

초음파를 이용한 능동 마이크로믹서

허 필 우* · 윤 의 수*

1. 개 요

소득 수준이 높아지고, 건강에 대한 관심이 고조되면서 일반인들이 쉽고 간편하게 현장에서 질병의 유무를 판정할 수 있는 마이크로 진단기기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{(1),(2)}. 또한 바이오 분야의 연구가 활발히 진행됨에 따라 분석대상이 되는 바이오품질의 수가 급격히 증가하면서, 분석기기의 고속화가 주된 관심사가 되고 있다. 이를 위해서는 바이오 진단기기의 크기를 줄일 필요가 있다. 기기가 소형화되면 분석에 사용되는 샘플의 양을 줄이고, 병렬 처리에 의해 분석에 소요되는 시간을 크게 단축하며, 분석 신호의 감도를 높일 수 있다. 마이크로 단위의 크기를 갖는 채널에서 혈액과 같은 작동유체는 레이놀즈 수가 낮기 때문에 층류 유동의 특성을 나타낸다. 층류 유동 조건에서 혼합은 주로 확산에만 의존하므로 혼합에 소요되는 시간이 길어진다. 이를 해결하기 위해 마이크로믹서가 요구된다.

마이크로믹서는 수동 마이크로믹서와 능동 마이크로믹서로 구분된다. 수동 마이크로믹서는^{(3),(4)} 외부 에너지를 사용하지 않고, 확산시간을 단축하기 위해 혼합하려는 시료들의 접촉면적을 늘리거나, 난류를 발생시키는 구조를 갖는다. 이것은 구조가 간단하고 크기가 작은 장점이 있으나, 상호 확산 효과를 증가시키는 구조에 초점을 맞추고 있어서, 난류효과는 미미하다. 이러한 수동믹서의 단점은 혼합에 소요되는 시간이 유속과 유체의 비율에 크게 영향을 받는다는 것이다. 특히 어레이 구조는 유로의 압력 저하에 의해 혼합된 시료의 동질성에 크게 영향을 받으며, 가스 버블에도 민감하다. 이러한 점들을 개선하기 위해서 신뢰성 있고 안정된 능동마이크로믹서가 사용된다. 능동마이크로믹서는 열, 자기력 혹은 초음파 등의 외부 에너지를

이용하는 믹서를 말하며, 가스 버블에 둔감하다. 능동 마이크로믹서에서는 입력 에너지의 크기를 조절함으로써 혼합의 제어가 가능하다. 능동마이크로믹서에 사용되는 외부 에너지원 중에서, 초음파는^{(5),(6)} 사용이 편리하고 혼합 성능이 우수하므로 최근에 많은 관심을 받고 있다.

본 논문에서는 초음파를 이용한 능동마이크로믹서에 대하여, 초음파를 발생시키는 압전소자의 특성, 초음파에 의한 혼합 원리와 가시화, 그리고 이들을 이용한 능동 마이크로믹서의 특성을 살펴보고자 한다.

2. 초음파의 혼합 특성

2.1 압전소자 특성

초음파를 발생시키는 압전소자는 전계를 가하면 변위가 발생하고, 반대로 힘을 가하면 전계가 발생하는 소자를 말한다. 이러한 압전효과는 1880년 프랑스의 Curie 형제에 의해, 역 압전효과는 1881년 Lippman에 의해 발견되었다. 그 후 1947년 미국의 Roberts가 BaTiO₃에서 압전성을, 1955년에는 영국의 Jaffe가 BaTiO₃의 성능을 훨씬 능가하는 PZT(PbZrTiO₃)를 발견하였다.

PZT는 Curie 온도(T_c) 이상에서 cubic 구조를 갖고 전기쌍극자 모멘트(electric dipole moment)를 갖지 않지만, T_c 이하의 온도에서는 Zr/Ti 이온의 중심이동에 의하여 방향성을 갖게 되어 결정격자가 perovskite 구조로 변화되어 전기쌍극자를 형성한다⁽⁷⁾. 이러한 전기쌍극자는 일반적인 세라믹재료에서 random하게 배열되어 있어 전체적인 전기쌍극자는 zero 이므로, PZT와 같은 압전재료를 이용하여 초음파를 발생하기 위해서는 Curie 온도 부근에서 큰 전기장을 가하여 domain dipole들을 단일 방향으로 정렬시키는 분극처리(poling)를 필요로 한다.

분극시킨 압전재료에 전기장을 가하면 변위가 발생

* 한국기계연구원, 에너지기체연구원
E-mail: pwheo@kimm.re.kr

하게 되는데, 이 때의 관계식은 식(1)과 같다.

$$S = s^E T + d_e E \quad (1)$$

$$D = d T + \epsilon^T E$$

여기서, S 는 mechanical strain, D 는 electric displacement factor, T 는 mechanical stress, E 는 electric field strength를 의미한다. 그리고 s 는 elastic compliance constant, d 는 piezoelectric strain constant, ϵ 는 dielectric permittivity를 말하며, 이들은 압전재료의 물성에 따른다. 식(1)에서 s^E 는 E 가 상수일 때의 elastic compliance constant를, ϵ^T 는 T 가 상수일 때의 dielectric permittivity를 나타낸다.

2.2 혼합 원리

Monnier 등⁽⁸⁾은 초음파에 의한 분자단위의 마이크로 믹싱에 대해 연구하였다. 초음파에 의한 마이크로 믹싱의 원리는 Fig. 1과 같다.

PZT에 의해 발생된 초음파가 유체에 방사되면 주기적으로 음압의 세기가 변화하면서 전방으로 전달된다(t_1). 이 때, 초음파가 전달되는 간격과 각 지점에서 음압의 세기는 인가되는 구동신호의 주파수와 인가 전압에 의존한다. 전방부에서는 회전력에 의한 소용돌

이 현상이 발생되면서(t_2) 좌우로 펼쳐지게 되고(t_3), 이렇게 펼쳐진 파는(t_4) 앞에서와 같은 원리에 의해 소용돌이 현상이(t_5) 다시 일어나면서 유체의 접촉면을 넓힌다. 이런 과정이 반복됨에 따라 아주 짧은 시간에 혼합 효과가 나타나게 된다.

2.3 혼합 과정의 가시화

혼합 과정의 가시화를 위해, PZT를 압전소자의 재료로 사용하여 정지된 상태의 시료를 혼합하는 batch type 실험장치를 제작하였다⁽⁹⁾. Fig. 2에 보이는 바와 같이 맨 아래에 150 μ m 두께의 압전소자가 있고, 그 위에 150 μ m 두께의 에폭시가 부착되며, 다시 그 위에 10 mm \times 7 mm \times 10 mm 크기의 챔버가 놓인다. 챔버의 위쪽은 개방되어 있으며, 여기로 시료를 공급한다.

압전소자의 주파수에 따른 임피던스 값을 임피던스 측정기로 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 저주파수에서는 임피던스가 크므로 본 연구에서는 300 kHz를 사용하였으며, 이 때의 임피던스 값은 233.7 Ω 이다.

시료로서는 NaOH와 페놀프탈렌을 사용하였다. 페놀프탈렌은 무색을 띤 지시약으로서 검사하고자 하는 시료의 특성이 산성인지 염기성인지 알아보기 위해 일반적으로 사용된다. 즉 pH가 8보다 크면 시료는 불

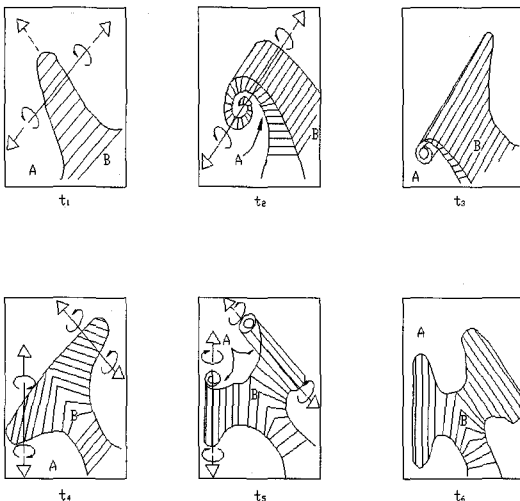


Fig. 1 초음파에 의한 마이크로혼합 과정

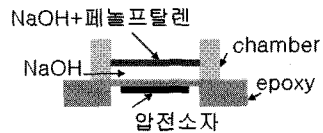


Fig. 2 혼합 가시화 실험소자의 구조

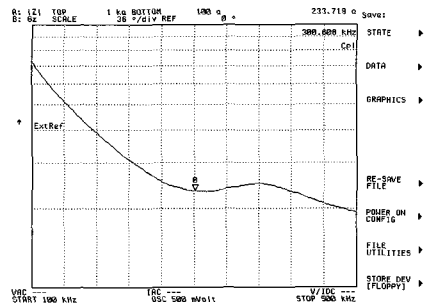


Fig. 3 임피던스 특성

초음파를 이용한 능동 마이크로믹서

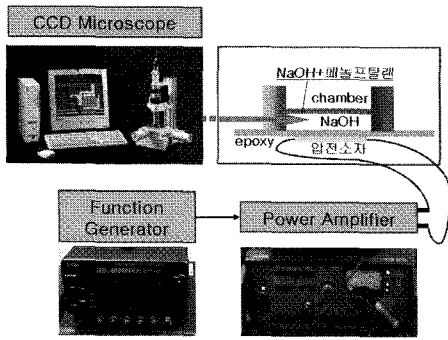


Fig. 4 혼합상태 가시화용 실험장치

은 색으로 변화하여 염기성임을, 그렇지 않으면 색상이 변하지 않고 무색을 띄므로 이 물질은 산성임을 알 수 있다. 본 연구에서는 먼저 NaOH로 챔버의 절반을 채운 후에 페놀프탈렌을 한 방울 떨어뜨린다. 그러면 시료의 위쪽만 붉은 색을 띄고 나머지 아래층은 무색이 된다. 이런 상태에서 초음파를 방사하면 매질의 색상이 시간에 따라 변화한다. 압전소자에 공급되는 전압으로서 주파수는 300 kHz이고 진폭은 각각 40 Vp-p, 50 Vp-p, 60 Vp-p 크기를 갖는 정현파를 사용하였다. 여기서 시료의 혼합 상태를 측면 벽을 통해 쉽게 측정하기 위해 시료를 챔버에서 5 mm 높이까지 채우고 가시화하였다. 그러나 이를 마이크로 장치로 사용할 때는 압전소자 및 다이아프램의 형상과 크기는 동일하게 하되, 챔버의 높이만 수십 μm 로 작게 한다. 실제로 $\mu\text{-TAS}$ 등의 진단기에 적용할 때는 시료가 연속적으로 공급되어 혼합된다는 점에서 위의 혼합 가시화 과정과 차이가 있다. 하지만 사용되는 능동믹서의 상대적인 성능 차이는 동등하므로, 정지상태에서 성능이 우수한 능동믹서가 연속적인 상태에서 우수한 능동믹서가 된다고 간주할 수 있다.

초음파가 가해지는 시간에 따라 능동믹서 챔버 내에서 시료의 색상이 변화하는 것을 관찰하기 위해 가시화 실험장치를 Fig. 4와 같이 주파수 발생기, 전력 증폭기, CCD 그리고 능동믹서로 구성하였다. 주파수 발생기는 압전소자에 요구되는 주파수의 정현파 신호를 발생시키고, 이 신호는 전력증폭기에서 필요한 전력만큼 증폭되어 압전소자로 공급된다. 챔버 내의 NaOH와 페놀프탈렌은 전술한 바와 같이 초기에 위층은 붉은 색 그리고 아래층은 무색을 나타내다가 초음파 방사가 진행되면서 점차 전체가 붉은 색으로 변화한다. 이와 같은 색상변화는 CCD를 이용하여 영상

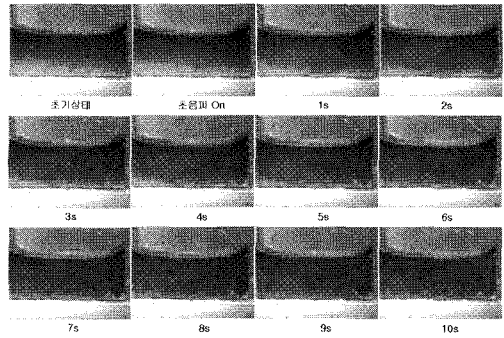


Fig. 5 중간 전압 (50Vp-p) 초음파 방사실험

신호로 변환한 후, 저장하였다.

위층은 붉은 색 그리고 아래층은 무색의 상태로 실험조건을 만든 후에, 50 Vp-p 진폭과 300 kHz 주파수를 갖는 초음파를 방사하면서 챔버 내의 색상 변화를 측정하였다. Fig. 5에 나타나 있듯이 시간에 따라 챔버 내의 전체가 붉은 색으로 변화하였고, 이는 초음파에 의해 혼합이 잘 일어남을 의미한다. 가운데 부분부터 변화가 일어나고, 점차 측면으로 진행됨을 알 수 있다.

혼합이 진행되는 상태를 정량화하기 위해 Fig.

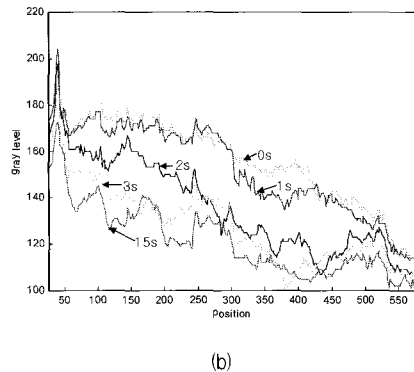
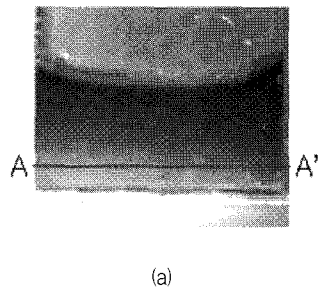


Fig. 6 시간에 따른 명암도 : (a) 측정지점 and (b) 명암도

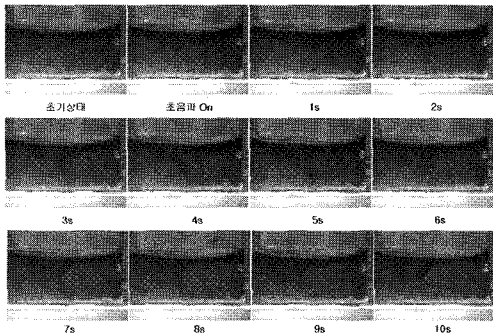


Fig. 7 저 전압 (40 Vp-p) 초음파 방사실험

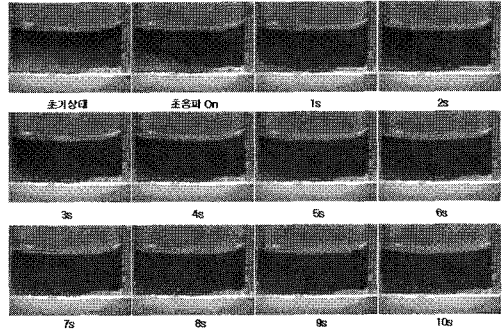


Fig. 8 고 전압 (60Vp-p) 초음파 방사실험

6(a)의 A-A' 위치에서 명암도의 변화를 계산한 것이 Fig. 6(b)에 있다. 수평축은 측정지점을 나타내고 수직축은 명암도(gray level)를 나타낸다. 명암도의 값이 0이면 검은 색을 나타내고, 255이면 흰색을 나타낸다. 즉 명암도 값이 줄어든다면 색상이 짙어짐을 나타낸다. 0 s, 1 s, 2 s, 15 s의 시간이 경과함에 따라 명암도 값이 가운데 부분에서 초기에 160 이상인 값이 120 이하로 줄어드는 것을 그림에서 알 수 있으며, 이것은 혼합이 효과적으로 진행됨을 나타낸다.

인가전압이 혼합에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 7에 보이고 있듯이 저 전압을 인가한 경우에 대한 혼합의 진행상태를 가시화하였다. 저 전압을 인가하면 혼합 속도가 감소하는 것으로 나타났으며, 진행 속도가 느리기 때문에 혼합의 과정을 보다 자세히 관찰할 수 있다. 초음파는 압전소자의 가운데 부분부터 붉은 색으로 변화시키면서, 회오리와 같은 형상으로 측면으로 점차 진행한다. 측면방향만 비교하면 우측보다는 좌측이 먼저 붉은 색으로 진행되고 있다.

고전압을 인가하면 Fig. 8에 보이는 바와 같이 혼합의 진행 시간이 더욱 짧아짐을 알 수 있다. 따라서

인가전압을 조절함으로써 쉽게 혼합속도를 변화시키는 것이 가능하다.

이러한 초음파 방사시간에 따른 혼합의 정도는 같은 능동믹서에서도 압전소자와 다이아프램 재료의 접합상태, 두께, 두께의 균일도, 평행정도 등에 따라 다르게 나타난다. 능동믹서의 성능개선을 위해 다른 압전재료나 다이아프램 재료를 사용하는 경우, 위와 같은 방법으로 성능에 관한 객관적인 데이터를 제시하는 것이 가능하다. 능동믹서를 실제로 biochip이나 μ -TAS 등의 진단기기에 적용하고자 할 때, 혼합 상태에 대한 정확한 자료를 제시함으로써 진단기의 성능개선에 공헌할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 초음파 이용 능동마이크로믹서의 특성

3.1 좌우형 능동 마이크로믹서

좌우형 능동 마이크로믹서⁽⁶⁾는 Fig. 9와 같이 2개의 유입구와 1개의 유출구를 가진다. 혼합 챔버의 아래에 압전소자가 부착되어 초음파를 방사하며, 챔버의



Fig. 9 좌우형 능동 마이크로믹서

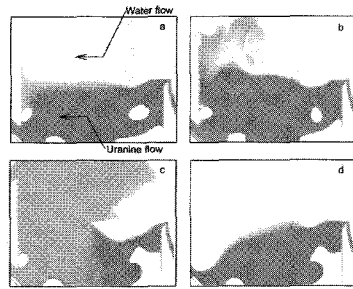


Fig. 10 실험 결과

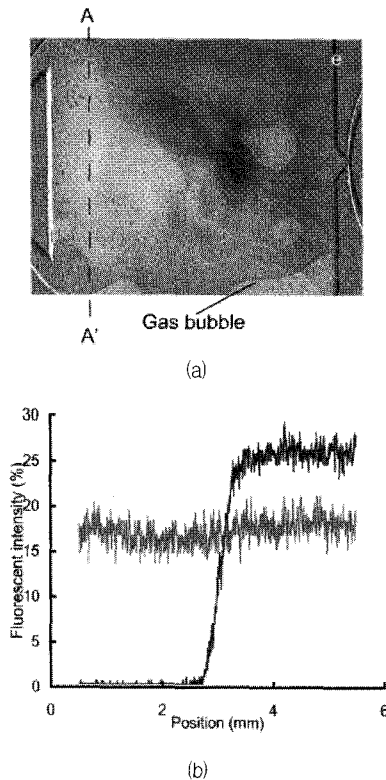


Fig. 11 명암도의 정량화 : (a) 측정 지점 and (b) 측정 결과

크기는 6 mm(L) × 6 mm(W) × 0.06 mm(H)이다.

물과 Uranine의 혼합에 대한 실험결과는 Fig. 10에 있다. 초음파를 방사하기 전에는 챔버 내의 층류 현상에 의해 Fig. 10(a)와 같이 두 시료가 혼합되지 않은 채로 유지된다. 초음파를 켜면 Fig. 10(b)와 같이 유출구 쪽에서 먼저 혼합되면서 Fig. 10(c)와 같이 챔버 전체로 퍼져 나간다. 초음파를 다시 꺼버리면 Fig. 10(d)와 같이 순식간에 초기 상태처럼 층류 현상을 나타내므로, 초음파는 혼합에 영향을 주는 효과적인 인자임을 알 수 있다.

혼합 상태를 정량화하기 위해 Fig. 11(a)와 같이 혼합 챔버의 유출구 부근의 A-A'선에 대해 명암도를 조사하였다. 조사한 결과, 초음파를 켜기 전에는 3 mm 지점을 전후하여 명암도 값이 아주 작은 값에서 아주 큰 값으로 급격하게 변하고 있으며(Fig. 11(b)의 검은 선), 이것은 층류 현상으로서 혼합이 되지 않은 상태를 나타낸다. 초음파를 켜 후(Fig. 11(b)의 회색선)에는 챔버의 길이 방향으로 비교적 균일한 명

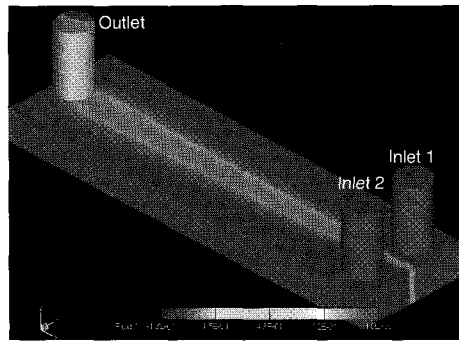


Fig. 12 좌우형 배치를 갖는 유체

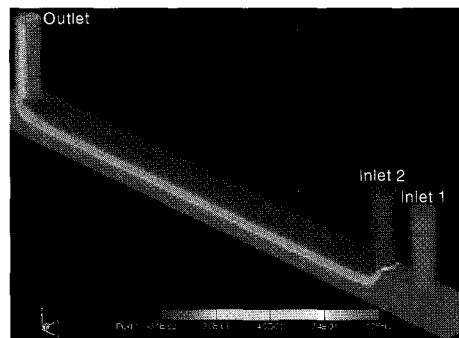


Fig. 13 상하형 배치를 갖는 유체

암도를 갖는 것으로 나타나, 균일하게 혼합되었음을 의미한다.

3.2 직렬 유입형 능동 마이크로믹서

혼합하고자 하는 시료가 챔버 내에서 어떻게 배치되느냐에 따라 믹서의 성능이 크게 좌우되며, 시료의 배치는 믹서의 입, 출구의 크기 및 위치는 바꿈으로서 간단하게 조절될 수 있다. 층류 유동의 가정 하에서 CoventorWare (Coventor Inc.)를 이용하여 입구의 크기 및 위치가 시료의 배치에 미치는 영향을 살펴본 결과, 서로 다른 시료가 주입되는 입구들(유입구 1, 2)이 Fig. 12와 같이 좌우로 배치되면 혼합 챔버 내에서 시료들이 좌우로 배치되는 것으로 나타났다. (좌우형)

또한 Fig. 13과 같이 입구들(유입구 1, 2)을 상류, 하류에 직렬로 배치하면 혼합 챔버 내에서 시료들이 상하로 배치되는 것으로 나타났다. (직렬 유입형) 단, 하류에 위치하는 유입구 2의 직경은 유로의 폭과

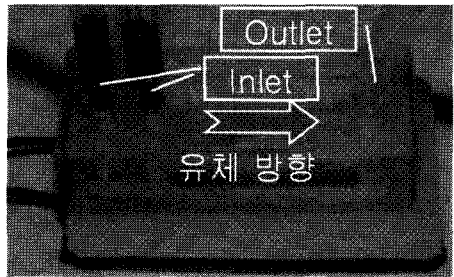
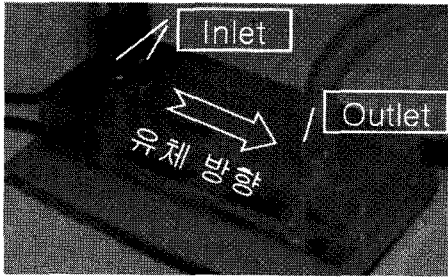


Fig. 14 제작된 능동믹서 : (a) 좌우형 능동믹서 and (b) 직렬 유입형 능동믹서

반드시 같아야 한다.

좌우형과 직렬 유입형 능동믹서의 혼합 과정을 조사하기 위해 Fig. 14와 같이 능동믹서를 제작하였다. Fig. 14(a)는 좌우형 능동믹서이고, Fig. 13(b)는 직렬 유입형 능동믹서이다. Fig. 13(b)에서 채널의 폭은 5 mm, 두께는 1 mm이다. 혼합 챔버 아래 면에는 두께 150 μm 인 PZT를 부착하여 두 시료 경계면에 수직하(아래에서 위) 방향으로 초음파가 방사되도록 하였다. 필요에 따라 채널의 두께는 마이크로 단위로 쉽게 제작이 가능하며, 채널이 두께가 작아지면 혼합시간을 줄이는데 유리하게 작용된다.

좌우형 능동믹서와 직렬 유입형 능동믹서의 성능실험을 위해 동일한 유속에 대해 시간의 경과에 따른 혼합현상을 CCD로 관찰하였다. 출구 쪽의 색상을 살펴보면, Figs. 15와 16에 나타난 바와 같이, 직렬 유입형 능동믹서에서 붉은 색이 넓은 면적에 대해 고르게 분포되어 혼합이 양호함을 알 수 있다.

색상의 분포를 좀 더 자세히 분석하기 위해 Fig.

17과 같이 압전소자 출구 지점에 대해 명암도를 측정하였으며, 명암도의 평균과 표준편차는 Table 1에 있다. 직렬 유입형의 평균과 표준편차가 좌우형 보다 낮은 것으로 나타났다. 낮은 평균은 혼합이 상대적으로 우수하며, 낮은 표준편차는 평균을 중심으로 고르게 혼합되었음을 의미한다.

4. 맺음말

초음파를 이용한 능동 마이크로믹서의 기본 원리와 2가지 능동 마이크로믹서의 혼합 특성에 대하여 검토하였다. 마이크로 믹서의 혼합 효율을 높이기 위해, 대체적으로 접촉 면적을 늘리거나(수동형), 난류를 발생시키는(능동형) 방향으로 연구가 진행되고 있다. 초음파를 이용한 능동 마이크로믹서는 혼합 효율과 혼합된 시료의 균일성을 높이는데 효과적이다. 다만, 수동 믹서에 비해 구동 장치가 복잡하고 소형화에 제약이 따른다. 그리고 이를 실용화하기 위해서는 구동전압의 감소

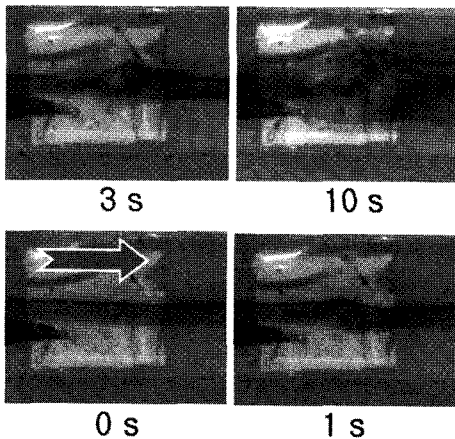


Fig. 15 좌우형 능동믹서의 혼합 상태에 대한 가시화

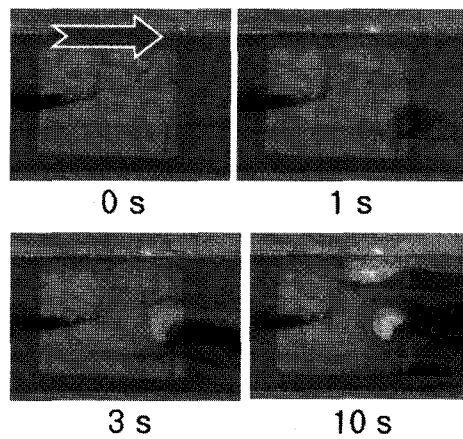


Fig. 16 직렬 유입형 능동믹서의 혼합 상태에 대한 가시화

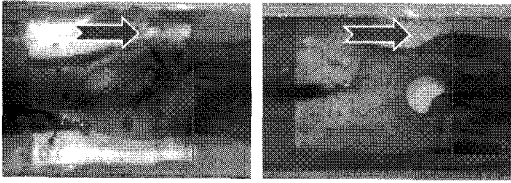


Fig. 17 명암도 측정을 위한 측정 지점

와 강한 초음파를 사용할 때의 바이오 시료의 손상을 억제시키는 연구가 추가적으로 수행되어야 한다.

참고문헌

- (1) N. T. Nguyen and S.T., 2002, *Wetley, Fundamentals and Applications of Microfluidics*.
- (2) R. E. Oosterbroek and A. van den Gerg, 2003, *Lab-on-a-chip: Miniaturized system for bio(chemical) analysis and synthesis*.
- (3) R. Miyake, T. S. J. Lammerink, M. Elwenspoek and J. H. J. Fluitman, 1993, "Micro mixer with fast diffusion," *Proc. MEMS'93, 6th IEEE Int. Workshop Micro Electromechanical System* (San Diego, CA), pp. 248~253.
- (4) A. D. Stroock, S. K. W. Dertinger, A. Ajdari, I. Mezic, H. A. Stone and G. M. Whitesides, 2002, "Chaotic mixer for microchannels," *Science* 295, pp. 647~651.
- (5) P. Woias, K. Hauser and E. Yacoub-George, 2000, "An active silicon micromixer for μ TAS Applications," *Micro Total Analysis Systems 2000*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 277~282.
- (6) Z. Yang, S. Matsumoto, H. Goto, M. Matsumoto and R. Maeda, 2001, "Ultrasonic micromixer for microfluidic systems," *Sensors Actuators A* 93, pp. 266~272.
- (7) 전용배, 2001, MEMS 소자의 응용을 위한 실리콘 기판 위에 형성된 PZT 후막의 제조 및 평가.
- (8) H. Monnier, A. M. Wilhem and H. Delmas, 1999, "Influence of ultrasound on mixing on the molecular scale for water and viscous liquids," *Ultrasonics Sonochemistry* 6, pp. 67~74.
- (9) 허필우, 고헌식, 윤의수, 2005, "마이크로믹서에의 응용을 위한 batch type 초음파믹서의 혼합 상태 가시화," *한국센서학회*, Vol. 14, No. 1, pp. 47~51.

Table 1 10초 경과 후 좌우형과 직렬 유입형 능동믹서의 명암도 비교

Type	Min.	Max.	Mean	Standard Deviation
좌우형	47	203	97.615	40.889
직렬 유입형	49	163	94.311	22.665