

인공신경망을 이용한 FRP 보강 콘크리트 보의 휨모멘트 평가

Evaluation of the Bending Moment of FRP
Reinforced Concrete Using Artificial Neural Network

박도경*
Park, Do Kyong

Abstract

In this study, Multi-Layer Perceptron(MLP) among models of Artificial Neural Network(ANN) is used for the development of a model that evaluates the bending capacities of reinforced concrete beams strengthened by FRP Rebar. And the data of the existing researches are used for materials of ANN model. As the independent variables of input layer, main components of bending capacities, width, effective depth, compressive strength, reinforcing ratio of FRP, balanced steel ratio of FRP are used. And the moment performance measured in the experiment is used as the dependent variable of output layer. The developed model of ANN could be applied by GFRP, CFRP and AFRP Rebar and the model is verified by using the documents of other previous researchers. As the result of the ANN model presumption, comparatively precise presumption values are achieved to presume its bending capacities at the model of ANN(0.05), while observing remarkable errors in the model of ANN(0.1). From the verification of the ANN model, it is identified that the presumption values comparatively correspond to the given data ones of the experiment. In addition, from the Sensitivity Analysis of evaluation variables of bending performance, effective depth has the highest influence, followed by steel ratio of FRP, balanced steel ratio, compressive strength and width in order.

요 지

본 연구에서는 FRP Rebar로 보강된 철근콘크리트 보의 휨성능을 평가할 수 있는 모형을 개발하기 위하여 인공신경망 중 다층인식자 모형을 사용하였다. 인공신경망 모형에 사용될 학습자료들은 기존 연구자료들의 데이터를 이용하였다. 입력층의 독립변수는 휨성능에 주요 요소인 폭, 유효깊이, 압축강도, FRP 보강비, FRP 균형철근비를 사용하였다. 출력층 종속변수는 실험에서 측정된 모멘트 성능을 사용하였다. 개발된 인공신경망 모형은 GFRP, CFRP, AFRP Rebar 적용이 모두 가능하며, 모형의 검증은 다른 선행 연구자들이 수행한 자료를 이용하였다. 인공신경망 모형 추정결과 ANN(0.05) 모형의 경우에 비교적 정확한 휨성능 추정값을 나타낸 반면, ANN(0.1) 모형에서는 다소 오차가 발생하였다. 인공신경망 모형의 검증결과 주어진 실험 데이터 값과 비교적 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 휨성능 평가 변수에 대한 민감도 분석결과 유효깊이의 영향이 가장 크고 FRP 철근비, FRP 균형철근비, 압축강도, 폭으로 분석되었다.

Keywords : Fiber Reinforced Polymer, Artificial Neural Networks, Back Propagation Algorithm

핵심 용어 : FRP, 인공신경망, 역전파 학습 알고리즘

* 정희원, 원광대학교 건축학부 강사, 공학박사

E-mail : accent7@nate.com 063-850-6705

•본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

불포화 폴리에스터 수지를 유리섬유나 기타 보강재와 혼합 성형한 FRP(Fiber Reinforced Polymer)는 가볍고 인장강도가 크며 내 부식성의 특성을 가지고 있기 때문에 해양 및 수리구조물, 교량구조물 등과 같이 수분에 직접적으로 접촉해 있는 콘크리트 구조물에서의 철근의 부식으로 인한 문제점을 해결하기 위한 새로운 보강재료로서의 활용이 증가하고 있다.⁽¹⁾

FRP Rebar가 이처럼 보강 재료로서 높은 인장강도를 갖고 있어 철근부식에 대한 대안으로 효과적일 수 있으나 FRP Rebar는 낮은 탄성강도와 항복과 동시에 파단되는 재료적 특성으로 인하여 큰 처짐과 균열의 증가가 발생하여 기존의 철근콘크리트 구조와는 다른 설계방법들을 요구한다.⁽²⁾

본 연구에서는 FRP 보강 콘크리트 보의 휨성능을 평가할 수 있는 모형을 개발하기 위하여 인공신경망(Antifical Neural Netw ork; 이하 ANN) 모형 중 다층인식자(Multi-layer perceptron; MLP) 모형을 사용하였다. 모형에 사용될 학습자료들은 기존 연구자료들의 데이터를 이용하였다. 입력층의 독립변수는 휨모멘트 평가에 주요 요소인 폭(b), 유효깊이(d), 압축강도(f_{ck}), FRP 보강비(ρ_f), FRP 균형철근비(ρ_b)를 사용하였으며, 출력층의 종속변수는 실험에서 측정된 휨모멘트(M)를 사용하였다. 개발된 ANN 모형은 GFRP, CFRP, AFRP Reber 적용이 모두 가능하며, 모형의 검증은 다른 선행 연구자들이 수행한 자료를 이용하였다.

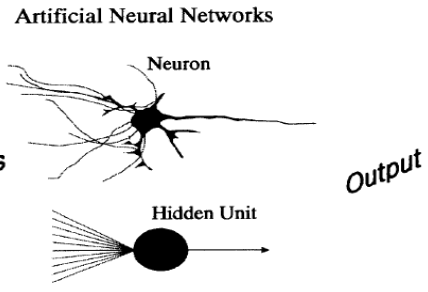


Fig. 1 인공신경망 구조

2. 인공신경망 모형의 기본이론⁽³⁾

2.1 인공신경망 이론

생물학적으로 뇌는 뉴런(Neuron)이라 불리는 수많은 요소들이 복잡하게 연결되어 구성되어 있으며, 이러한 뉴런들은 세 가지 주요한 성분들, 즉 수상돌기(Dendrite), 세포체(Cell body), 축삭돌기(Axon)들을 갖고 있다. 그리고 이들의 접촉점은 시냅스(Synapse)라하며 어떤 자극에 대한 반응을 다른 뉴런에 전달해주는 역할을 한다. 즉 복잡한 화학작용에 의해 결정된 각각의 시냅스 강도와 뉴런들의 배열들에 의해 신경망은 이루어진다. 인공신경망 모델도 인공뉴런들과 이러한 뉴런들을 연결시켜주는 매개체로 구성되어진다.

2.2 인공신경망 모형의 종류

신경망에는 여러 가지 다양한 모형이 있으나, 그중에서도 자료분석을 위해 가장 널리 쓰이는 모형은 MLP(Multi-layer Perceptron, 다층인식자) 신경망이다. 그 외에도 MLP에 비해서 주로 사용되지 않지만 RFB(Radial Basis Function, 원형기준함수), EBF (Elliptical Basis Function, 타원형기준함수)가 있다.

2.3 역전파 학습 알고리즘

목적함수를 최적화하는 방법으로는 역전파(Back Propagation), 레벤베르그-마퀴르트(Levenberg-

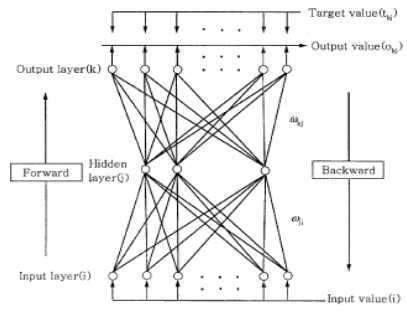


Fig. 2 역전파 학습알고리즘 모식도

arquardt), 준뉴턴(Quasi Newton), 결합기울기(Conjugate Gradient)와 같은 다양한 알고리즘이 있으며 이중 가장 간단하고 널리 쓰이는 역전파 학습 알고리즘을 본 연구에 적용하였으며, 역전파 학습 알고리즘을 단계별로 정리하면 다음과 같다.

단계 1 : 가중치(W_{ki} , W_{ji}), 바이어스(θ_j , θ_k), 학습률(η) 및 모멘텀(α)값의 초기값을 설정한다.

단계 2 : 출력층에서의 일반화된 오차(δ_k)를 계산한다.

단계 3 : 은닉층과 출력층 사이의 가중값을 다음의 식에 의해 학습한다.

$$\Delta W_{kj}(k+1) = \eta \delta_k y_j + \alpha W_{kj}(k)$$

여기서, k는 반복단계, η 는 학습율, α 는 모멘텀, y_j 는 은닉층의 출력값을 의미한다.

단계 4 : 은닉층에서의 일반화된 오차(δ_j)를 계산한다.

$$\delta_j = y_j(1 - y_j) \sum \delta_k W_{kj}$$

단계 5 : 출력층과 은닉층 사이의 가중값을 학습한다.

$$\Delta W_{ji}(k+1) = \eta \delta_j x_i + \alpha W_{ji}(k)$$

단계 6 : 오차함수를 체크하여 주어진 목표 값에 미달하면 단계 1~5를 반복한다.

3. 인공신경망(ANN) 모형 개발⁽⁴⁾

3.1 ANN 모형 구축

ANN 모형 개발을 위하여 학습자료로 사용될 선행 연구자료들을 수집한 후 정리하면 Table 1과 같다. ANN 모형 구축을 위한 학습자료들로는 단면의 폭, 유효깊이, 압축강도, FRP 철근비, FRP 균형철근비를 입력층 변수로, 휨모멘트를 출력층 변수로 설정하였다.

3.2 ANN모형 개발

ANN 모형은 2개의 은닉층을 가지고 첫 번째 Hidden에는 10개의 은닉마디, 두 번째 Hidden에는 7개의 은닉마디를 가지고 있는 MLP모형으로 구축하

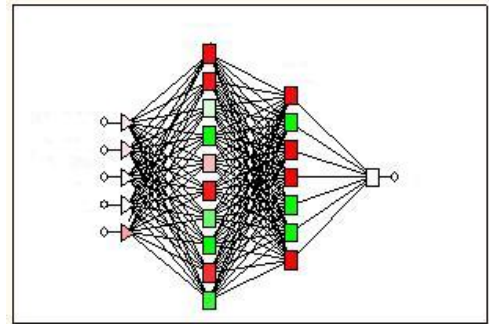


Fig. 3 ANN 모형 도식도

였다. 목적함수는 비선형 함수를 사용하였으며, 학습 알고리즘은 역전파 학습알고리즘을 사용하였다.

FRP의 휨모멘트를 추정하기 위한 ANN 모형은 오차목표량 0.1일 때와 0.05일 때의 추정값을 사용하였다. 본 연구에서 개발한 ANN 모형을 도식적으로 나타내면 Fig. 3과 같다.

ANN 모형 추정결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 ANN(0.05), ANN(0.1) 모형 모두 휨모멘트 실험 데이터 값과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. ANN(0.05) 모형의 경우가 ANN(0.1) 모형과 비교해 볼 때 좀 더 정확한 예측값을 나타내고 있으나, 오차 0.05 범위에 수렴하기 위한 훈련시간과 대비해 보았을 때 ANN(0.1)모형 또한 적합하다고 사료된다.

3.3 ANN모형을 이용한 FRP 휨성능 추정

개발된 ANN 모형을 이용하여 각 변수에 따른 휨모멘트의 예측값을 도식적으로 나타내면 아래 Fig. 5~ Fig. 9와 같다. 폭 변수에 의한 휨모멘트의 추정 결과 ANN(0.1)과 ANN(0.05)의 두 경우 모두 폭이 증가함에 따라 휨모멘트 역시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 유효깊이에 따른 휨모멘트의 추정결과도 유효깊이가 증가함에 따라 휨모멘트 역시 상대적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 압축강도 변수에 의한 ANN 추정결과 휨모멘트의 영향을 단일 영향인자로 보면 다른 변수보다는 휨모멘트의 영향이 상대적으로 작으며, 본 연구에서 개발한 ANN 모형에서는 다소 불안정한 추정을 나타내고 있다.

Table 1 선행연구자료

Reference	Beam notation	Width (mm)	Depth (mm)	f_{ck} (MPa)	ρ_f (%)	ρ_b (%)	$M_{exp t}$	Experimental mode of failure
Ashotur ⁽¹⁶⁾	Beam 2	150	200	32.56	0.23	0.49	5.89	FRP rupture
	Beam 4	150	250	32.56	0.17	0.49	7.85	FRP rupture
	Beam 6	150	300	32.56	0.14	0.49	10.79	FRP rupture
	Beam 8	150	200	58.93	0.23	0.84	5.89	FRP rupture
	Beam 10	150	250	58.93	0.17	0.84	9.48	FRP rupture
Benmkrane ⁽¹⁷⁾	Beam 12	150	300	58.93	0.28	0.84	16.75	FRP rupture
	ISO2	200	300	50.59	1.13	0.77	80.40	Concrete crushing
	ISO3	200	550	50.59	0.57	0.83	181.70	FRP rupture
Benmkrane ⁽¹⁷⁾	ISO4	200	550	50.59	0.57	0.83	181.70	FRP rupture
	ISO30-2	200	300	49.41	1.06	0.71	80.40	Concrete crushing
	KD30-1	200	300	49.41	1.06	0.69	50.60	Concrete crushing
	KD30-2	200	300	49.41	1.06	0.69	63.80	Concrete crushing
	KD45-1	200	450	61.18	0.68	0.84	106.60	Concrete crushing
	KD45-2	200	450	61.18	0.68	0.84	113.00	Concrete crushing
	ISO55-1	200	550	49.41	0.55	0.71	181.50	FRP rupture
	ISO55-2	200	550	49.41	0.55	0.71	181.50	FRP rupture
Alsayed ⁽⁵⁾	KD55-1	200	550	49.41	0.55	0.69	146.90	FRP rupture
	KD55-2	200	550	49.41	0.55	0.69	172.50	FRP rupture
	B	200	210	36.47	3.60	0.17	36.50	Concrete crushing
Brown and Bartholomew ⁽⁶⁾	C	200	260	36.47	1.20	0.27	48.10	Concrete crushing
	D	200	250	48.24	2.87	0.57	53.98	Concrete crushing
	1	152	152	42.24	0.38	0.40	7.04	FRP rupture
	2	152	152	43.41	0.38	0.41	6.64	FRP rupture
	4	152	152	45.76	0.38	0.43	7.23	FRP rupture
	5	152	152	46.94	0.38	0.44	7.35	FRP rupture
Yost ⁽⁷⁾	6	152	152	48.12	0.38	0.45	6.75	FRP rupture
	1FRP1	381	203	32.47	0.12	0.34	11.49	FRP rupture
	1FRP2	381	203	32.47	0.12	0.34	12.67	FRP rupture
	1FRP3	381	203	32.47	0.12	0.34	11.49	FRP rupture
	2FRP1	318	216	32.47	0.13	0.34	13.62	FRP rupture
	2FRP2	318	216	32.47	0.13	0.34	13.26	FRP rupture
	2FRP3	318	216	32.47	0.13	0.34	13.06	FRP rupture
	4FRP1	203	152	32.47	1.27	0.34	15.78	Concrete crushing
	4FRP2	203	152	32.47	1.27	0.34	15.58	Concrete crushing
	4FRP3	203	152	32.47	1.27	0.34	16.29	Concrete crushing
	5FRP1	191	152	32.47	1.35	0.34	16.37	Concrete crushing
	5FRP2	191	152	32.47	1.35	0.34	16.65	Concrete crushing
Masmoudi ⁽⁸⁾	5FRP3	191	152	32.47	1.35	0.34	15.78	Concrete crushing
	CB2B-1	200	300	61.18	0.69	0.65	57.90	Concrete crushing
	CB2B-2	200	300	61.18	0.69	0.65	59.80	Concrete crushing
	CB3B-1	200	300	61.18	1.04	0.66	66.00	Concrete crushing
	CB3B-2	200	300	61.18	1.04	0.66	64.80	Concrete crushing
	CB4B-1	200	300	52.94	1.47	0.59	75.40	Concrete crushing
	CB4B-2	200	300	52.94	1.47	0.59	71.70	Concrete crushing
	CB6B-1	200	300	52.94	2.20	0.60	84.80	Concrete crushing
Grace ⁽⁹⁾	CB6B-2	200	300	52.94	2.20	0.60	85.40	Concrete crushing
	cb-st	152	350	56.78	0.23	0.26	51.91	FRP rupture
Theriault ⁽¹⁰⁾	BC2HA	130	180	67.29	1.24	0.62	19.70	Concrete crushing
	BC2HB	130	180	67.29	1.24	0.62	20.60	Concrete crushing
	BC2VA	130	180	114.59	1.24	1.02	22.70	Concrete crushing
	BC4NB	130	180	54.35	2.70	0.36	20.60	Concrete crushing
	BC4HA	130	180	63.41	2.70	0.44	21.00	Concrete crushing
	BC4HB	130	180	63.41	2.70	0.44	21.40	Concrete crushing
	BC4VA	130	180	110.00	2.70	0.85	28.40	Concrete crushing
	BC4VB	130	180	110.00	2.70	0.85	29.50	Concrete crushing

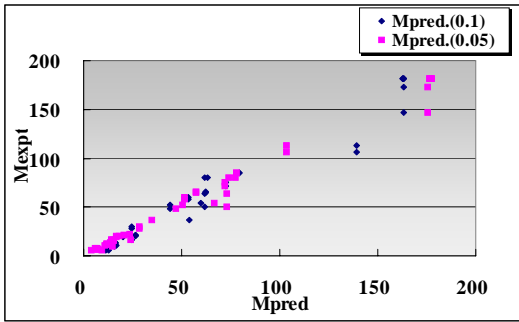


Fig. 4 M_{expt}/M_{pred} 비교

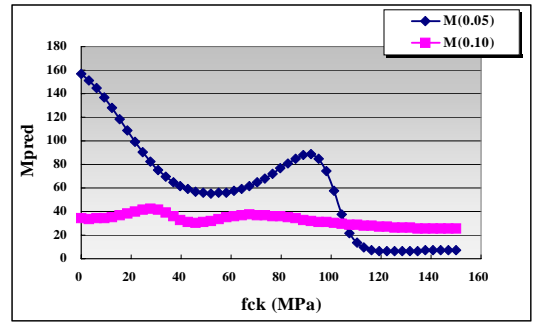


Fig. 7 압축강도에 따른 휨성능 추정

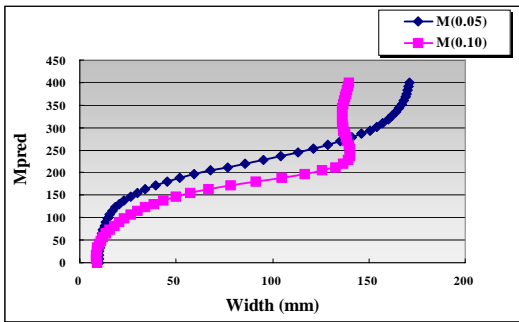


Fig. 5 폭에 따른 휨성능 추정

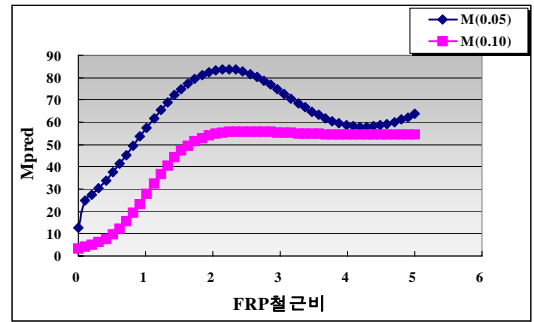


Fig. 8 FRP 철근비에 따른 휨성능 추정

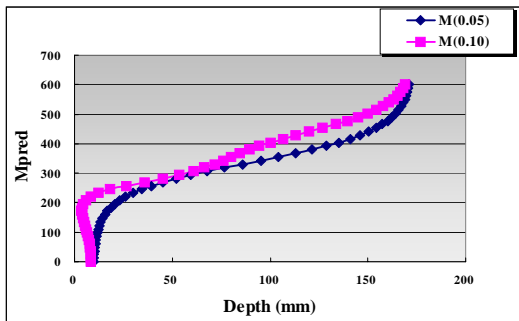


Fig. 6 유효깊이에 따른 휨성능 추정

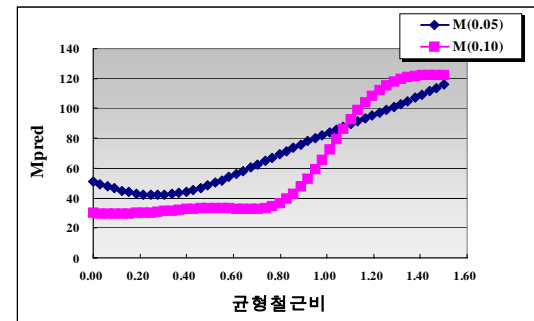


Fig. 9 균형철근비에 따른 휨성능 추정

하지만, 다른 변수들과의 조합을 통하여 이러한 오차는 어느 정도 해결될 수 있으리라 판단된다. FRP 철근비의 경우 1.6까지는 계속해서 휨모멘트가 증가하였으나, 2.0 이상에서는 휨모멘트의 증가비가 다소 적어지는 것을 확인하였다.

FRP 균형철근비 변수의 경우 약 0.8 이후부터 상대적으로 크게 휨모멘트가 개선됨을 확인하였다.

선행 연구자료에서 분석된 휨모멘트 값과 본 연구에서 개발한 ANN 모형에서 예측된 휨모멘트 값을 종합적으로 비교해 보면 Table 2와 같다. 일부 변수에서는 ANN 모형의 오차가 다소 크게 분석되었지만 평균적으로 볼 때 ANN(0.05) 모형에서는 오차율이 10%로 나타났으며, ANN(0.1) 모형에서는 19.4%로 분석되었다.

Table 2 추정결과

Beam notation	M _{expt.}	M _{pred.} (0.05)	M _{pred.} (0.1)	Target of error (0.05) %	Target of error (0.1) %
Beam2	5.89	4.707	7.672	20.1	30.3
Beam4	7.85	11.746	10.026	49.6	27.7
Beam6	10.79	16.262	16.028	50.7	48.5
Beam8	5.89	4.244	8.246	27.9	40.0
Beam10	9.48	10.901	12.023	15.0	26.8
Beam12	16.75	14.687	27.548	12.3	64.5
ISO2	80.40	79.175	75.499	1.5	6.1
ISO3	181.70	158.077	182.609	13.0	0.5
ISO4	181.70	158.077	182.609	13.0	0.5
ISO30-2	80.40	67.563	71.466	16.0	11.1
KD30-1	50.60	61.073	71.113	20.7	40.5
KD30-2	63.80	61.073	71.113	4.3	11.5
KD45-1	106.60	107.464	113.743	0.8	6.7
KD45-2	113.00	107.464	113.743	4.9	0.7
ISO55-1	181.50	168.739	175.822	7.0	3.1
ISO55-2	181.50	168.739	175.822	7.0	3.1
KD55-1	146.90	169.768	173.024	15.6	17.8
KD55-2	172.50	169.768	173.024	1.6	0.3
B	36.50	35.340	32.268	3.2	11.6
C	48.10	46.456	35.883	3.4	25.4
D	53.98	61.392	59.232	13.7	9.7
1	7.04	6.594	4.331	6.3	38.5
2	6.64	6.713	4.574	1.1	31.1
4	7.23	6.961	4.982	3.7	31.1
5	7.35	7.088	5.154	3.6	29.9
6	6.75	7.213	5.310	6.9	21.3
1FRP1	11.49	12.930	10.996	12.5	4.3
1FRP2	12.67	12.930	10.996	2.1	13.2
1FRP3	11.49	12.930	10.996	12.5	4.3
2FRP1	13.62	11.651	8.666	14.5	36.4
2FRP2	13.26	11.651	8.666	12.1	34.6
2FRP3	13.06	11.651	8.666	10.8	33.6
4FRP1	15.78	15.260	11.169	3.3	29.2
4FRP2	15.58	15.260	11.169	2.1	28.3
4FRP3	16.29	15.260	11.169	6.3	31.4
5FRP1	16.37	16.647	13.021	1.7	20.5
5FRP2	16.65	16.647	13.021	0.0	21.8
5FRP3	15.78	16.647	13.021	5.5	17.5
CB2B-1	57.90	56.781	53.787	1.9	7.1
CB2B-2	59.80	56.781	53.787	5.0	10.1
CB3B-1	66.00	61.519	70.612	6.8	7.0
CB3B-2	64.80	61.519	70.612	5.1	9.0
CB4B-1	75.40	79.822	71.625	5.9	5.0
CB4B-2	71.70	79.822	71.625	11.3	0.1
CB6B-1	84.80	81.197	73.122	4.2	13.8
CB6B-2	85.40	81.197	73.122	4.9	14.4
cb-st	51.91	50.029	47.592	3.6	8.3
BC2HA	19.70	22.372	23.339	13.6	18.5
BC2HB	20.60	22.372	23.339	8.6	13.3
BC2VA	22.70	28.720	37.644	26.5	65.8
BC4NB	20.60	22.938	25.915	11.3	25.8
BC4HA	21.00	22.631	23.759	7.8	13.1
BC4HB	21.40	22.631	23.759	5.8	11.0
BC4VA	28.40	25.701	24.029	9.5	15.4
BC4VB	29.50	25.701	24.029	12.9	18.5
			평균	10%	19.4%

4. ANN 모형 검증

본 연구에서 개발한 ANN 모형의 검증은 기존의 선형연구자들이 수행한 휨모멘트 평가 자료들을 이용하였다. ANN 모형 검증 결과 Table 3, Fig. 10과 같다. ANN (0.05) 모형의 검증결과 오차가 약 11.3% 정도로 발생하였으며, ANN(0.1)모형의 경우 약 22.5% 정도의 오차가 발생하였다.

5. 민감도 분석

주어진 자료들을 이용하여 휨모멘트 평가의 민감도 분석을 Hunter⁽¹⁵⁾의 방법에 의해 수행하였다. 주어진 변수들에 대한 민감도 분석결과 Table 4와 같다. 유효깊이가 휨 성능에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 분석되었으며, FRP 철근비, FRP 균형철근비, 압축강도, 폭 순으로 조사되었다.

6. 결론

본 연구는 FRP Rebar로 보강된 철근 콘크리트 보의 휨모멘트 평가 모형을 개발하기 위해 선행 연구자료를 분석하여 모형을 구축하고 휨모멘트를 추정한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 신경망 학습에 필요한 변수를 시편의 폭, 유효높이, 압축강도, FRP 철근비, FRP 균형철근비를 입력층으로 하여 출력층인 휨모멘트를 추정할 수 있었다.
- 2) 휨모멘트를 추정할 경우 목표 오차량의 감소에 따라 학습에 걸리는 시간이 현저히 늘어남을 알 수 있었고, 휨모멘트 추정값으로 선행 연구자료를 활용한 결과 주어진 실험데이터와 ANN(0.05) 모형과의 오차율이 10% 정도로 발생하였으나, ANN (0.1) 모형의 경우 19.4%로 발생하였다.
- 3) ANN 모형의 검증결과 주어진 실험 데이터 값과 비교적 정확히 일치하고 있음을 확인할 수 있었으며, 추후 FRP 보강 철근콘크리트 보의 휨모멘트 평가 예측모형에 적합함을 검증하였다.

Table 3 ANN 모형 검증

Reference	Beam notation	Width (mm)	Depth (mm)	f_{ck} (MPa)	ρ_f (%)	ρ_b (%)	$M_{exp t.}$	$M_{pred.}$ (0.05)	$M_{pred.}$ (0.1)	Target of error (0.05)%	Target of error (0.1)%
Toutanji ⁽¹¹⁾	GB1-1	180	300	41.18	0.53	0.60	60.00	51.282	39.125	14.53	34.79
	GB1-2	180	300	41.18	0.53	0.60	59.00	51.282	39.125	13.08	33.68
	GB2-1	180	300	41.18	0.79	0.62	65.00	53.506	51.518	17.68	20.74
	GB2-2	180	300	41.18	0.79	0.62	64.30	53.506	51.518	16.78	19.87
	GB3-1	180	300	41.18	1.10	0.63	71.00	64.084	70.723	9.74	0.39
	GB3-2	180	300	41.18	1.10	0.63	70.50	64.084	70.723	9.10	0.31
Pecce ⁽¹²⁾	F2	500	185	35.29	0.70	0.33	36.80	41.583	13.532	12.99	63.22
	F3	500	185	35.29	1.22	0.26	60.70	75.090	12.276	23.70	79.77
Almusallam ⁽¹³⁾	COMP-00	200	240	41.65	1.33	0.41	40.25	46.739	37.584	16.12	6.62
	COMP-25	200	240	42.82	1.33	0.30	40.25	42.987	31.643	6.80	21.38
	COMP-50	200	240	42.94	1.33	0.30	40.25	42.917	31.604	6.62	21.48
	COMP-75	200	240	44.12	1.33	0.31	44.28	42.393	31.513	4.26	28.83
Duranovic ⁽¹⁴⁾	GB5	150	250	36.71	1.36	0.29	40.30	39.299	36.800	2.48	8.68
	GB9	150	250	46.82	1.36	0.36	39.73	34.580	37.031	12.96	6.79
	GB10	150	250	46.82	1.36	0.36	39.50	34.580	37.031	12.45	6.25
	GB13	150	250	52.81	0.91	0.39	32.68	32.121	30.179	1.70	7.65

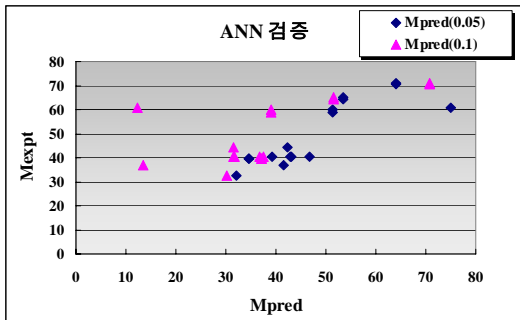


Fig. 10 ANN 모형 검증

4) 휨모멘트 평가의 주요 변수들에 대한 민감도 분석 결과 유효깊이가 휨모멘트에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 분석되었으며 FRP 철근비, FRP 균형 철근비, 압축강도, 폭 순으로 조사되었다.

이상과 같이 개발된 인공지능망 모형의 신뢰성을 확인하기 위하여 FRP Rebars로 보강된 휨모멘트 모형에 의하여 측정된 값을 비교한 결과 비교적 잘 일치하고 있었다. 따라서 좀 더 많은 실험변수와 실험데이터를 본 연구에서 개발한 신경망 모형에 학습자료로 다시 활용된다면 보다 큰 신뢰성을 가질 수 있을 것으로 사료된다.

Table 4 민감도 분석 결과

	Sensitivity Analysis				
	Width (mm)	Depth (mm)	fck (MPa)	ρ_f (%)	ρ_b (%)
Ratio.	1.2074	3.8899	1.7773	3.4218	2.1791
Rank.	5.0	1.0	4.0	2.0	3.0

참고문헌

1. 석정우, 김장용, 김경모, "FRP 보강재의 역학적 특성 및 현장시험 결과분석", KGS National Conference Committee of Slope Stability, 2001.9, pp32-42.
2. 이상호, 안상호, "FRP 봉을 주근으로 사용한 콘크리트 보 부재의 휨 거동", 대한건축학회 논문집, 제21권, 1호, 2005.1, pp67-74.
3. 김대수, "신경망 이론과 응용" 하이테크 정보, 1999, pp.91-116.
4. 오성권, "프로그래밍에 의한 컴퓨터 지능" 내하출판사, 2002, pp225-253.
5. Alsayed SH, "Flexural behavior of concrete beams reinforced with GFRP bars", Cem Concr Compos, 20(1), 1998, pp1-11.
6. Brown VL., Bartholomew CL., "FRP reinforcing bars in reinforced concrete members", ACI Mater J,90(1), 1993, pp34-9.
7. Yost JR., Goodspeed CH., Schmeckpeper ER., "Flexural performance of concrete beams

-
- reinforced with FRP grids", *J. Compos & Constr*, 5(1), 2001, pp18-25.
8. Masmoudi R., Theriault M., Benmokrane B., "Flexural behavior of concrete beams reinforced with deformed fiber reinforced plastic reinforcing rods", *ACI Struct J*, 95(6), 1998, pp665-676.
 9. Grace NF., Soliman AK., Abdel-Sayed G., Saleh KR., "Behavior and ductility of simple and continuous FRP reinforced beams", *J compos Constr*, 2(4), 1998, pp.186-194.
 10. Theriault M., Benmokrane B., "Effects of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behavior of concrete beams", *J Compos Constr*, 2(1), 1998, pp7-16.
 11. Toutanji HA., Saafi M., "Flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars", *ACI Struct J*, 97(5), 2000, pp712-9.
 12. Pecce M., Manfredi G., Cosenza E., "Experimental response and code models of GFRP RC beams in bending", *J Compos Constr*, 97(5), 2000, pp182-190.
 13. Almusallam TH., AL-Salloum YA., Alsayed SH., Amjad MA., "Behavior of concrete beams doubly reinforced by FRP bars", In: *Proceeding of the third international symposium on non-metallic(FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS-3)*, Japan, Vol. 2, 1997, pp471-478.
 14. Duranovic N., Pilakoutas K., Waldron P., "Tests on concrete beams reinforced with glass fiber reinforced plastic bars", In: *Proceeding of the third international symposium on non-metallic(FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS-3)*, Japan, Vol. 2, 1997, pp479-486.
 15. Hunter, A., Kennedy, L., Henry, J. and Ferguson, R.I. "Application of Neural Networks and Sensitivity Analysis to improved prediction of Trauma Survival" *Computer Methods and Algorithms in Biomedicine* 62, 2000, pp.11-19.
 16. A. F. Ashour, "Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars", *Construction and Building Materials*, 2005, pp.1-10.
 17. Benmokrane B., Challal O., Masmoudi R., "Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars", *ACI Struct J*, 91(2), 1996, pp.46-55.
- (접수일자 : 2006년 3월 10일)