

양어장 폭기에 사용되는 AQUATEX 폭기장치의 효율성에 관한 기초적 실험 연구

허 목 · 정 진 원*

제주대학교 환경공학과, *(주)아쿠아 엔지니어링

A basic experimental studies of the effectiveness of the AQUATEX Mass-Transfer Reactor in aerating fish stocks

Mock Huh and Jin-Won Jung*

Dept. of Environ. Eng., Cheju National Univ., Cheju 690-756, Korea

*AQUA Eng. Corp., Seoul 121-110, Korea

An advanced mobile technology is described to saturate the water with oxygen.

The AQUATEX reactor is 2-10 times more effective in dissolving oxygen in water than many other systems used in aquaculture, because it can generate extremely small(0.005~0.05mm) bubbles.

Because of the high mass transfer and very small bubble size the oxygen utilization by fish in our tests was 95 percent.

Key words : Oxygen supplementation, oxygen consumption, solubility, AQUATEX

서 론

대부분의 생물은 생명을 유지하기 위해서는 산소, 물, 음식이 기본적으로 요구된다. 물고기에 의한 산소소비는 몇 가지의 내부적·외부적 환경변수의 영향을 받는다. 외부조건들은 물 속에 용해된 사용 가능한 산소, 수질 (pH, 오염물질) (Carrick, 1981), 물리적 변수들 (온도, 기압, 이산화탄소, 비이온화 암모니아와 취급방법 (물고기의 밀도, 운송))이다. 내부조건들 중에서 가장 중요한 것은 물고기의 상태 (비육정도, 건강정도), 나이 (발육단계, 현재 나이, 무게), 성별, 활동성 (Garside, 1959)이다. 이 모든 변수는 종의 특성과 사료의 질과 같은 기타 조건에 의하여 변화할 수

있다. 일반적으로 잉어과와 Tilapias와 같은 특정한 물고기의 종은 저산소상태에서 매우 짧은 시간 살아남을 수 있는 데, 때로는 2시간 이상일 경우도 있다 (Palacios & Ross, 1986). 적절한 수질 관리를 위해서 산소는 반드시 충분한 양이 있어야 하며, 만약 조건이 충족되지 않을 경우 물고기는 병이 들고 앓다가 결국엔 죽게된다. 그러나 지속적으로 충분한 산소를 공급한다면 물고기의 산출량이 배가될 수 있을 것이다 (Banks, 1987; Clary, 1979; Hamor et al., 1966). 또한 알맞은 수질과 산소 공급은 암모니아의 독성을 감소시키거나 제거하여 물고기의 질병에 대한 저항력을 증진시켜 건강하게 하며, 물고기는 보다 빠르게 성장한다(Thuston et al., 1981). 그리고 적당한

산소의 공급은 신진대사에서 발생하는 독성을 감소시킨다 (Downing & Merkens, 1955). 반면에 만약 과도하게 산소가 공급된다면 산소는 유독할 수도 있다 (Barthelemy et al., 1981; Wiebe & McGavock, 1932).

이와같이 산소는 다른 가스와 함께 원하는 비율로 용해되어야 하는데 그렇지 않으면 물고기는 산소 과포화에 기인하는 기포증(gas bubble disease)에 걸려서 죽게 된다(Nebeker et al., 1976; Edsall & Smith, 1991). 자연적인 조건하에서 산소는 수표면으로부터 흡수되고 이 과정은 과도와 바람의 작용에 의하여 가속화된다. 그러나 수층이 충분히 섞이지 않게 되면 결과적으로 성층현상이 발생되어 저층은 산소가 불충분하게 되고, CO₂가 증가하고, pH는 낮아지게 되어 결국 저층은 무산소화되고 완전히 비생산적이 된다. 이런 상황을 완화하기 위하여 많은 양어장에서는 산소를 첨가하는 매우 다양한 인공적인 수단을 사용하고 있다(Visscher & Golby, 1987; Colt et al., 1988; Lippins & Valentine, 1988). 그들중에서

Paddlewheel, U-tube (Watten & Beck, 1985), Packed column (Bouck et al., 1984), Pressurized packed column (Lippins & Valentine, 1988), Spray column (Boersen & Chesney, 1987)과 High pressure injection (Shutte, 1986)이 양어업에서 가장 일반적으로 사용되고 있다. 이들중 spray column방식은 낮은 자본비용을 필요로 하지만 기능에서 제한적이다. 그리고 이들 기존의 시스템은 불충분한 교반에 의한 비효율적인 산소 전달 때문에 모든 연못이 아니라, 단지 아주 작은 연못에서만 가능하고 또한 큰 기포는 빠르게 수층을 상승하여 산소가 용해되는 효율을 저해하므로 결국 막대한 에너지를 소모하게 된다.

산소는 단지 적은 양만이 물 속에 용해된다. 따라서 일반적으로 많은 양의 산소는 수표면의 기포 형태로 낭비된다. 특히 고압으로 압축시켰을 때 공기중의 질소는 기포증을 유발하기 때문에 공기가 사용될 수 없다는 문제점이 대두된다. 이런 이유 때문에 시스템의 최적화가 바람직한 것이다 (Edsall & Smith, 1991). 본 AQUATEX 폭

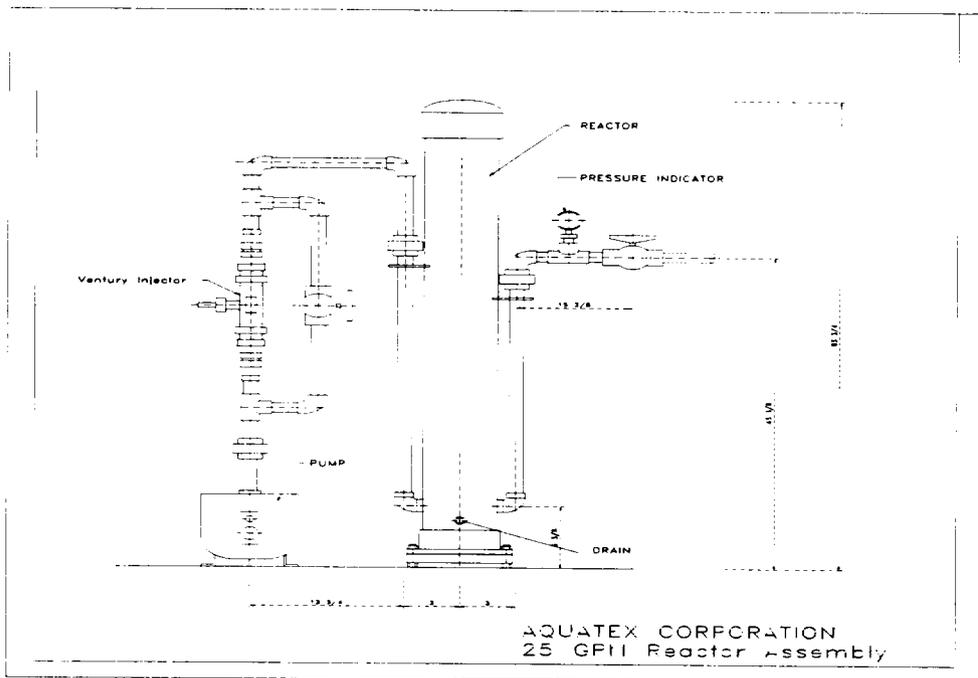


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

기장치는 용존산소가 어떤 상황에서도 최고의 균형을 경제적으로 유지할 수 있도록 모니터되고 제어되며, 상온·상압에서 가스를 액체에 용해시키는 구동부분이 없는 흐름식(flow-through) 장치이기 때문에 장치는 소형이며 매우 용이하게 이동할 수 있다는 특성을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 상기의 특성을 갖고 있는 AQUATEX 폭기장치를 이용해서 산소전달효율에 관한 기존의 폭기장치와의 비교검증 실험과 어류사육에의 이용가능성에 관한 실험연구를 하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 산소전달효율 실험

산소전달효율 실험은 개정된 ASCE 표준 방법(1992)에 서술된 절차에 따르고 Ontario Ministry of the Environment (MOE) (Boyle, 1986)의 부가 요구사항을 고려하여 수행되었고, 실험 장치는 Fig. 1.과 같다.

먼저 양질의 수돗물을 Na_2SO_3 와 CoCl_2 를 촉매로 이용하여 0.5 mg/L 이하로 용존산소 농도를 낮추었다. 시스템은 바람직한 물의 상태와 공기 흐름의 조건이 정상 상태에 도달토록 최소한 5분간 운전한 다음 Fig. 2에서와 같이 용존산소 측정기(YSI 5707B)를 사용하여 매 15초마다 용존산소의 농도를 기록하였다.

2. 어류사육에의 산소 이용 실험

AQUATEX 폭기장치를 사용하여 산소가 첨가된 물의 물고기에 의한 이용을 측정하기 위해서, 평균 177g의 무게를 가진 무지개 송어(*Oncorhynchus mykiss*) 8,388 개체가 있는 109m³의 용적의 연못이 선택되었다. DO 농도와 수온의 측정은 용존산소 측정기(YSI 5707B)를 사용하여 이루어졌다.

먼저 연못에 신선한 물을 공급하는 것을 차단시키고, 물은 135 L/min와 225 L/min의 용량을 갖는 두 대의 펌프에 의하여 지속적으로 신선한 물이 유동되도록 하였다. 감소하는 용존산소의 농

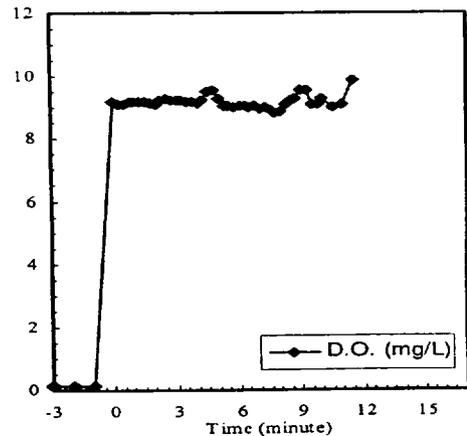


Fig. 2. DO profile on aeration time by AQUATEX MTR

도는 매 5분마다 용존산소 농도가 5 mg/L 부근이 될 때까지 측정하였다. 이 측정은 우리에게 주어진 온도와 물 흐름에서 개개의 어종에서 소비하는 산소의 양을 알려주었다. 실험개시 1~2시간 이후, 정상적인 물 공급이 재개되었고, 산소의 수준이 회복되었다. 두 번째 실험에서는 첫 번째 실험과 모든 조건을 동일하게 한 상태에서, AQUATEX 폭기장치로 산소가 지속적으로 주입되었다.

실험은 결과를 쉽게 반복할 수 있는 방법으로 구성되었으며, 어체의 평균체중, 평균 전장과 수온, DO농도가 30분이상 모니터되었다. DO 감소량은 물고기에 의하여 소비된 양으로 계산되었다. 그렇게 준비된 상태에서 AQUATEX 폭기장치가 물을 순환시키기 시작했고, 산소발생기에서 발생한 산소가 벤츄리를 통하여 들어오고, 완전히 용해되어 reactor를 통과하였으며, 용존산소 측정 30분 이후 실험은 종료되었으며, 실험은 3번 반복되었다.

실험결과 및 고찰

AQUATEX 폭기장치를 비롯한 각종 폭기장치를 사용하여 측정된 산소전달효율은 Table 1과 같이 비교되었다. Table 1에서, AQUATEX 폭기

허 목 · 정 진 원

Table 1. Comparison of oxygen transfer efficiencies

Method/Technology	Tank Temp (°C)	Holding Tank Size	Initial DO (ppm)	Final DO (ppm)	SOTE (%)	Typical Bubble Size	Power Used (KWH)	Flow Rate (Water)	Kg O ₂ per KWH	System Purchase Price	Total Time (MIN)		
Low speed Surface	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.2-2.4				
High-speed floating	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.2-2.4				
Coarse Bubble	13	140 gal	0	10	6.0	10 mm	0.5	N/A	.6-1.2	\$ 2,595	102		
Medium Bubble	13	140 gal	0	10	10.0	3-4 mm	0.5	N/A	1.0-1.6	\$ 3,114	61		
Fine Bubble	13	140 gal	0	10	12.5	2-3mm	0.5	N/A	1.2-2.0	\$ 3,633	49		
Aeration Panel	13	140 gal	0	10	23.5	.05-1.2 mm	0.5	N/A	2.4	\$ 6,488	26		
AQUATEX Reactor	13	140 gal	0	10	61.0	.005-0.05mm	0.5	10 gpm	6.0	\$ 2,025	10		
D/O Readings													
Time (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Coarse Bubble	0	2	4	5	6	7	7	8	8	9	9	9	10
Fine Bubble	0	3	5	7	8	9	10						
Ceramic Stone	0	4	7	8	9	10							
Aeration Panel	0	6	8	10									
AQUATEX Reactor	0	10											

Table 2. Measurements taken at Sam Livingston Fish Hatchery

AQUATEX UNIT TEST													
Total No of fish in pond	6,388			Total O ₂ used per hr. (g)	224			Initial O ₂ Concentration	8ppm				
Weight in Kg	1,133			O ₂ use in mg/kg/hour	198			Volume of Water	109 m3				
Average fish weight in grams	177			O ₂ use in mg/fish/hour	35			O ₂ depletion without adding supplemental O ₂	2.08 ppm/hr				
Calculated size of fish in cm	25			Pond Temperature	13								
Test Run													
O ₂ injection at 0.94 l/min								O ₂ absorbed per five minutes :	O ₂ absorbed per hours :	Total O ₂ supplied per hours	Total O ₂ utilized by the fish in percent		
O ₂ Cyl. weight at start in g.	23,308			Total O ₂ content in the pond in mg	Total O ₂ decline per 5 minutes in mg	Total O ₂ decline in mg	total O ₂ decline in mg	total O ₂ decline in mg	per hours in mg				
O ₂ Cyl. weight at end in g.	23,282												
Total O ₂ injection in mg.	48,000												
Total standard liters of O ₂ injected	28												
mg per hour injected	92,000												
Total gr. O ₂ reduction + injection	212												
	Time(sec)												
	0	6.85	748,650	10,900	7,267	87,204	92,000	94.79%					
	5	6.80	741,200	10,900	7,267	87,204	92,000	94.79%					
	10	6.70	730,300	10,900	7,267	87,204	92,000	94.79%					
	15	6.60	719,400	10,900	7,267	87,204	92,000	94.79%					
	20	6.50	708,500	10,900	7,267	87,204	92,000	94.79%					
	25	6.40	697,600	10,900	7,267	87,204	92,000	94.79%					
End time for injection	30	6.30	686,700	10,900	7,267	87,204	92,000	94.79%					
	Averages.	6.55	713,950	10,900	7,267	87,204	92,000	94.79%					
O ₂ depletion per hour in ppm	1.10												
Calc. from weight of O ₂													
								Total Kg fish supported by injection of O ₂ at 1.125 l/min	465				
								No of R B Trout supported by injection of 1.125 l/min @ 13.3 C	2,824				
								% of pond load supported	41				
								O ₂ use from flow meter (liters)	34				
								Percent accuracy of flowmeter	83.4%				
Results Summary													
1. AQUATEX reactor Dissolved Oxygen with 95% efficiency.													
2. The oxygen provide was almost totally used by the fish.													
3. The 10 gpm test reactor sustained 465 Kg of fish.													
4. Reactors up to 2000 g/min are available ; there is reason to expect proportionally similar results with larger reactors.													
Averages.	198	78	81	95%									

장치가 그 밖의 다른 폭기장치들에 비해서 보다 미세한 기포($\phi 0.005 \sim 0.05\text{mm}$)를 저동력으로 발생시킬 수 있기 때문에 산소전달효율이 2~10배 높아서 경제적이며, 효율적인 양어장의 수질(DO) 관리가 가능함을 확인할 수 있었다. 그리고 사육어에 의한 산소소모량을 계산하여 사육어의 단위중량당의 산소요구량을 Table 2에서와 같이 산출하였다.

이렇게 산출된 자료는 다음에 Reactor를 통하여 첨가되는 산소의 양, 어느 정도의 산소가 용존되는가, 그리고 물고기에 의하여 어느 정도의 산소가 소비되는가를 연역하기 위한 계산식의 기준이 된다. 그리고 이들 공정의 효율성이 계산되었고, 그 효율성이 Table 3과 Fig. 3에 정리되어 있다.

Table 3. Comparison of the performance of the test results of AQUATEX reactor with those reported in literature

Parameter	$K_L a$ (Hour^{-1})	SOTE	SAE ($\text{kg O}_2/\text{kWh}$)
AQUATEX	81.2	60.9%	6.5
Aeration Panel		44%	5.2
Coarse Bubble	<15	<18%	<3.1
Mechanical	<10	<10%	<2

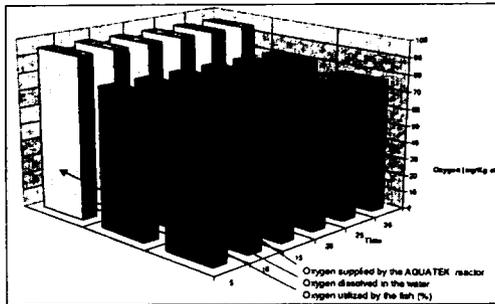


Fig. 3. Graphical representation of the results of the fish tank aeration tests

AQUATEX 폭기 실험의 일련의 관측에서 최소한의 가동비용 (즉, 6.5 $\text{Kg O}_2/\text{kWh}$)으로 보다 높은 용존산소 수준을 얻을 수 있다는 것이 나타

났다. 이들 시험에서 다른 어떤 폭기 장치도 이런 효율성에 도달하지 못했으며, 몇몇 Pond aeration 시스템의 기능에 관한 다른 연구에서는 0.16 - 2.4 $\text{Kg O}_2/\text{kWh}$ 사이의 값을 얻었다. 따라서 본 AQUATEX 시스템과 비교할 만한 유일한 장치는 U-tube 폭기장치이다. 그러나 이 시스템도 대체로 시설규모가 크고 자본과 설치비용도 많이 소요되며 용존산소 발생력에 있어서는 보다 낮으나 (즉, 0.95 $\text{Kg O}_2/\text{kWh}$), 만약 20 - 30 cm의 헤드가 가능하다면 효율성은 9.58 $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ 까지 높아질 수 있다. 그러나, 요구량의 변화에 대한 이 장치의 반응이 늦으며, 영구적인 설치를 위한 공간이 필요하였다(Boersen & Chesney, 1981; Colt and Tchobanoglous, 1981; Mitchell and Kirby Jr., 1974).

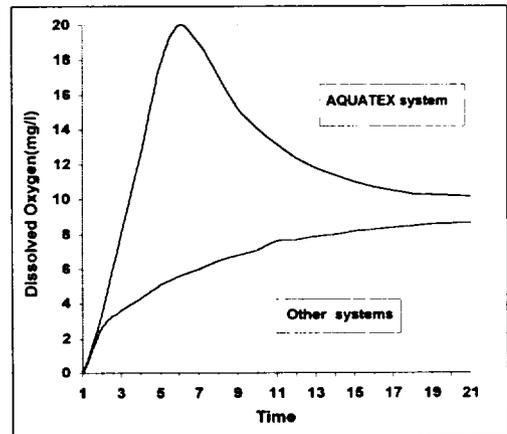


Fig. 4. Conceptual schematic representation of the difference in approach that AQUATEX takes relative to other systems

이에 비해서 AQUATEX 폭기장치의 경우는 작은 공간을 필요로 하고, 또한 이동가능하고 어류 수송용의 경우에도 사용될 수 있다. 그리고 움직이는 부분이 없고, 실질적으로 유지비가 소요되지 않으므로 매우 신뢰할 수 있다. 아울러 동력 상실로 인하여 발생될 수 있는 위험한 경우에 지속적으로 산소 농도를 유지하기 위하여 UPS (Uninterruptable Power Supply) 혹은 보조발전 시설을 사용하여 방지할 수 있다.

Table 2의 실험 결과로부터 최적의 산소 공급을 위해서는 어류의 산소 요구량을 고려하여 본 AQUATEX 폭기장치를 조정하여야 한다는 것을 나타내고 있다.

만약 이런 조건이 충족된다면 산소 이용의 효율성은 95% 까지 근접한다. 따라서 평온한 상태의 물고기가 필요로 하는 산소의 양은 물고기의 동맥과 정맥의 산소 함유량의 차이보다 작아지지 않을 때까지 일정하며, 무지개 송어의 경우는 4.57 mg/L, 잉어 (*Cyprinus carpio*), Flounder (*Platichthys stellatus*) 1.8 mg/L, 그리고 뱀장어 (*Anguilla anguilla*)의 경우는 5.57 mg/L 이었다. 이런 결과는 Spoor(1990)의 관찰로 입증되었는데, 이 관찰에서는 Fingerling brook trout (*Salvelinus fontinalis*)가 5 mg/L 혹은 그 이상의 산소 농도를 선호하며, 이것은 환기 흐름 (Ventilatory flow), 물-혈액 확산거리, 삼투계수, 기능 아가미 면적과 혈액에서 물로의 산소 부분압력과 같은 가스 교환 변수 내에서의 상호작용으로 설명되었다(Evns, D.H., 1993; Hamor, 1967a, 1975b; Hamor & Garside, 1975, 1977, 1979).

혈액의 가스 교환속도는 다음의 식으로 계산된다.(Dickens & Neil, 1964).

$$Ge = Q_b \times L_b(P_{b1}/P_{b2})$$

여기에서, Q_b = 혈액의 부피 흐름

L_b = 혈액내 가스의 용해도

P_{b1} = 혈액으로 용해되는 가스의 팽창력

P_{b2} = 혈액에서 방출되는 가스의 팽창력이다

몇몇 실험에서 어떤 연어류와 *Centrarchid*는 2.84 mg/L 이하의 산소 농도에서 헤엄치는 것이 불가능하였다 (Katz et al., 1959). 음식 섭취 중인 무지개 송어는 음식을 섭취하지 않는 경우보다 1.6배 이상의 산소를 소비하며 (Cho et al., 1982), 따라서 이 기간에 산소 공급이 이루어져야 한다. 본 AQUATEX 폭기시스템은 이상과 같은 용존산소의 변화요구에 빠른 응답속도를 가지고 있기 때문에 물고기의 생산면에서나 조작 비용면에서 경제성을 확보할 수 있는 매력적인 방법

이다. 그리고 AQUATEX 폭기시스템이 가진 94.8%라는 산소전달 효율성은 다른 진보한 폭기시스템에 비하여 최소한 10% 이상 높은 것이다 (Schutte, 1986; Kindschi et al., 1989).

결 론

1) AQUATEX 시스템은 $\phi 0.005 \sim 0.05\text{mm}$ 의 보다 미세한 기포를 저동력으로 발생시킬 수 있기 때문에 다른 폭기시스템들에 비해서 2~10배 보다 높은 산소전달효율을 갖는 경제적인 양어장 폭기시스템임을 확인할 수 있었다.

2) DO, 사료, 빛 등을 최적의 조건으로 이용하면서 다양한 종의 양어를 할 수 있게 하며, 보다 깊은 연못에도 효과적으로 설치 가능하며,

3) 최소화된 가동 비용으로 높은 용존산소 수준을 유지할 수 있어 유지비용을 절감할 수 있다.

4) 그리고 유지관리의 용이성, 신뢰성, 유용성을 인정할 수 있는 장치로써 효과적인 물고기 배설물 처리뿐만 아니라 양어를 위한 물 사용량의 감소를 도모할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- ASCE, 1992. ASCE standard — measurement of oxygen transfer in clean water, the American Society of Civil Engineers, New York, U.S.A.
- Boyle, W. C., 1986. Aeration systems — design, testing, operation and control. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A.
- Banks, J.M., 1987. Effect of raceway inflow and rearing density interactions on adult returns of coho and spring chinkook salmon, Papers on the use of supplemental oxygen to increase hatchery rearing capacity in the Pacific Northwest, Bonneville Power Administration, Portland, pp. 40-49.
- Barthelemy, L., A. Belaud and C.Chastel, 1981. A comparative study of oxygen toxicity in

- vetebrates, Respiration Physiology, 44. pp. 261- 268.
- Boersen, G. and J. Chesney, 1987. Engineering considerations in supplemental oxygen. Papers on the use of supplemental oxygen to increase hatchery rearing capacity in the Pacific Northwest. Bonneville Power Administration, Portland, pp. 17-24.
- Bouck, G. R., R. E. King and G. Bouck-Schmidt, 1984. Comparative removal of gas supersaturation of plunges, screens and packed columns. Aquaculture Eng., 3. pp. 251-273.
- Carrick, T.R., 1981. Oxygen consumption in the fry of brown trout (*Salmo trutta L.*) related to pH of the water, J. Fish. Biol., 18. pp. 73-80.
- Cho, C.Y., S. J. Slinger and H. S. Bayley 1982. Bioenergetics of salmonid fishes: Energy intakes, expenditure and productivity. Comp. Biochem. Physiol., 73B(1), pp. 23-41.
- Clary, J. R., 1979. High density trout culture salmonid, 1. 8-9.
- Colt, J. and B. Watten, 1987. Pure oxygen in fish culture, Presented at the U.S. Trout Farmers Association Annual Convention, Achville, North Carolina.
- Colt, J., K. Orwicz and G. Bouck, 1988. A survey and resource materials on the use of oxygen supplementation in fish culture, Special Publication Number 2. Bioengineering Section, American Fisheries Society, p. 44
- Colt, J. E. and Tchobanoglous, 1981. Design of aeration systems for aquaculture. Bio - Engineering Symposium for Fish Culture, 1. pp. 138-148.
- Dickens, F. and E. Neil, 1964. Oxygen in the animal organism, Pergamon Press, London, p. 673
- Downing, K. M. and J. C. Merckens, 1955. The influence of dissolved-oxygen concentrations on the toxicity of unionized ammonia to rainbow trout (*Salmo gairdneri Richardson*), Ann. Appl. Biol., 43, pp. 243-246.
- Edsall, D. A. and C.E. Smith 1991. Oxygen-induced gas bubble disease in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). Aquaculture and Fisheries Management, 22, pp. 135-140.
- Evans, D. H., 1993. The physiology of fishes, CRC Press, Boca Raton, p. 592
- Garside, E. T., 1959. Some effect of oxygen in relation to temperature on the development of lake trout embryos. Can. J. Zool., 37, pp. 689-698.
- Hamor, T., G. Lukas., G. Tusnady, and E. Vanger, 1966. Kiserletek a pontusprodukcio fokozasara suru nepesitesu szerkezetekkel. (Experiments for increasing carp production by means of densely populated production structures), Bulletin of the Aquacultural College, Keszthely, Hungary, 5. pp. 132-155.
- Hamor, T., 1967a. Versuche zur betaubung und tranqilisierung von karpfen und forellen. (Studies on effects of tranquilizers on carps and trouts), Der Fischwirt, Hamburg, 9. pp. 238-243.
- Hamor, T., 1967b. Measurements of oxygen consumption and demand of several aquatix organisms. University of Sao Paulo, Brasil. Unpublished.
- Hamor, T., 1975. Environmental regulation of developmental metabolism of embryos of Atlantic salmon. Thesis. Dalhousie University, Department of Biology, Halifax, N. S. Canada. p. 294.
- Hamor, T. and E. T. Garside, 1975. Regulation of O₂ consumption by incident illumination in embryonated ova of Atlantic salmon. Biochem. Physiol, London, 52, pp. 277-280.
- Hamor, T. and E. T. Garside, 1977. Size relation and yolk utilization in embryonated ova and alevine of Atlantic salmon, *Salmo salar L.* in various combinations of temperature and dissolved oxygen, Can. J. Zool, p. 55.

- Hamor, T. and E. T. Garside. 1979. Hourly and total oxygen consumption by ova of Atlantic salmon, *Salmo salar* L. during embryogenesis, at 2 temperatures and 3 levels of dissolved oxygen. *Can. J. Zool.* 57, pp. 1196-1200.
- Katz, M., A. Pritchard and Ch. E. Waren. 1959. Ability of some salmonids and centrarchids to swim in water of reduced oxygen content. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 88, pp. 88-95.
- Kindschi, G. A., Ch. E. Smith and S. K. Doulos. 1989. Use of aquatector oxygenation system for improving the quality of fish-rearing water. *The Progressive Fish Culture*, 51, pp. 140-145.
- Lippink, J. D. and Valentine, 1988. Oxygen injection: Its use in water quality improvement and growth enhancement for raceway culture of rainbow trout. (*Salmo gairdneri*).
- Mao, H., J. Lourenco, A. Rooyakkers and R. Carter. 1994. Aquatex advanced aeration/reactor system for hybrid AOP/biological treatment of pulp mill effluent. CPPA Western Branch Fall Conference.
- Mitchell, R.E. and A.M. Kirby. 1974. Performance characteristics of pond aeration devices. *Proceeding of the Annual Meetings of the World Mariculture Society*, 7, pp. 561-1581.
- Nebeker, A. V., G. R. Bouck and D. G. Stevens. 1976. Carbon dioxide and oxygen-nitrogen rations as factors affecting salmon survival in air-supersaturated water. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 109, pp. 659-702.
- Palacios, C. A. and L. G. Ross. 1986. The effects of temperature, body weight and hypoxia on the oxygen consumption of the Mexican mojarra, *Ciclasoma urophthalmus* (Gunther). *Aquaculture and Fisheries Management*, 17, pp. 243-248.
- Schutte, W.A., 1990. Distribution of fingerling brook trout, *Salvelinus fontinalis* (Mitchill), in dissolved oxygen concentration gradients. *J. Fish Biol.*, 36, pp. 363-373.
- Thurston, R.V., G.R. Phillips, R.C. Russo and S.M. Hinkins. 1981. Increased toxicity of ammonia to rainbow trout (*Salmo gairdneri*) resulting from reduced concentrations of dissolved oxygen. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 38, pp. 983-988.
- Visscher, L. and W. Godby. 1987. Oxygen supplementation: a new technology in fish culture. *Information Bulletin # 1*, U.S. Fish & Wildlife Service, Denver, Colorado.
- Watten, B.J. and T. Beck., 1985. Modeling gas transfer in a u-tube oxygen absorption system: effects of off-gas recycling. *Aquaculture Engineering*, 4, pp. 271-297.
- Wiebe, A. H. and A. M. McGavock., 1932. The ability of several species of fish to survive on prolonged exposure to abnormally high concentrations of dissolved oxygen., *Trans. Am. Fish. Soc.*, 63, pp. 267-274.