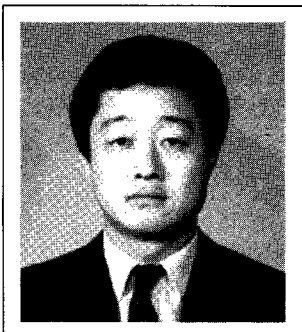


방사성폐기물 처리용 고건전성 용기의 개발

송 영 절

한전 전력연구원 원자력연구실 책임연구원



한전 전력연구원은 최근 서울대 기초전력공학공동연구소와 공동으로 원자력발전소 중·저준위 방사성폐기물의 처리·처분에 사용하기 위한 고건전성 용기를 개발했다. 93년 4월부터 95년 1월까지 총 3억2천만원의 예산을 들여 개발한 이 용기는 국제기준에 부합하는 내구수명 3백년 이상의 고건전성 용기로서, 이 용기의 개발로 제조기술 국산화를 통한 기술자립과 수입대체에 따른 외화절감은 물론, 연간 약 450드럼의 폐기물발생량이 절감될 것으로 기대된다.

연

자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성폐기물은 처리 및 처분시 안정성과 건전성이 확보되어야 한다.

방사성폐기물의 안정성과 건전성을 확보하기 위한 방법에는 방사성폐기물을 고형화하는 방법과 고건전성 용기(High Integrity Container)를 사용하는 방법이 있다.

그러나 전자의 고형화 방법은 공정이 복잡하고 발생하는 폐기물량이 많아지는 등의 단점이 있다.

한편 고건전성 용기는 탈수된 폐기

물(유리수 1% 이내)을 고형화시키지 않고도 처리 및 처분이 가능하여 처리공정의 단순화와 폐기물의 부피를 줄일 수 있는 장점이 있다.

또한 향후 정부가 추진중인 영구처분시설의 이용효율 극대화에도 크게 기여할 것으로 생각된다.

또한 방사성폐기물의 처리·처분의 신뢰성 확보측면에서 폐기물에 대한 획기적인 처리방법이 새로이 개발되지 않는 한, 고건전성 용기의 이용은 증가될 전망이다.

이에 부응하기 위해 국내 최초로 서

울대 기초전력공학공동연구소와 한전 전력연구원이 공동으로 93년 4월부터 95년 1월까지 22개월간의 연구기간과 3억원의 연구비를 투입하여, 섬유보강 폴리머침투 콘크리트(Steel Fiber Polymer Impregnated Concrete)를 사용한 고건전성 용기의 제작에 성공하였다.

본고에서는 개발된 고건전성 용기의 재료·용기모형·제작 및 성능평가시험에 대한 연구결과를 기술함으로써 향후 활용성을 제고시키는데 기여하고자 한다.

고건전성 용기의 설계기준

고건전성 용기의 설계·제작기준은 각국의 폐기물관리정책, 처분장 조건 등에 따라 그 기준을 달리하고 있으며, 국내의 경우에는 이에 대한 세부 기준이 마련되어 있지 않아 미국 NRC가 Technical Position을 통하여 제시한 고건전성 용기 설계·제작 기준을 사용하였다.

그 내용을 요약하면 (표 1)과 같으며, 동 기준에 부합하는 성능평가시험을 수행하여 만족할 만한 성과를 거둘 수 있었다.

고건전성 용기의 재료개발

고건전성 용기의 드럼내 라이닝재로 사용된 「강섬유 보강 폴리머침투 콘크리트(SFPIC)」는 콘크리트의 인장강도와 균열에 대한 저항성을 대폭 개선시킬 목적으로, 강섬유(Steel Fiber)를 콘크리트에 고르게 분산시켜 만든 구조용 복합재료에, 고분자 화학공업의 생성물인 폴리머(Polymer), 일명 수지(Resin)를 콘크리트에 침투시킴으로써, 콘크리트의 강도·수밀성·내방사성·내화성·내화학성 등의 물성을 획기적으로 개선

시킨 신소재 콘크리트를 말한다.

본 연구에 사용된 SFPIC의 강도는 최대 1,200kg/cm², 보증강도(Guaranteed Strength) 1,000kg/cm²을 목표로 설정하여 개발되었으며, 이때 사용된 콘크리트의 배합표는 (표 2)와 같다.

여기에서 사용된 시멘트는 국내에서 생산되는 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 굵은 골재의 최대치수는 13mm이다.

또한 강섬유는 직경 0.5mm, 길이 30mm의 섬유를 사용하였으며, 유동화제로는 나프탈렌계의 Rheobuild 2000을, 중합체(Polymer)는 MMA (Methyl Methacrylate), AIBN (Azobisiso Butyronitrile), DMA (Dimethyl Aniline)를 사용하였다.

(표 1) 미국 NRC Branch Technical Position(BTP)의 HIC 설계제작기준

항 목	기 준
유 리 수 (Free Liquid)	폐기물 부피의 1% 미만
설 계 수 명	최소 300년의 구조건전성 유지
기 계 적 강 도	매립깊이에서의 수평·수직하중에 견뎌야 함 특히 중합체(Polymeric Material)로 제작된 용기는 설계수명동안 Creep 또는 연성·취성파괴가 일어나지 않음을 입증
부 식 및 화 학 적 특 성	부식 및 화학적 영향이 설계수명기준에 부합
내 열 성	폐기물 처리·저장·운송 및 처분시 발생하는 열부하에 견뎌야 함
내 방 사 성	용기 재질에 대해 10 ⁶ rad의 선량에 조사된 후에도 용기 재질특성에 중대한 변화가 없어야 함
기 중 장 치	기중장치는 최소 3g의 수직 기중하중에 견뎌야 함
용 기 표 면	용기 상부표면은 부식이나 화학적 열화를 유발하는 액체의 축적이 최소화
용 기 덮 개	설계수명기간 동안 확고한 밀봉 보장
폐기물처리·취급·수송 및 처분	폐기물 처리·취급·수송 및 처분조건에 견딜 수 있도록 원형시험 (Prototype Testing) 수행
용 기 품 질 보 증	품질보증 프로그램에 따라 설계·제작사용

고건전성 용기의 규격 및 제조공정

1. 규 격

본 연구에서 개발을 목표로 한 용기의 규격은 기존의 200l 철제 탄소강 드럼을 사용하였으며 체원은 (그림 1)과 같다.

고건전성 용기의 중량은 205kg, 내부용적은 140l이며, 뚜껑체결에 사용되는 Sealing재로는 Epoxy Resin계의 Sealant를 사용하였다.

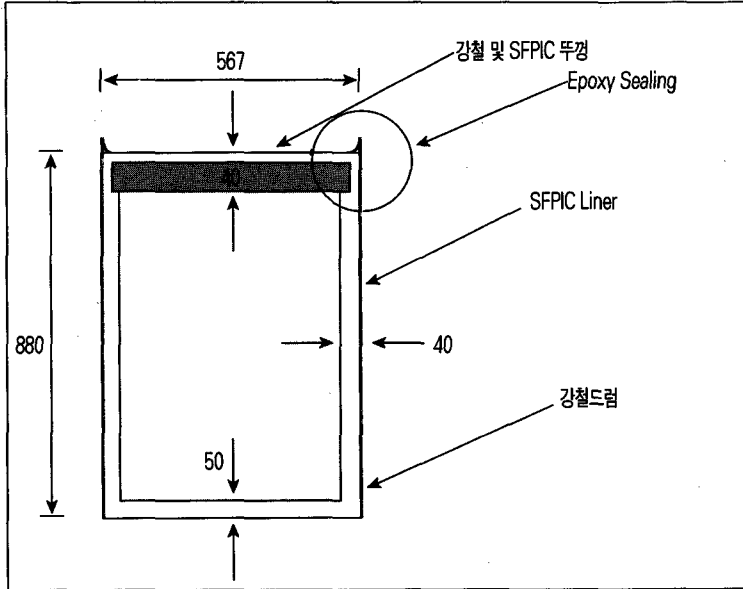
2. 제조공정

강섬유보강 폴리머침투 콘크리트(SFPIC)로 제조되는 고건전성 용기

(표 2) 재료배합비

(단위 : kg/m³)

시멘트	물	잔골재	굵은골재	유동화제(1)	실리카흄	스틸화이버
550	154	650	1,083	21	66	73.5



〈그림 1〉 고건전성 용기의 규격(단위 : mm)

의 제조는 크게 세 과정, 즉 강섬유보강 콘크리트(SFRC)인 Base Concrete의 배합, 용기의 제조, 폴리머침투제의 침투 및 중합과정으로 구성되어 있다.

압축강도 1,000kg/cm² 이상의 고강도 콘크리트이기 때문에 엄밀한 품질관리가 이루어지지 않으면 균질의 용기를 생산할 수 없게 된다.

〈그림 2〉는 용기의 제조과정 흐름도를 나타낸 것이다.

각 단계별 주요공정에 대해 기술하면 다음과 같다.

가. 배 합

〈표 2〉의 배합비에 따른 각 재료를 믹서에 넣고 건비빔(1분)한 후, 유동화제를 물에 타 믹서에 투입하여 다시 비빈 후 타설하는 순서로 배합 및 비

비를 실시하였다.

나. 타 설

운반된 콘크리트를 우선 바닥면을 친 후 충분히 다지고 나서 내부 거푸집을 거친 후 타설을 실시하였으며, 쿨드 조인트가 생기지 않도록 일괄작업으로 실시하였다.

다. 양 생

1일간 대기중 양생 후 몰드 제거 후에 수중양생을 실시하였는데, 실물용기의 부피가 큰 관계로 수조에 침투시키지 않고 용기에 물을 채워 20℃의 온도에서 실내수중양생을 실시하였다.

라. 용기의 건조

양생이 끝난 용기를 폴리머가 공극에 침투되도록 하기 위하여, 진공건조로에서 150℃의 온도로 24시간 건조시켰다.

〈표 3〉 SFPIC와 보통콘크리트 파괴인성시험결과

종 류	상대충격강도	강대파괴인성시험
보통콘크리트	1	1
SFPIC	10	> 70

마. 폴리머 침투

건조된 용기에 MMA 단량체와 개시제 AIBN, 촉진제 DMA를 넣은 후 24시간 함침하여 공극에 폴리머를 침투시켰다.

바. 중 합

함침된 용기에서 함침용액을 제거한 후, 건조로에서 90℃의 열로 5시간 중합을 시켜 SFPIC를 제작하였다.

고건전성 용기의 성능평가

1. 재료의 성능평가

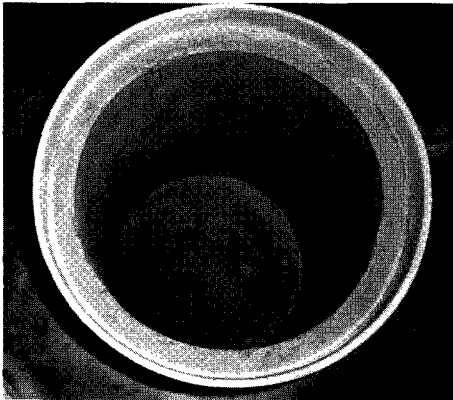
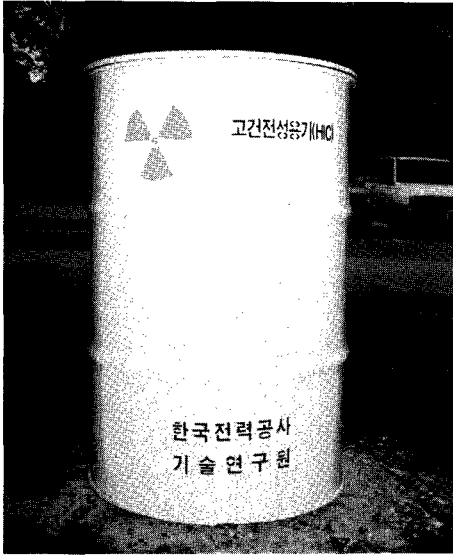
가. 충격 및 파괴인성

파괴인성시험을 통해 충격과 견고성을 기존의 일반 보통 콘크리트와 비교한 결과 〈표 3〉과 같이 SFPIC가 상대적으로 높은 인성과 충격강도를 갖는 것을 알 수 있었다.

나. Creep

SFPIC의 지속하중하에서의 장기 거동특성을 강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete : SFRC)와 비교실험한 결과, SFRC의 Creep 계수가 0.3, SFPIC의 Creep 계수는 0.22로서, SFPIC가 SFRC에 비해 Creep의 영향이 매우 적음을 알 수 있었다.

이러한 SFPIC의 Creep 계수는 보



개발된 HIC의 외관(상) 및 내부상태(하)

통콘크리트의 Creep 계수에 비하면 무시할 수 있을 정도로 적은 것이다.

이와 같이 Creep 변동이 적다는 것은 SFPIC가 다른 재료에 비하여 우수한 저장용기로 사용될 수 있다는 근거가 되는 것이다.

또한 용기의 제조후 건조수축변형률이 매우 작으므로 용기의 고건전

SFPIC가 보통콘크리트보다 훨씬 높은 것으로 판단된다.

이러한 피로강도는 용기의 저장장소의 여건에 따라 검토대상이 될 수도 있고, 고려할 필요가 없는 경우도 발생하는데, 이 실험결과를 분석할 때 정상상태의 응력이 피로한도 미만일 것이므로 피로에 대한 문제는 매우 안

성 유지에는 Creep으로 인한 문제는 발생하지 않음을 알 수 있었다.

다. 피로

반복하중하에서의 피로거동을 보통콘크리트와 비교 실험한 결과, 최대응력수준 80%를 중심으로 그보다 높은 응력수준에서는 SFPIC의 휨피로강도가 높고, 낮은 응력수준에서는 보통콘크리트의 휨피로강도가 높은 것으로 나타났다.

최대응력수준 80%보다 낮은 응력수준에서 SFPIC의 휨피로강도가 낮게 나타났으나, 이것은 SFPIC의 하중지지능력이 낮다는 것이 아니며 단지 피로를 받는 하중지지능력비가 낮다는 것을 의미한다.

따라서 동일한 반복휨응력을 가할 때에는 SFPIC의 휨강도가 보통콘크리트에 비해 2~3배 정도 크므로, 절대적인 휨피로강도는

〈표 4〉 SFPIC와 보통콘크리트의 내구성 비교

종 류	내구성지수(DF)
보통콘크리트	48
SFPIC	98

전측인 것으로 판단된다.

라. 내구성

온도변화(동결융해)로 인한 내구성을 보통콘크리트와 비교실험한 결과, SFPIC는 400회의 동결융해에도 불구하고 거의 중량변화가 없는 반면, 보통콘크리트에서는 2.2%~2.3%의 중량변화가 관찰되었다.

또한 보통콘크리트는 동결융해가 증가함에 따라 동탄성계수가 급격히 떨어지는데 비하여, SFPIC의 동탄성계수는 대단히 완만하게 감소되고 있다.

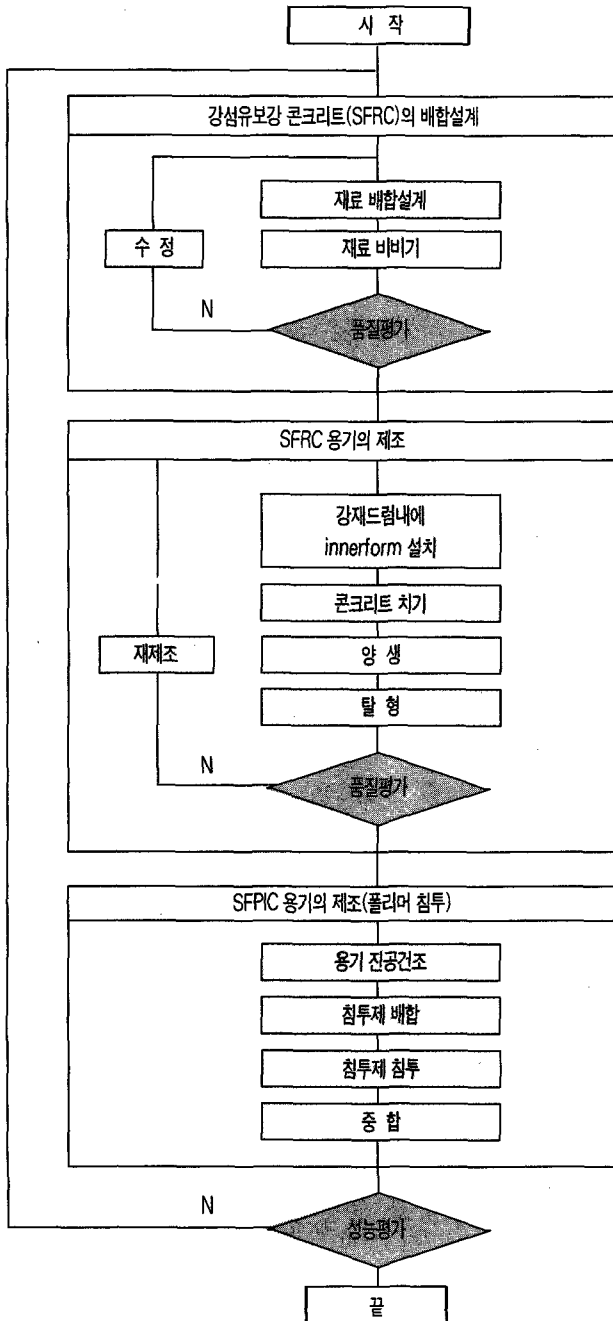
이상의 결과로 볼때 SFPIC는 온도변화에 대한 충분한 내구성을 갖는 것으로 판단된다(표 4).

마. 수밀성

폴리머 침투 전후의 수밀성 변화를 보통콘크리트와 비교실험한 결과, 200시간 동안 수중에 담근 후 보통콘크리트에는 3g/cm²의 물이 흡수되었으나, SFPIC는 0.15g/cm²의 물이 흡수되어 SFPIC가 보통콘크리트에 비하여 약 20배의 수밀성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

바. 내화학성

방사성폐기물내에서 생성되는 화학물질이나 폐기물저장소 주위환경에서 기인하는 화학물질에 대한 SFPIC와 Epoxy 시편의 저항정도를 알고자, 각



〈그림 2〉 SFPIC 용기의 제조과정

시편을 화학물질에 노출시킨 뒤 이에 따른 압축강도와 중량의 변화를 측정하고 미국 NRC의 기준과 비교하였다.

실험결과 각 시편의 무게변화는 $\pm 2\%$ 이하로서 화학물질에 대한 내구성이 높은 것으로 나타났으며, 압축강도의 변화는 SFPIC의 경우 2% NaOH 용액에서는 변화가 경미하나, 2% H₂SO₄에서는 약 40% 가량의 압축강도의 감소가 있었다.

그외의 화학물질에 대해서도 Citric Acid를 제외하곤 850kg/cm²(-15%) 이상의 강도가 나왔다.

여기서 H₂SO₄와 Citric Acid에 의한 강도감소가 크기는 하지만, 이 값들은 NRC에서 규정하는 최대매장압축깊이의 요구값보다는 훨씬 높으므로 안전한 것으로 판단된다.

그리고 Epoxy의 경우는 전 용액에 대하여 압축강도의 변화가 경미한 것으로 나타났다.

사. 내화성

저장·수송하는 동안의 가상 화재 사고의 열조건(450℃)하에서 SFPIC의 중량 및 강도변화를 측정된 결과 약 2.56%의 단위중량의 감소를 나타내었고, 시편의 하단에서 micro crack이 약간 발견되었으나 내부까지 진전되지 않았으며 시편 파괴의 징후는 나타나지 않았다.

이러한 실험결과로 볼 때 화재사고나 열사고에 의한 상황에 노출된 HIC는, 내용물이 문제가 되는 정도

의 손실없이 다른 HIC에 다시 포장하여 매장하거나 처분할 수 있다고 판단된다.

아. 방사선 저항성

SFPIC와 Epoxy시편을 방사선(Gamma Ray)에 노출시킨 뒤 이에 따른 강도변화와 가스발생 정도를 측정하였다.

방사선노출에 따른 압축강도의 변화는 <표 5>와 같다.

이 값들은 NRC에서 규정하는 최대 매장압축깊이(45ft)에서의 요구량을 충분히 만족하는 것으로 매우 안전한 것으로 판단된다.

또한 선량이 50MR, 100MR일 때의 H₂, CH₄, CO 가스의 발생량의 분석 결과는 <표 6>과 같다.

여기서 200l 용기의 SFPIC 무게를 150kg으로 산정하여 계산하면, 100MR에서의 수소 발생량 $4.31 \times 10^6 \text{g} \cdot \text{mol/g}$ 는 300년 동안 100MR의 방사능노출에 의해 $0.65 \text{g} \cdot \text{mol}$ 이 되며, 용기의 공극부피를 1.5ft^3 으로 가정하면 결과적으로 수소 발생량은 300년 동안 $0.431 \text{g} \cdot \text{mol/ft}^3$ 이 된다.

이 값을 운송과 저장을 위해 사전에 소모되는 100일의 값으로 환산한다면 $0.000394 \text{g} \cdot \text{mol/ft}^3$ 으로 이 값은 NRC 기준값 $0.063 \text{g} \cdot \text{mol/ft}^3$ 의 약 0.62% 정도로서 매우 안전측의 값을 알 수 있다

자. 생물학적 저항성

SFPIC와 Epoxy 시편의 세균을 배양한 뒤 일정 기간 경과 후의 세균의

<표 5> 방사선노출에 따른 압축강도의 변화 비교

선 량(MR)	압 축 강 도	
	SFPIC(kg/cm ²)	Epoxy(kg/cm ²)
0	1,000	840
50	1,079	883.5
100	964	809.5
150	879	789.5

<표 6> 방사선량에 따른 가스 발생량 분석결과

(단위 : 10⁶mol/g)

선 량(MR)		H ₂	CH ₄	CO
50m	시편 1	2.85	6.33	10.94
	시편 2	3.29	3.56	7.42
100m	시편 1	4.18	9.02	5.10
	시편 2	4.43	13.36	8.08

증가여부와 압축강도 및 중량의 변화 정도를 측정하였다.

측정결과 37℃에서 21일 배양 후 각 시편의 표면과 접촉면 모두에서 세균의 성장이 없었으며, 압축강도 및 중량의 증감비율은 각각 2% 및 1% 내외로, 모두 기준치의 표준편차 이내에 드는 값이다.

따라서 거의 변화가 없다고 보아도 무방하다.

차. 자외선 물분사 저항성

자외선에 의한 SFPIC의 품질저하 정도를 검토하기 위하여 시편에 자외선을 쬐면서 물분사를 하는 조건하에 3,000시간 동안 실험을 수행하였다.

실험결과 드림의 철재는 약간의 가시적인 품질저하 징후가 나타났으나, SFPIC는 심각한 영향을 받지 않아 전체적인 용기의 저항력에는 문제가

되지 않을 것으로 판단된다.

2. 실물 고건전성 용기의 성능평가

가. 낙하시험

운송이나 취급과정에서 발생할 수 있는 낙하충격에 대한 안전성을 평가하고자 실물 용기에 모래를 가득 채우고 1%의 자유수를 담은 상태에서, 1.2m(낙하면 : 0.5m 두께의 콘크리트 슬래브)와 7.5m(낙하면 : 0.5m 모래층 + 0.3m 쇠석층)의 높이에서 실증시험을 실시하였다.

시험 결과, 45° 기울여서 바닥 접촉시 외부드럼에 약간의 손상이 있었으나 내용물의 유출없이 건전성을 유지하였으며, 상부 접촉시에는 외부 드럼 상부 Lid부의 시건장치에 약간의 손상이 있었으나 용기는 고건전성을 유지하였다.

또한 용기 측면 접촉시에는 외부드



내화성 시험

럼 상부 Lid부의 시건장치에 손상이 발견되었으나, 역시 콘크리트부에는 균열이 없이 건전성을 유지하였다.

나. 관통시험

운송이나 취급과정에서 운송장비나 다른 HIC 등에 의한 충격하중에 의한 안전성을 평가하고자 길이 1m, 지름 3.2cm, 단부가 반구체, 무게가 6kg인 원통형 막대를 1m 높이에서 떨어뜨린 후 균열이나 파괴상태를 조사하였는데, 균열 및 파괴의 징후가 전무한 것으로 나타났다.

다. 운송진동시험

운송 및 취급과정에서의 진동에 의한 안전성을 평가하고자 수분 함유의

모래를 가득담은 HIC를 지게차에 수직·수평으로 단단히 묶고, 지면에 0.5m 간격으로 배치된 정방향 목재(40mm×40mm) 위를 1.6~2.5g의 가속도로 주행하여, 이때의 진동가속도와 균열이나 파손여부를 조사한 결과 용기의 건전성에는 어떠한 영향도 없었다.

라. 승강시험

용기 승강중 사고에 대한 안전성을 평가하고자, 크레인에 자유수 1%를 포함한 모래를 가득 채운 용기를 크레인에 들어 올려진 상태에서 1m 정도 떨어뜨린 후, Wire·용기·승강장비를 점검한 결과 균열 및 파손없이 건

전성을 유지하였다.

마. 매장압축시험

방사성폐기물을 담고 있는 HIC가 바로 세워져 있는 상태로 매장되어 있을 때에 토압에 의해 발생하는 균열이나 파손에 대한 안전성을 평가하기 위한 것으로, 고강도 Plain 콘크리트, 강섬유보강 콘크리트, 강섬유보강 폴리머침투 콘크리트의 축소용기를 500 ton급 만능시험기를 이용하여 균열하중(cracking load)과 파괴하중(ultimate strength)을 측정 한 결과, SFPIC 용기가 최대매장깊이(45ft)에서 균열 및 파괴에 대하여 안정한 것으로 나타났다.

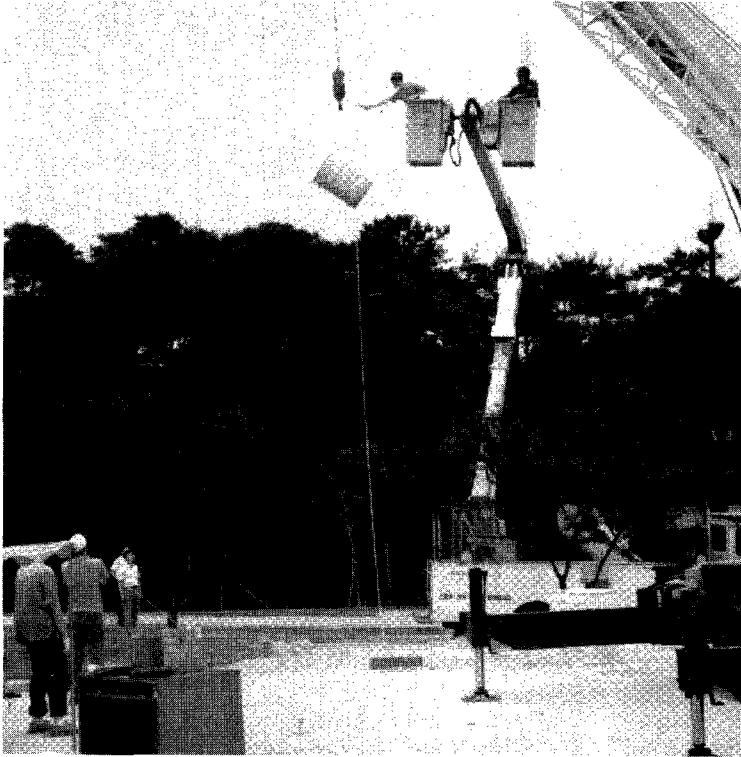
바. 누수밀착시험

HIC의 누수밀착성을 평가하기 위하여 공기압과 수압을 가하여 시험하였다.

공기압의 경우 약 10분간 0.2kg/cm²의 공기압을 air compressor로 유지하며 관측하였으나 Epoxy Resin 부에서 공기의 누출은 발견되지 않았으며, 수압의 경우에는 1kg/cm²의 압력이 작용하도록 압력을 점진적으로 증가시켜 관측한 결과에서도 Sealing 부에서의 누수현상이 발견되지 않아 전반적으로 누수밀착에 대한 건전성을 유지하였다.

사. 물분사시험

강우의 영향으로 인한 안전성을 검토하기 위하여 HIC에 대하여 샤워기를 사용하여 5cm/hr의 강우강도로 1시간의 강우에 노출시킨 후 조사한 결



낙하충격 시험

(표 7) 접착력시험 결과

하 중	200l 용기
최대접착저항력(kg)	2,480
접착강도(kg/cm ²)	4.24

과 가시적인 손상의 영향은 나타나지 않았다.

아. 내화성시험

취급 및 수송시 일어날 수도 있는 화재사고시의 안전성을 평가하기 위한 것으로, 600℃, 800℃의 온도에서 SFRC와 SFPIC의 축소용기를 사용하여 실증시험을 한 후의 중량비교결과, 모두 3.9% 정도의 중량감소가 나

타났다.

또한 실증시험 후의 외관조사 결과 SFRC의 경우에는 용기의 상부에 균열과 국부손상이 발생하였으나, SFPIC의 경우에는 균열이 발생하지 않아 건전성을 유지하였다.

자. 밀봉성능시험

HIC의 뚜껑과 몸체를 접착시키는 데 사용하는 Epoxy Resin의 밀착성을 평가하기 위한 것으로, HIC안에 Oil Jack과 Load Cell을 설치, 하중을 재하하여 Epoxy Resin의 접착력을 측정하였다.

200l 용기의 내용물의 무게는 약 260kg인데 반하여 접착최대하중은 2,480kg이므로, 내용물의 건전성 유지를 위한 충분한 접착력을 가지고 있다.

결론 및 활용방안

금번 순수 국내기술진에 의해 개발된 강섬유보강 폴리머침투 콘크리트를 이용한 고건전성용기는 전술한 바와 같이 재료의 물성평가 및 실물 성능평가시험을 통하여 미국 NRC의 HIC 설계제작요건을 모두 만족하는 우수한 성능을 가진 제품으로서, 정부 규제기관의 사용허가 획득을 준비중에 있다.

따라서 본 용기의 개발로 고건전성 용기의 국산화 및 표준화 기반을 조성함은 물론, 방사성폐기물 처리의 안정성과 건전성을 확보함으로써 방사성 물질 관리의 신뢰성을 제고할 수 있을 것이며, 일반 및 특수산업 폐기물 처리용기로도 활용이 기대된다.

향후 본 용기의 실무활용 목표를 달성하기 위해 기존 원전설비의 일부 개선, Sealing 자동화, 대량생산체제 구축, 용기제작 및 품질관리를 위한 세부기준이 보완된다면 97년 이후에는 실무활용이 가능하게 되고 이에 따른 수입대체효과도 원자력발전소 자동호기가 증가됨에 따라 더욱 커질 전망이다. ☻