

# 순환굵은골재 60% 이상 사용한 고강도 콘크리트에 대한 강섬유 보강 효과

## The Effects of Steel-Fiber Reinforcement on High Strength Concrete Replaced with Recycled Coarse Aggregates More Than 60%

김윤일\*

Yoon-Il Kim<sup>1\*</sup>

(Received November 18, 2016 / Revised December 22, 2016 / Accepted December 22, 2016)

The purpose of this study is to examine the extent to which the deterioration in strength of high strength concrete of 60MPa replaced by a large amount of recycled coarse aggregates (more than 60% to 100% of replacement ratio) could be recovered with steel fiber reinforcement through material compressive strength test and shear failure test on short and middle beams and then to offer useful data for aggregate supply system of a sustainable resource circulation type. This study first examined the results of previous related tests. The results of the material compressive strength tests confirmed that when using a combination of steel fiber reinforcements of volumn ratio 0.75% and high quality recycled coarse aggregates with an water absorption rate within 2.0%, the strength characteristics of high strength concrete of 60MPa level were not only restored to the strength level of concrete made with natural aggregates, but also showed superior ductility. And the shear failure tests on short and middle beams using recycled coarse aggregates more than 60% with shear span to depth ratio (a/d) of 2 and 4 controlled by shear forces mainly confirmed that effects of superior shear strength increase and ductile behavior characteristics were showed by steel fiber reinforcements.

**키워드** : 순환굵은골재 콘크리트, 강섬유 보강, 순환굵은골재 치환율, 전단강도

**Keywords** : Concrete using recycled coarse aggregates, Steel fiber reinforcement, Replacement ratio of recycled coarse aggregates, Shear strength

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경과 필요성

도시화와 재개발 등으로 지금까지 많은 천연골재 콘크리트가 생산 공급되어 왔다. 그러나 앞으로 지속가능한 건설자원의 고부가가치 순환을 위해서는 많은 양의 구조용 콘크리트의 천연골재를 폐콘크리트에서 생산된 순환굵은골재로 대체하는 것이 바람직하다. 뿐만 아니라 천연골재의 공급을 위해 자연환경이 크게 파괴되고 있는 환경 문제를 보다 적극적으로 해결하여야 할 것이다.

그러나 순환골재의 품질이 천연골재에 비하여 상당히 낮으므로 특별한 제한이나 조치 없이 골재를 바로 순환굵은골재로 대체할

수는 없는 것이다. 이에 순환골재 품질기준에서는 순환골재의 흡수율과 밀도를 제한하고 있다. 또한 순환골재를 사용한 구조용 콘크리트의 최대 설계기준압축강도를 제한하고 있고, 설계기준압축강도가 21MPa~27MPa인 순환골재 콘크리트를 제조할 경우 순환굵은골재 사용을 총 굵은골재 용적의 30% 이하로 권장하고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 지속가능한 건설자원의 고부가치 순환과 천연골재 생산으로 인한 자연환경 문제를 해결하기 위하여 다량(60%~100%)의 굵은골재를 순환골재로 대체 사용하는 것이 바람직하다. 이렇게 하기 위해서는 우선적으로 밀도와 흡수율에서 상당히 좋은 고품질의 순환골재를 사용하고 또한 특별한 조치로 보강함으로써 기준이 정하고 있는 콘크리트 강도 제한이나 순환굵은골재 사용 권장사항의 문제를 해결하여야 할 것이다.

\* Corresponding author E-mail: [kyi@cku.ac.kr](mailto:kyi@cku.ac.kr)

<sup>1</sup>가톨릭관동대학교 건축공학과 교수, 공학박사 (Department of Architectural Engineering, Catholic Kwandong University, Gangneung, 25601, Korea)

순환골재의 취약성은 원골재 표면에 부착된 모르타르나 페이스트에 의해 나타난다. 이로 인해 골재의 밀도가 낮아지고 흡수율이 크게 됨으로써 콘크리트의 품질이 저하되는 것이다. 따라서 이러한 문제를 완화하기 위해서는 기본적으로 순환골재 표면에 부착된 모르타르나 페이스트가 많이 제거된 밀도가 크고 흡수율이 낮은 고급의 순환골재를 사용하여야 한다. 최근에는 국내 순환골재 제조사의 생산설비 및 제조기술이 크게 향상되어서 고품질의 콘크리트용 순환골재가 대량 생산되고 있다. 앞으로는 그 품질도 상당히 안정화되어서 이러한 고품질의 순환굵은골재를 대량 사용하는 것이 가능해질 것으로 생각한다. 그렇지만 그러한 고품질의 순환골재일지라도 천연골재 보다 품질이 떨어짐으로 콘크리트의 성능이 저하되는 것을 정도의 차이는 있으나 피할 수는 없는 것이다. 따라서 콘크리트 강도 저하나 품질 저하가 거의 없이 순환골재를 대량 사용하기 위해서는 특별한 보강 조치가 필요하다.

또한 40MPa 이상의 고강도콘크리트의 사용이 앞으로는 일반화 될 것으로 예상되는 상황이다. 따라서 더 많은 순환굵은골재가 고부가치로 순환 사용되기 위해서는 일반강도 콘크리트 뿐만 아니라 40MPa~60MPa 수준의 고강도콘크리트에서도 순환굵은골재가 60% 이상 사용될 수 있다면 이는 매우 바람직하다 하겠다. 이를 위해서는 순환굵은골재 사용으로 나타나는 취약성을 해결하고 보강하는 특별한 조치가 더욱 필요하다.

## 1.2 연구의 목적

순환굵은골재를 대량 사용한 콘크리트를 보강하는 특별한 방법의 하나로 강섬유 혼입 보강을 들 수 있다. 혼입된 강섬유는 콘크리트 내에서 발생하는 미세한 균열에서 브릿지 작용을 하여 그 미세 균열의 진행과 확장을 크게 억제하는 것으로 알려졌다(Ashour et al, 1992; Karl et al, 2011).

이에 이 연구에서는 설계기준압축강도 60MPa 수준의 고강도콘크리트에서 흡수율이 매우 낮고 밀도가 큰 고품질의 순환굵은골재 사용과 함께 강섬유 혼입으로 보강하였을 때, 순환굵은골재로 60%에서 100%까지 대체한 콘크리트의 제작이 가능 할 수 있는지와 순환굵은골재 고강도콘크리트의 강도와 거동 특성이 어느 정도 개선될 수 있는지를 강도 시험과 보의 전단파괴 실험을 통하여 비교하고자 한다.

## 1.3 연구의 방법 및 범위

순환굵은골재 콘크리트의 강도변화 특성은 국내의 실험연구 문헌에서도 많이 취급되어 왔다. 그러나 특별한 보강 조치가 된 압축강도 40MPa 이상의 순환굵은골재 고강도콘크리트나 강섬유로 보

강된 순환굵은골재 고강도콘크리트에 대한 실험 연구는 상대적으로 부족한 것으로 생각한다.

이 연구에서는 먼저 국내에서 실시된 기존의 실험연구 결과들에 대하여 고찰하고, 굵은골재를 고급의 순환골재로 60%에서 100%까지 치환한 60MPa 수준의 고강도콘크리트에 대하여 압축강도 시험과 전단력이 보 거동 특성을 지배하는 짧은 보와 중간보의 전단파괴 실험을 통하여 강섬유 보강 효과를 밝히는 것을 연구의 범위로 한다.

## 2. 기존 실험연구 결과에 대한 고찰

### 2.1 순환굵은골재 콘크리트의 강도 특성

철근콘크리트구조는 인장력은 철근이 부담하고 압축력과 전단력은 주로 콘크리트가 부담하는 것으로서 두 재료가 이상적으로 합성된 구조이므로 콘크리트는 기본적으로 압축강도와 전단강도에 대한 강도 특성과 그 거동 특성이 중요하다. 따라서 순환골재 콘크리트에서도 압축강도와 전단강도에 대한 강도 특성 규명이 중요하며 우선적이라 할 수 있다.

Table 1은 국내의 기존 실험 연구에서 실시한 순환굵은골재 콘크리트에 대한 강도 시험 결과들을 비교한 것이다. 순환골재에 대한 대부분의 실험연구가 여건상 소규모의 실험실 작업으로 이루어졌고, 이는 실제 현장의 대량생산과 레미콘 비빔방법으로 나타날 수 있는 변화나 차이점을 간과할 수 있다. 이러한 문제를 배제하기 위하여, 실제 현장과 같은 레미콘배합으로 만든 콘크리트의 강도 시험과 실물 크기의 실험체에 대한 구조실험을 집중적으로 수행한 연구 결과들이 발표되었다.

Table 1의 콘크리트 강도시험 결과를 종합하여 보면, 압축강도 30MPa~40MPa 수준의 콘크리트에서 품질기준을 만족하는 순환굵은골재를 사용하였을 때, 30% 치환 시에는 10% 내외, 60% 치환 시에는 10%~20%, 100% 치환 시에는 15%~25% 압축강도가 저하되는 것으로 추정된다. 순수 전단력에 대해서는 순환굵은골재 50% 이상 치환 시 20%~30% 전단강도가 저하되고, 전단경간비(a/d) 5 정도의 전단보강 되지 않은 보에서는 순환굵은골재를 60% 이상 치환하였을 때 5%~10%의 강도저하가 나타나는 것으로 추정된다. 또한 순환굵은골재를 60% 이상 치환한 기둥 부재에서는 최대강도 이후에 심한 취성적 파괴양상을 보인다는 것을 알 수 있으며, 보에서는 상단 수평철근의 부착강도가 50% 정도 크게 저하된다는 것을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of test results of previous researches for strength of concrete using recycled coarse aggregate and reinforced by steel fiber

Reference	Recycled coarse aggregates			SF* <sup>1</sup>	C.S* <sup>2</sup>		S.T.S* <sup>3</sup>		F.S* <sup>4</sup>		Remark
	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water* <sup>5</sup> abs.(%)	Rep.* <sup>6</sup> ratio(%)	Volume fraction	(MPa)	Diff.* <sup>7</sup> (%)	(MPa)	Diff.* <sup>7</sup> (%)	(MPa)	Diff.* <sup>7</sup> (%)	
Chung, H. S. (2006)	2.48	1.93	-	-	39.50	-	4.04	-	4.31	-	direct shear strength test: 20%~30% reduction of shear strength
			30%	-	33.40	-15.4	4.03	-0.2	4.21	-2.3	
			50%	-	34.60	-12.4	3.65	-10.9	4.01	-7.0	
			100%	-	31.30	-20.8	3.29	-18.6	3.84	-11.0	
Lee, W. S. Youn, H. D. (2007)	2.49	2.99	-	-	37.05	-	3.45	-	-	-	a/d=5, real size specimen, 10% reduction of shear strength, brittle failure at 60% replacement with recycled coarse aggregates
			30%	-	33.58	-9.4	2.54	-26.4	-	-	
			60%	-	32.35	-12.7	3.09	-10.4	-	-	
			100%	-	29.17	-21.3	2.72	-21.2	-	-	
Lee, M. J. Youn, H. D. (2008)	2.49	3.01	-	-	27.50	-	1.81	-	-	-	bond strength test: bond strength reduction of 50% at upper reinforcement of beam replaced by 60% with recycled c. aggregates
			30%	-	22.82	-17.0	1.94	7.2	-	-	
			60%	-	26.92	-2.1	2.11	16.6	-	-	
			100%	-	24.97	-9.2	1.89	4.4	-	-	
Kim, Y. I. Lee, Y. K. (2008)	-	-	-	-	63.25	-	5.43	-	-	-	short beam(a/d=1.45), shear strength increase of 50%, at steel fiber of 0.5%, 70% at steel fiber of 2.0%
			0.5%	57.76	-8.7	7.29	34.3	-	-		
			1.0%	61.45	-2.8	9.10	67.6	-	-		
			1.5%	60.61	-4.2	10.63	95.8	-	-		
Kim, J. S. Shin, Y. S. (2008)	2.61	2.63	-	-	25.20	-	2.50	-	-	-	effect of steel fiber reinforcement, 5.0% increase of bending strength & 18% increase of shear strength at beam replaced with recycled aggregates of 60%
			1.0%	27.60	9.5	2.80	12.0	-	-		
			30%	-	24.30	-3.6	2.50	0	-	-	
			30%	1.0%	26.50	5.2	2.70	8.0	-	-	
			60%	-	21.50	-14.7	2.10	-16.0	-	-	
Song, S. H. Youn, H. D. (2009)	2.49	3.00	-	-	36.97	-	-	-	-	-	using mixed recycled aggregate, bending strength reduction of 7% in beams with a/d=5
			100%	-	29.17	-21.1	-	-	-	-	
	2.48	3.01	-	-	26.77	-	-	-	-	-	
100%	-		23.85	-10.9	-	-	-	-			
Karl, K. W. Kim, K. S. (2011)	-	-	-	-	49.1	-	4.12	-	4.51	-	effect of steel fiber reinforcement with 1.0 vol. ratio(direct shear strength test): shear strength increases by a maximum of 84% in 50MPa concrete, shear strength increases by a maximum of 60% for a 70MPa concrete, shear deformation capability improvement by a factor of up to 11 times, shear strength increases by a factor of up to 1.8 times
				0.5%	46.4	-5.5	4.23	2.7	5.17	14.6	
				1.0%	55.1	12.2	4.41	7.0	6.53	44.8	
				1.5%	62.0	26.3	5.13	24.5	4.10	-9.1	
				-	73.5	-	4.28	-	6.10	-	
				0.5%	69.1	-5.8	4.68	9.3	5.17	-15.2	
				1.0%	84.4	14.8	5.92	39.0	5.70	-6.6	
				-	62.7	-	3.77	-	4.07	-	
				0.5%	57.3	-8.6	4.24	12.5	4.60	13.0	
				1.0%	66.3	5.7	4.53	20.2	7.00	72.0	
				1.5%	56.3	-10.2	6.04	60.2	7.72	89.7	
				-	62.2	-	3.81	-	3.51	-	
				0.5%	69.9	12.4	4.58	20.2	4.43	26.2	
1.0%	79.0	27.0	4.89	28.3	6.46	84.1					
1.5%	97.0	56.0	6.26	64.0	13.35	280					

Table 1. Comparison of test results of previous researches for strength of concrete using recycled coarse aggregate and reinforced by steel fiber(Continued)

Reference	Recycled Coarse aggregates			SF <sup>*1</sup>	C.S <sup>*2</sup>		S.T.S <sup>*3</sup>		F.S <sup>*4</sup>		Remark
	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water abs. <sup>*5</sup> (%)	Rep. ratio <sup>*6</sup> (%)	Volume fraction	(MPa)	Diff. <sup>*7</sup> (%)	(MPa)	Diff. <sup>*7</sup> (%)	(MPa)	Diff. <sup>*7</sup> (%)	
Kim, Y. C. Kwak, Y. K. (2014)	2.59	1.95	30%	-	28.57	-	3.30	-	9.53	-	test of beams: flexural strength increase of 8%~10% at steel fiber ratio 1.0%, irrespective of using amounts of recycled aggregates,
				0.5%	28.99	1.5	3.67	11.2	10.26	7.7	
				0.75%	31.03	8.6	3.95	19.7	10.87	14.1	
				1.0%	30.50	6.8	4.10	24.2	10.98	15.2	
Shin, J. R. Kwak, W. K. (2015)	2.59	1.95	30%	-	29.27	-	3.65	-	10.17	-	shear strength test of beams with a/d=2, 3, 4, 20%~85% increase of shear strength by 1.0% vol. ratio of steel fiber
				0.5%	30.15	3.0	3.87	6.0	10.63	4.5	
				0.75%	30.32	3.6	4.05	11.0	11.18	9.9	
				1.0%	31.42	7.4	4.16	14.0	11.31	11.2	
Shin, W. C. Kwak, Y. K. (2016)	2.50	2.84	-	-	53.25	-	3.58	-	10.60	-	bending test of beams with a/d=4
			30%	-	47.20	-11.4	3.12	-12.8	9.42	-11.1	
			50%	-	41.15	-22.7	2.87	-19.8	8.24	-22.3	
Lee, H. H. Lee, T. W. (2016)	2.27	2.39	-	-	28.1	-	-	-	-	-	15% increase of compressive strength by 1.0% steel fiber reinforcement
			30%	-	25.0	-10.3	-	-	-	-	
			0.5%	28.0	0.0	-	-	-	-	-	
			1.0%	29.7	5.7	-	-	-	-	-	

\*1: SF - Steel Fiber, \*2: C.S - Compressive Strength, \*3: S.T.S - Splitting Tensile Strength, \*4: F.S - Flexural Strength  
 \*5: Water abs. - Water absorption, \*6: Rep. Ratio - Replacement Ratio, \*7: Diff. - Difference from standard specimen(%)

## 2.2 순환골은골재 콘크리트에 대한 강섬유보강 효과

### 2.2.1 천연골재 콘크리트에 대한 강섬유보강 효과

천연골재 콘크리트에 대한 강섬유보강 효과에 관한 실험연구는 일찍이 국내외에서 많이 발표되었다. Williamson(1974), Fanella and Naaman(1985), Ezeldin and Balaguru(1997)의 연구에서 보면 강섬유 혼입율이 증가하면 압축강도도 다소 증가하며 이는 혼입된 강섬유의 부피비율과 형상비에 따라 영향받는 것으로 알려졌다. 최근 Karl et al.(2011)의 실험에서는 50MPa과 70MPa의 고강도콘크리트에 대한 강섬유 보강 효과가 강섬유 혼입률 1.0% 시 압축강도에서 6%~27%의 증진효과를 보였으며, 직접전단에 대해서는 60%~80% 정도의 증진효과가 있는 것으로 나타났다.

### 2.2.2 순환골은골재 콘크리트에 대한 강섬유보강 효과

Table 1의 기존 실험연구 결과로 보면, 순환골은골재를 30%~60% 이상 치환한 일반강도 콘크리트에서 체적비 1.0% 내외의 강섬유 보강으로 압축강도가 5%~15% 정도 증진되고, 쏘개인장강도와 휨인장강도는 10%~25% 정도 증진되는 것으로 보인다. 뿐만 아니라 전단강도와 부착강도는 더욱 크게 증진되는 것으로 추정된다. 또한 강섬유 혼입율이 커질수록 균열 간격이 좁혀지고 미세균열이 많아지는 균열제어 효과가 향상되고 연성능력이 향상되었음

을 알 수 있다.

이와 같이 순환골은골재로 나타나는 강도저하 문제가 강섬유보강 방법으로 해결된다면 순환골은골재 콘크리트를 40MPa~60MPa 수준의 고강도콘크리트로 확장하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

## 3. 강섬유보강 순환골은골재 고강도 콘크리트의 강도 시험

### 3.1 시험 계획 및 사용 재료

콘크리트 강도시험은 사용하는 순환골은골재의 품질에 따라 1차 시험과 2차 시험으로 구분하여 실시하였다. 시험체 계획은 Table 2와 같이 천연골은골재(강자갈)를 사용한 기준 시험체와 순환골은골재를 각각 30%, 60%, 100% 치환한 시험체, 강섬유로 보강한 시험체로 분류 하였다. 강섬유 보강량은 모두 체적대비 0.75%로 동일하게 하였다. 강섬유보강은 그 보강량이 많을수록 좋겠으나 강섬유가 콘크리트 내에서 섬유 뭉침 없이 골고루 분포되고 콘크리트의 워커빌리티의 저하 정도를 고려하여 일반적으로 강섬유보강 량이 체적비로 0.5%~1.5% 정도이다. 이에 이 연구에서는 시공성을 고려하여 소량의 강섬유를 혼입하였을 경우 그 보강 효과가 주요 연구 주제이므로 강섬유보강 량을 0.75%로 하였다.

**Table 2. List of specimens and variables**

Specimen of 1st	Specimen of 2nd	Replacement ratio of recycled coarse aggregates	Use of steel fiber
HN-1	HN-2	-	×
HNF-1	HNF-2	-	○
HR-1-30	HR-2-30	30%	×
HRF-1-30	HRF-2-30	30%	○
HR-1-60	HR-2-60	60%	×
HRF-1-60	HRF-2-60	60%	○
HR-1-100	HR-2-100	100%	×
HRF-1-100	HRF-2-100	100%	○

HRF-1-30: HN: High strength concrete using natural aggregate  
 HR: High strength concrete using recycled aggregate  
 F: use of steel fiber  
 1: 1st test, 2: 2nd test  
 30: Replacement ratio of recycled coarse aggregates

**Table 3. Mixture proportion of concrete**

Specimen	Flow (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Weight(kgf/m <sup>3</sup> )						
				W	C	S	N.A	R.A	AE agent	Silica fume
HN-1	380	25	42	165	660	638.4	881.7	0	11.22	66
HR-1-30							617.3	249.6		
HR-1-60							352.7	499.2		
HR-1-100							0	832		

\*Specified compressive strength of concrete: 60MPa  
 \*Volume ratio of steel fiber: 0.75%, 58.87kgf/m<sup>3</sup>

**Table 4. Physical property of coarse aggregates**

	Natural aggregate	Recycled aggregates-1 <sup>*1</sup>	Recycled aggregates-2 <sup>*2</sup>
Density(g/cm <sup>3</sup> )	2.65, 2.67	2.50	2.59
Absorption(%)	0.60, 0.61	2.73	1.97
Fineness modulus	6.56, 6.59	6.55	6.57

Maximum size of natural aggregates and recycled aggregates: 20mm

\*1 Recycled aggregates-1: 1st strength test, beam specimens of series 1, 2, 3  
 \*2 Recycled aggregates-2: 2nd strength test, beam specimens of series 4, 5

천연골재(강자갈)와 순환골재는 입형에 차이는 있으나 순환골재는 생산과정에서 모난 형상이 상당히 개선됐었고, 표면에 붙어있는 시멘트 페이스트로 그 형상이 조금은 둥글게 변형되었기 때문에 입형의 차이가 실험결과에 별로 영향을 미치지 않은 것으로 판단하였다.

시험체의 설계기준압축강도는 60MPa로서 콘크리트 배합은 Table 3과 같으며, 시멘트 중량대비 10% 양의 실리카흄을 사용하

였다. 사용 골재의 물성은 Table 4와 같으며, 모든 굵은골재는 20mm 이하를 사용하였고, 천연굵은골재는 색석이 아닌 강자갈로서 5~10mm 골재와 10~20mm 골재를 표준입도분포에 맞게 혼합하여 사용하였다. 압축강도 시험용 공시체는 실린더 형으로 ø100X200 크기의 몰드를 사용하였다. 공시체는 각각의 시험에서 5개의 공시체를 제작하고 이를 수중에서 양생 후 28일 강도를 시험하였으며, 시험 값은 이를 평균한 것으로 하였다. 순환골재는 흡수율에 따라 Table 4와 같이 2종류의 골재를 사용하였고 표준입도분포 범위 내에 있는 것을 확인하였다. 1차 시험에서는 흡수율이 2.73%이고 밀도가 2,50g/cm<sup>3</sup>인 골재를 사용하였고, 2차 시험에서는 흡수율이 1.97%이고 밀도가 2,59g/cm<sup>3</sup>인 품질이 보다 우수한 골재를 사용하였다. 강섬유는 국내 C사의 길이 35mm, 직경 0.53mm, 형상비 66의 후크 화이버를 사용하였다.

**3.2 압축강도 시험 결과**

**3.2.1 순환골재 치환율과 품질에 따른 압축강도 저하**

1차 압축강도 시험 결과인 Table 5에서 보는 바와 같이 천연골재 콘크리트의 28일 압축강도는 평균 63.2MPa의 강도를 나타내었고, 순환골재로 30%, 60%, 100% 치환할 때에는 각각 13.3%, 28.5%, 41.9%의 압축강도 저하율을 보여 그 감소 추세가 순환골재 치환율 증가 추세와 거의 유사하게 나타났다. 이러한 압축강도 감소율은 앞에서 고찰하여 보았던 기존 실험연구 결과보다 크게 나타났는데 이는 60MPa 수준의 고강도콘크리트에 대한 강도 시험이기 때문인 것으로 사료된다.

2차 압축강도 시험 결과인 Table 6에서 보면, 순환골재 30%, 60%, 100% 치환 시 각각 15.0%, 7.6%, 11.1%의 압축강도 저하가 일어났다. 여기서 순환골재 치환율 30%인 HR-2-30 시험체의 압축강도가 상당히 낮게 측정되었다. 일반적으로 순환골재 치환량이 증가함에 따라서 압축강도 저하율이 증가될 것

**Table 5. Comparison of compressive strength-1(1st test)**

Specimen <sup>*1</sup>	C.S <sup>*3</sup> (MPa)	Com-1 <sup>*4</sup>	Specimen <sup>*2</sup>	C.S <sup>*3</sup> (MPa)	Com-2 <sup>*4</sup>	Com-3 <sup>*5</sup>
HN-1	63.2	-	HNF-1	65.2	-	+3.2%
HR-1-30	54.8	-13.3%	HRF-1-30	56.7	-13.0%	+3.5%
HR-1-60	45.2	-28.5%	HRF-1-60	51.0	-21.8%	+12.8%
HR-1-100	36.7	-41.9%	HRF-1-100	48.6	-25.5%	+32.4%

\*1: Non-use steel fiber, \*2: Use steel fiber  
 \*3: C.S - Compressive Strength  
 \*4: Decrease rate of compressive strength by replacement ratio of recycled coarse aggregates  
 \*5: Increase rate of compressive strength by use or non-use of steel fiber

Table 6. Comparison of compressive strength-2(2nd test)

Specimen *1	C.S.*3 (MPa)	Com-1*4	Specimen *2	C.S.*3 (MPa)	Com-2*4	Com-3*5
HN-2	68.4	-	HNF-2	71.1	-	+4.0%
HR-2-30	58.1	-15.0%	HRF-2-30	72.3	+1.6%	+24.4%
HR-2-60	63.1	-7.6%	HRF-2-60	71.5	+0.5%	+13.2%
HR-2-100	60.8	-11.0%	HRF-2-100	71.6	+0.8%	+17.8%

\*1: Non-use steel fiber, \*2: Use steel fiber  
 \*3: C.S - Compressive Strength  
 \*4: Decrease rate of compressive strength by replacement ratio of recycled coarse aggregates  
 \*5: Increase rate of compressive strength by use or non-use of steel fiber

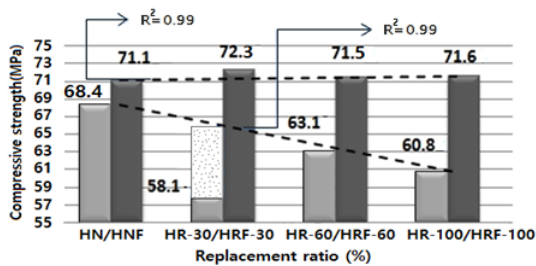


Fig. 1. Change of compressive strength reduction by recycled aggregates replacement and compressive strength enhancement by steel fiber reinforcement(2nd test)

로 보고, 또 품질이 좋은 순환골은골재를 사용했을 때에는 그 강도 저하율이 완화될 것으로 본다면, 이 압축강도 2차 시험에서 나타난 순환골은골재 치환율 30%일 때 15.0%의 과다한 강도 저하는 공시체 제작상의 오류로 판단될 수 있다. 그래서 이를 제외하면 세 시험체(HN-2, HN-2-60, HN-2-100)의 압축강도 감소 변화는 Fig. 1의 추세선과 같이 순환골은골재 치환량 증가와 유사하게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

Table 5와 Table 6의 압축강도 시험 결과를 비교에서 보면, 흡수율 3% 이내로 품질기준에 적합한 순환골재라도 품질의 차이가 압축강도에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 순환골은골재 100% 사용한 HR-1-100 시험체와 HR-2-100 시험체의 압축강도 비교에서, 품질이 좋은 순환골은골재-2를 기준하여 볼 때 흡수율은 38.6% 증가되었는데 압축강도는 39.6% 감소된 것으로 나타나 거의 역비례로 볼 수 있고, 순환골은골재-1을 기준하여 보면, 흡수율은 27.8% 감소되었는데 압축강도는 65.7% 증가되어 약 2배의 역비례로 볼 수 있다. 또한 압축강도 감소율로 보면, 위에서 언급한 바와 같이 흡수율이 2.73%인 순환골은골재-1을 사용했을 때에는 60% 치환 시 28.5%, 100% 치환 시 41.9%의 강도 감소가 나타났다. 그러나 흡수율이 1.97%로 보다 우수한 품질의 순환골은골재-2를

사용했을 때에는 60% 치환 시 7.6%, 100% 치환 시 11.0%의 강도 감소를 보여 거의 1/4 수준으로 압축강도 감소 비율이 현격히 축소되었음을 알 수 있다. 이러한 시험 결과로 볼 때 낮은 흡수율의 순환골은골재 사용이 고강도콘크리트에서 상당히 중요한 것으로 사료된다.

### 3.2.2 압축강도에 대한 강섬유 보강 효과

앞에서 언급한 바와 같이 일반적으로 콘크리트에서 강섬유 보강은 압축강도를 증가시키는 하나 그 증가율이 어느 정도라고 구체적으로 판단하기는 어렵다. 또한 강섬유 혼입상태도 조건에 따라 상당히 유동적일 수 있으며, 강섬유보강의 매카니즘도 분명히 밝혀지고 있지는 않다. 강섬유 혼입율이 1.5%를 초과할 때에는 혼합 시 강섬유가 뭉치는 경우가 발생하여 오히려 역효과가 나타나는 것으로 알려졌다. 그렇지만 콘크리트 강도 증진에 대한 강섬유보강 효과는 상당한 것으로 인정된다. Fanella and Naaman(1985), Ezeldin and Balaguru(1997), Kang and Ryu(2011)의 제안식에 따르면 강섬유보강 콘크리트의 압축강도( $f_{cf}$ )는 무보강 콘크리트 강도( $f_{co}$ )에 강섬유 혼입 부피비( $V_f$ )와 강섬유의 형상비( $l_f/d_f$ )로 만들어진 섬유보강지수  $RI = V_f(l_f/d_f)$ 의 값에 따라서 식 (1)과 같이 증가되는 것으로 제안되었다. 여기서 증가계수  $\alpha$ 는 연구자에 따라서 각각 1.9, 3.5, 1.7, 8로 제시하였다. 또 Song and Hwang(2004)은 식 (2)와 같은 제안식을 발표하였고, Lim and Hong(2016)은 식 (3)과 같이 강섬유보강 콘크리트의 압축강도를 무보강 콘크리트의 1.1배로 제시하였다.

$$f_{cf} = f_{co} + \alpha(RI) \tag{1}$$

$$f_{cf} = 85 + 15.12V_f - 4.7V_f^2 \tag{2}$$

$$f_{cf} = 1.1f_{co} \tag{3}$$

1, 2차 압축강도 시험 결과인 Table 5와 Table 6에서, 공시체 제작 오류로 판정할 수 있는 순환골은골재 30% 치환된 HR-2-30 시험체를 제외하면 순환골재의 사용량이 많아질수록 강섬유의 보강효과가 커지는 것으로 나타났다. 천연골재콘크리트에 대한 강섬유 보강 효과는 3.2%와 4.0%의 압축강도 증가를 보여 그 효과가 작은 반면, 순환골재로 60% 치환한 시험체들은 12.8%와 13.2%, 100% 치환한 시험체는 32.4%와 17.8%의 압축강도 증가를 보였다. 이러한 압축강도 증진 효과로 보면, 순환골재를 다량 사용함으로써

써 취약성이 두드러지게 나타나는 순환굽은골재와 시멘트 페이스트 계면에서 강섬유의 브리지(격쇠)작용이 상당히 유효하게 작용한 것으로 사료된다. 즉, 취약성이 더욱 두드러지게 나타나는 순환굽은골재 치환율이 큰 콘크리트에서 강섬유의 브릿지 작용 효과가 크게 돋보인 것으로 사료된다.

또한 Table 6과 Fig. 10에서 보는 바와 같이 고품질의 순환굽은골재로 30%, 60%, 100% 치환한 시험체들의 압축강도가 강섬유 보강으로 각각 72.3MPa, 71.5MPa, 71.6MPa로 나타났다. 이는 천연 골재 콘크리트의 압축강도 68.4MPa에 비해서도 강도가 감소되지 않고 오히려 각각 5.7%, 4.6%, 4.8%의 강도 증진을 보인 것이다. 이는 매우 주목할 만한 현상으로서, 품질기준에 적합한 순환골재 일지라도 낮은 품질의 순환굽은골재를 사용하였을 때에는, 60% 이상 치환 시 강도 저하가 크게 나타나 이를 강섬유 보강으로 회복시킬 수 없는 것으로 보인다. 그러나 고품질의 순환굽은골재를 사용하였을 때에는 60% 이상 순환굽은골재를 사용하였을지라도 강도 저하 폭이 크게 감소되어서 이를 체적비 0.75%의 적은 양의 강섬유 보강으로도 회복시킬 수 있음을 보여준다 하겠다.

따라서 이 시험 결과에서는 40MPa~60MPa 수준의 고강도콘크리트를 강섬유로 보강함으로써 순환굽은골재를 100% 사용했을지라도 그 감소된 압축강도가 완전히 회복되는 것이 가능할 수 있음을 보여 주고 있다. 이러한 압축강도의 완전한 회복은 강섬유 보강과 우수한 품질의 순환굽은골재 사용을 병용함으로써 얻어질 수 있는 것으로 사료된다.

#### 4. 강섬유보강 순환굽은골재 고강도콘크리트 보의 전단강도 실험

##### 4.1 실험 계획 및 실험체 제작

앞에서 언급한 바와 같이 콘크리트는 기본적으로 압축강도와 전단강도에 대한 강도특성이 중요하다. 이에 이 실험은 순환굽은골재를 사용한 고강도콘크리트 보의 전단강도에 대한 실험으로서 순환굽은골재 사용량에 따라 보의 전단강도가 어떠한 변화로 저하되는가를 알아보고, 이러한 전단강도 저하를 강섬유보강으로 어느 정도 회복시키고 개선시키는가를 규명하기 위한 것이다. 이를 위해 전단력이 보 거동 특성을 지배하는 짧은 보와 중간 보를 전단 파괴 되도록 제작하여 실험하였다. 주요 실험 데이터는 최대 재하하중과 보 중앙점 처짐으로서 로드 셀과 변위계(L.V.D.T)로 계측하였고, 인장철근과 콘크리트 표면의 변형은 계측치 않았다.

보 실험체들은 Table 7과 같이 순환굽은골재 치환율, 강섬유

보강 유무, 전단경간비(a/d)를 주요 변수로 하여 5개의 시리즈로 계획하였다. 순환골재 치환율은 0%, 30%, 60%, 100% 4종류로 하였고, 강섬유 보강은 콘크리트 체적에 대하여 0.75% 양을 혼입하는 것으로 모든 보강 실험체에 동일하게 하였다. 콘크리트 배합은 재료시험과 같이 Table 3과 같고, 설계기준압축강도는 60MPa로 하였다. 보의 인장철근은 SD 400의 D16과 D19를 사용하였고 스테리얼 보강은 하지 않았다. 보 실험체의 단면과 치수는 Fig. 2와 Fig. 3과 같다. 시리즈 1, 2, 3 실험체들의 단면 크기는 150(b)×200(D)(mm), 지점간 거리(L)는 750mm, 전단경간비(a/d)는 2이며, 시리즈 4, 5 실험체들의 단면 크기는 175(b)×250(D)(mm), 지점간 거리는 1600(L)mm, 전단경간비(a/d)는 3.9로 계획하였다.

Table 7. List of beam specimens test

Specimen	Replacement ratio of recycled coarse aggregates	Steel fiber reinforcing	Tension bars
Series 1	*2HN-D16	0%	SD400 2-D16 ( $\rho_w=0.0164\%$ )
	2HR-30-D16	30%	
	2HR-60-D16	60%	
	2HR-100-D16	100%	
Series 2	2HNF-D16	0%	SD400 2-D16 ( $\rho_w=0.0164\%$ )
	2HRF-30-D16	30%	
	2HRF-100-D16	100%	
Series 3	*2HN-D19	0%	SD400 2-D19 ( $\rho_w=0.0238\%$ )
	2HNF-D19	0%	
	2HRF-60-D19	60%	
	2HRF-100-D19	100%	
Series 4	*4HN-D19	0%	SD400 6-D19 ( $\rho_w=0.0529\%$ )
	4HR-30-D19	30%	
	4HR-60-D19	60%	
Series 5	4HNF-D19	0%	SD400 6-D19 ( $\rho_w=0.0529\%$ )
	4HRF-30-D19	30%	
	4HRF-60-D19	60%	
	4HRF-100-D19	100%	

\* Standard specimen made of natural coarse aggregates and non-reinforced by steel fiber

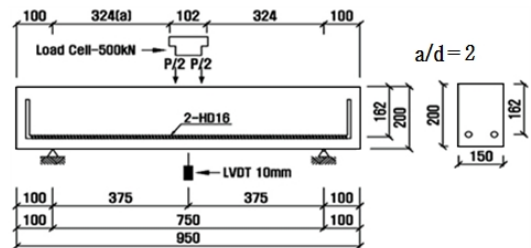


Fig. 2. Specimen size and loading position of series 1, 2, 3

제작된 실험체들의 상세 내용은 Table 7과 같다. 실험체들은 각기 2개씩 총 42개(기준실험체 3종류 포함)를 제작하였다. 순환 균은골재와 천연균은골재는 재료시험과 동일한 것을 사용하였으며, 시리즈 1, 2, 3 실험체들은 순환균은골재-1을 사용하였고, 시리즈 4, 5 실험체들은 보다 품질이 좋은 순환균은골재-2를 사용하였다. 시험체의 세팅은 단순지지로 하였으며, 실험은 U.T.M., 반력 프레임과 액추에이터를 사용하여 4점 가력하였다.

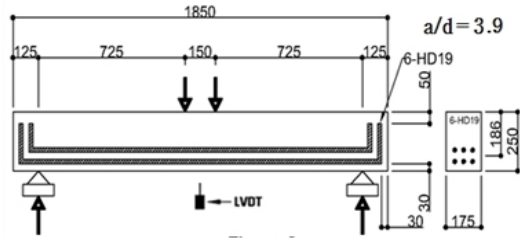


Fig. 3. Specimen size and loading position of series 4, 5

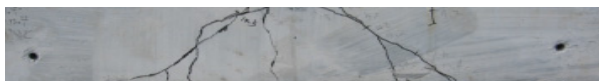
## 4.2 보 전단실험 결과 및 분석

### 4.2.1 파괴상황

#### (1) 전단경간비 2인 시리즈 1, 2, 3 실험체

강섬유를 보강하지 않은 시험체와 강섬유를 보강한 시험체 모두 초기 휨균열이 시험체 중앙 하부로부터 발생하였으며, 순환골재의 치환률의 변화와 초기 균열강도와의 관계는 잘 나타나지 않았다. Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6는 시리즈 1, 2, 3 실험체들의 종국파괴 상황이다. 전단경간비( $a/d$ ) 2인 실험체들에서, 강섬유로 보강되지 않은 시리즈 1 실험체들은 보 중앙부의 휨균열 이후 곧 하중점과 지점부를 잇는 대각선 전단-압축 균열이 크게 확장되면서 전단파괴에 이르렀다.

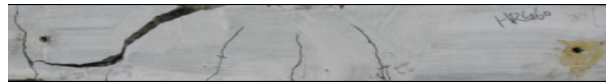
그러나 강섬유로 보강된 시리즈 2 실험체들(인장철근 2-D16 사용)은 휨균열 일부가 사인장 균열로 진행되었지만 강섬유 보강 효과로 종국에서는 보 중앙부에서 휨파괴로 나타났다. 휨인장 보강이 강화된 시리즈 3 실험체들(2-D19 사용)은 보 중앙부에서 많은 휨균열들이 발생한 후 사인장 균열의 진행과 함께 지점 부근과 하중점을 잇는 대각선 균열이 확장되면서 종국에 가서는 휨-전단 파괴로 나타났다.



(a) 2HN-D16



(b) 2HR-30-D16



(c) 2HR-60-D16

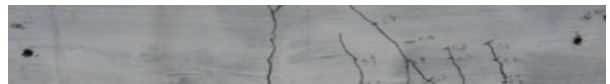


(d) 2HR-100-D16

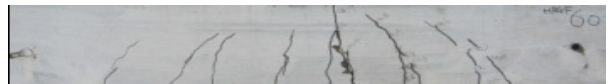
Fig. 4. Failure mode of series 1 specimens,  $a/d=2$



(a) 2HNF-D16



(b) 2HRF-30-D16

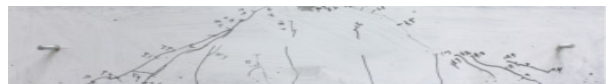


(c) 2HRF-60-D16



(d) 2HR100-D16

Fig. 5. Failure mode of series 2 specimens,  $a/d=2$



(a) 2HN-D19 specimen



(b) 2HNF-D19 specimen



(c) 2HRF-30-D19 specimen



(d) 2HRF-60-D19 specimen



(e) 2HRF-100-D19 specimen

Fig. 6. Failure mode of series 3 specimens

#### (2) 전단경간비 3.9인 시리즈 4, 5 실험체

Fig. 7은 시리즈 4, 5 실험체들의 종국파괴 상황(보의 1/2 스팬)



을 비교한 것이다. 전단경간비(a/d) 3.9인 실험체들에서, 강섬유로 보강되지 않은 시리즈 4 실험체들은 휨균열에 이어서 전형적인 사인장 균열들이 나타나고 이중 1개가 주된 대각 인장균열로 넓어지면서 가력점 압축부까지 연장되는 급격한 사인장 전단파괴가 나타났다. 이 때 지점 부근에서는 주철근의 부착파괴가 동반되었다. 그러나 강섬유로 보강된 시리즈 5 실험체들에서는 더 많은 휨균열과 사인장균열들이 나타났고 급격한 사인장 전단파괴가 상당히 지연되는 모습으로 나타났다.

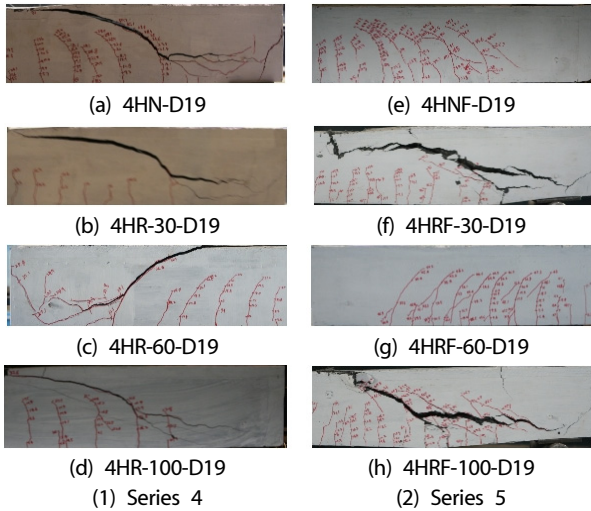


Fig. 7. Failure mode of series 4, 5 specimen, a/d=3.9

#### 4.2.2 전단강도 비교와 강섬유 보강 효과

##### (1) 전단경간비 2인 시리즈 1, 2, 3 실험체

보의 전단강도에 대한 실험결과는 Table 8과 같다. Fig. 8은 전단경간비(a/d)가 2인 짧은 보 시리즈 1, 2, 3 실험체들의 전단강도변화를 비교한 것이고, Fig. 9는 전단경간비(a/d)가 3.9인 중간 보 시리즈 4, 5 실험체들의 전단강도 변화를 비교한 것이다. Table 8과 Fig. 8에서 보면, 강섬유가 보강되지 않은 짧은 보인 시리즈 1 실험체들은 순환골재의 치환율에 거의 상관없이 천연골재를 사용한 기준 실험체(HN)에 비하여 전단강도가 33.6%~35.6% 급격히 저하된 것으로 나타났다. 이에 비하여 강섬유로 보강된 동일 조건의 시리즈 2 실험체들에서는 전단파괴 되지 않고 휨파괴되었다. 단순히 최대하중을 비교하면 순환골재 60% 치환 시 강섬유 보강으로 84% 향상되었고, 천연골재 무보강 실험체에 비해서는 18.9% 향상되었다. 그러나 파괴 양상이 다르므로 전단강도가 어느 정도 향상되었는지는 판단할 수 없다.

시리즈 3 실험체는 이러한 휨파괴를 방지하기 위하여 횡인장

철근을 D16에서 D19로 변경하여 인장철근비가 1.45배 증가된 것이다. 따라서 시리즈 1 실험체와 시리즈 3 실험체의 실험결과를 단순 비교는 할 수 없으나 강섬유보강의 효과를 개략적으로 판단할 수는 있다. 시리즈 3 실험체는 강섬유보강된 것으로서 순환골재 60%와 100% 치환 시 시리즈 1 실험체 보다 전단강도가 대략 130% 증가되었고, 천연골재만을 사용한 실험체 2HN-D16에 비해서는 50% 정도 전단강도가 향상된 것으로 나타났다.

또한 시리즈 3의 강섬유보강된 실험체들의 최대 전단내력이 순환골재 치환율과 거의 무관하게 3% 이내의 범위 내로 서로 유사하게 나타났고, 천연골재만을 사용한 강섬유보강 실험체 2HNF-D19와 8% 정도의 작은 차이를 보였다. 이는 주목된다.

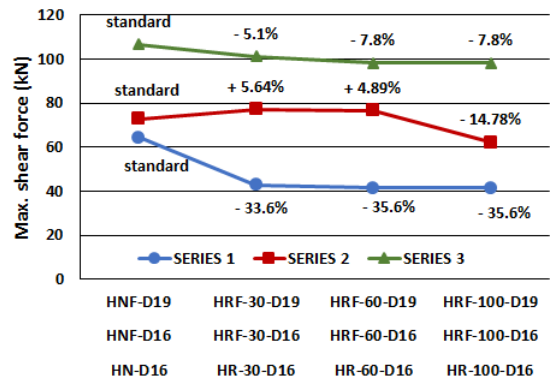


Fig. 8. Comparison of ultimate shear force for specimens of series 1, 2, 3, a/d=2

##### (2) 전단경간비 3.9인 시리즈 4, 5 실험체

전단경간비(a/d)가 3.9인 중간 보 시리즈 4 실험체들에서는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 순환골재 치환율에 따른 전단강도 감소가 8.3%~20.4%로 보다 완만히 나타났다. 이러한 전단강도 변화의 차이는 주로 전단경간비(a/d)가 2.0인 짧은 보와 3.9인 중간 보의 전단저항 매카니즘과 거동의 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

강섬유로 보강되지 않은 시리즈 4 실험체에서, 순환골재 치환율 60% 이내에서는 천연골재만을 사용한 기준 실험체에 비하여 10% 이내의 내력 감소를 보여 전단내력의 저하가 크지 않은 것으로 나타났다. 또 강섬유로 보강된 중간 보 시리즈 5 실험체에서 보면, 순환골재 실험체들은 천연골재만을 사용한 기준 실험체의 전단강도 보다 모두 41%~47% 정도 대폭 향상되었다. 그리고 시리즈 3 실험체들에 보여진 현상과 같이 강섬유로 보강한

모든 실험체들의 최대 전단내력이 순환골은골재 치환율과 거의 무관하게 4% 이내의 범위 내로 서로 유사하게 나타났다.

천연골재 만을 사용한 실험체 4HN-D19와 4HNF-D19는 강섬유보강 유무로 구별되는데 강섬유보강 효과로 46.9%의 강도 증진 효과가 나타났다. 또한 순환골은골재 100% 치환한 실험체 4HR-100-D19와 4HRF-100-D19 역시 강섬유보강 유무로 구별되는데 이 때는 강섬유보강 효과가 77%의 강도 증진 효과가 나타났다. 이러한 결과로 보면 강섬유보강 효과가 순환골은골재 사용시에 더 크게 나타나는 것으로 추정될 수 있다.

또 천연골재 만을 사용하고 무보강의 4HN-D19 실험체를 기준 하여 볼 때, 4HR-100-D19 실험체는 순환골은골재 100% 사용으로 20.4% 전단강도가 감소하였으나 4HRF-100-D19 실험체는 강섬유보강으로 감소된 전단강도 20.4%가 회복되었을 뿐만 아니라 전단강도가 41% 더 향상된 것으로 나타났다. 이러한 실험 결과는 강섬유 보강이 순환골은골재 사용에 따른 전단강도 저하 현상의 회복뿐만 아니라 그 이상으로 전단성능을 향상시키는 우수한 보강 효과가 있는 것으로 사료된다.

전단경간비(a/d)가 2.0인 시리즈 1, 2, 3 실험체는 품질기준 범위 내에서 품질이 낮은 순환골은골재-1을 사용하였고 전단경간비(a/d)가 3.9인 시리즈 4, 5 실험체는 품질이 우수한 순환골은골재-2를 사용하였으나 이 연구에서는 이를 확인할 실험이 수행되지 않아서 이 품질의 차이가 어느 정도 영향을 미쳤는지를 가늠할 수는 없었다.

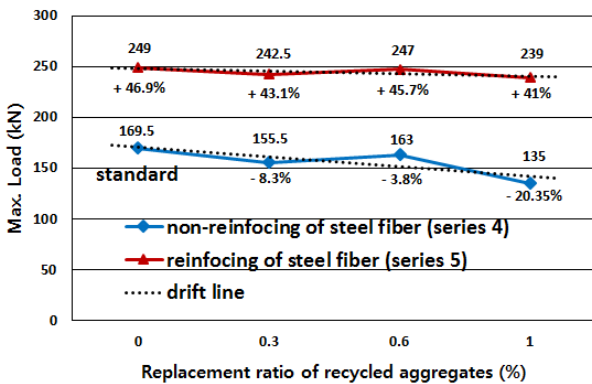


Fig. 9. Comparison of max. load(P) for series 4, 5 specimens, a/d=3.9

**(3) 최대 강도 이후의 연성적 거동**

Fig. 10은 시리즈 1, 2, 3 실험체들의 하중-처짐 관계곡선이다.

Fig. 10-(a)에서 보면, 보의 최고 강도 이후의 전단거동이 순환골은골재 사용으로 매우 취성적으로 변했다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 순환골은골재 사용에 따른 압축강도의 감소와 순환골재에 부착된 모르타르의 균열로 골재 맞물림 작용이 약화됨으로써 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 10-(b), (c)에서 보면, 강섬유 보강 효과로 이러한 보의 전단 거동이 상당히 연성적으로 개선되었음을 알 수 있다.

**4.3 실험 결과와 전단강도 예측식 비교**

강섬유보강 콘크리트를 사용한 RC 보의 전단강도 예측을 위한 제안식들이 지금까지 많이 발표되어 왔다. 그 중 많은 논문에 인용되는 것으로 Sharma(1986)가 제안한 식 (4), Narayanan and Darwish (1987)가 제안한 식 (5) 등이 있으며, 국내 연구자가 제안한 것으로는 Kwak et al.(2002)이 제안한 식 (6), Oh and Kim(2008)이 제안한 식 (7) 등이 있다.

$$v_u = kf_t \left(\frac{d}{a}\right)^{0.25} \tag{4}$$

$$v_u = e \left[ 0.24f_{sp} + 80\rho_w \frac{d}{a} \right] + 0.41\tau F_1 \tag{5}$$

$$v_u = 3.7ef_{st}^{\frac{2}{3}} \left(\rho_w \frac{d}{a}\right)^{\frac{1}{3}} + 0.8(0.41\tau F_1) \tag{6}$$

$$v_u = (0.2e + 0.25F_1) \sqrt{f_{ck}} + 75\rho_w \frac{d}{a} \tag{7}$$

특별히 고강도콘크리트 보 실험을 통하여 제안한 것으로는 Ashour et al.(1992)가 제안한 식 (8-1, 8-2), Karl et al.(2010)이 제안한 식 (9) 등이 있다. Ashour의 식 (8-1, 8-2)은 Zsutty(1971)가 제안한 일반콘크리트에 대한 식 (10-1, 10-2)을 수정한 것이다. 현행 설계기준 KBC에서는 철근콘크리트 보의 전단강도를 식 (11-1, 11-2)로 산정한다.

$$v_u = (2.11 \sqrt[3]{f_{ck}} + 7F_1) \left(\rho_w \frac{d}{a}\right)^{0.333} \tag{8-1}$$

for  $a/d > 2.5$

$$v_u = (2.11 \sqrt[3]{f_{ck}} + 7F_1) \left(\rho_w \frac{d}{a}\right)^{0.333} \frac{2.5}{a/d} + v_b \left(2.5 - \frac{a}{d}\right) \tag{8-2}$$

for  $a/d < 2.5$

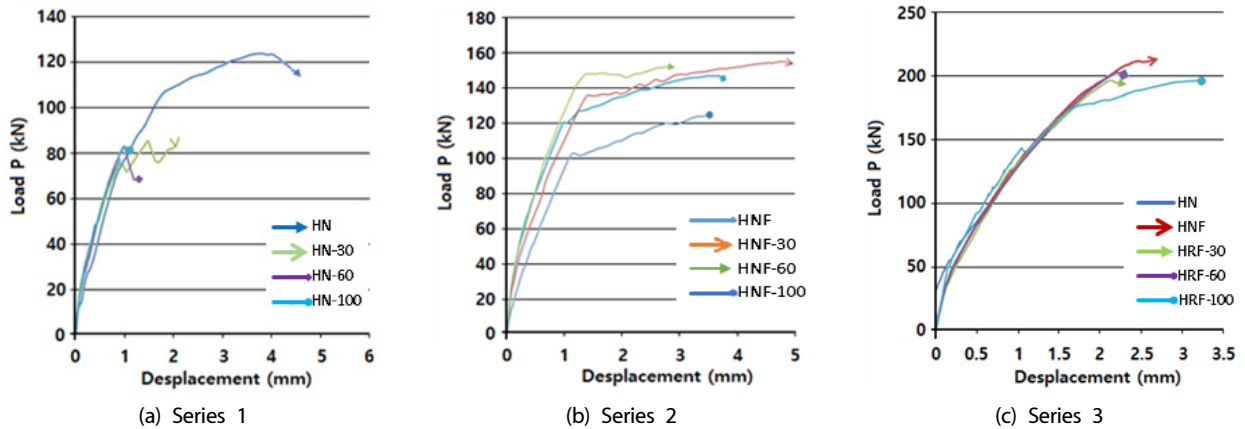


Fig. 10. Comparison of load-displacement relation curves for beam specimens of series 1, 2, 3, a/d=2

Table 8. Ultimate shear force comparison of test results with theoretical values

Specimen	(1) (%)	(2)	(3) (MPa)	(4)	Test results			(8) Ashour et al.		(9) Oh and Kim		(10) Karl et al.		Failure mode (11)	
					(5) exp. $F_{su}$ (kN)	(6) (%)	(7) KBC (kN)	the. $F_{su}$ (kN) *2	the.-exp. exp. (%)	the. $F_{su}$ (kN) *2	the.-exp. exp. (%)	the. $F_{su}$ (kN) *2	the.-exp. exp. (%)		
Series 1	*1 2HN-D16	0%	X	63.2	0.0164	64.4	-	34.4	53.0	-17.7%	63.2	-1.9%	58.6	+9.0%	C-SF
	2HR-30-D16	30%	X	54.8	0.0164	42.7	-33.0%	32.3	50.5	+18.3%	59.9	+40.3%	55.9	+30.9%	C-SF
	2HR-60-D16	60%	X	45.2	0.0164	41.5	-35.6%	29.6	47.4	+14.2%	55.8	+34.5%	52.4	+26.3%	C-SF
	2HR-100-D16	100%	X	36.7	0.0164	41.4	-35.6%	27.1	44.2	+6.8%	51.7	+27.9%	48.9	+18.1%	C-SF
Series 2	2HNF-D16	0%	O	65.2	0.0164	72.9	+13.2%	34.9	90.0	+23.5%	88.3	+21.1%	92.7	+27.2%	FF
	2HRF-30-D16	30%	O	56.7	0.0164	77.1	+19.7%	32.8	87.5	+13.5%	83.3	+8.0%	90.0	+16.7%	FF
	2HRF-60-D16	60%	O	51.1	0.0164	76.5	+18.9%	31.3	86.0	+12.4%	79.9	+4.4%	88.1	+15.2%	FF
	2HRF-100-D16	100%	O	48.6	0.0164	62.2	-3.4%	30.6	85.2	-37.0%	78.3	+25.9%	87.2	+40.2%	FF
Series 3	*1 2HN-D19	0%	X	63.2	0.0238	57.5	-	35.7	59.4	+3.3%	69.3	+20.5%	65.7	+14.3%	C-SF
	2HNF-D19	0%	O	65.2	0.0238	106.5	+85.2%	36.1	98.8	-7.2%	94.1	-11.6%	99.6	-1.1%	F-SF
	2HRF-30-D19	30%	O	56.7	0.0238	98.2	+70.8%	34.0	96.1	-2.1%	89.2	-9.2%	96.6	-3.0%	F-SF
	2HRF-60-D19	60%	O	51.1	0.0238	101.1	+75.8%	32.6	94.2	-6.8%	85.8	-15.1%	95.3	-5.7%	F-SF
	2HRF-100-D19	100%	O	48.6	0.0238	98.2	+70.8%	31.9	93.3	-5.0%	84.2	-14.3%	93.4	-4.9%	F-SF
Series 4	*1 4HN-D19	0%	X	68.4	0.0529	84.8	-	50.9	69.0	-18.6%	87.0	-2.6%	95.3	+12.4%	F-SF
	4HR-30-D19	30%	X	58.1	0.0529	77.8	-8.3%	47.5	65.3	-16.1%	82.8	-6.4%	90.3	+16.1%	F-SF
	4HR-60-D19	60%	X	63.1	0.0529	81.5	-3.8%	49.2	67.1	-17.7%	84.9	+4.2%	92.8	+13.9%	F-SF
	4HR-100-D19	100%	X	60.8	0.0529	67.5	-20.4%	48.4	66.3	-1.0%	83.9	+25.2%	91.7	+35.9%	F-SF
Series 5	4HNF-D19	0%	O	71.1	0.0529	124.5	+46.9%	51.7	94.8	-23.9%	122.1	-1.9%	141.5	+13.7%	F-SF
	4HRF-30-D19	30%	O	72.3	0.0529	121.3	+43.6%	52.2	95.2	-21.5%	122.9	+1.3%	142.0	+17.1%	F-SF
	4HRF-60-D19	60%	O	71.5	0.0529	123.5	+45.7%	51.8	94.9	-28.6%	122.4	-0.9%	141.7	+14.7%	F-SF
	4HRF-100-D19	100%	O	71.6	0.0529	119.5	+41.0%	51.9	95.0	-20.5%	122.4	+2.4%	141.7	+22.2%	F-SF

(1): Replacement ratio of recycled coarse aggregates, (%)

(2): Steel fiber reinforcement or not, (O, X)

(3): Compressive strength of concrete, (MPa)

(4): Ratio of tensile reinforcement, use SD 400

(5): Experimental value of ultimate shear force, exp.  $F_{su}$ , (kN)

(6): Ratio of increase or decrease of max. shear force to that of standard specimen using only natural coarse aggregate, (%)

(7): Max. shear force calculated by KBC (Korean Building Code), (kN)

(8): Theoretical value of ultimate shear force calculated by Oh and Kim (2008), formula (7), (kN)

(9): Theoretical value of ultimate shear force calculated by Ashour et al. (1992), formula (8), (kN)

(10): Theoretical value of ultimate shear force calculated by Karl et al. (2010), formula (9), (kN)

(11): C-SF : Compressive - Shear Failure

FF : Flexural Failure

F-SF : Flexural - Shear Failure

\*1: Standard specimen made with only natural coarse aggregates and non-reinforced by steel fiber

(2): Steel fiber reinforcement or not, (O, X)

(4): Ratio of tensile reinforcement, use SD 400

(6): Ratio of increase or decrease of max. shear force to that of standard specimen using only natural coarse aggregate, (%)

(8): Theoretical value of ultimate shear force calculated by Ashour et al. (1992), formula (8), (kN)

(9): Theoretical value of ultimate shear force calculated by Oh and Kim (2008), formula (7), (kN)

(10): Theoretical value of ultimate shear force calculated by Karl et al. (2010), formula (9), (kN)

(11): C-SF : Compressive - Shear Failure

FF : Flexural Failure

F-SF : Flexural - Shear Failure

\*2: the.  $F_{su}$  : Ultimate shear force calculated by prediction formula, (kN)

$$v_u = 3\left(\frac{d}{a}\rho_w f_{ck}\right)^{\frac{1}{3}} + 0.41\tau_u F_1 \quad (9)$$

$$v_c = 2.17(2.5\frac{d}{a})(f_{ck}\rho_w\frac{d}{a})^{\frac{1}{3}}, a/d < 2.5 \quad (10-1)$$

$$v_c = 2.17(f_{ck}\rho_w\frac{d}{a})^{\frac{1}{3}}, a/d \geq 2.5 \quad (10-2)$$

$$v_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_{ck}} \quad (11-1)$$

$$v_c = (0.16\sqrt{f_{ck}} + 17.6\rho_w\frac{V_u d}{M_u}) \quad (11-2)$$

여기서, 식 (4)에서  $f_t$ 는 콘크리트 인장강도,  $k$ 는 인장시험방법에 따른 계수,  $d$ 는 보의 유효 층,  $a$ 는 전단경간의 길이, 식 (5)에서  $e$ 는 아치작용을 고려한 무차원 계수이며, Kwak의 식 (6)에서  $e=1$  ( $a/d > 3.4$ ), 또는  $e=3.4 d/a$  ( $a/d \leq 3.4$ ) 이고, Oh의 식 (5)에서는  $a/d > 2.5$  때  $e=1$ ,  $a/d \leq 2.5$  때  $e=2.5 d/a \leq 3.0$  이다.  $f_{st}$ 는 실린더 공시체의 쪼갠인장강도,  $\rho_w$ 는 인장철근비,  $\tau$ 는 섬유의 부착강도로서 직선형일 때 4.15MPa, 절곡형(crimped)일 때 5.12MPa, 갈고리형(hooked)일 때는 6.80MPa로 제안되었다.  $F_1$ 은 섬유계수로서  $l_f/d_f \cdot V_f \cdot \alpha$ ,  $l_f$ 는 섬유길이,  $d_f$ 는 섬유직경,  $V_f$ 는 섬유 혼입율,  $\alpha$ 는 부착계수로서 섬유형상에 따라 갈고리형 1.0, 절곡형 0.75, 직선형은 0.5이다.

이 연구에서는 Table 8과 같이, 실험에서 계측된 최대 전단력 값을 Ashour et al.(1992)의 제안식 (8-1, 8-2), Oh and Kim(2008)의 제안식 (7), Karl et al.(2010)이 제안한 식 (9)와 설계기준 KBC 식 (11-1)으로 계산된 값과 비교하였다.

그러나 이러한 제안식들은 순환굵은골재 사용에 따른 전단강도 저하를 충분히 고려하지 않은 것이다. 따라서 이러한 비교는 실험 결과가 이론적 제안식 값과 어느 정도 근접한가를 판단하고 추후 순환굵은골재 콘크리트의 전단강도 예측식 제안에 활용될 수 있도록 하기 위한 것이다. 여기서 보면 3개의 제안식으로 산정된 값들이 모두 일부 실험체를 제외하고는 대부분의 실험체들에서 실험값의  $\pm 25\%$ 의 범위 내에 있었다. 이를 보면 적용한 제안식들이 상당히 근사하게 보의 전단강도를 예측하는 것으로 판단된다.

특히 Ashour et al.(1992)의 제안식은 시리즈 3 실험체에  $\pm 10\%$  이내의 값을 보였고, Oh and Kim(2008)의 제안식은 시리즈 5 실험체에서  $\pm 3\%$  이내의 값을 보였으며, Karl et al.(2010)의 제안식

은 시리즈 3의 강섬유보강 실험체에서  $-6\%$  이내의 값을 보였다. 그러나 이러한 예측 제안식들이 설계에 실질적으로 적용되기 위해서는 보정 연구가 더 필요할 것으로 사료된다. 앞에서 언급한 바와 같이 이러한 전단강도 예측 제안식들은 천연굵은골재를 사용한 콘크리트에 대한 것이므로 순환굵은골재를 다량 사용한 콘크리트에 대해서는 감소된 압축강도를 대입하였다 하여도 상당한 차이가 있을 수 있다. 따라서 순환굵은골재의 치환율을 고려한 전단강도 예측 제안식이 제시되어야 할 것이다.

## 5. 결론

앞으로 콘크리트의 골재공급이 지속가능한 자원순환형 시스템으로 이루어져야 하며, 콘크리트용 천연골재 공급으로 야기되는 자연환경의 파괴가 방지되어야 할 것이다. 이를 위해서 40MPa 이상의 고강도콘크리트가 상용화되는 시대에는 일반 콘크리트 뿐만 아니라 고강도 콘크리트용 골재도 60% 이상 순환굵은골재로 대체되어야 할 것이다. 그러나 우선적으로 순환굵은골재를 다량 사용함으로 발생하는 콘크리트의 강도 저하 문제와 급격한 취성 파괴와 같은 거동 특성상의 문제가 해결되어야 한다.

이에 이 연구에서는 그 해결 방안으로서 강섬유 보강이 가능할 것인지와 그 효과를 콘크리트 재료시험과 보 실험을 통하여 규명하고자 하였다. 순환굵은골재로 30%, 60%, 100% 대체 사용한 설계기준압축강도 60MPa 수준의 고강도콘크리트에 대한 압축강도 시험과 짧은 보와 중간 보에 대한 전단파괴 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 순환굵은골재를 사용한 고강도콘크리트의 압축강도가 대체로 순환골재 치환율에 따라 감소하는 것으로 판단된다. 또한 흡수율 2.0% 이하의 품질이 우수한 순환골재를 사용했을 경우에는 순환골재를 100% 사용했을 때에도 강도 저하 폭이 상당히 축소될 것으로 사료된다.
2. 순환굵은골재 고강도콘크리트의 강도 특성에 대한 강섬유보강 효과는 상당히 우수하며, 순환굵은골재 치환율이 커질수록 그 효과의 정도가 크게 되고 연성적 능력이 크게 증진되는 것으로 판단된다. 이는 순환골재와 같이 굵은골재 표면이 취약하여 계면의 부착력이 저하되고 골재의 맞물림이 악화되는 정도가 클수록 혼입된 강섬유의 브릿지 작용 효과가 더욱 두드러지게 나타나는 것에 기인하는 것으로 사료된다.
3. 순환굵은골재 치환율이 60% 이상인 전단력이 지배적인 고강도 콘크리트 짧은 보와 중간 보에서 체적비로 0.75% 내외의 강섬

유로 보강하였을 때, 저하된 전단강도가 회복될 뿐만 아니라 천연골재 콘크리트 보다 우수한 전단거동 특성을 보일 것으로 사료된다. 이는 콘크리트 전단강도에 대한 강섬유보강 효과가 매우 우수하기 때문이며, 이러한 강섬유보강 효과가 순환골재를 다량 사용함으로써 감소된 전단강도를 상회하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 흡수율 2.0% 이하의 고품질의 순환골재 사용으로 고강도 콘크리트의 강도 저하 정도를 축소하고, 강섬유 보강을 병행하여 이러한 강도 저하를 회복시키고 거동 특성을 증진시킴으로써 순환골재를 60%에서 100%까지 사용하는 것이 가능할 수 있을 것으로 판단된다. 이로써 이러한 강섬유 보강 방법은 콘크리트용 골재 공급에 대한 지속가능한 자원순환형 시스템 구축에 기여할 것으로 사료된다.  
그러나 부착강도 시험을 포함한 보다 많은 재료시험과 구조실험을 통하여 신뢰할 수 있는 자료 축적이 요구되며, 다른 방법과 병용하는 연구도 필요 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 가톨릭관동대학교 학술연구비에 의해 지원되었음 (CKURF-201600880001).

## References

- Ashour, S.A., Hasanain, G.S., Wafa, F.F. (1992). Shear behavior of high-strength fiber-reinforced concrete beams, *ACI Structural Journal*, **89(2)**, 176-184.
- Chung, H.S., Yang, K.H., Kim, H.H. (2006). The influence of the quality and the replacement level of recycled aggregate on the mechanical properties of concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **22(6)**, 71-78 [in Korean].
- Ezeldin, S., Balaguru, P.N. (1997). Normal-and high-strength fiber-reinforced concrete under compression, *ACI Material Journal*, **94(4)**, 286-290.
- Fanella, D.A., Naaman, A.E. (1985). Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression, *ACI Journal*, **82(4)**, 475-483.
- Jang, J.K., Lee, Y.J., Cho, B.H., Kim, Y.I. (2010). Strength deterioration of high-strength concrete using recycled aggregates and effects of steel-fiber reinforcement, *The Regional Association of Architectural Institute of Korea Annual Conference of Collection Dissertations*, **6(6)**, 533-536 [in Korean].
- Kwak, Y.K., Eberhard, M.O., Kim, W.S., Kim, J. (2002). Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups, *ACI Structural Journal*, **99(4)**, 530-538.
- Kim, J.S., Shin, Y.S., Park, Y.B., Kim, J.H., Cho, C.H. (2008). A study on the structural characteristic of recycled aggregate concrete reinforced steel fiber, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **8(5)**, 35-42 [in Korean].
- Kim, Y.I., Lee, Y.K., Kim, M.S. (2008). Influence of steel fiber volume ratios on workability and strength characteristics of steel fiber reinforced high-strength concrete, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **8(3)**, 75-83 [in Korean].
- Kim, Y.S., Yun, H.D., Byun, J.B., Choi, K.S., You, Y.C., Kim, K.H. (2008). Compressive behavior of recycled coarse aggregate concrete columns under uniaxial load, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **24(4)**, 75-82 [in Korean].
- Karl, K.W., Kim, K.S., Lee, D.H., Hwang, J.H., Ju, H.J., Seo, S.Y. (2010). An experimental study on shear strength of high-strength reinforced concrete beams with steel fibers, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **26(10)**, 19-28 [in Korean].
- Karl, K.W., Hwang, J.H., Lee, D.H., Park, H.C., Kim, K.S., Choi, I.S. (2011). Shear behavior of steel fiber-reinforced concrete at crack interfaces, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **27(12)**, 31-40 [in Korean].
- Kang, S.T., Ryu, G.S. (2011). The effect of steel-fiber contents on the compressive stress-strain relation of ultra-high performance cementitious composites(UHPC), *Journal of the Korea Concrete Institute*, **23(1)**, 67-75 [in Korean].
- Kim, Y.C., Baek, S.M., Kim, W.S., Kang, Thomas H.K., Kwak, Y.K. (2014). An experimental study on flexural behavior of steel fiber reinforced concrete beams using recycled coarse, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **30(3)**, 39-48 [in Korean].
- Lee, W.S., Yun, H.D., Kim, S.W., Choi, K.S., You, Y.C., Kim, K.H. (2007). The effect of replacement ratio of recycled coarse aggregate on shear strength of reinforced concrete beams without shear reinforcement, *Journal of the Architectural*

- Institute of Korea, **23(10)**, 3–10 [in Korean].
- Lee, M.J., Yun, H.D., Kim, S.W., Choi, K.S., You, Y.C., Kim, K.H. (2008). Bond performance between reinforcing bars and recycled coarse aggregate concrete with respect to reinforcement location, Journal of the Architectural Institute of Korea, **24(8)**, 29–39 [in Korean].
- Lee, Y.J., Jang, J.K., Kim, Y.I., Lim, C.S. (2010). “Using recycled aggregates in sustainable resource circulation system concrete for environment preservation,” Spring Annual Conference, The Korean Institute of Building Construction, **10(1)**, 57–61 [in Korean].
- Lee, Y.J. (2011). Epidemiological Characteristics of High-Strength Concrete Using Recycled Aggregates and Effects of Steel-Fiber Reinforcement, Ph. D Thesis, Kwandong University [in Korean].
- Lee, B.C., Lee, J., Cho, Y.K., Jung, S.H. (2015). The strength and length change properties of recycled aggregate concrete(RAC) by compressive strength levels, The Korea Recycled Construction Resources Institute, **3(4)**, 307–312 [in Korean].
- Lee, H.H., Lee, T.W. (2016). Experimental study on mechanical properties and deformation behavior of concrete with recycled aggregates and steel fiber, Journal of the Korea Concrete Institute, **28(3)**, 257–363 [in Korean].
- Lim, W.Y., Hong, S.G. (2016). Compressive behavior of hybrid steel fiber reinforced ultra-high performance concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **28(2)**, 213–221 [in Korean].
- Narayanan, R., Darwish, I.Y.S. (1987). Use of steel fibers as shear reinforcement, ACI Structural Journal, **84(3)**, 216–227.
- Oh, Y.H. (2008). Evaluation of flexural strength for normal and high strength concrete with hooked steel fibers, Journal of the Korea Concrete Institute, **20(4)**, 531–539 [in Korean].
- Sharma, A.K. (1986). Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams, ACI Journal, **83(4)**, 624–628.
- Song, P.S., Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, Construction and Building Materials, **18(9)**, 669–673 [in Korean].
- Song, S.H., Choi, K.S., You, Y.C., Kim, K.H., Yun, H.D. (2009). Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams, Journal of the Korea Concrete Institute, **21(4)**, 431–439 [in Korean].
- Shin, J.L., Kim, W.S., Baek, S.M., Kang, Thomas H.K., Kwak, Y.K. (2015). Structural performance evaluation of steel fiber-reinforced concrete beams with recycled coarse aggregates, Journal of the Korea Concrete Institute, **27(3)**, 215–227 [in Korean].
- Shin, W.C., Lee, H.K., Baek, S.M., Kim, W.S., Kwak, Y.K. (2016). An experimental study on the minimum reinforcement ratio of high strength reinforced concrete beams according to RCA replacement ratio, Journal of the Architectural Institute of Korea, **32(10)**, 13–22 [in Korean].
- Williamson, G.R. (1974). The Effect of Steel Fiber on the Compressive Strength of Concrete, in Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, SP-44, 195–208.
- Zsutty, T.C. (1971). Shear strength prediction for separate categories of simple beam test, ACI Journal, **68(2)**, 138–143.

**순환골은골재 60% 이상 사용한 고강도 콘크리트에 대한 강섬유 보강 효과**

이 연구는 지속가능한 자원순환형 골재공급 시스템 구축에 유용한 자료 제공을 목적으로 하며, 순환골은골재를 60% 이상 100% 까지 다량 사용한 고강도 콘크리트에서 이로 인하여 나타나는 압축강도와 전단강도 저하가 강섬유 보강으로 어느 정도 회복되고 개선되는지를 재료시험과 보의 전단파괴 실험을 통하여 밝히고자 하는 것이다. 이 연구에서는 먼저 관련된 기존 실험연구 결과들을 고찰하였다. 재료시험 결과, 체적대비 0.75%의 강섬유 보강과 흡수율 2.0% 이내의 고품질 순환골은골재를 병용하였을 때, 압축강도 60MPa 수준의 고강도콘크리트의 압축강도 특성이 천연골재 수준으로 회복되고 좋은 연성 특성이 나타나는 것을 확인하였다. 또한 전단력이 보 거동을 지배하는 전단스팬비(a/d) 2와 4인 보에 대한 전단파괴 실험에서 강섬유 보강에 의한 매우 큰 전단강도 증진 효과와 연성거동 특성을 확인하였다.