



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2015년 2월  
박사학위 논문

발파 진동 레벨을 이용한 내륙  
양식장의 수중소음 추정과  
양식어류 피해기준 제안

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

최 태 홍

발파 진동 레벨을 이용한 내륙  
양식장의 수중소음 추정과  
양식어류 피해기준 제안

Estimation of underwater noise level from  
blast-induced ground vibration for inland  
fish farming and suggestion of safety level

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

최태홍

발파 진동 레벨을 이용한 내륙  
양식장의 수중소음 추정과  
양식어류 피해기준 제안

지도교수 고진석

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함






2014년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

최태홍

## 최태홍의 박사학위논문을 인준함

위원장	한 국 지 질 자 원 연 구 원	공학박사 류 창 하	
위 원	조 선 대 학 교	전 교수 강 추 원	
위 원	군 산 대 학 교	교 수 이 연 규	
위 원	(유) 동 광	공학박사 김 재 응	
위 원	조 선 대 학 교	교 수 고 진 석	

2014년 12월

조 선 대 학 교 대 학 원

## < 목 차 >

List of Tables .....	v
List of Figures .....	vii
Abstract .....	x
1. 서론 .....	1
2. 선행 연구 .....	7
2.1 선행연구의 특징 .....	7
2.2 수중소음 피해기준 .....	12
2.2.1 국외 연구 사례와 피해기준 .....	12
2.2.2 국내 연구 사례와 피해기준 .....	20
3. 이론적 배경 .....	21
3.1 소음 · 진동 .....	21
3.1.1 소음 .....	21
3.1.2 진동 .....	21
3.2 발파 소음 · 진동 이론 .....	21
3.2.1 발파소음 특성 .....	21
3.2.2 발파진동 특성 .....	24
3.2.3 발파진동의 전파특성 .....	27
3.3 수중소음 이론 .....	31
3.3.1 수중소음 .....	31

3.3.2	수중소음 음향 .....	38
3.3.3	수중소음의 전파특성 .....	40
3.3.4	수중소음 발생원인 .....	43
3.4	수중소음에 의한 어류의 영향 .....	44
3.4.1	어류의 청감특성 .....	44
3.4.2	4단계의 수중 음압레벨 .....	47
3.4.3	청각역치의 결정방법 .....	48
4.	계측의 이론 .....	50
4.1	계측의 정의 .....	50
4.2	계측용어 .....	50
4.2.1	오차와 불확실성 .....	51
4.2.2	감도 .....	51
4.2.3	보정 .....	51
4.2.4	음압레벨 보정기 .....	52
4.3	실험 측정기 사양 .....	53
4.3.1	수중소음계 .....	53
4.3.2	발파진동 측정기 .....	57
4.3.3	진동레벨 측정기 .....	58
5.	현장 실험 .....	61
5.1	측정장소 개요 .....	61
5.2	연구지역의 지형 및 지질 .....	62
5.2.1	지형 .....	62
5.2.2	지질 .....	62

5.3 측정기의 종류 .....	64
5.4 측정장소의 제원과 측정방법 .....	64
5.5 실험결과 .....	67
5.5.1 수조의 계측결과 .....	67
5.5.2 수조 외부의 계측결과 .....	77
5.5.3 주주파수 특성 .....	79
5.6 진동레벨 측정기 비교 .....	85
5.6.1 발파진동 계측 .....	85
5.6.2 발파 진동레벨(VL, $L_{max}$ )분석 .....	86
5.6.3 배경 진동레벨 계측 .....	87
5.6.4 배경 진동레벨(VL, $L_{10}$ )분석 .....	88
6. 실험결과의 고찰 및 분석 .....	90
6.1 지반진동과 수중소음 결과 분석 .....	90
6.1.1 수조의 내부 결과 분석 .....	90
6.1.2 수조의 외부 결과 분석 .....	100
6.1.3 진동레벨과 진동속도를 수중소음으로 추정 .....	104
6.2 어류 피해기준에 대한 분석 및 고찰 .....	108
6.2.1 수중소음의 기준 .....	110
6.2.2 공중소음의 기준 .....	111
6.2.3 진동레벨의 기준 .....	111
6.2.4 수중 배경음과의 차 .....	112
6.2.5 손상레벨 .....	112



7. 결론 ..... 119

참 고 문 헌 ..... 121

## < List of Tables >

Table 2.1 Underwater noise measurement methods and safe criteria .....	15
Table 2.2 Effects of explosions .....	17
Table 2.3 Effects of pile driving .....	18
Table 2.4 Effects of shipping and continuous sounds .....	19
Table 3.1 Vibration unit .....	25
Table 3.2 Reference value of acceleration level( $A_0$ ) depending on the frequency range .....	27
Table 3.3 Parameters which influence ground motion .....	28
Table 3.4 Reflection and transmission ratio of pressure and power for air-steel, water-steel, air-water interfaces .....	31
Table 3.5 Comparison of air noise and underwater noise .....	32
Table 3.6 Interrelationships of various scales acoustic measurements; standard reference units are underlined .....	33
Table 3.7 Wave motion types and propagation velocity .....	40
Table 4.1 Specifications of hydrophone(RESON-TC4013) .....	54
Table 4.2 Specifications of amplifier(RESON-EC 6067) .....	55
Table 4.3 Specifications of DATA logger(PROSIG-P 8004) .....	56
Table 4.4 Specifications of BlastMate III .....	57
Table 4.5 Specifications of HLVS-04(Hong Lim company) .....	58
Table 4.6 Specifications of Real Wave(SV company) .....	59
Table 4.7 Specifications of VM-53A(RION company) .....	60
Table 5.1 Overview of the building for experimental study .....	61
Table 5.2 Equipments for vibration and noise measurement .....	64
Table 5.3 Description of measurement conditions .....	65
Table 5.4 Measurement results of blasting vibration and Underwater noise in fishing water tank .....	68
Table 5.5 Measurement results of blasting vibration in soil ground .....	77
Table 5.6 Measurement results of blasting vibration levels by three types of	

environmental vibration meters .....	86
Table 5.7 Measurement results of ambient vibration levels measured by three types of environmental vibration meters .....	87
Table 6.1 Comparison of vibration velocity and vibration level for the other references .....	99
Table 6.2 Data used to convert vibration velocity and vibration level to underwater noise level .....	104
Table 6.3 Comparison of predicted ground vibration velocity and underwater noise .....	108
Table 6.4 An example of safety level adopted by National Environmental Dispute Mediation Commission ( I ) .....	109
Table 6.5 An example of safety level adopted by National Environmental Dispute Mediation Commission ( II ) .....	110
Table 6.6 Measurement results of underwater noise level at marine fish farms ...	115

## < List of Figures >

Figure 2.1 Intimidation level of continuous sound for various kinds of fishes .....	13
Figure 2.2 Intimidation level of pulse sound fo various kinds of fishes .....	14
Figure 2.3 Safe limits for underwater blasting with 1 ton of charge weight .....	14
Figure 2.4 Estimated SEL that results in 50% mortality and no injury based on data for exposures to a single explosive sound .....	16
Figure 3.1 Reflection and transmission of plane sound wave normally incident on the plane interface of medium .....	29
Figure 3.2 Audio extent and pain limit of human .....	35
Figure 3.3 Variation of temperature, salinity and pressure with the depth of water .....	41
Figure 3.4 Typical velocity of sound in deep sea .....	42
Figure 3.5 Type of underwater noise .....	43
Figure 3.6 Hearing structures of fish(a) and Hearing thresholds of representative species(b) .....	46
Figure 3.7 Sound pressure level affecting red sea bream .....	47
Figure 3.8 Response of fish to sound pressure level .....	48
Figure 4.1 Zero offset and span error .....	52
Figure 4.2 Calibration in the Field .....	53
Figure 4.3 Overview of underwater noise measurement system .....	53
Figure 5.1 Geological map of study area .....	63
Figure 5.2 Schematic of blasting vibration and underwater noise measurements .....	65
Figure 5.3 Schematic of blasting vibration measurement in soil ground .....	66
Figure 5.4 View of measuring blasting vibration in soil ground .....	66
Figure 5.5 View of measuring blasting vibration and underwater noise in	

fishing water tank .....	67
Figure 5.6 Waveform and peak sound pressure level for measurement No. 12, No. 13, No. 36, and No. 40 .....	70
Figure 5.7 Waveform and peak particle velocity for measurement No. 12, No. 13, No. 36, and No. 40 .....	72
Figure 5.8 Histogram and vibration level(VL <sub>max</sub> ) for measurement No. 12, No. 13, No. 36, and No. 40 .....	76
Figure 5.9 Waveform and dominant frequency for measurement No. 12, No. 13, No. 36, and No. 40 .....	80
Figure 5.10 Waveform and dominant frequency for the blasting vibration measurement(No. 12, No. 13, No. 36, and No. 40) .....	81
Figure 5.11 View of measuring blasting vibration level in fishing water tank .....	85
Figure 5.12 Comparison of vibration level measured with three kinds of environmental vibration meters .....	87
Figure 5.13 Comparison of ambient vibration measured with three kinds of environmental vibration meters .....	88
Figure 6.1 Relationship between peak particle velocity(PPV) and scaled distance(SD) in fishing water tank .....	92
Figure 6.2 Relationship between vibration level(VL) and scaled distance(SD) in fishing water tank .....	94
Figure 6.3 Relationship between sound pressure(SP) and scaled distance(SD) in fishing water tank .....	96
Figure 6.4 Correlation between vibration level(VL) and peak particle velocity (PPV) in fishing water tank .....	97
Figure 6.5 Relationship between peak particle velocity(PPV) and scaled distance(SD) in soil ground .....	101
Figure 6.6 Relationship between vibration level(VL) and scaled diatance(SD) in soil ground .....	103
Figure 6.7 Correlation between VL and L <sub>peak</sub> .....	105
Figure 6.8 Correlation between VL and L <sub>max</sub> .....	106

Figure 6.9 Correlation between PPV and  $L_{peak}$  ..... 107

Figure 6.10 Schematic of underwater noise measurement in marine fish farm  
..... 113

Figure 6.11 View of measuring underwater noise in marine fish farm ..... 114

Figure 6.12 Waveform and peak sound pressure level measured in marine  
fish farm ..... 116

# ABSTRACT

## Estimation of underwater noise level from blast-induced ground vibration for inland fish farming and suggestion of safety level

Choi, Tae Hong

Advisor : Prof. Ko, Chin Surk, Ph.D.

Department. of Energy & Resource Engineering,  
Graduate School of Chosun University

With the rapid growth of the industrial economy and a growth-oriented economic policy, demands for development of national territory have been increasing annually. In particular, as diverse construction projects such as road construction, tunnel excavation, subway construction in metropolitan cities, and reconstruction of old buildings have been very active, we have suffered from environmental problems such as noise, vibration, fly rock and dust.

In fact, of 3045 cases of grievance mediation which were dealt with between 1991 and 2013 by the National Environmental Dispute Medication Commission, about 2600 cases(about 85%) were related with noise and vibration(National Environmental Dispute Medication Commission, 2013).

Some dynamic investigations on damage compensation for land based animals have been made, management standards have been enacted, and supplementary measures suitable for real conditions of construction areas have been developed and compensation was given in cases when the damage exceeded the management standards.

However, as for noise and vibration occurring due to construction near fish farms, engineering and the technical opinions of experts in different areas were excluded in

calculating any damage . The victims tend to present only biological consulting-based opinions while construction companies tend to present information on general construction noise and vibration as they have little biological knowledge on fish.

Thus, in most cases, it is difficult even to find common measurements between those concerned as there are few objective and well balanced engineering and technical approaches.

So, the National Environmental Dispute Medication Commission presented specific damage standards and compensation calculation standards in 2009 through studies on damage assessments to pond grown fish on farms that was caused by noise and vibration.

As farming techniques have developed, the kinds of farmed fish have diversified and the farm sizes and number have increased. Therefore, when civil engineering construction is done near fish farms, there are civil appeals against the noise and vibration coming from the construction projects, and an immediate response to the appeal is difficult because of the poor objective data and this problem will increase the construction period, resulting in the increase of the construction expenses.

With regards to the impact on fish in farms, underwater noise is the main source of damage. Existing noise and vibration measurement equipment used are a speed meter for structures and an acceleration-based level meter for human bodies. A speed meter has been frequently used as its use was recognized as natural in blasting and both domestic and foreign-made equipment is used equally. The acceleration-based level meter has been frequently used for environmental studies. However, underwater noise measurement equipment is not normal as it is expensive and its export procedure is complicated.

A few articles published recently show that there are methods to predict underwater noise through correlations based on measurement data of blast vibrations and underwater noise collected using a speed meter from test blasting.

However, it was reported that there were empirical cases when underwater noise



was predicted with the use of an acceleration-based level meter, but there were no relations to estimate blast vibration levels obtained through actual measurements related to underwater noise.

To examine existing damage impact assessments by national researchers, there were damage standards citing American and Canadian data and impact assessment methods using Japanese data. It was judged that the impact assessment methods using Japanese data are usually conservative because the Japanese data used R.M.S data of continuous sounds and the American and Canadian data differentiated continuous sounds from the impulsive sounds.

So, this study presented a relation to predict the vibration level with underwater sound pressure level to predict underwater sound pressure without measuring underwater noise and examined the problem in that minimum measurement level are different according to the manufacturers in measuring the background vibration with vibration level measurement equipment in the field.

This study analysed the problem in existing damage assessment standards for land farmed fish through visual observation in measuring underwater noise in the field. So, the background of this study was to differentiate whether Japanese data based on national farm fish damage assessment standards used impulsive sounds or continuous sounds, and to check whether the fish died through visual observation.

This study aimed to develop a base for having fewer disputes by correlating blast vibration level with underwater noise using a vibration level meter when there is a blast near fish farms and there is no underwater sound measurement equipment, or measurements can not be made at farms because of other reasons.

Also, our country accepts 140 dB re 1  $\mu$ Pa as a damage standard of underwater noise. This standard is the R.M.S value of continuous sounds for more than one second, not the impulsive sounds. To look up data on existing studies, fish showed different reactions to underwater sounds according to the different kinds of fish such as ostariophysan or non-ostariophysan, and pinnipeds or non-pinnipeds. So, this

study will present damage standards for impulsive sounds in consideration of the differences in the characteristics of the impulsive and continuous sounds.

# 1. 서론

산업경제의 급속한 발전과 성장 위주의 경제정책으로 국토 개발에 대한 수요는 매년 증가하고 있으며, 특히 도로개설, 터널굴착, 대도시 지역의 지하철 건설공사, 노후 주택의 재건축 공사 등 각종 건설공사가 매우 활발하게 이루어지면서 소음·진동과 비산·먼지 등의 환경문제에 시달리게 되었다.

주택과 빌딩 및 각종 시설물 등이 밀집된 도심지에서의 발파공사는 주거지역까지 소음·진동을 전파시켜 민원을 많이 발생시키고, 제주 해군기지 건설공사 사례에서 보는 것처럼 자연보호와 국가시설 건설의 상호 충돌이라는 사회문제를 낳기도 한다.

이러한 문제는 비교적 한적한 농어촌 지역에 이르기까지 사회전반적인 문제로 대두되기도 한다. 그러므로 농촌에서 사육되고 있는 소, 돼지, 닭, 염소 등의 가축, 특용으로 사육하는 곰, 사슴, 꿩, 멧돼지 등의 육상 동물뿐만 아니라 수상에서 양식하는 어류 등에 미치는 피해에 대한 보상을 요구하는 민원이 끊이지 않고 있는 실정이다.

이와 같이 오늘날 우리사회는 산업화 과정을 통하여 고도의 성장을 지속해오는 동안에 등한시 되었던 환경문제, 특히 건설 분야에서는 소음·진동 문제가 최근에 급속히 부상되고 있다. 국민의 쾌적한 환경에 대한 요구수준이 높아지고 있으며, 이는 양적인 성장에서 질적인 성장으로 변화를 대변한다. 또한, 정부 차원에서도 이와 같은 현실을 고려하여 환경피해의 구제를 위한 수단으로 환경 분쟁 조정위원회를 상설기구로 발족시켜 운영하고 있다. 이에 따라 건설 분야에서 발생하는 소음·진동은 더욱 엄격한 규제를 받고 있는 추세이다.

발파에 의한 소음·진동과 관련한 피해는 단순히 물리적 크기 이외에 영향을 미치는 대상의 응답조건, 주변 환경에 적응상태 및 주관적 감정, 정신적 상태 등에 따라 크게 좌우되는 특성을 가지고 있어 명확히 피해영향을 판단하는 것은 매우 어려운 일이다. 그래도 인체를 대상으로 한 피해영향평가는 많은 실험적 연구를 통해 피해의 한계 및 강제기준이 제시되어 있고, 이를 기준으로 크게 벗어나지 않는 범위에서 비교·평가함으로써 비교적 판단할 수 있는 범위가 좁고 설득력 있는 근거를 제시할 수 있으나, 어류에 피해영향에 대해서는 실험을 통한 연구자체도 어렵고, 적용할 수 있는 제시기준이 모호하여 정확한 평가방법은 물론 실제 소음·진동 노출정도의 예측에 많은 어려움이 있다.

실제로 중앙 환경 분쟁 조정위원회에서 1991년부터 2013년까지 처리된 분쟁조정 사건인 3045건 중 소음과 진동으로 인한 피해 관련 사건이 약 2600여건으로 약 85 %를 차지

하고 있다(중앙환경분쟁조정위원회, 2013).

지상 동물에 대한 피해보상의 경우는 어느 정도 타당성 있는 역학조사가 이루어져 관리기준이 설정되어 있고, 공사현장의 실정에 적합한 보안대책을 강구하여 공사를 진행하고 있으며, 관리(허용) 기준을 상회하는 경우 보상이 이루어지기도 한다.

그러나 어류 양식장 인근에서 건설공사로 인하여 발생하는 소음·진동의 경우 피해 금액과 산정방식 선정은 건설공사에 대한 공종별 전문가의 공학적, 기술적 의견이 배제된 상태에서 이루어지고 있다. 피해자 측이 일방적으로 어류 전문가들의 생물학적 자문 위주의 논리만 주장하는 반면, 어류에 대한 생물학적 전문지식이 부족한 건설사 측은 일반적인 건설소음·진동에 관한 논리를 전개하는 경우가 대부분이다.

이와 같이 보다 객관적이고 형평성에 적합한, 공학적, 기술적 접근방법이 사실상 전무한 상태로서 피해 당사자 간의 절충 방안을 모색하기도 어려운 경우가 대부분이다. 그래서 중앙 환경 분쟁 조정위원회에서는 2009년 소음·진동으로 인한 육상 양식어류 피해 평가 및 배상액 산정기준에 관한 연구를 통해 구체적인 피해기준을 제시하였다.

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(sonar), 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 도피반응을 보이거나 내적 손상을 입게 된다.

양식 기술이 발달함에 따라 양식어종이 다양화되며, 양식 규모 및 수량이 증대되고 있다. 따라서 양식장 인접 지역에서 토목공사를 실시할 경우 공사장 내 소음·진동으로 민원이 발생하여 이에 대한 객관적인 자료의 부족으로 민원에 대한 대응이 어렵다. 또한 공사 기간이 길어지고, 공사비 증액 요인으로 작용될 것이다.

양식 중인 어종에 대한 영향은 수중소음이 주요한 요인이다. 기존의 소음·진동 측정을 위한 장비는 구조물을 기준으로 할 때는 속도계, 인체를 기준으로 할 때는 가속도에 기반을 둔 레벨계를 사용한다. 속도계는 발파분야에서 당연히 사용하는 것으로 인식되어 많이 사용하고 있고, 국내 제품과 외국 제품이 같이 사용된다. 가속도를 기준으로 하는 레벨계는 환경분야에서 최근에 많이 사용되고 있다. 그러나 수중소음 측정 장비는 고가이고, 수입 절차 등으로 보급이 잘 이루어지지 않은 실정이다.

최근에 발표된 몇 편의 논문에 의하면 현장에서 시험발파 시 수집한 속도계를 이용한 발파진동과 수중소음 계측자료에 의한 상관식으로 당해 현장에 대해 수중소음을 예측하는 방법들이 있었다. 그러나 가속도를 기준으로 하는 레벨계를 이용한 수중소음 예측을 한 경우는 일부 보고서에 실험실에서 실시한 경우는 있어도, 실측에 의한 발파 진동레벨을 수중소음으로 추정하는 방법은 없었다. 기존의 국내 연구자들의 어류에 피해영향 평가들을 보면 미국과 캐나다의 자료를 인용한 피해 기준과 일본의 자료를 이용한 평가 방법들이 주를 이룬다. 일본의 자료를 이용한 피해영향 평가방법은 대체적으로 보수적이다. 그 이유는 일본의 자료가 연속음의 R.M.S 자료를 이용한 것이고, 미국과 캐나다는 연속음과 충격음을 구분하였기 때문으로 판단된다. 그래서 이 연구에서는 수중소음을 계측하지 않고 수중음압을 예상하기 위해 발파 진동레벨을 수중음압레벨로 변환하는 방법을 제시하고 현장에서 진동레벨 계측 장비로 배경진동을 계측할 때 제조사 별로 최소 계측레벨이 다른 문제점 등을 고찰하였다. 그리고 현장에서 수중소음을 계측했을 때 육안 관찰을 통한 기존 지상 양식 어류의 피해 평가 기준에 대한 문제점 등을 연구하게 되었다. 그래서 이 연구의 배경은 국내 양식어류 피해 평가 기준으로 하는 일본 자료가 충격음인지 연속음인지 구분을 하고, 육안관찰 시 양식어류의 폐사를 확인하는 것이다.

진동계측 자료와 수중소음과 관계를 비교한 연구로 박진형(2009)은 발파 시 발생하는 지반진동과 공중소음에 따른 인근 수 공간에서 수중소음 변화특성을 식 (1.1), 신영철(2010)은 발파 작업 시 수중소음 계측 결과를 토대로 수중소음을 식 (1.2), 그리고 박정봉(2011)은 지반진동과 수중소음의 상관성 연구에서 식 (1.3)의 관계식을 제시하였다.

$$\text{dB}(\text{re } 1 \mu\text{Pa}) = 13.247V_{\text{peak}}(\text{mm/s}) \quad (1.1)$$

$$\text{수중소음}(\text{dB}) = 2.1373 \times \log V(\text{cm/s}) + 203.68 \quad (1.2)$$

$$\text{SPL} = 173.90V^{0.0485} \quad (1.3)$$

수중생물과 관련하여 발생소음 영향성에 대한 연구로 신현옥(1995)은 수중소음(Underwater noise levels)이 149~176 dB(re 1μPa)일 때 가물치의 생태에 영향을 미칠 수 있다는 견해를 발표한 바 있고, 신현옥(2000)은 직접 양식 향어에 센서(Sensor)를 부착하여 채석장 발파가 이루어질 때 발생하는 소음과 진동에 의한 양식 향어의 유영형태를 분석·보고하였다.

이송(2006) 등은 양만장에서 진동·소음 허용기준을 진동레벨은 60 dB(V), 진동속도는

0.028 cm/s, 소음은 70 dB(A) 이하로 설정하고, 평상시 진동·소음 값의 상승치는 압진동·압소음치의 +20 dB에서 +25 dB 이하로 설정하였다.

박연수(2006)는 수중 발파공사가 지속되는 5개월 동안 가물치가 수중소음도 126.3 dB(A)에서 147.8 dB(A)와 육상소음 최대 86.8 dB(A), 지반진동 0.07 cm/s에서 0.244 cm/s에 노출되었으나 피해가 발생되지 않고 있음을 밝히고, 이와 같은 자료를 토대로 하여 식 (1.4)의 발파진동 추정식과 식 (1.5)의 수중소음 추정식을 제시하였다.

$$V_{50\%} = 1.507SD^{-0.536} \quad V_{95\%} = 2.171SD^{-0.536} \quad (1.4)$$

$$SL = 293.2SD^{-0.164} \quad (1.5)$$

윤종락(2006) 등은 20개의 천공에 공당 7 kg에서 8 kg의 장약으로 25 ms의 지발발파를 실시한 경우 부산항 준설공사 시에 측정된 최대 음원 준위는 234 dB/1μPa이므로 이 경우의 영향범위는 약 260 m라고 하였다.

배종우(2009) 등은 수변공사 중에 수반되는 수중발파 및 연안 육상발파, 파일 항타 및 쇄암봉 항타에 의해 발생하는 충격음을 해석하여 미국 캘리포니아 교통국의 어업 수중음향 연구회에서 제안한 기준치와 비교하여 어류에 미치는 피해 영향을 추정하였다. 그에 의하면 소음폭로레벨(SEL, sound exposure level)을 기준으로 한 수중 천공발파 충격음의 직접적인 피해영향 범위는 0.5 g 이하의 치어인 경우 약 300 m 까지 이고 100 g의 경우 약 15 m 이다. 연안 육상 천공발파의 경우 최대 피해거리는 약 120 m, 파일 항타의 최대 피해거리는 약 150 m, 쇄암봉의 최대 피해거리는 약 7 m이며, 충격파의 최대 음압 준위를 기준으로 한 피해거리는 SEL을 기준으로 한 피해범위의 약 1/3로 해석된다고 결론지었다.

중앙환경분쟁조정위원회(2009) 등은 소음·진동으로 인한 육상 양식어류 피해 평가 및 배상액 산정기준에 관한 연구에서 육상 양식어류 배상기준(안)을 평가방법으로 수중소음도는 최고소음도(L<sub>Amax</sub>)를 채택하고 피해 인정기준으로는 수중소음 140 dB/μPa, 배경소음과 차는 20 dB/μPa인 평가 안을 제시하였다.

하정민(2012) 등은 기준음압이 어류에 대한 최대 피해 영향범위는 140 dB/μPa일 경우 최대 반경 4.92 km 이내에서 발파작업에 의해 어류가 피해를 받을 수 있을 것으로 예측된다고 하였다.

전남대학교 수산과학연구소(2012)은 국도 77호선 완도 강독지구 위험도로 개수공사 어

업 피해 영향조사에서 공중소음의 경우 소음·진동 기준치를 공중소음(dB(A))과 진동(dB(V))은 50 dB에서 60 dB 이하, 평상시와 차는 15 dB에서 20 dB, 수중소음(dB re 1  $\mu$ Pa)의 경우 소음 기준치를 140 dB, 평상시와 차는 15 dB에서 20 dB로 제시하였다.

임대규(2013) 등은 양만장의 배경소음 +15 dB/ $\mu$ Pa을 양만장 기준으로 설정하였다. 그 이유로는 기존 연구 결과에 의하면 배경소음 +20 dB/ $\mu$ Pa을 적용하여도 어류에 대하여 일정 부분 피해율이 발생하였으므로 안전성을 고려하여 관리기준을 적용하였다고 언급하였다.

조민기(2013)는 소음이 민물양식 어류에 미치는 생리적 영향에 관한 연구에서 온수성 어종인 붕어와 냉수성 어종인 송어를 대상으로 소음과 진동을 차단한 대조구와 건설기계 중 사용 점유율이 높은 브레이커의 소음을 재현하여 80 dB(A)의 소음에 노출시킨 처리구 1, 55 dB(V)의 진동에 노출시킨 처리구 2, 그리고 이 소음과 진동을 동시에 노출시킨 처리구 3에 대해 1일 9시간씩 35일에서 40일간 실험을 실시하였다. 80 dB(A)의(배경음은 55 dB) 소음도는 수중소음도에 영향을 미치지 않아서 변화가 없었고, 55 dB(V)의 진동과 80 dB(A)의 소음 및 55 dB(V)의 진동을 동시에 노출시킨 경우 모두 수중소음도가 20 dB(re 1  $\mu$ Pa)정도 증가하였다고 하였다(여기서 배경수중소음도는 123 dB(re 1  $\mu$ Pa), 측정소음도는 143 dB(re 1  $\mu$ Pa)이었다). 그리고 수중소음도가 진동에 의해 20 dB(re 1  $\mu$ Pa) 증가하였음에도 붕어와 송어는 치사개체가 발생되지 않아 생존율에는 영향을 미치지 않았다. 또한 온수어종인 붕어의 경우 실험에서 사용한 소음 및 진동이 오히려 붕어의 생육을 촉진시키는 것으로 보고하였다.

선효성(2014)은 해상 풍력발전기 수중소음 평가방안에 관한 고찰에서 미국수산청의 자료를 인용해 Level A harassment와 관련한 한계 값으로 180 dB/ $\mu$ Pa을 제안하고, Level B harassment와 관련한 수중소음 한계 값으로 충격소음의 경우 160 dB/ $\mu$ Pa, 연속소음의 경우 120 dB/ $\mu$ Pa 정도를 고려하고 있다고 언급하였다.

기존의 연구들은 발파분야에서는 속도계를 이용한 발파진동과 수중소음 계측자료에 의한 상관식으로만 수중소음을 예측하는 방법이고, 국내의 여건상 수중소음을 계측 할 현장들이 많지가 않아서 계측 자료들이 충분하지 않았다. 또한 다른(어류, 수중음향 등) 분야에서는 수중소음을 계측하여 음원준위(Sound Source Level, SL)를 예측하는 방법을 주로 이용한다. 타 분야에서는 수중소음 용어를 사용할 때 수중음압레벨과 수중소음레벨을 혼용하여 사용하고, 주로 R.M.S값을 주로 사용한다.

이 연구는 지상에 있는 어류 양어장 주변에서 발파를 할 때, 수중소음 계측 장비가 없거나, 다른 이유로 계측 장비를 양어장(수중)에서 계측을 하지 못할 경우에 진동레벨 계

측기를 이용하여 발파 진동레벨로부터 수중소음을 추정함으로써 차후 분쟁의 소지를 줄일 수 있는 근거를 마련하는데 목적이 있다.

또한 국내의 경우 수중소음 피해인정 기준을 140 dB re 1  $\mu$ Pa을 인정하고 있다. 이 기준은 충격음이 아닌 1초 이상의 연속음의 R.M.S값이다. 그리고 기존 연구 자료들을 보면 어류는 골표류와 비골표류, 기각류와 비기각류 등 어종에 따라서 수중소음에 대한 반응이 많은 차이가 있는 것으로 보인다. 그래서 이 연구는 충격음과 연속음의 특성 차이를 고려하여 충격음의 피해기준을 제시하려 한다.



## 2. 선행 연구

### 2.1 선행 연구의 특징

인위적으로 발생하는 소음이 수중생물에 미치는 영향에 대한 관심은 지난 20여 년 동안 뚜렷이 증가해왔다. 몇몇 연구자들은 주로 해양 포유동물에 초점을 맞추어 왔으며, 해양 동물에 미치는 잠재적 영향이 어류와 기타 수중생태계에 영향을 미칠 수 있다는 주장을 했다. 육상동물이나 사람에 미치는 영향과 같이 어류에 대해서도 행동반응 및 물리적 손상과 스트레스에 의한 생리적 영향으로 분류하여 연구되었다(박정봉, 2011).

이 절에서는 발파 기술자의 관점에서 기존 연구들의 특징을 살펴보고자 한다. 발파기술자가 계측 자료를 분석할 때 기본적으로 필요한 자료는 지발당 장약량, 거리(발파지점과 계측 점과의 사거리), 진동·소음 데이터이다. 지질적 특성, 총 화약량, 천공장 등은 회귀분석에 필요하지는 않지만 발파 상황을 파악하는데 필요하다. 그리고 계측 자료에서 발파는 충격 진동·소음으로 간주해서 대체적으로 peak치를 이용한다. 그러나 다른 분야(어류전문가, 수중음향)의 경우 별다른 언급이 없으면 R.M.S(Root Mean Squares)로 간주해야 할 것이다.

안장영(1994) 등은 바다에서 TNT 30 kg과 50 kg을 사용하여 수중발파를 실시하였을 때, 250 m 이격된 위치에서 수중소음을 계측했다. 결과는 30 kg일 때, 208 dB(re 1  $\mu$ Pa), 50 kg에서는 214.6 dB(re 1  $\mu$ Pa)로 계측되었다. 250 m에서 수중소음이 214.6 dB(re 1  $\mu$ Pa)일 때는 자주복(Takifugu rubripes) 치어에 영향이 없었다. 그러나 이 논문에서 적용한 발파 조건이 천공발파인지 혹은 부착발파인지가 분명하지 않다.

신현옥(1995)은 Hydrophone(OKI, ST-1001), Underwater sound level meter(OKI, SW-1007)을 사용하여 발파지점과 238 m 이격된 지점에서 공사 전에 측정한 수중배경소음은 평균 106.6 dB이고, 발파 시 측정된 소음은 149 dB(re 1  $\mu$ Pa)로 42.4 dB이 증가하였다고 보고하였다. 이 논문은 발파 계측자료를 분석하는데 있어서 기본적으로 필요한 지발당 장약량에 대한 언급이 없다.

신현옥(2000)은 충주호 주변의 암 발파 작업 시 충주호 내 향어 가두리 양식장을 대상으로 수중소음의 변화 및 어류의 행동반응을 통한 영향을 평가하였다. 사용 장비는 Hydrophone(OKI, ST-1001, ST-1020), Underwater sound level meter(OKI, SW-1007, SW-1020)을 사용했다. 부지조성을 위한 발파공사가 진행 중인 상태에서 양식장으로부터

터 400 m 이격된 곳에서 1차 수중소음을 측정하고, 2년여의 시간이 지난 뒤에 2차로 공사가 완료된 후 발파에 의한 피해영향 평가를 위해 350 m 이격된 편마암 지역에서 공당 장약량 0.2 kg에서 6.0 kg을 사용하여 수중소음과 향어의 유영행동을 관찰하였다. 1차 측정 시 발파 작업 전 평균 수중배경소음은 103.0 dB(re 1  $\mu$ Pa) 이었고, 400 m 이격된 곳에서 140 dB(re 1  $\mu$ Pa) 이상과 143 dB(re 1  $\mu$ Pa)로 계측되었다. 발파 전과 비교하여 40 dB 이상 증가한 것으로 나타났으며, 2차 시험발파에서 측정한 수중배경소음은 95 dB(re 1  $\mu$ Pa) 에서 98 dB(re 1  $\mu$ Pa) 이고, 시험발파 시 140 dB(re 1  $\mu$ Pa)에서 156 dB(re 1 $\mu$ Pa)로 약 49.5 dB 증가한 것으로 나타났다. 이 연구에서 공당 장약량은 지발당 장약량이라는 말을 표현한 것 같다. 2차 측정시 수중배경소음은 100 dB(re 1  $\mu$ Pa) 미만으로 계측되었다. 그런데 이 논문 p. 350의 Table 2에 사용한 장비의 특성을 보면 Measuring range는 100 dB에서 180 dB로 표기되었다. 그러나 최소 Range 이하 계측이 가능한지 의문이다. 그리고 일부 계측 자료는 수중소음의 Range 설정 상 오류로 정확한 값을 제시하지 못하고 추정치를 이용하였다.

윤종락(2006) 등은 20개의 발파공에 공당 7 kg에서 8 kg의 장약으로 25 ms의 지발발파를 실시한 경우 부산항 준설공사 시에 측정된 최대 음원준위는 234 dB/1  $\mu$ Pa이므로 이 경우의 영향범위는 약 260 m이다' 라고 했다. 그리고 수중발파에서 어류에 영향을 주는 한계치는 205 dB/1  $\mu$ Pa이라고 했다. 또한 연구와 관련한 자료를 요약하면 연속음인 경우 어류가 구집반응을 보이는 음은 100 Hz에서 500 Hz 주파수 범위에서 130 dB/1  $\mu$ Pa에서 160 dB/1  $\mu$ Pa이기 때문에 구집반응의 반응역치는 일반적인 해양배경소음 환경에서 약 60 dB로 추정된다고 했다. 논문은 Hydrophone에 대한 설명이 그림에 조금 있고, 측정 은 발파지점으로부터 약 200 m에서 수행되었다고 언급하고 있으나 계측자료가(234 dB/1  $\mu$ Pa) 측정 점에서 계측자료인지 아니면 음원레벨(Source Level)인가 불분명하다. 이는 최대 음원준위로 추정된다.

박연수(2006) 등은 BlastMate series의 Hydrophone(714A5001)을 사용하여 수중 발파 공사가 시행되는 5개월 동안 수중소음도를 측정하였다. 가물치는 수중소음도의 경우 126 dB(A)에서 148 dB(A), 육상소음의 경우는 최대 86.8 dB(A), 그리고 지반진동의 경우 0.07 cm/s에서 0.244 cm/s에 노출되었으나 피해가 발생되지 않고 있음을 밝히고, 이와 같은 자료를 토대로 하여  $V_{50\%} = 1.507SD^{-0.536}$ ,  $V_{95\%} = 2.171SD^{-0.536}$ 의 발파진동 추정식과  $SL = 293.2SD^{-0.164}$ 의 수중소음 추정식을 제시하였다. 이 논문에 이용한 Hydrophone의 계측자료는 kPa(1  $\mu$ Pa) 단위로 계측된다. 그러나 kPa을 수중소음도 dB(A)로 어떻게

변환했는가에 대한 내용이 없다. 본 연구자가 사용해본 위 Hydrophone은  $L_{peak}$ 로 변환하면, 최저 트리거레벨은 0.16 kPa(164 dB)이고, Histogram 기능으로 계측 시 최저 측정값은 0.02 kPa(146 dB)로 계측된다. 이 논문의 특징은 국내 자료 중에 유일하게 수중소음도를 SL(dB(A))로 표현했다는 점이다.

이송(2006) 등은 양만장의 발파 진동소음 현장측정과 수치해석을 통한 영향검토 및 합리적인 발파설계 연구에서 시추공 시험발파 자료를 가지고 허용치 설정을 다음과 같이 했다. 진동레벨은 40 dB(V) 이하, 진동속도는 0.0028 cm/s 이하, 소음은 60 dB(A) 이하로 설정하였다. 이 연구의 특징은 양만장의 피해기준을 수중소음이 아닌 진동레벨, 진동속도, 공중소음(Air)으로 설정하였다는 것이다.

배중우(2009) 등은 수변공사 중에 수반되는 수중발파 및 연안 육상발파, 파일 항타 및 쇄암봉 항타에 의해 발생하는 충격음을 해석하여 미국 캘리포니아 교통국의 어업수중음향연구회에서 제안한 기준치와 비교하여 어류에 미치는 피해영향을 추정하였다. 소음폭로레벨(SEL, Sound exposure level)을 기준으로 한 수중 천공발파 충격음의 직접적인 피해범위는 0.5 g 이하의 치어의 경우 영향범위가 약 300 m까지 이고, 100 g의 성어의 경우 영향범위는 약 15 m라는 결론을 얻었다. 또한 육상 천공발파의 경우 최대 피해거리는 약 120 m, 파일 항타의 최대 피해거리는 약 150 m, 쇄암봉의 최대 피해거리는 약 7 m이며, 충격파의 최대 음압준위를 기준으로 한 피해거리는 SEL을 기준으로 한 피해범위의 약 1/3로 해석된다.'라고 결론지었다. 이 연구의 특징은 수중소음에 대한 피해영향거리 추정을 SEL로 적용하였다는 것이다.

중앙환경분쟁조정위원회Ⅱ(2009)는 소음·진동으로 인한 육상 양식어류 피해 평가 및 배양액 산정기준에 관한 연구에서 육상 양식어류 배양기준(안)을 평가방법으로 수중소음도는 최고소음도( $L_{Amax}$ )를 채택하고 피해인정기준으로는 “수중소음 140 dB/ $\mu$ Pa, 배경소음과 차는 20 dB/ $\mu$ Pa로 평가하여야 한다”라는 안을 제시했다. 이 연구의 특징은 수중소음도를 최고소음도( $L_{Amax}$ )로 규정 했다는 것이다.  $L_{Amax}$ 는 SPL을 A-weight로 보정을 했다는 표현이다(“A”는 오타로 추정된다). 그리고 수중소음 계측장비는 자세한 설명은 없지만, 일본제품으로 신현욱(2000)의 Hydrophone(OKI, ST-1001), Underwater sound level meter(OKI, SW-1007)와 비슷한 장비로 추정된다.

서울대학교 환경소음진동연구센터(2010)는 시추공 시험발파 소음·진동에 의한 어류 영향 평가 감정보고서에서 어류에 대한 영향 평가는  $L_{peak}$ ,  $L_{max}$  및 SEL 값을 평가 기준으로 한다고 했고,  $L_{peak}$  값은 폐사나 청각기관 손실 등의 심각한 영향을 미치는 수준을 190 dB 이상, 어류의 생리, 생태에 영향을 주어 성장 지연이나 먹이섭취의 감소 등을 일으키

고, 어류의 행동에 영향을 주는 위력레벨로  $L_{peak}$  값을 140 dB에서 160 dB을 제시하고 있다.  $L_{max}$  값은 피해발생을 140 dB 이상, 소음도 증가량(배경소음에 대한  $L_{max}$  증가량)은 20 dB로 하였다. SEL 값은 어류의 폐사 등의 심각한 손상을 초래할 수 있는 수중 소음도를 190 dB로 제시했다. 그리고 어류 종류가 550종 이상이 있어 종별 피해를 정확히 예측하는 것은 불가능하며, 양식어류에 대한 피해 발생 예측을 일괄적으로 적용하기는 힘들다. 개연성은 있다고 언급하였다. 이 연구는 어류에 대한 영향 평가를  $L_{peak}$ ,  $L_{max}$  및 SEL 로 구분을 했다.

하정민(2012) 등에 의하면 어류에 대한 최대피해영향 범위는 기준 음압이 140 dB일 경우 최대 반경 4.92 km 이내에서 발파작업에 의해 피해를 받을 수 있을 것으로 예측된다. 이 논문에서는 hydrophone으로 B&K 8105를 사용하였고, 측정결과를 보면 천공장 5 m, 폭약량 50 kg, 이격거리 580 m에서 140 dB, 천공장 6 m, 폭약량 195 kg, 이격거리 570 m에서 140 dB, 천공장 8 m, 폭약량 395 kg, 이격거리 570 m에서 137 dB, 천공장 9 m, 폭약량 1575 kg, 거리 190 m에서 143 dB, 천공장 11 m, 폭약량 950 kg, 이격거리 570 m에서 141 dB, 천공장 12 m, 폭약량 813 kg, 이격거리 50 m에서 157 dB로 측정되었다. 이 논문에 따르면 발파기술자의 경험적 관점에서 볼 때, 만약에 거리가 1 km이격된 지점에서 측정을 했다면 측정자료의 100 %가 140 dB미만으로 측정되었을 것으로 예측된다. 그런데 하정민(2012) 등은 기준 음압이 140 dB일 경우 최대 반경 4.92 km 이내에서 어류에 대한 피해가 발생하는 것으로 예측하고 있으나 이는 계산상의 오류로 추정된다.

전남대학교 수산과학연구소(2012)는 국도 77호선 완도 강독지구 위험도로 개수공사 어업피해영향조사에서 공기 중 보다 밀도가 높은 수중에서는 소음·진동의 전파속도가 빠르고, 공기 중 보다는 감쇠가 적어 크고 멀리 전파된다고 언급하였다. 따라서 수중에 서식하는 수생생물을 대상으로 한 소음·진동 기준치를 공중소음(dB(A))은 50 dB에서 60 dB 이하, 평상시와 차는 15 dB에서 20 dB, 진동(dB(V))은 55 dB에서 60 dB이하, 평상시와 차는 15 dB에서 20 dB, 수중소음(dB re 1  $\mu$ Pa)은 140 dB, 평상시와 차는 15 dB에서 20 dB로 제시했다. 이 보고서의 특징은 공중소음, 진동(dB(V))을 평상시와 차가 15 dB에서 20 dB이면 피해를 인정하는 것이다.

임대규(2013) 등은 양만장의 (배경소음 +15 dB/ $\mu$ Pa)을 양만장 기준으로 설정했다. 이 유는 기존 연구 결과에 의하면 (배경소음 +20 dB/ $\mu$ Pa)을 적용하여도 어류에 대하여 일정 부분 피해율이 발생하였으므로 안전성을 고려하여 관리기준을 적용하였다고 언급하였다.

솔하발파환경시스템(2013)은 삼호 저두지구 전원마을 조성사업의 시험발파 수중소음

측정 결과 보고서에서 수중소음 기준은 140 dB/μPa 이고, 수중배경소음이 124 dB/μPa에서 130 dB/μPa 이라고 주장한다. 시험발파에서 지발당 장약량 0.25 kg일 때 131 dB/μPa 이하, 지발당 장약량 0.375 kg을 발파 했을 때 4회, 5회, 6회는 131 dB/μPa 이하, 131 dB/μPa 이하, 130 dB/μPa 이하로 각각 계측되었다고 했다. 진동 적용식은  $V = 4965(D/W^{1/2})^{-2.03}$  (박정봉, 2011)을 적용했다(이 식은 지반진동과 수중소음의 상관성에 관한 식이다). 이 보고서의 문제점은 수중소음을 계측을 하기는 했는데 계측자료가 부정확하다는 것이고, 실제 적용은 이 현장과 아무 관련이 없는 박정봉(2011) 식을 적용했다는 것이다. 또한 수중소음의 기준은  $L_{max}$ 인데, 적용식은  $L_{peak}$ 를 적용했다는 것이다.

조민기(2013)는 소음이 민물양식 어류에 미치는 생리적 영향을 확인한 결과 “수중소음도가 진동에 의해 20 dB 증가하였음에도 붕어와 송어는 치사개체가 발생되지 않아 생존율에는 영향을 미치지 않았고 온수어종인 붕어의 경우 실험에서 사용한 소음 및 진동이 오히려 붕어의 생육을 촉진시키는 것으로 확인되었다”라고 언급했다. 이 연구의 특징은 소음도(Air)는 배경음과의 차를 25 dB(A), 수중소음도는 수중배경음과의 차를 20 dB(re 1 μPa)정도 주고 실험을 했다는 것이다. 이 연구도 충격음이 아닌 연속음이라는 것이다.

선효성(2014)은 해상풍력발전기 수중소음 평가방안에 관한 고찰에서 미국수산청의 자료를 인용하였다. 여기서 Level A harassment는 해양포유동물이나 그 서식지에 피해를 줄 수 있는 충격, 고통, 성가심 등의 행위를 의미한다. 이러한 Level A harassment와 관련한 한계 값으로 고래류의 경우 180 dB/μPa, 물개류의 경우 190 dB/μPa 정도를 제안하고 있다. Level B harassment는 해양포유동물에 대한 직접적인 피해가 아니라 이동, 호흡, 양육, 번식, 먹이, 차폐 등을 포함한 행동적 변화를 일으킬 수 있는 충격, 고통, 성가심 등의 행위를 의미한다. 이러한 Level B harassment 관련한 수중소음 한계 값으로 충격소음의 경우 160 dB/μPa, 연속소음의 경우 120 dB/μPa 정도를 고려하고 있다고 소개했다. 이 논문의 특징은 Level A harassment와 Level B harassment로 나누고, Level B harassment에서는 충격소음과 연속소음을 분리해서 한계 값을 제안했다는 것이다.

## 2.2 수중소음 피해기준

### 2.2.1 국외 연구 사례와 피해기준

#### (1) 일본

국내에서 수중소음이 어류에 미치는 영향을 판단할 때 畠山良己(1996) 자료를 많이 인용한다.

畠山良己(1996)의 魚の聽覺能力と水中音に對する反應(Ⅱ)을 살펴보면 다음과 같다.

“畠山良己(1996)에 따르면, 일본 혼슈·시코쿠 연락 대교의 건설공사와 라이시마 해협의 발파공사에 의한 어업 영향평가를 위한 기초 실험을 행한 경과를 보고한 내용 중에서, 1톤의 수중 공타(천공을 잘못 표기) 발파에 따른 어종별 안전범위를 예측한 결과를 보고한 바 있다. 이 논문에서는 해산어의 청각역치(聽覺閾値)를 90 dB/μPa에서 110 dB/μPa, 유치레벨을 110 dB/μPa에서 130 dB/μPa, 어류의 행동에 영향을 주는 위협(嚇, 혁 자를 협으로 잘못 표기)레벨은 140 dB/μPa에서 160 dB/μPa, 내장이나 부레의 파열 등이 일어나는 손상레벨은 220 dB/μPa이라고 보고하였다.”

위 논문에는 다음과 같은 내용도 있다.

“유치레벨을 활용하면 소리로 물고기 떼를 유치해서 한 장소에 모은다거나 그물 안으로 유도해 온다면 어로효과가 향상된다. 그것을 목적으로 주로 양식 물고기에게 먹이를 던져줄 때 유영포식음(遊泳捕食音)을 녹음해 그 테이프를 편집해 끊임없이 테이프를 재생하여 수중 스피커에서 틀기도 하고 여러 가지 물고기의 반응이나 조과(釣果)를 조사해 실험이 행해지고 있다.”

“음향어법은 기초 실험으로는 상당한 성공 사례가 있으나 음의 여부에 따라 어획의 비교가 어렵고, 장치의 무거움, 이외에 환경(수온, 염분, 먹이, 빛, 흐름, 유속 등)의 영향이 강하다는 등의 이유로 어부들에게 보급된 단계는 아니다.”

“위협(威嚇)레벨에 대해서는 다리, 터널, 공항 등을 건설하는 국가적 대형 프로젝트에서 공사기계나 항공기가 발생하는 음, 진동이 어업에 미치는 영향이 걱정되어 그 영향을 평가하기 위한 기초자료를 얻을 목적으로 위협방성(威嚇放聲, 위협음의 방출) 실험이 진행되고 있다. 1초 이상의 연속음에 대해서 어류가 도피 반응을 일으키기 시작한 음압레벨(위협레벨)을 Figure 2.1에 나타내었다.

멸치의 민감한 2종류, 기비나고, 쫄종개를 제외하면 140 dB에서 160 dB 범위에 있다.

쏨중개는 해산어로서는 진귀한 골표류로 소리에 민감하다. 일반적으로 수중음이 어업에 미치는 영향을 예측 평가할 때는 낮은 쪽(보수적인) 140 dB을 사용하고 있다.

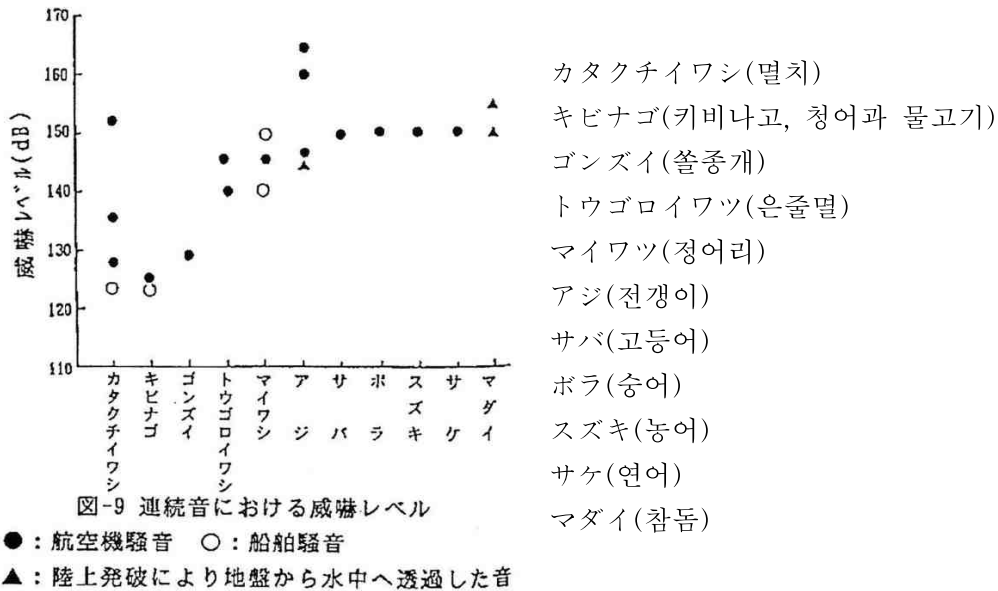


Figure 2.1 Intimidation level of continuous sound for various kinds of fishes(畠山良己, 1996)

물고기의 청각에도 에너지 적분기능이 있어 지속시간이 짧은 펄스음에 대해서는 반응이 둔하게 된다. 질소가스에 의한 수중 발음통에서는 수 ms 이하의 펄스음으로, 그것을 사용한 위력 실험결과를 Figure 2.2에 나타내었다. 연속음에 비해 참돔은 약 30 dB, 전갱이, 고등어, 정어리는 약 20 dB, 감도가 좋지 않다고 되어있다.

손상(損傷)레벨의 설명은 다음과 같이 하고 있다. 1톤의 약량으로 수중천공 발파에 의한 어류의 안전범위를 Figure 2.3에 나타내었다. 이 그림에서 참돔이 복부에 피폭되어 있지만 폭심에서 200 m 떨어져 있으면 안전하다는 것을 알 수 있다. 에너지 밀도는 단순히 계산할 수 있는 것이 아니므로 기준으로 피크 음압을 사용하는 경우 수중 천공발파에 약한 물고기는 중태어가 나오기 시작한 하한치는 1.5 kg/cm<sup>2</sup>에서 3 kg/cm<sup>2</sup>(약 224 dB에서 230 dB)이다(畠山良己, 1996).

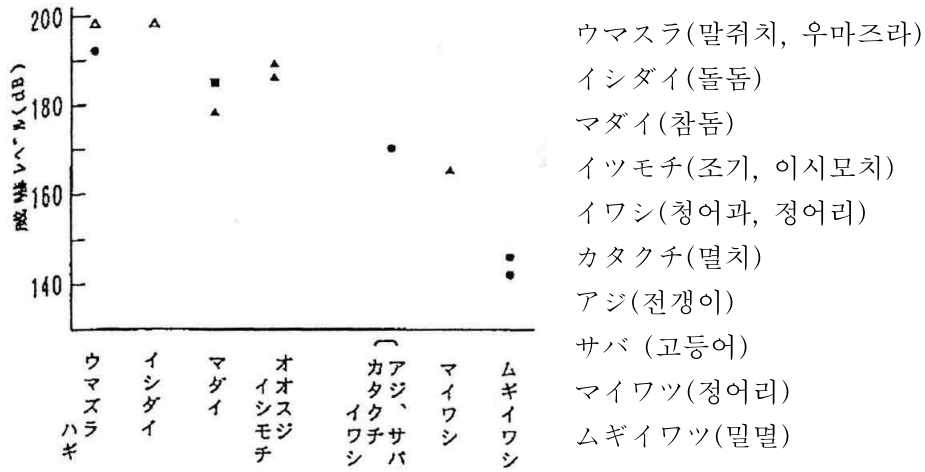


Figure 2.2 Intimidation level of pulse sound fo various kinds of fishes  
 (嶋山良己, 1996)

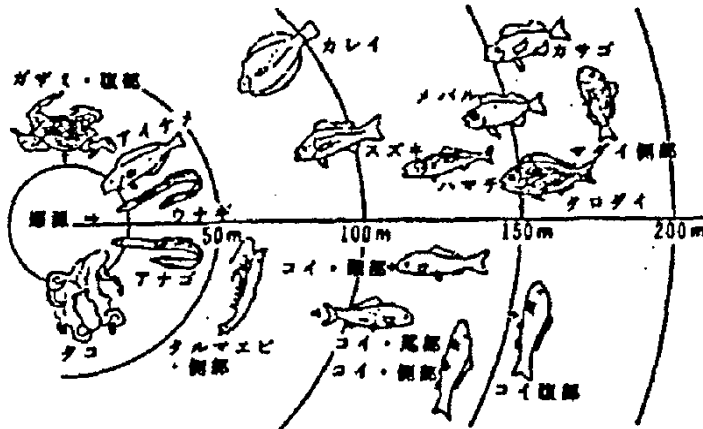


Figure 2.3 Safe limits for underwater blasting with 1 ton of charge weight(嶋山良己, 1996)

(2) 미국과 캐나다

우리나라와는 달리 미국과 캐나다에서는 연방 및 자치정부에서 해양이나 강 등과 인접한 수변구역에서 공사 시 어류 보호를 목적으로 폭약을 이용한 발파에 대하여 관련 연구 사례들을 토대로 관리기준을 제시하고 있다. Table 2.1은 미국과 캐나다의 관리기준을 제시한 것이다.



Table 2.1 Underwater noise measurement methods and safe criteria(박정봉, 2011)

Foreign			
1. Alaska department of fish and game, 1991	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceptance criteria of impact water pressure change that occurs in a moment about fish with a swim bladder : 2.7 psi(205.4 dB re 1 <math>\mu</math>Pa)</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The maximum vibration velocity in place scattering in the initial incubation step after spawning : 0.5 inch/s (1.27 cm/s)</li> </ul>		
2. Fisheries law of Canadian confederation Maritime Affairs and Fisheries	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Criteria of underwater pressure in spawning site : 100 KPa (220 dB re 1 <math>\mu</math>Pa) (Peter, 2003)</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Criteria of ground vibration in spawning ground : 1.3 cm/s(Jesen, 2003)</li> </ul>		
3. FHWG agreement in principle technical /policy meeting Vancouver, WA (Payne et al. 2008)	Interim criteria for injury	Agreement in principle	
	Peak	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 206 dB - for all size of fish</li> </ul>	
	Cumulative, SEL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 187 dB - for fish size of two grams or greater.</li> <li>• 183 dB - for fish size of less than two grams.</li> </ul>	
4. Oregon LNG terminal and Oregon pipeline project-underwater noise propagation monitoring and Mitigation (Bastasch et al., 2008)	Species	Injury threshold	Harassment
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pinnipedia (Seal etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 190 dB rms</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 180 dB rms</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mammal (Whale etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 180 dB rms</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 160 dB rms</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fish of 2 g and over</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 206 dB peak, 187 SEL(Cumulative)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 150 dB rms</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fish of 2 g and less</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 206 dB peak, 183 SEL(Cumulative)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 150 dB rms</li> </ul>	

Note) dB : deciBel(s), rms : root mean square, SEL : Sound Exposure Level

수중발파와 같은 지속시간이 짧은 충격신호에 의한 어류영향에 대해서 비교적 잘 수행된 Yelverton(1975) 등의 연구가 있다.

화약발파에 의한 압력파는 급속한 상승시간과 높은 피크압력의 특성을 가지고 있는데, 이를 이용하여 Yelverton(1975) 등은 0.02 g에서 744 g 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 피크 압과 0으로 하강하는데 걸리는 시간에 의한 특성 임펄스의 크기와 체중 사이의 직접적인 상호관계를 발견하였다. Figure 2.4는 Yelverton(1975) 등에 의해 보고된 단일 폭발음에 폭로된 자료를 근거로 에너지 폭로레벨(SEL)로 환산하여 50% 치사율과 손상 없음 수준을 나타낸 것이다.

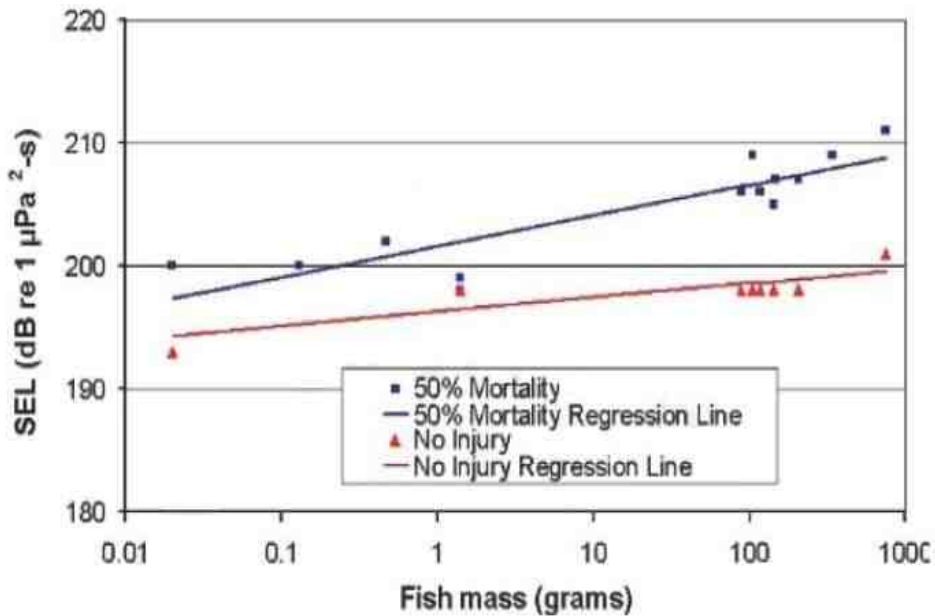


Figure 2.4 Estimated SEL that results in 50% mortality and no injury based on data for exposures to a single explosive sound (Yelverton, 1975, Hamernik, 1991)

다음 Table 2.2, Table 2.3, Table 2.4는 최근(2014)의 자료로 Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles를 참고했다. 여기서는 Sources를 폭약 (Explosives), 파일 항타(Pile driving), 배와 연속음(Shipping and continuous sounds)으로 구분하여 기준을 제시하고 있다.

Table 2.2 Effects of explosions(Popper, 2014)

Guidelines for explosions. Levels other than for eggs and larvae from Hubbs and Rechnitzer(1952); levels for eggs and larvae from Wright and Hopky(1998). Guidelines are not provided for masking since the animals are not exposed to more than a few explosive events, and masking would not last beyond the period of exposure					
Type of Animal	Mortality and potential mortal injury	Impairment			Behavior
		Recoverable injury	TTS	Masking	
Fish : no swim bladder (particle motion detection)	229 dB to 234 dB Peak	(N)High (I)Low (F)Low	(N)High (I)Moderate (L)Low	NA	(N)High (I)Moderate (F)Low
Fish where swim bladder is not involved in hearing (particle motion detection)	229 dB to 234 dB Peak	(N)High (I)High (F)Low	(N)High (I)Moderate (F)Low	NA	(N)High (I)High (F)Low
Fish where swim bladder is involved in hearing(primarily pressure detection)	229 dB to 234 dB Peak	(N)High (I)High (F)Low	(N)High (I)High (F)Low	NA	(N)High (I)High (F)Low
Sea turtles	229 dB to 234 dB Peak	(N)High (I)High (F)Low	(N)High (I)High (F)Low	NA	(N)High (I)High (F)Low
Eggs and larvae	$> 13 \text{ mm s}^{-1}$ peak velocity	(N)High (I)Low (F)Low	(N)High (I)Low (F)Low	NA	(N)High (I)Low (F)Low

Notes) Peak and rms sound pressure level dB re  $1\mu\text{Pa}$ ; SEL dB re  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ . All criteria are presented as sound pressure even for fish without swim bladders since no data for particle motion exist. Relative risk (high, moderate, low) is given for animals at three distances from the source defined in relative terms as near (N), intermediate (I), and far (F)

Table 2.3 Effects of pile driving(Popper, 2014)

Data on mortality and recoverable injury are from Halvorsen et al.(2011, 2012a, c) based on 960 sound events at 1.2s intervals. TTS based on Popper et al.(2005). See text for details. Note that the same peak levels are used both for mortality and recoverable injury since the same SEL <sub>ss</sub> was used throughout the pile driving studies. Thus, the same peak level was derived(Halvorsen et al., 2011)					
Type of Animal	Mortality and potential mortal injury	Impairment			Behavior
		Recoverable injury	TTS	Masking	
Fish : no swim bladder (particle motion detection)	>219 dB SEL <sub>cum</sub> or >213 dB peak	216 dB SEL <sub>cum</sub> or >213 dB peak	>>186 dB SEL <sub>cum</sub>	(N)Moderate (D)Low (F)Low	(N)High (I)Moderate (F)Low
Fish : swim bladder is not involved in hearing(particle motion detection)	210 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	203 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	>186 dB SEL <sub>cum</sub>	(N)Moderate (D)Low (F)Low	(N)High (I)Moderate (F)Low
Fish : swim bladder involved in hearing(primarily pressure detection)	207 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	203 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	186 dB SEL <sub>cum</sub>	(N)High (D)High (F)Low	(N)High (I)High (F)Moderate
Sea turtles	210 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	(N)High (D)Low (F)Low	(N)High (I)Low (F)Low	(N)High (D)Moderate (F)Low	(N)High (I)Moderate (F)Low
Eggs and larvae	>210 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	(N)Moderate (D)Low (F)Low	(N)Moderate (D)Low (F)Low	(N)Moderate (D)Low (F)Low	(N)Moderate (I)Low (F)Low

Notes) peak and rms sound pressure level dB re 1 $\mu$ Pa; SEL dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>-s. All criteria are presented as sound pressure even for fish without swim bladders since no data for particle motion exist. Relative risk (high, moderate, low) is given for animals at three distances from the source defined in relative terms as near (N), intermediate (I), and far (F)

Table 2.4 Effects of shipping and continuous sounds(Popper, 2014)

For the most part, data in this table are based on knowing that fish will respond to sounds and their hearing sensitivity, but, as discussed in the text, there are no data on exposure or received levels that enable guideline numbers to be provided.'					
Type of Animal	Mortality and potential mortal injury	Impairment			Behavior
		Recoverable injury	TTS	Masking	
Fish : no swim bladder (particle motion detection)	(N)Low (I)Low (F)Low	(N)Low (I)Low (F)Low	(N)Moderate (I)Low (F)Low	(N)High (I)High (F)Moderate	(N)Moderate (I)Moderate (F)Low
Fish : swim bladder is not involved in hearing (particle motion detection)	(N)Low (I)Low (F)Low	(N)Low (I)Low (F)Low	(N)Moderate (I)Low (F)Low	(N)High (I)High (F)Moderate	(N)Moderate (I)Moderate (F)Low
Fish : swim bladder involved in hearing(primarily pressure detection)	(N)Low (I)Low (F)Low	170 dB rms for 48 h	158 rms for 12 h	(N)High (I)High (F)High	(N)High (I)Moderate (F)Low
Sea turtles	(N)Low (I)Low (F)Low	(N)Low (I)Low (F)Low	(N)Moderate (I)Low (F)Low	(N)High (I)High (F)Moderate	(N)High (I)Moderate (F)Low
Eggs and larvae	(N)Low (I)Low (F)Low	(N)Low (I)Low (F)Low	(N)Low (I)Low (F)Low	(N)High (I)Moderate (F)Low	(N)Moderate (I)Moderate (F)Low

Notes) rms sound pressure level dB re  $1 \mu\text{Pa}$ ; SEL dB re  $1 \mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ . All criteria are presented as sound pressure even for fish without swim bladders since no data for particle motion exist. Relative risk (high, moderate, low) is given for animals at three distances from the source defined in relative terms as near (N), intermediate (I), and far (F)

## 2.2.2 국내 연구 사례와 피해기준

수중소음에 대한 선행 연구에서 국내 어류전문가의 자료와 일본, 미국, 그리고 캐나다의 어류에 대한 피해기준 자료를 보면 발파기술자로서 이해가 잘 되지 않는 부분이 있다. 배종우(2009)의 글을 인용해보면 “국내의 자료에서 수중소음에 대한 국내의 피해 영향거리 추정은 각 연구자의 독립적 연구결과에 따라 결정되고 있다. 친환경 정책을 기조로 하고 있는 현재의 국가발전 목표에 부응하기 위해서는 이 연구에서 인용한 국외의 충격과 영향범위 기준의 타당성, 다양한 충격과 음원의 발생기구, 전파특성 및 평가척도에 대한 연구가 수행되어 국내의 평가기준 수립이 필요하다고 판단된다” 라고 말하고 있다.

국내 연구자들의 피해기준 자료를 육상과 해상 구분 없이 비교해 보면 안장영, 윤종락, 박연수, 배종우 등의 기준보다 이승, 전남대학교 수산과학연구소, 서울대학교 환경소음진동연구센터, 최병근, 슬하발파환경시스템 등의 기준이 보수적이다. 이 연구자의 생각으로는 미국과 캐나다의 자료를 참고한 연구보다 일본 자료를 참고한 연구가 굉장히 보수적인 것으로 판단된다. 이는 미국과 캐나다의 연구 자료는 연속음과 충격음(펄스음, Impulse)을 구분하고 일본 자료는 연속음을(2.2.1절 참조) 기준으로 했기 때문이다.

수중발파에서 안장영(1994) 등은 50 kg의 TNT를 사용 시 250 m 이격거리에서 안전하다고 했고, 윤종락(2006) 등은 공당 7 kg에서 8 kg의 폭약을 사용 시 260 m 이격거리에서 안전하다고 했다. 그러나 전남대학교 수산과학연구소(2012, 육상 발파)는 2 kg의 폭약을 사용 시 500 m 이상에서 안전하다고 했고, 최병근(2012) 등은 천공장 5 m에서 12 m 까지, 4.92 km 이상에서 안전하다고 했다. 앞의 두 자료와 뒤 두 자료에 많은 차이가 있다. 발파기술자의 경험적 관점에서 이는 어딘가에 문제가 있음을 암시한다.

### 3. 이론적 배경

#### 3.1 소음·진동

##### 3.1.1 소음

소음은 ‘원하지 않는 소리’ 또는 ‘듣기 싫고 필요치 않은 소리’로 정의된다. 이 소음은 잠행성 오염물(insidious pollutant)로 단기적으로는 그 피해가 잘 나타나지 않기 때문에 소홀하게 취급하기 쉽다. 소음으로 인해 예상되는 피해는 사람의 경우, 불쾌감, 수면장해, 작업능률 저하, 생리적 변화, 청각능력 저하 등으로 종합할 수 있으며, 수중에서 생활하는 양식 어류의 경우에는 소음으로 인한 스트레스가 어류의 면역체계에 영향을 주어서 산란율을 떨어뜨리고 성장을 저해하며 나아가서는 사망에 이르게 한다. 바다에서 서식하는 자연산 어류의 경우에는 양식어류와 같은 피해를 입지 않기 위하여 소음원의 부근으로 회유하는 것을 본능적으로 피하게 된다(전남대학교 수산과학연구소, 2012).

##### 3.1.2 진동

진동이란 구조물이나 지반 등이 동적인 외력의 영향을 받아 운동적 평형위치로부터 시간의 경과와 함께 반복 위치가 변화하는 운동현상을 말한다. 구조물의 대부분은 탄성체이기 때문에 어떤 작용에 의하여 크고 작은 진동을 받는 것은 말할 필요도 없다. 이러한 진동에 의하여 구조물은 부분적인 파손을 일으키거나, 유해한 소음을 발생하거나 하여, 흔들림에 의한 불쾌감을 초래하게 된다(류복현, 2014).

#### 3.2 발파 소음·진동 이론

##### 3.2.1 발파 소음 특성

###### (1) 발파 소음

폭약이 폭발하면 에너지의 일부는 대기 중으로 압력파동의 형태로 전달된다. 이 압력

파동의 주파수가 사람이 들을 수 있는 가청주파수대역(20 Hz에서 20000 Hz)에 해당하면, 음(sound) 또는 소음(noise)이라 하며, 압력파동의 주파수가 낮아서 가청주파수대역 이하이면 충격음(concussion)이라 하여 우리가 들을 수 없다. 건설장비류나 자동차 등은 통상 고주파 압력파동인 음 또는 소음을 일으키지만 충격음을 발생시키지는 않는다. 따라서 이 경우에는 주로 소음만이 관심사가 되며, 아울러 소음을 감지함으로써 지반이나 구조물의 진동을 감지하게 되는 공해적인 문제가 유발된다. 반면, 폭약의 폭발에 있어서는 소음과 충격음이 모두 발생할 수 있는데, 충격음의 경우에는 사람이 직접 들을 수는 없으나 건물 내의 물건들이 떨어지는 소리를 들음으로써 간접적으로 느낄 수 있으며 유리창의 파손 또는 회벽이 떨어져 나가는 등의 구조물에 대한 피해를 유발할 수 있어 더욱 위험하다.

이와 같이 화약발파로 인해 발생하는 소음 및 충격음을 통틀어 발파풍(air blast)이라 하며, 발파풍의 세기는 발파풍압으로서 대개 압력단위(bar, Pa, psi)로도 표시할 수 있으나 환산단위인 데시벨(dB)로 많이 표시한다. 예를 들어, 거리에서 달리는 자동차가 일으키는 소음수준은 대략 80~90 dB 정도로 측정된다. 대개 발파로 비롯되는 ‘소음’을 말할 때에는 발파풍을 의미하며, 여기서는 발파소음이란 발파풍을 말한다(강추원, 2014).

## (2) 음압레벨 및 파워레벨

음압(Sound pressure)의 수준은 다음 식 (3.1)로 환산한 음의 세기레벨(Sound intensity level; SIL)을 사용하여 표시할 수 있다.

$$SIL = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (3.1)$$

위 식에서 SIL은 음의 세기레벨 [dB], I는 음의 세기 [ $w/m^2$ ],  $I_0$ 는 기준음의 세기 =  $10^{-12}$  [ $w/m^2$ ]이다. 기준음의 세기는 귀의 감각으로 1000 Hz 부근의 최소 가청치와 비슷한 값이다.

한편, 음압 P와 음의 세기 I 사이에는 다음의 식 (3.2)와 같은 관계가 성립한다.

$$P = \sqrt{\rho c I} \quad (3.2)$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도( $kg/m^3$ ), c는 파의 전파속도(m/s)이다.



따라서 음의 세기가 기준음의 세기  $I_0 = 10^{-12} [\text{w/m}^2]$  일 때의 음압  $P_0$ 는 다음과 같이 된다.

$$P_0 = \sqrt{\rho c I_0} = \sqrt{400 \times 10^{-12}} = 2 \times 10^{-5} [\text{Pa}] \quad (3.3)$$

그러므로 음압의 수준은 음압  $P_0$ 를 기준치로 하고  $I \propto P^2$ 의 관계를 이용하면 다음 식 (3.4)와 같이 음압레벨(Sound pressure level ; SPL)의 식으로 표시할 수 있다.

$$L_p = \text{SPL} = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (3.4)$$

위 식에서  $L_p$ (SPL)는 음압레벨 [dB],  $P$ 는 발파풍압 또는 음압 [Pa],  $P_0$ 는 인간의 최소 가청음압( $2 \times 10^{-5} \text{ Pa} = 20 \mu\text{Pa}$ )이다. 이와 같이 음의 세기레벨(SIL)과 음압레벨(SPL)은 실제로 같은 것이나 근래에는 주로 음압레벨을 사용하는 경우가 많으며, 본 연구에서 발파소음의 수준, 즉 발파풍압도 음압레벨(SPL)을 사용하여 환산한다. 음압레벨은 dB(L) 단위(L, linear)로 표시하며, 주파수에 대해 보정을 하지 않은 값으로서 구조물에 영향을 평가할 때 많이 사용된다(광해관리공단, 2008).

### (3) 소음레벨

압력의 단위는 소리의 압력 그 자체를 가리키고 있으며, 주파수에 관계없이 일정하다. 그러나 사람이 귀로 느끼는 소음의 감각량은 저주파일수록 둔하게 감각되기 때문에 인체를 대상으로 할 때에는 사람의 청감에 따라 적절한 보정회로를 사용해야 한다. 청감보정회로에는 건강한 사람이 가청 할 수 있는 1000 Hz 음을 기준으로 주파수에 따른 보정을 하는데, 가청응답을 연구하는데 적합한 것으로 A 및 C 보정회로가 있다. 청감보정회로를 통하여 측정된 소음을 소음레벨(sound level; SL) 또는 소음도라 하고 다음 식 (3.5)의 관계가 성립하고, 인체를 대상으로 한 일반적인 환경소음에는 A 특성을 많이 사용하므로 단위를 dB(A)로 표기한다.

$$\text{SL} = \text{SPL} + L_R \quad (3.5)$$

위 식에서 SL은 소음레벨 [dB(A)], SPL은 음압레벨 [dB],  $L_R$ 은 A특성에 따른 보정치이다(광해관리공단, 2008).

### 3.2.2 발파진동 특성

#### (1) 발파진동

폭약이 발파공 내에서 폭발하면 주변 암반은 강력한 폭굉 충격을 받으며 폭약과 접촉하고 있는 발파공 벽면과 주변의 상태는 고온, 고압 하에서 용융되며 유체역학적으로도 유도하는 현상을 나타낸다. 발파공의 외부에서는 충격압(shock pressure)에 의하여 파쇄대가 형성됨과 동시에 폭발에너지가 전달되어 발파공을 중심으로 원주방향으로 방사상의 균열이 생성, 전파되는 등 여러 형태의 암반파괴를 일으킨다.

이와 같은 파쇄대를 지나면 충격파는 더 이상 암반을 파괴하지 못할 정도로 급격하게 에너지를 잃게 되며, 이후부터는 탄성 응력파(stress wave)의 형태로 암반 중을 전파하게 된다. 즉, 힘을 받은 질량은 변형을 계속하려 하는 반면 암반이 지닌 강성은 변형을 원래상태로 되돌리려 하면서 변형과 회복을 반복하는 파동의 형태로 응력파가 전달된다. 이 응력파의 도달에 따른 지반의 반응은 진폭과 주기를 갖는 진동의 형태로 나타나는데, 이를 발파진동(blast vibration)이라 부른다.

일반적으로 암발파의 경우 발파로 인하여 발생하는 에너지 중에서 0.5~20%가 탄성파로 변환되어 발파진동으로 소비되는 것으로 밝혀졌다. 이러한 탄성파는 지반 속으로 전파되면서 지면에서는 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다.

진동의 강약을 나타내는 진동량으로는 변위, 속도, 가속도 등이 주로 쓰이며, 진동량은 위치와 경과시간에 따라 변화한다. 진동변위(D)는 시시각각의 이동량을 말하지만 실제로 계측할 수 있는 것은 진폭이다. 진동속도(V)는 진동변위의 시간에 대한 변화율이고, 진동가속도(A)는 진동 속도의 시간에 대한 변화율로서 이를 식으로 표현하면 아래 식 (3.6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 D &= \int V \cdot dt & V &= \frac{dD}{dt} \\
 V &= \int A \cdot dt & A &= \frac{dV}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

이러한 지반진동을 주파수  $f$ 의 정현진동으로 가정할 경우 다음 식 (3.7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{V}{2\pi f} & V &= 2\pi fD \\
 V &= \frac{A}{2\pi f} & A &= 2\pi fV \\
 f &= \frac{1}{T} & \omega &= 2\pi f
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

여기서,  $f$ 는 진동주파수,  $T$ 는 주기,  $\omega$ 는 각속도(angular velocity)이다.

발파진동은 충격적인 진동파형이므로 단순히 식을 이용하여 서로 다른 물리량들, 즉 변위, 속도, 가속도 사이의 변환을 하기는 곤란하며, 따라서 실제로 계측된 파형자료로부터 수치적분이나 수치미분을 통해 변환할 필요성이 있다. 단 이 과정에서도 적분의 경우에는 적분자체가 지니는 고유의 정밀성으로 인해 자료의 변환이 가능하지만 미분은 그렇지 않으므로 주의해야 한다(강추원, 2014).

## (2) 진동량의 단위

진동량은 국제표준화기구(ISO)의 규격에 따라 미터법(metric unit)으로 거의 통일하여 사용하고 있다. 하지만 실무적으로는 속도의 단위로  $\text{cm/s}$ , 가속도의 단위로  $\text{g}$  등을 사용하기도 한다. Table 3.1에 일반적으로 사용하는 진동량의 기본단위들과 관련정보들을 나열하였다(광해관리공단, 2008).

Table 3.1 Vibration unit(광해관리공단, 2008)

Classification	Basic unit	The others
Displacement	cm	$\mu=10^{-3}\text{mm}=10^{-4}\text{cm}$ $\text{mm}=10^{-1}\text{cm}$ , $\text{m}=10^2\text{cm}$
Velocity	cm/s	$\text{mm/s}=10^{-1}\text{cm/s}$ Kine=1cm/s, $\text{m/s}=10^2\text{cm/s}$
Acceleration	$\text{cm/s}^2(\text{gal})$	$\text{gal}=1\text{cm/s}^2$ , $\text{m/s}^2=10^2\text{cm/s}^2$ $\text{g}=980\text{cm/s}^2 \approx 1000\text{gal}$

### (3) 가속도레벨과 진동레벨

일반적으로 발파진동의 영향평가는 구조물이 주요 대상이 되어 구조물의 피해와 상관관계가 높은 지반진동의 속도파형에서 최대진폭, 즉 최대속도(peak particle velocity, PPV)를 사용한 평가가 주를 이루고 있다. 하지만 공해진동으로서 인체영향을 대상으로 할 때에는 진동가속도로부터 정의되는 진동레벨(vibration level; VL)에 의한 평가가 주가 되고 있다. 따라서 발파진동이 공해진동으로서 문제가 되는 경우에는 최대속도에 의한 평가와 더불어 진동레벨에 의한 평가를 병행해야 할 필요성이 있다.

일반 공해진동을 취급할 때에는 인체의 진동감각을 보정한 식 (3.8)과 같은 가속도레벨(acceleration level; AL)을 사용한다.

$$AL = 20 \log \left( \frac{A}{A_0} \right) \quad (3.8)$$

위 식에서 A는 가속도 실효치 [ $m/s^2$ ],  $A_0$ 는 가속도 기준치 =  $10^{-5} m/s^2$ 이며, AL은 가속도레벨로서 데시벨(dB) 단위로 표시한다.

한편, 국제표준화기구의 인체의 진동에 대한 기준은 위의 가속도레벨에 주파수에 따른 인체의 진동감각을 보정하여 다음 식 (3.9)에 의한 진동레벨(vibration level; VL)로 환산하는데 dB(V) 단위로 많이 표시하고, 연직방향에 대해 식 (3.8)의 가속도레벨의 기준치  $A_0$ 를 다음 식 (3.9)에 의한 Table 3.2에서와 같이 주파수대역별로 보정하여 사용한다.

$$VL = 20 \log \left( \frac{A}{A_0} \right) \quad (3.9)$$

인체의 진동에 대한 감지방법은 주파수에 의존하며, 연직방향의 진동에는 4 Hz에서 8 Hz에 가장 민감하고 수평방향의 진동에는 1 Hz에서 2 Hz에 가장 민감하다. 진동주파수에 대한 인체의 감지방법을 표현하기 위해서는 진동레벨의 연직 및 수평 양 특성을 갖는 진동감각 보정회로를 갖추어야 하며 계측된 가속도의 입력에 대해서 일차 진동감각 보정회로에 의해서 주파수 보정이 이루어지며, 다음 지시특성회로에 의해서 지속시간에 대한 보정이 행해진 결과가 진동레벨 값이 된다.

Table 3.2 Reference value of acceleration level( $A_0$ ) depending on the frequency range(광해관리공단, 2008)

$A_0$	Frequency
$\frac{2}{\sqrt{f}} \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$	$1 \leq f < 4\text{Hz}$
$10^{-5} \text{ m/s}^2$	$4 \leq f < 8\text{Hz}$
$0.125f \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$	$8 \leq f < 90\text{Hz}$

이론적으로 진동속도의 최대치(PPV)와 진동레벨(VL)의 관계는 8 Hz 이상의 주파수에 대해 연속적인 정현 파형을 가정하여 유도하면 다음 식 (3.10)과 같은 관계가 성립한다.

$$VL = 20 \log(PPV) + 91 \quad (3.10)$$

위 식에서 VL은 진동레벨(dB(V)), PPV는 최대진동속도(cm/s)이다. 만일 위의 식을 발파진동에 적용한다면 최대진동속도를 측정함으로써 진동레벨을 예측할 수 있으며, 또 그 반대로 가능하므로 진동계측 시 진동속도 또는 진동레벨 중에서 어느 한쪽만 측정해도 되겠지만 발파진동과 같은 일회적인 충격파형에 대해서는 두 평가법의 상호관계를 일의적으로 결정하기는 어렵다고 본다(광해관리공단, 2008).

### 3.2.3 발파진동의 전파 특성

#### (1) 발파진동의 전파조건

발파진동의 전파 특성을 결정하는 조건은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있으며 이를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

##### ①. 입지조건

- 발파가 이루어지는 현장부지의 지형과 인근 구조물의 형태
- 대상 지반의 지질학적 특성
- 대상 암석의 역학적 성질

②. 발파조건

- 사용폭약의 종류
- 장약량
- 기폭방법
- 폭원과 대상지역까지의 거리 등이다.

상기 중 발파조건에 열거된 항목들은 조절 가능한 인자이나 ‘입지조건’에 열거된 것들은 조절이 불가능한 인자에 속하는 것으로써, 발파진동의 영향을 최소한으로 낮춘다는 것은 조절 가능한 발파조건인 인자들을 잘 파악하여 이를 적극적으로 활용하는 것이라고 말할 수 있다. Table 3.3은 발파진동의 변수에 대한 영향을 미치는 정도를 나타내었다.

Table 3.3 Parameters which influence ground motion(광해관리공단, 2008)

Parameter	Items	Influence on ground motion		
		Significant	Moderately significant	Insignificant
Controllable parameters	A. Delay interval	○		
	B. Charge weight per delay	○		
	C. Explosives type	○		
	D. Burden and spacing		○	
	E. Hole diameter and drilling angle		○	
	F. Stemming			○
	G. Direction of initiation			○
	H. Charge weight per blasting			○
Uncontrollable parameters	A. Distance of blast site and structure	○		
	B. Geography		○	
	C. Soil type and layer depth		○	
	D. Rock condition		○	
	E. Atmospheric condition			○

상기 ‘발파조건’에서 열거한 바와 같이 여러 개의 인자가 발파진동의 영향 정도를 결정하지만, 그 중에서 장약량과 폭원으로부터 대상지역까지의 거리가 가장 중요한 영향인자로 꼽을 수 있다. 이들 두 인자 사이에는 다른 인자들보다 비교적 뚜렷한 함수관계를 보인다. 즉, 발파진동을 예측하기 위해서는 열거한 인자들이 모두 고려되어야 하겠지만, 진동치 예측에 관한 장약량과 거리가 가장 중요한 변수라고 할 수 있다. 따라서 발파진동을 제어하기 위해서는 발파지역 주변의 구조물의 현황과 상태, 그리고 인체에 미치는 감응정도 등을 파악하여 발생하지 않는 진동허용 기준치를 설정한 다음, 거리에 따라 지발당 장약량에 대한 규제를 두는 것이 가장 합리적이다(광해관리공단, 2008).

(2) 매질에 의한 전파특성

서로 다른 물리적 특성을 가진 두 매질이 서로 접해있고 각 매질이 균질한 매질이라고 가정할 경우, 하나의 매질을 통해 전파되던 평면파가 다른 매질을 만나게 되면 두 매질의 밀도와 음속 그리고 파의 입사각도 등에 따라 입사되는 파의 전체가 반사 또는 투과되거나, 부분적으로 투과되는 현상을 보인다.

실제 자연에서 볼 수 있는 다른 매질간의 경계를 이루고 있는 대표적인 형태는 대기 중 공기와 물, 공기와 콘크리트 또는 지반이나 고체매질, 지반과 물 등의 경계조건을 들 수 있다.

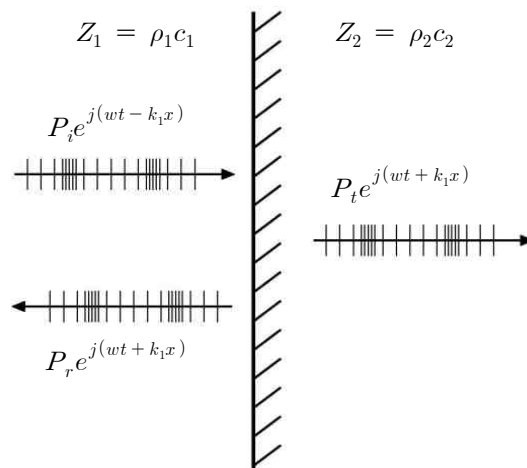


Figure. 3.1 Reflection and transmission of plane sound wave normally incident on the plane interface of medium(박진형, 2009)

Figure 3.1은 복소음압과 수직입자속도의 비로 정의되는 고유 음향임피던스  $Z_s(Z_s=(p/v)\text{surface})$ 가 다른 무한히 두꺼운 두 매질이 접해있을 때 수직 입사되는 평면파가 매질 경계면(표면)에서 파의 반사 및 투과형태를 보인 것이다.

경계면에서 수직으로 입사되는 파동의 입사파와 반사, 투과파의 압력과 입자속도 관계식 (3.11)은 다음과 같이 표현할 수 있다(박진형, 2009).

$$\begin{aligned} P_{inc} + P_{ref} &= P_{tran} \\ v_{inc} + v_{ref} &= v_{tran} \end{aligned} \quad (3.11)$$

여기서, 각 파의 입자속도  $v$ 는

$$v_{inc} = \frac{P_{inc}}{\rho_1 v_1}, \quad v_{ref} = \frac{P_{ref}}{\rho_1 v_1}, \quad v_{tran} = \frac{P_{tran}}{\rho_2 v_2} \text{ 이 되고,}$$

이때 반사파의 속도  $v_{ref}$ 는 입사방향의 반대부호를 가지므로

$$\frac{P_{inc}}{\rho_1 v_1} - \frac{P_{ref}}{\rho_1 v_1} = \frac{P_{tran}}{\rho_2 v_2} \text{ 가 된다.}$$

두께가 무한한 매질로 가정하여 1차 매질에서 파의 진행방향과 평행하게 전파되는 평면파가 2차 매질과의 경계면에서 반사되어 1차 매질로 되돌아오는 반사파와 2차 매질로 투과되는 투과파의 에너지 비율을 각각 반사율과 투과율이라 하며, 매질의 음속과 밀도의 곱으로 표현되는 고유음향 임피던스( $Z = \rho c$ )에 의해 결정되고, 입사에 대한 반사 및 투과에너지와 입사에 대한 반사 및 투과음압의 관계식은 식 (3.12), (3.13), (3.14), (3.4)와 같이 표현된다(박진형, 2009).

$$\frac{W_{ref}}{W_{inc}} = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right|^2 \quad (3.12)$$

$$\frac{W_{tran}}{W_{inc}} = 1 - \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right|^2 \quad (3.13)$$



$$\frac{P_{tran}}{P_{inc}} = \frac{4\text{Re}\{Z_2\}/\text{Re}\{Z_1\}}{\left|\frac{Z_2}{Z_1} + 1\right|^2} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3.14)$$

$$\frac{P_{ref}}{P_{inc}} = 1 - \frac{W_{tran}}{W_{ref}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.15)$$

공기와 물, 물과 강철, 강철과 물 등 두 매질 사이에 경계를 갖는 경우 각 매질의 고유 음향 임피던스가 강철  $3.9 \times 10^7$  rayles( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ), 공기 410 rayles( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ), 물  $1.5 \times 10^6$  rayles( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )이라 하면, 매질 경계에서의 음압과 에너지의 반사 및 투과비율은 Table 3.4와 같이 산출되며, 이는 공기로부터 입사되는 평면파가 강철이나 물로 투과되는 에너지는 극히 작은 부분만이 전달되며 물에서 강철로의 투과율은 상대적으로 높은 것을 알 수 있다(박진형, 2009).

Table 3.4 Reflection and transmission ratio of pressure and power for air-steel, water-steel, air-water interfaces(박진형, 2009)

Interface	$P_{tran}/P_{inc}$	$P_{ref}/P_{inc}$	$W_{tran}/W_{inc}$	$W_{ref}/W_{inc}$
Air/steel	1.99998	0.99998	0.00004	0.99996
Water/steel	1.927	0.0927	0.141	0.859
Air/water	1.99945	0.99945	0.00109	0.998907

### 3.3 수중소음 이론

#### 3.3.1 수중소음

##### (1) 수중소음 특성

육상에서 측정할 수 있는 공중소음(대기소음)이나 진동의 피해에 대해서는 일반인들에

계도 어느 정도 인식되어 있지만 땅 위에서나 물 속 작업으로 인한 수중 생물의 피해에 대해서는 사회에서 제대로 인식하지 못하고 있는 것이 현실이다.

일반적으로 발파가 이루어지는 동안의 시간은 수초 이내로 극히 짧은 편이지만 발파작업으로 인하여 순간적으로 발생하는 충격파는 수중에서 서식하는 어류에게는 중대한 영향을 끼치는 경우가 발생할 수 있다. 그러나 이와 같은 충격파는 전달되는 매체 및 전달과정 중 이질 매체(異質 媒體)의 통과를 통하여 저감되거나 증폭되어 나타나는 등 확실적인 값을 나타내기에는 어려움이 있다(박정봉, 2011).

## (2) 공중소음과 수중소음의 비교

공중소음과 수중소음은 전달매질에서 차이가 난다. 이 매질의 차이는 소리의 전달속도를 다르게 하며, 소음에 노출된 생물에 대한 충격에서도 차이가 난다. 공중소음이나 수중소음은 소음의 크기를 나타내는 단위로 데시벨(dB)을 사용하며, 공중소음과 수중소음은 dB로 환산하는 기준 값이 다르다. 기준음압에 대한 다양한 소음과의 관계는 Table 3.5와 같다.

Table 3.5 Comparison of air noise and underwater noise(신영철, 2010)

Air noise	Underwater noise
- Propagation velocity of sound wave in air : $331.5+3.6t \cdot \rho$ (m/s)	- Propagation velocity of sound wave in underwater : 1450 m/s (Quadruple the air noise)
- If the atmosphere, temperature, density is high, propagation velocity get faster	- If the atmosphere, temperature, density is high, propagation velocity get faster
- Reference level of air noise : 20 $\mu$ Pa	- Reference level of underwater noise : 1 $\mu$ Pa
- Measuring equipment : microphone	- Measuring equipment : hydrophone

수중소음 레벨의 단위는 현재 전 세계적으로 마이크로파스칼( $\mu$ Pa)을 사용하고 있으며, 지난 한 때 사용했던 다인 퍼 제곱센티미터( $\text{dyne}/\text{cm}^2$ ), 마이크로 바( $\mu\text{bar}$ )는 100 dB을 더하면 마이크로파스칼( $\mu$ Pa)된다. 공중소음을 현재 사용하고 있는 수중소음레벨의 단위로 환산하려면 공중소음 레벨에 26 dB을 더하면 된다(전남대학교 수산과학연구소, 2012).

Table 3.6 Interrelationships of various scales for acoustic measurements; standard reference units are underlined  
<sup>a</sup>(Richardson, 2008)

Pascal	Dyne/cm <sup>2</sup>	Bar	<u>dB re 1 μPa</u>	<u>dB re 1 μbar</u>	<u>dB re 0.0002 μbar</u>	Typical airborne sounds and human thresholds	Typical underwater sounds and marine mammal thresholds
1,000,000	10 <sup>7</sup>	10	240	140	214		
							2 kg high explosive, 100 m
100,000	1,000,000	1	220	120	194		Beluga echolocation call, 1 m
10,000	100,000	.1	200	100	174		
						Some military guns	
1,000	10,000	.01	180	80	154		
						Sonic booms	
100	1,000	.001	160	60	134		Large ship, 100 m
10	100	100μ	140	40	114	Discomfort threshold, 1 kHz 500 m from airliner	Fin whale call, 100 m
1	10	10μ	<b>120</b>	20	94		
.1	1	<b>1μ</b>	100	0	74	15 m from auto, 55 km/h Speech in noise, 1 m	Beluga threshold, 1 kHz Ambient, SS4, 1/3-OB @ 1 kHz <sup>b</sup>
.01	.1	.1μ	80	-20	54	Speech in quiet, 1 m	Seal threshold, 1 kHz
.001	.01	.01μ	60	-40	34		Ambient, SS0, 1/3-OB @ 1 kHz
.0001	.001	.001μ	40	-60	14		Beluga threshold, 30 kHz
20μ	200μ	.0002μ	26	-74	0	Open ear threshold, 1 kHz	
10μ	100μ	.0001μ	20	-80	-6	Open ear threshold, 4 kHz	
<b>1μ</b>	10μ	.00001μ	<b>0</b>	-100	-26		

a Airborne portions adapted from Kryter(1985).

b Ambient noise in 1/3-octave band centered at 1 kHz under sea state 4 conditions.

수중소음의 추천되는 단위는 dB re 1  $\mu$ Pa이고, 일부 문헌에서 축약형으로 dB//1 $\mu$ Pa을 사용하기도 한다(Richardson, 2008).

대기소음과 수중소음의 근본적인 차이점은 전파매질이 상이하다는 것이며, 이 매질의 차이는 소리의 전달속도를 다르게 하고, 소음에 노출된 생물에 대한 충격에서도 차이가 난다. 대기소음이나 수중소음은 크기를 나타내는 단위로 데시벨(dB)을 사용하고 있으나 대기소음과 수중소음은 dB로 환산하는 기준 값(reference level)이 다르다. 또한 수중소음은 대기 중 소음보다 전달 속도가 4.4배 정도 빠르게 나타난다. Table 3.6은 표준 reference units에 의한 다양한 음향 값의 관계이다(Urick, 1975, Richardson, 2008).

### (3) 소음의 표현

일반적으로 음향에서는 dB라는 단위로서 음파의 크기를 나타낸다. 소리는 본질적으로 대기의 작은 압력의 변화를 우리 귀의 고막에 의해서 감지하는 물리적 현상이다. 따라서 소리의 크기는 이 압력의 크기로서 정의하면 된다. 그러나 사람이 들을 수 있는 소리의 크기는 최저 가청 압력인  $2 \times 10^{-5}$  Pa에서 통증을 느끼기 시작하는 압력인 200 Pa 까지 광범위하기 때문에 소리의 압력 자체로서 소리의 크기를 정의하는 데는 불편이 있다.

이처럼 넓은 범위에서 변하는 양을 취급하기 위해서 물리학이나 공학에서는 흔히 그 양의 log값을 이용한다. dB(decibel)은 공학에서 다음 식 (3.16)과 같이 정의된다.

$$dB = 10 \log\left(\frac{\text{Power}}{\text{기준Power}}\right) \quad (3.16)$$

여기서,  $10 \log\left(\frac{\text{Power}}{\text{기준Power}}\right)$ 는 전화의 발명자 Alexander Graham Bell을 추모해서 “Bel”이라고 부르며 이 단위의 1/10을 deciBel이라고 정의한다.

음향에서 dB은 Power 대신에 거리가 증가함에 따라 소음이 감소되는 이론에서 정의된 세기(intensity)를 사용하여 다음 식 (3.17)과 같이 정의한다(신영철, 2010).

$$\text{Intensity level } L_1 = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3.17)$$

여기서  $I_0$ 는 기준이 되는 세기로서, 음향에서는 최저 가청압력  $P_0$ 는  $2 \times 10^{-5}$  N/m<sup>2</sup>에 해

당하는 세기,  $I_0 = 10^{-12}$  Watt/m<sup>2</sup>로 정의한다. 거리에 따른 에너지 감소에 의하면 I는 P의 자승에 비례하므로 위 식은 다음 식 (3.18)과 같이 음압의 함수로 쓸 수 있다(신영철, 2010).

$$\text{음압도 } L_p = 10 \log\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right) = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (3.18)$$

이처럼 dB은 어떤 기준 값에 의해 정의된 상대적인 양이다. 위 식들에서 정의되고 있는 세기와 음압은 모두 RMS 값이다. 즉, 음향의 dB 음압의 RMS값에 의해서 정의된다. 이와 같이 정의된 dB은 세기에 의한 것이든 음압에 의한 것이든 같은 값을 준다.

Figure 3.2는 몇 가지 경우들에 대한 음압도를 보여준다. 이 그림에서 각 경우에 대한 절대 음압이 micro pascal( $10^{-6}$  N/m<sup>2</sup>)의 단위로서 나타나 있으며, 절대 음압의 큰 차이가 dB서는 다루기 쉬운 작은 차이로서 나타낼 수 있음을 볼 수 있다(신영철, 2010).

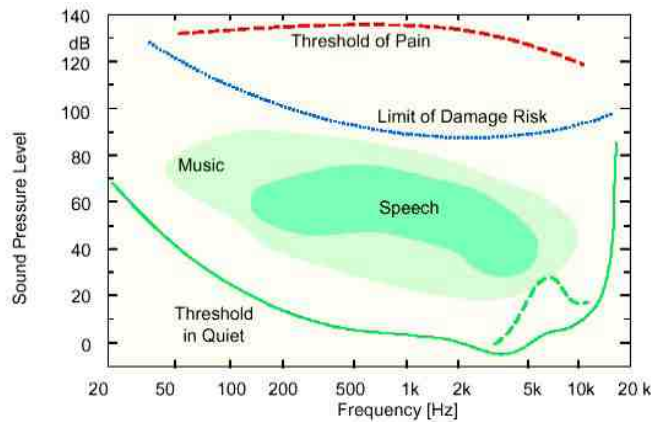


Figure 3.2 Audio extent and pain limit of human(신영철, 2010)

#### (4) dB의 대수법

상술한 바와 같이 dB은 큰 범위의 숫자를 쉽게 취급할 수 있는 장점이 있는 반면에 log를 이용해서 정의된 양이니 만큼 대수 법에 주의를 해야 한다. dB로 정의된 두개 이상의 양을 취급할 때는 이들을 일단 본래의 물리 양으로 바꾸어 더하거나 빼야한다. 이때 우리는 본래의 물리 양으로서 식 (3.19)에 의한 세기(intensity)를 생각할 수 있고, 식 (3.20)

에 의한 압력을 생각할 수도 있다. 그러나 R.M.S 세기(intensity)는 에너지 보존법칙에 의해서 직접 더할 수가 있으나 R.M.S 압력은 직접 더할 수가 없다(R.M.S 값이 아닌 순간 압력들은 물리법칙에 의거 직접 더할 수 있다). 따라서 dB을 계산할 때는 다음에서 보여주는 식 (3.21)과 (3.22)에 의해서 세기로 환산하는 방법을 써야 한다(신영철, 2010).

$$L_{p1} = 10 \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{P_1^2}{P_0^2}\right) \quad (3.19)$$

$$L_{p2} = 10 \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{P_2^2}{P_0^2}\right) \quad (3.20)$$

식 (3.19) 에서

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{P_1^2}{P_0^2} = 10^{L_{p1}/10} \quad (3.21)$$

식 (3.20) 에서

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{P_2^2}{P_0^2} = 10^{L_{p2}/10} \quad (3.22)$$

위의 두 식 (3.21)과 (3.22)를 합하면 다음 식 (3.23)과 같이 나타낸다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{I_1 + I_2}{I_0} = \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_0^2} = 10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10} \quad (3.23)$$

따라서, 음압  $L_P$ 는 다음 식 (3.24)와 같이 표현된다.

$$L_P = L_{p1} + L_{p2} = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \log(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10}) \quad (3.24)$$

특별한 경우로서 만일  $I_1 = I_2$ 라고 하면,  $I = I_1 + I_2 = 2I_1$ 이 된다. 따라서 최종적으로 식 (3.25)와 같이 나타낼 수 있다(신영철, 2010).

$$L_P = L_{P_1} + L_{P_2} = 10 \log\left(\frac{2I_1}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) + 3\text{dB} \quad (3.25)$$

(5) 용어의 설명

① Peak :  $L_{\text{peak}}$ (Peak level of sound pressure wave)라고도 하며 sound pressure wave 중에서 진폭의 최고 수치를 의미. 청감보정을 거치지 않은 평탄특성의 음에서 최고 값.

②  $L_{\text{max}}$  : 청감보정을 거치지 않은 평탄특성의 음을 R.M.S 처리를 하였을 때 최고 값 (Maximum RMS sound level with a time constant).

③  $L_{\text{Amax}}$  : 청감보정(A 특성)을 거친 음을 RMS 처리를 하였을 때 최고 값으로 인체를 대상으로 할 때 적용.

④ R.M.S : Root mean square(실효치) 평균출력치의 개념으로 cos이나 sin 함수로 표현되는 파형이며 최대 값에  $(1/\sqrt{2})$ 을 곱한 값.

⑤ SEL : Sound Exposure Level(dB re  $1 \mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$ , 노출소음레벨, 음향노출수준) 수학적 으로 소음에 노출되는 시간 동안의 소음에너지의 합. 인체의 청력손실 등을 평가할 때 사용.

⑥ NEL : Noise Exposure Level(소음노출정도) 짧은 시간 동안에 높은 음압레벨을 갖는 소음이 인간의 귀에 어떠한 영향을 미치는 가를 파악하는 인자로서 소음노출 정도를 주어진 시간동안 적분하여 나타낸다(한국소음진동공학회, 2002).

⑦ SPL : Sound Pressure Level(음압레벨,  $L_p$ ) 기준음압에 대한 계측음압의 크기를 dB(데시벨) 단위로 나타낸 것이다. 보통 약어로  $L_p$  또는 SPL로 표기를 하며 다음 식 (3.26)과 같이 정의한다(한국소음진동공학회, 2002).

$$L_p = 10 \log\left(\frac{p^2}{p_{re}^2}\right) \text{ dB} = 20 \log\left(\frac{p}{p_{re}}\right) \text{ dB} \quad (3.26)$$

여기서  $p_{re}$ 는 기준음압(20  $\mu\text{Pa}$ )을 의미한다.

⑧ 배경진동 : 한 장소에 있어서의 특정의 진동을 대상으로 생각할 경우 대상 진동이 없을 때 그 장소의 진동을 대상 진동에 대한 배경진동이라 한다. 측정방법은 디지털 진동자동분석계를 사용할 경우 샘플주기를 1초 이내에서 결정하고 5분 이상 측정하여 자동 연산·기록한 80 % 범위의 상단치인  $L_{10}$ 값을 그 지점의 배경진동레벨로 한다(환경부, 2010).

### 3.3.2 수중소음 음향

대기 또는 수중과 같은 유체 속을 전파하는 음에너지는 매질 내 전단탄성이 없고 압축탄성만 존재하기 때문에 음파의 진행방향과 평행하게 압축과 팽형을 반복하는 압축-인장파의 전파형태를 보인다.

탄성매질에서의 소음은 입자의 규칙적인 전후 운동으로 이루어지는데, 음의 발생원로부터 매질 내 한 점에 도달한 파동은 주변매질을 자극하여 한 점에서 인접한 다른 점으로의 에너지 전달현상으로 물질의 이동이나 전달 없이 에너지 전달이 이루어진다.

이러한 음파는 매질의 고유특성에 따라 결정되는 음속으로 음원으로부터 외부로 전파해간다. 음원으로부터 동일반경 내 모든 점에서 같은 음압을 갖는 평면파로 가정할 경우 임의의 점에서 음압  $P$ 는 매질의 입자속도 및 고유 음향임피던스( $Z = \rho c$ )와의 관계에서 다음 식 (3.27)과 같이 표현할 수 있다(박진형, 2009).

$$P = \rho c v \quad (3.27)$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $c$ 는 파의 전파속도( $\text{m}/\text{s}$ )이다.

밀도와 음속의 곱  $\rho c$ 는 유체의 고유음향저항이라고 하며, 해수와 대기에서의 값은 아래와 같이 큰 차이를 보인다.



In sea,  $\rho c \approx 1.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ (Rayles)

In air,  $\rho c \approx 428 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ (Rayles) (20°C, 1atm)

매질 속을 전파하는 음은 운동하는 입자의 운동에너지와 탄성 매질 내 압축에 따른 위치 에너지를 합한 물리적 에너지를 전달한다.

또한 음의 세기를 나타내는데 있어 음의 세기강도(intensity)를 이용하는데, 이는 파가 매질 속을 전파해갈 때 전파방향에 수직인 단위면적을 시간당 일정한 에너지가 통과하게 된다. 이때 단위면적을 통과하는 에너지 총량을 의미하며, 평면파에서 intensity(I)는 음압과의 관계에서  $I = P^2/\rho c$  와 같이 나타낼 수 있다.

사실상 고유계에서 순간 intensity보다 시간평균 intensity가 사용되며 실제로도 중요하다. 음압과 고유 음향임피던스와의 관계식에서 공기 중 및 수중에서의 평면파에 대하여 동일한 음압 1 Pa(N/m<sup>2</sup>) 이 나타내는 intensity는 매질의 고유 음향임피던스 값에 따라 아래와 같이 차이를 보인다(박진형, 2009).

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

$$I_{\text{water}} = \frac{\overline{P^2}}{\rho_{\text{water}} c_{\text{water}}} = \frac{1}{1000 \times 1500} = 0.67 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$$

일시적으로 발생하는 순간 신호에 대해 파가 전파하거나 경로 상 장애물에 충돌 시 신호 왜곡을 고려해야 하는데, 이때 음파의 에너지 유속밀도를 고려하는 것이 보다 더 중요하다.

에너지 유속밀도(E)는 순간 intensity의 시간 합으로 아래의 식 (3.28)으로 표현할 수 있다(박진형, 2009).


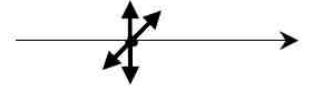
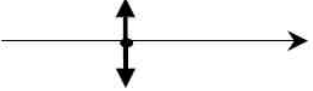
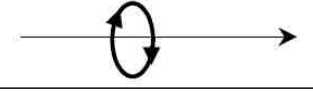
$$E = \int_0^{\infty} I \, dt = \frac{1}{\rho c} \int_0^{\infty} P^2 \, dt \quad (3.28)$$

### 3.3.3 수중소음의 전파특성

(1) 소음의 전파속도(박진형, 2009)

매질을 통해 전파하는 파동은 매질의 형상과 물리적 특성에 따라 다른 형태로 전파해 간다. 압축파 만이 존재하는 대기나 물과 같은 유체와 달리 고체의 경우 동일 매질 내에서도 압축파, 전단파, 굽힘파 및 표면파로 취급하는 레일리파 등이 함께 존재한다. 각 파동의 종류와 전파속도를 매질별로 파의 전파방향에 대해 상대적으로 표현하여 구분하면 Table 3.7과 같이 나타낼 수 있다.

Table 3.7 Wave motion types and propagation velocity(박진형, 2009)

Type of wave	Wave progress direction and particle motion direction	Medium	Propagation velocity of wave
Primary wave		Gas	$V = \left( \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \right)^{1/2}$
		Liquid	$V = \left( \frac{K}{\rho_0} \right)^{1/2}$
		Solid	$V = \left[ \frac{E(1-\nu)}{\rho_0(1+\nu)(1-2\nu)} \right]$
Secondary wave		Solid	$V = \left[ \frac{E}{2\rho_0(1+\nu)} \right]^{1/2}$
Flexural wave		Chord Rectangularly cross section	$V = \left[ \frac{T'}{A\rho_0} \right]^{1/2}$ $V = \left[ \frac{Eh^2}{12\rho_0} \right]^{1/4} \omega^{1/2}$
Rayleigh wave		Solid surface	$V = 0.385 \left[ \frac{E(2.6+\nu)}{\rho_0(1+\nu)} \right]^{1/2}$

Note)  $p_0$ =equilibrium pressure,  $\rho$ =density,  $\gamma$ =ratio of specific heat,  $K$ =Bulk modules,  $E$ =Young' modules,  $\nu$ =poisson's ratio,  $T'$ =tension,  $\omega$ =angular frequency

수중에서의 음속은 선형이론을 이용하면 물의 밀도와 체적탄성계수와의 관계에서

$c = (K/\rho_0)^{1/2}$  m/s로 구할 수 있으며, 물의 체적탄성계수 약  $2.2 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>와 밀도 1000 kg/m<sup>3</sup>, 그리고 0°C, 1 atm에서의 대기 중의 비열비(1.402), 밀도(1.293)를 이용하여 수중과 대기 중 음속을 비교하면, 음의 전파속도는 담수에서  $c = 1,483$  m/s, 공기 중에서  $c = 340$  m/s로 수중에서의 음속이 약 4.3배 빠르게 전파된다.

수중에서의 음속은 여러 조건에 의해 일정한 값을 갖지 않는데, 음속에 영향을 미치는 요인으로서 수온(°C), 염도(ppt) 및 압력(Pa)의 변화에 따라 음의 전파속도가 변하게 된다. 특히 지역적 차이와 수심, 계절 등의 변화에 따라 비교적 위 영향요소들 변화가 큰 해양에서의 경우 담수에서 보다 음속변화는 커질 수 있다.

일반적인 해수에서 수심에 따른 온도와 염도, 압력의 변화양상을 아래 Figure 3.3에 나타내었다.

수중에서의 음속은 온도, 염도 및 수심이 깊어짐에 따른 압력의 증가와 함께 빨라지는데 각 요소 변화에 의한 음속의 변화정도는 다음과 같다.

Temperature 1°C = 4 m/s

Salinity 1 PSU = 1.4 m/s

Depth(Pressure) 1 km = 17 m/s

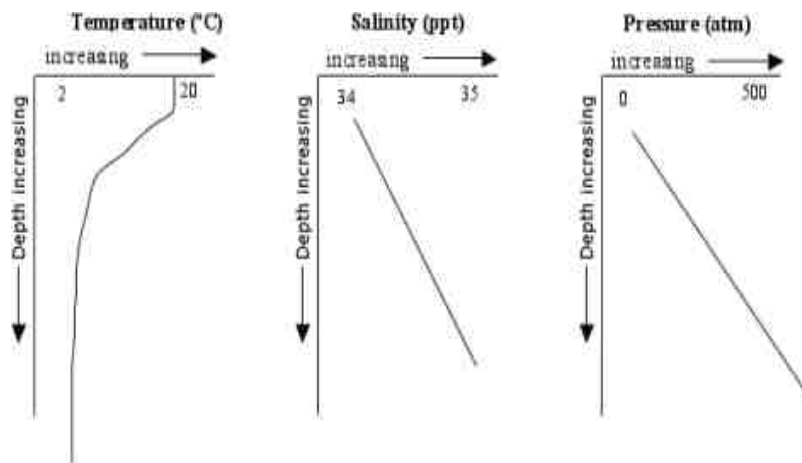


Figure 3.3 Variation of temperature, salinity and pressure with the depth of water (박진형, 2009)

해양에서 수심에 따른 온도, 압력, 염분농도 변화를 포함하여 수심별 음속을 나타내면

Figure 3.4와 같다.

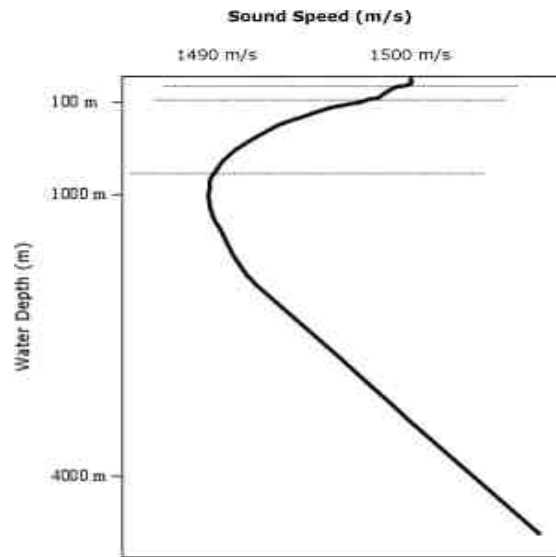


Fig. 3.4 Typical velocity of sound in deep sea(박진형, 2009)

일반적으로, 해수 수중에서의 음속은 다음과 같은 실험식 (3.29)로 표현된다.

$$c = 1449 + 4.6T - 0.055 T^2 + 0.0003T^3 + (1.39 - 0.012T)(S - 35) + 0.017z \quad (3.29)$$

담수에서는 주로 수온에 의한 영향만을 고려하는데, 실험적으로 제시된 수중에서의 음속은 아래 식(3.30)과 (3.31)을 이용하여 구할 수 있다.

- 0~95°C에서(Marczak)

$$c = 1402.385 + 5.038813T - 0.05799136T^2 + 0.0003287T^3 + 0.00000139T^4 + 2.787860 \times 10^{-9}T^5 \quad (3.30)$$

- 15~35°C에서(Lubbers and Graaff's)

$$c = 1404.3 + 4.7T - 0.04T^2 \quad (3.31)$$

### 3.3.4 수중소음 발생원인

수중소음의 발생원인은 진동원의 위치에 따라 다음의 Figure 3.5와 같이 크게 4가지로 구분되며, 발생 원인에 따라 전파범위가 큰 폭으로 변한다.

가장 영향범위가 큰 경우는 Figure 3.5의 Type-1(Water to Water)인 경우이고, 천공발파는 현수발파에 비해 1/4에서 1/6에 불과하며, 대부분의 건설공사에 의한 수중소음 민원 발생에 대한 사례를 조사한 결과 Figure 3.5의 Type-2 또는 Type-4의 형태이다.

그러므로 수중소음에 대한 확인은 발생유형에 따라 상황에 적절한 계측계획을 수립하고, 건설공사 시 실측을 통하여 어패류에 대한 피해를 확인하여야 하는 것이 바람직하다. 그러나 그동안의 조정사례 등을 보면 그렇지 않은 경우가 대부분이다.

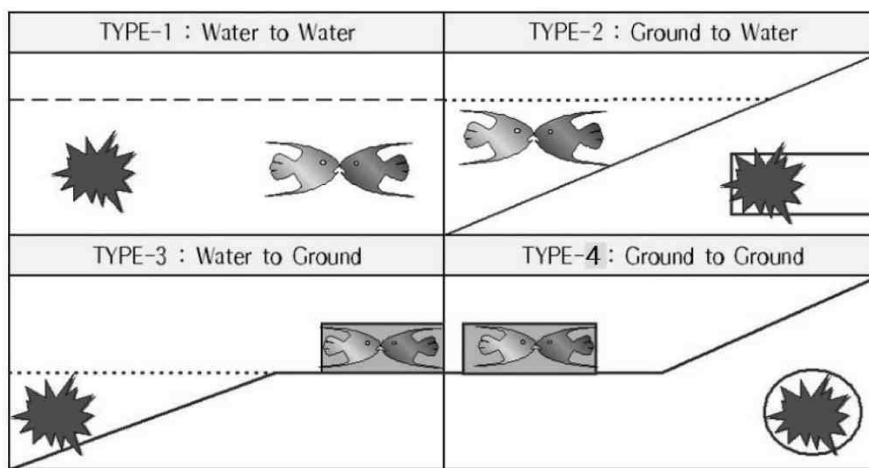


Figure 3.5 Types of underwater noise(박정봉, 2011)

건설공사로 인한 수중소음 연구자료 및 사례조사에 의하면 수중발파는 어업환경에도 악영향을 준다는 것이 선진국에서도 잘 알려져 있으나 우리나라에서는 수중발파 시공에 엄격한 제한을 두고 있지는 않다. 수중발파가 어업환경에 영향을 미치는 요소는 다음과 같다.

- ① 수중 압력파(수중 충격압)로 인한 어패류의 손상
- ② 수중소음으로 인한 어류의 도피
- ③ 암반의 파괴 및 준설로 인한 어업환경의 오염 등

특히 수중 압력파에 따른 어패류의 손상문제는 눈으로 피해를 쉽게 관가름 할 수 있으므로 문제시되기 쉬우며, 수중발파에 따른 어장환경의 변화에 관해 거론될 경우에는 커다란 사회문제로 발전될 수 있다.

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

물론 과거 일본에서 수중발파 시 어패류에 대한 조사 자료는 있으나 각각 다른 방법의 압력 측정방법과 측정치 등에 대한 조건이 다른 것이 많으므로 객관적인 자료로 활용하기에는 어려움이 많다.

작업 중의 수중소음이 어패류에 미치는 영향에 의한 연구로는 공기포(air-gun)를 사용한 지층 탐사작업 소음이 대구(大口, codfish)의 행동 및 어획에 미치는 영향에 관한 Lokkeborg and Soldal(1993)의 연구, 양식 가물치(Channa argus)의 행동에 미치는 과일 작업 소음의 영향에 관한 Shin(1995)의 연구 등이 있으며, 일본 本四架橋工事 시 수중발파에 의한 각종 어류의 영향에 대한 연구 자료가 잘 알려져 있다(박정봉, 2011).

### 3.4 수중소음에 의한 어류의 영향

#### 3.4.1 어류의 청감특성(박진형, 2009)

어류에 대한 소음의 중요성과 청감특성 및 음 발생에 대한 연구들은 20세기 중반이후 증가하였고, 20세기 후반에 들어 수중소음연구자들은 인위적인 소리가 해양포유동물뿐 아니라 어류 및 수중환경 생물들에 영향을 줄 수 있다는 것을 보다 실제적으로 인식하게 되었다.

대부분의 어류에서 진동을 감지하고 듣는 것이 가장 발달된 감각 형태이고 음 발생은 수중을 통해 저주파 음을 잘 전파할 수 있도록 한다. 어류에서 주요 음감지기관은 어류의 측면에 위치하고 있어 물과 접촉하여 100 Hz이하의 수중입자운동을 감지하는 측선조직과 머리내부에 있는 1 kHz에서 3 kHz이상의 음에 민감한 내이조직이다.

매질 내 소리를 듣는다는 것은 매질을 통해 전파된 기계적 운동을 감지하는 것을 의미한다. 어류에 있어 육상의 척추동물과 다른 것은 중이와 외이가 없이 내이만을 갖고 있지만, 내이 안에 있는 섬모세포 자극의 메커니즘과 음성에너지를 전기적 신호로 변환시

키는 신경조직을 통한 음의 인지는 다른 척추동물과 같다.

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

어류에 있어서의 청감은 어류의 몸체와 내이소낭 사이의 상대운동에 기초를 두고 있는 것으로, 물속에 충격성 소음이 가해지면 물고기는 대략 같은 진폭과 위상으로 움직이게 될 것이다. 반면 내이소낭은 감각 상피세포를 포함하는 어류 몸체의 다른 부분과 비교하여 3배의 강성을 가지고 있어 상피조직과 다른 진폭 및 위상으로 운동하게 되며, 이런 상대운동에 의해 소리를 감지하게 된다.

측선조직은 음원이 어류의 체장이내 근접한 곳에 있을 때 음향반사와 관련이 있는 것이 확실하지만, 내이조직은 주된 음 감지 조직과 연관이 있는 것으로 여겨진다.

어류의 두개골 내이 있는 내이는 음압보다는 차라리 진동에 민감하다. 부레를 가진 경골어류가 진동뿐만 아니라 소리를 감지한다는 것을 고려하면 내이조직은 음압을 진동으로 변환시키는 트랜스듀서 역할을 한다.

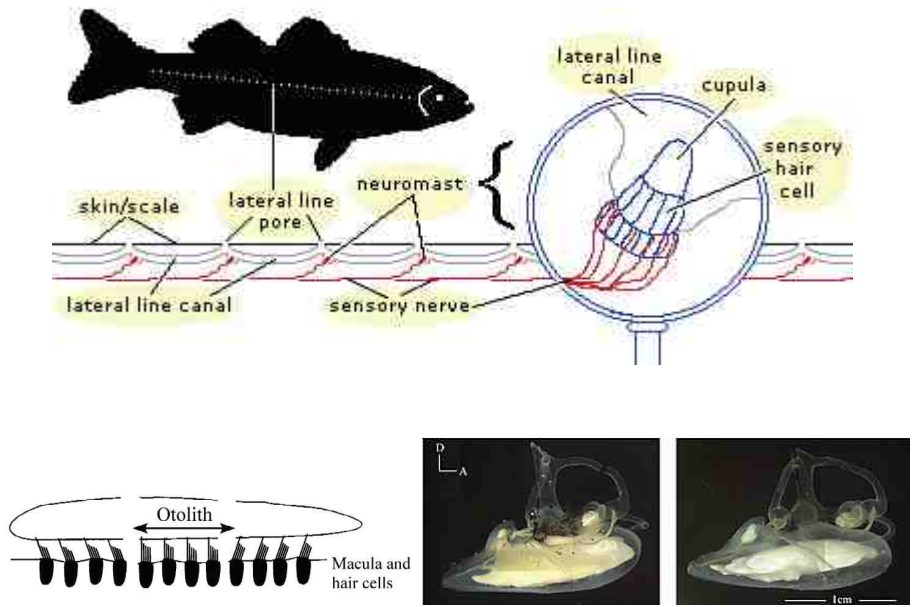
소음과 진동에 대한 청감능력은 특히 부레와 인접한 내이의 해부학적 구조에 의해 어종에 따라 다르다. 부레가 없는 연골어류나 광어를 포함한 저생 어류가 상대적으로 낮은 청각능력과 음향반사 능력을 갖는다. 부레를 가진 어류가 훨씬 민감한 경향을 보이며 부레와 내이 사이가 근접하여 연결된 형태의 어종에서 가장 민감하다.

어류는 일반적으로 넓은 범위의 소리를 감지할 수 있고 반응한다. 이러한 소리의 감지 능력에 대한 측정은 조건적 반응, 무조건적 반응 그리고 뇌 전압 측정 등을 통해 어류의 응답을 결정한다. 어류의 청감능력에 대한 연구들을 살펴보면, 소음에 특히 민감한 Hearing specialist와 일반적인 청감능력을 갖는 Hearing generalist 두 그룹으로 분류된다. Hearing generalist는 태평양 연안의 대부분 Hearing generalist보다 약 20 dB 낮은 청각역치를 가지며 청어류 및 대구류 이와 유사한 어종들로 알려져 있다.

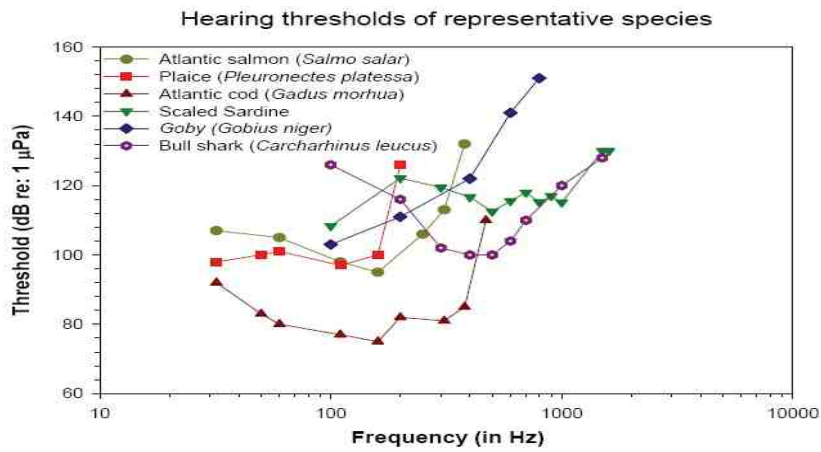
Hearing generalist는 음장의 입자 운동성분에 주로 민감한 것 같다. 최근 연구들은 압력과 관련한 청력데이터를 보고하는 경향이었던 반면 앞으로의 연구들은 많은 데이터를 얻고 보다 정확하게 어류의 청감능력을 평가하기 위해서 입자운동(속도)에 대한 응답을 실험하는 것이 중요할 것이다.

Hearing generalist와 대로 Hearing specialist는 음향학적으로 귀와 부레가 연동된 것에 많은 다른 메커니즘을 포함하고, 음장의 압력성분을 감지하는 청각시스템을 이용한다. 부레나 다른 공기주머니 구조의 운동을 바로 변환하는 이들 메커니즘은 입자변위의

직접감지를 보충하여 내이에 실제적인 압력이 가해지는 음압에 의해 일어난다. 이러한 커플링이 generalist와 비교하여 감지할 수 있는 주파수와 청감능력을 향상시킨다. Figure 3.6은 어류의 청각구조(a)와 어종별 청각역치(b)이다.



(a)



(b)

Figure 3.6 Hearing structures of fish(a) and Hearing thresholds of representative species(b) (박진형, 2009)



### 3.4.2 4단계의 수중 음압레벨

수중 음과 물고기의 관계에 대해서는 다음 4단계의 음압레벨이 생각되어진다.

① 청각역치(聽覺閾値, Threshold of hearing) : 물고기에게 겨우 들리는 최소 지각레벨로 감도가 좋은 특수한 물고기의 최고 감도로 60 dB re/ $\mu$ Pa에서 80 dB re/ $\mu$ Pa, 감도가 나쁜 일반적인 해산어로 90 dB에서 110 dB 이다.

② 유치레벨(誘致, Attraction level) : 물고기에게 있어서 쾌적한 음의 강도가 있어, 흥미 있는 음이 있으면 음원방향으로 몰려오는 음압레벨로 그 음압범위는 일반적으로 110 dB에서 130 dB 이다.

③ 위협레벨(威嚇, Aversive level) : 물고기가 놀라서 깊이 잠긴다든가, 음원에서 멀어지는 반응을 보인 음압레벨로 그 범위는 일반적으로 140 dB에서 160 dB 이다.

④ 손상레벨(損傷, Injury level) : 물고기의 내장, 부레파열 등의 손상은 음의 에너지 속 밀도나 임펄스에 관계하지만 수중천공발파에 의해 손상이 발생하는 음의 기준은 220 dB 이상이다.

해양목장에서 주요한 어종인 참돔의 청각역치, 유치레벨, 위협레벨을 Figure 3.7에 나타냈다(畠山良己, 1992, 1995).

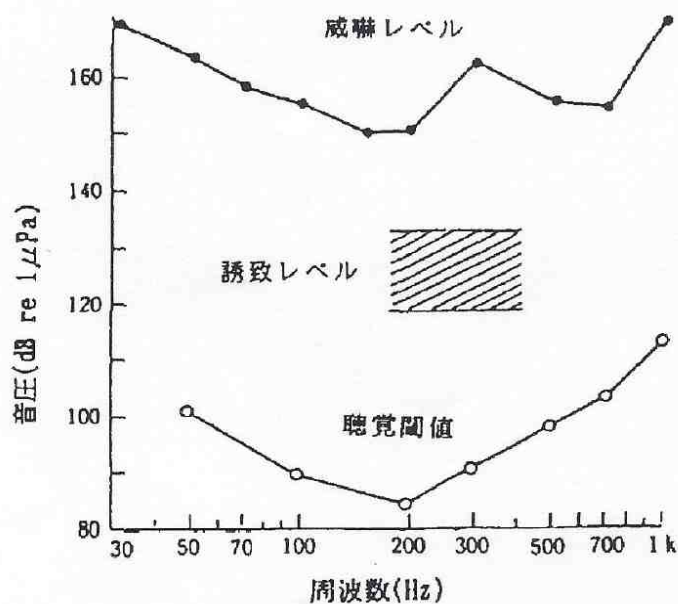


Figure 3.7 Sound pressure level affecting red sea bream(畠山良己, 1992, 1995)

### 3.4.3 청각역치의 결정방법

물고기의 청각역치는 정신물리학적인 측정법으로 측정되어, 물고기에게 양적판단은 하지 않고 자극에 대한 감각의 있고(○) 없고(×)의 2종류의 카테고리로 판단을 보고하게 된다. 그 판단의 출현율이 0.5로 되는 음압을 청각역치로 한다. 측정함에 빛, 진동 등 음이외의 자극을 혼입, 물의 흐름 등에 주의하지 않으면 안 된다.

① 극한법 : 음압의 상승계열인가 하강계열인가에서 실험을 행함. 상승계열에서는 명확히 『들리지 않는다』 음압레벨에서 시작, 일정의 음압스텝(2 dB에서 3 dB)으로 음압을 크게 하면서 자극의 제시하는 것으로 『×』인가 『○』인가를 판단한다. 『×』에서 『○』로 전환할 때 그 실험계열을 종료한다. 양 계열은 교대로 배치하는 것, 계열의 출발점을 랜덤으로 하는 것, 계열이 진척됨에 따라 생기는 학습이나 병로(病勞) 등의 영향을 제거하는 것 등의 주의가 필요하다.

② 항상법 : 청각역치를 중심으로 해서 4~7 스텝의 음압범위에 자극을 랜덤으로 다수회 반복해 자극제시하는 것에는 『○』, 『×』의 판단을 실행한다. 동일 음압레벨의 음을 다수회 제시했는데도 『○』의 출현율을 구할 수가 있다.

③ 단계법 : 청각역치보다 조금 큰 음압이나 조금 작은 음압에서 시작한다. 큰 음압에서 시작한 경우 Figure 3.8과 같이 하강계열의 음을 제시한다. 『×』로 된 시점에서 상승계열로 변환한다. 종축-음압, 횡축-실험회수의 그래프에 산과 계곡이 다수 나타난다. 산의 수가 10위로 되면 실험을 종료하고 마루와 골의 음압을 평균한다.

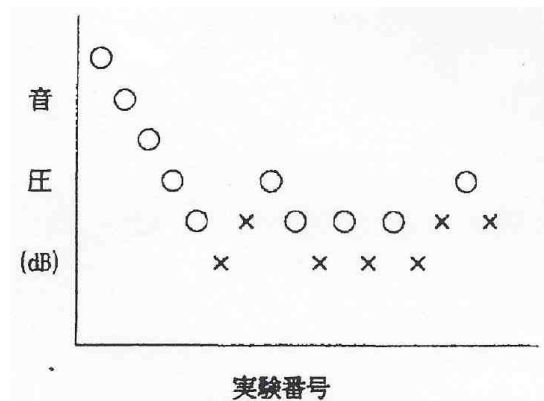


Figure 3.8. Response of fish to sound pressure level(畠山良己, 1996)

역치부근의 측정회수가 많고 안정된 반응을 확인할 수 있으므로 일반적으로 ③이 많이 쓰인다(畠山良己, 1996).

## 4. 계측의 이론

### 4.1 계측의 정의

계측이란 인간의 능력과 계측기기의 성능을 조합해서 공학적인 정보를 정확하게 수집하여 분석하는 행위이다. 이를 다시 말하면 이론과 기법, 통찰과 경험, 측정기술과 기기를 조합해서 공학적인 문제해결에 필요한 정량적, 정성적인 정보를 얻는 행위를 말한다. 그리고 계측기를 통하여 측정된 자료를 검토하여 정량적인 판단기준을 제시하며, 계측결과와 분석을 통해서 건설구조물의 특성과 연관성을 파악하고, 구조물의 현 상태 및 발생 가능성 문제를 관측 및 예측하는 행위를 의미한다.

측정과 계측의 용어 차이점을 보면 측정(Measurement)은 계량 및 측정법령집의 총칙에서 거래 또는 증명 외에 과학기술분야에서 물상상태의 량을 결정하기 위한 조작이라고 정의하고 있고, 측정기(Measuring device, equipment, apparatus, instrument)는 측정을 하기 위한 기계 및 기구 또는 장치로 규정하고 있다. 따라서 측정은 상태량을 기준량과 비교하여 수치화하는 가장 기본적인 단계로 이해할 수 있다.

반면에 계측(Monitoring)은 측정량을 공학적 응용이 가능한 아날로그나 디지털 량으로 변화시켜 각종 신호처리를 하고 신속한 정보처리를 통하여 수요자에게 생산적인 정보를 제공하는 수단으로 이해할 수 있다(한국구조물진단학회, 2006).

### 4.2 계측용어

계측은 정의에서와 같이 단순히 측정뿐만이 아니라 측정된 데이터를 처리하고 분석하는 작업까지를 포함한다. 즉, 측정된 데이터의 오차범위를 이해하고, 실험결과를 분석하는 작업까지를 포함한다. 이는 다시 말하면 측정된 데이터의 오차범위를 이해하고, 실험결과를 분석하여 공학적 원리나 유용한 자료로 가공하기 위한 신호처리 등의 실험적 기법에 대한 이해를 필요로 한다(한국구조물진단학회, 2006).

### 4.2.1 오차와 불확실성(Error and uncertainty)

계측에 있어서 우선적으로 오차에 대한 이해가 필요하며, 무엇을 측정한다는 것은 참값(True value)을 얻기 위하여 이와 근사한 측정값(Measured value)을 얻는 작업이며, 모든 측정값에는 필연적으로 오차가 수반된다. 그러므로 오차(Error)는 참값과 측정값의 차이의 절대 값으로 정의되며, 참값은 영원히 알 수 없는 값이므로 엄밀히 말해서 정확한 오차는 알 수 없다(한국구조물진단학회, 2006).

### 4.2.2 감도(Sensitivity)

감도란 입력되는 물리량의 변화에 대하여 계측기의 출력 값의 변화량을 나타내는 것으로 계측기가 얼마나 민감하게 반응하는가를 표시한다. 감도가 좋은 계측기란 적은 물리량의 변화에도 출력 값이 크게 변화하는 것으로서 정밀한 측정에 유리하고, 감도가 낮은 계측기는 큰 변화에 대하여 작은 출력변화를 보이는 것으로 정밀한 측정은 어려우나 넓은 범위의 측정에 유리하다.

감도는 계측기의 입력 및 출력 반응곡선에서 곡선의 기울기를 의미한다. 입력 값에 따라서 곡선의 기울기가 변화하는 경우도 있으나, 가급적 전 측정범위에 걸쳐서 선형적인 출력 신호를 내도록 하는 것이 바람직하다(한국구조물진단학회, 2006)

### 4.2.3 보정(Calibration)

계측기의 보정 또는 교정은 주어진 입력 량의 변화에 따른 계측기의 출력량과의 관계를 구하여 측정오차를 줄이고 계측기를 검증하는 작업을 의미한다. 보정을 위해서는 상호 비교하기 위한 비교대상이 필요한데, 보통 오차의 범위가 알려져 있는 표준계측기를 사용한다. 표준계측기의 보정을 위해서는 궁극적으로는 그 물리량이 어떻게 정의되었느냐 하는 문제에까지 도달하게 된다. 예를 들어 온도계를 보정하기 위해서는 이미 보정되어 있는 표준온도계를 사용해야 되고 이 표준온도계는 이 보다 더욱 정확한 표준온도계로 보정되어야 한다. 결국 온도가 어떻게 정의되어 있는가 하는 것까지 이해가 필요하다.

보정 곡선치가 선형적 관계로 주어지는 경우, 원점과 기울기만 제대로 설정해 주면 된다. Figure 4.1에서와 같이 원점이 영점에서 벗어나 있는 것을 영점오차(Zero offset)라

하고, 기울기가 원래의 기울기에서 벗어나서 발생하는 오차를 스패오차(Span error)라고 한다(한국구조물진단학회, 2006)

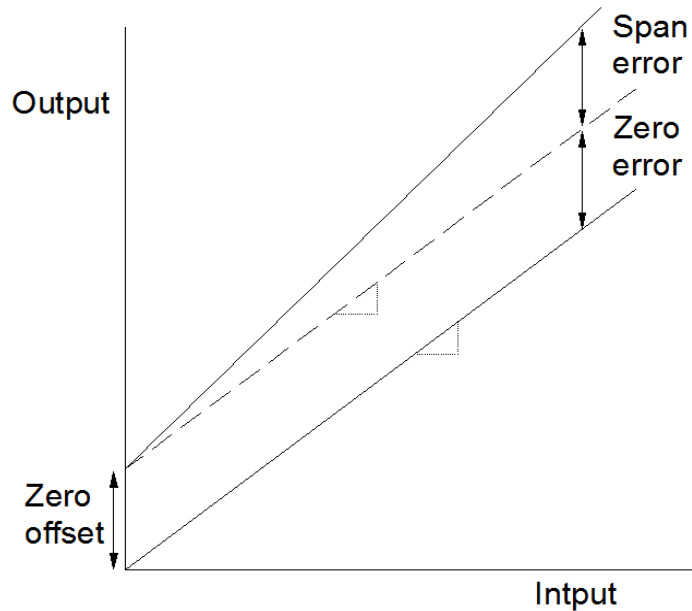


Figure 4.1 Zero offset and span error

#### 4.2.4 음압레벨 보정기(Sound Level Calibrator)

음향 탐측자에 의한 음압 측정 시 음향 탐측자에서 출력되는 전압과 음압 레벨을 연관 짓기 위한 보정이 필요하며, 이 때 사용되는 장치들을 음압 레벨 보정기라 한다. 그 예로는 기준음원(reference sound source), 피스톤 폰(piston phone) 등이 있다(한국소음진동공학회, 2002).

Figure 4.2는 현장에서 보정기를 사용하여 보정하는 그림이다. 그러나 국내의 수중소음 계측기 관련 논문이나 보고서에서 보정기(calibrator)를 이용하여 보정을 했다는 사례를 본적이 없다.



Figure 4.2 Calibration in the Field(California Department of Transportation, 2009)

### 4.3 실험 측정기 사양

#### 4.3.1 수중소음계

수중소음 측정을 위한 수중소음계 세트는 음압을 감지하는 Hydrophone(TC 4013)과 감지한 음압을 받아 증폭시켜주는 증폭기(EC 6067)와 증폭시킨 정보를 받아 외부로 출력시켜주는 DATA Logger(P 8004)로 구성되어 있다. 아래 Figure 4.3은 수중소음계의 구성도이다. 그리고 Table 4.1은 하이드로폰, Table 4.2는 증폭기, Table 4.3은 DATA Logger의 특성이다.

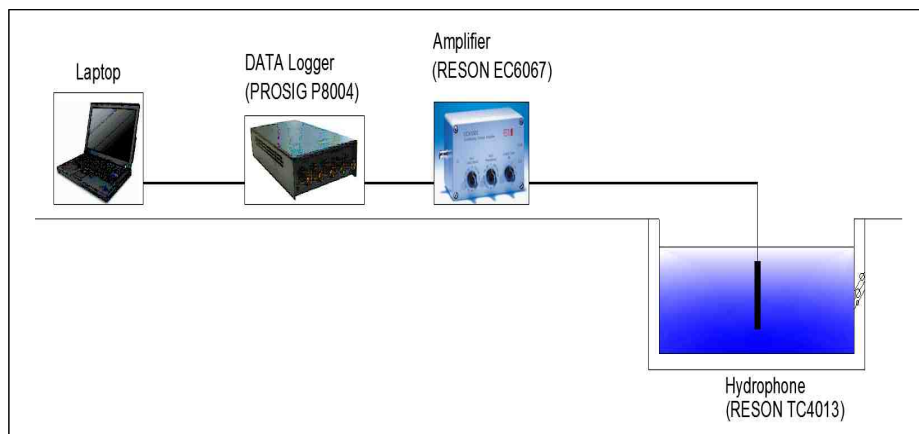


Figure 4.3 Overview of underwater noise measurement system

Table 4.1 Specifications of hydrophone (RESON-TC4013)


	<p>The TC4013 offers a usable frequency range of 1 Hz to 170 kHz and a high sensitivity relative to its size. It further-more provides uniform omnidirectional sensitivities in both horizontal and vertical planes up to high frequencies. The TC 4013 is an excellent transducer for making absolute sound measurements and calibrations within a broad frequency range.</p>
Technical specifications	
Usable frequency range	1 Hz to 170 kHz
Receiving sensitivity	-211 dB $\pm$ 3 dB re 1 V/ $\mu$ Pa
Transmitting sensitivity	130 dB $\pm$ 3 dB re 1 $\mu$ Pa/V at 1 m at 100 kHz
Horizontal directivity pattern	Omnidirectional $\pm$ 2 dB at 100 kHz
Vertical directivity pattern	270° $\pm$ 3 dB at 100 kHz
Nominal capacitance	3.4 nF
Operating depth	700 m
Survival depth	1000 m
Operating temperature range	-2°C to +80°C
Storage temperature range	-40°C to +80°C
Weight (in air)	75g



Table 4.2 Specifications of Amplifier (RESON-EC 6067)



	<p>The CCA 1000 is a compact low-noise conditioning charge amplifier designed for use with piezoelectric hydrophones and other piezoelectric detectors.</p> <p>The CCA 1000 enables the uses of long cables between hydrophone and amplifier without affecting the hydrophone sensitivity.</p>
<p>Technical specifications</p>	
<p>Input</p>	
<p>Impedance max</p>	<p>1 GOhm</p>
<p>Max input at(unity gain)</p>	<p>2 Vp</p>
<p>Estimating Input gain</p>	<p>dB = 20 log Ctr/Cin</p>
<p>Input capacitance selector</p>	<p>12 steps : 22 pF to 10 nF</p>
<p>Input resistance selector</p>	<p>12 steps: 3.3 kohm to 1 GOhm</p>
<p>Output</p>	
<p>Output gain settings 6 steps</p>	<p>0, 6, 12, 20, 26, 32 dB</p>
<p>Signal output, max</p>	<p>2 Vp</p>
<p>Output impedance</p>	<p>20 ohm</p>
<p>DC off-set</p>	<p>0</p>
<p>Bandwidth</p>	
<p>Operating - 3 dB frequency range at 20 dB gain</p>	<p>1 Hz to 1 MHz</p>
<p>Noise</p>	
<p>Input termination</p>	<p>1 nF to GND</p>
<p>Output noise with selector settings</p>	
<p>1 nF/1 GOhm/0 dB</p>	<p>2 to 4 <math>\mu</math>Vrms/A</p>
<p>10 nF/1 GOhm/20 dB</p>	<p>8 to 10 <math>\mu</math>Vrms/A</p>
<p>1 nF/1 GOhm/20 dB</p>	<p>14 to 20 <math>\mu</math>Vrms/A</p>
<p>100 pF/1 GOhm/20 dB</p>	<p>80 to 110 <math>\mu</math>Vrms/A</p>


Table 4.3 Specifications of DATA logger (PROSIG-P 8004)

	<p>The Prosig P 8004 is an ultra portable, high quality, 24-bit data acquisition system. It is compact, rugged and has 4 analog inputs plus a dedicated tacho input. Input is via industry standard BNC connectors. Internally there is comprehensive signal conditioning for voltage or ICP with programmable amplifiers, anti-alias filters and transducer power, all controlled by the Prosig DATS or ESP software.</p>
Technical specifications	
System	
Analog inputs	4 channels plus tacho input
Maximum sampling rate	100 k samples/s per channel (24 bit)
	400 k samples/s per channel (16 bit)
Tacho input and external trigger	Programmable $\pm 28$ V
Programmability	All features under software control
Resolutio	24 bit
Overall accuracy	$\pm 0.10$ % full scale
Non-linearity	Less than 1 LSB
Input voltage range	$\pm 10$ mV to $\pm 10$ V
Signal conditioning	
Signal inputs	Direct voltage
	IEPE with TEDS
Anti-alias protection	$> 100$ dB
Auto zero	Signal auto zero and amplifier auto zero
DC offset control	$\pm 50$ % full scale range in 32768 steps
Dynamic range	105 dB
Noise floor	-120 dB

### 4.3.2 발파진동 측정기

발파진동 측정기는 변위, 진동속도, 진동가속도, 주파수, 소음레벨을 모두 측정할 수 있는 Canada Instantel사의 BlastMate III를 사용하였으며, 국내에서 발파진동 측정 시 대부분 이 장비를 사용하고 있으며 신뢰도 또한 높은 편이다. Table 4.4는 BlastMate III의 특성이다.

Table 4.4 Specifications of BlastMate III

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Model : BlastMate III</li> <li>• Type : Blast noise and vibration meter</li> <li>• Country of manufacture : Canada</li> <li>• Manufacturing company : Instantel</li> </ul>
Technical specifications	
Seismic	
Range	10 in/s (254 mm/s).
Resolution	0.005 in/s (0.127 mm/s), to 0.000625 in/s (0.0159 mm/s) with built.in preamp.
Trigger levels	0.005 to 10 in/s (0.127 to 254 mm/s) in steps of 0.001 in/s (0.01 mm).
Frequency analysis	National and Local Standards for all countries (see text).
Accuracy	3% at 15 Hz.
Acceleration, Displacement	Calculated using entire waveform, not estimated at peak.
Air linear	
Range	88-148 dB, $7.25 \times 10^{-5}$ psi to 0.0725 psi, 0.5 Pa to 500 Pa.
Resolution	0.1 dB above 120 dB (0.25 Pa).
Trigger levels	100.148 dB in 1 dB steps.
Accuracy	0.2 dB at 30 Hertz and 127 dB.
A. Weight (optional)	
Range	50 to 110 dB in steps of 0.1 dB. (Impulse Response – 35 milliseconds)
Sampling rate	Standard 1024 samples per second per channel to 16,384 (8,192 for 8 channel).

### 4.3.3 진동레벨 측정기

소음·진동 측정기는 환경부 형식 승인 된 장비 중 국내에서 판매가 많이 된 국산인 (주)홍림 교역의 HLVS-04, 에스브이(주)사의 Real Wave와 일본 RION사의 제품 VM-53A를 선정하여 본 연구에 사용하였으며, 제품사양은 Table 4.5, Table 4.6, Table 4.7과 같다

Table 4.5 Specifications of HLVS-04(Hong Lim company)

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Model : HLVS-04</li> <li>• Type : Blast/environmental vibration &amp; noise measurement</li> <li>• Country of manufacture : korea</li> <li>• Manufacturing company : Hong Lim</li> </ul>
Technical specifications	
Vibration	
Measurement frequency range	1 Hz to 90 Hz
Measurement level range	40 dB(V) to 120 dB(V)
Processing functions	L 5, L 10, L 50, L 90, L 95, L <sub>max</sub> , L <sub>min</sub> , L <sub>eq</sub> 3-axis can be selected.
Sound	
Measurement frequency range	10 Hz to 20 KHz
Measurement level range	30 dB(A) to 130 dB(A)
Processing functions	L 5, L 10, L 50, L 90, L 95, L <sub>max</sub> , L <sub>min</sub> , L <sub>eq</sub>
Common	
Measurement time	1 s, 2 s, 3 s, 10 s, 1 min, 1 hr, 24 hr
Dimensions / Weight	160mm × 180mm × 40mm / 3 kg

Table 4.6 Specifications of Real Wave(SV company)



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Model : Real Wave</li> <li>• Type : Blast/environmental vibration &amp; noise measurement</li> <li>• Country of manufacture : korea</li> <li>• Manufacturing company : SV</li> </ul>
Technical specifications	
Measurement results	Instantaneous, $L_{eq}$ , $L_{max}$ , $L_{min}$
Statistic vibration level	L5, L10, L50, L90, L95
Vibration frequency range	1 Hz to 80 Hz
Measuring range	35 dB to 120 dB
Sound frequency range	30 dB to 130 dBA
Sound frequency range	20 Hz to 16 KHz
Dynamic range	more than 90 dB
Measuring time	1 s, 2 s, 3 s, 5 s, 10 s, 1 min, 5 min, 30 min, 1 hr, 8 hr, 1 day, User definable set up
Vibration trigger level	Set up with 1 dB step from 45 dB
Measuring mode	Manual, single, continuous

Table 4.7 Specifications of VM-53A(RION company)

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Model : VM-53A</li> <li>• Type : Environmental vibration measurement</li> <li>• Country of manufacture : Japan</li> <li>• Manufacturing company : RION</li> </ul>
Technical specifications	
Applicable standard	Weight and measure act(vibration level meters)
Measurement functions	$L_v$ , $L_{va}$ , maximum value hold of vibration level or vibration acceleration level
Processing functions	$L_{veq}$ or $L_{vaeq}$ , $L_5$ , $L_{10}$ , $L_{50}$ , $L_{90}$ , $L_{95}$ , $L_{max}$ , $L_{min}$
Measurement frequency range	Vibration level 1 to 80 Hz, Vibration acceleration level 1 to 80 Hz
Measurement level range	Vibration level $L_v$ -Z 25 to 120 dB, $L_v$ -X, Y 30 to 120 dB Vibration acceleration level $L_{va}$ 30 to 120 dB (0 dB = $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ )
Residual noise	$L_v$ -Z 19 dB max. $L_v$ -X, Y 24 dB max. $L_{va}$ 24 dB max. (0 dB = $10^{-5} \text{ m/s}^2$ )
Frequency compensation	Vertical characteristics according to weight and measure act or JIS, horizontal characteristics according to JIS, planar characteristics according to JIS
Level range	10 dB steps, 6 ranges switchable, 3-axis independent 10 to 70, 20 to 80, 30 to 90, 40 to 100, 50 to 110, 60 to 120 dB
Linearity range	70 dB
RMS detection circuit	Digital processing dynamic characteristics : 0.63 s
Sampling cycle	78 $\mu\text{s}$ (power average, $L_{max}$ , $L_{min}$ , max. hold) 100 ms ( $L_x$ ) 5 seconds for measurement time 500 s

## 5. 현장 실험

### 5.1 측정장소 개요

이 연구에서 지반진동과 수중측정을 실시한 장소는 전남 화순군에 위치하는 도로건설 현장이다. 수조(fishing water tank)는 현장과 약 200 m에서 300 m 정도 이격되어 있어 발파진동과 수중소음 등에 관한 연구에 적합하다고 판단하였다. 해당 구조물은 일반철골구조로서 건축물의 주요 현황은 Table 5.1 과 같다.

Table 5.1 Overview of the building for experimental study

Category	Contents
Land location	Jeollanam-do Hwasun
Main use	Indoor fishing place
Total floor area	862.42 m <sup>2</sup>
Building area size	862.42 m <sup>2</sup>
Floor No.	1 F
Main structure	Steel construction
Roof	Sandwich panel
Height	9.25 m
Completion date	March 7th, 2008

## 5.2 연구지역의 지형 및 지질

### 5.2.1 지형

이 연구 지역은 행정구역상 전남 화순군 화순읍 앵남리 일원으로, 광주 도곡에 해당한다. 화순군 일대는 남동우 저지대 산계에 속하며 대부분 표고 50 m이하의 농경지와 표고 100 m이하의 구릉이 대부분을 이룬다. 이러한 저지대는 주라기 흑운모화강암류로 되어 있으며 조립질로 구성되어 풍화에 대한 저항도가 낮은 편이다. 하계는 소백산맥과 노령산맥에 의한 평야에서 이들과 평행하게 NE-SW 방향으로 흐르는 영산강이 가장 두드러진 수계로 영산강은 북서쪽으로 황룡강 평동천의 지류를 남동쪽으로는 지석천(드들강)과 광주천 등의 지류를 합류시키고 있다. 이중 황룡강은 북서우의 노령산맥의 구성체인 화강암질 편마암을 가로질러 북쪽으로 뻗는다. 그리고 평동천은 중서부의 전담에 관개수로 역할을 하고 있다. 지석천은 영산강 본류보다 더 넓으며 남평부에서 소백산맥의 남쪽 구성체인 유문암질 암류를 횡단하여 동쪽으로 뻗는다. 이들은 산맥의 방향에 대체로 일치되고 있다.

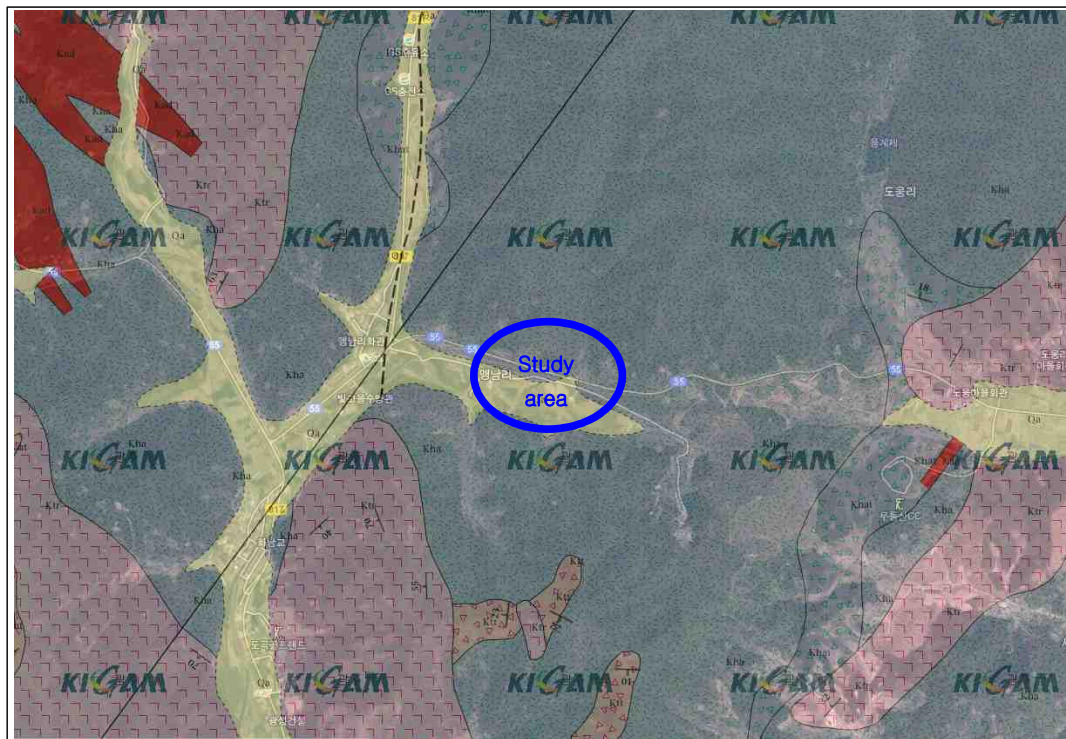
### 5.2.2 지질

이 연구 지역은 백악기의 화순 안산암층이 넓게 분포하고 있으며, 국부적으로 백악기의 도곡 유문암층이 자리하고 있다. 화순 안산암은 주라기 화강암류 이전의 암체를 대부분 부정합으로 피복하고 있으며, 암체는 안산암질 응회암, 안산암질 lava 및 안산암질 관입암으로 구성되어 있다. 본 암은 대부분 안산암질 lava들로 되어 있으며 하부에 안산암질 응회암을 소량 함유하고 있다.

안산암질 응회암은 녹회색 혹은 자갈색을 띤다. 안산암질 lava는 여러 매의 lava로 된 복합체로서 암녹색 내지 암회색을 띤고 풍화된 곳에서는 갈색 내지 적갈색을 띤다. 이들은 대부분 비반상이며 이 중에서 행인상인 것이 있고, 또한 반상인 것도 있다. 안산암질 관입체는 암녹색을 띤고 반정을 이체 가지지 않아 비반상이며 행인도 눈에 띄지 않는다. 그러나 관입안산암은 경하에서 분류안산암보다 Lath상의 사장석 결정들의 크기가 크고 균등함이 특징적이다. 그리고 사장석 Lath들은 방해석으로 보다 많이 변질되어 있다.



도곡 유문암은 성층 응회암을 하위에 두면서 화순 안산암 상위에 부정합으로 피복하고 화순 안산암을 여러 곳에서 관입하고 있다. 경하에서 본 유문암 중 lava에서 홍색대는 은정질 내지 유리질이고 백색대는 미정질로서 주로 석영들이 결정화되어 있다. 그리고 본암은 사장석, 흑운모, Magnetite, Rutile들이 드물게 함유된다. 성층 응회암은 층리를 발달시키며 다소 분급이 되어 점이층리를 보여준다. 이는 조립질 응회암 내지 라필리 응회암에 속하여 홍색의 유문암편, 담록색의 Pumice, 다갈색의 안산암편을 함유한다.



Stratigraphic	Geological eras	Strata / Representative rock
Qa	Quaternary period of cenozoic era	Alluvial layer / Soil, sand, gravel
Kha	Cretaceous period of mesozoic era	Hwasun andesite / Hwasun andesite
Khat		Hwasun andesite / Andesite tuff
Ktr		Dogok rhyolite / Dogok rhyolite

Figure 5.1 Geological map of study area

### 5.3 측정기의 종류

지반진동과 수중소음의 상호 연관성을 확인하기 위하여 속도계(BlastMate III), 환경진동계(Real Wave, VM-53A, HLVS-04), 수중소음계(TC-4013 set) 등의 측정장비를 사용하여 콘크리트 수조 내부에서 수중소음을 측정하였으며, 수조 콘크리트 바닥에서는 속도계와 진동레벨계로 동시에 측정하였다. 또한 수조 외부 토양지반에서 속도계와 진동레벨계로 측정을 실시하였다. 계측 위치는 될 수 있는 한 고정된 위치에서 실시하였으며, 수조 내부에서 hydrophone sensor는 수심 약 1 m에서 2 m 정도에 설치하여 측정하였다.

수중소음 측정을 위한 수중소음계 세트는 음압을 감지하는 hydrophone(TC4013)과 감지한 음압을 받아 증폭시켜주는 증폭기(EC6067)와 증폭시킨 정보를 받아 외부로 출력시켜주는 DATA Logger(P8004)로 구성되어 있다. Table 5.2는 본 연구에 사용한 지반진동과 수중소음 측정 장비의 종류를 설명한 것이다.

Table 5.2 Equipments for vibration and noise measurement

Category	Measuring equipment	Unit
Blast vibration meter	BlastMate III	mm/s
Environmental vibration measurement	VM 53-A	dB(V)
	HLVS-04	dB(V)
	RealWave	dB(V)
Underwater noise measurement	TC4013	dB re 1 $\mu$ Pa

### 5.4 측정장소의 제원과 측정방법

실제 발파 작업이 진행 중인 현장과 수조 소유주의 협조를 받아서 발파 작업 시 발파진동과 수중소음을 계측하여 상관성을 도출하고 물고기의 반응을 관찰(육안)하기 위한 실험을 실시하였다. 발파 작업이 진행 중인 현장의 특성상 작업환경 여건에 따른 지발당 장약량으로 발파 작업 시 진동과 수중소음에 대한 자료(data)를 확보하였다. Table 5.3은

발파진동과 수중소음 측정 장소의 제원이다.

Table 5.3 Description of measurement conditions

Sort	Condition
· Study area	· Jeollanam-do Hwasun
· Geological features	· Hwasun andesite
· Blast location	· Road opening
· Explosive/detonator	· Emulsion type / MS detonator
· Charge per delay range	· 1.0 kg to 6.0 kg
· Underwater noise measurement distance range	· 215 m to 291 m
· Distance between underwater noise measurement point and ground vibration measurement point	· 3 m to 10 m
· Underwater noise measurement depth	· 1 m to 2 m

Figure 5.2, 5.3은 발파진동과 수중소음 측정점(수조)의 모식도이다.

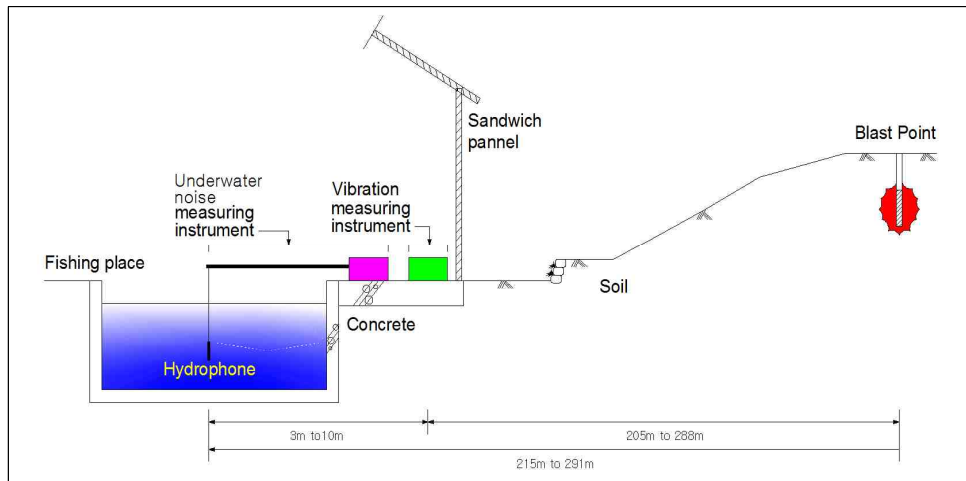


Figure 5.2 Schematic of blasting vibration and underwater noise measurements

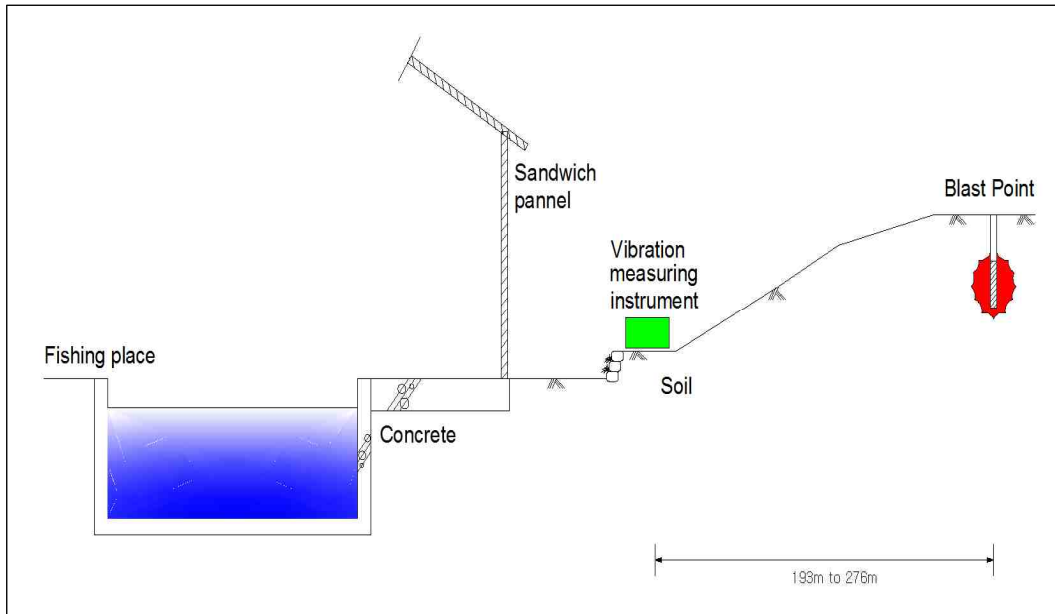


Figure 5.3 Schematic of blasting vibration measurement in soil ground

Figure 5.4는 수조 외부 지반에서 측정을 실시하는 그림이다. 그리고 Figure 5.5는 수조에서 발파진동, 진동레벨, 수중소음을 측정하는 그림이다.



Figure 5.4 View of measuring blasting vibration in soil ground



Figure 5.5 View of measuring blasting vibration and underwater noise in fishing water tank

## 5.5 실험결과

### 5.5.1 수조의 계측결과

Table 5.4는 발파에 의한 콘크리트지반에서의 발파진동(속도계, 레벨계)과 수조 내부의 수중소음을 측정 한 결과이다.

Table 5.4 Measurement results of blasting vibration and Underwater noise in fishing water tank

No.	Weight (kg/delay)	Distance (m)	Ground		Underwater		
			PPV (cm/s)	VL (dB(V))	SP (Pa)	L <sub>peak</sub> (dB re 1 μPa)	L <sub>max</sub> (dB re 1 μPa)
1	3	242	0.043	55.5	129.560	162.249	159.239
2	1.5	246	0.024	50.8	125.241	161.955	158.945
3	1.5	233	0.029	49.8	42.190	152.504	149.494
4	2	229	0.037	50.3	41.193	152.296	149.286
5	1.5	227	0.029	51.0	39.200	151.866	148.855
6	2	260	0.030	51.3	39.865	152.012	149.002
7	3	260	0.059	56.9	117.269	161.384	158.373
8	3	260	0.075	59.8	96.672	159.706	156.696
9	3	260	0.076	60.0	115.607	161.260	158.249
10	3	260	0.054	57.0	120.591	161.626	158.616
11	3	264	0.056	57.2	110.624	160.877	157.867
12	1	288	0.027	46.5	65.777	156.361	153.351
13	1	288	0.019	47.2	64.448	156.184	153.174
14	2	288	0.030	48.4	107.302	160.612	157.602
15	1	288	0.019	47.5	80.726	158.140	155.130
16	3	288	0.033	50.5	79.065	157.960	154.949
17	3	288	0.044	55.6	86.041	158.694	155.684
18	1.5	288	0.025	50.7	59.133	155.437	152.426
19	4	228	0.071	59.8	51.492	154.235	151.224
20	3	232	0.049	55.3	50.163	154.008	150.997

Table 5.4 Continued

No.	Weight (kg/delay)	Distance (m)	Ground		Underwater		
			PPV (cm/s)	VL (dB(V))	SP (Pa)	L <sub>peak</sub> (dB re 1 μPa)	L <sub>max</sub> (dB re 1 μPa)
21	3	232	0.043	53.4	44.516	152.970	149.960
22	2.5	232	0.035	52.0	41.526	152.366	149.356
23	3	230	0.044	54.9	47.838	153.595	150.585
24	4	228	0.086	54.6	41.858	152.436	149.425
25	6	230	0.083	57.2	64.780	156.229	153.219
26	3	230	0.048	56.7	56.475	155.037	152.027
27	3	232	0.062	59.2	61.126	155.725	152.714
28	1.5	234	0.027	52.4	56.475	155.037	152.027
29	1.5	230	0.032	50.3	53.153	154.511	151.500
30	1.5	230	0.041	53.9	61.126	155.725	152.714
31	1.5	232	0.038	52.0	86.706	158.761	155.751
32	3	232	0.048	55.3	75.078	157.510	154.500
33	2	234	0.038	49.9	52.488	154.401	151.391
34	2	234	0.029	51.0	93.350	159.402	156.392
35	1.5	230	0.025	46.7	68.434	156.705	153.695
36	4	230	0.051	55.2	105.974	160.504	157.494
37	5	212	0.083	54.6	159.791	164.071	161.061
38	5	212	0.059	54.4	159.126	164.035	161.025
39	3	215	0.033	52.4	101.323	160.114	157.104
40	3	205	0.054	55.4	135.872	162.663	159.652
41	2.5	207	0.030	52.7	158.130	163.980	160.970
42	2.5	209	0.032	53.4	151.153	163.588	160.578
43	2.5	205	0.032	54.0	160.123	164.089	161.079

Figure 5.6은 No. 12, No. 13, No. 36, 그리고 No. 40에서 측정된 수중소음의 파형의 예이다.

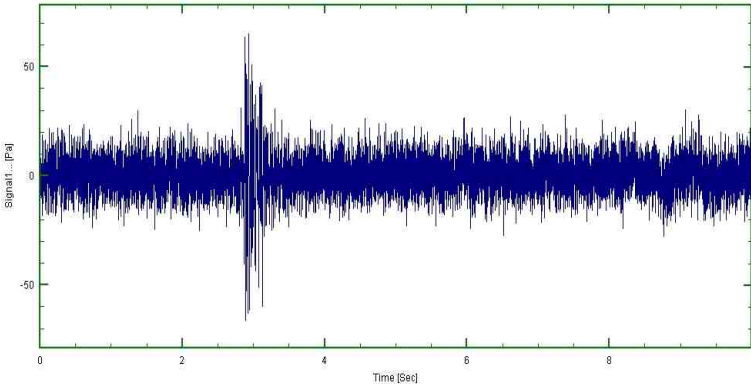
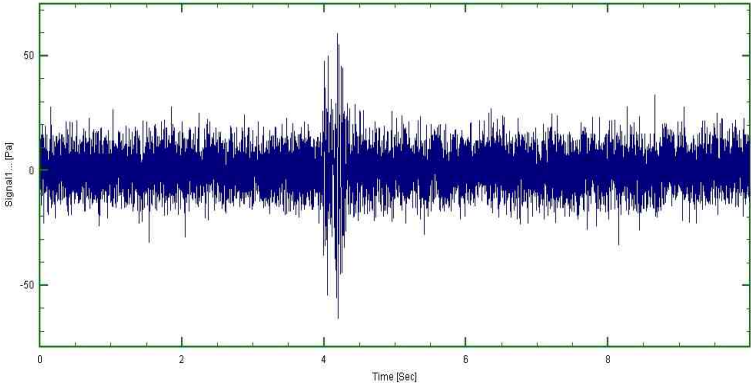
Underwater noise		
No. 12	Measurement waveform	
	Measurement value	SP : 65.777 Pa
No. 13	Measurement waveform	
	Measurement value	SP : 64.448 Pa

Figure 5.6 Waveform and peak sound pressure level for measurement No. 12, No. 13, No. 36, and No. 40



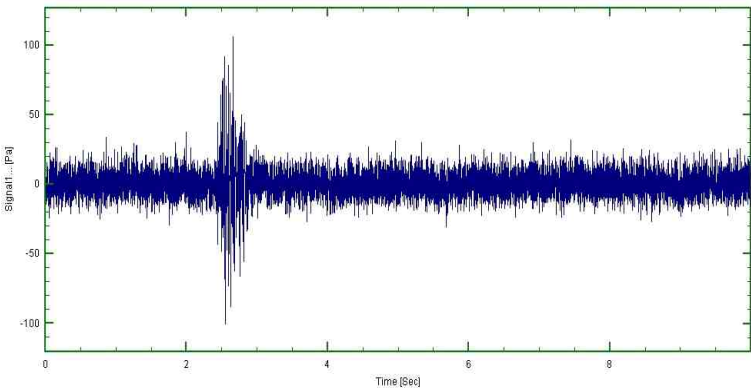
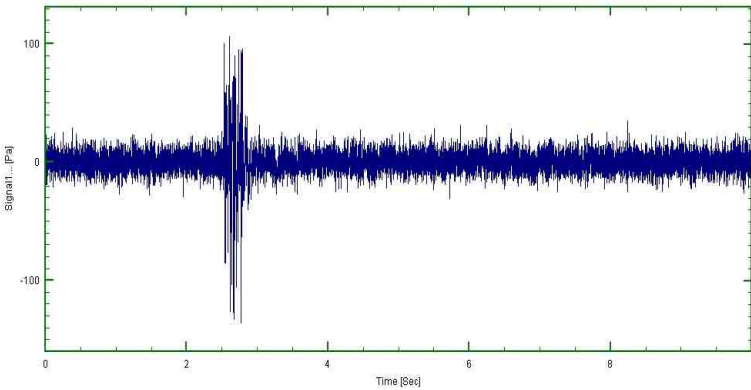
Underwater noise		
No. 36	Measurement waveform	
	Measurement value	SP : 105.974 Pa
No. 40	Measurement waveform	
	Measurement value	SP : 135.872 Pa

Figure 5.6 Continued

Figure 5.7은 No. 12, No. 13, No. 36, 그리고 No. 40에서 계측된 지반진동의 파형의 예이다.

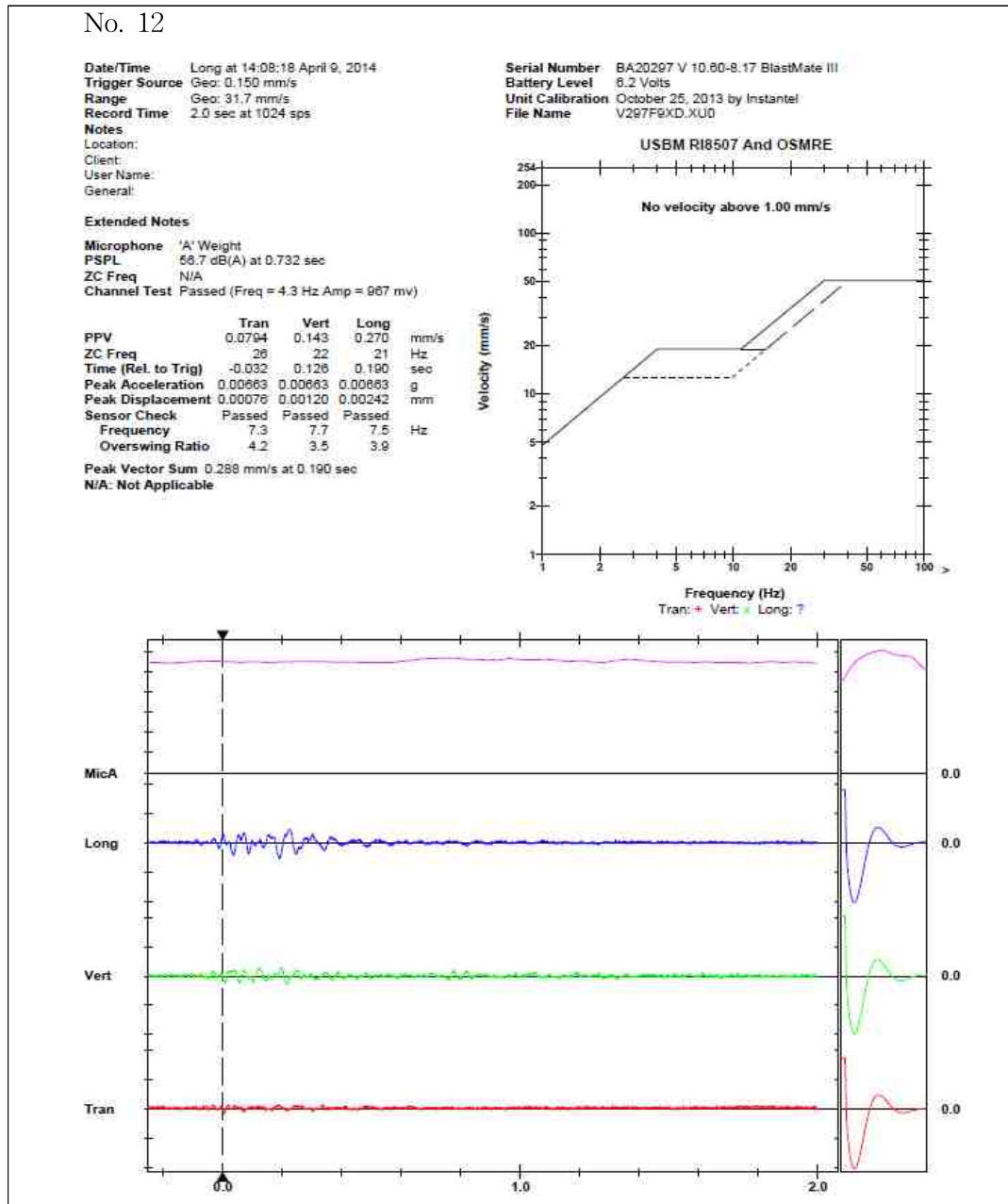


Figure 5.7 Waveform and peak particle velocity for measurement No. 12, No. 13, No. 36, and No. 40

No. 13

Date/Time Vert at 14:13:34 April 9, 2014  
 Trigger Source Geo: 0.150 mm/s  
 Range Geo: 31.7 mm/s  
 Record Time 2.0 sec at 1024 sps  
 Notes  
 Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

Serial Number BA20297 V 10.60-8.17 BlastMate III  
 Battery Level 8.2 Volts  
 Unit Calibration October 25, 2013 by InstanTel  
 File Name V297F9XE.BMD

Extended Notes

Microphone 'A' Weight  
 PSPL 57.4 dB(A) at 0.687 sec  
 ZC Freq N/A  
 Channel Test Passed (Freq = 4.3 Hz Amp = 967 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.0952	0.190	0.159	mm/s
ZC Freq	57	24	32	Hz
Time (Rel. to Trig)	-0.002	0.076	0.134	sec
Peak Acceleration	0.00683	0.00497	0.00497	g
Peak Displacement	0.00041	0.00128	0.00071	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.7	7.5	Hz
Overswing Ratio	4.2	3.5	3.9	

Peak Vector Sum 0.209 mm/s at 0.081 sec  
 N/A: Not Applicable

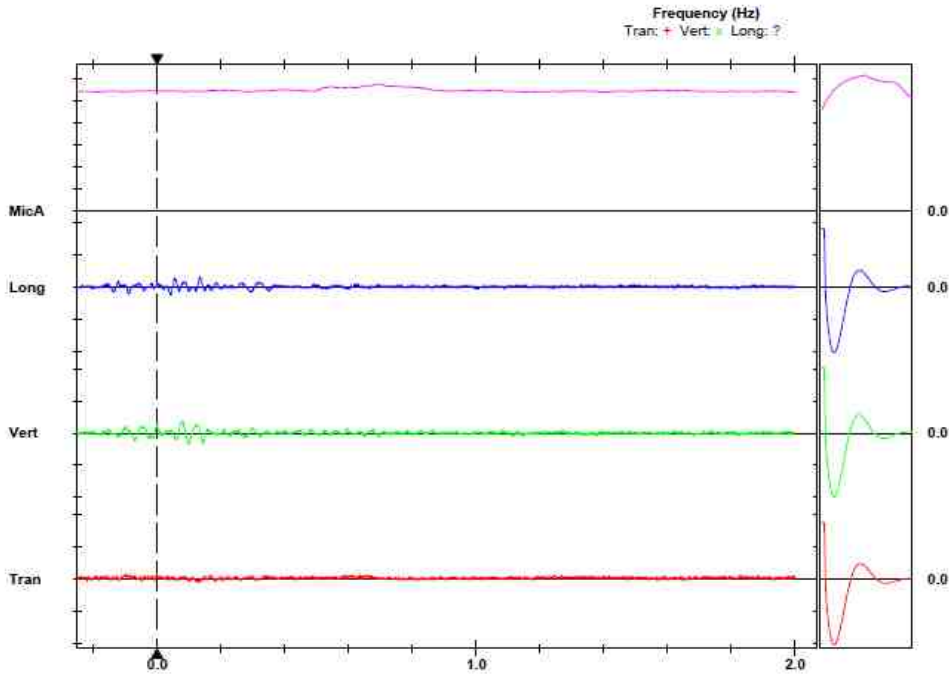
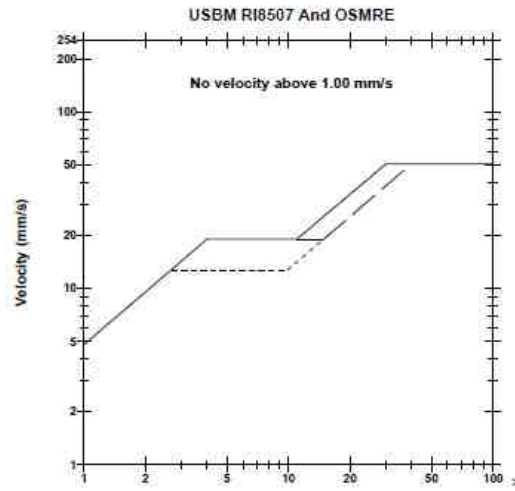


Figure 5.7 Continued

No. 36

**Date/Time** Vert at 15:25:17 April 30, 2014  
**Trigger Source** Geo: 0.150 mm/s  
**Range** Geo: 31.7 mm/s  
**Record Time** 1.0 sec at 1024 sps  
**Notes**  
 Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Serial Number** BA20297 V 10.60-8.17 BlastMate III  
**Battery Level** 8.3 Volts  
**Unit Calibration** October 25, 2013 by InstanTel  
**File Name** V297FB0D.I50

**Extended Notes**

**Microphone** 'A' Weight  
**PSPL** 57.5 dB(A) at 0.769 sec  
**ZC Freq** N/A  
**Channel Test** Passed (Freq = 4.3 Hz Amp = 973 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.159	0.508	0.333	mm/s
ZC Freq	18	32	17	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.367	0.090	0.259	sec
Peak Acceleration	0.00497	0.0149	0.00829	g
Peak Displacement	0.00143	0.00305	0.00300	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.4	7.8	7.6	Hz
Overswing Ratio	4.2	3.5	3.9	

**Peak Vector Sum** 0.511 mm/s at 0.090 sec  
 N/A: Not Applicable

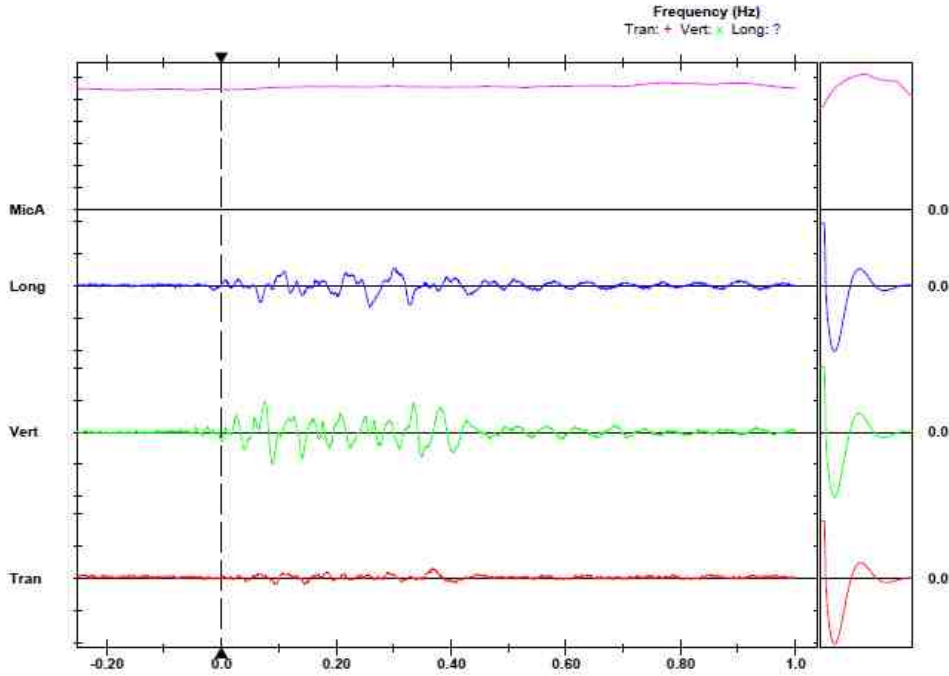
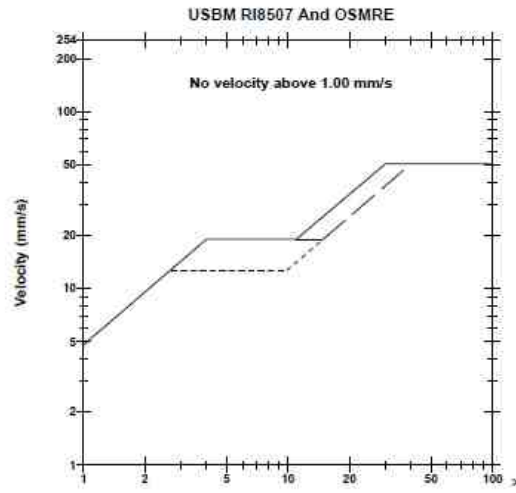


Figure 5.7 Continued

No. 40

**Date/Time** Long at 11:40:31 May 9, 2014  
**Trigger Source** Geo: 0.150 mm/s  
**Range** Geo: 31.7 mm/s  
**Record Time** 1.0 sec at 1024 sps

**Serial Number** BA20297 V 10.60-8.17 BlastMate III  
**Battery Level** 8.2 Volts  
**Unit Calibration** October 25, 2013 by Instante!l  
**File Name** V297FBGR.3J0

**Notes**  
 Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Extended Notes**

**Microphone** 'A' Weight  
**PSPL** 61.1 dB(A) at -0.076 sec  
**ZC Freq** N/A  
**Channel Test** Passed (Freq = 4.3 Hz Amp = 984 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.180	0.365	0.540	mm/s
ZC Freq	18	22	16	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.055	0.159	0.072	sec
Peak Acceleration	0.00963	0.00994	0.0116	g
Peak Displacement	0.00160	0.00257	0.00580	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.8	7.6	Hz
Overswing Ratio	4.1	3.5	3.9	

Peak Vector Sum 0.824 mm/s at 0.153 sec  
 N/A: Not Applicable

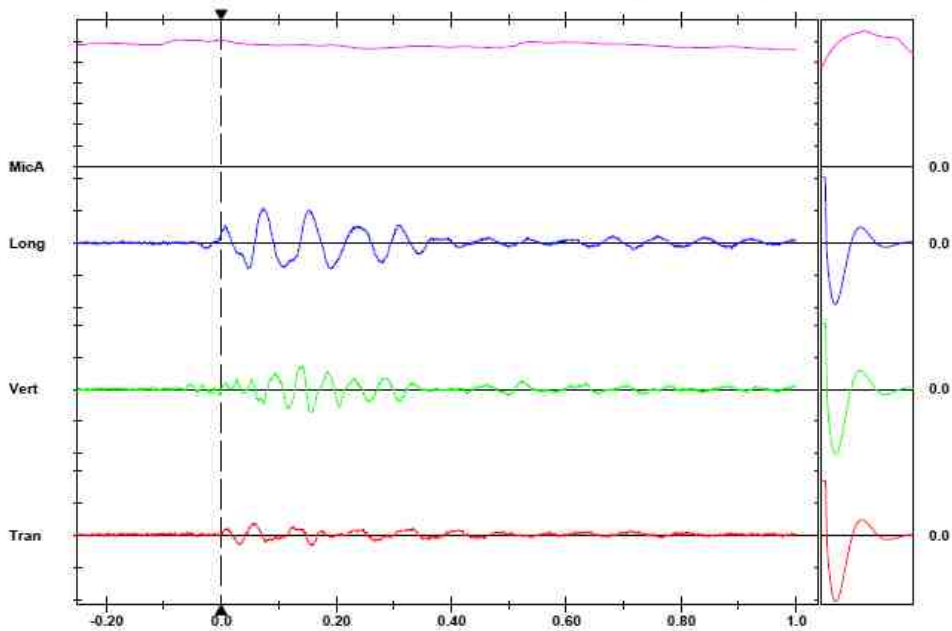
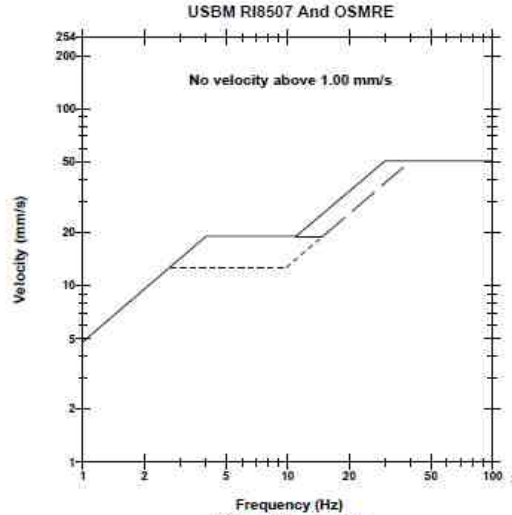


Figure 5.7 Continued

Figure 5.8은 No. 12, No. 13, No. 36, 그리고 No. 40에서 계측된 진동레벨계의 파형의 예이다.

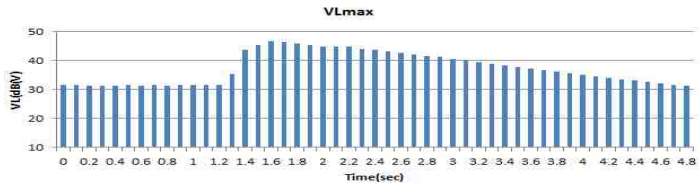
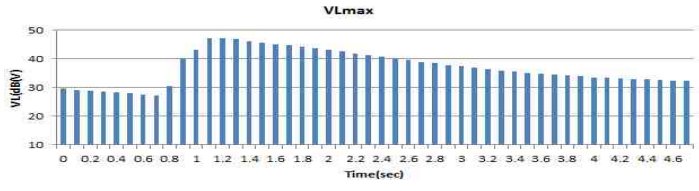
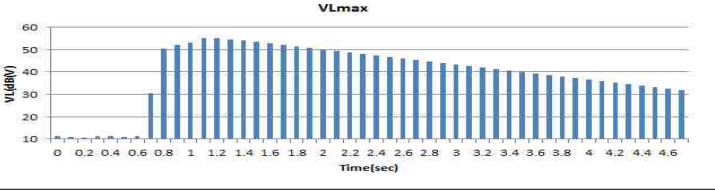
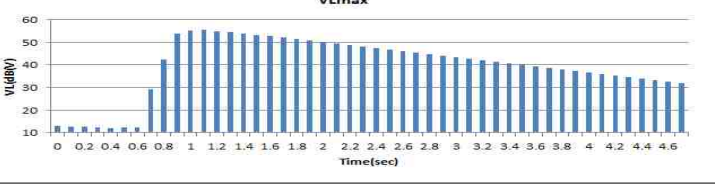
Blasting vibration level		
No. 12	Histogram	
	Measurement value	46.5 dB(V)
No. 13	Histogram	
	Measurement value	47.2 dB(V)
No. 36	Histogram	
	Measurement value	55.2 dB(V)
No. 40	Histogram	
	Measurement value	55.4 dB(V)

Figure 5.8 Histogram and vibration level(VLmax) for measurement No. 12, No. 13, No. 36, and No. 40

## 5.5.2 수조 외부의 계측결과

Table 5.5는 발파에 의한 토양 지반에서의 진동(속도계, 레벨계) 측정 결과이다. 수조 외부 레벨계의 일부 자료가 계측되지 않은 것은 계측기의 최소트리거 레벨이 45 dB(V)이기 때문에 그 이하는 계측되지 않았다.

Table 5.5 Measurement results of blasting vibration in soil ground

No.	Weight (kgdelay)	Distance (m)	PPV (cm/s)	VL (dB(V))
1	3	230	0.106	-
2	1.5	234	0.032	-
3	1.5	221	0.059	-
4	2	217	0.052	-
5	1.5	215	0.041	-
6	2	248	0.041	53.15
7	3	248	0.038	54.87
8	3	248	0.056	56.6
9	3	248	0.068	56.46
10	3	248	0.070	55.87
11	3	252	0.060	57.55
12	1	276	0.030	-
13	1	276	0.037	-
14	2	276	0.048	-
15	1	276	0.049	-
16	3	276	0.048	-
17	3	276	0.048	-
18	1.5	276	0.032	-
19	4	216	0.124	53.2
20	3	220	0.108	51.66

Table 5.5 Continued

No.	Weight (kgdelay)	Distance (m)	PPV (cm/s)	VL (dB(V))
21	3	220	0.059	47.03
22	2.5	220	0.056	50.27
23	3	218	0.065	-
24	4	216	0.079	-
25	6	218	0.098	-
26	3	218	0.067	-
27	3	220	0.081	-
28	1.5	222	0.065	-
29	1.5	218	0.038	49.95
30	1.5	218	0.056	54.04
31	1.5	220	0.089	59.88
32	3	220	0.106	59.05
33	2	222	0.040	52.14
34	2	222	0.057	54.93
35	1.5	218	0.041	52.11
36	4	218	0.087	61.04
37	5	200	0.087	61.94
38	5	200	0.081	62.82
39	3	203	0.054	62.88
40	3	193	0.089	55.72
41	2.5	195	0.083	56.25
42	2.5	197	0.067	56.46
43	2.5	193	0.057	57.54



### 5.5.3 주주파수 특성

시간 영역 파형분석에서는 시간에 따라 변화하는 진동속도가 주요한 관심사이다. 그러나 주파수 분석에서는 진폭이 가장 큰 파형의 주파수 대역을 찾는 데 있다. 이를 수행하기 위하여 시간영역에서의 파형을 주파수영역으로 변환시키는 푸리에 변환을 사용한다. 어류의 청각역치는 어종에 따라 주파수별 수중소음의 수준이 매우 다양하고 상이한 값으로 나타난다. 즉 저주파수 대역에서 청각역치의 반응을 나타내는 어종이 있는 반면 고주파수 대역에서 반응을 보이는 어종이 있기도 하다. 이 연구에서는 수중소음의 주파수와 콘크리트 지반 속도계의 주주파수 특성을 비교 분석하였다. 분석한 결과 속도계와 수중소음의 주주파수가 다소 상이하게 나타나고 있음이 확인되었다.

콘크리트 지반에서 속도계의 주주파수는 12.3 Hz에서 38.0 Hz로 나타났고, 수중소음의 주주파수는 23.44 Hz에서 46.87 Hz로 나타났다. 수중소음의 주주파수가 속도계의 주주파수 보다 상대적으로 높았다.

Figure 5.9는 No. 12, No. 13, No. 36, 그리고 No. 40에서 계측된 수중소음의 주주파수 파형의 예이다.

Underwater noise			
No. 12	Dominant frequency		39.06 Hz
No. 13	Dominant frequency		39.06 Hz
No. 36	Dominant frequency		39.06 Hz
No. 40	Dominant frequency		23.44 Hz

Figure 5.9 Waveform and dominant frequency for measurement No. 12, No. 13, No. 36, and No. 40

Figure 5.10은 No. 12, No. 13, No. 36, 그리고 No. 40에서 계측된 지반진동 주파수 파형의 예이다.

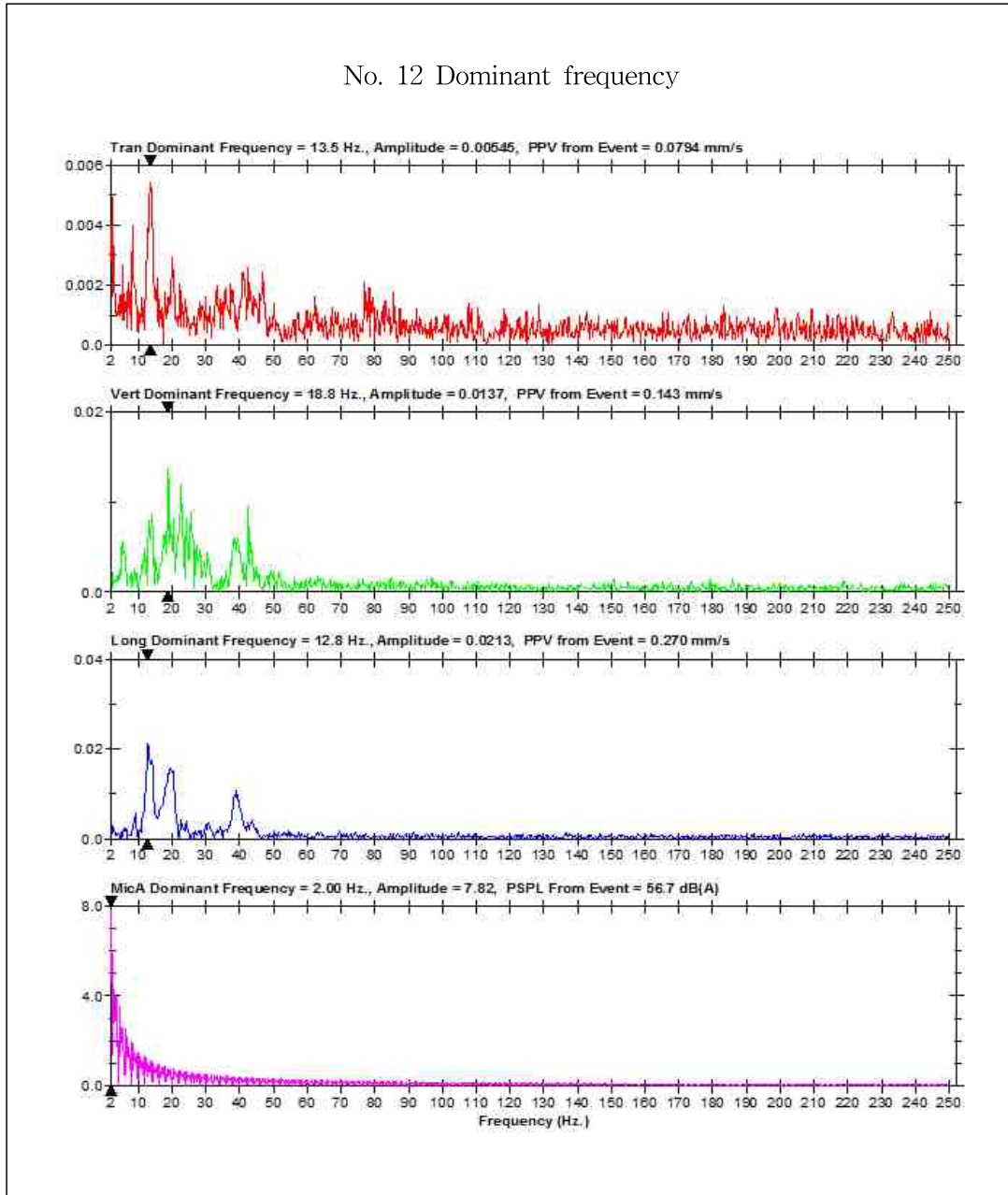


Figure 5.10 Waveform and dominant frequency for the blasting vibration measurement(No. 12, No. 13, No. 36, and No. 40)

No. 13 Dominant frequency

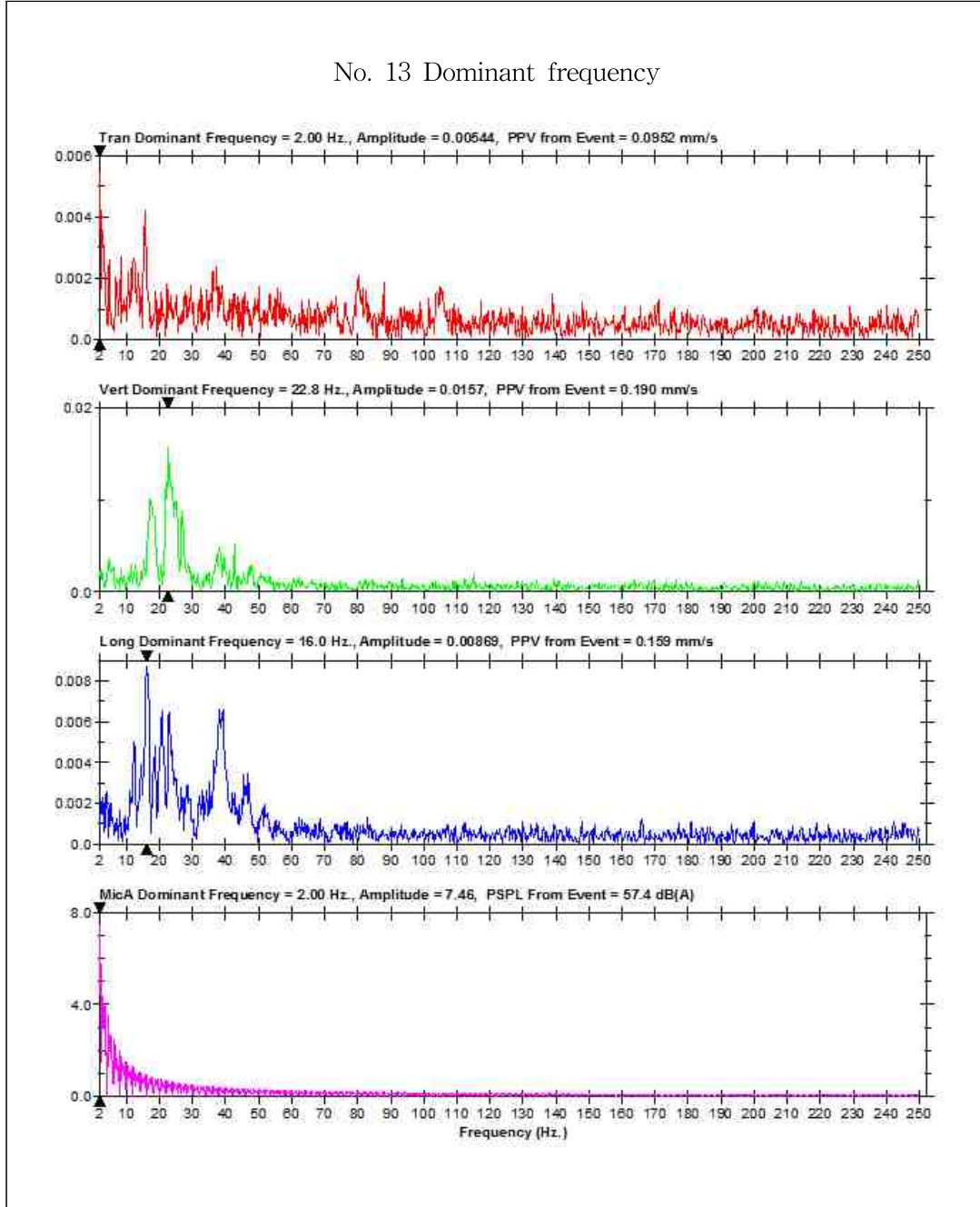


Figure 5.10 Continued

No. 36 Dominant frequency

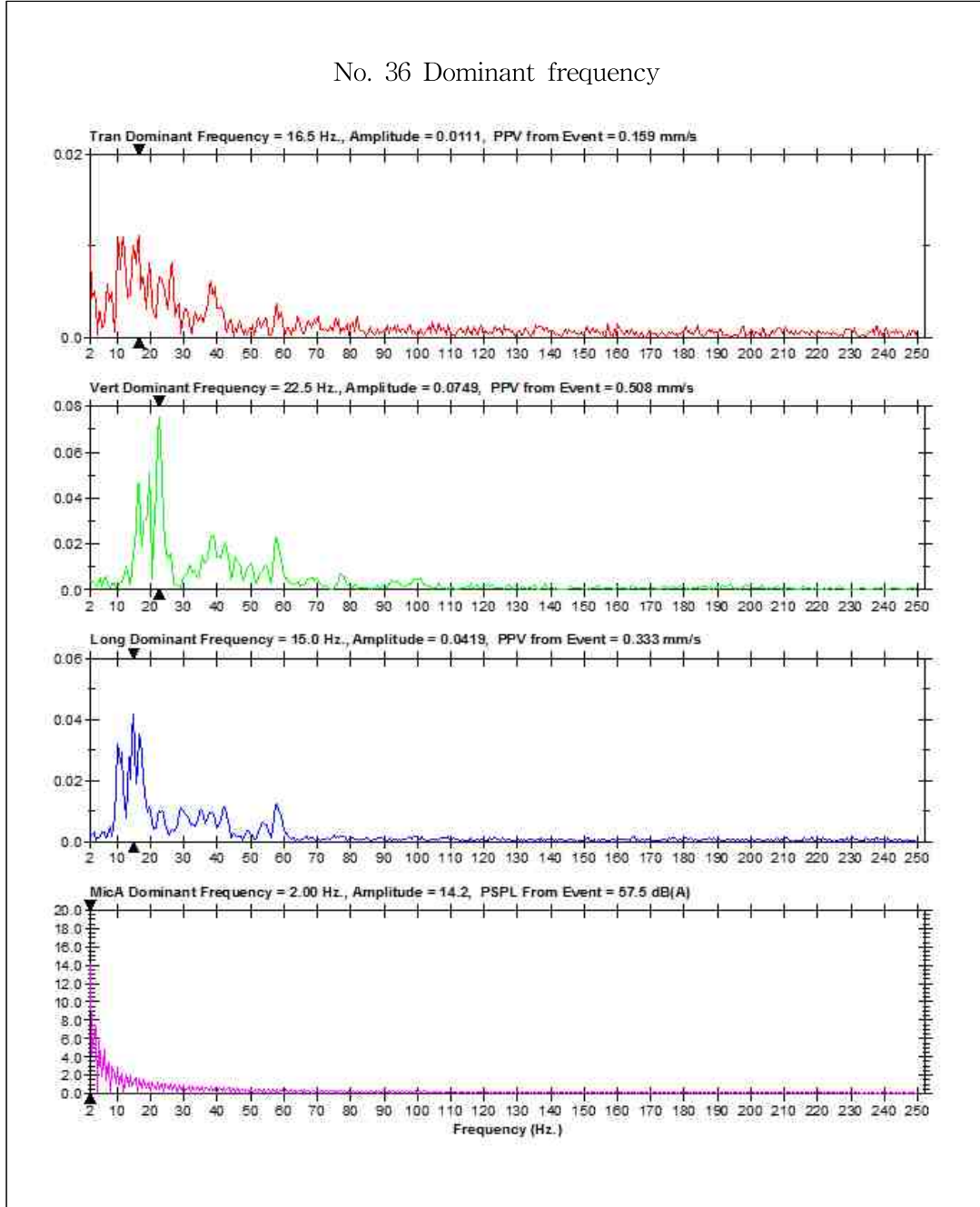


Figure 5.10 Continued

No. 40 Dominant frequency

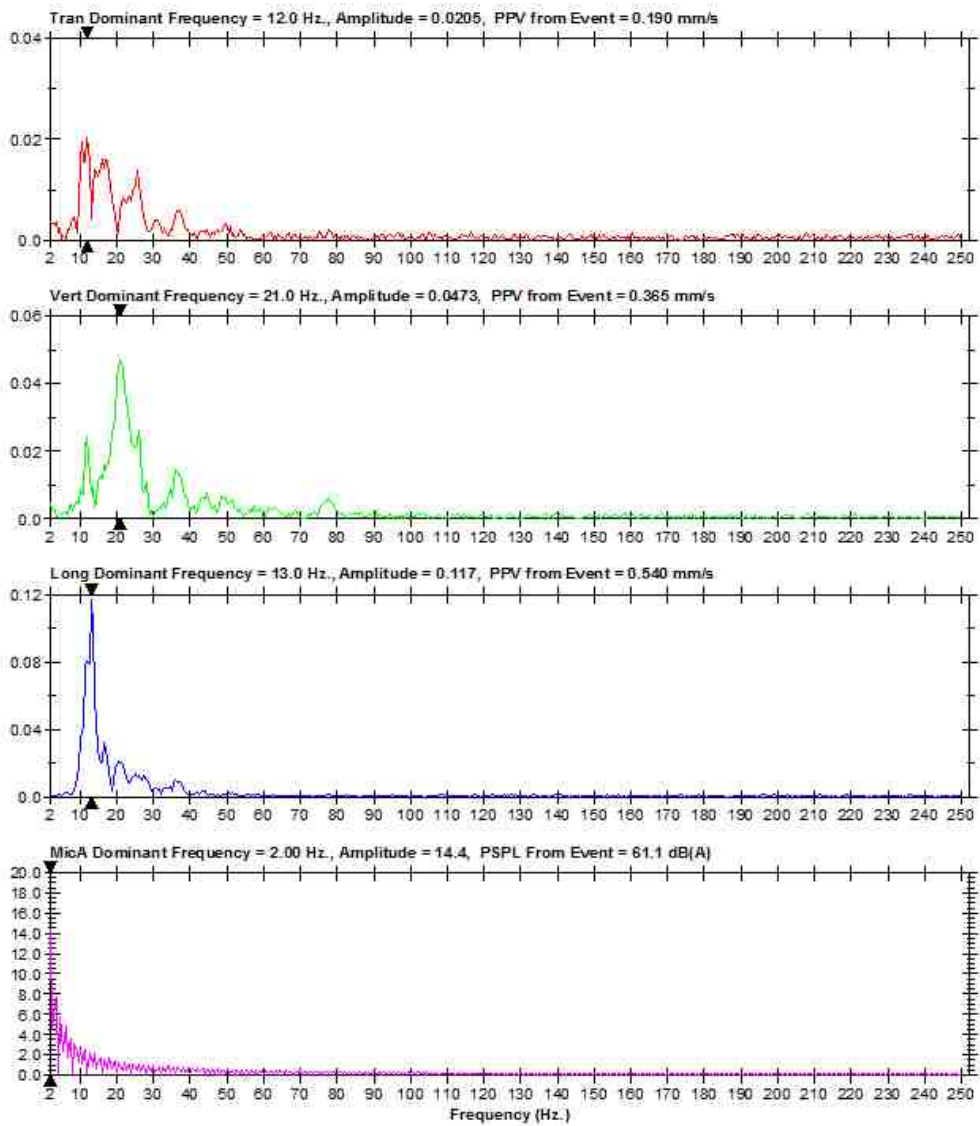


Figure 5.10 Continued

## 5.6 진동레벨 측정기 비교

이 연구에서는 환경부 형식승인 장비 중 국내에서 발파진동 계측 시 주로 사용하는 진동레벨계 중 일본 RION社의 VM-53A와 (주)홍림교역의 GreenMate(HLVS-04), (주)에스브이의 Real Wave 제품을 사용하여 발파진동계측을 할 때 민원과 관련하여 발생할 수 있는 문제점을 제시해 보고자 한다.

### 5.6.1 발파진동 계측

이 연구 지역의 노천발파 시 수조 내부에서 진동레벨 측정기(Real Wave, VM-53A, HLVS-04)로 측정을 실시하였다. Figure 5.11은 발파진동 측정 현장 모습으로 측정 장비를 동일 조건의 선상에 두고 계측을 실시하였다. Table 5.6은 현장에서 발파를 하였을 때 비슷한 위치에서 측정을 실시한 결과이다.

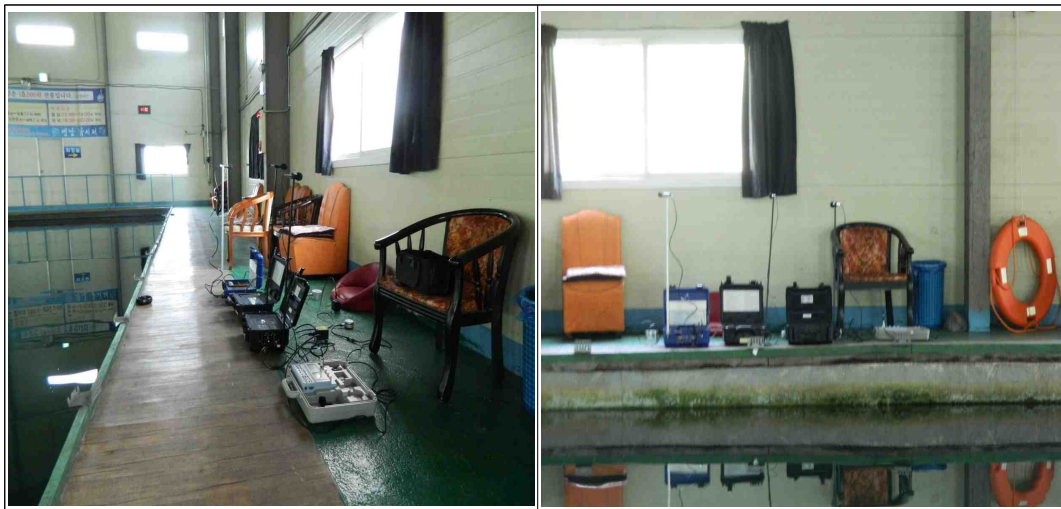


Figure 5.11 View of measuring blasting vibration level in fishing water tank

Table 5.6 Measurement results of blasting vibration levels by three types of environmental vibration meters

No.	A company	B company	C company
	$L_{\max}$ (dB(V))	$L_{\max}$ (dB(V))	$L_{\max}$ (dB(V))
1	58.52	55.4	54.4
2	55.26	52.7	51.5
3	53.99	50.3	49.2
4	52.27	48.6	46.2
5	50.82	48.9	47.1
6	58.40	55.3	53.9
7	56.93	53.4	50.8
8	56.94	54.0	53.3
9	57.18	52.9	52.1
10	61.60	58.0	55.8

### 5.6.2 발파 진동레벨(VL, $L_{\max}$ ) 분석

Table 5.6은 수조에서 비슷한 조건의 환경진동계로 발파 진동 측정을 10회 실시한 자료이다. Figure 5.12은 측정기 별로 발파횟수와 진동레벨을 그림으로 비교한 것이다. 발파 회수 별로 각각의 장비의 최대·최소 값의 차이는 B사를 기준으로 할 때 A사는 1.9 dB에서 4.3 dB, C사는 -0.7 dB에서 -2.6 dB의 차이를 보였다. 일반적으로 계측 작업 시 같은 계열의 장비로 동일조건 계측 시 장비에 측정된 값이 다소 차이를 보이므로 계측된 자료에는 크게 문제될 것이 없을 것으로 생각된다. 하지만 10회 차의 결과만 가지고 본다면 A사 계측기는 60 dB(V)를 초과하고, B사와 C사 계측기는 60 dB(V) 미만이다. 이는 전남대학교 수산과학연구소(2012)의 피해기준으로 본다면 피해를 인정해야하는 경우가 될 것이다. 이렇게 피해기준 부근에 형성된 발파 진동에서는 결과 값이 민감하게 작용 할 여지가 있다.



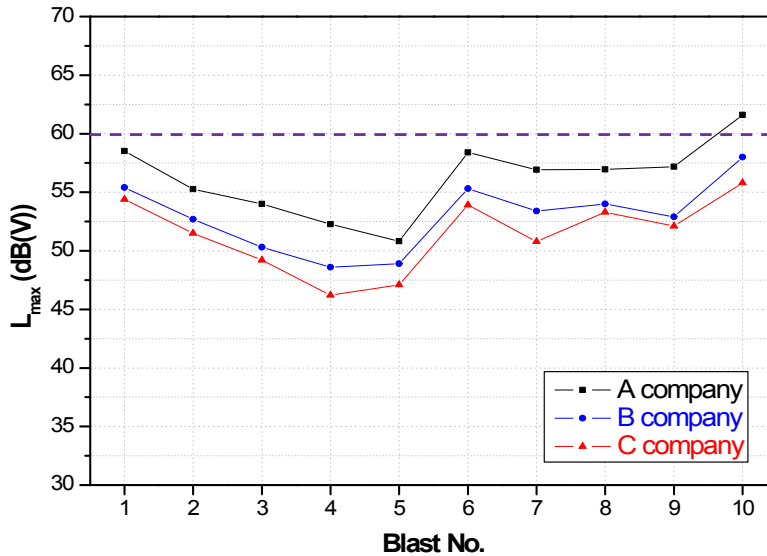


Figure 5.12 Comparison of vibration level measured with three kinds of environmental vibration meters

### 5.6.3 배경 진동레벨 계측

진동 측정 위치에서 발파 종료 후 5분 동안 배경진동을 계측하여, 각 제조사별 장비의 특성을 살펴보았다. 측정값의 오차를 줄이기 위해 5회에 걸쳐 배경진동을 계측하였다. Table 5.7은 진동레벨계의 배경진동  $L_{10}$ (dB(V)) 결과 값이다.

Table 5.7 Measurement results of ambient vibration levels measured by three types of environmental vibration meters

No.	A company	B company	C company
	$L_{10}$ (dB(V))	$L_{10}$ (dB(V))	$L_{10}$ (dB(V))
1	35.83	22.4	28.5
2	35.99	22.7	28.5
3	37.58	20.1	27.9
4	37.94	21.1	28.0
5	39.04	22.9	28.5

### 5.6.4 배경 진동레벨(VL, L<sub>10</sub>) 분석

Table 5.7은 수조 내부에서 발파 종료 후 동일 장소에서 배경진동을 계측하였다. Figure 5.13는 계측기 별로 측정 횟수와 배경 진동레벨을 그림으로 비교한 것이다.

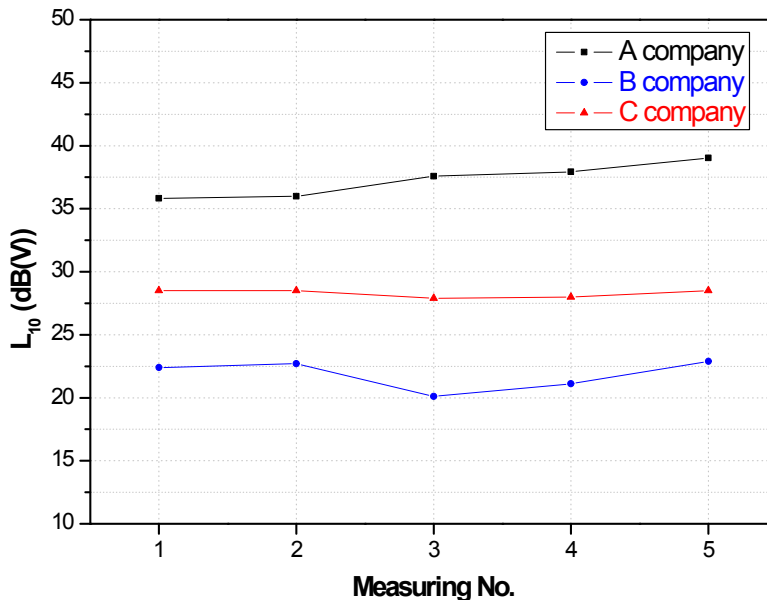


Figure 5.13 Comparison of ambient vibration measured with three kinds of environmental vibration meters

측정방법은 동일 지반에 1열로 놓고 같은 시간대에 계측하여 값의 차이 여부를 확인해 보았다. 각 장비별 배경진동의 평균값은 37.3 dB(V), 21.8 dB(V), 28.3 dB(V)로 B사를 기준으로 할 때 A사는 15.4 dB(V), C사는 6.4d B(V)의 차이를 보였다.

물론 소음·진동 공정시험기준(환경부, 2010)에서 사용하는 진동레벨계는 ‘환경측정기기의 형식승인·정도검사 등에 관한 고시 중 진동레벨계의 구조·성능 세부기준에 의한 진동레벨계 또는 동등 이상의 성능을 가진 것이어야 한다.’고 명시되어 있으며, 환경측정기기의 형식승인 정도검사 등에 관한 고시의 소음·진동분야(환경부, 2013)에 ‘진동레벨을 45 dB(V)에서 120 dB(V)로 하여 진동레벨 범위를 측정한다.’고 명시되어 있다. 이는 환경부 형식승인 장비는 45 dB(V)에서 120 dB(V)의 범위를 계측할 수 있는 능력을 갖추었으며, 이 연구에 사용한 장비 또한 형식승인을 받은 상태라 장비의 선택에는 문제가

없었을 것으로 판단된다.

그러나 실제 민원인과 시공사, 감독기관이 현장에서 계측을 할 경우 진동측정 값은 다소 차이가 있을 수 있다는 것은 상식적으로도 수긍하지만, 배경진동 측정 시 그 값의 차이가 10 dB(V)이상 차이가 난다면 결과 값에 만족할 민원인은 없을 것으로 보인다. 이 연구자는 민원 현장에서 관공서 환경공무원과 함께 측정한 배경진동이 20 dB(V)정도 차이가 나는 경험을 하기도 했다. 당연히 민원인으로부터 측정 장비의 신뢰도에 의심을 받았다.

한편 발파진동 측정 시 배경진동 값은 5분 이상 측정하여 자동연산 기록한 80% 범위의 상단치인  $L_{10}$ 을 사용하는데 이때 Table 5.7의 1회 배경진동 계측 값처럼 계측 시간 중에 배경진동 외의 기타 진동이 있을 경우  $L_{max}$  값은 각각 51.39 dB(V), 50.1 dB(V), 49.3 dB(V)로 나오나  $L_{10}$ 은 5분 측정값의 80% 범위 상단 차이므로 35.8 dB(V), 22.4 dB(V), 28.5 dB(V)로 나오게 된다. 이때의  $L_{max}$  값은 Table 5.6의 발파진동 측정값과 유사하여 이미 발파진동 이외에 주변의 진동에 의해 영향을 받았을 수 있다는 점이다. 특히 도심지를 벗어난 농어촌 등에 위치한 양식장의 주변에서 농기계를 사용하거나 도로변에 대형 트럭이 통과할 때 시공사에서 이를 인지하지 못할 경우 민원인에게는 발파진동으로 인한 피해로 오인될 수 있어 생각해 볼 문제이다.

## 6. 실험결과의 고찰 및 분석

### 6.1 지반진동과 수중소음 결과 분석

이 연구는 육상에 있는 어류 양어장 주변에서 발파를 할 때, 수중소음 측정 장비가 없거나, 다른 이유로 측정 장비를 양식장(수중)에서 측정을 못할 여건일 때, 진동레벨 측정기를 이용해서 발파진동레벨로부터 수중소음을 추정함으로써 차후 분쟁의 소지를 줄일 수 있는 근거를 마련하는데 목적이 있다.

진동레벨을 측정해서 수중소음의 상관식에 적용하여 구한 수중소음 예측 값은 실제 발파의 실측값과는 다소 차이를 보일 수 있다. 진동레벨은 V특성에 의해 주파수 보정이 되었으므로 현장 여건이 비슷하지 않으면 적합하지 않을 수도 있을 것이다. 그러므로 최상의 방법은 수중소음을 실측하는 것이다.

즉, 일반적으로 동일한 위치에서 동일한 지발당 장약량으로 여러 차례에 걸쳐 실시한 발파의 경우에도 동일한 측정 장비로 측정된 진동 값이 자유면의 상태, 절리, 발파효과 등 여러 가지 요인에 의한 변수의 작용으로 각각의 회차 별로 기록을 갖는 상이한 값으로 나타나는 것과 동일한 현상이다.

더욱이 수중소음도의 경우 일반 대기 중의 공중소음도와 동일한 기준으로 평가되는 것이 아닐 뿐만 아니라 전파 및 측정 메커니즘도 상이하다. 아울러 수중소음도는 수중 생물체의 생명유지를 위한 양식장 장비 또는 장치의 가동여부에 따라 매우 큰 값의 변화 폭을 갖기도 한다.

또한 수중소음 예측식(상관식)은 모든 검측자료의 평균적(50%) 중심점의 곡선에 의한 것이므로 평균값이라는 점에 주목할 필요가 있다.

#### 6.1.1 수조의 내부 결과 분석

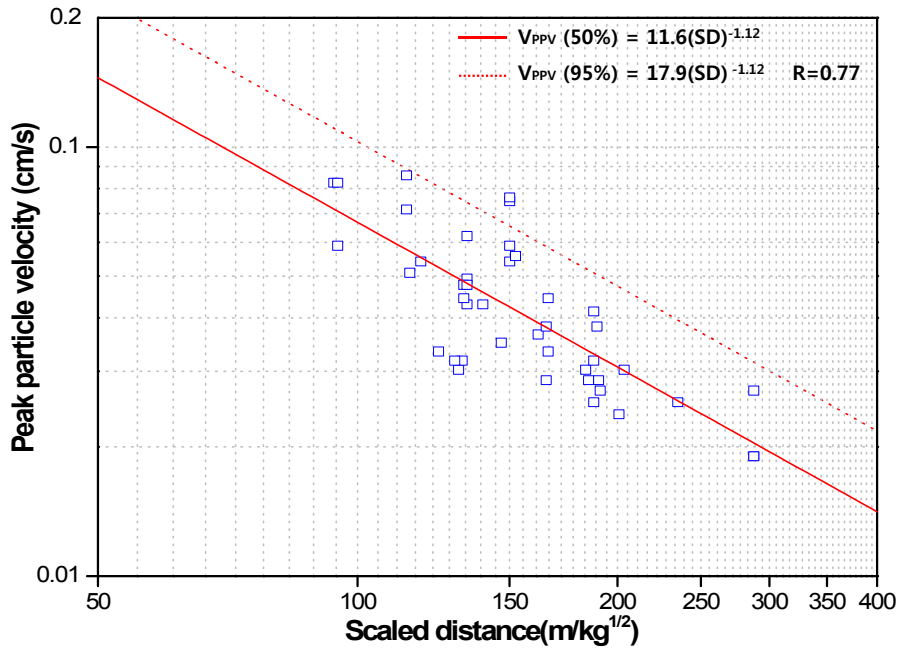
수조 콘크리트 지반에서의 속도계, 진동레벨계, 수조 내부 수중소음 측정 결과에 따른 회귀분석을 실시하였으며, 측정자료는 총 43개다.

회귀분석에서 상관도 낮은 것은 지발당 장약량을 1지발만 사용한 것이 아니고, 일부는 2 혹은 3지발까지 사용하였다. 그리고 일부에서는 발파 시 지질적 영향으로 가스압

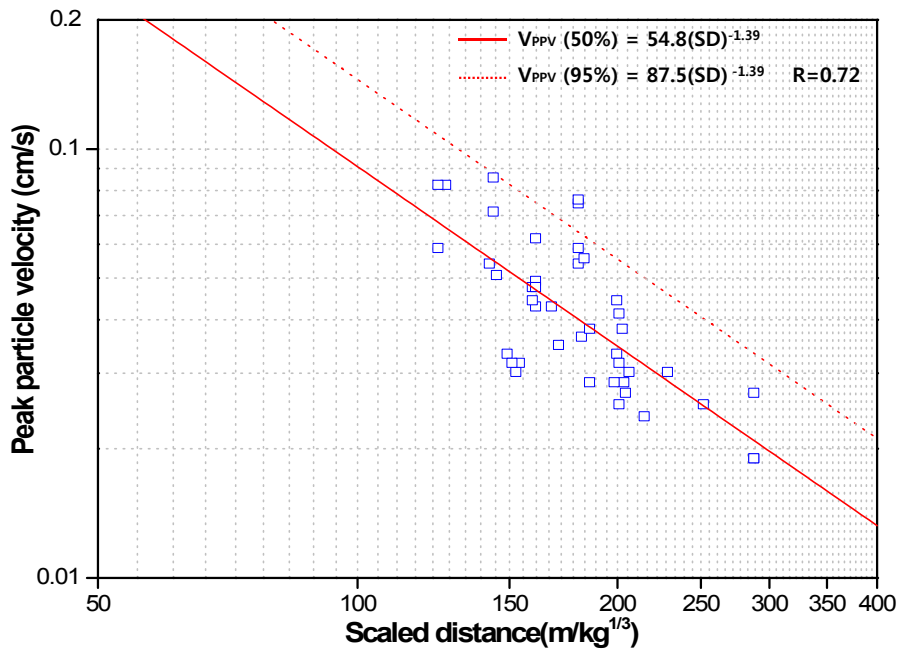
이 일부 층리 방향으로 새어 나가서 상관성이 떨어진 요인으로 추정된다.

(1) 수조 콘크리트 지반 속도계의 회귀분석

Figure 6.1은 수조 콘크리트 지반에서 속도계의 계측 자료를 회귀분석한 결과로 95%의 신뢰도를 갖는 식으로 자승근 진동식과 삼승근 진동식의 K값은 각각 17.9, 87.5로 나타났고, 기울기 값은 -1.12, -1.39이며, 이들 DATA들의 상관계수(R)는 각각 0.77, 0.72로 나타났다.



(a) Square root



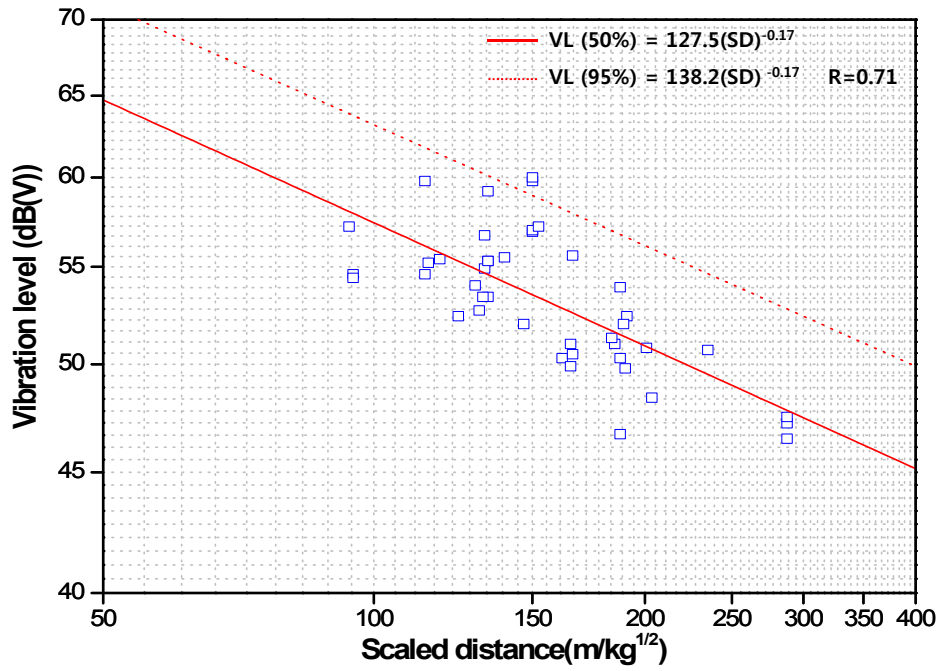
(b) Cube root

Figure 6.1 Relationship between peak particle velocity(PPV) and scaled distance(SD) in fishing water tank

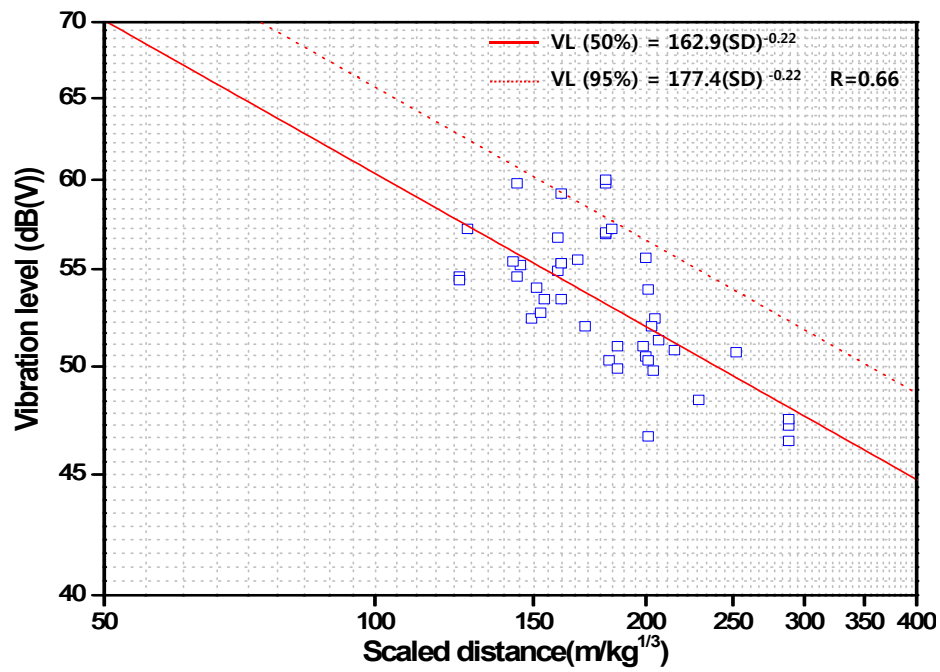
(2) 수조 콘크리트 지반 진동레벨계의 회귀분석

Figure 6.2는 수조 콘크리트 지반에서 계측된 환경진동계의 회귀분석 결과 95%의 신뢰도를 갖는 식으로 자승근 진동식과 삼승근 진동식의 K값은 각각 138.2, 177.4로 나타났고, 기울기 값은 -0.17, -0.22이며, 이들 DATA들의 상관계수(R)는 각각 0.71, 0.66으로 나타났다.

속도계와 레벨계의 상관성을 확인한 이유는 일반적으로 발파에서는 구조물에 대한 계측을 많이 하기 때문에 속도계를 많이 사용한다. 그래서 우리에게 익숙한 속도계와 레벨계를 비교함으로써 레벨계의 계측 자료도 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Square root



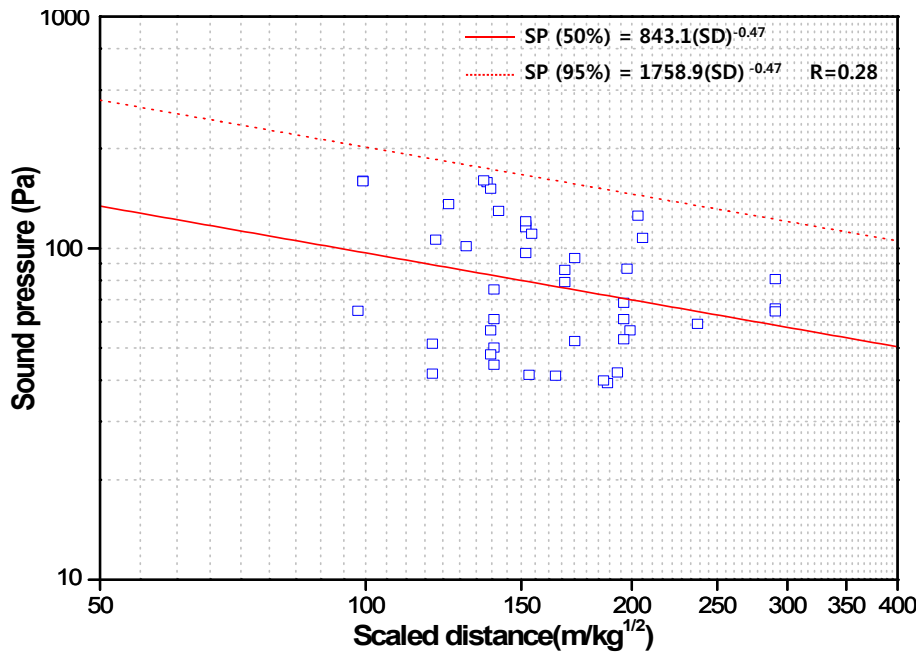
(b) Cube root

Figure 6.2 Relationship between vibration level(VL) and scaled distance(SD) in fishing water tank

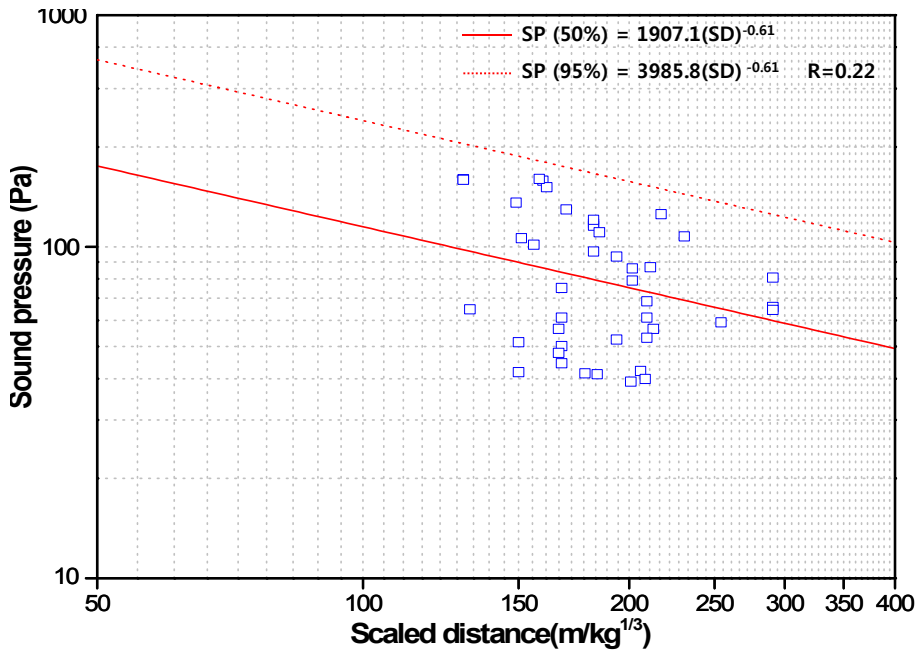


(3) 수조 내부 수중소음 회귀분석

Figure 6.3은 수조에서 수중소음 계측 자료를 회귀분석한 결과 95%의 신뢰도를 갖는 식으로 자승근 진동식과 삼승근 진동식의 K값은 1758.9, 3985.8로 나타났고, 기울기 값은 -0.47, -0.61이며, 이들 DATA들의 상관계수(R)는 각각 0.28, 0.22로 나타났다.



(a) Square root



(b) Cube root

Figure 6.3 Relationship between sound pressure(SP) and scaled distance(SD) in fishing water tank

(4) 수조의 속도계와 레벨계의 관계

Figure 6.4는 수조에서의 43개의 자료를 활용하여 속도계와 레벨계의 상관성을 비교한 그림이다.

자료로 사용된 Data는 지반진동성분 V방향 최대치인 진동레벨( $V_{max}$ )과 진동속도 PPV(Peak particle velocity)를 비교·분석한 결과 도출된 상관식은 (6.1)과 같다.

$$VL = 157.42PPV + 46.429 \quad (6.1)$$

여기서, VL은 진동레벨(dB(V))이며, V는 PPV(cm/s)을 나타낸다.

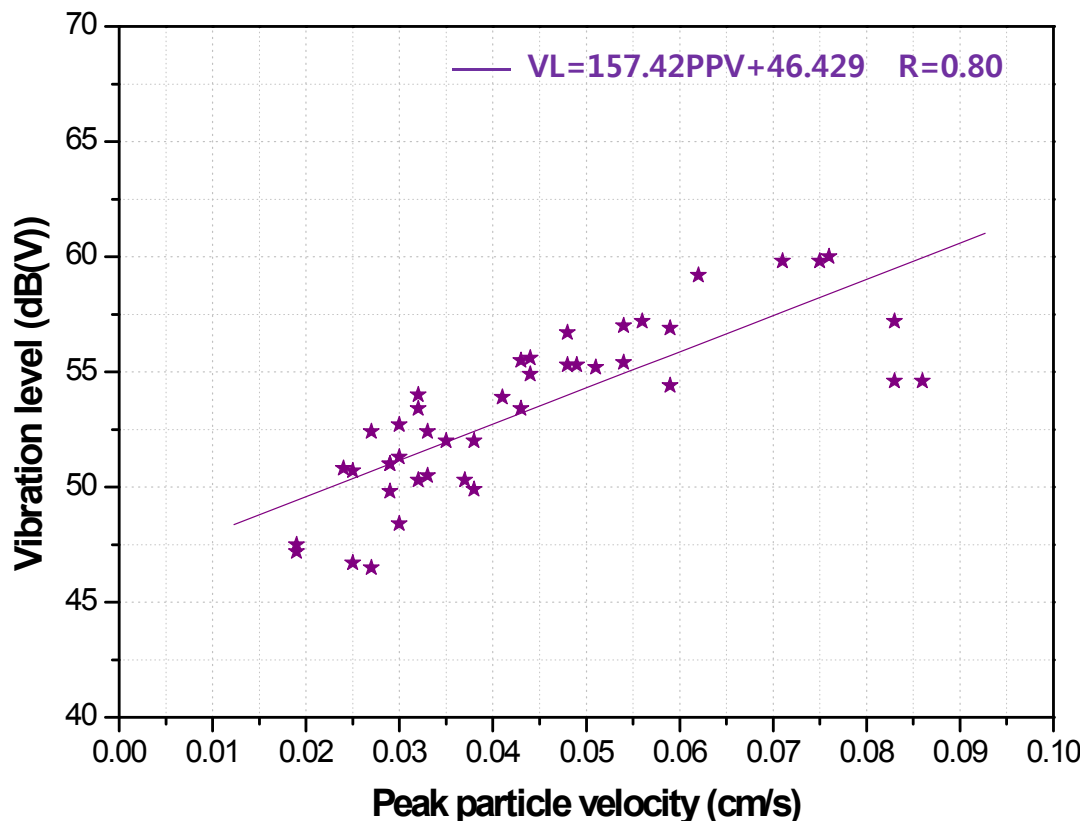


Figure 6.4 Correlation between vibration level(VL) and peak particle velocity (PPV) in fishing water tank

(5) 진동속도에 의한 진동레벨을 추정하기 위한 관계식의 고찰

진동피해 평가에 있어서는 인체의 피해에 대해서는 진동레벨 단위, 구조물에 대해서는 진동속도 단위로 평가하는 것이 일반적이다. 아래의 식 (6.2), (6.3), (6.4), 그리고 (6.5)은 정확하게 일치할 수는 없다는 근본적인 문제점은 있지만 현실적 필요성에 의해 널리 사용되고 있는데 진동 유형 및 주파수 영역 등을 고려한 특별한 조건에서만 사용할 수 있으므로 그 적용에 주의를 요하는 것으로 알려져 있다(중앙환경분쟁조정위원회, 2010).

① 江島 식(한국소음진동공학회, 1998)

$$VL = 20 \cdot \log V + 91 \quad (6.2)$$

여기서, VL은 진동레벨(dB(V)), V는 최대 진동속도(cm/s)이다.

② Vanmarcke 식(대한주택공사 주택연구소, 1999)

$$VL = 20 \cdot \log(V) + 10 \cdot \log(1 - e^{-Td/0.63}) + 85 \quad (6.3)$$

여기서, VL은 진동레벨(dB(V)), V은 진동속도(cm/s), T<sub>d</sub>는 동파형의 연속시간(s)이다.

③ 중앙환경분쟁조정위원회(2007)

$$VL = 13.54 \cdot \log V + 72.33 \quad (6.4)$$

여기서, V은 최대 발파 진동속도(실벡터합, True sum of particle velocity, cm/s)이다.

④ 중앙환경분쟁조정위원회(2010)

$$VL = 20 \cdot \log V_V + 80.0 \quad (6.5)$$

여기서, VL은 진동레벨(dB(V)),  $V_V$  : “V” 방향 진동속도(cm/s)를 의미한다.

(6) 주파수를 배제한 기존 관계식과의 비교

주파수를 배제한 관계식은 발파 진동속도를 주파수를 고려하지 않고 진동레벨로 추정하기 위한 관계식을 말한다. 진동속도와 진동레벨은 주파수에 영향을 받지만 진동속도 관계식에 의해 추정한 진동속도 또는 주파수를 모르는 측정치들을 이용하여 기준 지점에서의 진동레벨을 예측하기 위한 방식이다.

발파 진동속도를 진동레벨로 추정하기 위하여 (6.2), (6.3), (6.4), 그리고 (6.5) 식들과 이 연구를 통해 산출한 진동레벨 관계식인 (6.1)을 이용하여 발파 진동속도별 진동레벨 값을 산출하면 다음과 Table 6.1과 같다(이 연구 관계식의 적용상의 유의점으로는 주파수를 배제한 진동속도가 0.029 cm/s에서 0.076 cm/s의 구간에 유효하며, 이범위를 벗어난 진동속도 값에 대해서는 추가 계측 및 자료처리가 필요하다).

이 연구의 진동속도를 진동레벨로 추정하기 위한 관계식은 Vanmarcke의 진동과형 연속시간 0.4초와 중앙환경분쟁조정위원회(2010)의 중간 정도로 적용하여도 별 무리가 없을 것으로 판단된다.

Table 6.1 Comparison of vibration velocity and vibration level for the other references.

Predicted ground vibration velocity PPV(cm/s)	江島 식 dB(V)	Vanmarcke 식 dB(V)			National Environmental Dispute Mediation Commission (2007) dB(V)	National Environmental Dispute Mediation Commission (2010) dB(V)	This study dB(V)
		Td=0.1	Td=0.2	Td=0.4			
0.03	60.5	46.2	48.9	51.3	51.7	49.5	51.2
0.04	63.0	48.7	51.4	53.8	53.4	52.0	52.7
0.05	65.0	50.6	53.3	55.7	54.7	54.0	54.3
0.06	66.6	52.2	54.9	57.3	55.8	55.6	55.9
0.07	67.9	53.6	56.2	58.6	56.7	56.9	57.4

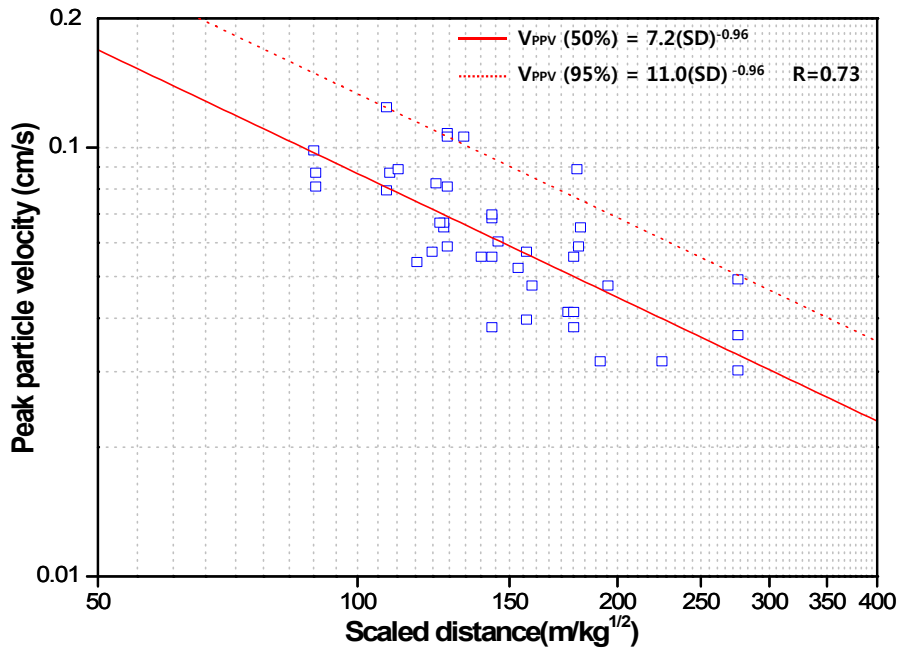
## 6.1.2 수조 외부 결과 분석

수조 외부 토양 지반에서의 속도계, 진동레벨계 측정 결과에 따른 회귀분석을 실시하였으며, 속도계의 계측자료는 총 43개, 레벨계는 총 25개이다. 수조 외부의 레벨계의 일부 자료가 계측되지 않은 것은 계측기의 최소트리거 레벨이 45 dB(V)이기 때문에 그 이하는 계측되지 않았다.

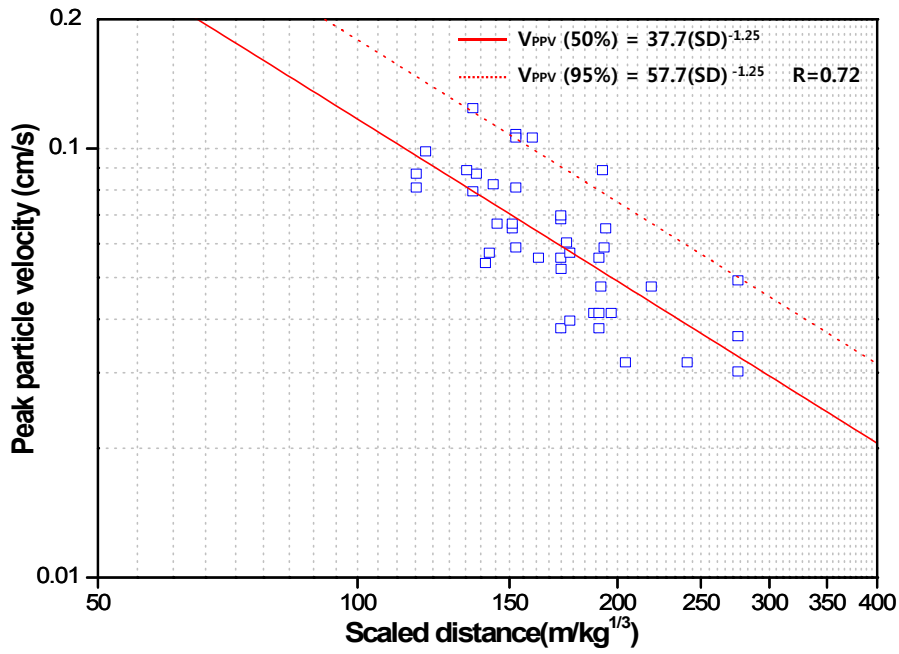
회귀분석에서 상관도 낮은 것은 발파 위치에서는 지발당 장약량을 1지발만 사용한 것이 아니고, 일부는 2 혹은 3지발까지 사용하였다. 그리고 일부에서는 발파 시 지질적 영향으로 가스압이 일부 층리 방향으로 새어 나갔다. 또한 계측 위치에서는 토사지반(화단)에서 계측기를 계속 똑같은 지점에 설치 할 수 있는 상황이 되지 않았다. 그래서 상관성이 떨어진 요인으로 추정된다.

### (1) 수조 외부 토양 지반 속도계 회귀분석

Figure 6.5는 수조 외부의 토양 지반에서 계측된 속도계의 회귀분석한 결과로 95%의 신뢰도를 갖는 식으로 자승근 진동식과 삼승근 진동식의 K값은 11.0, 57.7로 나타났고, 기울기 값은 -0.96, -1.25이며, 이들 DATA들의 상관계수(R)는 각각 0.73, 0.72로 나타났다.



(a) Square root



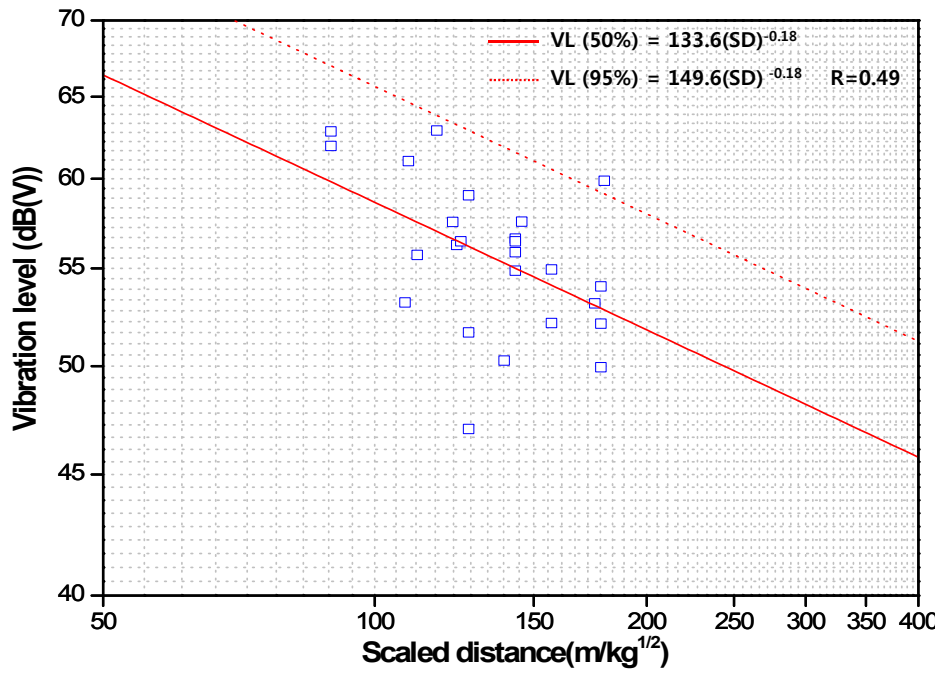
(b) Cube root

Figure 6.5 Relationship between peak particle velocity(PPV) and scaled distance(SD) in soil ground

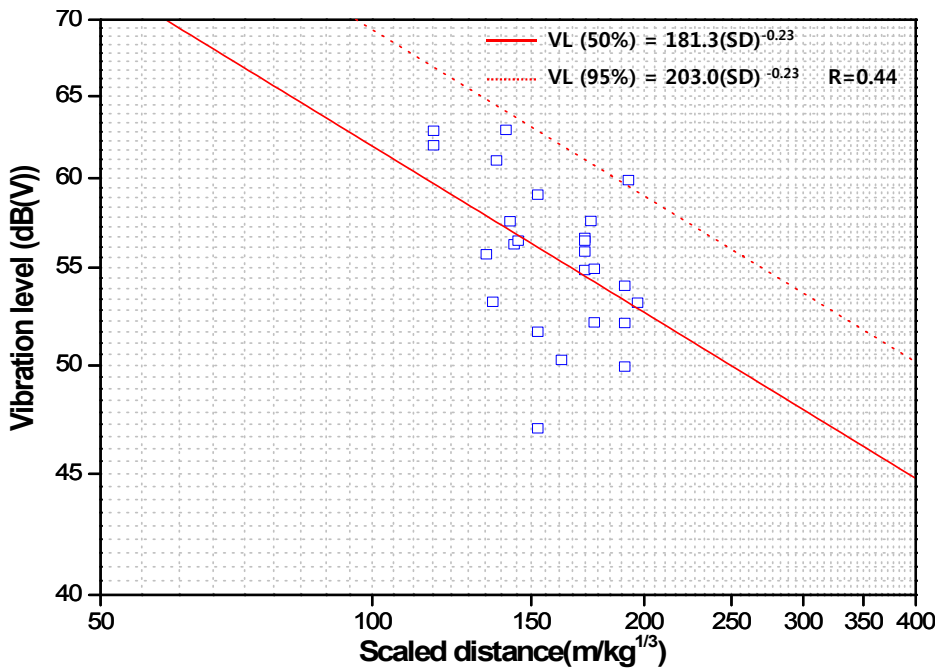
(2) 수조 외부 토양 지반 진동레벨계 회귀분석

Figure 6.6는 수조 외부의 토양 지반에서 계측된 환경진동계의 자료를 회귀분석한 결과로 95%의 신뢰도를 갖는 식으로 자승근 진동식과 삼승근 진동식의 K값은 149.6, 203.0으로 나타났고, 기울기 값은 -0.18, -0.23이며, 이들 DATA들의 상관계수(R)는 각각 0.49, 0.44로 나타났다.





(a) Square root



(b) Cube root

Figure 6.6 Relationship between vibration level(VL) and scaled distance(SD) in soil ground

### 6.1.3 진동레벨과 진동속도를 수중소음으로 추정

진동레벨로부터 수중소음을 추정하기 위하여 수조에서 43회에 걸쳐 발파진동을 계측하였다. 43개의 계측데이터 중 적합도가 떨어지는 상·하위 22%의 데이터는 제외하였으며, 적합도가 높은 24개의 데이터는 Table 6.2과 같다.

Table 6.2 Data used to convert vibration velocity and vibration level to underwater noise level

No.	Weight (kg/delay)	Distance (m)	Ground		Underwater noise		
			PPV (cm/s)	VL (dB(V))	SP (Pa)	L <sub>peak</sub> (dB re 1 μPa)	L <sub>max</sub> (dB re 1 μPa)
1	3	242	0.043	55.5	129.560	162.249	159.239
2	1.5	233	0.029	49.8	42.190	152.504	149.494
3	2	229	0.037	50.3	41.193	152.296	149.286
4	1.5	227	0.029	51.0	39.200	151.866	148.855
5	2	260	0.030	51.3	39.865	152.012	149.002
6	3	260	0.059	56.9	117.269	161.384	158.373
7	3	260	0.075	59.8	96.672	159.706	156.696
8	3	260	0.076	60.0	115.607	161.260	158.249
9	3	260	0.054	57.0	120.591	161.626	158.616
10	3	264	0.056	57.2	110.624	160.877	157.867
11	3	288	0.044	55.6	86.041	158.694	155.684
12	1.5	288	0.025	50.7	59.133	155.437	152.426
13	3	232	0.049	55.3	50.163	154.008	150.997
14	3	232	0.043	53.4	44.516	152.970	149.960
15	2.5	232	0.035	52.0	41.526	152.366	149.356
16	3	230	0.044	54.9	47.838	153.595	150.585
17	3	230	0.048	56.7	56.475	155.037	152.027
18	1.5	234	0.027	52.4	56.475	155.037	152.027
19	1.5	230	0.032	50.3	53.153	154.511	151.500
20	1.5	230	0.041	53.9	61.126	155.725	152.714
21	3	232	0.048	55.3	75.078	157.510	154.500
22	2	234	0.038	49.9	52.488	154.401	151.391
23	4	230	0.051	55.2	105.974	160.504	157.494
24	3	205	0.054	55.4	135.872	162.663	159.652

Figure 6.7은 진동레벨(VL)과 수중소음( $L_{peak}$ )과의 상관관계를 나타내는 그림이고, 식 (6.6)은 상관식이다(이 연구 관계식의 적용상의 유의점으로는 주파수를 배제한 진동레벨이 49.8 dB(V)에서 60.0 dB(V)의 구간에서 유효하며, 이 범위를 벗어난 진동레벨 값에 대해서는 추가 계측 및 자료처리가 요구된다).

$$L_{peak} = 0.9328VL + 106.07 \quad (6.6)$$

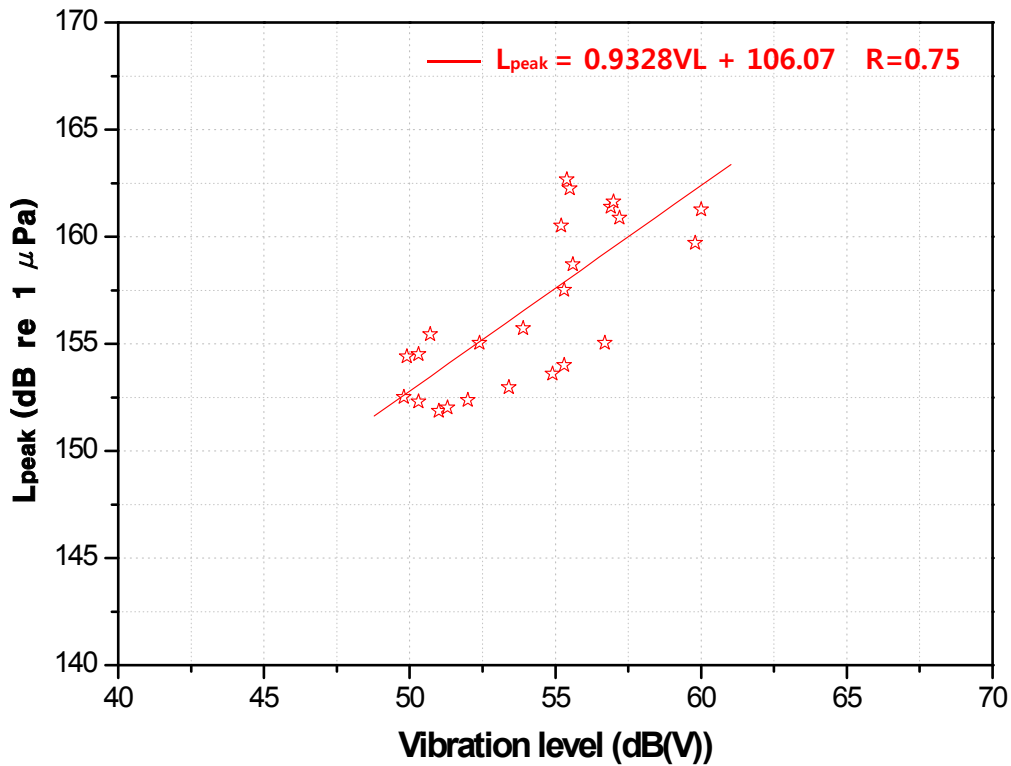


Figure 6.7 Correlation between VL and  $L_{peak}$

Figure 6.8은 진동레벨(VL)과 수중소음( $L_{max}$ )과의 상관관계를 나타내는 그림이고, 식 (6.7)은 상관식이다(이 연구 관계식의 적용상의 유의점으로는 주파수를 배제한 진동레벨이 49.8 dB(V)에서 60.0 dB(V)의 구간에서 유효하며, 이 범위를 벗어난 진동레벨 값에 대해서는 추가 계측 및 자료처리가 요구된다).

$$L_{max} = 0.9328 VL + 103.06 \quad (6.7)$$

수중소음( $L_{peak}$ )과 수중소음( $L_{max}$ )의 관계는 다음 식 (6.8)과 같다.

$$L_{peak} = L_{max} + 3 \text{ dB} \quad (6.8)$$

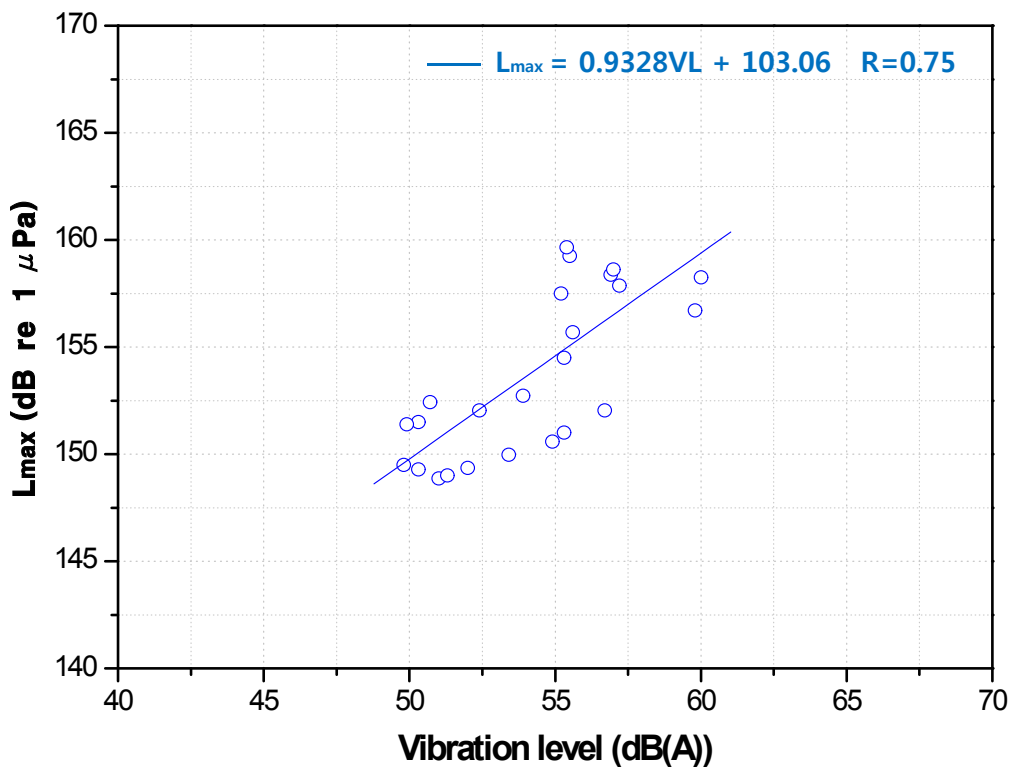


Figure 6.8 Correlation between VL and  $L_{max}$

Figure 6.9는 진동속도(PPV)와 수중소음( $L_{peak}$ )과의 관계를 나타내는 그림이고, 식 (6.9)

는 상관식이다(이 연구 환산식의 적용상의 유의점으로는 주파수를 배제한 진동속도가 0.029 cm/s에서 0.076 cm/s의 구간에 유효한 식이다).

$$L_{\text{peak}} = 197.49\text{PPV} + 147.81 \quad (6.9)$$

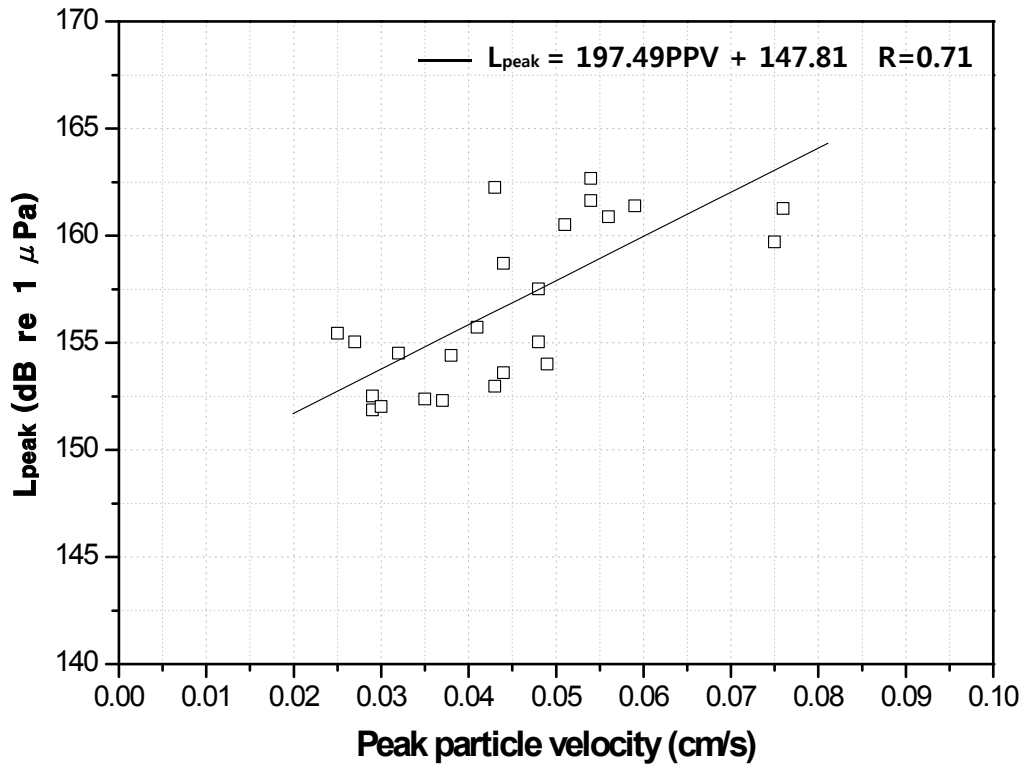


Figure 6.9 Correlation between PPV and  $L_{\text{peak}}$

(1) 기존 관계식과의 비교

발파 진동속도를 수중소음으로 추정하는 방법으로 박정봉(2014)의 연구식과 이 연구를 통해 추정된 관계식인 (6.9)을 이용하여 발파 진동속도별로 수중소음 값을 산출하면 Table 6.3과 같다.

박정봉(2014)의 연구식과 진동속도를 수중소음으로 추정했을 때 차가 생기는 요인으로 측정위치와 지질적 원인으로 생각된다. 이 연구에서 측정위치는 철근콘크리트 지반 위에서 측정을 하였고, 박정봉 (2014)은 콘크리트지반과 토사지반에서 측정을 하였고

때문에 토사지반에서 측정값이 더 크게 측정되었을 것으로 추정된다.

Table 6.3 Comparison of predicted ground vibration velocity and underwater noise

Predicted ground vibration velocity PPV(cm/s)	Park (2011) (A) dB re 1 $\mu$ Pa	This study (B) dB re 1 $\mu$ Pa	(B)-(A) dB re 1 $\mu$ Pa
0.03	146.703	153.446	6.743
0.04	148.765	155.978	7.213
0.05	150.383	157.971	7.588
0.06	151.719	159.619	7.900
0.07	152.858	161.025	8.167

## 6.2 어류 피해기준에 대한 분석 및 고찰

육상 동물에 대한 피해는 어느 정도 타당성 있는 역학조사가 이루어져 관리기준이 설정되어 있고, 공사현장의 실정에 적합한 보안대책을 강구하여 공사를 진행하고 있으며, 관리(허용)기준을 상회하는 경우 보상이 이루어지기도 한다.

그러나 어패류 양식장 인근에서 건설공사로 인하여 발생하는 소음·진동에 의한 피해 기준과 피해 금액 산정방식은 건설공사에 대한 공종별 전문가의 공학적, 기술적 의견이 배제된 상태에서 피해자 측이 일방적으로 어류 전문가들의 생물학적 자문 위주의 논리만 주장하고 있는 반면, 건설사 측은 어패류 피해에 대한 생물학적 전문지식이 부족한 상황에서 일반적인 건설소음·진동을 위주로 논리를 전개하는 경우가 대부분이다.

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. 어류가 평시에 적응하고 있는 배경소음 보다 수중에서 발생하는 인위적인 소음의 크기가 높게 되면 인간과 마찬가지로 해양 생물은 도피반응이나 손상 등을 보이게 된다. 건설현장과 인접되어 있는 장소에서 발생한 인근 어류 등에 대한 피해사례들을 살펴보면, 어패류에 대한 소음·진동 수준의 임계허용

치 또는 피해기준치 등에 대한 학문적·법률적 근거가 없으므로 항상 논란이 되고 있으며, 현재까지도 합리화된 생물학적 근거나 학문적인 논리가 부족한 상태에서 과학적인 제시 없이 일부 전문가들의 견해 및 기존의 판시(판례)에 의존해서 종결되는 경우가 대부분이다.

이와 같이 보다 객관적이고 형평성에 적합한, 공학적, 기술적 접근방법이 사실상 전무한 상태로서 피해 당사자 간의 절충 방안을 모색하기도 어려운 경우가 대부분이다. 그래서 중앙 환경 분쟁 조정위원회에서는 2009년 소음·진동으로 인한 육상 양식어류 피해 평가 및 배상액 산정에 관한 연구를 통해 구체적인 피해기준을 제시하였다.

국내의 소음·진동으로 인한 양식어류 피해 평가 기준을 중앙 환경 분쟁 조정위원회(2009)의 기준으로 살펴보면 Table 6.4에 나타난 2009년 환경분쟁조정 사례에서 볼 수 있듯이 공중소음은 50 dB(A)에서 60 dB(A) 이하, 진동레벨은 50 dB(V)에서 60 dB(V) 이하, 수중소음은 140 dB/μPa으로, 배경소음과의 차(정상시와의 차)는 세 항목 모두 15 dB에서 20 dB의 차를 적용하였다. 또한 전남대학교 수산과학연구소의 2012년 “국도 77호선 완도 강독지구 위험도로 개수공사 어업피해영향조사”에서도 위와 같은 피해기준을 제시했다.

Table 6.4 An example of safety level adopted by National Environmental Dispute Mediation Commission ( I ) (2009)

Category	Air sound (dB(A))	Vibration level (dB(V))	Underwater sound (dB/μpa)
Regulation standard	50 to 60 and less	55 to 60 and less	140 and less
Difference in ambient level	15 to 20	15 to 20	15 to 20

Table 6.5는 2009년 전남대학교 수산과학연구소에서 중앙환경분쟁조정위원장에 제출한 최종보고서 “소음·진동으로 인한 육상 양식어류 피해 평가 및 배상액 산정기준에 관한 연구”에서 인용한 것으로서 육상 양식어류 배상기준(안) 수중소음의 피해기준으로 140 dB/μPa, 배경소음과의 차는 20 dB 초과 값을 적용하였다. 그리고 양식장 환경, 수중

소음의 특성, 배경소음 등에 대한 신중한 검토를 거쳐 피해 발생 여부를 평가하여야 한다고 했다.

Table 6.5 An example of safety level adopted by National Environmental Dispute Mediation Commission (II) (2009)

Damage states of farming fish	Assessment method	Criteria of damage recognition
Die, growth delay, decreased egg production, decreased hatchability	$L_{Amax}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Underwater sound : 140 dB/<math>\mu</math>Pa</li> <li>- Difference in ambient sound level : 20 dB/<math>\mu</math>Pa</li> </ul>

Note)  $L_{Amax}$ 에서 A는 오타로 추정됨

국내에서 일반적으로 적용하는 수중소음, 진동레벨, 공중소음, 배경소음과의 차에 대한 기준을 살펴보면 다음과 같다.

### 6.2.1 수중소음의 기준

중앙 환경 분쟁 조정위원회와 어류전문가들은 수중소음의 피해인정기준을 일반적으로 140 dB re 1  $\mu$ Pa을 기준으로 삼고 있다. 이 기준은 일본의 자료(畠山良己, 1996)를 인용한 것이다. 물고기가 놀라서 깊이 잠긴다든가, 음원에서 반응을 보인 음압레벨로 그 범위는 140 dB re 1  $\mu$ Pa에서 160 dB re 1  $\mu$ Pa이다. 이를 위협(威嚇, 혁을 협으로 잘못 표기)레벨이라 한다. 일반적으로 수중음이 어업에 미치는 영향을 예측 평가할 때는 낮은 쪽의 140 dB re 1  $\mu$ Pa을 사용하고 있다고 언급되어 있다. 위의 기준은 2.2.1절의 Figure 2.1 연속음에 대한 위협레벨에 잘 나타나 있다. 위의 기준은 충격음이 아닌 1초 이상의 연속음에 대해서 어류가 도피 반응을 일으키기 시작한 음압레벨(위협레벨)을 나타내는 것이다. 충격음에 대한 자료는 Figure 2.2 펄스음에 대한 위협레벨로 설명되어 있다. Figure 2.2를 보면 일부 어종은 음압레벨이 200 dB re 1  $\mu$ Pa 근처에서도 무반응이다. 충격음의 경우 연속음에 비해 참돔은 약 30 dB re 1  $\mu$ Pa, 정어리는 약 20 dB re 1  $\mu$ Pa정도 높은 음에서 반응을 한다. 그러므로 충격음의 위협레벨은 최소 160 dB re 1  $\mu$ Pa에서 190 dB re 1  $\mu$ Pa이 되는 것이다. 그리고 연속음의 음압레벨은  $L_{water\ peak}$ ,  $L_{water\ max}$ 가 아닌 R.M.S 값



이다. 다시 말하면 국내에서 적용하는 수중소음 기준은 연속음의 R.M.S 값을 적용하고 있는 것이다. 건설 현장의 공사가 일부는 사기업도 있지만 대부분 국가의 인프라 건설이 많다. 잘못된 기준의 적용으로 국민의 세금을 낭비하는 현상이 일어나고 있다. 이 연구에서 대안을 제시하면은 Table 2.2와 같이 발파는 충격음이므로  $L_{water\ peak}$ 치를 적용하는 것이 좋으나 아직은 연구 자료가 많지 않으므로 중간단계로 선평성(2014)이 제시한 기준인 Level B harassment(해양포유동물에 대한 직접적인 피해가 아니라 이동, 호흡, 양육, 번식, 먹이, 차폐 등을 포함한 행동적 변화를 일으킬 수 있는 충격, 고통, 성가심 등의 행위를 의미)와 관련한 수중소음 한계 값으로 충격음의 경우 160 dB re 1  $\mu$ Pa, 연속음의 경우 120 dB re 1  $\mu$ Pa 정도를 기준으로 하면 좋을 것으로 판단된다.

## 6.2.2 공중소음(Air sound)의 기준

공중소음이 어류에 미치는 기준은 중앙 환경 분쟁 조정위원회 I (2009)와 전남대학교 수산연구소(2012)에서 50 dB(A)에서 60 dB(A) 이하라고 제안하고 있다. 공중소음이 수중 어류에 미치는 영향에 대한 자료는 국내외를 찾아 봐도 거의 없다. 대개는 공중소음과 지반진동을 구분 못하는 경우가 대부분이다. 조민기(2013)는 건설기계 중 점유율이 높은 브레이크 소음을 재현하여 80 dB(A)의 소음도는 수중소음도에 변화가 없었다고 했다. 이는 대기 중에서 수중으로 음파가 투과하면, 에너지와 입자속도는 약 0.1 % 밖에 투과하지 않는다는 것과 일맥상통 한다고 볼 수 있다. 그러므로 공중소음이 수중소음에 영향을 미친다고 하는 것은 이치에 맞지 않다고 생각된다. 그래서 연구자는 차후에 더 많은 연구 자료가 쌓이면 추후 기준을 정하는 것이 옳다고 판단된다.

## 6.2.3 진동레벨(Vibration level)의 기준

진동레벨이 어류에 미치는 기준은 중앙환경분쟁조정위원회 I (2009)와 전남대학교 수산연구소(2012)에서 55 dB(V)에서 60 dB(V) 이하라고 제안하고 있다. 진동레벨이 수중 어류에 미치는 영향에 대한 자료 국내외를 찾아 많지가 않다. 중앙환경분쟁조정위원회 II(2009)에서 제안한 진동과 수중소음과의 상관관계 식  $y = 0.7931x + 62.582$ 를 적용하면 140 dB re 1  $\mu$ Pa일 때의 진동레벨은 약 97.6 dB(V)가 된다. 조민기(2013)에 따르면 진동레벨 55 dB(V)을 노출시켰을 때 수중소음도가 20 dB re 1  $\mu$ Pa 정도 증가

하는 것으로 알려져 있다. 이때 붕어의 생존율에는 영향을 미치지 않았고, 진동이 오히려 붕어의 생육을 촉진시키는 것으로 확인되었다라고 언급하였다. 그러므로 진동레벨이 수중소음에 영향을 미치는 것은 확인이 되었지만 어류에 어느 정도 피해를 미치는지는 차후에 더 많은 연구 자료가 쌓이면 추후 기준을 정하는 것이 옳다고 생각된다. 그래도 부득이하게 사용해야 되는 상황이면 이 연구의 식 (6.2)와 (6.3)을 이용하여 변환을 하면 좋을 것으로 판단된다.

## 6.2.4 수중 배경음과의 차

수중 배경음과의 차가 어류에 미치는 기준은 중앙환경분쟁조정위원회 I (2009)와 전남대학교 수산연구소(2012)에서 15 dB re 1  $\mu$ Pa에서 20 dB re 1  $\mu$ Pa, 중앙 환경 분쟁 조정위원회 II(2009)에서는 20 dB re 1  $\mu$ Pa 미만으로 규정하고 있다. 조민기(2013)는 “수중소음도가 진동에 의해 하루 9시간씩 35일 동안 20 dB re 1  $\mu$ Pa 정도 증가하였음에도 붕어의 생존율에는 영향을 미치지 않았고, 오히려 붕어의 생육을 촉진시키는 것으로 확인되었다”라고 언급하였다. 국외에서도 배경소음도에 대한 소음도 증가량에 관한 연구가 이루어졌는데 Legadere(1982)에 의하면 배경소음보다 큰 30 dB re 1  $\mu$ Pa 위의 소음에 3달간 노출된 sand shrimp가 성장률과 번식률이 감소했다고 언급했다. 위의 두 연구자가 연구했던 방법은 배경음과의 차가 충격음이 아닌 연속음이다. 연속음의 기준 잣대를 충격음에 적용해서는 안 될 것이다. 그래서 연구자는 대안으로 선효성(2014)이 제시한 기준인 Level B harassment와 관련한 수중소음 한계 값으로 충격소음의 경우 160 dB re 1  $\mu$ Pa, 연속음의 경우 120 dB re 1  $\mu$ Pa 정도를 기준으로 정했는데 이때 충격음과 연속음의 차가 40 dB re 1  $\mu$ Pa이 생긴다. 이것을 수중 배경소음의 차 기준으로 설정하는 것이 적절하다고 판단된다.

## 6.2.5 손상레벨

이 연구에서는 손상레벨과 폐사를 동일 시 보고 설명하고자 한다. Yan(2010)은 다이내마이트 2200 kg을 사용하여 220 m에서 212 dB이 계측되었을 때를 손상레벨이라고 언급했다. 그런데 중앙환경분쟁조정위원회 II(2009) 자료를 보면, 그 중에서 “덜 민감한 송어나 잉어를 기준으로 140 dB re 1  $\mu$ Pa에서 150 dB re 1  $\mu$ Pa일 때는 폐사가 10%에서

20%, 150 dB re 1  $\mu$ Pa에서 160 dB re 1  $\mu$ Pa일 때는 폐사가 20%에서 40%정도 될 것이다.”라고 언급했다. 이 연구 장소에서 수중소음( $L_{max}$ ) 값이 주로 150 dB re 1  $\mu$ Pa에서 160 dB re 1  $\mu$ Pa의 범위에 분포할 때 육안 관찰시 폐사는 한 마리도 발생하지 않았다.

안장영(1994) 등도 TNT 50 kg을 수중발파를 실시하였을 때, 250 m 이격된 위치에서 214.6 dB re 1  $\mu$ Pa일 때 자주복 치어에 영향이 없었다고 언급하였다.

다른 현장 사례를 들면 다음과 같다. 연구자는 00도의 한 섬에서 00건설(주)에서 시공 중인 접속도로 암반 발파작업 중 해상 양어장에서 수중소음을 측정한 바 있다.

암반 발파 현장과 해상 양어장과의 거리는 약 240 m 이격되어 있으며, 해상 양어장은 섬에서 약 90 m 이격되어 있다. 총 6회에 걸친 시험발파에서 참관인으로 양어장 소유주, 감리단장, 연구자 등이 동반하였으며, 발파 전·후 해상 양어장 어류의 반응을 관찰하였는데 전혀 반응이 없었다.

수중소음 측정 방법은 Figure 6.10과 같이 양어장 옆 해상 관리실에서 수중소음 측정기를 설치하여 시험발파 결과를 Monitoring하였다. 수중소음 Monitoring 현황은 Figure 6.11이며, 측정된 파형은 Figure 6.12과 같다.

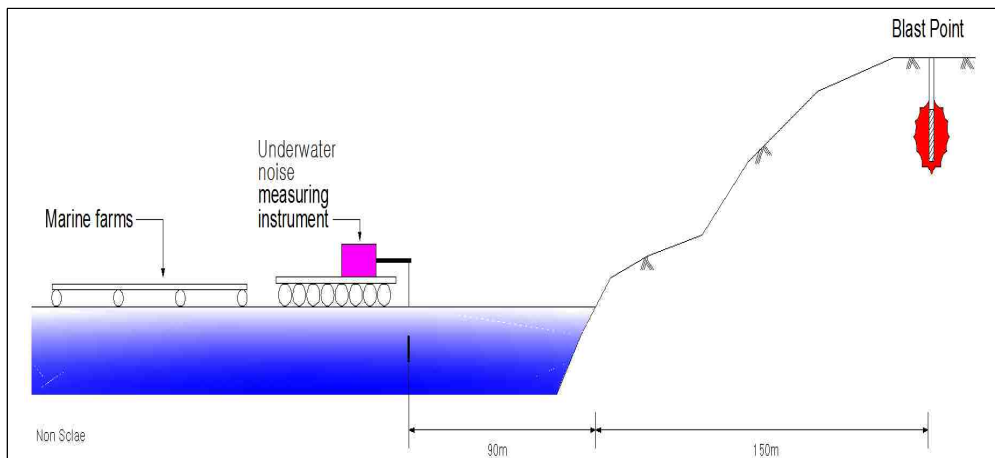


Figure 6.10 Schematic of underwater noise measurement in marine fish farm



Figure 6.11 View of measuring underwater noise in marine fish farm

시험발파는 지발당장약량 2.4 kg과 3.2 kg으로 각 3회씩 총 6회에 걸쳐 실시하였다. 발파지점과 거리는 약 240 m에서 256 m이며, 각 회수별 수중소음 측정 결과는 Table 6.4와 같다.

Table 6.6은 해상 양어장에서 수중 소음계측 결과를 보면 지발당장약량 2.4 kg과 3.2 kg에 의한 결과 값은 모두 170 dB re 1  $\mu$ Pa을 상회하였다. 이는 중앙환경분쟁조정위원회의 양식장에 수중소음허용기준인 140 dB re 1  $\mu$ Pa을 초과하는 값이다.

그러나 양어장 소유주, 감리단장 등은 발파 전과 후에 양어장 어류의 움직임에 대한 특이 사항이나 폐사 등을 발견하지 못하였고, 양어장 소유주는 동일 조건에서의 발파는 수용할 수 있다는 의견을 제시했다. 물론 시험발파 이후 상당한 시간이 지났음에도 양어장에서는 물고기의 피해사례는 없었던 것으로 전해 들었다.

Table 6.6 Measurement results of underwater noise level at marine fish farms

No	Weight (kg/delay)	Pressure (Pa)	$L_{peak}$ (dB re 1 $\mu$ Pa)	$L_{max}$ (dB re 1 $\mu$ Pa)	Distance (m)
1	3.2	871.678	178.807	175.797	240 to 256
2	3.2	1139.725	181.136	178.126	
3	3.2	949.022	179.546	176.535	
4	2.4	995.248	179.959	176.948	
5	2.4	785.497	177.903	174.893	
6	2.4	715.139	177.088	174.078	

Note)  $L_{peak} = 20 \log(SP/10^{-6})$ ,  $L_{max} = 20 \log(SP/\sqrt{2})/10^{-6}$

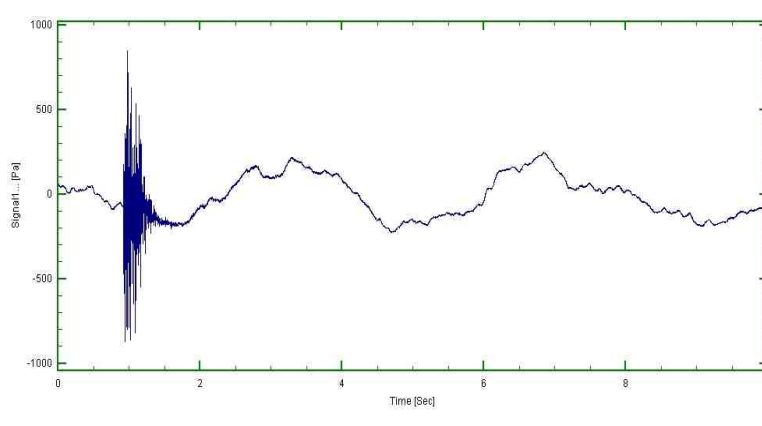
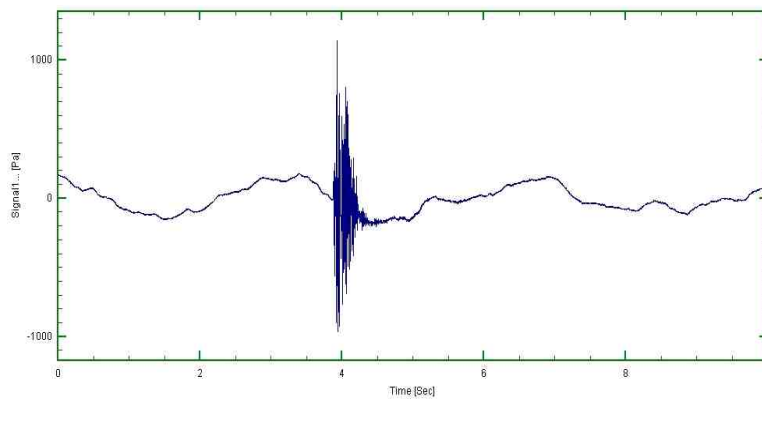
Underwater noise		
1st	Measurement waveform	
	Measurement value	SP : 871.678 Pa
2nd	Measurement waveform	
	Measurement value	SP : 1139.725 Pa

Figure 6.12 Waveform and peak sound pressure level measured in marine fish farm

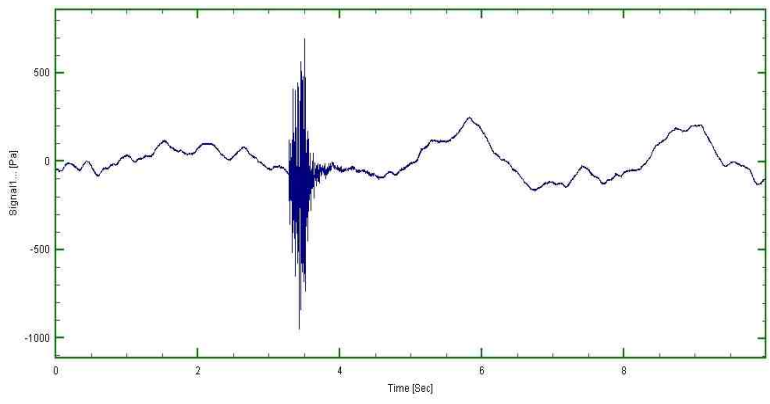
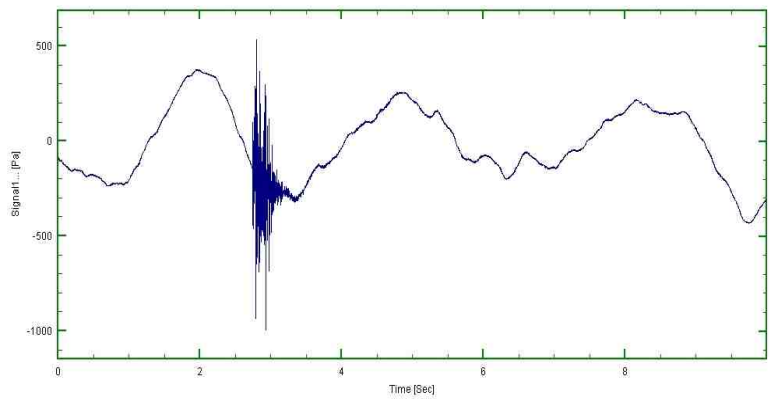
Underwater noise		
3rd	Measurement waveform	
	Measurement value	SP : 949.022 Pa
4th	Measurement waveform	
	Measurement value	SP : 995.248 Pa

Figure 6.12 Continued

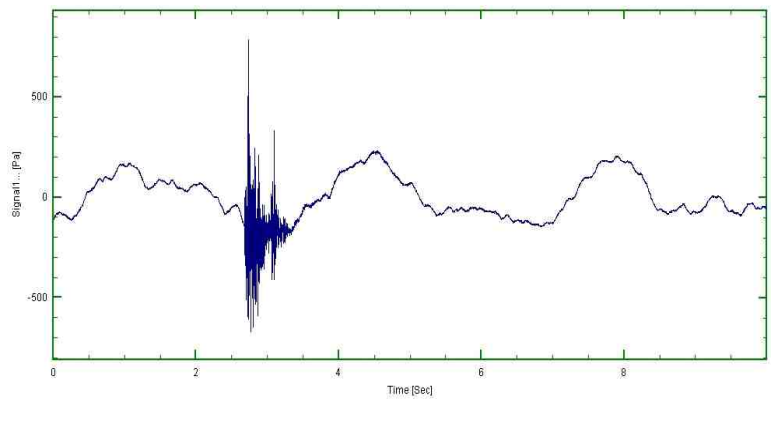
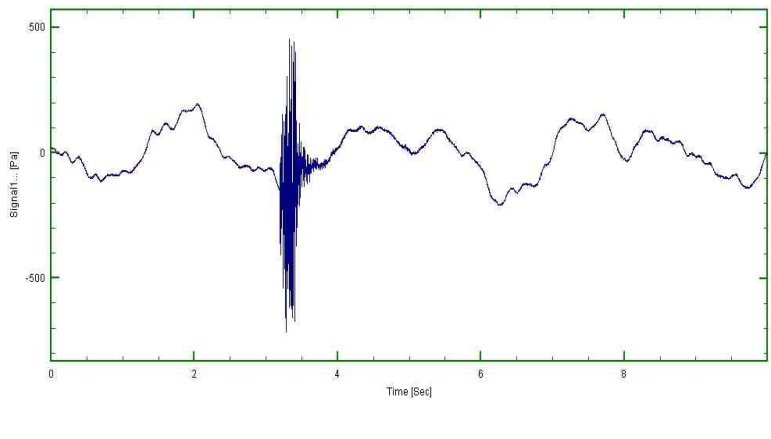
Underwater noise		
5th	Measurement waveform	
	Measurement value	SP : 785.497 Pa
6th	Measurement waveform	
	Measurement value	SP : 715.139 Pa

Figure 6.12 Continued



## 7. 결론

현재 국내에서는 양식어류에 대한 피해 기준을 잘못 적용함으로써 국가 기간산업인 사회간접시설 공사의 지연과 세금의 낭비를 초래하고 있다. 이 연구에서는 지상에 있는 어류 양어장 주변에서 발파를 할 때 수중소음 계측 장비가 없거나, 다른 이유로 계측 장비를 양어장(수중)에서 계측을 하지 못할 경우에 진동레벨 계측기를 이용하여 발파 진동레벨과 수중소음의 관계식을 추정함으로써 차후 분쟁의 소지를 줄일 수 있는 근거를 마련하는데 목적이 있다.

또한 국내의 경우 수중소음 피해 인정기준을 140 dB re 1  $\mu$ Pa을 인정하고 있다. 이 기준은 충격음이 아닌 1초 이상의 연속음의 R.M.S 값이다. 이 연구에서는 충격음과 연속음의 기존 연구 자료를 확인하여 연속음의 피해기준을 충격음의 피해기준으로 대체하는 방안을 제안하였다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 이 연구의 대상 현장에서 지반 진동레벨과 수중소음 수준을 동시에 계측하여 자료를 처리한 결과, 진동레벨과 수중소음 수준과의 상관관계는 다음과 같은 식으로 나타났다. 본 관계식의 유도에 사용된 진동레벨 계측자료는 49.8 dB(V)에서 60.0 dB(V)로서 이 범위 내의 진동레벨 값에 대한 수중소음 추정식으로 유효하며, 이 범위를 벗어난 진동레벨 값에 대해서는 추가 계측 및 자료처리가 요구된다.

$$L_{peak} = 0.9328 VL + 106.07$$

$$L_{max} = 0.9328 VL + 103.06$$

(2) 진동레벨 측정기로 배경진동을 계측을 했을 때, 제조사(A, B, C)에 따라 배경진동의 평균값은 37.3 dB(V), 21.8 dB(V), 28.3 dB(V)로 B사를 기준으로 할 때 A사는 15.4 dB(V), C사는 6.4 dB(V)의 차이를 보였다. 그러므로 측정 가능한 최소레벨을 확인하여 적절한 계측기를 선정하여야 한다.

(3) 국내에서 통상 적용하고 있는 어류에 대한 수중소음 피해 인정기준은 140 dB re 1  $\mu$ Pa로서 이는 1초 이상의 연속음에 대해 어류가 도피 반응을 일으키기 시작하는 음압레벨이다. 그러나 발파작업에 의한 충격음에 대해서는 어중에 따라 20 dB re 1  $\mu$ Pa에서 30 dB re 1  $\mu$ Pa 정도 높은 수준에서 반응을 하므로, 충격음에 대한 피해 인정기준은 최소 20 dB re 1  $\mu$ Pa 이상 상향 조정하는 것이 적정하다고 판단된다.

(4) 수중 배경음과의 차가 어류에 미치는 기준은 20 dB re 1  $\mu$ Pa 미만으로 규정하고 있으나, 이는 연속음에 대한 것으로서 발파작업에 대한 평가로서는 적합하지 않다. 따라서 충격음과 연속음의 특성 차이를 고려하여 충격음의 경우, 40 re 1  $\mu$ Pa을 수중 배경음과의 차에 대한 기준으로 설정하는 것이 적정하다고 판단된다.

(5) 이 연구를 기초로 하여 수중소음의 측정방법 및 평가방법의 제시와 진동레벨계를 이용한 측정에서는 주파수에 대한 해석이 필요할 것이며, 어류에 대해서는 어중에 따른 피해기준을 제시해 주면 좋을 것으로 판단된다. 그러나 경험적으로 볼 때 어류 양식장 근처에서는 발파 규모를 크게 할 수 없으나 민원인은 계속 피해가 있다고 말하는 것과 같이 피해기준과 민원은 상이하다. 이는 근거리에서는 암반 파열음의 소리, 원거리에서는 폭풍압에 의한 고체음(Structure borne noise)이 원인이라고 추정된다. 그러므로 이 두 음에 대한 연구가 이루어진다면 향후 어류에 대한 피해 기준을 제시하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

(6) 일반적으로 발파 분야에서는 소음이나 진동치는 peak치를 사용하고, 장약량은 지발당 장약량을 이용하여 분석한다. 타 분야에서는 진동이나 소음을 주로 R.M.S 값을 이용하여 분석하고, 지발당 장약량과 총 장약량을 혼용하여 사용한다. 그러므로 연구자료에 명확하게 표시를 해주어야 이런 오류가 생기지 않을 것이다. 그리고 자연 현상과 계측기는 있는 그대로만 보여줄 뿐인데, 그 자료를 바라보는 우리가(발파전문가, 어류전문가) 임의적으로 해석하지 말고 어류의 관점에서 수중소음을 바라보아야 한다.

## 참 고 문 헌

1. 강추원, 2014, 제3판 발파공학 A to Z, 구미서관, pp. 304~306, pp. 319~321.
2. 광해관리공단, 2008, 광산발파로 인한 소음·진동의 평가기술 개발, pp. 16~21, pp. 23~24.
3. 김남수, 1998, 발파 소음·진동 수준의 변환 연구, 한국소음진동공학회 춘계학술대회, pp. 377~380.
4. 대한주택공사 주택연구소, 1999, 건설현장의 소음·진동·분진 평가 및 저감대책에 관한 연구 : 발파공사를 중심으로, pp. 13~15
5. 류복현, 2014, 발파공 사이의 지연시차와 기폭위치가 지반진동에 미치는 영향, 조선대학교 박사학위논문, pp. 6.
6. 박연수, 박선준, 강성후, 전양배, 공강주, 2006, 한국소음진동공학회논문집, 제16권, 제7호, 수중발파 현장에서의 진동추정식에 관한 실험적 연구, pp. 777~783.
7. 박정봉, 2011, 지반진동과 수중소음의 상관성 연구, 조선대학교 박사학위논문, pp. 13, pp. 19~21, pp. 27, pp. 35, pp. 122.
8. 박진형, 2009, 지반진동 및 공중소음에 의한 수중소음 변화에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문, pp. 6~10, pp. 20~22, pp. 114.
9. 배종우, 박지현, 윤종락, 2009, 한국소음진동공학회 논문집, 제10권, 제9호, 수변공사에 의한 충격음의 특성과 어류에 미치는 영향, pp. 928~934.
10. 서울대학교 환경소음진동연구센터, 2010, 시추공 시험발파 소음·진동에 의한 어류 영향 평가 감정보고서, pp. 54~56.
11. 선호성, 2014, 한국환경정책·평가연구원 환경포럼, 제18권, 제2호, 해상풍력발전기 수중소음 평가방안에 관한 고찰.
12. 슬하발파환경시스템, 2013, 삼호 저두지구 전원마을 조성사업, pp. 130~131.
13. 신영철, 2010, 지반진동 및 수중소음이 양식장내 장어에 미치는 영향, 강원대학교 석사학위논문, pp. 14~18, pp. 59.
14. 신현옥, 1995, 한국수산학회지, 양식 가물치(*Channa argus*)의 행동에 미치는 파일 작업 소음의 영향에 관한 연구, 제28권, 4호, pp. 492~501.
15. 신현옥, 2000, 한국수산학회지, 양식 향어의 행동에 미치는 발파작업 소음의 영향에 관한 연구, pp. 348~355.

16. 안장영, 노섬, 1994, 제주대논문집, 39권, 해중 TNT폭발음에 있어서 폭약중량에 따른 폭발음의 소음준위와 자주복 치어의 반응, pp. 55~60.
17. 이송, 김성구, 이용호, 2006, 한국암반공학회지, 제16권, 제2호, 양만장의 발파 진동 소음 현장측정과 수치해석을 통한 영향검토 및 합리적인 발파설계 연구, pp.179~188.
18. 임대규, 신영철, 전양배, 2013, 대한화약발파공학회지, 제31권, 제1호, 양만장 및 가족 사육시설 인접지역 암굴착공법 검토에 관한 연구, pp. 23~32.
19. 에스브이에스, 환경진동소음측정기 RealWave Analyzer.
20. 윤종락, 이성욱, 안수용, 박지현, 배종우, 안명석, 2006, 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 수중소음이 어류에 미치는 영향.
21. 전남대학교 수산과학연구소, 2012, 국도 77호선 완도 강독지구 위험도로 개수공사 어업피해영향조사, pp. 54~55, pp. 64.
22. 조민기, 2013, 소음이 민물양식 어류에 미치는 생리적 영향, 충북대학교 박사학위논문, pp. 88~89.
23. 중앙환경분쟁조정위원회, 2007, 공사장 환경분쟁사건 소음·진동도 산출방법 개선 연구, pp. 32~33.
24. 중앙환경분쟁조정위원회 I, 2009, 환경분쟁조정사례집, 제18집, pp. 223~236.
25. 중앙환경분쟁조정위원회 II, 2009, 소음·진동으로 인한 육상 양식어류 피해 평가 및 배상액 산정기준에 관한 연구, pp. 113, pp. 117.
26. 중앙환경분쟁조정위원회, 2010, 진동레벨과 진동속도의 상관성 분석 등에 관한 연구, pp. 15~17, pp. 41, pp. 53~54.
27. 중앙환경분쟁조정위원회, 2013, 환경분쟁조정사례집, 제22집, pp. 30.
28. 하정민, 이종명, 이정훈, 구동식, 최병근, 2012, 한국해양공학회지, 제26권, 제2호, 수중소음 거리감쇠 특성식을 이용한 해양생물 피해영향범위 예측, pp. 14~19.
29. 한국구조물진단학회, 2006, 지하구조물 안전계측 이론과 실무, 구미서관, pp. 3~6.
30. 한국소음진동공학회, 2002, 소음·진동 용어해설집, pp. 119~120.
31. 환경부, 2010, 소음·진동 공정시험기준, pp. 77, pp. 108, pp. 110.
32. 환경부, 2013, 환경측정기기의 형식승인 정도검사 등에 관한 고시의 소음·진동분야, pp. 391.
33. 홍립, HLVS-04 설명서.
34. Alaska department of fish and game, 1991, Blasting standards for the protection of fish, pp. 1.

35. Bastasch et al, 2008, Appendix 8, Technical Memorandum: Oregon LNG Terminal and Oregon Pipeline Project-Underwater Noise Propagation, Monitoring, and Mitigation, pp. 1~2.
36. California Department of Transportation, 2009, Technical Guidance for Assessment and Mitigation of the Hydro-acoustic Effects of Pile Driving on Fish, pp. 2~15.
37. Cott P. A., Hanna B. W., and Dahl J. A, 2003, Canadian Manucript Report for Fisheries and Aquatic Sciences 2648, pp. 10.
38. Engas A., Lokkeborg S., Soldal A. V., and Ona E, 1993, Comparative fishing for cod and haddock with commercial trawl and longline at two different stock levels, Northwest Atlantic Fisheries Organization.
39. Halvorsen M. B., Casper B. M., Calson T. J., and Popper A. N., 2011, Predicting and mitigating hydro-acoustic impact on fish from pile installations, NCHRP Res Results Digest 363, project 25~28, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, D. C. <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/166159.aspx>.
40. Halvorsen M. B., Casper B. M., Woodley C. M., Calson T. J., and Popper A. N., 2012a, Threshold for onset of injury in Chinook salmon from exposure to impulsive pile driving sounds. PLoS ONE 7(6):e38968. doi:10.1371/journal.
41. Halvorsen M. B., Casper B. M., Matthews F., Calson T. J., and Popper A. N., 2012c, Effects of exposure to pile driving sounds on the lake sturgeon, Nile tilapia, and hogchoker. Proc Roy Soc B279:4705~4714.
42. Hamernik R. P., and Hsueh K. D., 1991, Impulse noise: some definitions, physical acoustics, and other considerations, J. Acoust. Soc. Am. 90, pp. 189~196.
43. Hubbs C. L., and Rechnitzer A. B., 1952, Report on experiments associated designed to determine effects of underwater explosion on fish life. Calif Fish Game 39, pp. 333~366.
44. Instanfel, Blastware Operational Manual.
45. Kryter K. D., 1985, The effects of noise man, 2nd edition, Academic Press, Orlando, FL, pp. 688.
46. Jenen., 2003, New Mechanical Shock Sensitivity Units in Support of Criteria for Protection of Salmonid Eggs From Blasting or Seismic Disturbance, pp. 2~4.

47. Lagardere J. P., 1982, Marine Biology, Vol. 71, Effects of Noise on Growth and Reproduction of Crangon in rearing Tanks, pp. 177~185.
48. Hasting M. C., and Popper A. N., 2005, Effect of Sound on Fish, California Dept. of Transportation, pp. 8~81.
49. Payne C., Andrews L., Fancey D., and Christian J., 2008, Agreement in principle for interim criteria for injury to fish from pile driving activities, pp. 1~4.
50. Popper A. N., Smith M. E., and Cott P. A., et al, 2005, Effects of exposure to seismic airgun use on hearing of three fish soecies, J. Acoust Soc Am 117, pp. 3958~3971.
51. Popper A. N., Hawkins A. D., Fay R. R., Mann D. A., Bartol S., Carlson T. J., Coombs S., Ellison W.T., Gentry R. L., Halvorsen M. B., Lokkeborg S., Rogers P H., Southal B. L., Zeddies D. G., and Tavalga W. N., 2014, Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles, pp. 37~51.
52. Richardson W. J., Greene Jr. C. R., Malme C. I., and Thomson D. H., 2008, Marine Mammals and Noise, Academic press, pp. 18
53. RION CO. LTD., Instruction manual Vibration Manual VM-53A.
54. Urick R. J., 1975, Principles of Underwater sound”, Mcgraw-Hill, pp. 13~15.
55. Wright D. G., and Hopky G. E., 1998, Guidelines for the use of explosives in or near Canadian fisheries waters. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2017, pp. 1~34.
56. Yan H. Y., Anraku K., and Babaran R. P., 2010, Behavior of Marine Fishes, pp. 47.
57. Yelverton et al., 1975, The Relationship Between Fish Size and Their Response to Underwater Blast, Report DNA 3677T, Director, Defense Nuclear Agency, Washington, DC.
58. 畠山良己, 1992, 水産工學, Vol. 28, No. 2, 漁の聽覺能力, pp. 111~119.
59. 畠山良己, 1995, 電子情報通信學會技術研究報告, 魚の聽覺と音に對する反應, pp. 19~26
60. 畠山良己., 1996, 海洋音響學會誌, Vol. 23, No. 3, 魚の聽覺能力と水中音に對する反應( I ), pp. 73~80.
61. 畠山良己., 1996, 海洋音響學會誌, Vol. 23, No. 3, 魚の聽覺能力と水中音に對する反

應(Ⅱ), pp. 132~139.

## 감사의 글

올해로 학위 과정을 마치게 되었습니다. 저에게 새로운 시작을 할 수 있게 도움을 주신 분들께 감사의 마음을 전합니다.

학사시절, 대학원 재학중에 많은 지도편달을 해 주신 강추원 교수님, 저의 무거운 짐을 덜어 주신 고진석 지도교수님, 제가 관과했던 부분을 깨우쳐주신 류창하 박사님, 세심하게 검토해 주신 이연규 교수님과 항상 지근거리에서 조언을 아끼지 않은 김재웅 박사님께 고개 숙여 깊이 감사드립니다.

학위를 준비하는 동안 많은 도움을 준 김의곤, 박진홍, 장호민, 류복현, 송하림, 김지수와 최낙철님께 감사합니다. 그리고 승훈개발 최동석 사장님께 고마움을 전합니다.

저의 아들이 성장 과정에서 힘들었을 때 많은 도움을 주신 분들께 감사하다는 말을 제대로 하지 못했는데 이제야 이 지면을 통해 진심으로 감사드립니다.

오늘도 들에 나가서 일하고 계실 아버지, 일본 자료를 번역해준 인생의 동반자 김윤정, 우리 5형제(형 최인홍, 동생 종필, 혜정과 윤정)와 항상 어려울 때 도와주신 처가 가족께 고마움을 전합니다.

새벽시간에도 아빠가 출근 할 때면 꼭 배웅을 하는 사랑스럽고 자랑스러운 민규, 영주와 함께 이 기쁨을 함께 하고자 합니다.

어머님과 장모님이 계셨으면 하루 밤만 자고 일어나면 소문이 10리는 퍼졌을 텐데, 아 안타까운 현실! 어머님, 장인어른과 장모님 영전에 이 논문을 바칩니다.