2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

수조내 원자로 부품의 모사를 위한 인상재료의 개발

Development of the Impression Material for the Replica of the Reactor Components in Pool

우상익, 조영갑, 이중희, 우종섭

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로 구성 부품은 다른 부품들과의 물리적 간섭 및 설계특성 때문에 제거 및 설치가 매우 힘들며 많은 시간이 필요한 작업이다. 원자로 구성 부품의 마모 또는 변형을 손쉽게 검사하기 위하여 치과의사들이 일반적으로 사용하는 폴리비닐실록산을 이용하여 검사 목적에 적합한 인상재를 개발하였다. 원자로 부품의 레플리카 채득뿐만 아니라 적합한 경화시간과 작업성을 확보하기 위해 다양한 시험을 통해 기존 제품에 추가되는 촉매제와 실리카 분말의 적정 혼입율을 결정하였다. 원자로 수조에서 사용조건을 만족하는 인상재를 개발하기 위해 특수공구의 취급시간, 수조수의 온도, 이송동안 인상재의 사전 변형 그리고 원자로 내부에서의 방사선 영향 등을 고려하였다. 최종적으로 검사 목적에 적합한 인상재를 개발하였고, 이를 이용하여 핵연료 채널의 마모검사를 성공적으로 수행하였다. 또한, 인상재를 이용하여 핵연료 채널 스파이더 핀의 변형을 검사하기 위한 계획을 갖고 있다.

Abstract

It is a very difficult and time-consuming work to remove and install the components because of its inherent characteristics and the physical interference with other components in the reactor core. We developed to easily inspect the wear marks or the deformation of the reactor components, for our purpose, a proper impression compound from the commercial material usually called vinylpolysiloxane which dentists are generally using. A proper mixing rate of the additional silica powder, the chemical catalyst and the commercial material was decided through various tests to ensure the good workability, appropriate hardening time as well as taking a good replication of the reactor components. To develop the compound satisfying applicable conditions in the reactor pool, we considered the tool handling time, the water temperature, deformations of the compound during tool handling, and radiation damages of the compound in the reactor core. We had finally developed the impression material for our purpose and successfully accomplished the inspection of the wear marks for a few fuel channels. Also, we have another plan to inspect the deformation of the spider pin of the fuel channel by using an impression material.

1. 서론

하나로는 원자로 본체가 수조 수에 잠겨 있고, 운전 및 유지관리를 위한 점검작업을 위해서는 수조 수위를 정상수위 내지 차폐측면에서 요구되는 최소한의 수위를 유지한 채 각종 원격공구를 이용하여 수행하고 있다. 하나로는 원자로 설치이후부터 현재까지 약 7년간 출력운전을 해오고 있으므로 원자로의 안정된 운전여건 확보 및 노화관리 차원에서 마모 또는 변형이 예상되는 원자로 부품의 검사가 수행[1]되었거나 계획되고 있다.

수조에 잠겨 있는 원자로 부품을 검사하는 방법으로 검사대상을 해체하고 원자로 외부로 인출하여 작업수조에서 검사하는 경우를 생각해 볼 수 있는데, 대상 부품을 해체하기 위한 공구를 준비해야하고 해체 이후 작업수조로 이동하여 검사를 위한 준비작업 등의 절차를 진행하여야 하므로 검사 소요시간이 장기화될 가능성 있다. 그러나, 이러한 경우에도 검사 대상의 변형 및 마모 등의 손상을 정량적으로 평가하기는 어렵다.

한편, 수중 카메라를 이용하여 검사 대상을 해체하지 않고 시각적으로 검사하는 방법이 있을 수 있으나, 미소한 변형 및 마모현상에 대해서는 식별이 불가능하며, 검사 부위의 정량적 평가 불가능 등의 이유로 역시 곤란하다. 다른 방법으로 비파괴 검사장비를 이용한 원격 검사를 생각해 볼 수 있으나, 원자로 심부의 방사능에 의한 계측장비의 노이즈 발생으로 계측 정도를 신뢰할 수 없다. 따라서, 수중에 잠겨 있는 원자로 내부 부품의 마모 및 변형 등을 검사하기 위해서는 검사 대상을 정밀하게 검사할 수 있으며, 정량적 검사 결과를 확보할 수 있는 방법이 필요하다. 또한, 원자로의 운전 및 점검 일정을 고려해 검사시간의 최소화 및 검사과정의 안전성 확보도 필수적으로 고려되어야 할 사항이다.

위에서 언급한 검사 방법들과 정밀한 검사 결과의 도출을 종합적으로 검토한 결과, 원자로 부품을 해체하지 않고 수중에서 원격으로 변형 또는 마모 손상부를 검사할 수 있는 방법으로 검사 대상의 레플리카를 채득하는 방법이 가장 바람직한 것으로 판단하였다. 레플리카를 채득하는 방법은 인상재를 원자로 내부로 이송하여 검사 대상에 대한 레플리카를 채득하고 원자로 외부로 인출하는 과정을 수행할 수 있는 특수 공구가 필요하지만, 정밀한 검사 및 정량적 검사 결과의 획득 그리고, 검사 시간의 단축 등 유리한 점이 많다. 따라서, 본 연구에서는 수중에 잠겨 있는 원자로 부품의 마모 또는 변형 예상부를 검사하기 위한 방법으로 원자로 수중에서 사용 가능한 인상재료를 선정하고, 이를 성분 조절과 사용성을 위한 시험을 거쳐 원자로 내부 환경에서 사용하기에 적합한 검사용 재료를 개발하였다.

2. 인상재의 선정

원자로 부품의 모사를 통한 검사는 특수공구를 이용하여 인상재를 원자로의 검사 대상부품 위치로 이송하여 성형한 다음 원자로 외부로 인출하는 과정이므로 원자로 내부 환경에서의 사용성 및 성형성을 만족해야 하며, 인상재에 함유된 화학 성분들에 의한 원자로 내부 구조물의 부식 유발 및 수조수의 전도도 상승에 영향을 미치지 않는 재료이어야 한다. 또한, 방사선에 노출된 수중 환경에서 수행되는 검사 과정 및 검사 후 일정기간 동안 방사선 영향에 의한 재료의 열화현상이 발생되지 않아야 한다. 이러한 사용조건들을 종합적으로 고려하여 정밀 레플리카용으로 사용되고 있는 인상재료들을 조사하였다.

현재까지 개발된 제품 중 비교적 정밀한 레플리카를 채득할 수 있는 인상재료로는 비탄성재에 해당되는 석고와 탄성재에 해당하는 하이드로 콜로이드(hydro-colloid) 및 폴리비닐실록산(poly-vinyl-siloksane) 등을 들 수 있다. 이들 중 가장 널리 사용되고 있는 폴리비닐실록산은 실리콘 고무에 알기드 규산염이 포함된 것으로 취급방법이 간편하고 깨끗하며 다른 계열의 인상재 보다 정밀도가 우수한 레플리카를 채득할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 폴리비닐실록산은 주로 정밀한 치형을 필요로 하는 치과의사들이 선호하는 인상재료로서 찢김이나 영구변형에 저항할 수 있는 충분한 기계적 강도를 갖고 있으며, 양호한 체적 안정성과 혼합 및 제거가 용이한 재료이다. 폴리비닐실록산은 약 50μm 이내의 높은 재현성능을 갖고 있으며, 선형치수 변화율이 약 0.1% 이내인 우수한 체적 안정성을 갖고 있다. 따라서, 원자로 내부 부품의 검사를 위한 인상재로서 폴리비닐실록산을 선정하였다. 그러나, 폴리비닐실록산은 당초에 치형용으로 개발된 것이므로 성형 시간이 3~5분 이내로 짧은 것이 단점이다. 경화 억제제를 사용하더라도 기존 제품의 경화시간을 10분 이상으로 연장시키는 것은 매우 어렵다. 더구나, 경화 억제제를 과다하게 사용할 경우 인상재료의 반죽질기가 액상 형태로 변화하기 때문에 특수공구를 이용한다고 해도 원자로 수중에서 사용하기에는 불가능하다. 따라서, 경화 시간만을 고려할 경우 원자로 부품의 레플리카를 채득하는데 필요할 것으로 예상되는 경화전 작업시간 약 2시간 정도에 턱없이 부족하므로 경화시간을 조절할 수 있어야 한다. 따라서, 인상재의 경화시간과 연경도를 원자로 수조수 내부에서의 사용 가능한 최적의 상태로 재 배합하여 원자로 내부 부품의 검사조건에 적합하도록 개발하였다.

3. 사용조건

원자로 내부 부품의 레플리카 채득을 위한 인상재료로 선정된 폴리비닐실록산은 기본 재료에 촉매 재료를 혼합하여 사용하는 방식으로 혼합과 동시에 성형을 위한 경화반응이 시작된다. 검사를 위해 개발된 특수공구에 인상재를 충진하고 검사를 준비하는 소요 시간은 약 2~3시간 정도이며, 이러한 소요시간을 공기중 작업시간으로 규정하였다. 또한, 작업수조 또는 원자로 수조내부에 잠긴 이후부터 특수공구가 복잡한 원자로 내부의 검사 대상부품에 설치되기까지 소요되는 시간이 필요하며, 이러한 소요시간을 수중 작업시간으로 규정하였다. 따라서 레플리카를 성형하기 직전까지 소요되는 시간은 준비과정에 따라 최대 약 4~5시간 소요될 수 있다. 특히, 수온이 높은 수중에서의 노출시간은 인상재에 함유된 촉매 반응을 더욱 활성화시켜 경화시간이 단축되기 때문에 매우 불리하다. 인상재가 검사 대상의 정확한 위치에 도달하기 전에 경화반응이 시작되면 정밀한 레플리카를 채득하기 어렵기 때문에 경화시간의 조절은 매우 중요하다. 따라서, 경화 반응시간을 연장하기 위하여 촉매 물질의 함유량을 조절하였다. 촉매물질 함량의 변화는 인상재의 정상적인 경화반응과 성형 완료 후 소정의 물성을 확보할 수 있는 범위내로 한정되며, 성분 조절된 인상재는 원자로 수중에서 사용 가능한 작업시간을 고려한 것이다. 성분 조절된 인상재의 재현성능은 약 75μm 정도로 나타났다. 인상재료가 원자로 내부 부품의 검사 재료로서 충족해야할 조건들은 다음과 같고, 폴리비닐실록산의 표준적인 화학적 성분 및 기계적 특성은 표 1과 표 2에 나타내었다.

- 공기중 작업시간: 3시간 이상
- 수중 작업시간: 수온 28~36℃에서 2시간 이상
- 수중 경화시간: 수온 28~36℃에서 5시간 이내
- 재현성능: 75μm 이상
- 수조 내부 구조물의 부식 가능성 최소화
- 냉각수 오염에 의한 전도도 상승 최소화
- 방사선에 대한 인상재료의 내변형성

표 1. 인상재료의 화학적 성분

Vinyl Poly Siloxane	Methyl Hydrogen Siloxane	Platinum Catalyst	White Mineral Oil	Filler (SiO2)	Filler (Al203)	Pigment
26.3%	1.2%	0.1%	7.0%	40%	25%	0.4%

표 2. 인상재료의 역학적 특성

Strain in Compression	Recovery from Deformation	Linear Dim. Change	Consistency	Final Hardness
3.6 ± 0.5%	≥ 99.2%	< 0.1%	very high type-0	60 shore A±2

4. 성능시험

선정된 인상재료의 원자로 사용조건 충족 여부 및 사용성을 검증하기 위하여 네 가지의 시험을 수행하였다. 첫째, 원자로 수조수내에서의 성형성을 확인하였고, 둘째, 인상재의 성분이 원자로 내부 구조물의 부식과 수조수의 전도도 상승에 미치는 영향에 대한 시험을 실시하였고, 셋째, 인상재료의 반죽질기를 조절하기 위한 연경도 시험을 실시하였고, 마지막으로, 방사화에 의한 인상재료의 열화, 재료 분리 및 변형 등의 가능성을 확인하기 위한 시험을 실시하였다.

4.1 수중 성형성 시험

원자로 수조수에 폴리비닐실록산의 경화 억제 물질 함유 여부를 조사하기 위하여 원자로 수조수의 성분분석을 실시하였다. 폴리비닐실록산은 혼합시에 S, N, P 등의 성분이 함유될 경우 촉매물질의 경화반응 억제 효과가 발생하여 성형성이 떨어지며, 성형 후 레플리카의 기계적 특성이 불리하게 변화할 수 있다. 따라서, 원자로 수조수가 경화억제 성분을 함유하고 있는지 여부를 확인하기 위하여 수조수의 성분분석을 의뢰하였다. 분석결과, 질소와 유황은 검출되지 않았고, 인은 0.1 μg/ml 이하로 나타나 수조수가 인상재료의 경화반응에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단하였다. 따라서, 최종적으로 인상재의 수중 성형성을 확인하기 위하여 원자로 수조와 동일한 조건의 모의 수조를 제작하여 수중 경화시험을 실시하였다. 모의 수조에 순수를 채우고 수온을 원자로의 내부와 비슷한 32~35℃로 유지한 상태에서 인상재의 경화반응 및 경화 완료 시간을 측정하였다. 시험결과, 인상재는 정상적인 경화 반응을 보이면서 성형되었고, 성형 완료 후 소정의 경도를 갖는 레플리카를 채득할 수 있었다.

4.2 수조수에 미치는 영향 분석

인상재의 수중 성형성을 확인하기 위한 모의 수조 시험에서 인상재가 침수되었던 순수 표면에서 기름띠 형상의 미세한 부유 물질이 발견되었다. 이러한 물질은 폴리비닐실록

산에 함유되어 있는 광물성 유분과 기타의 수용성 물질에 의해 발생된 것으로 판단되었다. 원자로 수조에서 이러한 현상이 발생할 경우 냉각수 수질 관리에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 있으므로, 이들의 정확한 성분을 분석할 필요가 있고, 이들 성분이 원자로 수조내부의 구조물을 부식시키거나 수조수 전도도 상승에 영향을 미칠 수 있는 성분을 함유하고 있는지 여부를 판단하기 위하여 인상재를 1주일 동안 침수했던 순수를 샘플링하여 성분 분석을 실시하였다.

분석결과, Si: 1.2 μg/ml, Ca: 0.04 μg/ml, Pt<0.1 μg/ml, Al<0.1 μg/ml로 나타났으며, 나머지 성분은 검출불가로 판정되어 성분분석 결과에서 특이한 사항이 발견되지 않았다. 검출된 성분들은 전체 수조수의 양에 비해 매우 미량이고 부식을 유발시킬 가능성이 낮은 물질들이므로 인상재가 수조수에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단하였다.

4.3 연경도 시험

인상재를 검사용 특수공구에 충진하여 검사 대상 부품에 설치 완료하는 시간은 최소 2시간 이내로 예상된다. 이 시간동안 인상재료 자체에 변형이 발생되는 경우, 검사 대상에 정확하게 부착하기 어렵고, 수조내부에 인상재료가 낙하될 경우 회수 작업 및 기타의 문제 등이 발생될 것이므로 검사대상 위치에 장착되기 전까지 특수공구에 충진된 최초의 형상을 유지하여야 한다. 이를 확인하기 위하여 인상재료의 연경도 시험을 실시하였다.

기본 재료와 촉매를 혼합한 인상재료를 몰드에 충진하여 연경도 시험을 위한 일정한 높이 31.5mm로 1차 성형한 후 경화전 일정기간 동안 시간경과에 따른 수직 변형량을 측정하고, 측정결과에 따라 인상재료의 연경도를 조절하였다. 인상재료의 연경도는 광물성 유분과 실리카 분말의 구성비에 따라 결정되므로, 실리카의 추가 혼입을 통한 성능시험을 거쳐 마모검사에 필요한 연경도를 다음과 같이 결정하였다.

기존재료는 1차 성형후 10분 경과시에 약 10.03mm 수직 처짐 변형이 발생하였으나, 실리카를 재료 중량비의 25% 추가 혼입한 재료는 1차 성형후 변형발생은 나타나지 않았다. 따라서, 기존의 재료에 실리카를 20～25% 추가 혼입하여 사용하기로 결정하였다. 실리카의 추가 혼입량이 많을수록 인상재료의 재현성능이 낮아지는 경향이 있으므로 20% 추가 혼입하기로 결정하였다. 최종 배합된 인상재료의 재현성능은 약 75 μm임을 확인하였고, 충분한 재현성능을 갖고 있음을 알 수 있었다. 기존 재료와 실리카의 추가 혼입에 따른 인상재료의 연경도 시험 결과를 그림 1에 나타내었다.

4.4 방사화 시험

배합된 인상재료가 특수공구에 의해 원자로 내부에 이송될 때 또는 원자로 내부에서 경화반응중일 때 방사능에 의한 영향으로 인상재료의 열화 또는 재료 분리, 변형 등의 현상이 발생한다면, 원자로 수조수를 오염시킬 가능성이 있다. 따라서, 이러한 문제들을 최종적으로 확인하기 위하여 배합된 인상재를 동위원소용 캡슐에 충진하여 밀봉하고, 운전시와 유사한 량의 핵연료가 장전되어 있는 노심의 핵연료 채널 R13과 작업수조의 핵연료 저장랙에 각각 설치한 다음, 24시간 후에 회수하여 인상재료의 상태를 확인한 결과 방사화에 의한 재료의 변형 및 열화 현상은 발견되지 않았다. 따라서, 원자로 수조수의 오염 가능성이 없음을 확인하였고, 최종적으로 노심에서의 인상재료 사용 가능성을 확인하였다. 인상재의 방사화 시험을 위해 사용되었던 캡슐의 모습을 그림 2에 나타내었다.

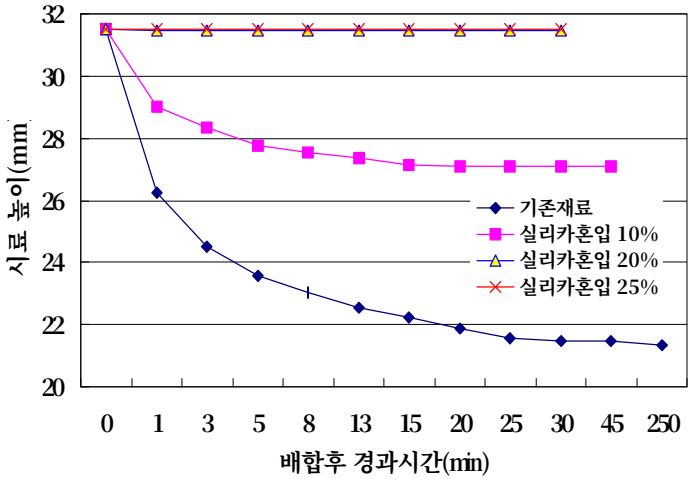

그림 1. 인상재료의 연경도 시험

그림 2. 인상재료의 방사화 시험(방사선량률 0.26 μSv/hr)

5. 적용 예

원자로 내부 부품의 마모 또는 변형을 레플리카를 통하여 검사하기 위한 방법으로서 원자로 수조에서의 사용조건을 만족하는 인상재료를 개발하였고, 이를 이용하여 하나로 핵연료 채널에서 예상되는 마모손상을 검사하기 위하여 인상재를 핵연료 채널 내부에 이송하여 레플리카를 채득할 수 있는 특수공구를 개발하였다.

하나로 핵연료 채널의 마모발생 가능성은 1997년에 수행된 핵연료 검사 Video 정밀 관찰 결과와 1999년에 수행된 하나로 핵연료 집합체 육안 검사 및 마모현상 평가 기술 보고서[2]에서 평가된 핵연료 집합체의 구성 부품별 마모 현상을 근거로 한 판단이다. 이들 자료에 따르면, 하나로 핵연료 집합체의 마모현상은 유체유발진동 (FIV, Flow Induced Vibration)에 의해 발생된 것으로 밝혀졌다. 핵연료 채널의 내부 마모를 검사하기 위하여 원형 및 육각 채널용 특수공구를 각각 설계하였고, 대상 핵연료 채널 중 사용빈도와 핵연료 집합체 구성 부품의 마모 발생 자료를 근거로 육각 핵연료 채널 2개와 원형 채널 1개에 대하여 마모검사를 수행하였다. 인상재를 이용한 마모검사 결과, 육각 핵연료 채널 R12에서 핵연료 집합체의 상부와 하부 유도체에 상응하는 위치의 채널 내벽에서 마모손상을 발견하였다. 마모손상부는 깊이 약 0.2mm, 길이 13mm의 하부 유도판의 형상과 일치하게 나타나, 핵연료 채널의 마모원인이 핵연료 집합체 구성부품의 유체유발진동에 의한 것임을 확인할 수 있었다. 또한, 핵연료 검사 결과 변형이 예상되는 핵연료 채널 스파이더 핀을 검사하기 위하여 인상재를 이송할 수 있는 특수공구를 설계하고 있으며, 제작완료 후 검사를 수행할 계획이다.

그림 3. 육각 핵연료 채널 R12에서 획득한 레플리카의 모습
(깊이 0.2mm, 길이 13mm 마모손상 발견됨)

6. 결론

원자로 구성 부품은 다른 부품들과의 물리적 간섭 및 설계특성 때문에 제거하고 설치하는 것이 매우 힘들며 많은 시간이 필요한 작업이다. 원자로 구성 부품의 마모 또는 변형을 손쉽게 검사하기 위하여 치과의사들이 일반적으로 사용하는 폴리비닐실록산을 이용하여 검사 목적에 적합한 인상재를 개발하였다. 원자로 부품의 레플리카 채득뿐만 아니라 적합한 경화시간과 작업성을 확보하기 위해 다양한 시험을 통해 기존 제품에 추가되는 촉매제와 실리카 분말의 적정 혼입율을 결정하였다. 원자로 수조에서 사용조건을 만족하는 인상재를 개발하기 위해 특수공구의 취급시간, 수조수의 온도, 이송동안 인상재의 사전 변형 그리고 원자로 내부에서의 방사선 영향 등을 고려하였다. 최종적으로 검사 목적에 적합한 인상재를 개발하였고, 이를 이용하여 핵연료 채널의 마모검사를 성공적으로 수행하고 있다. 또한, 인상재를 이용하여 핵연료 채널 스파이더 핀의 변형을 검사하기 위한 계획을 갖고 있다. 결론적으로, 본 연구에서 개발된 인상재를 이용하여 원자로 내부 부품에 발생된 마모 또는 변형부의 레플리카를 채득할 수 있으며, 이를 통하여 신속하고 정밀한 검사가 가능하다.

참고문헌

[1] 우상익, 조영갑, 이중희, “하나로 핵연료 채널 마모검사 장치 개발”, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-2230/2002, 2002, 7.

[2] 채희택, 임경환, 김학노, “하나로 핵연료집합체 육안 검사 및 마모현상 평가”, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1347/99, 1999, 6.

[3] 우상익, 조영갑, “하나로 핵연료 채널 마모검사 기술 및 장치 개발”, 한국원자력학회 춘계 학술발표회논문집, 2002. 5.