



국내 천연가스배관 유지관리를 위한 목표신뢰도 적용사례

†이진한 · 김정환 · 조영도 · 김래현*

한국가스안전공사 가스안전연구원, *서울과학기술대학교 화공생명공학과
(2017년 11월 04일 접수, 2018년 6월 6일 수정, 2018년 6월 7일 채택)

Application of Target Reliability Levels for Maintenance of Domestic Natural Gas Pipelines

†Jin-Han Lee · Jeong-Hwan Kim · Young-Do Jo · Lae Hyun Kim*

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

**Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Seoul National Univ. of Technology*

(Received November 4, 2017; Revised June 6, 2018; Accepted June 7, 2018)

요약

신뢰도기반 설계 및 평가(RBDA) 방법론은 천연가스 배관을 설계하는 최신의 방법 중 하나이다. 신뢰도 목표는 설계와 유지관리 단계에 걸쳐 관계된 한계상태를 충족하는 안전수준을 가지는 지 확인하기 위해 사용된다. 목표 신뢰도는 대누출과 파단과 같은 극한한계상태에 대한 개인적 위험과 사회적 위험에서 사용하는 허용 가능한 위험수준을 적용하여 개발되었다[1]. 본 논문에서 신뢰도 목표는 배관의 생애주기 동안 주기적인 유지관리를 적용함으로써 충족할 수 있음을 보여준다. 사례분석은 국내 천연가스 수송배관에 대한 굴착공사에 따른 손상확률 계산, 부식에 따른 손상확률의 계산, 그리고 재검사 주기의 추정을 포함한다.

Abstract - Reliability based design and assessment (RBDA) methodology is one of the newest directions of natural gas pipeline design method. Reliability targets are used to ensure that safety levels are met relevant limit states in the stage of design and maintenance. The target reliability for ultimate limit states such as large leak and rupture were developed using tolerable risk criteria for individual and societal risk[1]. This paper shows the reliability target can be met through the implementation of periodic maintenance measures during the life cycle of the pipelines. The case study involves the calculation of the failure probability due to equipment impact, the calculation of the failure probability due to corrosion, and the estimation the re-inspection interval for domestic natural gas transmission pipelines.

Key words : Pipeline, Reliability based design, Failure probability, Target reliability

1. 서론

천연가스 수송배관에 대한 신뢰도 기반 설계 및 평가법 (Reliability Based Design and Assessment, RBDA)은 2006년에 국제표준인 ISO 16708[2]과 캐나다 배관설계 기준인 CSA Z662-15[3]의 Annex O에 소개되어 있다. 국내의 경우도 신뢰도 기반 설계 및

평가법과 같은 확률론적 방법에 따라 부식 배관의 위험을 평가하는 방법이 소개[4][5][6][7]된 바 있다.

Fig. 1에 CSA Z662 소개된 배관 신뢰도 기반 설계 및 평가(RBDA)법의 절차에 대한 개요를 나타내었다. [3]

이 절차에 따르면 한계상태 함수를 실험 등을 통해 개발하고 한계상태 함수에 포함된 기본 변수들에 대해 실험, 문헌 등에 나타난 데이터를 근거로 통계분석을 통해 확률론적 모델을 얻는다. 다음 단계는 설계와 운전조건에 따른 인수들 즉 재료물성,

†Corresponding author:imhappy@kgs.or.kr

Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

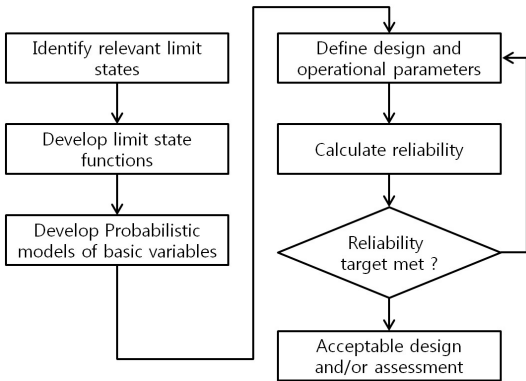


Fig. 1. Overview of RBDA process.

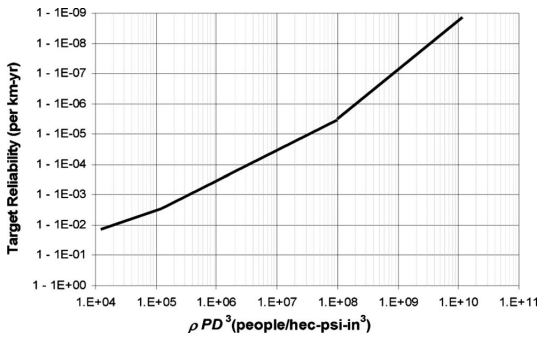


Fig. 2. Target reliability by CSA Z662[3].

설계인자, 방식특성 등을 정의 한 후 이를 한계상태 함수에 넣어 신뢰도를 계산한다. 이렇게 계산된 신뢰도는 목표신뢰도(target reliability)와 비교하게 되는 데 이 계산된 신뢰도가 목표신뢰도보다 낮으면 달성될 수 있도록 설계 및 운전변수를 변경해야 한다.

CSA Z662에 따르면, 설계단계에 신뢰도 기반 접근법에 따라 설계한 경우 유지관리 단계에도 신뢰도 기반 접근법을 적용하도록 권고하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 가스배관에 대한 신뢰도 기반 설계 및 평가방법을 현장에 적용한 사례가 없으므로 이 방법에 따라 유지 및 관리하는 사례도 없다. 신뢰도 기반 설계 및 평가법의 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 O에는 극한한계상태

(ultimate limit states)에 대해 Fig. 2의 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. 2 극한한계상태 신뢰도(R) 목표는 인구밀도, 운전압력, 배관직경의 함수로서 다음의 식 (1)로부터 계산할 수 도 있다.[3]

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

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.

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

본 논문에서는 CSA Z662 Annex O에 제안된 극한 한계상태에 대한 신뢰도 목표를 우리나라에서 운영되고 있는 배관이 충족하고 있는지를 적용해 보는 사례연구를 수행하였다. 사례연구는 현행 국내 배관설치 및 운영기준을 따른다는 가정 하에서 수행하였다. 즉 우리나라의 천연가스 배관 보호를 위해 요구되는 제도 및 기준이 충분한 지와 검사, 점검 등 유지관리 방법이 충분한지를 사례분석을 통해 검토하였다. 이를 통해 우리나라 천연가스 배관의 유지관리 방향을 제안하고자 한다.

II. 접근방법

2.1. 사례분석 대상 선정

사례분석 대상은 우리나라에서 운영하고 있는 고압 도시가스배관의 배관재료, 운전압력, 매설지 환경 등 설계 및 운전에 관계되는 인자들을 고려할 수 있도록 선정하였다. 다만 배관매설지의 지역구분에 따른

Table 1. Test cases used for reliability assessment

Test case	Grade	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Operating pressure (MPa)	Class location
					Population (people/ha)
Case #1	API 5L X65	762	17.5	7	가
					100
Case #2	API 5L X65	762	14.3	7	나
					18
Case #3	API 5L X70	762	15.9	7	가
					100
Case #4	API 5L X70	762	12.7	7	나
					18

인구밀도 추정치는 타 연구자의 선행연구와의 비교가 가능하도록 문헌[1]에 나오는 값을 사용하였다. 참고로 우리나라는 배관두께 설계 시 미국, 영국 등 선진국과 마찬가지로 지역구분(배관주변 건물빈도에 따른 지역구분) 기준을 사용한다. 4가지 사례분석 대상은 Table 1에 나타내었다.

2.2. 타공사로 인한 고장률

타공사로 인해 배관이 즉각적으로 파손되는 빈도는 굴삭기가 배관을 타격하는 빈도(hits per km per yr)와 그 타격으로 배관이 손상(누출)되는 확률의 곱으로 표현될 수 있다. 타공사로 인한 손상빈도는 배관 매설연도와는 관계없는 시간 비의존적인 값이다.

단위 배관길이(km)당 타공사로 굴삭기 등이 배관을 타격(hit)할 수 있는 빈도는 결함수목분석법(fault tree analysis)으로 구할 수 있다. 우리나라의 경우 1994년 대구 지하철 공사장 폭발사고 이후 타공사로 인한 배관 손상방지 제도가 강화되어 현재까지 운영되고 있다. 국내 도시가스배관에 대한 타공사로 인한 배관손상방지 제도를 반영한 결함수목분석법 적용사례는 이전 문헌[5]에 잘 설명되어 있다. 이 논문에 소개된 방법에 따르면 결함수목은 12개의 근본사건으로 구성된다. 본 사례연구를 위해 사용한 12개의 근본사건에 대한 빈도 또는 확률 값은 Table 2에 나타내었다.

다음으로 앞서 설명한 굴삭기(Excavator)의 배관 타격(hit) 시에 그 타격되는 타격력과 배관이 가진 저항력을 비교함으로써 구멍이 뚫려 누출이 발생할 확률을 구할 수 있다. 이는 굴삭기에 의해 가해지는

Table 2. Input values for basic events of fault tree

Basic event	Description	Applied level	Probability
B1	Activity rate around buried pipeline [day/km-yr]	<Excavation frequency> Location:가급 Location:나급	4 0.5
B2	Dangerous activity on pipeline alignment	Operator attends during dig	0.01
B3	Excavation depth exceeds the depth of cover	<Depth of cover> High pressure : 1.2m Midium pressure : 1.0m	0.5 0.83
B4	Function failure of protection slab	Protection slab Installed	0.2
B5	Failure of warning tapes	Warning tapes installed	0.333
B6	Pipeline map indicates wrong alignment	Pipeline maps verified	0.005
B7	No petrol during activity	Petrol interval : daily	1
B8	Fail to discover dig activity		0.01
B9	Fail to notify pipeline alignment	Enforced one-call system	0.001
B10	Third party chooses not to notify	-	0.1
B11	ROW signs not recognized	ROW signs installed	0.4
B12	Third party ignoring ROW signs	-	0.3

힘과 이에 견디는 배관의 저항력을 비교하는 한계상태함수인 식 (3)으로 표현될 수 있다.

$$g_1 = r_a - q \tag{3}$$

여기서, 배관의 저항력 r_a [kN]으로서 CSA Z662에서 제안하는 식은 다음과 같다[3].

$$r_a = [1.17 - 0.0029(D/t)](l_t + W_t)t\sigma_u/1000 + e \tag{4}$$

- 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)
- e = 모델 에러로서 평균 0.833 kN, 표준편차 26.7 kN인 정규분포

Table 3. Input variable distributions for mechanical damage[8]

Input variable	Distribution	Mean	Std. Dev.
Excavator tooth length[mm]	Uniform	90	28.4
Excavator tooth width[mm]	Uniform	3.5	0.875
Excavator weight[tonne]	Gamma	15.2	10.8
Ultimate tensile strength/SMTS*	Normal	1.12	0.039
Ultimate yield strength/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 연구된 사례[8]에 따르면, 굴삭기 무게에 따른 충격력은 식 (5)로 표현된다. 이 식은 미국의 굴삭기 판매 데이터로부터 유도되었다고 한다.

$$q = 16.5w^{0.619} \tag{5}$$

여기서, w =굴삭기 무게(tonne)

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. 한계상태 함수 계산에 사용되는 입력변수는 2.4에 후술한 Mont Carlo 시뮬레이션 방법에 따라, Table 3에 나타난 확률적 특성으로부터 무작위로 샘플링 된다.

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

2.3. 부식원인에 의한 고장률

부식으로 인한 배관의 극한한계상태에 대한 신뢰도 목표는 대누출과 파단만 고려된다. 타공사로 인한 신뢰도와 차이점은 시간에 의존적이라는 것이다. 따라서 시간 비의존적인 타공사와 기타 원인에 의한 고장률을 먼저 계산한 후 나머지 부식원인에 의한 고장율의 시간에 따른 변화를 평가함으로써 유지관리 시기를 예측할 수 있다.

Table 4. Input variable distributions for external corrosion

Input variable	Distribution	Mean	Std. Dev.	Ref.
Defect density*/km	Deterministic	0.1	N/A	
Defect depth growth rate[mm/yr]	Weibull	0.16	0.08	[3]
Defect length growth rate[mm/yr]	Lognormal	27	9.45	[3]
Operating pressure /MAOP	Gumbel	1.05	0.02	[3]
Diameter/Nominal	Normal	1.0	0.001	[9]
Thickness/Nominal	Normal	1.0	0.01	[9]

* Defect density represents significant corrosion defect

부식원인에 의한 극한한계상태는 인명피해가 발생할 수 있는 대누출과, 대누출이 원인이 되어 결함이 확대되어 파단(Rupture)이 되는 시나리오가 고려된다. 대누출 시나리오는 부식결함이 존재하는 배관의 파열압력과 운전압력이 초과되는 한계상황에 발생하며, 다음 식으로 표현된다. [7]

$$g_2 = P_{burst} - P_{op} \tag{6}$$

부식결함을 가진 배관의 잔존강도를 예측하는 방법은 전술한 바와 같이 다양한 관별식이 개발[9]되어 있다. 본 연구에서는 다음 식을 사용하였다.

$$P_{burst} = \frac{2.3t}{D} \sigma_{yield} \left[\frac{1 - h_{avg}/t}{1 - h_{avg}/Mt} \right] \tag{7}$$

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.[9]

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{l^2}{Dt} - 0.003375 \frac{l^4}{D^2t^2}} \tag{8}$$

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

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

부식원인 극한한계상태 평가를 위해 사용되는 입력 변수인 부식속도를 포함해 배관의 항복강도,

운전압력, 배관의 관경 및 두께의 확률론적 특성은 Table 4에 나타내었다.

2.4. 고장을 계산방법

한계상태함수로 부터 타공사로 인한 고장율과 부식원인에 의한 고장률을 계산하기 위해서 통상 Monte Carlo 접근법을 사용한다.[8] 본 연구에서는 “하중”과 “저항” 사이에 상호 의존성이 없다고 가정하여 Separable Monte Carlo(SMC) 시뮬레이션을 적용하였다.[7] 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 true이면 1, 상태가 false 이면 0이다. N은 “하중” 샘플의 수(number of load samples)이고 M은 “저항” 샘플의 수(number of resistance samples)이다.

III. 사례분석 결과

문헌[1]에 따르면 천연가스 배관의 극한 한계상태에 속하는 대누출과 파열사고의 경우 그 원인으로 타공사와 외면부식이 전체 배관의 고장률은 60%~76% 사이이며, 대략 2/3(66.7%)로 가정할 수 있다. 반대로 타공사와 외면부식 원인을 제외한 기타 고장률은 1/3으로 가정될 수 있다.

먼저 각각의 사례별로 발생 가능한 모든 고장원인에 의한 극한한계상태의 신뢰도 목표는 식 (1)로부터 계산할 수 있다. 인구밀도가 높은 지역에 설치된 Case #1과 Case #3의 신뢰도 목표가 높음을 알 수 있다. 극한한계상태 고장률 중 기타 원인은 모든 고장원인의 1/3로 가정하고, 시간의존성이 없는 타공사 원인에 의한 고장률은 식 (3)의 극한한계상태함수로부터 추정할 수 있는 데 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 특징적인 것은 Case #1과 Case #3과 같이 인구밀도가 높은 지역에는 배관두께가 두꺼운 배관을 매설하게 되는데 이로 인해 타공사 원인에 의한 파손에 대해서는 높은 신뢰도를 가진다는 것을 알 수 있다. 그러면 최종적으로 시간 의존적 원인인 외면부식원인에 의한 신뢰도 목표를 구할 수 있다. 이에 대한 계산 결과를 Table 5에 나타내었다.

외면부식 원인에 의한 대누출 등 극한상태 신뢰도목표는 배관 매설 후 유지관리 단계에서도 계속 달성되어야 한다. 배관의 피복결함부에서 발생하는 외면부식 결함은 매설연수가 증가함에 따라 계속

Table 5. Target reliability of test cases

Test case	Ultimate limit state target reliability			
	All causes (Eq. (1))	Other causes (1/3 of total failure prob.)	Mechanical damage (refer 2.2)	External corrosion
Case #1	1-1.67E-8	1-5.56E-9	1-5.16E-9	1-5.95E-9
Case #2	1-2.59E-7	1-8.64E-8	1-1.29E-8	1-1.60E-7
Case #3	1-1.67E-8	1-5.56E-9	1-2.93E-10	1-1.08E-8
Case #4	1-2.59E-7	1-8.64E-8	1-4.24E-8	1-1.30E-7

성장한다. 이런 결함으로 인해 배관의 신뢰도는 매설연수가 증가함에 따라 낮아지게 된다. 따라서 신뢰도목표를 충족하기 위해서는 적절한 시기에 검사 및 유지보수를 통해 고장률을 줄여야 한다.

Table 5의 신뢰도 목표가 설정되면, 사례분석 대상별로 외면부식 원인에 대한 신뢰도를 매설연수 경과에 따른 변화를 예측하여 비교할 수 있게 된다. 신뢰도는 식 (2)와 같이 고장률로부터 쉽게 계산될 수 있다. 부식원인에 의한 고장률을 계산하는 방법은 2.3과 2.4에 전술하였다.

4가지 사례분석 대상배관에 대해 Table 5에 계산된 외면부식 원인 목표신뢰도와 비교하여 분석한 결과를 Fig. 3에서 Fig. 6까지 나타내었다. 사례를 종합하여 살펴보면 부식원인에 의한 배관의 신뢰도는 배관의 두께에 매우 의존적임을 알 수 있다. 사례분석 대상 중 배관두께가 두꺼운 순서는 Case #1, Case #3, Case #2, Case #4이다. 목표신뢰도에 미달되는 시기는 Case #1은 약 20년, Case #3은 약 18년, Case #2는 약 17년, Case #4는 약 14년으로 줄어든다.

본 사례연구를 통해 얻을 수 있는 결론 중 중요한 사실은 장기운영 배관의 신뢰도 저하의 주요 원인은 외면부식으로서 매설연수 경과에 따라 빠른 속도로 신뢰도가 저하된다는 것이다. 따라서 목표신뢰도에 미달하는 시기가 도래하기 전에 검사를 실시하여 결함을 찾고 보수 또는 제거해야만 신뢰도 목표를 충족할 수 있다. 이러한 이유로 국내에서도 영국, 미국 등 많은 선진국과 같이 배관건전성관리 제도를 통해 도시가스 배관운영자의 주기적인 검사와 유지관리 활동을 강화할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 것으로 이에 감사드립니다. (과제번호 20162220100030)

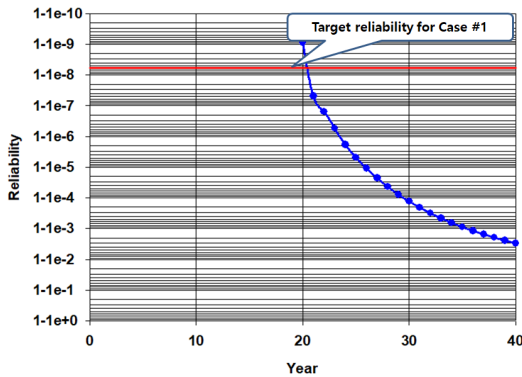


Fig. 3. Corrosion reliability for test case #1.

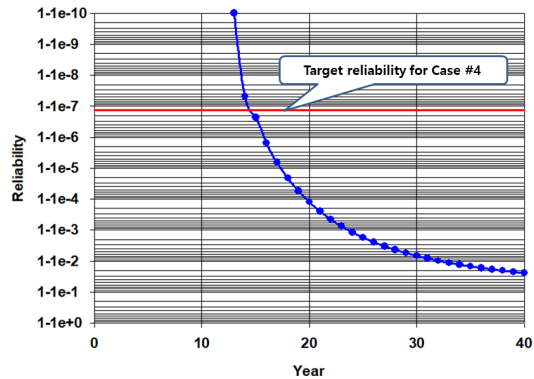


Fig. 6. Corrosion reliability for test case #4.

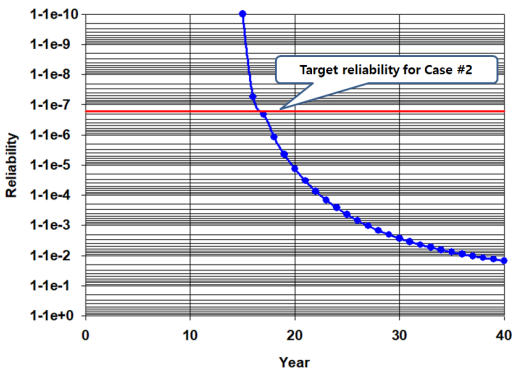


Fig. 4. Corrosion reliability for test case #2.

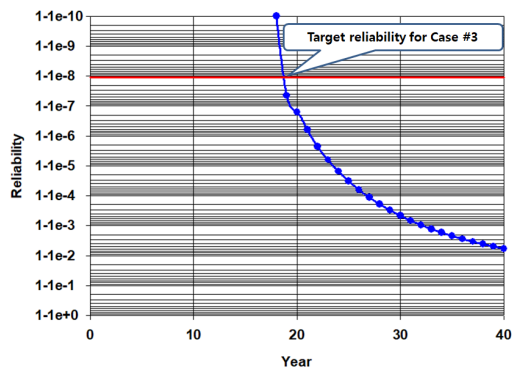


Fig. 5. Corrosion reliability for test case #3.

REFERENCES

[1] Nessim M, Zhou W, Zhou J, Rothwell B. "Tar-

- get Reliability Levels for Design and Assessment of Onshore Natural Gas Pipelines", *ASME. J. Pressure Vessel Technology*, 131(6), (2009)
- [2] ISO 16708, "Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems - Reliability-based limit state methods", *International Organization for Standardization*, (2006)
- [3] CSA Z662-15 "Oil and gas pipeline systems", *Canadian Standards Association*, (2007)
- [4] Lee, J. H., Park, K. S., Jo, Y. D., Park, J. H., "Development of Risk Assessment Techniques for City Gas Pipeline II - Corrosion Analysis", *KIGAS*, 7(2), 1-6, (2003)
- [5] Lee, J. H., Park, K. S., Jo, Y. D., Park, J. H., "Frequency Analysis for City Gas Pipeline", *KIGAS*, 7(2), 14-21, (2003)
- [6] Lee, J. H., Kim, Y.S., Kim, L. H., "Simplified Method for Predicting Failure Probability of Pipelines with Corrosion Defects", *KIGAS*, 14(4), 31-36, (2010)
- [7] Lee, J. H., Jo, Y. D., Kim, L. H., "Reliability Assessment for Corroded Pipelines by Separable Monte Carlo Method", *KIGAS*, 19(5), 81-86, (2015)
- [8] Chen, Q. C., and Nessim, M. A., "Reliability-Based Prevention of Mechanical Damage to Pipelines," *Pipeline Research Council International, Inc.*, Catalogue No. L51816, (1999)
- [9] 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)