

지반진동 측정을 통한 수중소음 예측 및 관리 적용사례

임대규¹⁾, 조광현^{2)*}, 전양배³⁾

A Case Study on the Prediction of Underwater Sound by Measuring Ground Vibration

Dae-Kyu Lim, Kwang-Hyun Cho and Yang-Bae Jun

Abstract As the quality of life is being upgraded, the public complaints about noise and vibration from construction sites are growing. Despite the disputes over the blasting damage on aquatic lives in river, ocean, and aquarium near construction sites tend to increase, most of existing solutions or regulations on the damages caused by blasting are established for the damages on land. Although the estimated amount of damage is up to several millions of USD, there is no guideline for resolving the dispute related to the underwater vibration. This paper presents an example where the public grievance about the underwater noise was successfully resolved by elucidating the characteristics of underwater sound, deducing the correlations between ground vibration and underwater sound during blast, and predicting the underwater sound level during blasting from the ground vibration measured on the ground near an aquarium basin.

Key words Underwater sound, Ground vibration, Blasting damage

초 록 건설공사에서의 소음 및 진동발생에 대한 민원은 끊임없이 대두되고 있으며, 삶의 질이 향상되어감에 따라 민원의 종류가 다양해지며, 발생빈도 역시 증가되고 있는 현실이다. 현재까지 정립된 발파공해에 대한 방지대책 및 규제기준의 대부분은 육상에서 이루어지는 피해사례를 토대로 연구된 결과물들이다. 하지만 최근 들어 공사구간과 인접하여 강, 바다 또는 육상 양식장에서의 수중생물에 대한 피해사례가 증가되고 있는 추세이며, 민원인들이 주장하는 피해액도 수억~수십억에 해당한다. 그러나 이에 따른 규제 및 관리기준 등이 정립되지 않아 분쟁조정에 대한 설득력 있는 결과물이 없다는 것이 문제시 되고 있는 현실이다. 따라서 수중소음의 특성을 명확히 하고, 발파작업에 의한 지반진동과 수중소음의 실측실험을 통해 상관성을 도출하여, 양식장 부근의 발파작업 시 지반진동계측을 통한 수중소음을 예측하고, 민원을 관리한 사례를 소개하고, 이를 수중소음평가를 위한 하나의 지표로 제시하고자 한다.

핵심어 수중소음, 지반진동, 발파피해

1. 서 론

건설산업의 지속적인 발전과 더불어 건설공사의 규

모가 대형화되어 감에 따라 각종 건설장비 역시 대형화되었으며, 이러한 현상은 건설소음과 진동의 발생 크기를 날로 증대시켜 왔다. 특히 화약류에 의한 암반 굴착 발파공사는 근래에 이르러 매우 심각할 정도로 민원문제에 봉착되어 있기도 하다.

주택과 빌딩 및 각종 시설물 등이 밀집되어 있는 도심지 지역에서 행하여진 발파공사로 인하여 주거생활에 대한 소음·진동에 의한 민원발생이 사회적으로 문제시 되어왔으나, 현재는 도심지를 벗어나 비교적

¹⁾ (주)대영지오발파엔지니어링

²⁾ (주)대영지오발파엔지니어링, 상지대학교 신에너지자원공학과 겸임교수

³⁾ 국토해양부 익산지방국토관리청

* 교신저자 : cho9054@hanmail.net

접수일 : 2010년 12월 14일

심사 완료일 : 2010년 12월 25일

게재 승인일 : 2010년 12월 28일

정온한 농어촌 지역에까지 전이되어 있는 바, 일반적으로 가내에서 사육하고 있는 소, 돼지, 닭, 염소 등의 육상 가축뿐만 아니라 뱀장어, 송어, 숭어, 전복 등 수중 양식 어패류에 대한 발파 소음·진동 영향에 관한 민원문제까지도 대두되고 있는바 사회적인 문제가 확대될 가능성이 충분하다고 보여진다.

특히 수중에서 양식하는 어패류는 대부분 기업화되어 있거나 주 생업수단으로 영위하는 경우가 많으므로 건설공해 중 소음과 진동으로 인한 피해발생이 비교적 큰 경제적 손실을 초래하여 사회적 문제로 발전하게 되었다.

건설현장에서 소음·진동으로 인해 발생하는 민원 문제는 현재까지도 유효적절한 관련 규제법규가 구체적으로 마련되어 있지 않음으로 인해서 끊임없이 지속되고 있고 심지어 소송으로까지 이어지고 있는 상태이다. 그나마 소음·진동규제법상 규준을 정하고 있는 것도 아직 인간생활에 대한 환경적 영향만을 기준하고 있을 뿐 피해보상 시 재화 가치가 큰 구조물이나 각종 시설물 및 인간생활의 경제적 소득원과 밀접한 관계를 맺고 있는 여타 생물체에 대한 피해영향의 관리 또는 허용 규준이 구체적으로 명확하게 제정되어 있지 않음으로 인하여 건설기술자들을 끊임없이 괴롭히고 있는 실정이며, 지금까지의 민원문제 해결 방법에 있어서 민원인과 건설기술자 간에 기술성, 타당성, 적법성 면에서 상당한 괴리가 존재해 온 것이 사실이다.

따라서 수중소음의 특성을 명확히 하고, 발파작업에 의한 지반진동과 수중소음의 실측실험을 통해 상관성을 도출하여, 양식장 부근의 발파작업 시 지반진동계측을 통한 수중소음을 예측하고, 민원을 관리한 사례를 소개하고, 이를 수중소음평가를 위한 하나의 지표로 제시하고자 한다.

2. 수중소음의 발생

육상에서 측정할 수 있는 공중소음(대기중 소음)이나 진동의 피해에 대해서는 일반인들에게도 어느 정도 인식되어 있지만 땅위에서나 물 속 작업으로 인한 수중 생물의 피해에 대해서는 사회에서 제대로 인식하지 못하고 있는 것이 현실이다.

통상적으로 육상의 지반위치에서 행하여지는 각종

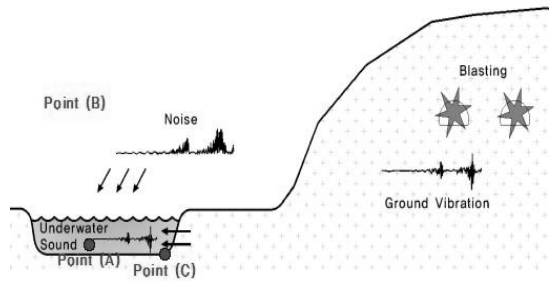


그림 1. 육상 발파 시 수중소음 전달 메커니즘.

건설공사에서는 다양한 소음과 지반진동이 발생된다. 건설공사에서 소음과 진동의 발생원은 원동기 작동에 의한 것, 기계작업에 의한 것, 물리적인 충격에 의한 것, 그리고 인력작업에 의한 것 등으로 구분되며, 이들은 모든 에너지에 의해 발생된 압력의 변동이 매질을 전파하면서 발생하는 것으로서 특히 물리적인 충격에 의하는 경우 매질의 차이에 의해 더욱 뚜렷하게 구분될 수 있다.

즉, 어떠한 매질에 동적인 외력이 가해져 운동적인 평형위치에서 시간의 경과에 따라 반복되는 위치(변위)를 바꾸는 운동현상이 공기의 떨림인 경우는 소리(음)이며, 지반의 떨림은 진동이라고 볼 수 있으나 수중에서의 매질은 액체이기 때문에 모두 소음으로 전이된다고 볼 수 있다.

그림 1과 같이 수중소음(underwater noise)은 매질(물, 액체)의 떨림(진동) 현상에 의한 압력의 변화에 의해 발생된다. 발파작업에 의해 생성된 지반진동(ground vibration)은 지반(고체)과 물(액체)의 경계면인 자유장(Point [B])으로 방출되는 과정에서 발생하는 수중소음 값과 발파소음(Point [C], Air Motion, Noise)이 대기 중으로 전파되어 물로 입사되어 발생하는 공중소음 값의 합성치(Point [A])를 수중소음(Underwater Sound)이라고 해석할 수 있다.

하지만 공중소음이 수중으로의 투과되는 비율은 약 0.11%라고 하는 연구결과(박진형, 2009)가 있으므로, 수중소음은 지반진동에 의해 좌우된다고 할 수 있다. 따라서 지반진동과 수중소음과의 상관관계를 정립한다면 정확한 수중소음의 예측 및 관리가 가능할 것으로 생각된다.

3. 수중소음의 특성

대기중 또는 수중과 같은 유체 속을 전파하는 음 에너지는 매질 내에 전단탄성이 없고, 압축탄성만 존재하기 때문에 음파의 진행방향과 평행하게 압축과 팽형을 반복하는 압축·인장파의 전파형태를 보인다.

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

매질 속을 전파하는 음은 운동하는 입자의 운동에너지와 탄성매질 내의 압축에 따른 위치에너지를 합한 물리적 에너지를 전달한다.

또한 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.

사실상 고유계에서 순간 인텐시티 보다 시간평균 인텐시티가 사용되며 실제로도 중요하다. 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.

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

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

건설현장과 인접되어 있는 장소에서 발생한 인근 어류 등에 대한 피해사례들을 살펴보면, 어패류에 대한 소음·진동 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 판례에 의존해서 종결지어지는 경우가 대부분이다.

하지만 공중소음과 수중소음은 데시벨(dB)로 환산하는 기준 값이 다르다고 표현하면서도 표 1과 같이 공중소음과 수중소음의 기준레벨 변환표에 의해 환산하거나 다인 퍼 제곱센티미터($dyne/cm^2$) 혹은 마이크로 바(μbar)에 100dB을 더하는 경우와 공중소음레벨에 26dB을 더하는 경우 등의 방법을 이용하여 왔다.

4. 수중소음에 의한 피해 및 보상사례

현재까지 국내외에서 이루어지고 있는 어류에 대한 진동 및 소음의 영향에 대한 연구 수행정도를 기준으로 판단할 때에 현 시점에서 양식 어류의 피해 발생을 예측하는 정확하고 획일화된 진동규제기준을 제시하는 것은 불가능한 상태이며 무의미하기도 하다. 어류는 특성상 그 종류에 따라 동일한 진동수준에 대해서도 피해발생 정도가 크게 다르고, 동일한 어류라 할지라도 계절, 크기, 양식방법 등에 따라 피해발생 정도가 다르게 나타난다(전양배, 2007).

따라서 관련기준이 없으므로 일부 연구기관에서 건

표 1. 공중소음과 수중소음의 기준레벨 변환표

공중소음 레벨 (dB re 0.0002 dyn/cm ²)	수중소음 레벨 (dB re 1 dyn/cm ²)	수중소음 레벨 (dB re 1 μPa)
94	20	120
74	0	100
54	-20	80
34	-40	60
-14	-60	40
-6	-80	20
-26	-100	0

설소음진동에 의해 유발되는 수중소음의 특성을 무시한 채 이론적인 측면만을 가지고 양식장의 피해영향을 평가하는 사례들이 빈번하게 발생하고 있다.

건설현장과 인접되어 있는 장소에서 발생한 인근 어류 등에 대한 피해사례들을 살펴보면, 어패류에 대한 소음·진동 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 판례에 의존해서 종결지어지는 경우가 대부분이다.

그러므로 기존의 수중소음에 관한 피해 및 판례 등을 검토하고, 이에 문제점을 도출하여 그 해결방안을 모색해보고자 하였다.

4.1 수중소음 피해사례 및 판례 검토

● 사례1. “서해안고속도로 공사로 인한 ○○수산의 피해 및 영향보고서”의 평가결과는 다음과 같다.

- 공사중 발생하는 소음·진동이 주간에는 60dB을, 야간에는 소음은 50dB(A), 진동은 55dB(V)을 초과하거나 자연상태보다 약 20~25dB 이상 증가하게 되면 이 소음·진동이 양식 중인 어류의 생리에 영향을 주어 정상적인 양식이 곤란한 것으로 평가하였다.

서해안 고속도로 공사가 진행되면 각종 공사장비, 파일작업 및 발파작업에 의한 소음과 진동의 피해를 입게 되어 “○○수산”에서의 소음은 40~50dB(A), 진동은 20~30dB(V)이 증가할 것으로 사료되어 뱀장어 양식에 치명적인 영향을 미치게 되므로 양식이 불가능하게 되는 것으로 평가하였다.

또한 고속도로가 개통되어 차량통행이 이루어지면 소음은 33.5dB(A), 진동은 13.8dB(V)이 증가할 것으로 판단되어 공사 진행시와 마찬가지로 뱀장어 양식이 불가능할 것으로 판단하였다(여수대학교 수산과학연구소, 2000).

- 문제점 : 상기 사례는 ‘공중소음이 수중으로 투과되는 비율이 약 0.00109로 입사되는 에너지의 약 0.11% 정도만이 수중으로 투과된다.’는 이론이 배제되어 있고, 공중소음이 증가되면 수중소

음도 증가할 것이라는 가정에 의한 것이므로 실제와는 다소 차이가 있다고 생각된다.

● 사례2. “서해안고속도로 건설공사 사후환경조사 용역 중 ○○양만장의 어업피해 조사보고서”의 판단 기준은 다음과 같다.

- 어류가 도로공사나 차량으로부터 발생하는 소음·진동에 노출되면 심한 스트레스를 받아서 생리적인 변화가 일어나며, 면역체계에 이상을 일으켜서 성장이 둔화되고, 나아가서 폐사에 이르게 된다. 다만 소음·진동 수준의 임계치에 대한 학문적·법률적 근거가 없어서 항상 논란이 되었다.

따라서 본 조사에서는 「소음·진동 규제법 시행규칙」상의 공장 소음·진동 규제기준 중에서 자연환경보전지구 → 수산자원보전지구에 해당하는 소음·진동 기준을 적용하고, 나아가서 소음·진동의 순 증가를 20~25dB 이상으로 어업피해 여부를 판단하였다(국립군산대학교 수산과학연구소, 1999).

- 문제점 : 상기 사례의 문제점도 공중소음이 증가되면 수중소음이 증가할 것이라는 가정에 의한 것이므로 오류가 있다고 생각된다.

● 사례3. “강진 천변저류 생태 호수공원 조성에 따른 인근 양만장 피해영향 조사보고서” 중 소음·진동에 대한 결론은 다음과 같다.

- 본 조사 대상 양식장인 ○○수산은 공사지역에 일부 편입되는 곳으로 소음·진동으로 직접적인 피해가 예상되며, 수중소음에 의한 피해범위는 소음원의 소음 및 진동으로 인한 수중소음 레벨이 자연소음 레벨보다 12.0dB 이상 높은 곳까지를 피해예상 범위로 정하였으며, 특히 공사 중 공사차량(덤프트럭) 이동으로 인한 피해범위는 반경 150m 정도로 예상된다(국립전남대학교 수산과학연구소, 2007).

- 문제점 : 상기 결론의 문제점은 피해기준으로 산정한 12.0dB의 산출근거가 모호하다는 것과 덤프차량에 의한 피해범위가 150m로 산정한 산출근거 역시 모호하다는 점이다.

● 사례4. “화순읍 하수도 민간투자사업으로 인하여 000 양식장에 대한 어업피해 영향조사”에서의 소음·진동에 대한 결론은 다음과 같다.

- 일반적으로 소음·진동은 매질의 특성에 따라 그 전파의 속도나 크기가 달라진다. 예를 들면 소리는 공기 중에 전달되는 속도가 약 4배가량 빠르게 전달되며, 그 크기 역시 공기 중보다 수중에서 전달되는 경우가 크게 된다.

소음과 진동에 노출된 어류의 경우는 아주 예민하게 반응하여 외부적으로는 유영속도가 증가한 다던지 급격하게 방향을 바꾸는 등의 반응을 보이고, 내부적으로는 진동에 따른 스트레스에 의해 내분비 계통 특히 면역체계 등에 장애를 일으키며, 소음의 경우는 생장에 심각한 영향을 준다. 본 조사에서는 수중소음에 의한 피해범위를 산출함에 있어 소음원의 위치를 기준으로 하여 해당 소음원의 소음 및 진동으로 인한 수중소음레벨이 자연소음 레벨보다 12.0dB 이상 높은 곳까지를 피해예상 범위로 정하였으며, 특히 공사장의 브레이커작업으로 인한 피해범위는 반경 305m 정도로 예상된다(국립전남대학교 수산과 학연연구소, 2008).

- 문제점 : 상기 결론의 문제점 역시 피해기준으로 산정한 12.0dB의 산출근거가 모호하다는 것과 브레이커작업에 의한 피해범위가 305m로 산정된 산출근거 역시 모호하다는 점이다.

● 사례5. “영암-독천간 도로 확포장공사에 따른 00 양만장 소음·진동 피해조사 감정보고서”의 감정 의견서 결과는 다음과 같다.

(1) 공사장 소음 분석결과

회문교 공사 작업시 00양만장 위치에서 예측되는 소음도(LAeq, 5min)는 51.5~79.9dB(A) 범위의 분포를 보이고 평균 소음도는 65.4dB(A)로 평가되었다.

(2) 공사장 진동 분석 결과

00양만장 위치에서 예측되는 진동도(L10, 5min)는 4.3~48.4dB(V) 범위의 분포를 보이고 평균 진동도는 29.5dB(V)로 평가 되었다.

(3) 도로 배경소음 실측조사

실측조사를 통해 양만장 전면에 위치한 2차선

지방도에 의해 발생하는 도로 배경소음을 측정·분석한 결과, 양만장 위치에서의 소음도는 49.1dB(A)로 나타났다. 공사시 발생한 소음도가 이와 비교해 평균 15dB(A) 이상, 최대 30dB(A) 가까이 차이를 보여 공사로 인한 소음피해가 더욱 클 것으로 예상된다.

(4) 수차 작동소음의 측정 및 분석

양만장 내부의 수차 작동소음을 측정된 결과, 1~3개의 수차가 작동할 때 67.9~72.6dB(A)의 상당히 높은 수준의 소음도를 나타내었으나, 주파수 분석결과 저주파 대역이 특히 탁월한 공사장 소음과 달리 전주파수(overall frequency) 대역별로 평탄한 특성을 보임을 알 수 있다. 또한 지속적으로 발생하는 수차 작동소음은 공사장 소음과 같은 충격성 소음에 비해 어류에 미치는 영향이 작은 것으로 알려져 있다.

(5) 수중 전달소음 예측결과

공중소음이 수중에 전달될 때, 매질의 차이와 소리의 전파속도의 차이 등으로 인해 공중소음도와 상이한 값의 수중소음도가 산출되며, 회문교 공사시 발생한 소음도 51.5~79.9dB(A)에 대한 수중소음도는 94~114dB의 범위로 이 수준의 소음으로 인한 어류피해는 국외 연구문헌 등을 참고해 볼 때 상당히 높은 피해의 개연성이 예상된다.

(6) 소음 및 진동에 의한 어류피해에 대한 감정의견
공사장으로부터 100m 거리의 양만장에서 예측되는 진동은 수인한도 기준인 57dB(V)와 비교해도 매우 낮은 수치로 어류에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 마지막으로 이론적 근거에 의해 산출된 수중 전달소음의 수준은 일반적으로 어류의 생장에 상당한 피해를 유발할 수 있는 수준인 것으로 보이나, 이 또한 어류피해 전문인의 자세한 감정을 위해 판단을 유보하고 기술하지 않는 것으로 한다(서울대학교 환경소음진동연구센터, 2008).

- 문제점 : 상기 감정결과에서 보면 배경소음의 척도인 수차소음의 측정을 공중소음으로 측정하였으며, 이에 따라 수중소음을 판단하였으므로 이 역시 ‘공중소음이 수중으로 투과되는 비율이 약 0.00109로 입사되는 에너지의 약

0.11%정도만이 수중으로 투과된다.’는 이론이 배제되었고, 공중소음이 증가되면 수중소음도 증가할 것이라는 가정에 의한 것이므로 오류가 있다고 생각된다.

4.2 피해사례 판례 검토결과

상기와 같이 몇몇 수중소음과 관련하여 피해사례에 대한 판례를 조사한 결과 공통적인 오류를 찾아낼 수 있었으며, 이에 대한 논리를 다음과 같이 정리할 수 있었다.

첫째, 공중소음을 현재 사용하고 있는 수중소음 레벨의 단위로 환산하려면 공중소음 레벨에 26dB을 더하면 된다는 논리는 근거가 명확치 않으며, ‘공중소음이 수중으로 투과되는 비율이 약 0.00109로 입사되는 에너지의 약 0.11%정도만이 수중으로 투과된다.’는 이론(박진형, 2009)에 의해 부정할 수 있을 것으로 사료된다.

둘째, 조사된 사례들 중 일부 사례에서 보면, 수중소음 레벨이 자연상태의 레벨보다 12.0dB 이상이면 피해가 있을 것이라는 가정들이 나오는 경우가 있는데, 그 근거가 명확치 않으며, 수중소음을 실측한 자료가 명확치 않은 경우가 대부분이므로 수중소음을 실측하여 배경소음과 대상소음 간의 차이를 명확히 구분하는 것이 바람직하다고 사료된다.

셋째, 일부 사례들 중에서 보면, 수차작업 등에 의한 배경소음을 공중소음으로 측정하여 대상소음에 대한 허용소음레벨을 제시하고 있으나 이것 또한 공중소음이 수중에 투과되는 비율이 미미하다는 이론 하에 수중소음의 실측에 의해 대상소음의 허용소음레벨

을 재 산정하여야 할 것으로 판단된다.

넷째, 공중소음이 수중소음에 투과된다고 할 경우라도 대부분의 양식장 등은 어류 등이 온도에 민감하기 때문에 비닐하우스 형태로 축조되어 있으므로 실제 공사장의 소음이 어류가 위치하는 양식장 등의 물속으로 직접 투과되는 경우가 거의 없을 것으로 생각되는 바, 수중에서 배경소음 및 대상소음을 실측할 경우 공중소음(대기중 소음)도 동시에 측정하여 실제 공사장에서 발생 전파된 소음 등이 양식장 주변에 미치는 영향을 평가해야 할 것으로 판단된다.

건설공사로 인한 수중소음과 관련된 피해사례 몇 가지를 검토한 결과 피해사례 평가결과가 실제 수중소음을 측정하지 않고 일반적인 이론적 기준만을 가지고 평가하는 경우가 대부분이었다. 이는 아직까지 수중소음에 대한 연구 및 관리기준이 미비 되어있기 때문이라고 할 수 있다.

5. 지반진동과 수중소음 상관성 도출을 통한 민원관리 사례

수중소음에 대한 관리기준이 모호한 상황에서 시험 발파를 통하여 발파 시 수중소음을 측정하고 상시 수중소음과의 비교분석 및 발파 시 어류의 유영형태 등을 관찰하여 현장에 따라 주변여건(양식어종, 암반상황 등)에 부합하는 수중소음의 관리기준 등을 제시하는 것이 최적의 방법이라 생각되어지며, 이에 따라 발파작업 현장에서 직접 시험발파를 수행하여 수중소음의 관리기준을 제시하고자 실험을 실시하였다.



(a) 가두리 양식장 전경



(b) 출하 직전 송어

그림 2. 가두리양식장 현황.

5.1 수중소음 측정 실험 개요

수중소음 측정을 위한 현장은 경남 하동에 위치한 ○○현장으로 터널의 굴착이 예정되어 있으며, 원안 설계에서 NATM공법이 적용되어 있다. 터널 굴진 방향은 시점부에서 종점부 방향으로 예정되어 있으며, 시점부에는 가두리양식장 및 항구 등이 위치하고 있다.

최근 발파작업 시 발생하는 지반 진동 및 수중 소음에 관한 민원이 증대되고 있으며, 중앙 환경 분쟁 조정위원회에서는 400~500m 이상 이격된 지역에서의 발파 작업으로 양식 어류의 피해가 발생된다고 판단하고 있으며. 따라서 본 실험은 굴착 지역과 약 350m 이격되어 위치하고 있는 가두리 양식장 내 양식 어류의 안전성을 확보하며 효율적인 굴착작업이 이루어질 수 있는 발파 패턴 및 굴착공법의 선정을 목적으로 양식장 내 상시 수중소음을 측정하고 발파 시 수중소음을 측정 비교분석하여 양식장 부근에서의 발파작업 시 관리기준을 제시함이 그 목적이다.

실험의 주된 목적인 수중소음에 관련하여 본 실험 현장에서의 대상어종은 해상에 위치한 가두리양식장에서 양식되고 있는 송어이며, 가두리양식장은 수심 5.0m 깊이의 그물로 제작되어 주변 바다의 자연상태 환경과 동일한 조건이지만, 주변 배경 수중소음에 대하여 어류가 도피할 수 없는 환경이다.

다음의 그림 2는 실험현장 주변 해상 가두리양식장을 보여주고 있다.

5.2 실험현장 주변현황 및 중점사항

실험현장의 해상 조건은 조류의 영향 및 바람의 영향 등이 크므로 항시 높은 상시소음에 노출되어 있으므로 배경소음 측정이 필수사항이라고 판단되었으며, 그림 3 실험현장 주변현황에서 보여지는 것과 같이 주변에 3개소의 항구가 위치해 있으므로 양식장이 소음에 항시 노출되어 있으며, 양식장과 약 150m 이상 이격하여 어선이 운항하는 항로가 위치하고, 어선 운전시 노출소음은 더욱 클 것으로 예상되므로 어선 운항 등에 대한 상시소음 측정 역시 필요할 것으로 판단되었다.

가두리 양식장은 수중소음을 대체할 수 있는 측정 인자가 불충분하므로 매 발파시 수중소음 측정하거나 대체요소 개발이 필요한 상황이다. 또한 가두리 양식

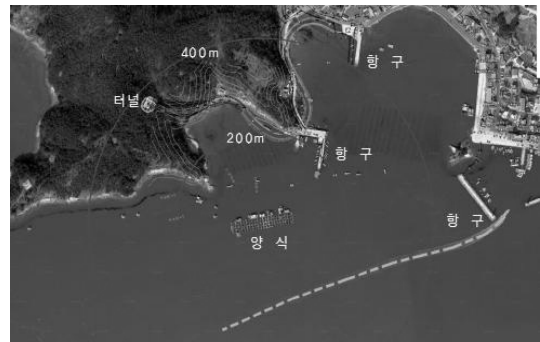


그림 3. 실험현장 주변 현황.

표 2. 실험 장비

구 분	수중 소음기	지반 진동 측정기
	수중소음 전용 측정 장비	진동속도계
장비 사진		
제 조 사	B&K	Instantel
제품 No	8106	Blastmate-III
비 고	· 정밀급 장비로서, 가두리 양식장에 대하여 수중 소음 실측	· 지반진동 속도 측정 (단위 : cm/s) · 7대 이상 현장 투입 후 매 발파 작업시 지반 진동 속도 측정 ⇒ 추후 발파진동 추정 자료로 활용

장과 터널 갱구부는 약 350m이상 이격되어 있으나, 발파작업에 의한 수중소음에 대한 민원사례가 급증함에 따라 상시 수중 소음의 영향을 평가하여 발파로 인한 수중소음기준의 상대적인 보정이 필요한 상황이다. 따라서 인근 양식장에 대한 발파작업 시 수중소음 영향성 평가 및 지반진동과의 상관관계를 도출하기 위해 다음과 같은 실험을 실시하였다.

- ① 정온한 상태에서의 양식장 주변의 수중 배경 소음 측정 및 분석
- ② 양식장 활동 및 선박 이동 시 수중 배경 소음 측정 및 분석
- ③ 발파작업 시 수중소음 및 지반진동 측정 분석
- ④ 지반진동과 수중소음간의 상관관계 도출
- ⑤ 본 굴착작업 시 양식장의 안전성을 확보할 수 있는 관리기준의 설정
- ⑥ 지반진동과 수중소음간의 상관관계를 적용하여 양식장 수중소음관리를 위한 진동계측 Ponit의 선정

5.3 수중소음 측정 실험

실험을 수행하기 위하여 B&K의 수중소음 전용 측정 장비와 Instantel의 진동속도 측정 장비인 Blastmt-III 장비를 적용하였으며, 적용 장비의 기본제원은 표 2와 같다.

5.4 수중소음 측정 결과

양식장은 가두리 그물의 깊이가 수심 5m까지 이므로 모든 실험시 수중소음측정은 중심이 되는 수심 3m에서 측정하였으며 평상시 배경 수중소음 측정결과 및 발파작업시 수중소음 측정결과는 다음의 표 3, 4와 같다.

배경 수중소음은 주변이 정온할 경우 129.639dB/ μ Pa로 비교적 낮은 수준을 나타내지만, 양식장의 운영을 위한 소형선박 이동 또는 그물작업시의 수중소음은 최대 155.324dB/ μ Pa까지 측정되어 평상시 수중소음도는 비교적 높은 것으로 측정되었다.

발파 실험결과 수중소음도 지반진동과 같이 발파단

표 3. 평상시 배경소음 측정결과

구 분	주변 배경	측정결과 그래프	측정 결과
정온시 (맑은날)	소음 유발인자 없음		소음레벨 최대 측정값 - 129.639dB/ μ Pa 압력 최대 측정값 - 3.034Pa
소형선박 이동시 (30m이격)			소음레벨 최대 측정값 - 142.677dB/ μ Pa 압력 최대 측정값 - 13.610Pa
소형선박 접안시 (10m이격)			소음레벨 최대 측정값 - 155.324dB/ μ Pa 압력 최대 측정값 - 58.373Pa
페그몰 이동 선박작업 (20m이격)			소음레벨 최대 측정값 - 149.350dB/ μ Pa 압력 최대 측정값 - 29.367Pa

표 4. 발파작업시 수중소음 측정결과

구 분		지발당장약량 (kg)	측정최대압력 (Pa)	수중소음레벨 (dB/μPa)	측정결과 그래프
1회 발파	심발공	1.500	3.766	131.518	
	확대공	1.125	24.921	147.931	
	바닥공	1.500	15.968	144.065	
2회 발파	심발공	0.750	18.963	145.558	
	확대공	1.125	26.786	148.558	
	바닥공	1.000	22.181	146.920	
3회 발파	심발공	1.500	7.512	137.515	
	확대공	1.875	31.725	150.028	
	바닥공	2.000	17.324	144.773	
4회 발파	심발공	0.750	50.026	153.984	
	확대공	1.125	45.502	153.161	
	바닥공	1.000	26.577	148.490	

차별로 구분이 확연하게 나타나고 있으므로 지발당장 약량에 의한 분석이 가능한 결과가 나타났다. 하지만, 육지 대비 발파 지속 시간이 0.5~1.0s 더 지속되는 경향이 있으며, 따라서 이와 같은 시간차를 보정하여 각 발파공별 최대 수중소음레벨을 분석하였다.

5.5 지반진동 측정 결과

발파작업 시 총 12개의 계측점에 지반진동 측정기를 설치하여 진동 자료를 획득하였으며, 그 결과는 다음의 표 5와 같다. 트리거 수준은 0.013cm/s로 설정하였다.

5.6 결과분석 및 상관식 도출

수중소음 추정식 도출

계측 당시 2회차와 4회차 실험시 약간의 비가내리고 유속이 빠른 상황이었으므로, 일기 상태 및 발파작업시 지발당장약량과 수중 소음 계측 결과의 상관성

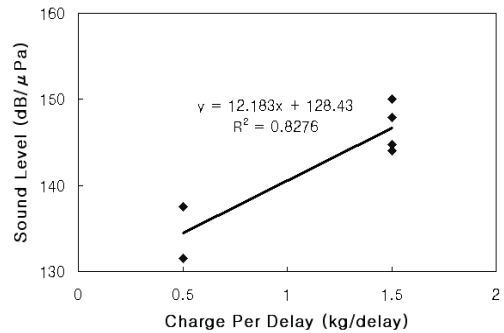


그림 4. 지발당장약량과 수중소음 상관 그래프.

을 비교하여 분석한 결과, 1회차와 3회차 발파가 실험현장의 일반적인 상황인 것으로 판단되었으며, 이에 따라 1회차와 3회차 자료를 토대로 지발당 장약량과 예상 수중소음의 상관식을 도출하였으며, 도출된 상관그래프는 그림 4와 같다.

표 5. 발파작업시 지반진동 측정결과

구 분	최대 지발당 장약량 (kg)	PPV (cm/s)	PVS (cm/s)	Sound (dB)	이격거리(m)
1회 발파	1.500	0.270	0.340	131.3(L)	58
		0.107	0.109	78.6(A)	108
		0.076	0.089	89.6(A)	158
		0.027	0.027	40.3(A)	208
2회 발파	1.125	0.190	0.240	128.2(L)	59
		0.090	0.118	92.8(A)	90.2
		0.0825	0.0966	85.0(A)	131
		0.0191	0.0191	84.8(A)	157
		0.0222	0.0245	85.5(A)	193
3회 발파	2.000	0.240	0.300	126.7(L)	60
		0.1415	0.1589	92.9(A)	91.2
		0.0488	0.0512	68.7(A)	141.2
		0.1270	0.1430	86.1(A)	132
		0.0302	0.0318	84.8(A)	158
		0.0444	0.0445	85.6(A)	194
4회 발파	1.125	0.250	0.260	134.1(L)	61
		0.0976	0.1064	92.3(A)	92.2
		0.0268	0.0340	69.9(A)	142.2
		0.1140	0.1150	89.7(A)	133
		0.0349	0.0413	89.6(A)	159
		0.0492	0.0506	84.7(A)	195

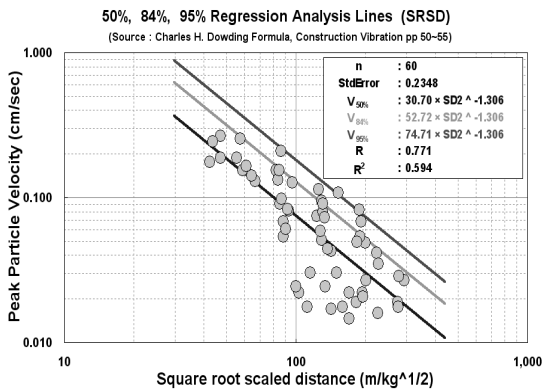


그림 5. 지발당장약량과 지반진동 상관 그래프.

지반진동 추정식 도출

발파시 측정된 자료 21개중 2회 발파시 측정된 자료(파형 이상 현상) 1개를 제외한 20개의 자료를 활용

하여, 시차분석을 통해 60개의 자료를 도출하고, 이를 토대로 지발당 장약량과 예상 지반진동의 상관식을 도출하였으며, 도출된 상관 그래프는 그림 5와 같다.

5.7 실험결과의 현장 적용

관리기준의 선정

배경소음 측정 및 분석결과를 토대로 중앙환경분쟁 조정위원회의 판례를 참고하여 표 6과 같이 실험현장의 관리기준을 제시할 수 있었다.

계측 포인트 선정

일반적으로 수변에서의 굴착작업 수행시 양식장 접근의 어려움과 고가의 수중소음장비를 적용한 상시계측이 현실적으로 어려운 상황이므로, 이를 대체할 수 있는 계측 계획의 수립이 필요하며, 지반진동 속도 계측 결과와 진동속도 자료의 회귀분석 결과를 토대로

계측점의 선정과 이에 따른 진동속도 관리기준을 제시하는 것이 하나의 방안이 될 수 있다.

따라서 본 실험구간에 대해서 지반진동 측정을 통하여 수중소음을 예측할 수 있는 시스템을 구축하기 위하여 진동계측 포인트를 선정하고, 지반진동과 수중소음간의 상관식을 통하여 계측관리를 할 수 있는 방안을 모색해 보았다.

계측점의 선정은 발파원에서 양식장 방향의 암반을

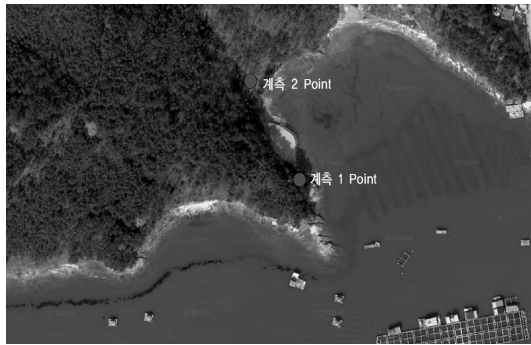


그림 6. 계측점 선정 현황.

기준으로 만조시에도 측정이 가능한 곳으로 계측의 편의성과 신뢰도를 위하여 2개소의 지반진동 계측점을 그림 6과 같이 선정하였다.

계측점별 지반진동과 수중소음간의 상관식 도출

실험결과를 토대로 지발당 장약량에 따른 이격거리별 지반진동 추정식($V_{95\%} = 74.71 \times \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.306}$)과 수중소음 추정식($Sound\ Level(dB/\mu Pa) = 12.813 \times W + 128.43$)을 통계처리하여 선정된 계측점별 지반진동과 수중소음간의 상관식을 도출할 수 있었으며, 계측점별로 지반진동의 측정값에 따른 수중소음 예측값을 다음의 표 7, 8과 같이 도출할 수 있었다.

위의 상관식을 근거로 실험현장에서 매 발파시 지반진동의 상시계측을 통하여 수중소음을 관리한 결과 본 실험현장에서는 인근 양식장에서의 극심한 민원을 해결할 수 있었다.

표 6. 관리기준 선정

구 분	최대 수중소음 관리기준		산출 근거	비 고
	실측 최대 수중소음	계시 관리기준		
1차관리기준	-	140.00 dB/μPa	환경분쟁조정위원회 판례	초과시 패턴조정
2차관리기준	149.350 dB/μPa	149.00 dB/μPa	폐그물 운반	초과시 지보하향
3차관리기준	155.324 dB/μPa	155.00 dB/μPa	소형선박 접안	초과시 공법변경

표 7. 계측점 Point-1에서의 진동속도 크기별 수중소음 예측결과

진동속도 (cm/s)	적용 지반진동-수중소음 상관식	수중소음 예측값 (dB/μPa)
0.013	$Sound\ Level(dB/\mu Pa) = 33.439 \times \log(V) + 191.99$ 단, V=진동속도(cm/s)	128.9222
0.015		131.0003
0.020		135.1781
0.025		138.4187
0.030		141.0665
0.035		143.3051
0.040		145.2443
0.045		146.9548
0.050		148.4849
0.055		149.8690
0.060		151.1326

표 8. 계측점 Point-2에서의 진동속도 크기별 수중소음 예측결과

진동속도 (cm/s)	적용 지반진동-수중소음 상관식	수중소음 예측값 (dB/μPa)
0.013	$Sound\ Level(dB/\mu Pa) = 33.295 \times \log(V) + 137.33$ <p>단, V=진동속도(cm/s)</p>	136.2037
0.015		138.2730
0.020		142.4328
0.025		145.6594
0.030		148.2958
0.035		150.5247
0.040		152.4556
0.045		154.1587
0.050		155.6822
0.055		157.0604
0.060		158.3185

6. 결 론

중앙환경분쟁조정위에서 발표한 2009년 12월 31일 까지의 환경분쟁조정현황을 살펴보면 중앙환경분쟁 조정위원회가 설립된 이래 현재까지의 접수된 사항 중 처리 완료된 사항의 86%가 소음진동에 대한 분쟁 이었다(중앙환경분쟁조정위원회, 2010).

이렇듯 소음진동에 관한 분쟁이 끊이지 않는 현시 점에서 아직까지 수중소음에 대한 분쟁사례는 극소수 라 할 수 있으며, 이에 따라 그 대책이 미비할 수밖에 없었다고 생각된다. 하지만 극소수의 분쟁사례라 할 지라도 분쟁에 대한 금액이 정확히 산출될 수 없으며, 일반적인 소음진동분쟁의 산출금액에 비해 매우 높다는 것을 감안하여 실험을 통한 정량적인 지표가 하루 빨리 마련되어야 할 것이다.

따라서 본 연구는 지반진동과 수중소음의 상관관계를 정립하여 지반진동을 통한 수중소음 예측 시스템을 구축한다면 굴착공사 시 발생하는 수중소음 민원의 대비책으로의 활용성을 높일 수 있다는 가설에서 시작된 것이며, 실제 시험발파를 통하여 도출된 결과를 통하여 본 실험현장에서는 양식장에 대한 민원을 해결하고 원활한 공사를 수행할 수 있었다.

본 연구를 토대로 인근 수중소음관련 민원이 야기 될 소지가 다분한 건설현장에서는 시험발파를 통한 수중소음과 지반진동간의 상관식을 도출하여 민원 대

비 및 수중생물의 안전성 증대를 기대할 수 있을 것으로 사료되어진다.

본 연구를 시작으로 향후 수중소음 및 지반진동에 관한 꾸준한 연구가 진행되어 수중소음에 관한 관리 기준이 정립될 수 있기를 기대하는 바이다.

참고문헌

1. 국립군산대학교 수산과학연구소, 1999, 서해안고속도로(군산~무안간)건설 공사 사후환경영향조사 용역 중 OO양만장의 어업피해 조사보고서, pp. 59.
2. 국립전남대학교 수산과학연구소, 2007, 강진 천변저류 생태 호수공원 조성에 따른 인근 양만장 피해영향 조사 보고서, pp. 74.
3. 국립전남대학교 수산과학연구소, 2008, 화순읍 하수도 민간투자사업으로 인하여 뱀장어 양식장에 대한 어업 피해 영향조사보고서, pp. 69-70.
4. 박진형, 2009. 지반진동 및 공중소음에 의한 수중소음 변화에 관한 연구, 석사학위, 서울시립대학교, 대한민국, pp. 6-9, pp. 76.
5. 서울대학교 환경소음진동연구센터, 2008, 영암독천 간 도로 확포장 공사에 따른 양만장 소음진동 피해조사 감정보고서, pp. 58-59.
6. 여수대학교 수산과학연구소, 2000, 서해안고속도로 공사로 인한 OO수산의 피해 및 영향보고서, pp. 48.
7. 전양배, 2007, 수중발파에 대한 양식어류 및 구조물의 영향성 평가 연구, 박사학위, 전남대학교, 대한민국, pp. 28-29.
8. 중앙환경분쟁조정위원회, 2010, 2009. 12. 31 현재 환경분쟁조정현황 통계.



임 대 규
(주)대영지오발파엔지니어링 대표

Tel : 033)762-8560
E-mail : limblast00@naver.com



조 광 현
(주)대영지오발파엔지니어링 과장
상지대학교
신에너지자원공학과 겸임교수

Tel : 033)762-8560
E-mail : cho9054@hanmail.net



전 양 배
국토해양부 익산지방국토관리청

Tel : 063)850-9220
E-mail : junyb@korea.kr