



전단파 속도를 이용한 콘크리트의 압축강도 추정연구

Estimating Concrete Compressive Strength Using Shear Wave Velocity

안 지 환* 남 정 희** 권 수 안*** 조 성 호****
 An, Ji-Hwan Nam, Jeong-Hee Kwon, Soo-Ahn Joh, Sung-Ho

Abstract

Compressive strength of concrete has been regarded as a very important parameter of the quality control both in new and existing concrete pavement. It has been used a lot as the concrete strength evaluation both in the various-mixture-using laboratory and construction field using the same mixture. An error usually occurs in the test experiments of the strength, even in the test experiments with evenly mixed and compacted specimens of the compressive strength. It is caused by the 'manually operated' compressing testing, or by the specimens preparation with eccentricity. When compressive strength of evenly mixed concrete is investigated by the curing ages at the construction field, there have to be lots of specimens. And it needs much labor and cost. To substitute the endlessly repeated test experiments of compressive strength, presumption of compressive strength, by nondestructive tests, is needed. In this study, elastic waves were used among various nondestructive tests. Compressive strength of concrete was presumed according to the curing ages, by using the shear wave velocity which is not affected by restricted conditions. In the result, shear wave velocity is very closely related to the compressive strength at the evenly mixed concrete.

Keywords : resonance analyzer, shear wave, concrete strength, QC

요 지

콘크리트 압축강도는 신설된 콘크리트 포장과 공용중인 콘크리트 포장의 품질관리 인자로 매우 중요하게 여겨져 왔다. 다양한 배합설계를 이용하는 실험실이나 도로포장 시공 현장처럼 동일배합으로 지속적으로 시공하는 경우에도 압축강도는 콘크리트의 강도 평가용으로 많이 제작하여 측정하고 있는 실정이다.

하지만 동일배합에 동일다짐을 한 압축강도 공시체라 하더라도 강도시험시 오차가 발생하는 것이 현실이다. 이는 수동으로 재하속도나 변위를 조절하는데서 기인한 압축강도시험 장비의 오차일수 있고 공시체의 편심으로 인한 강도차이 등으로 인한 오차가 발생할 수 있다. 또한 시공현장에서 동일한 배합의 재령별 압축강도를 매 시공때 마다 조사할 경우 수많은 공시체 제작이 필요하며 이에 따른 인력과 비용이 발생하게 된다. 이러한 반복적 압축강도 시험을 대체하기 위한 수단으로 비파괴를 이용한 압축강도 추정이 필요하게 된다. 본 연구에서는 다양한 비파괴 실험 방법 중에서 탄성파를 이용하였으며 그 중에서 구속조건에 따라 크게 영향이 없는 전단파 속도를 이용하여 콘크리트 압축강도를 재령별로 추정하였다. 그 결과 전단파 속도와 압축강도의 상관관계는 매우 우수한 것으로 나타났다.

핵심어 : 공진해석, 탄성파, 전단파, 압축강도, 콘크리트, 품질관리

* 정희원 · 한국건설기술연구원 도로시설연구실 연구원(E-mail: jenix@kict.re.kr)
 ** 정희원 · 한국건설기술연구원 도로시설연구실 선임연구원 공학박사(E-mail: archnam@kict.re.kr)
 *** 정희원 · 한국건설기술연구원 도로시설연구실 책임연구원 공학박사(E-mail: sakwon@kict.re.kr)
 **** 정희원 · 중앙대학교 토목공학과 정교수 공학박사(E-mail: shjoh@cau.ac.kr)



1. 서론

콘크리트 설계와 품질관리에 있어 강도는 콘크리트의 특성을 나타내는데 널리 사용되고 있다. 이는 대부분의 다른 시험방법들과 비교해서 강도시험은 상대적으로 쉽기 때문이다. 게다가 탄성계수, 불투수성, 장기공용성과 같은 고유성질은 강도에 의존하며 강도 데이터로부터 산출되기도 한다.

콘크리트의 압축강도는 일반적으로 휨강도보다 3~9배 정도, 간접인장강도보다 7~11배 정도 크며 대부분의 콘크리트 구조물은 가장 큰 압축강도를 이용하여 설계한다. 실제로는 콘크리트 구조물은 압축, 인장, 휨강도를 동시에 여러 방향에서 복합적으로 받고 있지만, 일축압축강도 시험이 실험실에서 수행하기에 가장 쉬우며 콘크리트의 28일 압축강도는 콘크리트 강도의 일반적 지표로 널리 받아지고 있다.(mehta, 2006)

하지만 콘크리트 포장에서는 포장설계시 휨강도를 사용하는데 이는 콘크리트 포장 슬래브에 교통하중 재하시 파괴거동이 상부의 압축응력과 하부의 인장응력에 의해 파괴가 되기 때문이다.

1940년대 Westergaard를 필두로 Picket에 이르기까지 콘크리트 포장의 해석에 관여하였던 학자들은 슬래브의 응력은 교통 하중의 크기에 비례하고, 슬래브의 두께와 탄성계수 그리고 포아송계수 등의 함수로서 나타낼 수 있음을 제시하였다. 그러나 실제 포장의 품질관리시 포설된 콘크리트 포장의 휨강도를 직접적으로 측정하는 것은 어렵기 때문에 간접적으로 휨강도와 압축강도의 상관관계를 통해서 평가하기도 한다.

압축강도의 사용은 실내와 현장으로 크게 나눌 수 있는데, 실내의 경우 재료 생산에 대한 품질관리나 새로운 배합설계 개발시 목표강도를 측정하는 방법으로 사용되고 있으며, 현장의 경우 코어시편을 이용하여 콘크리트 포장의 강도나 현재의 공용상태를 평가하기 위하여 사용하고 있다. 그러나 실내에서 품질관리나 새로운 배합설계를 개발하기 위해서는 무수한 압축강도시험을 실시해야 하고 현장에서는 코어 채취로 인한 많은 시간과 인력 및 비용뿐만 아니라 콘크리트 포장에 손상을 주는 문제점이 있다.

따라서 이러한 실내·외의 문제점을 해결하기 위해 비파괴 방법들을 이용한 콘크리트 압축강도 추정 방법이 필요하다.

본 연구는 단계적 연구로 첫째, 진단파와 압축강도의 상관관계를 검토하고 둘째, 양생조건에 따른 진단파와 압축강도의 상관관계에 대한 영향을 분석하며, 셋째, 골재함량에 따른 진단파와 압축강도의 상관성을 분석한다. 이를 통해서 진단파와 압축강도와의 상관여부 및 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 한다. 본 논문에서는 일차적으로 콘크리트 도로 포장에서 사용되는 현장의 재료를 이용하여 실내에서 탄성파 중 하나인 진단파를 이용해서 재령별 압축강도와 진단파 속도와 상관성을 분석하였다.

2. 탄성파 소개 및 연구 동향

탄성파 신호는 매질을 주행하다 경계면을 만나면 그 일부가 굴절 또는 반사를 하게 되는데 이렇게 굴절 또는 반사되어 되돌아오는 신호를 분석하여 구조를 조사하는 것이 탄성파를 이용한 측정법의 기본원리이다. 이러한 탄성파를 활용하여 비파괴 적으로 콘크리트 포장의 공학적 성능을 평가하는 것은 탄성파의 파동특성을 활용하는 것으로 탄성파의 파동전파 이론에 근거를 두고 있다. 탄성파는 크게 체적파(body wave)와 표면파(surface wave)로 나누어진다.

체적파는 다시 P파(Primary Wave, Compression Wave)와 S파(Secondary Wave)로, 표면파는 러브파(Love Wave)와 레일레이파(Rayleigh Wave)로 나누어진다(그림 1). 또한 탄성파를 발생시키는 에너지원에 따라 충격형, 임펄스형, 진동형으로 구분할 수 있다.

콘크리트 구조물에 대한 비파괴 평가는 P-파의 공진현상과 표면파의 파동전파 이론을 바탕으로 한다. P-파의 공진현상은 미국 코넬 대학의 Sansalone 교수가, 표면파의 파동전파 이론은 미국 텍사스 대학의 Stokoe 교수와 Roesset 교수가 비파괴 기법에 응용하는 연구를 수행하였고, 현재 미국 내에서 활용되고 있는 비파괴 장비의 근간이론이 되었다. 탄성파 비파괴 시험의 핵심기법으로 충격반향기법(Impact-Echo Method)과 SASW

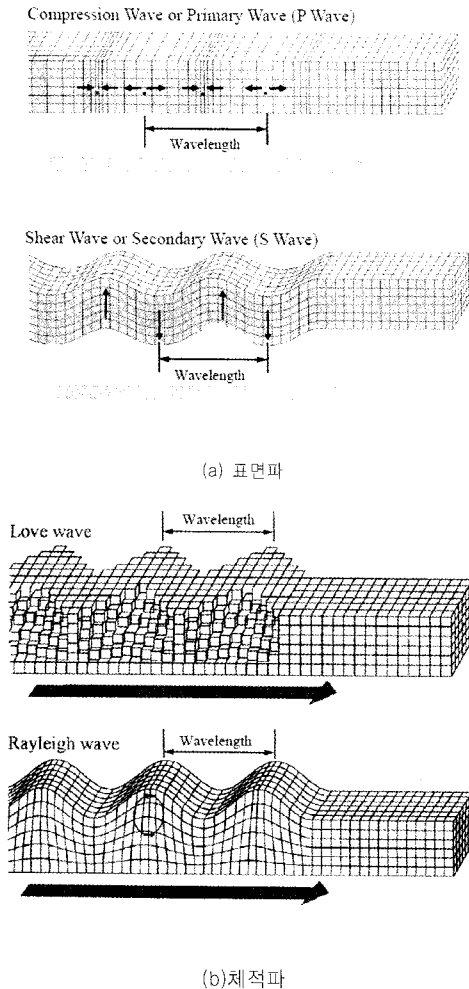
기법 (Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method) 등을 들 수 있다. 충격반향기법은 P-파의 공진현상에 기초한 기법이고, SASW 기법은 표면파의 파동전파 이론을 바탕으로 한 기법이다. 각 기법은 각각 장점과 단점을 가지고 있어서, 어느 하나의 기법만으로는 효과적이고 신뢰성 있는 콘크리트 포장도로의 건전도 평가가 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 기존 탄성과 기법들의 장점을 접목하는 새로운 탄성과 기법을 개발함으로써, 콘크리트 포장도로 품질관리 및 비파괴 건전도 평가 기법의 개발에 주안점을 두었다.

비파괴 기법을 이용하여 콘크리트 시료의 강도를 추정하는 연구는 다양하게 시도되어 왔다. 초음파 속도와 콘크리트 압축 강도와의 상관성에 영향을 미치는 인자에 대한 연구가 수행되었으며, 골재의 종류, 최대크기, 함량, 양생 조건, 함수비 등에 대한 검토를 실시하였다(Yuan et al., 2003). Pessiki 그리고 Carino 등은 Impact-Echo 등을 활용하여 콘크리트의 Setting과 강도 발현에 대한 연구를 수행하였다. 이들은 물-시멘트 비가 0.57~0.5에서는 강도와 속도와의 상관성에 별다른 차이가 없음을 발견하였으며, 골재의 함량이 속도와 강도와의 상관성에 영향을 미치는 것을 발견하였다(Lee et al., 2003). Pessiki 와 Johnson 등은 슬래브 또는 벽체 등의 플레이트 구조물에서 초기 강도를 Impact-Echo 방법을 이용해서 추정하는데 성공하였다(Pessoki et al., 1996).

Impact-Echo를 이용하여 속도-강도와의 상관식을 개발한 연구에서는 물-시멘트비 0.35를 기준으로 0.35 이하와 0.35~0.58 두 가지로 구분하여 상관식을 개발하였으며, Fly Ash의 유무에 따라 속도-강도와의 상관성이 약간 차이가 있음을 발견하였다(이희근 등, 2003). Impact-Echo 방법을 이용하여 골재종류별 재령에 따른 탄성계수를 비교분석한 결과 골재종류 및 재령에 따라 탄성계수에 차이가 있는 것으로 나타났다. 그리고 Impact-Echo를 이용한 휨강도 추정에서 골재종류에 따라 탄성계수와 휨강도의 추정상관성이 매우 높은 것으로 나타났다(안지환, 2000).

전단파를 이용할 경우 전달(wave propagation) 변형 방법과 콘크리트의 함수량에 영향을 받지 않기 때문이다. 또한 압축파와는 달리 콘크리트의 구속조건에도 영향을 주지 않는다. 그러므로 전단파 속도를 측정하는 것이 압축파를 측정하는 것 보다 더 일정한 값을 보여준다.(조미라, 2007)

그러므로 본 연구에서도 압축파를 대신하여 전단파를 사용하여 콘크리트 압축강도와 전단파 속도간 상관관계를 규명하고자 한다.



〈그림 1〉 표면파와 체적파

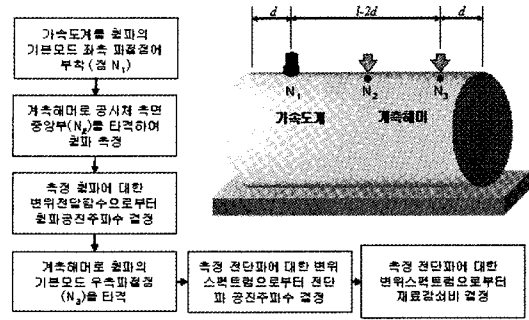
3. 전단파 기법 소개

원통형 공시체를 이용하여 재료의 동적특성(탄성계



수, 재료감쇠비)를 측정하는 기법은 오래전에 개발되어 ISO 규정에도 등록이 되어 있다. 비구속 압축파 (또는 ROD 파)를 측정하여 영탄성계수를 구하는 것은 큰 어려움이 없으나, 전단파를 측정하여 전단탄성계수를 구하는 것은 결코 쉽지가 않다. 일반적으로 공시체에 있어서 전단파의 발생과 측정은 공시체 끝단에 설치된 호스 클램프나 작고 긴 알루미늄 사각봉에 토크를 가함으로써 이루어지는데, 깨끗한 신호를 얻기가 용이하지 않다. 그리고 고유주파수, 재료감쇠비 등을 측정하기 위한 주파수 응답 측정도 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 새로운 개념의 전단파 측정기법을 제안하였다.

본 연구에서 제안한 전단파 측정기법은 공진기법의 일환으로 휨파와 비틀전단파의 공진특성을 이용하는 것이다. 일반적으로 공시체의 측면을 타격하면 공시체의 휨 거동이 발생하게 되는데, 1차 휨모드일 경우 변위가 0이 되는 지점은 두 지점이 된다. <그림 2>의 N1, N3). 이론적으로는 이들 지점에서는 기본모드 휨거동이 발생하지 않기 때문에 이들 지점에서는 전단파 거동이 더 지배적인 가능성이 있다. 공시체의 경우 순수한 S파 모드는 존재하지 않고 비틀전단파의 모드만 존재하게 되는데, 바로 이러한 휨파 기본모드의 파절점에서 비틀전단파를 측정하게 되면, 휨파는 극소화되고 비틀전단파는 극대화되어 매우 명확한 전단파 공진을 측정할 수 있게 된다. 이렇게 측정한 전단파 변위 스펙트럼으로부터 공진주파수와 재료감쇠비를 결정할 수 있다.



<그림 2> 비틀전단파 측정을 위한 공진기법의 개념도

4. 실험 계획 및 방법

각 실험현장에서 현장 공시체를 제작 후 재령일별 탄성파와 압축강도를 측정하였다.

대상현장은 미국 CTR(Center for Transportation Research)과 함께 J.J Pickel Research Campus와 한국의 외곽순환 고속도로 현장에서 2회에 걸쳐 실험을 실시하였다. 배합설계는 3개현장의 현장배합을 기준으로 하였으며 1개 현장에서는 양생조건을 달리한 방법으로 실험하였고, 나머지 2개 현장은 표준양생을 실시하였다. 배합의 경우 CTR 현장과 외곽순환 고속도로 현장의 배합은 상이하나 설계강도가 같으므로 재령별 강도 및 탄성파 속도거동을 비교하고자 하였다.

<표 1> 현장별 배합설계표

현장명	설계 기준강도 (휨강도)	굽은 골재의 최대 입경	슬럼프	공기량	단위 수량	단위 시멘트 량	물 시멘트 비	질내 잔골재율	단위 전골재 량	단위굽은 골재당		단위 AE 량
										32mm	19mm	
CTR	45	32	7.6	4.9	79	278	28.2	45	898	1098		0.742*
외곽1차	45	32	2.5	5.5	127	334	38	41	762	678	452	1,002
외곽2차	45	32	2.5	5.5	127	334	38	41	762	678	452	1,002

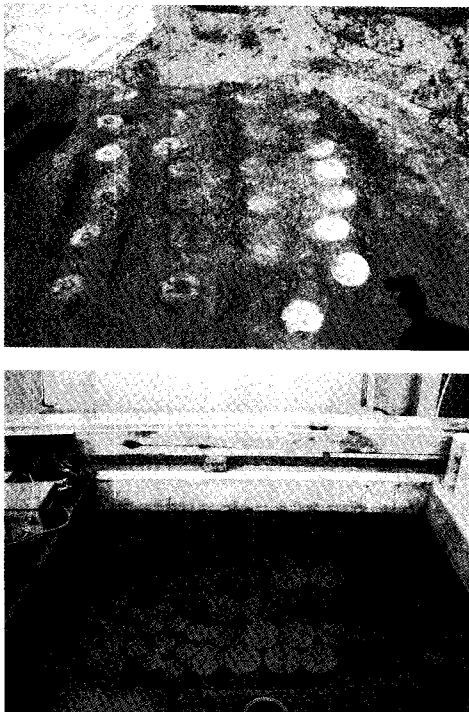
* 고성능 AE감수제를 사용함

〈표 2〉 현장별 양생방법

현장명	양생방법
CTR	표준양생, 모래양생
외곽1	표준양생
외곽2	표준양생

현장양생의 경우 시공현장 주변에 모래더미에 공시체를 넣은 후 매일 1회씩 물을 주어 수분을 유지시키며 양생하는 방법으로 현장시공시 양생의 환경조건을 묘사하기 위해 실시하였다.

실험에 사용된 시료는 CTR 현장의 경우 100×200mm 인 실린더 형이며 나머지 현장에서는 150×300mm을 사용하였다. 시공현장에서 만들어진 시료는 현장에서 일부 양생을 시킨 후 이동시 문제가 없다고 판단될 때 현장 실험실로 이동하였고 탈형에 문제가 없을 정도의 강도발현이 된 후 20℃의 양생수조에 보관하였다. 그리고 실험하기 바로 전에 시료를 채취하여 탄성과 실험을 실시하고, 압축강도 실험을 실시하였다.



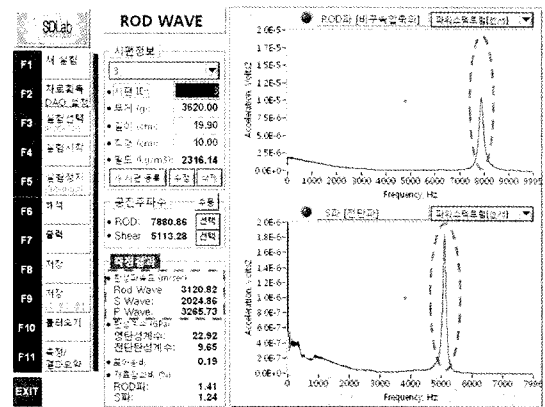
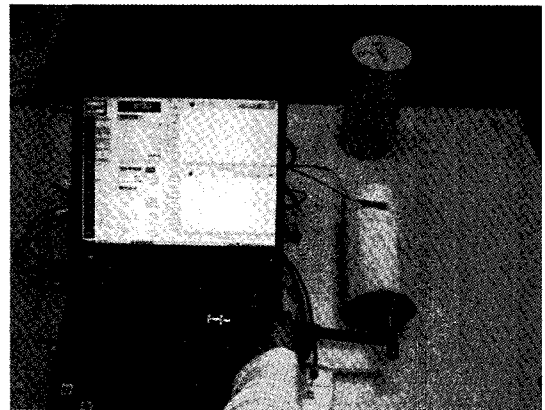
〈그림 3〉 양생방법(상:현장 모래양생, 하:표준양생)

실험시편의 경우 최소 강도가 발현되는 시점부터 시작하여 주기적으로 탄성과 시험과 압축강도시험을 병행하여 실시하였다. 시공당시 현장기후 조건과 배합에 따라 초기 탈형되는 시간은 차이가 있었으며 1회 시험시 평균3개의 공시체를 사용하였다.

초기 1~2일은 현장여건에 따라 수시로 시험을 실시하였고 기본적으로 3, 7, 14, 28일에 재령별 실험을 실시하였다.

탄성과 실험을 위한 장비의 구성은 〈그림 4〉의 측정장비와 같이 해석용 컴퓨터, 신호 분석을 위한 NI-DAQ CARD, 타격 해머, 가속도계 Sensor, 해석 프로그램이 있다.

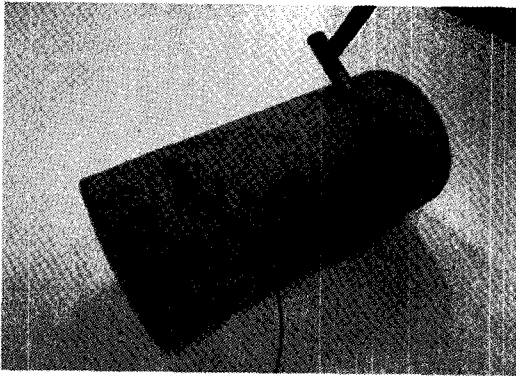
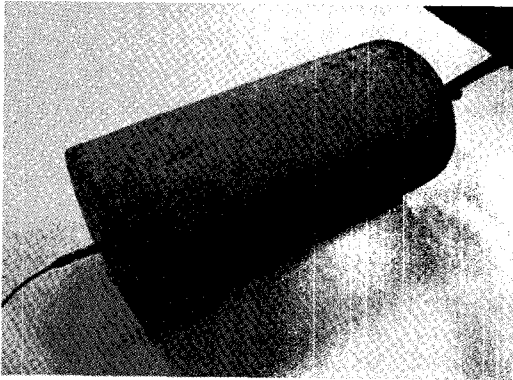
측정결과 화면에서는 ROD 파와 전단파를 측정한 후 각각의 파의 속도를 나타내고 있다.



〈그림 4〉 실험방법(상:측정장비, 하:측정결과화면)



〈그림 5〉는 탄성파를 측정하는 방법을 나타내었으며 ROD파의 경우 공시체의 한쪽 끝단의 중앙에 가속도계를 부착하고 반대편 끝단의 중앙부에 해머를 타격하여 측정하며, 전단파의 경우 최적의 전단파를 측정할 수 있는 거리를 계산하여 양 끝단에 동일거리의 떨어진 지점에 가속도계와 해머위치를 잡아 측정하게 된다.



〈그림 5〉 탄성파 측정방법
(상:ROD파 측정방법, 하:전단파 측정방법)

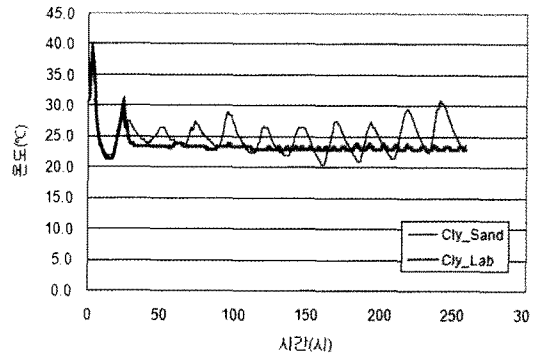
탄성파 실험이 완료되면 바로 KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법에 따라 압축 강도 실험을 실시하였다.

5. 실내 실험 결과

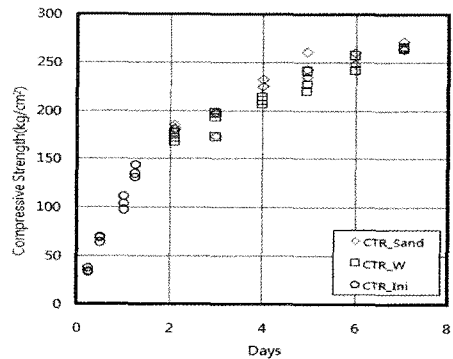
CTR 시험시공 현장에서 양생방법에 따른 재령별 압축 강도를 비교해 보았다. 〈그림 6〉에서는 양생조건별로 공시체 내부 온도를 10일간 비교하였다. 공시체의 내부 온도는 표준양생의 경우 초기 수화반응 후 일정한 온도를 유지하고 있지만 현장 모래 양생의 경우 대기온도변

화에 따라 온도가 변하고 있다.

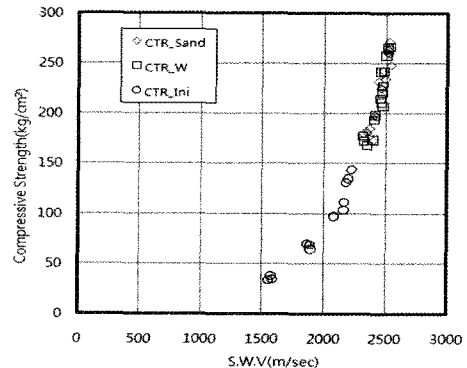
이 온도자료를 성숙도로 환산하면 250시간 기준으로 현장모래양생 공시체의 성숙도는 8791.9 hr·℃이며 표준양생 공시체의 성숙도는 8420.0 hr·℃로 현장모래양생 공시체가 370 hr·℃ 정도 차이로 유사한 것으로 판단하였다.



〈그림 6〉 양생방법에 따른 온도기록(CTR 현장)



〈그림 7〉양생방법에 따른 재령별 압축강도(CTR 현장)



〈그림 8〉 양생방법에 따른 탄성파와 압축강도 관계(CTR 현장)

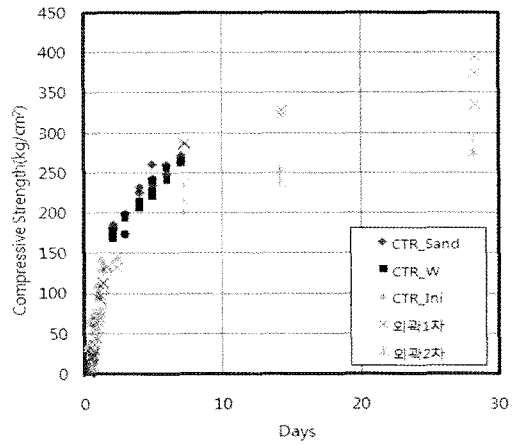
〈그림 7〉에서는 양생조건에 따른 재령별 압축강도를 나타내었는데, 공시체 제작후 2일 이내는 CTR_Ini 값으로 나타내었으며, 현장제작 후 1일이 지난 후 탈형하여 모래양생(sand)과 표준양생(W)을 실시하여 재령별 압축강도 공시체를 3개씩 실험하였다. 그 결과 재령별 압축강도는 비슷하게 나타났으며, 〈그림 8〉에서의 탄성과 속도와 압축강도의 관계에서도 양생조건에 관계없이 동일한 상관관계를 보여주고 있다. 이 결과로 동일배합에서 서로 다른 양생조건이라 하더라도 성숙도 값이 비슷할 경우 탄성과 속도와 압축강도의 상관작용은 동일하다.

〈그림 9〉에서는 현장별 압축강도를 나타내고 있다. 여기서 외곽1차와 외곽2차의 경우 동일재료와 배합이나 재령별 압축강도는 외곽2차가 14일 기준 75%정도 낮은 압축강도를 보이고 있으며 장기강도로 갈수록 압축강도 공시체별 강도 편차가 커짐을 알 수 있다. 외곽2차가 낮은 압축강도를 보이는 것은 시공시점이 외곽1차 시험시공의 경우 10월9일에 실시하였으며 2차 시험시공은 11월6일에 실시하여 시공당시 온도에 의한 영향과 현장시공시 현장배합의 오차등으로 판단된다.

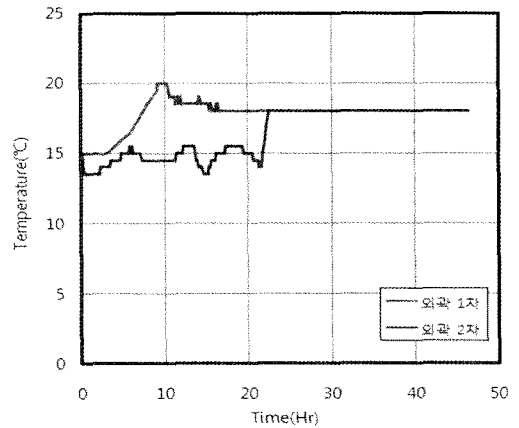
왜냐하면 〈그림 10〉의 공시체의 중심온도분포를 살펴보면 외곽 1차 시공시 공시체 온도보다 2차 시공시 공시체 온도가 낮았으며 24시간 이후에는 수중양생으로 18℃로 일정하게 계속 유지되었다.

하지만 〈그림 11〉의 전단파 속도와 압축강도의 상관관계 보면 재령에 관계없이 탄성과 압축강도의 상관관계가 높음을 알 수 있다. 이는 전단파의 속도의 경우 단순히 양생기간에 영향을 받기보다는 양생조건으로 공시체 자체의 밀실정도를 판단하여 압축강도와 상관관계를 보여주고 있는 셈이다. 동일재령에 압축강도가 크게 나온 경우 탄성과 속도역시 크게 나올 것이며 압축강도가 작게 나온 경우 탄성과 속도 역시 낮게 나타내기 때문이다.

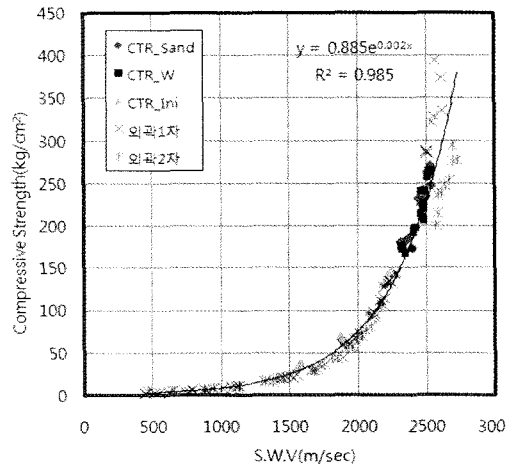
또한 압축강도와 전단파의 상관관계는 특히 초기재령에 있어 상관성이 매우 높다. 이는 지수함수 특성으로 인해 동일 전단파 속도 변화에 따른 압축강도 변화가 초기에는 작으나 장기로 갈수록 커지는 특성을 가지고 있기 때문이다.



〈그림 9〉 재령별 압축강도(현장별)



〈그림 10〉 공시체 온도 분포



〈그림 11〉 재령별 전단파와 압축강도 상관관계



6. 결론

비파괴 실험중 하나인 Resonance Analyzer 실험을 이용하여 현장별로 재령에 따른 전단파와 압축강도 시험을 실시하였으며 상관성을 분석하였다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전단파와 압축강도와의 상관성은 매우 높게 나타났으며, 그 관계는 지수승으로 보여준다.
2. 성숙도가 유사한 경우 양생조건에 관계없이 재령별 압축강도는 비슷하게 나타난다.
3. 동일 배합의 경우 시공시 환경조건이 다른 경우 재령별 압축강도는 다르게 나타나지만 탄성파와 압축강도의 상관관계는 유사하게 나타난다. 이는 동일재령에 압축강도가 크게 나온 경우 탄성파 속도 역시 크게 나오며 압축강도가 작으면 탄성파 속도 역시 낮게 나타내기 때문이다.
4. 압축강도와 전단파 속도의 상관관계에 있어 압축강도의 특성상 초기강도에는 실험편차가 적으나 장기재령으로 갈수록 편차가 커지는 경향을 보이므로 초기 재령에서 보다 정확한 전단파 속도를 이용한 압축강도 추정이 가능하다.

본 연구를 통해 전단파와 압축강도와의 상관성은 매우 높은 것으로 나타났으며 이를 응용해 동일조건인 반복시험시 많은 수의 공시체를 만들지 않고도 원하는 양생시점(특히 초기양생)의 압축강도를 추정이 가능하다.

향후 연구에서는 동일배합 내에서 다양한 양생조건에 따른 전단파 속도와 압축강도의 상관관계를 규명하고 전단파 속도에 영향을 미치는 것으로 예상되는 골재함량에 따른 전단파 속도 변화추이를 규명할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부에서 지원하는 “장수명·친환경 도로포장 재료 및 설계 시공기술 개발” 의 세세부과제입니다. 본 연구를 지원하여준 장수명·친환경 연구단에 감사드립니다.

참고문헌

1. A.M.Neville (1995), "Properties of Concrete, 4th", Longman
2. D. Yuan, S. Nazarian and A. Medichetti (2003), "A Methodology for Opening of PCC Pavements to

Traffic", TX-01 4188-2, TxDOT.

3. Hoi-Keun Lee, Hyunjune Yim, Kwang-Myong Lee (2003), "Velocity-Strength Relationship of Concrete by Impact-Echo Method", *ACI Material Journal*, V. 100, No. 1, January-February 2003.
4. Heisey, S., K. H. Stokoe, II, and A. H. Meyer. (1988), "Moduli of Pavement Systems from Spectral Analysis of Surface Waves", *In Transportation Research Record 852, TRB*, National Research Council, Washington, D.C.
5. Hoi-keun Lee, Hyunjune Yim and Kwang-Myong Lee (2003), "Velocity-Strength Relationship of Concrete by Impact-Echo Method," *ACI Material Journal*, V.100, No. 1, January-February, 2003.
6. Mi-Ra Cho, Sung-Ho Joh, etc.,(2007), "Nondestructive In-Place Strength Profiling of Concrete Pavements by Resonance Search Technique" *86th Annual Meeting of the Transportation Research Board* Washington, D.C.
7. P.Kumar Mehta and Paulo J.M.Monteiro (2006) , "Concrete microstructure, properties, and Materials", Mc Graw Hill
8. Pessiki, S., and Johnson, M. R.(1996), "Nondestructive Evaluation of Early-Age Concrete Strength in Plate Structures by Impact-Echo Method," *ACI Material Journal*, V. 93, No. 3, May-June 1996.
9. Soheil Nazarian, Deren Yuan (2003), "A Methodology for Optimizing Opening of PCC Pavements to Traffic," *Texas DOT, Research Report 4188-2*, 2003.
10. V.M. Malhotra, N. J. Carino (2004), "Nondestructive Testing of Concrete", CRC Press,
11. 안지환 (2000), 콘크리트 포장에서 횡강도 추정을 위한 기초물성 연구, 석사학위, 중앙대학교.

접 수 일 : 2008. 7. 22
 심 사 일 : 2008. 7. 24
 심사완료일 : 2008. 8. 27