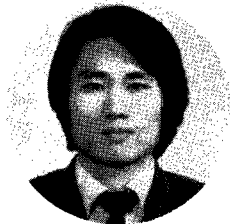


캔두核燃料 輸送容器 設計技術

The Technology of Cask Design for CANDU Nuclear Fuel



李 興 榮 (韓國에너지研·照射後試驗研究室 技術員)

1. 概 要

核物質 輸送容器에 대하여 現在 國際的으로 認定되어 있는 用語 “Packaging”과 “Packages” 대신에 Flask, Cask, Coffin 등을 一般的으로 많이 사용하고 있다. “Packaging”은 放射性物質을 담는 部品들의 組立을 말하며, “Packages”는 “Packaging”에 內容物을 담은 것으로 定義하는데 여기서는 잘알려진 Cask를 “Packaging” 또는 “Packages”대신에 사용한다.

Cask를 이용하여 運搬하는 物質은 照射後核燃料가 가장 一般的인 것으로 되어있지만 트리튬중수(tritiated heavy water), 濃縮우라늄, 이온交換레진 및 필터 등도 包含된다. 照射後核燃料는 全體 또는 다른試片을 實驗室로 運搬하는데, 最近 우리나라에서도 原子爐가 增加됨에 따라 輸送容器(Cask)에 대한 要求가 增加되고 있으며 또한 放射性物質의 輸送에 重要的 役割을 하게 될 것이다. 原子力 先進國의 경우, 現在는 60톤 輸送容器가 經濟的인 것으로 나타나 있지만 運搬車輛 및 크레인容量 등 取扱施設이 許容되는 곳에서는 100톤이상의 輸送容器까지 製作·使用되고 있다.

輸送容器의 遮蔽體로는 鉛, 鐵, 減損우라늄(depleted uranium)이 一般的으로 이용되고 있

는데, 鉛은 값이 싸고 製作技術 또한 普遍化되어 있어 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 假想事故 즉, 火災에 脆弱하며 製作時 溶解된 납이 굳을 때는 約3%이상의 體積이 收縮되므로 셸(shell)과 납 사이에 空氣갭이 발생하며, 납의 熱膨脹係數가 鐵보다 높으므로 火焰에 露出되는 동안에 輸送容器內的 높은 壓力으로 溶接이 破壞되어 遮蔽에 손실을 가져오는 경우도 있다.

鐵은 經濟的이고 製作技術 또한 普遍化되어 있지만, 遮蔽가 非效率的이어서 이로 인한 무게때문에 輸送上의 非經濟性이 問題이다. 한편 depleted uranium의 경우, 製作의 問題點을 除外하고는 輸送容器 遮蔽體로 상당히 效果的인 것으로 나타났는데 高密度, 高放射線 吸收率, 熱傳達, 高融點 등 여러가지 특성때문이며 특히, 高密度($19\text{g}/\text{cm}^3$)때문에 납을 사용했을 때보다 무게를 25%정도, 鐵보다는 50%정도 줄일 수 있다고 한다¹⁾. 따라서 납, 철, 우라늄을 遮蔽物質로 사용하는 경우 우라늄이 가장 經濟的이고 납, 철이 그 다음으로 經濟的인데 이것은 輸送料, 取扱費用, 減價償却費를 근거로 하여 算出한 것이다.

또한 放射線遮蔽能力은 放射性核種에 따라 다른데 Co-60을 輸送하는 경우 遮蔽두께에 따른

遮蔽능력을 비교해 보면 철 : 납 : 우라늄=4 : 2 : 1로 depleted uranium의 優秀性を 보여주고 있으며,²⁾ 최근들어 輸送容器 遮蔽體로써 사용이 서서히 增加하고 있다. 그렇지만 본문에서는 가장 一般的으로 많이 사용되고 있는 遮蔽輸送容器에 대하여 다루고자 한다.

2. 設計要求條件

輸送容器를 設計할때 優先的으로 타입을 決定하여야 하며, 새로운 輸送容器의 設計나 現存하는 輸送容器의 性能을 評價하는 경우에는 그것에 相應하는 報告書를 作成하여야 하는데, 輸送容器에 關한 放射線遮蔽, 熱傳達分析, 除染 및 取扱, 締結(tie-down), 核臨界分析 등에 關한 設計를 包含시켜야 한다. 製作된 輸送容器는 鐵路, 船舶, 航空機 등에 의해 運搬되며, 一般的으로 設計 및 輸送에 關한 事項은 國際原子力機構(IAEA)規定 安全시리즈No.6(放射性物質의 安全輸送)에 따르고 있다.

가. 放射性物質 確認

安全시리즈No.6의 表 I에서는 放射性核種을 危險의 程度에 따라 A₁, A₂값으로 分類하는데 A₁은 타입A輸送容器에 許容할 수 있는 特別型 放射性物質(special form radioactive material)의 最大 放射能을 말하며, A₂는 이러한 것을 除外한 타입A輸送容器에 許容할 수 있는 最大 放射線量을 나타낸다.

나. 輸送容器의 타입決定

IAEA는 輸送되는 放射性物質에 따라 輸送容器를 타입A, B로 分類하고 있으며, 이러한 각각 타입에 따른 輸送容器의 遮蔽要求條件을 決定하도록 規定하고 있다.

安全시리즈No. 6, para.308~313에서는 輸送容器로 運搬할 수 있는 最大 放射線量을 定하고 있는데, 이러한 放射性物質들은 U-233, U-235, Pu-238, Pu-239, Pu-241 그리고 이들의 混合物質 形態의 核分裂物質들을 包含하고 있다.

3. 試驗要求條件

輸送容器設計時 工學設計에 있어서의 不完全함과 본래의 誤差때문에 完全히 分析의인 方法에 의해 輸送容器를 試驗하는 것보다 一連의 實證試驗을 實施해야 하는데, 이 試驗은 假想的인 事故狀態와 正常狀態로 區分된다.

가. 事故狀態

輸送容器는 正常的인 輸送狀態가 아닌 경우에도 放射性物質의 漏出이나 遮蔽性質을 減少시켜서는 안되며, 이에 대한 設計要求條件은 안전시리즈No. 6, para. 541~548에 따라야 한다.

事故狀態는 첫째 9미터 落下試驗, 둘째 800℃에서 30分間 熱試驗, 셋째 水中 15미터에서 水浸試驗 등으로 分類되는데, 이러한 一連의 模擬試驗을 通하여 輸送容器의 性能을 評價할 수 있다.

나. 正常狀態

輸送容器는 또한 放射性物質이 漏出되거나 遮蔽性能을 減少시키지 않으면서 正常的인 輸送狀態를 만족해야 하는데, 正常狀態란 거칠은 取扱, 落下, 船積作業 등과 같은 것을 意味하며, 이것에 대해서는 水噴霧試驗, 1.2미터衝擊試驗, 壓縮試驗 및 貫通試驗 등 一連의 模擬試驗을 하게 된다.

一般的으로 이러한 試驗들은 쉽게 만족되는데, 輸送容器의 實際크기로 實施해야 하며 IAEA 안전시리즈No. 6 para. 524-540에 따라 設計되어야 한다.

4. 設計時 考慮해야할 事項

가. 放射線遮蔽設計

一般的으로 輸送容器에 대한 遮蔽는 鐵構造物에 납을 채우는 것이 보통이며, 납의 遮蔽두께는 各 容器의 要求條件에 따라 決定되고 許容放射線量은 IAEA安全시리즈No. 6의 規定值를 따라야 하는데, 여기에서 定義하고 있는 放射線量은 다음과 같다.

첫째, 輸送容器的 表面에서 測定한 放射線레벨이 200mrem/hr를 超過해서는 안된다.

둘째, 輸送容器的 表面으로 부터 2미터 거리에서 測定한 放射線레벨이 10mrem/hr을 超過해서는 안된다.

한편 납遮蔽設計時에 考慮해야할 共通事項은 熱傳達要求條件, 셀(shell)의 強度, 遮蔽空 등인데 製作時 發生되는 셀과 납 사이의 熱傳達減少를 防止하기 위해 이 사이에 金屬接着劑를 사용하는 것이 바람직하며, 다른 方法으로는 外部셀로부터 납이 있는 쪽으로 冷却핀을 設置하여 熱傳達效率을 增加시킬 수도 있다. 그리고 셀이 너무 얇으면 輸送容기를 支撐하기가 어렵게 되며, 납이 收縮될때 셀이 破壞되어 變形될 수도 있으므로 보통 셀의 두께는 1/4"~3/8"로 決定한다.

遮蔽空에 대해서는 大型輸送容器나 遮蔽面이 고르지 못한 容器에 發生되는 것으로 製作에 辛중을 기해야 하는데, 셀사이를 遮斷시키는 防害物質을 取小限으로 줄이거나 모퉁이를 流線形으로 만드는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다.

나. 熱傳達分析

모든 輸送容器는 熱에 견딜 수 있는 能力을 評價해야 하는데, 特히 正常狀態下에서 輸送容器的 最大 表面溫度과 最大 燃料棒溫度, 遮蔽를 통한 溫度分布 및 事故狀態下에서의 最大 燃料棒溫度를 決定해야 한다. IAEA規定에서 定하고 있는 正常 大氣溫度는 $-40^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{C}$ 이며 이러한 溫度에서 輸送容器는 放射性物質의 漏出이 전혀 없어야 하는데 事故狀態下에서 즉, 800°C 에서 30分間 노출시키고 9미터 自由落下試驗을 하였을때 새어나오는 放射線量이 輸送容器表面으로 부터 1미터 위치에서 1rem/hr를 超過해서는 안된다.

또한 正常狀態下에서 輸送容器 表面溫度는 85°C 를 超過해서는 안되며 燃料棒의 溫度는 被覆管의 材質과 두께, 燃燒度, 冷却期間, 照射時間

및 出力 등에 따라 다르지만 事故時에 發生되는 最大 溫度가 燃料를 破壞시키는 溫度보다 낮아야 한다.

1) 熱 源

輸送容器的 表面溫度는 放射性物質이 放出시키는 熱에 따라 다르며, 熱源은 核物質의 崩壞熱(decay heat)과 太陽의 輻射熱(solar heat)로 區分된다. 이 두가지는 모두 時間에 따라 變化하지만, 輸送하는 中에 發生하는 崩壞熱의 變化는 一般的으로 크지 않으며, 總熱量中에서 輻射熱이 차지하는 비율은 10~15%程度로서 이것은 輸送容器的 表面形態, 面積, 季節, 하루중의 時間 등등에 따라 變化된다.

2) 外部 熱傳達

실린더형 輸送容器的 表面으로 부터 傳達되는 熱을 分析하는데는 輸送容器的 形態 즉, 핀의 有無나 垂直型 또는 水平型이나로 分類하여 實施하며, 輸送容器 表面의 空氣는 亂流로 假定한다.

熱은 自然對流와 輻射에 의해 輸送容器 表面으로 부터 大氣中으로 傳達되며, 容器内部에서 發生되는 熱을 外部로 排出시키는 量은 容器的 外部面積과 密接한 關係이 있는데 대부분의 外部面積은 옆면이며 따라서 양쪽 끝면은 무시하는 경우가 많다.

熱傳達效率을 높이기 위한 方法으로 輸送容器 表面에 冷却핀을 附着하는 것이 아주 一般的으로 이용되고 있는데, 輸送方法에 따라 圓柱方向과 軸方向 두가지로 設計할 수 있다.

3) 内部 熱傳達

内部 熱傳達分析에는 fuel cladding, 一次 冷却地域, 輸送容器 内部셀, 遮蔽地域 및 輸送容器 外部셀을 통해 傳達되는 崩壞熱을 考慮해야 하며, 물과 같은 液體 冷却劑를 사용하는 경우에는 事故時에 冷却水의 漏出을 假定하여 이때 發生될 内部的 最大 溫度를 計算하여야 한다.

또한 核燃料棒의 溫度를 計算할때는 事故狀

態下에서 燃料棒이 破壞되는가에 대한 分析을 해야 하는데, 이러한 分析의 目的은 燃料을 船積하기전에 물에서 얼마나 冷却시켜야할지 冷却期間을 決定하기 위한 것으로 冷却期間이 길어질수록 燃料棒이 破壞되어 放射性物質이 漏出되는 確率は 적어지지만 經濟的인 面에서는 가능하면 빨리 船積해야 한다.

CANDU 核燃料의 경우 Zr-4 燃料棒은 250°C 에 到達할때까지는 U₂O₃의 物理的 狀態에 아무런 變化를 일으키지 않고, 290°C 를 넘어서면 U₂O₃의 性質이 變化되기 시작한다.³⁾ 따라서 核燃料을 正常狀態로 運搬하는 경우 核燃料棒의 最大溫度 制限을 核燃料에 아무런 缺陷도 發生치 않는 250°C 로 한다.⁴⁾

다. 除 染

貯藏풀에서 放射性物質을 裝填시킨 輸送容器는 輸送하기 전에 반드시 外部除染을 시켜야 하는데, 輸送容器의 突出部나 갈라진 틈 등이 적으면 除染은 簡單하게 될 수 있으나 冷却핀이 設置되어 있는 容器에 대해서는 注意깊게 해야

水中에서 放射性物質을 裝填시키는 輸送容器는 cavity內的 물이 새지 않도록 維持시키는 裝置나 또는 물을 完全히 除去시키는 裝置를 해야 하는데 前者를 濕式輸送容器, 後者를 乾式輸送容器라 하며 氣密을 잘 유지시킨 濕式輸送容器에는 壓力上昇防止를 위한 밸브를 설치해야 한다. 그러나 높은 崩壞熱을 除去하여 燃料棒의 溫度를 낮게 해주어야만 하는 경우, 특히 照射後 試驗과 같은 경우를 除外한 一般的인 輸送, 예를 들어 原子爐로부터 再處理施設까지의 核燃料輸送에는 濕式輸送容器에서 發生되는 過壓으로 인한 安全度때문에 最近에는 乾式輸送容器의 使用이 增加하고 있다.

또한 輸送容器 表面의 汚染을 쉽게 除去시키기 위해 表面에 페인팅을 해주며 内部셀은 스텐레스강을 사용하면 除染이 容易하고 腐蝕도 防止할 수 있다. IAEA規定에 따른 許容表面汚

染度는 β , γ 에 대해 $10^{-5}\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$, α 에 대해서는 $10^{-6}\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 의 放射線량을 말한다.

라. 取扱 및 締結裝置

放射性物質을 荷役 및 裝填시키는 중에 가장 重要한 것은 取扱作業으로 輸送容器는 貯藏풀이나 핫셀 또는 處理場에서 각각 사용할 수 있도록 設計해야 하며, 이러한 각각의 位置에서 遠融操縱이 可能하도록 設計해야 한다.

輸送容器 設計者는 매카니즘을 設計하기 前에 制限條件들을 잘 알고 있어야 하는데, 輸送容器의 荷重은 대체로 한곳에 集中的으로 作用하게 되므로 빌딩바닥이나 輸送車輛이 이러한 荷重에 견딜 수 있도록 해야 하며 대체로 集中荷重을 500lb/ft²로 制限하고 있다. 그리고 輸送容器를 들어올릴때 무게中心을 決定하여 容器가 비틀리거나 回轉하지 않도록 lifting lug의 位置를 決定해야 하며, 極限強度의 10倍로 安全係數를 준다.

한편 移動하는 物體의 締結시스템은 簡單하지 않으므로 수평, 수직 및 횡단방향을 기본으로 하여 設計한다. 一般的으로 締結에 대한 設計要求條件은 重力方向으로는 輸送容器 무게의 2배, 車의 進行方向으로는 10배, 橫斷方向으로는 5배의 荷重에 견딜 수 있도록 設計해야 한다.

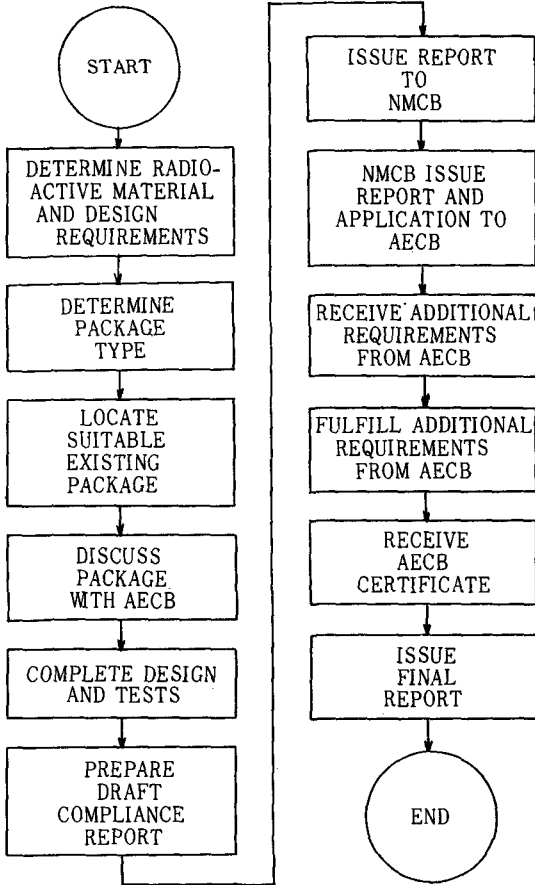
그리고 輸送容器는 水中에서 사용하는 경우가 있는데, 輸送容器의 正常作動溫度가 높을때는 荷役過程에서 熱衝擊을 받을 수도 있으므로 이런 경우에는 cavity를 낮은 壓力의 蒸氣, 뜨거운 물, 그 다음 찬물로 서서히 冷却시킬 수 있도록 設計하여 輸送容器나 內容物에 熱衝擊을 주지 않도록 주의를 기울여야 한다.

5. 輸送容器의 設計承認

輸送容器 設計가 完成되면 적절한 輸送方法을 選擇하여 設計와 船積에 관한 詳細事項을 關係當局에 提出해야 하는데, 이 提出事項에는 輸送容器가 輸送規定에 일치한다는 것을 立證해

(그림) 輸送容器 承認申請 系統圖

AECB-ATOMIC ENERGY CONTROL BOARD
NMCB-NUCLEAR MATERIALS CONTROL BRANCH



주는 設計評價書를 包含시켜야 한다.

캐나다의 경우 AECB(Atomic Energy Control Board)가 輸送에 대한 規定當局으로서의 役割을 하고 있으며, 承認申請이 적합하다고 評價될때는 設計, 船積에 관한 承認書를 내준다. 이 設計 承認申請에 대한 系統圖는 그림과 같다.

6. 輸送容器 設計의 問題點 및 解決策

바람직한 輸送容器 設計는 다음의 세가지 基本的인 要求事項 즉, 技能的인 面, 經濟性 및 安全性에 관한 事項을 만족해야 하는데 이러한

것들은 相互依存的이기 때문에 設計者는 이들을 동시에 考慮해야 한다. 設計者는 또한 輸送容器的 使用目的에 대해서도 詳細히 把握하여야 하며, 다음의 主要 價格要因을 主義깊게 考慮해야 한다.

總 輸送價格 = 輸送容器價格 + 取扱價格 + 運般價格 + 保險料

大型輸送容器에 대해서는 運般價格이 經濟的인 반면 輸送容器 무게가 만일 100톤 이상이라면 적절할 取扱施設이 問題이다. 하지만 이 경우 輸送容器 價格에 비해 輸送料를 줄일 수 있으므로 經濟的일 수도 있는데, 한 예로써 depleted uranium 輸送容器와 steel 輸送容器와의 材料價格에 대한 輸送料를 비교해 볼 수 있다.

또한 IAEA 規定에서는 設計要求條件에 完全히 일치가 안되는 輸送容器에 대해서도 약간의 融通性을 갖도록 特別協定(special arrangement)을 規定하고 있는데, 이것은 基本的인 安全方程式으로 設計安全으로 부터 作動安全까지의 모든 것을 包含한다. 즉,

總 安全(overall safety) = 設計安全(design safety) + 作動安全(operational safety)

여기에서 作動安全에 대한 대표적인 예로는 特別히 選定되는 수송루트나 警察護衛 및 消防車의 待機 등으로 때로는 作動上의 安全設計를 고려치 않음으로써 輸送容器에 대한 價格을 最適化시키는 경우도 있는데, 이것은 비싼비용을 들여 構造的인 安全性을 分析하는 것보다 特別協定을 이용하여 輸送容器를 船積할 수 있기 때문이다.

또한 照射後 核燃料를 6개월 이상 冷却시킨 것이라면 輸送容器 設計는 훨씬 더 간단해지고 經濟的일 수가 있는데 遮蔽두께減少, 무게減少, 熱傳達問題 등을 간단하게 解決할 수 있기 때문이다. 그리고 貨倉에서 사용하는 輸送容器를 設計한다면 水中에서도 사용할 수 있도록 약간의 融通性을 考慮하는 것이 필요하다.