

flat DMT

Application of flat DMT and ANN for reliable estimation of undrained shear strength of Korean soft clay

<sup>1)</sup>, Wi-Yong Byeon, <sup>2)</sup>, Young-Sang Kim, <sup>3)</sup>, Seung-Rae Lee, <sup>4)</sup>, Eun-Taeg Jeong

<sup>1)</sup> , Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>2)</sup> , Professor, Division of Ocean System, Yosu National University

<sup>3)</sup> , Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>4)</sup> ( ) , Manager, Civil Engineering Team, Hyundai Development Co. Ltd.

**개요(SYNOPSIS)** : The flat dilatometer test(DMT) is a geotechnical tool to estimate in-situ properties of various types of ground materials. The undrained shear strength is known to be the most reliable and useful parameter obtained by DMT. However, the existing relationships which were established for other local deposits depend on the regional geotechnical characteristics. In addition , the flat dilatometer test results have been interpreted using three intermediate indices - material index( $I_D$ ), horizontal stress index( $K_D$ ), and dilatometer modulus( $E_D$ ) and the undrained shear strength is estimated only by using the horizontal stress index( $K_D$ ). In this paper, an artificial neural network was developed to evaluate the undrained shear strength by DMT and the ANN, based on the  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $\sigma'_{v0}$ , and porewater pressure. The ANN which adopts the back-propagation algorithm was trained based on the DMT data obtained from Korean soft clay. To investigate the feasibility of ANN model, the prediction results obtained from data which were not used to train the ANN and those obtained from existing relationships were compared.

**주요어(Key words)** : flat dilatometer test(DMT), undrained shear strength, artificial neural network(ANN), soft clay

## 1. 서론

1980년 Marchetti에 의해 처음 고안된 flat DMT는 지반 특성을 파악하기 위하여 적용되고 있는 현장 시험 방법으로 매우 신속하고 간편하며 경제적으로 시험을 수행할 수 있을 뿐 아니라 시험자에 거의 상관없이 매우 신뢰성 있는 결과를 제공하는 장점을 가지고 있다. DMT 결과는 Marchetti에 의해 제안된 3가지 중간 지수에 의해 해석이 이루어지며 많은 연구자들에 의해 이들 지수를 이용하여 지반 설계변수들을 예측하는 여러 상관관계식들이 제안되었다. 즉 DMT 자료 분석으로부터 연직 배수 구속 변형계수(M), 비배수 전단강도( $s_u$ ), 현장 수평 정지토압계수( $K_0$ ), 과압밀비(OCR), 수평압밀계수( $c_h$ ), 단위중량 및 흙의 종류 등 여러 지반 설계변수들을 추정할 수 있다. 특히 이들

중  $M$ 과  $s_u$  값이 DMT 시험에 의해 가장 신뢰성 있고 유용하게 추정될 수 있는 지반 설계변수 값으로 알려져 있다 (Marchetti 등, 2001).

Marchetti(1980)는 Ladd 등(1977)이 제안한 식 (1)을 기초로 해서 비배수 전단강도를 산정하는 경험적인 방법을 제안하였다.

$$(s_u/\sigma_v')_{OC} = (s_u/\sigma_v')_{NC} OCR^A \quad (1)$$

여기서  $(s_u/\sigma_v')_{NC}$ 는 Mesri(1975)가 제안한 0.22를 사용하며 Marchetti(1980)가 제안한 OCR과  $K_D$  관계식 (2)를 사용하면 비배수 전단강도를 구하는 상관관계식은 식 (3)과 같이 정의될 수 있다.

$$OCR = (0.5K_D)^{1.56} \quad \text{for } I_D \leq 1.2 \quad (2)$$

$$s_u = 0.22\sigma_v'(0.5K_D)^{1.25} \quad \text{for } I_D \leq 0.6 \quad (3)$$

한편 Kamei & Iwasaki(1995)는 일본 점토에 대한 일축압축(UC)시험으로부터 얻어진 비배수 전단강도와 비압밀 비배수 삼축압축(UU) 시험 자료를 바탕으로 식 (3)을 보정하여 자국의 지반에 적합한 비배수 전단강도식을 다음과 같이 수정 제안하였다.

$$OCR = (0.47K_D)^{1.43} \quad (4)$$

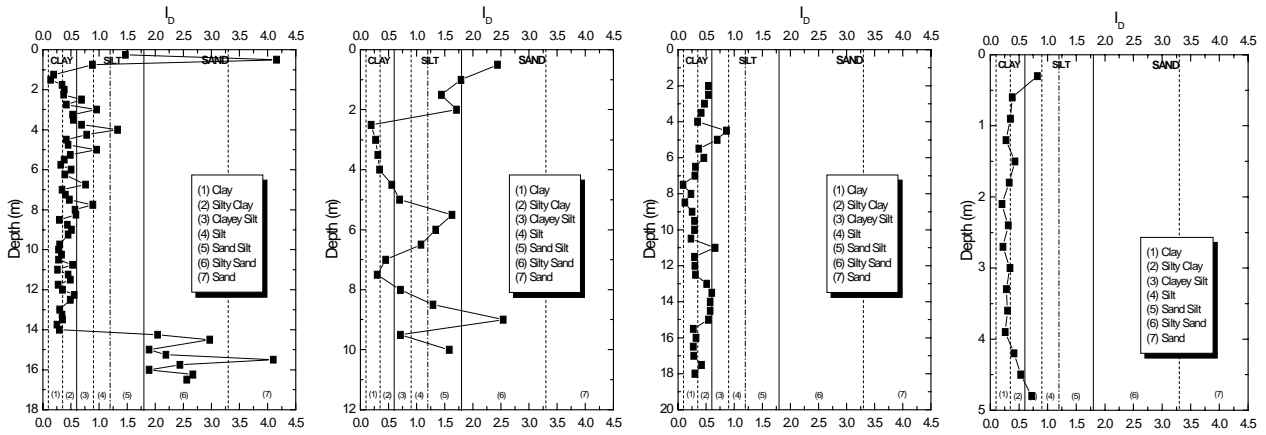
$$s_u = 0.35\sigma_v'(0.47K_D)^{1.14} \quad (5)$$

그러나 비배수 전단강도는 경계 조건, 구속 조건, 초기 조건 그리고 현장 시험 장비 특성 등에 의해 영향을 받으므로 시험 방법에 따라 다른 비배수 전단강도가 추정될 수 있다. 따라서 국내 지반과는 다른 공학적 특성을 나타내는 자료를 활용하여 제안된 여러 상관관계식들을 그대로 국내 지반에 적용할 경우, 예측된 결과의 신뢰성을 확보하기 어려운 경우가 빈번히 발생하고 있다. 이에 본 연구에서는 국내 연약지반에서 수행된 DMT 자료를 활용하여 보다 신뢰성있는 비배수 전단강도를 예측할 수 있도록 인공신경망 이론의 적용성을 검토하였다.

인공신경망은 다양한 입력변수에 대한 검토가 가능하며 현장지반의 변화와 입력된 자료의 불확실성을 고려할 수 있도록 학습함으로써 기존의 경험적 상관관계보다 높은 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다(Goh, 1994). 또한 비배수 전단강도는 비교란 시료를 이용한 UU, UC 또는 현장 배인 시험으로부터 구할 수 있으며 여러 연구자들에 의해 이러한 시험 방법들이 타당한 결과를 제공하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 UU, UC 그리고 현장 배인 시험을 기준되는 시험(reference tests)으로 선택하여 DMT 시험 결과와 비교하였으며 인공신경망 모델 적용 시 최종목표(target) 자료로 활용하였다.

## 2. 비배수 전단강도

본 연구에서는 국내 서·남해안에 위치한 4개 지역의 연약지반을 대상으로 총 20회의 DMT 시험을 수행하였으며 일축, 삼축 그리고 현장 배인 시험에서 각각 얻어진 비배수 전단강도를 DMT 시험으로 예측된 값과 비교하였다. 그림 1에는 DMT 시험을 통한 대상 지역의 대표적인 지반 특성을 보여주고 있다. 대부분 점토 지반으로 구성되어 있으며 Site-2의 경우는 점토 지반 중간에 실트층과 모래층이 존재하는 지반 특성을 보여주고 있다.



(a) Site-1

(b) Site-2

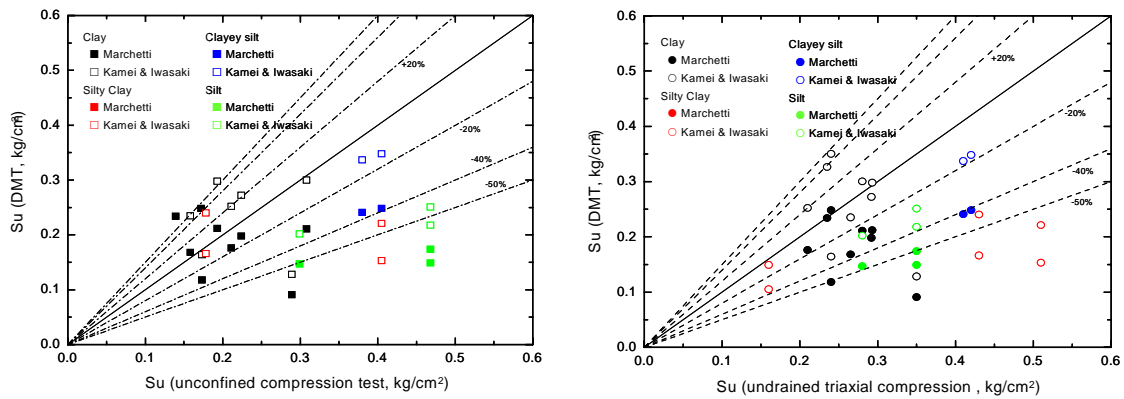
(c) Site-3

(d) Site-4

그림 1. 시험 대상 지역의 지반 특성

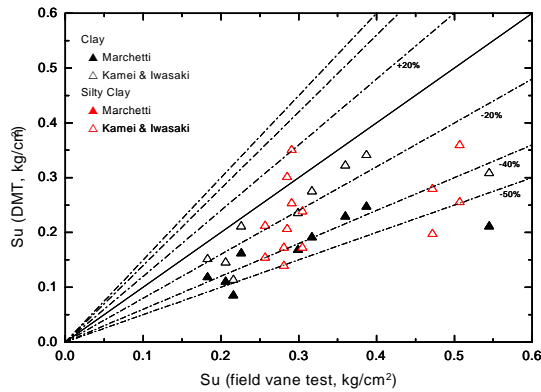
## 2.1 비배수 전단강도 비교

4개 지역의 지반을 대상으로 DMT 시험을 수행한 자료를 활용하여 기존에 제안된 상관관계식 (3)과 (5)를 이용하여 비배수 전단강도를 추정하고 실내시험에서 얻어진 비배수 전단강도와 비교하였다.



(a) 일축 압축시험과 DMT 시험 결과 비교

(b) 삼축 시험(UU)과 DMT 시험 결과 비교



(c) 현장 베인시험과 DMT 시험 결과 비교

그림 2. 일축, UU 또는 현장 베인시험으로부터 구한 비배수 전단강도와 DMT 시험 결과 비교

앞서 기술한 바와 같이 Marchetti의 제안 식 (3)은 Mesri(1975)가 제안한 현장 배인 시험으로부터 제안된 값  $(s_u/\sigma'_v)_{NC} = 0.22$ 을 사용하여 도출한 상관관계식이며 Kamei & Iwasaki(1995)의 제안 식 (5)는 UU와 UC로부터 유도한 상관관계식이다. 그러나 그림 2에서 알 수 있듯이 현장 배인 시험 결과와 비교한 경우 Marchetti 식보다는 Kamei & Iwasaki 식이 다소 유사한 결과를 추정하는 것으로 판단되며 전체적으로 기존에 제안된 상관관계식으로부터 추정된 비배수 전단강도는 기준이 되는 시험결과와는 차이가 나며 분산이 큰 것을 알 수 있다(그림 2). 이러한 이유는 여러 가지가 있으며 이 중에서 몇 가지를 제시하면 다음과 같다.

## 2.2 단위중량의 과소평가

비배수 전단강도 추정식 (3)과 (5)를 이용하기 위해서는 지반의 응력상태( $\sigma'_v$ )를 구해야 하며 일반적으로 실내시험으로부터 직접 얻어진 값을 입력하거나 Marchetti & Crapps(1981)가 제안한 상관관계인 그림 3을 이용하면 DMT 시험 결과로 얻어진 단위중량을 추정하여 초기 응력을 구할 수 있다. FHWA(1988)에서는 Marchetti & Crapps의 제안을 이용하여 깊이에 따른 단위중량 변화를 고려한 상재하중을 예측하여 해석에 사용하고 있다. 그림 3은 국내 연약지반에서 실내시험으로 얻어진 단위중량을 Marchetti & Crapps(1981)의 단위중량 상관관계를 나타내는 그림에 도시하여 비교한 것이며 그림 4는 국내외에서 얻어진 지반의 실제 단위중량과 그림 3을 이용하여 예측한 단위중량을 비교한 것으로 국내 자료와 국외 자료에서 모두 전반적으로 과소평가하는 경향을 보여주고 있다.

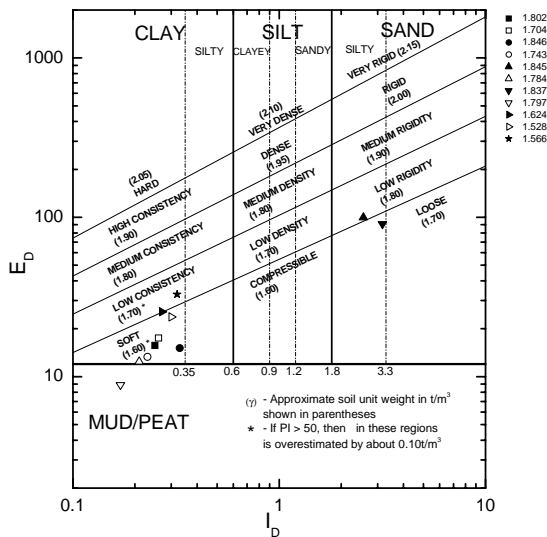


그림 3. 단위중량 비교

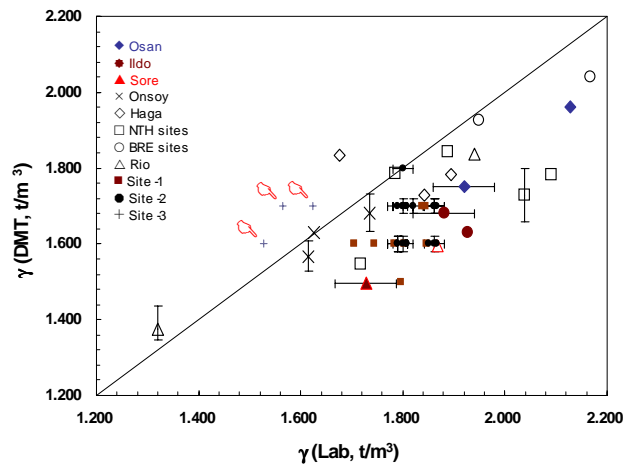


그림 4. 기존 자료를 이용한 여러 지역의 단위중량 비교

그림 4에서 Site-3 지역(➕ 표시)의 경우 DMT로부터 구해지는 단위중량이 실내시험보다 높게 평가되는데 이는 표 1에서 알 수 있듯이 Site-3 지역의 경우에는 소성지수가 다른 지역보다 다소 높은 것을 알 수 있다. Marchetti & Crapps (1981)의  $I_D$ - $E_D$  상관관계에서도 소성지수가 50이상인 경우에는  $0.1t/m^3$  이상 단위중량을 과대평가하는 것으로 지적하였다(그림 3). 그러므로 Site-3 지역의 경우도 이에 따르면 다소 과소평가하는 것으로 판단할 수 있다. 결과적으로 DMT로부터 구한 단위중량은 과소평가되는 경향이 있으며 이는 비배수 전단강도를 추정하는데 영향을 주게 된다.

표 1. 몇몇 지역 점토의 소성지수

지역	오산	일도	소래	Site-1	Site-2	Site-3
소성지수	15~20	19~25	26~20	4.9~23	2.6~12.2	36.8~54.8

### 2.3 과압밀비 (OCR)

한편 식 (3)과 (5)에는 상재하중과 더불어 비배수 전단강도 추정에 영향을 미치는 요소로 과압밀비가 있으며 Marchetti(1980)와 Kamei & Iwasaki(1995) 방법 모두 수평응력계수 ( $K_D$ )로부터 과압밀비를 예측하고 있다. 이에 대한 예측 결과는 그림 5에서 알 수 있듯이 두 방법이 모두 대체적으로 유사한 경향을 보여주고 있지만 국내 지반과 같이 과압밀비가 크지 않은 지반의 경우에는 차이가 있을 수 있다. 이는 실내시험결과와 비교한 그림 6에서 보다 명확하게 알 수 있다.

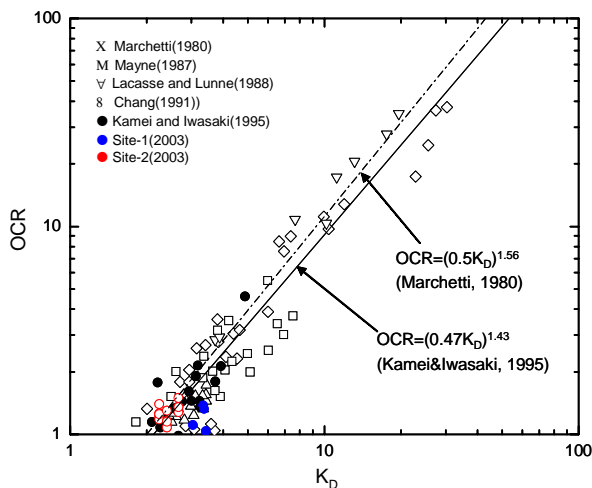


그림 5. 연약지반에서의 OCR- $K_D$ 간의 관계

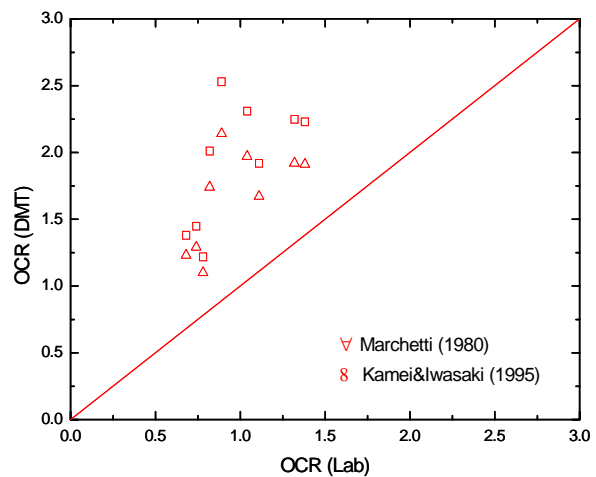


그림 6. 실내시험과 DMT 시험으로부터 구한 OCR 비교

즉 그림 6에서 알 수 있듯이 기존의 OCR 상관관계를 이용한 예측은 국내 지반의 경우 OCR을 다소 과대 평가하는 것으로 판단되며 이 또한 예측되는 비배수 전단강도에 분산을 야기하는 한 요인으로 사료된다.

### 3. ANN 모델의 적용

연약지반의 신뢰성 있는 비배수 전단강도를 예측하기 위해 이용되는 기존의 방법들은 앞에서 제시한 영향 요인 뿐 아니라 다양한 인자들이 그 결과에 영향을 미치므로 이들 각 요소간의 복합적인 작용을 기존의 간단한 상관관계식만으로는 표현하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 DMT로부터 비배수 전단강도를 예측하기 위하여 인공신경망 모델의 적용성을 검토하였다.

인공신경망 이론은 인간의 뇌 구조에서 학습되고 축적되는 기존 지식의 운용체계를 모사한 컴퓨터 모델로 최근 지반공학 분야에서도 다양한 문제에 적용되고 있다(Toll, 1996; 이성진, 2002; 김영상, 2003). 인공신경망 모델은 먼저 기지의 입력과 결과를 이용하여 각 층에 존재하는 뉴런간의 연결강도를 조정하는 훈련단계와 훈련과정을 통하여 구축된 모델을 검증하는 단계로 이루어져 있다.

### 3.1 구축된 모델 특성

본 연구에서는 4개 지역의 대상 연약지반지역에서 수행된 DMT자료들과 실내시험결과들을 이용하여 인공신경망 모델을 훈련, 검증하였다. 인공신경망 모델을 학습하기 위하여 19개의 학습 자료를 구축하였으며 구축된 모델을 검증하기 위하여 7개의 자료를 사용하였다.

본 연구에서 구축된 인공신경망 모델은 매트랩 툴박스(Matlab neural network toolbox)를 이용하였으며 오차 역전파 알고리즘을 학습 모델로 사용하였다. DMT 시험 자료를 활용한 비배수 전단강도를 추정하기 위한 인공신경망 모델은 5-3-1 구조이며 이는  $p_0, p_1, p_2, u_0, \sigma_v'$ 으로 구성된 입력층(input layer)과 3개의 뉴런으로 구성된 단일 은닉층(hidden layer) 그리고 비배수 전단강도를 제공하는 출력층(output layer)으로 모델이 되었음을 의미한다.

19개의 학습 자료를 이용하여 인공신경망 모델을 학습한 결과가 그림 7에 제시되어 있으며 그림 8에는 학습되어 추정된 비배수 전단강도를 기존 상관관계식들의 결과와 비교하였다. 학습된 인공신경망 모델의 예측결과가 기존 상관관계식보다 매우 적은 분산을 보이며 실험으로 얻어진 비배수 전단강도와 잘 일치하는 신뢰성 있는 결과를 제시하는 것으로 볼 때 구축된 신경망 구조가 효율적으로 구축되었음을 알 수 있다.

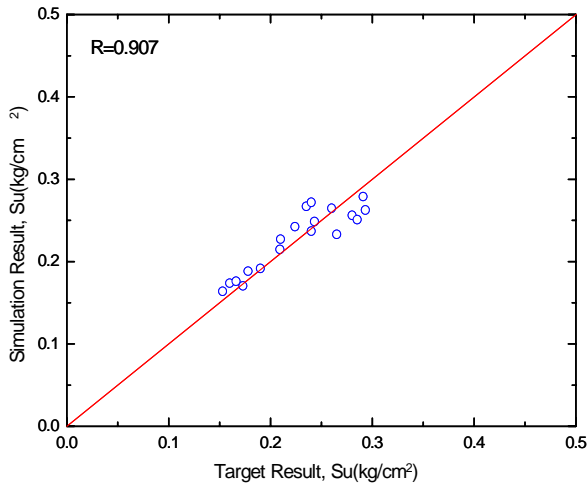


그림 7. 기존 자료를 이용한 훈련 결과

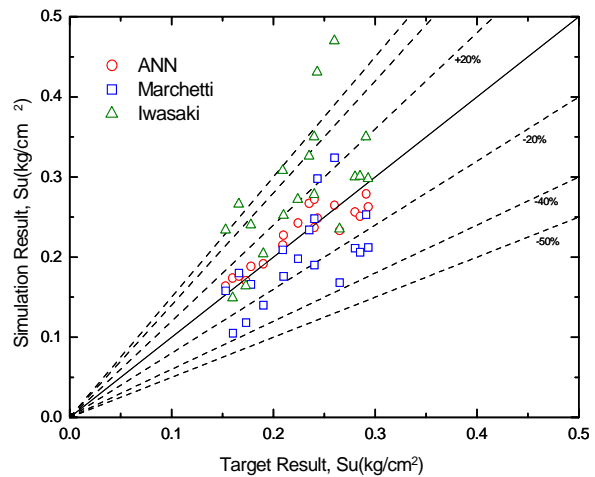


그림 8. 인공신경망 모델 결과와 기존 식을 이용한 결과의 비교

### 3.2 구축된 ANN 모델의 검증

구축된 모델을 검증하기 위하여 모델 구축 시 사용되지 않은 총 7개의 자료를 활용하여 인공신경망 모델을 검증하였으며 결과는 그림 9와 같다. 또한 인공신경망 모델을 통해서 추정된 비배수 전단강도 예측 결과를 기존 상관관계식들로 예측된 결과와 비교하여 그림 10에 도시하였다. 그림 10에서 알 수 있듯이 기존의 Marchetti와 Kamei & Iwasaki 식이 상당한 분산을 가질 뿐 아니라 과대 또는 과소평가하는 등 일관성이 결여된 것으로 보이는 반면 인공신경망 모델은 기존 상관관계식에 비하여 좀더 합리적인 비배수 전단강도를 추정하는 것을 알 수 있다.

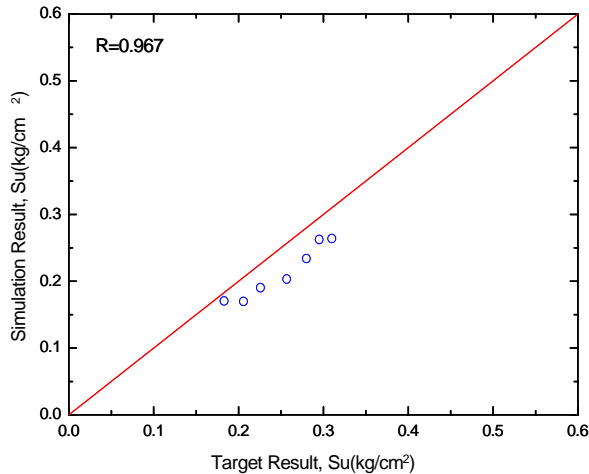


그림 9. 인공신경망 모델의 검증 결과

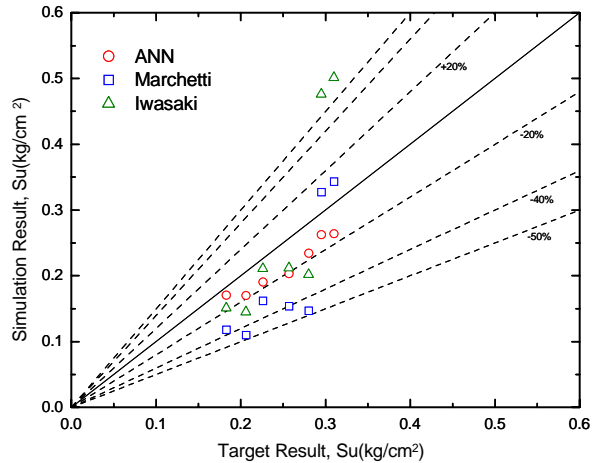


그림 10. 기존 식 결과와의 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 현장 시험 방법 중에 하나인 flat DMT를 이용하여 연약지반의 신뢰성 있는 비배수 전단강도를 추정하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 기존에 제안된 Marchetti(1980) 방법과 Kamei & Iwasaki (1995) 방법을 적용하여 실내시험인 일축과 UU시험 그리고 현장 시험인 현장 배인 시험을 통해서 구한 비배수 전단강도를 비교하였다. 현장 배인 시험의 경우 Kamei & Iwasaki 방법이 비교적 실험값과 일치하는 경향을 보이지만 전반적으로 Marchetti와 Kamei & Iwasaki 방법이 다른 시험방법들에 비해 비배수 전단강도를 과소평가하는 경향을 보이고 있으며 일축과 UU시험에서는 두 방법 모두 분산이 크고 일관성이 결여된 경향을 보인다. 또한 이들 방법들은 모두 OCR- $K_D$  간의 관계를 이용하여 비배수 전단강도를 추정하고 있으므로 단위중량 평가, OCR- $K_D$  간의 상관관계에 의해 큰 영향을 받을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Marchetti가 제안한 지수가 아닌 DMT 시험 자료인  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ 를 이용하여 대상 지반의 다양한 공학적 특성을 포함할 수 있도록 인공신경망 모델을 구축하였다. 이는 기존에 제안된 통계적 회귀분석 모델에 포함된 오류나 현장 지반 조건의 다양성 그리고 시료채취 시 야기되는 교란 효과 등으로 발생하는 경험적 상관관계의 오차 등을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 총 26개의 자료 중 19개의 학습 자료와 7개의 검증자료를 구분하여 인공신경망 모델을 구축하고 검증하였으며 기존에 제안된 상관관계식 으로부터 나온 비배수 전단강도와 비교하였을 때 신뢰성 있는 결과를 제공하는 것을 알 수 있었다. 이는 제안된 인공신경망 모델이 현장 지반 조건의 다양성과 입력된 자료의 부적절성까지 학습할 수 있으므로 기존의 경험적 상관관계보다 높은 신뢰성을 제공할 수 있기 때문으로 사료된다. 추후에 국내 지반에 대한 보다 많은 실험 자료가 추가될 경우 기존의 인공신경망 모델을 재학습함으로써 손쉽게 수정할 수 있으며 이로부터 국내 지반에 보다 적합한 모델을 구축할 수 있어 지속적인 연구가 요망된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 선정한 스마트 사회기반시설연구센터 (생산기반 분야/ERC)의 연구비 지원으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김영상 (2003), “피에조콘을 이용한 점토의 비배수전단강도 추정에의 인공신경망 이론 적용”, 한국지반공학

- 회논문집, 제 19권, 4호, pp. 287~298.
2. 김영상, 변위용, 이승래 (2003), "DMT를 활용한 국내 연약지반의 구속압축계수와 비배수 전단강도의 평가", 한국지반공학회 연약지반기술위원회 2003 학술세미나, pp.33~45.
  3. 김윤태 (1991), Flat Dilatometer 현장시험을 통한 점토지반의 공학적 성질 추정에 관한 연구, 석사학위논문, KAIST, pp. 19~20.
  4. 이성진, 이승래, 장범수 (2002), "인공신경망 모델을 이용한 불포화토 겔보기점착력 추정에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제 22권, 제 3-C호, pp.331~344.
  5. Goh, A.T.C. (1994), "Seismic liquefaction potential assessed by neural-networks", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 9, pp. 1467~1480.
  6. Kamei, T. & Iwasaki, K. (1995). "Evaluation of undrained shear strength of cohesive soils using a flat dilatometer". Soils and Foundations, Vol. 35, No. 2, June, 111~116.
  7. Marchetti, S. (1980). "In situ tests by flat dilatometer". ASCE Jnl GED, Vol. 106, No. GT3, Mar., 299~321.
  8. Marchetti, S. and Crapps, D. K., 1981, "Flat dilatometer manual," GPE Inc., Gainesville, FL.
  9. Marchetti S., Monaco P., Totani G. & Calabrese M. (2001), "The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations" A Report by the ISSMGE Committee TC 16. Proc. IN SITU 2001, Intl. Conf. On In Situ Measurement of Soil Properties, Bali, Indonesia, May 2001, 1~41.
  10. Ladd, C.C., Foot, R., Ishihara, K., Poulos, H.G. and Schlosser, F. (1977), "Stress-deformation and strength characteristics", Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, State-of-the-Art-Paper, 421~494.
  11. Mesri, G. (1975): Discussion of "New design procedure for stability of soft clays," by Ladd, C.C. and Foot, R., Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT4, pp. 409~412.
  12. Schmertmann and Crapps, inc. (1988), "Guideline Summary for Using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical Design", Rept. No. FHWA-PA-87-014+84-24 Submitted to PennDot, Office of Research and Special Studies, Harrisburg, PA, Feb., in 4 volumes with the three below concerning primarily the DMT.
  13. Toll, D. (1996), "Artificial Intelligence applications in geotechnical engineering", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Premiere Issue.