

# 수중소음이 어류에 미치는 영향 Effects of Underwater Noise on Fishes

윤종락<sup>†</sup>·이성욱\*·안수용\*\*·박지현\*\*\*·배종우\*\*\*·안명석\*\*\*\*

Jong Rak Yoon, Seongwook Lee, Soo-Yong Ahn, Ji-Hyun Park, Jong Woo Bae and Myung-Seog Ahn

Key Words : Anthropogenic underwater sound(인위적인 수중 소음), Pile driving sound(항타소음), Hearing of fish(어류의 청감), Ocean noise pollution(해양소음공해)

### ABSTRACT

Anthropogenic underwater sound such as ship radiated noise, pile driving noise, underwater explosive blast and so on, affects marine animals. This study describes the effects of underwater noise on fishes. The characteristics of noise, fish hearing and response, and sound propagation loss are analysed based on existing results and measured data in marine construction site. Finally, the safety zone range of fish on man made underwater noise is derived,

에 대한 감각 및 반응특성, 다양한 수중소음의 특성과 어류

## 1. 서론

인위적인 소음이 인간은 물론 동물에게도 해로운 영향을 미치며 해양포유류나 어류 등의 수서생물에게도 마찬가지로 이러한 소음이 생물의 먹이활동이나 기타 생리에 해로운 영향을 줄 수 있다는 사실이 부각되고 있다. 인위적인 수중 소음원에는 선박소음, 해저탐사용 air gun, 소나, 수중 폭발음, 항타 소음 등이 있고 어느 특정의 소음에 대한 어류의 음 반응을 다른 소음원에 대해 적용하기는 힘들고 아울러 어느 특정의 개체에 대한 반응을 다른 개체에 적용하기도 어렵다. 어류가 평시에 적용하고 있는 배경소음 보다 수중에서 발생하는 인위적인 원인 소음의 크기가 높게 되면 인간과 마찬가지로 해양 생물은 도피반응이나 손상 등을 보이게 된다. 그림 1은 인위적인 수중소음이 해양생물의 행동 반응에 미치는 과정을 도시한 것이다.

본 연구에서는 어류의 수중 소음에 의한 피해 영향범위를 결정하기 위해, 기존의 연구결과를 토대로 어류의 소음

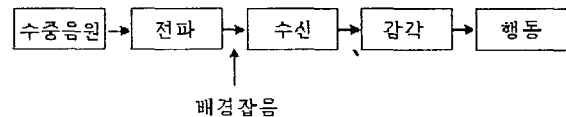


그림 1 수중음원이 어류의 행동반응에 이르는 과정

에 미치는 소음크기에 따른 해양생물의 반응도를 분석하였다. 최종적으로 해상 공사 시에 발생할 것으로 예상되는 수중 소음원을 대상으로 어류에 미치는 영향 범위를 산정하였다.

연구의 전체내용은 그림 1에서 보는 바와 같이 수중음원이 어류의 행동반응에 이르는 전체과정을 각 요소 별로 분석하여 결론을 유도하였다. 해상구조물 축조 공정에 따른 수중 소음원을 파일 항타 소음, 준설선소음, 쇄암봉 항타 소음, 수중발파 소음 등으로 분류하고 이들의 특성과 수중 소음에 의한 어류의 행동, 생리반응 등 특성을 분석하여 수행하였다. 음파전파해석은 조사해역의 수중음과 전달손실 모델을 사용하여 주파수별, 거리별 전달손실을 예측하여 공사 시 발생하는 수중소음원의 전파범위를 추정하였고 수중배경 소음은 실측자료와 문헌자료, 어류의 소음 수신과 감각 및 행동반응은 문헌자료를 기초로 하였다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 측정 장치로 수중청음기로 수중소음 측정하고, 녹음기에 저장하여 파형 및 스펙트럼을 분석하였다.

† 부경대학교 음향진동공학과  
E-mail : jryoon@pknu.ac.kr  
Tel : (051) 620-6473, Fax : (051) 620-6450

\* 부경대학교 음향진동공학연구소  
\*\* 부경대학교 음향진동공학과 대학원생  
\*\*\* 부경대학교 정보통신공학과 대학원생  
\*\*\*\* 동서대학교 응용생명공학부

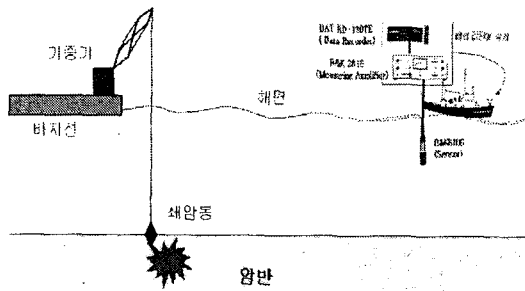


그림 2 측정 장비 구성도 (예 : 채암봉 향타 소음 측정도)

## 2. 어류의 음 감각 및 수중소음에 대한 행동반응

### 2.1 음 감각 특성

그림 1에서 보이는 바와 같이 수중음원에서 발생한 음은 전파과정을 거치면서 주파수별로 서로 다른 감쇄를 가지며 해양배경소음과 합쳐져 어류의 청각기관 혹은 기타 조직에 도달되어 수신된다. 경골어류가 음을 감지하는 방식은 포유류의 귀에 대응되는 어류의 측선이나 달팽이관의 신경구조를 갖는 종류도 있고, 부레와 같은 독특한 고유의 기관을 갖기도 한다. 경골어류가 음을 인식하는 감각기관은 그림 3-(a) 및 (b) 와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 많은 어류는 부레에 'Weberian ossicle' 이라는 소골이 연결되어 부레에서 감지된 음향에너지는 진동에너지로 내이의 미로(labyrinth)로 전달되어 포유류의 귀의 청각기능과 유사하다. 광어류와 같은 저서어는 부레를 갖지 않고, 등에 있는 섬모를 이용한다. 이들 섬모는 대부분의 어류에서 측선의 형태로 집중되어 있고 인간의 달팽이관과 비교하면 측선은 주위의 입자운동(진동)의 주파수를 분별하는 기능을 갖는다.

그림 4는 문헌자료에 의한 어류의 청감특성이다. 그림에서 보는 바와 같이 100Hz~2000Hz 범위에서 대부분의 어류가 음 반응을 갖고 인간에 비해 청감이 약 40dB 둔한 감도를 보인다.

### 2.2 음에 대한 행동 반응 역치

특정의 어류에 대한 행동 반응을 규명하기 위해서는 해당 어류의 청감 및 반응특성이 주어져야한다. 아울러 향타 소음 등에 노출된 경우, 노출된 후의 어류의 즉사, 일정시간 경과후의 치사에 대한 연구는 소음의 크기와 지속시간에 대해서 규명되어야 한다. 또한 다음과 같은 다양한 검사가 시행되어야 한다.

-청각조직이외의 조직에 대한 효과 : 조직손상이나 호르몬검사를 통한 스트레스 검사

-청감에 미치는 효과 : 영구적인 청감손상과 일시적인

손상

-행동반응 : 향타 소음 등에 대한 어류의 구집반응, 유집반응, 무반응검사

-포괄적인 반응 : 어군의 군집행동, 산란장소, 먹이활동, 산란등과 관련된 장기적인 효과 유무

-귀와 측선에 미치는 효과 : 형태학상의 변화 및 그러한 변화의 회복 유무

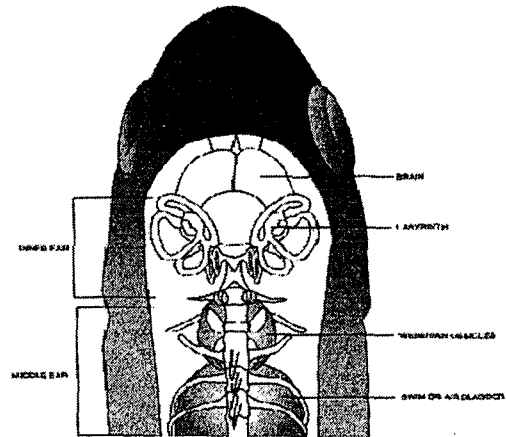


그림 3-(a) 경골어류의 귀의 구조

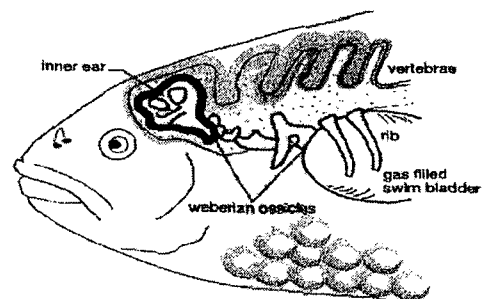


그림 3-(b) 경골어류의 귀의 구조

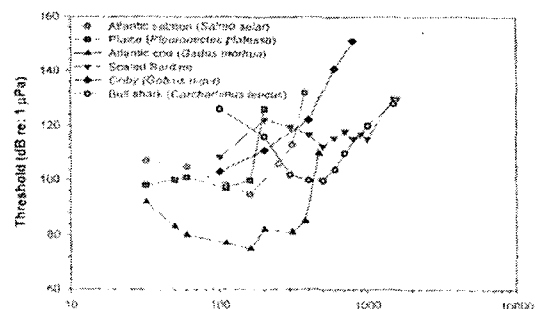


그림 4 어류의 청감 역치

미국의 국립해양수산물국(National Marine Fisheries Service : NMFS)은 충격파인 경우 실효치 음원준위가 190dB/uPa 이상인 경우 물개류는 일시적인 청각손상을 입게 되고, 고래는 180dB/uPa 이상인 경우 일시적 청각손상을 입는다고 보고하고 있다. NMFS는 180dB이하를 회색고래의 안전지대로 설정했다.

고래류와 달리 어류에 대한 소음의 영향은 보다 덜 알려져 있다. 대서양 연어의 청감은 인간보다 둔하고 저주파에서 이루어지며 따라서 충격파에 의한 청감에 대한 효과 보다 충격파가 부레에 주는 물리적 효과가 더 크다고 한다.

다음은 현재까지 알려진 어류에 대한 인위적인 수중소음 혹은 실험에 의한 어류의 행동반응이다.

1) 파일 항타 소음에 대한 반응

36" 항타작업시 최대치 음압이 224dB/uPa 일때 Chum, Chinook, Herring등의 어류치사, 부레파열 현상이 나타나며 최대치 음원준위가 186-206dB/uPa 일때 연어 치어에 피해를 주지 않았고 오히려 충격파에 의해 먹이생물의 교란이 일어나 연어 치어들이 모여드는 현상이 관찰된다고 한다. 8", 12" 목재 및 철재 파일 항타 작업이 천해에서 이루어지는 경우 최대 음압이 209dB/uPa이며 이 경우 치어에 대한 영향은 없으며 20"이상의 파일 항타는 어류에 영향을 주는 임계치 209dB/uPa 를 초과하는 충격파를 발생한다고 한다.

또 다른 연구는 최대치가 193dB인 경우 어류의 손상이 있었고, 183dB이하인 경우 피해가 없었다는 관측결과가 있다.

2) 시험음원을 이용한 실험실 연구결과

조피볼락의 경우 100Hz의 연속 순음에 대한 반응역치 RT는 28dB-40dB, 200Hz의 경우 20-36dB, 300Hz의 경우 37-56dB, 500Hz인 경우 37dB-44dB 인 것으로 보고되어 있다.

또 다른 연구결과에 의하면 어류를 유집하고자 하는 경우의 음압준위는 120dB/uPa~130dB/uPa이고, 어류가 구집반응을 하는 준위는 130dB/uPa~160dB/uPa로 알려져 있으며 전경이는 150Hz~250Hz 부근에서 140dB/uPa 이상 일 때 구집반응을 보이는 것으로 보고되어 있다.

3) Air gun 소음에 대한 반응

해저 석유탐사에 사용하는 저주파 air gun의 충격파 소음에 대한 도미의 귀에 미치는 영향은 귀의 섬유세포가 손상을 입는 것으로 확인되었고 58일 이후에야 복구된다는 연구가 있다. 이때 시험에 사용한 air gun의 충격파 최대치 음원준위는 약 222.6dB/uPa이며 어류의 청각세포에 손상을 주는 충격파의 최대치 음압 준위는 약 203dB이었다.

4) 수중 발파음에 대한 반응

화약 폭발에 의한 충격파의 최대 음압준위가 205dB/uPa 일 때 연어와 청어의 치어가 죽는 것으로 보고되어 있다. 참돔, 잉어, 볼락, 농어에 대한 수중 발파음에

대한 실험결과 충격파에 약한 어류는 부레가 발달한 어종이고, 강한 어류는 감각류나 장어 등의 부레가 발달하지 않은 종류이다.

이상에서 보는 바와 같이 인위적인 수중소음은 다양하며 어류의 반응 또한 다양하다. 상기의 1), 3) 및 4)는 충격파에 대한 어류의 반응으로 수중충격파를 나타내는 물리량은 다양하지만 보통은 최대음압이 사용된다. 그러나 최대음압이 같더라도 압력파형이 다르면 충격량이나 에너지 밀도는 달라지고, 어류에 대한 손상정도가 다르다고 한다. 연속음인 경우는 충격파에 비해 상대적으로 낮은 음압에서도 반응한다.

이상의 결과를 본 연구와 관련하여 요약하면 연속음인 경우 어류가 구집반응을 보이는 음은 100-500Hz 주파수범위에서 130dB/uPa~160dB/uPa이며 따라서 구집반응의 반응역치는 일반적인 해양배경소음 환경에서 약 60dB로 추정된다. 항타 등에 의한 충격파가 어류의 청각세포에 손상을 줄 수 있는 최대 음압준위는 약 193dB/uPa로 추정된다.

3. 수중소음에 의한 어류의 피해영향범위 지배방정식 및 변수

3.1 피해영향지배방정식

그림 1에서 보는 바와 같이 인위적인 수중소음원에서 발생한 음파는 전파하는 과정에서 거리 증가에 따라 증가하는 전파손실 및 흡수손실에 의해 감쇄되고 어류는 이러한 감쇄된 소음과 해양의 배경소음이 합쳐진 소음을 수신하게 된다. 최종적으로 감각기관에서 인식되어 행동반응을 일으키게 된다. 이러한 행동반응을 일으키는 수중음원으로부터의 영향 거리를 산출하기 위해서는 수중음원, 전파, 해양배경소음, 어류의 소음수신, 감각 및 행동반응의 각 요소가 결합된 피해영향 지배방정식이 정의되어야 한다.

수중소음이 어류에 미치는 범위를 결정하는 지배방정식은 식 (1)로 정의된다.

$$SL - TL = NL + RT \tag{1}$$

여기서, SL(Source Level : 음원준위)은 수중음원의 음원준위로 음원으로부터 1m 떨어진 거리에서 측정되는 음압준위(dB/uPa at 1m)이고, TL(Transmission Loss : 전달손실)은 음원으로부터 대상 어류 까지 전달하는 동안 손실되는 양으로 확산손실과 흡수손실로 구성되며 거리 및 해양환경에 좌우된다. NL(Noise Level)은 어류가 평상시에 적응하고 있는 해양 배경소음으로 평상시의 해상상태, 통행선박의 평균적인 특성에 의해 결정된다. RT(Response

Threshold : 반응역치)는 어류가 반응하는 음압준위에서 배경소음준위를 뺀 값이다.

식 (1)의 모든 변수는 dB로 주어지며 또한 식에서 SL-(NL+RT)는 FOM(Figure of Merit)으로 정의되며 음원준위 SL, 배경소음 NL 및 반응역치 RT로 부터 FOM을 추정하면, 이에 상응하는 음파전달손실에 일치하는 거리가 수중소음원의 최대 영향 거리가 된다.

### 3.2 피해영향 지배방정식 변수 특성

#### 1)수중소음원 특성

##### 가. 선박소음

해상공사의 경우 공사현장에는 바지선을 예인하기 위한 예인선과 준설선등의 선박이 운행되고 있어 주변해역의 수중소음 환경변화의 요인이 되며 이들 소음이 배경소음보다 높은 경우 어류에 피해를 줄 가능성이 있다. 준설선의 경우는 크레인 등 일반선박에 설치되어 있지 않은 장치가 있고 또한 준설 등의 작업은 바닥 준설토나 암반 등과의 마찰에 의해 소음이 발생하므로 일반 선박의 소음특성과 다르다.

선박소음은 저속력에서는 기관에 의한 기계적 소음이 우세하나 고속에서는 캐비테이션 소음이 우세하게 된다. 기계적 소음은 약 500Hz이하의 저주파수 선스펙트럼 특성이고 캐비테이션 소음은 200Hz 이상의 광대역 스펙트럼 특성으로 -6dB/Octave의 기울기로 주파수가 증가할수록 소음의 준위는 감소한다. 표 1은 일반적인 선박소음의 특성이다. 그림 5는 예인선의 스펙트럼특성이다. 예인선 소음과 배경소음을 측정하는 수중청음기의 위치는 해상 공사현장으로부터 500m에 위치하고 예인선은 수중청음기로부터 50m와 300m를 통과할 때 측정되었다. 표 1의 예인선 스펙트럼 소음준위는 구면전파손실을 보정한 특성이다. 그림 5에서 보는 바와 같이 예인선으로부터 50m 위치에서 예인선 소음은 배경소음보다 전 주파수 대역에서 약 10-20dB, 300m 거리에서 약 3-5dB 높은 특성을 보인다.

표 1 선박소음 스펙트럼의 일반적 특성 및 공사현장 예인선 스펙트럼

종류	길이(m)	속력 (m/s)	10 Hz	25 Hz	50 Hz	100 Hz	300 Hz
초대형유조선	244-366	7.7-11.3	185	189	185	175	157
대형유조선	153-214	7.7-9.3	175	179	176	166	149
소형유조선	122-153	6.2-8.2	167	171	169	159	143
상선	84-122	5.1-7.7	161	165	163	154	137
어선	15-46	3.6-5.1	139	143	141	132	117
예인선	약 10	약 3.0	-	144	149	154	144

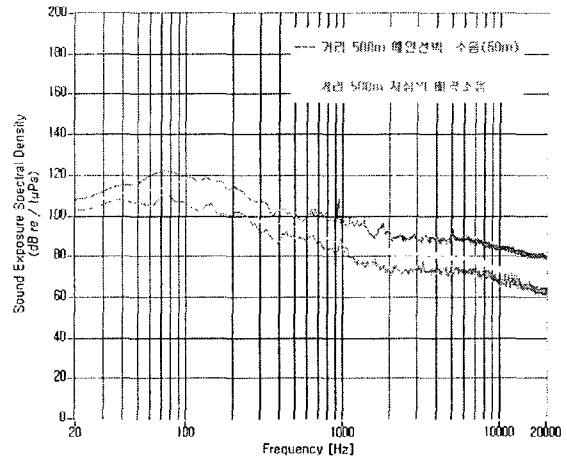


그림 5 공사현장 정점으로부터 500m 지점의 배경소음과 예인선 소음

해상의 준설 공사 시에는 일반적으로 Grab 준설선이 투입된다. 해상 공사 현장의 Grab 준설선 소음 분석 결과는 그림 6-(a)와 (b)과 같다. 주 에너지범위는 1KHz 이하이며 전체적으로 광대역 특성을 갖는다.

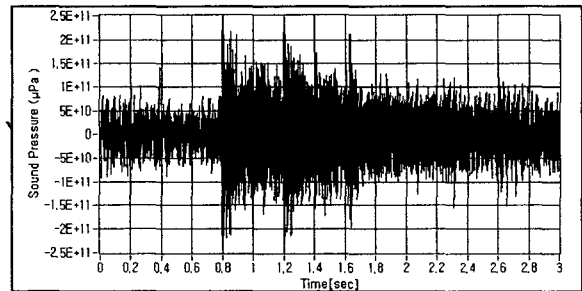


그림6-(a). 준설선 작업소음 시간과형

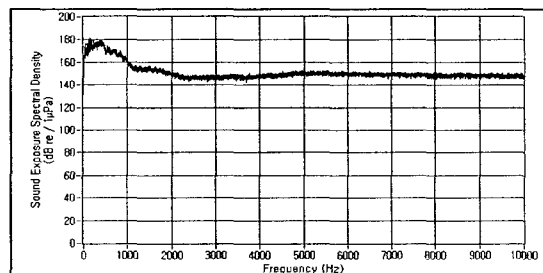


그림 6-(b). 준설선 작업소음 음원 준위 스펙트럼 나. 파일 항타 소음

#### (1) 원형 파일 항타 소음

햄머 타격의 충격은 파일의 벽면에서 굽힘(flexural) 응력파를 발생시키고 이는 주위의 수중과 공기 중으로 음을

전파시킨다. 파일의 길이 방향으로 전파된 펄스는 해저의 지반과 결합되어 지반으로 전파해 간다. 지반으로 전파해 가는 파는 수중으로 전파해 가는 파를 발생시킨다. 수심 50m 해역에서 측정된 전형적인 파일 항타 소음은 그림 7과 같다.

파일 항타 소음의 유효치(rms) 크기는 파형과 압력제공 평균의 제곱근을 분석하여 얻어진다. 여기서 평균시간은 에너지의 90%를 포함하는 시간으로 한다. 이와 같이 구한 유효치 음압의 준위를 “RMS(impulse)”로 정의하며 그림

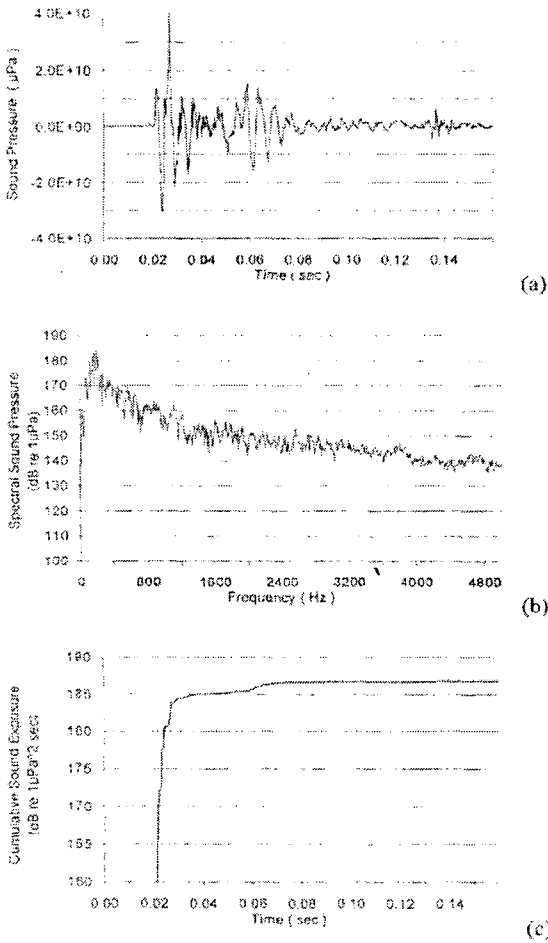


그림 7 파일항타 소음 특성. (a) 파형; (b) 스펙트럼; (c) 누적 음압제공크기

7-(a)에서 평균시간은 약 0.048sec이다. 항타소음의 스펙트럼은 그림 7-(b)와 같이 1000Hz이하의 대역이고 그림 4에서 보이는 많은 어류들의 청감대역과 일치한다. 항타 소음과 같은 충격파가 어류와 같은 해양생물에 미치는 영향을 평가하는데 사용되는 충격파의 소음 에너지 표현방법은 SEL(Sound Exposure Level)로 1초간에 작용하는 크기와 동일한 음의 크기로 정의되며 시간에 따른 누적 음압 제공을 가산하여 구하고 단위는 dB/uPa<sup>2</sup>-sec이다. 그림 7-(c)

는 항타 소음의 누적 음압 제공 특성이다. 그림에서 SEL은 187dB이고, RMS(impulse)는 200dB(펄스폭 0.048 sec)이다.

대구경의 CISS(Cast In Steel Shell)는 아주 큰 음압을 보이고 소구경 목재의 경우는 상대적으로 음압이 낮다. 디젤 햄머식에 의한 파일타격음은 파일위치로부터 90m 위치에서 10Hz-10KHz의 대역준위는 약 143dB/1uPa인 것으로 보고되어 있고, 또 다른 자료에 의하면 직경 8인치 목재 파일을 1000kg의 햄머로 4m 위치에서 펄에 박을 때 구면 확산 손실로 보정한 충격파의 최대 음원 준위는 206dB/1uPa 로 보고 되어 있다.

(2) 슈트파일 항타소음

슈트 파일 항타는 소음으로 해안공사의 가물막이 공사에서 주로 발생하며 진동항타기에 의해 소음이 발생한다. 본 연구 목적의 측정시의 슈트 파일 제원은 표 2와 같다. 항타 지점에서 약 100m, 200m, 400m, 500m위치에서 측정하였으며, 소음측정 완료 후 10개의 지점을 선택하여 배경소음을 측정하였다. 측정 장소의 수심은 약 15m이며, 수중청음기의 수심은 6m이다.

표 2 Cell-type 가물막이 파일제원

구분	Main Cell	Arc cell	30°Y-Connection
폭(mm)	500	500	500
Web Thick(mm)	12.7	10	12.7
단위중량 (kg/m)	77.2	64	

항타 작업 전후에 10개 지점에서 공사현장 해역의 배경잡음을 측정하였다. 그림 8은 거리 100m 위치에서의 항타소음의 시간파형 및 스펙트럼 특성이다. 주 에너지는 200Hz 이하의 주파수에 분포하고 배경소음보다 약 15-20dB 높다. 슈트 파일은 햄머식으로 타격하지 않고 진동항타기를 이용하여 파일을 박는 방식으로 그림에서 보는 바와 같이 연속음의 특성을 가지며 시트파일의 수중소음은 원형 파일에 비해 상대적으로 낮다고 할 수 있다.

다. 쇄암봉 항타 소음

쇄암봉 항타 소음 역시 파일 항타와 같이 2개의 물체가 부딪힐 때 발생하는 소음이다. 수면 위 5-7m 높이에서 자유 낙하하는 45톤 크기의 쇄암봉이 약 5m 깊이에 있는 현

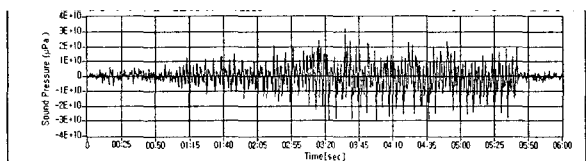


그림 8-(a) 거리 100m 지점의 항타소음의 시간파형(6분)

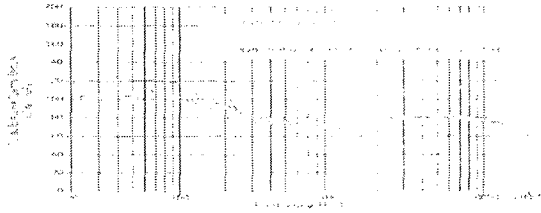


그림 8-(b) 거리 100m 지점의 향타소음 및 배경소음 스펙트럼

장의 해저 암반과 충돌할 때 충격음이 발생한다.

쇄암봉 작업 선박에서 약 150m, 500m, 1km, 2km지점으로 이동하며 측정하였으며 측정 지점의 해저는 모래로 구성되어있고 수심은 12-25m 이었다.

그림 9는 150m 위치에서 측정된 쇄암봉 향타 소음 파형 및 스펙트럼이다. 슈트파일 향타 소음에 비해 대역이 넓고 중심주파수 대역인 1000Hz에서 배경소음보다 약 20dB 높으며 2Km 거리에서는 배경소음과 비슷한 크기로 된다. 이때 최대음압은 약 215dB/uPa 이다.

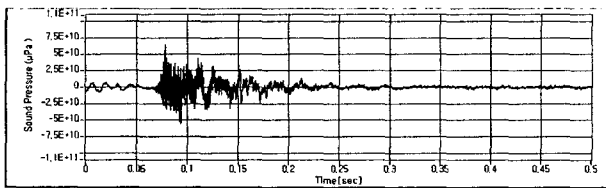


그림 9-(a) 거리 150m 지점의 쇄암봉 향타 소음 파형

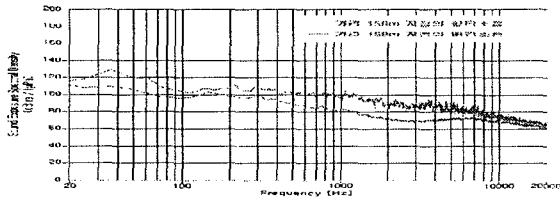


그림 9-(b) 거리 150m 지점의 배경소음과 쇄암봉 향타 소음 스펙트럼

라. 수중발파 소음

수중발파는 해저면 가까이 수중에서 발파하는 수중 현수 발파, 해저 면에서 발파하는 표면발파 및 해저암반부에 천공하여 발파하는 천공발파의 3가지가 있으나 압 파쇄 효율은 천공 발파공법이 가장 우수하다.

천공발파의 경우 폭발에 의해 발생하는 응력파는 지반속을 전파해 가고 해저 경계면에서 수중으로 충격파(지반-물 충격파로 정의됨)로 전파해 간다.

표면 발파의 경우는 지반-물 충격파 성분보다는 고온고압가스에 의한 수중충격파 성분이 충격파의 주성분이 된다. 수중현수 발파의 경우는 고온고압가스에 의한 수중충격파

성분이 전체 충격파의 성분이 된다.

충격파의 최대 음압  $P_p$  와 지속시간  $\tau$ 는 각각 식 (2) 과 (3) 로 주어진다.

$$P_p \approx 4 \times 10^7 \frac{W^{0.375}}{r^{1.13}} \text{ (Pascal)} \quad (2)$$

$$\tau \approx 0.075 W^{0.26} r^{0.22} \text{ (msec)} \quad (3)$$

여기서,  $W$ 와  $r$ 은 각각 lb와 m로 주어지는 TNT 양과 발파중심으로 부터의 거리이다. 충격파의 지속시간은 수 msec 이하로 에너지 대역 스펙트럼은 1KHz이상까지 평탄한 특성이고  $\tau^{-1}$  이상의 주파수에서는 6dB/octave로 감소하는 것으로 알려져 있다.

수중 현수 발파시의 수중충격파의 최대 압력은 식(2)로 추정할 수 있으며 표면 발파시의 최대 압력은 현수발파시의 1/2에 상당하는 것으로 알려져 있고 천공 발파의 경우는 현수발파시의 약 1/4~1/6에 상당하는 것으로 알려져 있다.

그림 10은 부산항 준설 공사 시의 수중발파 소음 특성이다. 해저지반은 안산암이고 25msec 지발천공발파(천공수:20, 장약량:7-8kg/공, 천공깊이 약 3m, 천공간격 약 3m)이다. 발파지역의 수심은 약 15m이고 측정은 발파지점으로부터 약 200m에서 수행되었다. 충격파의 지속시간은 약 400msec이며 최대음압은 약 5x1011uPa(234dB/uPa)이고 주 에너지는 전 주파수 대역에 분포하는 광대역 특성이다.

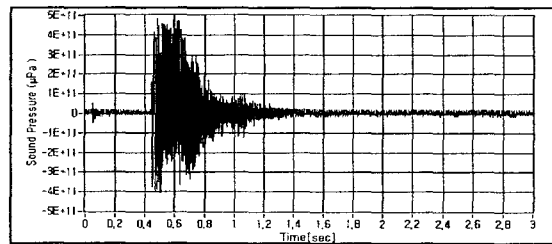


그림 10-(a) 부산항준설공사 발파음 파형

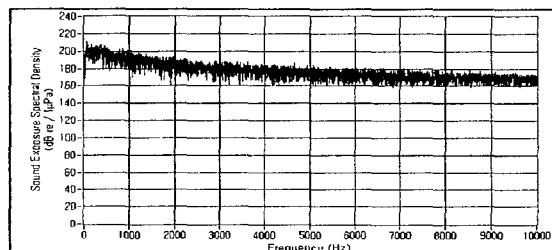


그림 10-(b) 부산항준설공사 발파음 스펙트럼

2) 수중음파전달 특성

수중소음은 직접파와 더불어 해면과 해저반사들에 의해 원거리까지 전파해 간다. 단일 주파수에 대해 수직방향으로 간섭이 일어나 여러 개의 정재파가 형성되며 각각의 정재파는 각각의 수평방향 전파속도를 갖는다. 정재파의 주파수가 너무 낮으면 수평방향으로 전파해 가지 못하며 이러한 주파수의 하한치를 차단주파수로 정의한다. 따라서 음원에서 발생한 주파수가 식 (4)로 주어지는 차단 주파수 이하이면 원거리 까지 전파하지 못하게 된다.

$$f_{cut} = \frac{C_w}{4h\sqrt{1 - C_w^2/C_s^2}} \quad (4)$$

여기서,  $C_w$ 와  $C_s$ 는 각각 물과 해저지질에서의 음속이고  $h$ 는 수심이다. 실제의 경우는 그림 1에서와 같이 전달특성이 아주 복잡하며 얕은 천해에서의 수중 음파전달 과정은 해저에서의 반사 또는 투과 및 재 굴절 등의 영향을 받는다.

그림 11에 나타난 바와 같이 수심이 얕은 해역에서의 일반적인 음파전달 특성에 대한 이론 및 수치 모델을 이용하여 조사대상 해역의 음파전달 특성을 구하였다.

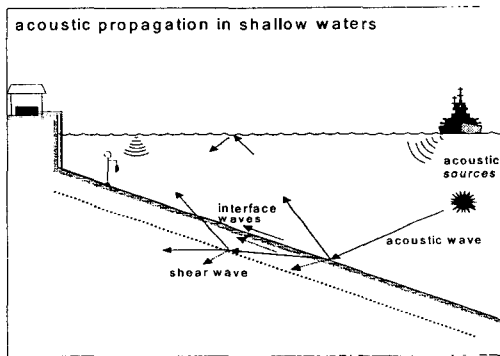


그림 11 천해에서의 수중 음파전달 모식도

그림 12는 음파전파 모델 중 Averaged Decay Law를 이용하여 조사대상 해역의 지질 특성인 모래바닥에 대하여 수심 20m일 때와 40m인 경우에 음원과 수신기 사이가 변할 때의 전달손실을 나타낸 것이다.

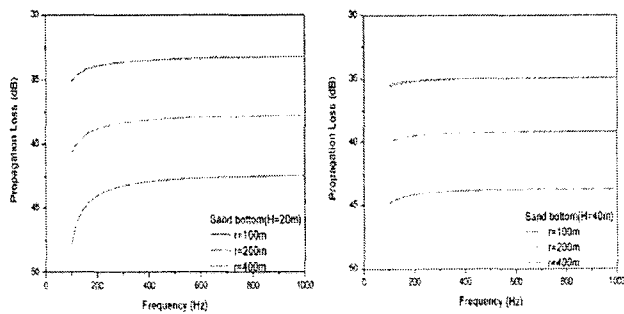


그림 12 Averaged Decay Law를 이용하여 계산한 전달손실

400Hz 이상에서의 전달손실은 주파수 변화와 관계없이 거의 일정하지만 그 이하에서는 주파수가 감소함에 따라 전달손실이 증가하며 전달손실은  $17\log(r)$ 의 특성을 보인다. 이러한 결과는 해수의 음속을 1500m로 가정하고, 해저지질의 음속을 1520(뽕)로 가정하는 경우 수심 10m의 차단주파수는 약 400Hz가 되는 식 (4)의 특성과 유사하다.

3) 수중배경소음 특성

수중에서 음파를 이용하여 수중표적을 탐지하고자 할 경우 수중배경소음은 제약요인으로 작용한다. 즉 수중배경소음이 높을수록 원하는 신호를 인지하기가 어려워진다. 따라서 수중 배경소음을 측정함으로써 해상 공사 작업 중 발생하는 수중소음이 거리에 따라 얼마나 배경소음보다 높은지가 규명된다.

그림 13은 대표적인 해양 수중배경소음의 특성으로 본 연구에서는 A등급인 통행량이 많은 항만의 특성을 배경소음 기준으로 하였다.

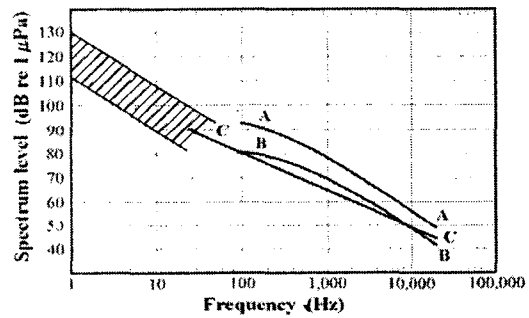


그림 13 대표적인 수중배경소음 특성. A:통행량이 많은 항만, B:평균해역, C:외해

4. 수중소음원에 대한 피해영향 범위

4.1 예인선 과 준설선 소음에 의한 피해영향 범위

기술한 바와 같이 보는 바와 같이 준설선 소음은 지속시간이 긴 연속음의 특성이다. 어류의 청감이 좋은 200Hz에서 175dB/1uPa의 음원 준위를 보인다. 경골어류의 연속음에 대한 반응은 주파수 및 어종 등에 따라 다르지만 제시한 바와 같이 구집반응을 보이는 준위는 130dB/uPa ~ 160dB/uPa이다. 조사해역의 200Hz 수중배경소음준위를 약 90dB/1uPa로 설정하면 FOM은 15dB~45dB이 된다. 따라서 200Hz의 전파손실을  $17\log(r)$ 로 적용하면 준설선 위치를 기준으로 최대 약 450m까지가 직접적인 피해영향 범위가 될 것이다. 예인선의 FOM은 최대 19dB로 영향범위는 15m이하로 아주 좁다.

#### 4.2 원형 파일 및 슈트 파일 항타 소음에 의한 피해영향 범위

원형파일의 경우, 5-10m 위치에서 측정된 최대치 음압은 문헌자료에 의하면 약 177-227dB/uPa 이다. 일반 공사의 경우에 대해 최대치 음원준위를 210dB/uPa로 가정하고, 충격파가 어류에 피해를 주는 193dB/uPa를 반응역치 기준으로 한다. FOM은 17dB이며 이 경우 피해거리의 약 10m이다. 슈트 파일은 햄머식으로 타격하지 않고 진동장치를 이용하여 파일을 타격하는 방식으로 연속음의 특성을 가지며 어류의 청감이 좋은 100Hz의 음원 준위인 155dB를 기준으로 하면 FOM은 15dB~25dB이 된다. 따라서 조사해역에 대한 전달손실을 적용하면 영향범위는 30m이다.

#### 4.3 쇄암봉 소음에 의한 피해영향 범위

해저암반 파쇄를 목적으로 사용하는 쇄암봉에 의한 소음 특성은 충격파를 발생하고 쇄암봉에 의한 충격파의 최대 음압에 대한 음원준위는 약 252dB/uPa이다. 충격파가 어류의 청각세포에 손상을 줄 수 있는 최대 음압준위는 약 193dB/uPa이다. 이러한 반응 준위를 적용하면 45톤 쇄암봉의 경우, FOM은 약 59dB이 된다. 따라서 조사해역의 전 파손실을 적용하면 3000m 거리 까지가 직접적인 피해영향범위가 될 것이다.

#### 4.4 수중발파에 의한 피해영향 범위

20개의 천공에 천공당 7-8Kg의 장약으로 25msec의 지발파하는 경우 부산항 준설 공사 시에 측정된 최대 음원준위는 234dB/1uPa 이므로 이 경우의 영향 범위는 약 260m이다.

### 5. 결론

수중소음이 어류에 미치는 피해 영향 범위를 추정하였다. 기존의 연구결과를 토대로 피해 영향범위를 결정하기 위해 어류에 대한 피해영향 지배방정식을 정의하고 피해 영향 지배방정식의 변수인 선박, 파일 항타, 쇄암봉 항타 및 수중 발파 소음 등의 특성을 해석하고 어류의 소음 진동에 대한 행동반응특성을 조사하였다. 이러한 결과를 토대로 수중 소음원별 어업피해영향 범위를 추정하였다.

결론적으로 준설선의 경우 영향범위는 준설선 중심 위치로부터 450m 까지이며 슈트 파일의 경우는 약 30m 이내 이다. 쇄암봉의 경우, 직접적인 피해범위는 쇄암봉 중심 위치로부터 3000m까지이고 20개의 천공에 천공당 7-8Kg의 장약으로 25msec의 지발파하는 부산항 준설 공사 시에

측정된 수중 발파의 경우, 최대 음원준위는 234dB/1uPa 이므로 이 경우의 영향 범위는 약 260m이다.

이상의 피해 범위는 각 수중소음원의 피해 범위이며 준설선이나 예인선 소음이 어류의 이동경로(어도)에 위치하게 되면 어류의 이동을 차단하게 되어 간접적인 피해를 주게 될 것이다.

#### 후 기

수중 발파음의 측정에 협조해 주신 (주)한화 오대곤 부산지점장, 노치성 과장 및 (주)한진중공업 박종민 부산항 중심 준설 토목과장 박종민님께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) M. C. Hastings et al, "Effects of Sound on Fish," California DOT Contract No. 43A0139, 2005.
- (2)S. Vagle, "On the Impact of Underwater Pile-Driving Noise on Marine Life," Institute of Ocean Sciences DFO/Pacific, 2003.
- (3)Urlick, R.J. 1983, Principle of underwater sound, Peninsula Publishing.
- (4)A.N. Popper et al. "Effects of exposure to seismic airgun use on hearing of three fish species," J. Acoust. Soc. Am., 117(6), 2005. pp3958~3971.
- (5)R.D. McCauley et al. "High intensity anthropogenic sound damages fish ears," J. Acoust. Soc. Am., 113(1), 2003. pp638~642.
- (6)A. N. Popper, " Effects of exposure to seismic airgun use on hearing of three fish species," JASA 117(6), pp. 3958-3971, 2005
- (7)R.D. McCauley et al., High intensity anthropogenic sound damages fish ears,J. Acoust. Soc. Am., 113(1), 2003. pp638~642.
- (8)F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter and H. Schmidt, Computational Ocean Acoustics (AIP Press, 2000).
- (9)부경대학교 해양과학공동연구소 서산비축기지 입출하 부두건설공사에 따른 어업피해조사 용역 최종보고서 , pp.63-74, pp. 533-555, 2006. 03.
- (10)경상대학교 해양과학대학 해양산업연구소 안정국가 산업단지 개발사업에 따른 어업피해 조사연구 용역, 2001. 04. pp.435-486, pp.502-514
- (11)부경대학교 해양과학공동연구소 부산 신항 비상항로 준설(암초제거)공사에 따른 어업피해영향조사보고서, 2005.12., pp193-213