

초음파 속도를 이용한 콘크리트의 응결 및 초기 강도 추정

Estimation of Setting Time and Early-age Strength of Concrete Using the Ultrasonic Pulse Velocity

이희근^{*.†}, 이광명^{*}, 김영환^{**}, 임현준^{***}

Hoi Keun Lee^{*.†}, Kwang Myong Lee^{*}, Young Hwan Kim^{**} and Hyunjune Yim^{***}

초 록 본 연구에서는 모르타르와 콘크리트의 초음파 속도를 자동적으로 측정할 수 있는 모니터링 시스템을 이용하여 물-결합재 비(W/B)가 0.27~0.50인 모르타르와 콘크리트의 초음파 속도를 배합 직후부터 24시간까지 측정하였다. 또한, 응결 시간과 압축강도를 측정하기 위해 관입 저항 시험과 압축강도 시험을 각각 수행하였다. 실험결과로부터, 보통강도 콘크리트 배합의 초음파 속도는 배합 후 수 시간 동안에는 일정하다가 이후부터 갑자기 증가하는 경향을 보인 반면에, 고강도 콘크리트 배합에서는 고성능 감수제의 사용에 따른 응결 지연으로 초음파 속도가 서서히 증가하는 경향을 보였다. 그리고, 콘크리트의 응결은 초음파 속도가 소정의 속도에 도달했을 때 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 초음파 속도로부터 재령 3일 이하의 초기 강도 추정식에 W/B의 영향을 고려하면 보다 정확한 예측이 가능하리라 판단된다.

주요용어: 초음파 속도, 관입 저항, 응결, 압축강도, 플라이애시

Abstract This paper presents experimental results for early-age properties of concrete such as the setting time and strength, evaluated via the ultrasonic pulse velocity (UPV). Developing and using an automatically-recording monitoring system, the UPV's of mortar and concrete with various water to binder ratios (W/B) were measured during the first 24 hours. In addition, probe penetration and compression tests were conducted to measure the setting time and compressive strength, respectively. It was observed that the UPV's of mortar with high W/B remained constant during the first 6.5 hours and then abruptly began to increase at constant rates. On the other hand, the UPV of mortar with low W/B increased relatively slowly and gradually due to the setting retardation caused by the use of high range water reducing agent (HRWR). It was found that setting of concrete occurs when the UPV reaches a certain value. Moreover, it was concluded that the estimation formulas should incorporate the effects of W/B to more accurately estimate the early-age strength of concrete from the UPV.

Keywords: ultrasonic pulse velocity, probe penetration, setting time, compressive strength, fly ash

1. 서 론

콘크리트가 단순히 물, 시멘트, 그리고 골재로만 이루어졌던 과거와는 달리, 근래에는 혼화재료의 사용이 필수적이라 할만큼 다양한 형태와 성능을 가진 무기계 혼화제 및 화학 혼화제가 사용되면서 콘크리트는 점점 더 복잡한 재료가 되어 가고 있다. 또한, 콘크리트가 차츰 고강도화, 고성능화 됨에 따라 이들의 초기 거동에 대한 관심이 높아지고 있으며 그 중에서도 특히, 응결 특성과 초기 강도는 콘크리트의 품질 관리 측면에서 대단히 중요한 특성이라 할 수 있다.

콘크리트는 유동성이 큰 소성 상태에서 고체 상태로 바뀌는 동안 블리딩, 침하, 초기 수축, 시멘트의 수화열에 의한 온도상승 등의 여러 가지 변화를 겪는다. 그리고 시멘트의 수화반응이 계속되면서 콘크리트는 응결(setting) 후 강도 발현 단계인 경화(hardening) 과정을 거치게 된다. 이러한 콘크리트의 초기 상태는 사용된 재료들의 특성과 배합비, 그리고 양생 조건 등의 여러 가지 인자들에 의해 영향을 받는다.

지금까지 콘크리트의 응결은 주로 관입 저항 시험에 의해 이루어져 왔으나, 이 방법은 응결 시간이 길어질 경우 장시간 측정하기가 힘들며, 시험 결과가 실험자의 숙련도에 따라 다소 달라질 가능성이 있다. 또한, 콘크리트 자체에 대해 측정하는 것이 아니라, 콘크리트를 채로 쳐서 얻은 모르타르에 대해 실험하기 때문에 물-결합재 비(water to binder ratio, W/B)가 낮고 점성이 큰 고강도 콘크리트의 경우에는 콘크리트 배합으로부터 직접 모르타르 시료를 얻기가 쉽지 않아 관입 저항 시험을 적용하는 데 어려움이 따른다. 따라서 관입 저항 시험의 대체 방법으로 굳지 않은 콘크리트의 성질 변화에 초음파가 민감하게 변함을 인식하고 초음파 속도로부터 콘크리트의 응결 시간 및 강도 추정에 대한 연구가 꾸준히 시도되어 왔다[1-4]. 하지만 아직 이에 대한 데이터가 충분하지 않으며, 실험 방법에 대한 표준화도 이루어지지 않은 실정이다. 또한, 콘크리트의 강도 추정을 위해 초음파 속도와 강도의 상관관계에 대한 많은 연구와 강도 추정식이 제안되었지만 그 사용이 제한적이며, 특히 속도-강도의 데이터에 대한 분석이 체계적으로 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 초음파 속도 모니터링 시스템을 이용하여 재령에 따른 모르타르의 초음파 속도를 측정하여 이를 관입 저항 시험 결과와 비교하였으며, 이로부터 초음파 속

도와 응결과의 관계를 조사하였다. 그리고, 콘크리트의 초기 강도 추정을 위해서 W/B에 따른 콘크리트의 공시체로부터 측정된 초음파 속도와 강도와의 상관관계를 조사, 분석하여 보다 향상된 강도 추정 방법을 제시하였다.

2. 콘크리트의 초기 특성과 속도와의 관계

2.1. 응결과 속도

시멘트는 접수와 동시에 수화반응을 시작하며, 수화반응이 진행되면서 시멘트 입자 주위에 수화물이 생성되고, 이 수화물이 서로 결합하여 시멘트 입자사이가 수화물로 채워지면서 응결하기 시작한다. 콘크리트의 응결은 시멘트 종류, W/B, 대기온도, 혼화재료 등에 의해 영향을 받는다[5].

관입 저항 시험에 의하면 콘크리트를 No. 4번(5 mm) 체로 체가름하여 얻은 모르타르에 대해 프록터(proctor)에 의한 관입 저항이 35 kgf/cm^2 , 280 kgf/cm^2 에 도달할 때까지 소요되는 시간을 각각 초결(initial setting)과 종결(final setting)으로 규정하고 있다[6]. 그러나 관입 저항이 임의의 값에 도달하였을 때를 콘크리트 내부의 미세구조가 변화하는 시점으로 생각하기에는 다소 모호한 면이 있다.

Keating 등은 재령 초기에서의 시멘트 풀에 대한 초음파 속도 특성에 관한 연구를 수행하여, 배합 직후에는 시멘트 풀 내에 상대적으로 많은 양의 물이 존재하기 때문에 초음파 속도는 유체 상태에 의해 지배되며, 수화 초기에는 갇힌 공기(entrapped air)가 초음파 속도에 큰 영향을 주는 것으로 보고하였다[7].

Pessiki와 Carino는 충격반향기법(impact-echo method)에 의해 측정된 콘크리트의 종파 속도와 응결과의 상관관계 연구를 수행하여 콘크리트의 응결에 대해 두 가지 정의를 제안하였다[8]. 첫째는 콘크리트의 속도가 증가하기 시작할 때 응결이 일어난다는 것과, 둘째는 콘크리트의 속도가 증가하여 임의의 속도에 도달하였을 때 응결이 일어난다는 것이다. 전자의 경우, 응결은 연속적으로 변화하는 강도나 강성의 임의의 값에 근거하기보다는 시멘트 풀에서 발생하는 실제 물리적인 변화에 근거하기 때문에 어느 정도 설득력을 가지고 있지만 속도가 증가하기 시작하는 시점을 정확히 구별하기가 쉽지 않다. 반면에, 후자의 경우에는 응결 시작의 기준이 되는 속도가 배합비에 따라 달라지는 결점이 있으나, 실용적인 측

면에서 장점을 갖는다.

국내에서도 구분창 등에 의해 초음파 속도를 이용한 콘크리트의 응결 시간 추정에 관한 연구가 수행된 바 있으나[9], 아직 이에 대한 데이터와 인식 부족으로 그 활용도가 낮은 상태이다.

2.2. 압축강도와 속도

콘크리트의 초기 특성 중에서 응결과 더불어 초기 강도는 콘크리트의 성질을 대표하며, 거꾸집 제거 시기와 슬럼프의 작업 속도를 결정하기 위한 중요한 인자이다. 초음파 속도를 이용하여 강도를 추정하고자 하는 연구가 오래 전부터 수행되어 왔으며, 현재까지 몇 가지의 강도 추정식이 제안되었으나 그 사용이 제한적으로 이루어지고 있는 실정이다. 게다가, 대부분의 추정식들이 재령이 오래된 콘크리트의 강도 추정에 초점이 맞추어져 있다. 그러나, 콘크리트 속도의 발현 특성을 고려한다면 오히려 초기 재령 콘크리트의 강도 추정에 그 활용도가 더 높다고 할 수 있다.

일반적으로 콘크리트의 초음파 속도와 압축강도의 상관관계가 낮은 강도를 추정하기에 어려움이 있으나, 배합 종류와 양생 조건 등을 제한하거나 재령 효과를 고려하면 보다 높은 상관관계를 얻을 수 있다[10-13]. 따라서, 보다 정확한 강도 추정을 위해서는 모든 경우에서의 속도-강도 데이터를 하나의 식으로 표현하기보다는 배합 조건에 맞는 속도-강도의 상관관계를 도출하여 적용하는 것이 바람직하다.

3. 실험

3.1. 실험의 개요

초음파 속도의 발현 특성을 이용하여 모르타르의 응결 및 경화 특성을 조사하고자, 보통강도와 고강도 모르타르를 각각 제조하여 배합 직후부터 초음파 속도의 발현 과

정을 모니터링하였으며, 이를 관입 저항 실험 결과와 비교하였다. 또한, 모니터링 시스템을 이용하여 콘크리트와 모르타르의 초음파 속도를 비교하였다.

초음파 속도를 이용한 콘크리트의 초기 강도 추정을 위해 다양한 W/B를 갖는 콘크리트의 초음파 속도와 강도의 상관관계를 조사하여 보다 향상된 강도 추정 방법을 모색하였다.

3.2. 재료 및 배합비

모르타르와 콘크리트를 제조하기 위해 보통 포틀랜드 시멘트와 플라이 애시를 사용하였으며, 이 재료들의 화학적 성분과 물리적 성질을 Table 1에 나타내었다. 잔 골재는 비중이 2.51이고 흡수율이 1.52%인 강모래를, 굵은 골재는 최대 치수가 25 mm인 화강암 채석을 각각 사용하였다.

Table 2는 본 실험에서 사용한 8가지의 콘크리트 배합비를 나타내며, Table 2에서 굵은 골재를 제외한 것이 모르타르 배합비이다. Mix 1에서 4까지는 일반 콘크리트 배합이며, Mix 5에서 8까지는 시멘트량의 20%를 플라이 애시로 대체한 콘크리트 배합으로, 본 연구에서는 각각 OPC(ordinary portland cement) 콘크리트와 FA(fly ash) 콘크리트로 나타내었다. OPC 콘크리트의 28일 설계기준 강도는 각각 27, 40, 50, 60 MPa이었으며, 그 W/B는 각각 0.50, 0.35, 0.31, 0.27이었다. W/B가 0.35 이하인 고강도 콘크리트 배합에는 나프탈렌 계열의 고성능 감수제(HRWR)가 사용되었다.

3.3. 초음파 속도 모니터링 시스템

배합 후 굳지 않은 상태부터 초음파 속도를 측정하기 위해 Fig. 1과 같은 초음파 속도 모니터링 시스템을 사용하였다. 두 개의 아크릴 판(두께: 4 cm, 초음파 속도: 2740 m/s) 중앙에 3.5 cm 깊이의 홈을 파고 한쪽에는 발신자(직경: 5 cm)를, 다른 한쪽에는 수신자를 각각 위치

Table 1 Chemical composition and physical properties of cement and fly ash

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

Table 2 Mix proportions of concrete per m³

Mix no.	Water (kg)	Cement (kg)	Fly ash (kg)	Fine aggregate (kg)	Coarse aggregate (kg)	AE (B×%)	HRWR (B×%)	W/B
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
5	185	296	74	744	956	0.5	-	0.50
6	158	360	90	661	1043	-	1.5	0.35
7	155	400	100	614	1054	-	2.0	0.31
8	148	440	110	605	1038	-	2.4	0.27

Note : AE = air-entraining water reducing admixture
 HRWR = high range water reducing agent
 W/B = water to binder (cement + fly ash) ratio
 Mixes 1 through 4 = OPC series, Mixes 5 through 8 = FA series

시켰다. 초음파 속도 측정시 주위로부터의 영향을 최소화 하기 위해 모르타르나 콘크리트에 비해 뎀핑이 크고 재료 자체의 속도가 매우 작은 발포고무(초음파 속도: 266 m/s)로 만든 용기를 아크릴 판 사이에 놓고 판의 양쪽 모서리를 볼트를 사용하여 고정시켰다. 용기에 시료를 채운 후 적당하게 다짐을 하고 표면을 비닐로 덮어 시료 표면에서의 수분 증발을 방지하였으며, 온도가 23±1°C이고 습도가 50±5%인 조건에서 시멘트가 접수한 시간부터

30분 간격으로 탐촉자 사이를 통과하는 초음파의 전달 시간을 측정하였다. 초음파 속도는 시료의 길이를 초음파의 전달 시간으로 나누어서 결정하였는데, 이 때 전달 시간은 탐촉자와 시료 사이의 거리를 고려하여 보정하였다. 초음파 속도 측정에는 Qcom사의 Quest-120+ 모델이 사용되었으며, 사용 중심 주파수는 54 kHz이었다. Fig. 2 는 실제 초음파 측정 장면을 나타낸다.

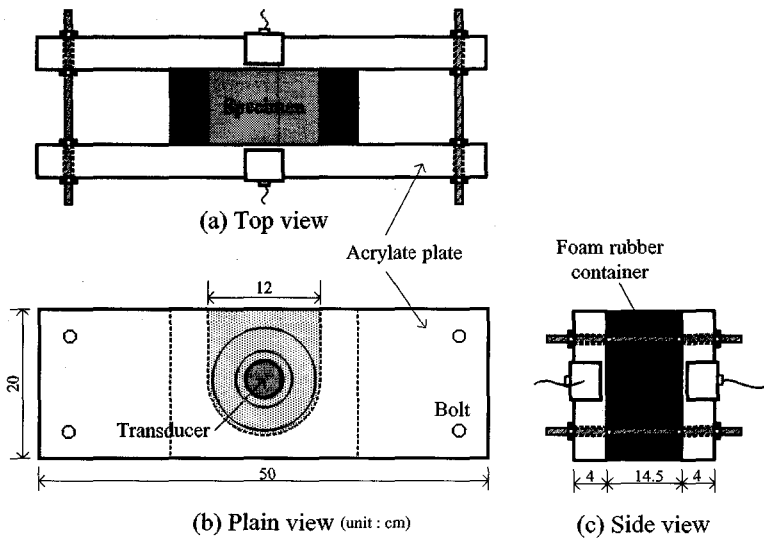


Fig. 1 Schematic of monitoring system

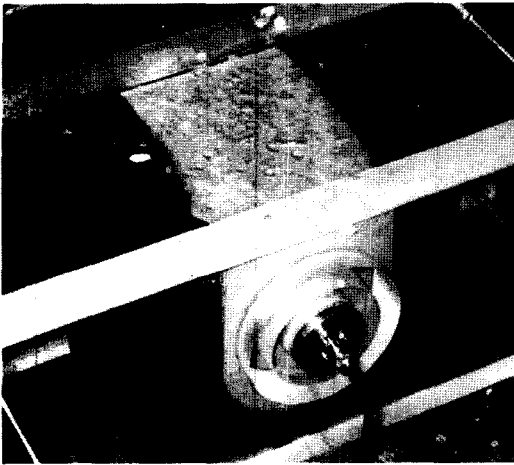


Fig. 2 Photograph of monitoring system

3.4. 실험 방법

앞서 언급한 바와 같이, W/B가 낮은 경우에는 콘크리트로부터 모르타르를 얻기 어렵기 때문에 콘크리트에서 모르타르를 채취하지 않고 직접 모르타르를 제조하여 실험에 사용하였다. 초음파 속도 모니터링 실험과 동일한 조건에서 관입 저항 시험을 실시하여 각 배합별로 초결과 종결 시간을 결정하였다.

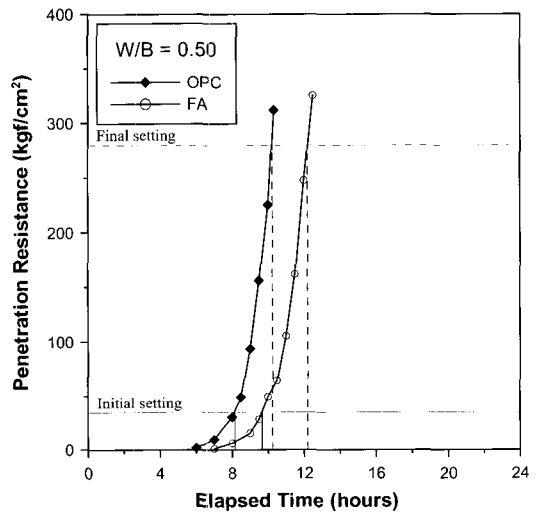
초기 재령 콘크리트의 초음파 속도와 강도의 상관관계를 도출하기 위해, Table 2에 주어진 8가지의 배합비를 갖는 콘크리트 공시체(φ10×20 cm)를 각각 제작하여 재령에 따라 초음파 속도와 압축강도를 측정하였다. 초기 재령에서의 속도-강도 데이터를 얻기 위해, 공시체 제작 후 12시간부터 초음파 속도와 압축강도 실험을 시작하여, 초음파 속도는 30분내지 1시간 간격으로 측정하였으며, 압축강도는 재령 3일까지는 6시간 또는 12시간 간격으로, 이후에는 재령 7일과 28일에서 측정하였다. 공시체의 초음파 속도는 직접법으로 3회 반복하여 측정된 값의 평균을 공시체의 초음파 속도로 정하였다.

콘크리트 공시체는 제작 후 24시간 동안 온도가 23±1℃이고 상대습도가 50±5%인 항온항습실에서 양생되었으며, 이 후 탈형하여 실험 전까지 23℃의 수중에서 양생하였다. 콘크리트의 초음파 속도는 수분함유량에 따라 달라지는 경향이 있으므로[14,15], 수중 양생된 공시체는 수분함유량을 일정하게 하기 위해 실험 전 물 속에서 꺼내어 약 3시간 동안 실험실에서 자연건조 한 후에 초음파 속도를 측정하였다.

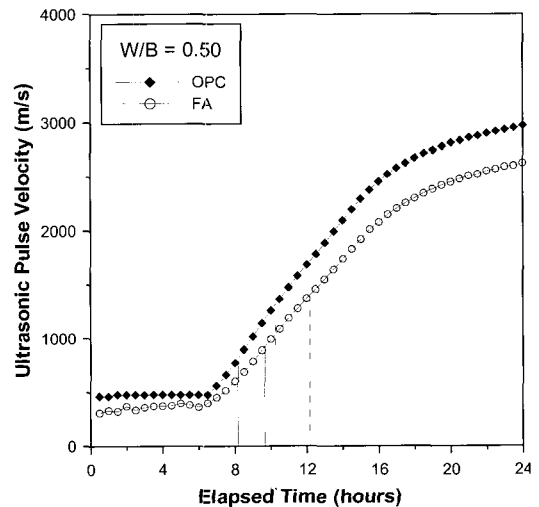
4. 결과 및 토의

4.1. 관입저항과 초음파 속도 모니터링 결과

Fig. 3~Fig. 6은 각각의 W/B에 따른 OPC 모르타르와 시멘트량의 20%를 플라이 애시로 대체한 FA 모르타르에 대한 관입 저항 실험 결과와 배합 직후부터 24시간까지의 초음파 속도 측정 결과를 나타낸다. 그림에서 실선과 점선은 각각 초결과 종결 시점을 나타낸다.



(a) Development of penetration resistance

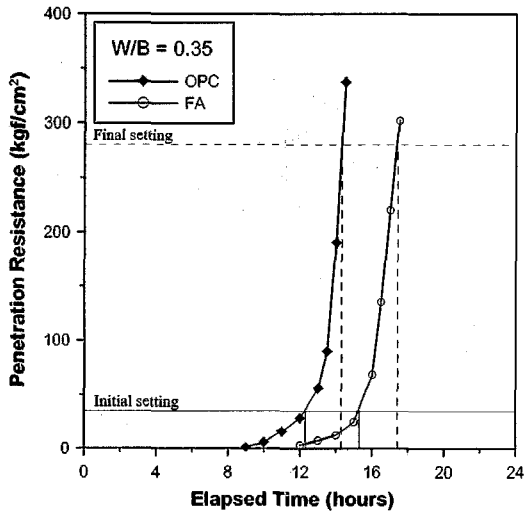


(b) Development of ultrasonic pulse velocity

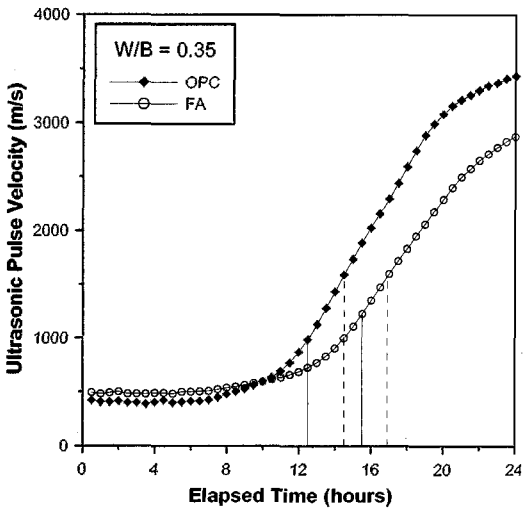
Fig. 3 Setting and ultrasonic pulse velocity at W/B of 0.50

W/B가 0.50인 보통강도 모르타르의 관입 저항 실험 결과를 나타내는 Fig. 3(a)를 보면, OPC 모르타르의 초결과 종결 시간은 각각 8.17, 10.25시간이었으며, FA 모르타르는 각각 9.67, 12.17시간으로 나타나 OPC보다 초결은 1.5시간, 종결은 1.92시간 정도가 지연됨을 알 수 있다. 이는 플라이 애시 사용에 따른 초기 수화반응의 지연으로 결국 응결이 지연된 것으로 플라이 애시의 사용량에 따라 응결 지연의 정도가 달라질 수 있다. 이러한 응결 특성은 동일한 W/B를 갖는 OPC와 FA 모르타르의 초음

파 속도 측정 결과를 나타내는 Fig 3(b)를 통해서도 알 수 있다. 초음파 속도의 발현 특성을 살펴보면, OPC 모르타르의 초음파 속도는 배합 후 약 6.5시간까지는 약 460~480 m/s로 일정하다가 이후부터 급격하게 변화하여 재령 12, 18, 24시간에서 각각 1684, 2676, 2972 m/s로 증가하였다. FA 모르타르의 초음파 속도 발현 경향은 대체적으로 OPC와 비슷하였으나, 같은 재령에서의 초음파 속도가 OPC보다 작게 나타나 재령 12, 18, 24시간에서 각각 1373, 2305, 2629 m/s를 나타내었다.

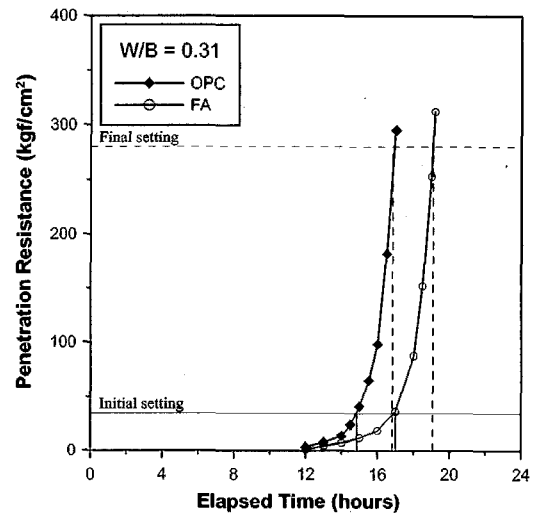


(a) Development of penetration resistance

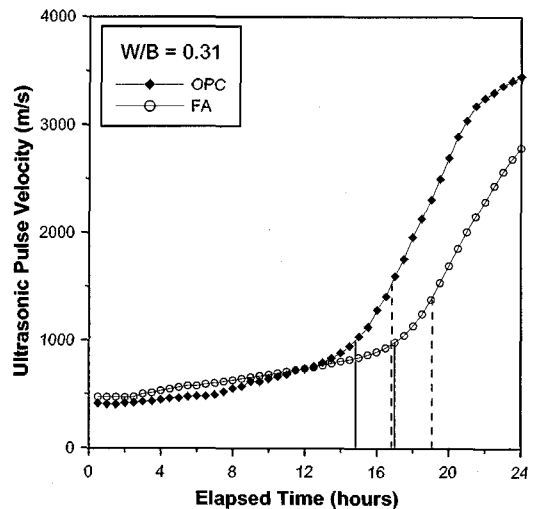


(b) Development of ultrasonic pulse velocity

Fig. 4 Setting and ultrasonic pulse velocity at W/B of 0.35



(a) Development of penetration resistance



(b) Development of ultrasonic pulse velocity

Fig. 5 Setting and ultrasonic pulse velocity at W/B of 0.31

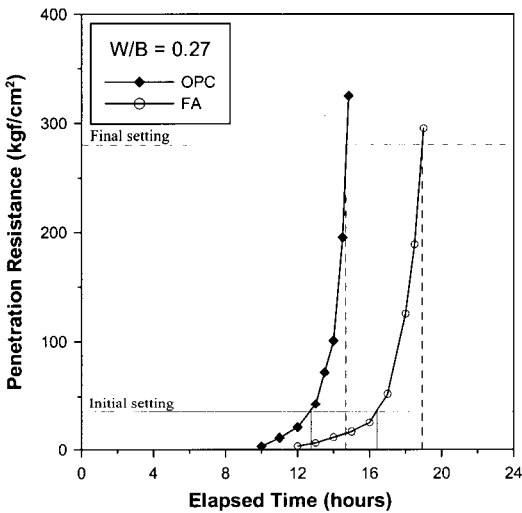
W/B가 0.35이하인 고강도 모르타르는 보통강도 모르타르에 비해 응결이 다소 지연되었으며, 특히 고강도 FA 모르타르에서 응결 지연이 두드러지게 나타났다. 예를 들면, W/B가 0.31인 OPC 모르타르의 초결과 종결은 각각 14.83, 16.83 시간, FA는 각각 17.0, 19.08 시간으로 상당한 응결 지연을 나타내었다. 고강도 모르타르 배합의 이러한 초기 응결 특성은 초음파 속도 측정 결과인 Fig. 4(b), 5(b), 6(b)에서도 잘 나타난다. 고강도 모르타르의 초음파 속도는 보통강도에서와는 달리 배합 초기에는 완

만한 기울기로 상당한 시간동안 서서히 증가하다가 이후부터 갑자기 증가하였으며, 고강도 FA 모르타르의 경우에는 속도의 완만한 증가 구간이 더 오래 지속되는 경향을 나타내었다. 또한, 초음파 속도가 배합 초기에는 보통강도 모르타르에서보다 작았으나 시간이 지나면서 그 크기가 역전되는 경향을 나타내었다. 예를 들면, W/B가 0.27로 매우 낮은 OPC 모르타르의 초음파 속도는 재령 12, 18 시간에서 각각 950, 2283 m/s로 W/B가 0.50인 경우보다 작았으나, 재령 24 시간에서는 3703 m/s로 오히려 커지는 경향을 나타내었다. 이로부터, 고강도일수록 재령 초기에서의 초음파 속도 발현은 느리지만 재령이 경과함에 따라 속도 발현률이 크게 증가하여 W/B가 낮을수록 초음파 속도가 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 초음파 속도의 증가 시점이 보통강도 모르타르의 경우에는 어느 정도 구별되었으나 고강도인 경우에는 구별하기가 쉽지 않았다. 이상과 같이 고강도 모르타르의 응결 지연을 비롯한 배합 초기의 초음파 속도 발현 특성은 고강도 모르타르 제조시 단위수량을 줄이고 유동성 확보를 위해 사용된 고성능 감수제의 사용에 따른 것으로, 이러한 경향은 고성능 감수제의 종류와 사용량에 따라 달라질 것으로 사료된다. 또한, 각 배합별 초음파 속도 측정 결과를 나타내는 Fig. 3(b), 4(b), 5(b), 6(b)를 보면, 배합 초기에는 OPC와 FA 모르타르의 초음파 속도가 거의 비슷하다가 시간이 지나면서 OPC 모르타르의 초음파 속도가 FA 모르타르보다 큰 경향을 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 플라이 애시를 첨가함으로써 응결 초기에 FA 모르타르내의 시멘트 수화생성물의 형성이 지연되어 FA 모르타르의 강성이 OPC 모르타르의 강성보다 작기 때문인 것으로 사료된다.

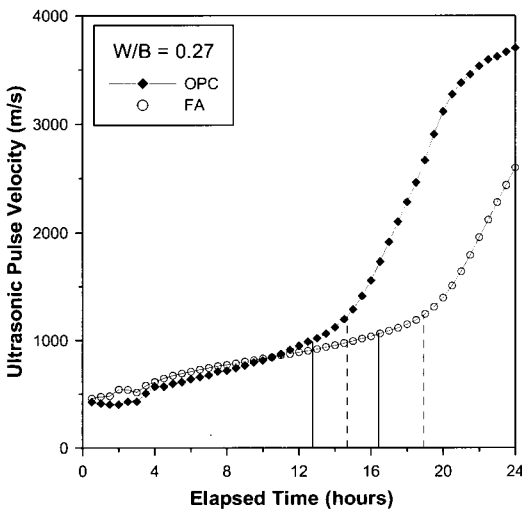
이상의 실험결과로부터, 초음파 속도는 모르타르의 상태 변화에 매우 민감하여 응결이 시작되어 굳어 가는 일련의 과정을 모니터링하기에 적합하며 특히, 초음파 속도가 배합 초기에 빠르게 발현되는 특성을 가지고 있기 때문에 모르타르의 초기 상태 변화를 간접적으로 조사하는데 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2. 응결과 모르타르 초음파 속도의 관계

4.1절에서 언급한 W/B에 따른 초음파 속도의 발현 특성과 응결과의 상관관계를 조사하기 위해 관입 저항 시험에 의해 결정된 응결 시간과 이에 대응되는 초음파 속도를 Table 3에 나타내었다. Fig. 3~Fig. 6에서도 볼 수



(a) Development of penetratin resistance



(b) Development of ultrasonic pulse velocity

Fig. 6 Setting and ultrasonic pulse velocity at W/B of 0.27

있듯이, 응결은 초음파 속도가 소정의 속도에 도달하였을 때 시작되는 것으로 나타났다. 특히, 고강도 모르타르의 경우에는 초음파 속도의 증가 시점이 명확하지 않기 때문에 응결의 기준이 되는 속도만 주어진다면 초음파 속도를 이용한 응결 시간의 추정이 가능할 것으로 판단된다. 하지만, Table 3으로부터 응결 기준 속도가 W/B와 배합 종류(OPC, FA)에 따라 달라짐을 알 수 있다. 각 배합별로 살펴보면, W/B가 0.50인 OPC의 초결 기준 속도는 800 m/s, W/B가 0.35이하인 경우에는 980~1020 m/s로 W/B가 낮을수록 다소 커지는 경향을 나타내었으며, 종결 기준 속도도 이와 비슷한 경향을 나타내었다. FA의 경우는 OPC에 비해 초결 기준 속도가 다소 증가하였다.

이상의 결과를 볼 때, 응결의 기준 속도가 배합종류와 W/B에 따라 달라지므로 배합비 또는 강도 수준을 고려한 기준 속도가 제시되어야만 초음파 속도를 이용한 응결 시간의 추정이 가능할 것으로 사료된다. 이러한 이유로 인하여, 초음파 속도로부터 응결의 시작을 판정하는 기준이 아직 정립되지 못하고 있다. 또한, 일반 콘크리트와는 달리 고강도 콘크리트에는 고성능 감수제의 사용이 필수적이기 때문에 고성능 감수제가 응결에 미치는 영향과 이에 따른 초음파 속도의 변화에 대한 연구가 요구된다.

4.3. 모르타르와 콘크리트의 초음파 속도 비교

본 연구에서 사용한 초음파 속도 모니터링 시스템은 모르타르뿐만 아니라 콘크리트에 대해서도 초음파 속도를 측정할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 이에 대한 적용

과 콘크리트에서의 초음파 속도 발현 특성을 알아보고자 W/B가 각각 0.50과 0.35인 콘크리트의 초음파 속도를 모르타르에서의 결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

W/B가 0.50인 콘크리트의 경우(Fig. 7(a)), 초음파 속도 발현은 모르타르에서의 유사하게 배합 후 수 시간 동안에는 일정하다가 이후부터 급격하게 증가하는 경향을 나타내었으며, 모르타르에서보다 약 0.5~1.0시간 정도 빨리 증가하기 시작하였다. 반면에, W/B가 0.35인 경우(Fig. 7(b))에는 콘크리트의 초음파 속도가 모르타르에서보다 빨리 발현되었으며, 응결 지연에 따른 완만한 속도 증가 구간도 모르타르에 비해 다소 단축되는 경향을 나타내었다. 또한, 초음파 속도는 모르타르보다 골재를 함유한 콘크리트에서 크게 나타났는데, 이는 골재의 강성이 모르타르 매트릭스의 강성보다 크기 때문으로 사료된다. 모르타르와 콘크리트의 속도 차이는 재령이 증가함에 따라 줄어드는 경향을 나타내었는데, OPC의 재령 12, 24 시간에서의 속도 차이를 보면 W/B가 0.50인 경우에는 각각 64.8, 40.0%, W/B가 0.35인 경우에는 각각 82.0, 22.0%로 줄어들었다. 또한, W/B가 낮을수록 재령 초기에서의 속도 차이가 상당히 크게 나타났으나 시간이 지나면서 그 차이가 크게 줄어들을 때, 배합 초기에는 골재가 콘크리트의 초음파 속도의 발현에 미치는 영향이 고강도 콘크리트에서 더 큼을 알 수 있다.

Fig. 7로부터 모르타르가 아닌 콘크리트의 초음파 속도 발현 특성을 이용하여 콘크리트의 초기 특성에 대한 조사가 가능하며, 특히 점성이 커서 콘크리트로부터 모르타르를 얻기 어려운 고강도 콘크리트의 응결 특성 조사에 편리하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3 Setting time and corresponding ultrasonic pulse velocity of mortar

Mix no.	Setting time (hr:min)		Ultrasonic pulse velocity (m/s)	
	Initial	Final	Initial	Final
1	8:10	10:15	800	1300
2	12:30	14:30	1020	1600
3	14:50	16:50	1010	1550
4	12:45	14:40	980	1220
5	9:40	12:10	920	1380
6	15:30	17:25	1220	1650
7	17:00	19:05	980	1380
8	16:25	18:55	1070	1230

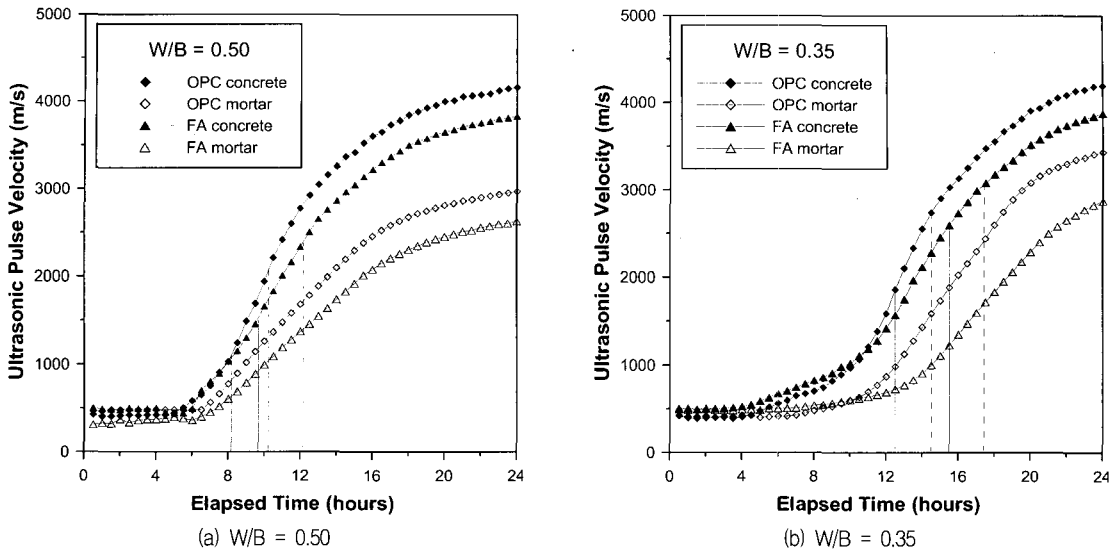


Fig. 7 Development of ultrasonic pulse velocity in mortar and concrete

4.4. 콘크리트 공시체의 압축강도 및 초음파 속도 실험 결과

본 연구의 두 번째 목적인 초음파 속도를 이용한 콘크리트의 초기 강도 추정을 위해 Table 2에 나타낸 각각의 배합비로 제작된 콘크리트 공시체의 재령별 압축강도와 초음파 속도의 평균을 Table 4에 나타내었다. OPC 콘크리트의 재령 28일 강도는 각각 31.1, 47.1, 55.5, 66.2 MPa로 모두 목표강도를 만족하였다. FA 콘크리트의 경우, 재령 초기에는 강도 발현률이 다소 낮았으나 재령 28일에

서는 동일한 W/B를 갖는 OPC 콘크리트의 강도보다 약 2.6~6.1% 정도가 낮은 29.3, 45.9, 52.6, 62.4 MPa의 압축강도를 나타내었다. 또한, W/B가 0.35이하인 FA 콘크리트의 경우에는 초기 응결 지연으로 재령 12시간에서 압축강도를 측정할 수 없었다.

Table 4로부터, 재령 28일을 기준으로 한 재령 3일에서의 강도 발현률이 W/B가 0.50인 보통강도 OPC 콘크리트는 65.3%, W/B가 0.35이하인 고강도 OPC 콘크리트는 72.7~80.0%로, 고강도 콘크리트의 강도가 재령 초기에 더 빨리 발현됨을 알 수 있다. 반면에, 재령 3일에서의

Table 4 Average compressive strength and ultrasonic pulse velocity of tested cylinders

Mix no.	Compressive strength (MPa)					Ultrasonic pulse velocity (m/s)				
	Day					Day				
	1	2	3	7	28	1	2	3	7	28
1	9.6	16.7	20.3	25.3	31.1	3888	4236	4360	4576	4667
2	21.8	30.9	37.7	43.0	47.1	4353	4540	4604	4694	4799
3	25.0	36.9	42.8	49.4	55.5	4356	4524	4638	4668	4733
4	30.3	44.0	48.1	58.3	66.2	4433	4640	4681	4722	4879
5	6.1	13.1	16.1	20.7	29.3	3779	4107	4305	4505	4627
6	14.0	24.2	29.3	37.4	45.9	4192	4456	4544	4677	4742
7	14.2	27.1	35.0	40.7	52.6	4162	4487	4585	4666	4717
8	13.4	30.4	38.9	45.6	62.4	4111	4509	4655	4707	4820

초음파 속도 발현률은 모든 배합에서 93% 이상으로 대부분의 초음파 속도가 재령 초기에 발현됨을 알 수 있다. 따라서, 이와 같은 발현률 특성을 고려할 때 콘크리트의 강도 추정을 위한 초음파 속도의 사용은 재령이 오래된 콘크리트보다는 재령 3일 이전의 초기 재령 콘크리트의 강도 추정에 더 유용할 것으로 판단된다.

4.5. 콘크리트의 초기 강도와 초음파 속도와의 상관관계

Fig. 8은 W/B에 따른 재령 3일까지의 초음파 속도와 강도의 관계를 나타낸다. 지금까지 굳은 콘크리트의 강도 추정을 위해 제안된 식들은 초음파 속도와 강도를 선형적인 관계로 표현하고 있으나, Fig. 8에서 보듯이 재령 초기에는 초음파 속도와 강도가 비선형적인 관계를 나타냄을 알 수 있다. 이는 앞에서도 언급했듯이, 재령 초기에는 초음파 속도 발현률이 강도 발현률보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 하지만, 재령이 지나면서 초음파 속도의 발현률은 둔화되는 반면에 강도는 꾸준히 증가하여 속도의 작은 차이가 결국 강도 측면에서는 상당히 큰 차이를 보이게 된다.

Fig. 8을 보면, W/B가 낮아질수록, 즉 고강도일수록 동일한 속도에서의 강도가 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 특성을 고려하기 위해서는 W/B, 즉 강도 수준에 따라서 속도-강도의 관계식을 달리 적용해야 할 것으로 판단되어, 본 연구에서는 W/B가 0.35인 경우를 기준으로 하여 W/B가 이보다 높은 경우와 낮은 경우(OPC

콘크리트에서는 각각 Group A, Group B, FA 콘크리트에서는 각각 Group C, Group D로 표기)로 나누어서 나타내었다.

속도-강도의 관계를 나타내는 여러 가지 형태의 식들이 제안되었으나, 본 연구에서는 그 중에서 가장 보편적이며 간단한 다음과 같은 식을 사용하였다[16,17].

$$f_c = a e^{bV_p} \tag{1}$$

여기서, f_c 는 압축강도, V_p 는 초음파 속도, a 와 b 는 실험으로부터 구해지는 상수이다. 본 연구의 실험 데이터로부터 회귀분석을 거쳐 얻은 a 와 b 의 값이 Table 5에 나타나 있다. 먼저 W/B의 영향을 고려하지 않은 채 OPC와 FA 콘크리트 각각의 데이터로부터 얻은 a, b 값이 Table 5의 "No grouping" 행에 나타나 있고, OPC 및 FA 각각의 경우에 있어서 W/B의 영향을 고려하여 Group A, B 및 C, D로 나누어 각각의 그룹에 대해 얻은 a, b 값이 "Grouping" 행에 나타나 있다.

Fig. 9는 실제 강도와 Table 5에 나타낸 상수들을 이용하여 추정된 강도의 관계를 나타내며, 두 개의 점선은 $\pm 10\%$ 의 오차 범위를 나타낸다. W/B의 영향이 고려되지 않았을 경우(Fig. 9(a))에는 실제 강도와 추정 강도의 오차 평균이 9.2%이었으며, 재령이 지날수록 오차가 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, W/B가 고려된 경우에는(Fig. 9(b)) 오차 평균 6.7%로 줄어들어 예측결과가 보다 향상됨을 알 수 있다.

Table 5 Constants, a and b, in Eq. (1), for each group

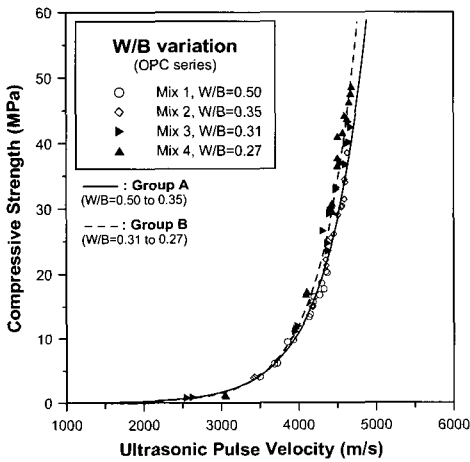
	Concrete type	Group	W/B	a	b	No. of data used	R ²
Grouping	OPC	A (Mix 1,2)	0.50 to 0.35	0.005411	0.001904	32	0.990
		B (Mix 3,4)	0.31 to 0.27	0.003001	0.002075	35	0.988
	FA	C (Mix 5,6)	0.50 to 0.35	0.003479	0.001980	32	0.993
		D (Mix 7,8)	0.31 to 0.27	0.002845	0.002053	30	0.989
No grouping	OPC	Mix 1 to 4	0.50 to 0.27	0.003282	0.002039	67	0.984
	FA	Mix 5 to 8	0.50 to 0.27	0.002866	0.002039	62	0.988

5. 결 론

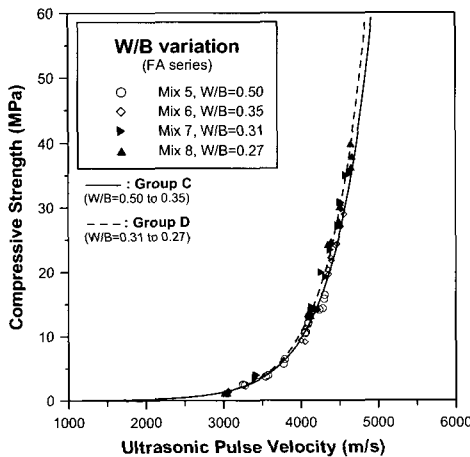
본 연구에서는 콘크리트의 초기 상태 변화에 민감한 초음파 속도의 발현 특성을 이용하여 응결 시간 및 초기 강도 추정에 대한 실험적인 연구를 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

응결 시간 추정에 대한 연구에서는 배합 직후부터 모르타르 또는 콘크리트의 초음파 속도를 자동적으로 측정할 수 있는 모니터링 시스템을 개발하였으며, 이를 사용하여 초기 재령에서의 초음파 속도 발현 과정을 모니터링할 수 있었다. 물-결합재 비(W/B)와 배합 종류(OPC,

FA)에 따라 초음파 속도의 발현 특성이 다르게 나타났으며, 이러한 특성으로부터 각 배합의 초결과 종결시점의 추정이 가능한 것으로 나타났다. 콘크리트의 응결은 초음파 속도가 특정한 값에 도달하였을 때 발생하는 것으로 볼 수 있으나, 응결의 기준이 되는 속도가 배합에 따라 다르기 때문에 배합의 영향을 고려한 기준이 정립되어야 할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 추후에 보다 다양한 배합에 대한 실험이 이루어져 많은 데이터로부터 기준 속도가 제시되어야 할 것이다. 이렇게 된다면, 초음파 속도를 이용한 비파괴검사방법이 기존의 관입 저항에 의한 응결 시간 결정 방법을 대체할 만 하며 현장에서의 콘크리트 품질 관리에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

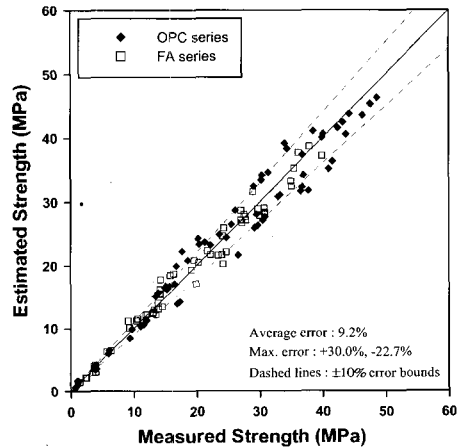


(a) OPC series

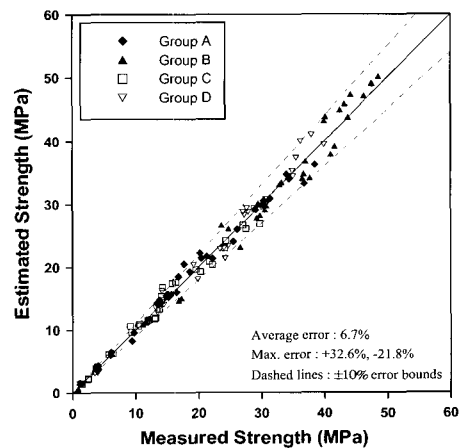


(b) FA series

Fig. 8 Velocity-strength relationship for various water to binder ratios



(a) Without considering W/B effect



(b) After considering W/B effect

Fig. 9 Measured versus estimated strengths

초기 강도 추정에 대한 연구에서는 초음파 속도와 강도가 비선형적인 관계를 나타내었으며, W/B에 따라 속도-강도의 상관관계가 다르게 나타나 W/B가 낮을수록 동일한 속도에서의 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서, 보다 정확한 강도 추정을 위해서는 강도 추정식에 W/B의 영향이 포함되어야 하며, 이밖에 배합 조건과 재령 등이 고려된다면 보다 실제 강도에 가까운 강도 추정이 이루어 질 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 성균관대학교 SAFE 연구센터의 지원하에 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. Keating, D. J. Hannant, and A. P. Hibbert, "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, pp. 554-566, (1989)
- [2] S. Popovics, R. Silva-Rodriguez, J. S. Popovics and V. Martucci, "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. pp. 207-225, (1993)
- [3] H. W. Reinhardt, C. U. Groβe, and A. T. Herb, "Ultrasonic Monitoring of Setting and Hardening of Cement Mortar," *Materials and Structures*, Vol. 33, pp. 580-583, (2000)
- [4] J. R. Rapoport, J. S. Popovics, S. V. Kolluru, and S.P. Shah, "Using Ultrasound to Monitor Stiffening Process of Concrete with Admixtures," *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 6, pp. 675-683, (2000)
- [5] P. K. Mehta, and P. J. M. Monteiro, *Concrete : Structure, Properties, and Materials*, 2nd edition, Prentice Hall, New York, (1993)
- [6] 관입저항에 의한 콘크리트의 응결 시간 측정, KS F 2436.
- [7] J. Keating, D. J. Hannant, and A. P. Hibbert, "Correlation between Cube Strength, Ultrasonic Pulse Velocity and Volume Change for Oil Well Cement Slurries," *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, No. 5, pp. 715-726, (1989)
- [8] S. P. Pessiki, and N. J. Carino, "Setting Time and Strength of Concrete Using the Impact-Echo Method," *ACI Materials Journal*, Vol. 85, No. 4, pp. 389-399, (1988)
- [9] 구본창, 강민호, 이대근, 김종우, 하재담, 박석균, "초음파법에 의한 콘크리트 응결시간 측정에 관한 연구," 콘크리트학회 봄 학술발표회, pp. 707-711, (1998)
- [10] 김영환, "콘크리트 구조물의 비파괴검사 현황," 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 4, pp. 329-341, (2000)
- [11] 이회근, 이광명, 김동수, "초기 재령 콘크리트의 강도와 종파속도의 상관관계," 콘크리트학회논문집, 제12권 6호, pp. 67-74, (2000)
- [12] G. V. Teodoru, "Mechanical Strength Property of Concrete at Early Ages as Reflected by Schmidt Rebound Number, Ultrasonic Pulse Velocity, and Ultrasonic Attenuation," *Properties of Concrete at Early Ages*, SP-95, American Concrete Institute, Detroit, pp. 139-153, (1986)
- [13] S. Popovics, "Analysis of the Concrete Strength versus Ultrasonic Pulse Velocity Relationship," *Materials Evaluation*, February, pp. 123-130, (2001)
- [14] 이회근, 이광명, 김동수, 김지상, "수분함유량이 콘크리트의 종파 속도에 미치는 영향에 관한 연구," 비파괴검사학회지, 제 19권 2호, pp. 259-269, (1999)
- [15] E. Ohdaira, and N. Masuzawa, "Water Content and its Effect on Ultrasound Propagation in Concrete - the Possibility of NDE," *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 546-552, (2000)
- [16] V. R. Strrup, "Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength," *In-Situ-Nondestructive Testing of Concrete*, SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp. 201-227, (1984)
- [17] S. Pessiki, and M. R. Johnson, "Nondestructive Evaluation of Early-Age Concrete Strength in Plate Structures by the Impact-Echo Method," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 3, pp. 260-271, (1996)