

조류발전 사업의 환경평가 가이드라인 연구

김태윤* · 박정일**† · 맹준호**

*, ** 한국환경정책·평가연구원

A Study on the Environmental Assessment Guideline
for Tidal Current Energy Development

Tae-Yun Kim* · Jeong-Il Park**† · Jun-Ho Maeng**

*, ** Environmental Assessment Group, Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Korea

요 약 : 본 연구는 조류발전 사업이 보다 환경친화적 에너지개발사업이 되도록 유도하기 위한 국내 해역에 적합한 환경평가 가이드라인을 제시하는데 목적을 두었다. 본 연구는 국내외 관련 문헌들을 수집하여 조사·분석하였고, 해양에너지 개발 및 해양환경 전문가들과의 면담과 전문가 세미나를 진행하여 합리적인 입지선정 타당성 검토방안과 환경평가단계의 가이드라인을 도출하였다. 입지선정 타당성 검토방안은 입지선정 시 고려해야할 항목을 제시하였고, 이를 바탕으로 조류발전 사업의 특성과 환경영향을 최소화 할 수 있는 적정입지선정 방안을 제시하였다. 환경평가 단계에서의 가이드라인은 조류발전 사업에 대한 환경영향을 파악하고 이에 대한 환경영향평가를 효과적으로 수행하기 위해 현황조사, 영향예측, 저감방안, 사후환경영향 조사계획의 네 단계로 구분하여 제시하였다.

핵심용어 : 해양에너지, 조류발전, 환경평가, 입지선정, 가이드라인

Abstract : This study aims to develop a guideline of environmental assessment for tidal current energy development in Korea. Based on an extensive discussion of the environmental effects of tidal current energy, this study provides an appropriate guideline for environmental assessment on tidal current energy development in Korea. The guideline includes a method for proper site selection and specific techniques for environmental impact assessment. The guideline for environmental impact assessment consists of four steps - including current condition investigation, impact predictions, identification and incorporation of mitigation measures, and post environmental monitoring - to effectively predict and assess impacts of tidal current energy development on the ocean environment. It is expected that the guideline can facilitate the often demanding environmental assessment review process and to reduce the time taken for it.

Key Words : Ocean energy, Tidal current energy, Environmental assessment, Site selection, Guideline

1. 서 론

지구 온난화와 기후변화 문제로 친환경적인 신재생에너지 개발의 필요성이 점차 강조되고 있다. 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 우리나라는 해양에너지 개발에 이점을 가지고 있어 조류발전, 조력발전, 파력발전, 온도차발전, 해상풍력발전 등에 관심과 투자가 활발하다. 해양에너지 중에 조류발전은 자연적인 조류 흐름을 이용하여 수중에 설치된 터빈을 돌려 전기를 생산한다. 방조제를 건설하여 바닷물을 가둬

가 해수의 낙차를 이용해 전기를 생산하는 조력발전과는 에너지 생산방식에서 차이가 있다. 또한 방조제 건설로 갯벌 파괴 등의 부정적 환경영향이 큰 조력발전에 비해 해양생태계에 미치는 영향이 적다는 점은 조류발전이 가진 특징 중 하나이다(Jeon, 2010). 해수의 밀도는 공기의 밀도에 비해 약 840배 크기 때문에 해상풍력발전에 비해 조류발전은 훨씬 작은 크기의 터빈으로도 동일한 양의 에너지를 생산할 수 있다(Ministry of Knowledge Economy, 2012). 태양광, 풍력발전 등은 날씨 변화나 계절에 영향이 큰 반면 조류발전은 이에 대한 영향이 적어 비교적 정확한 전력생산예측이 가능하다.

하지만 이러한 조류발전의 특징과 장점에도 불구하고 조류에너지를 생성함으로써 유발되는 해양환경 및 해양생물

* First Author : kimty@kei.re.kr, 02-6922-7851

† Corresponding Author : jipark@kei.re.kr, 02-6922-7825

에 대한 위험성은 조류를 이용해 에너지를 생산하는 방법이 조력발전에 비해 상대적으로 환경영향이 적다는 것뿐 알려진 것이 매우 부족하다. 조류발전에 대해서는 조류 터빈 블레이드의 설계 및 기기개발 관련 연구와 조류자원 평가 분야의 연구 등이 주로 이루어져 왔고, 조류발전이 끼치는 환경영향에 대한 연구는 많이 부족하다. 이는 조류발전 사업이 아직 초기단계에 있고, 특히 국내에서는 시험운영 과정에서 환경영향 정보의 수집이 충분하지 않았다는 이유 때문이다. 조류발전의 환경영향에 대한 해외사례들을 살펴보면, 조류발전 단지의 설치와 운영은 대기오염물질을 발생시키지는 않지만, 조류와 파도의 변화, 표층퇴적물의 이동과 퇴적양상의 변화 등 해양물리 및 퇴적환경의 영향을 주는 것으로 알려지고 있으며, 공사 및 운영에 따른 소음의 발생과 더불어 전자기장에 의한 영향 등을 보고하고 있다(DOE, 2009; Gill, 2005). 해양생물에 미치는 영향은 인공 구조물에 의한 국지적 저서생태환경의 변화, 해양생물의 산란기 및 서식지의 변화, 해양생물의 움직임과 회유경로에 대한 간섭, 운환제 및 도료의 독성으로 인한 영향, 조류발전 수차 등에 의한 해양생물의 충돌 등이 포함되며, 조류발전의 운영에 따른 해양생물의 개체수와 군집변화 등은 광범위하고 장기적인 영향을 준다고 하였다(DOE, 2009; Gill, 2005; Polagye et al., 2010).

해양에너지 개발에 선도적인 해외 국가들은 현재 조류발전 사업의 환경영향평가 방안의 필요성을 강조하고 있다. 예를 들어, 스코틀랜드 Orkney Island에 위치한 EMEC(European Marine Energy Centre)에서는 파력 및 조류에너지 설비를 시험하고 검증하는 과정에서 환경영향을 모니터링 하기 위한 가이드라인을 개발하고 있다. 가이드라인 개발의 목적은 지속적이고 통합적인 환경영향 정보수집의 토대구축과 더불어 장기적으로 대규모 상용화 발전단지의 환경영향을 예측하고 저감할 수 있는 방안을 마련하는데 있다(Maeng and Kim, 2013). 우리나라에서도 조류발전 사업이 해양 환경과 생태계에 미치는 영향 등에 대한 종합적인 연구를 바탕으로 사업대상 해역에 대한 계획의 타당성과 입지의 적절성을 검토하고 조류발전 단지 건설과 관련된 환경현황 조사방법 및 건설 후 영향예측 방법, 즉 환경평가방안에 대한 연구가 현 시점에서 매우 필요하다. 특히 2007년 산업자원부와 에너지관리공단이 수립하여 해양에너지 분야의 중장기 연구개발 기본계획의 성격을 띤 「신·재생에너지 R&D 전략2030[해양]」에서는 2008년에서 2012년까지 단기 목표로 조류발전이 가능한 후보적지 조사 및 에너지 개발의 타당성을 분석하는 것과 더불어 조류발전의 환경영향을 예측하고, 평가·분석할 수 있는 환경평가방안 개발을 포함하고 있다. 하지만 조류발전 사업에 관련된 환경평가방안을 개발하여 제시한

연구사례는 국내에서 찾아볼 수 없다.

본 연구는 조류발전 사업이 가지는 특징과 현황을 파악하여 국내 해역에 적합한 조류발전 사업의 입지선정 방안과 환경평가단계에서 가이드라인을 제시하여 조류발전이 보다 환경친화적 에너지개발사업이 되도록 유도하는데 목적을 두었다. 본 연구의 연구목적 달성을 위해 국내외 관련 문헌들을 수집하여 조사·분석하였을 뿐만 아니라 해양에너지 개발 및 해양환경 전문가들과의 면담 및 수차례의 전문가 세미나를 진행하여 합리적인 입지선정 타당성 검토방안과 환경평가단계의 가이드라인을 도출하였다. 입지선정 타당성 검토방안에서는 입지선정 시 고려해야 할 항목을 선별하고 적정입지선정 방안을 제시하였다. 환경평가 가이드라인에서는 현황조사, 영향예측, 저감방안, 사후환경영향 조사계획의 네 단계로 구분하여 체계적인 환경영향평가 방안을 제시하였다.

2. 입지선정 타당성 검토방안

2.1 입지선정 시 고려해야 할 항목

경제성 측면에서의 조류발전의 대표적인 입지조건은 풍부한 조류에너지 부존량, 적당한 수심과 해안과의 이격거리 등이다. 하지만 이러한 조건만으로 입지를 선정하는 것은 해양환경 및 해양생태계에 미치는 영향을 고려하지 못한 결과를 가져온다. 적절하지 못한 조류발전의 입지는 엄청난 비용 낭비는 물론이며, 주변 생태환경이나 인간의 해양활동에 매우 부정적 영향을 줄 수 있다. 경제적 효율성과 환경성 확보를 위한 조류발전의 입지선정에는 다음과 같은 입지 항목들을 종합적으로 고려해야 한다.

2.1.1 조류 에너지

조류발전은 물살이 빠른 곳에 터빈을 회전시켜 전기를 생산하기 때문에 해당 지역의 유속이 가장 중요한 입지요소이다. 우리나라에서 조류발전의 적지발굴을 위한 기초자료로는 Fig. 1과 같이 국립해양조사원에서는 제공하는 조류에너지자원도를 활용할 수 있다. 이 자원도는 서·남해안의 345개 지점에서 15~30일 이상 관측한 유속자료를 바탕으로 연간 조류에너지 잠재량을 추산한 결과를 보여준다. 전라남도 주변 해역은 3 MWh/m² 이상의 연간 에너지 밀도를 가진 관측 정점이 수십 개에 달하여 조류발전 사업의 주요한 입지대상으로 나타났다. 특히 연간 23 MWh/m²의 부존량을 가진 전라남도 울돌목은 우리나라 최고의 조류에너지 후보지로 나타났으며 맹골수도와 장죽수도는 각각 15 MWh/m²와 8.8 MWh/m²의 연간 에너지 밀도를 보였다. 조류에너지 자원이 풍부한 울돌목과 장죽수도에서는 한국해양연구원, 현대중공업, 레

조류발전 사업의 환경평가 가이드라인 연구

네테크 등 국내 조류발전 사업자들이 발전시설을 설치하여 실패역 시험가동을 수차례 진행한 바 있다. 전라남도 주변 해역 이외에는 연간 에너지 밀도 16 MWh/m²를 가진 경기만의 교동수로 지역이 잠재량이 크며, 경상남도에서는 진주만 남쪽 입구에 위치한 대방수호가 7 MWh/m²로 조류발전의 주요 입지로 나타났다(KHOA, 2013).

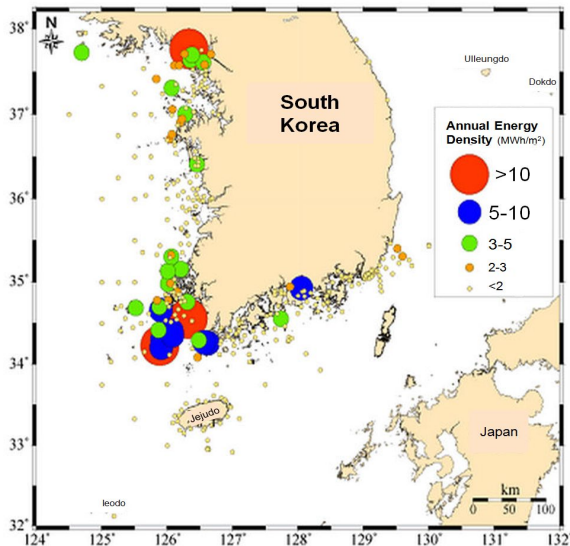


Fig. 1. Potential tidal current energy density map in Korea(KHOA, 2013).

일반적으로 조류발전의 입지는 최소 2 m/s의 유속을 가진 곳으로 알려지고 있지만, 최근에는 유속이 빠르지 않은 지역에서도 발전이 가능하도록 기술개발이 활발히 진행 중이다. 미국 미시간 대학에서는 1 m/s 이하의 약한 흐름에서도 에너지변환이 가능한 VIVACE(Vortex Induced Vibrations for Aquatic Clean Energy)라는 장치를 개발하여 실용화 연구를 수행 중이다(Bernitsas et al., 2008). 우리나라에서도 2011년부터 한국해양과학기술원 주관으로 '능동제어형 조류발전기술개발'이 시작되어 조류발전형식이나 제어방식의 경쟁력 확보와 동시에 유속 적용범위를 보다 넓게 적용 가능한 터빈 기술이 개발과정에 있다(Park, 2013). 이와 같은 고효율의 조류발전기술 개발은 최소유속이라는 입지제약 조건을 완화하여 조류발전 사업의 입지대상이 확대할 수 있을 것으로 보인다.

2.1.2 수심 및 해안과의 이격거리

조류발전의 입지선정에서 중요한 항목으로는 해당 지역의 수심과 해안으로부터 이격거리가 중요하다. 수심 및 해안과의 이격거리는 조류발전 단지 입지선정 과정에서 경제

성 및 발전량 측면에서 매우 중요하다. 뿐만 아니라 인근의 송배전과 변전설비 및 국가 전력망에 인입시키기 용이한 지역이 입지의 중요한 요인이며, 그 밖에 어장의 분포 및 어업 활동 등의 영향도 고려해야 한다.

조류발전 구조물의 형태는 수심에 따라 달라질 수 있다. 조류발전설비를 해상에서 고정시키기 위해 다양한 종류의 하부지지대(foundation) 또는 착저구조가 적용된다. 조류발전 적정입지의 조건에 따른 장단점과 사업자의 경제성 분석을 통해 특성과 구조가 다양한 수차형식과 하부구조가 결정된다. 재킷식이나 부유식은 강한 조류에도 구조물이 견고하다는 장점을 가지고 있지만 20~40 m 정도의 수심에 설치되어야 한다(Bryden and Melville, 2004). 또한 재킷식이나 부유식은 구조물이 해상 위로 도출되어 있어 지역사회와 해상으로 운항하는 선박과 갈등요인이 될 수 있다. 반면 착저식(완전잠수 방식)의 조류발전시설은 수심 40~60 m의 깊은 바다에 설치 가능하며, 구조물이 수면 위로 노출되지 않아 선박통행과의 마찰이 적고 경관 훼손이라는 부정적 영향에서 자유롭다는 장점이 있다(Renetec, 2013). 하지만 완전잠수 방식은 수중 설치로 발전효율이 저하될 우려가 있고, 장비의 유지·보수를 위해서는 깊은 바다에 잠수부가 직접 투입되어야 하는 단점도 있다(Park, 2013).

조류발전 방식은 조류가 흐르는 방향과 회전축이 이루는 각도에 따라 수평축(HAT, Horizontal Axis Turbine)과 수직축(VAT, Vertical Axis Turbine) 방식으로 나눌 수 있다. 수평축 터빈은 터빈축과 해류의 방향이 평행하도록 설계되므로 하천과 같이 유체가 흐르는 방향이 일정한 곳에 유리하지만 터빈의 회전을 유지하기 위해서는 유체가 흐르는 방향으로 지속적으로 터빈 방향을 바꿔줘야 하므로 조류의 방향이 시시각각 변화하는 해양에서는 단점이 된다. 반면 터빈의 회전축과 해류의 방향이 수직인 수직축 터빈은 유체의 방향에 상관없이 터빈이 같은 방향으로 돌기 때문에 조류처럼 유체의 흐름이 불규칙한 상황에 유리하다. 하지만 수직축 방식은 구조적으로 하중에 취약하며 이물질 삽입에 의한 불균형 진동이 발생하며 시설비용이 비교적 높다는 단점이 있다(Ministry of Commerce, Industry and Energy, 2008).

해상에서 생산된 전기는 전력계통망의 연계가 필요하기 때문에 해안과의 이격거리는 해저 전력 케이블의 설치비용이 직접적으로 연결된다. 해저 전력케이블의 가격은 1 km에 50만에서 500만 달러로 해양에너지 단지 건설비용에 큰 부분을 차지한다(Dalton et al., 2010). 육지와 가까울수록 케이블 설치비용이 줄어들 수 있지만, 육지와 가까운 연안에는 어업활동이 활발하거나 선박항로로 활용되고 있어 어장 훼손 및 어업 소득에 손실을 줄 수도 있고 자유로운 선박 통행에 방해가 될 수도 있다. 또한 해양 자연경관이 수려한 지역에

서는 해양경관의 훼손을 이유로 갈등이 발생할 여지가 크다. 예컨대 우리나라 울돌목 조류발전시설은 구조물이 17~25 m의 수심에 설치되어 있으며 비교적 연안 가까이에 입지하고 있어 기초시설 및 전력계통망 설치에 유리하다. 하지만 이 지역은 어선과 선박의 항로로 많이 이용되던 곳이어서 통항 선박과 발전시설물의 충돌 위험이 항상 존재한다(Cho, 2008). 또한 해상으로 노출된 철재구조물은 주변 경관과 어울리지 못하고 울돌목 주변의 경치를 오히려 해친다는 지적도 있었다(Jung, 2009).

Table 1. Site selection factors for tidal current energy development

Category	Factor
Tidal current energy	Potential tidal current energy
Depth of water	Considering device types: jacket, floating, and underwater types
Distance to coast	Economic constraints (installation and maintenance costs, including transmission cable) and Socio-environmental constraints (conflicts with marine transportation, fishery zone, coastal landscapes, and so on)
Environmental Conservation Area*	<ul style="list-style-type: none"> • Environment Conservation Sea Area and Special Management Sea Area (Marine Environment Management Act, Article 15) • Wetland Conservation Area (Wetland Conservation Act, Article 8) • Environment Conservation Sea Area (Marine Ecosystem Conservation and Management Act, Article 25) • Coastal and Marine National Park, Natural Park Protection, and Natural Park Environment Zone (Natural Park Act, Article 4 and 18) • Coastal Conservation Area (Coastal Management Act, Article 15) • Undersea Scenic Zone (Framework Act on Marine Fishery Development, Article 28) • Ecological and Scenery Conservation Area, Natural Reserve Area, and City/Do Ecological and Scenery Conservation Areas (Natural Environment Conservation Act, Article 12, 22 and 23) • Special Wildlife Protection Area (Wildlife Protection Act, Article 27) • Fishery Resource Conservation Area (National Land Plan and Use Act, Article 6 and 40) • Other marine environment and marine ecosystem conservation areas enforced by the other acts
Marine Activity	Marine transportation(Fairways and shipping lines, Fishery zone, Military training fields, Transmission, Cable Areas, Pipeline Areas, Resource extraction sites, Recreation areas (boat ramps, diving sites, marinas), weather observation and research sites, and so on
Others	Effects of device on birds and marine ecosystems

*maps for each conservation areas are available in Kim et al. (2013)'s study

2.1.3 환경보호해역

환경보호해역은 조류발전의 입지선정 과정에서 중요한 고려사항이다. 희귀하거나 멸종위기에 처한 해양생물 보호종의 서식지이거나 해양생물 다양성이 풍부하여 보전 및 학술적 연구가치가 있는 해역에 조류발전 시설 혹은 단지가 입지하는 것은 부정적 환경영향을 끼칠 우려가 있으므로 해당해역의 입지는 재고할 필요가 있다. 우리나라 서해와 남해 연안지역은 해양환경 및 수산자원의 보호를 위해 각종 보호 및 관리해역으로 지정되어 있다. Table 1에서는 우리나라 각종 법률에서 지정·관리하고 있는 대표적인 환경보호해역을 열거하고 있다. 조류발전의 입지를 선정하는 과정은 해양환경보호구역으로 지정 및 관리되는 해역인지를 파악하고 조류발전의 입지와 운영이 적절한지 충분히 검토하여야 한다.

2.1.4 인간의 해양활동

조류발전 시설 및 단지 주변이 선박의 주요 항로로 이용되고 있거나, 어업활동이 활발한 곳이라면 조류발전의 운영과정에서 해당 해양활동과 마찰이 불가피할 것이다. 특히 조류발전은 물살이 빠른 곳에 입지하게 되므로 통항 선박이나 어업활동의 안전성에 큰 영향을 줄 수 있다. 앞서 언급하였듯이, 우리나라에서 가장 빠른 조류가 흐르는 곳에 설치된 울돌목 조류발전시설은 어선과 선박들의 항로로 많이 이용하던 곳이어서 선박과 발전시설물의 충돌 위험이 항상 존재하는 것으로 알려진다(Cho, 2008). 따라서 사업 대상해역이 여객선이나 화물선의 정기항로와 중첩되는지 확인하는 것은 매우 중요한 검토사항이며, 만약 운항에 방해가 되거나 안전에 문제가 있다면 입지 배제나 이격거리의 확보 등을 통해 대책을 수립해야 한다.

선박운항이나 어업활동 이외에도 인간은 해양공간을 다양한 목적을 위해 광범위하게 사용하고 있다. 여기에는 군사훈련, 해양자원개발, 해양레저, 기상 및 과학 연구 등이 포함된다. Kim et al.(2012)은 해상풍력개발사업의 입지를 선정할 때 인간들의 다양한 해양활동과의 잠재적 갈등과 입지대책을 검토하였다. 그들의 연구결과는 해상풍력뿐만 아니라 조류발전 등에도 적용할 수 있을 것이다. 예를 들어 군사훈련지역에 조류발전시설이나 단지가 들어서면 군사시설과 훈련에 방해가 될 수 있으므로 이 지역을 배제하는 것이 필요하며, 해저케이블 및 송유관로가 매설되어 있는 지역 주변에서는 이들 시설에 손상을 줄 수 있으므로 배제나 이격거리 유지 등을 고려하여야 한다.

2.1.5 기타

일반적으로 조류발전은 해상풍력발전에 비해 철새 및 조

조류발전 사업의 환경평가 가이드라인 연구

류 서식지에 대한 영향은 적을 것으로 예상된다. 해상풍력은 해상으로 노출된 터빈을 가동하여 전기를 생산하기 때문에 조류 집단 서식지, 철새 이동경로, 중간 기착지 및 번식지역, 주요 종들의 서식지역 등 환경적으로 민감한 지역일수록 입지선정 시 신중하게 검토하여 피하는 것이 바람직하다(Maeng et al., 2012). 이에 비해 조류발전은 터빈이 수중에서 가동되기 때문에 수면 위에서 활동하는 조류에 대한 고려로부터 다소 자유로울 수 있다. 하지만, 조류발전시설은 형태에 따라 해상으로 지지구조물이 노출되기도 하며, 발전설비의 공사 시와 운영에 따른 해양생태계의 변화로 인해

조류서식지에 간접영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 모니터링과 검토가 필요하다.

2.2. 입지타당성 검토방안

우리나라에서 경제적인 조류발전 후보지는 대부분 연안에 위치하고 있다. 그러나 연안은 육지와 인접하여 인간의 활동 및 산업 시설 등과 같은 경제적 활동이 활발하고, 생태적으로 보호해야 할 지역 많다. 따라서 연안에 입지할수록 조류발전 사업 추진에 따른 사회적 갈등은 커질 가능성이 있다. 최근에는 해양공간계획(marine spatial planning)을 수립하여

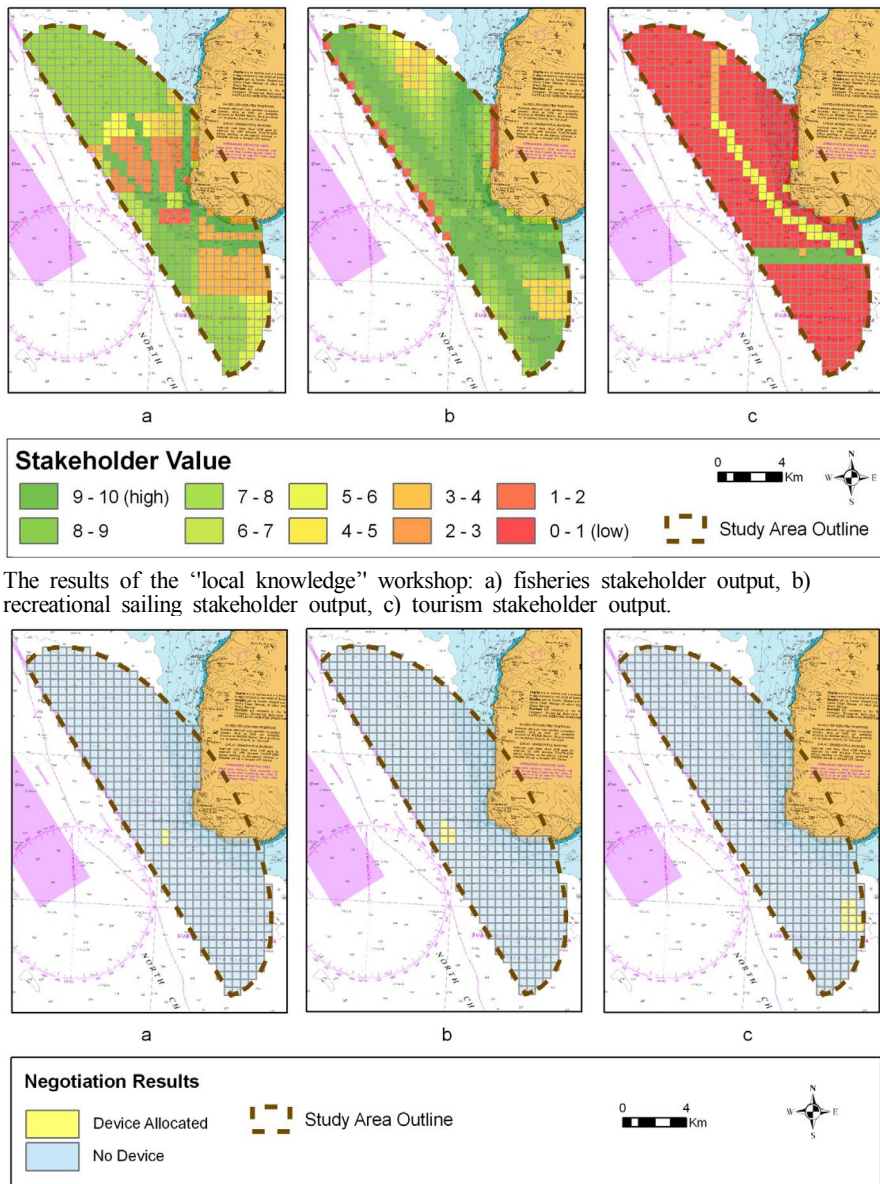


Fig. 2. Site selection for tidal current energy development through interactive marine spatial planning(Alexander et al., 2012).

해양에너지 개발사업에 대한 입지의 타당성을 검토하는 방안이 모색되고 있다. 해양이라는 공간은 어업활동, 선박운항, 레저, 군사훈련, 자원개발 그리고 해양에너지에너지 등 다양한 이용행위들이 중첩되면서 이용자 간에 서로 경쟁이나 부정적인 영향을 줄 가능성을 내포하고 있다. 또한 다수의 해양활동들은 해양생태계에 미치는 영향을 충분히 고려하지 못한 채 진행되고 있어 해양환경의 악화, 생태계의 훼손, 수산자원의 고갈 등 많은 부정적 영향이 일어나고 있다. 이러한 문제들을 미연에 방지하고 해양공간의 합리적 이용에 관심을 두고 있는 해양공간계획은 해양공간의 다목적 이용, 해양생태계의 가치 증진, 공간관리, 통합관리라는 목적에 부합하는 방향에서 수립되는 추세이다(Choi et al., 2011).

조류발전 사업에 해상공간계획을 적용한 해외 사례로는 스코틀랜드 킨타이어(Kintyre) 반도의 주변 해역에 설치될 조류발전시설의 입지선정 과정을 들 수 있다. Alexander et al.(2012)의 연구논문은 이 과정을 상세히 기술하고 있다. 2010년 이 해역에 조류발전시설이 들어설 것이라는 발표 이후 이를 두고 주민들 간에 그리고 주민과 사업자 간에 다양한 갈등이 나타나자 이를 해결하는 방안으로 워크숍을 개최하고 그 결과로 해상공간계획을 수립하였다. 몇 차례의 워크숍에서는 각기 다른 이해당사자가 참여하여 다른 공간의 활용방식을 지도 위에 표시하였고, GIS 공간분석기법을 통해 이들의 이해관계는 Fig. 2의 위쪽 지도와 같이 지도상에 나타내었다. 이 지도는 다양한 이해당사자의 이해관계를 반영하여 조류발전시설의 입지 가능한 곳을 탐색하고 협상을 진행하는 데 중요한 자료로 활용되었다. Fig 2의 아래쪽 지도들은 협상결과로 조류발전 단지의 입지가 가능한 곳을 표시한 지도이다. 이와 같은 연구결과는 발전단지 규모별로 각기 다른 입지가 합의·선택될 수 있음을 보여준다.

우리나라에서도 향후 조류발전 사업의 입지선정 과정에서 이러한 해양공간계획을 적용할 수 있을 것이다. 먼저 조류발전단지의 적정입지 선정을 위해 조류발전에너지가 풍부한 지역을 선정하고, 세부 공간단위에서 발전이익이 최대화되는 지역을 찾아내는 것이 필요하다. 이를 위해서는 유속의 크기, 수심, 연안으로부터의 거리 등을 고려하여 에너지 생산에 따른 경제성 분석이 이루어져야 하며, 항만 및 그리드 시스템을 포함한 기존 기반시설의 이용으로 비용을 절감할 수 있는 곳을 선택해야 한다. 다음으로 후보지 중에서 인간의 해양활동이나 주변 생태환경에 미칠 수 있는 영향을 최소화할 수 있는 지역을 선정하여야 한다. 해양보호구역이나 어업활동이나 선박의 항로 등 인간활동이 활발한 지역인지 확인하고 적절하지 못한 후보지는 배제하도록 해야 한다. 이러한 과정은 다양한 해양공간 정보자료를 활용하여 GIS 공간분석 기법으로 분석하는 것이 효과적이다. 여기에는 선박항로, 양식장, 해상공원, 습지보호구역, 수산자원보호구역, 해저케이블, 해양투기장 등 다양한 공간정보를 포함하

고 있어 조류발전에너지 부존량 위치 정보와 중첩하여 적절한 입지선정에 합리성을 제고할 수 있다. 뿐만 아니라, 이러한 해양공간계획기법들은 조류발전 입지의 적절성을 판단하는 데 다양한 이해당사자와 정책 결정자 간의 의사결정의 기준을 마련하고 협의를 도출하는 데 도움을 줄 수 있다.

2.3. 기초 현황조사 항목

조류발전단지의 공사와 운영의 전 과정에서 다양한 생태 환경 변화가 예상되므로, 입지선정 단계부터 기초 현황조사가 요구된다. Table 2는 Maeng et al.(2012)이 연구한 해상풍력 단지의 기초 현황조사 필요항목을 조류발전에도 적용 가능하도록 재구성한 것이다.

Table 2. Basic investigation of condition for strategic environmental assessment

Category	Indicator	Object
Tidal current energy	• Velocity and direction of tidal current	• Mapping tidal current energy
Marine physical environment	• Tidal observation, tidal current and ocean current observation , wave analysis	• Understanding marine physical environment • Providing data for numerical model calibration
Depositional environment	• Suspended sediment observation, seabed condition particle size analysis, coastline and beach survey	• Understanding suspended and sediment characteristics • Analysing erosion and sedimentation process
Marine water quality	• Marine water quality factor observation • Sediment water quality factor observation	• Understanding characteristics of sea water and sediment water quality
Marine flora and fauna	• Phytoplankton and zooplankton • Benthic organism	• Investigating species composition and standing crop of phytoplankton and zooplankton • Analysing primary productivity and species diversity • Analysing marine algae distribution pattern
Marine fish	• Distribution and emergence season of fish eggs and larvae • Distribution of adult fish	• Investigating fish spawning bed • Analysing fisheries ecological resources
Marine mammal and bird	• Migration route and breeding place	• Investigation migration route and breeding place
Conservation area	• Coastal and marine park, environment conservation area, etc.	• Measuring compatability
Marine activity area	• Fairways and shipping lines, Fishery zone, Military training fields, Resource extraction sites, Recreation areas, etc.	• Measuring compatability

3. 환경영향평가 단계의 가이드라인

조류발전 사업에 대한 환경영향을 파악하고 이에 대한 환경영향평가를 효과적으로 수행하기 위해 현황조사, 영향예측, 저감방안, 사후환경영향 조사계획의 네 단계로 구분하여 각각에 대한 가이드라인을 도출하고자 한다. 영향예측은 현황조사 자료를 입력자료로 사용함과 동시에 검증자료로 사용함으로써 서로 연관성을 유지하며 가이드라인을 작성해야 한다. 따라서 현황조사와 영향예측은 해양물리 및 해저지형 분야, 해양 수질 및 저질 분야, 해양 및 저서 생태계 분야, 수중소음 분야로 나누어 작성한다.

3.1 현황조사

현황조사는 향후 영향예측 및 사후조사와 연계되어 있으므로 일관성의 유지가 무엇보다 중요하다. 따라서 예측 모델 입력 및 검증, 사후조사와 비교·검증 등을 사전에 고려하여 사업 영향을 평가하기 위한 조사의 기본방향, 조사항목, 조사범위, 조사방법, 결과분석과 같은 계획을 수립하여야 한다. 사업대상 지역의 기초자료 확보 시 영향예측 및 사후조사와 연계하여 일관성을 유지하도록 계획하여야 한다. 조사범위와 조사방법은 각각의 조사항목에 따라 그 차이가 있으나 일반적으로 시공간 변동성을 고려하여 충분히 넓은 해역에 대하여, 장기간에 걸쳐, 동시성을 가진, 연속(시계열) 자료 수집을 기본 원칙으로 하며, 불가피할 경우는 자료의 신뢰성 확보를 위하여 이에 준하는 계획을 수립하여야 한다.

3.1.1 해양물리 및 해저지형 분야

조류발전 단지로 인하여 일차적으로 영향을 받는 부분이 발전단지 주변의 물리적 흐름과 지형의 변화이다. 따라서 조류발전 단지 건설 및 운영에 따른 해양물리 및 지형 변화를 예측하고 이들의 변화 기작을 이해할 필요가 있다. 해양물리 및 해저지형 분야의 현황조사는 해수위 관측, 해·조류 관측, 파랑 관측, 해안선 및 해저지형, 부유 및 표층퇴적물, 부표추적 및 기상관측으로 구분하여 조사한다. 해수위 관측은 해수위의 연중 변화 및 조석양상을 파악하고 조석조화상수와 비조화상수를 산출하며, 이들 자료는 향후 해수유동 수치모델실험의 입력자료 및 검·보정 자료를 사용할 수 있어야 한다. 해·조류 관측자료는 해역의 흐름뿐만 아니라 물질수송 및 확산, 밀도 차이로 인한 수직혼합 등의 정보를 담고 있어야 하며, 파랑 관측은 원운동을 통해 저층 퇴적물의 침·퇴적에 직접영향을 미치므로 조류발전 단지 내외의 파랑특성을 파악해야 한다. 해안선 및 해저지형, 부유 및 표층퇴적물(해저질) 관측자료는 조류발전 단지 주변 지역 퇴적환경의 특성을 파악하는데 이용되며 향후 사업으로 인해 발생하

는 퇴적환경 변화와 비교·검토가 가능하도록 해야 한다. 부표추적 및 기상관측은 표층수의 흐름 및 수평확산의 경향을 파악하여 확산계수를 평가하는데 목적이 있다. 조사지점과 조사시기는 각 조사항목별로 달라질 수 있는데 이는 Table 3에 나타내었다.

3.1.2 해양수질 및 저질 분야

해양 수질 및 저질 분야의 현황조사는 수체 내부에 일어나는 화학적인 해양환경 특성을 파악하는 것에 목적이 있다. 해양 수질은 해수의 밀도에 영향을 주는 수온 및 염분, pH, 대장균 수, 유기물질, 영양염, Chl-a, 중금속, 유해물질 등을 포함한다. 특히 pH, 대장균 수, Chl-a, 유기물질 및 영양염(아질산염, 질산염, 암모늄염, 인산염, 규산염), POC, DOC, TOC, COD 등은 필히 관측되어야 하며, 중금속과 유해물질 등 사업으로 영향이 예상되는 항목도 조사해야 한다. 조사수행은 해양환경 공정시험 기준과 해양관측업무 표준화규정에 따라서 이루어져야 하며, 부득이 다른 방법을 선택할 때는 그 사유를 기재하고 구체적인 조사방법에 대하여 기술하여야 한다. 해양 저질조사는 유기물질, 중금속, 유해물질이 저층에 얼마나 퇴적되었는지 조사하는 것으로 저층퇴적물의 오염정도와 오염원 근원지를 파악하고 그로 인한 수계, 해양 및 저서 생태계에 미치는 영향을 검토하는 것이 주요 목적이다. 조사항목은 입도, 함수율, 강열감량, 산화발성황화물, SOD, 유기물질, 영양염, 중금속, 유해물질 등이 포함된다. 해양 수질 및 저질 항목의 조사지점은 해양물리 및 해저지형의 조사지점과 동일한 지점으로 정하는 것이 바람직하며 계절별 관측을 실시할 최적의 대표지점 선정이 필요하다. 관측자료는 해양 수질수치모형의 검증에 활용되어야 하므로 이를 감안하여 조류발전기 주변으로 관측지점을 2개소 이상, 조류발전 단지의 영향을 파악할 수 있는 2개소 이상의 지점, 대상해역의 지형, 수질 특성을 잘 반영할 수 있는 인근 2개소 이상에서 관측하는 것이 필요하다. 조사시기는 해양물리 및 해저지형의 조사시기와 맞추어 일관성을 유지하는 것이 필요하며 관측은 연중 변동을 파악하기 위하여 1년 이상을 계절별 관측하여 그 특성을 분석하는 것이 바람직하다. 수온과 염분은 1년 이상을 연속 관측하는 것이 바람직하나 부득이 계절별 관측한다면 계절별로 30일 이상 연속관측하고 최소한 1시간 이내로 관측 간격을 유지하여야 한다.

3.1.3 해양 및 저서 생태계 분야

해양 및 저서 생태계는 조류발전 단지 조성으로 인한 서식환경의 변화 등 환경적 영향이 가장 큰 분야일 수 있다. 해양 및 저서 생태계의 조사항목에는 식물 및 동물 플랑크톤, 해조류 및 해산 현화식물, 어류 및 난·자치어, 저서동물

Table 3. Investigation of condition and prediction of environmental impact

Category	Indicator	Investigation		Prediction
		Survey point	Time period	
Marine physical & submarine topography	Sea level	<ul style="list-style-type: none"> At least 2 points around device At least 2 points around project site At least 2 points around the boundary of numerical model If possible, overlay with the survey points for water temperature, salinity, marine algae, sediment, water quality, ecosystem 	<ul style="list-style-type: none"> At least one year observation (more than 30 days if conduct seasonal survey, inevitably) 	<ul style="list-style-type: none"> Use of verified and wide used numerical model At least one year simulation
	Tidal & ocean current			
	Wave			
	Coastline & submarine topography	<ul style="list-style-type: none"> All areas of influence 	<ul style="list-style-type: none"> Seasonal survey 	
	Suspended & surface sediment	<ul style="list-style-type: none"> Coastline and submarine topography: areas of influence Multiple points around device and project site Point for surface sediment: overlay with the survey points for suspended sediment 	<ul style="list-style-type: none"> Seasonal survey (periodic observation, if necessary) 	
	Buoy tracking & weather observation	<ul style="list-style-type: none"> Multiple points around project site At least 1 AWS point around project site for weather observation 	<ul style="list-style-type: none"> Seasonal survey Annual survey 	
Marine water quality & sediment	Marine water quality	<ul style="list-style-type: none"> At least 2 points around device At least 2 points around project site At least 2 points around the points for marine physical and submarine topography Over with the survey points for sea level, marine algae, sediment, ecosystems 	<ul style="list-style-type: none"> Continuous observation: water temperature and salinity Seasonal survey: the others 	<ul style="list-style-type: none"> Intercompatible model to the marine physical & submarine topography models
	Marine sediment			
Marine and benthic ecosystem	Phytoplankton and zooplankton	<ul style="list-style-type: none"> At least 2 points around device At least 2 points around project site At least 2 points for phytoplankton and zooplankton Over with the survey points for sea level, marine algae, sediment, ecosystems 	<ul style="list-style-type: none"> Seasonal survey 	<ul style="list-style-type: none"> Mathematical model Conceptual model Empirical model
	Marine algae and phanerogam	<ul style="list-style-type: none"> At least 2 points around device At least 2 points around project site 		
	Fish and fish eggs and larvae	<ul style="list-style-type: none"> Varied by project scale (within a 15km radius) 		
	Benthic organism	<ul style="list-style-type: none"> Multiple points 		
Acoustic effects	Noise	<ul style="list-style-type: none"> At least 2 points around device At least 2 points around project site At least 2 points around the boundary of open sea 	<ul style="list-style-type: none"> Seasonal survey 	<ul style="list-style-type: none"> Numerical analysis method Acoustical modeling

등이 포함될 수 있다. 현존량, 종조성, 우점종, 종 다양성 등과 더불어 서식환경 파악을 조사목적으로 하며 조사지점은 일률적으로 결정하기 어려우므로 사업의 규모를 고려하되 조사항목별로 Table 3에 제시된 관측지점을 따르도록 권고한다. 조사시기는 연중 변동을 파악하기 위하여 1년 이상을 계절별로 관측하여 그 특성을 분석하는 것이 바람직하다.

3.1.4 수중 소음 분야

수중소음은 조류발전의 건설 및 운영 단계에서 해양생물에게 부정적 영향을 끼칠 수 있다. 조사시기는 계절적 양상을 파악할 수 있도록 춘계, 하계, 추계, 동계로 나누어 조사를 실시하는 것이 바람직하며 소음에 영향을 많이 받는 해양생물의 생물학적 특성(산란기 등)을 파악하여 조사시기를 정하는 것이 바람직하다. 조사방법으로는 Hydrophone과 주파

수 실측기 등을 이용하여 소음강도와 주파수를 측정하고 추가로 압력밀도 스펙트럼 및 파형데이터를 수집하는 것이 바람직하다. Hydrophone의 경우, 실제 해양생물에 영향을 미치지 않는 소음(pseudo-noise)이 관측되는데, pseudo-noise는 hydrophone의 표면 위로 난류가 지나가면서 생기는 부차적인 소음으로 실제 조류발전기에서 발생하는 소음과는 구분이 어렵다. 따라서 hydrophone에 흐름 보호막(flow shields)이나 표류하는(drifting) hydrophone을 사용하는 것이 바람직하다.

3.2 영향예측

조류발전에 의한 환경변화를 예측하고 문제점을 파악하여 이를 효과적으로 저감 또는 해결하기 위한 대안을 모색하는 것이 영향예측의 목적이다. 조류발전 사업은 소규모의 현장실험단계에 머물러 있어 발전 단지가 들어설 때 발생할

문제점을 파악하는 데 한계가 있어 영향예측 도구의 사용이 반드시 필요하다. 영향예측 도구는 크게 수리모형실험과 수치모형실험으로 나눌 수 있다. 수리모형실험은 실제 해역을 축소하여 물리적 및 퇴적학적 현상을 재현하여 환경변화를 관찰하는 것으로 대규모 조류발전 단지가 영향을 미치는 지역까지 수리모형을 만들어 재현하기에는 한계가 있다. 또한 해양 및 저질의 변화, 해양 및 저서 생태계의 변화 등의 예측은 거의 불가능하다. 반면 수치모형실험은 넓은 해역에서 세밀한 환경변화(해양물리 및 해저지형의 변화, 해양 수질 및 저질의 변화, 해양 및 저서 생태계의 변화)를 파악하는데 주로 사용되고 있으므로 본 연구의 조류발전 사업의 영향예측은 수치모형실험을 중심으로 서술하였다.

3.2.1 해양물리 및 해저지형 분야

해양물리 및 해저지형 분야의 주요 예측항목은 해수위, 해·조류, 파랑, 퇴적물의 침·퇴적, 퇴적물의 거동, 부표주적, 수온 및 염분 변화 등이 있다. 예측범위는 사업지역 및 사업 시행으로 인한 해양물리 및 해저지형의 변화가 발생하지 않을 것으로 명확히 예상되는 해역을 포함하여야 한다. 그리고 해양 수질 및 저질, 해양 및 저서 생태계의 변화를 고려하여 해역을 정하고 수치모형 외해 경계에서 정해진 해역까지 충분한 완충공간도 포함되어야 한다. 수치모형의 선정은 검증되고 범용적으로 사용되는 모형을 선택하여 수치모형의 검·보정은 최소 1년 이상의 연속모의를 통하여 이루어져야 한다.

3.2.2 해양 수질 및 저질 분야

수치모형의 선정에서 우선으로 고려할 것은 검증된 범용 모형의 선택이다. 수치모형은 해양물리 및 해저지형과 상호 호환성이 있어야 하며 해양 물리 및 퇴적거동 등의 영향예측 결과를 해양 및 저질 생태계 영향에 사용할 수 있어야 한다. 해양 수질 및 저질 수치모형의 구축에서 우선적으로 해양물리 및 해저지형 자료(해수위, 해·조류, 수온, 염분, 수심 등)가 필요하며 이들은 해양물리 및 해저지형 수치모형에서 얻을 수 있다. 초기조건, 경계조건, 수치모형에 사용되는 매개변수, 기상관측 등이 추가로 필요하며 이들 입력자료는 관측 자료를 근거로 하여 작성되어야 한다. 관측 자료가 부족할 때에는 사용된 입력자료의 적절성을 면밀히 검토하여 사용근거의 타당성을 확보하여야 한다. 수치모형의 검·보정 수행기간은 해양 물리 및 해저 지형의 수치모형과 일치시키는 것이 필요하며 Chl-a, 유기물질 및 영양염, 중금속, 유해물질 등에 대하여 시간적·공간적 변화에 대한 검·보정이 이루어져야 한다. 계절적 및 특수한 상황(강풍 등)에 발생하는 환경변화를 수치모형이 정확히 반영하여야 한다.

3.2.3 해양 및 저서 생태계 분야

해양 및 저서 생태계의 예측모형은 해양물리 및 해저지형과 해양 수질 및 저질의 예측모형처럼 물리적 현상을 수학적 개념으로 표현하여 수치모형으로 개발된 것보다 개념식 모델 또는 경험에 의한 모델이 대다수를 이루고 있다. 개념식 모델, 경험에 의한 모델, 일차생산량에 제한된 수리모델의 차원을 넘어선 부유계-저서계 결합 생태계 모델의 개발이 요구되고 있으며 지속적인 연구가 진행되고 있다. Maeng et al.(2012)가 제안한 부유계-저서계 결합 생태계 모델의 개념도에서도 부유계는 단순한 NPZD(Nutrient Phytoplankton Zooplankton Detritus)형의 생태계 모델이며, 저서생태계 또한 해조류 등이 포함되어 있지 않아 완전한 형태의 해양 및 저서 생태계 모델은 아니다. 하지만 이 개념도를 바탕으로 접근적으로 필요한 항목(박테리아, 어류 등)을 포함시켜 나간다면 통합적인 생태계 모델 개발이 이루어질 것으로 예상된다. 그러므로 현 시점에서는 해양 및 저서 생태계에 대한 영향예측 방법에 한계가 있으므로 몇 개의 주요 생물종을 선택하고 그들의 서식 환경, 번식 환경, 이동 성향 등과 같은 특성과 연계하여 주요 생물종에 대한 영향예측을 실시하는 것이 바람직하다.

3.2.4 수중소음 분야

조류발전단지의 건설 및 운영과정에서는 Fig. 3과 같이 다양한 소음이 전파될 수 있기 때문에 수중 소음의 수신 레벨을 예측하기 위해 음향 모델링이 수행되어야 한다. JASCO 음향 모델링(LGL and Jasco Research, 2005)은 음원의 주파수와 발생 위치, 깊이, 계절의 특정범위에 따라 음향을 계산하는 방식이다. 계산결과는 수신된 음향레벨과 평균 간격, 지역 범위를 10 dB의 등고선 형태의 그림으로 나타내어 건설 및 운영 과정의 시나리오별로 제공한다. 모델링을 수행하기 위하여 수중 음향 전파 모델링을 수행하기 전에 지역의 해양환경 자료를 구축하여야 한다. 필요한 매개변수들로는 수심, 계절별 음속 프로파일, 장기 주변소음 자료, 그리고 고려해야 할 영역에 대한 해저의 지리음향학적 프로파일 등이다. 수심은 50m 정도의 해상도를 가진 수심지형도와 자료의 품질관리가 완료된 온도와 염분(CTD 자료) 자료를 확보해야 한다. 그리고 확보한 자료를 분석하여 4계절 평균값을 입력자료로 사용한다. 자료가 존재하지 않는 경우 모니터링을 통하여 자료를 수집해야 한다. 소음의 전파와 그 영향예측을 위하여 발전기의 형태, 발전기 대수, 발전기 사이의 거리 등 다양한 시나리오를 구축하여 모델을 수행한다. 모델수행을 통하여 조류발전에 따른 소음원이 해양동물에 영향을 미치는 거리를 산정하여야 한다.

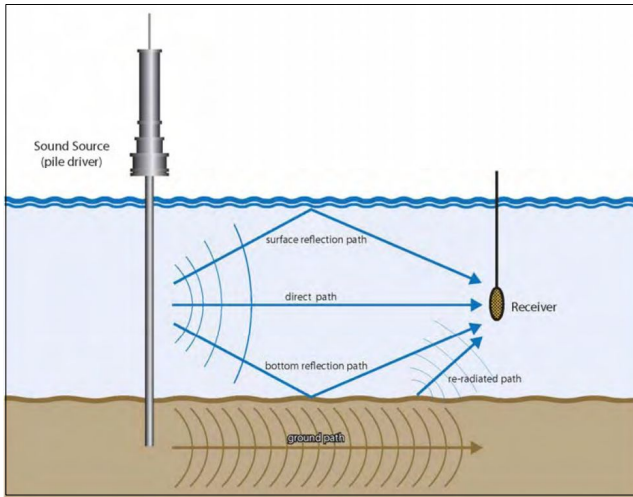


Fig. 3. Underwater Sound Propagation Paths(California Department of Transportation, 2009).

3.2.5 기타분야

영향예측에서는 앞서 논의한 분야이외에도 조류발전 구조물, 해저 전력케이블, 해양경관에 미치는 영향에 대한 예측이 필요하다. 조류발전구조물의 영향은 크게 (1)저층에 직접 구조물이나 앵커 등의 설치로 인한 저서생태계 교란 및 부유사 등에 의한 탁도 증가, (2)항타 등의 설치방식으로 인한 주변 생태계의 영향, (3)발전구조물에 해양생물 부착으로 인한 발전효율 저하 및 어류 등 해양생물에 위협, (4)오일 유출 등으로 인한 환경영향, (5)터빈의 회전날에 해양생물이 걸리거나 부딪혀서 생기는 손상 등이 포함된다(Cheon et al., 2011; Nietzel, 2000).

해저 전력케이블은 조류발전 단지에서 생산된 전기를 육상으로 송전하기 위해 설치되며 여기에서 발생하는 전자기파는 해양생물의 생산성 및 치사율에 영향을 줄 수 있다(Polagye et al., 2010). 해저 케이블의 규모 및 설치방법, 보호막 손상 등 상황에 따라 전자기파 규모와 환경영향 정도가 달라질 수 있고 해양생물 종류별로 전자기파에 대한 민감도가 다를 수 있기 때문에 설치지점 주변의 해양생물 현황을 조사하고 이들의 전자기파에 대한 민감도를 해양생물 종류별로 영향예측을 해야 한다. 또한 조류발전 단지의 규모에 따라 다수 케이블을 설치할 수 있기 때문에 이에 대한 영향예측도 필요하다.

조류발전기는 주로 수중에 위치하여 운영 시에는 시각적인 영향을 끼치지 않는다. 하지만 수리 및 유지·보수 시설과 함께 해상에 설치할 경우에는 해양경관에 영향을 미칠 것으로 예상되므로 이에 대한 영향예측도 필요하다.

3.3 저감방안

조류발전시설에 대한 환경적 모니터링은 발전시설 한두

개에 국한되어 있는 실정이며 대규모 조류발전단지에 대한 모니터링 자료가 없고 그에 대한 저감방안도 전무하다. 하지만 Polagye et al.(2010)은 일반적인 관점에서 일곱 개의 항목(구조물의 정적 및 동적 영향, 화학적 영향, 음향 영향, 전자기장 영향, 에너지 제거, 누적 영향)으로 구분하여 항목별 주요 지역과 저감방안을 제시하였다(Table 4 참조). 주요 내용으로는 환경영향을 최소화하도록 구조물을 설계하고 추가적인 장비나 화학적 물질의 사용을 최소화하는 것이다. 그리고 환경영향을 최소화 할 수 있는 발전시설 운영계획을 수립하고 발전시설을 점진적으로 확장해 나가야 한다는 것이다. 추가적으로 조류발전기 설치할 때 오탁방지막을 설치하여 부유물질의 확산을 최소화하고, 인공 해중립을 설치하여 새로운 서식처를 조성하며, 사업지구의 해양 및 저서 생태계 현황을 파악하여 생태계 교란이 최소화 될 수 있도록 장비의 설치시기를 조정하고, 영향예측 결과를 바탕으로 환경영향이 큰 영역에 대해서는 집중적인 저감대책을 수립해야 한다.

3.4 사후환경영향조사 계획

조류발전 사업은 조류발전 단지의 조성사례가 없고 실험용 조류발전기만 설치되어 운영 중에 있어 무엇보다 사후환경영향조사가 중요하다. 사후환경영향조사는 사업이 시행되기 전에 조사된 영향조사지점을 근거로 하여 사후환경영향조사지점을 설정하여야 하며 조사시기, 조사범위, 조사방법 등은 현황조사 결과와 비교하기 위해 현황조사 당시와 일관성을 유지하는 것이 필요하다. 사후환경영향조사는 크게 공사 시와 운영 시로 나눌 수 있으며 공사 시에는 공사로 인하여 발생하는 환경영향에 중점을 두고 조사를 실시하여야 한다. 공사가 완료되었을 때에는 사업지역의 현황조사를 실시하여 공사로 인한 주변 환경의 변화를 검토하여야 하며 현황조사와 비교·분석이 가능하도록 사후환경영향조사를 실시하는 것이 바람직하다. 사후환경영향조사는 5년 이상 실시하여야 하며 영향예측 결과와 비교·검토하여 영향예측에서 발견하지 못한 부분들을 파악하여 필요하다면 영향예측을 재실행해야한다. 그리고 사후환경영향 조사결과 환경적으로 영향이 큰 지역에 대해서는 추가 저감방안을 수립하고 이행할 수 있도록 해양환경관리계획(관리주체지정, 재정마련 등)을 수립하는 것이 필요하다.

4. 결론 및 제언

국제 원유가격 급등과 일본 후쿠시마 원전 사태 등과 함께 기후변화에 대한 우려는 신재생에너지 개발에 대한 관심과 투자확대를 촉진하고 있다. 삼면이 바다로 둘러싸인 우

조류발전 사업의 환경평가 가이드라인 연구

Table 4. Potential mitigation strategies for tidal current energy development

Indicator	Priority area	General recommendations for mitigation
Presence of devices: static effects	Effects of static structure on benthic ecosystems	Minimize anchor sizes Minimize number of moorings and slack lines Streamline support structures.
	Effects of static structure on the water column and/or surface	Minimize lights, shroud lights, or use strobes instead of constant lighting. Design structure to be less desirable for pinniped haul out. Streamline support structures.
	Disruption of habitat and motive species during device maintenance	Work windows should be scheduled to minimize impacts to fish (resident and migratory), migratory birds, and marine mammals. Follow best practices for containing anti-fouling coatings during biofouling removal.
Presence of devices: dynamic effects	Potential for direct interactions of marine species with turbine rotor	Increase visibility of rotors to fish. Acoustic avoidance measures Shock absorbers on leading edges of blades. Temporary device shutdown.
Chemical effects	Biofouling prevention needs are poorly defined	Avoid use of anti-fouling biocides when possible.
	Resuspension of pollutants from disturbed sediments	Use directional drilling to minimize disturbance to nearshore areas.
	Potential for large oil spills	Turbine design should minimize volume of lubricants and hydraulic fluid.
Acoustic effects	Excessive transient pressure from pile driving Behavioral responses to increases in noise (broad band or tonal) from device operation	Schedule construction timing to minimize adverse effects. "Soft start" pile driving. Bubble curtains. Design devices to minimize acoustic output.
Electromagnetic effects	Behavioral disruption from electric and magnetic fields	Bury power cables. Twist cores for AC cables. Run DC cables of opposing polarity in close proximity.
Energy removal	Changes to far-field physical environment and habitat	Minimize power dissipated by mixing of turbine wakes with free stream. Streamline support structures. Adapt patterns of device operation to avoid interfering with seasonally important events.
Cumulative effects	Effects on large, mobile species	Limit number of devices at a given location until effects of operation are sufficiently understood.
	Effects of energy removal	Projects should begin at small scale and increase incrementally to commercial scale.
	Difficulty of predicting, detecting, and attributing changes to the presence/operation of tidal energy devices	Projects should begin at small scale and increase incrementally to commercial scale.

Source: Polagye et al.(2010).

리나라는 해양에너지 개발에 큰 이점을 가지고 있으며, 특히 서남해안은 조류에너지 잠재력이 풍부하여 세계적으로도 손꼽히는 해양에너지 개발 유망지역으로 각광 받고 있다. 조류발전에 대해서는 터빈 블레이드 설계 및 기기개발 관련 연구와 국내 조류에너지의 부존자원에 관한 현황조사와 평가, 그리고 경제적 타당성 평가에 관한 연구가 주를 이루어 왔다. 이에 본 연구는 조류발전 사업 시 발생 가능한 환경영향을 고려하여 조류발전단지의 입지선정 방안과 국내 현황에 적합한 환경영향평가 방안을 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 먼저 조류발전 입지선정을 위한 요소와 방안을 도출하였다. 우리나라에서 경제적인 조류발전 후보지는 대부분 연안에 위치하는데, 연안은 육지와 인접하여 인

간의 활동 및 산업 시설 등과 같은 경제적 활동이 활발하고 생태적으로 보호해야 할 지역이 많아 부정적 환경영향과 사회적 갈등이 일어날 가능성이 많다. 따라서 경제적 효율성과 환경적 영향을 최소화하고 사회적 합의를 이끌어 낼 수 있는 입지선정을 위해 조류에너지 부존량, 수심과 해안의 이격거리, 환경보호해역, 인간의 해양활동 등 입지요소를 종합적으로 고려해야 한다. 또한 GIS를 활용한 해양공간계획 등으로 조류발전단지 입지의 타당을 우선적으로 검토할 것을 제안하였다.

다음으로 환경영향평가를 위한 기초 현황자료를 수집·분석방법을 제시하였으며, 본 연구의 결과를 종합하여 국내에 적합한 환경영향평가 단계의 가이드라인을 도출하였다. 가

이드라인은 조류발전 사업에 대한 환경영향을 파악하고 이에 대한 환경영향평가를 효과적으로 수행하기 위해 현황조사, 영향예측, 저감방안, 사후환경영향조사계획의 네 단계로 구분하였다. 영향예측은 현황조사 자료를 입력자료로 사용함과 동시에 검증자료로 사용되기 때문에 서로 연관성을 유지하며 작성되어야 한다. 현황조사와 영향예측은 해양물리 및 해저지형 분야, 해양 수질 및 저질 분야, 해양 및 저서 생태계 분야, 수중 소음 분야로 나누어 가이드라인을 제시하였다. 조류발전 사업이 가져오는 환경영향에 대한 자료가 부족한 상황이지만 향후 이에 대한 자료가 축적이 되면 누적영향에 대한 평가를 고려하는 것도 필요할 것이다.

조류발전의 환경영향 연구는 지속적으로 행해지고 있으나 조류발전 단지에 관한 영향조사 및 모니터링 자료는 미흡한 상태이다. 현재까지 우리나라에서 실시된 시험단계에서의 환경영향 조사자료를 바탕으로 조류발전단지 건설로 인한 환경영향을 파악하는 것은 타당하지 않은 것으로 사료된다. 따라서 대규모 조류발전 단지의 건설보다는 중규모 조류발전 단지를 조성하여 지속적인 모니터링을 실시하고 그로부터 얻어진 자료를 바탕으로 환경영향을 파악하는 것이 필요하다. 그와 동시에 국외의 조류발전단지 운영자들과 모니터링 자료를 공유하는 것이 필요하며, 종합적인 모니터링 자료를 바탕으로 중규모 조류발전 단지에서 환경적인 문제점이 크지 않다고 판단되면 대규모로 확장해 나가는 것이 바람직하다. 추가적으로 조류발전 단지를 개발할 때 후보지에 대한 구분별한 단지 조성보다는 해양공간 정보자료를 바탕으로 일정한 영역을 설정하고 그 영역 중심으로 조류발전 단지의 메카를 형성하는 것이 경제적일 뿐만 아니라 사회적·환경적으로 유리할 것으로 판단된다.

본 연구는 조류발전 사업의 환경영향을 파악하고 환경영향평가를 효과적으로 수행하기 위해 필요한 현황조사, 영향예측, 저감방안, 그리고 사후모니터링에 대한 가이드라인을 제시하였다. 하지만 현재 국내에서 해양에너지 개발사업의 문제점으로 지적되는 환경성을 고려한 입지선정 전략 부재와 해양환경 및 해양생태계 관련정보의 부족을 어떻게 해결할 것인지에 대한 후속연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 일부 해상풍력 발전사업의 추진사례에서 보이는 지역주민과의 갈등 문제가 조류발전 사업의 규모가 확대되는 과정에서도 유발할 수 있으므로 다양한 이해당사자들의 반응과 관련한 사회·경제적 영향에 대한 조사와 예측방안도 향후 함께 모색되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국환경정책·평가연구원의 지원으로 수행한

“조류발전사업 환경평가방안 연구(GP2013-08-02)”의 결과 중 일부입니다.

References

- [1] Alexander, K. A., R. Janssen, G. Arciniegas, T. G. O'Higgins, T. Eikelboom and T. A. Wilding(2012), Interactive Marine Spatial Planning: Siting Tidal Energy Arrays around the Mull of Kintyre, PLoS ONE, Vol. 7, No. 1, pp. 1-9.
- [2] Bernitsas, M. M., K. Raghavan, Y. Ben-Simon and E. M. H. Garcia(2008), VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy From Fluid Flow. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 130, No. 4, pp. 1-18.
- [3] Bryden, I. and G. T. Melville(2004), Choosing and evaluating its sites for tidal current development, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 218, pp. 567-577.
- [4] California Department of Transportation(2009), Technical Guidance for Assessment and Mitigation of the Hydroacoustic Effects of Pile Driving on Fish, p. 367.
- [5] Cheon, Y. J, B. J. Cho and T. H. Kim(2011), Impacts of Tidal Power Plant on the Marine Biotic Environment, Korea Environment Institute Working Paper, p. 69.
- [6] Cho, K. Y.(2008), Threaten Safety of Ships in Uldolmok... Considering Countermeasure, Yonhapnews, November 4, 2008.
- [7] Choi, H. J., J. Y. Choi, J. H. Jung and J. H. Nam(2011), A Study on the Improvement of Marine Spatial Planning System in Korea, Korea Maritime Institute, p. 218.
- [8] Dalton, G. J., R. Alcorn and T. Lewis(2010), Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America, Renewable Energy, Vol. 35, pp. 443-455.
- [9] DOE(2009), Report to Congress on the Potential Environmental Effects of Marine and Hydrokinetic Energy Technologies, p. 143.
- [10] Gill, A.(2005), Offshore renewable energy: Ecological implications of generating electricity in the coastal zone, Journal of Applied Ecology, Vol. 42, pp. 605-615.
- [11] Jeon, S. S.(2010), Tidal Current Energy Development for An Green Alternative, Ocean Country, Vol. 21, No. 6, pp. 26-37.

조류발전 사업의 환경평가 가이드라인 연구

- [12] Jung, M. S.(2009), Visiting the Test Site of Uldolmok Tidal Power Plant, Hankook Ilbo, April 19, 2014.
- [13] Kim, G. Y., D. I. Lee, K. A. Jeon and J. Yu(2012), Improvement for Marine Environmental Impact Assessment on the Development of Offshore Wind Power, Journal of Environmental Impact Assessment, Vol. 21, No. 1, pp. 1-13.
- [14] Kim, T. Y., J. H. Maeng and J. I. Park(2013), A Study on the Environmental Assessment Guideline for Tidal Current Energy Development. Korea Environment Institute, p. 254.
- [15] Korea Hydrographic and Oceanographic Administration(2013), Potential tidal current energy map, www.nori.go.kr, (2013.5.31).
- [16] LGL and Jasco Research(2005), Assessment of the Effects of Underwater Noise from the Proposed Neptune Lng Project, Ecology and Environment, Inc, p. 235.
- [17] Maeng, J. H. and T. Y. Kim(2013), European marine energy centre and La Rance tidal plant, Korea Environment Institute oversea business trip report, p. 8. (unpublished).
- [18] Maeng, J. H., H. Sung, Y. Joo, B. J. Cho, O. J. Lim and J. Seo(2012), A Study on the Environmental Impact Assessment of Offshore Wind Farm Projects, Korea Environment Institute, p. 262.
- [19] Ministry of Commerce, Industry and Energy and Korea Energy Management Corporation(2007), New and Renewable Energy R&D Strategy 2030 [Ocean], p. 233.
- [20] Ministry of Commerce, Industry and Energy(2008), Feasibility and application technology development for tidal current energy, p. 133.
- [21] Ministry of Knowledge Economy(2012), 2012 White Paper on New and Renewable Energy, p. 486.
- [22] Neitzel, D. A., R. A. Mousund, M. C. Richmond, C. S. Abernethy, D. D. Dauble, G. R. Guensch and R. P. Mueller(2000), Laboratory Studies on the Effects of Shear on Fish. Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-13323, p. 62.
- [23] Park, J. S.(2013), Current Tidal Current Energy Development in Korea, focusing on Ul-dolmok Tidal Power Station, Special Guest Speaker Seminar in Korea Environment Institute, July 5, 2013.
- [24] Polagye, B., B. V. Cleve, A. Copping and K. Kirkendall (2010), Proceedings of a Scientific Workshop, Environmental Effects of Tidal Energy Development. Seattle, National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA Technical Memorandum, p. 170.
- [25] Renetec(2013), <http://www.renetec.com/> (2013.5.15.).

원고접수일 : 2014년 05월 12일

원고수정일 : 2014년 06월 19일

게재확정일 : 2014년 08월 27일