

# GEP 모형을 이용한 교각주위 국부세굴 예측

김태준\* · 최병웅\*\* · 최성욱\*\*\*

Kim, Taejoon\*, Choi, Byungwoong\*\*, Choi, Sung-Uk\*\*\*

## Prediction of Local Scour Around Bridge Piers Using GEP Model

### ABSTRACT

Artificial Intelligence-based techniques have been applied to problems where mathematical relations can not be presented due to complicatedness of the physical process. A representative example in hydraulics is the local scour around bridge piers. This study presents a GEP model for predicting the local scour around bridge piers. The model is trained by 64 laboratory data to build the regression equation, and the constructed model is verified against 33 laboratory data. Comparisons between the models with dimensional and normalized variables reveals that the GEP model with dimensional variables predicts better. The proposed model is now applied to two field datasets. It is found that the MAPE of the scour depths predicted by the GEP model increases compared with the predictions of local scours in laboratory scale. In addition, the model performance increases significantly when the model is trained by the field dataset rather than the laboratory dataset. The findings suggest that apart from the ANN model, GEP model is a sound and reliable model for predicting local scour depth.

**Key words** : Local scour, Genetic algorithm, Bridge pier, GEP model

### 초록

물리현상의 난해성으로 인해 수학적인 관계식이 제시되기 어려운 경우 인공지능 기술에 근거한 다양한 기법이 적용되어 왔다. 수리학 분야의 대표적인 예로 교각주위 국부세굴 문제를 들 수 있다. 본 연구에서는 유전자 알고리즘의 진화된 방법인 GEP 기법을 이용하여 교각주위 국부세굴을 예측하는 방법을 제시하였다. 64개의 실험 자료를 이용하여 GEP 모형을 학습시켜 회귀식을 구축하였으며, 33개의 실험 자료를 이용하여 구축된 모형의 검증을 실시하였다. 평형세굴심 예측을 위하여 차원을 갖는 일반 변수와 표준화된 변수로 GEP 모형을 구축하여 예측 결과를 비교하였는데, 차원을 갖는 변수에 의한 GEP 모형이 세굴심을 더 잘 예측하는 것으로 나타났다. 구축된 GEP 모형을 두 가지 현장 실측자료에 적용하였다. 적용 결과, 실험 자료에 적용한 경우에 비해 예측의 정확도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한, 현장 실측자료를 이용하여 학습시킨 경우 실험 자료를 이용하는 경우 보다 예측 능력이 많이 향상되는 것으로 나타났다. GEP 모형의 적용성을 위해 ANN 모형과의 비교를 수행하였으며, 본 연구에서 사용된 GEP 모형이 교각주위 국부세굴 예측에 대하여 실내 및 현장 모두 ANN 모형보다 우수한 것으로 나타났다.

**검색어** : 국부세굴, 유전자 알고리즘, 교각, GEP 모형

## 1. 서론

국부세굴이란 수중에 설치된 구조물에 의해 흐름의 원활한 소통을 방해 받아 국부적으로 가속되어 하상이 침식되는 현상이다. 이런 유수의 가속에 의해 교각주위에 세굴공이 형성되며, 이는 흐름에 영향을 미치게 된다. 이런 과정을 통해 발생하는 교각주위의 세굴은

\* 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 (Yonsei University · crayon@yonsei.ac.kr)

\*\* 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 석·박사통합과정 (Yonsei University · bw628@yonsei.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Yonsei University · schoi@yonsei.ac.kr)

Received June 3, 2014/ revised July 16, 2014/ accepted September 18, 2014

하강류와 말발굽 형태의渦 및 후류를 동반하는 복잡한 3차원 난류 운동을 보인다.

하천에 위치한 교량의 교각 및 교대와 같은 수중 구조물 주위에서 발생하는 국부세굴은 교량의 안전에 치명적인 영향을 준다. 미국의 교량 붕괴에 관한 안전성 측면에서 약 60%가 세굴 파괴에 대해 잠재 위험성이 있는 것으로 조사되었다(Pagan, 2002). 우리나라의 경우 홍수거나 이상 호우 시 하천의 세굴 및 하천의 불안정성으로 인한 교량 피해 사례는 연 평균 100 여건에 이르고 있다(Ministry of Security and Public Administration, 2003).

교각주위 국부세굴에 관한 예측은 실내 및 현장에서의 실험을 통해 수많은 경험식을 제시하였을 뿐만 아니라 3차원 수치모의에 대한 연구가 주를 이루어왔다. 교각주위의 국부세굴 현상은 매우 복잡하므로 3차원으로 수치모의를 수행하는 것 보다는 실험에 의존하는 경우가 많다. Yanmaz and Altinbilek (1991)은 시간에 따른 세굴심 교각주위의 세굴 현상을 연구하였고 Melville and Chiew (1999) 역시 시간에 따른 세굴심 변동에 관한 연구를 하였다. 또한 선행 세굴 관련 실험을 통해 수많은 연구자들이 경험식을 제시하였다. Richardson and Davis (1995)는 교각의 형상, 교각에 접근하는 유체의 각도, 유사의 이동에 관련한 인자와 하상 재료와 관련한 인자를 종속변수로 하는 경험식을 제시하였다. 그리고 Sheppard et al. (2014)은 여러 경험식을 비교하고 계속된 수많은 자료 중 불확실성의 오차를 극복하기 위해 자료의 필터링을 수행하였으며 기존의 경험식을 개선하여 새로운 국부세굴심 예측을 위한 식을 제시하였다. 그러나 교각주위 국부세굴에 대해서는 일반적인 함수 형태의 식으로 제시하기는 어려운 실정이다.

최근에는 교각주위 국부세굴 예측을 하는데 있어 인공신경망(ANN: Artificial Neural Network) 모형, fuzzy 모형, ANFIS(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) 모형, 그리고 유전자 알고리즘과 같은 인공 지능기법을 사용하고 있다. 이러한 기법들은 어떠한 현상에 미치는 다양한 변수들 간의 상관관계를 분석하여 예측하는 방법을 나타낸다. 일반적으로 인공 지능기법은 학습된 자료를 기반으로 예측을 수행하기 때문에, 예측의 자료 범위가 학습의 범위에 소속되면 뛰어난 예측의 정확도를 보이게 된다. 유전자 알고리즘은 기존에 많은 선행 연구자들이 사용하였던 블랙박스 모형인 인공신경망과 ANFIS 모형 그리고 주관적인 판단이 우세한 지식 기반의 fuzzy 모형과는 다르게 세굴심과 그에 따른 종속변수들의 관계를 회귀식으로 도출하여 수학적으로 표현이 가능하다는 장점이 있다.

Choi and Cheong (2006)은 역전과 알고리즘의 인공신경망을 이용하여 교각주위의 국부세굴심을 예측하였고 그 결과들을 여러 경험식에 적용 및 비교하였다. Muzzammil (2010)은 ANFIS 모형을 이용하여 교량 교대 주위의 세굴심을 예측하고 그 결과를 인공신

경망 모형과 회귀 모형의 결과와 비교하였다. 그리고 Guven and Gunal (2008)은 GEP 모형을 이용하여 수공 구조물 근처에서 일어나는 국부세굴심을 예측하였으며 선행 회귀식과 비선형 회귀식의 비교를 통해 현장 자료에 대한 적용성을 확인하였다. Azamathulla et al. (2010)은 유전자 알고리즘을 이용하여 교각주위의 세굴심을 예측하고 이를 인공신경망 모형의 결과와 CSU 공식을 통해 산정된 결과와 비교하였다.

국내에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 Kim et al. (2004), Lee et al. (2005) 그리고 Jee et al. (2005)은 강우유출 분야에 적용하였고, Kim et al. (2007) and Shin et al. (2007)은 유전자 알고리즘을 강우강도 및 매개변수 추정에 적용하였다. 또한 Kim et al. (2008; 2009; 2011)은 도시위차공식 분야에 적용하였다. 국내에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 교각주위의 국부세굴과 같은 수리학적 현상에 적용한 사례를 찾아보기 어렵다. 또한 기존의 선행 연구는 인공신경망과 ANFIS 모형 등의 블랙박스 모형 및 전문가의 주관적인 판단이 우세한 지식 기반의 fuzzy 모형이 사용되었다. 그러나 이런 모형들은 세굴심과 종속변수들과의 관계를 수학적으로 표현할 수 없으며, 단지 예측의 정확도만을 중점으로 하여 분석하였다. 그러나 본 연구에서 사용된 GEP 모형은 실측 자료를 이용하여, 각 변수 및 세굴심과의 상관관계를 회귀식으로 도출하여 표현할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유전자 알고리즘의 가장 진화된 모형인 GEP 모형을 사용하여 교각주위의 국부세굴 현상에 적용하고자 한다.

본 연구의 목적은 교각주위의 국부세굴 예측을 위한 GEP 모형을 제시하는 것이다. 또한 도출된 회귀식을 다른 현장 자료에 적용하여 사용된 GEP 모형의 적용성을 확인하는 것이다. 바닥입자의 연행한계유속( $V_c$ )을 산정하여 추가하였고, 차원을 갖는 일반 변수와 정규화 된 변수에 대한 실험 자료의 학습 및 검증을 통하여 비교를 수행하였으며, 구축된 GEP 모형을 실제 현장 자료에 적용하였다. 또한, GEP 모형의 적용성을 위해 ANN 모형과 결과를 비교하였다.

## 2. 기본 이론

### 2.1 교각주위의 국부세굴

국부세굴이란 수중에 설치된 구조물에 의해 유수가 원활한 소통을 방해 받아 국부적으로 유수가 가속되어 하상이 침식되는 현상을 말한다. 교각주위에서 유수가 가속되어 교각주위에 세굴공이 형성되어 하상이 변화되고 이는 다시 유수에 영향을 주게 된다. 교각주위의 국부세굴은 하강류와 말발굽 형태의渦 및 후류를 동반하는 복잡한 난류 운동이다. Fig. 1은 교각주위 와류의 형상을 도식화시킨 것이다. 이렇게 복잡한 흐름 특성과 하상 변동 문제로 인해 물리적인 현상을 명확하게 규명하기는 어렵고 정확한 세굴심 산정

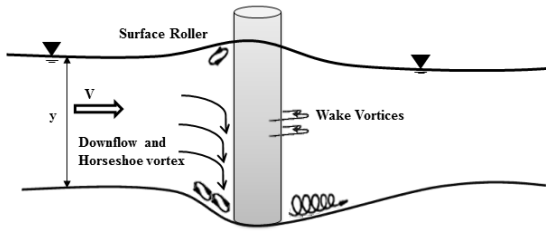


Fig. 1. A Schematic Sketch of Local Scour Around Bridge Piers

또한 쉽지 않다. 교각주위의 국부세굴에 영향을 미치는 요인을 흐름 특성, 하상 재료의 특성, 그리고 교각의 형상으로 나눌 수 있다(Melville and Coleman, 2000).

$$d_{sc} = fn[flow(\rho, \nu, V, y, g, \gamma), sediment(d_{50}, \sigma_g, \rho_s, V_c, \gamma_s), piergeometry(\alpha, \beta, b)] \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 와  $\nu$ 는 각각 유체의 밀도와 점성,  $V$ 와  $y$ 는 평균 유속과 수심,  $g$ 는 중력 가속도,  $\gamma$ 는 하상 형태 상관 계수,  $d_{50}$ 과  $\sigma_g$ 는 중앙 입경, 입도분포의 표준편차,  $\rho_s$ 는 유사 밀도,  $V_c$ 는 바닥입자의 연행 한계유속,  $b$ 는 교각 폭, 그리고  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 교각 형상과 흐름 입사각에 대한 형상계수이다. 위의 관계식에서 입자의 크기가 균일하다고 가정하면 입도분포의 표준편차를 무시할 수 있으며 하상 형상 계수는 형상 계수가 큰 사구 하상을 제외하고 대부분의 경우에 1.1의 값을 사용하므로 무시할 수 있다(Richardson and Davis, 1995). 그리고 흐름 입사각이 0도인 실린더 형태의 교각주위 국부세굴 문제이므로 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$d_{sc} = fn(b, d_{50}, V, V_c, y) \quad (2)$$

또한, 차원해석을 통해 하상재료의 중앙 입경과 수심을 교각 폭으로, 그리고 평균 유속은 한계유속으로 무차원화 하였으며, 차원해석 된 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{d_{sc}}{b} = fn\left(\frac{d_{50}}{b}, \frac{V}{V_c}, \frac{y}{b}\right) \quad (3)$$

여기서 바닥입자의 연행 한계유속  $V_c$ 는 Sheppard et al. (2014)에서 제시된 식을 이용하여 산정하였다. 바닥입자의 연행 한계유속  $V_c$ 는 다음 식과 같다.

$$u^* = \left(16.2D_{50} \left\{ \frac{9.09 \times 10^{-6}}{D_{50}} - D_{50} [38.76 + 9.6 \ln(D_{50})] - 0.005 \right\}\right)^{1/2} \quad (4)$$

$$R = \frac{u^* D_{50}}{2.32 \times 10^{-7}} \text{ for } 5 \leq R \leq 70 \quad (5)$$

$$V_c = 2.5u^* \ln\left(\frac{73.5y}{D_{50} \left\{ R[2.85 - 0.58 \ln(R) + 0.002R] \frac{111}{R} - 6 \right\}}\right) \text{ for } R > 70 \quad (6)$$

$$V_c = 2.5u^* \ln\left(\frac{2.21y}{D_{50}}\right) \quad (7)$$

## 2.2 유전자 알고리즘 이론

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm: GA)이란 Holland (1975)에 의해 개발된 최적화 기법이다. 이는 생물의 진화를 모방한 진화 연산의 대표적인 기법으로, 다윈의 적자생존의 법칙을 컴퓨터 기법화한 방법이다. 유전자 알고리즘을 사용하기 위해서는 해의 집단이 유전형으로 표현될 수 있어야하며 해의 집단이 우수한 지 평가할 수 있는 적합도 함수가 필요하다. 유전자 알고리즘은 구하고자 하는 해를 유전형으로 표현하며 해의 집단인 모집단을 기본 단위로 한다. 이렇게 되면 유전자들의 조합을 통해 기존의 해로부터 새로운 해를 얻을 수 있다. 초기의 해 집단은 유전자를 임의로 생성하며 이들을 교배, 돌연변이 및 전치 등의 유전 연산자를 사용하여 변형함으로써 점점 더 좋은 해를 만들어 낸다. 또한 룰렛 휠 선택법과 토너먼트 선택법 등의 선택법을 통하여 다음 세대에 더 좋은 해를 넘겨준다. 적합도 정도가 원하는 수준에 도달하였거나 일정 수준의 세대 수에 도달하였거나 혹은 할당된 계산 비용에 도달한 경우 알고리즘을 종료하게 된다.

## 2.3 GEP 모형

본 연구에서는 유전자 알고리즘의 진화된 형태인 GEP (Gene Expression Programming) 모형을 사용하였으며 GEP 모형은 Ferreira (2001)에 의해 개발되었다. GEP 모형은 기존의 유전자 알고리즘과 동일하게 구하고자 하는 해를 유전형으로 표현하고, 모집단을 기본 단위로 선택, 교배, 돌연변이 및 전치 등의 유전 연산자를 사용하여 변형함으로써 점점 더 좋은 해를 도출해낸다. 그러나 기존의 유전자 알고리즘은 이러한 과정과 적합도 함수를 통해 구하고자 하는 해와 종속변수들간의 매개변수 보정을 통해 값을 도출해낸다. 그러나 GEP 모형은 일반적인 유전자 알고리즘의 과정을 통해 계산된 유전자를 연결 함수를 이용하여 expression-tree를 구성하고 이를 통해 수학적 표현인 회귀식을 도출한다. GEP 모형의 경우 일반적인 유전자 알고리즘과는 달리 해의 길이가 가변적이고 유전적 다양성을 극대화 했다는 장점이 있다. Fig. 2는 GEP 모형의 알고리즘을 도식화 한 것이다. 본 연구에서 사용된

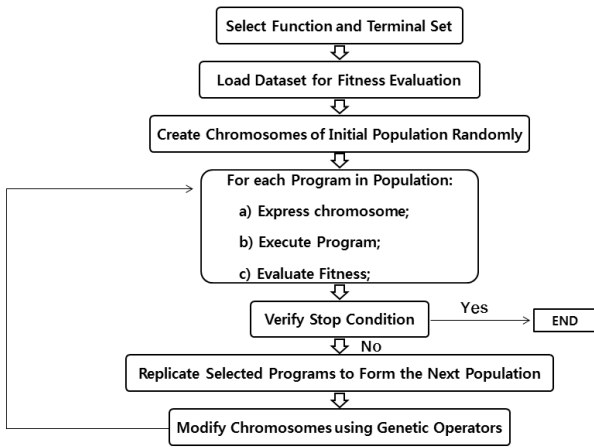


Fig. 2. Flowchart of Gene Expression Programming

GEP 모형을 교각주위 국부세굴 예측에 산정하기 위하여 예측을 위한 회귀식을 도출하기 위해 실측값과 그에 따른 종속 변수를 사용한다. 이는 처음 설정한 개체수 만큼 임의의 연산자와 종속 변수들로 구성된 염색체를 배열하게 되며, 교배, 돌연변이 및 전치 등의 유전 연산자를 사용하게 된다. 이런 과정에서 각 세대에서 회귀식을 도출하고 이는 적합도 함수를 이용하여 적합도 정도를 판단하게 되며, 어느 정도 실측값과의 오차 수준에 도달하였을 경우 이 때의 회귀식을 이용하여 해당 실측자료의 교각주위 국부세굴을 예측한다.

### 3. 모형의 학습 및 검증

본 연구에서는 4개의 서로 다른 실험 자료를 조합하여 64개의 실내 실험 자료를 학습 자료로 이용하여 GEP 모형을 구축하였다. 본 연구에서 사용된 학습 자료는 Chabert and Engeldinger's (1956), Shen et al.'s (1969), Jain and Fischer's (1979) 그리고 Dey et al.'s (1995)이며, 실험 자료 및 변수의 범위는 Table 2와 같다. 여기에 Sheppard et al. (2014)이 제시한  $V_c$ 를 예측인자로써 추가하여 모형을 구축하였다. 본 연구에서 사용된 GEP 모형의 변이율은 0.044, 교차율은 0.1, 일점 교배율과 이점 교배율은 0.3, 그리고 유전자 재조합률 및 유전자 전이율은 0.1로 설정하였다.

구축된 GEP 모형이 해당 변수 조건에 대해서 예측을 잘 하는지에 대해 판단하기 위해 평균 절대 오차율(Mean Absolute Percent Errors)을 구하여 나타내었다. 평균 절대 오차율에 대한 식은 다음과 같다.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|d_{sc}^m - d_{sc}^p|}{d_{sc}^m} \times 100 (\%) \quad (8)$$

Table 1. Parameters of the GEP Model

Definition	Value
Function Set	$+, -, \times, \div, \sqrt{\phantom{x}}, \ln(x), e, 10^x, \text{power}, \frac{1}{x}$
Linking Function	addition, multiplication
Fitness Function	MAE
Mutation Rate	0.044
Inversion Rate	0.1
One-point Recombination Rate	0.3
Two-point Recombination Rate	0.3
Gene Recombination Rate	0.1
Gene Transposition Rate	0.1

Table 2. Training Datasets

Source	Number of Data
Chaber and Engeldinger (1956)	9
Dey et al. (1995)	18
Jain and Fischer (1979)	14
Shen et al. (1969)	23

여기서  $d_{sc}^p$ 와  $d_{sc}^m$ 은 각각 예측 세굴심과 실측 세굴심을 나타낸다.

Fig. 3은 GEP 모형을 이용하여 동일한 실험 자료로 차원을 갖는 일반 변수와 정규화 된 변수에 대한 검증의 결과를 나타내었다. 검증은 Yanmaz and Altinbilek (1991)의 33개의 실험 자료를 통해 수행하였다. 만약 예측된 결과가 45° 선에 일치한다면, 실측값과 예측값은 정확히 일치하다는 것을 의미한다. 64개의 실험 자료를 이용하여 학습을 시키고 차원을 갖는 일반 변수와 정규화 된 변수에 대해 검증을 수행하였다. 차원을 갖는 일반 변수의 경우 검증의 평균 절대 오차율은 11.17%로 나타났으며, 정규화 된 변수의 경우는 18.67%로 나타났다. 검증에 사용된 실험 자료의 범위가 학습의 자료와 크게 다르지 않으므로 만족할 만한 결과를 도출한 것으로 판단된다. 그러나 차원을 갖는 일반 변수의 경우 정규화 된 변수보다 예측의 결과가 좋은 것으로 나타났다. 이는 GEP 모형이 교각주위 국부세굴심을 예측하기 위해 사용된 변수를 이용하여 예측 가능한 회귀식을 도출하는데 정규화 과정에서 종속 변수가 줄어들어 예측 인자의 다양성이 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.

### 4. 모형의 적용

구축된 GEP 모형을 이용하여 현장 실측 자료에 적용하였다. 현장 실측 자료는 Gao et al. (1993)와 Mueller and Wagner

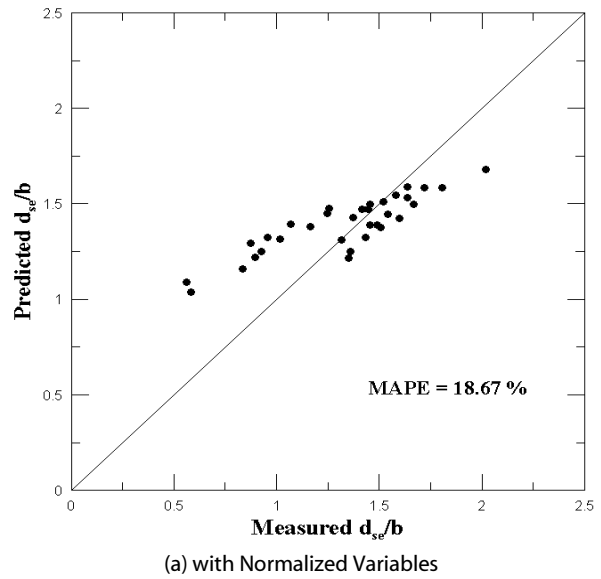
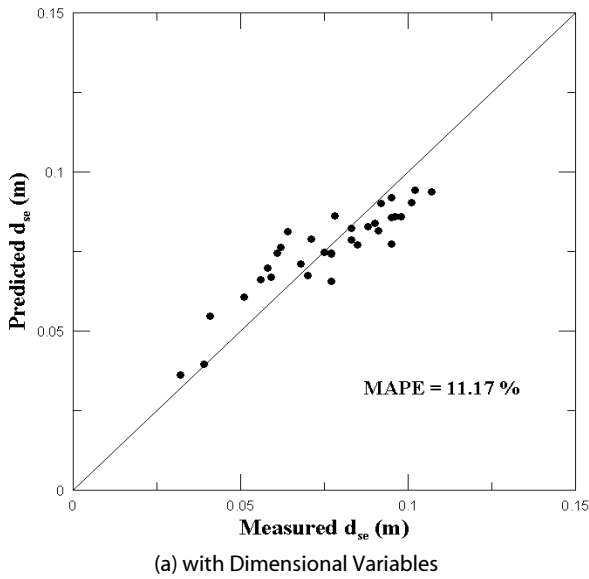


Fig. 3. Verification of the GEP Model

Table 3. Range of Field Dataset

Variable	Range	
	Gao et al. (1993)	Mueller and Wagner (2005)
$b(m)$	1.00 ~ 9.06	0.3 ~ 5.5
$d_{50}(mm)$	0.1 ~ 68.8	0.01 ~ 108
$V(m/s)$	0.43 ~ 4.70	0.1 ~ 4.5
$V_c(m/s)$	0.272 ~ 2.912	0.139 ~ 3.242
$y(m)$	0.11 ~ 11.60	0.1 ~ 11.9
$d_{sc}(m)$	0.27 ~ 5.54	0.1 ~ 7.7

(2005)의 자료를 이용하였다. 적용한 현장 실측 자료의 적용된 변수와 국부세굴 실측값의 범위는 Table 3과 같다. GEP 모델을 이용하여 차원을 갖는 일반 변수에 대해 교각주위 국부세굴에 적용한 현장 결과는 각각 Figs. 4 and 5에 나타내었다.

Gao et al. (1993)은 중국 매강의 지천인 저장에서 교각주위 국부세굴심 관한 212개의 현장 자료를 제시하였다. 이 자료는 1958년부터 1964년까지 모래 하상의 실린더 형태의 교각 형상에 대해 측정된 것이다. Mueller and Wagner (2005)는 미국의 Mississippi 강 외 65개의 중-대규모 하천에서 단일 교각과 연속 교각을 포함하여 교각주위 국부세굴심에 관한 493개의 현장 실측 자료를 제시하였다. 본 연구에서는 현장 실측 자료 중, 단일 교각에 해당하는 현장 자료를 적용하였다.

Fig. 4는 구축된 GEP 모델을 이용하여 212개의 현장 자료에 적용한 결과이며, Figs. 4(a) and 4(b)는 각각 실험 자료와 현장 자료로 학습시킨 결과를 이용하여 현장에 적용하여 나타낸 결과이

다. Gao et al. (1993)의 212개 현장 자료 중 절반을 임의적으로 추출하여 학습에 사용하였으며, 나머지 절반은 세굴심 예측에 사용되었다. Fig. 4(a)는 GEP 모델을 이용하여 64개의 실험 자료로 학습을 시키고, 106개의 현장 자료에 적용한 결과를 나타내며 평균 절대 오차율은 45.57%로 산정되었다. 106개의 현장 자료의 변수 범위가 실험 자료의 변수 범위 보다 더 넓기 때문에 예측 능력이 떨어지는 것으로 판단된다. Fig. 4(b)는 임의로 추출한 106개의 자료로 학습된 GEP 모델을 이용하여 106개의 동일한 현장 자료에 적용한 결과이다. 평균 절대 오차율은 28.26%로 산정되었으며, 실험 자료로 학습을 수행한 GEP 모델의 예측 결과와 비교하였을 때 평균 절대 오차율이 상당히 낮아짐을 볼 수 있다. 이는 실험 자료로 현장 자료를 예측할 경우 실험 자료의 범위와 현장 자료의 범위가 상이하며 제어가 용이한 실험의 경우, 현장의 여건 및 불확실성을 반영하기 어렵기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 Mueller and Wagner (2005)의 390개의 현장 자료에 적용한 결과이며, Figs. 5(a) and (b)는 각각 실험 자료와 현장 자료로 학습시킨 결과를 이용하여 현장에 적용한 결과이다. 마찬가지로 Fig. 5(a)는 64개의 실험 자료를 이용하여 GEP 모델을 학습시키고, 195개의 현장 자료에 적용한 결과이며, 평균 절대 오차율은 37.35%로 산정되었다. 또한 Fig. 5(b)는 Mueller and Wagner (2005)의 현장 실측 자료에서 임의로 추출한 195개의 자료를 이용하여 GEP 모델을 학습시켜 Fig. 5(a)와 동일한 195개의 현장 자료에 적용한 결과이며, 평균 절대 오차율은 19.63%로 산정되었다. 위의 결과와 마찬가지로 실험 자료로 학습을 수행한 경우 보다 현장 자료로 학습을 수행한 경우, 예측의 정확도가 개선되는 것으로

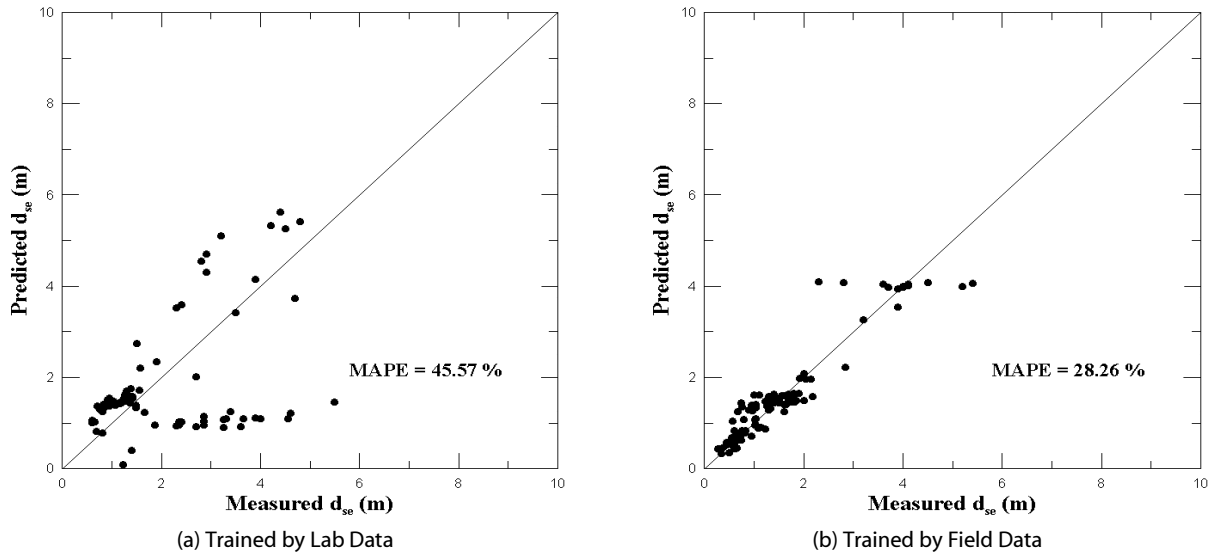


Fig. 4. Application of the GEP Model to Gao et al.'s Dataset

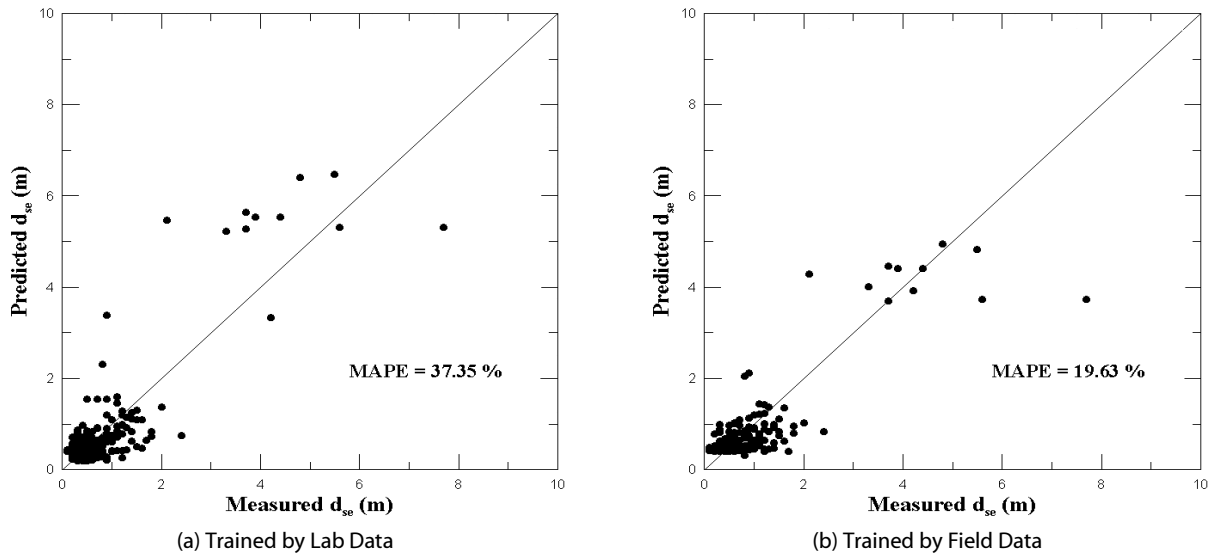


Fig. 5. Application of the GEP Model to Mueller and Wagner's Dataset

나타났다.

Fig. 6은 Gao et al. (1993)의 실험 자료를 이용하여 ANN 모형과 GEP 모형을 통해 얻은 결과를 비교한 것이다. ANN 모형은 본 연구에서 사용된 동일한 자료를 이용하여 계산된 Choi and Cheong (2006)의 결과로 GEP 모형의 적용성을 확인하기 위해 비교를 수행하였다. 결과를 비교해본 결과, ANN 모형보다 GEP 모형이 예측에 대한 정확성이 더 높은 것으로 나타났다. ANN 모형의 경우 실험 자료로 학습시킨 결과 보다 현장 자료로 학습시켰을 경우, 평균 절대 오차율이 약 3% 정도 감소하였으며, GEP 모형은 약 20% 정도로 감소하였다. 실험 자료에 의한 학습 결과와

비교하여 현장 자료를 이용하는 경우, GEP 모형의 결과가 크게 개선됨을 볼 수 있다. 이는 실험 자료의 범위 보다 현장 자료의 범위가 더 잘 일치할 뿐만 아니라, ANN 모형의 경우 계산 결과에 대하여 명백한 규칙을 찾아낼 수 없으며 주어진 학습 자료에 대해 일정한 해답에 수렴하므로 서로 상이한 자료의 경우 자료가 가지는 불확실성으로 인해 예측의 정확도가 떨어지게 된다. 그러나 GEP 모형이 많은 자료를 이용하여 회귀식을 도출하여 예측하기 때문에 고려된 변수들의 상관관계를 더 잘 반영하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 ANN 모형과 GEP 모형을 이용하여 Mueller and Wagner (2005)의 현장 자료를 각각 50개, 100개, 150개 및 195개

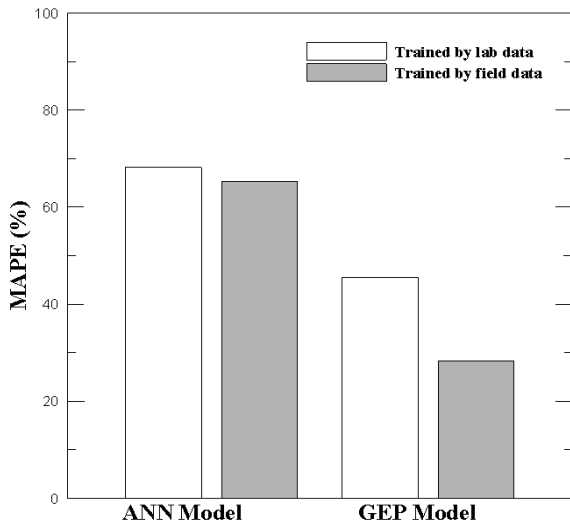


Fig. 6. Model Performance Depending on Training Dataset

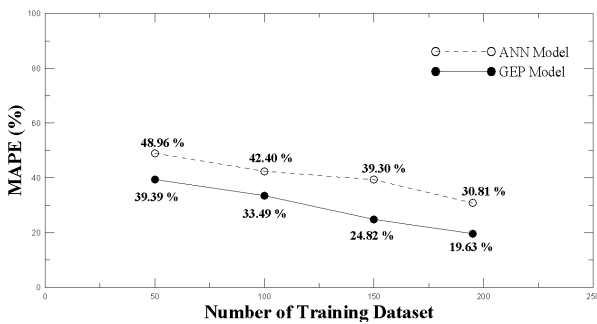


Fig. 7. Change of MAPE with Number of Training Dataset

로 임의로 추출하여 학습시키고 나머지 195개의 현장 자료에 적용한 결과이다. 학습에 사용된 자료의 수가 적을 때에도 ANN 모형에 비해 GEP 모형이 더 정확한 예측을 하는 것으로 나타났으며, 학습에 사용된 자료의 수가 많아져도 GEP 모형이 ANN 모형보다 예측을 더 잘하는 것으로 나타났다. 또한 학습에 사용된 자료의 수가 많아질수록 ANN 모형의 평균 절대 오차율이 감소하는 비율보다 GEP 모형의 평균 절대 오차율이 감소하는 비율이 더 크지만, 감소하는 비율은 유사한 것으로 나타났다. 이는 학습에 이용된 자료의 수가 많을수록 변수들의 상관관계를 더 잘 반영할 뿐만 아니라, 적용하고자 하는 변수의 범위와 학습 자료의 범위 차이가 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 유전자 알고리즘이 진화된 형태의 GEP 모형을 이용하여 교각주위 국부세굴을 예측하는 방법을 제시하였다. 차원

을 갖는 일반 변수와 정규화된 변수를 이용하여 GEP 모형을 각각 구축하여 예측 능력을 비교하였는데, 차원을 갖는 일반 변수를 이용하는 GEP 모형의 예측 능력이 우수함을 확인하였다. 64개의 실내 실험자료를 이용하여 GEP 모형을 학습시켰고 33개의 실내 실험자료에 적용하여 모형의 검증을 수행하였다.

구축된 GEP 모형을 두 가지 현장 실측 자료에 적용한 결과, 모형의 세굴심 예측 능력이 상당히 저하됨을 알 수 있었는데, 이는 학습에 사용된 자료와 예측 대상 자료의 범위가 상이하기 때문이다. GEP 모형의 현장 규모의 국부세굴 예측 능력을 향상시키기 위하여, 현장 실측자료를 이용하여 모형의 학습을 수행하였고 이를 ANN 모형의 경우와 비교하였다. 비교 결과, GEP 모형이 ANN 모형보다 현장 규모의 세굴심 예측 능력이 뛰어난 것으로 나타났다. 정량적으로 현장 실측 자료를 이용하여 모형을 학습시킨 경우 평균 절대 오차율이 GEP 모형과 ANN 모형의 경우 각각 20%와 3% 감소하여 GEP 모형의 예측능력이 큰 폭으로 개선된 것을 알 수 있다. 또한, 학습 자료의 수에 따른 평균 절대 오차율의 변화를 통해 구축된 모형의 예측 정확도를 확인하였다. 계산 결과, 학습 자료의 수가 많을수록 평균 절대 오차율이 감소하며, 감소하는 비율도 GEP 모형과 ANN 모형 모두 매우 유사함을 확인하였다. 이는 본 연구에서 사용된 GEP 모형이 교각주위 국부세굴을 예측하는데 적합한 모형임을 알 수 있다. 인공지능 기법의 경우 학습자료의 범위가 예측자료의 범위를 포함할 경우 뛰어난 예측능력을 보인다. 그러므로 인공지능 기법을 이용한 자료의 예측을 위해서는 일정 범위 내에서 적절한 학습자료의 수와 범위를 통한 세굴심과 종속변수에 대한 상관관계를 더 잘 반영할 수 있도록 하여 예측의 정확도를 향상시킬 수 있도록 하는 것이 필요하다고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 “하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형의 개발(11기술혁신C04)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

Azamathulla, H. Md. and Ghani, A. A. (2010). “Genetic programming to predict river pipeline scour.” *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, ASCE, Vol. 1, No. 3, pp. 127-132.

Azamathulla, H. Md., Ghani, A. A. and Guven, A. (2010). “Genetic programming to predict bridge pier scour.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 3, pp. 165-169.

Cater, J. E. and Williams, J. J. R. (2008). “Large eddy simulation of a long asymmetric compound channel.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 46, No. 4, pp. 445-453.

- Chabert, J. and Engeldinger, P. (1956). Etude des affouillements autour des piles des ponts, *Laboratoire Nationale d'Hydraulique*, Chatou, France.
- Choi, S.-U. and Cheong, S. (2006). "Prediction of local scour around bridge piers using artificial neural networks." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 42, No. 2, pp. 487-494.
- Cui, J. and Neary, V. S. (2008). "LES study of turbulent flows with submerged vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 46, No. 3, pp. 307-316.
- Dey, S., Bose, S. K. and Sastry, G. L. N. (1995). "Clear water scour at circular piers: A Model." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 15, No. 4, pp. 869-876.
- Ferreira, C. (2001). "Gene expression programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems." *Complex Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 87-129.
- Gao, D., Posada, G. L. and Nordin, C. F. (1993). *Pier scour equations used in the people's republic of China - Review and Summary*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication FHWA-SA-93-076.
- Grega, L. M., Wei, T., Leighton, R. I. and Neves, J. C. (1995). "Turbulent mixed-boundary flow in a corner formed by a solid wall and a free surface." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 294, pp. 17-46.
- Guven, A. and Gunal, M. (2008). "Genetic programming approach for prediction of local scour downstream of hydraulic structures." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 134, No. 2, pp. 241-249.
- Harlow, F. H. and Welch, J. E. (1965). "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface." *Physics of Fluids*, Vol. 8, p. 2182.
- Holland, J. H. (1975). "Adaptation in natural and artificial systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence." Oxford, England: University of Michigan Press.
- Hsu, T. Y., Grega, L. M., Leighton, R. I. and Wei, T. (2000). "Turbulent kinetic energy transport in a corner formed by a solid wall and a free surface." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 410, pp. 343-366.
- Issa, R. I., Gosman, A. D. and Watkins, A. P. (1986). "The computation of compressible and incompressible recirculating flows." *Journal of Computational Physics*, Vol. 62, No. 1, pp. 62-82.
- Jee, Y. G., Kim, S. J. and Kim, P. S. (2005). "Forecasting monthly inflow for the storage management of small dams." *2005' Conference of Korea Water Resources Association*, pp. 85-89 (in Korean).
- Kim, K., Kim, S., Kim, T. and Heo, J.-H. (2007). "Theoretical derivation of IDF curve using probability distribution function of rainfall data." *2007' Conference of Korea Water Resources Association*, pp. 1503-1506 (in Korean).
- Kim, S. J., Jee, Y. G. and Kim, P. S. (2004). "Parameter optimization of long and short term runoff models using genetic algorithm." *2004' Conference of Korea Water Resources Association*, pp. 1117-1121 (in Korean).
- Kim, S., Heo, J.-H. and Choi, M. (2011). "Derivation of plotting position formulas considering the coefficients of skewness for the GEV distribution" *Journal of Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 2, pp. 85-96 (in Korean).
- Kim, S., Heo, J.-H., Shin, H. and Kho, Y. W. (2009). "Comparison of plotting position formulas for gumbel distribution" *Journal of Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 5, pp. 365-374 (in Korean).
- Lee, K. S., Kim, S. U. and Hong, I. P. (2005). "Automatic calibration of rainfall-runoff model using multi-objective function" *Journal of The Korean Water Resources Association*, Vol. 38, No. 10, pp. 861-869 (in Korean).
- Melville, B. W. and Chiew, Y. M. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, pp. 59-65.
- Melville, B. W. and Coleman, S. E. (2000). *Bridge scour*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado.
- Ministry of Security and Public Administration. (1995-2003). *Disaster annual report* (in Korean).
- Mueller, D. S. and Wagner, C. R. (2005). *Field observations and evaluations of streambed scour at bridges*, Office of Engineering Research and Development, Federal Highway Administration, McLean, Virginia.
- Muzzammil, M. (2010). "ANFIS approach to the scour depth prediction at a bridge abutment." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 12, No. 4, pp. 474-485.
- Pagan-Ortiz, J. E. (2002). "Impact of the federal highway administration's scour evaluation program in the united states of north america's highway bridges." *Proceedings of the First International Conference on Scour of Foundations*, ICSF-1, Texas A&M University, College Station, Texas, U.S.A., Vol. 2. pp. 636-641.
- Richardson, E. V. and Davis, S. R. (1995). *Evaluating scour at bridges*, Report No. FHWA-IP-90-017, Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18) (Third Edition), Office of Technology Applications, HTA-22, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- Sheppard, D. M., Melville, B. and Demir, H. (2014). "Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 140, No. 1, pp. 14-23.
- Shin, J., Kim, S., Kim, T. and Heo, J.-H. (2007). "Parameter estimation of intensity-duration-frequency curve using genetic algorithm." *2007' Conference of Korea Water Resources Association*, pp. 142-146 (in Korean).
- Shppard, D. M. and Melville, B. (2011). *Scour at wide piers and long skewed piers*, NCHRP Report 682, Transportation Research Board of the National Academies. Washington, D.C.
- Yang, W. and Choi, S.-U. (2002). "Three-Dimensional numerical simulation of local scour around the bridge pier using large eddy simulation." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No.6-B, pp. 785-793 (in Korean).
- Yanmaz, A. M. and Altinbilek, H. D. (1991). "Study of time-dependent local scour around bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 10, pp. 1247-1268.