최적의 세척효율을 위한 캐비테이션 환경에 관한 연구

조승인† ·허 웅*·김정국**

A study on variance of the transducer impedance by fluid condition in ultrasonic cleaning tank

SeungIn Cho, Woong Her, JungKuk Kim

Key Words: Ultrasonic(초음파), Cleaning(세정), Cavitation(캐비테이션)

Abstract

Ultrasonic cleaning is performed by cavitation which is caused by the change of the sound pressure due to the vibration in a cleaning tank. In this study, experiments on electric power and sound pressure with various temperatures, dissolved oxygen and the level of the fluid was done in order to find out how the changes in a cleaning tank affect cavitation. As a result of a series of experiments, we found that transducer impedance changes periodically in response to the variances of fluid and have a direct influence on cleaning efficiency.

1. 서 론

초음파를 이용한 세정은 최근 가정용으로도 많이 보급이 되어있는 상태이지만, 그 이전에 초음파 세정은 산업용으로 널리 사용이 되고 있었다. 산업용 세정에 주로 적용되는 범위로는 반도체의 공정상 불량의 원인이 되는 미세먼지 제거와 LCD 및 브라운관의 오염물 제거를 위해 이전부터 공정라인의 설비에 초음파 세정 설비가 구축이 되어 사용이 되고 있다.

초음파의 세정시 캐비테이션은 가장 중요한 요소이다. 캐비테이션의 발생은 온도와 수위변화, 진동판의 재질, 진동자의 배열위치 및 설치각도 등의 세정 환경 변수에 의해 영향을 받는다. 이밖에 다른 여러 가지 변수들이 존재한다.

본 논문에서는 이러한 캐비테이션 발생에 영향을 주는 환경변수 중 수위에 따른 변화와 온도에 의한 변화, 세정수내의 용존 산소량의 여부에 의한 변화를 비교 및 측정실험을 하였다. 본 실험을 통하여 외부환경에 대하여 변화하는 캐비테이션 현상을 체계적으로 정립하여 좀더 효율적인 초음파 세정의 사용방안을 제시하고자 한다.

† 명지대학교 전자공학과 박사과정
E-mail :Ul-tech@ul-tech.com
TEL : (031)455-4603 FAX : (031)455-4604
* 명지대학교 전자공학과 정교수
** 명지대학교 전자공학과 부교수

2. 초음파 세정 시스템

2.1 초음파 세정 이론

파동 에너지를 이용하는 기술의 하나인 초음파 세정은 파동 전파에 따라 세정액이 고주파 진동을 하여 발생하는 캐비테이션(cavitation) 현상

과 큰 진동가속도 등이 활용된다. 세정액 중에 초음파를 방사하면, 주파수에 상응하는 정재파가 발생하여, λ/2의 정수배에 상응하는 위치에서 음압이 가장 높아지는 구간이 생겨난다. 캐비테이션은 이 구간에서 가장 우수하다. 즉, λ는 1파장이므로,

$\lambda = v_0 / f$ ·····(식2-1)

본 논문에서 사용된 시스템의 최대 주파수인 f=25.6[㎑]의 경우는 0℃의 물을 기준으로 수중에서의 음속은 v_0=1500[m/sec] 이므로

$\lambda = 1500[m/sec] / 25.6[kHz]$ ·····(식2-2)
$\lambda = 58.59375[mm]$ ·····(식2-3)
$\lambda/2 = 58.59375/2 = 29.296875[mm]$ ·····(식2-4)

즉 29.296875[㎜]마다 캐비테이션 발생 구간이 생겨나게 된다. 수[㎛]정도 크기의 미립자 분리에 사용되는 수십[㎑] 주파수의 초음파 세정 기에서는 주로 캐비테이션의 기포작용에 의해 오염물질이 분리가 된다. 또한 세정액 내의 용존 산소량은 캐비테이션의 강도에 큰 영향을 준다. 캐비테이션과 주파수, 용존산소량에 대한 관계식은 식(2-5)와 식(2-6)으로 표현된다.

$$I_c = \frac{T_s}{f \times G \times P_s} \quad \text{·····(식2-5)}$$

$$D_c = \frac{1}{I_c} \quad \text{·····(식2-6)}$$

로 나타낼 수가 있다. I_c는 캐비테이션의 강도로서 주파수 f와 용존 가스량 G와 증기압 P_s의 곱에 용액의 표면장력 T_s를 나눈 값으로 나타낼 수가 있으며, 캐비테이션의 밀도D_c는 1을 캐비테이션의 강도로 나눈 값으로 나타낼 수 있다.이는 캐비테이션의 강도가 세어질수록 그 밀도가 작아지는 반비례관계인 것을 나타낸다. 액체 내에 가하여 준 강력한 초음파는 소밀파가 되어 압축력(정압)과 팽창력(부압)이 반복적으로 나타나게 된다. 그림 1은 캐비테이션의 발생 원리를 나타낸 그림이다. 부압 주기 때에 세정수내에 기포가 발생하고, 이 기포는 다음의 압축 주기 때에 소멸한다. 이러한 기포는 1초에 수만 번씩 생성과 소멸을 거듭하면서 점점 구경이 커진다(그림 2-A). 어느 일정 구경 이상이 되면 이 기포는 단번에 수축 파열하면서 매우 큰 충격파를 일으킨다. 이 충격파는 큰 압력을 발생시킴과 동시에 순간적인 고열을 발생시켜, 액체 내에 여러 가지 물리적 작용을 일으키고 화학적 작용을 촉진한다(그림2-B). 즉, 캐비테이션 기포가 파열하여 오염 물질 사이에 틈을 만들고, 그 틈으로 기포들이 침투하여 파열함으로써 완전하게 오염물질이 분리되게 된다(그림2-C). 그림2는 캐비테이션의 세정작용을 나타낸 그림이다.

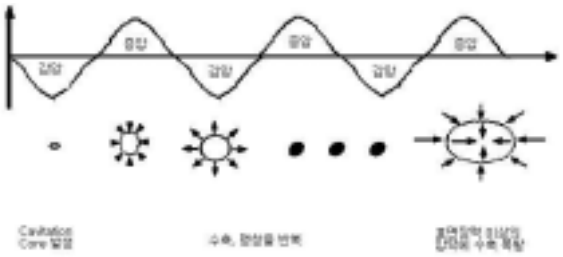

Fig. 1 Principle of cavitation

Fig. 2 Process of Removing pollutants by cavitation.

2.2 초음파 세정 장치

초음파 세정기는 일반적으로 발진기와 진동부의 두 부분으로 구성되어 있다. 발진기는 일정 주파수로 진동하는 고주파 전기신호를 발생시켜 진동부로 보낸다. 28[㎑] 주파수에서 작동되는 초음파 세정기의 진동부는 그림 3에서와 같이 진동판과 여러 개의 진동자로 이루어져 있다. 진동자들에 의해 가진된 진동판의 고주파 횡 진동은 인접 액체인 세정액에 초음파를 발생시켜 세정액에서 초음파가 전파된다. 그림3은 다주파 진동부를 나타낸 그림이다.

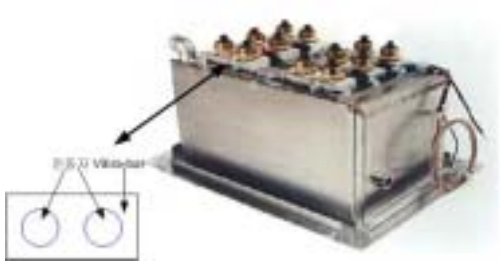

Fig. 3 Multi frequency transducer.

2.2.1 발진부

발진시스템의 최대 출력은 600[Watt]이며 출력 주파수는 28[KHz]의 저주파 대역이다. 시스템의 구성은 전원공급을 위한 파워보드(Power Board), 이상 상태 발생을 알리기 위한 릴레이 알람보드(Relay/ Alarm Board)로 구성하였다. 그림5는 구현된 발진부를 나타내는 그림이다.

2.2.2 진동부

진동부의 재질은 SUS(Steel Use Stainless)로 구성이 되어있으며 그 크기는 380[mm]×380[mm]×300[mm]([L]×[W]×[H])이며, 또한 조안에 설치되어있는 진동판의 크기는300[mm]×300[mm]×95[mm]이다. 또한, 진동자는 총 12개가 내부에 장착이 되어있다. 진동자는 압전 세라믹으로도 불리며 전기적인 신호를 기계적인 신호로 변환하여 세정수에 캐비테이션을 발생시키는 핵심적인 부분이다. 진동자는 초기의 고유 임피던스를 가지고 있지만 부하가 증가함에 따라 임피던스 또한 변화를 하게 된다. 이러한 관계를 보면 주파수 F_r은 진동자의 초(sec)당 진동횟수를 뜻한다. 즉 28㎑ 진동자는 초당 28,000번 진동한다는 것을 의미한다. 진동자의 공진(Resonance) 주파수 F_r과 반공진 (Anti-Resonance) 주파수 F_a간의 범위

$$\triangle F = F_a - F_r \quad \text{(식2-7)}$$

△F는 압전 물성 중의 k_p값에 가장 중요한 인자이다. △F가 크면 클수록 전기적인 특성이 우수해질 뿐 아니라 발진시 공진점의 안정성에도 좋다 즉, △F가 작을수록 초음파 가동시 등가회로가 틀어질 가능성이 많으며, 이는 k_p 값에 영향을 주게 된다

k_p값은 전기·기계 결합계수로서, 전기적인 에너지와 기계적인 에너지의 변환효율을 의미한다. 즉, 전기적 특성의 우수함을 나타내는 척도이다. k_p = 0.5이면 전기적인 에너지를 100을 가했을 때, 기계적인 에너지로 변환하는 효율이 정확한 물리적인 계산상으로 50%를 의미하지는 않지만, 50% 정도로 50이 발생한다고 할 수가 있다.

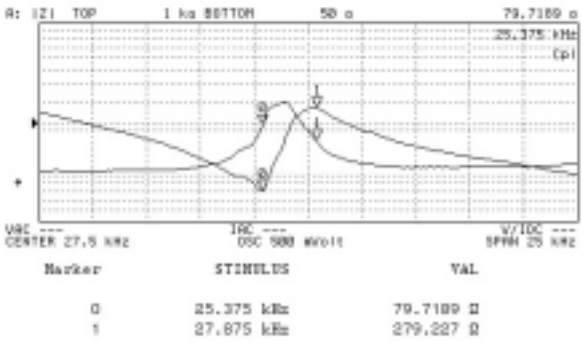

Fig. 4 Graph of Impedance characteristic.

그림4에서와 같이 공진 주파수 F_r(Mark 0)점에서 공진 저항은 최저가 된다. 엄밀히 말해 공진 저항은 임피던스 즉, 실수 성분인 R값과 허수 성분인X 값의 합성성분인 Z값의 크기를 나타내는 것으로 공진 주파수에서는 X값이 최소가 된다는 것을 의미한다. 즉, 공진 주파수 점에서 진동자를 가동하면 그 효율은 최대가 된다는 것이다. F_r점을 지나면 점점 저항은 증가하여 Fa(Mark 1)점에서 최대가 된다. 따라서 진동자의 최대 효율은 발진부와 임피던스 매칭(impedance matching)시 공진점(F_r)에서 최대가 된다. 이 점에서 멀어질수록 공진 저항의 증가로 인해 열(熱)이 발생하게 되고, 이는 진동자의 C값의 증가로 인한 F_r점의 감소로 나타나게 되고 진동자는 작동 불능 상태가 되어 버린다. 또한 그림4에서 보는 F_r점의 공진 저항값의 크기는 매우 중요한 의미를 갖는다. 압전세라믹 자체의 특성 중 Q_m(기계적 품질계수)은 고전계(電界) 또는 물리적인 힘이 가해졌을 때 세라믹이 견딜 수 있는가 즉, 압전 세라믹스의 내구성을 결정할 수 있는 요소이다. 이 Q_m값에 영향을 주는 중요한 요소는 압전 세라믹 자체의 미세조직상의 입경(Grain size)의 크기라 할 수가 있다. 압전소자에서 C값은 상온에서 온도가 증가함에 따라 T_c(Curie Temperature)에서

최대가 되며, 그 이상의 온도에서는 감소를 한다. 압전 소자의 C값은 공진 회로에서 F_r을 결정하는 L (inductance)의 값에 영향을 주며, 이는 콘덴서의 용량으로서 보상이 된다. 즉, 초기의 진동자 C값이 크거나 작은 것은 초음파 공진 등가회로를 구성하는데 문제가 되지 않는다고 할 수 있다. 단지 C값이 갖는 중요한 의미는 발진회로에 따라서 압전 소자가 발진함에 따라서 소자의 온도가 상승하고, 이에 따라 소자의 C값이 변화되며, 이는 진동자의 F_r 값의 감소로 이어진다는 것이다. 즉, C값의 변화는 공진 등가회로 구성이 발진함에 따라 초기에 설정된 회로와 맞지 않는 문제를 야기 시킬 수 있다는 것이다. 압전 세라믹은 발진함에 따라서 열이 발생하며, 발생된 열이 진동자의 C값 상승, F_r 값의 변화를 초래하여 급격한 발진효율의 저하로 이어진다. 결론적으로 진동자의 초기 정전 용량 값은 중요하지 않으며, 발진시 C값의 변화를 억제하는 것이 가장 중요하다.

Fig. 5 Ultrasonic generator.

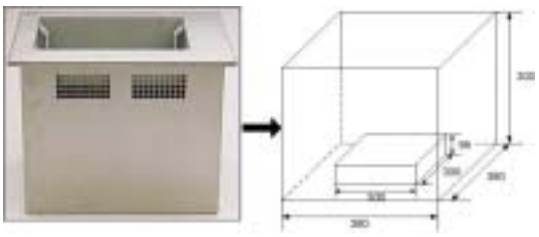

Fig. 6 Ultrasonic transducer.

3. 실험 및 결과

3.1 실험의 방법

본 논문의 실험에서는 저주파 대역의 초음파 세정시 세정력의 우수함을 결정짓는 캐비테이션의 발생에 영향을 미치는 환경에 대해 알아보고자 한다. 실험은 방법을 각기 달리하여 총 4회에 걸쳐 실시하였고 이를 바탕으로 비교 분석하였다. 실험1과 실험2는 비 탈기수와 탈기수에 대하여 수위변화에 따른 캐비테이션의 강도를 측정한 실험이다. 탈기수와 비탈기수의 분류는 용존산소량 측정기 (Orion社의 Dissolved Oxygen Meter 805A model)를 이용하여 탈기수 용존산소량 5.53[PPM] 비탈기수 용존산소량 7.23[PPM]으로 측정 분류하였다. 실험은 조안에 물을 진동자 기준 15[㎜] ~195[㎜]의 물을 넣었으며, 물의 온도는 최초 실험전 온도인 15[℃]로서 본 온도를 초기값으로 설정하였다. 이후 물은 초음파의 영향에 의해서 서서히 상승하여 22[℃]까지 상승되었다. 수위변화에 따른 캐비테이션 발생의 환경에 대한 변수 측정은 음압, 입력전력, 출력전력으로 하였다. 실험은 결과의 경향에 영향을 미치지 않도록 개시 시각부터 종료 시까지 한번에 실시하였고, 한 수위에 대한 실험은 전 측정과정을 되도록이면 같은 조건하에 측정하기 위해 짧은 시간 내에 측정토록 하였다. 실험3과 4는 초음파의 캐비테이션이 온도에 의해 어떠한 영향을 받는지를 알고자 실시하였다. 온도변화에 따른 캐비테이션 발생의 환경에 대한 변수 측정으로 음압을 측정 하였다. 실험 방법은 최초 조안의 온도를 온도계를 통해 측정 후 발진기의 전원을 인가, 초음파 발생시 음압측정기를 사용하여 측정 프로브를 세정액에 15[㎜]정도 담가 음압과 입력 전력, 출력 전력을 측정하였다. 측정프로브를 15[㎜]이상 담궈 측정하였을 경우 여러 방향에서 캐비테이션의 발생을 적용받아 그 수치의 측정이 어려워 15[㎜]로 결정하였다. 그 후 발진기의 전원을 차단한 후, 온도계의 온도를 측정하였고, Heater를 적용하여 온도를 5[℃] 상승시키며 측정을 반복하였다.

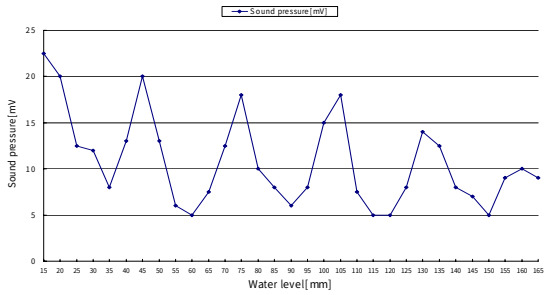

Fig. 7 Sound-pressure Graph due to the water level of 7.23 PPM of dissolved oxygen water.

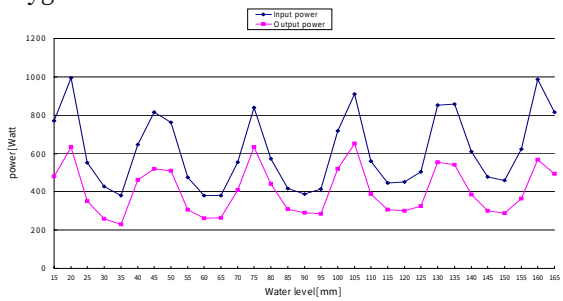

Fig. 8 Input and output power graph due to the water level of 7.23 PPM of dissolved oxygen water.

그림 7과 8은 비탈기수를 이용하여 수위의 변화에 따른 영향을 나타낸 그림이다. 그림7에서와 같이 일정한 주기를 나타내며 음압의 변화가 있음을 알 수 있다. 또한 그림 8은 수위에 따라 입. 출력의 전력 값이 일정한 주기로 변화하는 것을 나타낸다. 이는 수위에 따른 음압의 변화인 실험1의 데이터와 일치하는 것을 알 수가 있다.

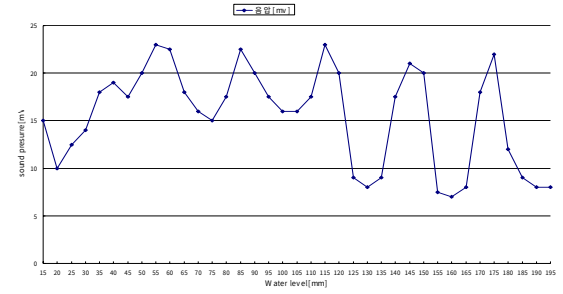

Fig. 9 Sound-pressure Graph due to the water level in 5.57 PPM of dissolved oxygen water.

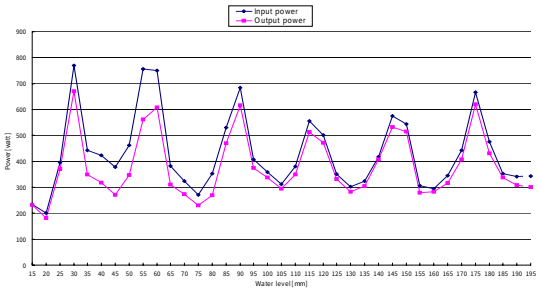

Fig. 10 Input and output power graph due to the water level of 5.57 PPM of dissolved oxygen water.

그림 9와 10은 탈기수를 이용한 수위변화에 따른 영향을 측정한 결과이다. 그림9에서 보듯이 이 실험 또한 일정주기로 음압이 변화하는 것을 볼 수가 있으며, 비탈기수에 비해 상대적으로 음압은 더 높았다.그림 10은 수위에 따른 입. 출력 전력을 나타낸 그림으로서 음압과 같은 경향으로 최대전력과 최소전력을 나타내는 것을 알 수 있다.

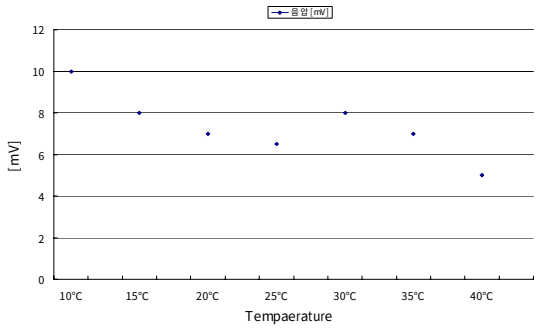

Fig. 11 Sound-pressure Graph due to the temperature in 7.23 PPM of dissolved oxygen water.

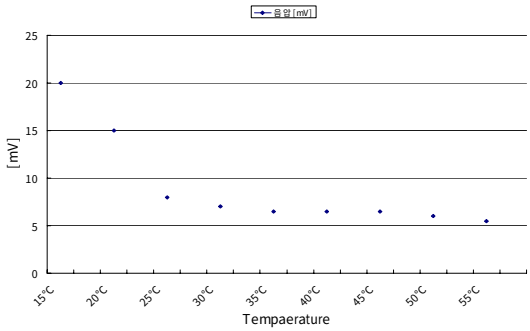

Fig. 12 Sound-pressure Graph due to the temperature in 5.57 PPM of dissolved oxygen water.

그림11은 비 탈기수에서 온도에 따른 음압을 나타내는 그림이다. 초기온도인 낮은 온도에서 가장 높은 음압을 나타내었으며 이후 음압은 줄어들다가 상대적으로 30℃부근에서 잠시 상승하여 다시금 하강하였다. 그림12는 탈기수로써 비탈기수에 비하여 평균 약 2[㎷]의 음압이 상대적으로 높은 것을 확인할 수가 있었다.

4. 결 론

실험1,2,3,4는 각기 다른 조건으로 캐비테이션 강도의 경향을 실험한 것이다. 수위에 따른 캐비테이션 실험인 실험1,2는 세정수를 비탈기수와 탈기수에 차이를 두고 수위에 따른 캐비테이션 실험을 실시하였다. 그 결과 두 실험 모두 수위에 따라 일정한 주기를 두고 최대 값과 최소 값을 나타내는 경향을 나타내었다 이는 앞서 설명한 반파장의 정수배의 위치마다 음압의 밀집지역이 생겨 음압의 최대 위치가 나타난다는 이론과 정합하는 것이다. 식2-1, 2-2, 2-3, 2-4에서나온 결과와 같이 29.296875[㎜]의 정수배의 위치에 실험에서의 음압과 전력의 최대구간이 부합된다. 또한 비탈기수 보다는 탈기수에서 음압의 최고점 값이 높다는 결과를 볼 수가 있다. 이 또한 위의 이론 중 세정액 내의 용존 가스량과 캐비테이션의 강도와는 반비례한다는 식2-5와도 부합되는 결과이다. 실험3과 실험4 역시 세정수를 비탈기수와 탈기수에 차이를 두고 온도에 따른 캐비테이션 강도측정 실험이다. 두 실험 모두 세정수의 온도가 낮았을 때 음압이 높게 나타났다. 상대적으로는 탈기수가 평균 약2[㎷]의 더 높은 음압을 나타내었다. 이는 세정수의 온도가 캐비테이션의 발생과 강도에 큰 영향을 주는 요소임을 나타낸다 할 수가 있다. 또한 비탈기수 역시 초음파를 조사하여 일정 시간이 지나면 세정수에 포함되어 있는 기체들이 초음파의 영향으로 탈기되어 비탈기수와 비슷한 음압 값을 나타내는 것으로 사료된다.

후기

보다 효율적인 초음파의 캐비테이션 효과를 이용한 세정을 위하여 세정수의 높이에 따른 캐비테이션 효과의 추가적인 연구와 함께, 초음파 세정시의 주변 환경요소들인 세정수의 높이, 세정수의 온도, 초음파 진동자의 개수, 진동부의 위치, 발진기의 주파수, 전력 등에 따른 추가적인 연구가 필요하다 사료된다.

참고문헌

(1) J.K. Roberts and A.R Miller, 1960, Heat and Thermodynamics, Interscience
(2) C.F Ying and R. Truell, 1956, Phys, Vol 2, pp.1086-1097.
(3) W.P. Mason and H.J. McSkimin, J. Acoust.Soc.Am. Vol 19 ,pp.464-473.
(4) Lord Ratleigh, 1945, The Theory of sound.1st AM, Vol.2, pp.45-144
(5) H.G. Flynn, 1958, in Physical Acoustics ,principles and Methods, Vol 4B, pp215-220
(6) P.M.Morse and K.U.Ingard, 1968, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill pp58-186