

SWASH형 격납용기 배기시스템

Bruno Pellaud

Electrowatt Engineering Services社

유럽의 원자로규제기관들은 비상시에 운전원들이 안도감을 가질 수 있도록 여과식 격납용기 배기시스템 사용을 의무화하려는 움직임을 보이고 있다. 스위스에서 개발한 이러한 시스템은 필요할 때 언제라도 작동할 수 있도록 단순하고 부식이 일어나지 않도록 설계돼 있다. (설치후 50년이 지나도 작동이 가능하도록 돼 있다).

여과식 배기시스템은 중대사고 발생시에 격납용기의 건전성을 유지하고 방사능누출과 환경오염을 방지해준다. 스위스는 프랑스, 스웨덴, 독일, 네덜란드에 이어 일부의 원자로에 여과식 격납용기 배기시스템(Filtered Containment Venting System, FCVS)을 설치할 계획이고 일부 동유럽국가에서도 앞으로 이러한 시스템을 설치할 것으로 보인다.

그러나 일부 국가에서는 이러한 조치를 취하지 않고 있다. 예를 들어 미국에서는 비용효과면에서 원자로의 안전성개선을 위해서는 이보다 더 효과적인 방법이 있다는 업계의 주장에 원자력규제위원회(NRC)도 동조하고 있는 것이다. 또 영국에서도 안전분석결과 현재 건설중인 Sizewell-B PWR이 매우 높은 안전성을 유지하도록 설계돼 있는 것으로 밝혀져 비용효과면에서 여과식 격납용기 배기시스템이 불필요하다고 보고 있다. 따라서 이러한 시스템을 설치하지 않고 다만 보조

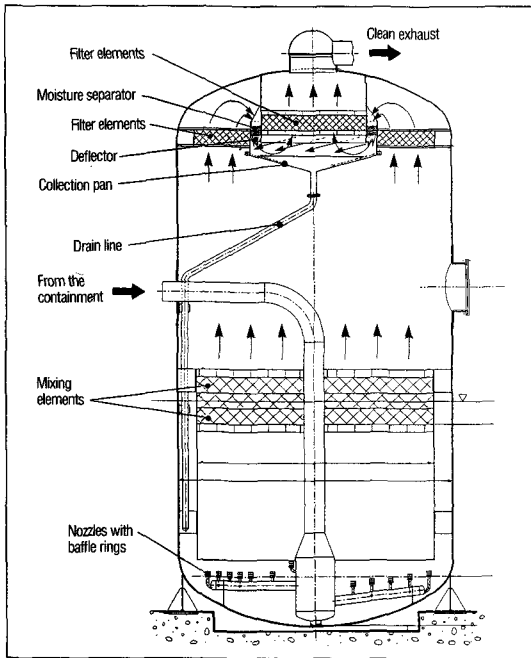
건물 옥상에 프랑스형 모래(砂)여과식 FCVS를 설치할 수 있는 공간을 마련해 놓았을 뿐이다.

日本の 전력회사와 通産省 내의 안전담당부서에서도 격납용기 배기문제를 매우 면밀하게 검토하고 있다. 그러나 이들 관계기관에서는 이러한 시스템을 설치하는 것을 꺼려하고 있는데, 그 이유는 이 시스템의 사용빈도가 낮다고 보았기 때문이 아니라 일반 국민들에게 안전성이 확보돼 있다는 확고한 자세를 보일 필요가 있기 때문이다. 日本에서는 지금까지 전력회사와 규제기관에서 일반 국민들에 대해 겉으로 보이는 격납용기가 절대적인 누출가스차폐체 역할을 하고 있어 가장 심각한 사고가 일어나더라도 외부환경에 어떠한 유해물질이 누출되는 것도 방지할 수 있다고 말해왔다. 그러나 이제 그들은 같은 일반 국민들에 대해 경우에 따라서는 격납용기 배기시스템 사용이 국제적인 차원에서 불가피하다는 점과 이미 일반 국민들에게 밝힌 바 있는 압력용기의 건전성과 氣密性에 대한 홍보내용과 표면상 모순되는 말을 하지 않으면 안될 난처한 입장에 놓여있는 것이다.

日本の 관계기관들은 일반 국민의 반대를 두려워하고 있지만 다른 나라에서는 그렇지 않다. 日本의 경우는 달리 스웨덴에서는 전력회사들이 안전당국의 지지를 받으며 격납용기 배기시스템의 설치로 원자로 안전성이 1,000배 높아진다고 주장하면서 일반 국민들의 안전성에 대한 우려를 진정시키고 있다. 이같은 안전성에 대한 우려는 1980년에 원자로건설에 관한 국민투표를 가져오는 원인이 되기도 했다.

일부 유럽의 안전당국이 격납용기에 배기시스템을 설치하도록 의무화시킨 이유는 아주 간단하다. 즉 중대사고가 발생했을 경우 운전원들로 하여금 어떠한 상황하에서도 격납용기의 건전성을 유지하도록 해서 환경오염을 방지하려는 것이다.

이들 규제기관들은 비교적 적은 비용(스위스의 경우 500만달러 이하)으로 설치된 FCVS가 사고관리면에서 안전성과 융통성을 높이고 운전원들에게 안도감을 가져다 준다고 믿고 있다. 이러한 이점은 확률론적인 분석에서는 定量化될 수 없기 때문에 비용효과면의 검토를 소홀히 하게 되고 결국 격납용기 배기시스템 사용에 관한 결정은 결정론적인 평가에 따르게 되는 것이



〈그림 1〉 SWASH 배기시스템은 물이 ½ 채워진 원통형 용기 내에 3단계 Wet Scrubber를 갖추고 있다.

다.

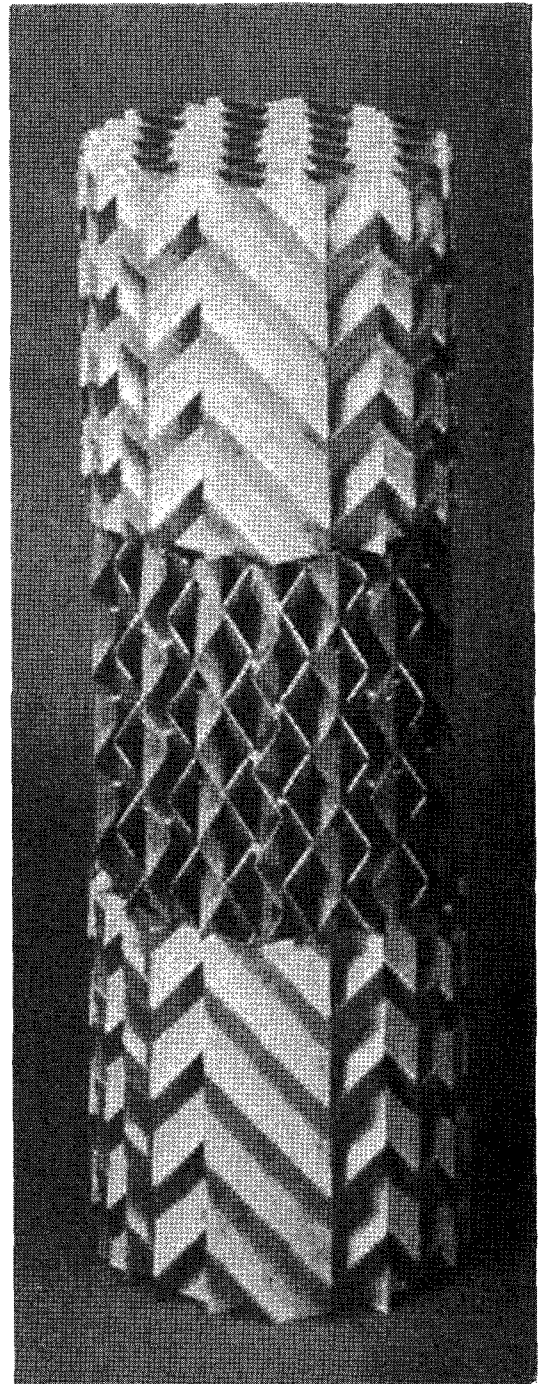
FCVS 설치여부에 대한 판단기준

원자로운영회사에게는 FCVS 설치여부에 대한 판단기준은 간단하다. 즉, 이 시스템은 투자비가 적고 보수비용도 낮으며 원자로운전에도 지장을 주지 않는다는 것이다.

그러나 무엇보다도 이 설비는 원자로의 수명기간중 사용되는 경우가 거의 없을 것이라는 점이다.

안전당국의 입장에서 보면 FCVS를 설치하기로 일단 결정이 내려지면 그 기술적인 선택기준은 이 시스템이 원자로의 수명기간중 절대 필요할 것이라는 전제하에 선택되지 않으면 안된다. 이에 따라 가장 중요한 기술적인 선택기준으로 다음의 3가지를 들 수 있다.

1. 이 시스템이 몇십년동안 대기상태로 있을 후에도 필요할 때 높은 여과율(Filtration Factor)로 즉시 시동될 수 있어야 한다. 이를 위해서는 장기간에 걸친



〈그림 2〉 Wet Scrubber시스템의 중심부에 표준형 SMV Sulzer 혼합용 엘리먼트가 설치돼 있다.

부식, 劣化의 방지를 위해 금속화이버필터를 질소가스에 의해 보존할 필요가 있다.

2. 격납용기 내 압력과 필터의 처리량과 관계없이 광범위한 압력영역에 걸쳐 빠른 속도로 여과처리할 수 있어야 한다. 이에 따라 운전원들이 가장 적절한 기후 및 격납용기조건 하에서 배기시킬 수 있는 융통성을 갖게 된다. 이러한 기준에서 보면 긴 Venturi노즐을 가진 FCVS는 부적합한데 그 이유는 이러한 FCVS는 여과율을 높이기 위해 비교적 높은 구동압력이 필요하기 때문이다.

3. 여과량이 많아져도 막히는 일이 없이 본래의 기능을 상실하지 않고 작동되어야 한다. 여과시험은 보통 한가지 에어로졸(Aerosol)과 깨끗한 증기를 사용해 실험실에서와 같은 조건으로 실시된다. 노심용융사고와 같은 중대사고는 혼돈상태를 가져와 塗料, 전기 케이블, 플라스틱부품 등에서 발생한 유독가스가 모두 증기와 섞이게 된다. 따라서 FCVS시험은 많은 양의 먼지와 많은 종류의 에어로졸을 배출해 보는 등 광범위하게 실시되어야 한다. 건식화이버필터는 작은 입자를 잡는 능력이 뛰어나 특히 막히는 경향이 있다.

다른 특성들도 원자별로 조심스럽게 다루어져야겠지만 이것들은 어디까지나 2차적인 성격의 것이라고 할 수 있다.

스위스형 격납용기 배기시스템

스위스는 현재 운전중인 5기의 원전을 갖고 있는데 여기에 모두 FCVS를 설치할 계획이다. 320MWe급의 Mühleberg원전 BWR에는 멀지않아 ABB사에서 공급하는 Venturi노즐시스템이 설치될 것이다. 이 노

즐시스템은 격납용기 외부에 설치된 2차 Suppression Chamber 내에 설치된다.

2단계로 돼있는 Siemens-KWU사의 FCVS(건식필터 다음에 습식 Venturi Scrubber가 있음)는 940 MWe급의 GUSGEN원전 PWR에 설치되는데 설치장소는 강철제의 내부격납용기와 콘크리트제의 외부격납용기 사이가 된다.

Sulzer Brothers of Winterthur & Electrowatt Engineering Service사에서 개발한 신행 FCVS는 나머지 3기(Beznau원전의 350MWe급 PWR 2기, Leibstadt원전의 990MWe급 BWR 1기)의 격납용기 외부에 설치된다.

위의 모든 시스템들은 스위스의 안전기관인 HSK에서 발급한 일반적인 사양에 맞도록 제작, 설치될 것이다. 그 일반적인 사양은 다음과 같다.

1. 정격처리량(100%)은 원자로출력의 1%에 상당할 것
2. 배기는 대기압까지 감압할 것
3. 여과율은 에어로졸에 대해 1,000, 요오드에 대해 100 이상 될 것
4. 정격처리량의 30~100% 되는 높은 여과능력이 보장될 것
5. 최소한 에어로졸 150kg의 흡수용량을 갖출 것
6. 자체전력공급이 가능한 수동적 시스템일 것

Sulzer-Electrowatt 배기시스템

일명 SWASH라고 불리우는 Sulzer-Electrowatt사의 FCVS는 물을 半 채운 원통형 용기 내에 3단계의 습식Scrubber를 갖추고 있다(그림 1).

SWASH design parameters at three Swiss plants

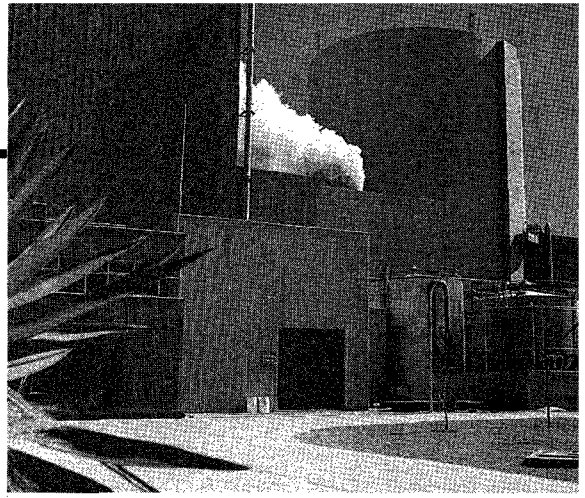
Parameter	Beznau I or II	Leibstadt
Relief pressure	3.6 bars (abs)	2.55 bars (abs)
Relief temperature	140°C	128°C
Nominal throughput (saturated steam)	4.85kg/s	13.8kg/s
Residual heat in scrubber	70kW	400kW
Vessel height	7m	7m
Vessel diameter	3.5m	4m

용기 맨 아래에 있는 1단계는 병렬로 배치된 수직 노즐(10mm ϕ)로 돼 있는데 이것이 큰 유동면적을 형성한다. Baffle Ring이 직렬로 노즐에 설치돼 있어 흐름의 교란을 높이고, 이에 따라 증기 내에서의 에어로졸의 분리가 촉진된다. 1단계는 3가지 기능을 갖고 있다.

1. 압력을 감소시킨다.
2. Scrubber용기 내에서 오염된 가스, 증기, 공기의 혼합가스를 균일하게 혼합한다.
3. 유입되는 혼합가스를 미세한 거품으로 세분한다 (노즐과 Baffle Ring의 절단력 이용).

시험결과 1단계는 유량이 중간 이상될 때 최고효율을 내는 것으로 나타났다.

이 시스템의 중심부인 2단계는 높이가 400mm 되는

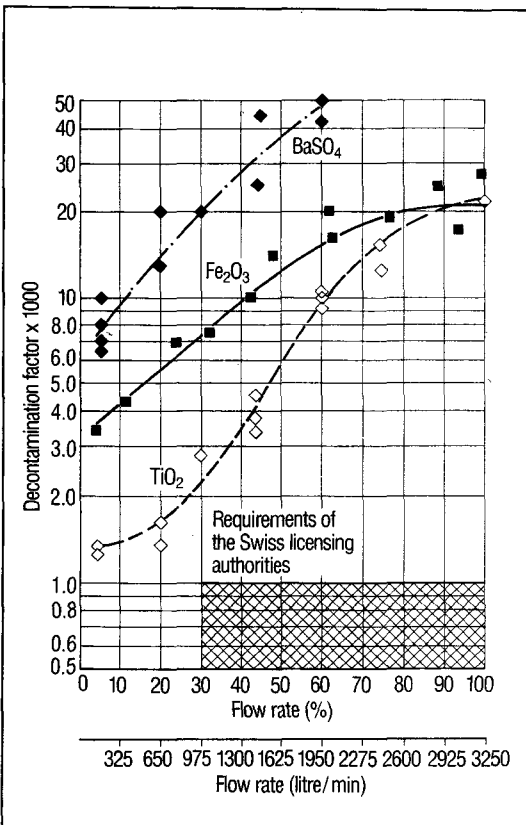


표준형인 SMV형 Sulzer 혼합용 엘리먼트의 2층구조로 돼 있다. 이 용접된 층들은 용기 내의 원통형 Barrel에 부착돼 있다. Sulzer사의 혼합용 엘리먼트는 장치산업에서 액체, 기체, 고체를 혼합해 균일한 제품을 내는데 널리 사용되고 있다. 이 혼합용 엘리먼트는 부식되지 않는다는 것이 사용과정에서 밝혀졌다. 폭 8mm의 흐름에서 이 엘리먼트다발은 막히는 일이 없고 큰 압력과 Water Hammer를 쉽게 흡수한다. 엘리먼트를 묶고 있는 재료는 가볍고 모든 종류의 동적인 힘(특히 수소폭발)을 잘 견디어 낼 수 있는 것으로 돼 있다. 많은 수량이 낮은 속도로 흐르기 때문에 요오드 흡수율이 높다. 에어로졸의 분리에 있어서는 2단계 처리량이 중간 이하일 때 최대의 여과율을 보인다.

용기의 水面 윗부분에 설치돼 있는 3단계는 2층의 기능을 갖고 있다. 즉 오염된 혼합가스유량이 낮을 경우에 앞의 두 단계를 빠져나온 미세한 에어로졸에 대해 추가로 여과율을 마련하는 한편 물분리기는 2단계를 빠져나온 물방울을 잡는다. 이와 같이 특수한 Sulzer 혼합용 엘리먼트로 이루어져 있는 3단계는 Wet Scrubber에 의해 이미 제거된 에어로졸이 다시 떨어져 나가는 것을 방지한다.

평균적인 가스, 증기, 공기의 혼합가스를 사용해 Sulzer-EWI 습식Scrubber의 모듈형 엘리먼트를 시험해본 결과 100,000 이상의 에어로졸 여과율을 쉽게 달성할 수 있는 것으로 나타났다. <그림 3>은 적정량의 에어로졸을 포함하고 있는 건조한 공기(입자크기 0.2~1.2 $\mu\text{m}\phi$)를 사용해 시험한 결과를 나타낸 것이다. 증기를 사용한 시험에서는 증기혼합가스의 점도가 낮아 이같은 입자흡수율이 최소한 5배 높아지는 것으로 나타났다.

산화티타늄은 믿을 수 없을 만큼 물에 젖지 않는 금속속성 에어로졸로 노심용융사고 발생시에 방출되는 에



<그림 3> 건조한 공기 중의 각종 에어로졸에 대해 SWASH 시스템이 달성한 제염률

어로졸 중에서 가장 잡기 어려운데 이 에어로졸의 시험결과는 특히 관심을 끈다. 이외에 더운 공기류에 의해 3단계 여과과정을 빠져나온 에어로졸의 양을 측정하기 위해 Scrubber의 물을 에어로졸로 포화시켜 몇 백시간동안 에어로졸이 다시 떨어져 나가는 시험(Resuspension Test)이 실시되었다.

〈그림 4〉는 Beznau원전 1, 2호기에 설치될 SWASH 시스템을 보여주고 있다. 아랫쪽 왼쪽에 격납용기로부터 減壓밸브와 파열디스크가 설치된 감압관이 나와 있다. 가운데에는 Wet Scrubber가 들어있는 용기가 있고 용기 윗쪽 왼쪽에 굴뚝과 연결된 배출관이 조금 보인다. Leibstadt발전소의 경우는 이같은 2개의 용기가 나란히 설치되는데 이는 사고시에 원자로출력이 크면 더 많은 증기가 누출되고, 격납용기용적이 크면 배기설비의 구동압력이 낮아지기 때문이다.

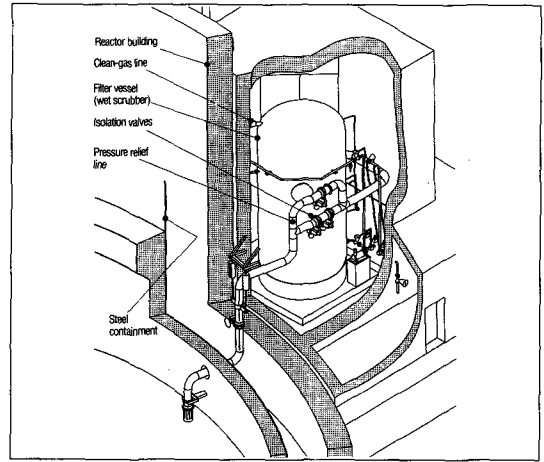
이들 3기의 원자로에 설치될 FCVS의 주요제원은 발표와 같다. 이외에 SWASH시스템은 다음의 보조 설비를 갖추고 있다.

1. 배기균질화를 위한 재순환계통과 배수계통
2. 보충수
3. 화학첨가제(요오드성분 제거를 촉진하기 위한 티오황산염)
4. 샘플채취설비
5. 제어계장설비(압력, 온도, 유량, 방사능, 밸브위치 등)

SWASH시스템의 기술적 특성 외의 이점

SWASH시스템은 위와 같은 기술적 특성 외에 간과하기 쉬운 2가지 중요한 특성을 지니고 있다. 즉 이 배기시스템은 어느 정도 방치된 상태로 두어도 괜찮다는 것과 이렇게 방치해 두어도 필요할 때 언제라도 사용할 수 있다는 것이다. 이 점은 연구소에서 연구해낸 여과율보다도 어느 면에서는 더 중요하다고 볼 수도 있다.

전력회사에서는 보수를 거의 하지 않아도 유지될 수 있는 FCVS를 필요로 하는 한편, 안전규제당국도 이같은 시스템이 설치된지 50년이 지난 후에도 필요할 때 언제라도 정확히 작동된다는 보장을 받으려고 하고



〈그림 4〉 SWASH시스템이 Beznau원전 1, 2호기에 각 1개, Leibstadt원전에 2개, 격납용기 밖에 설치된다. 그림은 Beznau원전의 배치도다.

있다. 이같은 2가지 요구조건을 모두 충족시키기 위해서는 단순하고 단단하며 부식하지 않는(부식이 일어나기 쉬운 부분을 질소가스로 보존한다) FCVS가 필요한 것이다. SWASH시스템은 일단 설치된 후에는 거의 잊어버리고 있어도 되고 언제라고 맨홀을 통해 들어가 볼 수 있도록 돼 있다.

FCVS는 노심용융사고와 같은 중대사고가 발생했을 경우에 대비한 것이다. 따라서 이 시스템은 그러한 사태에 대비할 수 있는 특성을 갖추고 있어야 한다. TMI원전사고의 경우만 보더라도 불완전한 정보로 큰 심리적 압박을 받아 잘못된 판단을 내렸던 것이다. 격납용기의 배기가 필요할 때, 운전원들로 하여금 FCVS의 여과율을 높이기 위해 격납용기압력이 높아질 때까지 기다리도록 해서는 안되고, 반복되는 부분 배기조작 후에 필터가 막힐까봐 신경을 쓰게 해서는 안된다. 다시 말해 FCVS는 여유가 있어야 하고 어떠한 경우라도 설계상의 제약 때문에 운전원들의 작업에 지장을 주어서는 안된다는 것이다. 사고가 나면 이에 대한 대처가 빨랐든, 늦었든, 또한 자동으로 작동했든, 수동으로 작동했든, 일단 이 시스템을 작동시킨 후에는 운전원들이 항상 마음놓고 배기조작을 할 수 있어야 한다. (NEI 5월號) □