[UCI]I804:24011-200000256731

2012년 2월
석사학위 논문

발파에 의한 수중음압레벨 예측

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

박 정 일

발파에 의한 수중음압레벨 예측

Prediction of Underwater Sound Pressure Level by Blasting

2012년 2월 24일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

박 정 일

발파에 의한 수중음압레벨 예측

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

박 정 일

박정일의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고 진 석

위 원 조선대학교 교수 박 천 영

위 원 조선대학교 교수 강 추 원

2011년 11월

조선대학교 대학원

< 목 차 >

List of Tables ····· iii
List of Figures ····· vi
Abstract ····· ix

1. 서론 ····· 1
2. 기초이론 및 연구동향 ····· 3
2.1 소음의 정의 ····· 3
2.2 수중소음 특성 ····· 4
2.3 음압레벨의 특성 ····· 9
2.3.1 발파음압의 기초이론 ····· 9
2.3.2 공기중과 수중에서 음압과 음압레벨의 관계 ····· 12
2.4 어류의 청감특성 ····· 17
2.5 수중소음 연구 사례 및 기준 ····· 19
2.5.1 국내 사례 및 기준 ····· 19
2.5.2 외국 사례 및 기준 ····· 21
3. 연구내용 및 방법 ····· 25
3.1 연구지역 ····· 25
3.2 수중소음 측정 장비 ····· 27
3.3 수중소음 측정 방법 ····· 28
3.4 실험결과 ····· 30
4. 실험결과 분석 ····· 32
4.1 실험결과 분석 및 상관성 ····· 32
4.2 수중음압레벨 예측값과 측정값 비교 ····· 34
5. 실험결과에 대한 고찰 ····· 44
6. 결론 ····· 45
참고문헌 ····· 47

<List of Tables>

Table 2.1 Wave motion types and propagation velocity ····· 6
Table 2.2 Case study of noise level ····· 12
Table 2.3 Reference level conversion table(Urick, 1967) ····· 13
Table 2.4 Comparison of measure to underwater noise and air(atmospheric) noise ····· 13
Table 2.5 Domestic literature data ····· 21
Table 2.6 Japan research results(若園 *et al.,* 1970) ····· 24
Table 3.1 Kinds of measuring equipment ····· 27
Table 3.2 Measurement results ····· 30
Table 4.1 Measurement results(Goseong) ····· 35
Table 4.2 Comparison of sound pressure level(Goseong) ····· 36
Table 4.3 Measurement results(Wonju) ····· 37
Table 4.4 Comparison of sound pressure level(Wonju) ····· 38
Table 4.5 Measurement results(JungYukDo) ····· 39
Table 4.6 Comparison of sound pressure level(JungYukDo) ····· 39

<List of Figures>

Figure 2.1 Underwater noise transfer mechanism on the ground blasting ·· 4
Figure 2.2 Depth profiles from the open of temperature, salinity and density(Universiry of Rhode Island, 2009) ····· 7
Figure 2.3 Pressure effect and water temperature from sound velocity(Urick, 1975) ····· 8
Figure 2.4 A model of noise from a source, and ambient noise, where levels vary(COWRIE, 2003) ····· 16
Figure 2.5 Lateral view of the head of a minnow *phoxinus laevis*(From von Frisch and Stetter, 1932) ····· 17
Figure 2.6 Hearing thresholds of representative species(from Hastings *et al.,* 2005) ····· 18
Figure 2.7 Type of underwater noise ····· 20
Figure 2.8 Estimated SEL that results in 50% mortality and no injury based on data for exposures to a single explosive sound(Yelverton, 1975) ····· 23
Figure 3.1 Geological map of study area ····· 26
Figure 3.2 Underwater noise system overview ····· 27
Figure 3.3 Blast-test schematic(reservoir) ····· 28
Figure 3.4 Blast-test schematic(concrete water tank) ····· 28
Figure 3.5 Measurement of underwater noise(reservoir) ····· 29
Figure 3.6 Measurement of underwater noise(concrete water tank) ····· 29
Figure 4.1 Square root regression analysis graph ····· 32
Figure 4.2 Cube root regression analysis graph ····· 33
Figure 4.3 Geological map and panoramic view(Goseong) ····· 34
Figure 4.4 Geological map and panoramic view(Wonju) ····· 37
Figure 4.5 Geological map and panoramic view(JungYukDo) ····· 38
Figure 4.6 Wave graph of underwater noise(Goseong) ····· 41
Figure 4.7 Wave graph of underwater noise(Wonju) ····· 42
Figure 4.8 Wave graph of underwater noise(JungYukDo) ····· 43

ABSTRACT

A Study on the Prediction of Underwater Sound Pressure Level by Blast

Park, Jeong-Il
Advisor : Prof. Kang, Choo-Won, Ph.D.
Dept. of Energy & Resource Engineering
Graduate School of Chosun University

Korea has lots of mountains and colline zones, whose three sides are surrounded by the sea. Due to such geological conditions, rock is mainly cut through blasting using explosive.

Blast pollution which occupies most of civil complaints in blasting includes noise and vibration. Such blasting pollution significantly affects our living physically and mentally and civil complaints are also caused by fish and shellfish in cultivation of fish in an inclosing net as well as cattle such as cows, pigs and chickens.

Such phenomenon occurred in the past, but in the process of developing into industrial society, damages to the neighboring areas have not been dealt with in the development-oriented policy and people hardly know damages caused by blasting. However, as national policy has been changed eco-friendly and people have had higher interest in environmental and damage issues, such civil complaints have been considered as one of social problems.

In this circumstance, there have been a number of research on qualitative measurement of ground vibration and noise due to blasting by

national and international scholars and institutes, but as they are confined to certain areas or comprehensive to be applied for wide areas, their use is limited and there are great differences between actual results and estimated results.

However, though relevant research on ground vibration of blasting is used and estimated for many areas, research on blasting noise is affected by distance from blasting source, charge per delay, stemming length, rock mass and blasting mat and there is a difficulty in research due to sensitive conditions such as geology, temperature, wind velocity and direction. So a number of instruments which are designed to measure noise of blasting were developed and have been generalized, and law on blasting noise has been enacted.

However, the law and instruments developed only deal with air noise and because of differences in characteristics of air noise and underwater noise (Kim, Gwang-jun, 1996), it is difficult to apply the standards on air noise for underwater noise, and the instruments are expensive and difficult to use. There are how to predict underwater noise using ground vibration (Park, Jung-bong, 2011) and how to predict it using characteristics of medium boundary delivery (Park, Jing-hyeong, 2009), few studies on underwater noise have been carried so far.

Therefore, this study estimated sound pressure using distance from blasting and charge per delay and underwater sound pressure level using the sound pressure. To identify the validity of the estimated value, the study demonstrated the results at other areas and compared actual results with estimated results.

1. 서론

우리나라의 지형은 대체적으로 산악과 구릉대가 발달되어 있으며, 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 형태를 띠고 있다. 이러한 지형적 조건 때문에 암 절취는 대체로 화약을 이용한 발파공법을 주로 이루고 있는 실정이다.

이러한 발파공법 위주의 공사를 진행하다 보면 민원발생의 대부분을 차지하고 있는 발파공해는 소음과 진동이다. 이러한 발파공해는 인간생활에 신체적, 정신적으로 적지 않은 영향을 주고 있으며, 이와 더불어 집에서 사육되고 있는 소, 돼지, 닭 등의 가축은 물론 강, 저수지, 바다 등 수중에 위치한 가두리 양식장의 어패류에 대한 피해 영향을 호소하는 민원도 발생되고 있다.

이와 같은 현상은 과거에도 발생하였지만 산업사회로 발전해 가는 과정에서 발전위주의 정책으로 주변에 미치는 피해에 대해서는 실질적으로 배제되어 왔으며 각각의 사람들에게도 발파 공해에 대한 피해에 대해서는 잘 알지 못하였다. 하지만 현재에 와서는 국가의 정책도 친환경적으로 변하며 사람들의 인식 또한 안전과 관련한 환경문제, 피해영향에 더욱 관심이 높아져서 이러한 민원발생이 사회문제로 대두되고 있다.

이런 상황에서 국내외의 여러 학자 및 기관 등에서 발파시 발생하는 지반진동과 소음을 정량적으로 추정하기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔으나 이러한 것들은 일정 지역에 국한되거나 넓은 범위에 적용하는 포괄적인 연구들이어서 제한적으로 이용되는 경우가 많고 현장 적용 시 실측된 결과와 예상치의 차이가 크게 나타나기도 하였다.

이러한 문제점들이 있는 와중에도 발파 지반진동에 관련된 연구들은 대체적으로 많은 곳에서 적용하며 예측되고 있는 반면 발파소음에 관하여서는 발파원으로부터의 거리, 지발당장약량, 전색길이, 암질, 발파매트 사용여부 등에 영향을 받으며, 아울러 발파지점의 지형 및 온도, 풍속과 풍향 등의 기상조건들과 같은 예민한 조건들로 인해 연구에 어려움이 있는 게 사실이다. 이런 과정 속에서 근래에 와서는 발파 소음을 측정하는 기기들이 많이 만들어 졌으며 지금은 이런 기기들이 보편화되어 있고 발파 소음에 관련된 법도 제정되어 있다.

하지만 발파 소음에 관련된 법 제정과 측정하는 기기들은 공중소음만을 다루고 있는 실정이며 공중소음과 수중소음의 특성상의 차이 때문에(김광준, 1996) 공중소

음에 각각 정해진 기준들은 수중소음에 적용하기 어렵다. 또한 수중소음을 측정하는 기기들은 고가로 사용하기 위한 여러 번거로움이 존재한다. 이 때문에 지반진동을 이용하여 수중소음을 예측하는 방법(박정봉, 2011)과 매질경계 전달 특성을 고려한 예측 방법(박진형, 2009)등의 연구가 진행되었지만 아직까지 수중소음에 대한 연구는 부족 한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 발파로 인한 공사 작업이 진행될 때 거리와 지발당장약량 그리고 측정한 수중음압을 회귀분석에 적용하여 수중음압 예측식을 도출해 보았다. 이를 이용하여 얻은 수중음압레벨의 타당성을 검토해보기 위해 실제 측정한 지역과 다른 지역에서 검증을 하여 실제 측정값과 예측값을 비교해 보았다.

2. 기초이론 및 연구동향

2.1 소음의 정의

일반적으로 소음은 인간의 정신과 건강에 많은 영향을 미치며 듣는 사람에 따라 다소 차이를 보인다. 또 일시적·연구적 난청을 일으키기도 하며 경우에 따라서는 순환계·호흡계·소화계 등에도 영향을 미친다. 소음은 클수록, 낮은 음보다 높은 음일수록, 지속시간이 길수록, 연속적으로 반복되는 소리일수록 인체에 더 많은 영향을 미치며 소음의 크기 단위로는 보통 dB(데시벨)을 사용한다. 이러한 소음은 인간이 청각으로 들을 수 있는 소리로 좁은 의미로 음파라 부르며, 음파 중 20~20000Hz의 범위 주파수 부분이 청각과의 상호작용으로부터 음(Sound)의 개념이 생겨 소리 중 필요하지 않거나 혹은 방해가 되는 소리를 말한다. 쉽게 말해서 듣기 싫은 소리를 총칭하는 것이며, 물리적 성질은 음과 동일하지만, 듣기 싫고, 일상생활을 방해하고, 인간의 생리적 기능에 변화를 주며, 청력을 저해하는 음을 지칭하여 말한다.

음파는 물체의 진동이 균일하던 매질에 부분적으로 압력 변화를 일으켜 종파의 형태로 고막을 진동시키는 것으로 가청주파수인 탄성파로써 청각에 관련시켜 다를 때는 소리라고 한다. 공기 속의 파동을 가리키는 경우가 많으나 액체·고체 속에서의 파도 포함시키고 진동수가 가청주파수 이상인 초음파나 가청주파수 이하인 초저주파음 까지 넣어 음파라고 할 때도 있다. 이러한 고체 속의 음파에는 가로파도 음파로 포함된다. 온도 t℃인 공기 속의 전파속도 $V(m/s)$는 0℃ 부근에서 $C=331+0.6t$로 표시 되며 파장은 같은 진동수인 전파의 $1/10^6$ 정도이며 가청 음파로는 마이크로파의 상단 부근이 된다. 음파의 매질은 조밀파이므로 기체 속 뿐만 아니라, 액체나 고체의 속도 전해진다. 음파의 종류에는 평면파(Plane wave), 발산파(Diverging wave), 구면파(Spherical wave), 진행파(progressive wave), 정재파(standing wave)로 나눠진다.

음속은 공기 속에서는 기온 15℃에서 매초 약 340m 이므로, 이 빠르기로 전해오는 가청주파수의 파장 영역은 대략 20~0.02m이다. 예컨대, 440Hz의 소리(음계로라의 소리)의 파장은 0.77m이며, 음압은 음에너지에 의해 매질에 미세한 압력변화가 생기는 것을 말하며, 단위는 $N/m^2\ (=Pa)$ 이다.

이와 같이 음압에 의해 발생한 음향 용어를 규정한 일본의 JIS 8106에서는 소음이란 “바람직하지 않는 소리, 예를 들면, 음성, 음악 등의 청취를 방해하거나 생활에 방해 또는 고통을 주거나 하는 등의 소리”라고 정의하고 있다.

2.2 수중소음 특성

일반적으로 대기 중의 소음과 진동의 피해에 대해서는 일반인들에게도 측정과 자료를 통해 어느 정도 인식되어 있으나 수중에서 발생하는 소음과 진동은 자세히 인식하지 못하고 있는 현실이다. 이러한 수중에 발생하는 소음과 진동에는 발파작업과 항타작업 등의 발생 원인으로 인해 지반에서 수중(ground to water), 수중에서 수중(water to water)으로 전달되어 수중생물이 피해를 받게 된다. 발파작업에서 생성된 지반 진동이 고체인 지반으로부터 액체인 물의 경계면으로 방출되는 과정에서 고체 전달음으로 전이 되어 발생하는 소음과 고체인 지반 내에서 진동이 지반으로 인하여 직접적으로 물로 전달되어 발생하는 소음의 합성치를 수중소음이라 한다. 하지만 공중에서 물의 경계면으로 투과되는 비율은 약 0.011%라고 하는 연구결과가 있으므로(박진형, 2009), 수중소음은 지반진동에 의해 많이 좌우 된다고 할 수 있다.

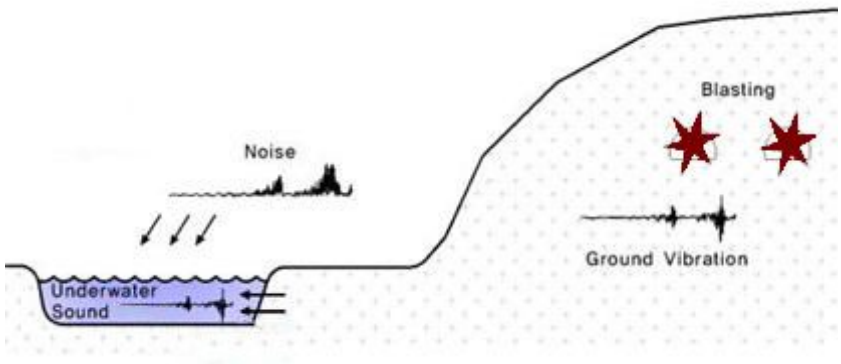


Figure 2.1 Underwater noise transfer mechanism on the ground blasting.

여기에서는 소음이 수중에 전달되어가는 형태와 더불어 대기소음과 수중소음의 전파매질에 대한 근본적인 차이점이 존재한다. 이러한 매질의 고유특성으로 인하여

음속이 변화되며 음원으로부터 외부로 전파해 가는 과정에 노출된 생물에 대한 충격에서도 차이가 난다. 음원으로부터 동일반경 내 모든 장소에서 같은 음압을 갖는 평면파라고 가정할 경우 음압 P 와 유체의 입자속도 v 와의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \rho \cdot c \cdot v \tag{2.1}$$

여기에서 ρ = 유체의 밀도, c = 파의 전파속도 이다.

유체의 밀도와 파의 전파속도의 곱 $\rho \cdot c$ 는 유체의 고유음향저항(specific acoustic resistance)이라 한다.

$$\text{seawater,} \quad \rho c = 1.5 \times 10^5 g/(cm^2)(s) \tag{2.2}$$

$$\text{air,} \quad \rho c = 43\ g/(cm^2)(s) \tag{2.3}$$

수중과 공기 중에서 고유음향저항이 차이가 나며 이와 더불어 음이 각각의 매질에 전파해 갈 때 음의 세기강도(sound intensity)도 이용된다. 음의 세기강도는 파가 매질 속을 전파해갈 때 전파방향에 수직인 단위면적을 시간당 일정한 에너지가 통과하게 되는데 단위면적을 통과하는 에너지 총량을 의미한다. 평면파에서 인텐시티(I)와 음압과 관계는 다음과 같다.

$$I = \frac{P^2}{\rho c} \quad [W/m^2] \tag{2.4}$$

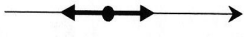
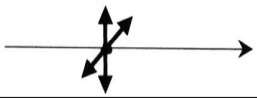
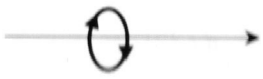
사실상 계면에서 순간 인텐시티 보다 시간평균 인텐시티가 사용되며 실제로도 중요하다. 음압과 고유 음향임피던스와의 관계식에서 수중 및 공기 중에서의 평면파에 대하여 동일한 음압 $1Pa(N/m^2)$이 나타내는 인텐시티는 매질의 고유 음향임피던스(specific acoustic impedance) 값에 따라 다음과 같은 차이를 보인다(강추원, 2005).

$$I_{air} = \frac{\overline{P^2}}{\rho_{air} c_{air}} = \frac{1}{1.293 \times 340} = 0.227 \times 10^{-2}\ [W/m^2] \tag{2.5}$$

$$I_{water} = \frac{\overline{P^2}}{\rho_{water} c_{water}} = \frac{1}{1{,}000 \times 1{,}500} = 0.67 \times 10^{-6} \ [W/m^2] \tag{2.6}$$

수중에서 소음이 전파해 가는 형태는 매질의 형상과 물리적 특성에 따라 다르다. 흔히 나타나는 파동의 종류와 각 파동의 전파속도를 Table 2.1에 나타내었다(김광준, 1996).

Table 2.1 Wave motion types and propagation velocity

파동의 종류	파의 진행방향과 입자운동 방향	매 질	파의 전파속도
압축-인장파 (종파)		기체	$V = (\frac{rp_0}{\rho_0})^{1/2}$
		액체	$V = (\frac{K}{\rho_0})^{1/2}$
		고체	$V = [\frac{E(1-\nu)}{\rho_0(1+\nu)(1-2\nu)}]^{1/2}$
전단파 (횡파)		고체	$V = [\frac{E}{2\rho_0(1+\nu)}]^{1/2}$
굽힘파		현	$V = [\frac{T'}{A\rho_0}]^{1/2}$
		사각단면봉	$V = [\frac{Eh^2}{12\rho_0}]^{1/4} \ \omega^{1/2}$
		판	$V = [\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)\rho_0}]^{1/4} \ \omega^{1/2}$
레일리파		고체표면	$V = 0.385[\frac{E(2.6+\nu)}{\rho_0(1+\nu)}]^{1/2}$

ρ_0 = 평형상태 압력 ρ = 밀도 r = 비열비 K = 단열 압축비
E = 탄성계수 ν = 포아송비 T' = 장력 ω = 각 주파수이다.

수중에서의 음속은 여러 가지 조건에 의해 일정한 값을 갖지 않는다. 해수 중에서는 1,481m/s 라고 하지만 음속에 영향을 미치는 요인들이 많이 있다. 그 중에 수온(℃), 염도(ppt) 및 압력(Pa)의 변화에 따라 음의 전파속도가 변하게 되며, 특히

지역적 차이와 수심, 계절 등의 변화에 따라 비교적 음속에 영향을 미치는 요인들의 변화가 큰 해양에서의 경우 담수에서 보다 음속변화는 커질 수 있다. 일반적인 해수에서 수심에 따른 온도와 염도, 압력의 변화양상은 다음의 Figure 2.2와 같다 (University of Rhode Island, 2009).

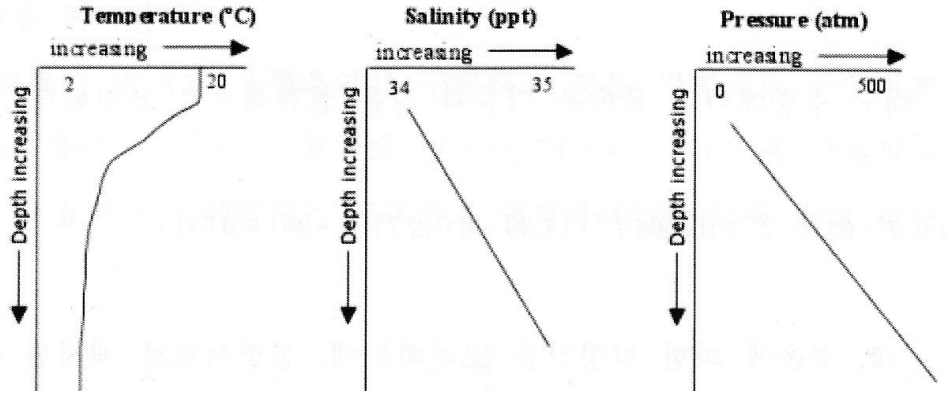


Figure 2.2 Depth profiles from the open of temperature, salinity and density(University of Rhode Island, 2009).

이와 같이 음속은 온도와 압력이 상승할 경우에도 증가된다. 해양에서의 음속은 태양열에 의해 온도가 상승되는 해수 표면에서부터 심해로 내려갈수록 수온이 낮아짐에 따라 감소한다. 그러나 심해에서는 온도가 매우 일정한 상태로 유지되지만 압력이 증가되면서 음속도 역시 증가하게 된다. 압력과 온도의 변화는 0.5와 1.5km 깊이에서 Sound ray의 변곡점이 발생한다. 따라서 소리는 Deep sound channel에서 에너지의 손실이 없이 먼 곳까지 전달될 수 있다(Urick, 1967), (Seppänen *et al.,* 2004). 담수에서의 음속은 온도와 압력에 의해 달라지지만 일반적으로 수온에 의한 영향만 고려한다고 볼 때 실험적으로 제시된 수중에서의 음속은 온도의 차이에 따라서 대표적으로 아래 식을 이용하여 구할 수 있다.

① 0~95℃에서 (Marczak, 1997)

$$c = 1.402385\times10^{3} + 5.038813\,T - 5.799136\times10^{-2}T^{2} + 3.287156\times10^{-4}T^{3} - 1.398845\times10^{-6}T^{4} + 2.787860\times10^{-9}T^{5} \quad (2.7)$$

② 15~35℃ 에서 (Lubbers and Graaff, 1998)

$$c = 1404.3 + 4.7T - 0.04T^2 \quad (2.8)$$

최대 오차 : 0.18 ms^{-1}

③ 10~40℃ 에서 (Lubbers and Graaff, 1998)

$$c = 1405.03 + 4.624T - 3.83 \times 10^{-2} T^2 \quad (2.9)$$

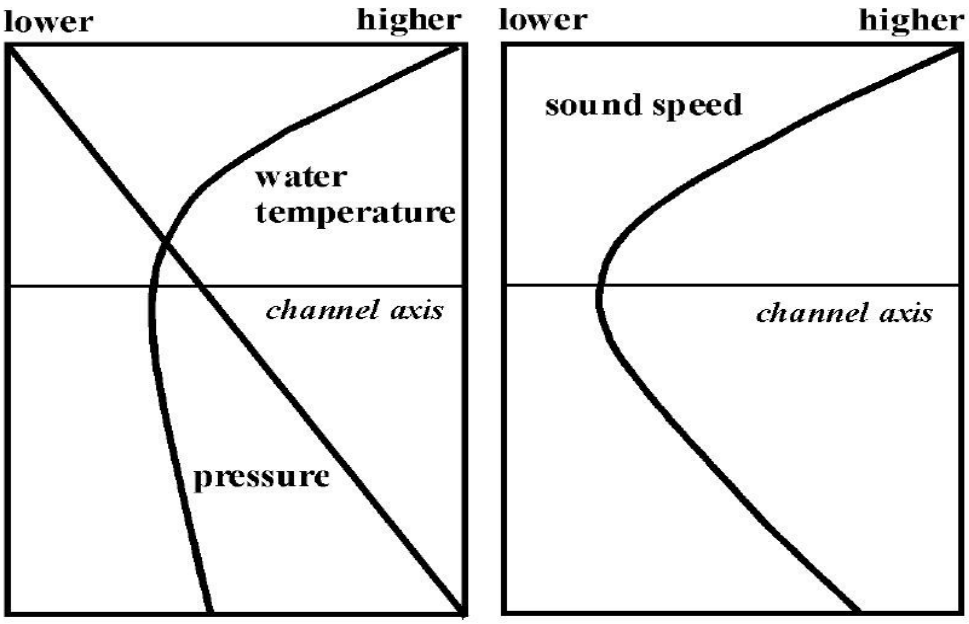


Figure 2.3 Pressure effect and water temperature from sound velocity(Urick, 1975).

2.3 음압레벨의 특성

2.3.1 발파음압의 기초이론

일반적으로 발파에 의한 소음은 공기를 매질로 하여 전파하는 파동 중에서 사람의 귀로 들을 수 있는 가청영역의 주파수를 가지는 파동을 말한다. 그러나 가청영역이 아닌 20Hz 미만인 저주파의 진동도 사람의 귀에는 들리지 않지만 건물을 진동시켜 이차적 소음을 발생시키거나 균열을 발생시킬 수도 있으며 고주파 성분에 비해 비교적 먼 거리까지 에너지 손실 없이 전파하는 특성이 있기 때문에 가청영역의 소음보다 오히려 위험할 수도 있다. 그러므로 발파로 인해 발생하는 소음의 피해를 평가할 때 이러한 저주파의 소음도 고려해야 한다. 가청영역의 소음과 저주파의 파동을 통틀어 발파풍압으로 표현하는데 사람에 따라서는 폭풍압이라 부르기도 한다.

이러한 폭풍압은 폭약이 자유면 근처에서 폭발할 때, 발파에 의한 에너지의 일부는 암반을 타고 탄성파로, 또한 일부는 폭풍압으로 주위에 전파되면서 소비된다. 이 경우 공기중에서 발생하는 파동은 발파원 근처에서는 충격파의 형태를 가지며, 발파원에서 어느 정도 떨어진 곳에서는 음압 $180dB$ 이하의 음파로 전파한다. 일반적으로 폭풍압은 넓은 범위의 주파수를 가지고 있으며 0.1Hz에서 200Hz 범위의 주파수가 중심이 된다. 이 범위 중 20Hz 이상의 폭풍압은 사람이 들을 수 있는 가청영역의 소음이 된다. 20Hz 이하의 저주파는 사람의 가청영역을 벗어나 사람이 들을 수는 없지만 비교적 먼 곳까지 에너지의 손실없이 전파하는 성질이 있으며, 가옥등 구조물을 진동시켜 2차 소음을 발생사킨다. 이 저주파의 폭풍압이 구조물의 피해의 주요원인이 되는데 발파작업과정에서 폭풍압의 생성원인은 다음과 같이 4가지로 분류하고 있다(Atlas powder, 1987).

① 발파지점에서의 직접적인 암반의 변위로 인한 공기압력파 (APP)
② 지반진동에 의해 공기로 전달되는 반압파 (RPP)
③ 파쇄된 암반의 틈을 통해서 나오는 가스 분출파 (GRP)
④ 불완전한 전색에 의해 전색물이 분출되면서 나오는 가스 분출파 (SRP)

대표적인 발파소음(폭풍압) 예측식으로 국외의 경우 Siskind(1980) 식 및

SveDeFo 식이 있는데, Siskind 식의 경우는 발파원으로부터의 거리 및 지발당 장약량을 제외한 다른 변수 K 및 n 값으로 반영하고 있으며, SveDeFo 식의 경우는 K 값만을 반영하고 있는 상태이다. 그리고 Siskind 등에 의하면 발파음압의 전파와 관련하여 자승근환산거리보다 삼승근환산거리로 추정하는 것이 바람직하다고 보고 있다. 이런 것과 더불어 현재 세계 여러 발파 현장에서의 발파소음 예측은 발파소음의 크기에 가장 영향을 미치는 것으로 알려진 지발당 장약량(W)과 폭원에서부터 측정지점까지의 거리(D)인 두 개의 독립변수로 하고 나머지 여러 변수들은 현장에서의 시험발파 결과로부터 회귀분석을 통해 구할 수 있는 두 개의 상수로 표시한 식(2.10)인 Siskind 식을 이용하여 예측하고 있다.

$$P = K \cdot (\frac{D}{\sqrt[3]{W}})^n \tag{2.10}$$

이와 더불어 SveDeFo에서 바람이 불지 않은 일반적인 상태, 거리가 어느 정도 떨어진 장소, 기온역전 등이 없는 조건을 가진 상태에서 최대압력을 다음 식으로 예측하고 있다(김홍식, 1999).

$$P = 70 \cdot \frac{\sqrt[3]{0.6 \times W}}{D} \ (kPa) \tag{2.11}$$

또, 전색을 모래 등으로 충분히 한 경우에서는 다음 식으로 예측하고 있다.

$$P = 40 \cdot \frac{\sqrt[3]{W}}{D} \ (kPa) \tag{2.12}$$

이밖에도 수중에서 TNT를 이용한 발파로 압력을 예측하는 식을 제안했는데 수중에서 현수 발파를 한 예측식 다음과 같다(Parvin *et al.,* 2007; Urick, 1967).

$$P = 5 \times 10^7 W^{0.37} R^{-1.13} \ (Pa) \tag{2.13}$$

또, 수중에서 암석에 천공을 하여 전색을 한 상태에서의 발파로 인한 압력은

$$P = 2.5 \times 10^{6} W^{0.37} R^{-1.13} \quad (Pa) \tag{2.14}$$

로 식을 제안하였다. 이렇게 구한 P값은 최대 압력이라 하며 압력이 인간의 청각에 따라 변화되면 그 대수에 비례하여 청각이 반응한다. 이러한 변화에 따라 음압을 음압레벨로 바꿔줘야 하는데 다음의 식을 이용하여 음압의 실효치 P와 음압의 기준치 P_0을 dB로 나타내보면 음압레벨(Sound pressure level, SPL)은 식(2.15)과 같다.

$$SPL = 20\log\left(\frac{P}{P_0}\right) \ [dB] \tag{2.15}$$

SPL : 음압수준 [Sound Pressure Level • $dB(L)$]

P : 측정된 최대음압

P_0 : 2×10^{-5} $[Pa(=N/m^2)]$, 2×10^{-4} $[dyne/cm^2]$

2.04×10^{-10} $[kg/cm^2]$, 2.9×10^{-9} $[\rho si]$

음압레벨에서 P는 대상으로 하고 있는 음압 그 자체를 가리키며, 그 값은 주파수와 관계없이 일정치인데 반해, 소음레벨에서는 P가 대상이 되는 음압 그 자체가 아니라, 여기에 청각보정을 가한 음압(실효치)을 취한 점이 다르다. 음압레벨의 단위는 항상 dB 뿐이지만, 소음레벨의 단위로는 $phon$이나 dB이 이용되고 있다. 소음계에는 모두가 청각보정회로를 갖추도록 규정되어 있으므로, 소음계에서 볼 수 있는 $phon$수 혹은 dB수가 그대로 소음레벨을 나타내는 것이다.

이러한 소음레벨($dB(A)$)과 음압레벨($dB(L)$)간의 차이 때문에 발파에 의한 소음을 측정할 경우 음압레벨과 소음레벨을 구별해서 생각해야 한다. 또, 발파소음의 측정기기의 특성상 보통 음압 Peak치인 $dB(L)$이 측정치로서 제시되고 있으나, 발파소음에 따른 정신적 피해를 평가하기 위해서는 상기 값을 인체 감응도에 부합하는 소음레벨 $dB(A)$로 변환하는 조치가 요구되기도 한다.

이로 인해 음압레벨을 이용하여 소음레벨을 추정 할 수 있는 다양한 연구가 진행 되었으며 현재는 여러 환산식(Table 2.2)이 제안되었다. 하지만 발파소음은 여러

요인들로 인해 그 예측에 상당한 어려움이 있으며, 현장에서의 실측치와 추정치를 비교·검토한 기존 결과를 참조할 때 상당한 편차를 나타내고 있는 것으로 보고 있다.

Table 2.2 Case study of noise level

연구 내용	환산식 제안
건설현장의 소음·진동·분진 평가 및 저감 대책에 관한 연구, 대한주택공사 주택연구소, 1999	$dB(A) = dB(L) - 12$
산·학인을 위한 발파공학, 기경철 외1, 1993	$dB(A) = dB(L) - 35$
발파소음의 예측기법과 환경규제 기준으로의 변환 연구, 김남수 외1, 2000	$dB(A) = dB(L) - 32$
진동레벨과 진동속도의 상관성 분석 등에 관한 연구, 환경부, 중앙환경분쟁조정위원회, 2010	$dB(A) = 0.94 \times dB(L) - 26$

2.3.2 공기중과 수중에서 음압과 음압레벨의 관계

유체 매질내 음압이 가장 측정하기 용이한 물리량으로 일반적으로 음압을 이용하여 dB(데시벨)로 표현한다. 음압레벨의 기본적인 정의는 음이 전해졌을 때 매질내의 압력 변화의 크기를 표시하는 방법으로, 기준 음압에 대한 비를 데시벨로 나타낸 값을 뜻하며, 여기서 기준 음압은 공기 중에서 $2 \times 10^{-5} Pa$을 사용하고 수중에서는 $0.1Pa$을 사용한다. 그리고 음압은 수중과 공기 중에서 고유음향임피던스 차가 다르기 때문에 동일하게 적용하기 어렵다. 이와 같이 기준 음압 설정 시 파스칼(Pa)을 사용하는 것은 음이 공기 중에서 확산, 전파될 때 대기 압력이나 수분 함유도에 따라서 통달 거리가 크게 달라지기 때문이다.

수중에서의 소음은 공기 중에서 소음과 동일하게 적용할 수 없는데, 이는 공기와 물의 고유음향임피던스 차가 크기 때문에 각각의 기준음압 또한 다르다. 1970년 미해군의 수중소음 연구에서 $1\mu Pa$을 기준음압으로 채택하여 ANSI(1971)에서 규정하고 지금까지 국제적으로 사용되고 있으며(Urick, 1967), 공기 중 음압레벨의 기준

음압은 가청범위내 사람이 가장 예민하게 반응하는 1~4000Hz의 주파수 범위에서 들을 수 있는 최소음의 세기를 1932년 American Standards Association에서 $1pW/m^2$으로 설정하고, 같은 시기에 음압에 대해 $20\mu Pa$을 기준음압으로 설정한데 근원을 두어 국제 표준으로 사용하고 있다.

공중소음과 수중소음은 데시벨(dB)로 환산하는 기준 값이 다르다고 표현하면서도 공중소음과 수중소음의 기준레벨 변환표(Table 2.3)에 의해 환산하거나 다인 퍼 제곱센티미터($dyne/cm^2$) 혹은 마이크로 바($\mu b\alpha r$)에 $100dB$을 더하는 경우와 공중소음레벨에 $26dB$을 더하는 경우 등의 방법을 이용하여 왔다.

Table 2.3 Reference level conversion table(Urick, 1967)

air noise level (dB re 0.0002 dyne/㎠)	underwater noise level (dB re 1 dyne/㎠)	underwater noise level (dB re 1μpa)	Plane wave rms pressure dyne/cm^2
94	20	120	10
74	0	100	1
54	-20	80	10^{-1}
34	-40	60	10^{-2}
-14	-60	40	10^{-3}
-6	-80	20	10^{-4}
-26	-100	0	10^{-5}

그러므로 공기중에서와 수중에서의 음압레벨을 비교할 경우 데시벨 값이 수중에서 항상 더 크다는 사실을 인지하고 있어야 한다. 종종 수중생물과 인간들 사이의 듣는 감각의 명백한 차이를 고려하지 않은 채 큰 소리에 대한 인식(견해)을 그들 자신의 주관적 관점에서 너무 간단히 비교하는 경우가 있다(Gordon and Tyack, 2001). 물론 이론적으로 공기에서의 레벨기준을 수중에서의 레벨기준으로 변환하는 것은 간단히 계산되어질 수 있다.

$$20\log\left(\frac{p_{air}}{p_{water}}\right)=20\log\left(\frac{20\mu Pa}{1\mu Pa}\right)=26dB \tag{2.16}$$

그러나 공기중에서와 수중에서 측정된 소음레벨을 직접적으로 비교하기 위해서는 다음과 같은 문제점이 있다.

① 공기와 물의 음향임피던스는 다르다.
($c_{water} = 1.5 \times 10^6$ and $c_{air} = 4.15 \times 10^2$)
② 공기와 물의 기준압력이 다르다.
($p_{ref\,water} = 1\mu Pa$ and $p_{ref\,air} = 20\mu Pa$)

아울러 이를 물리학적으로 정확히 보정한다 하더라도 해양 포유동물이 느끼는 정도를 그대로 반영한다고 할 수는 없다. 이는 육상 포유동물과 해양 포유동물을 그대로 비교하는 것과 같으므로 논란의 여지가 있으며, 따라서 기준압력을 보정하는 것(식 2.13)과 더불어 다음과 같이 매질에 따른 임피던스의 차이를 보정해 주어야 한다.

$$10\log\left(\frac{I_{air}}{I_{water}}\right) \approx 10\log\left(\frac{(\rho c)_{air}}{(\rho c)_{water}}\right) = 10\log(3600) = 36dB \qquad (2.17)$$

따라서 수중에서 측정되는 소음레벨과 육상에서 측정되는 소음레벨은 다음과 같이 $26dB + 36dB = 62dB$의 차이가 있다.

그러므로 수중소음레벨은 공기중에서 측정된 소음레벨에 $62dB$을 보정해 주어야 한다(Simmonds *et al.,* 2004). 이런 차이가 적용된 Table 2.4 볼 때 수중소음을 대기 중 소음 dB로 표현할 경우 약 $60dB$ 정도 크게 표현됨을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 크기의 차이는 실측 결과와는 다소 상이하다. 실제로 해상 환경은 조류의 영향 및 바람의 영향 등이 크며, 육상의 양식장은 수중 생물의 생명 유지 장치의 작동소음 및 기타 양식에 필요한 물리적 소음진동 등에 의해 정온한 상태로 보기는 힘들다. 온화한 상태에서 수중에 물 한 두 방울 떨어지는 수중소음도는 보통 10~20dB 정도에 이른다. 이렇기 때문에 측정을 시작하는 시점에서 배경소음도를 측정하여 외부로부터 오는 진동과 소음으로 인해 발생하는 수중소음도와 구별하여 비교 분석 해야 한다.

따라서 기존의 수중소음도를 예측한 사례들처럼 근거가 불분명하거나 없는 기준

을 제시하는 것 보다는 각기 다른 상황에 따라 배경소음을 측정하여 1차적인 피해 기준을 설정하는 것이 바람직하다고 사료된다.

Table 2.4 Comparison of measure to underwater noise and air(atmospheric) noise

대기 소음원과 dB 수준 (Air Sound Level and Intensity re : 20μPa)		수중 소음원과 dB 수준 (Ocean sound Level and Intensity re : 1μPa)	
수중에서 자신의 심장 박동소리를 들을 수 있는 수준	-	매우 고요한 바다 속 조건의 소음	46
방음 처리된 공간 또는 인간의 가청 한계	10	연안의 새우가 움직일 때 발생되는 소음	71
나뭇잎이 흔들릴 때 발생되는 소리	20	수로에 정박된 배에서 보통 규모의 짐을 선적할 때 소음	81
시골의 거주지, 빈 콘서트 홀, 발성의 최저 한계	30	수로에 정박된 배에서 중량의 짐을 선적할 때 소음	91
교실, 강당, 회의실의 소음	45	-	106
보통의 사무실, 호텔 로비, 은행의 소음	50	-	111
백화점, 실험실의 소음	55	북극고래가 회피하는 행동을 보이는 수준의 소음	116
혼잡한 식당, 시끄러운 사무실, 전화 대화가 곤란한 수준	60	다양한 고래와 돌고래가 회피하는 행동을 보이는 수준	121
분주한 기계실, 0.6m 이격된 거리에서의 목소리	75	이동하는 회색고래의 80%가 회피하는 행동을 보이는 수준	136
교통터널, 대화가 불가능한 수준의 소음	85	미 해군에서 적용하는 다이버의 최대 폭로 허용 수준	146
고속도로, 뉴욕의 지하철 소음	90	-	151
리벳팅 작업 소음, 용광로 부근의 소음	110	예인선 및 바지선이 18㎞/hr 속력으로 이동시 소음	171
30m 거리에서 프로펠러 비행기의 이륙시 소음	120	푸른 고래가 발생시키는 최대 발성 소음	180
인간의 청각기관에 고통을 발생시키는 소음 수준	125	대형 유조선 운행시 소음	186

*(주)대영Geo/발파엔지니어링, “신울진원자력 1,2호기 부지정지 굴착공사 시험발파 결과보고서”(2010)

배경소음의 중요성은 COWRIE(2003)의 보고서에서 나온 것과 같이 수중소음의 영향을 평가하기 위한 종합적인 그래프가 제시하였다(Figure 2.4).

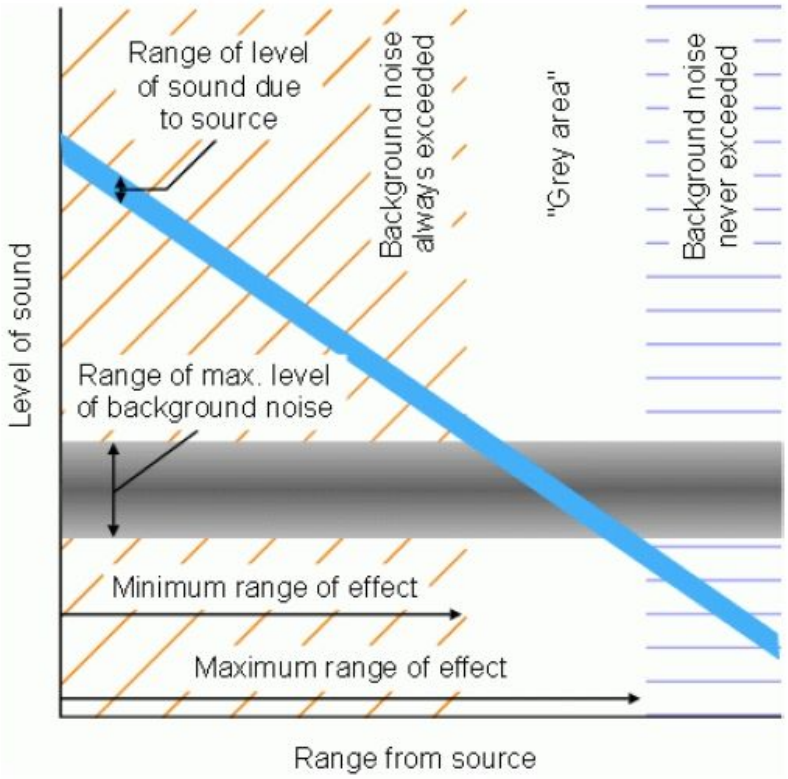


Figure 2.4 A model of noise from a source, and ambient noise, where levels vary(COWRIE, 2003).

소음원에서 멀어질수록 소음레벨이 배경소음에 넘어설 수 없다는 걸 말해주며 소음원과 가까워질수록 배경소음을 초과한다고 나와 있다. 또 소음이 발생하는 시점부터의 거리에 따라 최대 영향 범위와 최소 영향 범위의 차를 'Grey area' 라고 한다. 이런 것들을 종합하여 볼 때 배경소음을 이용하여 1차적인 피해기준을 선정해야 한다는 걸 보여준다.

2.4 어류의 청감특성

어류는 외이, 내이, 중이가 있는 인간의 청각과는 다르게 내이만 가지고 있으며 이러한 내이는 상하로 나뉘어 상부는 평형감각을 담당하며, 하부는 다시 통낭, 소낭, 호낭의 3개의 자루 모양으로 나뉜다. 이 중 청음 기구에 관련된 것은 소낭이며 소낭 속에 있는 이석은 내이와 연결된 부레의 진동을 내이에 채워져 있는 림프액의 압력으로 인하여 움직이게 되고 이때 소낭 내벽에 있는 감각 세포를 자극 하므로 어류가 음을 인식하게 된다(이창헌, 2000). 아래 그림에서 보듯이 M은 뇌 수질이며, C는 소뇌, S는 내이의 소낭 이며, L은 호낭 이라고 한다(Hastings *et al.,* 2005).

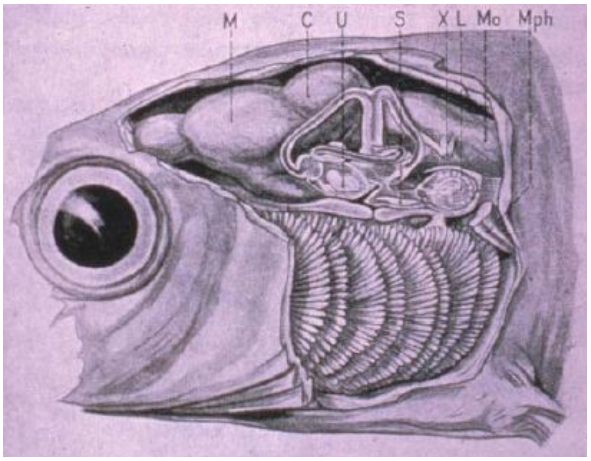


Figure 2.5 Lateral view of the head of a minnow *phoxinus laevis*(From von Frisch and Stetter, 1932).

어류의 청각 기관에는 내이, 부레, 측선 등이 있는데 그 중 주요 음 감지기관은 측면에 위치하고 있어 물과 접촉하여 100Hz 이하의 수중 입자운동을 감지하는 측선조직과 머리 내부에 있는 내이 조직이 있다. 이 내이 조직은 1~3000Hz 이상의 음에 민감하다고 알려져 있으며 어류의 식이음, 구애음, 유영음 등에 의한 유집 반응이 일어나는 것으로 알려지고 있다.

대부분의 어류에서 진동을 감지하고 듣는 것이 가장 발달된 감각 형태이고, 음 발생은 수중을 통해 저주파음을 잘 전파할 수 있도록 한다. 어류의 가청주파수 범위가 16~5000Hz 범위이나 주파수 10~1000Hz 범위에서 예민한 반응을 나타낸다고

보고하고 있다.

어류에서 측선조직은 수중음장과 관련하여 입자속도에 의해 직접적으로 자극을 받고, 공기주머니인 부레를 통해 음압변동으로 변화될 때 일어나는 입자운동에 의해 간접적으로 자극을 받게 된다.

소음과 진동에 대한 청감능력은 특히 부레와 인접한 내이의 해부학적 구조에 의해 어종에 따라 다르다. 부레가 없는 연골어류나 광어를 포함한 저생 어류가 상대적으로 낮은 청감능력과 음향반사 능력을 갖는다. 부레를 가진 어류가 훨씬 민감한 경향을 보이며 부레와 내이 사이가 근접하여 연결된 형태의 어종에서 가장 민감하다.

어류는 일반적으로 넓은 범위의 소리를 감지할 수 있고 반응한다. 이러한 소리의 감지능력에 대한 측정은 조건적 반응, 무조건적 반응, 그리고 뇌 전압측정 등을 통해 어류의 응답을 결정한다(Hastings *et al.,* 2005).

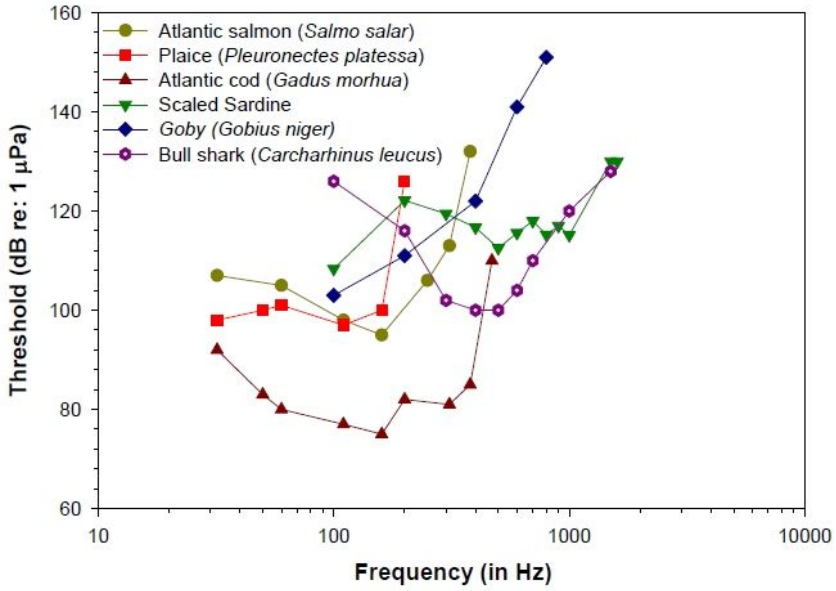


Figure 2.6 Hearing thresholds of representative species(from Hastings *et al.,* 2005).

2.5 수중소음 연구 사례 및 기준

2.5.1 국내 사례 및 기준

수중생물과 관련하여 발생소음 영향성에 대한 연구는 국내외에서 일부 해양학자들에 의해 이루어지고 있으나 영향을 규명하는 연구는 상당히 미진한 상태이다. 특히 발파작업에 의한 수중소음 영향은 자료가 매우 빈약하고, 명확하지 못하여 국내 분쟁사례를 보더라도 그 평가기준이 모호한 실정이며, 일괄적이지 못한 상황이 대부분이다.

기존의 수중소음 관련 분쟁사례를 보면, 대부분의 피해평가는 건설공사로 인하여 발생하는 소음·진동 측정을 육상에서 실시한 결과를 토대로 가두리양식장 등의 수중소음을 예측하는 경우가 대부분이었으며, 이에 따른 전파매질의 특성에 의해 변화되는 조건, 배경소음 등에 대한 기술적, 논리적 판단기준이 제시 되지 못한 상황에서의 피해평가로 인하여 갈수록 분쟁이 커져 가고 있는 상황이다.

수중소음으로 인한 어패류의 손상이 발생되는 원인은 지반진동과 소음의 전파범위, 여러 수중소음 사례들에 따라 크게 4가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 수중에서 수중으로 전파 되어 가는 형태(Water to water)로 수중 속에서의 발파(현수발파, 부착발파, 천공발파)와 같은 물의 흐름과 영향을 받는 작업들을 통해 발생하는 진동과 물의 압력파에 의한 어패류의 손상이다. 두 번째는 공사현장이 바다와 저수지가 맞닿는 보다 일반적인 수중발생 원인으로 지반에서 수중으로 전파 되어 가는 형태(Ground to water)를 띄고 있는 곳으로 발파 현장이나 항타작업 등과 같은 지반에 충격을 주는 현장이 그곳에서 발생하는 진동과 소음으로 인해 수중에 사는 어패류에 손상을 미치는 형태를 보이고 있다. 세 번째로 지반에서 지반으로 전파 되어 가는 형태(Ground to ground)로 수중이 아닌 지반 위에 수조를 이용하여 어패류를 관리 하는 경우 지반에서 발생하는 진동과 소음이 수조안의 어패류에 손상을 유발하는 경우를 말한다. 마지막으로 현재에는 해양에 관련하여 많은 공사가 진행되고 있지 않지만 시대가 거듭할수록 해양자원의 필요성이 대두되게 되고 이를 개발하게 되면 겪게 되는 수중에서 지반으로 전파되어 가는 진동과 소음의 형태(Water to ground)가 있다. 수중소음 민원발생에 대한 사례는 위에서 언급한 네 가지 형태가 주류를 이루는 것을 알 수 있다(박정봉, 2011).

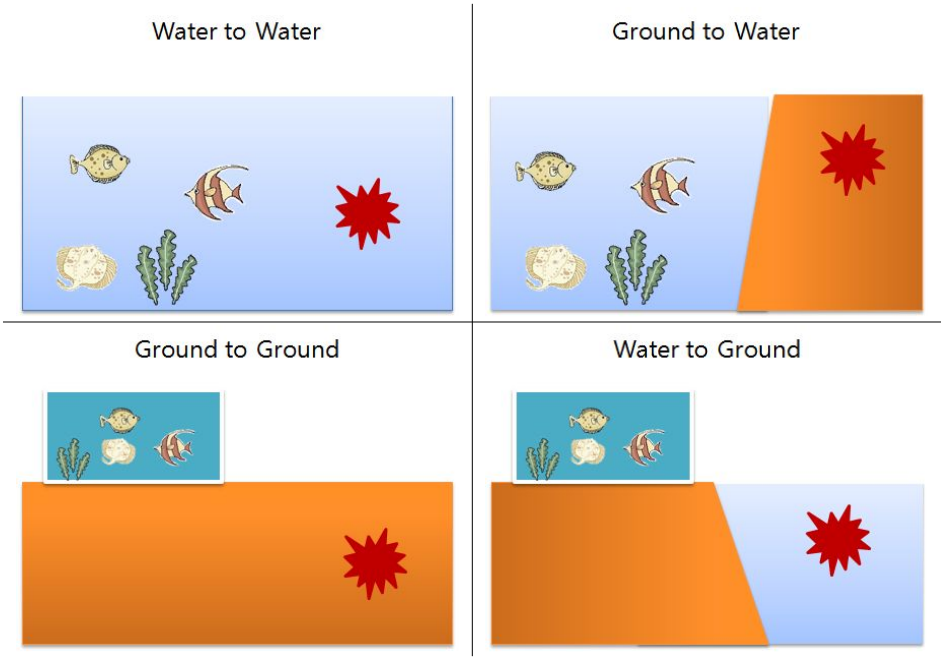


Figure 2.7 Type of underwater noise.

수중소음 피해기준의 설정 사례에서 안장영(1994)의 실험에서 자주복 치어의 치명적 한계치를 227.0dB re 1μPa로 잡았으며, TNT폭약량과 거리 및 첨두압력과 거리 관계식을 $P(\mu Pa) = 4.007 \times 10^{10} \times (W^{1.49}/D)$ 로 도출해 냈다. 그리고 윤종락(2006)등은 연속음인 경우 어류가 구집반응을 보이는 음은 130~160dB re 1μPa이며, 충격소음에 대한 어류의 청각세포에 손상을 줄 수 있는 최대 음압준위는 약 193.0dB re 1μPa로 추정하였으며, 수중현수 발파시 충격파 최대 음압식을 $P = 4 \times 10^{7} (W^{0.375}/D^{1.13})$ 으로 나타내었다. 이러한 연구와 더불어 중앙환경분쟁조정위원회에서는 주변 발전소 공사 차량의 소음 및 진동으로 인한 양어장 피해분쟁사건(2008)에서 평상시 양식장안의 소음 즉 배경소음에 비하여 어류별 소음 내성도는 20~50dB re 1μPa 중 20dB re 1μPa로 반영 하였으며, 터널 발파 진동으로 인한 뱀장어 피해 배상(2009)에 대해서는 배경소음의 15~20dB re 1μPa로 적용하였다. 또, 기경철(1998)등은 수중 충격압이 물고기에 미치는 영향을 다음과 같이 기술하고 있다(Table 2.5).

Table 2.5 Domestic literature data

Pm(피크 압력치, ㎏/㎠)	물고기 영향 정도	수중소음 환산값(dB)
2.0	거의 영향이 없음	226
3.5 이상	피해가 크다	230
7.0 이상	거의 고기가 폐사한다.	236

수중소음 연구자료 및 사례조사를 보면 수중발파가 어업환경에도 악영향을 준다는 것이 외국에서는 잘 알려져 있지만 국내에서는 사례 및 그에 따른 어업환경에 대한 연구 자료가 많지 않다. 이로 인해 수중소음에 대한 법적 기준이 미흡하다.

수중발파에 의해 수중에 생기는 물리화학적 제 현상에 따라 수산생물에 어떠한 영향을 미칠 것인가 하는 문제의 본질적인 구조(構造)는 아직까지도 명백히 밝혀지지 않았다.

2.5.2 외국 사례 및 기준

우리나라와 달리 미국과 캐나다 등에서는 바다와 강과 같은 지역에서 공사가 진행 될 때 주변 어패류 보호를 목적으로 발파에 따른 수중생물 피해에 대한 연구와 사례가 있다.

발파로 인한 수중에서의 압력파가 어패류에 대한 피해정도를 눈으로 쉽게 판가름 할 수 있으므로 문제시되기 쉬우며, 이러한 압력파는 수중생물에 직접적인 피해를 주게 된다. 압력파의 피해와 비슷한 상황을 만든 인위적 방법 중 하나가 Air-gun을 이용한 연구가 있다. Engas *et al.* (1996)은 Air-gun의 사용으로 대구와 연어의 포획율이 감소했다고 한다. 그리고 Slotte *et al.* (2004)은 Air-gun의 방사 전 보다 방사 후 수중생물이 더 깊은 곳으로 이동 했다는 걸 발견했으며, Skalski *et al.* (1992)은 Air-gun으로 186~191dB re 1μPa의 소음에 폭로된 지역에서 쏨뱅이의 어획량이 52% 감소한 것으로 보였다.

하지만 이러한 연구를 통해 발생되는 형태들이 수중 어패류에 대한 피해에 관하여 실질적인 상관성을 나타내는지에 대한 규명은 이루어지지 않고 있으며, 수중소음의 수준과 피해에 관하여 설득력 있는 이론적 근거를 가진 기준을 제시하지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 수중소음에 대한 확인을 위해 발생유형에 따라 적

절한 계측계획을 수립하고, 실측을 통해 어패류에 대한 피해를 확인하여야 하는 것이 바람직하다.

외국에서는 수중생물에 대한 관리 기준이 각각의 나라와 관할청에 따라 다르게 지정되어 있다. 캐나다에서의 알래스카 수렵청(1991) 같은 경우 부레를 가진 어류에 대하여 순간적인 충격성 수중 압력 변화의 허용 기준을 205.4 dB re 1μPa로 잡고 있으며, 캐나다 연방 어업법에서는 산란장소에서 수중 음압 기준을 220dB re 1μPa로 잡고 있다(Peter *et al.,* 2003). 수산워킹그룹 밴쿠버 기술기준정책협약에서는 부상에 대한 최대치를 모든 물고기들에 대하여 208dB re 1μPa로 잡고 있으며(Payne *et al.,* 2008), Oregon LNG의 항타소음 연구결과로는 물개등 기각류에 대해서는 190dB rms에서 치명적이며, 고래 등 포유동물은 180dB rms, 체중 2g 이상과 이하의 물고기에는 최대 206dB에 치명적이라고 알려져 있다(Mark *et al.,* 2008). 또, 미국 캘리포니아 교통부 연구 자료를 보면 2시간 동안 지속적으로 250Hz의 상태에서 최대 204dB re 1μPa의 음압레벨에 폭로된 40~50cm의 금붕어는 살아남지 못한다고 알려져 있으며 블루 구라미 또한 30분 동안 150Hz 상태에서 최대 198dB re 1μPa의 음압레벨에 지속적으로 폭로되면 살지 못한다고 나와 있다(Hastings *et al.,* 2005).

음압레벨은 높은 소음에 폭로된 후 청력손실이나 감각세포의 손상 등에 대한 연구가 진행되었는데 이와 다르게 물리적 손상의 정도를 나타내는 시험조건으로 50Hz이하의 주파수 범위에서 대부분 1분~24시간까지 긴 지속시간을 갖는 190dB re 1μPa이상 소음수준에서 어류에 폭로된 음향에너지(SEL)의 크기와 관련된 연구가 있다. 발파에 의한 실험 연구로 0.02g~744g 범위의 체중을 갖고 도관이 있는 부레를 가진 5종과 도관이 없는 부레를 가진 3종 등 8개 다른 종류의 어류를 대상으로 폭로시험을 실시한 결과 50%의 치사율을 보이는 피크압과 상처를 입지 않는 상태 피크압을 알아내었다(Yelverton *et al.,* 1975).

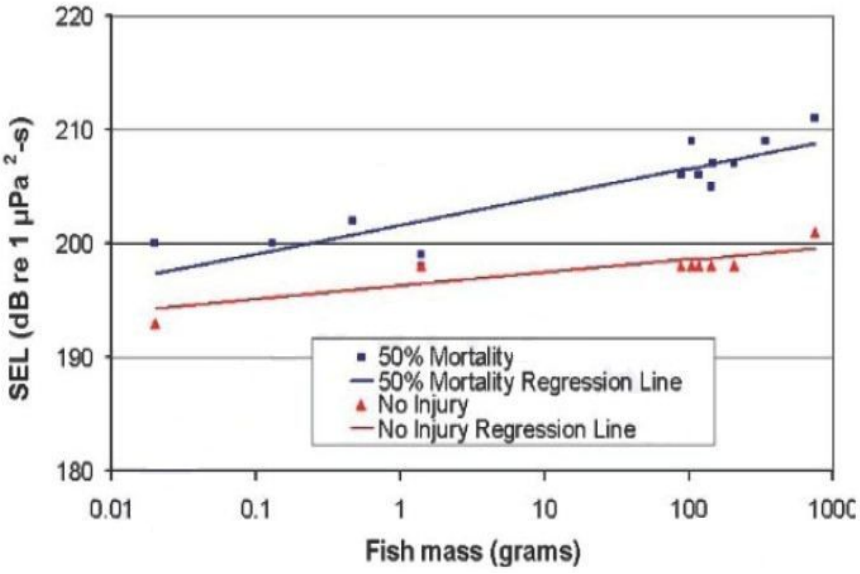


Figure 2.8 Estimated SEL that results in 50% mortality and no injury based on data for exposures to a single explosive sound(Yelverton, 1975).

아래 표와 같이 일본에서 수중발파시 어패류에 대한 조사자료는 있으나 각각 다른 방법의 압력 측정방법과 측정치 등에 대한 조건이 다른 것이 많으므로 객관적인 자료로 활용하기에는 어려움이 많다.

이처럼 수중소음으로 인하여 어류에 치명적으로 작용하는 요인이 되는데 어느 정도의 소음수준에 얼마나 이와 같은 반응 일어나는지에 대한 연구는 실험을 실시할 때의 물의 온도, 물속의 흐름, 주파수, 실험이 진행되는 실험체와의 거리 등의 시시각각 변하는 다양한 조건들로 인하여 정량적인 결과가 나오기 어려운 실정이다.

Table 2.6 Japan research results(若園 *et al.,* 1970)

어 종	충격압 (kg/㎠)	손 상 정 도	폭 원	폭원과의 거리(m)	실험 조건
전갱이 갈고등어	0.4	폐사 1/27 활기 없는 상태 16/27 평상시와 변화 없음. 10/27	다이나마이트 (1.0kg)	15	수심 6m로 수중 부착발파
전갱이 조기	1.6	대동맥 익혈 부레 파열 폐사 1/4	다이나마이트 (0.4kg)	15	수심 10m로 수중부착발파
마이고 시마지사끼	-	부레내 익혈 신장 익혈 반경 30m내 폐사	다이나마이트 (10.0kg)	18	수심 47㎝로 수면밑 5m의 수중현수발파
방어	7	폐사를 볼 수 없음.	다이나마이트 (7.0kg)	93	수심 3m로 수중부착발파
진주조개	29	패곡 파손은 2/30 그 후 성장무해	다이나마이트 (7.0kg)	25	수심 3m로 수중부착발파
쏨뱅이	1	부레 내출혈 2마리 모두 폐사	코즈 마이트 (9.0kg)	180	수중 12~18m 로 수중부착발파
참억새	14	폐사 볼 수 없음.	다이나마이트 (5.0kg)	40	수심 10m로 3m 의 현수발파
천징어	6	10마리 모두 생존	다이나마이트 (74kg)	50	천공발파
쥐노래미	98.6	10마리 모두 생존 이상 무	다이나마이트 (74kg)	103	천공발파
송어	10.5	후일 생존한 것을 생존으로 한다면 100% 생존	360ℓb	200	부착발파
멸치 전갱이	2.8~5.5	2.8kg/㎠에서 폐사하기 시작 5.5kg/㎠에서 폐사	다이나마이트 (2.3kg)	20	수심 8m에서 천공발파

3. 연구내용 및 방법

3.1 연구지역

발파 작업시 거리별 지발당장약량에 따른 수중소음을 측정할 수 있기 위해 지반에서 발파를 실행하여 지반으로 인해 발생하는 공기 중 소음과 지반 진동이 수중에 있는 지반으로 전달되어 발생하는 소음이 수중에 전달되는 조건이 되기 위해 수중과 인접해 있는 지역(경상남도 고성 및 사천, 부산광역시 기장, 전라남도 나주, 강원도 홍천, 충청남도 아산, 충청북도 청주)에서 연구를 수행하였으며, 자료 수집을 위한 발파대상 암석 종류는 화강암과 편마암이 주종이었다. 지질 특징으로는 대표적으로 불국사 화강암, 사암, 이암, 응회암, 혼성 편마암, 반상 화강암 등이었다.

강원도 홍천에서의 층서단위는 낭림층군, 편마암, 혼성편마암, 심성암류는 대보화강암, 단천복합체, 압록강 복합체, 불국사 화강암 이었으며, 경상남도 사천에서 층서단위는 신동층군, 한봉산층군, 박천층군, 봉천봉층군, 세손층군, 심성암류는 암록강복합체, 불국사화강암이고, 부산광역시 기장에서 층서단위는 유천층군, 재덕층군, 심성암류는 압록강복합체, 불국사화강암, 전라남도 나주에서 층서단위는 낭림층군, 편마암, 혼성편마암, 심성암류는 대보화강암, 단천복합체, 충청남도 아산에서 층서단위는 낭림층군, 편마암, 혼성편마암, 심성암류는 대보화강암, 단천복합체, 충청북도 청주에서 층서단위는 옥천층군, 심성암류는 대보화강암, 단천복합체를 확인할 수 있었다(Figure 3.1).

연구지역은 해상 가두리 양식장, 육상 콘크리트 수조 및 토사로 이루어진 자연저수지가 있는 수중과 인접한 공사현장으로 도로개설을 위한 굴착과 부지조성 등에 따른 발파 작업에서 실험이 진행되었다.

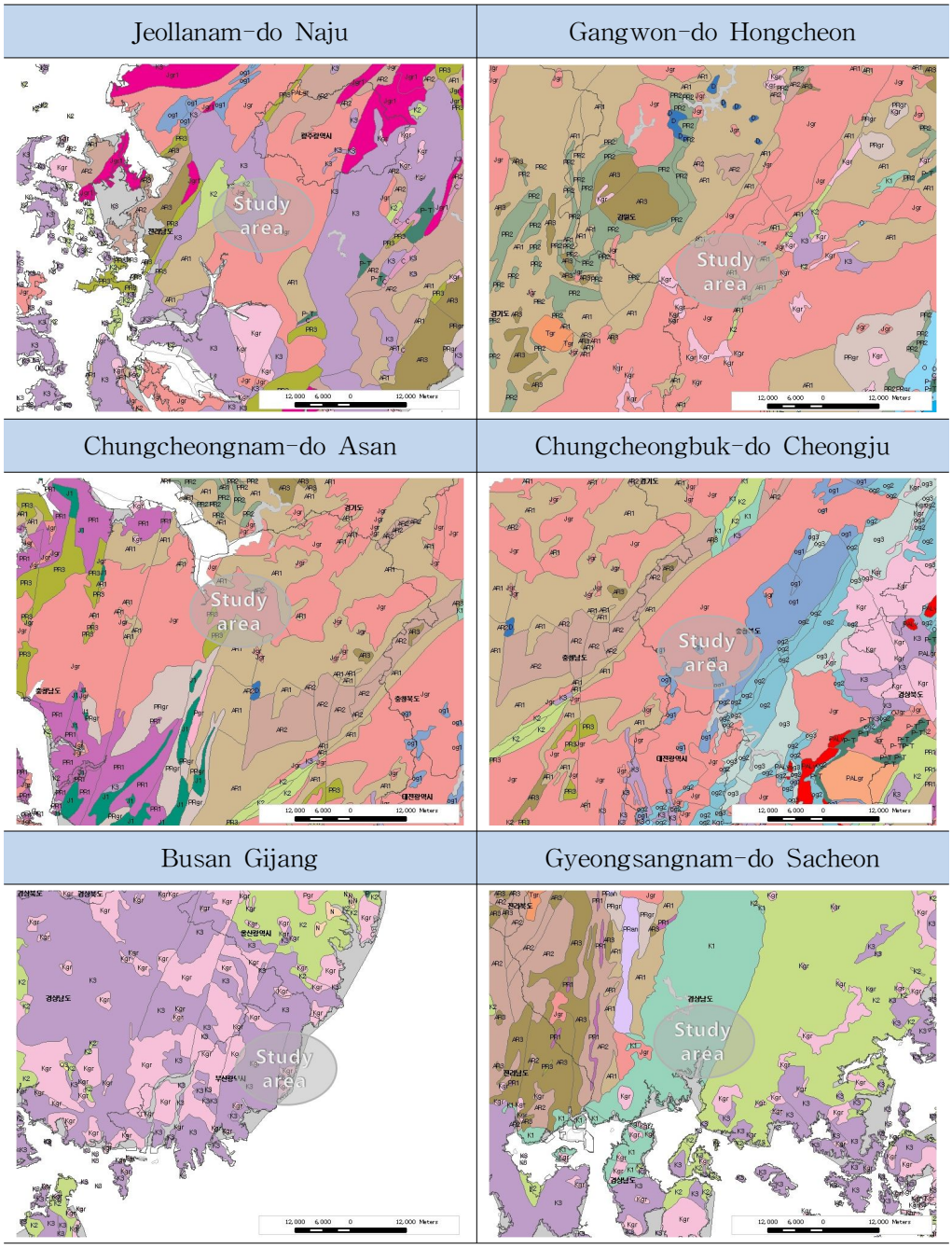


Figure 3.1 Geological map of study area.

3.2 수중소음 측정 장비

실제 발파로 인한 수중소음을 측정할 때 지반진동으로 인한 소음과 미미하지만 공중에서 수중으로 투과 된 소음을 함께 측정하게 된다. 수중소음을 측정하기 위한 Hydrophone sensor의 위치는 육상콘크리트 수조의 경우 어패류를 양식하는 수조의 높이가 대부분 1m 정도이므로 1m 이내의 적절한 깊이에 설치하였고, 해상 또는 저수지 내의 가두리 양식장의 수심은 통상 3~5m 정도인 점을 감안하여 수중소음 측정을 위한 Sensor는 수심 2~3m 정도에 설치하여 측정하였다. 이때 측정에 사용된 수중음압 측정 장비는 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Kinds of measuring equipment

	Manufacturer	Product No	Note	Unit
Underwater noise	B & K	8106	Underwater noise measurement equipment	$dB\ re\ 1\mu Pa$

B & K 8106 수중소음 측정 장비의 주요 특성은 주파수 범위가 저주파대역에서부터 고주파대역(7Hz~30kHz)에 이르기까지 폭이 넓고, 측정가능 수온의 범위도 영하 10도 내지 영상 60도까지 가능하며, 수중깊이 1,000m까지 측정이 가능한 9.8x10^{6}Pa(100atm)에 이르고 있다.

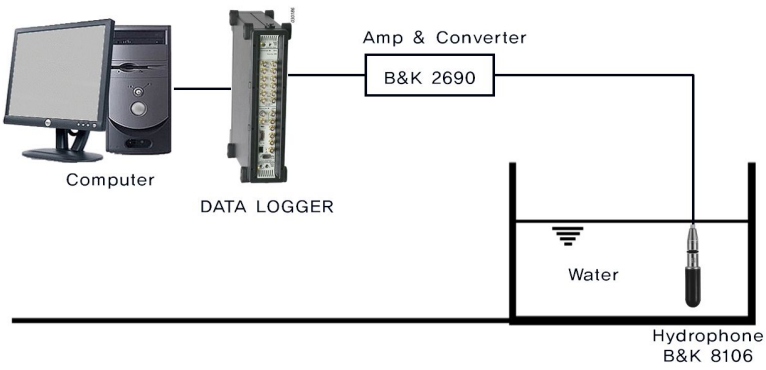


Figure 3.2 Underwater noise system overview.

3.3 수중소음 측정 방법

수중소음 측정 현장은 도로개설을 위한 터널 굴착 및 노천굴착과 부지조성을 하기 위한 지하터파기 굴착 현장에서 이루어 졌다. 발파에 사용된 폭약은 에뮬젼 계열의 폭약이며, 지발당장약량은 0.32~34.0kg을 사용하였고, 발파지점과 측정지점간의 거리는 176~692m 로 다양한 조건에서 측정하였다.

수중소음 측정하는 장소는 대체로 어패류와 수중생물들을 양식하는 방식과 동일한 조건으로 측정하기 위한 방법으로 물탱크, 해상 가두리 양식장, 육상 콘크리트 수조 및 토사로 이루어진 자연 저수지 등에서 측정하였다. 각각의 측정 모식도와 측정 전경은 Figure 3.3~3.6과 같다.

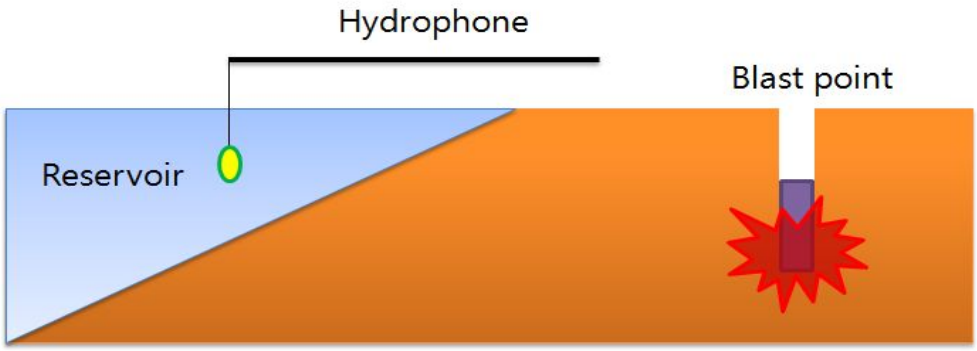


Figure 3.3 Blast-test schematic(reservoir).

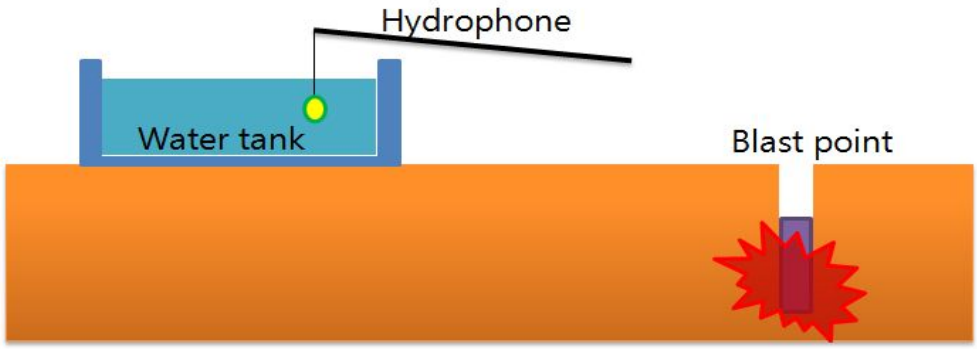


Figure 3.4 Blast-test schematic(concrete water tank).

Figure 3.5 Measurement of underwater noise(reservoir).

Figure 3.6 Measurement of underwater noise(concrete water tank).

3.4 실험결과

일반적인 발파작업이 이루어지는 현장에서 인근 저수지 또는 현장 내 실험용 수조를 통해 다양한 거리와 지발당장약량을 적용하여 수중소음을 측정하였다.

Table 3.2 Measurement results

Case	Weight (kg/delay)	Distance (m)	SP (Pa)	SPL(max) (dB re 1μPa)	Measurement location
Site 1	2.56	525	5.08	134.1	Concrete water tank
	5.12	525	5.45	134.7	
	4.80	525	6.89	137.2	
	12.8	525	14.47	143.2	
	19.2	525	18.62	145.4	
	29.2	525	26.88	148.6	
	34.0	525	24.51	147.8	
Site 2	0.32	240.7	25.62	148	Concrete water tank
	0.32	241.8	3.89	132	
	0.96	242.6	7.27	139	
	0.96	244.0	4.24	133	
	2.50	244.7	13.07	142	
	2.50	248.5	12.56	142	
	3.00	252.5	10.78	141	
	3.00	253.8	10.74	141	
Site 3	2.40	550.9	1.47	123	Reservoir
	2.40	552.7	3.99	132	
	1.00	553.4	1.28	122	
	1.00	555	2.05	126	
	0.375	561.7	3	130	
	0.375	562.8	1.28	122	
	5.60	435.4	12.18	142	
	5.60	436.3	13.32	142	

Table 3.2 (Continued)

Case	Weight (kg/delay)	Distance (m)	SP (Pa)	SPL(max) (dB re 1μPa)	Measurement location
Site 4	12.67	608.9	17.04	145	Reservoir
	12.67	602.9	18.31	145	
	8.00	612.7	226.24	167	
	4.34	691.6	4.28	133	
	4.34	687.4	0.64	116	
	3.00	666	2.81	130	
	3.00	662.5	2.68	129	
Site 5	1.00	265	4.44	133	Reservoir
	1.00	265	2.71	129	
	2.00	265	4.21	134	
Site 6	4.675	176	21.23	147	Reservoir

4. 실험결과 분석

4.1 실험결과 분석 및 상관성

본 연구에서는 발파를 할 때 적용하는 지발당장약량과 거리를 가지고 음압회귀분석을 통해 각각 현장에 따라 수중음압 예측식을 도출하여 상관성을 분석해 봤으며, 도출한 음압 예측식을 적용하여 수중음압레벨을 예측하고 그 값과 실제 측정값을 비교 분석해 보았다.

수중음압과 환산거리는 Tun design 4.0을 이용하여 회귀분석을 실시하였으며, 총 6개의 지역에서 지발당장약량과 거리별로 얻은 수중음압 데이터의 자승근, 삼승근 회귀분석은 다음과 같다.

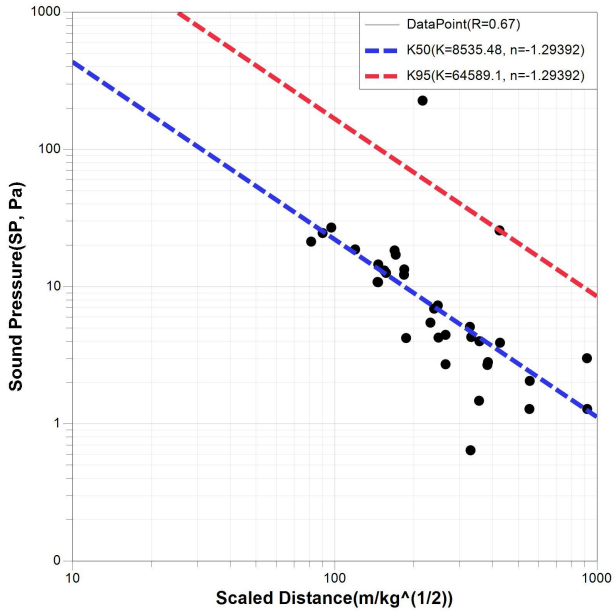


Figure 4.1 Square root regression analysis graph.

수중음압 자승근환산거리를 적용하여 50%, 95% 신뢰구간으로 상관식을 나타내었으며 상관계수는 0.67이다.

$$50\% \qquad Pa = 8535.48\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.29392} \tag{4.1}$$

$$95\% \qquad Pa = 64589.1\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.29392} \tag{4.2}$$

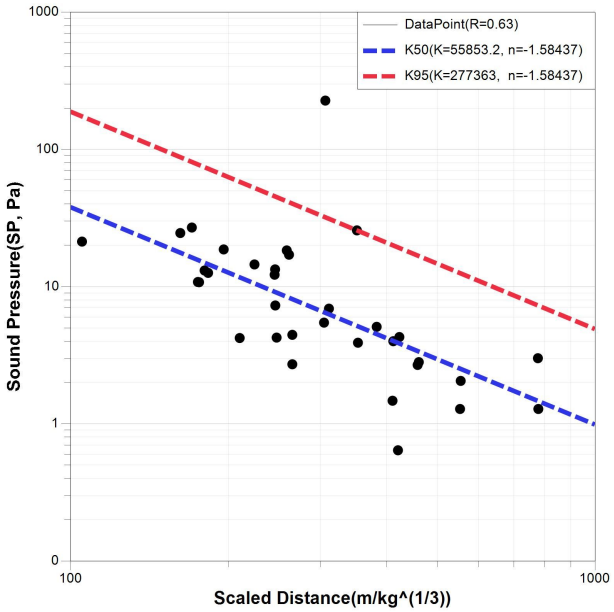


Figure 4.2 Cube root regression analysis graph.

수중음압 삼승근환산거리를 적용하여 50%, 95% 신뢰구간으로 상관식을 나타내었으며 상관계수는 0.63으로 나왔다.

$$50\% \qquad Pa = 55853.2\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.58437} \tag{4.3}$$

$$95\% \qquad Pa = 277363\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.58437} \tag{4.4}$$

여기서 구한 음압 값을 가지고 수중음압레벨을 예측하기 위해서 다음과 같은 식(4.5)에 적용하여 수중음압레벨을 예측하였다.

$$SPL = 20\log(\frac{Pa}{1\mu Pa}) \quad (4.5)$$

4.2 수중음압레벨 예측값과 측정값 비교

수중음압레벨을 예측하기 위해 총 6개 지역에서 측정한 수중음압을 가지고 거리별 지발당장약량에 따른 예측식을 적용하여 수중음압레벨을 도출하였다. 이 예측값을 검증하기 위해 경상남도 고성, 강원도 원주, 경기도 안산시에 있는 중육도를 대상으로 예측값과 측정값을 비교 하였다.

(1) 경상남도 고성

경상남도 고성의 층서단위는 유천층군, 재덕층군이며 심성암류는 압록강복합체, 불국사화강암인 지역에서 실험을 수행하였다. 수중음압레벨은 콘크리트 수조에서 측정하였으며 28번의 발파로 지발당장약량은 3.2~4.8kg, 거리는 70~240m의 조건에서 실험을 하여 데이터를 얻었다.

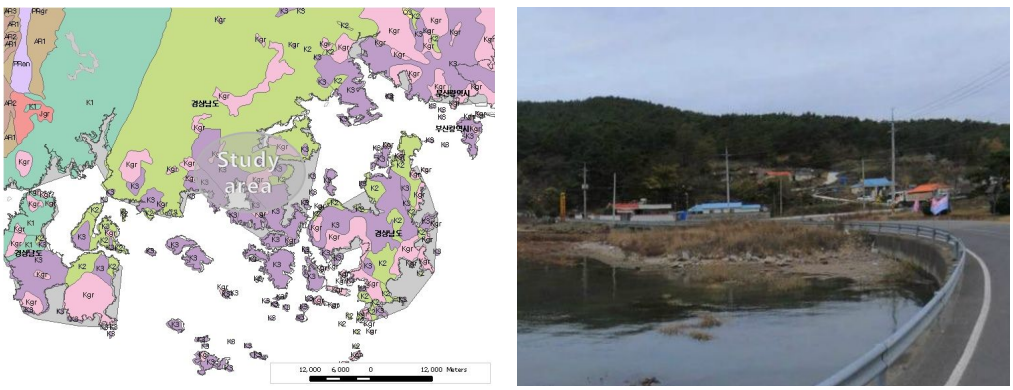


Figure 4.3 Geological map and panoramic view(Goseong)

Table 4.1 Measurement results(Goseong)

Case	Weight (kg/delay)	Distance (m)	SP (Pa)	SPL(max) (dB re 1μPa)	Measurement location
Site 1	3.20	80	213.02	166.87	Concrete water tank
	3.20	70	497.7	174.04	
	3.20	85	243.41	168.11	
	3.20	90	214.86	166.64	
	3.20	78	240.19	167.61	
	3.20	80	74	158.28	
	3.20	75	154.49	163.78	
	3.20	85	127.79	162.65	
	3.50	175	80.74	158.23	
	3.25	125	214.86	161.88	
	4.80	145	111.86	160.97	
	4.80	140	135.03	162.87	
	4.80	150	98.07	159.83	
	4.80	240	39.58	153.01	
	4.80	225	69.11	156.79	
	3.20	230	53.56	154.58	
	3.20	185	123.68	161.86	
	3.20	190	102.02	160.17	
	3.20	210	80.07	158.07	
	3.20	235	59.58	155.98	
	4.80	225	61.59	155.79	
	3.50	210	93	161.18	
	4.80	200	96.35	159.68	
	4.80	200	103.93	160.33	
	4.80	235	42.09	153.41	
	4.00	100	185.24	165.35	
	3.20	200	443.01	173.57	
	4.80	200	215.29	171.68	

Table 4.2 Comparison of sound pressure level(Goseong)

No	Measurement sound pressure level (dB re 1μPa)	Predicted sound pressure level (dB re 1μPa)	gap
1	166.87	173.89	-7.0
2	174.04	175.73	-1.7
3	168.11	173.06	-4.9
4	166.64	172.27	-5.6
5	167.61	174.24	-6.6
6	158.28	173.89	-15.6
7	163.78	174.78	-11.0
8	162.65	173.06	-10.4
9	158.23	163.53	-5.3
10	161.88	167.82	-5.9
11	160.97	167.57	-6.6
12	162.87	168.05	-5.2
13	159.83	167.10	-7.3
14	153.01	160.63	-7.6
15	156.79	161.52	-4.7
16	154.58	159.36	-4.8
17	161.86	162.36	-0.5
18	160.17	161.99	-1.8
19	158.07	160.61	-2.5
20	155.98	159.06	-3.1
21	155.79	161.52	-5.7
22	161.18	161.02	0.2
23	159.68	163.14	-3.5
24	160.33	163.14	-2.8
25	153.41	160.92	-7.5
26	165.35	171.85	-6.5
27	173.57	161.28	12.3
28	171.68	163.14	8.5
gap average			-4.40

고성에서 측정값과 예측값을 비교한 결과 최소 0.2의 차가 나타났으며 최대는 -15.6의 차이를 나타내었다. 4개의 데이터가 큰 차이를 보이는데 거리별 지발당장약량의 비교를 통해 볼 때 측정할 때의 환경여건이 좋지 않은 상태의 측정값이 포함되어 수치의 큰 차이가 보인다. 전체평균은 -4.40의 차이를 보여줬다.

(2) 강원도 원주

강원도 원주의 층서단위는 낭림층군, 편마암, 혼성편마암이며 심성암류는 대보화강암, 단천복합체인 현장에서 실험을 수행하였다. 수중음압레벨은 저수지에서 측정하였으며 5번의 발파로 지발당장약량은 1.6~7.2kg, 거리는 189~195m의 조건에서 실험을 하여 데이터를 얻었다.

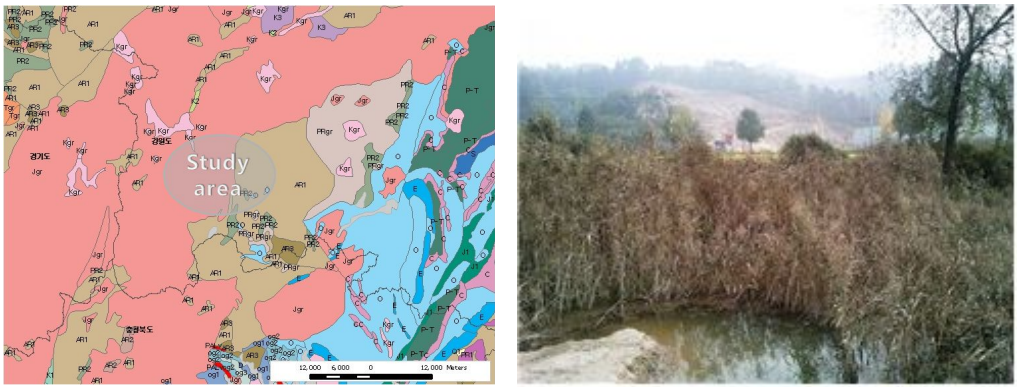


Figure 4.4 Geological map and panoramic view(Wonju)

Table 4.3 Measurement results(Wonju)

Case	Weight (kg/delay)	Distance (m)	SP (Pa)	SPL(max) (dB re 1μPa)	Measurement location
Site 2	1.6	188.6	45.60	154	Reservoir
	4.8	191.4	97.21	160	
	4.8	190.4	90.49	163	
	7.2	194.7	162.84	170	
	7.2	191.4	74.21	160	

Table 4.4 Comparison of sound pressure level(Wonju)

No	Measurement sound pressure level (dB re 1μPa)	Predicted sound pressure level (dB re 1μPa)	gap
1	154	158.91	-4.9
2	160	163.75	-3.7
3	163	163.82	-0.8
4	170	165.37	4.6
5	160	165.61	-5.6
gap average			-2.08

원주에서 총 5개의 측정값과 예측값을 비교한 결과 최소 -0.8의 차가 나타났으며 최대는 -5.6의 차이를 나타내었다. 전체평균은 2.08의 차이를 보여줬다.

(3) 경기도 안산시 중육도

경기도 안산시 중육도의 층서단위는 북부상원층군, 직현층군, 사당우층군, 연천층군, 장락-의암층군이며 심성암류는 대보화강암, 단천복합체인 현장에서 실험을 수행하였다. 수중음압레벨은 바다 수중에서 측정하였으며 11번의 발파로 지발당장약량은 3.0~64.0kg, 거리는 165~230m의 조건에서 실험을 하여 데이터를 얻었다.

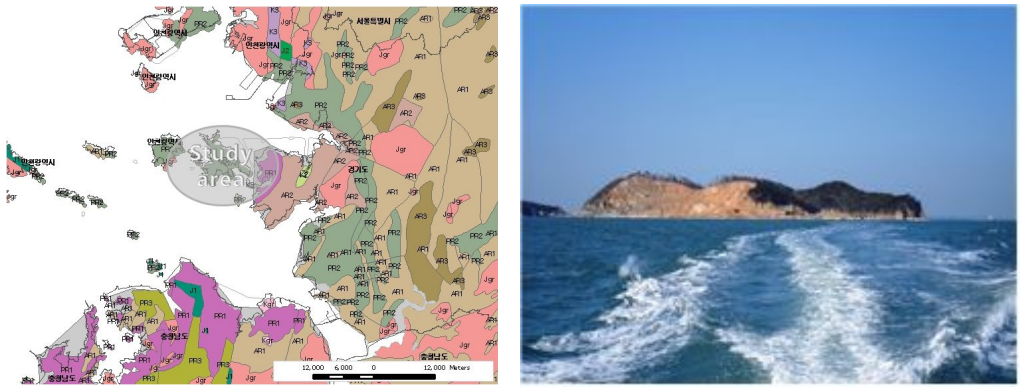


Figure 4.5 Geological map and panoramic view(JungYukDo)

Table 4.5 Measurement results(JungYukDo)

Case	Weight (kg/delay)	Distance (m)	SP (Pa)	SPL(max) (dB re 1μPa)	Measurement location
Site 3	35	165	61.59	155.79	Sea
	40	200	39.53	151.94	
	64	230	80.07	158.07	
	24	220	26.44	149.57	
	34	205	41.36	150.17	
	21	200	33.13	150.57	
	24	180	30.46	151.57	
	61	210	48.53	155.01	
	4.5	210	11.58	141.27	
	3	215	17.45	138.41	
	9	225	17.45	145.74	

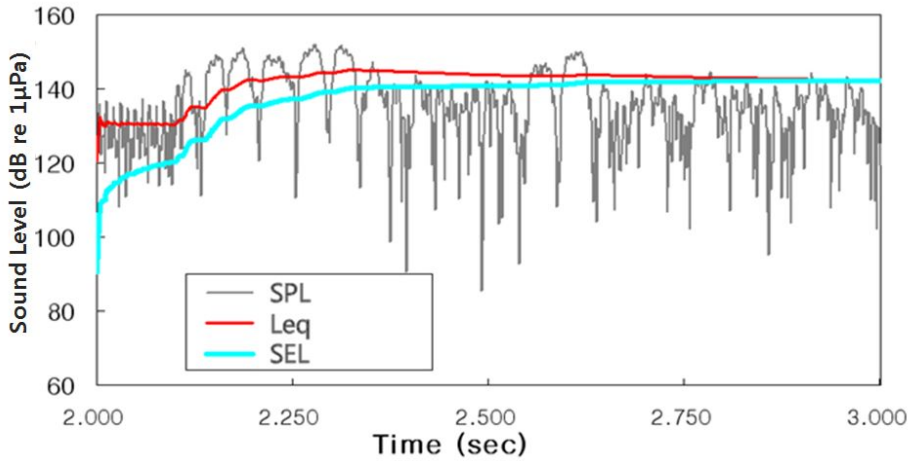
Table 4.6 Comparison of sound pressure level(JungYukDo)

No	Measurement sound pressure level (dB re 1μPa)	Predicted sound pressure level (dB re 1μPa)	gap
1	155.79	174.90	-19.1
2	151.94	172.87	-20.9
3	158.07	173.10	-15.0
4	149.57	169.21	-19.6
5	150.17	171.78	-21.6
6	150.57	169.91	-19.3
7	151.57	171.98	-20.4
8	155.01	174.13	-19.1
9	141.27	162.18	-20.9
10	138.41	159.99	-21.6
11	145.74	164.41	-18.7
gap average			-19.65

경기도 안산시 중육도에서 총 11개의 수중음압레벨 측정값과 예측값을 비교한 결과 최소 -15.0의 차가 나타났으며 최대는 -21.6의 차이를 나타내었다. 전체평균은 -19.65의 차이를 보여줬다. 다른 지역과 수중음압레벨이 많이 차이나는 값을 보이는데 암반의 특징과 물에 대한 매질의 차이로 추정된다.

경상남도 고성, 강원도 원주, 경기도 안산시 중육도에서 측정한 수중음압레벨의 대표적인 Wave graph는 각각 Figure 4.6~4.8과 같다.

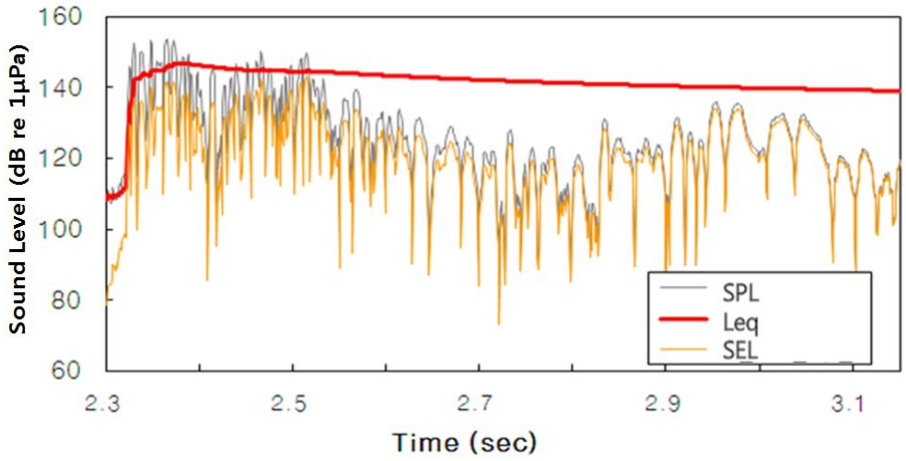
Gyeongsangnam-do Goseong



Sampling rate (SPS)	Measure-ment time	Pressure (Pa)	Peak measurement value		Equivalent noise (dB re 1μPa)
			SPL (dB re 1μPa)	SEL (dB re 1μPa^2-s)	
1000 Hz	3 sec	39.58	153.01	146.46	140.48

Figure 4.6 Wave graph of underwater noise(Goseong).

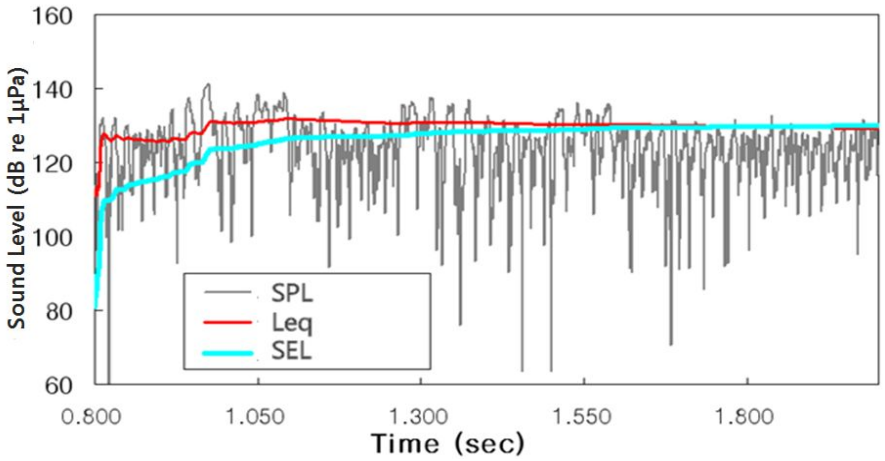
Gangwon-do Wonju



Sampling rate (SPS)	Measure-ment time	Pressure (Pa)	Peak measurement value		Equivalent noise (dB re 1μPa)
			SPL (dB re 1μPa)	SEL (dB re 1μPa^2-s)	
1000 Hz	3.1 sec	45.60	154	143	139

Figure 4.7 Wave graph of underwater noise(Wonju).

JungYukDo



Sampling rate (SPS)	Measure-ment time	Pressure (Pa)	Peak measurement value		Equivalent noise (dB re 1μPa)
			SPL (dB re 1μPa)	SEL (dB re 1μPa^2-s)	
1000 Hz	2 sec	11.58	141.30	129.90	129.20

Figure 4.8 Wave graph of underwater noise(JungYukDo).

5. 실험결과에 대한 고찰

수중음압레벨을 예측하기 위해 수중음압레벨 측정기기를 이용하여 수중음압을 측정해 거리별 지발당장약량으로 회귀분석을 하여 예측식을 도출하였다. 예측식은 기존에 있던 음압회귀분석(2.10)의 식에 각각의 값들을 적용하여 얻었으며, 자승근 회귀분석을 통한 것 보다 소음에 관련되어서는 일반적으로 삼승근 회귀분석의 신뢰성이 크다는 것을 참고하여 삼승근 회귀분석의 95% 신뢰구간 예측식을 가지고 각각 지역의 예측값을 도출하였다. 여기서 얻은 예측값의 신뢰성을 확인하기 위해 경상남도 고성, 강원도 원주, 경기도 안산시에 있는 중육도에서 실제 측정한 수중음압레벨 값과 예측식을 이용하여 얻은 수중음압레벨 값을 비교 분석하였다.

경상남도 고성에서의 측정값과 예측값 비교해본 결과 평균적으로 -4.40dB re 1μPa의 차이를 보였다. 하지만 측정값과 예측값의 차이에 오차가 나타난 4개의 데이터가 존재 하였으며 이 데이터를 거리별에 따른 지발당장약량을 다른 데이터들과 비교해본 결과 주변 환경에 따른 영향으로 측정값이 예측값에 비해 높고 적게 나온 데이터도 존재 하였다. 밀폐된 공간에 있는 콘크리트수조에서 측정한 수중음압레벨로 측정기기를 확인한 과정에서 약간의 오차가 생겼을 상황도 생각해 볼 수 있었다.

강원도 원주에서는 5개의 자료를 측정하였는데, 평균 -2.08dB re 1μPa의 수중음압레벨의 차를 보였으며 골프장을 만들기 위한 공사장으로 주변 배경소음이 일반적으로 크게 나타났다.

경기도 안산시에 있는 중육도에서 총 11개의 자료를 측정하였으며, 95% 신뢰구간에서 삼승근 환산거리를 이용한 식을 사용하여 얻은 평균은 -19.65dB re 1μPa의 차이가 나왔으며 각각의 값의 차이는 크게 나지 않았다. 앞의 분석방법과 다르게 삼승근 50% 신뢰구간을 적용하여 예측한 값은 -5.7dB re 1μPa이 나왔으며, 삼승근 95% 신뢰구간의 예측값 보다 적게 나타났다.

같은 삼승근 환산거리를 이용하여 예측한 값이 유독 중육도에서 높은 차이를 보였다. 각 지역의 지반의 특성과 물의 매질이 다른 점을 고려해 볼 수 있을 것 같다.

6. 결론

발파로 인해 발생하는 공해에서는 크게 두 가지가 있는데 그 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 지반진동이 있으며 진동과 같이 중요시 되고 있는 소음이 있다. 발파에 따른 각각의 진동과 소음은 법 제정이 되어 있는 상태이다. 하지만 법으로 제정되어 있는 소음이라 함은 공기중의 소음을 말하는 것으로 수중소음과는 별개의 의미를 지닌다. 이러한 공기중의 소음은 정해진 법령이 많고 판례도 많은 반면 수중에서의 소음은 연구가 부족한 것이 사실이다. 이러한 수중소음은 해외에서 많은 연구가 진행되고 있는 상황과 달리 국내에서는 소수의 판례만 나와 있고, 각각의 지역마다 정해진 수중생물에 대한 소음척도도 다르다. 이에 따라 수중소음에 대한 피해기준을 알기위해 많은 자료를 측정하여 그에 따른 분석과 실험을 통해 수중소음에 대한 연구가 요구되고 있다. 본 연구에서는 수중음압레벨을 측정하는 기기를 통해 얻은 값을 가지고 거리별 지발당장약량의 회귀분석을 통해 수중음압을 예측하는 식을 도출하였고 그 식의 검증하기 위해 다른 지역에서 검증실험을 하였다. 검증실험은 3곳의 지역에서 수행하였으며, 여기서 측정한 수중음압레벨 측정값과 식을 이용하여 예측한 수중음압레벨을 가지고 비교해 보았다. 이상의 연구를 통해 얻어진 주요 결과들은 다음과 같다.

1) 수중음압 예측식을 도출하기 위해 각 지역에 따라 거리와 지발당장약량을 달리하여 콘크리트 수조와 저수지에서 측정한 수중음압은 0.64~226.24Pa이 측정되었으며, 수중음압레벨은 116~167dB re 1μPa이 측정되었다.

2) 거리별 지발당장약량과 수중음압을 회귀분석에 적용하여 얻은 자승근, 삼승근 95%신뢰수준에서의 수중음압 예측식은 다음과 같다.

자승근 : $Pa = 64589.1(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.29392}$ $R = 0.67$

삼승근 : $Pa = 277363(\frac{D}{\sqrt[3]{W}})^{-1.58437}$ $R = 0.63$

3) 삼승근 음압 예측식을 적용하여 얻은 수중음압레벨과 3곳의 지역에서 실제 측

정한 수중음압레벨 비교하였다. 첫 번째로 경상남도 고성에서 28번의 발파를 하였으며, 측정값과 예측값은 최대 -15.6dB re 1μPa, 최소 0.2dB re 1μPa의 차이를 나타냈으며, 전체 평균은 -4.40dB re 1μPa의 차이로 나타났다. 두 번째로 강원도 원주에서 5번의 발파를 하였으며, 측정값과 예측값은 최대 -5.6dB re 1μPa, 최소 -0.8dB re 1μPa의 차이를 나타냈으며, 전체 평균은 2.08dB re 1μPa의 차이를 보여줬다. 경기도 안산시 중육도에서의 발파는 11회를 하였으며 측정값과 예측값의 차이는 최대 -21.6dB re 1μPa, 최소 -15.0dB re 1μPa이 나타냈으며, 전체 평균은 -19.65dB re 1μPa의 차이를 확인하였다.

4) 발파로 인한 수중음압레벨을 예측하기 위한 자료를 얻기 위해 수중과 인접한 곳의 현장 조건이 충족되어야 하는 특성상 많지 않은 데이터를 얻었으며, 수중음압레벨을 측정하는 기기의 희소성도 영향을 많이 끼쳤다. 이런 조건들을 보완한 상태에서 각각의 지역에 따른 많은 데이터를 가지고 분석을 한다면 보다 나은 결과를 얻을 것이라 판단되었다. 또한 각 지형과 지질에 따라서 수중음압레벨을 측정한 값을 참고하여 각 지역별 예측값에 따른 보정치를 두어 조정할 필요가 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 강추원, 2005, “제2판 발파공학 A to Z”, 구미서관, pp. 235～247.
2. 기경철, 윤철현, 1998, “최신 화약발파해설”, 구미서관, pp. 194.
3. 김광준, 1996. “소음과 진동”, 반도출판사, pp 2～7, pp. 23～24.
4. 김정진, 1998, “新・發破 핸드북”, 원기술, pp. 341.
5. 박정봉, 2011, “지반진동과 수중소음의 상관성 연구”.
6. 박진형, 2009. “지반진동 및 공중소음에 의한 수중소음 변화에 관한 연구”, pp. 6～9, pp. 23～27, pp. 40～44, pp. 76.
7. 김흥식, 대한주택공사 주택연구소, 1999, “건설현장의 소음·진동·분진평가 및 저감대책에 관한 연구 -발파공사를 중심으로-“
8. 안장영, 1994, “해중 TNT 폭발음에 있어서 폭약중량에 따른 폭발음의 소음 준위와 자주복 치어의 반응”
9. 윤종락, 이성욱, 안수용, 박지현, 배종우, 안명석, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 2006, “수중소음이 어류에 미치는 영향”
10. 이창헌, 2000, “한국 제주도 연안산 어류의 청각 특성에 관한 기초적 연구”, pp. 8.
11. 중앙환경분쟁 조정위원회 사이트, 2008, 2009.
12. 임대규, 조광현, 전양배, 대한화약발파공학회지 제28권 제2호, 2010, “지반진동 측정을 통한 수중소음 예측 및 관리 적용사례”, pp. 86~88.
13. ALASKA DEPARTMENT OF FISH AND GAME, 1991, “BLASTING STANDARDS For the Protection of Fish”, pp. 30.
14. Atlas Powder Company, 1987, “Explosives and Rock Blasting”, pp 316~318
15. Engas, Soldal, 1996, “Effects of seismic shooting on catch and catch-availability of cod and haddock”, pp. 9, pp. 99, pp. 117.
16. Gordon, J. and P. L. Tycak, 2001, “Sound and Cetaceans”
17. Lubbers, J. and R. Graaff, 1998, “A simple and accurate formula for the sound velocity in water”, Ultrasound Med. Biol. Vol 25, No 7, pp 1065~1068
18. Marczak, W., 1997, “Water as a standard in the measurements of speed of sound in liquids”, J, Acoust. Soc. Am. 102(5), pp. 2776~2779

19. Mardi C. Hastings & Arthur N. Popper, 2005, “Effects of Sound on Fish”, pp. 36, pp. 68~72.
20. Mark Bastasch, P.E./CH2M HILL, Maria Fernandez-Diaz, E.I.T./CH2M HILL, Jay Lorenz/CH2M HILL, Bob Ellis/Ellis Ecological Services, 2008, “Oregon LNG Terminal and Oregon Pipeline Project-Underwater Noise Propagation, Monitoring, and Mitigation”, Oregon LNG.
21. Mark Simmonds, MarkSarah Dolman and Lindy Weilgart, 2004, “Oceans of noise”, A WDCS(Whale and Dolphin Conservation Society) Science report, pp. 20-21.
22. Nedwell, J., J. Langworthy and D. Howell, 2003, “Assessment of sub-sea acoustic noise and vibration from offshore wind turbines and its impact on marine wildlife; initial measurements of underwater noise during construction of offshore windfarms, and comparison with background noise”, COWRIE, pp. 8~9.
23. Parvin S J, Nedwell J R and Harland E, 2007, “Lethal and physical injury of marine mammals, and requirements for Passive Acoustic Monitoring”, pp. 16.
24. Payne, C. Andrews, L. Fancey, D. White and J. Christian, 2008, “Potential Effects of Seismic Energy on Fish and Shellfish”, pp. 8.
25. Peter A. Cott, Bruce W. Hanna and Julie A. Dahl, 2003, “Canadian Manuscript Report for Fisheries and Aquatic Sciences 2648”, pp. 10.
26. Seppänen, Jukka and Mika Nieminen, 2004, “Measurements and Descriptions of Underwater Noise in Finland”, Geophysica(2004) 40(1-2), pp. 23-38.
27. Siskind, D. E, 1980, “Structure response and damage produced by ground vibration”.
28. Skalski, 1992, “Effects of sound from geophysical surveys device on catch-per-unit-effort in a hook-an-line fishery for rockfish”.
29. Slotte, Kaare Hansen, John Dalen, Egil Ona, 2004, “Acoustic mapping of pelagic fish distribution and abundance in relation to a seismic shooting area off the Norwegian west coast”, pp. 5.
30. University of Rhode Island, 2009, “Discovey of Sound in the Sea”, Website.
31. Urick Robert J, 1967, “Principles of underwater sound for engineers”, pp. 1

2～15, pp. 23～24, pp. 16～21, pp. 82.
32. von Frisch K and Stetter H, 1932, “Untersuchungen über den Sitz des Gohörsinnes bei der Elritze”, Zvergl Physiol 17, pp. 686-801
33. Yelverton, J. T., Richmond, D. R., Hicks, W., Saunders, K., and Fletcher, E. R., 1975, “The Relationship Between Fish Size and Their Response to Underwater Blast” Report DNA 3677T, Director, Defense Nuclear Agency, Washington, DC.
34. 若園, 小川, 陂口, 1970, “工業火藥協會誌”, pp. 31-2

감사의 글