셀룰로오스 섬유 종류에 따른 콘크리트의 기초 물성 평가에 관한 연구

Evaluation of the Basic Properties of Concrete with Types of Cellulose Fibers

박 용 규* 이 주 헌 전 인 기 김 현 우 윤 기 원

Park, Yong-Kyu* Lee, Joo-Hun Jeon, In-Ki Kim Hyun-Woo Yoon, Ki-Woon
AJU Corporation, 602-54, Gajwa-dong, Seo-Gu, Incheon, 404-250, Korea

Abstract

Topping concrete that is not reinforced with rebar to prevent poor tensile performance is vulnerable to cracking. In this study, jute, which is known to be an excellent natural fiber material for strengthening concrete performance, was compared with other cellulose fibers in terms of its capacity to reduce the cracking of concrete. As a result, it was found that compared with concrete using other fibers, concrete using jute fiber showed more than a 50 % reduction of plastic shrinkage crack resistance with the contents of 0.9 kg/m³ and 1.2 kg/m³ for. For impact strength tests, the final destruction of WF and PULP fibers took up to 5 times the number of falls, while jute has 10-18 circuitry, showing excellent ductility properties.

Keywords : topping concrete, jute fiber, cellulose fiber

1. 서 론

1.1 연구의 목적

건설산업에 있어서 구조체를 형성하는 구조재료 중 콘크리트는 가장 합리적인 재료라고 해도 과언이 아닐 것이다. 이러한 콘크리트는 원재료, 제조기술의 향상 및 연구개발 등에 의하여 기능성 및 요구성능을 충족시키는 면에서 비약적인 발전을 이뤄 왔지만, 균열에 대한 문제는 지금까지도 끊임없이 제기되고 있다.

이러한 균열은 수경성 재료의 특성 중 하나라고 할 수 있는데, 발생원인으로는 배합 및 원재료 요인, 시공적 요인 등 다양한 원인에 의해 나타날 수 있지만, 기본적으로 콘크리트의 성질 중 낮은 인장강도가 주요한 원인이 될 수 있으며, 이와 같은 취약점을 보완하기 위해 철근배근이나 섬유 혼입

등에 의한 다양한 인장력 보강공법 등이 연구개발 되어 실무현장에 적용되고 있다[1,2].

한편, 지하주차장 바닥에 시공되는 누름 콘크리트와 같은 무근 콘크리트의 경우는 균열발생을 최소화 하기위하여 인장력 보강 대책으로 주로 와이어 메쉬를 시공하는 방법과 섬유를 이용하는 방법이 주로 사용되어지고 있으나, 와이어 메쉬의 경우는 시공이 번거롭고 시공 시 위치고정 등의 문제로 인하여 균열저감에 효과가 적으며, 경제성 등의 이유로 그 사용이 감소되고 있는 추세이다. 실무에서는 와이어 메쉬의 단점을 보완하고 균열저감의 효과를 높이기 위한 방법으로 다양한 섬유보강공법을 시도하고 있다[1,2].

하지만, 섬유보강 공법도 섬유의 종류, 형태 및 혼입량에 따라 분산력, 표면 마감성 및 워커빌리티 저하 등의 문제가 있어 용도에 따라 최적화된 섬유 종류와 형태의 선정 및 혼입량이 주요한 요인으로 작용하게 되며, 최근의 경우 친환경적인 부분까지 관심의 대상이 되고 있어 천연섬유에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용되어지고 있는 천연 섬유 중 보강 성능이 우수한 것으로 알려진 황마섬유를 포함한 3가지의 섬유에 대하여 기초 물성 및 균열저감성능

Received : January 19, 2011

Revision received : August 1, 2011

Accepted : September 1, 2011

* Corresponding author : Park, Yong-Kyu

[Tel: 82-32-571-9561, E-mail: ykp0305@aju.co.kr]

©2011 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

을 비교 검토하여 섬유별 최적 혼입률 및 황마 섬유에 대한 효율성을 검토 해보고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획 및 실험사항은 Table 1과 같으며, 배합사항은 Table 2와 같다.

먼저 배합사항으로 플레인 배합은 W/B 52 %, 목표 슬럼프를 180 ± 15 mm로 하고, 여기에 각각의 섬유를 혼입하는 것으로 하였는데, 현재 실무에서 사용되어지는 셀룰로오스계 섬유 중 원재료가 다른 3종류에 대하여 혼입량을 0.6, 0.9, 1.2 kg/m³의 3수준으로 하여 비교하는 것으로 실험계획 하였다.

Table 1. Experiment plan

W/B (%)	fiber type	fiber contents (kg/m ³)	evaluation contents	
			fresh concrete	hardened concrete
52	no mixing	0		
	JF	0.6	-slump	-plastic shrinkage crack
	WF	0.9		-compressive strength
		1.2		-tensile strength
	PULP			-impact test

* JF : jute, WF : wood, PULP : pulp

Table 2. Mix proportion of concrete

W/C (%)	W (kg/m ³)	S/a (%)	SP/C (%)	unit weight (kg/m ³)				
				C	F/A	S/P	S	G
52	170	45.5	0.5	245	33	49	889	917

2.2 사용재료

2.2.1 분체

본 실험에 사용한 시멘트는 국내 D사의 보통포틀랜드 시멘트(밀도 : 3.15 g/cm³, 분말도 : 3 483 cm²/g)를 사용하였으며, 고로슬래그 미분말(밀도 : 2.9 g/cm³, 분말도 : 4 570

cm²/g)은 국내 V사, 플라이 애시(밀도 : 2.21 g/cm³, 분말도 : 3 434 cm²/g)는 국내 I사의 제품을 사용하였다.

2.2.2 골재

본 실험에서 사용된 골재는 인천 M사의 부순 잔골재(밀도 : 2.59 g/cm³, 조립률 : 2.86)를 사용하였으며, 굵은골재(밀도 : 2.62 g/cm³, 조립률 : 6.73)는 국내 M사의 20 mm 부순 굵은골재를 사용하였다.

2.2.3 섬유 보강재

본 실험에 사용한 섬유 보강재로서 원재료별 황마계 섬유(밀도 : 1.3 g/cm³, 직경 : 60~70 μ m, 길이 : 9~10 mm, 권장사용량 : 0.9 kg/m³) H사의 섬유를 사용하였고, 목질계 섬유(밀도 : 1.1 g/cm³, 직경 : 15 μ m, 길이 : 1.9~ 2.3 mm, 권장사용량 : 0.6 kg/m³) W사의 섬유를 사용하였으며, 펄프계 섬유(밀도 : 1.5 g/cm³, 직경 : 14~17 μ m, 길이 : 2.92 mm, 권장사용량 : 1.2 kg/m³)는 국내산 S사의 제품을 사용하였으며, 섬유의 모습은 Figure 1과 같다.

Figure 1. Cellulose Fibers used in this experiment

2.3 실험방법

소성수축 실험은 500×500×50 mm의 실험 시편을 제작하여, 시편의 중앙에 콘크리트의 균열을 유발하기 위한 PVC링을 설치하였으며, 바닥의 구속을 최소화하기 위하여 비닐막을 설치하였다. 실험은 30±3 °C의 온도와 40±3 %의 상대습도에서 콘크리트 표면에 일정량의 바람을 작용시키면서 24시간동안 실험하였으며[1,3], 그 실험모습은 Figure 2와 같다. 또한, 충격 시험은 KS F 2221에 의거하여 실시하고 첫 번째 균열이 나타난 충격 횟수와 시편이 파괴되기까지의 충격 횟수를 측정하도록 하였으며, 압축강도 시험은 KS F 2405에 의거 실시하였다.

Figure 2. Setup for Plastic shrinkage crack test

3. 실험결과

3.1 굳지 않은 콘크리트 성질

3.1.1 슬럼프

Figure 3은 섬유 종류별 혼입량 변화에 따른 슬럼프 값 및 30분 경시변화를 나타낸 것인데, 슬럼프의 경우는 섬유 혼입량이 증가함에 따라 JF, WF, PULP 섬유 모두 감소하는 것으로 나타났는데 이는 셀룰로오스계 섬유 표면이 수산기로써 시멘트 페이스트와의 높은 부착강도에

Figure 3. Relationship between slump and elapsed time by fiber content and type

의한 골재 침하 억제 등에 기인하여 약간의 슬럼프 저하 현상이 나타나는 것으로 섬유 혼입량이 증가함에 따라 슬럼프는 저하하는 것으로 판단된다. 그 중 동일 셀룰로오스계 섬유라 할지라도 JF 섬유가 PULP 섬유보다 섬유 혼입률 증가에 따라 슬럼프 감소치가 작은 것으로 나타났는데 이는 JF 섬유가 자체 내에 일정량의 수분을 함유하고 있는 친수성이 강한 섬유이기 때문에 유동성 감소가 적은 것으로 판

단된다. 반면 동일한 친수성 섬유인 PULP 섬유는 유동성이 감소하는 것으로 나타났는데 이는 기 연구문헌[1,5]을 참고하면 PULP 섬유 제조 시 사용되는 주원료인 펄프를 원통형 펠렛으로 특수 가공한 것이 콘크리트 믹싱 과정 중 배합수를 흡수하여 유동성 감소에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 특히, 모든 섬유의 경우에 혼입량 1.2 kg/cm^3 에서는 플레인 대비 60~80 mm의 슬럼프 저하가 나타나, 일정량 이상의 섬유를 혼입 할 경우 그에 따른 유동성 확보 대책이 필요 할 것으로 판단된다. 하지만, 각 섬유 혼입에 따른 30분 경시변화에서는 초기 섬유 혼입에 따른 슬럼프 감소 값에서 플레인 대비 경시변화에 따른 슬럼프의 감소는 크게 나타나지 않았다.

3.1.2 소성수축 균열 저항성

Table 3은 섬유 종류 및 혼입량 변화에 따른 균열면적, Figure 4는 섬유 종류 및 혼입량에 따른 상대균열면적, Figure 5는 섬유 권장 사용량별 소성수축에 의한 균열 성상을 나타낸 것이다.

섬유 종류 및 혼입량 변화에 따른 소성수축균열 실험을

한 결과를 상대균열면적으로 평가하였으며, 플레인의 균열 발생율을 100 %로 하여 섬유별로 혼입량이 0.6 kg/m^3 경우 90 %대의 균열 발생율로 플레인과 거의 유사한 것으로 나타나고 있어 소성수축 균열의 저감에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있었다. 혼입량 0.9 kg/m^3 및 1.2 kg/m^3 경우는 WF 0.9의 경우를 제외한 모든 수준에서 플레인 대비 50 %정도의 균열 발생 저감효과를 나타내고 있어 소

성수축 균열 저감에 상당한 성능을 발휘하는 것을 알 수 있었으며, 각 섬유 혼입량에 따라서는 0.6, 0.9 및 1.2 kg/m³에서 섬유 길이가 짧은 WF, PULP 섬유에 비하여 섬유 길이가 긴 JF 섬유가 양호한 균열 저항성을 나타내고 있었다. 이는 기존연구[5,6,7,9,10]와 같이 JF 섬유의 유효직경이 크고, 거친 표면조직에 의한 구속효과로 인한 소성수축에 대한 균열 저감 효과를 가져오는 것으로 판단된다.

Table 3. Effect of fiber type and content on crack

fiber type	average crack width (mm)	crack total length (mm)	crack number (number)	crack area (mm ²)	relative crack area (%)
Plain	0.13	1 559	8	198	100
0.6	0.17	1 057	6	180	90.88
JF 0.9	0.10	839	4	84	42.29
1.2	0.11	655	3	75.1	37.85
0.6	0.13	1 430	7	191	96.24
WF 0.9	0.12	1 041	7	122	61.70
1.2	0.16	607	3	100	50.15
0.6	0.13	1 407	7	186	93.60
PULP 0.9	0.10	1 073	6	107	54.08
1.2	0.2	477	3	95	48.08

Figure 4. Relative crack area by fiber content and type

Figure 5. Crack shapes after the test of plastic shrinkage crack

또한, 각 섬유별 권장 사용량에 따른 JF 0.9, WF 0.6 및 PULP 1.2의 경우 균열 저항성은 JF 0.9 > PULP 1.2 > WF 0.6의 순으로 효과가 큰 것으로 나타났으며, 특히 JF 섬유의 경우 그 사용량을 증가하여 1.2 kg/m³ 혼입 시에는 상대균열면적이 37.85 %로 소성수축 균열을 저감하는데 뛰어난 성능을 발휘하는 것으로 나타났지만, 슬럼프 저감 및 표면 마감성 등에 대한 문제에 대하여 고려 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.2 경화 콘크리트 성질

3.2.1 강도특성

Figure 6은 섬유별 권장 사용량에 따른 재령별 압축강도, Figure 7은 섬유별 권장 사용량에 따른 재령별 인장강도를 나타낸 것이다.

전반적으로 섬유 종류 및 혼입량에 따른 재령별 압축강도는 플레인과 유사한 수준으로 나타났으며, 섬유별 권장 사용량에 따른 압축강도의 경우 재령 3일에서 모든 섬유가 플레인보다 낮은 강도를 나타내고 있었으나, 재령 7일에서 플레인과 동등수준을 나타냈고, 재령 28일에서는 각 섬유별로 플레인 대비 1~2 MPa 정도의 차이를 보이고 있어 각 섬유 권장사용량에 따른 압축강도에 대한 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

Figure 6. Compressive strength with recommended fiber content

Figure 7. Tensile strength with recommended fiber content

섬유별 권장사용량에 따른 인장강도의 증진효과는 재령에 따라서 전반적으로 JF 0.9 kg/m³가 WF, PULP 섬유보다 인장강도의 증진효과가 양호한 것을 알 수 있었으며, 특히 재령 28일에서 PULP 섬유 1.2 kg/m³와 동등 수준으로 JF 섬유의 적은 양으로 양호한 인장강도를 나타내는 것을 알 수 있었다. 이는 기존 연구문헌[3,6,8]의 결과와 동일하게 JF 섬유의 거친 표면 조직이 콘크리트 내부에서 양호한 부착성능을 확보함에 따른 인장성능의 보강 효과를 가져온 것으로 판단된다.

3.2.2 충격 시험

Figure 8은 섬유 혼입량 변화에 따른 균열발생 및 최종 파괴 시까지의 충격낙하횟수, Figure 9는 충격시험에 의한 시편 파괴형상을 나타낸 것이다.

섬유의 충격시험에 대한 저항성을 보기 위해 초기균열 횟수 보다 초기균열 후 최종파괴까지의 낙하횟수를 검토하여 인성특성을 파악하였는데, 섬유 종류에 따라서는 플레인 대비 모든 섬유에서 초기균열까지의 횟수가 증가하는 것으로 나타났다.

Figure 8. Number of falling times required to wreck, by fiber content

Figure 9. Shapes of wreckage by fiber content and type

이는 각 섬유가 어느 정도 콘크리트 매트릭스 내에 네트워크를 형성함으로써 충격 저항성이 증진된 것으로 판단되며, 섬유의 혼입량에 따라서는 초기균열 및 최종파괴까지의 낙하횟수는 다소 차이가 나타났다. 즉, 초기 균열이 발생한 시점에서 최종파괴 시점까지의 낙하횟수는 WF, PULP 섬유의 경우 플레인 최종파괴 시점까지의 낙하횟수 5회와 비교하여, 2~5회에서 최종파괴가 나타나 충격강도에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있었는데, 이는 WF, PULP섬유가 초기균열 발생 후 섬유의 분산성 및 매트릭스의 형성의 부족으로 인하여 인성적 작용을 하지 못한 것으로 판단된다. JF 섬유의 경우 처음 균열발생 후 최종파괴까지의 낙하횟수가 혼입량 0.6 kg/m³에서는 6회로 다른 섬유와 마찬가지로 큰 영향을 미치지 못하였으나, 0.9 및 1.2 kg/m³에서는 15회, 18회로 다른 섬유들에 비하여 충격시험에 대한 저항성이 비교적 높은 것으로 나타났으며, 이는 기존 연구문헌[1]을 참고하면 섬유의 양호한 분산력에 의

해서 콘크리트 내에 매트릭스 네트워크를 형성하여 가교작용 효과의 상승에 의한 것으로 판단된다.

4. 최적혼입량 분석

본 실험에서는 원재료가 다른 셀룰로오스 섬유 혼입량 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성과 균열성상을 비교분석하였는데, 그 결과를 토대로 본 실험 조건 하에서의 최적 혼입량을 검토하였다.

굳지않은 콘크리트에서 소성수축 균열의 결과를 분석하면, 모든 섬유의 혼입량 0.9 kg/m^3 에서 상대균열면적이 40~50 % 저감하는 성능을 발휘하는 것을 알 수 있었으며, 특히 JF 섬유 0.9 kg/m^3 및 1.2 kg/m^3 가 소성수축 균열억제에 더 유효한 것으로 나타났다.

경화 콘크리트의 강도특성은 전반적으로 플레인 대비 섬유 혼입에 대한 큰 차이는 나타나지 않았으나, 섬유 종류별로 JF 섬유가 WF 및 PULP 섬유보다 비교적 우수한 효과를 발휘하는 것으로 나타났다. 충격횟수의 경우 초기균열 발생시점까지는 섬유 종류 및 혼입량 별로 크게 차이는 나타나지 않았지만, 그 후 최종파괴 균열 시점까지의 인성 특성면에서 JF 섬유의 모든 혼입량에서 양호한 결과를 나타내었다. 하지만 JF 섬유 혼입량 0.6 kg/m^3 의 경우 섬유보강 콘크리트의 일차 목적인 균열제어 면에서 부족함이 있고, 1.2 kg/m^3 의 경우 유동성 및 마감 성능 면에서 양호하지 못한 결과를 나타내어 JF 섬유 0.9 kg/m^3 가 타당 할 것으로 분석된다.

이상을 종합하여 섬유별 적정 혼입량을 보면 WF 섬유와 PULP 섬유의 적정 혼입량은 각각 0.6 , 1.2 kg/m^3 로 권장하고 있으나, 본 실험 조건하에서 WF 섬유의 경우 0.9 kg/m^3 PULP 섬유의 경우는 1.2 kg/m^3 로 적정 혼입량으로 나타났다으며, JF 섬유의 경우는 0.9 kg/m^3 가 균열 발생 저감성 등의 품질을 향상시키는 최적의 혼입량인 것으로 분석되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 셀룰로오스 섬유(황마)를 사용한 섬유보강 콘크리트의 기초적 특성과 균열 저감성능을 확인하기 위해 원재료가 다른 동일 셀룰로오스계 섬유와의 상호 비교하여

검토하였는데, 이상을 종합하면 다음과 같다.

- 1) 섬유 혼입량이 증가함에 따라 섬유 종류에 관계없이 슬럼프는 감소하는 경향이었는데, JF와 비교하여 WF 및 PULP의 경우 저하량이 다소 큰 것으로 나타나고 있으며, 특히 모든 섬유에서 혼입량을 1.2 kg/m^3 로 하였을 경우 플레인 대비 상당한 슬럼프 저하가 나타나, 적정 혼입량에 따른 유동성 확보 대책이 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 소성수축균열을 상대균열면적으로 평가한 결과, 혼입량 0.6 kg/m^3 경우는 소성수축 균열의 방지에 크게 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있었으며, 혼입량 0.9 및 1.2 kg/m^3 경우는 WF 0.9 kg/m^3 를 제외한 모든 수준에서 플레인 대비 50 %정도의 저감효과를 나타내고 있어 소성수축 균열 저감에 상당한 성능을 발휘하는 것을 알 수 있었다.
- 3) 강도특성으로 압축강도는 전반적으로 플레인과 유사한 수준으로 나타났고, 섬유 혼입량이 증가함에 따라 모든 섬유에서 압축강도가 증가하나, 전체적으로 섬유 혼입량 1.2 kg/m^3 일 때 다소 감소하는 것으로 나타났다. 섬유별 권장 사용량에 따른 인장강도의 증진효과는 전반적으로 JF 0.9 kg/m^3 가 WF, PULP 섬유보다 재령에 따라 인장강도의 보강 효과가 양호한 것을 알 수 있었다.
- 4) 충격시험 경우는 섬유 혼입량이 증가할수록 충격저항성은 증가하였으나, WF 및 PULP 섬유에서는 처음 균열 발생 후 파괴될 때까지의 낙하횟수가 5회 정도인 반면 JF 섬유의 경우 혼입량에 따라 다소 차이가 있지만 10~18회까지 낙하 횟수가 증가하는 것으로 나타나 섬유에 의한 인성의 증가효과가 큰 것으로 판단된다.

요 약

콘크리트의 특성상 상대적으로 작은 인장강도로 인하여 균열에 취약한 성질을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 무근 콘크리트의 균열저감을 위하여 천연섬유 중 성능이 우수한 것으로 알려진 황마섬유에 대하여 다른 종류의 셀룰로오스 섬유와 비교 검토하여 보았다. 그 결과 황마 섬유의 경우 유동성 측면에서 다른 섬유에 비하여 양호한 결과를 나

타내었고, 특히 소성수축 균열 저항성의 경우 혼입량 0.9 및 1.2 kg/m³에서 플레인 대비 50 % 이상의 균열저감 성능을 발휘하였으며, 충격시험의 경우 WF 및 PULP 섬유에서 최종파괴까지 5회의 낙하횟수가 걸리는 반면 황마섬유는 혼입량에 따라 차이가 있지만 10~18회로 우수한 인성적 성질을 발휘하고 있는 것으로 나타났다.

키워드 : 무근 콘크리트, 황마섬유, 셀룰로오스 섬유

References

1. Shin HS, A Study on the Fundamental Properties of Concrete Using the Nylon Fiber [master's thesis]. Cheongju (Korea): Cheongju University; 2007. 124 p.
2. Kim SS, A Study on the Properties and Field Application of Press Concrete Using PVA Fiber and Crack Reducing Agent, In:Kim JU, Choi SJ, Jin ES, editors, Korea Concrete Institute fall Conference 2007; 2007 Nov 3:Sung Kyun Kwan University Natural Sciences Campus, Suwon (Korea): Korea Concrete Institute; 2007. p. 457-60.
3. OH BH, Lee MG, Yoo SW, Baik SH, A Study on the Strength and Drying Shrinkage Crack Control Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete, Journal of Korea Concrete Institute, 1996 Dec;8(6):151-61.
4. Park SW, Study for resistance Plastic Shrinkage Cracking and apply field of cellulose Fiber Reinforced Concrete, In:Kim KY, Yun SH, Kwon YJ, Kim DY, editors, Korea Concrete Institute fall Conference 2004; 2004 Nov 6; Suwon University, Suwon (Korea): Korea Concrete Institute; 2004. p. 699-702.
5. Park YK, Lee JH, Jeon IK, Yoon GW, Research for performance evaluation of crack reduction in fiber reinforced concrete with using jutes, In:Lee JH, Jeon IK, Kim DY, Yoon GW, editors, Proceeding of the korea institute of building Construction; 2010 May 14; Hanyang University, Seoul (Korea); The korea institute of building construction; 2010. p. 53-6.
6. Kim SE, Lee MH, Seo CH, Research for Yielding the Best Mixture Design and Complemental Strength of Jutes Mixed Extrusion Molding Cement Complex, Journal of Architectural institute of Korea, 2007 Oct;10(23):115-22.
7. Lee MH, Kim SE, Seo CH, Research about the Physical Properties of the Extrusion Molding Cement Compounds with Using Jutes as Strengthen Textile, Journal of Architectural institute of Korea, 2007 Sep;9(23):159-66.
8. Kim BG, Kim KR, Kwon YJ, Han CG, Synthetic fiber to control the early crack in concrete and application in construction field, Journal of Korea Concrete Institute, 2006 Jan;18(1):36-43.
9. Jung YH, Choi IH, Kim OJ, Lee DB, A Study on the practicality of fiber reinforced concrete to control plastic shrinkage crack, In: Chol IH, Kim OJ, Lee DB, editors, Proceeding of the korea institute of building construction; 2007 Nov 16; Hannam University, Daejeon (Korea); The korea institute of building construction; 2007. p. 15-8.
10. Kwon YJ, Kim KR, Kang DS, Park SW, Study for field application of nylon fiber reinforced concrete for plastic shrinkage crack reduction, In:Kim KR, Kang DS, Park SW, editors, Korea Concrete Institute fall conference 2006; 2006 Nov 4; Soongsil University, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2006. p. 661-64.