

인공신경망을 이용한 피어의 국부세굴 평가

Estimation of Local Scour at Piers Using Artificial Neural Network

박 현 일¹ Park, Hyun-II

신 중 현² Shin, Jong-Hyun

Abstract

It is known that scour at bridge piers is one of the leading causes of bridge failure. However, the mechanism of flow around a pier structure is so complicated that it is difficult to establish a general empirical model to provide accurate estimation for scour. Especially, each of the proposed empirical formula yields good results for a particular data set but can't show reliable predictability for various scouring data set. In this study, an alternative approach, that is, artificial neural networks (ANN), is proposed to estimate the local scour depth with numerous field data base. The local scour depth was modeled as a function of seven variables; pier shape, pier width, pier length, skew angle, stream velocity, water depth, D_{50} . 426 field data were used for the training and testing of ANN model. The predicted results showed that the neural network could provide a better alternative to the empirical equations.

요 지

하천 교각에서 유발되는 국부세굴은 교량의 붕괴를 유발하는 요인들 가운데 하나로 알려져 있다. 그러나, 교각 주위 하천 흐름은 매우 복잡하기 때문에 국부세굴을 정확하게 산정하는 경험식을 도출하기가 쉽지 않다. 따라서, 기존의 경험식들은 특정 세굴 자료에는 좋은 상관 관계를 보이지만 다양한 현장 세굴자료들에 대해 신뢰성 있는 예측 정도를 갖기는 어렵다. 본 연구에서는 많은 현장 계측자료를 바탕으로 국부세굴심을 산정할 수 있는 인공신경망 모델을 제안하고자 하였다. 제안된 산정식은 교각 형상, 교각 폭, 교각 길이, 흐름 입사각, 흐름 속도, 수심 및 D_{50} 의 총 7개의 변수의 함수로 구성되었다. 인공신경망 모델의 학습과 검증에 총 426개의 현장 계측자료들이 사용되었으며, 인공신경망 모델이 기존 경험식들에 비하여 개선된 예측정도를 보임을 확인하였다.

Keywords : Artificial neural network, Local scour, Pier, Scour depth

1. 서 론

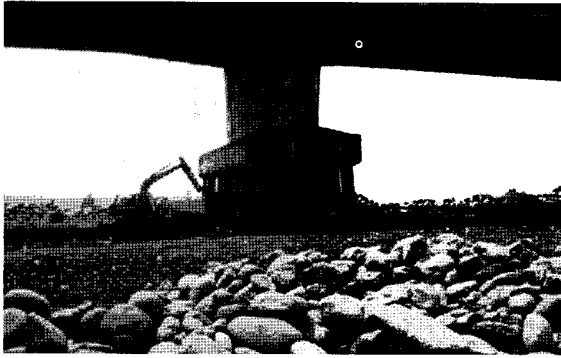
세굴은 하천에서 유속의 변화로 인해 교각 하부 지반이 유실되는 현상을 의미하며, 이러한 교각 하부 지반의 유실로 말미암아 하상 및 해상에 설치된 교각 구조물의 기초 지지력이 감소되어 결과적으로 구조물 붕괴를 초래하게 된다(그림 1 참고). 미국의 경우, 교량의

50% 가량이 홍수 발생시 유발된 세굴로 인하여 붕괴되었다고 보고된 바 있다(Wardhana와 Hadipriono, 2003). 국내 하천의 경우에도 계절적 유량의 편기 현상이 심하여 세굴로 인한 구조물 붕괴의 위험성이 상존하고 있는 실정이며, 근래 이상기후로 인하여 500~100년 빈도의 강우가 빈번히 유발되고 있기 때문에 세굴에 대한 보다 현실적인 대책 수립이 시급하다고 보고되었다(건

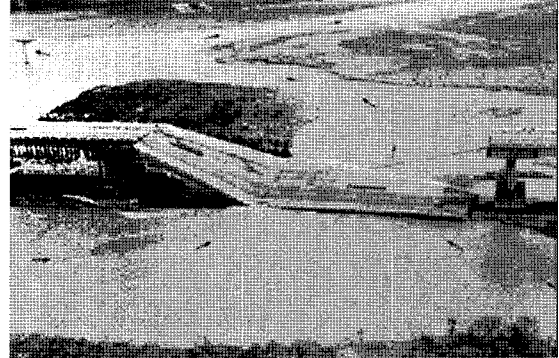
1 정회원, 삼성건설 기술연구소, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Research Center, Samsung E & C, gomdori7@empal.com, 교신저자)

2 정회원, 삼성건설 기술연구소, 전임연구원 (Member, Associate Researcher, Research Center, Samsung E & C)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.



(a) 대만 Kaoping Bridge에서 발생한 세굴 및 bed degradation



(b) 국부 및 일반 세굴에 의하여 파괴된 Kaoping Bridge

그림 1. 교각 붕괴 사례(Lin, 1998)

설교통저널, 1998). 세굴에 대한 연구가 국내에서도 현재 수행되고는 있지만, 세굴심도 평가 시 국외에서 개발된 산정 기법들이 주로 적용되고 있는 실정이다.

특히 홍수 발생 시 교각 주위의 와류(vortex)를 발생시켜 구조물 붕괴의 직접적인 원인이 되는 것으로 알려져 있는 국부세굴(local scour)에 대하여 지난 수십 년간 많은 연구들이 수행되었다(Laursen과 Toch, 1956; Shen, 1971; Hancu, 1971; Breusers 등, 1977; Melville과 Sutherland, 1988; Richardson 등, 1993). 이들은 국부세굴을 일으키는 와류를 직접적으로 해석하기보다는 실내시험을 통하여 유속, 수심, 교각 폭, 교각 길이, 흐름 입사각, 교각 형상, 하상 및 해상 지반의 입도분포 등과 같은 대표적인 영향인자들을 고려한 다양한 경험식들을 제안하였다. 그러나, 많은 국부세굴 경험식들이 실험실 규모에서 수행된 세굴 시험자료나 제한된 현장 세굴자료만을 근거로 제안되었기 때문에, 예측 정확도가 선정된 경험식마다 차이가 나며 현장 계측자료와 많은 편차를 보인다(Mueller와 Wagner, 2003). 최근 Jeng 등(2005), Kambekar와 Deo (2003), 강진구 등(2002), 최성욱과 정상화(2002) 등은 실내에서 수행된 세굴 시험자료들에 대하여 인공신경망을 적용하여 교각 국부세굴심 산정식들을 제안한 바 있다. 그러나, 이 인공신경망 식들은 실내 모형 시험자료들에 대한 학습을 바탕으로 제안되었기 때문에 실제적인 하천 및 해상 교각의 국부세굴 예측에 적용가능한지의 여부는 명확치 않은 실정이다.

본 연구에서는 해외 선진국들의 하천 교각에서 실제 계측된 426개의 현장 국부세굴심 들에 대하여 인공신경망을 적용함으로써 실제 현장자료에 근거한 교각 국부세굴심 산정식을 제안하고자 하였다. 제안된 산정식을 인공신경망 모델 학습에 사용되지 않은 한국 및 네덜란

드에서 계측된 20개의 현장 세굴자료에 적용하였으며, 이를 HEC-18식, Forehlich 식(1988), Neill 식(1964) 및 Breusers(1977)들과 비교함으로써 제안된 인공신경망 국부세굴심도 산정식의 국내 적용성을 함께 검토하고자 하였다.

2. 기존의 교각 국부세굴 산정식들

HEC-18식은 CSU 식(Richardson 등, 1993)을 바탕으로 실내실험 자료를 이용하여 개발되었다. Richardson 등(2001)에 의한 수정 HEC-18 식이 다른 경험식들보다 더욱 현실적으로 국부 세굴심도를 예측한다고 보고되었다(Richardson과 Davis, 2001).

$$y_s = 2.0y_o K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{b}{y_o}\right)^{0.35} Fr^{0.43} \quad (1)$$

여기서, y_s = 세굴심도(m), y_o = 교각의 직상류부 수심(m), K_1, K_2, K_3 및 K_4 = 교각 형상, 흐름의 입사각, 하상 조건, 하상재료의 입경에 의한 아머링(Armoring) 효과에 관한 보정계수들이며, b = 교각의 폭(m), Fr = Froude 수를 의미한다.

Forehlich(1988)는 교각에서 발생하는 다양한 세굴자료에 대한 회귀분석을 통하여 세굴식을 식 (2)와 같이 제안하였다. 이 공식은 국부 세굴심도의 과소평가를 방지하기 위해 교각의 폭을 산정식에 포함시켰다.

$$y_s = 0.32 b \phi Fr^{0.2} \left(\frac{b_e}{b}\right)^{0.62} \left(\frac{y_o}{b}\right)^{0.46} \left(\frac{b}{D_{50}}\right)^{0.08} + b \quad (2)$$

여기서, y_s = 세굴심도(m), y_o = 교각의 직상류부 수심(m),

b = 교각의 폭(m), ϕ = 교각 형상 계수, Fr = Froude 수, b_e = 흐름에 수직방향으로 투사되는 교각의 폭(m), D_{50} = 채분 석 시 하상재료의 50%가 통과하는 입경크기(m)를 의미한다.

Neill(1964)은 세굴심도가 Fr 수나 하상재료 인자의 영향보다는 교각의 폭과 수심에 직접 영향을 받는 것으로 판단하여 아래와 같은 세굴공식을 제안하였다.

$$y_s = b \times 1.5 \left(\frac{y_o}{b} \right)^{0.3} \quad (3)$$

여기서, y_s = 세굴심도(m), y_o = 교각의 직상류부 수심(m), b = 교각의 폭(m)을 의미한다.

Breusers 등(1977)이 제안한 식 (4)는 hyperbolic tangent function을 이용하여 세굴심을 예측하는 식으로 특히 네덜란드 등에서 많이 활용되고 있다.

$$y_s = b f_1 \left[k \tanh \left(\frac{y_o}{b} \right) \right] f_2 f_3 \quad (4)$$

여기서, $k = 1.5$ (단, 설계 시 $k = 2$), y_s = 세굴심도(m), b = 교각의 폭(m), f_1 = 한계속도와 평균속도의 비에 의해 결정되는 계수, y_o = 교각의 직상류부 수심(m), f_2 = 교각의 형상계수, f_3 = 흐름의 입사각 관련 계수를 의미한다.

3. 인공 신경망 이론

3.1 역전파 알고리즘(Backpropagation)

인공신경망은 뉴런(neuron)으로 불리우는 단위처리개체(simple processing unit)로 이루어져 있다. 각 뉴런은 입력신호에 대한 연산을 수행한 후 연결고리(connection)들을 통하여 다음 뉴런에 정보를 전달하는 처리개체이다. 여기서, 연결고리는 하나의 뉴런으로부터 다음뉴런으로의 정보 흐름을 의미한다. 가중치는 연결고리를 통하여 할당되며, 결과적으로 가중치가 고려된 입력신호값이 다음 뉴런에 전달된다. 인공신경망은 입력층(input layer), 은닉층(hidden layer), 출력층(output layer)으로 구성된다. 여기서, 입력층에서 뉴런들은 해석에서 고려되어야 하는 입력 설계변수이고, 반면에 출력층의 뉴런은 목표 출력값을 의미한다. 각 뉴런은 다음 층의 모든 뉴런들과 연결고리를 갖고 있으나 동일 층에서 각 뉴런간의 연결고리는 주어지지 않는다. 각 뉴런은 sigmoid 함수로 명

명되는 활성화함수를 포함하고 있다. 가중치는 모든 신경망의 연결고리에 할당된다.

신경망을 특정한 목적으로 사용하기 위해서는 신경망의 내부 설계변수인 weight와 bias 값들을 추정하여야 하며, 이러한 일련의 추정과정을 학습(learning)이라 한다. 학습은 일반적으로 신경망의 실제 출력값(t)과 목표값(T)과의 차이를 이용하여 식 (5)과 같이 오차함수를 정의한 후 이 값이 최소화되도록 하는 weight와 bias 값들을 구한다.

$$E = \|T - t\|^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 $\|$ 은 벡터의 2-norm을 의미한다.

3.2 인공신경망 이론의 학습과 시험

학습단계에서 인공신경망에서 가중입력에 사용되는 weight(w)와 bias(b) 값들이 임의의 값의 조합으로 가정된다. 초기에 가정된 가중입력값들이 고려된 인공신경망 모델을 적용하여 예측된 목표값(target output)과 출력값과의 평균제곱오차(mean square error)를 구한다. 이후에 역전파(backpropagation) 알고리즘을 적용함으로써 평균제곱오차값이 최소화되도록 적합한 weight(w)와 bias(b) 값들을 구하게 된다.

3.3 인공신경망 이론의 검증과정

인공신경망 모델의 적용 시 발생하는 문제 중 하나가 과적합(overfitting) 문제이다. 학습에 사용된 자료에 대한 오차는 매우 작은 값을 얻도록 해주지만, 그 신경망에 제공되는 새로운 자료에서는 오차가 더 커질 수 있는 것이다. 신경망 내의 미지수의 개수가 학습 자료의 총 개수보다 훨씬 작다면 과적합의 문제는 발생될 가능성이 매우 작다. 따라서 많은 자료를 확보하는 것이 필요하지만, 충분히 많은 자료가 확보되지 않은 상황에서는 일반화 기법을 이용하여 신경망의 학습결과에 대한 신뢰도를 확보할 수 있다. 본 연구에서는 보다 좋은 일반화 기법으로 알려져 있는 Bayesian 방법이 적용되었다. 이 방법은 평균제곱오차로 이루어진 전형적인 수행 함수(performance function)에 신경망의 weight와 bias의 평균제곱합에 대한 항을 추가하여 보다 일반적인 학습이 가능하도록 하였다(이성진 등, 2002). 더불어 보다 효과적인 신경망의 학습을 위하여 입력자료들을 최대값과 최소값을 기준으로 $\{-1, 1\}$ 사이에서 정규화하는 작업

을 수행할 수 있도록 하였다. 인공신경망 학습 시 수렴 기준은 0.00001로 적용되었다.

4. 인공신경망 이론에 근거한 세굴 심도 산정식 제안

미도로국(FHWA)에서는 미국 내 하천교각 세굴자료를 수집하기 위하여 BSDMS(Bridge Scour Data Management System)을 개발하였다. 200여 이상의 지점에서 계속된 495개의 세굴자료를 수집하여, 수로 지형, 수리정보, 하상재료, 위치 및 교각 정보 등을 정리하였다(Mueller와 Wagner, 2003). 본 연구에서는 수집된 세굴 자료들 가운

데 직상류 조건의 단일 교각에 대하여 계속된 354개 자료에 대하여 인공신경망 학습에 사용하였다. 또한, 건설교통부(1997)에서는 미국, 구소련 및 선진국에서 실제 하천을 관리하는 종사자들을 중심으로 홍수 전후의 실제 하천의 세굴심도를 관측한 사례를 정리하였으며, 구소련에서 계속된 72개의 세굴자료를 포함시켜 인공신경망 학습에 사용하였다. 미국 및 구소련에서 계속된 426개의 세굴 자료들은 아래 표 1에 간략히 정리되어 있다.

본 연구에서는 표 1에 나타난 교각의 국부세굴 기본 입력자료에 인공신경망 모델을 적용하였다. 그림 2에 적용된 인공신경망 모델이 나타나 있으며, 모델의 구조를 살펴보면 다음과 같다. 입력층에는 교각 형상, 교각 폭, 교각 길이, 흐름 입사각, 흐름 속도, 수심, D_{50} 으로 총 7개의 입력 유니트가 적용되었고, 은닉층은 5개의 유니트가 적용되었으며, 출력유니트는 1개로서 세굴심도 값을 의미한다. 여기서, 입력층-은닉층 및 은닉층-출력층 사이에 적용된 전이함수는 시그모이드(sigmoid) 및 선형(linear) 함수가 각각 적용되었다. 미국 및 소련에서 수집된 총 426개의 자료에서 학습(training)에는 381개가 사용되었으며, 검증(testing)에는 학습에 사용되지 않은 45개의 자료가 사용되었다.

Bayesian기법을 이용해서 그림 2에 제안된 신경망구조를 사용하여 세굴 시험자료에 대한 학습을 수행하였다.

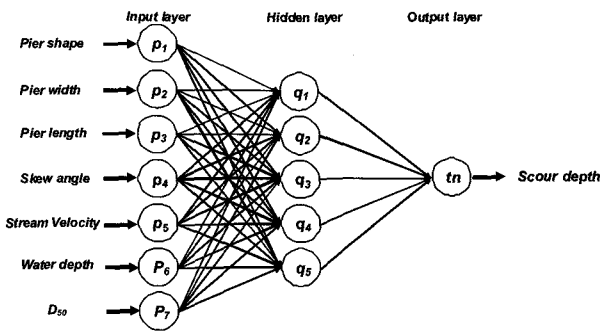
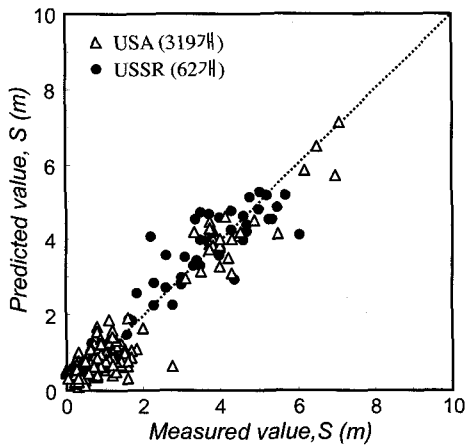
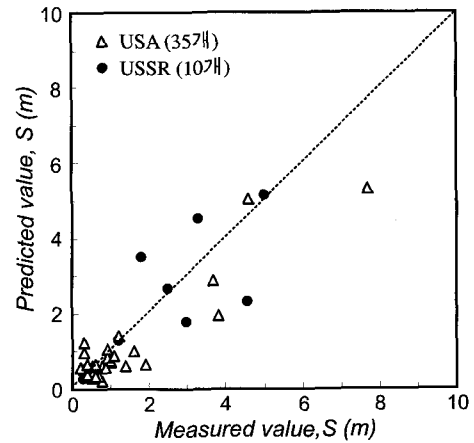


그림 2. 인공신경망 구조



(a) 학습



(b) 검증

그림 3. 인공신경망 모델 예측결과

표 1. 국가별 교각의 국부 세굴 관련 정보

국가	교각 형상	교각 폭 (m)	교각 길이 (m)	흐름 입사각 (°)	흐름 속도 (m/sec)	수심 (m)	D_{50} (mm)	세굴 깊이 (m)	자료 수
USA	1, 2, 3, 4	0.3~5.5	2.4~27.4	0~85	0.1~4.5	0.1~22.5	0.01~108	0~7.1	354
USSR	1,2	0.2~10.2	1~51	0~20	0.35~3.2	0.3~17.1	0.2~2.0	0.23~6.08	72

*. 교각형상에서 cylindrical = 1, round = 2, square = 3, sharp = 4을 의미한다. D_{50} = 하부 지반 흙이 체분석을 통해서 50%통과하였을 때의 체 입경을 의미한다.

학습 과정으로 얻어진 weight와 bias를 사용하여 학습에 사용되지 않은 45개의 나머지 세굴자료들에 대한 검증과정을 수행하였다. 학습 및 검증과정에서 얻어진 예측값과 계측값과의 관계가 그림 3에 나타나 있다. 학습과정에서 시험자료들에 대하여 높은 상관관계($R=0.898$)를 보였으며, 검증과정에서도 $R=0.795$ 정도의 상관관계를 보였다. 인공신경망 계산과정은 Kurup와 Dudani(2002)의 연구문헌에 기재되어 있다.

5. 기존모델들과의 비교

본 연구에서는 우리나라 하천설계기준(2005)에서 국부세굴 깊이 산정 시 사용되고 있는 HEC-18 식, Neill 식, Froehlich 식 및 Breusers 식을 미국 및 구소련(USSR) 세굴 자료에 적용한 결과가 그림 4에 나타나 있다. 그림

3에 나타나 있는 인공신경망 모델 식의 예측결과와 비교해 볼 경우 실측값보다 상당히 과다 예측하며 세굴심도 값이 커질수록 과다 예측하는 정도는 증가하는 것으로 나타났다.

미국 및 구소련에서 수집된 426개의 실제 현장 세굴 자료를 바탕으로 제안된 인공신경망 모델의 적용성을 검토하기 위하여 한국 및 뉴질랜드의 현장 세굴자료에 적용하여 보았다. 표 2에는 국내(여운광과 강준구, 1999) 및 뉴질랜드(Davoren, 1985)의 현장 세굴자료가 간략히 정리되어 있다.

그림 5에는 기존 세굴 산정식들과 제안된 인공신경망 모델의 적용성이 서로 비교되어 있다. 기존 산정식들은 미국 및 소련의 경우와 동일하게 계측값들에 비해 상당히 과다 예측하는 경향을 보였다. 이에 반해 제안된 인공신경망 모델로부터 구해진 예측값들은 계측값들과 큰

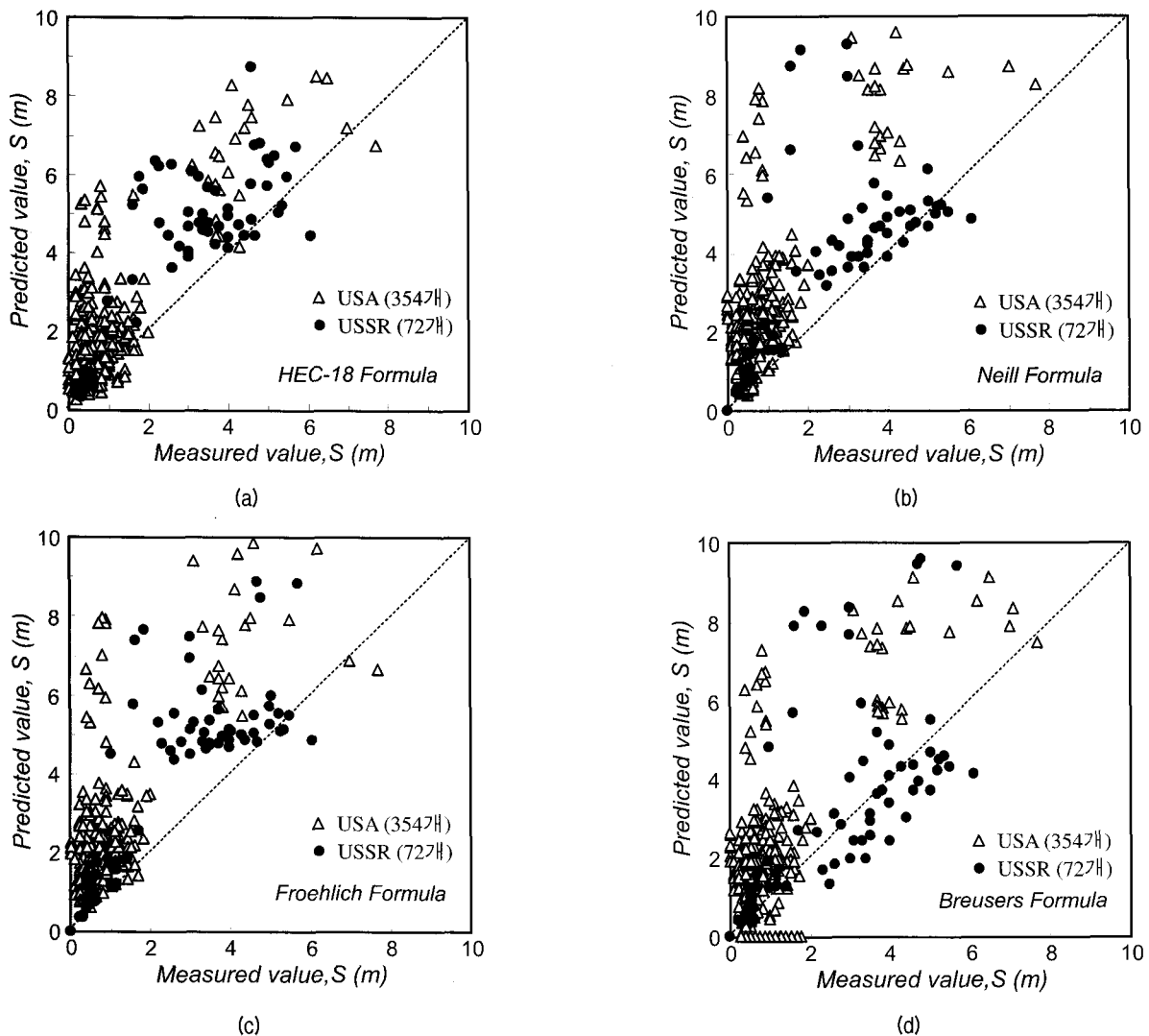


그림 4. 기존 세굴 산정식들을 이용한 예측결과

표 2. 국내 및 뉴질랜드의 현장 교각의 국부 세굴 관련 정보

국가	교각 형상	교각 폭 (m)	교각 길이 (m)	흐름 입사각 (°)	흐름 속도 (m/sec)	수심 (m)	D ₅₀ (mm)	세굴 깊이 (m)	자료 수
Korea	1,2	0.6~2.0	1.0~4.0	0~30	2.5~3.7	3.1~6.3	0.8~1.75	0.47~2.3	9
New Zealand	1	1.5	1.5	6	2.24~2.65	0.52~3.14	20	0.2~1.28	11

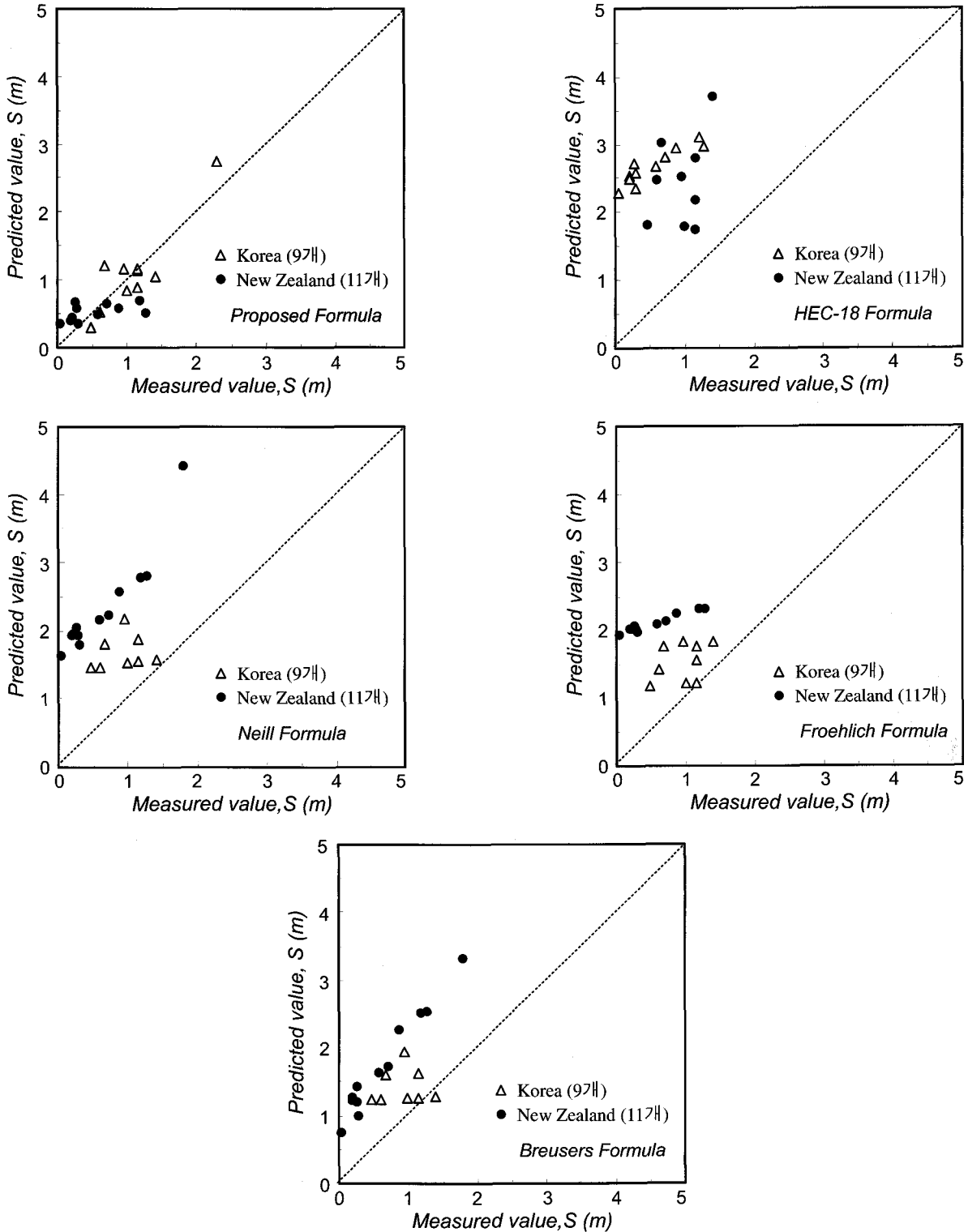


그림 5. 제안된 모델 및 기존 세굴 산정식들을 이용한 국내 및 뉴질랜드에서 계측된 세굴 자료에 대한 적용 결과 비교

표 3. 각각의 세굴심도 산정식들의 예측 정도 비교

	Proposed	HEC-18	Neill	Froehlich	Breusers
Sum of squared error	2.2	57.6	35.2	31.4	15.8

차이를 보이지 않음을 확인하였다. 표 3에는 각각의 산정식들의 오차 정도가 정리되어 있는데, 제안된 인공신경망 모델의 오차 정도가 가장 작게 나타났으며, Breusers, Froehlich, Neill, HEC-18의 순으로 오차 정도가 크게 증가하는 경향성을 보였다.

6. 결론

실제 하천 교각에서 계측된 세굴 자료로부터 국부 세굴심도를 산정할 수 있는 인공신경망 모델을 제안하였다. 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 미국 및 구소련에서 계측된 426개의 실제 하천 세굴자료를 바탕으로 교각 및 하천 기본자료와 세굴심도와의 상관관계를 인공신경망 해석을 통하여 구하였다. 세굴심도 예측에 사용된 인공신경망 모델(7×5×1)의 구조를 살펴보면 다음과 같다. 입력층은 교각 형상, 교각 폭, 교각 길이, 흐름 입사각, 유속, 수심 및 D_{50} 으로 7개의 유니트로 구성되어 있으며, 은닉층은 총 5개의 유니트이며, 출력층은 1개 유니트로서 세굴심도를 의미한다.
- (2) 기존의 대표적인 세굴심도 산정식들을 실제 현장 세굴자료들에 적용한 결과, 전반적으로 세굴심도를 상당히 과다 예측하는 경향성을 보인데 반해, 제안된 세굴심도 산정식은 계측자료들과 상당히 일치하는 경향성을 보였다.
- (3) 제안된 인공신경망 모델의 적용성을 검증하기 위하여 국내 및 뉴질랜드의 현장 세굴자료에 적용하였다. 기존 산정식들은 미국 소련의 세굴자료의 경우와 동일하게 상당히 과다 예측하는 경향성을 보인데 반해, 제안된 산정식은 예측 정도가 상당히 개선됨을 확인할 수 있었다.
- (4) 본 연구에서는 실제 교각에서 계측된 426개의 세굴자료를 활용하여 기존 세굴심도 산정식들보다 예측 정도가 개선된 세굴심도 산정식을 제안하였으며, 교각 및 하천 관련 기본 입력자료들로부터 실제 교각의 교각에서 유발되는 세굴심도를 비교적 신뢰성 있게 산정할 수 있음을 확인하였다.

- (5) 교각 설계 시 세굴에 대한 검토를 할 경우, 기존의 경험식에 대한 예측을 한 후 수치해석 시뮬레이션 혹은 실내모형실험을 수행하고 각각의 예측결과를 비교하여 세굴심도를 평가하고 있다. 기존의 경험식들은 시뮬레이션 결과보다 과다 예측하는 경향성이 있으므로, 본 연구에서 제안된 인공신경망 제안식이 시뮬레이션 결과를 보강할 수 있는 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 강진구, 심우배, 송재우 (2002), “신경망 이론을 이용한 교각 주위 국부세굴심 예측”, *대한토목학회 논문집*, Vol.22, No.2-B, pp.125-133.
2. 건설교통부 (1997), *하천횡단 구조물의 세굴안전진단 시스템의 개발*, '95 연구개발사업 최종보고서.
3. 건설교통부 (2005), *하천설계기준*.
4. 건설교통저널 (1998), *건설교통Journal*, 12월호.
5. 여운광, 강준구 (1999), “우리나라 중-소하천의 세굴 특징 조사연구(II)”, *한국수자원학회논문집*, 제32권, 제1호, pp.49-59.
6. 이성진, 이승래, 장범수 (2002), “인공신경망 모델을 이용한 불포화토 결빙기점착력 추정에 관한 연구”, *대한토목학회 논문집*, 제22권, 제3-C호, pp.331-344.
7. 최성욱, 정상화 (2002), “Monte-Carlo 시뮬레이션이 포함된 인공신경망을 통한 세굴심 예측”, *대한토목학회 2002년 학술발표회*, pp.596-599.
8. Breusers, H. N. C., Nicollet, G., and Shen, H. W. (1977), “Local scour around cylindrical piers”, *Journal of Hydraulics Research*, 15(3), pp.211-252.
9. Davoren, A. (1985), *Local scour around a cylindrical bridge pier*, Hydrology Centre, Christchurch, New Zealand, Publication no.3.
10. Froehlich, D.C. (1988), “Analysis of on-site measurements of scour at piers, in Abt, S.R., and Gessler, Johannes, eds.”, *Hydraulic Engineering-Proceedings of the 1988 National Conference on Hydraulic Engineering*, New York, ASCE, pp.534-539.
11. Hancu, S. (1971), “Sur le calcul des affouillements locaux dans la zone des piles des ponts”, *Proc., 14th IAHR Congress*, Paris, France, pp.299-313.
12. Jeng, D.S., Bateni, S. M., and Lockett, E. (2005), *Neural Network assessment for scour depth around bridge piers*, Research Report No R855, Department of Civil Engineering Environmental Fluids/Wind Group, The university of Sydney.
13. Kambekar, A.R. and Deo, M.C. (2003), “Estimation of pile group scour using neural networks”, *Applied Ocean Research*, Vol.25, pp.225-234.
14. Kurup, P. U., and Dudani, N. K. (2002), “Neural network for profiling stress history of clays from PCPT data”, *J Geotech Geoenviron Eng*, ASCE, 128(7), pp.569-579.
15. Laursen, E. M., and Toch, A. (1956), *Scour around bridge piers*

- and abutments*, Bulletin No. 4, Iowa Road Res. Board.
16. Laursen, E.M. (1960), "Scour at Bridge Crossings", *Journal Hydraulic Division*, ASCE, Vol.86, No.HY 2.
 17. Lin, C. (1998), *Analysis of Disasters Of Cross-River Bridge Foundations In The Western Area Of Taiwan And Establishment Of Data Base System For Their Protection Works*, Research Report, department of Civil Engineering, National Chung-Hisng University, Taichi ung, Taiwan, ROC. (in Chinese).
 18. Melville, B. W., and Sutherland, A. J. (1988), "Design method for local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, 114(10), pp.1210-1226.
 19. Mueller, D.S. and Wagner, C.R. (2003), *Field Observations and Evaluations of Streambed Scour at Bridges*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication FHWA-RD-03-052.
 20. Neill, C.R. (1964), *Local scour around bridge piers*, Council of Alberta, Highway and River Eng. Div.
 21. Richardson, E.V., Harrison, L.J., Richardson, J.R., and Davis, S.R. (1993), *Evaluating scour at bridges*, 2d ed.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular 18, Publication FHWA-IP-90-017, 132p.
 22. Richardson, E.V and Davis, S.R. (2001), *Evaluating scour at bridges*, 4th ed.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular 18, Publication FHWA-NHI-01-001, 378p.
 23. Richardson, E.V., Simons, D.B., and Lagasse, P.F. (2001), *River engineering for highway encroachments-highways in the river environment*, Federal Highway Administration, Hydraulic Series No. 6, Washington, D.C., Publication NHI-01-004.
 24. Shen, H. W. (1971), "Scour near piers", *River Mechanics II*, Chap.23, Ft.Collins, Colo.
 25. Wardhana, K. and Hadipriono, F.C. (2003), "Analysis of Recent Bridge Failures in the United States", *J. Perf. Constr. Fac.*, Volume 17, Issue 3, pp.144-150.

(접수일자 2008. 3. 7, 심사완료일 2008. 11. 3)