Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 14, No. 7 pp. 3121-3126, 2013

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.7.3121

원전 배관의 결함 평가를 위한 해석

이준성[1*]
[1]경기대학교 기계시스템공학과

Analysis for Defect Evaluation of Pipes in Nuclear Power Plant

Joon-Seong Lee[1*]
[1]**Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi University**

요 약 원전 배관의 건전성평가는 원자로 안전을 위해 중요하며 결함발견 시 반드시 건전성을 확보해야만 한다. 균열을 갖는 구조물에 대한 정확한 응력확대계수 해석과 균열성장속도는 파괴강도와 피로수명을 평가하는데 필요로 한다. 피로설계와 수명평가는 배관, 산업공장장비 등과 같은 구조물을 설계하는데 극히 중요하다. 응력확대계수를 이용한 균열간의 상호 간섭해석은 유한요소법으로 구하였다. 내압을 받는 원통형구조물의 경우 표면균열의 인접점에서 간섭이 가장 크게 일어남을 확인하였다. 또한, 반복하중 균열에 대해서는 균열 성장평가와 더불어 피로하중에 의한 균열진전을 예측하기 위한 피로해석을 수행하였다.

Abstract The integrity evaluation of pipes in nuclear power plant are essential for the safety of reactor vessel, and integrity must be assured when flaws are found. 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. Fatigue design and life assessment are the essential technologies to design the structures such as pipe, industrial plant equipment and so on. The effect of crack spacing on stress intensity factor K values was studied using three-dimensional finite element method (FEM). For the case of cylinder under internal pressure, a significant increase in K values observed at the deepest point of the surface crack. Also, this paper describes the fatigue analysis for cracked structures submitted to bending loads.

Key Words : Fatigue Analysis, Finite Element Analysis, Integrity Evaluation, Stress Intensity Factor

1. 서론

최근 발전소 또는 플랜트 주요기기와 이를 연결하는 배관계통에서는 환경적 요인인 침식부식 또는 유동 가속부식 등에 의하여 국부적인 두께감소 현상이 발견되고 있으며, 이러한 감육현상(wall-thinning phenomenon)은 구조물의 기기 건전성(integrity)을 저하시키고 잠재적인 사고발생 확률을 높이는 주요 원인으로 인식되고 있다[1]. 또한, 원자력발전소의 주요기기는 고온 고압의 가동조건하에서 안전성을 유지할 수 있도록 ASME Code[2]에 준하여 설계한다.

현재까지 여러 연구자들이 반타원형 표면균열에 대해 이론해석, 수치해석 및 실험해석 등을 통하여 응력확대계수에 대한 해석을 수행하였다. 특히, 압력용기난 배관계통과 같은 원통형 구조들은 항공산업이나 원자력 산업에서 널리 쓰이는 구조물의 형태로서, 이러한 구조물에 급격한 온도변화에 의해 혹은 환경의 영향으로 인하여 각종 형태의 표면균열이 발생하는 경우가 많게 된다. 그러나 균열간의 상호 간섭효과에 관한 연구는 수치해석상의 어려움 및 실험변수의 복잡성 때문에 실용적인 문제의

본 연구는 2012학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.
*Corresponding Author : Joon-Seong Lee(Kyonggi Univ.)
Tel: +82-31-249-9813 email: jslee1@kyonggi.ac.kr
Received April 05, 2013 Received (1st May 03, 2013, 2nd May 27, 2013) Accepted July 11, 2013

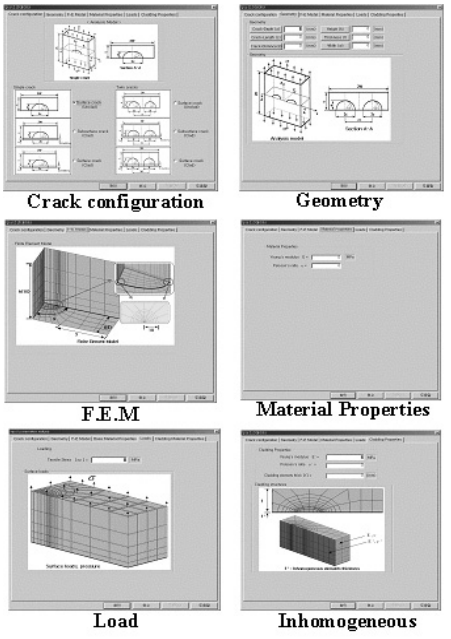
중요성에 비추어 볼 때 별로 발표된 바 없는 편이다.

본 연구에서는 배관의 결함평가를 위해 균열이 2개 존재하는 경우에 대하여 응력확대계수 해석을 통한 간섭작용을 해석해 보고자 한다. 또한 반복하중을 받는 구조물에 표면균열이 존재하는 경우, 균열성장평가와 더불어 피로해석을 수행하였다.

2. 해석 시스템

표면균열이 존재하는 3차원 유한요소망을 구성하려면 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 본 연구에는 3차원 균열에 대하여 FE해석을 위한 자동요소분할 및 해석에 필요한 모든 절차를 하나의 파일(Analysis File)로 생성해주는 프로그램을 작성하여, 3차원 균열에 대한 전체적인 해석 시스템을 구성하였다.

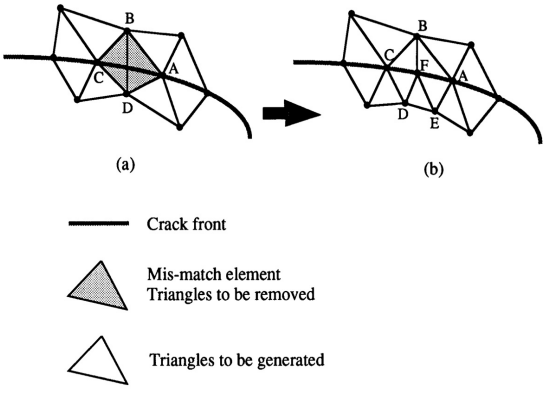
본 시스템은 균열의 형상, 재료물성치, 경계조건, 절점 및 요소의 구성에 필요한 사용자 입력부와 범용 해석코드인 ANSYS[3]를 이용한 해석부, 그리고 응력확대계수 값을 구해 나타내 주는 출력부로 구성되어 있다. 이와 같은 입력부의 실제구성을 Fig. 1에 나타내었다. 균열형상에 대한 창에서는 하나의 표면균열, 2개의 표면균열 존재하는 경우에 대해 각각 균질재료 및 비균질재료에 대해 선택할 수 있도록 하였다.



[Fig. 1] Formation of input screen

2.1 요소생성

기본적으로 데로우니 삼각화법[4]을 이용하여 요소생성을 하였다. 그러나 이러한 방법을 적용할 경우, Fig. 2와 같이 표면균열 선단을 가로지르는 잘못된 요소가 생성되어지게 되므로 이를 피하기 위해 Fig. 3과 같이 균열선단에 조밀한 절점을 발생시켜준다.



[Fig. 2] Technique of avoiding mis-match elements

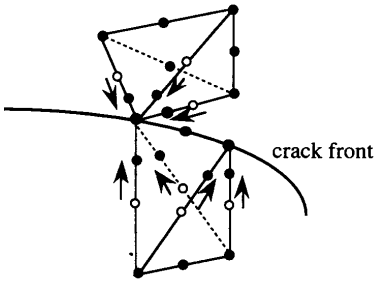
생성된 요소는 질적으로 좋지 않은 경우가 발생하므로 스무징 작업을 통해 절점의 일부를 재배치 할 필요가 있다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 주변 요소에 의해 이루어진 다각형의 중심에 내부절점이 위치하도록 절점을 재배치하는 방법인 Laplacian smoothing기법[5]을 이용하여 수정하게 된다. 이와 같은 절점의 위치를 수정하는 식은 다음과 같다.

$$P(i)=\frac{1}{2n}\sum_{n=1}^{n}[P(j)+P(k)] \quad (1)$$

여기서, i, j, k : 삼각형의 세 절점
n : 절점 주위의 요소개수
$P(i)$: 수정절점의 좌표
$P(j), P(k)$: 삼각형요소의 상대절점 좌표이다.

2.2 균열부위의 특이요소

응력확대계수를 계산하기 위해 Fig. 3과 같은 특이요소를 사용하였다[6]. 본 논문에서 사용된 특이요소는 사면체 요소의 중간절점을 1/4씩 이동시킨 것으로 유한요소 모델이 생성되는 단계에서 자동적으로 수행되어 진다.



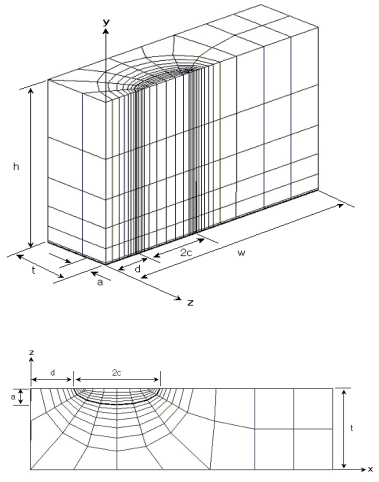
[Fig. 3] Singular element along crack front

3. 표면균열 해석

3.1 두 개의 표면균열

같은 크기의 반타원형 표면균열이 두 개 존재하는 경우에 대하여 응력확대계수를 해석하고, 두 개의 표면균열 간의 상호간섭 효과를 살펴보았다.

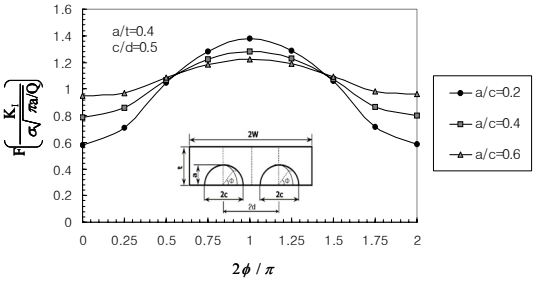
Fig. 4는 해석을 위한 유한요소모델링의 형상을 나타낸 것으로 전체의 1/4만 모델링하였다. 균열선단을 제외한 부분에서는 사면체요소를 육면체 요소로 변환하였으며 균열선단에서는 5면체요소로 모델링하였다. 특히 Fig. 4의 아래그림은 평면상에서의 요소들의 형상을 나타낸 것으로 균열선단에서는 응력특이성을 고려하여 특이요소를 사용하였다.



[Fig. 4] Finite element for twin surface crack

해석은 균열의 형상비(a/c)가 0.2, 0.4, 0.6과 균열의 깊이비(a/t)가 0.2, 0.4인 경우에 대하여 수행되었다. 또한, 두개의 표면균열의 상호간섭 효과를 살펴보기 위해 두 균열의 중심간 거리(2d)를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다.

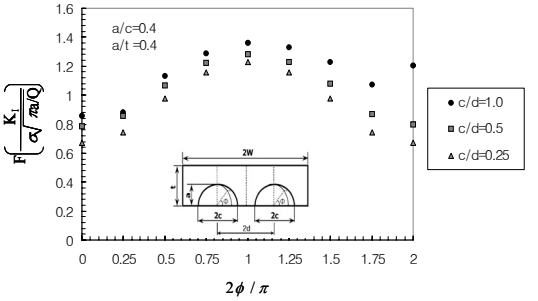
Fig. 5는 균열의 깊이비(a/t)가 0.4일 때, 균열의 표면길이 2c와 균열의 중심간 거리 2d를 일정하게 고정시키고, 균열깊이 a를 점차 증가시키면서 얻어진 해석결과를 나타낸 것이다. 균열의 깊이가 증가할수록 최대 깊이점에서의 응력확대계수는 점차 감소하는 경향을 보였으며, 두 개의 표면점에서는 응력확대계수 값이 증가함을 알 수 있었다.



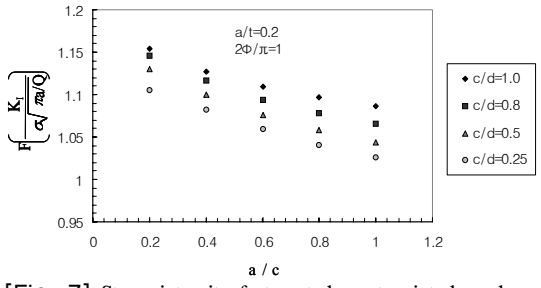
[Fig. 5] Stress intensity factor (c/d=0.5, a/t=0.4)

Fig. 6은 균열의 깊이비 a/t=0.4, 균열의 형상비 a/c=0.4에 대하여 균열사이의 거리를 변화시키면서 해석한 경우이다. 두 균열간의 거리가 가까워질수록 균열선단에 따른 응력확대계수 값은 크게 증가하는 것을 알 수 있었으며, 균열 사이의 거리비 c/d가 1.0인 경우에는 표면점에서의 응력확대계수가 상당히 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 두 표면균열간의 거리에 따른 상호간섭 효과는 두께가 얇을수록 응력확대계수에 더 큰 영향을 미치는 것을 파악할 수 있다.

Fig. 7은 균열의 깊이비가 0.2일 때, 균열사이의 거리 d를 변화시키면서 최심점에서의 응력확대계수 값을 나타낸 것이다. 균열의 형상비 a/c의 변화에 관계없이 균열사이의 거리 d가 작아질수록 최심점에서의 모든 응력확대계수 값들은 일정하게 커지는 것을 알 수 있다.



[Fig. 6] Stress intensity factor dependence on crack spacing c/d (a/c=0.4, a/t=0.4)



[Fig. 7] Stress intensity factor at deepest point dependence on crack spacing c/d (a/t=0.2)

4. 배관의 피로균열 해석

노치가 있는 배관에서의 균열개시 수명예측을 위해 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 노치부의 곡률반경, 노치길이, 변형률 범위 및 가공변화 효과의 고려방법을 변화시키면서 수행하였다.

배관은 중앙에 원주방향의 360°의 노치가 있는 형상으로 노치 및 배관의 형상을 Table 1에 나타내었다.

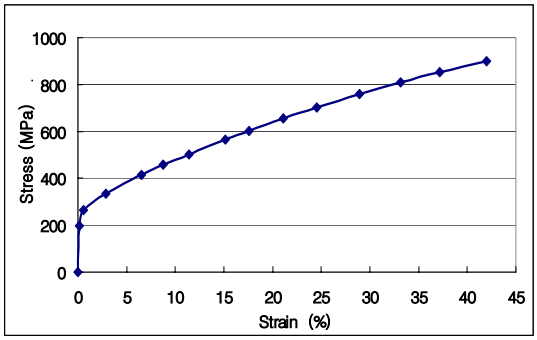
[Table 1] Details of input data

Inner radius (*mm*)	150.0
Outer radius (*mm*)	160.0
Wall thickness (*mm*)	6.0
Pipe length (*mm*)	700.0
Notch radius (μm)	less than 0.1
Notch angle (degree)	60
Notch depth (*mm*)	1.0
Notch direction	circumferential

하중은 배관에 4점 굽힘 반복하중을 작용하였으며, 균열개시 해석과 균열진전 해석에 따라 응력비를 달리 하였다. Table 2에 재료물성치를 나타내었으며, 진응력-변형률선도를 Fig. 8에 나타내었다.

[Table 2] Material properties

Young's Modulus (GPa)	188
Poisson's ratio	0.3
Yield Stress (MPa)	240
Ultimate Strength (MPa)	530



[Fig. 8] True stress-strain curve

원자력발전소의 주요기기에는 반복적으로 발생하는 과도상태(transient)에 의해 피로응력이 발생하여 응력집중부의 균열발생 및 진전을 유발한다. 이때 균열성장량의 계산은 식 (1)과 같이 주어지는 Paris 식[7]을 사용하였다.

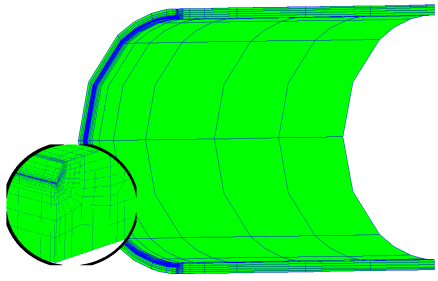
$$\frac{da}{dN} = C\,(\Delta K)^n \qquad (1)$$

여기서, da는 균열성장량, N은 평가기간 중 발생 가능한 과도상태의 반복횟수, ΔK는 응력확대계수 변화량, C와 n은 재료에 따라 결정되는 상수이다.

상온에서의 사이클릭 선도를 식 (2)에 나타냈으며 K=710, m=0.35, $\Delta\varepsilon$= strain range, $\Delta\sigma$= stress range 이다.

$$\Delta\epsilon(\%) = 100\frac{\Delta\sigma}{E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{m}} \qquad (2)$$

노치가 있는 배관에서의 균열개시 수명예측을 위해 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 피로하중 작용에 따른 가공경화 효과를 고려하기 위해 kinematic hardening 해석과 isotropic hardening 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 형상을 Fig. 9에 나타내었으며 대칭조건을 이용하여 1/4모델링을 하였다.



[Fig. 9] Finite element analysis model

Kinematic hardening 해석은 주어진 cyclic-curve를 같은 기울기의 곡선으로 이상화시킨 반면, isotropic hardening 해석은 식 (3)과 같은 조건에서 항복이 발생하도록 이상화시켰다.

$$f(\sigma) = \sigma^0(\epsilon^{pl}, T) \quad (3)$$

여기서 σ^0는 상당응력, ϵ^{pl}는 상당소성변형률, T는 온도이다.

Kinematic hardening 해석 시 피로하중 하의 항복강도는 0.2% offset 방법을 사용하여 결정하였으며, 변형률범위는 3%와 5%를 사용하였다. 노치반경에 대해서는 50, 75, 100 μ m에 대하여 해석하였다.

탄소성 유한요소해석 결과 4회의 반복하중 작용 이후 노치선단에서의 변형률 변화가 이전 반복하중에서의 값과 1%미만의 차이로 수렴하여 4회의 반복하중 시의 값을 사용하였다. 해석의 결과로 노치선단 및 리가멘트에서의 응력 및 변형률, 중앙에서 175 *mm* 되는 지점에서의 변형각, 평균응력을 계산하였다. Kinematic hardening 조건하에서 3%의 변형률 범위에 대한 해석에 대한 결과를 Table 3에 나타내었다. 노치선단에서의 응력과 변형률 변화는 1.8%로 균열개시수명은 750회로 나타났다.

[Table 3] Result of cyclic elastic-plastic FEA

Notch root radius (μm)	100	75	50
$\Delta\varepsilon$ (%)	1.80	2.20	260
σ_{mean} (*MPa*)	440	490	630
σ_{min} (*MPa*)	-241	-240	-220
σ_{max} (*MPa*)	1,120	1,215	1,425
β_{max} (Degree)	0.19		
Initiation cycle	750	480	250

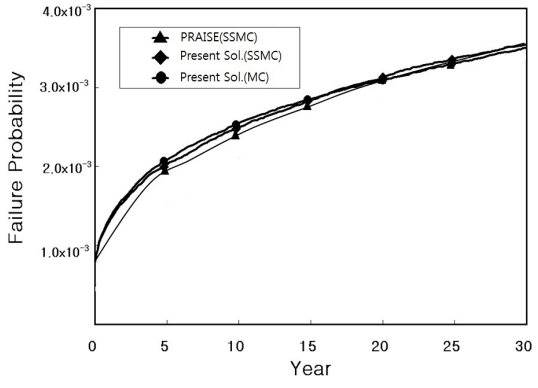
5. 배관의 소성붕괴 확률

원주방향 결함이 존재하는 배관의 가동기간에 따른 소성붕괴 확률을 계산하였다. 확률변수는 지수함수분포를 갖는 결함의 깊이비(a/t)와 결함형상비 역수(c/a)를 설정하였으며, 다른 주요입력 조건은 Table 4에 나타내었다. 파손기준으로는 소성붕괴 및 균열관통을 적용하였다[8].

[Table 4] Details of deterministic input data

pipe wall thickness (t)	4.0 mm
inner radius (R_i)	130.0 mm
inner pressure (P)	11 MPa
flow stress (σ_{flow})	280 MPa
loading cycle	5.0 cycle/year
Paris' law constant (C)	1.6×10^{-10}
Paris' law exponent (n)	4.0

일반 MC기법과 SSMC기법을 동시에 사용하였으며, 두 결과는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 일치하였다. MC기법에서는 시뮬레이션 수행횟수를 10^4에서 10^6까지 증가시켜 수렴하는 값을 이용하였으며, 10^5에서 파손확률이 수렴하였다. 또한 난수발생 시작점의 영향을 고려하여 5회의 반복 수행을 독립적으로 수행하여 평균값을 사용하여 그 결과를 나타내었다. 본 해석에서는 각 영역에 대해 1000회의 표본 추출을 수행하여, 각 영역의 발생확률 값을 고려하여 전체 파손확률을 계산하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있었다.



[Fig. 10] Comparison of failure probability

6. 결론

본 연구에서는 배관에 대한 결함평가를 위한 기본토대를 마련하기 위해 해석시스템을 개발하여 응력확대계수 평가 및 피로균열해석, 소성붕괴해석를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두 균열간의 거리가 가까워질수록 균열선단에 따른 응력확대계수 값은 크게 증가하였다. 균열 사이의

거리비 c/d가 1.0인 경우에는 표면점에서의 응력확대계수가 상당히 크게 증가하였다. 또한 두 표면균열간의 거리에 따른 상호간섭 효과는 두께가 얇을수록 응력확대계수에 더 큰 영향을 주었다.

2. 균열의 형상비 a/c의 변화에 관계없이 균열사이의 거리 d가 작아질수록 최심점에서의 모든 응력확대계수 값들은 일정하게 증가하였다.
3. 노치선단에 발생하는 큰 소성변형에 대한 영향을 보다 정확히 고려하기 위하여 탄소성 유한요소해석을 수행하여 균열개시수명을 결정하였다.
4. 차기버전에 등록될 확률론적 파괴역학해석을 위한 기본 검증사례로 배관의 소성붕괴확률에 대한 사례연구 수행결과, 상용코드에 의한 결과와 비교하여 잘 일치함을 알 수 있었다.

References

[1] USNRC, "Reactor Safety Study : An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants," WASH-1400, NUREG-75/014, 1975.

[2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, “Rules for In-Service Inspection of Neuclear Power Plant Components,” 1995.

[3] J.S. Park, “Finite Element Analysis with ANSYS”, Info-Tech Corea, 2011.

[4] J.S. Lee, “Automated CAE System for Three-Dimensional Complex Geometry,” *Doctoral Thesis*, 1995.

[5] 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

[6] J.S. Lee, “Integrity Evaluation for 3D Cracked Structures,” *J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 8, pp. 3295-3300, 2012.

[7] Paris, P. C. and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Trans. ASME, J. Basic Eng.* Ind., Vol. D85, 1963. DOI: http://dx.doi.org/10.1115/1.3656900

[8] J.S. Lee, S.L. Kwak and Y.J. Kim, “Application of Probabilistic Fracture Mechanics Technique Using Monte Carlo Simulation,” *Proceedings of KSPE 2001 Spring Conference*, pp. 667-670, 2001.

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, 자동요소생성기법