Smart Decontamination Device for Small-size Radioactive Scrap Metal Waste : Using Abrasion pin in Rotating Magnetic Field and Ultrasonic Wave Cleaner

소형 금속방사성폐기물 제염장치 개발 : 자기장 연삭핀과 초음파 세정기의 응용

Yong-Ho Hong^{1*}, Su-Ri Park², Sang-Wook Han², and Byung-Jick Kim²

¹ACT Co., 75 Techno-1ro Yuseong-gu, Daejeon, Korea

²Soongsil University, 369 Sangdo-ro, Dongjak-gu, Seoul, Korea

홍용호^{1*}, 박수리², 한상욱², 김병직²

¹(주)액트, 대전광역시 유성구 테크노 1로 75

²승실대학교, 서울시 동작구 상도로 369

(Received January 9, 2014 / Revised February 7, 2014 / Approved March 17, 2014)

We have developed a smart decontamination device for small-size radioactive scrap metal (SSRSM) necessarily generated from nuclear facilities. This is a multi-modal device such as rotation of magnetic field focusing on the region containing the abrasion pins placed around target and ultrasonic cleaner. Additionally, in order to increase the decontamination efficiency we have modified some configuration of the device so that it could work on them evenly and totally. With the Optimal operating for operation of the new device, we tried to decontaminate some various metal selected as a sample during 15 minutes sequentially using each method, magnetic and ultrasonic device. As a result, the range of decontamination factor has been highly increased to 18~56. After decontamination, all samples were found its activity less than background level.

Keywords: SSRSM(Small-size Radioactive Scrap Metal), Combined decontamination device, Equipment development, Decontamination factor, Magnetic Abrasive

원자력이용시설에서 발생한 작은 크기의 금속 조각들을 효과적으로 제염하는 스마트 장치를 개발하였다. 이 장치는 자성연마재를 포함한 영역의 자속밀도를 연속적으로 변화시키는 방법과 초음파를 이용하는 다중 제염장치이다. 한편, 제염 효율을 높이기 위해 제염 장치가 제염 대상 전체에 작용하도록 장치들의 구성을 수정하였다. 개발된 장치들의 최적 작동조건을 도출하여 샘플로 선정한 소형의 금속방사성폐기물에 대하여 자기장과 초음파제염을 각각 15분간 실시하였다. 그 결과 제염계수의 범위는 18~56으로 크게 향상되었으며 제염 후 모든 샘플은 백그라운드(BKG)값 이하로 확인되었다.

중심 단어: 소형금속방사성폐기물, 융합제염장치, 장치개발, 제염계수, 자성연마재

*Corresponding Author.

Yong-Ho Hong, ACT Co., E-Mail: hyh@actbest.com, Tel: +82-42-331-3885

1. 서론

전세계의 원자력이용시설에서 발생하는 금속방사성폐기물의 양은 해마다 증가하고 있다. 대형 금속방사성폐기물의 경우 2060년까지 증기발생기 880기, 원자로헤드 440기가 교체되어 금속 방사성폐기물로 발생될 전망이다[2], 그 밖의 소형 금속방사성폐기물도 동일한 증가추세에 있다. 매우 높은 방사성폐기물의 처분 비용 때문에 제염이나 용융방식을 통한 재활용 등 금속방사성 폐기물을 최소화 하는 것이 필요하다. 이러한 사유로 인하여 금속방사성폐기물의 제염 및 재활용의 중요성이 점차 커지고 있다[1-7].

우리나라의 경우 원자력이용 시설에서 발생하는 금속방사성폐기물 중 대형 금속방사성폐기물은 현재 증기발생기 8기와 원자로헤드 1기가 교체되어 보관 중에 있으며, 2035년까지 증기발생기 52기가 교체예정에 있고, 그 밖의 소형 금속방사성폐기물 발생량도 지속적으로 증가하고 있다. 따라서 대형이든 소형이든, 금속방사성폐기물의 처분비용 절감을 위해 금속방사성폐기물의 제염을 통한 재활용과 규제해제 목적의 자체처분 중요성이 크게 부각되고 있다. 또한 금속류의 방사성폐기물의 오염형태는 방사화된 금속류, 핵분열생성물과 부식생성물에 의해 오염된 금속류 등에서 오염제거가 가능한 유리성 표면오염과 오염제거는 가능하지만 제염방법 적용이 어려운 미세한 틈새에 오염된 고착성 오염 등으로 분류할 수 있다.

본 연구에서는 방사능 오염제거가 가능한 유리성 및 고착성 오염물인 소형 금속방사성폐기물을 대상으로 오염제거 실험을 실시하였고, 방사화된 금속방사성폐기물의 경우 오염을 제거하기 위해 용융제염방법을 택해야 하므로 본 연구에서는 제외하였다. 따라서 본 연구는 소형 금속방사성 폐기물을 효과적으로 제염처리방식의 융합을 통해 제염계수를 향상시키고자 SSRSM(Small-size Radioactive Scrap Metal)의 스마트 제염 장치를 개발하기 위하여 진행되었다.

본 연구에서는 원자력이용시설의 운영 중에 발생한 오염된 소형 금속방사성폐기물을 대상으로 제염연구를 진행하였다. Fig. 1은 SSRSM의 처리과정 흐름도를 보여준다. 방사능 준위가 원자력 안전법에서 규정된 자체처분 허용치 보다 낮은 금속방사성폐기물은 재사용하거나 재활용할 수 있고, 그렇지 않은 금속방사성폐기물은 방사성폐기물 드럼으로 이동한다. 따라서 금속방사성 폐기물의 재활용 및 자체처분 양을 극대화 할 수 있는 효과적인 제염장치를 개발하는 것이 중요하다.

소형의 금속방사성폐기물들로부터 오염물의 제거가 확실히 된다면 재활용 등의 방법으로 이들을 자원화 할 수 있는 경제적인 이점이 있다. 이에 따라 금속방사성폐기물 제염 기술이 다양하게 연구개발 되고는 있지만 어느 하나의 단일 종류의 제염장치에서 오염된 방사성물질 100% 제거하기는 어려운 것으로 보인다. 예를 들면 단위 제염방법에 있어서 제염효율이 높은 화학제염 기술은 유기산 및 무기산 등 강산류를 사용하기 때문에 액상의 2차 폐기물이 다량으로 발생되고 이를 중화처리 하는데 많은 처리비용이 소요되고 있다.

이러한 여러 가지 문제점들을 해결하기 위한 방법으로 본 연구는 하나의 제염방식이 아닌 두 개의 장치를 융합한 제염장치를 활용하여 100%에 가까운 제염효율을 얻을 수 있도록 하고 제염공정으로 인한 2차 폐기물 발생량을 최대한 억제할 수 있는 융합 제염장치 개발을 통해 효과적으로 감용 가능한 제염공정을 도출하기 위한 실험을 실시하게 되었다.

Table 1은 오염제거방식 별 성능 및 단점을 나타내었다 [3]. Table 1에서 화학적 방식 및 전기분해방식은 오염제거 성능이 우수하지만 2차 폐기물이 발생되어 본 연구에의 적용을 배제하였고, 건조 및 초 임계 방식도 오염제거 효율이 좋다. 하지만 높은 장치비용으로 인해 적용을 배제하였다. 자기장방식 및 초음파방식 각각의 물리적 제염효율은 낮은 반면에 2차 폐기물이 거의 발생하지 않아 이 두 가지 방식을 융합한다면 높은 제염계수와 2차 폐기물 발생량 저감에 따른 경제적 시너지 효과의 가능성이 있다고 판단되었다.

이에 따라 자성연마재를 사용하는 자기장 제염과 초음파 제염방법을 융합하고 전 처리를 겸한 선행제염방식의 선정

Fig. 1. Treatment process of SSRSM.

Table 1. Performance and Weakness of Present Decontamination Methods

Classification	Methods	Performance	Weakness
Chemical	Chemicals	Excellent	2 nd contamination
Electrolysis	Electrolysis	Excellent	2 nd contamination
Dry	CO ₂ Pellet Plasma	Good	High Cost
Super critical	CO ₂	Good	High Cost
Magnetic	Abrasion pin	Good	Non-magnetic only
Ultrasonic	Cavitation, Wave Energy	Good	Short Effective distance

이 중요하므로 개선 전·후 자기장 및 초음파의 제염결과로부터 각 제염계수값을 토대로 운전조건 별로 효과적인 제염 순서를 선정 하고자 하였다[8-14].

2. 본 론

2.1 메커니즘

2.1.1 자기장 제염 메커니즘

파이프 내면의 자기연마법에서는 비자성 파이프 외부에 설치한 자극에 의해 파이프 내부에 불 균일 자장분포가 일어나 파이프 내부에 투입한 자성연마재와 자극 사이에 연마압력이 발생하며, 파이프를 고속으로 회전시키면 내면과 자성 연마재 사이에 상대운동이 발생되어 내면이 연마된다. 연마 압력은 자성연마재가 자극에 흡인되는 자력으로 자성연마 시 연마입자 하나가 받는 연마압력은 Fig. 2에 간략하게 나타 내었다. 연마입자 한 개가 받는 연마압력을 이론 식으로 설명 하면, 불 균일 자장분포에 있어서 자성연마재에 작용하는 자 력선 방향 성분 자력 F_x 와 등자위선 방향 성분 자력 F_y 의 합력 으로 이루어지는데 이 합력은 F 로 주어진다. 자력 F_x , F_y 는 식 (1)과 식(2)로 표시할 수 있다.

$$F_x = V \cdot \chi \cdot H (\partial H / \partial x) \quad (1)$$

$$F_y = V \cdot \chi \cdot H (\partial H / \partial y) \quad (2)$$

여기서,

V : 자성연마재의 체적(m^3)

Fig. 2. Two dimensional magnetic field distribution and magnetic force acting.

X : 자성연마재의 자화율(%)

x, y : 자력선 방향 및 등자위선 방향의 좌표

H : 자기장의 세기(W_b/m^2)

$(\partial H / \partial x), (\partial H / \partial y)$: 자력선 및 등자위선 방향의 자기장 세기의 변화율

그러므로 합력 F 는 식 (3)과 같다.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (3)$$

이 자력은 자성연마재의 체적 V 와 자화율 X 의 곱에 비례해

서 증가한다. 자화율 X 는 자성연마재의 재질과 그 제조과정에서 결정된다. 또 자성연마재의 작용압력은 자기장의 세기 H 와 그 변화율 $(\partial H/\partial x), (\partial H/\partial y)$ 의 곱에 영향을 받는다. 그러므로 자성연마재의 직경을 크게 함으로써 작용압력을 높일 수 있고, 또 입자의 직경이 일정하다면 작용압력을 크게 하기 위해서는 자장분포의 값을 높일 필요가 있다. 파이프 내면의 자장 분포 값을 높이기 위해서 자속누출을 최소화하여야 하며, 영구자석을 이용하여 자장 분포 값을 크게 하는 방법이 있다. 따라서 본 연구에서는 자성연마재가 제염대상물인 금속방사성폐기물과 물리적 운동을 통해서 오염부위를 효과적으로 제거할 수 있도록 (주)엑트에서 “자기장을 이용한 제염장치 개발 과제”를 통해 발표된 자성연마재(크기 2.2 mm(ϕ)×5.0 mm(L)) 및 운전조건을 참고하고 본 연구를 통해 기존 제염장치를 개선하여 금속방사성폐기물에 효과적인 자기장제염 운전조건을 도출하고자 한다.

2.1.2 개선된 자기장 제염장치

본 연구에서는 기존의 제염장치를 개선하여 금속방사성 폐기물에 대한 제염계수를 증가시킬 수 있는 효과적인 운전조건 등을 도출하기 위하여, (주)엑트에서 “자기장을 이용한 제염장치 개발 과제”를 통해 발표된 자성연마재(크기 2.2 mm(ϕ)×5.0 mm(L)) 및 운전조건을 참조하였다[11]. 주요 개선내용은 Fig. 3과 같이 자성의 N극과 S극을 원판에 번갈아 설치하여 회전시킴으로써 자석의 N, S극이 교류형태의 운동을 하도록 하여 자성연마재의 운동을 극대화하고, 또한 자석

Magnetic disk size : 600 mm(ϕ)×10 mm(T) Aluminum

Fig. 3. Magnetic disk.

원판 1개를 운영하였을 경우 Fig. 3과 같이 사각형의 제염조에서 제염조와 자석원판의 기하학적 구조로 인한 제염대상물 미 접촉 부분인 각의 가장자리에 자기장원판을 도달시키기 위해 Fig. 4의 개선 후 모형같이 2개의 원판을 설치하고 수평운동장치를 추가로 설치한 후 수평으로 왕복운동 함으로서, 사각의 제염조 내 제염대상물의 미 접촉 부분이 생기지 않도록 개선하여 제염계수를 높일 수 있도록 하였다.

2.1.3 초음파 제염의 메커니즘

초음파 세정은 일반적인 수용액 안에서 고주파 음파를 사용한다. 미세한 캐비테이션 기포는 금속, 플라스틱, 유리, 고무, 세라믹 내의 작은 틈새나 구멍 사이로 파고들어 그 기포가 깨지면서 발생된 압력으로 오염물을 제거한다. 이 개념은 제거해야 할 오염물질에 따라 물이나 특정용매를 사용하여 고체 표면 위에 달라붙어 있는 오염물질을 제거하는 것을 뜻한다. 여기서 오염물질은 먼지, 오일, 안료, 녹, 윤활유, 조류, 균류, 박테리아, 라임 스케일, 광택혼합물, 스타왁스,

Fig. 4. Enhanced magnetic abrasion device.

Fig. 5. Three cleaning stages done by cavitation bubbles.

지문, 혈액 등과 같은 생물학적 오물 등을 포함 할 수 있다 [13-14]. 초음파 세정은 제염대상물의 크기와 재료에 상관없이 세정 전 제염대상물의 원형을 그대로 보존한 상태에서 적용 가능한 장점은 있으나 제염계수가 낮다는 단점이 있다. Fig. 5는 캐비테이션 기포의 내측과열 발생 모습이다[13].

2.1.4 개선된 초음파 제염장치

Fig. 6 은 개선된 초음파 제염장치를 보여준다. 왼쪽은 종래의 장치 모습이고, 오른쪽은 개선된 장치의 모습이며 금속방사성폐기물의 표면에 초음파의 접촉면적을 높이기 위해, 초음파 발생기의 위치를 측면과 하부에 설치하여 수조 내 초음파 도달거리를 중첩되게 하였고, 와류로 인한 제염효과를 고려하여, 수조 내에 위치한 금속방사성폐기물을 상하운동이 가능한 리프트에 탑재할 수 있도록 설계하여 제염계수를 높일 수 있도록 하였다.

2.2 실험 재료 및 방법

2.2.1 금속방사성폐기물 조각

본 연구의 실험에 이용된 실험대상물은 국내 원자력이용 시설에서 시설운영 중에 발생한 금속방사성폐기물이고, 실험수행은 영광원자력 제 2 발전소 내에서 방사선안전 팀의 협조아래 이루어 졌으며, 금속방사성폐기물의 길이는 가장 긴 것이 1 m 미만이었다. 또한 동일한 조건의 시료수집이 어려워 제염계수 비교를 위해 본 연구에서는 주로 30 cm 미만의 시료를 대상으로 실험하였다. 본 실험은 금속방사성폐기물의 자체처분 조건의 만족여부를 확인하는 차원에서 수공

구, 기어, 알미늄 캡, 파이프, 판금 등의 다양한 종류를 포함시켰으며(Fig. 7 참조), 이러한 종류의 소형 금속방사성폐기물을 SSRSM(Small-size Radioactive Scrap Metal)이라 정의하고, 구체적으로 다음과 같이 정의하였다.

■ SSRSM(Small-Size Radioactive Scrap Metal) ;

길이 1 m, 면적 0.5 m², 체적 0.15 m³, 무게 50 kg이하인
소형 금속방사성폐기물

Fig. 7은 다양한 SSRSM의 종류를 보여준다.

2.2.2 실험 방법

Fig. 8은 본 연구에서 활용된 실험 장치이며, 본 실험장치는 기존장치를 개선한 자기장 제염장치(자장원판 2개, 수평운동장치), 제어부, 초음파제염장치(측면 및 하부 초음파 발생기, 상하운동 리프트) 와 보조 장치인 세정 및 열풍건조 장치로 구성되었다.

Fig. 7. SSRSM samples.

Fig. 6. Configuration of the conventional device and the enhanced device.

Fig. 8. Combined decontamination device.

자기장제염장치의 운전조건은 제염효율이 가장 높은 조건을 적용하여, 기동시간 15분, 자성연마재 크기 2.2 mm(φ)×5.0 mm(L), 회전수 1,500 rpm, 자기장의 세기 0.1 Tesla이고, 초음파제염장치의 운전조건은 기동시간 15분, 주파수 29 kHz, 전류 4 A, 수조온도 35°C 로 적용하고, 실험을 진행하였다[11].

본 연구에서 자기장이나, 초음파 제염대상 시편의 오염도 및 오염상태에 대한 표준화 정량화 등 동일한 조건의 시료로 실험과 비교결과를 도출하는 것이 바람직하나, 본 연구에서는 현재 원자력이용시설에서 발생된 소형금속방사성폐기

물을 대상으로 하였기 때문에 정량적인 오염제거계수 비교를 할 수 없었으며, 실험결과값의 신뢰성을 위해 최대한 비슷한 조건에서 발생된 크기와 형태의 시료를 수집하였고, 파이프류는 절단 하여 사용하였다.

2.2.3 분석 방법

금속방사성폐기물 제염 전, 후의 오염도는 현재 영광 제2 발전소에서 사용중인 Table 2의 측정기로 측정된 후 제염계수를 산출하였고, 본 연구에서는 유리성오염과 고착성오염 제거효과를 산출하기 위한 목적이므로 핵종분석기는 활

Table 2. Surface Decontamination Detector

Model name	Manufacture	Efficiency, %
Frisk-Tech	BICRON	24.2
SURVEYOR-2000	BICRON	28

$$\text{Decontamination Factor} = \frac{\text{Before decontamination radioactivity}}{\text{After decontamination radioactivity}}$$

$$\text{Decontamination rate} = \frac{\text{Before decontamination radioactivity} - \text{After decontamination radioactivity}}{\text{Before decontamination radioactivity}} \times 100 \%$$

Table 3. The Comparison of Decontamination Performance Between Conventional and Enhanced Magnetic Abrasion Device

Category	Sample name	Sample spec.	Decontamination level(cps)		
			Before decon.	After decon.	DF
Conventional	STS Pipe A-1	φ5×10 cm	450	160	2.8
	STS Pipe B-1	φ5×30 cm	780	290	2.7
	Pb Plate-1	10×10 cm	1,200	461	2.7
	Aluminum Cap-1	φ5 cm	487	194	2.5
	STS Scale ruler-1	30 cm	531	200	2.6
Enhanced	STS Pipe A-2	φ5×10 cm	450	44	10.2
	STS Pipe B-2	φ5×30 cm	770	60	12.8
	Pb Plate -2	10×10 cm	1,150	96	11.9
	Aluminum Cap-2	φ5 cm	490	40	12.4
	STS Scale ruler -2	30 cm	523	44	11.8

- ▶ Decontamination time : 15 min., Number of rotations : 1,500 rpm,
Magnetic Abrasive grain size : 2.2 mm(φ)×5.0 mm(L), Magnetic field strength: 0.1 Tesla
- ▶ Background : 24 cps, Measuring instrument : Frisk-Tech efficiency 24.2%

용하지 않았다. 또한 제염 후 측정결과에서 잔류 방사능이 백그라운드(BKG)이하라는 것은 자연방사능과 같은 수준이라는 의미이며, 본 연구에서 핵종분석을 배제하였기에 정량적인 잔류방사능 표현 없이 백그라운드라는 용어를 사용하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 자기장 제염장치의 오염제거 성능

Fig. 9. The comparison of decontamination performance between conventional and enhanced magnetic abrasion device.

Table 3에서 기존의 자기장 제염장치와 개선된 자기장 제염장치의 제염계수를 비교하였다. 기존 및 개선된 제염장치 모두 동일한 제염조건을 적용 하여 측정하였으며, 측정결과 기존장치의 제염계수는 2.8이며, 개선된 장치의 제염계수는 12.8이다. Fig. 9는 기존의 자기장 제염장치와 개선된 자기장 제염장치의 제염계수 그래프이다. 모든 그룹은 개선된 자기장 제염장치에서 약 4배 정도 높은 성능을 확인하였다.

3.2 초음파 제염장치의 오염제거 성능

Table 4에서 기존의 초음파 제염장치와 개선된 초음파 제염장치의 제염계수를 비교하였다.

기존 및 개선된 제염장치 모두 동일한 제염조건을 적용 하여 측정하였으며, 비교결과 기어 등 홈이 많은 시료의 제염계수가 저조한 반면에, 플레이트, 스패너 등 비교적 표면이 평탄한 시료에 대한 제염계수가 높게 측정되었다. Fig. 10은 기존의 초음파 제염장치와 개선된 초음파 제염 장치의 제염계수 그래프이다. 모든 그룹은 개선된 초음파 제염장치에서 3~5배 정도 높은 성능을 확인하였다

3.3 융합 제염장치의 성능

개선 전 자기장을 이용한 제염방법과 초음파를 이용한 각각의 제염방법으로 실험한 결과 제염계수 최대값은 자기

Table 4. The Comparison of Decontamination Performance Between Conventional and Enhanced Ultrasonic Cleaning Device

Category	Sample name	Sample spec.	Decontamination level(cps)		
			Before decon.	After decon.	DF
Conventional	Gear 1	10×15 cm	870	310	2.8
	Plate 1	30×20 cm	975	244	4
	STS Pipe D-1	φ3×30 cm	810	189	4.3
	Spanner 1	25 cm	640	85	7.5
Enhanced	Gear 2	10×15 cm	880	62	14.2
	Plate 2	30×30 cm	975	60	16
	STS Pipe D-2	φ3×25 cm	810	45	18
	Spanner 2	30 cm	710	41	17.3

▶ Decontamination time : 15 min., Frequency : 29 kHz, Current : 4 A, Water Temp.: 35℃,

▶ Background : 24 cps, Measuring instrument : Frisk-Tech efficiency 24.2%

장이 2.8, 초음파가 7.5 정도 측정되었다. 따라서 각각의 장치에 대한 제염계수의 한계를 상승시킬 목적으로 새롭게 고안한 자기장 제염장치(자장원판 2개, 수평운동 장치 추가), 초음파제염장치(측면 및 하부 초음파 발생기, 상하운동 리

Fig. 10. The comparison of decontamination performance between conventional and enhanced ultrasonic cleaning device.

프트 추가)를 기존의 제염에 활용되었던 비슷한 종류의 금속 방사성폐기물을 대상으로 각각 제염한 결과 개선 후 제염계수 최대값은 자기장이 12.8, 초음파가 18 정도 측정되었고, Fig. 9, 10과 같이 개선전의 자기장, 초음파 각각의 제염계수보다 개선 후 약 4~5배 정도 향상된 제염결과를 얻을 수 있었지만, 각 제염장치를 개선한 결과값 역시 만족할 만한 수준은 아니었다. 가장 큰 이유는 자기장을 이용한 제염장치의 경우 자기력을 통한 자성연마재의 자전과 공전을 이용하여 제염대상 금속방사성폐기물을 제염처리 하는데 오염된 표면과 미세한 틈이나 볼트의 홈에 붙어있는 고착성 오염도에 대한 제염효과는 좋으나, 자성을 띄는 제염대상물에 대한 제염은 불가능하였고, 초음파 제염의 경우 비교적 제거가 용이한 유리성 표면오염에 대한 제염효과는 좋으나, 금속표면에 강하게 고착이 되었을 경우 그 오염을 완전히 제거하기 힘든 근원적인 단점을 보였다.

따라서 이러한 근원적인 단점을 극복하기 위하여 제염방식의 융합을 시도하였고, 자기장의 장점과 초음파의 장점을 최대한 활용하여, 고착화된 오염입자들을 Fig. 11과 같이 자기장 제염장치의 자성연마재 운동에 의해 들뜨게 하여 금속 방사성폐기물 표면에 대한 불림 및 전 처리효과를 상승시킨 후, 곧바로 초음파제염을 실시한 결과 Table 5, Fig. 12와 같

Table 5. Surface Decontamination Result

No.	Sample name	Sample spec.	Decontamination level (cps)			DF
			Before decon.	Magnetic	Ultrasonic	
1	STS Pipe B-1	φ5×10 cm	450	44	BKG	18.7
2	STS Pipe B-2	φ5×10 cm	432	38	BKG	18
3	STS Pipe C-1	φ5×30 cm	780	34	BKG	32.5
4	STS Pipe D-1	φ5×10 cm	532	30	BKG	22.2
5	STS Pipe E-1	φ3×30 cm	810	48	BKG	33.8
6	Aluminum Cap-2	φ5 cm	487	28	BKG	20.3
7	STS Scale ruler-1	30 cm	531	40	BKG	22.1
8	STS Pipe B-3	φ5×10 cm	1,210	28	BKG	50.4
9	STS Pipe B-4	φ5×10 cm	1,302	30	BKG	54.3
10	STS Pipe E-2	φ3×30 cm	1,352	38	BKG	56.3

- ▶ Decontamination time : 15 min., Number of rotations : 1,500 rpm,
Magnetic Abrasive grain size: 2.2 mm(φ)×5.0 mm(L), Magnetic field strength: 0.1 Tesla
Frequency : 29 kHz, Current : 4 A, Water Temp.: 35℃
- ▶ Background : 24 cps, Measuring instrument : Frisk-Tech efficiency 24.2%

이 백그라운드값(BKG) 이하의 제염결과를 얻을 수 있었고, 융합제염 결과 제염계수는 약 18~56까지 상승하였다.

그러므로 제염순서는 자기장제염을 선행하고, 초음파장 치로 제염하는 것이 높은 제염계수를 얻을 수 있다고 판단되었다. 또한 오염확산을 방지하는 목적으로 초음파제염 후 제염대상물에 묻은 물기로 인한 전이가능성을 배제하기 위해 높은 압력의 에어와 살수로 3차 제염을 하고 최종 마무리로 열풍으로 건조하는 방법을 선택하였다.

Fig. 11. Decontamination Performance Magnetic Abrasion Device.

Fig. 12. Change of decontamination factor with in magnetic abrasion device and ultrasonic combined apparatus.

Table 5는 실험대상 금속방사성폐기물의 제염 전, 후 결과값을 나타내었으며, 이 표를 참조하면 제염 후 금속방사성 폐기물의 오염도는 95% 이상이 제거 되었음을 확인할 수 있었다. 또한 고압 세척 시 발생하는 제염폐액이나 초음파세정 액, 자성연마재 등에 처리가 어려운 첨가 물질이 없으므로 Fig. 13과 같은 필터로 재순환시켜 계속 사용함으로써 제염 후 예상되는 2차 폐기물량을 최소화 하고, 2차폐기물 처리에 소요되는 비용을 절감하여 경제성을 높일 수 있도록 실험설 비 구성을 마무리 하였다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 · 외에서 다양하게 활용되는 금속 방사성폐기물 제염기술 중에서 자기장 제염 및 초음파제염 기술의 요소기술을 융합하고 개선하여 좀더 높은 제염계수와 제염과정에서 발생하는 2차 폐기물 발생량을 최소화할 수 있는 경제성이 높은 제염장치를 개발하게 되었으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 본 자기장, 초음파 융합장치는 기존의 장치보다 경제성이 높은 제염계수(융합 전 2.8~7.5, 융합 후 18~56)를 얻었다. 또한 제염공정에서 발생된 자성연마재와 초음파세정 액, 고압살수제염 폐액등의 2차 폐기물을 재활용이 가능하도록 필터를 장착하여 경제성을 향상시켰다.
- (2) 본 자기장, 초음파 융합 제염장치는 오염종류에 따라 자기장제염, 초음파제염 및 융합제염의 3 가지 선택제염으로 제염성능을 향상시킬 수 있다고 판단됨.
- (3) 효과적인 제염을 위해서는 제염대상에 따라 자성연마재의 크기, 회전수 및 작동 시간, 주파수와 전류의 선정(제염시간 : 15분, 주파수 : 29 kHz, 전류 : 4 A, 물 온도 : 35℃, 회전수 : 1,500 rpm, 자성연마재 크기 : 2.2

Fig. 13. Secondary waste treatment tool.

mm(ϕ) $\times$ 5.0 mm(L), 자기장의 세기: 0.1 Tesla)이 중요하고, 또한 제염순서(1차 자기장제염, 2차 초음파제염)가 중요하다고 판단된다.

REFERENCES

- [1] International Atomic Energy Agency, Methods for the minimization of radioactive waste from decontamination and decommissioning of nuclear facilities, Technical reports series, No.401 (2001).
- [2] MOST, Strategy Establishment in Preparedness of Upcoming Nuclear Facility D&D Technology Needs, 2012.4,
- [3] OECD/NEA, "Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities", 1999
- [4] T.P Valsala, S.C. Ror, J.G. Shah, J. Gabriel, Kanwar Raj, and V.Venugopal, "Removal of radioactive caesium from low level radioactive waste (LLW) streams using cobalt ferrocyanide impregnated organic anion exchanger", Journal of Hazardous Materials, 166, pp.1148-1153 (2009).
- [5] L.A.Nieves, S.Y. Chen, E.J. Kohout, B. Nabelssi, R.W. Tilbrook, and S.E. Wilson, "Analysis of Disposition Alternatives for Radioactively contaminated Scrap Metal, Journal of the Franklin Institute, 335, pp. 1089-1103 (1998).
- [6] Paulo Ernesto de O. Lainetti¹, Development of a new process for radioactive decontamination of painted carbon steel structures by molten salt stripping, INAC 2009: International nuclear atlantic conference, p.12 (2009).
- [7] Separation of Rare Metal Fission Products in Radioactive Wastes in New Directions of their Utilization, Progress in nuclear Energy, 47(1-4), pp.462-471 (2005).
- [8] Radioactive Scrap Metal Decontamination Technology Assessment Report, Sandia Report (1996).
- [9] Ministry of Science and Technology, Cleaning Technology Development using a New Solvent for Green Nuclear Energy (2003).
- [10] KEPSCO/Institute of Nuclear Environment, Surface decontamination technology development for Radioactive waste volume reduction (2001).
- [11] ACT CO. Ltd, "Decontamination device development of the final report for using Magnetic field" (2009).
- [12] Decontamination of radioisotopes, Reports of Practical Oncology and Radiotherapy 16(4), pp. 147-152 (2011).
- [13] Physical Principles of Ultrasonic Technology, Vol. 1. Edited by L. D. Rozenberg, Translated from Russian by J. S. Wood, Plenum Press, New York (1973).
- [14] H.J. Won, G.N. Kim, C.H. Jung, J.H. Park, and W.Z. Oh, "PFC Ultrasonic Decontamination Efficiency on the Various Types of Metal Specimens", J. of the Korean Radioact. Waste Soc., 3(4), pp. 293-300 (2005).