

## 초음파 속도법과 충격반향기법에 의한 콘크리트의 종파 속도 비교

### Comparison of Longitudinal Wave Velocity in Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity Method and Impact-Echo Method

이회근\*<sup>†</sup>, 이광명\*, 김영환\*\*

Hoi-Keun Lee\*<sup>†</sup>, Kwang-Myong Lee\* and Young H. Kim\*\*

**초 록** 비파괴시험(NDT)은 구조물의 기능에 손상을 주지 않으면서 콘크리트에 대한 많은 정보를 준다. 여러 가지 NDT 방법들 중에서, 초음파 속도법과 충격반향기법과 같이 탄성파의 속도를 이용하는 방법은 콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 포아송비의 추정뿐만 아니라, 내부 미세구조 변화 모니터링과 결함 탐지 등을 위해 이용되고 있다. 본 연구에서는 물-결합재비가 0.27~0.50이고 시멘트 중량의 20%를 플라이 애쉬로 대체 사용한 콘크리트를 제조한 후, 동일한 콘크리트에 대해 초음파 속도법과 충격반향기법을 이용하여 종파 속도를 각각 측정하여 서로 비교하였다. 실험 결과, 콘크리트 공시체로부터 측정된 초음파 속도가 충격반향기법에 의해 측정된 종파 속도, 즉 막대파 속도보다 큰 경향을 나타내었으며, 이들의 차이는 재령이 증가함에 따라 그리고 콘크리트의 강도가 커질수록 각각 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 동포아송비, 정탄성계수, 동탄성계수, 속도-강도의 상관관계 등을 실험적으로 결정하였다. 그 결과, 동적인 방법으로 결정되는 포아송비와 탄성계수가 정적인 시험에 의한 것보다 크게 나타났다. 따라서, 탄성과 속도를 이용하여 콘크리트의 성질들을 보다 정확하게 추정하기 위해서는 속도 특성에 대한 이해가 필요할 것으로 사료된다.

**주요어어:** 콘크리트, 종파 속도, 초음파 속도법, 충격반향기법, 동포아송비, 동탄성계수

**Abstract** Nondestructive test (NDT) provides much information on concrete without damage of structural functions. Of NDT methods, elastic wave propagation methods, such as ultrasonic pulse velocity (UPV) method and impact-echo (IE) method, have been successfully used to estimate the strength, elastic modulus, and Poisson's ratio of concrete as well as to detect the internal microstructural change and defects. In this study, the concretes with water-binder ratio ranging from 0.27 to 0.50 and fly ash content of 20% were made and then their longitudinal wave velocities were measured by UPV and IE method, respectively. Test results showed that the UPV is greater than the longitudinal wave velocity measured by the IE method, i.e., rod-wave velocity obtained from the same concrete cylinder. It was found that the difference between the two types of velocities decreased with increasing the ages of concrete and strength level. Moreover, for the empirical formula, the dynamic Poisson's ratio, static and dynamic moduli of elasticity, and velocity-strength relationship were determined. It was observed that the Poisson's ratio and the modulus of elasticity determined by the dynamic method are greater than those determined by the static test. Consequently, for the more accurate estimation of concrete properties using the elastic wave velocities, the characteristics of these velocities should be understood.

**Keywords:** concrete, longitudinal wave velocity, ultrasonic pulse velocity method, impact-echo method, dynamic Poisson's ratio, dynamic modulus of elasticity

## 1. 서 론

콘크리트는 토목 및 건축분야에서 가장 널리 쓰이는 구조용 재료로써, 다른 건설용 재료들과 달리 여러 가지 재료들을 조합하여 제조할 수 있으며, 타설된 콘크리트의 잠재적인 성능은 다짐 및 양생을 비롯한 현장에서의 여러 작업 과정들에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서, 콘크리트의 현재 상태 평가와 품질 관리를 위해 현장 콘크리트의 강도 및 여러 성질들을 추정하고자 하는 노력들이 있어 왔다. 이를 위해 구조물의 본래 기능에는 손상을 주지 않으며 동일한 부위에 대해 반복적으로 수행하여 시간에 따른 콘크리트의 성질 변화를 조사함으로써 지속적인 유지 및 보수에 적합한 비파괴 시험(nondestructive test; NDT)에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다 [1].

콘크리트에 적용되는 NDT 방법에는 콘크리트 강도 추정을 위해 국내에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 반발 경도법과 초음파 속도법을 비롯하여 관입법, 인발법, 압입법 등이 있으며, 강도 추정 이외의 결함 탐지 및 상태 평가를 위한 충격반향기법, 음향 방출법, 초음파 펄스 에코법, 표면파기법 등이 있다 [2]. 이 중에서 탄성파를 이용하는 NDT 방법은 측정된 탄성과 속도로부터 콘크리트의 동탄성계수를 얻을 수 있으며, 강도와와의 상관관계를 이용하여 구조물의 강도 및 손상 정도를 추정할 수 있다. 또한, 탄성파의 반향 특성을 이용하면 콘크리트 부재의 두께 측정, 균열 및 공동탐사에 적용할 수 있다[3]. 그러나, 콘크리트의 불균질한 재료적 특성 때문에 NDT 방법으로부터 얻어진 결과와 강도와 같은 콘크리트의 성질들이 직접적인 관계가 있다고 하기에는 다소 무리가 있다. 또한, 다양한 NDT 기법에 대한 이해가 부족하고 각각의 사용에 따른 장단점을 파악하지 못하거나 얻어진 결과에 대한 신뢰성이 낮아 제한된 범위 내에서 사용되고 있는 실정이다.

탄성파를 이용하는 NDT 방법들 중에 이미 초음파 속도법이 표준화되어 사용되고 있으며, 가장 최근에는 충격반향기법(impact-echo method; IE)이 개발되어 활발한 연구와 적용이 이루어지고 있다. 이러한 방법에서는 탄성파 중에서 주로 종파 속도(longitudinal wave velocity;  $V_L$ )가 콘크리트의 강도와 구조물의 상태를 평가하는 데에 이용된다. 하지만, 같은 종파 속도를 이용하는 방법이라 할 지라도

측정 대상물의 형상과 사용 주파수 대역의 차이로 종파 속도의 크기가 달라질 수 있다. 따라서, 탄성파법의 보다 폭넓은 이해와 올바른 적용을 위해서는 탄성파법에 따른 종파 속도의 특성에 대한 조사가 필요하며, 이러한 특성이 콘크리트의 성질을 평가하는 데 미치는 영향에 대한 연구가 요구된다.

본 연구에서는 탄성파를 이용하는 대표적인 방법인 초음파 속도법과 충격반향기법을 이용하여 동일한 콘크리트 시편에 대해 종파 속도를 각각 측정하여 두 속도간의 차이를 조사하였다. 또한, 측정된 종파 속도로부터 콘크리트의 동적 성질인 동포아송비와 동탄성계수를 구하였으며, 종파 속도 차이가 속도-강도의 상관관계에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 이론

### 2.1. 종파 속도와 콘크리트 재료 성질과의 관계

균질하며 등방성의 탄성체에서의 종파 속도( $V_L$ )는 동탄성계수( $E_d$ )와 밀도( $\rho$ ), 그리고 동포아송비( $\nu_d$ )와 관련이 있으며, 측방향 변위가 구속되어 있는 경우에는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_L = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu_d)}{\rho(1+\nu_d)(1-2\nu_d)}} \quad (1)$$

종파 속도는 매질의 형상에 영향을 받으며, 측방향 변위가 허용되는 봉과 같은 형태의 매질을 따라 전파하는 경우에서의 종파 속도를 막대파 속도(rod-wave velocity;  $V_c$ )라고 하고, 공진주파수를 이용할 경우 다음과 같이 결정된다.

$$V_c = f_1 \cdot \lambda = f_1 \cdot 2L = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (2)$$

여기서,  $f_1$ 은 첫 번째 모드 공진주파수이며  $L$ 은 시편 길이를 나타낸다. 본 논문에서는 콘크리트 공시체에 대해 초음파 속도법과 충격반향기법에 의해 측정된 종파 속도를 각각  $V_L$ 과  $V_c$ 로 표기하였다.

### 2.2. 동포아송비

일반적으로 포아송비라 함은 일축 하중하에서 재료의 하중 작용방향 변형률에 대한 횡방향 변형률

의 비로 정의된다. 콘크리트의 포아송비는 사용된 골재의 종류에 따라 달라 0.15~0.22 정도이며, 고강도 콘크리트의 포아송비가 보통강도 콘크리트의 포아송비보다 작은 경향을 나타낸다[4]. 포아송비는 정적인 실험이외에 동적인 실험으로부터 구할 수도 있으며, 이를 동포아송비(dynamic Poisson's ratio;  $\nu_d$ )라고 하며, 식 (1,2)로부터 얻어진 다음 식에 의해서 결정할 수 있다[4].

$$\left(\frac{V_L}{V_c}\right)^2 = \frac{1 - \nu_d}{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)} \quad (3)$$

지금까지 동포아송비에 대한 실험 결과는 극히 제한적이거나, 대체로 정적인 실험으로부터 구한 포아송비보다 큰 경향을 나타내며 평균 0.24 정도인 것으로 보고된 바 있다[5]. 이밖에, 동포아송비는 식 (3)을 이용한 방법이외에 아래 식에 나타낸 바와 같이, 종파 속도와 횡파 속도(transverse wave velocity;  $V_s$ ) 또는 종파 속도로부터 얻은 동탄성계수( $E_d$ )와 비틀림파 속도로부터 얻은 동전단탄성계수( $G_d$ )를 이용하여 구할 수도 있다.

$$\frac{V_L}{V_s} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu_d}{2(1 - \nu_d)}} \quad (4)$$

$$\nu_d = \frac{E_d}{2G_d} - 1 \quad (5)$$

### 2.3. 동탄성계수

콘크리트의 탄성계수에는 정적인 실험으로부터 구할 수 있는 정탄성계수(static modulus of elasticity;  $E_s$ ) 또는 영계수(Young's modulus)와 동적인 실험으로부터 결정되는 동탄성계수(dynamic modulus of elasticity;  $E_d$ )가 있으며, 일반적으로 탄성계수라함은 전자의 경우를 의미한다. 지금까지 콘크리트의 탄성계수 결정을 위해 정적인 실험 방법이 주로 사용되어 왔으나, 압축강도나 인장강도에 비해 측정 방법이 어렵고 시간이 많이 소요되는 등의 어려움이 있어 기존에 제안된 압축강도와 관계식들을 이용하거나 정탄성계수에 비해 상대적으로 측정하기 쉬운 동탄성계수를 사용할 수 있다[6]. 동탄성계수는 순수 탄성 영역에서 결정되기 때문에 초기 접선 탄성계수로 간주할 수 있으며, 일

반적으로 정탄성계수보다 크다. 또한, 고강도일수록 두 탄성계수간의 차이가 줄어드는 경향을 나타낸다[7]. 콘크리트의 동탄성계수는 식 (1) 또는 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

### 2.4. 종파 속도-강도의 상관관계

압축강도는 콘크리트의 품질과 상태를 나타내는 가장 대표적인 지표 중의 하나이며, 여전히 콘크리트의 강도 및 평가 방법에 대한 연구는 콘크리트 공학에서 주된 관심사이다. 이를 위해 비파괴적인 방법들이 개발되어 적용되어 왔으며, 그 중에서 속도-강도의 상관관계를 이용한 강도 추정에 관한 연구들이 수행되어 왔다. 하지만, 속도-강도의 상관관계가 다양한 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 그 사용이 제한적이며, 강도 추정 결과에 대한 신뢰도가 낮은 실정이다. 따라서, 많은 연구자들에 의해 속도-강도의 상관관계와 이에 영향을 미치는 인자들에 대한 실험적인 연구가 수행된 바 있으며, 이러한 영향인자들을 적절히 고려하여 보다 정확한 강도 추정을 위해 속도-강도의 상관관계에 대한 분석 기술 등이 소개되고 있다[7-11].

지금까지 속도-강도의 관계를 나타내는 여러 가지 형태의 관계식들이 제안되었으며, 가장 간단하고 보편적인 속도-강도의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다[11-13].

$$f_c' = a e^{bV} \quad (5)$$

여기서,  $f_c'$ 는 압축강도,  $V$ 는 종파 속도로 초음파 속도 또는 막대파 속도가 사용될 수 있으며,  $a$ 와  $b$ 는 속도-강도 데이터에 대해 회귀분석하여 결정되는 상수이다.

## 3. 실험 연구

### 3.1. 실험 개요

1종 시멘트와 콘크리트의 수화열 감소, 장기 강도 및 내구성 향상의 효과가 있는 플라이 애쉬를 사용하여 보통강도 콘크리트(normal-strength concrete; NSC)와 고강도 콘크리트(high-strength concrete; HSC)를 각각 제조하여 초음파 속도법과 충격반항기

법을 이용하여 재령별로 각각의 종파 속도를 측정하였다. 또한, 측정된 종파 속도로부터 동탄성계수를 구한 후 이를 정탄성계수와 비교하였으며, 압축강도를 측정하여 속도-강도의 상관관계를 도출하였다.

공시체는 제작 후 24시간 동안 온도가  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  이고 상대습도가  $50 \pm 5\%$ 인 항온항습실에서 양생되었으며, 이 후 탈형하여 실험 전까지  $20^\circ\text{C}$ 의 수중에서 양생하였다.

3.2. 재료 및 배합비

콘크리트를 제조하기 위해 사용된 결합재료는 비중이 3.15인 1종 시멘트와 강열감광과 비표면적이 각각 3.44, 3375  $\text{cm}^2/\text{g}$ 인 보령산 플라이 애쉬를 사용하였다. 강모래와 쇄석을 잔 골재와 굵은 골재로 사용하였으며, 각각의 비중은 2.51, 2.64, 흡수율은 1.52%, 0.54%, 조립률은 2.64, 7.32이었다.

Table 1은 본 실험에서 사용한 콘크리트 배합비로, Mix 1~4는 1종 시멘트만을 사용한 일반 콘크리트배합(ordinary portland cement; OPC)을, Mix 5~8은 시멘트량의 20%를 플라이 애쉬로 대체한 콘크리트 배합(fly ash replacement level of 20%; FA20)을 나타낸다. 또한, Mix 1과 5는 물-결합제비(water-binder(cement+fly ash) ratio; W/B)가 0.50인 NSC를, W/B가 0.35이하인 나머지 배합들(Mix 2~4, 6~8)은 HSC를 나타낸다. NSC 배합에는 AE 감수제(AEWR)를, HSC 배합에는 소요의 워커빌리티를 얻기 위해 나프탈렌 계열의 고성능 감수제(HRWR)를 사용하였다.

3.3. 실험 방법

3.3.1. 시편 제작 및 양생

Table 1에 주어진 각각의 콘크리트 배합비로 원주형 공시체( $\phi 10 \times 20$  cm)를 제작하였다. 콘크리트

3.3.2. 종파 속도의 측정

콘크리트의 종파 속도는 원주형 공시체를 대상으로 초음파 속도와 충격반향기법을 이용하여 막대와 속도를 각각 측정하였다. 초음파 속도 측정에는 Qcom사의 Qust-120+ 모델을 사용하였으며, 사용 중심 주파수는 54 kHz이었다. 공시체의 초음파 속도는 직접법으로 3회 반복하여 측정된 값의 평균을 공시체의 초음파 속도로 정하였다. 콘크리트 공시체의 막대와 속도 측정에는 기 수행된 연구에서 사용된 충격공진 시험장비가 사용되었다[14].

콘크리트의 속도는 수분함유량에 따라 달라지는 경향이 있으므로, 수분함유량을 일정하게 하기 위해 실험 전 물 속에서 꺼내어 약 3시간 동안 실험실에서 자연건조 한 후에 종파 속도를 측정하였다.

3.3.3. 압축강도 및 정탄성계수

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405[15]에 따라 측정하였으며, 공시체 제작 후 처음 12 시간부터 압축강도 실험을 시작하여 재령 3일까지는 6시간 또는 12시간 간격으로, 이후에는 재령 7일과 28일에서 측정하였다.

콘크리트의 정탄성계수는 공시체의 길이 방향으로 3개의 콘크리트 변형률 게이지를 등간격으로 설치한 후 일축압축 상태에서 얻은 응력-변형률 곡선으로부터 최대하중의 40%에 해당하는 점과 원점과

Table 1 Mix proportions of concrete per  $\text{m}^3$

| Mix type | Mix no. | Water (kg) | Cement (kg) | Fly ash (kg) | Fine aggregate (kg) | Coarse aggregate (kg) | AEWR (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 |
| FA20     | 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 |

의 기율기를 탄성계수(활선탄성계수)로 정하였으며, 측정 재령은 1, 2, 3, 7, 28일이었다.

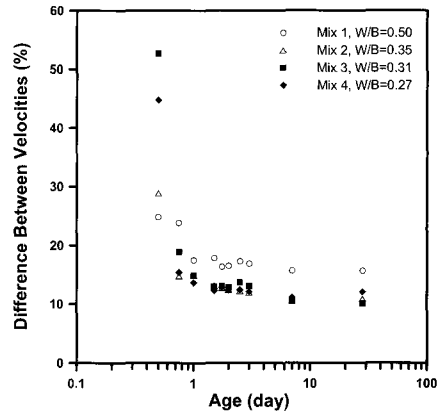
4. 실험결과 및 고찰

4.1. 압축강도 실험 결과

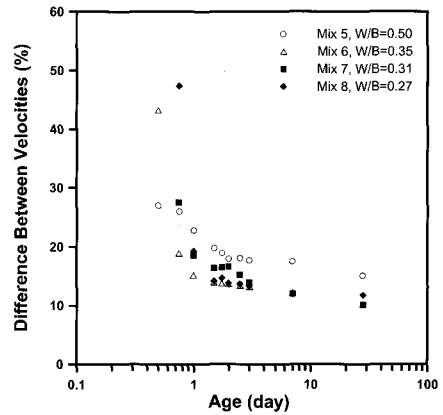
Table 2는 재령별 각 콘크리트의 평균 압축강도 실험 결과를 나타낸다. 재령 28일 압축강도 결과를 보면, 1종 시멘트만을 사용한 OPC 콘크리트(Mix 1~4)의 경우에는 W/B가 낮아질수록 압축강도가 각각 31.1, 47.1, 55.5, 66.2 MPa로 증가하였으며, W/B가 동일하고 시멘트량의 20%를 플라이 애쉬로 대체 사용한 FA20 콘크리트(Mix 5~8)의 압축강도는 OPC 콘크리트보다 약 2.5~5.8% 정도 낮게 나타났다. 또한, W/B가 낮아질수록 재령 초기에서의 OPC 콘크리트와 FA20 콘크리트의 압축강도 차이가 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 플라이 애쉬와 HRWR의 사용으로 인해 수화반응이 지연되었기 때문인 것으로 사료된다.

4.2. 초음파 속도와 막대파 속도의 비교

Fig. 1은 동일한 콘크리트 공시체로부터 측정된 초음파 속도와 막대파 속도의 재령별 차이를 나타낸다. 우선, 초음파 속도가 막대파 속도보다 크며 그 차이는 그 차이는 재령이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었다. OPC 콘크리트의 결과를 나타내는 Fig. 1(a)를 보면, 재령 1일에서의 속도차이는 약 17.5~13.6% 정도이나 재령이 증가함에 따라 점차 감소하여 재령 28일에서는 약 15.7~12.1%



(a) OPC



(b) FA20

Fig. 1 Variation of difference between ultrasonic pulse velocity and rod-wave velocity measured using the same concrete cylinder

Table 2 Average compressive strength of tested concrete cylinders (MPa)

| Mix type | Mix no. | Age (day) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|---------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          |         | 0.5       | 0.75 | 1    | 1.5  | 1.75 | 2    | 2.5  | 3    | 7    | 28   |
| OPC      | 1       | 4.0       | 6.1  | 9.6  | 13.6 | 15.5 | 16.7 | 18.2 | 20.3 | 25.3 | 31.1 |
|          | 2       | 4.0       | 15.0 | 21.8 | 25.8 | 29.6 | 30.9 | 34.2 | 37.7 | 43.0 | 47.1 |
|          | 3       | 0.8       | 11.6 | 25.0 | 29.5 | 33.1 | 36.9 | 40.0 | 42.8 | 49.4 | 55.5 |
|          | 4       | 1.2       | 17.1 | 30.3 | 37.1 | 41.3 | 44.0 | 46.9 | 48.1 | 58.3 | 66.2 |
| FA20     | 5       | 2.5       | 3.8  | 6.1  | 10.5 | 12.0 | 13.1 | 14.2 | 16.1 | 20.7 | 29.3 |
|          | 6       | 1.5       | 9.2  | 14.0 | 20.0 | 22.0 | 24.2 | 27.3 | 29.3 | 37.4 | 45.9 |
|          | 7       | -         | 3.8  | 14.2 | 19.6 | 23.7 | 27.1 | 30.8 | 35.0 | 40.7 | 52.6 |
|          | 8       | -         | 1.1  | 13.4 | 24.5 | 27.8 | 30.4 | 35.9 | 38.9 | 45.6 | 62.4 |

정도로 다소 줄어들었다. 특히, 아주 이른 재령인 콘크리트 타설 후 12시간에서의 속도 차이는 상당히 크게 나타나 W/B가 0.31(Mix 3)과 0.27 (Mix 4)인 경우에는 각각 52.1%, 44.7%이었다. 그러나, 재령이 지나면서 급격히 감소하여 재령 28일에서는 각각 10.1%, 12.1% 정도의 속도 차이를 나타내었다. 이러한 경향은 FA20 콘크리트의 결과를 나타내는 Fig. 1(b)에서도 볼 수 있다. 또한, 강도 수준에 따라서도 동일 재령에서의 속도 차이가 다르게 나타났다. 재령 28일에서 W/B가 0.50인 NSC (Mix 1과 5)의 속도 차이는 약 15% 정도인 반면에, W/B가 0.35 이하인 HSC (Mix 2~4, 6~8)에서는 약 10~12.5% 정도로, NSC에 비해 약 2.5~5.0% 정도 작았다.

이상과 같이, 초음파 속도가 막대와 속도보다 큰 이유는, 식 (1,2)에서 알 수 있듯이 구속도, 즉 포아송비의 영향 때문인 것으로 판단되며, 특히 포아송비의 차이로 재령에 따라 종파 속도의 차이가 다르게 나타난 것으로 사료된다.

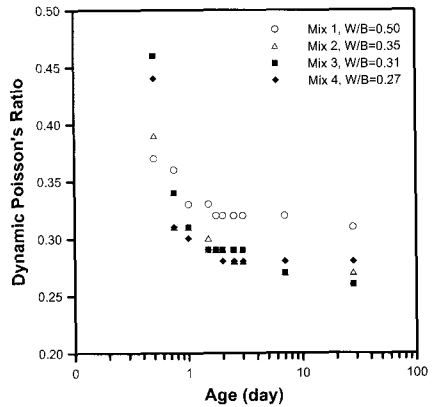
4.3. 동포아송비

4.2절에서 언급한 바와 같이, 동포아송비가 재령에 따른 초음파 속도와 막대와 속도의 차이에 미치는 영향을 조사하기 위해, 식 (3)을 이용하여 구한 재령별 평균 동포아송비를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1과 유사하게, 재령이 증가함에 따라 동포아송비가 점차 감소하였으며, 강도 수준에 따라 동포아송비가 다르게 나타남을 알 수 있다. 재령 1일에서의 동포아송비가 OPC 콘크리트의 경우(Fig. 2(a))에는 약 0.33~0.30, FA20 콘크리트의 경우(Fig. 2(b))에는 약 0.36~0.34이었으며, 재령 28일에서는 0.32~0.27로 다소 줄어들었다. 특히, HSC의 재령 12시간에서의 동포아송비는 0.40 이상이었으며, W/B가 0.31인 OPC 콘크리트 (Mix 3)의 경우에는 0.46으로 0.50에 가까운 값을 나타내었다.

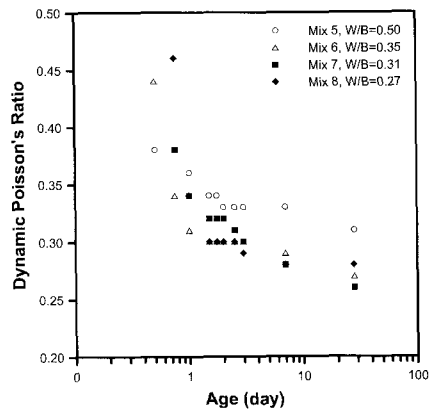
4.4. 동탄성계수

Table 3은 재령 1, 2, 3, 7, 28일에서의 평균 정탄성계수와 동탄성계수를 나타낸다. 정탄성계수는 3.3.3절에서 언급한 방법대로 구하였으며, 동탄성계수는 막대와 속도만으로 쉽게 구할 수 있는 식 (2)

를 이용하였다. Table 3에서 보듯이, 모든 재령에서 W/B가 동일한 콘크리트의 동탄성계수가 정탄성계수보다 크게 나타났으며, 그 차이는 재령이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 고강도일수록 두 탄성계수간의 차이가 다소 줄어들어 재령 3일에서 OPC 콘크리트의 경우 W/B가 0.50에서 0.27로 감소함에 따라 각각 28.3%, 25.0%, 24.2%, 20.1%로 감소하였다.



(a) OPC



(b) FA20

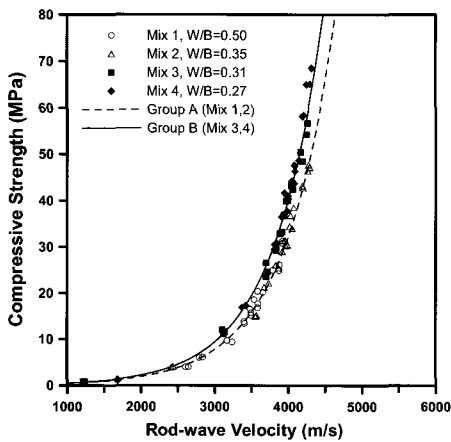
Fig. 2 Variation of dynamic Poisson's ratio with ages

4.5. 종파 속도-강도의 상관관계

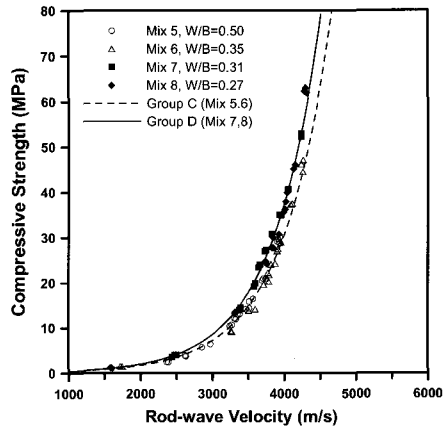
Fig. 3과 Fig. 4는 속도-강도의 상관관계로, (a)에는 충격반향기법에 의해 측정된 막대와 속도의 강도의 관계를, (b)에는 동일한 시편에 대해 측정된 초음파 속도와 강도의 관계를 각각 나타낸다.

Table 3 Static and dynamic modulus of concrete (GPa)

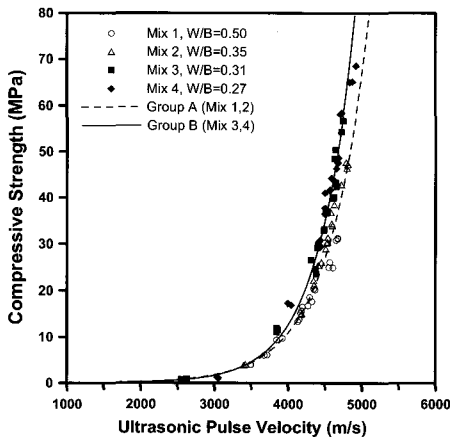
| Mix type | Mix no. | Static modulus |        |        |        |         | Dynamic modulus |        |        |        |         |
|----------|---------|----------------|--------|--------|--------|---------|-----------------|--------|--------|--------|---------|
|          |         | 1 day          | 2 days | 3 days | 7 days | 28 days | 1 day           | 2 days | 3 days | 7 days | 28 days |
| OPC      | 1       | 14.0           | 18.8   | 21.0   | 24.9   | 26.9    | 22.1            | 27.6   | 29.3   | 33.9   | 35.3    |
|          | 2       | 22.1           | 26.9   | 29.4   | 31.2   | 32.9    | 32.2            | 39.1   | 39.2   | 43.1   | 44.0    |
|          | 3       | 24.9           | 27.6   | 30.1   | 33.2   | 34.3    | 33.5            | 37.9   | 39.7   | 42.6   | 43.4    |
|          | 4       | 25.2           | 30.8   | 32.5   | 35.7   | 36.2    | 35.4            | 39.9   | 40.7   | 42.7   | 44.7    |
| FA20     | 5       | 12.3           | 15.3   | 18.0   | 19.5   | 26.7    | 19.7            | 25.3   | 27.8   | 31.0   | 34.8    |
|          | 6       | 16.6           | 24.1   | 25.9   | 28.4   | 32.4    | 30.5            | 35.1   | 37.3   | 40.1   | 42.9    |
|          | 7       | 18.1           | 25.5   | 27.3   | 29.0   | 33.6    | 27.6            | 33.4   | 37.1   | 39.4   | 42.9    |
|          | 8       | 16.4           | 25.9   | 28.5   | 32.4   | 34.5    | 26.5            | 36.7   | 38.3   | 40.9   | 44.0    |



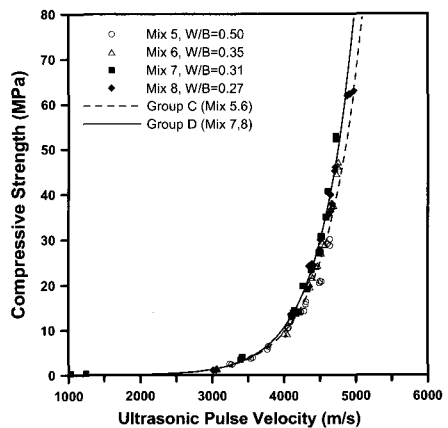
(a) Impact-echo method



(a) Impact-echo method



(b) Ultrasonic pulse velocity method



(b) Ultrasonic pulse velocity method

Fig. 3 Longitudinal wave velocity–compressive strength relationship for OPC concrete

Fig. 4 Longitudinal wave velocity–compressive strength of relationship for FA20 concrete

Table 4 Constants, a and b, in Eq. (5)

| Mix type | Mix no. | W/B  | Group | IE     |          | UPV      |          |
|----------|---------|------|-------|--------|----------|----------|----------|
|          |         |      |       | a      | b        | a        | b        |
| OPC      | 1       | 0.50 | A     | 0.1064 | 0.001428 | 0.005411 | 0.001904 |
|          | 2       | 0.35 |       |        |          |          |          |
|          | 3       | 0.31 | B     | 0.1171 | 0.001459 | 0.003001 | 0.002075 |
|          | 4       | 0.27 |       |        |          |          |          |
| FA20     | 5       | 0.50 | C     | 0.0920 | 0.001451 | 0.003479 | 0.001980 |
|          | 6       | 0.35 |       |        |          |          |          |
|          | 7       | 0.31 | D     | 0.1012 | 0.001477 | 0.002845 | 0.002053 |
|          | 8       | 0.27 |       |        |          |          |          |

그림에서 보듯이, 속도-강도의 관계가 W/B에 따라서 달라져 W/B가 낮을수록, 즉 고강도일수록 속도가 동일할 때 이에 대응하는 강도가 커지는 경향을 나타내었다. 따라서, 본 연구에서는 기 수행된 연구 [16]에서와 유사하게 OPC 콘크리트와 FA20 콘크리트를 각각 두 개의 그룹으로 나누어 W/B가 0.50, 0.35인 경우를 그룹 A 또는 C (점선)로, W/B가 0.31, 0.27인 경우를 그룹 B 또는 D(실선)로 나누었으며, 각각의 경우에서 회귀분석에 의해 결정된 상수 a, b를 Table 4에 나타내었다.

Fig. 3과 Fig. 4로부터, 속도-강도의 관계가 식 (5)에 나타난 지수함수 형태로 잘 표현되며, 동일한 속도에 의해 추정된 강도가 막대파 속도와 초음파 속도에 따라 달라짐을 알 수 있다. 예를 들어, OPC 콘크리트의 막대파 속도와 초음파 속도가 각각 4,000 m/s로 동일할 때 이에 대응하는 강도가 그룹 A에서는 각각 32.2 MPa, 11.0 MPa, 그룹 B에서는 각각 40.1 MPa, 12.1 MPa로 큰 차이를 보였다. 아울러, 고강도인 그룹 B가 그룹 A보다 동일한 속도로부터 추정된 강도가 커짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 초음파 속도법에 의해 측정된 콘크리트 공시체의 종파 속도(초음파 속도)가 동일한 시편에 대해 충격반향기법에 의해 측정된 종파 속도(막대파 속도)보다 크고, 그 차이는 재령이 증가함에 따라 또는 콘크리트의 강도가 증가할수록 점차 줄어드는 경향을 나타내었다.

- (2) 초음파 속도와 막대파 속도를 측정하여 콘크리트의 동포아송비를 구할 수 있었으며, 아주 이른 재령에서의 동포아송비는 0.40 내외였으나 재령이 증가함에 따라 점차 감소하여 재령 28일에서는 약 0.27~0.32 정도의 값을 나타내었다. 이러한 구속도에 따른 동포아송비의 변화로 초음파 속도와 막대파 속도가 서로 차이를 나타내는 것으로 판단된다.
- (3) 콘크리트의 동탄성계수가 정탄성계수보다 큰 경향을 나타내었으며, 고강도일수록 그 차이가 줄어드는 경향을 나타내었다. 또한, 콘크리트의 강도 추정을 위한 종파 속도-강도의 상관관계를 지수함수 형태로 제안하였으며, 종파 속도의 종류 (초음파 속도와 막대파 속도)와 물-결합재비 (강도 수준)에 따라 동일한 속도에 대응하는 콘크리트의 강도가 큰 차이를 보였다. 따라서, 보다 정확한 강도 추정을 위해서는 사용하고자 하는 탄성과법의 특성과 물-결합재비의 영향을 고려해야 할 것으로 사료된다.
- (4) 본 연구에서 얻어진 결과는 종파 속도를 이용한 콘크리트의 물성 평가시 기초자료로써 이용할 수 있을 것으로 판단되며, 추후 보다 다양한 콘크리트에 대한 실내 및 실제 시공 현장에서의 실험이 병행된다면 현장 콘크리트의 품질 관리에 유용할 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] N. J. Carino, "Nondestructive test methods to evaluate concrete structures," An International Workshop on Recent Advances in High-



- Performance Concrete Structures, Ed. by Oh, B. H. and Moon, K. S., pp. 158-231, (2000)
- [2] 김영환, "콘크리트 구조물의 비파괴검사 현황", 비파괴검사학회지, 제20권 4호, pp. 329-341, (2000)
- [3] 김동수, 박형춘, 이광명, "충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴검사", 콘크리트학회지, 제9권 2호, pp. 109-119, (1997)
- [4] F. D. Lydon and R. V. Balendran, "Some observations on elastic properties of plain concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 16, No. 3, pp. 314-324, (1986)
- [5] L. W. Teller, Elastic Properties, ASTM Special Technical Publication No. 169, pp. 94-103, (1956)
- [6] H. A. Mesbah et al., "Determination of elastic properties of HPC at early-ages," ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 1, pp. 37-41, (2002)
- [7] 이회근, 황수덕, 이광명, "양생조건이 콘크리트의 종파 속도와 압축강도의 상관관계에 미치는 영향," 콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제12권 1호, pp. 103-106, (2000)
- [8] P. K. Mehra and P. J. M Monteiro, Concrete: structure, properties, and materials, 2nd Edition, Prentice Hall, pp. 83, (1993)
- [9] A. M. Neville, Properties of Concrete, 4th Edition, Longman, pp. 631-633, (1995)
- [10] S. P. Pessiki and N. J. Carino, "Setting time and strength of concrete using the impact-echo method," ACI Materials Journal, Vol. 85, No. 5, pp. 389-399, (1988)
- [11] S. Popovics, "Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship," Materials Evaluation, No. 2, pp. 123-130, (2001)
- [12] V. R. Sturup et al., "Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength," In-Situ-Nondestructive Testing of Concrete, SP-2, American Concrete Institute, Detroit, pp. 201-227, (1984)
- [13] S. Pessiki and M. R. Johnson, "Nondestructive evaluation of early-age concrete strength in plate structures by impact-echo method," ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 3, pp. 260-271, (1996)
- [14] 이회근, 이광명, 김지상, 김동수, "수분함유량이 콘크리트의 종파 속도에 미치는 영향에 관한 연구," 비파괴검사학회지, 제19권 2호, pp. 259-269, (1999)
- [15] KS F 2405, 콘크리트의 압축 강도 시험 방법, KS 핸드북, 한국표준협회, pp. 314-315, (1999)
- [16] 이회근, 이광명, 김영환, 임현준, "초음파 속도를 이용한 콘크리트의 응결 및 초기 강도 추정," 비파괴검사학회지, 제22권 3호, pp. 292-303, (2002)