



## 전단보강이 없는 순환골재 철근콘크리트 보의 전단거동에 관한 연구

이정훈<sup>1)</sup> · 김우석<sup>2)</sup> · 백승민<sup>1)</sup> · 강현구<sup>2)</sup> · 곽윤근<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>금오공과대학교 건축공학과   <sup>2)</sup>서울대학교 건축학과

### A Study on the Shear Behavior of Recycled Aggregate Reinforced Concrete Beams without Stirrups

Jung-Hoon Lee,<sup>1)</sup> Woo-Suk Kim,<sup>2)</sup> Seung-Min Baek,<sup>1)</sup> Thomas H.-K. Kang,<sup>2)</sup> and Yoon-Keun Kwak<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 730-701, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

**ABSTRACT** Little investigations have been carried out to study the shear behaviors of RC beams with recycled aggregates. So, this experiment investigates the shear performance and suggests the possible application of Recycled Concrete Aggregate (RCA) for building structures. In general, shear strength of reinforced concrete beam without stirrups is dependent on the compressive strength of concrete, the longitudinal steel ratio, and the shear span-to-depth ratio. In this study, total 28 recycled aggregate concrete beams without shear reinforcement were tested by two-point load and all beams were singly reinforced. The variables studied in this investigation are shear span-to-depth ratios ( $a/d=2, 3$  and  $4$ ), RCA replacement ratios (0, 15, 30 and 50%) and longitudinal steel ratios (0.80, 1.27 and 1.84%). The designed concrete compressive strength with a 30 MPa is used. This research will play an important role toward the establishment of the structural design standard for RCA concrete.

**Keywords** : recycled concrete aggregate (RCA), construction waste, recycling, shear strength

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

삶의 질 향상에 대한 사회적인 요구가 증가됨에 따라 다양하고 많은 시설물의 건설이 필요하게 되었으며 이에 따라 특히 골재의 수요가 급증하고 있는 실정이다. 또한 건설폐기물 매립지 부족으로 인해 야기되는 환경파괴 등의 문제는 자원 및 에너지절약 측면뿐만 아니라 환경보호 차원에서 국가적으로 해결해야 할 중요한 당면과제의 하나로 등장하고 있다. 국내 건설폐기물은 매일 10만톤 이상이 발생되며, 그 중에서 아파트의 재건축을 비롯한 노후 구조물의 철거 등으로 인해 발생하는 폐콘크리트가 60% 이상을 차지하고 있다.<sup>1)</sup> 또한 천연골재는 점점 부족해지고 있는 상태이며, 환경보호 측면에서 새로운 골재 자원의 개발이 시급히 요구된다. 이러한 이유로 순환골재는 점차 증가되는 건설폐기물의 처리공간 부족문제 및

고갈되어가는 천연골재의 대체자원으로 사용할 수 있다. 환경오염을 줄이기 위한 방안으로 천연골재의 대체자원으로 순환골재를 사용한 콘크리트에 대하여 국내·외의 여러 연구자들에 의해 과거 수년간 많은 연구가 수행되었다.<sup>2-5)</sup> 그러나, 기존의 순환골재에 관한 연구는 순환골재 콘크리트의 시공성 및 재료성능 규명에 집중되었으며, 콘크리트의 성능, 특히 강도저하가 발생되지 않는 범위에서 순환골재를 대체하여 사용하는 것에 국한되어 있는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 순환골재 철근콘크리트 보의 성능을 파악하기 위해 실험체를 제작하여 전단거동에 관한 특성 규명을 통해 앞으로의 순환골재 콘크리트의 구조물에서의 적용가능성을 제시하는 것을 연구의 주된 목적으로 한다.

### 1.2 연구의 내용 및 방법

이 연구에서는 전단보강이 없는 순환골재 철근콘크리트 보의 전단 거동을 알아보기 위하여 전단실험을 실시하였다. 실험 결과를 토대로 균열 및 파괴 양상, 전단균열강도, 극한전단강도, 기준식과의 적용성 검토, 보유전단내력 등을 분석하여, 이를 통해 순환골재 철근콘크리트 보의 전단거동 특성에 대해 연구하였다.

\*Corresponding author E-mail : ykkwak@kumoh.ac.kr

Received October 29, 2012, Revised April 24, 2013,

Accepted June 4, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

## 2. 실험

### 2.1 실험체 계획

이 연구에서는 순환골재를 사용한 전단보강이 없는 철근콘크리트 보의 전단거동의 특성을 실험적으로 규명하기 위하여 순환골재 치환율(0, 15, 30, 50%)과 전단경간비( $a/d=2, 3, 4$ ), 인장철근비( $\rho=0.80, 1.27, 1.84\%$ )를 변수로 한 28개의 실험체를 제작하였다. 실험체 일람은 Table 1에 나타난 바와 같다. 모든 실험체의 단면은  $135 \times 270$  mm

Table 1 The list of specimens

Specimen	Section (mm)		RCA replacement ratio (%)	Longitudinal bar		Shear span-to-depth ratio ( $a/d$ )	Length (mm)
	Width ( $b$ )	Depth ( $h$ )		Ratio $\rho$ (%)	Size		
N0-13-2	135	270	0	0.80	2-D13	2	1528
N15-13-2	135	270	15	0.80	2-D13	2	1528
N30-13-2	135	270	30	0.80	2-D13	2	1528
N50-13-2	135	270	50	0.80	2-D13	2	1528
N0-16-2	135	270	0	1.27	2-D16	2	1528
N15-16-2	135	270	15	1.27	2-D16	2	1528
N30-16-2	135	270	30	1.27	2-D16	2	1528
N50-16-2	135	270	50	1.27	2-D16	2	1528
N0-13-3	135	270	0	0.80	2-D13	3	1992
N15-13-3	135	270	15	0.80	2-D13	3	1992
N30-13-3	135	270	30	0.80	2-D13	3	1992
N50-13-3	135	270	50	0.80	2-D13	3	1992
N0-16-3	135	270	0	1.27	2-D16	3	1992
N15-16-3	135	270	15	1.27	2-D16	3	1992
N30-16-3	135	270	30	1.27	2-D16	3	1992
N50-16-3	135	270	50	1.27	2-D16	3	1992
N0-19-3	135	270	0	1.84	2-D19	3	1992
N15-19-3	135	270	15	1.84	2-D19	3	1992
N30-19-3	135	270	30	1.84	2-D19	3	1992
N50-19-3	135	270	50	1.84	2-D19	3	1992
N0-13-4	135	270	0	0.80	2-D13	4	2456
N15-13-4	135	270	15	0.80	2-D13	4	2456
N30-13-4	135	270	30	0.80	2-D13	4	2456
N50-13-4	135	270	50	0.80	2-D13	4	2456
N0-16-4	135	270	0	1.27	2-D16	4	2456
N15-16-4	135	270	15	1.27	2-D16	4	2456
N30-16-4	135	270	30	1.27	2-D16	4	2456
N50-16-4	135	270	50	1.27	2-D16	4	2456

N0-13-2: N → Normal strength concrete  
 0 → RCA replacement ratio (15 → 15%, 30 → 30%, 50 → 50%)  
 13 → Longitudinal bar (13 → D13, 16 → D16, 19 → D19)  
 2 → Shear span-to-depth ratio (2 →  $a/d=2$ , 3 →  $a/d=3$ , 4 →  $a/d=4$ )

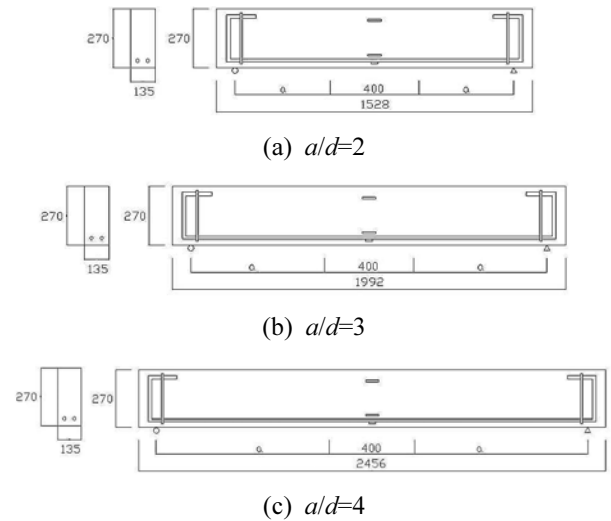


Fig. 1 Details of the specimens (unit: mm)

로 같으며, 길이는 전단경간비에 따라 1528 mm, 1992 mm, 2456 mm로 제작되었다. 전단파괴를 유도하기 위해 보의 전단보강을 위한 스티럽은 제외되었으며, 보의 주철근 최외단 50 mm에 인장철근의 간격 유지를 위해 한 개씩의 스티럽만이 설치되었다. 실험체의 상세는 Fig. 1과 같다.

### 2.2 사용 재료 및 재료특성

#### 2.2.1 시멘트

이 실험에 사용된 시멘트는 국내 S사에서 생산된 1종 보통포틀랜드시멘트로 특성은 Table 2와 같다.

#### 2.2.2 골재

잔골재는 낙동강 하천사로 입도 2.17의 것을 사용하였고, 굵은 골재는 깻자갈로 최대치수 25 mm, 입도 6.77의 것을 사용하였으며, 순환골재는 폐콘크리트를 파쇄하여 생산된 최대치수 25 mm의 골재를 사용하였다. 골재의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

#### 2.2.3 콘크리트 및 철근

이 연구에서는 순환골재 치환율 50%를 기준으로 압축 강도 30 MPa을 목표로 배합하였고 철근은 SD400 이형철근을 사용하였다. 콘크리트 타설시 순환골재치환율이 증가할수록 슬럼프가 저하하였는데 이는 순환골재에 포함된 미립분 함유량의 증가 및 골재표면에 부착되어 있는 시멘트페이스트의 높은 흡수율에 의한 것으로 판단된다. 또한 순환골재의 치환율이 증가함에 따라 공시체의 압축 강도는 각각 0.8, 6.4, 9% 감소하였으며, 쪼갬 인장강도는 11.2, 17, 18.7% 감소하였다. 콘크리트의 강도특성은 Table 4, 콘크리트 배합은 Table 5에 나타내었다.

**Table 2** Material properties of cement

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>	Specific gravity	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		
22.4	6.2	2.9	3.2	62.1	2.3	3.15	3200

**Table 3** Material properties of aggregate

Aggregate types	Weight (kg/m <sup>3</sup> )	Fineness modulus	Specific gravity	Absorption factor	Maximum size (mm)	
Fine aggregate	1529	2.17	2.56	1.51	-	
Coarse aggregate	Natural	1538	6.77	2.57	1.1	25
	Recycled	1446	6.74	2.20	5.37	25

**Table 4** Strength property of concrete

Division		RCA replacement ratio (%)			
		0	15	30	50
Compressive strength (MPa)	3 days	18.82	21.20	21.00	21.41
	7 days	24.75	26.59	27.32	25.88
	28 days	35.41	35.13	33.13	32.23
Tensile strength (MPa)	3 days	2.53	2.59	2.53	2.54
	7 days	2.83	2.79	2.80	2.86
	28 days	3.48	3.09	2.89	2.83
Flexural strength (MPa)	3 days	6.28	6.05	5.85	5.87
	7 days	6.87	6.87	6.34	6.37
	28 days	8.65	8.40	8.22	7.69
Modulus of elasticity (GPa)	28 days	29.87	29.81	29.34	29.13
Slump (mm)	Average	133.5	91.5	86.0	81.0

**Table 5** Mix design of concrete

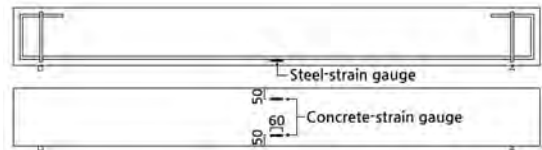
RCA replacement ratio (%)	W/C (%)	S/a (%)	Weight (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	CA	RCA
0	45.0	43.2	164.3	365	743	975.00	0
15						828.75	146.25
30						682.50	292.50
50						487.50	487.50

### 2.3 실험장치 및 실험방법

각 실험체들은 Fig. 2에서와 같이 H-150×150×7×10의 형상으로 된 가력보를 통해 2점 가력 하였다. 부재의 변형은 변형률계이지와 변위계를 설치하여 측정하였으며, 철근 변형률계이지는 인장철근 중앙부 2개소에 콘크리트



**Fig. 2** Test setup



**Fig. 3** Attaching position of strain gauge (unit: mm)

타설 전 부착하였고, 콘크리트 변형률계이지는 실험체 중앙부 상·하단에 각각 1개씩 부착하였다. 변형률계이지의 부착위치는 Fig. 3에 나타내었다.

하중의 재하는 예상중과파괴하중의 1/3까지는 일정하게 하중을 증가시키는 하중조절방식(load control)으로, 그 이후는 실험체 중앙부에 설치된 변위계의 치짐을 관찰하면서 재하하는 변위조절방식(deflection control)으로 가력하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 실험체의 균열 및 파괴양상

Fig. 4는 실험체의 균열형태를, Table 6은 실험체의 전단력 및 파괴양상을 나타낸 것이다. 실험체의 균열은 재하하중 10.54~29.40 kN 범위에서 초기 휨균열이 실험체 중앙 하부로부터 발생하였으며, 초기 휨균열이 수직으로 진행된 후 보의 중립축과 약 23~33°의 각을 이루며 사인장 균열이 나타났다. 사인장 균열이 진행되는 동안 휨균열의 폭은 증가하지 않았으며 사인장 균열의 진행이 상하로 진행이 완료된 이후에 전단경간비에 따라 파괴양상이 다르게 나타났다. 한편 순환골재를 치환함에 따라 균열폭이 다소 증가되는 경향을 보였다.

전단경간비 2에서는 사인장균열이 상하로 모두 진전된 후 사인장균열의 폭이 천천히 증가하며 최종파괴 되었으며, 전단파괴의 양상을 보였다. 순환골재 치환율이 증가함에 따라 전단강도는 control보인 N0-13-2실험체에 비하여 순환골재 치환율이 15, 30, 50%로 증가함에 따라 각각 14.5, 16.3, 22% 정도 저하되는 것으로 나타났다.

전단경간비 3에서는 경간비 2의 약 60%의 전단내력을 보였으며, 파괴 양상은 경간비 2에서와 유사하나 사인장 균열이 상하로 진행함과 동시에 균열폭이 급진적으로 증

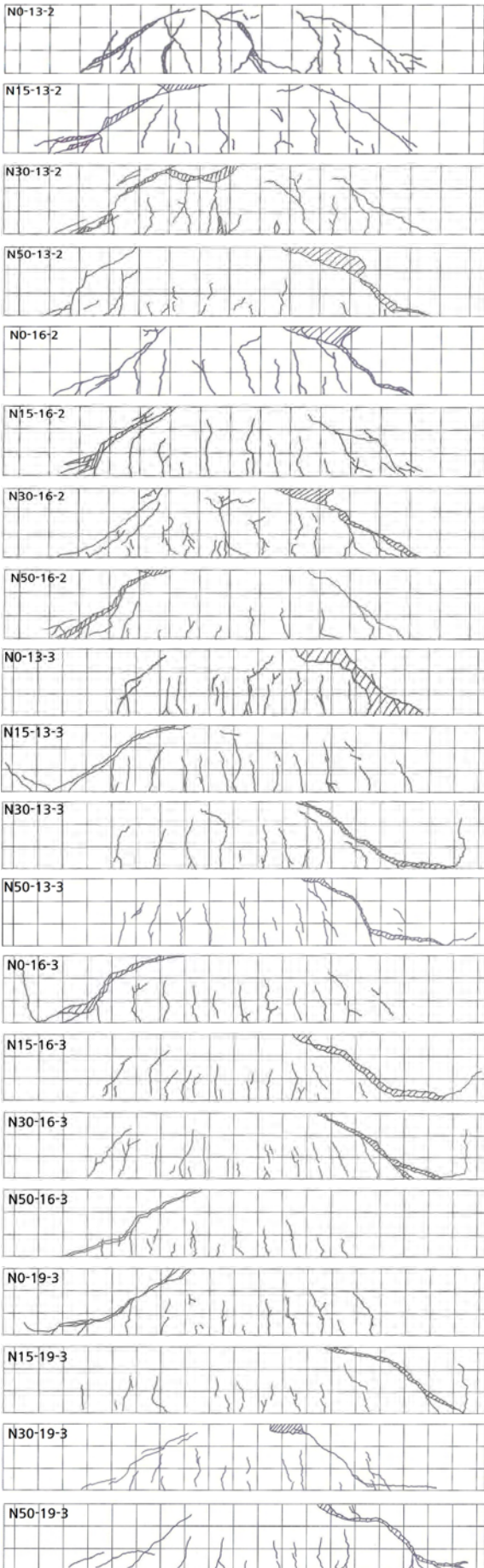


Fig. 4 Crack and failure mode of specimens (a/d=2,3)

Table 6 Shear strength and failure mode (unit: kN)

Specimen	Shear strength (kN)			$V_i/V_u$	$V_{cr}/V_u$	Failure mode
	Initial crack, $V_i$	Diagonal tensile crack, $V_{cr}$	Ultimate shear strength, $V_u$			
N0-13-2	29.40	43.61	82.32	0.36	0.53	shear
N15-13-2	26.95	43.56	70.41	0.38	0.62	shear
N30-13-2	24.55	43.12	68.89	0.36	0.63	shear
N50-13-2	23.52	40.18	64.19	0.37	0.63	shear
N0-16-2	28.91	49.98	109.07	0.27	0.46	shear
N15-16-2	27.44	49.00	107.70	0.25	0.45	shear
N30-16-2	26.46	47.53	105.25	0.25	0.45	shear
N50-16-2	15.68	39.20	63.21	0.25	0.62	shear
N0-13-3	17.35	35.77	43.71	0.40	0.82	shear
N15-13-3	16.61	35.38	44.00	0.38	0.80	shear
N30-13-3	16.02	34.89	42.04	0.38	0.83	shear
N50-13-3	14.75	33.22	40.82	0.36	0.81	shear
N0-16-3	18.03	46.55	54.73	0.33	0.85	shear
N15-16-3	16.66	41.80	52.82	0.32	0.79	shear
N30-16-3	16.27	39.30	50.32	0.32	0.78	shear
N50-16-3	15.88	38.42	42.24	0.38	0.91	shear
N0-19-3	17.25	45.67	58.02	0.30	0.79	shear
N15-19-3	17.15	45.47	52.38	0.33	0.87	shear
N30-19-3	15.88	43.07	53.00	0.30	0.81	shear
N50-19-3	15.19	37.29	45.28	0.34	0.82	shear
N0-13-4	14.80	35.67	35.82	0.41	1.00	flexure
N15-13-4	11.17	34.35	34.84	0.32	0.99	flexure
N30-13-4	12.45	33.91	34.45	0.36	0.98	flexure
N50-13-4	10.54	32.83	33.52	0.31	0.98	flexure
N0-16-4	16.22	30.97	46.21	0.35	0.67	flexure
N15-16-4	13.52	29.99	44.64	0.30	0.67	flexure
N30-16-4	13.00	29.60	45.62	0.28	0.65	shear-flexure
N50-16-4	11.56	29.99	43.61	0.27	0.69	flexure

가하며 최종파괴되었다. 전단강도는 N0-13-3실험체와 비교하여 순환골재 치환율이 15%에서 0.7% 증가하였고, 30%에서 3.8%, 50%에서 6.6% 저하되는 것으로 나타났다.

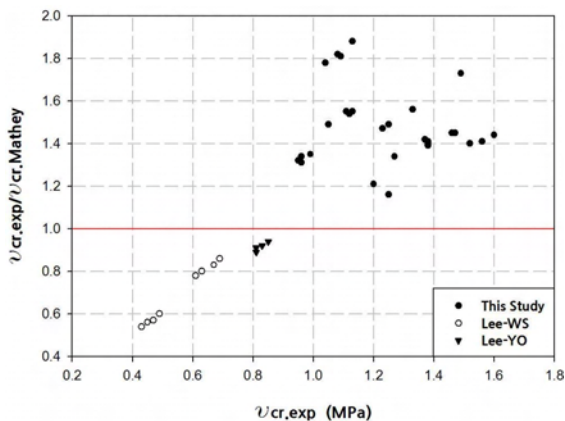
전단경간비 4에서는 최초 휨균열이 발생된 후 휨균열이 압축측으로 급격히 진행되었고, 균열폭도 급속히 증가 하였으며 최종파괴형태가 휨파괴(flexure)의 양상으로 나타났다. 한편 N30-16-4실험체에서는 사인장 균열이 지지점과 하중점으로 급격히 진행하면서 전단파괴됨과 동시에 중앙부의 휨균열이 압축측에 도달하면서 파괴되는 전단-휨 파괴(shear-flexure)의 형태가 나타났다. 전단강도는 N0-13-4실험체에 비하여 순환골재 치환율이 15, 30, 50%로 증가할 때 각각 2.7, 3.8, 6.4% 저하되는 것으로 나타났다. 또한, 경간비 3의 모든 실험체와 N30-16-4 실험체에서는 사인장균열 발생 이후 최종파괴와 동시에 하부 인장철근과 콘크리트의 부착력이 완전히 상실되어 인

장철근이 배근된 계면을 따라 콘크리트와 철근이 분리되는 전단인장파괴의 양상도 나타났다. 전단경간비 4에서는 N30-16-4를 제외하고 휼에 의한 파괴 양상이 나타났다. 또한 순환골재 치환율 50%의 실험체의 경우 다른 치환율을 가진 실험체 보다 잔균열의 수가 적었으며 균열의 폭은 크게 나타났다. 또한 순환골재를 사용한 실험체의 사인장균열은 골재계면을 따라 파괴가 일어나 사인장균열면에 굴곡이 많고 매끄럽지 못한 특성을 나타내었으며, 순환골재 치환율이 증가할수록 그 경향이 심해졌다. 극한전단하중은 전단경간비가 낮을수록 순환골재 치환율에 따라 큰 차이를 보였다.

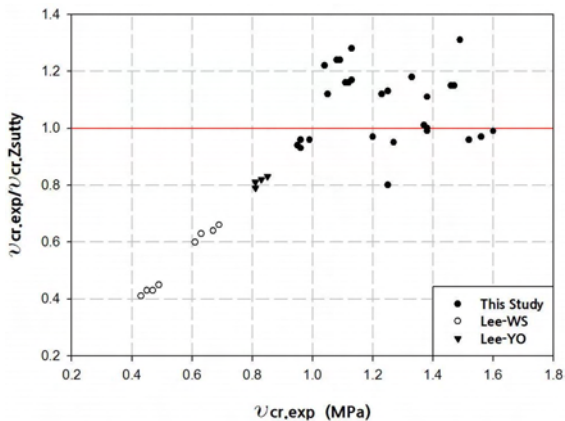
### 3.2 기준식과의 비교

#### 3.2.1 전단균열강도( $v_{cr}$ )

이 연구에서는 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도를 현행 기준식 및 제안식과 비교 분석하여 철근콘크리트 보에 순환골재의 사용 가능성을 평가하고자 하였다. 전단균열강도( $v_{cr}$ )의 분석에는 Mathey & Watstein의 제안식 및 Zsutty의 제안식을 사용하였으며, 순환골재에 관한 타 연구자들의 실험값과 비교하기 위하여, 이 연구에서의 실험값 및 이원석 등<sup>4)</sup> 이영오 등<sup>3)</sup>의 실험값에 의한 분석을 Table 7 및 Fig. 5에 함께 나타내었다.



(a) Mathey



(b) Zsutty

Fig. 5 Comparison of cracking shear ( $v_{cr}$ )

Table 7 Comparison between experimental value and theoretical value for cracking shear ( $v_{cr}$ ) (MPa)

Specimen	$v_{cr,exp}$	Theoretical value ( $v_{cr,cal}$ )		$\frac{v_{cr,exp}}{v_{cr,Mathey}}$	$\frac{v_{cr,exp}}{v_{cr,Zsutty}}$
		Mathey	Zsutty		
N0-13-2	1.38	0.99	1.39	1.40	0.99
N15-13-2	1.38	0.98	1.39	1.41	1.00
N30-13-2	1.37	0.96	1.36	1.42	1.01
N50-13-2	1.27	0.95	1.35	1.34	0.95
N0-16-2	1.60	1.11	1.62	1.44	0.99
N15-16-2	1.56	1.11	1.62	1.41	0.97
N30-16-2	1.52	1.09	1.58	1.40	0.96
N50-16-2	1.25	1.08	1.57	1.16	0.80
N0-13-3	1.13	0.73	0.97	1.55	1.17
N15-13-3	1.12	0.73	0.97	1.54	1.16
N30-13-3	1.11	0.71	0.95	1.55	1.16
N50-13-3	1.05	0.71	0.94	1.49	1.12
N0-16-3	1.49	0.86	1.13	1.73	1.31
N15-16-3	1.33	0.85	1.13	1.56	1.18
N30-16-3	1.25	0.84	1.11	1.49	1.13
N50-16-3	1.23	0.83	1.10	1.47	1.12
N0-19-3	1.47	1.01	1.28	1.45	1.15
N15-19-3	1.46	1.01	1.27	1.45	1.15
N30-19-3	1.38	0.99	1.25	1.39	1.11
N50-19-3	1.20	0.99	1.24	1.21	0.97
N0-13-4	1.13	0.60	0.88	1.88	1.28
N15-13-4	1.09	0.60	0.88	1.81	1.24
N30-13-4	1.08	0.59	0.86	1.82	1.24
N50-13-4	1.04	0.59	0.86	1.78	1.22
N0-16-4	0.99	0.73	1.03	1.35	0.96
N15-16-4	0.96	0.73	1.03	1.31	0.93
N30-16-4	0.95	0.72	1.01	1.32	0.94
N50-16-4	0.96	0.71	1.00	1.34	0.96
S-5-A0-1	0.47	0.82	1.09	0.57	0.43
S-5-A0-2	0.49	0.82	1.09	0.60	0.45
S-5-A30-1	0.45	0.81	1.06	0.56	0.43
S-5-A30-2	0.43	0.81	1.06	0.54	0.41
S-5-A60-1	0.67	0.80	1.05	0.83	0.64
S-5-A60-2	0.69	0.80	1.05	0.86	0.66
S-5-A100-1	0.61	0.79	1.01	0.78	0.60
S-5-A100-2	0.63	0.79	1.01	0.80	0.63
BS5-C0	0.85	0.91	1.02	0.94	0.83
BS5-C30	0.81	0.90	1.01	0.91	0.81
BS5-C60	0.81	0.91	1.03	0.89	0.79
BS5-C100	0.83	0.90	1.01	0.92	0.82

N-series: This study  
S-series: Lee, W. S. *et al.*  
BS-series: Lee, Y. O. *et al.*

1) Mathey & Watstein의 제안식<sup>6)</sup>

$$V_{cr} = (0.816\lambda \sqrt{f_c} \frac{d}{a} + 281\rho_w) b_w d \quad (kgf) \quad (1)$$

Mathey & Watstein의 제안식과의 비교에서는, 제안식이 이 연구에서의 실험체에서는 전단경간비에 따라 경간비 2인 실험체는 37%, 3에서는 49%, 4에서는 58% 과소평가하는 것으로 나타나, 전단경간비가 작은 실험체에서 전단균열강도를 더 잘 예측하는 것으로 나타났다. 또한, 이원석의 실험체에서는 평균 0.69, 이영오 등의 실험체에서는 평균 0.93으로 나타나 Mathey & Watstein의 제안식이 전단균열강도를 예측하는데 다소 과대평가하고 있는 것으로 나타났다.

2) Zsutty의 제안식<sup>7)</sup>

$$V_{cr} = 2.5 \frac{d}{a} 10.02\lambda (f_c \rho_w \frac{d}{a})^{1/3} b_w d \quad (kgf) ; a/d < 2.5 \quad (2)$$

$$V_{cr} = 10.02\lambda (f_c \rho_w \frac{d}{a})^{1/3} b_w d \quad (kgf) ; a/d \geq 2.5 \quad (3)$$

Zsutty의 제안식에 따르면, 식 (2), (3)에 나타난 바와 같이 전단경간비 2.5를 기준으로 하여 전단경간비가 2.5 미만인 경우 경간비에 따른 보정값을 사용하고 있다. 또한 전단강도가 콘크리트 입축강도의 1/3제곱에 비례한다고 제안하고 있으며 계수를 적용하여 그 값을 보정하고 있다. 전단균열강도에서 이 실험값과 비교한 결과 경간비 2에서는 4% 과대평가하고 있고, 경간비 3에서는 14%, 4에서는 10% 과소평가하는 것으로 나타났으며 전체적으로 강도예측을 잘 하는 것으로 보여진다. 또한, 이원석 등의 실험체에서는 평균 0.53, 이영오 등의 실험체에서는 평균 0.82로 나타났다.

3.2.2 극한전단강도( $v_u$ )

극한전단강도( $v_u$ )의 분석에는 KBC 2009 일반식 및 상세식<sup>11)</sup>, Zsutty의 제안식<sup>7)</sup>, Bazant & Kim의 제안식<sup>8)</sup>이 사용되었으며, 이 연구에서의 실험값과 이원석 등,<sup>4)</sup> 이영오 등<sup>3)</sup> 및 윤승조<sup>5)</sup>의 실험값을 식에 의한 이론값과 비교하여 Table 8 및 Fig. 6에 함께 나타내었다.

1) KBC 2009 (일반식: KBC-1)<sup>11)</sup>

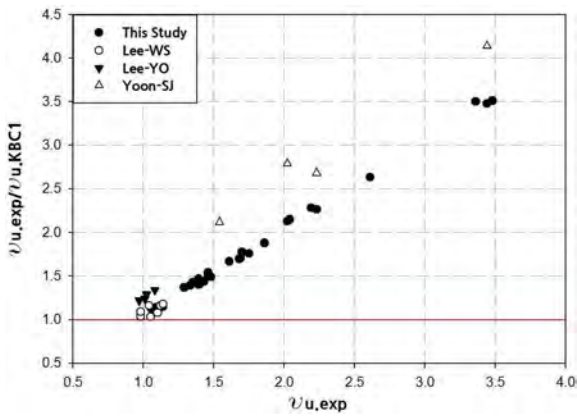
$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad [N] \quad (4)$$

국내에서 규정하고 있는 철근콘크리트 보의 전단내력에 관한 일반식은 식 (4)와 같으며 콘크리트 압축강도에

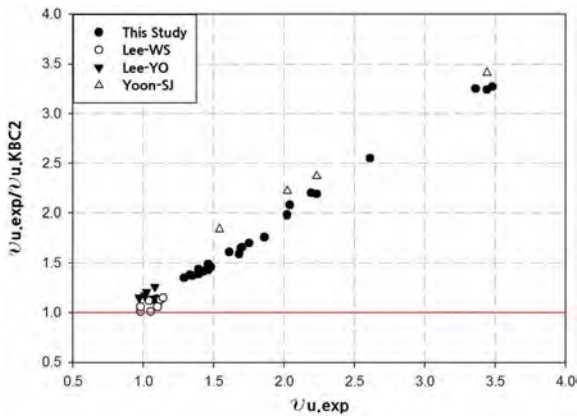
Table 8 Comparison between experimental value and theoretical value for shear strength ( $v_u$ ) (MPa)

Specimen	$v_{u,exp}$	Theoretical value ( $v_{u,cal}$ )				$v_{u,exp}$	$v_{u,exp}$	$v_{u,exp}$	$v_{u,exp}$
		KBC1	KBC2	Zsutty	Ba&Kim				
N0-13-2	2.61	0.99	1.02	1.42	1.42	2.63	2.55	1.84	1.84
N15-13-2	2.23	0.99	1.02	1.42	1.42	2.26	2.19	1.57	1.58
N30-13-2	2.19	0.96	0.99	1.39	1.39	2.28	2.20	1.57	1.57
N50-13-2	2.04	0.95	0.98	1.38	1.38	2.15	2.08	1.48	1.47
N0-16-2	3.48	0.99	1.06	1.65	1.81	3.51	3.27	2.11	1.93
N15-16-2	3.44	0.99	1.06	1.65	1.80	3.48	3.24	2.09	1.91
N30-16-2	3.36	0.96	1.03	1.61	1.77	3.50	3.25	2.08	1.89
N50-16-2	2.02	0.95	1.02	1.60	1.76	2.13	1.98	1.26	1.15
N0-13-3	1.39	0.99	1.00	0.99	1.06	1.40	1.39	1.39	1.31
N15-13-3	1.40	0.99	1.00	0.99	1.05	1.41	1.40	1.41	1.33
N30-13-3	1.33	0.96	0.97	0.97	1.03	1.39	1.38	1.37	1.30
N50-13-3	1.29	0.95	0.96	0.96	1.02	1.37	1.35	1.34	1.27
N0-16-3	1.75	0.99	1.03	1.15	1.28	1.76	1.70	1.52	1.36
N15-16-3	1.69	0.99	1.02	1.15	1.28	1.71	1.65	1.47	1.32
N30-16-3	1.61	0.96	1.00	1.13	1.25	1.67	1.61	1.43	1.28
N50-16-3	1.35	0.95	0.98	1.12	1.24	1.43	1.37	1.21	1.09
N0-19-3	1.86	0.99	1.06	1.30	1.52	1.88	1.76	1.43	1.23
N15-19-3	1.68	0.99	1.06	1.30	1.51	1.70	1.59	1.30	1.11
N30-19-3	1.70	0.96	1.03	1.27	1.48	1.78	1.66	1.34	1.15
N50-19-3	1.46	0.95	1.02	1.26	1.46	1.54	1.43	1.15	0.99
N0-13-4	1.14	0.99	0.99	0.90	0.95	1.15	1.15	1.26	1.20
N15-13-4	1.11	0.99	0.98	0.90	0.95	1.12	1.12	1.23	1.17
N30-13-4	1.09	0.96	0.96	0.88	0.92	1.14	1.14	1.24	1.19
N50-13-4	1.06	0.95	0.94	0.88	0.91	1.12	1.13	1.21	1.17
N0-16-4	1.48	0.99	1.01	1.05	1.13	1.49	1.46	1.41	1.31
N15-16-4	1.43	0.99	1.00	1.04	1.13	1.44	1.42	1.36	1.27
N30-16-4	1.46	0.96	0.98	1.02	1.10	1.52	1.49	1.42	1.33
N50-16-4	1.39	0.95	0.96	1.01	1.09	1.47	1.44	1.37	1.28
S-5-A0-1	1.10	1.01	1.04	1.11	1.08	1.08	1.06	0.98	1.01
S-5-A0-2	1.05	1.01	1.04	1.11	1.08	1.03	1.01	0.94	0.97
S-5-A30-1	1.12	0.97	0.99	1.08	1.02	1.16	1.13	1.04	1.10
S-5-A30-2	1.14	0.97	0.99	1.08	1.02	1.18	1.15	1.06	1.11
S-5-A60-1	0.98	0.95	0.97	1.07	0.99	1.03	1.01	0.92	0.99
S-5-A60-2	0.98	0.95	0.97	1.07	0.99	1.04	1.01	0.92	0.99
S-5-A100-1	0.98	0.90	0.93	1.03	0.92	1.09	1.06	0.96	1.07
S-5-A100-2	1.04	0.90	0.93	1.03	0.92	1.16	1.12	1.01	1.13
BS5-C0	1.08	0.81	0.86	1.04	0.97	1.34	1.26	1.04	1.11
BS5-C30	0.97	0.79	0.84	1.02	0.95	1.22	1.15	0.94	1.02
BS5-C60	1.01	0.81	0.86	1.04	0.98	1.24	1.17	0.97	1.03
BS5-C100	1.02	0.79	0.84	1.03	0.96	1.29	1.21	0.99	1.07
RBS21-20	2.02	0.72	0.91	1.66	2.24	2.79	2.23	1.22	0.90
RBS21-30	1.54	0.72	0.84	1.16	1.37	2.12	1.84	1.33	1.12
RBS24-20	3.44	0.83	1.01	1.82	2.37	4.14	3.41	1.90	1.45
RBS24-30	2.23	0.83	0.94	1.27	1.50	2.68	2.37	1.75	1.49

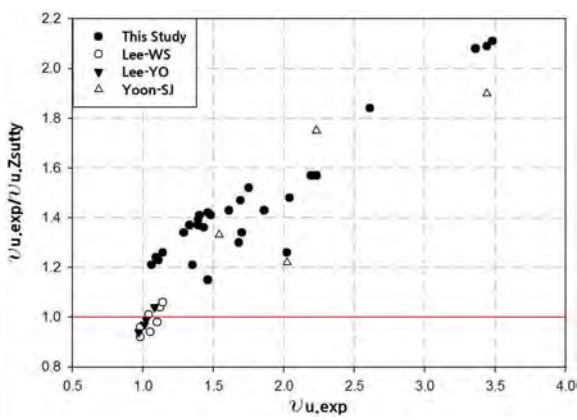
N-series: This study  
 S-series: Lee, W. S. *et al.*  
 BS-series: Lee, Y. O. *et al.*  
 RBS-series: Yoon, S. J.



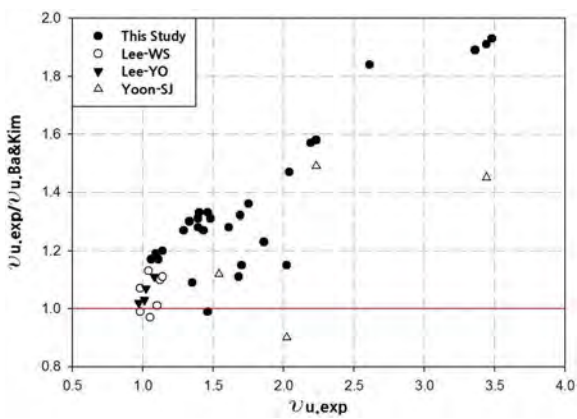
(a) KBC1



(b) KBC2



(c) Zsutty



(d) Bazant & Kim

Fig. 6 Comparison of shear strength ( $v_u$ )

대하여서만 고려하고 있다. 이 실험값과 비교한 결과, 전단경간비 2에서는 174%, 경간비 3에서는 59%, 4에서는 31% 과소평가하고 있어, 전체 실험값에 대한 이론값의 비는 평균 1.84로 나타났다. 또한, 이원석 등의 실험체에 대하여는 평균 1.10, 이영오 등의 실험체에 대하여는 평균 1.27, 윤승조의 실험체에 대하여는 평균 2.93으로 나타나 상당히 과소평가하고 있는 것으로 나타났다. 이는 국내 규정 일반식이 인장철근비와 전단경간비를 고려하지 않았기 때문으로 생각된다.

## 2) KBC 2009 (상세식: KBC-2)<sup>11)</sup>

$$V_c = \left( 0.16 \sqrt{f_{ck}} + 17.6 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.29 \sqrt{f_{ck}} b_w d [N] \quad (5)$$

또한, 전단내력에 관한 상세식은 식 (5)에 나타난 바와 같이 콘크리트 압축강도뿐만 아니라 전단경간비 및 인장철근비에 따른 영향을 고려하고 있다. 이 실험값과 비교한 결과 전단경간비 2에서는 160%, 3에서는 53%, 4에서는 29% 과소평가하여 실험값에 대한 이론값의 비는 평균 1.77로 나타났다. 타 연구자들의 실험체에서는 이원석의 실험체에 대하여는 평균 1.07, 이영오 등의 실험체에 대하여는 평균 1.20, 윤승조의 실험체에 대하여는 평균 2.46으로 나타나 일반식에서 보다는 과소평가의 경향이 줄어들긴 했지만 상세식 역시 과소평가의 경향이 많았고, 특히 전단경간비가 작을수록 그러한 경향이 두드러졌다.

## 3) Zsutty의 제안식<sup>7)</sup>

$$V_c = 2.17 \left( 2.5 \frac{d}{a} \right) \left( f_{ck} \rho_w \frac{d}{a} \right)^{1/3} b_w d (N) ; a/d < 2.5 \quad (6)$$

$$V_c = 2.17 \left( f_{ck} \rho_w \frac{d}{a} \right)^{1/3} b_w d (N) ; a/d \geq 2.5 \quad (7)$$

Zsutty의 제안식은 이 연구에서의 실험값과의 비교에서, 경간비 2에서 75%, 3에서는 36%, 4에서는 31% 과소평가 하고 있는 것으로 나타났다. 이원석 등의 실험체에 대하여는 평균 0.98, 이영오 등의 실험체에 대하여는 평균 0.99, 윤승조의 실험체에 대하여는 평균 1.55로 나타났다.

## 4) Bazant & Kim의 제안식<sup>8,12)</sup>

$$v_u = \frac{0.831 \sqrt[3]{\rho}}{\sqrt{1+d/(25d_a)}} \times (\sqrt{f'_c} + 249 \sqrt{\frac{\rho}{(a/d)^5}}) (MPa) \quad (8)$$

$d_a$  : 최대골재크기

Bazant & Kim의 제안식<sup>8)</sup>에서는 다른 제안식에서와 다

르게 골재의 최대크기에 대한 영향을 반영하였다. 이 연구의 경간비 2에서는 실험체의 극한전단강도값을 67% 과소평가하는 것으로 나타났고, 3에서는 23%, 4에서는 24%과소평가하는 것으로 나타났다. 이원석 등의 실험체에 대하여는 평균 1.05, 이영오 등의 실험체에 대하여는 평균 1.06, 윤승조의 실험체에 대하여는 평균 1.24로 나타났다.

순환골재의 치환율에 따른 실험으로부터 얻어진 전단강도 실험값을 현행 설계기준 및 제안식과 비교한 결과 전반적으로 실험값을 과소평가하는 것으로 나타났다. 전단균열강도의 비교에서는 Zsutty의 제안식이 Mathey의 제안식보다 더 실험값을 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 극한전단강도의 비교에서는 Bazant & Kim의 제안식에 의한 값이 실험값과 가장 근접하였다.

### 3.3 전단강도의 변수에 따른 영향

#### 3.3.1 전단경간비의 영향

전단경간비에 따른 전단균열강도( $v_{cr}$ )와 극한전단강도( $v_u$ )의 실험값과 제안식에 의한 값을 비교하여 Fig. 7, 8에 나타내었다.

전단균열강도는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 Mathey의 제안식에 대하여는 이 연구 실험체의 모든 실험값이 이론값을 상회하고 있으나, Zsutty 제안식에 의해서는 전단경간비 2에서 다소 과대평가되는 경향을 보이고 있다. 이원석 등과 이영오 등에 의한 실험값은 이론값보다 낮게 나타났다. 극한전단강도의 비교에서는 Fig. 8과 같이 이 연구의 실험체 및 타 연구자들의 실험체에서의 실험값이 제안식에 의한 값보다 대체적으로 높게 나타났다. 하지

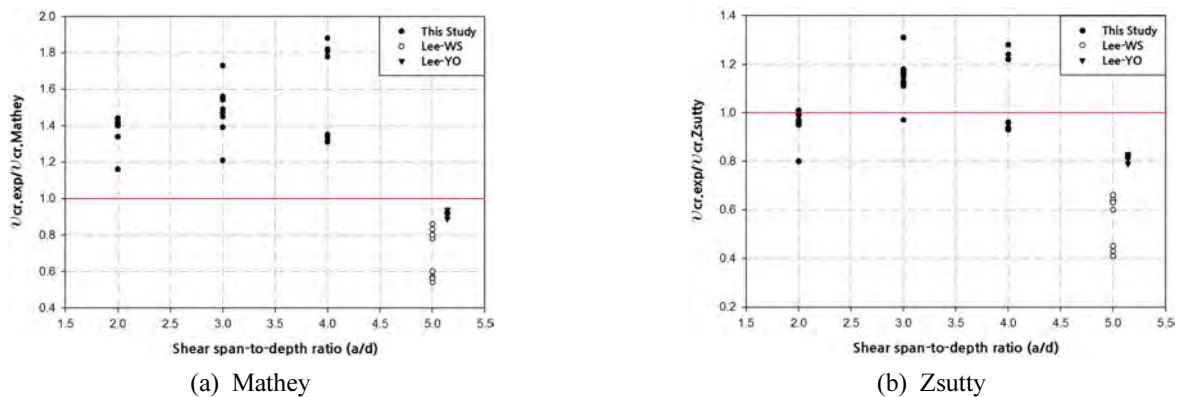


Fig. 7 Comparison of cracking shear ( $v_{cr}$ ) according to shear span-to-depth ratio

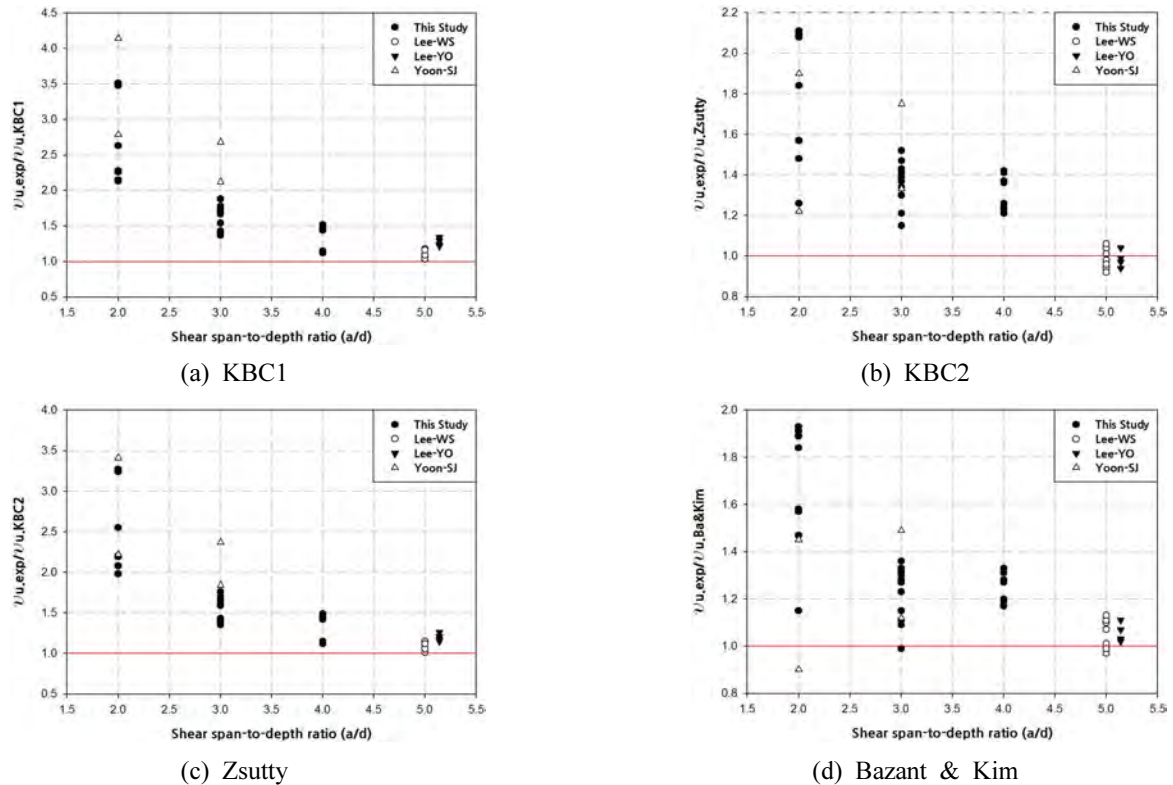


Fig. 8 Comparison of shear strength ( $v_u$ ) according to shear span-to-depth ratio



만 전단경간비가 증가 할수록 제안식과의 차이는 줄어드는 경향을 보이고 있다. 또한, 경간비가 2에서 3으로 증가하면서 극한전단강도가 급격히 감소하였다.

### 3.3.2 인장철근비의 영향

인장철근비에 따른 전단균열강도( $v_{cr}$ )와 극한전단강도( $v_u$ )에 대한 실험값과 제안식에 의한 값을 비교하여 Fig. 9, 10에 나타내었다.

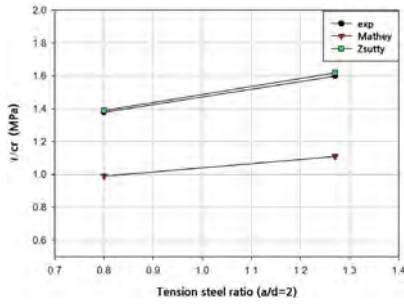
전단균열강도의 비교에서는 인장철근비가 증가하여도

순환골재치환율에 상관없이 유사한 경향을 보였다.

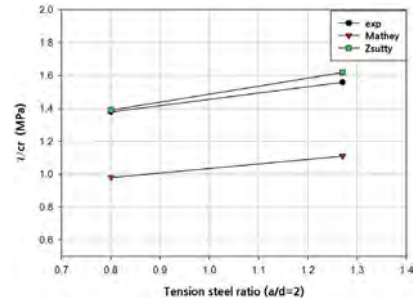
극한전단강도의 비교에서는 인장철근비가 증가함에 따라 제안식에 의한 값과 차이가 증가하였으나, 순환골재 치환율과는 상관없이 유사한 경향을 보였다.

### 3.3.3 상대전단강도

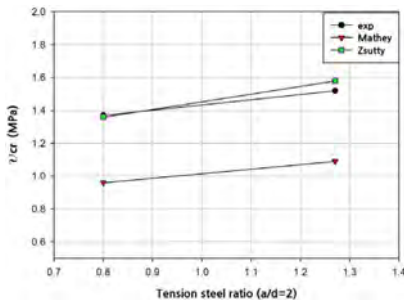
전단경간비에 따른 상대전단강도를 계산하기 위하여 기존연구자들 실험체의 인장철근비와 가장 근접하고, 일반적인 전단실험에서 가장 적당한 경간비 3에 해당되는



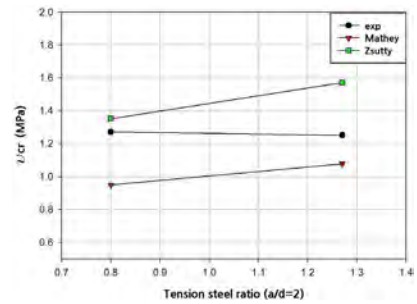
(a) Replacement ratio of RCA 0%



(b) Replacement ratio of RCA 15%

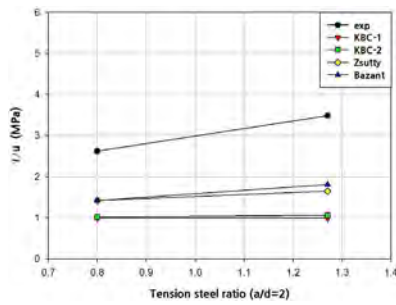


(c) Replacement ratio of RCA 30%

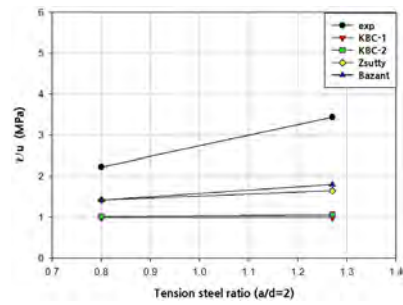


(d) Replacement ratio of RCA 50%

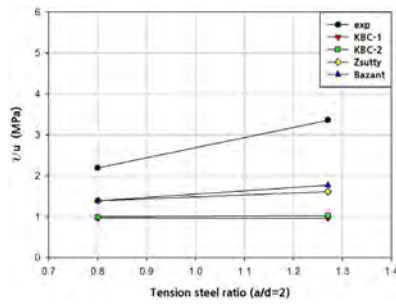
Fig. 9 Comparison of cracking shear ( $v_{cr}$ ) according to tension steel ratio ( $a/d=2$ )



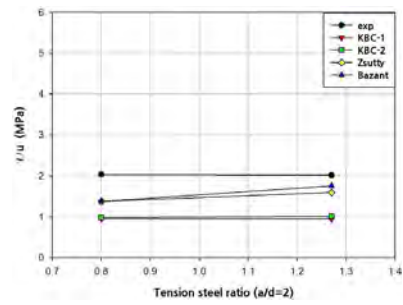
(a) Replacement ratio of RCA 0%



(b) Replacement ratio of RCA 15%



(c) Replacement ratio of RCA 30%



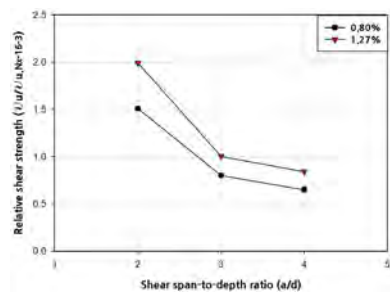
(d) Replacement ratio of RCA 50%

Fig. 10 Comparison of shear strength ( $v_u$ ) according to tension steel ratio ( $a/d=2$ )

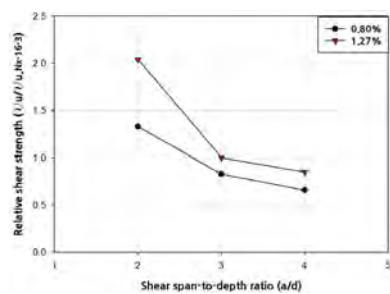
Nx-16-3 실험체군을 기준으로 각 실험체와 비교하여 Fig. 11과 Table 9에 나타내었다. 순환골재 치환율 50%를 제외하고 전단경간비가 증가할수록 인장철근비에 따른 상대전단강도의 차이가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

즉, 전단경간비가 증가함에 따라 인장철근이 상대전단강도에 미치는 영향이 줄어든다고 생각할 수 있다.

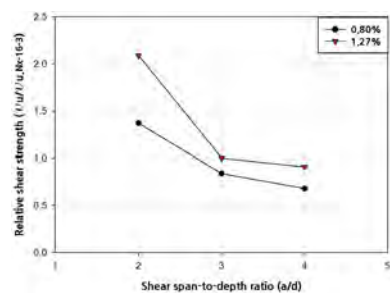
Fig. 12는 이 연구의 실험체(N0-16-3, N30-16-3)를 기준으로 하여 보통골재를 사용한 Kani,<sup>9)</sup> Ahmad,<sup>10)</sup> 김진근<sup>12)</sup>의 실험체 및 순환골재를 사용한 이영오 등<sup>3)</sup>의 실험체의 전단강도와 비교하여 상대전단강도를 나타낸 것이다. 사용된 데이터는 김진근의 실험체는  $\rho_w=0.019$ ,  $d=270$  mm,



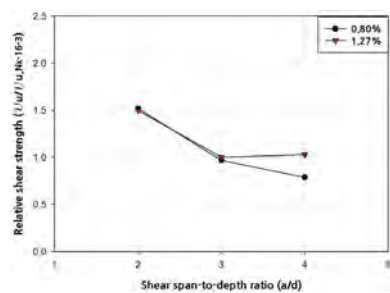
(a) Replacement ratio of RCA 0%



(b) Replacement ratio of RCA 15%



(c) Replacement ratio of RCA 30%

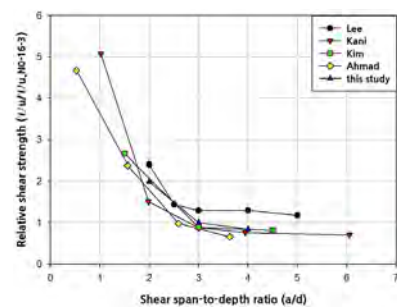


(d) Replacement ratio of RCA 50%

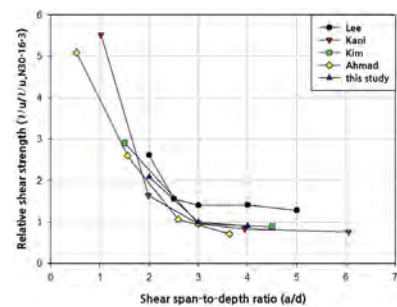
**Fig. 11** Comparison of relative shear strength with shear span-to-depth ratio

**Table 9** Relative shear strength (unit: kN)

Specimen	$V_{u.exp}$	$V_{u.Nx-16-3}$	$\frac{V_{u.exp}}{V_{u.Nx-16-3}}$
N0-13-2	82.82	54.73	1.51
N15-13-2	70.41	52.82	1.33
N30-13-2	68.89	50.32	1.37
N50-13-2	64.19	42.24	1.52
N0-16-2	109.07	54.73	1.99
N15-16-2	107.70	52.82	2.04
N30-16-2	105.25	50.32	2.09
N50-16-2	63.21	42.24	1.50
N0-13-3	43.71	54.73	0.80
N15-13-3	44.00	52.82	0.83
N30-13-3	42.04	50.32	0.84
N50-13-3	40.82	42.24	0.97
N0-16-3	54.73	54.73	1.00
N15-16-3	52.82	52.82	1.00
N30-16-3	50.32	50.32	1.00
N50-16-3	42.24	42.24	1.00
N0-13-4	35.82	54.73	0.65
N15-13-4	34.84	52.82	0.66
N30-13-4	34.45	50.32	0.68
N50-13-4	33.52	42.24	0.79
N0-16-4	46.21	54.73	0.84
N15-16-4	44.64	52.82	0.85
N30-16-4	45.62	50.32	0.91
N50-16-4	43.61	42.24	1.03



(a) Base on N0-16-3

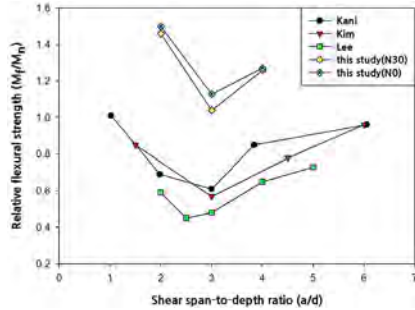


(b) Base on N30-16-3

**Fig. 12** Comparison of relative shear strength in other investigator's data

**Table 10** Summary of relative flexural strength

Researcher	Specimen	Shear span-to-depth ratio	Steel ratio	$M_f$ (kN·m)	$M_n$ (kN·m)	$\frac{M_f}{M_n}$	
Kani <sup>9)</sup>	Beam88	1.02	0.0281	974.95	967.82	1.01	
	$d=272$ mm	Beam94	1.98	0.0278	599.32	862.34	0.69
	$f_{ck}=26.31$ MPa	Beam83	3	0.0273	528.18	861.24	0.61
		Beam96	3.84	0.0276	610.18	840.02	0.85
		Beam91	6.05	0.0271	828.80	865.80	0.96
Kim & Park <sup>12)</sup>	B-5-1	1.5	0.019	86.07	101.00	0.85	
	$d=270$ mm	B-2-1	3	0.019	57.63	101.00	0.57
	$f_{ck}=53.7$ MPa	B-6-1	4.5	0.019	79.19	101.00	0.78
		B-7-1	6	0.019	97.41	101.00	0.96
Lee et al. <sup>4)</sup>	S-2-A100	2	0.0188	444.30	749.11	0.59	
	$d=525$ mm	S-2.5-A100	2.5	0.0188	333.78	749.11	0.45
	$f_{ck}=29.17$ MPa	S-3-A100	3	0.0188	363.08	749.11	0.48
		S-4-A100	4	0.0188	486.16	749.11	0.65
		S-5-A100	5	0.0188	545.90	749.11	0.73
This study	N0-16-2	2	0.0127	50.61	33.75	1.50	
	$d=232$ mm	N0-16-3	3	0.0127	38.09	33.75	1.13
	$f_{ck0}=35.41$ MPa	N0-16-4	4	0.0127	42.88	33.75	1.27
	$f_{ck30}=33.13$ MPa	N30-16-2	2	0.0127	48.84	33.54	1.46
		N30-16-3	3	0.0127	35.02	33.54	1.04
		N30-16-4	4	0.0127	42.34	33.54	1.26



**Fig. 13** Effect of shear span-to-depth ratio on relative flexural strength

$f_{ck}=53.7$  MPa, Kani의 실험체는  $\rho_w=0.027$ ,  $d=272$  mm,  $f_{ck}=26.31$  MPa이고, Ahmad의 실험체는  $\rho_w=0.023$ ,  $d=208$  mm,  $f_{ck}=67.1$  MPa, 이영오 등의 실험체는  $\rho_w=0.0188$ ,  $d=515$  mm,  $f_{ck}=29.17$  MPa가 사용되었다. 그림에서 보이듯 이영오 등의 실험체의 상대전단강도가 조금 높게 나타났고, 이 연구와 다른 연구자들 실험체의 상대전단강도는 유사한 것으로 나타났다. 이는 순환골재를 사용한 이 연구 실험체가 보통골재를 사용한 다른 연구자들의 실험체와 비슷한 전단거동을 나타내고 있다는 것을 보여준다.

### 3.3.4 상대휨강도에서 전단경간비의 영향

전단경간비가 보의 휨강도에 미치는 영향을 알아보기

위하여 이 연구의 실험 결과와 보통골재를 사용하여 전단실험한 다른 연구자들의 실험 결과를 비교하였다. Table 10은 ACI규준식에 의한 공칭 휨강도( $M_n$ )와 실험에 의한 실험체 파괴시의 휨강도( $M_f$ )를 비교하여 나타낸 것이고, 상대휨강도에서 전단경간비의 영향은 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 보여지듯 이 연구 실험체의 상대휨강도가 다소 높게 나타나고 있으나 전단경간비 3 근처에서 나타나는 전단계곡(shear valley)의 형태를 잘 나타내고 있으며, 상대휨강도는 전단경간비의 영향을 많이 받고 콘크리트의 강도나 단면의 크기에는 거의 영향을 받지 않아 순환골재를 사용한 이 연구 실험체도 보통골재를 사용한 실험체와 동일한 전단거동형태를 보인 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

이 연구에서는 순환골재 치환율(0, 15, 30, 50%)과 인장철근비(0.80, 1.27, 1.84%), 전단경간비(2, 3, 4)를 변수로 한 총 28개의 실험체를 제작, 실험하여 순환골재 철근 콘크리트 보의 전단거동 특성을 규명하였다. 또한 실험 결과와 보통골재 콘크리트에 대한 현 규준식 및 타 연구자들에 의한 제안식과의 비교를 통해 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 사용성을 검토하고자 하였다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재령 28일 공시체의 콘크리트 압축강도, 쪼갬 인장강도, 휨강도 시험 결과, 순환골재의 치환율이 증가함에 따라 압축강도는 0.8~9%, 쪼갬 인장강도는 11.2~18.7%, 휨강도는 2.9~11.1%정도 각각 감소되는 경향을 보였으나, 모든 공시체에서 목표강도 30 MPa를 상회하는 것으로 나타났다. 또한 슬럼프 테스트 결과 순환골재로 치환하지 않은 보통콘크리트에서 133.5 mm의 슬럼프를 나타내었고, 치환율이 증가함에 따라 슬럼프 값은 감소하였지만 치환율 50%에서 81.0 mm를 나타내어 보통 철근콘크리트의 슬럼프 범위 80~150 mm 안에 포함되었다. 이러한 결과로 순환골재치환율이 증가할수록 순환골재내부의 공극특성에 의한 흡수율 증가 등으로 인해 슬럼프가 저하된다는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 실험체의 균열발생 및 파괴양상을 관찰한 결과, 순환골재를 사용한 실험체가 보통골재를 사용한 실험체에 비하여 균열이 비교적 압축축까지 깊이 진전하는 특성을 보였으나, 사인장 균열이 진행되는 동안 휨균열의 폭은 증가하지 않았으며 사인장 균열의 진행이 완료된 이후에 경간비 2에서는 경간비 3, 4 보다 더 높은 전단내력을 보이며 사인장균열의 폭이 증가 하다가 최종파괴 되었다. 경간비 3에서는 경간비 2보다는 낮은 전단내력을 보였으며, 사인장 균열의 발생과 동시에 취성적인 전단파괴가 일어났다. 경간비 4에서는 휨파괴 또는 휨-전단 파괴가 나타났으며, 전반적인 균열양상은 유사하게 나타났다.

- 3) 실험체의 전단파괴하중은 인장철근비 0.80%인 보통 골재 철근콘크리트 보에서 전단경간비에 따라 82.32 kN, 43.71 kN, 35.82 kN으로 나타났고, 치환율이 증가함에 따라 각각 14.5~22%, -0.7~6.6%, 2.7~6.4% 감소하였다. 인장철근비가 증가함에 따라 전단파괴 하중은 다소 증가하였으나, 순환골재치환이 많아지면서 그 증가폭은 줄어들었고, 제안식과의 차이도 줄어들었다. 따라서 전단강도의 증가에는 전단경간비와 순환골재의 치환율이 영향을 미치고 있으며, 인장철근의 증가는 전단강도의 증가에 많은 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 특히, 순환골재 치환율이 50%인 경우 균열과 처짐, 전단내력의 급속한 감소를 보이므로, 이는 순환골재의 품질 및 사용방법에 관한 국내의 규정에 적시된 순환골재 콘크리트를 제조할 경우 순환골재의 치환율을 총 골재 용적의 30% 이하로 제한한 규정이 적합하다고 생각된다.
- 4) 상대전단강도와 상대휨강도의 분석에서는 보통골재를 사용한 기존의 타 연구자들 실험체와 유사한 전단거동을 보이고 있어, 순환골재를 사용한 실험체에 대하여도 보통골재와 동일한 규정의 적용이 가능할 것으로 생각된다.
- 5) 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 실험으로 얻어진 극한전단강도의 값을 KBC일반식과 상세식, Zsutty의 제안식 및 Bazant & Kim의 제안식에 의한 이론값과 비교한 결과 평균값이 각각 1.84, 1.77, 1.46, 1.36으로 나타나 순환골재 철근콘크리트 보의 전단설계시에도 보통골재를 사용한 철근콘크리트 보에 대한 현행 기준식 및 이론식들의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 2011년 한국연구재단의 기초연구사업(2011-0026619)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

1. Ministry of Environment, *Comprehensive Plan to Promote of the Recycling of Construction Waste*, Korea, 2002, 16 pp.
2. Kim, K. W., Yeon, K. S., and Lee, B. D., "Problems in Strength Characteristics of Recycled Waste Concrete," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 4, No. 2, 1992, pp. 44-49.
3. Lee, Y. O., Yun, H. D., You, Y. C., and Kim, K. H., "Shear Performance of Reinforced Concrete Beams Utilized Mixed Recycled Coarse Aggregates," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 26, No. 4, 2010, pp. 39-46.
4. Lee, W. S., Yun, H. D., Kim, S. W., Choi, K. S., You, Y. C., and Kim, K. H., "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*, Vol. 23, No. 10, 2007, pp. 3-10.
5. Yoon, S. J. and Jeon, S. J., "The Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Using Recycled Aggregate," *Proceedings of the Architectural Institute of Korea (AIK)*, 2006, pp. 261-264.
6. Mathey, R. G. and Watstein, D., "Shear Strength of Beams without Web Reinforcement," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 60, No. 2, 1963, pp. 183-208.
7. Zsutty, T. C., "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Test," *ACI Journal*, Vol. 68, No. 2, 1971, pp. 138-143.
8. Bazant, Z. P. and Kim, J. K., "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 81, No. 5, 1984, pp. 456-468.
9. Kani, G. N. J., "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?" *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 64, No. 3, 1967, pp. 128-141.
10. Salandra, M. A. and Ahmad, S. H., "Shear Capacity of Reinforced Lightweight High Strength Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 6, 1989, pp. 697-704.
11. Minister of Land, Transport and Maritime Affairs, *Korean Building Code*, Arch. Institute of Korea, Seoul, 2009, 1040 pp.
12. Kim, J. K. and Park, Y. D., "An Experimental Study on the Shear Strength of Reinforced High Strength Concrete Beams without Stirrups," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 5, No. 1, 1993, pp. 103-113.

**요약** 몇몇 연구자들에 의해 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단거동에 대한 연구가 수행되었다. 이 실험에서는 건물 구조체에 순환골재 콘크리트의 적용 가능성과 전단 성능에 대하여 조사하였다. 일반적으로, 전단보강이 없는 철근콘크리트 보의 전단강도는 콘크리트의 압축강도, 인장철근비 및 전단경간비의 영향을 받는다. 이 연구에서는, 전단보강이 없는 28개의 순환골재 철근콘크리트 보를 2점 가력하여 실험하였다. 순환골재 치환율(0, 15, 30, 50%), 전단경간비( $a/d=2, 3, 4$ ) 및 인장철근비( $\rho=0.80, 1.27, 1.84\%$ )를 변수로 하였고, 순환골재 치환율 50%를 기준으로 압축강도 30 MPa을 목표로 배합하였다. 이 연구가 순환골재 철근콘크리트 보의 전단설계식 제정에 기초적 자료로써 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다.

**핵심용어** : 순환골재 콘크리트, 건설 폐기물, 재활용, 전단강도