

이동 가능한 연료봉 지지부의 특성 고찰

송기남^{**} · 이상훈^{*}

* 한국원자력연구원

Study on Characteristics of Sliding Support for Fuel Rod

Kee Nam Song^{**} and Sang Hoon Lee^{*}

* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received July 27, 2010 ; Revised November 17, 2010 ; Accepted November 18, 2010)

Key Words: Sliding Fuel Rod Support(이동 가능한 연료봉 지지부), Nuclear Fuel Assembly(핵연료집합체), Spacer Grid Assembly(지지격자체), Fretting Wear(프레팅 마모), Flow-Induced Vibration(FIV), Fuel Rod(연료봉), Fuel Rod Support Integrity(연료봉 지지건전성), PWR(가압경수로)

초록: 지지격자체는 경수로 핵연료집합체의 특성과 성능에 영향을 주는 가장 중요한 핵심 구조부품 중 하나이다. 지지격자체 설계시의 우선적으로 고려해야할 사항은 핵연료가 원자로에 장전되어 있는 동안 내내 연료봉이 기계적인 원인에 의해 손상되지 않도록, 즉 연료봉의 기계적 지지건전성이 유지되도록 설계하는 것이다. 연료봉이 유동기인진동에 의해서 진동할 때 연료봉과 연료봉 지지부 사이에서 상대변위 발생을 완화해 줌으로서 연료봉의 프레팅 마모 손상 가능성이 감소될 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이동 가능한 연료봉 지지부로 구성된 새로운 지지격자체 형상을 제안하였고, 제안된 이동 가능 지지부의 연료봉 지지특성을 유한요소해석을 통해 분석하였다.

Abstract: A spacer grid assembly is one of the most important structural components of the nuclear fuel assembly of a pressurized water reactor (PWR), and it affects the performance of the fuel assembly. The primary design requirement is that the mechanical integrity of the fuel rod should be maintained by the spacer grid assembly during the operation of the reactor. It was known that fretting damage to the fuel rod can be reduced by adjusting the relative moving displacement between the fuel rod and its support. In this study, we used the finite element method to evaluate the characteristics of a sliding support designed to reduce fretting damage of fuel rods.

1. 서론

가압경수형 원자력발전소(Pressurized Water Reactor; PWR)에서 열을 생산하는 열원인 핵연료 집합체의 전형적인 형상 및 구조는 Figs. 1 및 2에 나타나 있다. Figures 1 및 2에서 보듯이 핵연료 부품들의 형태는 원자로 형태에 따라 약간 상이하나 전체적인 구조 및 기능은 동일하다.

지지격자체는 본래 연료봉을 원자로심내의 공간 정해진 위치에 고정하고 지지하기 위한 구조물인데 Fig. 3에서 보듯이 홈이 있는 지지격자판들이 가로, 세로로 엇갈리게 끼워져 조립되고 지지격자판들의 교차부위는 점용접(spot welding)되

어 있다. 지지격자체의 기계/구조적 핵심기능은 핵연료집합체가 원자로심내에 장전되어 있는 기간(보통 3-5년)동안 연료봉을 건전하게 지지하는 기계적 기능과 핵연료집합체의 측면에 가해질 수 있는 여러 하중(예를 들면 사고시의 하중이나 지진하중 등)으로부터 연료봉을 보호하는 구조적 기능으로 나뉘어진다.

지지격자체에 의해 지지된 연료봉은 냉각수 유동, 열팽창, 중성자 조사(Neutron irradiation)에 의해서 연료봉의 초기 지지력이 저하됨으로 인하여 쉽게 유동기인진동(Flow-induced vibration; FIV)이 발생할 수 있는 상황에 처하게 된다. 연료봉이 진동하게 되면 연료봉 지지부위에서 연료봉과 연료봉 지지부 간의 반복적이고 장기간 진행되는 상대 변위 운동으로 인하여 연료봉 표면(보통

† Corresponding Author. knsong@kaeri.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

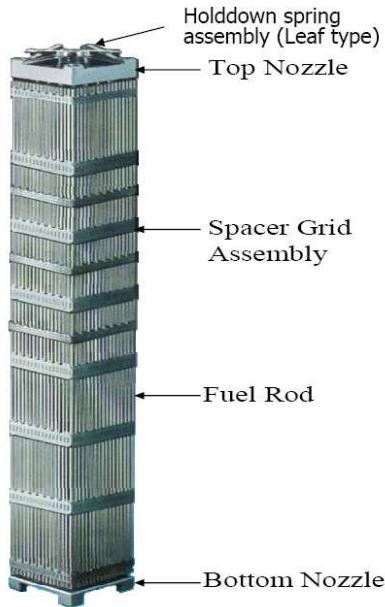


Fig. 1 Fuel assembly for Westinghouse type plant

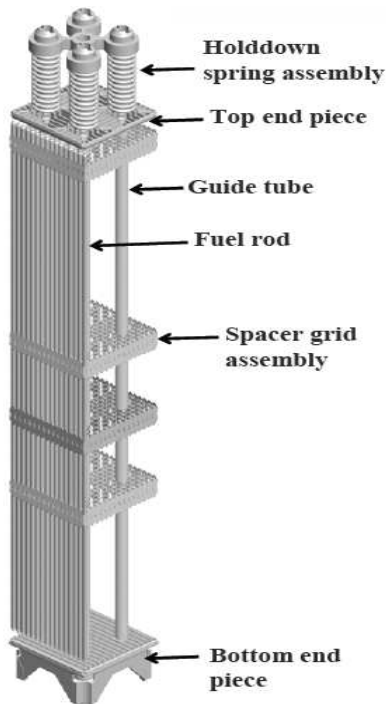


Fig. 2 Fuel assembly for ABB-CE type plant

Zircaloy 피복관)에 프레팅 마모가 일어나고 심하면 피복관 두께감소의 심화(설계기준 위배) 혹은 피복관 천공(연료 손상)이 발생할 수 있는데 이는 연료봉의 내구성 저하 혹은 방사능 물질의 냉각수로 누출 등이 발생하여 원자로 운전 관련 안전 기준을 위배하는 요인이 된다. 따라서 기계적 관점에서 지지격자의 성능을 향상시키기 위해 마모

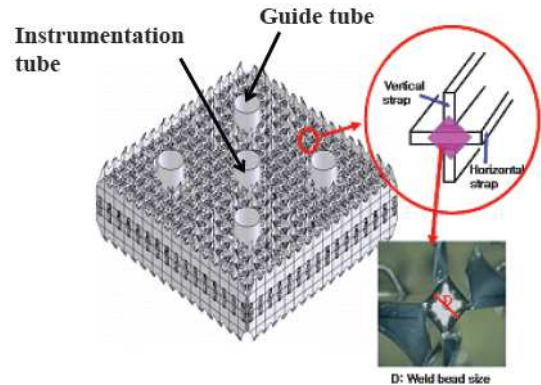


Fig. 3 Spacer grid assembly

손상이 감소될 수 있는 연료봉 지지부 형상을 개발(연료봉과의 접촉부 면적 및 접촉길이를 증가)하는 방향으로 많은 연구가 수행되었다.^(1~7)

지지격자체의 횡방향 충격특성을 향상시키기 위한 연구로서 지지격자체를 구성하는 지지격자판의 두께 및 높이를 증가시키는 방안과 지지격자판 형상을 개선하는 방안 그리고 지지격자체 용접부위에 대한 용접방법을 개선하는 방안 등이 주로 연구되어 왔다.^(8~15) 그런데 지지격자판의 두께 및 높이를 증가시키는 방안은 지지격자체 제조에 소요되는 지지격자판(spacer grid strap) 원자재 소요량을 증가시킬 뿐만 아니라 냉각수 유동 저항을 증가시켜서 핵연료집합체 홀다운력 및 원자로 압력펌프의 부하를 증가시키게 되는 단점이 있어서 근래에는 시도되고 있지 않다. 한편 지지격자판 형상을 개선하거나^(8,10) 지지격자체 용접방법을 개선하는 등의 연구가^(11,14,15) 근래에 수행되어 위에서 언급한 단점을 보완하는 좋은 결과를 얻은 것으로 알려져 있다.

그동안 개발되어 상용화된 대부분의 경수로 핵연료집합체에서는 Fig. 4에서와 같이 연료봉 지지부(스프링 및 덤플)가 성형된 지지격자판들을 가로/세로로 엇갈리게 조립한 뒤 지지격자판들의 교차부위를 용접한, 즉 고정형 연료봉 지지부를 갖는 지지격자체를 사용하고 있으나 본 연구에서는 연료봉 지지부가 별개의 부품으로 제작되어 지지격자체에 삽입되는 즉, 삽입 및 이동 가능한 연료봉 지지부로 구성된 지지격자체 형상⁽¹⁶⁾에 대하여 연료봉 지지부의 지지 특성을 유한요소법을 이용하여 분석하였다.

2. 통상적인 지지격자체 형상

2.1 통상적인 지지격자체 구조

상용화되고 있는 대부분의 지지격자체는 연료

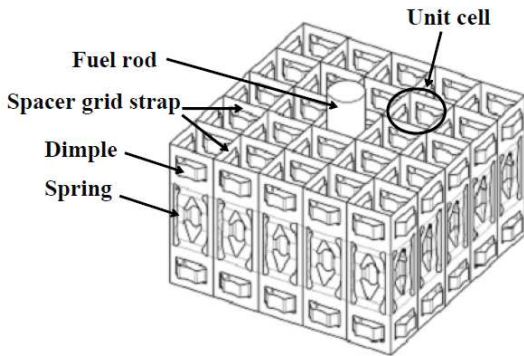


Fig. 4 Spacer grid assembly with fixed fuel rod supports

봉을 지지하기 위한 지지부(스프링 혹은 딤플)가 Fig. 4에서 보듯이 지지격자체를 구성하는 지지격자판에 성형되어 있는 즉, 고정형 연료봉 지지부로 구성된 지지격자체 구조인데 지지격자체 조립성 및 제작성이 용이하기 때문에 근래까지 거의 모든 상용 핵연료집합체에 사용되어 왔다.^(1~5)

2.2 통상적인 지지격자체의 단점

고정형 연료봉 지지부를 갖는 지지격자체는 다음과 같은 네 가지 제약이 있다.⁽¹⁷⁾

첫째, 비교적 좁은 단위격자(unit cell) 공간 내에서 연료봉을 지지하는 지지부가 형성되도록 설계되어야 하기 때문에 연료봉 지지부 설계공간에 대한 제약이 따르며 연료봉 지지부의 지지특성을 향상시키는 데 한계점이 노출되었다.

둘째, 지지격자판의 단위격자에서는 좁은 설계 공간에 스프링 및 딤플과 같은 복잡한 형상의 연료봉 지지부가 성형되어야 하므로 정밀한 금형설계가 요구되며 실제로 제조현장에서는 지지격자판 성형시에 소성변형 부위에서 종종 크랙 발생이나 chip에 의한 흠이 발생하는 등 제조불량이 발생하고 있다.

셋째, 원자로심내를 흐르는 축류 및 횡류의 냉각수 유동에 의해 연료봉의 FIV로 연료봉과 연료봉 지지부 사이의 상대 변위가 용이하게 발생함으로써 연료봉의 프레팅 마모 손상이 일어날 수 있다.

넷째, 지지격자판 측면에서 충격이 가해질 경우 충격력에 지탱할 수 있는 유효 strap 높이^(10,11,14)를 증가시키는데 한계가 있기 때문에 구조강도 관점에서 측면 충격저항이 상대적으로 취약할 수 있다.

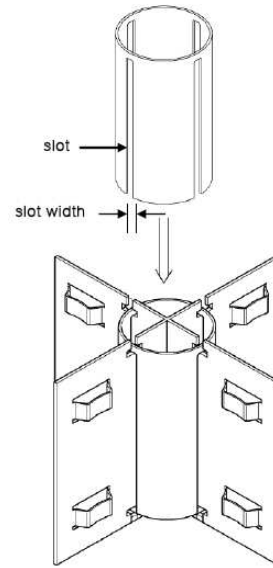


Fig. 5 Spacer grid with a insertable support

3. 삽입형 지지부의 지지격자 형상

2장에서 논의한 바와 같이 연료봉이 FIV에 의해 진동하게 되면 고정형 연료봉 지지부의 지지격자체에서는 연료봉과 연료봉 지지부 사이에서 발생한 상대 변위로 인하여 연료봉 표면에서 프레팅 마모가 용이하게 발생할 것이다. 반면 연료봉이 FIV에 의해서 진동할 때 연료봉 지지부와 연료봉이 고착된 상태로 같이 움직이게 되면 연료봉과 연료봉 지지부 사이에서는 작은 상대 변위로 인해 연료봉 표면에서는 프레팅 마모가 덜 발생할 것이다. 이러한 관점에서 본 연구자는 다음과 같은 삽입 및 이동가능한 연료봉 지지부를 갖는 지지격자체 형상⁽¹⁶⁾을 비롯한 여러 지지격자 형상^(18~23) 제안하였다.

Fig. 5는 비교적 단순한 형상(딤플이 생략될 수 있음)의 지지격자판으로 구성된 교차부에 연료봉을 지지할 수 있는 별도의 지지부를 삽입한 형태의 새로운 지지격자체 기본 형상을 나타낸 것이다. 이 지지부는 tube를 적절한 길이로 절단하고 지지격자체의 교차부에 삽입하기 위해 원주방향 90도 간격으로 지지격자판 높이 보다 긴 slot이 가공된 형태이다. 이 지지부를 지지격자체 교차부에 삽입한 후 slot 하단부를 용접으로 접합함으로써 지지부가 지지격자체로부터 분리되지 않도록 한 것이다. 장점으로서는 첫째, slot 길이가 끼워진 지지격자판 높이보다 길기 때문에 이 지지부는 연료봉의 FIV시에 연료봉을 지지하고 고착된

상태에서 연료봉과 같이 움직임으로서 연료봉과 연료봉 지지부 사이의 상대 변위가 적게 발생하도록 고안된 것으로 연료봉의 프레팅 마모 손상을 크게 완화시킬 것으로 기대된다. 둘째, 지지격자판과는 다르게 스프링이 형성되어 있지 않아서 실질적으로 측면 충격강도에 대한 지지격자판의 유효높이를 높일 수 있고 따라서 지지격자체의 측면 충격강도를 크게 향상시킬 수 있다. 셋째, 지지격자판에 스프링(필요시 딥플 생략 가능)이 형성되어 있지 않아서 지지격자판 제조용 금형설계가 상대적으로 단순해질 뿐 만 아니라 지지격자판 제조 불량률이 줄어드는 즉, 지지격자체 제조/생산성 관점에서의 장점이 있다.

4. 새로운 지지부의 특성 해석 및 토의

앞의 3장에서 언급한 이동 가능한 연료봉 지지부의 스프링 특성을 ABAQUS⁽²⁴⁾를 이용한 유한요소해석을 통해 분석하였다. 유한요소모델은 대칭성을 고려하여 연료봉 및 연료봉 지지부 모두 원주방향으로 1/4 부분만을 모델링하였다. 유한요소해석 모델에서 연료봉 및 연료봉 지지부는 모두 shell 요소 S4를 사용하였으며 full integration 기법을 사용하였다. Figure 6은 유한요소해석 모델과 경계조건을 나타낸 것이며 연료봉에 변위를 부과한 뒤 반력을 구하여 연료봉 지지부의 하중-변위(F-u) 선도를 도출하였다. Table 1은 유한요소 모델에 사용된 연료봉 및 연료봉 지지부의 치수를 나타낸 것으로 연료봉 지지부의 두께는 통상적인 지지격자판의 두께와 동일한 경우(0.457 mm)와 상용으로 공급되는 얇은 지지격자판 두께(0.35 mm) 등 2가지 경우의 치수를 사용하였다. Figure 7은 연료봉 지지부의 1/4을 유한요소 모델링한 것을 나타낸 것이다.

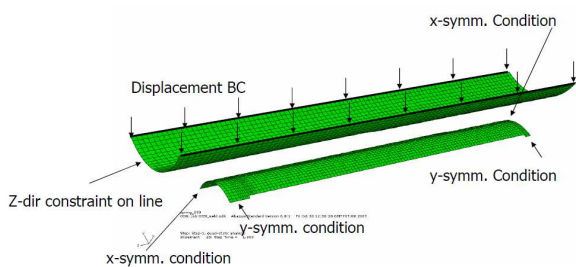


Fig. 6 Finite element model and boundary condition

slot 길이가 일정할 때 연료봉 지지부 두께 변화에 대한 지지부 지지 특성 변화와 연료봉 지지부 두께가 일정할 때 slot 길이 변화에 대한 지지부 지지 특성 변화를 분석하였다.

Figure 8은 연료봉 지지부가 0.3 mm 까지 변형되었을 때 연료봉 지지부에서 하중-변위 선도를 나타낸 것이고 Table 2는 연료봉 지지부 두께 및 slot 너비에 따른 최대 스프링력과 탄성계수를 비교한 것이다. Figure 8에서 보듯이 slot 너비를 조

Table 1 Geometric data

	Fuel rod cladding	Fuel rod support
Outer diameter (mm)	16.0	8.825
Thickness (mm)	1.08	0.35 0.457
Slot length (mm)	-	33.28

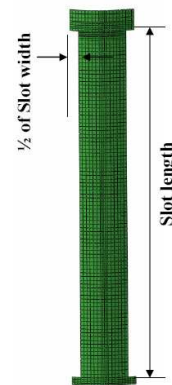


Fig. 7 Finite element model of fuel rod support

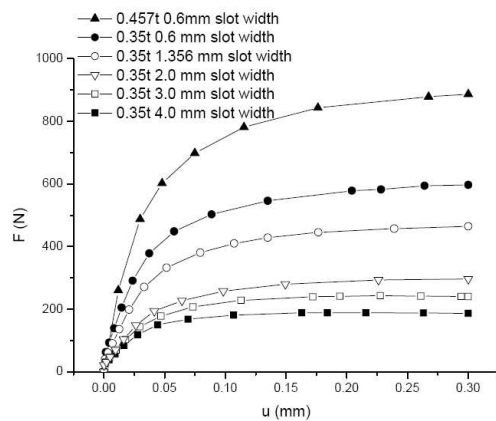


Fig. 8 Overlapped force-deflection curves

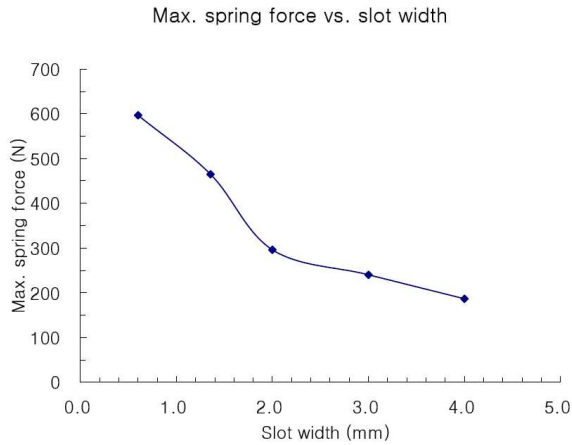


Fig. 9 Max. spring force vs. slot width

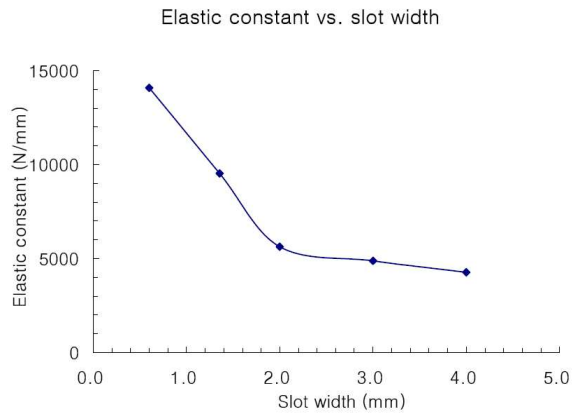


Fig. 10 Elastic constant vs. slot width

정함으로서 연료봉 지지력이 크게 변하고 있음을 알 수 있다. Table 2에서 보면 slot 너비가 커질수록 최대 스프링력 및 탄성계수는 크게 줄어들고 있다. 특히 두께 변화에 따른 최대 스프링력 변화 및 탄성계수는 각각 1.485승 및 1.663승에 비해하고 있는데 이는 지지부의 두께가 지지 특성에 매우 유력한 설계변수임을 시사해준다.

Figures 9와 10은 각각 slot 너비 변화에 따른 최대 스프링력과 탄성계수의 변화를 나타낸 것으로 Figs. 9 및 10에서 보면 최대 스프링력과 탄성계수 모두 slot 너비가 2.0 mm까지 급히 감소하다가(민감도가 크게) 그 이후에는 완만하게 감소하는(민감도가 작게) 특성을 보이고 있다. 이것은 slot 너비라는 설계변수의 민감도를 가름하는 지표로 보이며, 또한 연료봉 지지력에 대한 설계인자로서 연료봉 지지부의 두께뿐만 아니라 slot 너비도 상당히 유효한 설계인자임을 확인할 수 있다. 따라서 연료봉 지지력에 대한 설계요구사항을 맞추기 위해서는 먼저 연료봉 지지부 두께를

Table 2 Maximum spring force and elastic constant

Thickness of fuel rod support (mm)	Slot width (mm)	Maximum spring force (N)	Elastic constant (N/mm)
0.457	0.6	886.8	21,946
0.35	0.6	596.7	14,083
	1.356	464.7	9,533
	2.0	296.0	5,630
	3.0	240.0	4,884
	4.0	186.6	4,272

정한 뒤에 slot의 너비나 길이 등과 같은 보조 설계인자를 조정해야 될 것으로 보인다.

5. 결론

고정형 연료봉 지지부로 이루어진 통상적인 지지격자체 형상에 비해 연료봉 지지건전성이 향상되고 지지격자체의 측면 충격강도를 향상시킬 것으로 기대되는 삽입 및 이동 가능한 연료봉 지지부로 이루어진 지지격자체의 지지부의 특성을 유한요소해석을 통해 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연료봉 지지부 두께는 연료봉 지지부의 특성을 크게 변화시킬 수 있는 주요 설계변수이다.
- (2) slot 너비가 클수록 최대 스프링력과 탄성계수는 줄어들고 있으며 특정한 slot 너비를 기점으로 민감도가 변화였다.
- (3) slot 너비는 연료봉 지지부 특성을 변화시키며 설계요구조건을 맞추기 위한 중요한 보조 설계변수이다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구원의 자체연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Weiland, L. E. and Parks, B. H., 1987, "Nuclear Reactor Spacer Grid," US Pat. 4,702,881.
- (2) Weiland, L. E., 1991, "Fuel Assembly Support Grid," US Pat. 5,139,736.
- (3) Weiland, L. E., 1992, "Fuel Rod Capturing Grid Spring and Arch," US Pat. 5,243,635.

- (4) Kang, H. S. *et al.*, 1998, "Grid with Nozzle-Type Coolant Deflecting Channels for Use in Nuclear Reactor Fuel Assemblies," US Pat. 6,130,927.
- (5) Yoon, K. H. *et al.*, 2004, "Spacer Grid for Nuclear Reactor Fuel Assemblies with Grid Springs Maintaining Conformal Contact with Fuel Rods and Enlarged Elastic Range," US Pat. 6,707,872 B2.
- (6) DeMario, E. E., Boyle, R. F. and Kuchirka, P. J., 1987, "Nuclear Fuel Grid Spring and Dimple Structures," US Pat. 4,803,043.
- (7) Lee, H. A. *et al.*, 2007, "Design of a Nuclear Fuel Spacer Grid Considering Impact and Wear," *Trans. of KSME A*, Vol. 31, No. 10, pp. 1000~1009.
- (8) Kim, D. W. *et al.*, 2007, "Nonlinear Response Structural Optimization of a Spacer Grid Spring for a Nuclear Fuel Rod Using the Equivalent Loads," *Trans. of KSME A*, Vol. 31, No. 12, pp. 1165~1172.
- (9) Song, K. N., Lee, K. H. and Chung, I. S., 2008, "Comparison of Wear Resistance for Various Spacer Grid Spring Shapes," *J. of KSPVP*, Vol. 4, No. 1, pp. 1~7.
- (10) Lee, S. B., Song, K. N. and Kim, Y. W., 2008, "Parametric Study for a Dimple Location in a Spacer Grid Under the Critical Impact Load," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 2024~2029.
- (11) Lee, S. H., Song, K. N. and Kim, J. Y., 2007, "Design Improvement of an OPT-H Type Nuclear Fuel Rod Support Grid Using an Axiomatic Design and an Optimization," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 1191~1195.
- (12) Song, K. N., Lee, S. B. and Lee, S. H., 2007, "Performance Evaluation of New Spacer Grid Shapes for PWRs," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 6, pp. 737~746.
- (13) Shin, M. K. *et al.*, 2008, "Optimization of a Nuclear Fuel Spacer Grid Spring Using Homology Constraints," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, pp. 2624~2634.
- (14) Song, K. N. *et al.*, 2009, "Laser Welding Unit for Intersection Line Welding of Spacer Grid Inner Straps and Its Application," *Journal of Laser Micro/Nano-engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 11~17.
- (15) Song, K. N. *et al.*, 2010, "Study on the Lateral Dynamic Crush Strength of a Spacer Grid Assembly for a LWR Nuclear Fuel Assembly," *Trans. A of KSME*, Vol. 34, No. 9, pp. 1175~1183.
- (16) Song, K. N., 2010, Korea Patent # 10-0967119.
- (17) Song, K. N. and Lee, S. H., 2010, "Spacer Grid Assembly with Sliding Fuel Rod Support," *Trans. A of KSME*, Vol. 34, No. 7, pp. 843~850.
- (18) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0006230.
- (19) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0006229.
- (20) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0067020.
- (21) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0068838.
- (22) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0068839.
- (23) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0068836.
- (24) ABAQUS/Standard Version 6.8 User's Manual, 2009, H.K.S., USA.