



신뢰도평가 기반 도시가스배관 종합관리시스템 구축 연구

오동석 · †이진한

한국가스안전공사 가스안전연구원

(2018년 11월 26일 접수, 2018년 12월 20일 수정, 2018년 12월 21일 채택)

A study on the City-gas Pipeline Management System by Reliability Based Design and Assessment

Dong-Seok Oh · †Jin-Han Lee

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety corporation, Eumseong 27738, Korea

(Received November 26, 2018; Revised December 20, 2018; Accepted December 21, 2018)

요약

도시가스배관에 대한 효율적인 안전관리를 위해서 33개 도시가스사로부터 입력된 데이터를 체계적으로 관리하고 분석함으로써, 가스안전관리 관련 대내·외적 업무를 효과적으로 수행하기 위하여 도시가스배관 종합관리시스템을 구축하였다. 시스템에 업로드된 배관정보 데이터는 KGS Code에 명시된 기준에 의해서 위험지수로 표현되고, 이를 통하여 진단우선순위가 도출됨으로써 배관 안전관리가 수행되고 있다. 하지만 위험지수를 선정하는 배점방식이 매우 단순하고 관련 근거도 부족할 뿐만 아니라, 다수의 중복 순위로 인해 진단대상 선정에 대한 신뢰성이 높지 않다. 이에 신뢰도 기반 설계 및 평가법을 기반으로 한 프로그램을 개발하여 합리적인 위험도 및 위험순위를 도출하였다.

Abstract - For efficiently safety management of city gas pipelines, the City-gas Pipeline Management System(CPMS) has been developed to systematically manage and analyze the data collected from 33 city gas companies and to effectively perform internal and external affairs related to gas safety management. The piping information data uploaded to the CPMS is ranked the risk according to the criteria specified in the KGS Code, and the safety management of the piping has performed close inspection according to the risk ranking. However, the criteria for deriving the risk ranking is very simple and lacks relevant grounds, and the reliability for the determination of the close inspection pipeline is no high due to the redundant rank. Therefore, we developed a risk assessment program based on the Reliability Based Design Assessment(RBDA) methodology and tried to derive a reasonable risk ranking by linking it with the CPMS system.

Key words : CPMS, RBDA, risk ranking, close inspection, risk assessment

I. 서론

국내의 도시가스시설은 33개의 도시가스사들에 의해서 각각 운영되고 있으나 데이터 관리체계가 서로 상이하여 도시가스사업자가 진단·검사 관련 자료를 제출하는 서류가 통일되지 않아 배관상태 이력관리 등 데이터 활용에 어려움이 있었다.[1] 이에 도시가스

시설에 대한 전반적인 데이터를 체계적으로 관리하기 위해서 도시가스배관종합관리시스템(City-gas Pipeline Management System, CPMS)이 2015년 12월에 개발되었다. CPMS는 위험수준을 판단하는 정보항목에 가중치를 부여하여 위험구간 우선순위를 제안하는 “진단우선순위 지수”를 개발함으로써 객관적이고 신뢰할 수 있는 진단대상배관 선정근거를 마련하고자 하였다.[1] 하지만 현재 기준에 의한 선정 방식 및 배점이 매우 단순하여 다수의 중복 순위가 발생되고 있으며, 진단지수 즉 총 배점의 차이가 거의 없어 순위의

†Corresponding author:imhappy@kgs.or.kr

Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

Table 1. Criteria for computation of risk ranking

분류	배점 (최대)	점수
손상 유형부	3	견함 0.5
배관의 재질이 구 제종(강관 이외의 제종)의 배관	1	1
파괴이되지 않거나 손상이 우려되는 배관	1	1
불설 이외의 방법으로 설립된 배관	1	1
100% 비파괴시험을 하지 않은 배관	1	1
도양비 저항이 기준치에 미달(부식조건)되는 지역에 매설된 배관	1	1
연약지반에 설치된 배관	1	1
중차량(10톤 이상) 차량이 빈번한 편도 5차선 이상의 도로차도에 매설된 배관	1	1
상습 침수지역에 매설된 배관	1	1
야간진단 필요유무	1	1
심도미달 구간유무	1	1
파수관압거 설치여부	1	1
타공사가 진행 중인 구간의 배관과 타공사이후 매설된 배관	1	1
T/B 보수지수	5	방식보수인
VALVE 보수지수	5	방식보수인
배관 보수지수	5	방식보수인
1996년 이전(시공검리 도입 전) 시공된 배관	1	1

의미가 무색해졌다.

Table. 1은 현재 CPMS에서 진단지수를 산정하는 기준 및 배점을 나타내었다. 이러한 단순 유무를 판단하는 기준은 매년 크게 달라지지 않기 때문에 같거나 유사한 진단지수가 도출됨에 따라 진단대상배관이 변화하지 않은 결과가 나타나기도 한다.

이러한 CPMS의 약점을 보완하기 위해서는 적합한 위험 분석 방법론을 검토하고 프로그램화하여 현 시스템에 적용시킴으로써 합리적인 방법으로 위험도를 산정하고 위험순위를 도출할 수 있는 프로그램 개발이 필요하다.

위험도를 분석하는 방법 중의 하나로써 다양한 문헌에서도 확인 가능한 신뢰도 기반 설계 및 평가법(Reliability Based Design and Assessment, RBDA)이 있다. RBDA는 천연가스 수송배관의 신뢰성을 추정하는 확률론적 접근법으로 1999년 배관설계 가이드라인 중의 하나인 DNV-RP-F105[3]에서 소개된 바 있고, 2006년에 국제표준인 ISO 16708[4] 채택과 2007년에 캐나다 배관설계 기준인 CSA Z662-15[5]에 포함되었다. 국내에서도 신뢰도 기반 설계 및 평가법(RBDA)과 같은 확률론적 방법에 따라 부식 배관의 위험을 평가하는 방법이 여러 차례 소개된 바 있다.[6-10]

Fig. 1에 CSA Z662 소개된 배관 신뢰도 기반 설계 및 평가(RBDA)법의 절차에 대한 개요를 나타내었다. [5]

이 절차에 따르면 신뢰성에 관계된 한계상태를 정의한 다음 한계상태 함수를 실험 등을 통해 설정한다. 한계상태 함수에 사용되는 변수의 확률론적인 모델을 실제 통계데이터, 이론적 모델, 엔지니어링 판단에 근거하여 확정한다. 그런 후, 설계와 운전 적용되는 모든 인수를 즉 재료물성, 설계인자, 방식특성 등을 정의하고 주어진 한계상태 함수로부터 신뢰도를 계산한 후, 계산된 신뢰도가 허용가능

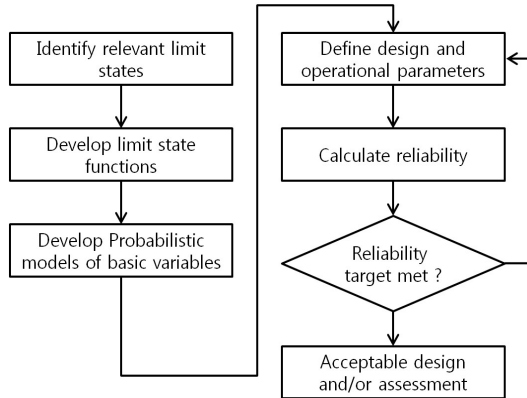


Fig. 1. Overview of RBDA process.

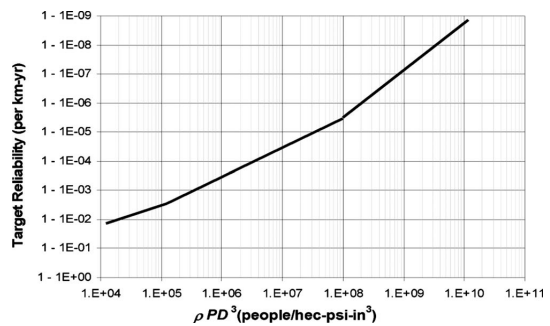


Fig. 2. Target reliability by CSA Z662[5].

수준인지를 판단하여 만족 될 때까지 설계 및 운전 인자를 변경하여 신뢰도 계산을 반복하는 평가이다.

CSA Z662에 따르면, 설계단계에 신뢰도 기반 접근법에 따라 설계한 경우 유지관리 단계에도 신뢰도 기반 접근법을 적용하도록 권고하고 있다. 신뢰도 기반 설계 및 평가법(RBDA)의 가장 큰 장점은 목표 신뢰도 값을 미리 설정해 놓고 그 목표 신뢰도 또는 최대 허용 가능한 고장(사고)확률(failure probability)을 충족하는 지를 설계단계 뿐만 아니라 유지관리 등 배관의 수명주기 전 단계에 걸쳐 평가하는 것이다. 따라서 이 방법론은 유지관리 계획을 수립하는 데 활용될 수 있다. CSA Z662 Annex O에서는 극한한계상태(ultimate limit states)에 대해 Fig. 3의 그래프와 같이 천연가스배관에 대한 신뢰도 목표를 제시하고 있다. 여기서 극한한계상태는 인명피해를 초래할 수 있는 통상 대누출(large leak)과 파단(rupture)이 고려된다.

그래프로 표현된 Fig. 2의 극한한계상태 신뢰도(R) 목표는 인구밀도, 운전압력, 배관직경의 함수로서 다음의 식 (1)로부터 계산할 수도 있다.[5]

$$R = \begin{cases} 1 - \frac{1650}{(PD^3)^{0.66}} & \text{for } \rho = 0 \\ 1 - \frac{197}{(\rho PD^3)^{0.66}} & \text{for } 0 < \rho PD^3 \leq 1.16 \times 10^7 \\ 1 - \frac{49700}{\rho PD^3} & \text{for } 1.16 \times 10^7 < \rho PD^3 \leq 7.1 \times 10^9 \\ 1 - \frac{4.05 \times 10^{10}}{(\rho PD^3)^{1.6}} & \text{for } \rho PD^3 > 7.1 \times 10^9 \end{cases} \quad (1)$$

여기서,

ρ = 인구밀도 (명/헥타르)

P = 압력 (MPa)

D = 배관의 직경 (mm)

신뢰도(R)와 고장빈도(p_f)와의 관계는 다음과 같은 식으로 표현되므로 고장빈도를 구하여 신뢰도를 평가할 수 있다.

$$R = 1 - p_f \quad (2)$$

만약 배관이 정해진 신뢰도 수준을 만족하지 못하면 보수 또는 교체를 고려하여야 하는데 국내의 경우는 보수 또는 교체를 해야 하는 신뢰도 목표 수준을 정하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서 개발되는 프로그램에서는 CSA Z662 Annex O에 제안된 극한 한계상태에 대한 신뢰도 목표를 적용하여 위험도를 도출하여 위험순위를 나타내고자 한다.

II. 접근방법

2.1. 타공사로 인한 고장률

단위 배관길이(km) 타공사 시 굴삭기 등이 배관을 타격(hit)할 수 있는 빈도는 결함수목분석법(fault tree analysis)으로 구할 수 있다. 국내 도시가스배관에 대한 타공사 손방방지 제도를 반영한 결함수목 분석법 적용사례는 이전 문헌[7]에 잘 설명되어 있다. 이 논문에서 소개된 방법에 따르면 결함수목은 12개의 근본사건으로 구성되며, 빈도 또는 확률 값은 Table 2에 나타내었다.

다음으로 앞서 설명한 굴삭기(Excavator)의 배관 타격(hit) 시에 그 타격되는 타격력과 배관이 가진 저항력의 비교로부터 구멍이 뚫려 누출이 발생할 확률을 구할 수 있다. 이는 굴삭기에 의해 가해지는 힘과 이에 견디는 배관의 저항력을 비교하는 한계상태함수인 식 (3)으로 표현될 수 있다.

Table 2. Input values for basic events of fault tree

기본 사건	설명	배관관리 상황	확률값
B1	배관 매설지역에서 굴착공사가 진행될 빈도 [day/km-yr]	<공사빈도> 가급 지역 나급 지역	4 0.5
B2	배관 매설지역에서 위험한 굴착행위 확률	굴착공사시 상주입회	0.01
B3	굴착깊이가 매설깊이를 초과할 확률	<매설깊이> 고압배관 : 1.2m 중압배관 : 1.0m	0.5 0.83
B4	보호철관이 설치되었을 경우 배관보호를 실패할 확률	보호철관 설치	0.2
B5	보호포의 기능실패 확률	보호포 설치	0.333
B6	배관관리자 정확한 배관위치 모름	도면 실측완료	0.005
B7	굴착 중 순찰 실패	순찰주기 1회/일	1
B8	순찰 중 굴착작업 발견실패	접근성 좋음	0.01
B9	배관관리자에게 굴착작업 통지 실패	원콜시스템 운영중	0.001
B10	굴착지로 이동전 사전협의 실패	사전무협의율	0.1
B11	안내표지 또는 라인마크 발견 실패	라인마크 설치	0.4
B12	안내표지 또는 라인마크 무시	라인마크 무시율	0.3

$$g_1 = r_a - q \quad (3)$$

여기서, 배관의 저항력 r_a [kN]으로서 CSA Z662에서 제안하는 식은 다음과 같다[5].

$$r_a = [1.17 - 0.0029(D/t)](l_t + W_t)t\sigma_u/1000 + \epsilon \quad (4)$$

여기서,

D = 배관직경(mm)

t = 배관두께(mm)

l_t = 굴삭기 이(tooth)의 너비(mm)

W_t = 굴삭기 이(tooth)의 폭(mm)

σ_u = 인장응력(MPa)

ϵ = 모델 에러로서 평균 0.833 kN, 표준편차 26.7 kN인 정규분포

Table 3. Input variable distributions for mechanical damage[11]

입력변수	분포	평균	표준편차
굴삭기 버켓 이의 너비[mm]	Uniform	90	28.4
굴삭기 버켓 이의 폭[mm]	Uniform	3.5	0.875
굴삭기 무게[ton]	Gamma	15.2	10.8
인장강도/SMTS*	Normal	1.12	0.039
항복강도/SMYS**	Normal	1.08	0.036

*SMTS: Specified Minimum Tensile Strength
 **SMYS: Specified Minimum Yield Strength

또한, 굴삭기에서 배관에 가해지는 충격력은 굴삭기의 무게와 상관관계가 있으며, 통계적 분석을 통해 굴삭기 무게의 함수로 표현될 수 있다. 기 연구구된 사례[11]에 따르면, 굴삭기 무게에 따른 충격력은 식 (5)로 표현된다.

$$q = 16.5w^{0.6919} \quad (5)$$

여기서, w =굴삭기 무게(ton)

주어진 굴삭기 타격으로부터 배관구멍이 뚫릴지 여부는 식 (3)의 한계상태함수로부터 판단하게 되는데 확률변수로부터 입력되는 값으로부터 계산되는 충격력(q)이 배관이 가지고 있는 저항력(r_a) 보다 큰 경우 파손이 일어난다고 판단한다. 계산에 사용되는 변수는 Table 3의 확률적 특성으로부터 샘플링 되어 입력되는 Monte Carlo 시뮬레이션 방법을 사용하였다.

배관에 구멍이 뚫려 누출이 발생하는 빈도는 굴삭기가 배관을 타격하는 빈도와 극한한계상태로 표현되는 구멍이 뚫릴 확률의 곱으로부터 계산하였다.

2.2. 부식원인에 의한 고장률

부식원인에 의한 극한한계상태는 인명피해가 발생할 수 있는 대누출과 대누출이 원인이 되어 결함이 확대되어 파단(Rupture)이 되는 시나리오가 고려되나 누출 시나리오는 부식결함이 존재하는 배관의 파열압력과 운전압력이 초과되는 한계상황에 발생하며, 다음 식으로 표현된다. [12]

$$g_2 = P_{burst} - P_{op} \quad (6)$$

Table 4. Input variable distributions for external corrosion

입력변수	분포	평균	표준편차	출처
결함빈도*/km	Deterministic	0.1	N/A	
평균결함깊이 성장속도[mm/yr]	Weibull	0.16	0.08	[5]
평균결함길이 성장속도[mm/yr]	Lognormal	27	9.45	[5]
운전압력/MAOP	Gumbel	1.05	0.02	[5]
직경/Nominal	Normal	1.0	0.001	[11]
두께/Nominal	Normal	1.0	0.01	[11]

*결함빈도는 부식속도(결함깊이 성장속도)가 상대적으로 큰 결함의 빈도로서 가정된 값임.

부식결함의 가진 배관의 잔존강도를 예측하는 방법은 전술한 바와 같이 다양한 판별식이 개발[12]되어 있다. 본 연구에서는 다음 식을 사용하였다.

$$P_{burst} = \frac{2.3t}{D} \sigma_{yield} \left[\frac{1 - h_{avg}/t}{1 - h_{avg}/Ml} \right] \quad (7)$$

여기서, P_{burst} = 잔존강도, t = 배관두께, D = 관경, σ_{yield} = 최소 항복응력, h_{avg} = 평균 결함깊이, l = 부식 길이이다. 이때 M 은 Folius Factor로서 다음과 같이 정의된다.[12]

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{l^2}{Dt} - 0.003375 \frac{l^4}{D^2 t^2}}$$

for $\frac{l^2}{Dt} \leq 50$

$$M = 0.032 \frac{l^2}{Dt} + 3.3 \quad \text{for} \quad \frac{l^2}{Dt} > 50 \quad (8)$$

부식원인 극한한계상태 평가를 위해 사용되는 입력 변수인 부식속도를 포함해 배관의 항복강도, 운전압력, 배관의 관경 및 두께의 확률론적 특성은 Table 4에 나타내었다.

2.3. 고장을 계산방법

한계상태함수로부터 타공사로 인한 고장율과 부식원인에 의한 고장률을 계산하기 위해서 통상 Monte Carlo 접근법을 사용한다.[11] 본 연구에서는 “하중”과 “저항” 사이에 상호 의존성이 없다고 가정하여

Separable Monte Carlo(SMC) 시뮬레이션을 적용하였다.[9] 고장률(failure rate)을 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\hat{p}_f = \frac{1}{N} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I[G(R_j < S_i)] \quad (9)$$

여기서, I는 지시함수(indicator function)로서 상태가 true 이면 1, 상태가 false 이면 0 이다. N은 “하중” 샘플의 수(number of load samples)이고 M은 “저항” 샘플의 수(number of resistance samples)이다.

III. 프로그램 설계 및 개발

전술한 신뢰도기반 설계 및 평가(RBDA) 방법론을 준용하여 배관 위험도 분석 소프트웨어 엔진을 개발하였다. 세부사항으로는 이력기반 및 신뢰도기반 분석 모듈을 각각 구현하였다. 위험도 평가는 주변 특성 및 사용자 선택에 따라 독립적으로 결과를 도출하거나 상호 연동해서 통합 결과도 도출이 가능하도록 설계하였다. 또한, 위험감소 평가 모듈과 위험도 평가 세부 모듈도 포함하여 구성하였으며 타공사(진단/유지보수와 무관한 위험요소) 및 외면부식(진단/유지보수에 따라 위험이 변화되는 요소) 원인에 대한 위험평가 방법을 적용하여 프로그램밍하였다.

진단/유지보수를 통해 결함의 제거에 따른 위험의 감소효과를 위험도 평가에 반영하는 방법을 적용하였다. Fig. 3은 검사, 굴착, 수리에 따른 잔류결함 판단절차를 도식화하여 나타내었다.

위험도 평가를 수행하기 위해 필요한 인자는 CPMS

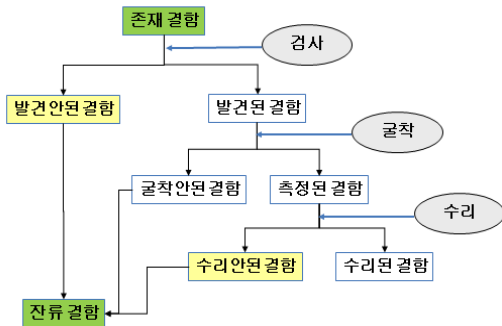


Fig. 3. Procedures for determining surviving defects following inspection, excavation and repair.

에 저장된 정보를 연동하여 배관 위험도 분석 프로그램의 입력으로 변화하는 모듈 및 사용자에게 직접 입력을 받는 모듈로써 구현하였으며, CPMS에서 필요한 데이터로는 배관번호, 시공년도, 관경(A), 재질, 압력(최저, 최고), 시점주소 및 위험지수 등으로 위험도 평가에 활용할 수 있도록 설계하였다. Fig. 4는 현재 운영되고 있는 CPMS의 상황으로 진단지수에 의해 순위대로 나열된 화면을 보여준다.

Fig. 5는 개발 프로그램의 전체 구성을 나타낸 것으로 배관 위험성평가 소프트웨어 엔진을 구동하기 위한 세부모듈과 실시간 배관 위험순위 분석 프로그램을 실행시키기 위한 모듈 및 배관 정보 입력 소프트웨어 모듈과 입력정보를 저장할 수 있는 데이터베이스 등을 보여주고 있다.

배관 위험순위 계산 및 표출 프로그램은 기본 웹기반 프로그램인 CPMS와 표출부분은 탑재시키고 계산부분은 연동하는 방법으로 설계하였고, 배관 정보 입력 소프트웨어 모듈 및 위험순위 산정/표현 소프트웨어 모듈과 배관 위험성평가 소프트웨어 엔진이 내부적으로 상호구동을 가능하게 하는 토대 프로그램을 개발하였다. 또한 배관별로 산정된 위험도에 따라 순위를 산정하여 사용자에게 렌더링하는 기능을 제공하였다.

Fig. 6은 계산된 위험도에 의해 위험순위 도출에

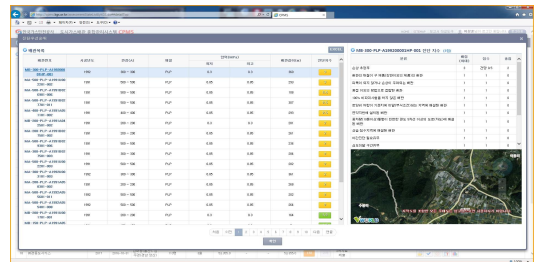


Fig. 5. CPMS program partial screen.

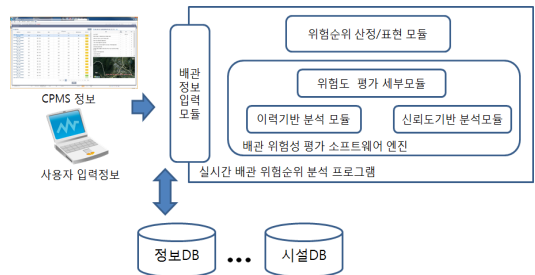


Fig. 6. Composition of risk-based ranking program.



Fig. 8. Change the inspection order of piping by risk ranking(example).

Fig. 7. Factor management for calculating risk.

계산년도	배관번호	위험도	위험순위	위험순위 점수
2018	P00016	0.00000111894687330175	0-10-172833	
2018	P00011	0.000001188344335707549	0-10017849	
2018	P00012	0.00000594492524861694	0-1107983	
2018	P00017	0.0000022009916046122	0-0966200000000001	
2018	P000111	0.000004188344335707549	0-1821384	
2018	P00021	0.00000326839981806132	0-0966200000000001	
2018	P000211	0.00000111894687330175	0-10-172833	
2018	P000212	0.000004188344335707549	0-1821384	
2018	P00027	0.00000111894687330175	0-10-172833	
2018	P000211	0.000004188344335707549	0-1821384	

Fig. 8. Ranking result by risk calculation.

다른 배관진단의 순서가 변경되는 시스템의 예시이다.

CPMS 연동정보와 사용자 입력을 데이터베이스에 저장하고 소프트웨어에 적재하여 신속하게 처리할 수 있는 기능(parallel DBMS pool 등)을 갖추었으며, 입력정보에 따라 속성이 용이하게 추가될 수 있는 가변적인 테이블로 설계하였다.

Fig. 7은 위험도 계산에 필요한 인자들의 관리 화면으로 배관별로 위험도 계산을 수행할 수 있는 페이지고, Fig. 8은 위험도 계산을 통해 위험순위대로 배관이 정렬되는 페이지로 앞서 언급했던 캐나다의 CSA Z662에서 소개된 목표 신뢰도 값과의 Gap 차이에 의해 결정된다.

IV. 결론

현행 KGS Code FS551(일반도시가스사업 제조소 및 공급소 밖의 배관의 시설 기술·검사·정밀안전진단 기준)의 정밀안전진단 방법에 따르면, 정밀안전진단대상 전체배관에 대한 자료를 통해 배관의 건전성을 확인하고, 현장조사를 필요로 하는 위험도가 높은 배관을 선정하도록 규정하고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 도시가스 배관 정보관리종합시스템(CPMS)에 수집된 정보를 활용하기 위해 신뢰도 기반 설계 및 평가(RBDA)법의 위험분석 시스템을 구축하여 33개 도시가스社 배관의 단위 구간별 실질적 위험도를 산정하는 기술을 개발함으로써 합리적인 위험순위를 도출하였다. 진단대상배관 선정 검토 시 효과적으로 활용된다면 배관안전관리에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

현재 프로그램은 개발을 완료하였으나, 실증 운영을 통하여 디버깅 작업 등 완성도를 검증하고 있다.

REFERENCES

- [1] Dong Youn Lim, "City-gas Pipeline Management System(CPMS) Development for Inspection Task Advancement", Report, (2015)
- [2] Nessim M, Zhou W, Zhou J, Rothwell B. "Target Reliability Levels for Design and Assessment of Onshore Natural Gas Pipelines", ASME. J. Pressure Vessel Technology, 131(6), (2009)
- [3] DNV, "Corroded pipelines", Recommended Practice DNV-RP-F101, (1999)
- [4] ISO 16708, "Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems - Reliability-based limit state methods", International Organization for Standardization, (2006)
- [5] CSA Z662-15 "Oil and gas pipeline systems", Canadian Standards Association, (2007)
- [6] Jin-Han Lee, Kyo-Shik Park, Young-Do Jo, Jin-Hee Park, "Development of Risk Assessment Techniques for City Gas Pipeline II - Corrosion Analysis". KIGAS, 7(2), 1-6, (2003)
- [7] Jin-Han Lee, Kyo-Shik Park, Young-Do Jo, Jin-Hee Park, "Frequency Analysis for City Gas Pipeline", KIGAS, 7(2), 14-21, (2003)
- [8] Jin Han Lee, Young Seob Kim, Lae Hyun Kim, "A Simplified Method for Predicting Failure Probability of Pipelines with Corro-

- sion Defects”, *KIGAS*, 14(4), 31-36, (2010)
- [9] Jin Han Lee, Young Do Jo, Lae Hyun Kim, “Reliability Assessment for Corroded Pipelines by Separable Monte Carlo Method”, *KIGAS*, 19(5), 81-86, (2015)
- [10] Jin-Han Lee, Jeong-Hwan Kim, Young-Do Jo, Lae Hyun Kim, “Application of Target Reliability Levels for Maintenance of Domestic Natural Gas Pipelines”, *KIGAS*, 22(3), 1-6, (2018)
- [11] Chen, Q. C., and Nessim, M. A., “Reliability-Based Prevention of Mechanical Damage to Pipelines,” *Pipeline Research Council International, Inc., Catalogue No. L51816*, (1999)
- [12] Nessim, M., and Zhou, W., “Guidelines for Reliability -Based Design and Assessment of Onshore Natural Gas Pipelines,” *Gas Research Institute GRI, Report No. GRI-04/0229*, (2005)
- [13] Mohammad Modarres, Mark P. Kaminskiy, Vasily Krivtsov, “Reliability Engineering and Risk Analysis”, A Practical Guide, Third Edition, (2016)
- [14] Richard Neapolitan, Kumarss Naimipour, “Found- ations of Algorithms”, Fourth Edition