

## 구조건전성 평가를 위한 CANDU 사용후연료 바스켓 낙하실험

최우석, 전재인, 서기석, 박정은\*, 유규수\*, 박완규\*, 이희택\*\*  
 한국원자력연구원, \*한국수력원자력(주), \*\*한국원자력안전기술원  
[wschoi@kaeri.re.kr](mailto:wschoi@kaeri.re.kr)

## 1. 서론

조밀건식저장시설 MACSTOR/KN-400은 CANDU type의 사용후연료를 바스켓에 담아 실린더에 10단 적재하여 보관하는 시설이다. 바스켓을 실린더 내로 이송하여 적재하는 과정에서 사고조건으로 발생할 수 있는 상황에 대하여 실증시험을 수행하였다. 고려한 사고조건은 두 가지 경우이다. 첫 번째는 바스켓이 7.5 m 높이에서 실린더 내로 자유낙하하는 경우이고, 두 번째는 실린더 내에 최하단 바스켓 1조가 적재되어 있는 상태에서 다른 바스켓이 실린더 내부를 통하여 적재된 바스켓 위로 자유낙하하는 경우이다. 실제 조밀건식저장시설의 실린더는 공중에 매달려 있는 구조이다. 그러나, 시험조건을 선정하기 위해 사전 수행된 낙하해석 결과 실린더가 매달려 있는 경우보다 실린더 바닥이 변형하지 않는 바닥에 올려진 경우가 바스켓 관점에서 더 가혹한 조건으로 판명되었다. 따라서, 실증시험에서는 실린더가 변형하지 않는 바닥에 올려진 경우에 대하여 낙하시험을 수행하였다. 낙하시험 이후 각각의 바스켓에 대한 헬륨을 이용한 누설시험이 수행되었고 누설율을 측정하였다.

## 2. 낙하시험시설 및 바스켓 시험모델

바스켓의 낙하시험 이후 만족해야 하는 성능요건은 다음과 같이 크게 두 가지이다.

(1) 변형량 < 1,102 mm (바스켓 외경 기준), (2) 누설율 < 10-5 atm·cm<sup>3</sup>/sec (He)

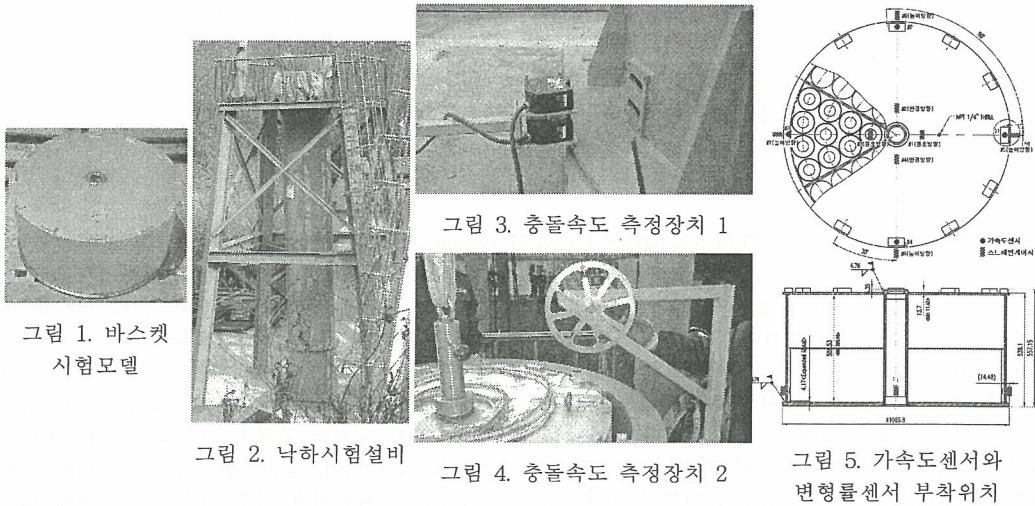
첫 번째 성능요건은 변형량에 대한 기준이고, 두 번째 성능요건은 누설율에 대한 기준이다. 변형량에 대한 성능요건은 바스켓의 낙하사고 이후 grapppler를 이용하여 회수가능여부를 판단하기 위한 조건이다. 누설율에 대한 성능요건은 바스켓의 누설여부를 판단하기 위한 조건으로 바스켓의 격납경계가 용접부임을 고려할 때 누설이 전혀 발생하지 않아야 함을 의미한다. 사고조건에 대한 실증시험을 위한 바스켓 시험모델은 그림 1과 같이 현재 월성 원자력발전소에서 사용되고 있는 바스켓과 동일한 바스켓을 사용하였다. 바스켓 내부에는 실제 CANDU 사용후연료의 무게와 동일한 모형연료다발을 적재하여 실제 바스켓의 중량과 동일하도록 시험 바스켓을 제작하였다. 바스켓을 낙하하기 위해서 제작된 낙하시험설비는 그림 2와 같다. 낙하시험설비는 크게 실린더와 실린더를 지지하는 낙하타워로 구성된다. 실린더는 상부실린더 부분과 하부드럼 부분으로 나뉘어져 있으며 각각은 볼트로 체결되어 실린더를 형성한다. 실린더를 두 개의 독립된 부분으로 나누어 제작한 것은 낙하시험 이후 바스켓의 변형이 심하게 발생하여 바스켓을 실린더 상부를 통하여 인출할 수 없을 때를 대비한 것이다. 하부드럼은 2조가 제작되었으며 1조는 낙하시험시 사용하고, 다른 1조는 누설시험시 챔버로 사용한다.

## 2.1 충돌속도 측정을 위한 장치

바스켓은 실린더 내부를 통하여 낙하하기 때문에 개방된 공간에서의 자유낙하와는 다른 성격을 가진다. 실린더 내부의 공기가 완충역할을 하여 바스켓의 낙하속도가 감소하기 때문이다. 바스켓이 실린더 바닥에 충돌하는 속도를 측정하기 위하여 2가지 장치를 고안하여 설치하였다. 첫 번째는 그림 3과 같이 거리 차이를 두고 설치된 두 대의 레이저 변위센서를 이용하여 속도를 측정하는 방법이다. 바스켓이 낙하하며 각각의 레이저 변위센서 설치위치를 통과할 때의 시간을 측정하여 시간차이를 계산하고 이를 이용하여 충돌속도를 계산하는 방법이다. 두 번째 장치는 그림 4와 같이 회전체와 레이저 변위센서로 구성된다. 회전체에는 낚시줄이 감겨져 있고 낚시줄의 한 쪽이 바스켓의 상부에 고정되어 있다. 바스켓이 낙하하면 낚시줄이 풀리면서 회전체는 회전을 시작한다. 회전체에는 8개의 반경방향 리브(rib)가 있으며, 이 리브의 옆쪽에 레이저 변위센서를 위치시키고 회전체가 회전할 때 펄스 데이터를 얻도록 한다. 펄스 데이터를 이용하여 바스켓의 충돌속도를 계산한다. 각각의 충돌속도를 상호 비교하여 검증하였다.

## 2.2 변형률 및 가속도 측정

바스켓의 충돌전후의 변형률과 가속도를 측정하기 위하여 바스켓 외부에 8개의 변형률 센서와 4개의 가속도 센서를 부착하였다. 바스켓 상판의 post 용접부 근방에 90도 간격으로 4개의 변형률 센서가 설치되며, 바스켓 하부 용접부 근방에 90도 간격으로 4개의 변형률 센서가 설치된다. 가속도 센서는 바스켓 상판의 spacer pad에 90도 간격으로 총 4개 설치된다. 센서의 설치위치는 그림 5와 같다.



3. 낙하시험 결과 및 결론

낙하시험시 바스켓의 충돌속도는 표 1과 같다. 바스켓 충돌전후 가속도 및 변형률은 정해진 위치에  
서 모두 취득되었다. 그 중 일부가 그림 6과 그림 7에 나타나 있다. 바스켓 위 바스켓 낙하 시험조건에  
서 기 적재되어 있던 기존 바스켓의 상부용접부에서 허용누설율을 초과하는 누설이 발생하였다. 따라서,  
유한요소해석 및 시편시험을 통해 바스켓의 설계를 개선하였고, 개선된 바스켓으로 재시험을 수행하였  
다. 개선된 바스켓은 두 가지 조건의 낙하시험 이후 요구되는 2가지의 성능요건을 모두 만족하였다. 낙  
하하는 바스켓의 최종 충돌 속도를 2가지 장치에 의해 측정하였으며 공기저항으로 인하여 이론적인 낙  
하속도보다 약 21 % ~ 23 % 정도의 속도감소가 발생하였다. 또한, 바스켓의 충돌 전후의 가속도 및 변  
형률을 측정하였다. 실증시험을 통하여 개선된 바스켓은 두 가지 성능요건을 모두 만족하였으며, 시험  
결과를 통하여 보건대, 저밀건식저장시설 MACSTOR/KN-400에 사용되는 바스켓은 낙하사고 조건에 대  
한 구조적 건전성을 유지한다고 할 수 있다.

표 1. 바스켓의 충돌속도 (Case 1: 실린더 바닥 낙하, Case 2: 바스켓 위 낙하)

| 낙하시험           | 낙하속도 #1  | 낙하속도 #2  | 낙하시험           | 낙하속도 #1  | 낙하속도 #2  |
|----------------|----------|----------|----------------|----------|----------|
| 1차 낙하시험 Case 1 | 9.43 m/s | 9.26 m/s | 1차 낙하시험 Case 2 | 9.15 m/s | 9.17 m/s |
| 2차 낙하시험 Case 1 | 9.42 m/s | N/A      | 2차 낙하시험 Case 2 | 9.22 m/s | N/A      |

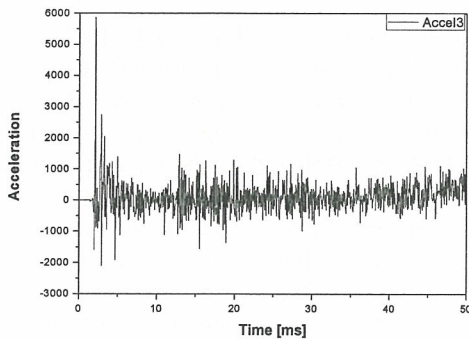


그림 6. 실린더 바닥 위 낙하시험 가속도이력 @#3

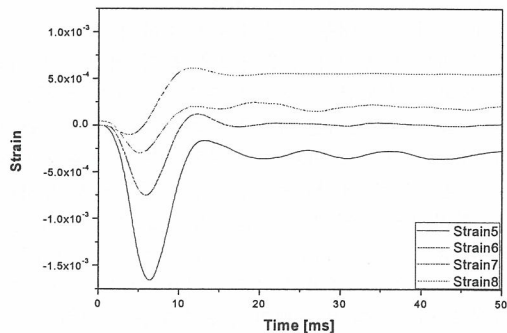


그림 7. 실린더 바닥 위 낙하시험 변형률 이력

참고문헌

1. Gheorghe Vieru, "Testing of the CANDU Spent Fuel Storage Basket Package," WM'02 Conference, 2002.