

굵은 골재 최대치수 및 시멘트 종류에 따른 압축강도와 전단파 속도의 상관관계에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on Relation between compressive strength and Shear Wave velocity for characteristics of coarse aggregate size and type of cement

안 지 환 An, Ji-Hwan
전 성 일 Jeon, Sung-IL
남 정 희 Nam, Jeong-Hee
권 수 안 Kwon, Soo-Ahn

정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 (E-mail : jenix@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원 (E-mail : jeonsi@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원 (E-mail : archnam@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 선임연구위원 (E-mail : sakwon@kict.re.kr)

ABSTRACT

Strength is one of the very important factors to evaluate the physical properties of concrete. Aggregate forms the most parts in concrete. Cement as a binder in concrete is also closely related to strength. This experiment was tested to understand the effect of the characteristics of aggregate and cement on the relationship between concrete compressive strength and Shear Wave velocity. It was experimented by the different types of cement and maximum coarse aggregate sizes. Type I cement and rapid setting cement was used. Aggregates from three different regions were used. Aggregate of 19mm and 13mm maximum coarse aggregate sizes was used for grading. The relationship between compressive strength and Shear Wave velocity was tested under the condition of same mixture. LA wear test was used to quantify the characteristics of aggregate. As a result, the relationship between concrete compressive strength and Shear Wave velocity was affected by the types of cement, but regular relationship was appeared regardless of types of aggregate, grading and abrasion ratio.

KEYWORDS

concrete, compressive strength, aggregate, shear wave, abrasion

요지

콘크리트에서 강도는 콘크리트의 물리적 특성을 평가할 수 있는 중요한 인자 중 하나이며 콘크리트에 가장 많은 부피를 차지하는 것이 골재이다. 또한 시멘트는 콘크리트 만드는 결합재로서 이 역시 강도와 매우 밀접한 관계가 있다. 이러한 골재와 시멘트의 특성이 콘크리트 압축강도와 전단파 속도의 상관관계에 미치는 영향을 파악하고자 굵은 골재 최대치수와 시멘트 종류별로 실험을 실시하였다. 시멘트는 1종 시멘트와 초속경 시멘트를 사용했고, 골재는 서로 다른 지역의 3가지 골재를 사용하였다. 골재의 입도는 굵은 골재 최대치수 19mm와 13mm의 단입도 골재를 사용하여 동일 배합시 압축강도와 전단파 속도의 상관관계를 살펴보았다. 또한 골재의 특성을 정량화 하고자 LA마모시험을 실시하였다. 그 결과 압축강도와 전단파 속도의 상관관계는 시멘트 종류에 따라 달랐으나, 골재의 종류, 입도 및 마모감량에 관계없이 일정한 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

핵심용어

콘크리트, 압축강도, 골재, 전단파, 마모

1. 서론

콘크리트를 구성하고 있는 재료중에서 골재는 다른 재료에

비해 저렴하고, 물로 인한 화학반응을 하지는 않기 때문에 콘크리트에서 단순히 채움재 역할을 하는 것으로 취급받아 왔

다. 경량골재를 제외하고는 골재 입자의 강도는 콘크리트 내의 페이스트와 천이영역의 강도보다 몇 배 더 강하기 때문에, 다시 말해 콘크리트의 파괴는 페이스트와 천이영역에 의해 결정되기 때문에 골재의 강도가 콘크리트의 파괴 특성을 이해하는데 이용되기가 어렵다. 그러나 골재의 입도, 골재크기, 흡수율, 표면조직, 광물학적 분류 등의 특성은 천이영역의 특성에 영향을 미치고 결국은 콘크리트의 강도에 영향을 미치므로 이러한 골재의 특성을 파악하는 것이 중요하다(Mehta, 2006).

골재의 특성으로는 골재의 강도, 형상, 표면의 질감 및 광물학적 분류 등이 있으며 각 항목별로 콘크리트 압축강도와 의 관계를 비교해보면 다음과 같다.

골재의 강도는 고강도 콘크리트에서는 중요한 역할을 하지만, 대부분에 적용되고 있는 일반적인 콘크리트의 강도와 배합설계는 골재의 구조와는 독립적이다. 다만 내구성에 있어서 골재의 역할은 중요하다(Young, 2002).

골재의 형상과 표면의 질감은 강도에 영향을 미치는데 보통 둥근 골재가 거친 골재보다 약 10%정도 낮은 압축강도를 보인다(Neville, 1995).

골재는 단순히 광물학적으로 분류되어지기는 어려우므로 가장 단순하고 유용한 방법은 골재의 비중을 근거한 분류이다. 왜냐하면 골재는 한 가지 광물학적 분류로 구성되어 있지 않고 다양한 성분으로 구성되어 있기 때문이다(Young, 2002).

골재크기와 압축강도와의 관계에서는 동일 물-시멘트 비율 일 경우 굵은 골재 최대치수가 클수록 압축강도는 작아지는 경향이 있으며 물-시멘트 비율이 낮을수록 강도하락폭이 커진다. 왜냐하면 물-시멘트 비가 낮을수록 천이영역에서의 미세공극이 감소하며 이것이 콘크리트의 강도에 중요한 역할을 하기 때문이다(Mehta, 2006).

또한 여기서 실험하고자 하는 전단파 속도와 압축강도와의 상관성은 매우 높은 것으로 나타났으며(안지환, 2008), 동일 배합의 경우 양생온도는 압축강도와 전단파 속도의 상관관계에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(안지환, 2009).

본 논문에서는 콘크리트에 대다수를 차지하는 골재의 특성과 이를 결합해 주는 시멘트 종류에 따른 압축강도와 전단파 속도의 상관관계를 파악하기 위해 19mm, 13mm 단입도 골재를 이용하고, 서로 다른 생산지의 3가지 골재를 사용하며, 초속경 시멘트와 1종 시멘트를 적용하여 재령별 압축강도와 전단파 속도를 비교하였다.

재령은 초속경 시멘트를 이용한 콘크리트의 경우 1시간, 3시간, 1일, 7일, 28일을 비교하였으며, 1종 시멘트를 이용한 콘크리트의 경우 1일, 3일, 7일, 14일, 28일을 비교하였다. 또한 골재의 특성을 비교하기 위해서 비중과 LA마모시험을

실시하였으며, 굵은골재 최대치수와 시멘트 종류별로 압축강도와 전단파 속도간의 상관관계를 비교·분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 시편의 제작 및 실험방법

2.1.1. 시멘트

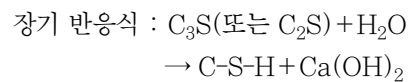
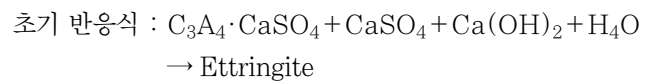
시멘트는 KS L 5201을 만족하는 국산 S사의 초속경 시멘트와 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 화학적 조성표는 표 1과 같다.

표 1. 시멘트 화학성분 특성

Type	Chemical Composition(%)						분말도 (㎠/g)	비중 (g/㎠)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		
초속경시멘트	23.5	16.8	1.7	50.7	1.8	6.7	5,627	2.91
1종 시멘트	21.6	6.0	3.1	61.4	3.4	2.5	3,539	3.15

초속경 시멘트는 속경성을 발현하는 구성광물에 따라 알루미늄나계, 비정질 알루미늄나계, 아원계 초속경 시멘트로 구분되며 본 실험에 사용된 시멘트는 아원계 초속경 시멘트이다.

아원계 초속경 시멘트의 경우 C₃A₃·CaSO₄를 주성분으로 하고 있으며 화학반응식은 다음과 같다.



2.1.2. 골재

배합에 사용된 골재는 A, B, C지역의 골재를 19mm~13mm(19mm)와 13mm~10mm(13mm)의 단입도로 분류하여 사용하였으며 물리적 특성은 표 2와 같다.

표 2. 골재의 물리적 특성

골재구분	골재크기	비중(g/㎠)	흡수율(%)
A지역	19mm	2.70	1.17
	13mm	2.69	1.02
B지역	19mm	2.70	0.85
	13mm	2.72	0.91
C지역	19mm	2.61	1.23
	13mm	2.58	1.15

2.1.3. 화학혼화제

화학혼화제는 공기량 확보를 위한 공기연화제(AE)와 유동성 확보를 위한 유동화제를 사용하였다. 사용된 유동화제는

폴리카본산계이며 초속경 시멘트의 경우 원활한 작업성을 위하여 지연제를 첨가하였다.

2.1.4. 공시체 제작

초속경 시멘트와 1종 시멘트의 배합은 물성 비교를 위하여 동일배합으로 실시하였으며 각 골재별 비중차이로 인해 골재단위량에서 약간의 차이가 있다. 배합설계는 표 3에 나타내었다. 공시체는 100mm×200mm의 원주형 공시체로 제작하였다.

표 3. 배합설계

지역	굵은골재 최대치수	W/C (%)	S/a (%)	단위량(kg/m³)			
				W	C	S	G
A지역	19mm	45	40	144.0	320.0	741.67	1149.79
	13mm			144.0	320.0	741.67	1145.53
B지역	19mm			144.0	320.0	741.67	1149.79
	13mm			144.0	320.0	741.67	1158.31
C지역	19mm			144.0	320.0	741.67	1111.46
	13mm			144.0	320.0	741.67	1098.69

2.2. 굵은골재 마모시험

KS F 2508 “로스엔젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모 시험 방법”에 근거하여 시험을 실시하였으며 입도 구분은 H방법을 이용하여 19mm골재와 13mm골재를 각각 시험하였다.

골재 마모감량은 식 (1)의 방법으로 계산하였다.

$$R = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

여기서, R : 마모감량(%)

m_1 : 시험 전의 시료의 질량(g)

m_2 : 시험 후 1.7mm의 망체에 남은 시료의 질량(g)

2.3. 탄성파를 이용한 전단파 속도측정

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. 탄성파는 크게 두 가지 종류가 있다. 매질 내부를 통과하는 실체파(body wave)와 탄성 특성이 서로 다른 매질 사이의 경계(특히 지표면)에 국한되어 진행되는 표면파(surface wave)가 있다.

실체파의 종류에는 P파(primary wave)와 S파(secondary wave)가 있으며, 표면파에는 레일리파

(Rayleigh wave)와 러브파(Love wave)가 있다. 이 중에서 P파는 탄성과 측정에서 중요하며 일명 종파(longitudinal), 압축파(compressional, push wave) 등으로 알려져 있다.

원통형 공시체를 이용하여 재료의 동적특성(탄성계수, 재료감쇠비)을 측정하는 기법은 오래전에 개발되어 ISO 규정에도 등록이 되어 있다. 비구속 압축파(또는 ROD파)를 측정하여 영탄성계수를 구하는 것은 큰 어려움이 없으나, 전단파를 측정하여 전단탄성계수를 구하는 것은 결코 용이한 일이 아니다. 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 이용하였다.

본 연구에서 사용한 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 1의 N_1 과 N_3). 이론적으로는 이들 지점에서는 기본모드 휨거동이 발생하지 않기 때문에 이들 지점에서는 전단파 거동이 더 지배적일 가능성이 있다. 공시체의 경우 순수한 S파 모드는 존재하지 않고 비틀전단파의 모드만 존재하게 되는데, 바로 이러한 휨파 기본모드의 과절점에서 비틀전단파를 측정하게 되면, 휨파는 극소화되고 비틀전단파는 극대화되어 매우 명확한 전단파 공진을 측정할 수 있게 된다.

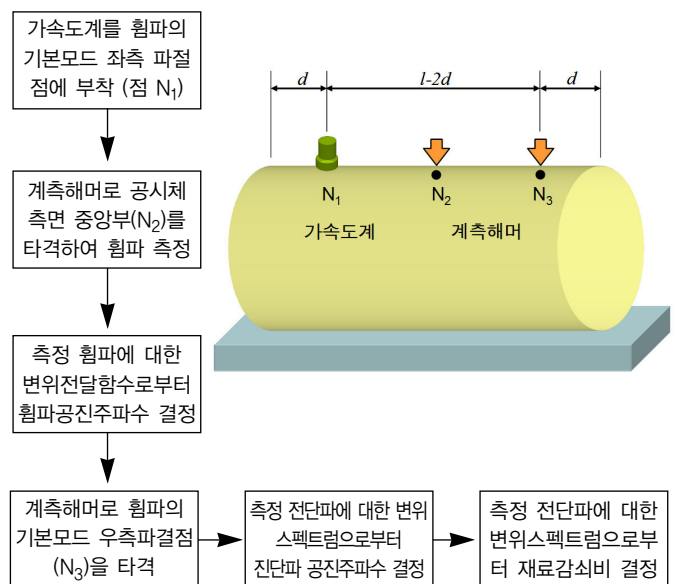


그림 1. 비틀전단파 측정을 위한 공진기법의 개념도

파의 속도는 어떤 매개체를 통과하는 속도로 정의할 수 있는데, 현장 또는 실내에서 원주형 공시체를 제작하거나 코어 시료로부터 공진 주파수를 얻게 되면 식 (2)을 이용해서 콘크리트 시료의 탄성계수를 추정할 수 있다. 실험장비의 구성은 타격을 위한 햄머(Source), 파를 받아들이는 센서(Receiver Sensor) 그리고 센서에서 받아들이는 신호를 분석하는 분석기(Analyzer) 등으로 구분된다. 파의 속도는 공시체의 강성(Stiffness)을 직접적으로 추정할 수 있는 지수이며, 파의 속도가 빠르면 높은 강성(Stiffness)을 나타내는 것이다.

$$V_{c,s} = f_{c,s} \times \lambda \quad (2)$$

여기서, $V_{c,s}$: 파의 속도(c : Rod파, s : 전단파)

$f_{c,s}$: frequency(c : Rod파, s : 전단파)

λ : 파의 길이(=2l)

3. 실험결과 검토 및 분석

3.1. 굵은골재 마모시험 결과

골재물성에 대한 특성을 보기 위하여 LA 마모시험을 실시하였으며, 그 시험 결과는 표 4에 나타내었다.

LA 마모시험 결과 19mm골재, 13mm골재 둘 다 마모감량이 B지역 < A지역 < C지역 순이었다.

표 4. LA 마모시험 결과

골재종류	입도	m ₁	m ₂	마모감량(R,%)
A지역	19~13mm	5001.8	4424.6	11.5
	13~10mm	5000.6	4303.7	13.9
B지역	19~13mm	5008.7	4548.7	9.2
	13~10mm	5007.9	4486.2	10.4
C지역	19~13mm	5000.1	4177.4	16.5
	13~10mm	5000.2	4009.8	19.8

3.2. 양생일별 압축강도 시험 및 전단파 속도 측정결과

본 연구에서는 총 12가지 배합에 대하여 압축강도와 전단파 속도의 특성을 양생일별로 분석하였으며 그 결과를 표 5~6과 그림 2~5에 나타내었다. 실험결과를 살펴보면 초속경 시멘트를 이용한 배합이 초기강도와 28일 강도에서 1종 시멘트보다 큰 것으로 나타났다. 골재종류별 압축강도를 살펴보면 굵은골재 최대치수와 시멘트 종류에 따라서 결과 값이 다르게 나타난다. 예를 들어 그림 2의 결과에서 초속경 시멘트를 이용한 시험결과에서는 B지역의 압축강도가 초기 재령에서는 낮게 나타났으나 장기재령에서는 높게 나타났다. 반면에 1종 시멘트를 이용한 시험결과에서는 B지역의

압축강도가 전반적으로 다른 지역의 압축강도보다 낮게 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 실험실에서 시편제작 과정 중에 골재의 표면수 보정이나 시험환경에 따른 편차일수도 있다. 또는 골재의 특성이 시멘트 종류별로 상이한 결과를 가져올 수도 있다. 하지만 이러한 결과에도 불구하고 전단파 속도를 측정한 결과, 압축강도 결과와 유사한 경향을 나타내었다(그림 4).

전단파 속도를 살펴보면 압축강도의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 즉, 그림 2, 3의 압축강도 지역별 압축강도 결과와 그림 4, 5의 지역별 전단파 속도 결과 순위가 비슷한 경향을 나타내는 것이다. 이는 전단파 속도가 압축강도의 특성을 잘 나타내며 두 인자간의 상관관계가 높은 것을 확인할 수 있다.

표 5. 양생일별 압축강도 시험결과

골재종류	굵은골재 최대치수	시멘트 종류	압축강도(kg/cm ²)				
			1시간	3시간	1일	7일	28일
A 지역	19mm	초속경	183.7	313.1	369.1	419.4	437.1
		1종	111.9	275.2	375.5	402.9	450.6
	13mm	초속경	208.6	324.8	386.4	448.4	490.3
		1종	74.7	211.0	309.7	353.0	381.5
B 지역	19mm	초속경	126.0	335.1	390.3	425.1	521.8
		1종	76.7	172.0	246.0	249.8	316.4
	13mm	초속경	164.7	292.6	338.6	419.5	496.6
		1종	96.7	243.4	309.5	381.6	435.1
C 지역	19mm	초속경	200.3	308.8	356.4	425.4	485.2
		1종	121.0	245.6	327.3	349.5	421.1
	13mm	초속경	240.8	335.7	390.5	464.0	497.4
		1종	116.6	277.2	350.1	392.0	415.6

표 6. 양생일별 전단파 속도 시험결과

골재종류	굵은골재 최대치수	시멘트 종류	전단파 속도(m/sec)				
			1시간	3시간	1일	7일	28일
A 지역	19mm	초속경	2171.6	2247.4	2439.7	2528.1	2596.7
		1종	2126.4	2490.1	2607.7	2659.1	2706.6
	13mm	초속경	2172.0	2339.9	2447.0	2522.5	2621.1
		1종	1946.8	2348.8	2493.6	2586.7	2598.7
B 지역	19mm	초속경	2067.8	2381.7	2449.3	2544.1	2637.9
		1종	2029.0	2365.6	2484.9	2562.4	2621.9
	13mm	초속경	2073.6	2299.8	2380.6	2493.7	2596.6
		1종	2053.7	2390.8	2509.8	2584.7	2624.5
C 지역	19mm	초속경	2141.9	2352.7	2408.5	2487.1	2570.6
		1종	2150.8	2481.3	2589.9	2600.4	2661.2
	13mm	초속경	2198.8	2311.9	2436.0	2471.1	2548.7
		1종	2141.2	2465.3	2565.5	2578.5	2655.1

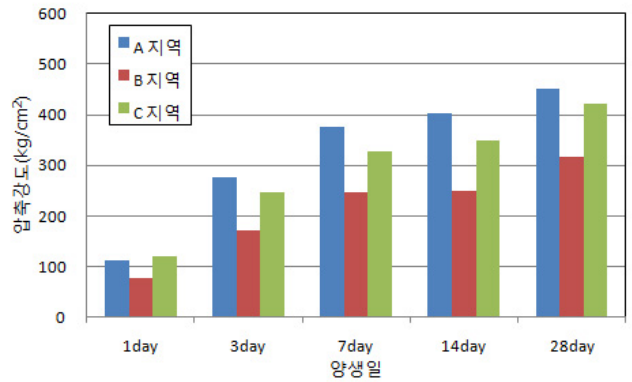
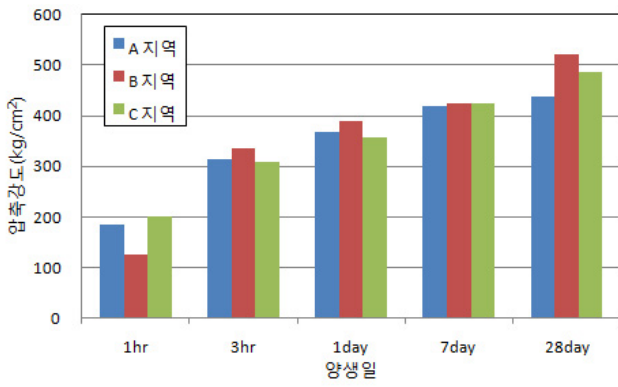


그림 2. 19mm골재의 양생일별 압축강도(좌:초속경 시멘트, 우:1종 시멘트)

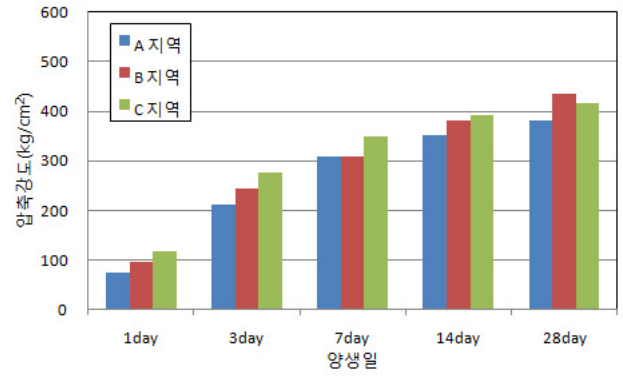
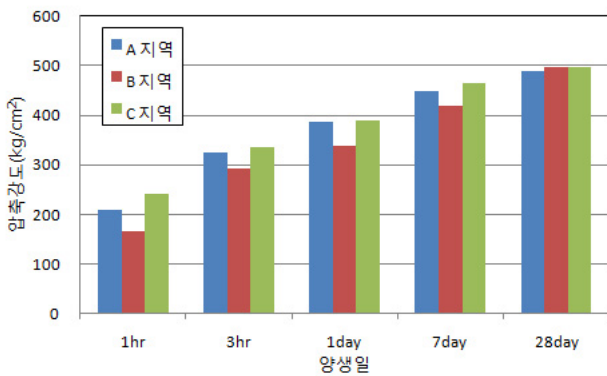


그림 3. 13mm골재의 양생일별 압축강도(좌:초속경 시멘트, 우:1종 시멘트)

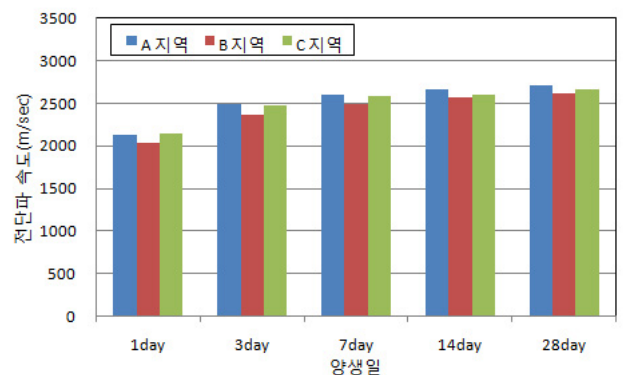
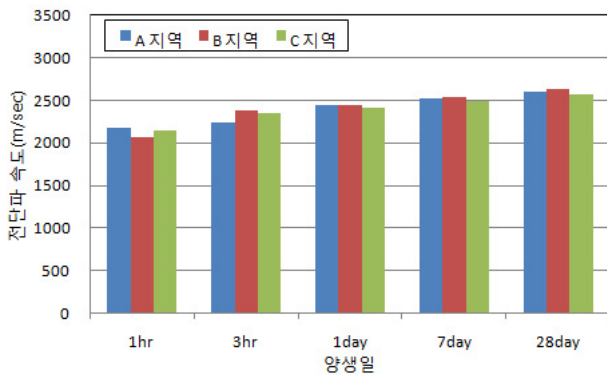


그림 4. 19mm골재의 양생일별 전단파 속도(좌:초속경 시멘트, 우:1종 시멘트)

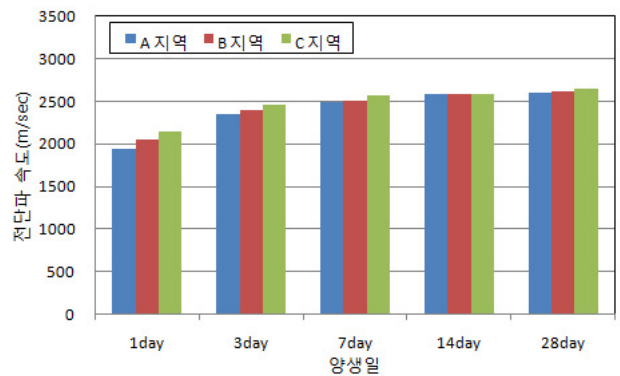
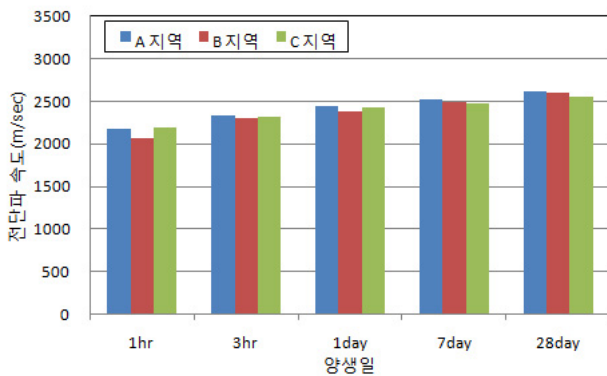


그림 5. 13mm골재의 양생일별 전단파 속도(좌:초속경 시멘트, 우:1종 시멘트)

3.3. 압축강도와 전단파 속도의 상관관계 분석 결과

그림 6은 19mm 골재를 이용한 콘크리트 시편의 전단파 속도와 압축강도의 상관관계를 나타내었다. 여기서 초속경 시멘트와 1종 시멘트에 따라 전단파 속도와 압축강도의 상관관계가 구분되는 것을 알 수 있다. 하지만 골재의 경우 마모감량에 차이가 있었음에도 불구하고 지역별 골재특성에 따른 전단파 속도와 압축강도의 상관관계에는 차이가 없는 것으로 나타났다.

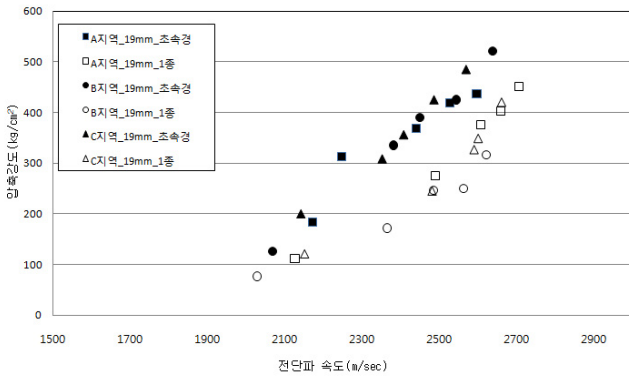


그림 6. 19mm골재의 전단파 속도와 압축강도 상관관계

그림 7은 13mm 골재를 사용한 콘크리트 시편의 전단파 속도와 압축강도의 상관관계를 나타내었다. 이 역시 그림 6과 마찬가지로 골재 종류에 관계없이 시멘트 종류에 따라 상관관계를 구분된다.

실험결과 초속경 시멘트와 1종 시멘트의 상관관계가 다르게 나타났다. 이는 시멘트 수화반응과 경화과정에서 초속경 시멘트의 경우 초기강도 발현을 위하여 아원계 성분이 많고 분말도가 높기 때문에 초기발열량이 높고 강도발현 속도도 빠르기 때문이다.

또한 초기에는 초속경 시멘트와 1종 시멘트의 시작 시점이 유사하나 강도가 발현되는 과정에서 전단파 속도와 압축강도의 상관관계가 다르게 전개되고 있는 것은 시멘트의 강도발현 메커니즘이 서로 상이한 것을 보여주고 있다.

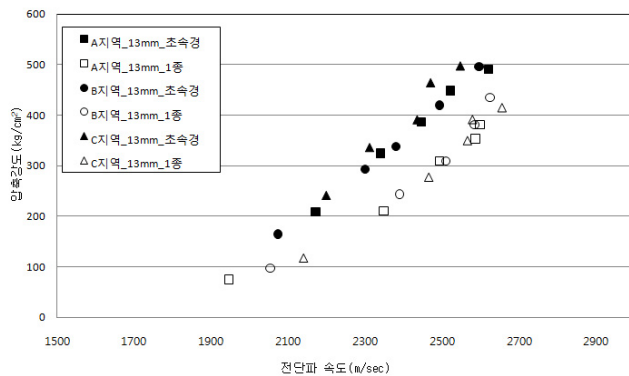


그림 7. 13mm골재의 전단파 속도와 압축강도 상관관계

그림 8은 초속경 시멘트를 이용한 골재종류별 전단파속도와 압축강도의 상관관계를 나타낸 것이다.

전단파 속도와 압축강도의 상관관계에 굵은골재 최대치수와 골재의 종류는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 굵은골재 최대치수의 변화는 압축강도와 전단파 속도 변화에 둘 다 영향을 미치지 않기 때문에 전단파와 압축강도의 상관관계에서는 굵은골재 최대치수에 관계없이 동일한 시멘트를 사용한 경우 일정한 상관관계를 유지한다.

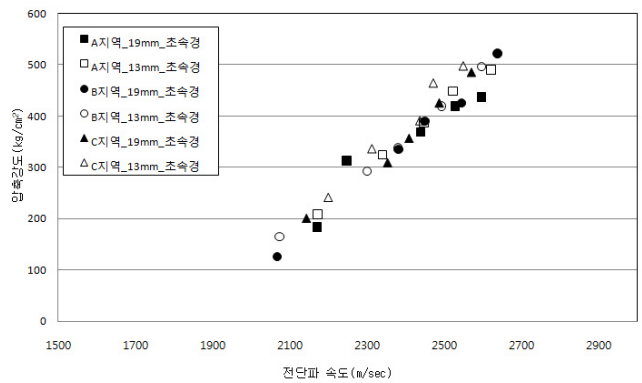


그림 8. 초속경 시멘트를 이용한 콘크리트의 전단파 속도와 압축강도 상관관계

그림 9는 1종 시멘트를 이용한 골재종류별 전단파속도와 압축강도의 상관관계를 나타낸 것이다.

여기에서도 전단파 속도와 압축강도의 상관관계에 굵은골재 최대치수는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이 역시 앞서 설명한 바와 마찬가지로 굵은골재 최대치수와 골재의 종류는 압축강도와 전단파 속도 변화에 둘 다 영향을 미치지 않기 때문에 전단파 속도와 압축강도의 상관관계는 동일한 시멘트인 경우 일정한 상관관계를 유지한다.

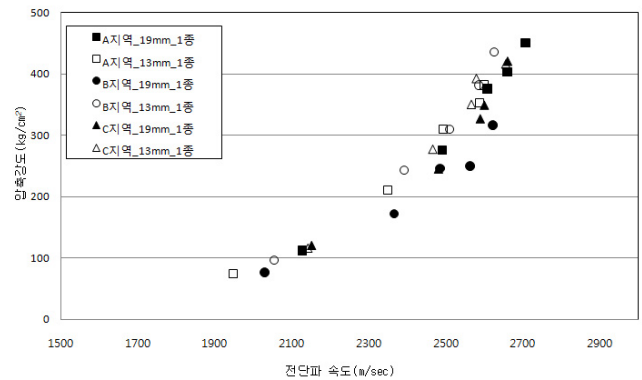


그림 9. 1종 시멘트를 이용한 콘크리트의 전단파 속도와 압축강도 상관관계

4. 결론

비파괴 시험을 이용한 시멘트 종류와 굵은골재 최대치수에 따른 전단파 속도와 압축강도의 상관관계를 살펴보았으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 골재의 특성중 하나인 마모감량은 압축강도와 전단파 속도의 상관관계에 영향을 미치지 않는다.
2. 동일 골재를 이용한 배합설계라 하더라도 시멘트의 종류에 따라 압축강도와 탄성과 속도간의 상관관계는 달라진다.
3. 동일 시멘트의 경우 굵은골재 최대치수가 19mm골재와 13mm골재의 압축강도와 탄성과 속도간의 상관관계는 유사하다. 왜냐하면 골재의 변화는 압축강도와 탄성과 속도에 둘 다 영향을 미치기 때문에 압축강도와 탄성과 속도의 상관관계에는 변화가 없기 때문이다.

본 연구를 통하여 시멘트 종류와 굵은골재 최대치수가 전단파 속도와 압축강도 상관관계에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구에 사용된 골재는 단입도이기 때문에 일반적인 콘크리트 포장에서의 상관관계는 추후 보완연구가 필요하다. 일반적으로 유지보수에 사용되는 골재의 경우 단입도 골재를 사용하는 경우가 많고 초속경 계열의 시멘트를 많이 사용하므로 유지보수재료의 물성평가에 적용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 안지환 외 3인(2008), "전단파 속도를 이용한 콘크리트 압축강도 추정연구", *한국도로학회 논문집* 제10권 3호.
- 안지환 외 3인(2009), "동일 시멘트 사용시 양생온도가 전단파 속도와 압축강도 상관관계에 미치는 영향", *한국도로학회 논문집* 제11권 2호.
- A.M.Neville (1995), "*Properties of Concrete, 4th*", Longman
- 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.
- 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.
- P.Kumar Mehta and Paulo J.M.Monteiro (2006) , "*Concrete microstructure, properties, and Materials*", Mc Graw Hill
- Sidney Mindess, J.Francis Young, David Darwin (2002), "*Concrete 2nd*", Prentice Hall
- V.M. Malhotra, N. J. Carino (2004), "*Nondestructive Testing of Concrete*", CRC Press.

접 수 일 : 2010. 10. 5
심 사 일 : 2010. 10. 24
심사완료일 : 2011. 1. 19