

2면전단시험법에 의한 무근 HVFAC 콘크리트의 전단강도 평가

An Evaluation of Shear Strength of Plain HVFAC Concrete by Double Shear Test Method

이형집¹ · 서정인^{1*} · 유성원²Hyung-Jib Lee¹ · Jeong-In Suh^{1*} · Sung-Won Yoo²

(Received August 5, 2017 / Revised August 14, 2017 / Accepted August 14, 2017)

In this study, to determine the shear properties, experiments on the shear behavior of plain concrete with the high volume fly ash cement by double shear test were performed. Test parameters are fly ash content and concrete compressive strength. Experimental results show the tendency that the shear strength similarly increases with an increase in the compressive strength as is generally known. The concrete shear strength formula proposed in the concrete structural design code of KCI shows a similar tendency to the experimental results, and it is expected that the shear strength of the high volume fly ash cement concrete can be applied with the formula given in the concrete structural design code of KCI. When considering the fly ash content ratio, the shear strength of high volume fly ash cement concrete according to fly ash content ratio shows as having a far greater correlation than if it is not considered to fly ash content ratio. So, even though existing code can be applicable for non consideration of the fly ash content ratio, we proposed a formula that is much more relevant than that of concrete structural design code of KCI.

키워드 : 2면전단강도시험, 다량 치환 플라이애시, 전단강도, 무근콘크리트**Keywords** : Double shear test, High volume fly ash, Shear strength, Plain concrete

1. 서론

최근 지구 온난화 방지를 위해서 CO₂와 같은 온실가스의 감축이 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히 시멘트 제조과정에서 발생하는 온실가스의 양이 크기 때문에 이의 저감은 시멘트 및 콘크리트 업계의 가장 큰 현안으로 대두되고 있다(Wang et al. 1995). 또한 화력발전소에서 발생하는 플라이애시는 콘크리트의 첨가제로 사용되는 것이 석탄회 재활용 방안 중 최선이라고 알려져 있다. 이러한 석탄회는 최근 더 이상 매립이 불가능하여 콘크리트에 다량 첨가하는 방안이 시도되고 있다(Jung 2010).

현재 국내의 경우, 약 25%까지의 플라이애시 첨가가 일반적인데 반해서 하이볼륨 플라이애시의 개념은 30~50%의 플라이애시 첨가를 의미한다(Mahdi et al. 2006). 하지만 하이볼륨 플라이애시 시멘트(High Volume Fly Ash Cement: HVFAC) 콘크리트에 대한

기존의 연구는 대부분 배합에 관련된 재료특성 자체가 대부분이었으나, 최근 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트를 구조체에 사용하기 위한 구조적 접근 연구가 활발히 시도되기 시작하였다. 즉, Yoo and Kwon(2014)은 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 압축강도, 탄성계수 등의 기초 역학적 성능을 평가하였다. Lee et al.(2016)은 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트와 철근의 부착 특성에 관한 연구를 수행하였으며, Yoo and Lee(2014)는 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트를 사용한 철근 콘크리트 보의 휨 및 전단 거동을 실험적으로 평가하였으며, Kim and Yoo(2015)는 7.5m 규모의 실물 철근 콘크리트 보를 제작하여 이의 휨 및 전단 거동을 실험적으로 평가하였다. 이러한 일련의 연구들이 꾸준히 수행되고 있음에도 불구하고 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트를 구조체에 사용하기 위한 구조적 접근 연구는 여전히 부족한 실정이다. 특히 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단거동

* Corresponding author E-mail: offsuhji@woosuk.ac.kr¹우석대학교 토목환경공학과 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Woosuk University, Chungbuk, 27841, Korea)²가천대학교 토목환경공학과 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi, 13120, Korea)

에 대한 연구는 아직까지 수행되지 않은 것으로 파악되어, 본 연구에서는 하이볼륨 플라이애시 시멘트를 사용한 무근 콘크리트의 2면전단거동에 관한 실험을 수행하여 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단특성을 파악하고, 실험에서 얻은 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단강도와 기존 연구 식들과 비교한 후, 새로운 식을 제안하였다.

2. 전단강도 실험 방법

전단강도는 20세기 초반부터 많은 논란과 논쟁의 대상이 되어왔으며, 일부 전단 시험 방법이 제안되어 콘크리트에 적용되었다. Fig. 1은 이러한 방법의 시험편 형상과 하중 구성을 보여준다. Fig. 1(a)는 균열에 따른 순수 전단 응력의 상태를 나타내나, 현재까지는 이러한 실험 장치가 개발되지 못했다.

Fig. 1(b)의 단일 전단 테스트 형상은 매우 매력적이나, 균열은 종종 두 개의 중간 하중점에서 시작하고 손상된 부분은 시험된 부분과 다르기 때문에 이 시험도 신뢰할 수 없는 것으로 알려져 있다(Uomoto and Minematsu 1985).

Fig. 1(c)와 (d)는 간접 전단강도 시험의 두 가지 유형을 보여준

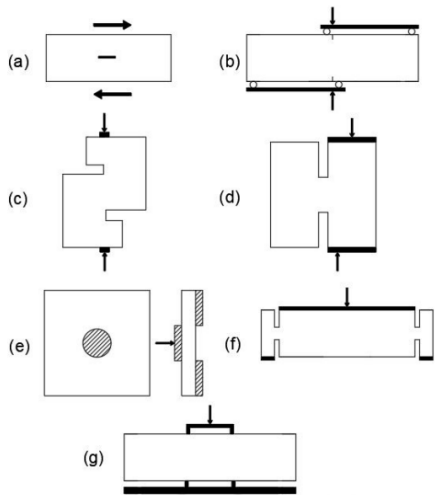


Fig. 1. Different test configurations

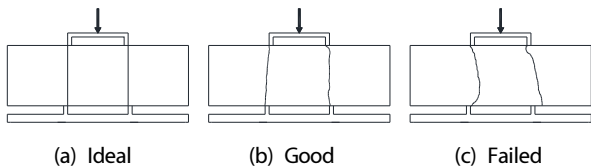


Fig. 2. Failure patterns

다. 유한요소해석은 Fig. 1(c)의 push-off 시험의 균열 선단에 인장 응력이 존재함을 보여 주었다. Reinhardt et al.(1997)은 Fig. 1(d)의 실험이 순수한 모드 II를 산출한다고 보고했다. Fig. 1(e)는 펀칭 전단 시험 방법이다. 이 시험에서 얻은 시험편의 전단강도 및 손상 상태는 시험편 크기와 하중 부품 크기에 따라 크게 달라진다(Uomoto and Minematsu 1985). Fig. 1(f)는 Luong(1990)이 제안한 실린더 시험편에 대한 이중전단시험이다. 분명히 이 시험은 휨응력의 존재 때문에 혼합 모드 결과를 산출한다. 마지막으로 Fig. 1(g)는 빔 시험편에 대한 2면전단시험(double shear test)으로, 이 시험 방법은 전단강도 측정에 매우 적합한 것으로 보고되고 있다(Uomoto and Minematsu 1985). 이 방법의 장점 중 하나는 손상된 단면이 실험 단면과 매우 잘 일치하며, 시험 형상이 비교적 쉽고 하중도 간단하나 이 역시 혼합 모드 결과가 산출된다.

앞에서 기술한 콘크리트 전단강도 실험 방법 7가지 중에서 현재까지는 2면전단시험이 비교적 적용하기 좋은 방법임을 알 수 있었다. 같은 이유로 본 연구에서의 콘크리트 전단강도는 비교적 정확하고 실험이 쉬운 Fig. 1(g)의 2면전단시험이 본 연구의 실험 방법으로 선택되었다.

한편 Uomoto and Minematsu(1985)는 2면전단시험에서 파괴 양상에 따른 실험의 성공 여부를 Fig. 2와 같이 구분하였다. 가장 이상적인 균열은 Fig. 2(a)로 균열이 하중 가력선을 따라 흐르며 상부와 하부 전단 가장자리가 이어지는 형태이다. 또 Fig. 2(b)와 같이 균열은 한 전단에서 시작하여 반대편 전단 가장자리(균열이 잘림)의 안쪽에서 일부 끝나는 경우로 이상적이고 좋은 균열 패턴을 가진 성공한 그룹에 속하나, Fig. 2(c)와 같이 균열이 기울어져 있는 경우는 실험이 실패한 것으로 간주하였다.

3. 실험 계획

3.1 사용재료

본 연구에서는 결합재로 국내 H사에서 제조된 1종 보통포틀랜드 시멘트와 밀도가 2,33g/cm³, 분말도 3,78cm²/g로 KS 기준에 적합한 플라이애시를 사용하였다. 잔골재로는 밀도가 2,56g/cm³인 강모래를 사용하였고, 굵은 골재로는 밀도가 2,65g/cm³인 쇄석을 사용하였다.

3.2 콘크리트

콘크리트에 사용된 플라이애시의 치환율은 0, 35 및 50%, 콘크리트의 목표 압축강도는 25, 35 및 45MPa로 정하였으며, 콘크리트

Table 1. Concrete mix proportion

ID	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)					
			W	C	FA	S	G	Adm. (%)
0-25	0.58	0.47	185	319	0	812	946	0.5
0-35	0.45	0.42	170	380	0	719	1028	1.0
0-45	0.35	0.42	165	471	0	694	991	1.0
35-25	0.44	0.42	185	273	147	673	962	0.5
35-35	0.35	0.42	150	277	149	707	1012	1.0
35-45	0.30	0.42	150	320	172	684	975	0.5
50-25	0.40	0.45	125	156	156	827	1047	0.5
50-35	0.48	0.45	208	216	216	681	861	0.5
50-45	0.33	0.45	242	368	368	509	647	0.5

ID: fly ash content - target compressive strength
 W: water, C: cement, FA: fly ash, S: sand, G: gravel,
 Adm.: super-plasticizer

트의 유동성을 확보하기 위하여 PC계 고성능 감수제를 사용하였고, 배합비는 Table 1과 같다.

3.3 실험계획 및 부재 형상

하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단거동 평가를 위한 실험변수는 플라이애시 첨가량 3수준(시멘트의 0, 35, 50% 치환), 콘크리트 압축강도 3수준(25, 35, 45MPa)이다. 실험시편은 150mm×150mm×550mm의 직육면체 형상으로 총 54개(3×3×2, 3회 반복)이며, 실험 변수는 Table 2에 정리되어 있으며, 시편 및 하중 재하 형상은 Fig. 3, 실험 장면은 Fig. 4와 같다.

실험은 제작된 시편에 2면전단파괴를 유도하기 위한 고정장치를 설치하고 2000kN의 UTM을 이용하여 0.5mm/min의 속도로 하중을 재하하면서 파괴하중을 측정하였다.

Table 2. Test variables

ID	Fly ash replacement ratio(%)	Target strength (MPa)	Measure item
0-25	0	25	Failure load, shape of broken section
0-35		35	
0-45		45	
35-25	35	25	
35-35		35	
35-45		45	
50-25	50	25	
50-35		35	
50-45		45	

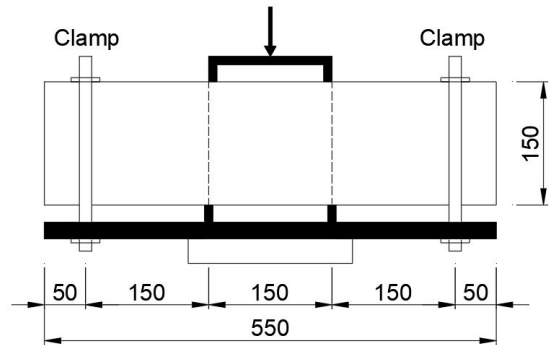


Fig. 3. Test setup of specimen



Fig. 4. Photo of test and failure shape

4. 실험결과 및 분석

4.1 전단강도, 파괴 형상

제작된 실험시편에 대해 재령 28일에 2면전단실험을 수행하여 전단특성을 파악하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타냈다. 이때 3절에서 기술한 바와 같이 Fig. 2(c)에 도시된 것과 같은 균열이

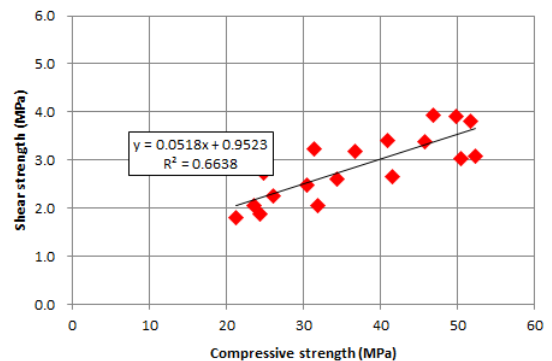


Fig. 5. Compressive strength-shear stress relationship

Table 3. Test results of shear strength

Fly ash content (%)	Average height (mm)	f_{28} (MPa)	τ_{test} (MPa)	Shape of broken section	Judgement
0	14.8	24.9	2.73	Fig. 2(a)	O.K.
	14.8	30.5	2.48	Fig. 2(a)	
	14.8	31.4	3.24	Fig. 2(a)	
	14.8	36.7	3.19	Fig. 2(a)	
	14.9	41.0	3.40	Fig. 2(b)	
14.9	49.9	3.90	Fig. 2(b)		
35	14.5	31.9	2.07	Fig. 2(a)	
	14.9	34.4	2.60	Fig. 2(a)	
	14.7	41.6	2.66	Fig. 2(a)	
	14.8	46.9	3.94	Fig. 2(a)	
	14.8	45.8	3.39	Fig. 2(a)	
50	15.4	52.4	3.08	Fig. 2(b)	
	14.8	26.1	2.27	Fig. 2(b)	
	14.7	23.6	2.06	Fig. 2(b)	
	14.6	24.3	1.89	Fig. 2(b)	
	14.8	21.3	1.81	Fig. 2(b)	
15.0	51.7	3.80	Fig. 2(a)		
14.8	50.5	3.04	Fig. 2(a)		

f_{28} : compressive strength at 28 days
 τ_{test} : test results of shear strength

심하게 기울어져 있는 경우는 발생되지 않았다.

압축강도 실험 결과, 전반적으로 예상 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 실험에서 구해진 압축강도와 전단강도 간의 관계를 Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 전단강도는 일반적으로 알려진 것과 유사하게 압축강도의 증가에 따라 증가하는 경향이 나타나고 있다. 직선으로 회귀분석한 결과만으로도 상관계수가 0.66정도로 나타나, 어느 정도의 상관성을 가지고 있다고 할 수 있다.

4.2 설계기준 및 기존연구결과와의 비교

콘크리트구조기준(KCI, 2012)에서는 다음 식 (1)과 같은 콘크리트 전단강도 식을 제안하고 있으며, Uomoto and Minematsu(1985)은 식 (2)를 제안하였다.

$$\tau_{cr} = 0.29 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

$$\tau_{cr} = 0.10f_{ck} + 2.03 \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

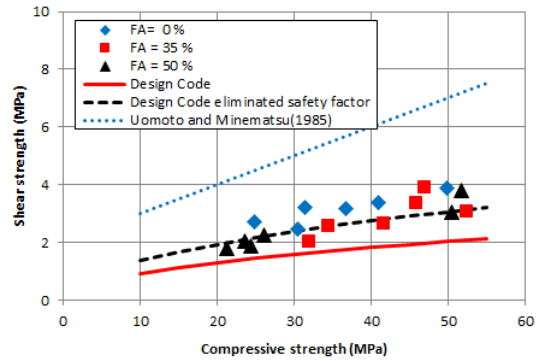


Fig. 6. Comparison between test results and existing formula

Table 4. Comparison between test results and existing formula

Fly ash content (%)	f_{28} (MPa)	τ_{test} (MPa)(1)	$\tau_{Eq.(1)}$ (MPa)	$\frac{\tau_{Eq.(1)}}{SF}$ (MPa)(2)	$\tau_{Eq.(2)}$ (MPa)	$\frac{(1)}{(2)}$
0	24.9	2.73	1.45	0.97	4.52	1.26
	30.5	2.48	1.6	1.07	5.08	1.03
	31.4	3.24	1.63	1.09	5.17	1.33
	36.7	3.19	1.76	1.17	5.7	1.21
	41.0	3.40	1.86	1.24	6.13	1.22
	49.9	3.90	2.05	1.37	7.02	1.27
35	31.9	2.07	1.64	1.09	5.22	0.84
	34.4	2.60	1.7	1.13	5.47	1.02
	41.6	2.66	1.87	1.25	6.19	0.95
	46.9	3.94	1.99	1.33	6.72	1.32
	45.8	3.39	1.96	1.31	6.61	1.15
	52.4	3.08	2.1	1.40	7.27	0.98
50	26.1	2.27	1.48	0.99	4.64	1.02
	23.6	2.06	1.41	0.94	4.39	0.97
	24.3	1.89	1.43	0.95	4.46	0.88
	21.3	1.81	1.34	0.89	4.16	0.90
	51.7	3.80	2.09	1.39	7.2	1.21
	50.5	3.04	2.06	1.37	7.08	0.98

여기서 τ_{cr} 는 균열 전단강도, f_{ck} 는 콘크리트 설계기준강도이다.

실험 결과와 설계기준 및 Uomoto and Minematsu(1985)이 제안한 콘크리트 전단강도 식과 비교를 수행하여 Fig. 6과 Table 4에 나타내었으며, 식 (1)의 설계기준 식은 안전율이 고려된 식이므로 안전율(Safety Factor: SF) 추정치인 1.5를 제거한 값과의 차이도 같이 표기하였다. 실험 결과와 설계기준 및 Uomoto and Minematsu(1985)가 제안한 콘크리트 전단강도 결과를 비교해 보면, Uomoto and Minematsu(1985)가 제안한 식의 결과는 지나치게 크게 나타나고 있으며, 설계기준에서 제시하는 식의 결과는 실험결과와 유

사한 경향을 보이고 있다. 특히 설계기준 식에 안전율 추정치인 1.5를 나눈 결과는 실험결과와 유사하며 평균 9% 정도의 작은 차이를 보이고 있다. 이러한 결과로 볼 때, 다량 치환된 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단강도는 콘크리트구조기준(KCI, 2012)에서 제시하고 있는 식을 준용하여도 큰 문제는 없을 것으로 예상된다.

4.3 플라이애시 첨가율의 영향

다량 치환된 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단강도에 플라이애시 첨가율이 미치는 영향을 고려하기 위하여 플라이애시 첨가율을 구분하여 Fig. 7에 나타내어 보았다.

플라이애시 첨가율에 따른 다량 치환된 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단강도는 50% 치환의 경우가 가장 상관성이 낮기는 하지만 플라이애시 첨가율을 고려하지 않은 경우보다 훨씬 더 큰 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

비록 플라이애시 첨가율을 고려하지 않아도 현행 설계기준 식에 적절하기는 하지만 좀 더 상관성이 높은 식을 제안하기 위하여 이러한 결과를 바탕으로 통계 S/W SPSS를 이용하여 비선형 회귀 분석

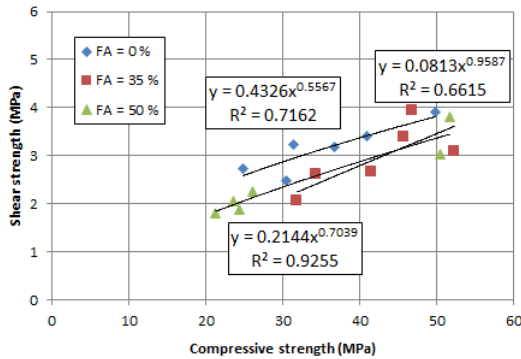


Fig. 7. Compressive strength-shear stresses relationship according to fly ash contents

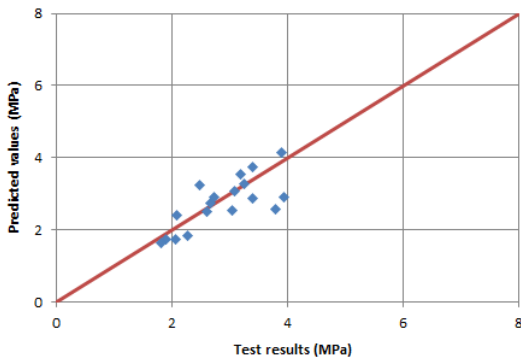


Fig. 8. Test results - predicted value relationship

을 수행하여 플라이애시 첨가율이 반영된 다음 식 (3)을 제안하였다.

$$\tau_{cr} = 1.17(1 - 0.778 \times FA) \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

여기서 FA 는 플라이애시 첨가율이다.

제안된 식 (3)의 상관계수는 약 0.85로 나타나 상당히 좋은 상관성을 가지는 것으로 나타났으며, 이러한 사실은 실험결과와 제안된 식의 예측값 관계를 나타낸 Fig. 8에서도 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 하이볼륨 플라이애시 시멘트를 사용한 무근 콘크리트의 2면전단거동에 관한 실험을 수행하여 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단특성을 파악하고, 실험에서 얻어진 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단강도와 기존 연구 식들과 비교하고 새로운 식을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전단강도의 변화는 일반적으로 알려진 것과 유사하게 압축강도의 증가에 따라 증가하는 경향이 나타나고 있다. 직선으로 회귀 분석한 결과만으로도 상관계수가 0.66정도로 나타나 어느 정도의 상관성을 가지는 것으로 예상된다.
2. 콘크리트구조기준(KCI, 2012)에서 제안한 콘크리트 전단강도 식은 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있으며, 안전율을 고려하지 않는다면 평균 9% 정도의 작은 차이를 보이고 있어, 다량 치환된 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단강도는 콘크리트구조기준에서 제시하고 있는 식을 준용하여도 큰 문제는 없을 것으로 예상된다.
3. 플라이애시 첨가율에 따른 다량 치환된 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단강도는 플라이애시 첨가율을 고려한 경우가 첨가율을 고려하지 않은 경우보다 훨씬 더 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다.
4. 비록 플라이애시 첨가율을 고려하지 않아도 현행 설계기준 식이 적절하기는 하지만 좀 더 상관성이 높은 식을 제안하였으며, 제안된 식의 상관계수는 약 0.85로 상당히 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 환경정책기반공공기술개발사업의 연구비 지원에(No.2016000700003) 의해 수행되었습니다.

References

- Jung, S.W. (2010). Standardization Technology for The Environmental-Friendly Utilization of Pond Ash Technical Report, R-2007-2-151, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 1-15 [in Korean].
- Kim, G.T., Yoo, S.W. (2015). An evaluation of applicable feature of structural member using high volume fly-ash concrete, Journal of the Korean Recycled Construction Resource Institute, **3(2)**, 109-114 [in Korean].
- Korea Concrete Institute(KCI). (2012). Concrete Structural Standard [in Korean].
- Lee, H.J., Suh, J.I., Yoo, S.W. (2016). Bond behavior of concrete according to replacement ratio of fly ash and compressive strength of concrete, Journal of the Korean Recycled Construction Resource Institute, **4(1)**, 19-24 [in Korean].
- Luong, M.P. (1990). Fracture testing of concrete and rock materials, Nuclear Engineering and Design, **133**, 83-95.
- Mahdi, A., Michael, H., Jeffery, V. (2006). A comparative study of the bond strength of reinforcing steel in high volume fly ash concrete and conventional concrete, Construction Building Materials, **40(6)**, 919-924.
- Rehardt, H.W., Ozbonlt, J., Xu., Dingku, A. (1997). Shear of structural concrete members and pure shear mode II testing, Advanced Cement Based Material, **5**, 75-85.
- Uomoto, K., Minematsu, T. (1985). Fundamental study on testing method for shear strength of concrete, Concrete Engineering, **23(3)**, 17-18.
- Wang, S., Pu, X., Scrivener, K., Pratt, P. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems, Advances in Cement Research, **27**, 93-102.
- Yoo, S.W., Kwon, S.J. (2014). An evaluation of basic mechanical performance for high volume fly ash concrete, Journal of the Korean Recycled Construction Resource Institute, **2(3)**, 265-272 [in Korean].
- Yoo, S.W., Lee, H.J. (2014). Experiment of flexural behavior of reinforced concrete beams with high volume fly ash, Journal of Korea Concrete Institute, **26(3)**, 323-329 [in Korean].

2면전단시험법에 의한 무근 HVFAC 콘크리트의 전단강도 평가

본 연구에서는 플라이애시 첨가량과 콘크리트 압축강도를 실험변수로 설정하여 하이볼륨 플라이애시 시멘트를 사용한 무근 콘크리트의 2면전단거동에 관한 실험을 수행한 후, 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단특성을 파악하고자 하였다. 실험 결과, 전단 강도의 변화는 일반적으로 알려진 것과 유사하게 압축 강도의 증가에 따라 증가하는 경향이 나타났다. 콘크리트 구조설계기준(KCI, 2007)에서 제안한 콘크리트 전단강도 식은 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있어 다량 치환된 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단강도는 콘크리트 구조설계기준에서 제시하고 있는 식을 준용하여도 큰 문제는 없을 것으로 예상된다. 한편 플라이애시 첨가율에 따른 다량 치환된 플라이애시 시멘트 콘크리트의 전단강도는 플라이애시 첨가율을 고려한 경우가 첨가율을 고려하지 않은 경우보다 훨씬 더 높은 상관성을 가지는 것으로 나타나, 비록 플라이애시 첨가율을 고려하지 않아도 현행 설계기준 식에 적절하기는 하지만 좀 더 상관성이 높은 식을 제안하였다.