

음향공진과 맥진동 현상을 이용한 폐수처리용 산기관 개발 및 성능시험

Development and Performance Tests of the Waste Water Diffusers using Acoustic Resonance and Oscillatory Pulsation

홍 석 윤*, 문 종 덕*
(Suk-Yoon Hong*, Jong-Duck Moon*)

요 약

음파와 진동에너지를 활용하는 음파기술의 응용 연구분야로 음향공진 및 맥진동 현상을 이용하여 기액상에서 산소전달효율을 극대화 할 수 있는 폐수처리용 음향공진 산기관의 개념을 제안하였으며 원리와 성능시험을 수행하였다. 또한 저압용 헬름홀츠 공진기, 실린더형 및 고리형 반사공진기 그리고 복합 공진시스템의 설계개념과 원리를 구현하였다. 물질전달 과정을 촉진하는 음향공진 에너지는 산소전달효율을 높여주며, 노즐에서 분출하는 공기 제트의 불평형에 의해 발생하는 주기적인 맥진동 현상은 미세한 공기방울을 만들어 내는데, 이 두가지 원리가 가장 잘 적용되는 고리형 반사공진기(AJR)의 성능이 가장 우수한 것으로 평가되었으며 기존의 산기관 보다도 20~30% 정도 높은 효율을 실험으로 확인하였다.

ABSTRACT

Using the acoustic resonances and oscillatory pulsations considered as the branch of wave technologies, the concept of the acoustic resonance diffusers for waste water treatment which maximize the oxygen transfer efficiency in gas-liquid two phase medium have been proposed, and studies for the principles and performance tests were accomplished. Besides, the design concepts for the low pressure Helmholtz resonator, cylinder and annular type reflection resonator and combined type resonance system have been implemented. The acoustic resonance energy which can speed up the mass transfer process increase the oxygen transfer efficiency, and periodic pulsations generated from the instability of air jet from nozzle make very small air bubbles. Then, the annular type jet resonator(AJR) applying these two principles successfully was evaluated as the most promising device and also the efficiency showing 20~30% better than conventional diffusers has been verified experimentally.

I. 서 론

진동 및 음파에너지는 다상의 매질(multi-phase medium) 내에서 작은 파워로도 에너지 변환과 관련하여 여러 관심있는 현상들을 보여준다. 이러한 음파에너지를 잘 활용하면 기액상(gas-liquid phase)에서 물질전달효율(mass transfer efficiency)을 수십배까지 높일 수가 있으며 여러 분야에서 그 응용이 가능하게 된다. 본 논문에서는 음파 기술중 음향공진 및 맥진동 현상을 이용하여 산소전달효율을 극대화 할 수 있는 폐수처리용 산기관의 개념을 제안하고 개발에 필요한 파라미터 선정법 및 성능시험 방법과 결과에 대하여 살펴보았다.

폐수처리의 핵심과정인 생물학적 처리과정의 폭기(ac-

eration)용 산기관(diffuser)으로 부터 공급되는 공기중의 산소가 폐수내로 스며드는 효율을 산소전달효율(Oxygen Transfer Efficiency, OTE)이라 하는데, 이 효율을 높일 수 있는 폐수처리용 산기관에 대한 관심은 대단히 높아, 많은 연구개발이 수행되고 있다. 통상 사용되는 볼(ball), 세라믹 봉(ceramic bar) 및 고무판(rubber plate) 형의 산기관들은 간단하나 효율 및 운용상의 단점이 있으며 최근의 산기시스템들은 고가이고 여전히 운용상의 단점들이 발견되어 기존의 산기관들을 대체하지는 못하고 있다. 산기관 으로부터 폐수중으로 공급된 공기와 폐수의 접촉면적과 접촉시간을 늘림으로써 산기관의 산소 전달효율이 높아지게 되는데 이를 위해서는 크기가 작은 공기방울의 발생이 필수적이다. 기존의 산기관들도 이러한 미세 공기발생을 위한 장치로 고안되었다. 또한 같은 크기의 공기 방울이 발생하였어도 음향 또는 진동에너지를 공급하면 공기중 산소의 용해속도가 증가하게 된다.

연구된 음향공진 및 맥진동형의 산기관들은 공기분출

*고등기술연구원 자동차기술연구소
Institute for Advanced Engineering, IAE

접수일자: 1996년 8월 26일

노즐과 음향공진기로 구성되는데, 여기서 발생하는 음파는 폐수중의 공기방울에 음향에너지를 공급함으로써 공기중 산소의 용해 속도를 증가시키며, 계속 유입되는 공기에 의해 공진기가 평형을 잃고 주기적으로 발생하게 되는 맥진동 현상에 의해 분출공기가 작은 공기방울로 쪼개지는 현상을 이용하고 있다. 이처럼 산소 전달효율을 높이는데 필요한 여러 주요 메카니즘을 단일품으로 구현하게 되므로 높은 효율을 얻을 수 있었고 실 폐수처리장과 유사한 압력과 유량의 조건하에서 실험으로 입증하였다. 또한 기본 시스템을 기준으로 노즐과 음향공진기의 변경, 저주파 발생용 헬름홀츠 공진기의 추가적인 부착등 시스템 변경안도 제안하였다.

II. 일반 산기관 및 폐수처리의 기본개념

생물학적 폐수처리는 폐수중에 포함되어 있는 부유물 질이나 용해성 물질등의 오염물들을 침전하기 쉬운 슬러지(sludge)로 바꾸어 제거하는 방법으로써 그 과정은 폐수중의 유기물을 먹이로 하는 세균및 원생동물과 같은 미생물들에 의존한다. 미생물들의 유기물 분해작용이 잘 이루어 지게 하려면 호흡을 위한 산소(공기)의 공급이 필수적이며 이러한 산소공급 장치를 산기관이라 한다. 산기관의 특성에 따라 같은 양의 공기를 폐수내에 공급하더라도 물속에 녹게 되는 산소의 양은 달라질 수 있으므로 기액상에서 산소전달효율이 높은 산기관이 선호된다. 기액 물질전달 과정(mass transfer process)이란 두 물질간의 평형에서 벗어나게 해주는 구동력에 의한 계면 확산(interface diffusion)을 말하는데 기상에서는 분압구배가, 액상에서는 농도구배가 구동력이 된다. 산소처럼 물에 잘 녹지않는 기체의 경우에는 액체 경막저항이 물질전달 속도를 결정한다.

동일한 공기량을 사용하어, 공기속의 산소전달효율을 높이고 폐수내 용존산소량을 증가시키기 위해서는 공기방울과 물과의 접촉면적을 증가시키고 공기방울의 이동경로를 연장시켜 물과의 접촉시간을 늘리는 방법을 생각할 수 있는데 이 두가지 모두 미세한 공기방울을 발생함으로써 구현될 수 있다. 일반 산기관들은 가능한 작은 공기방울들을 발생하기 위하여 작은 틈새로 공기를 통과시키거나 구형의 물체들과 충돌을 유도하기도 한다¹¹⁾. 그러나 구형의 물체와 충돌을 통해서 충분히 작은 공기방울이 생성되기 어려우며 작은 틈새를 주요 메카니즘으로 하는 산기관들은 폐수내 물질들로 자주 막히게 되는 단점을 갖고 있다. 최근에는 시스템화된 산기장치들이 개발되기도 하였으나 설치비용과 운영상의 문제로 아직은 많이 사용되지 못하는 실정이다.

III. 음향공진 및 맥진동 산기관의 기본원리

음향공진 및 맥진동현의 산기관은 공기분출 노즐과 및

가지 형상의 음향공진기로 구성되는데, 공급되는 공기는 저압용 헬름홀츠 공진기나 고압용 반사공진기를 동시에 또는 개별적으로 작동시켜 여기서 발생하는 음향에너지를 폐수중에 공급함으로써 공기중 산소의 용해 속도를 증가 시키게 된다. 고압용 반사공진기의 경우 계속 유입되는 공기에 의해 공진기가 평형을 잃어 주기적 맥진동 현상을 일으키면 분출공기 무리는 작은 공기방울들로 쪼개져 흩어지게 되어 산기관의 기능을 발휘하게 된다.

III-1. 저압용 헬름홀츠 공진기

그림 1에서 보는 원통형의 저압용 헬름홀츠 공진기에서는, 공진기 측면압력(lateral pressure)의 변화에 대해 노즐에서 분출하는 평면 제트(flat jet)¹²⁾ 형태의 공기흐름이 높은 민감도를 나타내는데 이것이 소리발생의 원인이 된다. 이 공진기는 비교적 작은 속도와 압력을 갖는 분출공기로도 작동이 가능하며 분출 공기압과 대기압의 차이 Δp 가 0.01 MPa 이하에서도 작동을 시작한다. 일반 목(neck)형의 헬름홀츠 공진기 보다는 노즐 분출 공기를 충분히 반영할 수 있는 원통형이 유리할 것으로 판단되며 여기서 발생하는 공진주파수, f (kHz)는 목형의 공진주파수식에 기하학적 형상을 고려하여 식(1)과 같이 유도하였다.

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{c}{2\pi} \left(\frac{b'}{V} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{c}{2\pi} \left(\frac{b}{\frac{\pi}{4} d^2 b} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{51}{d} \tag{1}
 \end{aligned}$$

여기서 c 는 음속으로 340(m/s), b 는 공진기의 폭(mm)이고, 유효 공진기폭 b' 은 (0.7~0.75) b 범위를 갖으나 0.7 b 값을 채택하였다. d 는 공진기의 직경(mm)이고, 공진기의 부피 V 는 $\frac{\pi}{4} d^2 b$ (mm³)가 되므로 위와 같이 간략화된 공진주파수식을 얻는다. 그러나 이러한 저압용 음

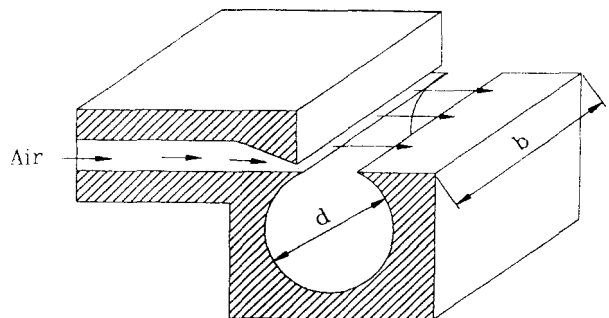


그림 1. 저압용 헬름홀츠 공진기 개념도

향공진기는 추가적인 음향에너지 변환 기능이 없어 맥진동 현상등을 발생시키지 못하므로, 단독의 산기관으로 활용하기에는 부족하며 다른 시스템과 조합하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

III-2. 고압용 반사공진기

음향공진과 함께 맥진동 현상도 유발하여 높은 산기성능으로 단독 활용이 가능한 고압용 반사공진기의 개략도는 그림2 와 같다. 노즐을 통해 분출되는 공기 제트는 그림2 에서와 같이 셀 구조(cell structure)를 형성하는데 압력의 peak가 나타나는 첫번째 셀의 길이 l_0 (mm)는 노즐의 직경 d_n (mm)과 분출 공기압과 대기압의 차이 Δp (bar)를 사용한 식(2)로 부터 구할 수 있다¹⁶⁾. 여기서 Δp 가 0.93 (bar) 이하인 경우는 subsonic 현상이 되어 식(2)는 적용할 수 없게 된다.

$$l_0 = 1.12 d_n (\Delta p - 0.93)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

노즐 반대편에 장착된 반사형의 공진기에서는 분출 공기의 수직력과 기하학적 형상에 기인하는 음향공진 현상이 나타나는데 이때 발생하는 음파의 공진주파수, f (kHz)는 식(3)의 파장(λ) 관계식으로 부터 식(4)와 같이 구해진다.

$$\lambda = 4(h_r + 0.3 d_r) \quad (3)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4(h_r + 0.3 d_r)} \quad (4)$$

여기서 h_r 과 d_r 은 그림 2 반사공진기의 높이와 직경이며 기본적으로 헬름홀쯔 공진기의 개념을 갖는다. 이러한 노즐과 공진기를 구성하여 1차계인 노즐 제트와 2차계인 반사공진기의 제트간에 상호작용이 일어나고 충격파(shock wave)가 형성되는 지점과 그림 2의 우측 끝 부분인 공진기 바닥면 사이에서는 강력한 음향공진이 발생한다¹⁶⁾. 이 충격파는 분출된 공기 제트가 반사공진기 앞에서 진행이 지연되어 그림 2에서와 같이 발생되며 분출 공기의 흐름은 공진기내에서 압축되어 위치에너지를 확보하게 된다. 만일 분출 공기에 의한 압력이 어느 이상으로 높아 반사공진기가 불안정 영역에 들어오게 되면 공진기에서는 주기성을 갖는 공기 방출, 즉 맥진동 현상이 일어나게 된다¹⁷⁾.

이 불안정 영역은 통상 충격파가 발생하는 지점, a_1 (mm)에서 부터 시작하는데, 이 위치는 다음 식(5)로 부터 구할 수 있다¹⁸⁾.

$$a_1 = d_n [1 + 0.041(\Delta p - 0.93)^{\frac{1}{2}}] \quad (5)$$

여기서 Δp 와 d_n 의 단위는 각각 bar와 mm이다. Δp 가 0.5 MPa 이상에서는 제트 구조가 깨어지므로 맥진동 현상이 나타나지 않으며 압력변화에 따른 음향발생 실험을 통해

0.03 MPa 이상이 되어야 음파가 발생함을 알 수 있었다. 이로 부터 공진기가 효과적으로 작동되는 Δp 의 범위는 0.03~0.5 MPa로 추정하였다.

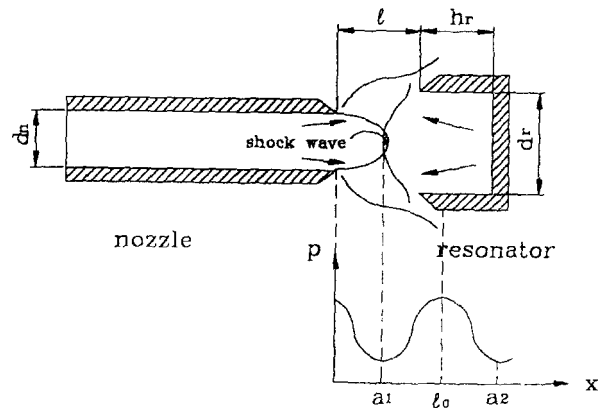


그림 2. 고압용 반사공진기 개략도

IV. 음향공진기의 최적화 설계

IV-1. 실린더형 반사공진기(CJR)의 파라미터 선정

충분한 음향에너지와 맥진동 현상을 일으키는 고압용 반사공진기는 산기관용으로 단독 또는 조합하여 사용할 수 있는 시스템으로, 노즐의 형상이 단순 실린더형인 공진기(Cylinder Jet Resonator, CJR)의 주요 파라미터인 d_n , d_r , h_r 과 l 의 적합한 선정을 위해 다음과 같이 진행하였다. 산기관의 공기 공급량과 공기압으로 결정되는 용량이 제시되면 노즐의 직경 d_n 이 선정될 수 있다. 노즐을 통해 분출되는 공기 제트는 약 40°의 팽창각도로 확산되어 반대편 공진기에 도달하게 되므로 반사공진기가 이 공기 제트의 많은 부분에 대해 작용하기 위해서 d_r 은 d_n 보다 충분히(50% 이상) 커야하는데 형상의 연속성등 설계 관점에서는 d_r 과 d_n 의 차이가 작을수록 유리하다. 이러한 사항들을 고려하여 공진기의 직경 d_r 은 (1.6~1.7) d_n 의 범위에서 선정하는 것을 제안한다. h_r 은 공진기의 주파수를 결정하는 요소이지만 음향파위의 발생을 보다는 방출되는 공기의 방향성과 주파수 관련 변수로 d_r 과 유사한 크기로 선정할 수 있다. l 또한 중요한 파라미터중의 하나인데 특별한 구속 조건이 없고 d_n , d_r 및 h_r 로 최적화하지 못한 부분도 l 을 적절히 선정함으로써 전체 시스템의 최적화를 구현할 수 있다. 먼저 l 의 범위를 제한하는 아래 관계 식(6)을 사용할 수 있다¹⁹⁾.

$$0.66(l_0 - a_1) < l < l_0 \quad (6)$$

여기에 식(2)와 (5)를 적용하고 앞에서 구한 Δp 의 범위(0.03~0.5 MPa)에 대하여 만족하는 l 의 범위를 수치적으로 구하면 4~16 mm가 된다. l 에 대한 설정 방향을 제시

하기 위하여 이와 같이 정리된 사항들을 토대로, 목표하는 표준통기량(약 450 liter/min.)을 선정하여 $d_n=6$ mm 를 채택하였으며 $h_r=d_r=1.66d_n$ 그리고 Δp 은 0.35 MPa 와 0.40 MPa 두 경우에 대하여 음향방사 시험을 수행하였으며 음압측정을 통한 음향에너지의 변화를 그림 3과 같이 구하였다. 여기서 보는 바와 같이 ℓ 은 8 mm 부근에서 전반적으로 충분한 음향 에너지를 방사하므로 5~10 mm 범위에서 1차 선정할 수 있었다. Δp 가 작아질수록 ℓ 은 줄어드는 경향이 있으나 최종 결정은 체계적인 파라미터 최적화 작업을 통하여 결정한다. 공급된 공기유량은 산기관으로 사용이 적합하도록 400 liter/min.를 약간 상회하는 범위에 맞추었다.

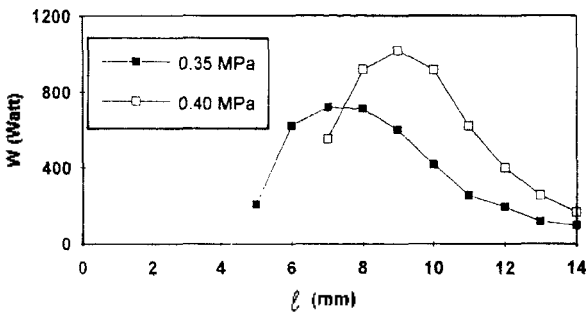


그림 3. 파라미터 ℓ 과 음향방사 관계

IV-2. 고리형 반사공진기(AJR)의 파라미터 선정

지금까지 검토된 실린더형 반사공진기의 노즐에서 분출하는 공기 제트의 형상을, 실린더형에서 그림 4와 같이 고리형으로 바꾼 고리형 반사공진기(Annular Jet Resonator, AJR)를 사용하면 여러 장점이 나타나게 된다. 고리형 공기 제트로부터 형성되는 셀의 길이 ℓ_{oc} (mm)와 발생하는 음파의 공진주파수, f_c (kHz)는 각각 식(7)과 식(8)로부터 구할 수 있는데

$$\ell_{oc} = 1.1 (d_n - d_o) (1 + 0.8 \frac{d_o}{d_n}) (\frac{\Delta p - 0.9}{p_o})^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$f_c = \frac{0.78 c (\Delta p - 0.9)^{\frac{1}{2}}}{4 [h_r + 0.4 \ell + (d_r - d_o) (0.4 - 0.2 \frac{h_r}{d_o})]} \quad (8)$$

해당 치수는 그림 4와 같으며 p_o 는 분출공기압을 의미한다. 식(7)을 식(2)와 비교하면 전반적으로 셀의 길이가 짧아져 주어진 ℓ 의 범위에서도 2차 음향모우드라 할 수 있는 2번째 셀이 형성 될 수 있으며 공진기에서 셀의 역할을 고려할 때 전반적으로 높은 효율의 산기성능이 예상된다. 또 다른 장점으로는 높은 시스템의 안정성을 들 수 있다. 견고한 중앙 봉에 의해 인도되는 공기 제트는 거동이 안정되어지고 공진기의 기하학적 주요 치수에 덜 민감하

게 된다. 따라서 이렇게 설계된 산기관은 주변 환경의 변화에 잘 대응할 수 있으리라 판단되며 다음 장의 성능비교 실험결과(그림 8)를 보아도 높은 산기성능이 나타나고 있다. 방출되는 공기흐름의 방향도 ℓ 과 h_r 을 조절하면 그림 4의 1) 또는 2) 방향으로 유도할 수 있게 된다[9][10].

주요 파라미터의 선정은 다음 과정을 따라 수행한다. 먼저 산기관의 표준통기량이 결정되면 이에 해당하는 d_n 과 d_o 의 많은 조합이 있게 된다. d_o 는 어느 정도 크기가 되어야 고리형 시스템으로 작동하지만 식(7)에서 보듯이 d_n 크기에 너무 근접하면 셀이 형성되지 않으므로 초기에는 $d_n=2d_o$ 의 관계에서 시작할 수 있다. d_r 은 실린더형에서와 같이 공기의 팽창을 고려하여 $d_r=1.66d_n$ 의 관계로부터 구하게 되며, 2개의 셀까지 존재할 수 있는 길이방향의 공간을 확보하기 위해서는 $(\ell+h_r)$ 값이 ℓ_{oc} 의 2배가 되도록 선정한다. 참고로 CJR에서는 기본셀이 길기 때문에 2개의 셀발생 시스템으로는 부적절하다. 식(7)로 부터 계산된 $2\ell_{oc}$ 를 만족하는 ℓ 과 h_r 도 많은 조합이 있는데 원하는 공진주파수가 있으면 식(8)과 연결하여 ℓ 과 h_r 을 각각 구할 수 있으며 $\ell=h_r$ 도 좋은 초기값이 된다. 통상 공진주파수값은 산기효율을 지배하는 직접적인 파라미터는 아니지만 공진기 설계 및 성능실험 과정상 중요한 파라미터로 인식된다. 표 1에서는 지금까지 제안된 파라미터 선정방법에 따라 채택된, 주요 고리형 산기관의 특성치를 정리하였다.

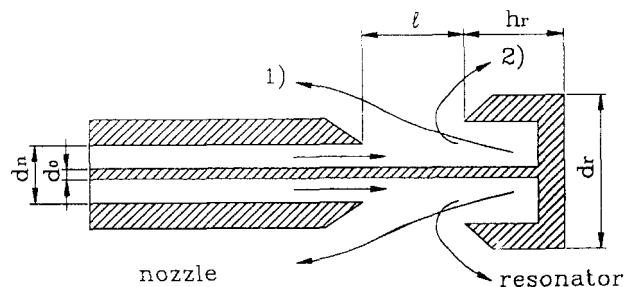


그림 4. 고리형 반사공진기 개략도

IV-3. 복합형 공진 시스템

복합형 공진 시스템은 고압용 반사공진기(CJR 또는 AJR)에 저압용의 헬름홀츠 공진기를 추가로 부착하여 사용하는 개념으로, 고압의 분출 공기를 사용하여 고주파 공진을 유도하는 반사공진기도 환경변화에 따라 부분적인 저압대역이 발생할 수 있으므로 이에 대응하는 저압용 헬름홀츠 공진기로부터 추가적인 성능을 예상할 수 있다. 본 관련 연구에서는 저압용 헬름홀츠 공진기의 공기압 영역을 넘어서는 일정한 고압을 대상으로 수행하였으므로 직접적인 효율증가는 확인하지 못하였다. 그림 5에서는 이러한 복합형 공진기의 개념도를 보여주고 있다.

표 1. 고리형 반사공진기 AJR의 주요 특성치

parameter	d_n	d_o	d_{eq}	p_a	l_o	d_r	h_r	l	Q_{max}	Freq.
unit	mm	mm	mm	bar	mm	mm	mm	mm	liter/min.	kHz
test 1	6	3	5.2	3	4.8	9.6	4.9	4.7	300	9.3
test 2	6	3	5.2	4	6.7	9.6	6.1	6.6	300	9.3
test 3	7	3	6.3	3	6.1	11.2	6.2	6.0	450	9.9
test 4	7	3	6.3	4	8.5	11.2	8.6	8.4	450	10.0
test 5	8	3	7.4	3	7.5	12.8	7.6	7.4	600	4.4
test 6	8	3	7.4	4	10.5	12.8	10.6	10.4	600	5.2
test 7	9.5	5	8.0	3	7.3	15.2	7.4	7.2	950	3.1
test 8	9.5	5	8.0	4	10.0	15.2	10.1	9.9	1000	4.2
test 9	8	4	6.9	3	6.5	12.8	6.6	6.4	500	6.9
test 10	8	5	6.2	3	5.2	12.8	5.3	5.1	390	7.7
test 11	8	6	5.3	3	3.7	12.8	3.8	3.6	300	9.5
test 12	8	7	3.8	3	1.96	12.8	0.0	2.0	150	14.4

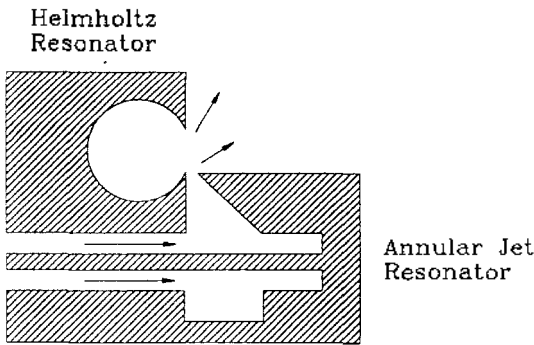


그림 5. 복합형 공진기의 개념도

V. 성능실험 및 결과

지금까지 검토된 음향공진 산기관들의 성능을 비교하기 위하여, 1차로 실린더형 반사공진기(CJR)와 고리형 반사공진기(AJR)의 성능 비교시험을 소형수조(가로 0.5m, 세로 0.5m, 높이 3.0m, 용적 0.75m³)에서 수행하였다. 실험방법은 먼저 수조내의 청수에 아황산나트륨(Na₂SO₃)을 첨가하여 용존산소(Dissolved Oxygen, D.O.)를 0으로 맞추고 바닥에 위치한 시험대상 산기관에 해당 유량과 압력의 공기를 주입하면서 일정한 시간간격(30초)으로 D.O. 측정기를 사용하여 청수중의 D.O. 농도를 계속하였으며 측정된 시간별 D.O. 농도 데이터와 공급된 산소(공기)량으로부터 ASCE(American Standard of Civil Engineers)의 청수중 산소전달측정 표준(ANSI/ASCE 2-91)에 의해, 20C, 1기압 기준으로 공급된 산소와 물에 흡수된 산소의 비율을 의미하는 표준산소전달효율(Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE)을 구하게 된다. CJR과 AJR의 성능비교 목적을 위해 노즐면적이 동일해야 하므로, 앞에서 검토한 파라미터 선정방법의 결과에 들어있는 치수중에서 CJR(그림 6)은 $d_n = 5 \text{ mm}$ 로, AJR(그

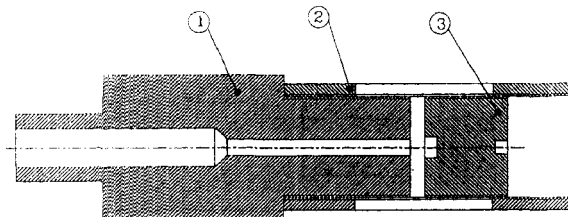


그림 6. CJR 단면도

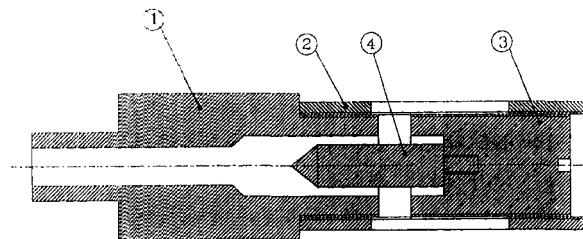


그림 7. AJR 단면도

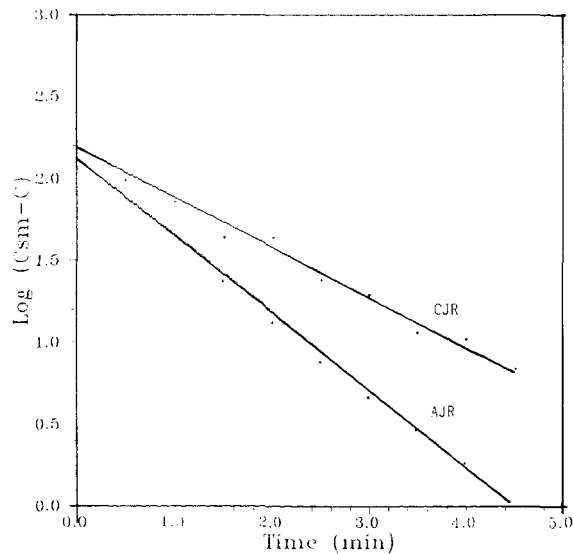


그림 8. CJR과 AJR의 산소전달율(Oxygen Transfer Rate) 비교

림 7)은 $d_n=8\text{ mm}$, $d_o=6\text{ mm}$ 를 선택하였다. 그림 6, 7에서 의 숫자는 제작시 필요한 단품번호를 의미한다. 그림 8은 두 산기관의 성능실험 결과로써 시간별 용존산소의 증가율을 보여주는데 전반적으로 AJR의 성능이 높게 나타남을 알 수 있다. 여기서 C_{sat} 은 청수의 산소 포화농도이고 C 는 산기관에 의해 변화되는 청수중의 산소 농도를 의미한다.

본 소형수조 실험에서는 그림 8과 같이 용존산소가 포화상태에 도달하는 시간이 비교적 짧은 5분 정도 소요되므로 유효 측정데이터(D.O. 농도: 약 0.4 ppm)가 불안하여 다른 변수의 영향을 받을 가능성이 있을 것으로 판단된다. 따라서 소형수조에서는 빠른 실험을 수행할 수 있는 장점과 데이터의 정밀도가 떨어질 수 있는 단점을 고려하여 안정적인 비교실험 목적으로 수행하였다. 앞장에서 검토되었던 노즐 직경의 범위인 5-10 mm에서 CJR 대응직경(equivalent diameter)이 8 mm 이내(8 mm 이상에서는 표준통기량, Q 가, 1000 liter/min.를 넘어 실제 폐수처리장의 산기관으로는 적합하지 않음.)의 AJR 중에서 (표 1) 선정하여 소형수조에서 안정적인 성능시험을 수행하였으며 결과로 test 2 AJR이 가장 우수한 것으로 평가되었다.

선정된 산기관, AJR(그림 9)과 기존의 산기관중 일반적으로 많이 사용되는 볼 형의 산기관, SH200LS(그림 10)을 대상으로 2차 중형수조(직경 1.8 m, 높이 1.8 m, 용적 4.58 m^3) 내에서 표준 산소전달효율을 구하기 위한 성능 실험을 수행하였다. 공급되는 공기의 유량은 기존 산기관의 특성을 고려하여 80~335 liter/min.로 하였으며 공기압은 실제 폐수처리장의 운영상황을 반영 하여 공급압력 4기압($\Delta p=3$ 기압)이하에서 실험을 수행하였다. 그림 11은 두 산기관의 용존산소 증가율을 보여주는 실험결과 ($Q=190\text{ liter/min.}$)로써 용존산소가 포화상태에 도달하는데 소요 되는 시간이 1시간 정도로 실험목적에 충분히 적합한 것으로 판단된다. 두 산기관에 대하여 유량을 바꾸어 가면서 그림 11과 같은 방법으로 용존산소 증가율을 측정하였으며 이를 토대로 ASCE의 청수중 산소전달 측정 표준(ANSI/ASCE 2-91)에 의해 그림 12의 SOTE를 최종적으로 구하였는데 유량별로 선정된 AJR이 20~30% 높은 효율을 보여주고 있다. 유량에 따라 공급압력

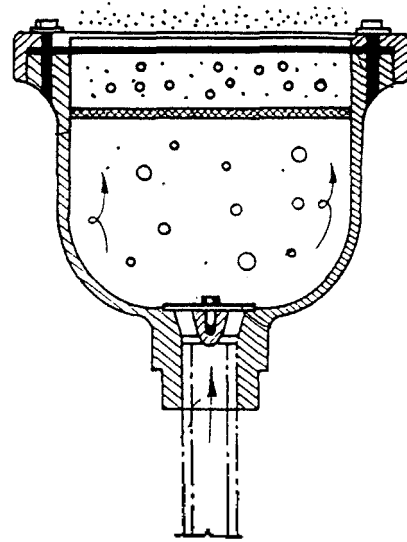


그림 10. 볼 형 산기관의 단면도

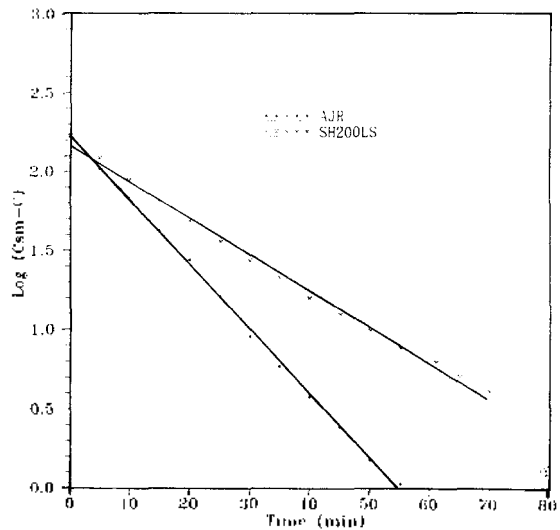


그림 11. AJR과 SH200LS의 산소전달율(Oxygen Transfer Rate) 비교

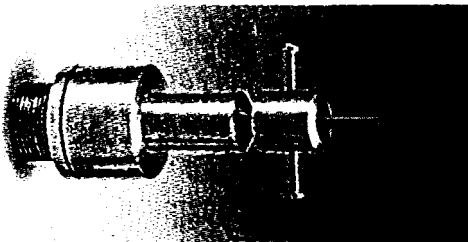


그림 9. AJR의 외형

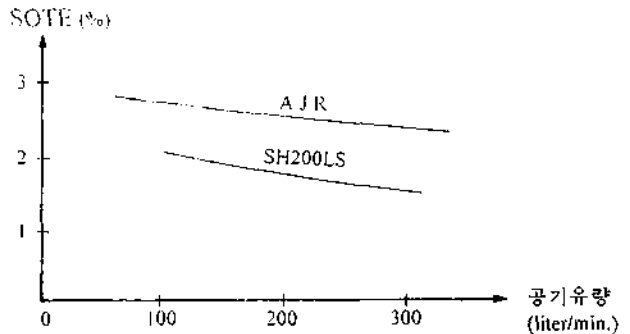


그림 12. AJR과 SH200LS의 SOTE 성능 비교

도 변화될 수 있는데 이것은 SOTE의 개념인 1 기압으로 환원된 기준 유량을 사용함으로써 직접적인 비교를 할 수 있게 된다.

산기관 효율은 1차로 작은 공기방울의 발생에 의존하는데 AJR 산기관에서 발생한 공기 방울의 크기는 SH200LS에서 발생하는 직경 1~15mm 크기 보다 현격히 작은 것을 유안으로 확인할 수 있었으며, 특히 AJR 산기관의 경우 가동을 중지한 후에도 수중에서 대단히 작은 공기방울들을 확인 할 수 있었는데 분당 상승속도가 5cm 이하로 계측되었고 따라서 크기가 50 μ m 이하의 많은 공기방울들이 존재함을 알 수 있었다. SH200LS의 경우 산기관의 작동을 중지하면 1분 이내에 거의 모든 공기방울들이 상승하여 사라지게 되었다. 실험 대상이었던 AJR 산기관은 좀더 많은 파라미터 최적화 작업과 이에 적합한 구조변경을 수행하면 추가적인 성능 향상이 기대된다. 참고로 실패수 대상의 플럭(floc)상태 실험을 통해서도 플럭이 온전히 보존되는 등 다른 문제점이 없음을 확인할 수 있었으며 운용상 중요한 것으로 보이는 폐수성분에 의한 막힘 현상이 발생하지 않았다.

VI. 결 론


음향공진과 백진동 현상을 산기관에 활용할 수 있는 원리를 제안하였으며 관련한 설계 변수를 검토하였다. 결과로 고압용 고리형 반사공진기, AJR이 작동 메카니즘을 고려할때 최적인 것으로 평가되었으며 이를 실험으로 확인하였다. 실제 폐수처리장의 환경을 적극 반영하여 성능실험을 수행하였으며 이 때 이용된 고리형 반사공진기, AJR은 기존의 불 형 산기관 보다 20~30% 높은 효율을 나타내고 운용상의 문제점도 예상되지 않으므로 실용성있는 산기관으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 더욱 다양한 최적화 연구를 수행할 경우 어느 정도의 추가적인 성능증가가 예상된다.

참 고 문 헌

1. W.W. Eckenfelder, *Industrial Water Pollution Control*, McGraw-Hill, pp. 35-40, 1989.
2. G.Tchobanoglous and F.L.Burton, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, Metcalf & Eddy, pp. 435-455, 1979.
3. E.Villermaux and Y.Gagne and E.T.Hofinger, "Self sustained oscillations and collective behaviours in a lattice of jets," *Appl.Sci.Res.*, Vol. 51, pp. 243-248, 1993.
4. C.J.Moore, "The role of shear layer instability waves in jet exhaust noise," *J.Fluid Mech.*, Vol. 80, pp. 321-367, 1977.
5. K.Matsuo and H.D.Kim, "Measurement of oscillating shock wave in supersonic nozzles," *Flow Visual. symp.proc.*, pp. 612-617, Yokohama, Japan, Oct. 1992.

6. M.Masuda and K.Ivamoto, "TVD numerical analysis on the shape of supersonic free jets under various pressure ration," *Asian Visual. symp.proc.*, pp. 647-650, Chiba, Japan, May 1994.
7. C.M.Ho and N.S.Nosseir, "Dynamics of an impinging jet (The feedback phenomenon)," *J.Fluid Mech.*, Vol. 105, pp. 119-142, 1981.
8. T.C.Adamson and J.A.Nicholls, "On the structure of jets from highly underexpanded nozzles into still air", *J.Aerospace Sci.*, Vol. 26, pp. 16-24, 1959.
9. B.H.K.Lee, "Near field studies of choked jet seeded with upstream sound," *J.AIAA*, Vol. 14, pp. 122-128, 1976.
10. Y.Miyake and K.Bando, "Numerical simulation of round jet," *Trans.Jap.Soc.Mech.Eng.*, Vol. 57, pp. 2022-2029, 1994.

▲홍 석 윤(Suk-Yoon Hong) 1959년 9월 3일생
 1982년 2월: 서울대학교 공과대학 조선공학과 졸업(학사)
 1992년 12월: (미국)펜실바니아 주립 대학교 음향학과 졸업 (음향학 박사)
 현재: 고등기술연구원 자동차기술연구실 책임연구원



▲문 중 덕(Jong-Duck Moon) 1964년 8월 4일생
 1988년 2월: 연세대학교 기계공학과 졸업(학사)
 1990년 2월: 포항공과대학 기계공학과 졸업(석사)
 현재: 고등기술연구원 자동차기술연구실 선임연구원

