녹색자연환경 보존을 위한 지속가능한 자원순환시스템 콘크리트

Using Recycled Aggregates in Sustainable Resource Circulation System Concrete for Environment Preservation

이 영 주* 장 정 권** 김 윤 일*** 임 칠 순***
Lee, Young-Joo Jang, Jung-Kwun Kim, Yoon-IL Lim, Chil-Soon

Abstract

In this study, many concrete specimens were tested to investigate the variations of strength characteristics of high-strength concrete due to amount of recycled coarse aggregates, and to investigate the effect of steel-fiber reinforcement on concrete using recycled coarse aggregates. Test results showed that all of the variations of compressive, tensile and flexural strength appeared in linear reduction according to icrease the amount of recycled coarse aggregates, and steel-fiber reinforcement of 0.75% volumn of concrete recovered completely spliting tensile strength and flexual strength and recovered greatly compressive strength of concrete using recycled coarse aggregates of 100% displacement. And test results showed that the shear strength falled rapidly at 30% of replacement ratio so far as 34% of strength reduction ratio, but after that it falled a little within 3% up to the replacement ratio 100%, and steel-fiber reinforcement of 0.75% of concrete volumn recovered completely the deteriorated shear strength, moreover improved the shear strength above 50% rather than that of concrete using natural coarse aggregates.

키 워 드 : 순환골재, 고강도콘크리트, 강섬유보강, 치환율, 압축강도, 전단강도
Keywords : recycled aggregate, high-strength concrete, steel-fiber reinforcement, replacement ratio, compressive strength

1. 서 론

1.1 지속가능 자원순환시스템 구축의 필요성

1.1.1 폐콘크리트 발생증가와 쇄석골재 공급을 위한 산림파괴

최근 콘크리트 구조물이 노령화되고 기능이 저하됨에 따라 구조물이 해체되거나 재개발되므로써 막대한 양의 건축폐기물이 발생되고 있으며 이러한 건축폐기물의 70%가 폐콘크리트이다. 이와같이 콘크리트 폐기물은 해마다 급격하게 증가되고 콘크리트 수요량 역시 증가되지만 천연골재는 한계를 보이고 있다.

천연골재 수요현황은 3억 6천만 톤 이상으로 이제는 천연골재 고갈사태가 발생 될 것으로 예상된다. 더욱 심각한 것은 쇄석골재를 생산하기 위하여 매년 여의도 면적의 100 배가 넘는 산림과 자연환경이 파괴되고 있다는 것이다.

이러한 상황에도 불구하고 폐콘크리트를 파쇄하여 만든 재생골재는 주로 성토, 복토용으로 사용되고 있으며, 고부가가치의 순환골재로 활용된 실적은 10%를 밑돌고 있는 실정이다. 뿐만아니라 많은 폐콘크리트가 단순 매립으로 폐기처리되므로써 매립지가 부족하고 무단폐기로 환경오염이 우려 되고 있다.

1.1.2 순환골재 결함에 따른 사용제한

1) 순환(재생)골재의 결함

순환(재생)골재의 결정적 결함은 골재 둘레에 폐콘크리트의 시멘트 모르타르 잔재가 붙어 있어 발생된다. 그 모르타르 내의 미세한 공극으로 인하여 천연골재에 비하여 비중이 5~10% 이상 낮으며, 순환(재생)골재의 흡수율이 매우 커져서(천연골재의 3~5배 이상) 콘크리트의 강도를 현저히 저하시킨다는 것이다. 또한 폐콘크리트 모르타르와 골재와의 접착력이 구조물 해체와 콘크리트 파쇄 과정에서 크게 약해져서 콘크리트의 강도저하를 가중 시킨다.

2)순환골재의 사용제한

콘크리트용 순환골재에 관한 규정 KS F 2573 에서는 순환 굵은 골재를 3종류, 순환 잔골재를 2종류로 품질을 구분하여 순환골재의 품질을 규정하고 있다.

이러한 순환골재의 결점으로 순환골재의 사용을 엄격히 제한하고

* 강송건설(주) 전무이사(관동대학교 박사과정)
** 녹색도시건축문화연구소 소장(관동대학교 박사과정)
*** 관동대학교 건축학부 교수

있다. 순환골재 사용 기준에 관한 국내 규정[5]에 따르면, 순환 굵은 골재의 흡수율은 3% 이하, 순환 잔골재 흡수율은 5% 이하로 제한하고 있다. 또한 순환골재를 사용한 콘크리트의 최대 설계기준강도는 27MPa 이하로 제한하고 있고, 설계기준강도가 21MPa~27MPa인 순환골재 콘크리트를 제조할 경우 굵은순환골재 용적을 총 굵은 골재 용적의 30% 이하로 그 사용량을 제한하고 있다.

이에 따라 순환골재의 사용량은 소량에 그치고, 순환골재를 사용하여야 하는 의미가 상실 되는 처지에 있는 상황이다.

1.1.3 골재순환시스템 구축을 위한 적극적인 접근 요망

콘크리트 공학의 발달로 현재 사용되고 있는 대부분의 콘크리트 강도가 30MPa 이상이다. 뿐만아니라 50MPa 이상의 고강도 콘크리트의 사용이 날로 증가되어 보편화되고 있는 상황에서 순환골재의 사용량이 27MPa 이하의 콘크리트로 크게 한정되면, 심각한 콘크리트용 골재 공급과 폐콘크리트의 환경 문제를 해결하기 위한 지속가능한 자원순환시스템이 구축될 수가 없다는 것은 자명하다.

따라서 이러한 문제들이 해결되기 위해서는 비용의 증가를 최소화 하면서 순환(재생)골재 사용량이 획기적으로 증가되어야 한다. 그러나 지금까지의 기술개발과 연구는 주로 순환골재의 품질과 생산, 순환골재 콘크리트의 성능 저하의 규명에 한정되었다[1,2,3,4].

그러므로 앞으로는 연구가 보다 적극적인 접근으로 활성화 되고 이에 필요한 기술 개발이 이루어져야 한다.

1.2 연구 내용 및 방법

이러한 콘크리트 골재공급이 지속가능한 자원순환시스템으로 해결되기 위해서는 순환골재의 사용량을 치환율 60% 이상으로 크게 증가 시켜야 하며, 50MPa 수준의 고강도 콘크리트에 순환골재가 다량(치환율 50% 이상) 사용되어야 한다. 이를 위해서는 순환골재 콘크리트의 취약점이 현저히 개선되고 보완되어야 하며, 그 방법은 (1)순환골재 자체의 취약점을 개선하는 접근과, (2)순환골재 콘크리트의 강도성능과 구조성능을 개선하는 접근으로 나눌 수 있다.

이에 본 연구에서는 강섬유보강에 의한 순환골재 콘크리트 강도성능을 내용으로 한다.

지금까지의 많은 실험연구 결과[6,7,8]로 보면, 강섬유보강의 브릿지 작용은 콘크리트의 인장,휨,전단에 매우 우수한 효과가 있으나, 압축강도에 있어서는 강섬유보강이 거의 효과가 없거나 있어도 5%~10% 미만이라고 알려 졌다.

그러나 본 연구의 순환골재 콘크리트에 대한 시험결과로 보면, 천연골재를 순환골재로 치환함으로써 발생되는 압축강도 저하요인, 즉 순환골재가 갖고있는 태생적 약점이 강섬유 보강으로 크게 개선된다는 것을 보여주는 것으로 판단된다[9,10].

2. 실험결과 및 분석

2.1 시험체 제작 및 사용 재료

시험체 계획은 천연굵은골재를 사용한 콘크리트에 순환굵은골재를 각각 30%, 60%, 100% 치환하고, 강섬유보강은 모두 체적대비 0.75%로 고정하였다. 시험체의 배합강도는 70MPa, 물시멘트비 25%, 잔골재율은 42%로 하고, 실리카흄을 시멘트 중량대비 10%의 양을 사용하였다.

본 실험에서 사용되어진 골재의 비중, 흡수율, 조립율은 표 1 과 같다. 본 실험에서 사용한 강섬유는 그림 1 과 같이 국내 C사의 후크화이버 길이 35mm, 직경 0.65mm 를 사용하였다.

표 1. 골재의 물리적 성질

	천연굵은골재(강자갈)	순환굵은골재(1등급)
비중	2.65%	2.5%
흡수율	0.6%*	2.73%
조립율	6.56	6.55

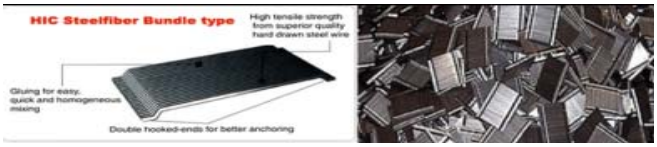

그림 1. 강섬유의 형상

2.2 순환굵은골재 치환율에 따른 압축강도 변화 추이

그림 2 에서 보면 동일한 조건에서 각 타입별로 순환골재를 천연굵은골재 체적의 30%, 60%, 100%로 치환하여 사용하였을 경우, 강도 저하가 치환율에 따라 비례하는 것으로 나타났다.

천연골재를 사용한 콘크리트의 경우 재령28일 압축강도는 평균 63.2MPa의 강도를 나타내었고 30%, 60%, 100%로 치환할시 각각 13.3%, 28.5%, 41.9%의 압축강도 감소율을 보였다. 이러한 감소추세로 볼 때 순환굵은골재 10%치환시 약 5%의 강도가 하락하는 것으로 판단된다.

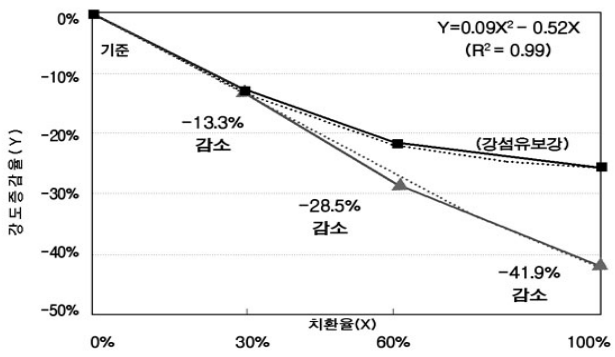

그림 2. 순환골재 치환율에 따른 압축강도 감소율 변화

2.3 순환골재 콘크리트 압축강도의 강섬유 보강효과

기존의 실험연구에서 강섬유 보강효과는 일반적으로 콘크리트의 압축강도 증진에는 뚜렷한 효과가 없는 것으로 알려졌다. 그러나 본 연구의 시험결과로 보면 압축강도를 상당히 증진시키는 효과가 나타났다.

치환율을 달리한 동일한 조건의 순환굵은골재 고강도콘크리트에 강섬유를 체적대비 0.75 % 혼입한 결과 4가지 타입의 공시체 모두 압축강도의 증진을 보였다.

주목할 만한 점은 그림 3 에서 보듯이 순환골재의 치환율이 높아질수록 강섬유의 보강효과가 뚜렷하게 나타났다는 것이다. 천연골재를 사용한 콘크리트의 강섬유 보강효과는 3.2%의 증가 효과를 보인 반면, 100% 치환한 콘크리트의 강섬유 보강효과는 32.4%의 상승률을 보였다.

이는 고강도콘크리트에서 순환굵은골재를 다량 사용하므로써 나타나는 압축강도를 저하시키는 요인들을 강섬유가 적절히 보강하는 것으로 판단된다.

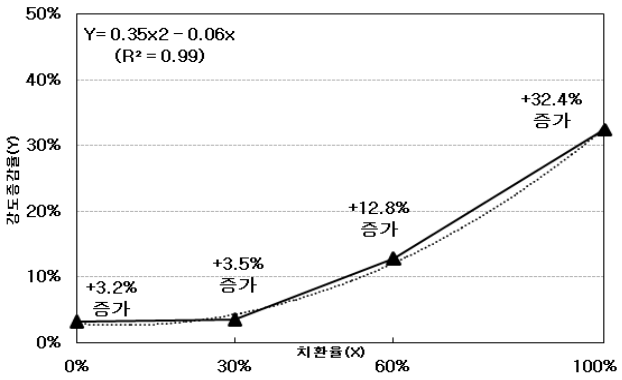

그림 3. 강섬유 보강시 압축강도의 증가율 추세

2.4 순환골재 콘크리트 인장강도의 강섬유 보강효과

콘크리트의 인장강도는 대부분 골재와 시멘트페이스트 간의 부착력에 의해서 결정되는데 순환골재를 치환하였을 경우 순환골재와 시멘트페이스트 사이의 미세균열들이 인장력을 약화시킨다. 이를 해결하기 위하여 순환골재 고강도콘크리트에 강섬유를 보강함으로써 인장강도가 크게 증가하여 감소된 강도가 완전히 회복되는 것으로 나타났다. 뿐만아니라 천연골재 콘크리트에 비하여 5%~15% 정도 더 크게 나타났다.

그림 4의 시험결과를 회귀분석한 추세선으로 유추하면 강섬유 보강 효과로 쪼갬인장강도가 증가하는 것이 순환골재 치환율에 비례하는 것으로 판단된다.

강섬유의 보강으로 인장강도의 증가효과 뿐만 아니라 콘크리트가 최대강도에 도달한 이후 연성적 능력이 대폭 향상 하는 것을 확인할 수 있다.

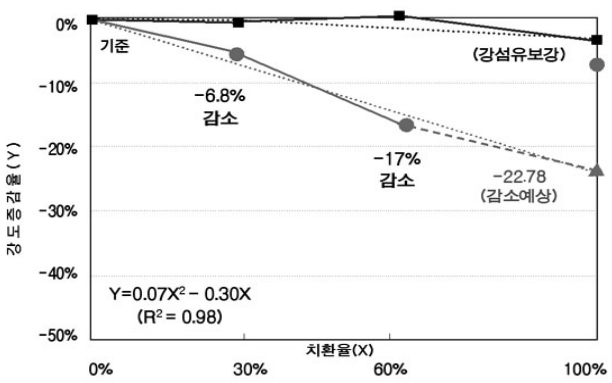

그림 4. 순환골재 치환율에 따른 쪼갬인장강도 감소율

2.5 순환골재 콘크리트 휨강도의 강섬유 보강효과

회귀 분석으로 얻은 감소 추세로 볼 때, 순환골재 치환율 10% 당 약 1.5% 내외의 휨강도가 감소하는 것으로 추정된다.

천연골재를 사용한 콘크리트의 경우 3.1 MPa의 강도를 나타냈고 순환골재를 100% 치환할 경우 17% 감소한 2.56MPa의 강도를 보였다.

그림 5에서 보면 순환골재를 사용하였을 때에는 강섬유보강으로 휨강도의 향상이 확연히 나타났다. 이 휨강도의 증가는 순환골재 치환율에 따라 비례적으로 나타나는 것으로 보인다. 순환골재를 60% 치환한 경우 14%의 휨강도가 증가되었고, 100% 치환한 경우에는 30.5%의 휨강도 증가를 보였다.

강섬유 보강은 이와같이 저하된 휨강도를 완전히 회복시킬 뿐만 아니라 천연골재 콘크리트의 휨강도 보다 10% 정도 더 향상시키는 것으로 나타났다.

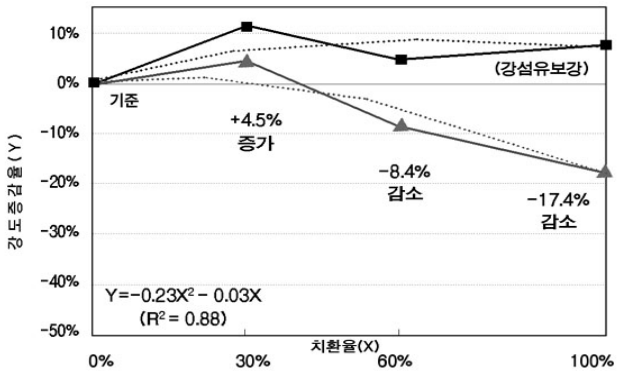

그림 5. 순환골재 치환율에 따른 휨강도 감소율 변화

2.6 순환골재 콘크리트보의 전단강도에 대한 강섬유 보강 효과

그림 6과 같은 보를 제작하여 사인장 전단파괴의 전단강도를 시험하였다.

시험체의 셋팅은 단순지지로 하였으며, 실험은 UTM을 사용하

여 4점 가력하였다. 정확한 하중측정과 계측을 위하여 500kN 용량의 로드셀과 데이터 로거(TDS 602)를 사용하였다. 보의 중앙 및 가력점에서의 처짐량을 변위계(LVDT)로 측정하였다.

강섬유가 보강되지 않은 순환골재 고강도콘크리트 보는 순환골재의 치환율에 상관없이 기준 시험체에 비하여 전단강도가 33.6%~35.6%로 저하 되므로써 그 차이가 거의 없다는 것을 표 2와 그림 7에서 알 수 있다.

강섬유로 보강된 실험체는 100% 이상의 전단강도 증가를 보였고, 특히 순환골재 치환율 60%이고 강섬유가 보강된 시험체는 최대 내력 101.1kN으로 75.9%의 강도 증가를 나타냈다.

그러나 굵은골재를 순환골재로 30% 치환하여 사용하였을 때 전단강도가 천연골재에 비하여 급격히 저하되어서 33.6%의 강도 감소를 보였다. 그러므로 고강도콘크리트에 순환굵은골재를 사용할 때에는 그 사용량이 30% 이내로 적은 양 일지라도 전단보강 조치가 필요한 것으로 판단된다.

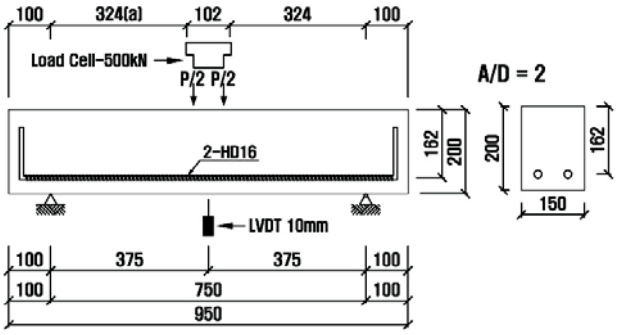

그림 6. 시험체 칫수, 형상 및 가력위치

표 2. 실험체의 최대내력 비교

시리즈	시험체명	최 대 내 력 (kN)	최대* 내력증감 (%)	비 고
1	HNC-D16	64.4	-	기준시험체 전단파괴
	HRG30-D16	42.75	33.6감소	전단파괴
	HRG60-D16	41.5	35.6감소	전단파괴
	HRG100-D16	41.45	35.6감소	전단파괴
2	HNCF-D16	72.9	13.2증가	휨파괴
	HRGF30-D16	77.1	19.7증가	휨파괴
	HRGF60-D16	76.55	18.9증가	휨파괴
	HRGF100-D16	62.2	3.4감소	휨파괴
3	HNC-D19	57.46	-	기준시험체 전단파괴
	HNCF-D19	106.5	85.3증가	전단파괴
	HRGF30-D19	98.2	70.9증가	전단파괴
	HRGF60-D19	101.1	75.9증가	전단파괴
	HRGF100-D19	98.2	70.9증가	전단파괴

*기준시험체를 기준으로하여 시험체의 최대내력 증감을 표시

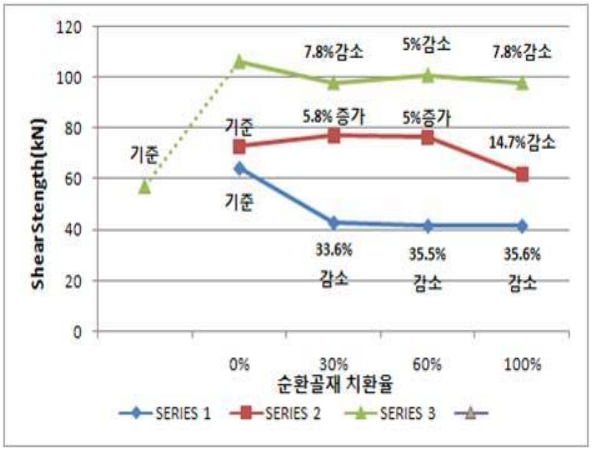

그림 7. 강섬유 보강 유무에 따른 최대내력(전단강도) 비교

3. 결 론

순환굵은골재 사용량이 치환율 30%에서 100%까지 증가 할 때 60MPa 수준의 고강도콘크리트에서 강도저하가 어떻게 나타나고, 이를 강섬유로 보강하였을 때 그 효과가 어떻게 나타나는가를 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도, 전단강도 시험을 통하여 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다..

1) 순환굵은골재를 사용한 고강도콘크리트의 압축강도 변화는 사용량(치환율)에 비례하여 하락한다. 대략 10% 치환시 약 5% 정도 강도 감소가 나타났다.
2) 압축강도에 대한 강섬유 보강효과가 천연골재 고강도콘크리트에서는 3% 정도로 작게 나타났다. 그러나 순환굵은골재를 치환율 60%로 사용할 때 압축강도가 10%~15% 증가되었고, 치환율 100%로 사용할 때에는 압축강도 30%~35% 증가가 나타나 강섬유 보강효과가 매우 크게 나타났다. 이를 순환골재 사용량에 따라 회귀분석 하면 2차함수인 포물선 형태로 압축강도가 회복되는 것으로 나타났다.
3) 순환굵은골재를 100% 까지 치환하여 사용한 고강도콘크리트를 강섬유로 보강 할 때, 쪼갬인장강도와 휨강도가 완전히 회복될 뿐만 아니라 천연골재 고강도콘크리트의 강도보다도 10% 정도 향상되고, 연성적 능력이 천연골재 고강도콘크리트의 경우보다 더 크게 증진되는 것으로 나타났다.
4) 순환골재로 30%를 치환하였을 경우, 34%의 큰 전단강도 저하가 나타났다. 그러나 순환골재를 60%, 100% 치환하여 더 많이 사용하여도 36%의 전단강도 저하를 보여 30% 치환의 경우와 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.
   이는 전단강도가 순환골재 사용량과 비례하지 않다는 것을 보여주며, 순환골재를 치환율 30% 정도의 적은 양을 사용할 지라도 적절한 전단보강이 필요하다고 판단된다.
5) 체적비로 0.5%~1.0% 정도 소량의 강섬유로 보강하였을때,

저하된 전단강도가 완전히 회복될 뿐만 아니라 천연골재 콘크리트보에 비해 50% 이상 강도증진을 나타내어 강섬유보강이 매우 우수한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 순환골재 품질기준, 2005
2. 김윤일, 권혁준, 임준호, 강섬유보강 순환골재 고강도콘크리트 보의 전단강도, 관동대학교 산업기술논문집 제26호 p.p.32~43, 2009.12
3. 김윤일, 김길환, 최종호, 순환굵은골재 사용량에 따른 콘크리트의 강도변화와 강섬유보강 효과, 관동대학교 산업기술논문집 제26호 pp.18~31, 2009.12
4. 김윤일, 박동순, 서치호, 강섬유 혼입량 증가에 따른 고강도 콘크리트 재료의특성 변화, 대한건축학회논문집, 제21권 제2호, 2005
5. 김정섭 신용섭, 박영배, 김정훈, 조창호, 강섬유 혼입 순 환골재 콘크리트의 구조적 특성에 관한 연구, 한국건축시공학회 논문집, 제8권 제5호, 2008
6. 윤현도 외1명, 전단보강되지 않은 재생골재 콘크리트의 전단거동, 대한건축학회논문집, 제2권, 제1호, pp.139~144, 2000
7. 이완석 외 5명, 순환굵은골재 치환율에 따른 전단보강 되지 않 은 철근콘크리트 보의 전단강도특성, 대한건축학회 논문집, 제23권, 제10호 pp.3~10, 2007
8. 정헌수, 양근혁, 김현호, 순환골재 품질과 치환율이 콘크리트 역학적 특성에 미치는 영향, 대한건축학회논문집, 제22권, 제6호 pp. 71~78, 2006
9. ACI Committee 544, Design Considerations for Steel-Fiber Reinforced Concrete (ACI544.4R), 1999, 2009
10. Cho, S.H., and Kim, Y.I., "Effects of Steel Fibers on Short Beams Loaded in Shear," ACI Structural Journal, Vol.100, No.6, Nov.~Dec 2003