

## 발파에 의한 수중음압레벨 예측 사례연구

박정일<sup>1)</sup>, 강추원<sup>2)</sup>, 노영배<sup>3)</sup>, 고진석<sup>2)\*</sup>

### Case study on the Prediction of Underwater Sound Pressure Level by Blasting

Jeong-II Park, Choo-Won Kang, Young-Bae Noh and Chin-Surk Ko

**Abstract** Most of the blast pollution that causes complaints is noise and vibration. Hence, special attentions need to be paid to controlling the underwater noise in designing blasting for those areas. This study estimated underwater sound pressure using distance from blasting and charge per delay and underwater sound pressure level using the underwater sound pressure. To identify the validity of the estimated value, the study demonstrated the results at other areas and compared actual results with estimated results.

**Key words** Underwater noise, Underwater sound pressure, Sound pressure level

**초 록** 발파공법 위주의 공사를 진행하다 보면 민원발생의 대부분을 차지하고 있는 발파공해는 소음과 진동이다. 이로 인해 발파설계시 안정성을 가장 우선적으로 고려하며, 그중에서도 수중소음을 제어하기 위한 노력이 필요하다. 본 연구에서는 발파로 인한 공사 작업이 진행될 때 거리와 지발당장약량을 적용하여 수중음압을 예측하고 그 수중음압을 이용하여 얻은 수중음압레벨 예측값의 타당성을 검토해 보기 위해 실제 측정된 지역과 다른 지역에서 검증을 하여 실제 측정값과 예측값을 비교해 보았다.

**핵심어** 수중소음, 수중음압, 음압레벨

#### 1. 서 론

발파공법 위주의 공사를 진행하다 보면 주변에 민원이 발생하게 되고, 그 원인이 되는 발파공해는 소음과 진동이 주를 이룬다. 발파에 따른 지반진동에 관련된 연구들은 대체적으로 많은 곳에서 적용되며 예측되고 있는 반면 발파소음에 관하여서는 부족한 게 사실이다. 근래에 와서 발파 소음을 측정하는 기기들이 많이 개발이 되었으며, 현재 이런 기기들이 보편화되어 있고 발파 소음에 관련된 법도 제정되어 있다. 하

지만 발파 소음에 관련된 법 제정과 측정하는 기기들은 대부분 공중소음만을 대상으로 하고 있으며, 공중소음과 수중소음의 특성상의 차이 때문에(김광준 외, 1996) 공중소음에 정해진 기준들은 수중소음에 적용하기 어렵다. 또한 수중소음을 측정하는 기기들은 고가이며, 사용하기 위한 한계가 존재한다. 이 때문에 지반진동을 이용하여 수중소음을 예측하는 방법(박정봉, 2011)과 매질경계 전달 특성을 고려한 예측 방법(박진형, 2009)등의 연구가 진행되었지만 아직까지 수중소음에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 발파를 이용한 공사 작업이 진행될 때 거리와 지발당장약량을 이용하여 수중음압을 예측하고, 이를 통해 얻은 수중음압레벨의 예측값을 실측값과 비교 분석해 보았다.

<sup>1)</sup> 조선대학교 에너지자원공학과 석사과정

<sup>2)</sup> 조선대학교 에너지자원공학과 교수

<sup>3)</sup> 대동발파기술사사무소 대표

\* 교신저자 : jsgo@chosun.ac.kr

접수일 : 2011년 12월 7일

심사 완료일 : 2011년 12월 26일

게재 승인일 : 2011년 12월 28일

## 2. 기초이론 및 연구동향

### 2.1 수중소음 특성

발파작업에서 생성된 지반 진동이 고체인 지반으로부터 액체인 물의 경계면으로 방출되는 과정에서 고체 전달음으로 전이되어 발생하는 소음과 고체인 지반 내에서 진동이 직접적으로 물에 전달되어 발생하는 소음의 합성치를 수중소음이라 한다. 하지만 공중에서 물의 경계면으로 투과되는 비율은 약 0.011%라고 하는 연구결과가 있으므로(박진형, 2009) 수중소음은 지반진동에 의해 많이 좌우된다고 할 수 있다.

음원으로부터 동일반경 내 모든 장소에서 같은 음압을 갖는 평면파라고 가정할 경우 음압  $P$ 와 유체의 입자속도  $v$ 와의 관계는 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \rho \times c \times v \quad (1)$$

여기에서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $c$ 는 파의 전파속도이다.

유체의 밀도와 파의 전파속도의 곱  $\rho \times c$ 는 유체의 고유음향저항(specific acoustic resistance)이라 한다(Urick, 1975).

$$\text{seawater, } \rho c = 1.5 \times 10^6 \text{ kg/(m}^2\text{)(s)}$$

$$\text{air, } \rho c = 430 \text{ kg/(m}^2\text{)(s)}$$

수중과 공기 중에서 고유 음향저항은 차이가 나며 이와 더불어 음이 각각의 매질에 전파해 갈 때 음의 세기강도(sound intensity)도 차이가 있다. 음의 세기강도는 파가 매질 속을 전파해 갈 때 전파방향에 수직인 단위면적을 시간당 일정한 에너지가 통과하는 에너지 총량을 의미한다. 평면파에서 인텐시티( $I$ )와 음압과의 관계는 다음 식 (2)와 같다.

$$I = \frac{P^2}{\rho c} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2)$$

사실상 계면에서는 순간 인텐시티보다 시간평균 인텐시티가 사용되며 실제로도 중요하다. 음압과 고유

음향임피던스와의 관계식에서 수중 및 공기 중에서의 평면파에 대하여 동일한 음압  $1\text{Pa(N/m}^2\text{)}$ 이 나타내는 인텐시티는 매질의 고유 음향임피던스 값에 따라 다음과 같은 차이를 보인다(Urick, 1975).

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

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

또, 담수에서의 음속은 온도와 압력에 의해 달라지지만 일반적으로 수온에 의한 영향만 고려한다고 볼 때 실험적으로 제시된 수중에서의 음속은 온도의 차이에 따라서 대표적으로 아래 식을 이용하여 구할 수 있다.

#### ① 0~95℃ 에서(Marczak, 1997)

$$c = 1.402385 \times 10^3 + 5.038813T - 5.799136 \times 10^{-2} T^2 + 3.287156 \times 10^{-4} T^3 - 1.398845 \times 10^{-6} T^4 + 2.787860 \times 10^{-9} T^5$$

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

$$c = 1404.3 + 4.7T - 0.04T^2$$

최대 오차 :  $0.18 \text{ ms}^{-1}$

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

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

여기서  $T$ 는 섭씨온도(℃)를 나타낸다.

### 2.2 음압레벨의 특성

대표적인 발파 폭풍압 예측식으로 국외의 경우 Siskind(1980)식이 있는데, Siskind 식의 경우는 다음 식 (3)과 같이 발파원으로부터의 거리( $D$ ) 및 지발당 장약량( $W$ )을 제외한 다른 변수로  $K$  및  $n$  값을 반영하고 있다. 그리고 Siskind에 의하면 발파음압의 전파와 관련하여 자승근환산거리보다 삼승근 환산거리로 추정하는 것이 바람직하다고 보고 있다.

$$P = K \cdot \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^n \quad (3)$$

이렇게 구한 P 값은 최대 압력이라 하며 식 (4)를 이용하여 음압레벨로 환산을 한다.

$$SPL = 20 \log \left( \frac{P}{P_0} \right) [dB] \quad (4)$$

여기에서 SPL은 음압레벨, P<sub>0</sub>는 기준음압이다.

음압레벨에서 P는 대상으로 하고 있는 음압 그 자체를 가리키며, 그 값은 주파수와 관계없이 일정치인데 반해, 소음레벨에서는 P가 대상이 되는 음압 그 자체가 아니라, 여기에 청각보정을 가한 음압(실효치)을 취한 점이 다르다.

음압레벨의 기본적인 정의는 음이 전해졌을 때 매질내의 압력 변화의 크기를 표시하는 방법으로 기준음압에 대한 비를 데시벨(dB)로 나타낸 값을 뜻하며, 여기서 기준 음압은 공기 중에서는 2 × 10<sup>-5</sup>Pa을 사용하고 수중에서는 0.1Pa사용한다. 수중에서의 소음은 공기 중에서의 소음과 동일하게 적용할 수 없는데, 이는 공기와 물의 고유음향임피던스 차가 크기 때문에 각각의 기준음압 또한 다르기 때문이다. 1970년 미해군의 수중소음 연구에서 1μPa을 기준음압으로 채택하여 ANSI(1971)에 규정하고 지금까지 국제적으로 사용되고 있다(Urick, 1975).

공중소음과 수중소음은 데시벨로 환산하는 기준 값이 다르다고 표현하면서도 공중소음과 수중소음의 기준레벨 변환표(Table 1)에 의해 환산하거나 공중소음레벨에 26dB을 더하는 경우 등의 방법을 이용하여 왔다.

### 3. 대상지역의 지질 및 연구방법

#### 3.1 대상지역의 지질

발파 작업시 거리별 지발당장약량에 따른 수중음압을 측정하기 위해 발파가 이루어지는 지반이 수중과 인접해 있는 8개의 지역을 대상으로 연구를 수행하였으며, 그 중 2곳에서 예측식을 검증하였다.

수중음압예측식을 만들기 위해 실험한 6개 지역의 지질특성으로 강원도 홍천 층서단위는 낭림층군, 편마암, 혼성편마암이었으며, 심성암류는 대보화강암, 단천복합체, 압록강 복합체, 불국사 화강암이다. 경상남도 사천의 층서단위는 신동층군, 한봉산층군, 박천층군, 봉천봉층군, 세손층군이며, 심성암류는 압록강 복합체, 불국사화강암이고, 부산광역시 기장에서 층서단위는 유천층군, 재덕층군, 심성암류는 압록강 복합체, 불국사화강암, 전라남도 나주에서 층서단위는 낭림층군, 편마암, 혼성편마암, 심성암류는 대보화강암, 단천복합체, 충청남도 아산에서 층서단위는 낭림층군, 편마암, 혼성편마암, 심성암류는 대보화강암, 단천복합체, 충청북도 청주에서 층서단위는 옥천층군, 심성암류는 대보화강암, 단천복합체를 확인할 수 있었다.

검증지역 2곳의 지질특성으로 경상남도 고성 층서단위는 유천층군, 재덕층군이며 심성암류는 압록강복합체, 불국사화강암이다. 경기도 안산시 중육도의 층서단위는 북부상원층군, 직현층군, 사당우층군, 연천층군, 장락-의암층군이며 심성암류는 대보화강암, 단천복합체인 현장에서 실험을 수행하였다. 자료 수집을 위한 발파대상 암석은 주로 화강암과 편마암이었으며, 각각 지역별 지질도는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Reference level conversion table(Urick, 1975)

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

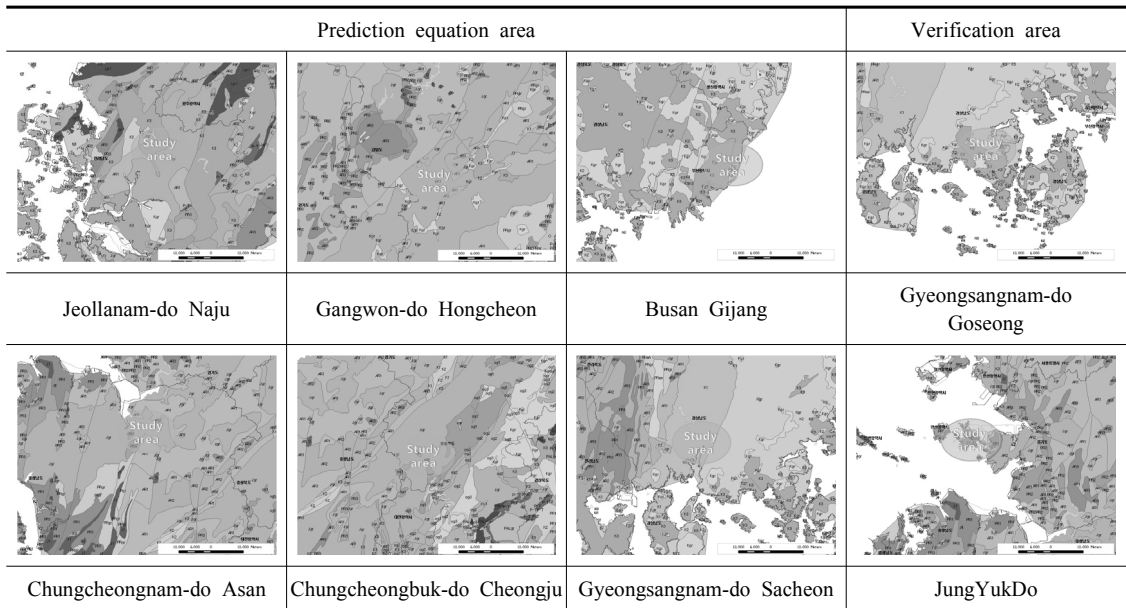


Fig. 1. Geological map of study area.

3.2 연구 방법 및 실험 결과

수중음압예측식을 도출하기 위한 발파조건으로 지발당장약량은 0.32~34.0kg이었으며, 발파지점과 측정지점간의 거리는 176~692m로 다양한 조건에서 측정하였다.

검증지역 2곳의 발파조건으로 경상남도 고성 의 지발당장약량은 3.2~4.8kg이었고 발파지점과 측정지점간의 거리는 70~240m의 다양한 조건에서 실험을 하여 데이터를 획득하였다. 경기도 안산시 중육도의 지발당장약량은 3.0~64.0kg이었으며, 발파지점과 측정지점간의 거리는 165~230m의 조건에서 실험을 하여 데이터를 얻었다.

수중소음에는 수중음압을 측정하고 이를 식 (9)에 적용되어 수중음압레벨로 자료가 출력되는 B&K 8106을 이용하였으며, 물탱크와 저수지 등에서 측정 할 때 어패류와 수중생물들을 양식하는 방식과 동일한 조건으로 측정하기 위하여 수중생물들이 활동하는 높이인 2~3m 정도로 B&K 8106 Hydrophone을 설치하여 측정하였다. 각 지역별로 실험을 통해 총 34개의 데이터를 얻었으며, 각 데이터의 값은 Table 2와 같다.

4. 실험결과 분석

4.1 실험결과 분석 및 상관식

본 연구에서는 발파를 할 때 적용하는 지발당장약량과 계측거리, 다양한 조건으로 측정된 음압을 음압회귀분석에 적용하였다. 이를 이용하여 수중음압 예측식을 도출하고 환산거리와 음압간의 상관성을 분석해 봤으며, 도출한 음압 예측식을 통해 수중음압레벨을 예측하여 그 값과 실제 측정값을 비교 분석하였다. 지발당장약량과 거리별로 얻은 수중음압 데이터의 자승근, 삼승근 회귀분석결과는 다음과 같다.

Fig. 2는 수중음압에 자승근환산거리를 적용하여 50%, 95% 신뢰구간으로 상관식을 나타내었으며 상관계수는 0.67이다.

$$50\% \quad Pa = 8535.48 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.29392} \quad (5)$$

$$95\% \quad Pa = 64589.1 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.29392} \quad (6)$$

Fig. 3은 수중음압에 삼승근환산거리를 적용하여 50%, 95% 신뢰구간으로 상관식을 나타내었으며 상관계수는 0.63으로 나왔다.

**Table 2.** Measurement results

Case	Weight (kg/delay)	Distance (m)	SP (Pa)	SPL (max) (dB re 1μPa)	Measurement location
1	2.56	525	5.08	134.1	Naju
	5.12	525	5.45	134.7	
	4.80	525	6.89	137.2	
	12.8	525	14.47	143.2	
	19.2	525	18.62	145.4	
	29.2	525	26.88	148.6	
	34.0	525	24.51	147.8	
2	0.32	240.7	25.62	148	Hongcheon
	0.32	241.8	3.89	132	
	0.96	242.6	7.27	139	
	0.96	244.0	4.24	133	
	2.50	244.7	13.07	142	
	2.50	248.5	12.56	142	
	3.00	252.5	10.78	141	
	3.00	253.8	10.74	141	
3	2.40	550.9	1.47	123	Asan
	2.40	552.7	3.99	132	
	1.00	553.4	1.28	122	
	1.00	555	2.05	126	
	0.375	561.7	3	130	
	0.375	562.8	1.28	122	
	5.60	435.4	12.18	142	
	5.60	436.3	13.32	142	
4	12.67	608.9	17.04	145	Cheongju
	12.67	602.9	18.31	145	
	8.00	612.7	226.24	167	
	4.34	691.6	4.28	133	
	4.34	687.4	0.64	116	
	3.00	666	2.81	130	
	3.00	662.5	2.68	129	
5	1.00	265	4.44	133	Gijang
	1.00	265	2.71	129	
	2.00	265	4.21	134	
6	4.675	176	21.23	147	Sacheon

50% 
$$Pa = 55853.2 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.58437} \quad (7)$$

95% 
$$Pa = 277363 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.58437} \quad (8)$$

여기서 구한 음압 값을 가지고 수중음압레벨을 예측하기 위해서 다음과 같은 식에 적용하여 수중음압레벨을 예측하였다.

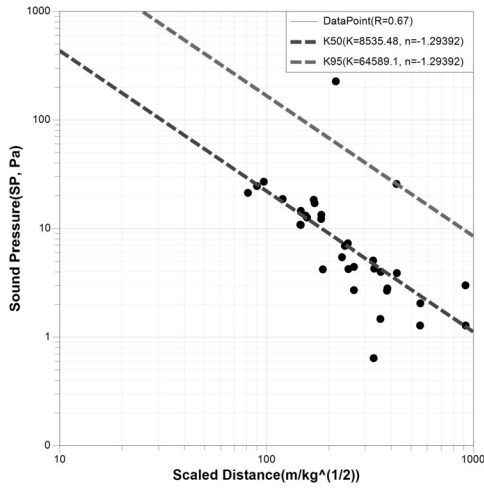


Fig. 2. Square root regression analysis graph.

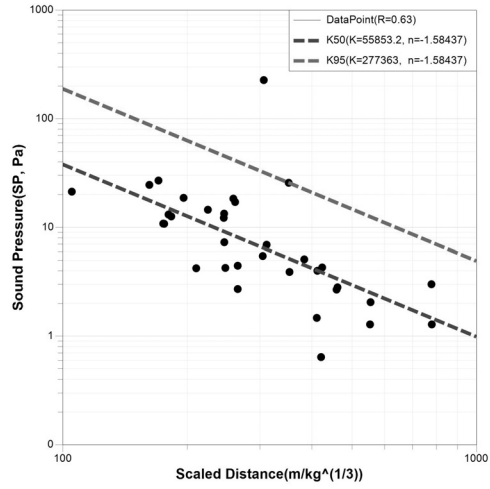


Fig. 3. Cube root regression analysis graph.

Table 3. Comparison of sound pressure level (Goseong)

No	Weight (kg/delay)	Distance(m)	Measurement sound pressure level (dB re 1μPa)	Predicted sound pressure level (dB re 1μPa)	gap
1	3.20	80	166.87	173.89	-7.0
2	3.20	70	174.04	175.73	-1.7
3	3.20	85	168.11	173.06	-4.9
4	3.20	90	166.64	172.27	-5.6
5	3.20	78	167.61	174.24	-6.6
6	3.20	80	158.28	173.89	-15.6
7	3.20	75	163.78	174.78	-11.0
8	3.20	85	162.65	173.06	-10.4
9	3.50	175	158.23	163.53	-5.3
10	3.25	125	161.88	167.82	-5.9
11	4.80	145	160.97	167.57	-6.6
12	4.80	140	162.87	168.05	-5.2
13	4.80	150	159.83	167.10	-7.3
14	4.80	240	153.01	160.63	-7.6
15	4.80	225	156.79	161.52	-4.7
16	3.20	230	154.58	159.36	-4.8
17	3.20	185	161.86	162.36	-0.5
18	3.20	190	160.17	161.99	-1.8
19	3.20	210	158.07	160.61	-2.5
20	3.20	235	155.98	159.06	-3.1
21	4.80	225	155.79	161.52	-5.7
22	3.50	210	161.18	161.02	0.2
23	4.80	200	159.68	163.14	-3.5
24	4.80	200	160.33	163.14	-2.8
25	4.80	235	153.41	160.92	-7.5
26	4.00	100	165.35	171.85	-6.5
27	3.20	200	173.57	161.28	12.3
28	4.80	200	171.68	163.14	8.5
gap average					-4.40

**Table 4.** Comparison of sound pressure level (JungYukDo)

No	Weight (kg/delay)	Distance (m)	Measurement sound pressure level (dB re 1μPa)	Predicted sound pressure level (dB re 1μPa)	gap
1	35	165	155.79	174.90	-19.1
2	40	200	151.94	172.87	-20.9
3	64	230	158.07	173.10	-15.0
4	24	220	149.57	169.21	-19.6
5	34	205	150.17	171.78	-21.6
6	21	200	150.57	169.91	-19.3
7	24	180	151.57	171.98	-20.4
8	61	210	155.01	174.13	-19.1
9	4.5	210	141.27	162.18	-20.9
10	3	215	138.41	159.99	-21.6
11	9	225	145.74	164.41	-18.7
gap average					-19.65

$$SPL = 20\log\left(\frac{Pa}{1\mu Pa}\right) \quad (9)$$

#### 4.2 수중음압레벨 예측값과 측정값 비교

수중음압레벨을 예측하기 위해 총 6개 지역에서 측정한 수중음압을 가지고 거리별 지발당장약량에 따른 예측식을 적용하여 수중음압레벨을 도출하였다. 발파음압의 전파와 관련하여 자승근환산거리보다 삼승근환산거리로 추정하는 것이 바람직하다고 보고 삼승근환산거리 95%의 예측식 (8)을 이용하였으며, 예측값을 검증하기 위해 경상남도 고성과 안산시에 있는 중육도를 대상으로 예측값과 실제 측정값을 비교하였다.

##### 경상남도 고성

수중음압레벨 측정값과 예측값을 비교한 결과 최소 0.2의 차가 나타났으며 최대는 -15.6의 차이가 났다. 평균음압차는 -4.40이다(Table 3).

##### 중육도

총 11개의 수중음압레벨 측정값과 예측값을 비교한 결과 최소 -15.0의 차가 나타났으며 최대는 -21.6의 차이가 났다. 평균음압차는 -19.65의 차이를 보여줬다(Table 4).

고성에서 나타난 수중음압레벨과 많은 차이를 보이

는데 이는 해수음속에 영향을 미치는 수온, 염도, 압력의 변화에 따라 음의 전파속도가 변하게 되며, 특히 지역적 차이와 수심, 계절 등의 변화에 따라 음속의 변화가 담수보다 해수에서 더 커지는 특성으로 사료된다(University of Rhode Island, 2009).

## 5. 결론

수중소음에 대한 피해기준을 알기위해 많은 자료를 측정하여 그에 따른 분석과 실험을 통해 수중소음에 대한 연구가 요구되고 있다. 본 연구에서는 수중음압레벨을 측정하는 기기를 통해 얻은 값을 가지고 거리별 지발당장약량의 회귀분석을 통해 수중음압을 예측하는 식을 도출하였고 그 식의 검증하기 위해 다른 지역에서 검증실험을 하였다. 검증실험은 2곳의 지역에서 수행하였으며, 여기서 측정한 수중음압레벨 측정값과 식을 이용하여 예측한 수중음압레벨 예측값을 가지고 비교해 보았다. 삼승근 음압 예측식을 가지고 각각 지역의 거리와 지발당장약량을 적용하여 수중음압레벨을 예측하였다. 이 예측한 수중음압레벨을 가지고 2곳의 지역에서 실제 측정한 수중음압레벨과 비교하였다. 첫 번째로 경상남도 고성에서 28번의 발파를 하였으며, 측정값과 예측값은 최대 -15.6dB re 1μPa, 최소 0.2dB re 1μPa의 차이를 나타냈으며, 전체

평균은  $-4.40\text{dB re } 1\mu\text{Pa}$ 의 차이로 나타났다. 두 번째로 경기도 안산시 중육도에서의 발파는 11회를 하였으며 측정값과 예측값의 차이는 최대  $-21.6\text{dB re } 1\mu\text{Pa}$ , 최소  $-15.0\text{dB re } 1\mu\text{Pa}$ 이 나타났으며, 전체 평균은  $-19.65\text{dB re } 1\mu\text{Pa}$ 의 차이를 확인하였다. 경상남도 고성읍의 전체평균은 실제 측정값과 적은 차이를 보여줬지만 최대 최소차이가 많이 나타났다. 중육도에서의 전체평균은 실제 측정값과 많은 차이를 보여줬지만 최대 최소의 차이는 적은 것을 확인할 수 있었다. 발파로 인한 수중음압레벨을 예측하기 위한 자료를 얻기 위해 수중과 인접한 곳의 현장 조건이 충족되어야 하는 특성상 많지 않은 데이터를 얻었으며, 수중음압레벨을 측정하는 기기의 희소성도 영향을 많이 끼쳤다. 이런 조건들을 보완한 상태에서 각각의 지역에 따른 많은 데이터를 가지고 분석을 한다면 보다 나은 결과를 얻을 것이라 판단되었다. 또한 각 지형과 지질에 따라서 수중음압레벨을 측정할 값을 참고하여 각 지역별 예측값에 따른 보정치를 두어 조정할 필요가 있다고 판단된다.

### 참고문헌

1. 김광준, 김정태, 김중희, 이원경, 임병덕, 1996, “소음과 진동”, 반도출판사, pp. 2-7, pp. 23-24.
2. 박정봉, 2011, “지반진동과 수중소음의 상관성 연구”, 박사학위논문, 조선대학교, pp. 12-14, pp. 38-39.
3. 박진형, 2009. “지반진동 및 공중소음에 의한 수중소음 변화에 관한 연구”, 석사학위논문, 서울시립대학교, pp. 6-9, pp. 23-27, pp. 40-44, pp. 76.
4. ANSI, 1971, ANSI S1.8-1969, American National Standards Institute, New York.
5. Lubbers, J. and R. Graaff, 1998, “A simple and accurate formula for the sound velocity in water”, *Ultrasound Med. Biol.* Vol. 25, No. 7, pp. 1065-1068.
6. Marczak, W., 1997, “Water as a standard in the measurements of speed of sound in liquids”, *J. Acoust. Soc. Am.* 102(5), pp. 2776-2779.
7. Parvin, S. J., J. R. Nedwell and E. Harland, 2007, “Lethal and physical injury of marine mammals, and requirements for Passive Acoustic Monitoring”, Subacoustech report 565R0212, report prepared for the UK Government Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform, pp. 16.
8. Siskind, D. E., V. J. Stachura, M. S. Stagg, and J. W. Kopp, 1980, “Structure Response and Damage Produced by Airblast From Surface Mining.” Report of Investigations 8485, U.S. Bureau of Mines, Washington, D.C, pp. 8, pp. 85.
9. Urick Robert, J, 1975, “Principles of underwater sound for engineers”, McGraw Hill, New York, pp. 12-15, pp. 16-21, pp. 82.
10. University of Rhode Island, 2009, “Discovery of Sound in the Sea”, Website.



**박 정 일**

조선대학교 대학원  
에너지자원공학과 석사과정

Tel: 062)230-7876  
E-mail: berilac@naver.com



**노 영 배**

대동발파기술사사무소 대표

Tel: 062)230-7876  
E-mail: bayo21@hanmail.net



**강 추 원**

조선대학교 에너지자원공학과 교수

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



**고 진 석**

조선대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062)230-7118  
E-mail: jsgo@chosun.ac.kr