

# 경수로 핵연료 지지격자체의 충격해석(III)

송기남<sup>†</sup>·이수범<sup>\*</sup>·이현아<sup>\*\*</sup>·김종기<sup>\*\*</sup>·박경진<sup>\*\*</sup>

## Impact Analysis of the Spacer Grid Assembly for PWR Fuels(III)

Kee-nam Song, S-B Lee, H-A Lee, J-K Kim, and Gyung-jin Park

**Key Words:** Impact Strength(충격강도), Spacer Grid Assembly(지지격자체), Fuel Assembly(핵연료 집합체), PWR(가압경수로)

### Abstract

The spacer grid assembly is one of the main structural components of the nuclear fuel assembly of a PWR. The spacer grid assembly supports and aligns the fuel rods, guides the fuel assemblies past each other during handling and, if needed, sustains lateral seismic loads. The ability of the spacer grid assembly to resist the lateral loads is usually characterized in terms of its dynamic and static crush strengths, which are acquired from tests. In this study, a finite element analysis on the dynamic crush strength of spacer grid assembly specimens is carried out and compared with test results.

### 1. 서 론

가압경수로 핵연료집합체는 보통 가로, 세로 길이가 약 200 mm, 높이 약 4,000 mm의 제원을 갖는 구조물로서(Fig. 1의 웨스팅하우스형 연료 참조) 하단에는 많은 유로구멍이 뚫려있는 하부노즐(혹은 하단고정체) 1개, 상단에는 판형 스프링이나 코일형 스프링으로 이루어진 홀다운스프링집합체 4세트, 상부노즐(혹은 상단고정체) 1개 그리고 상·하부 노즐을 연결하면서 원자로 제어시나 긴급정지시에 제어봉 삽입경로를 제공하는 다수의 안내관(4~24개)과 운전중에 원자로 상태를 계측하기 위한 계측기(probe)의 삽입경로를 제공하

는 계측관 1개로 구성되는 골격체와 다수의 연료봉(약 200여개 이상)과 여러 개의 지지격자체로 구성되어 있다.

연료봉은 직경과 길이가 각각 약 8 mm, 10 mm인 원기둥형 이산화 우라늄(UO<sub>2</sub>) 소결체들을 두께 약 0.7 mm, 길이 약 3,800 mm의 지르칼로이 피복관속에 밀봉한 것으로 상당히 유연한 구조물이다. 이렇게 유연한 연료봉을 적절한 간격으로 지지하며 고정하기 위한 (즉 연료봉이 지지격자체 내에 매달려 있는 형상) 구조물이 지지격자체로서 핵연료집합체에 보통 8~10여개가 사용되고 있다. 지지격자체는 Fig. 2와 Fig. 3에서 보듯이 홈이 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판들의 교차점을 용접한 형상의 구조물이다. 지지격자체를 구성하는 가로, 세로의 격자판에는 유연한 강성을 갖는 스프링과 매우 높은 강성을 갖는 딥플이 형성되어 연료봉을 지지하고 있는데 스프링력에 의한 마찰력에 의해서 연료봉이 매달려 지지되고 있다.

<sup>†</sup> 한국원자력연구원

E-mail : knsong@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2254 FAX : (042)868-4717

\* 한국원자력연구원

\*\* 한양대학교

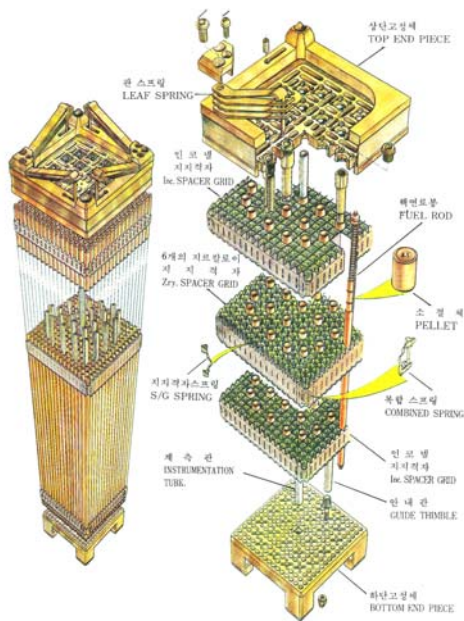


Fig. 1 Fuel assembly for Westinghouse-type plant

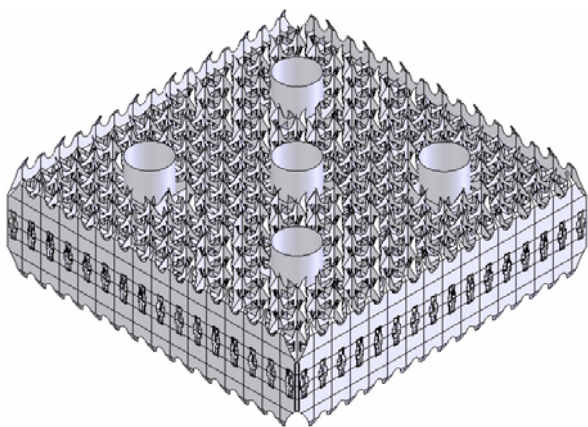


Fig. 2 Spacer grid assembly for ABB-CE type fuel

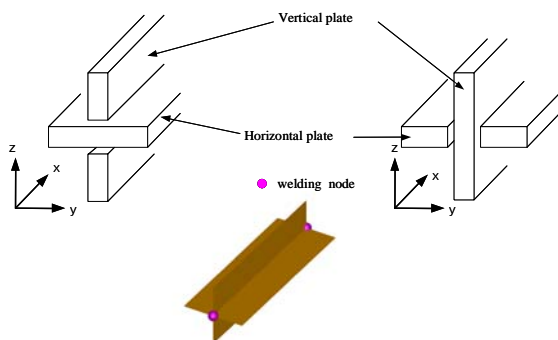


Fig. 3 Interconnected array of straps

지지격자체의 기계/구조적 기능을 크게 2가지로 나누면 첫째, 원자로 운전조건에서 연료봉을 정해진 위치에 있도록 견건하게 지지하는 것과 둘째, 핵연료집합체 측면에서 가해지는 여러 하중으로부터 연료봉을 보호하는 것이다. 전자의 기능을 살펴보면 격자 안으로 연료봉이 삽입되면 스프링의 변형에 의한 스프링력(정확하게는 마찰력)으로 연료봉을 지지하고 있는데, 원자로 운전중의 연료봉 지지력은 원자로심내의 여러 운전환경조건(예를 들면 중성자 조사, 열팽창, 크립 등)에 의해 초기 연료봉 지지력에 비해 크게 감소하고 있다 [1]. 후자의 기능을 살펴보면 지진하중이나 원자로 냉각재 상실사고(Loss Of Coolant Accident; LOCA)시에 발생할 수 있는 횡방향 설계하중으로부터 연료봉을 보호하면서 원자로 긴급정지가 가능하도록 하기 위해 지지격자체는 충분한 횡방향 충격강도를 갖추도록 요구되고 있다.

본 연구에서는 지지격자체의 횡방향 충격강도를 수치해석적으로 예측하기 위한 해석기법 연구와 해석모델의 검증에 위해 실제 지지격자체에 대해 수행한 충격강도시험을 수행한 결과[2]를 보강하여 요약한 것이다.

## 2. 충격강도시험

### 2.1 시험용 지지격자체 시편

충격강도시험용 지지격자체 시편은 지르칼로이로 제조된 다수의 내부격자판과 외부격자판으로 이루어졌고 내·외부 격자판의 교차점 부위는 레이저빔 용접되었다. 특히 지지격자체를 구성하는 격자판에서 덤플 위치를 최적설계하여[3, 4] 시편을 제작하였다.

### 2.2 충격시험 결과

충격시험은 한국원자력연구소에서 개발한 Fig. 4와 같은 진자식 충격시험기를 이용하여 수행하였다. 충격시험 방법은 참고문헌 5에 기술되어 있다. 충격시험은 최적설계 전, 후의 16x16형 지지격자체 형상에 대해 상온에서 수행하였고 충격강도 값은 각각 평균 30.1 kN 및 34.1 kN 이었다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 기하학적 자료 및 물성치

해석적으로 충격강도를 결정하기 위해서는

소성좌굴을 고려해야 한다. 따라서 재료의 물성치는 ASTM 시험절차[6]에 따른 단축 인장시험에서 얻은 탄소성 물성치를 사용하며 사용된 지르칼로이-4의 탄·소성 물성치는 참고문헌 7에 있다.

### 3.2 유한요소모델

충격해석을 위한 유한요소모델은 Fig. 5와 같이 I-DEAS를 이용하여 생성하였다. Fig. 5 및 Fig. 6과 같이 내·외부 격자판들은 4-node 쉘 요소를 사용했고 격자판들의 교차점 용접부위는 4-node tetrahedral solid 요소를 사용하였다. Fig. 5의 유한요소모델에서 사용한 node 및 요소의 수는 각각 136,604 및 116,208이다. Fig. 3에서 보듯이 격자판에 있는 홈의 간극이 격자판의 두께보다 크기 때문에 간극을 모사하기 위해 격자판들의 교차부 위에서는 Fig. 6과 같이 surface-to-node 접촉요소를 사용하였다.

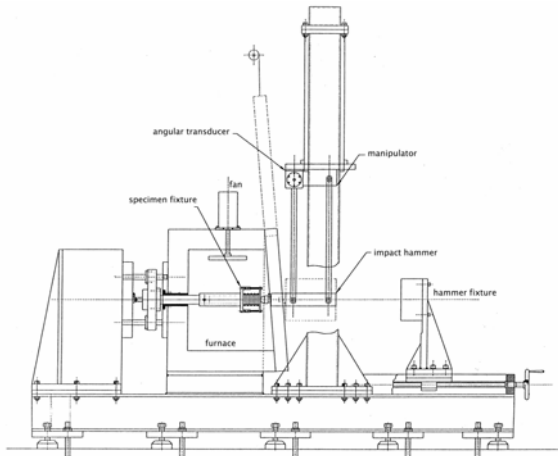


Fig. 4 Pendulum type impact tester

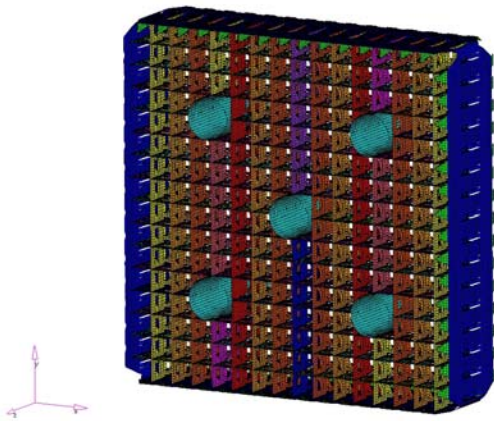
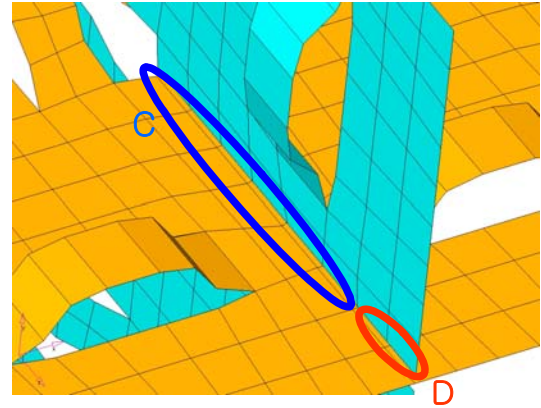


Fig. 5 Finite element model



C ; Surface-to node contact  
D ; Welded cross point

Fig. 6 Contact condition between straps

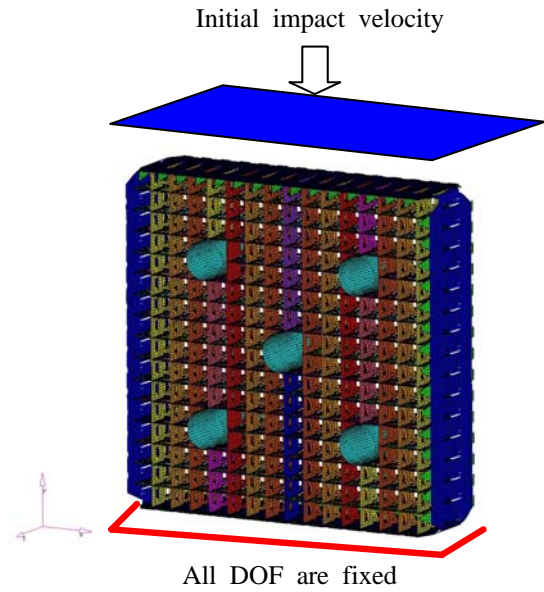


Fig. 7 Boundary and loading condition

### 3.3 경계조건 및 하중조건

유한요소모델에서 Fig. 7과 같이 rigid and mass element가 충격해머를 모사하기 위해 사용되었다. 충격시 지지격자체에 작용하는 외력은 rigid surface의 중앙에 초기 충격속도를 부과하여 얻는다. 지지격자체의 충격력은 경계조건이 적용된 node에서의 반력들의 합으로 결정한다. 이 반력이 직전 해석단계에서의 반력보다 작을 경우 임계충격하중은 직전 해석단계의 값과 현 해석단계 사이에서 구한다[8]. 본 연구에서의 경계조건은 실험조건을 모사하기 위해 Fig. 7과 같이 지지격자

체 하단부의 rigid surface에서 모든 자유도를 구속하였다. 동적해석에서 잡음이 포함되므로 고주파 잡음을 제거하기 위해 SAE filtering이 사용되었다.

#### 3.4 해석결과

상부 rigid surface의 중앙 node에서 충격 parameter가 얻어진다. 각각의 초기 충격속도에서 모델의 최대가속도는 직전 초기 충격속도에서의 값에 비해 변한다. 따라서 임계 충격가속도는 최대치로 결정된다. 구조물에 좌굴이 발생하면 그 값은 좌굴전보다 작거나 같게 된다. 최적설계 전, 후의 16x16형 지지격자체 형상에 대한 충격강도 해석결과는 각각 23.5 kN, 25.5 kN으로 실험에서 얻은 값과 비교할 때 각각 78.1 % 및 74.8 % 수준이다.

### 4. 결론

1. shell 요소와 solid 요소를 결합하여 PWR용 지지격자체 동적 충격강도를 예측하는 모델과 기법으로 얻은 지지격자체의 충격강도는 실험치의 약 74.8-78.1 % 수준이다.

2. 최적설계후에 16x16형 지지격자체의 충격강도값은 최적설계 전보다 크게 증강되었으며 이것은 실험과 해석에서 입증되었다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업인 경수로용 신형핵연료 개발(대과제) 고성능 지지격자 개발과제(세부과제)의 일환으로 수행되었음.

### 참고문헌

- (1) K-N, Song, 2005, The Present Development Status of the Spacer Grid for PWR Fuels Patented by KOREA, Proceedings of KSME Autumn Meetings.
- (2) K-N Song, J-Y Kim, H-A Lee, J-K Kim, and G-J Park, 2006, Impact Analysis of the Spacer Grid Assembly for PWR Fuels(II), Proceedings of KSME Fall Meetings.
- (3) S-H Lee, K-H Yoon, and K-N Song, 2006, Design Improvement of OPT-H type Nuclear Fuel Rod Support Grid Using Design Axioms and

Optimization, Proceedings of KSME Spring Meetings.

- (4) J-K Kim and G-J Park, 2007, Shape Optimization of a Nuclear Fuel Rod Spacer Grid Considering Impact and Wear, MS Thesis, Hanyang University.
- (5) K-H, Yoon, 2006, Buckling Behavior as the Configuration of a Grid Assembly under the Lateral Impact Load, Proceedings of 1st KSME Material and Fracture Subsection Meetings.
- (6) ASTM E8M-99: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 1999.
- (7) K-H Yoon, W-K In, H-S Kang, and K-N Song: ICONE 12-49106, 2003.
- (8) K-H Yoon, S-H Heo, K-N Song, and Y-H Jung, "Dynamic impact analysis of the grid structure using multi-point constraint (MPC) equation under the lateral impact load," Computers & Structures, Vol. 82, pp.2221-2228, 2004.