

플라이애시를 함유한 고강도 콘크리트의 조기 강도와 속도 발현 특성

Characteristics of Early Strength and Velocity Development in High Strength Concrete Containing Fly Ash

이 회 근^{*} 윤 태 섭^{**} 이 광 명^{***}
Lee, Hoi-Keun Yun, Tae-Sup Lee, Kwang-Myong

ABSTRACT

The use of fly ash in cement and concrete industries has many benefits including engineering, economic, and ecological aspects. However, it has a disadvantage of low strength development, especially at early ages. In this study, in order to overcome this problem, the early strength accelerating agent(Na_2SO_4) was selected and applied to the production of high strength concrete(HSC) containing fly ash. It was found that the compressive strength of fly ash concrete incorporating Na_2SO_4 has greater than that of concrete containing fly ash only until 7 days after casting. From the microstructural point of view, ettringite increased and pores decreased in fly ash concrete incorporating Na_2SO_4 , leading to the development of early age strength. It was also found that the velocity vs. strength relationship of HSC is considerably different from that of low-strength concrete(LSC). Therefore, in order to predict early age strength of HSC, a estimation equation different from that for LSC is needed.

1. 서론

1960년대 말에 일본과 독일에서 고성능 감수제가 처음으로 콘크리트에 사용되고, 그 이후에 실리카 폼이 시멘트와 함께 결합제로 사용되기 시작하면서 매우 낮은 물-결합제를 갖는 고강도 콘크리트의 제조가 가능하게 되었다⁽¹⁻⁴⁾. 이후 콘크리트 기술의 발전과 더불어 100 MPa 또는 그 이상의 강도를 갖는 콘크리트를 별다른 문제없이 제조하는 것이 가능하게 되었으며, 고강도 콘크리트의 사용이 점점 증가하고 있다. 최근에는 고강도 뿐만 아니라 고유동성, 고내구성을 모두 만족하는 고성능 콘크리트(high performance concrete)가 등장하면서 많은 나라에서 이에 대한 연구가 활발하게 진행중이다.

고강도 콘크리트에 산업 부산물인 플라이애시, 슬래그 등을 사용하면 자원 재활용에 따른 경제적,

*정회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정수료

**정회원, 성균관대학교 토목공학과 석사과정

***정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

환경적인 측면뿐만 아니라, 낮은 수화열 발생에 의한 온도 균열에 대한 저항성과 워커빌리티 개선, 그리고 장기 강도 증진 및 내구성 향상 등의 여러 가지 이점이 있다⁽⁵⁾. 하지만, 이러한 포졸란 재료는 일반적으로 시멘트의 대체재로 사용되는 경우 재령 초기의 강도 발현이 낮기 때문에 콘크리트의 초기 품질관리에 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 플라이애시를 사용한 콘크리트의 초기 강도를 높이기 위해 초기 강도 증진제(이하 조강제로 함)가 함유된 고강도 플라이애시 콘크리트를 제조하여 초기 강도의 발현 특성을 실험을 통해 조사하였다. 그리고 비파괴적으로 고강도 콘크리트의 초기 강도를 추정하기 위해 콘크리트의 종파속도를 측정하여 강도와 상관관계를 알아보았다.

2. 실험 연구

2.1 재료 및 배합비

본 실험에서 사용된 시멘트, 플라이애시, 실리카폼의 물리적 성질과 화학적 성분을 Table 1에, 골재의 성질을 Table 2에 각각 나타내었다. 콘크리트 제조에 사용된 배합비를 나타내는 Table 3과 같이, 본 실험 연구에는 설계기준강도가 각각 27, 40, 60 MPa인 보통 콘크리트 배합(OPC)과 시멘트량의 20%가 플라이애시로 치환된 배합(FA20), 그리고 FA20에 조강제로 Na_2SO_4 가 결합제의 1% 첨가된 배합(Na_2SO_4), 즉 모두 9가지의 배합이 사용되었다. 또한, 나프탈렌 계열의 고성능 감수제가 사용되었으며, 높은 강도를 얻기 위해 60 series에는 중량으로 결합제의 5%인 실리카폼이 사용되었다.

2.2 압축강도와 종파속도의 측정

Table 3에 나타낸 배합비로 원통형 콘크리트 공시체($\phi 100 \times 200$ mm)를 각각 제작하여 재령별로 압축강도와 종파속도를 측정하였다. 공시체는 콘크리트 타설 후 24시간 후에 몰드를 제거하여 실험 전까지 수증양생(20 °C)을 실시하였다. 실험 전에 미리 공시체를 물속에서 꺼내어 약 3시간 동안 대기 중에서 자연 건조시킨 후 충격공진법을 이용하여 종파속도를 측정하였다. 이 후 곧바로 압축강도를 측정하였고, 실험 재령은 1, 2, 3, 7, 28일이었다.

Table 1. Physical properties and chemical analysis of cement, fly ash and silica fume

Materials	Physical properties		Chemical analysis (%)								
	Blaine (cm ² /g)	Specific gravity	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Loss of ignition
Cement	3,450	3.15	20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	-	-	2.4	1.36
Fly ash	3,360	2.30	45.7	22.4	8.1	11.8	1.3	0.5	0.8	0.4	6.44
Silica fume	-	-	90.1	1.7	2.1	0.4	0.6	0.2	0.9	-	3.38

Table 2. Physical properties of aggregates

Aggregate type	Specific gravity	Absorption (%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m ³)
Fine (river sand)	2.51	1.52	2.27	1,530
Coarse (crushed granite, 25mm)	2.64	0.54	7.32	1,500

Table 3. Mixture proportions of concrete

Design strength (MPa)	Mix type	Water	Cement	Fly ash	Aggregate		S/a (%)	Silica fume	HRWR (%)	W/B
					Coarse	Fine				
27	OPC	185	370	-	1016.2	680.8	40	-	0.2	0.50
	FA20		296	74						
	Na ₂ SO ₄		296	74						
40	OPC	160	450	-	1083.2	692.6	39	-	1.5	0.36
	FA20		360	90						
	Na ₂ SO ₄		360	90						
60	OPC	150	510	-	1053.2	673.4	39	25.5	2.5	0.28
	FA20		408	102						
	Na ₂ SO ₄		408	102						

3. 실험 결과 및 분석

3.1 조강제가 첨가된 플라이애시 콘크리트의 압축강도

Table 3에 나타난 대로 제작된 콘크리트 공시체의 재령에 따른 압축강도와 종파속도의 측정결과를 Table 4에 나타내었으며, 이를 Fig. 1에 도시하였다.

Table 4. Compressive strength and velocity of tested concrete cylinders

Design strength (MPa)	Mix type	Compressive strength (MPa)					Rod-wave velocity (km/s)				
		1	2	3	7	28	1	2	3	7	28
27	OPC	8.9	14.1	17.7	25.5	35.0	3.27	3.62	3.73	3.95	4.19
	FA20	5.3	10.5	13.5	19.1	30.2	2.87	3.43	3.54	3.83	4.04
	Na ₂ SO ₄	6.6	11.9	16.2	20.2	26.6	3.05	3.59	3.71	3.88	4.09
40	OPC	21.3	35.7	42.6	53.4	63.0	3.64	3.96	4.03	4.16	4.31
	FA20	5.1	21.8	29.6	42.8	55.7	2.81	3.74	3.90	4.13	4.26
	Na ₂ SO ₄	22.8	32.8	35.4	42.9	52.2	3.73	3.99	4.08	4.10	4.24
60	OPC	-	42.1	51.3	66.0	79.0	-	4.01	4.14	4.28	4.43
	FA20	-	30.6	40.4	59.9	78.4	-	3.80	3.98	4.20	4.34
	Na ₂ SO ₄	-	37.9	45.3	52.9	68.6	-	4.02	4.05	4.14	4.28

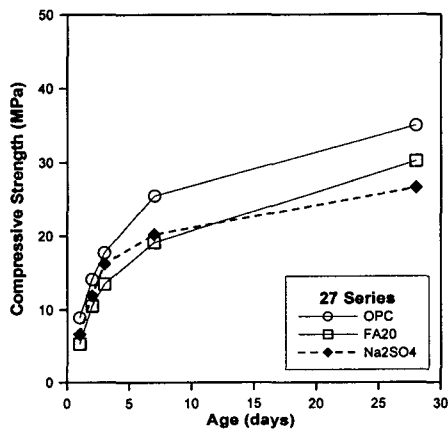
Table 4를 보면, 재령 28일에서 OPC의 압축강도는 강도 수준대로 각각 35.0, 63.0, 79.0 MPa임을 알 수 있다. 또한, OPC의 압축강도가 40 series의 재령 1일을 제외하고 모든 재령에서 FA20, Na₂SO₄ 배합보다 크게 나타났다. 예상한 대로 초기 재령에서 FA20 배합의 압축강도가 가장 낮았으며 재령 28일에서도 OPC의 압축강도보다 작게 나타났다.

Fig. 1(a), (b), 그리고 (c)를 보면, 플라이애시에 조강제가 첨가된 Na₂SO₄ 배합의 콘크리트 강도가 플라이애시만 사용된 콘크리트(FA20)의 강도보다 27과 40 series에서는 7일까지, 60 series에서는 3일까지

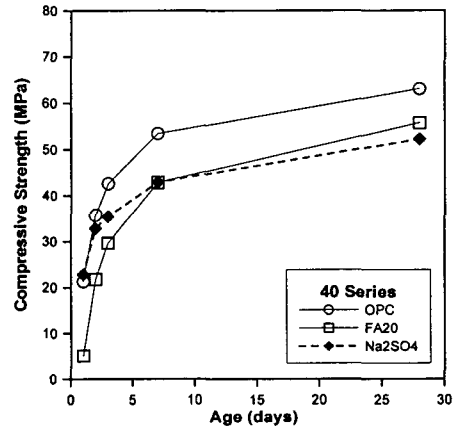
크게 나타났다. 하지만, 재령이 경과하면서 재령 28일의 강도는 역전되는 경향을 보였다.

Fig. 1(d)는 FA20과 Na₂SO₄ 배합의 재령 28일 강도를 기준으로 한 재령별 강도 발현률을 보여준다. Fig. 1(d)를 보면, 강도 수준에 상관없이 조강제가 첨가된 경우가 플라이애시만 사용된 콘크리트의 강도보다 초기의 강도 발현률이 모두 높게 나타났다. 예를 들어 40 series의 경우(사각형으로 표시), 재령 1일에서의 강도 발현률이 FA20은 약 9.2%로 매우 낮으나 Na₂SO₄ 배합의 경우에는 약 43.7%로 오히려 OPC(약 33.8 %)보다 크게 나타났다. 그러나 이러한 차이는 재령이 지나면서 점차 줄어드는 경향을 나타내었다.

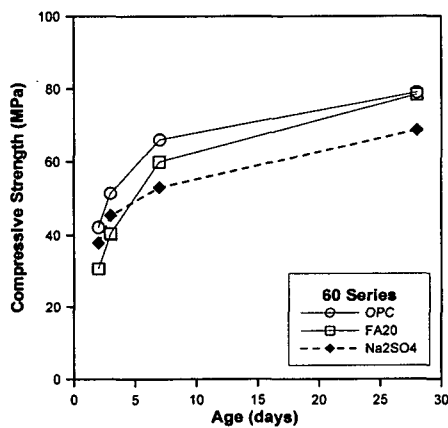
기 수행된 연구 결과⁽⁶⁻⁷⁾를 볼 때, 이러한 경향을 나타내는 이유는 플라이애시에 조강제가 첨가되면 초기에 에트링자이트의 생성이 많아지고 누적기공률이 적어져서 초기 강도 증진에 기여한 것으로 판단된다.



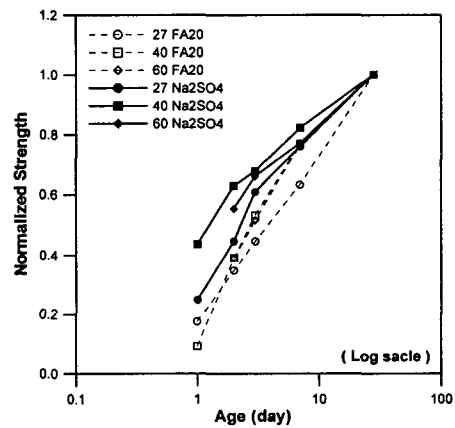
(a) 27 series



(b) 40 series



(c) 60 series



(d) Development rate of compressive strength

Fig. 1 Compressive strength of concrete with ages

3.2 고강도 콘크리트의 종파속도와 압축강도의 상관관계

Fig. 2에 콘크리트 공시체로부터 측정된 종파속도와 압축강도의 관계를 강도 수준별로 각각 나타내었다. 보통 강도 콘크리트(27 series)의 결과를 나타내는 Fig. 2(a)를 보면, 속도-강도의 관계가 비선형적인 일대일의 대응관계가 있음을 알 수 있다⁽⁸⁻⁹⁾. 즉 OPC, FA20, Na₂SO₄ 등의 배합 종류에 관계없이 속도에 따라 강도가 비례하는 것으로 나타났다. 이러한 일대일의 대응관계는 고강도 콘크리트(40과 60 series)의 경우에서도 동일하게 나타남을 Fig. 2(b)와 (c)를 통해 알 수 있다.

그러나 강도가 높아짐에 따라 속도-강도의 관계가 보통 강도 콘크리트와는 다른 경향을 나타내었다. 즉, 동일한 속도라 할지라도 이에 따른 강도는 강도 수준에 따라 차이를 보였다. 예를 들어, 종파속도가 4.0 km/s로 동일할 때 이에 대응되는 강도는 보통 강도 콘크리트에서는 약 25.3 MPa, 고강도 콘크리트에서는 각각 36.1 MPa와 41.4 MPa 정도로 각각 다르게 나타났다. 따라서, 콘크리트의 속도를 이용하여 비파괴적으로 콘크리트의 강도를 추정할 때에는 강도 수준에 따라 다른 추정식이 적용되어야 할 것으로 판단된다. 이밖에 강도를 포함한 초기 재령 콘크리트의 물성 변화를 모니터링하는 데에 콘크리트의 속도가 이용된다면 재령 초기에서의 콘크리트 품질관리에 큰 도움이 될 것으로 사료된다 (10-11)

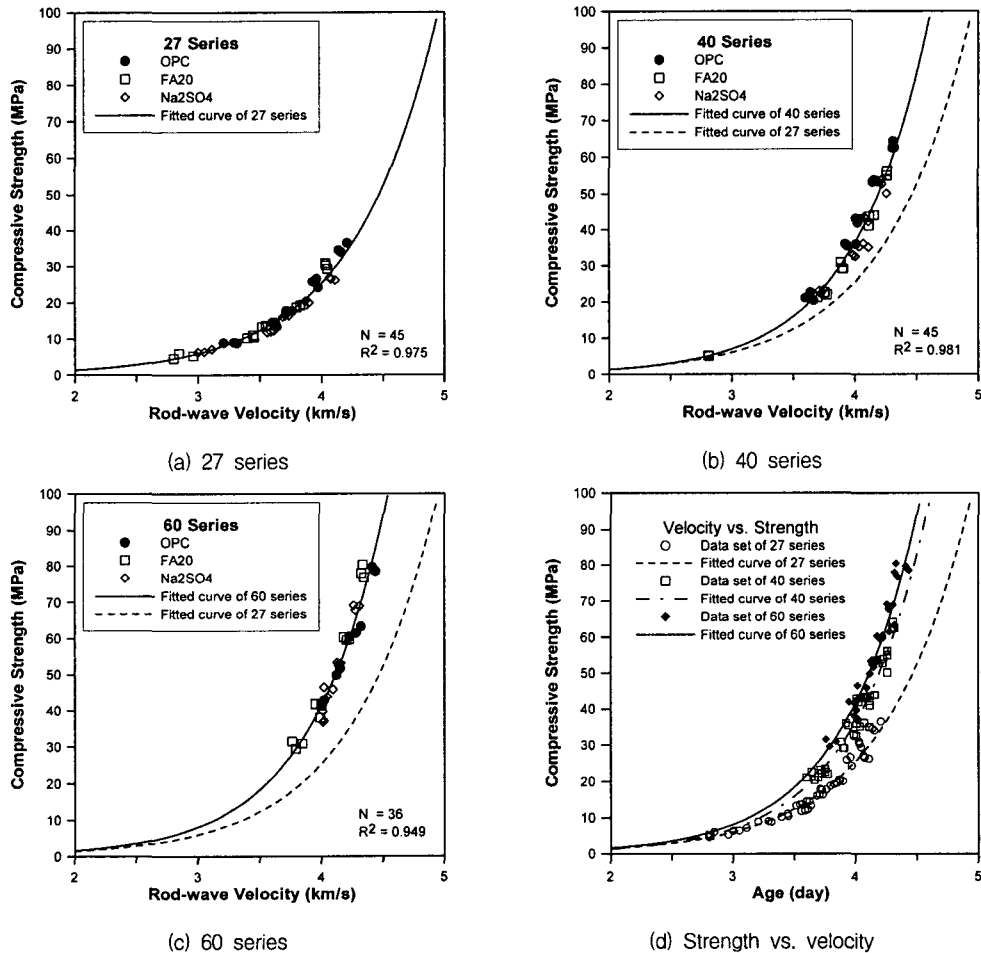


Fig. 2 Rod-wave velocity vs. compressive strength for tested concretes

4. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 플라이애시를 사용한 콘크리트에 조강제를 첨가한 결과, 초기 재령에서의 강도 발현률이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 따라서, 초기 재령 콘크리트의 품질관리를 위해 조강제가 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.
- (2) 배합의 종류(OPC, FA20, Na₂SO₄)에 상관없이 초기 재령 콘크리트의 속도와 강도는 일대일의 대응 관계가 있는 것으로 나타났다. 하지만, 고강도 콘크리트의 속도-강도의 관계는 보통 강도 콘크리트에서와는 다른 경향을 나타내었다. 따라서 속도를 이용하여 콘크리트의 강도를 추정하기 위해서는 강도 수준에 따라 다른 추정식이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학재단의 특정 기초연구(1999-1-311-004-3)지원 하에 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Hattori, K., *Experiences with mighty superplasticizer in Japan*, ACI SP-62, 1983, pp. 37-36.
2. Meyer, A., *Experiences with the use of superplasticizer in Germany*, ACI SP-62, 1981, pp. 21-36.
3. Aitcin, P.-C. *Condensed silica fume*, Editions de L'Universite, de Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, 1983, pp. 52.
4. Malhotra, V. M., Ramachandran, R., Feldman, R., and Aitcin, P.-C., *Condensed silica fume in concrete*, CRC Press, 1987, pp. 221.
5. Malhotra, V. M. and Mehta, P. K., *Pozzolan and cementitious materials*, Gordon and Breach Publishers, 1996, pp. 4-6.
6. 이진용, 배성용, "증기양생이 플라이애쉬 콘크리트의 강도발현에 미치는 영향," *한국콘크리트학회지*, 제10권 1호, 1998, pp.101-108.
7. 이진용, 조현수, 이선우, 이광명, "조강제를 함유한 플라이애쉬 시멘트 페이스트의 특징," *한국콘크리트학회논문집*, 제12권 6호, 2000, pp. 51-56.
8. 이회근, 이광명, 김동수, "초기 재령 콘크리트의 종파속도와 강도의 상관관계," *한국콘크리트학회논문집*, 제12권 6호, 2000, pp. 67-74.
9. Pessiki, S. and Johnson, M. R. "Nondestructive evaluation of early-age concrete strength in plate structures by the impact-echo method," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 3, 1996, pp. 260-271.
10. Rapoport, J. R., Popovics, J. S., Kolluru, S. V. and Shah, S. P., "Using ultrasound to monitor stiffening process of concrete with admixtures," *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 6, 2000, pp. 675-683.
11. Reinhardt, H. W., Groβe, C. U. and Herb, A. T., "Ultrasound monitoring of setting and hardening of cement mortar - A new device," *Materials and Structures*, Vol. 33, November 2000, pp. 580-583.