

동아시아의 인공어초 개발과 연구 현황

이문옥 · 김종규[†] · 김병국
(전남대학교)

A Review-Status of Development and Research of Artificial Reefs in the East Asian Countries-

Moon-Ock LEE · Jong-Kyu KIM[†] · Byeong-Kuk KIM
(Chonnam National University)

Abstract

We conducted a comprehensive review on artificial reefs (ARs) including seaweed reefs for marine afforestation in relation to their development and research from 1972 to 2016, and then systematically analyzed their current a state-of-the-art and practice. From the review, the followings conclusions are made. First, the objectives of AR projects in the Southeast Asia can be classified into three, i.e. protection and increase of fishery resources, local community's profits, and ecological tourism. Second, fish gathering effects by ARs can be determined in terms of wake region or wake length that tends to increase with the K-C (Keulegan-Carpenter) number. Third, ARs are desirable to deploy across a direction of the main flow but it is essential to keep the deployment interval two to four times the length of a single reef. Fourth, stability of ARs depends on how to evaluate drag coefficient, and Morison formula turns out to be practical. Fifth, local scours of ARs are likely to occur due to a downward flow around the center of the front surface. Finally, it is natural for ARs to positively contribute to the marine ecosystem but it is imperative to develop an evaluation method for the effects of ARs on the marine ecosystem.

Key words : Artificial Reefs (ARs), Morison formula, Optimum deployment, Stability, Local scour

I. 서론

인공어초는 해저 또는 해중에 지형적 변화를 주어 집어를 피하는 어구를 말한다(Nakamura, 1991; Sato & Isobe, 2015). 이러한 인공어초를 사용하여 인위적인 어류의 위집을 도모하여 조성된 어장을 어초어장이라고 하는데, 현재 세계 각국은 연안해역에서의 유용수산자원의 고갈이 심각한 사회문제로 대두됨에 따라, 인공어초를 이용한 어류와 해조류의 증식을 도모하는 사업을 활

발히 전개하고 있다. 한편, 해중림초는 원래는 해조류를 증식할 목적으로 해역에 설치되는 인공 구조물이지만 어류의 이료생물이 되는 해조류나 패류의 증식을 도모하여 궁극적으로는 어류의 위 집효과를 극대화하기 위한 목적을 가지고 있다. 따라서 해중림초도 설치목적이나 기능면에서 보면 일반 어초와 크게 다르지 않다고 생각된다. 다만, 해중림초의 경우는 일반 어초와는 달리 설치된 구조물의 가능한 많은 면적에 감태나 다시마, 미역, 대황, 파래 등 주로 대형해조류가 부착

[†] Corresponding author : 061-659-7155, kimjk@jnu.ac.kr

할 수 있도록 기질(基質, substrate)을 생물친화적인 재료를 써서 만들 필요가 있다. 이러한 해중림초에 의한 바다숲 조성사업은 현재 우리나라를 비롯한 세계 각국에서 활발히 전개되고 있으며, 특히 갯녹음(또는 백화)현상에 대한 대책으로서 더욱 주목을 받고 있다(Korea Fisheries Resources Agency (FIRA), 2015a, 2015b).

본 연구에서는 일반어초와 해중림초 모두를 어초로 정의하고, 이들 어초의 개발 및 연구와 관련하여 지금까지 우리나라를 비롯한 동아시아에서의 인공어초 개발 역사와 연구현황을 살펴봄으로써 앞으로 어초어장의 이용 효율을 극대화하고 또한 새로운 개념의 어초개발을 통해 건전하고 지속가능한 해양생태계의 창조와 회복 방향을 모색하는 데 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 자료 및 방법

본 연구에서는 1972년부터 2016년까지 우리나라를 비롯하여 일본이나 미국의 대학, 학회, 연구소, 컨설팅회사 및 출판사 등에서 발행한 인공어초와 해중림초 또는 어초의 개발 연구 및 사업과 관련한 논문과 인쇄물, 국제회의 및 세미나 자료, 인터넷상에 공개된 온라인 자료 등을 광범위하게 수집하였다. 이들 수집된 자료를 바탕으로 먼저, 동아시아를 중심으로 인공어초(또는 해중림초)의 개발 현황을 살펴보고, 다음으로 어초와 관련한 연구로서 어초 재료, 어초 주변의 유향특성, 어초의 최적배치, 어초의 수리학적 안정성, 어초 주변의 국소세굴 및 어초의 매몰, 침하 및 그 대책공법, 어초 설치 효과 및 평가 등과 관련한 지금까지의 연구 동향을 체계적으로 정리, 고찰하였다.

III. 결과 및 고찰

1 어초 개발 현황

우리나라는 1971년에 저인망 어업 등에 의한

불법어업 방지와 어업인 소득 증대를 위해 처음으로 인공어초사업이 실시되었다(Kim Dae-Young, 2006; Kim & Lee, 2007). 이후 1980년대까지의 인공어초 도입기를 지나 기반조성과 다양한 어초 재료가 개발되었고, 최근은 어초를 수출하기까지에 이르렀다. 우리나라에 있어서의 인공어초 시설현황에 관해서는 Kim Chang-Gil (2000), Joo Jae-Wook(2000), Kim et al. (2002), Kwon Yeong-Jin(2002) 등이 있으며, 2014년 현재 우리나라에서 개발된 인공어초는 일반어초가 75종으로, 콘크리트 사각형 어초가 가장 많고, 그 다음으로 반구형, 원통형, 점보형 순이지만, 강제어초와 세라믹 어초가 차지하는 비율도 점차 증가추세에 있다(FIRA, 2015). 또한 Yoon et al.(2010)이 1971년부터 2008년까지 우리나라에 시설된 인공어초의 현황 조사에 따르면, 2008년 현재 인공어초의 시설면적은 202,018ha, 시설량은 1,315,603개로, 그 중에 전라도 관할 해역이 20.6%로 가장 많았다.

한편, [Fig. 1]은 한국수산자원관리공단(FIRA, <http://www.fira.or.kr>)이 2009년부터 2014년 현재까지 전국 연안에 조성한 바다숲 현황을 보여주는 데(괄호 속의 숫자는 조성년도를 나타냄), 2030년까지 전국 마을어장 35,000ha와 바다숲 조성을 통한 연안생태계 복원을 목표로 하고 있다. 이 기간 동안 각 연안별로 조성된 해중림초의 시설 현황을 나타낸다. 2014년 현재 우리나라에서 해조류 또는 패류 증식을 위해 사용되고 있는 해중림초는 38종이다.

한편, 일본에서는 1650년대에 돌담을 쌓아 만든 어초가 최초의 기록으로 남아 있다. 그동안 일본에서는 수세기에 걸쳐 해양생물자원을 재생산하고 기르는 데 필요한 장소를 창조하기 위해 집중적인 노력을 기울여 왔으며, 그 중에 돌 투하 사업(stone installation project)과 같은 국가 사업은 1952년에 시작되었으나, 인공어초 설치 사업은 2차 세계대전 후인 1947년이였다. 이후 일본은 인공어초사업을 1976년부터 2011년까지 연

안정비개발사업 또는 수산기반정비사업의 일환으로 꾸준히 추진해 왔으며, 현재는 인공어초의 구조와 안정성, 공학적 설계, 어초와 어류의 생태

학적 관계, 어초의 이용 및 관리에 의한 생산 및 소득증대효과 등에 관한 연구 등으로 진화하고 있다(JAFRA, <http://www.nissyoukyou.com>).



[Fig. 1] Creation status of marine forest(FIRA, <http://www.fira.or.kr>).

반면, 브루나이를 비롯한 캄보디아, 인도네시아, 말레이시아, 싱가포르, 미얀마, 필리핀, 베트남, 태일랜드 등의 동남아시아 각국의 인공어초 개발 현황을 개략적으로 살펴 보면, 이들 나라 중 말레이시아와 태일랜드를 제외한 대부분의 나라에서는 인공어초 개발기술이나 사업이 아직 초기단계에 머무르고 있는 것으로 보인다 (Kheawwongjian & Kim (2012). 그러나 이들 나라들이 인공어초사업을 수행·계획하거나 어초를 설치하는 목적은 크게 세 가지로서 첫째, 어업자원의 증식과 보호 둘째, 어업인의 소득증대 셋째, 생태관광산업을 위한 인프라 구축이 그것이다 (Fisheries Research Agency(FRA), 2010). [Fig. 2]는 동아시아 각국이 현재 개발, 사용하고 있는 대표적인 어초를 보여준다.



[Fig. 2] ARs in Japan, Brunei, Indonesia, Malaysia, Myanmar, Thailand(Fisheries Agency of Japan, FRA)(2010).

이밖에도 중국의 인공어초 개발 현황에 대하여는 Lan et al.(2004), Lan et al.(2006), Liu et al.(2013), Chai et al.(2014), Yu et al.(2015) 등의 문헌을 통해 살펴볼 수 있다.

2 어초 연구 현황

어초와 관련한 연구는 기 개발된 어초를 실 해역에 설치 또는 배치할 경우에 발생하는 문제를 해결하기 위한 연구가 주를 이루고 있다. 이와 관련하여 지금까지 수행된 연구분야로서는 대략적으로 어초 재료, 어초 주변의 유황특성, 어초의 최적배치, 어초의 수리학적 안정성, 어초 주변의 국소세굴 및 어초의 매몰, 침하 및 그 대책공법, 어초 설치 효과 및 평가 등을 들 수 있다. 따라서 여기서는 이들 연구분야와 관련한 현황을 체계적으로 살펴보고자 한다.

가. 어초 재료

Hong et al.(2003)은 폐콘크리트로부터 생산된 재생골재를 인공어초의 재료로서 활용하기 위한 역학적 특성을 연구하였다. 그 결과, 재생골재를 사용한 다공성 콘크리트의 경우, 일반 콘크리트에 비해 pH가 상대적으로 낮게 나타나 해조류 부착이 용이하여 어초 재료로서의 유리한 조건을 갖추고 있음을 확인하였다. 한편, Chen et al.(2015)은 황화알루미늄산염(sulpoaluminate), 바다 모래, 해수 등을 사용하여 만든 새로운 어초 콘크리트(New Artificial Reef Concrete, NARC)를 제안하였다. 그들이 제안한 NARC는 포틀랜드 시멘트 콘크리트와 하천 모래, 담수를 사용하여 만든 기존의 어초에 비해 가공성(질 저하, 응집력 상실, 물 유지력), 역학적 성질(압축강도, 파단인장강도, 동역학적 탄성계수), 친화성(표면 초기 pH 값, 콘크리트에 있어서의 알칼리성 물질의 침출 속도) 등에 있어서 매우 뛰어난 실험결과를 얻었다.

나. 어초 주변의 유황특성

어초배후에 형성되는 와류는 어초가 가지는 집

어효과 요인 중의 하나이며, 어류의 먹이가 되는 플랑크톤의 집적 및 소형어의 생식조건이 되는 하강류역의 완화작용 등 극히 중요한 수리량이다. Kuroki et al.(1964)는 균일류 중에 놓인 원통형 및 입방체형의 어초모형(구멍이 없는 형태)을 사용하여 어초 배후의 유영(流影)에 대하여 검토하였고, Osaka & Yamata(1979), Kageyama et al.(1980, 1982), Sakuda et al.(1982) 등은 각종 어초모형을 사용하여 그 어초 배후에 있어서의 유황 및 유속변동에 관하여 연구하였다.

그러나 이들 연구는 균일류 중에 있어서의 유황변화를 대상으로 한 해석결과이며, 진동류하에 있어서의 어초배후의 유황에 관한 연구는 Sawaragi & Nochino(1979)에 의한 실험적 및 이론적 연구가 있을 뿐이다. 이후, Kageyama et al.(1980, 1982)가 입방체형의 각 측면에 설치된 구멍의 개수를 변화시켜 유황에 미치는 어초의 유공성 효과에 관하여 검토하였다. 그러나 그들의 결과는 측면에 대한 구멍의 개공비(開孔比)가 30%까지로 비교적 작고, 또한 균일류에서 얻어진 결과이다. 이에 대하여, Matsumi(1988)는 파랑장에 설치된 어초를 상징하여, 흐름으로서 진동류를 사용하여 어초의 공극률 및 흐름의 제원을 계통적으로 변화시키는 것에 의해 단체어초 배후의 유황특성을 수리실험적으로 검토하였다. 그 결과, 그는 유공각주(有孔角柱)형 어초 배후의 후류와(後流渦, wake) 영역은 어초의 형상이나 공극률에 관계없이 $K-C$ 수(Keulegan-Carpenter No., 여기서, $K-C$ 수 = $u_m T/D$, u_m 은 원주에 작용하는 파의 최대 수립자속도, T 는 파의 주기)의 증가에 따라 거의 선형적으로 증대한다는 사실을 밝혔다. 또한 그는 후류와 영역의 최대값은 어초의 공극률이 56%일 때 나타난다는 사실을 밝혔다.

한편, Kim et al.(2014)은 우리나라의 대표적인 24개의 어초에 대하여 후류역(wake region)에 대한 어초의 구조적 반응을 수치적 방법으로 조사하였다. 그 결과, 후류장(wake length)은 어초의

높이가 증가할수록 증가하지만, 주류의 유속과는 무관하다는 사실을 밝혔다.

이상의 결과로부터, 어초에 의한 어류 위집효과는 그 배후에 형성되는 후류와(wake)의 영역 또는 후류장(wake length)이 얼마만큼 큰가에 의해 결정되며, 이 후류와 영역이나 후류장은 어초의 공극률과 $K-C$ 수가 클수록 크다는 것을 알 수 있다.

다. 어초의 배치 간격 및 최적배치

어초에 의한 어장조성사업이 발족한 초기의 어초규모는 사업자금의 범위내에서 적의하게 계획된 것이기 때문에, 해역의 특성이나 대상어종의 특성 및 어획방법 등의 조건으로부터 정해진 것은 아니었다. 그후, 어초군내의 산소량이나 수중 조도와 어류의 서식상황, 어초 높이와 위집효과와의 관계, 어초 배치구조와 생산량의 관계 등 다양한 조사가 이루어졌다(Japan Artificial Reef Research Institute(JARRI), 1976). 그 결과, 저서성 어류를 대상으로 한 어초는 어초 높이보다는 평면적인 넓이가 더 효과적인 반면, 회유성 어류의 어초는 어초가 클수록 집어효율이 더 높다고 알려져 있지만, 아직 이들에 대한 정량적 평가는 이루어져 있지 않다. 이후, Fisheries Agency of Japan(FAJ)(1981)은 인공어초어장조성계획 지침안을 작성하였다. 이 지침서에 따르면, 어초 상호간에 형성되는 공간은 생물 및 수리학적인 측면에서 어류의 위집에 중대한 관계를 가진다. 그래서 만약 단체어초가 극도로 집적되어 밀도가 높아지면, 생물에 대한 자극을 줄여, 어초로서의 경제성을 잃게 되고, 또한 어초간의 공간이 어떤 유효 공간을 넘게 되면, 각 어초는 단체(單位)가 되어 집어효과를 기대할 수 없음을 지적하였다. 한편, 어초의 설치간격에 있어서는 1m³ 정도의 소형어초의 경우는 2m를 넘지 않는 범위로 하고, 대형어초의 경우는 어초 폭의 3배 정도 이내로 하는 것이 바람직하다고 하였다. 또한 어초 배치에 있어서는 흐름 상류측 어장면적의 확대를 생각하여

흐름을 횡단하는 방향으로 배치할 것을 권장하고 있다. 그러나 군체 어초 주변의 유향변동에 미치는 어초 설치간격의 영향이 거의 밝혀져 있지 않아 어초의 구체적인 설치간격에 대하여는 종래의 생물학적인 조사결과를 바탕으로 구한 경험칙에 머무르고 있다.

한편, 어초는 단체(單位) 어초보다는 집어효과를 높이기 위하여 일정한 간격으로 복수 배치하는 형태의 군체 어초(群體魚礁)가 많이 설치되고 있다. 군체 어초의 경우, 개개의 어초배후에 형성되는 후류와는 어초상호의 간격에 의해 변동하여, 어초 한 개당의 후류와의 공간적 확대가 어초간격에 따라 단체 어초의 경우보다 좁아진다는지, 넓어진다는지 할 것으로 추측된다. Matsumi (1988)는 FAJ(1981)가 장기간의 관측결과에 기초한 경험칙으로 어초의 설치간격을 규정하는 것은 수리학적 근거를 가진 합리적 지침은 아니라고 판단하고, 어초간격에 따른 주변의 유향변화 등을 고려하면서 어초의 최적배치를 위한 수리실험을 실시하였다. 그 결과, 군체 어초를 종렬로 배치하였을 경우, $K-C$ 수가 5 이하에서는 $l_f/a=1$ (여기서, l_f 는 한 군체 어초와 인접한 다른 군체 어초간의 설치간격, a 는 군체 어초내의 어초간의 간격), $K-C$ 수가 7 이상에서는 $l_f/a=2$ 가 후류와(後流渦) 영역의 확대에 최적인 어초간격인 것으로 나타났다. Lan et al.(2004)은 어초를 배치함에 있어서 편리한 새로운 알고리즘과 수학적 모델을 구축, 개발하였다. 그들이 제안한 모델 LARCs(Layout of Artificial Reef Communities)는 인접한 어초(Adjacent Artificial Communities, ARCs)의 배치간격, 설치되는 ARCs의 수, 예산, 비용 등을 고려하면서 어초계의 공간 배치를 설계하는 데 필요한 새로운 공학적 방법으로써, 특히 생태공학자에 있어 유용한 도구이다. 한편, Lan & Hsui(2006)은 인공어초생태계(Artificial Reef Ecosystem, ARE)의 최적배치를 위한 수학적 모델인 DARCs(Deployment of Artificial Reef

Communities)를 개발하였다. 본 모델은 유한의 예산하에 ARE를 배치하기 위한 구체적인 방법(예를 들면, 배치하는 AREs의 수, 인접한 ARCs (Artificial Reef Communities)의 거리, ARCs의 공간 배치 등)을 제시하는 데 있으며, 보다 복잡한 서식계가 생물량과 종다양성을 증가시킨다는 생물학자의 관측결과에 기초하고 있다. 반면, Liu et al.(2013)는 별 모양의 어초(star-shaped ARs) 주변에서의 비정상류적 흐름장 재현을 위해 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS)에 기반을 둔 3차원 수치모형을 개발하였다. 그들이 개발한 수치모형에 의한 어초 주변 흐름의 계산결과에 따르면, 두 개의 어초간의 상호간섭효과는 어초간 간격이 어초 길이의 3~4배 일 때, 가장 컸다. 또한 Ponti et al.(2015)는 이탈리아 연안에 설치된 두 종류의 어초(피라미드형과 콘크리트 튜브형 어초) 주위에 정주하는 표재저서생물(epibenthos)의 군집에 대한 현장조사 결과, 어종이 어초 주위에 모이는 것은 어초의 형태보다는 오히려 어초 설치해역의 환경조건의 다양성과 가입과정에 의한 것이라고 주장하였다. 따라서 그들은 어초의 계획과 설계에 있어서는 특히 하천으로부터의 높은 오염부하가 있는 부영양화된 해역이나 탁도가 높은 연안역에 있어서는 어초 설치해역의 환경이 주위 깊게 고려되어야 함을 역설하였다.

이상의 결과로부터, 어초의 크기나 어초간의 배치간격을 어느 정도로 하는 것이 어초의 집어효과를 높일 수 있을까에 대하여는 대상 종(즉, 저서성 어류인가 또는 회유성 어류인가)에 따라 다르지만, 어초의 배치는 주류 방향에 횡단하여 설치하는 것이 바람직한 것으로 생각된다. 또한 어초간의 배치 간격은 현장에서의 생물학적인 경험에 기초하여 판단하되, 단체 어초 길이의 약 2~4배 정도로 하는 것이 후류와 영역의 확대나 어초간의 상호간섭효과를 생각할 경우 어초의 최적배치조건인 것으로 판단된다. 그러나 어초 설치지는 실 해역의 물리적 환경 또한 어초의 형태나 배치간격 이상으로 고려해야 할 중요한 인자

임을 간과해서는 안될 것으로 생각된다.

라. 어초의 안정성

어초의 내용년수는 일반적으로 30년으로 보고 있으며, 따라서 어초는 그 내용년수 동안 제 기능을 유지할 수 있도록 안정하게 설계되지 않으면 안된다. 그러나 실 해역에 설치후의 어초는 파 및 흐름 등의 작용 유체력에 의해 활동(滑動), 전도(轉到)하거나 손상이 발생할 수 있다. 이러한 경우를 대비하여 예를 들면, 일본에서는 National Coastal Fishery Promotion and Development Association(1986)에 기초한 어초사업을 실시하고 있다. 이 지침서에서는 실 해역에 설치된 어초에 작용하는 유체력을 일반적인 해양구조물의 경우와 마찬가지로 소위 Morison식에 의해 평가하고 있다.

Nakamura & Uekita(1975)의 어초 침설시의 착저 충격력에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 착저 충격력이 어초가 해저에 충돌할 때의 지반의 밀립을 지반반력으로 생각하고, 이 지반반력에 Frolich의 이론을 적용, 지반반력을 고려한 어초에 관한 운동방정식에 의해 지반의 최대변위와 착저시의 충격력을 산정하였다. 그러나 그들은 어초와 같이 구형이 아닌 물체가 낙하하는 경우 고려해야 할 회전운동과 수평방향의 동요 등을 무시하고 있어서 그 산정결과에 의문이 남아 있다. 특히, 어초의 항력계수 및 부가질량계수에 대하여는 종래의 해양구조물에 있어서의 값이 준용되고는 있으나, 착저 직전의 유체저항에 미치는 저면효과를 생각하면 결코 타당하다고는 말하기 어렵다. 그럼에도 불구하고 Morison식에서는 항력계수 C_{DL} 및 관성력계수 C_{ML} 로서 예를 들면 각주(角柱)부재로 구성되어 있는 어초의 경우 $C_{DL}=2$, $C_{ML}=2$ 가 파나 흐름 변화에 관계없이 현행 어초의 설계지침에서 그대로 채용되고 있다. 따라서 Morison식의 개념을 어초에 적용하는 데는 유체력에 미치는 어초 특유의 부재간의 간섭 및 어초 상호의 간섭효과, 나아가 어초와 같

이 높이가 낮은 구조물에 대해서는 저면의 영향이 고려된 항력계수 및 관성력계수를 명확히 해둘 필요가 있다고 생각된다. 이러한 관점에서 Matsumi(1988)는 어초에 작용하는 유체력을 수리 실험결과에 기초하여 측정하고, Morison식의 어초에 대한 적용성을 검토하였다. 또한 그는 어초의 유공성 및 군체 어초의 설치간격에 의한 C_{DL} , C_{ML} 의 변화특성 및 저면효과에 대하여 검토하였다. 그 결과, 어초에 작용하는 수평방향의 최대 유체력의 산정에 있어서는 Morison식의 적용이 큰 문제는 없으나, 이 식에 포함된 항력계수 및 관성력계수는 저면효과 등이 고려된 값을 사용할 필요가 있다고 결론지었다. 또한 그는 어초의 항력계수는 단체 또는 군체 어초를 불문하고, $K-C$ 수가 증가하면 감소하는 한편, 관성력계수는 $K-C$ 수가 10 부근에서 최대값을 나타낸다는 사실을 유체력 측정실험으로부터 밝혔다.

한편, Miao & Xie(2007)는 수치적 파랑장에서 어초의 유체력에 미치는 수심의 영향을 검토한 결과, 천해역에서 수심이 감소함에 따라 유체력이 증가한다는 사실을 밝혔다. 그러나 어초 높이에 대한 수심의 비가 6.0이상인 경우는 수심은 장기간 동안의 유체력에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Kim et al.(2009)은 쇄파대에 설치된 어초의 안정 계산에 사용되고 있는 유체력(특히 항력계수)에 관한 공식을 2차원 수치 파동수로실험에 기초하여 평가하였다. 그들은 미소진폭파 이론에 의해 산정된 쇄파대에서의 수립자 속도를 적용한 유체력은 어초의 설계외력으로 적절하다고 주장하였다. Düzbastılar & Şentürk(2009)는 FLUENT software를 사용하여 어초의 설계 중량, 주류 흐름에 대한 방향각, 수심 및 저면 경사를 달리할 경우에 있어서의 파와 어초간의 상호작용에 관하여 조사하였다. 그 결과, 어초의 항력계수는 주류 흐름에 대한 각도에 따라 값이 다르며, 또한 저면 경사는 어초의 설계중량과 설치 수심에 현저한 영향을 준다는 사실을 지적하

였다. Sohn et al.(2011)은 파와 흐름이 공존하는 유동장에 있어서의 폐 철도차량을 이용한 어초의 수리학적 안정성 평가를 위한 수리모형실험을 수행하였다. 그들은 어초의 안정성 검토를 위해 Morison식과 Froude 상사법칙을 각각 적용하였으며, 그 결과 어초의 활동 및 전도에 대한 안전율은 각각 0.9~1.2, 2.0~2.5로 나타났다. Baek et al.(2014)은 수리실험을 수행하여 파랑과 흐름 등의 외력조건의 변화에 따른 요철형 어초의 안정한계를 검토하였다. 그 결과, 새로이 개발된 요철형 어초의 경우, 설치해역의 수심(15m)이내에서는 실험조건(파고 및 주기)에 대하여 전도나 활동 등은 발생하지 않았다고 보고하였다. 또한 Shin et al.(2014)은 갯녹음(백화) 현상에 대처할 목적으로 개발한 신형인공어초(일명 이식형바이오 해중립초)의 설치수심에 따른 안정성 평가를 위해 2차원 수리실험을 수행하였다. 그 결과, 어초 설치해역의 수심 15m이내에 있어서는 실험조건(파랑의 파고 및 주기)에 대하여 전도나 활동 등은 발생하지 않았다고 보고하였다.

Woo et al.(2014)는 우리나라의 대표적인 24개 일반어초에 대하여 유한체적(finite-volume)에 기초한 흐름해석에 의해 보다 간편하게 항력계수를 추정할 수 있는 무차원량을 제안하였다. 또한 그들은 흐름과 어초가 이루는 각도에 따라 항력계수가 현저하게 변화한다는 사실을 지적하였다.

이상의 결과로부터, 어초의 안정성은 어초에 미치는 유체력 중 주로 항력계수를 어떻게 평가하는가에 달려 있는 것으로 생각된다. 또한 현재 어초의 유체력 산정에 사용되고 있는 이른바 Morison식은 다소 개선의 여지는 있으나, 실용상 큰 문제는 없는 것으로 나타났다. 한편, 복수의 어초로 구성된 어초어장에서는 어초 상호간의 간섭효과, 파나 주류 흐름의 변화, 저면경사 등이 어초의 안정성에 영향을 주게 되며, 또한 동일한 유체력이 어초에 작용하는 경우에도 수심이 비교적 얇은 천해역에 설치되는 어초가 보다 깊은 수심에 설치되는 어초에 비해 상대적으로 유체력에

취약한 것으로 나타났다.

마. 어초 주변의 국소세굴 및 어초의 매몰, 침하 및 그 대책공법

일반적으로 어초가 설치·계획되는 수역의 저질은 사질이기 때문에, 어초 주변에서의 국소세굴의 발생이 예상된다 (Kim et al., 2009). 이 국소세굴은 어초의 활동(滑動)이나 전도(轉倒)를 유발하여, 결국 어초는 침하(沈下)·매몰(埋沒)되며 (Kim Heon-Tae, 2001; Yoon & Kim (2001); Kim et al., 2008; Kim et al., 2010), 어초로서의 기능을 잃게 된다(Sato, 1967; Saito & Osuge, 1976; Iwagaki & Sawaragi, 1979; Sawaragi & Matsumi, 1983). 이와 같이 어초 주변에 생기는 국소세굴은 어초의 기능유지면에서 중요한 문제이지만, 현행 어초설계상에 있어서는 이와 같은 어초 주변의 국소세굴에 대한 적절한 방지공법이 취급되고 있지 않다.

Kuroki(1964), Sato(1967) 등은 어초주변에 생기는 국소세굴에 따른 안정문제에 관하여 실험 연구를 수행하였다. 그들은 어초가 세굴에 의해 안정을 잃게 되는 활동과, 전도가 발생할 때의 어초에 작용하는 유체력(이 경우는 항력만을 생각함)과 저면의 마찰저항력간의 균형조건을 생각하여, 이동을 일으키는 한계유속을 제안하였다. 그러나 그들은 파랑류에 의한 국소세굴에 관해서는 해명하지 못하였다. 그 후 Matsumi(1988)는 파랑류를 고려하여 어초 주변에 있어서의 국소세굴에 따른 지형변동과 세굴방지책을 수리실험적으로 규명하였다. 그 결과, 현행의 공극률 60% 정도인 어초에서는 하강류에 의해 생기는 어초 하부의 중앙부 세굴심이 어초의 침하량을 좌우하며, 이때 최대 침하량은 $K-C$ 수에 관계없이 어초 한 변의 10% 정도로 나타났다. 또한 국소세굴 방지 대책공법으로서는 어초 바닥에 날땀(鏢)을 부착하는 공법이 세굴방지에 뛰어난 효과를 발휘한다는 사실을 밝혔다.

Ryu et al.(1997)는 어초 주변의 세굴, 퇴적, 침

하, 매몰기구를 수리실험적으로 검토하였다. 그 결과, 어초 주변에서의 최대세굴심 및 침하량은 *Reynolds No.*(= ul/ν , u : 유속, l : 유체 운동의 대표적 길이, ν : 동점성계수)와 밀접한 관련이 있음을 밝혔다. 또한 그들은 어초 전면에 생기는 하강류를 차단하는 것을 어초의 세굴과 매몰의 방지책으로 제안하였다. Yoon & Kim(2001)은 흐름과 파가 공존하는 유동장에서의 정상 및 비정상 조건일 경우의 어초의 침하 및 매몰에 관한 실험 결과를 비교, 고찰하였다. 그 결과, 어초 주변에서의 침하는 $K-C$ 수 보다는 *Shields No.*(= $\tau/((\rho_s - \rho)gD)$, τ : 전단력(shear stress), ρ_s : 해저 퇴적물의 밀도, ρ : 유체의 밀도, g : 중력가속도, D : 퇴적물의 대표적 입경)에 더 의존적이라는 사실을 밝혔다. Jeong & Kim(2007)은 정상 흐름장에 놓인 사각형 어초 주변의 유황, 특히 세굴현상에 대하여 수치적으로 검토하였다. 이들 결과에 따르면, 전단응력이 가장 큰 어초 전면의 양 끝단에서 가장 먼저 세굴이 발생하였고, 또한 그 세굴의 크기도 어초내부의 저면에서 발생하는 세굴에 비해 상대적으로 컸다. 또한 어초 주변에서의 세굴 깊이는 *Shields No.*가 커질수록 증가하는 경향을 보였다.

이상에서 살펴 본 연구결과에 따르면, 어초 주변에서의 국소세굴은 어초 전면의 중앙부에서 생기는 하강류에 의해 발생하며, 또한, 이때의 어초 침하량은 $K-C$ 수보다는 *Reynolds No.* 또는 *Shields No.*에 의존하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 어초의 세굴 방지를 위해서는 어초 전면 중앙부에 생기는 하강류를 제어할 수 있는 어초 개발이 하나의 대책으로 생각된다.

3. 어초 설치 효과 및 평가

Ryu et al.(1998)는 통영 사랑면의 수우도 해역(시설면적 640ha, 사각형 어초시설량 4,000개)의 어초어장에 대한 경제성을 분석하였다. 그 결과, 그들은 어초어장이 처음으로 조성되기 시작한

1988년 이래, 2001년 현재 어초어장의 가치가 총 투자비용을 능가하는 것으로 진단하였다. 또한, Ahn et al.(1999)은 제주 연안에 위치한 어초어장의 집어효과를 조사하기 위해 패조류 및 어류의 표본채집을 실시한 결과, 조사 대상 어초어장에서 어획량은 천연초 어장에 비해 약 3.5~20.4 배 높았다고 보고하였다. 이후, Park et al.(2000a, 2000b)도 전라북도 연안의 어초어장에서의 통발, 연승, 삼중자망 등에 의한 어획량을 조사한 결과, 어초어장은 대조구인 천연초 어장에 비해 약 2배 가, 또한 충청남도 연안의 어초어장에서는 단위 노력당 어획량(CPEU)이 천연초 어장에 비해 약 2~3배가 더 많았다고 보고하였다. Kim et al.(2005)은 통영 및 장승포 연안역에 설치된 인공어초의 현상태를 파악하기 위해 해저퇴적물 채취와 탄성과 탐사기 및 사이드스캔소나(SSS)를 이용한 현장조사를 실시하였다. 그 결과, 전단강도가 2~3kPa 이상인 곳을 제외한 대부분의 곳에서 침하가 발생하고 있음을 확인하였다. Yoon et al.(2016)은 1987년부터 2002년 사이 우리나라에 설치된 사각어초의 현재 상태를 추정하기 위하여 실제 사용가능한 체적과 매몰된 체적을 이용하였다. 여기서 그들은 어초 설치시의 해저 상태(즉, 경성질 해저면 또는 연성질 해저면)와 시설 표준 체적에 근거하여, 어초의 전체 유실, 실제 사용가능한 체적 및 매몰된 체적을 추정하기 위해 세 개의 체적계수를 각각 제안하였다. 비록 이들이 제안한 계수를 사용할 경우 10%내외의 오차는 있으나 어초의 현재 상태를 확인하는 데 있어서 멀티빔이나 사이드 스캔소나의 사용 또는 잠수 조사 등을 줄일 수 있어 비용면에서 효율적임을 주장하였다.

한편, Seaman(2000)은 영양염과 기초생산 등의 영양원의 공급원에 기초하고, 또한 사회적, 경제적 가치 창출을 고려한 인공어초의 평가수법에 관하여 기술하였으며, Baine(2001)은 지금까지 설치된 인공어초와 또한 이와 관련한 설계, 적용, 관리 등에 관한 연구성과를 광범위하게 검토하였

다. 여기서 그는 미래에 있어서의 연구와 관리를 해야 할 분야는 어초의 설계와 복잡성이라고 강조하였다. 또한 그는 지금까지 수행된 어초사업의 절반 정도가 당초의 목적에 부합하고 있어서, 인공어초사업의 성공은 전적으로 사전 계획과 사후 관리가 중요함을 역설하였다.

Vicente et al.(2008)는 생산성이 높은 lagoon지역에 인접하고 있으나, 설치 위치가 다소 다른 두 개의 어초계에 대한 환경평가를 위해 영양염 순환과 해저 생물 풍부도를 각각 조사하였다. 그 결과, 한 어초계는 생산성이 있는 계인 반면, 다른 어초계는 빈영양상태의 계로 나타났는데, 이러한 차이는 물리 순환계의 차이로 판단하였다.

또한 Fisheries Infrastructure Development Center (FIDEC, <http://www.fidec.or.jp>)는 일본수산청(JFA)의 위탁을 받아 바다숲 조성기술 및 어초효과 진단시스템을 개발하였다. 이 사업은 방파제 등의 인공구조물에 해조류장을 조성하여 자연조화형 어항을 구축하고, 백화현상 대책을 위한 요소기술 개발과 어업인의 해양생태계 보전활동을 위한 기술지원 등을 주요 골자로 하고 있다. 또한 지역에서 산출되는 간벌재(즉, 목재)를 활용한 증식초 실증사업을 전국 17개소에서 실시하고 있다. 이 사업에서는 수산생물에 있어서 유효한 먹이생산의 기반이 되고 수산생물의 위집효과도 발휘되는 목재 증식초의 모니터링 조사를 실시하고 있다. 이들 모니터링 조사에서는 증식초로서의 어류의 위집상황 조사, 목재 부분에 있어서의 먹이동물의 발생상황 조사, 증식초 주변에 위집하는 위 내용물 조사 등이 이루어지고 있는데, 지금까지의 조사결과, 어류의 위집상황의 관찰과 합쳐서 설치후 수개월의 증식초의 목재 부분에 있어서 단기간에 지렁이류(해수종의 목재에 천공하는 이때패의 동물)가 대량으로 발생한 것이 확인되었다. 또한 이 지렁이류가 천공한 갭의 공간이나 목은 목재 표피 밑에서는 간극성의 갑각류(소형 새우, 게 등)나 다모류 등의 어류가 좋아하는 먹이동물이 증가한 사실을 확인하였다.

한편, 어초 설치에 따른 효과를 산정함에 있어서는 많은 경우, 어업인의 조업일지나 어업자로 부터의 청취에 의존하고 있기 때문에 효율적인 어장정비의 관점에서 볼 때, 어획 효과 산정의 정도 향상이 요구된다. 이러한 관점에서, FIDEC에서 개발한 어초효과 진단시스템은, 우선 side scan sonar, 소형 GPS 등의 최신 기술을 활용하여 어초의 설치상황을 정확히 파악, 이것을 관련정보와 함께 PC상에서 용이하게 가시화할 수 있게 하고, 또한 어초의 설치효과를 정량화, 화폐화할 수 있는 종합적인 시스템이다. 특히, 주목할 것은 이 시스템에 의한 어초 효과의 진단평가 방법인데, GIS에 의한 어초대장의 정비, 어선위치정보의 자동취득, 어초효과(어초 또는 어장별 어획량, 어획고, CPUE 산출)의 평가를 하게 된다. 이러한 어초효과 진단시스템을 도입함으로써 첫째, 어초를 효율적이고도 효과적으로 관리 운영할 수 있는 database가 구축되어 에너지 절약을 도모할 수 있고 둘째, 어업자에게 어초의 설치상황을 정확히 알려주어 어초의 이용을 촉진할 수 있으며 셋째, 어초설치효과의 정량화, 화폐화가 가능해져서 원단위(어초의 공(空) m^3 당의 연간 증가생산량)를 정확히 알 수 있는 등의 이점이 있다. 현재 일본에서는 2009년도 나가사키(長崎)현에서의 실증실험을 시작으로, 현재까지 7건의 실시사례가 있다.

또한 The Japanese Institute of Fisheries Infrastructure and Communities(JIFIC, <http://www.jific.or.jp>)에서는 2011년 동일본 대지진 재해로 인해 방대한 양의 재해폐기물이 발생하여 그 처리가 큰 과제였으며, 또한 쓰나미에 의해 재해를 입은 지역의 어업 회복과 어장의 조속한 재생도 절실히한 상황인 점에 주목하여, 재해폐기물을 어장 조성에 효율적으로 이용할 수 있는 방안을 모색하였다. 그 결과, 본 연구소에서는 어장 시설에 대한 재해폐기물 등의 재생이용을 검토하여, 재해로 인해 발생한 콘크리트를 써서 이와테(岩手)현의 2개 마을에는 다시마와 미역의 증식

초, 그리고 아오모리(靑森)현 1개 마을에는 다시 마 양식용 앵커 블록을 각각 제작, 침설하였다. 또한 이 연구소에서는 이들 사업의 성과를 정리하여 “어장시설에의 재해폐기물 등 재생이용의 지침”을 작성하였고, 현재 증식초 설치후의 모니터링을 자체적으로 실시하고 있다. 그밖에도 FRP 어선을 어초사업에 활용하는 문제, 인공어초 효과지표의 검토조사(인공어초 위집량 조사 매뉴얼의 작성), 어초의 증식기능의 편익계측 매뉴얼 작성, 해조류장 및 간석지에 있어서의 탄소고정효과 검토, 현행 인공어초계획지침의 개정 등과 관련한 기술개발도 행하고 있다.

Miura et al.(2010)는 환경영향평가에 있어서의 정량적인 예측방법을 확립하기 위한 일환으로서, 해조류 4종 즉 대황, 팽생이 모자반, 파배기 모자반, 쌍발이 모자반에 대한 문헌정보를 정리하여, 각 종에 따른 서식장 적성지수(Habitat Suitability Index, HSI) 모형을 작성하였다. HSI 모형을 구축하는 적성지수(Suitability Index, SI)로서 그들은 착생기질, 저온기(2월) 평균수온, 고온기(8월) 평균수온, 수심, 투명도, 파랑, 염분 및 COD를 채용하였다. HSI 모형은 1974년 미국의 연방야생생물국(USFWS)에서 개발된 서식장 평가수법(Habitat Evaluation Procedure, HEP)에 있어서 처음 사용된 것으로, HSI라고 하는 지수는 개념적으로는 다음 식과 같이 표현되며, 0에서 1까지의 수치를 취한다.

$$HSI = \frac{\text{조사지의 환경조건}}{\text{서식장으로서의 최적 환경조건}} \quad (1)$$

실제 HSI 산출에 있어서는 환경조건으로서 복수의 요인이 있다고 생각되기 때문에 개개의 요인마다 요인과 대상생물의 적성과의 관계를 모형화한 적성지수(SI) 모형으로부터 유도되는 값을 종합하여 SI를 구한다. HSI는 서식장으로서의 적성을 나타내는 지수이지만, HSI 모형은 대상생물의 HSI를 산출하는 수순을 나타낸 지수로서, 우선 대상생물에 대한 생태정보가 표현된다. 다음에 이러한 정보를 바탕으로 작성된 SI 모형과 또

한 HSI를 산출하기 위한 계산방법이 각각 표현된다. HSI 모형은 정량적인 예측평가가 가능하다는 것, 단순하고 알기 쉽다는 것 등의 이점을 가지기 때문에 최근 일본에서는 환경영향평가의 도구로서 주목받고 있다.

한편, Gatts et al.(2014)는 인공어초의 체적 및 배열 변화가 어류상(ichthyofauna)에 미치는 영향을 고찰하기 위해 현장조사를 실시한 결과, 어초 크기가 1m²에서 3m²로 증가할 때, 어류군집에 다소의 변화가 나타난 반면, 단위체적당 종의 풍부도와 다양성은 오히려 감소하는 결과를 얻었다. 반면, Yu et al.(2015)는 중국 Daya Bay에 어초가 설치된 후의 생태학적 효과에 관한 현장조사를 실시하였다. 이 현장조사에서는 클로로필-a(Chl-a) 농도, 영양염, 부착생물, 유영생물, MODIS에 의한 위성자료 등의 자료가 수집되었다. 그 결과, 어초 설치후 Chl-a농도, 유영생물량, 종다양성 등이 어초 설치 전에 비하여 각각 증가한 것으로 나타나, 어초 설치에 의한 생태적 효과가 확인되었다.

이상의 결과로부터, 어초는 설치후 단위노력당의 어획량이 증가하는 등 대체로 긍정적인 결과를 보인 것으로 나타났다. 그러나 어초의 설치효과를 정량적이고 합리적으로 판단하기 위한 수단이나 방법이 아직 우리나라에서는 확립되어 있지 못한 것이 현실이라고 생각된다. 이러한 관점에서, FIDEC이 제안한 어초효과 진단시스템이나, Yamaguchi et al.(2006)의 어초성 지수(Reef Affinity Index), Miura et al.(2010)의 서식장 적성 지수(HSI) 등은 앞으로 우리나라 어초사업의 평가에 있어서도 참고할 만한 유용한 도구의 하나로 생각된다. 또한, 어초의 설치나 어초사업은 비교적 많은 예산을 필요로 하는 만큼 사전계획과 설계는 물론 철저한 사후관리가 사업의 성공여부를 결정짓는 중요한 요인이라는 사실을 인식할 필요가 있다고 생각된다.

IV. 결론

본 연구에서는 1972년부터 2016년까지 우리나라를 비롯한 동아시아 각국에 있어서의 해중림초를 포함한 인공어초 또는 이들 사업과 관련하여 개발 연구된 자료를 광범위하게 수집하고 이를 체계적으로 분석하였다. 얻어진 주요결과는 다음과 같다:

1) 동아시아에서의 인공어초사업의 목적은 크게 세 가지로 볼 수 있는데 첫째, 어업자원의 증식과 보호, 둘째, 어업인의 소득증대, 셋째, 생태관광산업을 위한 인프라 구축이 그것이다. 그러나 말레이시아와 타이랜드를 제외한 대부분의 나라에서는 인공어초 개발기술이나 사업이 아직 초기단계에 머물고 있는 것으로 생각된다.

2) 어초의 어류 위집효과는 그 배후에 형성되는 후류와(wake) 또는 후류장(wake length)에 의해 결정되는데, 이들 값은 어초의 공극률과 $K-C$ 수가 클수록 크다.

3) 어초의 크기나 어초간의 배치간격은 어종 즉 저서성 어류인가 회유성 어류인가에 따라 다르나, 어초의 배치는 가능한 한 주류 방향에 횡단하여 설치하는 것이 바람직하다. 그러나 어초간의 간격은 현장에서의 생물학적인 경험에 기초하여 판단하되, 대개 2~20m 이내로 하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 또한 어초군과 어초군간의 간격은 단체 어초 길이의 약 2~4배 정도로 하는 것이 후류와 영역의 확대나 어초간의 상호간섭효과를 생각할 경우 어초의 최적배치조건인 것으로 판단된다.

4) 어초의 안정성은 어초에 미치는 유체력 중 주로 항력계수를 어떻게 평가하는가에 달려 있으며, 현재 어초의 유체력 산정에 사용되고 있는 이른바 Morison식은 다소 개선의 여지는 있으나, 실용상 큰 문제는 없는 것으로 나타났다. 또한 동일한 유체력이 어초에 작용하는 경우, 수심이 비교적 얇은 천해역에 설치되는 어초가 보다 깊

은 수심에 설치되는 어초에 비해 상대적으로 유체력에 취약한 것으로 나타났다.

5) 어초 주변에서의 국소세굴은 어초 전면의 중앙부에서 생기는 하강류에 의해 발생하며, 또한 이때의 어초 침하량은 $K-C$ 수보다는 *Reynolds No.* 또는 *Shields No.*에 의존하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 어초의 세굴 방지를 위해서는 어초 전면 중앙부에 생기는 하강류를 제어할 수 있는 어초개발이 하나의 대책으로 생각된다.

6) 어초는 설치후 단위노력당의 어획량이 증가하는 등 대체로 긍정적인 결과를 보인 것으로 나타났다. 그러나 어초의 설치효과를 정량적이고 합리적으로 평가, 판단하기 위한 수단이나 방법은 아직 제대로 확립되어 있지 못한 것이 현실이라고 생각된다. 따라서 어초효과 진단시스템(FIDEC, <http://www.fidec.or.jp>), 어초성 지수(Reef Affinity Index, Yamaguchi et al.(2006)), 서식장 적성지수(HSI, Miura et al.(2010)) 등이 앞으로 우리나라 어초사업의 평가에 있어서도 참고할 만한 유용한 도구의 하나로 사료된다. 또한 어초의 설치나 어초사업은 비교적 많은 예산을 필요로 하는 만큼 사전계획과 설계는 물론 철저한 사후관리가 사업의 성공여부를 결정짓는 중요한 요인이라는 사실을 인식할 필요가 있다고 생각된다.

References

- Ahn, Young-Wha · Rho, Hong-Kil · Kim, Suk- Jong · Jeong, Dong-Gu · Kim, Mun-Kwan(1999). Studies on the improvement of the fish gathering effects of artificial reefs in the coastal area of Cheju Island-The effectiveness of fishery resources enhancement of artificial fish reefs, *Journal of Fisheries and marine Sciences Education*, 11(1), 59 ~ 68.
- Asano, H.(1991). Wave characteristics propagating to fluctuating algal communities, *Proceedings of Japanese Coastal Engineering*, 38, 26~30.
- Baek, Seung-Hwa · Shin, Bum-Shick · Kim, Kyu-Han(2014). Hydraulic model test for corrugated

- artificial reef stability, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 15(8), 5327~5332.
- Baine, Mark(2001). Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance, *Ocean & Coastal Management*, 44, 241~259.
- Chai, Zhaoyang · Huo, Yuanzi · He, Qing · Huang, Xiwen · Jiang, Xingpei · He, Peimin (2014). Studies on breeding of *Sargassum vachellianum* on artificial reefs in Gouqi Island, China, *Aquaculture*, 189~193.
- Chen, Caiyi·Ji, Tao·Zhuang·Yizhou·Lin, Xujian(2015). Workability, mechanical properties and affinity of artificial reef concrete, *Construction and Building Materials*, 98, 227~236.
- Düzbastılar, F.Ozan · Şentürk, Utku(2009). Determining the weights of two types of artificial reefs required to resist wave action in different water depths and bottom slopes, *Ocean Engineering*, 36, 900~913.
- Fisheries Infrastructure Development Center (FIDEC). (<http://www.fidec.or.jp>).
- Fisheries Research Agency(1981). Manual of creation plan of artificial reef's fishing ground, 1~184.
- Fisheries Research Agency(FRA)(2010). Proceedings of The FRA-SEAFDEC Joint International Workshop on Artificial Reefs for Fisheries Resource Recovery(<http://www.fra.affrc.go.jp>).
- Gatts, P.V. · Franco, M.A.L. · Santos, L.N. · Rocha, D.F. · Zalmon, I.R.(2014). Influence of the artificial reef size configuration on transient ichthyofauna-Southeastern Brazil, *Ocean & Coastal Management*, 98, 111~119.
- Hong, Chong-Hyun·Kim, Moon-Hyun·Woo, Kwang-Sung (2003). An experimental study on recycled aggregate concrete for artificial fishing reefs, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 17(4), 16~22.
- Iwakagi, M. · Sawaragi, K.(1979). *Coastal Engineering*, Kyoritsu Publisher, 1~307.
- Japan Artificial Fish Reef Association(JAFRA). (<http://www.nissyokyou.com>).
- Japan Artificial Reef Research Institute(1976). Theory and practice of artificial reefs(I), A collection of Fisheries Aquaculture, 26, 33~39.
- Jeong, Chil-Hoon · Kim, Heon-Tae(2007). Numerical analysis of the flow field around artificial reefs, *Journal of the Korean Fisheries Society*, 40(1), 31~38.
- Joo, Jae-Wook(2000). Implementation status and its development direction of artificial reefs in Korea, *KFPA*, 51, 23~29.
- Kageyama, H. et al.(1980). Visualization of the flow around porous cubic type of artificial reef model, *Journal of Japanese Society of Fisheries Engineering*, 17(1), 1~10.
- Kageyama, H. et al.(1982). Visualization of the flow around a cube with a permeable wall, *Journal of Japanese Society of Fisheries Engineering*, 18(2), 1~9.
- Kheawwongjian, Apitha·Kim, Dong-Sun(2012). Present status and prospects of artificial reefs in Thailand, *Ocean & Coastal Management*, 57, 21~33.
- Kim, Chang-Gil(2000). Current status and its research direction of artificial reef development in Korea, *KFPA*, 51, KFPA, 18~22.
- Kim, Chang-Gil · Oh, Tae-Gun · Suh, Sung-Ho · Kim, Dae-Kweon · Kim, Byung-Gyun · Choi, Yong-Suk(2009). Review of stability calculation of an artificial reef in the breaking wave zone of coastal waters, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 33(6), 965~974.
- Kim, Dae-Kweon · Kim, Wan-Ki · Son, Yong-Soo · Yoon, Jang-Tack · Gong, Yong-Gun · Kim, Young-Dae · Lee, Ji-Hyun(2008). Settlement characteristics of three type of artificial reefs on sandy bottom in the eastern coast of Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 32(2), 359~364.
- Kim, Dae-Kweon · Suh, Sung-Ho · Cho, Jae-Kwon · Kim, Chang-Gil · Choi, Im-Ho · Kim, Byoung-Sub(2010). Settlement characteristics of square reefs installed on soft seafloor ground, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 34(1), 163~167.
- Kim, Dae-Young(2006). Current status and implications of artificial fish reef in Japan, *Monthly Ocean and Fisheries*, Korea maritime Institute, 267, 6~20.
- Kim, Dae-Yeong · Lee, Jung-Sam(2007). Current status and implications of Korean artificial reef project, *Monthly Ocean and Fisheries*, Korea Maritime Institute, 284, 23~45.

- Kim, Dongha · Woo, Jinho · Yoon, Han-Sam · Na, Won-Bae(2014). Wake lengths and structural responses of Korean general artificial reefs, *Ocean Engineering*, 92, 83~91.
- Kim, Heon-Tae(2001). A study of artificial reef subsidence in unsteady flow field, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 15(2), 33~38.
- Kim, Ho-Sang · Kim, Chang-Gil · Seo, Young-Kyo · Kim, Gil-Young(2005). Subsidence characteristics of artificial reefs using sediment grain size and shear strength, *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, 41(1), 46~53.
- Kim, Jae-Hwan · Kang, Seok-Pyo · Kim, Chang-Gil · Kwon, Yeong-Jin · Kim, Moo-Han(2002). The present condition of domestic artificial reefs, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 14(2), 61~69.
- Korea Fisheries Resources Agency(FIRA)(2015a). Proceedings of the 2nd Fisheries Resources Forum, Pusan, 2015. 11. 20. 1~79.
- Korea Fisheries Resources Agency(FIRA)(2015b). Hydraulic stability evaluation of artificial reefs for afforestation creation and model development for its optimal deployment, 1~407.
- Korea Fisheries Resources Agency(FIRA)(2015). Installation statistics of artificial reefs, 1-583.
- Korea Fisheries Resources Agency(FIRA). (<http://www.fira.or.kr>).
- Kuroki, S. et al.(1964). Physical study on artificial fish reef structures, *Hokkaido University*, 1~19.
- Kwon, Yeong-Jin(2002). The present situation and approach methods for improvement of artificial reef, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 14(6), 72~79.
- Lan, Chun-Hsiung · Hsui, Che-Yu(2006). The deployment of artificial reef ecosystem: Modelling, simulation and application, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14, 663~675.
- Lan, Chun-Hsiung · Chen, Chung-Chiang · Hsui, Che-Yu (2004). An approach to designing spatial configuration of artificial reef ecosystem, *Ecological Engineering*, 22, 217~226.
- Liu, Yan · Zhao, Yun-peng · Dong, Guo-hai · Guan, Chang-tao · Cui, Yong · Xu, Tiao-Jian (2013). A study of the flow field characteristics around star-shaped artificial reefs, *Journal of Fluids and Structures*, 39, 27~40.
- Matsumi, Y.(1988). A fundamental study on hydraulic functions of artificial reefs, PhD thesis, Osaka University, 1~186.
- Miao, Zhen-qing · Xie, Yong-he(2007). Effects of water-depth on hydrodynamic force of artificial reef, *Journal of Hydrodynamics*, 19(3), 372~377.
- Miura, M. et al.(2010). Habitat suitability index model for four different algae, *Report of Japanese Marine Organism Environment Institute*, 13, 1~50.
- Nakamura, M.(1991). Fisheries Civil Engineering(Ed.), INA, 1~561.
- Nakamura, M. · Uekita, M.(1975). Study on the bottom hitting shock impact of a falling body in the sea, *Proceedings of the 22nd Coastal Engineering of the Japanese Society of Civil Engineers*, 483~487.
- National Coastal Fishery Promotion and Development Association(1986). Infrastructure design manual for coastal fishing ground maintenance and development projects, Tokyo, Japan, 1~184.
- Osaka, H. · Yamata, E.(1979). Study on flow conditions around artificial fish reefs with a grid-type block structure(I), *Report of Yamaguchi University*, 29(2), 105~122.
- Park, Jong-Soo · Seo, Man-Seok · Kim, Ji-Hyun (2000a). Effect of artificial fish reefs in the coastal area of Jeonbug Province, *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 12(1), 11~21.
- Park, Jong-Soo · Seo, Man-Seok · Kim, Ji-Hyun (2000b). A study on the research condition and efficiency of artificial reefs of Rokdo sea region of Chungnam Province, *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 13(1), 87~98.
- Ponti, Massimo · Fava, Federica · Perlini, Rossella Angela · Giovanardi, Otello · Abbiati, Marco(2015). Benthic assemblages on artificial reefs in the northwestern Adriatic Sea: Does structure type and age matter *Marine Environmental Research*, 104, 10~19.
- Ryu, Cheong-Ro · Kim, Hyeon-Ju · Lee, Han-Su · Shin, Dong-il(1997). Structural and layout design optimization of ecosystem control structures(2), *Journal of the Korean Fisheries Society*, 30(1), 139~147.
- Ryu, Jeong-Gon · Lee, Sung-Woo · Hwang, Jin-Wok

- (1998). A study on the economic effects of artificial reefs-In case of Suwoo-do artificial reefs, Fisheries Management, 24(2), 177~197.
- Saito, M. · Osuge, J.(1976). A fundamental report of artificial reef installation in a beach area, Ocean Institute of Tokai University.
- Sakuda, H. et al.(1982). A fundamental study on hydrodynamic characteristics of artificial fish reef model, Journal of Japanese Society of Fisheries Engineering, 18(1), 7~19.
- Sato, O.(1967). A few issues on artificial fish reefs, Fisheries Multiplication, 7, 43~62.
- Sato, Shinji · Isobe, Masahiko(2015). International compendium of coastal engineering, World Scientific, 375~396.
- Sawaragi, K. · Matsumi, Y.(1983). Mechanism of topographical variations caused by a horizontal vortex behind artificial reefs, Proceedings of the 30th Coastal Engineering of the Japanese Society of Civil Engineers, 288~291.
- Sawaragi, K. · Nochino, M.(1979). Numerical simulation of flow variations behind the artificial reefs, Proceedings of the 26th Coastal Engineering of the Japanese Society of Civil Engineers, 673-676.
- Seaman, W Jr.(2000). Artificial reef evaluation with application to natural marine habitats, CRC Press, 1~246.
- Shin, Bum-Shick · Chung, Hyun-Joon · Kim, Kyu-Han (2014). Experimental study on new artificial reef for hydraulic stability, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 15(1), 555 ~ 560.
- Sohn, Byung-Kyu · Lee, Byung-Ho · Yoon, Han-Sam(2011). Hydraulic characteristics of train carriage artificial reef in wave and current field conditions, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 35(1), 108~117.
- The Japanese Institute of Fisheries Infrastructure and Communities(JIFIC). (<http://www.jific.or.jp>).
- Vicente, M. · Falcão, M. · Santos, M.N. · Caetano, M. · Serpa, D. · Vale, C. · Monteiro, C.(2008). Environmental assessment of two artificial reef systems off southern Portuga (Faro and Olhão): A question of location, Continental Shelf Research, 28, 839~847.
- Woo, Jinho · Kim, Dongha · Yoon, Han-Sam · Na, Won-Bae(2014). Characterizing Korean general artificial reefs by drag coefficients, Ocean Engineering, 82, 105~114.
- Yamaguchi, et al.(2006). Quantification of the reef affinity based on the results of fish catch experiments, Fisheries Engineering, 43(2), 151~159.
- Yoon, Han-Sam · Kim, Dongha · Na, Won-Bae (2016). Estimation of effective usable and burial volumes of artificial reefs and the prediction of cost-effective management, Ocean & Coastal Management, 120, 135~147.
- Yoon, Han-Sam · Kim, Ho-Sang · Kim, Jeong- Ryeol (2010). Analysis study on artificial reef facility status in the Korean coastal waters, Proceedings of the Korean Environmental Science Society Conference, 19. 310~313.
- Yu, Jing · Chen, Pimao · Tang, Danling · Qin, Chuanxin(2015). Ecological effects of artificial reefs in Daya Bay of China observed from satellite and in situ measurements, Advances in Space Research, 55, 2315~2324.
-
- Received : 19 January, 2016
 - Revised : 07 April, 2016
 - Accepted : 12 April, 2016