

하나로 핵연료 채널 마모검사 기술 및 장치 개발
Development of Wear-Inspection Technology and Tools
for the Fuel Channels in HANARO

우 상익, 조 영갑

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 핵연료 채널에서 유체유발진동에 의한 핵연료 집합체 구성 부품들의 기계적인 손상이 발견되었다. 주요 기계적인 손상은 하부 봉단 접합판과 간격판에 발생된 마모손상이었다. 노화관리 관점에서 핵연료 채널의 내부표면 검사가 필요하게 되었다. 따라서, 원자로 부품들을 해제하지 않고 인상재료를 이용하여 핵연료 채널을 검사할 수 있는 특수공구를 개발하였다. 특수공구는 핵연료 집합체 설치공구를 이용하여 중심봉을 회전 시킴으로서 방사선 방향으로 구동되는 36개의 몰딩컵(6레벨×6컵/레벨)을 갖고 있다. 마모검사는 3개의 핵연료 채널에 대하여 성공적으로 이루어졌다. 검사결과 육각 핵연료 채널에 핵연료 집합체의 상부와 하부 유도체에 상응하는 위치에서 식별 가능한 정도의 마모손상이 발견되었다. 마모깊이는 약 0.2mm 정도로 핵연료 채널의 두께 1.6mm와 비교하면 가벼운 정도이다. 원형 핵연료 채널에서는 마모손상이 발견되지 않았다. 핵연료 채널의 수명 평가를 위한 자료를 얻기 위해 모든 핵연료 채널을 대상으로 마모검사를 계속 수행할 예정이다. 검사 결과는 핵연료 집합체의 설계 개선에도 도움을 줄 것이다.

Abstract

It has been observed in HANARO that fuel assemblies have mechanical damages on some components due to the flow-induced vibration in the fuel channels. The major damages were the fretting-wear on the bottom end plates and spacer plates. The inspection of the inner surfaces of the fuel channels was required from the lifetime point of view. Thus, authors developed special tools for the inspection of the fuel channels by using an impression material without the removal of the reactor components. The inspection tool has respectively 36 molding cups (6 levels x 6 cups each level) that are operated in radial direction by turning the central rod with a fuel-handling tool. The wear-inspection had been successfully accomplished for three flow tubes. The result shows visible wear marks on a hexagonal flow tubes at the positions corresponding to fuel components such as the top and bottom guide. The wear damage is slight (approximately 0.2mm depth) in comparison with the thickness of the flow tube (1.6mm). No visible wear mark was found in the cylindrical flow tubes so far. The inspection is being continued for all the remaining fuel channels to get the valuable results for the estimation of lifetime of the flow tubes. The results would be helpful also for the design improvement of the fuel assemblies.

1. 서론

하나로는 1995년 5월 첫 임계 후 7년간 출력 운전을 해오고 있는 연구용 원자로로서 원자로 본체 및 반응도 제어장치와 관련된 대부분의 부품들은 수조 수에 잠겨 있고 운전 및 유지관리를 위한 주기적인 점검 작업들이 이루어지고 있다. 이러한 작업들은 수조 수위를 정상수위 내지 차폐측면에서 요구되는 최소한의 수위를 유지한 채 수조 밖에서 원격으로 정확하게 이루어 질 수 있어야 한다. 수중에 위치한 많은 부품들이 매우 복잡하고 수직상부에서 작업해야 하기 때문에 작업을 위한 시야확보에 많은 어려움이 있다. 따라서, 원격 조정이 가능한 다양한 종류의 특수 공구가 필요하게 됨에 따라 원자로의 설계와 설치경험을 바탕으로 자체적으로 개발해오고 있다. 본 논문에서 다루고 있는 핵연료 채널 마모 검사 장치도 하나로의 노화 관리를 위해 개발된 특수 공구 중의 하나로서 그 개발 배경은 다음과 같다.

1997년에 수행된 핵연료 검사 Video 정밀 관찰 결과에서 핵연료 집합체 구성 부품들의 마모현상이 발견되었으며[1], 1999년에 수행된 하나로 핵연료 집합체 육안 검사 및 마모현상 평가 기술 보고서에서 핵연료 집합체의 구성 부품별 마모 현상을 평가한 바 있다[2]. 이들 자료에 따르면, 하나로 핵연료 집합체의 마모현상은 유체유발진동(FIV, Flow Induced Vibration)에 의해 발생되며, 마모가 발생한 핵연료 집합체의 구성 부품들과 상응하는 위치에서 핵연료 채널 내부 표면에 마모손상이 발생되었을 가능성이 있으므로 핵연료 채널의 노화 관리를 위한 마모 검사가 필요하게 되었다.

따라서, 본 논문에서는 하나로 핵연료 채널의 마모검사를 위해 개발된 마모검사 장치의 설계 메카니즘에 대한 원리를 설명하고, 성능시험을 거쳐 현재 하나로에서 사용되고 있는 3개의 핵연료 채널을 대상으로 수행한 마모검사 결과에 대한 정보를 제공하고자 한다. 또한, 마모검사 장치의 설계개념을 보다 다양한 형상의 핵연료 채널에 적용 할 수 있으며, 일반 산업체에서 사용하고 있는 파이프 형상의 배관 내부 표면검사에도 응용할 수 있는 기술적 특징에 대한 정보를 제공하고자 한다.

2. 마모손상의 발생

하나로 핵연료 집합체의 마모현상은 1차 냉각수의 난류가 발생시키는 유체유발진동(FIV, Flow Induced Vibration)에 의해 발생되며, 주요 손상 부위는 간격판(Spacer plate), 봉단 접합판(Endplate) 및 중앙 지지봉(Central rod) 등인 것으로 밝혀졌다.[1,2] 핵연료 집합체의 육안 검사를 통하여 발견된 36봉 핵연료 집합체의 주요 손상 중 마모와 관련된 손상은 간격판 마모 및 절단, 상·하부 봉단 접합판(Top and Bottom endplate)의 마모, 하부 봉단 접합판의 guide arm slot 마모확장, 그리고 guide arm tip 마모 등이며, 18봉 핵연료 집합체에서는 간격판 마모와 봉단 접합판의 마모 등인 것으로 조사되었다.[3]

이상과 같은 조사 결과는 36봉 및 18봉 핵연료 집합체에서 발견된 부품들의 마모손상이 각 손상 부품들과 상응하는 위치에서의 핵연료 채널 내부 표면에 마모손상을 발생시켰을 가능성이 있음을 뒷받침하는 자료이다. 더욱이, 핵연료 채널은 하나로 원자로 설치 이후부터 약 7년간 대부분 교체되지 않고 계속 사용되고 있으므로 마모손상의 발생 가능성은 충분하며, 핵연료 채널의 노화관리 차원에서 마모손상의 발생 여부를 확인하기 위한 검사가 반드시 필요한 것으로 판단되었다. 또한, 마모손상이 발생한 경우 핵연료 채널의 잔류수명을 평가하기 위한 기본 자료로서 반드시 필요한 검사과정이다.

핵연료 채널은 수조상부에서 13m 이하에 위치하고 있고, 18봉 핵연료 채널은 내경 60mm, 36봉 핵연료 채널은 내측 평면부 거리가 74.4mm의 협소한 공간을 통과하여 채널 내부 표면에 발생된 미소 마모량을 검사해야 하기 때문에 매우 어려운 과정이다. 검사 대상의 크기와 모양에 제한을 받지 않고 채널 내부에 발생된 임의의 예상 마모부에 접근하여 부품을 해체하지 않고 검사할 수 있는 방식은 아직까지 시도된 바가 없는 것으로 조사되었다[5]. 검사 방법으로 수중 카메라 등을 이용할 수 있으나, 마모량을 정량적으로 평가할 수 없기 때문에 적합하지 않다고 판단하여 배제하였다. 따라서 손상부에 대한 마모량을 정량적으로 평가할 수 있는 레플리카를 이용하는 방법을 선택하게 되었고, 이를 위하여 원자로 수중에서 사용할 수 있는 인상재료와 인상재료를 검사 위치까지 운반하여 레플리카를 획득할 수 있는 특수 공구를 36봉과 18봉 핵연료 집합체용 핵연료 채널에 대해 각각 개발하게 되었다.

핵연료 채널의 마모손상 부위는 36봉과 18봉 핵연료 집합체 각각 7개씩의 위치로 예상되며, 상부 유도체(Top Guide), 상부 봉단 접합판(Top Endplate), 3개의 간격판(Spacer Plate), 하부 봉단 접합판(Bottom Endplate), 그리고 하부 유도체(Bottom Guide)에 해당되는 핵연료 채널 내부 표면이다. 검사용 특수공구의 설계는 핵연료 집합체의 마모 발생부품들의 위치를 참고로 레플리카 획득을 위한 위치를 결정하였다. Figure 1에서 36봉 및 18봉 핵연료 채널에 마모손상을 발생시킬 수 있는 핵연료 집합체의 부품 및 핵연료 채널에서의 검사 범위를 각각 나타내었다.

3. 마모검사 장치의 개발

핵연료 채널은 육각(36봉) 핵연료 집합체용, 원형(18봉) 핵연료 집합체용, 그리고 OR 등으로 분류되는데, 현재까지 육각 및 원형 핵연료 채널용 검사장치를 개발 완료하였으며, OR용 검사장치는 향후에 설계할 예정이다. 육각 핵연료 집합체는 원형 핵연료 집합체와 달리 인출 및 장전시 일정한 방향성을 유지할 수 있으므로 육각 핵연료 채널의 마모손상 발생 가능성은 원형의 경우보다 크다. 반면, 원형 핵연료 채널의 경우는 원형인 채널 내부에 방향성을 갖지 않고 임의의 방향으로 인출, 장전되므로 마모가 발생했다라도 발생 위치가 장전 시마다 분산되므로 마모손상의 누적량은 낮을 것으로 판단된다. 핵연료 집합체가 채널 내면을 마모시킬 수 있는 위치는 원형 및 육각 핵연료 집합체 각각 7개소이므로 마모검사 장치는 핵연료 채널의 길이방향으로 7

개소의 레벨을 측정 중심점으로 정하였다. 단, 상부 유도체와 상부 봉단 집합관의 마모 발생 위치는 공간상 근접하여 있으므로 두 개의 레벨을 한 개의 검사 위치로 통합하였고, 하부 봉단 집합관과 하부 유도체 역시 근접한 위치에 있으므로 한 개의 검사 위치로 통합하였다. 따라서, 검사 공구는 핵연료 채널의 길이방향으로 각각 5개씩의 검사 위치를 갖도록 설계하였다. 또한, 육각 핵연료 채널의 경우는 레벨 당 육각면의 1개면 마다 레플리카를 획득하기로 하여 총 6개 면을 검사 대상으로 하였고, 원형의 경우는 방향성이 없으므로 해당 레벨의 가능한 넓은 면적에 대해 레플리카를 획득하기 위하여 원형 채널 내부를 6개 면으로 분할하였다. 따라서, 원형 및 육각 채널용 검사 장치는 한 개의 레벨당 각각 6개씩의 검사면을 갖는다.

검사장치는 핵연료 집합체 설치 공구를 이용하여 핵연료 채널에 장전 및 인출할 수 있도록 하기 위하여 핵연료 집합체와 결쇠 머리(Grapple Head)를 부착하였으며, 외경은 핵연료 집합체와 동일한 치수로 설계하였다. 결쇠 머리에 장착된 핵연료 집합체 설치 공구를 이용하여 핵연료 채널에 장전한 뒤 결쇠 머리를 회전시켜 중앙 지지봉(Central Rod)에 연결된 레벨 당 6개씩의 몰딩 컵들이 각각 채널 내부면과 직교방향으로 팽창되어 핵연료 채널 내부에 부착되도록 설계되었다. 34℃ 수온에서 약 5시간동안 인상재를 성형한 후 중앙 지지봉을 장전시와는 반대방향으로 회전시키면 원래의 형태로 수축되어 수조외부로 인출할 수 있도록 설계하였다. 개발된 마모검사 장치의 특징을 요약하면 다음과 같다.

(가) 협소한 핵연료 채널 내부에 삽입되어 채널 내부 표면의 예상 마모부위에 대한 레플리카를 획득할 수 있도록 하였다.

(나) 검사 대상 채널에 장치를 삽입한 뒤 중심봉을 시계방향으로 회전시켜 중심봉에 연결된 각 레벨 당 6개씩의 몰딩컵들이 채널 내측면의 예상 마모부위로 수평 이송되어 밀착되도록 하였다.

(다) 마모검사 후 중심봉을 반시계방향으로 역회전시켜 몰딩컵들이 원상태로 돌아오도록 한 뒤 장치를 채널 외부로 인출할 수 있도록 하였다.

(라) 몰딩컵이 연결된 내측관의 상부와 하부에 가이드 핀을 설치하여 중심봉의 회전력이 몰딩컵의 수평 이송력으로 전환되도록 하여 몰딩컵이 채널의 내측면과 잘 밀착되도록 하였고, 이로써 정밀한 레플리카를 획득할 수 있도록 하였다.

(마) 몰딩컵의 가장자리에 탈출방지턱을 만들어 검사 완료 후 장치를 인출하는 과정에서 성형된 인상재가 원자로 수조내에 낙하하지 않도록 하였다.

(바) 검사 대상 채널의 모양과 크기에 제한을 받지 않고 검사장치의 일부 부품을 교체함으로써 다양한 형상의 채널에도 사용 가능하도록 하였다.

Figure 2에서와 같이 마모검사 장치는 Grapple Head(부품1), 중심봉(부품2), Top End Plate(부품3), Bottom End Plate(부품4), Space Plate(부품5), 몰딩컵(부품6, 7), Expander(부품8), Contractor(부품9), Stopper(부품10), Outer Pipe(부품11), Inner Pipe(부품12), Top Guide Pin(부

품13), Bottom Guide Pin(부품14) 등으로 구성되어 있다. Figure 3은 마모검사장치가 삽입된 육각핵연료 채널의 종단면을 보여주고 있다. 본 장치의 중심봉(부품2)에 연결된 각 레벨당 6개씩 (5레벨×6개=30개)의 몰딩컵(부품6, 7)에 인상재를 충전한 후 검사 대상 핵연료 채널에 삽입한 뒤 중심봉(부품2)에 연결된 Grapple Head(부품1)를 시계방향으로 회전시켜 각 몰딩컵들이 채널 내측면의 예상 마모부위에 직교방향으로 밀착되도록 하였다.

Figure 4는 중심봉(부품2)의 시계방향 회전에 의해 몰딩컵이(부품6, 7) 수평 이송되어 채널 내면에 밀착되는 모습과 중심봉의 반시계방향 회전에 의해 몰딩컵이 원상태로 복귀하는 모습의 종단면을 보여주고 있다. 또한, Figure 5는 Figure 4에서 설명된 각각의 구동 상황에 대한 평면도를 보여주고 있다. 또한, 중심봉의 회전운동이 몰딩컵의 수평 이송 운동으로 원활하게 전달될 수 있도록 하기 위하여 Inner Pipe(부품12)의 상단과 하단에 각각 Top Guide Pin(부품13), Bottom Guide Pin(부품14)을 부착하였다. Figure 6과 7은 몰딩컵이 핵연료 채널 내면과 밀착되고 원상태 복귀되는 상황에 따른 Guide Pin의 구동 모습을 보여주고 있다. 이와 같이 구성된 본 발명품을 이용하여 방사능 오염으로 인해 접근이 용이하지 않은 제한된 공간에서 핵연료 채널의 내부표면에 대한 마모검사를 할 수 있다.

본 검사 장치는 몰딩컵의 크기와 모양을 다르게 설계하면 보다 다양한 형상의 핵연료 채널에 대한 마모검사를 할 수 있으며, 중심봉 회전에 의한 수평 이송 구동 원리를 이용하여 장치의 전체적인 크기와 형상을 변경하면 핵연료 채널뿐만 아니라 일반 산업체에서 파이프 형상 배관의 내부 표면을 검사할 수 있는 특징을 갖고 있다. 또한, 작동원리가 간단하여 쉽게 조작할 수 있으며, 제작비용이 저렴하여 경제적인 장점을 갖고 있다.

4. 검사장치의 성능시험

제작 완료된 마모검사 장치의 성능검사를 위하여 여유분으로 보유하고 있는 핵연료 채널을 이용하여 공기중 및 모의수조를 이용한 수중 실험을 실시하였다. 공기중 실험은 검사장치에 부착되어 있는 30개의 컵홀더에 주어진 작업시간 내에 인상재료를 효과적으로 충전하는 방법과 충전 이후, 검사장치의 핵연료 채널 충전 가능성을 확인하기 위한 것이었다. 30개의 컵 홀더에 인상재를 충전하는데 평균 1시간 이상이 소요되었으며, 공기중 작업시간 3시간 내에 충분히 끝낼 수 있었다. 그러나, 마모검사의 관건은 인상재의 충전 상태에서 거의 결정되므로 매우 신중한 작업이었다.

모의수조를 이용한 수중 실험은 아크릴 수조에 설치한 리셉터클에 핵연료 채널을 설치하고 순수를 34℃로 조절하여 원자로 수조와 유사한 실험환경을 만들었다. 수중실험은 인상재와 마모검사 장치의 최종적인 성능검사 실험으로서 인상재의 수중 성형 성능과 검사장치의 원활한 구동을 종합적으로 확인할 수 있으며, 모의수조에 설치된 핵연료 채널 내부 표면에 대한 레플리카를

획득하여 시각적으로 직접 비교·확인할 수 있는 장점이 있다. 실험은 계획했던 대로 성공적으로 수행되었으며, 인상재는 핵연료 채널 내부의 형상을 매우 정확하게 재현하였고, 검사장치 역시 원활하게 작동되어 마모검사 수행에 특별한 문제가 없음을 확인하였다. Figure 9에 모의 수조를 이용한 마모검사 장치의 수중 시험 모습을 나타내었다.

5. 핵연료 채널의 마모검사

원자로의 정기점검을 이한 운전정지 기간 동안에 육각 채널 R11과 R12를 검사하였고, 원형 채널은 원자로 주기 운전 정지기간에 수행되었던 핵연료 검사의 공백 시간을 이용하여 C1을 검사하였다. R11과 C1 채널의 검사결과에서는 마모손상이 전혀 발견되지 않은 반면, R12 채널에서는 핵연료 집합체의 상부와 하부 유도체에 상응하는 위치에서 시각적으로 식별 가능한 정도의 마모손상이 발견되었고, 마모손상은 약 0.2mm 정도로 핵연료 채널의 두께 1.6mm를 고려할 때 심각한 상황은 아닌 것으로 판단되었다. 향후에 레플리카에 나타난 마모손상부를 정량적으로 평가하기 위한 방법론을 구체적으로 모색할 계획이다. 또한, 마모검사의 특성상 검사장치의 장전, 양생 및 인출 시간을 포함하여 최소 7시간 이상이 소요되므로 향후에 원자로의 주기 운전 및 정지 기간을 이용하여 지속적으로 검사할 계획이다. Figure 10에 나타난 개념도는 수조상부에서 핵연료 집합체 설치공구(1)를 이용하여 마모검사 장치(2)를 원자로 수조(3)에 잠겨있는 핵연료 채널(4) 장전하는 모습을 나타낸 것이다. Figure 11에는 육각 핵연료 채널 R12에서 획득한 레플리카의 모습을 나타내었다. Table 1에서는 마모검사를 수행하였던 핵연료 채널에 대한 검사 결과 및 검사 후 레플리카의 잔류 방사선량률을 나타내었다.

Table 1. 핵연료 채널 마모검사 결과

채널	월/일	배합 시간	수조 삽입	장전 시간	인출 시간	침니온도 (°C)	인렛온도 (°C)	방사선량률 (Sv/Hr)	결 과
R11	11/13~14	14:00	16:20	16:55	11/14 10:00	31.95~ 32.06	31.60~ 33.00	5 μ	마모현상 발견 안됨
R12	11/15	09:20	11:30	11:50	17:30	32.15~ 32.70	32.13~ 32.33	600 n	Top & Bottom Spacer Plate 위치에서 약 0.2mm 마모발견
C1	12/17~18	15:45	17:25	17:50	12/18 09:30	38.83~ 39.53	39.82~ 41.23	160 μ	마모현상 발견 안됨

6. 결 론

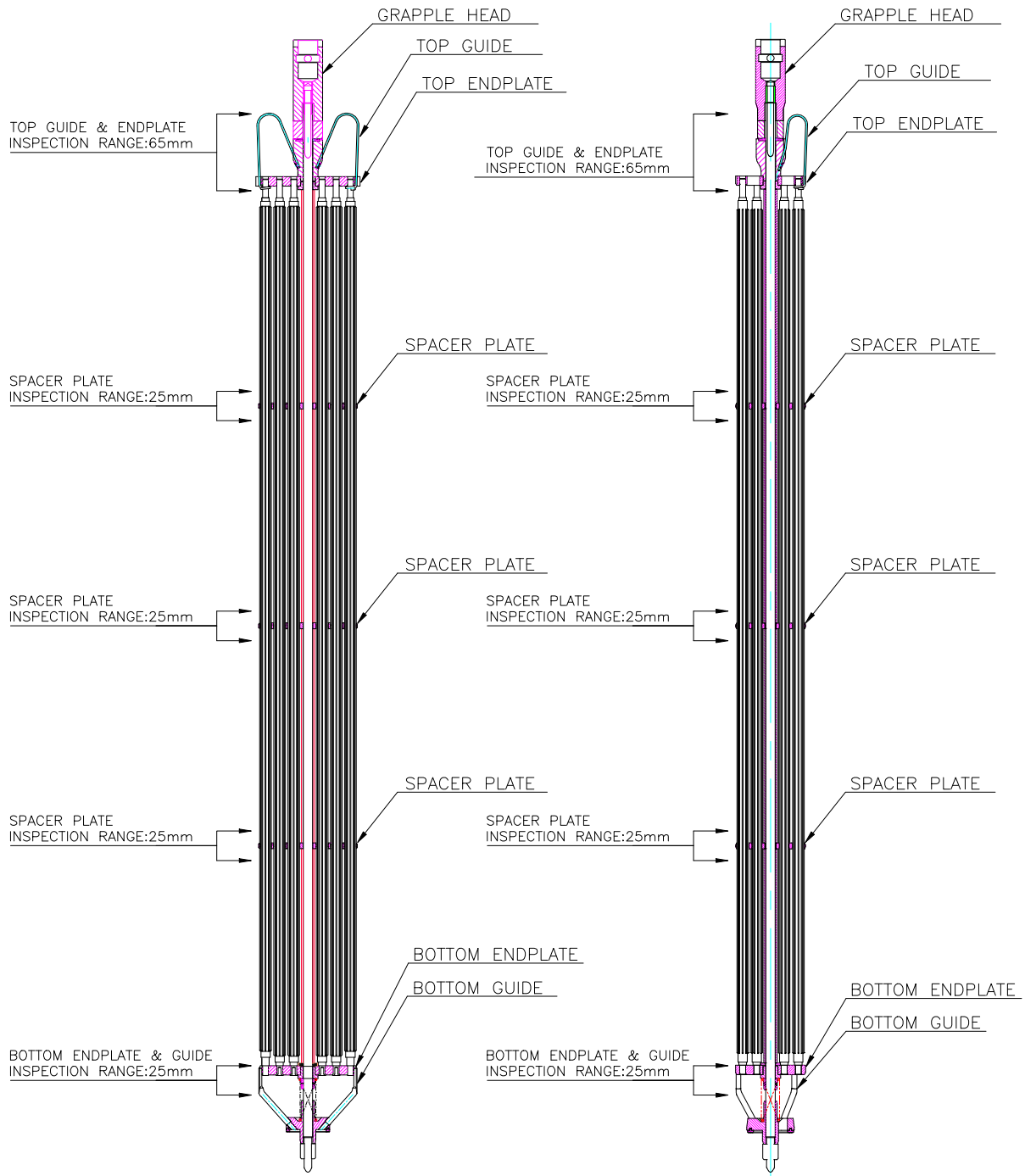
하나로 핵연료 집합체에서 발견된 구성 부품들의 마모손상을 근거로 핵연료 채널에 대한 마모 검사를 수행하기 위해 핵연료 채널 마모 검사 장치를 개발하였다. 개발된 장치는 검사 대상 핵연료 채널에 장치를 삽입한 뒤 중심봉을 시계방향으로 회전시켜 중심봉에 연결된 각 레벨 당 6 개씩의 몰딩컵들이 채널 내측면의 예상 마모부위에 직교방향으로 밀착되도록 하였고, 마모검사 후 검사장치를 제거하기 위해서는 중심봉을 반시계방향으로 회전시켜 몰딩컵들이 원상태로 돌아오도록 한 뒤 채널 외부로 인출할 수 있도록 하였으며, 본 장치를 사용함으로써 원자로의 부품을 해체하지 않고 수중에서 원격으로 검사할 수 있고, 검사장치의 일부 부품을 교체하여 다양한 형상의 핵연료 채널에도 적용할 수 있는 특징을 갖고 있다.

본 장치를 이용한 검사 결과를 근거로 핵연료 채널에 발생된 마모량을 정량적으로 평가할 수 있으며, 평가 자료들을 이용하여 원자로의 노화관리를 위한 핵연료 채널의 잔류수명 및 교체시기를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 장치의 기본 설계개념을 유지한 채 치수와 형상만 변형시키면 연구용 원자로뿐만 아니라 원자력 발전소, 플랜트 시설의 배관 시스템 등에서 분해가 어려운 파이프 형상 구조체의 내측면을 검사하는데 매우 손쉽고 유용하게 사용될 수 있으므로, 다양한 분야에서의 기술적 응용이 예상된다.

본 장치를 이용한 하나로 핵연료 채널의 마모검사 결과, 원형 채널에서는 마모손상이 발견되지 않았으나, 육각형 채널 R12에서는 예상대로 마모손상이 발견되었으며, 상부와 하부 유도체에 상응하는 위치에서 약 0.2mm의 마모손상이 발견되었다. 육각 핵연료 채널의 두께가 1.6mm인 점을 고려할 때 현재까지의 마모손상은 심각하지 않은 상태임을 알 수 있었지만, 원자로 장기 운전을 위한 가동조건의 변화에 따라서 마모손상이 증가될 수 있으므로 지속적인 노화관리가 필요함을 알 수 있었다. 향후에 하나로에서 사용하고 있는 모든 핵연료 채널을 대상으로 마모검사를 수행할 예정이며, 검사 결과를 이용하여 핵연료 채널의 잔류수명 예측 및 핵연료 집합체의 마모감소를 위한 설계 개선에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 임인철, 채희택, “핵연료 검사 Video 정밀관찰 결과 요약”, 내부통신문, HAN-RT-CR-97-016, 1997. 2.
- [2] 채희택, 임경환, 김학노, “하나로 핵연료집합체 육안 검사 및 마모현상 평가”, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1347/99, 1999, 6.
- [3] 조영갑, 채희택, 류정수, 김학노, “하나로 핵연료집합체 마모 감소를 위한 설계 개선”, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1594/2000, 2000, 6.
- [4] 우상익, “발명특허 출원 신청”, 내부결재, 하운계 제 07호, 2002. 1.
- [5] 유재복, “핵연료 채널 마모검사 장치에 대한 선행기술조사 결과서”, 기술정보과 접수번호 2002-001, 2002. 1.



a) 36봉 핵연료집합체

b) 18봉 핵연료집합체

Figure 1. 핵연료 채널에 마모손상을 발생시키는 핵연료 집합체의 부품 및 검사 범위

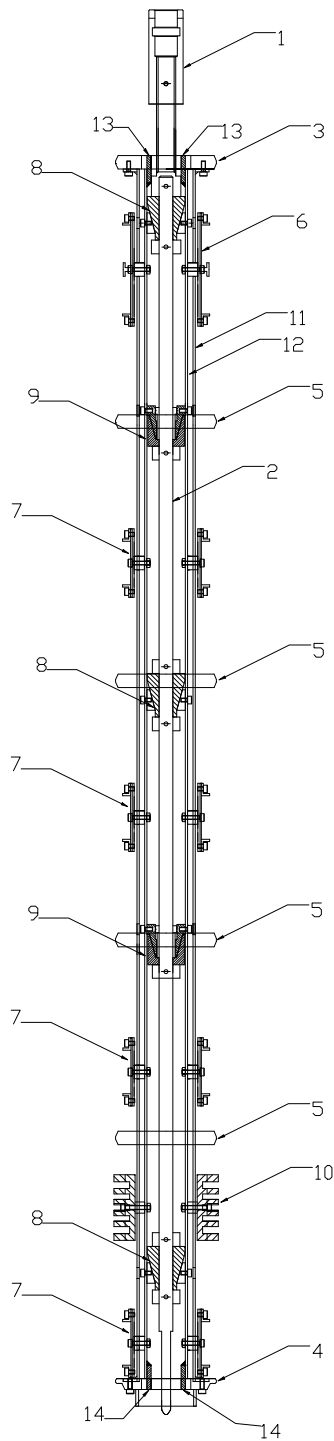


Figure 2. 마모검사장치 종단면도

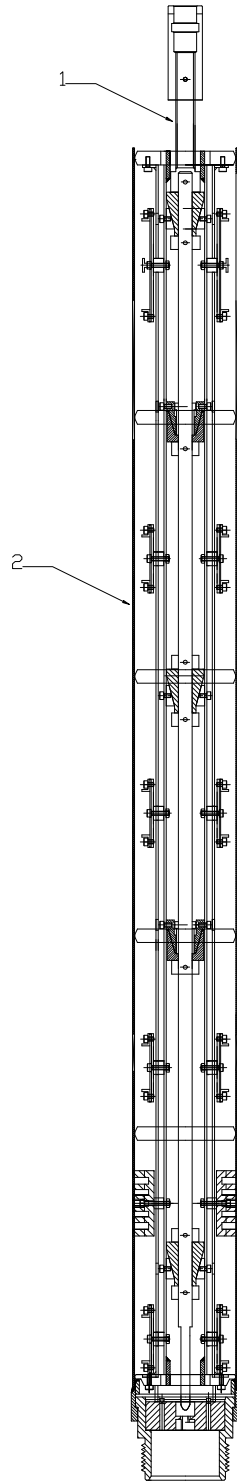
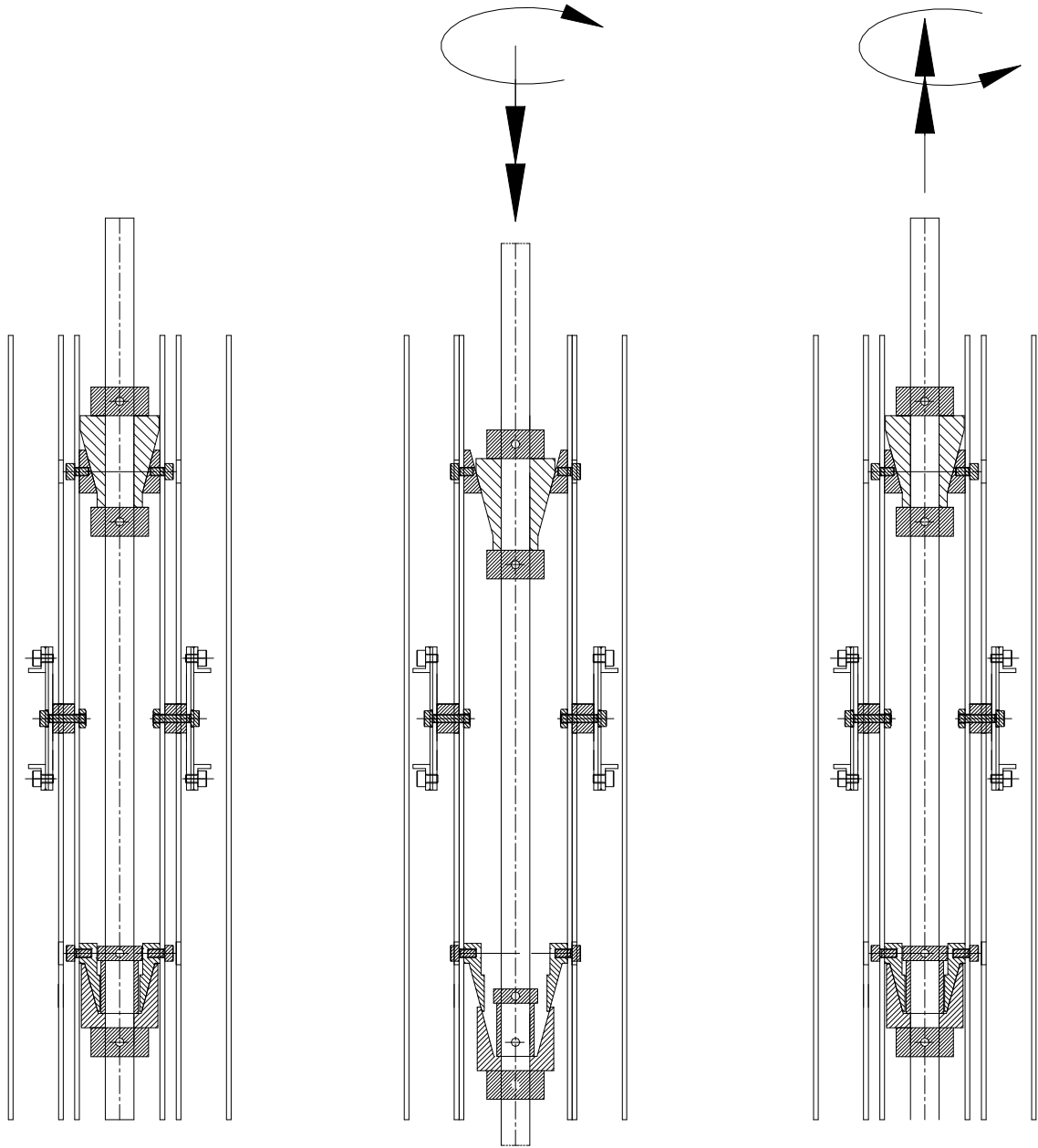


Figure 3. 마모검사장치가 삽입된
육각핵연료채널의 종단면도

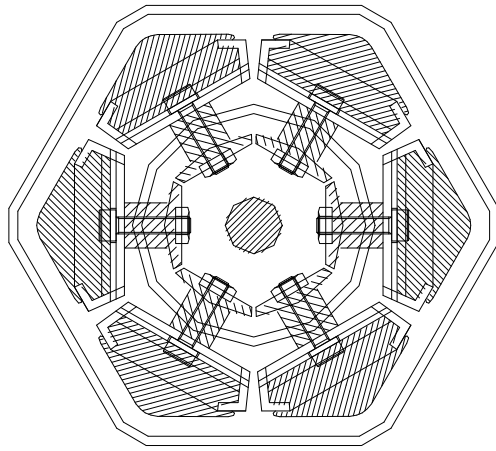


a) 검사장치 삽입

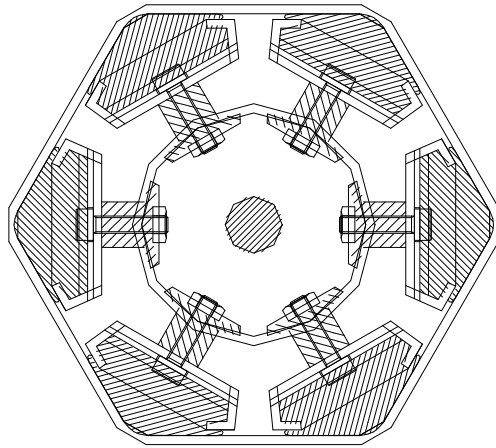
b) 중심봉 시계방향 회전후
채널내면에 몰딩컵 밀착

c) 중심봉 반시계방향 회전후
몰딩컵 원상태 복귀

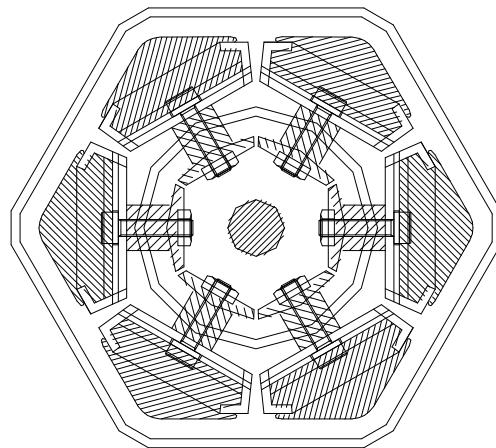
Figure 4. 중심봉 회전에 따른 몰딩컵의 수평 이송 원리(중단면도)



a)

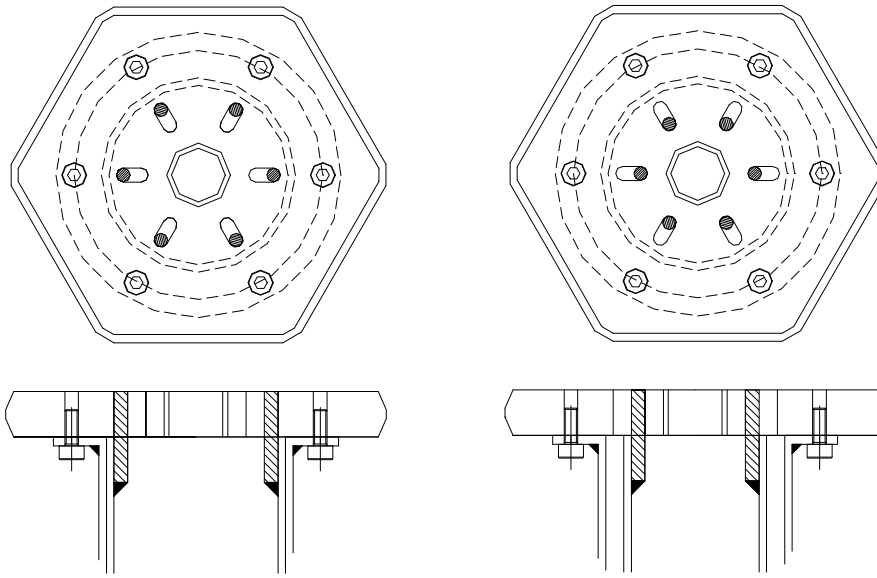


b)



c)

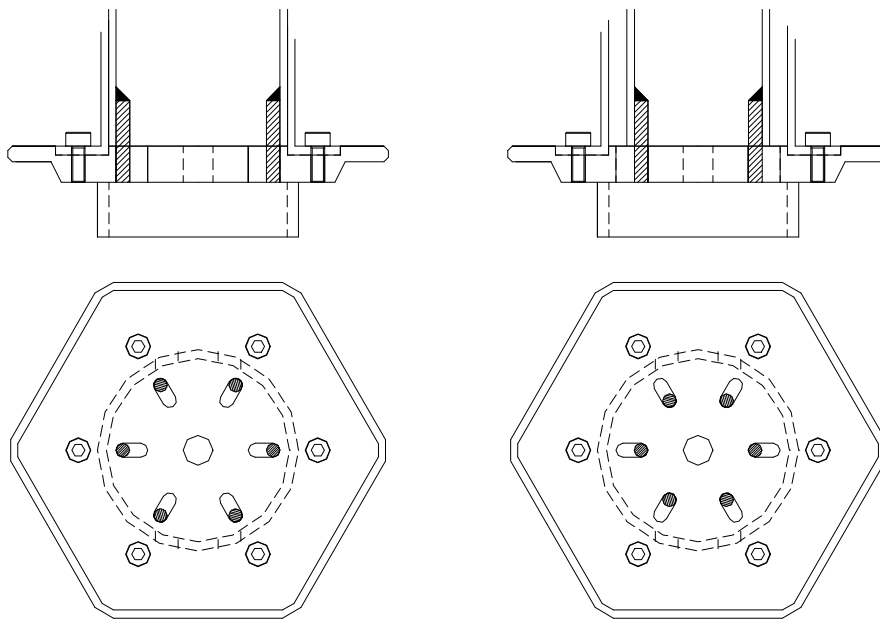
Figure 5. 중심봉 회전에 따른 몰딩컵의 수평 이송 원리(평면도)



a) 폴딩컵 밀착상태

b) 폴딩컵 원상태 복귀

Figure 6. 폴딩컵 구동에 따른 Top Guide Pin 모습



a) 폴딩컵 밀착상태

b) 폴딩컵 원상태 복귀

Figure 7. 폴딩컵 구동에 따른 Bottom Guide Pin 모습

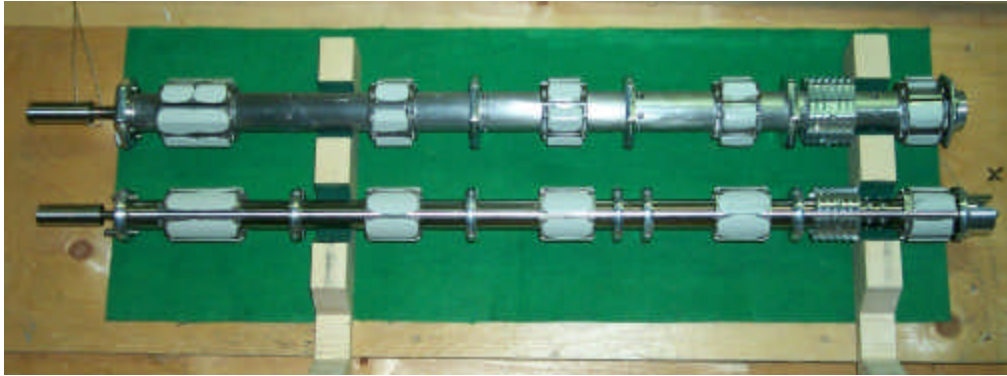


Figure 8. 제작 완료된 육각 및 원형 핵연료 채널 마모검사 장치의 모습

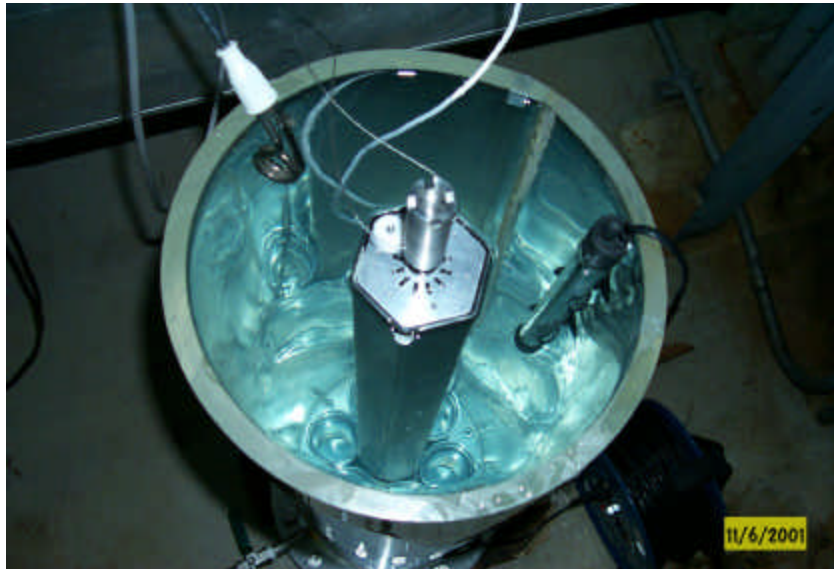


Figure 9. 모의 수조를 이용한 마모검사 장치의 수중 시험 모습

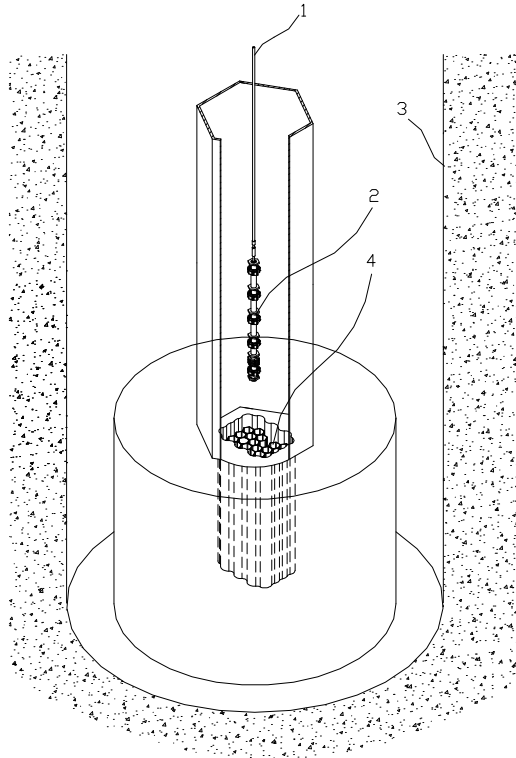


Figure 10. 핵연료 집합체 설치공구를 이용한 핵연료 채널 마모검사 개념도

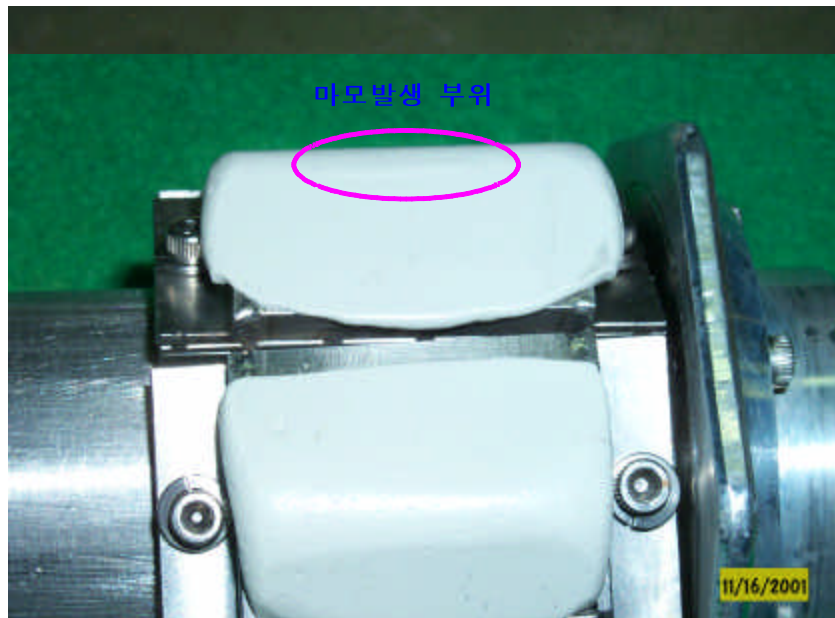


Figure 11. 육각 핵연료 채널 R12에서 획득한 레플리카의 모습
(하부 유도체 위치에서 약 0.2mm 마모손상이 발견됨)