

베이지안 추론법을 이용한 부식된 배관의 통계적 수명예측

노유정*

¹계명대학교 기계자동차공학과

Statistical Life Prediction of Corroded Pipeline Using Bayesian Inference

Yoojeong Noh*

¹Department of Automotive and Mechanical Engineering, Keimyung University

요약 배관은 대형기계설비에서 다양한 작동유체를 운반하는데 사용되는데, 대형시스템의 성능을 유지하기 위해서는 부식된 배관의 잔존 수명을 정확히 예측될 필요가 있다. 하지만, 배관 형상, 물성치, 부식률 등 배관의 수명에 영향을 미치는 요인들의 불확실성이 크기 때문에 부식 잔존 수명을 정확히 예측하기 힘들다. 본 연구에서는 통계적인 접근방법인 베이지안 추론법을 이용하여 부식 잔존 수명을 예측하는 방법을 제안하였다. 여기서, 배관의 파손 확률은 베이지안 법칙을 기반으로 시간에 따른 배관 파손 압력에 관한 사전 정보와 실험데이터를 이용하여 계산되고, 부식 잔존 수명은 10%의 파손 확률을 갖는 경과 시간으로 계산되었다. 예제에서는 부식에 영향을 미치는 주요인자로부터 10개와 50개의 데이터를 생성하여 배관의 파손 확률 및 배관의 잔존수명을 예측하였으며 가정한 실제 잔존수명과의 비교를 통해 제안한 방법을 검증하였다.

Abstract Pipelines are used by large heavy industries to deliver various types of fluids. Since this is important to maintain the performance of large systems, it is necessary to accurately predict remaining life of the corroded pipeline. However, predicting the remaining life is difficult due to uncertainties in the associated variables, such as geometries, material properties, corrosion rate, etc. In this paper, a statistical method for predicting corrosion remaining life is proposed using Bayesian inference. To accomplish this, pipeline failure probability was calculated using prior information about pipeline failure pressure according to elapsed time, and the given experimental data based on Bayes' rule. The corrosion remaining life was calculated as the elapsed time with 10 % failure probability. Using 10 and 50 samples generated from random variables affecting the corrosion of the pipe, the pipeline failure probability was estimated, after which the estimated remaining useful life was compared with the assumed true remaining useful life.

Key Words : Bayesian inference, Corrosion remaining life, Failure pressure, Pipeline failure probability

1. 서론

배관은 항공, 조선, 플랜트 등과 같은 다양한 기계설비에서 냉각수, 가스, 정유 등과 같은 작동유체를 운반하는데 사용된다. 배관은 시스템 성능 및 신뢰성을 유지하기 위한 중요한 요소이므로, 장기간 작동되는 기계설비

에서 배관의 수명을 정확히 예측한다면 배관을 적절한 시기에 보수 및 교체가 가능하여 안전사고를 미연에 방지할 수 있으며 배관의 불필요한 유지 및 보수비용을 상당부분 줄일 수 있다. 배관의 수명을 결정짓는 인자는 부식, 피로, 침식 등 노출된 환경에 따라 다양하다. 대부분의 설비에서 배관은 금속재질이며 장기간 다양한 환경에

본 연구는 2011년도 계명대학교 비사(신진)연구기금으로 이루어졌음.

*Corresponding Author : Yoojeong Noh(Keimyung Univ.)

Tel: +82-53-580-5264 email: romana79@kmu.ac.kr

Received March 2, 2015

Revised April 8, 2015

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

노출되므로, 특히 부식으로 인해 사용시간이 길어질수록 배관의 손상 정도는 급격히 증가한다. 배관의 부식수명을 결정하는 가장 고전적인 방법은 배관수명에 미치는 배관형상변수, 부식률 등의 요인을 확정적(deterministic) 변수로 가정하여 실험데이터로부터 제안된 부식된 배관의 파손식을 이용하여 계산한다[1]. 하지만, 배관은 사용기간 동안 다양한 환경적 요인으로 인한 변수의 불확실성(uncertainty)이 많으므로 확정적인 배관 파손식을 사용할 경우 실제 배관 수명과 상당한 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 변수의 불확실성을 고려한 통계적인 방법을 이용하여 배관의 수명을 결정하는 연구가 다양하게 이루어지고 있다.

Ahmed와 Mokhtar [2-4]는 부식결함이 있는 경우 부식에 영향을 미치는 인자의 확률분포를 이용하여 잔존 수명의 신뢰성 해석을 수행하였다. Shu-Xin et al. [5-6]은 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 이용하여 부식 잔존 수명을 통계적으로 예측하였으며, 여러 개의 결함을 갖는 경우 결함간의 상관관계를 이용하여 부식 잔존 수명을 예측하는 방법을 제안하였다.

하지만 위 방법의 경우 부식과 관련된 인자에 대한 확률분포, 분포함수의 관련 계수 등이 요구되므로 정확한 확률적 특성을 모르면 사용하기 힘들다. 그러므로 본 연구에서는 관련변수에 대한 정확한 통계적인 정보가 요구되지 않는 베이지안 추론법을 사용하여 파손압력이 발생하는 확률을 계산하고, 이를 이용하여 부식 잔존 수명을 계산하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 배관의 파손확률

2.1 배관 모델

SME B31G-91, Battle-97, DNV-99 등 배관의 파손 압력을 예측하는 다양한 모델이 존재하는데 본 논문에서는 Shell-92를 이용하여 배관 파손 압력(failure pressure)을 계산하였다[6].

$$p_f = \frac{1.8UTSt}{D} \left(\frac{1 - \frac{d(T)}{t}}{1 - \frac{d(T)}{t} M^{-1}} \right) \quad (1)$$

여기서 UTS는 재료의 최대 인장 강도, p_f 는 파손 압력,

D는 배관 직경, t는 배관 두께, d(T)는 시간에 따른 결함의 깊이, T는 경과 시간, M은 Folias factor를 가리킨다.

$$M = \sqrt{1 + 0.805 \frac{L(T)^2}{Dt}} \quad (2)$$

결함의 깊이 d(T)와 배관장축의 길이 L(T)는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} d(T) &= d_0 + V_r(T - T_0) \\ L(T) &= L_0 + V_a(T - T_0) \end{aligned} \quad (3)$$

V_r 는 원주 방향의 부식률이며, V_a 는 축방향 부식률, d_0 와 L_0 은 T_0 에서 측정된 결함 깊이와 길이이다. 여기서 수식(3)을 수식(1)에 대입하면 부식된 배관의 파손압력은 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$p_f = \frac{1.8UTSt}{D} \left(\frac{1 - \frac{d_0 + V_r(T - T_0)}{t}}{1 - \frac{d_0 + V_r(T - T_0)}{t} M^{-1}} \right) \quad (4)$$

2.2 배관의 확률적 모델

배관의 파손은 배관의 파손압력이 배관의 작동압력보다 낮을 경우 발생한다. 그러므로 배관 파손의 기준이 되는 조건을 다음과 같은 한계상태 함수(limit state function)로 정의할 수 있다.

$$z = p_f(UTS, D, t, d_0, L_0, V_r, V_a) - p_{op} \quad (5)$$

여기서 p_{op} 는 작동 압력이다. 다시 말해서 $z > 0$ 일 때 배관은 안전하게 작동됨을 의미하며, $z \leq 0$ 일 때 배관이 파손되는 상태를 의미한다. 그러므로 배관 파손 확률은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = Prob(z \leq 0) \quad (6)$$

배관의 파손확률을 정확히 계산하기 위해서는 관련된 배관형상변수, 재료 물성치, 부식률 등 각 변수의 확률분포를 정확히 파악해야한다. 하지만, 각 변수에 대한 확률분포는 거의 알려져 있지 않으므로 많은 연구에서 정규

분포함수 (normal distribution) 혹은 로그정규분포함수 (lognormal distribution)와 같은 특정한 분포함수를 가정하고 사용하는 경우가 많고, 각 분포함수의 파라미터 역시 특정한 값을 가정하고 사용하는 경우가 많으므로 파손확률을 정확히 계산하기가 어렵다. 파손확률을 정확히 계산하지 못한다면, 배관의 부식 수명을 예측하는 것 역시 어려우므로 이를 통계적으로 안전하게 예측하는 방법에 대한 개발이 필요하다.

3. 베이지안 추론

3.1 배관의 파손압력의 베이지안 추론

베이지안 추론은 추론해야하는 대상의 사전확률(prior distribution)과 추가적인 관측을 통해 대상의 사후확률 (posterior distribution)을 추론하는 방법으로써, 수식으로 정리하면 아래와 같다[7,8].

$$P(A|B, I) = \frac{P(A|I)P(B|A, I)}{P(B|I)} \quad (7)$$

여기서 $P(A|I)$ 는 A의 사전확률, $P(B|A, I)$ 는 데이터로부터 계산된 우도함수(likelihood function), $P(B|I)$ 는 추가적 정보와 관련된 정규화계수(normalization constant), $P(A|B, I)$ 는 관측된 데이터(B)와 추가로 관측된 정보(B)로부터 예측된 사후확률이다. 여기서 사전확률은 이론적 근거, 전문가의견, 혹은 과거 실험데이터로부터 얻으며, 가능한 많은 사전정보를 얻게 되면 더욱 정확한 사후확률을 확보할 수 있다. 우도함수는 실험데이터의 통계적 특성을 함수형태로 나타내는 것을 의미한다. 사후확률은 관심 변수 A와 관련된 사전 정보와 실험데이터를 이용하여 베이지안 법칙에 의해 A의 사후확률을 계산한다. 여기서 베이지안 추론은 새롭게 관측된 정보가 주어진 경우 미지 변수에 대한 사후확률을 계산하는 수학적인 근거를 제공한다.

이를 부식된 배관의 파손모델에 적용한다면, 관심 있는 변수는 시간에 따른 파손압력에 해당된다. 파손압력에 미치는 인자들은 다양한 환경적 혹은 실험 조건에 의해 불확실성을 포함하므로 파손압력 역시 불확실성을 포함한다. 그러므로 본 연구에서는 파손압력의 사전확률 및 실험데이터를 통해 시간에 따른 파손압력에 대한 사후확률을 계산하여 파손 확률을 계산하는 것을 목표로 한다.

3.2 베이지안 업데이트

베이지안 방법을 부식모델에 적용하면 수식 (7)은 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$P(path|test, I) = \frac{P(path|I)P(test|path, I)}{P(test|I)} \quad (8)$$

여기서 $P(path|test, I)$ 는 각 샘플 path가 실제 정확한 파손압력커브와 일치하는 사후확률을 의미하며, $P(path|I)$ 는 파손압력의 사전확률, $P(test|path, I)$ 는 실험결과를 이용한 우도함수값, $P(test|I)$ 는 사후확률의 정규화 상수를 의미한다. 확률이론에 따르면 연속인 확률 밀도 함수를 적분하면 1이 되므로 $P(test|I)$ 는 각 샘플 path에 대한 사후확률값을 이용하여 계산된다.

베이지안 수식에 따르면 사후분포는 사전분포와 우도함수의 곱에 비례한다. 우도함수는 각각의 실험데이터가 측정된 데이터의 평균으로부터 벗어난 정도를 계산하여 평균으로 벗어난 정도가 심한 경우 낮은 가중치(weighting factor)를, 평균과 근사한 경우 높은 가중치를 갖는다. 본 연구에서 사용된 우도함수는 아래와 같이 정규분포함수를 사용하였다.

$$l = \exp \left[-\frac{(p_f - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (9)$$

여기서 p_f 는 수식 (4)로부터 계산된 파손압력이며, μ 와 σ 는 파손압력의 평균값과 표준편차이다.

베이지안 방법을 설명하기 위해 각각의 확률변수의 균등 분포로부터 10개의 샘플을 임의로 추출한다고 가정하자. 여기서 Table 1은 확률 변수의 결정적값(deterministic value)과 균등분포로 가정한 경우 상한과 하한을 나타낸다.

Table 1. Statistical information on random variables

Variables	deterministic values	Distribution
V_r (mm/year)	0.15	Uniform (0.09, 0.21)
V_o (mm/year)	20.0	Uniform (9.6, 30.4)
L_o (mm)	5.29	Uniform (4.76, 5.82)
d_o (mm)	2.0	Uniform (1.4, 2.6)
D (mm)	400.0	Uniform (360, 440)
t (mm)	7.0	Uniform (6.3, 7.7)
UTS(MPa)	580.0	Uniform (522, 638)

Fig. 1은 파손압력 관계를 나타내는 수식 (1)에서 각각의 변수가 균등분포(uniform distribution)를 따른다는 가정아래 임의로 추출된 7개 변수의 10쌍의 샘플을 수식(1)에 대입하여 얻은 파손압력 커브에 해당된다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 각각의 샘플 조합은 10개의 파손압력 커브를 생성하며, 각 커브는 1/10의 확률을 갖는다. 여기서 사전확률은 실험데이터가 추가되면 베이저안 법칙에 의해 업데이트된다.

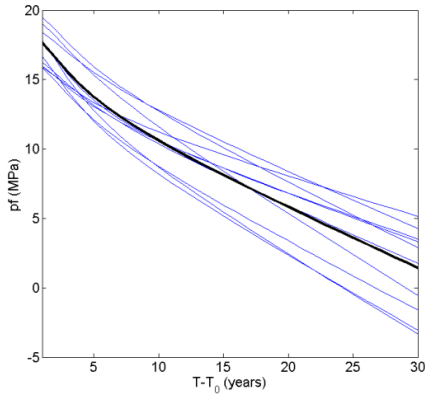


Fig. 1. Sample failure pressure curves according to elapsed time

여기서 검은색 굵은 실선은 주요 인자가 결정적 값을 갖는 경우이며, 파란색 가는 실선은 10개 쌍의 샘플로 얻은 그래프이다. 균등 분포로부터 임의로 10개의 추출된 데이터는 데이터의 임의성으로 인해 밴드 형태의 그래프를 갖게 된다.

Fig. 2는 배관의 파손 확률에 대한 사전확률과 사후확률을 나타낸다. 경과 시간이 짧은 경우 파손압력이 작동압력보다 큰 확률은 1에 가깝지만 시간이 경과될수록 파손압력은 감소하여 작동압력보다 감소되는 확률 역시 점점 감소하였다.

만약 10개의 데이터에서 40개의 샘플을 추가하면, 10개의 데이터를 이용한 사후확률은 베이저안 업데이트를 통해 사전확률이 되고, 40개의 샘플에 대한 우도함수와 곱을 이용하여 50개 데이터의 사후확률을 계산할 수 있다. 50개의 샘플을 사용하여 계산된 파손압력의 사후확률은 10개의 샘플을 사용하여 계산된 파손압력의 사후확률보다 시간에 대해 연속적인 확률분포를 가지며 사전확률과의 차이도 비교적 작다는 것을 확인할 수 있다. 데이터 수가 증가하면 할수록 사후확률은 주로 우도함수에 의해 결정된다.

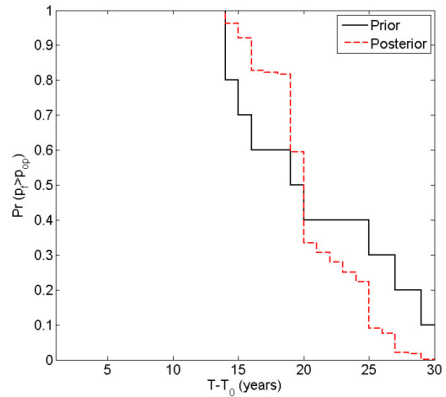


Fig. 2. Prior and posterior distributions for Pipeline failure probability (n=10)

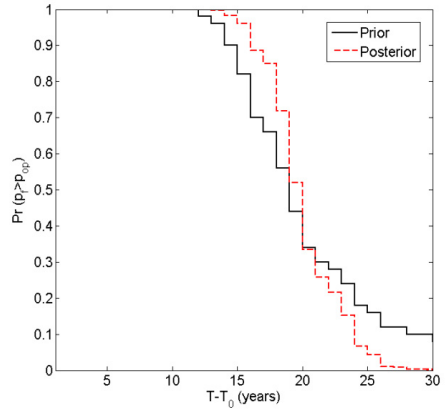


Fig. 3. Prior and posterior distributions for Pipeline failure probability (n=50)

4. 잔존수명의 예측

배관의 파손압력에 대한 사후확률은 배관의 잔존수명을 예측하는데 사용된다. 본 연구에서는 배관의 파손압력이 작동압력보다 큰 확률이 90%, 다시 말해서 파손확률은 10%일 때의 경과시간을 잔존수명으로 정하였다. 잔존수명을 예측하는 방법을 흐름도로 나타내면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

베이저안 추론법을 이용하여 계산된 잔존수명과 실제 수명과의 비교를 위해 1,000개 세트(nset)에서의 잔존수명을 계산하였다. 각 세트에서는 배관의 부식에 영향을 미치는 7개의 변수로부터 n=10과 n=50개의 샘플을 생

성하였다. 실제 배관의 부식 수명 평가를 위해서는 주어진 실험 데이터를 이용할 수 있으며, 실험데이터가 없는 경우 각 변수를 균등분포라고 가정하거나 변수의 분포를 아는 경우 특정한 분포로부터 샘플링을 통해 데이터를 생성할 수 있다. 주어진 데이터 혹은 생성된 데이터는 수식 (4)를 이용하여 파손 압력을 계산할 수 있고, 수식 (8)을 이용하여 파손압력의 사후확률을 계산할 수 있다. 이러한 계산과정은 경과시간이 $dT(T-T_0)=1, \dots, 30$ 까지 반복되면 Fig. 2와 3과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 경과시간에 따라 계산된 사후확률, 다시 말해서 파손 확률은 10%의 파손확률에 해당되는 경과시간은 잔존수명이 되며, $nset=1,000$ 까지 반복해서 계산된다.

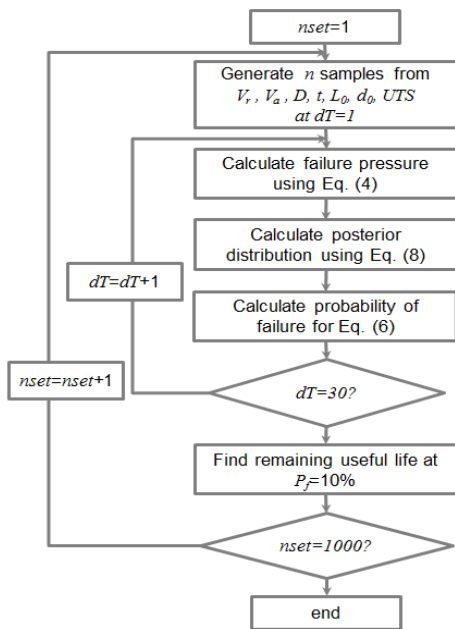


Fig. 4. flow chart

Fig. 5와 6은 샘플수가 10개, 50개인 경우, 1,000개 샘플 세트로부터 계산된 잔존수명의 히스토그램을 나타낸다. 여기서, 실제 잔존수명은 20.4년으로 가정하였으며[6], 이는 Table 1에서 각 변수에 결정적 값을 수식 (4)에 대입하여 계산된 파손압력커브인 Fig. 1에서 작동압력과 동일한 값을 가지는 경과시간을 실제 잔존수명으로 가정하였다. 샘플수가 10개인 경우 잔존수명의 평균값은 16.62년이며 14년에서 22년 사이의 넓은 구간에 걸친 분포를 가진다. 부식잔존수명의 분포는 평균인 16.62년 근처에 밀집되어 있으므로 본 연구에서 가정

실제 잔존수명인 20.4년보다 대부분 낮은 값을 가지며, 95%의 백분위수(percentile)에 해당되는 잔존수명은 18.76년이다. 예측된 잔존수명이 대부분 실제 잔존수명보다 낮은 이유는 본 연구에서 10%의 파손확률을 갖는 시간을 잔존수명으로 정의하였기 때문이며 이는 배관의 보수적인 수명예측을 가능하게 한다.

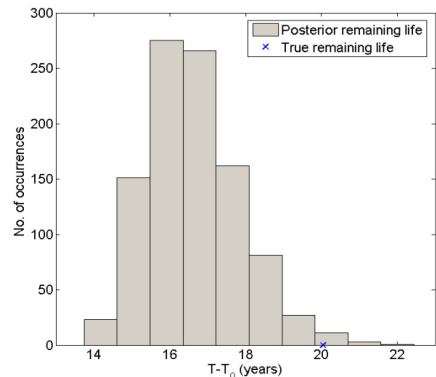


Fig. 5. Histogram of the predicted pipeline remaining life (n=10)

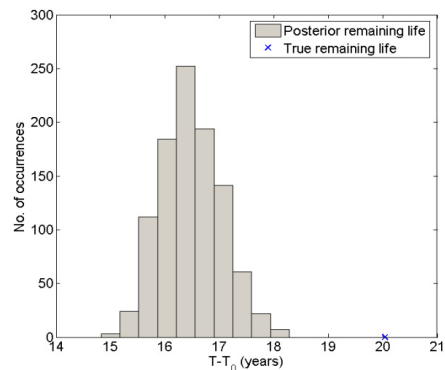


Fig. 6. Histogram of the predicted pipeline remaining life (n=50)

샘플수가 50개로 증가할 경우 잔존수명은 16.47년으로, 평균값은 10개 샘플로 계산한 결과와 거의 유사하지만 잔존수명의 분포는 15년에서 18.5년 사이의 좁은 구간에 분포한다. 또한 95%의 백분위수에 해당되는 잔존수명은 17.28년이므로 실제 잔존 수명보다 낮으며, 10개의 샘플로 계산된 95% 백분위의 잔존수명보다도 낮은 값을 가진다.

샘플수가 적은 경우 샘플링의 임의성으로 인한 불확실성이 증가하므로 이로 인해 10%의 파손확률에 대한 잔존 수명을 계산한다고 할지라도 일부 실제 잔존 수명

보다 큰 경우가 존재한다. 하지만, 샘플수가 많은 경우 샘플링으로 인한 불확실성은 줄어들기 때문에 더 보수적인 결과를 얻을 수 있다.

본 연구는 부식에 영향을 미치는 주요 인자의 불확실성에 대한 고려만 했지만, 이외에도 측정 시 발생하는 노이즈나 바이어스 등 부식 수명을 더욱 보수적으로 평가하기 위해서는 다양한 영향도 고려할 필요가 있다. 그러므로 향후 측정으로 발생하는 불확실성으로 인한 부식 수명 평가에 대한 연구를 수행할 예정이며, Shell-92 모델 이외에도 다양한 부식모델에도 적용할 함으로써 연구 결과의 파급효과를 검증할 예정이다.

5. 결론

- (1) 베이지안 추론법을 이용하여 부식에 영향을 미치는 주요 인자들의 분포를 임의로 가정하지 않고 사전확률과 우도함수만을 이용하여 Shell-92 모델의 부식잔존수명을 통계적으로 예측하였다.
- (2) 배관의 안전한 수명 예측을 위해 10%의 파손 확률을 기준으로 계산된 잔존수명의 분포로부터 95%의 백분위에 해당되는 값을 잔존 수명으로 정의함으로써 배관의 보수적인 잔존 수명 예측을 가능하게 하였다.
- (3) 부식으로 인한 배관의 수명은 부식에 영향을 미치는 인자들의 불확실성이 높아 주요 인자들의 불확실성을 정량화하는 것이 불가능하므로, 베이지안 추론법을 통해 보수적이면서 안전하게 배관의 수명을 예측하는 것이 가능하므로 실제 배관 수명의 예측 시 유용한 방법으로 활용될 수 있다.

References

- [1] F. Caleyo, J. L. González, J. M. Hallen, "A Study on the Reliability Assessment Methodology for Pipelines with Active Corrosion Defects", *International Journal of Pressure and Piping*, Vol. 79, No. 1, pp. 77-86, 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0308-0161\(01\)00124-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-0161(01)00124-7)
- [2] M. Ahammed, "Probabilistic Estimation of Remaining Life of a Pipeline in the Presence of Active Corrosion Defects", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, No. 4, pp. 321-329, 1998.

- DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0308-0161\(98\)00006-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-0161(98)00006-4)
- [3] M. Ahammed, R. E. Melchers, "Reliability Estimation of Pressurized Pipelines Subjected to Localized Corrosion Defects", *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, Vol. 69, pp.267-272, 1996. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0308-0161\(96\)00009-9](http://dx.doi.org/10.1016/0308-0161(96)00009-9)
 - [4] A. A. Mokhtar, M. C. Ismail, "Probabilistic Reliability Assessment of an Insulated Piping in the Presence of Corrosion Defects", *Journal of Applied Science*, Vol. 11, pp. 2063-2067, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.3923/jas.2011.2063.2067>
 - [5] S. X. Li, H. L. Zeng, S. R., Yu, X. Zhai, S. P. Chen., R. Liang, L. Yu, "A Method of Probabilistic Analysis for Steel Pipeline with Correlated Corrosion Defects," *Corrosion Science*, Vol. 51, No. 12, pp. 3050-3056, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.033>
 - [6] S. X., Li, S. R., Yu, H. L. Zeng, J. H. Li, L. Liang, "Predicting Corrosion Remaining Life of Underground Pipelines with a Mechanically-based Probabilistic Model," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 65, No. 3-4, pp. 162-166, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2008.12.023>
 - [7] J. M. Karandikar, N. H. Kim, T. L. Schmitz, "Prediction of Remaining Usefull Life for Fatigue-damaged Structures Using Bayesian Inference", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 96, pp. 588-605, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.09.013>
 - [8] A. Gelman, J. B. Carlin, H. S. Stern, D. B. Rubin. Bayesian data analysis. 2nd ed. Boca Raton (FL): Chapman and Hall/CRC Press, 2009.
 - [9] F. J. Klever, G. Stewart, New Developments in Burst Strength Predictions for Locally Corrodes Pipes, *Shell International Research*, 1995.

노 유 정(Yoojeong Noh)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 12월 : Univ. of Iowa 기계공학과 (공학박사)
- 2010년 2월 ~ 2010년 12월 : 부산대학교 박사후연구원
- 2010년 12월 ~ 2011년 8월 : 한국기계연구원 선임연구원
- 2011년 9월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학과 교수

<관심분야>

전산역학, 최적 설계, 신뢰성 해석