

지반진동과 수중소음의 상관성 연구

박정봉^{1)*}, 강추원²⁾, 이창원³⁾

A Study on the Correlation between Underwater Noise and Ground Vibration

Jung-Bong Park, Choo-Won Kang, Chang-Won Lee

Abstract This study compared and analysed ground vibration, size of underwater background noise in fish farms and underwater object noise of blasting and obtained ground vibration prediction equation through a regression analysis and correlation equation between underwater object noises in order to predict degrees of underwater noise in blasting and organize underwater noise control regulations. Before the study, when background noise of fish and shellfish farms with different conditions was measured, levels of background noise were different according to environmental characteristics of each farm. Ground vibration which causes underwater noise was measured to obtain a correlation equation between ground vibration and underwater object noise. Therefore, if underwater noise is predicted for each construction with a use of a correlation and permissible standards appropriate for each condition are applied for design and construction, financial loss from damages to fish and shellfish caused by development of insufficient technological and engineering logic can be prevented and successful construction with safety of underwater creatures guaranteed can be achieved.

Key words Ground vibration, Underwater noise, Sound pressure level

초 록 본 연구에서는 암반의 굴착(발파)공사 등으로 인하여 발생하는 지반진동과 어패류 양식장 등의 수중 배경소음도 및 실제 발파작업시에 발생하는 수중 대상소음도의 척도를 비교·분석하고, 회귀분석에 의한 지반진동추정식과 수중 대상소음 간의 상관식을 도출하여 굴착공사시 수중소음도의 발생정도를 사전 예측하고자 하였으며, 나아가 수중소음 관리기준의 정립을 위한 첫걸음으로 본 연구를 시작하게 되었다. 그동안 실험을 진행하기 전에 상황조건을 달리한 어패류 양식장에 대해 배경소음도를 측정하여 본 결과 양식장마다 각각의 환경적 특성에 따라 배경소음 수준정도가 다양하게 나타나고 있고, 수중소음을 유발하는 지반진동을 실측하여 지반진동과 수중 대상소음 간의 상호 관계식을 도출할 수 있었다. 따라서 상관식에 의해 각종 건설공사에서 수중소음 유발정도를 사전에 예측하여 당해 실정에 적합한 관리(허용)기준을 설정, 설계시공 등에 적용할 수 있으므로 과거의 기술적, 공학적 논리의 빈약한 기술전개로 인한 어패류 피해의 경제적 손실을 사전에 예방할 수 있고, 수중생물체에 대한 안전성을 확보한 가운데 원만한 건설공사를 진행할 수 있다는 가능성을 발견할 수 있었다.

핵심어 지반진동, 수중소음, 음압레벨

¹⁾ 서울과학기술대학교 안전공학과 외래교수

²⁾ 조선대학교 에너지자원공학과 교수

³⁾ 삼정 ENC 기술사사무소 대표

* 교신저자 : debe5505@naver.com

접수일 : 2013년 6월 5일

심사 완료일 : 2013년 6월 19일

게재 승인일 : 2013년 6월 26일

1. 서론

각종 건설공사로부터 발생하는 소음과 진동이 인간 생활에 미치는 매우 심각한 환경 공해문제로 대두되어 온 바는 이미 오래 전부터의 일이다. 현재 이와 같

이 인간생활에 미치는 환경적 공해문제뿐만 아니라 소, 돼지, 닭 등 집안 우리에서 사육되고 있는 가축은 물론 강, 저수지, 바다 등 수중에 위치한 가두리양식장의 어패류에 대한 피해영향을 호소하는 민원발생이 사회문제로 대두되고 있다. 뱀장어, 송어, 광어, 숭어, 우럭, 전복 등 수중 양식 어패류에 대한 발파 충격파의 소음·진동 영향으로 인한 민원문제는 국내의 경우 피해기준이 설정되어 있지 않고 있을 뿐만 아니라 역학조사가 이루어진 바 없으므로 피해주장에 대해 사실적 검증방법조차도 매우 모호한 상태이다. 또한 이들의 민원발생에 따른 피해보상 요구액도 일반 가축 등에 비하여 월등히 높아 양 당사자 간의 주장도 첨예하게 대립되고 있는 양상을 보이고 있다. 특히 수중에서 양식하는 어패류는 대부분 기업화되어 있거나 촌락지역에서도 농업을 대체하는 주 생업수단으로 영위하는 경우가 많으므로 건설공해 중에서도 소음과 진동으로 인한 피해발생이 비교적 큰 경제적 손실을 초래하고 있는 사회적 문제로 발전하게 되었다. 또, 객관적이고 형평성에 적합한 공학적, 기술적 접근방법이 사실상 전무한 상태로서 피해당사자 간의 절충방안을 모색하기도 어려운 경우가 대부분이다. 그리고 중앙환경분쟁조정위원회에서도 외국의 어류전문가들이 제시한 문헌내용을 일부 제한적으로 인용함으로써 보다 확실한 공학적 논리와 기술적 접근방법이 결여된 조정결정을 내리는 경우가 많았다.

그러므로 이로 인해 실질적인 피해에 대한 정확한 근거가 결여된 상태에서 건설공사로 인한 인근 양식장 등의 어패류 피해를 호소하는 민원인과 건설사 간의 시각차가 어긋나고 있는 현 상황 하에서 분쟁이 지속된다면 건설전문가들과 어류전문가들 간의 대립으로 변질될 가능성 또한 배재할 수 없을 것이다.

따라서 일반적인 환경적 특성이 고려된 수중소음 관리기준의 확립과 수중소음 측정방법 등의 기준 설정이 시급하게 요구되고 있으나 이에 앞서 보다 공정하고 현실적인 방법으로 지반진동과 수중소음이 발생하는 공학적 원리에 주목하여 소음·진동 발생원과 이격거리를 고려한 어패류 양식장 등에서 지반진동의 발생크기에 따라 수중 대상소음을 예측할 수 있는 상관성에 대한 연구를 착안하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 좀 더 범용성과 객관성을 제고하기 위하여 지역과 지질 및 암상이 상이한 지반조

건과 굴착(발파)조건(개착발파, 터널 심빼기 발파, 지하터파기 발파 등) 및 제원(지발당 최대장약량 및 측정거리 등)을 다변화(多變化)한 조건하에서 시험발파를 통해 수집한 발파진동과 수중소음에 대한 분석을 실시하였다. 특히 수중소음과 연관된 지반진동 측정 자료의 회귀분석을 통해 검측된 자료의 신뢰성과 유용성을 우선 확인한 다음 지반진동과 수중소음 간의 상관성을 비교·분석하였다.

2. 수중소음 이론

육상에서 측정할 수 있는 공중소음(대기소음)이나 진동의 피해에 대해서는 일반인들에게도 어느 정도 인식되어 있으나 지반으로부터 수중(ground to water) 또는 수중에서 수중(water to water)으로의 작업으로 인해 발생하는 수중생물의 피해에 대해서는 대부분의 일반인들이 정상적으로 인식하지 못하고 있는 것이 현실이다(Fig. 1).

일반적으로 발파가 이루어지는 동안의 시간은 수초 이내로 극히 짧은 편이지만 발파작업으로 인하여 순간적으로 발생하는 충격파는 수중에서 서식하는 어패류에게는 중대한 영향을 끼치는 경우가 발생될 수 있다. 이와 같은 충격파가 전달되는 과정에서 동일매체(同一媒體)가 아닌 여러 가지 상황에서의 이질매체(異質媒體)의 통과 즉, 지반에서 수중, 수중에서 지반으로 또는 대기중에서 수중(air to water)을 통하여 전달되기 때문에 실제 발생하는 소음의 세기(크기) 정도가 매우 저감되어 나타나거나 또는 증폭되어 나타날 수도 있으므로 획일적인 값을 나타낼 수 없다 하겠다.

대기소음과 수중소음의 근본적인 차이점은 전파매질이 상이하다는 것이며, 이러한 매질의 차이는 소리

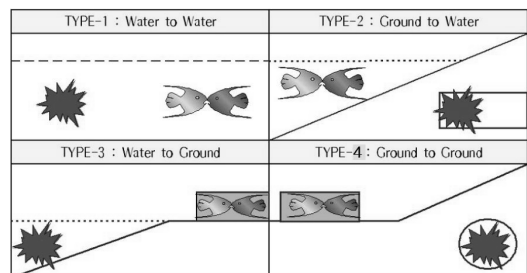


Fig. 1. Type of underwater noise.

의 전달속도를 다르게 하고, 소음에 노출된 생물에 대한 충격에서도 차이가 난다. 매질 속을 전파하는 음은 운동하는 입자의 운동에너지와 탄성매질 내의 압축에 따른 위치에너지를 합한 물리적 에너지를 전달한다. 음의 세기를 나타내는데 있어서 음의 세기강도(Intensity)를 이용하는데, 이는 파가 매질 속을 전파해 갈 때 전파방향에 수직인 단위면적을 시간당 일정한 에너지가 통과하게 된다. 이때 단위면적을 통과하는 에너지 총량을 의미하며, 평면파에서 인텐시티(I)는 음압과의 관계에서 $I = P^2/\rho c$ 와 같이 나타낼 수 있다. 음압과 고유 음향임피던스와의 관계식에서 공기중 및 수중에서의 평면파에 대하여 동일한 음압 $1Pa(N/m^2)$ 이 나타내는 인텐시티는 매질의 고유 음향임피던스 값에 따라 아래와 같이 차이를 보인다.

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

$$I_{water} = \frac{\overline{P^2}}{\rho_{water} c_{water}} = \frac{1}{1,000 \times 1,500} = 0.67 \times 10^{-6} W/m^2 \quad (2)$$

3. 수중소음 피해기준

건설현장과 인접되어 있는 장소에서 발생한 인근 어류 등에 대한 피해사례들을 살펴보면, 어패류에 대한 소음진동 수준의 임계허용치 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 종결지어지는 경우가 대부분이다. 공중소음과 수중소음은 데시벨(dB)로 환산하는 기준 값이 다르다고 표현하면서도 공중소음과 수중소음의 기준레벨 변환표에 의해 환산하거나 다인 퍼 제곱센티미터(dyne/cm²) 혹은 마이크로 바(μ bar)에 100dB을 더하는 경우와 공중소음레벨에 26dB을 더하는 경우 등의 방법을 이용하여 왔다.

그동안 우리나라에서 수중소음으로 인한 기존의 피해와 피해조정사례 및 판례 등을 검토하여 보면 다음

의 Table 1과 같이 정리된다.

해상의 환경은 조류의 영향 및 바람의 영향 등이 크며, 육상의 양식장은 수중생물의 생명 유지장치(물 순환기, 수차 등)의 작동소음 및 기타 양식에 필요한 물리적 소음진동 등에 의해 정온한 상태로 보기는 힘들다.

수중생물의 생명 유지장치를 가동할 때에 물 한 두 방울이 떨어지는 수중소음도는 무시된다. 그러나 온화정숙한 상태에서의 물 한 두 방울이 떨어지는 수중소음도는 보통 10~20dB 정도에 이른다. 따라서 육상에서 10dB 정도의 공중소음값은 매우 큰 의미를 가지며, 피해기준을 설정하는 영향의 범위도 크지만 수중소음에서의 의미는 피해기준을 설정하는 영향의 범위에 큰 의미를 갖지 않으며 일반적인 배경소음도에 해당된다.

따라서 기존의 수중소음도를 예측한 사례들처럼 근거가 불분명하거나 없는 기준을 제시하는 것 보다는 각기 다른 상황에 따라 배경소음을 측정하여 1차적인 피해기준을 설정하는 것이 바람직하다고 사료된다.

4. 현장실험

4.1 실험장소 및 압중

현재까지 수중소음에 대한 관리기준 및 소음추정식이 정립되어 있지 않으므로 전국의 다양한 여러 곳의 현장(경상남도 고성 및 사천, 부산광역시 기장, 전라남도 나주, 강원도 홍천, 충청남도 아산, 충청북도 청주 등 7개 현장)에서 행하여지고 있는 발파작업시에 지반진동과 함께 수중소음을 측정하였다.

자료수집을 위한 발파대상 압중을 대별하면 화강암과 편마암이 주종이었으며, 발파대상 현장은 도로개설을 위한 터널굴착 및 노천굴착, 부지조성 및 기계설 지하터파기 굴착 등 다양한 장소에서 이루어졌으나 발파횟수의 제한성 때문에 수집자료(약 2년 반 기간 동안 62회 발파 중 45개의 진동 Data, 수중소음-SPL 62개 수집)의 한계가 있었다. 수중소음 측정장소는 해상 가두리 양식장, 육상 콘크리트 수조 및 토사로 이루어진 자연 저수지 등이었다.

4.2 수중소음 측정방법 및 실험내용

수중소음 측정방법과 실험내용은 지반진동과 수중

Table 1. Underwater noise measurement methods and judgment of past

구분	수중소음 측정방법 및 판단결과	문 제 점	비 고
Case 1	① dyne/cm^2 or $\mu\text{bar} + 100\text{dB}$ ② 공중소음 + 26dB	① 공중소음의 수중투과율: 0.109% (Air to Water 전파경로 무시) ② 공중소음이 증가하면 수중소음도 증가한다는 판단.	
Case 2	① 평상소음 126~130dB인 실험수조에서 녹취한 폭파소음이 수록된 수중소음을 10dB 단위로 140~180dB을 3분간 방음 - 넓치 생리상태 영향조사. ② 160dB : 스트레스 반응 지표-혈청 코티졸, 글루코스 농도 증가. ③ 170~180dB : 유의하게 높은 값을 보여 평상소음에 비해 약 30~40dB 높은 수중소음 조건에 해산어류가 간헐적으로 노출돼도 스트레스로 작용. ④ 발파진동은 발파위치, 사용 장약량, 천공 수에 따라 0.08~0.09m/s로 나타나 주변양식장 어류와 전복에 간접영향 미침.	① 공중소음의 수중투과율: 0.109% (Air to Water 전파경로 무시) ② 육상 녹음소음을 수중에 방음한 것.	
Case 3	① 공사중 소음진동 주간 60dB, 야간 소음 50dB(A), 진동 55dB(V)을 초과하거나 자연 상태 + 20~25dB 이상 증가하면 양식중 어류의 생리에 영향으로 정상적 양식 곤란. ② 각종 공사 장비, 파일, 발파작업 소음·진동 피해 : 소음 40~50dB(A), 진동 20~30dB(V) 증가 예측 - 뱀장어에 치명적 영향으로 양식 불가능. ③ 고속도로 개통, 차량통행시 소음 33.5dB(A), 진동 13.8dB(V) 증가 예측 판단으로 뱀장어 양식 불가능.	① 공중소음의 수중투과율: 0.109% (Air to Water 전파경로 무시) ② 공중소음이 증가하면 수중소음도 증가한다는 판단.	
Case 4	① 양어장 피해발생 주 원인 : 브레이커 작업, 덤프트럭 통행 및 도로포장 공사용 콘크리트 독성. ② 이 원인에 의해 공사기간 동안 제한 피해 발생하므로 수산업법 시행령 검토결과 보상대상 됨.	① 공중소음의 수중투과율: 0.109% (Air to Water 전파경로 무시)	뱀장어 넓치 전복 등
Case 5	「소음진동 규제법 시행규칙」상의 공장소음진동 규제기준 중 자연환경보전지구 → 수산자원보전지구에 해당하는 소음진동 기준 적용, 소음진동의 순 증가를 20~25dB 이상으로 어업피해 여부를 판단.	① 공중소음의 수중투과율 : 0.109% (Air to Water 전파경로 무시) ② 공중소음이 증가하면 수중소음도 증가한다는 판단.	
Case 6	① 수중소음에 의한 피해범위 : 소음원의 소음진동으로 인한 수중소음레벨을 자연소음 레벨보다 12.0dB 이상 높은 곳까지를 직접피해 예상범위로 정함. ② 공사차량(덤프트럭) 이동으로 인한 피해범위 반경 150m 정도로 예상.	① 자연 소음레벨보다 12.0dB 이상 높은 값을 피해기준으로 산정한 산출근거 미비. ② 덤프 차량 운행에 의한 피해 범위를 150m로 산정한 산출근거 미비.	
Case 7	① 소음원의 소음 및 진동으로 인한 수중소음레벨이 자연소음레벨보다 12.0dB이상 높은 곳까지를 피해예상 범위로 정함. ② 브레이커작업으로 인한 피해범위는 반경 305m 정도로 예상.	① 자연 소음레벨보다 12.0 dB 이상 높은 값을 피해기준으로 산정한 산출근거 미비. ② 브레이커작업에 의한 피해범위를 305m로 산정한 산출근거 미비.	
Case 8	공중소음도와 상이한 값의 수중소음도가 산출되며, 회문교공사시 발생한 소음도 51.5~79.9dB(A)에 대한 수중소음도는 94~114dB의 범위로 이 수준의 소음으로 인한 어류피해는 국의 연구문헌 등을 참고해 볼 때 상당히 높은 피해의 개연성이 예상	① 배경소음의 척도인 수차소음의 측정을 공중소음으로 측정하였으며, 이에 따라 수중소음을 판단. ② 공중소음의 수중투과율 : 0.109% (Air to Water 전파경로 무시)	

소음을 발생시키는 상이한 메카니즘과 전파매질의 임피던스에 따른 영향 등을 확인하여 이들 상호 간의 연관성을 분석하기 위한 실험으로, 첫째, 저수지 인근에서 10kg의 추를 다양한 높이에

서 낙추(Drop-test)시켜 이때의 충격에 의해 발생하는 지반진동과 수중소음을 동시에 수집, 분석하였고, 둘째, 실제 발파(Blast-test)시에 발생된 지반진동 및 수중소음을 동시에 측정할 자료를 수집, 분석하였으며,

Table 2. Kinds of measuring equipment

	Ground vibration		Underwater Noise
	Blast vibration velocity	Ground vibration level	
Manufacturer	Instantel, PMT etc.	Rion	B & K
Product No	DS equipment	VM-1220E	8106
Note	Ground vibration velocity measurement	Ground vibration level measurement	Underwater noise measurement equipment
Unit	cm/s	dB(V)	SPL : dB re : 1μPa

Table 3. Drop-test specification

Sort	Condition	
Study area	Gangwon-do Hongcheon	
Geological features	Biotite granite	
Drop weight	10kg	
Drop height	1.0m, 1.5m, 2.0m	
Ground vibration measurement point	Drop initial point distance 2.0m, Space 1.0m, 24point.	
Underwater noise measurement point	Drop initial point distance 25.0m.	
Underwater noise measurement depth	Water tank	0.2m
	Reservoir	1.0m

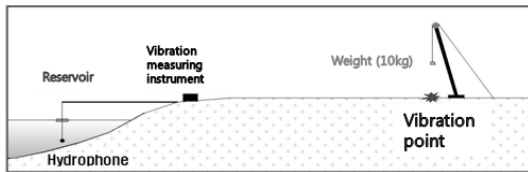


Fig. 2. Drop-test schematic(reservoir).

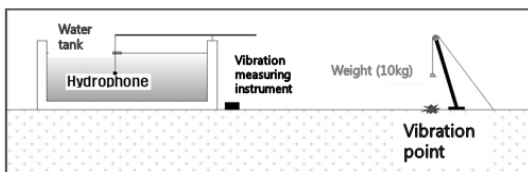


Fig. 3. Drop-test schematic(water tank).

셋째, 낙추실험과 발파실험에 의해 수집된 자료를 통합·분석하였다.

넷째, 육상 콘크리트 수조의 경우 어패류를 양식하는 수조의 높이가 대부분 1m 정도이므로 1m 이내의 적절한 깊이에 수중센서(Hydrophone sensor)를 설치하였고, 해상 또는 저수지 내의 가두리 양식장의 수심은 통상 3~5m 정도인 점을 감안하여 수중소음 측정

을 위한 센서는 수심 2~3m 정도에 설치·측정하였다.

다섯째, 수중소음과 지반진동 간의 상관성을 비교·분석하기 위한 지반진동 측정기는 수중소음측정기를 설치한 위치로부터 5~10m 정도 이격된 최단거리 내의 지반에 설치하였다.

이때 사용된 지반진동 및 수중소음 측정장비는 Table 2와 같다.

4.3 낙추실험 개요

낙추실험을 실시한 장소의 지질, 충격하중 추 증량, 지반진동 측정점 및 수중소음 측정점에 대한 제원과 모식도는 다음의 Table 3과 Fig. 2~3과 같다.

낙추실험은 센서위치에서 2.0m 이격된 위치로부터 1.0m 간격으로 25.0m 이격된 거리까지 총 24개의 계측점을 선정하고, 정 위치에서 자유낙하 방식으로 충격하중을 가했다. 또한, Fig. 4와 5는 실험장비와 계측장비의 사진이다.

4.4 발파실험 개요

발파실험은 실제 발파작업이 이루어지고 있는 현장에서 발파작업시의 발파진동과 수중소음을 측정하여

상관성을 도출하기 위한 실험을 실시하였으며, 실제 발파작업을 실시하는 현장인 관계로 현장 주변의 환경여건에 따라 변화를 준 지발당장약량으로 실시한 발파시의 진동과 수중소음에 대한 계측자료(Data)를 확보하였다.

발파실험을 실시한 장소의 지질, 발파제원, 지반진동 측정점 및 수중소음 측정점에 대한 제원과 모식도는 다음의 Table 4 및 Fig. 6~7과 같다. 또한, Fig. 8과 9는 지반진동과 수중소음을 측정하기 위한 계측기 설치 사진이다.

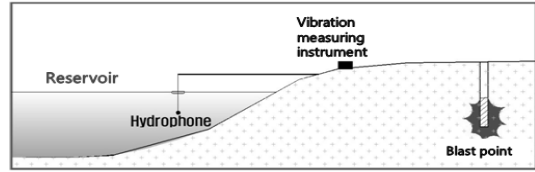


Fig. 6. Blast-test schematic(reservoir).

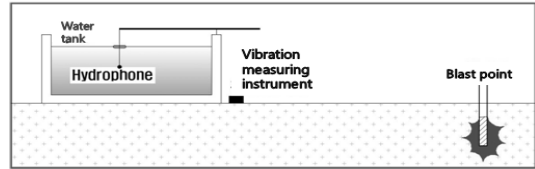


Fig. 7. Blast-test schematic(concrete water tank).



Fig. 4. Impact loading equipment and impact testing.



Fig. 8. Measurement of underwater noise and ground vibration (reservoir).



Fig. 5. Ground vibration and underwater noise measurement from reservoir(a) and water tank(b).



Fig. 9. Measurement of underwater noise and ground vibration (concrete water tank).

Table 4. Blast-test specification

Sort	Condition	
Study area	Gangwon-do Hongcheon, Gyeongsangnam-do Goseong & Sachun, Busan Gijang, Jeonnam-do Naju, Chungcheongnam-do Asan, Chungcheongbuk-do cheongju.	
Geological features	Biotite granite, Sandstone, Mudstone, Tuff, Mixed gneiss, Porphyritic granite etc.	
Blast location	Road opening, Tunnel excavation, Bed excavation etc.	
Explosive/Detonator	Emulsion type / MS, DS detonator	
Charge per delay range	0.32~34.0kg	
Underwater noise measurement distance range	70~692m	
Underwater noise measurement depth	Water tank	0.6m
	Reservoir	2.0~3.0m

5. 실험결과분석

과거 국내의 학자들에 의한 연구결과를 보면 측정자의 판단에 의해 소음영향 대상의 중요도에 따라 소음의 영향범위를 최대 또는 최소로 볼 수 있으며, 배경소음의 수준에 따라 배경소음이 작을수록 소음의 영향을 미치는 대상의 피해범위가 커진다는 것을 고려하지 않은 것으로 사료된다.

또한 발파작업으로 인하여 순간적으로 발생하는 충격파는 수중에서 서식하는 어패류에게 중대한 영향을 끼치는 경우가 발생될 수 있으며, 이와 같은 충격파가 전달되는 과정에서 동일매체(同一媒體)가 아닌 여러 가지 상황에서의 이질매체(異質媒體) 통과 즉, 지반에서 수중, 수중에서 지반, 수중에서 수중, 또는 대기중에서 수중을 통하여 전달되기 때문에 실제 발생하는 소음의 세기(크기) 정도가 매우 저감되어 나타나거나 또는 증폭되어 나타날 수도 있으므로 확실적인 값을 나타낼 수 없다는 점에 대해서도 유의할 필요가 있다 하겠다. 대기중의 공중소음과 수중소음의 근본적인 차이점은 전파매질이 상이하다는 것이며, 이러한 매질의 차이는 소리의 전달속도를 다르게 하고, 소음에 노출된 생물에 대한 충격에서도 차이가 난다.

따라서 본 연구에서는 이러한 점들을 고려하여 실제 현장상황에 대한 수중에서의 배경소음과 대상소음을 측정하였으며, 수집된 지반진동값과 수중소음 간의 상관관계를 보다 정확하게 확인·구명하기 위하여 지반진동 자료를 통계 프로그램(excel)으로 회귀분석을 실시, 신뢰도와 상관계수를 확인하였다. 그리고 회귀분석 결과 유용하게 활용될 수 있다는 적용성을 확인한 후 실험을 통해 수집된 충격진동 및 발파진동과 이때의 수중소음 계측자료를 비교·분석하여 다음과 같이 수중소음예측식을 도출하였다.

- ① 낙추실험 자료에 의한 PPV - SPL 간의 상관식
- ② 발파실험 자료에 의한 PPV - SPL 간의 상관식
- ③ ① 및 ②의 전체 자료에 의한 PPV - SPL 간의 상관식

5.1 낙추실험에 의한 수중소음 예측식

자연상태의 저수지와 임의의 수조에서에서 실시한 낙추실험결과를 검토한 결과 별다른 차이가 없음이

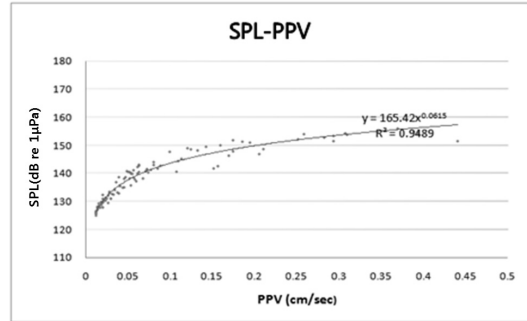


Fig. 10. Graph of the correlation between underwater noise and ground vibration through the Drop-test.

확인되었다. 즉, 일반적인 토사로 구성된 저수지와 지반 위에 임의로 설치한 수조에서의 수중소음 측정결과와는 이격거리와 추의 중량에 따른 발생정도의 차이만 있을 뿐 수중소음의 전파과정상에 특이한 점은 발견되지 않았다.

따라서 낙추실험을 통하여 수집된 계측자료 중 수중소음과 지반진동 간의 비교가 가능한 100개의 자료를 활용하여 SPL-PPV 간의 상관성을 비교·분석한 결과는 Fig. 10과 같다.

적용 계측자료는 지반진동 성분 중 최대치인 PPV와 수중소음의 최대치인 SPL값을 활용하여 비교·분석하였으며, 그 결과 도출된 상관식은 다음과 같다.

$$SPL = 165.42(V)^{0.0615} \tag{3}$$

여기서 SPL은 예상되는 수중소음치(dB)이며, V는 지반진동값(cm/s)을 나타낸다.

5.2 발파실험에 의한 수중소음 예측식

실제 수중소음과 관련된 발파작업이 행하여지고 있는 공사현장(전국 7개 현장)에서 측정한 계측자료 중 수중소음과 지반진동의 비교가 가능한 45개의 계측자료를 활용하여 상관성을 비교·분석한 결과는 Fig. 11과 같다.

분석에 사용된 계측자료는 지반진동성분 중 최대치의 PPV와 수중소음 최대치의 SPL값을 적용하였으며, 이를 비교·분석한 결과 도출된 상관식은 다음과 같다.

$$SPL = 173.90(V)^{0.0485} \tag{4}$$

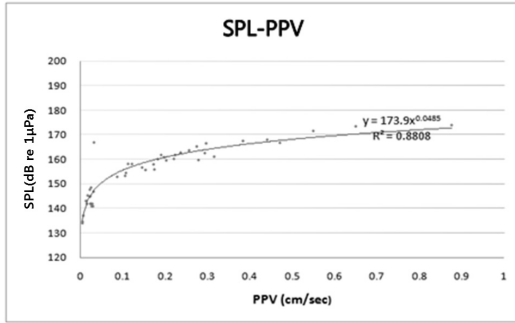


Fig. 11. Graph of the correlation between underwater noise and ground vibration through the Blast-test.

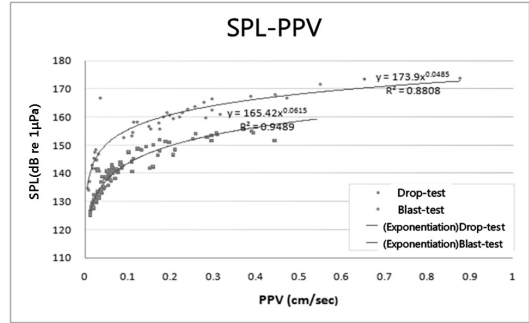


Fig. 12. Comparison of correlation graphs from Drop-test and Blast-test.

여기서 SPL은 예상되는 수중소음치(dB)이며, V는 지반진동값(cm/s)을 나타낸다.

5.3 낙추실험 예측식과 발파실험 예측식의 비교

낙추실험 결과에 의해 도출된 수중소음 예측식과 발파실험 결과에 의해 도출된 수중소음 예측식을 비교·분석한 결과 Fig. 12와 같다.

위의 Fig. 12에서 보는 바와 같이 낙추실험을 통해 구한 수중소음예측식과 발파실험에 의해 도출된 수중소음예측식의 곡선 형태도 유사하게 나타나고 있으며, 발파실험에 의한 상관식이 낙추실험에 의한 상관식보다 상위에 위치함을 보여주고 있다.

이와 같은 결과는 일반적으로 발파작업에 의한 진동·소음의 발생 특성과 항타작업 등의 충격성 진동·소음의 발생 특성에 근본적인 차이가 있으므로 그래프상의 위상을 달리하는 것은 당연한 결과이다. 그러나 상관관계를 나타내는 곡선은 발파실험에 의한 것과 낙추실험에 의한 것 모두 유사하게 분석되고 있으므로 두 가지 예측식을 통하여 발파작업과 항타작업 등에 대한 수중소음의 발생정도를 사전에 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 낙추실험과 발파실험 전체를 통한 수중소음과 지반진동의 상관 그래프는 다음의 Fig. 13과 같다.

Fig. 13의 적용 계측자료는 낙추실험과 발파실험 전체를 통한 지반진동 성분 중 최대치의 PPV와 수중소음 최대치의 SPL값을 비교·분석하였으며, 그 결과 도출된 상관식은 다음과 같다.

$$SPL = 169.78(V)^{0.0617} \quad (5)$$

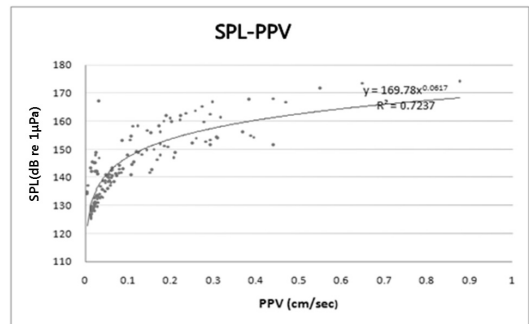


Fig. 13. Graph of the correlation between underwater noise and ground vibration from entire Drop-test and Blast-test.

여기서 SPL은 예상되는 수중소음치(dB)이며, V는 지반진동값(cm/s)을 나타낸다.

이상과 같이 위에서 열거한 각각의 지반진동과 수중소음 간의 상관식을 정리하면 Table 5와 같다.

5.4 수중소음 예측을 위한 상관식 적용성 평가

수중소음 예측을 위한 상관식에 의해 구한 예측값과 실제값을 비교 검증하기 위하여 실제 발파가 행하여지고 있는 두 곳의 발파현장에서 검증에 임하였다.

검증현장 중 한 장소는 강원도 원주시 인근 외곽에 위치한 ○○골프장 건설현장으로 시험발파시 현장과 근접되어 있는 저수지에서 발파진동계측기와 수중소음계측기를 설치하여 총 5회의 시험발파 결과를 모니터링하였다. 또, 서해상에 위치한 중육도 노천발파에서 해안선까지 일직선상으로 총 8대의 발파진동계측기를 설치하고, 해안선에 설치한 진동계측기와 근접된 해상에

Table 5. Prediction model of underwater noise by experimental results

Drop-test prediction equation	$SPL = 165.42 V^{0.0615}$	R = 0.9741	$R^2 = 0.9489$
Blast-test prediction equation	$SPL = 173.90 V^{0.0485}$	R = 0.9385	$R^2 = 0.8808$
All data prediction equation	$SPL = 169.78 V^{0.0617}$	R = 0.8507	$R^2 = 0.7237$

Table 6. Blast-test specification of verification Site I

Sort	Condition
Study area	Gangwon-do Hongcheon
Geological features	Biotite granite
Blast method	Bench blast / Crawler drill $\phi 76$ mm
Explosive / Detonator	Emulsion type / MS, DS Detonator
Blasting number	5
Charge per delay range	1.60~7.20kg
Underwater noise measurement distance	188.6~194.7m
Distance between underwater noise measurement point and ground vibration measurement point	Distance length 5m
Underwater noise measurement depth	2.0m

Table 7. Blast-test specification of verification Site II

Sort	Condition
Study area	Gyeonggi-do Ansan-si Jungyukdo
Geological features	Biotite gneiss
Blast method	Bench blast / Crawler drill $\phi 76$ mm
Explosive / Detonator	Emulsion type / MS, DS Detonator
Blasting number	11
Charge per delay range	3.0~64.0kg
Underwater noise measurement distance	165~230m
Distance between underwater noise measurement point and ground vibration measurement point	Distance length 5~10m
Underwater noise measurement depth	3.0m

수중소음측정기 1대를 설치하여 측정에 임하였다. 두 현장의 실험조건은 Table 6~7과 같다.

Site I 검증

수중소음예측식을 검증하기 위하여 원주의 ○○골 프장공사 노천발파와 현장 인근에서 측정한 수중 배경소음과 수중 대상소음 측정결과는 Table 8과 같다.

검증 Site I에서 발파시 수집된 발파진동 및 수중소음 측정 자료(Table 8)를 수중소음예측식(Table 5)에 의해 산출된 예측값을 비교·검증한 결과 다음의 Table 9와 같다.

Site II 검증

수중소음예측식을 검증하기 위하여 서해상에 위치한 중육도 노천발파에서 측정한 수중 배경소음과 수중 대상소음 측정결과는 Table 10과 같다.

검증 Site II에서 발파시 수집된 발파진동 및 수중소음 측정 자료(Table 10)를 수중소음예측식(Table 5)에 의해 산출된 예측값을 비교·검증한 결과 다음의 Table 11과 같다.

6. 결론

지반진동과 수중소음 간의 단순한 비교·분석은 열

Table 8. Measurement data of blast vibration and underwater noise by verification Site I

	No.	Weight (kg/delay)	Distance (m)	SP (Pa)	SPL(max) (dB re : 1 μ Pa)	Leq (dB re : 1 μ Pa)	SEL(max) (dB re : 1 μ Pa ² -s)	PPV (cm/s)	Note
Verification Site	-	Background noise		4.05	156	111	132	-	Reservoir
	1	1.6	188.6	45.60	154	139	143	0.0270	
	2	4.8	191.4	97.21	160	141	146	0.0857	
	3	4.8	190.4	90.49	163	149	146	0.0651	
	4	7.2	194.7	162.84	170	156	156	0.1130	
	5	7.2	191.4	74.21	160	146	147	0.0810	

Table 9. Comparison of predicted value and measured value of underwater noise(verification Site : reservoir)

		Measurement value		Predicted value(dB re 1 μ Pa)					
		PPV (cm/s)	SPL (dB re : 1 μ Pa)	Blast-test		Drop-test		All data	
				SPL	Gap	SPL	Gap	SPL	Gap
Background noise			156	-	-	-	-	-	-
Verification Site I	1	0.0270	154	146.0	-8.0	132.5	-21.5	135.9	-18.1
	2	0.0857	160	154.4	-5.6	142.2	-17.8	145.9	-14.1
	3	0.0651	163	152.3	-10.7	139.8	-23.2	143.4	-19.6
	4	0.1130	170	156.4	-13.6	144.7	-25.3	148.4	-21.6
	5	0.0810	160	153.9	-6.1	141.7	-18.3	145.4	-14.6
Average		0.0700	161.4	152.6	-8.8	140.2	-21.2	143.8	-17.6
SD					3.3		3.2		3.2
SE					2.6		3.0		3.0

Table 10. Measurement result table of underwater noise from test blasting(Verification Site II)

Number of blast	Sampling rate (SPS)	Distance (m)	Charge per delay(kg)	Peak measurement value		Equivalent noise value (dB re : 1 μ Pa)
				SPL (dB re : 1 μ Pa)	SEL (dB re : 1 μ Pa ² -s)	
1	1000Hz	165	35.0	155.79	142.4	146.20
2	1000Hz	200	40.0	151.94	142.3	141.90
3	1000Hz	230	64.0	158.07	144.5	144.05
4	1000Hz	220	24.0	149.57	140.2	140.23
5	1000Hz	205	34.0	150.17	136.4	143.47
6	1000Hz	200	21.0	150.57	141.2	139.50
7	1000Hz	180	24.0	151.57	140.6	140.21
8	1000Hz	210	61.0	155.01	143.9	144.40
9	1000Hz	210	4.5	141.27	129.9	129.20
10	1000Hz	215	3.0	138.41	128.6	128.60
11	1000Hz	225	9.0	145.74	132.0	132.00
Background noise				141.16	131.90	130.94

Table 11. Measurement result table of blasting vibration and underwater noise

Number of blast	Measurement Data		② Predicted underwater noise (dB re : 1μPa)	Difference between measurement value and predicted value (①-②) (dB re : 1μPa)
	PPV (cm/s)	① Underwater noise (dB re : 1μPa)		
1	0.139	155.8	154.4	1.4
2	0.154	151.9	155.4	-3.5
3	0.215	158.1	158.6	-0.5
4	0.100	149.6	151.3	-1.7
5	0.090	150.2	150.4	-0.2
6	0.068	150.2	147.8	2.4
7	0.088	151.2	150.2	1.0
8	0.103	155.0	151.6	3.4
9	0.030	141.3	140.6	0.7
10	0.030	138.4	140.6	-2.2
11	0.063	145.7	147.1	-1.4
Average gap				-0.31

만든지 가능하지만 보안물건과의 이격거리와 허용진동치에 해당하는 지발당장약량을 산출하는 발파진동 추정식의 신뢰구간과 상관계수의 적합성, 그리고 유용성 검증이 이루어지지 않은 비교·분석은 객관적이지 못하다. 따라서 본 연구에서는 단순히 특정 현장에서 수집한 지반진동과 수중소음 간의 상관성만을 비교·분석하기보다는 여러 장소의 다양한 발파현장에서 지반진동 검측자료를 수집하여 회귀분석을 실시하였고, 발파진동추정식의 신뢰구간과 상관계수의 객관적 적용성 여부를 확인한 후 보안물건(수중 생물체)에 적용할 수중소음 관리(허용)기준치에 해당하는 이격거리별 지발당장약량을 산출하기 위해 지반진동값과 수중소음값의 상관성을 비교·분석하였다. 발파현장에서 발파실험 상관식을 검증, 평가하기 위하여 저수지에서 수중 대상소음을 측정, 분석한 결과 수중소음 예측치와 실측치의 최대차이는 -13.6 ~ -5.6dB re : 1μPa(평균 -8.8dB re : 1μPa)의 차이를 보이고 있으나 부(-)의 수만큼을 감안, 예측하여 관리할 수 있으므로 이 제안식은 범용성과 적용성이 있는 것으로 판단된다. 또한, 검증 Site(중육도 해상)에서 시험발파를 실시, 지반진동 검측자료의 회귀분석에 의한 발파진동추정식으로 허용진동치에 해당하는 수중소음 예측치와 실측치의 차이를 비교한 결과 최대 범위가 -3.5 ~ 3.4dB

re : 1μPa(평균 -0.31dB re : 1μPa) 정도로 나타나 적용성이 매우 높은 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2012년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드린다. 또한 이 논문을 위해 세심한 조언을 해주신 심사위원께도 진심으로 감사드린다.

참고문헌

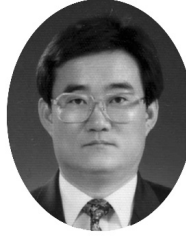
1. Mark Simmonds, Sarah Dolman and Lindy Weilgart, 2004, "Oceans of noise", A WDCCS(Whale and Dolphin Conservation Society) Science report, pp. 20-21.
2. Urick Robert. J, 1975, "Principles of underwater sound for engineers", McGraw Hill, New York, pp. 12-15, pp. 16-21, pp. 82.
3. ALASKA DEPARTMENT OF FISH AND GAME, 1991, "BLASTING STANDARDS For the Protection of Fish", pp. 30.
4. A. E. Ellis, STRESS AND FISH(A. D. Pikerling ed. 1981), "Stress and The Modulation of Defence Mechanism in Fish", pp. 155.
5. Braja M. Das, 1993, "Principles of Soil Dynamics", PWS-KENT Publishing Company, USA.



박 정 봉

서울과학기술대학교 안전공학과 외래
교수
(주)덕원기술사사무소 대표이사/공학
박사/화약류관리기술사

Tel: 02) 335-4242
E-mail: dukwon@paran.com



강 추 원

조선대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062) 230-7117
E-mail: cwkwang@chosun.ac.kr



이 창 원

삼정 ENC
기술사사무소 대표

Tel : 02) 412-8787
E-mail : icw117@dreamwiz.com