

원자로 냉각재 정화필터 및 밀봉수 주입필터 국산화 설계

° 박종범\*, 김동수\*\*, 이주형\*\*  
\*한국전력공사 전력연구원 \*\* (주)우진정밀

Design of Reactor Coolant Purification Filter and Seal Injection Filter

° Jong Beom Park\*, Dong Soo Kim\*\*, Joo Hyoung Lee\*\*  
\*KEPRI \*\*Woo Jin Precision Co.,Ltd

**Abstract** - Objective is to design a high performance purification filter system of reactor coolant and seal injection system at nuclear power station. The purification filter systems play an important role in the stability of the nuclear and volume control system which consist the primary network systems of the nuclear power station. But the users of the purification filter systems frequently suffer from high maintenance cost which comes from lack of understanding of the system technology and domestic suppliers. It is time to establish a high performance domestic filter system manufacturing technology and optimum design for wide use in industrial applications.

1. 서론

일반산업용 필터는 대부분 국산화되어 국내산업기계 및 설비에 공급되고 있으나, 원자력 발전소 안전계통에 사용되는 필터는 원자력법령 또는 미연방 10CFR50 APP. B, ASME NQA-1&2의 안전성품목(품질등급 Q)에 준하여 개발되어야 하며, 또한 국내기술의 낙후, 소재부분의 미개발, ANSI/ISO규격 및 품질보증제도 미흡 등으로 국내 개발이 매우 어려운 실정이다. 그러나 안전(품질등급Q)관련 필터의 기술 및 품질보증은 매우 발달해서 원자력발전소 및 항공우주학 유압산업용, 의료, 제약 산업체에서 많이 활용되고 있다.

원자로 냉각재 정화필터 및 밀봉수 주입필터는 원자력 발전소에서 불순물인 입자성 물질이 계통내에 유입되면 순환계통에 계속 침적되어 열효율 저하 및 재질 부식 유발로 수명단축의 원인이 되므로 입자성 불순물을 엄격하게 제한하는 기능을 한다. 이러한 필터는 방사선량을 증가 방지 즉, 방사선 안전관리 측면과 냉각재 펌프의 밀봉재질 마모를 줄이기 위한 기기 수명과의 직접적인 역할을 담당하며, 따라서 고효율의 성능과 신뢰성이 요구된다.

정화용 필터 및 밀봉수 주입필터는 주 사용처가 원자력 발전소의 1차 계통에 제한하여 사용되므로 현재는 전량 수입에 의존하고 있으며, 국내수요가 미미하고 엄격한 안정성 품목으로 ISO/ASTM/ANSI/KS 규격에서 요구되는 성능 및 품질보증 여건이 너무 까다롭고, 국내기술의 낙후와 정보자료 수집의 애로점이 많아서 국내 Filter 제조업체들이 개발을 회피해 왔다. 본 논문에서는 전량수입에 의존하여 사용하는 원자력발전소 안전계통에 사용되는 필터를 지속적인 연구개발을 통하여 국산화될 수 있도록 설계하였으며 이 과정에 대하여 논의하려고 한다. 이 개발이 성공적으로 수행되면 대외 수입 의존도 탈피 및 외화절감효과라는 물론, 국내 자체 기술을 보유함으로써 자생력이 생겨 이와 관련된 제품개발 및 관련부품산업의 기술력향상과 파급효과를 상승시킬 수

있을 것으로 기대하며, 향후 해외원전 수출사업에도 적극 기여하여 국제 경쟁력 향상에 파급효과를 상승시킬 수 있을 것으로 기대한다.

2. 정화 및 밀봉수 주입필터의 특성

2.1 화학 및 최적제어 필터 운영체제

가. 정화 필터

정화필터는 체적제어 탱크의 유입라인에 설치되며, 필터는 각각 유출수의 불용성 입자를 제거하도록 설계된다. 두 개의 압력 지시계가 정화필터의 유입, 유출의 압력을 감지할 수 있게 설치 되어있고, 필터의 차압을 나타내게 되어있다. 필터는 최대 막힘 상태에서 필터 부품의 허용압력차를 초과하지 않고 최대유출량이 통과하도록 설계된다.

나. 밀봉수 주입 필터

2개의 필터로 구성되며 원자로 냉각재 펌프에 공급되는 밀봉수에 함유된 불용성 입자를 제거하도록 설계되었다. 각각의 필터는 최대막힘 조건에서 부품의 허용 압력차를 초과하지 않고 최대이상 유량을 처리 할 수 있는 용량을 가진다. 차압지시계는 각 밀봉수 주입 필터의 압력 강하를 감시하고, 종합 감시판에 높은 차압 경고 신호와 동시에 현장지시도 가능하도록 설계되어있다. 그림 1은 필터의 설치위치를 보여주고 있다.

Flow Diagram for Filter

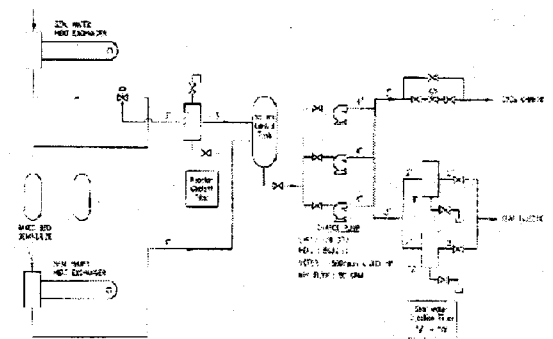


그림 1. 필터 설치 위치

2.2 필터 주요기능

유체중에 입자성 불순물을 제거하는 여과기는 모든 산업사회에서 중요한 역할을 수행하며, 액체나 기체인 유체가 통과할 수 있는 여과재로 유체에 포함된 입자를 분리 및 제거시키는 것을 의미한다. 원자력 발전소에서 불순물인 입자성 물질이 계통내에 유입되면 순환계통에 계속 침적되어 열효율 저하, 재질 부식 유발로 수명 단축의 원인이 되므로 입자성 불순물을 엄격하게 제한하고 있다. 따라서 원수를 계통 수질기준에 맞춰 공급하기 위해 정수장의 침사조와 물처리실의 활성탄 탭, 이온교환

수지탑, 필터 등에서 현탁 부유물질을 제거하고 있다. 원전 1차계통내에서는 입자성 물질이 운전중 냉각재 흐름에 따라 이동하다가 핵연료표면이나 노심 재질에 침적하게 되면 중성자와 반응하여 장 반감기를 갖는 방사성 핵종으로 변화하여 계통 방사선량을 증가의 주요 원인으로 작용하므로 방사선 안전관리의 측면과 원자로 냉각재 펌프 밀봉부위에서 입자성 물질로 인해 밀봉재질 마모를 줄이기 위한 기기 수명과 직접적으로 관련되므로 여과기의 역할이 매우 중요하다.

### 2.3 미세 필터의 종류 및 특성

원자력 1차계통은 작동중에 상당한 양의 미립자들이 연속적으로 발생하게되며, 이 불순물인 입자성 물질이 화학 및 제적계통의 작동불량이나 고장의 원인이 될 수도 있다. 이러한 원인은 계통내의 수질을 깨끗이 유지하고 적은 수리점검, 교환으로 장시간 사용에 견디며, 작동온도의 고온화에 따른 오염원(Contaminant)에 의한 영향에 민감해져서 필터의 구실 및 성능에 대한 고려가 미세필터 설계에 중요하게 되었다.

#### 2.3.1 미세필터 종류

필터의 종류는 형상에 의한 방식과 부착위치에 의한 방식으로 크게 분류된다.

가. 형상에 의한 분류

- T형(설계품)

계통의 Line을 때어내지 않고 카트리지 필터의 서비스를 할 수 있다. 원자로 냉각재는 몇가지 방향전환을 해서 지나므로 압력강하가 있다. Filter cartridge 에 쌓여있는 Dust(오염물질)를 향해 유체가 들어가므로 혼탁과 회석이 되어 Element로 들어가는 유체를 오염시킬 수 있다.

- Port형
- Inline형
- Y형

나. 부착위치에 의한 분류

- 고압라인 필터(High pressure line type filter)

고압쪽의 주회로 또는 각기기 앞에 설치하는 전류식 필터로 회로의 각기기를 확실하게 보호하는 점에서 효과적인 부착이다. 펌프 마모분의 시스템 유입방지를 하고 돌발사고로부터 생기는 불순물입자를 포집하고 회로 바깥으로 오염물을 제거해내는 Last chance filter와 같은 역할을 한다.

- Tank filter(Reservoir type filter)

탱크중에 부착함으로써 케이스가 불필요하고, 압력강하가 커지면 펌프의 진공(Cavitation)을 일으키므로 여과 넓이를 크게하여 방지하는 방식이다.

- 복귀라인 필터(Return line filter)

탱크의 복귀회로에 부착하며 비교적 저압케이스에 적용된다. 시스템에 돌아오는 불순물을 제거하고 설비의 전체적인 청정도를 향상시키는 데 목적이 있다.

- 흡입관용 필터(Suction line filter)

상기분류에서 정화용 및 밀봉수 주입필터로 형상에서는 T형이며, 부착위치로서는 고압라인 필터용으로 설계한다.

#### 2.3.2 미세필터 특성

다양한 여과기술을 고려하여 볼 때 Liquid filter 작용 특성을 고려해 볼 수 있다. 유체에 함유되어 있는 용해하지 않는 물질을 소위 여과재라는 격벽에 의해서 여과 케이크와 여과액으로 분리하기 위하여 가압 또는 감압을 이용하는 고체와 액체 분리장치로서는 Filter, Strainer, Press등이 있다. Filter, strainer 등을 사용해서 행하는 조작을 보통 filter라고 하고 Press를 이용하는 조작을 압착이라 한다. 이들 중 가장 중요한 것은 압력과 유량의 변화에도 여과지 기공이 확장되지 않

으며 filter의 최종수명까지 동일한 여과 효율을 유지하기 위하여 고려되어야 할 인자는 여과입도와 여과효율, 청정차압과 설계차압이다. 필터설계는 이들 요소를 잘 조화시킴으로서 최적의 효과를 거둘 수 있을 것이다.

가. Darcy의 법칙

유체가 층류상태로 충전층, 고정층 등의 유체층을 통과할 단위시간의 유량은 압력구배에 비례하고, 유체의 점도에 반비례한다. Darcy의 법칙이 기공을 가진 여과지(Porous Media) 또는 케이크를 통과하는 여과방식이 사용되어진다.

나. 투과율(Permeability)

Glass fiber는 다른 Filter media로 제조된 섬유보다도 훨씬 작은경을 갖고있으며, 다른 Media의 투과율과 분진포집능력에 있어서 우수하다. 분진포집능력(Dirt holding capacity)은 말단저항으로 필터에 포집된 오염물의 량을 나타낸다. 유체가 청정하게 될 범위에 따라서 필터의 효율이 결정되면 분진포집능력은 필터의 수명을 결정하게된다. 그러므로 필터의 품질을 결정하는 중요한 요소가 된다.

다. 여과면적

높은 필터면적은 필터여과지의 처리능력에 영향을 미친다. 여과면적을 증가시키면 필터의 수명도 연장할 수 있게 된다. 절곡된 Media로 만들어진 필터카트리지는 유사한 필터보다 여과면적이 2배정도 까지 증가시킬 수 있다. 높은 여과면적을 만들기 위하여 더 조밀하게 절곡시키기 위해서는 더 얇은 여과지를 겹으로 만들어야 함으로 더 작은경의 섬유재질을 사용하여야 만 한다. 이러한 장점을 살리기 위하여 Support layer 방식을 채택하여 가능한 한 높은 여과면적을 만들 수 있게 설계하였다. 그림2는 절곡된 Media를 보여주고 있다.

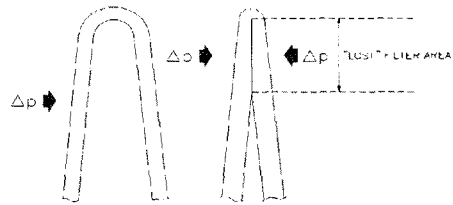


그림 2. 절곡된 Media

라. 청정 및 설계차압

모든 필터는 통과하는 유체에 저항을 준다. 이것은 대개 차압으로도 표현되며 필터를 가로 통과하는 압력손실로 측정된다. 케이크 여과의 기간중 특히 여과초기에서의 여과재 저항은 반드시 일정하다고는 볼 수 없지만 여과방정식에서는 편의상 일정한 것으로 취급되며, 여과재의 실제의 저항값은 새로운 여과재에 대한 투과실험에서 구해진다. 또한 생성케이크의 평균비 저항과 초기 청정차압과는 밀접한 관계가 있다고 생각된다. 필터 외 저항(설계차압)은 필터에 미세불순입자가 쌓임으로서 증가하게 되며, 이러한 이유 때문에 초기 청정차압뿐만 아니라 필터의 교체가 필요한 말기차압이 결정된다. 모든 유체는 유체흐름에 저항을 갖는다. 압력손실은 저항이 있는 필터를 통과할 때 폐관과 연계하여 기인한다. 청정 필터를 통과하는 저항은 필터하우징이나 카트리지 하드웨어 필터여과재에 그원인이 있다. 유체가 필터에서 저항을 받게되면 필터의 Down stream에서 압력손실이 나타난다. 필터를 통과하는 압력손실의 측도는 차압 또는  $\Delta P$  이라고 불리워지며, 필터엘레먼트의 강도는 설계차압 75 Psid 이상에서 견디도록 설계되어야 한다.

마. 여과공정 특성

아주 큰것에서 작은것까지의 다양성과 고체나 액체 그 밖의 여러 형태를 지닌 불순물 종류와 성질, 처하고있는 환경의 다양성 등 때문에 이들을 여과하는데 여러 방법이 있을 수 있다. 즉, 유체로부터 혼탁물질의 분리는 3가지

주요기구 즉 관성충돌, 확산 및 직접 제거에 의해서 이루어진다. 여과가 진행될 때 이 세가지 기구의 중요도와 역할은 변화한다. 확산과 직접거름의 효과는 액체성 유체 보다 기체 유체에서 훨씬 중요한 역할을 하는데 이는 입자의 밀도가 기체에서 액체보다 작기 때문에 액체 흐름선으로부터 혼탁 입자의 편위(Deviation)가 작아진다. 이에 따라 액체상에서의 입자와 여과재 물질사이의 충돌이 적게 일어난다. 액체상에서 확산거름은 매우 좁은 영역에서 일어나는데 이는 브라운 운동이 액체상보다 기체상에서 우세 하기 때문이다.

### 3. 설계품의 시험 및 방법

설계될 정화용 필터 및 밀봉수 주입용 필터의 시험방법은 세가지로 분류된다. 첫째는 필터를 완전히 분해된 상태에서 각종 사용 재질에 대한 특성분석시험(Mock up Test 포함)을 실시하여 그 결과를 설계에 반영하여 필터의 제작 조립에 일하는 것이고, 둘째는 성능시험으로서 제작완제품을 설계조건과 동일하게 최대부하상태에서 지속적으로 시험을 하여, good/fail을 판정하며, fail 인 경우는 보완설계를 시행하여 제작 조립 후 재차 성능 시험을 수행하는 것이고, 셋째는 On Line 시험으로 정화용 필터 및 밀봉수주입 필터를 현장에 설치된 상태에서 실증시험을 실시하여 차압 등 운전상태를 관측하는 것이다.

#### 3.1 특성 시험

현재사용 필터의 제작회사 또는 자재사양서, 카탈로그 등에 명시된 내용과 사양에 대해 분석 시험하는 것이다. 또한 필터를 축소형으로 제작하여 Multipass test Facility 에서 여과성능시험을 실시하여 그 시험결과를 설계에 활용하였으며, 시험항목은 다음과 같다.

##### 가. Media 시험분석

- 현재 사용필터의 화학 성분 분석을 실시하여 적용 재질을 선정한다.
- 자재사양 및 catalogue 상의 재질과 사용재질을 분석하기 위하여 조직을 촬영하여 비교분석 한다.
- 기공구조 조직 분석하기 위하여 wave분석시험 한다.

- Support layer의 Screen Mesh에 대한 조직 분석을 위하여 wave분석시험을 한다.

##### 나. Mock up Test

이 시험 방법은 평면 필터 여과지의 물리적 변화 및 성능 특성을 시험하기 위하여 사용되며, 이 공정에서 얻은 결과는 미세필터 제품의 제거효율을 결정하는데 사용된다. 시험 분석하는 동안 일정한 유량(최소 5 ℓ/min, 최대 73 ℓ/min)이 평면필터 여과지를 통과하고 청정차압도 기록되어진다. 여과 효율의 값은 upstream 과 downstream에 각각 sampling Line을 통해 포집하여 particle counter에 의해 분석되어진다. 이 결과를 토대로 기본 data를 구성하여 설계에 반영한다.

##### 다. Self Vent Disc 시험분석

소결필터는 가공의 크기, 입자의 포집, 특수표면적, 액체투과율의 여러 조건을 파악하기 위하여 먼저 조직 분석을 위한 촬영을 실시하고 다음에 성분 및 특성 분석을 위한 Capillary Flow analysis를 실시한다.

#### 3.2 Off Line 시험

일명 Good/Fail 시험이라고도 하며 Filter cartridge 에 대한 성능시험 및 검사를 실시한다. Filter Element에 대해서는 외관검사, Filter Media 이동상태, 재료의 내구성을 check하고 여과효율, 압력강하(정정차압), 압력상승(설계차압), 여과입도 등의 성능검정을 위하여 시험 분석할 수 있는 규격 ASTM/ANSI/ISO/KS의 관련 code를 검토하여 시험을 실시한다.

#### 가. 내압강도시험

이 시험은 필터 엘리먼트의 내압강도(Collapse & burst)를 측정한다. 즉 정격유량에서 설계된 차압에 견디는 수용능력을 측정한다. 필터 엘리먼트 강도에 영향을 주지 않고, 여과 면을 폐쇄하고 그 내의 면의 압력차가 75psid가 될 때까지 가압하여, 여과재, 끝판내통의 파손유무를 조사한다. 단, 밀봉수 주입용필터는 고압 System (3100Psid)을 갖추어야 함으로 내압 Test(압력 3100 Psid)와 설계차압 Test를 분리 시험하여 판정되고 현장 실증시험을 실시한다.

#### 나. 조립안전도 시험

각 개발 필터 엘리먼트의 조립안전도를 식별하기 위해 실시하며 필터 엘리먼트를 수평으로 부착하여 회전시키면서 공기압을 천천히 증가시켜 필터엘리먼트 표면에서 최초로 기포가 발생하였을 때로부터 공기유량과 공기압을 측정하고 공기유량변화율이 거의 일정하게 될 때까지 계속되 지정된 압력(In H<sub>2</sub>O)이하에서 기포가 발생하지 않아야 한다.(Bubble point Test)

#### 다. 압력강하시험(Evaluation of pressure drop)

필터를 통과한 유체 gm를 동역학과 점성 효과에 기인하는 저항을 맞게된다. 압력은 흐름을 지속하기 위해서는 압력강하가 일어나는데 이러한 저항을 이겨내야 한다. 초기 압력강하는 하우징 입구에서, 출구까지의 전체 압력감소를 나타내고, 하우징과 엘리먼트의 손실의 합계로 나타내진다. 이는 정화용필터는 5psid, 밀봉수 주입 필터는 7psid를 초과하지 않도록 한다.

#### 라. 여과성능시험(Multipass Filtration)

이 시험은 유압 filter의 여과성능을 검증하기 위한 절차이다. 실제 필터는 사양의 설계 압력강하 까지 오염 물질의 연속적인 흐름이 유체에 들어가는 것을 막는데 있다. 이 시험은 미세필터 엘리먼트에 연속적으로 오염 물질을 분사시킴으로서 여과성능 시험을 시행하는 것이며, 압력손실과 여과 제거특성과 오염 포집 능력을 판단하는 절차이다.

## 5. 결 론

원자력발전소의 1차계통내는 완전한 청정상태라고 할 수 없으며 장주기 사용으로 발생하는 오염원을 연속적으로 발생하게된다. 계통내의 유체를 깨끗이 유지하고 적은 수리점검으로 장시간 사용에 견디며 신뢰성 있는 미세필터를 설치하고 연속적으로 미세 불순물을 제거하는 것이 필요하다. 미세필터는 오염원에 의한 영향에 민감해져서 필터의 구실과 성능에 대한 고려는 한층 중요하게 되었다. 국내의 미세필터는 구미로부터 기술도입 및 완제품수입으로 대체해왔다. 지금까지 설계된 미세필터 카트리지의 분석, 설계, 시험의 공정을 거친 제작품에 대해서 현장실증시험을 통하여 신뢰성과 안정성을 확보해 나가야 할 것이며, 1차 계통의 화학 및 체적 계통 Filter는 원자력 발전소의 안정성 확보라는 측면에서도 중요한 제품이다. 이를 국산화로 대체 할 수 있는 기반 기술 및 설계기술을 축적하였으며, 정밀, 미세 절대여과 기용으로 그 활용범위가 광범위하여 국내 기반기술로 활용도가 높을 것으로 예측된다.

### [참 고 문 헌]

- (1) ASTM F795/F796 Determining the Performance of a Filter a Single Pass Constant rate Liquid test
- (2) ISO/R 1219. Graphical Symbols for Hydraulic and Pneumatic
- (3) ANSI B93.22/ISP2942. Hydraulic Fluid Power - Filter Elements Verification of Material Compatibility.
- (4) ISO1219. Fluid Power System and Components - Graphic Symbols