

# 울돌목 시험조류발전소의 수중소음 특성 연구

## Acoustic Characteristics of Underwater Noise from Uldolmok Tidal Current Pilot Power Plant

고명권, 최지웅<sup>†</sup>, 이진학\*, 정원무\*

(Myungkwon Ko, Jee Woong Choi<sup>†</sup>, Jin-Hak Yi\*, and Weonmu Jeong\*)

해양대학교 해양융합학과 해양음향연구소, 한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부\*

(접수일자: 2012년 8월 20일; 수정일자: 2012년 9월 28일; 채택일자: 2012년 10월 19일)

**초 록:** 최근 친환경 발전에 관한 관심이 높아지면서 태양광, 풍력, 조력, 조류 발전에 대한 수요가 점차 증가되고 있다. 이러한 친환경 발전 방식 중 조력발전은 해수의 흐름을 이용하는 조류발전은 지형적 특성에 의해 강한 조류가 발생하는 지역에서만 사용할 수 있는 특수한 발전 방식이다. 울돌목 해역은 조류 발전이 가능한 매우 강한 조류가 형성되는 지역으로 다른 지역의 해역과 구분되는 특별한 환경을 제공한다. 하지만, 해양에서의 인간의 활동은 수중소음을 야기하여 해양환경에 큰 영향을 미친다. 최근에는 환경영향평가의 중요성이 대두되면서 발전소 가동 시의 소음 특성 분석 및 전파양상 예측에 대한 필요성이 증가하고 있다. 본 연구는 조류발전소의 수중소음 특성을 측정하고 울돌목 해역으로의 전파양상을 모델링 하였다.

**핵심어:** 울돌목 시험조류발전소, 수중소음, 음파전달 모델링

**투고분야:** 수중음향 분야(5.4)

**ABSTRACT:** Recently, as a result of increasing concern about eco-friendly power, the demand for the power stations using environmentally friendly powers such as photovoltaic energy, wind force, tidal power, and tidal current has been increasing worldwide. Among these power stations tidal current power plant requires strong current generated by the topographic characteristics of the ocean floor. Uldolmok waterway producing very strong current is an ideal location for a tidal current power generation. However the occurrence of anthropogenic underwater noise generated by the tidal current power station may affect the marine environment. Therefore, it is necessary to evaluate the noise radiated from the station and predict the range influenced by the radiated noise. In this paper, the measurements of radiated noise spectrum level by the tidal current power station are presented, and the source level per unit area is estimated. Finally, the propagation properties of the radiated noise in the Uldolmok waterway is evaluated from the model simulation using the parabolic equation method, RAM.

**Key words:** Uldolmok tidal current pilot power plant, Underwater noise, Acoustic propagation modeling

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5.4)

## 1. 서 론

최근 선진국을 중심으로 해양에너지 자원 확보를 위한 기술개발 경쟁이 가속화되고 있으며, 이 중 조류(tidal current) 에너지 및 조류발전용 수차에 관한 연구가 영국, 미국, 캐나다 및 노르웨이 등에서 활발

히 수행되고 있다.<sup>[1]</sup> 그럼에도 불구하고 전 세계적으로 아직 조류를 이용한 대규모 발전이 진행되지는 못하고 있다. 이는 우선 조류발전을 위한 기본 조건인 강한 조류는 지형에 의해 발생하는데 이러한 조건을 만족하는 지역이 매우 제한적으로 존재하기 때문이다. 하지만 국내의 서·남해안은 복잡한 해안선과 많은 섬들의 영향으로 약 1,000 MW 정도의 조류 에너지가 부존 되어 있는 것으로 추정되고 있다.<sup>[2]</sup> 국내의 대표적인 조류발전 가능 지역으로는 울돌목

<sup>†</sup>Corresponding author: Jee Woong Choi (choijw@hanyang.ac.kr)  
Department of Marine Science and Convergence Technology,  
Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan,  
Gyeonggi-do 426-791, Republic of Korea  
(Tel: 82-31-400-5531)

(진도수도)을 비롯하여 장죽수도, 맹골수도 등이 있다. 이러한 지역들은 지형적인 요인에 의해 발생하는 조류의 최고 유속이 약 4~5 m/s의 빠른 조류가 생성되는 지역으로 일찍이 조류발전의 최적지로 여겨져 왔다.<sup>[3]</sup> 이중 울돌목은 세계에서 5번째 안에 드는 빠른 조류가 흐르는 지역으로 한국해양과학기술원은 울돌목 시험 조류발전소를 2009년 5월 완공 후 현재까지 시험 운행 중에 있다. 조류발전은 빠른 물살의 힘으로 수차를 돌려 전기를 생산하는 방식으로, 댐과 같은 대규모의 인공 구조물 없이 자연 여건을 비교적 온전히 이용하는 에너지 상용화 시설이다. 조류에 의해 움직이는 수차는 터빈을 거쳐 전기를 생산하는 과정에서 수중소음이 발생하여 해양으로 전파된다. 해양 구조물의 진동에 의해 발생한 수중소음의 주파수는 구조물의 진동수와 일치하는 것으로 보고되고 있다. Lindell<sup>[4]</sup>은 발트해에 위치한 Utgrunden 풍력발전소를 대상으로 수중소음을 측정하여 발전소에서 발생한 수중소음의 주파수와 해상에 위치한 풍력발전소의 진동수간의 높은 상관성을 확인하였다. 인간의 활동에 의해 발생한 수중소음은 해양 내 서식하는 동·식물의 활동에도 영향을 주는 것으로 알려져 있으며,<sup>[5]</sup> 최근 해양 선진국을 중심으로 해양에너지 분야의 환경영향평가(EIA, Environmental Impact Assessment)의 일환으로 수중소음에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 본 연구는 시험조류 발전소에서 발생하는 수중소음의 준위 및 주파수 특성을 파악하고 해당 해역으로의 전파 양상을 모의하는 연구를 수행하였다.

본 논문은 아래와 같이 구성된다. 제 2장에서는 울돌목 해역의 조류 특성과 발전소의 소음원인 터빈간의 관계를 설명한다. 제 3장에서는 수중소음 측정을 위한 해상실험 개요와 신호분석 방법을 설명하고, 제 4장에서는 해상실험 결과를 제시하며, 제 5장에서는 발전소 소음의 음원준위와 전파양상을 모의한다. 제 6장에서는 본 논문에 대한 결과에 대한 토의가 제시된다.

## II. 측정환경특성

조석운동에 의해 발생하는 12시간 주기의 해수 유

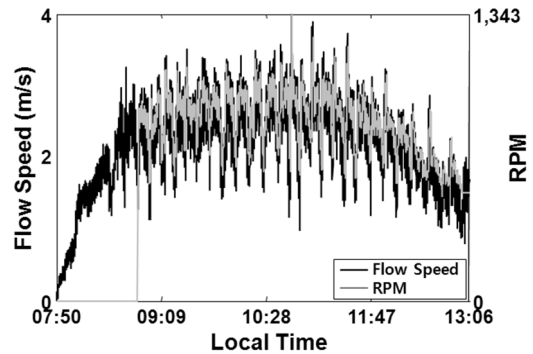


그림 1. 2011년 3월 21일 측정한 울돌목 해역의 조류세기 변화(검은색 선)와 시험 조류발전소의 로터 회전수(회색 선)의 변화양상비교

Fig. 1. Flow speed (black line) and RPM of the rotor (gray line) in tidal current pilot power plant measured at Uldolmok waterway (March 21, 2011).

동은 울돌목 부근 해역에서 그림 1과 같은 양상을 나타낸다. 그림 1의 검은색 선은 해수의 유동이 매우 강한 사리 때인 2011년 3월 21일 울돌목 시험조류발전소에서 관측한 시간에 따른 조류 세기 변화이다. 조류 흐름은 해수의 유동이 없는 정조에서 다음 정조까지 6시간 동안 그림 1의 검은색 선과 같은 양상을 보인다.<sup>[6]</sup> 울돌목 해역의 대표적 조류 특성은 10분 주기의 유속 변화이다. 변화 원인으로는 조류가 울돌목 해역을 통과하며 발생하는 와류(eddy)에 의해서 조류의 세기가 주기적으로 변화하는 것으로 보고되고 있다.<sup>[7]</sup> 그림 1의 회색 선은 울돌목 시험조류발전소 내의 발전기 로터(rotor) 회전수(RPM, Revolutions Per Minute)를 나타낸다. 터빈의 회전수는 측정 당시 최고 1,343 rpm이며 터빈이 회전하기 시작한 08시 45분 이후의 평균 회전수는 821 rpm이다. 동일한 시간에 측정한 그림 1의 유속 세기와 터빈 회전수는 높은 상관성을 가지는 데 이는 터빈을 회전시키는 조류발전소 수차의 회전이 조류의 세기에 의해 변화하기 때문이다. 또한, 본 연구에서 측정된 로터 회전수는 수차의 회전보다 17.5배 빠르게 회전하게 설계되어 있어 조류에 의해 회전하는 수차의 회전은 측정 당시 최고 77 rpm, 평균 47 rpm으로 회전했음을 추정할 수 있다.

### III. 해상실험

발전소 가동/비 가동 시의 수중소음 측정은 2011년 8월 31일~9월 1일에 실시되었다. 실험 해역은 전라남도 진도 북단 울돌목 해역에 위치한 한국해양과학기술원의 시험조류발전소 부근(북위 34° 33.875', 동경 126° 18.556')에서 이루어 졌다(그림 2). 조류와 같은 유체의 흐름이 존재하는 지역은 유체소음(flow noise)의 영향을 받는다. 유체소음은 유체의 흐름에

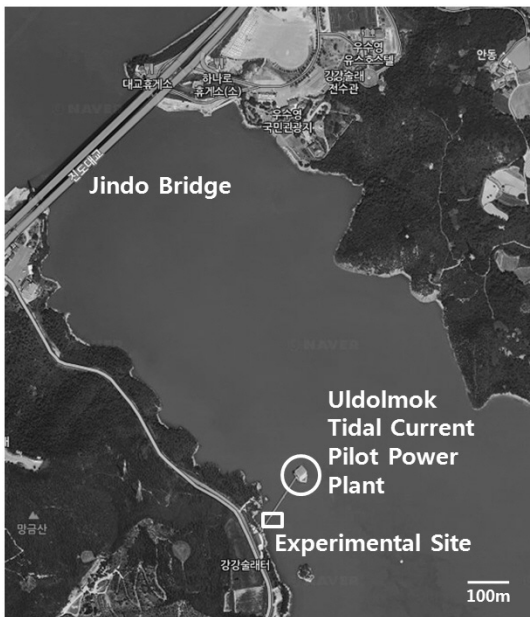


그림 2. 울돌목 시험조류발전소 수중소음 측정 실험해역 (북위 34° 33.875', 동경 126° 18.556')  
 Fig. 2. Experimental site for underwater noise measurements from Uldolmok tidal current pilot power plant (34° 33.875' N, 126° 18.556' E).

따른 압력 변화에 의해 발생하는 그리고 측정 시에만 존재하는 수중청음기에 의한 소음을 의미한다.<sup>[8]</sup> 울돌목 해역 같은 조류가 강한 지역에서는 높은 유체소음준위로 인해 발전소의 수중소음측정이 어려우므로 본 연구의 해상실험 시 유속이 최소인 위치를 선정하였다(그림 2, 흰색네모구역). 수중청음기는 시험조류발전소에서 진도로 연결된 다리 하부, 발전소로부터 120m 떨어진 지점의 해저면에 그림 3과 같이 설치하였다.

측정을 위해 사용된 수중청음기(RESON, TC - 4014)는 가용 주파수 대역이 15 Hz~480 kHz로 수백 Hz 대역에 존재할 것으로 예상되는 터빈에 의한 수중소음<sup>[9]</sup>을 측정하기에 적합한 수중청음기이다. 또한 발전소 가동/비 가동 시 발생 가능한 전원부의 잡음 문제를 해결하기 위하여 해상실험 시스템 전원은 배터리를 이용하여 발전소 및 육상전원과 독립 운용하였다. 수신신호는 10 Hz~100 kHz의 신호를 일정하게 증폭시켜주는 특성을 갖는 증폭기(amplifiers, B&K 2693)를 통과시킨 후 A/D 변환기(NI, PCI-6110)를 이용하여 디지털신호로 저장하였으며, 샘플링 주파수(sampling frequency)는 100 kHz를 이용하였다. 수신신호는 50%오버랩(overlapping)된 해닝윈도우(hanning window) 신호들을 이용하여 파워 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density, PSD)로 표현되었다.

### IV. 해상실험결과

발전소 가동/비 가동 소음 측정은 9월 1일 이루어 졌다. 그림 4(a)의 검은 점선은 발전소 가동 전 10분

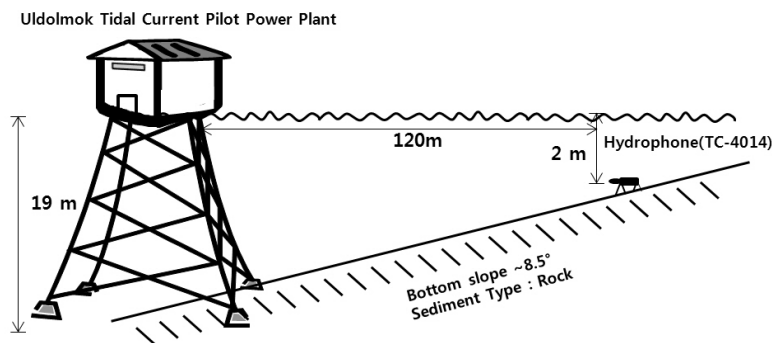


그림 3. 울돌목 조류발전소 수중소음 측정 실험 모식도  
 Fig. 3. Experimental geometry for underwater noise measurements from Uldolmok tidal current pilot power plant.

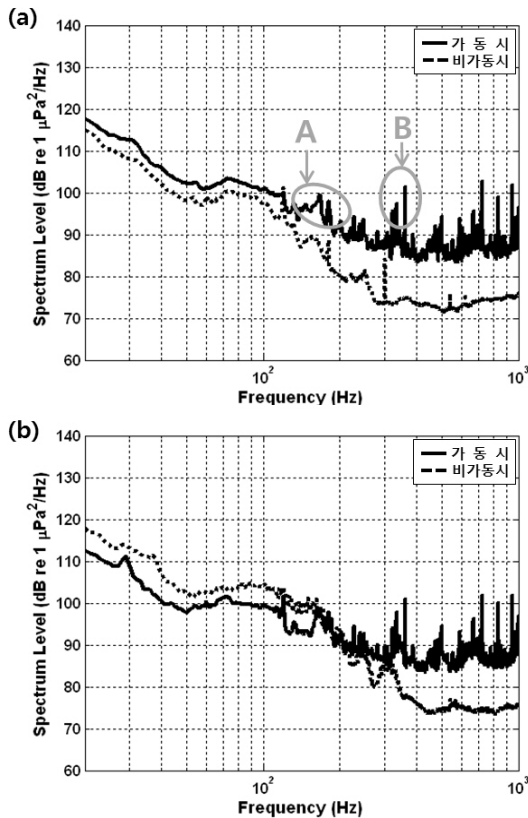


그림 4. 울돌목 시험조류발전소 수중소음 측정 결과. 그림 내에 표기된 A와 B는 그림 6에서 확대 표현된다.  
 Fig. 4. Noise spectrum levels measured in operating (solid line) and downtime (dashed line) of power plant. (a) and (b) show the noise levels measured at different time.

간 측정된 발전소 비 가동 시의 주변소음의 스펙트럼 준위(spectrum level, in dB re 1  $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ )이다. 검은 실선은 발전소 비 가동 시의 데이터 수신 완료 후 발전소 가동을 시작하여 터빈 회전의 안정화를 위해 5분을 대기한 다음 10분 동안 측정된 발전소 가동 시 스펙트럼 준위이다. 그림 4(b)는 반대의 경우로 가동 중인 발전소 소음 수신 후 발전소를 정지하여 완전 정지를 위해 5분을 대기한 다음 10분간 측정된 비가동 시의 스펙트럼 준위이다. 측정 결과 약 200 Hz 이하의 저주파 대역의 스펙트럼 준위는 발전소 가동/비가동 여부에 상관없이 변화함을 알 수 있다. 즉, (a)의 경우는 발전소 가동 시의 소음준위가 약 2~3 dB 높게 측정되었으나 (b)의 경우는 비 가동 시가 오히려 3~4 dB 높게 측정되었다. 이는 울돌목 해역에 존재하는 조류 세기의 변화에 의한 유체소음의 영향으

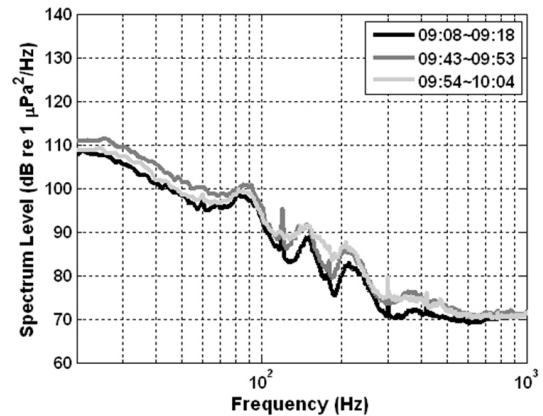


그림 5. 2011년 8월 31일 측정된 발전소 비 가동 시의 주변소음 스펙트럼 준위 변화  
 Fig. 5. Spectrum levels of ambient noise measured in downtime of power plant (August 31, 2011).

로 판단된다. 이러한 양상은 발전소 소음 측정실험 하루 전인 8월 31일 유사한 유속이 형성되는 시간에 측정된 발전소 비 가동 시의 주변소음 스펙트럼 준위에서도 볼 수 있다(그림 5). 즉, 200 Hz 이하의 저주파 대역에서의 소음 준위는 약 3~4 dB의 변화폭을 가지고 변동하였으며, 이는 9월 1일 측정결과와 유사한 결과이다. 200 Hz 이상의 고주파 대역은 발전소 가동/비가동 시의 차이가 발생 하는데 발전소 가동 시 일반적으로 소음 준위가 약 10 dB 정도 증가하며, 특정 주파수 대역에서 피크가 발생하였다. 그림 6(a), (b)는 각각 그림 4의 발전소 가동 시의 A와 B 구역에 존재하는 피크를 확대한 그림이다. 가는 실선들은 10분 동안의 수신신호를 1분 간격으로 나눠 분석한 결과들이고 검은색 굵은 실선은 이들의 음압강도 평균(averaged intensity level)이다. 그림 6(a)의 경우 평균 값 곡선을 보면 특정 주파수에서 피크가 발생한 것으로 보이나 1분단위 분석에서는 피크가 특정주파수에서 지속적으로 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 6(b)에 표현된 피크는 1분 단위의 분석 결과 역시 동일한 주파수 대역에서 근사한 준위를 갖고 10분 동안 수신됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 그림 6(b)에서 표현된 형태의 피크와 100 Hz 이상의 주파수 대역에서 평균적으로 10 dB 증가된 양상을 보이는 특성을 발전소의 영향으로 정의하였다. 발생 피크 중 가장 영향력 높은 주파수는 수신 스펙트럼 준위가 가장 우세한 주파수(dominant frequency)인

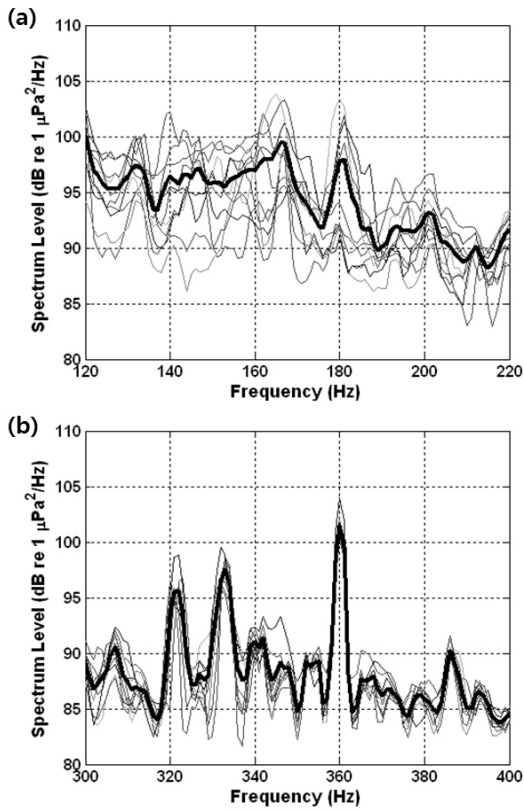


그림 6. 발전소 가동 시 발생하는 수중소음의 1분단위 단주기 분석결과 (a) 그림 4의 구역 A, (b) 그림 4의 구역 B

Fig. 6. Spectrum levels for 1 minute data segments (thin gray lines) and their power-averaged spectrum level (thick line) for (a) portion A and (b) portion B in Fig. 4.

360Hz였다(그림 6(b)). 발전소 소음의 발생기작을 추정하기 위해 발전소 소음 측정 당시의 조류 흐름과 로터 회전의 변화를 비교하였다(그림 7). 진한 음영 구역과 옅은 음영구역은 각각 발전소 가동 시와 비가동 시의 수중소음 측정 시간 대역이다. 발전소 가동시의 로터와 수차의 평균 회전수는 각각 748 rpm과 43 rpm으로 이를 주파수로 환산하면 12 Hz와 0.7 Hz가 된다. 이는 측정된 수중소음의 주파수인 360 Hz보다 매우 낮은 주파수이다. 이와 같은 결과는 해상에 존재하는 풍력발전기에서 발생하는 수중소음을 측정 한 Lindell<sup>[4]</sup>의 연구결과에도 유사하게 나타난다. 발트해에 위치한 Utgrunden 풍력발전기 소음분석에서도 로터와 회전날(blade)의 최고 회전수가 각각 30 Hz와 0.3 Hz인 발전기에서 발생하는 수중소음의 우세 주파수는 178 Hz로 로터와 회전날의 회전수 보다 높게 나타났으며, 결국 우세 주파수는 로터와 회전날의 회전수가 아니라 발전소 구조물의 진동에 의해서 결정됨을 보고하였다. 따라서 울돌목 시험조류발전소의 우세 방사소음 주파수인 360 Hz 또한 발전소 구조물의 진동에 의해 발생하였을 가능성이 큰 것으로 판단된다.

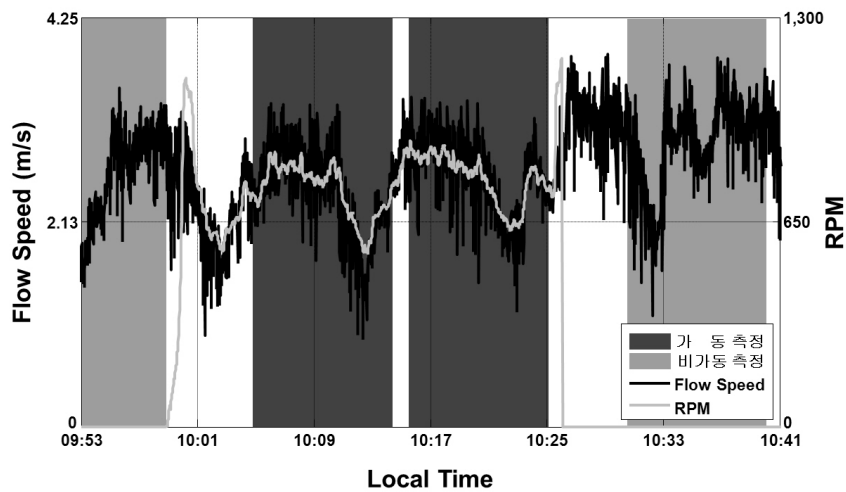


그림 7. 2011년 9월 1일 측정된 울돌목 해역의 조류세기 변화(검은색 선)와 시험조류 발전소의 로터 회전수(회색 선)의 변화양상 비교. 여기서 진한 음영구역과 옅은 음영구역은 각각 발전소 가동 시와 비가동 시의 수중소음 측정 시간 대역이다.

Fig. 7. Comparison of flow speed (black line) and RPM of the rotor (gray line) in tidal current pilot power plant.

## V. 발전소 음원 준위 및 음파전달 모델링

본 연구는 음향모델을 이용하여 발전소로부터 방사된 수중소음의 전달손실을 모의하였다. 또한, 모의된 전달손실과 해상실험을 통해 측정된 수중소음 준위를 이용하여 울돌목 시험 조류발전소 가동 시의 수중소음의 음원준위를 모의하고, 울돌목 해역으로의 전파양상을 예측하였다. 음원으로부터 방사되어 해양 내를 진행하는 음파는 수층의 수온구조, 해수면 상태, 해저면 구성 성분 및 해저지형에 따라 전파양상이 변화한다. 따라서 음향모델을 이용하여 음파의 전달 특성 및 전달손실을 모의하기 위한 입력 인자로 주파수, 음속, 해저 구성성분, 지형 등의 정보가 필요하다. 본 연구의 음원준위 모의는 Cho and Choi<sup>[9]</sup>의 연구에서 제시한 단위면적에 따른 음원준위의 모의 방법을 이용하였다. 발전소 소음원은 발전소 가동 시 고속으로 회전하는 터빈에 의한 구조물의 진동 영향으로 알려져 있으므로,<sup>[4]</sup> 본 연구에서 가정한 수중소음원은 발전소 구조물 중 공기 중에 위치한 터빈과 연결되어 수중에 존재하는 구조물인 수차이다. 수차의 형상은 지름 3 m, 높이 10.8 m인 기둥에 회전 날이 부착되어있는 형태를 취하고 있어 본 연구에서는 이러한 구조물 형상의 외관면적(apparent area)을 이용하여 면적에 의한 음원준위를 모의한 후

이를 단위면적 당 음원준위로 도출하였다. 면의 형상을 갖는 음원에서 발생하는 소음 준위의 예측을 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다. 우선, 음파가 발생하는 면을 수직/수평 방향에 따라  $n \times m$  개의 격자로 나누는 후 해당 격자에서 발생하는 음압강도(intensity)는 일정하다고 가정한다. 본 연구에서는 수평격자 개수인  $m$ 은 1을 가정하였으며, 수직격자 개수인  $n$ 은 1~10.8 m까지 1 m간격으로 11개의 음원이 존재한다고 가정하였다(그림 8). 이를 이용하여 계산되는 외관면적과 동일한 크기의 발원지역(effective source region)은 넓이 3 m<sup>2</sup>인 사각형 11개로 이루어진 직사각형으로 정의하였다. 수중청음기에 수신되는 음압강도는 11개로 이루어진 개개의 음원에서 방사되어 수신기에 도달하는 음압강도의 합으로 나타난다. 또한, 발원지역의 단위면적당 음원준위는 식(1)과 같이 나타난다.<sup>[9]</sup>

$$SL = RL + 10 \log \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |g_{ij}(r, f)|^2 - 10 \log dA \quad (1)$$

여기서  $SL$ 은 단위면적당 음원준위(in dB re 1  $\mu\text{Pa}^2/(\text{Hz} \cdot \text{m}^2)$ ),  $RL$ 은 수신준위(in dB re 1  $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ ),  $g_{ij}(r, f)$ 는 거리( $r$ )과 주파수( $f$ )에 의한 함수인  $ij$ 번째 음원으로부터 방사되어진 전달함수(spatial transfer function),  $dA$ 는 발원지역을 구성하는 개개 음원들의 면적이

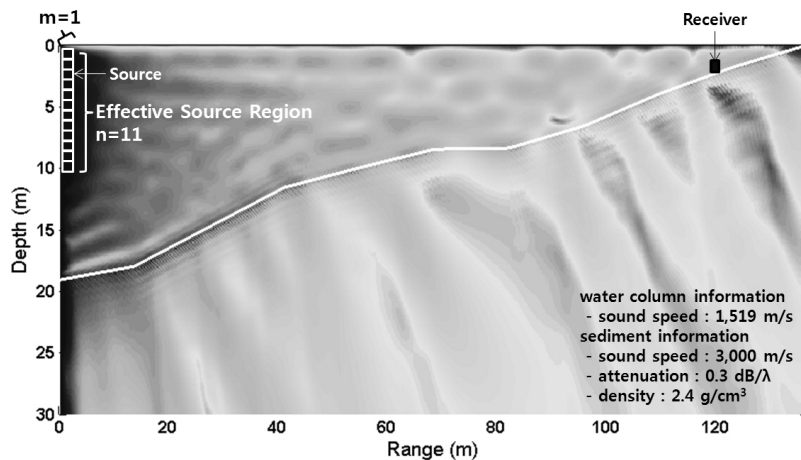


그림 8. 발원지역으로부터 방사된 음파의 전달손실 계산을 위한 모델링 기법 도식화

Fig. 8. Schematic representation for calculating the acoustic propagation loss from the effective source region to the receiver.

다. 전달함수인  $g$ 는 각각의 음원으로부터 방사되어 수중청음기에 수신되는 신호의 음압 전달손실이며 음전달 모델 중 포물선 방정식법을 이용하는 RAM (Range dependent Acoustic Model)을 이용하여 구현하였다.<sup>[10]</sup> 전달손실을 모의하기 위한 음전달 모델의 입력변수는 다음과 같다. 수층의 수직수온 구조는 해수의 유동이 매우 강한 수심 20 m 이하의 천해 환경에서는 수직적인 차이가 적을 것으로 예상하여 표층에서 측정된 수온인 20°C를 이용하여 1,519 m/s로 일정하게 가정하였다. 또한 지음향 입력인자로는 울돌목 지역에 넓게 분포되어있는 암반지역의 특성을

반영하여<sup>[2]</sup> 해저면 음속, 밀도, 감쇠계수를 각각 3,000 m/s, 2.4 g/cm<sup>3</sup>, 0.3 dB/λ로 설정하였다.<sup>[11,12]</sup> 그림 9은 측정 소음준위와 식(1)을 이용하여 모의한 울돌목 시험조류발전소 방사소음의 음원준위이다. 측정 소음은 발전소 가동 시 수신한 20분간의 데이터를 평균하여 분석하였다. 그림 9의 발전소가동 시 발생하는 소음의 단위면적당 음원 특성은 넓은 주파수 대역에서 평균 85 dB를 나타내며 특정 주파수 대역에서 피크의 형태로 존재한다. 대표적인 피크의 주파수는 360, 720, 834, 947 Hz이며, 각각의 단위면적당 음원 준위는 102, 101, 97, 99 dB이다.

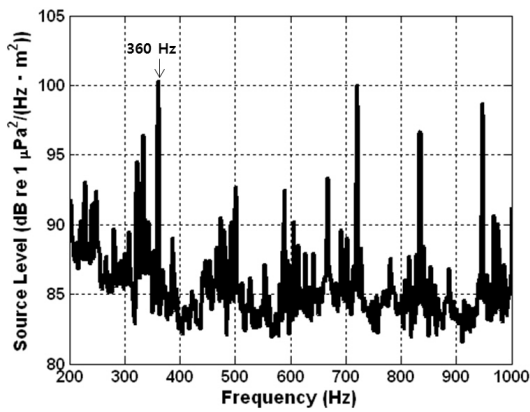


그림 9. 발전소 가동 시 발생하는 수중소음의 단위면적당 음원준위

Fig. 9. The estimated source spectrum level (per unit area) for the Uldolmok tidal current pilot power plant (in operation).

본 연구에서는 발전소의 음원준위 중 가장 높은 360 Hz의 소음이 울돌목 해역으로 퍼져나가는 양상을 모의하였다(그림 10). 모의는 울돌목 시험조류 발전소로부터 진도대교 방향으로 1,000 m 지점까지의 해저지형을 고려하여 수행하였으며, 이를 위해 식 (1)은 아래 식으로 변경하였다.

$$RL = SL - 10 \log \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |g_{ij}(r, f)|^2 + 10 \log dA \quad (2)$$

그림 10에 표시된 수직 점선은 음원에서 송신된 소음이 최등<sup>[13]</sup>에 의해서 개발된 한국연근해 주변소음 모델로부터 모의된 주변소음 준위와 같아지는 거리를 표시한 것이다. 주변소음 준위 모의 시 해상풍 속도는 수중소음 측정 실험 당일 풍속의 평균인 5

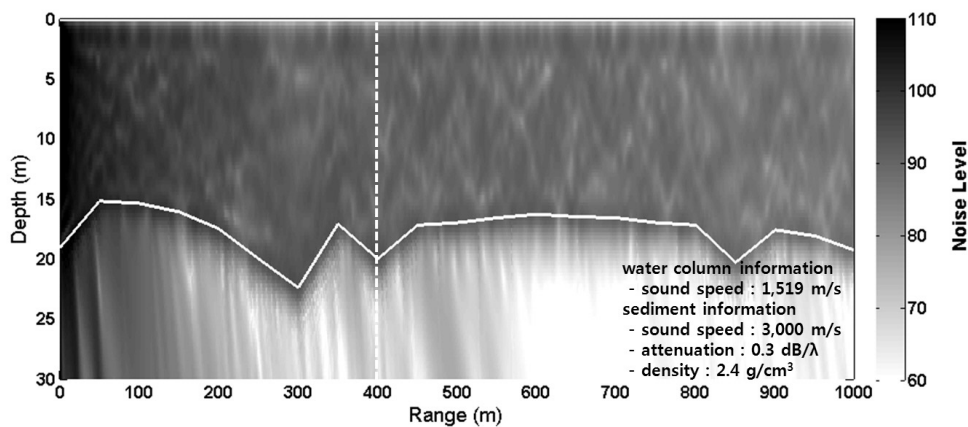


그림 10. 발전소 가동 시 소음의 진도대교 방향 전파양상.

Fig. 10. Simulated acoustic field for the underwater noise from an operating tidal current pilot power plant, as a function of depth and range, propagating toward Jindo Bridge.

m/s를 사용하였다. 또 다른 모델 입력 인자인 선박 밀도함수는 주변의 선박의 양에 따라 결정되며 14 km 내에 선박이 존재하지 않으면 0, 선박이 평균적으로 4척 가량 존재하는 경우는 1을 이용한다.<sup>[13]</sup> 본 연구가 진행된 울돌목 해역은 선박의 통행이 활발한 지역이므로 선박밀도함수로 1을 사용하여 주변소음을 모의하였으며, 모의 결과 360 Hz에서의 주변소음 준위는 약 88 dB로 예측되었다. 이러한 주변소음 준위와 그림 10의 관계를 보면 발전소 구조물로부터 방사된 소음은 진도대교방향의 해역을 통과하면서 약 400 m 지점에서 주변소음과 유사한 준위인 88 dB까지 낮아져 주변소음과 구분되지 않음을 알 수 있다. 이러한 특성은 최대 피크치를 보이는 360 Hz 이외의 주파수 대역에서는 이보다 더 짧은 구간에서 주변소음 준위에 묻히게 되며 단위면적당 평균 음원준위인 85 dB를 이용할 경우 수십 m 이내에서만 주변소음보다 큰 준위를 갖는 것으로 모의되었다.

## VI. 결론 및 토의

조류 발전소의 이용은 강한 조류가 존재해야 한다는 환경적 요인 때문에 전 세계적으로 드물게 존재하고 있다. 하지만 조류발전소의 특성상 발전소가 해상에 독립적으로 설치되어 운용되어야 하므로 발전소에서 발생하는 수중소음의 특성을 분석하고, 전파양상을 파악하는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 울돌목 시험조류발전소의 방사소음을 측정하였다. 조류 발전소의 방사소음 측정은 조류가 강한 지역에서 발생하는 유체소음의 영향으로 측정이 용이하지 않다. 따라서 발전소 소음을 측정하기 위하여 조류가 가장 약한 지역을 선정하여 유체소음의 영향을 최소화한 상태에서 실험을 실시하였으며, 음전달 모델을 이용하여 전달손실을 보상 후 단위면적당 음원준위를 계산하였다. 발전소 소음 측정은 발전소의 가동/비 가동 시의 수중 소음 데이터를 수집하여 주변소음과 발전소가동 시의 소음을 분리 하였다. 발전소 소음 특성은 360 Hz에서 가장 강한 소음이 발생하였으며, 이 외의 주파수 대역에서도 비 가동 시의 소음준위에 비해 평균적으로 약 10 dB 정도 증가함을 보였다.

본 연구에서는 발전소가동 시 발생하는 수중소음의 단위면적당 음원준위를 측정소음준위와 음전달 모델을 이용하여 모의하였다. 계산된 음원준위는 넓은 주파수 대역에서 평균적으로 약 85 dB의 준위 값을 나타내었으며 360, 720, 834, 947 Hz에서 다른 주파수대역의 발전소가동 시 소음과 구분되는 95 dB 이상의 높은 피크를 나타내었다. 여기서 720 Hz 진동은 360 Hz 진동의 고조파(harmonics)인 것으로 판단된다. 진동을 하는 구조물은 그 구조물의 기본주파수(fundamental frequency)의 배수성분에서 진동주파수를 가지는 고조파 진동을 하게 된다.<sup>[14]</sup> 이는 주파수가 두 배가 될 때마다 진동신호의 파장이 반으로 짧아짐으로써 두 주기의 신호가 이전 신호의 한 파장과 유사한 특성을 지니게 되며, 한 구조물 내에서 여러 파장이 함께 진동을 하게 되므로 주파수가 증가할수록 그 고조파 성분의 크기는 감소하게 된다. 이러한 결과는 풍력발전소 수중소음 측정<sup>[4]</sup>에서도 보고되고 있다.

예측된 음원준위를 이용하여 발전소가동 시 발생하는 수중소음이 울돌목 해역으로 퍼져나가는 양상을 모의하였으며, 모의결과 가장 높은 음원준위를 갖는 360 Hz에서 약 400 m 전파 시 한국연근해에 존재하는 주변소음 준위와 유사해짐을 알 수 있었고, 다른 주파수 대역에서는 그 이하의 거리에서만 발전소 소음이 영향을 미침을 알 수 있었다. 본 연구에서는 아쉽게도 진동계를 이용한 조류발전소의 진동수를 측정하지 못하였다. 발전소 및 해상에 존재하는 구조물의 수중소음 주파수대역은 구조물의 진동수와 높은 상관성을 갖는 것으로 알려져 있으므로 발전소 소음의 정확한 소음원 파악을 위해서는 발전소에서 발생하는 수중소음의 주파수와 구조물의 진동수 간의 상관성을 비교하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원 주요사업 “조력발전 시스템 성능향상 기술 개발(PE98763)”의 지원을 받아 수행되었습니다.



## 참고문헌

1. 해양수산부, 조력·조류에너지 실용화 기술 개발(1단계) 보고서, 2006.
2. 권오정, 오명학, 박진순, 이광수, “울돌목 시험조류발전소의 기초 시공 사례,” *한국 신·재생에너지학회 추계학술대회 논문집*, pp. 610-613, 2009.
3. 이진학, 박진순, 박우선, 이광수, “울돌목 시험조류발전소에 대한 구조건전성감시 시스템 구축 및 활용,” *한국전산구조공학회 정기 학술대회*, pp. 114-118, 2009.
4. H. Lindell, “Utgrunden off-shore wind farm - Measurements of underwater noise,” INGEMANSSON, 2003.
5. M. C. Hastings and A. N. Popper, “Effects of Sound on fish,” *California DOT Contract No. 43A0139*, 2005.
6. 고명권, 최지웅, 이진학, 이광수, “조류발전소의 수중소음특성 분석,” *한국음향학회 추계학술발표대회 논문집*, pp. 491-493, 2011.
7. S. K. Kang, K. D. Yum, J. So, W. Song, “Nonlinear Tidal Characteristics along the Uldolmok Waterway off the Southwestern Tip of the Korean Peninsula,” *Ocean and Polar Research*, vol. 25, no. 1, pp. 89-106, 2003.
8. M. Strasberg, “Nonacoustic noise interference in measurements of infrasonic ambient noise,” *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 66, no. 5, pp. 1487-1493, 1979.
9. S. Cho and J. W. Choi, “Measurements of Breaking Wave Noise in the Sea-Cliff Zone,” *Jpn. J. Appl. Phys.* pp. 49 07HG05, 2010.
10. M. D. Collins, “A split-step Padé solution for the parabolic equation method,” *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 93, no. 4, pp. 1736-1742, 1993.
11. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Potter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, AIP Press, New York, pp. IV-6, 2000.
12. APL-UW, *High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook*, APL-UW TR 9407, Oct. 1994.
13. 최복경, 김봉채, 김철수, 김병남, “한반도 주변해역 수중배경소음의 풍속과 선박분포에 따른 의존성 분석,” *한국음향학회지*, vol. 22, no. 3, pp. 233-241, 2003.
14. T. D. Rossing, *THE SCIENCE OF SOUND*, Addison-Wesley Company, 2nd edition, 1990.

## 저자 약력

### ▶ 고 명 권(Myungkwon Ko)



2010년 2월: 한양대학교(이학사)  
2012년 2월: 한양대학교(이학석사)  
2012년 3월 ~ 현재: 한양대학교 박사과정

### ▶ 최 지 웅(Jee Woong Choi)



1996년 2월: 한양대학교(이학사)  
1998년 2월: 한양대학교(이학석사)  
2002년 8월: 한양대학교(이학박사)  
2002년 11월 ~ 2007년 8월: Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate  
2004년 ~ 현재: 미국음향학회 수중음향 기술위원회 위원  
2009년: 한국음향학회 수중음향 학술위원장  
2011년: 한국음향학회 국제교류위원장  
2012년: 한국음향학회 회원관리위원장  
2007년 9월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합과학과 부교수

### ▶ 이 진 학(Jin-Hak Yi)



1994년 2월: KAIST 기계공학과(공학사)  
1996년 2월: KAIST 토목공학과(공학석사)  
2001년 2월: KAIST 토목공학과(공학박사)  
2001년 11월~2003년 4월: University of California, Irvine, Post Doctoral Researcher  
2011년 8월 ~ 2012년 8월: National Renewable Energy Laboratory, Research Associate  
2010년 3월 ~ 현재: 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구부 책임연구원

### ▶ 정 원 무(Weonmu Jeong)



1984년 2월: 서울대학교 토목공학과(공학사)  
1992년 2월: 명지대학교 토목환경공학과(공학석사)  
1999년 2월: 서울대학교 토목공학과(공학박사)  
2000년 8월 ~ 2001년 8월: Cornell University, Post Doctoral Researcher  
2010년 12월 ~ 2011년 12월: Oregon State University, Research Associate  
2000년 3월 ~ 현재: 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구부 책임연구원