

# 다층 인식자 신경망 모형을 이용한 FRP 판의 부착강도 예측 모형 개발

## Development of Bond Strength Model for FRP-Plates Using Multi-layer Perceptron

곽 계 환\* · 석 인 수\*\* · 황 해 성\*\*\* · 성 배 경\*\*\* · 장 화 섭\*\*\*

Kwak, Kae-Hwan · Seok, In-Soo · Hwang, Hae-Sung · Sung, Bai-Kyung · Jang, Hwa-Sup

### ABSTRACT

Synthetic materials with excellent thermodynamic characteristics and the merit of anti-corrosion are frequently used in buildings and constructions for enforcement of bent in stead of steel plates. Among them, many practical studies have been conducted on bond strength because of increased bond strength of FRP plates. Previous investigators identified the bond strength of FRP plates through experiments with settlement of various variables to identify the bond strength. However, the experiments to identify the bond force are difficult to be conducted because they requires large expenses and long time for equipment arrangement, thus, are conducted with limitation. In this study, for bond experiment, optimum neural network model was developed with use of Back-propagation and Conjugate gradient technique of previous investigators. Learning was performed with use of the variables of previous investigators in developed neural network model so as to identify the bond strength of FRP plates. for verification of developed model, credibility and excellence was proven by comparing with the models of previous investigators.

### 1. 서 론

합성재료(composites materials)는 강도, 강성이 우수하고 내부식성이 크다는 장점을 가지고 있어 교량 및 건축구조물의 휨 보강을 위해 강판대용으로 사용되고 있다. 그 중 Fiber Reinforce Polymer (FRP) 판은 외부에 부착된 보강판으로서 부착강도의 증진에 효과적이어서 많은 연구가 수행되어왔다.(양동석,2004)

현재, Carbon-FRP, Glass-FRP, Aramid-FRP등의 섬유 재료를 가지고 콘크리트와의 부착강도의 특성을 파악하기 위하여 다양한 연구가 수행 중에 있다. 그러나, 이러한 실험을 수행하기 위해서는 장비구축 비용, 실험재료 비용, 시간적, 공간적 제약등으로 인하여 많이 수행하기 어렵기 때문에 국한적으로 수행되고 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 연구자들에 의해 수행된 부착실험 데이터를 다층 인식자(Multi-layer perceptron) 신경망 모형을 이용하여 부착강도 예측 모형을 개발하였다. FRP판의 부착강도 특성에 주요 변

\* 정회원 · 원광대학교 토목환경, 도시공학부 교수

\*\* 전라북도 도청 건설교통방재국장 · 공학박사

\*\*\* 원광대학교 토목환경공학과 박사과정

수로는 FRP판의 두께, 폭, 부착길이, 탄성계수, 인장강도와 콘크리트의 압축강도, 인장강도, 폭을 변수로 선정하였다. MLP모형 개발에 주요 인자인 알고리즘은 역전파학습(back-propagation) 알고리즘과 결합기울기(Conjugate gradient technique)방법 2가지를 적용시켰다. 목적함수는 비선형 함수를 처음 모멘텀(momentum)은 0.9를 적용하였고, 학습은 오차율 0.001 범위에 수렴 될 수 있도록 분석한 결과 약 3000epochs 정도에 수렴됨을 확인하여 이를 적용하였다.

## 2. 선행 연구자료 수집 및 분석

FRP판의 부착강도 예측 모형 개발을 위해 학습 자료로 사용할 데이터를 표 1에, 검증자료로 활용할 데이터를 표 2에 정리하였다.

표 1 모형 개발을 위한 학습자료

Reference	Specimen	FRP Plate					Concrete			Ultimate bond strength $P_u$ (kN)
		Thickness $t_f$ (mm)	Width $b_f$ (mm)	Bond length L(mm)	Elastic modulus $E_f$ (GPa)	Tensile strength $f_f$ (MPa)	Compressive strength $f'_c$ (MPa)	Tensile strength $f_t$ (MPa)	Width $b_c$ (mm)	
Tan (2002)	PG1-11	0.169	50	130	97	2777	37.60	2.90	100	7.78
	PG1-12	0.169	50	130	97	2777	37.60	2.90	100	9.19
	PG1-1W1	0.169	75	130	97	2777	37.60	2.90	100	10.11
	PG1-1W2	0.169	75	130	97	2777	37.60	2.90	100	13.95
	PG1-1L11	0.169	50	100	97	2777	37.60	2.90	100	6.87
	PG1-1L12	0.169	50	100	97	2777	37.60	2.90	100	9.20
	PG1-1L21	0.169	50	70	97	2777	37.60	2.90	100	6.46
	PG1-1L22	0.169	50	70	97	2777	37.60	2.90	100	6.66
	PG1-21	0.338	50	130	97	2777	37.60	2.90	100	10.49
	PG1-22	0.338	50	130	97	3500	37.60	2.90	100	11.43
	PCI-1C1	0.111	50	130	235	3500	37.60	2.90	100	7.97
PCI-1C2	0.111	50	130	235	3550	37.60	2.90	100	9.19	
Zhao (2000)	NJ2	0.083	100	100	240	3550	20.50	2.08	150	11.00
	NJ3	0.083	100	150	240	3550	20.50	2.08	150	11.25
	NJ4	0.083	100	100	240	3550	36.70	2.87	150	12.50
	NJ5	0.083	100	150	240	3550	36.70	2.87	150	12.25
	NJ6	0.083	100	150	240	3481	36.70	2.87	150	12.75
Takeo (1997)	1-11	0.167	40	100	230	3481	36.56	2.86	100	8.75
	1-12	0.167	40	100	230	3481	33.75	2.74	100	8.85
	1-21	0.167	40	200	230	3481	36.56	2.86	100	9.30
	1-22	0.167	40	200	230	3481	33.75	2.74	100	8.50
	1-31	0.167	40	300	230	3481	36.56	2.86	100	9.30
	1-32	0.167	40	300	230	3481	33.75	2.74	100	8.30
	1-41	0.167	40	500	230	3481	36.56	2.86	100	8.05
	1-42	0.167	40	500	230	3481	36.56	2.86	100	8.05
	1-51	0.167	40	500	230	3481	33.50	2.73	100	8.45
	1-52	0.167	40	500	230	3481	33.50	2.73	100	7.30
	2-11	0.167	40	100	230	3481	31.63	2.64	100	8.75
	2-12	0.167	40	100	230	3481	31.63	2.64	100	8.85

표 1 모형 개발을 위한 학습자료(계속)

Takeo (1997)	2-13	0.167	40	100	230	3481	33.13	2.71	100	7.75
	2-14	0.167	40	100	230	3481	33.13	2.71	100	7.65
	2-15	0.167	40	100	230	3481	30.88	2.61	100	9.00
	2-21	0.334	40	100	230	3481	31.63	2.64	100	12.00
	2-22	0.334	40	100	230	3481	31.63	2.64	100	10.80
	2-31	0.501	40	100	230	3481	33.63	2.64	100	12.65
	2-32	0.501	40	100	230	3481	33.63	2.64	100	14.358
	2-41	0.165	40	100	373	2942	30.88	2.61	100	11.55
	2-42	0.165	40	100	373	2942	31.88	2.61	100	11.00
	2-51	0.167	40	100	230	3481	31.13	2.71	100	9.85
	2-52	0.167	40	100	230	3481	31.13	2.71	100	9.50
	2-61	0.167	40	100	230	3481	31.13	2.71	100	8.80
	2-62	0.167	40	100	230	3481	30.13	2.71	100	9.25
	2-71	0.167	40	100	230	3481	30.13	2.71	100	7.65
	2-72	0.167	40	100	230	3481	33.13	2.71	100	6.80
	2-81	0.167	40	100	230	3481	33.25	3.87	100	7.75
	2-82	0.167	40	100	230	3481	33.25	3.87	100	8.05
2-91	0.167	40	100	230	3481	33.88	2.61	100	6.75	
2-92	0.167	40	100	230	3481	33.88	2.61	100	6.80	
2-101	0.111	40	100	230	3481	33.63	2.64	100	7.70	
2-102	0.111	40	100	230	3481	63.13	2.71	100	6.95	
Ren(2003)	DLUT15-2G	0.507	20	150	83.03	3271	28.70	2.50	150	5.81
	DLUT15-5G	0.507	50	150	83.03	3271	28.70	2.50	150	10.60
	DLUT15-7G	0.507	80	150	83.03	3271	28.70	2.50	150	18.23
	DLUT30-1G	0.507	20	100	83.03	3271	45.30	3.22	150	4.63
	DLUT30-2G	0.507	20	150	83.03	3271	45.30	3.22	150	5.77
	DLUT30-3G	0.507	50	60	83.03	3271	45.30	3.22	150	9.42
	DLUT30-4G	0.507	50	100	83.03	3271	45.30	3.22	150	11.03
	DLUT30-6G	0.507	50	150	83.03	3271	45.30	3.22	150	11.80
	DLUT30-7G	0.507	80	100	83.03	3271	45.30	3.22	150	14.65
	DLUT30-8G	0.507	80	150	83.03	3271	45.30	3.22	150	16.44
	DLUT50-1G	0.507	20	100	83.03	3271	55.50	3.60	150	5.99
	DLUT50-2G	0.507	20	150	83.03	3271	55.50	3.60	150	5.90
	DLUT50-4G	0.507	50	100	83.03	3271	55.50	3.60	150	9.84
	DLUT50-5G	0.507	50	150	83.03	3271	55.50	3.60	150	12.28
	DLUT50-6G	0.507	80	100	83.03	3271	55.50	3.60	150	14.02
	DLUT50-7G	0.507	80	150	83.03	3271	55.50	3.60	150	16.71
	DLUT15-2C	0.33	20	150	207	3890	28.70	2.50	150	5.48
	DLUT15-5C	0.33	50	150	207	3890	28.70	2.50	150	10.02
	DLUT15-7C	0.33	80	150	207	3890	28.70	2.50	150	19.27
	DLUT30-1C	0.33	20	100	207	3890	45.30	3.22	150	5.54
	DLUT30-2C	0.33	20	150	207	3890	45.30	3.22	150	4.61
	DLUT30-4C	0.33	50	100	207	3890	45.30	3.22	150	11.08
	DLUT30-5C	0.33	50	100	207	3890	45.30	3.22	150	16.10
	DLUT30-6C	0.33	50	150	207	3890	45.30	3.22	150	21.71
DLUT30-7C	0.33	80	100	207	3890	45.30	3.22	150	22.64	
DLUT50-1C	0.33	20	100	207	3890	55.50	3.60	150	5.78	
DLUT50-5C	0.33	50	150	207	3890	55.50	3.60	150	16.72	
DLUT50-6C	0.33	80	100	207	3890	55.50	3.60	150	16.24	
DLUT50-7C	0.33	80	150	207	3890	55.50	3.60	150	22.80	

모형 개발을 위해 사용된 학습 자료를 분석해 보면 부착강도는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 거의 선형적인 증가양상을 나타내고 있었다. 부착 길이에 따른 부착강도 변화는 아주 미소하게 증가함을 확인

할 수 있었고 이는 부착 길이가 아무리 증가하여도 부착강도는 증가하지 않고, 아무리 길더라도 보강재의 인장강도에는 절대로 도달하지 못하였다. 하지만, 부착 길이가 증가 할수록 파괴과정에서는 연성은 증가한다. FRP-콘크리트 깊이비 또한 미소 선형적 증가 경향을 나타내고 있다.

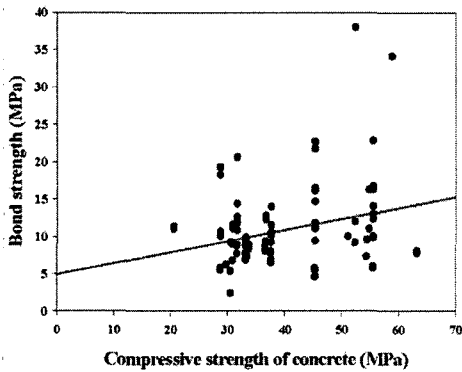


그림 1 콘크리트 압축강도와 부착강도와의 관계

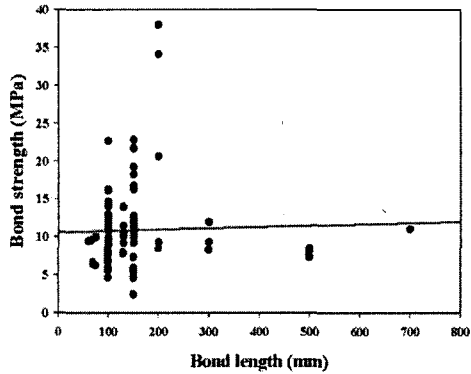


그림 2 부착길이와 부착강도와의 관계

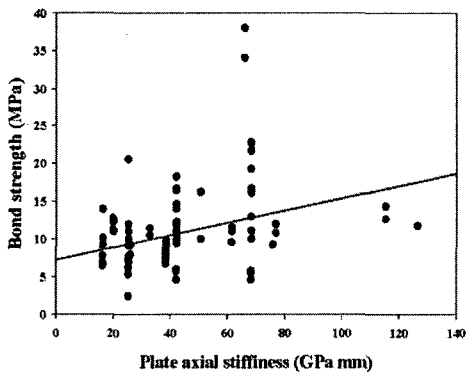


그림 3 FRP강성과 부착강도와의 관계

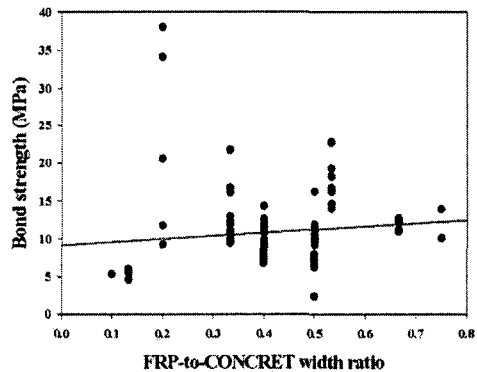


그림 4 FRP-to-concrete 깊이비와 부착강도와의 관계

### 3. MLP 모형의 개발 및 검증

본 연구에서는 표 1에서의 부착강도 실험 데이터를 이용하여 MLP 모형을 개발하고자 한다. 역전파학습(back-propagation) 알고리즘과 결합기울기(Conjugate gradient technique)방법 2가지를 변수로 선정 알고리즘에 따른 MLP 모형의 예측값의 변화를 분석하고자 한다. 모형 개발을 위해 필요한 입력층(input layer)에는 FRP 판의 두께, 폭, 부착길이, 탄성계수, 인장강도와 콘크리트의 압축강도, 인장강도, 폭을 사용하였다. 은닉층(Hidden layer)은 2개를 은닉마디는 6개를 적용하였다. 출력층(output layer)에는 부착강도를 사용하였으며, 활성화함수는 비선형 함수를 사용하였다. 학습과정은 약 3000epochs 정도에 오차율 0.001범위에 수렴됨을 그림 5에 나타낸 바와 같이 확인할 수 있었다.

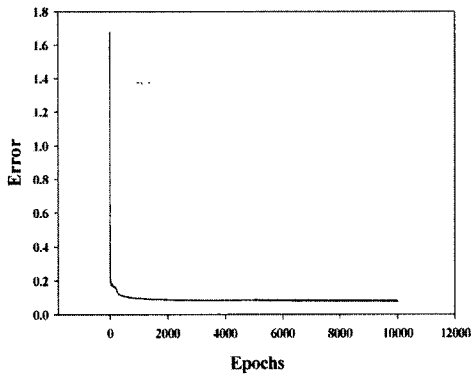


그림 5 오차율 수렴 과정

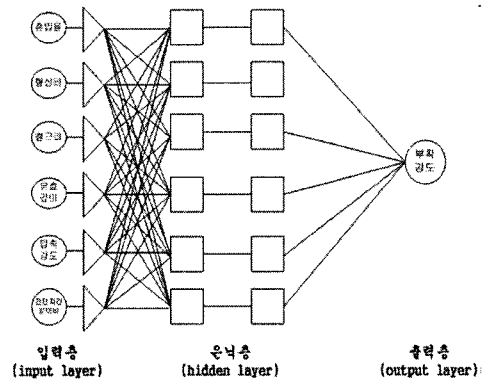


그림 6 MLP 모형 조직도

표 2 MLP모형 검증 자료

Reference	Specimen	FRP Plate					Concrete			Ultimate bond strength $P_u$ (kN)
		Thickness $t_f$ (mm)	Width $b_f$ (mm)	Bond length L (mm)	Elastic modulus $E_f$ (GPa)	Tensile strength $f_{tj}$ (MPa)	Compressive strength $f'_c$ (MPa)	Tensile strength $f_t$ (MPa)	Width $b_c$ (mm)	
Wu (2001)	D-CFS-150-30a	0.083	100	300	230	4200	58.85	3.71	100	12.20
	D-CFS-150-30b	0.083	100	300	230	4200	73.85	4.21	100	11.80
	D-CFS-150-30c	0.083	100	300	230	4200	73.85	4.21	100	12.25
	D-CFS-300-30a	0.167	100	300	230	4200	73.85	4.21	100	18.90
	D-CFS-300-30b	0.167	100	300	230	4200	73.85	4.21	100	16.95
	D-CFS-300-30c	0.167	100	300	230	4200	73.85	4.21	100	16.65
	D-CFS-600-30a	0.333	100	300	230	4200	73.85	4.21	100	25.65
	D-CFS-600-30b	0.333	100	300	230	4200	73.85	4.21	100	25.35
	D-CFS-600-30c	0.333	100	300	230	4200	73.85	4.21	100	27.25
	D-CFM-300-30a	0.167	100	300	390	4400	73.85	4.21	100	19.50
	D-CFM-300-30b	0.167	100	300	390	4400	73.85	4.21	100	19.50
	D-AR-280-30a	1.0	100	300	23.9	4400	73.85	4.21	100	12.75
	D-AR-280-30b	1.0	100	300	23.9	4400	73.85	4.21	100	12.85
	D-AR-280-30c	1.0	100	300	23.9	4400	73.85	4.21	100	11.90
	S-CFS-400-25a	0.222	40	250	230	4200	73.85	4.21	100	15.40
	S-CFS-400-25b	0.222	40	250	230	4200	73.85	4.21	100	13.90
	S-CFS-400-25c	0.222	40	250	230	4200	73.85	4.21	100	13.00
	S-CFM-300-25a	0.167	40	250	390	4400	73.85	4.21	100	12.00
	S-CFM-300-25b	0.167	40	250	390	4400	73.85	4.21	100	11.90
	S-CFM-900-25a	0.5	40	250	390	4400	73.85	4.21	100	25.90
S-CFM-900-25b	0.5	40	250	390	4400	73.85	4.21	100	23.40	
S-CFM-900-25c	0.5	40	250	390	4400	73.85	4.21	100	23.70	

MLP모형 최적화 방법으로 역전파 학습알고리즘 과 결합기울기 알고리즘을 적용하여 예측한 부착강도와 표 2에 나타난 Wu(2001)의 실험 데이터 부착강도 값을 비교, 분석한 결과 아래 그림 7,8과 같다. MLP모형에 역전파 학습 알고리즘을 적용하여 부착강도를 예측한 결과 상관계수( $r^2=0.816$ )으로 분석되었고, 결합기울기 알고리즘을 적용한 경우 상관계수( $r^2=0.813$ )으로 나타났다. 이는 FRP 부착강도 예측 모형으로서 MLP 모형의 최적화 방법 알고리즘은 역전파 학습알고리즘이나 결합기울기 알고리즘 적용에는 큰 차이를 나타내지

않았다.

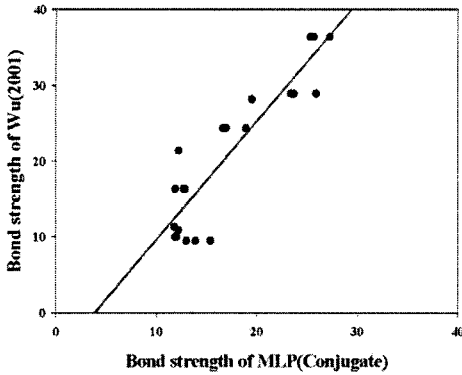


그림 7 Expt./MLP(BP) 결과값

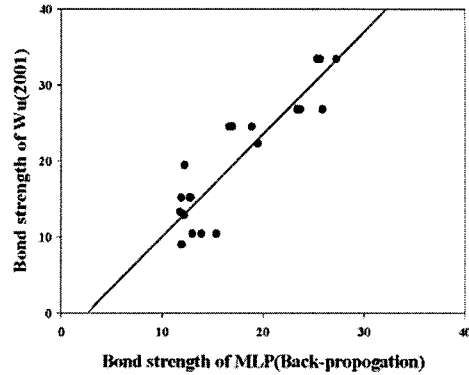


그림 8 Expt./MLP(Conjugate) 결과값

#### 4. 결 론

본 연구에서는 FRP 판-콘크리트의 부착강도 모형을 개발하기 위하여 선행 연구자들이 수행한 실험 데이터를 인용하여 수집, 분석하였다. 최적화 방법으로 역전파 학습알고리즘과 결합기울기 알고리즘을 적용한 결과 역전파 학습알고리즘을 적용한 결과 상관계수가  $r^2=0.816$ 로 분석되었고, 결합기울기 알고리즘을 적용한 경우 상관계수  $r^2=0.813$ 로 나타나 두 알고리즘 모두 적절한 것으로 판단된다.

제안사항으로, 더욱 많은 자료를 수집, 분석하여 본 연구에서 개발한 모형의 신뢰성을 높이도록 더욱 많은 자료에 의한 개발 및 검증이 이루어져야 한다고 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가연구원 지정 R&D(03-산학연 A02-04)연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

#### 참고문헌

- 양동석, 박선규 (2004) 콘크리트와 부착된 탄소섬유 및 강판의 부착강도 모델, 한국구조물진단학회, 번역 기사, pp 80-88
- Tan Z (2002) Experimental research for RC beam Strengthened with GFRP", Master thesis, China: Tsinghua University
- Ren HT, (2003) Study on basic theories and long time behavior of concrete structures strengthened by fiber reinforced polymer", Ph. D. thesis, China: Dalian University of Technology
- Wu Zs, Yuan H, Hiroyuki Y, Tashiyuki K, (2001) Experimental/analytical study on interfacial fracture energy and fracture propagation along FRP-concrete interface", In: ACI International SP-201-8, pp133-152