

수분 함유량이 콘크리트의 종파 속도에 미치는 영향에 관한 연구

Influence of Moisture Content on Longitudinal Wave Velocity in Concrete

이회근*, 이광명**, 김지상***, 김동수****

H. K. Lee*, K. M. Lee**, J. S. Kim*** and D. S. Kim****

초 록 최근 초음파 속도법과 충격반향기법 등과 같이 탄성파를 이용한 비파괴검사 방법이 콘크리트의 강도나 탄성계수를 결정하는데 유용하게 사용되고 있다. 하지만 탄성과 속도에 영향을 미치는 다양한 인자들이 고려되지 않은 상태에서 비파괴검사가 행해지고 있어 실제로 만족할 만한 결과를 주지 못하고 있다. 이 연구에서는 다양한 영향인자들 중에서 특히 콘크리트의 수분함유량이 종파 속도에 미치는 영향정도를 실험을 통해 조사하였다. 콘크리트 내부의 수분함유량이 감소하면, 즉 콘크리트가 건조해지면 종파 속도는 점점 감소하며, 충격반향기법에 의해 측정된 막대파 속도가 초음파 속도보다 수분의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 또한 기건양생하에서는 재령이 증가함에 따라 수분함유량이 감소하게 되어 콘크리트의 종파 속도는 거의 증가하지 않는 반면에 강도는 점차적으로 증가하는 경향을 보이기 때문에 종파 속도와 콘크리트 강도의 상관관계 설정시 이를 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

주요용어 : 종파 속도, 막대파 속도, 초음파속도법, 충격반향기법, 수분 함유량

Abstract Elastic wave velocity measurement technique such as impact-echo method and ultrasonic pulse velocity method has been successfully used to evaluate the moduli and strength of concrete. However, estimation results obtained by the NDT methods do not agree well with real things because longitudinal wave velocity is influenced by various factors. In this paper, among several factors influencing P-wave velocity, the influence of moisture content in concrete was investigated through the experiment. Test results show that longitudinal wave velocity is significantly affected by the moisture content of concrete, i.e., the lower moisture content, the lower velocity. Moisture content influences rod-wave velocity measured by impact-echo method stronger than ultrasonic pulse velocity measured by transmission method. During drying process with ages, the difference of increasing rate between longitudinal wave velocity and compressive strength of concrete is gradually increased. Therefore, to establish more accurate relationship between longitudinal wave velocity and strength, the difference of the increasing rate should be considered.

Keywords: longitudinal wave velocity, rod-wave velocity, ultrasonic pulse velocity method, impact-echo method, moisture content

1. 서 론

최근 사용중인 구조물의 상태를 연속적으로 진단하여 구조물을 효율적으로 관리하기 위해 비파괴검사에 대한 관심과 수요가 점점 증가하고 있다. 국내에서도 콘크리

트 구조물의 결함 탐사나 강도 평가에 비파괴 기법이 제한적으로 이루어지고 있기는 하지만 다양한 비파괴 검사 기법에 대한 이해가 부족한 형편이다. 또한 비파괴 검사 장비의 사용 용도에 따른 장단점을 파악하지 못하거나 얻어진 결과분석에 대한 신뢰성에 문제가 있는 것

으로 판단되는 등 기술이 초보단계에 머물러 있고 전문적인 기술인력도 부족한 실정이다.

여러가지 비파괴검사 방법중에서 탄성파를 이용한 방법으로는 이미 초음파 속도법이 표준화되어 사용되고 있으며, 최근에는 충격반향기법이 개발되어 활발한 연구와 적용이 이루어지고 있다[1-3]. 이 방법에 의해 측정된 P파 속도, 막대파 속도와 같은 종파 속도를 이용하여 콘크리트의 강도와 구조물의 상태를 평가할 수 있다. 그러나 이러한 비파괴검사 기법들은 실제 현장에서 속도에 영향을 미치는 여러 가지 인자들이 고려되지 않은 상태에서 이루어지기 때문에 만족할 만한 결과를 주지 못하고 있다.

이 연구에서는 콘크리트의 속도에 영향을 미치는 다양한 인자들 중에서 콘크리트의 수분함유량이 속도에 미치는 영향정도를 실험을 통해 조사하였다. 또한 동일한 콘크리트 공시체를 대상으로 하여 충격반향기법에 의해 측정된 막대파 속도와 초음파 속도법에 의해 측정된 초음파 속도의 차이를 실험을 통해 확인하였다.

2. 이론 배경

2.1. 콘크리트의 P파 속도와 재료 성질의 관계

균질하며 등방성의 탄성 매질에서 측방향 변위가 구속되어 있는 경우의 P파 속도는 탄성계수와 밀도, 그리고 포아송 비와 관련이 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, M은 구속탄성계수(constrained modulus), E는 재료의 탄성계수, ν는 포아송비, ρ는 밀도를 나타낸다.

P파 속도가 강도와는 직접적인 물리적 상관관계가 없지만 식 (1)에서 보듯이 콘크리트의 탄성계수 및 밀도와 관련이 있기 때문에 일정한 제한 범위내에서 P파 속도를 이용한 콘크리트의 강도 평가가 가능하다.

만일 측방향 변위가 허용되는 봉과 같은 형태의 매질을 따라 전파하는 경우 막대파 속도(rod-wave velocity: V_c)는 다음과 같이 결정된다.

$$V_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots (2)$$

2.2. 콘크리트의 P파 속도에 영향을 미치는 인자

콘크리트의 P파 속도는 탄성계수, 강도와 같은 콘크리트의 재료 성질과 상관성이 있기 때문에 정확한 P파 속도의 측정을 통해서 콘크리트 재료의 성질들을 추정할 수 있다. 그러나 P파 속도는 여러 가지 요인에 의해 영향을 받기 때문에 P파 속도와 강도가 높은 상관관계를 갖기에는 다소 어려움이 있다. 콘크리트의 P파 속도는 배합에 사용된 골재의 탄성계수와 골재량에 의존하지만 콘크리트의 강도는 골재의 탄성계수나 양에 의해 큰 영향을 받지 않는다[5].

P파 속도는 물로 가득차 있는 공극을 통과할 때가 공기보다 차있는 공극을 지날때 보다 빠르다[6-7]. 즉 콘크리트가 건조해지면 P파 속도는 감소하는 반면에 강도는 증가하는 경향을 나타낸다. 이밖에도 P파 속도는 콘크리트의 온도, 골재의 크기와 형상, 골재-시멘트비에 의해 영향을 받는다.

2.3. 충격반향기법

Fig. 1에 나타난 콘크리트 슬래브와 같은 시험 대상체에 충격을 가하면 구형의 파면 형태로 매질속으로 전파하는 체적파인 종파(P)와 횡파(S), 그리고 매질의 표면을 따라 전파하는 표면파(R)가 발생한다. 체적파는 전파하는 도중에 내부 결함이나 경계면을 만나면 파의 진행 방향을 바꾸어 시험 대상체의 상부 표면으로 전파하며 이렇게 반사된 파는 상부 표면에서 다시 반사되어 매질 속으로 전파하게 된다. 그래서 상부 표면과 내부 결함 또는 경계면 사이에서의 다중반사에 의해 공진 상태가 유발된다[8]. 이때 체적파가 되돌아 오는 시간 Δt가 탄성파의 진동 주기 T에 정수배가 될 경우에는 진폭이 커지고 그렇지 못할 경우에는 진폭이 작아지게 된다. 따라서 공진이 일어날 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta t = nT = \frac{n}{f_n}, (n = 1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots (3)$$

콘크리트 슬래브에서 파가 한번 왕복한 이동경로는 슬래브 높이(d)의 2배이므로 P파 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_p = \frac{2d}{\Delta t} \dots\dots\dots (4)$$

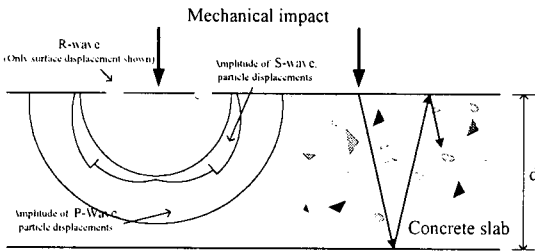


Fig. 1 Propagation and reflection of elastic wave

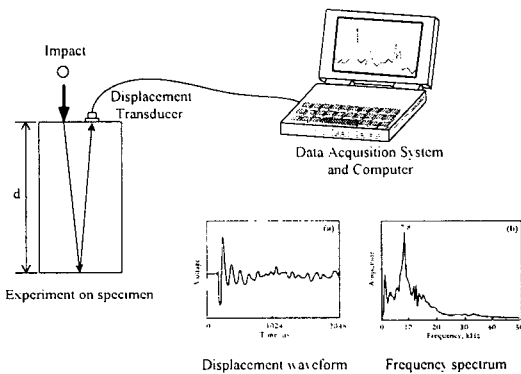


Fig. 2 Simplified diagram of the impact-echo method

충격반향기법에서는 기본 공진 모드를 이용하기 때문에 $n = 1$ 일 때 식 (3)으로부터 $\Delta t = 1/f_1$ 이 되며 P파 속도는 식 (4)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$V_p = 2d f_1 \dots\dots\dots (5)$$

만일, 측방향 변위가 구속되지 않은 공시체에서 시험을 수행하면 P파 속도 대신에 막대파 속도(V_c)가 획득된다. 이 연구에서의 실험은 콘크리트 공시체를 이용하여 수행되었으며 막대파에 의한 공진주파수는 시간영역에서의 변위 파형을 FFT를 통해 주파수영역으로 변환

시켜 결정되었다. Fig. 2에 충격반향시험의 개요도를 나타내었다.

2. 4. 초음파 속도법

초음파 속도법은 매질의 밀도에 따라 파의 전달속도가 다르다는 원리를 이용한 방법으로 콘크리트 표면에 위치한 발진자에서 발진된 초음파가 콘크리트 매질을 통해 인접한 수신자로 되돌아오는 시간을 측정함으로써 P파 속도를 측정하는 방법이다. 발진자와 수신자의 배치방법으로는 직접 전달법, 반간접 전달법, 표면 전달법이 있으며, 밀도, 골재량, 수분량의 변화와 철근의 존재유무 등이 초음파 속도에 영향을 미친다(9).

3. 실험 연구

3. 1. 재료 및 배합비

콘크리트 배합에 사용된 굵은 골재는 최대치수가 25mm인 화강암 쇄석이, 잔 골재는 표준모래가 사용되었다. Table 1의 2가지의 콘크리트 배합비(C1, C2)를 사용하여 원주형 공시체($\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$)가 제작되었다. 공시체 타설 직후 24시간 동안은 항온항습실(온도: $21 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도: $50 \pm 5\%$)에서 양생되었으며, 이후 몰드에서 꺼내져 실험전까지 수중 및 기건양생되었다.

3. 2. 실험 장비

충격반향기법을 이용한 콘크리트 공시체의 막대파 속도 측정에는 휴대용 노트북에 파형 수신용 카드가 장착된 충격공진시험 장비가 사용되었다. 충격발생을 위해 직경이 7.9mm인 강철구가 사용되었으며, 이로 인해 발생한 탄성파의 검출에는 압전 탐촉자가 사용되었다. 또한 충격원이나 시험체에 따라서 진동 신호의 크기가 달라질 수 있으므로 외부에 전치 증폭기를 부착하여 신

Table 1 Mixture proportion of two concrete mixtures (kg/m^3)

Type	Water	Cement	Aggregate		S/a(%)	Air(%)	AEWR/C (%)	W/C
			Coarse	Fine				
C1	185	350	1008.3	703.1	41	6.0	0.2	0.53
C2	185	400	1032.0	691.0	40	6.0	0.2	0.46

호의 크기가 작으면 증폭을 하여 원하는 크기의 신호를 얻었으며 주위의 잡음 신호를 배제하기 위해 필터가 사용되었다. 초음파 속도의 측정에는 Proceq사 제품의 초음파 측정기(Model TICO)가 사용되었으며 사용주파수는 54kHz이었다.

3.3. 실험 방법 및 내용

3.3.1. 콘크리트의 수분함유량이 종파 속도에 미치는 영향

종파 속도가 재령에 따라 변하기 때문에 이에 대한 영향을 최소화하면서 단지 콘크리트의 수분함유량 변화에 따른 막대파 속도와 초음파 속도의 변화 정도를 알아보기 위해 Table 1의 C1, C2 배합 중에서 임의로 C1 배합을 택하여 공시체를 제작한 후, 재령이 6개월 이상이 되면 콘크리트 강성의 변화가 거의 없을 것으로 예상되기 때문에 재령 6개월 이상의 공시체가 사용되었다.

건조기를 사용하여 공시체의 수분을 강제적으로 감소시키는 방법과 항온항습실에서 자연건조시키는 방법으로 공시체의 수분함유량이 조절되어 종파 속도 측정실

험이 수행되었다. 콘크리트 공시체의 무게가 단지 공시체 내부의 공극에 차 있는 수분의 변화에 의존한다고 가정하고 먼저 공시체의 수분감소량을 알아보기 위해 수증양생된 공시체를 실험전에 꺼내어 공시체 표면의 물기를 마른 수건으로 잘 닦아 표면 건조 포화 상태로 만든 후 공시체의 무게를 측정하여 수분함유량의 기준으로 삼았다. 이후 충격반향시험기와 초음파 속도 측정기를 사용하여 막대파 속도와 초음파 속도를 각각 측정한 후 건조기(90~100℃)와 항온항습실을 이용하여 공시체를 건조시켜 가면서 속도 측정을 반복 수행하였다.

충격 공진 실험에 사용된 sampling rate는 125kHz ($\Delta t=8\mu s$)이며, 데이터 개수는 4096개로 고정되었다. 건조기를 사용하여 강제로 건조시킨 공시체는 건조후 온도에 의한 영향을 고려하여 항온항습기에서 충분히 식힌 다음 속도가 측정되었으며, 측정시 공시체의 표면온도는 $20\pm 1^\circ C$ 로 유지되었다.

3.3.2. 재령에 따른 콘크리트의 수분 함유량, 종파 속도, 강도의 변화

재령의 증가에 따른 종파 속도와 강도의 변화 정도를 알아보기 위해 두 가지의 양생방법이 사용되었다.

Table 2 Variation of P-wave velocity with moisture contents in concrete(C1) dried by oven

Specimen	Moisture decrease rate (%)	Rod-wave velocity (a) (m/s)	Ultrasonic velocity (b) (m/s)	Difference $\left(\frac{b-a}{b} \times 100\right)$ (%)
A	0.00	3935	4340	9.3
	0.36	3920	4330	9.5
	0.61	3908	4320	9.5
	1.07	3896	4300	9.4
	1.38	3884	4280	9.3
	1.71	3872	4270	9.3
	1.93	3860	4260	9.4
	2.56	3739	4200	11.0
B	0.00	3812	4230	9.9
	0.28	3800	4210	9.7
	0.86	3776	4180	9.7
	1.30	3752	4170	10.0
	1.66	3739	4150	9.9
	1.85	3712	4400	9.5
	2.29	3631	4100	11.4

Table 1의 C1과 C2 배합비로 제작된 공시체는 타설 직후 항온항습실에서 24시간 동안 양생된 후 몰드에서 꺼내져 항온수조에서 양생되다가 재령 14일째 되는 날에 제작된 공시체의 반은 항온수조에서 꺼내져 항온항습실에서 실험전까지 기건양생(dry curing)되었으며 나머지 반은 실험전까지 수중양생(moisture curing)되었다. 수중양생된 공시체는 실험전에 꺼내져 항온항습실에서 3시간 동안 자연건조시킨 후에 충격공진시험과 초음파 속도 시험이 수행되었다. 실험 재령일은 28, 56, 84, 112일(4, 8, 12, 16주)이었으며, 동일한 공시체에 대해 충격반향 실험과 초음파 속도 실험을 5회 이상 반복하여 얻은 각각의 측정값을 평균하여 막대파 속도와 초음파 속도가 결정되었다.

4. 실험 결과 및 분석

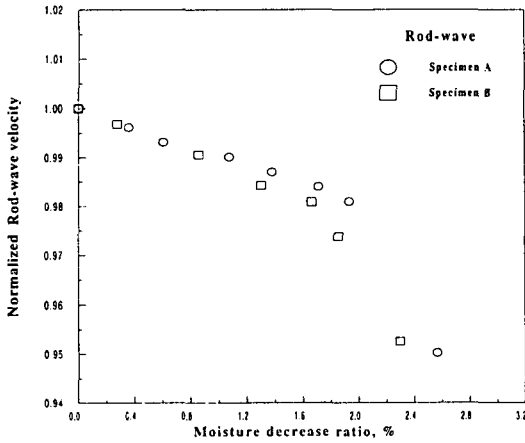
4. 1. 콘크리트의 수분함유량 감소에 따른 종파 속도의 변화

Table 2와 Table 3에 콘크리트 공시체의 수분함유량을 건조기와 항온항습실을 사용하여 감소시켜 가면서 측정된 막대파 속도와 초음파 속도를 각각 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4에는 공시체의 수분함유량이 표면건조포화상태일 때를 기준으로 하여 막대파 속도와 초음파 속도의 변화를 각각 무차원으로 나타내었다.

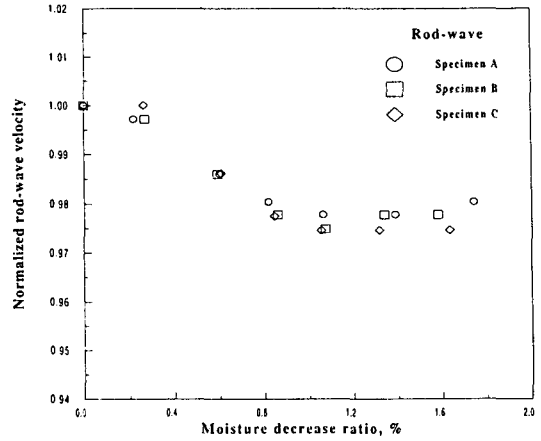
건조기를 사용하여 강제로 공시체의 수분을 감소시킨 경우의 실험결과인 Fig. 2를 보면 공시체의 수분감소율이 약 2.3~2.5% 정도까지 증가함에 따라 막대파 속

Table 3 Variation of P-wave velocity with moisture contents in concrete(C1) dried at controlled humidity room

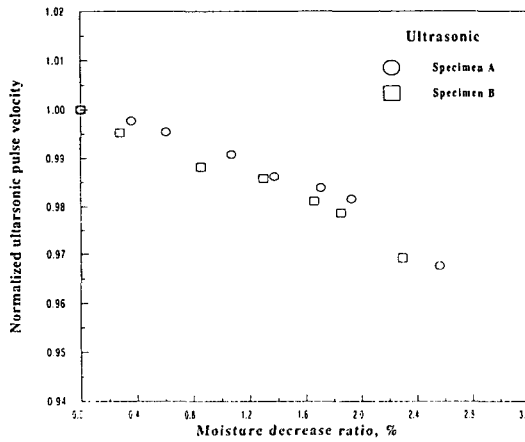
Specimen	Moisture decrease rate (%)	Rod-wave velocity (a) (m/s)	Ultrasonic velocity (b) (m/s)	Difference $\left(\frac{b-a}{b} \times 100\right)$ (%)
A	0.00	4273	4740	9.9
	0.22	4261	4740	10.1
	0.60	4213	4690	10.2
	0.82	4189	4660	10.1
	1.06	4178	4630	9.8
	1.39	4178	4630	9.8
	1.74	4189	4610	9.1
B	0.00	4261	4720	9.7
	0.27	4249	4710	9.8
	0.59	4201	4680	10.2
	0.86	4166	4650	10.4
	1.07	4154	4620	10.1
	1.34	4166	4620	9.8
	1.60	4166	4610	9.6
C	0.00	4253	4700	9.5
	0.26	4253	4700	9.5
	0.61	4194	4650	9.8
	0.84	4157	4620	10.0
	1.05	4145	4590	9.7
	1.32	4145	4580	9.5
	1.63	4145	4570	9.3



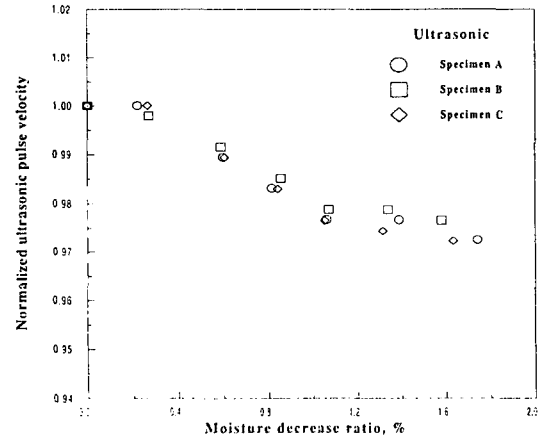
(a) Normalized rod-wave velocity



(a) Normalized rod-wave velocity



(b) Normalized ultrasonic pulse velocity



(b) Normalized ultrasonic pulse velocity

Fig. 3 Variation of rod-wave and ultrasonic pulse velocity with moisture content in concrete dried by oven

Fig. 4 Variation of rod-wave and ultrasonic pulse velocity with moisture content in concrete dried at controlled humidity room

도와 초음파 속도가 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 수분감소율이 약 2%일 때까지는 막대파 속도와 초음파 속도의 감소율이 비슷한 경향을 나타내었으나, 수분감소율이 약 2.4% 정도일 때 막대파 속도의 감소율은 약 5% 정도로 초음파 속도의 감소율인 3% 정도보다 크게 나타났다. 이로부터 수분감소율이 증가할수록, 즉 콘크리트가 건조해 질수록 막대파 속도가 초음파 속도보다 수분의 영향을 더 받을 것으로 사료된다.

항온항습실에서 자연적으로 공시체의 수분을 감소시

킨 경우의 실험결과인 Fig. 3을 보면 공시체의 수분감소율이 약 1.6~1.7% 정도까지 증가함에 따라 Fig. 2와 마찬가지로 막대파 속도와 초음파 속도가 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 Fig. 2와는 달리 수분감소율이 1.5~1.7% 정도까지는 막대파 속도와 초음파 속도가 감소하다가 이후에는 속도의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 수분감소율이 1.0%일 때 항온항습실에서 건조된 공시체의 막대파 속도는 평균 2.5%의 속도 감소율을 보인 반면에 건조기에서 건조된 막대

파 속도는 평균 1.0%의 속도 감소를 나타내어 자연 건조시킨 경우에 속도의 감소율이 큼을 알 수 있으며, 초음파 속도 역시 이와 비슷한 결과를 나타내었다.

4.2. 막대파 속도와 초음파 속도의 비교

Table 2와 Table 3을 보면 초음파 속도가 막대파 속도보다 약 9.1~11.4% 정도 크게 나타났다. 이렇게 막대파 속도와 초음파 속도가 차이를 보이는 이유는 식 (1)과 식 (2)에 나타낸 바와 같이 포아송 계수의 영향으로 원주형 공시체와 같이 측방향 변위를 허용하는 경우에서의 속도는 측방향 변위가 구속되어 있는 경우의 P파 속도보다 작게 나타나기 때문이다. 충격반향 실험과 초음파 실험에서 사용되는 주파수 대역은 각각 10kHz와 54kHz로 차이가 있어 동일한 공시체를 사용하였다 하더라도 서로 구속정도가 다르게 되어 속도

가 차이를 보인 것으로 사료된다. 또한 초음파 속도는 콘크리트 표면에 위치한 발진자에서 발진된 초음파가 콘크리트 매질을 통해 인접한 수신자에 가장 먼저 도달하는 시간의 측정을 통해 결정되는 반면에 막대파 속도는 공진 현상을 이용하기 때문에 시험방법의 차이에 의해 속도의 차이가 발생한 것으로 사료된다. 일반적으로 초음파 속도법에서는 발진자와 수신자 사이의 간격이 짧은 경우에는 정확한 도달시간 측정이 어렵고, 이에 따른 오차도 증가한다.

4.3. 재령에 따른 종파 속도와 강도의 관계

두 종류의 배합비로부터 제작된 공시체의 재령에 따른 수분감소율과 종파 속도, 그리고 압축강도가 Table 4와 Table 5에 양생방법에 따라 각각 정리되어 있다. Fig. 5와 Fig. 6에 재령의 경과에 따른 막대파

Table 4 Variation of moisture decrease rate, P-wave velocity, and compressive strength of concrete with ages (dry curing)

Type	Age (days)	Spec. No.	Moisture decrease rate (%)	Velocity (km/s)		Compressive strength (MPa)
				Rod-wave	Ultrasonic	
C1	28	①	1.30	3.99	4.39	33.0
		②	1.31	3.94	4.33	29.4
	56	①	1.88	4.00	4.39	37.4
		②	1.82	4.02	4.44	33.7
	84	①	2.16	4.04	4.42	38.3
		②	2.19	4.04	4.37	39.7
	112	①	2.29	4.00	4.46	43.1
		②	2.38	3.93	4.40	39.3
		③	2.30	3.97	4.41	38.6
C2	28	①	1.23	4.09	4.49	37.4
		②	1.28	4.05	4.45	34.9
	56	①	1.70	4.12	4.55	43.5
		②	1.60	4.10	4.56	39.7
	84	①	1.80	4.13	4.62	48.2
		②	1.82	4.11	4.55	46.0
	112	①	2.19	4.12	4.61	48.6
		②	2.21	4.13	4.63	49.5
		③	2.26	4.10	4.58	47.2

속도와 초음파 속도의 변화를 각각 나타내었다. Fig. 7에는 재령 28일 이후의 종파 속도와 강도의 변화정도를 알아보기 위해 재령 28일을 기준으로 하여 강도와 속도를 무차원으로 나타내었다.

Table 4로부터 기건양생 조건에서 콘크리트 공시체의 수분감소율이 재령에 따라 점차 증가함을 알 수 있다. 동일한 배합비로부터 제작된 공시체라 하더라도 공시체에 따라 수분감소율이 약간의 차이를 나타내었다. 재령 28일에서의 평균 수분감소율이 C1 배합에서는 1.31%, C2 배합에서는 1.26% 정도로 나타났으며, 재령 112일에서의 평균 수분감소율은 C1 배합에서 2.32%, C2 배합에서는 2.22% 정도로 나타났다. 배합비의 차이로 인해 재령 112일까지의 수분감소율이 C2 배합에서보다 C1 배합에서 약간 크게 나타났다.

Table 4, 5 및 Fig. 5와 6을 보면 재령이 경과함에 따라 막대파 속도와 초음파 속도가 각각 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 동일한 배합비로부터 제작된 공

시체라 하더라도 수중양생된 공시체로부터 측정된 속도가 기건양생된 공시체로부터 측정된 속도보다 크게 나타났다. 양생방법에 따른 막대파 속도의 차이를 보면, 수중양생된 공시체에서의 막대파 속도가 기건양생된 공시체의 막대파 속도보다 재령 28일에서는 약 3.2~3.3%, 재령 112일에서는 약 4.6~6.2% 정도 크게 나타났다. 또한 초음파 속도 역시 막대파 속도와 비슷한 경향을 보였다. 이러한 이유는 재령의 증가에 따른 공시체 내부의 수분 감소의 영향으로 기건양생된 공시체의 속도가 감소하여 수중양생된 공시체의 속도보다 작게 나타난 것으로 판단된다.

Table 4와 5의 강도실험결과를 보면 C1과 C2의 압축강도 모두 기건양생인 경우가 수중양생된 경우보다 컸으며 C2의 압축강도가 C1의 압축강도에 비하여 다소 크게 나타났다. 기건양생된 콘크리트 공시체의 재령 28일 이후의 종파 속도와 강도의 증가 정도를 나타내는 Fig. 6을 보면 재령 28일을 기준으로 한 재령 112일까지

Table 5 Variation of moisture decrease rate, P-wave velocity, and compressive strength of concrete with ages (moisture curing)

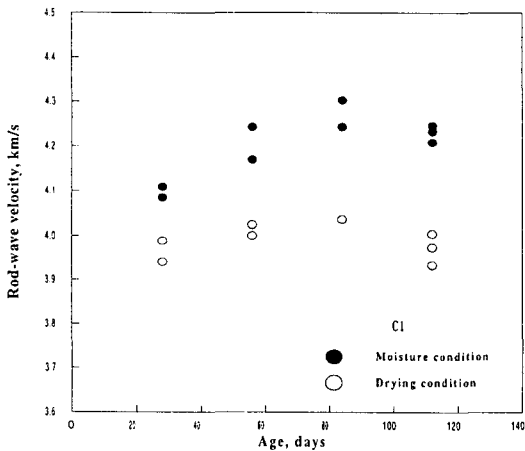
Type	Age (days)	Spec. No.	Moisture decrease rate (%)	Velocity (km/s)		Compressive strength (MPa)
				Rod-wave	Ultrasonic	
C1	28	①	0.25	4.09	4.54	25.7
		②	0.25	4.11	4.53	29.3
	56	①	0.22	4.17	4.68	33.3
		②	0.22	4.24	4.69	31.2
	84	①	0.16	4.30	4.72	37.8
		②	0.13	4.24	4.69	37.4
	112	①	0.11	4.21	4.73	37.7
		②	0.19	4.25	4.75	38.3
		③	0.08	4.23	4.74	37.4
	C2	28	①	0.16	4.15	4.58
②			0.19	4.27	4.66	32.4
56		①	0.11	4.30	4.76	36.3
		②	0.11	4.27	4.77	39.6
84		①	0.14	4.31	4.76	40.9
		②	0.16	4.35	4.78	43.1
112		①	0.08	4.29	4.77	40.5
		②	0.08	4.34	4.80	43.9
		③	0.08	4.33	4.78	42.6

지의 강도 증가율은 30~35% 정도로 나타났다. 반면에 종파 속도의 증가율은 1.3~1.8% 정도로 강도에 비해 상당히 낮은 증가율을 나타내었다. 이러한 경향을 볼 때 112일 이후의 장기 재령으로 갈수록 종파 속도의 증가율 변화는 거의 없는 것에 비해 강도는 상대적으로 증가율이 크게 나타날 것으로 사료된다.

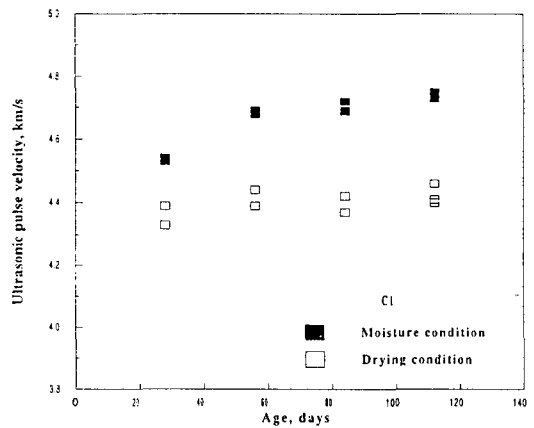
4.4. 결과 분석

실험으로부터 수분함유량이 감소할수록 종파 속도가 감소하며 충격반향기법에 의해 측정된 속도가 초음파

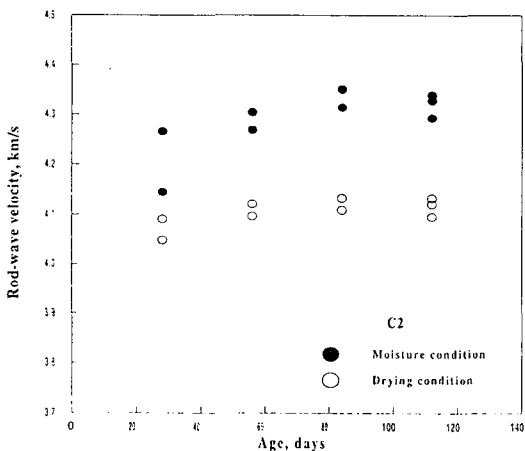
속도보다 수분의 영향을 더 많이 받는다는 결과를 얻었다. 콘크리트의 수분함유량에 따른 속도의 변화에 대해 기수행된 연구결과(6)에도 본 실험결과와 비슷한 경향이 보고된 바 있다. 재령에 따른 P파 속도의 변화에 대한 강도의 변화 정도가 상대적으로 크기 때문에 P파 속도를 이용하여 정확한 강도를 추정하기 위해서는 우선 P파 속도 측정시 콘크리트의 재령과 수분함유량의 영향이 고려되어야 할 것이다. 그러나 콘크리트 내부의 결합 및 공동 탐사, 두께 측정시 사용되는 P파 속도는 일반적으로 현장에서 코아링을 통해 측정되기 때문에 재령 및 수분함유량의 영향을 적게 받을 것으로 판단된다.



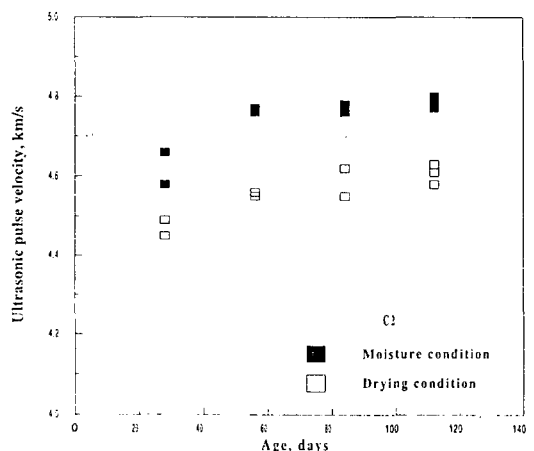
(a) C1



(a) C1



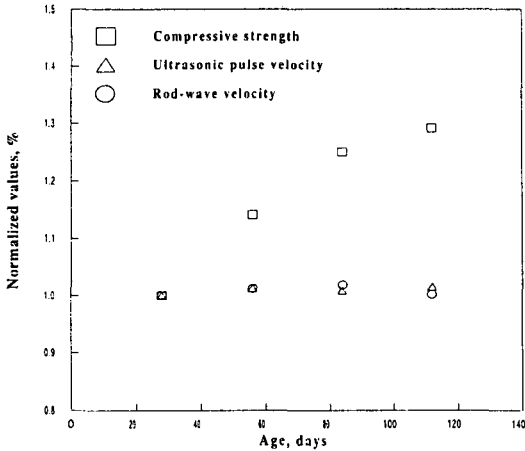
(b) C2



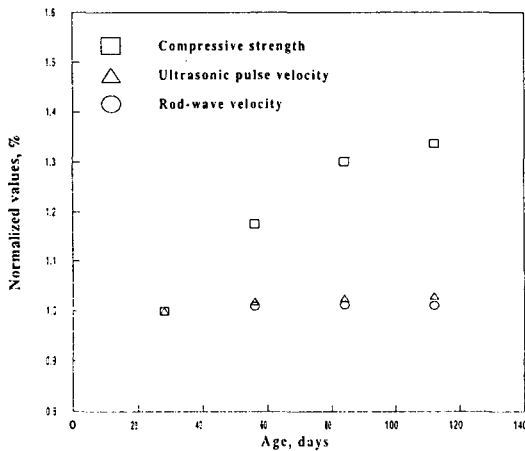
(b) C2

Fig. 5 Variation of rod-wave velocity in concrete with curing condition and age

Fig. 6 Variation of ultrasonic pulse velocity in concrete with curing condition and age



(a) C1



(b) C2

Fig. 7 Normalized strength of and velocity in concrete with ages

5. 결 론

이 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 종파 속도는 수분함유량에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 콘크리트가 건조함에 따라 막대파 속도와 초음파 속도는 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, 막대파 속도가 초음파 속도보다 수분의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.
- 2) 동일한 콘크리트 공시체에서 충격반향기법에 의해

측정된 막대파 속도가 초음파 속도보다 약 9.1~11.4% 정도 작게 나타났다. 이는 구속조건, 시험방법, 사용하는 주파수대의 차이 등에 의한 것으로 사료된다.

- 3) 콘크리트의 종파 속도는 장기 재령으로 갈수록 속도의 증가가 거의 없었으나 압축강도는 계속해서 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 양생조건과 재령에 따른 종파 속도와 압축강도의 발현을 차이로 종파 속도와 압축강도 사이에 일정한 상관관계를 설정하기가 어렵기 때문에 종파 속도를 이용한 콘크리트 강도 평가시 이에 대한 영향을 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국통신 정보통신 기초연구(98-10)와 SAFE 연구센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 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)
- [2] S. P. 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)
- [3] 김동수, 박형춘, 이광명, "충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴검사", 콘크리트학회지, 제 9권 2호, pp. 109-119, (1997)
- [4] M. Sansalone and W. B. Streett, Impact-Echo, Bullbrier Press, pp. 35-36, (1997)
- [5] A. M. Neville, Properties of Concrete, 4th Edition, Longman, England, pp. 631-632, (1995)
- [6] V. R. Sturup, F. J. Vecchio and H. Caratin, "Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength", In-Situ/

- Nondestructive Testing of Concrete, SP-82, Edited by Malhotra, V. M., ACI, Detroit, pp. 201-227, (1984)
- [7] J. H. Lee, W. J. Song, J. S. Popovics and J. D. Achenbach, "Application of advanced one-sided stress wave velocity measurement in concrete", Proceedings, Fourth Far East Conference on NDT, Cheju-do, Korea, pp. 433-442, (1997)
- [8] M. Sansalone and N. J. Carino, "Detecting delaminations in concretes slabs with and without overlays using the impact-echo method", ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 2, pp. 175-184, (1986)
- [9] 비파괴시험법에 의한 콘크리트 강도 평가 요령, 한국콘크리트학회, pp. 15-32, (1997)