 따라서, 이러한 손상특성 및

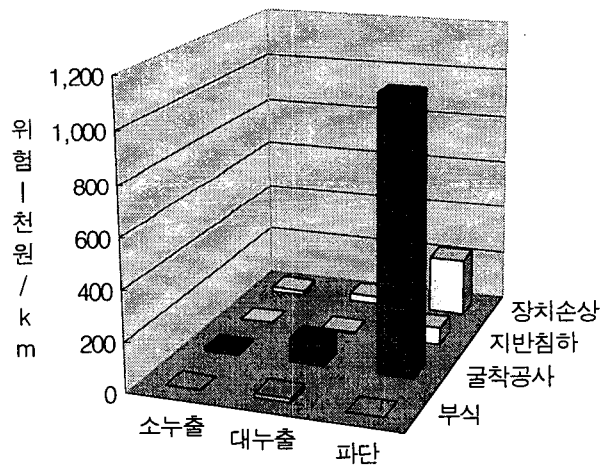

Fig. 2 Cost of risk according to mode and cause of failure.

2.7. 빈도(Frequency)와 영향(Consequence)의 결합

이 방법을 통해 1km 구간의 총위험은 약 157만원으로 계산되었다. 여기에 포함되지 않은 타 매설물(상수도, 고압선 등)에 의한 영향을 포함한다면, 위험값은 조금 더 큰 값을 가질 것이다. 그림 2에 손상원인별, 손상모드별 위험을 나타내었는데, 굴착공사에 의한 위험이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 한 편, 부식원인에 의한 위험은 압력에 의한 영향을 가장 크게 받으며, 저압에서는 소누출, 중압 대누출, 고압

환경특성별로 이 특성을 가장 잘 반영할 수 있는 평가모델을 제시하였다.

즉, 굴착공사등 외부요인을 평가하기 위해 FTA(Fault Tree Analysis)기법, 부식으로 인한 결함을 평가하기 위해 SRA(Structural Reliability Analysis)기법, 밸브 등 장치의 손상특성을 평가하기 위해 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), 사고영향 모델링을 위해 ETA (Event Tree Analysis), 배관의 마찰저항특성을 고려한 누출모델을 제시하였다.

Table 5. Estimated loss by release of city gas considering frequency study.

손상모드		누출빈도(event/km·yr)			영향(원/event)	연간위험(원)	
부식 원인	소누출	7.72×10^{-5}	단순누출	0.86	4,055,669	269	331
			화 재	0.14	5,705,838	62	
	대누출	1.23×10^{-5}	단순누출	0.86	5,411,807	10,985	13,501
			화 재	0.14	40,225,148	2,516	
굴착* 공사 원인	소누출	3.15×10^{-3}	단순누출	0.86	4,055,669	10,985	13,501
			화 재	0.14	5,705,838	2,516	
	대누출	6.30×10^{-3}	단순누출	0.72	5,411,807	24,544	95,489
			화 재	0.28	40,225,148	70,945	
	파 단	3.15×10^{-3}	단순누출	0.52	16,574,743	27,145	1,093,179
			화 재	0.48	705,167,427	1,066,034	
지반 침하	소누출	1.10×10^{-4}	단순누출	0.86	4,055,669	384	472
			화 재	0.14	5,705,838	88	
	대누출	2.48×10^{-4}	단순누출	0.72	5,411,807	964	3,752
			화 재	0.28	40,225,148	2,788	
	파 단	1.93×10^{-4}	단순누출	0.52	16,574,743	1,659	66,817
			화 재	0.48	705,167,427	65,157	
장치 손상 (밸브)	소누출	4.00×10^{-3}	단순누출	0.86	4,055,669	13,938	17,130
			화 재	0.14	5,705,838	3,192	
	대누출	2.00×10^{-3}	단순누출	0.72	5,411,807	7,785	30,289
			화 재	0.28	40,225,148	22,504	
	파 단	6.67×10^{-3}	단순누출	0.52	16,574,743	5,740	231,168
			화 재	0.48	705,167,427	225,428	

* 굴착공사원인의 경우 연간위험은 원/km·yr로 표시됨

이러한 평가모델의 적용을 통해 위험평가를 기술을 개발한 결과 주요 성과물은 다음과 같다.

- 부식부 잔류강도 평가와 손상확률 예측을 통한 잔류수명 예측기술
- 배관의 흐름마찰 저항을 고려한 새로운 누출속도 계산프로그램 개발
- 도심을 통과하는 도시가스배관 특성과 국내실정을 고려한 피해영향 및 손실비용 예측기술
- 비용/효용 분석을 통한 최적의 검사주기 예측방법

이 기술은 경제적인 측면을 고려한 종합적 안전관리 기술로 위험관리가 중요한 도시가스 업계에 적용된다면, 위험을 줄일 수 있는 최적의 위험감소 전략 수립에 유용한 정보를 제공한다. 즉, 보수의 우선순위뿐만 아니라 부식배관의 잔류수명을 예측하고, 비용대비 효용측면에서 유리한 검사주기를 제시할 수 있는 기술이다. 따라서, 이 기술이 실제 활용되면 기업의 경영에 많은 도움이 될 수 있으리라 본다.

참 고 문 헌

1. 한국가스안전공사, 1998. '도시가스배관 안전성평가(SPC) 기법 개정판'
2. API (2000) 'Risk Based Inspection Base Resource Document', API Publiction 581, First Edition, May 2000, American Petroleum Institute.
3. Jones, D. A. and Fearnehough, G. D. (1986), 'Natural Gas Transmission by Pipelines', Fifth International Symposium on Loss Prevention and Safety

4. EGIG (1993), 'Gas Pipeline Incidents', Report 1970-1992, European Gas Pipeline Incident Data Group.
5. J. H. Lee, K. S. Park, Y. D. Jo, and J. H. Park, 'Frequency Analysis of Failure for City Gas Pipeline', Submitted to Korea Institute of Gas, 2002
6. Jo, Y.D. (2001), 'Explosion Hazard Analysis in Partially Confined Area', Korean J. Chem Eng. 18(3).
7. OREDA, (1997), 'Offshore Reliability Data Handbook, 3rd Edition, OREDA Participants.
9. http://www.ops.gov/stat.htm