

핵 연료봉 중간 지지격자의 모달 해석 및 실험

Modal Analysis and Testing for a Middle Spacer Grid of a Nuclear Fuel Rod

류 봉 조* · 구 경 완†
(Bong-Jo Ryu · Kyung-Wan Koo)

Abstract - The paper presents modal testing and analysis in order to obtain the dynamic characteristics of a middle spacer grids of a nuclear fuel rod. A spacer grid is one of the important structural elements supporting nuclear fuel rods. Such a fuel rod can be oscillated by its thermal expansion, neutron irradiation and etc. due to cooling water flow under the operation of a nuclear power plant. When the fuel rod vibrates, fretting wear due to repeated friction motion between the fuel rods and spacer grids can be occurred, and so the fuel rod is damaged. In this paper, through modal analysis and testing, natural frequencies and modes of a middle spacer grid were calculated, and the following conclusions were obtained. Firstly the numerical first-seven natural frequencies for spacer grids of a fuel rod having complicated structures have a small difference within 3.8% with experimental natural frequencies, and so the suitability of simulation results was verified. Secondly, experimental mode shapes for a middle spacer grid of a nuclear fuel rod were verified by obtaining lower non-diagonal terms through MAC(Modal Assurance Criteria), and were confirmed by the simulation modes.

Key Words : Nuclear fuel rod, Middle spacer grid, Modal analysis and testing, Natural frequencies and modes, Frequency response function

1. 서 론

원자력 발전소의 핵 연료봉 지지격자는 연료봉의 간격을 일정하게 유지하고, 횡방향의 하중으로부터 연료봉의 동적 및 정적 안정성을 확보하는 구조물이다. 연료봉 내부는 농축된 우라늄 펠렛이 존재하며, 연료봉의 세장비는 매우 커서 횡 방향으로 매우 유연한 구조물이다. 축 방향으로 배열된 여러 개의 지지격자는 연료봉을 지지하여 연료봉의 횡 방향 건전성을 확보한다.

핵연료 집합체에 들어가는 기계적 구조부품 중에서 지지격자는 기계적 및 열·수력학적 측면에서 매우 중요한 기능을 가지고 있다. 지지격자는 핵연료 집합체에서 연료봉을 수평 및 수직방향으로 지지하며 일정한 간격을 유지시키고 집합체 취급시 원자로 내에서 연료봉의 축 방향 열팽창 및 반경방향의 조사 성장을 수용한다. 또한 냉각수의 흐름 상태를 일정하게 유지시켜 냉각제 흐름으로 인한 핵연료봉의 진동 손상 및 핵연료봉의 휨을 방지하는 역할을 한다.

지지격자의 구성은 인코넬 지지격자(Inconel spacer grid)와 지르칼로이 지지격자(Zircaloy spacer grid)의 조합으로 이루어지며 집합체 형태에 따라 구성이 달라진다. 지지격자는 핵 연료봉의 건전성을 확보하는데 중요한 역할을 하기 때문에, 이에 대한 명확한 동특성 해석의 검증이 이루어져

야 한다.

본 논문에서는 핵연료 집합체 요소 중의 하나인 중간 지지격자의 모달 시험과 해석을 통해, 중간지지격자의 동특성을 파악하고자 한다. 원자력 발전소의 핵 연료봉이나 지지격자에 관한 직접적인 연구는 그리 오래되지 않았으나, 초기에는 주로 일반적 파이프 구조물의 동적안정성과 진동문제라든지, 유체유발진동 등에 관한 연구가 주로 이루어져 왔다(Paidoussis, 1970 ; Sugiyama 등, 1985). 이러한 연구들과 더불어, 실제로 원자력 발전소의 핵연료봉과 노심지지물에 관한 연구(Song 등(1994))가 이루어져 왔는데, 이 연구에서 저자들은 노심 Barrel에 대한 실험적 모달해석 방법을 이용하였다. 또한, 원자로 핵 연료봉 진동문제나 지지격자의 설계 및 동특성 연구로서, Walton(1979)과 Larson(1982)이 지르칼로이 지지격자의 설계 또는 최적설계에 관한 연구를 하였다. 이러한 연구는 계속되어 윤경호 등(2001)과 송기남 등(2002)은 H-형상 지지격자 및 공리적 설계를 이용한 지지격자를 설계하였고, 지속적으로 지지격자의 형상개선을 위한 노력들이 이루어졌다(Lee 등, 2007). 위의 연구들은 주로 지지격자의 형상설계에 주로 관련된 연구들이 대부분인데, 최근 원자로 핵연료봉의 진동문제나 동특성 연구에 관한 관심이 증가됨으로써, 이에 관련된 연구들도 활발히 진행되어 왔다. 임승호 등(2010, 2011)은 일체형 원자로 내부 유동분배통의 동특성 해석과 유한요소 축소모델을 이용한 일체형 원자로 축소모형의 자유진동 해석을 통해, 원자로 냉각재의 부가질량 효과나 유체속에 잠겨있는 원자로 축소모형 모델에 대한 구조-유체 연성해석을 행하였다. 그러나, 원자로 핵 연료봉을 지지하는 지지격자에 대해, 모달 해석과 시험을 통한 명확한 검증은 현재까지 거의 이루어지지 않았다. 본 논문

* Dept. of Mechanical Eng., Hanbat Univ.

† Corresponding Author : Dep. of Defense Science & Tech. Hoseo Univ.

E-mail : alarmkoo@hoseo.edu

Received : October 16, 2012; Accepted : November 19, 2012

에서는 핵 연료봉 중간지지격자의 고유진동 특성에 대해 실험과 시뮬레이션을 병행하여, 해석의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 지지격자 해석 모델

본 연구의 원자로 핵연료봉 지지격자 해석 모델은 Fig. 1에 나타나 있으며, ANSYS Workbench 버전(version) 13.0을 이용하였다. 지지격자의 고유한 동특성을 얻기 위해 Solidworks 모델을 상용 ANSYS Package로 시뮬레이션을 행하였다.

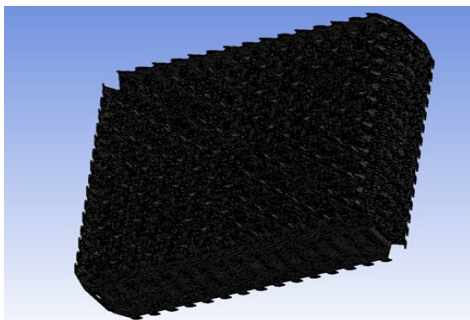


그림 1 연료봉의 중간지지격자에 대한 시뮬레이션 모델.
Fig. 1 Simulation model for a middle spacer grid of a fuel rod.

그림 1에서 보는 바와 같이 지지격자 자체가 복잡한 형상이므로 자유메쉬(free mesh) 기능을 이용하여 메쉬를 나누었으며, 경계조건은 자유단의 조건을 적용하였다. 또한, 중간 지지격자 재료의 물성치는 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1 연료봉 중간지지격자에 대한 재질 특성.

Table 1 Material properties for a middle spacer grid of a fuel rod.

Materials	Elastic modulus (Gpa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Zirconium	90	6,600	0.34

2.2 고유 모드형상과 고유진동수의 산출

ANSYS 시뮬레이션 모델에 의해 수행된 중간 지지격자의 모드 형상은 그림 2에 나타난 바와 같다. 시뮬레이션 모드형상은 1차부터 20차 모드까지 추출되었으나, 8차 모드 이상은 본 논문에는 나타내지 않았다. 이는 우주 구조물과 같은 대형구조물이 아닌 경우, 상당히 고차인 모드들에 대한 추출은 해석 상 큰 의미가 없다고 판단되었기 때문이다. 표

2는 시뮬레이션에 의한 중간 지지격자의 1차부터 7차까지의 고유진동수 값을 나타낸다.

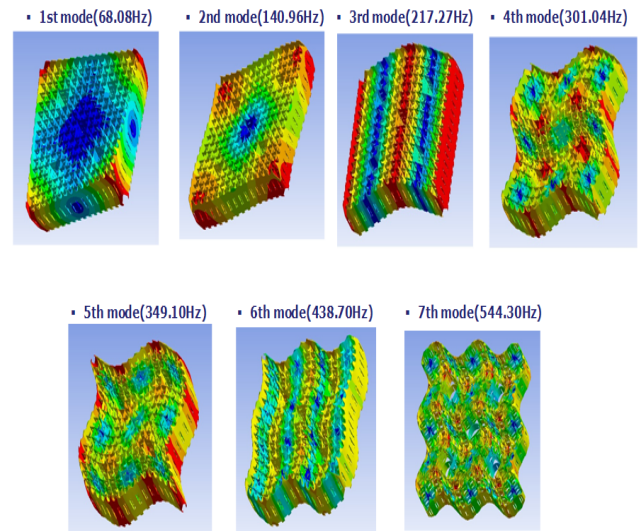


그림 2 연료봉의 중간지지격자에 대한 모드 형상.
Fig. 2 Mode shapes for a middle spacer grid of a fuel rod.

표 2 중간지지격자의 처음 7개 고유진동수.

Table 2 The first-seven natural frequencies for a middle spacer grid.

Modes	Natural frequencies (Hz)
1	68.08
2	140.96
3	217.27
4	301.04
5	349.1
6	438.7
7	544.3

2.3 중간 지지격자의 모달 시험(modal test)

2.3.1 실험장치

실험장치는 충격해머(impact hammer), 가속도계(accelerometer), LMS SCADAS Mobile과 소프트웨어로 구성되며, 이에 대한 사진들은 그림 3과 같다. 그림 3(a)는 입력신호 및 응답신호를 수집하는데 사용되며, 주파수 응답함수(Frequency Response Function), 응집성(Coherence), 모달 신뢰기준(Modal Assurance Criteria)을 추출하는데 이용된다. 충격해머는 PCB 086D05모델로 0.23(mV/N)의 민감도를 가지며, 측정범위는 22,240(pN)이다. 한편, 가속도계는 B&K Deltatron 4517이며, 주파수 범위는 1~20(kHz)이다.

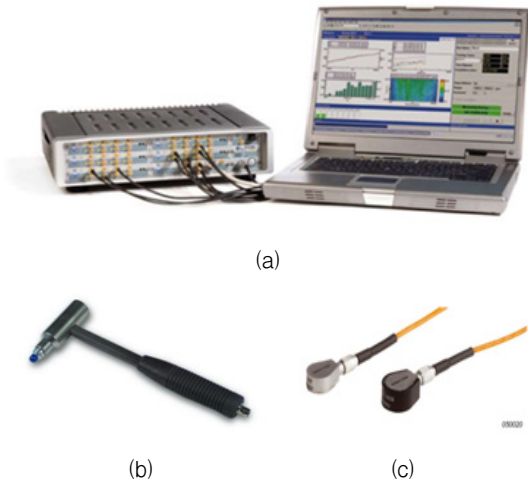


그림 3 모달시험에 대한 사진과 장치.
 Fig. 3 Photographs of an experimental equipment for a modal test. (a) LMS SCADAS Mobile Frontend, (b) Impact hammer, (c) Accelerometer.

2.3.2 실험

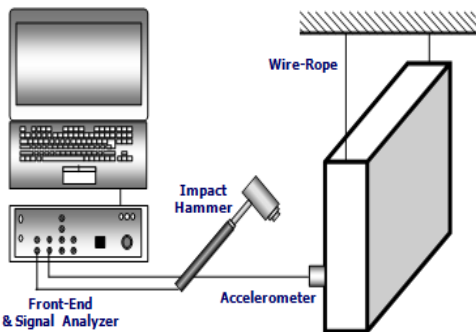


그림 4 모달 시험 시스템에 대한 개략도.
 Fig. 4 Schematic diagram for a modal experimental system.

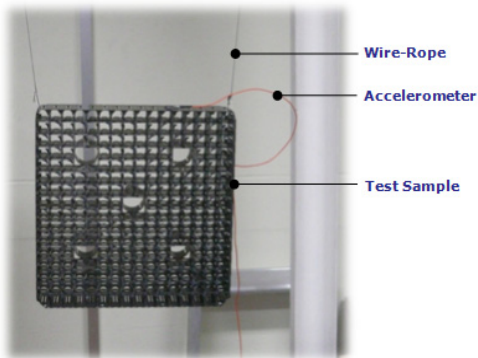


그림 5 자유 경계조건을 갖는 중간지지격자의 사진.
 Fig. 5 Photograph of a middle spacer grid with free boundary conditions.

그림 4는 실험 개략도를 보여주는 그림으로, 실험에 앞서, 그림 4에 나타난 바와 같이 중간 지지격자를 가는 와이어로프(wire rope)로 고정단에 매달아 비교적 자유 경계조건에 맞는 상태를 유지하였다. 지지격자의 고유진동수를 얻기 위해, 지지격자의 3축 방향($x-y-z$)으로 충격 햄머를 이용하여 가진하였으며, 이에 대한 응답은 가속도계를 통해 신호분석기를 거쳐 컴퓨터로 전송되었다. 그림 5는 실험에 사용된 중간 지지격자가 가는 와이어로프에 의해 매달려 있는 상태를 보여준다.

2.3.3 실험격자의 설정

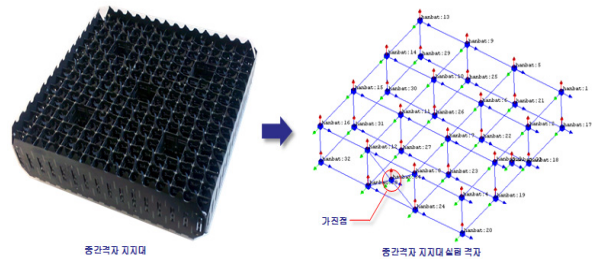


그림 6 중간지지격자와 실험 격자 생성.
 Fig. 6 A middle spacer grid and an experimental grid establishment.

실험 모드형상을 얻기 위해 그림 6에 나타난 바와 같이 총 32개의 응답 측정점을 설정하였으며, $x-y-z$ 각각의 방향에 대해, 가진점은 고정된 가운데, 측정점을 변경시켜 가면서 실험을 행하였다. 각 모서리 당 4개, 높이방향으로 2개의 측정점을 설정하였다. $x-y-z$ 방향에 있어, x 는 그림 6에 나타난 격자의 옆면인 가진점이라고 표시된 방향이고, y 도 격자의 옆면으로 x 와 직각인 방향을 의미하며, z 는 지지격자 윗면 방향을 나타낸다.

2.3.4 주파수 응답함수

모달 시험을 통한 주파수 응답함수 결과는 측정점당 5회의 주파수응답함수를 평균낸 그래프이다.

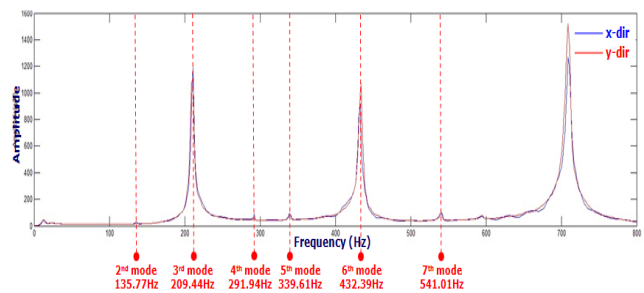


그림 7 $x-y$ 방향에 대한 중간지지격자의 주파수 응답함수.
 Fig. 7 Frequency response function of a middle spacer grid for $x-y$ direction.

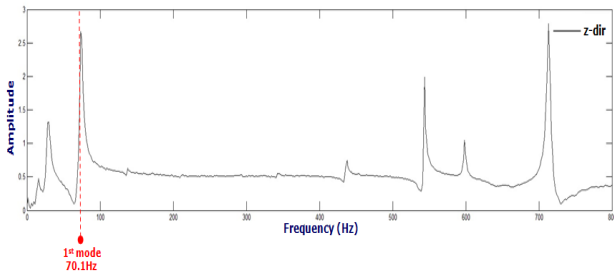


그림 8 z방향에 대한 중간지지격자의 주파수 응답함수.
 Fig. 8 Frequency response function of a middle spacer grid for zdirection.

그림 7은 x-y방향으로 충격햄머로 가진했을 경우에 대한 주파수응답함수를 나타내며, 그림 8은 z방향으로 타격했을 경우의 주파수 응답함수이다. 이 그림들에서 알 수 있듯이, x-y방향은 지지격자의 옆면방향으로, 옆면방향으로의 타격에 의한 첫 번째 모드는 잘 나타나 보이지 않는 것으로 측정되었다. 이는 첫 번째 모드가 지지격자의 굽힘 모드로서 z방향으로의 타격에 의해 잘 나타날 수 있기 때문으로 사료된다. 그 외의 2차이상의 모드들은 비교적 잘 측정된 것으로 판단된다. 따라서, z방향에 대한 그림 8에서는 첫 번째 굽힘모드에 대한 성분이 비교적 잘 나타난 것으로 해당 모드의 1차 고유진동수는 70.1(Hz)이다.

2.3.5 모달 신뢰기준(MAC)

모달시험에 의한 모드형상 추출의 신뢰성을 확보하기 위해 모달신뢰기준을 적용하였으며, 모달 신뢰기준의 식은 식 (1)에 나타난 바와 같다.

$$MAC\{(\Phi_t)_i, (\Phi_a)_j\} = \frac{|(\Phi_t)_i^T (\Phi_a)_j|^2}{\{(\Phi_t)_i (\Phi_t)_j\} \{(\Phi_a)_i (\Phi_a)_j\}} \quad (1)$$

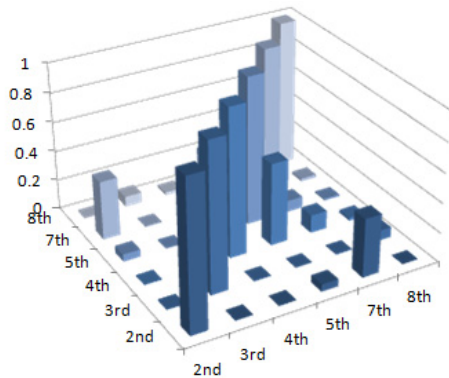


그림 9 x방향에 대한 MAC 그래프.
 Fig. 9 Modal assurance criteria graph with xdirection.

MAC 추출결과 높은 대각항(diagonal term)을 얻음으로써 시험의 신뢰성을 확보하였다고 사료되며, x-y축에 있어서의 6번째 모드는 국부모드로 추정되므로 MAC도시에서 제외하였다. 모달 신뢰기준은 측정된 모드들 간의 직교성과 실험의 신뢰성 확보를 위해 살펴본 것이다. 그림 9와 그림

10은 각각 x와 y방향에 대한 MAC의 그래프를 보여주고 있다.

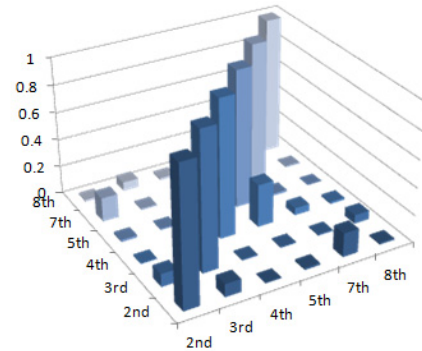


그림 10 y방향에 대한 MAC 그래프.
 Fig. 10 Modal assurance criteria graph with ydirection.

2.3.6 실험 모드형상(experimental mode shape)

그림 11은 x-y방향으로 실험한 데이터로부터 추출된 중간 지지격자의 모드형상을 나타낸다. 첫 번째 모드는 z방향 모드이므로, x-y축 방향으로는 잘 나타나지 않았다. 이는 중간 지지격자의 형상 특성상, z방향 실험이 대단히 어려우며, z방향 모드의 확인을 위해 z방향에 대한 주파수 응답함수를 추출하여 첫 번째 모드를 확인하였다.

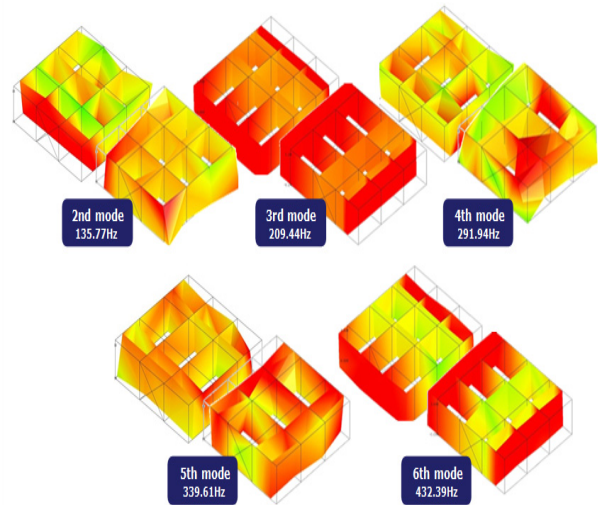


그림 11 중간지지격자의 실험 모드형상.
 Fig. 11 Experimental mode shapes of a spacer grid.

3. 결과해석 및 고찰

고유진동수 해석 및 실험을 통해 표 3과 같은 결과를 얻음으로써, 해석과 실험이 1차부터 7차 모드까지 약 3.8%이내의 근소한 차이만을 보이고 있다. 이는 핵 연료봉 지지격자와 같이 복잡한 형상의 모델에 있어서, 해석 모델의 설정이 비교적 잘 이루어졌다고 사료된다. 실험모드는 MAC 확인 결과 극소의 낮은 비대각항을 얻음으로써 실험의 신뢰성을 검증하였고, 비교적 해석 모드들을 잘 추종하고 있음을 확인하였다.

표 3 고유진동수에 대한 실험과 시뮬레이션 값.

Table 3 Comparison experimental results with simulation ones for natural frequencies.

Mode	Experiment (Hz)			Simulation (Hz)	Error (%)
	Direction				
	x	y	z		
1	-	-	70.1	68.08	2.9
2	135.77	134.9	-	140.96	3.8
3	209.44	209.85	-	217.27	3.7
4	291.94	291.18	-	301.04	3.1
5	339.61	338.35	-	349.10	2.8
6	432.39	429.74	-	438.70	1.5
7	541.01	538.42	-	544.30	0.6

4. 결 론

핵 연료봉 지지격자의 진동해석 및 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다. 첫째, 형상 구조가 복잡한 원자로 핵 연료봉 지지격자의 처음 7차까지의 고유진동수 해석결과와 실험결과에 있어, 약 3.8%이내의 근소한 차이를 보임으로써, 해석결과의 타당성이 검증되었다. 둘째, 원자로 핵 연료봉 지지격자의 실험모드는 MAC 확인 결과 극소의 낮은 비대각항을 얻음으로써 실험의 신뢰성을 검증하였고, 비교적 해석 모드들과 근사함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Paidoussis, M. P., "Dynamics of Tubular Cantilevers Conveying Fluid", Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 12, pp. 85-103, 1970.

[2] Sugiyama, Y., Tanaka, Y., Kishi, T. and Kawagoe, H., "Effect of a Spring Support on the Stability of Pipes Conveying Fluid", Journal of Sound and Vibration, Vol. 100, pp. 257-270, 1985.

[3] Song, S. H. and Jhung, M. J., "Experimental Modal Analysis on the Core Support Barrel of Reactor Internals Using a Scale Model", KSME International Journal, Vol. 13, No. 8, pp. 585-594, 1994.

[4] Walton, L. A., "Zircaloy Spacer Grid Design", Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 32, pp. 601-602, 1979.

[5] Larson, J. G., "Optimization of The Zircaloy Spacer Grid Design", Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 43, pp. 160-161, 1982.

[6] Yoon, K. H., Kim, H. K., Kang, H. S., and Song, K. N., "Shape Optimization of the H-Shape Spacer Grid Spring Structure", Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 33, No. 5, pp. 547-555, 2001.

[7] Song, K. N., Kang, B. S., Choi, S. K., Yoon, K. H., and Park, G. J., "Design of a Nuclear Fuel Rod Support Grid Using Axiomatic Design", Transactions of the Korean Society for Mechanical Engineers, Series A, Vol. 26, No. 8, pp. 1623-1630, 2002.

[8] Lee, H. A., Kim, C. K., Song, K. N., and Park, G. J., "Design of a Nuclear Fuel Spacer Grid Considering Impact and Wear", Transactions of the KSME, Vol. 31, No. 10, pp. 1000-1009, 2007.

[9] Lim Seung-Ho, Choi Young-In, Park Young-Pil, Park No-Cheol, Park Kyoung-Su, Jeong Kyeong-Hoon, Lee Jang-Won, "Dynamic Characteristics of a Flow Skirt in SMART", Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, pp.213-214, 2010.

[10] Lim Seung-Ho, Ha Gyeong-Rok, Choi Young-In, Park Young-Pil, Park No-Cheol, Park Kyoung-Su, Jeong Kyeong-Hoon, Park Jin-Seok, "Finite Element Modal Analysis of Scaled-down SMART", Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, pp.219-220, 2011.

저 자 소 개



류 봉 조 (柳 鳳 祚)

1959년 11월 19일생. 1981년 연세대학교 기계공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1989년 삼성종합기술원전자기기연구소 선임연구원. 1991년~1992년 오사카부립대학 항공우주공학과 객원교수. 1989년~현재 한밭대학교 기계공학부 교수.

Tel : 042-821-1159

Fax : 042-821-1587

E-mail : bjryu701@hanbat.ac.kr



구 경 완 (丘 庚 完)

1961년 2월 5일생. 1983년 충남대학교 전자공학과 졸업(학사). 1992년 동 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1987년 현대전자 반도체연구소 선임연구원. 1994년~2005년 영동대학교 전자·정보공학부 부교수. 2005년~현재 호서대학교 국방과학기술학과 교수.

Tel : 041-540-9541

Fax : 041-540-9548

E-mail : alarmkoo@hoseo.edu