



## 하이 볼륨 플라이애쉬 철근콘크리트 보의 휨거동 실험

유성원<sup>1)</sup> · 이형집<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>우석대학교 토목환경공학과

### Experiment of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with High Volume Fly Ash

Sung-Won Yoo<sup>1)</sup> and Hyung-Jib Lee<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University, Jinchon 365-803, Korea

**ABSTRACT** It is known that the best way to recycle fly ash is to use in concrete. It is impossible to bury in the ground this fly ash recently, so it is trying to use high volume fly ash concrete. Nevertheless, recent main research topics are focused in the part of material only, however, it is necessary to perform the researches about elasticity modulus, stress-strain relationship and structural behavior. Therefore, in this paper, 18 test members were manufactured with 3 test variables, namely fly ash replacement ratio 0, 35, 50%, concrete compressive strength 20, 40, 60 MPa and 2 tensile steel ratio. 18 test members were tested for flexural behavior. From the test results, there were no differences between 35, 50% high volume fly ash cement concrete and ordinary concrete without fly ash(FA=0%).

**Keywords** : high volume, fly ash, flexural behavior, performance evaluation

## 1. 서 론

화력발전소에서 발생하는 플라이애쉬는 콘크리트의 첨가재로 사용되는 것이 석탄회 재활용 방안 중 최선으로 알려져 있다. 이러한 석탄회는 최근 더 이상 매립이 불가능하여 콘크리트에 다량 첨가가 시도되고 있다.<sup>1)</sup>

또한, 향후 온실가스 감축이 시멘트 업계의 가장 큰 현안으로 될 것이며 세계의 시멘트 수요량은 21세기 초반까지 매년 2.5~5.8% 정도 증가로 이어지고 있어 새로운 시멘트 관련 기술의 개발이 필요한 실정이다. 문제점에 대안으로 클링커를 사용하지 않고 플라이애쉬와 같은 산업 부산물을 콘크리트에 다량 첨가하면 생산원가 절감과 천연자원 및 에너지 고갈 문제와 이산화탄소 배출에 의한 환경오염을 동시에 해결 할 수 있을 것으로 판단된다.<sup>2)</sup> 현재 국내의 경우, 약 25%까지의 플라이애쉬 첨가가 일반적인데 반해서 하이 볼륨 플라이애쉬의 개념은 30~50%의 플라이애쉬 첨가를 의미한다.

그럼에도 불구하고 현재까지 하이볼륨 플라이애쉬(High Volume Fly Ash: HVFA) 시멘트 콘크리트의 연구분야는

주로 재료적인 차원 즉, 압축강도, 탄성계수, 건조수축 및 내구성 분야 등에 대해서만 수행되어지고 있는 실정이다.<sup>3-5)</sup> 그러나 하이볼륨 플라이애쉬 시멘트 콘크리트의 구조재료로의 적용을 위해서는 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 구조 부재 거동 등에 대한 연구가 필수적이다.<sup>6,7)</sup>

이를 위하여 이 논문에서는 0, 35 및 50% 까지 다량 첨가된 플라이애쉬 시멘트 철근콘크리트 보 18개를 제작한 후, 이들의 휨거동을 실험적으로 평가하고자 하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험변수 및 부재 형상

실험변수로는 플라이애쉬 치환율 0, 35 및 50% 3수준, 콘크리트 압축강도 20, 40 및 60 MPa 3수준과 철근비 2수준(설계기준에서 요구하는 (최소+최대)철근비/3, 2(최소+최대)철근비/3)이다. 이러한 실험변수를 가진 실험부재는 총 18개이며, 실험 변수들은 Table 1에 나타내었으며, 실험 부재들의 철근 배근 형상은 Fig. 1에, 제작 완료된 부재와 하중 재하장치 형상은 Fig. 2에 나타냈다.

\*Corresponding author E-mail : hyunglee@woosuk.ac.kr

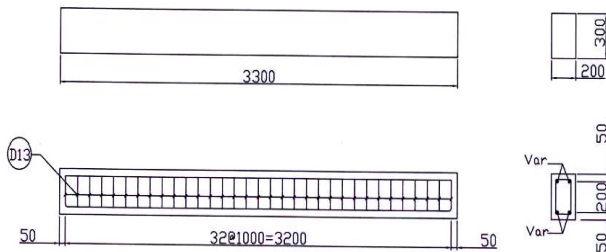
Received April 1, 2014, Revised April. 7, 2014,

Accepted April 20, 2014

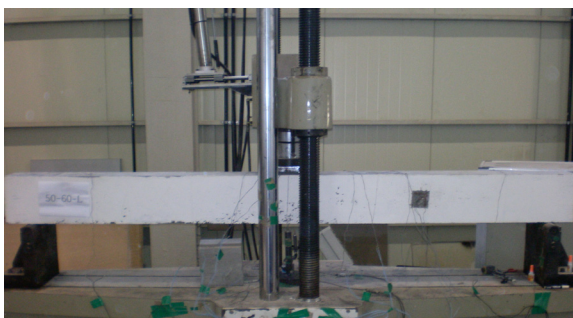
©2014 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Test variables

ID	FA (%)	$f_{ck}$ (MPa)	Tensile steel ratio	Tensile steel detail
0-20-L	0	20	0.00794	D16-2EA
0-20-H	0	20	0.01548	D22-2EA
0-40-L	0	40	0.01548	D22-2EA
0-40-H	0	40	0.02570	D29-2EA
0-60-L	0	60	0.02027	D25-2EA
0-60-H	0	60	0.03176	D32-2EA
35-20-L	35	20	0.00794	D16-2EA
35-20-H	35	20	0.01548	D22-2EA
35-40-L	35	40	0.01548	D22-2EA
35-40-H	35	40	0.02570	D29-2EA
35-60-L	35	60	0.02027	D25-2EA
35-60-H	35	60	0.03176	D32-2EA
50-20-L	50	20	0.00794	D16-2EA
50-20-H	50	20	0.01548	D22-2EA
50-40-L	50	40	0.01548	D22-2EA
50-40-H	50	40	0.02570	D29-2EA
50-60-L	50	60	0.02027	D25-2EA
50-60-H	50	60	0.03176	D32-2EA



**Fig. 1** Reinforcement details (unit: mm)



**Fig. 2** Test setup

## 2.2 콘크리트 및 철근

실험 부재에 사용된 콘크리트의 배합 및 압축강도 실험 결과는 Table 2, 3에 나타냈으며, 실험 부재에 사용된 철근은 Fig. 1에 나타낸 바와 같으며, 전단파괴가 발생하지 않도록 배근하였다. 사용한 철근은 SD400으로 직접인

**Table 2** Concrete mix proportion

ID	W/B (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	FA	C	S
0-20	0.58	185	319	-	946	812
0-40	0.45	170	380	-	1028	719
0-60	0.35	165	471	-	991	694
35-20	0.44	185	273	147	962	673
35-40	0.35	150	277	149	1012	707
35-60	0.27	133	320	172	1002	701
50-20	0.40	125	156	156	1047	827
50-40	0.29	125	216	216	983	776
50-60	0.17	125	368	368	816	645

**Table 3** Results of concrete compressive strength

ID	$f_{ck}$ (MPa)	slump (mm)	air (%)
0-20	22.1	122	4.2
0-40	38.8	121	3.8
0-60	56.2	119	3.3
35-20	21.5	116	4.0
35-40	41.8	117	3.4
35-60	60.5	114	3.7
50-20	20.5	120	3.9
50-40	38.1	122	3.8
50-60	59.2	114	3.6

장시험 결과 항복강도는 평균 412 MPa이었다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 균열, 철근 항복 및 극한 하중

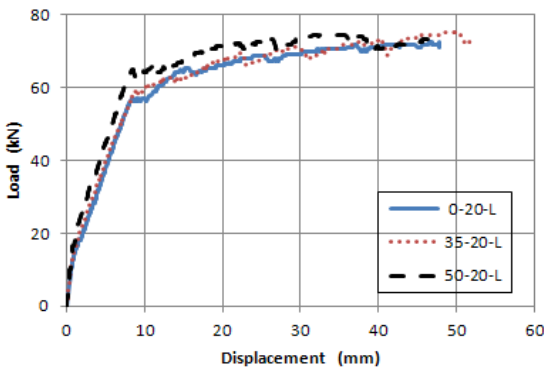
제작된 실험 부재에 대해 휨 파괴 실험을 수행하였다. 이 실험 결과에서 균열 하중, 인장 철근의 항복하중 및 극한하중을 구하여 다음 Table 4에 나타냈으며, 실험 부재 모두에서 휨파괴가 발생했으며, 철근 항복하중과 극한하중의 비는 1.10~1.46 정도로 나타났다. 또한 균열하중은 콘크리트 압축강도에 거의 비례하여 발생하는 것으로 나타났다. 또한 인장 철근비가 큰 H-series는 L-series에 비해서 하중저항 능력이 더 우수하게 나타나는 등 일반적인 콘크리트의 거동과 유사하게 나타났다.

### 3.2 하중-변위 관계

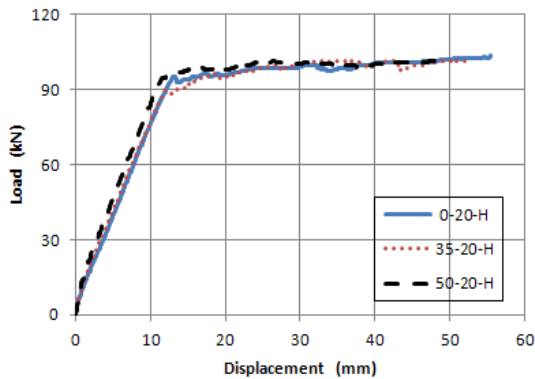
구조 시험체의 휨거동 평가 결과, 하중-처짐 관계는 Fig. 3~8에 나타내었다. Fig. 3~8을 분석해보면, 모든 실험 부재는 하중-처짐 관계에 있어서 초기균열 단계까지 선형으로 증가하며, 초기균열 이후 처짐량은 비선형

**Table 4** Crack, yield and ultimate load of members

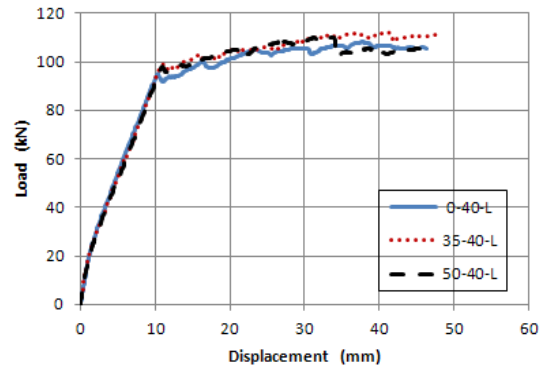
ID	crack load (kN)	yield (kN, mm)		ultimate (kN, mm)		ultimate /yield		Failure pattern
		load	displ.	load	displ.	load	displ.	
0-20-L	10.3	61.5	11.2	72.5	47.8	1.18	4.22	flexure
0-20-H	11.6	92.9	13.8	103.7	55.5	1.12	4.02	flexure
0-40-L	14.8	94.8	10.5	108.1	46.3	1.14	4.42	flexure
0-40-H	15.7	135.2	12.8	157.5	68.9	1.16	5.38	flexure
0-60-L	18.3	108.8	12.2	125.1	61.2	1.15	5.03	flexure
0-60-H	19.3	147.9	11.2	182.2	46.0	1.23	4.11	flexure
35-20-L	11.8	55.1	8.0	75.1	52.2	1.36	6.52	flexure
35-20-H	11.8	86.9	9.4	102.1	52.0	1.17	5.53	flexure
35-40-L	15.8	99.6	10.7	113.0	48.4	1.13	4.53	flexure
35-40-H	16.1	144.6	11.2	160.4	45.0	1.11	4.02	flexure
35-60-L	18.9	103.1	8.0	123.6	31.8	1.20	4.00	flexure
35-60-H	19.2	167.1	10.6	183.4	41.9	1.10	3.95	flexure
50-20-L	10.8	64.3	8.2	74.6	47.4	1.16	5.79	flexure
50-20-H	11.8	92.4	11.1	101.7	49.6	1.10	4.47	flexure
50-40-L	15.8	95.9	11.7	110.2	59.1	1.15	5.04	flexure
50-40-H	15.3	136.4	11.8	154.6	42.5	1.13	3.61	flexure
50-60-L	18.7	98.8	9.8	144.2	61.1	1.46	6.23	flexure
50-60-H	19.7	168.0	11.3	197.9	40.1	1.18	3.55	flexure



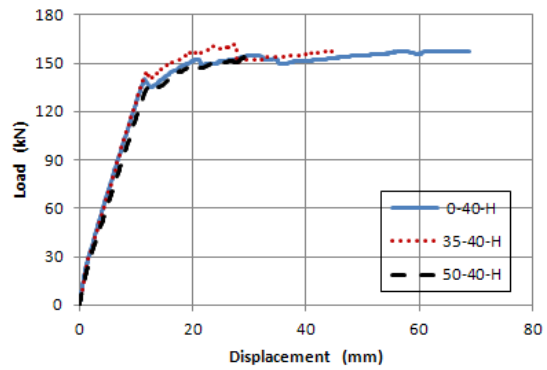
**Fig. 3** Load-displacement for 20-L series according to FA replacement ratio



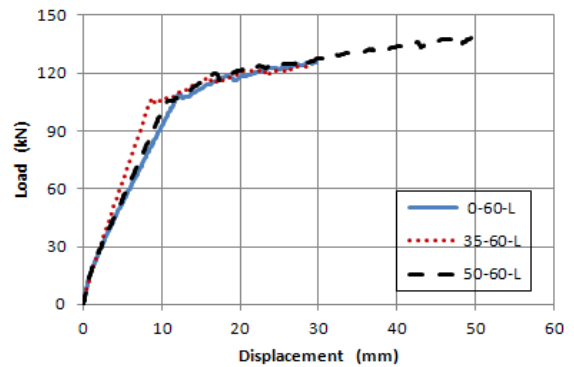
**Fig. 4** Load-displacement for 20-H series according to FA replacement ratio



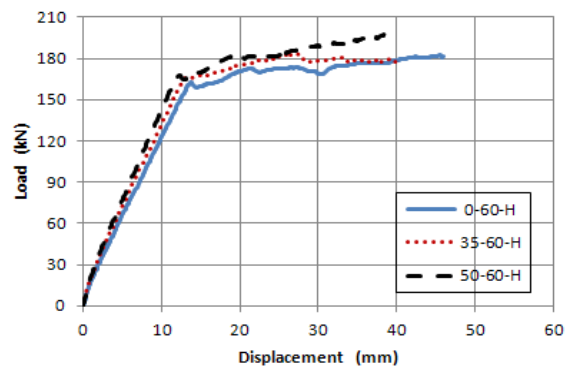
**Fig. 5** Load-displacement for 40-L series according to FA replacement ratio



**Fig. 6** Load-displacement for 40-H series according to FA replacement ratio



**Fig. 7** Load-displacement for 60-L series according to FA replacement ratio



**Fig. 8** Load-displacement for 60-H series according to FA replacement ratio

으로 증가하며, 이후 하중은 극한하중까지 증가한다. 또한 전반적인 거동은 콘크리트 압축강도에도 영향을 받지만 그 크기차이는 상대적으로 작게 나타났으며, 철근량(비)의 영향이 구조 거동에 절대적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

일반적으로 콘크리트 구조물의 연성은 연성지수(ductility index)로 정량화할 수 있으며, 변형 특성 중에서 구조물의 처짐, 회전각, 또는 곡률을 바탕으로 표현할 수 있다.<sup>8,9)</sup> 이 연구에서는 식 (1)와 같이 처짐에 근거하여 연성지수를 정의하여 각 부재의 연성 특성을 고찰하였다.

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

여기서,  $\mu$ : 부재의 연성지수

$\Delta_{u(y)}$ : 부재의 극한(항복)하중에서의 처짐

실험에서 얻어진 부재의 연성지수는 Table 4에 나타내었다. 고강도 콘크리트의 연성지수에 관한 기존 연구 결과는 고강도 콘크리트의 취성과파괴를 방지하기 위한 최소 연성지수로써 4.0 이상의 값을 제안하고 있다.<sup>10)</sup> 실험 결과에 의하면, 철근비가 작은 L-series의 경우, 연성지수는 항상 4.0 이상으로 취성과파괴를 방지할 수 있는 것으로 나타났다. 철근비가 상대적으로 큰 H-series의 경우, 일부에서 연성지수가 4.0 이하가 나타나기도 했지만 대부분의 경우 역시 4.0을 상회하는 것으로 나타났으나, L-series에 비해서 상대적으로 작은 연성지수값을 나타내고 있다. 또한 콘크리트 압축강도가 클수록 연성지수는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상들은 플라이애쉬 첨가량에 관계없이 동일하게 나타나므로 35%, 50% 플라이애쉬 시멘트 콘크리트의 부재거동 경향 자체는 일반 콘크리트 부재와 크게 차이 나지 않음을 알 수 있다.

### 3.3 하중-철근 변형률 관계

휨거동 평가 결과, 하중-철근 변형률 관계는 Fig. 9~14에 나타내었다. 철근의 경우, 균열이전에는 변형률이 거의 발생되지 않으며, 균열이후에는 선형적으로 증가한 후, 항복이후에는 변형률이 크게 증대하는 것으로 나타났으며, 이러한 현상들은 플라이애쉬 첨가율에 관계없이 나타나고 있어 35, 50% 플라이애쉬 시멘트 콘크리트의 부재거동 경향은 일반 콘크리트 부재와 유사함을 알 수 있다.

### 3.4 하중-콘크리트 변형률 관계

구조 시험체의 거동 평가 결과, 하중-콘크리트 변형률 관계는 Fig. 15~20에 나타내었다. 그림들에서 알 수 있듯이 모든 부재들에서 콘크리트 극한변형률이 0.0035~0.0055로 나타났으며, 플라이애쉬의 첨가율에 관계없이

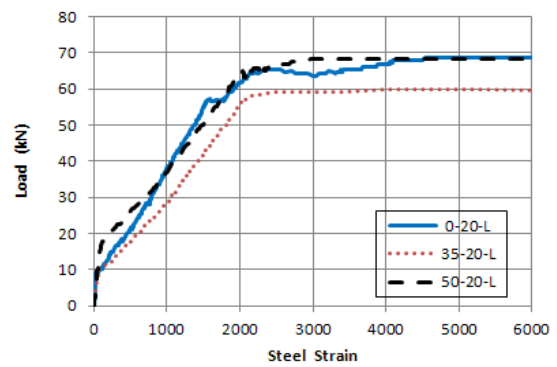


Fig. 9 Load-steel strain for 20-L series according to FA replacement ratio

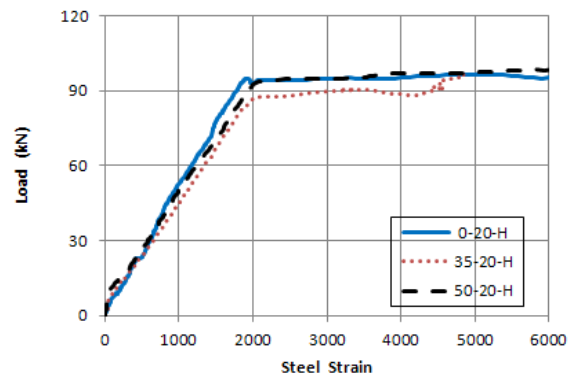


Fig. 10 Load-steel strain for 20-H series according to FA replacement ratio

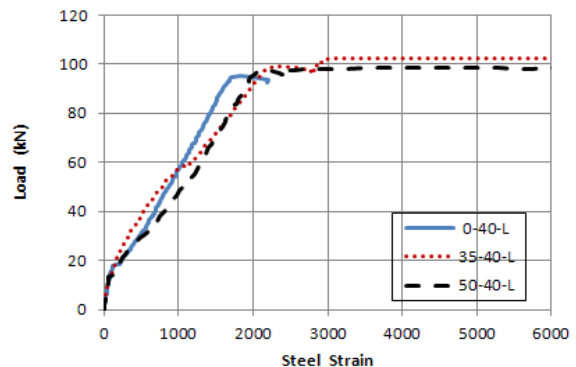


Fig. 11 Load-steel strain for 40-L series according to FA replacement ratio

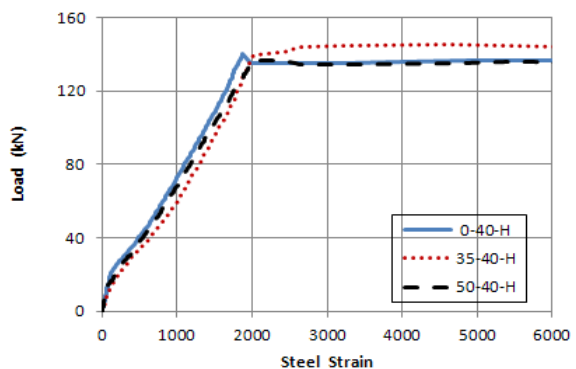


Fig. 12 Load-steel strain for 40-H series according to FA replacement ratio

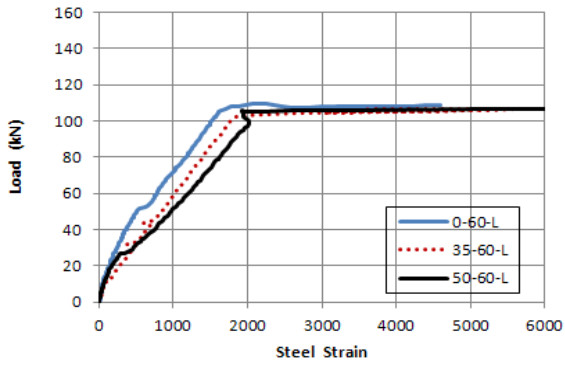


Fig. 13 Load-steel strain for 60-L series according to FA replacement ratio

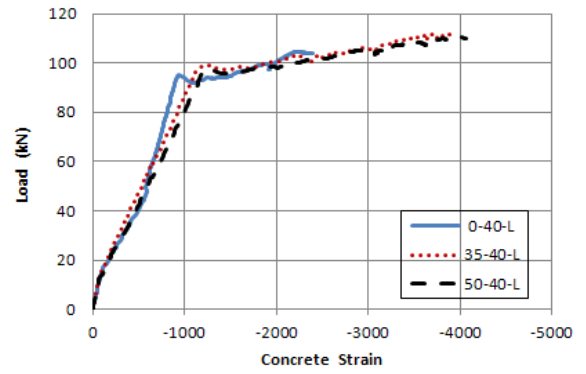


Fig. 17 Load-concrete strain for 40-L series according to FA replacement ratio

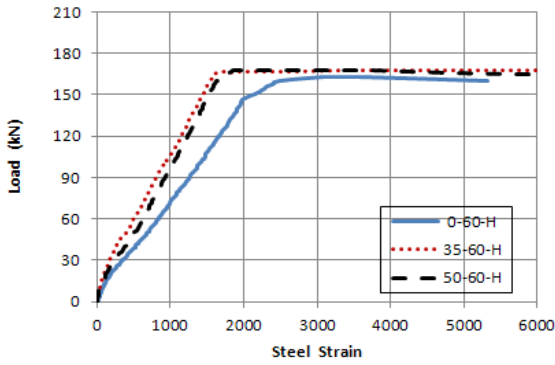


Fig. 14 Load-steel strain for 60-H series according to FA replacement ratio

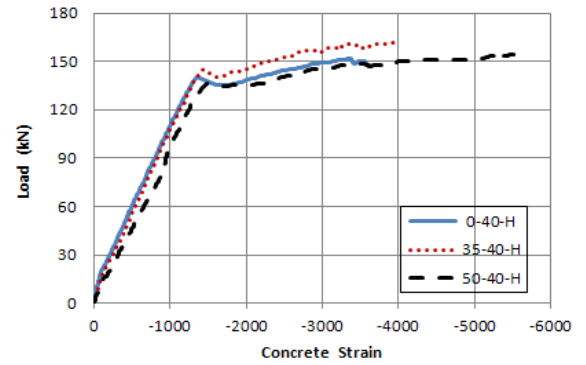


Fig. 18 Load-concrete strain for 40-L series according to FA replacement ratio

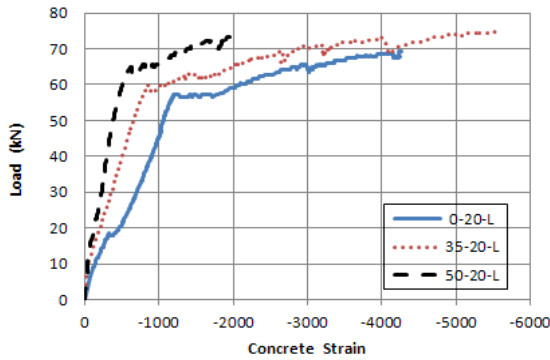


Fig. 15 Load-concrete strain for 20-L series according to FA replacement ratio

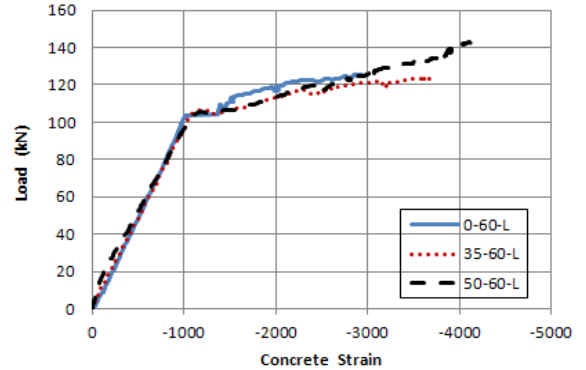


Fig. 19 Load-concrete strain for 60-L series according to FA replacement ratio

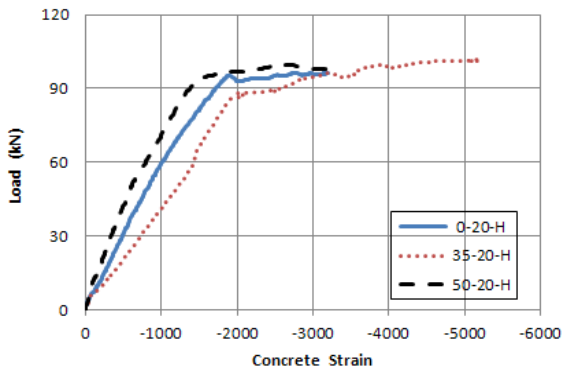


Fig. 16 Load-concrete strain for 20-H series according to FA replacement ratio

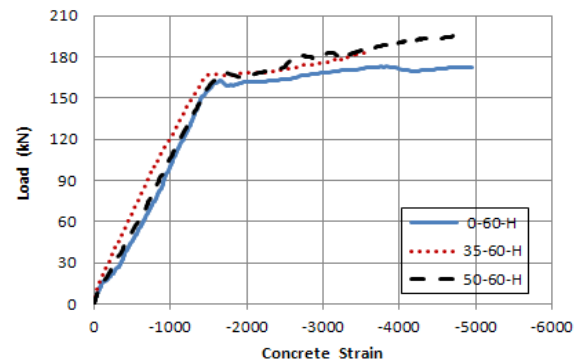


Fig. 20 Load-concrete strain for 60-H series according to FA replacement ratio

유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 3.5 향후 연구 내용

앞서 기술한 바와 같이 실험결과에서 플라이애쉬를 첨가하지 않은 일반 콘크리트(FA=0%)와 35, 50% 플라이애쉬 시멘트 콘크리트 부재의 휨거동은 크게 차이 나지 않음을 알 수 있었다.

한편, 플라이애쉬가 다량첨가된 콘크리트는 시멘트 비중보다 플라이애쉬 비중이 25% 정도 작은 이유로 콘크리트의 단위중량도 최대 2~3% 감소하는 것으로 알려져 있다. 이러한 단위중량은 탄성계수의 감소 및 부재 처짐의 증가를 유발한다. Fig. 3 ~ 8에서 알 수 있듯이 이 실험결과에서도 이러한 현상이 약간 나타남을 추정할 수 있다.<sup>11)</sup>

그러나, 실험은 필연적으로 오차를 수반할 수 밖에 없는 이유로 향후에는 이 연구진의 결과 및 기존 연구 결과 등을 이용하여 다량 첨가된 플라이애쉬 콘크리트의 탄성계수 등을 규명하고, 이를 바탕으로 해석모델을 제시한 후, 해석적인 추가 연구를 수행하여 하이볼륨 플라이애쉬 콘크리트의 휨거동을 좀 더 정량적으로 분석할 예정이다.

## 4. 결 론

이 논문에서는 0, 35 및 50% 까지 다량 첨가된 플라이애쉬 시멘트 철근콘크리트 보 18개를 제작한 후, 이들의 휨거동을 실험적으로 평가하고자 하였다. 이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 철근 항복하중과 극한하중의 비는 1.10~1.46 정도로 나타났다. 또한 균열하중은 콘크리트 압축강도에 거의 비례하여 발생하는 것으로 나타났다. 또한 인장 철근비가 클수록 하중저항 능력이 더 우수하게 나타났다.
- 2) 철근비가 작은 L-series의 경우, 연성지수는 항상 4.0 이상으로 취성파괴를 방지할 수 있는 것으로 나타났으나 철근비가 상대적으로 큰 H-series의 경우, L-series에 비해서 상대적으로 작은 연성지수값을 나타내고 있다.
- 3) 처짐, 변형률 등의 발생 양상 및 크기가 플라이애쉬 첨가량에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타나서 플라이애쉬를 첨가하지 않은 일반 콘크리트(FA=0%)와 35, 50% 플라이애쉬 시멘트 콘크리트 부재의 휨거동은 크게 차이 나지 않음을 알 수 있었다.
- 4) 향후에는 이 연구진의 결과 및 기존 연구 결과 등을 이용하여 다량 첨가된 플라이애쉬 콘크리트의 탄성계수 등을 규명하고, 이를 바탕으로 해석모델

을 제시한 후, 해석적인 추가 연구를 수행하여 하이볼륨 플라이애쉬 콘크리트의 휨거동을 좀 더 정량적으로 분석할 예정이다.

## 감사의 글

이 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20111010100030).

## References

1. Jung S. W., *Standardization Technology for The Environmental-Friendly Utilization of Pond Ash Technical Report*, R-2007-2-151, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 2010, pp. 1-15 [in Korean].
2. Singh, M. and Garg, M., "Phosphogypsum - Fly Ash Cementitious Binder - Its Hydration and Strength Development," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 4, 1995, pp. 752-758. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00065-K](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00065-K))
3. Bilodeau, A., Sivasundaram, V., Painter, K., and Malhotra, V., "Durability of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash from Sources in the USA," *American Concrete Institute Material Journal*, Vol. 91, No. 1, 1994, pp. 13-20. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/4411>)
4. Muller, U. and Rubner, K., "The Microstructure of Concrete Made with Municipal Waste Incinerator Bottom Ash as an Aggregate Component," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 10, 2006, pp. 1434-1443. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.023>)
5. Jung, S. H. and Kwon, S. J., "Engineering Properties of Cement Mortar with Pond Ash in South Korea as Construction Materials: from Waste to Concrete," *Central European Journal of Engineering, VERSITA*, Vol. 3, No. 3, pp. 522-533.
6. Arezoumandi, M., Wolfe, M. H., and Volz, J. S., "A Comparative Study of the Bond Strength of Reinforcing Steel in High-Volume Fly Ash Concrete and Conventional Concrete," *Construction Building Materials*, Vol. 40, 2013, pp. 919-924. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.105>)
7. Arezoumandi, M. and Volz, J. S., "Effect of Fly Ash Replacement Level on the Shear Strength of High-Volume Fly Ash Concrete Beams," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 59, No. 2, 2009, pp. 120-130.
8. Yang, I. H., "An Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete," *Journal of Korean Concrete Institute Structural*, Vol. 21, No. 6, 2009, pp. 737-744. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2009.21.6.737>)
9. Federal Highway Administration, *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*

- 1st ed.*, Washington DC: FHA, 2006, pp. 23-49.
10. Shin, S. W., Ghosh, S. K., and Moreno, J., "Flexural Ductility of Ultra High Strength Concrete Members," *American Concrete Institute Structural Journal*, Vol. 86, No. 4, 1989, pp. 394-400. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/2877>)
  11. Yoon, S., Monteiro, P. J. M., Macphee, D. E., and Glasser, F. P., "Statistical Evaluation of the Mechanical Properties of High-Volume Class F Fly Ash Concretes," *Construction Building Materials*, Vol. 54, 2014, pp. 432-442. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.077>)

---

**요 약** 화력발전소에서 발생하는 플라이애쉬는 콘크리트의 첨가제로 사용되는 것이 석탄회 재활용 방안 중 최선으로 알려져 있다. 이러한 석탄회는 최근 더 이상 매립이 불가능하여 콘크리트에 다량 첨가가 시도되고 있다. 그럼에도 불구하고 현재까지 하이볼륨 플라이애쉬(High Volume Fly Ash: HVFA) 시멘트 콘크리트의 연구분야는 주로 재료적인 분야에 대해서만 수행되어지고 있는 실정이다. 그러나 하이볼륨 플라이애쉬 시멘트 콘크리트의 구조재료로의 적용을 위해서는 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 구조 부재 거동 등에 대한 연구가 필수적이다. 이를 위하여 이 논문에서는 플라이애쉬 치환율 0, 35 및 50%, 압축강도 20, 40 및 60 MPa 그리고 인장철근비 2수준을 실험변수로 하여 플라이애쉬 시멘트 철근콘크리트 보 18개를 제작하여 이들의 휨거동을 실험적으로 평가하였다. 실험결과에 의하면 플라이애쉬를 첨가하지 않은 일반 콘크리트(FA=0%)와 35, 50% 플라이애쉬 시멘트 콘크리트 부재의 휨거동은 크게 차이나지 않음을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 하이볼륨, 플라이애쉬, 휨거동, 성능평가