

## In-line Inspection과 부식결함 클러스터링을 이용한 가스배관의 고장에측

### A Prediction Method of the Gas Pipeline Failure Using In-line Inspection and Corrosion Defect Clustering

김성준\* · 최병학\*\* · 김우식\*\*\*

Seong-Jun Kim<sup>†</sup>, Byung Hak Choe, and Woosik Kim

\*강릉원주대학교 산업경영공학과, \*\*강릉원주대학교 신소재금속공학과, \*\*한국가스공사 연구개발원

<sup>†</sup>Department of Industrial Engineering, Gangneung-Wonju National University

\*\*Department of Metal and Materials Engineering, Gangneung-Wonju National University

\*\*R&D Division, Korea Gas Corporation

#### 요 약

부식결함은 가스배관의 신뢰성평가 및 정비계획에 유의한 영향을 미친다. 부식결함은 정기적인 ILI를 통해 수집할 수 있지만 ILI 데이터의 효과적인 분석은 아직 미흡한 실정이다. 본 논문은 부식결함이 존재할 때 가스배관의 잔여수명을 예측하는 문제를 다룬다. 실제 운용 환경에서 배관 파라미터는 불확실성의 영향 하에 놓이게 되므로 확실적인 접근방법을 채택한다. 배관의 고장은 그 운용압력이 배관파열압력보다 클 때 발생하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 배관의 고장확률은 운용압력이 배관파열압력보다 클 확률로서 정의된다. 이를 계산하기 위해 본 논문에서는 구조공학 분야에서 널리 쓰이는 First Order Reliability Method (FORM) 알고리즘을 이용한다. 배관파열압력을 얻기 위한 모델은 잘 알려진 Battelle 코드를 채택한다. ILI 데이터가 주어질 때 고장확률을 계산하는 과정은 Matlab GUI를 통해 제시하고 특히 부식결함의 클러스터링이 계산결과에 미치는 영향을 논의한다. 본 논문의 결과는 고장확률 추정의 정밀도를 높이고 효율적인 정비정책을 수립하는데 적절한 클러스터링이 필요함을 시사한다.

**키워드** : 가스배관, 부식, 고장확률, 클러스터링, 인라인검사, 일차신뢰도법

#### Abstract

Corrosion has a significant influence upon the reliability assessment and the maintenance planning of gas pipeline. Corrosion defects occurred on the underground pipeline can be obtained by conducting periodic in-line inspection (ILI). However, little study has been done for practical use of ILI data. This paper deals with remaining lifetime prediction of the gas pipeline in the presence of corrosion defects. Because a pipeline parameter includes uncertainty in its operation, a probabilistic approach is adopted in this paper. A pipeline fails when its operating pressure is larger than the pipe failure pressure. In order to estimate the failure probability, this paper uses First Order Reliability Method (FORM) which is popular in the field of structural engineering. A well-known Battelle code is chosen as the computational model for the pipe failure pressure. This paper develops a Matlab GUI for illustrating failure probability predictions. Our result indicates that clustering of corrosion defects is helpful for improving a prediction accuracy and preventing an unnecessary maintenance.

**Key Words** : Gas Pipeline, Corrosion, Failure Probability, Clustering, In-line Inspection, FORM

## 1. 서 론

접수일자: 2014년 9월 14일

심사(수정)일자: 2014년 9월 28일

게재확정일자: 2014년 12월 7일

<sup>†</sup> Corresponding author

본 연구는 한국가스공사의 지원으로 수행되었음.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

부식결함은 가스배관의 효율적이고 안전한 관리에 중대한 위협이 될 수 있다. 부식은 배관 신뢰성에 영향을 미치는 핵심요인 중 하나이다. 부식결함이 진행됨에 따라 배관 잔류강도가 약화되고 일정 기준을 넘어설 경우 누설, 파단, 폭발 등의 사고로 이어질 수 있기 때문에 부식결함을 허용한계 이내로 유지, 관리하는 것은 배관 신뢰성평가 프로그램의 핵심이 된다[1].

매설된 지 일정 기간이 경과하면 가스배관의 상태를 점검하기 위해 In-line Inspection (ILI)이 실시된다. ILI를 통

해 수집된 데이터는 부식결함에 대한 많은 정보를 담고 있으므로 이를 효과적으로 분석하여 배관 관리에 활용해야 하지만 그 중요성에 비해 ILI 데이터분석에 대한 연구는 아직 제한적인 실정이다[2]. ILI를 통해 부식결함의 위치, 형상, 크기 등을 측정할 수 있지만 또 하나 중요한 것은 이들을 통해 부식결함의 성장률을 파악하는 것이다. 성장률은 ILI 시기와 배관정비계획을 수립하는 데 결정적인 역할을 한다. 성장률이 지나치게 크게 설정되면 불필요한 ILI와 배관보수에 의한 비용증가를 초래하게 되고 반대로 성장률이 너무 작게 적용이 되면 적정 보수시기를 놓칠 수 있고 배관사고의 위험을 높이기 때문이다[3].

본 논문은 부식결함 ILI 데이터가 주어질 때 폭발압력 및 고장확률을 계산하는 절차를 제시하고자 한다. 폭발압력은 다양한 배관 파라미터의 영향을 받으므로 이를 묘사하고자 본 논문에서는 Battelle 코드를 이용한다. 이 코드는 배관 분야에서 널리 수용되는 코드 중 하나로 국내 실정에 맞춰 개발된 코드와도 유사성이 높아 본 논문의 목적에 부합된다고 하겠다. 폭발압력 모델이 알려져 있다고 하더라도 그 확률분포를 유도해서 고장확률을 계산하는 것은 매우 어려운 문제이다. 이를 극복하기 위해 구조공학 분야에서 다양한 근사적 해법이 제시되어 왔다. 그 중 하나인 First-Order Reliability Method (FORM)은 단순하지만 양호한 수준의 고장확률 근사치를 제공하는 것으로 알려져 있어 본 논문에서도 이를 채택하고자 한다. 고장확률 계산과정은 Matlab 프로그램으로 구현한다. 특히 사용자 편의를 돕기 위해 Graphical User Interface (GUI)를 개발하고 이를 이용하여 현장 ILI 데이터가 주어질 때 고장확률을 계산하는 절차를 예시한다. 어떤 구간에서 얻어진 부식결함 데이터를 적절하게 그룹핑하면 배관고장 진단을 위한 보다 유용한 정보를 얻을 수 있다. 예를 들어, 표시장치의 고장검출력을 개선하기 위해 퍼지클러스터링을 이용한 사례가 발표한 바도 있다[4]. 본 논문에서는 부식결함의 클러스터링이 고장확률 계산 결과에 미치는 영향과 임계치 선택에 대해서 논의한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 고장확률 계산을 위한 기존의 연구를 소개하고 Battelle 코드를 적용할 때의 고장확률을 정의한다. 고장확률 또는 신뢰도 계산을 위한 근사적 해법과 Matlab GUI를 이용한 예시는 3장에서 제공된다. 부식결함의 클러스터링이 계산결과에 미치는 영향과 의미에 대해서도 논의한다. 마지막으로 4장에서는 연구내용을 정리하고 향후 연구방향을 제시하고자 한다.

## 2. 배관고장확률의 정의와 평가

배관의 고장은 임의의 한 지점에서 운용압력이 배관과열압력을 초과할 때 발생하는 것으로 정의된다. 그러면 배관 고장확률  $F$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \Pr(P_f < P_{op}) \quad (1)$$

식 (1)에서  $P_f$ 와  $P_{op}$ 는 배관과열압력과 운용압력을 각각 의미한다. 여기서  $P_f$ 와  $P_{op}$ 가 정규분포를 따르는 확률변수라고 가정하고 각각의 평균과 표준편차를  $\mu_f, \sigma_f, \mu_{op}, \sigma_{op}$ 라 놓으면 식 (1)의 상황은 그림 1과 같이 묘사할 수 있다.

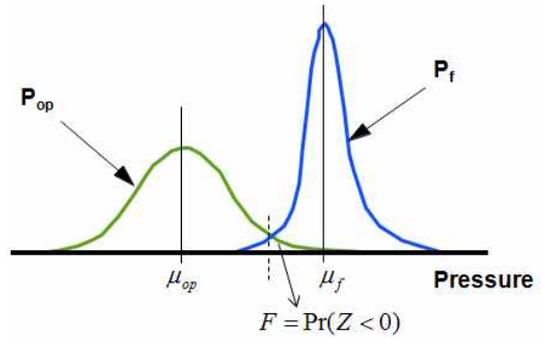


그림 1. 응력-강도 모형에서 고장확률 묘사

Fig. 1. Illustration of the failure probability in the stress-strength model

그림 1에서  $Z$ 는  $Z = P_f - P_{op}$ 를 의미하며 이를 한계상태함수 (Limit State Function, LSF)라고 한다. 또한 식 (1)은 정규분포 이론을 이용하면 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$F = \Phi\left(-\frac{\mu_f - \mu_{op}}{\sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_{op}^2}}\right) = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

여기서  $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수를 의미하며  $\beta$ 는 신뢰도지수 (Reliability Index)라고 부른다.  $\beta$ 가 클수록 신뢰도가 높고 고장확률이 낮음을 의미한다.

하지만 식 (2)와 같이 고장확률을 구하는 것은 제한된 상황에서나 가능하다.  $P_f$ 와  $P_{op}$ 는 매우 다양한 요인의 영향을 받을 뿐 아니라 정규분포를 따른다는 보장도 없기 때문이다. 실제로  $P_f$ 는 배관의 직경, 두께, 강도 등에 따라 다르며 특히 부식과 같은 결함이 있을 때에는 더욱 복잡하게 변화한다. 이같은 점을 고려하여  $P_f$ 의 값을 근사적으로 얻을 수 있도록 다양한 모델(코드)이 제시되어 왔으며 ASME B31G, Modified B31G, Battelle, DNV-99, Shell-92 등이 그 대표적인 사례이다. 코드 간의 차이와 특성에 대해서는 Caleyo et al.[5]을 참고하기 바란다. 이들 코드 중 본 논문에서는 Battelle 코드를 이용하여 고장확률 계산절차를 제시한다. Battelle 코드로 선택한 이유는 국내에서 개발된 몇 코드와 가장 유사성이 높아 국내 실정에 적합할 것으로 판단되었기 때문이다.

비록 코드에 의해  $P_f$ 를 수식으로 표현할 수 있지만 그 확률분포를 얻는 것은 여전히 어려운 문제이다. 따라서 고장확률을 정확하게 계산하는 것은 거의 불가능하며 근사적인 해법을 사용해야 한다. 이러한 목적으로 First order second moment (FOSM), First order reliability method (FORM), Second order reliability method (SORM), Monte Carlo Simulation (MCS) 등이 널리 이용되고 있다[4]. 결과의 정확도는 MCS가 가장 높지만 준비작업이 복잡하고 계산량이 많아 현업에서는 비교적 간단한 FOSM과 FORM을 선호한다[6]. FOSM과 FORM은 테일러 전개를 이용하여  $P_f$ 를 1차항까지 근사화하는 방법으로서 특히 FORM은 근사오차를 줄이는 절차가 포함되어 있어 FOSM에 비해 정확도가 높다. Caleyo et al.의 연구에 따르면 1차항 근사의 적합도가 고장확률의 정확도에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 예를 들어 Teixeira 등은 FORM을 이용한 배관과열압력을 예측하였고 Shell-92 코드와 Monte

Carlo Simulation을 통해 그 불확실성을 분석한 바 있다[6]. 이 연구는 항복강도, 직경, 두께, 운용압력 등을 기본 파라미터로 사용하였다. 이에 본 논문에서도 FORM을 채택하고자 하며 배관의 직경, 두께, 강도, 운용압력, 부식성장속도 등으로 주요 인자로 고려한다.

한편 ILI 데이터는 다양한 분석을 통해 고장확률 예측의 정밀도를 높이는 데 기여할 수 있다. 예를 들어, Li et al. (2009)는 인접한 부식결함 간의 상관관계를 고려하여 고장확률을 예측하는 방안을 제시하였다[1]. 특히 상관계수가 클수록 고장확률이 낮아짐을 보였는데 이는 부식결함이 서로 독립일 때가 고장확률이 가장 커짐을 의미한다. 즉 독립성 가정을 가장 보수적인 의사결정을 가져온다고 볼 수 있다. Cronin and Pick (2002) 역시 ILI 데이터로 모델링되는 부식결함형상을 고려하여 과열압력을 계산하는 방법을 제안하였다[2]. Maier et al. (2012)는 두 Run의 ILI 데이터를 이용하여 부식결함의 활성화 영역을 식별하고 로컬 부식성장률을 계산하는 방안을 제시하였다[7]. 본 논문에서는 ILI 부식결함의 크기가 잔여수명 예측에 미치는 영향을 고찰하고 클러스터링의 필요성을 논의한다.

### 3. 고장확률 계산절차와 클러스터링

FORM에 의한 고장확률 또는 신뢰도 평가는 다음 그림 2와 같이 진행된다. 먼저 적절한 코드를 선택해야 한다. 본 논문에서 채택한 Battelle 코드는  $P_f$ 를 다음과 같이 근사화한다.

$$P_f = \frac{2UTSt}{D} \left( 1 - \frac{d(T)}{t} M \right) \quad (3)$$

단,  $M = 1 - \exp(0.157L(t) / \sqrt{D[t-d(T)]/2})$ . 식 (3)에서  $UTS$ ,  $D$ ,  $t$ 는 각각 배관의 강도, 직경, 두께를 의미한다. 또한  $d(T)$ 와  $L(T)$ 는 시점  $T$ 에서 측정된 부식결함의 깊이와 길이를 각각 나타낸다. 이들은 시간에 비례하는 값으로 가정하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d(T) = d_0 + V_r(T - T_0) \quad (4)$$

$$L(T) = L_0 + V_a(T - T_0) \quad (5)$$

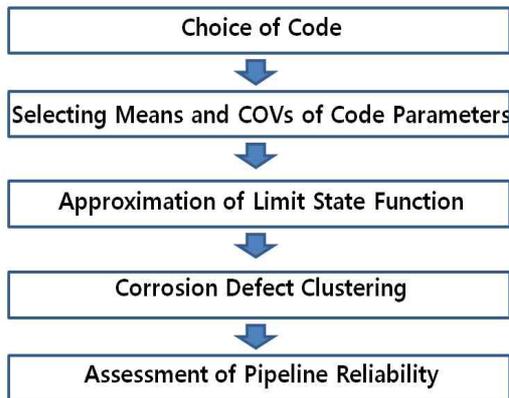


그림 2. FORM에 의한 신뢰도 계산 절차

Fig. 2. Procedure of reliability computation by FORM

식 (4)와 (5)에서,  $T_0$ 는 바로 직전의 ILI 시기를 나타내며  $d_0$ 와  $L_0$ 는 그 때 당시에 기록된 부식깊이의 깊이와 길이를 각각 의미한다. 또한  $V_r$ 과  $V_a$ 는 부식결함의 크기가 얼마나 성장하는지 연간성장률을 각각 깊이 방향과 길이 방향으로 구한 값이다.

다음, 코드 파라미터의 평균과 변동계수 (Coefficient of Variation, COV)를 결정해야 한다. 변동계수는 표준편차를 평균으로 나눈 값으로 상대 표준편차의 의미를 갖는다. 현장에서 표준편차 대신 변동계수를 널리 사용하는 이유는 변동계수가 상대적인 변동범위를 더 잘 표현하기 때문이다. 표 1은 본 논문에서 사용된 설정치들을 보여주고 있다.  $D$ ,  $t$ ,  $P_{op}$ ,  $UTS$ 의 평균은 모두 기술사양서에 지시되어 있는 수치를 적용하면 되지만  $V_r$ 과  $V_a$ 는 ILI에 의해서 측정된 값을 이용한다. 다시 말해,  $V_r$ 의 경우 직전의 ILI 데이터가 있으면  $V_r = [d(T) - d_0] / (T - T_0)$ 으로 하고 그렇지 않으면  $V_r = d(T) / T$ 으로 계산한다.  $V_a$ 의 경우도 마찬가지이다. 이렇게 하는 것은 부식결함의 크기가 시간에 비례해서 성장하는 것을 전제로 하고 있기 때문이다.

COV의 설정 역시 기술사양서에 따를 수 있지만 경우에 따라서는 ILI 데이터를 분석한 결과로도 이용이 가능하다. 다만  $V_r$ 과  $V_a$ 의 COV 설정에는 분석자의 경험적 판단이 필요하다. 많은 연구가 필요하겠지만 부식의 성장은 환경조건에 따라 매우 다양하게 나타나며 불확실성이 높은 요인이므로 COV를 가급적 큰 값으로 다루는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 본 논문에서는  $V_r$ 과  $V_a$  모두 40%로 설정하였다.

다음은 LSF를 유도해야 한다. 이를 위해서는 식 (3)을  $Z = P_f - P_{op}$ 에 대입하고 다음과 같은 테일러 급수전개를 1차항까지 적용한다.

$$Z = g(x) \approx g(m) + \nabla g(m)(x - m)^T \quad (6)$$

식 (6)에서, 벡터  $x$ 와  $m$ 은 각각 배관 파라미터와 Most Probable Point (MPP)를 나타낸다. MPP는 FORM 적용시 발생하는 근사오차를 최소화하기 위해 설정되는 값이다. 이 값을 찾는 데 실패하면  $m$ 은 평균 벡터로 설정할 수 있다. 또한 벡터  $\nabla g(m)$ 은 LSF의 1차 미분계수를 나타내며  $x = m$ 을 대입해서 구한다.

표 1. FORM 적용을 위한 배관 파라미터 설정

Table 1. Configuration of pipeline parameters for FORM

Parameter	Mean	COV (%)
Diameter, D	762 mm	0.1
Thickness, t	17.6 mm	1.0
$P_{op}$	6.3 Mpa	4.2
UTS	594 Mpa	5.2
$V_r$	as measured	40.0
$V_a$	as measured	40.0

다음, ILI에 의해 부식결함 데이터가 주어지면 적절한 클러스터링을 실시하고 클러스터 별로 고장확률을 예측하게 된다. 어떤 배관구간에 대해 ILI를 실시하여 총 22개의 부식결함 데이터를 얻었다고 가정하자. 다음

그림 3은 가상의 ILI 부식결함 데이터에 대한 클러스터링 결과를 보여주고 있다. 즉 부식결함을 길이와 깊이, 2개의 변수로 정리하고 Matlab의 Fuzzy Toolbox에서 제공하는 Fuzzy c-means clustering을 적용한 것으로 변수 스케일에 따른 바이어스를 방지하기 위해 표준화를 먼저 실시하였다. 클러스터링에 따른 영향은 잠시 후에 다시 논의한다.

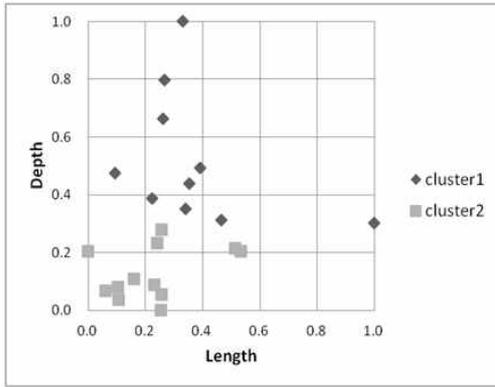


그림 3. 가상 ILI 데이터의 클러스터링  
Fig. 3. A clustering of constructed ILI data

다음은 구간 전체에 대한 고장확률을 계산하는 단계이다. 총  $n$ 개의 부식결함이 발견되었다고 하면 구간 전체의 고장확률은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{all} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i) \quad (7)$$

단,  $F_i$ 는  $i$ 번째 부식결함에 대한 고장확률을 뜻한다. 식 (7)에는 단 한 곳의 고장도 구간 전체의 고장이 된다는 의미가 포함되어 있다.

지금까지 설명한 고장확률 계산을 능률적으로 수행하기 위해 본 논문에서는 Matlab 코드 기반의 실행프로그램인 KGRP (KOGAS-GWNU Reliability Program)를 개발하였다. 그 실행 초기화면은 그림 4에서 보는 바와 같이 ① Data, ② Configuration, ③ Pipeline Parameters 세 개의 영역으로 구성되어 있다.

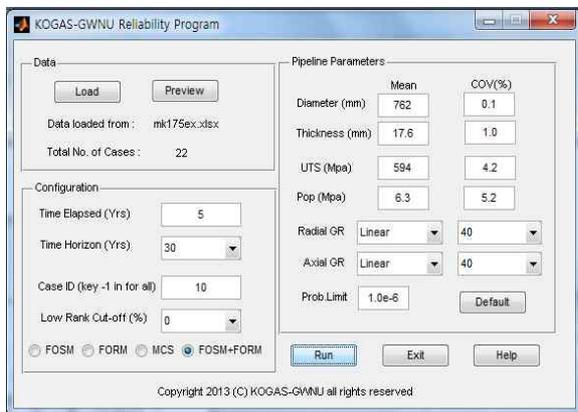


그림 4. 고장확률 계산을 위한 GUI  
Fig. 4. GUI for computing failure probabilities

먼저 Data 영역에 배치되어 있는 실행버튼에 대해 간단하게 설명한다. Load를 클릭하면 ILI 부식결함 데이터가 저장되어 있는 파일을 불러올 수 있다. 부식결함 데이터는 부식 길이와 깊이, 2개 변수로 구성된다. Preview는 부식 길이와 깊이의 상관관계와 분포패턴을 그림 5와 같이 간략하게 보여준다. 그림 5의 (a)와 (d)는 부식 길이와 깊이의 Histogram을 도시하고 있어 분포패턴을 파악하는 데 도움이 된다. 그림 5의 (b)와 (c)는 부식 길이와 깊이의 Scatter Plot으로서 두 변수 간에 다소의 상관관계가 존재함으로 보여주고 있다. 사실 (b)와 (c)는 동일한 산포도이며 X-Y축만 서로 바뀌어 있음을 알 수 있다.

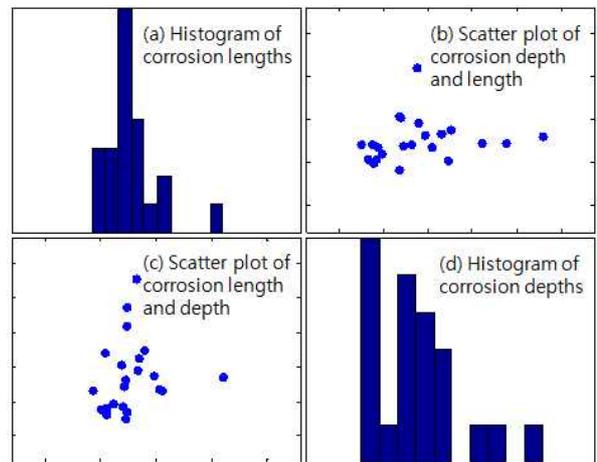


그림 5. FORM과 FOSM에 의한 고장확률 계산결과  
Fig. 5. Failure probabilities obtained by FORM and FOSM

다음으로 Configuration 영역에는 고장확률 계산을 위한 몇 가지 설정치를 입력하도록 되어있다. Time Elapsed와 Time Horizon은 배관매설 후 경과년수와 향후 고장확률을 관찰할 연수를 각각 입력한다. Case ID는 고장확률을 평가할 부식결함 번호로 1에서 22 사이에서 선택할 수 있다. 여기서는 부식결함 10번을 대상으로 한다. 한편 22개의 결함을 한꺼번에 다룰 경우에는 -1을 입력한다. Low Rank Cut-off는 배관 전체의 신뢰도를 계산할 때 하위 몇 %를 절사할 것인지를 말한다. 일반적으로 작은 크기의 결함은 배관 전체의 신뢰도에는 별 영향이 없기 때문이다. 선택버튼은 신뢰도 계산방법을 FOSM, FORM, MCS 등 중에서 사용자가 선택할 수 있도록 한다.

GUI 우측의 Pipeline Parameters 영역은 배관 파라미터의 평균과 변동계수를 입력하기 위한 것으로 여기서는 표 1에 기술된 내용과 동일하게 입력한다. 단 Prob Limit는 허용할 수 있는 고장확률의 상한값으로 이를 초과하면 배관은 고장을 일으킨 것으로 판정한다. 여기서는 ISO에서 제시하는 권고기준을 참고하여  $1.0e-6$ 으로 설정해 둔다[8].

상기와 같이 준비작업을 마치고 GUI 하단의 실행버튼 Run을 클릭하면 고장확률 계산결과를 다음 그림 6과 같은 그래프로 얻을 수 있다.

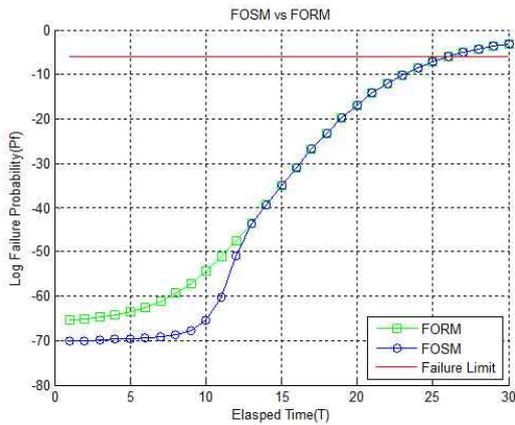


그림 6. 부식결함 10번에 대한 고장확률  
Fig. 6. Failure probability of defect No. 10

즉 부식결함 10번의 경우 고장확률이 향후 30년간 어떻게 증가하는지를 보여주고 있으며 대략 26년 후에 허용기준을 초과하는 것으로 나타난다. FORM과 FOSM에 의한 계산값은 초기에 약간의 차이를 보이다가 13년이 경과한 후 부터는 동일하게 나타남을 알 수 있다.

그림 6처럼 부식결함마다 고장확률을 얻을 수 있지만 현장에서는 하나라도 고장을 일으키면 즉 허용기준을 초과하면 이는 곧 배관 전체의 고장을 의미하게 된다. 그림 7은 22개 결함을 모두 고려하여 식 (7)로 구한 배관 전체의 고장확률을 도시하고 있다. 이 경우, 해당 배관의 잔여수명은 약 9년으로 예측된다. 현장에서는 이 시기가 도래하기 전에 적절한 보수를 실시해야 한다.

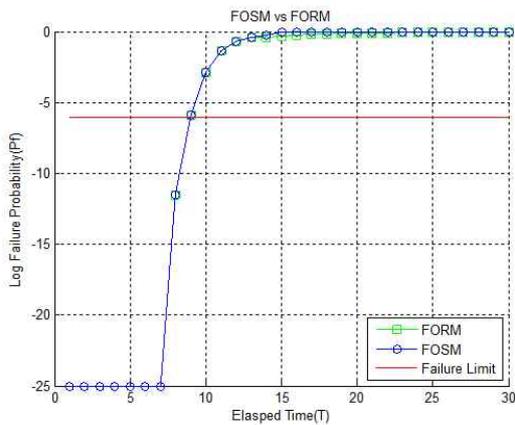


그림 7. 배관 전체의 고장확률  
Fig. 7. Failure probability for whole pipeline

하지만 결함에 따라 부식이 진행되는 속도가 다르기 때문에 일률적인 성장률에 의해 고장확률을 계산하는 것은 비현실적인 결과를 낳을 수 있다. 이를 극복하기 위해서는 진술한 부식결함 클러스터링을 이용하는 것이 필요하다. 앞의 그림 3에서 보는 바와 같이 클러스터 1은 부식의 진행속도가 빠른 그룹이라고 볼 수 있다. 반대로 클러스터 2는 부식이 많이 진행되지 않은 상태이다. 따라서 그림 7과 같이 잔여수명을 9년으로 보고 클러스터 2에 대해 보수를 실시하는 것은 과도한 조치가

될 것이다. 이에 클러스터 2에 해당되는 12개의 부식결함을 고려하여 배관 고장확률을 계산한 결과 그림 8과 같이 잔여수명은 약 25년으로 나타났다.

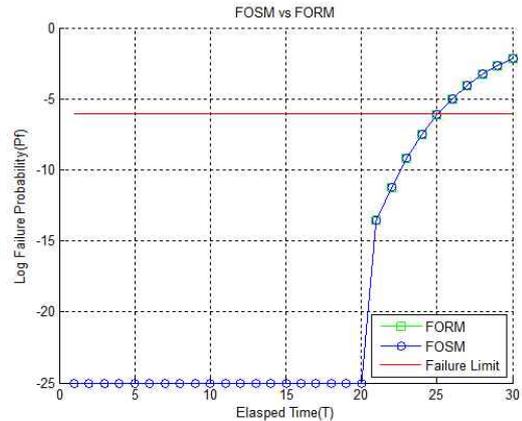


그림 8. 클러스터 2에 대한 고장확률  
Fig. 8. Failure probability for cluster 2

이처럼 부식결함의 크기는 잔여수명 예측에 큰 영향을 미치게 되므로 적절한 클러스터링을 통해 구간 별로 잔여수명을 평가함으로써 보수계획 수립 등 가스배관 관리에 유용한 정보를 제공할 수 있다. 클러스터링은 클러스터 멤버십 임계치에 따라 영향을 받는다. 상기의 클러스터 2는 부식결함의 멤버십 값이 0.5 이하인 경우이다. 반면 그림 9는 클러스터 2의 잔여수명 예측결과가 멤버십 임계치에 따라 어떻게 변화하는지 보여준다.

그림 9에 타점된 표식은 22개의 부식결함을 의미하며 멤버십이 낮은 순으로 나타나있다. 단 멤버십이 낮은 하위 7개는 잔여수명 예측에 영향이 없었으므로 그림에서 제외되었다. 나머지 15개 결함 중 클러스터 멤버십 값이 가장 큰 것이 a이고 가장 낮은 것은 b이다.

예를 들어, 멤버십 임계치를 0.5로 정하면 c까지 클러스터 2에 속하게 되고 이때 잔여수명은 25년이 된다. 만약 임계치를 0.7로 상향하면 클러스터 2에 d까지가 포함이 되며 이때의 잔여수명은 19년으로 예측됨을 알 수 있다. 퍼지 클러스터링에서의 임계치 선택에 관한 논의는 [9]를 참고할 수 있다.

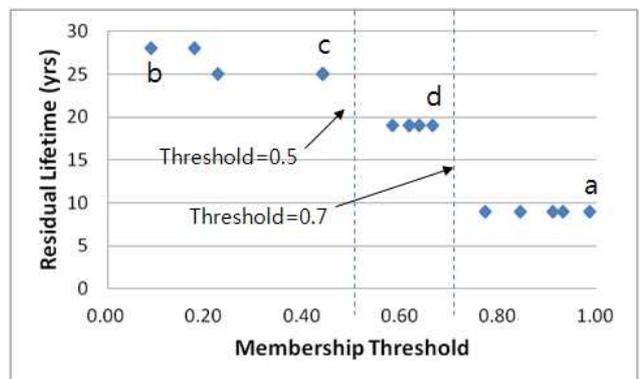


그림 9. 멤버십 임계치에 따른 클러스터 2의 잔여수명  
Fig. 9. Residual lifetime of cluster 2 according to membership threshold values

#### 4. 결 론

가스배관의 고장확률 및 잔여수명 예측은 현업에서 배관정비계획을 수립하는 데 중요하다. 부식결함은 배관고장의 주요 원인 중 하나로서 주기적인 ILI를 통해 측정, 모니터링되고 있다. 본 논문에서는 ILI에 의한 부식결함 데이터가 주어질 때 고장확률을 계산하는 절차를 제시하였으며 계산과정을 Matlab 프로그램으로 구현하여 사용의 편의를 돕고자 하였다. 가상의 ILI 데이터를 이용하여 계산과정 및 프로그램 사용을 예시하였으며 부식결함의 클러스터링이 잔여수명 예측에 미치는 영향을 논의하였다. 즉 부식성장속도에 따라 잔여수명 예측결과에 큰 차이가 있음을 수치실험으로 제시하였다. 본 논문의 내용은 정비가 시급한 배관구간을 식별하거나 불필요한 보수를 억제하는 데 유용한 정보가 될 것으로 판단된다.

일반적으로 FORM 계산결과는 코드 선택 및 COV 설정에 의존한다. 이에 따른 민감도를 검토하기 위한 추가연구가 필요하겠고 특히 ILI 주기와 비용을 고려한 클러스터링 방안에 대해서도 연구가 필요할 전망이다. 또한 본 논문에서 부식성장속도를 선형으로 다룬 부분도 지수함수, 로그함수 등 보다 다양한 모델로 확장되어야 하며 특히 ILI 런이 2회 이상일 때에도 적용가능하도록 추가연구가 필요하다. 이를 위해 [3]이 제안한 Bayesian Dynamic Linear Model을 클러스터 별로 적용하는 방안이 유용할 전망이다.

#### References

[1] S. Li, H. Zeng, S. Yu, X. Zhai, S. Chen, R. Liang, and L. Yu, "A method of probabilistic analysis for steel pipeline with correlated corrosion defects," *Corrosion Science*, vol. 51, pp. 3050-3056, 2009.

[2] D. S. Cronin and R. J. Pick, "Prediction of the failure pressure for complex corrosion defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 79, pp. 279-287, 2002.

[3] S. Zhang and W. Zhou, "Bayesian dynamic linear model for growth of corrosion defects on energy pipelines," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 128, pp. 24-31, 2014.

[4] Dae-Seung Hong and Hwa-Young Yim, "A study on the improvement of fault detection capability for fault indicator using fuzzy clustering and neural network," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 374-379, 2007.

[5] F. Caleyo, J. L. Conzalez, and J. Hallen, "A study on the reliability methodology for pipelines with active corrosion defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 79, pp. 77-86, 2002.

[6] A.P. Teixeira, C. Guedes Soares,, T.A. Netto, S.F. Estefen, "Reliability of pipelines with corrosion defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 85, pp. 228-237, 2008.

[7] C. J. Maier, P. J. Moreno, W. V. Harper, D. J. Stucki, S. J. Polasik, T. A. Bubenik, D. A. R. Shanks, and N. A. Bates, "Application and validation of statistically based corrosion growth rates," *Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference, IPC2012-90424*, 2012.

[8] ISO 16708, Petroleum and natural gas industries, pipeline transportation systems, reliability-based limit state methods, International Standards, 2006.

[9] Sung-Suk Kim, Sung-Soo Kim, and Jeong-Woong Ryu, "Improved fuzzy clustering," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 6-11, 2005.

#### 저 자 소 개



##### 김성준 (Seong-Jun Kim)

1989년 : 연세대학교 응용통계학과 학사  
 1991년 : KAIST 산업공학과 석사  
 1995년 : KAIST 산업공학과 박사  
 1995년~현재 : 강릉원주대학교 산업경영공학과 교수

관심분야 : Soft computing, Statistical modeling/analysis  
 Phone : +82-33-640-2375  
 E-mail : sjkim@gwnu.ac.kr



##### 최병학(Byung Hak Choe)

1984년 : 서울대학교 금속공학과 학사  
 1986년 : 서울대학교 금속공학과 석사  
 1990년 : 서울대학교 금속공학과 박사  
 1995년~현재 : 강릉원주대학교 신소재금속공학과 교수

관심분야 : Failure analysis, Remained life assessment of engineering materials  
 Phone : +82-33-640-2365  
 E-mail : cbh@gwnu.ac.kr



##### 김우식(Wooshik Kim)

1985년 : 서울대학교 금속공학과 학사  
 1989년 : 서울대학교 금속공학과 학사  
 1993년 : 서울대학교 금속공학과 박사  
 1993년~현재 : 한국가스공사 연구개발원 수석연구원

관심분야 : Pipeline integrity assessment, Remained life prediction  
 Phone : +82-31-400-7470  
 E-mail : wskim@kogas.or.kr