

디지털 영상처리를 이용한 초음파 소노루미네센스 이미지 개선

Enhancement of Ultrasonic Sonoluminescence Image Using Digital Image Processing

김 정 순*, 조 미 선**, 문 관 호**, 김 무 준**, 하 강 렬**, 전 병 두***
(Jung-Soon Kim*, Mi-Sun Jo**, Kwan-Ho Mun**, Moo-Joon Kim**,
Kang-Lyeol Ha**, Byung-Doo Jun***)

*동명대학교, **부경대학교, ***LG Innotek Co., R&D

(접수일자: 2007년 7월 16일; 수정일자: 2007년 9월 11일; 채택일자: 2007년 9월 11일)

소노루미네센스를 이용한 음향가시화법에 관한 연구가 많이 수행되었음에도 불구하고 그 응용사례를 찾기 힘든 것은 소노루미네센스 현상이 임계음압 이상에서만 나타난다는 단점 때문이다. 최근 개발된 고감도 디지털 카메라는 큰 메모리 용량과 높은 해상도를 이용하여 육안으로 관측하기 힘든 미약한 빛의 영상에 대해서도 그 디지털 데이터를 취득할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 방사음압에 대한 소노루미네센스 현상의 발광 강도 변화를 조사하여 이 결과로부터 방사음압에 따른 강도변화를 선형화시키는 역함수의 형태를 구하였다. 이 역함수의 형태로부터 매칭함수의 형태를 예측할 수 있었고 이를 소노루미네센스 현상으로부터 얻어진 디지털 영상데이터에 적용한 결과 영상데이터의 히스토그램의 분포를 적절히 제어하여 비교적 약한 음향강도에 의해 생성되는 소노루미네센스의 영상을 개선시킬 수 있었다.

핵심용어: 소노루미네센스, 디지털 영상처리, 매칭함수, 음향 가시화

투고분야: 초음파 및 탄성파분야 (4,3)

In spite of many studies of the acoustic field visualization by using sonoluminescence phenomena, the visualization method has not been used widely because it needs high acoustic intensity to get the luminescence intensity enough to observe. Recently, the digital camera with high resolution and big memory makes it possible to get the digital image data even though the brightness of the image is too weak to observe with naked eyes. In this study we investigated the variation of sonoluminescence intensity with the acoustic intensity from an ultrasonic transducer. From this result, the inverse function, which makes the tendency of the variation to linear, was obtained. Using the order of the inverse function, we can expect a matching function. Applying the matching function to digital image data, the distribution of the histogram could be controlled appropriately and the image from relatively weak acoustic intensity could be enhanced by the method.

Key words: Sonoluminescence, Digital image processing, Matching function, Visualization of acoustic field

ASK subject classification: Ultrasonic and Elastic Waves (4,3)

I. 서론

음파의 방사특성을 가시화 하는 방법으로는 하이드로폰 (Hydrophone)을 이용하여 음장 영역의 음압분포를 직접 측정하여 도시화하는 방법이 일반적이다. [1-3] 이

방법은 정량적인 측정치를 얻을 수 있는 반면 고가의 장비와 오랜 측정 시간이 요구된다는 단점을 가지고 있다.

비교적 간단하게 광학적으로 음파를 가시화하는 방법으로 수중에 높은 음압의 초음파를 방사하여 소노루미네센스 (Sonoluminescence) 현상에 의한 발광 현상을 이용하는 방법이 있다. 이러한 소노루미네센스 현상을 이용한 음의 가시화법은 적은 비용과 간단한 측정법으로 음향의 방사특성을 알 수 있다는 장점 때문에 많은 연구가 진행되어왔다. [4-7] 그러나 소노루미네센스 현상은 임계음압 이상에서만 발생하기 때문에 상대적으로 약한 음장을 관측하기에는 적절치 못하다. 이러한 이유 때문에 소노루미네센스 현상을 이용한 음의 가시화법은 그 장점에도 불구하고 산업적으로 그 응용 예를 찾기가 쉽지 않다.

본 연구에서는, 이와 같은 단점을 보완하기 위하여, 영상 데이터의 히스토그램을 제어할 수 있는 화상처리법을 이용하여 개선된 소노루미네센스 이미지를 얻을 수 있는 방법을 소개한다. [8-9] 히스토그램이란 영상의 명암 데이터에 대한 누적 분포라고 할 수 있는데, 소노루미네센스 현상을 촬영한 영상은 소노루미네센스에 의한 발광 현상이 임계음압 이상에서 발생하기 때문에 영상 데이터의 명암 대비가 극단적이며, 이는 히스토그램의 극단적 분포를 야기 시킨다. 따라서 이 영상 디지털 데이터의 분포를 적절히 조절하는 방법으로 개선된 소노루미네센스 이미지를 얻을 수 있다. 즉, 극단적인 히스토그램의 분포를 적절히 조절하는 매칭함수 (Matching function)를 찾는다면, 이를 적용하면 비교적 약한 음장분포에 대해서도 보다 선명한 이미지를 얻을 수 있다.

II. 매칭함수 (Match function)의 도출

소노루미네센스의 발광 강도의 변화는 일반적으로 음압에 비례한다. 또 디지털 카메라에 의해서 얻어지는 이미지의 데이터는 그 영상의 상대적인 명암을 나타낸다고 볼 수 있는데, 이러한 데이터 값의 누적 분포를 나타내는 것이 히스토그램이다. 즉, 가장 어두운 것을 0, 가장 밝은 것을 255로 나타낸 화상의 명암의 누적 분포라고 볼 수 있다.

그림 1은 트랜스듀서의 구동주파수 177.3 kHz, 방사음압 250 kPa인 경우 발생한 소노루미네센스 현상에 의하여 얻어진 이미지와 그에 대한 히스토그램 분포를 나타낸 것이다. 이 이미지는 디지털 카메라 (CANON EOS 350D)

를 이용하여 노출 시간을 40초로 설정하여 촬영하였다. 그림 1 (b)에서 알 수 있듯이 소노루미네센스 이미지의 히스토그램은 그레이레벨 (Gray level)의 양 극단에 집중적으로 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 상술한 바와 같이 발광현상이 임계음압이상에서만 일어나므로 공간적으로도 음압수준이 높은 국부적인 곳에서만 밝은 영역을 나타내고 있기 때문이다. 그러나 임계음압 이상의 영역이라 하더라도 육안으로 확인할 수 있을 만큼 충분한 발광 강도를 갖지 않는 영역이 존재하며 이러한 영역이 갖는 화소의 누적분포를 강조하면 좀 더 명확한 소노루미네센스 이미지를 얻을 수 있다. 이를 위해서는 적당한 매칭함수를 구하고 이 함수에 얻어진 이미지 데이터를 적용하는 방법을 생각할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 음압강도에 따른 소노루미네센스의 상대 발광 강도의 변화경향으로부터 매칭함수를 실험적으로 구하고 이를 적용한 개선된 이미지를 소개한다.

음압에 따른 발광 강도 측정을 위한 실험 장치를 그림 2에 나타내었다. 이때, 트랜스듀서로부터 방사되는 음압은 방사면으로부터 7cm 떨어진 지점에서 하이드로폰을 이용하여 측정하였고, 소노루미네센스의 발광 강도는

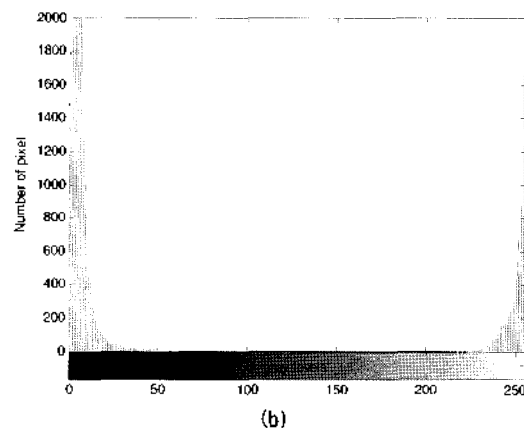
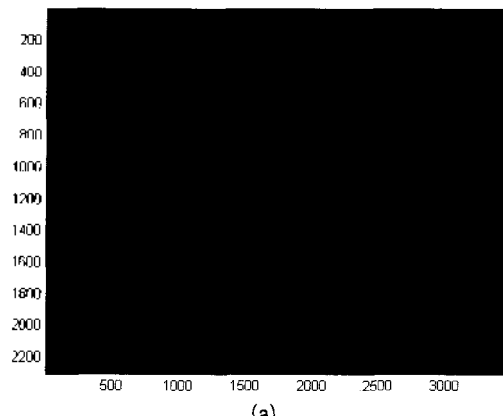


그림 1. 소노루미네센스 현상으로부터 얻어진 이미지 및 히스토그램
Fig. 1. Image from sonoluminescence and its histogram.

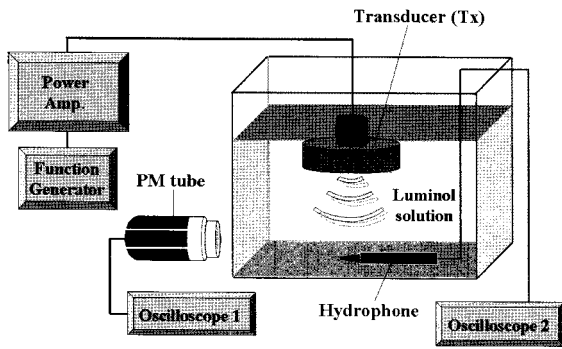


그림 2. 음압에 따른 소노루미네센스 발광 강도 측정 장치
 Fig. 2. Experimental setup for measurement of sonoluminescence intensity with sound pressure.

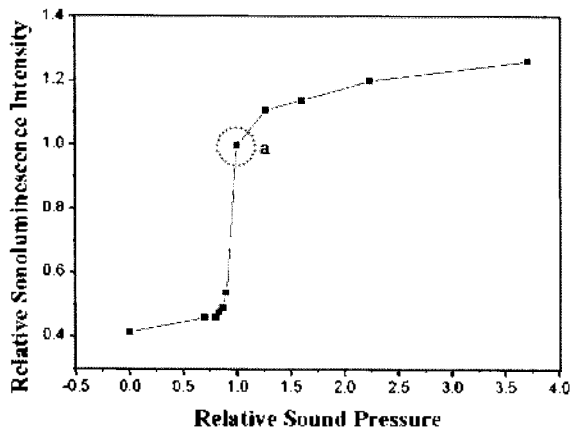


그림 3. 상대음압과 소노루미네센스의 상대강도 관계
 Fig. 3. Relative sonoluminescence intensity versus relative sound pressure.

PMT (Photo-Multiplier Tube: Tennelec TC954A)를 이용하여 측정하였다. 트랜스듀서의 주파수는 177.3 kHz로 일정하게 구동하였다. 트랜스듀서로부터의 방사음압을 변화시켜 가며 측정된 소노루미네센스 발광 강도의 변화를 그림 3에 나타내었다. 여기서 a는 소노루미네센스에 의한 발광현상이 육안으로 관찰 가능한 음압과 그때의 발광 강도를 나타낸 것으로 이를 기준으로 규격화하여 나타내었다.

그림 3에서 상대음압이 1 부근에서 소노루미네센스에 의한 상대 발광 강도가 급격히 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 트랜스듀서로부터 방사된 음장에 의해 발생된 소노루미네센스 발광 강도의 분포에 있어서도 동일하게 나타날 것이다. 즉, 높은 음압이 분포된 영역에서는 육안으로 관찰 가능한 정도의 밝기를 나타내지만 음압수준이 약해짐에 따라 그 밝기는 급격히 저하되어 육안으로 관찰할 수 없게 된다. 따라서 그림 1 (a)의 예에서 볼 수 있듯이 비교적 약한 음향출력을 가진 트랜스듀서로부터의 음장분포는 국부적인 영역에서만 발광현상을 관찰할 수 있게 되어 충분한 음장 예측이 불가능하게 된다. 이러

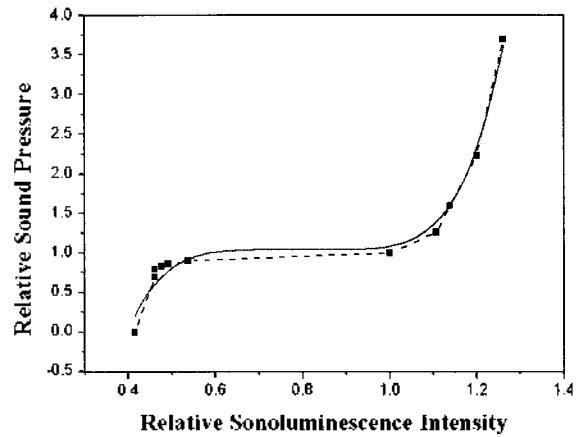


그림 4. 역함수를 구하기 위한 좌표축 변환
 Fig. 4. Axes change to obtain the inverse function.

한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 음압수준의 증가에 따른 소노루미네센스의 발광 강도가 선형적인 변화를 갖도록 하는 역함수를 구하였다. 즉, 그림 4는 이 역함수를 구하기 위하여 그림 3의 상대음압축과 소노루미네센스 상대 강도축을 바꾸어 나타낸 데이터를 점선으로 나타내었다. 이 데이터에 대한 피팅함수 (Fitting function)를 비선형 곡선 피팅법 (Nonlinear curve fitting method)을 이용하여 식 (1)과 같이 구하였고, 이를 실선으로 나타내었다. [10]

$$f(I_t) = 111.5(I_t - 0.8)^5 + 1.0 \quad (1)$$

여기서, I_t 는 소노루미네센스의 상대발광 강도를 나타낸다. 식 (1)로부터 음압변화에 대한 소노루미네센스 발광 강도변화가 선형적인 관계를 가지기 위한 역함수는 발광 강도의 5승에 비례한다는 것을 알 수 있다.

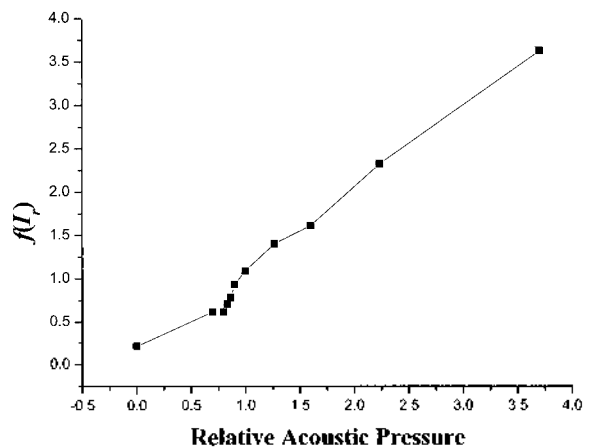


그림 5. 역함수를 적용한 결과
 Fig. 5. Results of applying the inverse function to data of Fig. 2.

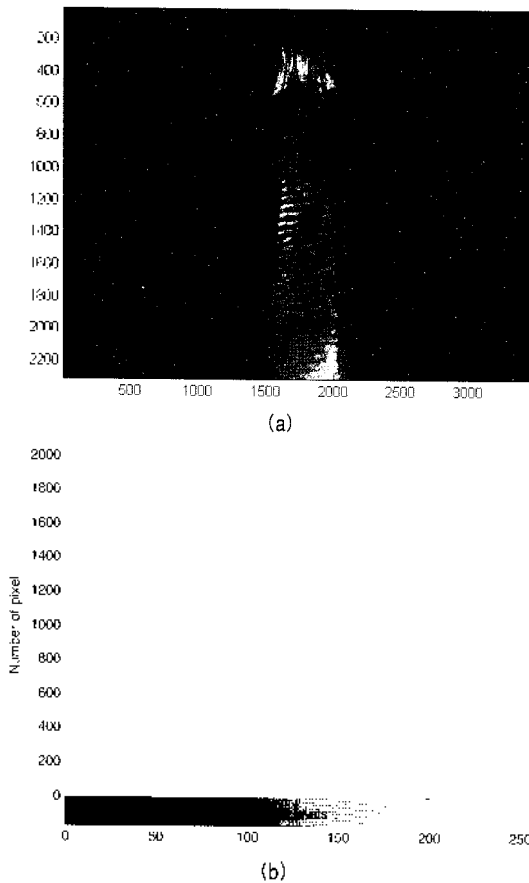


그림 6. 그림 1의 이미지를 영상 처리한 이미지(a)와 히스토그램(b)
 Fig. 6. Image(a) and histogram(b) after the image processing.

그림 5는 그림 3의 결과에 식 (1)을 적용하여 나타낸 것으로, 이 역함수는 상대음압변화에 대한 소노루미네센스 발광 강도의 변화를 비교적 선형적으로 만들 수 있음을 확인할 수 있다.

여기서 식 (1)의 역함수의 경우 정의역 및 치역이 이미지의 화소가 갖는 범위 즉 0~255와는 많은 차이가 있어 식 (1)을 그대로 매칭함수로 적용하기는 곤란하다. 그러나 구하려 하는 매칭함수의 경우에도 독립변수의 5승에 비례한다는 것을 예측할 수 있다. 이로부터 경험적으로 구한 매칭함수의 예쁜 식 (2)에 나타내었다.

$$f(I) = 0.001 I^5 - 10 \tag{2}$$

이 식을 그림 1의 화상에 적용한 결과를 그림 6에 나타내었다. 개선된 화상의 히스토그램인 그림 6 (b)를 보면 그림 1 (b)에서는 볼 수 없었던 누적분포의 파크가 그레이 레벨 30~50사이에서 나타남을 확인할 수 있다. 이것은 그림 6 (a)에서는 보이나 그림 1 (a)에서는 육안으로 볼 수 없었던 영역의 화소에 대한 누적분포로 생각된다.

III. 결과

이상의 매칭함수에 대한 유효성을 검토하기 위하여 방사음압을 단리해 가며 촬영한 소노루미네센스의 이미지와 이에 대한 히스토그램을 나타내고 식 (2)의 매칭함수를 적용하여 개선한 이미지 및 이때의 히스토그램을 각각 그림 7에서 그림 9까지에 나타내었다. 이때 사용한 구동주파수는 그림 1에서와 같이 177.3 kHz를 사용하였으며 카메라의 노출 시간도 40초로 동일하다. 그림 7은 방사음압이 150 kPa인 경우로 화상처리전의 이미지인 그림 7 (a)에 비하여 화상처리 후인 그림 7 (c)의 경우가 보다 넓은 범위의 음장을 확인할 수 있다. 매칭함수의 적용에 의한 히스토그램의 변화 역시 처리전의 분포에 비해 보다 넓은 영역에 걸쳐 분포되어 있음을 확인할 수 있다.

방사음압이 210 kPa인 그림 8의 경우를 보면 화상처리전의 이미지인 그림 8 (a)에 비해 처리후인 이미지인 그림 8 (c)의 경우, 트랜스듀서로부터 방사된 음향빔의 주엽 (main lobe) 및 부엽 (side lobe)의 형태를 확연히 구별할 수 있으며 음파의 파면이 더욱 뚜렷이 관측됨을 알 수 있다. 또한 히스토그램의 변화를 보면 매칭함수를 적용한 그림 8 (d)의 경우 그레이레벨이 30~50 사이의 누적분포가 처리전의 분포 (그림 8(b))에 비해 상대적으로 크게 증가된 것을 확인할 수 있으며 이와 같은 경향은 그림 1 (b) 및 그림 6 (b)에서의 변화 경향과 일치한다.

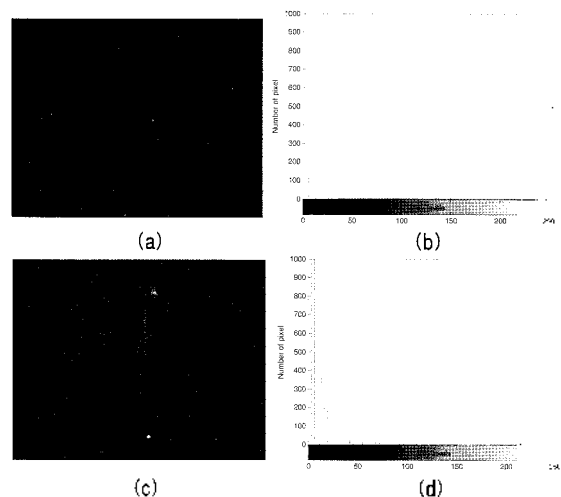


그림 7. 주파수 177.3 kHz, 음압 150 kPa인 경우에 대한 이미지 및 히스토그램의 변화 (a) 영상처리 전 이미지 (b) 영상처리 전 히스토그램 (c) 영상처리 후 이미지 (d) 영상처리 후 히스토그램
 Fig. 7. Variation of image and histogram using the image processing at 177.3 kHz and 150 kPa. (a) Original image (b) Histogram of the original image (c) Result image of the image processing (d) Histogram of the result image.

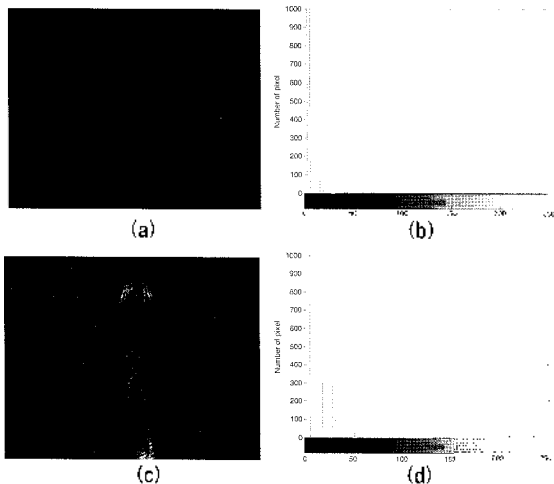


그림 8. 음압 210 kPa인 경우에 대한 이미지 및 히스토그램의 변화
 (a) 영상처리 전 이미지 (b) 영상처리 전 히스토그램
 (c) 영상처리 후 이미지 (d) 영상처리 후 히스토그램
 Fig. 8. Variation of image and histogram using the image processing at 210 kPa. (a) Original image (b) Histogram of the original image (c) Result image of the image processing (d) Histogram of the result image.

음압의 수준을 충분히 강하게 하여 330 kPa로 구동한 경우인 그림 9는 화상처리전의 이미지인 그림 9 (a)에서도 음장분포를 확인할 수 있으나 화상처리를 행한 그림 9 (c)를 보면 보다 확연한 음장의 분포를 확인할 수 있다. 히스토그램 역시 앞서 기술한 경향과 같이 그레이레벨 30~50 사이의 누적분포가 상대적으로 크게 증가되었음을 알 수 있다.

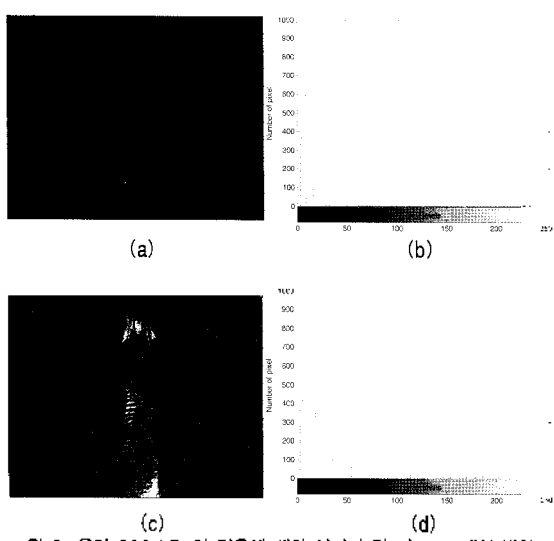


그림 9. 음압 330 kPa인 경우에 대한 이미지 및 히스토그램의 변화
 (a) 영상처리 전 이미지 (b) 영상처리 전 히스토그램
 (c) 영상처리 후 이미지 (d) 영상처리 후 히스토그램
 Fig. 9. Variation of image and histogram using the image processing at 330 kPa. (a) Original image (b) Histogram of the original image (c) Result image of the image processing (d) Histogram of the result image.

IV. 결론

소노루미네센스 현상을 이용한 음장의 가시화법은 비교적 약한 음압의 음장 관측은 어렵다는 단점 때문에 그 응용에 제약이 크다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 방사음압에 따른 소노루미네센스의 반광 강도의 변화를 조사하였고 이로부터 방사음압의 변화에 따른 반광 강도를 선형적으로 변화시키는 역함수는 반광 강도의 5승에 비례한다는 것을 알 수 있었다. 이것으로부터 각 화소의 그레이레벨의 5승에 비례하는 배칭함수의 예를 구하였고, 이를 비교적 낮은 음압으로부터 얻어진 이미지에 적용시킨 결과 이미지가 크게 개선되어 육안으로 구별하기 어려웠던 영역의 음장분포까지도 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 산학협동재단으로부터 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고 문헌

1. S. Saito and J. S. Kim, "Second Harmonic Component in the Focused Ultrasound Diffracted by a Straight Edge", *Jpn. J. Appl. Phys.* 38, 3085-3090, 1999
2. I. J. Song, J. H. Kim, M. J. Kim, K. L. Ha and N. Chubachi, "Analysis of Acoustic Fields From Acoustic Convex Lens", *Jpn. J. Appl. Phys.* 43, 3059-3060, 2004.
3. J. S. Kim, M. J. Kim, J. H. Kim, K. L. Ha and A. Yamada, "Arrayed Ultrasonic Transducers on Arc Surface for Plane Wave Synthesizing", *Jpn. J. Appl. Phys.* 43, 3061-3062, 2004.
4. S. Hatanaka, K. Yasui, T. Tuziuti and H. Mitome, "Difference in Threshold between Sono- and Sonochemical Luminescence", *Jpn. J. Appl. Phys.* 39, 2962-2966, 2000.
5. S. Hatanaka, K. Yasui, T. Tuziuti, T. Kozuka, and H. Mitome, "Quenching Mechanism of Multibubble Sonoluminescence at Excessive Sound Pressure", *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, 3856-3860, 2001.
6. T. Kozuka, S. Hatanaka, K. Yasui, T. Tuziuti and H. Mitome, "Simultaneous Observation of Motion and Size of a Sonoluminescing Bubble", *Jpn. J. Appl. Phys.* 41, 3248-3249, 2002.
7. H. Mitome, "Relationship among Sound Field, Bubble Behavior and Sonoluminescence", *World Congress on Ultrasonics, Paris 7-10 September*, 585-589, 2003.
8. R. Gonzalez et, *Digital Image Processing*, (Prentice Hall, 1977.) Chapt. 3

- 9. 田村秀行, コンピュータ画像処理入門 (総研出版, 1996) Chapt. 2.
- 10. Press et. al, Numerical Recipes in C++. The Art of Scientific Computing. (Cambridge University Press, New York, 1988) chap. 9.

저자 약력

• **김 정 순 (Jung-Soon Kim)**

한국음향학회지 제25권 3E호 참조

• **조 미 선 (Mi Sun Jo)**



2004년 2월: 부경대학교 물리학과(이화사)
 2007년 8월: 부경대학교 교육대학원
 물리교육전공(교육학석사)

• **문 관 호 (Kwan Ho Mun)**



2006년 2월: 동서대학교 전자공학과(공학사)
 2006년 3월~현재: 부경대학교 음향전통공학과
 대학원(석사과정)

• **김 무 준 (Moo-Joon Kim)**

한국음향학회지 제25권 3E호 참조

• **하 강 렬 (Kang-Lycol Ha)**

한국음향학회지 제25권 3E호 참조

• **전 병 두 (Jun Byung Doo)**



1984년: 부산수산대학 어업학교 졸업
 1992년: 농대학원 수산물리학과 석사
 2007년: 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 박사
 1989년~현재: (주)LIG넥스원 수중안구조사 수석연구원