

소노루미네센스를 이용한 액체정합층의 고출력 초음파에너지 전달특성 평가

Evaluation of high power ultrasonic energy transmission characteristics of a liquid matching layer by using sonoluminescence

김정순,¹ 김해운,² 손진영,³ 김무준^{2†}

(Jungsoon Kim,¹ Haeun Kim,² Jinyoung Son,³ and Moojoon Kim^{2†})

¹동명대학교 전기공학과, ²부경대학교 물리학과, ³랩유엔디

(Received June 30, 2021; revised July 30, 2021; accepted August 19, 2021)

초 록: 초음파 분산에 있어서 초음파의 방사면이 시료에 직접 닿는 것을 피하기 위해 액체시료는 유리용기에 의해 분리되어 음향매질에 의해 초음파 에너지를 받는다. 이와 같이 다층구조로 이루어진 음향시스템에서 초음파에너지의 전달효율은 중요한 요소이다. 본 연구에서는 다층구조로 이루어진 음향시스템에 있어서 프로필렌글리콜 용액을 액체정합층으로 사용하여 초음파에너지 전달효율을 개선하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서는 란주반형 초음파 트랜스듀서와 루미놀용액과의 사이에 프로필렌글리콜 용액을 액체정합층 매질로 채우고, 초음파트랜스듀서로부터 방사되는 강력초음파의 비선형현상에 의해 발광되는 루미놀용액의 발광정도를 광전증폭관을 이용하여 관측하여 루미놀용액으로의 초음파에너지 전달 효율을 조사하였다. 프로필렌글리콜 농도변화에 따른 초음파에너지 전달정도를 측정하였고, 그 결과 프로필렌글리콜 용액의 농도가 증가함에 따라 정합효과는 증가하는 반면 음향감쇠가 증가함을 알 수 있었다. 이들 두 상충되는 조건이 절충되는 최적의 농도가 존재함을 확인할 수 있었으며, 프로필렌글리콜 용액의 최적 농도를 실험적으로 결정할 수 있었다.

핵심용어: 초음파에너지전달, 소노루미네센스, 음향정합, 광전증폭관, 루미놀

ABSTRACT: In the ultrasonic dispersion, in order to avoid direct contact of the radiation surface of ultrasonic transducers with a liquid sample, the liquid sample is separated by a glass container and it receives ultrasonic energy through an acoustic medium. The transmission efficiency of the ultrasonic energy in the multi-layered ultrasonic system is an important factor. In this study, we suggested a method that can improve the ultrasonic energy transfer efficiency by using a propylene glycol solution as a liquid matching layer in the multi-layered acoustic system. In this method, a propylene glycol solution was filled between the Langevin-type ultrasonic transducer and the luminol solution and the sonoluminescence phenomena in the luminol solution, which is caused by nonlinear effect of high power ultrasound radiated from the transducer, was examined by using a Photo Multiplier Tube (PMT). The transmission efficiency depending on the concentration of propylene glycol solution was observed, and we can see that as the concentration of the propylene glycol solution increased, the matching effect increased while the acoustic attenuation increased. It was confirmed that there is an optimal concentration compromised these two conflicting conditions, and the optimum concentration of the propylene glycol solution was determined experimentally.

Keywords: Ultrasonic energy transfer, Sonoluminescence, Acoustic matching, Photo multiplier tube, Luminol

PACS numbers: 43.58.Bh, 43.58.Fm

†Corresponding author: Moojoon Kim (kimmj@pknu.ac.kr)

Department of Physics, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-Gu, Busan 48513, Republic of Korea

(Tel: 82-51-629-5572, Fax: 82-51-629-5549)

“이 논문은 2020년도 추계 공동학술대회(한국음향학회, 한국음악지각인지학회)에서 발표하였던 논문임.”



Copyright©2021 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

최근 나노입자의 분산법 혹은 물과 기름과 같은 서로 다른 성질의 유체간 혼합법에 있어서 초음파를 적용하는 방법이 주목받고 있다.^[1-3] 기존의 초음파를 사용한 분산방식에는 초음파 균질기와 같이 초음파가 발생하는 프로브를 유체 시료에 직접 접촉하는 방식으로, 이는 프로브의 마모로 인하여 발생하는 이물질이 분산시료 내에 혼입될 수 있다는 단점이 있다.^[4-6] 이에 대해 초음파 세척기 및 최근 개발된 와류식 초음파 분산장치에서는 분산시료의 순도를 유지하기 위해서 분산시료를 별도의 시료용기에 넣어 초음파 트랜스듀서의 방사면으로부터 방사된 음향에너지가 물과 같은 음향전달매질을 통해 분산시료에 전달되도록 하는 비접촉식 방법을 적용하고 있다.^[7-10] 그러나 이러한 비접촉식 방법에는 금속 재질인 초음파 트랜스듀서의 방사면의 음향임피던스와 음파전달 매질인 물 및 액체분산시료의 음향임피던스와의 매우 큰 차이가 있어 음향에너지의 효율적인 전달이 어렵다.

따라서 본 연구에서는 다층구조로 구성된 음향매질층에서 초음파에너지 전달 효율을 증진시키기 위하여 프로필렌글리콜 용액을 액체정합층으로 사용하여 초음파에너지 전달효율을 개선하는 방법을 제안한다. 일반적으로 유체매질내의 음향에너지의 전달효율을 조사하기 위해서는 수중청음기가 사용된다. 그러나 음파의 비선형 효과를 이용한 강력초음파의 동력적 응용에 있어서는 수중청음기의 사용이 매우 제한적이다. 특히 분산장치와 같이 협소한 수조 내에서의 음장측정은 매우 어려우며 초음파트랜스듀서 표면에 의한 영향 또한 무시할 수 없다. 강력초음파의 비선형현상에 의한 초음파에너지를 가시화하는 방법으로 소노루미네센스 현상을 사용하기도 한다.^[11-13] 루미놀 용액에 방사된 강력초음파의 음향에너지는 음향 캐비테이션을 발생시키게 되고 이 캐비테이션이 붕괴될 때 발생하는 충격파는 루미놀에 작용하여 빛을 발산하게 되며 이때 발광의 빈도는 음향에너지에 비례한다. 이에 본 연구에서는 프로필렌글리콜 액체정합층에 의한 초음파에너지 전달효율 개선을 검증하기 위한 방법으로, 소노루미

네센스 현상을 적용하였고 소노루미네센스 현상에 의한 빛의 광도를 광전증폭관(Photo Multiplier Tube, PMT)을 활용하여 측정함으로써 액체정합층 매질을 투과하는 음향에너지의 전달효율을 평가한다. 또한 액체정합층으로 사용되는 프로필렌글리콜 용액의 농도변화에 따른 초음파에너지 전달효율을 검토하여 보다 높은 정합효과를 발휘하는 프로필렌글리콜 용액의 최적의 농도를 조사한다.

II. 실험방법

Fig. 1은 액체 정합층 매질로 사용할 프로필렌글리콜 용액의 농도변화에 따른 음향특성을 측정하기 위한 실험장치를 도식화한 것이다. 크기가 160 × 70 × 45 mm³인 아크릴 수조 용기에 원하는 농도의 프로필렌글리콜 용액을 채우고 송신용 초음파 트랜스듀서(Panametrics, A112S)로부터 10 MHz의 버스트 펄스를 방사한다. 송신용 트랜스듀서와 특성이 동일한 수신용 초음파 트랜스듀서는 슬라이더에 고정되어 있어 수신거리를 0.05 mm의 정확도로 제어 가능하다. 펄스의 수신 거리와 수신 시간을 측정하여 프로필렌글리콜 용액의 농도변화에 따른 음속을 측정할 수 있다.

한편, 음향감쇠 계수는 송신용 트랜스듀서와 수신용 초음파트랜스듀서 사이의 거리 l 을 변화시켜가며 수신거리에 따른 신호의 도달 시간 및 수신전압의 변화를 측정 후, Eq. (1)을 이용하여 도출할 수

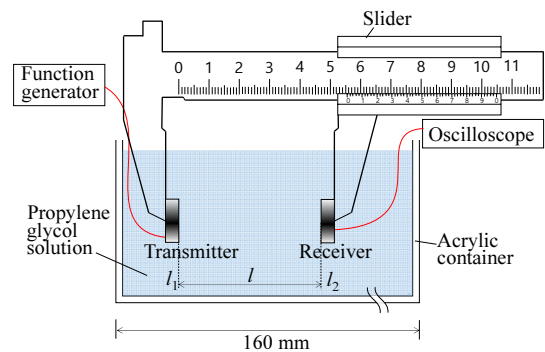


Fig. 1. (Color available online) Experimental setup for measurement of acoustic properties of propylene glycol solution.

Table 1. Acoustic properties of the propylene glycol solution with the change of concentration at 10 MHz.

wt%	c [m/s]	α [Np/m]	ρ [kg/m ³]	Z_a [Mrayl]
0	1486.3	5.8	998.00	1.483
5.0	1527.2	6.5	984.50	1.504
10.0	1559.6	6.7	985.60	1.537
20.0	1612.9	7.9	993.90	1.603
30.0	1666.7	9.6	1004.0	1.673
40.0	1694.9	12.6	1011.80	1.715
50.0	1705.9	17.3	1019.80	1.740
60.0	1697.2	18.9	1022.00	1.735

있다.^[14]

$$\alpha = \frac{\ln \frac{V_1}{V_2}}{\Delta l}, \quad (1)$$

여기서 Δl 은 수신용 트랜스듀서의 위치변화, V_1 및 V_2 는 각 수신 위치에 있어서의 수신 전압을 나타낸다. 본 연구에서는 수신용 트랜스듀서의 위치를 각각 $l_2 = 5.0$ mm와 $l_2 = 40.0$ mm인 두 경우로 두었고 (즉 $\Delta l = 35$ mm), 각 위치에서의 신호의 도달 시간 및 수신전압을 측정하였다. 프로필렌글리콜 용액은 증류수 2 L에 농도별 적정량의 프로필렌글리콜을 혼합하여 만들었다. 0 wt%~60 wt% 사이의 농도 변화를 갖는 프로필렌글리콜 용액에 대한 음속 및 음향 감쇠계수 등의 음향특성을 측정하여 결과를 표 1에 나타내었다. 농도가 0 wt%인 프로필렌글리콜 용액은 프로필렌글리콜이 혼합되지 않은 순수 증류수를 의미한다.

여기서 c 는 음속, α 는 감쇠계수, ρ 는 밀도, Z_a 는 음향임피던스를 각각 나타낸다. 이들 측정결과 중 음속과 감쇠계수의 결과를 Fig. 2에 그래프로 나타내어 프로필렌글리콜의 농도변화에 따른 음속과 감쇠계수의 변화경향을 가시화하였다. Fig. 2의 음향특성은 5회 반복 측정하여 얻어진 측정데이터를 평균하여 나타낸 값이다. 음속의 경우, 최대오차가 7 m/s, 최소 오차가 1.5 m/s로 매우 작게 나타났고, 감쇠계수의 경우 오차는 최대 2.7 Np/m, 최소 0.5 Np/m로 나타났다. 음향매질의 농도변화에 따른 음향특성은, 음속의 경

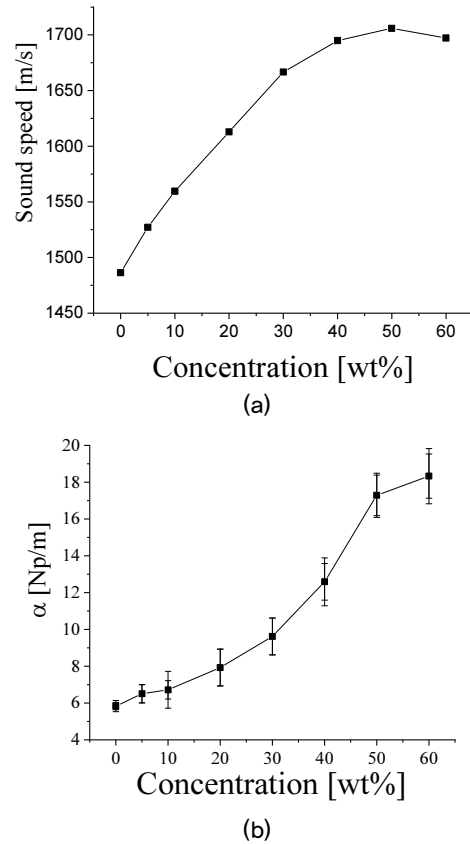


Fig. 2. Change of acoustic properties of propylene glycol solution depending on the concentration. (a) Sound speed and (b) acoustic attenuation.

우, 프로필렌글리콜 용액의 농도가 증가함에 따라 음속은 비례하여 증가하나 농도가 50 wt% 이상이 되면 약간 감소하는 경향을 보였다. 한편 감쇠계수의 경우는 프로필렌글리콜 용액의 농도가 0 wt%~50 wt%까지는 감쇠계수가 매우 급격하게 증가하는 반면, 음속이 감소되는 구간인 50 wt%~60 wt%에서는 감쇠계수의 증가가 완만해지는 경향을 보이고 있다. 이는 감쇠계수의 변화가 음속의 변화에 미치는 영향을 잘 보여주는 결과로, 기존의 많은 연구에서 알려진 결과들과도 일치함을 알 수 있다.^[15,16]

액체정합층 매질에 의한 음향에너지 전달 특성을 측정하기 위하여 Fig. 3에 보인 것과 같은 실험 장치를 구성하였다. 크기가 $115 \times 87 \times 104$ mm³인 아크릴 용기의 바닥에 구멍을 뚫고 방사면의 직경이 32 mm인 란주반형 초음파트랜스듀서를 고정한다. 이 아크릴 용기에 액체정합층 매질로 사용하는 프로필렌글리콜 용액을 채운다. 본 연구에서 사용된 프로필렌

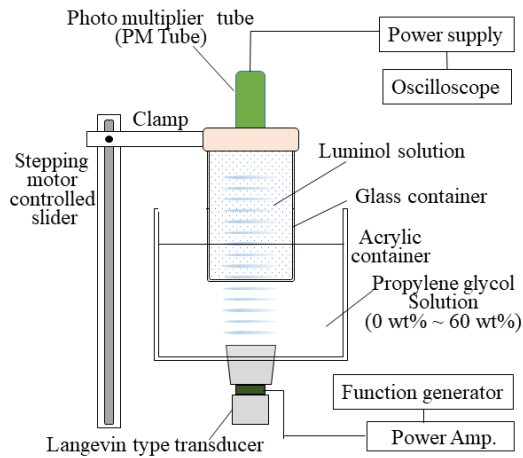


Fig. 3. (Color available online) Experimental setup for measurement of acoustic energy transfer characteristics.

글리콜 용액은 0 wt%~60 wt% 범위이다. 소노루미네선스를 이용한 초음파 에너지의 전달특성을 측정하기 위하여 증류수 1 L에 루미놀 분말 0.1 g과 탄산나트륨 0.05 g을 혼합하여 만든 루미놀용액을 만들어 두께 0.7 mm, 내경 60 mm인 유리용기에 채운 후, Fig. 3에 나타난 것과 같이, 프로필렌글리콜 용액으로 채워진 아크릴 용기 속에 위치시킨다. 이때 루미놀용액으로 채워진 유리용기의 덮개 부분에는 광전증폭관(Hamamatsu, H10722-110)을 설치하여, 초음파 캐비테이션에 의해 루미놀의 작용으로 발생하는 발광강도를 측정할 수 있도록 하였다. 관측된 전기신호를 통해 란주반형 초음파 트랜스듀서로부터 방사된 초음파 에너지가 프로필렌글리콜 액체정합층을 통한 전달정도를 관찰할 수 있다. 이때 란주반형 초음파트랜스듀서에는 52 kHz의 연속파를 인가하였다. 한편, 본 연구에서는 액체정합층으로 다양한 농도의 프로필렌글리콜 용액을 사용하는데, Table 1 및 Fig. 2의 결과에서 볼 수 있듯이, 프로필렌글리콜 용액의 농도가 변하면 음속이 달라져 동일한 주파수의 초음파를 방사한다고 할지라도 다양한 농도의 프로필렌글리콜 매질 내에서의 파장이 달라져 정재파의 형성거리는 달라진다. 따라서 루미놀용액을 채운 유리용기를 스텝핑 모터로 제어되는 슬라이더에 부착하여 일정한 속도(1.0 mm/s)로 유리용기와 트랜스듀서의 방사면과의 거리를 변화시켜가며 루미놀 용액

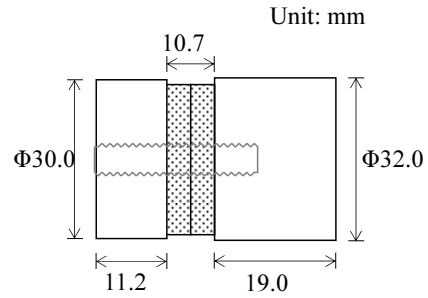


Fig. 4. Langevin-type ultrasonic transducer used in the experiment.

내의 광도 변화를 측정하였다. 실험에 사용된 란주반형 초음파 트랜스듀서를 Fig. 4에 나타내었다. 디스크형 압전세라믹 2장을 분극 방향이 서로 마주 보도록 적층하여 2개의 알루미늄 봉 사이에 삽입한 후 볼트로 체결한 구조이다. 란주반형 초음파 트랜스듀서로부터 방사되는 음향에너지를 조사하기 위하여, Eq. (2)를 이용하여 기본공진 모드에 있어서 물이 음향매질로 하였을 때의 전기음향변환효율 η_{ea} 을 측정하였다.^[17,18]

$$\eta_{ea} = \frac{|Y_{wf0}|}{G_{wf0}} \left(1 - \frac{|Y_{wf0}|}{|Y_{af0}|} \right), \quad (2)$$

여기서 각 파라미터는 다음과 같다.

- $|Y_{wf0}|$: 물이 음향매질일 때 공진주파수에서의 어드미턴스의 절댓값,
- G_{wf0} : 물이 음향매질일 때 공진주파수에서의 컨덕턴스,
- $|Y_{af0}|$: 매질이 없을 때 공진주파수에서의 어드미턴스의 절댓값.

Fig. 4의 란주반형 초음파 트랜스듀서를, Fig. 3에 나타난 것과 같이, 아크릴 용기의 바닥에 고정된 후, 아크릴 용기에 증류수를 채운 경우와 공기를 채운 경우에 대하여 공진주파수인 52 kHz 부근에서의 입력어드미턴스를 각각 측정하였다. Fig. 5는 측정된 입력어드미턴스의 실수부와 허수부에 대한 어드미턴스 로커스를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 Eq. (2)의 각 파라미터는 다음과 같이 측정될 수 있다.

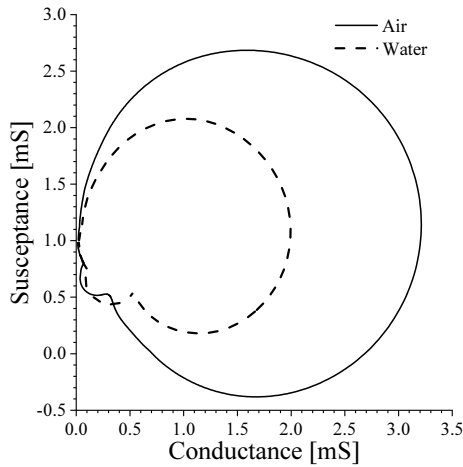


Fig. 5. Admittance loci of the Langevin-type ultrasonic transducer measured in air and water, respectively.

$$|Y_{af0}| = 3.2 \text{ mS}, G_{wf0} \approx |Y_{wf0}| = 2.0 \text{ mS}.$$

따라서 본 연구에서 사용한 란주반형 초음파트랜스듀서의 전기음향변환효율은 약 38%임을 확인하였다. 실험에서 증폭기로부터 란주반형 초음파트랜스듀서에 인가된 전기적 파워는 약 30 W이었으며 위에서 구한 전기음향변환효율을 적용하면 트랜스듀서로부터 프로필렌글리콜 용액에 방사되는 음향파워는 약 11.4 W임을 알 수 있다.

III. 실험결과 및 분석

액체정합층 매질에 의한 음향에너지 전달 특성을 조사하기 위하여 Fig. 3에 나타난 실험 장치를 이용하여 프로필렌글리콜의 농도변화에 따른 초음파에너지의 전달 특성을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 발광강도는 총 5회 반복 측정된 데이터 중 대표적인 데이터를 나타낸 것이다. 그림은 루미놀 용액이 채워진 유리용기의 바닥면과 초음파트랜스듀서의 방사면 사이의 거리, 즉 액체정합층 매질의 두께가 0 mm ~ 57 mm로 변하는 동안에 광전증폭관에 의해 측정된 전압의 변화를 나타낸 것이다.

프로필렌글리콜의 주어진 모든 농도에 대하여 액체정합층 매질의 두께변화에 따른 광전증폭관의 출력 전압은 특별한 규칙성은 갖지 않는 것으로 보인다. 이러한 불규칙성은 다음과 같은 이유로 추론된

다. 측정시스템에서, 유리용기 바닥면의 두께는 초음파 트랜스듀서로부터 방사되는 초음파의 파장에 비해 무시할 수 있을 정도로 얇다. 따라서 음파는 란주반형 초음파트랜스듀서의 방사면인 알루미늄, 프로필렌글리콜 용액, 루미놀 용액 등 세 개의 서로 다른 매질로 구성된 음향매질층을 투과하여 진행한다고 볼 수 있다. 일반적으로 서로 다른 세 개의 음향매질을 투과하는 평면파의 경우, 가운데 삽입된 매질의 두께가 변함에 따라 음향에너지의 투과 계수는 주기적인 변화를 갖게 된다. 그러나 본 연구에서 사용된 초음파 트랜스듀서의 방사면의 직경은, Fig. 4에 나타낸 것과 같이, 32 mm이며 이로부터 산출한 초음파 음장의 평면파 영역(근거리 음장영역)이 약 9 mm이므로 거리에 따른 음향 에너지의 입사율이 일정하지 않을 것으로 예측된다. 또한 9 mm 이후에서는 구면파 입사에 의한 불규칙한 경로 및 간섭 등에 의해 루미놀 용액에 전달되는 음향에너지의 변화는 주기성이 없는 불규칙한 결과를 초래하는 것으로 생각된다.

프로필렌글리콜 용액의 농도가 0 wt%(증류수)인 Fig. 6(a)의 결과를 보면, 액체정합층 매질의 두께 변화에 따라 광전증폭관에서 나타나는 전압의 변화는 0 V에서 약 1 V까지 불규칙한 변화를 나타내고 있으며 정합매질의 두께가 약 20 mm와 42 mm의 위치에서 각각 약 1 V의 피크를 보이고 있다. 이 경우는 트랜스듀서 방사면의 재질인 알루미늄의 음향임피던스와 증류수(액체정합층 매질)의 음향임피던스의 차이가 커서 모든 거리에 있어서 음향에너지의 전달율이 크지 않은 것으로 생각된다. 프로필렌글리콜 용액의 농도가 5 wt%인 Fig. 6(b)의 결과에서는, 표 1에서 확인할 수 있듯이, 정합매질의 음향임피던스의 증가로 인해 음향에너지의 전달율이 증가함을 확인할 수 있다. 특히 음속의 증가로 인해, Fig. 6(a)에서 약 20 mm 및 42 mm 부근에서 나타났던 전압의 피크값이 Fig. 6(b)에서는 각각 22 mm 및 44 mm 부근으로 이동하였으며 그 크기 또한 1.6 V 및 2.4 V로 각각 증가하였다. 프로필렌글리콜 용액의 농도가 10 wt%인 Fig. 6(c)의 결과에서는, 전압이 피크인 위치는 24 mm 및 46 mm로 이동하였으며 그 크기도 각각 2.5 V 및 3.8 V로 증가하였다. 그러나 프로필렌글리콜 용액의

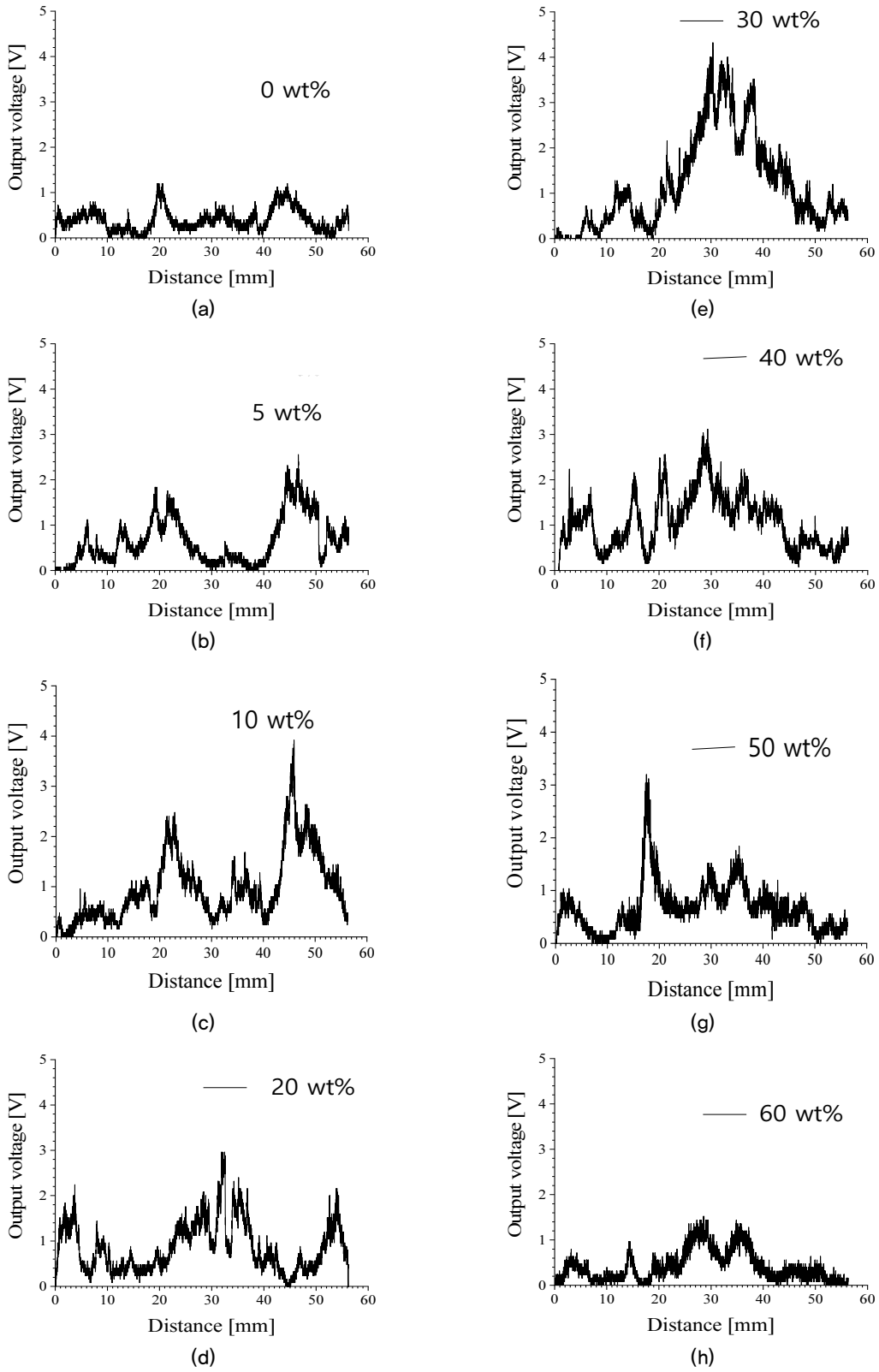


Fig. 6. Output voltage of photo multiplier tube depending on the concentration and the thickness of propylene glycol solution. These data show the characteristic of acoustic energy transfer. The percentage numbers in the figure refer to the concentration of propylene glycol solution.

농도가 20 wt%인 결과 Fig. 6(d)에서는, 왼쪽 피크의 위치는 약 32 mm로 이동하며 크기가 약 3 V로 증가하는 반면 오른쪽 피크는 측정 범위에서는 나타나지 않았다. Fig. 6(e)에 나타난 프로필렌글리콜 용액의 농도가 30 wt%일 때의 결과에서는 전압의 피크값이 더욱 커져 약 4.5 V까지 증가하였으며 비교적 넓은 영역에 걸쳐 높은 전압을 나타내고 있다. 이 결과는 프로필렌글리콜 용액의 음향정합효과에 의해 음향 에너지의 전달이 효율적으로 이루어지고 있음을 나타낸다고 볼 수 있다. Fig. 6(f~h)에서 볼 수 있듯이, 프로필렌글리콜 용액의 농도가 40 wt% 이상으로 높아지면, 음향에너지 전달의 효과는 떨어져 광전증폭관의 출력 전압은 감소하는 경향을 보인다. 이것은, 표 1에서도 확인할 수 있듯이, 음향임피던스의 값은 더욱 증가하나 음향감쇠의 효과가 커져 오히려 루미놀 용액으로의 음향에너지 전달이 감소하므로 초음파 캐비테이션에 의한 루미놀용액의 발광이 약화되며 이로 인하여 광전증폭관에 의한 수신전압이 떨어지기 때문으로 생각된다.

이상의 결과로부터 란주반형 초음파 트랜스듀서의 방사면과 루미놀용액과의 사이에 채워진 액체정합층 매질인 프로필렌글리콜 용액의 농도변화에 따른 음향에너지 전달효율은 주어진 정합매질의 두께 범위에서 농도가 30 wt%이고 두께가 약 30 mm일 때 가장 높은 피크값을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 측정에 있어서 액체정합층 매질의 두께에 따른 광전증폭관의 출력 전압의 변화가 매우 불규칙해 특정 두께에서의 음향전달효율을 평가하는 것은 용이하지 않았다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 본 연구에서는 각각의 액체정합층 매질에 대해 광전증폭관의 출력 전압을 두께에 대하여 적분값(Vmm)을 구하여 음향에너지 전달효율을 평가하였다.

Fig. 7은 프로필렌글리콜 용액의 농도변화에 따른 그 적분값을 나타낸 것이다. 발광강도 5회 반복 측정하여 얻어진 측정데이터의 적분값의 평균을 취한 결과로 에러바를 함께 나타내었다. 에러바의 오차는 최대 6 Vmm, 최소 1 Vmm 였다. 이 결과를 보면 프로필렌글리콜 용액의 농도가 30 wt%까지는 적분값이 증가하다가 30 wt% 이후로는 다시 감소하는 경향을

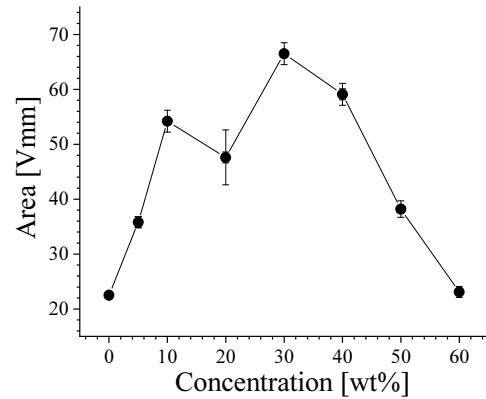


Fig. 7. The integration value of the output voltage of the photo multiplier tube to evaluate the acoustic energy transfer efficiency depending on the concentration of propylene glycol solution.

보이고 있다. 이는 상술한 바와 같이 농도의 증가에 따른 음향임피던스의 증가로 인해 트랜스듀서와 루미놀용액과의 사이에서 음향임피던스의 정합효과가 개선됨을 나타내는 반면, 30 wt% 이상에서는 프로필렌글리콜 용액의 음향감쇠 증가로 인한 음향에너지 전달 효율의 저하에 의한 것으로 생각된다.

VI. 결 론

본 연구에서는 초음파 분산장치에 있어서 고강도 초음파의 유체매질 내에서의 비선형현상을 사용하는 경우, 음향에너지의 전달효율을 개선하는 방법으로 액체정합층 매질의 적용가능성을 검토하였다. 음향에너지의 전달효율에 대한 평가방법으로, Fig. 3의 측정시스템에서 유리용기의 수용액으로 루미놀 용액을 사용함으로써 액체정합층 매질을 투과하여 유리용기 속으로 전달된 음향에너지에 의해 발생하는 소노루미네센스 현상을 적용하였다. 초음파캐비테이션의 발생빈도는 빛의 세기로 변환되며 이 빛의 세기를 광전증폭관을 이용하여 관찰함으로써 프로필렌글리콜 정합층 매질에 의한 음향에너지 전달효율을 평가하는 방법을 제안하였다. 란주반형 초음파 트랜스듀서로부터 방사되는 초음파가 다양한 농도의 프로필렌글리콜 매질층을 투과하여 유리용기에 들어있는 루미놀용액에 전달될 때 음향에너지의 변화를 측정하였다. 그 결과 0 wt%~60 wt% 범위내의

농도를 갖는 프로필렌글리콜 용액에 있어서 30 wt%의 농도를 갖는 용액을 액체정합층 매질로 사용한 경우가 음향에너지의 전달효율이 가장 컸으며, 0 wt%(물)에 비해 약 2.5배 정도 초음파에너지 전달효율이 증가함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안된 루미놀용액 및 광전증폭관을 활용하는 방법은 수증침습기와 같이 음향센서를 직접 수용액에 넣지 않아도 되므로 비접촉 측정이 가능하고 음향센서에 의한 음장의 교란을 막을 수 있으며, 강한 음향강도로 야기되는 음향센서의 파손 및 감도의 포화 현상을 극복할 수 있다는 장점이 있다. 또한 연구결과로부터 강력초음파의 활용분야에 있어서 음향에너지의 전달효율의 개선을 위해 유체정합층 매질의 사용가능성을 확인할 수 있었으며 그 비접촉식 평가방법을 제안할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1F1A1062399).

References

1. K. Sato, J. Li, H. Kamiya, and T. Ishigaki, "Ultrasonic dispersion of TiO₂ nanoparticles in aqueous suspension," *J. Am. Ceram. Soc.* **91**, 2481-2487 (2008).
2. G. Caneba, C. Dutta, V. Agrawal, and M. Rao, "Novel ultrasonic dispersion of carbon nanotubes," *J. Miner. Mater. Char. Eng.* **9**, 165-181 (2010).
3. S. Chung, J. Leonard, I. Nettleship, J. Lee, Y. Soong, D. Martello, and M. Chyu, "Characterization of ZnO nanoparticle suspension in water : Effectiveness of ultrasonic dispersion," *Powder Technol.* **194**, 75-80 (2009).
4. C. Asada, K. Doi, C. Sasaki, and Y. Nakamura, "Efficient extraction of starch from microalgae using ultrasonic homogenizer and its conversion into ethanol by simultaneous saccharification and fermentation," *Natural Resources*, **3**, 175-179 (2012).
5. Z. Ambri A. Karim, D. Tee, M. Khan, and F. Hagos, "Investigation of water-in-biodiesel emulsion characteristics produced by ultrasonic homogenizer," *MATEC Web Conf.* **225**, 01012 (2018).
6. C. Pholnak, C. Sirisathikul, S. Danworaphong, and D. Harding, "Sonochemical synthesis of zinc oxide nanoparticles using an ultrasonic homogenizer," *Ferroelectrics*, **455**, 15-20 (2013).
7. T. Yamamoto, Y. Miyauchi, J. Motoyanagi, T. Fukushima, T. Aida, M. Kato, and S. Maruyama, "Improved bath sonication method for dispersion of individual single-walled carbon nanotubes using new triphenylene-based surfactant," *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 2000-2004 (2008).
8. M. Kim and J. Kim, "Nanoparticle dispersionizer by ultrasonic cavitation and streaming," *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 07LE03 (2018).
9. J. Kim, M. Kim, and M. Chu, "Dispersion effect of nanoparticle according to ultrasound exposure using focused ultrasound field," *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 07HE19 (2011).
10. J. Kim, M. Kim, K. Ha, and M. Chu, "Dispersion method using focused ultrasonic field," *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 07HE21 (2010).
11. J. Kim, M. Jo, K. Mun, M. Kim, K. Ha, and B. Jun, "Enhancement of ultrasonic sonoluminescence image using digital image processing" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **26**, 409-414 (2007).
12. M. Brenner, "Single-bubble sonoluminescence," *Rev. Mod. Phys.* **74**, 425-484 (2002).
13. B. P. Barber, C. C. Wu, R. Löfstedt, P. H. Roberts, and S. J. Putterman, "Sensitivity of sonoluminescence to experimental parameters," *Phys. Rev. Lett.* **72**, 1380-1383 (1994).
14. U. Kaatz, K. Lautscham, and M. Brai, "Acoustical absorption spectroscopy of liquids between 0.15 and 3000 MHz: II. Ultrasonic pulse transmission methods," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **21**, 98-103 (1988).
15. S. Garrett, *Understanding Acoustics 2nd Ed* (Springer, USA, 2020), Chap. 14.
16. H. Bass, L. Sutherland, A. Zuckerwar, D. Blackstock, and D. Hester, "Atmospheric absorption of sound: Further developments," *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 07HF13 (2015).
17. J. Kim, J. Kim, M. Kim, K. Ha, and A. Yamada, "Arrayed ultrasonic transducers on arc surface for plane wave synthesis," *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, 3061-3062 (2004).
18. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, New York, 2008), Chap. 12.

저자 약력

▶ 김 정 순 (Jungsoon Kim)



1996년 2월 : 부경대학교 물리학과 학사
 1999년 2월 : 부경대학교 대학원 음향진동 공학과 석사
 2002년 3월 : Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan 공학박사
 2006년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 전기공학과 교수
 <관심분야> 초음파 영상, 비선형음향, 초음파 분산, 의용 초음파

▶ 김 해 운 (Haeun Kim)



2001년 8월 : 목원대학교 응용화학공학과 학사
 2009년 8월 : 고려대학교 화공생명공학과 석사
 2020년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 물리학과 박사과정
 <관심분야> 초음파 분산, 초음파 유화, 초음파 변환기

▶ 손 진 영 (Jinyoung Son)



1986년 2월 : 부경대학교 응용물리학과 학사
 2001년 3월 : University of Tokyo, Japan 이학박사
 2020년 12월 ~ 현재 : 랩유앤디 대표
 <관심분야> 초음파 분산, 초음파 유화, 초음파 변환기

▶ 김 무 준 (Moojoon Kim)



1985년 2월 : 부경대학교 응용물리학과 학사
 1990년 2월 : 부경대학교 대학원 응용물리학과 석사
 1994년 3월 : Tohoku University, Japan 공학박사
 1995년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 물리학과 교수
 <관심분야> 초음파 트랜스듀서, 비선형음향, 초음파 분산, 수중음향