



새로운 다목적 사용후 연료의 이송 및 저장 용기

〈NEI〉

19 74년까지 미국 원전에서 방출된 사용후 핵연료는 재처리를 위해 계획된 선적을 위하여 소내 사용후 연료 저장조에 저장되었으나, 지미 카터 미국 대통령이 재처리를 금지하자 새로운 시대가 시작되었다.

이 당시에 사용후 연료 저장조는 추가 사용후 연료를 저장할 수 있도록 확장될 필요가 있었다. 사용후 연료 저장조의 용량은 새로운 고밀도 저장대의 추가를 통하여 증대되었으며, 사용후 연료 저장력의 설계 및 인허가의 반복을 통하여 사용후 연료 저장조의 저장 능력은 크게 증대되어 왔다.

현재 157,000 이상의 사용후 연료 다발이 미국 원전 소내에 저장되어 있지만, 저장조의 저장 능력 확장은 거의 한계에 도달했으며, 이제 사용후 연료의 건식 저장이 필요하게 되었다.

사용후 연료 건식 저장의 초기에는 장비들이 연료 저장만을 수용하

도록 설계되었다. 사용후 핵연료의 장기 저장을 위한 미국 연방 처분장의 확보에 대한 기대속에 건식 설비들은 다목적, 이송 가능 저장이 가능하도록 개발되어 왔다.

현재 이들 설비들은 연료를 수용하는 금속 캐니스터가 저장 용기 내에 있고, 향후 그 캐니스터가 저장 용기에서 분리되어 수송 용기 내에서 장기 처분장으로 수송되도록 설계된다.

그러한 설비의 한 공급사는 조지아주 아틀란타에 소재한 NAC International(NAC) 이다. NAC의 범용 다목적 시스템(UMS)은 〈그림 1〉에 나타난다.

수송 가능 저장 용기(TSC)는 연료가 수용되는 최내부 부품이다. 저장 기법에 있어서 이 캐니스터는 수직형 콘크리트 용기(VCC) 내에 놓여지는데 원전 현장의 독립적인 사용후 연료 저장 설비(ISFSI)의 저장용 설비로 사용된다.

저장소에 놓여질 때, 캐니스터는

나중에 분리되어 수송 충격 제한기를 가진 수용 용기에 놓여지며 장기 처분장으로 수송된다.

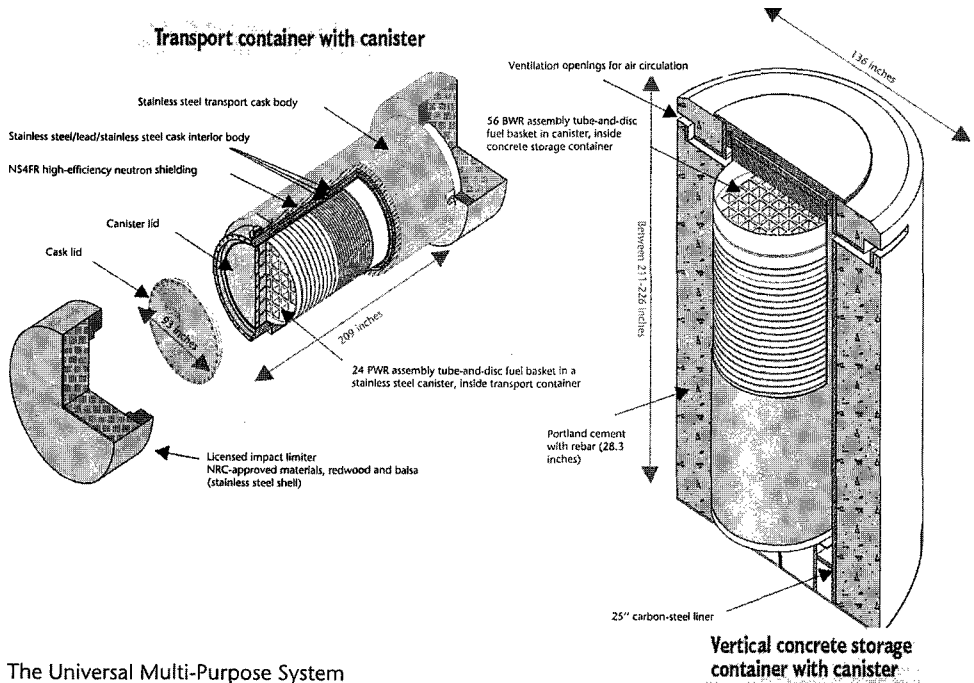
콘크리트의 이점

건식 저장에 사용되는 시스템들은 피동형이다. 전형적인 설계는 금속 또는 콘크리트 용기를 가진 1차 억제(confinement) 용기이다.

1차 억제 용기는 저장 형태를 유지하고, 붕괴열을 제거하는 구조적 용기이며, 방사성 핵종을 수용하는 억제 경계이다. 이러한 구조는 1차 억제 용기를 보호하고 감마선 및 중성자선을 차폐하며, 붕괴열을 발산시키는 경로가 된다.

다양한 형태의 시스템들이 인가되었으며, 사용후 핵연료의 건식 저장을 위해 발전되어 왔다.

건식 저장 기술은 사용후 연료의 수송을 위하여 개발된 시스템에서 발전되었다. 사용후 연료의 건식 저장을 위한 2가지 주요 기술은 금속



The Universal Multi-Purpose System

〈그림 1〉 NAC의 범용 다목적 시스템(UMS)

또는 콘크리트 용기를 채택한다.

금속과 콘크리트 용기를 비교하는 데 있어서, 비용·차·열 제거 능력, 안전성, 운전 단순성, 그리고 저장 연료의 궁극적인 수송을 수용할 능력이 평가되어야 한다.

콘크리트 용기는 금속 용기에 비하여 매우 저렴하면서도 두꺼운 용접 마개와 볼트 마개 비교에서 더 나은 차폐 및 억제 역할을 한다. 또한 콘크리트 용기는 더 좋은 냉각 작용을 하는데, 잘 환기되고 열 수송에 대한 더 큰 능력을 갖고 있기 때문이다. 이러한 점은 미래의 연료가 더 높은 농축도와 연소도를 갖기 때문에 매우 중요하게 될 것이다.

금속 용기 제작의 복잡성은 설비를 생산하는 데 있어서 콘크리트 설비에 요구되는 시간보다 약 8개월에서 12개월 더 들게 된다.

결과적으로 콘크리트 다목적 설비의 이용은 금속 이중 용기 이용보다도 처분장 또는 소외(AFR) 저장 시설까지의 최종 선적을 위한 훨씬 더 새로운 수송 용기의 이용을 가능하게 한다.

전세계적으로 콘크리트 설비 이용을 제한할지 모르는 한 가지 문제는 콘크리트 저장 설비가 항공기 충돌 사고에 덜 견고할 것이라는 우려이다. 다음에 명확히 나타나듯이, 콘크리트 다목적 설비는 그러한 사

건의 경우에 분명한 안전성을 준다.

보수적 해석

건식 저장 설비의 가장 중요한 부품은 격납 또는 억제 경계 부문인데, 이것은 정상·비정상 또는 사고 상황시 방사성 핵종을 가두는 캐니스터가 주는 물리적인 차폐이다.

경계로 이용되는 캐니스터 외곽 물질은 미국기계공학회(ASME) 보일러 및 압력용기(B&PV) 코드를 위해 개발되어 반영된 매우 보수적인 해석 방법을 이용하여 평가된다.

이 코드에서는 응력(stress)과 인장력(strain) 사이에 탄성(선형) 관



제가 있다고 추정한다. 이러한 가정은 사실과 매우 다른데 실제 물질에서 응력과 인장력 사이의 관계가 매우 비선형이기 때문이다.

〈그림 2〉는 전식 저장 및 수송 설비에서 사용되는 매우 흔한 물질인 304 stainless steel에 대하여 탄성 응력/인장력 관계와 실제 응력/인장력 관계를 보여준다.

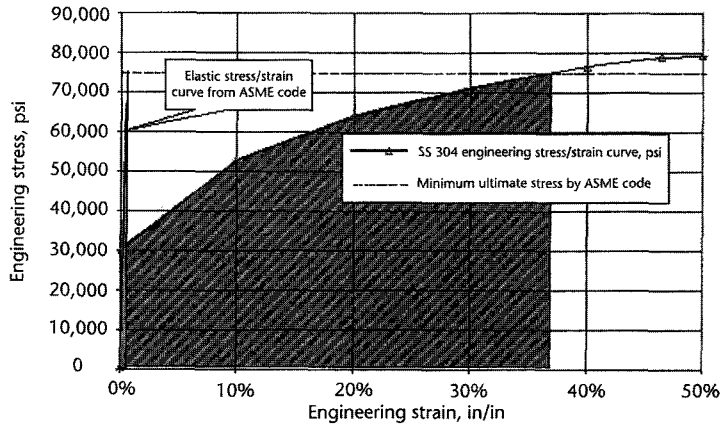
실제로 물질은 극단적인 인장력에 도달할 때 기능을 상실한다. 〈그림 2〉에서 보듯이, stainless steel에 대한 탄성 응력/인장력 곡선은 1% 이하의 극단적인 인장력을 예측하는데 실제로 적어도 40%까지는 극단적인 인장력 기능 상실에 도달하지 않는다.

모든 규제적 한계는 실제 물질의 응력/인장력 곡선이 아닌 탄성 응력/인장력 곡선에 근거한다.

ASME 코드의 탄성 응력/인장력 곡선과 실제 응력/인장력 곡선과의 면적이 기능 상실 전 물질에서 에너지 흡수 능력의 크기이므로, stainless steel이 미국 원자력규제위원회(NRC)가 적용하는 기능상실 전 잠재적 변형에 있어서 대략 100배의 차이가 있음이 사실이다.

전식 저장 설비는 항상 설계 기준 사고(DBA)하에서조차 보수적인 코드 응력/인장력 관계를 초과하지 않도록 설계된다.

NRC의 설계 검토는 설계를 승인하기 전에 또한 이러한 점을 확실히



〈그림 2〉 304 stainless steel 탄성 응력/인장력 곡선

한다. 이것은 UMS의 설계와 물질이 실제 물질 특성 및 성능에 비추어 매우 큰 구조적 안전 여유도를 가짐을 의미한다.

그러므로 UMS는 정상·비정상 및 사고 상황 등 모든 설계 기준하에서 매우 견고한 기술이다.

설계 기준 이상 사고

작년 9.11 테러 사건은 원자력 시설에 확산될 수 있는 유사 사건에 대한 우려를 야기시켰다. NAC는 UMS에 대한 대형 항공기 충돌의 결과를 분석했는데 이것은 명백히 설계 기준 이상 사고(BDBA)이다.

다음은 UMS에 대한 항공기 충돌의 평가와 관련된 필수적인 요소를 나타낸다. 이러한 평가는 ISFSI 내에 포함된 UMS와 충돌하는 Boeing 747-400으로 이루어진다.

747-400 기종이 상업용 항공기 중 가장 크고 무겁기 때문에 가정된 항공기이며, 고려 사항과 중요한 변수는 다음과 같다.

- 500mph에서 UMS에 대한 747 동체의 충돌; 뚜껑 높이에서의 충돌이 회전력을 최대화하며, 중력 중심에서의 충돌이 활주를 최대화
 - 인접 UMS의 캐니스터 뚜껑 부근에 제트 엔진 터빈 로터의 충돌
 - UMS의 직경은 11.3ft, 높이는 18.7ft
 - UMS의 무게는 304,500lbs
 - 747 동체의 직경은 20.5ft, 길이는 23ft
 - 완전히 하중된 747 동체의 무게는 452,000lbs
 - UMS 밀도는 162lbs/ft³
 - 747 동체의 밀도는 61lbs/ft³
- 고밀도를 갖는 물체에 저밀도를 갖는 물체의 고속 충돌을 평가하는

데 있어서 저밀도 물체는 고밀도 물체 주위로 흘러갈 것이며 특히 물체들이 상대적으로 가까운 무게를 갖는다면 더욱 그렇다.

이런 경우에 747 항공기는 물의 밀도의 약 10%이며, UMS는 고강화 콘크리트의 밀도를 갖는다. 이런 상이한 밀도에서 747 항공기 몸체는 원통형 유체 흐름같이 흘러지면서 용기의 몸체 근처에서 붕괴된다.

이러한 사건의 개략적인 유추는 저위털로 채워진 큰 플라스틱 가방이 고속으로 콘크리트 기둥에 던져지는 것과 같다. UMS와 항공기의 충돌에 따른 4가지 다른 사고 시나리오에 대한 평가는 다음과 같다.

- 인접 콘크리트 용기 속으로 활주하는 콘크리트 용기로부터 캐니스터에 미치는 하중

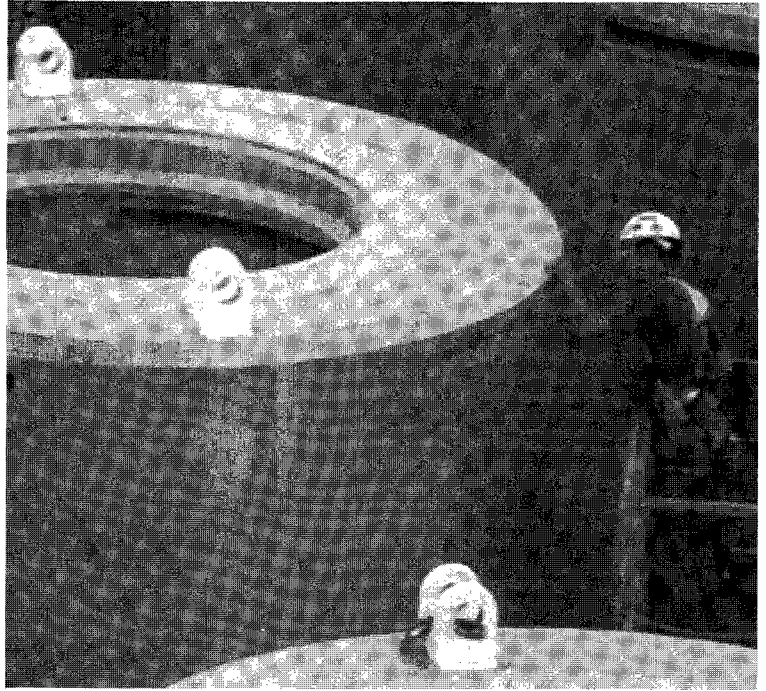
- 콘크리트 용기 및 캐니스터의 콘크리트판으로의 충돌로부터 캐니스터에 미치는 하중

- 제트 엔진 터빈 로터의 충돌로부터 캐니스터에 대한 충격

- 항공기 충돌 후 주요 제트유 화재로부터 캐니스터에 대한 충격

이들 모든 사고 시나리오에 대하여, BDBA 사건 후 UMS가 수용 가능한지를 결정하는 수용 기준은 방사능의 비누출이다.

평가의 결과는 두 범주로 나누어지는데 방사능 핵종을 가두는 캐니스터의 능력에 대한 물리적 충격의 영향 및 방사능 핵종을 가두는 캐니



스터의 능력에 대한 화재의 영향이 그것이다.

1. 충격 영향

UMS 수직 콘크리트 용기 및 캐니스터 설비는 분석에 있어서 보수적인 형태로 만들어졌다.

활주 또는 급습 충돌 사건에 대하여, 캐니스터 외곽, 뚜껑 및 용접부의 물질은 극단적인 물질 인장력에 접근하지 않는다.

양쪽 캐니스터 뚜껑의 용접은 중첩적인 마개 시스템을 유지하면서 극단적 인장력 이하로 유지된다. 이것은 캐니스터가 기능을 잃지 않으며, 어떤 방사능 핵종의 누출도 없

음을 의미한다.

또한 제트 엔진 터빈 로터의 충돌은 콘크리트 용기 금속 라이너를 투과하지 못한다.

라이너가 캐니스터를 부풀리거나 위축시키는 반면, 캐니스터 외곽·뚜껑 및 용접 물질의 인장력은 다른 사고에 비하여 작다.

그러므로 항공기 충돌의 결과로서 캐니스터로부터 어떤 방사능 핵종의 누출도 없을 것이다.

2. 화재 영향

항공기는 연료로서 휘발성 및 연소 온도가 등유와 매우 유사한 제트유인 JP-5를 사용한다. 200mph



이상의 속도에서 항공기의 충돌은 제트연료를 매우 넓은 지역에 걸쳐 흩뿌릴 것이다.

또한 ISFSI는 콘크리트판에 대한 UMS의 수송 및 이송을 용이하도록 기준 지형의 옥외에 건설된다.

이러한 특징들은 제트 연료가 널리 흩어지고, ISFSI의 설계 때문에 흩어진 제트 연료를 집수하는 것이 어려움을 의미한다.

모든 이러한 특징들은 ISFSI와 항공기 충돌을 따라 발생하는 화재의 형태에 대한 다음의 관측들로 나타난다.

- JP-5의 연소 온도는 다른 석유 연료에 비하여 매우 낮으며, 옥외에서 완전히 삼킬 JP-5 화재의 최대 온도는 대략 1500°F이다.

- ISFSI는 옥외에 설치되며, 둘러싸인 어떤 건축 구조물(지붕 및 벽)도 없다. 이것은 UMS 주위의 화재 온도를 강화시키는 그러한 구조물로부터 반사된 열에 대한 어떤 잠재성도 없음을 의미한다.

- 제트 연료를 집수하는 것이 ISFSI의 설계 때문에 매우 제한되므로, UMS 주위에서 완전히 삼킬 화재는 분명히 최대 30분 이내로 제한될 것이다.

- stainless steel의 용융점이 2600°F 범위이므로, 격납/억제 경계가 용융될 어떤 잠재성이 없다.

- 항공기 충돌은 화재 전에 발생하므로, 화재 동안 UMS에 부과되

는 어떤 큰 기계적 하중이 없다.

- 캐니스터 내의 연료는 1058°F의 설계 기준 온도 한계를 가지므로, 수 주에서 수 개월까지 수용 가능하다. 그러나 연료는 짧은 기간(수 시간) 동안 1800°F의 온도를 쉽게 수용할 수 있을 것이다.

NAC는 콘크리트 차폐에 대한 화재의 영향을 평가하기 위하여 30분 동안 완전히 삼킬 JP-5 화재에 있어서 UMS의 열적 해석을 수행했다. 해석 결과, 외부 표면(피크) 콘크리트의 온도는 1475°F를 초과하지 않았으며, 평균 콘크리트 온도는 350°F를 초과하지 않았다.

항공기 충돌에 이은 화재는 캐니스터 또는 용기 구조 철강의 구조적 안전성에 어떤 영향도 미치지 않으며, 방사능의 어떤 누출도 일으키지 않는다.

제트 연료의 확산에 따라 UMS의 외부 표면의 콘크리트가 꽤 높은 온도까지 상승될 것이 명백하지만, 단지 외부 수 인치만이 평균 온도보다 상당히 높은 온도에 있게 된다.

미국콘크리트협회(ACI)의 ACI 349 코드는 650°F의 단기간 국지적 콘크리트 온도를 허용하므로, 콘크리트는 단기간 동안 상승한 온도로 다시 회복한다.

또한 화재로부터 냉각된 후 용기에 대한 물의 분사는 콘크리트를 재수화하여 콘크리트의 많은 특성들을 회복시킨다. 그러므로 UMS는

화재로부터 단지 최소한의 차폐 기능 저감을 겪게 될 것이다.

결론적으로, 충돌 및 화재에 이은 UMS로의 접근은 크게 제한되지 않으며, 요구되는 대로 임시 차폐 장치로 수용될 수 있다.

3. 실증 시험

NAC는 DBA 및 BDBA 상태에서 용접 stainless steel의 격납 용기에 대한 시험을 시행해 왔다. 한 계통은 60g(실제 크기로는 300g, 1/4 축적으로는 1200g로 시험)의 규제 설계 기준 구조 한계의 5배까지 축적으로 시험되었다.

그러한 구조적 하중은 항공기 충돌에 의해 실제 부과될 수 있는 하중보다 더 크다. 이러한 시험의 결과는 다음과 같다.

- 어떤 격납 물질 또는 용접의 기능 상실이 없고,

- 어떤 격납 물질 또는 용접의 손상도 없으며,

- 격납 용기로부터 내용물의 어떤 누출도 없다.

그러므로 해석 및 시험에 의하여 NAC의 UMS와 물질 및 용접은 규제 요건을 만족하는 매우 큰 안전 여유도를 가지며, DBA 및 BDBA 하에서 방사능 물질의 누출을 예방한다. ☞