

【研究報告】

PVC 樹脂製品を活用したベンチュリ管方式気液混合器による 地下浸透海水の溶存酸素改善 (地下浸透海水を用いたハタ類養殖基礎技術開発試験)

山内 岬*

The effect of Venturi tube type gas-liquid mixer using PVC products on dissolved oxygen level of well-seawater.

Misaki YAMAUCHI *

硬質塩化ビニル樹脂製品を活用したベンチュリ管方式の気液混合器を設計し、溶存酸素飽和度の低い地下海水を処理原水として、その設置効果と性能を検証した。同量の原水・混合気体を供給した曝気槽内における溶存酸素飽和度の変化を比較した結果、空気混合ではエアーストーンによる散気処理と比べて約 1.2 倍、酸素混合では約 1.9 倍に達した。入水側圧力 0.1MPa におけるベンチュリ管のど部径 4~10mm の処理流量は、毎分 7.0~60.8L (日間 10.1~87.6m³) と推定され、陸上養殖用水として地下海水を用いる場合の前処理装置として十分な性能を有することが確認された。

陸上施設で海産魚の養殖を行う場合、飼育水を安定的に確保することは、施設の生産性を高める上で最も重要な要因であり、取水コストが安く、清浄な用水であるほど、その利用価値は高い。透水性を有する地層が沿岸域と接する地域では、内陸側に設置した井戸により、地下の帯水層に浸透した海水（以下、地下海水）を取水できる。成分や構造の異なる様々な岩石を浸透透過するため、表層海水に比べて有機懸濁物や微生物の現存量が少なく、溶出した地質成分の影響を受けて無機塩類を多く含有することが知られる。また、地温の日変化や季節変化がほとんど生じない恒温層に滞留することで、年間水温が一定範囲に維持される恒温性を示すことから、ろ過・殺菌・温度管理のコストが不要な用水源として魚介藻類の増養殖事業等への活用が期待されている（江端ほか、2006）。ただし、地表を流れる河川水や表層海水から隔離され、空気への露出機会が極端に制限された特殊状態であることに起因して、含有する溶存酸素量が極端に少ないといった課題を有する。

サンゴ礁性海域に取り囲まれた沖縄県の沿岸域には、過去に発達した造礁サンゴ群集の堆積物から成る琉球石灰岩層が多く分布しており、層内部に豊富な地下海水資源を有することが知られ（今田ほか、2006）、曝気装置等を用いて溶存酸素量を改善することにより、魚類の飼育水として使用することができる（岸本・木村、2011）。

その際使用される曝気方式としては、揚水した原水を高架水槽内などに一時貯水し、内部に沈設した分散器を介して圧縮空気を送風する散気処理が一般的だが、同処理は高架水槽の

増設によって生産水槽の設置面積が制限されるばかりでなく、送風機等の曝気動力にも追加コストが生じるため、収率の低下要因となることが懸念される。

一方、近年注目される新たな流体機器として人工的に生成した微細気泡によって効率的な気液混合を行うファインバブル発生装置がある。ファインバブル（以下、FB）とは、発生時の気泡直径が 100 μ m 以下と定義される微細気泡のことを示し、セラミックやカーボン製の分散器等で生成した気泡とは大きく異なる特徴を有する。通常、水中に生じたミリサイズの気泡が、自己の浮力によって上昇し、一部は液中に溶解せずに大気中へ放出されるのに対して、微細な状態である FB は浮力をほぼ失った状態であり、水中でほとんど上昇せず、縮小しながら消失（圧潰）することで効率的な気体溶解が行われる（高橋、2005）。

FB 発生装置の登場によって、従来は困難であった気泡サイズの細やかな人為的制御や、使用する混合気体の供給量節減が可能となったが、大量の用水を常時使用する水産養殖分野で必要な耐久性や利便性を備えた装置は少ない。

そこで、本研究では地下海水を使った陸上魚類養殖施設における効率的な曝気方式の開発を目的として、一般的に広く流通する JIS 規格製品である硬質塩化ビニル（以下、PVC）樹脂製の管材を材料とした気液混合器を設計し、その性能と溶存酸素改善効果について検証した。

材料及び方法

(1) PVC 樹脂製気液混合器の概要

*E-mail : ymuchimi@pref.okinawa.lg.jp 石垣支所（現所属：水産海洋技術センター普及班）

微細気泡の生成方法として、管路内の一部を絞ることにより流体速度を局部的に増加させるベンチュリ管方式を採用した(図1)。本方式は、管路内の定常流で流体の質量が保存されることを表した「連続の式(断面積×速度=体積流量=一定)」によって、管内の断面積が減少すると速度が半比例的に増加し、圧力が低下するベルヌーイの定理を応用したものであり、管内部の流速変化にともなって生じた負圧を利用して外気を自吸し、その後の拡大部で生じる剪断力によって混合気体を粉碎・微細気泡化するものである。

材料は、全て市販のPVC樹脂製品を使用し、流速が最も増加するベンチュリ管のど部には任意の径で先端に孔を穿設したTSキャップ材を用いた(図1)。のど部が接続された入水側の送水管と、拡大部となるTSソケット材が接続された出水側の送水管は、伸縮継手(ウルトラユニオンII型、東栄管機社製)を用いて接続し、外気の取り入れ口として伸縮継手材の外装に口径5mmの吸気口を穿設した。吸気口より取り込まれた気体は、伸縮継手内のTSキャップ材とTSソケット材の隙間より拡大部に流入後、気泡化し、管路内の液体と混合する仕組みである。

(2) 溶存酸素改善効果の検証

1) のど部の口径と入水側圧力が溶存酸素改善効果に与える影響

製作した気液混合器の溶存酸素改善効果を評価するため沖縄県水産海洋技術センター石垣支所内の海水井戸より揚水した地下海水(岸本・木村, 2011)を処理原水として、以下の実験を行った。

気液混合器は呼び径20mmの注水口末端に設置し、のど部径を4, 6, 8および10mmの4種類、入水側圧力を0.01~0.11MPaの範囲で変化させた場合における溶存酸素量を計測した。入水側圧力は、気液混合器の直前に設置したブルドン管式圧力計(60A-N01N G1/4 2MPa, 日新計器社製)で測定し、混合気体には吸気口から自吸された空気のみを使用した。

また、多項目水質計(MS-5, HydroLab社製)を用いて測定した原水と処理水の各溶存酸素量 O_2 と水温 T および塩分 S を基に以下の式(Weiss, 1970)から、それぞれの溶存酸素飽和度 Op (%)を求めた。

$$O_M = \ln \left[A_1 + A_2 \left(\frac{100}{T_S} \right) + A_3 \ln \left(\frac{T_S}{100} \right) + A_4 \left(\frac{T_S}{100} \right) + S \left\{ B_1 + B_2 \left(\frac{T_S}{100} \right) + B_3 \left(\frac{T_S}{100} \right)^2 \right\} \right]$$

$$T_S = 273.15 + T$$

$$O_P = 100 \left(\frac{O_2}{1.4276 O_M} \right)$$

$$A_1: -173.4249, A_2: 249.6339, A_3: 143.3483, A_4: -21.8492$$

$$B_1: -0.033096, B_2: 0.014259, B_3: -0.0017$$

2) 気液混合処理と散気処理の曝気性能比較

地下海水の曝気に対する気液混合処理の有効性を検証するため、以下の曝気装置を用いて一般的な散気処理との比較

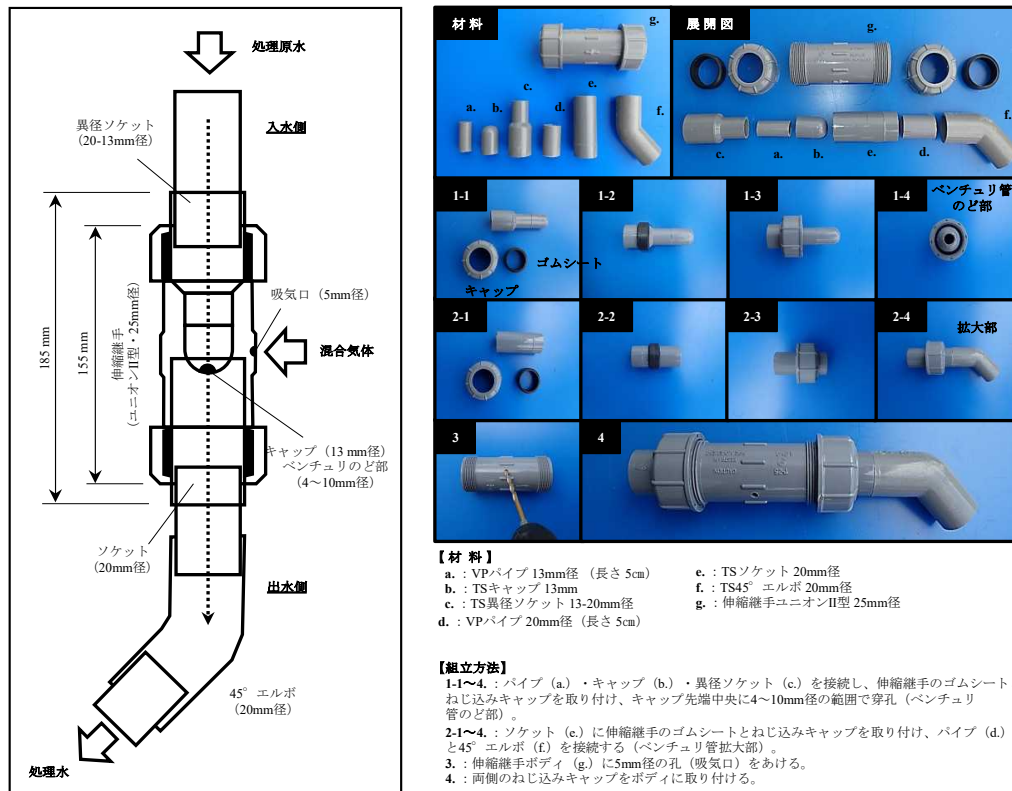


図1 硬質塩化ビニル(PVC)樹脂製品を活用したベンチュリ管方式気液混合器の概要。

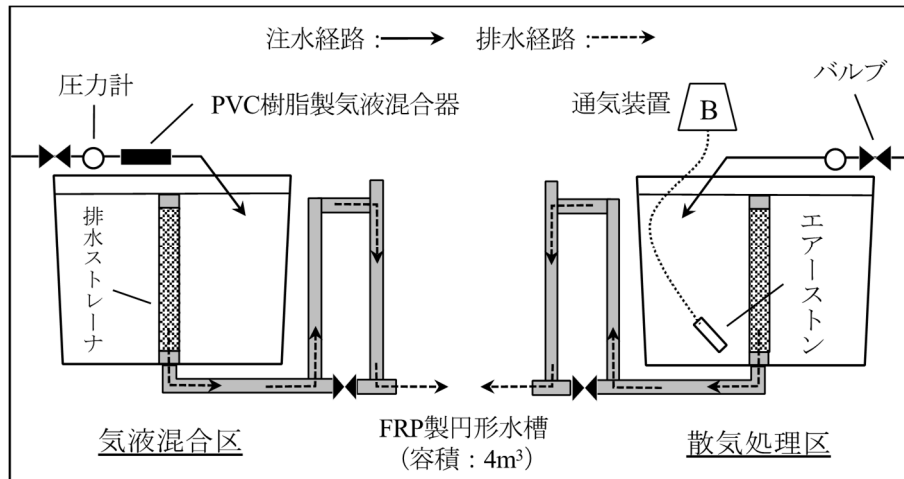


図2 実験装置の概要

実験を行った（図2）。

装置は、圧送ポンプより送水された原水が、容量4m³の曝気槽内に一時貯留した後、中央底面の排水管から一定量が排水される仕組みで、のど部径10mmの気液混合器を取り付けた試験区（以下、気液混合区）と注水口直下の水槽外縁底部にセラミック製エアーストン（KA-50R、イワキ社製）を設置した散気処理区を対照とした。

注水する原水は、それぞれ毎分45.6L（換水率：16.4回転／日）に設定し、混合気体として通気装置（LA-40E、日東工器社製）により供給した空気、または酸素調整機で減圧した工業用酸素ガス（純度99.7%）を用いた。気体流量は、吸気口に接続したアクリル樹脂流量計（RK200V、コフロック社製）を用いて測定し、空気は毎分9L、酸素は毎分1Lの設定流量で供給した。

水槽内には多項目水質計（MS-5、HydroLab社製）を設置し、15分毎に水温、塩分および溶存酸素量を記録した後、前述の式に従って溶存酸素飽和度を求めた。

3) 単位時間あたりの処理流量と流量予測式

のど部径と入水側圧力の違いが気液混合器の処理流量に与える影響を把握するため、のど部径4, 6, 8および10mmにおける単位時間あたりの流量を0.01～0.11MPaの範囲で段階的に測定した。また、各径の処理流量（y）が入水側圧力（x）に応じて累乗回帰（ $y=ax^b$ ）すると仮定し、異なる圧力における各流量の実測値から統計処理ソフトR ver. 3.1.2を用いた非線形最小二乗法により、それぞれの流量予測式を作成した。

4) 気体流量の違いが溶存酸素改善効果に与える影響

入水側圧力を0.05MPaに固定したのど部径4mmと10mmの気液混合器を使い、毎分0.5～5Lの範囲でベンチュリ管内に流入する空気の量を調節した場合における溶存酸素改善効果を調べた。

気体流量は毎分0.5L単位で設定し、各流量における処理

水の水温、塩分および溶存酸素量を多項目水質計（MS-5、HydroLab社製）で記録した後、同様に溶存酸素飽和度を求めた。また、常圧の空気飽和における溶存酸素量は飽和濃度に漸近するため、処理水の溶存酸素飽和度（y）が気体流量（x）に応じた漸近指数モデル（ $y=ab^{x+c}$ ）へ回帰すると仮定し、非線形最小二乗法による予測式を求めた。

結果

(1) のど部の口径と入水側圧力が溶存酸素改善効果に与える影響

地下海水原水（水温25.1℃、塩分28.6psu）の溶存酸素飽和度が47.2%であったのに対し、入水側圧力0.01～0.11MPaにおける気液混合処理水の飽和度は、平均84.4～98.4%の範囲であった。いずれの径でも0.02MPa以上の圧力で90%以上の高い飽和濃度に達し、その後は飽和濃度に漸近することが確認された（図3）。

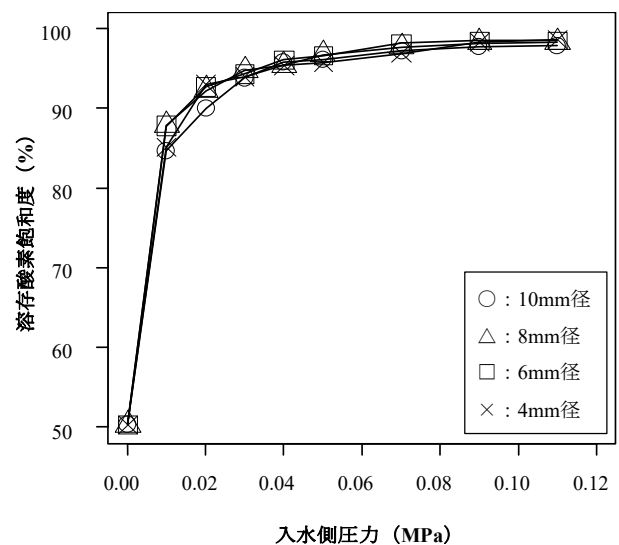


図3 空気混合における気液混合処理の溶存酸素改善効果

表 1. 処理流量予測式 $y=ax^b$ の推定結果.

のど部径	係数 a	t 値	P	乗数 b	t 値	P
10mm	158.22	29.06	<0.001	0.42	34.61	<0.001
8mm	101.60	45.54	<0.001	0.44	56.59	<0.001
6mm	52.49	42.03	<0.001	0.46	55.20	<0.001
4mm	21.79	24.86	<0.001	0.49	34.33	<0.001

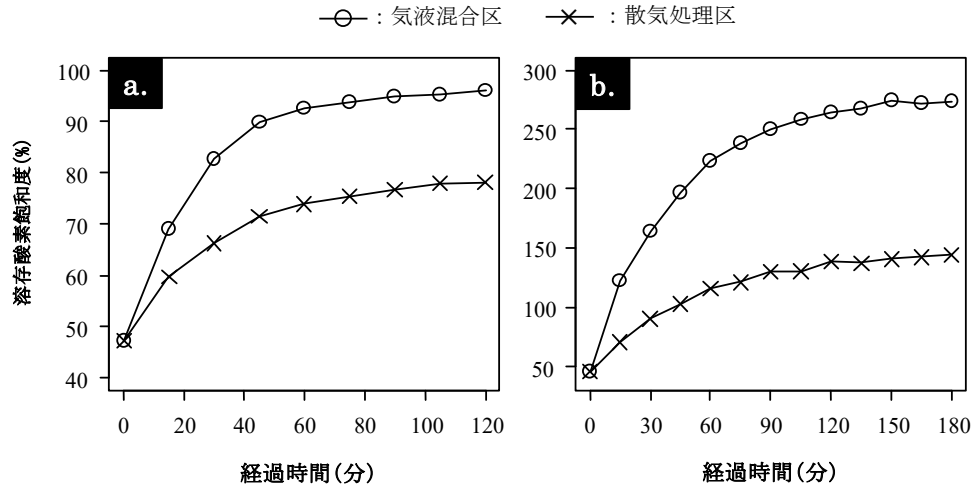


図 4 異なる曝気方式における溶存酸素改善効果の違い (a: 空気混合, b: 酸素ガス混合).

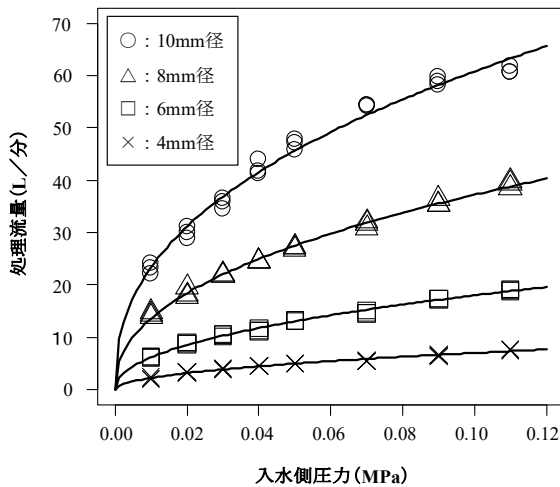


図 5 ベンチュリ管のど部径の異なる気液混合器の処理流量予測.

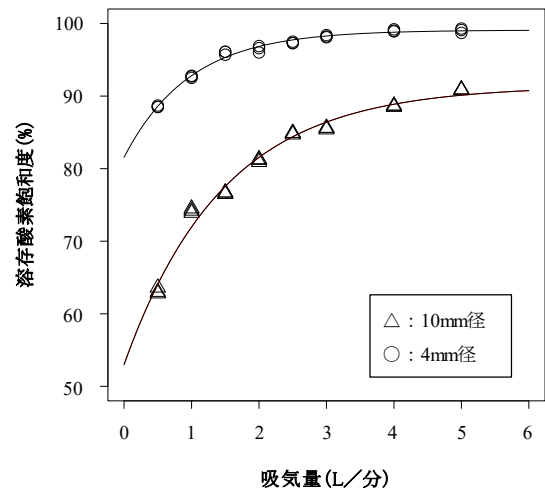


図 6 異なる気体流量における気液混合器の溶存酸素改善効果.

(2) 気液混合処理と散気処理の曝気性能比較

処理開始 120~180 分後までの溶存酸素飽和度の変化を記録した結果, いずれも気液混合区の処理水が散気処理区に比べて高い改善効果を示し, 空気では最大 96% (6.7mg/L) 酸素ガスでは最大 273% (19.0mg/L) にまで達した (図 4).

一方, 散気処理区は空気混合で 78% (5.4mg/L), 酸素ガス混合で 144% (10.0mg/L) であった. また, 各測定区間における溶存酸素量の経時変化をもとに, それぞれの酸素上昇速度を算出した結果, いずれの処理方法でも 15 分後が最も大きく, 空気混合における気液混合区で毎分 0.1mg/L 散気処理区で毎分 0.06mg/L, 同様に酸素混合では, それぞれ毎分 0.36mg/L と毎分 0.12mg/L であった.

(3) 単位時間あたりの処理流量と流量予測式

入水側圧力 0.01~0.11MPa における処理流量は, 4mm 径で毎分 2.2~7.6L, 6mm 径で毎分 6.3~19.0L, 8mm 径で毎分 14.4~39.3L および 10mm 径で毎分 23.2~61.0L であった (図 5).

また, 実測値に基づき推定された予測式の係数 a は, それぞれ 21.79~158.21 の範囲に推定され, 乗数 b は 0.42~0.49 の範囲であった (表 1).

(4) 気体流量の違いが溶存酸素改善効果に与える影響

気液混合処理における溶存酸素飽和度は気体流量の増加とともに飽和度に漸近し, のど部径 4mm で平均 88.2~

98.7%, 10mm で 62.9~90.5%の範囲で変化した (図 6)。

また、実測値に基づき推定された予測式の係数 a はのど部径 4mm で 17.52 と 10mm で 38.39, 同様に b は 0.36 と 0.51 および乗数 x の補正值 c は 99.09 と 91.40 であった ($p<0.001$)。

考 察

本研究による性能評価試験の結果、大気中の空気のみを混合気体とした気液混合処理によって、地下海水原水の溶存酸素量を曝気動力なしに飽和度近くまで改善できることが確認され、その処理性能の詳細が明らかとなった。

設定する入水側圧力やベンチュリ管のど部径の違いによる溶存酸素飽和度と処理流量の変化及び気体流量の違いによる飽和度の変化に関する知見は、地下海水の前処理装置としての本器の特性を理解する上で有用な情報である。

すなわち、1) 空気混合では入水側圧力 0.02MPa 以上で溶存酸素飽和度を 90%以上に改善でき、2) その最大処理流量はのど部の口径と入水側圧力の増大にともなって累乗回帰する、3) のど部径が小さく、処理流量が少ないほど、少ない気体で高い飽和度に達することを示している。従って、本器の導入を検討する場合は、入水側圧力 0.02MPa の処理流量 (毎分 3.2~31.2L) を使用水量の最低値として、設置する水槽の換水率の目標値に応じた処理流量を示すのど部径を選択し、各自が保有する圧送ポンプの出力に応じて、その設置数を決定すべきであろう。

曝気装置を用いた実験では、従来の散気処理に比べて気液混合処理が効率的な曝気性能を示すことが明らかとなり、その溶存酸素量は空気混合の場合で最大 1.2 倍、酸素混合の場合で 1.9 倍に達した。飽和量に達するまでの上昇速度は、それぞれ 1.7 倍と 3.0 倍に及んだことから従来の散気処理に比べて、より短時間に少ない気体流量で高い改善効果を示すことが明らかとなった。

同じ気体流量でありながら両区の飽和度に差が生じた原因は、ベンチュリ管内部で生じた微細気泡によって液相中への気体溶解が水槽外 (注水管内) で行われる気液混合処理に対し、水中への沈設によって水圧がかかった状態のエアーストンから放出された気体により、水槽内で気泡が生じる散気処理の各気泡特性の違いと処理流路の違いにあると推察され、両方式で生じる気泡径に起因した溶解度の違いが最も大きく影響したものと考えられる。

一般的に、液相中に生じた微細気泡の内圧は、気泡界面が曲率を持つため、周囲に存在する液体圧力より高くなることが知られ、微細な気泡であるほど溶解気体の分圧に比例して高い溶解度を示す (芹澤, 2011)。また、エアーストンと送風機を用いて空気を圧送した場合、水中での上昇にともなう気泡径の増大と内圧の低下によって、上昇した気泡ほど溶解度は低くなる。この場合、曝気槽への注水量増加に伴って換水率が高まるほど飽和度が低下し、十分な溶存酸素改善効果が得られない恐れがあることから、飽和度まで改善するには分

散器の増設や供給気体の増量といった曝気動力への追加コストが生じる。一方、気液混合器では槽内に 0.5 回転分の処理水が貯留された時点で既に 90%以上の飽和度に達しており、1 回転でほぼ飽和状態に達した。ベンチュリ管通過直後に生じる微細気泡によって、液中の溶存酸素量が瞬間的に飽和する気液混合処理では、曝気槽内へ飽和水が常に流入するため、散気処理と比べて溶存酸素量を効率的に上昇させることができる。また、処理流量の増加によって、曝気槽内の換水率が高まるほど、管路内の負圧や剪断力が増大し、より多くの微細気泡が発生すると想定されるため、飽和度の低下は生じない。

空気混合の場合に比べて、酸素ガスを混合した場合に両方式の改善効果の差がより明確に生じた理由は、素材となる多孔質材の孔径によって、発生する気泡径が固定される散気処理に対し、気体の分子物理学的性質と管内の圧力変化に応じて異なる気泡崩壊現象が生じるベンチュリ管の気泡発生原理の違いにあると推察され、空気よりも分子量の小さい酸素ガスでは、より微細な気泡が生じ、液中に長く残存したことで高い溶解度を示したものと考えられる。

本研究では、発生した気泡の粒径を計測していないため一般に市販される気液混合器と本器の性能差や、微細気泡の分布特性について考察できないが、実験中の観察ではいずれの気体を混合した場合でも目視判別可能な気泡は数十秒から数分以内に全て消失した。また、一般的なベンチュリ方式による微細気泡の平均径は 200 μ m であることから (芹澤, 2011)、本器で生じる気泡径はそれよりも小さくなる可能性は低く、FB と呼ぶにはやや粒径が大きいものと考えられる。しかしながら、その性能は地下海水の溶存酸素改善方法として十分採用可能なレベルであり、陸上養殖に使用する海水の溶存酸素改善処理に必ずしも FB を用いる必要性がないことを示している。

文 献

- 今田克, 前田広人, 田中淑人, 2006 : 沖縄琉球石灰岩島の地下海水の取水・性状・養殖特性. 日本海水学会誌 60, 116-24.
- Weiss, R.F., 1970 : The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. Deep-Sea Res 17, 721-735.
- 江端弘樹, 佐藤義夫, 福江正治, 畠田智, 榎田和彦, 2006 : 地下海水を陸上養殖に利用する可能性と問題点ならびに対応策. 日本海水学会誌 60, 110-118.
- 岸本和雄, 木村基文, 2011 : 沖縄県水産海洋研究センター石垣支所敷地内で取水された地下浸透海水の性状. 沖縄県水産海洋研究センター事業報告書 72, 78-81.
- 芹澤昭示, 2011 : マイクロ/ナノバブルの基礎. 日本マリンエンジニアリング学会誌 46, 863-866.
- 高橋正好, 2005 : マイクロバブルを利用した環境浄化と食の安全確保. 日本海水学会誌 59, 17-22.