

## 3차원 균열을 갖는 구조물에 대한 건전성 평가(II)

이준성<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 기계시스템공학과

## Integrity Evaluation for 3D Cracked Structures(II)

Joon-Seong Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi University

**요 약** 3차원 균열은 항공기나 압력용기 계통에서 흔히 발견되는 결함중의 하나이다. 균열을 갖는 구조물에 대한 정확한 응력확대계수 해석과 균열성장속도는 파괴강도와 피로수명을 평가하는데 필요로 한다. 3차원 유한요소법은 구조물에 존재하는 표면균열의 응력확대계수를 구하는데 이용되어 진다. 기하모델, 즉 균열을 포함하는 솔리드모델을 정의한 후, 절점이 버킷법에 의해 생성되어 진다. 요소생성은 사변형 솔리드요소를 테라우니 삼각화 기술에 의해 생성하도록 하였다. 시스템의 정확도와 효율성을 체크하기 위해 내압을 받는 원통형용기에 균열이 존재하는 경우의 응력확대계수 해석을 수행하였다. 개발된 시스템을 이용한 해석결과는 ASME 식과 Raju-Newnam식과 비교하여 5%이내의 차이를 보였다.

**Abstract** Three Surface cracks are among the more common flaws in aircraft and pressure vessel components. Accurate stress intensity analyses and crack growth rate data of surface-cracked components are needed for reliable prediction of their fatigue life and fracture strengths. Three Dimensional finite element method (FEM) was used to obtain the stress intensity factor for surface cracks existing in structures. A geometry model, i.e. a solid containing one or several 3D cracks is defined. Nodes are generated by bucket method, and quadratic tetrahedral solid elements are generated by the Delaunay triangulation techniques. To examine accuracy and efficiency of the present system, the stress intensity factor for a semi-elliptical surface crack in cylindrical structures subjected to pressure is calculated. Analysis results by present system showed good agreement with those by ASME equation and Raju-Newman's equation.

**Key Words** : Surface Crack, Stress Intensity Factor, Finite Element Analysis, Mesh Generation

### 1. 서론

원자력발전소의 주요기기는 고온 고압의 가동조건하에서 안전성을 유지할 수 있도록 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III[1]에 준하여 설계한다. 이렇게 설계된 원자력발전소 주요기기에는 재질의 불균일성이나 용접과정상의 문제 등의 이유로 미소균열이 존재할 수 있으며 이러한 미소균열 중 일부는 가동 시 계속적인 반복하중을 받음으로써 기기 건전성에 영향을 미칠

수 있는 크기의 균열로 성장할 수도 있다. 가동 중인 원자력발전소에서 이러한 결함이 발견될 경우, ASME Section XI[2]에 준한 결함 안전성 평가를 수행하여 그 안전성이 입증되어야만 계속 가동할 수 있다.

국내의 중수형 원자로로는 핵연료의 교체가 용이하게 원자로를 수평으로 설치하고 여기에 중수형 원자로 압력관을 설치한다. 압력관은 고온 고압의 가동환경에서 균열발생 확률이 높으며 나중에는 균열이 진전하여 압력관의 파손을 유발한다[3]. 압력관 결함의 건전성 평가를 위해

본 연구는 2011학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

\*Corresponding Author : Joon-Seong Lee (Kyonggi University)

Tel: +82-11-725-1140 email: jsleel@kyonggi.ac.kr

Received September 24, 2012 Revised October 31, 2012 Accepted January 10, 2013

3차원 균열해석은 필수불가결의 요건이라 할 수 있다. 일반적인 효율성과 범용성의 관점에서 유한요소법이 가장 널리 이용되고 있는 실정이다[4]. 압력관과 같은 원통형 용기에 존재하는 표면균열의 실제 공학문제로서의 중요성은 잘 인식되고 있으나 해석의 복잡성 때문에 지속적으로 여러 가지 해석과 연구를 하고 있는 형편이다[5]. 그러나 현실적으로 유한요소법을 이용하기 위해서는 몇 가지 어려운 점이 있다. 즉 3차원 균열의 유한요소 해석에서는 대규모 해석이 되기 쉽고, 응력특이장인 균열선단 근방에 특수한 요소분할이 요구되어지기 때문에 요소생성을 포함한 입력데이터의 작성에 많은 노력이 필요하게 된다. 계산효율과 같은 정확도(accuracy)에 영향을 미치는 요소생성과정의 자동화는 3차원인 경우, 그리 쉽지 않으며 유한요소해석(FEA) 전 과정에서 가장 중요하다고 할 수 있다[5,6].

본 연구에서는 구축된 유한요소해석의 자동화 시스템 [7] 모듈을 추가로 개발 통합하여 3차원 균열이 존재하는 유한요소망을 자동으로 생성해 주는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 PC의 Windows환경을 기반으로 하여 Visual C++를 사용하였다. 개발된 시스템을 이용하여 표면균열이 존재하는 원통형용기에 대한 응력확대계수 해석을 수행하고자 한다.

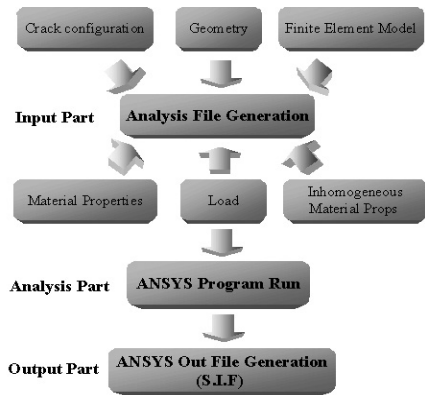
## 2. 해석 시스템

원통형 용기에 표면균열이 존재하는 3차원 유한요소망을 구성하려면 많은 시간과 노력을 필요로 한다[7]. 본 모듈은 균열의 형상, 재료물성치, 경계조건, 절점 및 요소의 구성에 필요한 사용자 입력부와 범용 해석코드인 ANSYS[8]를 이용한 해석부, 그리고 응력확대계수 값을 구해 나타내 주는 출력부로 구성되어 있다.

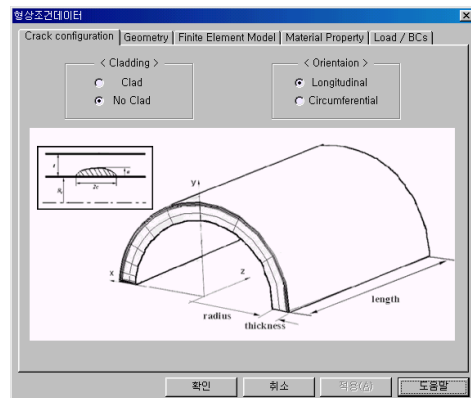
본 연구에서 개발한 시스템의 주요 입력파라미터는 Table 1에 나타내었으며, 단위는 SI, USCS 모두 사용가능하도록 하였다. Fig. 1은 시스템의 전체적인 구성을 나타낸 것이다. 입력부의 하나의 예로서 Fig. 2는 원통형 용기에 균열이 존재하는 경우, 균열의 방향이 축방향인지 원주방향인지를 선택하고 구조물에 클래드(clad)가 있는지 없는지를 선택하는 입력창을 나타낸 것이다. 재료물성치인 탄성계수 E, 포아송의 비  $\nu$ , 그리고 간단한 이름을 입력받는다. 클래드가 있는 경우는 클래드에 대한 E,  $\nu$ 도 입력받는다.

[Table 1] Input parameters of dialog box

Dialog Box	Input Parameter
Crack configuration	Clad(Yes/No)
	Orientation(Longitudinal/Circumferential)
Geometry	Crack center coordinates(x, y, z)
	Crack-depth(a)
	Crack-length(c)
	Inner-radius(R)
	Thickness(t)
	Length(L)
Material property	Youngs modulus E
	Poisson's ratio $\nu$
Load / BCs	Pressure



[Fig. 1] Flow chart of SIF analysis system



[Fig. 2] Example of input screen of crack shape

### 2.1 3차원 균열의 형상정의 및 등록

임의의 위치에 3차원균열을 형상정의 하기 위하여 사용자는 다음과 같은 정보를 입력할 필요가 있다.

- (1) 3D 균열을 표현하는 타원체의 중심좌표(x, y, z)
- (2) 타원체의 반경( $r_x, r_y, r_z$ )
- (3) 타원체로부터 타원을 생성할 때 필요한 파라미터 이상과 같은 정보를 정의하고 싶은 균열의 수만큼 입력한다.

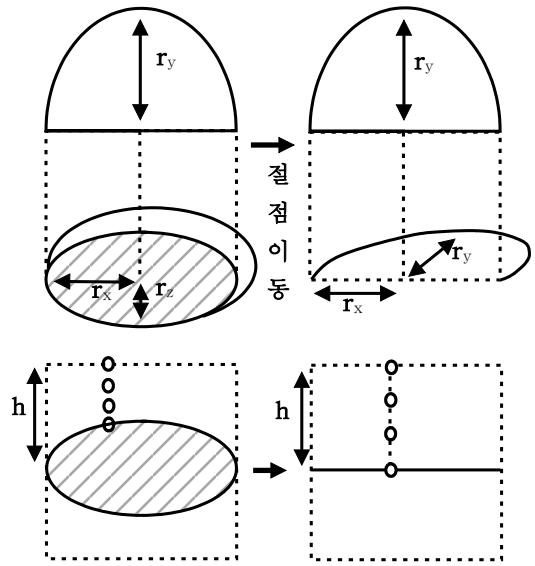
### 2.2 절점 및 요소생성

이미 개발된 시스템[7]에서 사용했던 방법대로 해석영역 전체의 절점밀도 분포를 구한 후에는 계산 기하학적 수법의 하나인 버킷(bucket)법[9]을 이용하여, 절점을 자동적으로 생성한다. 이 프로세스는 절점을 기하모델의 표면 및 내부에도 생성하기 때문에 솔리드모델러의 형상 연산라이브러리를 이용하게 된다.

생성되어진 절점들은 잘 알려진 데라우니(Delaunay)의 삼각화[10]을 이용하여 4면체 요소를 고속으로 생성하게 된다. 이 데라우니법을 이용할 경우 凹형상의 기하모델은 형상외부에도 요소가 생성되어지게 되므로 요소의 중심으로 내외판정을 체크하여 외부에 생성되어진 요소를 제거한다. 또한, 절점패턴의 접합부와 경계근방에서는 간혹 찌그러진 요소가 생성되어지는 경우가 있으므로 라플라시안(Laplacian) 평활화[11] 수법을 도입하여 요소형상을 수정하게 된다.

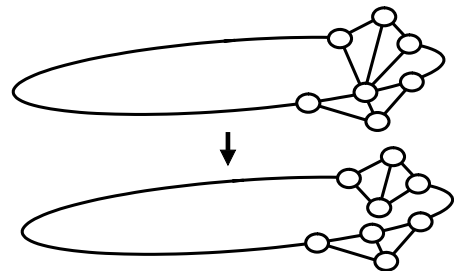
### 2.3 3D 균열의 도입

3차원 균열면은 x-y평면에 평행으로 반타원 형상이라고 가정하면, 본 시스템에서는 요소생성법으로서 데라우니법을 이용하고 있다. 그러나 데라우니법은 요소가 생성되어진 절점분포에 의해 임의로 분할되기 때문에 균열면의 상하에 위치하는 절점을 연결하지 않도록 절점분포를 미리 조정할 필요가 있다. 그래서, 타원체로서 균열의 토폴로지의 유사성에 착안하여 타원체를 도려내는 균열도입법을 제안하고자 한다. 구체적으로는 구조물의 형상을 정의할 때, 균열을 넣고 싶은 위치에 타원체를 도려냄으로써 균열부의 상하면을 연결하지 않도록 하면 된다. 요소가 생성된 후, Fig. 3에서 보는 바와 같이 절점좌표를 z방향으로 이동한 타원체를 찌부러뜨리는 것에 의해 균열부의 표현을 실현 가능케 하여준다. 여기서  $r_x$ 는 균열의 장반경,  $r_y$ 는 균열의 깊이,  $r_z$ 는 타원체의 z방향으로의 반경이다. 또한, 2.1항에서 입력한 타원체로부터 타원을 생성할 때 필요한 h는 절점을 이동하는 범위를 나타내는 파라미터이다. 사용자는 솔리드모델러를 이용하여 형상을 정의할 때 균열중심부의 위치 및 위의  $r_x, r_y, r_z, h$ 를 입력하는 것으로 원하는 균열을 표현할 수 있다.



[Fig. 3] Mapping of an ellipsoid

파라미터를 입력한 후에는 균열은 자동으로 생성되어 지나 본 자동해석 시스템내에는 다음과 같은 3가지 처리가 행하여 진다. 우선, 타원체표면에 있는 점이 Fig. 2에서 보는 바와 같은 부적절한 요소로 결합되는 경우가 있다. 이는 2.2항에서도 설명하였듯이 요소중심에 대하여 내외판정을 하여 외부에 있는 요소는 없어지지만, Fig. 4는 요소중심이 모델의 내측에 있기 때문에 그대로 남아 있는 상태를 보여주고 있다. 이러한 경우에는 타원체를 찌부러뜨리기 전에 이러한 결합을 없애는 절점 첨가 알고리즘[5]을 도입하였다. 두 번째로 절점 이동과 더불어 요소가 변형되어 체적이 0에 가깝거나 마이너스로 되는 경우가 있다. 이러한 경우에는 타원체를 타원으로 변환시킨 후에 균열형상을 벗어나지 않도록 1개의 절점을 상하에 추가시켜 체적을 회복시키고 있다.



[Fig. 4] Example of mis-match elements

### 3. 응력확대계수 및 시스템의 검증

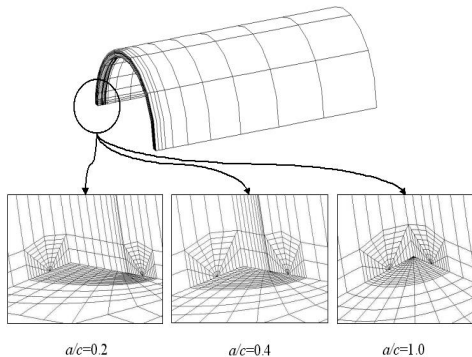
#### 3.1 유한요소모델

시스템의 효율성을 검증하기 위하여 내압을 받는 원통형용기 내벽에 표면균열이 존재하는 경우에 대해 해석을 수행하였다. 용기의 내경은 2,500mm, 벽두께는 249mm로 설정하고 재료물성치의 탄성계수 E는 200 GPa, 포아송의 비 ν는 0.3이다. 유한요소해석은 원통형용기의 벽두께와 원통형용기의 내벽에 존재하는 균열의 깊이비(a/t)와 형상비(a/c)를 변수로 총 9가지의 경우에 대해 수행하였으며 각 모델의 기하학적 형상은 Table 2에 나타내었다.

[Table 2] Finite element analysis matrix

R	t	a	c	t/R	a/t	a/c
2500	249	49.80	249.00	0.10	0.20	0.20
2500	249	49.80	124.50	0.10	0.20	0.40
2500	249	49.80	49.80	0.10	0.20	1.00
2500	249	124.50	622.50	0.10	0.50	0.20
2500	249	124.50	311.25	0.10	0.50	0.40
2500	249	124.50	124.50	0.10	0.50	1.00
2500	625	25.00	125.00	0.25	0.20	0.20
2500	625	25.00	62.50	0.25	0.20	0.40
2500	625	25.00	25.00	0.25	0.20	1.00

원통형용기의 내부에 축방향 표면균열이 존재하고 축방향으로 대칭인 하중이 작용하는 경우, 실제모델은 전체 구조물과 하중조건을 대칭성을 고려하여 Fig. 6과 같이 1/4로 단순화하여 모델링하였다. Fig. 5는 결함부를 확대된 것으로 1/4 절점 요소(quarter-point element)를 사용하여 집중요소망(focused mesh)으로 구성하였다. 확대된 3개의 그림은 각각 a/c = 0.2, a/c = 0.4, a/c = 1.0에 대한 균열부분 요소망의 예이다.



[Fig. 5] Three dimensional mesh for finite element analysis

하중조건은 원자력발전소의 정상가동조건에서의 내압

인 15.8 MPa로 가정하였으며, 원통형용기의 내벽에 압력을 가하고 내압으로 인해 발생하는 축력을 단면에 작용시켜 축방향으로 인장력을 가하였다. 경계조건은 형상에서 주어진 대칭면을 따라 각각의 면은 고정 경계조건으로 설정하였으며, 균열전단의 노드는 구속되어 있다.

#### 3.2 ASME Section XI 식[2]

ASME Section XI에서는 내부결함과 표면결함에 대한 응력확대계수 계산식을 제시하였다. 응력확대계수 계산에는 결함표면(x/a=0)에서부터 균열의 최심점(x/a=1)까지의 응력분포가 사용된다. 이때 응력분포는 균열이 없는 구조물에 대한 동일한 하중조건에 의하여 발생한 벽두께 방향으로의 응력변화를 3차 다항식형태로 이상화하여 사용된다. 응력분포식은 다음과 같다.

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \quad (1)$$

여기서, x : 내벽으로부터의 거리

A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> : 응력분포식의 계수

이다.

응력분포가 결정되면 표면균열에 대한 응력확대계수는 식 (1)의 상수 A<sub>0</sub>-A<sub>3</sub>을 이용하여 다음 식 (2)에 따라 계산한다.

$$K_I = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (2)$$

여기서

A<sub>p</sub> : 균열면에 대한 작용압력

G<sub>0</sub>, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub> : 자유표면수정계수

Q : 결함형상 매계변수

이다.

결함형상매계변수 Q는 다음과 같다.

$$Q = 1 + 4.593 \left( \frac{a}{2c} \right)^{1.65} - q_y \quad (3)$$

여기서

2c : 결함길이

a/2c : 결함비

q<sub>y</sub> : 소성역 보정계수

이다.

이때 소성역 보정계수는 식 (4)와 같다.

$$q_y = [A_0G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3/\sigma_{ys}]^2/6 \quad (4)$$

식 (2)는 평판에 대한 응력확대계수 계산식인 Shiratori

식[12]에 원통형 용기에 대한 Raju- Newman의 유한요소 해석 해[13]를 고려하여 작성한 것이다. 식 (2) 중  $A_p$ 는 표면균열의 균열면에 내압이 작용하는 상태를 고려한 항이며,  $G_0, G_1, G_2, G_3$  는 ASME Section XI에 균열깊이에 대한 두께비를 매개변수로 테이블 형태로 제시되어 있다.

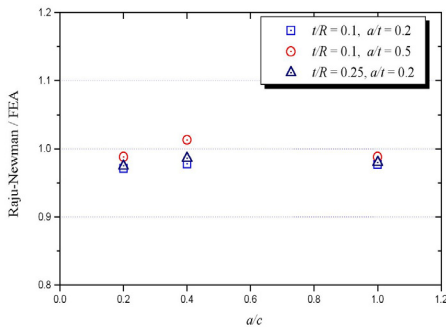
### 3.3 해석결과

원통형용기의 균열평가에는 표면균열의 두께방향으로의 진전여부가 주요평가 대상이므로 균열의 최심점에서의 응력확대계수 값을 Raju-Newman 식과 ASME Section XI에 의한 계산결과와 비교하였다.

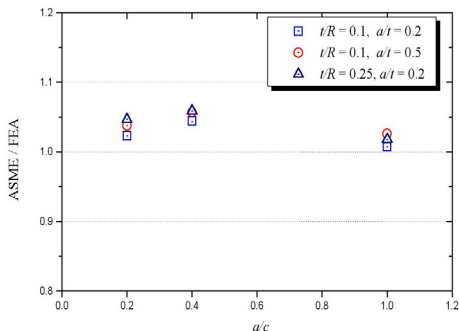
Fig. 6은 자동 요소망 생성 프로그램으로 작성한 유한요소모형을 이용하여 해석한 결과와 Raju- Newman 식을 이용하여 계산한 응력확대계수 값을 비교한 것으로, 비교 결과와 3%이내의 차이를 보였다.

Fig. 7은 자동 요소망 생성 프로그램으로 작성한 유한요소모형을 이용하여 해석한 결과와 ASME Section XI 식을 이용하여 계산한 응력확대계수 값을 비교한 것으로, 비교 결과와 5%이내의 차이를 보였다.

Raju와 Newman 식과 ASME Section XI 식에 의한 응력확대계수는 개발된 시스템에 의한 해석결과와 잘 일치하였다.



[Fig. 6] Comparison of stress intensity factor between Raju-Newman and FEA



[Fig. 7] Comparison of stress intensity factor between ASME and FEA

## 4. 결론

본 연구에서는 원통형용기에 존재하는 3차원 표면균열에 대한 응력확대계수 해석을 위하여, 해석코드와 연계된 해석시스템을 개발하였다. 개발된 시스템을 이용하여 내압을 받는 원통형용기의 균열에 대한 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 균열이 존재하는 구조물에 대한 자동 요소생성 모듈을 개발하여 통합하였다. Windows 환경을 기반으로 Visual C++를 사용하여 손쉽게 유한요소모형을 생성할 수 있도록 개발되었다.
2. 개발된 시스템을 이용한 응력확대계수 값과 다른 공학적 해석방법을 이용하여 구한 응력확대계수 값은 잘 일치하였다.
3. 균열의 깊이비가 감소할수록 응력확대계수 값은 증가하였다.
4. 균열의 깊이비가 일정할 때, 균열의 두께비가 감소할수록 응력확대계수 값은 증가하였다.

## References

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, "Rules for Construction of Nuclear Plant Components," 1995.
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, "Rules for In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components," 1995.
- [3] S.L. Kwak, J.S. Lee, Y.J. Kim and Y.W. Park, "Probabilistic Integrity Assessment of Axial Flaw in CANDU Pressure Tube Due to the Diameter and Thickness Variation," Fitness for Service Evaluation and Non-Linear Analysis, *Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, PVP Vol. 442, pp. 111-118, 2006.
- [4] Y.J. Choi, J.S. Lee, Y.J. Yoo, "Fracture Analysis for Ceramic Disk with Semi-Elliptical Crack and Pore", *Proceedings of KSPE 2012 Spring Conference*, pp. 957-958, 2012.
- [5] J.S. Lee, "Automated CAE System for Three-Dimensional Complex Geometry", Doctoral Thesis, The University of Tokyo, 1995.
- [6] B.K. Bae and J.S. Lee, "Domain Decomposition Method for Elasto-Plastic Problem," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 12, No.

- 8, pp. 3284-3390, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.8.3384>
- [7] J.S. Lee, "Integrity Evaluation for 3D Cracked Structures(I)," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 8, pp. 3295-3300, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.8.3295>
- [8] J.S. Park, "Finite Element Analysis with ANSYS", Info-Tech Korea, 2011.
- [9] T. Asano, "Practical Use of Bucketing Techniques in Computational Geometry," *Computational Geometry*, North-Holland, pp. 153-195, 1995.
- [10] Watson, D. F., "Computing the n-Dimensional Delaunay Tessellation with Application to Voronoi Polytopes," *The Computer Journal*, Vol. 24, pp. 162-172, 1991.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/24.2.167>
- [11] J.C. Cavendish, D.A. Field and W.H. Frey., "An approach to Automatic Three-Dimensional Finite Element Mesh Generation," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 21, pp. 329-347, 1985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/nme.1620210210>
- [12] Shiratori, M., "Analysis of Stress Intensity Factors for Surface Cracks subjected to Arbitrary Distributed Stresses," *Bulletin of the Faculty of Engineering, Yokohama National University*, Vol. 35, 1996.
- [13] Raju, I.S. and Newman, J.C., "Stress Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessel," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 104, pp. 293-298, 1982.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3264220>
- 

이 준 성(Joon-Seong Lee)

[정회원]



- 1988년 2월 : 성균관대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 9월 : 동경대학교 (공학박사)
- 1988년 7월 ~ 1991년 7월 : 육군사관학교 교수부 기계공학과 교수
- 1996년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 기계시스템공학과 교수

<관심분야>

최적설계, Neural Network, 구조물 수명평가