



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년 2월
석사학위 논문

초음파/초임계 설비를 이용한
한빛1발전소 증기발생기
취출수계통의 폐수지 감용 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 대 성

초음파/초임계 설비를 이용한
한빛1발전소 증기발생기
취출수계통의 폐수지 감용 연구

A study on the waste resin reduction of the Hanbit NPP 1
steam generator blow-down system using
ultrasonic/supercritical plant

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 대 성

초음파/초임계 설비를 이용한
한빛1발전소 증기발생기
취출수계통의 폐수지 감용 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 대 성

김대성의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위원 조선대학교 교수 김진원 (인)

위원 조선대학교 교수 송종순 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	iii
그림 목차	iv
ABSTRACT	v
제 1 장 서 론	1
제 1 절 증기발생기 취출수계통 폐수지 감용 연구개발 배경	1
제 2 절 연구개발 추진 현황	1
제 2 장 폐수지 오염특성 및 발생현황 분석	2
제 1 절 고형폐기물 자체처분 인·허가 사항 조사	2
1. 원자력안전위원회 고시	2
2. 국제원자력기구(IAEA) 규제 해제기준	5
3. 한국원자력안전기술원(KINS) 규제기준 및 규제지침	6
제 2 절 방사성핵종 분리·추출기술 현황	8
1. 이온교환수지 재생기술	8
2. 화학약품을 이용한 혼상폐수지내 ¹⁴ C 제거기술	8
3. 용융염 산화기술을 이용한 양이온수지 분해기술	9
제 3 절 정화수지 탈수 및 이송방안 검토 및 기본설계	9
제 4 절 수지 건조 예비실험	11
제 3 장 제염시스템 제작 및 성능시험	12
제 1 절 초음파 제염시스템 제어공정 설계	12
제 2 절 초임계 제어시스템 제어공정 설계	14
제 3 절 초음파 제염시스템 구성	17
제 4 절 초임계 제염시스템 구성	20
제 4 장 제염장치를 이용한 성능실험	27
제 1 절 초음파 제염장치를 이용한 제염실험	27

제 2 절 초임계 장치를 이용한 제염실험	33
제 3 절 복합공정을 이용한 제염 효과	35
1. 복합공정	35
2. 초임계 CO ₂ 공정	35
3. 공정별 제염 효과	35
제 4 절 발전소 현장 성능시험	36
1. 현장 성능시험 개요	36
2. 현장 성능시험 결과	37
제 5 장 결론	46
참고문헌	48
감사의 글	49
저작권 이용 허락서	50

표 목 차

표 1. 방사성핵종별 자체처분 허용농도	2
표 2. 저준위방사성폐기물의 방사능 농도 제한치	5
표 3. 방사성폐기물 규제해제 기준농도 (단위: Bq/g)	5
표 4. 경수로형 원전 규제기준 및 규제지침의 규제기준 12.5.3	6
표 5. 경수로형 원전 규제기준 및 규제지침의 규제지침 12.8	6
표 6. 감압가열조건 전·후 수지 부피변화	12
표 7. 초음파 이용 제염시스템 제어관련 부품	12
표 8. 초임계 이용 제염시스템 구성품 및 주요기능	14
표 9. 초음파 이용 제염시스템 구성장치 및 사양	19
표 10. 초임계 이용 제염시스템 구성장치 및 사양	21
표 11. 초임계 제염시스템의 주요품목 형태 및 사양	25
표 12. 초음파 조사 시간별 감마핵종 분석결과	28
표 13. 초음파 처리장치를 이용한 주요 핵종별 제염결과	28
표 14. 방사성폐수지 오염형태	30
표 15. 인산암모늄을 이용한 ¹⁴ C 제염 실험결과	30
표 16. 초음파와 인산암모늄을 이용한 ¹⁴ C 제염결과	31
표 17. 초음파 처리 후 발생된 폐수지의 핵종분석 결과	32
표 18. 응집제를 이용한 모의 폐용수 중 방사성핵종 제거결과	32
표 19. 초임계 장치의 비방사성 Co 제염 효율	34
표 20. Lab 장치를 이용한 폐수지의 제염 실험 결과	34
표 21. 초음파 제염장치 보완사항 및 해결방안	37
표 22. 신폴 필터 차압 실험 결과	38
표 23. 초음파 제염장치 현장실험 결과	39
표 24. 초음파 제염장치 2차 현장실험 결과	40
표 25. 초임계 제염장치 2차 현장실험 결과	41
표 26. 초음파 제염장치 2차 폐기물 발생량(필터류)	44
표 27. 초음파 제염장치 2차 폐기물 발생량(이물질)	44
표 28. 초음파 제염장치 2차 폐기물 발생량(합계)	44
표 29. 초임계 제염장치 리간드 소요량	45

그 립 목 차

그림 1. 튜브연동식 펌프의 구동 메카니즘	10
그림 2. 튜브연동식 펌프를 이용한 폐수지 이송 실험	10
그림 3. 스크류형 연속식 제염수지 건조장치	11
그림 4. 이온교환수지 건조전·후 입자크기 변화	11
그림 5. 초임계 제염시스템 구성 및 이산화탄소 순환도	15
그림 6. 초임계 추출용기 자동개폐방식 구성도	16
그림 7. Push-Pull형 초음파 발생기와 진동자	17
그림 8. 초음파 제염시스템 Lay-out 도면	18
그림 9. 초임계 제염시스템 P&ID	20
그림 10. 초임계 제염시스템 Lay-out 도면	24
그림 11. 초음파 제염처리장치 공정도	27
그림 12. 초음파 처리전·후 폐수지 모습	29
그림 13. 초음파 처리전·후 폐수지 현미경 확대모습	29
그림 14. 초음파와 인산암모늄 적용시 ¹⁴ C 변화 추이	31
그림 15. 초임계 처리장치 공정도	33
그림 16. 폐수지 제염장치 공정 및 배관 수정도	42
그림 17. 폐수지 배출 및 용수회수 바스켓	43
그림 18. 초음파/초임계 CO ₂ 기술을 이용한 폐수지 제염장치	46

ABSTRACT

A study on the waste resin reduction of the Hanbit NPP 1
steam generator blow-down system using
ultrasonic/supercritical plant

Kim, Dae Sung

Adviser : Prof. Song, Jong Soon, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Nuclear power plants generate approximately 10,000 liters (Hanbit 1&2) waste resin that can be extracted from blow-down of the steam generator. Some do not dispose of in a waste resin containing a small amount of radionuclides and store them temporarily. The techniques that separated radionuclides in a physicochemical method contaminated waste in order to reduce the waste volume has been developed to extract. Therefore, nuclear power plants develop and produce the device decontamination system (ultrasonic/supercritical plants) to be able to treat waste resin occurring in the nuclear power plants below its disposal. It is reviewed technical principles, operation convenience, safety and performance test of decontamination devices through commissioning test, applying the hanbit 1 power plant steam generator blow-down system and saw the possibility, reviewing the operation decontamination equipment, ultrasonic and supercritical unit.

제 1 장 서 론

증기발생기 탈염탑에서 교체된 폐수지에서 소량의 방사성 핵종이 검출되어 방사성폐기물드럼 처리는 물론, 자체처분을 시행하지도 못하는 상태로 장기 보관 중이다. 향후 전자동 폐수지 제염설비 실용화를 위한 시스템을 구축함으로써 방사성폐기물 발생량에 대한 전사적 감용화 정책에 탄력적으로 대응하고자 하며, 전 원전의 공통 현안사항을 해결함으로써 방사성폐기물의 제염 및 감용에 따른 소내 저장공간의 이용률 제고와 장기보관에 따른 부담감 해소 및 방사성 폐기물 처분비용을 절감하고자 본 연구를 시작하게 되었다.

제 1 절 증기발생기 취출수계통 폐수지 감용 연구개발 배경

원자력발전소 증기발생기 취출수계통에서 발생하는 폐수지 일부에서 미량의 방사성핵종을 함유한 폐수지가 발생되어 처분하지 못하고 임시보관 하고 있다. 폐수지에 미량에 오염된 방사성 물질을 추출·제거하기 위한 신개념 초음파/초임계 제염장치를 개발하였다. 본 장치는 소형화 및 자동화 개념을 도입하여 장치운영의 편리성과 효율적 운영을 위한 발전소의 공간적 한계를 극복하는데 초점을 맞추어 개발 하였으며, 제염장치는 원자력발전소 계통에 적용하여 사용하는데 충분한 성능실험과 설계변경이 불가피한 사항이다. 본 논문에서는 원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물 폐수지를 자체처분 이하로 처리할 수 있도록 하는 장치인 초음파/초임계 설비를 개발 및 제작하여 시운전을 통한 제염장치의 기술적 원리, 운전편의성, 안전성, 성능시험을 검토하고 증기발생기 취출수계통에 적용하여 방사성폐기물 발생을 저감 하고자 한다.

제 2 절 연구개발 추진현황

국내 각 원전에서 발생하는 폐수지의 특성 및 발생현황, 제염 전·후의 방사능 평가 기법 및 자체처분 인·허가 사항 등의 조사·분석을 통한 효율적인 제염을 위한 요소기

술 파악하여 단위 공정기술 실증 및 성능 평가를 보관중인 폐수지를 대상으로 수행하여 제염공정을 최적화 하였다. 최적화된 제염조건을 전제로 연속제염 Pilot 시스템을 설계·제작하여 시간당 약 30ℓ를 처리할 수 있는 연속제염 및 2차 폐기물 처리 Pilot 시스템의 설계·제작 하였다. 그리고 Pilot 시스템의 실증시험을 통하여 제염기술의 완성도를 검증하고 제염시스템의 표준절차를 확립하여 폐수지와 폐액의 제염 전·후 방사능 Inventory 및 핵종별 오염 정도에 대한 평가를 수행 하였다.

제 2 장 폐수지 오염특성 및 발생현황 분석

제 1 절 고행폐기물 자체처분 인·허가 사항 조사

1. 원자력안전위원회 고시

자체처분과 관련된 국내 법적근거는 원자력안전법 시행령 제2조제1호 및 제107조 제1항부터 제4항, 원자력안전법 시행규칙 제94조 및 제95조 제2항, 방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙에 따른 원자력안전위원회 고시 제2014-3호(방사성폐기물의 자체처분에 관한 규정) 에 방사성폐기물의 처분제한치와 처분제한치 미만 방사성폐기물의 자체처분절차·방법·기타 필요한 사항에 관하여 규정하고 있다.으며, 제3조 별표 1의 허용기준과 핵종별 농도는 표 2.1과 같다.

표 1. 방사성핵종별 자체처분 허용농도(제2조 제2호 및 제3조 제1항 관련)

방사성핵종	허용농도 (Bq/g)
I-129	0.01
Na-22, Sc-46, Mn-54, Co-56, Co-60, Zn-65, Nb-94, Ru-106, Ag-110m, Sb-125, Cs-134, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Ta-182, Bi-207, Th-229, U-232, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Pu-244, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-245, Cm-246, Cm-247, Cm-248, Cf-249, Cf-251, Es-254	0.1
C-14, Na-24, Cl-36, Sc-48, V-48, Mn-52, Fe-59, Co-57, Co-58, Se-75, Br-82, Sr-85, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Tc-96, Tc-99, Ru-103, Ag-105, Cd-109, Sn-113,	1

Sb-124, Te-123m, Te-132, Cs-136, Ba-140, La-140, Ce-139, Eu-155, Tb-160, Hf-181, Os-185, Ir-190, Ir-192, Tl-204, Bi-206, U-233, Np-237, Pu-236, Cm-243, Cm-244, Cf-248, Cf-250, Cf-252, Cf-254	
Be-7, F-18, Cl-38, K-43, Ca-47, Mn-51, Mn-52m, Mn-56, Fe-52, Co-55, Co-62m, Ni-65, Zn-69m, Ga-72, As-74, As-76, Sr-91, Sr-92, Zr-93, Zr-97, Nb-93m, Nb-97, Nb-98, Mo-90, Mo-93, Mo-99, Mo-101, Tc-97, Ru-97, Ru-105, Cd-115, In-111, In-114m, Sn-125, Sb-122, Te-127m, Te-129m, Te-131m, Te-133, Te-133m, Te-134, I-126, I-130, I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, Cs-129, Cs-132, Cs-138, Ba-131, Ce-143, Ce-144, Gd-153, W-181, W-187, Pt-191, Au-198, Hg-203, Tl-200, Tl-202, Pb-203, Po-203, Po-205, Po-207, Ra-225, Pa-230, Pa-233, U-230b, U-236, Np-240, u-241, Cm-242, Es-254m	10
H-3, S-35, K-42, Ca-45, Sc-47, Cr-51, Mn-53, Co-61, Ni-59, Ni-63, Cu-64, Rb-86, Sr-85m, Sr-87m, Y-91, Y-91m, Y-92, Y-93, Tc-97m, Tc-99m, Rh-105, Pd-109, Ag-111, Cd-115m, In-113m, In-115m, Te-129, Te-131, I-123, I-125, Cs-135, Ce-141, Pr-142, Nd-147, Nd-149, Sm-153, Eu-152m, Gd-159, Dy-166, Ho-166, Er-171, Tm-170, Yb-175, Lu-177, Re-188, Os-191, Os-193, Ir-194, Pt-197m, Au-199, Hg-197, Hg-197m, Tl-201, Ra-227, U-231, U-237, U-239, U-240, Np-239, Pu-234, Pu-235, Pu-237, Bk-249, Cf-253, Es-253, Fm-255	100
Si-31, P-32, P-33, Fe-55, Co-60m, Zn-69, As-73, As-77, Sr-89, Y-90, Tc-96m, Pd-103, Te-125m, Te-127, Cs-131, Cs-134m, Pr-143, Pm-147, Pm-149, Sm-151, Dy-165, Er-169, Tm-171, W-185, Re-186, Os-191m, Pt-193m, Pt-197, At-211, Th-226, Pu-243, Am-242, Cf-246	1,000
Co-58m, Ge-71, Rh-103m, Fm-254	10,000

주1) 다수의 방사성핵종이 혼합되어 있는 경우에는 다음과 같이 한다.

$$\sum_i \frac{C_i}{C_{L,i}} < 1$$

C_i : 방사성핵종 i 의 방사능농도(Bq/g)

$C_{L,i}$: 별표1에 주어진 방사성핵종 i 의 자체처분 허용농도(Bq/g)

주2) 별표1에 수록되지 않은 알파선을 방출하지 아니하는 방사성핵종의 경우 자체처분 허용농도로서 0.1 Bq/g을 적용할 수 있다.

주3) 다음 목록에 제시된 모핵종과 그 모핵종의 붕괴로 생성되는 자핵종이 함께 존재하는 경우, 모핵종에 대해서만 허용농도를 적용한다.

모핵종	자핵종
Fe-52	Mn-52m
Zn-69m	Zn-69
Sr-90	Y-90
Sr-91	Y-91m
Zr-95	Nb-95
Zr-97	Nb-97m, Nb-97
Nb-97	Nb-97m
Mo-99	Tc-99m
Mo-101	Tc-101
Ru-103	Rh-103m
Ru-105	Rh-105m
Ru-106	Rh-106
Pd-103	Rh-103m
Pd-109	Ag-109m
Ag-110m	Ag-110
Cd-109	Ag-109m
Cd-115	In-115m
Cd-115m	In-115m
In-114m	In-114
Sn-113	In-113m
Sb-125	Te-125m
Te-127m	Te-127
Te-129m	Te-129
Te-131m	Te-131
Te132	I-132
Cs-137	Ba-137m
Ce-144	Pr-144, Pr-144m
U-232	Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208
U-240	Np-240m, Np-240
Np237	Pa-233
Pu-244	U-240, Np-240m, Np-240
Am-242m	Np-238
Am-243	Np-239
Cm-247	Pu-243
Es-254	Bk-250
Es-254m	Fm-254

표 2. 저준위방사성폐기물의 방사능 농도 제한치(제3조제2항제1호 및 제2호 관련)

방사성 핵종	방사능 농도 (Bq/g)
H-3	1.11E+6
C-14	2.22E+5
Co-60	3.70E+7
Ni-59	7.40E+4
Ni-63	1.11E+7
Sr-90	7.40E+4
Nb-94	1.11E+2
Tc-99	1.11E+3
I-129	3.70E+1
Cs-137	1.11E+6
전알파	3.70E+3

2. 국제원자력기구(IAEA) 규제 해제기준

국제적으로는 IAEA 에서 방사성폐기물의 규제해제에 해당하는 농도를 IAEA Safety Standard Series No. RS-G-1.7(Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance) 보고서의 주요 핵종 기준농도를 표 3 에 정리 하였다.

표 3. 방사성폐기물 규제해제 기준농도 (단위: Bq/g)

핵종	^{14}C	^3H	^{60}Co	^{137}Cs	^{54}Mn
기준농도	1	100	0.1	0.1	0.1

3. 한국원자력안전기술원(KINS) 규제기준 및 규제지침

경수로형 원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물의 자체처분은 한국원자력안전기술원(KINS)의 경수로형 원전 규제기준 및 규제지침(KINS/RS- N12.00)의 규제기준 12.5.3 (고체방사성폐기물계통의 성능기준)에 표 4와 같이 명시하였다.

표 4. 경수로형 원전 규제기준 및 규제지침의 규제기준 12.5.3

규제기준	규제기준 내용
규제기준 12.5.3 제7항 마. 항	원자력안전위원회 고시 제2014-3호(폐기물.16)방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한규정이 적용되는 처분제한치 미만의 방사성폐기물을 자체처분하고자 하는 경우, 다른 방사성폐기물과 혼입되지 않도록 저장해야 하며, 자체처분 세부수행절차 및 평가 방법은 지침에서 제시한다.

규제기준 12.5.3의 제7항 마항에 명시한 바와 같이 처분 제한치 미만의 방사성폐기물을 자체처분 하는 경우에 적용할 수 있는 세부 수행절차와 평가방법을 경수로형 원전 규제기준 및 규제지침(KINS/RS-N12.00)의 규제지침 12.8(방사성폐기물 자체처분 안전성 평가)에 제시하였으며, 주요 내용을 표 5 에 정리하였다.

표 5. 경수로형 원전 규제기준 및 규제지침의 규제지침 12.8

규제지침	규제지침 주요내용
총론	자체처분 대상 폐기물의 핵종별 방사능농도는 원자력안전위원회 고시 제2014-3호(폐기물.16)방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한규정) 별표 1에 제시된 핵종별 처분제한치 농도 미만이어야 한다. 그 외 핵종에 대하여는 IAEA Safety Guide RS-G-1.7(Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance)에 제시된 핵종별 처분제한치 농도 미만이어야 한다. 다만, Safety Guide에 제시된 핵종별 방사능 농도를 초과하더라도 연간 개인선량이 10 μ Sv 이하, 집단선량이 1 man-Sv 이하임이 입증되면 자체처분이 허용될 수 있다.

<p>제출서류</p>	<p>사업자는 원자력법시행규칙의 별지 제84호 서식에 따라 자체처분계획서를 작성해야 한다.</p>
<p>대표시료 채취</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 표면오염폐기물 대상 폐기물의 표면상태가 직접측정법이나 간접측정법을 이용하여 방사능을 측정하기에 적절하지 않은 경우에 사업자는 대상 폐기물 모집단으로부터 일정량을 대표시료로 채취하여 방사능분석을 할 수 있다. 사업자는 모집단 폐기물 약 200 kg 마다 또는 매 1 m² 면적당 폐기물 표면오염을 대표할 수 있는 약 1 kg의 대표시료를 채취해야 한다. 대상 폐기물 전체 체적에서 균일하게 시료를 채취할 수 있도록 사업자는 사전에 시료채취계획을 적절하게 수립해야 한다.
<p>방사능측정의 적절성</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 감마방사능측정 감마핵종분석 최소검출방사능농도(MDC)는 자체처분 제한농도의 10 % 이하를 유지하여야 한다. ○ 알파 및 베타방사능 측정 최소검출방사능(MDA)은 원자력안전위원회 고시 또는 IAEA RS-G-1.7에 제시된 핵종별 농도의 1/10에 해당하는 방사능을 확인할 수 있도록 유지되어야 한다. ○ 기타 방사능 측정 대상 폐기물의 발생 공정상 ³H 및 ¹⁴C 핵종이 함유되어 있을 가능성이 있는 경우에는 해당 핵종에 대한 방사능측정이 수행되어야 한다. 이때 방사능측정시 ³H 및 ¹⁴C 핵종에 대한 각각의 에너지 구간이 적절히 구분되어 계수되었음이 입증되어야 한다. 그리고 ³H 및 ¹⁴C의 방사능측정시에는 시료의 색상에 따른 colour quenching이 고려되어야 한다.
<p>자체처분에 따른 선량평가</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 매립에 따른 선량평가 자체처분 대상 폐기물의 매립에 따른 방사선영향 평가에는 기 검증된 방법론 또는 전산프로그램이 적용되어야 한다. 매립에 따른 선량평가지 매립으로 발생할 수 있는 단일 시나리오에 의한 영향이 총 선량평가결과의 10 %를 초과할 우려가 있는 경우에는 고려되어야 한다.

제 2 절 방사성핵종 분리·추출기술 현황

1. 이온교환수지 재생기술

아직까지는 국·내외에 증기발생기 취출수 탈염탑에서 발생한 방사성폐수지의 자체처분을 위한 제염방법으로 적용되고 있는 기술이 개발된 바는 없다. 연구차원에서 전기투석법과 약산에 의한 산화방법을 이용한 제염법 및 초임계수 산화방법을 이용한 제염기술의 개발 등에 대한 연구가 보고는 되었지만 상용화에 이르지 못하는 못하였다. 일반산업의 순수제조설비에 사용된 혼합수지는 상당기간 재생하여 사용하고 있는데 주로 사용하는 재생법으로는, 비중에 의한 침강속도차를 이용하여 양이온교환수지와 음이온수지로 분리한 후, 양이온교환수지에는 5~10% 염산용액이나 0.5~5% 황산용액을 이용하여 수지에 결합된 나트륨, 암모늄, 칼슘 등의 양이온을 제거하고 수지를 수소이온(H^+) 형태로 바꾸어주는 재생기술이 사용되고, 황산을 사용할 경우에는 침전물이 수지층에 축적되어 이온교환수지의 오염은 물론 처리수의 수질도 저하시키기 때문에 황산보다는 염산을 이용한 재생기술이 널리 사용되어지고 있다. 음이온교환수지에는 2~10% 수산화나트륨용액을 이용하여 수지에 결합된 황산, 염소 등의 음이온을 제거하고 수지를 수산화이온(OH^-) 형태로 바꾸어주는 재생기술이 널리 사용되고 있다. 일반산업에서 사용되는 염산용액을 이용한 양이온교환수지 재생법과 수산화나트륨용액을 이용한 음이온교환수지 재생법을 SG 취출수 계통에서 발생하는 방사성혼상폐수지의 제염방법으로 사용한다면 재생을 위해 방사성폐수지를 양이온교환수지와 음이온교환수지로 먼저 분리하여 제염하여야 한다. 또한 방사성폐수지를 제염한 후에는 다량의 오염된 약품 제염폐액이 2차폐기물로 발생할 뿐만 아니라, 발생된 제염폐액 중에서 방사성물질을 추가로 제거하여야 하며, 중화처리를 위해 고농도의 산성 화학약품으로 처리해야 하므로 환경적으로도 바람직하지 못하며 작업자의 안전에도 많은 영향을 주는 단점들을 지니게 된다.

2. 화학약품을 이용한 혼상폐수지내 ^{14}C 제거기술

폐수지의 자체처분이 아닌 유리화를 위한 전처리 기술로 활용하기 위해 ^{14}C 제거 기술개발에 관한 연구를 수행하였다. 이 기술은 중수로에서 발생하는 혼상 폐수지의 처

리에 중점을 두었으며, 폐수지 중 ^{60}Co , ^{137}Cs , ^3H 는 제거하지 않고 ^{14}C 만을 분리·제거하는 것으로 알카리 용액 (NaNO_3 , Na_3PO_4)을 이용하여 중수로에서 발생한 폐수지에 결합한 $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$, $^{14}\text{CO}_3^{2-}$ 를 이온형태로 먼저 분리한 후 질산, 염산을 추가로 첨가하여 $^{14}\text{CO}_2$ 기체로 전환·배출하거나, 인산용액 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, H_3PO_4)을 이용하여 $^{14}\text{CO}_2$ 기체로 전환·배출하여 발생된 $^{14}\text{CO}_2$ 기체를 칼슘계열(Soda lime, 수산화칼슘)의 흡착제에 포집·분리하는 것이다. 이 기술로는 ^{60}Co , 유기형 ^{14}C 을 제거 할 수 없으며 비방사성 모의시료로 실험을 수행하였을 뿐 경수로 및 중수로 발생 방사성폐수지를 이용한 실증 실험은 수행하지 않았기 때문에 폐수지 자체처분 기술로 활용하기에는 많은 보완연구가 필요할 것으로 여겨진다.

3. 용융염 산화기술을 이용한 양이온수지 분해기술

용융염산화기술(MSO, Molten Salt Oxidation)은 미국의 Rockwell 에서 20여년 전에 coal gasfication 에서 처음 사용한 공정으로, 이후 미국내 ETEC, LLNL, ORNL 등에서 기술을 도입하여 용융염(molten salt)을 PCBs, TCE 등의 난분해성 유해유기물을 분해하기 위한 공정으로 개발되었다. 국내에서는 원자력연구원이 사용후핵연료 처리, PCB 분해 등에 용융염산화기술을 이용한 연구가 수행되었으며 최근에는 방사성폐수지에 대한 적용연구도 일부 수행하였다. 용융염산화는 700~950 ℃의 고온에서 폐기물을 분해하는 열처리 공정으로 폐기물 내 유기성분을 CO_2 와 H_2O 로 분해시킨다. 방사성폐수지의 경우, 방사성핵종만을 용융하기 위하여 혼합수지를 분리하여 양이온교환수지에만 적용한 기술로 음이온교환수지에 결합되어 있는 이온형 방사성탄소($\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$, $^{14}\text{CO}_3^{2-}$)에 대한 처리계획이 수립되어 있지는 않다. 또한 혼합수지를 분리하지 않고 용융염 산화시킬 경우에는 다량의 비방사성 CO_2 가 발생하여 기체 방사성탄소($^{14}\text{CO}_2$)와 함께 환경으로 배출되는데 방사성 이산화탄소($^{14}\text{CO}_2$)에 대한 처리방안이 고려되지 않아 폐수지 자체처분기술로 활용하기에는 어려움이 따를 것으로 여겨진다.

제 3 절 정화수지 탈수 및 이송방안 검토 및 기본설계

폐수지에는 미세 이물질이 존재하고 있어 고형물로 운송할 경우 분진 등으로 인해 환경에 악영향을 초래할 수 있어 습식이송이 적합할 것으로 여겨진다. 습식이송 방안

으로는 슬러지펌프에 의한 이송, 진공에 의한 이송 및 튜브 연동식 펌프(Peristaltic pump)에 의한 이송을 고려할 수 있다. 튜브 연동식 펌프는 그림 1에 나타낸 바와 같이 튜브내로 폐수지가 이송되므로 펌프 오염이 전혀 없어 방사성물질의 이송에 가장 적합할 뿐만 아니라 완전 자흡식(self-priming)으로 초기 구동이 용이하고, 이송 폐수지가 없어도 펌프손상 없이 공회전이 가능하여 유지관리 측면에서도 유리한 것으로 판단되어 그림 2와 같이 튜브 연동식 펌프를 이용한 폐수지 이송실험을 수행하여 제염 공정에 적용이 가능함을 확인하였다.

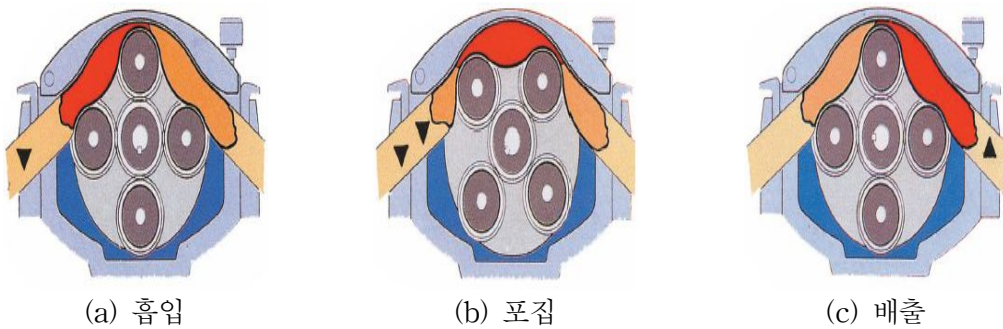


그림 1. 튜브 연동식 펌프의 구동 메카니즘



그림 2. 튜브 연동식 펌프를 이용한 폐수지 이송 실험

제 4 절 수지 건조 예비실험

제염된 폐수지를 자체처분하기 위해서는 정화수지를 건조하거나 포대에 담아 탈수 후 처리한다. 건조방안으로는 감압가열건조, 유동층가열건조 및 마이크로파 건조 등을 활용할 수 있으나, 건조과정에서 제염수지에 잔류하는 ^{14}C 의 환경배출을 방지하기 위해 건조장치를 밀폐형으로 제작이 용이한 감압가열방법과 스크류형 연속식 건조방법이 유리할 것으로 여겨진다. 건조 효과를 평가하기 위해 Semi-pilot 규모의 스크류형 연속식 건조장치로 건조 전·후의 수지 입자크기와 부피변화를 측정하여 그림 4에 나타내었다. 실험결과는 표 6에 정리하였다. 수지직경은 약 18%가 감소하였지만 부피는 약 53%가 감소되어 수지건조방법으로 유용하게 활용할 수 있음을 확인하였다.



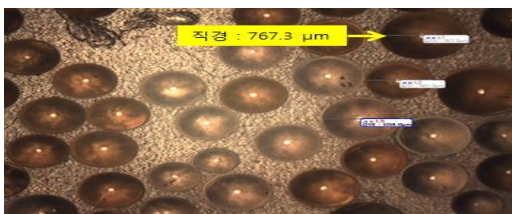
(a) 건조로 제어반



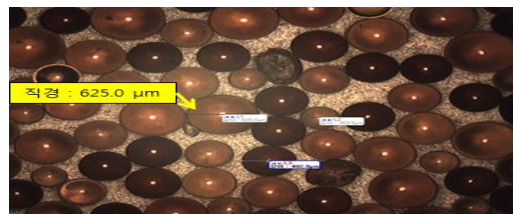
(b) 스크류형 연속식 제염수지 건조로

그림 3. 스크류형 연속식 제염수지 건조장치

스크류형 연속식 건조로는 제염수지에 잔류하는 ^{14}C 의 환경배출을 방지하기 위해 수분 및 가스 배출구에 촉매시스템 및 ^{14}C 포집시스템을 설치하여 ^{14}C 의 환경배출을 최소화할 수 있다.



(a) 건조전 수지



(b) 건조후 수지

그림 4. 이온교환수지 건조전·후 입자크기 변화

표 6. 감압가열건조 전·후 수지 부피변화

항목	건조전	건조후	감소율(%)
입자크기 (μm)	767.3	625.0	18.5
부피 (ml)	15	7	53.3

$$\ast \text{ 감소율(\%)} = \frac{\text{건조전입자크기(부피)} - \text{건조후입자크기(부피)}}{\text{건조전입자크기(부피)}} \times 100(\%)$$

제 3 장 제염시스템 제작 및 성능시험

제 1 절 초음파 제염시스템 제어공정 설계

초음파를 이용한 Pilot(160L)급 폐수지 제염시스템에 사용된 제어관련 주요 기자재 및 부품을 표 7 에 정리하였다.

표 7. 초음파 이용 제염시스템 제어관련 기기

기기	Part No.	용도	비고
Solenoid V/V	SV1	원수공급밸브	
	SV2	용수공급밸브	
	SV3	수지공급밸브	
	SV4	순환수 공급밸브	
	SV5	순환수 배출밸브	
	SV6	수지 배출밸브	
Pump	Pump-1	수지공급펌프	Peristaltic Pump (속도 가변)

	Pump-2	수지배출펌프	Peristaltic Pump (속도 가변)
	Pump-3	급수펌프	원심펌프
Pressure Transducer	P-1	순환수 압력계#1 (수지처리탱크 & Bag Filter)	Digital Signal Output (4~20mA)
	P-2	순환수 압력계#2 (Bag Filter & 1st Filter)	
	P-3	순환수 압력계 #3 (1st Filter & 2nd Filter)	
	P-4	순환수 압력계 #4 (2nd Filter & 배출라인)	
Level Sensor	수지저장탱크	상한 및 하한	반도체 Sensor
	수지처리탱크	하한	
	용수저장탱크	상한 및 하한	

초음파 제염시스템의 운전요소들을 검토하여 구성부품들을 동작하기 위한 제어반을 구성하였다. 제어반의 주요 기능으로는 운전 중 소비되는 전압과 전류를 표시하도록 하였고, 운전 중 상황을 지시하도록 초음파 출력, 교반속도 및 온도를 표시하도록 하였으며 각각의 처리탱크에 수위센서를 설치하여 이송펌프가 자동으로 동작하거나 정지하고 밸브도 자동으로 열리거나 닫히도록 설계하였다. 시스템 이상이 발생할 경우 경보음이 울려 작업자가 비상스위치를 조작하여 시스템의 동작을 정지시키도록 하였다. 또한 전 공정 자동/수동운전, 단계별 수동운전 및 점검·보수시의 공정 Sequence에 대한 검토를 완료하여 이를 바탕으로 HMI/PLC를 적용하도록 설계하였다.

제 2 절 초임계 제염시스템 제어공정 설계

초임계이산화탄소를 이용한 Pilot(12L)급 폐수지 제염시스템의 구성은 이산화탄소가 순환되는 순서로 저장용기, 고압펌프, 예열기, 추출제 용해용기, 추출용기, 분리용기 및 열교환기로 되어 있으며 각각의 품목들에 대한 주요 기능을 표 8 에 정리하였다.

표 8. 초임계 이용 제염시스템 구성품 및 주요기능

번호	품목	주요기능
1	저장용기	이산화탄소를 액체 상태로 저장하며, 초임계 추출공정 후 회수된 이산화탄소도 액체상태로 함께 저장.
2	이산화탄소 고압펌프	이산화탄소를 초임계 상태의 운전압력(약 200Bar)까지 가압.
3	예열기	이산화탄소를 초임계 상태의 운전온도(약 60℃)까지 가열.
4	추출제 용해용기	방사성핵종(⁶⁰ Co) 추출제를 초임계이산화탄소에 용해.
5	추출용기	초임계이산화탄소에 용해된 추출제로 폐수지 중의 방사성핵종(⁶⁰ Co)을 결합하여 용기 밖으로 추출.
6	분리용기	이산화탄소를 기화시켜 초임계이산화탄소에 용해된 추출제와 결합한 방사성핵종(⁶⁰ Co)을 분리.
7	열교환기	기화된 이산화탄소를 냉각방식으로 액화시켜 저장용기로 이송하여 재사용.

방사성폐수지의 제염에 적합한 초임계 이산화탄소 온도와 압력은 60℃, 200 bar로 설정하였으며, 유량은 1L/min 이상의 조건을 형성하고 유지할 수 있도록 하여 그림 5 에 나타낸 바와 같이 이산화탄소가 순환되도록 하였다. 또한 공정 적용온도, 압력 및 유량에 따라 초임계이산화탄소의 밀도, 확산성 및 유동성이 달라질 수 있으므로 다양한 온도와 압력 및 유량 설정이 가능하도록 공정제어 요인과 운전변수 등을 검토하여 설계에 반영하였다. 초임계이산화탄소의 재순환 방법으로는 온도를 신속히 낮추어 이산화탄소를 액체상태로 변화시켜 회수할 수 있도록 하였으며 이산화탄소의 상태변화, 추출제 용해, 방사성핵종(⁶⁰Co) 추출 등의 전체공정이 연속적으로 자동운전 되도록 설계하였다.

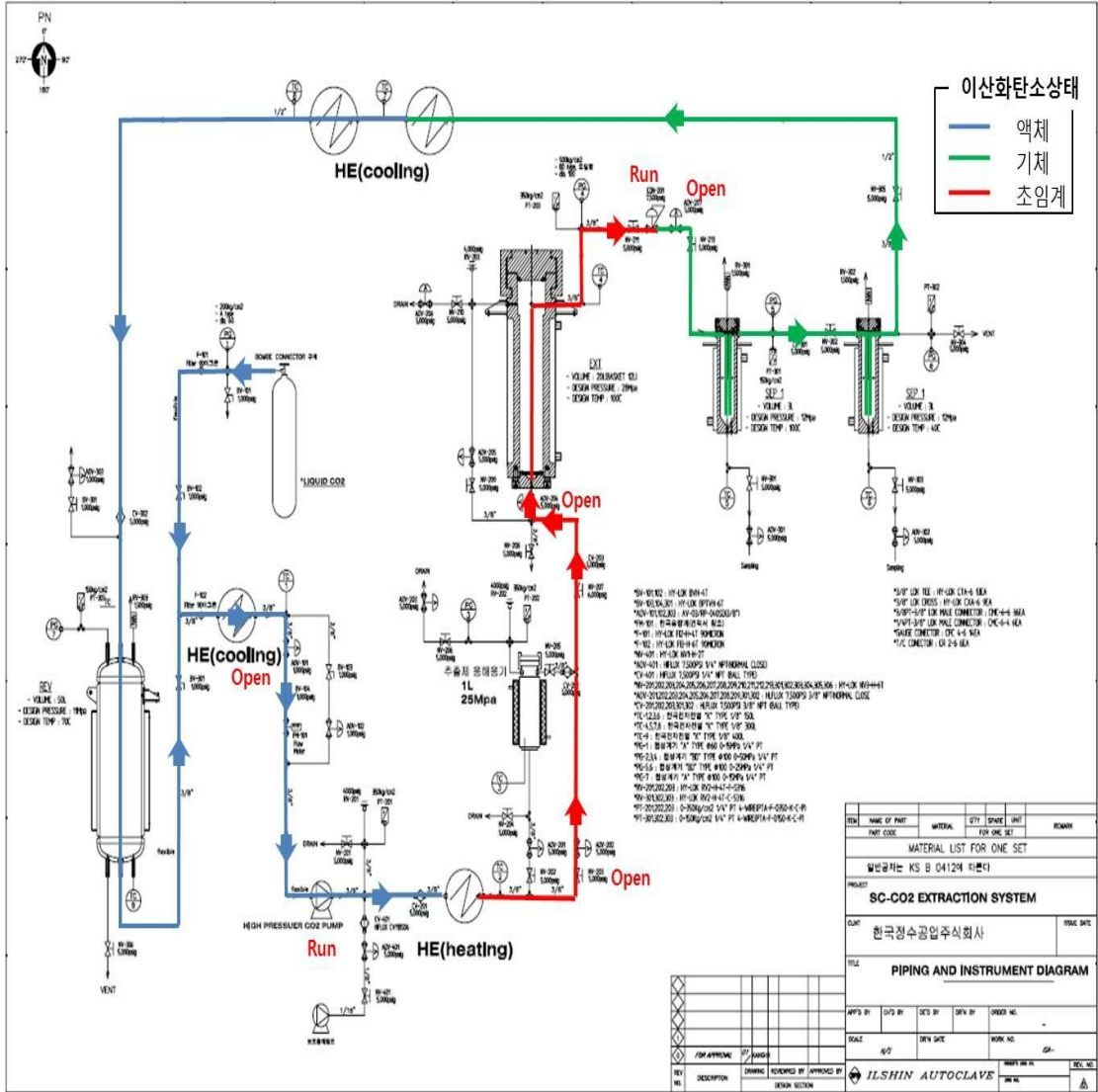


그림 5. 초임계 제염시스템 구성 및 이산화탄소 순환도

초임계 제염시스템 중 폐수지가 주입·배출되는 추출용기의 뚜껑은 그림 6 에 나타난 바와 같이 급속개폐(Quick open/close) 방식을 적용하여 자동개폐가 가능하도록 하였으며, 추출용기 내부에는 바스켓을 장착하여 바스켓 리프트와 호이스트장치를 이용한 방사성폐수지의 주입과 배출이 용이하도록 설계하였다.

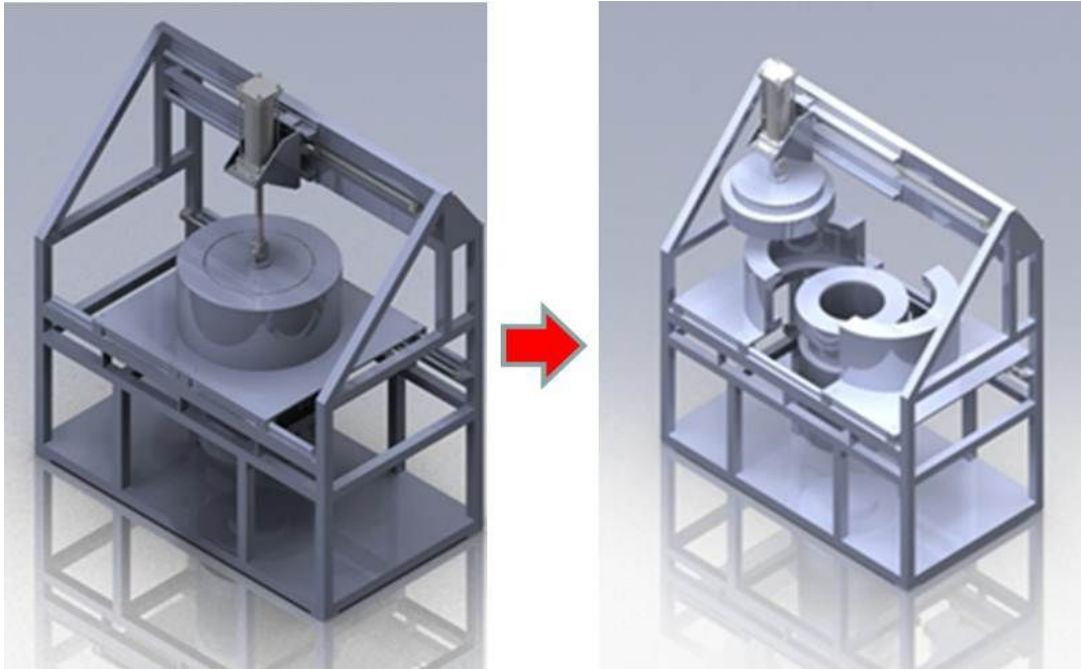
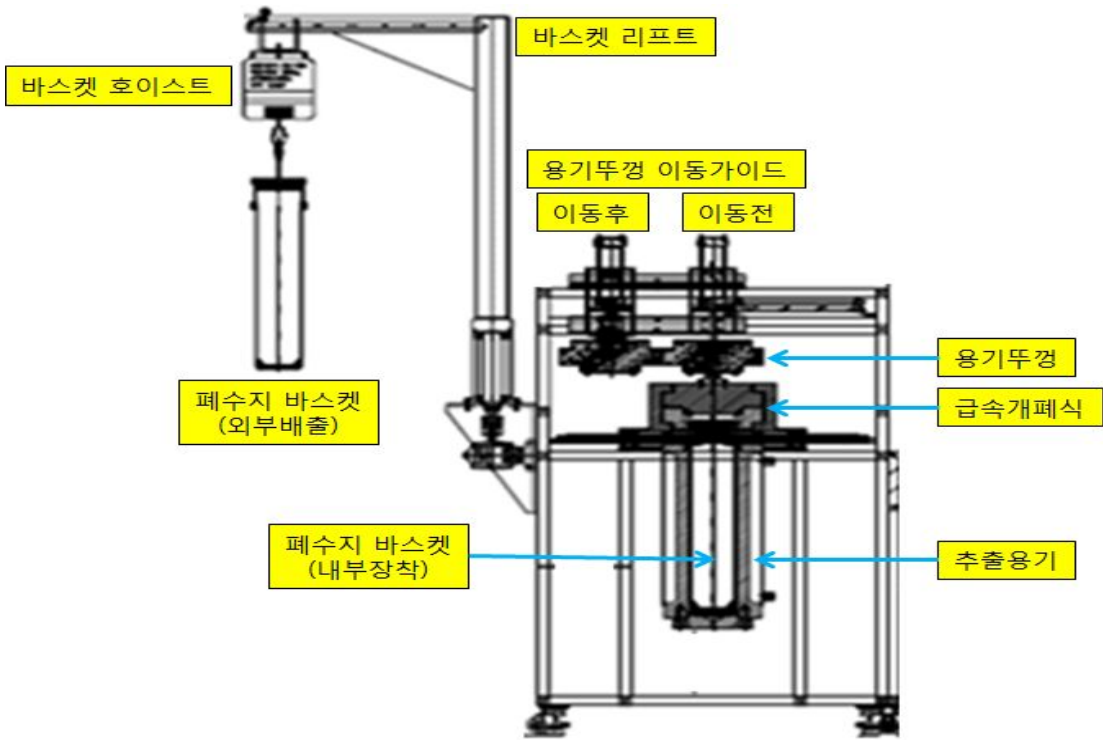


그림 6. 초임계 추출용기 자동개폐방식 구성도

제 3 절 초음파 제염시스템 구성

초음파 제염시스템에는 수지 표면에 초음파를 인가하기 위해 Push-Pull형 진동자를 사용하였다. Push-Pull형 진동자는 Horn형 진동자보다 이물질 탈착효율이 높아 원자력산업에서 핵연료 집합체에 부착된 방사성 크러드(CRUD)의 제거에 활용되는 진동자로 제염성능이 입증된 초음파 장치이다.



그림 7. Push-Pull형 초음파 발생기와 진동자

초음파 제염시스템은 그림 8 에 나타낸 바와 같이 Push-Pull형 초음파 발생장치가 장입된 초음파 처리조, 폐수지 저장조, 수지여과필터, 처리수저장조, 공급펌프 등으로 구성하여 설계하였으며 Push-Pull형 진동자를 적용한 초음파 제염시스템을 구성하는 초음파 발생장치, 수지처리탱크, 수지저장탱크, 용수저장탱크, 수지이송펌프, 용수공급펌프, 필터 등의 제작사양을 표 9 에 정리하였다.

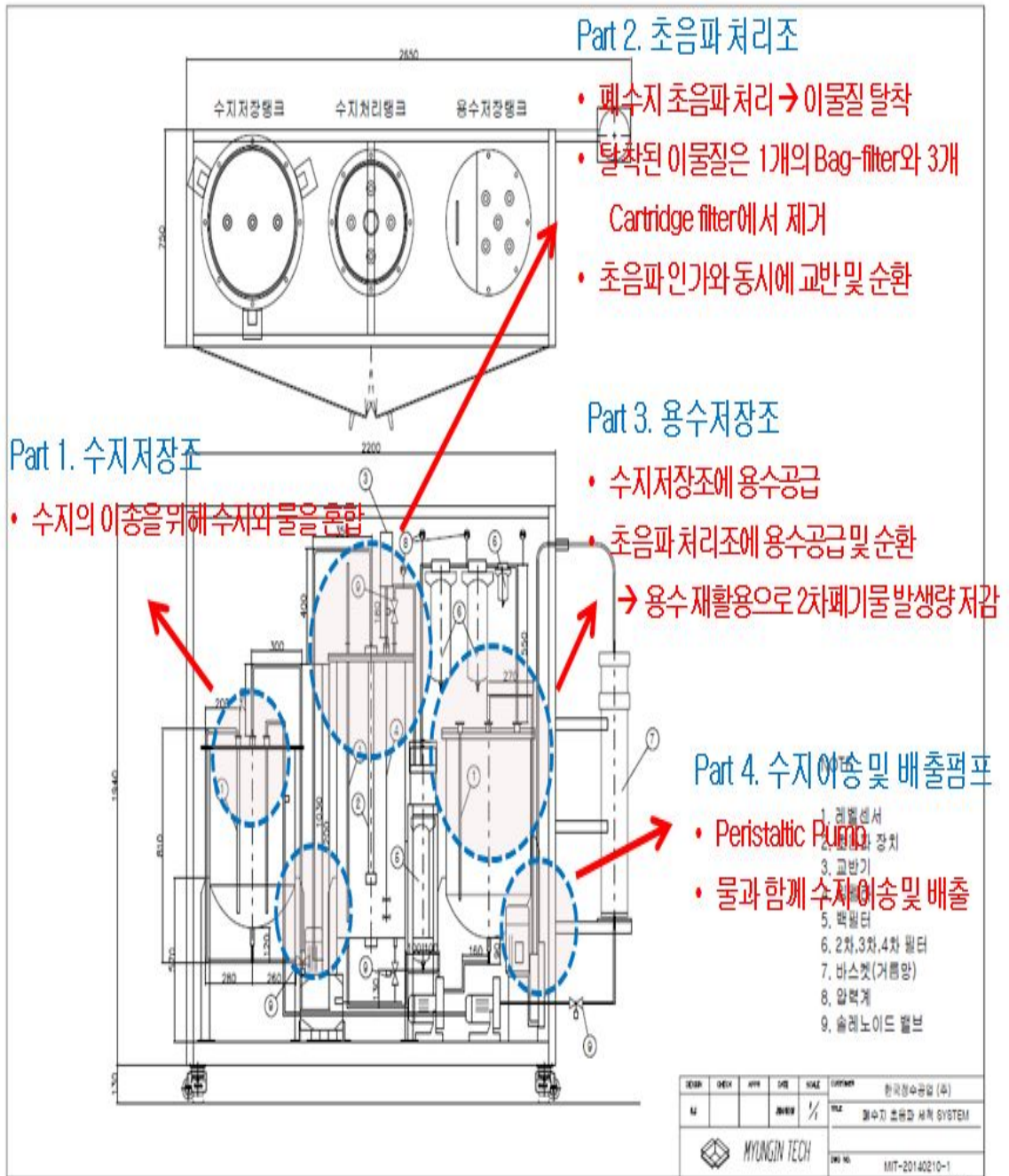


그림 8. 초음파 제염시스템 Lay-out 도면

표 9. 초음파 이용 제염시스템 구성장치 및 사양

1	 수지저장탱크	<ul style="list-style-type: none"> ○ 용량 : 80L ○ 재질 : SUS 304 ○ 특징 : Drain line 	1
2	 용수저장탱크	<ul style="list-style-type: none"> ○ 용량 : 200L ○ 재질 : SUS 304 ○ 특징 : Drain line 	1
3	 수지, 용수 이송펌프	<ul style="list-style-type: none"> ○ 유량 : 0.5 m³/hr ○ 특징 : 속도조절 가능 (Dial 방식) 	2
4	 교반기	<ul style="list-style-type: none"> ○ 길이 : 900 mm 이상 (수처리탱크 하단 도달) ○ 블레이드 : 2단 날개 ○ 특징 <ul style="list-style-type: none"> - 단독 On/Off 가능 - 속도조절 가능 (Dial 방식) 	1
5	 존슨 스크린	<ul style="list-style-type: none"> ○ 재질 : SUS316 mesh (Body : PVC) ○ pore size : 50mesh ○ 수지 반응조 내부에 장착 	3
6	 제어반	<ul style="list-style-type: none"> ○ 단순 개별조작 및 자동화 (수동, 자동 겸용) ○ Flow sensor 	1

제 4 절 초임계 제염시스템 구성

초임계 제염시스템의 구성은 이산화탄소를 액체상태로 저장하는 용기, 이산화탄소를 초임계 상태의 운전압력까지 가압하여 주는 고압펌프, 액체 이산화탄소를 초임계 상태의 운전온도까지 가온하여 주는 가열기, 초임계이산화탄소에 추출제를 용해시키는 용기, 폐수지로부터 방사성핵종을 초임계이산화탄소로 추출하는 용기, 추출된 방사성핵종을 초임계이산화탄소로부터 분리하는 용기 및 분리된 이산화탄소를 기체에서 액체로 전환하여 회수하는 열교환기 등으로 되어 있으며 자동제어 기능이 부가된 초임계 제염시스템은 그림 9 와 같이 설계도를 구축하였다.

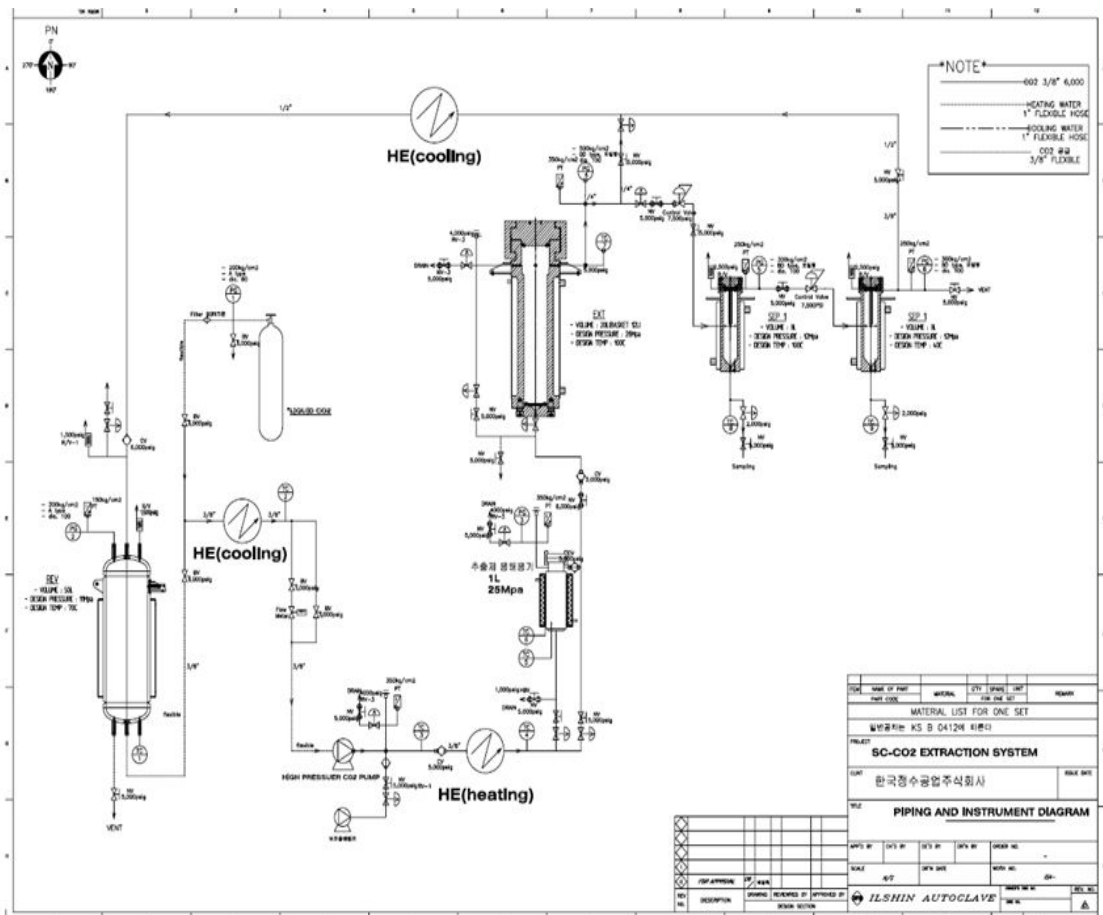


그림 9. 초임계 제염시스템 P&ID

폐수지 중 ^{60}Co 을 추출·분리하기 위한 초임계 제염시스템은 저장용기, 추출용기, 추출제 용해용기, 분리용기, 이산화탄소 가압펌프 및 가열장치, 냉각기 등으로 구성되며 각각의 구성장치와 사양을 표 10에 정리하였다.

표 10. 초임계 이용 제염시스템 구성장치 및 사양

번호	구성장치	장치사양	수량
1	추출용기 (Extraction Vessel)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Type : Quick Closure Clamp ○ Material : SUS 304 ○ Volume : 12L(Basket) ○ Design Condition : 280Bar @ 80°C ○ Max. Working : 280Bar @ 70°C ○ Heating Jacket : SUS 304 ○ Filter Basket Inside ○ 한국가스안전공사 안전인증 	1 ea
2	추출제 용해용기 (Extraction Material Vessel)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Type : Quick Closure Clamp ○ Material : SUS 304 ○ Volume : 3L ○ Design Condition : 280Bar @ 80°C ○ Max. Working : 280Bar @ 70°C ○ Heating Jacket : SUS 304 	1 ea
3	분리용기 (Separator)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Type : Bolt Closure & Closure ○ Material : SUS 304 ○ Volume : 3L ○ Design Condition : 200Bar @ 80°C ○ Max. Working : 180Bar @ 70°C ○ Heating Jacket : SUS 304 	2 ea
4	저장용기 (Storage Vessel)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Type : Cylinder ○ Material : SUS 304 ○ Volume : 50L ○ Design Condition : 110Bar @ 70°C ○ Max. Working : 100Bar @ 60°C ○ Heating Jacket : SUS 304 ○ External Insulation ○ 한국가스안전공사 안전인증 	1 ea
5	고압 CO ₂ 공급펌프 (High Pressure CO ₂ Pump)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Fluid : Liquid CO₂ ○ Type : Plunger ○ Flowrate : 1 ℓ/min ○ Max. Working Pressure : 250Bar ○ Head Cooling Jacket & Insulation 	2 set

		<ul style="list-style-type: none"> ○ Motor Power : 380VAC, 3-ph, 3HP ○ Temp. : - 2 ~ 15°C 	
6	열교환기 (Heat Exchanger, Condensor)	<ul style="list-style-type: none"> ○ SUS 316 tube ○ Type : Internal Exchanger(Inner Pipe) ○ Internal Cooling Water ○ External Insulation 	2 set
7	냉동기 (Chiller)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Power : 380VAC, 3-ph ○ Temp. Range : 0 ~ RT ○ Compressor Power : 7.7kW ○ 공냉식 일체형 	1 ea
8	Heater & Heating Bath	<ul style="list-style-type: none"> ○ Material : SUS304 ○ Volume : 50L ○ Electric Power : 12 kw ○ RTD Range : 0-80°C ○ External Insulation 	1 set
9	Controller	<ul style="list-style-type: none"> ○ PC & PLC Program ○ Main Temp Control ○ Over Temp Control ○ Flow Control ○ Pressure Control ○ Digital Indicator & Card 	1 set
10	Control Valve	<ul style="list-style-type: none"> ○ Inlet Pressure : 6000psi ○ Process Connection : 3/8" NPT 	2 ea
11	Pressure Safety Valve	<ul style="list-style-type: none"> ○ Material : SUS 316 ○ Connection : 3/8" NPT ○ Setting Press. : 4000psi, 2500psi, 1500psi 	5 ea
12	Pressure Gauge	<ul style="list-style-type: none"> ○ Type : 브로돈관형 ○ Case/Stem/Diaphragm Material : SUS 304 ○ Range : 0-500bar, 0-200bar 	5 ea
13	Pressure Transmitter Sensor	<ul style="list-style-type: none"> ○ Type : VDC, mA 아나로그 출력 ○ Precision : ±0.5% ○ Range : 0~350bar ○ Connection : 3/8" NPT 	5 ea
14	Liquid Circulating Magnet Pump	<ul style="list-style-type: none"> ○ Capacity : 30 ℓ/min ○ 유압호스 Hose 포함 	2 ea
15	Liquid Flow Meter	<ul style="list-style-type: none"> ○ Fluid : CO₂(Liquid) ○ Flow Rate : 0-2 ℓ/min ○ Connection : 3/8" FNPT 	1 ea

		<ul style="list-style-type: none"> ○ Mat'L : All SUS ○ Max. Pressure : 300bar ○ Accuracy : ±2% ○ Supply Power : 24VDC ○ Output : 4-20mA 	
16	Check Valve & Line Filter	<ul style="list-style-type: none"> ○ Material : SUS304/316 ○ Connection Size : 3/8" ○ Design Press. : 6000psi 	4 ea
17	Ball Valve & Sol Valve	<ul style="list-style-type: none"> ○ Material : SUS304/316 ○ Connection Size : 3/8" ○ Design Press. : 1,000psi 	1 set
18	Air Operated Valve & Solenoid Valve	<ul style="list-style-type: none"> ○ Material : SUS304/316 ○ Connection Size : 3/8" ○ Design Press. : 6000psi, 5000psi 	1 set
19	Needle Valve	<ul style="list-style-type: none"> ○ Material : SUS304/316 ○ Connection Size : 3/8" ○ Design Press. : 6000psi, 5000psi 	1 set
20	기타배관설비	<ul style="list-style-type: none"> ○ Structure ○ Straight Union, Reducer Union ○ Tee, Cross, Elbow 등 ○ Male, Female Connector, Adaptor ○ Tube : 3/8", 1/4", 1" ○ Filter, 단열재 ○ Tee, Cross, Elbow 등 ○ Male, Female Connector, Adaptor ○ Filter, 단열재 	1 set
21	Hoist & Basket Zig	<ul style="list-style-type: none"> ○ Motor Power : 220VAC, 1-ph ○ 용량 : 250kg 	1 set
22	기타 전기계장설비	<ul style="list-style-type: none"> ○ 판넬 : 600(W)x300(D)x800(H) ○ NFB ○ Magnet Con ○ Temperature Sensor ○ Relay ○ Cable, Flexible, Channel, 부스바 ○ CAB PC BOX ○ Converter ○ Cable Tray ○ 기타 전기 잡자재 	1 set

초임계 제염시스템을 구성하는 장치들을 조립한 배치도를 그림 10 에 나타내었다. 초임계 CO₂ 제염시스템이 차지하는 공간은 가로 2,100 mm × 세로 2,100 mm × 높이 3,200 mm이다.

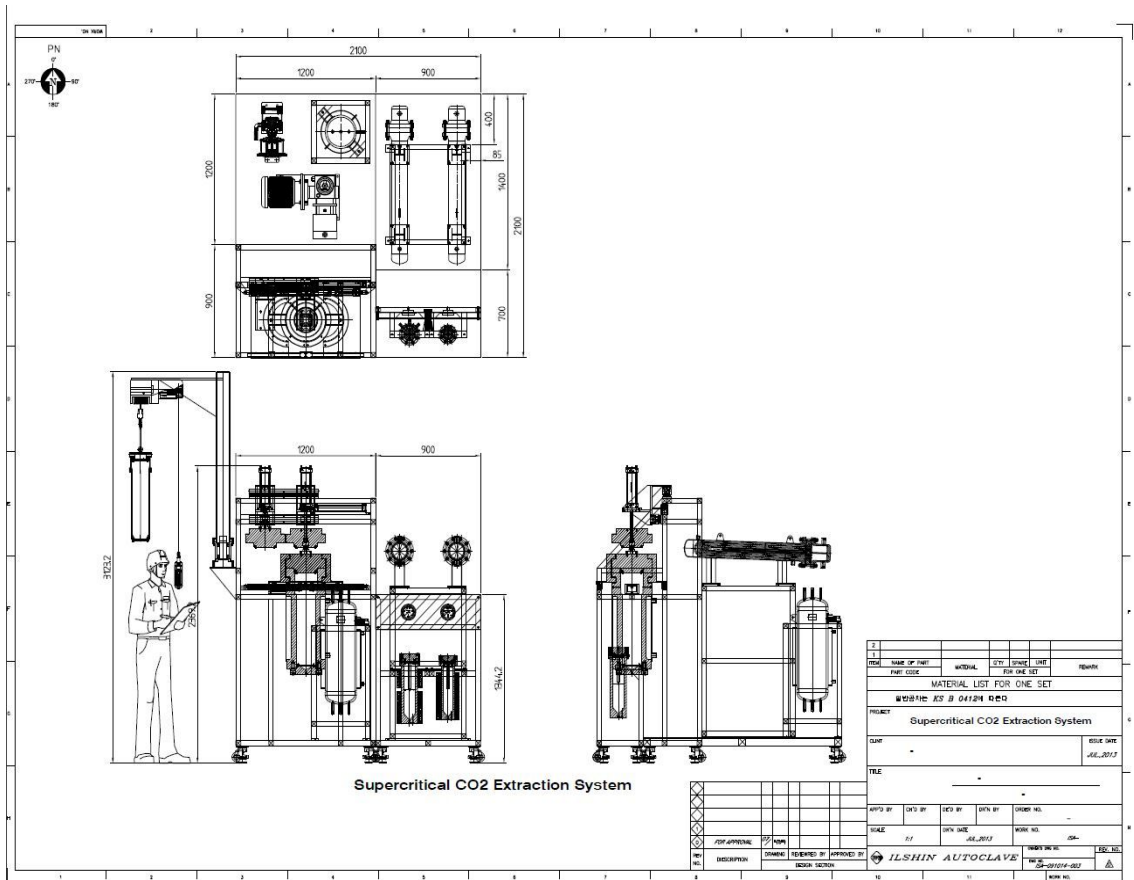


그림 10. 초임계 제염시스템 Lay-Out 도면

라. 초임계 제염시스템의 형태 및 사양

초임계이산화탄소를 이용한 폐수지 제염시스템은 초임계이산화탄소의 운전조건 등에 따른 주요 기술내용을 검토하여 제작을 위한 세부설계를 진행하였으며 주요부품들의 형태와 사양을 표 11 에 정리하였다. 초임계 제염시스템의 안전한 제작·운영을 위해 한국가스안전공사로부터 압력용기 설계/제작 인·허가 검사서류의 승인을 득하였으며, 추출용기와 저장용기 최종적으로 선정하여 제작을 완료하였다.

표 11. 초임계 제염시스템의 주요품목 형태 및 사양

번호	품목	형태	주요사양
1	저장용기		<ul style="list-style-type: none"> ○ 수량 : 1 Set ○ 내부부피 : 50 ℓ ○ 운전조건 : 10MPa @ 60℃ ○ 설계조건 : 11MPa @ 70℃ ○ 재질 : SA 240 316L ○ 용기형태 : Cylinder ○ 냉각방식 : HEATING JACKET ○ 안전검사 : 가스안전공사 검사필
2	이산화탄소 고압펌프		<ul style="list-style-type: none"> ○ 수량 : 1 Set ○ 유체 : 액체 이산화탄소 ○ 가압형식 : Plunger ○ 유량 : 최대 1 ℓ/min ○ 운전조건 : 25MPa ○ 모터 : 380VAC, 3Ph, 3HP
3	예열기		<ul style="list-style-type: none"> ○ 수량 : 1 Set ○ 유체 : 액체/초임계 이산화탄소 ○ 유량 : 최대 1 ℓ/min ○ 운전조건 : 25MPa

4	추출용기		<ul style="list-style-type: none"> ○ 수량 : 1 Set ○ 내부부피 : 20 ℓ ○ 운전조건 : 25MPa @ 70℃ ○ 설계조건 : 28MPa @ 100℃ ○ 재질 : SA 182 F316L SA 479 316L ○ 개폐방법 : Quick Open/Close ○ SEAL : TEFLON SES SEAL ○ 가열방식 : HEATING JACKET ○ 이산화탄소 확산필터 장착 ○ 안전검사 : 가스안전공사 검사필
5	추출계용해용기		<ul style="list-style-type: none"> ○ 수량 : 1 Set ○ 내부부피 : 3 ℓ ○ 운전조건 : 28MPa @ 70℃ ○ 설계조건 : 28MPa @ 80℃ ○ 재질 : SUS 304 ○ 개폐방법 : Bolt Close ○ SEAL : TEFLON SES SEAL ○ 가열방식 : HEATING JACKET
6	분리용기		<ul style="list-style-type: none"> ○ 수량 : 2 Set ○ 내부부피 : 3 ℓ ○ 운전조건 : 15MPa @ 70℃ ○ 설계조건 : 18MPa @ 100℃ ○ 재질 : SA 479 316L ○ 개폐방법 : Bolt Close ○ SEAL : TEFLON SES SEAL ○ 가열방식 : HEATING JACKET
7	열교환기		<ul style="list-style-type: none"> ○ 수량 : 1 Set ○ 유체 : 기체/액체 이산화탄소 ○ 재질 : SUS 316 Tube ○ 형식 : Internal Exchanger (Inner Pipe) ○ Internal Cooling Water

제 4 장 제염장치를 이용한 성능실험

제 1 절 초음파 장치를 이용한 제염실험

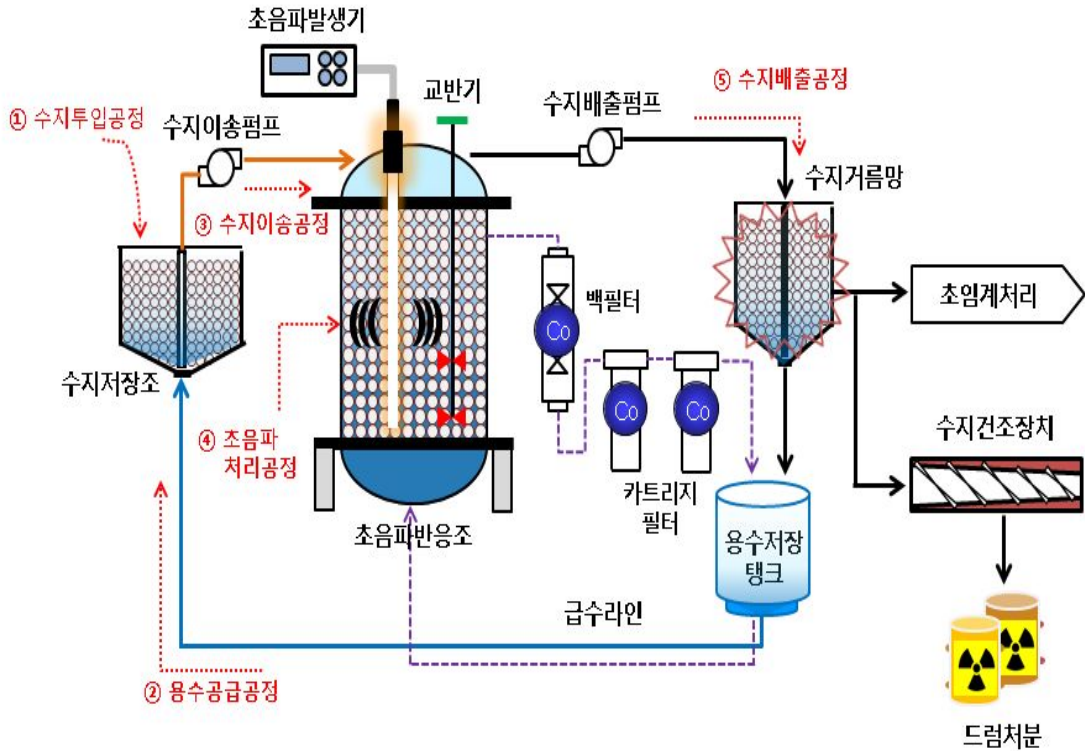


그림 11. 초음파 제염처리장치 공정도

초음파 제염장치를 이용한 실험결과는 처리장치에 폐수지 투입량 약 30 l, 처리시간 60분으로 실제 오염된 폐수지를 투입하여 처리 한 후 제염효율을 평가 하였다. 오염 폐수지의 비방사능을 평가하고 오염 폐수지 일부를 샘플링 하여 HPGe 감마분석기를 이용하여 핵종 분석한 결과를 표 12 에 나타 내었으며 폐수지의 비방사능은 0.03 ~ 0.01 Bq/g 으로 자체처분 기준치 0.1 Bq/g의 약 1/3 ~ 1/10 수준으로 나타났으며 폐수지 처리에 사용된 용수에서는 핵종이 검출되지 않았다.

표 12. 초음파 조사 시간별 감마핵종 분석결과

시료명	초음파 처리시간(분)	샘플 중량(g)	분석 시간(초)	검출핵종		비고
				⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs	
샘플 A	10	38.59	3600	0.041±0.003	MDA	
샘플 B	20	21.71	3600	0.029±0.003	MDA	
샘플 C	30	24.81	3600	0.030±0.003	MDA	
샘플 D	40	28.44	3600	MDA	MDA	
			10000	0.016±0.001	MDA	
샘플 E	50	25.92	3600	0.026±0.003	MDA	
			10000	0.027±0.002	MDA	
샘플 F	60	24.28	3600	MDA	MDA	
			10000	0.011±0.001	MDA	
폐용수	-	50g	10000	MDA	MDA	

현장에서 발생된 실제 폐수지를 이용한 초음파 제염 결과를 표 13 에 나타내었다.

표 13. 초음파 처리장치를 이용한 주요핵종별 제염결과

핵 종	비방사능(Bq/g)		비고
	처리 전	처리 후	
⁶⁰ Co	0.211	0.015	분석시간 : 10,000초
		0.0068	
		0.016	
¹³⁷ Cs	0.0137	0.011	
		0.013	
		0.0065	

제염결과 ^{60}Co 의 검출값이 7,200초에서 MDA 미만으로 나왔으며 계측시간을 10,000초로 늘려 분석한 결과 0.0063~0.0065 Bq/g 으로 거의 완벽하게 처리되었다. ^{137}Cs 의 경우 오염농도가 0.0137 Bq/g으로 IAEA 규제해제 허용농도값(0.1 Bq/g)의 1/10 수준으로 자체처분 기준치를 만족하였다. 또한, 폐수지에 부착되어 있는 이물질이 제거되어 폐수지의 형상이 그림 12, 13과 같이 새수지의 형상으로 복원됨을 확인 할 수 있었다.

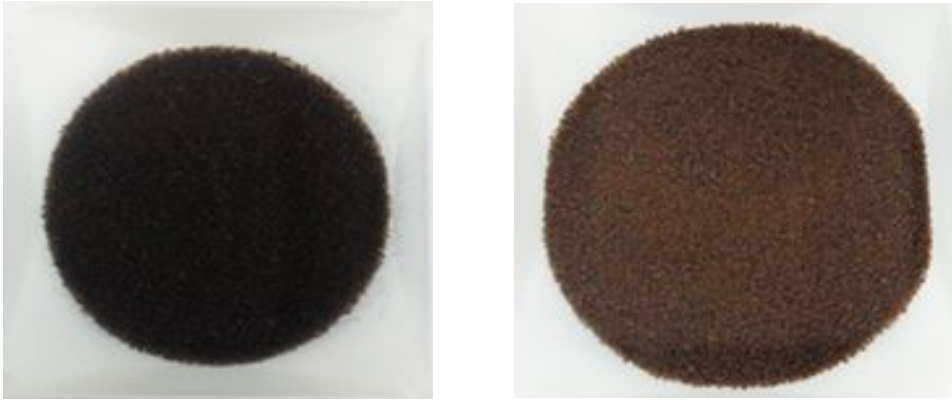


그림 12. 초음파 처리전·후 폐수지 모습

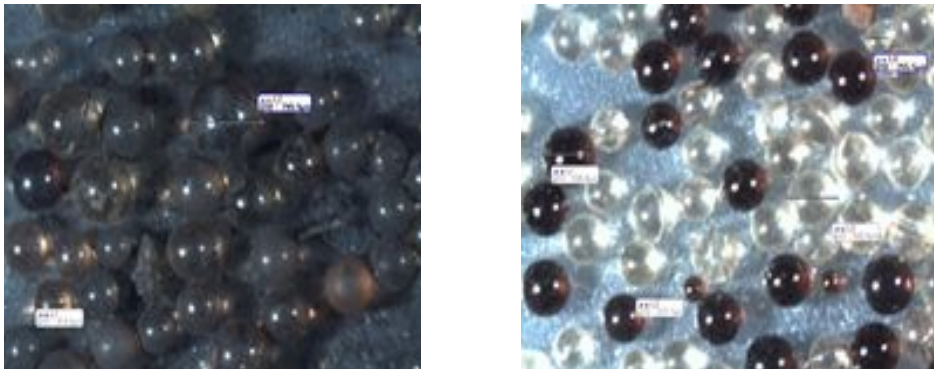


그림 13. 초음파 처리전·후 폐수지 현미경 확대모습(x75)

표 14. 방사성 폐수지 오염형태

	처리전	처리후	백필터	C.필터(1)	C.필터(2)	C.필터(3)	비고
폐수지 Co 농도	8200 Bq	160 Bq	62 Bq	2240.7 Bq	486 Bq	18 Bq	

폐수지 10 kg의 처리전 총방사능은 8,200 Bq 이었으며 백필터, 카트리지필터등에서 회수된 총방사능은 7,513 Bq로 약 91.62 %가 회수되어 대부분의 방사성핵종은 이물질에 존재하는 것을 알수 있었다. 그리고 인산암모늄을 이용한 ^{14}C 제염실험은 폐수지의 ^{14}C 농도가 매우 낮아 초음파 이후 실행될 약품처리에 대한 정확한 제염효과를 측정하기가 어려웠기 때문에 임의로 오염시킨 IRN-150 수지를 이용하여 ^{14}C 에 대한 제염효과를 다시한번 실험하였다. 표 15 는 인산암모늄 농도를 달리하여 ^{14}C 으로 오염된 모의수지를 제염실험한 결과이다. 처리전 모의수지의 비방사능은 3.25 Bq/g 이며 0.01 mol 에서는 2.1 Bq/g, 0.1 mol 에서는 1.11 Bq/g, 0.5 mol 에서는 1.17 Bq/g 1 mol 에서는 1.15 Bq/g 이었으며 제거효율은 각각 35.4 %, 65.8 %, 64 %, 64.6 %로 0.1 mol 이상에서는 비슷한 효율을 나타 내었다.

표 15. 인산암모늄을 이용한 ^{14}C 제염 실험결과

인산암모늄 농도(mol)	^{14}C (Bq/g)	제거효율(%)	비고
0.01	2.1	35.4	Original resin : 3.25 Bq/g
0.1	1.11	65.8	
0.5	1.17	64	
1	1.15	47	

표 15 는 ^{14}C 으로 오염된 모의수지를 인산암모늄 수용액에 담근 후 초음파를 1시간동안 조사하여 제염한 모의수지의 ^{14}C 농도 결과이다. 0.01 mol에서는 1.72 Bq/g, 0.1 mol에서는 1.03 Bq/g, 0.5 mol에서는 0.55 Bq로 나타났다. 1mol의 인산암모늄 수용액과 함께 초음파를 조사할 경우, 폐수지에 잔존하는 ^{14}C 농도는 0.037 Bq/g로 제거율은 99.9 %로 백그라운드 수준으로 나타났다.

표 16. 초음파와 인산암모늄을 이용한 ^{14}C 제염결과

인산암모늄 농도(mol)	^{14}C (Bq/g)	제거효율(%)	비고
0.01	1.72	47	Original resin : 3.25Bq/g BKG : 0.04Bq/g
0.1	1.03	68.3	
0.5	0.55	83.1	
1	0.037	99.9	

그림 14. 초음파와 인산암모늄 적용시 ^{14}C 변화 추이

인산암모늄과 초음파의 복합기술을 이용해 오염폐수지에 흡착된 ^{14}C 핵종을 제거해 본 결과, IAEA 규제해제농도인 1 Bq/g 의 $1/27$ 수준으로 낮아져 제염이 확실하게 이루어짐을 확인하였다. 또한 인산암모늄은 HCl , H_2SO_4 , HNO_3 에 비해 약산으로 설비 제작시 재질의 건전성도 확보할 수 있는 매우 양호한 산화제임을 확인하였다. 또한 폐수지 초음파처리 폐용수 핵종분석 결과를 표 17에 나타 내었다.

표 17. 초음파 처리 후 발생된 폐수지의 핵종분석 결과

시료번호	분석시간(초)	핵종분석결과(Bq/g)	비고
1	10,000	MDA 미만	모든 핵종 불검출
2	10,000	MDA 미만	
3	10,000	MDA 미만	
4	10,000	MDA 미만	
5	10,000	MDA 미만	
6	10,000	MDA 미만	

초음파 처리공정시 발생된 폐용수를 분석해 본 결과, 필터에서 전량 제거되어 폐수중 방사능 농도는 MDA 미만으로 검출되지 않았다. 공정과정에서 발생한 처리수는 여과하여 재사용함으로써 2차폐기물 발생을 최소화 시킬 수 있음을 확인하였다. 발생처리수는 수회 반복 사용한 후 폐용수에서 방사성핵종이 검출된다면 폴리아마이드계 응집제를 이용하여 방사성 핵종을 제거할 수 있다.

표 18. 응집제를 이용한 모의 폐용수 중 방사성핵종 제거결과

핵종	초기값(Bq/g)	응집제 투입농도		
		200 ppm	500 ppm	1,000 ppm
^{60}Co	2.12E+00	2.11E-02	7.98E-03	7.73E-03
제염계수(DF)		100.47	265.6	274.2

표 18 은 polymer 투입량에 따른 DF 값의 변화결과를 보여주고 있다. 200 ppm 투입시 DF 값은 100.47, 500 ppm 투입시에는 DF 값이 265.6 으로 나타났으며, 응집제의 농도를 두배로 늘린 1,000 ppm의 응집제를 투입시에 274 ppm으로 약품 추가투입량에 비해 그다지 제염효과는 높게 나타나지 않았다. 또한 Polymer 사용에 따른 COD 상승효과를 평가한 결과, COD 값은 약 2.25 ~ 2.48 ppm 범위로 수질에 미치는 영향이 거의 없음을 확인할 수 있었다.

제 2 절 초임계 장치를 이용한 제염실험

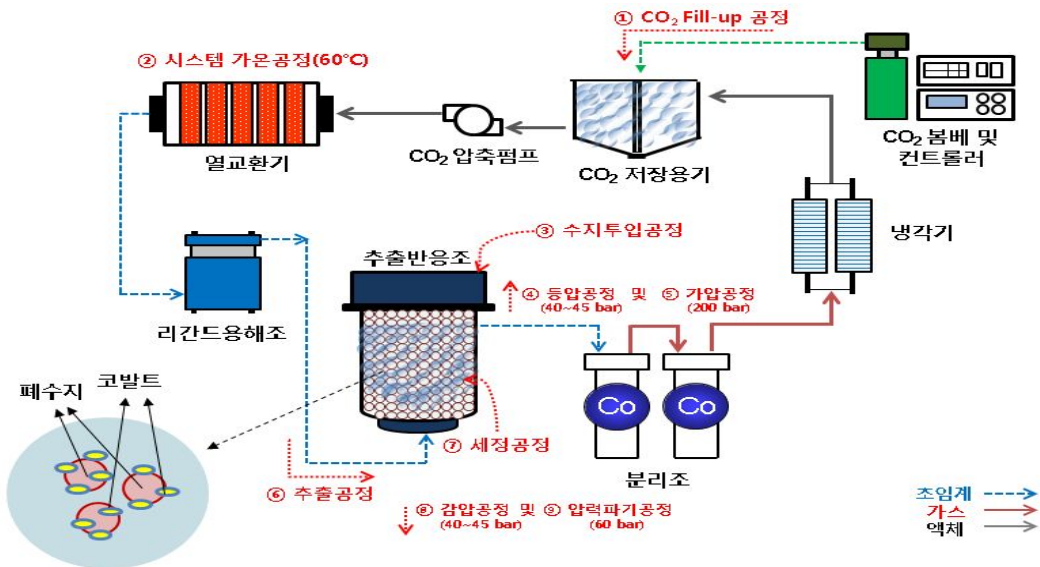


그림 15. 초임계 처리장치 공정도

폐수지에 대한 초임계 시스템의 제염효율을 측정하기 위하여 Lab 규모와 Pilot 규모로 나누어 초임계 실험을 진행하였다. Pilot 시스템을 이용한 실증실험은 장치가 크고 관리구역의 설정이 어려워 비방사성 물질을 이용해 성능 실험을 진행하였다. 방사성 물질을 이용한 제염실험은 Lab 규모의 장치를 이용해 당사의 방사선 화학실험실에서 수행하였다. 각각의 이 두 장비를 이용한 초임계 시스템을 이용한 제염실험 결과는 표 19, 표 20 에 나타내었다.

표 19. Pilot 장비를 이용한 초임계 장치의 비방사성 Co 제염 효율

적요 No	시료량 (ml)	리간드 투입량 (ml)	운전 모드	추출 전 비방사성 Co 농도(ppm)	추출 후 비방사성 Co 농도(ppm)	추출 효율 (%)
1	비방사성 Co 수용액 500ml	C-272 : 25ml DEA : 25ml	AUTO	55.2	0.592	98.9
2			AUTO	60	11.2	81.3
3			MANUAL	60	4.1	93.2

표 19 의 Pilot 장비를 이용한 제염효율은 운전모드에 상관없이 동일조건에서 높은 제염효율을 나타냄을 확인하였다. 이것은 이온상태로 존재하는 비방사성 Co의 경우 C-272, DEA와 같은 추출제를 사용하면 수용액 속의 Co를 거의 완벽하게 제거할 수 있음을 나타내어 비방사성 Co 물질을 이용한 제염성능 실험은 매우 우수한 것으로 나타났다.

표 20. Lab 장치를 이용한 폐수지의 제염 실험 결과

적요 No	리간드	HNO ₃ 시료량 (2%)	CaCO ₃ (g)	CaCl ₂ 시료량 (20%)	핵종	초기 방사능 농도 (Bq/g)	제염 후 방사능 농도(Bq/g)	제염 효율
1	C-272 : 2ml DEA : 2ml	50ml	1	X	⁶⁰ Co	11.17	6.51	41
					¹³⁷ Cs	1.35	0.49	63
2		100ml	1	X	⁶⁰ Co	2.25	1.46	35
					¹³⁷ Cs	0.027	N/D	100
3		50ml	1	X	⁶⁰ Co	2.15	1.5	30
					¹³⁷ Cs	-	-	-
4	X	X	100ml	⁶⁰ Co	1.94	0.50	74	
				¹³⁷ Cs	-	-	-	
5	X	X	100ml	⁶⁰ Co	2.04	0.55	73	
				¹³⁷ Cs	-	-	-	
6	TBP : 2ml	X	X	X	⁶⁰ Co	0.65	0.67	0
					¹³⁷ Cs	1.52	1.67	0

표 20 은 첨가제 및 리간드의 종류에 따른 제염효율을 나타낸 것이다. 첨가제와 리간드의 종류에 따라, 제염효율이 각기 다른 것을 볼 수 있는데, 탄산칼슘이 용해된 질산에 폐수지를 담근 채 초임계 추출을 하였을 때 30~40 %의 제염효과를 얻을 수 있었고 폐수지를 염화칼슘 수용액에 담근 채 초임계 추출을 진행하였을 때 70 % 이상의 높은 제염효율을 얻었다. 염화칼슘 수용액을 사용하여 높은 제염효과를 얻은것은 염화칼슘 수용액 속의 Ca 이온이 폐수지와 결합된 Co의 결합력보다 우세하여 Co를 추출하기 쉬운 형태로 만드는 것으로 여겨진다. TBP 리간드 물질을 추출제로 사용한 경우에는, 제염효과가 거의 없는 것으로 나타나 방사성 Co의 경우 C-272와 DEA가 적합한 리간드이며 제염효율이 상승시킬 수 있는 염화칼슘 수용액과 함께 사용한다면 저오염 폐수지의 처분에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

제 3 절 복합공정을 이용한 제염 효과

1. 복합공정

본 제염시스템은 제 1단계에서 초음파 제염공정 및 약품을 이용한 공정으로 이루어졌고 제2단계에서는 1단계 공정에서 핵종에 대한 완벽한 제염효과를 얻지 못할 경우에 대비해 적용하기 위한 공정으로 초임계 CO₂ 공정을 거칠 수 있도록 하였다.

2. 초임계 CO₂ 공정

초임계 CO₂ 공정은 장치가 너무 크고 실험을 위한 관리 구역의 설정에 제약을 받아 방사성오염 폐수지를 이용한 실증 실험은 직접 수행하지 못하고 Lab 규모의 소형 초임계 장치를 이용한 실험만을 수행하였다. 오염수지는 대부분 1단계 제염공정인 초음파 제염공정에서 목표제염 농도인 자체처분 허용제한값 이내로 만족시킴을 나타내었다. 따라서, 초임계 CO₂ 제염실험은 의도적으로 오염시킨 폐수지를 이용하여 제염효과를 평가하였다.

3. 공정별 제염 효과

제 1단계 제염효과(초음파)는 오염된 폐수지 초음파 제염을 실시해 본 결과, 대부분의 핵종이 이물질에 포함되어 있었으며 초음파 공정을 통해 폐수지 중 이물질을 제거 및 분리함으로써 폐수지의 방사성 농도를 자체처분 기준치(^{60}Co : 0.1Bq/g, ^{14}C : 1.0Bq/g)보다 1/3~1/10 수준까지 낮출 수 있었다. 또한 제 2단계 제염효과(초임계)의 초임계 장치는 염화칼슘 수용액을 투입하여 오염폐수지를 제염해 본 결과 약 70% 정도의 제염효율을 얻을 수 있었다. 앞에서 언급한 것처럼 오염폐수지에 대한 초임계 공정은 당사의 방사선 관리구역 설정의 어려움으로 실 제염효과를 평가할 수는 없었으나 비방사성 Co 오염 물질을 인위적으로 만들어 실험한 결과와 Lab 장치를 이용한 실험결과에 의하면 핵종에 대한 제염효과는 비교적 양호한 것으로 나타났다.

제 4 절 발전소 현장 성능시험

1. 현장 성능시험 개요

개발된 제염시스템은 1단계인 초음파 제염공정과 2단계인 초임계 제염공정 으로 구성되어 있으며, 개발된 Pilot 제염시스템의 성능평가를 위해 비방사성 물질로 오염시킨 모의시료와 현장에서 이송한 실제 폐수지 시료를 이용하여 성능평가를 수행하였다. 초음파 제염장치는 규모가 Compact 하여 방사화학실험실에서 비 방사성 모의시료 및 방사능을 띤 실제 폐수지를 대상으로 성능평가를 수행하였으나, 대량의 현장 폐수지 이송의 문제로 인하여 소량의 시료만을 투입하여 제한적인 조건에서 성능평가가 이루어 졌으며, 초임계 제염장치의 경우는 장치의 규모가 크기 때문에 방사화학실험실 내에 설치가 불가능하여 모의시료만을 대상으로 성능평가를 수행하였다. 따라서, 개발된 초음파 & 초임계 폐수지 제염장치의 명확한 성능평가를 위해서는 실제 처리조건에 준하여 현장에 설치한 후 처리예정인 폐수지를 대상으로 한 성능평가가 필수적으로 요구되므로 개발된 초음파 & 초임계 제염장치를 현장에 설치한 후 약 2주간에 걸쳐 실제 현장 폐수지를 대상으로 현장 성능 시험을 수행하였다.

2. 현장 성능시험 결과

초음파 제염장치의 경우 현장 설치 후 점검결과 장치 자체의 운전측면에서는 별다른 문제점이 발생되지 않았으나, 표 21 에 나타난 바와 같이 이물질의 제거를 위해 설치된 1개의 Bag Filter 및 3개의 Cartridge Filter가 급속히 포화되어 초음파 인가와 동시에 수행되는 이물질 제거공정이 원활히 진행되지 않는 현상이 발생 하였다. 이는 방사 화학실험실로 이송하여 시험하였던 폐수지와 금번 현장 실험에서 사용하였던 폐수지의 이물질의 성상 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 현장실험시 사용하였던 폐수지에는 이물질의 양이 상대적으로 많고 비교적 작은 입자들로 구성되어 있어 Bag Filter 및 Cartridge Filter에 걸러진 이물질이 Cake와 같은 형태로 Filter의 표면에 달라붙어 물의 원활한 흐름을 방해함으로써 충분한 유량이 발생하지 않게 된 것으로 여겨진다. 또한, 1회 처리시에 약 30L의 폐수지가 투입되나 폐수지 배출라인에 설치되어 처리된 폐수지를 저장하는 용도로 적용한 Bag Filter의 용량이 10L에 불과하여 1회 처리과정 중에 Bag Filter를 교체해야 하는 번거로움이 발생할 수 있어 이에 대한 보완조치를 하였다.

표 21. 초음파 제염장치 보완사항 및 해결방안

구 분	해 결 방 안
Bag Filter 및 Cartridge Filter 조기 포화	<ul style="list-style-type: none"> • 이물질 제거공정(순환공정) 초기에 발생하는 고오염 용수를 Bag Filter만 거친 후 외부로 배출(약 100L) • 대용량의 Bag Filter 추가 설치
처리완료 폐수지 배출 및 저장방안	<ul style="list-style-type: none"> • 현재 폐수지의 보관시에 사용하고 있는 마대에 초음파 처리된 폐수지를 직접 배출 • 마대 거치 및 용수회수용 배출용기 별도 제작

또한 초임계 제염장치는 현장 설치 후 점검 및 현장 폐수지를 이용한 운전결과, 운전 및 기능 측면에서는 별다른 문제점을 발견하지 못하여 별다른 보완조치 없이도 즉시 제염처리에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

초음파 제염장치의 현장시험은 이물질이 없는 용수를 투입하여 Bag Filter 및 Cartridge Filter 사이에서 걸리는 압력을 Check한 후 실제 폐수지를 투입하여 “투입 공정 → 처리공정 → 배출공정”을 수행하며 폐수지를 처리한 후 γ 핵종은 발전소 분석실에서 분석하고 β 핵종은 방사화학실험실로 이송하여 분석을 수행하였다. 필터 차압 시험은 백필터, 필터카트리지(10 μm , 1 μm , 0.5 μm)를 교체한 후 용수만을 이용하여 초음파 처리장치를 50 분간 운전하였고, 표 22 와 같이 초음파처리장치의 각 필터의 초기 차압은 백필터 0.100 Mpa, 10 μm 카트리지 0.060 Mpa, 1 μm 카트리지 0.050 Mpa, 0.5 μm 카트리지 0.04 Mpa로 나타났다.

표 22. 신폼 필터 차압 실험 결과

	백필터	10 μm 카트리지	1 μm 카트리지	0.5 μm 카트리지	비고
초기압력	0.100	0.060	0.050	0.040	
30분 후	0.100	0.060	0.050	0.040	
60분 후	0.101	0.061	0.050	0.040	

각 필터의 초기 압력을 확인한 후 이물질이 많은 폐수지를 초음파 처리장치에 투입하여 운전한 결과 Bag Filter 전단의 압력이 약 0.140 Mpa에 도달하면 유량이 현저히 줄어들어 드는 것을 확인하였으며, Bag Filter 전단의 압력이 0.149 Mpa에 도달했을때는 필터가 거의 막혀 1 μm 및 0.1 μm 필터의 압력의 0.001~0.005 Mpa로 거의 용수 흐름이 없음을 확인하였으며, 필터의 막힘 현상은 주로 Bag Filter와 10 μm 카트리지 필터에서 주로 발생하였다. 따라서, Bag Filter 전단의 압력계의 수치가 약 0.140 Mpa에 도달하면 Bag Filter와 1차 Cartridge Filter를 교체 하여야 한다.

표 23. 초음파 제염장치 현장실험 결과

Amount of Resin (L)	Put Place	Treating Time (min)	Pressure(MPa)				Activity(Bq/g)				Note
			Bag Filter	Cartridge (10um)	Cartridge (1um)	Cartridge (0.5um)	Co-60	Cs-137	C-14	H-3	
30		Initial	0.103	0.062	0.050	0.037	2.582	-	2.41	0.45	
		10	0.123	0.092	0.032	0.027					
		20	0.134	0.115	0.021	0.016	MDA		0.43	0.19	
		30	0.140	0.127	0.012	0.008					
		40	0.141	0.131	0.011	0.005	MDA		0.36	0.19	
		50	0.142	0.133	0.008	0.003					
		60	0.143	0.134	0.008	0.003	MDA		0.28	0.14	
35		Initial	0.103	0.065	0.055	0.042	2.88		2.41	0.45	
		10	0.106	0.068	0.058	0.046					
		20	0.109	0.067	0.056	0.045					
		30	0.109	0.066	0.055	0.044					Exchange bag filter & 10um cartridge filter after 3min operation
		40	0.110	0.064	0.053	0.042					
		50	0.110	0.063	0.052	0.040					
		60	0.110	0.062	0.050	0.039	0.1874		0.50	0.05	
10		Initial	0.109	0.065	0.055	0.042	1.244				
		20	0.109	0.057	0.044	0.029					
		40	0.112	0.053	0.040	0.027					
		60	0.112	0.051	0.038	0.025	0.123				
10		Initial	0.109	0.053	0.042	0.028	0.7944				
		10	0.132	0.031	0.027	0.020					
		40	0.146	0.005	0.001	0.001					
		60	0.147	0.005	0.001	0.001	MDA				
30		Initial	0.102	0.061	0.049	0.034	0.3902				
		20	0.118	0.086	0.072	0.062					
		40	0.147	0.141	0.020	0.017					
		50	0.148	0.144	0.010	0.007					
		60	0.149	0.144	0.005	0.003					

초음파 장치의 현장 이송 후 장치 점검과 더불어 발전소에서 보관중인 폐수지를 대상으로 5회에 걸쳐 성능시험을 수행하였고 그 결과를 표 23 에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 현장에서 시료로 사용한 폐수지의 경우, 이물질이 많고 입자의 크기가 미세하여 이물질을 여과하기 위한 Bag Filter 및 Cartridge Filter가 조기 포화되는 현상 발생하였다. 표 23 에 나타낸 바와 같이, 5회의 현장 실험과정에서 대부분 약 40분 경과 후에는 필터가 거의 포화되는 것을 확인하였다. 그러나 처리시간이 경과 하여도 Bag Filter의 압력이 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있으며 순환공정 초기에 일정시간 동안 순환수를 배출시킨 후 신품으로 교체된 Bag Filter 및 Cartridge Filter를 통과시키는 공정으로 수행하였다. 이를 통해 1 Batch 처리시에 투입되는 폐수지에 부착된 이물질 중 상당량은 순환공정 초기에 배출됨을 확인할 수 있었다. 폐수지에는 Co-60 외 Cs-137, C-14 및 H-3과 같은 핵종을 포함되어 있으나, 폐수지의 주 오염 핵종이며 발전소 현장에서 분석이 가능한 Co-60을 기준으로 초음파 제염장치의 성능을 평가하였으며, Co-60을 포함한 감마핵종은 초음파 처리 후 발전소내 분석실에서 수행하였으며, C-14와 H-3는 방사화학실험실로 이송하여 분석을 수행하였다. 현장 성능시험 및 분석 결과 표 23에 나타낸 바와 같이 처리전 폐수지의 방사능은 시료에 따라 1.2~2.8 Bq/g로 나타났으며, 초음파 처리 후 일부는 MDA 미만으로 떨어진 반면 일부는 자체처분 기준치인 0.1 Bq/g보다 다소 높은 수치를 나타내었다. 폐수지 초음파 제염 2차 실험의 초음파 제염장치에 대한 2차 성능시험은 이물질 제거공정 초기에 발생하는 다량의 이물질을 1차로 배출시킨 후 처리하는 공정으로 시험하였다. 표 24 에 초음파 제염장치 2차 실험에 대한 결과를 정리하였다.

표 24. 초음파 제염장치 2차 현장실험 결과

Amount of Resin (L)	Put Place	Treating Time (min)	Pressure(MPa)				Activity(Bq/g)				Note
			Bag Filter	Cartridge (10um)	Cartridge (1um)	Cartridge (0.5um)	Co-60	Cs-137	C-14	H-3	
30	A Tank	Initial	0.098	0.038	0.028	0.014	0.2449	0.0201	-	-	
		15	0.108	0.035	0.025	0.012	-	-	-	-	
		60	0.120	0.044	0.019	0.009	MDA	MDA	-	-	
30	B Tank	Initial	0.095	0.048	0.034	0.014	0.4343	0.0287	0.73	0.65	
		5	0.094	0.048	0.034	0.016	-	-	-	-	
		15	0.093	0.048	0.034	0.016	-	-	-	-	
		40	0.093	0.048	0.034	0.016	0.0549	MDA	BKG	BKG	

표 24 에서 보는 바와 같이 이물질 제거공정 초기에 발생하는 다량의 이물질을 약 100L의 용수와 함께 1차로 배출시킨 후 기존 Filter System으로 처리한 결과, 처리시간이 경과하여도 압력변화가 거의 없었으며, 처리후의 Co-60 방사능 수치도 자체처분 기준치 이하로 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서, 초음파 제염장치의 처리효율을 극대화 시키면서 Filter에 걸리는 부하를 줄이고 필터 사용량 절감 및 필터 교체 회수를 줄이기 위해서는 초기에 발생하는 다량의 이물질을 배출한 후 필터시스템을 통과시켜 처리하는 것이 바람직할 것으로 여겨진다. 초임계 제염장치는 개발과정 중에 실제 현장 폐수지를 대상으로 시험하지 못하였기 때문에 현장 성능시험 시에는 모의시료를 대상으로 도출되었던 최적조건에서 시료를 1단계 초음파 처리를 거친 현장시료를 투입하여 시험을 수행하였다. 초임계 제염장치의 현장시험 조건과 분석결과를 표 25 에 나타내었다.

표 25. 초임계 제염장치 2차 현장실험 결과

Amount of Regand				CaCl ₂ (5%)	Activity(Bq/g)				
C-272	DEA	PF	DCH		Co-60	Cs-137	C-14	H-3	
15	15	-	-	×	Untreated	0.044	MDA	-	-
					Treated	MDA	MDA	-	-
15	15	-	-	○	Untreated	0.826	MDA	-	-
					Treated			-	-
20	20	20	20	○	Untreated	0.542	MDA	-	-
					Treated	MDA	MDA	-	-
25	25	30	30	○	Untreated	1.455	MDA	-	-
					Treated			-	-

초임계 제염장치의 경우, 앞선 기능적인 측면의 점검에서도 별다른 보완사항이 필요하지 않았으며, 1단계의 초음파 처리단계를 거친 현장시료를 투입하여 시험한 결과 초음파 처리 후 잔류하고 있는 핵종이 대부분 제거되어 MDA 미만으로 분석됨을 확인할 수 있었다. 앞서 언급한 바와 같이 초음파 제염장치의 경우, 필터의 조기포화로 인해 제염효율이 떨어지고 빈번한 필터 교체가 예상되기 때문에 기구적인 측면에서의 장치보완이 필요하다. 당초 초음파 처리장치에서 폐수지에 부착되어 있는 이물질은 폐수지가 수지저장탱크에서 수지처리탱크로 옮겨진 후 초음파가 조사됨과 동시에 이물질이

포함된 용수를 다단계의 필터시스템을 통과시키면서 제거되도록 설계되어 있으나 필터가 조기 포화되면서 순환되는 용수의 유량이 저감되고 이에 따라 원활한 이물질 제거가 어려워지는 현상이 발생하였다. 이를 개선하기 위하여 순환공정 초기에 약 100L의 용수를 오염물질과 함께 배출시킨 후 필터시스템으로 순환시켜 필터시스템에 걸리는 부하를 줄일 수 있도록 공정을 수정하였다. 또한, 제거된 이물질은 Bag Filter 및 Cartridge Filter에 여과되며 제거되는데 Bag Filter가 Cartridge Filter 보다 상대적으로 많은 양의 이물질을 여과할 수 있어 효율개선 및 필터 소모량 절감을 위하여 추가로 2개의 Bag Filter Housing을 설치하였다. 그림 17 에 최종 수정된 초음파 제염장치의 배관 구성도를 나타내었다.

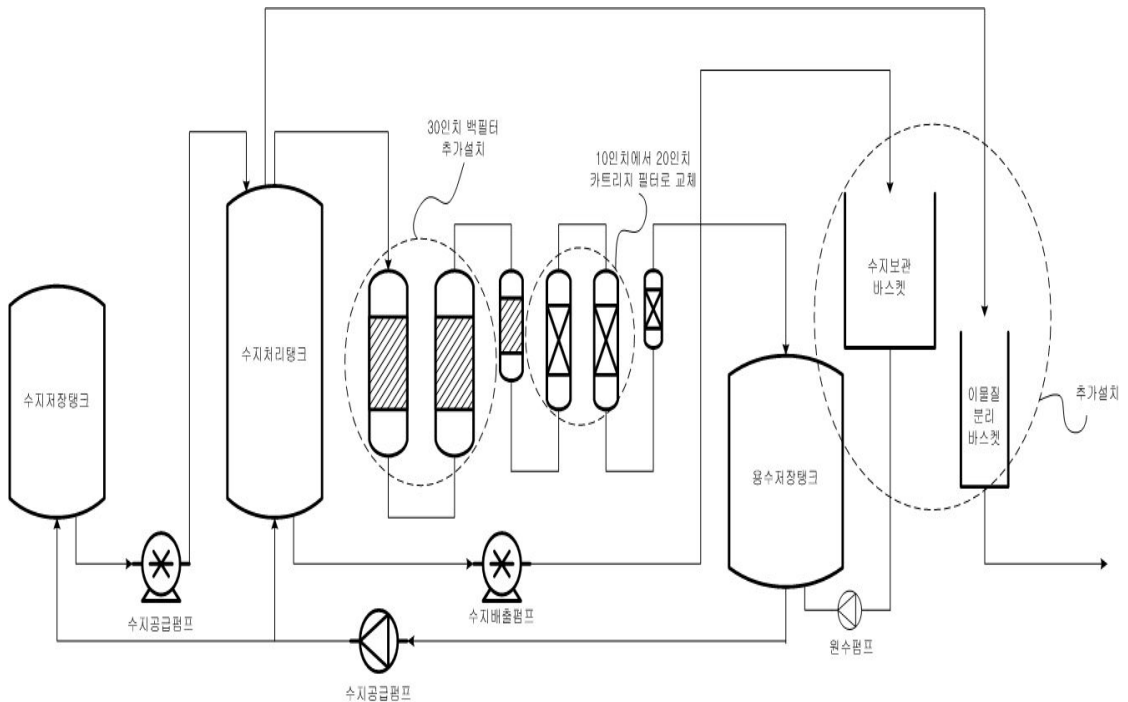


그림 16. 폐수지 제염장치 공정 및 배관 수정도

초음파 제염장치는 1회 운전시 약 30L의 수지가 투입되어 처리되나, 기존에는 약 15L 정도 용량의 Bag Filter로 폐수지를 배출시키도록 설계되었다. 이는 2단계 공정인 초임계 제염장치의 용량(12L)에 맞추어 설계한 것이나 처리된 폐수지의 방사능 분석을 통하여 2단계 공정없이 자체처분 기준치 이하로 제염이 가능한 경우에는 배출공정을 중

지한 후 Bag Filter를 교체해야 하는 번거로움이 발생할 수 있다. 따라서, 1단계 초음파 처리공정만을 적용하는 경우에 초기에 투입된 30L의 폐수지 전량을 배출하여 저장할 수 있는 별도의 수지배출 바스켓을 추가로 제작하였다. 수지 배출바스켓의 상부에는 제염장치에서 배출되는 수지를 저장하기 위한 자루를 거치할 수 있도록 하였고, 하부에는 폐수지와 함께 배출되는 용수를 회수할 수 있도록 구성하였다. 그림 17에 신규로 제작한 수지배출 바스켓의 개요도를 나타내었다.

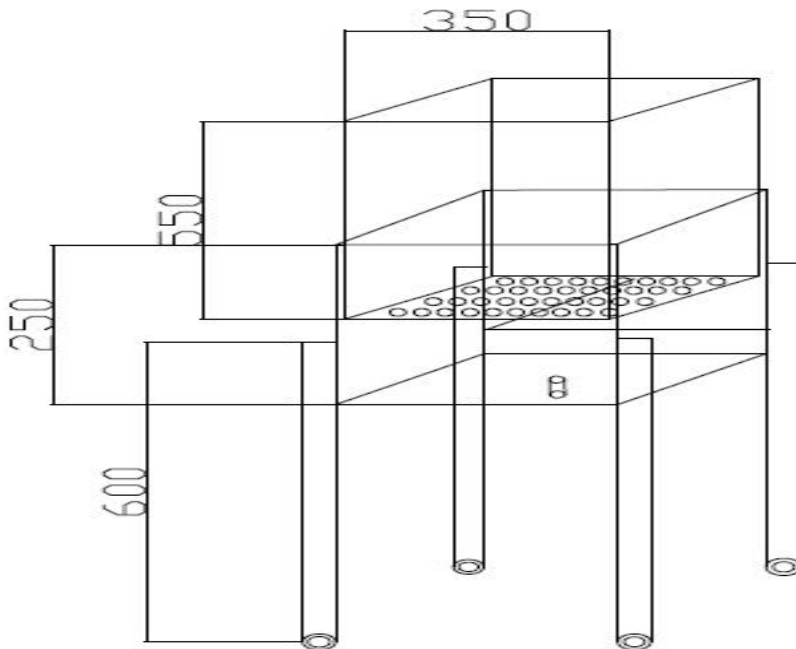


그림 17. 폐수지 배출 및 용수회수 바스켓

초입계 및 초음파 제염장치를 이용하여 현재 보관중인 폐수지를 제염할 경우의 제염처리시에 필요한 각종 소모품 및 필터류와 같은 2차 폐기물 발생량을 추정하여 보았다. 초음파 제염장치의 운전에 따라 발생하는 폐기물은 폐수지에서 분리된 이물질과 이물질의 여과를 위해 사용된 필터류가 대부분으로 1톤의 폐수지 처리를 기준으로 예상량을 계산하여 보았다.

표 26. 초음파 제염장치 2차 폐기물 발생량(필터류)

2차 폐기물 종류	pore size (um)	교체주기(L)		발생량 (개/ton)		개당 부피 (L)	2차 폐기물 발생량 (L/ton)	
		용수 배출	용수 미배출	용수 배출	용수 미배출		용수 배출	용수 미배출
1차 Bag filter	25	600	200	0.6	5	0.525	0.315	2.625
2차 Bag filter	10	600	400	0.6	2.5	0.525	0.315	1.313
3차 Bag filter	5	600	500	0.6	2	0.145	0.087	0.290
4차 카트리지필터	5	600	300	0.6	3.3	1.400	0.840	4.620
5차 카트리지필터	1	600	300	0.6	3.3	1.400	0.840	4.620
6차 카트리지필터	0.5	600	400	0.6	2.5	0.700	0.420	1.750
Total	-	-	-	3.6	18.6	-	2.817	15.218

표 27. 초음파 제염장치 2차 폐기물 예상량(이물질)

2차 폐기물 종류	주요물질	함유량(Vol%)	2차 폐기물 발생량(L/ton)
방사성 이물질	Fe	3~5	30~50

표 28. 초음파 제염장치 2차 폐기물 발생량(합계)

2차폐기물 종류	발생 폐기물 부피 (L/ton)		예상 드럼량 (드럼/ton)		비고
	용수 배출	용수 미배출	용수 배출	용수 미배출	
1차 Bag filter	0.315	2.625	0.002	0.013	① 용수 배출시 : 약 3.7톤 처리 시 1드럼 발생 ② 용수 미 배출시 : 약 2.9톤 처리 시 1드럼 발생
2차 Bag filter	0.315	1.313	0.002	0.007	
3차 Bag filter	0.087	2.90	0.0005	0.015	
4차 카트리지필터	0.84	4.62	0.005	0.023	
5차 카트리지필터	0.84	4.62	0.005	0.023	
6차 카트리지필터	0.42	1.75	0.003	0.0088	
방사성 이물질	30~50	30~50	0.25	0.25	
Total	52.8	67.8	0.27	0.34	

표 28 에서 보는 바와 같이 초음파 제염장치를 이용하여 처리할 경우 처리용수를 매 공정마다 재순환 사용하지 않고 액체폐기물처리 계통으로 보내는 운전 모드를 채택 시에는 폐수지 3.7톤 처리시 1드럼의 고체폐기물이 발생할 것으로 예상되며 처리용수 미배출 시에는 즉, 처리용수 재사용시는 처리수중의 불순물로 인해 폐수지 2.9톤 처리 시 1드럼의 2차 폐기물이 발생할 것으로 예상된다.

초임계 제염장치의 경우는 1단계 초음파 공정에 의해 폐수지에 부착된 이물질이 제거된 상태에서 처리되고 폐수지 내의 핵종과 리간드와의 화학적 결합을 통하여 제거하기 때문에 2차 폐기물의 발생량은 상대적으로 작으며, 투입된 후 핵종과 결합하여 회수된 리간드만이 2차 폐기물로 발생하게 된다.

표 29. 초임계 제염장치 리간드 소요량

구 분	품 목	투입량 (mL,g/ 회)	예상 폐기물량 (kg/ton)
⁶⁰ Co추출 리간드	C-272 (DIISOCTYLPHOSPHINIC)	10ml	3
	DEA (DIETHYLAMINE)	10ml	
¹³⁷ Cs추출 리간드	CIS-DICYCLOHEXANO-18-CROW	3g	
	PERFLUORO-1-OCTANESULFONI	3g	

표 29 에서 보는 바와 같이 초음계 제염장치에 투입되는 폐수지 10L에 대한 리간드의 양은 26~52g으로 매우 작으며 이를 1톤의 폐수지 처리시를 기준으로 계산하면 2.6 ~ 5.2kg 정도로 예상된다.

제 5 장 결 론

본 연구를 통해 원자력발전소 증기발생기 취출수계통에서 발생하는 일부 폐수지는 미량 오염된 방사성 물질을 추출·제거하기 위한 신 개념의 초음파/초임계 제염장치를 개발하였다. 본 장치는 소형화 및 자동화 개념을 도입하여 장치운영의 편리성과 효율적 운영을 위한 발전소의 공간적 한계를 극복하는데 초점을 맞추어 개발하였다.



초음파 제염장치



초임계이산화탄소 제염장치

그림 18. 초음파/초임계 이산화탄소 기술을 이용한 폐수지 제염장치

본 연구를 통해 제작된 초음파 제염장치는 오염폐수지를 시간당 30ℓ씩 처리할 수 있으며 초임계 제염장치는 시간당 최대 12ℓ까지 처리할 수 있다. 발생 폐수는 필터를 통해 정화 후 재 사용하고 사용한 이산화탄소는 압축, 냉동시켜 액화상태로 회수하여 재 사용된다. 본 장치를 이용하여 제염 처리한 결과, 초음파 제염장치는 제염효율이 90 ~ 99.% 정도로 나타났고 초임계 이산화탄소 제염장치는 Co 핵종에 대해 최대 70% 제거 효율을 나타냈다.

성능시험 결과, 당초 제시했던 각 핵종별 자체처분 목표치보다 훨씬 낮게 나타났다. ^{60}Co ^{137}Cs 에 대해서는 당초 제염목표치인 0.1 Bq/g 보다 약 1/3 ~ 1/10수준 또는 MDA 수준으로 나타났으며 베타 핵종인 ^{14}C 의 경우는 제염목표치를 자체처분 기준값 (1.0 Bq/g)보다 절반 정도 낮은 0.5 Bq/g로 잡았으나 시험결과 약 0.04 Bq/g으로 거의 백그라운드 값 수준으로 나타났다.

또한, 연구를 진행하는 과정에서 제염장치의 운전 편의성과 안전성을 제공하기 위해 최적화된 제염공정 절차서를 작성하였으며 자동연속처리가 가능한 상용 제염시스템 설계자료를 확보하였다. 향후 본 제염기술을 잘 활용 한다면, 원전에서 발생하는 극미량의 오염 폐수지에 완벽한 제염을 수행하게 되어 방사성폐기물 발생량 저감화와 처분비용 저감화에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) 한국원자력안전위원회 고시 2013-33호, “방사성폐기물의 자체처분에 관한 규정”
- 2) IAEA Safety Standard Series No. RS-G-1.7 “Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance”, 2004
- 3) 한국원자력안전기술원(KINS), “경수로형 원자력발전소 규제기준 및 규제 지침 (KINS/RS-N1200), 2011
- 4) <http://www.kntc.re.kr/openlec/nuc/Atomicpile/chapter3/3-7.htm>
- 5) DOWEX Ion Exchange Resins, Product Information, “DOWEX HGR NG (H)”
- 6) DOWEX Ion Exchange Resins, Product Information, “DOWEX SBR LC NG (OH)”
- 7) Graver Technologies, Data Sheet, “GRAVEX GR 3-16 N”
- 8) Purolite NRW 36, Nuclear Grade Mixed Bed, Product Data Sheet, 2007
- 9) Characteristics and applications Summary, Purolite Brochure, The Purolite Company, 2008
- 10) SSI report, Review of C-14 inventory for the SFR facility, 2002
- 11) Proceeding of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 2(1), pp147-147, 2004
- 12) Ion Exchange Introduction, Rohm and Haas, 2008
- 13) 한국특허 10-0739855, 2007.07.29.
- 14) J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 4(4), p373-384, 2006
- 15) 한국방사성 폐기물학회 추계학술대회 논문요약집, 2006
- 16) 한국특허 10-0747762 2007,08.02
- 17) Korean Chem. Eng. Res., Vol. 45, No. 4, pp 319-327, 2007
- 18) 한국특허 10-1065353, 2011.09.08
- 19) <http://blog.naver.com/craem?Redirect=Log&logNo=40002277298>
- 20) <http://blog.naver.com/isteel9606?Redirect=Log&logNo=120187817279>
- 21) <http://www.o2bubble.co.kr/default/>
- 22) Wai, C. M., Lin, Y., Brauer, R. and Wang, S., Talanta 40, p1325, 1993
- 23) Erkey, C., J. Supercritical Fluids 17, p259, 2000

감사의 글

한국전력공사에 입사하여 발전소 계통을 거쳐 현재는 방사선안전팀에서 폐기물업무를 하면서 많은걸 배웠고 무던히도 발버둥 쳤던 지난 대학원 생활의 지지와 격려를 아끼지 않으셨던 회사 동료들께 진심으로 감사의 말씀을 전해드리고 싶습니다.

직장과 학업을 병행하는 일이 결코 쉽지만은 않았지만 저에게 애정을 쏟아 주시는 많은 분들의 도움으로 인해 이렇게 무사히 졸업을 할 수 있었습니다. 모든 과정을 마치고 논문의 마지막을 감사의 글로 남기려고 하니 항상 도움만 받고 나보다는 남을 먼저 배려할 줄 하는 지혜를 얻어서 매우 기쁩니다. 대학원 총무를 하면서 많은 일들이 있었지만 때론 많은걸 챙겨 드리지 못해 동료들께 죄송할 뿐입니다

본 논문의 지도와 원자력공학이라는 새로운 학문의 길을 소개해주시고 끝까지 이끌어 주신 송종순 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀 올립니다. 논문 심사과정과 평소 학교생활을 통하여 변함없는 애정과 관심으로 격려해 주신 정운관 교수님, 김진원 교수님, 나만균 교수님, 이경진 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

끝으로, 석사 과정을 무사히 마칠 수 있도록 배려해 주고 늘 곁에서 따뜻하게 도와 준 분들께 감사드립니다.

2015년 11월

김 대 성

저작물 이용 허락서					
학 과	원자력공학과	학 번	20147264	과 정	석사
성 명	한글 : 김 대 성 한문 : 金 大 成 영문 : KIM DAE SUNG				
주 소	전남 영광군 홍농읍 홍농로 546, 한수원 사택 112동 204호				
연락처	E-mail : kds00765@khnp.co.kr				
논문제목	초음파/초임계 설비를 이용한 한빛1 발전소 증기발생기 취출수계통의 폐수지 감용 연구				
	A study on the waste resin reduction of the Hanbit NPP 1 steam generator blow-down system using ultrasonic/supercritical plant				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함. 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음. 7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(O) 반대()</p> <p style="text-align: center;">2015년 11월</p> <p style="text-align: right;">저작자 : 김 대 성 (인)</p> <p style="font-size: 1.2em; font-weight: bold; text-align: center;">조선대학교 총장 귀하</p>					