

초음파 속도 모니터링에 의한 모르타의 초기재령 특성 평가

Assessment of Early-age Properties of Mortar by Monitoring of Ultrasonic Pulse Velocity

이 회 근* 이 광 명**
Lee, Hoi Keun Lee, Kwang Myong

ABSTRACT

Ultrasonic pulse velocity(UPV) is a useful tool for examining the property of early-age mortar or concrete. Thus, UPV has been used for a long time to characterize setting and hardening of cementitious materials. In this study, in order to investigate the characteristics of setting for mortar, UPV was measured using automatic monitoring system up to 3 days after casting. Test results show that UPV of high water to binder ratio(w/b) mortar remained constant at the beginning of hydration and then abruptly began to increase. However, UPV of low w/b mortar gradually increase due to setting retard caused by use of superplasticizer. Furthermore, the development of UPV for mortar with fly ash is slower than that of mortar without fly ash. It was concluded that the property change of mortar or concrete, such as setting and hardening can be assessed by monitoring of UPV.

1. 서 론

콘크리트는 유동성이 큰 소성 상태에서 고체 상태로 바뀌는 동안 블리딩, 침하, 초기 수축, 수화열에 의한 온도상승 등의 여러 가지 변화를 겪는다. 그리고 시멘트의 수화반응이 계속되면서 콘크리트는 응결(setting)후 강도 발현 단계인 경화(hardening)의 과정을 거치게 되며, 이러한 일련의 상태 변화를 제대로 평가할 수 있다면 콘크리트의 품질 관리 측면에서 매우 유리하다. 지금까지 콘크리트의 응결은 주로 관입저항 시험에 의해 이루어졌으나, 실험자의 숙련도에 따라 시험 결과가 달라질 가능성이 있으며 콘크리트 자체에 대해 측정하는 것이 아니라, 체로 쳐서 얻은 모르타에 대해 실험하기 때문에 물-시멘트 비가 낮고 점성이 커서 모르타르 시료를 얻기가 불가능한 고강도 콘크리트에는 적당하지 않다. 따라서 대체 방법으로 굳지 않은 콘크리트의 초음파 속도를 측정하여 이로부터 콘크리트의 응결 특성을 조사하고자 하는 노력이 오래전부터 시도되어 왔다¹⁻⁴⁾. 하지만, 아직 이에 대한 충분한 데이터가 없고, 실험 방법에 대한 표준화 작업이 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 초음파 속도 자동 모니터링 시스템을 이용하여 모르타의 초음파 속도 발현 특성을 조사하였으며, 기존

* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정 수료
** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

의 관입저항 실험 결과와 비교하였다.

2. 콘크리트의 응결과 속도와의 관계

시멘트는 물과 접촉하자마자 수화반응을 시작하며, 수화는 시멘트 입자의 표면에서부터 입자내부로 진행된다. 수화가 진행되면서 시멘트 입자 주위에 수화물이 생성되고, 이 수화물이 서로 결합하면서 시멘트 입자사이가 수화물로 채워지면서 응결하기 시작한다. 관입저항 시험(KS F 2436)에 의하면 굳지 않은 콘크리트를 No. 4번(5 mm) 체로 체가름하여 얻은 모르터에 대해 프록터에 의한 관입저항이 35 kgf/cm^2 , 280 kgf/cm^2 에 도달할 때까지 소요되는 시간을 각각 초결(initial setting)과 종결(final setting)로 규정하고 있다.

Pessiki와 Carino⁵⁾는 충격반향기법(impact-echo method)에 의해 측정된 콘크리트의 종파속도와 응결과의 상관관계 연구를 수행하여 콘크리트 응결에 대해 두 가지의 정의를 제안하였다. 첫째는 콘크리트의 속도가 증가하기 시작할 때 응결이 일어난다는 것과, 둘째는 속도가 증가하여 임의의 값에 도달하였을 때 응결이 일어난다는 것이다. 전자의 경우, 속도가 증가하기 시작하는 시간을 명확하게 구별하기가 쉽지 않은 반면에, 후자의 경우에는 응결 시작의 기준이 되는 속도가 배합비에 따라 달라지는 결점이 있으나, 실용적인 측면에서 장점이 있다.

3. 실험 연구

3.1 개요

초음파 속도 변화 특성을 이용하여 응결 및 경화 특성을 알아보고자, 플라이애시의 사용 유무에 따라 보통 강도 및 고강도 모르터를 제조하여 배합직 후부터 일정한 시간간격으로 초음파 속도의 발현 과정을 관찰하였으며, 이를 관입저항 실험 결과와 비교하였다.

3.2 재료 및 배합비

모르터를 제조하기 위해, 결합재로는 비중이 3.15인 국내 D사의 보통 포틀랜드 시멘트와 비표면적이 $3,375 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이고 강열감량이 3.44%인 국내 H사의 플라이애시가 사용되었다. 사용한 결합 재료들의 화학적 성분과 물리적 성질을 Table 1에 나타내었다. 잔 골재는 비중이 2.51이고 흡수율이 1.52%인 강 모래를 사용하였다. 일반 모르터(OPC)는 Table 2에 나타낸 바와 같은 시멘트 : 물 : 잔골재의 중량비에 따라 제조되었으며, 모든 종류의 모르터에서 시멘트 중량의 20%가 플라이애시로 치환된 모르터(FA20)도 함께 제조하였다. 물-결합재 비(w/b)가 0.50인 M1 배합에는 AE 감수제가 시멘트 중량의 0.5% 사용되었으며, w/b가 0.35 이하인 배합(M2~M4)에는 시멘트 중량의 각각 1.5, 2.0, 2.4%인 나프탈렌 계열의 고성능 감수제가 사용되었다.

Table 1 Chemical compositions and physical characteristics of cement and fly ash

Material	Chemical compositions (%)							Physical characteristics	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss of ignition	Specific gravity	Blain (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 Mixture proportions of mortar

Mix type	Cement	Water	Fine aggregate	Water reducer (HRWR/C)
M1	1	0.50	2.038	0.005
M2	1	0.35	1.493	0.015
M3	1	0.31	1.252	0.020
M4	1	0.27	1.121	0.024

3.3 초음파 속도 모니터링 시스템

본 연구에서 사용한 초음파 속도 모니터링 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 3 cm 두께의 아크릴 판 ($V_p=2740$ m/s) 중앙에 초음파 탐촉자가 위치할 수 있도록 2.5 cm 깊이의 홈을 파서 한쪽에는 발진자를, 다른 한쪽에는 수신자를 위치시켰다. 탐촉자에는 접성이 있는 커플런트(couplant)를 발라 아크릴 판과 밀착시켜 측정 중에 탐촉자와 판 사이가 떨어져 초음파의 수신에 영향을 주지 않게 하였다. 두 개의 아크릴 판 사이에 시료를 담기 위해 발포고무로 만든 U자형의 용기를 놓고 양쪽 모서리를 볼트를 사용하여 아크릴 판과 용기를 고정시켰다. 발포고무($V_p=266$ m/s)는 모르터나 콘크리트에 비해 댐핑이 크고 속도가 작기 때문에 시료 사이를 통과하는 초음파 속도에 영향을 주지 않는다. 모르터나 콘크리트를 배합 한 후 즉시 컨테이너에 채워 고무망치로 적당하게 다짐을 한 후 표면에서의 수분 증발을 막기 위해 비닐로 덮었다. 시멘트가 접수한 시간부터 적당한 시간간격을 두고 주기적으로 초음파 속도를 측정하였다. 초음파 속도 측정에는 PUNDIT와 유사한 결과를 나타내는 국내 Q사 제품(Model Quest-120+)이 사용되었으며, 사용 주파수는 54 kHz이었다.

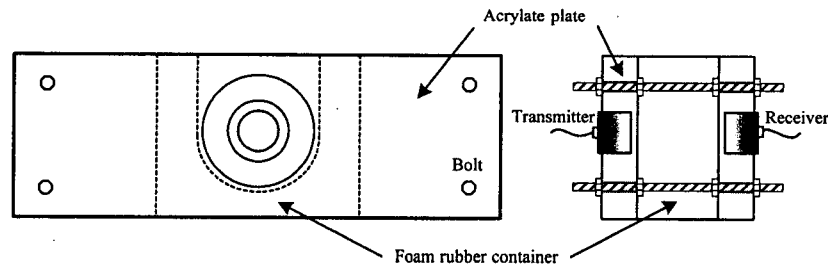


Fig. 1 Ultrasonic Monitoring Device

4. 실험 결과 및 분석

4.1 OPC 모르터의 초음파 속도 발현 특성

물-결합재 비(w/b)에 따른 OPC 모르터의 초음파 속도 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 모르터 배합 직후부터 24시간까지의 결과를 나타내는 Fig. 2(a)를 보면, w/b에 따라 약간의 차이는 있으나, 배합 후 처음에는 약 400~470 m/s 정도의 초음파 속도를 나타내었다. 이 후부터는 이러한 경향이 일정 기간동안 유지되다가 초음파 속도가 증가하기 시작하였는데, w/b가 0.50인 M1에서는 초음파 속도가 갑자기 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 w/b가 0.50보다 낮은 경우(M2, M3, M4)에서는 초음파 속도가 완만한 기울기로 증가하였다. 비록 배합 후 일정 시간 동안에는 w/b가 낮을수록 초음파 속도의 발현 속도가 느리지만, 배합 후 약 19 시간을 전후로 해서 고성능 감수제의 영향으로 인해 초음파 속

도의 크기가 역전되는 경향을 나타내었다. 즉, w/b가 높은 보통 강도 모르터에서는 초음파 속도가 갑자기 증가하기 시작하여 최대 초음파 속도에 도달하는 데 걸리는 시간이 짧았으나, w/b가 낮은 고강도 모르터에서는 초음파 속도가 서서히 꾸준히 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 보통 강도 모르터에서는 초음파 속도가 증가하기 시작하는 시점을 어느 정도 구별할 수 있으나, 고강도 모르터에서는 속도의 증가 시점을 뚜렷하게 구별하기가 쉽지 않음을 알 수 있다. 이는 고강도 모르터 제조시 사용된 고성능 감수제에 의한 응결 지연 작용 때문에 응결이 서서히 일어나 이에 대응되는 초음파 속도의 증가도 완만한 기울기를 나타낸 것으로 판단된다. 즉 배합 초기 고강도 모르터의 초음파 속도 발현 특성은 사용된 고성능 감수제의 종류와 사용량에 따라 달라질 수 있다. 이상의 실험 결과를 볼 때, 배합에 따른 초음파 속도의 변화 특성을 이용하여 모르터의 응결 시간을 추정할 수 있을 것으로 사료된다

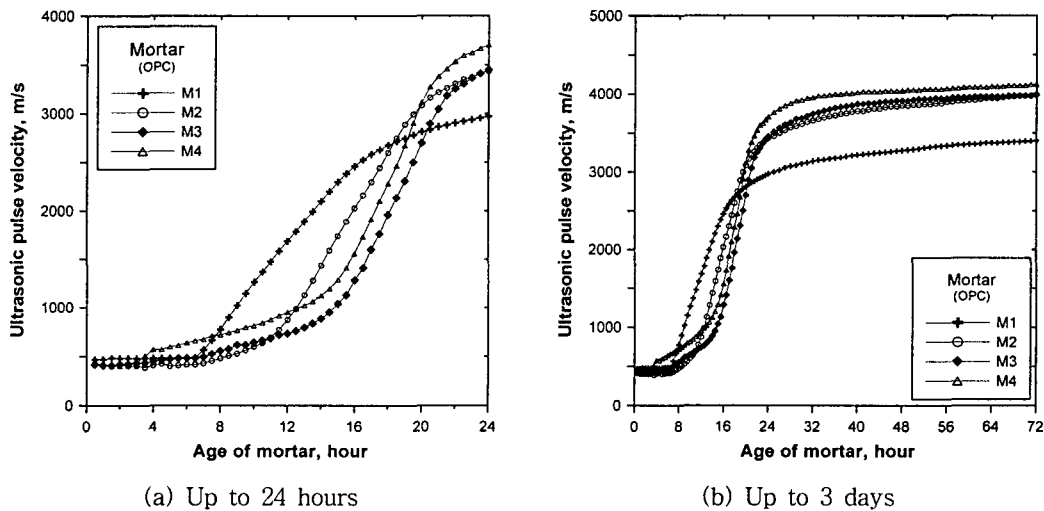
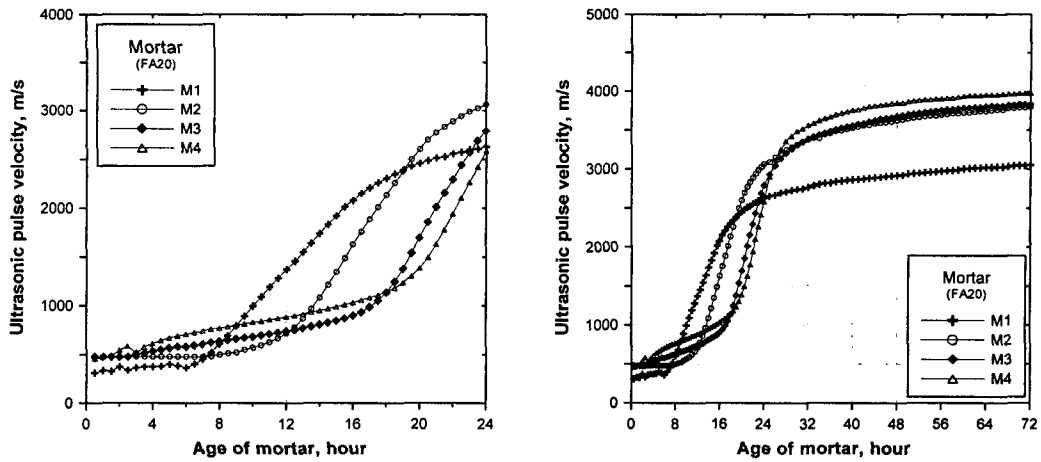


Fig. 2 Development of ultrasonic pulse velocity of OPC mortar series

4.2 FA20 모르터의 초음파 속도 발현 특성

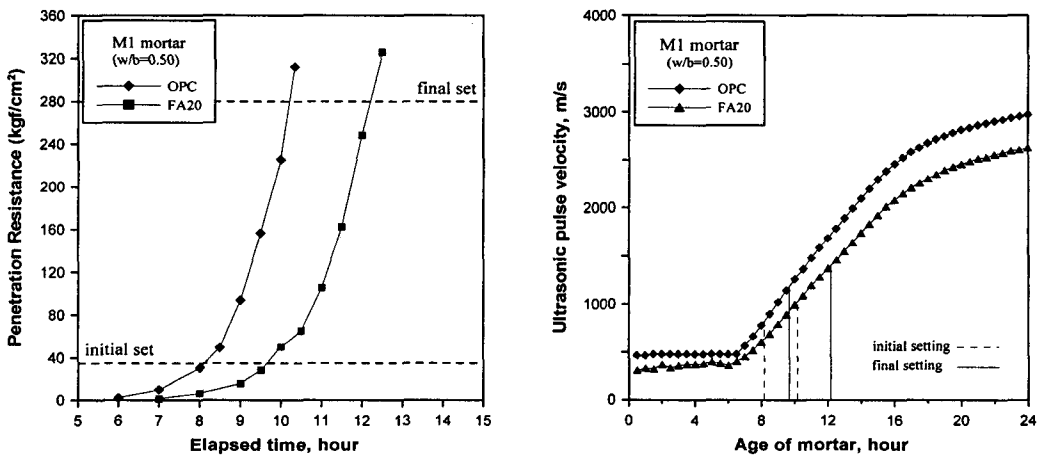
시멘트 중량의 20%를 플라이애시로 대체한 모르터의 초음파 속도 발현 특성을 Fig. 3에 나타내었다. 일반적으로 플라이애시를 사용하면 재령 초기에 응결이 지연되어 초기 강도 발현이 낮은 것으로 알려져 있으며, 이러한 경향은 Fig. 3(a)를 통해서도 알 수 있다. 전체적으로 보면, OPC와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나, 동일한 시간에서의 초음파 속도가 OPC에 비해 작게 나타났다. 특히, 재령 초기에는 w/b가 낮아질수록 고성능 감수제의 사용량이 늘어남과 동시에 플라이애시의 영향으로 OPC에 비해 초음파 속도의 발현률이 현저하게 낮게 나타났다. 그러나, 배합 후 3일까지의 초음파 속도 모니터링 결과를 나타내는 Fig. 3(b)를 보면, w/b가 낮을수록 초음파 속도가 크게 나타났다. w/b가 0.27인 M4 모르터 경우에는 초음파 속도가 재령 1일에서 약 2,584 m/s로 다른 배합에 비해 가장 낮았으나 재령 3일에서는 약 3,978 m/s로 오히려 가장 크게 나타났다. 콘크리트가 단순히 물과 시멘트, 그리고 골재만으로 이루어지던 과거와는 달리, 현재에는 콘크리트 제조시 다양한 기능과 성능을 발휘하는 혼화재료의 사용이 필수적이라 할 만큼 이에 대한 사용이 증가하고 있으며, 고성능 콘크리트의 등장으로 혼화재료에 대한 중요성이 더욱더 높아지고 있다. 따라서, 이러한 혼화재료가 사용된 배합의 특성을 재령 초기의 초음파 속도의 발현 특성으로 알아 낼 수 있다면 콘크리트의 초기 품질 관리 측면에서 큰 장점을 제공할 수 있을 것으로 사료된다. 추후 플라이애시를 비롯한 각종 혼화재 및 축진제, 지연제 등 재령 초기의 콘크리트 성질에 영향을 미치는 재료들에 대한 실험 연구가 요구된다.



(a) Up to 24 hours (b) Up to 3 days
 Fig. 3 Development of ultrasonic pulse velocity of FA20 mortar series

4.3 응결과 초음파 속도와와의 관계

응결과 초음파 속도의 관계를 알아보려고 M1(w/b=0.50)을 대상으로 관입저항 시험을 수행하여 얻은 결과를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 관입시험 결과, 초결과 종결 시간이 OPC는 각각 8시간 10분, 9시간 40분, FA20은 각각 10시간 10분, 12시간 10분이었다. 이러한 측정 결과를 초음파 속도의 발현 결과에 적용한 Fig. 4(b)를 보면, 초결 시간에 대응되는 초음파의 속도가 OPC는 약 780 m/s, FA20은 약 1,000 m/s, 종결시 초음파 속도는 각각 1,200 m/s와 1,400 m/s 정도로 배합에 약간 따라 다르게 나타났다. 이러한 결과를 볼 때, 응결은 초음파 속도가 증가하기 시작하는 시점에서 일어난다고 보기는 속도가 증가하기 시작하여 소정의 속도에 이르렀을 때 응결이 일어난다고 보는 것이 타당하다고 할 수 있다. 또한, 응결 시작의 기준이 되는 속도가 배합비에 따라 달라지기 때문에 앞으로 다양한 배합에 대한 위와 같은 실험이 수행되어 응결 시작의 기준이 되는 속도만 제안된다면, 기존의 관입저항 시험에 의한 응결 시간 결정의 대체 방법으로 그 활용도가 증가할 것으로 기대된다.



(a) Probe penetration resistance test results (b) Setting vs. ultrasonic pulse velocity

Fig. 4 Relationship between setting and ultrasonic pulse velocity of M1 mortar(w/b=0.50)

5. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 초기재령 모르터 및 콘크리트의 초음파 속도 변화를 모니터링하기 위하여 초음파 속도 자동 모니터링 시스템을 개발하였으며, 이를 이용하여 모르터 및 콘크리트의 품질 변화를 간접적으로 조사할 수 있었다.
- (2) 재령 초기에 물-결합재 비가 높은 모르터의 초음파 속도는 보다 이른 재령에서 증가하기 시작하였지만 물-결합재 비가 낮은 고강도 모르터에서는 고성능 감수제 사용에 따른 응결 지연으로 초음파 속도가 서서히 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 시간이 지나면서 물-결합재 비가 낮을수록 초음파 속도가 크게 나타났다. 또한, 플라이애시 사용에 따른 응결 지연도 초음파 속도의 변화 특성을 통해 알 수 있었다.
- (3) 기존의 관입저항 시험의 대체 방법으로 초음파 속도법에 의한 콘크리트의 응결 특성 조사 방법이 적용 가능하며, 특히 콘크리트 자체를 대상으로 물-결합재 비가 낮은 고강도 콘크리트의 초기 품질 평가에 적합할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 성균관대학교 SAFE 연구센터의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. 구본창, 강민호, 이대근, 김종우, 하재담, 박석균, "초음파법에 의한 콘크리트 응결시간 측정에 관한 연구," *콘크리트학회 봄 학술발표회*, 1998, pp. 707-711.
2. 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.
3. Reinhardt, H. W., Große, C. U., and Herb, A. T., "Ultrasonic Monitoring of Setting and Hardening of Cement Mortar - A New Device," *Materials and Structures*, Vol. 33, Nov., 2000, pp. 580-583.
4. 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, Nov.-Dec., 2000, pp. 675-683.
5. 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, Sept.-Oct., 1988, pp. 389-399.