



뉴로-퍼지 시스템을 이용한 프리텐션 콘크리트 부재의 전달길이 예측

김민수¹⁾ · 한선진¹⁾ · 조해창¹⁾ · 오재열¹⁾ · 김강수^{1)*}

¹⁾서울시립대학교 건축학부

Prediction of Transfer Lengths in Pretensioned Concrete Members Using Neuro-Fuzzy System

Minsu Kim,¹⁾ Sun-Jin Han,¹⁾ Hae-Chang Cho,¹⁾ Jae-Yuel Oh,¹⁾ and Kang Su Kim^{1)*}

¹⁾Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 02504, Rep. of Korea

ABSTRACT In pretensioned concrete members, a certain bond length from the end of the member is required to secure the effective prestress in the strands, which is defined as the transfer length. However, due to the complex bond mechanism between strands and concrete, most transfer length models based on the deterministic approach have uncertainties and do not provide accurate estimations. Therefore, in this study, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), a Neuro-Fuzzy System, is introduced to reduce the uncertainties and to estimate the transfer length more accurately in pretensioned concrete member. A total of 253 transfer length test results have been collected from literatures to train ANFIS, and the trained ANFIS algorithm estimated the transfer length very accurately. In addition, a design equation was proposed to calculate the transfer length based on parametric studies and dimensional analyses. Consequently, the proposed equation provided accurate results on the transfer length which are comparable to the ANFIS analysis results.

Keywords : ANFIS, fuzzy, transfer length, neuro-fuzzy, pretensioned concrete member

1. 서 론

최근 전산·컴퓨터의 발달과 더불어 건축 및 토목공학 분야에서는 해석변수가 다양해지고, 복잡해짐에 따라 지능정보 시스템을 이용한 문제해결 노력이 활성화되고 있다.^{1,2)} 일례로 Cho et al.³⁾은 뉴로-퍼지(Neuro-Fuzzy)를 이용한 강섬유보강 콘크리트 휨부재의 전단강도 평가방법을 제안한 바 있으며, Mehmet et al.⁴⁾은 유전자 알고리즘을 이용하여 프리텐션부재에서 강연선의 전달길이를 규명하기 위한 해석적 연구를 진행하였다.

프리텐션 부재에서 강연선에 도입되는 프리스트레스는 콘크리트와 강연선 사이에 발달되는 부착응력을 통해 콘크리트에 전달되고, 강연선이 유효 프리스트레스에 도달되기 위해 요구되는 거리를 전달길이라고 한다.⁵⁾ 이러한 전달길이는 도입 시 콘크리트 압축강도(f_c), 프리스트레스 도입응력(f_{pi}), 콘크리트 피복두께(C), 강연선의 직경(d_b) 등 다양한 요인에 의하여 영향을 받는다.⁵⁾ 프리텐션 부재에서의 전달

길이를 규명하기 위하여 많은 연구자들이 실험 및 이론적 연구를 진행하였으나, 강연선과 콘크리트 사이의 복잡한 부착 매커니즘으로 인해 전달길이 산정에 많은 불확실성을 내포하고 있다. 따라서, 이 연구에서는 전달길이에 영향을 미치는 다양한 인자들의 복잡한 메커니즘을 보다 효과적으로 고려하여 정확한 전달길이를 산정하고자 인공지능망과 퍼지 이론을 조합한 Adaptive Neuro-Fuzzy System (ANFIS)을 도입하였다. 기존연구⁶⁻¹⁴⁾로부터 총 253개의 전달길이 실험체 데이터를 수집하였으며, 이를 기반으로 ANFIS 알고리즘 훈련을 실시하여 전달길이 산정을 위한 ANFIS 해석모델을 구축하였다. 또한, 구축된 해석모델을 바탕으로 방대한 양의 변수 분석 및 차원해석을 통하여 현행기준들¹⁵⁻¹⁸⁾에서 제시하고 있는 전달길이 산정식보다 정확도가 높은 설계식을 제안하고자 하였다.

2. ANFIS를 이용한 전달길이 모델 개발

2.1 전달길이 산정 현행기준 및 기존 연구

ACI 318-14¹⁵⁾ 및 AASHTO-LRFD¹⁶⁾에서는 프리텐션 부재의 전달길이($l_{t,ACI}$ 및 $l_{t,AASHTO}$)를 강연선의 직경(d_b) 또는 유

*Corresponding author E-mail : kangkim@uos.ac.kr

Received August 3, 2016, Revised October 10, 2016,

Accepted October 19, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

효 프리스트레스(f_{pc})에 관한 단순한 함수, 즉,

$$l_{t,ACI} = \frac{1}{21} f_{pc} d_b \quad (1)$$

$$l_{t,AASHTO} = 60d_b \quad (2)$$

로 각각 제시하고 있다. ACI에서 제시하고 있는 전달길이 산정식은 현행 KCI 2012¹⁷⁾에서도 동일하게 적용되고 있다. 위 두 식은 전달길이를 보수적으로 평가하는 경향을 나타내며, 콘크리트 압축강도, 피복두께 등 Hoyer effect에 영향을 미치는 다른 인자들을 반영하지 못하고 있다.⁵⁾ Eurocode 2¹⁸⁾는 콘크리트 인장강도(f_{ctd}), 프리스트레스 도입응력(f_{pi})과 강연선의 직경(d_b)에 관한 함수로 전달길이($l_{t,EC2}$)를

$$l_{t,EC2} = \alpha_1 \alpha_2 \frac{f_{pi}}{\eta_{p1} \eta_1 f_{ctd}(t)} d_b \quad (3)$$

으로 산정하도록 제시하고 있으며, 여기서, α_1 은 프리스트레스 도입방법에 따른 계수, α_2 와 η_{p1} 은 강연선 종류에 따른 계수이며, η_1 은 강연선과 콘크리트 사이의 부착상태에 따른 계수이다.¹⁸⁾

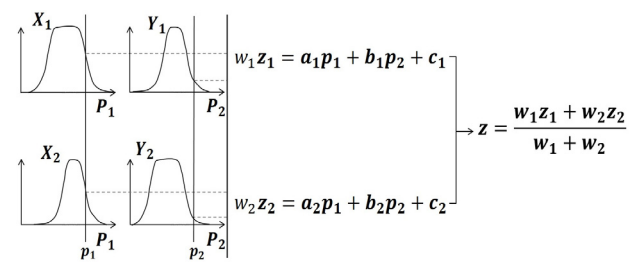
Park and Cho⁶⁾는 전달길이 구간 내에서 콘크리트와 강연선의 변형을 변화곡선을 2차 함수의 형태로 가정한 부착-슬립 관계를 제시함으로써 전달길이를 간략하게 산정할 수 있는 해석모델을 제시하였다. Han et al.⁵⁾은 두꺼운 벽 실린더 이론(Thick-walled cylinder theory)을 이용하여 프리스트레스 도입 시 발생하는 Hoyer effect를 이론적으로 모델링하고, 전달길이를 산정할 수 있는 수치해석 알고리즘을 제시하였다. 이와 더불어 다양한 변수분석을 통해 프리스트레스 도입 시 콘크리트 압축강도(f'_c), 콘크리트 피복두께(C), 초기 프리스트레스(f_{pi})와 강연선의 직경(d_b)이 전달길이에 미치는 영향을 상세히 분석하였다. 이러한 이론적 연구들에도 불구하고 강연선과 콘크리트 사이의 부착매커니즘에 의해 지배되는 전달길이를 산정하기 위해서는 대부분 수치해석적 접근이 요구된다.⁵⁾

2.2 ANFIS 평가기법

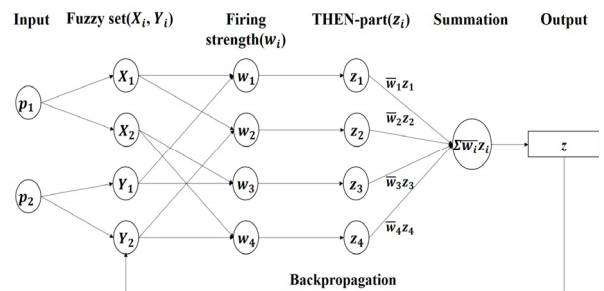
지능정보시스템을 철근콘크리트 공학분야에 응용한 사례는 여러 연구에서 찾아볼 수 있다. Cho et al.¹⁹⁾은 Neuro-Fuzzy System을 이용하여 철근콘크리트 패널의 전단거동을 평가하는 모델을 제안하여, 기존 모델들에 비해 매우 높은 정확도를 보여주었다. Kim et al.²⁰⁾은 퍼지이론을 이용하여 균열진단 시스템을 개발한 바 있고, Song et al.²¹⁾은 베이지안 모수 추정방법(Bayesian parameter method)을 활용하여 전단철근이 보강되지 않은 철근콘크리트 보의 전단강도 평가방법을 제시하였으며, 제안모델은 기존 전단강도 모델들에 비해 매우 높은 정확도를 보여주었다. 뉴로-퍼지 시스템(Neuro-Fuzzy

system)은 인공신경망(Artificial Neural Network)과 퍼지(Fuzzy)이론을 조합한 이론이다. 퍼지(Fuzzy)이론은 경계가 애매하고 불분명하거나 다양한 변수들의 영향으로 인해 변수들의 상관관계를 명확히 알기 어려운 문제에 많이 활용되고 있다.²²⁾ 그러나, 기존 퍼지(Fuzzy)이론은 퍼지연산을 통해 도출된 결과값과 실제 실험데이터 사이에 발생하는 오차를 수정하기 어렵다. 반면에, 인공신경망 이론은 인간의 두뇌 신경망 매커니즘을 모방한 학습 알고리즘으로서, 입력 정보와 수렴 목표에 따라 스스로 학습되어지며, 충분한 학습이 이루어지면 매우 정확한 결과를 출력할 수 있다.²³⁾ 따라서, 이 연구에서는 뉴로-퍼지 시스템 중 대표적 방법인 ANFIS²⁴⁾를 사용하여 프리텐션 부재의 전달길이를 평가하고자 하였다. 퍼지(Fuzzy)이론에서는 퍼지집합에 대한 입력변수의 소속 정도를 소속함수로 나타낼 수 있으며, 이 연구에서 도입한 Sugeno fuzzy model²⁴⁾과 ANFIS 구조를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에서, p_1, p_2 는 입력 변수, X_i, Y_i 는 i 번째 퍼지 규칙에 해당하는 입력변수 p_1, p_2 의 퍼지집합, z_i 는 i 번째 퍼지 규칙에 따른 출력변수, a_i, b_i, c_i 는 i 번째 퍼지규칙의 결론부 인자이며, z 는 z_i 를 비퍼지화 시킨 값이다. 여기서, 결론부 인자 a_i, b_i, c_i 는 최소제곱법을 통해 결정된다. Fig. 1(b)의 ANFIS 구조에서 입력 변수 p_1, p_2 에 따라 i 번째 퍼지 규칙에 해당하는 퍼지집합 X_i, Y_i 의 소속함수를 계산할 수 있다. 퍼지이론에서 발화강도(firing strength) w_i 는 i 번째 퍼지규칙 결과값의 소속함수를 의미하며, 각 입력변수 소속함수의 최소값으로 산정된다. 최소값 연산을 통해 도출된 발화강도 w_i 는 결론부 출력을 위하여 정규화되며, 정규화된 발화강도 \bar{w}_i 는

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum w_i} \quad (4)$$



(a) Fuzzy inference concept



(b) ANFIS structure

Fig. 1 Fuzzy inference concept and ANFIS structure

로 결정될 수 있다. 정규화된 발화강도와 최소제곱법을 통해 도출된 결론부인자 z_i 를 비퍼지화하여 최종 출력값 z 를 얻을 수 있다. Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 역전파 학습(backpropagation)을 통하여 실제 데이터와의 오차를 감소시킴으로써 보다 정확한 최종 출력값 z 를 얻을 수 있다.

2.3 ANFIS를 이용한 전달길이 예측

이 연구에서는 Han et al.⁵⁾의 연구결과에 근거하여 프리텐션 부재의 전달길이 예측을 위한 입력변수로 강연선의 직경(d_b), 프리스트레스 도입응력(f_{pi}) 및 이 때의 콘크리트 압축강도의 역수($1/f_{ci}$)와 콘크리트 피복두께의 역수($1/C$)를 사용하였다. 프리스트레스 도입 시 콘크리트 압축강도(f_{ci})와 콘크리트 피복두께(C)를 역수의 형태로써 입력변수로 선택한 이유는 ANFIS 알고리즘의 학습 효율을 향상시키기 위함이다. 예를 들어, 강연선의 직경(d_b)이 증가하면 전달길이가 증가하는 반면, 도입 시 콘크리트 압축강도(f_{ci})가 증가하면

전달길이는 감소하게 된다. 만약, 도입 시 콘크리트 압축강도(f_{ci})를 그대로 입력변수로 선택하게 되면 다른 변수들(d_b , f_{pi})과 반대되는 경향으로 인해 최소 오차점(global minimum)에 도달하기 어려우며, 부정확한 결과값을 도출할 우려가 있다. 이 연구에서는 기존 연구들⁶⁻¹⁴⁾로부터 수집된 253개의 실험 데이터를 ANFIS 학습 및 평가에 사용하였으며, Table 1에는 실험체들의 단면 및 재료에 대한 정보를 정리하여 나타내었다. 총 253개의 실험 데이터 중 202개를 무작위 추출(random sampling)하여 ANFIS 모델의 학습에 사용하였고, 나머지 51개의 실험 데이터는 학습된 ANFIS 모델의 검증에 사용되었다. 본 연구에서 적용된 소속함수의 형태는 Fig. 1(a)와 같은 종형(Bell-shaped type)²⁴⁾이 적용되었으며, 이때 소속함수(μ_i)는

$$\mu_i = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - x_c}{x_w} \right|^{2x_q}} \quad (5)$$

Table 1 Dimensions and material properties of the specimens collected from literature

Researcher	Number of specimens	d_b (mm)	f_{pi} (MPa)	f_{ci} (MPa)	C (mm)
Park et al. ⁶⁻⁷⁾	98	12.7~15.2	824~1681	24.5~46	22.4~93.7
Cousins et al. ⁸⁾	23	9.5~15.2	1489.6	29.9	39.7~68.6
Mitchell et al. ⁹⁾	22	9.5~15.2	871~1329	21~50	42.4~45.3
Oh, B. H., and Kim, E. S. ¹⁰⁾	36	12.7~15.2	1395	32.5~47.2	30~50
Russell, B. W., and Burns, N. H. ¹¹⁾	18	12.7~15.2	1168~1406	19.2~30.2	43.4~44.7
Oh et al. ¹²⁾	12	12.7~15.2	1396.5	35~50	30~50
Canh N. Dang et al. ¹³⁾	32	17.8	1047	62.5~92.7	33.02
Marti-Vargas et al. ¹⁴⁾	12	12.7	1395	24.2~54.8	43.6

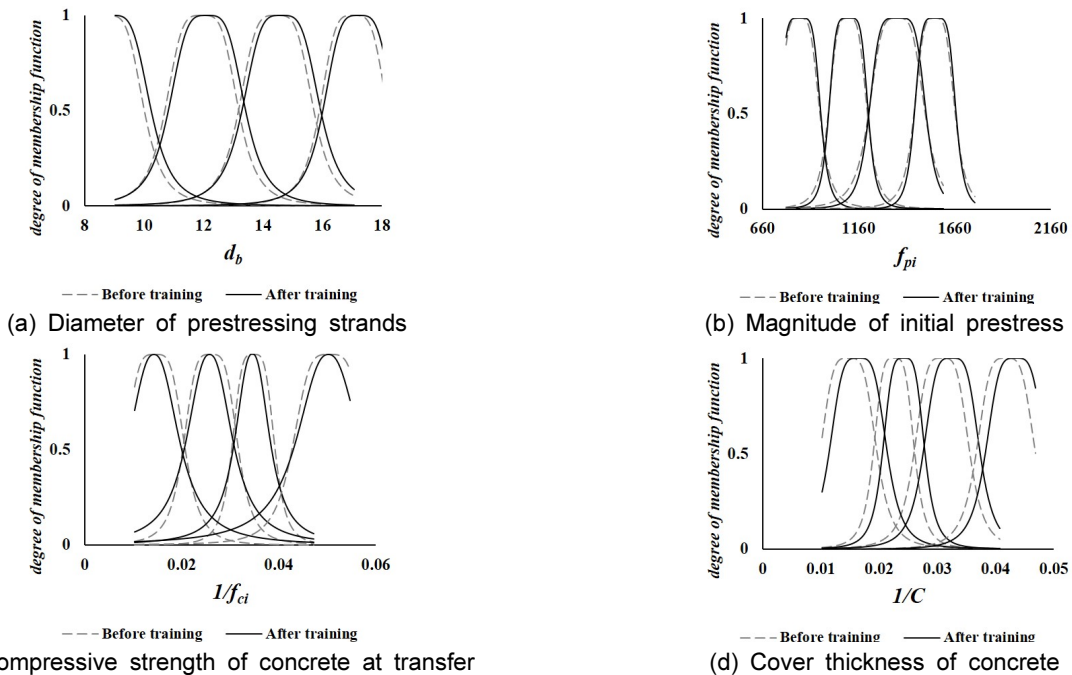


Fig. 2 Comparisons of memberships function between before and after training

와 같이 정의된다. 여기서 $x_c, x_w, 2x_q$ 는 소속함수(μ_i)의 형상 인자들로써 각각 소속함수의 중심, 폭, 소속함수 형상 계수이다. ANFIS에서는 소속함수(μ_i) 형상인자들을 인공신경망으로 학습시켜 수정하므로 초기 형상인자들을 가정할 수 있으며, 이 연구에서는 Macqueen이 제안한 k-means clustering 기법²⁵⁾을 이용하여 초기 형상인자들을 가정하였다. Fig. 2는 학습 전후의 소속함수 형태를 비교하여 각각 점선과 실선으로 나타내었고, Table 2는 훈련 전과 후 소속함수 형상인자들의 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 4개의 변수를 이용하였으며, 각각의 변수는 4개의 퍼지집합을 가지므로 총 256 (즉, 4^4)개의 규칙(rule)이 생성된다. ANFIS는 Sugeno Fuzzy model²⁴⁾을 적용하므로, i 번째 출력값 $l_{t,ANFIS_i}$ 는

$$l_{t,ANFIS_i} = a_i d_b + b_i f_{pi} + c_i \frac{1}{f_{ci}} + d_i \frac{1}{C} + e_i \quad (6)$$

로 산정된다. 여기서 a_i, b_i, c_i, d_i, e_i 는 ANFIS 훈련 결과로 결정되는 결론부 인자이다. 퍼지 연산에서는 모든 입력변수의 퍼지화가 이루어지고, 그 출력값 역시 퍼지 값으로 도출된다.³⁾ 퍼지 값(Fuzzy value)으로 도출된 출력값은 정량적인 하나의 결과값(Crisp value)으로 변환시키는 과정이 필요하며, 이를 비퍼지화라고 한다. 비퍼지화된 최종 출력값인 전달길이($l_{t,ANFIS}$)는 무게중심법을 이용하여

$$l_{t,ANFIS} = \sum_i^n \bar{w}_i l_{t,ANFIS_i} \quad (7)$$

으로 산정할 수 있다. 앞서 언급된 바와 같이, 식 (7)을 통해 산

정된 전달길이($l_{t,ANFIS}$)는 실제 전달길이 값($l_{t,test}$)와의 오차(E_p)가 최소값이 될 때까지 역전파 학습을 통하여 반복 계산된다. 여기서 오차(E_p)는

$$E_p = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{|l_{t,test} - l_{t,ANFIS}|}{|l_{t,test}|} \cdot 100\% \quad (8)$$

와 같이 산정되며, 여기서 m 은 훈련에 사용된 데이터의 개수이다. 소속함수를 구성하는 형상인자 x_c, x_w, x_q 의 증분 $\Delta x_c, \Delta x_w, \Delta x_q$ 는 최소구배법(Gradient descent method)을 이용하여

$$\Delta x_{c,w,q} = \frac{\partial E_p}{\partial x_{c,w,q}} \quad (9)$$

와 같이 산정할 수 있으며, 오차의 증분 $\Delta x_c, \Delta x_w, \Delta x_q$ 은 학습률(η)과 함께

$$x_{c,w,q}(t'+1) = x_{c,w,q}(t') + \frac{\eta}{m} \Delta x_{c,w,q} \quad (10)$$

와 같이 있으며, $t'+1$ 번째 소속함수를 구성하는 형상인자로 사용된다. 이 연구에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 491번의 반복계산 후에 오차가 특정 수치에 수렴하는 결과를 얻었다.

2.4 ANFIS를 이용한 전달길이 예측모델 검증

Fig. 4에는 수집된 253개의 실험 데이터 중 학습(training)에 사용된 202개 데이터를 제외한 나머지 51개의 실험체를

Table 2 Parameters of bell-shaped membership functions

Variables	Before training			After training		
	x_c	x_w	x_q	x_c	x_w	x_q
d_b	8.741901	2.536607	2	8.91439	2.652502	1.921373
	11.9419	2.486681	2	12.11466	2.602662	1.921502
	14.4419	2.53298	2	14.61474	2.649136	1.921353
	17.0419	2.300187	2	17.21465	2.41644	1.92113
f_{pi} (MPa)	852.08861	2.6881176	2	855.06118	2.7216343	2.5816463
	1104.4819	2.5445472	2	1107.4935	2.5783837	2.5813722
	1359.1647	3.6795533	2	1362.1224	3.7136005	2.5809205
	1555.9124	2.6809028	2	1558.9436	2.7145488	2.5808689
f_{ci} (MPa)	69.195063	6.2487843	2	70.260878	5.7422256	1.2014998
	38.574129	5.7537883	2	38.902009	5.2474242	1.2016894
	28.770677	4.4864069	2	28.954338	3.9803175	1.2021029
	19.834132	7.7303478	2	19.921377	7.2242678	1.2018867
C (mm)	68.11479	4.93322	2	61.14249	5.025075	2.021484
	44.43013	3.575891	2	41.35427	3.667793	2.021517
	32.53627	4.815611	2	30.85596	4.907417	2.020905
	23.94332	5.123596	2	23.02047	5.21552	2.02116

이용하여 ANFIS 해석모델을 검증한 결과를 나타내었다. 해석결과, ANFIS 모델은 평균 0.978, COV 0.198로 실험체들의 전달길이를 높은 정확도로 예측하는 것으로 나타났다. Table 3에는 전달길이 기준식들과 ANFIS 해석결과를 비교하여 나타내었으며, 훈련 (training)에 포함되지 않은 51개의 실험체 해석결과이다. 모든 기준식들은 대부분 안전측의 해석결과를 나타내었으며, Eurocode 2¹⁸⁾의 경우 평균과 COV가 각각 1.296, 0.538으로써, 다른 기준식들에 비해 다양한 영향인자를 반영할 수 있음에도 불구하고 정확도가 낮은 것으로 나타났다. 이에 비해, ACI 318-14¹⁵⁾ 및 AASHTO-LRFD¹⁶⁾ 기준은 COV가 약 0.3으로 상대적으로 높은 정확도를 보였지만, 실측값과 해석값 사이에 여전히 큰 편차를 나타내었다. 제안된 ANFIS 전달길이 모델의 경우, 평균 0.978, COV 0.198로 기준식들에 비하여 매우 우수한 정확도를 나타내었다. 이 연구에

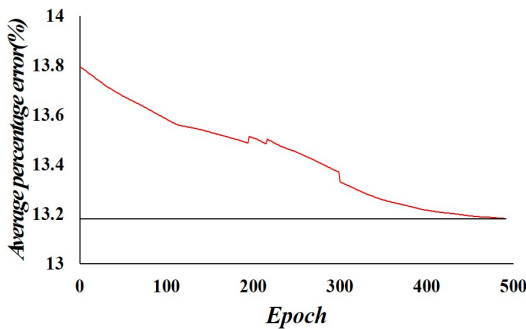


Fig. 3 Error convergence along the number of iterations

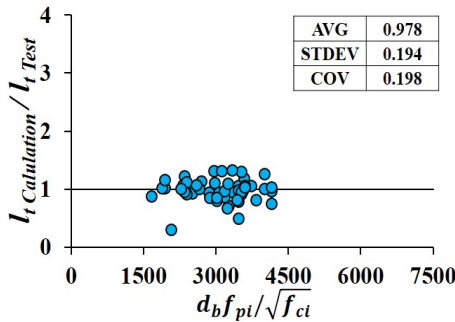


Fig. 4 Verification of ANFIS model

Table 3 Verification of proposed model using ANFIS

	MEAN	STDEV	COV	MIN	MAX
ANFIS	0.978	0.194	0.198	0.690	1.721
ACI 318-14(15)	1.251	0.401	0.321	0.554	2.144
AASHTO-LRFD(16)	1.226	0.391	0.319	0.469	2.073
Eurocode 2(18)	1.296	0.696	0.538	0.512	3.473

Note) All the values are for the ratios of the transfer length calculated by the approaches to test values, i.e., $l_t \text{ Calculation} / l_t \text{ Test}$.

서는 도출된 ANFIS 전달길이 모델을 기반으로 방대한 양의 변수분석을 수행하여 설계에 쉽게 적용할 수 있는 간략식을 도출하고자 하였다.

3. ANFIS를 통한 전달길이 간략식 제안

3.1 변수분석 단면

이 연구에서는 제시한 ANFIS 모델은 기존 전달길이 산정 모델들에 비해 높은 정확도를 제공하지만, 하나의 식으로 표현할 수 없고, ANFIS 학습을 통해 결과를 산정해야한다는 단점이 있다. 따라서, 이 연구에서는 앞서 제안된 ANFIS 해석모델을 기반으로 가상데이터를 생성하여 변수분석을 실시하고, 간략화된 전달길이 산정식을 제안하고자 하였다. 이 연구에서 수행된 변수분석 단면 및 재료특성은 Table 3에 나타난 바와 같이 강연선의 직경(d_b)은 9.5~17.8 mm, 도입 시 프리스트레스응력(f_{pi})은 $(0.4\sim0.7)f_{pu}$, 도입 시 콘크리트 압축강도(f_{ci})는 20~60 MPa, 콘크리트 피복두께(C)는 20~60 mm 이었다.

3.2 변수분석 결과

Fig. 5에는 ANFIS 모델을 통한 각 변수별 해석결과를 나타내었다. 변수분석 결과, 프리스트레스 도입 시 콘크리트의 압축강도(f_{ci})와 콘크리트 피복두께(C)가 증가함에 따라 전달 길이는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 도입 시 콘크리트 압축강도 및 콘크리트 피복두께가 증가함에 따라 강연선을 둘러싸고 있는 콘크리트의 구속효과가 증대되고, 결과적으로 Hoyer effect의 크기가 증가되기 때문이다.⁵⁾ 반대로, 강연선의 직경 및 프리스트레스 도입응력이 증가함에 따라 전달 길이는 증가하는 경향을 나타내었다.

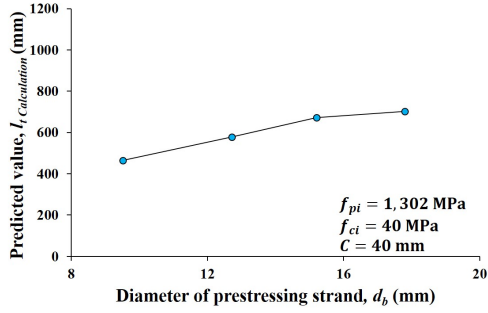
3.3 차원 해석

이 연구에서는 변수분석 결과를 토대로 전달길이 간략식을 도출하기 위한 차원해석을 수행하였다. 차원해석법은 무차원화된 변수를 통하여 각 변수 사이의 상호 관계를 해석하는 방법을 말한다. 이 연구에서는 차원해석을 위한 무차원 항을 다음과 같이 결정하였다.

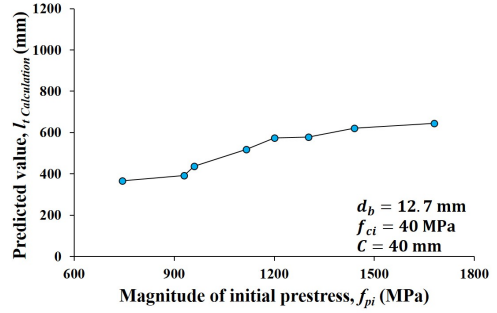
$$\pi_1 = \frac{l_t}{C}, \pi_2 = \frac{d_b}{C}, \pi_3 = \frac{f_{pi}}{f_{ci}} \quad (8)$$

여기서, π_1 은 전달길이-피복두께 비, π_2 는 피복두께-철근 직경 비, π_3 은 프리스트레스 도입응력-프리스트레스 도입 시 콘크리트의 압축강도 비이다. 식 (8)로부터, π_1 을 좌변, π_2 과 π_3 을 우변에 놓고 관계식을 세우면

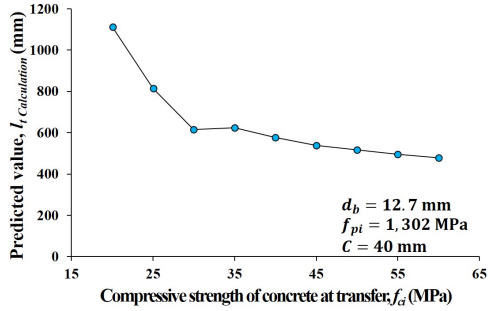
$$\frac{l_t}{C} = f\left(\frac{d_b}{C}, \frac{f_{pi}}{f_{ci}}\right) \quad (9)$$



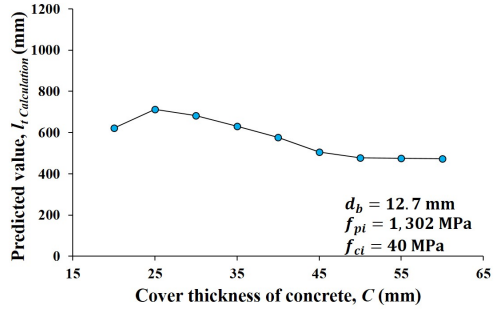
(a) Diameter of prestressing strand



(b) Magnitude of initial prestress



(c) Compressive strength of concrete at transfer



(d) Cover thickness of concrete

Fig. 5 Variable analysis results

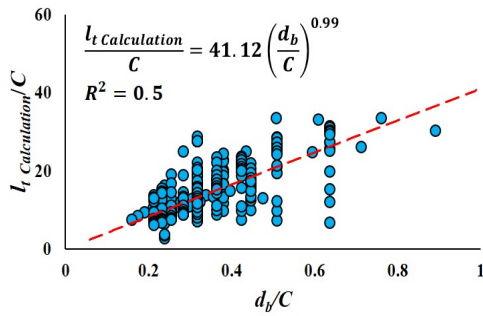


Fig. 6 Analysis result according to d_b/C

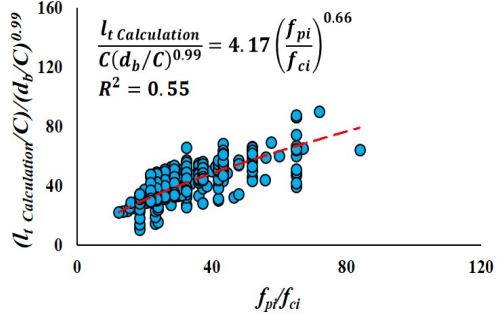


Fig. 7 Analysis result according to f_{pi}/f_{ci}

으로 나타낼 수 있고, 피복두께-강연선 직경 비($\frac{d_b}{C}$)와 프리스트레스 도입응력-프리스트레스 도입 시 콘크리트의 압축강도 비($\frac{f_{pi}}{f_{ci}}$)에 관한 함수로 나타낸다면

$$\frac{l_t}{C} = K_1 \left(\frac{d_b}{C} \right)^\alpha \left(\frac{f_{pi}}{f_{ci}} \right)^\beta \quad (10)$$

으로 무차원수($\frac{d_b}{C}$)에 관하여 지수의 형태로 나타낼 수 있으며, 여기서 K_1 는 상수항, α 와 β 는 지수항이다. Fig. 6에는 식 (10)에 나타낸 함수의 최적화된 추세선을 나타내었다. Fig. 6의 추세선 식을 식 (10)에 대입하여 좌변으로 이항하면

$$\frac{l_t}{A(d_b/C)^{0.99}C} = f \left(\frac{f_{pi}}{f_{ci}} \right) \quad (11)$$

으로 나타낼 수 있으며, A 는 Fig. 6에 보이는 바와 같이 상수항(즉, 41.12)으로서 계산과정을 통하여 추후 최종 상수값으로 조정될 수 있도록 편의상 도입한 것이다. 같은 방법으로, 식 (11)에서 프리스트레스 도입응력과 도입 시 콘크리트 압축강도 비의 함수항 $f \left(\frac{f_{pi}}{f_{ci}} \right)$ 을 무차원항 $\frac{f_{pi}}{f_{ci}}$ 에 관하여 거듭제곱의 형태로 표현하면

$$\frac{l_t}{A(d_b/C)^{0.99}C} = K_2 \left(\frac{f_{pi}}{f_{ci}} \right)^\beta \quad (12)$$

으로 나타낼 수 있으며, 여기서 K_2 는 상수항, β 는 지수항이다. Fig. 7에는 식 (12)에 나타낸 함수의 최적화된 추세선을 나타내었다. 여기서 도출된 추세선 식은

$$\frac{l_t}{(d_b/C)^{0.99}C} = 4.17 \left(\frac{f_{pi}}{f_{ci}} \right)^{0.66} \quad (13)$$

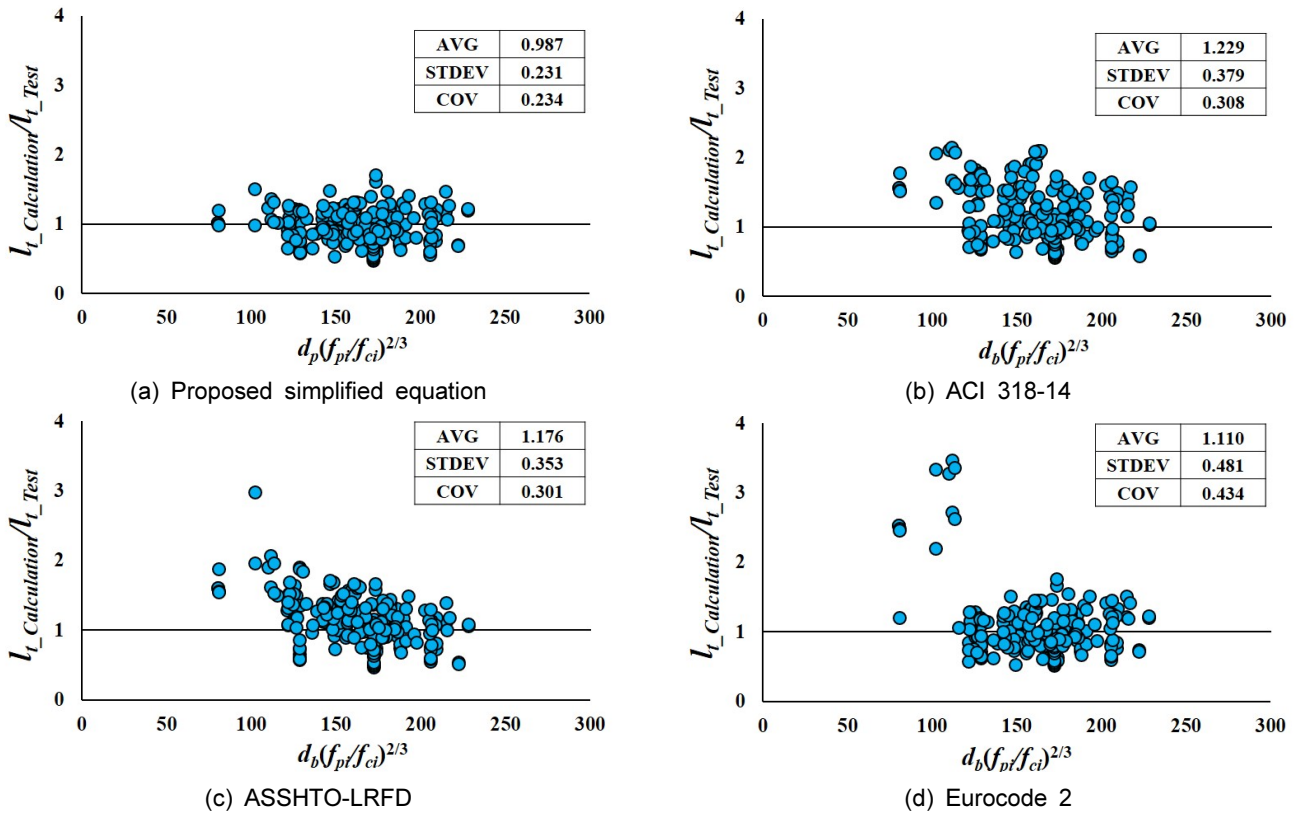


Fig. 8 Comparison of proposed and code equations

으로 나타낼 수 있다. 식 (13)을 정리하면, 프리텐션 콘크리트 부재의 전달길이(l_t)는

$$l_t = 4.17 \left(\frac{d_b}{C} \right)^{0.99} \left(\frac{f_{pi}}{f_{ci}} \right)^{0.66} C \quad (14)$$

으로 결정된다. 식 (14)는 강연선의 직경 및 프리스트레스 도입응력이 증가함에 따라 전달길이가 증가하는 경향을 나타내며, 프리스트레스 도입 시 콘크리트 압축강도 및 콘크리트 피복두께가 증가함에 따라 전달길이가 감소하는 경향을 나타낸다. 또한, ACI318-14¹⁵⁾ 및 KCI 2012¹⁷⁾에서 제시하고 있는 전달길이 산정식(식 (1))과 비교하였을 때, 도입응력 또는 유효프리스트레스 응력이 전달길이에 미치는 영향이 다소 감소되었으며, 프리스트레스 도입 시 콘크리트 압축강도 및 콘크리트 피복두께의 영향을 반영할 수 있다는 점을 알 수 있다. 다만, 식 (14)에서 지수항 및 계수를 간략화하여 나타내면, 프리텐션 콘크리트 부재의 전달길이(l_t)는

$$l_t = 4.5d_b \left(\frac{f_{pi}}{f_{ci}} \right)^{2/3} \quad (15)$$

으로 표현될 수 있다.

3.4 전달길이 간략식 검증

Fig. 8에는 기존에 보고된 문헌들⁶⁻¹⁴⁾로부터 수집된 253개

의 실험체 중 학습에 사용되지 않은 실험데이터들을 통해 제안된 전달길이 간략식을 현행 기준들과 비교·검증한 결과를 나타내었다. 해석결과 제안 간략식은 평균 0.915, COV 0.234로써 앞서 개발된 ANFIS 모델의 해석결과보다는 다소 정확도가 낮지만, 현행 기준들(ACI 318-14,¹⁵⁾ ASSHTO-LRFD,¹⁶⁾ Eurocode 2¹⁸⁾)에서 제시하고 있는 전달길이 산정식들에 비해서는 매우 우수한 정확도를 나타내었다. 해석결과로 미루어 보아 제안식은 간략하면서도 전달길이에 영향을 미치는 인자들을 합리적으로 반영하고 있으며, 다양한 범위의 변수분석을 통하여 도출되었기 때문에 광범위한 변수범위에서도 정확도 높은 전달길이 산정결과를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

이 연구에서는 프리텐션 콘크리트 부재의 전달길이를 예측하기 위하여 지능정보시스템 중 하나인 ANFIS 기법을 도입하였으며, 수집된 253개 중 202개의 실험체를 훈련하여 정확도 높은 ANFIS 해석모델을 구축하였다. 이를 기반으로 방대한 양의 변수분석 및 차원해석을 통해 간략화된 전달길이 산정식을 도출하였으며, 현행 구조설계기준들과의 비교를 통해 제안식의 합리성을 검증하였다. 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수집된 실험결과들의 훈련을 통해 프리스트레스 도입 시 콘크리트 압축강도(f_{ci}), 프리스트레스 도입응력

(f_{pi}), 콘크리트 피복두께(C), 강연선 직경(d_b)이 전달 길이에 미치는 영향을 반영할 수 있는 ANFIS 해석모델을 구축하였으며, 제안된 모델은 전달길이 실험값과 해석값의 비($l_t \text{ Calculation} / l_t \text{ Test}$)가 COV 0.198, 평균 0.978로 실험에서 측정된 전달길이를 매우 근사하게 예측하는 것으로 나타났다.

- 2) ANFIS 평가모델은 높은 정확도를 나타내지만, 정형화된 식으로 나타낼 수 없기 때문에 실무적용에 어려움이 존재한다. 따라서 ANFIS 평가결과를 바탕으로 변수분석을 실시하였으며, 차원해석을 수행하여 간략화된 전달길이 산정식을 제안하였다. 제안 간략식은 전달길이 실험값과 해석값의 비($l_t \text{ Calculation} / l_t \text{ Test}$)가 COV 0.234, 평균 0.987로 전달길이에 영향을 미치는 인자들을 합리적으로 반영하면서도 정확도 높은 해석결과를 나타내었다.
- 3) 제안 간략식은 다양한 범위를 가지는 변수들에 대해서 도출된 식이므로 일반적으로 실무에서 설계되는 프리텐션 콘크리트 부재들에 대해서 정확도 높은 해석결과를 제공할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진 연구개발사업의 연구비지원(16CTAP-C097986-02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kim, I. S., Lee, J. H., Yang, D. S., and Park, S. K., "Prediction on Mix Proportion Factor and Strength of Concrete Using Neural Network", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14, No. 4, 2002, pp. 457-466.
2. Park, T. W., Na, U., and Kwon, S., "Prediction of Ultimate Strength and Strain of Concrete Columns Retrofitted by FRP Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, 2010, pp. 19-27.
3. Cho, H. C., Lee, D. H., Hwang, J. H., Ju, H., Kim, K. S., and Seo, S. Y., "Shear Strength Evaluation of Steel Fiber-Reinforced Concrete Flexural Members Using ANFIS", *Journal of the architectural institute of Korea*, Vol. 29, No. 6, 2013, pp. 3-11.
4. Kose, M. M., and Kayadelen, C., "Modeling of transfer length of prestressing strands using genetic programming and neuro-fuzzy", *Advances in Engineering Software*, Vol. 41, No. 2, 2010, pp. 315-322.
5. Han, S., Lee, D. H., Cho, S., Ka, S. B., and Kim, K. S., "Estimation of Transfer Lengths in Precast Pretensioned Concrete Members Based on a Modified Thick-Walled Cylinder Model", *Structural Concrete*, Vol. 17, No. 1, 2016, pp. 52-62.
6. Park, H., and Cho, J. Y., "Bond-Slip-Strain Relationship in the Transfer Zone of Pretensioned Concrete Elements", *ACI Journal*, Vol. 111, No. 3, 2014, pp. 503-514.
7. Park, H., Din, Z. U., and Cho, J. Y., "Methodological Aspects in the Measurement of Strand Transfer Length in Pretensioned Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 109, No. 5, 2012, pp. 625-634.
8. Thomas, E. C., David, W. J., and Paul, Z., "Transfer Length of Epoxy-Coated Prestressing Strand", *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 3, 1990, pp. 193-203.
9. Mitchell, D., Cook, W. D., Khan, A. A., and Tham, T., "Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Pretensioning Strand", *PCI Journal*, Vol. 38, No. 3, 1993, pp. 52-66.
10. Oh, B. H., and Kim, E. S., "Realistic Evaluation of Transfer Length in Pretensioned, Prestressed Concrete Members", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 3, 2004, pp. 293-302.
11. Russell, B. W., and Burns, N. H., "Measured Transfer Lengths of 0.5 and 0.6 in. Strands in Pretensioned Concrete", *PCI Journal*, Vol. 44, No. 5, 1996, pp. 44-65.
12. Oh, B. H., Lim, S. N., Lee, M. K., and Yoo, S. W., "Analysis and Prediction of Transfer Length in Pretensioned, Prestressed Concrete Members", *ACI Structural Journal*, Vol. 111, No. 3, 2014, pp. 549-560.
13. Dang, C. N., Floyd, R. W., Hale, W. M., and Marti-Vargas, J. R., "Measured Transfer Lengths of 0.7 in. (17.8 mm) Strands for Pretensioned Beams", *ACI Structural Concrete*, Vol. 113, No. 1, 2016, pp. 85-94.
14. Marti-Vargas, J. R., Arbelaez, C. A., Serna-Ros, P., and Castro-Bugallo, C., "Reliability of Transfer Length Estimation from Strand End Slip," *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 4, 2007, pp. 487-494.
15. American Concrete Institute Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, Farmington Hills, 2014.
16. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *AASHTO LEFD Bridge Design Specifications: Customary U.S. Units*, 4th edition, AASHTO, Washington, DC, 2007.
17. Korea Concrete Institute (KCI), "KCI 2012," Korea Concrete Institute, 2012, p. 342.
18. European Committee for Standardization, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, Brussels, Belgium, 2004.
19. Cho, H. C., Lee, D. H., Hwang, J. H., Ju, H., Kim, K. S., and Seo, S. Y., "Neuro-Fuzzy Approach for Evaluation of Shear Behavior of RC Panel", *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 15, No. 1, 2013, pp. 67-73.
20. Kim, Y. M., Kim, C. K., and Hong, S. G., "Fuzzy Based State Assessment for Reinforced Concrete Building Structures", *Engineering Structures*, 28, 2006, pp. 1286-1297.
21. Song, J. H., Knag, W. H., Kim, K. S., and Jung, S. M.,

- “Probabilistic Shear Strength Model for Reinforced Concrete Beams without Shear Reinforcement,” *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 34, No. 1, 2010, pp. 15-38.
22. Park, H. C., “Diagnosis Method of Reinforced Concrete Structures Exposed to Fire by Fuzzy Approach”, Univeristy of Seoul, Master’s thesis, 2012, p. 97.
23. Oh, J. W., Lee, J. H., and Lee, I. W., “Use of Neural Networks on Concrete Mix Design,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 9, No. 2, 1997, pp. 145-151.
24. Jang, J. S. R., Sun, C. T., and Mizutani, E., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, 1997, p. 614.
25. MacQueen, J. B., *Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations*, Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, University of California press, 2009, pp. 281-297.

요 약 프리텐션 콘크리트 부재에서 강연선의 유효프리스트레스를 확보하기 위해서는 부재의 단부부터 특정 부착길이가 필요하며, 이를 전달길이라고 정의한다. 그러나, 강연선과 콘크리트 사이의 복잡한 부착 메커니즘으로 인해 결정론적인 방법으로 전달길이를 산정하는 기존 방법들은 많은 불확실성을 내포하고 있으며, 안전측의 해석결과를 제공하는 것에 초점이 맞추어져 있다. 따라서, 이 연구에서는 여러 영향인자들의 복잡한 메커니즘을 보다 효과적으로 고려하여 정확한 전달길이를 산정하기 위해 뉴로-퍼지 시스템의 방법 중 하나인 ANFIS를 도입하였다. 기존 연구로부터 총 253개의 실험체를 수집하여 ANFIS 알고리즘을 훈련시켰으며, 훈련된 ANFIS 알고리즘은 전달길이를 매우 정확히 예측하였다. 또한, ANFIS 전달길이 평가결과를 토대로, 변수분석과 차원해석을 수행하여 보다 간략화된 전달길이 산정식을 제안하였으며, 제안식은 ANFIS 해석결과와 거의 대등한 정확도를 보여주었다.

핵심용어 : ANFIS, 퍼지, 전달길이, 뉴로-퍼지, 프리텐션 콘크리트부재