

어류에 미치는 인위적인 수중소음 영향과 피해기준에 대한 고찰

박지현 · 윤종락*

부경대학교 정보통신공학과

Overview of anthropogenic underwater sound effects and sound exposure criteria on fishes

Jihyun PARK and Jong-Rak YOON*

Department of Information and Communications Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

A scientific and objective sound exposure criterion for underwater sound damage on fish has been required since there has been many disputes between an underwater sound maker and a fish damage receiver. The existing criteria are still incomplete scientifically owing to a degree of variability of underwater sounds, diversity of fish hearing sensitivity and damage types, etc. This study reviews existing studies on a hearing mechanism of fish species, manmade underwater sound characteristics and sound exposure assessment parameters, and recent sound exposure criteria. A governing equation for damage coverage estimation and damage coverage dependency on sound source level, ambient noise and transmission loss are also reviewed and interpreted based on sound exposure environments. The foreign and Korean (National Environmental Dispute Medication Commission) criteria are reviewed and compared based on scientific aspects. In addition, the deficit and limit of Korean criteria are presented. The objective of this study is to give a direction for related researches and legislation of sound exposure criteria on fish.

Keywords : Underwater noise pollution, Sound exposure criteria, Underwater sound damage, Fish hearing threshold, Impulsive sound

서론

공중소음이 인간에 미치는 법적인 피해기준은 초기의 다양한 소음피해 시비에 대한 판례를 기초로 하였으나, 이후 과학적 객관적 소음에 대한 평가 기술이 발전하게 되어 현재에는 연속음의 환경소음기준이 설정되어 이 기준을 근거로 피해유무가 결정된다. 그러나 연

속음 평가기준인 L_{eq} dBA는 충격소음 평가에는 부적합하여 L_{max} dBA 기준을 추가하여 층간 소음 피해유무를 평가한다. 이러한 기준이 소음피해 시비 판정에 크게 기여하고 있으나 소음에 의한 인간의 물리적 손상, 생리 변화, 행동변화 혹은 스트레스 등의 반응을 계수화하는 법칙은 여전히 완전하지 못하여 소음에 의한 피해

*Corresponding Author: jryoon@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-6233, Fax: +82-51-629-6229

시비는 여전히 발생하고 있다.

1990년대 이래 국내의 수중소음에 의한 어류피해 관련 시비는 공사장 인근 육상 양어장 혹은 해상의 어장 피해 연구가 많이 있다. 육상 양어장에 대한 가해자와 피해자 간의 중앙환경분쟁조정위원회의 피해분쟁 판례심판 사례들 (National Environmental Dispute Medication Commission, 2010)이 있고, 수변 공사의 파일 항타나 쇄암봉 소음 피해에 관한 부경대학교 해양과학공동연구소의 연구보고서 (Korea Inter-University Institute of Ocean Science, 2005; 2007; 2014), 교량공사에서 발생하는 공중소음 및 지반진동이 인근 양만장에 미치는 영향 (Division of Ocean Technology, 2006; Institute of Sound and Vibration Engineering, 2007) 등이 있으며, 이외에도 통행 선박소음, 준철선, 육·해상 발파에 의한 피해 조사 등 다양한 연구들이 있다.

사실 이와 같은 피해 사례의 피해 판단 기준이나 피해 판정은 국외의 연구결과를 단편적으로 인용하여 적용하는 수준으로 연구자마다 피해기준과 판정이 다르다. 수중 소음원, 수중음향, 수중소음 평가, 어류의 물리적/생리적/행동 반응 및 소음 스트레스 평가 등에 대한 가해자 및 피해자의 과학적 지식이 부족하고 인용하는 연구결과가 검증되지 않은 연구 (gray literature)가 많아 시비는 지속될 수밖에 없다.

이러한 이유로 중앙환경분쟁조정 위원회는 육상 양식장 어류의 다양한 피해분쟁 시비에 과학적 피해기준을 사용하기 위해 전남대학교 수산과학연구소에 소음·진동으로 인한 육상 양식 어류피해 영향 소음·진동 기준 및 배상액 산정 기준 연구 (Fisheries Science Research Center, 2009)를 의뢰하였다. 연구결과 육상 양식어류에 대해 수중소음 피해기준을 “수중소음이 140 dB/1 μ Pa 이상이거나, 인위적인 수중소음과 수중 배경소음과의 차이가 20 dB/1 μ Pa 이상인 경우 피해 인정”으로 기준을 설정하였다. 피해의 근거는 인위적인 수중소음 및 지반진동이 수중 생물의 서식 환경의 변화나 생리적 장애 등을 유발하여 생산량 감소와 집단 폐사 등이 발생한다는 것이다. 그러나 이 기준 역시 충격성/연속성 소음에 동일한 기준을 적용한다는 이유로 한국 터널지하공간학회지에 새로운 피해기준이 제안되었다 (Choi et al., 2015).

순음을 이용한 어류의 순치 및 유집에 관한 논문은

한국어업기술학회지에 다수 발표되었으나 수중소음에 의한 어류피해를 다룬 정규 학술지 논문이나 학위논문은 극소수에 불과하다. 양식 가물치의 행동에 미치는 파일작업 소음의 영향 (Shin, 1995), 양식 향어의 행동에 미치는 발파작업 소음의 영향 (Shin, 2000) 및 수중 발파/말뚝항타/쇄암봉에 의한 충격음이 어류에 미치는 영향 (Bae, 2009) 및 제주연안 어류 청각 관련 논문 (Lee, 2009)이 있고, 학위논문으로는 한국 제주도 연안 어류의 청각 특성에 관한 기초적 연구 (Lee, 2000)와 공사소음이 민물 양식어류에 미치는 생리적 영향 (Cho, 2013)이 있다. 따라서 국내의 연구결과만으로 과학적이고 객관적인 수중소음 피해기준 설정은 여전히 어려운 것으로 판단된다.

국외 특히 미국에서는 일찍부터 해양 생물의 청각기관의 해부학적 특성과 기능에 대한 연구와 군용의 소나, 수중 폭발 및 지층탐사용 공기 폭음 (air gun)이 고래와 같은 해양 포유류를 포함한 해양 생물들에 미치는 피해에 관하여 연구하고 있다. 수중소음 발생원, 수중소음 환경, 수중소음 평가 기술, 어류의 물리적/생리적/행동 반응 및 소음 스트레스에 의한 병리적 지표에 대한 전문가 집단의 공동 연구도 다수 있다. 그러나 3,200여종에 달하는 어류의 물리적 해부학적 생리적 다양성에 의해 모든 어류에 적용할 수 있는 수중소음 피해 평가 기준은 여전히 정립되어 있지 않다. 1998년부터 시작된 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 고래류 피해기준 연구 등 일부 연구자 집단이나 연구기관의 독자적인 피해기준 연구를 시작으로 2000년대에 들어서는 수중소음과 관련된 정부 및 민간 기구들이 수중소음 피해 및 규제에 보다 큰 관심을 갖기 시작하였다. 본문에서 이들 국외 연구들의 대표적인 결과를 소개하기로 한다. 이들 국외 연구들의 피해기준 설정과 관련된 연구 분야는 1) 어류의 청각, 2) 지속적인 스트레스를 유발하는 연속음과 놀라움이나 조직 손상을 유발하는 충격음의 특성, 2) 음향 척도로서 손상이나 행동 장애를 주는 기준치, 3) 수중소음의 크기, 주파수 범위, 상승시간, 지속시간, 반복 횟수 등의 영향 등이다. 이러한 각 연구 분야 국내기술이 미흡하여 단기적으로는 국내의 개별 연구자들의 피해기준이나 중앙환경분쟁조정위원회의 판례심판 피해기준이 다를 수 있으나 장기적으로는 보다 과학적이고 객관적인 수중소음에 의한

어류피해기준 설정이 요구된다.

본 연구에서는 수중소음 피해기준 설정에 관련한 요소기술들인 어류의 청각, 수중소음의 종류 및 평가 척도, 피해 유형 및 규제 등에 관한 국내의 연구결과를 조사하여 수중소음 피해 관련 연구, 피해기준 및 법제화에 대한 방향을 제시하고자 한다.

“자료 및 방법”에서 수중소음이 어류에 미치는 영향과 피해기준에 대한 기존의 연구자료를 어류의 청각기관, 어류의 청각에 따른 분류 및 청각 역치, 어류의 입계대역폭과 마스킹, 수중소음 평가 척도 및 피해 유형, 수중소음 피해기준, 피해영향거리, 수중소음 감쇠대책으로 나누어 각 분야에 대한 기존 연구결과를 제시하고 분석하였다. “결과 및 고찰”과 “결론”에서는 각 분야의 기존 연구결과에 대한 재분석 및 각 기술 분야간의 관

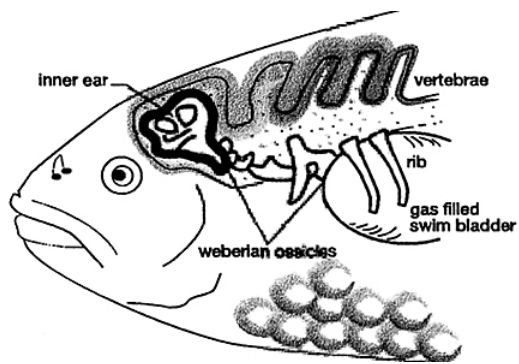
련성을 해석하여 국내의 새로운 피해기준 설정이나 관련 기술의 추후 연구 방향을 제시하였다.

기존 연구 결과의 재분석은 가능한 객관적으로 검증된 기존 연구결과나 저서 등의 내용을 기초로 하였다.

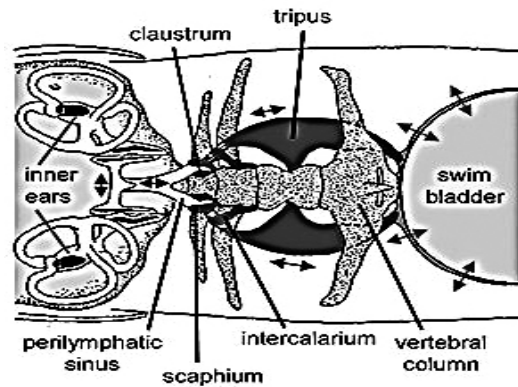
재료 및 방법

어류의 청각기관

어류의 귀를 이해하기 위하여 우선 인간의 귀의 구조를 소개한다. 귀의 구조는 외이 (귓바퀴, 고막), 중이 (청소골: 등골, 추골, 침골), 및 내이 (전정기관, 달팽이관)로 구성된다. 외이에서 수신한 음파는 중이에서 증폭되고 중이의 침골에 연결된 전정기관 (vestibule)과 달팽이관으로 전달된다. 전정기관은 세반고리관 (semicircular canal)과 이석기관 (난형낭: utriculus, 구형낭: sacculus)



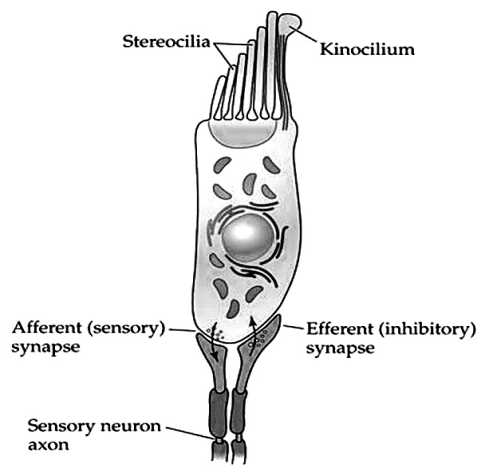
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1. Fish ear, (a) Schematic view; (b) Connection structure of ear apparatus: inner ear-Weberian ossicles-swimbladder; (c) vestibule (inner ear); (d) hair cell (Popper et al., 1976; 2003).

으로 이루어져 있고, 세반고리관은 회전운동, 난형낭은 수평운동, 구형낭은 수직운동의 평형감각을 감지하고 달팽이관이 음파를 감지한다. 전정기관과 달팽이관 내부는 림프액으로 차 있고, 신체 위치 변화와 소리에 의한 림프액의 상태변화(흐름변화)가 이들의 상피조직에 있는 유모세포(hair cell)를 자극하여 뇌에서 인지하게 된다. 유모세포는 림프액(내이)에서의 입자 운동(변위, 속도, 가속도)을 감지하며 이는 고막이 외이 음압을 입자운동으로 변환함을 의미한다.

Fig. 1은 어류 귀의 구조 및 음파를 감지하는 유모세포이다. Fig. 1(a)와 1(b)에서 보는 바와 같이 인간의 귀의 구조와 대응시키면 외이에 해당하는 부레의 압력 변화는 중이에 해당하는 베버 소골(Weberian ossicles)을 거쳐 Fig. 1(c)의 내이(전정기관: 난형낭, 구형낭, 호낭)로 전파되며 달팽이관이 없다. 음파의 수신은 부레와 내이와 가까운 머리 부분에서 이뤄지고 청각은 구형낭에서 이루어지는 것으로 알려져 있다. Fig. 1(d)는 유모세포로 베버 소골을 거쳐 증폭된 진동이 림프액 흐름(입자운동)을 야기하면 유모세포의 유모가 굽히게 되어 음압을 감지하게 되는 것이다.

인간의 중이(청소골)에 해당하는 베버 소골은 삼각골(tripus), 삽입골(intercalarium), 주상골(claustum), 갑골(scaphium)로 인간보다 한 개 많고 평형감각을 관장하는 이석 기관은 호낭(lagenae)이라는 것이 한 개 더 있다(Fig. 1(c)에서 하얀색 부분이 이석). 어류의 청각은 구형낭에서 이루어지는 것으로 알려져 있고 구형낭의 일부가 육상 포유류의 달팽이관으로 분화된 것으로 알려져 있다.

귀와 더불어 음파의 입자운동을 감지하는 감각기관이 측선이다. Fig. 2는 측선의 구조 및 유모세포이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 어류의 측선은 경골 및 연골 어류의 머리, 몸통에 있는 수백 수천 개의 흐름 감지센서이다. 가장 뚜렷한 특징은 몸통의 길이 방향으로 구멍이 있고 각 구멍은 유모세포 군으로 되어 있다. 귀의 유모 세포와 같은 동작으로 어류 주위 흐름을 감지한다(Denton et al., 1989, 1993; Coombs et al., 1999). 즉 Fig. 2(C)의 신경소구(neuromast)의 팽대정(cupula: 컵을 엮어 놓은 모양)내에 있는 유모세포가 흐름에 의해 굽어지게 되어 외부 흐름을 감지한다. 입자운동 변화가 큰 음원 가까운 영역에서만 유모세포 작동이 가능하다.

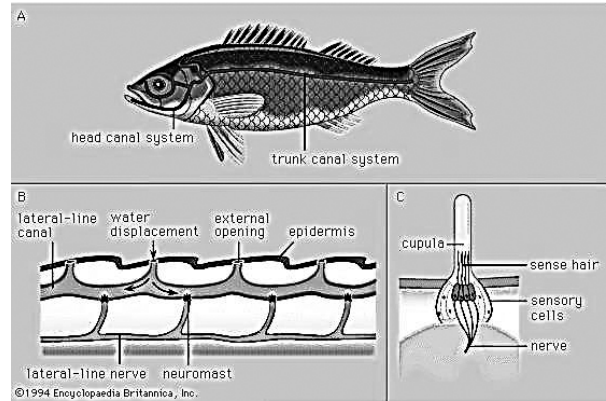


Fig. 2. Lateral line structure and particle motion sensing mechanism, (A) lateral line distribution; (B) schematic diagram of lateral line apparatus; (C) neuromast (Denton et al., 1989, 1993; Coombs et al., 1999).

따라서 측선에 의한 감지는 음압과는 관계하지 않는 것으로 알려져 있다. 왜냐하면 입자운동은 벡터로 보통의 경우 음원에서 먼 위치에서는 입자변위나 속도가 아주 작기 때문이다. 측선의 역할은 흐름을 감지하여 포식자로부터 회피, 먹이 사냥, 흐름 방향 감지 및 야간 투시 및 탐색에 활용된다. 수중소음에 의해서 측선이 손상된다는 연구결과는 없고 수중 파일 구조물이 소용돌이를 일으키므로 어류의 측선기능을 방해할 것이라는 의견이 있다(Hastings et al., 1996).

어류의 청각에 따른 분류 및 청각 역치

32,000종에 달하는 각 어류의 청각은 다양하다. 이러한 다양성은 Fig. 1과 Fig. 2의 귀나 측선의 해부학적 형태, 개별 청각 기관 및 유모세포의 외부 음압이나 입자운동에 대한 청각의 다양성에 기인된다. 부레가 없는 어류는 머리 부분에서 수신하는 음파의 입자 운동을 내이에서 감지하거나 측선에서 입자 운동을 감지한다. 그러나 부레가 베버 소골로 연결되어 있는 어류는 부레에서 음압이 입자운동으로 변환되어 전달되므로 부레가 없거나 부레가 내이와 연결되어 있지 않는 어류에 비해 청각과 청음대역이 상대적으로 좋은 것으로 알려져 있다. 일반적으로 청음대역은 수십 Hz에서 수백 Hz로 알려져 있으나 청어는 20 kHz 이상까지 들을 수 있다.

따라서 청음에 관계하는 귀의 구조를 기반으로 어종을 4가지로 분류하는 것을 제안하고 있다(ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014). 1) 부레가 없는 어종으로 입자

운동만 감지하는 어종 (상어, 넙치, 대서양 고등어 등), 2) 귀와 멀리 떨어진 위치에 부레 혹은 기낭이 있고 입자 운동을 감지하는 어종 (연어 등), 3) 귀와 가까이 부레가 있어 청각 능력이 우수한 어종 (금붕어, 청어, 메기, 대구 등), 4) 치자어 1) 및 2)의 어종을 hearing generalist, 3)의 어종을 hearing specialist라고도 하며 hearing generalist는 hearing specialist보다 청각이 좋지 않아 약 20 dB 높은 청각 역치 (HT: hearing threshold)를 가지는 것으로 알려져 있다. 부레는 음 감지는 물론 부력 조절, 음 발생 및 호흡에 관계하며 충격성 소음과 같은 아주 큰 외부 압력에는 청각 기관 피해보다 부레 파열 등에 의한 주위의 생체 기관들의 생리적인 외상 피해가 우선한다고 한다 (Halvorsen et al., 2012c). 국내의 경우는 골표류, 정골어류 및 기각류 등으로 구분하고 있다 (Fisheries Science Institute, 2009; Choi et al., 2015).

어류의 청각 역치는 생리학적 AEP (Auditory Evoked Potential) 혹은 ABR (Auditory Brainstem Response: 청감 뇌간 반응)로 측정되며 특정 주파수의 순음을 이용하며 주파수 별로 주어진다 (Suga et al., 2005). 대부분의 어류의 청각은 100~2000 Hz 범위에서 좋은 감도를 보이며 3~4 kHz까지도 들을 수 있고 금붕어의 청각이 가장 좋다. Fig. 3은 몇 가지 어류의 청각 역치 (Hasting et al., 2004)를 인간의 청각 역치와

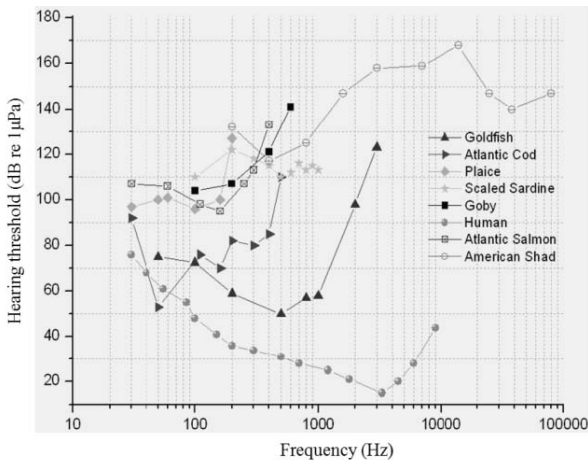
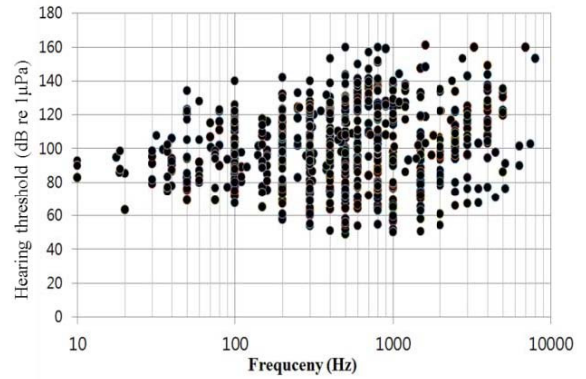
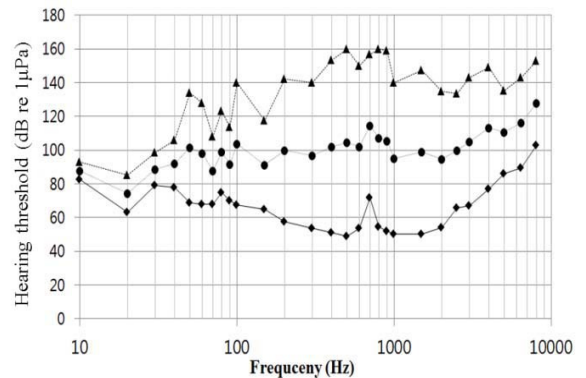


Fig. 3. Hearing threshold of 8 different fish species and human (Hasting et al., 2004).



(a)



(b)

Fig. 4. Hearing thresholds of 42 different fish species, (a) distribution of 42 species hearing thresholds; (b) upper/lower limit and average of hearing thresholds of 42 species (Nedwell et al., 2004).

비교한 것으로 인간에 비해서는 전 주파수 대역에서 최소 약 30 dB 이상 청각이 나쁘다고 할 수 있다. Fig. 4(a)는 42종의 어류의 청각 역치 자료 (Nedwell et al., 2004)를 재분석한 것으로 Fig. 4(b)는 이들 어류의 최고, 최저 및 평균치이다. 전체적으로 청음 대역은 10 Hz~8 kHz이며, 가장 청각이 좋은 주파수 대역은 1 kHz 대역임을 알 수 있다. Fig. 5는 제주도 연안의 조피볼락, 솜뱅이, 볼락, 자리돔, 방어의 청각 역치 (Lee, 2000)로 Fig. 4와 비교하면 청각이 좋지 않은 어종에 속한다.

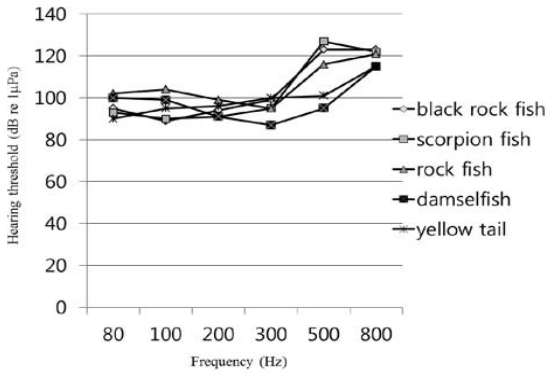


Fig. 5. Hearing thresholds of five fish species in the coast of Cheju island in Korea (Lee, 2000).

어류의 임계 대역폭과 마스킹

인간의 귀는 여러 개의 병렬 필터로 구성되어 각각의 필터들은 그 자신의 대역폭을 갖고 있고 이를 임계 대역폭 W_{cr} 이라 한다 (Kinsler et al., 2000). 어류의 귀도 이와 같은 기능을 가지며 소수의 관련 연구가 있다 (Madsen et al., 2006; Fay et al., 2011; Tavolga, 1974; Ahn et al., 1999; Seo et al., 2003). 이러한 기능을 갖는 귀가 순음과 광대역 잡음 NL ($\text{dB}/1\mu\text{Pa}/1\text{Hz}$)이 섞인 음에서 순음을 감지하려면 순음의 크기 SL ($\text{dB}/1\mu\text{Pa}/1\text{Hz}$ at 1m)은 다음 식을 만족해야 한다.

$$SL \geq NL + 10\log_{10}W_{cr} \quad (1)$$

즉, 배경잡음 NL이나 수중소음은 스펙트럼 밀도 ($\text{dB}/\mu\text{Pa}/1\text{Hz}$)로 주어지므로 배경잡음이 있는 환경에서 순음의 피해 영향 거리 등을 평가하기 위해서는 필히 어류의 임계 대역폭을 고려해야 할 것이다. 아울러 임계대역폭에 의해 외부 소음이 있는 경우 주파수 별의 청각 역치가 증가하는 마스킹 효과가 발생한다.

해양 포유류의 경우 임계 대역폭은 다음 식으로 가정한다 (Au et al., 1990; Richardson et al., 1995; South et al., 2001).

$$W_{cr} = 10\log_{10}(0.23f) \quad (2)$$

수중소음의 피해거리 평가에 임계 대역폭이 미치는 영향의 예를 소개한다. Fig. 6은 순음과 광대역 소음이

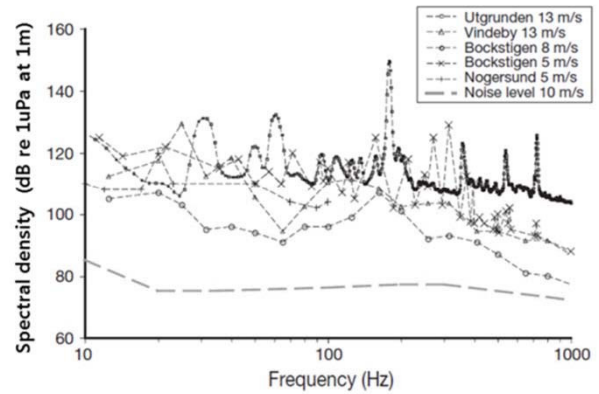


Fig. 6. Source level density spectra of windmill sounds (Wahlberg et al., 2005).

존재하는 풍력발전소음의 스펙트럼 밀도이다 (Wahlberg et al., 2005). 그림에서 Utgrunden 풍력발전소의 풍속 13 m/s 스펙트럼 (Utgrunden 13 m/s)을 보면, 기어박스에 의한 약 180 Hz의 순음 준위는 약 151 $\text{dB}/1\mu\text{Pa}$ at 1m이고, 이때 배경잡음은 약 82 $\text{dB}/1\mu\text{Pa}/\text{Hz}$ (Fig. 6의 10 m/s 잡음보다 2 dB 높은값)이다.

대구의 180 Hz 임계대역폭을 약 80 Hz (Hawkins et al., 1975)로 가정하고, 음파가 거리에 따라 감쇠되는 전송 손실을 $13\log_{10}r$ 로 하여 대구의 최대 감지거리를 계산해 보자 (후술하는 피해거리 산출 지배방식에서 전송손실 추가 설명). 이 경우 대구가 180 Hz 순음을 감지할 수 있는 최대거리를 배경잡음과 순음의 크기가 같아지는 거리로 가정하면 임계대역폭을 고려한 최대거리는 다음 식으로 계산되며 약 7 km이다.

$$151 - 13\log_{10}r = 82 + \log_{10}80 \quad (3)$$

임계 대역폭의 의미는 혀의 미각 (쓴맛, 신맛, 짠맛, 단맛) 기능과 비교하여 해석할 수 있다. 혀의 각 미각은 해당 영역 (각각의 필터)에서 이루어진다. 단맛을 단위 면적당 느끼고 있는 상태 (NL)에서 단맛 영역 일부분에 새로운 강한 단맛 (SL)을 추가하면 뇌는 어느 정도 차이로 단맛을 느낄까? 이 경우 단맛의 차이는 단맛 영역에서 느끼고 있는 배경 단맛의 총합 ($NL + 10\log_{10}W_{cr}$)과 새로운 단맛과의 차이이다.

수중소음 평가 척도 및 피해유형

소음은 연속음과 과도음으로 구분된다. 전자에는 순

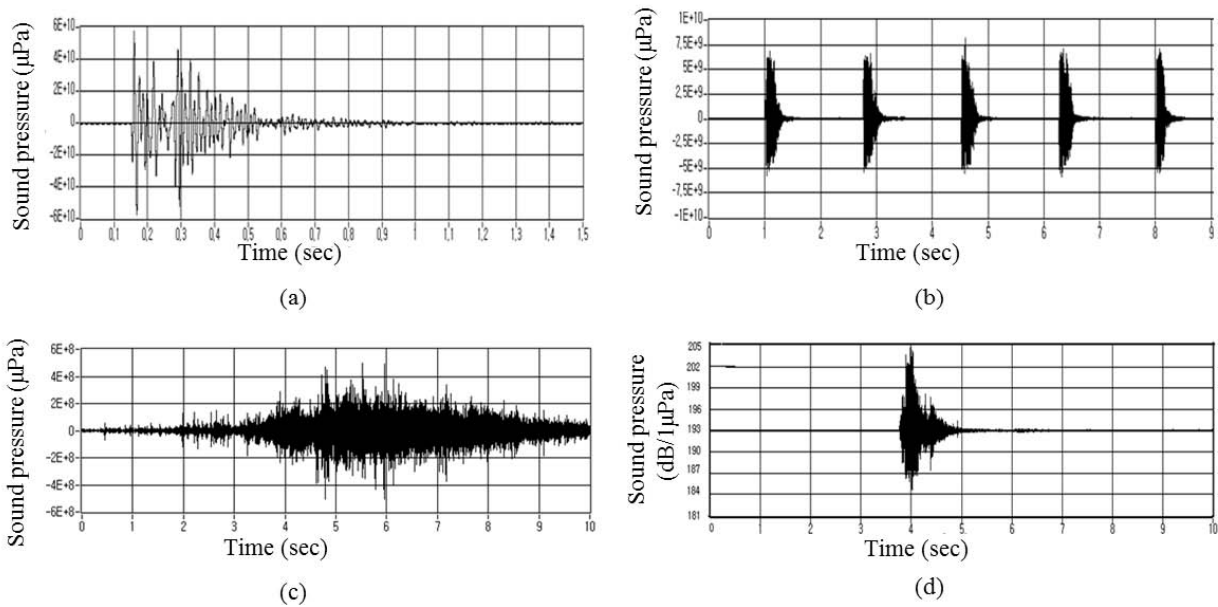


Fig. 7. Underwater noise measured, (a) at 300m from waterside blast; (b) at 10m from in-water drop hammer piling; (c) at 150m from dump truck unloading (Korea Inter-University Institute of Ocean Science, 2007, 2014).

음 (단일 주파수 혹은 조화음)과 광대역 음이 있다. 풍력 발전기와 선박소음은 순음과 광대역 음의 합성음이고 준설소음 및 굴착소음 등은 광대역 음이다. 후자의 과도음은 충격성과 비충격성이 있고 지속시간이 짧은 음이다. 충격성은 폭발음, 지층탐사용 공기 폭음 (Air Gun), 항타음 (낙하 항타)으로 짧은 상승시간을 갖고 비충격성은 충격성에 비해 상승시간과 지속시간이 긴 음으로 소나 신호음, 항타음 (진동 항타) 및 원거리에서 측정되는 충격성 음이다. 과도음의 피해 평가는 일회성 폭발음의 경우는 단일 음으로 평가되나 지층탐사용 공기 폭음과 항타음은 주기적으로 반복되므로 주기 및 횟수 등도 평가 요소에 고려된다.

Fig. 7은 과도음의 시간 파형이다 (Korea Inter-University Institute of Ocean Science, 2007, 2014). Fig. 7(a)~7(d) 각각 300 m 떨어진 육상 발파음을 수중에서 측정된 소음, 10 m 위치에서 측정된 수중파일 항타음, 150 m 위치에서 측정된 덤프트럭 사석 하역 소음 수중 소음, 200 m 위치에서 측정된 수중 지발 천공 발파음이다. Fig. 7에서 발파음과 파일 항타음은 지속시간이 1초 이하로 짧은 충격성이고 사석 하역 음은 약 5초의 지속시간을 갖는 비 충격성이다. Fig. 8은 파일 항타음의 거리별 시간파형 (Dahl, 2013)으로 Fig. 8에 표시된

평가치는 평가 척도에서 설명한다. Fig. 8(a)는 파일로부터 12 m 위치의 파형으로 지속시간이 아주 짧은 전형적인 충격파이다. 이러한 충격파는 수중발파에 의한 고온, 고압의 가스 구에 의해서도 발생하며 이상적인

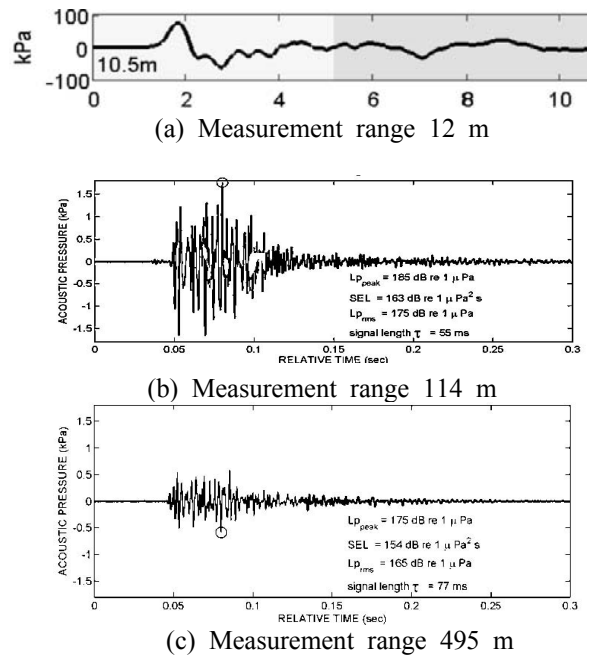


Fig. 8. Range dependent sound pressure time series for the radiated underwater noise from pile impact (Dahl, 2013).

충격파는 Friedlander파로 모델링된다 (Hamernik et al., 1991). 지속시간은 수 ms 이하로 에너지 스펙트럼은 1 kHz까지는 평탄하고 그 이상의 주파수에서는 6 dB/octave로 감소하는 것으로 알려져 있다.

연속음과 과도음의 피해 영향 평가를 위해서는 각 소음원의 1) 최대치, 유효치, 상승시간, 지속시간, 반복 횟수 및 주파수 범위 등을 고려한 음파신호의 평가 척도, 2) 어종 별 청각 손상, 물리적 손상 및 행동 반응 피해 유형, 3) 음향 척도로서 손상이나 반응을 야기하는 각 소음의 어종 별 피해기준이 요구된다.

음파신호의 평가 척도

음파의 음압 신호 $p(t)$ 가 상대적으로 긴 시간 지속될 때 연속음으로 평가한다. 이 때 음압의 유효치 P_{rms} , 음압 준위 SPL_{rms} , 세기 I (1초간의 에너지), 및 세기 준위 IL 은 다음 식으로 주어진다.

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad (4)$$

$$SPL_{rms} = 20 \log_{10}(P_{rms} / P_{ref}) = 20 \log_{10}(P_{rms} / \mu Pa) \quad (5)$$

$$I = P_{rms}^2 / \rho c \quad (6)$$

$$IL = 10 \log_{10}(I / I_{ref}) = 10 \log_{10}(I / (1 \mu Pa)^2 \rho c) = 10 \log_{10}(P_{rms}^2 / 1 \mu Pa^2) \quad (7)$$

여기서 T 는 평균시간이다. 공중소음의 경우 dBA는 마이크로폰의 신호 $p(t)$ 에 청취 가능 주파수 범위의 청각 가중치 필터를 적용한 신호이다. 공중소음과 수중소음의 기준 음압 P_{ref} 는 각각 20 μPa 과 1 μPa 이다. 교통소음이나 공사장 소음은 SPL_{rms} (dBA)의 값으로 평가되며 대략 40~70 dBA에서 이루어진다. 그러나 층간소음에는 SPL_{rms} (dBA) 평가가 부적합 (지속 시간이 짧아 평균 시간 T 에 따라 값이 변동)하여 L_{max} (dBA)를 적용한다. 식 (6)은 1초당의 에너지로 연속음의 경우 아주 낮은 음압 신호도 장 시간 수신하면 에너지는 아주 크게 될 수 있다.

어류의 경우에도 이와 같은 주파수 별 가중치 필터로 소음도를 평가하기 위해 dBht (species)를 제안하였다

(Nedwell et al., 2007). 각 어류의 주파수별 청각 역치가 가중치 필터 계수로 변환되며, 공중소음의 dBA는 dBht (Homo sapiens)로 표기될 것이다. 이와 같은 단위로 평가하면 각 어류의 소음 영향도를 평가하기 편리하며 비 음향전문가가 소음 영향을 평가하는데 유용하다. dBht (species)가 0~50 dB이면 소수 어류군이 약한 반응, 50~90 dB이면 대다수 어류가 강한 반응, 90 dB 이상이면 모든 어류가 회피 반응을 보인다고 제안하였다. 110 dB 이상이면 한계치를 벗어난다고 하였다. 공중소음의 경우 0~50 dBA (0~50 dBht (Homo sapiens))에서 인간의 소수 개체 집단이 약한 반응을 보인다는 의미이다.

그러나 인간에 대한 광범한 실험자료와 달리 어류에 대한 청각 역치 자료의 부족, 어종에 따른 다양한 행동 반응 형태, 동일 어종의 성, 연령, 크기 및 행동 동기 (식이, 구애 등)에 따른 반응 차이에 의해 아직은 불완전한 기준으로 보고 있다. 최초 제안자는 풍력 발전소음의 피해 영향 거리 예측에 적용하였고 (Nedwell et al., 2012) 국내에는 이를 적용한 어류용 소음계 설계 특화가 있다 (Yoon et al., 2016).

dBht (species)는 주파수 별 가중치 필터 구현을 위해 개별 어종의 청각 역치가 요구되나, 행동 반응 역치와 청각 역치는 비례하지 않으므로 청각 역치 자료를 직접 적용할 수 없고 입자 운동을 감지하는 어류에는 적용할 수 없다. 결론적으로 연속음에 대한 행동 반응 기준 설정은 여전히 어려운 것으로 알려져 있다.

과도음에 의한 부레 파열 등의 생리적인 반응 기준은 별도의 과도음의 평가 척도로 평가된다. 짧은 시간 지속되는 한 개 과도음을 식 (4)의 P_{rms} 로 평가하면 평균 시간 T 가 증가하면 0으로 접근하므로 과도음을 식 (4)의 P_{rms} 로 평가하는 것은 의미가 없다. 따라서 과도음은 최대 음압 준위 SPL_{peak} (= LP_{peak}), 총 에너지 E 및 노출소음도 SEL (Sound Exposure Level)로 평가된다.

$$SPL_{peak} = 20 \log_{10} (p_{peak} / 1 \mu Pa) \quad (8)$$

$$E = \frac{1}{\rho c} \int_0^{\infty} (p(t))^2 dt \quad (9)$$

$$SEL = 10\log_{10}(E/E_{ref}) = 10\log_{10}(E/[(p_{ref}^2 / \rho c)s]) = 10\log_{10}(\int_0^{\infty} p(t)^2 dt / 1\mu Pa^2 s) \quad (10)$$

항타음과 같이 여러 개의 과도음이 연속으로 발생하는 경우는 누적노출 소음도 (SEL cumulative)로 평가된다.

$$SEL_{cum} = 10\log_{10} \sum_{i=1}^N \int_0^{t_i} p_i(t)^2 dt / 1\mu Pa^2 s = SEL + 10\log_{10}(N) \quad (11)$$

여기서 t_i 는 한 개 과도음의 에너지가 0이 될 때까지의 시간이며, 식 (11)의 두 번째 식은 각각의 과도음의 SEL이 동일한 경우이다.

과도음을 유효치 음압으로 평가하기 위해 과도음 총 에너지의 90%를 점유하는 지속시간 T를 정의하고 다음식으로 P_{rms} 를 구한다 (Fig. 8의 LP_{rms}).

$$\sqrt{\int_0^T p(t)^2 dt} = \sqrt{0.9 \int_0^{\infty} p(t)^2 dt} \quad (12)$$

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad (13)$$

Fig. 9는 파일 항타음의 음압 신호 $p(t)$ 와 SEL의 관계를 보인다 (Bae et al., 2009).

결론적으로 연속음은 어류의 청각을 고려한 식 (4)~(7)로 평가되고 충격음은 식 (8)~(13)으로 평가된다

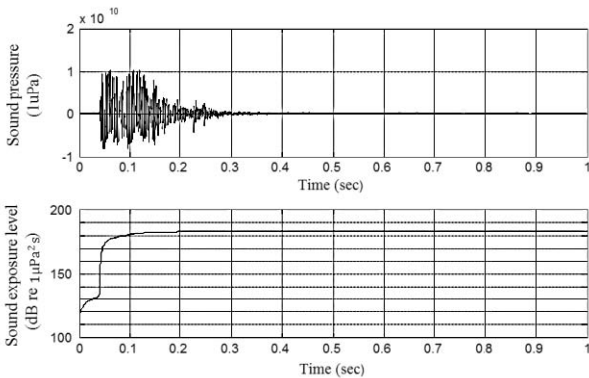


Fig. 9. Impulsive waveform and SEL of piling noise (Bae et al., 2009).

(신호처리 분야에서는 연속신호와 과도신호를 각각 전력신호와 에너지 신호로 구분한다). 그러나 최대치가 큰 연속음이나 지속시간이 긴 비 충격성 과도음의 평가는 (4)~(13)의 모든 식이 적용될 수 있을 것이다.

수중소음 피해 유형

미국 표준 협회 (ANSI: American National Standards Institute)는 수중소음 피해기준의 필요성을 인식하여 미국음향학회와 공동으로 피해기준 설정에 대한 가이드라인을 제시하였다 (ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014). 다음은 가이드라인에서 기술하는 어류에 대한 수중소음 피해 유형이다.

(1) 치사와 손상 : 치사나 손상은 아주 큰 음에 노출되거나 충격소음에 의한 압력 외상 (barotrauma)에 기인된다. 압력 외상은 급격한 압력 변화에 의한 조직 손상이다. 이 경우 혈액 속의 가스발생, 부레 혹은 기낭의 급격한 수축과 팽창으로 인한 주위 조직 손상 및 부레의 손상이다. 압력 외상은 압력의 시간 변화율이 큰 즉 충격성 소음에서 크게 발생한다. 압력 외상을 받으면 노출 후 즉사, 지연사, 회복 불능 장애, 성장 저하 등 다양한 형태로 나타난다.

(2) 청각 손상 : 영구적 혹은 일시적 청각 손상으로 구분된다. 일시적 청각 역치 변화 (TTS: Temporary Threshold Shift)가 일어난다. 이는 청각 유모세포나 청신경의 일시적 손상에 의해 발생한다. 어류는 포유류와 달리 유모세포 등의 손상이 발생하면 새로운 유모세포가 생기는 것으로 알려져 있다. 소음의 크기나 노출 시간에 따라 손상 기간이 결정된다. 청각 역치가 6 dB 이상 차이가 있는 경우 TTS가 있는 것으로 정의한다.

(3) 마스킹 : 소음에 의해 어류의 소음의 감지 능력이 저하되는 것으로 소음이 어류의 청각 역치보다 크게 되면 어류의 청각 능력은 저하된다. 이러한 결과로 어류의 반응 역치나 음 탐지 역치를 증가시키는 효과를 갖는다.

(4) 행동 변화 : 소음에 의한 행동 변화를 미국의 NRC (National Research Council)는 생물의 정상적인 활동 (성장, 서식, 산란 등)에 영향을 주는 것으로 정의하고 있고 대상 어종의 다수가 장기간의 행동, 분포, 식이, 회유 및 산란 등에 영향을 주는 것으로 정의한다. 어류에 대한 실험 (Popper et al., 2007; Sarà et al., 2007)으로

이러한 효과를 확인하는 것은 어렵고 비용이 많이 들 뿐만 아니라 실험결과를 자연상태의 어류의 행동 변화와 직접 비교할 수 없는 경우가 많다. 일시적 놀라움에 의한 도피반응은 행동반응에 포함시키지 않는다.

(5) 스트레스 : 소음이 인간에게 스트레스를 주는 바와 같이 어류에게도 스트레스를 줄 것으로 예상할 수 있지만 연구결과는 많지 않다. 수조 벽의 진동과 무지개 송어의 스트레스 반응과의 관계를 연구하여 진동 노출 후 1일에서 5일 사이에 serum cortisol의 뚜렷한 증가를 관측하였으나 정량화할 수는 없었다 (Gilham et al., 1984). 금붕어를 소음에 노출시켜 corticosteroid로 스트레스 레벨을 조사한 연구결과 통계적인 유의성을 보이는 레벨 변화는 없었다 (Smith et al., 2004). 사용한 소음은 0.1~10 kHz의 광대역 소음의 SPL_{rms} 가 170 dB/1 μ Pa이었다. 조피 볼락은 소음 노출에 의해 cortisol의 유의한 변화를 보였다는 국내 연구결과가 있다 (Lee, 2009).

수중소음 피해기준

Fig. 10은 수중 폭발음이나 항타음과 같은 충격파에 대한 SEL과 어류의 50% 치사율과의 관계를 보인다 (Yelverton et al., 1975; Hastings et al., 2005). Fig. 10에 표시된 실험결과는 부레가 있는 경골어류 5종 (minnow (*Gambusia affinis*), goldfish (*Carassius auratus*), carp (*Cyprinus carpio*), rainbow trout (*Salmo gairdneri*), and channel catfish (*Ictalurus punctatus*))과 부레가 없는 3종 (guppy (*Lebistes reticulatus*), bluegill (*Lepomis macrochirus*), and largemouth bass (*Micropterus salmoides*))이며, 0.02~744 g의 범위를 갖는다. 실선으로 표시된 예측치는 충격파를 Friedlander 파로 모의한 결과이다. 부레와 같은 기낭을 갖는 어류의 경우, 높은 음압에 의해 기낭이 진동하여 파열되며 충격파의 경우, 부 압력상태가 더 큰 영향을 갖는다 (Yelverton et al., 1975; Abbot et al., 2002). 아울러 혈관 내의 기포발생이나 모세관 파열에 의한 출혈, 기절 등이 발생한다 (Crum et al., 1996; Hasting, 1990, 1995). 이외에도 신장, 간, 눈이나 신경손상도 일어난다. 이러한 피해는 기낭 유무, 체중, 체형, 부레의 생 역학적 구조 등에 따라 다른 것으로 알려져 있다.

Fig. 10을 기초로 캘리포니아 교통부에 항타음의 규제

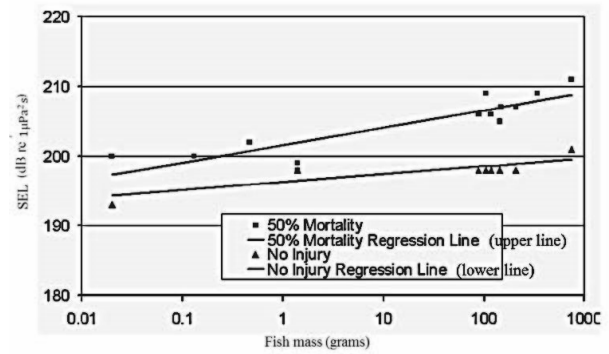


Fig. 10. Sound exposure level (SEL) that results in no mortality and 50 % mortality (Carlson et al., 2007).

기준안을 Table 1과 같이 제안하였고 (Carlson et al., 2007), 이에 근거하여 미국의 7개 기관 (NOAA's Fisheries Northwest and Southwest regions, US Fish and Wildlife service Regions 1 & 8, California/Washington/Oregon Departments of Transportation, California Department of Fish and Game, US Federal Highway Administration)은 TTS 이상의 피해 규제 기준은 어류 무게가 2g 이상일 경우 보수적인 기준으로 $SPL_{peak} = 206$ dB, $SEL_{cum} = 187$ dB로 하고, 0.5 g 이하는 $SEL_{cum} = 183$ dB 로 결정하였다 (Carlson et al., 2007). 어류 무게 0.5 g과 200 g 사이의 그래프 단위의 어류 무게와 SEL_{cum} 과의 관계식은 다음 식으로 주어진다.

$$SEL_{cum} = 186.47 + 11.53 \log_{10}(\text{mass}) \quad (14)$$

Table 1에서 Hearing specialist는 청각이 좋은 어종이며, Hearing generalist는 상대적으로 청각이 좋지 않은 어종으로 전자는 대부분 부레가 베버 소골로 연결되어 있는 어종이다. 전자가 약 20 dB 청각이 좋은 것으로 알려져 있다 (Popper et al., 2003; Ladich et al., 2004).

국내 연구로는 파일 항타음이 평상시 배경소음보다 약 37 dB 높은 경우 항어의 평균 유영속도가 평상시보다 약 1.4배 빠르게 관측되었다는 결과가 있고 (Shin, 2000), 수중발파, 수면 육상발파, 수중 파일 및 수중 쇄암봉에 대한 수중소음 현장 측정 자료에 식 (10)을 적용하여 어류 무게 별 피해거리를 제시한 결과가 있다 (Bae et al., 2009).

Table 2는 수중 폭발음에 대한 피해기준 가이드라인이다 (ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014). 폭발에 의한 충

Table 1. Underwater noise criteria recommendation for pile driving (Carlson et al., 2007; Caltrans, 2009)

Fish species	Immediate mortality	Physical injury	Non-Auditory tissue damage	Auditory tissue damage	TTS	Behavioral effects
Hearing generalist	upper line	lower line	Mass < 0.5 g	SPL _{peak} > 206 dB	SPL _{peak} > 207 dB	NA
			SEL _{cum} ≥ 183 dB	SEL _{cum} > 189 dB	SPL _{peak} > 185 dB	
Hearing specialist	upper line	lower line	Mass > 200 g	SPL _{peak} > 205 dB	SPL _{peak} > 205 dB	NA
			SEL _{cum} ≥ 213 dB	SEL _{cum} > 185 dB	SPL _{peak} > 183 dB	
			0.5 g < Mass < 200 g	SEL _{cum} > 185 dB	SPL _{peak} > 183 dB	
			SEL _{cum} = 186.47 + 11.53log ₁₀ (mass)			

Table 2. Underwater noise criteria guideline for underwater explosions (ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014)

Fish species	Mortality and potential mortal injury	Recoverable Injury	TTS	Masking	Behavior
no swim bladder (particle motion detection)	SPL _{peak} 229~234 dB	(N) High (I) Low (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) Low	NA	(N) High (I) Moderate (F) Low
swim bladder is not involved in hearing (particle motion detection)	SPL _{peak} 229~234 dB	(N) High (I) High (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) Low	NA	(N) High (I) High (F) Low
swim bladder involved in hearing (primarily pressure detection)	SPL _{peak} 229~234 dB	(N) High (I) High (F) Low	(N) High (I) High (F) Low	NA	(N) High (I) High (F) Low
Eggs and larvae	V _{peak} > 13 mm/s	(N) High (I) Low (F) Low	(N) High (I) Low (F) Low	NA	(N) High (I) Low (F) Low

격파는 폭심, 수심, 저질 등에 의해 결정되며 영향 범위는 근거리 (N: near, 음원으로부터 수십 미터), 중거리 (I: Intermediate, 음원으로부터 수백 미터) 및 원거리 (F: Far, 음원으로부터 수천 미터)로 구분되고 근거리는 충격파의 압축력, 원거리는 폭발에 의해 발생된 가스 구의 팽창력이 작용하는 영역이다. 피해는 부레와 같은 기관의 압력외상에 의한 치사 혹은 손상이다. 부레가 없는 어류는 있는 어류에 비해 피해거리는 1/100이라는 연구결과 (Goertner, 1978)가 있다. 폭발에 의해 행동변화는 있으나 일시적인 놀라움에 그치는 것으로 조사된

결과도 있다 (Eaton et al., 1981). 국내 연구로는 수중배경소음과 발파음의 최대치 차이가 약 23~50 dB 차이에서 유영속도 변화를 보이고 일시적 도피 행동을 보이다가 정상으로 되었다는 결과가 있다 (Shin, 1995).

Table 3은 파일 항타음의 피해기준 가이드라인 (ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014)으로, 이 기준은 부레 등의 구조가 서로 다른 연어, 역돔, 배스, 철갑상어 연구결과를 기준으로 제시한 치사, 손상 및 TTS가이드라인이다. Table 1과 유사하나 Table 3의 TTS 기준은 Table 1보다 약 1~3 dB 높은 값으로 보수적인 기준임을 알 수 있다.

Table 3. Underwater noise criteria guideline of pile driving (ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014)

Fish species	Mortality and potential mortal injury	Recoverable Injury	TTS	Masking	Behavior
no swim bladder (particle motion detection)	SEL _{cum} > 219 dB or SPL _{peak} > 213 dB	SEL _{cum} > 216 dB or SPL _{peak} > 213 dB	SEL _{cum} > 186 dB	(N) Moderate (I) Low (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) Low
swim bladder is not involved in hearing (particle motion detection)	SEL _{cum} > 210 dB or SPL _{peak} > 207 dB	SEL _{cum} > 203 dB or SPL _{peak} > 207 dB	SEL _{cum} > 186 dB	(N) Moderate (I) Low (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) Low
swim bladder involved in hearing (primarily pressure detection)	SEL _{cum} > 207 dB or SPL _{peak} > 207 dB	SEL _{cum} > 203 dB or SPL _{peak} > 207 dB	SEL _{cum} > 186 dB	(N) High (I) High (F) Moderate	(N) High (I) High (F) Moderate
Eggs and larvae	SEL _{cum} > 210 dB or SPL _{peak} > 207 dB	(N) Moderate (I) Low (F) Low	(N) Moderate (I) Low (F) Low	(N) Moderate (I) Low (F) Low	(N) Moderate (I) Low (F) Low

Table 4는 국내의 발파공학 저서 (Kang, 1998)에 있는 수중발파에 따른 썸뱅이, 볼락, 농어, 잉어, 참돔, 가자미, 장어 및 쥐노래미의 피해를 재분석한 내용이다. 자료의 출처가 분명하지 않아 에너지 값은 대략적인 값이며, SEL은 식 (10)을 적용하여 구한 값이다. 해수의 음향 임피던스 (pc)는 1.6×10^6 으로 하였다. 에너지가 50 J/m^2 이상이 되면 회복 불능어가 나타나기 시작하는데, 이는 수중 매단 발파에서 약 100 m 거리의 세기에 해당

하며, 1톤의 수중 천공 발파의 경우 약 150 m 거리의 세기에 해당한다고 한다. 자료의 출처는 분명하지 않지만 발파음의 SEL이 $203 \text{ dB}/1\mu\text{Pa}$ 이상이면 약 10%의 회복 불능어가 나타나는 결과이다. Fig. 10과 비교하면 1 g 무게의 어류가 50%의 치사율을 갖는 것과 유사하고 Table 3에서 부레가 있는 청각이 좋은 어종의 회복 가능 레벨의 한계치와 같다.

Table 5는 저 주파수 대역 (수 kHz)의 군용 소나 피해

Table 4. Underwater noise criteria guideline for underwater explosions (Kang, 1998)

Fishes	Mortality and potential mortal injury 10% E (J/m ²)	Mortality and potential mortal injury 30% E (J/m ²)	Mortality and Potential mortal injury 50% E (J/m ²)
Marbled rock fish	50	100	200
Dark-banded rockfish	200	300	400
Sea bass	200	200	200
Common carp	100	300	400
Red seabream	30	40	90
Flat fish	200 SEL=205 dB	5k SEL=219 dB	20k SEL=225 dB
Eel	>200 k SEL=235 dB	>200 k	>200 k
Greenling	>200 k	>200 k	>200 k

Table 5. Underwater noise criteria of low frequency sonar (ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014)

Fish species	Mortality and potential mortal injury	Recoverable injury	TTS	Masking	Behavior
no swim bladder (particle motion detection)	(N) Low	(N) Low	SPL _{rms} > 193 dB	(N) Low	(N) Low
	(I) Low	(I) Low		(I) Low	(I) Low
	(F) Low	(F) Low		(F) Low	(F) Low
swim bladder is not involved in hearing (particle motion detection)	SPL _{rms} > 193 dB	SPL _{rms} > 193 dB	SPL _{rms} > 193 dB	(N) Low (I) Low (F) Low	(N) Low (I) Low (F) Low
swim bladder involved in hearing (primarily pressure detection)	SPL _{rms} > 193 dB	SPL _{rms} > 193 dB	SPL _{rms} > 193 dB	(N) Moderate (I) Low (F) Low	SPL _{rms} > 197 dB
Eggs and larvae	(N) Low	(N) Low	(N) Low	(N) Low	(N) Low
	(I) Low	(I) Low	(I) Low	(I) Low	(I) Low
	(F) Low	(F) Low	(F) Low	(F) Low	(F) Low

기준 가이드라인이다 (ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014). 군용 소나 펄스는 상대적으로 지속시간이 길어 폭발음이나 향타음과 달리 SPL_{rms}로 평가된다 (Popper et al., 2007; Kane et al., 2010). Table 5에 보이는 바와 같이 정량적인 수치 기준은 청각이 가장 좋은 어류를 중심으로 일부 평가 항목에 제시되어 있다. Table 5에서 제시하는 정량적인 기준을 요약하면 TTS 이상의 피해를 야기하는 음압은 SPL_{rms}가 193 dB/1μPa 이상이라 할 수 있다.

실험자료 부족으로 치자어에 대한 정량적인 기준은 제시되어 있지 않으나 마스킹에 대한 청각이 우수한 어류와 비교하면 성어의 기준치보다 반드시 높지는 않음을 알 수 있다.

Table 6은 선박소음과 같은 연속음의 피해기준 가이드라인이다 (ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014). Table 6에 보이는 바와 같이 정량적인 수치는 청각이 가장 좋은 어류에 대한 것이다. 제시하는 정량적인 기준을 요약하면 TTS 이상을 야기하는 음압은 SPL_{rms}가 158 dB/1μPa

Table 6. Underwater noise criteria guideline for shipping and continuous sounds (ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014)

Fish species	Mortality and potential mortal injury	Recoverable injury	TTS	Masking	Behavior
no swim bladder (particle motion detection)	(N) Low	(N) Low	(N) Moderate	(N) High	(N) Moderate
	(I) Low	(I) Low	(I) Low	(I) High	(I) Moderate
	(F) Low	(F) Low	(F) Low	(F) Moderate	(F) Low
swim bladder is not involved in hearing (particle motion detection)	(N) Low	(N) Low	(N) Moderate	(N) High	(N) Moderate
	(I) Low	(I) Low	(I) Low	(I) High	(I) Moderate
	(F) Low	(F) Low	(F) Low	(F) Moderate	(F) Low
swim bladder involved in hearing (primarily pressure detection)	(N) Low	>170 dB for 48 h	>158 dB for 12 h	(N) High	(N) High
	(I) Low			(I) High	(I) Moderate
	(F) Low			(F) High	(F) Low
Eggs and larvae	(N) Low	(N) Low	(N) Low	(N) High	(N) Moderate
	(I) Low	(I) Low	(I) Low	(I) Moderate	(I) Moderate
	(F) Low	(F) Low	(F) Low	(F) Low	(F) Low

Table 7(a). Underwater noise criteria for in-land fish farm species (Fisheries Science Research Center, 2009)

Damage effects on in-land farm fish	Assessment sound pressure	Damage criteria
mortality, feeding, growth, reproduction and etc.	L_{Amax}	1) $L_{Amax} \geq 140 \text{ dB}/1\mu\text{Pa}$ 2) $\Delta L = L_{Amax} - NL \geq 20 \text{ dB}/1\mu\text{Pa}$ *NL: Ambient noise level

Table 7(b). Underwater noise damage and remuneration amount criteria for in-land fish farm species (Fisheries Science Research Center, 2009)

	Damage ratio 10%	Damage ratio 30%	Damage ratio 50%	Remarks
Direct damage on mortality	$L_{Amax} > 145\sim 150 \text{ dB}$	$L_{Amax} > 150\sim 160 \text{ dB}$	$L_{Amax} > 160 \text{ dB}$	Absolute level of sound
In-direct damage on feeding, growth, reproduction and etc.	$\Delta L = 20\sim 30 \text{ dB}$	$\Delta L = 30\sim 40 \text{ dB}$	$\Delta L = 40\sim 60 \text{ dB}$	$\Delta L = L_{Amax} - AN$

이상에서 12시간 이상 노출되는 경우이다.

연속음에 의한 치사 혹은 손상이 있다는 결정적 증거를 제시하는 연구결과는 아직 없으며, TTS 관련 증거는 부레가 내이와 직접 연결되어 있는 금붕어에 대한 것만 실험적으로 알려져 있다. 양식장의 무지개 송어는 9개월 동안 SPL_{rms} 150 dB/1 μ Pa에 노출한 결과 청각손실이나 건강 상태에 미치는 영향은 없는 것으로 발표하였고 (Wysocki et al., 2007), 연속소음인 선박소음이 어류의 행동변화 (도피, 속도변화, 군집성)를 야기한다는 연구들 (Mitson 1995, Engås et al., 1995; Sarà et al., 2007; Mitson et al., 2003; Ona et al., 2007)이 있지만 선박소음에 대한 반응을 계수화하는 것은 현재로서는 불가능한 것으로 알려져 있다.

Table 7은 서론에서 기술한 중앙환경분쟁조정위원회의 판례심판에서 적용하고 있는 육상 양식어류에 대한 피해기준 및 피해율 기준의 상세내용이다 (Fisheries Science Research Center, 2009).

Table 7(a)에서 첫째 기준은 임의 수중소음의 L_{Amax} 가 140 dB/1 μ Pa보다 높은 경우 피해가 일어난다고 정의

하였다. 두 번째 기준은 배경잡음으로 정의하여 수중소음의 L_{Amax} 가 배경잡음보다 20 dB 이상 높으면 피해가 일어난다고 정의하였다. 기준 설정 근거는 공중소음과 수중소음의 비교 해석, 기초실험, 일본 해양음향 학회지의 수중 천공 발파자료, 파일 항타에 의한 가물치 유영 속도 변화 및 연속음을 이용한 어류의 행동 변화자료를 참고한 것으로 판단된다.

Table 7(b)는 수중소음의 값에 따른 피해율 기준으로 피해율은 기존의 연구조사 보고서 결과를 인용하였다.

Table 8은 Table 7(a)의 기준이 폭발이나 항타음과 같은 충격성 소음에는 부적합하다는 이유로 제안된 충격성 소음에 대한 피해기준이다 (Choi et al., 2015).

피해영향 거리

인위적인 수중 음원에서 발생한 음파는 거리 증가에 따라 증가하는 전파손실 및 흡수손실에 의해 감쇠되고 해양생물체는 이러한 감쇠된 소음과 해양의 배경소음이 합쳐진 소음을 수신하게 된다. 피해를 야기하는 수중 음원으로부터 영향거리를 산출하기 위해서는 수중 음원 세기, 전파손실, 배경소음, 어류의 청각, 생리반응

Table 8. Underwater impulse noise criteria recommendation for in-land fish farm species (Choi et al., 2015)

Damage effects on in-land farm fish	Assessment sound pressure of blasting and pile driving	Damage criteria
mortality, feeding, growth, reproduction and etc.	L_{Amax}	1) $L_{Amax} \geq 160 \text{ dB}/1\mu\text{Pa}$ 2) $\Delta L = L_{Amax} - NL \geq 40 \text{ dB}/1\mu\text{Pa}$ *NL: Ambient noise level

및 행동반응을 유발하는 반응 역치의 각 요소가 결합된 피해영향 지배방정식이 정의되어야 한다.

수중소음이 어류에 미치는 범위 r 을 결정하는 지배방정식은 수동 소나 방정식 (Urlick,1983; Wahlberg et al., 2005)으로부터 식 (15)~(17)로 주어진다. 여기서 어류의 귀나 어류 손상은 소음과의 상대 방위에 관계되지 않는다고 가정한다.

$$RL = (SL - TLR) - NL \quad (15)$$

$$\Delta L = RL = (SL - TLR) - NL \text{ if } NL > ST \quad (16)$$

$$\Delta L = RL - ST = (SL - TLR) - ST \text{ if } NL > ST \quad (17)$$

여기서, RL , SL , TLr 및 NL 은 각각 어류가 수신하는 음압 준위 ($dB/1\mu Pa$), 수중 음원에서 1 m 떨어진 거리에서 측정되는 음원준위 ($dB/\mu Pa$ at 1 m), 전송손실 (dB) 및 배경잡음 ($dB/1\mu Pa$)이다. ST (Sensing Threshold)는 손상 혹은 감각 역치로 어류의 각 기관에 따라 다른 값을 갖는다. 만일 청각을 기준으로 하면 ST 는 HT 이며, 부레 손상 역치의 경우라면 부레가 압력 변화를 겨우 감지하는 최소 음압이 된다. 식 (16)과 (17)에서 ΔL 은 피해기준치(중앙 환경 분쟁 조정위원회 피해기준 참조)이다.

전송손실은 음원에서 r 거리 떨어진 어류까지의 손실되는 양으로 확산손실과 흡수손실로 구성된다. NL 은 어류가 서식하는 환경의 배경소음이다.

식 (15)~(17)은 단위주파수에 대한 스펙트럼 밀도 ($dB/\mu Pa/Hz$)를 적용하는 식으로 충격음 평가나 순음 평가 등에는 충격음의 최대치, 소음의 스펙트럼 밀도, 임계대역폭, 주파수 별 청각, 가청 주파수 대역 등을 고려하여야 한다. 예를 들면 충격음의 최대치, 충격음의 스펙트럼 밀도, 주파수 별 전송 손실, 어류의 주파수 별 청각 역치가 주어진 경우 최대 피해거리를 산출한다고 가정하자. 스펙트럼 밀도를 기준으로 하면 주파수 별 최대 피해거리를 예측해야 하며, 최대치를 기준으로 하면 최대치의 평균 전송손실과 총 배경잡음을 계산하여

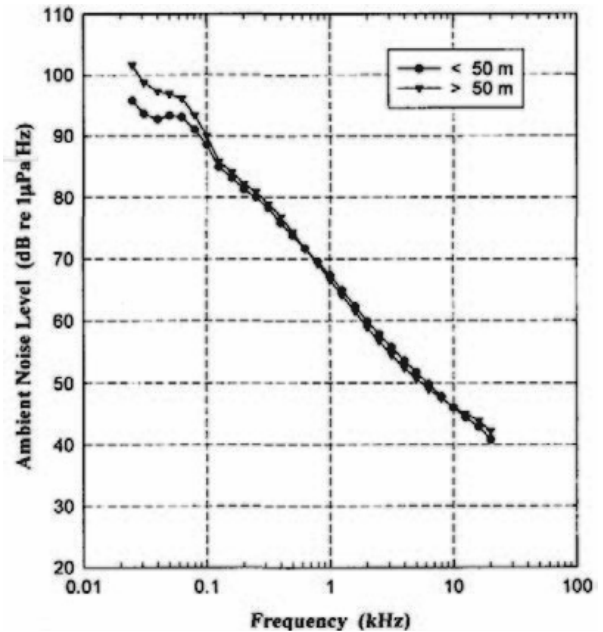


Fig. 11. Typical underwater ambient noise at shallow sea surrounding the Korean peninsula (Choi et al., 2003).

최대 피해거리를 예측해야 한다.

SL 은 수중 음원 특성(발파의 경우 천공, 장약량, 발파 매질 등에 의해 결정되고 ΔL 은 어중에 따른 청각 및 반응의 종류 (치사, 손상, 생리적 반응, 행동반응 등)에 의해 다양하게 결정된다.

배경잡음 NL 은 다양한 요인에 의해 결정되며 해양의 경우 통행선박이나 주위의 산업 활동에 의해 결정된다. Fig. 11은 한국 연안의 대표적인 배경소음의 특성이다 (Choi et al., 2003). Table 8은 캘리포니아 교통부 배경잡음 자료 (Caltrans, 2009)이다. 대부분의 국내 배경소음 자료는 스펙트럼 밀도로 주어져 있으나, Table 9는 총합 레벨로 주어져 있다. 파일 항타와 같은 충격파의 최대치 평가에 사용하기 위한 것으로 판단된다. 단일 주파수 평가에는 배경잡음의 스펙트럼 밀도가 요구된다.

피해거리 산출에서 중요한 요소인 전송 손실 TLr 은 음파 반사, 투과, 굴절 및 흡수와 더불어 장애물에 의한

Table 9. Underwater ambient noise measured at several shallow sea sites (Caltrans, 2009)

Location	Bay A	Bay B	Canal	Coast	Bay C	Bay D	Beach
Ambient noise levels	120~155 dBpeak 133 dBrms	147~156 dBpeak 132~143 dBrms	115~135 dBrms	74~100 dBpeak	113 dBpeak	116 dBpeak	138 dBpeak

회절, 산란 및 복 반사에 의해 발생한다. 흡수손실은 주파수가 커지면 증가한다. 경계나 장애물이 없는 공간에서 흡수손실이 없다면 식 (15)의 $T_{Lr} = 20\log_{10}r$ 로 최대 전송손실, 경계가 해면과 암반 해저로 되어있는 경우 $T_{Lr} = 10\log_{10}r$ 로 최소의 전송손실을 보인다. 그러나 수변 교량공사의 파일 항타 소음을 지속적으로 연구하는 캘리포니아 교통부 연구결과에 의하면 전송손실은 $5\log_{10}r \sim 30\log_{10}r$ 의 범위를 갖는다고 한다 (Caltrans, 2009).

전송손실 T_{Lr} 은 해양의 음향 물성이나 주파수 등에 의해 결정되고, 단일 주파수에 대해서도 수직방향으로 간섭이 일어나 여러 개의 정재파가 형성되며, 각각의 정재파는 각각의 수평방향 전파속도를 갖는다. 정재파의 주파수가 너무 낮으면 수평방향으로 전파해 가지 못하며 이러한 주파수의 하한 값을 차단주파수로 정의한다. 따라서 음원에서 발생한 주파수가 차단 주파수 이하이면 원거리까지 전파하지 못하게 된다. 차단 주파수는 식 (18)로 주어진다 (Urlick, 1983).

$$f_{cut} = \frac{c_w}{4h\sqrt{1-c_w^2/c_s^2}} \quad (18)$$

여기서, c_w 와 c_s 는 각각 물과 해저지질에서의 음속이고 h 는 수심이다. 해저지질은 층상구조로 되어 있으므로 실제의 차단주파수는 더욱 복잡한 특성이다. 해수의 음속을 1500 m로 가정하고, 해저지질의 음속을 1520 (빨)로 가정하는 경우 수심 10~100 m까지의 차단 주파수는 약 400~40 Hz의 범위를 갖고, 해저지질의 음속이 5000 m (암반)로 가정하는 경우 차단주파수는 약 40~4 Hz의 범위를 갖는다. 실제의 경우는 전달특성이 아주 복잡하며 얇은 천해에서의 수중 음파전달 과정은 해저에서의 여러 차례의 반사 또는 내부로의 투과 및 수층으로의 재 굴절 등의 영향을 받는다.

수변공사가 주로 이뤄지는 천해 환경에서는 수중 음속의 시공간적 분포와 같은 수층 내부의 물리적 인자보다는 해저의 구성 물질, 층 구조 및 탄성 정도 등에 의해 결정되는 해저면의 밀도, 음파 전달 속도, 저질 음파 전달 속도, 음파 및 전단파의 감쇠 계수, 퇴적층의 두께 등과 같은 해저면 관련 음향 인자가 전달 조건을 조절하는데 있어 중요한 역할을 하므로 해저면이 수중 음파

전달에 영향을 미치는 지배적 요인이라 할 수 있다 (Yoon et al., 2007).

수중소음 감쇠 대책

파일 항타 소음 감소를 위한 다양한 기술이 제안되었다 (Caltrans, 2009). 소극적인 대책과 적극적인 대책이 있다. 소극적인 대책은 다양한 형태의 기포막 (bubble curtain), 임시물막이 (cofferdam)이며, 적극적인 대책은 낙하 햄머 대신 진동 햄머 방식이나 햄머에 나무나 나일론의 쿠션 블럭 캡 사용으로 바꾸는 것이다. 진동 햄머 방식은 최대 음압을 줄일 수는 있으나 항타 시간이 길어지고 SEL은 오히려 커질 수 있고 부하가 작은 환경에서만 사용 가능하다. 기포막에 의해 약 20 dB 감쇠를 보이며, 나무 쿠션 블럭 캡으로 최대 26 dB, 나일론 캡으로 5 dB 감소 효과를 보인다고 한다. 폭발음의 감소 (Kang, 1998)에도 사용되는 기포막은 충격파의 세기, 기포 층의 기체 함유율 및 두께 등에 그 효과가 결정되는 것으로 알려져 있다.

결과 및 고찰

어류의 청각기관

어류의 귀나 측선의 구조, 기능 및 청각에 대한 다양한 연구결과는 생물 음향이나 동물의 생리에 관한 국외의 기초과학 전문 학술지에 발표되어 있다. 이러한 연구결과를 기초로 국내의 대표적 양식어종, 자연어 및 고유 어종에 대한 기초적 연구가 필요하다고 판단된다.

귀는 부레와 베버소골을 거쳐 입자운동으로 변환된 음압이나 머리 부분에서 직접 전달되는 입자운동을 감지하고 측선은 측선 구멍에서 직접 입자운동만을 감지한다. 입자운동 변화에 따른 측선 감각 기능에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. 이러한 연구는 파일 등의 수중 구조물에 의한 와류의 영향 평가에도 적용될 수 있을 것이다.

어류의 청각에 따른 분류 및 청각 역치

어류의 청각은 수중소음 피해기준 설정에 중요한 요소이다. 청각이 좋은 어종은 상대적으로 피해가 크다. 국외의 경우 치자어를 포함하여 4가지로 분류하고 있고, 국내의 경우는 골표류 등으로 구분하고 있다. 부레의 청각 기여도 등의 다양한 기술 (해부학, 생리학, 병리

학, 음향학 등)이 요구되어 어류의 청각에 따른 분류는 기술적으로 어렵다. 해부학적 구조(부레와 내이의 연결 구조)에 입각한 국외의 4가지 분류가 타당성을 갖는다고 판단되며, 이러한 해부학적 기준으로 국내 어종도 분류가 가능하다고 판단된다.

Fig. 3의 주파수에 따른 개별 어류의 청각 역치는 인간에게 적용하는 dBA와 같은 dBht (species) 단위의 피해기준과 어류용 소음계 제작에 필수적이다. 아울러 개별 어류의 가청 주파수 범위와 청각 역치는 수중소음의 분석 주파수 대역 설정에 필수적이다. Fig. 3에서 금붕어의 경우 청각 대역은 40 Hz~3 kHz, 대서양 대구는 40~500 Hz로 임의 수중소음의 분석 주파수 범위는 개별 어류의 청각에 좌우된다. 대안으로는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같은 국내외 자료를 수집 비교하여 유사어종에 대한 청각 역치로 할 수 있을 것이다. 또 다른 대안은 Fig. 4의 청각 역치 최저치를 모든 어종에 동일하게 적용하여 보수적인 기준으로 할 수 있을 것이다.

개별 어류의 청각 역치는 AEP나 ABR에 의해 실험적으로 측정 가능하나 국내 어종에 대한 결과는 제주 연안의 어종에 불과하다. 따라서 국내 어종에 대한 지속적인 청각 역치 자료는 피해기준 설정의 기초자료로서 가치가 있다 하겠다. ABR 등의 측정을 위한 실험수조는 결과의 정확성을 위해 벽면반사파나 정제파 등의 음향환경에 주의를 요한다.

AEP나 ABR에 의한 청각 역치와 행동반응 역치와는 비례하지 않아 행동반응 역치는 별도의 실험이 요구된다. 그러나 이는 기술이나 비용 측면에서 어려운 문제로 인식되고 있다.

어류의 임계대역폭과 마스킹

기술한 바와 같이 어류의 임계 대역폭은 풍력발전 혹은 선박소음과 같이 순음 소음이 있는 경우 피해거리 평가에 특히 중요성을 갖는다. AEP나 ABR에 의한 어류의 청각 역치 연구에 임계대역폭에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다. 국외의 경우에도 임계대역폭에 대한 연구결과는 소수이며, 국내의 경우도 2편에 불과하다 (Ahn et al., 1999; Seo et al., 2003). 임계대역폭을 피해영향 거리에측에서 고려하지 않으면 피해거리는 커진다.

수중소음 평가척도 및 피해유형

음파신호의 평가 척도

국외의 경우 수중소음을 폭발음, 공기 폭음 (Air gun), 향타음 (낙하 향타, 진동향타), 소나음 및 연속음으로 구분하여 평가한다. 평가 척도는 폭발음, 공기 폭음 및 향타음은 지속시간이 짧으므로 최대음압 (SPL_{peak}), 총 에너지 (E), 총에너지 레벨 (SEL)로 평가되며 소나음과 연속음은 지속시간이 길어 유효음압 (SPL_{rms})과 청각 가중치 음압 dBht (species)으로 평가된다. 국내의 경우는 수중소음의 구분에 일관성이 없고 평가척도에 대한 정의가 명확하지 않으며, 동일한 수중소음에도 연구자마다 적용하는 평가 척도가 다르다. 따라서 국내의 경우에도 공사 공정에 따라 수중소음을 구분하고 각 소음 고유의 평가 척도를 명확히 정의하여 적용할 필요가 있다고 판단된다.

예를 들면 충격음의 유효치 평가척도는 “식 (12) 와 (13)을 적용한 충격음 유효치 SPL_{rms} 를 적용하고 청각 가중치는 적용하지 않으며, 주파수 대역은 10 Hz~10 kHz (Fig. 4 참조)로 할 수 있다.”

공중소음의 층간 충격음 평가 기준 “A 가중치를 적용하고 20 Hz~20 kHz 대역의 1분간 등가 소음도 L_{eqms} 로 평가하고 아울러 평균시간 T를 1초로 하여 전체 60 개 중 가장 큰 값을 L_{Amax} 로 하여 평가한다”의 설정근거는 다음과 같다. 층간 충격음은 보통 1분 정도로 쿵쿵거리는 소리가 반복되며 상대적으로 큰 소리도 있으므로 L_{Amax} 로도 평가하는 것이다. 아울러 쿵 소리는 1초 이상 지속되므로 평균시간 T를 1초로 하는 것이다.

Table 6에서 L_{Amax} 는 L_{max} 로 수정되어야 하며, 이는 A의 의미는 사람의 청각 가중치를 의미하므로 어류 평가 척도 단위에 사용할 수 없다. L_{max} 를 평가척도로 사용하기 위해서는 수중소음 특성 (연속성, 충격성 등)을 고려한 평균시간 T, 가중치 필터 적용유무, 주파수 대역 등이 정의되어야 할 것이다.

결론적으로 국내 수중 소음 평가척도에도 수중소음의 특성에 따라 평가척도가 달라져야 한다고 판단된다.

수중소음에 의한 피해 유형

국외의 경우, 1) 치사와 손상, 2) 청각 손상, 3) 마스킹, 4) 행동반응, 5) 스트레스로 피해유형을 구분하고, 피해유형에 따라 평가 척도 (SEL 등) 값으로 피해기준

을 제시한다. 국내의 경우는 피해유형 전체를 단일화하여 기술하고 있다.

국외 연구결과에 의하면 행동반응이나 스트레스가 식이, 성장 및 산란 등에 미치는 효과는 정량적인 평가가 어려운 것으로 알려져 있다. 일시적 놀라움이나 도피 행동은 행동반응 (대상 어류 다수에 장기간 식이 등에 영향을 주는 반응으로 정의)이 아니라고 정의하고 있다.

수중소음 피해기준

국외의 경우 5개 피해 유형에 대한 충격음의 SPL_{peak} 와 SEL의 피해기준을 제시하고 있다 (Table 1~3, Table 5). 피해유형 중 마스킹, 행동반응 및 스트레스에 대해서는 정량적인 수치는 제시되어 있지 않다. 이는 행동변화나 스트레스 징후에 대한 충격음의 정량적인 피해 평가가 현재의 연구결과로는 불가능한 이유이다. 연속음에 대해서는 SPL_{rms} 기준 (Table 6)으로 청각이 좋은 어류에 대해서는 손상과 청각 역치 변화에 대한 기준만이 제시되어 있고 풍력 발전에 의한 연속음 피해에 어종별 dBht (species)로 평가를 시도하고 있다.

국내의 경우는 최대 음압 L_{max} 140 dB 기준과 L_{max} 와 배경소음과의 차이 (ΔL) 기준을 혼용하고 있다 (Table 7). Table 7은 일본의 연구결과를 인용하여 적용한 것으로 판단되며, 인용 내용은 “어류의 위험레벨 140~160 dB/1 μ Pa”이다. Table 7의 기준이 충격음 평가에는 부적합하여 동일한 평가척도에 20 dB를 더한 Table 8의 피해기준이 제안되었다.

Table 7과 8은 평가척도의 관점에서 재고되어야 한다. 식 (4)와 (13)에서 보는 바와 같이 소음분석에서 평균시간 T는 중요한 의미를 갖는다. 예를 들면 T=1 s로 가정하고, 아래에 T가 평가척도 및 피해기준에 미치는 영향을 기술한다.

소음 신호가 연속음이고 시간적으로 변동이 없으면 신호를 취하는 시각에 관계없이 1초간의 SPL_{rms} 는 동일하다. 교통소음은 연속음이나 통과하는 차종이 변화하므로 일정시간 (예를 들면 10분) 데이터 (1초간의 SPL_{rms})들을 평균하여 등가소음도 L_{eqArms} 로 평가된다.

그러나 소음 신호가 짧은 증간 충격음의 경우는 10분간의 데이터의 L_{eqArms} 는 의미가 없다(평균치가 아주 낮게 됨). 따라서 증간 소음의 지속시간이 약 1분이라고

가정하고 1분간의 등가소음도로 평가되며, 이때 각 데이터(1초간 데이터) 중에서 가장 높은 값을 보이는 최대치 L_{Amax} 로도 평가된다.

수십 초 이상 지속되는 증간 소음과 달리 수중 폭발이나 파일 향타음은 Fig. 7과 8에서 보는 바와 같이 지속시간이 1 s 이하이다. 이 경우 T=1 s로 하면 유효치 SPL_{rms} 는 의미가 없게 되며, 식 (12)와 (13)으로 SPL_{rms} 을 계산해야 한다 (Fig. 8의 4가지 평가 척도 지표에서 L_{prms} 와 τ 참조). 따라서 Table 7을 보다 과학적 평가척도로 사용하기 위해서는 적용 대상의 수중소음 종류, 청각 가중치 필터, 평균시간, 주파수 대역이 정의되어야 할 것이다.

예를 들면 만일 평균시간을 1초로 하여 모든 소음에 적용한다고 가정하면, 수초 이상 지속되는 수중소음의 경우는 $SPL_{rms}(L_{max})$ 를 평가할 수 있으나 1초 이하의 충격음의 $SPL_{rms}(L_{max})$ 는 실제보다 낮게 평가될 것이다. 평균시간이 명확히 정의되지 않은 이유로 Table 8의 기준도 제고되어야 할 것이다.

기술한 바와 같이 국외의 경우는 충격음 (에너지 신호)과 연속음 (전력신호)의 평가척도 및 피해기준이 다르다.

피해영향거리

피해 영향거리를 산출하기 위한 수중 음원 세기, 전송손실, 수중배경소음과 어류의 청각, 생리반응 및 행동반응을 유발하는 반응 역치의 각 요소가 결합된 피해 영향 지배방정식이 제시되었다. 지배 방정식 변수의 정량적인 수치는 이들 각각의 특성에 좌우되며 지배 방정식에 의한 피해거리 산출은 발파, 수중 음향 혹은 생리음향 분야 등의 전문 기술이 요구된다. 수중소음, 청각, 전송손실 및 배경잡음의 주파수 특성 및 어종에 따른 청각 임계대역폭에 관한 연구가 요구된다.

수중소음 감쇠대책 및 기타

수중소음을 발생시키는 수변 공사 측의 효과적인 소음 감쇠 대책이 요구된다. 수중 소음 피해기준을 제시하기 위해서는 감쇠효과의 측정기술을 포함하여 수중소음 측정/분석 시스템, 음향/수중음향에 대한 기초지식 및 생물음향에 대한 기초지식이 요구된다.

수변 공사장 인근 어류의 피해 관련 국내 연구보고서

에서 기술하고 있는 일차적 피해요인은 지반진동과 공중소음이다. 많은 보고서에서 공중소음이 수면 경계층을 투과하여 수중소음으로 변환되는 과정이 기술되어 있고 지반진동과 공중소음을 어류피해기준으로 제시하고 있다. 이는 지반진동과 공중소음이 높으면 수중에 있는 어류가 피해가 있을 것이라는 해석이다. 바닥에 접하고 있는 어류를 제외하면 어류는 수중소음을 감지하므로 지반진동이나 공중소음이 수중소음으로 변환되는 기구와 수중소음 예측에 대한 수학적 모델이 제시되지 않으면 과학적 평가 방법으로 적용할 수 없다고 판단된다.

수변 공사장의 육상 항타나 육상 발파의 경우, 공중소음과 지반진동 양자에 의해 수중소음이 발생하며 전파환경의 물리적 복잡성에 의해 수중소음 예측을 위한 수학적 모델은 대단히 어려운 문제로 판단된다. 따라서 다양한 음파전달 환경에 대한 수중소음의 실험적 자료 축적이 요구된다. 또한 마이크로폰을 이용하는 공중 소음계의 사양 (예를 들면 Fast/Slow/Impulse Mode 등)은 공중소음 측정에 최적화 되어 있어 이를 수중소음 측정이나 해석에 적용할 수 없는 경우가 많다. 범용의 수중소음계는 흔하지 않으므로 수중청음기로 측정된 시간 신호를 저장한 후, 신호처리 소프트웨어를 이용하여 피해기준치 도출에 적용해야 할 것이다.

아울러 음파의 전파 경로에 대한 해석 없이 지반진동과 공중소음이 높으면 수중소음도 높을 것이라는 사고를 지양하고 어류가 겨우 들을 수 있을 정도의 수중소음도 서식환경에는 피해를 줄 것이라는 친환경 책임을 인식해야 할 것이다.

결론

각국은 환경보호나 어류피해를 최소화하기 위해 소음노출 피해기준을 법제화하여 규제하려고 하지만 여전히 과학적인 자료가 부족하여 법제화나 규제는 제한적이다. 즉 미국 교통부 (FHWA)를 포함한 7개 기관이 채택하고 있는 파일 항타 피해기준인 Table 1이나 미국 표준 협회 (ANSI)의 Table 3도 정량적인 측면에서 여전히 추가적인 연구 보완 (행동반응 피해기준 등)이 필요하다.

“자료 및 방법”에서 기술한 피해기준 설정의 분야 기술이 미흡하여 현재로서는 국내의 개별 연구자들의

피해기준이나 중앙환경분쟁조정위원회의 피해기준이 다를 수 있으나, 요소 기술의 지속적인 연구로 장기적으로는 보다 과학적이고 객관적인 수중소음에 의한 어류피해기준 설정이 요구된다.

수중소음의 특성에 따라 평가척도와 피해기준이 달라져야 한다는 이유로 중앙환경 분쟁 조정 위원회가 제시하는 피해기준인 Table 6도 수정되어야 한다는 지적이 있으나 과학적 객관성과 사회적 합의에 의한 법제화는 여전히 어려운 현실이다. 어류 귀의 해부학적 생리적 청각 인지 기구나 다양한 수중소음의 평가척도 등을 위시한 요소 기술들의 수준 향상이 요구된다.

피해유형을 청각 역치가 일시적으로 변화는 범위 (TTS)까지로 하고, 충격음에 대한 국외의 Table 1과 연속음에 대한 Table 6을 도입하여 국내의 새로운 피해기준으로 채택할 수도 있다. 그러나 수중소음 피해분쟁 시비 당사자들의 상반된 이해에 대한 충격을 완화하기 위해서는 새로운 기준으로 기존의 국내 어류피해 관련 보고서의 피해범위나 피해액을 재평가하여 채택여부를 판단해야 할 것이다. 즉 국외의 과학적인 평가기준을 적용한 새로운 피해기준은 사회적 합의가 우선적으로 반영되는 보수적인 기준이 되어야 한다고 판단된다.

국외의 기존 피해기준은 주로 해양의 야생 어류에 대한 것으로, 국내의 해수 및 담수 양식장과 같은 제한된 공간의 어류 생리 및 행동 반응에 대한 피해기준과는 다를 수 있어 독자적인 피해기준을 구축할 수도 있다. 따라서 제한된 공간에 서식하는 대표적 어종에 대한 피해 영향 평가가 요구되며, 이는 어시장의 수족관 어류의 스트레스 반응과 같은 기초적 연구도 포함될 수 있을 것이다.

본문의 많은 부분에서 인용한 미국 표준 협회 (ANSI)의 피해기준 가이드라인 (ASA S3/SC1.4 TR-2014, 2014)은 12개의 민관군 및 대학/연구소/학회의 21명의 전문가 집단에 의해 제안된 것이고, 캘리포니아 교통부의 파일항타 피해기준은 거의 10년간의 연구결과이다. 따라서 보다 과학적이고 객관적인 수중소음 노출에 의한 어류피해기준을 법제화하고 규제하기 위해서는 수중소음 원인 제공자, 피해 요소기술 전문가 및 규제 관리자로 구성되는 연구 집단에 의한 장기적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2015년)에 의하여 연구되었습니다.

References

- Abbott R and Bing-Sawyer E. 2002. Assessment of pile driving impacts on the Sacramento blackfish, *Orthodon microlepidotus*. Draft report prepared for Caltrans District 4.
- Ahn JY, Lee CH, Kim YJ and Park YS. 1999. The auditory thresholds and fish behaviors to the underwater sounds for luring of target species at the set-net in the coast of Cheju (II)-Critical ratios of the yellow tail (*Seriola quinqueradiata*). *Bull Korean Soc Fish Tech* 35(1), 19-24.
- ASA S3/SC1.4 TR-2014. 2014. Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI -Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI. Springer and ASA Press, Cham, Switzerland, 73.
- Au WWL and Moore PWB. 1990. Critical ratio and critical bandwidth for the Atlantic bottlenose dolphin. *J Acoust Soc Am* 88, 1635-1638.
- Bae JW, Park JH and Yoon JR. 2009. Characteristics of impulsive noise of waterfront construction site and its effects on fishes. *Trans KSNVE* 19, 928-934.
- Carlson T, Hastings M and Popper AN. 2007. Update on recommendations for revised interim sound exposure criteria for fish during pile driving activities. Memorandum.
- Caltrans. 2009. Technical guidance for assessment and mitigation of the hydroacoustic effects of pile driving on fish, 367.
- Cho MK. 2013. Physiological effects of construction noise on fresh water fish farming. PhD. dissertation, Chungbuk National University, Korea.
- Choi BK, Kim BC, Kim C and Kim BN. 2003. Analysis of dependence on wind speed and ship traffic of underwater ambient noise at shallow sea surrounding the Korean peninsula. *J Acoust Soc Kor* 22(3), 233-241.
- Choi TH, Kim JH, Song HL and Ko CS. 2015. Suggestion of safety level in fish farming by impulsive sound. *Tunnel & Underground Space* 25(2), 125-132.
- Coombs S and Montgomery JC. 1999. The enigmatic lateral line system, In: Fay, R. R., and Popper, A. N. (eds.) *Comparative Hearing: Fish and Amphibians*. Springer-Verlag, New York, 319-362.
- Dahl PH. 2013. The underwater sound field from impact pile driving and its potential effects on marine life. *Acoustic Today* 11, 18-25.
- Crum LA and Mao Y. 1996. Acoustically enhanced bubble growth at low frequencies and its implications for human diver and marine mammal safety. *J Acoust Soc Am* 99, 2898-2907.
- Denton EJ and Gray JAB. 1989. Some observations on the forces acting on neuromasts in fish lateral line canals, In: *The mechanosensory lateral line-neurobiology and evolution* (Coombs S, Görner P, Münz M, eds), Springer-Verlag, Berlin, 229-246.
- Denton EJ and Gray JAB. 1993. Stimulation of the acoustico-lateraline system of clupeid fish by external sources and their own movements. *Phil Trans Roy Soc Lond Ser B* 341, 113-127.
- Division of Ocean Technology, Chonnam National Univ. 2006. Judgement report on fish farm damage by Godal bridge construction, 267.
- Eaton RC, Lavender WA and Wieland CM. 1981. Identification of mauthner-initial-response patterns in the goldfish, evidence from simultaneous cinematography and electrophysiology. *J Comp Physiol* 144, 521-531.
- Engås A, Misund OA, Soldal AV, Horvei B and Solstad A. 1995. Reactions of penned herring and cod to playback of original, frequency-filtered and time-smoothed vessel sound. *Fisheries Res* 22, 243-254.
- Fay RR. 2011. Signal-to-noise ratio for source determination and for a comodulated masker in goldfish, *Carassius auratus*. *J Acoust Soc Am* 129(5), 3367-3372.
- Fisheries hydroacoustic working group-Federal Highway Administration. 2008. Agreement in principle for interim criteria for injury to fish from pile driving activities. Memorandum.
- Fisheries Science Institute, Chonnam National Univ. 2009. In-land fish farm damage and remuneration amount on sound and vibration by near-by construction. 133.
- Gilham ID and Baker BI. 1985. A black background facilitates

- the response to stress in teleosts. *J Endocrinol* 105, 99-105.
- Goertner JF. 1978. Dynamical model for Explosion injury to fish. Naval Surface Weapons Center White Oak Lab, Silver Spring, MD Report No, NSWC/WOL/TR-76-155.
- Hastings MC. 1990. Effects of underwater sound on fish. Document No 46254-900206-01IM, Project No. 401775-1600.
- Hastings MC. 1995. Physical effects of noise on fishes. Proceedings of INTER-NOISE 95; The 1995 International Congress on Noise Control Engineering, vol. II, 979-984.
- Hastings MC, Popper AN, Finneran JJ and Lanford PJ. 1996. Effect of low frequency underwater sound on hair cells of the inner ear and lateral line of the teleost fish, *Astronotus ocellatus*. *J Acoust Soc Am* 99, 1759-1766.
- Hastings MC and Popper AN. 2005. Effects of sound on fish. California Department of Transportation Contract 43A0139 Task Order 1, 82.
- Hamernik RP and Hsueh KD. 1991. Impulse noise: some definitions, physical acoustics, and other considerations. *J Acoust Soc Am* 90, 189-196.
- Hawkins AD and Chapman CJ. 1975. Masked auditory thresholds in the cod, *Gadus morhua*. *J Comp Physiol* 103, 209-226.
- Ingemansson, 2003. Utgrunden off-shore wind farm- Measurements of underwater noise report 11-00329-03012700, 30.
- Institute of Sound and Vibration Engr, Pukyong National Univ. 2007. Consultant report on fish farm damage by Godal bridge construction, 142.
- Kane AS, Song J, Halvorsen MB et al. 2010. Exposure of fish to high intensity sonar does not induce acute pathology. *J Fish Biol* 76, 1825-1840.
- Kang, DW. 1998. Gumiseokwan, Seoul, 261-270.
- Kinsler LE, Frey AR, Coppens AB and Sanders JV. 2000. Fundamentals of Acoustics. 4th ed. John Wiley & Sons, New York, 113-126; 310-321.
- Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University. 2005. Fisheries damage by rock removal process for Busan New Port emergency passage, 271.
- Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University. 2007. Fisheries damage by Busan-Kimhae light railroad construction, 188.
- Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University. 2014. Fisheries damage by National Highway 600-Busan outer circle road construction, 254.
- Ladich F and Popper AN. 2004. Parallel evolution in fish hearing organs: In *Evolution of the Vertebrate Auditory System*. Springer-Verlag, New York, 98-127.
- Lee CH. 2000. Study on auditory characteristics of fishes around the coast of Cheju island in Korea. PhD. dissertation, Jeju National University, 108.
- Lee CH. 2009. Stress response of black rock fish according to adapted time in measurement of auditory threshold. *J Korean Soc Fish Technol* 45(4), 260-266.
- Madsen PT, Wahlberg M, Tougaard J, K. Lucke JK and Tyack P. 2006. Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Mar Ecol Prog Ser* 309, 279-295.
- Mitson RB. 1995. Underwater noise of research vessels. Cooperative research report; international council for the exploration of the sea, 65.
- Hamernik RP and Hsueh KD. 1991. Impulse noise: some definitions, physical acoustics and other considerations. *J Acoust Soc Am* 90, 189-196.
- Müller A and Zerbs C. 2011. Niederlassung Hamburg offshore wind farms measuring instruction for underwater sound monitoring. Müller-BBM GmbH, 62.
- Mitson RB and Knudsen HP. 2003. Causes and effects of underwater noise on fish abundance estimation. *Aquatic Liv Res* 16, 255-263.
- National Environmental Dispute Medication Commission, 2010. Environmental dispute medication cases of provinces.
- Nedwell JR, Edwards B, Turnpenny AWH and Gordon J. 2004. Fish and marine mammal audiograms: A summary of available information. Subacoustech report 534R0214, 278.
- Nedwell J, Mason T, Barham R and Cheesman S. 2012. Assessing the environmental impact of underwater noise during offshore windfarm construction and operation. Proceedings of Acoustics 2012, Fremantle, Australia, 1-5.
- Ona E, Godø OR and Handegard NO. 2007. Silent research

- vessels are not quiet. *J Acoust Soc Am* 121, EL145-EL150.
- Popper AN and Clarke NL. 1976. The auditory system of the goldfish, *Carassius auratus*: Effects of intense acoustic stimulation. *Comp Biochem Physiol A* 53, 11-18.
- Popper AN, Fay RR, Platt C and Sand O. 2003. Sound detection mechanisms and capabilities of teleost fishes: In sensory processing in aquatic environments. Springer-Verlag, New York, 3-38.
- Popper AN, Halvorsen MB and Kane E. 2007. The effects of high-intensity, low-frequency active sonar on rainbow trout. *J Acoust Soc Am* 122, 623-635.
- Richardson WJ, Greene CR, Malme CI and Thompson DH. 1995. Marine mammals and noise. Academic Press, San Diego.
- Sarà G, Dean JM and D'Amato D. 2007. Effect of boat noise on the behaviour of bluefin tuna, *Thunnus thynnus* in the Mediterranean sea. *Mar Ecol Prog Ser* 331, 243-253.
- Seo YJ, Kim SH, Kim BY, Lee CH and Seo DO. 2003. A fundamental study on the auditory characteristics of Amberjack *Seriola dumerili* in the coast of the Jeju island. *Bull Korean Soc Fish Tech* 39(4), 269-274.
- Smith ME, Kane AS and Popper AN. 2004. Noise-induced stress response and hearing loss in goldfish, *Carassius auratus*. *J Exp Biol* 207, 427-435.
- Shin HO. 2000. Effect of the filing work noise on behavior of Israeli carp, *Cyprinus carpio* in the cage of aquaculture. *J Kor Fish Soc* 33, 348-355.
- Shin HO. 1995. Effect of dynamite explosion work noise on the behavior of snakehead, *Channa argus*. *J Kor Fish Soc* 28, 492-502.
- Southall BL, Schusterman RJ and Kastak D. 2001. Masking in three pinnipeds: underwater low-frequency critical ratios. *J Acoust Soc Am* 108,1322-1326
- Subacoustech Ltd. A review of offshore windfarm related underwater noise sources Report No. 544 R 0308, 57.
- Suga T, Akamatsu T, Kawabe R, Hiraishi T and Yamamoto K. 2005. Method for underwater measurement of the auditory brainstem response of fish. *Fisheries Science* 2005, 71, 1115-1119.
- Tavolga WN. 1974. Signal/noise ratio and the critical band in fishes, *J Acoust Soc Am* 55, 1323-1333.
- Urick RJ. 1983. Principle of underwater sound. 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 17-30; 147-236.
- Wahlberg M and Westerberg H. 2005. Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms, *Mar Ecol Prog Ser*, 288, 295-309.
- Wysocki LE, Davidson JW III, Smith ME. 2007. Effects of aquaculture production noise on hearing, growth, and disease resistance of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture* 272, 687-697.
- Yelverton JT, Richmond DR, Hicks W, Saunders K and Fletcher ER. 1975. The Relationship between fish size and their response to underwater blast. Report DNA 3677T, Defense Nuclear Agency, Washington DC.
- Yoon JR, Lee SW and Park KC. 2007. Studies on the characteristics of sound propagation for the passive and active sonars deployed near the bottom of shallow waters. Agency for Defense Development, ADDR-420-071129. 68.
- Yoon JR, Park JH and Seo CW. 2016. Sound level meter for aquatic animal. Korea Patent No 1016281620000.

2017. 01. 09 Received

2017. 02. 16 Revised

2017. 02. 16 Accepted