

Scoring Model을 이용한 매설배관 안전성 개선에 관한 연구

손명덕* · 김성근**

Son, Myoung-Duck*, Kim, Sung-Keun**

A Study on the Safety Improvement of Buried Pipeline Using Scoring Model

ABSTRACT

As the gas is manufactured, handled and used more often due to the continuous increase of gas, the related facility gets expanded and more complex causing small and big accident which causes economic loss including damage for humans and materials. The gas pipeline, the most common gas facility, has the biggest risk of accidents. Especially in the urban area and densely populated areas, the accident due to the high pressure pipeline may cause even more serious damages. To prevent the accident caused by the buried pipeline, it is required for the relevant authorities to evaluate the damage and risk of the whole pipeline system effectively. A risk is usually defined as a possibility or probability of an undesired event happening, and there is always a risk even when the probability of failure is set low once the pipeline is installed or under operation. It is reported that the accident caused by the failure of the pipeline rarely happens, however, it is important to minimize the rate of accidents by analyzing the reason of failure as it could cause a huge damage of humans and property. Therefore, the paper rated the risk of pipelines with quantitative numbers using the qualitative risk analysis method of the Scoring Model. It is assumed that the result could be effectively used for practical maintenance and management of pipelines securing the safety of the pipes.

Key words : High pressure gas pipeline, Buried pipeline, Risk, Scoring model, Qualitative risk analysis

초 록

가스 사용의 지속적인 증대로 이에 따른 가스의 제조, 취급, 사용이 점점 확대되어 관련 시설이 대형화, 복잡화되어, 이로 인한 크고 작은 사고가 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 사고는 인명피해 및 물적 손실 뿐만 아니라 국가의 경제적인 손실의 큰 원인이 된다. 가스시설의 공통적으로 많은 부분을 차지하고 있는 Pipe Line 부분에 외부의 영향에 의한 사고가 가장 큰 위험요소를 가지고 있다. 특히, 도심지역 및 인구밀집지역의 경우의 고압가스배관의 사고 발생은 경제적 손실을 비롯한 보다 많은 손실을 야기시킬 수 있다. 이러한 매설배관의 사고에 대한 예방대책으로 여러 관련 기관에서는 가스배관에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 전체 시스템의 파손 및 위험요소를 효과적으로 평가할 필요가 있다. 특히 가스 배관이 설치되거나 작동되어 질 때에 이러한 파손(failure)의 가능성을 매우 작게 하더라도 위험요소가 존재하게 된다. 그러나 일단 파손이 발생 하면 인명 및 재산상의 피해가 매우 크기 때문에 파손의 원인을 분석하여 파손사고의 비율을 최소한으로 낮추는 것이 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 Scoring Model의 정성적 위험성 분석기법을 이용하여 매설배관의 위험성을 점수로 표현하여 정량적인 숫자로 표현하였다. 이러한 가시적인 평가의 결과는 매설배관의 안전을 확보하여 실질적인 매설배관의 유지관리를 하는데 있어서 매우 효율적으로 적용될 수 있을 것이다.

검색어 : 고압가스배관, 매설배관, 위험요소, 스코어링 모델, 정성적 위험성 분석기법

* 정회원 · 한국가스기술공사 석사 (Korea Gas Technology Corporation · son0332@kogas-tech.co.kr)

** 종신회원 · 교신저자 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 정교수, 공학박사

(Corresponding Author · Seoul National University of Science and Technology · cem@seoultech.ac.kr)

Received November 25, 2016/ revised December 5, 2016/ accepted December 22, 2016

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

산업 및 기술의 발달로 다양한 종류의 가스가 개발·생산되어 여러 가지 목적으로 다양하게 활용되고 있고 가스 사용의 지속적인 증대로 이에 따른 가스의 제조, 취급, 사용이 점점 확대되어 관련 시설이 대형화·복잡화되며, 이로 인한 크고 작은 사고가 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 사고는 인명피해 및 물적 손실 등 경제적인 손실의 원인이 된다.

가스시설의 공통적으로 많은 부분을 차지하고 있는 가스배관은 사고에 가장 큰 위험요소를 가지고 있다. 특히, 도심지역 및 인구밀집지역의 경우의 도시가스배관의 사고 발생은 경제적 손실을 비롯한 보다 많은 손실을 발생 시킬 수 있다(Kim, 2013).

국내의 경우 1990년대 이후의 가스시설에 대한 안전기술 및 안전관리기법에 관한 연구는 가스 관련 장치와 시설의 완결성, 누출시의 감지설비 및 경보시설, 가스설비를 취급하는 인적 어려움 등에 대한 연구가 주로 수행되어 오고 있다. 또한 가스시설의 위험을 미리 예측하기 위해 수행하고 있는 위험성평가에 관한 연구로는 가스 폭발 시 폭발 특성이나 가스 폭발 및 화재가 주위에 미치는 영향 등에 관한 연구만이 지속적으로 진행되고 있다. 그러나 가스시설에 대한 체계적인 안전관리에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는데, 그 중에서도 가스시설의 많은 부분을 차지하고 있는 가스배관의 안전관리제도에 관한 연구는 저조한 실정이며, 장기 사용 도시가스배관에 대한 안전성 판단 기준이 부족하여 배관의 교체주기 결정 등 효율적 안전관리의 한계가 나타나고 있다.

가스관과 비슷한 에너지 수송용 배관의 안전성평가에서 배관의 주요손상 원인인 용접부 결함(weld defect), 부식결함(corrosion defect), 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking; SCC) 등을 들 수 있으며, 이러한 결함을 보수하기 위하여 정량적인 안전성평가를 수행한다.

배관의 용접부 결함평가를 위한 기준은 크게 배관파손 방지를 위한 기본 기준(Workmanship Standards; WMS)과 공학적 해석 기법(Engineering Critical Analysis; ECA)에 기초한 사용적합성(Fitness For Purpose; FFP) 형식 기준의 두 가지로 분류할 수 있으며, WMS의 보수적인 결함평가기준은 높은 신뢰도를 보장해주는 반면, 기준자체에 내포된 지나치게 높은 안전계수로 인하여 비경제적이며, ECA는 WMS의 지나친 보수성을 보완하기 위하여 제정되었으며, 배관에 작용하는 응력, 재료의 파괴인성치, 결함의 형상을 기초로 파괴역학적 해석을 수행하여 결함을 평하는 방법이다. 또한 결함의 발생이 빈번한 특정부위에 대한 구체적인 해석기법을 개발하여 FFP형식으로 적용하는 것이 일반적이다(Choi, 2013).

우리나라의 경우에는 아직까지 정확한 사고통계는 없으나 지하

매설물에 대한 취급 부주의로 인하여 매년 사고가 빈발하고 있으며, 보고되지 않은 사고수를 포함하면 그 숫자가 상당하리라 예상된다. 따라서 우리나라에서도 지하에 매설된 위험 시설물들의 실태와 관리현황을 조사 분석하고 문제점을 도출하여 대책을 강구할 시점에 와 있다고 판단된다. 이에 한국가스공사 천연가스배관도 시간 경과에 따라 침식, 피로응력 등이 증가되어 배관의 수명이 단축되는 위험성을 내포하고 있다. 따라서, 본 연구는 노후화된 배관을 비롯하여 위험성이 큰 가스배관의 안전성 확보를 위하여 유지관리 단계에서 정량적으로 매설배관의 위험성을 평가하기 위한 방안을 제시하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 대상은 지하에 매설된 가스배관을 대상으로 하며, 유지관리 단계에서 위험도를 평가하기 위한 평가모델을 제시하는 것을 연구의 범위로 한다. 구체적인 연구내용 및 방법은 다음과 같다.

1.2.1 매설배관의 현황 조사

정부기관 및 공기업에서 보유하고 있는 지하 매설배관의 현황을 조사하고 관리현황을 조사한다. 매설배관의 안전점검 기준과 안전성 판단기준에 대하여 조사한다.

1.2.2 위험성 평가기법에 관한 조사

각 분야에서 사용되는 위험성 평가기법을 조사하고, 특히 매설배관의 위험성을 평가하는 기법을 분석한다. 외국에서 수행된 위험성 평가기법 적용사례에 관하여 조사한다.

1.2.3 매설배관 위험성 평가모델 제시

기준에 적용되고 있는 위험성 평가모델의 한계를 고려하여 개선된 위험성 평가모델을 제시한다.

1.2.4 개선된 평가모델의 사례 적용

택지개발지구를 선정하여 개발된 평가모델을 기반으로 하여 매설배관의 특성 및 구간별로 나누어 위험도를 평가하고, 전문가로부터 유용성에 관한 평가를 실시한다.

2. 연구의 이론적 배경

2.1 고압가스배관 관리

국내의 고압가스배관의 현황은 Figs. 1 and 2와 같으며, 도시가스사업법 제17조 및 KGS CODE에 따라 가스배관에 대한 정기검사 및 정밀안전진단이 이루어지고 있다. 그 중 고압가스배관을

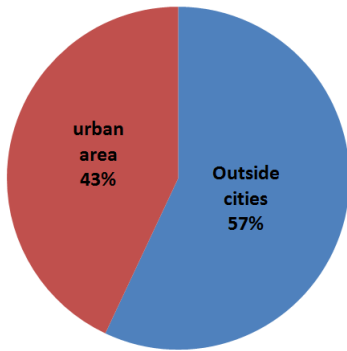


Fig. 1. Buried Pipeline of Urban Gas

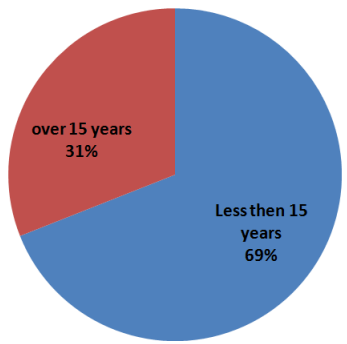


Fig. 2. Buried Pipeline Age of Urban Areas

Table 1. Examples of Weighting of Index Based Model (Son, 2016)

Classification	Weighing% (±deviation)	Maximum Evaluation Value
Third Construction	50%(±20)	70
Corrosion	25%(±15)	40
Design	17%(±11)	28
Incorrect Operations	8%(±4)	12
Total	100%	150

대상으로 하여 가스도매사업자 기준의 FS451, FS452와 일반도시 가스사업자 기준의 FP551, FP552 등이 활용되고 있다(Korea Gas Safety Corporation, KGS CODE FS451, 452, FP551, 552., 2015).

고압가스배관 안전성 평가는 공정조건의 변화가 거의 없으며, 현재까지 알려진 위험성 평가기법으로는 What-if, HAZOP (Hazard and Operability), FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) 등의 방법 중 하나를 선택하여 위험을 적절하게 평가하는 데 많은 제약과 한계가 있다.

매설된 고압가스배관의 경우 배관의 설계조건, 운전조건 그리고 주변의 환경에 따라 위험의 정도가 다르다. 일반적인 분석방법을 사용한다면 단위 구간이 비슷한 정도의 위험이 존재한다고 분석되므로 배관계의 특성을 고려한 분석기법이 필요하다.

전통적으로 고압가스배관의 위험을 평가하기 위해 Index Based Model을 사용하며, Pipeline Risk Management Manual (Muhlbauer, 2004)가 대표적이다. 이 방법은 1990년대부터 현재까지도 배관 운영회사에 채택되어 널리 사용되고 있다. Index Based 평가 모델은 과거 이력을 토대로 각각의 평가항목 중요도에 따른 가중치를 부여하고, 평가항목에 점수를 부여한 후 그 합으로 위험도를 평가하는 방법이다.

2.2 고압가스배관 관리시 문제점 분석

현재 고압가스배관 관리시 해결이 되어야 할 사항을 파악하기 위하여 관련 전문가 16명을 대상으로 면담 및 설문조사 실시하였다. 결과에 따르면 효과적인 매설배관 관리를 위하여 다음과 같은 사항이 필요한 것으로 나타났다.

- 정밀한 지하매설 배관지도(1/500 이상의 축적) 구축
- 지하매설 배관지도와 GPS 정보 및 GIS 시스템 통합
- 지하매설 배관 통합관리 체계 구축 및 시스템 개발
- 유지관리 단계에서 위험도 평가모델을 이용한 표준화된 안전성 평가기법 개발
- 각종 공사시 지하매설 배관이 직접 영향을 받는 경우에 효율적이며 안전한 대체 이송배관 설치방법 개발

2.3 위험성 평가 기법

위험이란 용어는 국어사전에 “충치 않은 일이 생길 우려가 있어 위태롭고 험악함”이라고 정의되어 있다. 손상의 결과에 따른 손실 (Damage)이라는 두 개념의 조합이다(Acton et al., 1998). 위험성 평가의 목적 중의 하나는 객관적인 증거와 지식을 사용하여 인식된 위험도를 절대위험도에 되도록 근접시키려는 데에 있으며, 이를 위해서 인자들에 대한 자료의 구축이 반드시 필요하며, 확률적인 분석데이터도 필요하다.

위에서 언급된 위험성의 속성을 고려하면, 위험성의 분석이란 다음의 3개의 질문에 대한 대답을 하는 것이라고 할 수 있다(Kim et al., 2000).

- 무엇이 잘못될 수 있는가? (손상요인)
- 잘못될 사건의 발생 가능성은? (사고 발생확률)
- 결과로 인한 손실의 규모는? (손상결과)

위험성을 평가하는 개략적인 절차는 Fig. 3과 같다.

2.3.1 매설배관의 위험성 평가기법

기존 가스배관의 안전성을 평가하기 위한 방법으로는 육안 검사법이나 내부 검사법과 같이 가스배관을 직접 검사하는 방법이

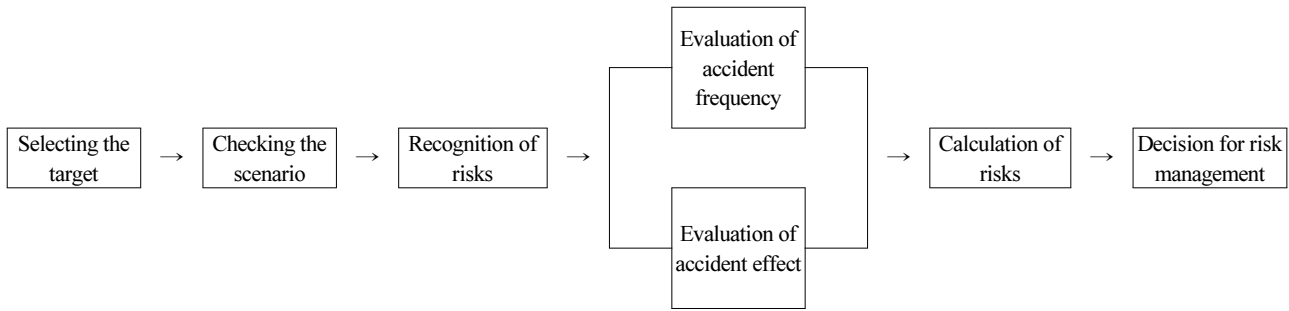


Fig. 3. Procedure of Risk Analysis Management Evaluation (Kim et al., 2000a)

주로 이용되었다. 그러나 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 평가할 필요가 있다(Kim and Go, 2000).

가스배관 사용 중에 파손사고가 발생하였을 경우와 파손사고가 없더라도 배관계 설비의 일정기간 사용한 후에는 정기적인 정밀안전진단을 실시하여 배관계 안전도 향상이나 유지보수 효율화를 위해 필요한 사항을 찾아내고 기존 배관계의 노후정도, 향후 잔여수명 등을 평가하여, 필요한 경우 보수 및 교체 등의 적절한 조치를 취해야 한다(Korea Gas Corporation, 1995).

2.3.2 외국의 위험성 평가기법사례

미국의 경우에는 DOT (Department of Transportation)에서 49 CFR Parts 192~195와 Part 199등에서 가스 배관의 안전한 운전을 위해서 최소의 요구 조건을 명시한다. 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.

IAP (Integrity Assessment Program)는 전체적으로 가스배관 설비의 데이터베이스 구성, 위험요소 평가용 알고리즘의 정의, 위험요소의 평가 및 위험요소를 줄이는 방법 등으로 구성되어 있으며, 위험요소를 ROF (Risk of Failure)와 COF (Consequence of Failure)로 구분하고, 다시 이를 세부항목들로 나누어 각각의 경우 위험요소에 얼마나 영향을 끼치는지를 평가하고 있다. 위와 같은 시스템으로 멕시코, 캐나다 등의 다른 국가들도 미국의 IAP와 비슷하게 위험요소를 ROF와 COF로 구분하고 있다.

Table 2. Risk Assessment Programs of Several Countries (Son, 2016)

Countries	Programs
USA	IAP (Integrity Assessment Program) : ROF(Risk of Failure) & COF(Consequence of Failure)
Canada	TRPRAM (Transcanada Pipeline Risk Assessment Model)
Mexico	RAMP (Pipeline Risk Assessment and Management Program)
UK	PIPESAFE, TRANSPIRE
Australia	AS 2885-1997 (Australian Petroleum Code)

위험요소인 ROF와 COF들을 정의할 때 현장에서의 관찰, 사고 사례 분석, SCC나 부식 실험등과 같은 실제 환경에서 실험을 통한 데이터의 축적, 가스배관 설비나 환경의 모사를 통한 모델링, 현장 유경험자나 전문가의 조언 등으로부터 자료를 얻고 있다(Kim and Go, 2000).

2.3.3 매설배관 위험성 평가모델

앞에서 언급한 위험성 평가기법의 HAZOP, FMECA, What-if, Check-list 등과 같이 일반적으로 널리 사용되고 있는 위험성 평가 방법들은 제조공정 설비의 분석에 주로 적용된다. 제조공정 설비는 일반적으로 여러 기기들이 상호 연결되어 있으며 공정 조건이 변화될 가능성이 항상 존재하기 때문에 다양한 변화가 발생할 수 있다. 그러나 공정조건의 변화가 거의 없고 시설이 지극히 단순한 배관계에 대해서 기존의 위험성 평가 기법을 적용하는 것은 적절하지 않다.

이러한 배관자체의 특성과 적절한 위험성 평가방법의 미비로 대부분의 위험성 평가에서 모든 배관은 단위 길이 당 위험도가 동일하다고 가정하고 있다. 그러나 실제로 배관의 부식환경, 운전조건, 배관의 두께, 용접개소 등과 같은 구조적인 차이로 인해서 당연히 위험성이 다르게 존재할 뿐만 아니라, 국내의 경우에는

Table 3. Risk Assessment Classification and Application Example for Pipeline (Korea Gas Safety Corporation, 1998)

Classification	Contents	Overseas Program Model and Host Company	Domestic Program Model and Host Company
Scoring Model	Giving a relative score by type for pipeline risks to evaluate the risk. Both quantitative and qualitative evaluation.	- LAP (Bass-Trigon) - Pipeline Risk Model (Trans Canada Pipeline)	- SPC (Korea Gas Safety Corporation) - RiskFree (Korea Gas Corporation)
Accident Effect Evaluation Model	Describe the risk in a quantitative way involving interpretation about the spread and explosion of gas after the accident. Various techniques are developed.	- PIPESAFE (BG) - TRANSPIPE	- TRIMS (Korea Gas Safety Corporation)
Damage Probability Data Model	To indicate the risk of pipelines by applying the risk factors and damage probability	- PIMOS (GRI&Wood Ward Clyde) - Corrosion Model (BG)	- TRIMS (Korea Gas Safety Corporation)

Table 4. Procedure of Risk Evaluation

Stage	Description
1 Classification of Pipelines	Classification by conditions like pressure, environment, laying years, etc. and environmental changes
2 Generalization	Setting each factor. Relative importance by factor. Stage to decide the weighting (based on experienced of the local workers and data from Korea and overseas)
3 Collecting Data	Stage to collect data by factor for evaluation by pipeline classification
4 Maintenance	Stage to select a maintenance plan based on the evaluation result and establish database for changes afterwards

도심지역의 잦은 굴착공사로 인한 사고도 빈번하므로, 이를 고려한 위험성 평가 접근방법이 필요하다.

3. 매설배관의 위험성 평가모델

3.1 매설배관 위험성 평가

위험성 평가를 수행하는 국내의 기관들의 현황을 살펴볼 때, 사고 이후 영향평가 모델과 같은 기법은 도시가스사와 같이 인구 밀집지역에 배관이 대부분 매설되어 있는 현실을 감안할 때 적합한 방법은 아니다. 또한 손상확률 모델을 사용할 경우 우리나라의 실정상 가스사고에 대한 충분한 조사 및 자료가 미흡하고 외국의 사례를 적용하는 것은 환경적 차이로 인해서 적절하지 않다. 따라서 도시가스사에 적합한 위험성평가 방법은 Scoring Model과 유사한 배관의 위험성 평가로 접근한다.

여기서, 사고발생빈도 즉 사고확률을 포함시키지는 않았지만 위험성을 나타내는 손상 요인들 안에 여러 인자들 사이의 가중치를 두어서, 사고가 일어나게 되는 원인별 기여도를 표시하여, 이 부분들을 어느 정도 보완하고자 하였다. 이 적용기법은 배관에 위험을 미치는 요인들의 정성적인 위험성을 정량적인 점수로 표시하여 배관별로 위험성을 나타내고 유지관리 및 보수 시 차별적으로 대처하고자 하는데 목적을 두었다(Kim et al., 2000).

또한 기존의 Scoring Model에서 한 단계 진전하기 위해서 배관

의 위험을 주는 요소들을 세분화 및 조정하여 고압가스배관의 특성상 다양한 조건의 도심 지역 간접 시설물의 영향을 나타내고자 하였다.

Scoring Model을 사용하여 배관의 위험성을 평가를 진행할 때 일반적으로 Table 4의 네 가지 단계를 통해서 진행한다(Table 4).

3.2 Scoring Pipeline Checklist (SPC) 시스템

SPC 시스템은 미국의 PLG에서 개발한 것을 한국가스안전공사에서 우리 실정에 맞도록 변형한 것이다.

SPC 시스템은 분석대상이 되는 배관의 외부요인을 반영하여 위험도를 평가한다. 이 외부요인은 적용하고자 하는 배관 시스템의 특성에 따라 약간씩 달라질 수 있으나 일반적으로 Table 5와 같이 분류할 수 있다. SPC 시스템은 도시가스 배관을 특성에 따라 여러 구간으로 나누고 각 구간의 여러 요인을 고려하여 구간별로 위험성을 서열화하는 방법이다(Hong, 2003).

배관은 행로를 따라 위험요소가 달라질 수 있기 때문에 다른 설비와 달리 전체 배관길이에 대해 동일한 위험도를 갖지 않는 경우가 많다. 따라서 배관의 위험도를 평가하기 위해서는 배관의 구간을 나누는 일이 대단히 중요하다. 배관의 구간을 짧게 하여 여러 구간으로 나누면 평가는 정확하나 자료의 수집과 분석에 많은 시간과 자원이 필요하다.

반면 배관 구간을 길게 하면 적은 비용으로 쉽게 처리할 수

Table 5. Thomas Model: External Factors of SPC System

External Factors	Items
1. Corrosion	- Environmental Factors (interface, air environment, liquid and soil corrosion, lapse year of pipelines, etc.) - Measurement (coating condition, coating test, cathode type, Smart Pigs, patrol interval, etc.)
2. The Third Construction	- Environmental Factors (the third construction frequency, on-land facilities, etc.) - Measurement (laying depth, index condition, damage prevention measure, indication of pipelines, patrol frequency, etc.)
3. Welding & Test	- Environmental Factors (welding to circumference or length) - Measurement (nondestructive test, internal pressure and confidential test)
4. Design	- Pipeline materials, soil movement, maximum operation pressure MAOP (Maximum Allowable Operating Pressure)
5. Operation & Maintenance	- Pipeline remote monitoring system (SCADA), education/training, maintenance procedure statement

※ Environmental Factors : Factors that causes leakage by destructing integrity of the pipelines

※ Measurement : To prevent leakage coping with environmental factors that cause leakage

있지만 특성이 다른 부분이 섞여 있는 경우에는 최악의 조건에 있는 것을 기준으로 판정해야 하므로 결과의 정확도가 떨어진다. 그러므로 배관 구간을 나누는 최선의 방법은 중요한 변화가 생기는 곳에서 구간을 나누는 것이다. 평가담당자는 자료 수집에 필요한 경비와 원하는 정확도를 고려하여 중요한 변화에 정의와 우선순위를 결정해야 하며, 반드시 배관을 운영, 관리하는 담당자의 의견을 반영해야 한다.

3.3 SPC를 이용한 매설배관 위험성 평가

본 논문에서 적용하고자 하는 SPC 기법은 분석대상이 되는 배관의 외부요인을 반영하여 위험도를 평가한다.

매설배관에서의 가스누출을 유발하는 환경요인과 이를 방지하고자 하는 방지대책에 근거하여 각 매설배관 구간에 가중치를 부여하는 Scoring Model 시스템이다.

Scoring Model을 사용하여 배관의 위험성 평가를 위해서 4가지 단계를 통해 진행이 된다. 먼저 1단계 배관의 구분을 통해 배관의 압력, 환경, 매설년도 등과 같은 조건 및 환경의 변화로서 분석대상 배관을 결정한다. 2, 3단계인 일반화 단계, 자료입수 단계는 많은 기간과 비용이 필요로 하며, 5가지 외부요인에 따른 28가지 세부항목 및 가중치를 결정하며 SPC 평가를 수행하기 위한 배관 구분별 평가요인 자료를 수집한다. 이러한 결과로 4단계 유지관리 계획을 선정하고 추후 요인들의 변화에 대한 DB화를 구축한다.

Scoring Model 시스템의 분석대상이 되는 배관 특성을 반영하여 배관이 겪고 있는 외부요인들을 결정하며, 세부항목들의 종류와 가중치는 누출사고 원인 분석결과와 배관 유지관리를 담당하는 기술자의 경험을 바탕으로 결정해야 한다.

각 세부 항목들을 어떻게 정의하는 것이 평가결과의 신뢰성을 결정한다. 그러므로 대상 회사의 배관에 관련된 자료를 철저히 수집 분석하여 그 동안의 경험과 기술축적을 충분히 이용할 수 있도록 했다.

3.3.1 위험점수 계산

정성적인 배관의 위험성을 정량적인 점수 값으로 나타냈으며, 점수가 높아질수록 위험성이 감소하는 것으로 정의한다(Korea Gas Safety Corporation, 1998).

SPC에 적용된 평가요인별 가중치는 각 도시가스 사고 전체 원인 발생 및 배관담당자의 경험을 바탕으로 실정에 맞게 평가 항목 및 가중치를 결정한 것으로, 한국가스안전공사의 2014년 가스사고 연감을 기초로 하여 결정한 것을 매설배관 위험성 평가 위험요인 도출 및 지수 조사를 위한 매설배관 전문가 의견을 수렴하기 위하여 A회사의 관로파트장, 굴착공사 담당자를 대상으로 의견수렴을 실시하였다. 조사대상지는 현재 A회사의 전국 9개 지사에 근무하는 전문가들로 구성하였으며, 조사대상지는 크게 관로파트를 담당하고 있는 관로파트장 9명과 각 지사의 관로파트에서 현장을 담당하고 있는 굴착공사 담당자 2명씩 18명을 2개 그룹으로 구성하였다.

조사는 총 3단계에 걸쳐서 수행되었으며, 1차 조사는 2015년 9월에 실시되었다. 설문대상을 대상으로 연구의 목적을 설명하고 기존의 위험성 평가기법중 도시가스 배관 안전성 평가기법 SPC (Scoring Pipeline Checklist)의 문제점 및 차이점의 분석을 위해 메일을 통하여 안내를 하였으며, SPC (Scoring Pipeline Checklist) 선행 평가기법을 바탕으로 문헌정보 및 관련 전문가와의 상의를 통해 의견을 도출하여 매설배관 위험성을 평가 위험요인 항목에

Table 6. Weights for External Factors (Son, 2016)

Classification	Weighing% (±deviation)	Maximum Evaluation Value
1. Corrosion	28% (±14)	42
2. The Third Construction	48% (±24)	72
3. Welding & Test	9% (±4)	13
4. Design	7% (±4)	11
5. Operation & Maintenance	8% (±4)	12
Total	100%	150

관한 자유기술식 개방형 설문지를 설계하여 1,2,3 단계별로 평가 및 정리 단계로 설문조사의 결과를 최종적으로 평가하고 정리하여 평가 항목 및 가중치를 재결정한 것이다.

3.3.2 세부항목 기준결정

여러 가지 세부항목들에 대해 현장 실정에 알맞게 적용, 의미 있는 분석결과가 얻어지도록 가중치를 결정하여 자료 분석 결과와 배관담당자의 경험을 바탕으로 현장실정에 맞게 평가 항목 및 가중치를 결정한 자료를 근거한 평가기준을 설정하였다.

- 부식: 배관의 부식에 영향을 줄 수 있는 요인들을 환경적 요인과 방지대책으로 구분하여 매설배관에 적용하였다.

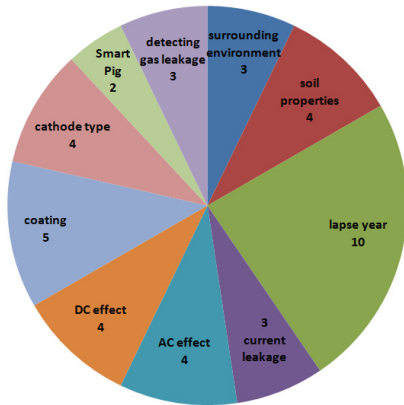


Fig. 4. Sub Categories and Their Evaluation Scores for Corrosion

- 제3자 공사: 배관손상을 일으킬 수 있는 제3자 요소의 환경적 요인은 굴착공사의 작업발생의 빈도, 타공사 발생건수 등이 있다. 이들 각 환경요인에 대한 대책으로는 관로검사를 위한 순찰빈도, 매설배관 보호 조치율 등이 있다.

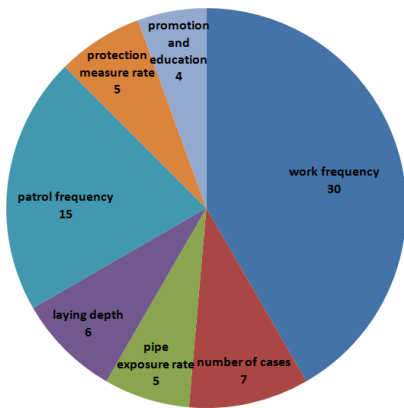


Fig. 5. Sub Categories and Their Evaluation Scores for the Third Construction

또한 매설배관 주위의 주민들에게 가스의 잠재위험과 비상대응 및 연락에 대한 주민홍보·교육을 실시함으로써 타공사의 협의 없이 실시하는 미신고 굴착공사를 발견할 수도 있고 또한 가스누설이 발생했을 때 가까이에 있는 주민이 사고의 초기단계에 발견, 연락함으로써 사고피해를 최소화할 수도 있다.

- 용접/시험: 매설배관 운영상 배관에 손상을 줄 수 있는 용접/시험의 요인들을 환경적 요인과 방지대책으로 구분하였으며, 환경적 요인으로는 매설된 배관의 원주방향 용접부 평균길이, 길이방향 용접부 개수의 요인이 있으며, 방지대책으로는 매설된 배관의 사공 시 비파괴 검사의 유무와 배관을 매설이 완료된 후 사용승인을 받기 위해 내압시험 등이 있다.

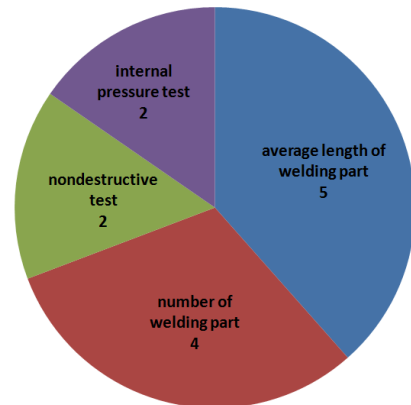


Fig. 6. Sub Categories and Their Evaluation Scores for Welding & Test

- 설계: 가스시설에서의 설계사항은 매우 중요한 사항으로서, 매설배관의 안전율과 주변 인구밀도 지수에 따른 설계지역 구분등급, 매설배관에 사용되는 최고허용운전압력(MAOP)에 따른 시스템의 안전율, 배관이 매설된 지역의 매립지 및 연약지반에 의한 Land Moving의 잠재성 등이 있다.

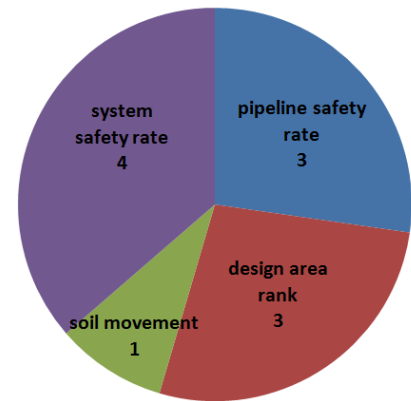


Fig. 7. Sub Categories and Their Evaluation Scores for Design

- 운전/보수: 매설배관 운영을 위해서는 운전/보수가 필수적이며, 이중에 하나인 SCADA System (Supervisory Control And Data Acquisition System)의 적용과 유지보수, 교육·훈련 등이 있다.

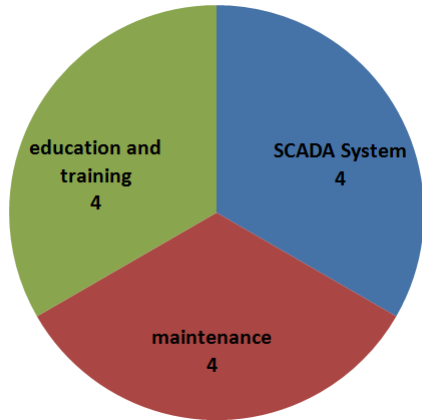


Fig. 8. Sub Categories and Their Evaluation Scores for Operation & Maintenance

3.3.3 항목별 가중치 Score 관리기준

5가지의 주요 외부요인과 28가지의 세부항목으로 매설배관 위험구간의 상대적 위험도 결정 및 효율적인 관리기준을 마련하였다. 예를 들어 각 요인별 효과를 점수로 환산하여 평가결과를 Score 관리기준을 적용 매설배관의 안전성과 위험구간 및 위험요소를 개선함으로써 매설배관의 안전성을 향상시킨다(Table 7).

Table 7. Management Standards by Criteria (Son, 2016)

Criteria	Corrosion	The Third Construction	Welding/Test	Design	Operation/Maintenance	Total Score
Maximum Evaluation Value	42	72	13	11	12	150
Very Good	30~42	60~72	10~13	9~11	10~12	119~150
Good	25~30	50~60	8~10	7~9	8~10	98~119
Bad	20~25	40~50	6~8	5~7	6~8	77~98
Very Bad	Less than 20	Less than 40	Less than 6	Less than 5	Less than 6	Less than 77

Table 8. Section for Risk Evaluation - CASE 1

Pipe Diameter	30 inch (762 mm)
Material	Polyethylene coated steel pipeline
Pipeline Standard	API-5L-X65
Length of Pipeline	1,547.1 m
Wall Thickness	17.5 mm

4. SPC를 이용한 매설배관 위험성 평가사례

인구밀집지역인 대전 노은1,2지구 택지개발사업구간을 통과하는 한국가스공사의 A관리소 ~ B관리소 ~ C관리소 사이의 고압가스 매설배관에 대하여 정성적 평가 방법을 실시하여, 배관을 특성별로 나누고 구간별로 위험성을 분석하여 각 구간의 상대적인 위험도를 결정하여 효율적인 관리기준을 정할 것이다.

4.1 위험성 평가 절차

평가절차는 다음과 같은 순서로 진행되었다.

- ① 분석대상 배관 결정
- ② 사고 이력자료 검토
- ③ 외부요인 결정
- ④ 세부항목 및 점수평가 기준 작성
- ⑤ 가중치 및 편차
- ⑥ 평가 Score 관리기준 작성
- ⑦ 특성별 배관구분기준 마련 및 NODE 구분
- ⑧ 평가수행
- ⑨ 평가결과 Score 관리 기준과 비교검토
- ⑩ 불량구간에 대한 대책수립

4.2 위험성 평가대상

위험성 평가대상은 A관리소 ~ B관리소 ~ C관리소 구간의 고압가스 매설배관이며, 배관의 규격 및 현황은 Tables 8 and 9와 같이 재질은 API-5L-X65이며 관경은 30 inch (762 mm)로 배관의 총길이는 A관리소 ~ B관리소 7.82 km, B관리소 ~ C관리소 14.12 km

Table 9. Section for Risk Evaluation - CASE 2

Pipe Diameter	30 inch (762 mm)	
Material	Polyethylene coated steel pipeline	
Pipeline Standard	API-5L-X65	API-5L-X65
Length of Pipeline	595.8 m	1,080 m
Wall Thickness	17.5 mm	14.3 mm



Fig. 9. Test Location for Case Studies

중 위험성 평가대상 구간(CASE 1 : A관리소 ~ B관리소), (CASE 2 : B관리소 ~ C관리소)인 1.547 km와 1.675 km에 대하여 실시하였다.

4.3 매설배관 위험성 평가

배관의 위험성을 평가하기 위해서는 전체배관을 여러 구간으로 나누는 방법이 중요한 사항이다. 배관의 구간을 짧게 나누면 평가가 정확하지만, 자료의 수집과 분석에 많은 시간과 자원이 필요하다.

반면에 배관구간을 길게 하면 적은 비용으로 쉽게 처리할 수 있지만 특성이 다른 부분이 섞여있는 경우 최악의 조건에 있는 것을 기준으로 판정해야 하므로 결과의 의미가 모호하고 정확도가 감소한다. 따라서 가장 좋은 방법은 어떤 형태로든 중요한 변화가 생기는 곳에서 나눔으로서 의미 있는 구간으로 구분하는 것이다.

매매설배관의 세부구분은 전체 위험성 평가대상 구간(CASE 1 - A관리소 ~ B관리소, CASE 2 - B관리소 ~ C관리소)인 1.547 km와 1.675 km중 매설배관의 두께, 관경, 운전압력, 매설년도 등의 세부 사항을 반영하였다.

CASE 1,2의 대상 배관에 있어서 결과치는 Tables 10 and 11과 같으며 Table 7의 SCORE별 관리기준에 의해 불량 판정기준에 해당하는 것은 없으며 SCORE 관리기준인 총점 150점 중에

Table 10. Result of Risk Evaluation - CASE 1

NO	Corrosion SCORE	The Third Construction SCORE	Welding/Test SCORE	Design SCORE	Operation/Maintenance SCORE	SPC TOTAL SCORE
Node-1	25	52.6	9	7	8.9	102.5
Node-2	25	55	11	7	8.9	106.9
Node-3	25	55	11	7	8.9	106.9
Node-4	25	53	11	7	8.9	104.9
Node-5	25	55	11	7	8.9	106.9
Node-6	25	53	7	7	8.9	100.9
AVERAGE	25.0	53.9	10.0	7.0	8.9	104.8

Table 11. Result of Risk Evaluation - CASE 2

NO	Corrosion SCORE	The Third Construction SCORE	Welding/Test SCORE	Design SCORE	Operation/Maintenance SCORE	SPC TOTAL SCORE
Node-1	25	55	7	7	8.9	102.9
Node-2	25	55	11	7	8.9	106.9
Node-3	27	53	11	7	8.9	106.9
Node-4	20	55	11	7	8.9	101.9
Node-5	20	55	11	7	8.9	101.9
Node-6	20	53	11	7	8.9	99.9
Node-7	20	55	11	7	8.9	101.9
AVERAGE	22.8	54.3	10.3	7.0	8.9	103.4

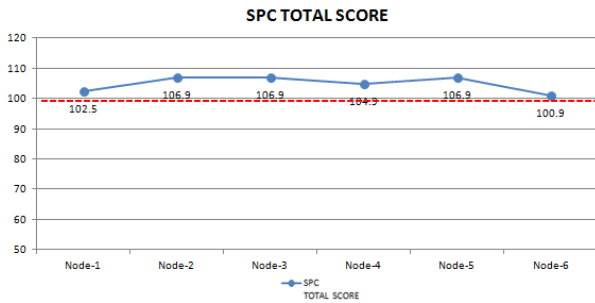


Fig. 10. Result of Risk Evaluation - CASE 1

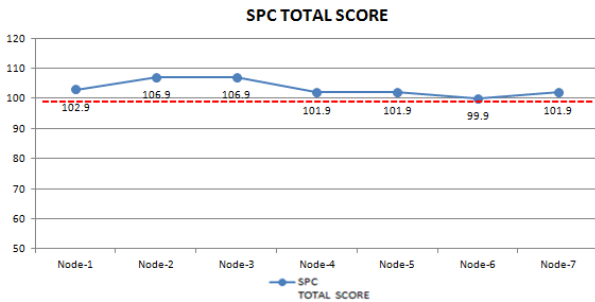


Fig. 11. Result of Risk Evaluation - CASE 2

양호의 판정기준인 98점~119점에 부합하였다.

그러나 5가지 외부평가요인별 세부항목에 있어서 일부 불량관정에 해당하는 항목이 다음과 같이 발생하였다.

CASE 1, 2의 Figs. 10 and 11의 매설배관 위험성 평가결과 비교에서 대상배관의 부식위험성 점수 값이 약 28%를 차지하는 비중이 큰 부분으로 총점 150점 중에 42점에 해당하는 부식 항목 중 대부분이 25점 이상으로 양호의 판정기준에 부합하나, CASE 2의 Node-4~7의 경우 상대적으로 부식위험성이 불량인 상태임을 알 수 있다.

부식 세부항목의 불량관정에 해당하는 CASE 2의 Node-4~7번은 SCORE 관리기준인 총점 42점 중에 양호기준인 25점 미만인 20점을 획득하였다. 이는 매설된 배관의 경과년수가 20년 이상으로 배관의 노후화로 일부 위험성을 내포하고 있다.

CASE 1, 2의 Figs. 10 and 11의 매설배관 위험성 평가결과 비교에서 대상배관의 제3자 공사의 점수 값이 약 48%를 차지하는 비중이 큰 부분으로 총점 150점 중에 72점에 해당하는 제 3자 공사 항목 중 대부분이 50점 이상으로 양호의 판정기준에 부합하였다.

제3자요인(타공사) 세부항목의 부분에서 인구밀집지역에 매설되어 있으나, 주변의 타공사(굴착공사)로 인한 환경적 요소로 매설 배관의 물리적인 영향을 줄 수 있는 위험성이 없어 안전한 평가를 보여주고 있다.

용접/시험 세부항목의 부분에서 불량관정에 해당하는 CASE

1의 Node-6번, CASE 2의 Node-1번은 B관리소 앞부분으로 2002년에 배관이설공사시 작업 절차상 12 m 정본 배관을 Tie-in작업을 위하여 6 m 이하의 단관을 사용함으로써 세부항목 평가기준인 용접부간 평균거리가 6 m 이하에 해당됨에 SCORE 관리기준인 총점 13점 중에 양호기준인 8점에 못 미치는 7점을 획득하였다.

설계, 운전/보수 세부항목에 있어서는 모두 양호한 결과치 이상을 보여주고 있다.

부식항목에서 낮은 점수를 얻은 매설배관이 통과하는 주변 환경의 영향, 배관의 경과년수, 다른 금속배관으로의 전류누설 항목에서 안전성을 향상시키기 위해 전기방식관리, 피복관리, 건전성관리를 통한 보다 체계적인 예방활동을 해야 할 것이다. 뿐만 아니라 제3자 공사 요인 중 작성발생빈도, 타공사 발생건수, 공사에 따른 배관 노출률 등은 SOC 사업과의 연관성으로 불가피하게 발생할 수밖에 없는 조건이나, 매설배관의 위험성을 낮추기 위한 개선사항을 수행하고, 사고예방을 위한 안전관리 활동을 지속해야 할 필요가 있다.

4.4 위험성 평가의 응용

매설배관의 위험성 분석결과를 이용하여 효과적인 배관의 안전 관리 전략을 수립할 수 있다. 예를 들어 매설배관을 관리하는 업체가 모든 배관에 대해 부식 점수 값을 30점 이상의 매우 양호의 상태로 관리하고자 한다면, 배관의 경과 년수에 따른 노후배관을 단계적으로 교체, 다른 금속배관으로의 전류누설을 차단할 수 있는 추가적인 절연 및 차단조치, 전철의 영향에 따른 방식전류의 안정화를 위한 배류기 설치 등의 여러 가지 조치를 취할 수 있다. 이런 여러 가지 추가적인 방법이 밝혀지면 각각의 방법의 효과를 평가해야 한다.

평가의 기준은 투입해야 하는 비용과 그에 따른 Score값의 증가이다. 비용을 추정할 때에는 반드시 생애주기비용(LCC : Life Cycle Cost)을 고려해야 한다. 또한 경제적인 요소에 근거하기 때문에 의사결정에 비경제적인 요소에 대해서 고려하여 가능한 방법들 중에서 현재의 예산 상태나 법적적 제약요인(도로굴착허가) 등을 고려하여 가장 적절한 방법을 적용할 수 있다(Choi et al., 1999).

5. 결론

도심지역 및 인구밀집지역에 매설된 가스배관의 경우에 사고가 발생하면 경제적 손실과 더불어 다양한 위험상황이 생길 수 있다. 하지만 아직까지 가스배관의 안전관리에 관한 연구는 미비한 실정이며, 장기사용 도시가스배관에 대한 안전성 판단 기준이 부족하여 배관의 유지보수 및 교체주기 결정 등 효율적 안전관리의 한계가 나타나고 있다. 본 연구에서는 노후화된 배관을 비롯하여 위험성이

큰 가스배관의 안전성 확보를 위하여 유지관리 단계에서 정량적으로 매설배관의 위험성을 평가하기 위한 모델을 제시하였다. 기본적으로 Scoring Model의 정성적 위험성 분석기법을 이용하여 매설배관의 위험성을 점수로 표현되도록 하였다.

제시된 위험성 평가모델을 적용하여 인구밀집지역인 대전 노은 1,2지구 택지개발사업구간을 통과사이의 고압가스 매설배관에 대하여 정성적 평가를 실시하였다. 그 결과, 4,000 km가 넘는 한국가스공사의 고압 매설배관에 대해 본 연구에서 수행된 매설배관 위험성 평가 절차를 이용하여 관리하면 서열화된 위험성평가 결과를 이용하여 효과적인 매설배관 안전관리가 가능하게 됨을 밝혔다.

고압가스 매설배관 관리시스템에 대하여 추가연구 및 보완이 필요한 부분은 시스템의 평가항목과 평가결과에 따른 데이터의 연계, 평가 결과에 따른 업무 등에 따른 시스템의 확장 및 평가 문진들의 신뢰성 확보를 위한 지속적 연구 등이 있다. 이러한 관련 사항에 대하여 지속적인 연구를 통하여 고압가스 매설배관의 관리 시스템을 구축하면 관련 장치 및 시설뿐만 아니라 나아가 가스 산업시설의 중대사고의 안전성 향상 및 예방을 실현할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

Acton, M. R., Baldwin, P. J. and Baldwin, T. R. (1998). "The development of the pipe safe risk assessment package for gas transmission pipelines." *Proceedings of The International Pipeline Conference*, Vol. 1, pp. 1-7.

Bang, H. J. (2011). "The study on cost-benefit with rationalizing burial depth of urban gas pipelines crossing a river." Master's thesis. Yonsei University (in Korean).

Choi, M. S. and Lee, U. S. (1999). "LCC analysis techniques and methods applied in the construction business." *Research Report*,

Construction Economy Reserch Institute of Korea (in Korean).

Choi, J. B. (2001). "Integrity evaluation of oil and gas pipelines." *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 21, pp. 91-99 (in Korean).

Go, J. S. and Kim, H. (2004). "Risk ranking analysis for the city-gas pipeline in the underground laying facilities." *Journal of the Korean Institute of Fire Science & Engineering.*, KIFSE, Vol. 18, No. 1, pp. 54-66 (in Korean).

Hong, S. K. (2003). "Gas pipeline risk assessment technology." *Journal of Fluid Machinery*, KSFM, Vol. 6, No. 2, pp. 104-111 (in Korean).

Kim, B. S. (2013). "A study on management of gas transportation pipelines based on integrity assessment system." Doctoral dissertation. KwangWoon University (in Korean).

Kim, T. U., Sung, J. S. and Jo, Y. H. (2000a). "Risk assessment program of underground pipeline development." *Journal of the Korean Institute For Gas.*, KIGAS, Vol. 4, No. 2, pp. 37-45 (in Korean).

Kim, U. S. and Go, Y. T. (2000b). "Study on safety assessment of gas pipeline." *Journal of the Korea of Safety*, KOSOS, Vol. 2000, pp. 7-12 (in Korean).

Korea Gas Corporation (1995). Risk Assessment on the Korea gas corporation's valve station (in Korean).

Korea Gas Corporation (2009). Gas supply technical handbook (in Korean).

Korea Gas Safety Corporation (1998). Safety Evaluation Method of City Gas Pipelines (in Korean).

Korea Gas Safety Corporation (2015). "Annual Report 2014 Gas accident." Available at : <http://www.kgs.or.kr/kgsmain/GasAccident.do?method=list> (in Korean).

Korea Gas Safety Corporation (2015). KGS CODE FS451, 452, FP551, 552 (in Korean).

Korea Ministry of Trade, Industry and Energy (2015). City gas business law, High pressure gas safety control law (in Korean).

Muhlbauer, W. K. (2004). Pipeline Risk Management Manual (3rd Ed.), Gulf Professional Publishing.

Son, M. D. (2016). A Study on the Safety Improvement of Buried Pipeline Using Scoring Model. Mater thesis, SeoulTech (in Korean).

US Department of Transportation PHMSA (2011). Code of Federal Regulation : Transportation of Natural and other Gas by Pipeline, Title 49, Part 192.

