

매설배관의 건전성 평가

이억섭*·윤해룡**

The intergrity assessment of buried pipeline

Ouk Sub Lee and Hai Long Yin

Key Words: Buried Pipeline(매설배관), Corrosion(부식), Corrosion Crack(부식균열), Cavity(캐비티),

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 and the effect of cavity. 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.

1. 서 론

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 기준

이 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 건전성평가가 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 평가 시스템을 데이터베이스의 체계적인 구축시스템과 효율적으로 연계시키면 산업현장에서의 파이프라인 관리를 용이하게 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 외부부식에 따른 파이프라인의 파손 데이터베이스와 캐비티의 영향에 대한 데이터베이스를 구축하였으며, 그에 따른 건전성 평가모듈을 개발하였다.

* 인하대학교 기계공학부

** 인하대원

2. 이 론

2.1 사각캐비티가 매설배관에 미치는 영향

매설배관의 유한요소해석에서 주응력($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)은 식(1)에 의해서 구할 수 있다.

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{vmatrix} = 0 \quad \dots \dots (1)$$

여기서, σ_0 는 3개의 주응력이다.

Equivalent stress(σ_{eqv})는 유한요소해석에서 매설배관의 파손 안전성을 고려한 설계변수로서 사용하였다.

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}} \quad \dots \dots (2)$$

2.2 부식이 매설배관에 미치는 영향

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

$$\sigma_f = \bar{\sigma} \left[\frac{1 - (A/A_0)}{1 - (A/A_0)/M} \right] \quad \dots \dots (3)$$

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 벌정계수(bulging factor)이다. 식(3)을 수정하여 개발된 코드로서 실용적으로 많이 사용되는 것에는 다음과 같은 것이 있다.^(3,4,5)

2.2.1 ANSI/ASME B31G code

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

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

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

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

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

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

$$\left(\sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} \leq 4 \text{인 경우} \right) \dots \dots (5a)$$

$$M = \infty$$

$$\left(\sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} > 4 \text{인 경우} \right) \dots \dots (5b)$$

2.2.2 MB31G(Modified B31G) code

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

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

$$\left(\left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right) \leq 50 \text{인 경우} \right) \dots \dots (6a)$$

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

$$\left(\left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right) > 50 \text{인 경우} \right) \dots \dots (6b)$$

2.3 FEM에 의한 응력해석

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 부식부분을 피트(pit) 모델과 그루브(groove) 모델로 구분하여 모델링 하였으며, 모델의 폭과 두께를 변화시킴으로써 다양한 부식형상에 대한 파손압력을 예측할 수 있도록 하였다.^(1,6)

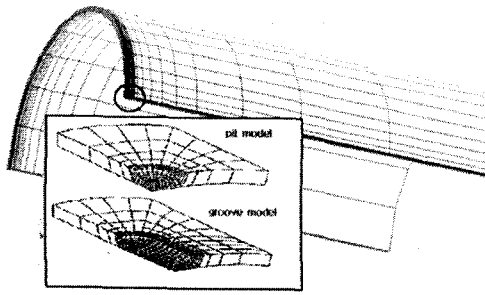


Fig. 1 Finite-element model on a semi-elliptical external corroded pipeline

사각캐비티가 매설배관에 미치는 영향을 규명하기 위하여 Fig. 2와 같이 모델링하여 캐비티의 위치와 크기를 변화시키며 매설배관에 발생하는 최대유효응력값을 계산하였다.

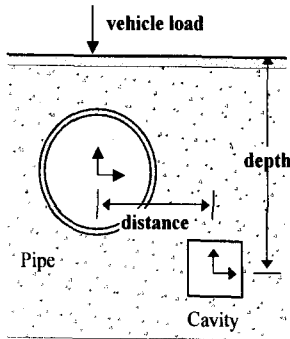


Fig. 2 Finite-element model on an analysis of the square cavity's effects

3. 건전성 평가 시스템

이 시스템은 여러 연구실 및 현장에서 얻어지는 수치해석 데이터와 파손사례 등을 데이터베이스로 구축하고, 현장에서의 기계적 결합이나 파손 가능 요인 발견 시에 그에 따른 평가절차를 대신 수행할 수 있는 소프트웨어의 개발이 목적이다. 개발된 소프트웨어(software)는 현장에서 신속하고 용이한 건전성 평가를 하는데 유용하게 쓰일 수 있으며 많은 설비 투자 및 평가시간 절약의 효과를 가진다. 이 시스템은 GNU(Graphic User Interface)의 윈도우 환경을 지원받는 알고

리즘을 포함하고 있으며, C언어와 MS Visual Studio를 사용하여 프로그래밍한다. User friendly 개념으로 설계하여 산업현장에서 쉽고 용이하게 활용될 수 있도록 하였다.

3.1 시스템의 구성

이 시스템의 모듈은 파이프라인의 내·외부 부식, 균열, 응력부식균열(SCC), 피로 파손, 캐비티의 위치와 크기 등 파이프라인의 건전성에 영향을 미치는 요소로 구분하여 구성되어 있다. 균열 및 내·외부 부식이 파이프라인의 파손에 미치는 영향에 관한 데이터베이스를 유한요소해석 상용 패키지를 통해 얻은 결과를 사용하여 계속적으로 업데이트되고 있다.

확률통계적 접근방법을 사용하여 부식 손상의 거동에 대한 보다 정확하고 해석적인 이해를 하기 위해서는 많은 관련 데이터가 필요하며⁽¹⁾, 그에 대한 평가기준은 ANSI/ASME B31G⁽⁴⁾ 와 MB31G⁽⁵⁾ 에 의한 해석과 유한요소해석을 통하여 얻어지는 파이프라인의 파손압력으로 고려한다.

이 시스템은 크게 파이프라인의 건전성 평가부와 데이터베이스의 관리부분으로 구분된다. 평가부는 하나의 어플리케이션이고 데이터베이스의 관리는 윈도우즈 시스템에서 제공하는 PC용 데이터베이스 엔진인 DAO(Data Access Object)를 사용하였다. 평가부에서 데이터베이스와 연동하여 전체 시스템이 구동된다.

Fig. 3은 파이프라인 데이터베이스의 구성을 나타내며 데이터베이스는 파이프라인의 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 파이프라인의 건전성을 평가한 후 현재 파이프라인의 유지·보수의 결정을 할 수 있도록 지침을 제공한다.

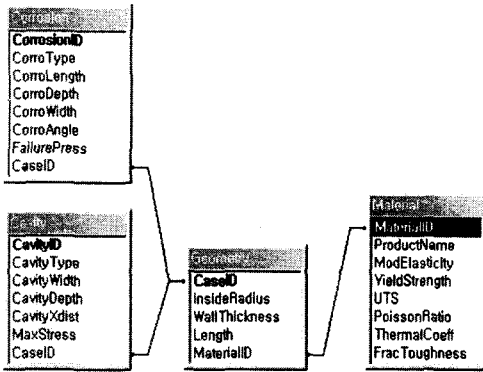


Fig. 3 Construction of database

3.2 파이프라인의 건전성 평가

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

Fig. 4와 Fig. 5은 외부 부식이 매설배관의 건전성에 미치는 영향을 규명하기 위해 평가시스템의 사용자 입력을 받아 데이터베이스와 연동하여 기존 데이터에서 검색, 비교하여 입력된 파이프라인의 파손예측을 하는 모듈을 나타낸 것이다.

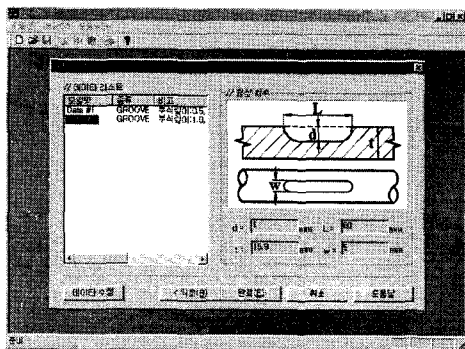


Fig. 4 External corrosion type module

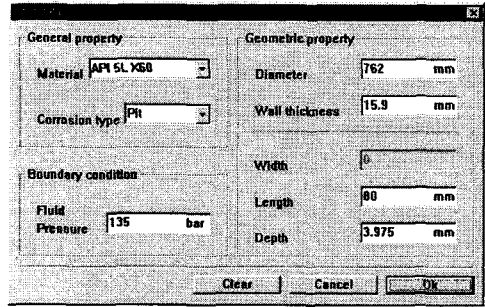


Fig. 5 Input display

파손해석은 depth/thickness가 0.25, 0.5, 0.7일 때의 결과를 기준으로 하였고, 본 시스템의 데이터베이스는 그 해석 결과로 구축되어져 있다.

Fig. 6은 외부 부식에 대한 파손해석 데이터를 리스트로 나열한 것이다. Fig. 7에는 해석 결과 데이터를 식(7)의 함수로 Polynomial approximation curve fitting하여 나타낸 것이다.⁽⁹⁾ 데이터수가 많지 않아서 다소의 오차를 보이고, 적은 수의 데이터로 curve fitting을 하는 것은 데이터 신뢰성에는 문제가 있다고 생각되지만 파이프라인의 두께에 따른 부식깊이와 파손압력과 관계가 2차 곡선의 경향을 나타낸다고 알려져 있으므로 second-degree polynomial로 fitting 하여 파손압력의 근사값을 결정할 수 있도록 하였다.

$$P_{failure} = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \quad \dots \dots (7)$$

여기서,

$$a_0 : 308, a_1 : -228, a_2 : 144$$

Material	Dia.	Type	Width	Length	Depth/Thickness	Maximum Internal Pressure
API 5L X50	762.00	Groove	80.00	250.50	0.25	230.00
API 5L X50	762.00	Groove	80.00	250.50	0.50	182.00
API 5L X50	762.00	Groove	80.00	250.50	0.75	132.00
API 5L X50	762.00	Groove	80.00	250.50	0.25	235.00
API 5L X50	762.00	Groove	80.00	250.50	0.50	185.00
API 5L X50	762.00	Groove	80.00	250.50	0.75	135.00
API 5L X50	762.00	Pit	80.00	80.00	0.25	262.00
API 5L X50	762.00	Pit	80.00	80.00	0.50	238.00
API 5L X50	762.00	Pit	80.00	80.00	0.75	225.00
API 5L X50	762.00	Pit	80.00	80.00	0.25	260.00
API 5L X50	762.00	Pit	80.00	80.00	0.50	230.00
API 5L X50	762.00	Pit	80.00	80.00	0.75	220.00

Fig. 6 List of the predicted failure data in the database

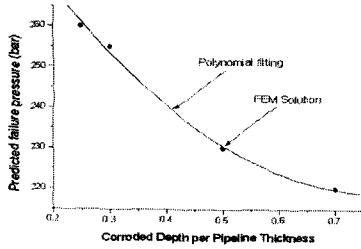


Fig. 7 Polynomial approximation fit

Fig. 8에서는 사각캐비티의 영향에 대한 파손해석데이터를 리스트로 나열한 것이다.

CavityID	Cavity Type	CavityWidth	CavityDepth	CavityXzList	MaxStress	CaseID
38	rect	203.2	1100.1248	1500.0224	2.73E+01	5
39	rect	203.2	1300.0736	1500.0224	2.73E+01	5
40	rect	203.2	1500.0224	1500.0224	2.73E+01	5
41	rect	203.2	499.872	1699.9712	2.74E+01	5
42	rect	203.2	699.8208	1699.9712	2.73E+01	5
43	rect	203.2	900.176	1699.9712	2.73E+01	5
44	rect	203.2	1100.1248	1699.9712	2.73E+01	5
45	rect	203.2	1300.0736	1699.9712	2.73E+01	5
46	rect	203.2	1500.0224	1699.9712	2.73E+01	5
47	rect	203.2	499.872	1899.92	2.73E+01	5
48	rect	203.2	699.8208	1899.92	2.73E+01	5
49	rect	203.2	900.176	1899.92	2.73E+01	5
50	rect	203.2	1100.1248	1899.92	2.73E+01	5
51	rect	203.2	1300.0736	1899.92	2.73E+01	5
52	rect	203.2	1500.0224	1899.92	2.73E+01	5
53	rect	406.4	499.872	499.872	2.86E+01	5
54	rect	406.4	699.8208	499.872	2.73E+01	5
55	rect	406.4	900.176	499.872	2.73E+01	5
56	rect	406.4	1100.1248	499.872	2.73E+01	5
57	rect	406.4	1300.0736	499.872	2.73E+01	5
58	rect	406.4	1500.0224	499.872	2.73E+01	5
59	rect	406.4	499.872	699.8208	2.87E+01	5
60	rect	406.4	699.8208	699.8208	2.73E+01	5
61	rect	406.4	900.176	699.8208	2.74E+01	5
62	rect	406.4	1100.1248	699.8208	2.73E+01	5
63	rect	406.4	1300.0736	699.8208	2.72E+01	5
64	rect	406.4	1500.0224	699.8208	2.72E+01	5

Fig. 8 List of the predicted failure data in the database

4. 결론

4.1 건전성 평가 시스템

파이프라인의 건전성 평가에 있어서 이 시스템은 데이터베이스의 구축과 건전성 평가개념 및 파이프라인의 유지, 보수에 대한 판단을 결정짓는 소프트웨어로서 개발되었다. 산업설비현장에서 검사를 통해 입력되는 데이터는 다양하므로 현장의 파이프라인 건전성 평가는 확률통계적으로 이뤄져야 한다. 따라서 많은 데이터가 구축되고 여러 경제조건에 따른 평가 모듈이 개발되면 산업현장의 파이프라인에 대한 건전성 평가 및 관리가 체계적으로 수행될 수 있을 것으로 기대된다.

4.2 수행 평가

외부 부식이 파이프라인에 미치는 영향을 FEM 해석 패키지인 ABAQUS v5.7을 사용하여 규명하였고, 그 파손데이터를 산출하였다. 또한 B31G와 MB31G 코드로 외부부식에 따른 파이프라인의 파손데이터를 계산하여 FEM 데이터와 비교하였다. 수행평가에서는 API Grade X60 ($\sigma_y = 400\text{MPa}$, $E = 193.2\text{GPa}$)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
135bar	15.9mm	762mm	Pit	80mm	3.975mm
200bar	15.9mm	762mm	Pit	80mm	6.39mm

첫 번째 평가에서는 사용압력을 135bar로 했으며, depth/thickness값이 0.25가 되도록 부식깊이를 3.975mm로 가정하였다. 이것은 구축된 데이터베이스의 한 파손데이터와 정확히 일치하며, 이때의 파손 데이터는 curve fitting을 통한 근사값이 아닌 해석 결과와 정확히 일치하는 값으로 curve fitting에 따른 오차를 무시할 수 있도록 하였다.

두 번째 평가에서는 사용압력을 200 bar로 가정하였고, 임의의 가정된 부식깊이에 대해서 식 (7) 건전성 평가 시스템을 이용하여 근사파손압력값을 결정하였다. 그 후 이론식(B31G, MB31G)에 의해 계산된 파손압력값과 서로 비교하여 파이프라인의 건전성을 평가하도록 하였다.

수행평가 결과를 Table 2와 Fig. 9의 (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(7) 및 건전성평가 시스템에 의해 산정된 파손압력보다는 다소 낮은 압력 값을 보이지만 MB31G 코드에 의해 산정된 값 보다 높게 나타났다. MB31G는 부식

폭이 고려되지 않은 코드이므로 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	260bar	220bar	185bar	135bar
2nd try	240bar	211bar	180bar	200bar

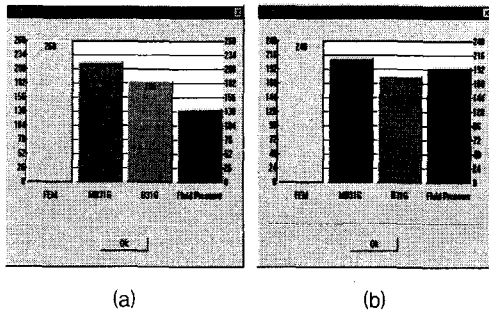


Fig. 9 Predicted failure pressure

사각캐비티가 매설배관에 미치는 영향을 FEM 패키지인 Ansys5.1를 사용하여 규명하였으며 그 최대 유효응력을 산출하였다. 수행평가에서는 API Grade X60 ($\sigma_y = 400\text{MPa}$, $E = 193.2\text{GPa}$)의 파이프재료를 선택했으며, 기타 입력값은 Table 3의 값을 사용하였다.

Table 3 Used input data with cavity's effect

cavity type	vehicle load	width	depth	distance
rectangle	30000 kgf	350 mm	500 mm	750 mm

Table 4에서는 건전성 평가 시스템이 구축된 데이터베이스에서 입력값과 근접한 데이터를 검색한 것을 나타내었다. Polynomial fitting을 통하여 이경우의 최대 유효응력값이 28.174 kgf/m^2 임을 알 수 있으며 매설배관이 안전함을 알 수 있다. 지금까지의 건전성 평가 시스템은 각각의 경우에 한해서만 개발되어 있는데 앞으로 여러 가지 경우를 종합한 해석프로그램으로 개발하여 현장에서의 매설배관의 건전성 평가에 큰 기여를 하리라고 기대한다.

Table 4 Searched material property, geometry in the database

width	depth	distance	Max. stress
203.2	499.9	699.8	27.634 kgf/m^2
203.2	699.8	699.8	27.414
203.2	499.9	900.2	27.493
203.2	699.8	900.2	27.270
406.4	499.9	699.8	28.719
406.4	699.8	699.8	27.850

후 기

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

참고문헌

- (1) 이억섭, 김호중, 1999, "외부부식의 형상이 파이프라인의 파손예측에 미치는 영향", 대한기계학회논문집 A권, 제23권 제11호, pp. 2096~2101
- (2) Kiefner, J. F., 1974, "Corroded Pipe Strength and Repair Methods", Symposium on Line Pipe Research, Houston, Texas.
- (3) Kiefner, J. F. and Vieth, P. H., 1990, "New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe", Oil and Gas Journal, pp. 56~59.
- (4) ANSI/ASME B31-1985, 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.
- (5) Kiefner, J. F. and Hisey, D. T and O'Grady, T. J., 1992, "Pressure Calculation for Corroded Pipe Developed", Oil and Gas Journal, pp. 84~89.
- (6) ABAQUS v5.7, 1997, Hibbit, Karlson and Sorenson Inc. Providence