

## 집합체 SSE/LOCA 해석을 위한 지지격자 충격시험

전상윤, 김용환, 전경락, 김재원  
한국원전연료주식회사

### 요 약

지진 및 냉각재상실사고와 같은 외력에 대한 집합체 구조적 건전성 분석을 위한 해석 시 필요한 지지격자의 동적 특성치들을 얻기 위해 17X17 JDFA 중간지지격자에 대한 충격시험을 수행 하였으며, 지지격자에 대한 허용충격하중값(Crush Strength)을 구하고 Impact Duration Method를 이용하여 집합체 구조해석에 필요한 지지격자의 동적 강성도(Dynamic Stiffness)를 구하였다.

#### 1. 서 론

원자력발전소 부지에서의 지진(SSE, Safe Shutdown Earthquake) 및 원자로냉각재계통 배관에서의 냉각재상실사고(LOCA, Loss Of Coolant Accident)와 같은 사고시 발생하게 되는 외력이 원자로냉각재계통에 작용하게 되면 원전연료집합체에도 어떠한 형태의 외력이 작용하게 되며, 이러한 사고에 대해서 원자로 노심에 장전되어 있는 집합체에 대한 구조적 건전성 분석을 요구하고 있다.

안전심사지침(SRP, Standard Review Plan) 4.2절[1]에서는 발생 확률이 낮은 지진 및 냉각재상실사고와 같은 외력에 대한 노심내의 원전연료집합체 구조응답에 대한 해석을 통해 지진 및 냉각재상실사고와 같은 외력하에서도 핵연료계통의 냉각성이 유지되어야 하며 노심의 손상정도가 제어봉을 삽입할 수 없을 만큼 심하면 안된다고 규정하고 있다. 이를 위해 지진 및 냉각재상실사고에 대한 집합체 구조해석으로부터 얻어진 하중을 SRSS(Square Root of Sum of Squares) 방법으로 합한 지지격자 조합하중이 지지격자의 충격시험으로부터 구한 허용하중보다 작음을 보여 주면 된다. 또한 지지격자 충격시험으로부터 얻어진 Dynamic Stiffness 등은 집합체의 SSE/LOCA 해석을 위한 집합체 노심모델의 입력자료로 사용된다.

#### 2. 지지격자 충격시험

##### 2.1 시험개요

원자로 노심에서의 지진 및 냉각재상실사고 등의 외부하중에 대한 지지격자 동특성을 얻기 위해 Impact Hammer에 의한 지지격자 횡방향 충격시험을 수행하여 ① 충격속도에 대한 충격하중의 변화, ② 지지격자 파괴하중(Crush Strength), ③ 지지격자 파괴모드(Failure Mode), ④ 지지격자 동적 강성도(Dynamic Stiffness) 등을 구하였다. 시험 대상으로는 17X17 JDFA 중간 지지격자를 사용하였으며 지지격자 완성체에 약 10 cm 길

이의 연료봉 피복관을 장입하였고 안내관 Section을 Sleeve에 의해 지지격자와 결합하여 집합체가 조립된 상태를 모사하였다. 시험에 사용된 지지격자 및 피복관의 재질 및 제원을 표 1에 나타내었다[2].

표 1. 지지격자 및 피복관의 재질 및 제원

| 재 질 | 지지격자 Strap |                       | Zircaloy-4 |
|-----|------------|-----------------------|------------|
|     | 피복관        |                       | Zircaloy-4 |
| 제 원 | 지지격자       | Inner Strap Thickness | 0.0189 in. |
|     |            | Outer Strap Thickness | 0.0189 in. |
|     |            | Height                | 1.654 in.  |
|     |            | Width                 | 8.421 in.  |
|     | 피복관        | Outer Diameter        | 0.374 in.  |
|     |            | Inner Diameter        | 0.324 in.  |
|     |            | Section Length        | 4.000 in.  |

## 2.2 시험장치

지지격자 충격시험에 사용된 시험장치의 개략도를 그림 1에 나타내었으며 주요 장비들은 다음과 같다.

- ① Hammer and Stand
- ② Furnace and Thermocouples
- ③ Angular Transducer and Load Cells
- ④ GHI Transient Waveform Capture System
- ⑤ Digital Device for Thermocouple Readout
- ⑥ Furnace Controller for Strip Heater
- ⑦ Polaroid Camera

지지격자에 가해지는 충격하중의 크기는 진자의 Hammer 각도로써 조절되며, 충격시의 충격하중을 측정하기 위해 2개의 Load Cell이 사용 되었다. 또한 각 각도에 대한 지지격자와 Hammer의 충격시 GHI Capture System에 의해서 Impact Time Duration, Impact Force, 그리고 Rebound Angle 등의 값이 기록된다[3].

## 2.3 시험방법

지지격자에 대한 충격시험은 원자로 노심의 온도상태를 모사하기 위해 전기로를 이용하여  $600^{\circ}\text{F} \pm 20^{\circ}\text{F}$ 의 온도 범위에서 수행하였으며, 지지격자에 충격하중을 가하기 위한 진자 질량은  $198 \pm 3$  lbm를 사용하였다. 또한 지지격자에 대한 충격하중을 증가시키기 위해 진자 각도를  $4^{\circ}$  에서  $1^{\circ}$  씩 증가 시켰으며 개략적인 시험절차는 다음과 같다. 먼저 연료봉 피복관 Section을 안내관이 결합된 지지격자에 삽입하고 지지격자를 Back Holding Plate에 고정후 Thermocouple을 지지격자의 정해진 위치에 부착한다. Furnace를 고정시키고 Thermocouple 온도값이  $600^{\circ}\text{F} \pm 20^{\circ}\text{F}$  가 될 때까지 Heat-Up 시킨다. 진자의 각도를  $4^{\circ}$  까지 상승시킨후 Furnace의 Door를 열고 진자를 Release 시켜 해머가 지지격자와 충격하도록 한다. 이때 Peak Impact Force와 Time Duration 등이 자동 기록되며, Peak Impact Force가 이전의 충격값과 비교하여 특징적으로 작아 질 때까지 진자의 각도를  $1^{\circ}$  씩 증가시키면서 반복해서 실시한다[3].

### 3. 지지격자 파괴하중 및 동적 강성도

지지격자의 충격시험에서 각 각도에서의 Peak Impact Force가 이전의 각도에서의 충격값과 비교하여 특징적으로 작아질 때 그 이전의 충격값을 그 지지격자의 파괴하중으로 하였으며 이와 같은 시험측정치 분포로부터 취한 평균값의 95% 신뢰 수준으로 구해진 지지격자 파괴하중값을 집합체 SSE/LOCA 해석시 허용하중값으로 사용한다.

지지격자에 대한 Dynamic Stiffness는 지지격자 충격시험 결과로부터 Energy Method 나 Impact Duration Method를 사용하여 계산할 수 있으며[3], 집합체 SSE/LOCA 해석시 사용되는 집합체 노심모델의 입력자료로 사용되어 진다.

#### ① Energy Method

Energy Method는 지지격자를 Crush 되기 이전까지는 완전 탄성체라고 가정하여 충돌 전후의 에너지보존법칙으로부터 지지격자의 Dynamic Stiffness를 계산하는 방법이다.

$$\frac{1}{2} MV^2 = \frac{1}{2} K\delta^2, \quad F = K\delta \quad \text{로부터,}$$

$$K = \left(\frac{F}{V}\right)^2 \frac{1}{M}$$

여기서,  $F = \text{Impact Force}$ ,  $K = \text{Grid Stiffness}$   
 $V = \text{Impact Velocity}$ ,  $M = \text{Hammer Mass}$

#### ② Impact Duration Method

Impact Duration Method는 지지격자 충격시험시 충격하중이 Sinusoidal 응답으로 나타나는 것으로 가정하여 계산하는 방법이다.

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \text{에서,}$$

$$K = \frac{4\pi^2 M}{T^2}$$

여기서,  $f = 1 / T$ ,  $T = \text{Period of Response}$ ,  $\omega = \text{Circular Frequency}$ ,  
 $K = \text{Grid Stiffness}$ ,  $M = \text{Hammer Mass}$

위에서 설명한 두가지 계산방법 중에서 Energy Method에 의한 계산값이 Impact Duration Method에 의한 계산값보다 다소 크게 나타나는 경향이 있는데 이것은 Energy Method가 완전탄성충돌을 가정하여 계산하기 때문이다. 실제로 탄성충돌에서 충돌 전후의 에너지 보존정도를 나타내는 복원계수(Restitution Coefficient)를 계산하여 보면 지지격자의 충돌후 속도는 초기 충돌속도의 약 75%정도이다[3]. 따라서 Impact Duration Method에 의해서 계산된 Dynamic Stiffness값을 집합체 구조적 건전성 분석을 위한 집합체 SSE/LOCA 해석에 근사적으로 사용할 수 있다.

#### 4. 시험 결과

지지격자에 대한 충격시험 결과, 17X17 JDFA 중간지지격자에 대한 허용하중값은 평균값으로 약 6,100 lbs 였으며 집합체 SSE/LOCA 해석시 집합체 노심모델의 입력자료로 사용되어지는 값으로서 Impact Duration Method를 이용해 계산한 Dynamic Stiffness값은 약 180,000 lbs/in 정도였다. 그림 2에 Impact Velocity에 따른 Impact Force의 변화를 보여주고 있다.

한편, 지지격자 충격시험에 의한 지지격자 파괴모드(Failure Mode)는 그림 3에서 보는 바와 같이 지지격자 내부격자 열 중에 안내관을 포함하지 않은 두개 혹은 세개의 열이 변형되는 형태이다. 이 때 파괴모드는 지지격자 격자판의 좌굴(Buckling)과 내부격자판의 용접교차점에서 발생하는 상대적인 회전(Rotation)이 혼합된 형태로 나타났다.

#### 5. 결 론

지진 및 냉각재상실사고와 같은 외력에 대한 집합체 구조적 건전성 분석을 위한 집합체 SSE/LOCA 해석에 필요한 지지격자 파괴하중 및 동적 강성도 등을 얻기 위한 지지격자 충격시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 시험에서 사용한 시험장치와 시험방법으로 원자로 노심에서의 지지격자의 거동을 보수적으로 모사할 수 있었다.
- (2) 집합체 노심해석모델에 사용할 수 있는 지지격자의 Dynamic Stiffness 값을 Impact Duration Method에 의해 구할 수 있었다.
- (3) 17X17 JDFA 중간지지격자에 대한 허용하중값은 약 6,100 lbs 였으며, Dynamic Stiffness값은 약 180,000 lbs/in 였다.

또한, 이상과 같은 시험방법에 의해 새로운 집합체 개발이나 지지격자 설계 변경시 지지격자의 동적 특성값을 구하여 집합체 SSE/LOCA 해석에 사용할 수 있을 것이다.

#### 6. 참고 문헌

- [1] "Evaluation of Fuel Assembly Structural Response to Externally Applied Forces", USNRC Standard Review Plan Section 4.2 Appendix A, 1981
- [2] "Fuel Design Report for 17X17 Fuel Assembly", KWU and KAERI, 1987
- [3] "17X17 JDFA 중간지지격자에 대한 충격시험", KNFC/TR-MD-94009, 1994

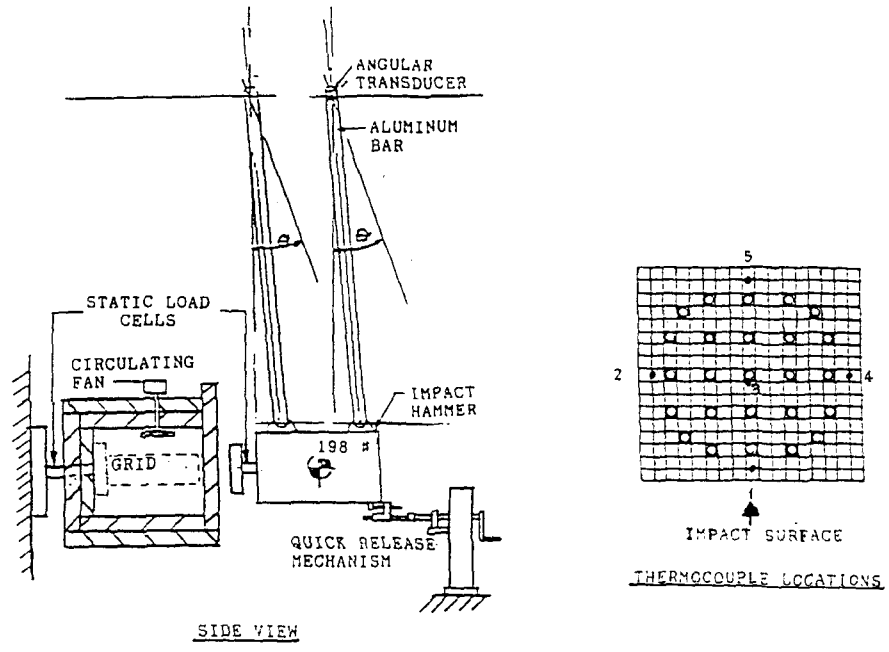


그림 1. 시험장치 개략도 및 Thermocouple 부착위치

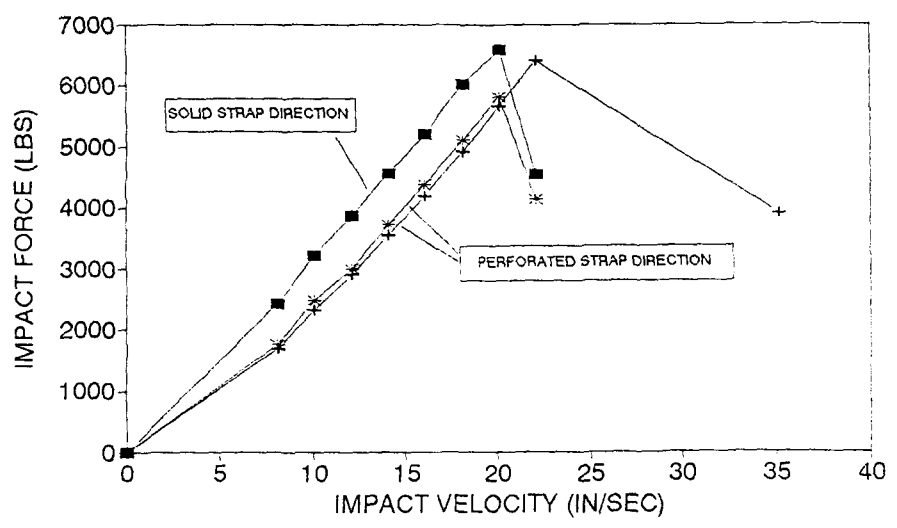
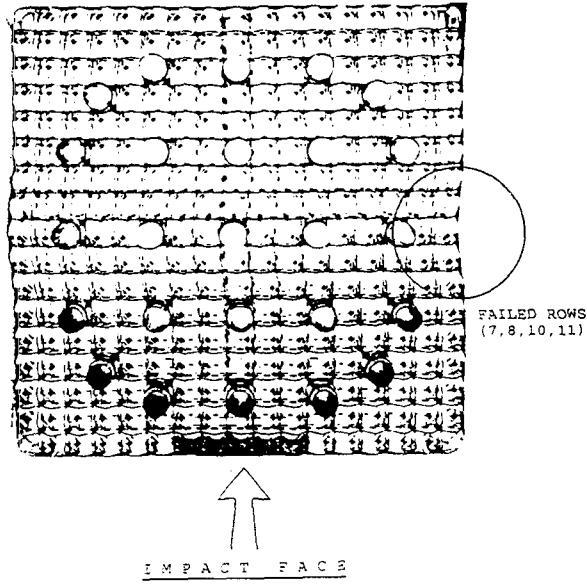
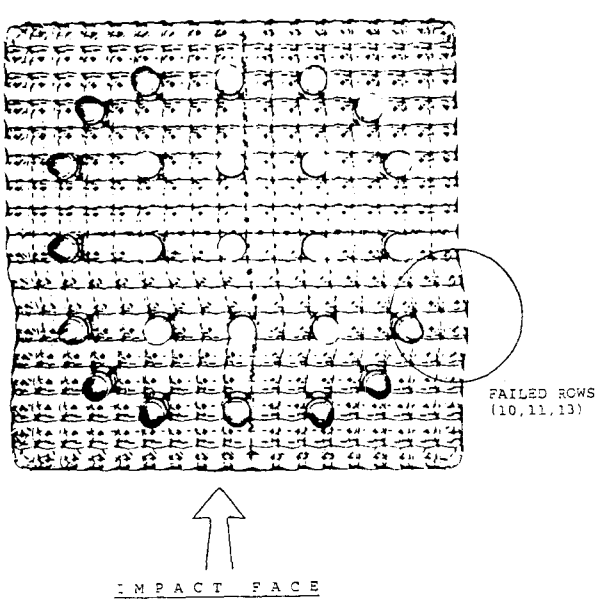


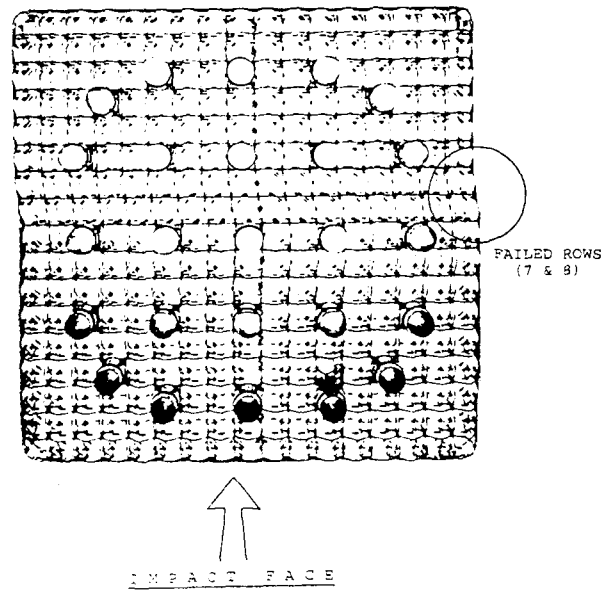
그림 2. Impact Velocity에 따른 Impact Force의 변화



(a) Solid Strap Direction (Grid ID=15234)



(b) Perforated Strap Direction  
(Grid ID=15238)



(c) Perforated Strap Direction  
(Grid ID=18865)

그림 3. 지지격자 파괴모드(Failure Mode)