

Packed Column 에어레이터에서 매질로 이용한 발포스티로폼 입자의 산소 전달 효과

박정환 · 김유희 · 조재윤

부경대학교 양식학과

Effects of Oxygen Transfer Rate of a Polystyrene Foam Bead Media in a Packed Column Aerator

Jeonghwan Park, Youhee Kim and Jae-Yoon Jo

Department of Aquaculture, Pukyong National University, 608-737, Korea

To evaluate the characteristics and efficiency of oxygen transfer rate of a polystyrene foam bead as media in a packed column aerator was tested. This media has more surface area and cheaper than other ordinary plastic media. The polystyrene foam media was a sphere-shaped bead with 2.5 mm in diameter and specific surface area was 1,350 m²/m³. Oxygen transfer rate and standard aeration efficiency were tested under different hydraulic loading rates, depths of the media and temperatures.

Experiment 1 was performed using a small packed column aerator with 10 cm in diameter and 1 m in length. The aerator filled with 0, 4.5, 9.0 and 18.0 cm of the media was tested under hydraulic loading rates of 2.0, 4.0 and 5.6 m³/m²/min at temperatures of 20, 25 and 30°C, respectively. In this experiment, standard oxygen transfer rate (SOTR) increased with the hydraulic loading rate and depth of the media increased. The maximum SOTR was reached at 5.6 m³/m²/min of hydraulic loading rate with 9 cm in depth of the media. However, standard aeration efficiency (SAE) decreased with the hydraulic loading rate increased because electricity consumed by pump increased as hydraulic loading rate increased. The highest SAE was reached at hydraulic loading rate of 2.0 m³/m²/min with 9.0 cm in depth of the media. Therefore, the highest SOTR and SAE were achieved at 9.0 cm in depth of the media regardless of the hydraulic loading rate. The maximum SAE was about 1.8 kg O₂/kW-hr with the hydraulic loading rate of 2m³/m²/min at temperature of 20°C.

Experiment 2 was performed using a larger aerator, 20 cm in diameter with 2 m in height. The aerator filled with 0, 9, 18, 27 and 36 cm of the media was operated under hydraulic loading rate of 2.0, 4.0 and 5.6 m³/m²/min at temperature of 27°C. The SAE reached to the highest efficiency (1.9 kg O₂/kW-hr) at 2.0 m³/m²/min of hydraulic loading rate and 36 cm in depth of the media. According to the above results, the polystyrene foam bead as a media in a packed column aerator was effective to increase oxygen transfer rate.

Key words : Oxygen transfer rate, Aeration efficiency, Packed column aerator, Polystyrene foam bead

서 론

용존산소는 양식 시설 내 생산량을 결정짓는 첫번째 제한 인자로서, 모든 어류와 패류의 생산을 위해 필수적으로 공급되어야 할 중요한 수질 조건이다. 고밀도 사육

시설내의 용존산소 부족 현상을 보충하기 위한 효과적인 방법으로 환수와 에어레이션이 가장 일반적이다. 그러나 환수에 의한 산소 보충은 양어 용수의 계절에 따른 용수량의 변동 및 수온 차이 등으로 인하여 사용상 제약이 많이 따른다. 그러므로 가스-액체 접촉 시설을 이용한

에어레이션 방식이 과거로부터 양식 시설에 용존산소 보충 수단으로서 가장 일반적으로 이용되어 왔으며 보다 효율적일 것으로 생각된다 (Petit, 1990; Huguenin and Colt, 1992). 특히 고밀도 순환 여과식 사육 시설의 경우, 1일 환수량이 약 5% 또는 그 이하에 불과하여 환수에 의한 산소 보충은 거의 기대할 수 없으므로 산소 공급 장치의 설치는 필수적이라고 할 수 있다.

서로 접하고 있는 액체와 가스는 물질의 전달을 방해하는 얇은 경계면에 의해 분리되어 있는데, 만약 가스액체의 교반이 없다면, 경계면으로 인해 두 매질간의 물질 교환의 정도는 낮아지게 된다. 그러나 이러한 경계면에 의한 방해 작용은 약한 와류에 의해서도 감소되므로, 결국 가스 또는 액체의 교반을 통해 산소가 녹아 들어가는 비율을 증가시킬 수 있다 (Petit, 1990). 즉 에어레이션은 이러한 원리를 이용하여 강한 와류를 일으키고 공기 방울을 보다 작게 조각내어, 액체 내로 가스 전달을 방해하는 경계면의 두께를 감소시키고 접촉 표면적을 넓힘으로써 산소의 전달률을 증가시킬 수 있다 (Wheaton, 1977; Boyd and Watten, 1989). 그러므로 이러한 에어레이터를 이용하여 상대적으로 높은 용존산소를 시설 내에서 일정하게 유지할 수 있다면, 어류의 부하량 (kg/l) 과 사육 밀도 (kg/m^3)를 증가시킬 수 있으므로, 양식 생산량을 보다 증대시킬 수 있다 (Watten, 1990; Lawson, 1995). 또한 공급 수량 또는 용적에 대한 어류 수용 밀도의 증가를 통해 사육 수조의 용적을 축소시키고 수리학적 부하에 민감한 여러 가지 수처리 시설의 크기를 감소시킬 수 있으므로 순환 여과식 시설의 설립 목적에 잘 부합된다고 할 수 있을 것이다.

Packed column 에어레이터는 낙차를 이용한 간단한 형태로 시설 내 산소를 전달할 수 있으며, 또한 column 내에 매질을 채워, 통과하는 물이 효과적으로 공기와 접촉할 수 있게 하여 더 많은 산소를 전달할 수 있는 장점을 지니고 있다. 어떤 경우에는 이 시설에 부가적으로 공기나 순수 산소를 주입시켜 포화 농도 이상의 용존산소를 시설 내에 공급하여 생산량의 증대를 도모하기도 한다. 그러나, 공기나 순수 산소의 부가적인 공급은 여러 가지 문제와 경제적으로 불리한 점들이 발생할 수 있으므로, 부가적인 시설이나 순수 산소를 이용하지 않으면서, 간단하고 쉽게 사용할 수 있는 에어레이터의 개발이 필요하다. Packed column 에어레이터의 산소 전달 성능은 일반적으로 채워지는 매질의 물리적 특성에 따라 결

정되는데, 더 넓은 가스-액체 접촉면적을 제공할 수 있는 비표면적이 넓은 매질이 필요하다.

발포스티로폼은 가격이 저렴하고, 물보다 가벼운 매질이어서, column내에 고정을 위한 특별한 장치가 불필요하며, 수류에 의해 쉽게 교반되므로 에어레이터를 지나는 수중의 유기물에 의한 막힘 현상을 방지할 수 있어서, 높은 비표면적을 가지고 수류를 최대한 저해하지 않아야 한다는 매질의 조건을 충족시킬 (Huguenin and Colt, 1992) 수 있는 것이므로, 양식 시설에 직접적으로 이용 가능할 것으로 생각된다.

이 논문은 발포 스티로폼 입자를 이용하여, 각 수온에서의 산소 전달 특성 및 매질의 깊이와 수리학적 부하량의 변화에 따른 산소 전달 효과와 성능을 조사하였으며, 수온, 매질의 깊이, 수리학적 부하량에 따른 상관관계를 조사하여 packed column 에어레이터 매질로서의 이용 가능성 여부를 조사하였다.

재료 및 방법

1. 실험 장치

실험은 발포스티로폼 입자를 이용한 실내 소규모 실험 (Exp. 1)과 순환여과식시설내의 pilot 규모의 실험 (Exp. 2)으로 나누어 수행하였다.

○ Exp. 1 : 실내 소규모 장치에서의 실험

Table 1에 나타나 있는 물리적 특성을 가진, 발포스티로폼 입자를 이용한 에어레이터의 산소 전달 효과를 알아보기 위해, 먼저 소규모의 에어레이터를 이용한 Exp. 1을 실시하였다.

실험에 사용된 에어레이터는 내부 관찰이 용이하도록 직경 10 cm, 높이 1 m, 두께 0.5 mm의 아크릴 관으로 제작하였다. 순환 펌프 (한일 PB-40-1-D)를 이용하여, 30 l의 저수조로부터 물을 에어레이터의 상부로 유입시켰는데, 물은 20 mm PVC 파이프와 연결된 살수기를 통해 에어레이터 내부에 고루 분배하여 주수되도록 하였다. 에어레

Table 2. Physical characteristics of the polystyrene foam bead used in a packed column aerator

Material	polystyrene foam
Diameter	2.5 mm
Specific surface area	1,357 m ² /m ³
Porosity	48%

이터로 유입된 물은 에어레이터 바닥으로부터 5 cm 위쪽에 부착된 직경 30 mm PVC 파이프를 통해 배출되었다. 수리학적 부하량은 PVC 밸브로 조절하였으며, 공급되고 남은 여분의 물은 저수조로 침지시켜 유입되도록 하였으며, 이때 물의 낙차에 의한 추가적인 산소 전달 효과를 방지하기 위해 조용히 저수조의 수중으로 떨어지게 하였다. 실험 장치는 모두 3개가 독립적으로 운전되었다.

○ Exp. 2 : 순환여과식 시설 내에서 pilot 규모의 실험

Exp. 2에 사용된 에어레이터는 직경 20 cm, 높이 2 m의 PVC 파이프를 제작되었으며, 에어레이터의 내부 관찰이 용이하도록 파이프의 길이 방향으로 양면을 잘라내고 아크릴 판을 부착하여 방수처리 하였다. 파이프에 유입된 물은 밑바닥으로부터 상부 20 cm에 부착된 50 mm PVC 파이프를 통해 배출되었다. 이 때 사용된 저수조의 총 용적은 약 3 톤 (1.9×1.9×0.9 m, FRP 사각 수조)으로, 2.5 톤의 물을 채워 실험하였다. 물은 순환 펌프 (한일 PA-280)에 의해 에어레이터의 상부로 유입시켰고, 40 mm PVC 파이프와 연결된 살수기를 통해 에어레이터 내부에 고루 주수되도록 하였다. 수리학적 부하량은 밸브를 이용하여 조절하였고, 공급되고 남은 물은 저수조로 조용히 재 유입되도록 하였다. 에어레이터는 저수조의 내부에 설치하였고, 이 때 에어레이터 내부 수량은 약 20 l였으며, Exp. 1과 Exp. 2에 이용된 실험 장치의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

2. 실험 조건

Exp. 1은 20℃, 25℃ 그리고 30℃에서 각각 수행하였으며, 각각의 수온에 대해 수리학적 부하량과 발포 스티로폼의 길이의 변화를 달리하여 산소 전달 효과를 조사하였다. 이때 수리학적 부하량은 에어레이터의 단면적 (m²)에 대해 2 m³/min, 4 m³/min 및 5.6 m³/min이었으며, 각각의 수리학적 부하량에 대해 발포 스티로폼의 길이는 0 cm, 4.5 cm, 9 cm 및 18 cm이었다.

Exp. 2는 수온 27℃에서 실시되었으며, 이때 수리학적 부하량은 Exp. 1과 동일하게 하였다. 발포 스티로폼의 길이는 각각 0 cm, 9 cm, 18 cm, 27 cm 및 36 cm이었다.

3. 가스 전달 이론

산소, 질소 그리고 알콘과 같은 용해도가 낮은 가스들의 액체 내 전달률은 가스-액체 접촉 표면적, 액체내 가

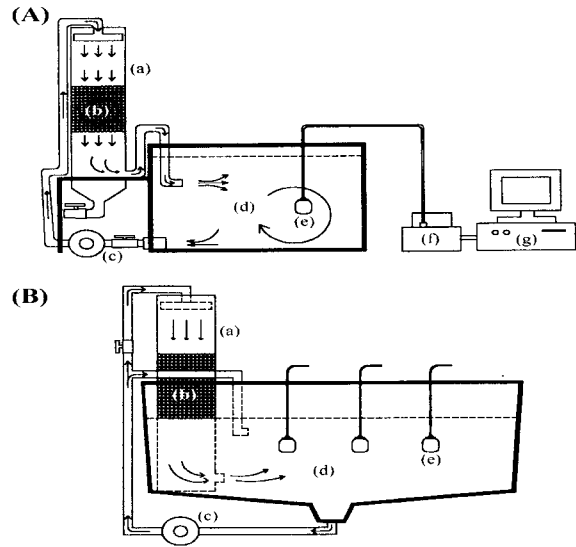


Fig. 1. Schematic diagrams of oxygen transfer rate measuring system for Experiment 1 (A) and Experiment 2 (B). (a) packed column aerator; (b) media (polystyrene foam); (c) pump; (d) test basin; (e) oxygen probes; (f) logger system for saving the data; (g) computer for analyzing the data from logger system

스의 실제 농도와 포화 농도간의 농도 차에 비례한다. 이러한 상관 관계는 Lewis and Whitman (1924)의 가스 전달 모델을 이용하여 계산하였다.

여기서 계산된 (K_La)_T 값을 다시 Stenstrom and Gilbert (1981)에 의해 제시된 식을 이용하여 표준 수온인 20℃에 대해 보정함으로써, 수온에 의한 영향을 상쇄하고, 각 수온에서의 산소 전달 효과를 비교하였다. 또한, 표준 조건에서, K_La를 이용한 에어레이터의 성능 평가를 위해서 산소전달률과 에어레이션효율이 일반적인 척도로 이용되는데, 표준산소전달률과 (standard oxygen transfer rate : SOTR, g O₂/hr) 표준에어레이션효율 (standard aeration efficiency : SAE, g O₂/kw-hr)은 Lawson (1995)에 계산하였다. 이 때 펌프에 의한 소모전력은 Hackney and Colt (1982)에 의해 계산하였다.

4. 산소 전달 효과 측정

Exp.1과 2 모두에서, 산소 전달 효과를 조사하기 위해, 저수조 내 물을 아황산나트륨 (Na₂SO₃)과 촉매제인 염화코발트 (CoCl₂ · 6H₂O)를 투입하여 탈산소화시켰다 (APHA, 1985). 아황산나트륨은 산소 1 mg/l 을 제거하는데 7.88 mg / l, 염화코발트는 0.1 mg/l 의 농도로 투입하였다. 염화코

발트를 먼저 소량의 물에 녹인 후 저수조에 투입하고 펌프를 가동하여 충분히 용해시킨 후, 다시 아황산나트륨을 소량의 수돗물에 녹여 수표면에 고루 뿌렸다. 저수조내 용존산소가 완전히 0 mg/l에 도달한 것을 확인한 후, 에어레이터를 재 가동하여 용존산소의 변화를 측정하였다.

용존산소 측정은 산소 probe (OxyGuard, 4 Channel Multi Logger System, Denmark)를 이용하여 매 30초 간격으로 실시하였다. Exp. 2의 경우, 수조의 벽면으로부터 최소 15 cm 떨어진 중층에 3개의 산소 probe를 설치하였다. 주어진 수온 조건에서 포화 농도의 90% 이상 되는 농도에 도달할 때까지 에어레이터를 가동하여, 포화 농도의 20%와 80%에 해당하는 두 시점의 용존산소 농도와 시간에서 $(K_La)_T$ 값을 계산하였다. Exp. 1에서 각각의 수리학적 부하 조건에서, 식 (4)를 θ 값에 대해 변형하여, 온도 보정 상수인 θ 값을 구하였다. 이 θ 값을 이용하여 $(K_La)_T$ 값을 $(K_La)_{20}$ 로 환산하였고, 또한 Exp. 2에서도 이 θ 값을 이용하여 수온의 영향에 대해 보정하였다. 다시 보정한 $(K_La)_T$ 값을 이용하여 표준 조건에서의 산소전달률과 에어레이션효율을 평가하였다. 이러한 방법을 통해, 각 실험에 있어서 수온 변화에 따른 산소 전달 특성, 수리학적 부하량에 따른 산소 전달효율과 발포스티로폼 매질의 깊이에 따른 산소 전달 효율을 평가하였다.

5. 통계 처리

통계 처리는 Statistix 4.0 (Analytical Software, USA) 통계 프로그램으로 ANOVA test를 실시하여 최소 유의 차 검정 (LSD)으로 95% 신뢰 구간에서 평균간의 유의성을 검정하였다.

결 과

1. Exp. 1: 실내 소규모 장치에서의 에어레이션 효과

- 수온에 따른 $(K_La)_T$ 값의 변화 및 온도 보정 상수, θ 값의 측정

수온이 상승함에 따라 $(K_La)_T$ 값은 $(K_La)_{20}$ 값보다 높아지는 경향을 나타내었는데, 20℃에서는 $(K_La)_T$ 값이 2 $m^3/m^2/min$, 4 $m^3/m^2/min$ 및 5.6 $m^3/m^2/min$ 의 수리학적 부하량에 대해, 각각 8.4, 10.0 및 13.4 였으나, 25℃에서는 9.1, 11.0과 14.5, 30℃에서는 9.9, 11.7과 15.4로 각각 증가하여, 20℃에서의 K_La 값보다 25℃에서는 약 8~10% 그리고 30℃에서는 약 15~17.5%까지 증가한 것으

로, 수온이 상승함에 따라 $(K_La)_T$ 값은 뚜렷히 증가하였다 ($P < 0.05$). 또한 $(K_La)_T$ 값과 $(K_La)_{20}$ 값의 비는 수온이 상승함에 따라 지수 함수적으로 증가하였으며, 이 때 지수 함수식의 상수에 해당하는 θ 값은 각각의 수리학적 부하량에서 1.016, 1.017 및 1.015로 평균간의 유의적인 차이는 없는 것으로 나타나 ($P > 0.05$), 수리학적 부하량 변화에 대한 수온의 영향은 동일하게 하였다.

- 매질의 깊이와 수리학적 부하량에 따른 $(K_La)_{20}$ 값의 변화
- 매질의 깊이와 수리학적 부하량에 따른 $(K_La)_{20}$ 의 상관 관계를 Fig. 2, 3 및 4에 나타내었다. 20℃에서 $(K_La)_{20}$ 은 0 cm, 4.5 cm 및 9 cm 로 매질의 깊이가 증가함에 따라, 수리학적 부하량이 2 $m^3/m^2/min$ 에서는 8.4 ± 0.05 , 11.4 ± 0.06 및 19.7 ± 0.13 , 4 $m^3/m^2/min$ 에서는 10.2 ± 0.12 , 13.9 ± 0.23 및 21.2 ± 0.41 , 그리고 5.6 $m^3/m^2/min$ 에서는 13.4

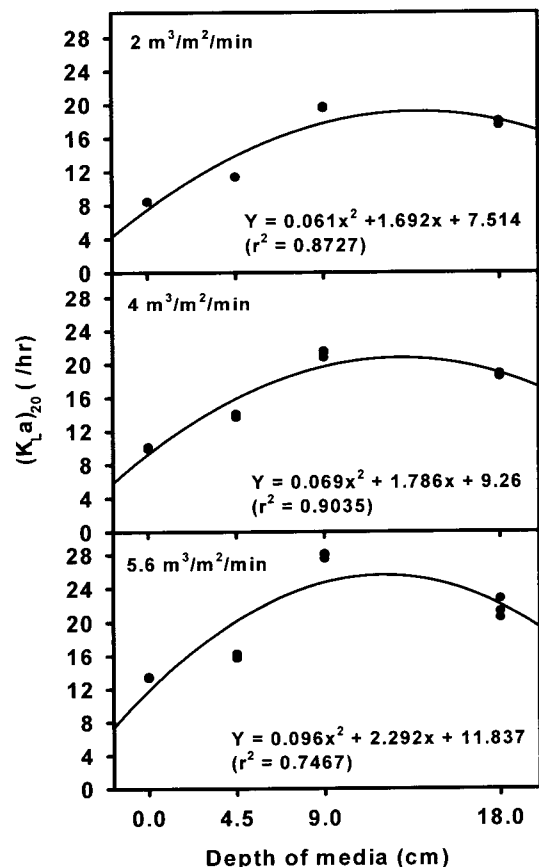


Fig. 2. Relationship between depths of media and overall oxygen transfer coefficient $[(K_La)_{20}]$ in a packed column aerator under different hydraulic loading rates, 2.0 (top), 4.0 (middle), and 5.6 $m^3/m^2/min$ (bottom). Experimental temperature was at 20℃.

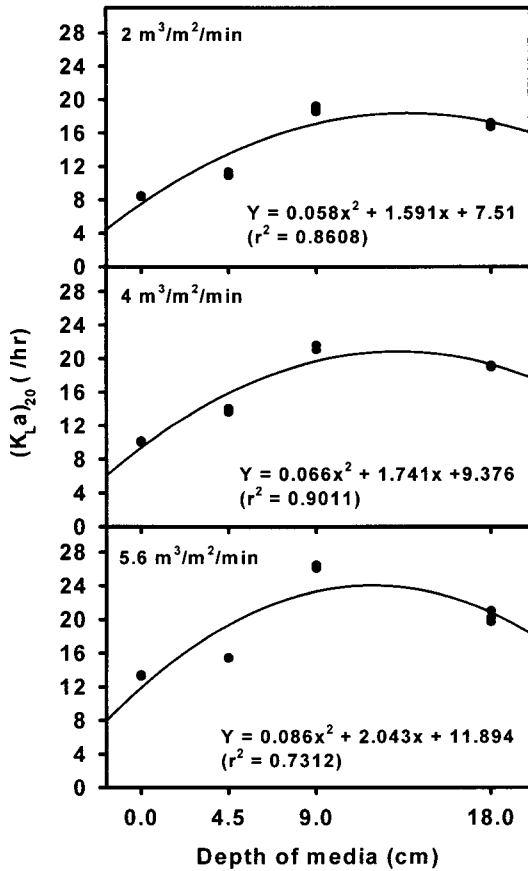


Fig. 3. Relationship between depths of media and overall oxygen transfer coefficient [(KLa)₂₀] in a packed column aerator under different hydraulic loading rates, 2.0 (top), 4.0 (middle), and 5.6 m³/m²/min (bottom). Experimental temperature was at 25 °C.

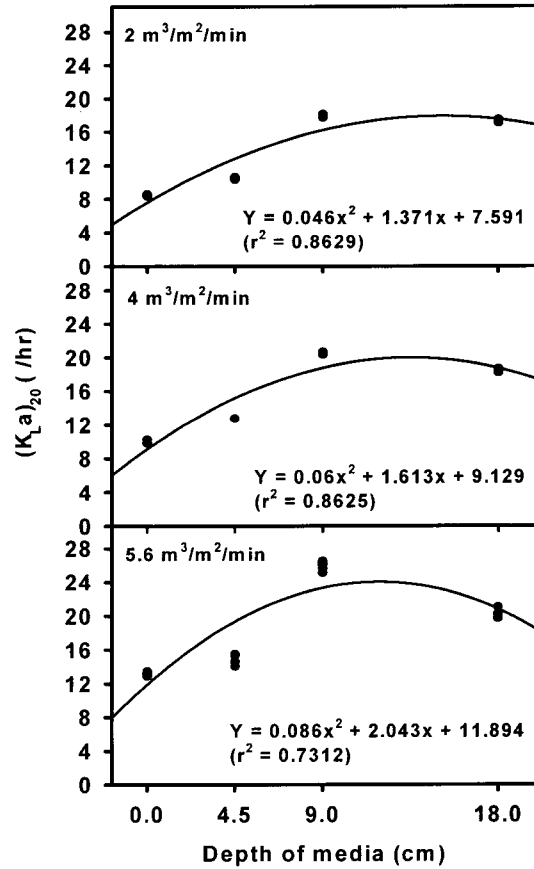


Fig. 4. Relationship between depths of media and overall oxygen transfer coefficient [(KLa)₂₀] in a packed column aerator under different hydraulic loading rates, 2.0 (top), 4.0 (middle), and 5.6 m³/m²/min (bottom). Experimental temperature was at 30 °C.

±0.11, 16.0±0.31 및 27.9±0.33으로 상승하였다. 그러나 매질의 깊이 18 cm에서는 각각의 수리학적 부하량에 대해, (K_La)₂₀ 값은 17.8±0.29, 18.7±0.21 및 21.6±1.14로 9 cm에서보다는 낮았다 (P<0.05).

25°C와 30°C에서도 9 cm까지 매질의 깊이가 증가함에 따라, 각각의 수리학적 부하량에서 (K_La)₂₀ 값이 상승하였다가, 18 cm에서는 오히려 하강하는 동일한 경향을 나타내었다. 비록 18 cm에서는 (K_La)₂₀ 값이 하강하는 경향을 나타내었으나, 모든 수온 조건과 수리학적 부하 조건에 대해, 0 cm, 4.5 cm 및 9 cm로 매질의 깊이가 증가함에 따라, (K_La)₂₀ 값이 유의적으로 상승하여, 매질의 깊이의 증가를 통해 산소전달률을 높일 수 있었다.

○ 표준산소전달률 (SOTR)과 표준에어레이션효율 (SAE) 수리학적 부하량과 매질의 깊이에 따른 SOTR과 SAE

값들을 수온 20°C, 25°C 및 30°C에 대해 Table 2에 각각 나타내었다. SOTR은 모든 수온과 매질의 깊이에서 수리학적 부하량이 증가함에 따라서 증가하였고, 또한 매질의 깊이가 증가함에 따라서 증가하였으나, 18 cm에서는 오히려 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 그러므로 5.6 m³/m²/min의 수리학적 부하량에서 매질의 깊이가 9 cm일 때, 20°C, 25°C 및 30°C에 대해 각각 시간당 7.6, 7.2 그리고 6.9 g O₂로 나타나, 가장 많은 산소를 전달하였다.

그러나, 수리학적 부하량이 증가하면서 펌프가 소모하는 전력이 상승하므로, 단위 소모 전력당 산소 전달량은 수리학적 부하량이 증가하면서 오히려 감소하였다. 따라서 매질의 깊이 9 cm에서 수리학적 부하량이 2 m³/m²/min일 때, 20°C, 25°C 및 30°C에 대해 각각 1784.2, 1718.5 그리고 1634.7 g O₂/kw-hr로 단위 소모 전력당

Table 2. Standard oxygen transfer rate(SOTR) and standard aeration efficiency(SAE) in a packed column aerator under different hydraulic loading rates and bed depths with three temperatures

Temp.	Depth of Bed (cm)	Hydraulic loading rate ($m^3/m^2/min$)					
		2		4		5.6	
		SOTR	SAE	SOTR	SAE	SOTR	SAE
20 °C	0	2.3	766.4	2.7	454.9	3.7	406.2
	4.5	3.1	1036.0	3.8	629.7	4.4	484.3
	9	5.4	1784.2	5.8	962.5	7.6	844.4
	18	4.9	1619.0	5.1	848.5	5.9	652.3
25 °C	0	2.3	764.1	2.8	461.3	3.7	405.4
	4.5	3.0	1006.5	3.8	624.9	4.2	467.2
	9	5.2	1718.5	5.8	964.5	7.2	794.0
	18	4.6	1544.9	5.2	863.8	5.5	615.1
30 °C	0	2.3	768.5	2.7	453.2	3.6	397.7
	4.5	2.9	955.2	3.5	581.1	3.9	431.3
	9	4.9	1634.7	5.6	933.6	6.9	769.6
	18	4.7	1565.7	5.0	837.1	5.5	607.4

가장 많은 산소를 전달하였다.

2. Exp. 2 : 순환여과식 시설 내 pilot 규모에서 에어레이션 효과

○ 매질의 깊이와 수리학적 부하량에 따른 $(K_{La})_{20}$ 값의 변화

Fig. 5에서 보는 바와 같이, 동일한 매질의 깊이에서 $(K_{La})_{20}$ 값들은 수리학적 부하량이 증가함에 따라 증가하여, 수리학적 부하량이 $5.6 m^3/m^2/min$ 일 때, 매질의 깊이 0, 9, 18, 27 및 36 cm에 대해 $(K_{La})_{20}$ 값은 2.7 ± 0.07 , 3.4 ± 0.12 , 4.6 ± 0.06 , 5.4 ± 0.15 그리고 4.7 ± 0.14 로, $2 m^3/m^2/min$ 일 때, 1.4 ± 1.05 , 2.2 ± 0.07 , 2.8 ± 0.16 , 3.4 ± 0.08 및 3.4 ± 0.07 과 $4 m^3/m^2/min$ 일 때, 2.1 ± 0.03 , 2.8 ± 0.07 , 3.6 ± 0.04 , 3.9 ± 0.17 및 3.7 ± 0.05 보다 높은 값을 나타내어 수리학적 부하량이 증가를 통해 $(K_{La})_{20}$ 값을 증가시킬 수 있었다 ($P < 0.05$).

또한, 동일한 수리학적 부하량에 대해 매질의 깊이가 증가함에 따라 $(K_{La})_{20}$ 값이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 매질의 깊이가 가장 깊은 36 cm 에서는 수리학적 부하량이 $2 m^3/m^2/min$ 일 때, 27 cm에서의 $(K_{La})_{20}$ 값과 유의적으로 차이가 없었으나, 4와 $5.6 m^3/m^2/min$ 에서는 오히려 27 cm에서보다 유의적으로 낮아졌다 ($P < 0.05$). 하지만 모든 수리학적 부하량에서 27 cm의 매질의 깊이까지는 매질의 깊이가 증가함에 따라 $(K_{La})_{20}$ 값을 증가시킬 수 있었는데, 이러한 $(K_{La})_{20}$ 값에 대한 수리학적 부하량과 매질의 깊이 변화에 따른 상관 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

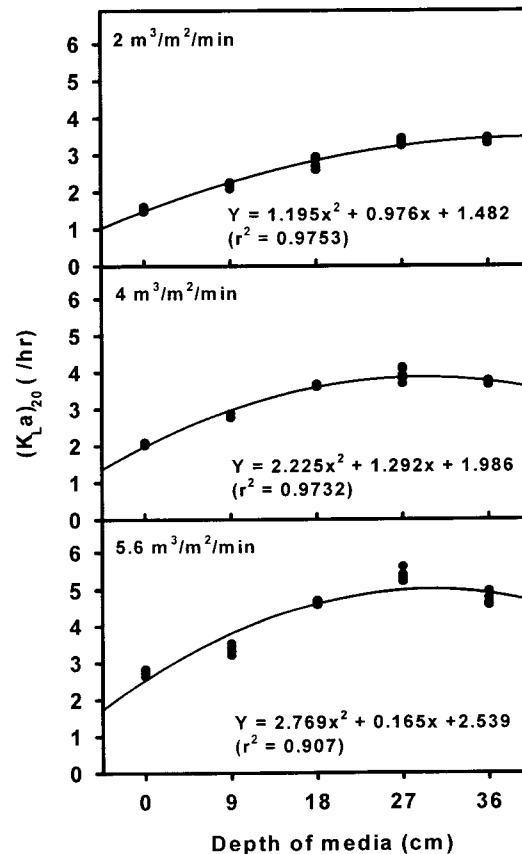


Fig. 5. Relationship between depths of media and overall oxygen transfer coefficient $[(K_{La})_{20}]$ in a packed column aerator with three different hydraulic loading rates, 2.0 (top), 4.0 (middle), and 5.6 $m^3/m^2/min$ (bottom).

○ 표준산소전달률과 표준에어레이션효율

수리학적 부하량과 매질의 깊이에 따른 SOTR과 SAE 값의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. SOTR은 수리학적 부하량이 증가함에 따라 상승하여, 5.6 m³/m²/min의 수리학적 부하량에서 0 cm, 9 cm, 18 cm, 27 cm 및 36 cm의 매질의 깊이에 대해 각각 62.2, 77.2, 105.4, 121.7 및 107.0 g O₂/hr로 가장 높은 산소전달률을 나타내었다. 또한 수리학적 부하량이 낮은 2.0 cm 에서는 매질의 깊이가 증가함에 따라 SOTR은 증가하였으나, 수리학적 부하량이 4 및 5.6 m³/m²/min 일 때 매질의 깊이 36 cm에서는 27 cm에서보다 오히려 산소 전달률이 감소하는 경향을 나타내었다. 그러므로 5.6 m³/m²/min의 수리학적 부하량에서 매질의 깊이가 27 cm일 때 121.7 g O₂/hr로 가장 많은 산소를 전달하였다.

그러나, 펌프의 소모 전력은 양수량이 증가함에 따라 상승하여, 단위 소모 전력당 산소전달률은 수리학적 부하량이 증가함에 따라 감소하였다. 따라서 매질의 깊이 36 cm에서 수리학적 부하량이 2 m³/m²/min일 때, 1914.5 g O₂/kw-hr로 단위 소모 전력당 가장 많은 산소를 전달하였다.

고 찰

본 연구에서는 실험에 이용된 에어레이터에 대한 수온의 영향을 보정하기 위해, 표준 수온인 20℃와 온수성 어류의 사육 수온인 25℃ 및 30℃에서 θ 값을 구하였는데, 매질을 채우지 않은 조건에서 각각의 수리학적 부하

량에 대해 조사하였다.

실험 결과 수리학적 부하량 2, 4 그리고 5.6 m³/m²/min에 대해, θ 값은 각각 1.016, 1.017 그리고 1.015로 평균값은 1.016이었고, 평균간에 유의적인 차이는 나타나지 않았다 (P>0.05). 이것은 일반적으로 담수에서 권장되는 1.024 보다는 낮은 값이지만, 다른 연구자에 의해 제시된 1.008~1.047의 범위 내에 포함되는 값이다 (Beata et al., 1970). 일반적으로 온도에 의한 영향을 보정하는 기술들은 경험적인 방법에 의존하는 것으로, Hunter (1979)는 에어레이터의 종류, 실험 조건 및 수온에 따라 보정상수는 달라지므로 모든 에어레이터에 동일한 보정 상수를 이용하는 것은 바람직하지 못하다고 하였다. 그러나, 매질을 채운 실험구에서는 수온이 증가함에 따라 보정된 총산소전달계수가 다소 낮아지는 경향을 나타내었는데, 이것은 채워진 매질에 의해 수중에 형성되는 공기 방울의 움직임과 형태를 변화시켰기 때문으로 사료된다.

수온에 의한 영향을 θ 값을 이용하여 보정한 후, 표준 수온에서의 총산소전달계수를 구하였는데, 수리학적 부하량과 총산소전달계수를 살펴 본 결과, 수리학적 부하량이 증가함에 따라 총산소전달계수가 상승하였다. 이것은 동일한 높이에서는, 공급되는 수량이 증가함에 따라 총산소전달계수와 산소전달률이 증가되었다는 Mohapatra et al. (1989)과 김 (1999)의 연구 결과와 일치하였다.

또한 매질의 깊이와 총산소전달계수와 상관계수에 있어서도, 매질의 깊이가 증가함에 따라 총산소전달계수가 상승하였는데, Exp. 1의 경우, 9 cm에서 모든 조건에 대해, 가장 높은 값을 나타내었다. 이것은 매질의 깊이가 증가하면서, 충전된 매질의 용적이 증가하여 보다 넓은 비표면적을 제공하였고, 매질의 깊이가 증가함에 따라 column 내에 생성되는 공기 방울의 양은 많아졌다. 매질의 아래쪽에서 수류에 의해 생성된 공기 방울들이 하강하는 수류의 힘과 매질의 압박으로 인해 상승하지 못하고 지속적으로 column 내에 머물게 되고, 이에 따라 통과하는 수류와 접촉하는 시간이 길어지면서, 더 많은 산소가 녹아들어 갈 수 있었던 것으로 생각된다. 공기 확산 에어레이터의 경우, 일반적으로 공기 방울의 수중 체류 시간이 길어지고 공기 방울의 직경이 작아질수록 더 많은 산소를 전달할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Colt and Orwicz, 1991).

Exp. 1에서 산소 전달률을 조사한 결과, 수리학적 부하량이 증가하고 매질의 깊이가 9 cm까지는 총산소전달계

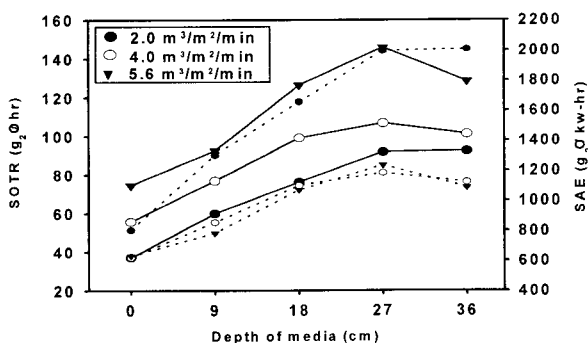


Fig. 6. Standard oxygen transfer rate (SOTR: solid line) and standard aeration efficiency (SAE: dotted line) in a packed column aerator under different depths of media with three different hydraulic loading rates, 2.0, 4.0, and 5.6 m³/m²/min.

수에서와 같이 증가하였는데, 가장 높은 수리학적 부하량에서 수온 30℃일 때, 매질을 채우지 않은 실험구에서 시간당 3.58 g의 산소를 전달한 반면, 매질의 깊이가 9 cm에서는 시간당 6.93 g의 산소를 전달하여, 매질을 채우지 않은 실험구에 비해 약 2배정도 더 많은 양의 산소를 전달하여 더 높은 효율을 나타낼 수 있다는 것을 확인하였다. Exp. 2에서도 Exp. 1에서와 같이, 매질의 깊이가 27 cm, 수리학적 부하량이 5.6 $m^3/m^2/min$ 일 때, 시간당 121.7 g의 산소를 전달하여 가장 높은 효율을 나타내었고 전달된 산소의 양은 Exp. 1에 비해 매우 높았다. 이것은 표준 산소전달률은 에어레이터가 전달할 수 있는 산소의 절대량을 나타내는 것으로, 사용되는 에어레이터의 규모와 형태, 그리고 펌프의 용량에 따라 전달하는 산소의 양이 달라질 수 있기 때문이다 (Lawson 1995).

Boyd and Watten (1989)은 양식장에서 이용할 수 있는 펌프의 단위 소모 전력 당 전달 가능한 산소의 양을 나타내는 표준에어레이션효율을 이용하여 에어레이터의 산소 전달 능력을 나타내는 것이 바람직하다고 하였다. 즉, 특정 에어레이터의 산소 전달량이 매우 높다 하더라도, 사용하는 펌프의 소모 전력이 크다면, 경제적인 면에서 효율적이지 못하기 때문이다. 실질적으로 에어레이션에 의한 지출 경비는 총 지출 경비에서 사료 다음으로 많은 부분을 차지하는데, 송어 양식 시설의 경우에 13~15% 그리고 부화장의 경우에는 23%의 비율을 차지하며 (Petit, 1990), 순환 여과식 시설에서는 전체 비용의 8.6%를 차지할 정도로, 에어레이션은 매우 에너지 소모적인 수처리 과정 (Stenstrom and Gilbert, 1981; Timmons and Aho, 1998)이다. 본 연구의 Exp. 1과 Exp. 2에서도 에어레이터에 의해 전달된 총 산소의 양은 수리학적 부하량이 증가함에 따라 증가하였으나, 단위 소모 전력 당 전달된 산소의 양은 오히려 가장 낮은 수리학적 부하량에서 가장 높았다. 이러한 사실은 Boyd and Moore (1993) 그리고 Loyless and Malone (1998) 등의 연구들에서도 확인할 수 있었다.

Exp. 2에서, 표준에어레이션효율은 매질의 깊이 36 cm에서 수리학적 부하량이 2 $m^3/m^2/min$ 일 때, 1.9 $kg O_2/kw-hr$ 로 가장 높은 값을 나타내어, Colt and Orwicz (1991)가 packed column 에어레이터를 이용하여 1.2~2.4 $kg O_2/kw-hr$ 범위의 산소 전달 효율을 보고한 것과 유사한 결과를 나타내었다. 또한 packed column 에어레이터에 순수 산소를 주입하여 산소 전달 효율을 조사한 Hackney

and Colt (1982)의 연구에서는 0.5~1 $kg O_2/kw-hr$ 범위의 값을 보고하여 이 실험에 사용한 에어레이터가 더 높은 효율을 나타내었다. 이밖에 Boyd (1998)는 양식 못에서 수차, 에어오투 형의 propeller-aspirator-pump, 표면 분수형 펌프, 분사형 펌프 및 확산 에어레이터 등의 산소 전달 효율을 조사한 결과 각각 1.1~3.0 $kg O_2/kw-hr$, 1.3~1.8 $kg O_2/kw-hr$, 0.7~1.8 $kg O_2/kw-hr$, 0.9~1.9 $kg O_2/kw-hr$ 및 0.7~1.2 $kg O_2/kw-hr$ 의 값을 보고하여, 이 실험에 이용된 에어레이터의 산소 전달 효율이 높거나 유사한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 이용된 발포스티로폼의 매질을 채운 packed column 에어레이터는 기존에 이용되어 오고 있는 packed column 에어레이터 뿐만 아니라 다른 형태의 에어레이터들과 비교하여, 표준 조건에서 유사한 성능을 나타내어, 충분한 이용 가능성을 가지는 것으로 나타났다.

그러나 이 연구에 이용된 에어레이터의 일반 양어장에의 적용과 안정적인 운전을 위해 실제 어류 사육 실험을 통한 성능의 검증이 필요하며, 에어레이터의 직경과 충전된 매질의 양에 따른 산소 전달률의 관계에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한, 부가적인 전력의 소모 없이, 양식 시설 내 물의 낙차에 의해 간단히 이용될 수 있는 에어레이터의 설계를 통해 보다 경제적인 에어레이터 개발에 관한 연구도 수행되어야 할 것으로 사료된다.

요 약

이 연구는 값싸고 높은 비표면적을 제공할 수 있는 발포스티로폼 입자를 packed column 에어레이터의 산소 전달 매질로 이용 가능성을 알기 위하여 매질의 깊이와 수리학적부하량에 따른 산소 전달 특성과 효율을 조사하였다. 이용된 발포스티로폼 입자는 직경 2.5 mm의 구형이었으며, 비표면적이 1350 m^2/m^3 으로 일반적으로 이용되는 매질에 비해 약 3.7~7.0배 더 넓은 비표면적을 제공할 수 있다.

이 매질을 직경 10 cm, 높이 1 m의 내부 관찰이 용이한 아크릴 관으로 제작한 packed column 에어레이터에 0, 4.5, 9 그리고 18 cm의 매질을 채워 넣고, 수온 20, 25 및 30℃에 대해 수리학적 부하량을 2, 4 및 5.6 $m^3/m^2/min$ 로 각각 달리하여 산소전달특성을 실험한 결과 (Exp. 1), 모든 실험 수온에서 수리학적 부하량이 증가함

에 따라 표준산소전달률이 증가하였으나 매질의 깊이는 9 cm 까지는 증가하다가 18 cm에서는 감소하였다. 표준 산소전달률은 매질 깊이 9 cm에서 수리학적 부하량이 $5.6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ 일 때 가장 높았다. 그러나 수리학적 부하량이 증가함에 따라 펌프의 소모 전력이 증가하여, 단위 소모 전력당 표준에어레이션 효율은 매질의 깊이 9 cm에서 수리학적부하량 $2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ 일 때 가장 높았다. 따라서 모든 수리학적 부하량에서 매질의 깊이 9 cm 일 때 표준산소전달률과 표준에어레이션 효율이 가장 좋았다.

이 매질을 직경 20 cm, 높이 2 m의 PVC 관으로 제작한 packed column 에어레이터에 깊이를 0, 9, 18, 27 및 36 cm로 넣고 순환여과식 시설 내에 실험실 규모의 적용 실험을 통해 에어레이터의 효율을 조사하였는데 (Exp. 2), 실험 수온 27℃에서, Exp. 1에서와 동일한 3개의 수리학적 부하량에서 산소 전달률을 측정 한 결과, Exp. 1에서와 같이 수리학적 부하량과 매질의 깊이의 증가에 따라 산소 전달률이 증가하였으며, 매질의 깊이가 가장 깊은 36 cm에 대해, 수리학적 부하량이 $2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ 일 때, $2 \text{ kg O}_2/\text{kW-hr}$ 의 가장 높은 표준에어레이션효율을 나타내었다. 위의 두 실험 결과에 따라 packed column 에어레이터에서 발포스티로폼 입자를 산소전달 매질로 이용하여 산소 전달률을 증가시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- APHA (American Public Health Association), American Water Works Association, and Water Pollution Control Federation. 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater. 16th edition. American Public Health Association, Washington, DC.
- Beata, J. K., W. R. Nicholas and L. B. Poldowski, 1970. Effect of temperature on oxygen transfer in water. *Water Research*, 4 : 115-123.
- Boyd, C. E., and J. M. Moore, 1993. Factor affecting the performance of diffused-air aeration systems for aquaculture. *Journal of Applied Aquaculture*, 2 : 1-12.
- Boyd, C. E. and J. Watten, 1989. Aeration systems in aquaculture. *Reviews in Aquatic Science*, 1 : 425-472.
- Colt, J. and C. Orwicz, 1991. Aeration in intensive culture. *Aquaculture And Water Quality*, Brune, D. E. and J. R. Tomasso, eds., Baton Rouge, LA: The World Aquaculture Society.
- Hackney, G. E. and J. Colt, 1982. The performance and design of packed column aerators for aquaculture. *Journal Aquacultural Engineering*, 1 : 275-295.
- Huguenin and Colt, 1992. Design And Operating Guide For Aquaculture Seawater Systems. p.135-159. Elsevier. Amsterdam.
- Lawson, T. B., 1995. Fundamentals of Aquacultural Engineering. Chapman & Hall, New York. 355pp.
- Lewis, W. K. and W. C. Whitman, 1924. Principles of gas adsorption. *Journal industrial Engineering*, 16 : 1215-1220.
- Loyless, J. C. and R. F. Malone, 1998. Evaluation of air-lift pump capabilities of water delivery, aeration, and degasification for application to recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 18 : 113-133
- Mohapatra, R. K., R. K. Rout and S. Bandyopadhyay, 1989. Performance of packed column aerator at low hydraulic loading. *Aquacultural Engineering*, 8 : 393-405.
- Petit, J., 1990. Water supply, treatment and recycling in aquaculture. p.63-196. *Aquaculture*, Vol. 1, G. Barnabe, ed. New York: Ellis Horwood.
- Stenstrom, M. K. and R. G. Gilbert, 1981. The effects of alpha, beta and theta factors upon the design, specification and operation of aeration systems. *Water Research* 15 : 643-654.
- Timmons, M. B and P. W. Aho, 1998. Comparison of aquaculture and broiler production systems. *In Proceedings of The Second International Conferences on Recirculating Aquaculture* (ed. G. S. Libey and M. B. Timmons). Virginia, Polytechnic Institute and State University Roanoke, Virginia, July 16-19, pp.190-195.
- Watten, B. J., 1990. Design of packed columns for commercial oxygen addition and dissolved nitrogen removal based on effluent criteria. *Aquacultural Engineering*, 9 : 305-328.
- Wheaton, F. W., 1977. *Aquacultural Engineering*, New York: Wiley-Interscience.
- 김유희, 1999. 순환여과식 탈라피야 양식장에서의 산소 소비와 대기중 산소의 공급. 박사학위논문. 부경대학교. 124pp.