

# 공극구조 및 하중조건에 따른 콘크리트의 초음파 속도 모델링

## Modeling on Ultrasonic Velocity in Concrete Considering Micro Pore Structure and Loading Conditions

김윤용\*, 오광진\*\*, 박기태\*\*\*, 권성준\*\*\*\*

충남대학교 토목공학과\*, 한국시설안전공단\*\*, 한국건설기술연구원\*\*\*, 한남대학교 건설시스템공학과\*\*\*\*

Yun Yong Kim(yunkim@cnu.ac.kr)\*, Kwang-Chin Oh(nokj9@daum.net)\*\*,  
Ki-Tae Park(ktpark@kict.re.kr)\*\*\*, Seung-Jun Kwon(jjuni98@hnu.ac.kr)\*\*\*\*

### 요약

초음파 속도를 이용한 콘크리트의 건전성 및 강도평가는 오랫동안 사용되어 왔으며, 현장조사에서 필수적이다. 콘크리트 내부의 공극률은 내구성 및 강도를 평가할 수 있는 주요인자이며, 초음파 진행에 방해가 되므로 공극률 변화에 따라 초음파 속도변화가 발생한다. 본 연구에서는 기존의 공극률 모델을 이용하여 콘크리트 내부를 통과하는 초음파 속도 모델링을 수행하였으며 실험값과의 비교하였다. 또한 인장 및 압축 재하 시험과 동시에 초음파 속도를 측정하여 재하 하중비를 이용한 모델링을 수행하였다. 압축영역에서는 하중재하비 50% 수준까지 초음파 속도가 약간 증가하였으며, 최대하중에 근접할수록 급격한 속도의 감소가 발생하였다. 인장영역에서는 압축영역과 다르게 초기부터 초음파 속도가 상당히 변화하였다. 제안된 기법은 콘크리트의 건전부 및 압축영역에서는 합리적인 결과를 보이고 있으며 인장영역에서는 미세균열 및 국소적인 골재치합을 고려한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

■ 중심어 : | 초음파 속도 | 내구성 | 공극률 | 모델링 | 인장응력 | 압축응력 |

### Abstract

For a long time, evaluation of soundness and strength in concrete has been performed through ultrasonic velocity(UV), which is essential work in field assessment. Porosity in concrete is a major parameter indicating durability and strength, and UV passing concrete depends on porosity variation. In this paper, a modeling on UV through concrete is carried out considering porosity and the results are verified with those from test. Additionally UV in concrete under compression/tension loading condition is measured and UV modeling with loading condition is performed. Up to 50% of loading ratio, UV slightly increases and greatly drops at peak load in compression region, however it fluctuates in tensile region due to micro cracking in matrix. The proposed model shows a reasonable agreement with test results in control and compression region, and needs modification for tensile region considering micro cracks and local aggregate interlocking.

■ keyword : | Ultrasonic Velocity | Durability | Porosity | Modeling | Tensile Stress | Compressive Stress |

\* 본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(FRP Hybrid Bar를 활용한 해양항만구조물 수명향상 기술 개발) 과제로 수행되었습니다.

접수일자 : 2014년 11월 19일

심사완료일 : 2015년 01월 20일

수정일자 : 2015년 01월 19일

교신저자 : 권성준, e-mail : jjuni98@hnu.ac.kr

## I. 서론

최근 들어 콘크리트의 건전성 및 결함 평가를 위해 다양한 비파괴 기법(NDT: Non-Destructive Technique)이 사용되고 있다. 이러한 기법은 기존 구조물에 손상을 입히지 않으면서 역학적/내구적 성능을 평가할 수 있으므로 많이 사용되고 있다[1][2]. 다양한 비파괴 기법 중 콘크리트 구조물의 건전성 평가에는 초음파(UV: Ultrasonic Velocity)법, 탄성파법, 방사선에 의한 검사, AE(Acoustic Emission)법 등이 사용되는데, 최근 들어 EM(Electromagnetic) 특성을 이용하여 콘크리트의 건전성 및 재료적 특성을 평가하는 연구도 시도되고 있다[3][4]. 이러한 방법 중 초음파 탐사법은 압축파의 전달속도를 이용한 것으로 ASTM C597-83, BS 1881, RILEM NDT 1 등 다양한 기관 및 학회에서 인정받아 건전성, 공동유무, 균열깊이 평가에 널리 사용되고 있다[5][6].

UV법은 속도에 따라 강도평가, 건전성 평가에 사용되고 있으나 속도에 따른 간접적인 평가이므로 절대적인 기준값이 될 수 없다고 제시되었다. 또한 함수율, 골재종류, 강도, 철근의 위치 등에 따라 UV가 다르게 평가된다[7][8].

공기는 이온 전달 또는 압축파 전달 매체가 아니므로 콘크리트내의 공극률은 내구성 및 UV평가에 주요한 영향인자이다. 일반적으로 콘크리트 강도 증가에 따라 공극률이 감소하고 UV가 빠르게 평가되며, 강도감소의 경우 반대의 경향을 나타낸다. 공극률은 강도, 확산, 투수 등에 중요한 연결통로가 되므로[9-11], 공극률과 비파괴 특성값과의 상관성을 찾으려는 연구가 지속적으로 수행되고 있다[4][12]. 또한 모든 RC(Reinforced Concrete) 구조물의 경우 하중의 크기는 다르지만 인장 및 압축응력을 받고 있으며, 이는 공극구조 및 공극연결도(Connectivity)에 영향을 미친다. 압축영역에서는 내부 공극의 압밀에 따라, 인장영역에서는 미세균열의 증가에 따라 물질이동(확산 및 투수) 특성이 변화하고 UV 역시 이에 따라 변화하게 된다[13-15].

본 연구에서는 초기재령 거동 모델링을 이용하여 도출된 공극률을 변수로 하여 초음파 속도 모델링을 수행

하도록 한다. 이를 위해 OPC(Ordinary Portland Cement)와 Slag를 이용하여 두 가지 콘크리트를 제조하였으며 인장 및 압축응력을 도입하였다. 또한 하중재하와 동시에 초음파 측정 실험을 수행하여 인장 및 압축응력에 따른 초음파 속도를 평가하였다. 본 연구에서는 공극률을 이용하여 간략화 된 초음파 속도 모델링과 하중재하(인장 및 압축)에 따른 속도변화, 그리고 OPC 콘크리트와 슬래그 콘크리트에 대한 초음파 속도의 변화 등이 고찰되었다.

## II. 실험 계획

### 1. 사용재료 및 배합

본 연구에서는 W/C 0.6을 기준으로 OPC 콘크리트와 치환률 40%의 슬래그 콘크리트를 제조하였다. [표 1]에서는 실험을 위한 콘크리트 배합을 나타내었으며, [표 2]에서는 OPC 및 슬래그의 화학적 조성, [표 3]에서는 잔골재 및 굵은 골재의 물리적 특성을 나타내었다.

표 1. Mix proportions for UV and loading conditions

Case	slump (mm)	S/a (%)	W/B (%)	W	Unit weight: kg/m <sup>3</sup>			
					Binder		S	G
					C	Slag		
OPC	180	41.4	60	180	300	-	735	1,040
GGBFS					180	120		

W/B: Water to binder ratio, C: Cement, S: Sand, G: Coarse aggregate, GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag

표 2. Chemical composition of OPC and Slag

	Chemical composition(%)						Physical properties		
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig. loss	Specific gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214
GGBFS	32.74	13.23	0.41	44.14	5.62	1.84	0.2	2.89	4,340

표 3. Physical properties of fine and coarse aggregates

Types	items	G <sub>max</sub> (mm)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate	-	-	2.60	1.00	2.70
Coarse aggregate	25	-	2.62	0.78	6.78

2. 하중재하 및 초음파 속도 측정

콘크리트 시편은 실린더 몰드(지름 100mm, 높이 200mm)를 이용하고 KS F 2405를 참고하여 압축강도를 재령 28일 및 56일에 수행하였다. 인장응력을 가하기 위해 실린더 시편을 두께 50mm로 절단하였고, 쪼갬 인장강도 시험을 수행하였다. 또한 압축응력을 가하기 위해 75×75×50mm 큐빅 몰드를 제작하여 압축응력을 인가하였다. 하중 재하용 시편과 재령에 따른 압축강도 평가 시편은 각각 3개가 준비되어 평균값을 사용하였다.

수중양생 후 수분 포화의 영향을 제거하기 위해 재령 91일까지 실험실조건(온도 20℃, 습도 65%)에 존치하였으며 이후 하중재하와 UV측정을 동시에 수행하였다. UV 측정을 위해 실린더 몰드 측면은 그라인딩을 하여 UV 송신 및 수신자와 완전한 접촉을 하도록 제조하였다. [그림 1]에서는 시편사진을 나타내었으며 [그림 2]에서는 하중재하에 따른 UV 측정상태를 나타내었다. 또한 [표 4]에서는 UV 측정장비의 사양을 요약하였다.

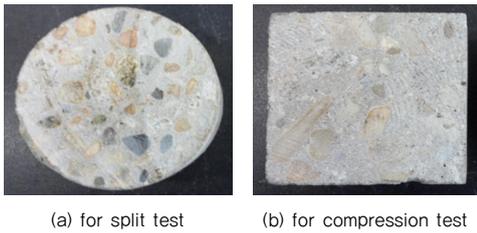


그림 1. Test samples for compressive and tensile conditions

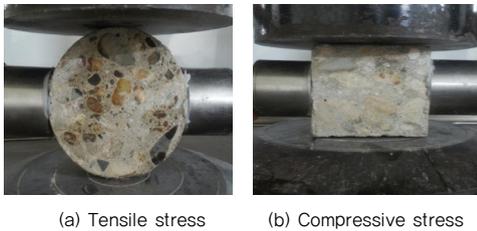


그림 2. Photos for UV measurement under loadings

표 4. Specification of UV equipment

Transit Time measurement	Range Resolution	0.1~9,999 $\mu s$ 0.1 $\mu s$
Transmitter	Energising Pulse	Normal 1.2kV or 500V 1.5 $\mu s$ switch selected
Receiver	Input sensitivity	250 $\mu V$
	Impedance	470k $\Omega$
Power supply	Mains	105/125, 210/250V AC 50/60Hz
Environmental	Operating temperature range	0 to 40 $^{\circ}C$
	Electronics unit	Dimension: 186×130×186 mm Weighting : 30kg

III. 공극구조를 고려한 초음파 속도 모델링

1. 공극구조 형성모델 개요[16]

본 연구에서는 공극률 평가를 위해 DUCOM FE 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 열역학적 연성 모델을 기초로 복합다상수화 발열모델(MCHM: Multi Component Hydration Model), 수분이동모델(MTM: Moisture Transport Model), 공극구조 형성모델(MPSFM: Micro Pore Structure Formation Mode)로 초기부분이 구성되어 있다.

복합수화발열 모델에서는 시멘트 4대 광물질인  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  이외에 슬래그 및 플라이 애쉬의 중량률을 이용하여 각각의 수화발열량을 고려하여 [식 1]과 같이 전체 바인더의 열량을 계산한다.

$$\begin{aligned} \bar{H}_c &= \sum p_i \bar{H}_i \\ &= p_{C_3S} \bar{H}_{C_3S} + p_{C_2S} \bar{H}_{C_2S} + p_{SG} \bar{H}_{SG} + \\ &\quad p_{FA} \bar{H}_{FA} (\bar{H}_{C_3AET} + \bar{H}_{C_3A}) + \\ &\quad p_{C_4AF} (\bar{H}_{C_4AFET} + \bar{H}_{C_4AF}) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $\bar{H}_c$ 는 총 바인더의 단위열량,  $p_i$ 는 각 성분의 중량률,  $\bar{H}_i$ 는 각 성분의 발열특성을 나타낸다. 또한 공극구조는 공극분포 밀도함수를 통해 도출하는데, 내부생성물 및 외부생성물을 동시에 다룬 전체 체적에서의 공극구조를 [식 2]와 같이 공극분포 밀도함수로 나타낸다.

$$\phi(r) = \phi_{cp} V_{cp}(r) + \phi_{gl} V_{gl}(r) + \phi_{lr} \quad (2)$$

여기서,  $V_{cp}(r)$ ,  $V_{gl}(r)$  ( $m^3/m^3$ )은 시멘트 경화체중의 모세관 공극 및 겔 공극에 대한 공극경분포를 규정한 함수이고  $\phi_{cp}$ ,  $\phi_{gl}$ ,  $\phi_{lr}$ 은 capillary pore, gel pore, layed pore를 나타낸다. 각각의 공극  $i$ 에 및 관련된  $B$  parameter를 이용하여 [식 3]과 같이 공극분포 밀도함수를 제시하고 있다.

$$V_i = 1 - \exp(-B_i r), \quad (0 \leq V_i(r) \leq 1) \quad (3)$$

$$dV_i = B_i r \exp(-B_i r) d \ln r$$

여기서,  $B_i$ 는 함수형상을 결정하는 변수이다.

모세관공극 또는 겔공극을 원통형으로 가정할 때 표면적의 값  $S_i$ 는 [식 4]에 따라서 도출하며  $B_i$ 에 대한 함수도 구현된다.

$$S_i = 2\phi_i \int r^{-1} dV$$

$$= 2\phi_i \int_{r_{min}}^{\infty} B_i \exp(-B_i r) d \ln r \quad (4)$$

여기서,  $r_{min}$ 은 고려할 최소공극반경이다.

위의 수분이동모델 및 공극구조형성모델은 많은 문헌에 소개되어 있으므로 이를 참고하는 것이 바람직하다[16-18].

## 2. 공극률과 하중재하상태를 고려한 초음파 속도 모델링

### 2.1 공극률을 고려한 초음파 속도 모델링

다층 매질(Multi-layer)을 통과하는 초음파 속도는 일정한 주파수에서 [그림 3]과 같이 각각의 층(layer)를 고려하여 도식화할 수 있다.

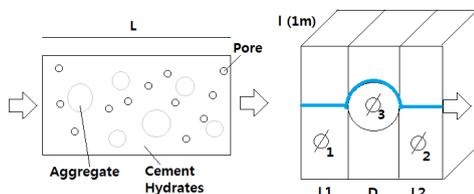


그림 3. Ultrasonic velocity through multi-layer

[그림 3]에서 단위길이의 다층을 통과하는 초음파 속도  $V$ 는 [식 5]과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = L / T \quad (5)$$

여기서  $L$ 은 매체의 단위길이(1m),  $T$ 는 매질을 통과하는 속도(sec)이다.

[그림 3]에서 전체 체적비 구성을 수화물( $i=1$ ), 골재( $i=2$ ), 공기( $i=3$ )으로 가정할 수 있다. 수화물과 골재에 대한 초음파 속도는 공기에 비하면 매우 크므로 비슷한 수준으로 가정할 수 있다. 또한 콘크리트내의 공극을 지름  $D$ 를 가진 구(sphere)의 체적으로 가정하면 전체 매질의 통과길이( $L_T$ )는 [식 6]과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_T = L_{act} [1 - D + (\pi D / 2)] \quad (6)$$

여기서  $L_{act}$ 는 콘크리트의 실제 길이이며, 나머지 항은 길이의 비이다.

공극이 없는 콘크리트 내부의 기본 초음파 속도를  $V_b$ 로 가정하면  $L_{act}$ 를 통과하는 전체 시간( $t_{total}$ )은 [식 7]과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{total} = \frac{L_{act} [(1 - D) + \pi D / 2]}{V_b} \quad (7)$$

시편 전체를 통과하는 초음파속도를  $V_{us}$ 라 하면 [식 6]을 [식 7]으로 나누어야 하므로 [식 8]과 같이 정리할 수 있다.

$$V_{us} = \frac{V_b}{(1 - D) + \pi D / 2} \quad (8)$$

[식 8]은  $D$ 가 증가할수록 시편을 통과하는 초음파속도( $V_{us}$ )가 감소하는 형태를 취하고 있다. 콘크리트내의 공극률( $\phi_3$ )의 지름을  $D$ 로 표기하였으므로, [식 9]와 같이 지름과 공극률의 관계를 도출하고, 이를 [식 8]에 대입하면 최종적으로 [식 10]과 같이 공극률을 고려한 초음파 속도식을 도출할 수 있다.

$$D = \left( \frac{6\phi_3}{\pi} \right)^{(1/3)} \quad (9)$$

$$V_{us} = \frac{V_b}{1 + (\pi/2 - 1)(6\phi_3/\pi)^{(n/3)}} \quad (10)$$

여기서  $n$ 은 실험상수를 나타낸다.

본 모델링에서 사용된 가정은 1] 콘크리트내의 골재, 시멘트 수화물은 공기에 비하여 초음파 전달이 매우 빠를 것, 2] 공극률과 다른 매질이 일정하게 분리될 것, 3] 미세하게 분포된 공극률의 총합을 하나의 구로 고려하고 최단거리로 초음파가 공극을 통과할 것, 4]  $V_b$ 는 공극이 없는 콘크리트의 초음파 속도이므로 일반적으로 측정되는 콘크리트에서의 초음파 속도보다 높은 초음파 속도일 것 등이다.

또한 위의 모델링에서는 일부 콘크리트의 체적이 고려되지 않으며, 골재특성이 고려되지 않으므로 이를 고려하기 위해 실험상수( $n$ )를 가정하였다.

위와 같이 공극률과 전달매질로 분류하여 전체체적을 고려한 REV(Representative Element Volume)기법은 물질 확산 및 이동[9][10][19]뿐 아니라 전자기 모델링에서도 많이 사용되고 있다[20][21].

### 2.2 하중재하상태를 고려한 초음파 속도 모델링

압축영역에서는 공극이 일부 닫히게 되고 인장영역에서는 미세균열이 초기에 발생하므로 이에 따라 확산 및 투수성의 증가 및 감소가 발생한다[14]. 초음파 속도 역시 압축영역에서는 어느 정도의 하중증가에 따라 초음파 속도의 증가가 예상되고 이후 미세균열이 진전되면서 초음파 속도가 크게 감소될 것이다. 기존의 연구에서는 압축응력 재하시 큰 차이가 발생하지 않았으나 [15], 본 연구에서는 투수 및 확산특성에 대한 변화패턴을 고려하여 압축응력을 고려한 초음파 속도를 [식 11]과 같이 모델링하였다.

$$V_f = V_{us} [1 + a(f') + b(f')^2] \quad (11)$$

여기서  $V_f$ 는 하중재하상태에서의 초음파 속도,  $f'_c$ 는 압축응력을 나타낸다.

[식 11]과 다르게 인장영역에서는 초기하중 재하시부터 미세균열이 발생하므로 초음파 진행을 저해하는 구간(공극률 및 미세균열)이 초기부터 증가하게 된다. 그

리므로 최대값은 1을 가지도록 가정하였으며, Harris model을 이용하여 [식 12]과 같이 인장응력에 대하여 초음파 속도를 모델링하였다.

$$V_f = \frac{V_{us}}{(1 + a(f'_t)^b)} \quad (12)$$

여기서  $f'_t$ 는 인장응력을 나타낸다.

## IV. 하중재하상태에 따른 초음파 속도변화 분석

### 1. OPC 및 슬래그 콘크리트의 역학적 성능 평가

본 절에서는 OPC 및 슬래그 콘크리트의 역학적 성능 평가결과를 나타내었다. [그림 4]에서는 재령에 따른 압축강도 결과를 나타내었는데, 28일 재령에서는 Slag 콘크리트에서 약간 강도가 크게 평가되었는데, 이는 양생 온도를 25°C로 설정하였기 때문이다. 또한 56일 재령에서는 Slag 콘크리트에서 OPC 콘크리트를 상회하는 결과가 도출되었다. 장기재령에서 Slag 콘크리트의 강도 개선, 수밀성 개선 등에 대해서는 잠재수경성에 의한 추가적인 수화물의 생성과 이로 인한 공극률의 감소로 알려져 있다. Slag를 사용하여 역학적, 내구적 성능을 개선하려는 시도는 기존의 연구에서 많이 찾아볼 수 있다[19][22].

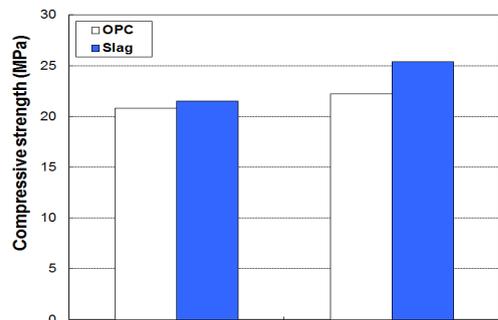


그림 4. Compressive strength in OPC and Slag concrete

2. 압축 및 인장 응력 하에서의 초음파 속도 평가

본 절에서는 압축 및 인장 응력에 따른 초음파 속도 변화를 분석하였다. OPC 콘크리트 및 슬래그 콘크리트의 초음파 측정은 3개의 시편에 대해 측정되었으며, 부분 파괴를 제외한 평균값을 [그림 5]에 나타내었다. [그림 5]에서 알 수 있듯이 압축부에서는 하중의 증가에 따라 약간 증가하는데, 최대하중의 40~50% 수준에서 최대값을 가지고 있다. 기존의 연구에 의하면 압축 영역 구간 중 최대하중의 50% 정도에서는 투수성이 90% 수준으로 감소하며, 이후 급작스런 증가가 발생하는데, 이는 초기 하중 재하시 물질 이동을 위한 유효공극률의 감소에 따라 투수성이 감소하기 때문이다. 이후 하중증가로 인해 미세균열이 증가하고 이는 급진적인 투수성의 증가를 야기한다[13]. 공극을 통한 물질 이동 관점에서 투수성의 증가 및 감소는 초음파 속도의 감소 및 증가로 고려할 수 있다. [그림 5]에서 알 수 있듯이 압축영역에서는 초음파 속도가 약간 증가한 것을 확인할 수 있었다. 다만 콘크리트의 취성파괴로 인하여 최종 파괴하중시의 초음파 속도는 측정하지 못하였다.

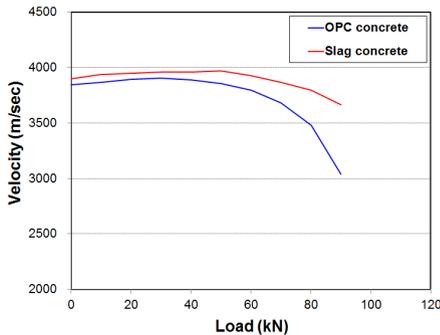


그림 5. Ultrasonic velocity in concrete under compressive load

초음파 속도 측정용 시편의 면적(75×50mm)을 고려하면 압축강도는 26MPa 정도로 평가되며 이는 [그림 4]의 결과와 거의 비슷하다. 또한 기존의 연구[5][23]에서는 초음파 속도와 콘크리트 강도 및 건전성 평가에 대한 제안값을 [표 5]와 같이 제안하였다. OPC 및 Slag 콘크리트의 속도범위인 3,846~3,897m/sec는 보통수준

으로 추정강도도 실험값과 비슷한 결과를 나타내었다.

표 5. Ultrasonic velocity and the related concrete soundness and strength[23]

Ultrasonic velocity(km/sec)	Concrete quality	Estimated strength(MPa)
Over 4.6	Excellent	Over 25
4.1~4.6	Good	20~25
3.7~4.1	Medium	18~20
2.5~3.7	Bad	10~18
Under 2.5	Poor	Under 10

[그림 6]에서는 인장영역에 대한 초음파 속도 변화를 나타내고 있다. 예상과 달리 급격한 감소는 발생하지 않았으나 매우 불규칙한 초음파 속도가 평가되었다. 이는 내부에서 발생한 미세균열로 인해 공극연결도가 크게 변동되는 것으로 평가된다. 압축하중 재하시와 마찬가지로 최종 인장파괴시의 초음파 속도는 측정하지 못하였다.

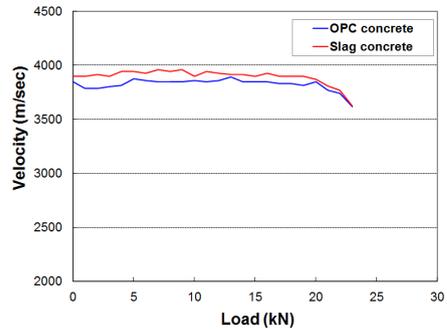


그림 6. Ultrasonic velocity in concrete under tensile load

3. 초기재령 거동을 고려한 초음파 모델링과 실험값과의 비교

3.1 DUCOM 및 MIP를 이용한 공극률 평가

전술한대로 본 절에서는 DUCOM을 이용하여 배합 및 양생상태를 고려하고 이에 따라 공극률을 도출하였다. [그림 7]에서는 재령에 따라 변화하는 공극률을 나타내었다. 해석조건은 [표 1]에 따른 배합조건을 입력하였으며, 56일 양생기간을 동일하게 고려하여 해석을 수

행하였다. 재령 56일에서 OPC 콘크리트와 Slag 콘크리트의 공극률은 0.4339 및 0.4191로 각각 평가되었는데, 이 값은 [식 10]에 사용된다.

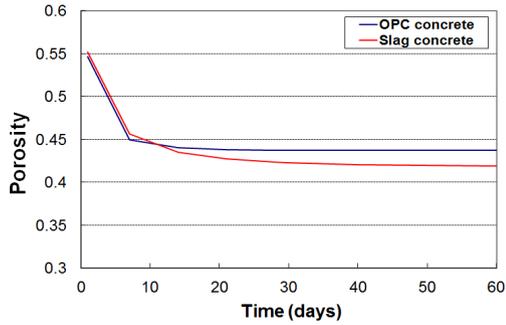
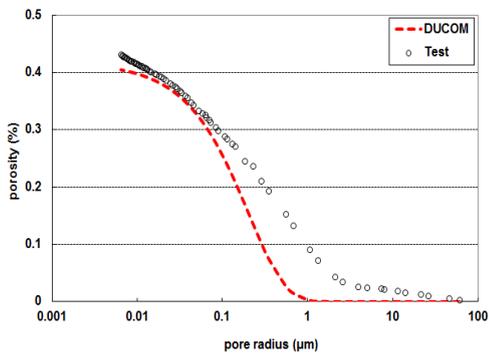


그림 7. Porosity variation with time

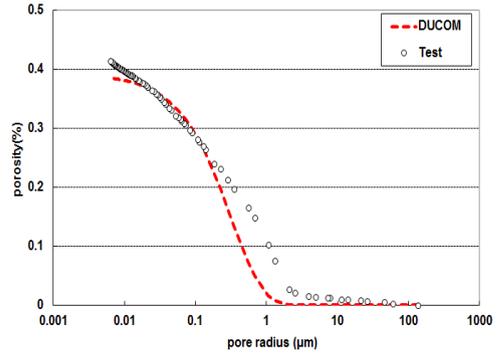
또한 제작된 시편의 공극률을 실험적으로 구하기 위해 MIP(Mercury Intrusion Porosimetry)을 수행하였다. 실험조건은 [표 6]에 나타내었으며, 해석결과와의 비교는 [그림 8]에 나타내었다. 해석기법인 DUCOM은 비교적 배합특성에 따른 공극률을 잘 평가하고 있음을 알 수 있다.

표 6. Conditions for MIP test

Evacuation Pressure	Mercury Filling Pressure	Contact Angle	Hg. Surface Tension
50Hg	1.33psi	130degree	485dynes/cm



(a) Porosity of OPC concrete

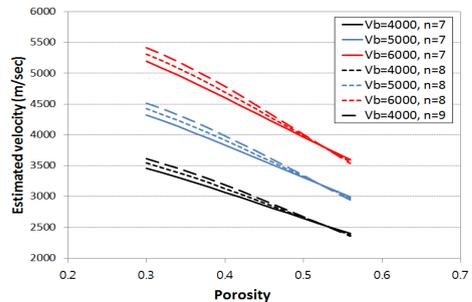


(b) Porosity of slag concrete

그림 8. Comparison of porosity with test and DUCOM

### 3.2 제안된 모델의 초음파 속도 시뮬레이션

본 절에서는 [식 10]을 이용하여 다양한 조건의 초음파 속도를 나타내었다. [그림 9(a)]에서는  $V_b$ 와  $n$ 의 변화에 따른 초음파 속도의 모사를 나타내고 있으며, [그림 9(b)]에서는 실험값과의 비교를 나타내고 있다. [그림 9(b)]의 경우  $V_b$ 는 5,200(m/sec)를,  $n$ 은 8.2를 가정하였다. 기본속도인  $V_b$ 는 일반적인 강재에 대한 초음파 속도인 7,200m/sec에 비하여 낮은 속도이며, 가력주파수, 온도, 습도에 따라 변화하게 된다. 다른 주파수와 환경조건에서 본 기법을 적용할 때는  $V_b$ 를 조정하는 것이 합리적이다.



(a) Velocity variations with various  $V_b$  and  $n$

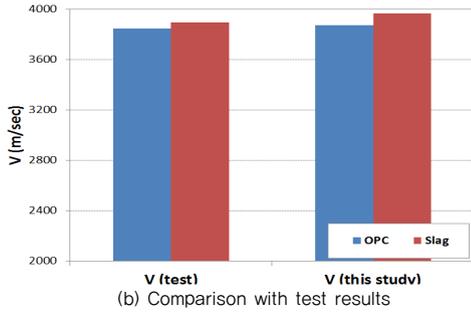


그림 9. Simulation and estimation of velocity in concrete

3.3 제안된 모델과 시험값의 초음파속도 비교

건전부 초음파 속도식인 [식 10]과 압축/인장응력을 고려한 [식 11],[식 12]를 이용하여 초음파 속도 모델링의 결과값을 실험값과 비교하였다. [표 7]은 해석 변수들과 실험상수를 나타낸다.

표 7. Parameters for ultrasonic velocity modeling

Type	$\phi$	$t$	$L_{act}$	$V_b$	$n$
OPC	0.4339	19.50 $\mu$ s	75m m	5,200	8.2
Slag	0.4191	19.25 $\mu$ s			
Parameter		$a$		$b$	
Compressive region	$V_f = V_{us} [1 + a(f_c') + b(f_c'^2)]$				
	OPC	8.050E <sup>-3</sup>		-6.482E <sup>-4</sup>	
Slag	2.139E <sup>-3</sup>		-2.028E <sup>-4</sup>		
Tensile region	$V_f = V_{us} / [1 + a(f_t')^b]$				
	OPC	4.667E <sup>-5</sup>		6.590	
Slag	1.224E <sup>-4</sup>		6.042		

압축영역에서의 해석결과를 [그림 10]에, 인장영역의 해석결과를 [그림 11]에 나타내었으며, 전 구간에서의 비교를 [그림 12]에 나타내었다.

[그림 10-그림 12]에서 알 수 있듯이 제안된 모델은 비교적 하중에 증가 및 감소에 따른 초음파속도 변화를 잘 나타낸다.

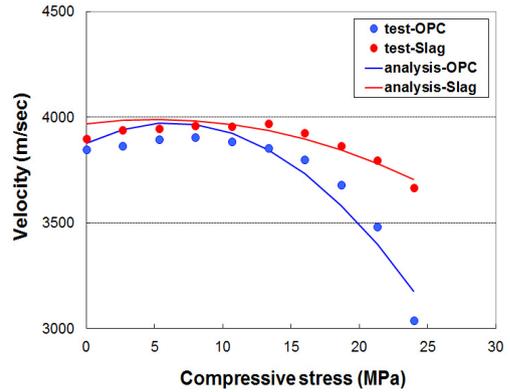


그림 10. Comparison of UV velocity with test and proposed model (compressive region)

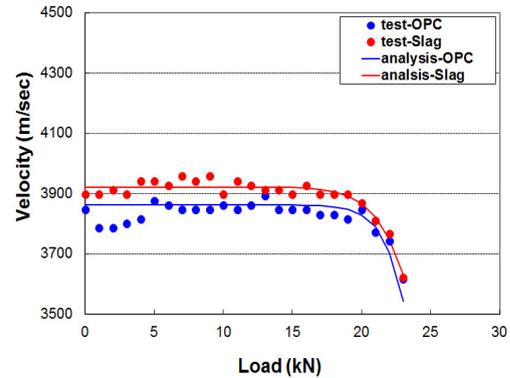


그림 11. Comparison of UV velocity with test and proposed model (tensile region)

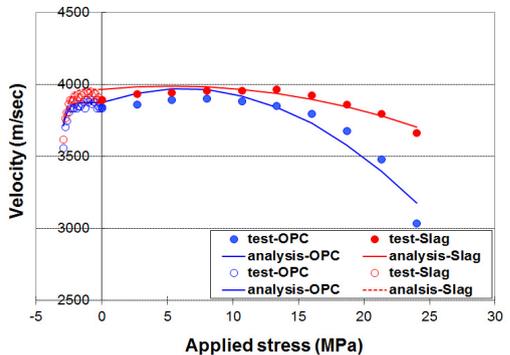


그림 12. Comparison of UV velocity with test and proposed model (entire region)

3.4 제안된 모델의 검증

본 절에서는 초음파 속도 모델링을 통한 해석결과와 다른 OPC 및 Slag 콘크리트를 제조하여 결과를 비교하였다. 설계목표강도는 30MPa으로 하였으며, 배합표는 [표 8]에, 재령에 따른 압축강도결과는 [그림 13]에 나타내었다.

표 8. Mix proportions for verification (OPC and Slag concrete)

Case	slump (cm)	S/a (%)	W/B (%)	Unit weight: kg/m <sup>3</sup>				
				W	Binder		S	G
					C	Slag		
OPC	12	44	45	175	387	-	751	992.8
GGBFS					271	116	747	988.7

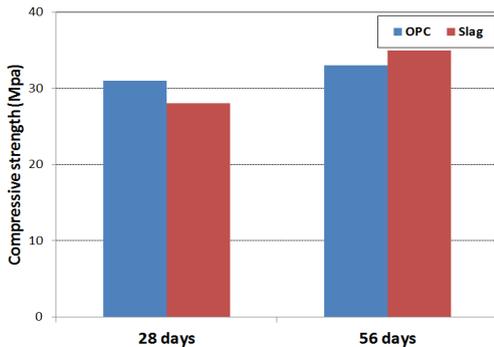
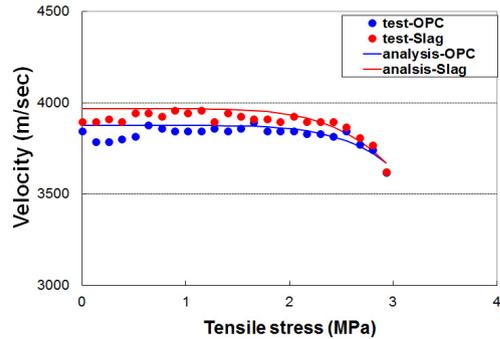
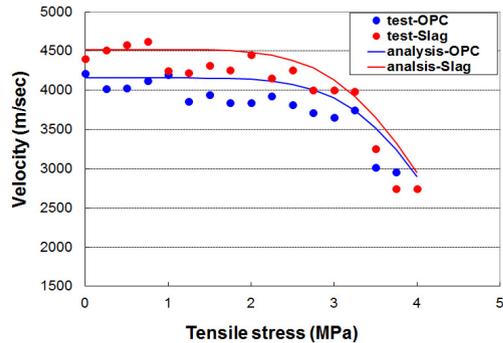


그림 13. Compressive strength for verification

Slag를 혼입한 배합에서는 56일 경과 35.0MPa이 평가되었는데, 이는 OPC 콘크리트에 비해 28일 재령 압축강도가 낮음에도 불구하고 잠재수경성을 통한 장기 강도가 발현되었기 때문이다[19][22]. 초음파 시험을 위한 시편은 모델링 도출과 동일한 시편으로 압축영역에서는 75×75×50mm의 각주형 몰드를, 인장영역에서는 100×50mm의 실린더형 디스크 몰드를 사용하여 쪼갬 인장시험을 수행하였다. [그림 14]에서는 OPC 및 Slag 콘크리트의 압축 및 인장영역에서의 초음파 속도를 해석값과 같이 나타내었다.



(a) UV in compressive region



(b) UV in tensile region

그림 14. Verifications for the proposed model with compressive and tensile region

초기조건에서 DUCOM을 이용한 공극률은 OPC 콘크리트에서 0.3875, Slag 콘크리트에서 0.3211로 도출되었으며, 측정된 초음파 속도는 각각 4218.3m/sec (17.78 μs), 4402.2m/sec (17.03μs)로 기록되었다. [표 5]의 속도 기준과 비교하면 강도증가에 따라 적절한 초음파 속도를 나타내고 있다. 비교결과 제안된 초음파 모델은 적절하게 하중 변화에 따른 초음파 속도를 나타내었지만 파괴응력에 도달할수록 해석 및 실험값의 차이가 발생하였다. 또한 인장영역에서도 실험 시 초음파속도가 증가하였는데, 이는 미세균열이 발생하더라도 골재치합과 같이 매질이 연속되어 있는 경우라고 판단된다.

제안된 모델은 적절한 기법으로 공극률만 도출할 수 있으면 간단하게 콘크리트 모재의 초음파 속도를 비교적 정확하게 예측하고 있으며, 인장 및 압축영역에서 파괴하중의 80%수준까지 초음파속도 변화를 잘 예측

하고 있다. 또한 압축영역에서는 OPC 및 Slag의 구분 없이 실험상수  $a, b$ 를 사용해도 되지만, 만일 수화물, 잔골재, 굵은 골재로 구분하여 다층구조를 고려하면 좀 더 합리적인 모델링이 가능할 것이다. 본 실험에서 초기에 적용한 속도( $V_b$ )는 온도, 습도, 가력 주파수에 따라 변화한다. 일정한 조건에 대해서 적용한 것이므로 현장실험 등에 적용하기는 다른 보정기법이 필요하다.

## V. 결론

공극구조 및 하중조건에 따른 콘크리트의 초음파 속도 모델링을 통해 본 연구 내에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 콘크리트내의 초음파전달영역과 공극률을 각각 독립적으로 고려하여 초음파 속도 모델링을 수행하였다. 물-시멘트비 0.6인 OPC 콘크리트와 Slag 콘크리트를 제조하여 건전부에 대한 초음파 속도 모델링에 대한 검증을 수행하였는데, 제안된 모델은 합리적으로 공극률 변화에 따른 초음파 속도 변화를 예측하고 있다.
- 2) 인장 및 압축영역에서 콘크리트를 통과하는 초음파 속도를 하중비의 함수로 고려하여 모델링하였다. 압축영역에서는 파괴하중의 50%까지는 미소하지만 초음파 속도의 증가가 나타났으며 2차함수를 이용하여 모델링을 수행하였다. 또한 최대값을 건전부의 초음파속도를 가정하여 인장영역에서의 초음파 속도를 모델링 하였는데, 초기 재하시부터 초음파 속도가 불규칙하게 평가되었다. 이는 인장응력의 증가에 따라 미세균열이 진전하여 초음파의 도달시간이 변동되는 것으로 평가되었다.
- 3) 본 연구에서는 시편의 길이를 최대 100mm를 사용하여 측정 시 초음파 전달속도의 큰 차이를 평가하지 못하였다. 또한 본 연구의 가정과 달리, 콘크리트에서 초음파 속도를 잔골재, 굵은골재, 공기량, 시멘트 수화물로 분류하여 각각의 속도를 가정하면 좀 더 합리적인 모델이 될 것이다.

## 참고 문헌

- [1] S. J. Kwon and S. S. Park, "Non Destructive Technique for Steel Corrosion Detection Using Heat Induction and IR Thermography," Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.16, No.2, pp.40-48, 2012.
- [2] J. H. Bungey, *The Testing of Concrete in Structures*, London: Blackie; pp.28-63, 1944.
- [3] W. J. McCarter, T. M. Chrisp, G. Starrs, and J. Blewett, "Characterization and Monitoring of Cement-based Systems using Intrinsic Electrical Property Measurements," Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.197-206, 2003.
- [4] S. J. Kwon, Maria Q. Feng, and S. S. Park, "Characterization of Electromagnetic Properties for Durability Performance and Saturation in Hardened Cement Mortar," NDT & International, Vol.43, No.2, pp.86-95, 2010.
- [5] 한자중, 초음파속도법에 의한 터너라이닝 콘크리트의 품질평가 개선방안 연구, 연세대학교 대학원, 석사학위논문, pp.28-56, 2002.
- [6] 김동수, 이광명, "건축토목구조물의 비파괴검사방법-탄성파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사, 한국콘크리트학회 논문집, 제10권, 제2호, pp.40-49, 1998.
- [7] R. Jones, *A Review of the Non-destructive Testing of Concrete*, Institution of Civil Engineers and the British National Committee for Non-destructive Testing, pp.1-7, 1970.
- [8] V. R. Sturup, R. J. Vechio, and H. Caratin, "Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength," ACI Special Publication, Vol.82, 1984.
- [9] H. W. Song, S. J. Kwon, K. J. Byun, and C. K. Park, "Predicting Carbonation in Early-aged Cracked Concrete," Cement and Concrete Research, Vol.36, No.5, pp.979-989, 2006.

- [10] H. W. Song and S. J. Kwon, "Permeability Characteristics of Carbonated Concrete considering Capillary Pore Structure," *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.6, pp.909-915, 2007.
- [11] S. S. Park, S. J. Kwon, S. H. Jung, and S. W. Lee, "Modeling of Water Permeability in Early aged Concrete with Cracks based on Micro Pore Structure," *Construction and Building Materials*, Vol.27, No.1, pp.597-604, 2012.
- [12] 권성준, M. Q. Feng, "적외선 화상기법을 이용한 시멘트 모르타르 특성의 실험적 평가", 대한토목학회 논문집, 제30권, 제1A호, pp.53-59, 2010.
- [13] N. Banthia, A. Biparva, and S. Mindes, "Permeability of Concrete under Stress," *Cement & Concrete Research*, Vol.31, pp.213-220, 2005
- [14] M. Hoseini, V. Bindiganavile, and N. Banthia, "The Effect of Mechanical Stress on Permeability," *Cement & Concrete Composites*, Vol.31, pp.213-220, 2009.
- [15] 유경석, 김익범, 김지상, "굵은 골재 최대치수의 변화에 따른 초음파 속도 특성", 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, pp.691-692, 2012.
- [16] K. Maekawa, T. Ishida, and T. Kishi, "Multi-scale Modeling of Concrete Performance," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.2, pp.91-126, 2003.
- [17] T. Ishida, K. Maekawa, and T. Kishi, "Enhanced Modeling of Moisture Equilibrium and Transport in Cementitious Materials under Arbitrary Temperature and Relative Humidity History," *Cement and Concrete Research*, Vol.37, pp.565-578, 2007.
- [18] T. Ishida and K. Maekawa, "Modeling of Durability Performance of Cementitious Materials and Structures based on Thermo-hygro Physics, Rilem Proceeding PRO 29," *Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures*, pp.39-49, 2003.
- [19] S. J. Kwon and H. W. Song, "Analysis of Carbonation Behavior in Concrete using Neural Network Algorithm and Carbonation Modeling," *Cement and Concrete Research*, Vol.40, No.1, pp.119-127, 2010.
- [20] W. M. K. Roddis, *Concrete Bridge Deck Assessment using Thermography and Radar, Master Thesis*, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, 1987.
- [21] U. B. Halabe, A. Sotoodehnia, K. R. Maser, and E. A. Kausel, "Modeling the Electro-magnetic Properties of Concrete," *ACI Mater J*, Vol.90, pp.552-563, 1993.
- [22] 이학수, 권성준, "공극률을 이용한 고성능 콘크리트의 압축강도 특성 모델링", 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제16권, 제6호, pp.124-133, 2012.
- [23] BS 1881 : Part 203, Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, British Standards Institution, pp.56-58, 1986.
- [24] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, London: Pitman, pp.12-62, 1963.

저 자 소개

김 윤 용(Yun-Yong Kim)

정회원



- 1998년 2월 : KAIST 토목공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 교수

<관심분야> : 염해, 탄산화, 구조물 유지관리, 섬유보강 콘크리트

오 광 진(Kwang-Jin Oh)

정회원



- 1997년 8월 : 충남대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 1997년 11월 ~ 현재 : 한국시설 안 전공단 건설평가실 부장

<관심분야> : 시설물 점검진단 기술, 콘크리트 보수보강, 점검진단시스템

박 기 태(Ki-Tae Park)

정회원



- 2006년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조융합연구소 연구위원

<관심분야> : 모니터링, 성능평가, 건설-IT 융합

권 성 준(Seung-Jun Kwon)

정회원



- 2006년 9월 : 연세대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 한남대학교 건설시스템 공학과 교수

<관심분야> : 염해, 탄산화, 마이크로 모델링, 투수