

# 탄소섬유그리드 보강 휨부재의 거동에 대한 실험적 연구

박제용\* · 안동준\*\* · 정상균\*\*\* · 윤순중\*\*\*\*

## An Experimental Study on the Behavior of Carbon Fiber Grid Reinforced Flexural Members

Park, Je-Yong\* · Ahn, Dong-Jun\*\* · Jeong, Sang-Kyoon\*\*\* · Yoon, Soon-Jong\*\*\*\*

**Key Words:** carbon fiber grid, polymer mortar, flexural member, experimental

### Abstract

In this paper we present the results of an experimental investigation on the physical and mechanical properties of carbon fiber grid, polymer mortar, and carbon fiber grid reinforced plain concrete flexural members. In order to repairing and reinforcing damaged and/or deteriorated existing concrete structural members, new materials have been developed and utilized in the construction industries. But the physical and mechanical behaviors of the material are not well understood. To use the material effectively various aspects of the material must be thoroughly investigated analytically as well as experimentally. In this investigation, we found the physical and mechanical properties of carbon fiber grid and polymer mortar which are directly utilized in the repair and reinforcement design of damaged or deteriorated concrete structures. In addition, we also investigate the strengthening effect of carbon fiber grid on the plain concrete flexural test specimens. It was found that the material can be used to repair and strengthen the concrete structures effectively.

### 1. 서론

급속한 경제성장과 그 성장에 따라 필요하게된 각종 건설구조물(도로, 철도, 항만, 공항, 댐, 상하수도시설, 전력관련시설, 각종 공장 등)이 건설되었으며, 현재에도 건설 중에 있다. 이런 건설구조물들이 인구의 증가와 집중화에 따른 교통량의 증가, 교통하중의 증가 등 사회적 문제와 각종 오염물질의 배출증가 등 환경적 문제, 그리고 자연적인 재해 등으로 인하여 구조물의 손상 및 노후화가 촉

진되고 있으며, 따라서 보수보강공법의 개발에 대한 필요성이 증대되고 있다.

건설구조물의 보수보강은 설계목적에 적합한 안전성과 구조물의 내구성 및 수명을 증대시키기 위한 것으로 국내 실정에 맞는 경제적인 보수보강재료의 선택과 공법의 개발이 요구된다<sup>(1)</sup>. 보수보강재료로는 강재 외에도 유리섬유(glass fiber), 탄소섬유(carbon fiber), 아라미드섬유(aramid fiber) 등 복합재료가 사용되고 있다<sup>(2)</sup>. 이러한 복합재료는 단위중량당 강도와 강성이 크며, 내부식성, 내화학

\* 홍익대학교 대학원 토목공학과 석사과정

\*\* 동신기술개발주식회사 상무이사

\*\*\* 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 홍익대학교 공과대학 토목공학과 조교수

성, 절연성 등 기존 구조재료에 없는 장점을 가지고 있기 때문에 콘크리트 구조물의 보수보강에 많이 사용되고 있다. 또한 선진국에서는 탄소섬유 또는 유리섬유가 내부식성이 크고, 가볍기 때문에 철근의 대체재료로 뿐만 아니라, 프리스트레스트 콘크리트의 긴장재로도 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다<sup>(3,4)</sup>. 그러나 국내에서는 이런 재료들의 보수보강효과에 대한 실험적 연구조차도 아직은 초기 단계에 머물러 있어 역학적 특성과 거동을 파악하는 것이 실제 적용에 앞서 규명되어야 할 과제이다.

본 연구는 노후 또는 손상된 콘크리트 부재를 효과적으로 보수보강하기 위한 공법의 개발에 관한 연구의 일부로써, 보수보강에 사용되는 탄소섬유그리드와 모르타르에 대한 물리적 역학적 특성을 조사하고, 탄소섬유그리드로 보강된 콘크리트 휨부재에 대한 역학적 거동과 탄소섬유그리드의 보수보강효과를 실험적으로 검토하였다. 또한 탄소섬유그리드를 사용한 보수보강공법의 효율성과 현장 적용 가능성을 실험적으로 검토하였다.

## 2. 재료의 기하학적 물리적 특성

### 2.1 탄소섬유그리드의 단면적 및 단위중량

본 실험에 사용된 탄소섬유그리드는 탄소섬유를 비닐에스터수지(vinyl-ester)에 함침시킨 후 격자형태로 성형한 것으로 시공성, 현장구조물의 형태 및 강성을 고려하여 만든 제품이다(그림 1 참조)<sup>(5,6)</sup>. 탄소섬유그리드를 콘크리트 보수보강재료로 설계하여 사용하기 위해서는 단면적 및 단위중량을 알아야 한다. 단면적 및 단위중량은 일정한 길이의 탄소섬유그리드의 부피와 중량을 측정하여 구하였다.

탄소섬유그리드(C6, C10, C13)의 물리적 성질을 구하기 위한 시편의 모양은 그림 2와 같다.

실험을 통해 구한 탄소섬유그리드의 평균 단면적과 단위중량은 다음 표 1과 같다.

### 2.2 보수보강 모르타르의 물리적 특성

콘크리트의 보수보강에 사용되는 모르타르는 기존 콘크리트에 잘 부착되어야 하고, 보수 또는 보강되는 콘크리트보다 더 큰 강도를 가져야 한다. 실험에 사용된 폴리머 모르타르는 무기질계의 원료

를 사용하고, 결합제로 합성고분자 폴리머를 사용했기 때문에 내구성과 화학적 안정성이 좋으며, 시공성이 양호한 무수축 건조 모르타르이다<sup>(7)</sup>.

실험을 통해 구한 폴리머 모르타르의 단위중량과 건조수축 및 흡수율은 다음 표 2와 같다.

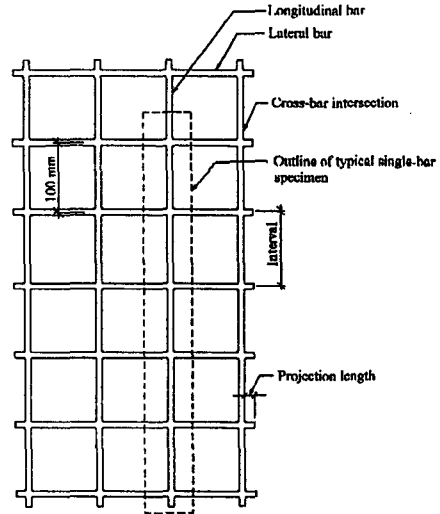


그림 1. 탄소섬유그리드<sup>(5,6)</sup>

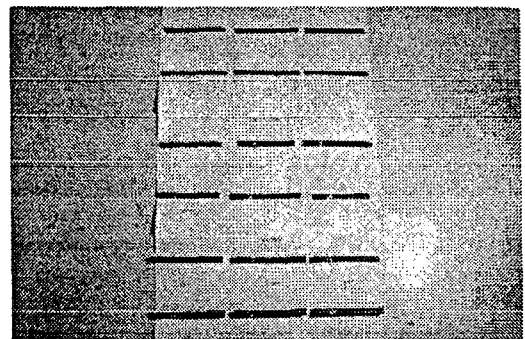


그림 2. 탄소섬유그리드 시편

표 1. 탄소섬유그리드의 단면적과 단위중량

시편	길이 (cm)	중량 (g)	부피 (cm <sup>3</sup> )	단면적 (cm <sup>2</sup> )	단위중량 (g/cm <sup>3</sup> )
C6	8.76	2.19	4.90	0.1865	1.340
C10	7.96	4.45	9.91	0.4150	1.348
C13	8.72	8.27	18.4	0.7036	1.349

표 2. 폴리머 모르타르의 물리적 성질

모르타르	단위중량 (g/cm <sup>3</sup> )	건조수축율 (%)	흡수율 (%)
폴리머 모르타르	2.601	0.066	10.89

### 3. 재료의 역학적 특성

#### 3.1 탄소섬유그리드의 인장강도 및 탄성계수

탄소섬유그리드는 부재내에서 철근처럼 거동을 하도록 사용하기 때문에 인장시험만 하였다. 인장시험(C10, C16)은 탄소섬유그리드를 가로와 세로방향으로 잘라내어 시편의 중앙부(gage length)가 일정한 단면치수를 갖도록 가공하였다(그림 1 참조).

인장시험은 시편의 중앙에 익스텐소미터를 부착하여 하중증가에 따른 변위를 측정하였다. 시험 후 파괴된 모양은 그림 3과 같다.

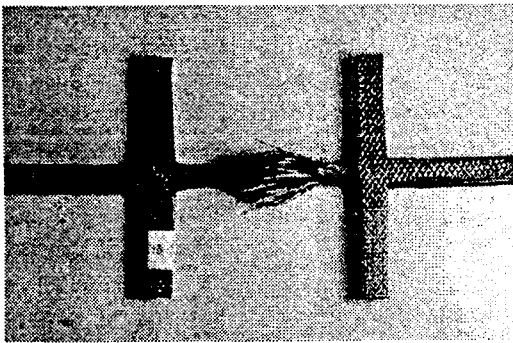


그림 3. 탄소섬유그리드 인장시험편의 파단

측정된 응력과 변형률 관계에 대한 그래프를 그리고 그 그래프의 기울기, 즉 탄성계수를 구했으며, 파단될 때의 응력, 즉 강도를 기록하였다. 대표적인 응력-변형률 관계는 그림 4와 같으며, 탄소섬유그리드의 응력과 변형률의 관계는 선형임을 알 수 있다.

인장시험으로부터 얻은 결과를 분석하여 탄소섬유그리드의 인장강도와 탄성계수를 구하면 표 3과 같다. 표 3은 시편별 인장강도와 탄성계수의 평균값을 정리하여 나타낸 것이다.

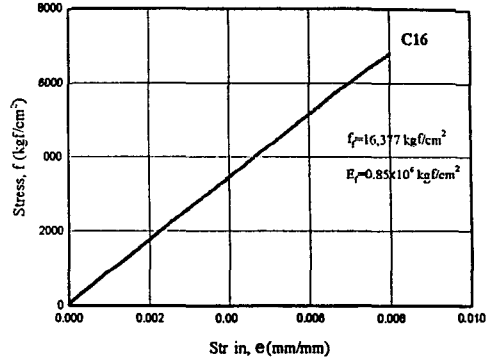


그림 4. 탄소섬유그리드의 응력과 변형률 관계

표 3. 탄소섬유그리드의 인장시험결과

시편번호	단면적 (mm <sup>2</sup> )	극한하중 (tf)	극한변형률 (mm/mm)	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
C10	1방향	24.59	4.0225	0.0170	16,463	0.95×10 <sup>6</sup>
	2방향	24.71	4.3500	0.0200	17,660	0.88×10 <sup>6</sup>
C16	1방향	49.80	8.5100	0.0150	16,643	1.13×10 <sup>6</sup>
	2방향	35.46	6.0000	0.0164	16,372	0.90×10 <sup>6</sup>

\* Gage length: 50mm

실험결과 탄소섬유그리드의 탄성계수값이 0.8×10<sup>6</sup>kgf/cm<sup>2</sup>~1.0×10<sup>6</sup>kgf/cm<sup>2</sup> 범위 내에 존재하고 있음을 알 수 있었다. 그러나, 하한값인 0.8×10<sup>6</sup>kgf/cm<sup>2</sup>을 사용하는 것이 더 큰 단면을 사용하게 되므로 그만큼 더 안전측 설계가 된다는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 보수보강 모르타르의 압축 및 휨강도

폴리머 모르타르<sup>(7)</sup>에 대한 압축강도와 휨강도를 측정하기 위해 각각 압축강도시험 공시체(5×5×5cm: KS L 5105)와 휨강도시험 공시체(4×4×16cm: KS F 2477)를 제작하였으며, 강도의 실험에서는 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM, UH-100A)를 사용하였고, 변위제어방식으로 압축강도시험과 휨강도시험을 하였다<sup>(8)</sup>.

압축강도와 휨강도는 재령 3일, 7일, 21일, 그리고 28일에 각각 실험하였으며, 각 재령에 대해서 3개의 공시체를 실험하고 평균값을 구해 그 재령에 대한

강도로 결정하였다.

폴리머 모르타르의 재령별 압축강도시험결과는 그림 5와 같으며, 휨강도시험결과는 그림 6과 같다. 이 두 그래프로부터 알 수 있듯이 압축강도는 재령 7일에 200kgf/cm<sup>2</sup>, 재령 28일에 400kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 높은 강도를 나타냈으며, 재령 28일인 휨강도는 약 70kgf/cm<sup>2</sup> 정도로 큰 강도를 나타내었다. 따라서 이 모르타르는 콘크리트의 보수보강에 사용하는데 적합하다는 것을 알 수 있다.

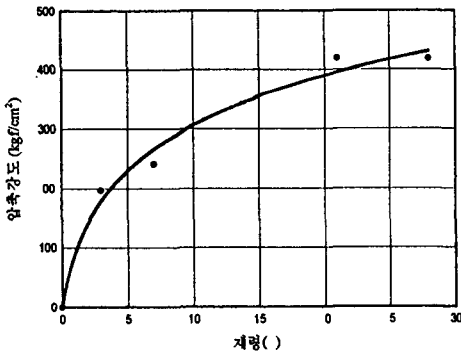


그림 5. 폴리머 모르타르의 재령별 압축강도

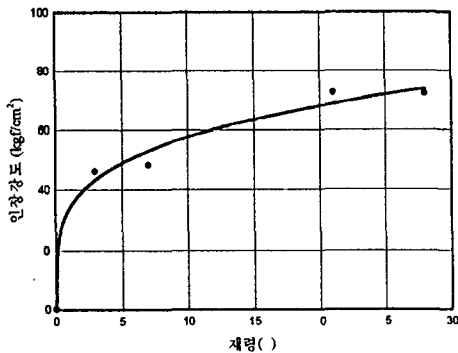


그림 6. 폴리머 모르타르의 재령별 휨강도

#### 4. 탄소섬유그리드 보강 콘크리트

##### 4.1 시험체 제작 및 시험

콘크리트의 배합설계는 시험배합에 의한 방법을 사용하였으며, 본 연구는 콘크리트 배합설계가 목적이 아니므로 표 4와 같이 물-시멘트비가 45%인 경우에 대한 각 재료의 단위량만을 산출하였다<sup>(9)</sup>.

콘크리트의 역학적 실험을 위한 공시체는 KS F

2403에 의해 제작하였으며, 압축강도시험(KS F 2405)과 인장강도시험(KS F 2323)을 위한 공시체는 원형공시체(φ15×30cm)를 사용하였고, 휨강도시험(KS F 2408)을 위한 공시체는 표준휨공시체(15×15×55cm)를 제작하여 시험에 사용하였다. 시험한 결과는 표 5와 같이 재령 7일과 28일의 강도를 얻을 수 있었다.

표 4. 콘크리트 배합설계

설계강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)
240	19	8	2	45

잔골재율 (%)	단위량 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
	물 (W)	시멘트 (C)	잔골재 (S)	굵은골재 (G)
44	172.5	383.3	301.8	384.0

표 5. 콘크리트의 재령 7일, 28일 강도

재령 (일)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	휨강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
7	203.40	-	40.65
28	258.64	19.74	47.71

탄소섬유그리드로 보강한 콘크리트 휨강도 공시체는 보통콘크리트 휨강도 측정에 사용한 공시체와 같은 콘크리트 표준휨공시체를 사용하여 제작하였다. 그림 7과 같이 공시체의 상부 3cm를 제외한 나머지 부분만 콘크리트로 타설하였다. 공시체를 21일간 수중양생 시킨 후 공시체 표면의 불순물(레이탄스 등)을 와이어 브러쉬로 제거하고 접촉증강제(리포텍스 M-400)를 도포하였다. 앵커볼트 2개로 탄소섬유그리드를 콘크리트에 고정시켰다. 그 위를 폴리머 모르타르로 피복하였으며, 완성체의 단면 모양은 그림 8과 같다.

휨강도시험을 할 때의 콘크리트와 폴리머 모르타르의 재령은 각각 28일, 7일이었으며, 시편의 휨강도는 단순보의 3등분점 하중법(4-point bending test)을 사

용하여 측정하였다.

부착강도실험은 휨강도실험에서 파괴되지 않은 부분을 절단하여 공시체의 크기가 15×15×15cm가 되도록 가공한 후 압축강도실험을 하였으며, 부착면을 하중재하방향과 평행하게 하여 압축강도와 압축력에 의한 부착면의 파괴여부를 조사하였다.

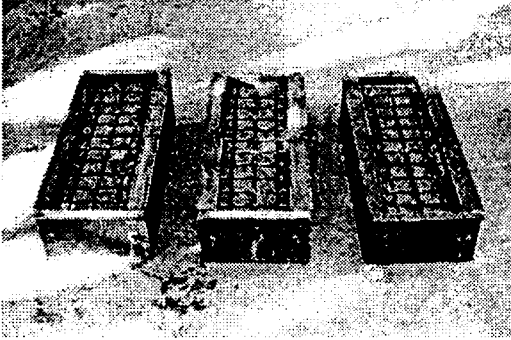


그림 7. 탄소섬유그리드 고정 및 접착증강제 도포



그림 8. 탄소섬유그리드 보강 콘크리트 시편 단면

#### 4.2 실험결과

휨강도실험에서 탄소섬유그리드(C6)로 보강한 콘크리트 휨부재 공시체는 콘크리트 인장부에 균열이 먼저 발생하고 이어서 균열이 발생한 부분을 중심으로 콘크리트와 모르타르의 부착부위가 분리되는 파괴모드를 보였으며, 일반적으로 콘크리트와 같은 취성재료에서 발생하는 갑작스런 파괴는 발생하지 않았다. 이와 같은 현상은 보강한 탄소섬유그리드가 휨인장응력에 적절히 저항하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

극한하중을 측정하여 비교하면, 탄소섬유그리드로 보강한 콘크리트 휨공시체가 보통콘크리트 휨공시체에 비해 약 13.3%의 휨강도가 증가되었음을

표 6과 같이 알 수 있었다.

표 6. 탄소섬유그리드 보강 콘크리트 휨공시체의 극한강도 증가(재령 28일)

공시체 번호	콘크리트 휨공시체의 극한강도 (tf)	탄소섬유그리드 보강 콘크리트 휨공시체의 극한강도 (tf)	강도 증가율 (%)
C6-1	3.35	4.01	19.7
C6-2	3.78	4.29	13.5
C6-3	3.88	4.14	6.7
평균	3.67	4.15	13.3

탄소섬유그리드로 보강한 경우 콘크리트의 탄성계수에 비해 탄소섬유그리드의 탄성계수가 약 4배 이상 크므로 중립축의 위치는 콘크리트 휨강도 공시체의 하단 인장부로 이동하게 된다. 따라서 콘크리트가 파괴되기까지 더 큰 휨용력을 받을 수 있게 되며, 단면에 발생하는 휨용력은 콘크리트의 극한강도와 관계되므로 탄소섬유그리드로 보강한 경우 극한강도가 증가하게 된다.

보통콘크리트의 압축강도를 탄소섬유그리드로 보강한 콘크리트의 공시체와 같은 정육면체 단면의 압축강도로 환산<sup>(10)</sup>해보면 탄소섬유그리드로 보강한 콘크리트의 압축강도가 표 7과 같이 약 14.7% 증가됨을 알 수 있다.

표 7. 탄소섬유그리드 보강 콘크리트 의 압축강도 증가

재령 (일)	공시체 번호	극한강도 (tf)	강도 증가율 (%)
콘크리트-28 보강 모르타르-7	C <sub>28</sub> -1	74.26	13.56
	C <sub>28</sub> -2	75.00	14.70
	C <sub>28</sub> -3	75.78	15.89
평균		75.01	14.70

\* 같은 단면(15×15×15cm)을 갖는 콘크리트 공시체의 추정된 극한강도 : 65.39tf

탄소섬유그리드로 보강한 휨공시체의 휨강도실

협에서 콘크리트와 모르타르 부착면에 대해 조사하였다. 조사결과 휨인장력에 의해 콘크리트의 인장부에 균열이 먼저 발생하면서 파괴에 이르렀으며 콘크리트에 균열이 발생하기 전까지는 부착에 전혀 문제가 없음을 확인할 수 있었다. 휨강도실험을 한 후 시편의 균열이 발생하지 않은 부분을 징육면체로 절단하여 압축실험을 실시하고 압축력에 의한 부착면의 균열발생여부를 육안으로 조사하였다. 탄소섬유그리드로 보강할 경우 기존 콘크리트에서 먼저 파괴가 발생하였고, 모르타르와 탄소섬유그리드로 보강한 경계면은 충분히 부착되어 있음을 확인할 수 있었다. 이 실험에서 실험할 때의 콘크리트의 재령은 28일이고 모르타르의 재령은 7일이므로 실제 현장에서 사용될 경우 모르타르의 재령이 28일 이상이 되면 재령 28일 강도는 재령 7일 강도보다 약 2배 증가되므로 보강효과는 그만큼 더 크게 될 것이다. 따라서 부착에는 전혀 문제가 되지 않을 것으로 판단되며 보강효과가 크다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

탄소섬유그리드 시편, 보수보강 모르타르 실험 공시체, 그리고 탄소섬유로 보강한 콘크리트 휨강도 공시체에 대한 실험적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탄소섬유그리드의 인장강도는  $16,000\text{kgf/cm}^2$  이상의 큰 강도를 나타냈으며, 철근(SD 40)의 항복강도보다 4배 이상 크다는 것을 확인하였다. 그러나 제품제작사가 추천한  $15,000\text{kgf/cm}^2$ 를 사용할 경우 안전측 설계가 된다는 것을 알 수 있었다.
2. 보수보강에 사용되는 폴리머 모르타르의 재령 7일 강도와 재령 28일 강도는 각각  $200\text{kgf/cm}^2$ ,  $400\text{kgf/cm}^2$  이상으로 충분한 강도를 가지고 있으며, 기존 콘크리트와 잘 부착됨을 확인하였다.
3. 탄소섬유그리드(C6)로 보강한 콘크리트의 휨강도와 압축강도는 보통콘크리트의 휨강도 및 압축강도와 비교하여 약 13%, 14%정도 큰 강도를 얻었다. 따라서 보강효과가 크다는 것을 알 수 있었다. 즉, 기존의 콘크리트 구조물을 탄소섬유그리드로 보수 또는 보강할 경우 구조물의 한계상태는 본래 콘크리트의 극한강도에 의해 좌우되므로 충분한 보수 및 보강효과가 있음을 알 수 있었다.
4. 탄소섬유그리드와 콘크리트의 부착에 관한 실험

결과 콘크리트와 모르타르 부착면의 부착강도는 콘크리트 파괴강도보다 큼을 확인하였다. 따라서 보강되는 콘크리트 구조물이 파괴되지 않는 한 부착면, 즉 보강한 곳은 안전하다는 것을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 M. S. Asia사의 재정적 지원에 의해 이루어진 것으로 지원에 대해 감사의 뜻을 표한다.

## 참고문헌

- (1) Yoon, S. J., Mechanics of Polymer Matrix Composites, Class Lecture Note, Graduate School, Department of Civil Engineering, Hongik University, 1998.
- (2) 토목시설물 안전점검진단 세부지침(유지관리, 보수 보강), 한국건설기술정보원, 1999.
- (3) Schwartz, M., Composite Materials Handbook, 2nd ed., McGraw-Hill Inc., New York, 1992.
- (4) 조병완, 태기호, 최용환, "탄소격자섬유로 보강한 철근콘크리트보의 휨파괴 특성에 관한 연구", 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 제3권 1호, 1999, pp. 239-244.
- (5) 네프맥(NEFMAC) 설계·시공지침(안), 일본토목학회(JSCE), 1998.
- (6) 콘크리트 구조물의 보수-보강 New Fiber Grid-NEFMAC공법, M. S. Asia, 1999.
- (7) 네프그리트 및 랜더록 기술자료, 한일시멘트주식회사, 1999.
- (8) SHIMADZU, Introduction Manual SHIMADZU Universal Testing Machine UH-series, DI Inc., 1996.
- (9) Kosmatka, S. H. and Panarese, S. C., Design and Control of Concrete Mixtures, 3rd ed., Portland Cement Association (PCA). 1988.
- (10) Neville, A. M., Properties of Concrete, Pitman Publishing Co. Inc., London, 1981.