

국산 17x17 중간 지지격자의 구조적 건전성 평가

Structural Integrity Evaluation of the KNFC 17x17 Mid Grids

김일규, 전상윤, 김경재, 홍종승, 전경락

한국원전연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

경수로용 핵연료집합체의 지지격자 충격시험을 수행하여 지진 및 냉각재상실사고에 대한 구조적 건전성을 평가하였다. 시험에는 웨스팅하우스형 17x17 핵연료집합체의 국산 중간지지격자가 사용되었으며, 각각의 지지격자에 대한 고온 충격시험을 수행하고, 지지격자의 충격성능을 비교하였다. 시험한 모든 지지격자는 고리 3,4호기, 영광 1,2호기 및 울진 1,2호기에서의 지진 및 냉각재상실사고에 대한 집합체 구조적 건전성을 만족하며, 좌굴 후에도 안내관 및 계측관이 삽입되는 격자의 변형이 발생하지 않아 제어봉 삽입능력이 유지되는 것으로 평가되었다. 또한, 지지격자관의 재료특성 및 두께, 지지격자 용접변수, 스프링력 등이 지지격자의 충격성능에 미치는 영향을 분석하였다.

Abstract

This study contains the dynamic crush tests conducted at elevated temperature on the 17x17 type mid grids of PWR fuel assembly to evaluate their structural integrity for the seismic and LOCA events. The three different groups of prototype grids manufactured by KNFC were tested and the dynamic characteristics of the grid and failure modes etc. were investigated. The results show that the structural integrity of grids is maintained for seismic and LOCA loads in KRN 3&4, YGN 1&2, and UCN 1&2 plants. In addition, the effects of mechanical properties and thickness of grid straps, weld penetration, and spring force on the dynamic characteristics were also investigated.

1. 서론

지지격자는 상하단고정체에 연결되어있는 안내관 및 계측관과 함께 조립되어 핵연료집합체의 횡 방향 변형을 억제하며, 핵연료집합체 전 수명기간동안 연료봉을 안정적으로 지지하고, 연료봉의 간격을 일정하게 유지하여 핵연료의 냉각성을 유지시키는 기능을 하는 구조부품이다.

따라서 지진(SSE, Safe Shutdown Earthquake)이나 냉각재상실사고(LOCA, Loss Of Coolant Accident)와 같은 원자로의 가상 사고가 발생하는 경우 핵연료집합체에 가해지는 외부 충격하중에 의해 지지격자가 좌굴되지 않거나, 만약 좌굴이 발생하더라도 제어봉의 삽입을 가능하게 하여 원자로가 안전하게 정지될 수 있어야 한다[1]. 이를 입증하기 위해, 지지격자 충격시험을 수행하여 지지격자의 좌굴강도가 지진 및 냉각재상실사고시 지지격자에 가해지는 최대충격하중보다 크다는 것과 좌굴시 안내관 및 계측관이 삽입되는 격자에 변형이 발생하지 않는다는 것을 보여줘야 한다.

본 논문에서는 웨스팅하우스형 17x17 핵연료집합체의 중간지지격자를 국산화하면서 제조된 지지격자에 대한 충격시험을 수행하여 지진 및 냉각재상실사고에 대한 지지격자의 구조적 건전성을 평가하였다. 시험에 사용된 지지격자는 지지격자판의 원자재 또는 가공공정에 따라 세 그룹으로 분류하였으며, 충격강도와 동적강성도에 영향을 미치는 요인으로서 지지격자판의 재료특성과 두께, 지지격자 용접변수, 스프링력 등에 대한 분석을 수행하였다.

2. 시험 지지격자 및 시험 방법

시험에 사용된 지지격자는 17x17형 핵연료집합체의 중간지지격자로서[2], 혼합날개가 있고, 안내관 24개와 계측관 1개에 연결하기 위한 Sleeve가 용접 되어있으며, 지지격자판의 재질은 지르칼로이-4로서 각 그룹의 지지격자판에 대한 주요 기계적 특성은 표 1과 같다. 충격시험에서 사용한 지지격자는 지지격자 원자재 및 가공공정에 따라 분류하였다. 그룹 I, II는 동일 원자재에 의해 제조되었으며, 그룹 II, III는 동일 공정에 의해 제조되었고, 시험에 사용된 지지격자는 그룹 I이 7개, 그룹 II와 III는 각각 8개가 사용되었다.

표 1. 지지격자판의 주요 기계적 특성

구 분	그룹 I	그룹 II	그룹 III
U.T.S. (psi)	68,269	68,269	71,591
Y.S., 0.2% (psi)	55,448	55,448	55,506
Elongation (% in 2 inch)	26.3	26.3	36.75
Thickness(inch)	0.0180	0.0180	0.0186

지진 및 냉각재상실사고시 노내에서 핵연료집합체에 가해지는 충격은 인접 핵연료집합체의 지지격자를 통하여 전달되므로, 이를 모사하기 위해 지지격자 충격시험기는 핵연료집합체에서 지지격자와 지지격자 사이의 무게에 해당하는 해머를 진자에 달아 진자 운동에 의해 지지격자에 충격을 가하도록 설치하였다. 지지격자 충격시험에 사용되는 충격시험 장비는 그림 1 과 같이 구성

된다.

지지격자의 강도는 방사선 조사에 의해 증가하므로 보수적으로 방사선에 조사되지 않은 지지격자를 사용하며, 지지격자의 연료봉이 장입되는 격자에 짧은 피복관 토막을 삽입하여 시험한다. 또한, 원자로내 온도를 모사하기 위해 지지격자를 전기로내의 지지면에 견고하게 고정된뒤, 온도가 600°F에 도달하면 전기로 전면에 있는 문을 열고, 진자에 달려있는 해머를 낙하시켜 지지격자에 충격을 가한다. 충격력을 증가시키기 위해 진자의 각도를 점차 증가시켜 좌굴이 발생할 때까지 시험을 계속하며[3], 충돌시 마다 지지격자 지지면 및 충격면에서의 시간에 따른 충격력, 해머의 가속도, 해머의 반발각 등을 측정한다.

3. 시험 결과 및 평가

지지격자 충격시험에서 충격력은 지지격자 고정면에 설치된 Load Cell 로 직접 측정되며, 동적강성도는 Energy Method 나 Impact Duration Method 로부터 구할 수 있다. Energy Method 에 의한 동적강성도는 에너지 보존법칙을 이용하여 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}KX^2, \quad X = \frac{F}{K} \quad \text{에서} \quad K = \frac{F^2}{V^2M} \quad (1)$$

여기서, M = Hammer Mass, V = Impact Velocity
K = Grid Stiffness F = Impact Force

Impact Duration Method 는 충격하중이 Sinusoidal 응답으로 나타나는 것으로 가정하여 계산하는 방법으로 충격시험에서 측정된 충격시간을 사용하여 식 (2)와 같이 구한다.

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \text{에서} \quad K = 4\pi^2 \frac{M}{T^2} \quad (2)$$

여기서, ω = Circular Frequency, f = 1 / T, T = Period of Response
K = Grid Stiffness, M = Hammer Mass

Energy Method 는 완전탄성충돌을 가정하기 때문에 지지격자와 같은 구조물에 대한 충격시험의 경우 반발각이 상대적으로 작게 나타나, 동적강성도의 값이 지나치게 크게 계산되는 경향이 있으므로, 본 논문에서는 Impact Duration Method 를 이용하여 동적강성도 값을 구하였으며, 좌굴강도는 지지격자가 좌굴되기 직전의 충격력으로 하였다. 충격시험 결과 그룹 I 의 좌굴강도 및 동적강성도는 기준 값에 비해 각각 17%, 5% 증가하였고, 그룹 II 의 경우는 각각 18%, 2%, 그룹 III 의 경우는 각각 36%, 4% 증가하였다. 지진 및 냉각재 상실사고에 대한 핵연료집합체 구조해석에서 동일한 외부하중에 대한 지지격자의 충격성능은 충격시험에서 구한 좌굴강도가 클수록, 그리고 동적강성도는 작을수록 더 나아지게 된다. 실제로 각각의 동적강성도를 입력하여 지진 및 냉각재

상실사고에 대한 해석을 수행한 결과, 발생한 충격력보다 그룹 I, II, III 지지격자의 좌굴강도가 충분히 크며, 초기설계에 사용된 지지격자보다 설계여유도가 증가하였다.

지지격자 좌굴 발생 후 제어봉의 삽입가능성을 평가하기 위해 좌굴된 지지격자의 좌굴 모드를 분석한 결과 지지격자의 좌굴은 지지격자판의 교차점 용접부위의 회전변형에 의해 발생한 형태이며, 대부분의 지지격자가 그림 4(a)와 같이 충격면에 인접한 열에서 발생하였으며 일부의 지지격자는 그림 4(b)와 같이 지지면에 인접한 열에서 좌굴이 발생하였다. 또한, 그룹 I, II, III 모두 안내관 및 계측관이 삽입되는 격자에서는 변형이 발생하지 않아 지지격자에 좌굴이 발생된 후에도 제어봉 삽입이 가능하여 원자로의 안전 정지에 문제가 없는 것으로 평가되었다.

4. 좌굴강도에 대한 영향 분석

그룹 I, II, III 지지격자는 동일한 설계도면 및 시방에 의해 제작되었으나 그룹 III의 좌굴강도가 다른 그룹에 비해 상당히 크게 나왔으므로 이에 대한 원인을 분석하였다.

지지격자의 구조적 특성에 영향을 미치는 인자로는 지지격자판의 재료특성, 두께 및 폭, 지지격자 용접방법 및 조립 정밀도, 지지격자 Cell의 스프링력 및 강성도 등을 들 수 있다. 시험에 사용된 지지격자의 형상 및 조립정밀도는 동일한 시방에 의해 관리되므로 이에 따른 지지격자 좌굴강도의 차이가 크지 않을 것으로 보이며, 동일 시방 내에서 그룹 I, II 와 그룹 III의 원자재 재료특성과 두께 차이, 이때 적용한 용접 변수에 의한 용접량 차이, 지지격자 Cell의 스프링력 및 강성도의 차이 등이 주로 영향을 미칠 것으로 보인다.

표 1에서 보는 바와 같이 원자재의 항복강도는 그룹 I, II, III이 모두 비슷하고 극한강도와 연신률은 그룹 III이 그룹 I, II 보다 크게 나타나 그룹 III의 좌굴강도가 다른 그룹에 비해 증가된 것으로 보인다. 한편, 판재가 압축하중을 받을 때의 좌굴하중은 일반적으로 식 (3)과 같이 표현되는데[4], 좌굴하중이 판재 두께의 세제곱에 비례하므로 판재의 두께가 좌굴하중에 미치는 영향은 매우 크다.

$$N_{cr} = \frac{4\pi^2 D}{b^2} \quad \text{with} \quad D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3)$$

여기서, N_{cr} : 단위길이당 좌굴하중, D : flexural rigidity, E : 탄성계수, ν : Poisson 비
 b : 압축하중을 받는 단면의 길이, t : 압축하중을 받는 단면의 두께,

그룹 I, II, III 지지격자에 사용된 지지격자판의 두께 측정결과 표 1과 같이 그룹 III의 지지격자판이 그룹 I, II의 지지격자판 보다 3.5% 정도 두꺼운 것으로 나타났다. 위의 좌굴식은 지지격자의 좌굴 문제에 직접적으로 적용하기는 좌굴모드 등에 약간의 차이가 있으나 식 (3)에서 3.5%의 두께 차이에 의해 좌굴하중은 약 11% 정도 까지 증가할 수 있다.

지지격자는 각 Strap을 교차하여 조립한 후, 교차점에서 레이저 용접으로 결합하며, 레이저 용접 변수에 의한 용접부의 깊이 및 크기 등이 지지격자의 좌굴강도에 영향을 주게 된다. 웨스팅

하우스의 시험결과에 의하면 용접깊이를 증가 시켰을 때 좌굴강도가 다소 증가하였으며 동적강성도의 변화는 없는 것으로 나타났다. 각 그룹의 지지격자 용접에 사용된 용접변수는 표2와 같으며, 그룹 III 지지격자의 입열량이 그룹 I 및 II 지지격자의 입열량 보다 약 14%가 많은 것으로 나타났다. 용접 입열량의 증가로 그룹 III 지지격자에 대한 좌굴강도가 그룹 I, II 지지격자에 대한 좌굴강도보다 증가한 것으로 판단된다.

표 2. 지지격자의 조립에 사용된 레이저 용접 변수

용접변수	그룹 I	그룹 II	그룹 III
Average Power (W)	438	438	440
Frequency (Hz)	17	17	17
Pulse Width (ms)	8.0	8.0	8.0
Shot Pulse	7	7	8
Heat Input (J/inch)	180	180	206

지지격자 Cell의 스프링력과 강성도가 클수록 지지격자가 충격하중에 저항하는 힘이 커져서 지지격자의 좌굴하중 및 동적강성도가 증가하게 된다. 웨스팅하우스의 시험결과에 의하면 지지격자 스프링력이 영인 경우가 지지격자 스프링력이 정상인 경우에 비해 좌굴하중이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 표 3에서 보는 바와 같이, 지지격자 Cell의 강성도는 그룹 III이 그룹 I, II 보다 약 17% 크며, 스프링력도 그룹 III이 그룹 I, II 보다 각각 15%, 33% 정도 큰 것으로 나타났다. 이러한 Cell의 스프링력과 강성도의 차이로 인하여 그룹 III 지지격자의 좌굴강도가 그룹 I, II 지지격자보다 커진 것으로 보인다.

표 3. 지지격자 Cell의 스프링력 및 강성도

구분	그룹 I	그룹 II	그룹 III
Cell Stiffness	918.9 lbs/in	918.9 lbs/in	1071.8 lbs/in
Cell Spring Force	7.48 lbs	6.43 lbs	8.58 lbs

5. 결론

17x17 Zircaloy 중간 지지격자 국산화 과정에서 제조된 그룹 I, II, III 지지격자에 대해 지지격자 충격시험을 수행한 결과, 그룹 I, II, III 지지격자의 좌굴강도 및 동적강성도가 초기설계에 사용된 기준값보다 크게 나왔으며, 지지격자의 충격성능도 향상된 것으로 나타났다. 또한, 세 그룹의 지지격자 좌굴모드를 분석한 결과, 지지격자의 좌굴은 지지격자판의 교차점 용접부위의 회전변형에 의해 발생한 형태이고, 대부분의 지지격자가 충격면에 인접한 열에서 발생하였으며 일부의 지지격자는 지지면에 인접한 열에서 좌굴이 발생하였다. 지지격자 좌굴시 안내관 및 계측관이 삽입되는 격자의 변형이 발생하지 않은 것으로 나타나 지진 및 냉각재상실사고시 지지격자에 좌굴이 발생된 후에도 제어봉 삽입이 가능하여 원자로의 안전 정지에 문제가 없는 것으로 평

가되었다.

한편, 지지격자의 좌굴강도에 영향을 미치는 요인들을 분석한 결과, 지지격자판의 두께 증가, 레이저 용접변수에 의한 교차점 용접부위의 용접 입열량 증가, Cell Spring Force와 Cell Stiffness의 증가 등에 의한 복합적인 영향으로 지지격자의 좌굴강도가 증가한 것으로 평가되었다. 그러나, 이러한 인자들이 지지격자의 좌굴강도 및 동적강성도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해서는 각 변수들에 대한 개별적인 민감도 분석이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] “Evaluation of Fuel Assembly Structural Response to Externally Applied Forces”, USNRC Standard Review Plan Section 4.2 Appendix A, US. NRC, 1981
- [2] “Fuel Design Report for 17x17 Fuel Assembly”, KNFC, 1994
- [3] 전상운 외, “집합체 SSE/LOCA 해석을 위한 지지격자 충격시험”, '95 한국원자력학회 춘계 학술대회 논문집, 한국원자력학회, 1995.5
- [4] A.C.Ugural, “Stresses in Plates and Shells”, McGraw-Hill, 1981

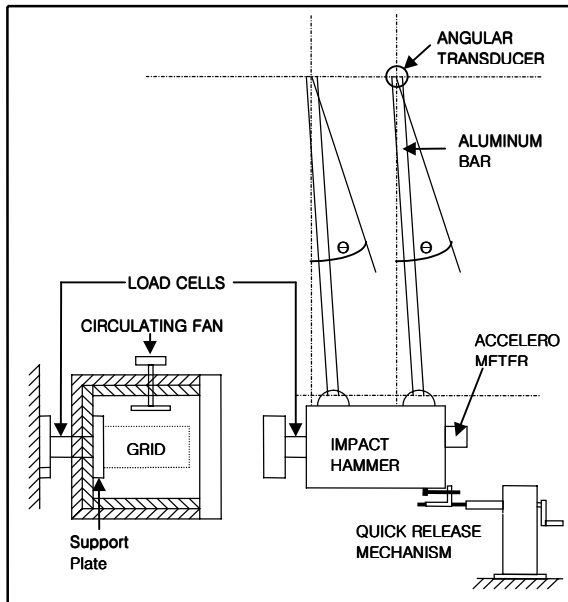


그림 1. 충격시험기 개략도

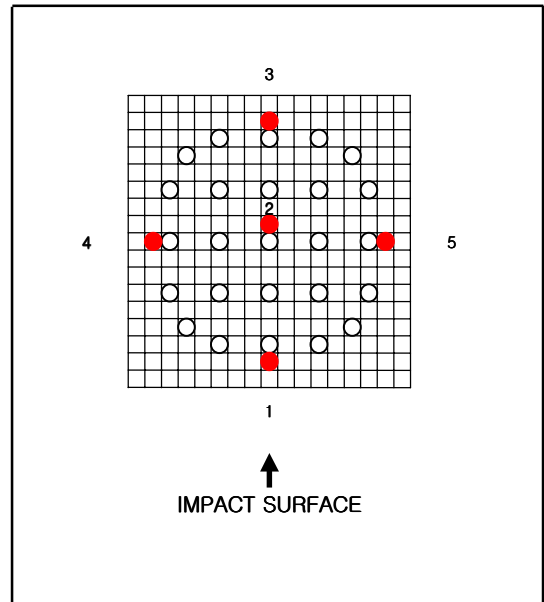


그림 2. 충격방향 및 Thermocouple 위치

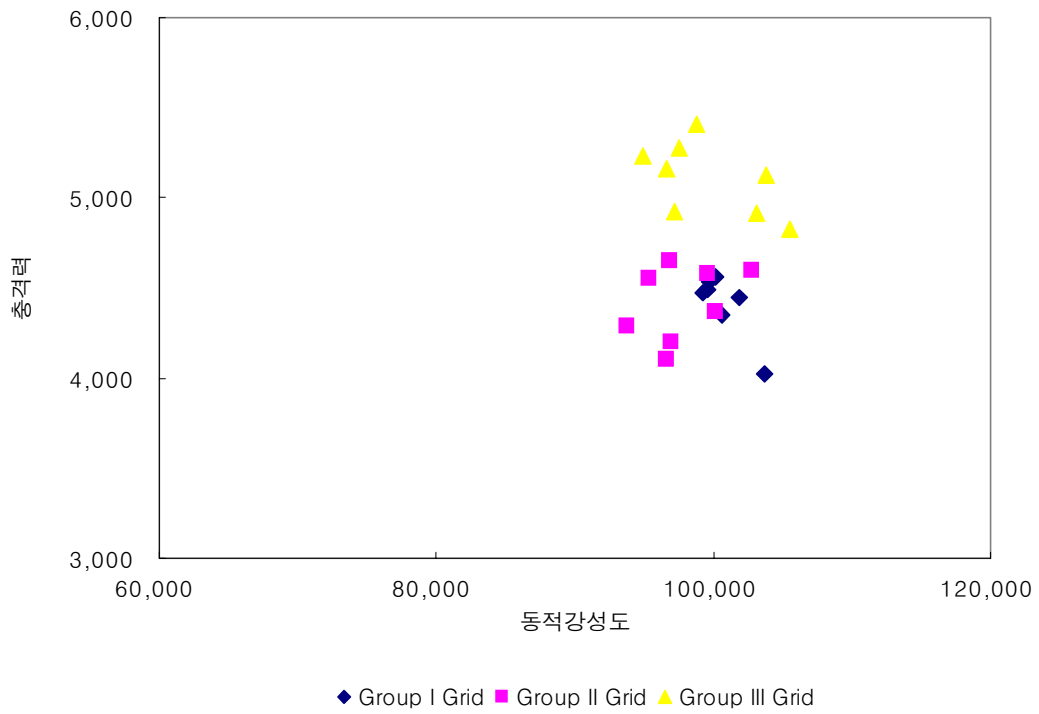
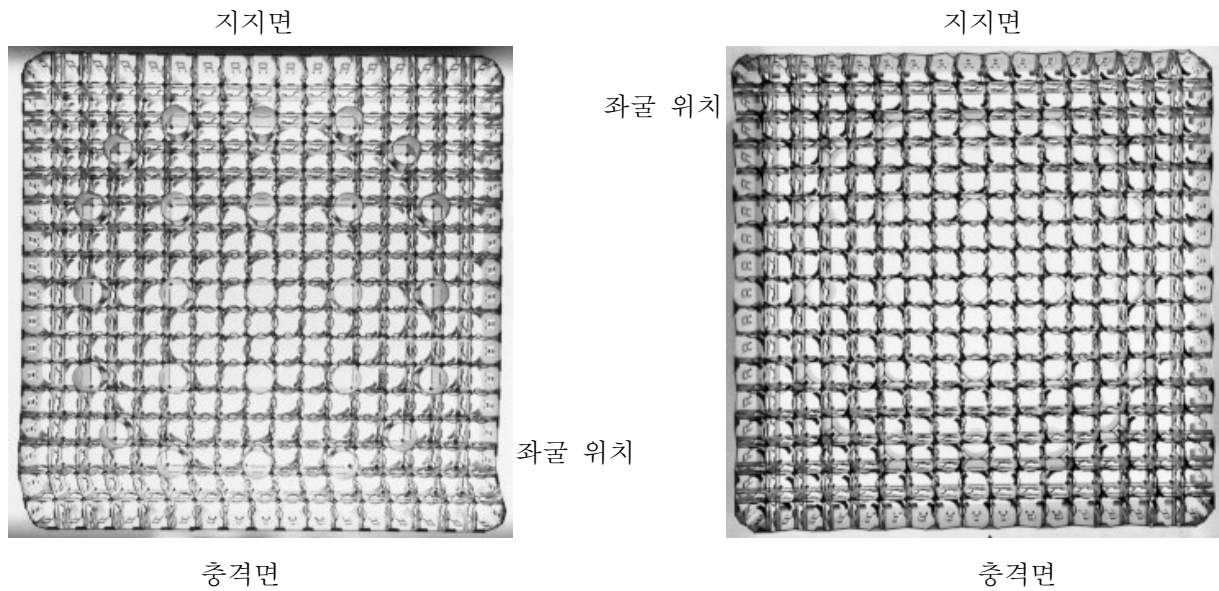


그림 3. 각 지지격자의 충격력 및 동적강성도 분포



(a) 충격면에서 변형된 지지격자

(b) 지지면에서 변형된 지지격자

그림 4. 충격시험 후 변형된 지지격자 형상