

사용후핵연료집합체 구조폐기물의 절단길이에 따른 볼륨감소
Volume Reduction related to Cutting Length of the Spent Fuel
Assembly Skeleton

김영환*, 정재후*, 윤지섭*, 오승철*, 김도우**
한국원자력연구소*, (한양대학교**)

요 약

경수로형 사용후핵연료 집합체의 구조폐기물은 방사선 환경과 유해한 보관 공간 측면에서 볼륨 감소의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 핵연료 집합체의 구조폐기물에 가해지는 압축 힘의 방향에 따른 크기를 비교하였으며, 절단되는 길이에 따른 벌크 볼륨비와 진동 후 정렬된 볼륨비를 비교 실험하였다. 또한, 핵연료 집합체의 구조폐기물에 완전강체 상태에서의 이상적 볼륨 조사와 압축 후 전단되었을 때의 실제 핵연료 집합체경우 이상적 볼륨이 조사되었으며, 압축 후 전단 되었을 때 실제 핵연료 집합체의 구조폐기물 볼륨을 실험으로 조사하였다. 따라서, 이상의 비교 데이터와 실험 데이터에의하여 핵연료 집합체의 구조폐기물의 압축 후 절단길이에 따른 볼륨감소비를 구하였다.

Abstract

The skeleton of the spent nuclear fuel assembly is demanding volume reduction respect to the radioactivity surrounding and toxicity storage space. The paper is researched for comparison of compacting force related to the direction on the skeleton of the spent nuclear fuel assembly, and experimented bulk volume ratio and compacted volume ratio. When skeleton of the spent nuclear fuel assembly is completely compacted, ideal volume is researched on it and experimented actual spent nuclear fuel assembly skeleton volume, therefore researched volume reduction ratio related to cutting length on the compacted skeleton of the spent nuclear fuel assembly.

1. 서론

경수로형 원자력 발전소에서 사용되어진 사용후핵연료 집합체는 현재 2020년 까지 누적예상량이 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. 독일의 PKA[2]에서는 구조폐기물에 대해 압축방식을 채택하고 있고, B&W[3]에서는 절단방식으로 구조체 폐기물을 감용시키고 있다. 독일의 압축방식은 사용후핵연료봉이 제거된 집합체 구조물을 500톤 프레스를 사용하여 8 : 1의 압축비로 압축 처리하여, 이를 처분용 캐니스터에 밀봉, 사용후핵연료와 함께 POLLUX Cask에 적재하여 저장 혹은 처분하고 있다. 독일의 사용후 핵연료 전처리시설 PKA[2]에서 사용하고 있는 POLLUX Cask는 처분용 캐니스터에 사용후 핵연료 물질을 5개 적재할 수

있도록 되어 있다. 따라서, PKA[2]에서는 8개의 PWR 사용 후 핵연료봉을 밀집하여 4개의 캐니스터에 넣고 이때 발생하는 NFBC 8개를 압축하여 1개의 캐니스터에 밀봉하여 처리하고 있다. 그리고, B&W에서 사용되고 있는 절단방식은 압축구조물을 절단 장치내부에 수직 방향으로 인입하여, 이를 서서히 단계적으로 아랫방향으로 내려오도록 함으로써, 1차적으로 수평방향의 램에 의해서 집합구조물을 밀집, 압축한다. 그리고, 2차적으로 수평 램의 하단부에 수평방향 카터를 설치하여, 4cm단위로 전단한다. 이와같이 전단된 구조물들은 자중에 의해서 경사진 안내판을 따라 저장박스에 모아지며 저장된 조각들을 저장한다. 이상과 같은 두가지 처리방식중 독일의 압축방식은 압축시스템의 복잡한 구조와 시스템 운영으로 B&W[3]의 절단방식보다 보수,유지와 경제성에 적절치 못한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 절단방식중 수평 인입후 핵연료집합체 구조폐기물에 가해지는 압축힘을 작용방향에 따라 정면, 측면으로 비교하고, 측면압축방법에서 압축전의 절단길이에 따른 벌크 볼륨비와 진동정렬후 볼륨비를 조사한다. 그리고 압축후 절단길이에 따른 최종 볼륨비를 비교 조사한다.

2. 본론

2.1 실험방법

핵연료 집합체의 구조폐기물에 가해지는 작용방향에 따른 압축힘의 비교는 사용후 핵연료 집합체 처리의 작동방식을 결정하기 위한 분석자료로 사용되어지며, 또한, 구조체를 길이 방향으로 압축하는 정면압축 방식의 지지관 좌굴하중, 인코넬 지지격자의 항복하중과 수직 방향으로 압축되는 구조체의 지지격자의 측면의 압축 항복하중의 조사 비교는 시스템 제작의 각 구성요소의 구조적 형상을 결정하는데 이용된다. 따라서, 본 절에서는 작용방향에 따른 압축힘의 비교와 각 작용방향에서의 지지격자의 압축 항복하중을 비교 조사하고, 아울러 구조체의 절단길이에 따른 최종 볼륨비를 계산하기 위하여 집합체 구조물의 전체 체적을 조사한다. 그리고, 지지관의 길이 2, 3, 5, 7, 9cm에 따라 절단한 후의 벌크볼륨비와 진동후 정렬된 볼륨비를 실험으로 구하여 비교 검토 한다. 따라서, 이 실험값을 토대로 절단 전의 전체 체적에 대한 절단후의 최대 감용 볼륨비로서 최적의 적정절단길이를 결정한다.

볼륨값의 측정은 눈금이 새겨진 1 l 비이커를 사용하여 수행하였다. 그리고 실험재료는 실제 사용후 핵연료 지지관의 직경과 비교할 때 볼륨비 오차가 0.1인 SUS1/2" 튜브를 사용하고, 발생된 오차는 최종계산에서 보정한다.

2.2 작용방향에 따른 압축힘의 비교실험

2.2.1 정면압축과 측면 압축방식의 비교

● 정면압축방식

① 안내관의 정면압축 시 좌굴하중 : P_g

$$P_g = P_1 + P_2$$

$$P_1 = \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{L_1^2} \cdot \pi^2 \cdot \text{플렉체수} \cdot \text{격자간수} = 555 \text{KN} \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{L_1^2} \cdot \pi^2 \cdot \text{플렉체수} = 865 \text{KN} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 P_g 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\therefore P_g = P_1 + P_2 = 1420 \text{KN} = 145 \text{톤} \quad (3)$$

(pa: 골격체 좌굴하중, pl:격자간의 골격체좌굴하중, P2:골격체끝부분 좌굴하중
E: 지르칼로이 탄성계수, I: 단면2차모멘트, n1,n2 : 가이드튜브 개수)

㉔ 인코넬 지지격자의 정면압축 시 항복하중: Pb

$$P_a = \frac{\sigma (b-d)t}{2} = 38KN \quad (4)$$

식 (4))와 (5)로부터 Pb는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\therefore P_b = P_a \times \text{전단면 수} = 38 \times 18 = 684KN = 70 \text{톤} \quad (5)$$

(Pa : hole 1 개일 때 항복하중, Pb:hole 17 개일 때 항복하중)

σ : 인코넬 허용응력, b : 격자hole간의 중심거리, d : 가이드튜브 외경)

● 측면압축방식

인코넬 지지격자의 측면압축 시 항복하중: Pc

$$\sigma_m = \alpha k \cdot \sigma_a \quad , \quad \sigma_a = \frac{P_L}{(b_1 - d \cdot n)t}$$

$$\sigma_m = \frac{\alpha k \cdot P_L}{(b_1 - d \cdot n)t} \quad , \quad \alpha k = 2.8$$

$$P_L = \frac{\sigma_m \cdot (b_1 - d \cdot n)t}{\alpha k} = 150KN \quad (6)$$

식 (6)과 (7)로부터 Pc는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\therefore P_c = P_L \cdot h = 570KN = 58 \text{톤} \quad (7)$$

(Pc: 지지격자의 측면압축시 항복하중, σ_m : 최대집중하중, 인코넬항복응력 :
6468Kgf/cm², σ_a : 평균응력, αk : 형상계수, PL : 선하중, Pb=Pa·h : 면하중
b1: 격자폭, d: 가이드 튜브 외경, n : 가이드튜브 구멍 수 t : 격자두께)

상기 조사비교에 의해 측면에서 구조체를 압축하는 힘의 크기는 정면압축방식으로 힘이 작용될 때 보다 압축힘의 크기가 적게 요구된다. 따라서, 1차적으로 집합체 지지 구조물을 측면 압축에 의해 밀집, 압축하는 방법은 경제성 측면에서 적절한 방법이다. 그리고, 이러한 측면 압축에 의한 집합체 지지 구조물의 2차적 볼륨감소를 위해 핵연료 집합체의 구조물의 절단길이에 따른 최종 볼륨감소비를 다음과 같이 실험으로 구한다.

2.2.2 핵연료 집합체 구조폐기물 압축 전의 절단길이에 따른 벌크 볼륨비와 진동정렬 볼륨비 비교

본 절의 실험에서 사용되는 지지관의 튜브 외부직경은 실제 지지관 튜브의 외부직경 12.4mm과 유사한 SUS튜브1/2"(직경12.7mm)를 사용한다. 여기서 실제 지지관을 사용하지 못한 이유는 재질이 지르칼로이-4로 튜브 길이가 2000cm 이상되며, 가격이 고가이기 때문이다. 따라서, 본 실험에서는 실제 지지관과 SUS튜브1/2"를 2000cm의 실제 길이가 아닌 실험길이 500cm로 하고 절단길이를 2, 3, 5, 7, 9cm로 절단하여 벌크볼륨비(식 8)와 진동정렬 후 볼륨비(식 9)를 비교한다. 그리고, 실험값의 오차는 0.1로 SUS1/2튜브 실험 값에 보정하여 계산한다(그림1).

$$\text{Bulk volume ratio} = \frac{\text{봉의 체적}}{\text{절단후체적}} \quad (8)$$

$$\text{Compacted volume ratio} = \frac{\text{봉의 체적}}{\text{진동정렬후체적}} \quad (9)$$

그림 1에서는 본 실험에서 2, 3, 5, 7, 9cm에 의해 구해진 볼륨비의 기울기 값을 고려하여 절단시험편 길이가 11, 13, 15, 17, 19, 21cm 일때의 벌크 볼륨비와 진동 후 정렬 볼륨비를 결정한 것이다. 절단시험편 길이가 21cm 까지 한정된 것은 절단상자의 폭이 21cm 이하로 제한되어 있기 때문이다. 그리고, 2, 3, 5, 7, 9cm의 실험값에 의한 기울기값의 적용으로 11, 13, 15, 17, 19, 21cm 일때의 벌크 볼륨비에서는 실제 실험과의 오차가 최대 0.03 최소 0.001로 발생되고, 진동 후 정렬볼륨비에서는 최대오차가 0.04에서 최소오차가 0.006 발생한다.(그림 2).

벌크볼륨비

$$\begin{aligned} Y_b &= Y_1 + a_1 * X \\ &= 1.702 + 0.1369 * X \end{aligned} \quad (10)$$

진동정렬 후 볼륨비

$$\begin{aligned} Y_c &= Y_2 + a_2 * X \\ &= 1.405 + 0.1224 * X \end{aligned} \quad (11)$$

(a1, a2 : 기울기값, Y1,Y2 : 실험 절편값 , X : 절단길이)

2.3 핵연료 집합체의 구조폐기물 압축 후 절단길이에 따른 최종 볼륨감소 비

2.3.1 핵연료 집합체의 구조폐기물의 이상적 볼륨 비(Ideal volume ratio)

핵연료 집합체의 구조폐기물의 총볼륨은 185931cm³이며 집합체의 상부노즐, 하부노즐, 안내관볼륨(계측관포함), 인코넬 지지격자 2개, Zry-4 지지격자 6개, 소형부품등의 각부분에 대한 볼륨이 조사되었다[4]. 이들의 총합은 이상적인 하나의 강체이기 때문에 핵연료 집합체의 구조폐기물의 총볼륨과 강체로 되었을 때 볼륨비로 이상적인 볼륨비가 계산되었다(표 1).

$$\begin{aligned} SIV &= \text{상부노즐} + \text{하부노즐} + \text{안내관볼륨(계측관포함)} + \text{인코넬지지격자 2개} \\ &\quad + \text{Zry-4 지지격자 6개} + \text{소형부품} = 13284.5 \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)과 STV로부터 구조체의 이상적 볼륨비(SIVR)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SIVR = \frac{SIV}{STV} = \frac{13284.5}{185931} = 0.0714. (\text{압축비 } 14 : 1) \quad (13)$$

SIVR : 구조체의 이상적 볼륨비(Skeleton Ideal Volume Ratio)

STV : 구조체의 압축전 총볼륨(Skeleton Total Volume): 185931 cm³

SIV : 구조체가 완전히 압축되어 강체가 되었을 때의 이상적 볼륨 :

그러나 실제적으로는 상부노즐의 스프링 공간, 하부노즐의 바닥부분, 지지격자들은 실제적으로 압축되어 모아진 볼륨, 그리고 가이드튜브와 소형부품들의 벌크볼륨을 고려해야한다. 따라서 각각의 요소에 대한 실제적인 볼륨이 계산되었다(표 1).

2.3.2 핵연료 집합체의 구조폐기물 압축 전단 후 구성요소들의 실제 볼륨

핵연료 집합체의 구조폐기물의 각 구성요소들을 보면 상,하부노즐, 인코넬 지지격자2개, 지르칼로이 지지격자 6개, 안내관(계측관포함) 25개, 소형부품[4]등으로 구성된다. 압축 후 전단되었을 경우 실제적인 볼륨을 보면 상,하부노즐은 압축,전단을 고려하지 않고 그대로 계산되었다. 인코넬 지지격자는 인코넬 지지격자 1개가 강체로 되었을때 총 볼륨은 79,2cm³ 이다. 이것으로 폭 5cm로 압축,전단되었을때 압축된 실제두께와 압축전단후 벌크볼륨이 고려된 총볼륨이 계산되었다. 여기서 인코넬 지지격자 수를 2배수로 하였는데 이유는 집합체구조물을 절단할 때 모든 지지격자의 폭이 반으로 절단될 때를 가정하여 고려된 수이다. 지르칼로이 지지격자는 지르칼로이 1개가 강체로 되었을 때 총 볼륨은 178,112cm³ 이다. 이것으로 폭 5cm로 압축,전단되었을 때 압축된 실제 두께와 압축전단후 벌크볼륨이 고려된 총볼륨이 계산되었으며 여기서 지르칼로이 지지격자 수를 2배수로 한 이유는 집합체구조물을 절단할 때 모든 지지격자의 폭이 반으로 절단될 때를 가정하여 고려된 수이다. 그리고 압축 전단된 안내관과 소형부품들은 실험값에서 나온 진동 후 정렬된 볼륨비를 적용하였다.

절단, 압축에 따른 실제 총 볼륨 : Vci

$$\begin{aligned}
 V_{ci} &= \text{상부노즐} + \text{하부노즐} + \{ \text{압축인코넬지지격자} 4 \text{개} + \text{압축지르칼로이 지지격자} \\
 &\quad 12 \text{개} \} \times C_G + \{ \text{압축안내관볼륨(계측관포함)} + \text{압축소형부품} \} \times C_i \\
 &= 6228 + 3183 + (997,24 + 5146) \times C_G + (2637 + 9,528) \times C_i \\
 &= 216328,88 * (8,059 + C_i) \text{ cm}^3 \tag{14}
 \end{aligned}$$

Ci : 절단길이에 따른 compact volume ratio

C_G = 1.94 : 절단 폭이 5cm 이고 지지격자 길이가 21.4cm 일 때
인코넬과 지르칼로이의 벌크볼륨 실험 계수값

2.3.3 핵연료 집합체의 구조폐기물 압축전단 후 절단길이에 따른 최종 볼륨비(그림 3)

식 (14)과 구조체의 압축전 총볼륨(STV)로부터 구조체 최종 볼륨비(SVR)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SVR = \frac{V_{ci}}{STV} = \frac{\text{절단길이에 따른 볼륨}}{\text{총볼륨}} \tag{15}$$

(SVR : 구조체의 최종 볼륨비, STV : 구조체의 압축전 총볼륨,
Vsi : 절단압축에 따른 실제 총 볼륨)

3. 결 론

핵연료 집합체의 구조폐기물의 압축방식은 구조체의 길이방향의 정면 압축에서 좌굴 응력은 145톤, 압축항복하중은 70톤, 구조체의 직각방향인 측면 압축에서 인코넬 지지격자는 가장 적은 58톤이 소요된다. 따라서 압축방식에서 측면 압축방식이 경제성 측면에서 타당하다. 압축후 전단 시스템장치를 고려할때 핵연료 집합체의 구조폐기물의 절단길이에 따른 볼륨 감용정도에서는 핵연료 집합체의 구조폐기물 집합체(L405cmxW21.4cmxH21.4cm)가 완전히 압축되어 강체 덩어리가 되었을 때 이상적 볼륨(Ideal volume)은 13284.5 cm³ 이며 이상적인 볼륨비(Ideal volume ratio)는 14 : 1이다. 그리고 구조폐기물의 1차 압축한 후 실제적인

벌크 볼륨비(Bulk volume ratio)은 절단길이 증가에 따라 감소하며, 1차 압축되어 전단된 구조폐기물 집합체 축소 볼륨비 범위는 7.3대1에서 5.8 대1 이다. 절단시험편 길이별로 보면 핵연료 집합체의 구조폐기물 절단길이가 5cm이하 일 때는 볼륨비가 증가하나 절단된 지지격자들의 수가 증가하여 볼륨비가 감소된다. 따라서 절단길이는 핵연료 집합체의 구조폐기물 볼륨축소비는 7 : 1인 5cm가 적정하다.

참고문헌

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" KAERI/TS-33/97(1997)
4. K.N. Song "The Calculation of Volume and Mass of the 17x17 Type KOFA Components" KAERI/TR-303/92(1992)

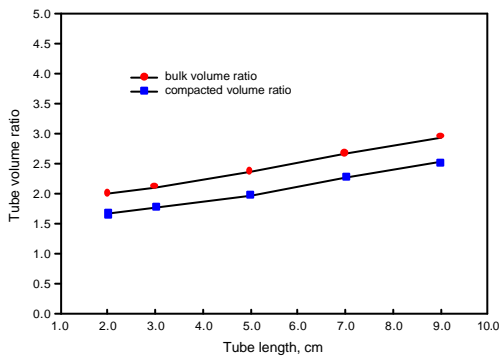


Fig. 1. Bulk / Compacted volume ratio related to tube length , cm

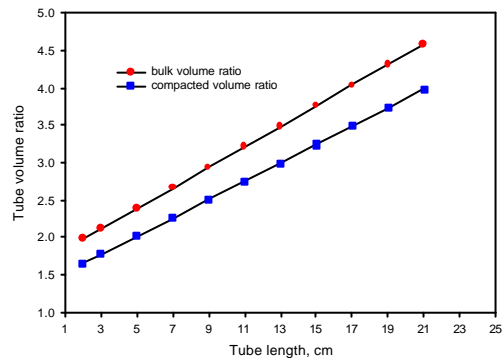


Fig. 2. Bulk / Compacted volume ratio related to tube length , cm

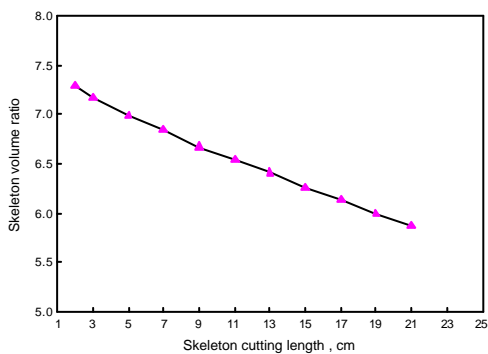


Fig. 3. Skeleton volume ratio related to cutting length, cm

표 1 구조체 구성 요소에 대한 압축정체의 이상의 볼륨과 압축전단 후 일체의 볼륨

구성 요소	기준	이상의 압축정체 볼륨 Cm ³	압축전단후 일체의 볼륨 Cm ³
상부노즐		4225	6222
하부노즐		3122	3122
인내전(외측전 포함)		2527	5210
인코넬 지지격자 22개		192	307
지르알로이 지지격자 6개		1022	5527
소형부품		95	122