

# 진동 버블에 의한 마이크로 유동의 전산해석

## Computational analysis of microstreaming by an oscillating

\*권용석, #이계한, 오진선, 정상국, 정우원,

\*Y. S. Kwon, #K. Rhee(khanrhee@mju.com), J. S. Oh, S. K. Chung, W. Jeong

명지대학교 기계공학과

Key words : Oscillating bubble, Microstreaming, Computational analysis

### 1. 서론

최근 약물의 부작용을 최소화하기 위하여 혈액 내의 약물이 특정 조직에만 전달되게 하는 표적 약물 전달 기술이 개발되고 있다. 약물의 혈중 농도가 높아지면 인체 내 다양한 조직에서 부작용이 발생하므로, 암세포 또는 혈전과 같은 병변에만 고농도의 약물을 투약할 수 있는 표적약물 전달 기술의 필요성이 높다. 마이크로 버블은 특정 주파수 영역대의 초음파에 의해 공진하고, 버블이 진동하여 주변 유체에 미세 대류 유동을 발생하며(microstreaming), 이 유동은 세포 및 조직으로 약물의 전달을 향상 시킨다. 버블의 진동에 의해 발생하는 유동은 약물전달에 중요한 영향을 미치나, 버블로 인한 유동해석 연구는 제한적으로 수행되고 있다. 진동하는 버블에 의해 발생하는 정상 유동(steady streaming)은 bubble streaming 레이놀즈수

( $Re_{bs} = \varepsilon^2 \left(\frac{\omega a^2}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}}$ )가 작은 경우 스토크스 유동으로 간주하여 이론적 해석이 수행되었으며[1], Longuet-Higgins[2]는 반경 및 축 방향으로 진동 버블의 유동에 의해 발생하는 부차적 유동의 far field 근사해를 특이점을 갖는 유선 함수로 나타내어 속도장을 해석하였다[3]. 그러나 이런 근사해는 버블 주위의 유동을 예측하기 어렵다. 본 연구에서는 유체-고체 상호작용(Fluid Structure Interaction: FSI)를 이용하여 진동하는 버블 주위의 유동을 해석하는 전산 기법을 개발하고, 그 결과를 이론적 유동해와 비교하여 전산 해석의 유용성을 검증하고자 한다.

### 3. 연구방법

유체-고체 상호작용에 대해 계산할 수 있는 상용프로그램 ADINA (Ver. 8.8, ADINA R&D, Inc., MA, USA)를 이용하여 FSI 해석을 수행하였다. 유동장은 2 차원 축 대칭의 비압축성

비정상상태로 문제를 해석하였다. 좌우로 진동하는 버블 모델 (Fig.1)의 유체영역은 14mmX14mm 사이즈의 챔버 모델 (사각형)을 만들고, 챔버의 정 중앙에 0.5mm 버블 모델을 만들었으며, 벽에 부착되어 상하 및 반경 방향으로 진동하는 버블 모델 (Fig.2)의 유체영역은 40mmX25.6mm 사이즈의 챔버를 만들고 챔버의 바닥 중앙에 0.5mm 버블을 만들었다. 유체영역의 밀도 및 점도는 일반적인 물의 물성치 (밀도=999kg/m<sup>3</sup>, 점도=0.001N's/m)를 이용하였다.

경계조건으로는 버블과 유체의 경계에 FSI, Slip condition, Fix mesh 조건을 적용하였고, 벽에 부착된 버블 모델의 바닥은 벽조건을 주고 다른 경계면은 traction free 조건을 적용하였다. 버블 주변의 유동을 자세히 관찰하기 위해 버블 주변의 격자를 매우 촘촘하게 만들었으며, 좌우로 진동하는 모델은 60,754 개의 격자를 생성하였고, 벽에 부착된 버블모델은 70,400 개의 격자를 생성하였다. 이 두 모델을 12kHz 로 진동하는 버블에서 발생하는 유동을 계산하기 위해 한 주기를 8.33X10<sup>-7</sup> 초의 시간 간격으로 100 번을 계산하였고, 유동 패턴이 충분히 수렴되어질 수 있도록 50 주기까지 해석을 진행하였다. 고체영역의 버블 모델은 유체영역의 버블과 같은 좌표에 같은 크기의 버블을 만든 후 버블의 윗 점과 아랫 점의 횡방향 자유도를 FIX 하였다. 버블의 물성치는 영계수는 1.0X10<sup>11</sup> N/m<sup>2</sup>, 포아송비 0.3, 밀도는 999 kg/m<sup>3</sup> 로 하였다. 유동장은 버블의 진동패턴이나 진동크기 등에 영향을 받으므로 물성치는 버블을 컨트롤하기에 적당하게

설정하였다. 버블에서 격자크기는 영향이 거의 없으므로 96 개의 격자를 생성하였다. 버블 벽의 운동을 조절하기 위해서 좌우진동 버블은 가운데 점에 횡방향으로 변위를 0.025mm 로 주었다. 벽에 부착되어 상하 및 반경 방향으로 진동하는 버블은 버블 표면에 반경방향으로 압력을  $1.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$  가하였고, 가운데 점에 종방향으로 변위를 0.0117mm 적용하여 버블 아랫부분은 고정되고 윗부분만 팽창하도록 하여 총 반경 변위는 0.0211mm 가 되도록 하였다. 그리고 이 두 가지 버블이 sine 함수로 12kHz 로 진동 하도록 하였다. post-processing 은 상용프로그램인 Enight (Ver. 9.2, CEI, Inc., NC, USA) 를 이용하였으며, 50 주기 중 유동 패턴이 수렴하는 40 주기부터 50 주기까지 총 10 주기의 속도 데이터를 각 node 에서 평균을 내어 정상유동 (steady streaming) 속도장을 구하였다.

### 3. 결과

좌우로 진동하는 구의 경우 진폭( $\epsilon$ )이 반경에 비해 작고 Bubble streaming 레이놀즈 수가 1 보다 매우 작은 경우, Ratleigh-Nyborg-Westervelt (RNW) 유동을 발생하고, 이때 발생하는 부차적 유동을 나타내기 위해 유선함수의  $\epsilon$  에 관한 2 차항의 경계층 외부의 근사해를 구하면 Fig.1(a)와 같다[2]. 여기에 구의 반경 방향의 진동을 포함하여 2 차 유선함수를 구하면 stokeslet, dipole 및 hexadecapole 의 특이점을 갖는 정상 RNW 유동으로 근사해를 얻게 된다[2]. 벽에 부착되어 진동하는 버블로 인한 부차적 유동을 나타내기 위해 벽 아래 반경위치에 가상적인 특이점을 중첩하여 스토크스 유동을 이론적으로 해석하면 벽에서 먼 지역의 근사해는 dipole 과 유사한 유동이 발생한다 (Fig.2(a)). 이 두 가지 유동해와 전산해석 (Fig. 1b, Fig 2(b)) 의 유동을 비교하면 유동방향과 패턴이 유사함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 FSI 를 이용한 전산해석은 진동 버블에 의해 발생하는 정상 유동장의 예측에 적용될 수 있으며, 이는 향 후 물질전달 해석을 이용한 약물의 전달 해석 등

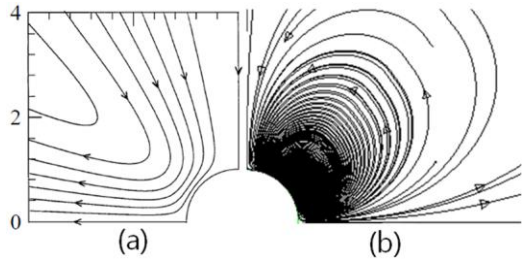


Fig. 1 Comparison of streamlines of spherical bubble in purely lateral oscillation. (a) theoretical result (b) computational analysis

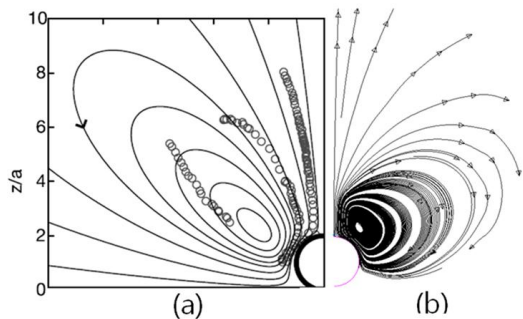


Fig. 2 Comparison of streamlines of radially oscillating bubble which is attached to the wall. (a) theoretical result (b) computational analysis

진동하는 버블을 이용한 다양한 현상의 해석에 활용이 가능하리라 판단된다.

### 후기

본 연구는 연구재단(2011-00121)의 지원에 의해 수행되었음.

### 참고문헌

1. Lighthill, J., "Acoustic Streaming," J. Sound Vib, **61**, 391-418, 1978.
2. Longuet-Higgins, M.S., "Viscous Streaming from an Oscillating Spherical Bubble," Proc. R. SoC. Lond. A, **454**, 725-742, 1998.
3. Pozrikidis, C., "Boundary Integral and Singularity Methods for Linearized Viscous Flow," Cambridge Univ. press, 1992.