

콘크리트 공시체의 압축강도 추정을 위한 최적전단파공진 기법

Optimized Shear-Wave Resonance (OSR) Method to Evaluate the Compressive Strength of Concrete Cores and Cylinders

조성호*, 조미라**, 박병선***, 권수안****

Joh, Sung-Ho, Cho, Mi-Ra, Park, Byoung-Sun, Kwon, Soo-Ahn

1. 서론

최근 콘크리트 공시체의 동적특성은 콘크리트 구조물의 비파괴 영역에서 중요한 설계 변수와 품질/공정관리 변수로 활용되고 있다. 특히 콘크리트 재료의 탄성과 속도는 콘크리트 압축강도 추정을 비파괴적으로 수행할 수 있다는 측면에서 더욱 그 활용도가 증가하고 있다. 현재 대부분의 콘크리트 압축강도를 측정하기 위한 탄성파나 초음파의 종류는 압축파를 이용하는 것이 일반적인 방법이나, 최근 연구에 의하면 슬래브형 콘크리트 구조물의 비파괴 건전도 평가에 있어서 전단파를 사용하는 것이 압축파를 사용하는 것 보다 높은 신뢰성과 정확도를 제공하는 것으로 알려져 있다.

콘크리트 공시체의 압축강도 측정은 콘크리트 구조물의 비파괴 건전도 평가에 있어서 중요한 항목이다. 전단파를 이용하여 비파괴적으로 콘크리트 구조물의 압축강도를 추정하기 위해서는 우선적으로 콘크리트 전단파 속도-압축강도 사이의 관계식을 정립하여야 한다. 본 연구에서는 콘크리트 전단파 속도-압축강도 관계식 정립을 위한 선행연구로서, 콘크리트 공시체의 전단파 속도를 실용적으로 측정할 수 있는 최적전단파기법 (OSR 기법)을 제안하였고, 이 기법을 검증하기 위하여 국내 서해안 고속도로, 영동고속도로, 김해공항 활주로 등의 일부 구간의 코어를 채취하여 일축압축시험과 OSR 기법을 수행하였다. 이 실험으로 전단파 속도-압축강도 관계식을 수립하였으며, 콘크리트 배합비에 따라 전단파 속도-압축강도가 달라지는 부지 고유특성식을 제안하였다.

본 연구에서 제안한 콘크리트 전단파 속도 또는 전단탄성계수를 추정하는 OSR 기법은 향후 콘크리트 포장도로의 건전도 평가기법 개발에 필수적인 요소기술을 제공하였다는 측면에서 의미가 크다고 판단된다.

2. 압축강도 추정을 위한 비파괴 기법

콘크리트 재료의 압축강도를 일축압축시험이 아닌 비파괴 시험으로 추정하고자 했던 연구는 1900년대 중반부터 진행되어 왔으며, 성숙도 측정법 (maturity method; Saul, 1951), 반발경도 측정법 (rebound test; Schmidt, 1950), 초음파 펄스속도법 (ultrasonic pulse velocity method; ASTM C597) 등의 시도가 있었다. 그리고 다소 콘크리트 손상을 초래하였지만 완전한 파괴를 유발하지 않는 준비파괴 기법으로는 관입저항법 (penetration resistance method; Malhotra, 1974), 인발 시험 (pull out test; Jensen and Braestrup, 1976), 절단시험법 (break off test; Johansen, 1976) 등이 있으나, 진정한 의미의 비파괴 기법이라고는 할 수 없다. 또한, 비파괴기법으로 전자기장파 전류의 흐름을 이용하는 기법 등이 있으나 이들 기법들은 콘크리트 내의 함수비나 철근부식정도를 측정할 수 있지만, 콘크리트 재료의 압축강도를 추정하는 것은 불가능한 기법이다. 따라서 상기한 기법 중에서 콘크리트에 손상을 주지 않으면서 콘크리트 강도를 추정하는 진정한 의미의 비파괴 기법은 초음파 펄스속도법이라고 할 수 있다.

* 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 031-670-3341 (E-mail : shjoh@cau.ac.kr)

** 중앙대학교 토목공학과 겸임교수 · 공학박사 · 031-670-4661 (E-mail : headpin875@hotmail.com)

*** 다산 ENG 사원 · 공학석사 · 02-873-1701 (E-mail : pbsone77@hotmail.com)

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 수석연구원 · 공학박사 · 031-910-0175 (E-mail : sakwon@kict.re.kr)



Parker (1953)의 연구는 초음파를 활용하는 연구의 초기 연구라고 할 수 있는데, 초음파를 이용하여 콘크리트 압축강도를 추정하고자 하였다. Parker의 연구결과에 의하면, 경화된 콘크리트의 강도는 초음파 펄스속도로 추정하기에는 예민도가 낮아서 충분히 신뢰성 높은 압축강도 추정이 가능하지 않았다고 보고하였다. 그리고 Malhotra 등(1980)은 초음파 펄스속도 방법으로는 현장 콘크리트뿐만 아니라 실험실 조건에서도 정확하게 콘크리트 압축강도를 추정할 수 없다고 보고하였다. 한편 Sturup 등 (1984)은 초음파 펄스속도와 콘크리트 압축강도의 관계는 골재 종류, 양생조건, 양생 시간, 함수율 등에 의해서 영향을 받는 것을 확인하였으며, 정확한 초음파 펄스속도-압축강도 간의 관계식을 결정하기 위해서는 여러 가지 영향인자에 대한 고려가 반드시 필요하다는 사실을 확인하였다. 그리고 Pessiki 와 Johnson (1996)의 경우, 콘크리트 강도를 추정하기 위해서 Impact-Echo 기법을 사용하였으며, 초기재령 콘크리트 강도의 경우 매우 성공적으로 추정할 수 있음을 확인하였다. Impact-Echo 기법은 Sansalone 와 Carino (1986)에 의해서 제안되었으며 이후 수정이론 (Sansalone and Strett, 1997)이 제시되었다. Impact-Echo 기법에서는 주파수 영역에서 P-파의 공진주파수를 측정하여 측정결과와 편이성과 정확도를 향상시킬 수 있었다. Impact-Echo 기법은 평판형 콘크리트 구조물의 P-파 속도를 측정하는 것이었으나, P-파 공진 주파수를 측정하는 개념을 준용하여 콘크리트 공시체나 코어의 비구속 압축파 속도를 측정하는데 활용하는 시도가 있었다. 비구속 압축파 속도는 콘크리트 재료의 영탄성계수를 직접적으로 산정하는데 활용할 수 있기 때문에 매우 광범위하게 적용되어왔다. 또한 나아가서 콘크리트 재료의 영탄성계수로부터 강도를 추정하는 실험적 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되어왔다 (Nazarian, 1996).

콘크리트 재료의 압축강도를 추정하기 위한 초음파 펄스속도 시험이나 비구속 압축파의 공진시험은 모두 압축파를 활용하는 기법이다. 압축파의 경우 파동의 발생이나 측정이 모두 용이한 편이나, 구조물이나 공시체 내에서 공진 또는 다중반사를 하게 될 경우 모드변환의 문제가 발생할 수 있다. 압축파의 모드 변환은 압축파의 전파특성을 왜곡하게 되어 정확한 압축파 속도의 측정이 불가능하게 된다 (조미라, 2002). 따라서 모드변환의 가능성이 배제되어 있는 SH 파를 활용하여 구조물이나 코어의 공진특성을 측정하는 개념이 조미라(2002)에 의해서 제안되었다.

본 연구에서는 콘크리트 강도 추정을 위하여 탄성파의 일종인 전단파를 활용하기로 하였다. 이는 전단파의 파장이 초음파 펄스보다 훨씬 크기 때문에, 콘크리트 내의 골재로 인한 국부적 비균질성 영향이 최소화될 수 있어서 비교적 콘크리트 코어의 평균적 물성을 측정할 수 있기 때문이다. 또한 기존의 연구자들이 사용하였던 비구속 압축파를 사용하지 않고 전단파를 사용하고자 한 것은 다중반사 또는 공진현상으로 인한 탄성파의 왜곡현상을 피하여 속도측정의 정확성을 높이고자 하였기 때문이다.

3. 자유단 공시체의 공진특성

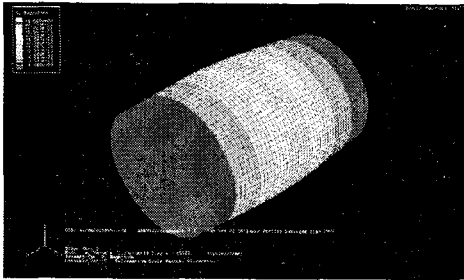
콘크리트 공시체 또는 코어에 대하여 탄성파를 가하였을 때 발생할 수 있는 공진현상을 수치해석적으로 살펴보았다. 압축파, 전단파, 횡파의 공진 특성을 정량화하고 이를 바탕으로 효과적인 전단파 측정기법을 정립하고자 하였다.

3.1 자유단 공진실험에 대한 유한요소해석

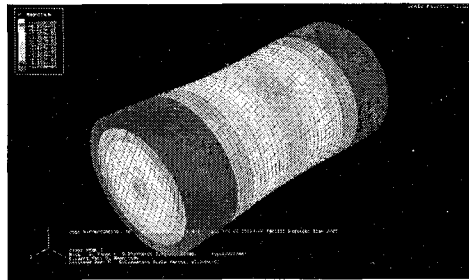
비구속압축파, 전단파, 횡파의 공진특성에 대한 영향인자를 연구하기 위해 자유단 공시체에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석모델은 원기둥 모양의 3D 모델을 사용하였고, 직경은 5cm, 길이는 5cm~40cm로 설정하였다. 유한요소망의 간격은 0.2~0.25cm, 총 유한요소의 개수는 14950~66240개이다. 경계조건은 지지조건이 없는 자유단으로 설정하였고, 고유모드를 알기 위하여 고유치해석을 하였다. 표 1은 유한요소 해석을 수행할 때 사용된 물성이다. 세장비(길이와 직경의 비) 4가지, 밀도 4가지, 영탄성계수 3가지, 포아송비 4가지의 조합에 대하여 총 192개의 유한요소해석을 수행하였다. 자유단 공진시험의 유한요소해석으로 총 20개 모드의 결과를 구하였다. 그 중 그림 1과 같이 비구속압축모드, 비틀전단모드, 횡모드를 찾았다.

표 1. 유한요소해석에 사용된 물성

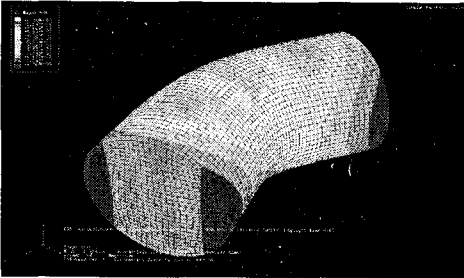
유한요소해석 입력변수	입력 데이터
세장비 (직경/길이)	2, 3, 4, 5
밀도 (kg/m ³)	2700, 2160, 1620, 1080
영탄성계수 (Pa)	7.31×10 ¹⁰ , 5.85×10 ¹⁰ , 4.39×10 ¹⁰
포아송비	0.3333, 0.2666, 0.2, 0.15



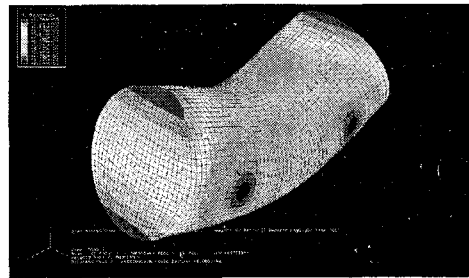
(a) 비구속압축 모드



(b) 비틀전단 모드



(c) 1축 휨 모드



(d) 2축 휨 모드

그림 1. 자유단 공진시험의 유한요소해석 결과

3.2 공진특성에 대한 세장비의 영향

알루미늄과 콘크리트의 기본물성(표 2)으로 세장비 1:1에서 8:1의 자유단 공시체의 유한요소해석결과를 바탕으로 비구속압축과 속도(v_C), 전단과 속도(v_S), 세장비의 상관관계를 살펴보았다. 그림 2에서 점선으로 표시된 이론 v_C , v_S 는 유한요소해석의 입력변수 물성, 즉 영탄성계수, 밀도, 포아송비를 가지고 구한 탄성파속도이다. 또한 검은 실선인 수치해석 v_C , v_S 는 유한요소해석으로 구한 비구속 압축파와 전단파의 공진주파수를 가지고 구한 탄성파속도이다. 그림 2(e)는 그림 2(a), (b), (c), (d)의 y축인 탄성파속도를 정규화한 그래프이다. 그림 2(e)에서 보듯이 알루미늄과 콘크리트의 전단파 속도는 세장비의 변화에 영향을 받고 있지 않으며 정규화된 전단파 속도는 1에 근접하고 있다. 그러나 알루미늄의 정규화 된 비구속 압축파의 속도는 세장비 1:1일 때와 2:1일 때는 큰 차이를 보이고 있고 콘크리트의 정규화된 비구속 압축파의 속도도 세장비 1:1일 때 큰 차이를 보이고 있다. 즉 전단파 속도는 세장비의 변화에 특정한 패턴을 보이고 있지 않지만 비구속 압축파 속도는 세장비가 커질수록 1에 근접하고 있음을 알 수 있다.

표 2. 유한요소해석에 사용된 콘크리트와 알루미늄의 물성

입력변수	재료	콘크리트	알루미늄
밀도 (kg/m^3)		2300	2700
영탄성계수 (Pa)		2.45×10^{10}	7.31×10^{10}
포아송비		0.167	0.333

3.3 공진특성에 대한 기타물성의 영향

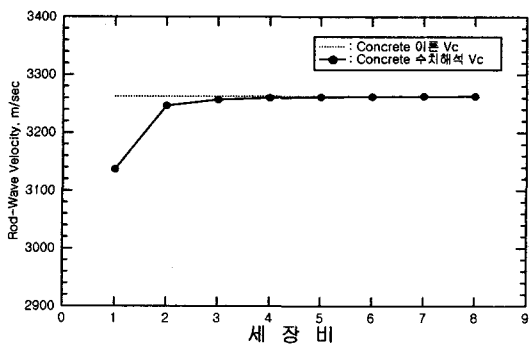
공시체의 세장비 2:1일 때 정규화된 전단파 속도는 물성의 영향을 받지 않고 정규화된 이론 파속도인 1에 근접한 0.99이지만 정규화된 비구속압축파 속도는 물성에 따라 정규화된 이론 파속도와 많은 차이를 보이고 있다. 따라서 자유단 공진시험을 수행할 때 규정되어 있는 세장비가 2:1일 때 비구속압축파 속도에 어떤 물성이 영향을 주는지에 대해 살펴보았다. 그림 3은 세장비 2:1일 때 알루미늄의 물성에서 각각 영탄성계수, 밀도, 포아송비 만을 변화하여 유한요소해석을 수행한 결과이다. 그림 3에서 보듯이 영탄성계수와 밀도를 변화시켜도 비



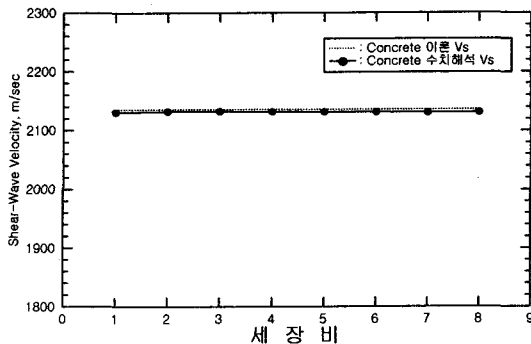
구속압축과 속도는 변화하지 않았다. 그러나 포아송비는 커질수록 물성으로 계산된 비구속압축과 속도와 유한 요소해석으로 구한 공진주파수로 계산한 비구속압축과 속도의 차가 커짐을 알 수 있다. 따라서 세장비 2:1로 자유단 공진시험을 수행할 때 비구속압축과 속도는 포아송비에 따라 보정을 해야 한다. 비구속압축과의 보정은 식 (1)에 의해 할 수 있으며, 식 (1)내에 포함되어 있는 보정계수 β 는 포아송비(ν)의 함수로서 식 (2)로 규정된다. 여기서 v_c 는 세장비에 대한 보정 후의 비구속압축과 속도이고, \bar{v}_c 는 실측 비구속압축과 속도이다.

$$\beta = 1.0008 - 0.017189\nu - 0.12344\nu^2 \tag{식 1}$$

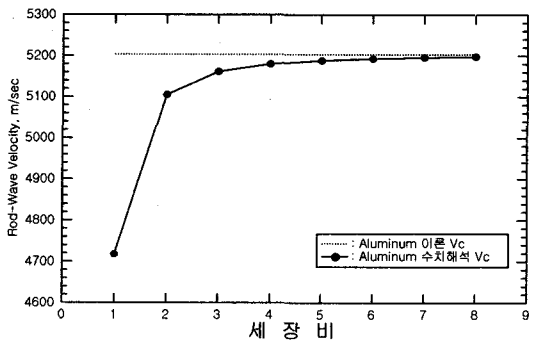
$$v_c = \bar{v}_c / \beta \tag{식 2}$$



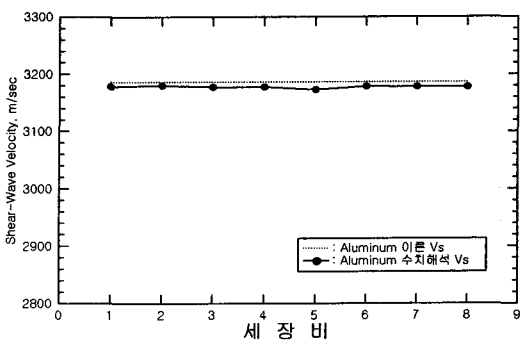
(a) 콘크리트의 세장비별 비구속 압축과 속도변화



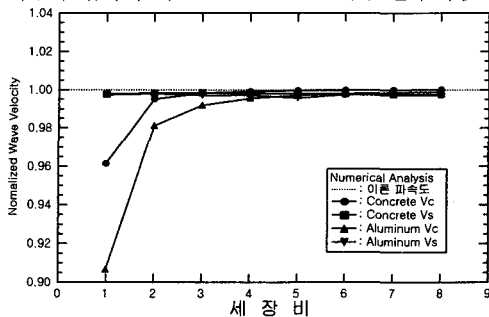
(b) 콘크리트의 세장비별 전단파 속도변화



(c) 알루미늄의 세장비별 비구속 압축과 속도

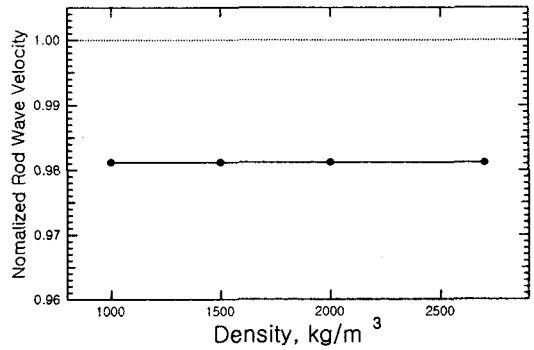
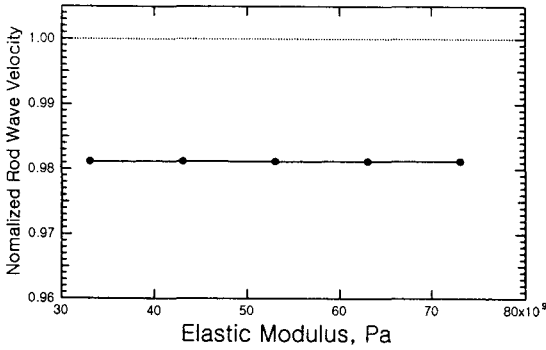


(d) 알루미늄의 세장비별 전단파 속도



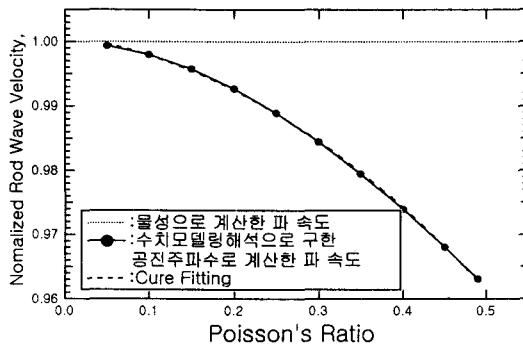
(e) 세장비별 정규화속도

그림 2. 세장비에 따른 탄성과 속도



(a) 영탄성계수의 변화에 따른 비구속압축파속도변화

(b) 밀도의 변화에 따른 비구속압축파속도변화



(c) 포아송비의 변화에 따른 비구속압축파 속도변화

그림 3. 물성에 따른 비구속압축파 속도변화

4. 비틀전단파를 이용한 최적 전단파 공진기법

4.1 휨파공진의 최소화를 이용한 전단파 공진의 최적화

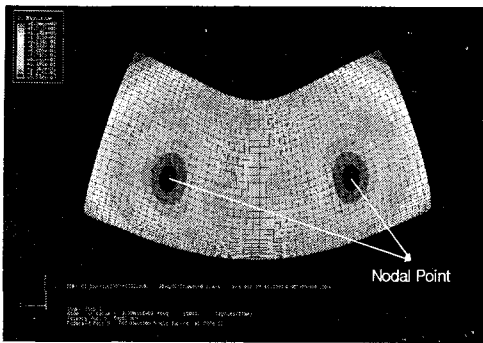
앞의 유한요소해석의 결과인 20개의 모드 중 그림 4(a)는 휨 모드이다. 그림 4(a)에서와 같이 전체 공시체 중 길은 회색 부분의 휨파의 영향이 가장 작은 부분이 있다. 이 지점에서는 휨파의 변위보다 비틀 전단파의 변위가 더 크게 측정된다. 따라서 휨파의 영향이 가장 작은 부분인 두 지점의 파절점 (nodal point) 중 한 지점에 가속도계 1개를 부착하고 또 다른 지점에 충격해머로 가격을 하면 가장 효과적이고 최적의 조건에서 비틀 전단파 공진주파수를 측정할 수 있게 된다. 한편 파절점의 위치는 각 세장비에 따라 다르게 되며, 파절점의 위치는 세장비 1:1~8:1의 유한요소해석 결과로부터 알 수 있다 (그림 4(b)). 그림 4(b)에서 알 수 있듯이 세장비와 d/D 는 선형관계를 이루고 있으며 두 변수사이의 관계는 식 (3)~(5)에 의해 정의 될 수 있다. 여기서 d 는 공시체의 한 쪽의 끝단에서 가까운 파절점까지의 거리, D 는 공시체의 직경, λ 는 공시체의 세장비(= l/D , 공시체 직경에 대한 공시체 길이의 비)이다.

$$d = 7.5(d_{0.3333} - 0.2l)(\nu - 0.2) + d_{0.2} \tag{식 3}$$

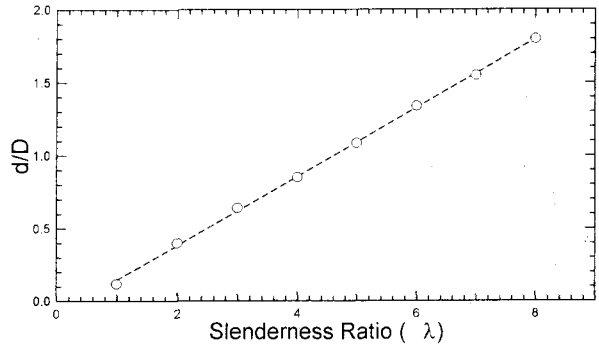
여기서,

$$d_{0.3333} = 0.2362 \times l - 0.09 \times D, \quad \text{포아송비}=0.3333 \text{인 경우} \tag{식 4}$$

$$d_{0.2} = 0.2302 \times l - 0.05 \times D, \quad \text{포아송비}=0.2 \text{인 경우} \tag{식 5}$$



(a) 휨파의 파절점



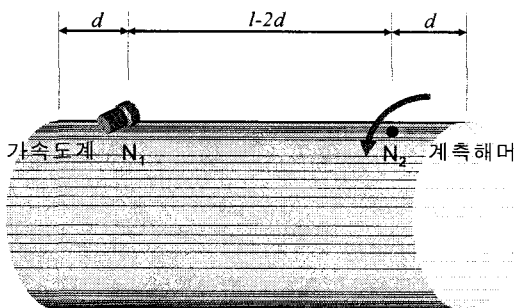
(b) 세장비에 따른 파절점

그림 4. 물성에 따른 비구속 압축파 속도변화

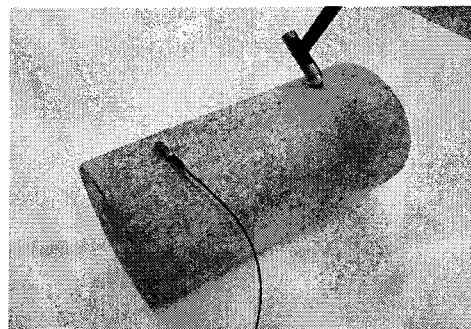
4.2 전단파공진의 최적화를 이용한 전단파 속도 측정

전단파공진을 최적화시키는 방법으로 전단파 속도를 측정하기 위한 실험구성은 그림 5와 같으며, 측정장비로는 가속도계 1개, 계측해머 1개, 자료획득 시스템 등이다. 가속도계는 식 (3)으로 결정한 위치(N_1)에 강력접착제로 부착하고, 계측해머도 식 (3)으로 결정한 위치(N_2)에서 타격을 가한다.

가속도계 부착에 있어서 유의할 점은 OSR 기법에서 측정하는 탄성파가 비틀전단파이므로 가속도계의 설치 위치도 비틀전단파의 진동방향과 일치시켜야 한다는 점이다. 따라서 그림 5에 도시한 바와 같이 가속도계를 수평으로 설치하되 공시체의 길이방향에 직각을 이루도록 설치하여야 한다. 또한 계측해머의 타격도 비틀전단파를 발생할 수 있도록 비스듬히 하여야 한다.



(a) 가속도계와 계측해머의 배치



(b) OSR 시험의 실 사례

그림 5. 최적전단파공진 (OSR) 시험을 위한 기본개념도

4.3 전단파속도로부터 일축압축 강도의 추정

일반적으로 공학적 재료에 있어서 강성 또는 탄성계수가 증가하면 강도가 증가하는 경향이 있다. 물론 강성과 강도는 이론적으로 직접적인 관계로 연결되는 특성이 아니지만, 재료의 초기강성이 크면 재료의 강도가 크게 측정되는 실험적 증거는 많이 찾아볼 수 있다. 콘크리트 재료의 경우에 대해서도 많은 연구자들의 선행연구가 있었으며, 이들 연구결과에서도 강성과 강도의 직접적인 연관성을 찾아볼 수 있다. 콘크리트 강성-강도 관계 관련 선행연구에서는 강성-강도 관계를 찾을 때에 압축강성 즉, 영탄성계수를 사용하였으나, 본 연구에서는 전단강성을 사용하였다. 압축강성이 아니라 전단강성을 사용한 이유는 압축강성 (또는 비구속 압축파) 측정에 있어서 도입되는 불확실성을 피하고자 함이었다. 압축강성 계산에 있어서 주인공인 비구속 압축파 속도는 공시체의 세장비에 따라 측정결과가 달라지며, 특히 콘크리트 포장과 같이 평관구조물에서 측정하게 될 때는 모드전이와 같은 현상으로 부정확한 속도가 측정된다.



전단파속도와 일축압축 강도사이의 관계는 일련의 공시체 또는 코어에 대하여 전단파속도를 측정하고 이어서 동일 시료에 대해 압축강도를 측정한 후 두 변수에 대한 상관관계를 구함으로써 결정할 수 있다. 일반적으로 전단파속도와 일축압축 강도 사이의 관계는 지수함수로 정의되며, 대표적인 예는 그림 6과 같다. 이렇게 결정된 전단파 속도와 일축압축강도 사이의 관계를 시험체와 동일한 콘크리트 배합의 구조물에 적용하면 콘크리트 구조물의 일축압축강도를 비파괴적으로 추정할 수 있다.

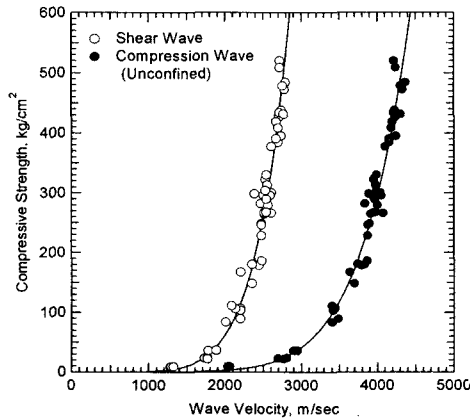
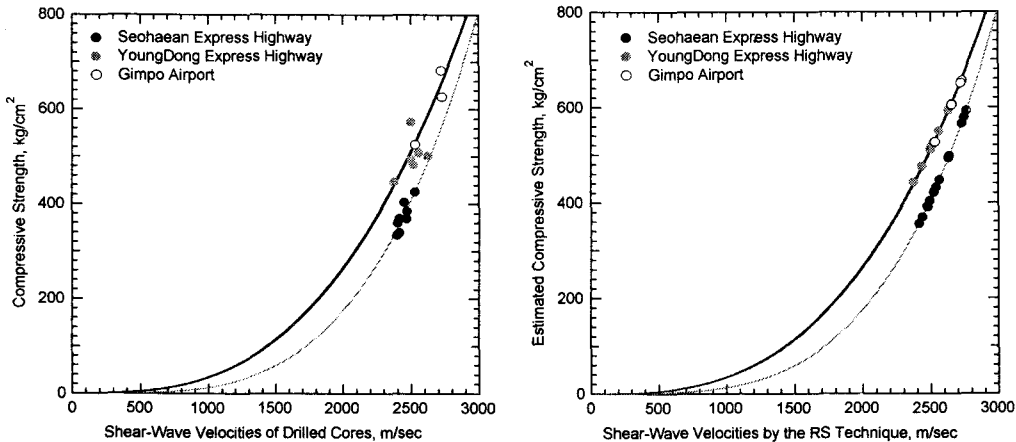


그림 6. 탄성과 속도와 압축강도 관계의 대표적 사례



(a) 고속도로와 공항활주로에 대한 전단파속도-압축강도 관계

(b) 전단파속도-압축강도 관계식을 활용한 콘크리트 포장도로의 강도추정

그림 7. 전단파 속도와 압축강도 관계의 정립과 활용사례

5. OSR 기법에 의한 콘크리트 포장의 강도추정

본 연구에서 제안한 전단파기반 콘크리트 강도추정 기법을 국내 일부 고속도로와 김포공항 활주로의 콘크리트 포장에 적용하여 보았다. 서해안 고속도로, 영동 고속도로의 일부 폐구간과 김포공항의 주기장 일부 지역에서 코어를 채취하여 OSR 시험과 일축압축시험을 수행하였다. OSR 시험으로 측정된 전단파 속도와 일축압축 시험으로 측정된 압축강도를 이용하여 전단파속도-압축강도 관계식을 정립하였다. 정립된 관계식의 예를 들면, 영동고속도로의 일부구간에서 획득한 전단파속도-압축강도 관계식인 식 (6)과 같다. 식 (6)에서 f_c 는 압축강도 (kg/cm^2), v_s 는 OSR 시험으로 구한 전단파 속도, $v_{P,water}$ 는 물의 P-파 속도(1500 m/sec)이다.

$$f_c = 115(v_s/v_{P,water})^{3.066} \tag{6}$$



그림 7(a)에서 알 수 있듯이, 배합비가 다른 콘크리트 포장의 경우 전단파속도-압축강도의 관계식도 다르게 된다. 물론 콘크리트 타설시 양생조건이 다른 경우도 전단파속도-압축강도의 관계식이 달라질 것이다. 따라서 단상파속도로 콘크리트 강도를 추정하기 위해서는 해당 콘크리트의 배합비, 양생조건에 상응하는 전단파속도-압축강도의 관계식을 별도로 개발할 필요가 있다. 참고로 식 (6)을 이용해서 콘크리트 포장에서 직접 측정된 전단파 속도를 이용하여 콘크리트 포장의 강도를 추정해보면 그림 7(b)과 같다.

6. 결 론

본 논문에서는 콘크리트 공시체와 코어의 전단파 속도를 측정하기 위한 OSR 기법을 제안하였다. OSR 기법은 휨파공진을 최소화하여 전단파 공진을 최적화함으로써 전단파 공진을 효율적으로 측정하는 기법으로 간단한 타격으로 전단파 속도를 측정할 수 있다. OSR 기법으로 측정한 전단파 속도와 일축압축시험으로 측정한 압축 강도 사이의 관계식을 살펴보면, 콘크리트 배합비에 따라서 전단파속도-압축강도 사이의 관계식이 달라짐을 알 수 있었다. 따라서 콘크리트 강도의 비파괴적 추정은 전단파의 도입으로 용이하게 수행될 수 있지만 여러 영향 인자에 의한 영향을 숙지하여 적용할 필요가 있음을 확인할 수 있었다.

감사의글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술 연구개발사업(과제명: 장수명·친환경 도로포장 재료 및 설계시공 기술 개발, 과제번호: 05건설핵심D08)의 지원비에 의해 수행되었으며 이에 감사의 마음을 표합니다.

참고문헌

1. Cho, M.-R. Development of a Seismic Method for the Nondestructive Integrity Assessment of Concrete Structures. Ph.D. Dissertation, Chung-Ang University, 2002.
2. Jensen, B.C. and Braestrup, M.W. "Lok-tests Determine the Compressive Strength of Concrete," Nordisk Betong, No. 2, 9, 1976.
3. Malhotra, V. M. and G. G. Carette. Comparison of Pullout Strength of Concrete with Compression Strength of Cylinders and Cores, Pulse Velocity, and Rebound Number, ACI Journal, Vol. 77, No. 3, pp. 17-31., 1980.
4. Nazaraian, S., D. Yuan, and M. R. Baker. Quality Control of Portland Cement Concrete Slabs with Wave Propagation Technique. In Transportation Research Record 1544, TRB, National Research Council, Washington, D.C. pp. 91-98. 1996.
5. Parker, W. E. Pulse Velocity Testing of Concrete, Proceedings, American Society for Testing Materials, Vol. 53, pp. 1033-1042. 1953.
6. Pesski, S. 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.
7. Sansalone, M., and N. J. Carino. Impact Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves. NBSIR 86-3452. National Technical Information Service, Springfield, Va., Sept., 222 pp. 1986.
8. Sansalone M. J., W. B. Streett, IMPACT-ECHO: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry. Bullbrier Press, p.339. 1997.
9. Saul A.G.A. "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure," Magazine of Concrete Research, 2(6), 127, 1951.
10. Schmidt, E. "The Concrete Test Hammer (Der Beton-Prufhammer)," Schweiz. Bauz. (Zurich), 68(28), 378, 1950.
11. Sturup, V. R., F. J. Vecchio and H. Caratin, Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength, In-Situ Nondestructive Testing of Concrete, SP-82, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp. 201-227. 1984.