

## 천연우라늄분말로 오염된 드럼의 재활용을 위한 제염

### Decontamination for Recycling of Packaging Drums Contaminated with Natural Uranium Powder

강일식, 손종식, 김길정

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

원자력 이용에 따라 부수적으로 발생하는 방사성 오염물질은 방사성폐기물로 분류하여 포장용기에 수집하여 폐기물 저장고에 안전하게 임시 저장한다. 그러나 방사능에 의한 오염정도가 미미하거나 고가의 장비인 경우에는 폐기하지 않고 재사용 또는 재활용하여야 한다. 최근에 방사성폐기물의 발생량을 줄이는 방안으로 제염의 필요성이 대두되고 있으며 가까운 장래에 처분장의 건설과 폐기물의 효과적인 감용처리가 수행되지 않은 한 적극적인 제염을 통하여 방사성폐기물의 발생량을 최소화할 수 있는 기술축적이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 제염방법의 종류와 제염설비에 대하여 기술하였고, 또한 방사성폐기물처리시설에 설치되어 있는 제염설비를 이용하여 천연우라늄분말로 오염된 공드럼 등의 제염을 수행한 결과를 보여주고 있다. 공드럼 제염후의 표면오염도는  $\alpha$  핵종의 경우 법적 허용한도인  $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  미만이었으며, 제염계수는  $10^4 \sim 10^6$  사이로 제염효과는 양호하였다. 이와 같이 공드럼을 제염하여 재활용함으로써 저장고의 저장공간을 확보하고 폐기물 처리에 따른 처리처분비용을 절감할 수 있다.

#### Abstract

Radioactive contaminants by the utilization of nuclear power are classified to radioactive wastes, collected at packaging drums, and then safely stored at interim storages. But the equipment which contamination level of radioactivity is very low or expensive one should be reused or recycled by decontamination instead of being disposed. Recently, the need of decontamination is strongly on the rise to reduce the amount of radioactive wastes. The generation of radioactive wastes should be minimized by adopting positive decontamination if the construction of disposal site and advanced volume reduction of wastes will not be performed in the near future. The decontamination methods and equipment are described in this report. Results on decontamination of the spent drums contaminated with natural uranium powder utilizing blasting cleaner are also shown. The surface contamination levels of drums after decontamination were  $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ , below permissible limit on alpha nuclides. Decontamination factor was  $10^4 \sim 10^6$  and the efficiency of decontamination was evaluated to be excellent. Resultingly, the storing capacity of interim storage can be maintained and management costs can also be reduced by recycling of used drums through decontamination.

## 1. 서론

원자력 산업의 발달과 더불어 방사능에 오염된 물질의 발생은 필연적이다. 이러한 오염물질은 방사성폐기물로 분류하여 포장용기에 수집되어 폐기물 저장고에 안전하게 임시 저장한다. 그러나 방사능에 의한 오염정도가 미미하거나 고가의 장비인 경우에는 폐기하지 않고 재사용 또는 재활용하여야 한다. 제염기술은 각 분야의 모든 기술이 요구되는 공학적 기술분야로서 최근에 원자력 산업에서 급속하게 성장하고 있는 기술이다. 이 기술은 인체피폭 저감과 방사성폐기물 처리비용 절감의 대안으로서 현재까지 원자력 선진국가에서 많은 연구·개발이 진행되어 개발된 기술을 상용화하여 이용하고 있다. 최근에 방사성폐기물 저장고의 폐기물 저장량이 포화상태에 근접하여 제염의 필요성이 새삼 강력하게 대두되고 있으며 가까운 장래에 처분장의 건설과 폐기물의 활발한 처리가 수행되지 않은 이상은 적극적인 제염을 통하여 방사성폐기물의 발생량을 최소화하여야 한다. 본 논문에서는 제염에 관한 일반적인 사항 즉, 제염 방법의 종류와 제염방법의 선정에 대하여 기술하였으며, 또한 방사성폐기물처리시설에 설치되어 있는 제염설비를 이용하여 공드럼 등의 제염을 수행한 결과를 보여주고 있다.

## 2. 제염절차 및 제염방법 선정

### 2.1. 제염절차

원자력시설의 정상가동시 또는 사고에 의해 방사능으로 오염된 장치 및 기기 등을 제염액을 사용하여 오염을 제거함으로써 재사용 또는 재활용할 수 있게 처리하는 행위를 제염이라 한다. 방사성폐기물처리시설에서의 제염공정은 그림 1과 같은 절차를 걸쳐 수행된다.

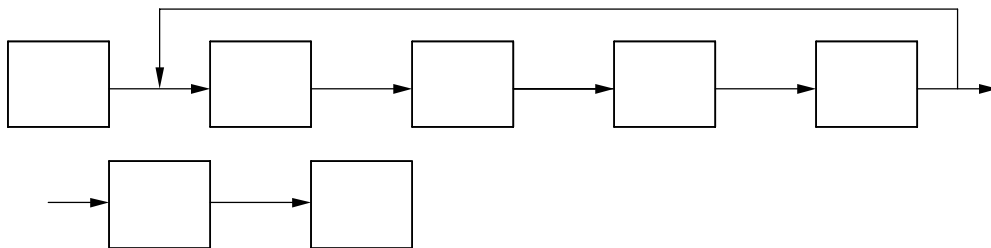


Fig. 1. Flow of Decontamination Process

오염된 기기나 장치 등을 크레인, 지게차 등 운반기구를 사용하여 수송 차량으로부터 하역하여 접수장에서 접수한 후 오염도를 측정한다. 오염된 물질, 오염원, 오염의 정도, 기기나 장치의 재질 및 부피에 따라 적합한 제염 방법 및 제염설비를 선택하기 위하여 일반적으로  $\alpha$  핵종으로 오염된 장치, 부피가 큰 장치,  $\beta$ - $\gamma$  핵종의 오염도가 심하거나 약한 장치, 복잡한 형상을 가진 장치, 부식이 심하거나 표면에 깊이 침투된 장치 및 기기로 분류한다. 분류된 장치 등은 이송장치에 의해 사전에 선정된 각 제염설비로 이송되어 제염을 수행하게 된다. 각 제염설비에서 제염된 장치는 재사용 가능성을 조사하고 재사용이 불가능한 것은 다시 제염을 하거나 방사성폐기물로 분류하여 폐기한다. 제염도 측정에서 재사용이 가능하다고 인정된 장치는 제염을 의뢰한 장치의 초기 상태와 동일하게 마무리 작업을 한다. 필요에 따라서 제염 수행과정에서 장치 표면의 손상이 발생되었을 때에는 도장실에서 도장을 한다. 마무리 작업이 끝난 장치는 제염을 의뢰한 곳으로 보내기 위해 일시 보관한다. 제염 작업 후 제염 작업에 대한 결과를 평가한 최종보고서를 작성한다. 이 최종보고서에는 제염작업의 배경, 사용된 제염설비, 제염 작업절차, 사용한 제염제, 제염계수 및 부식율과 폐기물 처리방법 등을 기록한다.

## 2.2. 제염방법

### 2.2.1. 화학적 제염방법

화학적 제염방법은 산 또는 알칼리 용액 중에 침수시키거나 화학약품으로 세척 또는 슝 등에 화학약품을 문혀서 닦아내는 방법으로 일반적으로 금속이나 산화된 표면이 오염되어 있을 때 필요한 방법이다. 제염제의 주요 성분이 되는 약품의 농도 1%를 기준으로 하여 고농도 제염공정과 저농도 제염공정으로 크게 구분한다. 최근에는 화학제염 공정에서 사용되는 제염제와 거품(foams), 겔(gels) 및 페이스트(pastes)등을 혼합시켜 사용하는 제염기술이 개발되고 있다. 이 제염방법은 제염시킬 수송용기 외부 표면에 foams을 도포한 후 일정시간 동안 방치하여 반응을 진행시킨 다음 닦아낸다. Foams의 발생은 거품을 안정화시키는 약품과 제염화학제가 섞인 혼합물에 압축공기를 불어넣어 이루어진다. 이 공정은 제염제를 순환시키거나 침수시키는 공정에 비하여 적은 양의 액체폐기물을 발생시킨다는 잇점이 있다. 또한, 제염제 시약을 포함한 도막박리제염법(strippable coating)이 사용될 수도 있다. 고농도 제염방법은 제염제를 달리 사용하여 중간세정을 하는 등 단계적 제염법으로 수행한다. 제염제를 1%이상의 고농도로 사용하여 높은 제염계수를 얻게 되며 짧은 시간내에 제염 할 수 있는 반면에 부식율을 저하시키기 위하여 부식억제제를 첨가하지만 국부부식이 발생하는 등 재질에 대한 부식성이 큰 것이 단점이다. 저농도 제염에서는 제염제 농도가 1%이하로 조절되는데 이 공정의 장점으로 전 1차계통을 제염할 수 있다는 것과 부식율이 낮으며 폐기물의 처리가 용이하다는 점을 들 수 있다. 반면에 고농도 제염법에 비해 제염 효능이 비교적 낮다[1]. 전기화학 제염공정은 일반적으로 금속 표면의  $\alpha, \beta, \gamma$  핵종의 오염 제거에 이용되어 왔다. 이 공정의 장점은 짧은 적용시간, 높은 제염계수, 폐기물량이 적고, 부드러운 표면을 만들 수 있다는 것이다. 방사성 오염원은 금속이 용액속으로 용출됨으로써 제거되는데 보통 전해액으로는 인산, 황산, 옥살산 등이 사용된다[2].

### 2.2.2. 물리적 제염방법

물리적 제염공정은 고압하에서 고온의 화학용액을 분사하여 오염물질을 물리적으로 제거하는 방법으로 작업이 용이하나 작업자의 피폭이 크게 우려된다. 방사성물질이 입자의 형태로 표면에 침적되어 있는 경우 이들을 손쉽게 제거할 수 있는 방법으로서 화학제염 및 기타 제염을 적용하기 전에 진공 세척법을 이용한다. 이 방법은 오염물질을 부수는 작업과 병행함으로써 제염효과를 높일 수 있고, 방사성 물질의 대기방출을 억제함으로써 작업조건을 증진시킬 수 있으며 다공질보다는 표면의 부드러운 오염물질을 제거하는데 효과적이다[3]. 수 연마제염은 작업자가 솔이나 주걱 등의 도구를 가지고 직접 제염대상물을 제염하는 방법으로 제염효과는 제염시간, 도구, 제염용액 및 제염할 표면의 상태 등에 따라서 다양하며, 대상물의 부식이나 손상없이 제염할 수 있으나 작업자가 대상물에 접근해야 하므로 피폭선량이 크다는 단점이 있다[4]. 고압수/증기 분사제염은 3,000MPa의 고압수를 40~200L/min의 속도로 제염대상 물체에 분사시킴으로써 느슨하게 부착된 오염물을 제거하는 방법이다. 특히 제염제, 세제, 계면 활성제 등 각종 화학약품을 첨가시킴으로써 제염효과를 증진시킬 수 있고 원격 조작이 용이하며 노즐을 여러 방향으로 회전시킴으로써 타 제염법으로는 제염하기 어려운 부분까지 쉽게 제염할 수 있는 장점이 있다. 페인트, 기름 등과 함께 오염된 대상물에 대하여 제염계수 50정도를 얻을 수 있다[5]. 물 대신 수증기를 사용하는 경우는 포화 수증기 혹은 습식 수증기를 사용해야 한다. 분사연마제염은 연마재를 압축공기나 고압수와 함께 분사노즐을 통하여 분사시키는 방법인데 연마재로는 모래, 유리구슬, 금속성구슬 및 호두 껍질, 왕겨 등 연한 물질 등이 사용되며, 금속이나 콘크리트 표면 오염물질의 외부층을 제거하는데 효과적이다. 건식 분사연마제염은 5MPa정도의 기압이 주로 사용되며 분사속도는 약 350m/sec가 적당하다[6]. 습식 분사연마제염은 500~1,000MPa의 수압이 필요하며 분사속도는 역시 350m/sec가 적당하다[7]. 진동연마제염은 진동하는 제염조내에 연마재를 넣고 제염제를 분사하는 방법으로 기계적 연마작용과 제염제의 화학작용이 조합되어 효과적인 제염효과를 얻을 수 있다.

### 2.3. 제염방법 선정

높은 제염계수를 얻기 위해서는 오염된 물질의 재료가 금속, 아스팔트, 콘크리트, 토양 또는 목재에 따라 표면의 형태가 거친 표면, 다공성 표면 또는 페인트나 플라스틱으로 코팅된 표면인지, 오염물의 조성이 방사화 또는 핵분열 생성물인지, 오염물의 화학 및 물리적 형태, 필요한 제염계수, 제염공정에 대한 입증된 효율과 침전물에 대한 방법 등 여러 인자들을 고려하여 오염기기에 적합한 제염방법을 선정하여야 한다. 위와 같은 인자들을 고려하여 최적의 비용으로 전반적인 영향과 종사자들의 위해 요소를 최소화 할 수 있는 최종 제염방법을 선택한다.

## 3. 제염설비

본 실험에서는 부식이 심하거나 표면에 깊이 침투된 장치를 고압의 공기로 물과 연마제를 분사시켜 물리적 제염을 수행하는 분사연마기를 사용하여 드림의 제염을 수행하였다. 한편 방사성폐기물처리시설에 설치되어 있는 제염장은 해체장 등 7개의 제염설비와 크레인으로 구성되어 있다.

### 3.1. 해체장 (Dismantling pit)

크레인에 의해 이송된 제염대상물을 해체하여 오염물질의 종류 및 장치의 크기에 따라 분류하여 선정된 제염설비에 수송하거나 이곳에서 제염이 가능한 대상물은 제염액을 공급받아 오염부위를 닦아내고 세척하여 재사용이 가능한 상태로 제염하고 각 제염설비에서 제염이 완료된 부분들을 모아 원상태로 조립한다. 해체지역은 2% 정도의 경사로 되어 있으며 가운데에 배수구로 있다.

### 3.2. Fume hood

$\beta$ - $\gamma$  핵종으로 오염된 비교적 경량 물체를 -15~-25mmWG의 일정한 감압상태를 유지하면서 hood 내부에서 숨이나 형겔에 제염액을 묻혀 오염부위를 닦아내는 물리적으로 제염을 수행한다.

### 3.3. Glove box

$\alpha$  핵종으로 오염된 장비를 밀폐된 glove box 내에서 숨이나 형겔에 탈염수와 시약을 묻혀 오염부위를 닦아내 제염을 수행하는 곳으로 이곳에는 환기장치와 3개의 glove box가 설치되어 있다.

### 3.4. 차폐침수조 (Shielded soaking tank)

$\beta$ - $\gamma$  핵종의 오염도가 높고 비교적 중량장비를 차폐침수조에 넣어 100m<sup>3</sup>/hr의 순환기에 의해 제염액을 순환시켜 오염장비를 제염한다. 열교환기, 배수펌프, 온도계 및 수위계가 구성되어 있다.

### 3.5. 화학침수조 (Soaking tank)

$\beta$ - $\gamma$  핵종의 오염도가 비교적 약한 장치 및 기기를 수조 내에 넣어 물과 질산 및 가성소다 용액을 채우고 폐회로로된 순환펌프에 의해 일정시간 보지시켜 화학반응을 통해 제염을 수행한다. 3개의 탱크가 있으며 가운데 탱크는 제염공정이 수행된 장비를 세척하며 sewer로 직접 배수한다.

### 3.6. 분사연마기 (Blasting cleaner)

본 실험에서 공드림을 제염하는데 사용된 설비이다. 부식이 심하거나 표면에 깊이 침투된 장치 및 기기는 침수조에서 화학적 방법등으로 제염이 곤란하므로 분사 연마기에서 고압의 공기 (약 4.5 bar)로 물과 연마제를 분사시켜 표면을 깎아내는 물리적 제염을 수행하는 설비로 제염처리실, 1차세척실, 가압세척실로 3개의 실로 구분되며 케이싱, 회전대, 분사노즐 등으로 구성되어 있다.

### 3.7. 초음파연마기 (Ultrasonic cleaner)

Piezoelectric 현상에 의해 발생하는 교류를 이용하여 초음파 (20~100kHz)를 일으켜 진동을 주고, 이때 발생된 고, 저압의 교류파가 고, 저압에서 기포를 깨뜨려 수많은 기포를 형성하고 이러한 파열로 적은 면적내에서 높은 힘을 일으킨다. 이러한 원리를 이용하여 비교적 부피가 적고 형상이 복잡하여 다른 제염설비의 사용이 비효율적인 오염 대상기기를 제염액과 함께 수조중에 넣어 진동을 주면서 제염시키는 장비로 발진기, 변환기 및 제염조 등으로 구성되어 있다.

#### 4. 공드럼 및 오염장비 제염

천연우라늄 분말을 담았던 공드럼을 방사성고체폐기물을 수집하기 위한 포장드럼으로 재활용하기 위하여 제염장에 설치되어 있는 그림 2의 모래분사연마기에서 제염액 순환배관 일부를 수정하여 제염을 수행하였다. 이때 발생하는 저준위 액체폐기물의 양을 줄이기 위하여 제염후 제염액을 직접 배수탱크에 보내지 않고 고체성분인 우라늄 분말, 녹, 찌꺼기들은 3개의 액체필터에 의해서 여과되도록 하였다. 공드럼의 제염에는 제염액이 액체필터를 통하므로 모래는 사용하지 않고 제염액으로 탈염수를 순환펌프에 의해 순환시키면서 분사노즐에서 4.5 bar의 압축공기를 폐달에 의해 필요시 공급하여 드럼의 내부에 제염액을 가압 분사시키면서 제염하였다. 연마기 내부의 환기 및 감압상태를 유지하기 위하여 배기팬을 가동하고 연마기 내부의 안개현상을 방지하고 작업장면을 관찰할 수 있도록 건조기를 가동하였다. 제염액은 일정시간 사용한 후 오염도를 측정하여 오염도가 높거나 또는 액체필터의 막힘으로 제염액 순환이 원활하지 않으면 배수밸브를 열어 배수탱크로 보낸다. 제염과정에서 발생한 액체폐기물은 드럼당 약 2.5ℓ 정도였다. 제염시간은 드럼 1개당 최대의 효과를 얻을 수 있는 10분 정도로 제한하였다. 제염전, 후 드럼의 표면오염도는 smear test로  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 측정하였다. 표 1은 제염전 및 제염후의 드럼표면오염도와 제염계수를 나타내고 있다. 제염후의 오염도는  $\alpha$  핵종의 경우 법적 허용한도인  $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  미만이었으며 제염계수는  $10^4 \sim 10^6$  사이로 제염효과는 양호하여 방사성폐기물 수집용기로 재활용하기에 충분하였다.

또한 조사후시험시설 등의 핫셀내에서 실험하고 발생된 고준위 방사성폐기물을 수집하고 운반하는 과정에서 오염된 수송용기를 EDTA 등의 제염제를 넣은 화학침수조에서 제염 작업을 수행하였다. 제염결과는 표 2에서와 같이 제염전 용기외면과 내면에서의 표면방사선량율은 평균 1mR/h, 10.7mR/h이었으나 제염후의 선량율은 각각 0.1mR/h, 0.9mR/h로 제염계수는 9~13 정도이었다. 한편 제염용액의 온도는 별도로 상승시키지 않았으나 일반적으로 제염 최적온도인 80℃에서 제염을 수행할 필요가 있다. 방사능 기체포집장치의 실험에서 사용하여 오염된 비교적 소형이며 오염정도가 미미한 column element를 별도의 제염제를 넣지 않은 초음파연마기에서 제염을 수행하였다. 주요 오염핵종은 Co-60, Cs-137로서 표 3에서와 같이 제염전 표면방사선량율은 최대 0.037mR/h이었으나 제염후의 선량율은 0.024mR/h로 제염계수는 1.3~1.5 정도이었다. 이처럼 제염계수가 낮은 이유로는 부품들의 오염정도가 미미하여 별도의 제염제를 사용하지 않은 결과이다.

#### 5. 결과 및 고찰

오염된 장치의 형태, 재질, 오염물질 및 상태 등에 따른 적합한 제염제의 선정을 위해서는 충분한 자료를 확보하여야 하며 또한 제염용액의 온도변화에 따른 제염효과 등 다양한 연구가 병행되어야 한다. 한편 방사성폐기물처리시설의 액체폐기물처리시스템 특성에 따라 처리 가능한 제염제를 선택하여야 하며 제염수행에 따른 액체폐기물의 발생을 최소화하여야 한다. 실제 오염된 공드럼 등의 제염작업에는 제염액으로 단순히 탈염수만으로도 제염이 충분히 가능하였으나 보다 제염효과를 높이기 위해서는 제염시약을 사용하여 드럼내부의 고착성 오염물질을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 제염효과를 향상시킬 수 있다고 사료되며 압축 또는 절단등의 처리되기 전까지 폐기물 저장고에 저장되었던 공드럼과 같은 방사성폐기물을 이와 같이 제염하여 재활용함으로써 저장고의 저장공간을 확보하고 폐기물 처리에 따른 처리, 처분비용과 수집용기의 관리비용을 절감할 수 있을 것이다. 한편으로 제염장에서 제염작업시 개인피폭 관리를 위해 작업장내의 공기 오염도, 표면오염도의 측정 및 감시, 공간 방사선량율의 측정, 방사성물질이 작업장 내에서 외부로의 누출 여부를 감시하여야 하며, 제염장 및 제염장치의 배기 계통에 철저를 기함으로써 인체의 방사선 장애 및 대기 오염의 최소화를 기하여야 할 것이다.

## 참고 문헌

1. SWAN, T., SEGAL, M., "Chemical Considerations in the Choice of Decontamination Reagents for Water Reactors", Proc. 3rd Int. Conf. Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, British Nuclear Energy Society, London (Oct. 1983).
2. ALLEN, R. P., et al., Electropolishing as a Decontamination Process: Progress and Applications, Battelle Pacific Northwest Laboratories, Richland, Rep. PNL-SA-6858 (1978).
3. PLATT, A. M., POWELL, J. A., Nuclear Waste Management Quarterly Progress Report (Oct.-Dec. 1979), Battelle Pacific Northwest Laboratories, Richland, Rep. PNL-3000-4 (1980).
4. GARDNER, H. R., et al., Evaluation of Non-chemical Decontamination Techniques for Use in Reactor Coolant Systems, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Rep. EPRI-NF-2690 (1982).
5. HALARIS, V. A., BORTZ, S. A., "High-Pressure Water Jet Application in Radioactivity Contaminated Facilities", Concrete Decontamination (Proc. Workshop Seattle, 1980), Battelle Pacific Northwest Laboratories, Richland (1980).
6. HALTER, J. M., SULLIVAN, R. G., Techniques for Removing Contaminated Concrete Surfaces, Battelle Pacific Northwest Laboratories, Richland, Rep. PNL-SA-8171 (1980).
7. MIS, F., VORT, R., Liquid Abrasive Decontamination is Versatile, Safe Effective, and Power (Oct. 1983).
8. KAERI/MR-311/97, "방사성 폐기물처리시설운영". (1997).

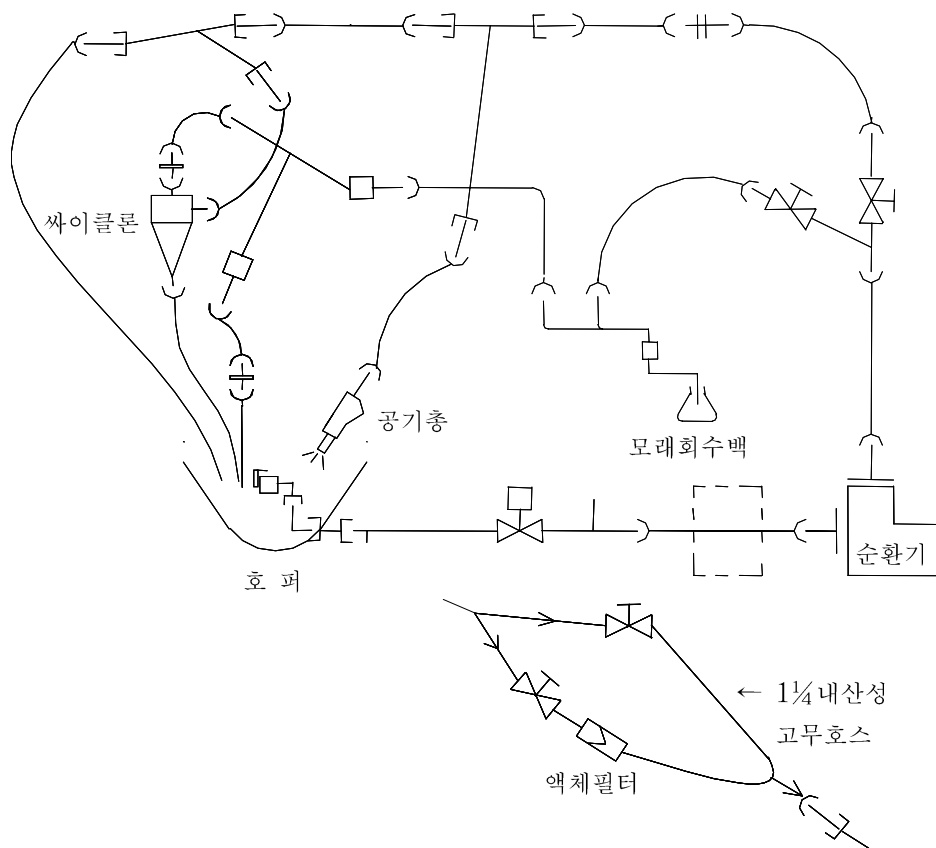


Fig. 2. Diagram of Sand Blasting Cleaner

Table 1. Decontamination Results of Spent Packaging Drums

Drum No.	$\alpha$ ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ )			$\beta$ ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ )		
	제 염 전	제 염 후	제염계수*	제 염 전	제 염 후	제염계수*
1	7.86E-1	9.50E-6	$8.3 \times 10^4$	2.70E-1	6.64E-6	4.1E4
2	2.23E-2	1.31E-6	1.7E4	6.43E-1	1.45E-5	4.4E4
3	1.35E-1	2.15E-7	6.3E5	1.07E-1	1.71E-6	6.3E4
4	2.96E-2	1.85E-7	1.6E5	2.32E-2	7.46E-7	3.1E4
5	3.53E-1	3.27E-7	1.1E6	4.63E-1	2.85E-6	1.6E5

Table 2. Decontamination Results of Padirac Cask

(단위 : mR/h)

측 정 위 치		제 염 전	제 염 후	제 염 계 수
외 면	No. 1	1.2	0.13	9.2
	No. 2	0.9	0.08	11.2
	No. 3	1.2	0.1	12
	No. 4	1.5	0.12	12.5
내 면	No. 5	10	1.0	10
	No. 6	12	0.9	13.3
	No. 7	10	0.8	12.5

Table 3. Decontamination Results of Column Element

(단위 : mR/h)

품 명	제 염 전	제 염 후	제 염 계 수
Plate I	0.028	0.019	1.5
Plate II	0.032	0.021	1.5
Perforated Plate	0.035	0.022	1.6
Steel Filter	0.037	0.024	1.5
Bolt, Nut	0.026	0.018	1.4
Packing Ring	0.024	0.018	1.3

\* 제염계수(D.F. : Decontamination Factor) =  $\frac{\text{제염전의 오염도}}{\text{제염후의 오염도}}$