수중 방사 임펠러의 모드 변경에 따른 용존성 세슘 흡착 및 산소전달효율 평가

Evaluation of Dissolved Cesium Removal and Oxygen Transfer Efficiency by Mode Change of Underwater Radial Impeller

김복성 · 김영석 · 강성원 · 김솔 · 오대민^{*}

Bokseong Kim · Youngsuk Kim · SungWon Kang · Sol Kim · Daemin Oh^{*}

한국건설기술연구원

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received January 5, 2018; Revised February 19, 2018; Accepted February 27, 2018)

Abstract : The purpose of this study was to develop a process that can be applied to the diffusion of radioactive pollutants in the water due to radioactive fallout. We designed and fabricated an underwater radial impeller with various characteristics and measured the oxygen transfer efficiency and the mixing / diffusion efficiency of the adsorbent. The aim of this study was to develop a treatment technology that can be operated not only for emergency conditions due to diffusion of radioactive pollutants but also for normal water pollution. Experiments were carried out in a water tank for the measurement of oxygen transfer efficiency. The adsorbents used in the adsorption experiments were carried out using natural illite. We tried to derive normal and emergency operating conditions through the analysis of standard oxygen delivery and the results of the mixed diffusion efficiency of the impeller when the adsorbent is introduced.

Key Words : Water circulator, Adsorption, Impeller, Illite, Cesium

요약 : 방사능 낙진으로 인한 수계 내 방사성 오염물질 확산시 제염할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다. 각각의 특징을 갖는 수중방사임펠러를 설계 및 제작하였고, 산소전달효율, 흡착제의 혼합·확산효율을 측정하였다. 이를 통해 방사성 오염물질 확산에 의한 비상시 조건뿐만 아니라 평상시에도 수질오염개선의 목적으로 운영될 수 있는 처리기술을 개발하고자 하였다. 산소전달효율 측정을 위해 인공수조를 제작하여 수조 내에서 실험을 실시하였고, 흡착실험에 사용된 흡착제는 천연광물인 일라이트를 사용하여 수행하였다. 표준산소전달량 분석과 흡착제 투입시 각각 임펠러의 혼합 확산 효율의 결과를 통해서 평상시와 비상시 가동 조건을 도출하고자 하였다.

주제어 : 물순환장치, 흡착, 임펠러, 일라이트, 세슘

1. 서론

세계적인 원전 밀집지역인 동북아시아에 속해 있는 우리나라는 국내 및 인접국가의 원자력발전소 사고, 북한으로부터의 방사능 테러 등에 대한 대형 방사능 노출사고로부터 노출되어있다.^{1,2)} 사고가 발생하게 되면 방사성 오염물질 등 방사능 낙진이 수계로 직접 낙하되어 확산되거나 지표에 낙하 후 빗물에 의해 수계로 유입될 수 있다.³⁾ 이러한 경우 수계로 유입된 방사성 오염물질을 보, 부담과 같은 구조물을 이용하여 체류시킨 후 정체수역을 형성하여 방사능 흡착제를 투입하여 수중 확산을 억제할 수 있는 기술이 필요하다. 하지만 대형 방사능 노출사고는 발생 가능성이 낮은 이벤트성 사고로 판단될 수 있기 때문에 평상시에는 수체 내 산소공급을 통해 수중 생태계 개선장치로 사용될 수 있어야 하고 방사능 사고가 발생하여 비상시에 대상 흡착제를 효율적으로 혼합·확산시킬 수 있는 처리기술이 동반되어야 한다.

정체수역에서의 수질오염을 방지하기 위해서 수층 교반장치, 수중 폭기 시스템, DCG (Density Current Generator),

물순환장치 등이 사용되고 있다.⁴⁾⁵⁾⁶⁾ 그 중 물순환 장치의 가동 목적은 호소 및 정체수역 내 심층수를 표층으로 양수시켜 대기 중의 산소와의 접촉을 통해 수체 내 DO농도를 증가시켜 성층현상을 파괴하고 조류의 성장을 억제하기 위한 목적으로 활용되어 왔다.⁵⁾ 이러한 처리장치들을 방사능 사고 발생시 흡착제의 Rolling Dish 형태의 임펠러에서 토출되는 유속과 유량이 낮아 영향반경이 넓지 않기 때문에 흡착제의 효율적인 혼합 확산 범위가 제한적으로 나타날 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 새로운 유형의 수중 방사 임펠러 3종을 개발하여 해당 수계 내 방사능 낙진시 대상 오염물질에 대한 흡착제의 신속하고 효율적인 혼합 및 확산을 통해 방사성 오염물질의 추가적인 수중 확산을 제어할 수 있는 기술로서 활용하고자 하였다. 추가적으로 기존의 물순환장치와 비교하였을 때 보다 높은 산소전달효율로 수체 내 용존산소의 농도를 향상시켜 조류 발생 억제 및 수질오염을 관리할 수 있는 2 mode system으로 운영 가능한 기술을 개발하고자 하였다. 본 연구에서 개발된 3종의 수중 방사 임펠러는 $\sin$ 의 각도, 유입 및 토출의 구경의 변경에 따

^{*} Corresponding author E-mail: daeminoh@kict.re.kr Tel: 031-995-0876 Fax: 031-910-0291

른 효과적인 선화와류 형성을 통해 토출유속 및 하부 영향권을 증대시킬 수 있도록 설계되었다. 개발된 수중 방사 임펠러를 각각 평상시, 비상시 모드에서 가동하여 산소전달 효율 및 흡착제 혼합, 확산에 따른 세습 제거효율을 평가하여 각 모드 운영시 최적화된 임펠러 모델을 선정하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에서는 임펠러 토출구의 위치 변경에 따라 Mode 1(평상시), Mode 2(비상시), Mode 3로 구분하여 산소전달 효율 및 흡착제 혼합능에 따른 세습 제거효율을 평가하고자 하였다. Mode 1(평상시)의 경우 산소전달효율의 성능을 향상시키기 위해 수면의 위치를 임펠러 토출구 하단에서 1cm 지점에 고정시켰다. Mode 2(비상시)의 경우 대상 수체 내 확산된 오염물질의 제거를 위한 흡착제의 신속하고 효율적인 확산을 목적으로 수면의 위치를 임펠러 토출부의 하단에 고정시켰다. Mode 3의 경우 추가적으로 Mode 1(평상시), Mode 2(비상시)와 비교하기 위해 임펠러의 위치를 수면 아래 고정하여 실험을 수행하였다.

2.1. 실험재료

산소전달효율 실험과정에서 인공수조 내 DO 제거를 위해 사용된 무수황산나트륨 및 아황산나트륨(Sodium Sulfate)은 대정화금 시약을 사용하였다. 임펠러의 흡착제 확산효율을 평가하기 위해 진행된 흡착실험에서의 Cs오염수는 Cs-137과 화학적 거동이 유사한 동위원소인 Cs-133을 사용하였고, Cs STD solution (KANTO CHEMICAL, 1000 ppm)을 사용하여 흡착실험을 진행하였다. 또한 하천수를 오염수로 제조할 경우 하천수 내의 입자성, 부유 물질의 영향으로 인한 추가적인 흡착반응이 발생할 수 있기 때문에 수돗물을 사

용하여 인공적인 Cs 오염수를 제조하였다. Cs의 흡착제로는 Yongkoong Illite 제품을 사용하여 Cs 흡착효율 분석 통해 임펠러의 흡착제 혼합·확산 특성을 평가하였다.

수중방사형임펠러를 최적화하기 위한 방법으로 Table 1과 같이 3종류의 임펠러를 개발하였다. 각 임펠러의 흐름은 Fin의 회전에 의한 회전상승류를 만들고 표층, 중층, 심층수를 혼합하여 표면으로 토출하는 형태를 갖도록 설계되었다. Model 1의 임펠러는 수면과 Fin의 각도를 수직으로 하여 하부 회전류를 상승류로 전환하여 상부로 토출하고 흐름을 유도하는 형태로 설계되었고, Model 2는 Model 1의 토출부직경의 확장형으로 Fin의 각도가 수면으로부터 회전방향으로 기울여 Fin에서 토출부까지의 상승유속을 증가시키는 형태로 설계되었다. Model 3는 Model 2의 개방형 Fin에서 손실되는 유량을 최소화하기 위하여 각 Fin에서 별도의 유도부가 구성된 형태를 목표로 설계되었으며, 토출면적을 증가시키기 위한 별도의 보조 Fin이 구성되었다. 따라서 토출유속과 하부 상승유속을 증가시키고 임펠러 중심부의 회전유속을 증가시켜 수직방향의 영향권을 증가시키는 특징을 갖도록 제작하였다.

2.2. 산소전달효율 및 흡착제 확산효율 실험 방법

인공수조 내에서의 Mode 및 토출유속 변경에 따른 산소전달효율을 분석하기 위한 실험을 실시하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 강화유리를 사용하여 가로 4.46 m 세로 2.46 m 높이 0.6 m의 인공수조를 제작하였다. 임펠러의 영향반경(D.1), 수조의 가장자리(D.2)에서 DO 측정을 통해 Mode 변경에 따른 산소전달효율을 평가하였다. 인공수조 내 실험대상 수체의 DO를 0.1 mg/L까지 제거하기 위한 아황산나트륨의 주입량을 선정하기 위해 수조 내 원수의 수온 및 DO를 측정하였다. 저속교반 후 30분 동안 정제하였고 완속교반을 통해 수조 내 DO를 0.3~0.5 mg/L까지 증가시킨 후 급속교반을 통해 산소전달효율을 분석을 위한 DO

Table 1. Developed an impeller capable of operating in normal and emergency mode

Items	Model 1	Model 2	Model 3
Impeller
Size (model)	<ul style="list-style-type: none"> Discharge port - $\phi 250$ mm, 20 mmH Intake port - $\phi 152$ mm, 60 mmH 	<ul style="list-style-type: none"> Discharge port - $\phi 280$ mm, 22 mmH Intake port - $\phi 170$ mm, 73 mmH 	<ul style="list-style-type: none"> Discharge port - $\phi 280$ mm, 27.5 mmH Intake port - $\phi 168$ mm, 91 mmH
Body	<ul style="list-style-type: none"> Discharge/Intake ratio : 1.52 (Design standard Ratio 1.5~1.67) 	<ul style="list-style-type: none"> Discharge/Intake ratio : 1.64 Changing the angle of the fin joint and Increase of inlet diameter due to increase of discharge part 	<ul style="list-style-type: none"> Discharge/Intake ratio : 1.66 Increased length of induction part of intake part Reduction of recirculation rate due to frictional force
Increased performance	<ul style="list-style-type: none"> General impeller 	<ul style="list-style-type: none"> Fin angle adjustment for intake flow rate increase Increase the discharge flow rate to increase the diffusion range 	<ul style="list-style-type: none"> Increase of discharge velocity and increase of lower influence point Increase in discharge volume Increase diffusion range and mixing power

Fig. 1. The artificial water tank used to evaluate the oxygen transfer efficiency and adsorption efficiency.

를 측정하였다. 측정된 DO를 통해서 산소전달계수 산정을 실시하여 Mode 및 토출유속 변경에 따른 산소전달효율을 분석하였다.

2.3. 흡착실험 방법

수중 방사 임펠러의 종류 변경에 따른 용존성 세슘 흡착 효율을 평가하기 위해 비상시 mode가 적용된 인공수조 내에서 실시하였다. 인공수조의 용량은 약 4,400 L로 수조 내에서의 세슘의 초기오염농도가 30 ppb ($\mu\text{g/L}$)로 형성되도록 Cs STD solution (1,000 ppm)을 주입하였다. Cs 흡착제로 사용된 일라이트(YONG KOONG ILLITE)는 인공수조 내에서 200 mg/L 농도가 형성되도록 일정량을 청수와 혼합한 후, 주입장치를 통해 임펠러 하단 선회와류가 형성되는 지점인 흡입구 하부에 용액상태로 주입하였고 이를 통해 임펠러 종류에 따른 Cs 흡착효율을 분석하고자 하였다.

2.4. 분석 방법

Cs의 흡착제로 사용된 일라이트의 광물학적 특성과 표면의 조성을 확인하기 위하여 전계방출형 주사현미경(FE-SEM, Carl Zeiss), X-선 회절분석기(X-ray Diffraction, Bruker) 분석을 실시하였다. 비표면적 공극분석기(BELSORP-max, BEL)를 통해 질소가스 흡·탈착 등온선을 얻은 후 BET (Brunauer-Emmett-Teller)공식을 이용해 비표면적 분석을 실시하였다.

산소전달효율을 평가하기 위한 실험과정에서 DO meter (A223 DO meter, Thermo)를 사용하여 측정한 후 산업자원부 기술표준원의 산소전달효율 측정 시험방법(KSI3223)을 통해 산소전달계수를 산정하였다. 임펠러의 흡착제 확산효율을 평가하기 위해 진행된 흡착실험에서의 Cs 농도는 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-Q, Thermo Fisher Scientific)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산소전달효율 측정 및 평가

평상시 mode에서 model별 임펠러의 가동시 용존산소농도 (mg/L) 변화는 Fig. 2에 나타났다. 그래프 (a)는 mode 1, (b)는 mode 2, (c)는 mode 3의 가동시 시간에 따른 용존산소농도의 변화를 나타낸다. 그래프 (a)에서 확인할 수 있듯이

Fig. 2. Dissolved oxygen concentration change in artificial water tank per impeller model during normal mode operation. (a) Mode 1 (normally), (b) Mode 2 (emergency), (c) Mode 3.

평상시 mode에서의 model별 임펠러의 가동시 인공수조 내 용존산소농도의 변화는 model 3에서 가장 크게 나타났다. 이를 통해 수체 내에서 산소 주입속도가 model 3 가동시 가장 빠르게 나타났다고 판단되었다.

그래프 (b)를 통해서 그래프 (a)와 유사한 용존산소농도의 변화를 확인할 수 있었지만 model 3 가동시 수체 내 용존산소농도가 더욱 급격하게 변하는 것을 확인하였다. 평상시 가동시에 비해서 비상시 가동시 수체 내 용존산소농도의 변화가 낮게 나타났는데, 이는 평상시 가동의 경우 인공수조 내 수면의 위치가 임펠러 토출구 위쪽에 위치해있어 임펠러 가동시 수면 윗부분에서 jet수류가 발생하게 되고 이로 인해 수면 아랫부분에서는 버블링 효과가 크게 일어난다. 반면에 비상시 가동의 경우 임펠러의 토출구가 수면 위로 올라와 있다. 비상시 mode를 적용하는 목적은 보다 넓은 반경으로 방사능 흡착제의 혼합·확산을 위해 운영되기 때문에 임펠러의 토출구를 수면위로 상승시켜 토출유속과 토출유량을 증가시키게 된다. 따라서 수면과 마찰이 더욱 높은 평상시 운전에 비해 인공수조 내 용존산소농도의 변화는 낮게 나타났다고 판단하였다. 그래프 (c)의 경우 수면이 임펠러 본체 위에 위치해 있는데 본 연구의 목적인 평상시 및 비상시 mode 운영시와 비교했을 때 인공수조 내 용존산소농도의 변화가 낮게 나타났다.

각각의 mode에서 model별 터빈 가동시 표준산소전달량 (SOTR kgO₂/hr) 측정을 위한 산소전달계수(K_La)는 수학적 모형을 사용하여 산정할 수 있었다.⁷⁾ 포기조 내 수체에 산소를 인위적으로 주입하여 그 상수의 용존 산소를 증가시키는 경우에는 다음과 같은 식을 적용했다.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_{\infty}^* - C) \quad (1)$$

여기서 C 값은 용존산소 농도(mg/L), C_∞^{*} 값은 용존산소포화 농도(mg/L), K_La 값은 산소전달계수(min⁻¹), t는 시간인 min을 나타낸다. (1) 식을 기초로 두고 exponential form으로 변환시켜 다음과 같은 식으로 나타냈다.

$$C = C_{\infty}^* - (C_{\infty} - C_0) \exp(-K_L a_t) \quad (2)$$

여기서 C₀ = 시간, t=0일 때 대상 수체 내 DO 농도(mg/L), 온도의 변화에 따른 영향은 (3)식을 사용하여 온도 변화에 따른 산소전달계수 값을 보정했다.

$$K_L a_{(t)} = K_L a_{(20)} \theta^{(T-20)} \quad (3)$$

K_La_T는 온도 T °C일 때 산소전달 계수(min⁻¹)를, K_La₂₀은 표준상태에서의 산소전달계수(min⁻¹)를 나타낸다. 여기서 θ 값은 Eckenfelder에 의하면 1.016~1.037 사이이며, 일반적으로 기계식 포기장치에서의 1.024를 적용된다.⁸⁾

$$SOTR = K_L a_{20} \times C_{sm(20)} \times V \quad (4)$$

여기서 C_{SM(20)} 값은 수체 내 수온이 20°C에서 보정된, 순수 포화증기압 상태이고 공기 중 산소의 부피분율이 20.94% 1기압일 때의 용존산소 포화농도(mg/L)를 나타낸다. V 값은 본 실험에서 사용된 인공수조 내 수체의 수량(m³)을 나타낸다. 각각의 mode에서 model별 터빈의 표준산소전달량을 Fig. 3에 나타냈다.

Fig. 3. Oxygen transfer efficiency by mode according to impeller type (kgO₂/hr).

종류별 수중방사임펠러의 표준산소전달량은 mode 1 가동시, model 3 적용시 가장 높게 나타났다. 인공수조 내 수체의 산소농도 변화를 확인한 결과와 마찬가지로 mode 1 가동시 수면의 위치는 터빈의 토출부 위쪽에 위치해 있어 수면 윗부분에서 jet수류가 발생하게 되고 이로 인해 수면 아랫부분에서는 버블링 효과가 크게 일어났기 때문이라고 판단되었다. 또한 임펠러 model에 따른 표준산소전달량은 model 3 적용시 가장 높게 나타났다. 이는 model 3의 경우 나머지 2개의 모델과 비교하였을 때 개방형 Fin에서 손실되는 유량을 최소화하기 위해 각 Fin에서 별도의 유도부가 구성되도록 설계하였고 토출면적을 증가시키기 위해 보조 Fin을 부착하여 토출유속과 하부 상승유속을 증가시킨 결과로 판단되었다.

또한 중심부의 회전유속을 증가시켜 수직방향의 영향권을 증가시켰기 때문에 표준산소전달량이 가장 높게 나타났다고 판단되었다. 이를 통해 평상시 정체수역에서의 산소 주입을 통해 수질오염개선을 위해 사용하기 위한 목적인 mode 1에서 터빈 model 3으로 운영하는 것이 가장 적합하다고 판단되었다.

3.2. Cesium 제거효율 평가

아래 Fig. 4에는 비상시 mode에서의 임펠러 model별 가동시 흡착제로 사용된 illite의 혼합확산에 따른 cesium 제거 효율을 나타내었으며, model 3에서 가장 높게 나타났다. 이는 model 3 설계시 model 1, 2와 비교하였을 때, 토출구와 흡입구의 크기 및 높이, 보조 fin의 추가, 하부 흡입부의 유도부분 길이 증가로 인한 토출시 마찰력에 의한 재유입율을 감소, 토출유속증가 및 하부 영향권 증가, 토출량 증가, 확산범위 증가로 나타났기 때문이라고 판단되었다. 이를 통해 본 연구의 목적인 방사능 낙진으로 인한 수체 내 방사성 cesium 확산시 비상시 mode 운전을 통한 model 3의 가동이 가장 신속하고 효율적으로 대응할 수 있는 운영 방식이라고 판단되었다.

Fig. 4. The efficiency of cesium removal at impeller operating per model in emergency mode.

4. 결론

본 연구에서는 방사능 낙진시 수계로 유입된 방사성 오염물질을 보, 부딪과 같은 구조물을 이용하여 체류시킨 후 정체수역을 형성하여 방사능 흡착제를 투입하여 수중 확산을 억제할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위해 3종의 수중방사임펠러를 개발하였고 대상 흡착제의 혼합·확산효율을 측정하여 방사성 오염물질 확산시 신속하고 효율적으로 대응할 수 있는 처리기술을 개발하고자 하였다. 또한 평상시에도 운영할 수 있는 처리기술로서 활용하기 위해 평상시 mode 운전을 통한 산소전달효율 평가를 실시하였다.

산소전달효율 측정 결과 3가지 mode 중 mode 1, 3가지 model 중 model 3 가동시 산소전달효율이 가장 높게 나타났다. mode 1의 경우 mode 2에 비해 수면의 위치가 임펠러 토출구 위쪽에 위치해있어 임펠러 가동시 수면 윗부분에서 jet수류가 발생하게 되고 이로 인해 수면 아랫부분에서는 버블링 효과가 크기 때문이라고 판단되었다. Model 3의 토출면적을 증가시키기 위해 보조 Fin을 부착하여 토출유속과 하부 상승유속을 증가시킨 결과로 판단되었다. 이에 따라 평상시 운전 조건으로 mode 1이 가장 적합하다고 판단되었다.

비상시 가동 조건에 속하는 mode 2에서 흡착제의 혼합·확산효율 측정 결과 model 3 가동시 가장 높게 나타났다. 이는 하부 흡입부의 유도부분 길이 증가로 인한 토출시 마찰력에 의한 재유입을 감소, 토출유속증가 및 하부 영향권 증가, 토출량 증가, 확산범위 증가로 나타났기 때문이라고 판단되었다. 이에 따라 비상시 운전 조건으로 model 3 가동이 가장 적합하다고 판단된다.

Acknowledgement

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

KSEE

References

- Oh, D. M., et al., "Flow Characteristics Analysis of the Decontamination Device with Mixing and Diffusion Using Radio-Isotopes Tracer," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39.5**, 282~287(2017).
- Kim, J. S., "Nuclear Safety Policy and Implications in China," *STEPI Insight*, **95**, 1~26(2012).
- 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," *J. Korean Soc. Water Environ. and Korean Soc. Water & Wastewater*, pp. 259~260(2016).
- Park, J.-H. and Ra., B.-P., "Positive Research About Water Aeration Improvement to Break Thermal Stratification of Dam," *Korean Soc. Fluid Machinery*, **17.5**, 37~42(2014).
- Yang, J.-W., et al., "A Study on the Behavior of Water Quality using Density Current Generator (DCG) in a lake - Focused on DO, Temperature, Salinity-," *J. Korean Soc. Urban Environ.*, **11.1**, pp. 49~55(2011).
- Lee, Y. S., et al., "Study on Effect of Convection Current Aeration System on Mixing Characteristics and Water Quality of Reservoir," *Korean J. Limnol.*, **42.1**, pp. 85~94(2009).
- Lee, M.-S., Kang, J.-H. and Haam, S. J., "Studies of the Overall Oxygen Transfer Rate and Mixing Effect in A Pure Oxygen Activated Sludge Bath Using Surface Aerator," *Korean Inst. Chem. Eng.*, **5.1**, 1701-1704(1999).
- Landberg, G. G., Graulich, B. P. and Kipple, W. H., "Experimental problems associated with the testing of surface aeration equipment," *Water Res. Pergamon Press*, **3**, 445~455(1969).
- Kim, B. S., et al., "Removal characteristic of soluble Cs in water using natural adsorbent and high basicity coagulant Poly Aluminium Chloride," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39.7**, 385~390(2017).