

초음파 속도 모니터링에 의한 고강도 콘크리트의 응결 평가

이회근¹⁾ · 이광명^{1)*}

¹⁾성균관대학교 토목환경공학과

(2002년 7월 22일 원고접수, 2002년 9월 13일 심사완료)

Setting Assessment of High Strength Concrete Using the Ultrasonic Pulse Velocity Monitoring

Hoi-Keun Lee¹⁾ and Kwang-Myong Lee^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

(Received July 22, 2002, Accepted September 13, 2002)

ABSTRACT

Recently, the use of high strength concrete (HSC) has increased dramatically and however, few studies have been conducted on the early-age properties of HSC such as setting. The penetration resistance test (specified by KS F 2436) that is the standard test method for determining initial and final setting times of concrete, may not be appropriate for HSC because of the high viscosity of the mortar mixture. To address this issue, an ultrasonic pulse velocity (UPV) monitoring system was used to investigate the setting behavior of mortar and concrete. The experimental study was carried out to measure the UPV's of mortars and concretes having various water/binder ratios (W/B) and various fly ash replacement levels, during the first 24 hours of testing. Test results showed that the UPV in concrete was developed faster than that of mortar with the same W/B, and that of ordinary concrete was greater than that of fly ash concrete. Typical values of UPV were suggested that correspond to the initial and final setting times, based on following criteria: (1) the penetration resistance method; (2) the instant when the UPV begins to develop; and (3) the instant when the UPV development rate is maximum. The method and UPV monitoring device used in this study is promising for the setting assessment of concrete, particularly for HSC.

Keywords : high strength concrete, setting time, ultrasonic pulse velocity, penetration resistance, fly ash

1. 서 론

응결 및 초기 강도 발현 특성은 콘크리트 시공 현장에서 작업 스케줄 조절과 콘크리트의 품질 관리 측면에서 매우 중요한 성질이다. 지금까지 콘크리트의 응결 시간 결정을 위해 주로 사용되어 온 관입 저항 시험(KS F 2436)에 의하면¹⁾, 콘크리트를 No. 4번(5 mm) 체로 체가름하여 얻은 모르타르에 대해 프록터(proctor)에 의한 관입 저항이 35 kgf/cm², 280 kgf/cm²에 도달할 때까지 소요되는 시간을 각각 초결과 중결로 규정하고 있다. 그러나, 콘크리트의 배합조건 등에 관계없이 일률적으로 관입 저항이 특정한 값에 도달했을 때를 초결과 중결로 규정하기에는 다소 모호한 면이 있다²⁾. 더욱이, 이 방법은 자동화 및 연속적인 측정이 어려우며, 시험 결과가 실험자의 숙련도에 따라 달라질 가능성이 크다. 특히, 콘크리트에 대해 측정하는 것이 아니라, 모르타르에 대해 실험하기 때문에 물

-결합재비(water-binder ratio, W/B)가 낮고 점성이 큰 고강도 콘크리트(high strength concrete, HSC)의 경우에는 콘크리트 배합으로부터 직접 모르타르 시료를 얻기가 쉽지 않아 관입 저항 시험을 적용하는 데 어려움이 따른다. 따라서, 관입 저항 시험의 대체 방법으로 콘크리트의 초기 상태 변화, 즉 유체에서 고체로의 변화에 민감하게 반응하는 초음파 속도(ultrasonic pulse velocity, UPV)와 같은 파속(wave velocity)을 이용하여 콘크리트의 응결 시간을 추정하고자 하는 연구가 꾸준히 시도되어 왔다^{3, 6)}.

Keating 등³⁾은 재령 초기에서의 시멘트 풀에 대한 UPV 특성에 관한 연구를 수행하여, 배합 직후에는 시멘트 풀 내에 상대적으로 많은 양의 물이 존재하기 때문에 UPV는 유체 상태에 의해 지배되며, 갇힌 공기가 UPV에 영향을 미친다고 보고하였다.

UPV와 응결과의 관계를 나타냄에 있어서, Kakuta와 Kojima는⁴⁾ 동전단계수(dynamic shear modulus)의 증가율이 최대가 되는 순간을 응결로 정의하였으며, Garnier 등⁵⁾과 Chotad 등⁶⁾은 UPV의 발현 곡선 특성을 이용하여 응결을 정의하고자 하였는데, 이에 대한 자세한 내용은 다음

* Corresponding author

Tel : 031-290-7516 Fax : 031-290-7549

E-mail : leekm79@dreamwiz.com

장에서 기술하였다.

Pessiki와 Carino⁷⁾는 종파 속도와 관입 저항 실험 결과를 비교하기 위해 충격반향기법(impact-echo method)을 사용하였으며, 콘크리트의 응결을 속도가 증가하기 시작할 때 또는 소정의 속도에 도달했을 때로 정의하였다. 그러나, 충격반향기법은 실험자가 임의의 시간에 수행하기 때문에 연속적인 실험이 어려워 콘크리트의 속도가 증가하기 시작하는 시점이나 소정의 속도에 도달하는 순간을 지나치기 쉽고, 응결의 기준 속도가 배합에 따라 달라지는 등의 단점이 있다.

국내의 윤석수와 권성덕⁸⁾은 UPV의 변화율이 증가하기 시작하는 시점과 UPV 증가율이 최대인 시점을 각각 초결과 종결로 규정하였으며, 구본창 등⁹⁾은 UPV 미분치의 최초 극대값을 초결로, 두 번째 극대값을 종결로 규정하였다. 이회근 등^{10,11)}은 모르타르와 콘크리트의 UPV와 관입 저항 시험에 의한 응결시간의 상관관계를 조사한 바 있다.

그러나, 지금까지 수행된 실험의 대부분은 주로 W/B가 높은 보통강도 콘크리트(normal strength concrete, NSC) 배합에 대해 것으로 HSC에 대한 실험 결과가 부족하고, 초음파 속도법에 의한 응결시간 추정방법도 정립되어 있지 않은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 HSC의 응결과 UPV에 대한 기존의 실험 결과^{10,11)}와 본 연구의 실험 결과를 분석하여 UPV를 이용한 응결시간 결정방법과 응결의 기준이 되는 UPV값을 제안하였다. 또한, 콘크리트의 내부미세구조의 변화와 UPV 발현 곡선과의 관계를 파의 물리적인 특성과 관련하여 논의하였다.

2. 이론적 배경

2.1 콘크리트의 미세구조 변화와 초음파와의 관계

Fig. 1은 전형적인 UPV의 발현 곡선을 나타내며 UPV의 변화 경향은 크게 3 구간으로 나눌 수 있다^{3,8,12,13)}. Fig. 2는 수화가 진행됨에 따른 시멘트 풀의 미세구조를 도식적으로 나타낸 것으로, 미세구조 변화와 UPV의 관계는 다음과 같이 설명할 수 있다.

배합 직후에는 시멘트 입자들 사이의 거리가 다소 멀리 떨어져 있으며, 입자들 사이가 물로 채워진 유체에 가까운 상태가 된다(Fig. 2(a)). 이 때 UPV는 유체를 통과하는 것으로 간주할 수 있으며, UPV는 거의 일정하게 된다(Fig. 1의 Step I). 시간이 지나 수화반응에 의해 생성된 수화물이 시멘트 입자 표면에 쌓이면서 입자 크기는 서서히 증가하여 시멘트 입자의 일부는 서로 연결되나 전체가 연결되는 것은 아니다(Fig. 2(b)). 계속된 수화로 시멘트 입자는 더욱더 커지게 되어 입자들이 서로 연결되며, 파가 서로 연결된 시멘트 입자들을 통해 전달되는 퍼콜레이션

(percolation)이 발생한다(Fig. 2(c)). 시간이 더 지나면, 시멘트 풀내 물의 양은 점차 줄어들고 수화에 의해 발생된 공극에는 물이 채워진 다공질의 매질로 간주될 수 있다(Fig. 2(d)). 이러한 변화를 겪는 동안, 파는 유체에서 고체의 매질을 통과하게 된다. 배합 초기, 시멘트 풀의 강성은 작지만 수화가 진행됨에 따라 내부미세구조의 성장으로 점점 커지게 되어 UPV가 증가하게 된다(Fig. 1의 Step II). 이후에는 매질의 강성이 최종값에 근접함에 따라 UPV가 일정한 값에 접근하는 경향을 나타낸다(Fig. 1의 Step III).

2.2 응결과 초음파 속도

응결이 발생하는 동안 초음파의 거동을 조사한 연구자들은 UPV를 사용하여 초결과 종결을 결정하는 몇 가지의 기준들을 제안하였으며, 그 중에서 본 연구에서는 관입 저항 시험에 의해 얻은 초결 및 종결 시간에 상응하는 UPV로부터 응결 시점을 결정하는 방법 이외에 다음의 두가지 방법을 고려하였다.

첫 번째는 Garnier 등⁵⁾과 Chotad 등⁶⁾이 제안한 것으로, Fig. 1에 나타난 이웃한 Step 사이의 변화 시점 즉, A와

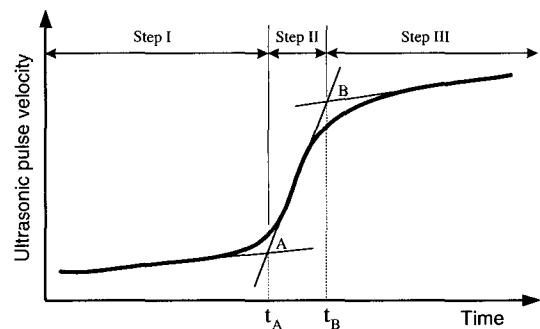


Fig. 1 Schematic representation of typical evolution of UPV

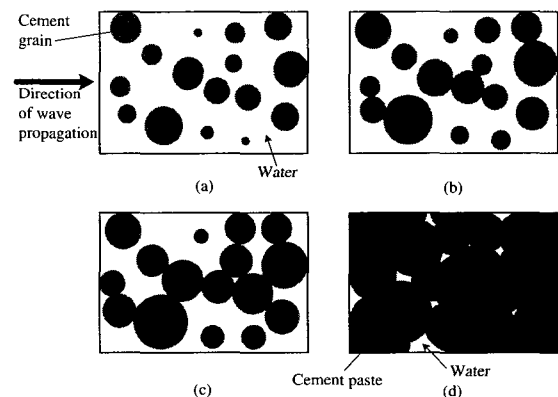


Fig. 2 Microstructural change that occur in the setting process of cement paste

B점이 미세구조의 변화와 관계가 있는 것으로 생각할 수 있다. Fig. 1의 A점은 2.1절에서 설명한 바와 같이 내부미세구조가 형성되기 시작하는 시점으로 볼 수 있으며, Pessiki와 Carino⁷⁾는 이 시점이 초결과 관계된 것으로 제안하였다.

두 번째는 UPV의 증가율이 최대가 되는 시점을 종결로 간주하는 것으로, 이 때 강성의 증가율이 최대에 이르게 되며 이 시점은 Fig. 1의 Step II 내에 존재한다.

3. 실험 연구

3.1 재료 및 배합비

모르타르와 콘크리트를 제조하기 위해 1종 시멘트와 플라이 애쉬를 사용하였으며, 이 재료들의 화학적 성분과 물리적 성질을 Table 1에 나타내었다. 강모래와 화강암 쇄석을 잔 골재와 굵은 골재로 사용하였으며, 이들의 비중은 각각 2.51, 2.64, 흡수율은 1.52%, 0.54%, 조립률은 2.64, 7.32이었다.

Table 2는 본 실험에서 사용한 12가지의 콘크리트 배합비로, Mix 1~4는 일반 콘크리트 배합(OPC)을, Mix 5~12는 시멘트량의 10%, 20%, 30%를 플라이 애쉬로 대체한 콘크리트 배합(FA10, FA20, FA30)을 나타낸다. OPC 콘크리트와 FA20 콘크리트는 기존의 연구¹¹⁾에서 사용했던 배합으로, 이 배합에 대해서는 보완실험을 수행하였다. NSC 배합(Mix 1, 7)과 W/B가 0.35이하인 HSC 배합(Mixes 2~6, 8~12)에 사용한 굵은 골재의 최대 치수는 각각 25 mm, 19 mm이었으며, HSC 배합에는 나프탈렌 계열의 고성능 감수제(HRWR)를 사용하였다. 관입 저항 시험에 사용된 모르타르는 굵은 골재를 빼고 모르타르 믹서를 이용하여 제조하였다.

3.2 초음파 속도 모니터링 시스템

Table 2 Mixture proportions of concrete per m³

Mix type	Mix no.	Water (kg)	Cement (kg)	Fly ash (kg)	Fine aggregate (kg)	Coarse aggregate (kg)	AE water reducer (B×%)	HRWR (B×%)	W/B
OPC	1	185	370	-	754	969	0.5	-	0.50
	2	158	450	-	672	1061	-	1.5	0.35
	3	155	500	-	626	1074	-	2.0	0.31
	4	148	550	-	617	1060	-	2.4	0.27
FA10	5	155	450	50	620	1064	-	2.0	0.31
	6	148	495	55	612	1049	-	2.4	0.27
FA20	7	185	296	74	744	956	0.5	-	0.50
	8	158	360	90	661	1043	-	1.5	0.35
	9	155	400	100	614	1054	-	2.0	0.31
	10	148	440	110	605	1038	-	2.4	0.27
FA30	11	155	350	150	608	1044	-	2.0	0.31
	12	148	385	165	598	1027	-	2.4	0.27

배합 직후부터 UPV를 연속적으로 측정하기 위해 Fig. 3에 나타난 UPV 모니터링 시스템을 사용하였다^{10,11,14)}. 이 시스템은 40 mm 두께의 아크릴 판과 발포고무 재질의 용기, 그리고 탐촉자의 중심 주파수가 54 kHz인 UPV 측정 장치로 이루어져 있다. 시료와 아크릴 판 사이의 접촉을 위해 4개의 볼트로 고정시켰으며, 아크릴 판 중앙에는 직경이 51 mm이고 깊이가 35 mm인 홈을 파고 직경이 50 mm인 탐촉자 표면에 커플런트(couplant)를 충분히 바른 후 고정시켰다. 시료를 용기에 붓고 다짐한 후 30분 간격

Table 1 Physical properties and chemical compositions and of cement and fly ash

Material		Cement	Fly ash
Properties	Specific gravity	3.15	2.27
	Blaine (cm ² /g)	3,450	3,375
Chemical composition (%)	SiO ₂	20.7	56.7
	Al ₂ O ₃	5.2	21.2
	Fe ₂ O ₃	3.0	6.0
	CaO	62.4	6.7
	MgO	4.7	1.4
	SO ₃	2.4	0.1
Loss on ignition		1.36	3.44

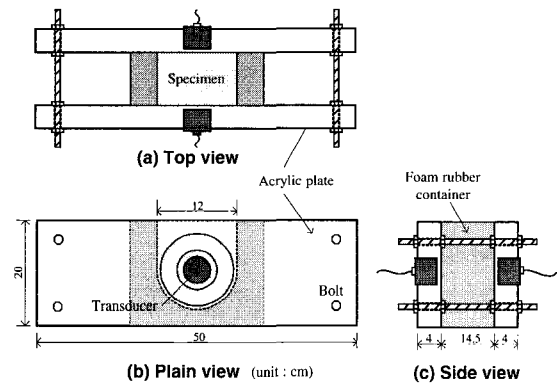


Fig. 3 Schematic of UPV monitoring system

으로 배합 후 처음 24시간 동안 UPV를 측정하였으며, UPV, V_p 는 다음과 같이 구하였다.

$$V_p = L/t_p \quad (1)$$

여기서, L은 시편을 통과하는 초음파의 직선 경로이며, t_p 는 L을 통과하는 데 걸린 시간이다. UPV와 관입 저항 실험시의 외기 온도는 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 이고 습도는 $50 \pm 5\%$ 이었다.

4. 실험 결과 및 분석

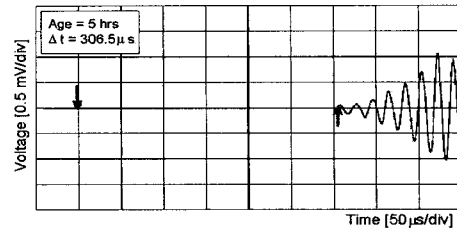
4.1 굳지 않은 콘크리트 성질 및 역학적 성질

Table 3은 본 실험에서 사용한 콘크리트의 슬럼프, 플로우, 공기량 등의 굳지 않은 콘크리트의 성질과 재령 1, 3, 7, 28일에서의 평균 압축강도와 탄성계수를 나타낸다. 슬럼프는 모든 배합에서 19 cm 이상, 공기량은 1.4~5.0%이었다. 특히, HSC 배합(Mixes 2~6, 8~12)의 슬럼프는 23 ± 2 cm로 재료 분리없이 일정 시간동안 유동성을 유지할 수 있었다. OPC 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 29.3~66.2 MPa이었으며, 상응하는 탄성계수는 26.9~36.2 GPa이었다. 또한, 플라이 애쉬 콘크리트의 경우에는 28일 까지의 재령에서는 동일한 W/B를 갖는 OPC 콘크리트보다 압축강도와 탄성계수가 낮게 나타났다.

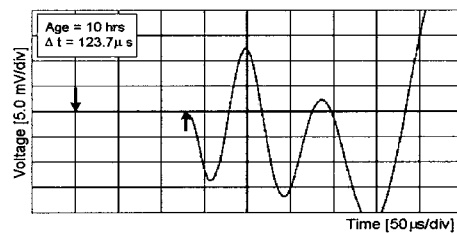
4.2 재령 초기에서의 초음파 파형 변화

Fig. 4는 오실로스코프(oscilloscope)를 이용하여 W/B가 0.50 (Mix 1)인 모르타르에 대해 배합 후 5, 10, 21시간에서 측정된 시간영역에서의 초음파 파형을 나타낸다. Fig. 4에서 아래 방향의 화살표는 발진된 초음파를, 위 방향의 화살표는 발진된 초음파가 수신자에 도착된 순간을 각각

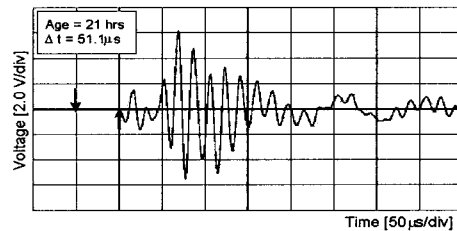
나타낸다. 두 화살표 사이가 초음파가 시료를 통과한 시간으로 Fig. 4에서 Δt 가 이에 해당한다. Fig. 4(a)~(c)로부터, 시간이 지남에 따라 초음파의 통과시간이 감소함을 알 수 있으며 이는 곧 UPV가 점차 증가함을 의미한다.



(a) 5 hrs



(b) 10 hrs



(c) 21 hrs

Fig. 4 Ultrasonic waveform obtained using oscilloscope for mortar with W/B of 0.50 (Mix 1)

Table 3 Properties of fresh and hardened concrete

Mix type	Mix no.	Slump (cm)	Flow (cm)	Air content (%)	Compressive strength (MPa)				Modulus of elasticity (GPa)			
					1	3	7	28 days	1	3	7	28 days
OPC	1	19.0	41×40	5.0	9.6	20.3	25.3	31.1	14.0	21.0	24.9	26.9
	2	21.0	45×45	4.8	21.8	37.7	43.0	47.1	22.1	29.4	31.2	32.9
	3	22.5	55×53	2.4	25.0	42.8	49.4	55.5	24.9	30.1	33.2	34.3
	4	23.0	54×55	2.0	30.3	48.1	58.3	66.2	25.2	32.5	35.7	36.2
FA10	5	22.0	55×53	2.0	20.2	38.3	47.8	53.4	19.8	28.3	32.5	34.0
	6	22.5	60×62	1.7	24.3	43.9	53.1	63.6	23.5	32.3	33.5	35.1
FA20	7	19.0	42×40	4.7	6.1	16.1	20.7	29.3	12.3	18.0	19.5	26.7
	8	23.5	56×58	3.3	14.0	29.3	37.4	45.9	16.6	25.9	28.4	32.4
	9	24.5	58×63	2.1	14.2	35.0	40.7	52.6	18.1	27.3	29.0	33.6
	10	24.0	63×62	1.6	13.4	38.9	45.6	62.4	16.4	28.5	32.4	34.5
FA30	11	23.5	56×55	1.7	5.6	28.2	36.5	49.3	10.2	25.0	27.6	32.8
	12	24.5	63×65	1.4	4.7	30.8	41.1	55.8	10.1	25.8	29.3	35.0

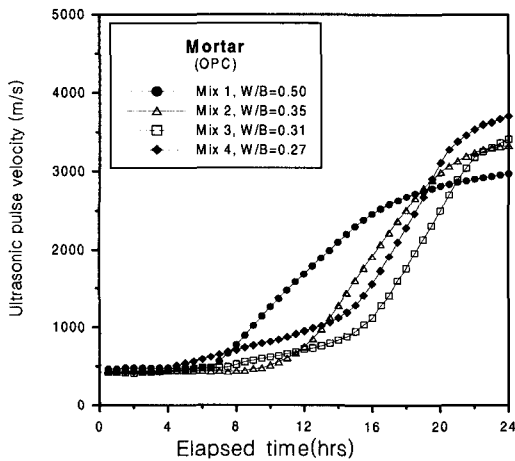
4.3 초음파 속도 모니터링 결과

4.3.1 W/B에 따른 UPV 발현 특성

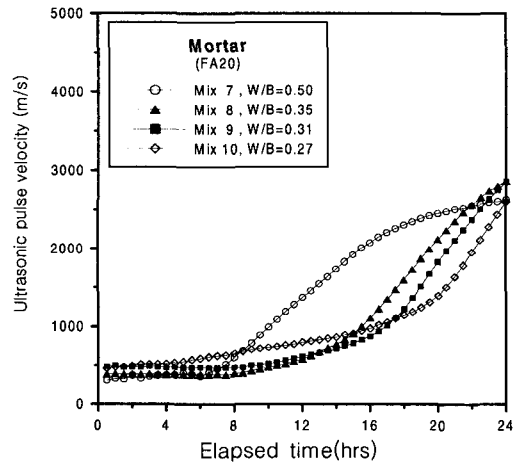
Fig. 5와 Fig. 6은 W/B에 따른 모르타르와 콘크리트의 UPV 모니터링 결과로, Fig. 5는 OPC series(Mix 1~4)를, Fig. 6은 FA20 series(Mix 7~10)를 각각 나타낸다. Fig. 5와 Fig. 6을 보면, 전체적으로 UPV의 발현 곡선이 Fig. 1과 유사한 형태를 나타냄을 알 수 있다. 배합 후 수 시간 동안에는 모든 모르타르와 콘크리트의 UPV가 거의 비슷한 크기를 나타내고 있으나, 시간이 지나면서 콘크리트의 UPV가 동일한 W/B를 갖는 모르타르보다 훨씬 큰 경향을 나타내었다. 이는 2.1절에서 언급한 바와 같이, Fig. 2(a) 단계에서는 UPV가 굵은 골재의 영향을 받지 않고 주로 유체 상태에 의해 지배되며, UPV도 약 300~500 m/s로 매우 작은 경향을 나타내는 데, 이는 굳지 않은 배합내 시멘트 입자들의 부유로 파의 전달 경로가 길어지기 때문이다¹⁵⁾. 하지만, 재령이 지나면서 초음파를 전달하는

매질이 점차 고체로 바뀌면서 굵은 골재를 함유한 콘크리트의 강성이 모르타르보다 커지기 때문에 콘크리트의 UPV가 모르타르의 UPV보다 큰 경향을 나타내게 된다. 또한, W/B가 동일한 경우, 모르타르와 콘크리트에서 FA20의 UPV 발현률이 OPC 보다 낮은 경향을 나타내었는데, 이는 플라이 애쉬의 사용으로 초기 수화가 지연되었기 때문인 것으로 판단된다.

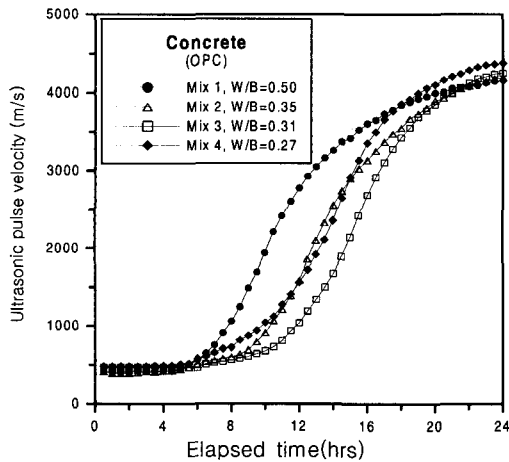
Fig. 5와 Fig. 6을 자세히 관찰해 보면, UPV의 발현 곡선이 NSC 배합과 HSC 배합에서 다른 점을 발견할 수 있다. 즉, NSC 배합(Mix 1, 7)의 UPV 발현 결과를 보면, UPV가 초기에는 일정하게 유지되다가 갑자기 증가하는 경향을 보인 반면에, HSC 배합(Mix 2~6, 8~12)에서는 다소 긴 시간동안에 UPV가 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 이처럼 초기재령에서 고강도 배합의 UPV 발현이 늦어지는 이유는 응결지연의 효과가 있는 HRWR의 사용 때문인 것으로 판단되며, 여기에 플라이 애쉬가 함께 사용됨으로써 OPC보다 FA20 배합에서 UPV 발현률이 더욱더



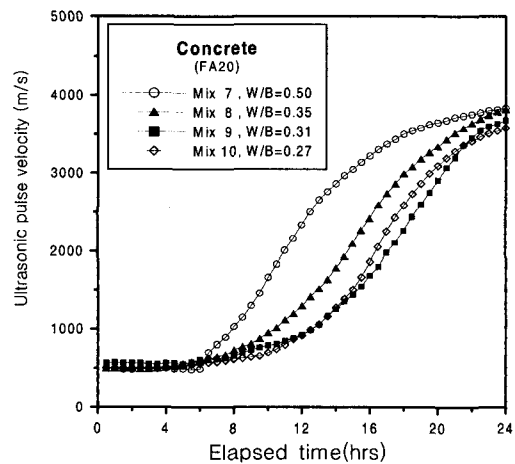
(a) OPC mortar



(a) FA20 mortar



(b) OPC concrete



(b) FA20 concrete

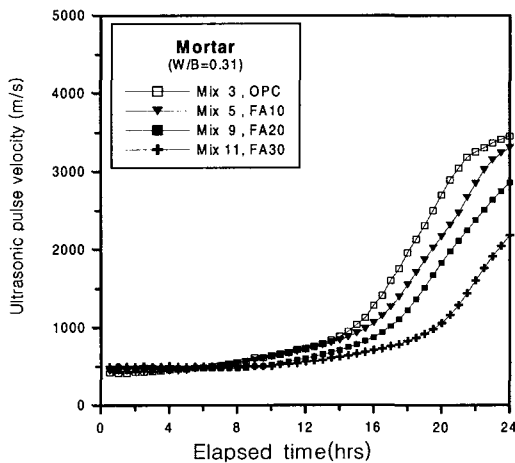
Fig. 5 Development of UPV for OPC series with various W/B

Fig. 6 Development of UPV for FA20 series with various W/B

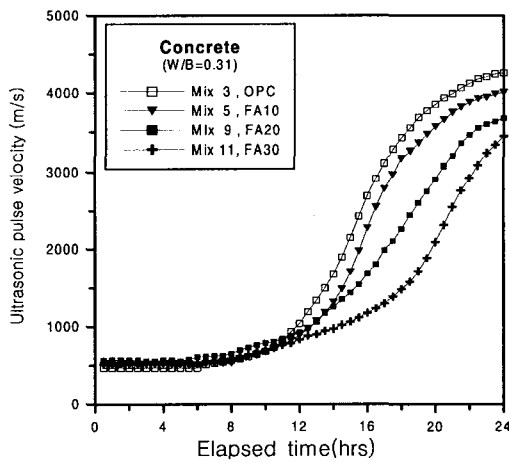
지연된 것으로 사료된다.

4.3.2 플라이 애쉬 대체율에 따른 UPV 발현 특성

Fig. 7과 Fig. 8은 W/B가 0.31과 0.27인 고강도 배합에 대해 플라이 애쉬의 대체율이 각각 0%, 10%, 20%, 30% 일 때 모르타르와 콘크리트의 UPV 모니터링 결과를 나타낸다. Fig. 5와 Fig. 6에서와 마찬가지로, 배합 후 일정 시간 동안에는 플라이 애쉬의 대체율이 상관없이 UPV가 모두 비슷한 크기를 나타내었다. 하지만, 플라이 애쉬 대체율이 증가할수록 UPV가 서서히 증가하는 구간이 길어지는 경향을 나타내었으며, 재령 초기에서의 UPV 발현률이 낮아짐을 알 수 있다. 이는 플라이 애쉬의 대체율이 증가할수록 수화에 직접적으로 기여하는 시멘트량이 상대적으로 감소하여 초기 수화가 지연되었기 때문인 것으로 사료된다. 이상의 결과로부터, 주어진 배합의 UPV를 연속적으로 모니터링함으로써 배합 특성과 재령 초기에서의 성질을 간접적으로 조사할 수 있을 것으로 사료된다.



(a) Mortar



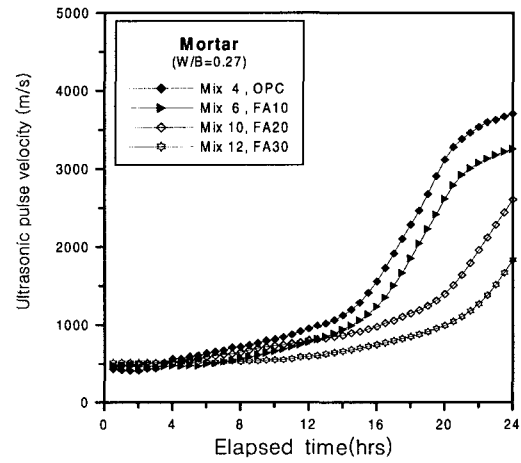
(b) Concrete

Fig. 7 Development of UPV for mortar and concrete having various fly ash contents at W/B of 0.31

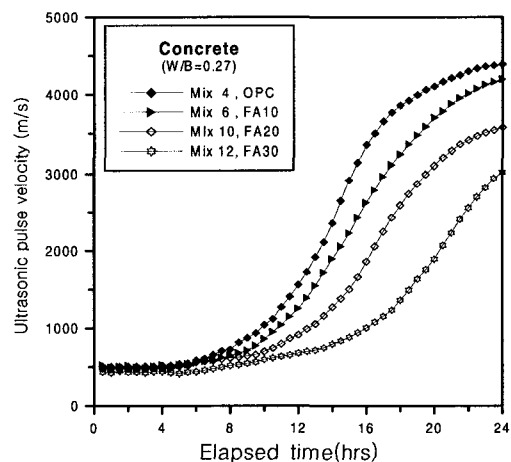
4.4 초음파 속도와 응결과의 관계

본 실험에서 사용한 12가지 배합에 대해 관입 저항 시험(KS F 2436)을 수행하여 얻은 응결 시간과, UPV를 이용하여 응결시간을 결정하기 위한 기준을 적용했을 때의 특정 시간과 이에 대응되는 UPV를 모르타르 배합은 Table 4(a)에, 콘크리트 배합은 Table 4(b)에 각각 나타내었다. Table 4에서, Criterion 1I와 Criterion 1F는 관입 저항 시험의 초결과 종결에 근거한 것이며, Criterion 2I는 Fig. 1에서 Step I과 Step II의 경계 즉, A점을 초결 시간으로 가정한 것이다. 마지막으로, Criterion 2F는 UPV를 시간에 대해 미분하여, 즉 dV_p/dt 가 최대가 되는 시간을 종결의 기준으로 가정한 것으로, 한 예로 OPC series (모르타르와 콘크리트)에 대한 UPV의 시간에 따른 증가율 변화를 Fig. 9에 나타내었다.

4.4.1 모르타르



(a) Mortar



(b) Concrete

Fig. 8 Development of UPV for mortar and concrete having various fly ash contents at W/B of 0.27

Table 4 Times and corresponding UPV's based on various criteria for setting

(a) Mortar

Mix type	Mix no.	Initial setting				Final setting			
		Penetration resistance (KS F 2436) (Criterion 1I)		Beginning of UPV development (Criterion 2I)		Penetration resistance (KS F 2436) (Criterion 1F)		Maximum rate of UPV development (Criterion 2F)	
		Time (hr:min)	UPV (m/s)	Time (hr:min)	UPV (m/s)	Time (hr:min)	UPV (m/s)	Time (hr:min)	UPV (m/s)
OPC	1	8:10	800	6:30	480	10:15	1300	9:40	1150
	2	12:30	855	11:10	610	14:30	1445	15:30	1750
	3	14:50	930	14:30	885	16:50	1350	19:10	2160
	4	12:45	980	13:00	1020	14:40	1220	18:30	2450
FA10	5	15:05	930	14:50	1000	17:10	1280	19:50	2100
	6	13:10	850	14:20	950	16:10	1260	19:00	2200
FA20	7	9:40	920	6:30	350	12:10	1380	10:20	1020
	8	15:30	1000	13:10	700	17:25	1400	18:10	1630
	9	17:00	990	15:20	800	19:05	1460	20:10	1850
FA30	10	16:25	1010	17:40	1100	18:55	1230	22:30	2120
	11	19:10	930	18:30	900	21:10	1310	22:20	1680
	12	17:30	830	19:40	930	20:40	1050	24:00	1830

(b) Concrete

Mix type	Mix no.	Initial setting				Final setting			
		Penetration resistance (KS F 2436) (Criterion 1I)		Beginning of UPV development (Criterion 2I)		Penetration resistance (KS F 2436) (Criterion 1F)		Maximum rate of UPV development (Criterion 2F)	
		Time (hr:min)	UPV (m/s)	Time (hr:min)	UPV (m/s)	Time (hr:min)	UPV (m/s)	Time (hr:min)	UPV (m/s)
OPC	1	8:10	1100	6:00	560	10:15	2050	9:40	1750
	2	12:30	1850	9:50	840	14:30	2700	12:50	2000
	3	14:50	2000	11:40	950	16:50	3000	15:20	2290
	4	12:45	1830	10:00	1040	14:40	2700	14:00	2320
FA10	5	15:05	1700	12:40	980	17:10	2800	16:00	2250
	6	13:10	1580	10:20	900	16:10	2650	15:00	2230
FA20	7	9:40	1500	6:00	500	12:10	2380	10:00	1630
	8	15:30	2260	10:00	950	17:25	2850	15:10	2120
	9	17:00	1980	12:10	940	19:05	2600	19:00	2000
FA30	10	16:25	2000	12:20	950	18:55	1950	17:00	2250
	11	19:10	1940	15:50	1180	21:10	2780	20:30	2500
	12	17:30	1230	15:30	950	20:40	1900	21:00	2230

모르타르의 경우(Table 4(a)), 초결시 UPV가 Criterion II에서는 W/B 또는 플라이 애쉬의 사용과 무관하게 800~1010 m/s이었으며, 12가지 모르타르 배합의 평균은 약 920 m/s이었다. 반면에, Criterion 2I에서는 W/B가 낮아질수록 즉 고강도 모르타르일수록 초결에 상응하는 UPV가 점차 증가하는 경향을 나타내어 그 범위가 350~1100 m/s로 다소 큰 것으로 나타났다. 그러나, W/B가 고정된 상태에서 플라이 애쉬의 대체율에 따른 UPV의 변화는 일정한 경향을 나타내지는 않았다.

한편, 종결시 UPV는 Criterion 1F에서는 1050~1460 m/s이었으며, Criterion 2F에서는 Criterion II에서와 마찬가지로 W/B가 낮아질수록 UPV가 증가하는 경향을 나타

내었고, Criterion 1F에 비해 종결의 기준 속도가 크게 증가하였다.

4.4.2 콘크리트

콘크리트의 경우(Table 4(b))에는 4.3절에서 언급한 바와 같이, 콘크리트의 UPV가 모르타르에 비해 빨리 발현하기 때문에 응결의 기준이 되는 UPV도 모르타르에 비해 전반적으로 증가함을 알 수 있다. 콘크리트의 초결 시간을 결정하기 위하여 Criterion 1I와 2I를 적용했을 때의 평균 UPV는 각각 1635 m/s와 895 m/s로 큰 차이를 보였다. 비록, UPV의 증가 시작 시점을 초결로 가정한 Criterion 2I를 적용했을 경우 UPV 기준속도가 배합에 따라 다소 큰

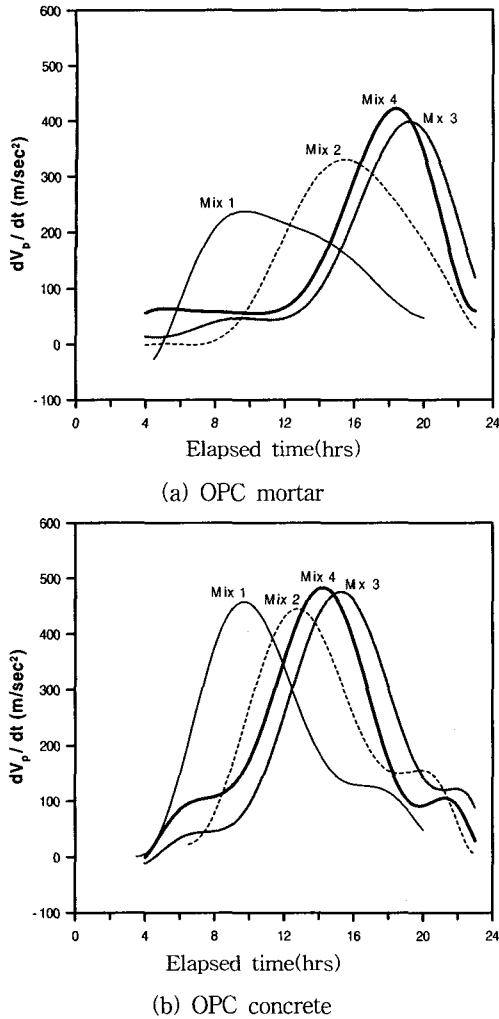


Fig. 9 Development rate of UPV for OPC series

차이를 나타내었으나, 2장에서 언급한 내용을 고려할 때 관입 저항 시험에 근거한 Criterion II보다 콘크리트의 미세구조의 변화를 보다 잘 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

종결시 UPV는 Criterion 1F에서는 1900~3000 m/s, Criterion 2F에서는 1630~2500 m/s로 그 범위가 매우 크게 나타났으며, Criterion 2F에 의한 UPV의 발현률이 최대가 되는 시간이 관입 저항 시험에 의해 결정된 종결 시간(Criterion 1F)에 대체적으로 근접하는 경향을 나타내었다.

이상의 결과로 미루어 볼 때, 특정한 배합비를 갖는 콘크리트에 대하여 응결의 기준이 되는 UPV가 제시된다면 응결과정을 모니터링 하기 위한 목적으로 UPV 모니터링 시스템을 실용적인 측면에서 널리 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 초음파 속도 자동 모니터링 시스템을 이용하여 배합

직후부터 모르타르와 콘크리트의 UPV를 측정할 수 있었다. 이 방법은 모르타르뿐만 아니라 콘크리트에 대해서도 직접 적용할 수 있기 때문에 기존의 관입 저항 시험 방법보다 실용적인 측면에서 장점을 가지며, 특히 점성이 커서 콘크리트로부터 모르타르를 얻기 어려운 고강도 콘크리트에의 적용성이 높을 것으로 판단된다.

2) 아주 이른 재령에서, 동일한 W/B를 갖는 콘크리트와 모르타르의 UPV는 굵은 골재 또는 플라이 애쉬의 존재에 상관없이 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 그러나, 시간이 지나면서 콘크리트의 UPV가 모르타르보다, 그리고 FA 콘크리트보다 OPC 콘크리트의 UPV가 더 커지는 경향을 나타내었다. 이를 파의 전파 이론에 의해 설명하였으며, 이는 플라이 애쉬와 HRWR의 영향 때문인 것으로 사료된다.

3) 다양한 W/B를 갖는 모르타르 배합에 대해 관입 저항 시험을 수행하여 초결과 종결 시간을 결정하였으며, 이에 대응하는 모르타르와 콘크리트의 UPV를 얻었다. 또한, UPV가 발현하기 시작하는 순간과 UPV의 발현률이 최대가 되는 순간을 초결과 종결로 가정하는 방법이 관입 저항과 UPV의 상관관계에 의한 방법에 비하여 모르타르의 미세구조 변화를 보다 잘 반영하는 것으로 판단되나, 각 배합별로 초결과 종결시의 UPV의 차이가 다소 크기 때문에 앞으로 이에 대한 더 많은 실험과 분석이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. "관입 저항에 의한 콘크리트의 응결 시간 측정," KS F 2436.
2. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., "Concrete: Structure, Properties, and Materials," 2nd edition, Prentice Hall, New York, 1993.
3. Keating, J., Hannant, D. J., and Hibbert, A. P., "Comparison of Shear Modulus and Pulse Velocity Techniques to Measure the Built-up of Structure in Fresh Cement Pastes used in Oil Well Cementing," *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, No. 4, 1989, pp.554~566.
4. Kakuta, S. and Kojima, T., "Evaluation of Very Early Age Concrete Using a Wave Propagation Method," *Quality Control of*

- Concrete Structures*, Ed. Taerwe, L. and Lambotte, H., E&FN Spon, Ghent, Belgium, 1991, pp.163~172.
5. Garnier, V., Corneloup, G., Sprauel, J. M., and Perfumo, J. C., "Setting Time Study of Roller Compacted Concrete by Spectral Analysis of Transmitted Ultrasonic Signals," *NDT&E International*, Vol. 28, No. 1, 1995, pp.15~22.
 6. Chotard, T., Gimet-Brert, N., and Smith, A., Fargeto, D., 10. Bonnet, J. P., and Gault, C., "Application of Ultrasonic Testing to Describe the Hydration of Calcium Aluminate Cement at the Early Age," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2001, pp.405~412.
 7. Pessiki, S. P. and Carino, N. J., "Setting Time and Strength of Concrete Using the Impact-Echo Method," *ACI Materials Journal*, Vol. 85, No. 5, 1988, pp.389~399.
 8. 윤석수, 권성덕, "초음파 속도 측정에 의한 콘크리트 응결시간 결정에 관한 연구," 한국물리학회지, 제7권 3호, 1994, pp.209~214.
 9. 구분창, 강민호, 이대근, 김종우, 하재담, 박석균, "초음파법에 의한 콘크리트 응결시간 측정에 관한 연구," 콘크리트학회 봄 학술발표회, 1998, pp.707~711.
 10. 이회근, 이광명, "초음파 속도 모니터링에 의한 모르타르의 초기 재령 특성 평가," 콘크리트학회 가을 학술발표회, 제13권 2호, 2001, pp.245~250.
 11. 이회근, 이광명, 김영환, 임현준, "초음파 속도를 이용한 콘크리트의 응결 및 초기 강도 추정," 한국비파괴검사학회지, 제22권 3호, 2002, pp.292~303.
 12. Popovics, S., Silva-Rodriguez, R., Popovics, J. S., and Martucci, V., "Behavior of Ultrasonic Pulses in Fresh Concrete," *New Experimental Techniques for Evaluating Concrete Materials and Structural Performance*, SP-143, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. 1993, pp.220~225.
 13. Boumiz, A., Vernet, C., and Cohen Tenoudji, F., "Mechanical Properties of Cement Pastes and Mortars at Early Ages," *Advanced Cement Based Materials*. Vol. 3, 1996, pp.94~106.
 14. Reinhardt, H. W., Große, C. U., and Herb, A. T., "Ultrasonic Monitoring of Setting and Hardening of Cement Mortar," *Materials and Structures*, Vol. 33, Nov., 2000, pp.580~583.
 15. 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.
 16. Valic, M. I., "Hydration of Cementitious Materials by Pulse Echo USWR Method, Apparatus and Application Examples," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp.1633~1640.

요 약

최근 들어, 고강도 콘크리트의 사용이 증가하고 있으나 응결과 같은 초기 성질에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 콘크리트의 초결과 종결 시간을 결정하기 위해 널리 사용되어 온 관입 저항 시험 방법(KS F 2436)은 점성이 커서 콘크리트로부터 모르타르를 얻기 어려운 고강도 콘크리트에는 적용하는 데에 어려움이 따른다. 따라서, 콘크리트의 응결 거동을 조사하기 위해 본 연구에서는 관입 저항 방법 대신에 초음파 속도 모니터링 시스템을 이용하여, 다양한 물-결합재 비(W/B)와 플라이 애쉬의 사용량에 따른 모르타르와 콘크리트에 대해 배합 직후부터 처음 24시간 동안 초음파 속도를 연속적으로 측정하였다. 실험 결과, 콘크리트의 초음파 속도가 동일한 W/B을 갖는 모르타르보다 빨리 발현되었으며, 일반 콘크리트의 초음파 속도 발현이 플라이 애쉬 콘크리트보다 빠른 것으로 나타났다. 또한, 세 가지의 기준, 즉 (1) 관입 저항 시험, (2) 초음파 속도가 증가하기 시작하는 시점, (3) 초음파 속도의 증가율이 최대가 되는 시점 등에 근거하여 초결과 종결에 해당하는 초음파 속도 값을 제시하였다. 본 연구에서 사용한 초음파 속도 모니터링 장치와 응결 추정 방법은 콘크리트 현장에서 특히, 고강도 콘크리트의 응결 평가에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 고강도 콘크리트, 응결 시간, 초음파 속도, 관입 저항, 플라이 애쉬