

기간설비 사용적합성 평가 프로그램 개발

박영재[†]·윤강옥*·장윤석*·김영진*·조경식**

Development of Fitness for Service Evaluation Programs

Young-Jae Park[†], Kang-Ok Yun*, Yoon-Suk Chang*,
Young-Jin Kim*, Kyung-Shik Cho**

Key Words: Corrosion Integrity Evaluation(부식안전성평가), Crack Integrity Evaluation(균열안전성평가), Fatigue Life Evaluation(피로수명평가), Fitness For Service(사용적합성)

Abstract

An effective integrity evaluation system is essential to manage the fitness for service issues on infra-structure because the evaluation processes usually take long times and are detrimental for productivity point of view. In this paper, the key structures and procedures of four integrity evaluation programs which have been developed based on currently available codes and standards are described. The proposed programs are not only flexible to adopt advances in fitness for purpose type assessment methodologies but also convenient for field engineers. The developed programs which will be unified as an integrity evaluation system are expected to play a prominent role for integrity evaluation of major infra-structure.

1. 서 론

과거 각국의 산업계와 연구소에서는 기간산업 설비의 수명 연장에 대한 활발한 연구를 수행하여 균열 구조물의 수명평가를 위한 평가법들을 제안한 바 있으며, 특히 최근에는 비약적인 발전을 이루어 미국 및 유럽 각국을 중심으로 많은 수명 평가법이 새롭게 제시되었다. 미국의 대표적인 설계 및 수명 평가법으로는 ASME Code⁽¹⁻³⁾와 API Code⁽⁴⁾ 등이 있다. 유럽의 경우 1996년~1999년까지 수행된 유럽공동체 연구 (Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry; SINTAP)를 통해 구조건전성

평가절차를 제시하였으며, 영국의 British Energy에서는 R6 및 R5 평가에 대한 지속적인 수정 및 보완 연구를 수행 중에 있다. 또한 BS 7910, RSE-M, SAQ 등 각국의 실정을 반영한 다양한 수명 평가법들도 제시되어 현장 적용중이다. 그러나 이와 같은 기존의 평가법들은 각국의 실정에 따라 상이한 점이 있어, 기 개발된 절차법의 국내 적용 및 개선을 위해서는 장단점에 대한 비교 연구가 선행되어야 한다. 따라서 ASME Code, API RP579, SINTAP, R5, R6, BS 7910 등의 절차를 분석하였으며, 이를 통해 ASME Code와 API RP579를 국내 기간산업설비의 사용적합성 평가를 위한 프로그램 개발 기준으로 채택하였다.

본 논문에서는 피로균열발생에서 성장에 이르는 전과정동안의 평가절차와 균열 및 부식 안전성평가 절차를 분석하고, 이를 기반으로 알고리즘을 구성하여 4가지 사용적합성평가 프로그램을 개발하였다.

[†] 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : pyj0909@skku.edu

TEL : (031)290-5277 FAX : (031)290-5276

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 회원, 한국기계연구원 시험평가센터

2. 피로균열발생평가 프로그램

2.1 프로그램 개요

ASME Code Sec. III⁽¹⁾의 평가절차에 기초하여 피로균열발생평가 프로그램을 개발하였다. Fig. 1은 본 연구에서 개발한 피로균열발생평가 프로그램의 구성도를 나타낸 것이다. 피로설계곡선에서 교차응력에 대응하는 최대허용 사이클수를 계산하고, 누적사용계수(CUF)를 구하여 값이 1.0을 초과하는 경우 피로균열발생 시점으로 결정할 수 있도록 하였다.

2.2 데이터 입력

과도상태는 최대 4개까지 선택할 수 있고, 과도상태는 시간에 따른 함수 형태의 응력성분으로 구성된다. 주응력 방향이 일정한 경우에는 전체 사이클 동안 시간에 대한 3개의 주응력 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 을 통해 전체 시간에 걸쳐 절대값이 가장 큰 $S_{r12}, S_{r23}, S_{r31}$ 을 결정한다. 이로부터 각 성분에 대한 S_{alt} 를 구한다($S_{alt,ij}=0.5S_{rij}$). 주응력 방향이 변하는 경우에는 전체 사이클 동안 시간에 대한 함수로 6개의 응력성분을 통해 각 사이클에 대해 최대응력이나 최소응력 중 하나를 택한다. 각 점에 대해 6개의 응력성분으로부터 주응력 $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ 을 구하고, 전체 사이클 동안 시간에 대한 응력차를 결정해 S_{alt} 를 구한다.

2.3 평가 및 출력

데이터가 정상적으로 입력된 경우, 각 하중에 대한 최대허용 사이클수를 결정하여 안전성 여부를 판단한다. 최대허용 사이클수는 피로설계곡선에서 교차응력에 해당하는 사이클수(N)로 결정되며, 다음과 같이 식 (1)을 통해 보간하여 사용할 수 있다.

$$\frac{N}{N_i} = \left(\frac{N_j}{N_i} \right)^{\log(S_i/S) / \log(S_i/S_j)} \quad (1)$$

2개 이상의 응력사이클 형태가 존재할 경우 손상은 누적형태로 평가된다. 각각의 응력사이클에 대한 사용계수($U_1=n_1/N_1, U_2=n_2/N_2, U_3=n_3/N_3, \dots, U_n=n_n/N_n$)를 계산한 후, 누적 사용계수($CUF=U_1+U_2+U_3+\dots+U_n$)를 결정한다.

피로균열발생 평가는 Fig. 1과 같은 계산절차에 따라 Fig. 2와 같은 결과로 나타나게 된다. 평가절차에 대한 요약을 텍스트 문서로 출력하며, 누

적사용계수를 막대그래프로 제시하여 과도상태별 기여도를 확인할 수 있다.

2.4 사례연구

적용성 검증을 위해 피로균열발생 프로그램과 수계산을 이용한 계산 결과를 비교하였다. Table 1은 2가지 과도상태에 대한 검증 결과를 나타낸 것으로서 수계산 결과와 일치함을 알 수 있다.

Table 1 Comparison between hand calculation and crack initiation evaluation program

Transient No.	Alternating Stress (ksi)			Cycle counting (cycles)		
	Hand	Prog.	Diff.	Hand	Prog.	Diff.
1	79	79.161	0	965	965	0.030
2	110	110.66	0	373	367	0.009
Transient No.	Usage Factor			Cumulative Usage Factor		
	Hand	Prog.	Diff.	Hand	Prog.	Diff.
1	0.083	0.083	0	0.243	0.248	0.004
2	0.16	0.163	0.003			

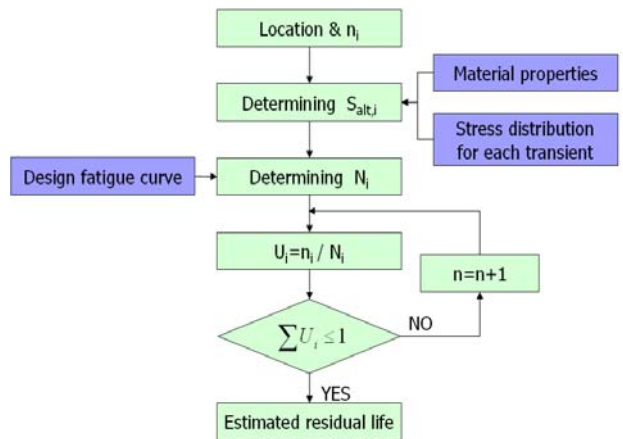


Fig. 1 The algorithm of fatigue initiation evaluation program

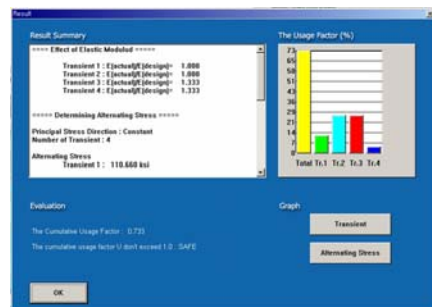


Fig. 2 The result window of fatigue crack initiation evaluation

3. 피로균열성장 프로그램

3.1 프로그램 개요

피로균열성장 프로그램은 기본적으로 ASME Code Sec. XI⁽²⁾에 의한 평가절차에 기초하고 있으며, 다양한 결함형상에 대한 응력확대계수 계산 시 보수성을 줄인 Raju-Newman식 및 Kobayashi식을 사용할 수 있도록 하였다^(5,6).

피로균열성장 프로그램은 각 평가절차에 따라 3개의 독립 모듈로 구분하였으며, 각 모듈별은 다음과 같이 4가지 부분으로 구성하였다.

- 평가 방법을 설정하는 설정부
- 결함해석 조건을 입력하는 입력부
- 결함 안전성평가를 수행하는 해석부
- 평가 결과를 보여주는 출력부

3.2 입력부

피로균열성장량 평가시 필요한 결함형상 정보, 응력 및 재료물성치 등의 데이터를 입력한다. 입력부는 결함형상, 재료물성치 대화상자와 파괴역학해석 DB 인터페이스로 구성된다. 결함형상 탭 대화상자는 안전성평가에 사용되는 균열형태를 지정하기 위한 것으로, 균열은 표면균열, 내부균열, 그리고 흘균열⁽⁷⁾ 등으로 분류된다.

표면균열은 ASME Code Sec. XI⁽²⁾식과 Raju-Newman⁽⁵⁾식을 이용하여 평가하며, 내부균열은 ASME Code Sec. XI식과 Kobayashi⁽⁶⁾식을 이용하여 계산한다. 재료물성치 탭 대화상자에서는 기기에 대한 형상정보와 재료물성치 정보를 입력한다.

3.3 평가 및 출력

평가 해석부에서는 입력조건에 대한 결함안전성 평가를 수행한다. 결과 출력부는 평가 해석부에서 계산된 균열성장량, 최종균열길이, 임계균열길이, 균열안전성 여부 등을 출력하는 해석보고서 탭 대화상자로 구성되어 있으며, Fig. 3에 이를 제시하였다.

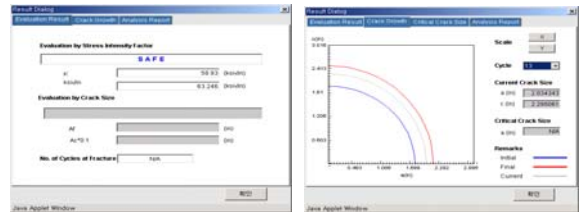
3.4 사례연구

적용성을 검증하기 위해 수계산을 이용한 계산결과와 비교하였다. 사례연구에 필요한 각 결함의 형상 정보는 Table 2에 제시하였다. 평가의 신뢰성을 위해 실제 원자력발전소의 응력분포를 적용하여 9 사이클까지의 균열 성장량을 계산하였

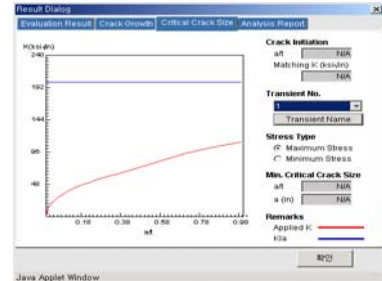
다. 표면균열과 내부균열은 각각 원통형 용기에 존재하는 표면균열과 타원형 균열로 가정하였고, 연속균열은 원통형 용기의 원주방향 균열로 가정하였다. 표면균열의 경우, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 수계산 결과와 잘 일치하였다.

Table 2 Cases considered in the verification study

Crack Shape	R[in]	t[in]	a[in]	c[in]	e[in]
Surface	19.00	1.90	0.95	2.38	-
Subsurface	41.75	4.00	0.90	1.05	0.60
Continuous	19.00	1.90	0.95	2.38	-



(a) Evaluation result (b) Crack growth



(c) Dialog box of critical crack size

Fig. 3 The analysis result windows of fatigue crack growth evaluation program

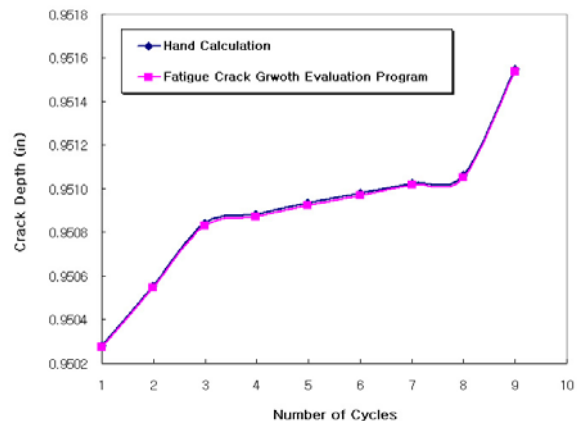


Fig. 4 Verification of surface crack module in fatigue crack growth evaluation program

4. 균열안전성평가 프로그램

4.1 프로그램 개요

배관에 존재하는 결함의 형상은 배관의 외부 혹은 내부에 위치하고, 다양한 형태로 존재할 수 있다. 본 논문에서 개발한 균열안전성평가 프로그램은 Fig. 5의 평가절차 순서로 다양한 형상의 균열배관에 대해 안전성을 평가할 수 있다.

4.2 데이터 입력

형상입력부에서는 구조물을 배관으로 고정하고 결함의 방향, 위치, 형상에 따라 사용자가 편리하게 선택할 수 있도록 하였다.

결함의 형상을 API RP579⁽⁴⁾에 준하여 분류하였으며 Table 3에 분류 항목을 조합하여 총 12가지 경우를 고려할 수 있도록 하였다. 배관의 치수와 균열의 치수는 텍스트 박스를 통해 입력 받으며, 결함의 형상에 따라 필요한 치수만 입력받도록 구성하였다. 또한 평가의 신속성과 정확성을 위해 X65 배관의 각 부위별 재료물성치 DB를 구축하였다. 인장물성치와 파괴인성치를 각 부위별로 관리할 수 있도록 하였으며, 각 데이터의 추가, 삭제 및 수정이 가능하다. 배관에 작용하는 하중으로 내압, 굽힘모멘트, 축하중, 벽두께방향의 응력분포를 입력할 수 있도록 구성하였다. 벽두께 방향의 응력분포는 4차 다항식으로 표현되는 다항식의 각 계수를 입력함으로써 응력분포를 입력할 수 있다. 또한 입력된 벽두께 방향의 응력분포를 도식적으로 나타낼 수 있도록 하였다.

4.3 평가 및 출력

본 프로그램은 재료물성치 보유 정도에 따라 평가단계 선택부에서 Step 1, 2, 3을 선택한다. Step 1은 $K_r=0.707$, $L_r=0.8$ 로 고정된 가장 보수적인 평가를 수행하는 단계이다.

Step 2는 다양한 재료로부터 얻어진 파손평가 선도(Failure Assessment Diagram; FAD)의 하한계를 기준으로 작성한 FAD를 이용하는 평가단계이다. Step 2의 FAD는 식(2)로 표현된다. Step 2에서 요구되는 입력조건은 Step 1과 동일하다.

$$K_r = (1 - 0.14L_r^2)[0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)] \tag{2}$$

Step 3은 재료의 진응력-진변형률선도를 이용하

여 FAD를 작성하는 평가단계로서, 균열에 대한 가장 정확한 평가를 수행할 수 있는 단계이다. Step 3에서는 진응력-진변형률선도 데이터를 식(3)에 대입하여 FAD를 작성한다.

$$K_r = \left[\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_Y} + \frac{1}{2} \frac{L_r^3\sigma_Y}{E\varepsilon_{ref}} \right] \tag{3}$$

Fig. 6은 Step 3일 경우 FAD 및 텍스트 결과 출력부를 나타낸 그림이다. 결함에 대한 평가결과를 도식적으로 보여주며, 배관과 결함의 형상과 평가단계, 재료물성치, 파괴인성치, 하중조건 등의 평가절차에 대한 결과를 텍스트로 출력하도록 구성하였다. 각 단계별 평가로부터 계산된 K_r 과 L_r 값을 수치적으로 출력하고 FAD상의 한점으로 표현할 수 있도록 하였다.

4.4 사례연구

본 논문에서 개발한 균열안전성평가 프로그램을 검증하기 위해 수계산 결과와 비교하였다. Table 4와 같은 반타원 내부 표면균열에 대한 입력데이터가 주어질 경우, K_r 및 L_r 값을 비교하였다. 프로그램을 통해 평가한 결과가 Table 5에서 보는바와 같이 수계산 결과와 잘 일치하였다.

Table 3 Classification of flaw shape

Flaw orientation	Flaw location	Flaw shape
Longitudinal	Internal	Infinite
Circumferential	External	Semi-elliptical
		Embedded

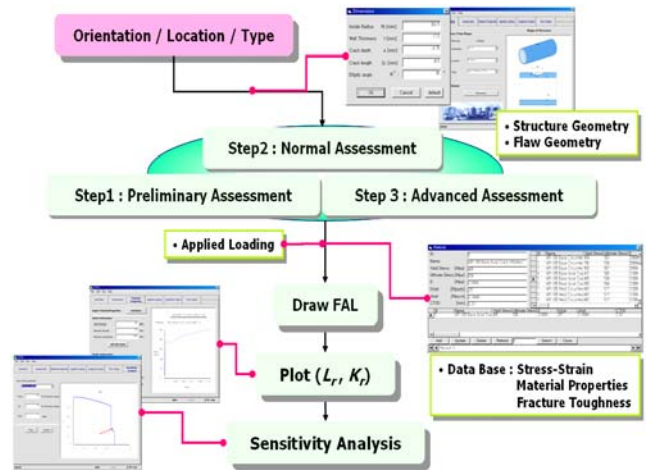


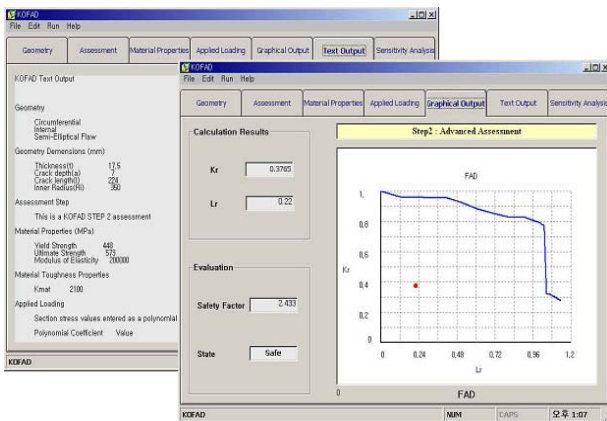
Fig. 5 The algorithm of crack integrity evaluation program

Table 4 Input data for evaluating crack integrity

R [mm]	350
t [mm]	17.5
a [mm]	7
c [mm]	112
Young's modulus [MPa]	196000
Yield strength [MPa]	448
Ultimate strength [MPa]	531
Kmat [MPa√mm]	2100

Table 5 Comparison between hand calculation and crack integrity evaluation program

Parameter	Hand Calculation	Program	Difference [%]
K _r	0.377	0.376	0.26
L _r	0.209	0.210	0.47

**Fig. 6** The windows of graphical and text output section

5. 부식결함평가 프로그램

5.1 프로그램 개요

부식손상부의 잔류강도 평가와 사용자 인터페이스 및 DB의 효율적인 사용을 통하여 배관 부식부위 건전성평가가 가능한 프로그램을 개발하였다.

5.2 데이터 입력

입력부는 크게 재료물성치 및 배관형상 (Material Properties and Pipe Geometry), 설계안전 계수 및 최대 허용운전압력 (Design Factor and MAOP) 그리고 부식부위 형상(Corroded Area

Profile) 등 크게 3개로 구성되어 있다. 사용자는 “Pipe & Material Selection” 버튼을 선택하거나 “Input Data Selection” 버튼을 선택하여 DB에 저장된 값을 입력 받을 수 있으며 사용자가 직접 입력하는 것도 가능하게 구성하였다. 그리고 설계안전계수 및 최대 허용운전압력 입력부에서 사용자는 먼저 설계 안전 계수(Design Factor)를 입력해야 하며, MAOP (Maximum Allowable Operating Pressure)는 다음과 같은 식에 의해 자동으로 계산 된다.

$$MAOP = \frac{2\sigma_y t}{D} F(\text{Design Factor}) \quad (4)$$

또한, 옵션버튼에서 “With Corrosion Profile”을 선택했을 경우 적용되는 모듈로 실제 부식부위 형상 데이터를 입력받게 된다. Corrosion profile 입력부는 “Regular”를 선택하여 자동으로 부식부위길이 증가분을 입력할 수 있으며, 사용자가 입력한 데이터들은 DB에 저장이 가능하여 효율적인 데이터 관리가 가능하다.

5.3 평가 및 출력

본 프로그램에서는 안전성평가와 관련 있는 ASME B31G, Modified B31G, RSTRENG Software, Chell limit load analysis, Kanninen Shell Theory, Sims Pressure Vessel, Ritchie and Lastt, BG Technology/Det Norske Veritas Level 1 평가법을 적용하였다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 잔여강도 평가부에는 corrosion profile을 사용하지 않은 경우와 사용하는 경우에 대한 결과창으로서 최대 부식깊이와 최대 부식깊이를 타원형으로 이상화하여 그래프로 출력하도록 구성하였다.

Fig. 7은 corrosion profile을 사용했을 경우에 대한 결과창으로서 실제 부식깊이 및 부식깊이를 그래프로 출력하고 최대 부식깊이와 유효면적 (Effective Area) 및 유효길이(Effective Length) 값을 출력하도록 구성하였다. Fig. 7의 하단부에 나타나 있는 그래프는 최대안전압력(Maximum Safe Pressure)과 파열압력(Burst Pressure)을 막대그래프로 보여줌으로써 사용자가 평가결과에 대한 분석을 보다 쉽게 할 수 있도록 구성하였다.

1-10번까지 왼쪽에 있는 막대그래프는 잔여강도 평가 결과를 나타내고 있으며, 각 그래프의 오른쪽에 있는 막대그래프는 최대 허용운전압력을 나타내고 있다.

Table 6 Comparison between experiment and assessment by corrosion integrity evaluation program

	ASME B31G	Mod. B31G	PCORRC
MAOP	12.32	12.37	13.39
Diff.[%]	11.09	10.67	3.33

	Kanninen	Sims	Chell
MAOP	11.07	10.34	11.54
Diff.[%]	20.11	25.38	16.71

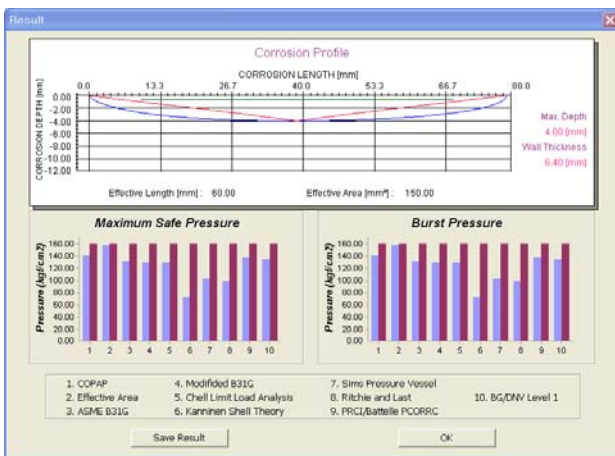


Fig. 7 Result window for single analysis with corrosion profile

5.4 사례연구

외벽에 반타원 모양의 부식이 존재하고 허용운전압력 실험치가 13.85MPa인 배관에 대해 사례연구를 수행하였다. 비교 결과는 Table 6에 나타낸 바와 같이 3%~25%의 차이를 보이므로, 안전성 평가시 평가식 선정에 상당한 주의가 요구된다.

6. 결론

본 논문에서는 기간설비 사용적합성 평가 프로그램을 개발하였다. 이를 통해 균열발생에서 파괴에 이르는 동안의 구조 건전성 평가가 가능할 것으로 예상되며, 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) ASME Code와 API Code를 기반으로 피로균열발생, 피로균열성장, 균열안정성 및 부식결함을 평가할 수 있는 프로그램을 개발하였다.
- (2) 본 논문에서 제시한 프로그램을 이용하여 주요 노화기구에 대한 효율적인 안전성평가가

가능하며, 현재 통합시스템을 구축중이다.

- (3) 통합시스템을 상시감시 DB 시스템과 연계할 경우, 실시간 사용적합성평가를 통해 기간설비의 장수명 운전이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) ASME, 1996, "Rules for In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components, ASME Boiler and pressure vessel Code, Section III".
- (2) ASME, 1998, "Rules for In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI".
- (3) American Society of Mechanical Engineer, 1967, "Power Piping Code", USAS B31.1, New York.
- (4) American Petroleum Institute, 2000, "Fitness-for-Service", API Recommended Practice 579.
- (5) Raju, I. S. and Newman, J. C., 1982, "Stress Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 104, pp. 293~298.
- (6) Shah, R. C. and Kobayashi, A. S., 1971, "Stress Intensity Factor for An Elliptical Crack Under Arbitrary Normal Loading", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 3, pp. 71~96.
- (7) Cloud, R. L. and Palusamy, S. S., 1982, "A Summary and Critical Evaluation of Stress Intensity Factor Solutions of Corner Cracks at the Edge of a Hole", Welding Research Council Bulletin 276.
- (8) American Society of Mechanical Engineers, 1991, "ASME B31G-1991; Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipeline".
- (9) RSTRENG for window, 1989, "User's manual", Technical Toolbox, inc.
- (10) Denny R. Stephens and Rebert B. Francini, 2000, "A Review and Evaluation of Remaining Strength Criteria for Corrosion Defects in Transmission Pipelines", Proceedings of ETCE/OMAE 2000 Joint Conference, ETCE2000/OGPT-10255, pp.1~11.