

퍼지메쉬를 이용한 3차원 균열에 대한 응력확대계수 해석 시스템

Stress Intensity Factor Analysis System for 3D Cracks Using Fuzzy Mesh

이준성* · 이은철** · 최윤종** · 이양창***

Joon-Seong Lee*, Eun-Chul Lee**, Yoon-Jong Choi** and Yang-Chang Lee

* 경기대학교 기계시스템디자인공학부

** 경기대학교 대학원 기계공학과

*** 대림대학 산학협력팀

요 약

상용화된 FEM코드와 3차원 솔리드 모델러를 통합하여 3차원 균열에 대한 자동 응력확대계수 해석 시스템을 개발하였다. 하나 또는 몇 개의 3차원 균열을 포함하는 기하학적 모델을 정의한다. 시스템에 저장된 몇 개의 절점패턴을 선택하면 자동적으로 퍼지지식 처리기법을 이용한 기하학적 모델 전 영역에 절점들이 중첩되어진다. 절점들은 생성되어지고 테로우니삼각화 법에 의한 사면체 솔리드요소가 생성되어진다. 최종적으로 완전한 유한요소 모델이 생성되어져 응력해석을 수행하게 된다. 본 논문은 몇몇 함수들을 실현시키기 위한 방법론에 대해 묘사하고 있으며 시스템의 타당성을 제시하였다.

키워드 : 응력확대계수, 표면균열, 유한요소해석, 퍼지이론, 자동요소생성법, 테로우니삼각화

Abstract

Integrating a 3D solid modeler with a general purpose FEM code, an automatic stress intensity factor analysis system of the 3D crack problems has been developed. A geometry model, i.e. a solid containing one or several 3D cracks is defined. Several distributions of local node density are chosen, and then automatically superposed on one another over the geometry model by using the fuzzy knowledge processing. Nodes are generated and quadratic tetrahedral solid elements are generated by the Delaunay triangulation techniques. Finally, the complete finite element(FE) model generated, and a stress analysis is performed. This paper describes the methodologies to realize such functions, and demonstrates the validity of the present system.

Key Words : Stress Intensity Factor, Surface Crack, Finite Element Analysis, Fuzzy Theory, Automatic Mesh Generation Method,, Delaunay Triangulation

1. 서 론

3차원 표면균열은 실제 구조물에 존재하는 가장 일반적인 결함중의 하나이다. 결함이 존재하는 구조물에 대한 강도평가를 위하여 파괴역학의 도입은 재료를 더욱 안전하게 사용하고, 파괴를 사전에 방지하는데 커다란 진전을 가져오게 하였다. 초기의 연구는 구조물에 존재하는 결함의 대부분을 관통균열(through crack)이라 가정하여 주로 2차원적으로 해석하여 왔다. 그러나 하중을 받는 실제 구조물에서의 피로균열 전파는 표면균열 또는 부분관통균열(part-through crack)

이라 불리우는 3차원 특성을 지닌 균열형태로부터 시작되다는 사실이 알려져 왔다 [1]. 그런데 구조물에 존재하는 균열 문제를 파괴역학적으로 해석하기 위해서는, 먼저 균열을 진전시키는 힘(crack driving force)인 응력확대계수(stress intensity factor : S.I.F.)인 K 값을 결정하여야 하며, 응력확대계수와 균열의 진전속도(crack propagation rate)를 연관 지음으로써 구조물의 수명예측이 가능해진다.

3차원 균열의 정확한 K 해석을 위하여 3차원 유한요소 해석(finite element analysis: FEA)이 필요하다. 유한요소법(FEM)은 구조물 변형, 열전도, 유체역학, 전자기학 등과 같은 여러 공학적인 문제를 시뮬레이션하는데 널리 사용되고 있다. 그 주된 이유로 임의의 형상에 경계치 문제를 다루는 능력을 갖고 있기 때문이다. 그런데 FEA를 수행하기 위해서는 소요되는 시간뿐만 아니라 계산의 정확도에 요소(mesh)가 중요한 영향을 미치고 있다. 따라서 여러 연구자들에 의해 자동으로 요소를 생성하는 기법이 연구되어 왔다 [2-5]. 발표된 연구결과들은 2차원 또는 3차원 형상에 대한 요소생

접수일자 : 2007년 11월 20일

완료일자 : 2007년 12월 7일

감사의 글 : 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2004-000-10469-0)지원으로 수행되었기에 관계자 여러분께 감사드립니다.

성 기술에 대한 내용이 대부분이다. 현존하는 요소생성법에 관한 여러 기술은 실제문제에 적용시킬 경우 제한 조건이 많고, 특히 구조물의 3차원 균열문제를 적용시킬 경우에는 적절히 지원되지 못하는 것으로 보고되었다 [6]. 3차원 균열해석에서는 대규모 해석이 되기 쉽고 막대한 계산기 파워를 필요로 한다. 또한 응력 특이장인 균열선단 근방에서는 특수한 요소분할이 요구되고 있기 때문에 3차원 해석을 위한 요소분할 및 입력데이터의 작성에 방대한 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 최소한의 조작을 통한 대규모 유한요소모델을 자동적이면서도 고속으로 생성시키는 알고리즘이 필요하다. 저자들 중의 일부는 지금까지 대규모 해석의 효율화를 큰 목표로, 3차원 솔리드모델러를 이용하여 구조물의 형상정의 및 하중, 경계조건 등을 입력한 후, 이들 정보로부터 요소의 자동생성 시스템을 개발 한 바 있다 [7]. 그러나 종래의 시스템은 구조물에 존재하는 균열에 대한 해석보다는 임의의 형상에 대한 요소분할에 초점을 맞춘 내용이었다. 그래서 본 연구에서는 3차원 균열이 존재하는 경우에 대해서도 최소한의 조작만으로 퍼지메쉬를 이용하여 유한 요소모델을 자동으로 생성한 후, K해석을 수행 가능하도록 하였다.

2. 시스템의 개요

균열을 포함하는 기하모델에 대해 간단하고 손쉬운 조작을 행하므로써, 요소 사이즈가 제어된 수만 혹은 수십만 절점의 대규모 유한요소 모델을 완전히 자동적으로 생성 가능토록 하였다. 본 시스템의 처리는 (a) 형상(기하모델) 정의, (b) 균열의 형상정의 및 등록, (c) 기하모델에 대한 경계조건 및 재료물성치의 지정, (d) 절점밀도 정보의 지정, (e) 절점발생, (f) 요소생성 및 스무딩(smoothing), (g) 요소에의 경계조건 및 재료물성치 부가, (h) FE 해석, (i) 파괴역학 파라미터 K값의 산출 등으로 이루어진다. 이 가운데 (a)~(d)는 사용자가 기하모델에 대하여 직접 행하는 대화형 작업이고, 다른 나머지는 전부 자동적으로 처리되는 작업이다.

2.1 형상 정의

기하모델은 유리 Bezier곡면 및 유리 Gregory패치 등의 자유곡면의 표현이 가능하고, 형상처리를 위한 라이브러리 함수를 풍부하게 갖고 있는 솔리드모델러 [8]의 기하모델정의 기능을 이용하였다. 이 이후의 처리에서는 라이브러리 함수를 이용하는 것에 의해 형상데이터에 관한 필요한 정보를 얻을 수 있다.

2.2 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 수 만큼 입력한다.

2.3 기하모델에의 경계조건 및 재료물성치 입력

기하모델을 구성하는 정점(vertex), 능선(edge), 면(loop) 등을 마우스로 클릭함으로써 지정한다. 또한 지정되어진 기하모델의 구성요소에 부가하는 경계조건의 종류와 수치를 입

력한다.

2.4 절점밀도 정보 지정

절점밀도는 a) 국부적인 응력집중에 대응하는 분포, b) 일부 유한 영역내를 일정하게 분할하는 분포, c) 전 영역을 일정하게 분할하는 분포 등 복수의 절점밀도 분포 함수를 미리 시스템의 내부에 준비하고 있다. 결과적으로는 사용자가 해석대상에 따라 이들을 선택하고, 그 위치를 지정하면 퍼지이론에 의해 자동적으로 기하모델의 전 영역에 걸친 절점밀도 분포가 계산되어 진다 [9].

2.5 절점 및 요소생성

위에서 해석영역 전체의 절점밀도 분포를 구한 후에는 계산 기하학적 수법의 하나인 버킷(bucket)법 [10]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 삼각화법 [11]을 이용하여 4면체 요소를 고속으로 생성하게 된다. 이 데라우니법을 이용할 경우 뾰족한 기하모델은 형상외부에도 요소가 생성되어지게 되므로 요소의 중심으로 내의 판정을 체크하여 외부에 생성되어진 요소를 제거한다. 또한, 절점패턴의 집합부와 경계근방에서는 간혹 찌그러진 요소가 생성되어지는 경우가 있으므로 라플라시안(Laplacian) 평활화 [12] 수법을 도입하여 요소형상을 수정하게 된다.

2.6 요소에의 경계조건 및 물성치 부가

본 시스템에서는 생성되어진 요소 및 절점이 각각 소속된 원래의 형상요소(정점, 능선, 면)를 정보로서 보전하는 데이터구조로 되어 있다. 그래서 2.3항의 작업에서 사용자에게 의해 형상모델에 직접 지정된 경계조건 및 재료물성치는 요소가 생성되어진 직후에 자동적으로 요소의 정점(절점), 변, 면, 내부에 할당되어 진다. 결과적으로 유한요소 해석코드의 입력화일인 유한요소모델(요소+재료물성치+경계조건)이 자동적으로 생성되어 진다.

3. 3D 균열의 도입 및 퍼지메쉬

3.1 3D 균열

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, 그림 1에서 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, 2.2항에서 입력한 타원체로부터 타원을 생성할 때 필요한 h는 절점을 이동하는 범위를 나타내는 파

라미터이다. 사용자는 솔리드모델러를 이용하여 형상을 정의할 때 균열중심부의 위치 및 위의 r_x, r_y, r_z, h 만을 입력하는 것으로 원하는 균열을 표현할 수 있다.

파라미터를 입력한 후에는 균열은 자동으로 생성되어지나 본 자동해석 시스템내에는 다음과 같은 3가지 처리가 행하여진다. 우선, 타원체표면에 있는 점이 그림 2에서 보는 바와 같은 부적절한 요소로 결합되는 경우가 있다. 이는 2.5항에서도 설명하였듯이 요소중심에 대하여 내외관정을 하여 외부에 있는 요소는 없어지지만, 그림 2는 요소중심이 모델의 내측에 있기 때문에 그대로 남아있는 상태를 보여주고 있다. 이러한 경우에는 타원체를 찌부러뜨리기 전에 이러한 결합을 없애는 절점 첨가 알고리즘 [9]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.

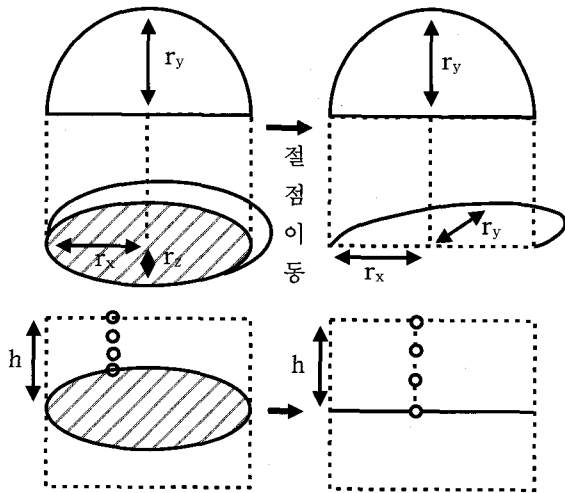


그림 1. 타원체의 맵핑.
Fig. 1. Mapping of an ellipsoid.

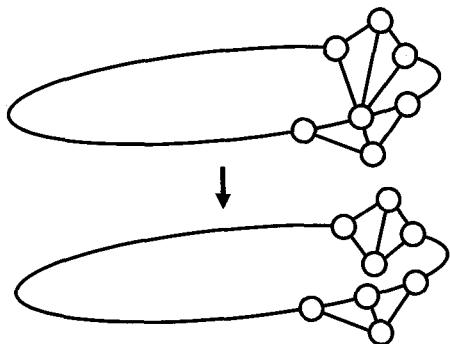


그림 2. 잘못 결합된 요소의 예.
Fig. 2. Example of mis-match elements.

3.2 퍼지메쉬

3차원 균열선단 근방에서는 특수한 요소분할이 요구되어지기 때문에 세심한 주의를 요할 필요가 있다. 본 시스템에서는 다음과 같은 퍼지규칙을 적용하였다.

RULEi : IF p is Ai , THEN q is Bi

여기서 RULEi는 i번째 퍼지규칙이고, Ai와 Bi는 퍼지변수이다. 이들의 퍼지변수는 그림 3과 같이 정의될 수 있다. 이들 변수에 대해서는 그림 4와 같은 사다리꼴 멤버쉽함수가 사용되었다. 또한 사용자입장에서 필요로 하는 절점패턴, 즉 응력집중이 예상되어지는 균열과 홀(hole)에 대한 절점패턴의 예를 그림 5에 나타내었다.

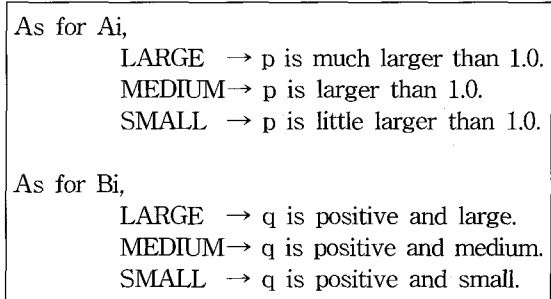


그림 3. 퍼지변수의 정의.
Fig. 3. Definition of fuzzy variables.

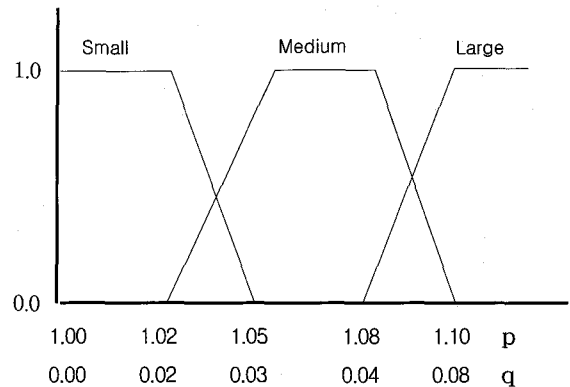


그림 4. Ai(p)와 Bi(q)의 멤버쉽 함수.
Fig. 4. Membership functions of labels of Ai(p) and Bi(q).

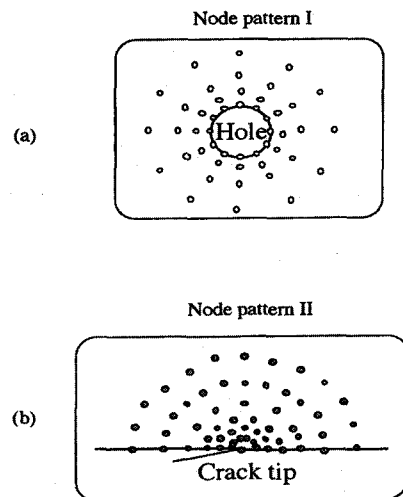


그림 5. 균열과 hole에 대한 절점패턴의 예.
Fig. 5. Examples of locally-optimum node patterns for a crack and a hole.

그림 6과 그림 7은 평판과 원통형구조물에 대칭으로 존재하는 반타원형 표면균열의 1/4모델에 대한 요소분할 예를 각각 나타낸 것이다.

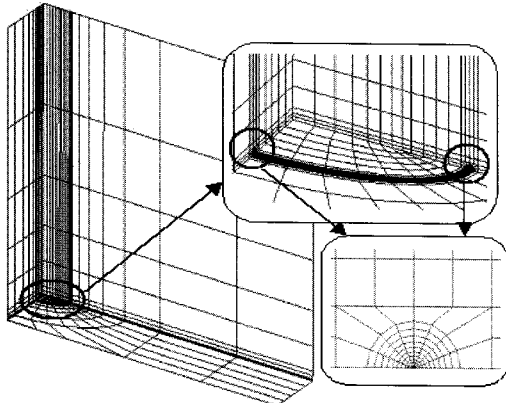


그림 6. 균열에 대한 국부적인 최적의 요소생성에 대한 예.

Fig. 6. Examples of locally-optimum mesh generation for a crack.

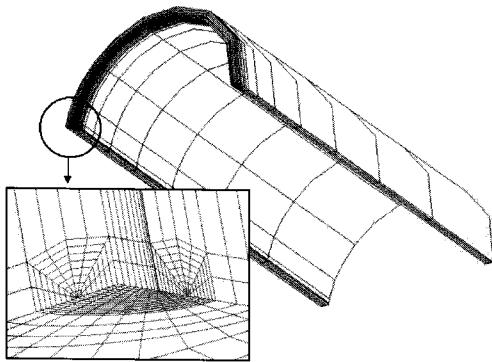
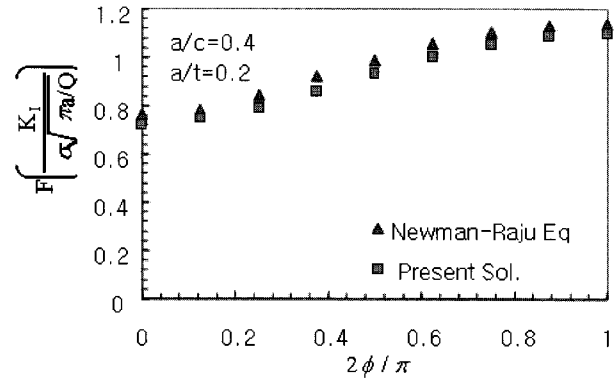


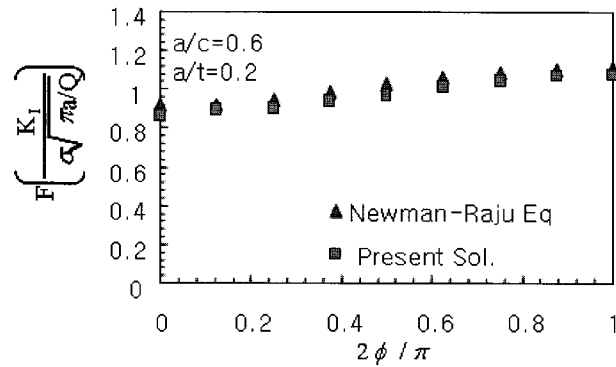
그림 7. 원통형구조물에 대한 요소생성 예.

Fig. 7. Examples of mesh generation for cylindrical structures.

판에 균열깊이(a)와 표면 반길이(c)의 형상비 $a/c=0.4, 0.6$, $a/t=0.2$ 인 반타원 표면균열이 존재하는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 탄성계수 E값과 포아송의 비는 각각 200 GPa, 0.3을 사용하였다. 또한, 이때 사용된 유한요소 모델은 그림 6과 같으며, 사용된 요소 수는 3160개, 절점 수는 6,024개이다. 본 시스템에서 구한 응력확대계수 K값을 Raju-Newman의 식 [14]으로 구할 수 있는 무차원화 시킨 값(F)과 비교하여 그림 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 3%이내에서 일치함을 알 수 있었다.



(a) $a/c=0.4, a/t=0.2$



(b) $a/c=0.6, a/t=0.2$

그림 8. 균열선단부분에서의 응력확대계수.

Fig. 8. S.I.F dependence on crack front position.

4. 응력확대계수 및 시스템의 검증

4.1 응력확대계수

응력확대계수는 해석에 필요한 유한요소모델이 생성되어 지면 범용 코드인 ABAQUS프로그램 [13]과 연계되어 응력 해석을 수행하게 된다. 균열형상에 대한 응력확대계수(S.I.F. K)는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a / Q} F(a/c, \phi, a/t) \quad (1)$$

여기서 Q는 완전타원 적분 값으로 식 (2)와 같다.

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad (2)$$

4.2 시스템 검증

시스템의 효용성을 검증하기 위하여 인정하증을 받는 평

5. 결 론

본 연구에서는 해석자로 하여금 최소한의 대화적 조작만으로 퍼지메쉬를 이용하여 3차원 균열에 대한 응력확대계수를 손쉽게 구할 수 있는 시스템을 구성하였다. 특히 임의의 위치에 존재하는 3차원 균열의 도입기능과 해석기능을 추가함으로써 해석을 위한 일련의 입력으로부터 출력까지 수행하는 자동화시스템을 구축하였다. 또한, 본 시스템의 효용성을 확인하기 위해 반타원형 표면균열이 존재하는 평판에 대한 해석을 수행하여 Raju-Newman식의 결과와 서로 비교하였으며 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

- [1] Irwin, G. R., "Introduction for Part-Through Crack Fatigue Life Prediction," *ASTM 687*, pp. 11-12, 1999.
- [2] Schroeder, W.J. and Shephard, M.S., "Combined Octree/ Delaunay Method for Fully Automatic 3-D Mesh Generation," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 29, pp. 37-55, 1990.
- [3] Pourazady, M. and Radhakrishnan, M., "Optimization of a Triangular Mesh," *Computers and Structures*, Vol. 40, No. 3, pp. 795-804, 1991.
- [4] Buratynski, E. K., "Fully Automatic Three-Dimensional Mesh Generator for Complex Geometries," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 30, pp. 931-952, 1990.
- [5] Shephard, M. S. and Georges, M. K., "Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Finite Octree Technique," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 32, pp. 709-749, 1991.
- [6] Sugioka, K., Lee, J. S., Yoshimura, S. and Yagawa, G., "A Probabilistic Fracture Mechanics Analysis of Multiple Surface Cracks Considering their Interaction Effects," *Proceedings of the '94 Annual Meeting of JSME/MMD*, No. 940-37, pp. 257-258, 1994.
- [7] Yoshimura, S., Lee, J. S. and Yagawa, G., "FEM Modeler for 3D Solid Geometry with Free-Form Surface: Automatic Attachment of Boundary Conditions to 3D Mesh," *The 6th Computational Mechanics Conference*, No. 930-71, pp. 505-506, 1993.
- [8] Chiyokura, H., "Solid Modeling : Theory and Implementation," Addison -Wesley, 1988.
- [9] Lee, J. S., "Automated CAE System for Three-Dimensional Complex Geometry," *The Doctoral Thesis*, The University of Tokyo, 1995.
- [10] Asano, T., "Practical Use of Bucketing Techniques in Computational Geometry," *Computational Geometry*, North-Holland, pp. 153-195, 1985.
- [11] Watson, D. F., "Computing the n-Dimensional Delaunay Tessellation with Application to Voronoi Polytopes," *The Computer Journal*, Vol. 24, pp. 162-172, 1991.
- [12] Cavendish, J. C., "Automatic Triangulation of Arbitrary Planar Domains for the Finite Element Method," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 8, pp. 679-696, 1974.
- [13] Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., "ABAQUS User's Manual," 2007.
- [14] Newman, J. C. and Raju, I. S., "An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 15, pp. 185-192, 1981.

저 자 소 개



이준성(Lee, Joon-Seong)
 1888년 성균관대 대학원 기계공학과 석사
 1995년 동경대학교 공학박사
 1988~1991 육군사관학교 기계공학과 교수
 1996~현재 경기대학교 기계시스템디자인
 공학부 교수

관심분야 : 퍼지 이론, 신경회로망, 유전알고리즘
 Phone : 031-249-9813
 Fax : 031-244-6300
 E-mail : jslee1@kyonggi.ac.kr

이은철(Lee, Eun-Chul)
 2007년 경기대학교 기계공학과 학사
 2007년~현재 동 대학원 기계공학과 석사과정

관심분야 : 피로이론, 퍼지 이론, 신경회로망
 Phone : 031-249-9818
 E-mail : lec9853@hanmail.net



최윤종(Choi, Yoon-Jong)
 2000년 경기대학교 기계공학과 학사
 2002년 숭실대학교 기계공학과 석사
 2003년~현재 경기대학교 대학원 기계공학과
 박사과정

관심분야 : 신뢰성평가, 피로수명평가, 신경회로망
 Phone : 031-249-9810
 E-mail : nakhwa7@hanmail.net



이양창(Lee, Yang-Chang)
 2002년 경기대학교 기계공학과 석사
 2006년 경기대학교 기계공학과 박사

관심분야 : CAD/CAM, CNC머신, 신뢰성평가, 수명평가

Phone : 031-467-4734-9810
 E-mail : yclee@daelim.ac.kr