

# 도로 기층 재료로 활용하기 위한 섬유보강 빈배합 콘크리트에 플라이애시와 리젝트애시를 사용한 경우 역학적 특성 및 섬유 분산성 분석

## Evaluation of Mechanical Properties and Fiber Dispersing Characteristics of Fiber Reinforced Lean Concrete Using Fly Ash and Reject Ash

장영재 Jang, Young Jae  
박철우 Park, Cheol Woo  
박영환 Park, Young Hwan  
유평준 Yoo, Pyeong Jun  
정우태 Jung, Woo Tae  
김용재 Kim, Yong Jae

정희원 · 강원대학교 토목건설공학과 석사과정 (E-mail: lhrjyj@hanmail.net)  
정희원 · 강원대학교 토목공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail: tigerpark@kangwon.ac.kr)  
한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구위원 (E-mail: yhpark@kict.re.kr)  
정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 (E-mail: pjyoo@kict.re.kr)  
한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구위원 (E-mail: woody@kict.re.kr)  
한양대학교 건설환경공학부 박사과정 (E-mail: kimseungwok@naver.com)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** As pavement generally provides service shorter than an expected life cycle, maintenance cost increases gradually. In order to help extending the service life and reduce maintenance cost, a new multi-functional composite pavement system is being developed in Korea.

**METHODS :** This study is a part to develop the multi-functional composite pavement and is to investigate the mechanical performances of fiber-reinforced lean concrete for pavement subbase. The inherent problem of fiber reinforced concrete is dispersion of fibers in concrete mix. This study additionally evaluated fiber dispersion characteristics with respect to different fiber types.

**RESULTS :** From the test results, the compressive strengths of the concretes satisfied the required limit of 5MPa at 7days. The standard deviation of the measured number of fibers were lower in the order of nylon, steel fiber and polypropylene.

**CONCLUSIONS :** Reject ash was shown to be satisfactory as a replacement material to Portland cement in lean concrete base. The fiber volume fraction is suggested to be 0.4% even though the fracture toughness did not vary significantly with respect to fiber types. However, fracture energy absorbed up to complete failure increased with the increased fiber volume fraction increment.

### Keywords

*fiber reinforced lean concrete, fly ash, reject ash, dispersibility*

Main Author : Park, Cheolwoo, Associate Professor  
Department of Civil Engineering, Kangwon National University,  
#1 Choongang-Ro, Samcheok-Si, Gangwon-Do, 245-711, Korea  
Tel : +82.33.570.6515 Fax : +82.33.570.6517  
E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ijhe.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (Print)  
ISSN 2287-3678 (Online)

## 1. 서론

현재 도로포장의 공용수명은 50~100년에 이르는 교량이나 터널 등과 같은 다른 도로 시설물의 공용수명에

비해 매우 낮은 실정으로 이는 기존 도로포장 시스템의 설계 및 시공에 있어 많은 부분이 개선되어야 함을 시사한다고 할 수 있다(Park et al., 2009).

기존 아스팔트 포장의 경우 역시 설계수명의 50~60%에 머물고 있는 실정으로 설계수명 15~20년에 크게 미치지 못하고 있는 실정이며 이와 같은 도로포장의 설계수명의 감소로 인하여 도로 시설물의 급격한 유지관리비용의 상승은 국가 재정에 위협적인 요소가 되고 있다.

본 연구에서는 아스팔트 표층을 구성하기 위한 기층 재료로 섬유보강 빈배합 콘크리트를 활용하였으며 파괴 인성 증대 등의 역학적 특성을 만족하는 재료의 개발 연구를 수행하고자 한다. 따라서 섬유의 종류 및 혼입률 등에 따라 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성에 직접적으로 관련이 있을 것으로 판단되며 시공성을 고려하기 위해 분산성에 유리한 섬유를 판별하고자 한다.

또한 혼화재료로서 플라이애시의 활용성을 극대화 시키기 위해 화력발전소의 정제과정에서 폐기되고 있는 비정제 플라이애시인 리젝트애시의 품질특성을 검토하고 콘크리트 혼화재료 적용하여 동일한 공정에서 생산된 플라이애시와 비교분석하여 콘크리트용 혼화재료로서의 활용성을 검토하고자 한다.

## 2. 실험변수

섬유보강 빈배합 콘크리트의 역학적 특성을 분석하기 위해 우선적으로 고려하는 실험의 계획은 Table 1 과 같다.

Table 1. Design of Experimental Factors

Factors	Levels	
W/B(%)	1	79.5
Unit cement(kg/m <sup>3</sup> )	1	150
Macro fiber : Micro fiber	1	1 : 1
Fiber volume fraction, Vf, (%)	2	0.2 0.4
Micro fiber	1	Nylon(NY)
Macro fiber	3	Polypropylene(PP) Nylon(NY) Steel(ST)
Replacement ratio of admixtures(%)	1	40
Kinds of admixtures	2	Fly ash(FA) Reject ash(RA)

## 3. 사용재료 및 실험배합

### 3.1. 사용재료

#### 3.1.1. 시멘트

본 연구에서 사용한 시멘트는 국내 S사에서 생산한 제 1종 보통시멘트로서 각각 Table 2와 Table 3에 물리적 및 화학적 특성을 나타내고 있다.

Table 2. Physical Properties of Used Cement

Specific gravity	Blain (cm <sup>2</sup> /g)	Stability (%)	Setting time(min)		Comp. Str. (MPa)		
			Initial	Final	3day	7day	28day
3.15	3,400	0.1	230	410	23	31	40

Table 3. Chemical Compositions of Used Cement

SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Ig-loss (%)
21.95	2.81	60.12	3.32	2.11	6.59	2.58

#### 3.1.2. 골재

사용된 골재는 강원도 삼척 인근의 골재원에서 채취한 것으로 굵은 골재의 경우 최대치수가 25mm로서 비중, 흡수율(%) 및 조립률은 각각 2.75, 0.45 및 6.72이며 잔골재의 경우 비중, 흡수율(%) 및 조립률은 각각 2.52, 1.45 및 2.62의 물리적 특성을 가지고 있다.

#### 3.1.3. 혼화재료

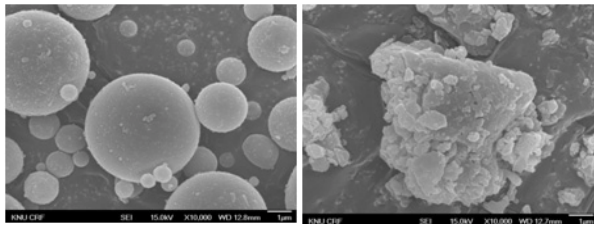
본 연구에서 사용한 혼화재료로는 플라이애시 및 리젝트애시를 사용하였으며 앞서 말한바와 같이 리젝트애시는 정제과정을 거치지 않은 플라이애시로서 그 활용성을 검토하기 위하여 정제된 플라이애시와 비교하고자 한다(Jang et al., 2011).

본 연구에서 사용한 혼화재료로 비중, 분말도(cm<sup>2</sup>/g) 및 강열감량(%)을 분석하였으며 플라이애시의 경우 각각 2.28, 3944 및 3.5, 리젝트애시의 경우 2.41, 6554 및 4.4의 물리적 특성을 갖는 것으로 나타났다. Table 4는 플라이애시 및 리젝트애시의 화학적 특성을 나타내었다.

Table 4. Chemical Composition of Used Fly Ash and Reject Ash

Chemical compositions	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl
Fly ash(%)	52.50	8.07	26.30	4.82	1.30	0.81	3.88	0.39	0.01
Reject ash(%)	49.40	4.59	25.50	11.20	1.01	0.27	3.59	2.54	-

또한 Fig. 1은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 10,000배로 확대하여 촬영한 분석 사진을 나타내고 있다. SEM분석 결과 플라이애시는 둥글고 매끄러운 표면을 보이는 반면 리젝트애시는 모나고 불규칙한 형상으로 나타난 것을 볼 수 있다.



(a) Fly ash (b) Reject ash

Fig. 1 SEM Images of Fly Ash and Reject Ash

### 3.1.4. 보강섬유

실험에 사용한 섬유의 종류는 강섬유(ST), 폴리프로필렌(PP), 나일론(NY) 섬유이며 Table 5는 사용한 섬유의 물리적 성질 및 제원을 나타내고 있다.

Table 5. Properties of Used Fibers in Experiments

Fiber	Density (g/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Tensile Str. (MPa)	Melting Pt. (°C)	Length (mm)	Dia. (mm)	Shape
Steel (ST)	7.86	200	1,200	-	35	0.54	Hooked
Polypropylene (PP)	0.91	6	550	160	30	0.79	Waved
Nylon macro (NYmacro)	1.16	-	500	210	30	0.52	Waved
Nylon micro (NYmicro)					12	0.025	-

Table 6. Mix Proportions of Concrete with Fiber Volume Fraction(V<sub>f</sub>) of 0.2%

Specimen	W/C	S/a	Fiber content(%)				Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					
			ST	PP	NY		W	C	S	G	FA	RA
					micro	macro						
Plain(1)	0.795	40	-	-	-	-	119.3	150.0	824.6	1349.9	-	-
SIF-0.2			0.1	-	0.1	-						
NIF-0.2			-	-	0.1	0.1						
PIF-0.2			-	0.1	0.1	-						
SIR-0.2			0.1	-	0.1	-						
NIR-0.2			-	-	0.1	0.1						
PIR-0.2			-	0.1	0.1	-						
OPC(1)	0.675	44	-	-	-	-	206.0	305	794.0	1042.0	-	-

Table 7. Mix Proportions of Concrete with Fiber Volume Fraction (V<sub>f</sub>) of 0.4%

Specimen	W/C	S/a	Fiber content(%)				Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					
			ST	PP	NY		W	C	S	G	FA	RA
					micro	macro						
Plain(2)	0.795	40	-	-	-	-	119.3	150.0	824.6	1349.9	-	-
SIF-0.4			0.2	-	0.2	-						
NIF-0.4			-	-	0.2	0.2						
PIF-0.4			-	0.2	0.2	-						
SIR-0.4			0.2	-	0.2	-						
NIR-0.4			-	-	0.2	0.2						
PIR-0.4			-	0.2	0.2	-						
OPC(2)	0.55	41	-	-	-	-	175.0	318.2	732.5	1150.3	-	-

## 3.2. 실험배합

본 연구에서 고려한 배합의 각 실험변수는 섬유를 보강하지 않은 Plain 및 OPC변수를 포함하여 총 16가지이며 각 실험변수에 대한 배합은 Table 6 및 Table 7과 같으며 OPC(1)과 OPC(2)는 상이한 W/C를 활용한 다른 종류의 일반콘크리트 배합을 고려하였다.

## 4. 실험방법

### 4.1. 시험체 제작 방법

현행 빈배합 콘크리트에 대한 시방규정에서는 기본 물성 실험을 위한 시험체 제작 방법이나 규정을 따로 정하지 않고 있다(KOREA EXPRESSWAY CORPORATION, 2009).

본 연구에서는 이러한 시험체 제작과정에서 다짐수준 변동에 의해 발생할 수 있는 오차를 최소화하고 실험 결과에 대한 객관성을 확보하기 위해 다짐수준을 변수로 하는 실험을 통하여 최적 다짐수준을 확보하였다(Sin et al., 2011). 다음의 Fig. 2와 Fig. 3은 각 시험체 종류별 최적다짐방법을 제시하고 있다. 이 때 시험체의 양생은 강도측정 재령까지 비닐덮개를 이용하여 습윤양생을 실시하였다.



(a) Marshall compaction 15ea/layer (3 layers)  
 (b) Vibration table 30sec/layer (3 layers)  
 (c) Surface finish

Fig. 2 Fabrication Procedure for Compressive Strength Specimen( $\phi 10 \times 20$ cm)



(a) Hammer drops 40times/layer (2 layers)  
 (b) Vibration over steel plate 30sec/layer (2 layers)  
 (c) Surface finish

Fig. 3 Fabrication Procedure for Flexural Strength and Toughness Specimen( $10 \times 10 \times 40$ cm)

## 4.2. 압축강도

압축강도 실험은 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 의거하여 재령 7일, 28일, 91일에 압축강도를 측정하였다.

## 4.3. 인장강도

인장강도 실험은 KS F 2423 콘크리트의 인장강도 시험방법에 의거하여 재령 28일에 인장강도를 측정하였다.

## 4.4. 휨강도

휨강도 실험은 KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험방법에 의거하여 재령 28일, 91일에 휨강도를 측정하였다.

## 4.5. 휨인성 및 파괴에너지

섬유혼입에 따른 파괴인성의 증대를 분석하기 위하여 ASTM C 1018 (Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading))에 의거 실험을 수행하였으며 하중-처

짐 곡선의 아래면적을 계산하여 파괴 시 에너지 흡수량을 산정하였다(Choi et al., 2011). Fig. 4는 휨파괴인성 실험장면을 나타내고 있다.

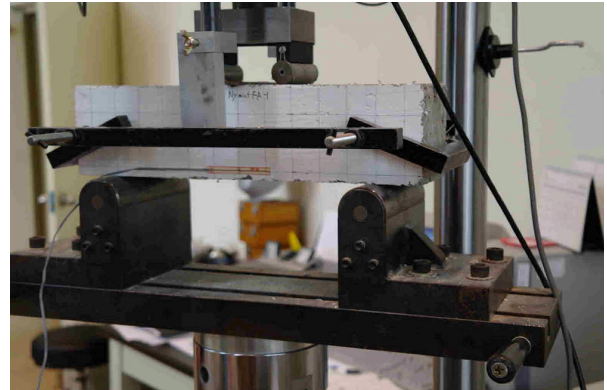


Fig. 4 Fracture Toughness Test Setup (ASTM C 1018)

## 4.6. 건조수축 길이변화

각 실험변수별 건조수축 길이변화를 측정하기 위하여 변수별로 2개의  $10 \times 10 \times 40$ cm 시험체를 Fig. 3과 같이 제작하였다. 제작 후 약 24시간 이후 거푸집을 탈형하였다. 제작된 시험체의 양생은 온도  $24 \pm 1^\circ\text{C}$ , 상대습도 50%로 조정되는 실내양생실 내부에서 보관하였으며 시험체 길이변화의 값의 정확도를 높이기 위하여 최초 3일간은 매 6시간 마다, 이후 재령 14일까지는 매 12시간, 그 이후에는 매 24시간 마다 길이변화를 측정하였다.

## 5. 실험 결과

### 5.1. 압축강도

Fig. 5와 Fig. 6은 섬유혼입률 0.2%와 0.4%의 경우에 측정된 압축강도 결과를 나타내고 있다. 전반적으로 재령이 증가함에 따라 강도가 증가하였으며 재령 28일 기준으로 OPC변수의 경우 약 30~40MPa의 일반적인 강도수준을 확보하였으나 Plain변수의 경우 약 20MPa 전후의 낮은 값을 나타내었다. 특히 섬유를 혼입할 경우에는 플라이애시 및 리젝트애시를 시멘트 중량의 40%로 치환하여 압축강도가 Plain변수에 비하여 더 낮게 측정되었다.

재령 7일~재령 28일의 재령의 증가에 따라 약 30~70%의 압축강도가 증가하는 것으로 나타났고 변수별로 증가율이 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 재령 28일~재령 91일의 재령의 증가에 따라 플라이애시가 혼입된 변수를 제외하고 모두 약 20% 미만의 증가율

을 나타내었다.

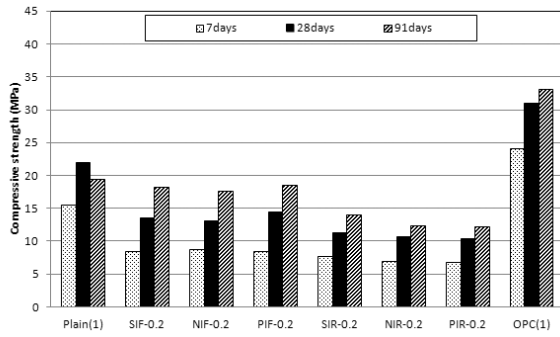


Fig. 5 Measured Compressive Strength with Vf 0.2%

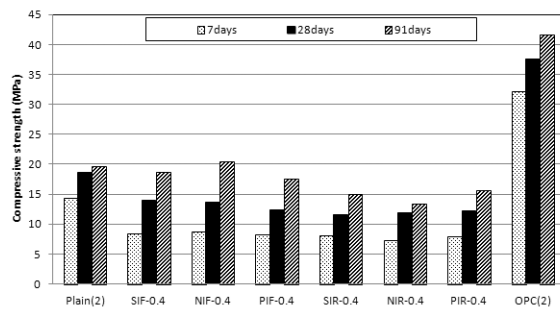


Fig. 6 Measured Compressive Strength with Vf 0.4%

재령 7일의 초기재령의 경우 플라이애시를 혼입한 변수와 리젝트애시를 혼입한 변수의 강도차이가 크지 않았지만 재령 91일의 장기재령의 경우 리젝트애시를 혼입한 변수는 플라이애시를 혼입한 변수의 약 60~80% 정도의 압축강도를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 장기적인 측면에서 압축강도는 플라이애시를 사용하였을 때 더 효과적인 것으로 판단된다.

섬유혼입률에 의한 압축강도의 차이는 혼입률이 높을수록 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 섬유혼입률이 상당히 낮아 그 강도의 차이가 크지 않으므로 공학적으로 크게 성능이 개선되는 수준은 아닐 것으로 판단된다.

## 5.2. 인장강도

Fig. 7과 Fig. 8은 섬유혼입률 0.2%와 0.4%의 경우에 측정된 인장강도를 나타내고 있다. 재령 28일의 인장강도 측정결과 OPC변수의 경우 약 2.5MPa의 일반적인 콘크리트의 인장강도 수준을 나타내었으며 Plain 변수의 경우 1.5MPa를 상회하는 수준으로 분석되었다.

재령 28일에서 플라이애시를 치환하였을 때 약 10~20%정도 인장강도가 증가되었으며 섬유혼입률이 증가할수록 인장강도가 증가하는 것을 확인할 수 있었

다. 또한 플라이애시를 치환한 경우 리젝트애시를 치환한 경우보다 인장강도에서는 유리한 것으로 나타났다.

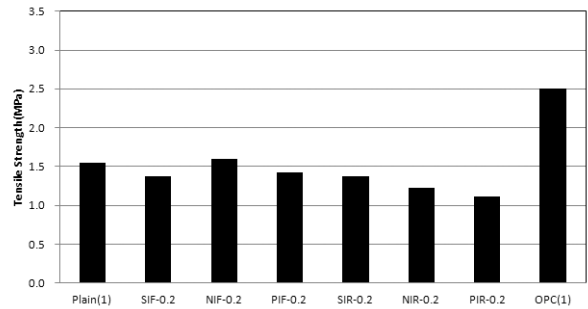


Fig. 7 Measured Tensile Strength with Vf 0.2%

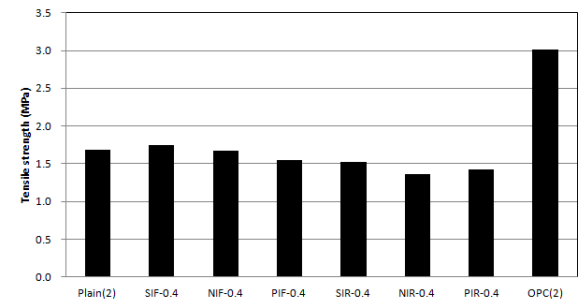


Fig. 8 Measured Tensile Strength with Vf 0.4%

## 5.3. 휨강도

Fig. 9와 Fig. 10은 섬유혼입률 0.2%와 0.4%의 경우에 측정된 휨강도 결과를 나타내고 있다. 재령 28일의 인장강도 측정결과 OPC변수의 경우 약 4MPa 이상의 일반적인 콘크리트 휨강도 수준을 나타내었으며 Plain변수의 경우 3~4MPa, 섬유 및 혼화재를 혼입한 변수의 경우 2~3MPa의 휨강도를 나타내었다.

Plain변수와 OPC변수에서는 재령의 증가에 따른 강도 변화가 작거나 오히려 감소하는 것으로 나타났지만 섬유와 혼화재를 함유한 경우 상대적으로 높은 증가율이 분석되었다. 또한 플라이애시와 리젝트애시의 치환에 따른 장기강도의 차이는 크지 않으므로 기층 구조물에 적용하기 위해 리젝트애시의 적용도 충분히 가능할 것으로 판단된다.

일반적으로 콘크리트에 섬유의 혼입으로 인한 효과는 압축강도 보다는 휨강도 또는 휨인성의 증가 효과가 더욱 뚜렷한 편이다. 본 연구에서도 섬유혼입률이 0.2%에서 0.4%로 증가함에 따라 휨강도가 다소 증가하는 양상을 나타내었다. 하지만 섬유혼입률의 증가에 따라 장기재령 91일에서 강도의 증가율이 다소 적은 것으로 나타났지만 리젝트애시를 치환하였을 경우 강도의 증가율은 약간 높은 것으로 분석되었다. 플라이애시를 치환하였

을 경우 전반적인 휨강도는 더 높은 것으로 나타났는데 이는 리젝트에서의 미연 탄소의 함유량이 많아 혼화재료로서 품질이 다소 떨어지는 것으로 사료된다.

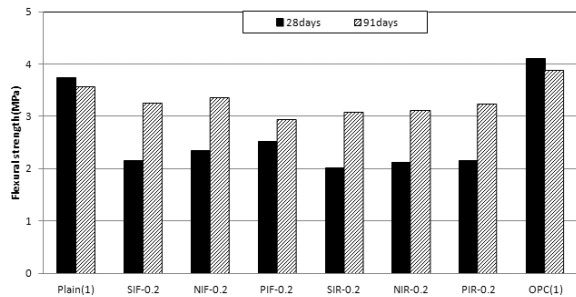


Fig. 9 Measured Flexural Strength with Vf 0.2%

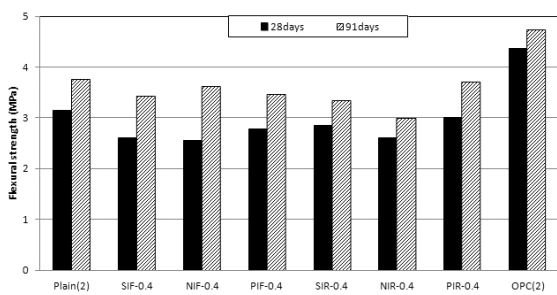


Fig. 10 Measured Flexural Strength with Vf 0.4%

#### 5.4. 휨인성 지수

Fig. 11~Fig. 14는 섬유혼입률 0.2%와 0.4%의 경우에 대하여 휨인성 지수 측정결과를 나타내고 있다. OPC변수의 경우 일반적인 콘크리트의 휨특성으로 매우 취성적 휨파괴가 일어나 휨인성 증가를 거의 기대할 수 없는 수준으로 나타났다. 하지만 Plain시험체의 경우 섬유를 전혀 함유하고 있지 않음에도 불구하고 휨인성 지수가 OPC변수에 비하여 증가한 양상을 나타내고 있다. 이는 섬유의 혼입에 따른 휨인성이 아니고 시험체를 구성하고 있는 빈배합 콘크리트 매트릭스 자체가 OPC변수의 경우처럼 치밀하지 못하여 취성적인 파괴형태가 일어나지 않고 균열의 진전이 골재와 페이스트 간의 약화된 면을 따라 발생하면서 추가적인 파괴에너지의 흡수에 기인한 것으로 사료된다. 또한 느린 하중재하속도에 따른 영향도 있을 것으로 판단된다. 전반적으로 강섬유를 함유한 경우가 휨인성 지수가 높은 것으로 나타났으나 나일론매크로와 폴리프로필렌섬유의 경우에서도 크게 차이가 나지 않았다.

섬유혼입률이 0.2% 및 0.4%인 경우 재령 28일~재령 91일의 재령의 증가에 따라 섬유를 함유한 모든 변수에서 휨인성 지수가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 재령이 증가함에 따라 강도가 증가하면서 시험체를 구성

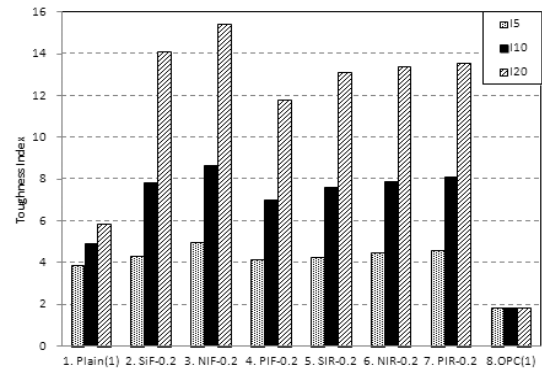


Fig. 11 Measured Flexural Fracture Toughness with Vf 0.2% (28days)

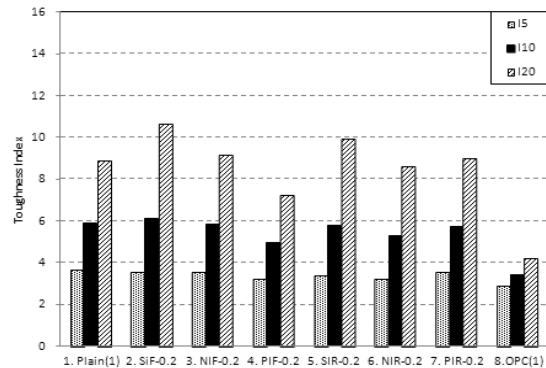


Fig. 12 Measured Flexural Fracture Toughness with Vf 0.2% (91days)

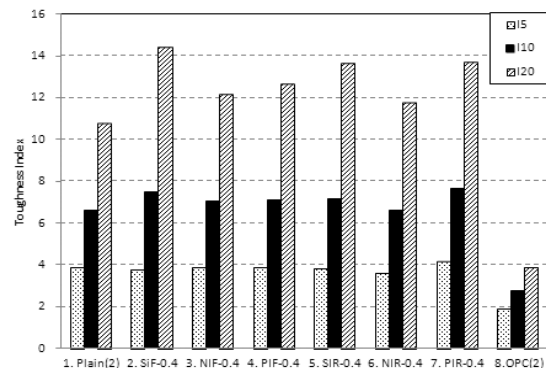


Fig. 13 Measured Flexural Fracture Toughness with Vf 0.4% (28days)

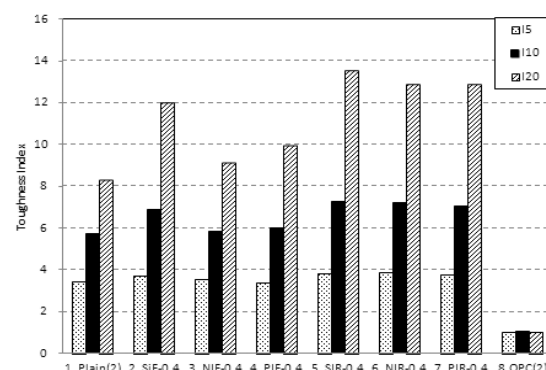


Fig. 14 Measured Flexural Fracture Toughness with Vf 0.4% (91days)

하는 콘크리트 매트릭스의 초기균열 이후의 휨하중 거동이 다소 취성적으로 나타났으며 이에 따라 초기균열 이전의 에너지 흡수량이 증가하여 전반적인 휨인성 지수는 감소한 것으로 분석된다.

재령 28일에서 섬유혼입률 0.4%의 경우 0.2%보다 휨인성 지수가 감소하거나 동일한 것으로 나타났지만 재령 91일에서 섬유혼입률 0.4%의 경우 0.2%보다 휨인성 지수가 증가하였다. 이는 재령 28일에서는 높은 플라이애시 및 리젝트애시의 치환율로 인하여 느린 수화반응에 의해 섬유와 매트릭스 사이의 부착력이 약하기 때문인 것으로 판단되며 재령 91일에서는 오랜 양생기간에 걸쳐 콘크리트 내의 매트릭스 강도의 증가와 함께 부착력이 증가하여 섬유의 가교작용에 의해 휨인성 지수가 증가한 것으로 판단된다.

### 5.5. 파괴에너지

Fig. 15~Fig. 18은 섬유혼입률 0.2%와 0.4%의 경우에 대하여 파괴에너지 측정 결과를 나타내고 있다. OPC변수의 경우 초기균열 이전까지의 에너지 흡수량 ( $I_1$ )은 나머지 변수보다 크지만 일반적인 콘크리트의 휨 특성으로 매우 취성적 휨파괴가 일어나 균열 후 에너지 흡수량은 상당히 낮게 계산되었다. 또한 Plain변수의 경우 섬유를 전혀 함유하고 있지 않음에도 불구하고 에너지 흡수능력이 큰 것으로 나타났는데 하중의 재하속도가 매우 느리고 콘크리트를 구성하는 매트릭스의 내부구조가 치밀하지 못하며 균열의 진전이 일반적인 OPC변수의 경우와 달리 균열 시 준취성적인 성향을 나타내어 전체적인 파괴에너지 흡수가 크게 측정된 것으로 판단된다. 또한 섬유를 혼입한 경우 전반적으로 강섬유를 사용하였을 때 에너지 흡수능력이 높은 것으로 나타났다.

재령 28일~재령 91일의 재령의 증가에 따라 섬유를 함유한 모든 변수에서 에너지 흡수량이 증가하는 경향으로 나타났다. 이는 앞의 휨인성 지수를 측정한 결과와 다른 것으로 나타났으며 재령이 낮을수록 전체적인 에너지 흡수량은 감소하지만 초기균열 이후의 거동이 더 연성적인 것을 알 수 있다.

섬유혼입률 0.4%의 경우 0.2%보다 에너지 흡수량이 증가하였으나 그 증가량이 작고 불규칙하기 때문에 경제성을 고려하여 섬유혼입률 증가의 필요성을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 본 실험 연구 결과 섬유 혼입률의 증가에 따른 휨파괴에너지의 증가는 강섬유를 활용한 경우 가장 크게 나타났으며 나일론과 폴리프로

필렌의 경우는 플라이애시보다 리젝트애시의 경우 다소 크게 나타났다.

재령 28일에서 혼화재의 종류에 따른 파괴에너지는 뚜렷한 특성을 나타내지 않았지만 재령 91일에서 플라이애시를 사용하였을 때 보다 리젝트애시를 사용하였을 때 에너지 흡수량이 증가하였다. 이는 리젝트애시를 치환하였을 때 매트릭스의 내부구조가 치밀하지 못하고 준취성적인 성향으로 인하여 장기 재령 91일에서 균열 이전까지의 에너지 흡수량보다 균열 이후의 에너지 흡수량이 크기 때문인 것으로 판단된다.

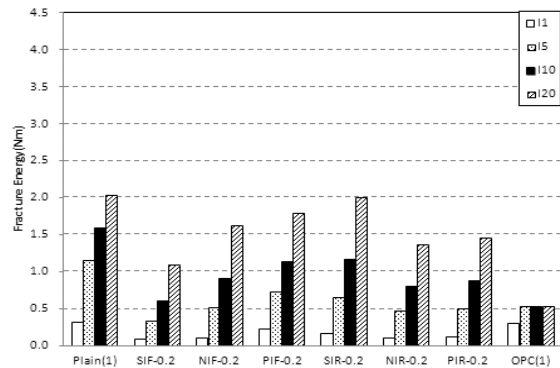


Fig. 15 Measured Flexural Fracture Energy with Vf 0.2% (28days)

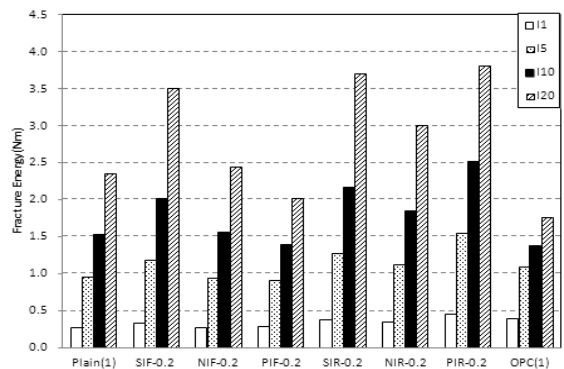


Fig. 16 Measured Flexural Fracture Energy with Vf 0.2% (91days)

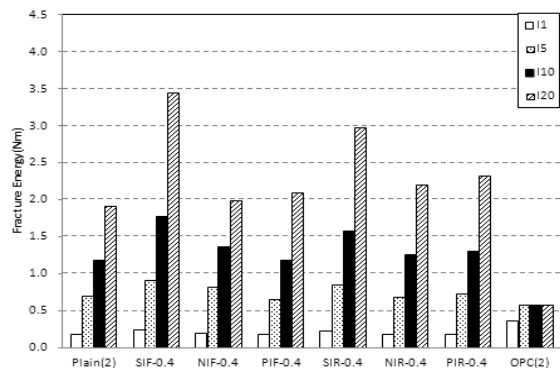


Fig. 17 Measured Flexural Fracture Energy with Vf 0.4% (28days)

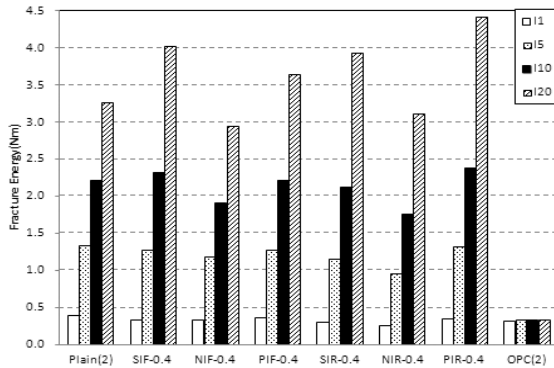


Fig. 18 Measured Flexural Fracture Energy with Vf 0.4% (91days)

## 5.6. 건조수축 길이변화

건조수축 길이변화는 각 변수별 2개씩 탈형 후 재령 155일 동안 측정되었으며 그 결과는 Fig. 19~Fig. 22에 나타내었다. 건조수축 길이측정 실험 결과 전체적인 측정 결과는 일반적인 빈배합 콘크리트 수준과 크게 다르지 않는 것으로 분석되었다.

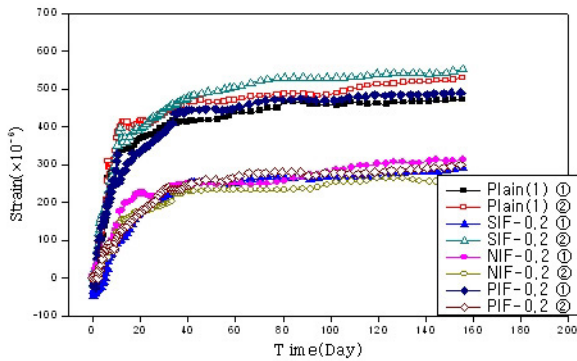


Fig. 19 Measured Drying Shrinkage Results (Vf 0.2%-1)

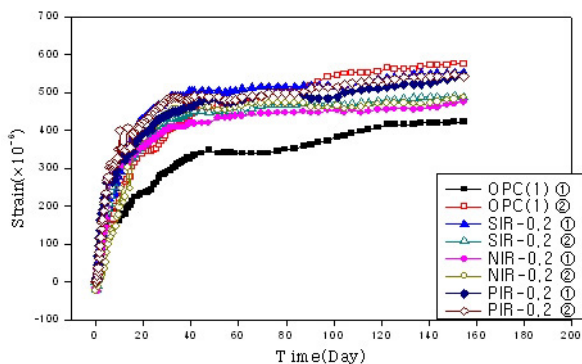


Fig. 20 Measured Drying Shrinkage Results (Vf 0.2%-2)

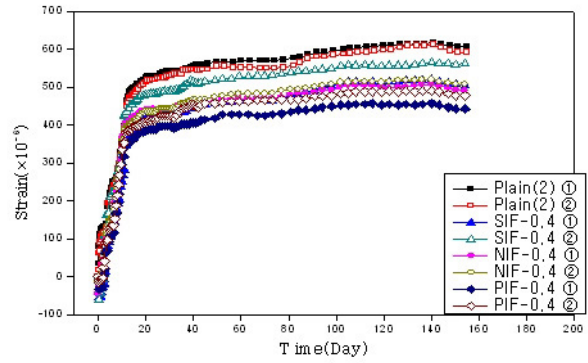


Fig. 21 Measured Drying Shrinkage Results (Vf 0.4%-1)

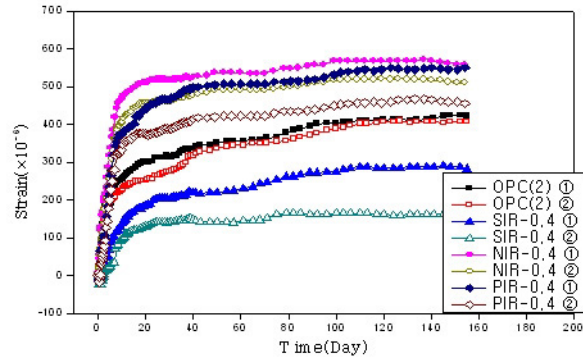


Fig. 22 Measured Drying Shrinkage Results (Vf 0.4%-2)

## 6. 섬유 분산성

### 6.1. 개요

콘크리트는 소성 및 건조수축균열과 수화열에 의한 온도 균열이 발생된다. 또한 일반적인 콘크리트는 인성에 취약한 약점을 가지고 있으며 이를 보완하기 위해 섬유를 사용하여 가교작용으로 매트릭스의 균열 시 다수의 미세한 균열로 분산하여 인성능력을 향상시킨다. 인성을 증가시키기 위해서 섬유의 강도, 섬유와 매트릭스의 부착강도 등이 영향을 미치지만 섬유를 고르게 분산시켜 균열을 제어하는 것도 중요하다(Kang et al., 2007).

하지만 섬유의 종류, 형태 및 혼입률에 따라 콘크리트의 분산성에 영향을 미치는 유동성이 변하므로 각 섬유의 분산성에 대한 특성을 파악하기 위하여 다음과 같은 실험을 진행하였다.

### 6.2. 실험계획

섬유의 사용으로 인하여 유동성 및 시공성에 유리한 섬유를 판별하고자 앞서 실시한 실내배합과 동일한 섬유를 사용하였다. 다만 폴리프로필렌섬유의 경우 기준



의 섬유는 다짐 시 물결형의 형상이 변형되는 특성을 보완하기 위하여 제작방식을 다르게 하여 제작한 길이 40mm의 섬유를 사용하였다. 본 연구에서 분산성을 고려하기 위한 실험의 계획은 Table 8과 같으며 Table 9는 계획에 따른 배합표를 나타내고 있다.

Table 8. Design of Experimental Factors

Factors	Levels	
W/B(%)	1	79.5
Unit cement(kg/m <sup>3</sup> )	1	150
Macro fiber : Micro fiber	1	1:1
Fiber volume fraction, Vf, (%)	1	0.4
Micro fiber	1	Nylon(NY)
Macro fiber	3	Polypropylene(PP) Nylon(NY) Steel(ST)
Replacement ratio of admixtures(%)	1	40
Kinds of admixtures	2	Fly ash(FA) Reject ash(RA)

### 6.3. 실험방법

실험 방법은 섬유의 개수를 측정하는 방식으로 Fig. 23에 나타내고 있다. 각 변수별 총 20L배합을 Fig. 23(a)에서와 같은 격자를 활용하여 총 25조각으로 나누었다. 이를 3조각씩 무작위로 그룹화하여 섬유의 개수를 Fig. 23(d)와 같이 물을 이용하여 콘크리트를 분리하였고 이에 포함된 섬유의 개수를 직접 확인하였다.



(a) Grid for dividing concrete



(b) Divided pieces passing through grid



(c) Sieving concrete



(d) Washing concrete



(e) Counting fibers in concrete

Fig. 23 Experiment for Fiber Dispersion

### 6.4. 실험 결과

섬유 분산성 실험은 각 변수의 총 20L의 배합에 대하여 총 8개 그룹(3조각씩, 총 24조각, 1개 조각은 버림)으로 나누어서 측정되었으며 그 결과는 Table 10과 같다. 섬유 분산성 실험결과 각 8개의 그룹 평균대비 표준편차는 나일론매크로섬유, 강섬유, 폴리프로필렌섬유 순으로 낮은 것으로 나타났으며 이에 따라 나일론매크로섬유가 가장 분산성이 좋은 것으로 판단된다. 플라이애시를 사용한 경우와 리젝트애시를 사용한 경우 각 섬유 변수별 측정된 섬유의 개수는 크게 차이가 없었으나 폴리프로필렌섬유의 경우 리젝트 애시를 사용하였을 때 표준편차 값이 매우 크게 나타났다. 따라서 리젝트애시를 사용할 경우 폴리프로필렌 섬유를 사용하고자 할 때는 시공에 주의해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 섬유의 분산성 실험은 섬유의 분산성을 확인하기 위하여 배합 직후 실시한 배합된 콘크리트 내의 실질적인 섬유의 분산을 확인한 것으로서 이는 현재 명확한 규정이 없는 상태에서 최대한 현실성을 고려한

Table 9. Mix Proportions of Concrete

Specimen	W/C	S/a	Fiber volume fraction (%)				Unit content (kg/m <sup>3</sup> )					
			ST	PP	NY		W	C	S	G	FA	RA
					micro	macro						
SIF-0.2	0.795	40	0.2	-	0.2	-	119.3	90	818.3	1344.4	60	-
NIF-0.2			-	0.2	0.2	-						
PIF-0.2			-	-	0.2	0.2						
SIR-0.2			0.2	-	0.2	-			819.8	1346.8	-	60
NIR-0.2			-	-	0.2	0.2						
PIR-0.2			-	0.2	0.2	-						

실험방법으로 판단되고 추후 이러한 실험법을 좀 더 개선하여 표준화된 분산성 검증방법으로 발전시킬 필요가 있을 것으로 예상된다.

Table 10. Results of Fiber Dispersibility

NO.	Variables	FA			RA		
		ST	NY	PP	ST	NY	PP
1		213	468	254	223	589	620
2		192	458	220	255	547	145
3		282	662	383	260	732	310
4		256	563	253	203	592	282
5		190	612	324	329	761	326
6		218	622	316	303	614	361
7		161	610	270	222	655	275
8		229	652	304	239	692	326
Average		217.6	580.9	290.5	254.3	647.8	330.6
Standard deviation		36.0	73.6	48.3	40.1	70.5	125.0
Standard deviation /Average		16.6	12.7	16.6	15.8	10.9	37.8

## 7. 결론

본 연구는 섬유보강 빈배합 콘크리트를 기층에 활용하기 위하여 역학적 특성을 규명하기 위한 실험적 연구와 사용섬유의 종류에 따른 시공 중 섬유의 분산성에 대한 실험을 수행하였다. 이러한 연구 수행의 결과를 정리하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 매크로 섬유의 종류에 따라 압축강도나 휨강도의 변화는 뚜렷하게 나타나지 않았으나 인장강도는 강섬유를 사용하였을 때 비교적 높은 것으로 나타났다.
2. 40%의 높은 혼화재 치환율에도 압축강도 및 휨강도의 경우 장기강도의 증가는 만족할 만한 수준이었다. 특히 플라이애시를 사용하였을 경우 재령 91일의 압축강도와 휨강도는 Plain변수와 동일한 수준으로 리젝트애시를 사용하였을 경우보다 더 강도적인 측면에서 효과적인 것으로 나타났다.
3. 섬유혼입률의 증가에 따라 압축강도, 휨강도 및 인장강도는 증가하는 것으로 분석되었다. 하지만 압축강도의 경우 낮은 섬유혼입률로 인하여 그 차이는 크지 않아 공학적으로 크게 성능이 개선되는 수준은 아닌 것으로 판단된다.
4. 도로기층의 압축강도기준은 재령 7일에 5MPa으로서 모든 빈배합 콘크리트의 변수가 이를 충분히 만족시키는 것으로 나타났다. 또한 플라이애시를 치환한

경우보다 리젝트애시를 치환하였을 경우에 강도가 다소 낮았으나 기층재료로서 높은 수준의 압축강도를 요구하지 않는 점을 고려하면 리젝트애시도 적용 가능할 것으로 판단된다.

5. 휨강도는 섬유를 혼입하고 혼화재를 치환한 변수의 경우 Plain변수나 OPC변수에 비하여 휨강도 발현이 늦으므로 시공 시 이러한 점을 중요하게 고려하여야 할 것으로 판단된다.
6. 휨인성 측정결과 Plain시험체의 경우 섬유를 전혀 함유하고 있지 않음에도 불구하고 휨인성이 OPC변수와 비교하여 증가한 양상을 나타내고 있다. 또한 매크로 섬유의 종류에 따른 휨인성의 차이가 크지 않으므로 다기능 복합포장체의 기층재료로 사용하기 위해서는 여러 가지 변수를 고려하여 결정할 수 있을 것으로 판단되며 경제성 및 시공성을 고려하여 가능하다면 섬유혼입률을 0.4% 수준으로 향상시키는 것이 바람직할 것으로 기대된다.
7. 휨과피에너지 측정결과 재령 28일~재령 91일의 재령의 증가에 따라 대부분의 변수에서 에너지 흡수량이 증가하는 경향으로 나타났다. 이는 앞의 휨인성 지수를 측정한 결과와 다른 것으로 나타났으며 최초 균열 이전까지의 휨과피에너지량의 증가는 크지만 균열 이후의 휨과피에너지량의 증가는 크지 않은 것이 이 같은 현상의 원인이라고 판단된다.
8. 건조수축 길이변화 변형률은 일반적인 빈배합 콘크리트 수준과 크게 다르지 않는 것으로 분석되었다.
9. 섬유 분산성 실험결과 나일론매크로섬유가 가장 분산성이 좋은 것으로 판단된다. 또한 리젝트애시를 치환하거나 폴리프로필렌섬유를 혼입하고자 할 경우 섬유의 분산성을 나타내는 표준편차의 값이 큰 것으로 나타나 실제 시공 시에 섬유의 분산성에 대하여 주의해야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 한국건설기술연구원 기관고유사업(2011-0095-1-1)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Kang, S. T., Park, J. J., Ryu, G. S., Koh, K. T., Kim, S. W., Lee, J. H., 2007, The Orientation and Dispersion of Steel Fiber in UHPC(Ultra High Performance Concrete), *Proc. of Korea Concrete Institute*, Vol.19, No.2, pp.749~752.
- Korea Institute of Construction Technology, 2009, *Development of FRC Composite Pavement, Research Reports, KICT 2009-096*,

- Korea Institute of Construction Technology.
- Sin, N. R., Jang, Y. J., Park, C. W., Kim, G. H., 2011, Strength Development of Roller Compacted Concrete with Respect to Compaction Levels, *Proc. of Korea Concrete Institute*, Vol.13, No.2, pp.61~62.
- Lee, C. H., Kim, Y. K., Kang, J. G., Park, C. W., Lee, S. W., 2011, A study on Construction Methods of Roller Compacted Concrete Pavement for Bike Roads, *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol.13, No.2, pp.103~114.
- Jang, Y. J., Park, C. W., Park, Y. H., Jung, W. T., Choi, S. Y., Sin, N. R., 2011, Fracture Toughness Comparison of Fiber Reinforced Lean Concrete Incorporating Fly Ash or Rejected Ash, *Proc. of Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.2, pp.145~146.
- Choi, W. H., Park, C. W., Park, J. S., Jung W. T., Kim, S. W., Park, Y. H., 2011, Investigation of Flexural Toughness of Fiber Reinforced Lean Concrete for Road Subbase Material, *Proc. of Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.1, pp.385~386.
- Choi, W. H., Park, C. W., Park, J. S., Jung, W. T., Jang, Y. J., 2011, Strength Development of Fiber Reinforced Lean Concrete for Subbase Material, *Proc. of Korean Society of Road Engineers*, pp.153~158.
- KOREA EXPRESSWAY CORPORATION, 2009, *Highway construction provisions*.
- (접수일 : 2012. 3. 20 / 심사일 : 2012. 3. 22 / 심사완료일 : 2012. 11. 12)