

## 상자형 어초의 흐름 및 구조응답 특성 Flow and Structural Response Characteristics of a Box-type Artificial Reef

김동하\* · 우진호\* · 나원배\* · 윤한삼\*\*  
Dongha Kim\*, Jinho Woo\*, Won-Bae Na\* and Han-Sam Yoon\*\*

**요지** : 콘크리트와 강재로 제작된 상자형 어초의 흐름응답과 구조응답 수치해석을 수행하였다. 흐름해석으로부터 대상 어초의 후류역과 항력계수를 평가하였으며 압력장을 외력으로 재하하여 구조해석을 수행하고 대상어초의 응력과 변형을 평가하였다. 후류역 평가를 위하여 후류체적 개념을 도입하였고 이로부터 유향과 유속에 따른 후류역의 변동을 정량적으로 제시하였다. 해석결과로부터 흐름응답은 유향에 지배적인 영향을 받으나 유속과는 무관하며 구조응답은 유향과 유속에 영향을 받지만 그 크기가 매우 작고, 단일어초의 최적 설치 조건(유향 30°)에서 대상어초의 후류체적은 공용적의 3.52배임을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 상자형 어초, 후류역, 항력계수, 구조응답

**Abstract** : We carried out flow and structural response analysis of a box-type artificial reef (AR), which is made of concrete and structural steel. From the flow analysis, the wake region and drag coefficient were evaluated and accordingly, the structural analysis was performed to evaluate the stress and deformation of the target reef by considering the pressure field obtained from the flow analysis. The concept of wake volume was presented to quantitatively estimate the wake region and its variation according to flow direction and velocity. From the results, it is shown that the flow responses are only sensitive to the flow direction; the structural responses are sensitive to both of the flow velocity and direction although the magnitudes are negligible; and the wake volume became 3.52 times the AR volume with an optimum installation condition (30°, flow direction) of the target unit.

**Keywords** : box-type artificial reef, wake region, drag coefficient, structural response

### 1. 서 론

일반적으로 인공어초(artificial reefs)에 관한 연구는 2가지로 대별된다. 첫 번째는 인공어초의 안정성과 기능성에 중점을 둔 연구로서 어초의 설계, 제작, 설치, 관리와 연관된다. 두 번째는 인공어초의 효율성에 중점을 둔 연구로서 어초의 집어 및 용승 효과, 어초 주변 해양생물체의 분포, 행동, 습성을 다룬다. 또한 지역과 국가별로 인공어초 연구주제가 다소 상이하다. 미국은 육상이나 해상에서 수집되는 다양한 폐기물을 인공어초로 활용하여 어초의 환경위해성과 생물학적 효율성에 중점을 두고 있다. 반면, 한국, 일본, 중국의 경우는 중앙정부와 지방자치단체의 주관으로 어초의 안정성과 기능성, 설계, 제작, 시설, 관리에 역점을 두고 있다. 이와 같은 현상은 인공어초의 활용으로 설명될 수 있다. 즉, 미국은 인공어초를 레저, 스포츠 피싱, 관광 등을 위해 활용하는 반면 한국을 비롯한 아시아 국가들은 인공어초를 바다목장 조성과 같은 수산자원 증대에 활용하고 있다.

국내에서 수행된 인공어초에 관한 선행연구를 살펴보면, 인공어초 설계와 관련하여 신행어초의 개발(Park et al., 2007), 파랑과 흐름장에서 특정 인공어초의 수리학적 특성 및 안정성 평가가 수행되었다(Sohn et al., 2011; Sohn et al., 2010; Kim et al., 2009a; Suh et al., 2007; Yang and Kim, 2000). 인공어초의 설치와 관련된 연구로는 특정지역에서 인공어초의 세굴 특성(Kim et al., 2010; Suh et al., 2010; Kim et al., 2009b), 침하특성 평가 등이 있다(Kim et al., 2005; Kim, 2001; Yoon and Kim, 2001; Ryu et al., 1997). 인공어초 관리와 관련하여 특정어초의 수량산정 및 유효공용적 평가(Kim et al., 2009c; Kim et al., 2009d)에 관한 연구가 수행되었다. 또한 인공어초의 효율성에 관해서는 용승효과(Jeon et al., 2007), 인공어초 주변의 어군량 추정(Hwang et al., 2004), 수산자원 조성효과(Park et al., 2003), 해저지형 및 인공어초의 분포(Kim and Shin, 2001), 어군의 행동특성(Hong and Okamoto, 1998)에 관한 연구가 진행되었다.

\*부경대학교 해양공학과 (Corresponding author : Won-Bae Na, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Yongso-ro 45, Busan, 608-737, Korea, Tel: +82-51-629-6588, Fax: +82-51-629-6590, wna@pknu.ac.kr)

\*\*부경대학교 해양산업개발연구소 (Research Center for Ocean Industry and Development, Pukyong National University)

이밖에 국내외에서 수행된 차별된 인공어초 연구사례를 살펴보면, Baine(2001)과 Jensen(2002)은 유럽에서 수행된 연구 결과를 분석하여 인공어초 설계, 적용, 관리 등에 관련된 연구동향을 검토하였다. 특히 Baine은 출판된 249개의 논문 초록을 분석하여 성공적인 인공어초 프로젝트를 위해서 선행되어야 할 연구 분야로 환경영향평가, 기대효과 산출, 추가적인 설계와 설치법 그리고 자연과학을 근간으로 한 기초 연구를 제시하였다. 그밖에도 해양에너지를 생산하는 해상풍차의 기초를 인공어초로 활용하고자 하는 연구(Langhamer et al., 2009), 철근콘크리트 어초의 화학적 열화(degradation)를 규명한 연구(Kim, et al., 2008), 2005년 발생한 허리케인이 미국 루이지애나 인공어초 프로그램에 미친 영향평가(Kaiser and Kasprzak, 2008) 등이 있다. 최근에 주목할 만한 연구는 인공어초 설계와 관련하여 전산유체역학을 기초로 한 특정어초의 흐름해석을 들 수 있다(Liu and Su, 2013; Liu et al., 2013). 이들 연구는 유한체적법(finite volume technique)을 활용한 범용프로그램인 ANSYS-Fluent를 사용하여 특정어초의 수리학적 특성(속도장)을 규명하였다.

인공어초에 흐름이 작용할 때 어초 주위에서 여러 가지 수리학적 변화가 발생한다. 그 중 어초의 뒤편에 유속이 정체되어 유기물과 수산생물의 유생이 모이게 됨으로써 해양생물의 산란장과 먹이장을 제공하는 영역을 후류역(wake region)이라고 한다. 연구결과에 의하면 해양생물의 중에 따라 인공어초를 이용하는 양상이 다소 상이하며 일반적으로 후류역에서 집어효과가 탁월한 것으로 알려져 있다(Pickering and Whitmarsh, 1997). 즉, 인공어초 후면에서 생성되는 후류역에서 영양염류나 1차 생산자(플랑크톤) 등이 체류하게 되고 이를 먹이로 하는 어류들이 모인다. 따라서 수치적으로 또는 실험적으로 후류역을 평가하는 연구는 매우 중요하다. 문헌 조사에 의하면 후류역을 정의한 연구(Sawaragi, 1995)는 있으나 구체적으로 어초의 후류역을 평가한 연구는 찾아 볼 수 없다. 모형실험으로 후류역을 규명하는 것이 어렵기 때문이다. 하지만 최근 개발된 흐름해석(flow analysis) 기법과 관련 소프트웨어의 개발로 복잡한 어초의 후류역 산정이 용이하게 되었다. 앞서 소개한 Liu and Su(2013)와 Liu et al.(2013)의 연구결과가 그러한 경우이나 어초 주변의 속도장으로부터 후류역을 정량적으로 제시하지는 못하였다.

후류역과 아울러 어초의 중요한 수리학적 특성으로 항력계수(drag coefficient)를 들 수 있다. 이는 어초의 항력을 효과적으로 대표하는 계수로서 어초의 전도(overtuning) 및 활동(sliding)을 평가할 때 사용된다. 기존 인공어초의 항력계수 산정은 모형실험에 의존되어 왔으며 이를 정량적으로 평가하는 연구는 매우 제한적이다. 대표적인 연구결과로 Ryu and Kim(1994)은 상자형 어초의 항력계수를 모형실험으로 산정하였지만 수심에 대한 조건만 고려하였고 유속과 유향에 관한 항력계수의 변동은 고려하지 못하였다.

과거 소형 콘크리트구조 어초에서 최근 대형 강구조 어초로

개발되는 추세에 따라 인공어초의 강재 판과 플레임 연결부의 응력거동을 규명할 필요성이 제기된다. 즉, 인공어초의 수리학적 특성뿐만 아니라 구조적 특성을 정량화 할 필요가 있다. 이때 설계유속으로부터 압력장을 획득하고 이를 구조해석에서 외력으로 간주하여 구조거동을 획득하는 연동해석이 필요하다.

따라서 본 논문의 목적은 상자형 어초의 수리학적 특성(후류역, 항력계수)과 구조적 특성(변위, 응력)을 정량적으로 평가하는 일련의 수치계산 과정을 제시하고 이를 통해 유체 흐름의 크기(유속)와 방향(유향)이 후류역, 항력계수, 구조응답 변동에 끼치는 영향을 분석함으로써 단일어초의 최적 설치 조건을 제안하는데 있다. 이를 위해 (1) 콘크리트와 강재로 제작된 상자형 어초를 요소기반 유한체적법(element-based finite volume method) 패키지인 ANSYS-CFX를 이용하여 모델링하고, (2) 흐름해석을 수행하여 후류체적과 항력계수를 산정하고, (3) 흐름해석으로부터 획득한 압력장을 상자형 어초에 외력으로 재하하여 구조해석을 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 모델 선정

현재 우리나라에서 사용되는 표준 인공어초(일반어초)는 총 72종이다. 이들 중 상자형(box type)이 가장 널리 사용되는 어초 형태이다. 본 논문에서는 상자형 어초들 중 콘크리트와 강재를 사용한 상자형 어초를 대상 구조물로 선정하였다. 상자형 어초는 Fig. 1과 같으며 외부 벽은 콘크리트로 내부에는 강재 박스를 설치하여 흐름에 의한 난류(turbulent)가 어초의 후면은 물론 내부에도 생성될 수 있도록 설계되었다. 크기는 폭 3.0 m, 높이 3.0 m, 길이 3.0 m이며 탄성체 모델링에 사용된 콘크리트와 강재의 물성치는 Table 1과 같다. 일반적으로

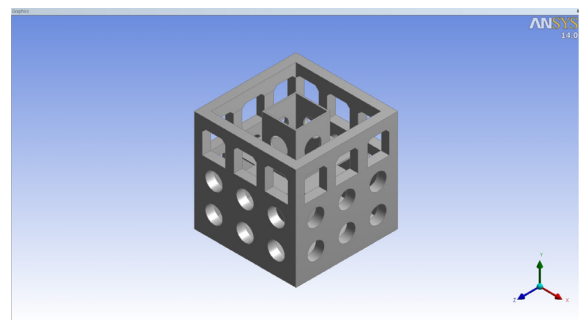


Fig. 1. Box-type artificial reef.

Table 1. Material property of box-type artificial reef

Property	Concrete	Steel
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	2300	7850
Tensile yield strength ( $\text{Pa}$ )	1.5E+06	2.5E+08
Tensile ultimate strength ( $\text{Pa}$ )	5.0E+06	4.6E+08
Compressive yield strength ( $\text{Pa}$ )	2.1E+07	2.5E+08
Compressive ultimate strength ( $\text{Pa}$ )	4.1E+07	4.6E+08

어류를 대상으로 인공어초가 설치되는 해역은 수심 20~30 m이며 이때 우리나라 해역의 인공어초 설계 유속은 2 m/s이다.

**2.2 흐름해석 기법**

어초의 흐름 해석을 위하여 전산 유체 해석을 수행하였다. 사용된 소프트웨어는 ANSYS CFX이다.(ANSYS-Inc., 2009) CFX는 유한요소 기법이 복잡한 형상을 처리할 수 있는 장점을 가지고 있는데 주목하여, 유한요소 및 유한체적 기법의 장점을 갖는 하이브리드 방식인 요소기반 유한체적법을 제공한다. 이 방법은 복잡한 형상처리에 유리하고, 정밀도가 높으며, 격자 생성이 용이하다는 장점이 있다.

어초 주변의 유동공간은 폭 20 m, 높이 20 m, 길이 20 m이며 어초는 하부면에 위치하도록 모델링하였다. Fig. 2와 같이 흐름이 시작되는 평면을 유입(inlet), 흐름이 빠져나가는 평면을 유출(outlet), 바닥면을 벽(wall), 측면은 경계조건으로 인한 영향을 받지 않게끔 대칭(symmetry)으로 설정하였다. 내부 유체는 비압축성, 점성, 뉴턴 유체인 25°C의 물(water)로 가정하였으며, 난류모델(turbulence model)은 k-ε모델을 사용하였다. 본 논문에서는 설계유속 2 m/s를 기준(해양수산부훈령 제86호 ‘인공어초시설사업 집행 및 관리규정’)으로 0.1, 0.5, 1, 2, 4, 8 m/s의 유속과 유향(0, 15, 30, 45, 60, 75, 90°)을 고려하여 후류체적과 항력계수의 변동을 조사하였다.

또한 흐름 해석 특성상 유동공간을 유한개의 체적으로 나누어 해석을 진행하는데, 본 연구에서는 유한체적의 형상을 한 면의 모양이 삼각형인 사면체와 사각형인 육면체로 나누어 해석하였다. 두 가지 형태 중 어떤 형태가 실제 유동흐름을 잘 재현하는지 확인하는 과정이 필요하기 때문이다. Ryu and Kim(1994)은 사각 어초를 대상으로 항력계수를 구하였으며, 그 값은 약 1.5(쇄파대 영역에서는 2.0)이다. 따라서 같은 모델을 대상으로 두 가지 유한 체적 형태에 따라 해석을 수행하였다. 그 결과, 사면체가 약 1.0, 육면체가 약 1.51의 값을 나타내었다. 따라서 육면체 형상이 실제 유동을 잘 나타낸다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 유동공간의 격자 형태를 육면체로, 유한체적의 한 면의 최대 크기를 0.2 m로 제한하였다.

**2.3 후류역(Wake region)**

후류역은 전술한 바와 같이 인공어초에 있어서 중요한 수리학적 현상이다. 그 정의는 어초의 배후 영역에서 수평방향의 유속성분이 주류방향의 역방향이 되는 영역이다(Sawaragi,

1995). 특정단면을 후류면(wake plane)으로 정의하고 어초의 후면부터 후류역까지의 길이를 후류길이(wake length)로 나타내어 후류역을 정량화 하는 것이 일반적이다. 따라서 인공어초의 후류영역은 어초표면을 따라 흐르는 박리(separation)로부터 시작하여, 수평방향의 유속성분이 “0”이 되는 부분까지를 연결한 선분의 내부 영역이 된다(Fig. 3). 하지만 어초의 종류와 형상에 따라 후류역의 분포가 달라지고 후류면의 정의에 따라 후류길이가 달라짐으로 후류길이로 후류역을 정량화하는 것에 다소 어려움이 존재한다. 이때 후류영역을 정량화하기 위해서는 후류체적(wake volume)을 계산하는 것이 바람직하지만 이를 수행한 연구사례는 찾아 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 후류길이 대신 후류체적을 실현화하기 위해 (1) 육면체 형상을 갖는 제어체적(control volume)의 절점에서 유속을 측정하고, (2) 이들 절점의 평균값이 역방향 유속을 갖게 되면 해당하는 유한체적을 정량화하고, (3) 유동공간에서 역방향 유속을 갖는 유한체적의 합을 구하여 인공

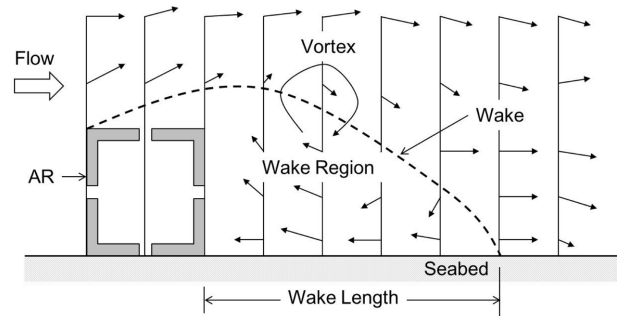


Fig. 3. Definition of wake region and wake length.

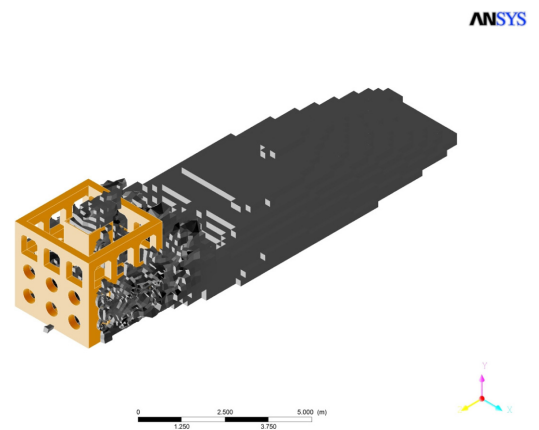


Fig. 4. Wake volume represented by summation of finite volumes, which have recirculating water flows.

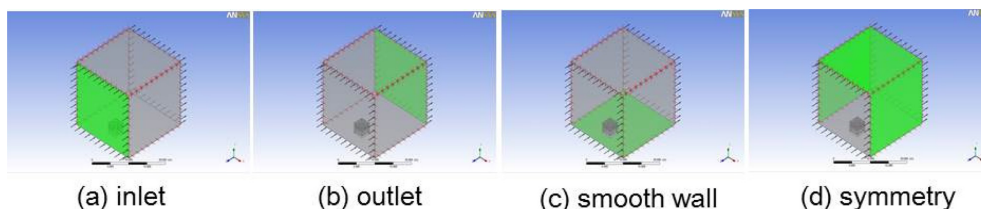


Fig. 2. Flow boundary conditions.

어초의 후류체적을 계산하였다. Fig. 4는 역방향 유속을 갖는 유한체적으로 후류역(회색)을 나타낸 것이다.

**2.4 항력계수(Drag coefficient)**

유체 내에 구조물이 있을 때에 고려되어야 하는 중요한 물리적 인자로 항력계수( $C_D$ )가 있다. 여러 종류의 항력계수가 있지만, 본 연구에서는 압력항력( $F_p$ )에 대한 항력계수를 고려하였다. ANSYS-CFX를 사용하여 어초가 받는 압력을 계산하였으며, 어초의 항력계수 계산식은 식(1)과 같다. 여기서,  $F_p$ 는 압력,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $v$ 는 유속,  $A'$ 는 투영면적이다.

$$C_D = \frac{F_p}{0.5\rho v^2 A'} \quad (1)$$

또한 본 연구에서는 어초에 작용하는 흐름의 유향, 유속이 항력계수 변동에 미치는 영향을 조사하였다. 먼저, 유향의 변화에 따른 차이를 살펴보기 위하여 유향을 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90°로 변화시켰다. 유향의 정의는 Fig. 5와 같다. 이때 유속은 2 m/s, 상부면은 대칭 경계조건을 고정하였다. 다음으로 유속을 0.1, 0.5, 1, 2, 4, 8 m/s로 변화시켰다. 이때 유향은 0°, 상부면은 대칭 경계조건으로 고정하였다.

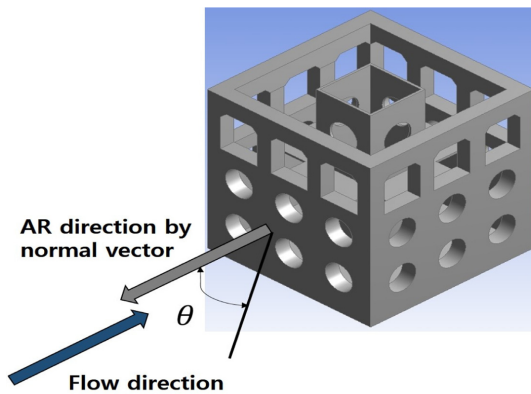


Fig. 5. Definition of flow direction.

**2.5 구조 해석(Structural analysis)**

유향, 유속에 따른 구조물의 거동 변화를 해석하였다. 먼저, 유향의 변화에 따른 차이를 살펴보기 위하여 유향을 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90°로 변화시켰으며, 유속 2 m/s, 상부면은 대칭 경계조건으로 고정하였다. 다음으로 유속을 2, 4, 8 m/s로 변화시켰으며, 유향 0°, 상부면은 대칭 경계조건으로 고정하였다. 외력 조건인 압력은 흐름해석의 결과로 도출된 값을 적용하였다. 구조해석 시 구조물의 바닥면은 고정지점으로 가정하였다.

**3. 결 과**

**3.1 후류역**

Fig. 6은 유향에 따른 후류체적의 변동을 나타낸 것이다. 이 때 Fig. 4와 같은 후류체적을 부드럽게 하여 검정색으로 후류체적을 나타내었다. 결과적으로 유향의 변동에 따라 후류체적이 달라지고 후류체적을 정량적으로 나타낸 Fig. 7에서 45°를 기준으로 후류체적이 대칭임을 알 수 있다. 이는 대상 어초가 45°를 기준으로 유향에 대칭이기 때문이다. 최대 후류체적은 유향이 30°(또는 60°)일 때 95 m<sup>3</sup>이다. 대상 어초의 공용적이 27 m<sup>3</sup>임을 고려하면 후류체적은 3.52배임을 알 수 있다. Fig. 8은 유속에 따른 후류체적의 변동을 나타낸 것으로 유속에 따른 변동은 거의 없음을 알 수 있다. 이와 같은

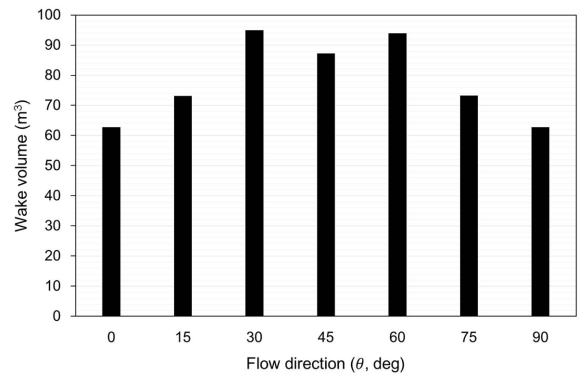


Fig. 7. Wake volumes according to flow directions.

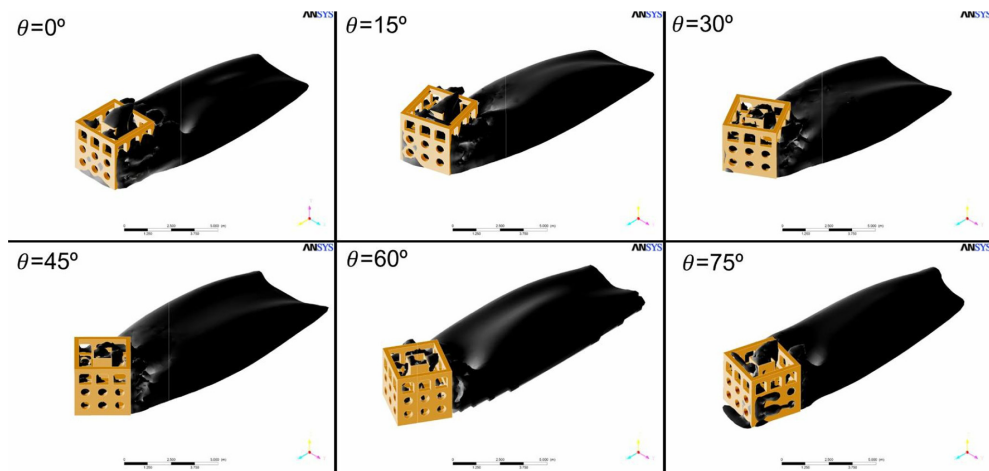


Fig. 6. Three dimensional views of wake volumes according to flow directions.

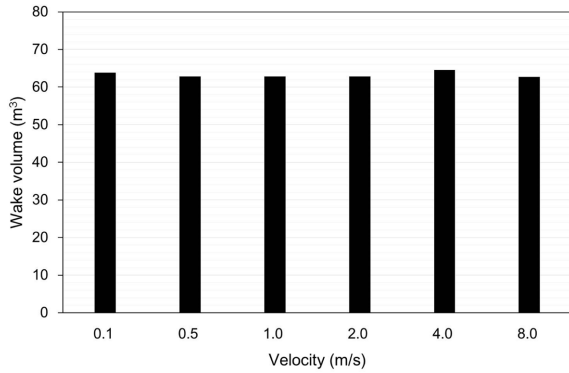


Fig. 8. Wake volumes according to inlet velocities.

Table 2. Reynold's numbers according to inlet velocities

Inlet velocities (m/s)	Reynold's numbers
0.1	2.3511E+06
0.5	1.1756E+07
1.0	2.3511E+07
2.0	4.7022E+07
4.0	9.4045E+07
8.0	1.8809E+08

현상은 유속 2 m/s에서 충분한 난류가 발생하였음을 의미한다. 따라서 후류역은 유향 변화에 민감하게 반응하며, 유속에 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다. 난류의 발생정도를 판단하기 위해 각각의 유속에 관해 레이놀즈수(Reynold's number)를 Table 2와 같이 제시하였다. 유속이 0.1 m/s 일 때 레이놀즈수가 2.3511E+06에 육박함으로써 이미 충분한 난류가 발생하였음을 확인할 수 있다.

### 3.2 항력계수

Fig. 9는 유향과 항력계수 관계를 나타낸 것이다. 결과적으로 유향이 0° (또는 90°)일 때에 가장 큰 항력계수(2.02)를 가진다. 45°를 기준으로 좌우대칭인 양상을 보이는데, 이는 해석 결과의 신뢰성을 입증한다. 유향이 45°가 되었을 때 그 다음으로 큰 항력계수(1.42)를 나타내며 유향에 따라 1.26에서 2.02까지 변동함을 알 수 있다. 유속과 항력계수 간의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 유속을 0.1, 0.5, 1, 2, 4, 8 m/s로 증가시켜도 항력계수는 2.02이다. 즉, 대상어초의 항력계수는 유향 변화에 민감하게 반응하며, 유속에 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다.

### 3.3 구조응답

유향의 변화에 따라 대상어초에 발생하는 최대 von-Mises 응력과 최대 변형을 Fig. 11에 나타내었다. 결과적으로 유향이 0°(또는 90°)일 때 응력이 가장 작으며 유향이 45°가 될 때 최대 응력을 가진다. 이때 최대 응력이 발생하는 위치는 내부 강판과 콘크리트의 연결부에서 나타났으며 약 2.0 MPa이다. 최대 변형의 경우 유향이 0° (또는 90°)일 때 변형이 가

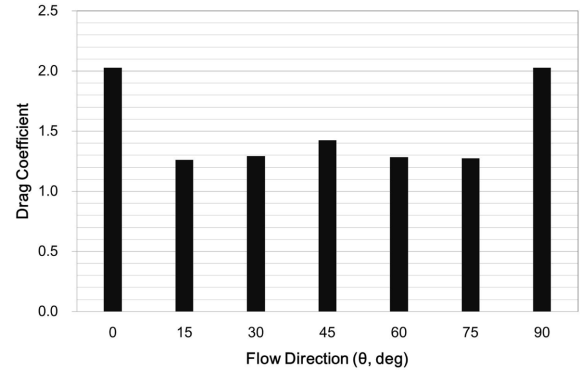


Fig. 9. Drag coefficients according to flow directions.

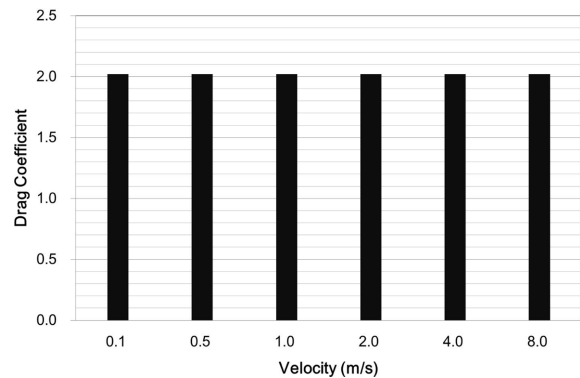


Fig. 10. Drag coefficients according to inlet velocities.

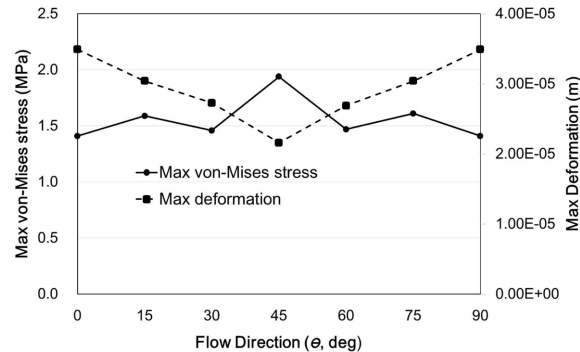


Fig. 11. von-Mises stress or deformation according to flow direction.

장 크게 나타났으며 45°가 될 때 가장 작게 나타났다. 이때 최대 변형이 발생하는 위치는 외부 콘크리트의 상단이며  $3.5 \times 10^{-5} \text{ m}$  (0.035 mm)로서 매우 작다. 여기서 주목할 것은 응력은 유향 45°일 때, 변형은 유향 0° (또는 90°)일 때 최대치가 발생한다는 것이다. 이와 같은 현상은 유향 45°에서는 투영면적이 작아지고 압력이 커지므로 응력이 크게 발생하고 유향 0°에서는 압력은 작으나 압력의 작용 면적이 증가하여 변위가 크게 발생한 것으로 판단된다. 또한 대상 어초가 45° 기준으로 대칭이므로 최대 von-Mises 응력과 변형이 45°를 기준으로 대칭임을 알 수 있다. 유속의 변화에 따라 대상어초에 발생하는 최대 von-Mises 응력과 최대 변형을 Fig. 12에 나타내었다. 유속이 증가함에 따라 응력과 변형 모두 증가한다. 유속이 4 m/s 이상일 때 응력과 변형의 기울기가 더

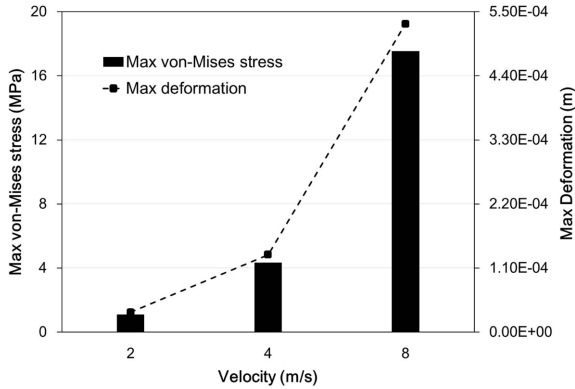


Fig. 12. von-Mises stress or deformation according to velocity.

커짐을 알 수 있다.

인공어초는 유체력에 의해 이동이나 전도가 될 수 있으므로 이동이나 전도에 의한 어초의 안정성을 설계에 고려하여야 한다. 일반적으로 이동에 대한 안정은 유체력보다 해저바닥과 어초의 마찰 저항이 클 때, 전도에 대한 안정은 인공어초에 작용하는 저항모멘트가 전도모멘트보다 클 때 확보된다. 본 논문에서 고려한 대상어초는 수심 20~30 m에 설치되는 어류용 어초이므로 파랑에 의한 유체력은 미비할 것으로 판단되며 설계유속(2 m/s)을 흐름 유속으로 가정하고 본 논문에서 제시한 최대 항력계수 2.02를 사용하여 이동과 전도를 판단할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 우리나라 일반어초 중의 하나인 상자형 어초의 흐름응답과 구조응답 해석을 수행하였다. 흐름응답 해석으로부터 대상 어초의 후류역과 항력계수를 평가하였으며 구조응답 해석으로부터 대상어초의 von-Mises응력과 변형을 평가하였다. 후류역 평가를 위하여 후류체적 개념을 도입하였고 이로부터 유향과 유속에 따른 후류역의 변동을 정량적으로 제시하였다. 이때 흐름의 방향(유향)과 크기(유속)를 달리하여 이들 인자가 응답에 미치는 영향을 분석하였다. 분석한 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 후류체적은 유속에 영향을 크게 받지 않으며 유향에 지배적인 영향을 받는다. 유향이 30°일 때 최대 후류체적이 나타나며 그 값은 약 95 m<sup>3</sup>로서 어초 공용적의 3.52배이다. 유향에 따른 후류체적의 변동은 최대 51%까지 발생한다. (2) 항력계수는 유속의 영향을 크게 받지 않으며 유향에 지배적인 영향을 받는다. 유향이 0°(또는 90°)일 때 최대 항력계수가 나타나며 그 값은 2.02이다. 유향에 따른 항력계수의 변동은 최대 60%까지 발생한다. (3) 구조해석 결과로서 최대 응력의 발생 위치는 내부 강판과 콘크리트의 바닥 연결부에서 나타났다. 유향이 0°(또는 90°)일 때 가장 작은 응력을 보이며 유향이 45°가 될 때 응력(2.0 MPa)이 가장 크다. 변형은 응력과

반대되는 양상을 보이거나 모든 경우에 그 값이 1 mm 이하로 매우 작다. 유속이 증가함에 따라 응력과 변형은 모두 증가하며 점차적으로 그 변동의 폭이 커짐을 알 수 있었다. (4) 대상어초의 후류체적을 최대화하고 항력계수와 구조응답(응력, 변위)을 상대적으로 작게 발생시키는 유향은 30°이다. 즉, 상자형 어초가 흐름의 방향과 30°의 각으로 설치될 경우 보다 나은 기능성(후류체적)과 안정성(항력계수, 구조응답)을 확보할 수 있다. 상자형 어초가 단일어초가 아닌 군집형으로 설치될 경우에는 어초사이의 간격, 배열 등을 고려해야 하므로 기능성과 안정성 확보의 양상이 보다 복잡하고 상이할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2013년 해양수산부(바다목장사업) 재원으로 한국수산자원관리공단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

#### References

- ANSYS-Inc. (2009). ANSYS CFX, Release 12.1.
- Baine, M. (2001). Artificial Reefs: A Review of their Design, Application, Management, and Performance, *Ocean & Coastal Management*, 44, 241-259.
- Hong, S.W. and Okamoto, M. (1998). The Behavioral Character of Fishes Near the Artificial Reefs Setted Up Submersible Artificial Sea - Floor, *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, 34(4), 378-385 (in Korean).
- Hwang, D.J., Park, J.S. and Lee, Y.W. (2004). Estimation of Fish School Abundance by Using an Echo Sounder in an Artificial Reef Area, *Journal of the Korean Fisheries Society*, 37(3), 249-254 (in Korean).
- Jensen, A. (2002). Artificial Reefs of Europe: Perspective and Future, *ICES Journal of Marine Science*, 59, S3-S13.
- Jeon, Y.H., Lee, G.S., Kang, Y.K. and Ryu, C.R. (2007). An Experimental Study for the Falling Test and Upwelling Effect of the Artificial Upwelling Structures in Flow Field, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 21(4), 21-27 (in Korean).
- Kaiser, M.J. and Kasprzak, R.A. (2008). The Impact of the 2005 Hurricane Season on the Liousuana Artificial Reef Program, *Marine Policy*, 32, 956-967.
- Kim, C.G., Oh, T.G., Suh, S.H., Kim, D.K., Kim, B.G. and Choi, Y.S. (2009a). 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 (in Korean).
- Kim, D.K., Lee, J.Y., Suh, S.H., Kim, C.G., Cho, J.K. and Cha, B.Y. (2009b). Scouring and Accumulation by Tidal Currents around Cubic Artificial Reefs installed at Geoggeom Waterway, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 33(8), 1275-1280 (in Korean).
- Kim, D.K., Suh, S.H., Cho, J.K., Kim, C.G., Choi, I.H. and Kim,

- B.S. (2010). Settlement Characteristics of Square Reefs Installed on Soft Seafloor Ground, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 34(1), 163-167 (in Korean).
- Kim, H.S., Kim, C.G., Na, W.B. and Kim, J.K. (2008). Chemical Degradation Characteristics of Reinforced Concrete Reefs in South Korea, *Ocean Engineering*, 35, 738-748.
- Kim, H.S., Kim, C.G., Seo, Y.K. and Kim, G.Y. (2005). Subsidence Characteristics of Artificial Reefs using Sediment Grain Size and Shear Strength, *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, 41(1), 2005, 46-53 (in Korean).
- Kim, H.S., Lee, J.W., Kim, J.R. and Yoon, H.S. (2009c). Estimation of Countermeasures and Efficient Use of Volume of Artificial Reefs Deployed in Fishing Grounds, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 12(3), 181-187 (in Korean).
- Kim, H.S., Lee, J.W., Won, S.H., Kim, J.R. and Yoon, H.S. (2009d). Estimation of Efficient Use of Volume and Facility Volume Distribution of Artificial Reefs deployed in the Busan Sea Region, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 12(4), 255-263 (in Korean).
- Kim, H.T. (2001). A Study of Artificial Reef Subsidence in Unsteady Flow Field, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 15(2), 33-38 (in Korean).
- Kim, S.C. and Shin, H.O. (2001). Research on the Geographic Characteristics of the Sea Bed and the Distribution of Artificial Reefs in Jaran Bay, *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, 37(3), 214-222 (in Korean).
- Langhamer, O., Wilhelmsson, D. and Engström, J. (2009). Artificial Reef Effect and Fouling Impacts on Offshore Wave Power Foundations and Buoys - a Pilot Study, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82, 426-432.
- Liu, T.L. and Su, D.T. (2013). Numerical Analysis of the Influence of Reef Arrangement of Artificial Reef Flow Fields, *Ocean Engineering* 74, 81-89.
- Liu, Y., Zhao, Y., Dong, G., Guan, C., Yui, Y. and Xu, T.J. (2013). A Study of the Flow Field Characteristics around Star-shaped Artificial Reefs, *Journal of Fluids and Structures*, 39, 27-40.
- Park, H.H., Shin, J.K., Kim, J.O., Park, S.Y., Kim, H.S., Lim, D.H., Park, Y.C., Cho, S.H., Hong, S.H., Lee, J.W. and Ahn, B.G. (2003). An Effect on Fisheries Resources Enhancement of Hollow Jumbo Structure and a Search for Artificial Reefs by Side Scan Sonar in the Western Sea of Korea, *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, 39(3), 230-238 (in Korean).
- Park, S.B., Hong, C.H., Kim, S.K. and Kim, K.H. (2007). Experimental Study on Development of Artificial Fishing Reefs Using Environmental-Friendly Sulfur Concrete, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 21(3), 58-64 (in Korean).
- Pickering, H. and Whitmarsh, D. (1997). Artificial Reefs and Fisheries Exploitation: a Review of the 'Attraction versus Production' Debate, the Influence of Design and Its Significance for Policy, *Fisheries Research*, 31, 39-59.
- Ryu, C.R. and Kim, H.J. (1994). A Study on the Characteristics of Wave Forces on Artificial Reefs, *Bulletin of the Korean Fisheries Society*, 27(5), 605-612 (in Korean).
- Ryu, C.R., Kim, H.J., Lee, H.S. and Shin, D.I. (1997). Structural and Layout Design Optimization of Ecosystem Control Structures (2), *Journal of the Korean Fisheries Society*, 30(1), 139-147 (in Korean).
- Sawaragi, T. (1995). *Coastal Engineering - Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions*, Elsevier.
- Sohn, B.K., Lee, J.W., Yi, B.H. Yoon, H.S. (2010). Hydraulic Characteristics of Two Types of Pyramid Shaped Artificial Reefs, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 34(5), 725-734 (in Korean).
- Sohn, B.K., Yi, B.H. and Yoon, H.S. (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 (in Korean).
- Suh, S.H., Lee, Y.K., Kim, C.G., Kim, D.K. and Park, S.W. (2010). A Study on the Scour Characteristics around Artificial Reefs, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 34(4), 567-574 (in Korean).
- Suh, S.H., Lee, Y.K., Lee, I.H. and Kim, D.K. (2007). Field Investigation on the Efficiency of the Artificial Steel Reefs, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 21(5), 61-67 (in Korean).
- Yang, C.K. and Kim, H.J. (2000). A Study on the Characteristics of the Flow around a Sunken Vessel, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 14(4), 9-16 (in Korean).
- Yoon, S.J. and Kim, H.T. (2001). A Study of Artificial Reef Subsidence in Unsteady Flow-Wave Field, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 15(3), 28-34 (in Korean).

---

원고접수일: 2013년 12월 13일

수정본채택: 2014년 3월 27일(1차)

2014년 5월 9일(2차)

게재확정일: 2014년 5월 20일