'03 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한국 표준형 핵연료집합체용 신형 하단고정체의 이물질여과 성능

Debris Filtering Performance of Newly Developed Bottom Nozzle for the KSNP Fuel Assembly.

김형구, 박남규, 이성기, 서정민, 이준노, 김규태

한전원자력연료㈜ 설계기술원
대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

원자로 냉각수 속에는 원자로 건설 혹은 정비 작업 중에 발생된 다양한 형태의 금속성 이물질들이 존재할 수 있고, 이 이물질들은 냉각수와 함께 핵연료집합체 내부로 유입되어 연료봉과 지지격자 사이에서 핵연료봉에 심각한 프레팅 손상을 일으키게 된다. 지금까지 보고된 핵연료 손상 원인 중 이물질로 인한 핵연료 손상이 큰 비중을 차지하고 있는 관계로 원자로 내에 이물질이 발생하지 않도록 노력하고 있으나, 원자로 일차계통 내의 이물질들을 완벽하게 제거하는 것은 거의 불가능한 것이 현실이다. 본 연구에서는 이러한 이물질로 인한 핵연료 손상을 최소화하기 위하여 신형 하단고정체를 개발하고, 이를 한국표준형 핵연료집합체에 적용하여 이물질 여과 성능 평가 시험을 수행하였다. 이 시험에서 개발된 신형 하단고정체는 매우 우수한 이물질 여과 성능을 갖는 것으로 나타나 핵연료 건전성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 평가되었다.

Abstract

There can be various kinds of metallic debris in the reactor coolant, which is usually produced during the reactor construction or maintenance campaign. The debris is injected into the fuel assembly, captured between spacer grid and fuel rod and causes severe fretting wear on the fuel cladding surface. Because a lots of fuel failures due to the debris have been addressed, each power plant makes an effort to eliminate the debris creation. However, it is very difficult to completely remove the debris in the primary reactor coolant system.

In this study, in order to minimize the fuel failure due to debris, new bottom nozzles with debris filtering device have been developed. And the flow test to evaluate the debris filtering efficiencies of the developed nozzles has been performed by using the test assemblies for Korean Standard Nuclear Plants (KSNP). The test results showed that one of the developed bottom nozzles had very good debris resistant performance. As a result, the bottom nozzle would significantly contribute to the improvement of the integrity of the fuel assembly.

1. 서론

지르칼로이가 연료봉 재료로 제안된 이래 연료봉이 다른 부품과 접촉하거나 마찰을 일으킬 때에는 항상 프레팅 마모의 가능성이 존재해 왔다. 따라서, 연료봉의 프레팅 손상을 방지하여 일차계통 냉각수의 방사능 오염도를 가능한 한 최저 수준으로 유지하기 위해서는 baffle jetting과 일차계통 냉각수 내의 금속성 이물질과 같은 외부 프레팅 유발 요인들이 반드시 제거되어야 한다. 근래에 들어 baffle jetting으로 인한 연료봉 파손은 baffle에 대한 sealing 기술의 발달로 현저히 줄어드는 추세에 있다. 그러나, 원자로 건설 혹은 정비 작업 중에 발생되어 원자로 냉각수 속에 유입되어 있는 다양한 형태의 금속성 이물질들은 완벽하게 제거하기가 매우 어려울 뿐만 아니라, 또 실제로 이 이물질들이 냉각수와 함께 핵연료집합체 내부로 유입되어 연료봉과 지지격자 사이에 끼여 핵연료봉에 심각한 프레팅 손상을 일으킨 사례들이 지속적으로 보고되는 등 금속성 이물질로 인한 연료봉 프레팅 손상 가능성은 여전히 상존하고 있다. 이러한 이물질로 인한 연료봉 손상을 방지하기 위하여 세계 유수 핵연료 설계회사들은 이물질이 핵연료 내부로 유입되지 못하도록 하단고정체에 이물질 여과 기능을 갖도록 설계하고 있다 [1,2].

지금까지 국내에 상용 공급되어온 핵연료집합체는 해외 기술 도입에 의해 설계되고 제조된 관계로 기술적으로나 상업적으로 많은 제약이 있어왔다. 본 연구는 이물질로 인한 연료봉의 프레팅 손상을 방지하여 국산 핵연료집합체의 노내 건전성을 향상시킬 뿐 아니라, 해외 기술에서 탈피하여 독자적인 고유 모델의 하단고정체를 개발하기 위해 과기부 과제의 일환으로 수행되었다.

본 연구에서는 이물질로 인한 핵연료 손상을 최소화할 수 있는 신형 하단고정체를 개발하고, 이를 한국표준형 핵연료집합체에 적용하여 이물질 여과 성능 평가 시험을 수행하였다. 이 시험을 위하여 현재 상용 공급 중인 가디안 핵연료집합체에 대한 시험집합체와 새로이 개발된 신형 하단고정체를 채택한 시험집합체를 제작하여 동일한 조건에서 이물질 여과 시험을 수행하였으며 그 결과를 비교 평가 하였다.

2. 신형 하단고정체 후보모델 개발

원자로 냉각수 속에 있는 이물질들은 하단고정체의 유로구멍을 통하여 핵연료집합체 내로 유입되게 되는데, 이러한 이물질의 유입을 방지하려면 일차적으로 유로 구멍의 크기를 작게 하여야 하지만, 줄어든 유로구멍으로 인하여 냉각수의 압력 손실이 커지게 되어 핵연료의 성능을 저하하게 되므로 하단고정체를 개발할 때에는 상반된 이 두 가지 성능을 반드시 고려하여야 한다.

본 연구에서 고유 모델의 하단고정체를 개발하기 위하여 일차적으로 10종의 후보모델을 도출하여 이들에 대한 기계 및 수력적 특성 해석에 필요한 모델을 개발하고 특성해석을 수행하였으며, 이와 병행하여 5x5 크기의 후보모형을 제작하여 자체적으로 구축한 시험설비에서 이물질여과 시험과 압력강하 시험을 수행하여 각각의 특성을 평가하였다[3]. 그림 1은 일차적으로 도출되어 5x5 크기로 제작된 후보모형을 나타낸 것이고 그림 2는 본 연구에서 자체적으로 구축한 수력적 시험 설비를 나타낸 것이다. 그림 3과 4는 각각 후보모형들의 이물질 여과 및 압력강하 특성 평가 결과를 나타낸 것이다[3]. 이 평가 결과를 바탕으로 성능이 상대적으로 우수하다고 평가되는 2종의 후보모형을 주후보로 선정하고, 보다 상세한 성능 평가를 위해 한국 표준형 원전용 핵연료집합체에 적용할 수 있는 실물크기(16x16)의 하단고정체를 설계하고 제작하였다. 그림 5는 제작된 주후보 모델의 형상을 나타낸 것이다.

3. 이물질 여과 특성 평가

3.1 시험집합체

실물크기의 주후보 모형 하단고정체에 대한 이물질 여과 특성을 보다 정확히 평가/분석하기 위해서는 주후보 모형에 대한 직접적인 실험이 필수적이다. 이 특성시험을 위하여, 그림 6에서 보는 바와 같이 현재 한국표준형 원전에 공급되고 있는 핵연료의 이물질 여과용 가디안 지지격자를 채택한 시험집합체와 주후보 모형을 채택한 시험집합체를 각각 1다발씩 제작하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 제작된 시험집합체는 4개의 지지격자를 포함하는 짧은 길이의 시험집합체로써 과거 ABB-CE사에서 수행되었던 이물질 여과 시험에 사용된 시험집합체와 거의 유사한 규격으로 제작되어 기존의 시험조건과 일관성을 갖도록 하였다[2]. 그리고, 특성시험에 필요한 시험계획서를 작성하여 시험조건과 결과분석 방법에 대한 방법론을 확립하고, 본 연구에서 요구하는 수준의 시험설비를 보유하고 있는 일본 NFI사와 시험수행 용역계약을 체결하여 효과적이고도 안정적인 시험이 수행되도록 하였다[4].

3.2 이물질여과 시험

하단고정체의 이물질 여과 특성을 정확히 평가하기 위해서는 시험에 사용할 이물질을 매우 합리적이고 실제 발생 가능한 것들을 선정하여야 하며, 시험조건도 실제 발전소의 냉각수 유동을 모사할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 과거 ABB-CE사에서 CE형 발전소의 냉각수 유동조

건을 모사하여 이물질 여과 시험에 사용한 시험조건과 동일한 조건에서 시험을 수행하였다. 표 1은 이 시험에 사용된 이물질 종류를 나타낸 것이다. 이 이물질들은 ABB-CE사에서 이물질 여과 시험을 위해 사용한 이물질과 같은 규격의 것으로 발전소 정비 작업 중 발생 가능한 metal chip, wire 및 metal shaving등 다양한 형태의 금속성 이물질을 모사한 것이다.

그림 7은 이물질 여과 시험설비 구성도를 도식적으로 나타낸 것이며, 그림 8은 시험장치 상세 형상을 나타낸 것이다.

이물질 여과시험은 시험장치를 흐르는 냉각수 흐름이 정상상태에 도달하고 냉각수 중 기포가 완전히 소실된 다음, 앞에서 제작 분류된 이물질들을 미리 계획한 이물질 투입절차에 따라 그림 8의 이물질 투입구에 투여하고 일정시간 냉각수를 순환시키면서 이물질들의 거동을 고속 비디오 카메라로 촬영하는 방식으로 수행되었다. 그림 9는 이물질 여과 시험에서 이물질들이 하단고정체에 걸려있는 모습을 나타낸 것이다. 이물질 여과 효율은 펌프의 작동을 멈춘 다음 여과된 이물질의 수량과 통과된 이물질의 수량을 확인하여 하단고정체에 걸려 통과하지 못한 이물질 시편 수량을 투입된 총 이물질 시편으로 나누어 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 10은 본 연구에서 수행한 이물질 여과 시험 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보는 바와 같이 가디안 핵연료의 경우 wire 이물질에 대해서 약 92%, metal chip 이물질에 대하여 약 88%, metal shaving 이물질에 대하여 약 90%의 이물질 여과 성능을 갖는 것으로 평가되었으며, 종합적으로 약 90%의 이물질을 여과하는 성능을 갖는 것으로 평가되었다. 이 시험 결과는 ABB-CE사에서 발표한 가디안 지지격자의 이물질 여과 성능 90~92%와 매우 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다[5]. 주후보 모형 중 Wavy 형상의 이물질 여과 장치를 갖는 하단고정체(모델 A)의 경우, 총 투여된 150개의 이물질 중 shroud와 시험집합체 사이로 빠져 나간 1개의 이물질을 제외하고, 이물질 형상에 관계없이 100%의 이물질이 여과되었다. 그리고, 유로구멍을 사각 분할한 형상의 이물질 여과 장치를 갖는 하단고정체(모델 B)의 경우 metal shaving 이물질에 대해서는 약 98%의 높은 이물질 여과 성능을 갖는 것으로 평가되었으나, wire 이물질에 대해서 약 62%, metal chip 이물질에 대하여 약 58% 정도의 여과성능을 보임으로써 wire와 chip에 대하여 매우 취약한 모델임이 판명되었다. 특히, metal chip 이물질의 경우는 일차적으로 이물질 여과 장치에 걸려 있다가 시험이 진행되면서 냉각수에 의하여 파손되는 거동을 나타내었는데, 가디안 핵연료와 모델 B의 경우에는 그 파편이 시험집합체 속으로 유입되는 경향을 보였으나, 모델 A의 경우에는 상대적으로 파편 발생 율도 적을 뿐 아니라 파편 2차 유입도 방지하는 것으로 나타나 이물질 여과 성능 면에서 매우 우수한 것으로 평가되었다.

하단고정체에 여과된 이물질들은 냉각수 펌프의 정지와 함께 하단고정체에서 떨어져 여전히 일차계통 냉각수 속에 잔류할 수 있게 된다. 따라서, 하단고정체에 여과된 이물질들은 가능한

많은 이물질들이 하단고정체에 포획되어 핵연료와 함께 빠져 나오는 것이 바람직하다. 이에 따라, 각 시험집합체의 이물질 포획성능을 분석하여 그 결과를 그림 11에 종합하여 표시하였다. 이 평가에서 wire 형태의 이물질에 대하여 가디안 지지격자는 약 50%, 모델 A는 37%, 모델 B는 6%의 포획성능을 갖는 것으로 나타났다. 다음으로, metal chip 형태의 이물질에 대하여 가디안 지지격자는 약 58%, 모델 A는 73%, 모델 B는 20%의 포획성능을 갖는 것으로 나타났으며, 끝으로, metal shaving 형태의 이물질에 대하여 가디안 지지격자는 약 21%, 모델 A는 30%를 포획 하는 것으로 나타났으나, 모델 B는 metal shaving을 거의 포획하지 못하는 것으로 나타났다.

5. 결론

이물질로 인한 연료봉의 프레팅 손상을 방지하여 국산 핵연료집합체의 노내 건전성을 향상시킬 수 있는 고유모델의 이물질 여과 하단고정체를 개발하고, 이에 대한 이물질여과 특성 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

제안된 두 개의 주 후보 모형 중 Wavy 형상의 이물질 여과 장치를 갖는 하단고정체(모델 A)의 경우, ABB-CE사에서 개발하여 현재 국내 발전소에 공급되고 있는 가디안 핵연료보다 우수한 이물질 여과 성능을 갖는 것으로 평가되었으며, 이물질 포획 성능 측면에서도 상당히 우수한 성능을 갖는다. 이에 반하여 유로구멍을 사각 분할한 형상의 이물질 여과 장치를 갖는 하단고정체(모델 B)는 비교 평가된 다른 모델에 비해 가장 열등한 것으로 나타나 최종 고유모델로는 부적합한 것으로 판명되었다. 따라서, 최종 고유모델로 Wavy 형상의 이물질 여과 장치를 갖는 하단고정체(모델 A)가 선정되었으며, 이 모델이 적용될 경우 이물질로 인한 연료봉 프레팅 손상 가능성은 현저히 줄어들게 되어 핵연료집합체의 노내 건전성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 신형 핵연료 상하단고정체 개발 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. “The Impact of Metallic Debris on fuel Rod Performance ,” Westinghouse, 1985.
2. P.F. Joffre, “ 14x14 short bundle hydraulic and debris test summary report,” ABB-CE Test Report, PDB-88-172, 1988.
3. 김정하, 이진석, 김홍주, 엄경보, 김형구, “한국 경수로 핵연료용 이물질 여과 하단고정체 개발,”

2001년 추계 원자력학회 학술발표회 논문집, 2001.

4. “Test report of the debris filter test and pressure drop test for KNFC newly developed top and bottom nozzle ,” NFI, NFK-MM-0210037, 2002.

5. “Guardian Debris Protection and Its Implementation in Korean PWRs,” ABB-CE, 1997.

표 1. 이물질여과 시험용 이물질 종류

투입 이물질	규격 (ϕ x L)	개수
wires	ϕ 1.0 mm x 12.5 mm	10
wires	ϕ 1.5 mm x 12.5 mm	10
wires	ϕ 2.4 mm x 12.5 mm	10
metal chips	L =12.5 mm	10
metal shavings	L =12.5 mm	10
wires	ϕ 1.0 mm x 25.0 mm	10
wires	ϕ 1.5 mm x 25.0 mm	10
wires	ϕ 2.4 mm x 25.0 mm	10
metal chips	L =25.0 mm	10
metal shavings	L =25.0 mm	10
wires	ϕ 1.0 mm x 50.0 mm	10
wires	ϕ 1.5 mm x 50.0 mm	10
wires	ϕ 2.4 mm x 50.0 mm	10
metal chips	L =50.0 mm	10
metal shavings	L =50.0 mm	10

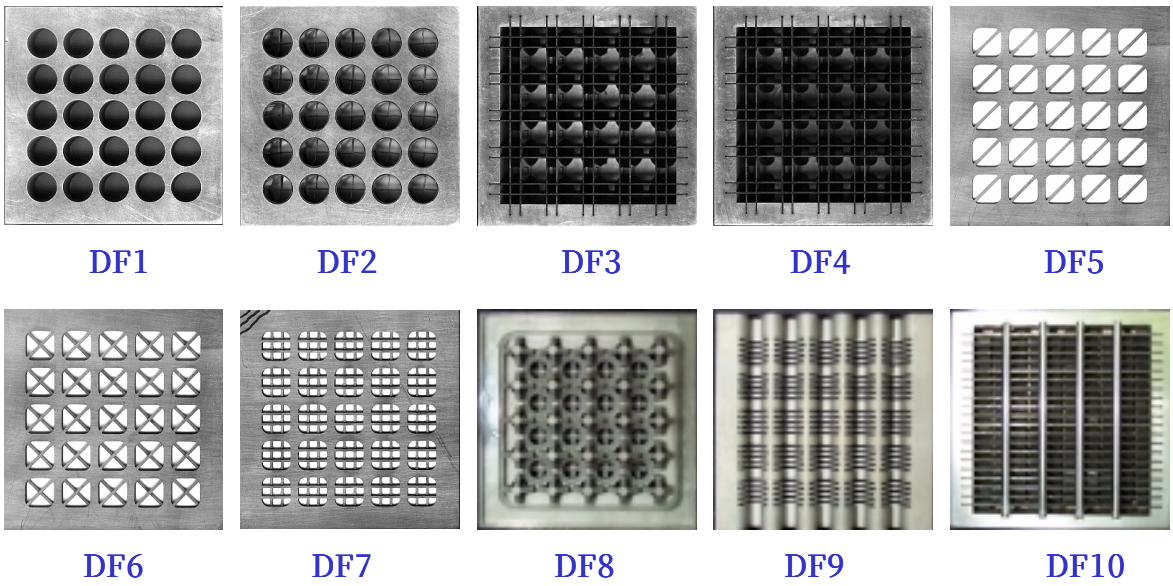

그림 1. 하단고정체 이물질여과체 후보모형

그림 2. 후보모형 수력성능비교시험 설비

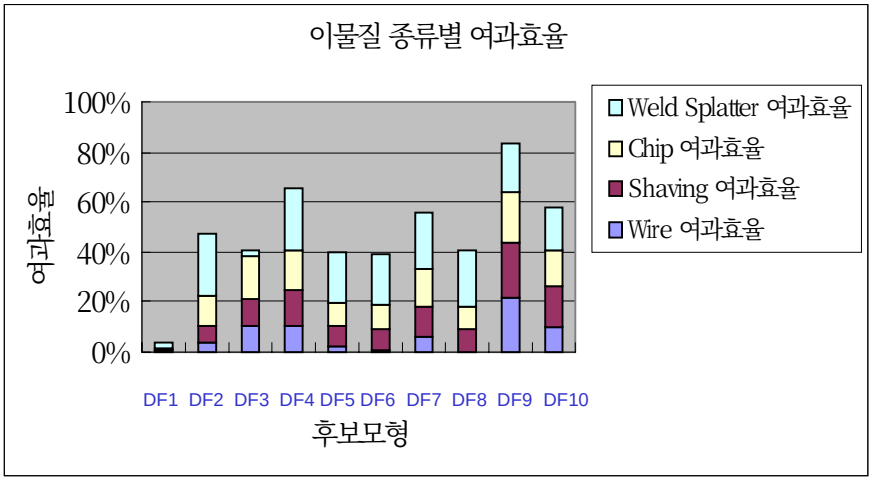

그림 3. 하단고정체 후보모형별 이물질 여과 특성

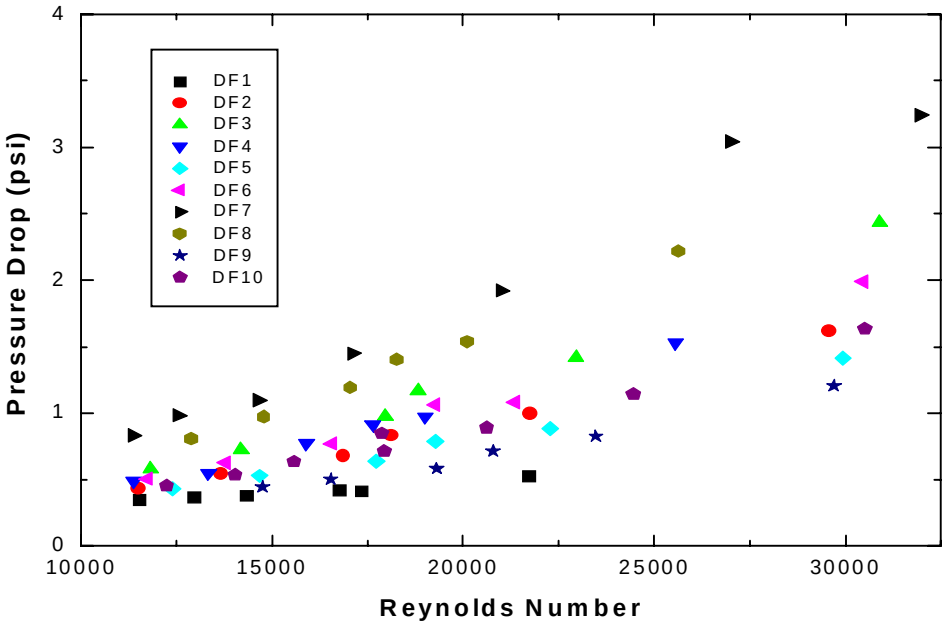

그림 4. 하단고정체 후보모형별 압력강하 특성

(a) 모델 A (Wavy Type)　　(b) 모델 B (Square Type)

그림 5. 하단고정체 주후보모형

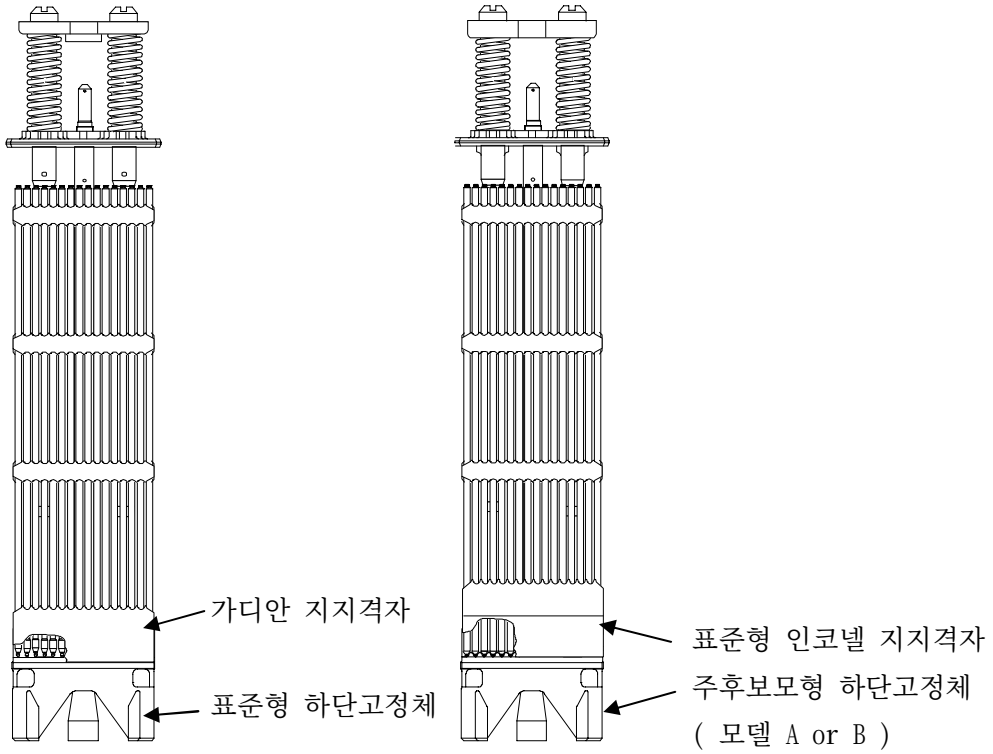

그림 6. 주후보모형 수력시험용 시험집합체

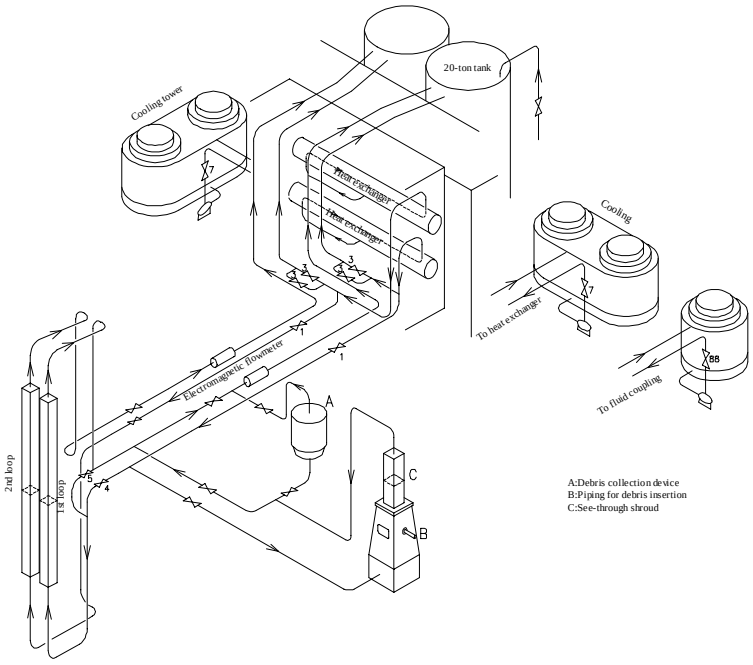

그림 7. NFI 수력시험 설비 구성도

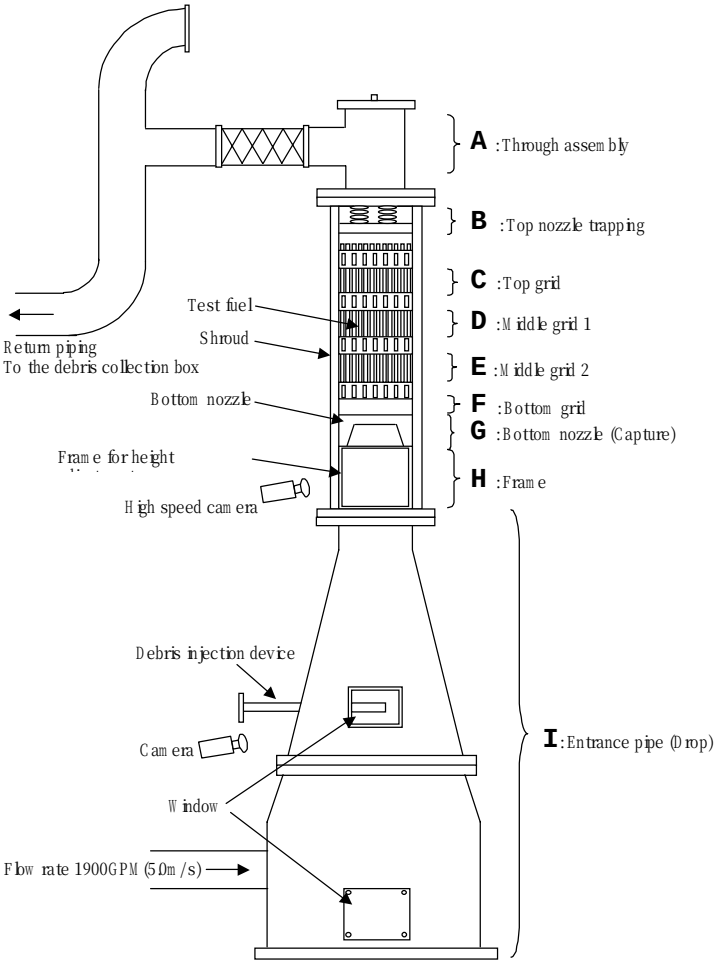

그림 8. 이물질여과 시험 장치 구성도

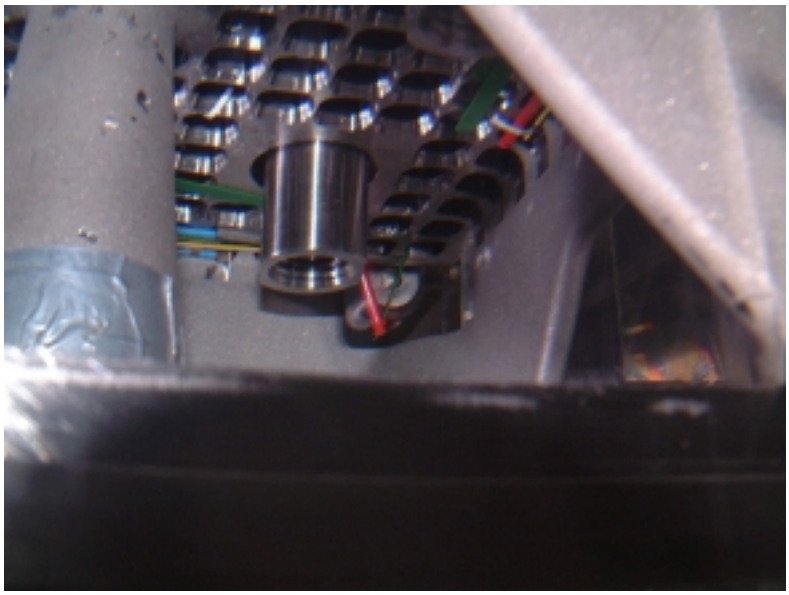

그림 9. 이물질여과 시험장면

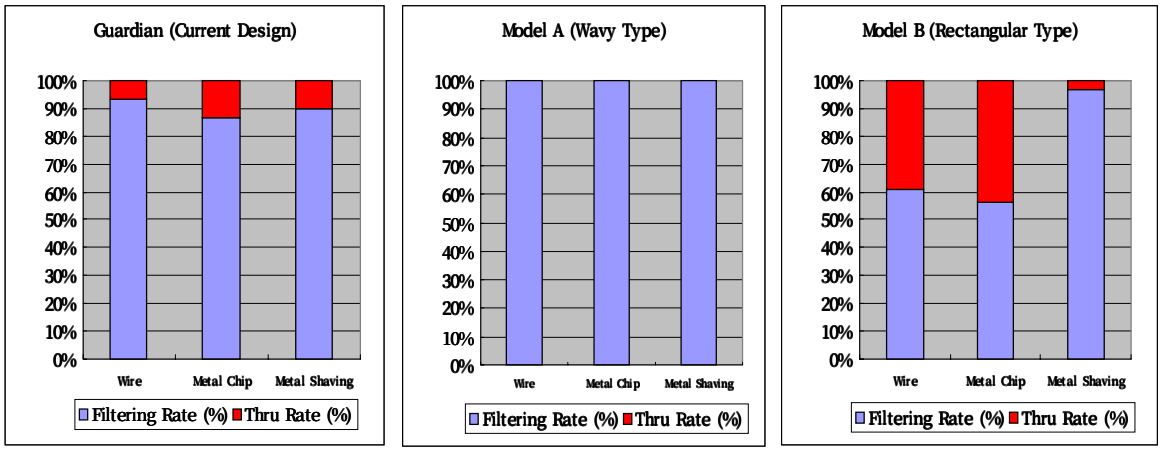

그림 10. 이물질여과 시험 결과 (여과효율)

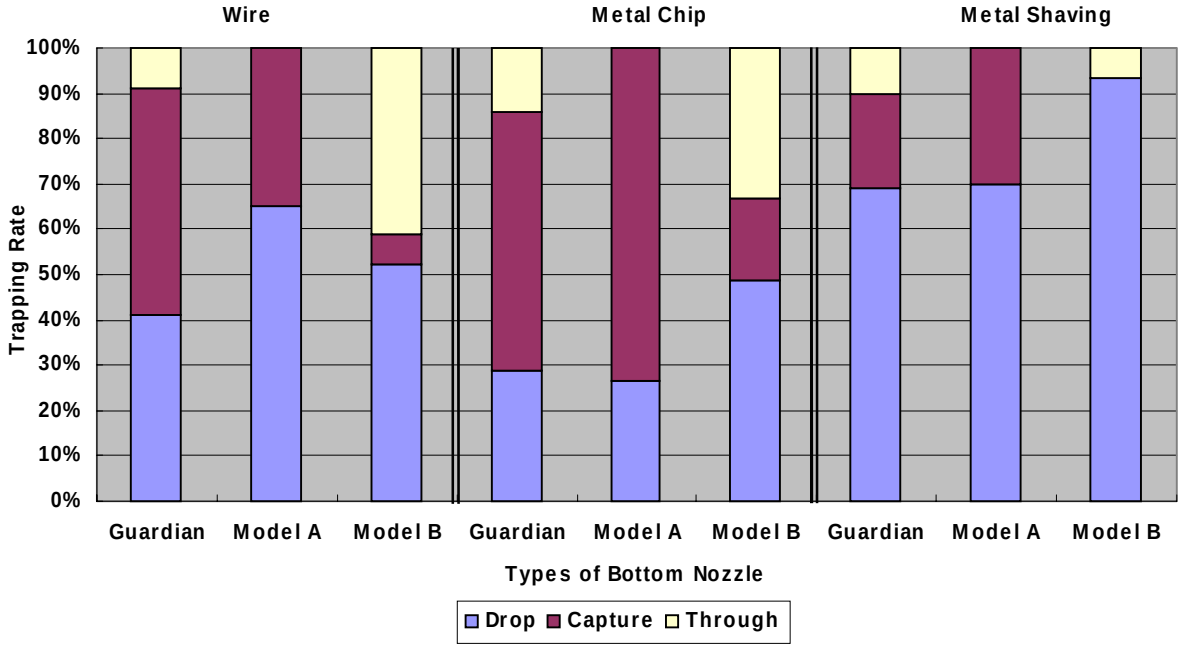

그림 11. 이물질여과 시험 결과 (포획효율)