방사성 동위원소를 이용한 제염제 혼합확산장치의 유동특성분석 Flow Characteristics Analysis of the Decontamination Device with Mixing and Diffusion Using Radio-Isotopes Tracer

오대민[†] · 강성원 · 김영석 · 정성희* · 문진호* · 박장근*

Daemin Oh[†] · Sungwon Kang · Youngsug Kim · Sunghee Jung* · Jinho Moon* · Jangguen Park*

한국건설기술연구원 · *한국원자력연구원

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Korea Atomic Energy Research Institute

(Received March 6, 2017; Revised April 4, 2017; Accepted April 12, 2017)

Abstract : The purpose of this study was predicted the effects of mixing and diffusion due to the operation of the apparatus before the development of the mixed diffusion device for the decontamination absorbent to minimize the influence of contaminant inflow due to radiation accident. The tracer used for the flow characteristics was ^{68}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, which is a radioactive isotope, and 2 inch NaI radiation detector was used to detect it. The impeller of the decontamination mixed diffusion system applied to this study was made into three types and the mixing diffusion effect was compared. As a result of analyzing the flow characteristics of the radio-isotope with decontamination mixed diffusion device, mixing, diffusion and flow pattern were obtained. The radial mixing type impeller was able to diffuse to the water surface by the upflow flow, and the fin structure was adjusted for finding optimal conditions. The model 3 type consists of a fin guiding part and an auxiliary fin so that the diffusion speed is higher than that of other types of impellers. It also showed a short time to reach complete mixing.

Key Words : Radio-isotopes, Decontamination, Flow Characteristics, Tracer, Impeller, Detection

요약 : 본 연구의 목적은 방사능 사고로 인한 오염물질 유입으로 인한 영향을 최소화하기 위한 제염제의 혼합확산장치 개발에 앞서 장치 가동으로 인한 혼합 및 확산영향을 예측하는데 있다. 유동특성분석을 위해 사용된 추적자는 방사성 동위원소는 Gy, To이며, 이를 검출하기 위해 2인치 NaI 방사선 검출기를 사용했다. 본 연구에 적용된 제염제 혼합확산장치의 임펠러는 3가지 type으로 제작하였다. 방사혼합형 임펠러는 상향류 흐름을 이용하여 수표면으로 확산이 가능하며, 최적의 조건을 찾기 위해 핀 구조를 조정하였다. 방사능 동위원소를 이용한 제염제 혼합확산장치의 유동특성을 분석한 결과, 모델별 혼합확산과 유동패턴특성을 획득하였다. Model 3 type은 별도의 Fin유도부와 보조 Fin이 구성되어 있어 다른 type의 임펠러보다 확산속도가 크고 완전혼합에 도달하는 시간이 짧게 나타났다.

주제어 : 방사성 동위원소, 제염, 유동특성, 추적자, 임펠러, 검출

1. 서론

최근 우리나라는 지진발생이 증가되고 있으며 인접국의 원자력발전소의 건설이 지속적으로 증가하고 있어 대규모 원전사고에 대한 위험성이 증가하고 있다.¹⁾ 일본의 후쿠시마 원전사고는 해저에서 발생한 규모 8.9의 강진과 대형 쓰나미로 인해 사고등급 7등급인 대형 방사능 사고가 발생하였다. 일본은 재난 및 사고에 대한 선진 대응능력을 갖추고 있었지만 원전사고 초동대응 실패로 인해 전력공급 중단 및 방사능 물질이 대량으로 누출되었다. 이 사고로 인해 대규모 인명·재산피해가 발생되었으나 현재 진행중인 피해와 영향은 예측할 수 없다.²⁾ 우리나라는 현재 전력수요량이 증가하고 있어 원전밀집도가 높아 위험성이 높은 지역임에도 불구하고 원자력발전소는 계속적으로 계획되고 있다. 또한, 인접국의 원전사고 발생시 지역적, 기후적 취약성이 높아 방사성 오염물질 유입으로 인한 위험성이 높다.³⁻⁵⁾

원전사고는 원전 주변과 해수오염의 문제뿐만 아니라 상

수원 및 수계 등 피해범위가 매우 넓으며 상수원 및 수계의 오염 시 식수와 농업·공업용수의 공급중단으로 인한 수자원 이용에 치명적인 영향을 가져올 것이다. 방사능 오염물질로 인한 오염 후 수자원 복원 및 사용까지 얼마의 시간이 경과해야하는지 알 수 없어 방사능 노출에 대응하기 위한 초동대응 시스템 구축이 요구된다.⁶⁾ 이러한 방사능 노출로 인해 방사능 제염제를 수체내로 안정적으로 주입하고자 현재 수질개선 목적으로 이용되고 있는 물순환장치를 이용하고자 한다. 다음의 Table 1은 국내에 적용되어 있는 물순환장치 기술을 비교하였다.⁷⁾ 이 중 Type A는 미세기포 발생장치를 하부에 설치하고 상부에 혼합장치를 구성하여 산소 전달 및 혼합을 유도하는 기술이며, 좁은 영향권에서 산소전달과 혼합효율이 높은 것이 특징이다. Type B는 저층수의 물을 가이드를 통하여 표층으로 이송시켜 혼합을 유도하는 기술로서 임펠러는 rolling dish 형태로 저속 회전을 통하여 발생하는 상승류를 이용한다. Type C는 Jet-diffusion를 이용하여 표층에 빠르게 확산하는 장치로 수표면에서의 빠른 확산과

[†] Corresponding author E-mail: daeminoh@kict.re.kr Tel: 031-995-0867 Fax: 031-910-0291

Table 1. Comparison efficiency of water circulator with mixing and diffusion

Items	Operation	Discharge velocity (m/s)	Discharge capacity (m ³ /day)	Influence area (m)	Power (kW)
Type A	Aeration + Mixing	0.4	3,500	50	2.1
Type B	Surface Renewal	0.7	11,500	80	0.6
Type C	Jet-diffusion + Mixing	8 - 12	75,000	160	5.5

수층에서의 혼합이 가능하며, 영향반경을 확대하기 위해 토출유속을 증가시킬 수 있다.

방사능 오염물질을 흡착하기 위해서는 제염제와 오염물질과의 접촉시간을 증가시켜야 하며, 제염제의 확산이 빠르게 이루어져야 한다. 그러므로 제염제의 급속혼합과 확산을 목적으로 하는 임펠러의 개발이 필요하여 본 연구에서는 방사혼합형 임펠러를 개발하여 수체에 적용하고자 한다. 본 임펠러의 수체 적용에 앞서 제염제 투입효과를 증가시키기 위해 임펠러 가동시의 유체의 혼합 및 확산 거동특성의 분석이 필요하다. 실제 수체에서의 유체혼합 및 확산거동특성을 분석하는 기법으로 염료 및 전해물질을 이용하여 추적자 실험을 실시하고 있다.⁸⁾ 최근 추적자로서 방사성 동위원소를 이용하여 유체내의 흐름을 실시간으로 측정한 연구가 진행되고 있으며, 이 때 사용되는 짧은 반감기의 방사성 동위원소는 소량 주입으로도 검출되어 추적자를 통해 유체의 물리적 거동을 효과적으로 분석할 수 있다.⁹⁻¹⁴⁾

따라서 본 연구는 수중 방사능 오염물질 처리를 위해 적용할 제염제 혼합확산장치를 방사성 동위원소 추적자를 이용하여 유동패턴 및 혼합·확산 성능을 검증해 임펠러 운전 인자에 대한 기초인자를 획득하는데 목적이 있다.

2. 실험 방법 및 재료

2.1. 실험장치

방사능 노출시 수계로 유입되는 방사성 오염물질을 제염제와 급속 혼합하여 흡착하기 위한 방법으로 방사혼합형 임펠러(Ø270 mm)를 설계하였다. 임펠러는 수표면에서 수직

방향으로 상향류 흐름을 발생시켜 상, 중, 하부의 물을 제염제와 혼합함과 동시에 표면으로 확산이 가능하다. 방사혼합형 임펠러의 내부날개 각도변화에 따른 혼합성능을 평가하기 위하여 4.4 mM × 2.4 mL × 0.6 mH의 수조를 제작하였다. 수위는 하부로부터 0.36 mH로 채워진 물의 용량은 4.12 m³이다. 수조는 전 방향에서 내부 유동의 관찰이 가능하도록 강화유리로 제작되었으며, 비중 1.02의 유동체를 주입하여 육안으로 유동의 관찰이 가능하도록 하였다. 방사혼합형 임펠러는 Model I, II, III로 3가지 Type으로 제작되었으며 Table 2에 그 형상을 나타내었다. 수조 상부에 임펠러를 회전하기 위한 동력장치와 Shaft가 구성되어 있으며, 정밀한 회전속도 조절이 가능한 인버터가 설치되어 있는 것이 특징이다.

방사혼합형 임펠러는 단일 Body에 다수의 Fin이 부착되어 수표면에서 심층부까지 회전상승류를 형성하여 상, 중, 하부가 혼합된 혼합수를 표면으로 빠르게 토출하는 구조를 가지고 있다. Model I의 임펠러는 수면과 Fin의 각도를 수직으로 하여 하부 회전류를 상승류로 전환하여 상부로 토출하고 흐름을 유도하는 특징을 가지고 있으며, Model II는 Model I의 토출부직경의 확장형으로 Fin의 각도가 수면으로부터 회전방향으로 기울어 Fin에서 토출부까지의 상승유속을 증가시키는 형태를 가지고 있다. Model III는 Model II 개방형 Fin에서 손실되는 유량을 최소화하기 위해 각 Fin에서 별도의 유도부가 구성된 형태를 가지고 있으며, 토출면적을 증가시키기 위한 별도의 보조 Fin이 구성되었다. 따라서 상부 토출유속과 하부 상승유속을 증가시키고 임펠러 중심부의 회전유속을 증가시켜 수직방향의 영향권을 증가시키는 특징을 가진다.

2.2. 검출기의 배치

방사혼합형 임펠러의 제염제 확산 성능 평가를 위한 검출기는 2인치 NaI 검출기를 이용하였으며, 다음의 Fig. 1과 같이 Lab-scale 수조에 중심에서 대각선 방향으로 방사선 검출기 설치를 위한 지그를 설치하고, 중심에서부터 80, 145, 218 cm 위치에 수면으로부터 11 cm 잠기도록 설치하였다. 방사혼합형 임펠러는 하부로부터 흡입된 물을 수표면으로 빠르게 분사하는 기능으로 운동방향을 x, y 축이라 할 때, z 방향의 방사능을 검출하기 위해서는 검출면을 수조 중심부에 위치하도록 설치하였다.

Table 2. Structure of radial mixing type Impeller

Model I	Model II	Model III

Fig. 1. installation spot of 2 inch NaI detector using radio-isotopes.

Table 3. Characteristic of radio-isotopes

Radio-isotope	Half life	Rhm	Energy	Dose-rate	Dose
^{68}Ga	67.6 min	1.763×10^{-4} $\text{mSv} \cdot \text{m}^2 /$ $(\text{hr} \cdot \text{MBq})$	0.511-1.883 MeV	6.5-9.7 μSv	37-57 MBq (1.5 mCi)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.0 hr	3.32×10^{-5} $\text{mSv} \cdot \text{m}^2 /$ $(\text{hr} \cdot \text{MBq})$	0.140 MeV	2.4 μSv	72 MBq (2.0 mCi)

2.3. 실험방법

실험에 사용된 방사성 동위원소 추적자로 사용된 ^{68}Ga 과 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 은 안전관리 규정에 따라 사용되었으며, 그 특성을 Table 3에 제시하였다. 방사성 동위원소는 Ge/Ga 및 Mo/Tc generator에서 ^{68}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 을 용출하여 이용하였으며, 용출된 방사성 동위원소를 1m 거리에서 선량률을 측정된 후 감마상수로 나누어 방사능을 산출하였다.

아래 Fig. 2에 나타난 것과 같이 방사성 동위원소는 텅스텐으로 차폐된 주사기와 30 cm의 주사바늘을 이용하여 임펠러 바닥면에 주입하였다. 방사성 동위원소 추적자의 주입

은 임펠러가 정지된 상태로 진행되었으며, 주입완료 후 아래 Table 4에 나타난 것과 같이 임펠러를 100 rpm의 속도 (최대 1.88 m/s)로 작동시켰다. 방사성 동위원소 추적자실험은 각 검출기에서 0.5초마다 계측하고, 방사성 동위원소가 완전히 확산되어 모든 방사선 검출기의 계측신호가 일정하게 유지될 때까지 진행되었다. 계측된 데이터는 배경방사선을 제거하고 방사성 동위원소의 반감기를 보정하였다. 본 추적자실험을 통해 실험대상 임펠러의 완전혼합과 유동형상, 각 검출기로의 도달시간 등을 분석하여 수체내의 혼합확산 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 검출기 도달시간 및 유동패턴 분석

방사성 동위원소는 Fig. 3에서 보인 바와 같이 임펠러 정지 상태에서 수조 바닥 중심부에 주입하고 임펠러를 가동하였다. 방사성 동위원소 추적자 계측 순서를 바탕으로 유동을 추정하였으며, 임펠러 Model I-III의 모델에서 모두 동

Fig. 2. Injection method of radio-isotopes for tracer test.

Table 4. Mixing and diffusion effect by operating impeller

Model I	Model II	Model III

Fig. 3. Flow pattern by detection of radio-isotopes.

Table 5. Complete mixing and initial arriving time by detector

Model	Arrival time (sec) (Intensity)			Complete mixing (sec)
	D.01	D.02	D.03	
I	5 (0.023)	15 (0.012)	83.5 (0.024)	520
II	13.5 (0.020)	18.5 (0.025)	50 (0.011)	270
III	-	11 (0.014)	31 (0.010)	345

일한 패턴의 유동이 관찰되었다. 수조에서의 유동은 흡입에 의한 하부 유동과 토출에 의한 상부 유동으로 구분되며 두 유동의 상호작용으로 Fig. 3에서와 같이 ①-⑨ 유동으로 나타난다.

Model I-III의 방사성 동위원소 추적자 계측에 따른 도달 시간을 Table 5에 나타내었다. Model I에서 D.01 최초 도달 시간은 5 sec, D.02 도달시간은 15 sec, D.03 도달시간은 83.5 sec로 계측되었다. D.01 최초 도달 후 강도가 0.35 arb까지 도달 후 다시 0.086 arb까지 감소하였다가 다시 상승하는데 이는 Fig. 3에서 ③과 같이 최초 토출된 물의 일부가 임펠러의 흡입구로 유입되는 과정과 D.02로 확산되는 과정이 관찰되었다. 이와 같은 반복과정을 통하여 혼합유동의 확장이 발생하며 520 sec 이후 완전 혼합이 이루어졌다.

Model II에서는 D.01 최초 도달시간은 13.5 sec, D.02 도달시간은 18.5 sec, D.03 도달시간은 50 sec로 계측되었

다. Model I과 추적자 도달시간을 비교한 결과 D.01, D.02에서 각각 최초 도달 시간이 8.5 sec, 3.5 sec 느리게 나타났다. 또한 완전 혼합시간도 Model II가 175 sec 빠르게 나타났다. 이러한 결과는 Model II의 Fin 구조에 의해 나타난 결과로 예측된다. 물에 잠기는 Fin의 각도가 Model I은 수면에서 하부방향으로 90°로 설계된 반면 Model II는 회전방향으로 67° 기울어져 설계되어 Model I보다 흡입 유속이 30 % 빠르게 유입된다. 설계된 방사혼합형 임펠러는 회전에 의하여 하부 회전수류를 형성하고 상향류(②)로 전환되어 토출구로 이송되는 원리를 가지고 있다.

일정한 속도의 회전유속이 형성되어 하부층에 전달되는 상향유속이 발생하는데 Model II는 Model I에 비해 흡입 유속이 빠르기 때문에 회전수류를 형성하기 전에 임펠러 흡입부로 유입되어 상향수류를 형성하는 시간이 증가한 것을 판단된다. 방사성추적자를 수조 하부에 유입하였기 때문에 임펠러 흡입부로 추적자의 이송이 느려 D.01, D.02에서 검출되는 시간이 증가한 것으로 판단된다. 하지만 D.03의 검출속도는 Model II가 빠르게 나타났다. 이는 표면 확산속도가 Model I에 비하여 빠르다는 것을 의미하며 혼합확산의 효율 또한 높을 것으로 판단된다.

Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 Model III의 방사성추적자의 계측에서 D.01 검출기의 계측신호의 검출 폭이 갑자기 감소 또는 증가하는 등 이상신호가 발견되는데, 이는 반응조

Fig. 4. Result of detection of radio-isotopes tracer.

기에 방사능검출기의 계측한계를 넘어섰기 때문이다. Model III의 D.01 최초 도달시간은 2.0 sec, D.02 최초 도달시간은 11 sec, D.03 도달시간은 31 sec로 계측되었다. D.01의 계측 값의 정확성을 파악할 수 없어 D.02, D.03 검출기의 도달시간을 비교한 결과 Model III 검출기 값이 가장 빠른 도달시간을 기록하였다. Fin의 설계 시 토출유속을 증가시키기 위한 방법으로 Fin의 흡입구 옆면을 개방형에서 폐쇄형으로 설계하고 토출구의 각도를 회전의 역방향으로 설계하였다. 검출기에서의 도달시간을 비교한 결과 토출유속의 증가가 D.03 검출기의 도달 시간을 감소시켰고, 완전혼합의 시간도 감소시킨 것으로 판단된다. 그림에서 ①-⑨ 연속과정이 빠르게 연결되어 완전혼합의 속도 또한 빠른 것으로 판단된다.

3.2. 검출기 위치에 따른 모델별 성능 비교

아래 Fig. 5는 검출기 위치에 따른 모델별 도달시간을 비교하여 제염제 혼합확산장치의 성능을 비교하였다.

Model I, II의 관측된 계측 값은 유사한 패턴으로 검출되었다. 두 Model의 Fin의 형태가 하부 흡입구의 각도와 토출면의 길이를 제외하고 모두 동일한 조건을 가지고 있으므로 다음과 같은 계측 값의 패턴이 형성된 것으로 판단된다. 하지만 두 Model의 추적자 도달시간은 가동 초기에는 Model I이 빠르나 가동 후 유동이 형성되어 완전혼합을 이루는 시간은 Model II가 빠르게 관측되어 제염제의 확산

및 혼합에는 Model II가 더 적합하다고 판단된다. Model III의 경우 가동시간에 따라 계측 값의 증가와 감소를 반복하고 있으며, 이는 Fig. 5에서 설명한 바와 같이 ①-⑤번까지의 과정이 다른 두 모델에 비하여 빠르게 진행되어 추적자의 흡입과 토출이 연속적으로 발생했다고 판단된다. 또한 흡입에 의한 하부 유동과 토출에 의한 상부 유동의 상호작용으로 Fig. 5에서와 같이 ①-⑨의 진행과정이 빠르게 이루어져 완전 혼합을 이루는 시간이 감소한 것으로 판단된다. 단 Model III의 Fin의 형태와 구성이 다른 모델에 비하여 높은 동력을 필요로 하는 구조로서 동력과 확산-혼합의 효율을 검토할 필요성이 있다.

4. 결론

본 연구에서는 방사성 동위원소 추적자를 이용한 수조내의 방사혼합형 임펠러의 유동특성을 측정하였다. 방사혼합형 임펠러는 단일 Body에 다수의 Fin이 부착되어 있는 구조로 임펠러 형태에 따라 3가지 type의 Model을 제작하였다. 임펠러에 의한 수조 내 유동은 방사성 동위원소 추적자 주입 후 기기작동과 동시에 회전유속을 통한 하부 유입과 수표면으로의 토출 유동이 발생하고 가동시간에 따른 수조 내의 물 혼합 유동패턴을 각각의 Model과 Detector 별로 분석되었다.

Fig. 5. Comparison efficiency by detection spot of radio-isotopes tracer.

1) 방사혼합형 임펠러 Model II는 Model I보다 완전혼합 시간이 빠르게 측정되었으며, Fin의 각도의 상의함으로 인한 흡입유속의 증가로 회전수류를 형성하기 전에 임펠러 흡입부로 유입되어 상향수류를 형성하는 시간이 증가한 것으로 판단되며, D.03의 검출결과 Model II가 Model I에 비해 단시간에 측정되어 표면 확산 속도와 혼합-확산 효율이 Model II가 높아 더 적합할 것으로 판단된다.

2) Model III 임펠러는 다른 모델에 비해 계측결과 값이 가장 빠르게 측정되었으며 완전혼합을 이루는 시간 또한 가장 빠른 시간을 나타내었지만 Model III의 구성은 다른 모델에 비해 높은 동력을 요구하므로 동일 동력에서 실험한 결과로 확산-혼합 효과를 검토할 필요가 있다.

3) 검출기 위치별 측정결과, Model I과 Model II의 계측 값이 유사한 형태를 나타내고 있으나 미세한 차이를 보이며, Model III의 임펠러는 혼합-확산 유동이 빠르게 진행되어 증가와 감소하는 값을 보이고 있다.

본 실험에서는 방사성 동위원소 추적자를 이용한 실제측 실험을 통한 모델별 혼합 및 유동특성을 얻는데 의의가 있었다. 향후 제염제 확산-혼합에 대한 성능을 정량적으로 평가하기 위해 소요동력을 계측하고 Model의 가동조건을 변경하는 연구를 수행하고자 한다.

Acknowledgement

본 연구는 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(CAP-15-07-KICT)의 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

References

- Charlton, J. S., "Radioisotope Technique for Problem Solving in Industrial Process Plants," Leonard Hill. London, pp. 112~137(1986).
- Heo, I., "A study on the improvement of firefighting response in event of radioactivity leaking focusing on firefighting education institution's training program development," Graduate School of Dongshin University(2016).
- Kim, I. S., "A study on the improvement of quality of water contaminated with nuclear radiation-focus on the cases of the advanced countries," Graduate school of public policy Sejong University(2016).
- Choi, B. S., "World Nuclear Power Plant Continuous Operation Status and Policy," *J. Electric World/Monthly Magazine*, **441**, 32~36(2013).
- Oh, D. M., Kim, Y. S. and Kang, S. W., "A Study on the Estimate Method for Radioactive Materials Runoff by Fall-out in Basin using Grid-Catchment Integrated Environmental Modeling System," *KSWW & KSWE Conference*, pp. 259~260(2016).
- Kim, K. C. and Lee, J. S., "Analysis of a pollutant flow tracer test in river using radioactive isotope," *J. Korea Contents Assoc.*, **9**(1), 400~406(2009).
- An, J. S., Lee, Y. S. and Oh, D. M., "A Study on 3-Dimensional Advection-Diffusion Model Operating Density Current Generator in Agriculture Lake," *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, **13**(7), 3275~3284(2012).
- Kim, J. S., Jung, S. H. and Kim, J. B., "BTD analysis using radioisotope tracer on the water flow characteristics in a flocculator of wastewater treatment facility," *J. Korean Soc. Nondestructive Testing*, **26**(1), 1~6(2006).
- Jung, S. H., Jin, J. H., Kim, J. B. and Choi, B. J., "A state of the art on coastal environmental protection using radioisotope tracer technology," KAERI(2002).
- Choi, B. J., Jung, S. H., Kim, J. B. and Lee, J. S., "A study on the sediment transport using radioisotope tracer," *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Eng.*, **16**(3), 162~170(2004).
- Moon, J. H., Park, J. G., Kang, M. H. and Jung, S. H., "Measurement of the flow characteristics and vertical density profile of catalyst in RFCCU by radioisotope," *J. Radiat. Ind.*, **5**(4), 317~323(2011).
- Moon, J. H., Park, J. G., Kang, M. H. and Jung, S. H., "Measurement of flow characteristics of digester installed tray motioned mixer by using radiotracer," *J. Radiat. Ind.*, **9**(3), 131~135(2015).
- Kim, Y. S., Cho, S. H., Kyong, N. H., Oh, H. S. and Moon, K. C., "Analysis and simulation of SF₆ tracer experiments for tracking the pollutant transport," *J. KAPRA*, **14**(5), 397~410(1998).
- Kim, H. S., Shin, M. S., Jang, S. H. and Jin, J. H., "Study of flow characteristics in a secondary clarifier by numerical simulation and radioisotope tracer technique," *Appl. Radiat. and Isotopes*, **63**, 519~526(2005).