

수중소음 거리감쇠 특성식을 이용한 해양생물 피해영향범위 예측

하정민* · 이종명* · 이정훈* · 구동식** · 최병근***

*경상대학교 해양과학대학 정밀기계공학과

**창원문성대학 조선학부 조선설계과

***경상대학교 해양과학대학 에너지기계공학과 해양산업연구소

Prediction of Effect Zone for Marine Organisms Using Distance Attenuation Equations for Oceanic Noise

Jeong-Min Ha*, Jong-Myeong Lee*, Jeong-Hoon Lee*, Dong-Sik Gu** and Byeong-Keun Choi***

*Department of Mechanical and Precision Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

**Division of Shipbuilding Production, Shipbuilding Planning, Changwon Moonsung University, Changwon, Korea

***College of Marine Science, Dept. of Energy and Mechanical Engineering, Institute of Marine Science, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

KEY WORDS: Oceanic noise 해양소음, Equations of attenuation in distance 거리감쇠식, Effect zone 영향범위, Marine organism 해양생물

ABSTRACT: There are insufficient data to consider the effect zone for the marine life of coastal fisheries, because no standard has been defined for the sound level of marine life. In this study, equations for distance attenuation were used to determine the effect zone for oceanic noises. A reference noise level was divided into 4 parts to consider the characteristics of the fishes, and the effect zone of each reference noise level was determined. To increase the reliability of the effect scope, approximately 100 repetitions of blasting work split into several parts by the boring depth, the sound level of the source caused by an increase in weight, and the effect zone were calculated using the prediction equation. According to the prediction, the maximum distance of the effect zone was 4.92 km.

1. 서 론

각종 동물에게 소음피해를 주지 않으려면 사람의 주거환경기준과 유사한 적용기준을 적용시켜야 하며, 환경소음의 기준은 일반적으로 45 ~ 60 dB(0.005 ~ 0.028 Kine)을 제시하고 있다. 여기서 특이할 사항은 해양생물에 대한 소음 기준이 설정되어 있지 않을 뿐만 아니라 해수면 어장의 어류와 해양생물에 대한 자료도 전무한 실정임으로 적용기준의 판단이 상당히 어렵다는 점에 이렇다 할 피해영향범위(Effect zone)를 선정하거나 예측하기가 까다로운 실정이다(신현욱, 2000).

일반적으로 수중에 살고 있는 어류도 높은 소음에 노출될 경우, 피해를 받는 것으로 알려져 있다. 그러므로 내수면 어류는 소음 진동에 대한 스트레스 등으로 어류가 폐사하는 경우가 많이 나타나므로 이에 대한 민원이 야기되는 사례가 많이 보고되고 있다. 그리고 해수 어종에 대한 생태는 일반적으로 소음에 약한 것으로 알려져 있고, 어류의 청각은 예민하여 부정기적인 소음이나 진동에 대하여 취약한 것으로 알려져 있다(배종우 등, 2009).

어류의 경우, 음향은 수중에서 의사소통에 사용되는 필수적인 도구이기 때문에 대부분의 어류들은 청각기관이 발달되어 있다. 강한 소음, 약 180dB 정도의 소음에 노출된 물고기의 경우, 소

음노출 후 2시간 안에 실험대상의 1/3이 폐사하였다는 사례도 있다. 나머지 물고기들도 소음에 노출된 뒤에 균형을 찾지 못한 것을 보아 소리에 민감한 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

한편, 어류는 각기 종류에 따라서 소음·진동에 관여하는 청각기능 및 성질이 다른 양상을 보이고 있으며, 현재 알려져 있기는 2,000여종의 뼈 있는 물고기에서 내이를 가지고 있으므로 대부분 물고기는 정도의 차이는 있으나, 소음에 영향을 받는다고 볼 수 있다.

암소음(Background noise)의 영향에 있어서는 어떤 특정 소음원이 발생하는 음을 측정하려고 할 경우 그 이외의 음을 암소음이라 한다. 소음 환경평가에서는 모든 음(Sound)이 소음(Noise)이므로 암소음을 특별히 생각할 필요는 없지만, 특정 소음원 전체로의 기여도와, 소음대책의 효과 등을 조사할 경우에는 암소음이 문제가 된다. 이와 같은 경우에는 목적대상을 제외한 나머지 요소에 대한 소음을 최소화하여 암소음을 낮게 측정환경을 조성하여 대상이 되는 소음을 측정하는 것이 필요하다.

그러나 이 역시도 해양의 어류에 대하여는 아직 확실한 근거가 제시되어 있지 않을 뿐만 아니라 관련 근거도 명시되어 있지 않다. 그러나 일반적으로 모든 어류는 내이를 가지고 있고 놀라기를 잘하는 동물로 알려져 있으므로 진동 및 소음에 아주 예

민한 것으로 볼 수 있다.

따라서 본 논문에서는 해안에 인접한 발파작업으로 인해 발생하는 수중소음을 실측하여, 이를 바탕으로 미계측된 발파작업에 대한 수중소음도를 사용된 장약량(Gross weight)과 천공깊이(Boring depth)에 따라 예측하였다. 그리고 예측된 수중소음도에 의해 해양생물에 피해를 줄 수 있는 영향범위를 거리감쇠 특성식(윤종락 등, 2006)을 이용하여 예측하는 방법을 기술하고, 적용된 사례에 대해 논의한다.

2. 수중소음 측정

2.1 측정 장비

발파, 소음, 진동 등으로 인한 어류의 피해영향범위를 결정하기 위하여 미발파시의 수중 환경소음을 측정하여 대상해안의 암소음에 대한 특성을 파악하고, 발파 시 수중으로 전달되는 소음을 측정하여 암소음 측정 결과와 비교 분석하였다. 그리고 주파수 스펙트럼은 1/3 Octave band로 16 Hz ~ 20 kHz(가청주파수범위), Data는 약 60분 정도로 저장(Recording)하였고, 하이드로폰(Hydrophone)을 설치하여 수중소음을 측정하였다. 수중소음은 수심 2m로 고정하여 측정하였고, 하이드로폰의 신뢰도를 확보하기 위해 측정 시 2개의 센서를 사용하였다.



Fig. 1 Measuring equipment

Table 1 Measuring equipment specifications

Type	Product name	Input type
Pulse 3560C	Generator: 4/2-ch. Input/output module	Direct/cclld/mic. Preamp. 1 tacho conditioning
	5/1-ch. Input/output controller module	Direct/cclld 1 tacho conditioning
Hydrophone 8105	2606830	53.9 $\mu\text{V}/\text{Pa}$

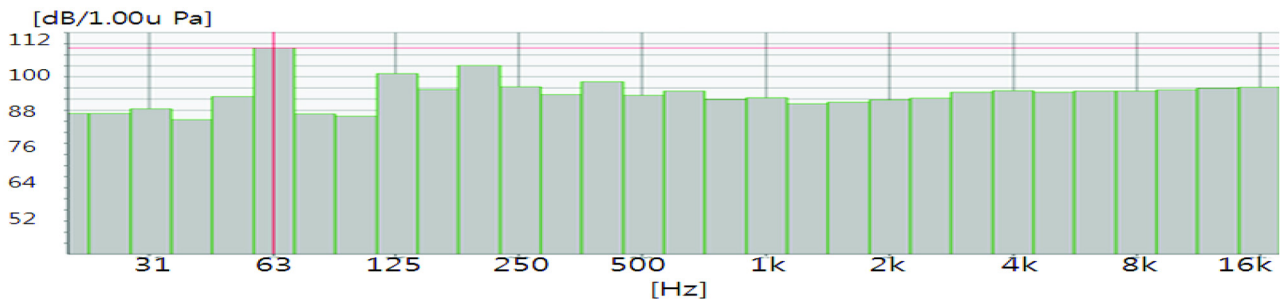


Fig. 2 Oceanic noise

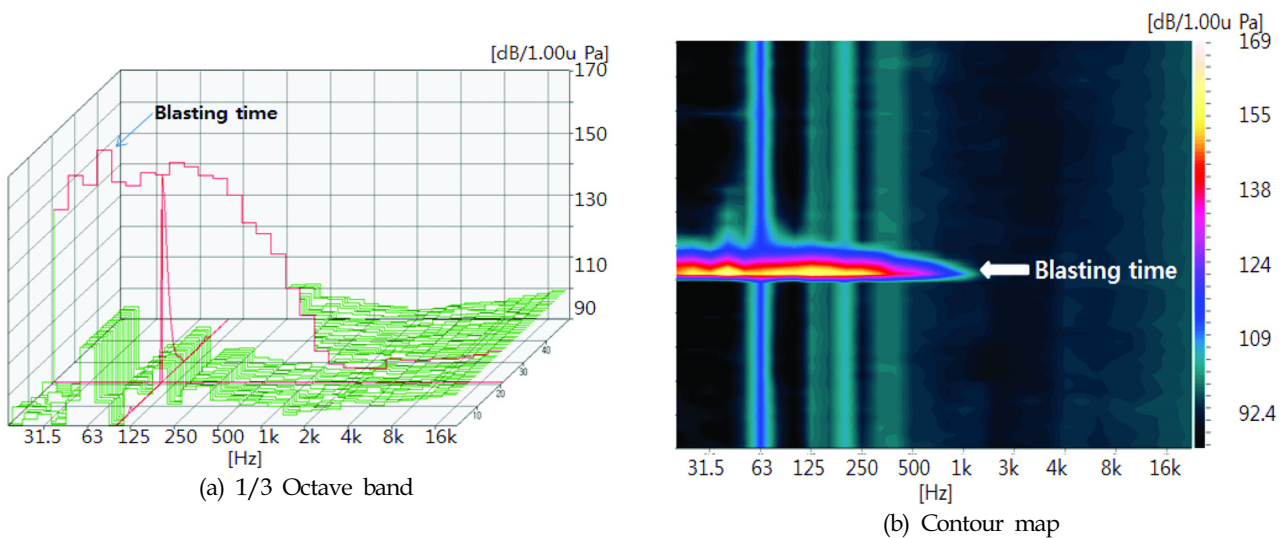


Fig. 3 Man made noise measure of blasting

Table 2 Measure result of man made noise

Boring depth	Gross weight(kg)	Distance(m)	Measure(dB)
5m	50	580	140
6m	195	570	140
8m	605	50	166
	395	570	137
9m	1290	190	148
	1575	190	143
10m	595	60	166
11m	725	60	168
12m	750	50	169
	813	50	157

Fig. 1은 측정 장비를 나타내며, Table 1은 수중소음계 및 분석 장치의 세부 사양을 나타낸다.

2.2 측정 결과

수중소음은 2개의 센서를 통해 총 12회에 걸쳐 측정되었으며, 발파 시간을 중심으로 측정하였다. 날씨는 대체로 맑았으며, 파고는 낮았다. 측정시간동안 주변에 선박의 이동이 없었고, 암소음은 일정하였다. 그리고 Table 2는 수중소음 측정 결과 값을 나타낸 것으로 최대 170dB, 최소 137dB로 측정되었다. 최대 음압이 측정된 발파 작업의 조건은 천공 깊이 8m, 장약량 605kg이며, 최소 측정 음압값에 대한 조건은 천공 깊이 9m, 장약량 395kg이다. 하지만 최댓값이 나타난 조건과 동일한 상태에서 발파시간의 차에 의해 또 다른 값(166dB)을 나타냄을 알 수 있다. 이는 발파 순간의 해수 유속, 풍속 등의 환경조건에 의해 발생하는 것으로 사료된다. 또한 동일한 조건이나 측정값이 서로 다르기 때문에 피해영향범위 예측 과정에서 두 값에 대한 피해영향범위를 모두 산출하였다.

저장된 데이터는 발파 작업을 포함하여 총 60분 동안 저장되었으며, 발파순간의 소음과 미발파시(환경소음)를 모두 포함하고 있다. 측정을 진행하는 동안 발파 작업이 중지되는 시간을 활용하여 상기의 측정방법과 동일한 방법으로 측정 대상지역의 수중 환경소음을 측정하였으며, Fig. 2와 같이 측정 지역의 수중 환경소음은 110dB로 일정하게 나타남을 알 수 있었다. 발파에 대한 수중소음 측정 결과 값은 Fig. 3과 같이 저장된 데이터를 0.5초 간격으로 Waterfall 및 Contour map에 나타내어 그 중 최댓값을 취한 것이며, 발파 시 수중소음이 급격히 증가한 후 약 4초에 걸쳐 감소된다는 것을 Fig. 3(최대 169dB)에서 나타낸 바와 같이 알 수 있다.

3. 예측방법 및 적용

3.1 예측 방법

전체 발파 작업 중 일부에 대해 계측된 수중소음을 이용하여,

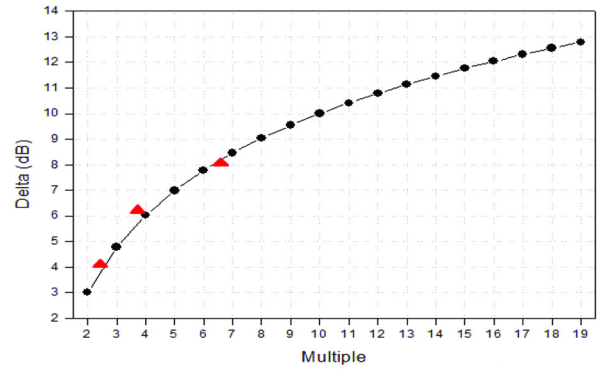


Fig. 4 The difference of Under-water noise according to increasing Power Factor

전체 발파작업에 대한 피해영향 범위를 예측하기 위해 다음과 같은 예측 식들을 사용하였다. 우선 식 (1)은 음압합산 공식으로 음압은 기준 음압에 대한 측정음압의 비를 대수식을 이용하여 dB로 나타낸 것으로, 음압의 합은 dB 값을 측정음압으로 변경 후 합산하여 다시 dB로 나타내는 것이다.

Fig. 4는 유사한 측정거리에서 실측한 데이터를 이용하여 장약량의 변화에 대한 수중소음의 변화량(▲)을 나타낸 것이다. 또한 ●의 실선은 장약량 변화(배수)에 대한 수중소음 변화량 추정곡선(식 (2))을 이용하여 수중소음 변화량을 예측한 그래프이다. 그림에서 실측값과 예측값이 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 식 (2)를 사용하여 실제 측정되지 못한 발파에 대해서 수중소음을 예측하였으며 식 (2)에서 x는 장약량의 증가배수, P_n 은 실제 측정음압을 나타낸다.

$$P = 10 \times \log(10^{P_1/10} + 10^{P_2/10} + 10^{P_3/10} + \dots) \tag{1}$$

$$P = 10 \times \log(10^{P_n/10} \times x) \tag{2}$$

TL(Transmission loss : 전달손실)은 음원으로부터 대상 어류까지 전달하는 동안 손실되는 양으로 확산손실과 흡수손실로 구성되며 거리 및 해양환경에 좌우된다. 본 논문에서는 측정 및 조사해역의 수심이 15~20m 전후의 천해이고, 음원으로부터 1km까지는 구면확산을 그 이상의 해역에 대해서는 원통확산 특성을 띄고 있다. 아래의 식(3)에서 구한 전달손실은 오로지 음원준위를 예측하기 위해서만 사용하였다.

$$TL = \alpha \times \frac{r}{1000} + 20 \times \log_{10}(r) : \text{구면확산}(1\text{Km 이내영역}) \tag{3}$$

식(3)에서 α 는 유효감쇠계수, r은 측정지점으로부터 해안선까지 거리를 나타낸다. 천해에서 음파의 전반손실은 해면, 해수매질 및 해저와 주파수 특성에 의존하며 전반손실을 구하는 방법도 다양하지만 본 논문에서는 어류에게 가장 민감한 주파수 대역(100~300Hz)만을 고려하였으며 유효감쇠계수로 0.18을 사용하였다(Rozenfeld, I. etc., 2001). 또한 음원의 음압예측을 위해서 거리, 측정값, 배경소음을 사용하여 음원준위(Source level, SL)를 식 (4)에서와 같이 계산할 수 있다.

$$SL = 10 \times \log_{10}(10^{P/10} + 10^{110/10}) + TL \tag{4}$$

수중소음이 어류에 미치는 범위를 결정하는 지배방정식은 식

(5)로 정의 된다.(윤종락 등, 2006)

$$SL - TL = NL + RT \tag{5}$$

여기서 NL(Noise level)은 해양배경소음을, RT(Response threshold : 반응역치)는 어류가 반응하는 음압준위에서 배경소음을 뺀 값이다. 식 (5)의 모든 변수는 dB로 주어지며 SL-(NL+RT)는 FOM(Figure of merit)으로 정의되며 SL, NL 및 RT로 부터 FOM을 추정하면 이에 상응하는 음파전달손실(전반손실)에 일치하는 거리가 수중소음의 피해 영향거리가 된다. 본 논문에서는 음파전달손실로 수심 20~40m인 천해에서 어류의 청각주파수범위 대역(100 ~ 300Hz)을 고려하여 실제 실험을 통해 만든 실험식 $17\log(r)$ (윤종락 등, 2006)을 사용하였다.

식(6)은 음파전달손실을 이용하여 피해영향범위를 예측하는 식으로 반응역치는 140dB로 설정[현재 어류에 대한 기준음압이 설정되어있지 않으나, 배경소음보다 30dB정도 높은 경우 피해 영향이 있는 것으로 보고됨(윤종락 등, 2006)]하였다.

$$\text{피해영향범위}(km) = 10^{FOM/17}/1000 \tag{6}$$

3.2 피해영향범위 예측

발파 시 폭약의 중량이 동일할 때 천공 깊이에 따라서 소음, 진동에 의한 소음도가 다르게 나타나므로 총12회에 걸쳐 측정된 값을 천공 깊이(5m, 6m, 8m, 9m, 10m, 11m, 12m)별로 분류하였다. 또한 피해영향범위를 산출함에 있어서 신뢰도를 높이기 위하여 7개월간 작업장에서 실시된 약 100여회의 발파일지를 바탕으로 모든 발파 작업을 천공 깊이별로 분류하여 피해영향

범위 예측에 적용하였다. 그중 천공 깊이가 5m인 발파작업에 대해 사용된 장약량을 조사하여, 사용된 장약량의 증가에 따른 예측 소음도(P)를 천공 깊이 5m의 측정값을 토대로 산출된 피해영향범위는 Table 3에 나타내었으며, Fig. 5는 장약량에 따른 Source level의 증가량을 나타낸 것이다.

Table 3에서와 같이 측정값 140dB(천공 깊이 5m)에 대한 발파작업 시의 사용된 장약량은 50kg이었다. 여기서 50kg의 장약량이 사용될 때 발생하는 수중소음이 140dB로 일정하다고 가정하고, 장약량의 증가에 따라 수중 소음 역시 일정한 비율로 증가한다고 가정할 때, 만약 장약량이 505kg (50kg의 10.1배)이 사용된다면 수중소음은 식(2)에 의해 150.04dB로 예측할 수 있다. 그리고 50kg에 대한 측정값과 해안선까지의 거리를 이용하여 식 (3)과 식(4)를 통해 음원준위(SL)를 추정하면 195.38dB이 되며, 그에 따른 피해영향범위는 1.81km가 된다. 피해영향범위를 예측하기 위하여 산출해낸 음원준위와 기준음압을 이용하게 되는데 3.1절에서 언급하였듯이 현재 어류에 대한 기준음압이 설정되어있지 않고, 배경소음보다 30dB정도 높은 경우 피해영향이 있는 것으로 되어있으므로, 기준음압을 140dB로 선정하여 식(5)와 식 (6)을 통해 피해영향범위를 계산하였다. 따라서 장약량(50kg에 대해)이 10.1배 증가하게 되면 음원준위는 205.42dB이 되고, 피해영향범위는 7.05km로 된다. 이와 같이 천공 깊이 5m에서 실시된 발파에 대해 장약량의 증가배수에 따라 소음도를 예측하고, 예측된 소음도를 이용해 음원준위를 계산하여 각각의 피해영향범위를 나타낼 수 있었다. 따라서 실제 사용된 최대 장약량(5m 기준)은 50kg의 최대 25.98배로, 그에 대응되는 음원준위는 209.52dB, 피해영향범위는 12.29km가 되며, 최종적으로 천공 깊이 5m에 대한 전체 평균 피해영향 범위(Mean effect zone)는 7.6km가 된다.

상기의 동일한 방법을 통하여 천공 깊이 6m, 8m, 9m, 10m, 11m, 12m에 대한 피해영향범위도 산출하여 전체 평균내면(기준음압을 140dB로 설정 시) 피해영향범위를 예측할 수 있다. 따라서 100여회에 걸쳐 진행된 발파작업에 대한 정보를 통해 천공 깊이가 별로 예측된 평균피해범위는 Table 4와 같으며, 모든 천공 깊이를 고려한 전체 평균 피해영향범위는 4.92km로 예측된다.

Table 4에 나타낸 예측 결과는 어류가 반응하는 기준음압(음압준위)을 140dB로 가정한 예측된 결과이며, 서론에서 기술된 바와 같이 어류에 대한 소음기준이 현재까지 명확히 설정되어 있지 않기 때문에 기준음압을 네 가지로 구분하여(140dB, 145

Table 3 Boring depth (5m) Mean effect zone

Gross weight (kg)	Gross weight (product)	Measure (dB)	Source level (dB)	Effect zone (km)
50	1	140.00	195.38	1.81
505	10.10	150.04	205.42	7.05
550	11	150.04	205.42	7.05
555	11.10	150.45	205.83	7.45
565	11.30	150.53	205.90	7.53
590	11.80	150.72	206.09	7.72
900	18	152.55	207.93	9.90
1299	25.98	154.15	209.52	12.29
Mean effect zone(km)				7.6

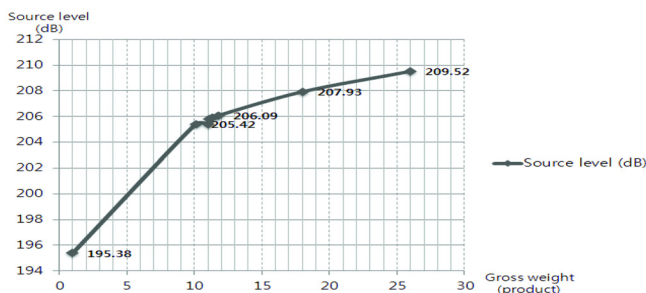


Fig. 5 Source level according gross weight

Table 4 Mean effect zone(Ref. 140dB)

Boring depth(m)	Mean effect zone(km)
5	7.6
6	3.65
8	6.51
9	1.85
10	7.39
11	2.59
12	4.91
total average(km)	4.92

Table 5 Effect zone in accordance with standard sound pressure

Boring depth(m)	145dB	150dB	160dB
5	3.86	1.96	0.5
6	1.85	0.94	0.24
8	3.31	1.68	0.43
9	0.94	0.48	0.12
10	3.75	1.91	0.49
11	1.31	0.67	0.17
12	2.49	1.27	0.36
total average(km)	2.5	1.27	0.33

dB, 150dB, 160dB) 각각에 대한 피해거리를 산출하였다. 이는 상기의 방법과 동일하게 계산하되 식(5)에서 기준음압을 145dB로 변경하여 산출할 수 있으며, 그에 대한 전체 평균 피해영향범위는 2.5km가 된다. 기준음압을 150dB로 선정 시 전체 평균은 1.27km이며, 기준음압 160dB선정 시에는 0.33km의 피해영향범위가 예측되게 되며, 140dB를 제외한 세 가지 기준음압에 대한 전체 평균 피해영향범위를 Table 5에 정리하였다.

Fig. 6은 네 가지의 기준음압(140dB, 145dB, 150dB, 160dB)에 따라 예측된 피해영향범위를 나타낸 것으로, 발파지점은 화살표의 위치와 같이 해안선에 인접해 있으며, 피해영향범위는 발파지점들로부터 최대 반경 4.92km를 가지는 영역으로 예측된다.

4. 결 론

발파 소음으로 인한 주변해역의 해양생물에 대한 피해영향 범위를 예측하기 위하여, 미발파 시의 수중소음(암소음)을 조사(측정)하고, 발파 시 발생하는 수중소음을 측정하였다. 측정된 두 조건에 대한 수중소음을 비교한 결과, 발파 시는 배경소음(미발파)과 최대 60dB 차로 증가됨을 알 수 있었고, 100~300Hz(어류의 청각 주파수 범위)(윤종락 등, 2006)대역에서 소음이 급

격히 증가하는 것을 알 수 있었다.

측정된 수중소음을 토대로 하여, 피해영향 범위를 예측하기 위해 음원준위 예측식과 거리감쇠식을 사용하였으며, 음원레벨 예측식은 측정된 소음준위와 음원과의 거리를 통해 계산되며, 계산된 음원준위를 거리감쇠 식에 대입하여 피해영향 범위를 예측하였다. 또한 발파 작업의 조건에 대해 천공 깊이 및 장약량에 대한 조건을 고려하기 위해, 12회에 걸쳐 측정된 수중소음을 천공 깊이 별로 분류하고, 각 천공 깊이에 대한 피해영향 범위로 예측하였다. 이는 천공 깊이 및 장약량에 따라서 피해영향범위가 다르게 예측되기 때문이며, 피해영향범위의 신뢰도를 높이기 위하여 실측되지 못한 약 100여회의 발파작업을 천공 깊이 별로 정리하고, 장약량의 차를 고려하기 위해 측정된 작업의 장약량을 기준으로 측정되지 못한 작업에 대한 장약량을 증가배수에 따라 음원준위 및 피해범위를 예측 방정식을 이용해 산출하였다. 또한 현재 어류에 대한 소음기준이 설정되어있지 않기 때문에 기준음압 설정(140dB ~ 160dB)을 달리하여 동일한 방식으로 피해영향 범위를 예측하였다. 140dB 기준에 대한 전체 평균 피해영향 범위는 4.92km, 145dB에 대한 피해영향 범위는 2.5km, 150dB는 1.27km, 160dB는 0.33km로 예측되었다. 따라서 어류에 대한 최대피해영향범위는 기준음압이 140dB일 경우 최대 반경 4.92km 이내에서 발파작업에 의해 피해를 받을 수 있을 것으로 예측된다.

후 기

본 연구는 2단계 BK21의 친환경냉열에너지기계연구팀의 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Rozenfeld, I., W.M. Carey, P.G. Cable and W.L. Siegmann, (2001). "Modeling and analysis of sound transmission in the Strait of Korea", IEEE J. Oce. Eng., Vol 26, No 4, pp

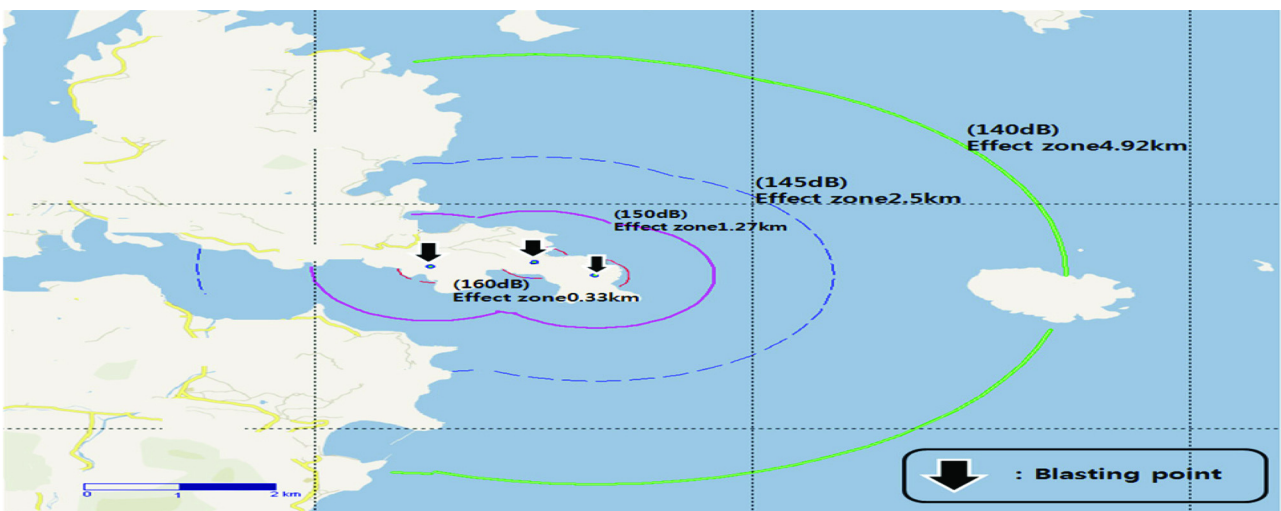


Fig. 6 Mean effect zone

809-820.

배종우, 박지현, 윤종락 (2009). “수변 공사에 의한 충격음의 특성과 어류에 미치는 영향”, 한국소음진동공학회논문집, 제19권, 제9호, pp 928-934

신현옥 (2000). “양식 향어의 행동에 미치는 발파작업 소음의 영향에 관한 연구”, 한국수산과학회지, 제33권, 제4호, pp 348-355.

윤종락, 이성욱, 안수용, 박지현, 배종우, 안명석 (2006). “수중소음이 어류에 미치는 영향”, 한국소음진동공학회 2006년도 추계학술대회논문집, pp 739-746.

2011년 10월 14일 원고 접수

2012년 2월 22일 심사 완료

2012년 4월 19일 게재 확정