

Structural Design Requirements and Safety Evaluation Criteria of the Spent Nuclear Fuel Disposal Canister for Deep Geological Deposition

심지층 고준위폐기물 처분용기에 대한 설계요구조건 및 구조안전성 평가기준

Young-Joo Kwon and Jong-Won Choi*

Hongik University, 300 Shinanri Chochiwon, Yeonki, Choongnam

*Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

vjkwon@wow.hongik.ac.kr

권영주, 최종원*

홍익대학교, 충남 연기군 조치원읍 신안리 300

*한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received March 9, 2007/Approved July 2, 2007)

Abstract

In this paper, structural design requirements and safety evaluation criteria of the spent nuclear fuel disposal canister are studied for deep geological deposition. Since the spent nuclear fuel disposal canister emits high temperature heats and much radiation, its careful treatment is required. For that, a long term(usually 10,000 years) safe repository for the spent nuclear fuel disposal canister should be secured. Usually this repository is expected to locate at a depth of 500m underground.

The canister which is designed for the spent nuclear fuel disposal in a deep repository in the crystalline bedrock is a solid structure with cast iron insert, corrosion resistant overpack and lid and bottom, and entails an evenly distributed load of hydrostatic pressure from underground water and high pressure from swelling of bentonite buffer. Hence, the canister must be designed to withstand these high pressure loads. If the canister is not designed for all possible external loads combinations, structural defects such as plastic deformations, cracks, and buckling etc. may occur in the canister during depositing it in the deep repository. Therefore, various structural analyses must be performed to predict these structural problems like plastic deformations, cracks, and buckling. Structural safety evaluation criteria of the canister are studied and defined for the validity of the canister design prior to the structural analysis of the canister. And structural design requirements(variables) which affect the structural safety evaluation criteria should be discussed and defined clearly. Hence this paper presents the structural design requirements(variables) and safety evaluation criteria of the spent

nuclear fuel disposal canister.

Keywords : spent nuclear fuel disposal canister, hydrostatic pressure, underground water, bentonite buffer, structural design requirements, structural safety evaluation criteria, structural analysis

요 약

본 논문에서는 고준위폐기물 처분용기를 지하 심지층에 처분하기 위하여 요구되는 구조설계 요구조건과 구조안전성 평가 기준을 도출하였다. 고준위폐기물은 높은 열과 많은 방사능을 방출하기 때문에 고준위폐기물을 넣어 보관하는 처분용기는 그 취급에 많은 주의가 요구된다. 이를 위하여 고준위폐기물 처분용기는 장기간(보통 10,000년 동안) 안전한 장소에 보관되어야 한다. 보통 이 보관 장소는 지하 500m에 위치한다.

지하 깊은 화강암에 고준위폐기물을 보관하도록 설계되는 처분용기는 내부주철삽입물과 이를 감싸고 있는 부식에 강한 외곽셸, 위 덮개와 아래 덮개로 구성되는 구조로 되어있으며 지하수압과 벤토나이트 버퍼의 팽윤압을 받는다. 따라서 고준위폐기물 처분용기는 심지층에 보관 시 이들 외력들을 견디도록 설계되어야 한다. 만약에 발생 가능한 모든 하중조합을 고려한 처분용기 설계가 되지 않으면 심지층에 위험한 고준위폐기물 처분 시에 처분용기에 소성변형이나 크랙 또 좌굴같은 구조적 결함이 발생할 수 있다. 따라서 심지층에 처분용기를 처분 시에 처분용기에 발생하는 구조적 문제들이 발생하지 않게 하기 위하여 여러 가지 구조해석이 수행되어야 한다. 이러한 구조해석 수행에 앞서 처분용기 설계 타당성을 평가하기 위한 기준이 필요하다. 또한 평가기준에 영향을 미치는 설계요조건(설계변수)이 명확히 검토되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 처분용기의 구조설계 요구조건(설계변수)과 구조 안전성 평가기준을 도출하고자 한다.

중심단어 : 고준위폐기물 처분용기, 수압, 지하수, 벤토나이트 버퍼, 구조설계 요구조건, 구조 안전성 평가기준, 구조해석

I. 서 론

원자로에서 사용한 후 폐기되어지는 고준위폐기물은 위험한 방사능과 높은 온도를 가지고 있기 때문에 고준위폐기물을 안전하게 관리하는 데에는 세심한 주의를 필요로 한다. 이러한 고준위폐기물을 어떤 조건 하에서도 고준위폐기물의 방사성독성이 사라지는 10,000년 동안 고준위폐기물을 완전히 안전하게 격리시킬 수 있도록 처분용기에 넣어 보관한다. 이러한 고준위폐기물 처분용기는 보통 지하 수백 m 아래의 안전한 장소에 보관하는 것이 좋다는

연구결과가 지배적이다[1]. 이와 같은 연구내용은 화강암층의 지하 500m의 암반에 수직 처분공을 뚫고 처분하는 개념이다[2]. 만약에 발생 가능한 모든 하중조합을 고려한 처분용기 설계가 되지 않으면 심지층에 고준위폐기물 처분 시에 처분용기에 소성변형이나 크랙 또 좌굴 같은 구조적 결함이 발생할 수 있다. 따라서 심지층에 처분용기를 처분 시에 처분용기에 발생하는 구조적 문제들이 발생하지 않게 하기 위하여 여러 가지 구조해석이 수행되어야 한다. 이러한 구조해석 수행에 앞서 처분용기 설계 타당성을 평가하기 위한 기준이 필요하다. 또한 평가기준에

영향을 미치는 설계요구조건(설계변수)이 명확히 검토되어야 한다. 이러한 이유로 고준위폐기물이 처분용기 내에 보관되는 기간 중에 처분용기에 구조적 결함이 발생하지 않도록 처분용기의 구조적 안정성 측면에서 여러 가지 조건을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 심지층 처분장에 처분되는 처분용기를 기준으로 처분용기의 구조적 안정성을 평가하기 위한 구조해석을 수행하는데 요구되는 처분용기의 구조설계 요구조건과 구조안전성 평가기준을 도출하고자 한다.

처분용기는 여러 가지 안전성 측면에서 고려되어야 할 외부조건에 대하여 충분한 안전계수를 만족해야 하는데 첫 번째로 처분용기가 화강암층의 지하 500m에 놓여서 정상적으로 받을 외압인 지하수압 5MPa과 벤토나이트 완충재의 팽윤압 10MPa 등 총 15MPa에 견딜 수 있는 안전계수를 만족해야 한다. 또한 처분용기 설계 시 고려되는 안전계수에는 외압 조건의 불확실성(비정상적인 외압조건)과 재료 특성 및 제조상의 불확실성도 함께 포함되어져야 하는데 이런 경우에 사용되는 처분용기 재료의 구조와 특성에 따라 1.5~2.5의 안전계수 값이 사용되어진다([3][4][5][6]). 여기서 안전계수는 특수한 경우(좌굴현상 또는 피로·파괴현상 등)를 제외하고는 처분용기를 구성하는 고체물질의 항복응력과 처분용기 구조물내부에 발생하는 최대 내부 응력의 비(또는 구조물내부에 소성변형이 발생하는 외력과 현재 적용되는 외력의 비)로 정의된다[5]. 따라서 안전계수 값을 구하기 위해서는 처분용기에 대한 선형구조해석을 수행하여 처분용기 내에 발생하는 최대 내부응력 값을 구하여야 한다. 그러므로 여러 가지 조건 하에서 먼저 기본적인 선형구조해석[7]을 수행하여야 한다. 이를 통하여 처분용기를 구성하고 있는 내부주철 삽입물의 제원(직경, 길이)을 결정하고 또한 처분용기의 사용 후 핵연료다발의 개수, 배열위치 및 각 구성부에 적당한 물질 등을 결정할 수 있다. 이와 같은 선형구조해석에 추가하여 지진 등과 같은 갑작스런 외부 충격에 의해 발생하는 압반의 갈라지는 움직임에 의해 외부 벤토나이트 버퍼에 발생할 수 있는 전단변형에 대한 비선형구조해석[8]도 요구된다. 또한 고온의

내부 핵연료다발이 방출하는 열에 의한 열응력 해석[9] 및 시간 경과에 따른 크립변형에 대한 해석[10]도 수행하여야 한다. 그리고 처분용기의 외부 표면온도는 벤토나이트 등의 화학적인 반응을 고려하여 100℃를 넘지 않아야 한다[11].

본 연구에서 고려하고 있는 처분용기는 가압경수로(PWR) 고준위폐기물을 저장하는 처분용기와 중수로(CANDU Reactor) 고준위폐기물을 저장하는 처분용기 두 가지 처분용기를 대상으로 하고 있다. 이들 처분용기들의 기본 구조는 스웨덴에서 고려하고 있는 구리 처분용기(copper canister) 개념([2][3][6][11][12])으로 구리로 된 얇은 외곽 셀 안에 주철을 채우고 주철내부에 사용 후 핵연료 다발들을 저장하는 개념이다. 이와 같은 처분용기를 지하 500m의 화강암층 암반에 처분공을 뚫고 처분하고자 한다. 이때 처분용기 주위에 수십 cm 두께의 완충재를 설치한다. 이 완충재는 스며드는 지하수를 막아 주지만 지진과 같은 유사시에 갑작스러운 외부 충격으로부터 처분용기를 보호하는 역할도 수행한다. 구리로 된 외곽 셀은 처분용기의 부식을 방지하는 역할을 수행한다. 외곽 셀의 표면온도는 주위의 벤토나이트 버퍼의 화학적 안정성을 보장할 수 있도록 항상 100℃ (혹은 93℃)이내로 유지하여야 한다. 내부의 주철삽입물은 처분용기의 주요 기계적 강도를 유지시켜주며 또한 방사능 차폐역할도 수행한다. 따라서 이와 같은 역할을 충분히 수행할 수 있도록 내부 주철 삽입물의 구조형태와 제원, 외곽 셀의 두께, 벤토나이트 버퍼의 두께 등이 설계되어야 한다. 처분용기 상부에는 수 cm 두께의 덮개를 설치하게 되는데 이 덮개는 처분용기를 처분장/처분공으로의 이동이나 운송수단에의 하역 시 외부의 기계적 잡는 장치에 의하여 들어 올려 질 경우 안전하게 처분용기의 중량에 견딜 수 있도록 그 구조형태와 제원이 설계되어 져야 한다. 따라서 본 연구에서는 먼저 상기에서 언급한 모든 외부 조건들을 만족하기 위하여 요구되는 처분용기의 기본 설계요구조건들을 도출하고 이러한 설계요구조건들(설계변수)을 결정하기 위한 구조안전성 평가 기준을 도출하였다.

II. 처분용기의 기본설계 요구조건

본 절에서는 처분용기 설계에서 요구되는 기본적인 사항들을 검토하고자 한다. 이를 위하여 먼저 스웨덴의 구리 처분용기(5[6])를 모델로 하여 처분용기의 기본 형상을 정의하고 이와 같은 처분용기가 기본적으로 만족해야 하는 외부조건들을 검토한 후 처분용기 설계에서 요구되는 기본적인 요구사항들(설계변수들)을 도출하고자 한다.

가. 처분용기의 기본형상 정의

스웨덴의 구리 처분용기는 기본적으로 구리로 된 원통형의 얇은 외곽 셸 내부에 역시 원통형의 주철 삽입물을 채우고 이 주철 삽입물 내부에 여러 개의 긴 홈을 만들고 그 내부에 고준위폐기물 다발들을 저장하는 형태로 되어 있다(Fig. 1). 내부 바스켓으로 불리우는 긴 홈의 단면은 정사각형 혹은 원형으로 되어 있다. 이를 참조로 하여 가압경수로(PWR)와 중수로(CANDU Reactor) 두가지 형태의 원자로에서 배출되는 고준위폐기물을 처분하는 처분용기 기본형상을 정의한다[13].

① 가압경수로(PWR) 고준위폐기물 처분용기의 기본 구조형상 정의

가압경수로(PWR)의 고준위폐기물 튜브다발은 17×17개의 튜브들을 1개의 다발로 한 것으로 이 튜브들을 한 번이 22.4cm의 정사각형 단면형태로 묶은 것이다. 다음 Fig. 2는 이와 같은 튜브 다발의 형태와 제원들을 나타낸다. 따라서 가압경수로 고준위폐기물 처분용기의 주철삽입물 내 홈(바스켓) 형태는 이와 같은 튜브다발을 저장할 수 있도록 단면이 22.4cm×22.4cm의 정사각형 단면이고 길이는 455cm가 되도록 정의된다. 이와 같은 수 개의 바스켓(홈)들을 갖고 있는 주철삽입물의 형태는 스웨덴의 구리 처분용기와 같이 원통형으로 정의된다. 이와 같은 원통형의 주철삽입물 외부에 얇은 두께의 외곽 셸을 설치하고 구조물 상부에 적당한 구조와 두께의 덮개를 설치한다. 정의된 예상 가압경수로(PWR) 고준위폐기물 처분용기의 형태는 내부 바스켓의 개수를 4개로 한정 경우 다음 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 이미 결정되어 있는 내부 바스켓의 단면 치수 22.4cm와 길이 455cm를 제외한 나머지 치수들(D1, D2, L1, L2, t1, t2, t3, g1, g2, g3 등)들은 처분용기에 가해지는 외부조건들에 따라 결정되는 설계변수들이다.

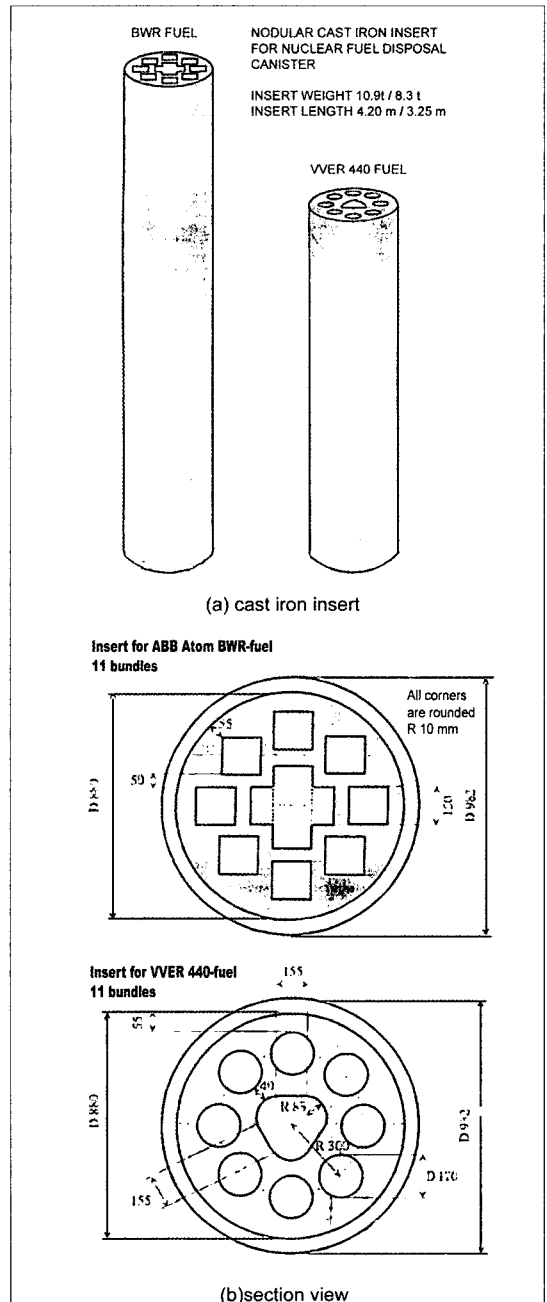


Fig. 1. Spent nuclear fuel disposal canister used in Sweden.

② 중수로(CANDU Reactor) 고준위폐기물 처분용기의 기본 구조형상 정의

중수로의 고준위폐기물 튜브다발은 9개의 튜브들을 1개의 다발로 한 것으로 이 튜브들을 직경이 11.5cm의 원형 단면형태로 묶은 것이다. 따라서 중수로 고준위폐기물 처분용기의 주철삽입물내 바스켓(홈) 형태는 이와 같은 튜브다발을 저장할 수 있도록 단면이 직경 11.5cm의 원형 단면이고 길이는 455cm가 되도록 정의된다. 이와 같은 수 개의 바스켓(홈)들을 갖고 있는 주철삽입물의 형태는 스웨덴의 구리 처분용기와 같이 원통형으로 정의된다. 이와 같은 원통형의 주철삽입물 외부에 얇은 두께의 외곽 셸을 설치하고 구조물 상부에 적당한 구조와 두께의 덮개를 설치한다. 정의된 예상 중수로 고준위폐기물 처분용기의 형태는 다음 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 이미 결정되어 있는 내부 바스켓의 단면 치수 11.5 cm와 길이 455 cm를 제외한 나머지 치수들(D1, D2, L1, L2, t1, t2, t3, d1, d2, d3, g3 등) 들은 처분용기에 가해지는 외부조건들에 따라 결정

되는 설계변수들이다. 이에 추가하여 내부 바스켓의 개수도 결정되어야 할 설계변수이다.

나. 처분용기가 만족해야 되는 외부조건

본 논문에서 연구되고 있는 고준위폐기물 처분용기의 처분개념은 스웨덴에서 고려하고 있는 화강암(granite)층의 지하 500m의 암반에 수평 처분터널(horizontal deposition tunnel)을 뚫고 각 처분터널 내에 수직 처분공(vertical borehole)을 뚫고 처분하는 개념이다(Fig. 5).

Fig. 5에서 처분터널(deposition tunnel) 사이의 간격(D)과 처분공(borehole)의 간격(d)은 고준위폐기물이 발생하는 열에 의해서 처분용기 주위에 영향이 발생하지 않도록 결정되어야 한다. 특히 Fig. 6에서와 같이 처분용기를 감싸고 있는 벤토나이트 버퍼의 화학적 안정성을 확보할 수 있도록 처분용기 외곽 셸 표면온도가 적당한 온도(100℃) 이하로 유지될 수 있도록 결정되어야 한다. Fig. 5와 Fig. 6과 같이 처분되는 처분용기가 받는 처분 환경

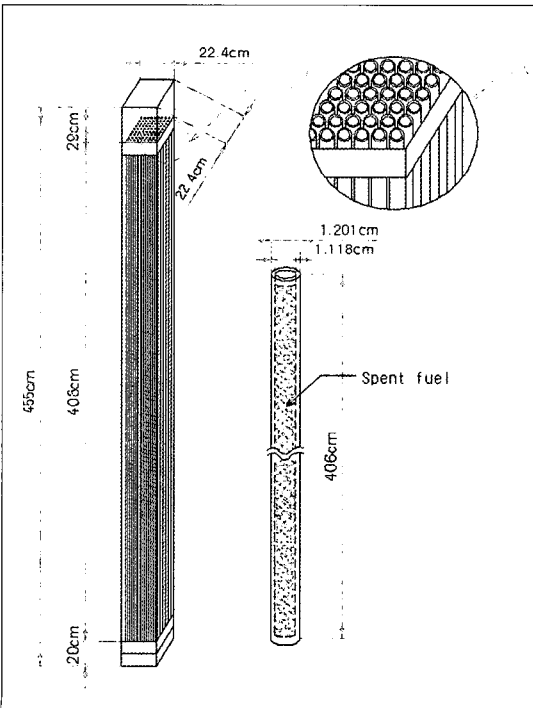


Fig. 2. Spent nuclear fuel tube and basket type and dimension for PWR.

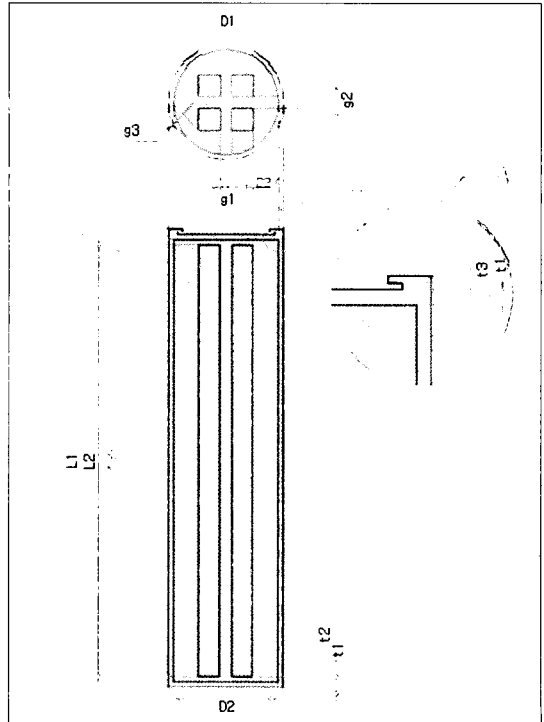


Fig. 3. Basic canister type definition for PWR.

조건은 먼저 지하수의 유입에 의해 벤토나이트 버퍼에 발생하는 수압이다. 이 수압은 깊이 500m의 물기둥에 해당하는 정수압(hydrostatic pressure)과 벤토나이트 버퍼에 지하수가 침투함으로써 발생하는 팽윤압(swelling pressure)의 합으로 되어있다. 따라서 처분용기는 지하에 처분되는 기간(약 10,000년) 동안 이 수압에 견딜 수 있어야 한다. 또 처분용기내의 핵연료 다발에서는 비록 점점 감소하지만 열 발생하고 있기 때문에 이 열 발생에 따른 처분용기내의 온도분포에 의한 열응력에도 견딜 수 있어야 한다. 이 이외에도 비록 저장 시 지진발생이 없는 안전한 지하 암반층에 저장하더라도 미래에 발생할 수도 있는 지진 등에 의한 지각변동에 따른 암반의 갈라짐에 의해 처분용기에 가해지는 충격에도 견디어야 한다. 또한 장시간 저장에 따라 처분용기에 발생할 수도 있는 크립 변형도 견디어야 한다.

처분용기는 이상과 같이 이미 지하에 처분된 환경조건 이외에도 제작의 용의성과 처분직전 고준위

폐기물 다발들을 처분용기에 담는 공장[14]에서 처분장/처분공까지 운송하는 과정에서 발생할 수 있는 처분용기를 들어 올리는 것과 같은 취급(handling) 시 수 톤의 처분용기의 하중을 견딜 수 있도록 충분한 강도를 갖게 설계되어야 한다.

다. 처분용기의 기본 설계 요구조건(설계변수)

Fig. 3과 Fig. 4에 정의된 가압경수로(PWR) 처분용기와 중수로(CANDU Reactor) 처분용기의 각 재료들은 위에서 논의된 처분용기 제작의 용이성, 처

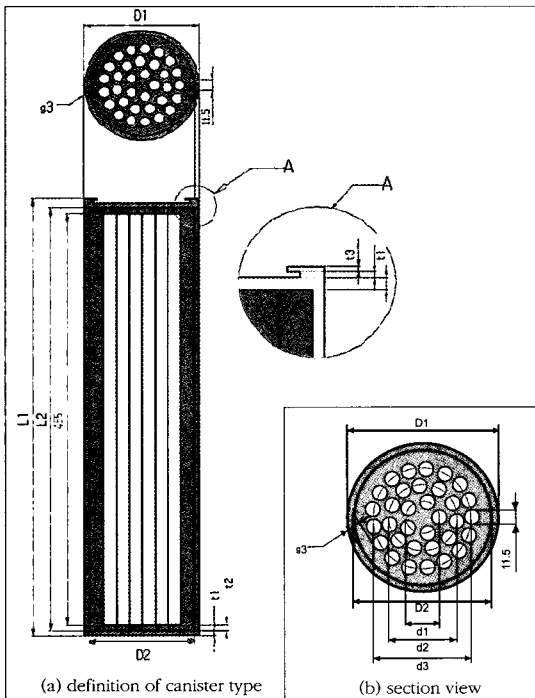


Fig. 4 Basic canister type definition and section view for CANDU reactor.

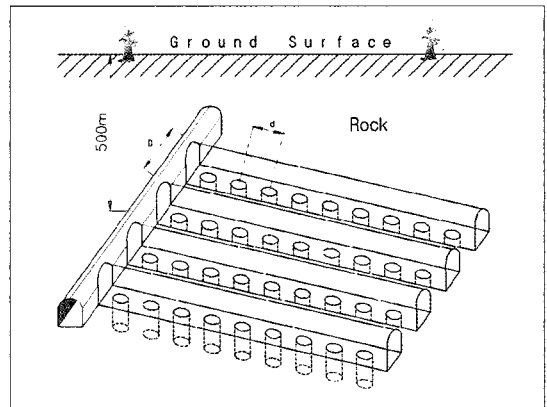


Fig. 5 Deep geological deposition concept of spent nuclear fuel disposal canister(D: tunnel distance, d: borehole distance).

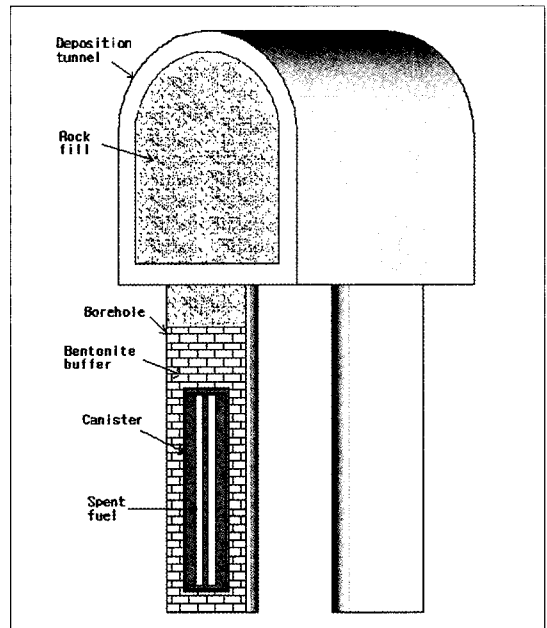


Fig. 6 Canister deposition tunnel and borehole section.

분환경 및 운송시의 조작(handling) 조건들을 만족할 수 있도록 결정되어야 한다. 각 외부 요구조건에 맞는 처분용기의 기본 설계요구조건(설계변수) 들을 검토하면 다음과 같다.

① 처분용기 제작의 용이성 조건

가압경수로 처분용기와 중수로 처분용기는 동시에 제작된 후 고준위 폐기물이 밀봉포장(encapsulation)되어 동일한 처분공에 처분되기 때문에 그 제작의 용이성을 위하여 외부 구조형태 뿐 아니라 그 외부 재원도 동일해야 한다. 따라서 Fig. 3과 Fig. 4에서 가압경수로와 중수로 처분용기의 단면 직경(외경(D1)/내경(D2))과 높이(L1/L2)들은 각각 동일해야 되며 처분용기 덮개(lid)도 동일 구조이어야 된다. 또 두 처분용기의 내부 삽입물과 외곽 셸 위아래 덮개를 구성하는 물질들도 동일하여야 한다. 이는 가압경수로의 사용 후 연료다발의 길이와 중수로의 사용 후 연료 다발 길이가 455cm로 동일하기 때문이기도 하다.

② 처분용기의 처분환경 조건

처분용기가 지하의 처분공에 오랜 기간(10,000년) 동안 처분될 시 받는 외부조건들에 견딜 수 있는 충분한 강도를 유지하기 위해서는 Fig. 3과 Fig. 4에 표시된 여러 제원들의 크기가 적당히 결정되어야 한다. 이들을 각 처분용기별로 구체적으로 검토하면 다음과 같다.

- 가압경수로(PWR) 처분용기의 기본 설계 요구 조건(설계변수)
 - 처분용기의 길이 : L1, L2(t2)
 - 처분용기의 단면 직경(처분용기 외곽 셸의 두께) : D1, D2(t1)
 - 처분용기 내 핵연료 바스켓의 개수 : 가압경수로 처분용기의 경우 내부 핵연료 바스켓의 개수는 4개로 고정한다.
 - 내부 핵연료 바스켓의 배열구조 및 바스켓 사이의 간격 : g1, g2, g3
- 중수로(CANDU Reactor) 처분용기의 기본 설계 요구조건(설계변수)
 - 처분용기의 길이 : L1, L2(t2)

- 처분용기의 단면 직경(처분용기 외곽 셸의 두께) : D1, D2(t1)
- 처분용기 내 핵연료 바스켓의 개수
- 내부 핵연료 바스켓의 배열구조 및 바스켓 사이의 간격 : d1, d2, d2, g3

③ 처분용기 운송 시의 취급(handling)조건

처분용기는 사용 후 핵연료를 처분용기에 담고 이를 처분장/처분공까지 운송 시 수 톤의 처분용기를 들어 올리는 것과 같은 취급 시 처분용기를 들어 올리는 하중(이 하중은 보통 처분용기 자체의 하중보다 크다)에 견딜 수 있도록 외부에서 처분용기를 잡는 부분이 적당히 설계되어야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 취급 시 외부 장치(grip 등)가 처분용기 덮개 부분을 잡는 경우로 가정한다. 덮개(lid) 부분은 본 연구에서는 Fig. 3과 Fig. 4의 A 부분과 같이 정의하고 있다. 따라서 이 경우 결정하여야 할 설계 조건은 다음과 같다.

- 덮개(lid)의 두께(t3)와 돌출길이

Ⅲ. 처분용기에 대한 구조안전성 평가기준

본 절에서는 제 2절에서 검토한 처분용기가 만족해야 될 외부조건(제작의 용이성 조건, 처분환경조건, 처분용기 운송 시 취급조건)에 맞게 처분용기를 안전하게 지하 처분장에 오랜 기간(10,000년) 동안 보관할 수 있는 구조안전성평가에서 요구되는 평가 기준을 검토하고자 한다.

제 2절에서 정의된 처분용기는 금속(metal)으로 이루어진 고체 구조물로서 고체구조물의 기계적 안전성(safety)을 확보하기 위해서는 고체 구조물이 외부에서 가해지는 하중에 견디어 붕괴(collapse)되지 않도록 충분한 강도(strength)를 유지하여야 한다. 여기서 붕괴(collapse)의 의미는 여러 가지를 내포하고 있는데 전문적인 의미로는 구조물의 파괴(굽혀짐, 일그러짐, 갈라짐, 절단)를 의미한다. 본 연구에서는 심지층에 고준위폐기물 처분 시에 처분용기에 가해지는 모든 하중조합에 의하여 처분용기에 발생할 수 있는 붕괴현상인 소성붕괴, 좌굴현상, 피로·파괴현상, 크립변형에 대하여 검토하여 이들

붕괴현상의 발생가능성을 검토하고 검토결과를 이용하여 처분용기에 대한 구조안전성 평가기준을 도출한다.

소성붕괴는 고체 구조물 특히 금속으로 된 고체 구조물에 과도한 외력이 작용하여 구조물에 복구되지 않는 영구변형이 발생하는 현상으로 구조물이 완전히 파괴되기 전 단계 붕괴현상이다. 소성붕괴가 발생하는 현상을 항복(yield) 현상이라 하고 이를 고체 구조물의 일차적인 안전성 평가기준으로 삼고 있다. 일반적인 고체 구조물에 대한 일차적인 구조 안전성 평가기준은 “외력에 의해 구조물 내부에 발생하는 응력(등가응력 : equivalent stress) 값이 구조물의 항복응력(yield stress) 값보다 작아야 한다.”이다. 이를 구체적으로 표현하면 다음과 같은 안전계수(safety factor)를 정의하여 고체 구조물에 대한 구조 안전성 평가기준으로 정한다.

- 안전계수(safety factor) = 항복응력 값/내부 등가응력 값(최대 값)
- 혹은 $S = \sigma_y / \sigma_c$ (S = 안전계수, σ_c = 등가응력)

즉 고체 구조물에 대한 일반적인 구조 안전성 평가 기준은 “안전계수 값이 일정한 값을 만족해야 된다.”이다. 이때 일정한 안전계수 값은 2.0을 취하는 것이 구조해석에서 통례로 되어 있다(15). 그러나 안전계수 값은 구조물을 설계하는 목적에 따라서 다르게 잡아야 한다. 구조물에 가해지는 외부 하중이 매우 큰 경우에 있어서는 안전계수 값은 2.0보다 크게 잡아야 한다. 예를 들어 스웨덴이나 핀란드 같이 북쪽 추운 지방에 위치하는 나라에서는 고준위폐기물 처분용기 설계 시 요구되는 구조해석에서는 통례적으로 요구되는 안전계수 값 2.0 보다 4~5배 큰 값을 취하고 있다(5)(6). 이는 북쪽 지방에서 예상되는 빙하의 하중까지 고려 한 것으로 처분용기에 가해지는 외부하중이 빙하의 하중에 의하여 매우 커지기 때문이다. 이와 같이 안전계수 값을 크게 잡는 경우의 단점은 처분용기 강도를 크게 해야 되기 때문에 처분용기의 부피와 무게가 커진다는 점이다. 이런 경우 처분용기가 너무 크고 무겁기 때문에 제작 및 취급하는데 어려운 점이

발생한다. 또 제작비용이 비싸진다. 그러나 한국의 경우는 스웨덴이나 핀란드 같이 고준위폐기물 처분장 건설 시 빙하에 의한 하중을 고려할 필요가 없다. 또한 지진과 같은 심각한 지각변동도 크게 염려되지 않고 있다. 따라서 한국에서 건설되는 고준위폐기물 처분장에 처분되는 처분용기는 통례적인 구조물로 사료되며 따라서 처분용기 구조해석 시 안전계수 값을 통례적인 2.0 값을 취해도 큰 무리가 없다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 “안전계수 값 $S = 2.0$ 을 처분용기 구조 안전성 평가기준”으로 삼는다.

고체 구조물은 소성붕괴현상이 발생한 후 변형의 증가에 따라 내부 응력도 계속 증가하지 않은 어떤 일정한 값(극한강도(ultimate stress), σ_u)에 도달하면 변형은 외력이 더 이상 증가하지 않더라도 계속 발생하여 결국에 가서는 구조물은 파괴된다. 따라서 어떠한 특수한 경우에 있어서는 안전계수 값을 정할 때 항복응력 값 대신에 극한강도 값을 사용하기도 한다. 특히 고체 구조물의 재질이 취성재료(brittle material)이고 압축외력이 가해지는 경우에는 외력에 의하여 소성 변형 없이 구조물이 붕괴되기 때문에 이런 경우에는 안전계수 값을 계산할 때 항복응력 값을 대신하여 다른 값(압축하중인 경우 극한강도)을 사용한다.

특수한 구조물(긴 얇은 기둥(장주, long column), 얇은 평판(thin plate), 얇은 쉘 구조물(원통형 쉘(thin cylindrical shell), 구형 쉘(thin spherical shell) 등)에 외력(압축력 혹은 압력 등)이 작용하는 경우에는 구조물에 소성붕괴가 발생하기 이전에 좌굴현상(buckling phenomenon)이 발생하여 구조물이 붕괴할 수 있다. 이 때 좌굴현상이 발생하는 응력을 임계 좌굴응력(critical buckling stress), 그때의 외력(하중)을 임계 좌굴하중(critical buckling load)이라 한다. 보통 좌굴응력 값은 구조물의 항복응력 값 보다 작기 때문에 좌굴현상이 발생할 수 있는 구조물에서는 구조안전성 평가기준으로 안전계수(S)를 계산할 때 구조물의 항복응력 값 대신에 임계 좌굴응력 값을 사용해야 한다. 그러나 본 연구에서 정의된 처분용기 구조는 위에서 언급한 특수한 구조물에 분명히 해당되지 않는다. 따라서 처분용기에 작용하는 외력에 의하여 좌굴현상은 발생하지 않는다고 가정한다.

피로·파괴현상(fatigue & fracture phenomenon)은 반복하중에 의하여 구조물에 발생하는 붕괴현상이다. 그러나 본 연구에서 처분용기에 가해지는 외력은 지하수에 의한 정수압과 벤토나이트 버퍼의 팽윤압 또 내부 고준위폐기물 바스켓의 열 발생에 의한 열 하중으로 반복하중이 아니기 때문에 처분용기에 작용하는 외력에 의하여 피로·파괴현상은 발생하지 않는다고 가정한다.

고체 구조물에 외력이 작용하여 내부 응력과 변형이 발생한 이후에 추가적인 외력이 작용하지 않더라도 시간(time)이 경과함에 따라 고체 구조물에 크립변형이 발생한다. 이와 같은 크립변형은 고체 구조물의 온도가 올라가면 더 증가하게 되고 기타 다른 여러 가지 원인에 의하여 증가할 수도 있다. 크립변형이 발생하는 경우 오히려 내부 응력 값은 감소(응력이완현상)하기 때문에 응력 증가에 따른 구조물의 붕괴 현상은 예기되지 않으며 증가하는 크립변형률이 구조물의 구조안전성에 영향을 미치게 된다. 따라서 크립변형이 발생하는 경우 고체 구조물의 구조 안전성 평가기준은 안전계수(S)가 아닌 크립변형률(creep strain)의 크기이다. 구조해석 시 안전한 구조설계를 위한 최대 크립변형률 허용치는 작용하는 하중에 따라 통례적으로 1%~5% 미만의 값을 취한다([15][16]). 보통 구조조물에 동적인 급격한 하중이 작용하는 경우는 1%미만의 값을 정적인 하중이 작용하는 경우는 5%미만의 값을 취한다([15][16]). 즉 정적인 하중이 작용하고 있는 경우 구조물에 발생하는 크립변형률 값이 5%이내에 있으면 구조물은 안전하다고 사료된다. 본 연구에서 취급하는 처분용기도 분명히 지하수에 의한 정수압 및 팽윤압, 또 열하중 등의 정적인 하중을 받는 통례적인 구조물 범주에 있다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 크립변형률 5% 미만을 크립변형에 의한 처분용기 구조안전성 평가기준으로 정한다([15][16]).

IV. 결 론

본 논문에서는 사용 후 영구 폐기되는 고준위폐기

물 처분용기를 심지층 500m의 지하 암반에 처분 시 요구되는 기본 설계요조건(설계변수)들을 도출하였다. 이를 위하여 처분용기가 만족해야 하는 처분용기 제작의 용이성 조건, 처분환경 조건 및 운송시의 취급(handling) 조건들을 검토하였다. 처분용기 제작의 용이성 조건에서는 “가압경수로(PWR)와 중수로(CANDU Reactor) 처분용기의 단면 직경(외경(D1)/내경(D2))과 높이(L1/L2)들은 각각 동일해야 하며 처분용기 덮개(lid)도 동일 구조이어야 한다. 또 두 처분용기의 내부 삽입물과 외곽 셀 위아래 덮개를 구성하는 물질들도 동일하여야 한다.”는 설계요조건이 도출되었다. 처분환경 조건에서는 “처분용기의 길이, 처분용기의 단면 직경(처분용기 외곽 셀의 두께), 처분용기 내 핵연료 바스켓의 개수, 내부 핵연료 바스켓의 배열구조 및 바스켓 사이의 간격”의 설계요조건(설계변수)들이 도출되었다. 운송시의 취급 조건에서는 “덮개(lid)의 두께(t3)와 돌출길이”의 설계요조건(설계변수들)이 도출되었다.

처분용기 구조안전성 평가기준 도출에서는 처분용기에 가해지는 외력에 대하여 처분용기에 발생하는 여러 가지 구조붕괴현상들을 검토하였다. 검토된 구조붕괴현상들은 소성붕괴, 좌굴현상, 피로·파괴현상, 크립변형이며 이들 변형 검토를 통하여 구조안전성 평가기준인 “안전계수(S) = 2.0조건과 크립변형률 허용치 5%미만 조건”을 도출하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 시행한 원자력 중장기 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 최종원, 권상기, 강철형, "세계 주요국의 고준위 폐기물 처분개념과 현황," 터널과 지하공간, 한국암반공학회 논문집, 10(1), pp. 1-16(2000).
- [2] J.W. CHOI, Y.S. CHOI, S.K. KWON, J.E. KUH, and C.H. KANG, "Technology Assessment of the Repository Alternatives

- to Establish a Reference HLW Disposal Concept," Journal of the Korean Nuclear Society, 31(6), pp. 83-100(1999).
- [3] M. Anttila, Criticality Safety Calculations for the Nuclear Waste Disposal Canisters, Report POSIVA-96-11, Posiva Oy, Helsinki (1996).
- [4] M. Anttila, Criticality Safety Calculations of the Nuclear Waste Disposal Canisters for Twelve Spent Fuel Assemblies, Working Report 99-03, Posiva Oy, Helsinki, p. 20(1999).
- [5] H. Raiko, and J.P. Salo, Design Report of the Canister for Nuclear Fuel Disposal, Report POSIVA 96-13, Posiva Oy, Helsinki, ISBN 951-652-012-x, Finland (1996).
- [6] H. Raiko, and J.P. Salo, Design Report of the Disposal Canister for Twelve Fuel Assemblies, Report Posiva-99-18, Posiva Oy, Helsinki, Finland(1999).
- [7] Y.J. Kwon, S.U. Kang, J.W. Choi, C.H. Kang, "Structural Analysis for the Determination of Design Variables of Spent Nuclear Fuel Disposal Canister," KSME International Journal, 15(3), pp. 327-338(2001).
- [8] 권영주, 최석호, 최종원, "고준위폐기물 처분용기와 벤토나이트 버퍼로 이루어진 복합구조물에 대한 비선형 구조해석: 대칭 암반 전단력," 한국전산구조공학회 논문집, 16(4), pp. 369-376(2003).
- [9] 권영주, 하준용, 최종원, "가압경수로 고준위폐기물 처분용기의 열응력 해석," 한국전산구조공학회 논문집, 15(3), pp. 471-480(2002).
- [10] 권영주, 하준용, 최종원, "가압경수로 고준위폐기물 처분용기에 대한 크립해석," 한국전산구조공학회 논문집, 17(4), pp. 413-421(2004).
- [11] L. Ahonen, Chemical Stability of Copper Canisters in Deep Repository, Report YJT-94-13, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki, p. 101(1995).
- [12] P. Auerkari, Holmstrom, S. Long-term Strength of EB Welds of the Canister for Nuclear Fuel Disposal, Working Report 97-35e, Posiva Oy, Helsinki, p. 21(1997).
- [13] J.W. CHOI, W.I. Ko and C.H. KANG, "Reference Spent Fuel and Its Characteristics for a Deep Geological Repository Concept Development," Journal of the Korean Nuclear Society, 31(6), pp. 23-38(1999).
- [14] E. Mayer, Spent Fuel Encapsulation Plant, Preliminary Design. TVO/Spent fuel disposal, Work Report 85-10, Teollisuuden Voima Oy, Helsinki(1985).
- [15] 임상전, 재료역학, pp. 42-46/pp. 429-432, 문운당(1997).
- [16] J.J. Skrzypek, and R.B. Hentnarski, Plasticity and Creep, pp. 467-493, CRC Press, Inc.(1993).