



## 유체유동에 의한 감육배관의 국부응력변화 평가

송기훈 · 이상민\* · 장윤석\* · 최재봉\* · †김영진\*

한국가스안전공사 가스안전연구개발원, \*성균관대학교 대학원 기계공학과  
(2006년 5월 12일 접수, 2006년 8월 25일 채택)

## Estimation of Local Stress Change of Wall-Thinned Pipes due to Fluid Flow

Ki hun Song · Sang min Lee\* · Yoon suk Chang\* · Jae boong Choi\* · †Young jin Kim\*

Facilities R&D Division, Korea Gas Safety Corporation, 332-1, Daeya-dong, Shihung,  
Kyunggi-do 429-712, Korea

\*SAFE Research Center, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University,  
300 Chunchun-dong, Jangan-gu, Suwon, Kyonggi-do 440-746, Korea

(Received 12 May 2006, Accepted 25 August 2006)

### 요 약

본 논문은 배관에 대한 유동해석과 구조해석을 연계하여 감육부 최심점에서의 국부응력변화를 평가하기 위한 새로운 방법을 제시하였다. 이를 위해 배관 크기, 감육깊이 및 길이 등 3가지 변수를 고려한 해석모델을 적용하고, 침부식 또는 유동가속부식에 취약한 배관계통에서의 2가지 대표적 유체유동을 적용시켜 배관에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 유체의 흐름은 정상상태 비압축성 유동으로 가정하였고, 그 결과값을 감육배관 최심점에서의 국부응력을 구하기 위해 수행한 유한요소해석의 초기조건으로 적용하였다. 이러한 방법으로 구한 감육부에서의 압력분포와 기존의 단순 내압만을 고려한 경우와 상이하며, 그 결과를 비교하여 나타내었다. 향후 본 논문은 발전소설비나 가스설비의 배관건전성 평가에 참고자료로 적용 가능할 것으로 사료된다.

**Abstract** – In this paper, a new evaluation scheme is suggested to estimate load-carrying capacities of wall thinned pipes. At first, computational fluid dynamics analyses employing steady-state and incompressible flow are carried out to determine pressure distributions in accordance with conveying fluid. Then, the variational pressures are applied as input condition of structural finite element analyses to calculate local stresses at the deepest point. The efficiency of proposed scheme was proven from comparison to conventional analyses results and it is recommended to consider the fluid structure interaction effect for exact integrity evaluation.

**Key words** : Computational fluid dynamics, Local stress, Structural analysis, Wall thinned pipe

### I. 서 론

발전소나 일반 화학공장 등의 배관계통에서 흔히 발견되고 있는 감육(wall-thinning) 현상은 침부식(erosion/corrosion) 또는 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion: FAC)에 의해 발생되고 있는 것으로 알려져 있다[1,2]. 이러한 감육현상은 배관의 건전성을 저해하는 중요한 원인 중 하나로 알려져 있다. 특히, 안전성과 경제성을 중요하게 고려하고 있는 원자력발전소 및 가스설비의

경우, 감육배관의 건전성 확보는 매우 중요한 고려 사항으로 대두되고 있다. 따라서, 보다 안정적이고 정확한 감육배관 건전성의 평가를 수행하기 위해 ASME Code Sec. III[3]와 Modified B31G[4] 등과 같은 평가기준이 제정되어 사용되고 있고, 또한 많은 연구자들[5-7]에 의해 다양한 연구가 수행되고 있다.

심 등[5]은 복합하중을 받는 국부 감육배관에 대한 건전성 평가를 수행하였고, 임 등[6]은 감육배관의 실제 문제에 적용이 용이한 공학적인 평가법을 개발하였고, 장 등[7]은 결정론적 해석 기법과 확률론적 해석 기법을 이용하여 감육배관의 건전성 평가를 수행한 바 있

†주저자:khsong41@kgs.or.kr

다. 그러나 기존에 제시된 기준들은 지나친 안전여유로 인해 보수적인 경향을 초래할 수 있고, 선행 연구들은 유체의 유동을 고려하지 않고 배관에 대한 유한요소해석만을 이용하여 건전성 평가를 해 왔다. 따라서 형상의 변화에 의해 유동의 형태나 속도가 변하는 경우에는 낮은 신뢰도를 보이고 있다. 또한 감육부에 대한 건전성 평가에 가장 중요한 인자로 인식되는 유체의 유속 변화에 따른 배관 감육부의 응력 변화에 대한 연구는 아직까지 보고된 바 없다.

따라서 본 논문에서는 유체의 유속이 배관 감육부의 응력 변화에 미치는 영향을 유동 및 구조해석을 이용하여 기존의 방법과 비교하고자 한다.

## II. 감육배관의 건전성 평가

### 2.1. ASME Code Section III

일반적인 압력배관의 감육부에 대한 평가는 기본적으로 배관의 설계코드에 제공하는 최소설계두께( $t_{min}$ )를 이용하여 수행한다. 설계코드에서 허용두께는 압력에 의한 원주방향 응력기준과 굽힘하중에 의한 축방향 응력기준에 만족하도록 결정한다. 배관 설계코드인 ASME Sec. III에서는 배관의 최소설계두께를 다음과 같이 정의하고 있다.

$$t_m = \frac{PD}{2(S+Py)} + A \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 설계압력,  $D$ 는 배관의 외경,  $S$ 는 ASME Sec. II[8]에 명시된 설계온도에서의 최대허용응력이다.

감육부의 배관 두께가 위의 최소설계두께를 만족하지 못한다면 ASME에서 제시된 감육부위에 대한 평가 절차법에 따라 감육배관의 교체, 보수, 계속사용 등을 결정하게 된다.

### 2.2. Modified B31G

ASME B31G 기준에 사용된 지나친 가정과 보수성을 줄이기 위해 Kiefner와 Vieth[9]는 부식배관에 대한 파열시험을 수행하였다. 이러한 연구결과로 다음과 같은 Modified B31G 기준을 제안하였다. 이들은 유동응력값으로  $1.1s_y$ 를 사용하는 경우, 별정계수인 Folias 계수 계산식과 감육부의 길이가 길 때의 감육부 이상화 기준에 대한 보수성을 각각 지적하였다. 또한 포물선모양의 감육부형상을 가정하는 2/3의 형상 인자를 대신하여 실험적으로 결정된 0.85라는 값을 사용하였다.

감육배관의 계속사용을 위해서는 허용두께 기준 이

외에도 압력과 굽힘 하중에 대해 제시된 설계코드의 응력기준을 만족해야 한다. 이 때, 감육에 의한 배관의 단면적 감소를 고려하기 위해서 전체 배관 두께를 감육부의 최소두께( $t_{p,min}$ )로 가정하여 보수적으로 평가하거나, 감육된 영역의 측정치를 사용하여 응력기준에 적용해야 한다.

$$P_{max} = \frac{2t}{D_i}(\sigma_y + 68.95\text{MPa}) \left[ \frac{1 - (0.85)(a/t)}{1 - (0.85)(a/t)/M_{T2}} \right] \quad (2)$$

여기서,

$$M_{T2} = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{t^2}{D_o t} - 0.003375 \frac{t^4}{D_o^2 \cdot t^2}} \quad \text{for } \frac{t^2}{D_o t} \leq 50$$

$$M_{T2} = 0.032 \frac{t^2}{D_o t} + 3.3 \quad \text{for } \frac{t^2}{D_o t} > 50$$

### 2.3. PCORRC 기준

Battelle/PRCI는 기존 평가기준의 보수성을 줄이고, 부식배관의 파손을 제어하는 메커니즘을 정립하기 위해 연구를 수행하였다[10,11]. 샤프피 충격인성 60 J 이상인 고인성 배관은 소성붕괴에 의해 파괴되고 이때 파손되는 부식배관의 파열압력은 유동응력보다는 인장강도에 의해 결정된다는 것을 밝힌 바 있다. 또한 저인성 감육배관에서는 동일한 감육형상을 지닌 고인성 배관보다 더 낮은 압력에서 파손이 발생한다고 보고하였다. Battelle에서는 내압과 외부하중이 작용하는 감육배관의 해석을 위해 유한요소해석 프로그램인 PCORR을 개발하였다. 소성붕괴에 의한 파괴를 제어하는 인자를 정의하기 위한 연구를 수행하였으며, 감육배관 파손에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 감육부의 파괴압력에 대하여 다음과 같은 기준식을 제시하였다.

$$P_{max} = \frac{2t}{D_i} \sigma_u \left[ 1 - \frac{a}{t} \left( 1 - \exp \left( -0.157 \frac{1}{\sqrt{R(t-a)}} \right) \right) \right] \quad (3)$$

PCORRC 기준으로 알려진 이 계산식은 중, 고인성 배관에 존재하는 감육부의 한계하중을 예측하는데 사용된다.

## III. 유동해석 및 구조해석

Fig. 1은 유체부와 배관부에 대한 형상을 모사한 것으로서, 배관의 평균반경  $R_m$ , 감육깊이  $d$ , 감육길이  $2l$ , 감육각도  $2\theta$  등을 주요 형상 변수로 설정하여 유동해석과 구조해석을 수행하였다.

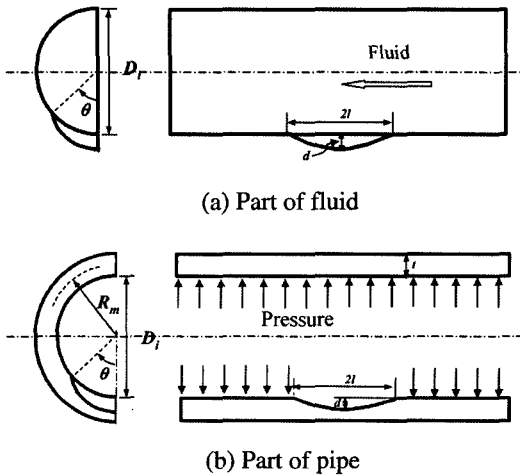


Fig. 1. Schematic illustration of wall thinned pipe subjected to internal pressure.

Table 1. Analysis matrix.

$R_m/t$	10, 15, 20
$d/t$	0.25, 0.5, 0.75
$l/t$	5, 10, 20
$\theta/\pi$	0.25
$V(m/s)$	20, 40

3.1. 유동해석 조건

유동해석을 위하여 상용 CAD 프로그램인 Autodesk Inventor v.9.0[12]을 이용하여 모델링하였다. 또한 유체 유동에 의한 배관감육의 압력 분포를 알아내기 위해 범용 유동해석 프로그램인 Fluent 6.2[13]를 이용하여 해석을 수행하였다. 초기경계조건으로는 velocity-inlet과 pressure-outlet 조건을 적용하였고, no-slip 마찰조건을 이용하여 벽면과 유체 간의 마찰을 무시하였다. 유체유동은 정상상태, 비압축성 난류유동으로 가정하였다. 유동해석에 이용된 요소망은 I-deas ver. 10[14]과 Gambit ver. 2.2[15]를 이용하여 Fig. 2(a)와 같이 요소망을 생성하였다. 유체부에 사용된 요소는 육면체체적요소(hexahedral volume mesh)를 사용하였으며, 요소수는 34,000개의 요소를 사용하였다. 대상유체는 물을 고려하였으며, 982 kg/m<sup>3</sup>의 밀도와 0.001003 kg/ms의 점성을 가진다.

3.2. 유동해석 결과

Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이, 배관 감육부의 와류로 인한 배관 감육부 최심점에서의 압력증가를 유동해석

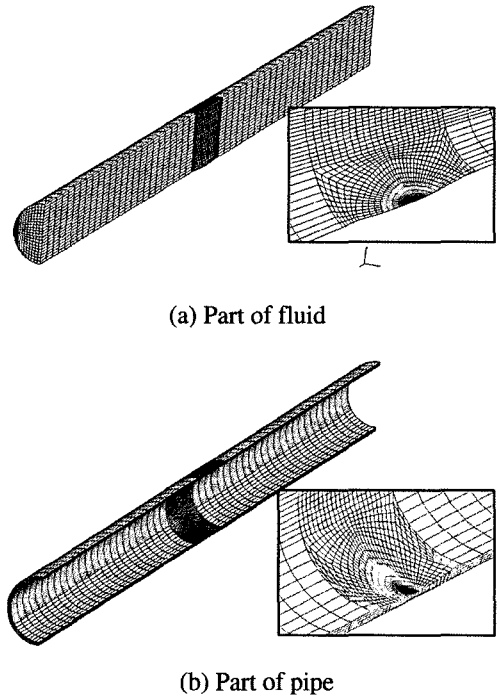


Fig. 2. Typical CFD and FE meshes employed in the present work.

을 통해 알 수 있었다. 여기서, 감육부 최심점에서의 압력이 초기압력에 비해 약 6% 정도 증가함을 보여주고 있다. 또한 감육이 시작되는 부분과 끝나는 부분에서의 압력이 초기 압력보다 낮은 압력값을 갖는 결과를 보여주고 있다. 이 결과는 감육부에서의 와류로 인한 유속변화에 의한 영향으로 유속 V가 20 m/s보다 40 m/s 일 때 훨씬 큰 압력변화를 보인다. 감육부에서  $R_m/t$ ,  $d/t$ ,  $l/t$ 와 유속 V에 의해 내압이 10% 이상 증가하였다. 또한 얻어진 결과값을 구조해석의 초기입력조건으로 이용하였다.

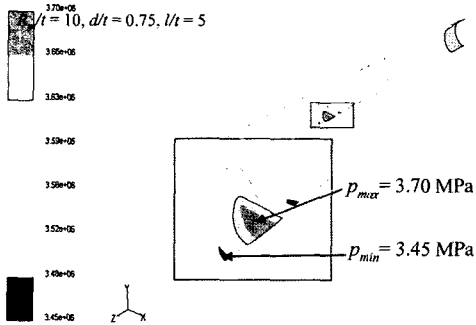
3.3. 구조해석 조건

선행 연구로부터 얻어진 배관 감육부의 압력분포를 적용하여, 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[16]를 이용하여 감육배관에 대한 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 또한 동일한 조건에 대해 기존의 평가방법인 배관 감육부에 일정한 내압을 적용시켜 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

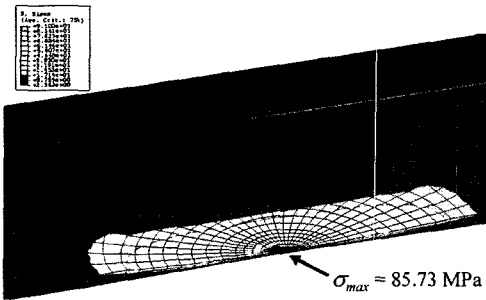
구조해석에 이용한 형상은 Fig. 1(b)에 도시한 바와 같이 감육형상을 축방향과 원주방향 모두 원형으로 이상화하여 모델링였다. Table 1은 본 논문에서 수행한 해석 경우에 대해 정리한 것이다. 해석에 이용된 이중

Table 2. Material properties of ASTM SA 106 Gr.B.

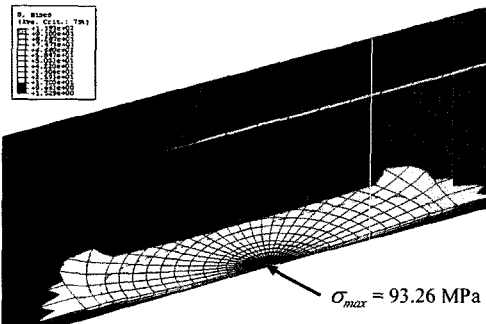
Young's modulus (GPa)	195
Poisson's ratio	0.3
Yield strength, $\sigma_y$ (MPa)	294
Ultimate tensile strength, $\sigma_u$ (MPa)	700



(a) CFD analysis



(b) FE analysis



(c) Combined analysis

Fig. 3. Examples of resultant pressure and stress distributions of wall thinned pipe.

은 3.5 MPa로 동일한 내압을 적용한 경우와 유동해석에 의해 얻어진 압력 분포를 적용한 경우에 대해 해석

을 수행하였다. 내압이 작용하는 경우, 내압에 의해 발생하는 등가축방향 응력을 배관의 끝단에 작용시켰다. 또한 해석에 사용된 요소망은 20 절점 등계수 사각주 요소(20-node isoparametric brick element)를 사용하였으며, 69,909개의 절점과 14,480개 요소 수를 가진다. 또한 형상과 하중의 대칭조건을 고려하여 Fig. 2(b)와 같이 1/2로 단순화하여 모델링하였다. Table 2에 본 논문에서 고려한 ASTM SA106 Gr.B 배관에 대한 재료 물성치를 제시하였다.

### 3.4. 구조해석 결과

감육부 최심점에서의 등가응력을 비교하기 위해 일정한 내압이 작용하는 경우와 유동해석으로부터 얻어진 결과값을 이용하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 또한 감육형상과 유속에 의한 영향을 분석하기 위해 연성해석을 수행하여 그 결과를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3(a)는 40 m/s의 유속과 3.5 MPa의 압력으로 흐르는 유체가 감육부에서의 와류로 인해 배관 내벽에 미치는 결과를 나타내었고, 동일한 조건 하에서 구조해석을 이용한 결과 값과 연성해석을 이용한 결과 값을 Fig. 3(b)-(c)에 나타내어 등가응력  $\sigma_{CFD+FE}$ 와  $\sigma_{FE}$ 를 서로 비교하였다.

Fig. 4에서 보여지는 것처럼 연성해석에 의한 결과값( $\sigma_{CFD+FE}$ )이 3.5 MPa로 동일한 내압만을 적용시킨 구조해석 결과값( $\sigma_{CFD}$ )보다 높게 나타남을 알 수 있다. 해석에 이용된 변수  $R_m/t$ ,  $d/t$ ,  $l/t$  그리고 유속, V 등에 의해  $\sigma_{FE}$ 에 대한  $\sigma_{CFD+FE}$ 의 응력비는 1.02에서 최대 1.10까지 변하는 것을 알 수 있다.

동일한 유속조건에서  $d/t$ 가 0.25에서 0.75로 증가할수록  $\sigma_{CFD+FE}/\sigma_{FE}$ 의 값은 증가함을 알 수 있다. 또한  $l/t$ 가 5에서 20으로 증가할 때  $\sigma_{CFD+FE}/\sigma_{FE}$ 는 감소함을 알 수 있다. 그 원인은 감육길이가 길어질수록 유체의 흐름에 의한 압력 변화가 완만하기 때문이다. 반면에  $R_m/t$ 에 의한 영향은 크지 않았다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 감육배관의 일반적인 운전조건 하에서 유체 유동이 배관 건전성에 어떤 영향을 미치는지를 연구하기 위해 감육길이비와 감육깊이비의 영향을 고려하였다. 또한 감육배관에 대한 유동해석과 구조해석 수행하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 논문에서 감육배관의 건전성 평가에 있어 유체 유동을 고려한 새로운 평가 방법을 제시하였다.

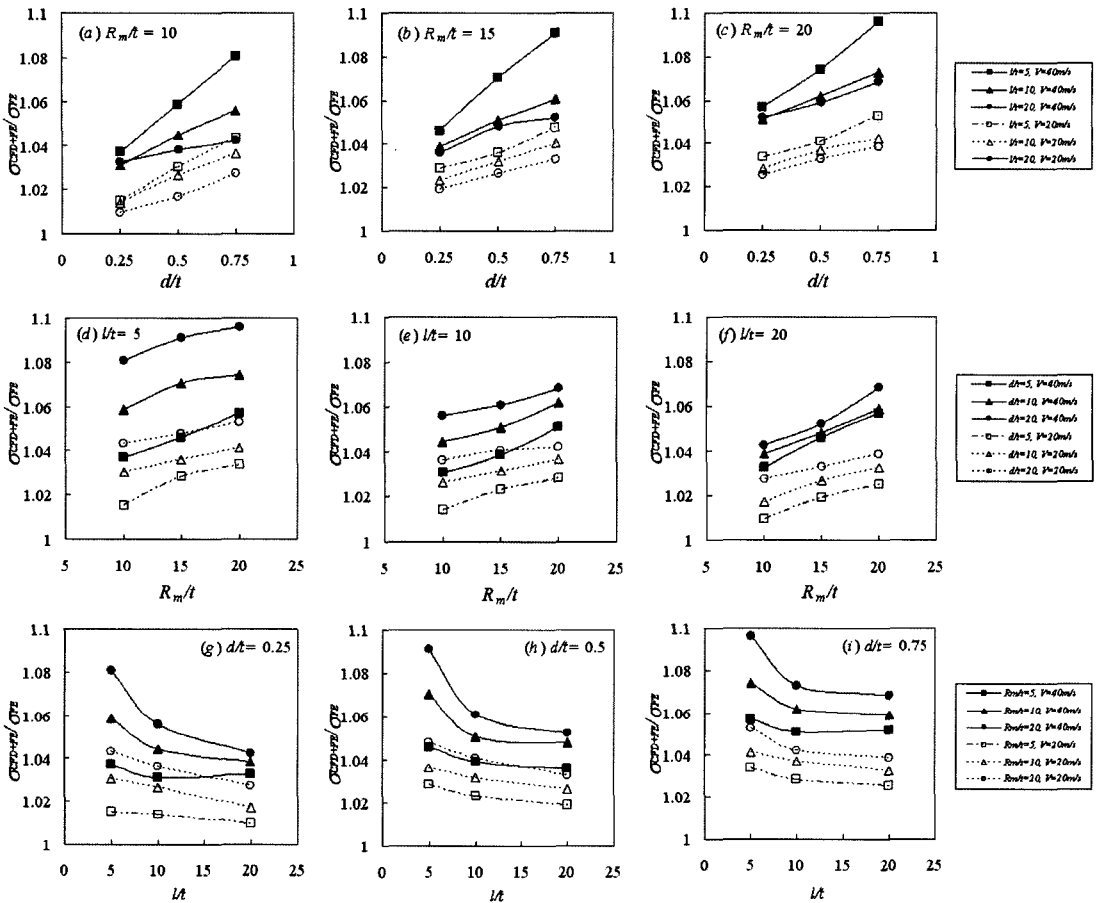


Fig. 4. Comparison of  $\sigma_{CFD+FE}$  values with  $\sigma_{FE}$  values for the locally wall thinned pipe under internal pressure.

2) 유동해석과 구조해석을 수행한 감육부 최심점에서의 등가응력은 기존의 배관에 대한 구조해석만을 수행한 경우에 비해 등가응력이 최대 10% 이상 높은 결과값을 보였다.

3) 본 연구결과에서 배관 두께에 대한 감육깊이비가 커질 할수록 감육부 최심점에서의 등가응력은 4~10%의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 이 결과는 다른 변수들에 비해 감육부에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 사료된다.

### 참고문헌

[1] Virginia Electric and Power Co., "Surry Unit 2 Reactor trip and Feedwater Pipe Failure Report", (1989)  
 [2] Japanese Nuclear and Industrial Safety Subcommittee Advisory Committee for Natural Resources and

Energy: <http://www.meti.go.jp/press/0005524>, (2005)

[3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, (1998)  
 [4] ASME Manual for Remaining Strength of Corroded Pipelines  
 [5] Shim, D.J., Choi, J.B., Kim, Y.J., Kim, J.Y. and Park, C.Y., "Failure Strength Assessment of Pipes with Local Wall Thinning Under Combined Loading Based on Finite Element Analyses", *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, **126**(2), 179-183, (2005)  
 [6] Kim, Y.J., D.J. Shim, H. Lim, and Y.J. Kim, "Reference Stress Based Approach to Predict Failure Strength of Pipes with Local Wall Thinning Under Single Loading", *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, **126**(2), 1203-1218, (2004)  
 [7] 장윤석, 윤강욱, 박영재, 김영진, "감육현상을 고려한 가스배관의 파손확률 평가", *한국정밀공학회지*, **22**(10), (2004)

- [8] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. II, (1995)
- [9] Kiefner, J.F., "Pressure Calculation for Corroded Pipe Developed", *Oil & Gas Journal*, pp. 84-89, (1992)
- [10] Stephens, D.R. and Lei, B.N., "Development of an Alternative Criterion for Residual Strength of Corrosion Defects in Moderate-to High-Toughness Pipe", ASME International Pipeline Conference, 2, (2000)
- [11] Stephens, D.R. and Francini, R.B., "A Review and Evaluation of Remaining Strength of Corrosion Defects in Transmission Pipelines", Proceedings of ECTE/ OMAE 2000 Joint Conference, (2000)
- [12] "Inventor 9.0 User's Manual", Autodesk Inc., (2004)
- [13] "Fluent 6.2 User's Guide", Fluent Inc., (2004)
- [14] "I-DEAS Update Training", SDRC, (2000)
- [15] "Gambit 2.0 User's Guide", Fluent Inc., (2004)
- [16] "ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 6.5", ABAQUS Inc., (2005)