

매설배관의 건전성 평가 시스템 개발

이억섭[#], 윤해룡^{*}

Development of Assessment System for Pipeline Integrity

Ouk Sub Lee[#] and Hai Long Yin^{*}

ABSTRACT

The object of this work is to develop an assessment system for pipeline integrity. The internal algorithm and the database of the system are described in this paper. The system consists of four module applications; the effect of corrosion in pipeline, crack, SCC (stress corrosion cracking) and fatigue module. The database of the system is separated to mainly four parts; geometry of pipeline, material properties, boundary condition and general properties. This system may give a guideline for maintenance and modifications.

Key Words : Assessment System for Pipeline Integrity(파이프라인 건전성평가 시스템), Database(데이터베이스), Four Modules(부식, 균열, 응력부식균열, 피로 모듈), Application(소프트웨어)

1. 서론

부식, 균열, 응력부식균열(SCC), 피로 파손 등에 의한 파이프라인의 파손해석 데이터 관리와 신속한 건전성 평가를 위해 컴퓨터 어플리케이션 개발이 필요하다.

부식에 의해 손상된 파이프라인의 파손을 예측하는 기술은 설계시 부식여유를 결정할 때 필요하며 특히 노후된 파이프라인의 안전수명 점검 시에 응용할 수 있는 매우 중요한 기술이다. 가스를 운송하는 파이프라인은 화학적 작용 및 여러 가지 환경적 영향에 의해 내부 및 외부부식이 발생하며 이로 인하여 파이프라인의 강도는 저하되고, 누출 및 폭발에 의한 위험도가 증가된다. 따라서 파이프라인의 외부 표면에 부식이 발생했을 때, 그 곳에서

의 응력상태나 파손수명 등을 예측하여 위험한 파손사고들을 예방할 수 있는 기준이 연구되고 있다. 산업설비 현장에서는 그러한 부식상태나 균열이 발견되었을 시에는 이론적 해석은 물론 유한요소해석을 통한 건전성 평가가 이뤄져야 한다. 이런 평가 절차는 많은 시간과 노력이 필요하게 된다.

또한 국내·외적으로 이론적인 해석 및 유한요소해석 그리고 실제 모델을 사용한 실험을 수행하여 파이프라인의 건전성평가가 여러 연구실에서 이뤄지고 있고 평가기준이 정립되고 있다. 그러나 기준에 준하는 데이터의 관리가 미흡하며 실제 산업현장에서의 활용도가 낮다. 따라서 건전성 평가 시스템의 개발로 데이터베이스의 체계적인 구축 및 산업현장에서의 파이프라인 관리가 용이하게 이루어질 것이다.

접수일: 2002년 11월 8일; 게재승인일: 2003년 5월 11일
교신저자: 인하대학교 기계공학부
Email: leeos@inha.ac.kr, Tel: (032) 860-7315
* 인하대학교 대학원

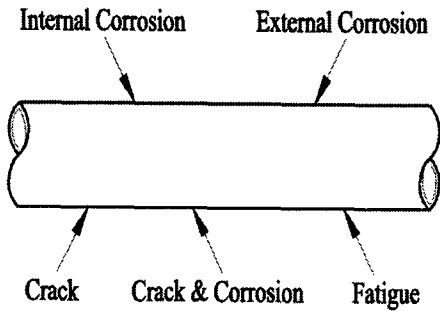


Fig. 1 System module

2. 데이터베이스 구축을 위한 파손해석

이 시스템은 Fig. 1과 같은 구성으로 파이프라인의 건전성 평가 기준을 정하고 그에 해당하는 모듈을 개발하고 있다. 파이프라인의 내·외부 부식 균열, 응력부식균열(SCC), 피로 파손 등 파이프라인의 건전성에 영향을 미치는 요소로 구분하여 구성되어 있다^{6~9}. 현재 균열 및 내·외부 부식이 파이프라인의 파손에 미치는 영향에 관한 데이터베이스가 유한요소해석 상용 패키지를 통해 계속적으로 업데이트되고 있다.

확률통계적 접근으로 부식 손상의 거동에 대한 보다 정확하고 해석적인 이해를 위해서는 많은 데이터가 필요하며¹, 그에 대한 평가기준은 ANSI/ASME B31G² 와 MB31G 에 의한 해석과 유한요소 해석을 통하여 얻어지는 파이프라인의 파손압력으로 고려된다.

부식된 파이프라인에 대한 파손식은 가압과열 실험의 데이터에 기준을 두고 작성되었으며, 다음과 같이 제안되고 있다.³

$$\sigma_f = \bar{\sigma} \left[\frac{1 - (A/A_0)}{1 - (A/A_0)/M} \right] \quad (1)$$

여기서 σ_f 는 파손응력(MPa), $\bar{\sigma}$ 는 재료의 유효응력(MPa), A 는 투영된 부식 부의 면적(mm²), A_0 는 $L \times t$ (mm²), L 은 투영된 부식길이(mm), t 는 벽의 두께(mm), M 은 Folias 벌징계수(bulging factor)이다.

1) ANSI/ASME B31G code

포물선 모양

$$\sigma_f = 1.1\sigma_{\min} \left[\frac{1 - (2/3)(d/t)}{1 - (2/3)(d/t)/M} \right]$$

$$\left(\sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} \leq 4 \text{인 경우} \right) \quad (2a)$$

사각형 모양

$$\sigma_f = 1.1\sigma_{\min} [1 - (d/t)]$$

$$\left(\sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} > 4 \text{인 경우} \right) \quad (2b)$$

여기서, D 는 파이프의 외경(mm), σ_{\min} 는 하부항복강도(MPa)이며, 벌징계수(M)는 다음과 같이 정의된다.

$$M = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)}$$

$$\left(\sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} \leq 4 \text{인 경우} \right) \quad (3a)$$

$$M = \infty$$

$$\left(\sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} > 4 \text{인 경우} \right) \quad (3b)$$

2) MB31G(Modified B31G) code

Kiefner와 Vieth는 ANSI/ASME B31G 기준에서 유효응력($\bar{\sigma} = 1.1\sigma_{\min}$)과 벌징계수(M)에 대해 문 제점을 지적하고, $\bar{\sigma} = 1.1\sigma_{\min} + 69$ (MPa)을 새로운 유효응력으로 제시하였고, 새로운 벌징계수(M)를 다음과 같이 정의하였다.⁴

$$M = \sqrt{1 + 0.63 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right) - 0.0034 \left(\frac{L}{D} \right)^4 \left(\frac{D}{t} \right)^2}$$

$$\left(\left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right) \leq 50 \text{인 경우} \right) \quad (4a)$$

$$M = 3.3 + 0.032 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)$$

$$\left(\left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right) > 50 \text{인 경우} \right) \quad (4b)$$

3) FEM에 의한 응력해석

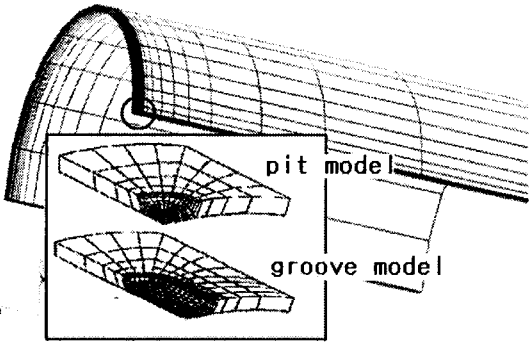


Fig. 2 Finite-element model on a semi-elliptical external corroded pipeline

Fig. 2는 해석모델을 피트(pit) 모델과 그루브(groove) 모델로 구분하여 모델링 한 것을 나타내며, 모델의 폭과 두께를 변화시킴으로써 다양한 부식형상에 대한 파손압력을 예측한다. 현재 파이프라인의 파손데이터는 모델의 기하학적 형상, API grade X60 ($\sigma_Y = 400 MPa, E = 193.2 GPa$) 모델링 재료, 부식 깊이 그리고 폭 등의 변수에 의한 해석을 통해 얻어진다.

3. 시스템 개발

이 시스템은 여러 연구실 및 현장에서 얻어지는 수치해석 데이터와 파손사례 등을 데이터베이스로 구축하고, 현장에서의 기계적 결함이나 파손 가능 요인 발견 시에 그에 따른 평가절차를 대신 수행할 수 있는 소프트웨어의 개발이 목적이다. 현장에서 신속하고 용이한 건전성 평가를 하여 많은 설비 투자 및 평가시간 절약의 효과를 가진다. 또한 GNU(Graphic User Interface)의 윈도우 환경을 지원하여 개발중이며, 비주얼 스튜디오(Visual Studio)를 사용하여 프로그래밍한다. 사용자 편의(User friendly) 개념으로 설계하여 산업현장에서 쉽고 용이하게 활용될 수 있다.^{5,6}

1) 건전성평가 시스템의 구성

이 시스템은 크게 매설배관의 건전성 평가부분과 데이터베이스의 관리부분으로 구분된다. 평가부

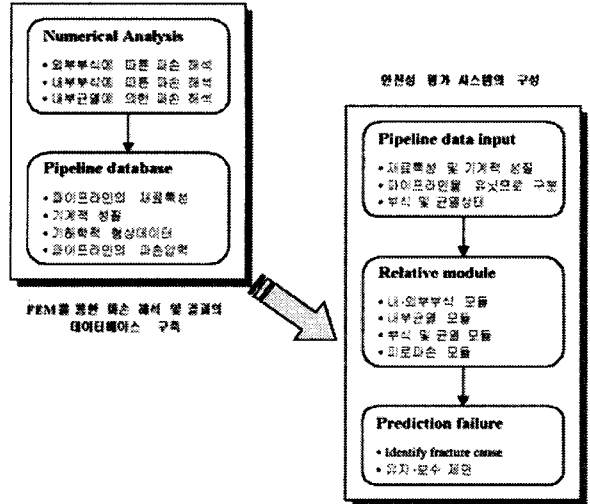


Fig. 3 System structure

는 하나의 어플리케이션이고 데이터베이스의 관리 는 윈도우즈 시스템에서 제공하는 PC용 데이터베이스 엔진인 DAO(Data Access Object)을 사용하였다.⁵ 평가부에서 데이터베이스와 연동하여 전체 시스템이 구동된다.

Fig. 3은 매설배관 데이터베이스 구축, 사용자 입력, 건전성 평가, 유지·보수의 결정을 위한 모듈의 구성을 나타내며 데이터베이스는 매설배관의 기하학적 형상, 재료의 기계적 특성, 부식 및 균열상태 등에 의한 일반적인 데이터와 기후, 토양 및 인위적으로 발생할 수 있는 파손 사례 등의 경계조건으로 구성되고 수치해석을 통한 파손 데이터를 포함한다. 이 시스템은 현장에서 발견되는 모든 데이터 및 경계조건을 사용자 입력방식에 의해 구축된 데이터베이스와 접근법을 통해 비교하여 매설배관의 건전성을 평가한 후 현재 매설배관의 유지·보수의 결정을 할 수 있도록 지침을 제공한다.

2) 매설배관의 건전성 평가

이 시스템의 매설배관 건전성 평가를 위한 내부 구성은 대략적으로 다음과 같다. 첫째, 매설배관 시스템의 데이터 입력부를 통하여 데이터를 수집한다. 둘째, 데이터베이스에 접속하여 기존 데이터에 상응하는지 확인한다. 셋째, 사용자 입력을 통한 데이터와 데이터베이스와의 비교를 한다. 넷째, 데이

터 베이스의 레코드(record)별 검색, 필드(field)별 검색 등을 통한 다각적인 접근을 한다. 이러한 방법은 DAO에서 제공하는 내부 데이터베이스 접근법을 사용하였다.⁵

Fig. 4는 외부 부식에 따른 건전성 평가후 이 시스템이 지시하는 유지 및 보수 관리의 내용을 보여 준다.

Fig. 5는 평가시스템의 사용자 입력을 받아 데이터베이스와 연동하여 기존 데이터에서 검색, 비교하여 입력된 매설배관의 파손예측을 하는 모듈이다.

건전성 평가후 이 시스템은 매설배관의 관리를 위한 척도를 제시한다. 기본적으로 위험도를 나타내는 다음의 관계에 개념을 두었다.

$$\text{위험도} = \text{파손가능성} \times \text{파손영향}$$

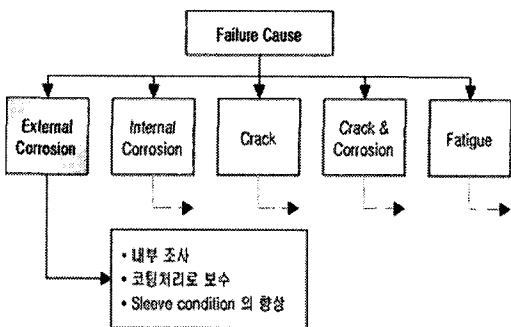


Fig. 4 Possible maintenance actions

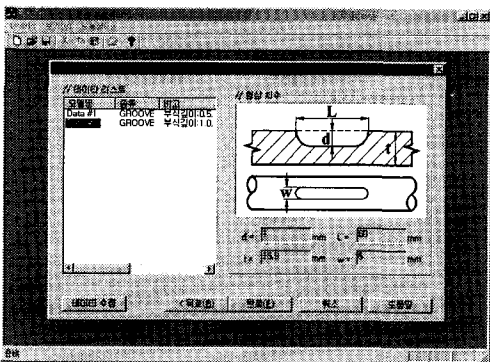


Fig. 5 External corrosion type module

여기서, 파손가능성은 매설배관의 조사를 통한 파손상태를 나타내고, 파손영향은 파손발생시 보수

및 교체에 따른 비용, 안전도, 생산성 등에 해당하는 변수로 나타낸다.

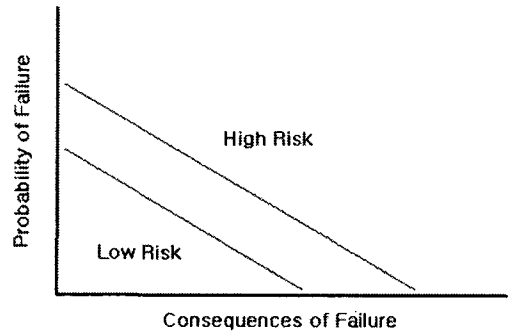


Fig. 6 Estimating Risk

Fig. 6은 위험도를 나타낸다. 낮은 위험도에서 평가되면 검사기간을 연장하는 등의 유지 및 보수 비용을 감소시킬 수 있는 방향을 제시하고 높은 위험도로 평가되는 매설배관은 그 운전수명을 연장할 수 있는 방향이나, 설비의 활용을 증가시킬 수 있는 방법을 제시하는 등의 파손 위험도 최소화 방안을 제시한다.

4. 결과 및 고찰

1) 데이터베이스

외부 부식이 매설배관에 미치는 영향을 유한요소해석 패키지(package)인 ABAQUS v6.1을 사용하여 규명하였고, 내부 압력의 증가에 따른 부식된 파이프라인의 외부표면에서의 von Mises 응력을 산정하여 파손을 예측하였다. 파손데이터는 유한요소해석에서 파손압력의 예측을 von Mises 응력-압력 하중의 관계를 나타내는 그림에서 재료의 von Mises 응력이 진극한강도응력을 초과한 후 불안정하게 증가하는 순간의 내부압력을 파손압력으로 예측하여 데이터를 산출하였다.

Fig. 7에서는 최근 유한요소해석을 통해 데이터베이스에 새로 추가된 파손해석모델을 나타내었다.

그림에서 나타낸 것과 같이 여러 개의 부식피트가 나란히 배열돼 있을 때 그에 대한 FEM 해석과 같은 길이의 그루브 모델을 해석을 비교하여 파이프라인에 대한 파손해석을 진행하였으며 그 결과를

데이터베이스에 추가하였다. 모델링은 HyperMesh version3.1을 이용하여 진행하였으며 약 2000개의 C3D20 요소(element)로 구성되었으며 실제 매설배관의 1/4모델로 형상화 하였다. 피트의 개수는 3개와 5개에 대해 해석을 진행하였으며 모델링한 형상을 부식부위를 확대하여 Fig. 8에 나타내었다.

Figs. 9~11에서는 피트가 세 개일 때 피트사이의 거리와 피트의 반경을 변화시키면서 해석한 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 피트사이의 거리가 가까워질수록 또 피트의 깊이가 깊어질수록 서로 인접한 피트 사이의 영향이 커지는 것을 알

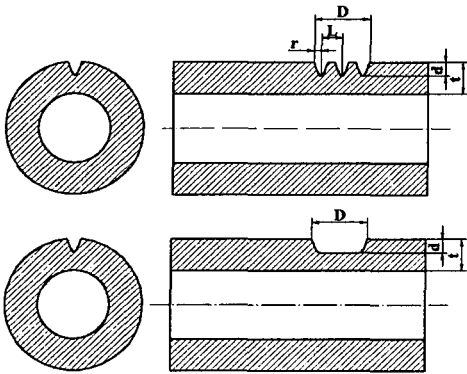


Fig. 7 FEM analysis model of multi-pit corrosion

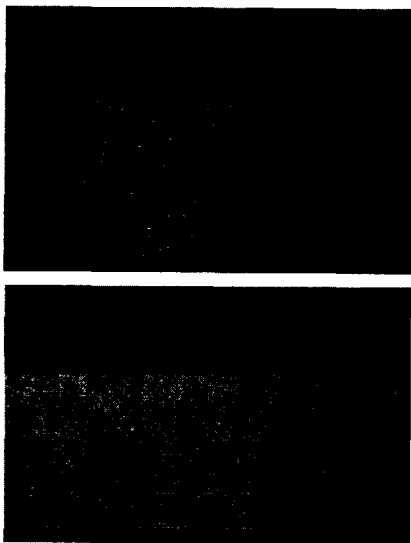


Fig. 8 FEM analysis model of multi-pit corrosion with Hyper Mesh version 3.1

수 있다. 그 영향력에 대한 상세한 평가를 위해 multi-피트 모델과 같은 길이의 그루브 모델의 파손압력을 비교하여 그 차이를 다음 식을 이용하여 백분비를 계산하여 비교하였다. Fig. 12에서는 피트가 3개이고 피트의 반경이 30인 경우에 대해 나타내었으며 Fig. 13에서는 피트가 5개이고 피트의 반경이 30인 경우에 대하여 나타내었다. 두 그래프에서 알 수 있듯이 피트사이의 거리가 가까워질수록 multi-피트 모델의 파손압력은 같은 길이의 그루브 모델의 파손압력에 가까워지며 또 피트의 깊이가 깊어질수록 그루브 모델의 파손압력에 가까워진다.

피트가 3개일 때가 피트가 5개인 경우보다 그루브 모델의 파손압력에 더 근접함을 알 수 있다. 이는 그루브 모델의 경우 그루브의 길이가 배관의 파손압력에 많은 영향을 미치기 때문이다.

이 시스템의 데이터베이스는 윈도우즈에서 기본적으로 제공하는 데이터베이스 엔진을 사용하여 쉽게 접근하도록 개발하였고, 데이터베이스의 테이블(table), 레코드(record), 필드(field)의 관리가 용이하다. 매설배관에서 발생 가능한 파손형태의 조사, 파이프라인의 제조 및 설치에 관련된 정보, 과거 운전기록, 이전 검사기록 등 현장에서 산출되는 데이터의 추가가 용이하고, 본 시스템의 건전성 평가 파트와 관련된 모듈(module)을 개발하여 그 데이터를 평가요소의 한 기준으로 설정할 수 있다.

$$\% = \frac{\text{Groove model} - \text{Mltipit model}}{\text{Groove model}} \times 100\% \quad (5)$$

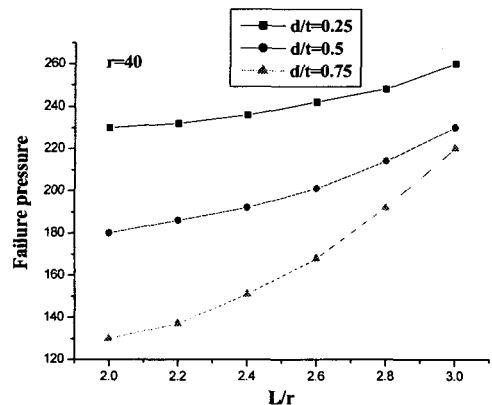


Fig. 9 FEM analysis result of multi-pit corrosion pipeline(r=40, pit number=3)

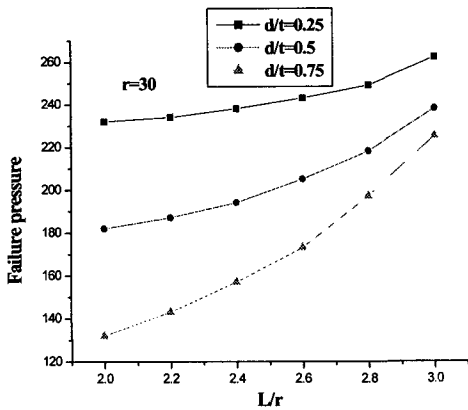


Fig. 10 FEM analysis result of multi-pit corrosion pipeline ($r=30$, pit number=3)

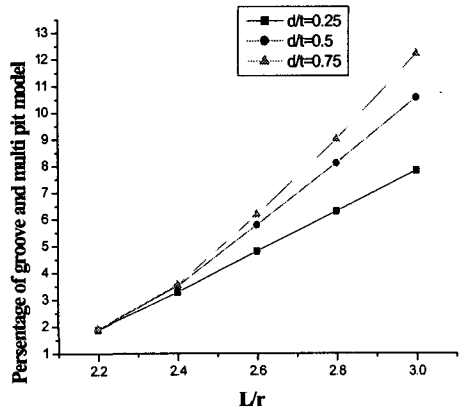


Fig. 12 Failure pressure percentage of groove model vs. multi-pit model (pit number = 3)

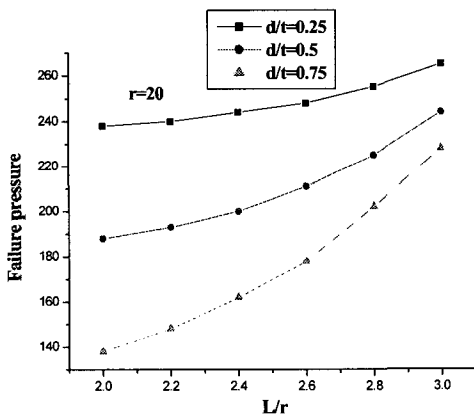


Fig. 11 FEM analysis result of multi-pit corrosion pipeline ($r=20$, pit number=3)

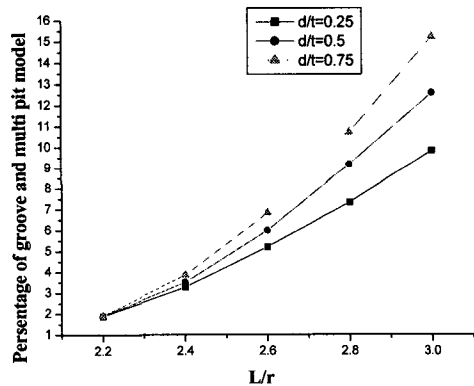


Fig. 13 Failure pressure percentage of groove model vs. multi-pit model (pit number = 5)

2) 건전성 평가 시스템

이 시스템 설계에 있어서 사용자 편의 개념은 산업설비현장에서 관리자들이 직접적으로 사용할 수 있도록 한 것이다. 입력된 데이터는 평가부에서 데이터베이스와 연동하여 파이프라인의 건전성 평가가 이뤄지며, 위험도를 예측하여 대처방안을 제시한다.

Figs. 14~15에서는 이 평가시스템의 사용자 입력부에 대해 나타낸 것이다. 현재 시스템은 corrosion, cavity, fatigue 등에 대해 서로 독립적인 모듈로 해석을 진행하고 있으나 앞으로 계속 발전시켜 여러 가지 모듈을 종합한 하나의 통합적인 모듈로 해석을 하는 것이 목적이다.

외부 부식이 매설배관에 미치는 영향을 FEM 상용패키지인 ABAQUS v6.1을 사용하여 규명하였고 그 파손데이터를 산출하였다. 또한 B31G와 MB31G 코드로 외부부식에 따른 매설배관의 파손데이터를 계산하여 FEM 데이터와 비교하였다. 수행평가에서는 API Grade X60($\sigma_y = 400\text{MPa}$, $E = 193.2\text{GPa}$)의 파이프채료를 선택했으며, 기타 입력값은 Table 1의 값을 사용하였다.

Table 1 Used input data for failure pressure evaluation

corrosion type	pit number	pit radius(r)	corrosion depth(d/t)	distance (L/r)
multi-pit	3	30	0.25	2.6

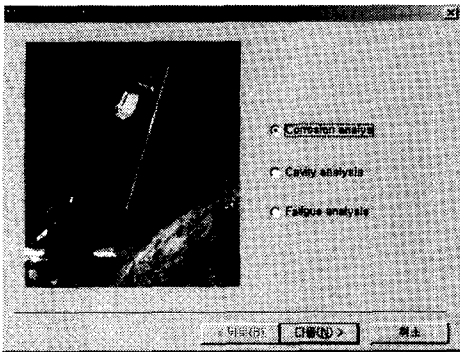


Fig. 14 Input display(1)

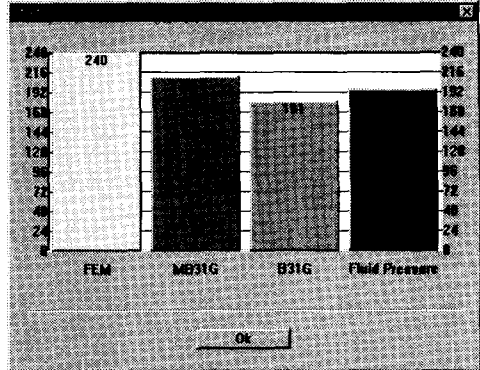


Fig. 17 predicted failure pressure

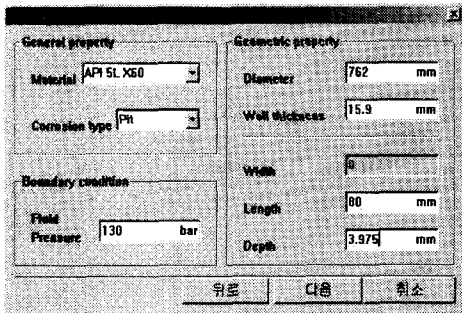


Fig. 15 Input display(2)

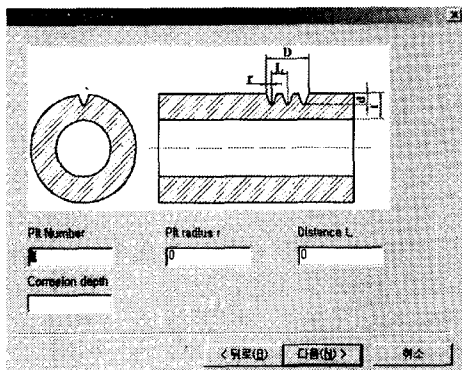


Fig. 16 Input display(3)

수행 평가 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 이 결과에서 알 수 있듯이 FEM 해석을 통한 파손압력이 MB31G 코드를 이용하여 계산한 값보다 좀 크게 나왔는데 이는 MB31G 코드가 부식의 폭을 고려하지 않은 코드이므로 부식의 폭을 고려한 새로운 건전성 평가가 이루어져야 함을 알 수 있다.

5. 결론

매설배관의 건전성 평가에 있어서 이 시스템은 데이터베이스의 구축과 건전성 평가개념 및 파이프라인의 유지, 보수에 관한 판단을 결정짓는 소프트웨어로서 개발되었다. 산업설비현장에서 검사를 통해 입력되는 데이터는 다양하므로 현장의 매설배관의 건전성 평가는 확률통계적으로 이뤄져야 한다. 현재 시스템은 각각의 모듈에 대해 독립적으로 해석을 진행하고 있으나 앞으로는 모두 통합하여 하나의 시스템으로 개발 예정이다. 실제 매설배관의 경계조건에 대해 많은 FEM 해석과 연구가 필요하다. 따라서 FEM 해석을 통한 많은 데이터가 구축되고 여러 경계조건에 따른 평가 모듈이 개발되면 산업현장의 파이프라인에 대한 건전성 평가 및 관리가 체계적으로 수행될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

이 연구는 한국과학재단(KOSEF) 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 연구 센터(SAFE)의 연구 지원으로 수행되었으며, 이에 동센터 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee Ouk Sub, Kim Ho Jung, "Effect of Shape of External Corrosion in Pipeline on Failure Prediction," Transactions of the KSME A, Vol. 23 No. 11, pp. 2096-2101, 1999.

2. Kiefner, J. F., "Corroded Pipe Strength and Repair Methods," Symposium on Line Pipe Research, Houston, Texas, 1974.
3. Kiefner, J. F. and Vieth, P. H., "New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe," Oil and Gas Journal, pp. 56-59, 1990.
4. ANSI/ASME B31-1985, "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipeline," A Supplement to ANSI/ASME B31G Code for Pressure Piping, The American Society of Mechanical Engineers, 1985.
5. Kiefner, J. F. and Hisey, D. T and O'Grady, T. J., "Pressure Calculation for Corroded Pipe Developed," Oil and Gas Journal, pp. 84-89, 1992.
6. Manfredi, C. and Otegui, J. L., "Failures by SCC in Buried Pipelines," Engineering Failure Analysis, Vol. 9, pp. 495-509, 2002.
7. Chouchaoui, B. A. and Pick, R. J., "Behavior of Longitudinally Aligned Corrosion Pits," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 67, No. 1, pp. 17-35, 1996.
8. Xie, Y. J., "A Theory on Cracked Pipe," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 865-869, 1998.
9. Zhang Ruoxue, Snakaran Mahadevan, "Reliability-based Reassessment of Corrosion Fatigue Life," Structural Safety, Vol. 23, pp. 77-91, 2001.
10. Lee Ouk Sub, Hwang In Hyun, "Development of Assessment System for Pipeline Integrity," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 17, No. 12, pp. 157-162, 2000.