

인공어초 안정성 해석 프로그램 개발 - 컴퓨터 코딩시스템 적용

전용호* · 박재형** · 윤한삼***†

*, ** (주)씨엔에스솔루션, *** 부경대학교 생태공학과

Development of a Program for Analyzing the Stability of Artificial Reefs - Application of a Computer Coding System -

Yong-Ho Jeon* · Jae-Hyung Park** · Han-Sam Yoon***†

*, ** CnS Solution Co., Ltd., Busan 48508, Korea

*** Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요약 : 본 연구에서는 해수 중 유체력에 의한 인공어초의 활동 및 전도를 평가하기 위한 간편하고 효율적인 사용자 중심의 전산 프로그램(SCAR program)을 개발하였다. 개발된 전산 프로그램은 인공어초의 안정성 평가 공식인 모리슨(Morison) 식을 기반으로 델파이(Delphi) 코드 및 그래픽 사용자 인터페이스(GUI, Graphic User Interface) 방식을 적용하였다. 개발된 SCAR 프로그램은 학부 및 대학원 과정, 실제 현장 전문가들의 수산구조물(인공어초 또는 수중구조물 등) 설계 및 안정성 평가에 널리 적용 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 인공어초, 모리슨 방정식, 안전성 해석, 델파이, 그래픽 사용자 인터페이스(GUI), SCAR 프로그램

Abstract : In this study, a simple, efficient, user-based program called SCAR was developed for evaluating the sliding and collapse of artificial reefs due to hydrodynamic forces in ocean environments. SCAR was developed by applying Delphi code and a Graphical User Interface (GUI) based on the Morison formula for evaluating and analyzing the stability of artificial reefs. SCAR can be applied widely for design and stability evaluation of fishery structures (such as artificial reefs or other underwater structures) in undergraduate and graduate courses and by experts in the field.

Key Words : Artificial reef, Morison equation, Stability Analysis, Delphi, GUI (Graphic User Interface), SCAR program

1. 서론

인공어초는 연안역의 해저 또는 해중에 지형 변화를 주기 위하여 인공적으로 설치된 어초를 말하며, 유용수산생물의 집어에 의한 생산력을 증가시키는 중요한 어장 시설이다 (Kim, 1995).

최근 Lee et al.(2016)이 우리나라를 비롯한 동아시아 인공어초 개발 역사와 연구현황을 고찰하고 어초어장 이용 효율 극대화 및 어초 개발 방향에 대해서, Yoon(2018)의 우리나라 일반어초(시험어초)의 자원조성 효과에 대해서 시험어초 효과를 분석한 연구 사례가 있다. 또한 인공어초의 배치에 따른 후류역과 후류면적 등과 같이 어초 주변의 유향특성, 어초 최적 배치, 어초 수리학적 안정성, 어초 주변의 국소세굴

및 어초의 매몰, 침하 등에 대한 세부 연구들이 지속적으로 수행되어 왔다(Jung and Na, 2018; Kim et al., 2016; Lee et al., 2016).

인공어초가 본래의 목적대로 기능을 발휘하기 위해서는 시설 후 매몰되거나 전도(Fall or Collapsing) 및 활동(Sliding)이 일어나지 않아야 한다. 그러나 인공어초는 수심이 얇은 쇄파대에서부터 심해에 이르기까지 다양한 수심대에 침설되기 때문에 Fig. 1과 같이 조류, 파랑 등 외부 유체력에 의해 전도, 활동, 쇄굴, 매몰 등이 발생하는 경우가 있다(Kim et al., 2009).

어초의 침설 후 안정성에 대해서는 유체력과 국소세굴을 분리하여 검토한다(Kim, 1995). 먼저 유체력에 의한 활동 및 전도는 모리슨(Morison) 식을 사용하여 검토하며, 연직방향력과 그 양력을 합성한 유체력에 대해서 안정계산을 수행하고, 만약 불안정한 경우에는 자중 및 부재강도를 재검토한

* First Author : yh21jeon@hanmail.net, 051-610-0090

† Corresponding Author : yoonhans@pknu.ac.kr, 051-629-7375

다. 모리슨 식에 적용하는 항력계수와 관성력계수에 관해서는 유체력에 미치는 인공어초의 부재간의 간섭효과, 인공어초 상호간의 간섭효과의 영향, 인공어초와 같이 해저에 놓여진 구조물에 의해 생기는 지면효과의 영향을 고려한 값을 분명히 할 필요가 있다.

또한 인공어초 주변의 국소세굴에 관한 안정계산에 대해서는 설계파랑의 조건과 저질의 조건에서 묘사현상의 유무를 분명히 하고, 묘사가 있는 경우에는 묘사에 따른 매물에 대해 검토해야 한다. 한편, 묘사가 없는 경우에는 주로 국소세굴이 안정계산의 대상이 된다.



Fig. 1. Buried and broken artificial reefs located in Gangwon.
(Data: <https://blog.naver.com/withwanju/220834133129>)

기존 모리슨 식을 이용하여 어초 안정성 해석을 위한 해결 방법은 간단히 엑셀(Excel) 프로그램을 이용하는 방법, 계산기를 이용한 수작업에 따른다. 하지만 이는 많은 시간과 에너지가 요구되고 계산 과정에서 조그만 오류가 발생할 경우 결과 값에 신뢰도가 떨어질 뿐만 아니라 오류를 찾아 수정하는 것에도 많은 어려움이 따르는 것이 현실이다. 더구나 입력 변수가 많은 경우이거나 일부 수정이 필요해 재계산할 필요가 있을 시에는 최종 결과를 도출함에 있어서 비교적 많은 시간이 소요되는 작업이라 볼 수 있다.

따라서 인공어초 안정성 해석의 신뢰도 향상 및 시간 소모량을 줄이기 위해서 계산 방법을 통일시키고 사용자가 사용하기 편한 방법을 개발할 필요성이 있다. 또한 학부 및 대학원 과정의 수산구조물(인공어초 또는 수중구조물 등) 설계를 위한 교과목 수강 학생의 수준에 맞추어서 다루기 쉽도록 사용자 중심의 교육용 프로그램 개발의 필요성이 강조되고 있다.

이에 본 연구에서는 인공어초의 유체력에 의한 활동 및 전도를 평가하기 위한 공식인 모리슨 식을 델파이(Delphi) 코드로 된 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 사용 중에 언제라도 사용자가 편리하게 작업을 조정할 수 있도록 그래픽 사용자 인터페이스(GUI, Graphic User Interface) 방식을 적용하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 인공어초의 유체역학적 특성

인공어초는 해저에 설치된 후, 파랑과 흐름에 의해 활동하거나 전도되어 인공어초의 기능을 상실할 우려가 있다. 따라서 이에 대한 문제점 해소를 위해 인공어초의 안정성에 대한 이론적, 실험적 및 현장 검토가 필요하다. 일반적으로 구조물에 작용하는 유체력은 Morison et al.(1950)에 의해 제안된 식을 적용한 사례가 많으며, 인공어초의 경우 적절한 파력계수의 변화를 통해 실질적으로 타당한 결과를 보이는 것으로 인정되고 있다(Ryu and Kim, 1994). 인공어초에 작용하는 외력은 수립자 속도에 의한 항력(drag force)과 수립자의 가속도에 의한 관성력(inertia force)의 선형적인 결합으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{C_D A w_0}{2g} u^2 + \frac{C_M V w_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, 제1항은 흐름의 항력, 제2항은 걸보기 질량력을 나타내며, C_D 는 항력계수, A 는 어초의 투영면적, w_0 는 해수의 단위체적중량, g 는 중력가속도, C_M 은 질량계수, V 는 인공어초의 실용적을 의미한다. 파랑에 의한 유속(u_1)은 미소 진폭과 이론으로부터 식(2)~식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_1 = u_m \sin\theta \quad (2)$$

$$u_m = \frac{\pi H \cosh 2\pi D/L}{T \sinh 2\pi h/L} \quad (3)$$

$$\theta = kx - \omega t = \frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -\frac{2\pi}{T} u_m \cos\theta \quad (5)$$

여기서, H , L , T 는 각각 파고, 파장, 주기를 나타내고, D 는 인공어초의 해저에서 높이, h 는 수심을 나타낸다. 그리고 조류 등에 의한 유속을 u_0 라고 하면, 유체력(F)의 값을 구하기 위한 설계유속(u)은 식(6)~식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$u = u_1 + u_0 = u_m \sin\theta + u_0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u_1}{\partial t} \quad (7)$$

따라서 식(1)은 파·흐름장에 대해 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$F = \frac{C_D A w_0}{2g} (u_m \sin\theta + u_0)^2 - \frac{2\pi C_M V w_0 u_m}{gT} \cos\theta \quad (8)$$

식(8)을 식(9)와 식(10)과 같이 치환하면 최종적으로 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_D = \frac{C_D A w_0 u_m^2}{2g}, \quad \alpha = \frac{u_0}{u_m} \quad (9)$$

$$F_M = \frac{2\pi C_M V w_0 u_m}{gT} \quad (10)$$

$$F = F_D (\sin\theta + \alpha)^2 - F_M \cos\theta \quad (11)$$

식(11)에서 유체력(F)은 파랑의 위상(θ)에 의해 변하며, 이를 최대화 하는 위상은 식(12)와 식(13)의 조건에서 구할 수 있다.

$$\frac{dF}{d\theta} = 2F_D (\sin\theta + \alpha) \cos\theta + F_M \sin\theta = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d^2F}{d\theta^2} = 2F_D (1 - 2\sin^2\theta - \alpha \sin\theta) + F_M \cos\theta < 0 \quad (13)$$

여기서, $F_M/(2F_D) = \beta$, $\sin\theta = S$, $\cos\theta = C$ 라 하면, 식(12)와 식(13)은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{dF}{d\theta} = 2F_D \{C(S + \alpha) + \beta S\} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{d^2F}{d\theta^2} = 2F_D (1 - 2S^2 - \alpha S + \beta C) < 0 \quad (15)$$

다시 식(14)를 S 에 대한 식으로 정리하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S^4 + 2\alpha S^3 + (\alpha^2 + \beta^2 - 1)S^2 - 2\alpha S - \alpha^2 = 0 \quad (16)$$

식(16)은 S 에 대한 4차 다항식으로서 Newton-Raphson법을 이용해 접근해를 구할 수 있다. 제1근사를 $S_1 = 1$, $S_1 = 0$ 의 경우에 대해서 풀면, 다음과 같이 S_n 의 수렴값을 구할 수 있으며, 이 값을 식(15)에 대입하여 F 의 최대값 F_0 를 얻을 수 있다.

$$S_{n+1} = S_n - \frac{S_n^4 + 2\alpha S_n^3 + (\alpha^2 + \beta^2 - 1)S_n^2 - 2\alpha S_n - \alpha^2}{4S_n^3 + 6\alpha S_n^2 + 2(\alpha^2 + \beta^2 - 1)S_n - 2\alpha} \quad (17)$$

인공어초의 안정조건은 작용 유체력의 최대값(F_0)에 대해 전도와 활동이 발생하지 않아야 한다. 즉, 유체력에 의한 인공어초의 이동, 전도에 대한 안정을 확보하여야 하는데 이동에 대한 안정은 인공어초가 흐름이나 파도 등에 의해 이동하지 않을 조건은 어초에 작용하는 유체력 F_0 보다 해저와 어초의 마찰 저항이 크면 된다. 즉, 안전율 SF_S 의 값이 1.2이상이면 안정하다.

인공어초의 활동에 대한 안전율(SF_S)은 식(18)과 같이 나타낼 수 있고, 안정조건은 유체의 작용력(F_0)보다 인공어초의 저면마찰 저항이 큰 경우이다.

$$SF_S = \frac{W\mu(1 - w_0/\sigma_G)}{F_0} \geq 1.2 \quad (18)$$

여기서, W 는 인공어초의 공기 중 중량, μ 는 인공어초와 해저 지반의 마찰계수로서 0.5~0.6의 값을 가진다.

또한 인공어초의 전도에 대한 안전율(SF_O)은 식(19)와 같이 나타낼 수 있고, 안정조건은 저항 모멘트가 전도 모멘트보다 큰 경우이다. 또한 지반반력이 허용 지반반력보다 크지 않아야 하며, 수중자중 및 유체력의 작용선이 저면 내부에 있으면 안정성에 유리하다. 즉, 안전율 SF_O 의 값이 1.2이상이면 안정하다.

$$SF_O = \frac{W(1 - w_0/\sigma_G)l_W}{F_0 h_0} \geq 1.2 \quad (19)$$

여기서, l_W 는 전도와 회전의 중심에서 무게중심까지의 수평거리, h_0 은 F_0 의 작용높이를 나타낸다.

2.2 개발 툴 소개: 델파이 프로그램

델파이(Delphi)란 미국 Borland에서 오브젝트 파스칼(Pascal) 언어의 기능을 향상시켜 개발한 일반 응용 프로그램 개발 언어이다. 국내에서는 많이 알려지지 않았지만 Visual Basic과 유사한 파스칼 언어 기반의 GUI 애플리케이션 개발 도구이다(Hodges, 2014). 흔히 윈도우를 가리켜 GUI라고 말한다. 이것은 화면에서 움직이는 대부분의 프로그램 요소가 그래픽으로 처리되어 사용자가 쉽게 운영체제를 익힐 수 있는 장점이 있다. 델파이는 이러한 GUI를 충실히 컴파일러에 반영한 도구이다.

또한 델파이는 기본적으로 Visual Component Library(VCL)가 많이 포함되어 있어 높은 개발 생산성을 가지며, 애플리케이션 운영 중 발생한 오류에 대해 빠르게 대처가 가능하여 신속한 애플리케이션 개발과 유지관리가 필요한 산업에서 여전히 많이 사용되고 있다. 최근에는 한 번의 코딩으로 윈도우, 안드로이드, IOS, OS X, Linux의 애플리케이션을 개발할 수 있어 델파이의 사용이 증가하고 있다(Glowacki, 2017).

2.3 델파이 코딩

본 연구에서는 구조물에 작용하는 유체력 산정식인 모리슨 식을 델파이(Delphi) 프로그램을 적용하여 코딩을 수행하였다. 구축되어진 인공어초 안정성 해석 모델 프로그램은 SCAR(Stability Calculation model of Artificial Reef)이다.

먼저, 델파이 프로그램 코딩에 앞서 Fig. 2와 같이 유체력에 의한 인공어초의 활동, 전도에 대한 안정성을 계산하는 순서도(flowchart)를 작성하였다. 이는 계산조건 입력 및 천해과장 계산, 식(17)을 이용한 인공어초에 작용하는 최대 유체력(F_0) 계산, 식(18) 및 식(19)를 이용한 활동 및 전도에 대한 안전을 검토의 순으로 계산이 진행된다. 계산과정에서 S에 대한 4차 다항식을 풀이하는 과정에 Newton-Raphson법을 이용해 점근해를 구하는데 근사해 수렴조건을 사용자가 입력하도록 설정하였다(초기조건은 0.0000001).

작성된 순서도에 기반하여 Fig. 3과 같이 델파이 프로그램을 적용하여 코딩을 수행하였다. 프로그램에 계산조건으로 입력되는 변수들을 정리하면 Table 1과 같다. 입력조건은 크게 인공어초에 대한 내용과 환경조건으로 구분할 수 있다. 먼저 인공어초에 대한 내용은 어초의 규모로서 높이, 중량, 투영면적, 항력 및 질량계수 등이며 환경조건은 수심, 파고, 주기, 유속, 마찰계수 등에 대한 것이다.

최종적으로 사용자가 편리하게 작업을 조정할 수 있도록 GUI 방식으로 개발한 것이 Fig. 4와 같다. 최초 화면창에서 계산조건을 입력한 후 안정성 평가 실행 버튼을 클릭하면 자동적으로 계산이 수행되고 최종적으로 인공어초의 활동 및 전도에 대한 안정성이 판정되도록 구성하였다. 또한 입력조건을 수정하더라도 동일한 계산이 수행된다.

그리고 구축된 SCAR 프로그램이 인공어초의 초기 설계적용에 유용하도록 설계 결과가 불안정일 경우 민감도 분석을 통해 안정하기 위한 조건을 역으로 제시하도록 하는 부분을 추가하였다. 계산 입력 조건의 몇몇은 종속적인 관계에 있는 상황이므로 일부 초기 조건만이 주어지면 자동적으로 활동 및 전도에 대한 안전율을 만족하는 공중중량(W)이 계산되도록 구성하였다. Fig. 4의 우측 그래프를 예로 들면 주어진 조건하에서 활동에 대한 안전율을 만족하기 위한 공중중량(W)이 46.1 ton 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

Table 1. Input parameters for the calculation using SCAR

Parameter and condition	Symbol	Unit	Input value
Artificial reef			
Height	D	m	Non-variable
Weight	W	ton	Non-variable
Max. width		m	Non-variable
Public volume		m^3	Non-variable
Projected area	A	m^2	Non-variable
Unit volume weight	w_{AR}	σG	Non-variable
Location acting water force	h_o	m	Non-variable
Drag coefficient	C_D		Non-variable
Mass coefficient	C_M		Non-variable
Environmental conditions			
Water depth	h	m	Variable
Wave height	H	m	Variable
Wave length at shallow water	L	m	Variable
Wave period	T	sec	Variable
Water current	u	m/sec	Variable
Gravitational acceleration	g	m/sec	Non-variable
Unit weight of seawater	w_o		Non-variable
Ground friction coefficient	μ		Non-variable
Calculating condition			
Approximate convergence condition			Non-variable

2.4 시험어초 안정성 평가 적용

본 연구에서는 해양수산부 중앙어초관리위원회에서 2016년 시험어초로 선정된 Fig. 5의 사단경사형 어초를 대상으로 개발된 SCAR 프로그램을 적용하고자 하였다.

사단경사형 어초는 패조류형 어초로서 수산자원 증식을 목적으로 패조류의 위집효과와 생산력 향상을 위해 개발된 인공어초이다. 바다숲 조성용 인공어초로서 갯녹음 현상이 발생한 수심이 얕은 5~15 m내의 관리수역에 해조의 종자를 인위적으로 이식하여 해조류가 착생하고 성장함으로써 단기간에 바다숲을 조성하고, 자연 상태의 어장을 회복함과 동시에 어류나 패류의 은신장, 산란장, 성육장으로 공간을 조성하는데 목적이 있다.

사단경사형 인공어초의 재원을 간략히 살펴보면 재료는 철근 콘크리트, 3.0 m(L) × 3.0 m(B) × 1.4 m(D)의 규격을 가지며, 콘크리트 17,048 kg, 철근 352 kg의 중량(총중량 W는 17.4 ton)이며, 겉용적은 7.25 m^3 을 가진다.

개발된 SCAR 프로그램에 사단경사형 어초를 적용할 경우의 입력조건을 정리하면 Table 2와 같다. SCAR 프로그램 계산 결과의 정확도 및 정밀도를 확인하기 위해 기존 인공어초에 작용하는 유체력 산정식인 모리슨 식을 적용한 엑셀 프로그램을 이용하는 방법과 동일한 입력조건을 적용하여 그 결과를 비교하였다.

인공어초 안정성 해석 프로그램 개발 - 컴퓨터 코딩시스템 적용

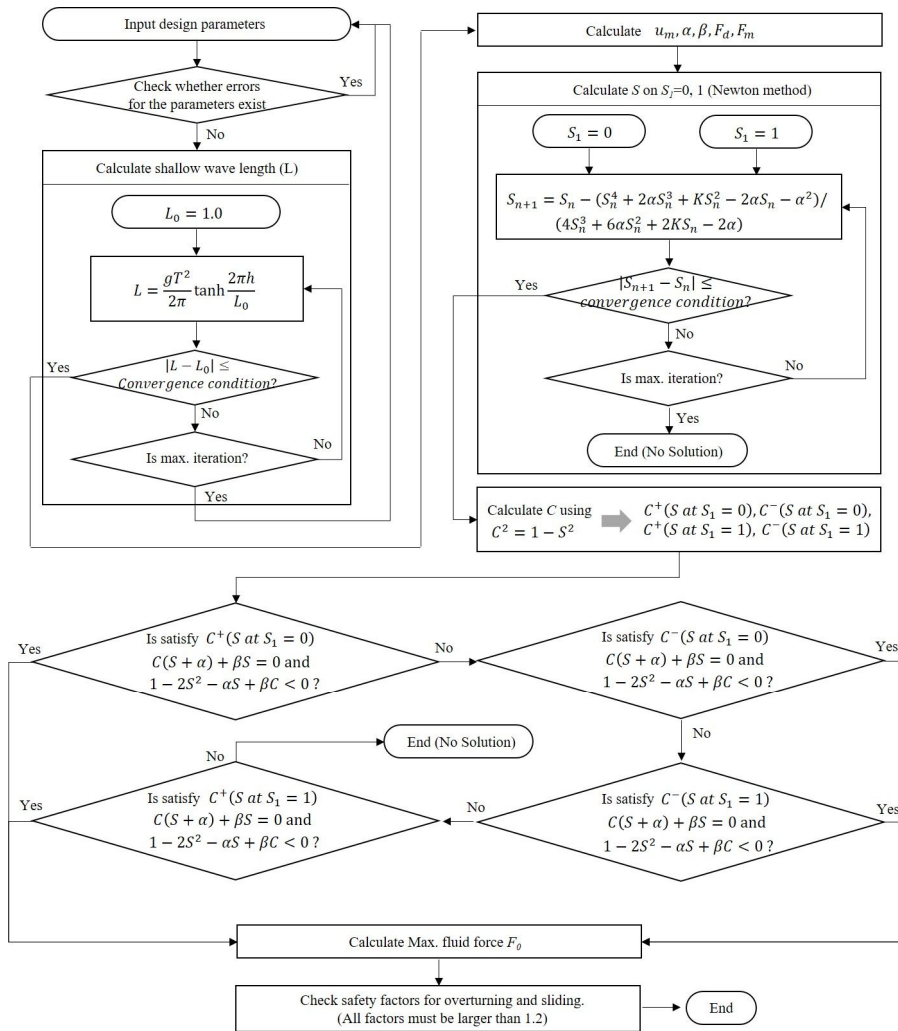


Fig. 2. Flowchart for the stability analysis of an artificial reef.

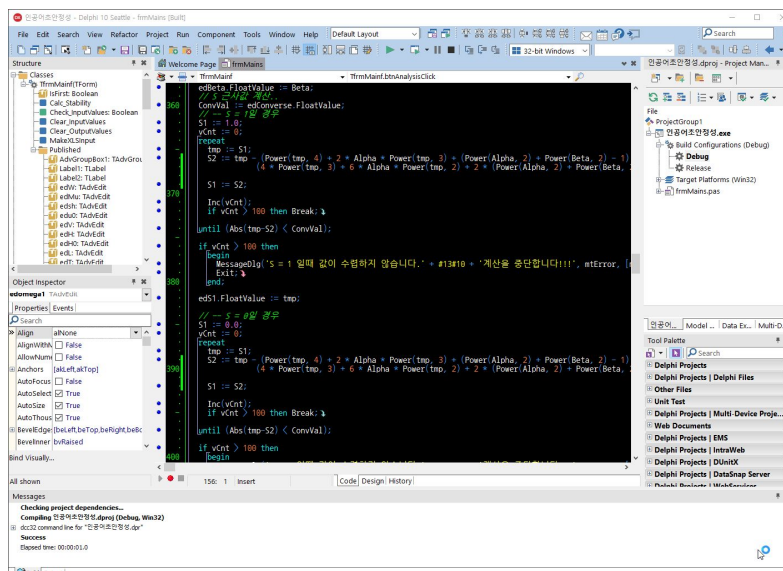


Fig. 3. Coding work screen using the program Delphi.

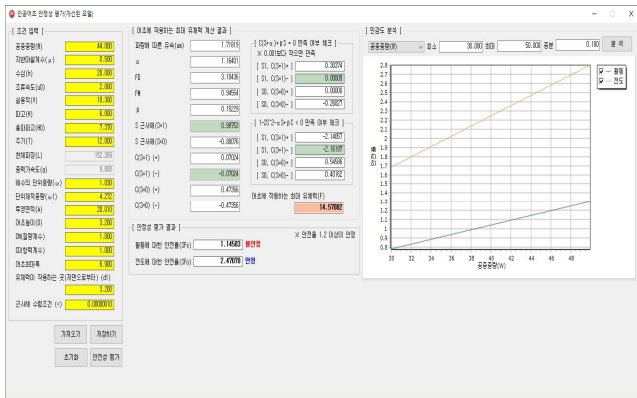


Fig. 4. The start screen for the main procedures used in the calculation.

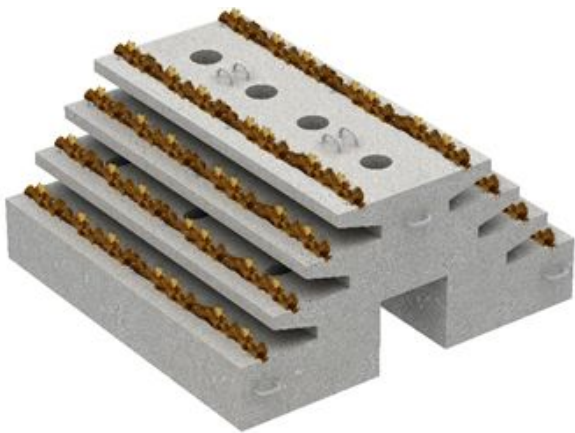


Fig. 5. The shape of the four-step inclined artificial reef used in the experiment.

Table 2. Specifications of the four-step inclined artificial reef and external environmental conditions

Calculation conditions		Input value
Artificial reef	Height (m)	1.4
	Weight (ton)	17.28
	Public volume (m ³)	7.2141
	Projected area (m ²)	4.2
	Unit volume weight	2.395
Wave condition	Depth (m)	10, 15
	Wave height (m)	2~9
	Wave period (sec)	6, 8, 10, 12
	Water current (m/sec)	2.0
Ground friction coefficient		0.6
Drag coefficient		0.9
Mass coefficient		1.6

3. 결과 및 고찰

3.1 어초의 안정성 평가

사단경사형 어초를 대상으로 기존 엑셀 프로그램과 구축된 SCAR 프로그램 계산 방법을 적용하여 두 가지 계산 결과의 정도를 비교하고자 하였다.

Fig. 6은 기존 인공어초에 작용하는 유체력 산정식인 모리슨 식을 적용한 엑셀 프로그램을 이용하는 방법을 그림으로 나타낸 것이다. 각 셀별로 계산조건을 입력하면 순차적으로 앞서 제시된 모리슨 식의 각 항들이 계산되는 상황을 나타내고 있다.

최종적으로 앞서 Fig. 4의 화면창에서 계산조건을 입력하여 SCAR 프로그램을 통해 계산한 결과와 비교한 것이 Table 3과 같다. 실험조건은 Table 2에서 제시한 바와 같이 2개의 수심 조건, 2~9m 범위의 파고 조건, 4개의 파 주기 조건에 해당하는 24가지의 실험안이며 인공어초의 활동에 대한 안전율(SF_S)과 전도에 대한 안전율(SF_O)을 계산하고 그 차이값(B-A)을 제시하였다. 결과적으로 동일 수심 및 주기 조건에서 산정되어진 활동 및 전도 안전율이 파고가 작을수록 그 차이(B-A)가 커지고 파고가 클수록 두 가지 계산 결과가 일치하는 경향을 나타내었다. 또한 동일한 수심 및 파고 조건에서 주기가 작을수록 그 차이(B-A)가 커짐을 알 수 있다.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	2	파고	주기	파장	수심	바닥-어초높이	조류속	항력계수		류형학적	계수단위중량	중력	항력		
3	4	H	T	L	h	D	u _m	u ₀	alpha	C _D	A	w ₀	g	F _D	
3	1	1.000	6.000	38.090	5.000	1.4	0.583405774	2	3.428145709	0.9	4.2	1.025	9.81	0.067213747	
4	2	2.000	6.000	38.090	5.000	1.4	1.166811548	2	1.714072854	0.9	4.2	1.025	9.81	0.268854989	
5	3	3.000	6.000	38.090	5.000	1.4	1.750217322	2	1.142715236	0.9	4.2	1.025	9.81	0.604923725	
6	4	1.000	8.000	53.800	5.000	1.4	0.644265608	2	3.104309737	0.9	4.2	1.025	9.81	0.081968419	
7	5	2.000	8.000	53.800	5.000	1.4	1.288531216	2	1.552154868	0.9	4.2	1.025	9.81	0.327873677	
8	6	3.000	8.000	53.800	5.000	1.4	1.932796824	2	1.034769912	0.9	4.2	1.025	9.81	0.737715772	
9	7	1.000	10.000	67.680	5.000	1.4	0.658616769	2	3.03667291	0.9	4.2	1.025	9.81	0.085668021	
10	8	2.000	10.000	67.680	5.000	1.4	1.317233538	2	1.518333645	0.9	4.2	1.025	9.81	0.342643282	
11	9	3.000	10.000	67.680	5.000	1.4	1.975850307	2	1.01222243	0.9	4.2	1.025	9.81	0.770947385	
12	10	1.000	12.000	82.080	5.000	1.4	0.671417912	2	2.978770692	0.9	4.2	1.025	9.81	0.089023058	
13	11	2.000	12.000	82.080	5.000	1.4	1.342835825	2	1.489385346	0.9	4.2	1.025	9.81	0.356092332	
14	12	3.000	12.000	82.080	5.000	1.4	2.014253737	2	0.992923564	0.9	4.2	1.025	9.81	0.801207523	
15	13	2.000	6.000	48.410	10.000	1.4	0.628314444	2	3.183119585	0.9	4.2	1.025	9.81	0.077959806	
16	14	4.000	6.000	48.410	10.000	1.4	1.256628888	2	1.591559782	0.9	4.2	1.025	9.81	0.311839224	
17	15	6.000	6.000	48.410	10.000	1.4	1.884943332	2	1.061039855	0.9	4.2	1.025	9.81	0.701638254	
18	16	2.000	8.000	70.900	10.000	1.4	0.786071871	2	2.544296614	0.9	4.2	1.025	9.81	0.122022853	
19	17	4.000	8.000	70.900	10.000	1.4	1.572143743	2	1.272148307	0.9	4.2	1.025	9.81	0.488091411	
20	18	6.000	8.000	70.900	10.000	1.4	2.355215614	2	0.849098871	0.9	4.2	1.025	9.81	1.093205674	
21	19	2.000	10.000	92.370	10.000	1.4	0.860019749	2	2.325306096	0.9	4.2	1.025	9.81	0.146804005	
22	20	4.000	10.000	92.370	10.000	1.4	1.720037498	2	1.162765348	0.9	4.2	1.025	9.81	0.58424162	
23	21	6.000	10.000	92.370	10.000	1.4	2.580056247	2	0.775176899	0.9	4.2	1.025	9.81	1.514543645	

Fig. 6. Examples of calculations using existing Excel programs.

3.2 SCAR 프로그램의 정도 분석

구축된 SCAR 프로그램과 기존 엑셀 프로그램 계산 방식을 적용하여 두 가지 계산 결과의 정도를 비교하고자 하였다. 그 결과로서 Fig. 7은 사단경사형 어초의 활동에 대한 안전율(SF_S), Fig. 8은 전도에 대한 안전율(SF_O)을 계산하여 비교한 결과이다.

Fig. 7은 어초의 활동에 대한 안전율(SF_S)을 계산한 결과

Table 3. Calculation of the sliding and fall safety factors of a four-step inclined artificial reef under various wave conditions

Case	Depth (m)	Wave height (m)	Wave period (sec)	Sliding safety factor			Fall safety factor		
				Excel cal.(A)	SCAR (B)	B-A	Excel cal.(A)	SCAR (B)	B-A
1	2.0			3.39	3.41	0.02	5.65	6.09	0.44
2	4.0	6.0		2.14	2.16	0.02	3.56	3.85	0.29
3	6.0			1.53	1.54	0.01	2.55	2.75	0.2
4	2.0			3.26	3.28	0.02	5.44	5.86	0.42
5	4.0	8.0		1.98	1.99	0.01	3.31	3.56	0.25
6	6.0			1.37	1.37	0	2.28	2.44	0.16
7	2.0			3.26	3.27	0.01	5.44	5.84	0.4
8	4.0	10.0		1.94	1.94	0	3.23	3.48	0.25
9	6.0			1.31	1.31	0	2.18	2.34	0.16
10	2.0			3.28	3.28	0	5.46	5.86	0.4
11	4.0	12.0		1.92	1.93	0.01	3.20	3.44	0.24
12	6.0			1.28	1.28	0	2.13	2.28	0.15
13	3.0			3.63	3.65	0.02	6.04	6.51	0.47
14	6.0	6.0		2.35	2.36	0.01	3.91	4.22	0.31
15	9.0			1.70	1.72	0.02	2.84	3.07	0.23
16	3.0			3.15	3.17	0.02	5.26	5.66	0.4
17	6.0	8.0		1.89	1.90	0.01	3.15	3.39	0.24
18	9.0			1.29	1.29	0	2.15	2.31	0.16
19	3.0			3.02	3.03	0.01	5.04	5.42	0.38
20	6.0	10.0		1.74	1.75	0.01	2.90	3.12	0.22
21	9.0			1.15	1.15	0	1.91	2.05	0.14
22	3.0			2.97	2.98	0.01	4.95	5.32	0.37
23	6.0	12.0		1.67	1.67	0	2.78	2.99	0.21
24	9.0			1.08	1.08	0	1.80	1.93	0.13

를 나타내었는데 두 계산 방식의 차이(B-A)가 거의 발생하지 않고 그 계산 결과가 거의 선형적으로 일치하며 그 선형 방정식을 $y = 1.0059x - 0.004$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 x 는 기존 엑셀 프로그램 계산값을, y 는 구축된 SCAR 프로그램 계산값을 의미한다. 또한 두 계산 방식 모두에서 주어진 실험조건의 2가지 경우에서 어초의 활동에 의한 불안정성이 발견되었다.

또한 Fig. 8은 어초의 전도에 대한 안전율(SF_0)을 계산한 결과를 나타내었는데 두 계산 방식의 차이(B-A)가 거의 발생하지 않고 그 계산 결과가 거의 선형적으로 일치하며 그 선형 방정식을 $y = 1.0772x - 0.004$ 로 나타낼 수 있다. 두 계산 방식의 차이가 평균적으로 약 7.7% 차이를 보이고 구축

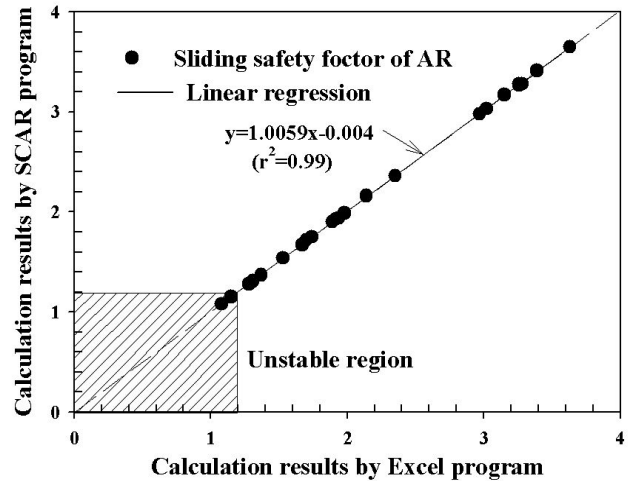


Fig. 7. Comparison of the sliding safety factor calculation results using Excel and SCAR programs.

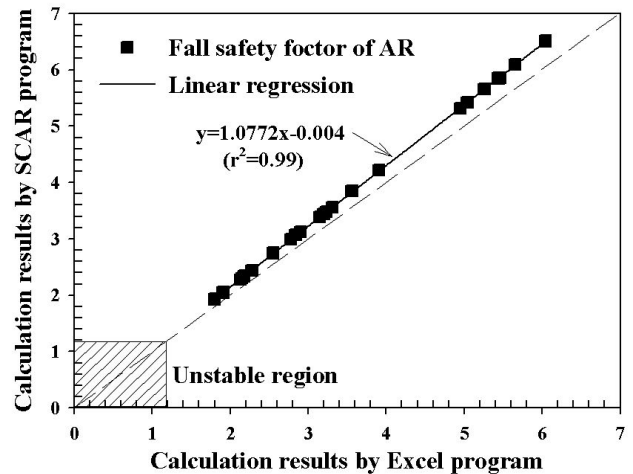


Fig. 8. Comparison of the collapse safety factor calculation results using Excel and SCAR programs.

된 SCAR 프로그램으로 계산한 결과가 크다는 것을 알 수 있다.

그러나 현 개발 단계에서 계산된 결과들이 인공어초의 안정성에 문제가 발생하는 범위($SF_0 < 1.2$)를 모두 벗어나므로 실제적인 인공어초의 안정성 평가에는 크게 문제시 되지 않는 것으로 판단할 수 있다.

하지만 현재 차이가 발생하는 원인에 대해서는 식(18) 및 식(19)에 사용된 변수들 중에서 인공어초와 해저 지반의 마찰계수(μ), 전도와 회전의 중심에서 무게중심까지의 수평거리(l_w), F_0 의 작용높이(h_0)에 따른 영향이 반영된 것으로 생각되며 향후 이러한 변수들의 민감도 분석을 통해서 위에 제시된 차이를 줄이기 위한 검토가 요구된다.

4. 결론

본 연구에서는 해수 중 유체력에 의한 인공어초의 활동 및 전도를 평가하기 위한 간편하고 효율적인 사용자 중심의 전산 프로그램(SCAR program)을 개발하고자 하였다. 개발된 전산 프로그램은 인공어초의 안정성 평가 공식인 모리슨 식을 델파이 코드 및 그래픽 사용자 인터페이스 방식으로 개발하였다.

개발된 SCAR 프로그램을 기존 엑셀 프로그램을 통해 계산하는 방식과 비교하여 그 정도를 평가한 결과, 인공어초의 활동에 대한 안전율에는 거의 일치하는 결과를 보였다. 또한 전도에 대한 안전율에서는 약 7.7%의 오차를 보였으나, 계산 결과들이 인공어초의 안정성에 문제가 발생하는 범위($SF_o < 1.2$)를 모두 벗어나므로 실제적인 인공어초의 안정성 평가에는 크게 문제시 되지 않는 것으로 판단할 수 있다.

향후 본 연구에서 개발된 프로그램은 인공어초의 유체력 산정에 적용되는 다양한 입력 변수에 따라서 결과 값이 어떻게 달라지는지를 민감도 분석을 통해 추가 검토함으로써 프로그램의 정도를 향상시킬 필요성이 있다.

결론적으로 개발된 SCAR 프로그램은 학부 및 대학원 과정, 실제 현장 전문가들의 수산구조물(인공어초 또는 수중구조물 등) 설계 및 안정성 평가에 널리 적용 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Glowacki, P.(2017), Expert Delphi: Robust and fast cross-platform application development, Packt Publishing, Birmingham, UK.
- [2] Hodges, N.(2014), Coding in Delphi, Nepeta Enterprises, Gilbertsville, PA, USA.
- [3] Jung, S. and W. B. Na(2018), Placement Models of Marine Forest Artificial Reefs to Increase Wake Region Efficiency, Journal of Fisheries and Marine Science Education, Vol. 30, No. 1, pp. 132-143.
- [4] Kim, C. G., T. G. Oh, S. H. Suh, D. K. Kim, B. G. Kim and Y. S. Choi(2009), Review of stability calculation of an artificial reef in the breaking wave zone of coastal waters, J. of the Korean Soc. Mar. Eng., Vol. 33, No. 6, pp. 965-974.
- [5] Kim, D. H., S. Jung and W. B. Na(2016), Wake Region Estimation of Artificial Reefs using Wake Volume Diagrams, Journal of Fisheries and Marine Science Education, Vol. 28, No. 4, pp. 1042-1056.
- [6] Kim, N. H.(1995). Artificial fish as a fishery structure, Korea

Fisheries Infrastructure Promotion Association (FIPA), Fishing port, pp. 43-47.

- [7] Lee, M. O., J. K. Kim and B. K. Kim(2016). A Review-status of Development and Research of Artificial Reefs in the East Asian Countries, Journal of Fisheries and Marine Science Education, Vol. 28, No. 3, pp. 630-644.
- [8] Morison, J. R., M. P. O'Brien, J. W. Johnson and S. A. Schaff (1950), Forces exerted by surface waves on piles, Pet. Trans., AIME, p. 189.
- [9] Ryu, C. R. and H. J. Kim(1994), A study on the characteristics of wave forces on artificial reefs, Bull. Korean Fisheries Soc., Vol. 27, No. 5, pp. 605-612.
- [10] Yoon, H. S.(2018), Evaluation of Fishery Resource Enhancement by General Artificial Reefs in South Korea, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, Vol. 21, No. 2, pp. 119-129.

Received : 2018. 06. 14.

Revised : 2018. 07. 13. (1st)

: 2018. 07. 30. (2nd)

Accepted : 2018. 08. 28.