

원전연료 성형가공시설의 방사성 입자관리

박 병 서
한국원전연료(주)
기술연구원 / 선임연구원

1. 머리말

원전연료란 원자력발전소(이하 원전)에서 사용되는 우라늄연료를 의미한다. 원전의 종류에 따라 사용되는 연료의 물성 및 형태 그리고 형태를 유지하는데 필요한 금속재료들은 여러 가지가 있다. 특히 연료의 연소(핵분열반응)형태나 연소기간은 연료설계에 중요한 변수가 된다. 원전은 현재 운전방식에 따라 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 가압경

수로형, 가압중수로형, 비등형 등이 그것인데 국내에는 앞의 두 가지 원전이 표 1과 같이 운전되고 있다. 그리고 각 원전에 사용되는 연료의 전형적인 연료형태는 그림 1과 같다. 그리고 이들 각 연료를 생산하는 업체들은 표 2에 나타나 있다.⁽¹⁾ 국내에서는 한국전력그룹내에 원전설계기능을 담당하는 한국전력기술(주)와 연료설계 및 생산을 담당하는 한국원전연료(주)가 있다.

표 1. 국내 가동 원자력 발전소

발전소	형식	발전량(만 kw)
고리 1 호기	W형 ⁽¹⁾ 가압경수로(2-loop)	58.7
고리 2 호기	W형 가압경수로(2-loop)	65
고리 3,4 호기	W형 가압경수로(3-loop)	95
영광 1,2 호기	W형 가압경수로(3-loop)	95
울진 1,2 호기	Framatome형 ⁽²⁾ 가압경수로 (3-loop)	95
영광 3,4 호기	CE형 ⁽³⁾ 가압경수로(2-loop)	100
월성 1,2,3,4 호기	가압중수로 ⁽⁴⁾	각 67.9, 70, 71.3, 71.3

(1) 미국, Westinghouse형

(2) 프랑스, Framatome형, 고리 3,4호기와 유사

(3) 미국, Combustion Engineering형

(4) 캐나다, AECL형

표 2 주요 원전연료 생산업체

ABB-ATOM (스웨덴)

ABB-CE(미국)

BNFL(영국)

Framatome Cogema(미국)

European Fuel Group(스페인)

Fragema(프랑스)

Siemens(독일)

Westinghouse(미국)

GE International(미국)

Korea Nuclear Fuel Company(한국)

Mitsubishi(일본)

AECL(캐나다)

CNEA(아르헨티나)

원전연료의 구조는 그림 2에 나타낸 바와 같이 우라늄화합물을 원주형 소결체(Pellet) 형태로 제작한 후 이를 피복관(Cladding Tube)내에 장입하여 밀봉하고 이 밀봉된 연료봉(Fuel rod)들을 그리드(Grid)와 상단 및 하단고정체(End Fitting)로 고정하여 집합체(Fuel Assembly)형태를 구성한다.

따라서 연료의 설계 및 제작공정은 크게 우라늄 소결체제작 과정과 피복관, 그리드 및 고정체제작과 이들의 조립공정으로 구성되는데 이들 전체공정을 일괄하여 성형가공이라 부른다. 각 공정의 속성은 우라늄 소결체 제작공정과 조립과정을 제외하고는 일반 기계 가공으로 볼 수 있다.

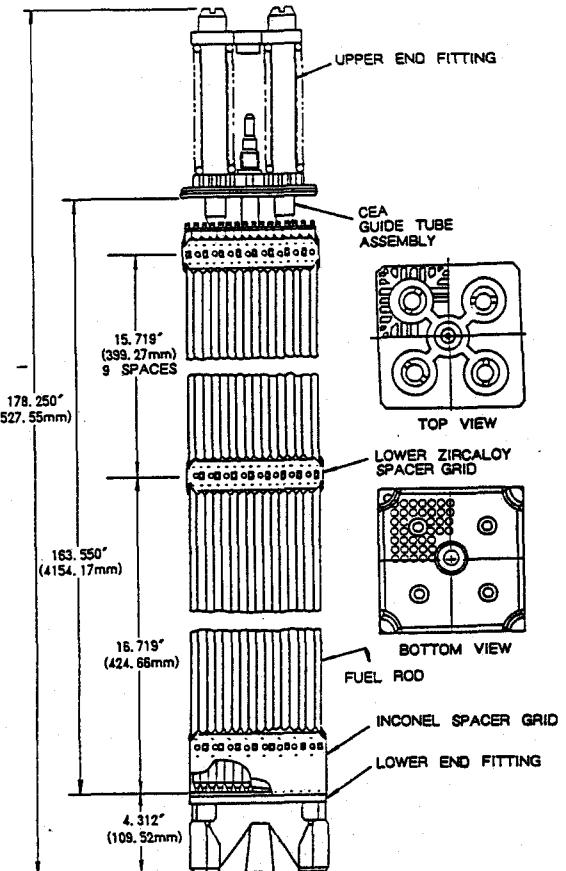


그림 1 가압경수로형 원전연료 집합체 개형

한편 우라늄화합물을 직접 다루는 공정 및 조립과정에서는 우라늄화합물이 공기 중에 비산될 확률이 있다. 따라서 공기 중에 노출되는 우라늄화합물에 의한 오염가능성을 수시로 점검하여 시설의 안전성을 확인해야 한다. 여기서 오염이란 우라늄화합물에서 발생하는 방사선에 의한 내부작업자의 피폭(Irradiation) 및 성형가공시설 외부로 누출된 입자에 의한 일반대중(Public)에 대한 피폭을

의미한다. 아울러 일반 산업체에 적용되는 안전기준도 동시에 적용하여 만족되도록 하여야 한다. 즉, 성형가공시설의 안전성은 시설내부의 공기와 환기시설 등을 통해 외부로 배출되는 기체 및 액체나 고체입자들에 의한 안전성을 의미하는데 일반적으로 공기 중에 비산되는 우라늄 화합물에 의한 영향정도가 가장 크다. 따라서 공기청정도 자체는 성형가공시설의 안전성이라는 말로 포괄할 수 있다.

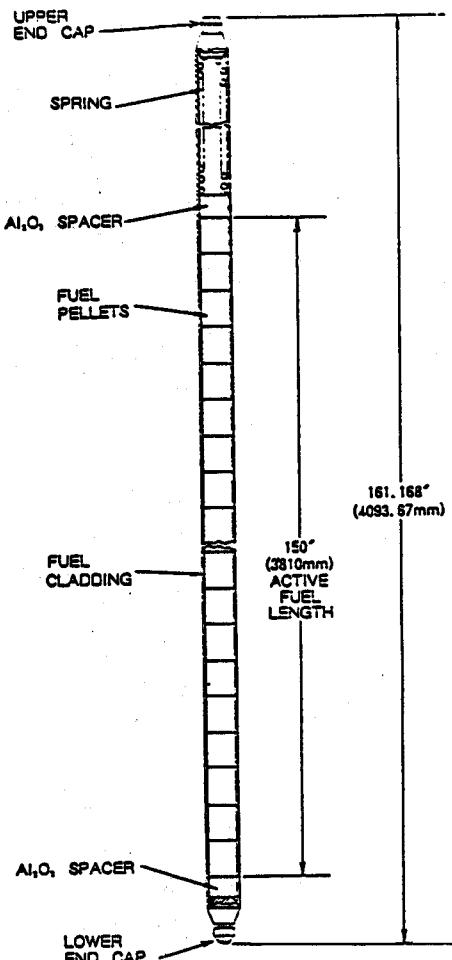


그림 2 가압경수로형 연료봉 개형

본고에서는 성형가공시설내의 각종 우라늄 화합물과 금속가공 공정에서 입자가 발생할 가능성이 있는 공정에 대해 알아보고 이들 노출된 입자들에 의한 오염방지대책에 대해 알아본다.

2. 안전성 관리기준

앞서 언급한 바와 같이 성형가공시설의 안전성은 크게 일반산업 안전기준과 방사선안전기준으로 대별할 수 있다. 일반산업안전기준은 산업안전보건법에 의해 규제가 이루어지는데 소음, 분진, 진동 등과 시설 외부배출물 등에 대한 규제 제한치 등이 기술되어 있다. 이 기준은 일반 가공공장에도 적용되는 것이므로 본고에서는 다루지 않는다. 다만 분진 량에 대한 기준을 보면 현재 기준치는 10 mg/m^3 인데 비해 국내 성형가공시설내의 최대 분진 량은 기준치의 $1/10$ 이하를 유지하고 있다. 즉, 분진 량은 상당히 낮은 값을 유지하므로서 여타분야 생산시설보다 훨씬 청결한 상태를 유지하고 있다.

2.1 방사선관리기준

방사성물질을 취급하는 시설에 대해서는 방사선 관리규정이 적용되는데 일반 의료용이나 비파괴검사 등에 사용되는 경우를 제외하면 원자력발전에 관련되는 시설에 대한 기준이 대부분이다. 원자력발전에 관련되는 시설은 연료를 생산하는 원전연료 성형가공시설, 원자력발전소 및 폐기물저장시설 등 3 가지로 구분 된다. 그리고 이들 시설에 대한 방사선관리기준 및 방법은 국제적으로 공인된 허용치뿐만 아니라 각국의 상황에 따라

추가 규정 등을 통해 구성된다. 국내의 방사선량 기준은 국제기준인 ICRP⁽²⁾나 미국규제기준인 10CFR20, 100⁽³⁾ 등에 부합되도록 원자력법을 통해 정해져 있다.

원전연료 성형가공시설내의 방사성 물질은 중량 농축도 5% 이하의 저농축 우라늄으로서 주된 방사선은 알파선이며 U-238에서 발생하는 저 에너지의 베타선 및 감마선이 소량 존재한다. 방사선으로부터의 주된 방어 항목은 방사성 물질의 흡입에 의한 내부 피폭을 방지하는 것이다.

한편 위와 같은 기준을 만족하기 위해 해당시설 설계단계 및 가동 중에 발생 가능한 여러 가지 형태의 상황을 설정하고 각 상황에 따라 발생하는 방사선량을 계산 및 추적

하여 규제치 만족여부를 분석하여 안전성을 유지한다. 즉, 정상운전이 이루어질 경우와 비정상운전 혹은 사고발생시 해당시설의 안정성을 확인한다. 원전연료 성형가공 시설의 안전성분석에서 고려되는 사고상황은 표 3과 같다.

표 3의 여러 상황들은 실제로는 발생할 확률이 매우 작지만 안전성 분석에서는 낮은 확률에도 불구하고 상황이 발생한 것으로 가정하고 안전성을 확인한다. 여기서 분석의 관점은 해당상황에서 성형가공 시설의 경계를 기준으로 내부와 외부로 구분하여 해당지역의 방사선 피폭선량을 보수적으로 계산하여 그 값이 안전제한치보다 낮은가를 확인하는 것이다.

표 3. 원전연료 성형가공시설의 가상사고 종류

가상사고 종류	주요 변수 및 가정	비 고
핵 임계사고	우라늄의 이송 및 보관형태	연쇄반응 방지관점
폭발/화재 동시사고	단위공간내 가장 많은 우라늄 누출 가정	시설 내부 및 외부 누출량의 제한치 확인
배기 계통 화재	배기 및 여과능력 상실 가정	"
UF ₆ 누출	흡입에 의한 내부피폭 가정	"
UO ₂ 분말 엎지름	내부공간에 확산	"
환기계통 고장	여과능력 상실	"
기타 홍수 지진 외부로부터의 화재 전파 번개 폭풍 우	외부요인에 의한 사고발생	

3. 성형가공공정

성형가공시설의 각 공정의 주요특징을 보면 다음과 같다.

1) UF₆ 기화공정

액체(젤리)상태로 반입된 육불화우라늄(UF₆)을 기화시킨다.

2) 변환공정

기화된 UF₆는 과포화증기 및 질소와 함께 반응시켜 불화우라늄(UO₂F₂) 분말 및 불산(HF) 가스를 생성한다. 불화우라늄 분말을 과포화증기 및 수소와 반응시켜 이산화우라늄(UO₂)분말로 환원시키고 불산 가스는 회수 시킨다.

3) 균질혼합공정

환원된 이산화우라늄 분말은 350 마이크론으로 여과한 후 균질혼합시킨다.

4) 압분공정

이산화우라늄을 압분기(Press)를 사용하여 원주형의 압분체(Green Pellet)를 제조한다.

5) 소결공정

압분체를 수소가스와 함께 고온 소결하여 소결체를 생산한다. 소결체는 장구형태(양끝의 직경이 중앙부보다 큰 형태)를 나타낸다.

6) 연삭공정

장구형의 소결체를 요구 직경을 갖는 원주형의 소결체로 연삭한다.

7) 회수공정

각 공정에서 발생하는 잔류물은 모두 회수 한다.

4. 방사선 방호 대책

전술한 여러가지 방사선 방어 규제(ICRP

#26, #60) 및 과기처 고시 90-11호) 제한치를 만족시키기 위해 각 공정에서 다음과 같은 원칙을 적용한다.

- 1) 부유성 우라늄을 취급하는 기기는 기밀구조로 하고 밀폐된 방에 설치한다.
- 2) 대량의 우라늄을 저장하는 저장실은 차폐물을 설치한다.
- 3) 지역환경계통을 설치한다.
- 4) 영구적인 방사선 감시장치를 설치 운영한다.
- 5) 제한구역을 설치하고 출입을 통제한다.
- 6) 지속적인 종사자 훈련을 실시한다.

위와 같은 원칙 하에 모든 시설과 기기는 다음과 같은 설계특성을 반영한다.

- 1) UF₆ 및 UO₂ 분말을 취급하는 기기 및 배관은 기밀구조로 한다. 연결부는 용접 처리 한다.
- 2) 우라늄 축적을 최소화하고 침전물의 세척이 용이하도록 설계한다.
- 3) 수동조작이 필요한 기기는 가능한 설치하지 않는다.

위와 같은 설계특성을 구현한 후에는 시설 내의 작업자나 출입자들에 대해 개인별로 피폭선량을 측정하고 기록을 통해 계속 추적하게 된다. 아울러 시설내의 오염여부를 측정하기 위해 실내공기를 계속 감시하게 된다. 이를 위해 방사선원을 취급하는 구역 및 환기된 공기를 시설 외부로 배출하는 굴뚝에 방사능 농도측정기를 상설 가동하며 새로운 기기 설치나 공정설치 등이 이루어질 경우에는 부가적인 측정기를 설치한다. 방사능 농도 측정은 공기시료 채취기를 통해 필터에 여과된 입자들을 방사능 측정기를 사용하여 방사선을 측정한다. 필터는 매일 교체하여

정확도를 유지한다. 이 방법은 다소 불편한 점이 있으나 신뢰성 있는 방법이다.⁽⁴⁾

5. 공기중 부유 방사성 입자관리

원전연료 성형가공시설내의 우라늄 취급에 의해 공기 중으로 부유가능성이 있는 방사성 물질의 형태는 다음과 같다.

- 1) 변환공정구역에서의 기체상 육불화우라늄 (UF_6)
- 2) 변환공정구역내의 분말상 이산화우라늄 (UO_2)
- 3) 압분공정구역에서의 분말상 이산화우라늄 (UO_2)
- 4) 소결공정 및 연삭공정구역에서의 이산화 우라늄 소결체
- 5) 고체, 액체 및 기체 폐기물

표 4.1. 우라늄 동위원소의 비방사능

동위원소	비방사능(Bq/g) ⁽¹⁾
U-232	8.280×10^{11}
U-234	2.309×10^8
U-235	8.001×10^4
U-236	2.397×10^6
U-238	1.244×10^4
붕괴생성물	3.000×10^4

(1) Bq(베크렐) : 1 초에 1개 핵이 붕괴시 방출하는 방사선세기

위와 같은 방사성 물질은 저장 및 이송 시 소결체를 제외하고는 모두 기밀성 용기내에 담겨 밀폐상태로 취급되며 이를 취급하는 기기는 모두 기밀성 구조를 가지므로 정상운전

중 공기 중으로 누출될 가능성은 매우 적다. 또한 이산화우라늄 분말은 밀도가 5 g/cm^3 이상으로서 신속한 침적특성을 가지고 있어 이를 기기나 용기로부터 누출되더라도 부유화하기는 어렵다. 육불화우라늄은 상온에서는 젤리상태이며 기화기 외에는 항상 상온상태로 취급되므로 기화기를 제외한 곳에서 누출이 발생하여도 부유화되지 않는다. 한편 기화기로부터 누출되는 경우에는 부유선원이 되는데 기화기 구조자체는 기밀성 2 중차단 벽 형태를 갖고 있으므로 부유화하기는 매우 어렵다. 표 4에는 우라늄의 비방사능값이 나타나 있다.

표 4.2. 천연우라늄의 비방사능

동위원소	핵종자료		Bq/g
	구성비 (w/o)	비방사능 (Bq/g)	
U-234	0.006	2.309×10^8	1.4×10^4
U-235	0.720	8.001×10^4	5.6×10^2
U-238	99.274	1.244×10^4	1.2×10^4
합계	100.0	—	2.7×10^4

표 4.3. U-235의 농축도에 따른 비방사능

농축도(w/o)	비방사능(Bq/g)
0.2	1.2×10^4
0.72	2.6×10^4
1.0	2.8×10^4
5.0	1.0×10^5
10.0	1.8×10^5

- 5.1 각 구역에서의 공기중 부유선원
 각 공정구역에서의 방사성 물질의 농도 추정시 고려되는 사항은 다음과 같다.
- 1) 취급되는 우라늄의 물리적 특성
 - 2) 취급 빈도 및 방법
 - 3) 취급 기기의 밀폐성
 - 4) 환기 계통
 - 5) 제염주기 및 방법

표 5. 공정구역별 우라늄 농도

공정	부유선원농도 제한치(Bq/m ³)		비고
	일평균	연평균	
기화구역	3.7 ⁽¹⁾	0.6 ⁽²⁾	- 출입제한구역
분말배출구역	18.0 ⁽³⁾ 3.7	-	- 밀폐지역 - 출입시 방호장비착용
균질혼합구역	3.7	1.8 ⁽⁴⁾	- 출입시 방호장비착용
암분 및 연삭구역	-	1.8 0.6	- 작업시간 제한 - 출입시 방호장비착용
소결구역			- 비부유성 소결체만 취급

- (1) 원자력법령에 따른 공기중 최대허용농도
 (2) ICRP 26에 따른 DAC(Derived Air Concentration)
 (3) ICRP 26 DAC의 30 배
 (4) ICRP 26 DAC의 3 배

그러나 위와 같은 사항을 종합적으로 고려하여 각 공정구역에서의 우라늄의 농도를 해석적으로 산출하는 것은 어렵기 때문에 국내 시설에서는 유사한 외국시설의 경험치를 참고하여 보수적인 관리 목표치를 정해 사용하고 있다. 각 공정구역에서의 공기중 우라늄 농도는 표 5 와 같다.

5.2 환기대책

환기설비는 시설내의 생산 기기 및 작업자를 위한 안전한 환경을 유지하기 위한 것으로 개봉우라늄 취급구역의 공기를 외기와 순환 및 정화시키므로써 부유성 우라늄의 축적

을 방지한다.

5.2.1 설계기준

환기설비는 원자력법 제 44 조 및 88 조의 규정에 의한 설계기준에 따른다. 주요내용은 다음과 같다.

- 1) 방사선 장해를 방지하기 위해 필요한 환기능력을 가질 것
- 2) 방사성물질에 의해 오염된 공기가 누설되기 어려운 구조이고 역류할 우려가 없을 것
- 3) 배출공기를 정화하는 장치를 설치한 경우에는 여과 장치의 방사성 물질에 의한 오염의 제거 및 여과 장치의 교체가 쉬운

구조일 것

- 4) 급기구는 방사성 물질에 의해 오염된 공기를 흡입하지 아니하도록 시설할 것

5.2.2 HVAC 시스템

전술한 여러 규정에 의해 실제 시스템을 설치하는데 있어서 주요 특성은 다음과 같다.

- 1) 시설내 개봉우라늄 취급구역에서 발생할 가능성이 있는 방사성 물질이 다른 구역으로 유출되는 것을 방지하기 위해 구역 간 부압조건을 이루도록 한다.
- 2) 개봉우라늄 취급구역의 환기설비는 방사성 물질에 의한 오염을 방지하기 위하여 전외기 방식으로 하고 기타 구역은 재순환 방식을 취한다.
- 3) 공정구역별로 적정량의 HEPA 필터를 설치한다.
- 4) 구역별로 부압이 유지되도록 급기 및 배기 풍량을 조절한다. 필터 유니트에는 차압 측정 및 경보장치, 차압스위치를 설치하고 차압측정치에 의해 배기 풍량을 조절하고 차압이 낮은 경우에는 주제어반에 경보를 발생한다.
- 5) 모든 환기설비의 운전상태는 주제어반에서 감시한다.

6. 맺음말

지금까지 원전연료 성형가공시설의 방사성 입자관리에 대해 개략적으로 알아보았다. 방사성 입자관리의 기본관점은 설명한 바와 같이 입자로부터 발생하는 방사선의 양을 관리하는 것으로서 시설내의 모든 구역 및 시설 외부에 미치는 영향까지 함께 관리한다. 아울러 사고 발생 상황하에서의 안전성을 고려하여 설계 및 운영되기 때문에 높은 안전성을 유지하고 있다. 특히 모든 안전기준이 국제기준 및 선진외국기준에 맞춰 운영되기 때문에 시설에 대한 안전관리의 신뢰도는 매우 높다고 할 수 있다. 끝으로 이 글이 원자력 관련 시설의 이해를 돋기 바란다.

- 참고문헌 -

1. "Fuel Designs, 1996," Nuclear Engineering International, Vol.41, No 506, pp. 28 – 26.
2. ICRP, Internal Commission on Radio-logical Protection, Pergamon Press.
3. CFR, Code of Federal Regulation.
4. Schieferdecker, H., et al., 1985, "Inhalation of U Aerosols from UO₂ Fuel element Fabrication," Health Physics, Vol.48. No 1, pp. 29–48.