



## 초음파 소음

엄 원 석\*

(연세대학교 기계공학부)

### 1. 머리말

과거 필자가 수학했던 텍사스주 오스틴 시에는 북미 주 최대 규모의 박쥐 서식처가 위치하고 있다. Congress Avenue Bridge 밑에 둥지를 튼 100여 만 마리의 박쥐 (Mexican free-tailed bat) 들이 땅거미가 질 무렵 붉은 석양을 배경으로 무리지어 사냥을 나가는 모습은 어느 도심 한복판에서는 볼 수 없는 오스틴 시만의 자랑거리이다(그림 1). 박쥐는 대략 20 kHz에서 100 kHz 범위의 초음파 빔을 이용하여 주변 탐지 및 사냥을 하는 것으로 알려져 있는데, 필자는 박쥐들이 연출하는 초저녁의 장관을 감상하면서 인간의 가청 주파수 대역이 20 Hz에서 20 kHz 사이라는 사실이 이 박쥐들에게는 얼마나 큰 다행인가에 대해 생각하곤 하였다. 만약 인간의 청각이 초음파 영역에까지 발달되었다면 100여 만 마리의 박쥐들이 내는 초음파 소음을 인내할 인근 주민들은 거의 없었을 것이며 따라서 이 박쥐들은 십중팔구 오스틴 시로부터 퇴출될 운명에 놓였을 것이기 때문이다.

일반적으로 소음이라고 하면 인간의 청각 기관을 통하여 감지되는 소리 중 성가심 내지는 불편함 나아가 청각 기관의 손상을 유발하는 “원하지 않는 소리”를 총칭한다. 따라서 가청 주파수 범위 밖에 있어 들을 수 없는 초음파에까지 소음의 정의를 확대 적용하는 데에는 이론의 여지가 있을 수 있다. 더욱이 초음파는 공기 중에서 급격히 흡수 및 감쇠되어 설령 사람이 청각을 통하여 인지할 수 있다고 하더라도 그다지 큰 문제를 야

기하지 않을 가능성이 크다. 예를 들면, 음파의 흡수 정도를 나타내는 지수로서 데시벨 흡수율(decibel



그림 1 텍사스 오스틴 시 소재 Congress Avenue Bridge 밑의 둥지로부터 박쥐들이 저녁 사냥을 나가는 장면(출처 : <http://www.batcon.org>)



그림 2 태아의 B-모드 초음파 진단 영상(출처 : <http://www.medison.com>)

\* E-mail : ohm@yonsei.ac.kr / (02) 2123-5819

absorption rate)  $\alpha$  를 정의하는데, 대기압 1기압, 기온 20 °C, 상대습도 40 %의 조건하에서 100 kHz 초음파의 데시벨 흡수율은 무려 400 dB/100 m에 달한다<sup>1)</sup>. 즉, 평면파를 가정할 때 음원으로부터 10m만 떨어져 있어도 음향 파워가 40 dB나 감소되는 것이다. 따라서 이 글에서 논하고자 하는 “초음파 소음”은 전통적인 의미에서의 소음이 아닌, 초음파가 인간(혹은 동물)에게 소위 부정적인 생체 효과(negative bio-effects)를 유발할 수 있는 몇몇 특정상황을 지칭하는 광의적 의미의 소음임을 먼저 밝히고자 한다.

## 2. 초음파의 생체 효과

초음파에 의한 생체 효과에 대하여 가장 심도 있는 연구가 진행되어 왔던 분야가 바로 초음파 진단 영상 분야일 것이다. 초음파 영상 기법은 타 영상 기법(예를 들면 X-ray CT나 MRI)과 비교하여 무엇보다 안전하고 저렴하게 실시간 진단 영상을 제공한다는 장점을 가지고 있다. 특히 타 영상 기법에 비하여 탁월한 안전성에 힘입어 초음파 영상 기법은 태아의 기형 여부 검사(그림 2) 등에 있어 압도적 우위를 점하고 있다.

보통 펄스-에코 방식에 기반한 초음파 진단 영상의 구성을 위하여 1~10 MHz 사이의 중심 주파수와 1 MPa 미만의 음압 크기를 갖는 초음파 펄스가 사용된다. 초음파 펄스는 사람의 피부와 직접 접촉하거나 환부로 삽입되는 압전 트랜스듀서에서 생성되어 인체 내로 방사된다. 이들 초음파 펄스가 체내 음향 임피던스의 불연속면 혹은 산란체 등으로부터 반사되어 돌아오는 시간(time of flight)을 각 스캔 라인 별로 신호 처리한 후 스크린에 도시하면 그림 2에서와 같은 B-모드 진단 영상이 얻어지는 것이다.

필자가 수년 간 초음파 진단기기 업체에서 근무했던 경험에 비추어 볼 때, 초음파 영상 진단은 숙련된 의료진에 의하여 진단 목적에 부합되게 수행되었을 경우 음향안전 측면에 있어 안전하다고 할 수 있다. 이는 지난 수십 년 간 전세계 산학연관이 부단한 노력을 통하여 구축한 의용 초음파 안전 규격 및 관리 시스템<sup>2,3)</sup>에 힘입은 바 크다. 그러나 좋은 약도 잘못 사용하면 독이 될 수 있는 법, 간혹 언론에 보도되는 진단 초음파의 오/남용 사례들은 필자로 하여금 초음파의 잠재적 파괴력에

대하여 다시금 주의를 환기하지 않을 수 없게 한다. 예를 들어 지난 2005년 영화 배우 톰 크루즈-케이티 홈즈 커플(그림 3)은 둘 사이에 생긴 태아의 모습을 수시로 감상하기 위하여 초음파 영상 진단기를 구입하였다고 밝혀 세간에 논란을 일으킨 바 있다<sup>4)</sup>. 이는 미국 방사선 의학회(American College of Radiology)로 하여금 진단용 초음파의 오/남용에 관한 경고 성명을 발표하게 하였고, 나아가 캘리포니아 주 의회가 진단 목적 외의 초음파 진단기기 사용을 금지하는 일명 “Tom Cruise Law”를 발의하여 통과시키게 되는 계기가 되었다.

초음파에 의한 생체 효과는 크게 역학적인 것(mechanical effect)과 열적인 것(thermal effect)으로 대별된다. 역학적 효과란 초음파 신호가 생체 조직을 타고 전파할 때 음의 음압(negative acoustic pressure 혹은 rarefaction pressure)의 세기에 따라 발현될 수 있는 공동 효과(cavitation effect)를 지칭한다. 즉, 초음파 펄스가 전파하면서 생체 조직 내 압력이 포화 증기압 이하의 값을 갖게 되면 조직 내 미세 기포가 생성 되고, 그림 4에 보이는 바와 같이 이들 기포가 갑작스럽게 붕괴하는 과정에서 미세 제트(cavitation micro-jet)가 발생되게 된다. 이 고압의 미세 제트는 주변 조직의 손상을 유발하는데, 마치 선박 프로펠러에 있어 공동 효과에 의하여 생긴 구멍(propeller cavitation pit)에 비교할 수 있겠다.

열적 효과는 초음파 에너지가 생체 조직에 흡수되어 열 에너지로 변환되면서 해당 조직의 온도가 상승하는 것을 가리킨다. 생체 조직 내 초음파 흡수 정도의 예측을 위하여 0.3 dB/cm/MHz의 기율기를 갖고 주파수에 대

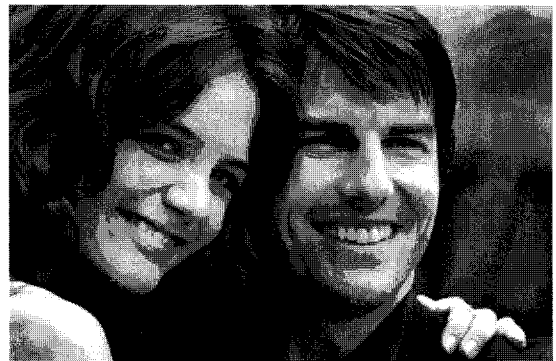


그림 3 진단 외 목적을 위하여 초음파 영상 진단기를 구입/사용하였다고 밝혀 물의를 빚은 톰 크루즈-케이티 홈즈 커플(출처 : 참고문헌(4))

략 선형적으로 증가하는 소위 "0.3 dB derating" 모델이 널리 통용되고 있다. 초음파의 흡수에 기인한 생체 조직의 온도 상승은 그 정도가 심할 시에는 구성 단백질 변성(protein denaturation) 및 조직 괴사(tissue necrosis) 등의 심각한 부작용으로 이어질 수 있다. 예컨대, 그림 5는 고강도 집속형 초음파(high intensity focused ultrasound, HIFU)에 의하여 괴사된 생체 조직(폐지의 간)의 예를 보여주고 있다<sup>6)</sup>. 유의할 점은 그림 5의 예는 진단이 아닌 치료를 목적으로 HIFU에 의한 조직의 괴사를 의도하였다는 점에서 여기서 필자가 언급하고자 하는 진단 초음파의 열적 부작용의 실례는 아님을 밝힌다. 그러나 초음파의 잠재적 위력을 예시하기에는 부족



그림 4 기포 붕괴 시 주변 경계면을 향하여 돌진하는 고압의 미세 제트(출처 : <http://home.att.net/~iii3/uson-pix/bublcrum.gif>)

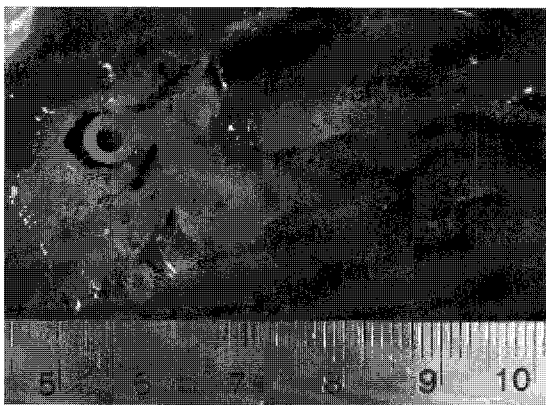


그림 5 고강도 집속형 초음파로 인한 생체 조직 괴사의 예. 밝은 부분으로 나타나는 괴사 조직이 어두운 부분의 정상 조직과 대조를 이룬다<sup>6)</sup>.

함이 없을 것이다.

초음파에 의한 위 두 가지 생체 효과의 발현 가능성을 나타내는 음향안전 지수가 개발되어 현재 널리 사용 중인데 이른 바 역학지수(mechanical index, MI)와 열지수(thermal index, TI)가 그것이다(그림 2 우측 상단부를 보면 MI와 TI가 표시되어 있음을 확인할 수 있다). 진단 초음파 관련 안전 규격<sup>4)</sup>에서는 보통 MI와 TI 값이 각각 2와 6을 초과하지 않도록 제한하고 있는데, 거의 모든 초음파 진단기들은 영상 모드(B-모드, color-Doppler 모드 등)에 관계없이 항상 이 안전 기준을 만족하도록 최대 음향 파워/강도에 제한을 두어 출고된다. 그러므로, 전술한 바와 같이 의료 전문가에 의하여 정상적으로 수행되는 초음파 진단인 경우 음향 안전 여부에 대해 염려할 필요는 없겠다.

### 3. Parametric Array

일반적으로 음향 빔(acoustic beam)의 지향성을 좋게 하려면 고주파 신호를 사용하여야 함은 주지의 사실이다. 그러나 앞서 머리말에서 기술한 바와 같이 고주파 빔은 매질에서 급격히 흡수되어 그 유효 전파 거리가 짧은 단점이 있다. 이 두 상충하는 메커니즘에 제한 받지 않는 음향 빔의 생성을 위하여 1963년 Peter Westervelt는 소위 "parametric array"를 제안하게 된다<sup>6)</sup>. 이후 parametric array는 수중 음향 분야에서 약방의 감초처럼 등장하며 소나(sonar)의 제작 및 구동에 있어 가장 중요한 기술적 패러다임으로 자리잡게 된다.

Parametric array의 기본 원리는 다음과 같다. 서로 근사한 두 고주파 성분(각각  $f_1$ 과  $f_2$ 라고 하자)으로 구성된 고강도 초음파 빔(primary 빔이라고 칭함)을 방사하면 이 두 고주파 성분 간에 비선형 상호 작용에 기인한 차주파수(difference frequency,  $|f_1 - f_2|$ ) 성분(secondary 빔이라고 칭함)이 primary 빔의 전파 경로를 따라 생성되게 된다. 이 secondary 빔은 고주파 primary 빔의 뛰어난 지향성을 유지하면서도 차주파수에 상응하는 긴 유효 전파 거리를 갖게 되는데, 이는 고강도 초음파에 수반하는 비선형 효과를 이용하면 우수한 지향성 및 긴 유효 전파 거리를 모두 갖춘 가칭 주파수대 음향 빔을 생성할 수 있음을 의미한다.

공기 중에서의 parametric array의 응용은 수중 음향 분



그림 6 시위대 통제 및 진압을 위하여 경찰차에 탑재된 LRAD (American Technology Corporation의 Long Range Acoustic Device) (출처 : <http://www.atcsd.com/>)



그림 7 로켓 추진 수류탄 등으로 무장하고 호화 여객선 Seabourn Spirit를 공격했던 소형 해적선의 모습. 이 사진은 사건 당시 Seabourn Spirit에 탑승했던 한 승객에 의하여 촬영된 것이다.<sup>(8)</sup>

야의 그것만큼 활발히 추진되지는 않았는데, 지난 10년 간 공기 중에서 작동하는 parametric array를 상용화하려는 노력이 다수 있었다. 이 중 가장 눈에 띄는 시도가 캘리포니아주 소재 American Technology Corporation (ATC)의 그것인데, 필자는 1997년 미국음향학회에서 있었던 ATC사의 “HyperSonic Sound” 모델의 시운전<sup>(7)</sup>을 아직도 생생히 기억한다. 위 parametric array는 40 kHz의 중심주파수를 갖는 60여 개의 압전 소자를 환형으로 배열한 것으로서 매우 훌륭한 지향성 및 전파 거리와 함께 간단한 음악 정도를 연주할 수 능력을 보여


주었다.

필자가 초음파 소음을 논함에 있어 parametric array에 지면을 할애하는 이유는 parametric array를 이용하여 가청 주파수대 소음을 발생한 실례 및 이를 상용화한 장비가 최근 몇 년 간 세계 주요 언론의 관심을 끌었기 때문이다<sup>(8,9)</sup>. 그림 6은 ATC사의 “Long Range Acoustic Device (LRAD)”를 보여주고 있다.

이 장비는 parametric array의 원리에 기초하여 고막을 찢는 듯한 날카로운 소음을 최대 300 m 전방의 대상에 선택적으로 보낼 수 있다. 즉 LRAD는 상대적으로 경미한 부상(예를 들면 일시적 청각 장애)만을 수반하는 비살상용 음향 무기(non-lethal acoustic weapon)로 고안된 것으로서, 현재 적군의 평화적 제압 및 시위 진압 등에 널리 이용되고 있다. 특히 LRAD의 실제 사용 예 중 세계 주요 언론의 이목을 끈 사건이 있었으니 그것은 2005년 소말리아 근방 해상에서 해적들이 호화 여객선 Seabourn Spirit를 나포하려는 시도(그림 7)가 여객선에 장착된 LRAD의 사용으로 인하여 수포로 돌아간 사건이다<sup>(9)</sup>. 실제로 LRAD가 해적들을 퇴치하는데 어느 정도 기여를 하였는지에 대해서는 다소 의문의 여지가 있지만, 사건 발생 당시 여객선에 LRAD 이외에는 해적들을 제압할 무기 내지 방어책이 없었음을 상기한다면 승객들의 안전을 보장하는데 있어 초음파 소음이 일조하였음을 추측해 볼 수 있다.

#### 4. 맺음말

향후 초음파의 산업 및 실생활에의 응용은 그 범위와 빈도에 있어 지속적인 증가세를 보일 것으로 예상된다. 특히 parametric array 등에 기반한 공기 중 작동 초음파 트랜스듀서(airborne ultrasonic transducer)는 앞으로 급속하게 여러 응용 분야로 확산될 것이다. 예를 들면 현재의 무인 자동차 시스템의 절대 다수는 전자기파를 이용하는 레이더에 의존하고 있는데, 초음파를 이용한 공기 중 작동 소나(airborne sonar)가 개발된다면 무인 자동차 시스템의 가격을 현저히 떨어뜨릴 수 있을 것이다. 따라서 향후 본격적으로 대두될 초음파 소음 내지는 초음파 공해 문제에 대비한 체계적 연구가 요구되는 시점이다. 무엇보다도 인간의 가청 범위 외라는 이유만으로 일부 소수 연구자들에게만 국한되었던 공기 중 초음파

(airborne ultrasound)의 환경 영향 평가에 새로운 관심 및 투자가 집중되기를 희망해 본다. 

참고문헌

(1) Blackstock, D. T., 2000, "Fundamentals of Physical Acoustics", Wiley, New York.

(2) Medical Electrical Equipment-Part 2-37, 2004, "Particular Requirements for the Safety of Ultrasonic Medical Diagnostic and Monitoring Equipment", IEC Standard 60601-2-37, ed. 1.1.

(3) Information for Manufacturers Seeking Marketing Clearance of Diagnostic Ultrasound Systems and Transducers, Rockville, MD, 1997, "Center for Devices and Radiological Health", US Food and Drug Administration.

(4) <http://www.msnbc.msn.com/id/10309963>

(5) Mast, Faidi, and Makin, 2005, "Acoustic Field Modeling in Therapeutic Ultrasound", in Proceedings of the 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics, State College, Pennsylvania, pp. 209-216.

(6) Westervelt, P. J., 1963, "Parametric Acoustic Array", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 35, pp. 535-537.

(7) Norris, E. G., 1997, "The Creation of Audible Sound from Ultrasonic Energy: A Fundamental Paradigm Shift", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 101, 3072(A).

(8) <http://origin.foxnews.com/story/0,2933,113096,00.html>

(9) <http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/africa/4418748.stm>

## 특별 회원사 가입 안내

우리 학회 특별 회원사는 학회의 설립목적에 찬동하고, 소음진동 관련 학술 또는 기술자료의 이에 따른 지문을 원하는 기업은 가입이 가능하며, 참여 정도에 따라 연회비 500만, 300만, 200만, 100만원의 4종류로 구분합니다. 우리 학회 특별회원으로 가입한 경우에는 다음과 같은 혜택이 주어집니다.

1. 특별 회원사에는 다음과 같은 혜택이 주어집니다.

각종 행사 안내와 정기간행물(월간논문집, 격월간 학회지)을 매회 발행 즉시 받을 수 있으며, 회원사 소속 전직원이 정회원의 자격으로 모든 행사에 참여할 수 있다.

2. 회원사의 납부 회비별로 다음과 같이 세부사항의 특전이 주어집니다.

혜택의 종류	회비별(백만원)			
	500	300	200	100
소속 직원의 학술행사 무료 참여(명)	5	3	2	1
소속 직원의 무료 회원 가입(명)	10	6	4	2
광고료 할인 혜택(%)	40	30	20	10
전시료 할인 혜택(%)	40	30	20	10
각종 발간물 배포(권)	1	1	1	1

광고지면 (4원씩 기준)	광고료 (만원)	할인 요금(만원) <small>(연간계와 특별회원사)</small>				
		일반	특1	특2	특3	특5
표지 2면	100	매회 계약				
표지 3면	80	70	65	55	45	40
표지 4면	120	매회 계약				
간지 1면	100	90	80	70	60	50
간지 2면 이후	60	50	45	40	35	30
전시출품료	100	90	80	70	60	

▶ 세부 사항은 한국소음진동공학회 사무국으로 문의하시기 바랍니다.

TEL : (02)3474-8002,3 / E-mail : [ksnve@ksnve.or.kr](mailto:ksnve@ksnve.or.kr) / <http://www.ksnve.or.kr>