

파이프라인의 건전성 평가 시스템 개발

이억섭*, 황인현**

Development of Integrity Assessment System for the Pipeline

Ouk Sub Lee*, In Hyun Hwang**

ABSTRACT

The object of this work is to develop an assessment system for pipeline integrity. The system consists of four module applications for internal algorithm; the effect of corrosion in pipeline, crack, stress corrosion crack (SCC) and fatigue modules. Presently, the module of the external corrosion has been developed and the internal algorithm for the effect of corrosion in pipeline and the database of the system are described in this paper. The database of the system is separated to mainly four parts; geometry of pipeline, material properties, boundary conditions and general properties. Each components of the system are designed by user-friendly concept. This system may give a guideline for maintenance and modifications for the pipeline at the industrial sight. Furthermore, a procedure to evaluate an inspection interval is also provided.

Key Words : Assessment system for pipeline integrity(파이프라인 건전성평가 시스템), External corrosion(외부 부식), Stress corrosion crack(응력 부식 균열)

1. 서론

부식에 의해 손상된 파이프라인의 파손을 예측하는 기술은 설계시 부식여유를 결정할 때 필요하며 특히, 노후된 파이프라인의 안전수명 점검 시에 응용될 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 대한 위험도가 증가된다. 따라서 파이프라인의 외부 표면에 부식이 발생했을 때, 그 곳에서의 응력상태나 파손수명 등을 예측하여 위험한 파손사고들을 예방할 수 있는 기준이 연구되고 있다.

산업설비 현장에서는 그러한 부식상태나 균열이 발견되었을 시에는 이론적 해석과 더불어 유한요소해석을 통한 건전성 평가가 이뤄져야 한다. 이런 평가절차는 많은 시간과 노력이 필요하게 된다.

또한 국내·외적으로 이론적인 해석 및 유한요소해석 그리고 실제 모델을 사용한 실험을 수행하여 파이프라인의 건전성 평가가 여러 연구실에서 수행중이며 평가기준이 정립되고, 많은 데이터가 산출되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 아직 산발적으로 연구되고 있는 결과들이 체계적으로 사용되는 건전성 평가시스템의 개발로 이어지지 못하고 있는 실정이다. 건전성 평가시스템을 데이터베이스의 체계적인 구축 시스템과 효율적으로 연계시키면 산업현장에서의

* 인하대학교 기계·항공·자동차공학부

** 인하대학교 기계공학과 대학원

파이프라인 관리를 용이하게 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 외부부식에 따른 파이프라인의 파손 데이터베이스를 구축하였으며, 그에 따른 건전성 평가모듈을 개발하였다.

2. 이론

부식된 파이프라인에 대한 파손식은 가압과 열실험의 데이터에 기준을 두고 작성되었으며, 다음과 같이 제안되고 있다.⁽²⁾

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

여기서 σ_f 는 파손응력(MPa), $\bar{\sigma}$ 는 재료의 유동응력(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. 식(1)을 수정하여 개발된 코드로서 실용적으로 많이 사용되는 것에는 다음과 같은 것이 있다.

2.1 ANSI/ASME B31G code

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

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

$$\sigma_f = 1.1 \sigma_{\min} [1 - (d/t)] \dots \dots \dots (2b)$$

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

여기서, D 는 파이프의 외경(mm), σ_{\min} 는 하부항복강도(MPa)이며, 벌징계수(M)는 다음과 같이 정의된다.⁽³⁾

$$M = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} \dots \dots \dots (3a)$$

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

$$M = \infty \dots \dots \dots (3b)$$

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

2.2 MB31G(Modified B31G) code

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

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

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

$$M = 3.3 + 0.032 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right) \dots \dots \dots (4b)$$

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

3. 시스템 개발

본 연구에서는 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. 개발된 소프트웨어는 현장에서 신속하고 용이한 건전성 평가를 하는데 유용하게 쓰일 수 있으며 많은 설비 투자 및 평가시간 절약의 효과를 가진다. 본 연구에서는 이 시스템을 GUI(Graphic User Interface)의 윈도우즈 환경에서 사용할 수 있도록 C언어와 MS Visual Studio를 사용하여 프로그래밍 하였다. 사용자 편의 개념으로 설계하여 산업현장에서 쉽고 용이하게 활용될 수 있도록 하였다.

3.1 건전성평가 시스템의 구성

이 시스템의 모듈은 Fig. 1과 같은 구성요소에 대해서 파이프라인의 건전성 평가 기준을 정하고 그에 해당하는 모듈을 개발하였다. 각각의 모듈은 파이프라인의 내·외부 부식, 균열, 응력부식균열(SCC), 피로 파손 등 파이프라인의 건전성에 영향

을 미치는 요소로 구분하여 구성되어 있다. 본 연구에서는 균열 및 내·외부 부식이 파이프라인의 파손에 미치는 영향에 관한 데이터베이스를 유한요소해석 상용 패키지를 통한 해석 결과로 구축하여 건전성 평가부와 연계하여 사용하도록 하였다.

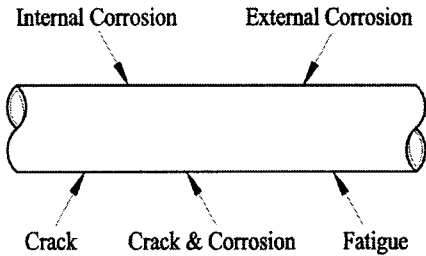


Fig. 1 System module

확률통계적 접근방법을 사용하여 부식 손상의 거동에 대한 보다 정확하고 해석적인 이해를 하기 위해서는 많은 관련 데이터가 필요하며⁽¹⁾, 그에 대한 평가기준은 ANSI/ASME B31G⁽³⁾ 와 MB31G⁽⁴⁾ 에 의한 해석과 유한요소해석을 통하여 얻어지는 파이프라인의 파손압력으로 고려한다.

이 시스템은 크게 파이프라인의 건전성 평가부분과 데이터베이스의 관리부분으로 구분된다. 평가부는 사용자 입력부를 통하여 입력된 데이터로부터 이론적해석 및 데이터 베이스와 비교 및 평가하는 응용프로그램으로 개발하였으며, 데이터베이스의 관리는 윈도우즈 시스템에서 제공하는 PC용 데이터베이스 엔진인 DAO(Data Access Object)을 사용하였다. 평가부에서 데이터베이스와 연동하여 전체 시스템이 구동된다.

Fig. 2는 파이프라인 데이터베이스 구축, 사용자 입력, 건전성 평가, 유지·보수의 결정을 위한 모듈의 구성을 나타내며 데이터베이스는 파이프라인의 기하학적 형상, 재료의 기계적 특성, 부식 및 균열 상태 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 파이프라인의 건전성을 평가한 후 현재 파이프라인의 유지·보수의 결정을 할 수 있도록 지침을 제공한다.

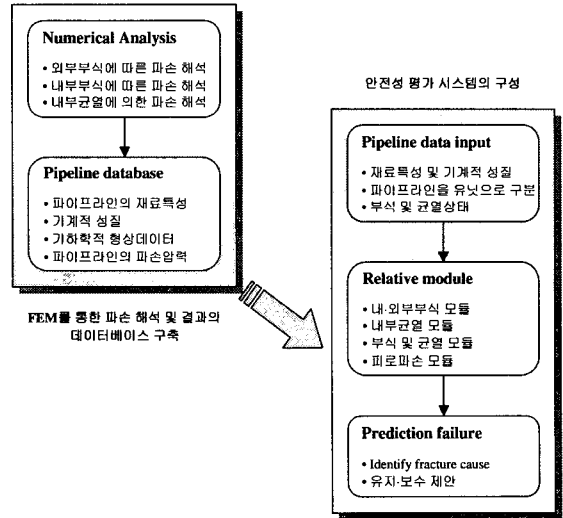


Fig. 2 System structure

3.2 파이프라인의 건전성평가

이 시스템의 파이프라인 건전성 평가를 위한 내부 구성은 대략적으로 다음과 같다. 첫째, 파이프라인 시스템의 데이터 입력부를 통하여 데이터를 수집한다. 둘째, 데이터베이스에 접속하여 기존 데이터에 상응하는지 확인한다. 셋째, 사용자 입력을 통한 데이터와 데이터베이스와의 비교를 한다. 넷째, 데이터 베이스의 레코드 검색, 필드 검색 등을 통한 다각적인 접근을 한다. 이러한 방법은 DAO에서 제공하는 내부 데이터베이스 접근법을 사용하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 평가시스템의 사용자 입력을 받아 데이터베이스와 연동하여 기존 데이터에서 검색, 비교하여 입력된 파이프라인의 파손예측을 하는 모듈을 나타낸 것이다.

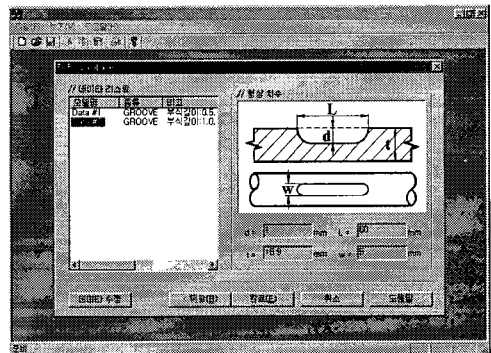


Fig. 3 External corrosion type module

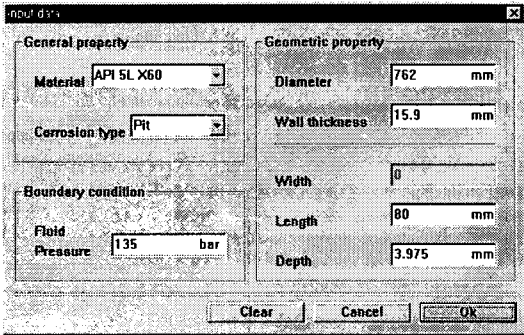


Fig. 4 Input display

파손해석은 두께에 대한 깊이비가 0.25, 0.5, 0.7 일 때의 결과를 기준으로 하였고, 본 시스템의 데이터베이스는 그 해석결과로 구축되어져 있다. Fig. 5는 그 파손해석 데이터를 리스트로 나열한 것이다. Fig. 6에는 해석 결과 데이터를 식(5)와 같은 다항식 곡선 근사법(polynomial curve fitting)을 사용하여 나타낸 것이다.⁽⁵⁾ 데이터수가 많지 않아서 다소의 오차를 보이고, 적은 수의 데이터로 곡선 근사법을 사용하는 것이 데이터 신뢰성에는 문제가 있다고 생각되지만 파이프라인의 두께에 따른 부식깊이와 파손압력과와의 일반적인 관계가 2차 곡선의 경향을 나타낸다고 알려져 있으므로 2차 다항식 근사법으로 파손압력의 근사값을 결정할 수 있도록 하였다.

$$P_{failure} = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \cdot \dots \cdot \dots \quad (5)$$

$$a_0 = 308, \quad a_1 = -228, \quad a_2 = 144$$

Material	Dia.	Type	Width	Length	Depth/Thickness	Maximum Internal Pressure
API 5L X60	762.00	Groov	60.00	250.50	0.25	243.00
API 5L X60	762.00	Groov	60.00	250.50	0.50	182.00
API 5L X60	762.00	Groov	60.00	250.50	0.75	132.00
API 5L X60	762.00	Groov	80.00	250.50	0.25	235.00
API 5L X60	762.00	Groov	80.00	250.50	0.50	185.00
API 5L X60	762.00	Groov	80.00	250.50	0.75	135.00
API 5L X60	762.00	Pit	60.00	60.00	0.25	262.00
API 5L X60	762.00	Pit	60.00	60.00	0.50	238.00
API 5L X60	762.00	Pit	60.00	60.00	0.75	225.00
API 5L X60	762.00	Pit	80.00	80.00	0.25	260.00
API 5L X60	762.00	Pit	80.00	80.00	0.50	230.00
API 5L X60	762.00	Pit	80.00	80.00	0.75	220.00

Fig. 5 List of the predicted failure data in the database

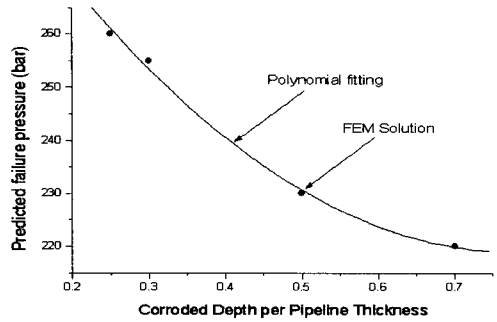


Fig. 6 Polynomial approximation fit

이 시스템은 건전성 평가 후 파이프라인의 관리를 위한 척도를 제시하는 기능도 가지고 있으며 위험도를 나타내는 다음과 같은 관계에 기본적인 개념을 두고있다.

$$\text{위험도} = \text{파손가능성} \times \text{파손영향} \cdot \dots \cdot \dots \quad (6)$$

여기서, 파손가능성은 파이프라인의 검사를 통한 파손상태를 나타내고, 파손영향은 파손발생시 보수 및 교체에 따른 비용, 안전도, 생산성등에 해당하는 변수로 나타낸다.

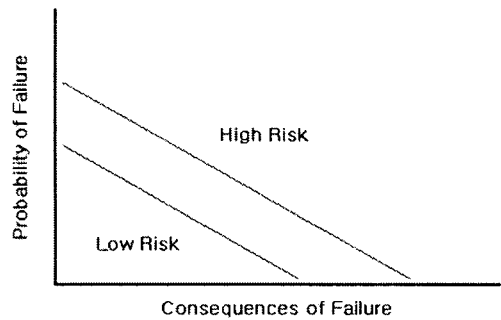


Fig. 7 Estimating Risk

Fig. 7은 위험도를 나타낸다. 낮은 위험도로 평가되면 검사기간을 연장하는 등의 유지 및 보수비용을 감소시킬 수 있는 방향을 제시해야 한다. 높은 위험도로 평가되는 파이프라인은 그 운전수명을 연장할 수 있는 방향이나, 설비의 활용을 증가시킬 수 있는 방법을 제시하는 등, 파손 위험을 최소화

하는 방안을 제시한다. 이 부분에 대한 상세한 연구가 계속 되고 있으며, 곧 문헌을 통해 발표할 예정이다.

4. 사례해석

외부 부식이 파이프라인에 미치는 영향을 유한 요소해석 패키지인 ABAQUS v5.7을 사용하여 규명하였고, 그 파손데이터를 산출하였다. 또한 B31G와 MB31G 코드로 외부부식에 따른 파이프라인의 파손데이터를 계산하여 유한요소해석 데이터와 비교하였다. 수행평가에서는 API Grade X60 ($\sigma_y = 400$ MPa, $E = 193.2$ GPa)의 파이프재료를 선택했으며, 기타 입력값은 Table 1의 값을 사용하였다.

Table 1 Used input data for failure pressure evaluation

used pressure	pipeline		corrosion		
	thickness	diameter	type	length	depth
13.5MPa	15.9mm	762mm	Pit	80mm	3.975mm
20MPa	15.9mm	762mm	Pit	80mm	6.39mm

첫 번째 평가에서는 사용압력을 13.5MPa로 했으며, 두께에 대한 깊이비가 0.25가 되도록 부식깊이를 3.975mm로 가정하였다. 이것은 구축된 데이터베이스중의 한 파손데이터와 정확히 일치하며, 이때의 파손 데이터는 곡선 근사법을 통한 근사값이 아닌 해석결과와 정확히 일치하는 값으로 곡선 근사법에 따른 오차를 무시할 수 있도록 하였다.

두 번째 평가에서는 사용압력을 20MPa로 가정하였고, 임의의 가정된 부식깊이에 대해서 식(5) 및 건전성 평가 시스템을 이용하여 근사파손압력값을 결정하였다. 그후 이론식(B31G, MB31G)에 의해 계산된 파손압력값과 서로 비교하여 파이프라인의 건전성을 평가하도록 하였다.

수행평가 결과를 Table 2와 Fig. 8의 (a), (b)에 나타냈다. 첫 번째 평가에서는 부식 폭이 고려되지 않은 B31G 나 MB31G 코드를 사용하여 산정된 파손압력보다도 사용압력이 낮으므로 이 평가대상 파이프라인은 건전함을 알 수 있다. 두 번째 평가에서는 사용압력이 식(5) 및 건전성평가 시스템에 의해 산정된 파손압력보다는 다소 낮은 압력 값을 보

이지만 MB31G 코드값 보다 높게 나타났다. MB31G는 부식 폭이 고려되지 않은 코드임으로 부식 폭을 고려한 건전성 평가가 다시 이뤄져야함을 예측할 수 있다.

Table 2 Comparison of predicted failure pressures by using the proposed assessment system

	Numerical analysis	B31G	MB31G	Fluid Pressure
1st try	26MPa	22MPa	18.5MPa	13.5MPa
2nd try	24MPa	21.1MPa	18MPa	20MPa

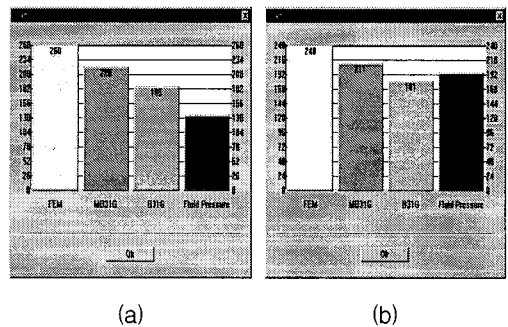


Fig. 8 Predicted failure pressure

5. 결론

5.1 데이터베이스

이 시스템의 데이터베이스는 윈도우즈에서 기본으로 제공하는 데이터베이스 엔진을 사용하여 쉽게 접근하도록 개발하였고, 데이터베이스의 테이블, 레코드, 필드의 관리가 용이하다. 파이프라인에서 발생 가능한 파손형태의 조사, 파이프라인의 제조 및 설치에 관련된 정보, 과거 운전기록, 이전 검사기록 등 현장에서 산출되는 데이터의 추가가 용이하다.

5.2 건전성평가 시스템

파이프라인의 건전성 평가에 있어서 이 시스템은 데이터베이스의 구축과 건전성 평가개념 및 파이프라인의 유지, 보수에 판단을 결정짓는 소프트웨어로서 개발되었다. 산업설비현장에서 검사를 통해 입력되는 데이터는 다양하므로 현장의 파이프라인 건전성 평가는 확률통계적으로 이뤄져야 한다.

따라서 많은 데이터가 구축되고 여러 경계조건에 따른 평가 모듈이 개발되면 산업현장의 파이프라인에 대한 건전성 평가 및 관리가 체계적으로 수행될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 연구 센터(SAFE)의 연구 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 진심으로 감사 드립니다.

참고문헌

1. 이억섭, 김호중, "외부부식의 형상이 파이프라인의 파손예측에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 A권, 제23권 제11호, pp. 2096~2101, 1999.
2. Kiefner, J. F., "Corroded Pipe Strength and Repair Methods," Symposium on Line Pipe Research, Houston, Texas., 1974.
3. 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.
4. Kiefner, J. F. and Vieth, P. H., "New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe," Oil and Gas Journal, pp. 56~59, 1990.
5. Joe D. Hoffman, Numerical Methods for Engineers and Scientists, McGraw-Hill, Inc., 1993.