

CANDU 사용후연료 저장바스켓 설계 개선

최우석, 전재인, 서기석, 박완규*

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

*한국수력원자력(주), 경주시 양남면 동해안로 696-13

wschoi@kaeri.re.kr

1. 서론

월성원자력본부의 MACSTOR/KN-400은 CANDU type의 사용후 연료를 바스켓에 담아 실린더에 10년 적재하여 보관하는 조밀건식저장시설이다 [1]. MACSTOR/KN-400의 인허가 과정에서 사고조건에 대한 바스켓의 안전성 평가를 위한 실증시험의 필요성이 제기되었다. 실증시험으로 고려한 사고조건은 두 가지 경우였다. 첫 번째는 바스켓이 7.5 m 높이에서 실린더 내로 자유낙하하는 경우이고, 두 번째는 실린더 내에 최하단 바스켓 한 조가 적재되어 있는 상태에서 다른 바스켓이 실린더 내부를 통하여 적재된 바스켓 위로 자유낙하하는 경우였다. 두 번째 조건에 대한 실증시험 결과 실린더 내 적재 바스켓의 상부 용접부가 낙하 바스켓과 충돌하여 상부 용접부가 파손되고 누설이 발생하였다. 기존 바스켓이 누설을 성능요건을 만족하지 못함에 따라 바스켓의 설계 개선안 도출이 필요하게 되었다.

설계 개선안 도출을 위해 유한요소해석 및 시편시험 등을 수행하였다. 최종 개선안은 기존 제작공정 등을 고려하여 기존설계에서 변경을 최소화하고, 설계 개선이 건식저장시설의 다른 부속물에 미치는 영향을 최소화하는 방향으로 선정되었다. 이후 바스켓 최종개선안에 대한 실증시험이 재수행되었고, 요구되는 성능요건을 모두 만족하였다. 본 논문에서는 바스켓 설계 개선안 도출을 위하여 6개의 설계안에 대하여 수행된 전산모사 해석 및 시편시험, 그리고 이를 통한 설계 개선안 도출 과정에 대하여 기술하고자 한다.

2. 설계개선안 도출 및 개선안의 해석적 평가

실증시험에서 누설이 발생하게 된 경위를 파악하기 위해 실증시험 결과 및 낙하해석 결과를 분석하였다. 적재된 바스켓 위에 다른 바스켓이 낙하하면서 적재된 바스켓 상부의 블록 (spacer pad)에 낙하 바스켓 하판의 가장자리가 먼저 충

돌한다. 내부의 사용후 연료 모형 중량에 의하여 낙하 바스켓 하판이 굽힘하중을 받으며 하판 중앙부의 처짐이 발생한다. 하판 중앙부가 적재 바스켓 중앙의 포스트를 가격하고 이에 의해 포스트와 바스켓 상판의 용접부에 과도한 충격이 발생한다. 이로 인해 용접부가 파손된다. 따라서, 바스켓 설계개선 방향을 상부용접부의 건전성을 증가시키는 방향으로 선정하여 다음과 같이 4 가지 설계수정 방향을 설정하였다.

- (1) 용접부 자체의 성능을 개선하는 방향
- (2) 낙하바스켓 하판 처짐을 받아줄 수 있는 방향
- (3) 바스켓 상판의 굽힘저항성을 증가시키는 방향
- (4) 바스켓 하판의 굽힘저항성을 증가시키는 방향

이러한 설계변경방향에 기초하여 6가지의 설계 개선안을 도출하였고, 그림 1과 표 1에 나타나 있다. 6가지의 설계 개선안에 대하여 유한요소 모델을 작성하여 구조해석을 수행하여 상부용접부에 발생하는 소성변형률을 정리하면 표 2와 같다. 표 2에서 상부 용접부의 성능이 개선된 설계안은 #1, #2, #3, #6 이다. 이 가운데 설계 개선안 #2, #3은 바스켓을 구성하는 판의 두께를 변경해야 한다. 최종 설계 개선안은 기존모델에서 최소한의 설계 변경으로 달성할 수 있어야 하며, 설계변경이 용이한 것이어야 한다. 이러한 점을 고려하여 1안과 6안을 좀 더 심도있게 검토하기로 결정하였다.

Table 1. The revised designs based on the design direction

Revised designs	Design direction
1. Increasing the welding thickness at the top welding region	(1)
2. Adding extra spacer pads and increasing the rib height	(2)
3. Increasing the thickness of the side wall	(4)
4. Increasing the thickness of the bottom plate	(3)
5. Increasing the thickness of the top plate	(4)
6. Decreasing the height of the central post	(2)

Table 2. The revised designs based on the design direction and performance enhancement

Revised designs	Design direction	Enhance-ment	Plastic strain (%) ⁽¹⁾
#1	(1)	↑	27.35 ⁽²⁾
#2	(2)	↑	25.87
#3	(4)	↑	25.40
#4	(3)	↑	25.55 ⁽³⁾
#5	(4)	↓	Beyond elongation ⁽³⁾
#6	(2)	↑	24.89

※(1) The plastic strain of the current design is 28.07 %.
 (2) The plastic strain is slightly beyond the elongation limit.
 (3) Collision between the dummy fuel and the top plate occurred.

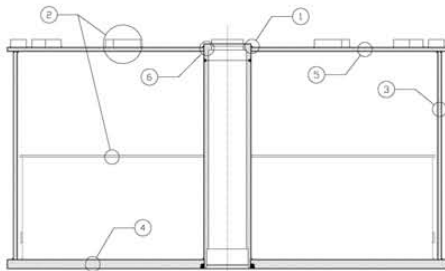


Fig. 1. Locations for design modification per each revised basket design

3. 설계개선안의 시험적 평가

설계개선안 가운데 상부용접부 자체를 보장하는 설계안의 검증을 위해 시편시험을 수행하였다. 시편제작을 위하여 바스켓의 포스트와 상판이 용접되는 위치의 형상과 동일한 치수를 갖는 두 개의 동심 파이프를 용접하여 바스켓 상부 용접부를 모사할 수 있는 구조물을 제작하였다. 이 구조물을 축방향으로 잘라 시험시편을 제작하였다. 동심 파이프의 용접은 월성원자력본부의 자동용접장치를 이용하여 바스켓의 상부 용접부와 동일한 상태로 용접하였다. 상부 용접부의 용접두께의 크기에 따른 성능을 보기 위한 시험이므로, 시험시편은 용접부 chamfer의 크기에 따라 총 3가지로 나누어 제작하였다. 시편의 분류는 표 3과 같다. 제작된 시편을 이용하여 인장시험 및 압축시험을 수행하였다. 표 4는 압축시험 결과를 나타내고 있다. 시험결과 용접두께를 증가시키면 용접부의 건전성이 크게 향상됨을 알 수 있었다. 인장시험 및 압축시험의 시편시험에서 가해진 하중은 정하중 및 준정적인 하중이었다. 반면에, 본 논문에는 포함하지 않았으나, 정하중과 충격하중의 두 가지

하중에 대한 구조해석을 수행한 결과, 정하중하에서의 해석결과는 용접부 성능이 크게 증가하였으나 충격하중하에서는 성능향상의 정도가 정하중하에서와 같이 크지 않았다. 이러한 점들을 고려하여 설계 개선안 #6번의 “중암 포스트의 높이를 낮추는 방안”이 최종 설계안으로 확정되었다.

Table 3. Specimen specification per chamfer thickness

Specimen	Chamfer thickness	Specimen no.
C0	0.0 mm	#1, #2
C3	3.0 mm	#3, #4
C4.75	4.75 mm	#5, #6

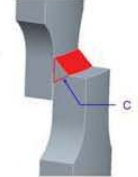


Table 4. Compressive test results

Chamfer Size	Ultimate load [kN]	Fracture thickness (upper, B1) [mm]	Fracture thickness (lower, B2) [mm]	Fractured region view
#1 C0	42.65	6	3.5	
#2 C0	42.45	5	3.5	
#3 C3	53.49	6	4.0	
#4 C3	52.99	6.5	4.0	
#5 C4.75	87.27	8.5	7.0	
#6 C4.75	92.00	10.0	7.5	

where, B1 and B2 are the thickness of fractured section

4. 결론

월성원자력본부의 조밀건식저장시설에서 운영되는 바스켓의 설계 개선안을 도출하였다. 실증시험에서 누설율 성능요건을 만족하지 못한 이유를 분석하여 설계 개선 방향을 선정하고 6 가지의 설계 개선안을 도출하였다. 각 설계 개선안에 대한 전산모사에 기초한 해석을 수행하고 바스켓 상부 용접부를 모사하는 시편의 인장 및 압축시험을 수행하였다. 해석 및 시험결과를 분석하고 최종 설계 개선안을 도출하였다.

5. 참고문헌

[1] Korea Hydro & Nuclear Power Co., Safety Analysis Report for MACSTOR/KN-400 (2007).
 [2] W.-S. Choi, J.-E. Jeon, K.-S. Seo, J.-E. Park, G.-S. You, W.-G. Park, "Demonstration drop test and design enhancement of the CANDU spent fuel storage basket in dry storage facility", Nucl. Engin. Des. 241, pp. 723-730 (2011).