

양생조건이 콘크리트의 종파속도와 압축강도의 상관관계에 미치는 영향

Effects of Curing Condition on the Relationship Between Longitudinal Wave Velocity and Compressive Strength of Concrete

이 회 근* 황 수 덕** 이 광 명***
Lee, Hoi-Keun Hwang, Soo-Duck Lee, Kwang-Myong

ABSTRACT

Nondestructive tests are useful method in rapidly evaluating the condition of existing concrete structures. An objective of this work is to investigate the factors influencing the longitudinal wave velocity-strength relationship, such as w/c ratio, curing temperature, curing condition. Test results show that a change in the w/c ratio ranging from 0.46 to 0.58 and in the curing temperature from 10°C to 30°C did not alter the velocity-strength relationship. However, curing methods had significant effects on the velocity-strength relationship. Therefore, the estimation of compressive strength until 28 days can be accomplished by only a nonlinear equation with consideration of curing condition.

1. 서론

콘크리트 구조물의 수명 및 내구적 성능은 재령 초기의 콘크리트 품질 관리 상태에 따라 좌우된다. 따라서 재령 초기에 콘크리트의 품질을 적절한 방법으로 평가할 수 있다면 시간이 지남에 따라 증가할 것으로 예상되는 구조물의 유지 및 보수비용의 절감과 시공 스케줄을 빠르게 하는 등의 경제적인 측면에서 상당한 이점이 있다. 이를 위해 비파괴검사가 여러 가지 장점을 제공하지만 각각의 검사 방법에 대한 이해 부족과 실제 적용 결과에 대한 신뢰성의 문제가 대두되면서 기존의 방법보다 사용하기 쉽고 높은 신뢰성의 강도 평가 방법이 필요하게 되었다. 이에 본 연구에서는 초기 재령에서의 콘크리트 강도 평가 방법을 제안하기에 앞서 충격공진법에 의해 측정된 콘크리트의 종파 속도와 압축강도의 상관관계에 영향을 미치는 여러 인자들을 실험을 통해 조사하였다.

2. 이론 배경

2.1 콘크리트의 종파 속도와 압축강도의 상관관계에 영향을 미치는 인자

콘크리트의 종파 속도와 압축강도의 상관관계는 콘크리트의 수분함유량, 골재량, 골재의 종류, 양생 방법, 재령 등 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다^(1,2,3). 따라서 종파 속도를 이용하여 콘크리트의 강도를 추정하기에 앞서 이들이 속도-강도의 관계에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 조사가 선행되어야 한다. 콘크리트의 속도는 콘크리트 내부의 공극에 수분이 많을수록 커지는 경향을

*정회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정

**정회원, 성균관대학교 토목공학과 석사과정

***정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

나타낸다^(4,5,6). 또한 골재의 함유량이 많은 콘크리트일수록 속도는 빨라지는데 반해 강도는 골재의 양이나 탄성계수에 그다지 큰 영향을 받지 않는다⁽⁷⁾. 속도-강도의 관계는 동일한 배합으로 제작된 콘크리트라 할지라도 양생방법에 따라 상당한 차이를 나타낸다. 따라서 종파 속도를 이용하여 콘크리트의 강도를 예측할 때에는 위에서 언급한 영향인자들의 영향정도를 실험을 통해 확인하여 이러한 인자들이 고려된 강도 예측 방법의 개발 및 적용이 요구된다.

2.2 충격공진법에 의한 종파속도의 결정

충격공진법은 시험 대상체에 충격을 가했을 때 발생하는 파의 반향특성으로 인해 유발되는 공진 현상을 이용하여 종파 속도를 구하는 방법으로 콘크리트 공시체 또는 코아로부터 쉽게 얻을 수 있다⁽⁸⁾. 공시체의 길이(L)와 직경의 비가 2 이상이라고 할 때, 막대와 속도(rod-wave velocity, V_c)는 다음 식에 의해 결정할 수 있다.

$$V_c = 2L f_1 \quad (1)$$

여기서 f_1 은 첫 번째 모드 성분의 공진 주파수이다.

3. 실험 연구

3.1 실험 변수

실험에서 고려된 변수들은 (1) 물-시멘트비 : 0.46~0.58, (2) 양생온도 : 10, 20, 30℃, (3) 양생방법 : A, B이며, 각각의 변수들이 콘크리트의 종파 속도와 압축강도의 관계에 미치는 영향을 조사하였다. 본 실험에서 사용된 구체적인 양생방법을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Curing Methods for Concrete Specimen

Curing Method	Details
A	Specimens are placed in a water bath at 10, 20 and 30℃ until tested, respectively.
B	After casting, specimens are covered with wet-burlap for 3 days, and then, exposed to ambient condition until tested

3.2 재료 및 배합비

콘크리트 배합에는, 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를, 굵은 골재는 최대치수가 25 mm인 화강암 쇄석을, 잔 골재는 강모래를 사용하였다. 실험에 사용된 4가지 종류의 콘크리트 배합비를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보듯이 C1~C4 배합의 단위 수량은 185 kg/m³으로 일정하고 단위 시멘트량에 조금씩 차이를 두어 물-시멘트 비를 0.46~0.58로 변화시켰다. 또한 콘크리트의 종파 속도가 골재의 양에 의해 영향을 받기 때문에 잔골재율을 조정하여 각각의 배합에서의 단위 체적당 골재의 양에 큰 차이가 나지 않도록 조절하였다.

Table 2. Mix Proportions of Five Concrete Mixtures (kg/m³)

Type	Water	Cement	Aggregate		S/a (%)	Air (%)	W/C
			Coarse	Fine			
C1	185	320	1025.6	712.7	41	5.0	0.58
C2	185	350	1008.3	703.1	41	5.0	0.53
C3	185	370	1016.2	680.8	40	5.0	0.50
C4	185	400	1032.0	691.0	40	3.0	0.46

3.3 종파 속도 및 압축강도의 측정

실험 재령일은 1, 2, 3, 7, 14, 28일이었으며, 재령별로 종파 속도와 압축강도를 각각 측정하였다. 종파 속도의 측정에는 충격공진법을 사용하였다. 양생방법 A로 양생된 공시체에 대한 종파 속도(막대파 속도)는 시편의 수분함유량에 따른 종파 속도의 영향을 고려하여 물 속에서 꺼낸 후 3시간 이후에 측정하였다. 종파 속도를 측정 한후 곧바로 압축강도를 측정하였다.

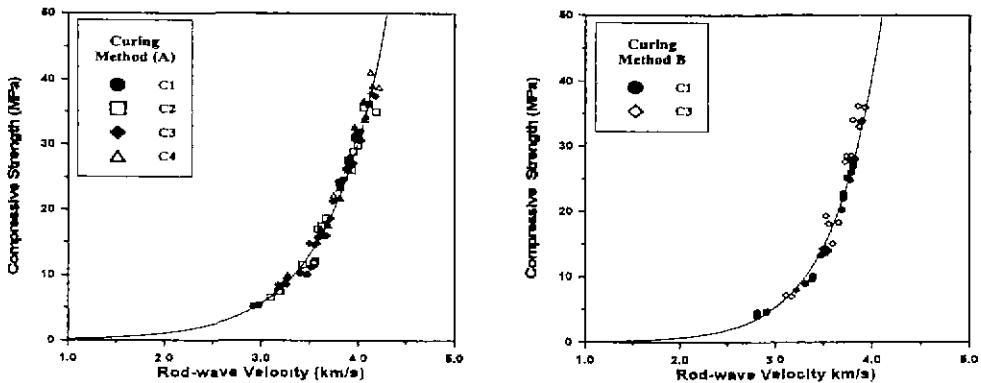
4. 실험 결과 및 분석

4.1 양생방법과 물-시멘트의 변화가 종파 속도와 압축강도의 상관관계에 미치는 영향

Table 2에 나타낸 C1~C4 배합으로부터 제작되어 Table 1의 방법대로 각각 양생된 공시체의 막대파 속도와 압축강도의 관계를 Fig. 1에 나타내었다. 20°C 수중양생에서의 결과를 나타내는 Fig. 1(a)를 보면, 막대파 속도와 압축강도의 관계가 하나의 비선형적 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 배합에 따라 약간의 차이는 있으나 막대파 속도와 압축강도가 일대일의 대응관계가 있음을 알 수 있다. 다시 말해 속도가 증가하면 압축강도도 증가하는 관계가 있다. 이러한 비선형적 관계를 나타내는 이유는 재령 28일까지는, 재령 초기에는 막대파 속도의 발현율이 압축강도의 발현율 보다 크며 재령에 따라 속도와 강도가 같이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

기건양생인 양생방법 B에서의 결과를 나타내는 Fig. 1(b)를 보면, Fig. 1(a)에 비해 속도-강도의 관계가 다소 분산된 경향을 나타내었다. 이는 양생방법 A와는 달리 양생방법 B는 양생시의 대기 온도와 습도에 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 1로부터 동일한 배합의 콘크리트라고 해도 양생방법의 차이로 속도-강도의 관계가 달라짐을 알 수 있다. 또한 동일한 양생방법에 의해 양생된 콘크리트일 경우, 단위 골재량이 비슷하고 물-시멘트 비가 0.46~0.58인 배합에서는 물-시멘트비의 차이가 속도-강도의 관계에 별다른 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이상의 실험결과로부터 재령 28일 이전의 강도 추정은 양생환경의 영향이 고려된 비선형적 속도-강도의 관계식에 의한 강도 예측이 가능한 것으로 판단된다.



(a) Curing Method A at 20°C

(b) Curing Method B

Fig. 1 Rod-wave velocity vs compressive strength at different curing method

4.2 양생온도 차이가 종파 속도와 압축강도의 상관관계에 미치는 영향

Fig. 2에는 양생온도의 변화가 종파 속도-강도의 관계에 어떠한 영향을 미치는 지를 알아보기 위해 C1과 C3 배합으로 제작되어 양생온도가 각각 10, 20, 30°C인 수조에서 양생된 공시체의 막대파 속도와 압축강도의 관계를 나타내었다.

C1 배합에서의 결과를 나타내는 Fig. 2(a)를 보면, 양생온도가 10~30°C일 때 속도-강도 관계가 서

로 비슷한 경향을 나타내었다. C3 배합에서의 결과를 나타내는 Fig. 2(b)를 보면, Fig. 2(a)와 비슷한 경향을 나타내었다.

실험결과로부터 양생온도가 10~30℃인 범위에서는 양생온도의 변화가 속도-강도의 관계에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 따라서 양생온도 변화에 대한 영향을 강도 예측식에 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

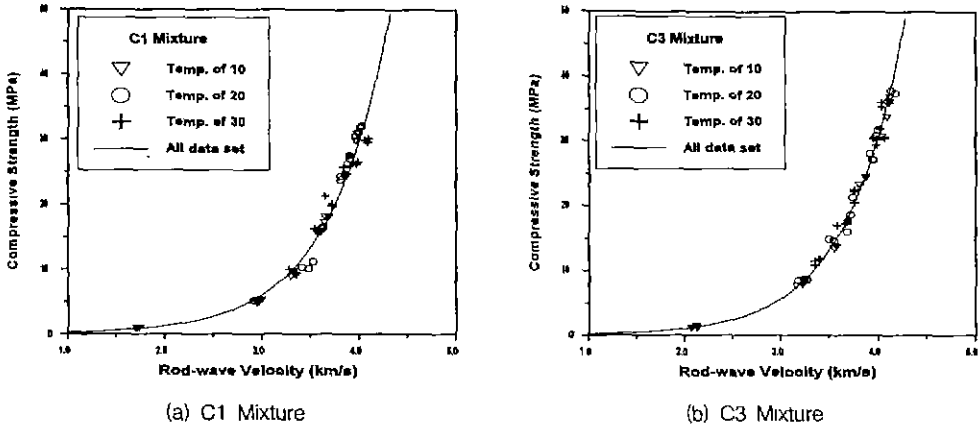


Fig. 2 Rod-wave velocity vs. compressive strength at different curing temperature

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다

- (1) 콘크리트의 단위 체적당 골재량이 비슷하며 동일한 방법에 의해 양생된 콘크리트인 경우, 물-시멘트 비(0.46~0.58)와 양생온도(10~30℃)의 변화가 콘크리트의 종파 속도와 압축강도의 관계에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.
- (2) 콘크리트의 속도-강도의 관계는 양생조건에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 초기 재령에서의 콘크리트 강도 예측식은 양생조건에 따라 달리 적용해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 SAFE 연구센터와 KISTEP의 엔지니어링 핵심 공동 기반기술 개발사업의 지원 하에 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., *Concrete*, 2nd edition, Prentice Hall, 1993, pp. 334-336.
2. 이광명, 이회근, 김동수, 김지상, "콘크리트의 P파 속도에 영향을 주는 인자에 관한 연구," *콘크리트학회 학술발표회*, 제10권 2호, 1998, pp. 725-730.
3. 김영진, 이상민, 최홍식, "재령을 고려한 콘크리트의 비파괴 강도 평가," *구조물진단학회지*, 제 3권 3호, 1999, pp. 157-165
4. 이회근, 이광명, 김지상, 김동수, "수분함유량이 콘크리트의 종파 속도에 미치는 영향에 관한 연구," *비파괴검사학회지*, 제 19권 2호, 1999, pp. 259-269.
5. Sturup, V. R., Vecchio, F. J., and Caratin, H., "Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength," *In-Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, SP-82, Edited by Malhotra, V. M., ACI, Detroit, 1984, pp. 201-227.
6. Lee, J. H., Song, W. J., Popovics, J. S., and Achenbach, J. D., "Application of Advanced One-Sided Stress Wave Velocity Measurement in Concrete," *Proceedings, Fourth Far East Conference on NDT*, Cheju-do, Korea, 1997, pp. 433-442.
7. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, 4th edition, Longman, England, 1995, pp. 631-632.
8. Sansalone, M. and Streett, W. B., *Impact-Echo*, Bullbrier Press, 1997, pp. 72-73.