

해수 순환여과양식 시스템에서 충전 매질별 이산화탄소 탈기 장치의 성능 및 적정 운전 조건 평가

김덕규 · 김유희* · 박성덕** · 김병기*** · 박정환†

국립부경대학교(학생) · *강원도립대학교(연구원) · **강원특별자치도 양식산업과(연구사) ·
***강원도립대학교(교수) · †국립부경대학교(교수)

Performance Evaluation of a CO_2 Degassing Column Using Different Packing Media in Seawater Recirculating Aquaculture Systems

Deokgyu KIM · Youhee KIM* · Seongdeok Park** · Pyong-Kih KIM*** · Jeonghwan PARK†

Pukyong National University(student) · *Gangwon State University(researcher) ·

**Department of Aquaculture Industry, Gangwon State(researcher) ·

***Gangwon State University(professor) · †Pukyong National University(professor)

Abstract

The demand for sustainable aquaculture has increased the need for efficient seawater recirculating aquaculture systems (RAS). Dissolved CO_2 accumulation in seawater RAS lowers pH, affecting fish health. This study evaluated a degassing column (30 cm diameter, 100 cm height) under three conditions : control (no media), cascade disk packing media and tubular packing media at water flow rates of 5-20 L/min and air flow rates of 20-160 L/min. Tubular packing media showed the highest CO_2 removal efficiency (25.8%) and daily removal rates ($10.4 \text{ kg } CO_2 \cdot m^{-3} \cdot day^{-1}$). Cascade disk media demonstrated moderate performance, whereas the control showed minimal CO_2 removal. Tubular packing media effectively reduced CO_2 and enhanced pH stability.

Key words : Seawater recirculating aquaculture system (RAS), CO_2 removal, Degassing column, Cascade disk packing media, Tubular packing media

I. 서론

순환여과양식 시스템(recirculating aquaculture system, RAS)은 양식에 사용된 물을 생물학적, 기계적 여과 장치를 통해 정화하여 90% 이상 재사용하는 시스템으로, 기존의 양식 시스템보다 환경에 대한 영향을 줄일 수 있다(Sugita et al.,

2005; Ahmed and Turchini, 2021). 또한, 정밀한 사육 환경 제어와 노폐물 처리를 통해 효율적인 물 관리, 생물학적 안전성 확보, 비용 및 노동력 절감, 사료 전환 효율 개선이 가능하다(Ahmed and Turchini, 2021). 전 세계적으로 40년 이상 다양한 연구와 기술 개발이 이루어져 오고 있으며, 국내에서도 뱀장어와 같은 담수 어종과 더불어

† Corresponding author : 051-629-5911, parkj@pknu.ac.kr

* 이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

넙치, 연어 등 해수어를 대상으로 실용화 시도가 진행되고 있다(Cho et al., 2023).

어류는 사료 섭취와 산소 소비량에 비례하여 아가미를 통해 CO_2 를 배출하며 생물여과조 내 질산화세균 역시 상당한 양의 CO_2 를 생성한다(Summerfelt et al., 2004). 해수 RAS 내에서 CO_2 는 쉽게 축적되어 물속에서 탄산(H_2CO_3), 중탄산이온(HCO_3^-), 탄산염 이온(CO_3^{2-})으로 전환된다. 이 과정에서 수소 이온(H^+)이 방출되어 수질의 pH 변동이 커질 수 있다(Ellis et al., 2017). 어류가 장기간 고농도의 CO_2 에 노출되면 성장 감소(Mota et al., 2019; Aslam et al., 2019; Murray et al., 2024), 과호흡 증상(Perry et al., 2023), 산혈증(Shartau and Baker, 2025) 등이 발생하게 된다.

수중 pH의 감소를 줄이기 위해서는 완충제인 수중 중화 물질의 총합으로 표현되는 알칼리도를 안정적으로 유지해야 한다. 일반적으로 중탄산나트륨($NaHCO_3$)이 알칼리도를 안정시키기 위해 중화제로 주로 이용된다. 하지만 중탄산나트륨은 목표 알칼리도와 pH 설정, 새물 교환율, 어체량, 사료 공급량에 따라 투입량이 달라지며 이는 운영비가 증가하는 요인이 된다.

최근에는 중탄산나트륨 투입보다 직접적인 CO_2 제거가 pH를 안정시키는 데 효과적인 것으로 보고되고 있으며(Jafari et al., 2024), 이에 따라 RAS에서 CO_2 탈기 기술에 대한 중요성이 커지고 있다(Lindholm-Lehto, 2023).

담수 RAS에서는 벤츄리관, 낙차식 폭기 방식, 에어 블로워 등을 이용한 CO_2 탈기 장치에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다(Xiao et al., 2019; Ativie, 2024). 그러나 해수의 경우, CO_2 가 수중에 탄산 계열의 물질로 축적되는 경향이(Ramos et al., 2014) 있어 해수 조건에서 탈기 장치의 성능 평가에 관한 연구의 필요성이 커지고 있다. 탈기 장치의 성능은 사육수의 수리학적 부하량, 공기 유량, 사육수와 공기 간 접촉 시간 등 여러 변수에 따라 크게 달라지며(Barrut et al., 2012), 이러

한 설계 변수들은 시스템 전체의 에너지 효율과 유지보수 부담에 직접적인 영향을 미친다.

또한, 해수의 높은 염분과 표면장력은 기포의 응집과 거품 형성을 유도하므로 공기 분사 통로가 막히거나 탈기 장치 매질 표면에 스케일이 쉽게 형성될 수 있다(Murray et al., 2014). 과도한 폭기는 오히려 미세한 염분 입자의 비산으로 인해 장비 부식 및 안전 문제가 발생할 수도 있어(Murray et al., 2014), 해수 조건에 적합한 탈기 장치의 구조와 성능에 관한 연구가 필요하다.

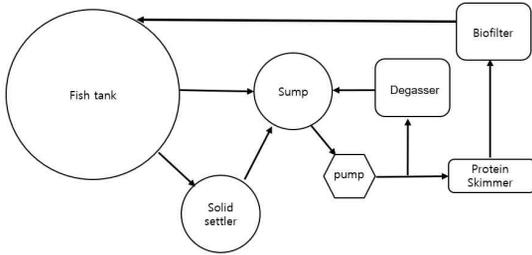
따라서, 본 연구의 목적은 해수 RAS 환경에서 충진 매질 유형에 따른 탈기 장치의 CO_2 제거율을 정량적으로 규명하고, 유수량과 공기유량이 제거율에 미치는 상호작용을 분석하여 매질별 최적 공기유량/유수량 비율과 수리학적 부하량을 제시하는 데 있다.

II. 연구 방법

1. 실험 시스템 구성

가. 해수 RAS 개요

해수 RAS에서 CO_2 탈기 공정을 평가하기 위하여 약 7톤 규모의 파일럿 규모 RAS를 실험에 이용하였다. 해당 RAS는 수량 약 3,500 L의 원형 폴리에틸렌 수조(직경 2.0 m, 높이 1.0 m) 2개로 구성되었으며, 사육수는 침전조(중력 침강 방식), 포말분리기, 살수식 생물학적 여과조를 통과하여 사육수조로 재순환하도록 하였다([Fig. 1]). 새 물은 일간 전체 수량의 약 5-10% 비율로 보충하였고, 평균 염분농도는 34 psu, 수온은 22°C를 유지하였다. 배출된 사육수가 모이는 저수조에서 양수한 물의 일부(전체 유수량의 10%)가 탈기 장치로 유입되도록 하였다. 이 과정 중에 탈기 장치의 유입수와 배출수 내 CO_2 농도를 측정하고 탈기 장치의 성능을 평가하였다.

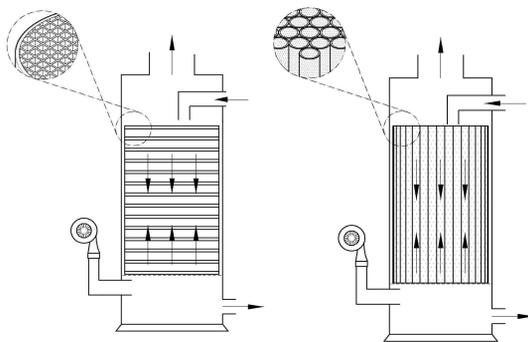


[Fig. 1] Schematic diagram of pilot-scale recirculating aquaculture system.

나. 탈기 장치와 매질

본 장치는 직경 300 mm, 높이 1,000 mm 규격의 아크릴 칼럼으로 제작하였으며, 내부의 흐름을 관찰하기 위해 투명 소재를 사용하였다([Fig. 2]). 칼럼 하단에는 직경 75 mm의 배수구를 설치하였고, 에어블로워를 칼럼 하부 벽면에 위치한 직경 50 mm의 공기 주입구와 연결하여 공기를 공급하였다. 또한 매질 지지판을 공기 주입구 위쪽에 설치하여 지지판에 의한 공기의 흐름이 방해받지 않도록 하였다. 두 매질은 각각 지지판 위에 설치하였다.

본 연구에서는 원판형 매질 및 튜브형 매질을 투입한 실험구와 매질을 투입하지 않은 대조구 조건을 비교하였다. 대조구는 단순히 상단에서 낙하하는 물과 하단에서 주입하여 상승하는 공기

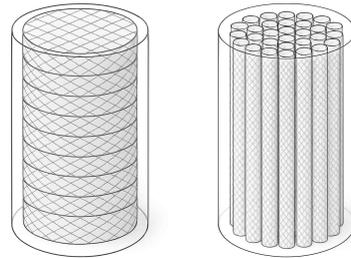


[Fig. 2] Conceptual diagram of degassing apparatus and schematic installation of degassing media (Left : Cascade disk packing media, Right : Tubular packing media)

가 칼럼 내부를 통과하면서 접촉되도록 하였다.

원판형 매질은 플라스틱 재질 그물망 형태(망목의 크기 : 약 5 mm, 매질 비표면적 : $200 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)의 원판 디스크를 적층한 구조로 구성하였다([Fig. 3]). 물이 칼럼 상부에서 낙하하면서 각 디스크를 통과하거나 칼럼의 벽면을 타고 흐르도록 하였다.

튜브형 매질은 플라스틱 관다발(직경 : 15 mm, 매질 비표면적 : $300 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)을 묶어 칼럼 내부에 수류 방향과 같은 방향으로 배치하였다. 튜브의 측면은 약 3 mm 직경의 구멍이 튜브의 길이를 따라 전체 면에 뚫려 있었다. 물은 상단에서 여러 개의 수로로 분산되어 하강하였다. 공기는 튜브 사이의 빈 공간을 통해 상승하면서 물과의 접촉이 충분히 이루어지도록 하였다.



[Fig. 3] Left : Cascade disk packing media, Right : Tubular packing media

2. 실험 조건 설정

사육수는 순환펌프(0.75 kW)로 탈기 장치 상부로 보내어 아크릴 칼럼 내로 유입되도록 하였다. 실험 유수량은 5, 10, 20 L/min(탈기 장치 내 수리학적 부하량 : $102, 204, 408 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}^{-1}$)이었다. 공기는 에어블로워(0.45 kW)에서 공기유량계, 조절 밸브를 거쳐 칼럼 하단 벽면으로 주입하였다. 실험 공기유량은 20, 80, 160 L/min으로 조절하였다. 이때 공기유량/유수량 비율은 1:1-1:32의 범위였다(<Table 1>).

<Table 1> Experimental conditions showing water flow rates (WFR), air flow rates (AFR), and air-to-water ratio

	Water flow rates (WFR, L/min)			
	5	10	20	
Air flow rates (AFR, L/min)	20	1:4	1:2	1:1
	80	1:16	1:8	1:4
	160	1:32	1:16	1:8

3. 분석 항목 및 측정 방법

탈기 장치의 성능 평가를 위해 아크릴 칼럼의 입출구에서 수중 CO₂ 농도를 측정하였다. CO₂ 농도는 중화적정법으로 측정하였으며, 수산화나트륨 용액과 반응 후 생성되는 중탄산나트륨을 페놀프탈레인 지시약으로 적정하였다. 시료는 칼럼 입출구에서 채취한 즉시 샘플병에 담아 공기 접촉을 최소화하여 운반하였으며, 채수 후 15분 이내에 측정을 완료하여 시료 내 CO₂ 농도의 변화를 최소화하였다. 측정된 CO₂ 농도를 이용하여 조건별 탈기 장치의 제거율을 식(1)으로 계산하였다.

CO₂ 제거율(%)

$$= \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

또한 식(2)을 이용하여 탈기 장치에 충전된 매질의 단위 부피(m³)당 하루 동안 제거되는 일간 CO₂ 제거량(kg CO₂·m³·day⁻¹)을 계산하였다.

CO₂ 제거량

$$= \frac{(C_{in} - C_{out}) \times Q_{water} \times 1,440}{1,000,000 \times V_{bed}} \dots\dots\dots (2)$$

C_{in} : 유입 CO₂ 농도(mg CO₂·L⁻¹)

C_{out} : 배출 CO₂ 농도(mg CO₂·L⁻¹)

Q_{water} : 유수량(L/min)

V_{bed} : 칼럼 내 충전된 매질의 부피(m³)

4. 통계 분석

통계 분석은 IBM SPSS Statistics (ver. 29.0)를 이용하였고, three-way ANOVA를 통해 충전 매질의 종류에 따라 유수량과 공기유량이 탈기 장치 유입수와 배출수 내 CO₂ 농도에 미치는 영향을 평가하였다. Duncan's multiple range test를 통해 평균값 간의 유의한 차이를 검정하였다(P<0.05).

또한, 매질에 따른 탈기 장치의 성능 비교와 적정 운전 조건을 구명하기 위해 수리학적 부하량과 공기유량/유수량 비율을 독립 변수로 설정하였다. 각 조건에서 충전 매질의 CO₂ 제거율 및 일간 제거량을 3차원 등고선 그래프(contour plot)로 모델링하였다. 이 모델을 이용하여 매질별 탈기 효과가가 가장 높은 적정 운전 조건을 도출하였다.

III. 연구 결과

1. 실험 조건별 CO₂ 제거 성능

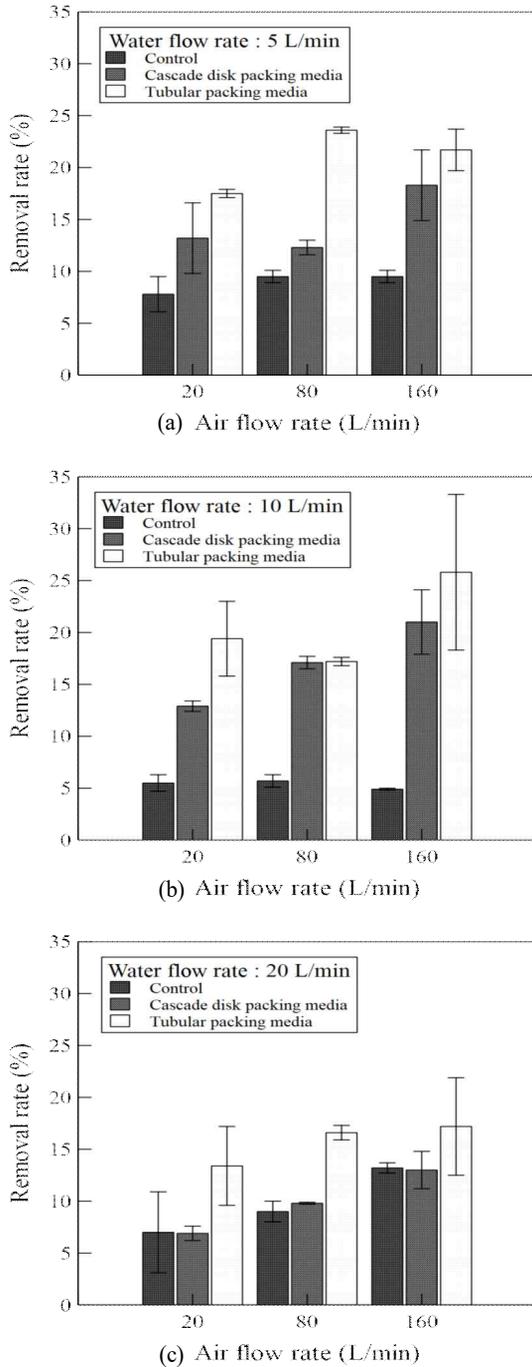
유수량 및 공기유량에 따른 탈기 장치의 유입수와 배출수 내 CO₂ 농도를 <Table 2>에 나타내었다. 대조구와 두 실험구 모두에서 탈기 장치의 유입수에 비해, 배출수 내 CO₂ 농도가 유의하게 감소하였다(P<0.05). 중간 유수량인 10 L/min 조건에서 모든 공기유량에 대해 CO₂ 농도가 유의하게 높았다(P<0.05). 또한 모든 유수량 조건에서 공기유량이 80 L/min일 때 CO₂ 농도가 가장 높았다(P<0.05). 실험 조건에 따라 차이는 있었으나 대조구와 비교하여 모든 실험 조건에서 두 가지 매질을 충전한 탈기 장치에서 CO₂가 유의하게 낮았으며, 튜브형 매질에서 가장 낮은 값을 보였다(P<0.05).

<Table 2> Carbon dioxide concentrations (mg/L) in the inlets and outlets of the experimental columns and three-way ANOVA with water flow rates, air flow rates and types of degassing columns.

Water flow rates (WFR, L/min)	Air flow rates (AFR, L/min)	Inlets <i>CO</i> ₂ con. (mg/L)	Outlets <i>CO</i> ₂ con. (mg/L)			Pooled mean
			Control (No media)	Disk media	Tubular media	
5	20	134 ± 3	124 ± 5	121 ± 2	109 ± 4	122 ± 10
	80	156 ± 3	140 ± 5	124 ± 6	130 ± 3	138 ± 13
	160	136 ± 5	125 ± 2	116 ± 1	107 ± 2	121 ± 12
	Pooled mean	141 ± 11	129 ± 8	121 ± 5	115 ± 11	127 ± 13 ^y
10	20	134 ± 4	122 ± 10	114 ± 6	104 ± 12	119 ± 14
	80	161 ± 14	149 ± 12	131 ± 6	135 ± 5	144 ± 15
	160	142 ± 4	135 ± 4	126 ± 2	119 ± 3	131 ± 10
	Pooled mean	146 ± 14	135 ± 14	124 ± 9	119 ± 15	131 ± 16 ^x
20	20	127 ± 1	113 ± 6	112 ± 7	110 ± 5	116 ± 9
	80	146 ± 11	138 ± 7	129 ± 4	134 ± 3	139 ± 10
	160	142 ± 4	135 ± 2	130 ± 3	119 ± 2	131 ± 9
	Pooled mean	140 ± 12	129 ± 14	123 ± 10	122 ± 12	128 ± 14 ^y
Total pooled mean	20	132 ± 4	120 ± 8	116 ± 7	108 ± 7	119 ± 11 ^c
	80	151 ± 11	143 ± 8	129 ± 4	134 ± 4	140 ± 16 ^a
	160	140 ± 5	132 ± 6	124 ± 6	115 ± 6	128 ± 11 ^b
	Total	142 ± 12 ^A	131 ± 12 ^B	122 ± 8 ^C	119 ± 13 ^D	129 ± 14
Analysis of variance	Group	Sum of square	df	Mean square	<i>F</i> value	<i>P</i> value
	Treat.	10,079	3	3360	98.6	0.000
	WFR	306	2	153	4.49	0.014
	AFR	9,498	2	4,749	139	0.000
	Treat. x WFR	321	6	53.4	1.57	0.167
	Treat. x AFR	755	6	126	3.69	0.003
	WFR x AFR	1,148	4	287	8.43	0.000
Treat. x WFR x AFR	232	12	19.3	0.567	0.862	

Note : Pooled means ± STD having the same superscript are not significantly different at *P*<0.05 based on Duncan's multiple range test. For significance testing, the Analysis of Variance section lists the p-values for each main effect and all interaction terms.

대조구와 두 실험구에서 실험 조건에 따른 유수량 5 L/min, 공기유량 20 L/min으로 운전 시 *CO*₂ 제거율을 [Fig. 4]에 나타내었다. 대조구는 제거율은 7.8%로 나타났으며, 공기유량을 80



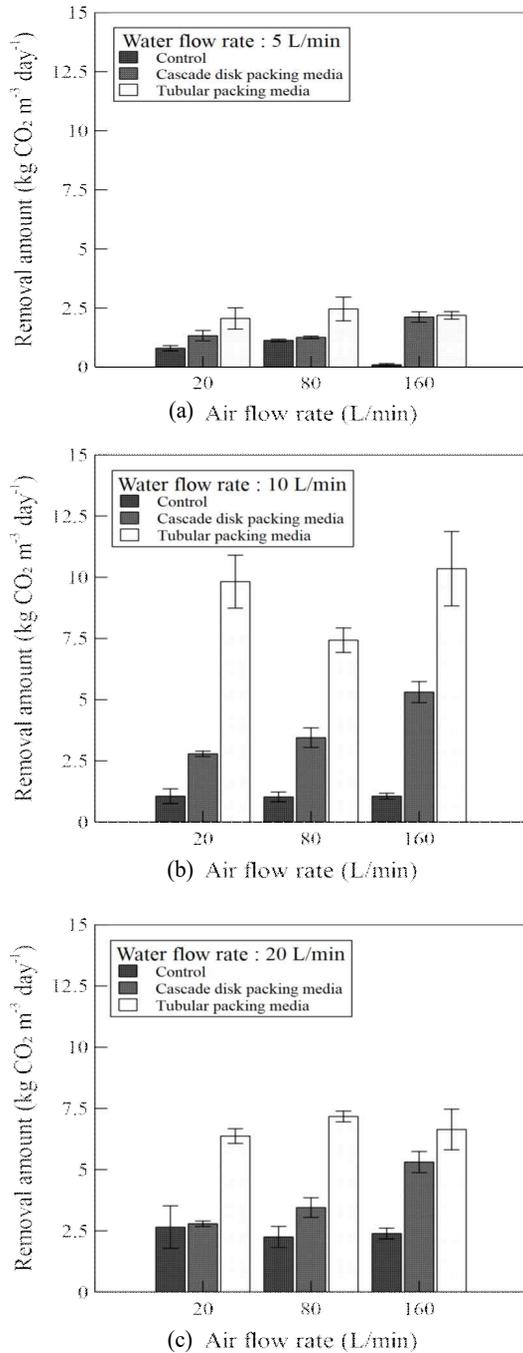
[Fig. 4] Carbon dioxide removal efficiency (%) of degassing columns according to water flow rates and airflow rates(Air flow rates 5, 10, 20 L/min)

L/min에서 160 L/min으로 증가시켜도 9.5%로 소폭 상승하였다. 매질이 없는 경우, 공기유량 증가에도 탈기 효율의 상승폭은 미미하였다. 유수량이 10 L/min으로 증가하였을 때 제거율은 오히려 감소하여 4.9-5.7% 범위를 나타내었다. 유수량이 20 L/min인 경우에는 낮은 유수량 조건과 비교하여 공기유량 증가에 따라 제거율이 상승하는 경향을 보였으나, 최대 제거율은 약 13.2%에 그쳤다.

두 실험구 모두 대조구에 비해 동일한 유수량 및 공기유량 조건에서 높은 CO₂ 제거율을 나타내었다. 원판형 매질의 경우, 유수량 5 L/min, 공기유량 160 L/min 조건에서 제거율은 18.3%로 상승하여 대조구 9.5% 대비 약 2배 높았다. 유수량 10 L/min 구간의 경우 공기유량이 20 L/min에서 160 L/min으로 늘어났을 경우 제거율은 21.0%까지 증가하였다. 반면, 유수량이 20 L/min, 공기유량이 160 L/min으로 증가한 경우의 제거율은 13.0%로 효율이 감소하였다. 원판형 매질은 가장 높은 유수량 조건에서 공기유량 증가에 따른 CO₂ 제거율의 상승효과는 없었다.

튜브형 매질은 모든 조건에서 원판형 매질과 대조구에 비해 제거율이 높았다. 유수량이 5 L/min일 때, 공기유량 20 L/min에서 제거율이 17.5%로 나타나, 원판형 매질 13.2% 및 대조구 7.8%와 비교하여 상대적으로 높았다. 공기유량이 160 L/min으로 증가하였을 때 제거율은 21.7%로 상승하였다. 유수량 10 L/min 구간의 경우에도 공기유량 80 L/min 조건에서 17.2%, 공기유량 160 L/min 조건에서 25.8%로 나타나, 공기유량 증가에 따라 제거율이 상승하였다. 최대 유수량과 최대 공기유량 조건에서, 제거율은 17.2%로 앞선 제거율에 비해 제거율의 증가는 없었지만, 원판형 매질 13.0%나 대조구 13.2% 대비 약 30% 높은 값을 유지하였다.

유수량과 공기유량 조건에 따른 일간 CO₂ 제거량 변화를 [Fig. 5]에 나타내었다. 대조구에서 유수량 5 L/min, 공기유량 80 L/min일 때 일간



[Fig. 5] Daily carbon dioxide removal (kg CO₂·m³·day⁻¹) of degassing columns according to water flow rates and airflow rates

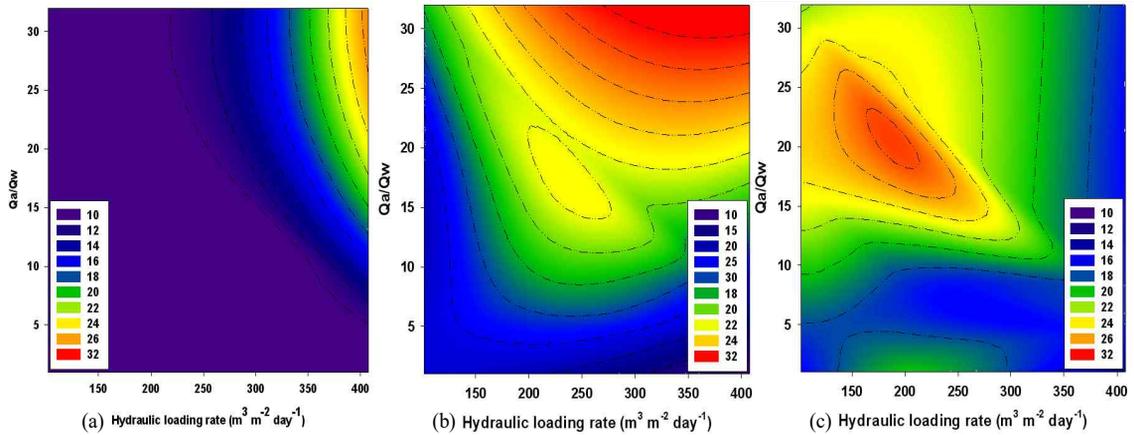
CO₂ 제거량은 1.13 kg CO₂·m³·day⁻¹였으며, 유수량 20 L/min, 공기유량 20 L/min에서는 2.65 kg CO₂·m³·day⁻¹로 대조구 조건에서 가장 높은 일간 CO₂ 제거량을 보였다. 최대 유수량 및 공기유량 조건에서 2.39 kg CO₂·m³·day⁻¹였다.

원판형 매질에서 유수량 5 L/min, 공기유량 20 L/min일 때, 일간 CO₂ 제거량이 1.33 kg CO₂·m³·day⁻¹로 같은 조건의 대조구(0.80 kg CO₂·m³·day⁻¹)와 비교하여 약 1.66배 높았다. 유수량 10 L/min 구간에서 공기유량 160 L/min일 때 일간 CO₂ 제거량은 5.31 kg CO₂·m³·day⁻¹로 같은 조건의 대조구(1.06 kg CO₂·m³·day⁻¹)에 비해 약 5배까지 상승하였다. 최대 유수량과 공기유량에서는 일간 CO₂ 제거량이 5.84 kg CO₂·m³·day⁻¹까지 증가하였다. 유수량과 공기유량이 증가하면서 전체적으로 제거율이 증가하는 경향이었다.

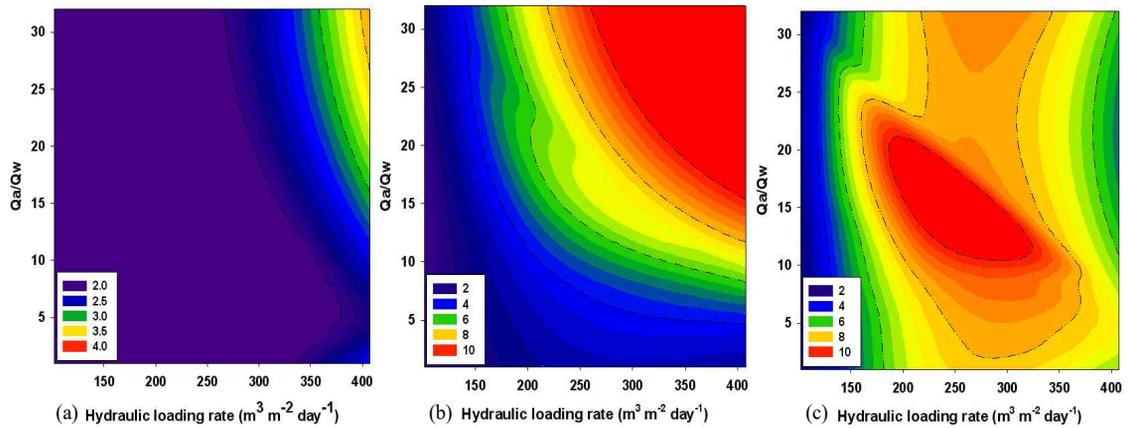
튜브형 매질은 모든 유량 조건에서 일간 CO₂ 제거량이 대조구 및 원판형 매질과 비교하여 매우 증가하였다. 중간 수준의 유수량 10 L/min 조건과 최대 공기유량 조건 160 L/min의 경우, 일간 CO₂ 제거량이 10.4 kg CO₂·m³·day⁻¹로 전체 실험 조건 중 가장 높은 결과를 보였다. 이는 원판형 매질 5.3 kg CO₂·m³·day⁻¹ 대비 약 2배, 대조구 1.1 kg CO₂·m³·day⁻¹ 대비 약 10배에 해당한다.

유수량을 탈기 장치의 단면적으로 나눈 수리학적 부하량과 공기유량/유수량 비율에 따른 대조구와 매질별 CO₂의 제거율과 일간 CO₂ 제거량의 등고선 모델을 [Fig. 6]과 [Fig. 7]에 나타내었다.

대조구의 최대 CO₂ 제거율은 수리학적 부하량 408 m³·m²·day⁻¹, 공기유량/유수량 비율 8일 때 나타났으며, 이때 제거율은 13.2%였다. 동일 조건에서 일간 CO₂ 제거량은 약 2.4 kg CO₂·m³·day⁻¹로 나타났다. 원판형 매질을 충전한 탈기 장치의 경우, 최대 일간 CO₂ 제거량은 수리학적 부하량 204 m³·m²·day⁻¹ 및 공기유량/유수량 비율 16 조



[Fig. 6] Carbon dioxide removal efficiency of degassing columns filled with different media types (Cascade disk packing media, and Tubular packing media) as functions of hydraulic loading rates and air-to-water ratio. Left: Control; Middle: Cascade disk packing media; Right: Tubular packing media.



[Fig. 7] Daily carbon dioxide removal rates of degassing columns filled with different media types (control, Cascade disk packing media, and Tubular packing media) as functions of hydraulic loading rates and air-to-water ratio. Left : Control; Middle : Cascade disk packing media; Right : Tubular packing media.

건에서 약 $5.84 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ 였다. 튜브형 매질을 충전한 탈기 장치는 수리학적 부하량 $204 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}^{-1}$, 공기유량/유수량 비율 16 조건에서 약 32%의 최대 CO_2 제거율과 $10.4 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ 의 일간 CO_2 제거량을 보였다.

IV. 결론

본 연구는 해수 RAS에서 고농도 CO_2 축적 문제를 해결하기 위해 탈기 장치 내 충전 매질의 유무 및 형태에 따른 CO_2 제거 성능과 최적 운전 조건을 실험적으로 규명하였다.

충진 매질을 사용하지 않은 대조구의 최대 CO_2 제거율은 수리학적 부하량 $408 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, 공기유량/유수량 비율 8 조건에서 13.2%로 상대적으로 낮은 수준이었으며, 일간 CO_2 제거량은 최대 $2.65 \text{ kg } CO_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ 로 공기유량 증가에 따른 성능 향상은 미미하였다. 이는 해수의 높은 점도와 염분으로 인해 낙차 구간에서 충분한 혼합이 이루어지지 않고 체류 시간이 짧아 기체-액체 간 접촉 효율이 저하되었기 때문이다. 이러한 결과는 단순 낙차식 폭기 방식의 제한성에 대한 담수 탈기 장치에서 나타난 경향과 유사하였다 (Moran, 2010; Micha et al., 2003).

반면, 충전 매질을 사용할 경우, CO_2 제거 성능이 유의하게 향상되었다. 원판형 매질 적용 시 최대 CO_2 제거율은 수리학적 부하량 $204 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, 공기유량/유수량 비율 16 조건에서 21.0%로 대조구 대비 약 1.6배 증가하였으며, 일간 CO_2 제거량은 최대 $5.84 \text{ kg } CO_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ 로 2.2배 향상되었다. 원판형 매질은 반복적인 낙차와 역류 공기 흐름을 통해 기체-액체 접촉을 증가시키나 (Timmons and Ebeling, 2007), 유수량이 20 L/min 으로 증가할 경우 매질 사이의 좁은 간격으로 인해, 물의 단락 현상이 발생하여 성능 향상이 제한되었으며, 공기유량/유수량 비율이 약 32로 높아 상업적 적용 측면에서는 비효율적이었다.

튜브형 매질은 모든 운전 조건에서 가장 우수한 성능을 보였으며, 최대 CO_2 제거율은 25.8%로 대조구 대비 약 2배 높았다. 최대 일간 CO_2 제거량은 수리학적 부하량 $196 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 및 공기유량/유수량 비율 16 조건에서 $10.4 \text{ kg } CO_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ 로 나타났다. 이는 튜브형 매질 내부의 균일한 공기 분산과 얇은 수막 형성에 따른 난류 촉진 및 기체-액체 접촉 면적 극대화 효과 때문으로 분석된다 (Hewitt, 2010).

충진 매질을 사용한 두 가지 형태의 탈기 장치에서는 일반적으로 공기유량이 증가할수록 CO_2

제거율이 향상되는 경향을 나타내었다. 그러나, 일부 조건에서 제거율이 상대적으로 감소하였으며, 이는 일회 통과 시 제거되는 CO_2 비율이 낮아지더라도 유수량의 증가로 인해 일일 총 CO_2 제거량은 증가하였기 때문으로 판단된다. 특히, 공기유량/유수량 비율이 16 이상인 조건에서 공기유량이 증가하여도 일간 CO_2 제거량이 뚜렷하게 증가하지는 않았는데, 이는 높은 유수량으로 인해 기체-액체 접촉이 충분히 이루어지지 않아, 이러한 현상이 높은 공기유량 조건에서 더욱 두드러졌기 때문으로 판단된다.

따라서, 탈기 장치의 효율적 운영을 위해서는 공기유량과 유수량을 적절히 조절하며, 매질별 최적의 공기유량/유수량 비율을 찾는 전략이 요구된다. 원판형 매질은 튜브형 매질에 비해 최대 제거율과 일간 CO_2 제거량이 상대적으로 낮고, 에너지 효율성 측면에서 공기유량이 32로 높아 16인 튜브형 매질보다 불리한 것으로 나타났다. 따라서 상업적 규모의 RAS에서는 튜브형 매질에서 공기유량/유수량 비율을 16으로 설정하고, 유수량 증가 시 공기유량을 단계적으로 조절하는 공기유량 제어 시스템을 설계함으로써 에너지 효율을 최적화하는 방안이 권장된다.

본 연구의 튜브형 매질 탈기 장치는 해수 조건에서 25.8%의 CO_2 제거율을 보였다. 이는 air-lift형 장치가 보고한 10-20% (Moran, 2010) 대비 약 1.3-2.6배 높은 결과로, 기존 기술의 한계를 상회한다. 이러한 성능 향상은 매질 내부의 균일한 미세 공기 분산과 얇은 수막 형성이 기체-액체 접촉 면적을 극대화한 결과로서, 매질 구조가 제거율을 결정한다는 Zhao et al. (2011)의 연구 결과와 일치하였다. 특히, 화학적 중화제 사용량 저감과 효과적인 CO_2 저감을 통해 해수 pH를 안정화하고 지속 가능한 수질 관리 가능성을 제시하였다.

그러나 본 실험은 실험실 규모의 단기 연구로 수행되었기 때문에, 실제 상업 규모의 RAS에 적

용하기 위해서는 추가적인 검증이 요구된다. 향후 연구에서는 파일럿 규모 이상의 장기 연속 운전 실험을 수행하여 탈기 장치의 내구성, 유지관리의 필요성, 장기 운전 중의 성능 안정성을 평가하고, CO₂ 탈기와 pH 조절 공정을 결합한 통합 관리 기술 개발을 통해 상업적 적용 가능성을 구체적으로 검증할 필요가 있다.

References

- Ahmed N and Turchini GM(2021). Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126604.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126604>.
- Aslam SN and Terjesen BF(2019). Effect of CO₂ on elemental concentrations in seawater RAS tanks. *Aquaculture*, 505, 334~341.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734254>.
- Atvie JK(2024). Dimensioning, design, and evaluation of small scaled single unit recirculating aquaculture systems for educational purposes. Unpublished master's thesis, Norwegian University of Life Sciences.
- Barcelos e Ramos J, Schulz KG, Brownlee C, Sett S and Azevedo EB(2014). Effects of increasing seawater carbon dioxide concentrations on chain formation of the diatom *Asterionellopsis glacialis*. *PLOS ONE*, 9(3), e90749.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090749>.
- Barrut B, Blancheton JP, Champagne JY and Grasmick A(2012). Mass transfer efficiency of a vacuum airlift—application to water recycling in aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 46, 18~26.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.10.004>.
- Cho KS, Jang SW, Lee YJ and Lee SH(2023). Effect of different feeding frequency on the growth performance, hematological parameters and body nutrient composition of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* reared in a recirculating aquaculture system. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56(5), 734~740.
- <https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0734>.
- Ellis RP, Urbina MA and Wilson RW(2017). Lessons from two high CO₂ worlds—future oceans and intensive aquaculture. *Global Change Biology*, 23(6), 2141~2148.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13515>.
- Eshchar M, Mozes N and Fediuk M(2003). Carbon dioxide removal rates by aeration devices in marine fish tanks. *The Israeli Journal of Aquaculture - Bamidgeh*, 55(2), 79~85.
<https://doi.org/10.46989/001c.20342>.
- Hewitt G(2010). Flooding and flow reversal. *Thermopedia*.
https://doi.org/10.1615/AtoZ.f.flooding_and_flow_reversal.
- Jafari L, Fivelstad S, Attramadal KJ, Flataker H, Mjaatvedt P, Olsen AB, Chierici M and Hosfeld C D(2024). A descriptive study of carbon dioxide production and removal in full-scale RAS for Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) post-smolt: A comparison of two different measurement methods for CO₂. *Aquacultural Engineering*, 107, 102442.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2024.102442>.
- Lindholm-Lehto P(2023). Water quality monitoring in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture, Fish and Fisheries*, 13, 113~131.
<https://doi.org/10.1002/aff2.102>.
- Moran D(2010a). Carbon dioxide degassing in fresh and saline water I: Degassing performance of a cascade column. *Aquacultural Engineering*, 43(1), 29~36.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.05.001>.
- Moran D(2010b). Carbon dioxide degassing in fresh and saline water II: Degassing performance of an air-lift. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 120~127.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.001>.
- Mota VC, Nilsen TO and Gallo M(2019). Effects of CO₂ on growth performance and health of Atlantic salmon in RAS. *Aquaculture*, 511, 734257.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.08.075>.
- Murray CS, Gregg JL, Mackenzie A H, Jayasekera HT, Hall S, Klinger T and Hershberger PK(2024). Effects of elevated pCO₂ on bioenergetics and disease susceptibility in Pacific herring *Clupea pallasii*. *Marine Ecology Progress Series*, 738, 225~242.

- <https://doi.org/10.3354/meps14607>.
- Murray F, Bostock J and Fletcher D(2014). Review of recirculation aquaculture system technologies and their commercial application. Institute of Aquaculture, University of Stirling, Stirling FK9 4LA, UK.
- Perry SF, Pan YK and Gilmour KM(2023). Insights into the control and consequences of breathing adjustments in fishes—from larvae to adults. *Frontiers in Physiology*, 14, 106557. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1065573>.
- Shartau R and Baker D(2025). Water pH alters acid-base compensatory responses in White Sturgeon (*Acipenser transmontanus*) exposed to modest and severe environmental hypercapnia. SSRN. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5219148>.
- Sugita H, Nakamura H and Shimada T(2005). Microbial communities associated with filter materials in recirculating aquaculture systems of freshwater fish. *Aquaculture*, 243(1 - 4), 403~409.
- Summerfelt ST, Wilton G, Roberts D, Savage TM and Fonkalsrud K(2004). Developments in recirculating systems for Arctic char culture in North America. *Aquacultural Engineering*, 30, 31~71. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2003.09.001>.
- Timmons MB and Ebeling JM(2007). *Recirculating aquaculture*. Cayuga Aqua Ventures, LLC, Ithaca, NY, 456~466. ISBN 9780971264625.
- Xiao R, Wei Y, An D, Li D, Ta X, Wu Y and Ren Q(2018). A review on the research status and development trend of equipment in water treatment processes of recirculating aquaculture systems. *Reviews in Aquaculture*, 11(3), 863~895. <https://doi.org/10.1111/raq.12270>.
- Zhao X, Smith KH, Simioni MA, Tao W, Kentish SE, Fei W and Stevens GW(2011). Comparison of several packings for CO_2 chemical absorption in a packed column. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(5), 1163~1169. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.07.006>.
-
- Received : 14 May, 2025
 - Revised : 09 June, 2025
 - Accepted : 13 June, 2025