'2000 춘계계학술발표회 논문집
한국원자력학회

사용후핵연료집합체 구조폐기물의 압축방식에 따른 힘의 비교

Comparison of Yield Stress related to Compacted Method of the Spent Fuel Assembly Skeleton

김영환, 윤지섭, 정재후, 김성현, 오승철
한국원자력연구소

요 약

세계 각국에서는 원자력 발전소에서 사용하고 난 사용후핵연료의 저장공간을 감소시키고, 사용후핵연료 내에 잔존해 있는 유효 에너지 자원을 재사용하기 위하여, 사용후핵연료를 재활용하고 있다. 이를 위하여 사용후핵연료 집합체로부터 연료봉을 추출하고난 후 최종적으로 핵연료집합체 구조폐기물 만 남게 되며, 이를 효율적으로 처리를 위해서 핵연료집합체 구조폐기물의 볼륨을 감소해야한다. 볼륨감소를 위한 핵연료집합체 구조폐기물 압축장치 개발에 앞서 보수유지, 경제성, 동력원 등을 고려해야한다. 구조폐기물은 상부/하부 노즐, 지지격자, 가이드튜브, 소형부품들로 구성된다. 특히 가이드튜브와 지지격자는 볼륨감소의 중요 요소이다. 따라서 본 연구에서는 지지격자의 정면 압축방시과 측면 압축방식 그리고 경사면 압축방식에 소요되는 힘을 비교하고 가이드튜브의 좌굴하중과 압축하중을 고려하였다. 이론 값 과 실험 값을 비교하였으며 이들을 통하여 최종으로 측면 압축방식이 선정되었다.

SUMMARY

To increase the utilization of uranium resources contained in the spent fuel, the spent fuel is reused. For this, the spent fuel is disassembled or spent fuel rod is extracted from the spent fuel assembly. After the rod is extracted, the remaining components of spent fuel assembly, so called a NFBC(Non-Fuel Bearing Components), should be compacted for the final disposal. To develop the compacting device, the compacted device should be considered in terms of fabrication cost of devices, maintainability, required power. Skeleton is composed of the top and bottom nozzle, grid, guide tube, compacted elements etc. Especially, the grid and guide tube is important factor for the skeleton compaction. In this study the characteristic of these three methods was investigated in the front face method, in the side face method, in the mixed face method for the grid compaction. Also It was considered in the bulking and compacting stress for the required power of the guide tube. The theoretical values are compared with the experimental values. Finally, the side face method is selected by the comparison.

1. 서론

경수로형 원자력 발전소에서 사용되어진 사용후핵연료 집합체는 현재 2020년 까지 누적 예상량이 약 20,000톤[1]에 달하기 때문에 이에 따른 고 방사능 핵 물질의 안전하고 효율적인 관리를 위한 기술자립이 시급하다. 세계 각국의 사용후 핵연료 집합체 관리 동향을 보면

사용후핵연료 집합체의 인출공정으로부터 핵연료봉이 인출된후의 집합체 구조체는 절단 및 압축처리에 의하여 보관되어지고 있는 추세이다. 현재까지 개발된 사용후핵연료 집합체 구조 폐기물의 감용 방식을 살펴보면, 독일의 밀집 포장 실증 시설PKA[2]에서는 유압 실린더의 500톤 프레스로 8 : 1로 압축 처리하는 방식을 사용하고 있다. PKA방식은 집합체 구조 폐기물의 길이방향과 평행으로 압축하는 정면 압축방식을 채택하고 있다. Fuel Master의 습식 밀집 방식을 사용하고 있는 미국의 B&W(Babcock and Wilcox)[3]사에서는 수중에서 집합체 구조폐기물을 상부방향에서 하부방향으로 인입하면서 1차로 집합체 구조폐기물의 길이 방향에 직각방향인 측면 압축방식으로 압축을 한 후 2차로 절단 방식을 사용하고 있다. 집합체 구조폐기물의 구성은 상부/하부노즐 각각 1개, 인코넬 지지격자 2개, 지르칼로이 지지격자6개, 안내관 및 소형부품 등으로 구성된다. 볼륨감소를 하는데 있어서 지지격자들과 안내관은 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 지지격자의 정면 압축방식과 측면 압축방식 그리고 경사면 압축방식에 소요되는 힘을 비교하고 가이드튜브의 좌굴하중과 압축하중을 고려하였다. 이론 값 과 실험 값을 비교하였으며 이들을 통하여 최종으로 측면 압축방식을 선정되었다.

2. 본론

2.1 실험방법

핵연료 집합체의 구조폐기물에 가해지는 작용방향에 따른 압축힘의 비교는 사용후 핵연료 집합체 처리의 작동방식을 결정하기 위한 분석자료로 사용되어지며, 또한, 구조체를 길이방향으로 압축하는 정면압축 방식의 안내관의 좌굴하중, 인코넬 지지격자의 항복하중과 구조체의 길이방향에 수직방향으로 압축되는 구조체의 지지격자의 측면의 압축 항복하중의 조사비교는 시스템 제작의 각 구성요소의 구조적 형상을 결정하는데 이용된다. 따라서, 본 절에서는 작용방향에 따른 압축힘의 비교와 각 작용방향에서의 지지격자의 압축 항복하중를 비교 조사하고 실험을 통하여 실험값과 이론값을 분석한다. 이를 통하여 최종 핵연료집합체구조폐기물의 압축장치의 압축방식을 결정한다.

2.2. 압축 방식에 따른 압축힘 비교

2.2.1 직접 압축 방식

가. 골격체 정면 압축시 좌굴 항복 하중

집합체 구조물을 절단하지 않고 그대로 압축력을 가하여 압축하는 방식으로 이 방식은 여러 조건을 고려해야 한다.

그 기본 원리를 Fig. 1에 나타냈으며, 이 방식에서의 조건을 기술하면 다음과 같다. 골격체의 정면 압축시 좌굴 항복 하중 P_a는 다음식과 같이 주어질 수 있다.

$$P_a = P_1 + P_2 \tag{1}$$

식(1)의 P_1은 격자간의 골격체 좌굴하중을 나타내며, P_2는 골격체 끝부분 좌굴하중을 나타낸다. 그 관계식은 다음과 같다.

$$P_1 = \frac{E \times I \times n_1 \times \pi^2 \times C_1 \times C_2}{L_1^2} \tag{2}$$

$$P_2 = \frac{E \times I \times n_2 \times \pi^2 \times C_1}{L_1^2} \tag{3}$$

여기서 C_1, C_2는 각각 골격체의 수와 격자간 수를 나타내며, E, I은 각각 재료의 종탄성

계수와 원형에 대한 단면 2차 모멘트, 그리고 n_1, n_2는 고정 계수를 나타낸다.

식(2), (3)에 의해 계산한 P_1은 555 KN이고 P_2는 865 KN이다. 그러므로 식(1) 골격체 좌굴 항복 하중 P_a는 1420 KN으로 거의 145 톤으로 산출된다.

나. 지지 격자의 정면 압축시 전단 항복 하중

정면압축시 지지격자가 전단될 때 17x17홀의 1layer(17홀)이 전단 된다고 가정할 때 지지 격자의 정면 압축시 항복 하중 P_b는 Fig. 2에서와 같은 개념으로 다음식으로 계산된다.

$$P_i = \frac{\sigma(b - d)t}{2} \quad (4)$$

$$P_b = P_i \times N \quad (5)$$

여기서 P_i는 hole 1개에 대한 항복 하중을 나타내고, P_b는 hole 17개일 때의 항복 하중, 그리고 N은 hole의 수를 나타낸다.

식(4), (5)에 의해 P_i가 38 KN, P_b가 684 KN으로 70 톤로 산출된다.

다. 지지 격자의 측면 압축시 항복 하중

지지 격자의 측면 압축을 고려하면 다음과 같다. 지지 격자의 측면 압축시 항복 하중 P_c에 대한 기본 개념은 Fig. 3과 같다

측면 압축시 항복 하중 P_c는 아래의 관계로부터 산출할 수 있다.

$$\sigma_m = \alpha_k \times \sigma_a \quad (6)$$

$$\sigma_a = \frac{P_a}{(b - a \times n) \times t} \quad (7)$$

$$\sigma_m = \frac{\alpha_k P_a}{(b - a \times n) \times t}, \qquad \alpha_k = 2.8 \quad (8)$$

$$P_a = \frac{\sigma_m \times (b - d \times n) \times t}{\alpha_k} \quad (9)$$

$$\therefore \quad P_c = P_a \times h \quad (10)$$

식에서 σ_m은 최대 집중 하중, 즉 인코넬의 경우 6468 kgf/cm^2[4]이고, σ_a는 평균 응력, α_k는 형상계수, 그리고 P_a, P_b는 각각 선하중과 면하중을 나타낸다.

그러므로 식(10)에 의한 지지 격자의 측면 압축시 좌굴 항복 하중은 식(9)으로 산출되는 선하중 150 KN에 의해 570 KN으로 대략 58 톤으로 계산된다.

라. 지지 격자의 경사면 압축시 좌굴 항복 하중

위 (나)와 (다)에서 구한 지지 격자의 정면 압축시 전단 항복 하중 P_b와 충격 하중 P_f, 그리고 지지 격자의 측면 압축시 항복 하중인 P_c와 충격 하중 P_n을 이용하면 경사면 압축에 대한 좌굴 항복 하중을 구할 수 있으며, 그에 대한 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_o = (P_b^2 \times P_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$P_w = (P_f^2 \times P_n^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

여기서 P_o는 항복 하중을, 그리고 P_w는 충격 하중을 나타낸다.

윗 식(11), (12)에 의한 P_o는 91 톤, 그리고 P_w는 182 톤으로 산출된다. 그리고 지지 격자

의 방향에 따른 충격 하중의 크기를 보면 경사면에 대한 값이 182 톤, 그 다음 정면이 140 톤, 측면이 116 톤으로 경사면에 대한 충격 하중이 가장 큰 것으로 계산되었다.

2.2.2 절단 후 압축 방식

가. 2 cm로 절단된 1 layer의 압축시 항복 하중

Fig. 4는 절단 후 압축력이 작용할 경우 힘의 전달 과정을 도시하고 있다. 그림에서와 같이 압축력 P가 1개의 연료봉에 가해지면 그 힘은 그 연료봉을 지지하고 있는 하부의 두 개의 연료봉에 각각 분력 P_1, P_2로 가해지게 된다. 그러면 Fig. 4 에 보인 바와 같이 이 힘들의 벡터로 해석하면 연료봉 1개의 항복 하중을 구할 수 있으며 그 관계식은 아래와 같이 표현된다.

$$P = P_1 \cos\theta + P_2 \cos\theta \tag{13}$$

그림에서 $P_1 = P_2$이고 $\theta = 30°$ 이므로 식(13)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P = 2 \times P_1 \cos\theta = P_1 \times \sqrt{3} \tag{14}$$

Fig. 5에 보인 연료봉의 변형되는 한 단면을 고려하여 2 cm로 절단된 1 층의 압축시 항복 하중을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{P_1}{ab}, \quad a = D - d \tag{15}$$

$$\sigma = \frac{P_1}{(D - d)b} \tag{16}$$

$$P_1 = \sigma(D - d)b = 675\ kgf \tag{17}$$

$$P = P_1 \times \sqrt{3} = 1169\ kgf \tag{18}$$

여기서 σ는 SUS316재질의 항복 강도로서 $2812\ kgf/cm^2$이고, D, d, b, a는 각각 연료봉의 외경, 내경, 길이, 전단 단면적을 나타낸다.

그리고 연료봉의 총 길이는 연료봉 1개의 길이와 총 개수의 곱으로 $4974\ cm$로 구해진다. 이것을 $2\ cm$로 절단시 총 개수는 23987개이다. 그러므로 $2\ cm$로 절단된 1 층의 압축시 항복 하중 P_g를 구하면 다음과 같다.

$$P_g = f \times N = 2291\ KN \tag{19}$$

여기서 f는 연료봉 1개에 가해지는 힘이고 N은 1 층의 개수를 나타내며 그 골격체의 절단 후 압축되기 전의 배열도를 Fig. 6에 나타냈다.

그러므로 1층 압축시 항복 하중 는 234 톤이다.

나. 정면 압축시 지지격자의 압축항복 하중

절단 후 압축시 지지 격자의 P_g 항복 하중 P_o는 Fig. 7에서와 같이 절단된 전체 면적에서 연료봉의 면적을 제거한 경우로 식(20)에 의해 구해진다.

$$\sigma = \frac{P_0}{(a \times b) - (A_1 \times 289 - 25)} \tag{20}$$

A_1은 연료봉의 단면적, $\frac{\pi d^2}{4}$으로 계산하고 이 식(20)을 이용하여 P_0를 구하면 2902 KN이 되며 이것은 약 296 톤이 된다. 위의 압축 방식에 따른 각 부의 이론적인 변형 하중을 Table 1에 나타냈다.

3. 결 론

경수로 형 사용후 핵연료 집합체 구조폐기물은 압축방식에 따라 소요되는 동력이 이론적으로 조사되었다. 지르칼로이 가이드튜부의 좌굴응력 및 전단응력의 이론값이 조사되었다. 이실험은 인코넬 지지격자의 정면압축과 측면압축의 경우에 대하여 수행하였고 각각 경우의 최대 압축력을 측정하였다. 이론값과 실험값을 비교해보면 정면압축의 경우, 인코넬 지지격자의 이론 압축항복 값과 실험 압축항복 값이 각각 296톤 과 232톤으로 약 20 %의 오차가 발생하였다. 이 오차는 KOPA형과 신형지지격자의 지지스프링의 구조차이로 사료된다. 측면압축의 경우는, 이론 압축항복 값과 실험 압축항복값이 각각 58톤 과 61톤으로 대체적으로 일치함을 보여주었으며, 정면압축과 오차발생이 적은 이유는 KOPA형과 신형지지격자의 지지스프링의 구조차이가 측면압축에 영향을 주지 않기 때문이다. 핵연료 집합체의 구조폐기물의 압축방식은 구조체의 길이방향의 정면 압축에서 좌굴 응력은 145톤, 압축항복하중은 70톤, 구조체의 직각방향인 측면압축에서 인코넬 지지격자는 가장 적은 58톤이 소요된다. 따라서 이와 같이 각 방식별 작업공간의 크기 및 압축력을 분석한 결과, 정면압축 방식보다 측면압축 방식이 경제성, 작업공간 및 보수유지 측면에서 유리한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. S.W. Park "Development of Spent Fuel Management Technology Research and Test Facility" , KAERI/RR-1802/97(1997).
2. R. Jung "Remote Handling and Disassembly of Light Water Reactor Fuel Elements in the Gorleben Pilot Conditioning Plant" IAEA-TECDOC-842 p27-45(1994)
3. S.W. Park "Spent Fuel Reconstitution, Consolidation, and Disassembly"

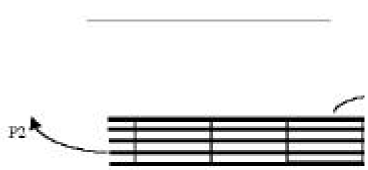


Fig. 1 골격체 정면 압축시 좌굴 항복 하중에 대한 기본 원리

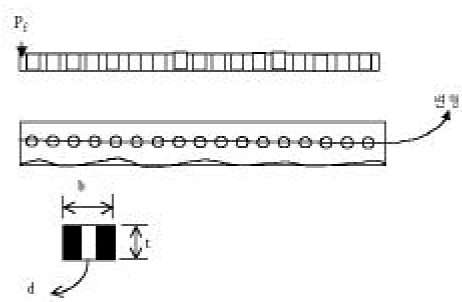


Fig. 2 지지 격자 정면 압축시 항복 하중에 대한 기본 원리

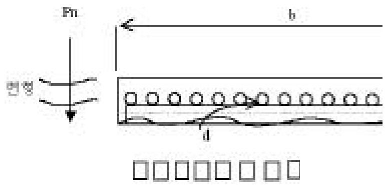
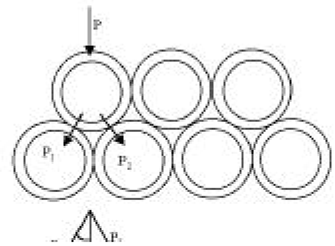
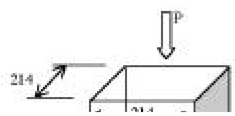


Fig. 3 **지지 격자 측면 압축시 항복**





r 200 개(20x10)

ㅓ의 배열도

변형 하중 비교

방식 \ 요소			직접 압축(ton)	절단 후 압축(ton)	비고
골격체			145	234	
지지 격자판	정면	1 layer 전단	70	-	
		17x17 hole 압축	296		
	측면		58		
	경사면		91		

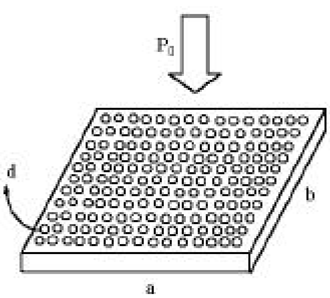


Fig. 7 **지지 격자가 면압력을 받을 때의 힘**

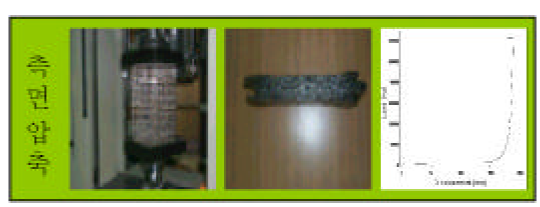


그림 8 핵연료집합체 지지격자의 정면압축 실험결과

그림 8 핵연료집합체 지지격자의 측면압축 실험결과