투수 콘크리트의 투수성과 확률 분포 함수의 상관관계 분석

Analysis of Correlation between Percolation of Porous Concrete and Probability Distribution Functions

정상엽* · 조영국** · 한동석***

Chung, Sang Yeop · Jo, Young Kug · Han, Tong Seok

Abstract

Concrete is a multi-phase material of which material properties are strongly affected by the phase distribution. Spatial distribution of pore in concrete affects mechanical behavior and percolation significantly. Therefore, a proper method to describe the pore distribution of a material is needed. CT(computed tomography) image is used to examine and to quantify the pore distribution of porous concrete specimens. 3D concrete digital specimens base on the real concrete with different pore ratio are created by subsequent stacking of 2D cross-sectional images from CT. Probability distribution functions such as two-point correlation, lineal-path and two-point cluster functions are used for pore distribution characterization. Correlation between hydraulic conductivity from experiment and probability distribution functions of porous concrete is examined using CT image processing. It is confirmed that probability distribution functions based on CT images are effective in characterizing pore distributions including pore clustering and percolation.

Key words : porous concrete, CT image processing, pore, percolation, probability distribution functions

요 지

다상(multi-phase) 재료인 콘크리트는, 각 구성 성분의 공간적 분포에 의해 재료의 특성이 큰 영향을 받는다. 공극(pore)은 콘크리트의 강도 및 투수성 등에 큰 영향을 주는 요인으로서, 콘크리트 재료의 물성 파악을 위해서 콘크리트에 존재하는 공극의 공간적 분포를 살펴보는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 투수 콘크리트 시편에 존재하는 공극 분포를 분석하기 위해서 CT(computed tomography)를 사용하여 얻은 단면 이미지를 적층하여 3차원 디지털 시편을 생성하고, 공극의 분포를 관찰하였다. 공극의 공간적 분포 상태를 분석하기 위해서 확률 분포 함수(two-point correlation function, lineal-path function, two-point cluster function)을 사용하여 투수 콘크리트의 공극 분포를 확률적으로 묘사하였다. 서로 다른 공극비(pore ratio)와 공극 분포를 가진 투수 콘크리트 시편들에 대해 CT 이미지를 활용해서 확률적인 공극 분포를 묘사하고, 실제 투수 실험 결과와의 비교를 통해서 투수 콘크리트의 투수성(percolation)과 확률 분포 함수의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, CT 이미지 분석과 확률 분포 함수를 이용하여 투수 콘크리트의 투수성 및 공극의 연속적인 분포를 효과적으로 파악할 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 투수 콘크리트, CT 이미지 분석, 공극, 투수성, 확률 분포 함수

1. 서 론

콘크리트는 2가지 이상의 재료로 구성된 대표적인 다상(multi-phase) 재료이다. 일반적으로 다상 재료가 각 상의 공간적 분포에 의하여 재료 특성에 영향을 받는 것처럼, 구조 재료로 널리 쓰이는 임의 불균질성(random heterogeneous) 재료인 콘크리트는 시멘트, 골재, 공극 등의 요인들에 의해 재료의 특성이 큰 영향을 받는다. 공극(pore)은 콘크리트의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 요인들 중, 강도 및 투수성

등에 큰 영향을 주는 주요 원인이 된다(Dorey 등, 2001; 정상엽 등, 2011b). 따라서 콘크리트 재료의 특성을 파악하기 위해서는 콘크리트에 분포하는 공극을 보다 정확하게 파악하는 연구가 필수적이다. 콘크리트는 사용 목적에 의해 여러 가지 종류로 분류된다. 그 가운데 물을 통과시키거나 공극에 저류시키기 위해 사용되는 다공성 콘크리트인 투수 콘크리트는, 시멘트 페이스트로 둘러싸인 골재 입자들 사이에 연속되는 수많은 공극이 조성되기 때문에 다른 콘크리트에 비해 시편 내부에 상대적으로 많은 공극을 포함하고 있다(한국콘크

*정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail : sychung@yonsei.ac.kr)

**정운대학교 건축공학과 부교수

***정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 조교수(교신저자)

표 1. 투수 콘크리트 배합표

시편 번호	물시멘트비(%)	공극충전율 (%)	단위용적중량(kg/)			고성능 AE혼화제 (kg)
			시멘트	수량	순환 굵은골재	
시편 1	35	50	282	99	1,495	-
시편 2	30	40	244	73	1,495	-
시편 3	25	55	365	91	1,495	3.65

리트학회, 2005). 따라서 투수 콘크리트의 특성 파악을 위해서는 시편 내부에 분포하는 공극을 효과적으로 묘사할 수 있는 방법이 필요하다.

투수 콘크리트는 대표적인 다공성 재료이기 때문에 육안으로 관찰이 가능한 재료 표면의 공극 이외에도 보이지 않는 내부에 많은 공극이 분포한다. 특히, 재료에 손상을 가하지 않고 내부에 분포하는 공극을 육안으로 직접 관찰하기는 어렵기 때문에 투수 콘크리트 내부 공극의 형태 및 분포 상태를 파악하는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 투수 콘크리트 내부에 분포하는 공극의 공간적 분포를 확인 및 분석하기 위하여 비파괴 방법인 CT(computed tomography)를 사용하여 투수 콘크리트 구조를 살펴보았다. CT는 X-ray를 사용하는 단층 촬영 기법으로서, X-ray를 사용하여 3차원 대상의 단면을 생성한다. CT를 사용하면 관찰 대상에 외부 손상을 가하지 않고 픽셀(pixel) 크기를 가진 단면 이미지를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 CT로부터 촬영해서 이진화(binary) 처리된 투수 콘크리트 시편의 단면 이미지를 활용하여 투수 콘크리트의 내부 공극의 공간적 분포 상태를 파악하였다. 투수 콘크리트의 CT 단면 이미지들을 적층하여 3차원 디지털 시편으로 묘사하고, 확률 분포 함수를 활용하여 시편 내부의 공극 분포를 확률적으로 묘사하였다.

투수 콘크리트 내부의 공극 분포를 분석하기 위하여, 확률 분포 함수 two-point correlation function(Gokhale 등, 2005), lineal-path function(Coker 등, 1995; Torquato, 2002) 그리고 two-point cluster function(Torquato 등, 1988; Lee 등, 1989)을 사용하여 공극의 분포를 확률적으로 묘사하였다. 선행 연구(Torquato, 2002; 정상엽 등, 2011b)에 따르면 저차원(low-order) 확률 분포 함수인 two-point correlation function과 lineal-path function을 사용하면 최소한의 통계 데이터를 이용하여 재료 내부에 존재하는 공극의 군집(cluster)에 대한 확률적인 정보를 파악할 수 있다. Two-point cluster function은 재료 내부에 존재하는 군집의 분포 및 연속성 등을 파악할 수 있는 함수로서, two-point cluster function을 사용하면 보다 정확한 상 군집 분포의 연속성을 알 수 있다(Torquato, 2002).

본 연구에서는 서로 다른 공극비(pore ratio)를 가진 투수 콘크리트 시편들에 대해 CT 이미지와 확률 분포 함수를 사용하여 3차원 콘크리트 시편 이미지를 분석하였다. 결과를 바탕으로 투수 콘크리트 시편 내부에 존재하는 공극의 분포 상태 및 연결성 등을 확인하고, 공극비에 따른 확률 분포 함수 결과와 실험으로 얻어진 수리 전도도(hydraulic conductivity)의 상관관계를 파악하였다. 이를 통해, CT 이미지 처리 방법 및 확률 분포 함수의 투수 콘크리트의 물리적 특성 파악을 위한 도구로서의 활용성을 살펴보았다.

2. 투수 콘크리트 시편 및 이미지 처리 과정

2.1 투수 콘크리트 시편

투수 콘크리트는 재료 내부에 분포하는 공극을 통해서 물을 통과시키거나 공극에 저류시키기 위해 사용되는 다공성 콘크리트이다(한국콘크리트학회, 2005). 투수 콘크리트는 친환경 건설자재로서 최근에는 보·차도용 도로 및 자전거 도로 등의 60~70%가 투수 콘크리트를 사용하여 제작되고 있다(고은정 등, 2009). 또한 포장 재료인 보도블록과 아스팔트 콘크리트, 시멘트 콘크리트 등 불투수성 재료가 갖고 있는 지하수의 고갈, 지중생태계의 파괴, 포장체 하층부의 사막화 현상 등의 단점을 보완하고 천연 잔골재원의 보호 등의 목적으로 사용되고 있다(채창우, 2002). 본 연구에서는 투수 콘크리트의 공극비와 투수성의 상관관계를 살펴보기 위한 투수 실험을 위해, 서로 다른 공극비를 가진 투수 콘크리트 공시체를 제작하였다. 본 연구에 사용된 투수 콘크리트 시편들의 배합은 표 1과 같다.

표 1에 나타난 투수 콘크리트의 배합은 순환 굵은 골재만의 단위용적중량 실험을 실시하여 공극비를 측정한 후, 투수 콘크리트 1 m³ 배합설계에서 순환 굵은 골재량을 결정하고 목표하는 공극충전율에 맞추어 계산된 부피를 시멘트와 물로 채우는 방법으로 투수 콘크리트를 배합함으로써 계산된다. 표 1에 나타난바와 같이 일반 포틀랜드 시멘트(OPC)와 20 mm 이하의 재생 순환 굵은 골재를 사용하여 제작된 투수 콘크리트의 물리적 특성은 표 2에 나타나 있다. 각 배합에 따른

표 2. 투수 콘크리트의 물리적 성질

시편 번호	압축 강도 (MPa)	수리 전도도 (cm/sec)
시편 1	13.0	3.39
시편 2	13.2	3.29
시편 3	14.8	2.80

그림 1. 투수 콘크리트 시편

투수 콘크리트 시편은 그림 1에 나타나있다. 표 2를 살펴보면 표 1의 시편 배합에 따라 압축 강도가 증가할 때, 수리 전도도는 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 본 연구에서는 투수 콘크리트에 존재하는 공극의 공간적 분포가 압축 강도와 수리 전도도 등의 물리적 성질과 연관이 있을 것이라고 판단하여, 투수 콘크리트 내부의 공극 분포를 파악하여 투수 성과의 상관관계를 살펴보았다. 본 연구에서는 그림 1의 투수 콘크리트를 사용해서 CT 이미지를 획득하고 확률 분포 함수를 활용한 공극의 공간적 분포를 분석하여 확률 분포 함수와 투수 콘크리트의 투수성의 상관관계를 분석하였다.

2.2 CT 이미지 처리 과정

투수 콘크리트 시편의 공극을 관찰하는 과정에서, 시편 표면에 분포하는 공극을 제외한 내부의 구조는 비파괴 방법을 통해서 육안으로 파악할 수 없다. 본 연구에서는 투수 콘크리트 내부에 분포하는 공극을 살펴보기 위하여 CT로부터 얻어진 투수 콘크리트의 단면 이미지를 활용하였다. 그림 2(a)는 그림 1(a)의 실제 투수 콘크리트 시편이다. 그림 2(a)의 시편을 CT를 사용하여 촬영하면, 그림 2(b)에 나타난 것과 같은 투수 콘크리트의 단면 이미지를 8비트 이미지로 픽셀로 표현하여 얻을 수 있다. 각 픽셀(pixel)이 256단계의 값(0-255)에 가까울수록 검은색으로 표현)으로 표현되는 8비트 이미지를 일정한 한계점(threshold)을 정하고 한계점 이상의 값을 갖는 픽셀은 모두 콘크리트로 가정하여 이미지 처리를 하면 그림 2(c)와 같이 이진화(binary) 처리된 이미지를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 선행 연구(정상엽 등, 2011)을 참고하여 그림 2(c)의 이미지를 생성하는 과정에서 한계점을 35로 정하였다. 그림 2(c)에서 밝게 표현된 부분은 투수 콘크리트

단면의 콘크리트 부분을 의미한다. 그림 2(c)의 선으로 표시된 원형 내부를 살펴보면 CT를 활용한 비파괴 검사를 사용하였을 때, 육안으로 보이지 않는 시편 내부에 존재하는 공극(밝게 표현된 고체 사이에 존재하는 어두운 부분)까지 묘사하고 있는 것을 확인할 수 있다. 3차원 투수 콘크리트 시편 이미지를 묘사하기 위하여 그림 2(c)와 같이 이진화 처리된 여러 장의 단면 이미지를 연속적으로 적층하여 그림 2(d)와 같이 표현하였다. 그림 2(d)는 그림 2(c)와 같이 CT를 활용하여 생성된 433장의 단면 이미지들을 z축 방향으로 적층하여 3차원으로 표현한 것이다. 본 연구에서는 그림 2(d)의 투수 콘크리트 이미지를 활용하여 확률 분포 함수의 결과를 살펴보고, 확률 분포 함수와 수리 전도도(hydraulic conductivity)의 상관관계를 파악하여, 공극 분포가 투수성(percolation)에 미치는 영향을 살펴보았다. 투수 콘크리트 이미지의 공극 분포에 대한 자세한 분석은 본 논문의 4절에 나타나 있다. 그림 2를 통해 확인할 수 있듯이 CT를 활용한 이미지 처리를 사용하면, 육안으로 관찰하기 어려운 투수 콘크리트의 시편 내부에 존재하는 공극을 비파괴 검사로 확인할 수 있다.

3. 확률 분포 함수

다상 재료의 상의 공간적 분포는 재료의 특성에 큰 영향을 미친다(Torquato, 2002; Han 등, 2005; Chung 등, 2010; 정상엽 등, 2011b). 따라서 상 분포를 파악하는 것은 재료의 이해를 위해 필수적이며, 이를 위해 상의 공간적 분포를 묘사할 수 있는 적절한 방법이 필요하다. 다상 재료의 상 분포 특성을 파악하기 위해서, 상대적으로 적은 양의 데이터를 활용하여 재료의 공간적 상 분포를 표현하는 낮은 차수(low-order)의 확률 분포 함수(probability distribution function)를 이용할 수 있다. 본 연구에서는 낮은 차수 확률 분포 함수 가운데 two-point correlation function(Gokhale 등, 2005; Chung 등, 2010), lineal-path function(Coker 등, 1995; Torquato, 2002), two-point cluster function(Torquato 등, 1988; Lee 등, 1989)을 사용하여 투수 콘크리트 시편 내부에 존재하는 공극의 공간적 분포를 확인하였다.

3.1 Two-point correlation function (P_2)

Two-point correlation function, P_{ij} 는 임의의 두 점이 i 와 j 상에 위치할 확률을 의미한다(Torquato, 2002; Gokhale 등, 2005). 본 연구에서 그림 3(a)에서 나타난 바와 같이 i (또는 j)는 공극(v) 또는 콘크리트(s)를 의미한다. Two-point correlation function은 두 점이 위치한 상의 정보만 고려하며, 두 점 사이의 어떠한 정보도 포함하지 않는다. 일반적인 two-point correlation function의 극값은 다음과 같다.

$$\lim_{r \rightarrow 0} P_{ii}(r, \theta, \phi) = f_i, \quad \lim_{r \rightarrow 0} P_{ij}(r, \theta, \phi) = 0 \quad (1)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} P_{ii}(r, \theta, \phi) = [f_i]^2, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} P_{ij}(r, \theta, \phi) = [f_i][f_j] \quad (2)$$

여기서 f_i 는 i 상의 부피비(volume fraction)를 의미한다. θ 는

그림 2. 투수 콘크리트 시편(a), 단면의 형상(b), 이진화 처리된 단면 이미지(c, 주. 밝은 색 부분 : 콘크리트, 원 내부의 어두운 부분 : 시편 내부 공극), 단면 이미지를 적층하여 생성한 3차원 투수 콘크리트 이미지(d)

그림 3. 확률 분포 함수들의 개념도(어두운 부분 : 콘크리트, 밝은 부분 : 공극)

test line과 z 축과의 각도이고, ϕ 는 test line의 xy 평면으로의 정사영과 x 축 사이의 각도를 의미한다. 두 점사이의 거리 r 이 0에 가까워 질 때, 식 (1)에서 나타난 바와 같이 두 점이 동일한 상에 위치할 확률은 상의 부피비로 수렴하고, 서로 다른 상에 위치할 확률은 0으로 수렴한다. 반대로 식 (2)에 나타난 바와 같이, r 이 증가할수록 함수 값은 두 점이 위치한 상들의 부피비의 곱과 같아진다. Corson(1974)에 의해 제안된 two-point correlation function 이후로, 이와 관련하여 다양한 연구가 수행되어 왔다(Lin 등, 2000; Tewari 등, 2004; Gokhale 등, 2005). 본 연구에서는 Gokhale 등(2005)이 제안한 two-point correlation function을 사용하였다. Gokhale 등(2005)은 상 사이의 통계 정보를 이용하는 간단한 형태의 two-point correlation function을 제안하였다.

$$P_{ij}(r, \theta, \phi) = f_i f_j [1 - \exp(-[P_L(\theta, \phi)]_{ij} / (2f_i f_j) r)] \quad (i \neq j) \quad (3)$$

$$P_{ii}(r, \theta, \phi) + P_{ij}(r, \theta, \phi) = f_i \quad (4)$$

여기서 $[P_L(\theta, \phi)]_{ij}$ 는 단위 test line 길이 당, test line과 $i-j$ 교차면이 만나는 교차점 개수이다. 2상 재료의 경우, 두 점이 i 상에 위치할 확률 P_{ii} 은 식 (3)과 (4)를 통하여 계산된다. 본 연구에서는 확률 분포 함수를 투수 콘크리트 내부의 공극 부분을 대상으로 제한하고 있기 때문에, 표현상의 편의를 위해 two-point correlation function, $P_{vv}(r, \theta, \phi)$ 를 P_2 로 표기한다.

3.2 Lineal-path function (L_2)

Lineal-path function, $L_i(r, \theta, \phi)$ 는 길이가 r 인 임의의 선분 전체가 i 상에만 위치할 확률을 의미한다(Coker 등, 1995; Torquato, 2002). Lineal-path function을 사용하면 특정한 방향으로의 연속적인 상 분포의 연결성을 확인할 수 있다. 그림 3(b)의 개념도를 살펴보면 $L_a(r)$ 과 $L_b(r)$ 의 경우에는 선분 전체가 각각 공극과 콘크리트의 군집에 위치하고 있기 때문에 lineal-path의 고려 대상이 되지만, $L_c(r)$ 의 경우에는 선분이 서로 다른 상에 걸쳐서 위치하고 있기 때문에 고려 대상이 되지 않는다. 일반적인 lineal-path function의 극값은 다음과 같다. 일반적인 lineal-path function의 극값은 다음과 같다.

$$\lim_{r \rightarrow 0} L_i(r, \theta, \phi) = f_i \quad (5)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} L_i(r, \theta, \phi) = 0 \quad (6)$$

본 연구에서는 Coker 등(1995)에 의하여 제안된 방법을 이용하여 lineal-path function을 계산하였다. Coker 등(1995)의 방법에 따르면, 임의의 점을 재료 내부에 위치시켜서 그 점을 기준으로 선분의 길이를 증가시키면서 선분이 지나가는 위치의 상 정보를 분석하고 이러한 과정을 반복하는 수치(numerical) 계산법을 사용하여 lineal-path function을 계산할 수 있다. 선분의 양 끝점이 위치한 상의 정보만을 이용하는 two-point correlation function과는 달리, lineal-path function은 선분이 위치한 곳의 정보를 모두 고려하기 때문에 상 분포의 연속성에 대한 파악이 가능하다. 본 연구에서는 lineal-path function의 공극 부분만 고려하기 때문에 표현의 편의상 $L_v(r, \theta, \phi)$ 를 L_2 로 표기한다.

3.3 Two-point cluster function (C_2)

Two-point cluster function, C_i 는 임의의 두 점이 모두 동일한 상의 동일한 군집에 위치할 확률을 의미한다(Torquato, 1988). Two-point cluster function을 사용하면 특정한 방향으로의 상 분포의 연결성을 확인할 수 있을 뿐 만 아니라, 상 군집의 연결성을 확인할 수 있다. 그림 3(c)를 살펴보면 Lineal-path function의 경우, $C_a(r)$ 와 $C_b(r)$ 모두 콘크리트 부분에 위치하고 있기 때문에 동일한 상에 대한 lineal-path의 고려 대상이 되지만, two-point cluster의 경우에는 $C_a(r)$ 와 $C_b(r)$ 는 다른 군집에 위치하고 있기 때문에 동일한 고려 대상으로 간주될 수 없다. 그림 3(c)에서 공극(밝은 부분)을 기준으로 살펴보면, $C_c(r)$ 의 경우 선분 전체가 공극 부에만 위치하고 있기 때문에 lineal-path function과 two-point cluster function의 적용 대상이 된다. $C_d(r)$ 의 경우, 선분 전체가 공극 부분에 위치하지 않기 때문에 lineal-path function의 고려 대상이 될 수는 없지만, 양 끝점이 모두 동일한 상과 군집에 위치하기 때문에 two-point cluster function의 고려 대상이 된다. 이와 같이 two-point correlation은 $C_d(r)$ 과 같이 두 점 사이에 다른 상이 존재하는 경우에도, 두 점이 위치한 군집의 정보를 통해 상 군집의 연속성을 확인할 수 있는 확률 분포 함수이다. 투수 콘크리트와 같이 유체 등이 흐를 수 있는 공극 채널(channel)이 확보되어야 하는 재료의 경우, two-point cluster function을 사용함으로써 공극 분포의 연속성을 파악할 수 있다. 일반적인 two-point cluster function의 극값은 L 와 마찬가지로 다음과 같다.

$$\lim_{r \rightarrow 0} C_i(r, \theta, \phi) = f_i \quad (7)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} C_i(r, \theta, \phi) = 0 \quad (8)$$

본 연구에서는 two-point cluster function을 계산하기 위하여, Lee 등(1989)에 의하여 제안된 방법을 사용하였다. Lee 등(1989)의 방법에 따르면, 임의의 두 점을 재료 내부에 위치시킨 후, 두 점이 동일한 상에 위치하는지 여부를 확인하고 두 점사이의 거리를 계산하는 과정을 반복하여 two-point cluster function을 계산할 수 있다. 선분의 양 끝점이 위치한 상의 정보만을 이용하는 two-point correlation function과, 동일한 상의 연속성에 대한 정보만을 제공하는 lineal-path function과는 달리, two-point cluster function은 상의 연속성 뿐만 아니라 상 군집의 연결 정도를 파악할 수 있기 때문에 보다 자세한 상 분포에 대한 정보를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 편의상 $C_i(r, \theta, \phi)$ 을 C_2 로 표기하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 투수 콘크리트 시편의 공극 분포 묘사

투수 콘크리트에 존재하는 공극의 공간적 분포 분석을 위해서 CT 단면 이미지를 적층하여 그림 4와 같이 3차원 투수 콘크리트 이미지를 복셀(voxel)로 표현하였다. 그림 4는 그림 2(c)의 이진화 된 투수콘크리트의 단면 CT 이미지를 z축 방향으로 적층하여 생성된 3차원 이미지이다. 그림 4의 각 그림에 사용된 단면 이미지는 200×200 픽셀로 구성되어 있으며, z축 방향으로 430장의 단면 이미지를 적층하여 200×200×430 (x×y×z 방향)의 복셀로 구성되어 있다. 본 연구에서는 그림 4에 나타난 3차원 투수 콘크리트 이미지를 그림 2(c)에 나타난 원을 기준으로 해서 공극 부분과 콘크리트 부분, 그리고 시편 외부의 공간으로 구분하고 색인(index)하여 공극의 공간적 분포를 확인하였다. 그림 5는 그림 4에 나타난 각각의 3차원 시편 이미지에 대해서 시편 내부의 공극 부분만 표현한 그림이다. 그림 5를 살펴보면 투수 콘크리트 표면에 분포하는 공극 이외에, 육안으로 관찰이 어려운 시편 내부의 공극 분포도 파악할 수 있다. 본 연구에서는 MATLAB(R2010a, Mathworks)의 이미지 처리 도구(image processing toolbox)를 사용해서 공극 데이터를 후처리(post-processing)하고 분석하여 투수 콘크리트 시편에 존재하는 공극 군집의 연속성을 확인하였다.

투수 콘크리트의 이미지 처리 방법을 통한 공극비 분석을 위해 그림 5의 결과를 활용할 수 있다. CT 이미지 처리를 사용해서 복셀을 기준으로 계산된 공극비는 시편 1의 경우 17.8%, 시편 2는 17.2%, 시편 3은 12.9%로 확인되었다. 이와 같이 계산된 공극비는 표1에 나타난 배합비를 바탕으로 계산된 공극비와 3% 내외의 오차를 보임으로서 상당히 유사한 것을 알 수 있다. 오차의 원인으로서는 배합 환경에 따른 오차 및 이미지 처리 과정에서 고려되는 투수 콘크리트 내부의 미세 공극 등에 의하여 오차가 발생할 수 있다. 공극비와 표 2에 나타난 투수 콘크리트의 강도 및 수리 전도도의 실험 결

과를 비교하면, 공극비가 클수록 압축 강도는 감소하고 투수성과 관계된 수리 전도도는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 투수 콘크리트 내부에 많은 공극이 존재할수록 공극 증가에 따른 재료의 강도는 감소하지만, 기체 또는 유체 등이 통과할 수 있는 공간이 확보되기 때문에 투수성과 관련된 물리적 특성은 증가하는 것을 알 수 있다. CT를 활용한 이미지 처리 과정에서, 본 연구에서 사용한 한계점은 선행 연구를 통해서 실제 실험의 공극을 효과적으로 묘사할 수 있음이 확인되었다(정상엽 등, 2011a). 하지만 3차원 이미지로 표현된 투수 콘크리트에서는 이미지 해상도의 한계 때문에 콘크리트에 존재하는 아주 작은 미세 공극 등을 파악하는 것에는 어려움이 있기 때문에, 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는, 고해상도의 촬영이 가능한 고에너지 CT를 활용하는 것과 동시에 한계점 값을 조정하여 실험값과 이미지 처리된 시편의 공극비를 조정하는 방법이 사용될 수 있다. 본 연구에서는 실제 투수 실험을 대체하는 것에 목적을 갖는 것이 아닌, CT 이미지 처리 과정을 통해 생성된 시편을 활용하여 확률 분포 함수와 실제 실험을 통해 얻어진 투수성의 상관관계를 밝히는 것에 목적을 두고 있다. 따라서 본 연구에서는 사용된 시편에 대해 동일한 기준(한계점)을 적용하여 3차원 이미지를 생성하고, 생성된 시편 이미지에 대해 확률 분포 함수와 실험의 상관관계를 분석하였다.

그림 5에 나타나 있는 그림은 시편 전체를 통과하는 연속적인 공극 군집을 의미한다. 동시에 동일한 그레이 스케일(gray scale)의 색도로 표현된 공극 이외에 다른 색으로 표현된 공극 군집을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 투수 콘크리트 시편 내부에 존재하는 공극은 단일 군집이 아닌 다

(a) 시편 1 이미지 (b) 시편 2 이미지 (c) 시편 3 이미지

그림 4. 3차원 투수 콘크리트 이미지

(a) 시편 1 공극 분포 (공극비 17.8%) (b) 시편 2 공극 분포 (공극비 17.2%) (c) 시편 3 공극 분포 (공극비 12.9%)

그림 5. 투수 콘크리트 시편에 존재하는 공극 분포 묘사

군집 형태로 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 시편 전체를 통과하는 공극 군집이 존재하는 것을 확인함으로써 시편 내부에 유체 등의 흐름이 가능한 채널(channel)이 확보된 것을 알 수 있다. 결과를 통해서, CT를 활용한 이미지 처리 방법을 활용하여 투수 콘크리트 내부의 육안으로 보이지 않는 공극 분포를 비파괴 방법을 통해서 살펴볼 수 있으며, 특히 투수성과 연관이 있는 시편 전체를 통과하는 공극 군집의 확인 및 분포 상태를 파악할 수 있음을 확인하였다.

4.2 확률 분포 함수를 사용한 공극 분포의 묘사 및 투수 실험과의 연관성 분석

그림 5에서 확인한 투수 콘크리트에 존재하는 공극의 공간적 분포를 정량적으로 분석 및 비교하기 위하여 확률 분포 함수 two-point correlation function(P_2), lineal-path function(L_2), two-point cluster function(C_2)을 사용하여 공극의 공간적 분포를 살펴보았다. 그림 6은 투수 콘크리트 시편들에 대한 P_2 의 결과이다. 그림 6을 살펴보면 세가지 투수 콘크리트 이미지 중, 공극비가 큰 순서대로 동일한 r/D 에 대해서 P_2 의 값이 큰 것을 확인할 수 있다. 여기서 D 는 z 축 방향 길이를 나타낸다. 또한 r/D 가 0.1~0.2 사이에서의 함수의 기울기 절대값을 비교하면, 공극비가 클수록 기울기의 절대값이 작은

그림 6. 투수 콘크리트 시편의 P_2 비교 (D : z 축 방향 길이, r : 두 점 사이의 길이)

것을 관찰할 수 있다. P_2 함수에서 그래프의 기울기가 작다는 것은 상대적으로 그 방향에 대해 군집이 많이 존재하는 것을 의미한다(Chung 등, 2010). 즉, 세가지 투수 콘크리트 이미지에 대한 P_2 분석을 통해서 상대적으로 공극비가 큰 시편일수록 더 많은 공극 군집이 분포하는 것을 확인할 수 있다.

L_2 분석 결과인 그림 7(a)을 살펴보면 각 시편의 L_2 값이 r/D 가 0.2 이상인 경우에는 0인 것을 확인할 수 있다. 따라서 각 시편에 따른 L_2 를 비교하기 위하여, L_2 의 값이 0이 아닌 구간의 그래프를 그림 7(b)와 같이 확대해서 표현하였다. 그림 7(b)를 살펴보면 동일한 r/D 에 대해서 공극비가 클수록 L_2 값이 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 L_2 가 각 시편의 경우에 대해서 r/D 가 상대적으로 작을 때 값이 0으로 수렴하는 결과를 통해서, 투수 콘크리트 시편에 분포하는 공극이 z 축 방향과 평행한 방향에 대해서는 시편 전체에 분포하는 연속적인 군집이 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 세가지 시편에 대한 C_2 의 결과이다. 그림 8의 C_2 를 살펴보면 P_2 , L_2 와 마찬가지로 공극비가 높을수록 동일한 r/D 에서 함수값이 높은 것을 확인할 수 있다. 즉, 공극비가 높을수록 투수 콘크리트 내부에 더 많은 공극 군집이 존재한다는 것을 C_2 의 결과를 통해서 판단할 수 있다. 또한, 3.3절에서 언급한 바와 같이 C_2 함수를 사용하면 특정 방향을 따라 평행하게 분포하지 않는 군집 분포의 연속성을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 그림 8의 C_2 의 결과를 살펴보면 세가지 투수 콘크리트 이미지의 모든 경우에서 시편 전체를 통과하는 공극의 군집이 존재하는 것을 파악할 수 있다. 그림 7과 그림 8을 비교하여 분석하면, 투수 콘크리트 시편에 z 축 방향과 평행하게 분포하지는 않지만 시편 전체를 통과하는 공극의 군집이 투수 콘크리트 내부에 존재하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 확률 분포 함수를 사용, 공극비가 서로 다른 세가지 투수 콘크리트 이미지를 분석하고 공극비와 공극 군집 분포 사이의 상관관계를 파악하였다. 그 결과, 공극비가 높을수록 투수 콘크리트 내부에 더 많은 공극 군집이 존재한다는 것을 확률 분포 함수를 이용하여 정량적으로 묘사하였

그림 7. 투수 콘크리트 시편의 비교

그림 8. 투수 콘크리트 시편의 비교

다. CT 이미지를 활용한 공극 분포의 수치, 정량적 분석의 결과와 표 2에 나타난 수리 전도도의 결과를 비교하면, 공극 비가 증가할수록 확률 분포 함수의 값과 수리 전도도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 C_2 함수의 결과를 바탕으로 분석하면, 투수 콘크리트 이미지 내부에 연속적인 공극의 군집이 분포할수록 유체 등이 흐를 수 있는 공간이 확보되어 투수 콘크리트의 투수성이 증가하는 현상과 상관관계가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로, CT 이미지 처리 기법과 확률 분포 함수의 결과를 활용하여 수리 전도도와 같이 투수 콘크리트의 투수성과 관련이 있는 물리적 성질의 경향을 예측할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 사용된 투수 콘크리트 공시체의 경우, 단면 지름 방향의 길이가 z축 방향 길이의 약 46%에 해당하므로 확률 분포 함수를 통해 확인된 투수 콘크리트 공극 분포의 특성이 임의의 불균질성을 가진 투수 콘크리트 시편 전체의 특성을 대표한다고 볼 수 있다.

정상엽 등(2010)의 연구에 따르면, 저차원 확률 분포 함수의 일반적인 특성을 표현 가능 여부를 통해서 시편의 RVE 여부를 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 시편 이미지가 3절에서 나타난 확률 분포 함수의 특성을 잘 표현하는 것을 통해서, 재료를 대표할 수 있는 최소 부피 단위인 RVE (Representative Volume Element)를 만족할 수 있음을 알 수 있다. 또한 실제 실험의 결과와 이미지 처리를 통해서 생성된 시편 이미지에 유사한 경향을 통하여 상관관계가 있음을 DQ인함으로서, 본 연구에서 사용한 3차원 투수 콘크리트 이미지가 투수 콘크리트를 대표할 수 있는 최소의 부피 단위인 RVE(Representative Volume Element)를 만족하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 CT 이미지를 활용하여 투수 콘크리트 시편의 존재하는 공극 분포를 분석하였다. 투수 콘크리트의 내부 구조를 비파괴 상태로 파악하기 위해 CT를 사용하여 얻은 단면 이미지들을 적층하여 3차원 디지털 시편을 묘사하고 육

안으로 관찰할 수 없는 내부 공극 분포를 시각적으로 표현하여 내부 공극 분포를 확인하였다. 투수 콘크리트에 분포하는 공극의 공간적 상태를 수치, 정량적으로 묘사하기 위해서 확률 분포 함수 two-point correlation function, lineal-path function, two-point cluster function을 사용하여 서로 다른 공극비를 가진 투수 콘크리트 시편의 공극 분포를 분석하였다. 각 시편의 확률 분포 함수 결과와 실제 투수 콘크리트의 실험 결과를 비교하여 실험과 해석의 상관관계를 분석하였다.

그 결과, CT 이미지를 활용해서 생성된 이미지를 통하여 투수 콘크리트 내부의 공극 분포를 비파괴 방법으로 묘사할 수 있음을 확인하였으며, 확률 분포 함수들을 사용하여 방향에 따른 군집의 크기 및 공극 군집의 연속적인 분포 등을 효과적으로 분석할 수 있음을 확인하였다. 또한 투수 콘크리트 이미지 해석 결과와 실제 실험 결과의 비교를 통해서 실험과 해석 결과의 상관관계를 파악하고 공극비 및 확률 분포 함수 값이 클수록 수리 전도도가 증가하는 것을 확인함으로써, CT 이미지 처리 기법과 확률 분포 함수를 활용하여 투수 콘크리트의 투수성과 관련된 물리적 특성을 예측할 수 있음을 확인하였다. 확률 분포 함수의 결과와 재료의 임의의 불균질성 특성을 바탕으로 판단하여 본 연구에서 사용한 (공시체)이미지가 투수 콘크리트의 특성을 대표할 수 있는 최소 부피 시편(RVE) 이상 인 것을 확인하였다. 추가적으로 동일한 배합비를 가진 투수 콘크리트 시편 사이에서 나타날 수 있는 투수성의 차이 및 다양한 배합비를 가진 투수 콘크리트의 분석에 대한 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서 활용한 투수 콘크리트 시편의 경우, 본 연구에서 사용한 3차원 이미지 분석 방법을 기반으로 한 정량적/정성적 특성 분석을 위해서 이미지 처리 과정의 해상도를 높일 수 있는 해석 도구와 공극의 분포 특징에 따른 물리·역학적 물성치의 연관성을 파악하고 검증하기 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 #’09지역기술혁신 B-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 고은정, 고은주, 석호중, 이승혁 (2009) 투수콘크리트 현장품질관리 지침서 개발에 관한 연구, **한국건축시공학회논문집**, 한국건축시공학회, 제9권, 제3호, pp. 65-71.
- 정상엽, 윤태섭, 한동석 (2010) 확률 분포 함수의 지수 곡선 접합을 이용한 RVE 적합성 평가, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제5A호, pp. 425-431.
- 정상엽, 김영진, 윤태섭, 전현규 (2011a) Micro CT 이미지 분석을 통한 경량 골재 콘크리트의 공극 분포 분석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제31권, 제2A호, pp. 121-127.
- 정상엽, 한동석 (2011b) 2상 다결정 미세구조의 상 분포 위상에 따른 역학적 거동 분석, **한국전산구조공학학회논문집**, 한국전산구조공학회, 제24권, 제1호, pp. 9-16.
- 채창우 (2002) 혼화재를 혼입한 투수콘크리트의 물리적 특성, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제14권, 제2호, pp. 257-265.
- 한국콘크리트학회 (2005) **최신 콘크리트공학**, 기문당.
- Chung, S.-Y. and Han, T.-S. (2010) Reconstruction of random two-phase polycrystalline solids using low-order probability functions and evaluation of mechanical behavior, *Comput. Mater. Sci.*, Elsevier, Vol. 49, No. 4, pp. 705-719.
- Coker, D.A. and Torquato, S. (1995) Extraction of morphological quantities from a digitized medium, *J. Appl. Phys.*, American Institute of Physics, Vol. 77, No. 12, pp. 6087-6099.
- Corson, P.B. (1974) Correlation functions for predicting properties of heterogeneous materials. . experimental measurement of spatial correlation functions in multiphase solids, *J. Appl. Phys.*, American Institute of Physics, Vol. 45, No. 7, pp. 3159-3164.
- Dorey, R.A., Yeomans, J.A. and Smith, P.A. (2002) Effect of pore clustering on the mechanical properties of ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.*, Elsevier, Vol. 22, No. 4, pp. 403-409.
- Gokhale, A.M., Tewari, A. and Garmestani, H. (2005) Constraint on microstructural two-point correlation functions, *Scr. Mater.*, Elsevier, Vol. 53, No. 8, pp. 989-993.
- Han, T.-S. and Dawson, P.R. (2005) Representation of anisotropic phase morphology, *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.*, IOPscience, Vol. 13, No. 2, pp. 203-223.
- Lee, S.B. and Torquato, S. (1989) Measure of clustering in continuum percolation: Computer-simulation of the two-point cluster function, *J. Chem. Phys.*, American Institute of Physics, Vol. 91, No. 2, pp. 1173-1178.
- Lu, B. and Torquato, S. (1992) Lineal-path function for random heterogeneous materials, *Phys. Rev. A*, American Physical Society, Vol. 45, No. 2, pp. 922-929.
- Singh, H., Gokhale, A.M., Lieberman, S.I. and Tamirisakandala, S. (2008) Image based computations of lineal path probability distributions for microstructure representation, *Mater. Sci. Eng., A*, Elsevier, Vol. 474, No. 1, pp. 104-111.
- Tewari, A., Gokhale, A.M., Spowart, J.E. and Miracle, D.B. (2004) Quantitative characterization of spatial clustering in three-dimensional microstructures using two-point correlation functions, *Acta Mater.*, Elsevier, Vol. 52, No. 2, pp. 307-319.
- Torquato, S., Beasley, J.D. and Chiew, Y.C. (1988) Two-point cluster function for continuum percolation, *J. Chem. Phys.*, American Institute of Physics, Vol. 88, No. 10, pp. 6540-6547.
- Torquato, S. (2002) *Random heterogeneous materials*, Springer, New York.
- Underwood, E. (1970) *Quantitative stereology*, Addison-Wesley, Massachusetts.

◎ 논문접수일 : 11년 11월 08일

◎ 심사의뢰일 : 11년 11월 10일

◎ 심사완료일 : 11년 12월 19일