

## Separable Monte Carlo 방법을 적용한 부식배관 신뢰도평가

†이진한 · 조영도 · 김래현\*

한국가스안전공사 가스안전연구원, \*서울과학기술대학교 화공생명공학과  
(2015년 9월 21일 접수, 2015년 10월 22일 수정, 2015년 10월 23일 채택)

### Reliability Assessment for Corroded Pipelines by Separable Monte Carlo Method

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

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

*\*Graduate School of Energy & Environment, Seoul National Univ. of Technology*

*(Received September 21, 2015; Revised October 22, 2015; Accepted October 23, 2015)*

#### 요약

배관설계에 있어 스트레스에 기반한 결정론적 방법이 전통적으로 사용되어 왔다. 한편, 신뢰도기반 설계 및 평가(RBDA) 방법론은 해양 또는 원자력 구조물에 대해 적용되어 왔다. 최근 들어 배관의 한계상태법에 기반한 신뢰도에 대해 ISO 규격 즉, ISO 16708의 출간은 RBDA 방법론이 천연가스배관 설계의 최신방향 중에 하나라는 것을 보여준다. 본 논문은 부식결함을 가진 배관의 시간 의존적 파손 확률을 예측하는 절차에 대한 사례연구를 보여준다. 여기서 전통적인 부식 배관의 신뢰도를 추정하는 데 crude Monte Carlo (CMC) 법을 사용하는 대신에 separable Monte Carlo (SMC) method 적용한다. 그 결과 SMC 방법은 신뢰도 계산에 효율을 향상시키는 장점을 보여준다.

**Abstract** - A deterministic stress-based methodology has traditionally been applied in pipeline design. Meanwhile, reliability based design and assessment (RBDA) methodology has been extensively applied in offshore or nuclear structures. Lately, the release of ISO standard on reliability based limit state methods for pipelines ISO16708 indicates that the RBDA methodology is one of the newest directions of natural gas pipeline design method. This paper presents a case study of the RBDA procedure for predicting the time-dependent failure probability of pipelines with corrosion defects, where separable Monte Carlo (SMC) method is applied in the reliability estimation for corroded pipeline instead of traditional, crude Monte Carlo(CMC) Method. The result shows the SMC method take advantage of improving accuracy in reliability calculation.

**Key words** : pipeline, reliability based design, failure probability, separable monte carlo

#### 1. 서 론

부식배관에 대해 신뢰성을 추정하는 확률론적 접근법은 다양한 문헌에서 확인할 수 있다[1-9]. 이러한 연구들을 토대로 배관에 대한 신뢰도 기반 설계 및 평가법 (Reliability Based Design and Assessment, RBDA)은 1999년 배관설계 가이드라인 중의 하나인 DNV-RP-F105 [10]에 확률론적 접근법으로 소개된

바 있으며, 2006년에 국제표준인 ISO 16708[11]으로 채택이 되었다. 더 나아가 캐나다의 경우 이 방법의 적용이 의무적인 사항은 아니지만 2007년 자국 배관 설계 기준인 CSA Z662-07[12]에 RBDA방법론을 포함하였다. 미국 기계학회(ASME)도 RBDA방법을 표준화하기 위한 작업을 진행 중이다. 국내의 경우도 확률론적 방법에 따라 부식 배관의 위험을 평가하는 방법이 소개[13]되기도 하였으나 아직은 선진 외국의 경우처럼 확률론적 배관 설계 및 평가 방법을 실제 현장에서 배관을 설계하거나 건전성을 관리하는데 널리 적용하고 있지는 못하는 실정이다.

†Corresponding author:imhappy@kgs.or.kr  
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

우리나라 천연가스 배관의 매설 역사는 선진 외국에 비해 짧은 편이나 30여년이상 경과한 고압배관이 증가함에 따라, 배관의 수명예측과 건전성 관리가 중요한 이슈가 되었다. 이러한 배관 수명관리의 중요성에 따라 최근 정부에서는 중압배관정밀안전진단 제도를 도입한 바 있으며, 고압 수송배관에 대해서도 미국의 배관 건전성관리제도인 IMP (Integrity Management Program)를 벤치마킹하여 도입할 계획을 가지고 있다. 앞서 언급한 배관 정밀안전진단과 IMP제도의 핵심활동은 배관의 건전성을 저해하는 결함, 특히 부식결함을 찾아내는 것이다.

내압 하에서 부식결함이 존재하는 배관의 잔존강도를 예측할 수 있는 다양한 결정론적 접근법은 이미 많은 연구가 이루어져 그 판단기준이 표준화되어 있으며, ASME B31G[14], DNV-RP-F101[10] 등의 판단기준이 있다. 이들 방법은 배관에 가해지는 하중인 운전압력과 부식 결함을 포함한 배관이 가지는 저항에 대한 결정론적인 값(Deterministic value)을 사용하여 개별 결함의 심각도를 평가한다. 결정론적 방법론의 한계는 배관의 생애주기 동안 하중과 저항의 시간적 변화에 따른 부식배관의 파손확률을 예측할 수 없다는 것이다. 즉 결정론적 접근법에서는 배관에 가해지는 하중과 저항을 계산하기 위해 사용되는 입력 인수들에 대해 각각 하나의 값을 사용하는 데 실제로는 그 인수들은 불확실성(Uncertainty)을 포함하고 있다는 것을 무시한다. 이러한 불확실성은 결함의 크기(깊이, 길이)의 측정, 배관의 제조 시 발생하는 오차(직경, 두께, 강도) 배관의 운전상태(운전압력의 변동) 등에 기인하는 데 결정론적 접근법에서는 불확실성을 무시하는 대신 보완적으로 안전율을 고려하여 설계하고 관리한다.

신뢰도기반 접근법은 확률론적 방법으로서, 시스템의 신뢰도를 계산하여 추정하는 대표적인 방법으로 Monte-Carlo(MC)시뮬레이션을 흔히 사용한다. 이 방법은 하중 또는 저항으로 구성된 해석적인 해를 구할 수 없는 한계상태함수로부터도 손상확률을 추정할 수 있다는 장점을 가지는 반면 계산에 시간이 많이 소요되는 단점도 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 한계상태 함수에 사용되는 입력인수 중 일부를 결정론적 값을 사용하는 방식으로 단순화한 후 근 찾기 방법을 사용해 근사하는 방법이 제안[13]되기도 했으나, 입력인수 중 하나를 결정론적 값으로 가정함으로써 모든 인수의 불확실성을 정량화하지 못하는 한계가 존재하였다.

따라서 본 연구에서는 부식배관을 신뢰성을 추정하기 위해 기존 전통적 Monte Carlo법 대신에 샘플링 수를 줄이면서도 계산결과의 정밀도를 높일 수 있는

Separable Monte Carlo 법을 적용하고자 한다. 또한 부식배관의 신뢰도 기반 접근법의 사례연구를 통해 이 제안된 방법의 유용성을 논하고자 한다.

## II. 접근방법

### 2.1. 신뢰도 기반 평가 절차

Fig. 1에 배관에 대한 신뢰도 기반 설계 및 평가(RDBA)법의 절차에 대한 개요를 나타내었다. [14] 위 절차를 요약하여 설명하면, 먼저 신뢰성에 관계된 한계상태를 정의한 다음 한계상태 함수를 개발한다. 그런 다음 한계상태 함수에 사용되는 변수의 확률론적인 모델을 실제 통계데이터, 이론적 모델, 엔지니어링 판단에 근거하여 개발한다. 다음단계는 설계와 운전에 적용되는 모든 인수 즉 재료물성, 설계인자, 방식특성 등을 정의하는 단계이다. 그 다음 주어진 한계상태함수로부터 신뢰도를 계산한 후 마지막으로 계산된 신뢰도가 허용가능 수준인지를 판단하고 이를 만족하지 못할 경우 만족 될 때까지 설계 및 운전 인자를 변경하여 신뢰도 계산을 반복한다.

### 2.2. 한계상태 함수

한계상태 (G)는 하중(S)와 저항(R)의 함수이다. 이들 변수는 통계적으로 독립적이라고 가정된다. 일반적인 한계상태 함수는 다음 식으로 표현된다.

$$G = R - S \tag{1}$$

불확실성 분석을 통해 하중(S)와 저항(R)의 분포 함수를 설정하게 되면, 실패확률(Failure probability = 1- Reliability)산 될 수 있다.

$$p_f = G(R < S) \tag{2}$$

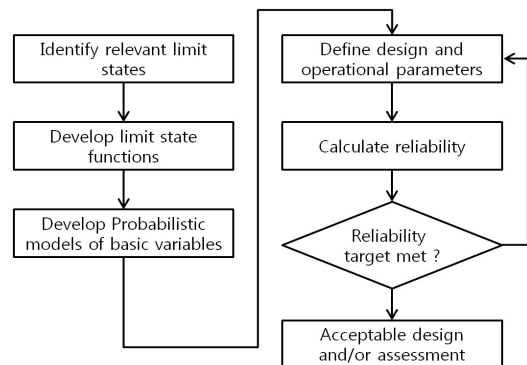


Fig. 1. Overview of RBDA process.

여기서 실패(Failure)는  $G < 0$ 일 때 발생하며, 저항이 하중을 견디지 못하는 상황( $R < S$ )으로 표현될 수 있다.

배관의 누출 시나리오는 통상 소누출, 대누출, 파단으로 구분[12, 13]되며, 본 고에서는 소누출과 대누출 시나리오만 사례연구를 위해 적용하였다.

소누출에 대한 한계상태는 부식깊이가 두께를 초과했을 때 발생하며, 다음 식으로 표현된다. [12, 13]

$$z_1 = t - d_{max} \quad (3)$$

여기서  $t$ =배관두께,  $d_{max}$  는 최대부식 깊이이다.

대누출 시나리오는 부식결함이 존재하는 배관의 과열압력과 운전압력이 초과되는 한계상황에 발생하며, 다음 식으로 표현된다. [10]

$$z_2 = p_{burst} - p_{op} \quad (4)$$

### 2.3. 입력변수

개별 부식결함은 매설기간(Life time)동안 일정한 부식속도를 가진다는 것이다.

$$d(T) = d_0 + V_r(T - T_0) \quad (5)$$

$$l(T) = l_0 + V_a(T - T_0) \quad (6)$$

여기서  $d(T)$ 는 시간결과에 따른 원심방향(Radial) 부식깊이,  $V_r$ 는 원심방향 부식속도,  $V_a$ 는 축방향 부식속도,  $d_0$ ,  $l_0$ 는 마지막 검사가 이루어진 시점( $T_0$ )에서의 부식결함 깊이와 길이이다. 한편, 각각의 부식결함은 다른 부식속도를 가진다.

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

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

여기서,  $P_{burst}$  = 잔존강도,  $t$  = 배관두께,  $D$  = 관경,  $\sigma_{yield}$  = 최소 항복응력,  $h_{avg}$  = 평균 결함깊이,  $l$  = 부식 길이이다. 평균 부식결함 깊이는 최대 부식결함 깊이( $d_{max}$ )의 1/2로 가정하였으며[9], 이때  $M$ 은 Folius Factor로서 다음과 같이 정의된다.

**Table 1.** Probabilistic characteristics of Input Parameters

parameter	distribution	mean	standard deviation	Ref.
Initial defect depth[mm]	Normal	2	0.03	[6]
Avg. defect depth growth rate[mm/yr]	Weibull	0.06	0.03	[9]
Initial defect length[mm]	Lognormal	5.29	0.26	[6]
defect length growth rate[mm/yr]	Lognormal	20	5.2	[6]
Yield strength[MPa]	Lognormal	531.3	42.5	[15]
Annual maximum internal pres. [MPa]	Gumbel	7.056	0.141	[12]
Outer diameter of pipe[mm]	Normal	762	0.76	[15]
Wall thickness of pipe[mm]	Normal	12.7	0.127	[15]

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

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

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

확률론적 분석을 위해 부식속도를 포함해 배관의 항복강도, 운전압력, 배관의 관경 및 두께의 확률분포는 Table 1에 나타내었다.

### 2.4. 신뢰도 계산방법

신뢰도(또는 손상확률)을 계산하는 방법은 크게 근사해석법(Approximate analytical method), Monte Carlo simulation, 근접 신뢰도법(Nested reliability method) 3가지로 대별될 수 있다. Monte Carlo simulation법은 해석적 해가 존재하지 않거나 비연속적 함수에 대해서는 수치적 근사를 할 수 있어 널리 사용되고 있으나 정밀도를 높이기 위해 샘플링 수를 늘리게 되면 계산시간이 증가한다는 단점이 있다.

Monte Carlo법 적용을 위해 무작위 변량(Random variate)을 샘플링하는 방법 중 가장 널리 사용되는 방법은 역변환법으로서 분포의 누적 분포함수의 역함수로부터 변량을 구하는 방법이다. 즉 0과 1사이에 있는 난수를 생성( $U \sim U(0,1)$ )한 후 누적함수  $F(X) = U$ 로부터  $X$ 의 값을 찾는 방법으로 Fig. 2에 그 개념을 나타내었다.

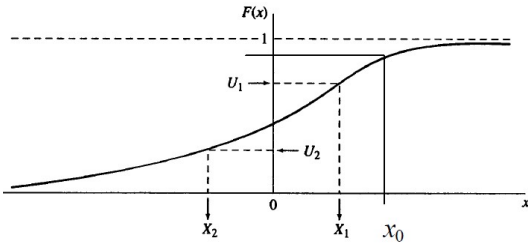


Fig. 2. Illustration of Inverse transform method.

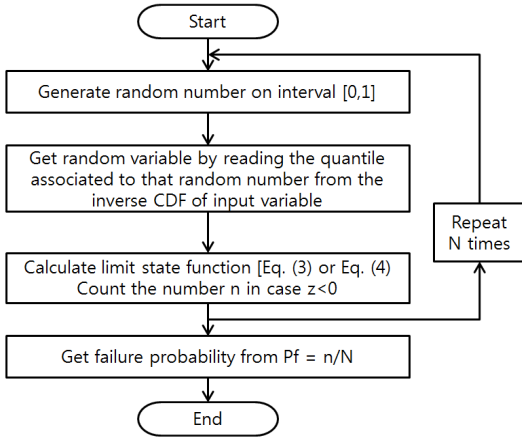


Fig. 3. Flow chart for crude MC simulation.

전통적 Crude Monte Carlo(CMC) 방법은 일반 실패확률(Failure probability)을 계산하기 위한 방법으로 시뮬레이션에 기반 한 방법이다. 실패확률은 “하중”과 “저항” 분포의 무작위 샘플의 쌍을 비교함에 의해 얻어지며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

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

위 식에 따라 실패확률을 계산하는 절차는 Fig. 3.에 나타내었다.

### 2.5 Separable Monte Carlo 법 제안

“하중”과 “저항” 사이에 상호 의존성이 없다면 변량을 샘플링할 때 동시에 샘플링을 수행할 필요 없이 각각 독립적으로 샘플링을 수행하더라도 상호 의존성에 따른 오차를 유발하지 않는다. 이런 경우 Separable Monte Carlo(SMC) 시뮬레이션을 적용할 수 있다.[16].

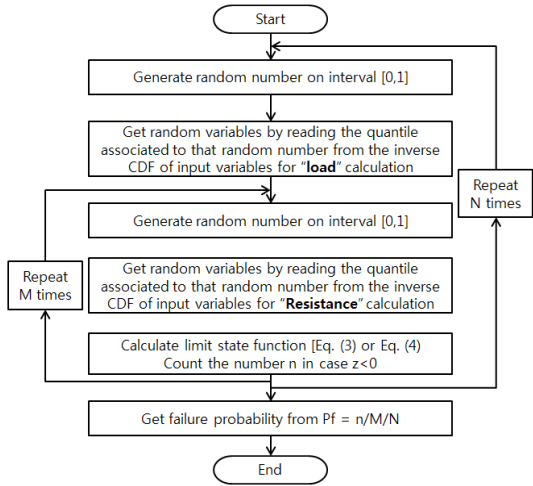


Fig. 4. Flow chart for separable MC simulation.

본 연구의 대상인 배관시스템의 경우 매우 높은 신뢰도 수준  $1 - 10^{-2}/km - yr \sim 1 - 10^{-9}/km - yr$ 을 요구한다.[17] 따라서, 매우 낮은 실패확률을 추정할 수 있어야 하므로 추가적인 값비싼 컴퓨팅의 수행 없이도 그 확률을 더 효과적으로 계산하기 위해 SMC법의 적용을 제안하였다. 즉, 한계상태 함수의 하중인 운전압력과 저항인 잔존 강도는 상호 의존적이지 않으므로 SMC 방법을 적용할 수 있으며, 이 방법은 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\hat{p}_f = \frac{1}{N} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I[G(R_j < S_i)] \quad (10)$$

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. “하중”과 “저항”은 이 경우 상호 독립적이며, 이들은 결국 분리되어 샘플링 될 수 있다. 위 식을 계산하기 위한 계산절차를 Fig. 4.에 나타내었다.

## III. 결과 및 고찰

전술한 신뢰도 기반 접근법에 따라 부식배관의 파손확률을 고려하기 위해 소누출과 대누출에 대해 한계상태함수를 설정하였다. 한계상태 함수의 불확실성을 모두 정량화할 수 있도록 정의하였다. 본 사례 연구를 위해 사용된 입력변수는 Table 1에 나타난 바와 같이 문헌에 나타난 확률론적 특성을 사용하였다.

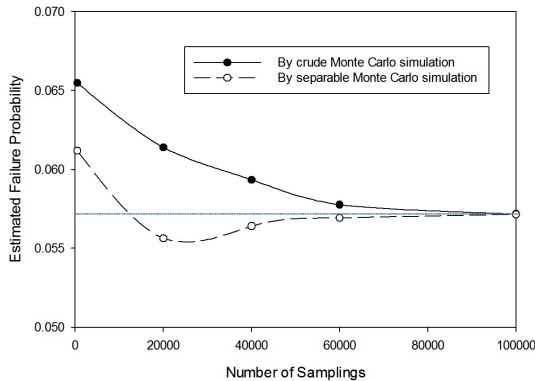


Fig. 5. Estimated failure probability as the number of trials(samples).

SMC방법은 낮은 확률을 계산할 때 CMC방법보다 더 효율적인데 그 효율성을 연구한 기존 연구사례를 살펴보면, Smarslok등[18]은  $10^{-6}$ 의 유니폼 분포를 사례연구를 통해 SMC방법은 CMC방법보다 1/1000의 샘플 수도도 동일한 오차로 예측이 가능함을 보였다[18]. 본 연구에서도 제한한 SMC방법의 유용성을 확인하기 위해 CMC 방법과 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. SMC 방법은 샘플링 수를 늘림에 따라 CMC 방법보다 더 빠르게 추정 값이 수렴됨을 알 수 있었다. 만약 하중 또는 저항을 샘플링(예: 유한요소 해석)하는 데 많은 컴퓨팅 시간이 소요되어 샘플링 수를 늘이는 것이 제한되는 경우 CMC의 경우 작은 샘플링 수도 인해 계산의 정밀도가 떨어지나, SMC는 샘플링이 제한된 입력변수는 그대로 두고 샘플링 수의 제한이 없는 변수를 분리하여 재편성함으로써 계산 효율성을 높일 수 있다. [16, 18]

Fig. 6에 Fig. 1에 언급한 절차에 따라 부식배관의 실패 확률( $p_f$ )을 소누출, 대누출을 각각 정의한 한계상태함수로부터 추정한 결과를 나타내었다. 부식결함이 내재된 배관의 실패확률은 시간이 경과함에 따라 증가하며, 이는 시간이 경과함에 따라 신뢰도( $1-p_f$ )는 낮아짐을 의미한다. 만약 부식배관이 정해진 신뢰도 수준을 만족하지 못하면 보수 또는 교체를 고려하여야 하는데 우리나라의 경우 보수 또는 교체를 해야 하는 신뢰도 목표 수준을 정하고 있지 않다. 캐나다의 경우 CSA Z662-07[12]에 그 목표수준이 추천되어 있어 우리를 이를 벤치마킹할 필요가 있다고 판단된다.

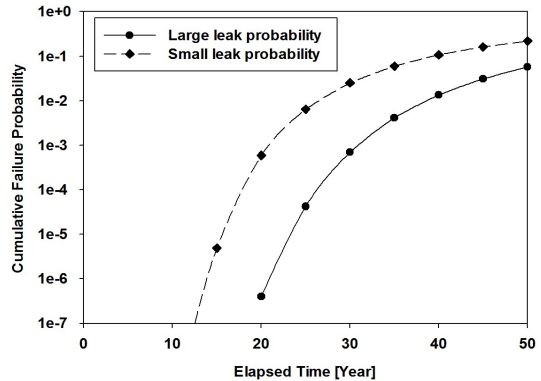


Fig. 6. Cumulative failure probability estimated by separable MC simulation.

#### IV. 결론

본 연구를 통해 부식결함을 가진 배관의 신뢰도를 분석하는 절차와 방법을 소개하였다. 소개된 방법의 적용성을 알아보기 위해 사례연구를 통해 부식결함이 내재된 천연가스 고압배관의 신뢰도(파손확률)를 추정해 보았다. 이를 통해 시간 의존적 인자인 부식원인에 의해 시간경과에 따른 손상확률 변화를 예측할 수 있었다. 허용손상확률이 정해지면 손상확률 변화로부터 잔존 수명을 예측할 수 있다. 한편, 신뢰도 계산의 효율성을 높이기 위해 전통적으로 사용되어 온 Crude Monte-Carlo(CMC) 법 대신에 Separable Monte-Carlo(SMC)법을 적용해 그 유용성을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 것으로 이에 감사드립니다. (과제번호 20132010500030)

#### REFERENCES

- [1] Ahammed, M. & Melchers, R.E., "Reliability estimation of pressurized pipelines subject to localized corrosion defects", *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, 69, 267-272, (1996)
- [2] Ahammed, M., "Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects", *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, 75, 321-329, (1998)

- [3] Caleyó, F.; Gonzales, J.L. & Hallen, J.M., "A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defects", *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, 79: 77-86. (2002).
- [4] Lee, S-M; Chang, Y-S; Choi, J-B & Kim, Y-J., "Probabilistic Integrity Assessment of Corroded Gas Pipelines", *J. Pressure Vessel Technology*, 128, 547-555, (2006)
- [5] Santosh, G.V; Shrivastava, O.P.; Saraf, R.K.; Ghosh, A.K. & Kushwaha, H.S., "Reliability analysis of pipelines carrying H<sub>2</sub>S for risk based inspection of heavy water plants", *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 163-170, (2006)
- [6] Li, S.-X; Yu, S-R; Zeng, H-L; Li, J-H & Liang, R., "Predicting corrosion remaining life of underground pipelines with a mechanically-based probabilistic model", *J. of Petroleum Science and Engineering*, 65, 162-166, (2009a)
- [7] Li, S.-X; Zeng, H-L; Yu, S-R; Zhai, X.; Chen, S-P; Liang, R. & Yu, L., "A method for probabilistic analysis for steel pipeline with correlated corrosion defects", *Corrosion Science*, 51, 3050-3056, (2009b)
- [8] Pandey, M.D., "Probabilistic models for condition assessment of oil and gas pipelines", *NDT & E International*, 31(5), 349-358, (1998)
- [9] Zhou, W., "Reliability Evaluation of Corroding Pipelines Considering Multiple Failure Modes and Time-Dependent Internal Pressure", *J. Infrastructure Systems*, 17(4), 216-224, (2011)
- [10] DNV, "Corroded pipelines", Recommended Practice *DNV-RP-F101* (1999)
- [11] ISO 16708, "Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems - Reliability-based limit state methods", *International Organization for Standardization*, (2006)
- [12] CSA Z662-07 "Oil and gas pipeline systems", *Canadian Standards Association*, (2007)
- [13] Jin-Han Lee, et al, "Development of Risk Assessment Techniques for City-gas Pipeline II - Corrosion Analysis", *J. of the Korean Institute of Gas*, (2003)
- [14] ANSI/ASME B31G, "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines", *American Society of Mechanical Engineers*, (2012)
- [13] Jin Han Lee, Young Seob Kim, Lae Hyun Kim, "A Simplified Method for Predicting Failure Probability of Pipelines with Corrosion Defects", *J. of the Korean Institute of Gas*, (2010)
- [14] Zhou, J., Rothwell, B., Nessim, M., Zhou, W., "Reliability-Based Design and Assessment Standards for Onshore Natural Gas Transmission Pipelines", *J. Pressure Vessel Technology*, 131, 031702, (2009)
- [15] Teixeira, A.P., Guedes Soares, C., Netto, T.A., Estefen, S.F., "Reliability of pipelines with corrosion defects", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85, 228-237 (2008)
- [16] Ravishankar, B., et al., "Separable Sampling of the Limit State for Accurate Monte Carlo Simulation", *50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA: Palm Springs, California, (2009)
- [17] Nessim, M., Zhou, W. Zhou, J., Rothwell, B., "Target Reliability Levels for Design and Assessment of Onshore Natural Gas Pipelines", *J. Pressure Vessel Technology*, 131, 061701-1, (2009)
- [18] Smarslok, B., Haftka R., Kim, N., *47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Newport, Rhode Island, (2006)