



Wave Propagation 기법을 이용한 콘크리트의 압축강도 추정

Estimating Concrete Compressive Strength Using Wave Propagation Method

권 수 안* 안 지 환** 서 영 찬*** 조 용 주****
 Kwon, Soo Ahn An, Ji Hwan Suh, Young Chan Cho, Yong Joo

Abstract

For many years, the compressive strength of concrete has been regarded as an important index in determining concrete pavement quality. The compressive strength of the sample cores from the field has been used as quality index of concrete pavement. However, this process is time consuming and requires a lot of labor. Recently, the M-E Design Methodology in the pavement design based on the elastic modulus has been adopted. Therefore, several NDT methodologies have been adopted for QA/QC in the field and for the pavement design. Among various NDT methods, the wave propagation method can be used to measure the elastic modulus of concrete because the wave velocity is directly related to the elastic modulus. Therefore, in this study the wave propagation method was used for estimating the concrete modulus.

The relationship between the compressive strength measured in the laboratory and the elastic modulus measured by the wave propagation method was analyzed, and the compressive strength was estimated from the elastic modulus for various mix types.

The results showed that the relationship between the elastic modulus and the compressive strength was observed and the relationship varied depending on the aggregate types.

Keywords : wave propagation, compressive strength, concrete strength, QA/QC

요 지

콘크리트 포장의 품질관리 항목 중에서 압축 강도는 매우 중요한 인자로 여겨져 왔다. 압축 강도 값을 얻기 위해 현장에서 코어를 채취하여 이를 품질관리의 기준으로 사용하였다. 그렇지만, 코어를 채취하는 것은 많은 인력과 시간을 필요로 하며, 실제로 현장의 품질관리를 정확히 추정하는데 많은 어려움이 있다. 또한 포장의 설계 방법도 탄성계수에 근거한 역학적-경험적 방법이 도입되고 있다. 이러한 현장의 품질관리 문제점을 해결하고, 포장설계와의 연계를 위해 비파괴 실험방법이 도입되고 있다. 다양한 비파괴 실험 방법 중에서 이론적으로 탄성계수를 추정할 수 있는 방법은 Wave Propagation 방법이므로 본 연구에서는 Wave Propagation 방법을 도입하였다.

본 연구에서는 현장의 품질관리를 수행하는 방법 중의 일환으로 실내에서 제작한 시편의 압축 강도와 비파괴 방법으로 얻은 탄성계수와의 상관성을 검토하였으며, 비파괴 방법으로 얻은 탄성계수로부터 압축 강도를 추정할 때 배합별 특성에 대한 분석을 실시하였다.

비파괴 실험에서 구한 탄성계수와 압축강도와의 상관성은 매우 우수한 것으로 판명되었으며, 골재의 종류별로 상관성이 서로 상이하게 나타남을 알 수 있었다.

핵심용어 : wave propagation, 압축강도, 콘크리트, 품질관리

* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 수석연구원 · 공학박사
 ** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원
 *** 정회원 · 한양대학교 교통공학과 교수 · 공학박사
 **** 정회원 · 한양대학교 교통공학과 박사과정



1. 서론

콘크리트 포장의 품질관리 항목 중에서 압축강도는 매우 중요한 인자로 여겨져 왔다. 기존 품질관리 방법에서는 실내와 현장 실험으로 구분할 수 있다. 실내에서는 압축강도의 값을 얻기 위해 원형 공시체를 제작하여 일정 기간이 지난 후 실험을 실시하는 방법을 실시하였으며, 현장에서는 일정 시간이 지난 후 코어를 채취하여 압축강도를 실험하였다. 그렇지만 실내에서 수행한 압축강도 값은 실제 현장에서 시공한 후의 포장체 강도 값이 아니라 재료의 생산에 대한 품질관리만을 얻을 수 있고, 현장에서 수행한 압축 강도 값은 실내에서 수행한 압축강도 값과 약간의 차이가 있을 뿐 더러 여러 문제점을 내포하고 있다. 예를 들어, 코어를 채취하는 것은 비용이 많이 소요될 뿐 아니라, 많은 시간과 인력이 필요하며, 코어 채취로 인한 충격 등으로 인해 정확한 강도 추정에는 많은 문제점을 내포하고 있다. 또한 최근의 콘크리트 포장의 설계 방법이 탄성계수에 근거한 역학적-경험적 설계법으로 변화되고 있는 추세이다. 따라서 이러한 코어 채취의 문제점을 해결하고 포장 설계와 연계를 위해서 비파괴 방법이 도입되고 있는 현황이다.

코어의 압축강도를 추정하기 위한 비파괴 방법들은 Pull-Out 실험, 리바운드 해머(Rebound Hammer), 웨이브 전달법(Wave Propagation Method), 초음파 속도법(Ultrasonic Pulse Velocity Method) 등이 있다. 이들 실험 방법 중에서 이론적으로 포장체의 탄성계수를 추정할 수 있는 방법은 Wave Propagation 방법이므로 본 연구에서는 비파괴 기법으로 Wave Propagation 기법을 선정하였다.

비파괴 기법을 이용하여 콘크리트 시료의 강도를 추정하는 연구는 다양하게 시도되어 왔다. 초음파 속도와 콘크리트 압축강도와의 상관성에 영향을 미치는 인자에 대한 연구가 수행되었으며, 조골재의 종류, 최대크기, 함량, 양생 조건, 함수비 등에 대한 검토를 실시하였다(Yuan et al., 2003). Pessiki 그리고 Carino 등은 Impact-Echo 등을 활용하여 콘크리트

리트의 경화와 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). Pessiki와 Johnson 등은 슬래브 또는 벽체 등의 플레이트 구조물에서 초기 강도를 임팩트 에코(Impact-Echo) 방법을 이용해서 추정하는데 성공하였다(Pessiki 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(이회근 등, 2003). Impact-Echo 방법을 이용하여 골재 종류별 재령에 따른 탄성계수를 비교 분석한 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).

따라서 본 연구에서는 콘크리트 도로 포장에서 사용되는 재료적 측면의 변화에 대하여 실내에서 Wave Propagation 방법을 이용해서 압축강도와 탄성계수(Modulus)와의 상관성을 분석함으로써, 향후 비파괴 방법을 이용하여 콘크리트 포장의 품질관리를 수행하는데 있어 고려해야 할 사항을 검토하였다.

2. Wave Propagation 기법 소개

Wave Propagation 기법이란 소형 햄머로 콘크리트 시편을 타격하여 발생하는 Wave의 속도를 이용하여 콘크리트 시편의 탄성계수 또는 균열의 진전 여부 등을 산정하는 기법이다. 햄머로 콘크리트 시편을 타격하면 그림 1과 같은 진폭 스펙트라를 얻을 수 있으며, 이를 통해서 공진 주파수를 얻을 수 있다. 공진 주파수를 알게되면 (식 1) 및 (식 2)를 통해 해당 공



시체의 동탄성계수(Dynamic modulus)를 산정하게 된다. 햄머로 파동을 발진하는 방법에 따라 압축파(Compressive wave), 전단파(Shear wave) 등으로 구분하게 되며, 이로부터 압축탄성계수(Compressive Modulus) 또는 전단탄성계수(Shear Modulus) 등을 얻게 된다.

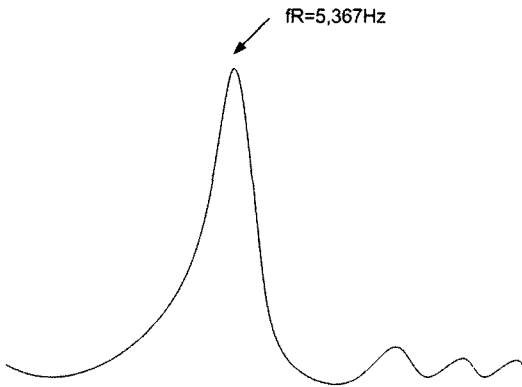


그림 1. Wave Propagation으로부터 얻은 진폭 스펙트라

$$V_{c,s} = f \lambda \quad (\text{식 1})$$

여기서,

$V_{c,s}$ = 속도(압축파, 전단파)

f = 공진주파수

λ = 파 길이(wave length = 2d)

$$E = \rho V^2 \quad (\text{식 1})$$

여기서,

E = Young's 탄성계수

ρ = 공시체 밀도

3. 실험 계획

3.1 동탄성계수 - 강도와의 상관성에 영향을

미치는 인자

동탄성계수 - 강도와의 상관성에 영향을 미치는 인자는 배합비율, 골재의 특성, 시편의 크기, 양생 조건

등이 된다고 한다. 여기서 배합비율은 물 - 시멘트 비, 골재의 양, 혼화제의 양 등을 들 수 있다. 즉, 동일한 물-시멘트비라 하더라도, 골재의 함량이 많으면 동탄성계수가 커지고, 다른 한편으로는 물의 양이 많아지거나 갇힌 공기가 많아지면 동탄성계수가 줄어든다는 것이다. 시편의 크기의 경우 체적과 무게 때문에 시편이 클수록 낮은 공진주파수를 갖는다고 알려져 있다. Kesler와 Higuchi 등은 빔 시편의 길이가 길수록 높은 동탄성계수를 갖는다고 주장하였으며, Thornton과 Alxander 등은 시편의 길이가 길수록 공진주파수는 작아지고, 두께가 커질수록 공진주파수는 커진다고 주장하였다(V.M. Malhotra, 2004). 또한 자체적으로 시편의 크기에 따른 주파수의 변동을 분석한 결과 직경 100mm, 높이 200mm 시편에서의 실험 값이 가장 안정적으로 얻어지는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 비파괴 기법을 이용한 품질 관리 기법의 타당성을 분석하기 위해 시편의 크기 및 양생의 조건 등에 대해서는 변화를 주지 않고 현재 실무에서 사용하고 있는 시편(직경 100mm, 높이 200mm)을 그대로 사용하여 콘크리트 포장의 품질관리 측면에서 사용 가능한 배합의 조건에 대해서만 실험을 계획하였다.

3.2 실험 방법

3.2.1 재료 및 배합설계

실내 실험을 위한 인자는 표 1과 같이 골재의 종류, 물-시멘트비, 플라이 애쉬(Fly ash) 함량의 변화 등을 선정하였다. 골재의 종류로는 규산질 강자갈, 석회석을 선정하였으며, 물-시멘트비는 0.4, 0.45 그리고 0.5, 플라이 애쉬 함량은 0%, 20%, 35%, 50% 등을 선정하였다. 총 16개의 배합을 실시하였으며, 모든 시료는 재령 1, 3, 7, 21, 28일에서 실험을 실시하였고 통계적 의미를 두기 위해 중복시료를 3개로 하였으므로 총 시료의 개수는 240개이다.

실험에 사용된 Type-I 시멘트 및 플라이애쉬에 대



표 1. 실험계획표

골재종류	Siliceous River Gravel												Lime Stone			
	0.4				0.45				0.5				0.4	0.45		0.5
W/C Ratio	0.4				0.45				0.5				0.4	0.45		0.5
Fly ash (%)	0	20	35	50	0	20	35	50	0	20	35	50	35	0	35	35
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1일																
3일																
7일																
21일																
28일																

표 2. Fly Ash의 성분

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	% LOI	% Moisture	Specific Gravity	Finess
36.56	20.79	5.58	23.7	4.32	1.48	0.49	0.14	2.71	14.64

표 3. 시멘트의 성분

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Blaine
20.08	5.23	3.39	64.42	0.89	3.27	0.09	0.23	0.26	60	5	8	10	3756

표 4. 배합별 배합설계 표

Mixtrure No	Water, (lb/yard ³)	Cement, (lb/yard ³)	Fly ash, (lb/yard ³)	Fine Aggregate, (lb/yard ³)	Coarse aggregate, (lb/yard ³)	W/C
1	11	29	0	73	116	4.5
2	11	23	5	73	116	4.5
3	13	21	10	83	132	4.5
4	11	14	12	73	116	4.5
5	13	29	0	69	116	5.072
6	13	23	5	69	116	5.072
7	15	21	10	79	132	5.072
8	13	14	12	69	116	5.072
9	14	29	0	66	116	5.6
10	14	23	5	66	116	5.6
11	16	21	10	75	132	5.6
12	14	14	12	66	116	5.6
13	11	19	9	73	116	4.5
14	13	29	0	69	116	4.5
15	13	19	9	69	116	4.5
16	14	19	9	66	116	4.5



표 5. 배합별 슬럼프 값

Mix No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Slump (cm)	0.64	1.27	3.18	3.81	1.91	6.35	5.08	12.70	5.08	17.78	17.78	19.05	1.91	1.27	5.08	15.24

한 물리적 화학적 성분은 표 2 및 표 3과 같으며, 플라이 애쉬의 종류는 C-Type이었다. 골재의 최대크기는 40mm 이었으며, 모래의 비중은 2.61이다. 규산질 강자갈 및 석회석의 비중은 각각 2.5, 2.6이다.

표 4는 16개 배합에 대한 배합 설계를 보여주며, 표 5는 각 배합별 시료 제작시 측정된 슬럼프 값을 정리한 것이다. 표 5를 보게 되면 Fly Ash의 양이 증가할수록 동일 물-시멘트비에서 슬럼프 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 플라이 애쉬 양이 증가할수록 동일한 물-시멘트비에서 작업성(Workability)이 좋음을 알 수 있다.

3.2.2 실험 방법

실험에 사용된 시료는 100×200mm인 실린더 형이며, 실내 배합에서 만들어진 시료는 24시간 동안 20℃, 50% 상대 습도에서 보관한 후 20℃의 양생조에 보관하였다. 그리고 실험하기 바로 전에 시료를 채취하여 Wave Propagation(Compressive, Shear) 실험을 실시하고, 압축강도 및 정탄성계수 실험을 실시하였다.

Wave Propagation 실험을 위한 장비의 구성은 그림 2와 같이 햄머, 리시버 센서(Receiver Sensor)

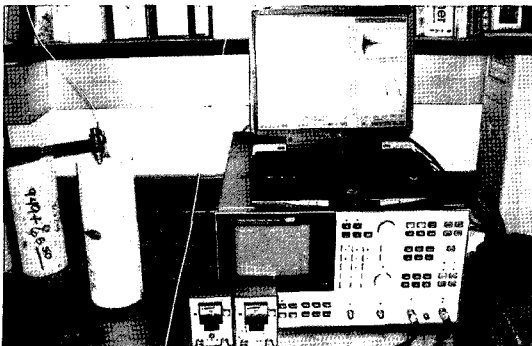


그림 2. Wave Propagation 실험 장비

Analyzer, 분석 프로그램 그리고 전단파(Shear Wave) 발생을 위한 알루미늄 바 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 콘크리트의 동탄성계수(Dynamic Modulus) 값을 얻기 위해 압축파, 전단파 실험을 실시하였으며, 전단파는 그림 2에서와 같이 시료 표면에 알루미늄 바를 붙인 후 알루미늄 바의 끝단부를 햄머로 타격하여 얻었고, 압축파는 시료의 한쪽면의 중앙부를 햄머로 타격하여 얻었다.

Wave Propagation 실험이 완료되면 바로 ASTM C 39에 따라 1개 시료에 대하여 압축강도 실험을 실시하고, 잔여 두 개 시료는 ASTM C 469에 따른 정탄성계수(Static Modulus) 실험을 실시하였다. 탄성계수 실험을 완료한 후 압축강도 실험을 실시하였다.

4. 실내 실험 결과

실험결과 그림 3에서와 같이 압축강도의 값이 재령별로 증가하며, 플라이 애쉬를 많이 함유할수록 초기 강도에서는 크게 차이가 있으나 시간이 지날수록 일반 콘크리트와 같은 강도 발현이 나타나는 것을 알 수 있다. 다만 플라이 애쉬 함량이 50%인 경우 강도

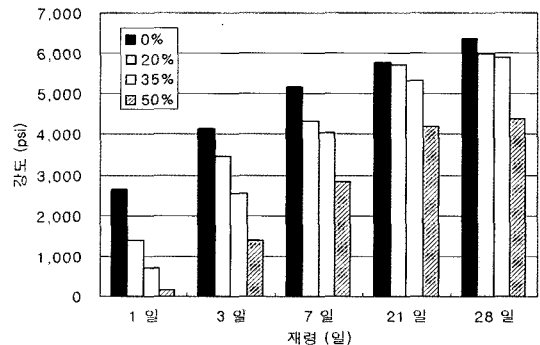


그림 3. Fla Ash 양에 따른 재령별 압축강도 실험 결과(w/c = 0.5)



발현이 늦은 것으로 나타났다. 또한 모든 배합에 대하여 재령별로 강도가 증가하고 이에 따라 동탄성계수는 증가하였다. 압축파로부터 얻은 동탄성계수는 E로 표시하고 압축탄성계수로 하였으며, 전단파로부터 얻은 동탄성계수는 G로 표시하고 전단탄성계수로 나타내었다.

동탄성계수가 정탄성계수보다 1.1~1.4배 정도 크게 나타나며, 초기 재령보다 장기 재령에서는 그 차이가 크게 나타난다. 모든 배합비에서 압축강도와 동탄성계수 상관성은 지수관계를 나타냈으며, 상관성이 매우 좋은 것으로 나타났다.

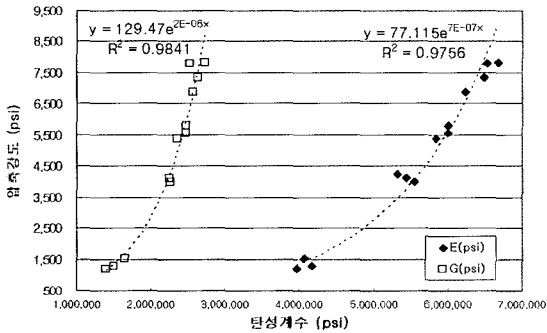


그림 4. 재령별 탄성계수와 압축강도 상관관계(Mix-3)

그림 4에서 보이는 바와 같이 전단탄성계수 보다 압축탄성계수가 크게 나타났으며, 압축 강도와 상관성은 두 가지 방법 모두 좋은 것으로 나타났다. 상관성을 분석하면 전단탄성계수의 경우 초기 재령에서 압축탄성계수보다 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 또한 전단탄성계수의 범위가 동탄성계수보다 적게 나타남을 보였다. 따라서 향후 실내에서 품질관리를 위해서는 전단탄성계수 보다는 압축탄성계수가 타당할 것으로 판단된다.

플라이 애쉬의 함량에 따른 압축강도와 동탄성계수의 상관성에서도 그림 5에서와 같이 플라이 애쉬의 함량은 압축강도와 동탄성계수의 상관관계에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

W/C 비 별로 압축강도와 동탄성계수의 상관성을 분석한 결과(그림 6.) W/C비는 압축강도와 동탄성

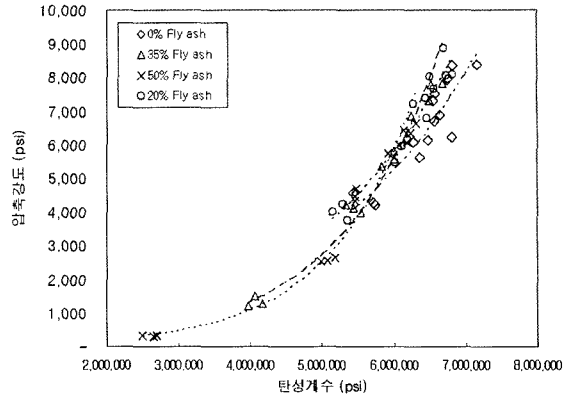


그림 5. Fly Ash 함량에 따른 재령별 탄성계수와 압축강도 상관관계

계수의 상관관계에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 압축강도와 동탄성계수 상관성을 보면 재령 초기에는 압축강도보다 탄성계수 값이 급격하게 증가하는 경향을 보이고, 14일 재령을 전후해서는 강도 발현이 탄성계수보다 크게 증가하는 경향을 보인다. 이는 초기 재령에서는 강도가 발현하는 속도보다 일정한 크기의 하중에 대한 응력의 증가 속도가 더 빠르다는 의미이다.

골재의 종류에 따라서는 압축강도와 동탄성계수의 상관성에 차이를 보이는 것으로 나타났다. 동일 강도에서 석회석의 탄성계수보다 골재의 탄성계수가 큼을 알 수 있었다. 그러므로 향후 품질관리를 위해서는 골재가 상이하게 되면 별도로 상관식을 선정해야 한다는 의미이다.

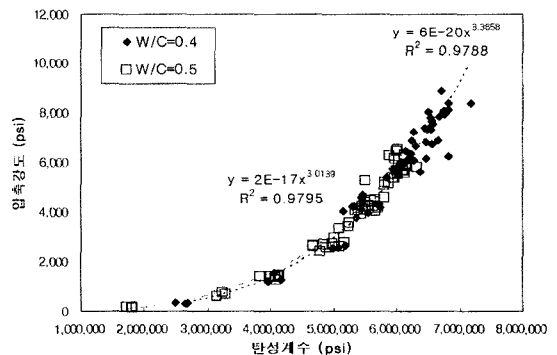


그림 6. W/C 비에 따른 재령별 탄성계수와 압축강도 상관관계(W/C=0.4, 0.5)

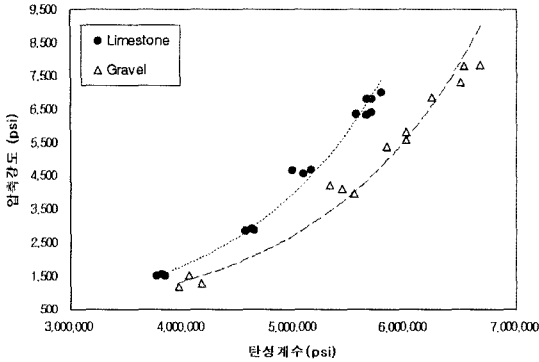


그림 7. 골재종류에 따른 재령별 탄성계수와 압축강도 상관관계

5. 결론

비파괴 실험 방법인 공진법 (Resonance Frequency Method) 기법을 이용해서, 콘크리트 포장의 배합 가능한 조건을 대상으로 재령별로 동탄성계수와 압축강도와의 상관성 분석실험을 실시하였다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 동탄성계수와 압축강도와의 상관성은 매우 좋게 나타났으며, 그 관계는 지수승을 보여주었다.
2. 동탄성계수와 정탄성계수와의 실험 결과를 분석한 결과 동탄성계수가 정탄성계수 보다 1.1~1.4 배정도 크게 나타났다.
3. 압축파를 이용한 경우와 전단파를 이용해서 얻은 동탄성계수를 비교해보면 두 가지 방법 모두 상관성이 좋으나, 실내 품질관리 실험을 위해서는 전단탄성계수보다 동탄성계수가 실용성이 좋은 것으로 판단된다.
4. 초기 재령에서는 압축강도 보다는 탄성계수의 발현이 크게 나타났으며, 재령 14일 전후해서는 탄성계수보다 압축강도가 더 크게 발현하는 것을 보여주었다.
5. 물-시멘트비, 플라이 애쉬의 혼입을 등에 따라서는 압축강도와 동탄성계수의 상관성에 별 영향이 없었으나, 골재에 종류에 따라서는 상관성이 상

이하에 나타났다. 이는 향후 품질관리 실험을 위해서는 골재의 종류별로 별도의 상관식을 개발해서 이용해야 한다는 것을 의미한다.

향후 콘크리트 포장 재료의 품질관리를 위해서는 재료의 종류별로 압축강도와 동탄성계수와의 상관성을 실내에서 미리 개발해야 하며, 추가적으로 현장에서 동탄성계수를 측정하기 위한 장비의 개발 및 현장 여건에 따른 변동성 분석 그리고 품질관리 기법을 개발해야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지원에 의해 실시된 연구이며, 본 연구의 실내 실험을 위해 물심양면으로 도움을 주신 중앙대학교 조성호 교수님께 진심으로 감사를 드린다.

참고문헌

1. D. Yuan, S. Nazarian and A. Medichetti, 2003, *A Methodology for Opening of PCC Pavements to Traffic*, TX-01 4188-2, TxDOT.
2. 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.
3. Pessiki, S., and Johnson, M. R., "Nondestructive Evaluation of Early-Age Concrete Strength in Plate Structures by Impact-Echo Method," *ACI Material Journal*, V. 93, No. 3, May-June 1996.
4. V.M. Malhotra, N. J. Carino, 2004, *Nondestructive Testing of Concrete*, CRC Press.
5. 안지환, 2000, 콘크리트 포장에서 휨강도 추정을 위한 기초물성 연구, 석사학위, 중앙대학교.

〈접수 : 2005. 5. 20〉