

콘크리트 공극구조 분석을 위한 화상분석결과의 변동성 분석

Variation of Image Analysis Results for Determining the Characteristics of the Air-Void System on Hardened Concrete

전성일* · 이진범** · 안지환*** · 남정희**** · 권수안*****

Jeon, Sung IL · Choi, Pan-Gil · Nam, Jeong Hee · Kwon, Soo Ahn · Yun, Kyong KU

1. 서론

일반적으로 콘크리트는 동결융해저항성을 확보하기 위해서 적절한 공기량과 공극구조를 가지고 있어야 한다. 콘크리트에 동결발생 시 물은 모세관공극(capillary pore)에서 동결이 발생하는 인접한 공극으로 끌어당겨지고 이를 통해 콘크리트 내부에 열평형(thermodynamic equilibrium)이 이루어지는데, 이때 콘크리트 내부에 압력이 증가한다. 또한 콘크리트 내에 있는 물이 얼음으로 변화하면서 체적이 증가하여 내부에 인장응력을 발생시킨다. 만약 콘크리트내부에 적절한 간격으로 공극이 분포하고 있다면 공극은 수분흐름의 통로 역할을 하게 되어 내부의 압력과 체적팽창에 의한 내부 인장응력을 완화시켜 콘크리트의 내동결성을 유지할 수 있게 된다. 그러나 이와 반대로 공극이 적절한 간격으로 분포하여 있지 않다면 시멘트 페이스트의 인장강도를 초과하여 콘크리트 내부에 균열이 발생하게 된다.

Cordon and Merrill(1963)은 공기량과 내구성지수(동결융해저항성)간에 상관성이 존재하는 것으로 보고하였다. 그러나 최근의 연구결과에서 공기량과 간격계수(spacing factor)의 상관관계가 크게 좋지 않은 것으로 나타났으며, 이는 적절한 공기량이 적절한 간격계수를 보증할 수 없다는 것을 의미한다.

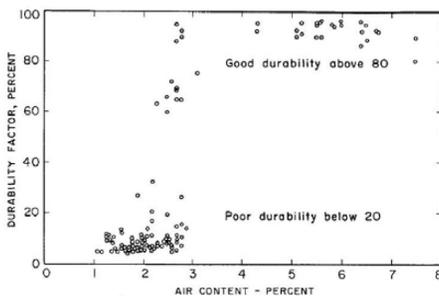


그림 1. 공기량과 내구성 지수의 관계
(Cordon, W.A. and Merrill, D)

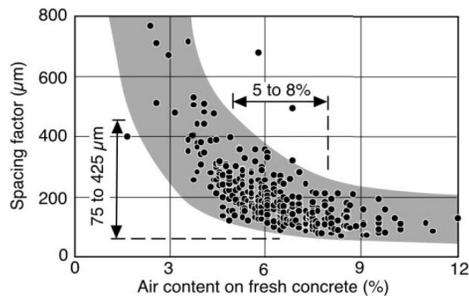


그림 2. 공기량과 간격계수의 관계
(Richard Pleau et al, 2001)

현재, 국내 콘크리트포장에서 동결융해 파손에 대한 사례들이 주기적으로 보고가 되고 있으며, 이에 공기량 기준과 더불어 간격계수에 대한 기준을 마련하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 그러나 간격계수를 산정

* 정회원 · 한국건설기술연구원 전임연구원 · 공학석사(E-mail:jeonsi@kict.re.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 전임연구원 · 공학석사(E-mail:ohnewhara@kict.re.kr)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 전임연구원 · 공학석사(E-mail:jenix@kict.re.kr)

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 공학박사(E-mail:archnam@kict.re.kr)

***** 정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 · 공학박사(E-mail:sakwon@kict.re.kr)

하기 위한 실험방법은 국내에 규정되어 있지 않아 ASTM 기준을 따라야 하며, 특히 이 실험결과 분석 시 연구자의 주관적 판단에 기인하는 경우가 많아 이에 대한 철저한 보정작업이 수반되어야 한다.

이에 본 연구에서는 콘크리트의 화상분석결과에 대한 변동성을 분석하고 이를 보정하기 위해 round robin test를 수행하였으며, 이를 통해 신뢰성 있는 콘크리트 공극구조 분석의 가능성 여부를 평가하였다.

2. 실험계획

2.1 실험개요

본 연구에서는 콘크리트의 화상분석실험에 대한 결과를 보정하기 위해, 표 1에 나타난 바와 같이 총 6가지 배합을 실시하였다. 이 배합들에 대한 슬럼프, 공기량, 압축강도 실험을 수행하였으며, 콘크리트의 공극구조 평가를 위해 화상분석을 실시하였다. 화상분석 결과에 대한 보정작업을 위해, 화상분석프로그램으로 측정된 공극수와 연구자들이 측정된 공극수를 비교하였다. 이를 통해 결정된 pixel intensity values를 이용하여 각각의 배합에 따른 공극구조 특성을 비교·분석하였다.

표 1. 콘크리트 배합비

	W/B (%)	S/a (%)	단위량 (kg/m ³)						공기량 (%)
			C (kg)	W (kg)	S (kg)	G (kg)	고성능 감수제 (시멘트 중량대비)	AE제 (감수제0.5% 중량대비)	
Mix45-1	45	45	360	162	767	925	-	-	1.0
Mix45-2	45	45	360	162	767	925	-	1%	3.1
Mix45-3	45	45	360	162	767	925	-	2%	6.1
Mix40-1	40	45	360	144	787	950	0.5%	-	2.8
Mix40-2	40	45	360	144	787	950	0.5%	0.2%	3.5
Mix40-3	40	45	360	144	787	950	0.5%	1%	8.0

2.2 화상분석실험방법

(1) 콘크리트 시편 표면처리

화상분석의 용이함을 위해서 표면연마 작업은 반드시 행해져야 한다. 이는 화상분석 시 오차를 줄이기 위한 매우 중요한 작업이다. 시편 절단 직후의 공시체는 그 표면이 매우 거칠어 기포부의 구별이 불가능하다. 일반적으로 표면연마 시 ASTM 규정에 따라 SiC 파우더를 이용하여 최초 60번 연마제에서 시작, 100번, 200번, 320번, 420번의 연마제를 거쳐 최종 600번 연마제 순서로 콘크리트 표면을 연마한다. 기존 연구에서는 연마제를 이용하여 사람이 직접 작업하는 경우가 많았으나, 사람에 따라 또는 작업시점에 따라 시편의 거칠기 정도와 평탄 정도가 다르게 나타날 수 있다. 이와 같은 작업을 자동화된 기계를 이용하여 정해진 시간동안에 연마작업을 하였고, 매 시편마다 동일한 표면상태를 구현하게 하였다. 또한 연마된 콘크리트 표면을 화상카메라로 촬영한다면 공극을 분간하기 어렵다. 이에 공극을 표시하기 위해 고분말도의 흰가루 물질을 충전하여 공극의 윤곽을 명확히 구분하였다.



그림 3. 콘크리트 표면 연마기

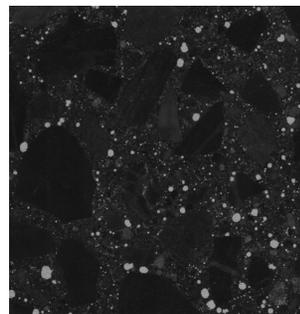


그림 4 콘크리트 표면 처리 후 형상

(2) 화상촬영 및 분석

그림 5는 화상촬영기를 보여주고 있다. QICAM 디지털카메라(1.4 million, 1392× 1040)에 현미경렌즈(optical 0.5-5x)를 부착하였으며, TurboScan을 장착하여 시편을 자동으로 움직이면서 촬영이 가능하게 하였다. 이렇게 촬영된 화상에 공극구조 특성을 분석하기 위해 'image-pro' 프로그램을 사용하였다.

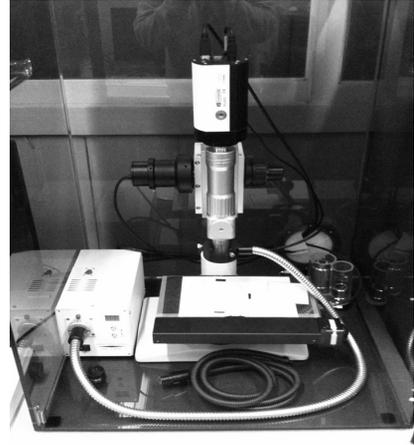


그림 5. 콘크리트 화상촬영기

(3) 화상분석결과의 변동요인

Pixel intensity values는 색상 정도를 수치화한 것으로, 일반적으로 명암도를 의미한다. 콘크리트 표면 공극에 주입된 흰가루 입자의 밀도와 촬영 시 광량의 정도에 따라 공극의 색깔은 정확하게 흰색이 아닌 여러 다양한 색상으로 촬영될 수 있다. 이에 촬영된 콘크리트 표면 화상에 공극을 구분하려고 할 때, pixel intensity values를 변화시켜 어느 색상까지를 공극으로 인식할지를 결정해야 한다. 그림 6은 pixel intensity values의 변화에 따라 공극의 인식정도를 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이, pixel intensity values를 90으로 하였을 경우 대부분 공극이 구별되지만, 110으로 할 경우 일부 공극이 구별되지 못하고 있다. 그림 7~8은 pixel intensity values의 변화에 따른 공기량과 간격계수의 추이를 나타내고 있다. 그림 7의 경우 공기량은 0.7~1.9%, 간격계수는 340~610 μm 정도의 범위를, 그림 8의 경우 공기량은 2.3~6.6%, 간격계수는 124~240 μm 정도의 범위를 나타내고 있다. 이와 같이 pixel intensity values의 변화에 따라 콘크리트의 공극구조 특성이 다르게 분석될 수 있으며, 분석자의 주관에 따라 이 값이 결정된다면 분석의 신뢰도가 떨어질 수밖에 없다. 이에 본 연구에서는 pixel intensity values 변화에 따라 측정된 공극수와 연구자들이 측정한 공극수를 비교하여, 최적의 pixel intensity values의 범위를 결정하고자 한다.

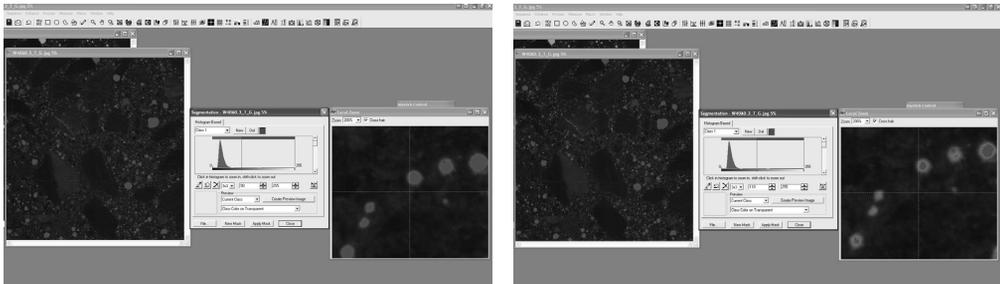


그림 6. Pixel intensity values의 변화에 따른 공극인식 정도 비교

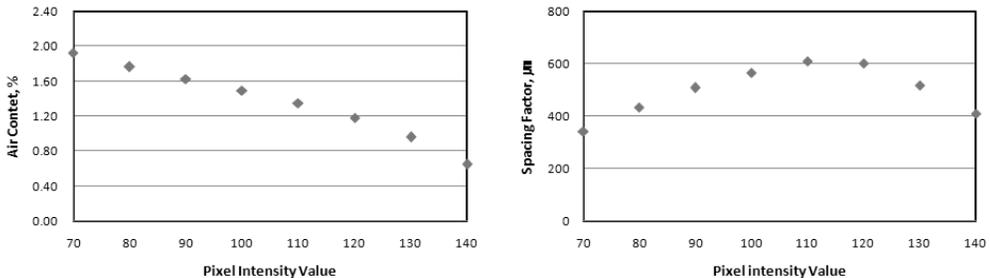


그림 7. Pixel intensity values의 변화에 따른 공기량과 간격계수 추이 (Mix45-1)

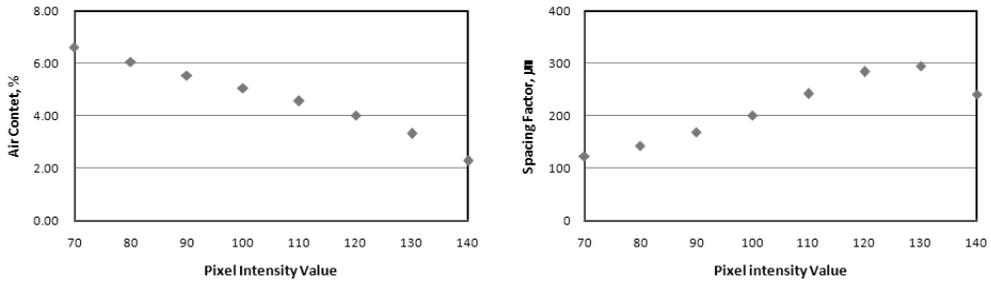


그림 8. Pixel intensity values의 변화에 따른 공기량과 간격계수 추이 (Mix45-3)

3. 압축강도 실험결과

그림 9는 재령 28일에 측정된 압축강도 실험결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 고성능감수제를 첨가하여 물시멘트비를 5% 줄인 배합이 압축강도가 더 크게 나타났으며, 공기량의 증가에 따라 전반적으로 강도가 감소하는 경향을 나타내었다(표 1 참조). 특히 공기량이 약 6% 증가할 때, 압축강도가 약 6~7 MPa정도 감소하여, 공기량이 과다할 경우 강도를 크게 저하시키는 것으로 나타났다.

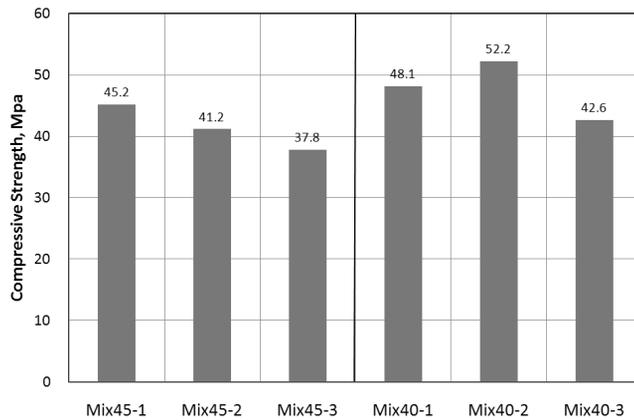


그림 9. 압축강도 실험결과 (재령 28일)

4. Pixel Intensity Values의 검증을 위한 Round Robin Test 결과

본 연구에서는 5명의 연구자가 콘크리트 표면 화상에 나타나 있는 공극수를 직접 측정하여, 사람에 따른 공극인식정도에 대한 변동성을 파악하고자 하였다. 또한 화상분석프로그램에서 pixel intensity values에 따라 자동 계산된 공극수와 비교하여 적정 pixel intensity values를 찾고자 하였다.

이에 Mix40-1, Mix40-2의 시편에 대하여 round robin test를 실시하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 분석결과, 동일한 시편에 대하여 측정된 공극수가 사람에 따라 약간의 차이를 보이고 있다. 이와 같은 변동성은 현미경이 미세한 부분까지 확대하여 촬영하기 때문에 정확하게 공극여부를 판단하기 어려운 일부 화상에서 서로간의 인식차이에 의해 발생할 수 있다. 또한 골재에 있는 공극에 흰색분말이 삽입될

표 2. 수작업을 통해 산정된 공극수 결과

항 목	Mix40-1	Mix40-2
공극수	4532	5697
	3799	6085
	4634	5847
	3521	4947
	4125	5392
최대값	4634	6085
최소값	3521	4947
평 균	4122	5594
표준편차	473	440
변동계수	0.11	0.08

수 있는데, 이와 같은 부분에서 분석자들간에 인식차이가 발생할 수도 있다. 본 결과를 화상분석프로그램에서 자동 계산된 공극수와 비교하였으며, 그 결과를 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 그림에서는 pixel intensity values의 변화에 따른 공극수 곡선에 사람이 관측한 공극수 결과를 삽입하였으며, 이 때 pixel intensity values가 약 80~90 정도의 범위를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. pixel intensity values가 80~90이 변할 때, 공기량은 약 0.2~0.3%, 간격계수는 약 30~40 μm 정도 변할 수 있다. 이와 같은 결과는 분석된 해당 시편에 국한된 것이며, 배합조건이 다른 시편에서는 이 차이가 다르게 나타날 수 있다. 이와 같은 분석을 통해 pixel intensity values의 적정 범위를 구할 수 있으며, 콘크리트의 공극구조 분석에 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 좀 더 다양한 시편에 대한 분석을 통해 추가적인 연구가 요망된다.

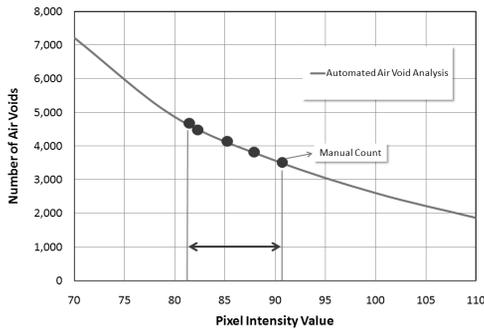


그림 10. 자동계산과 수계산을 통해 산정된 공극 수 비교 (Mix 40-1)

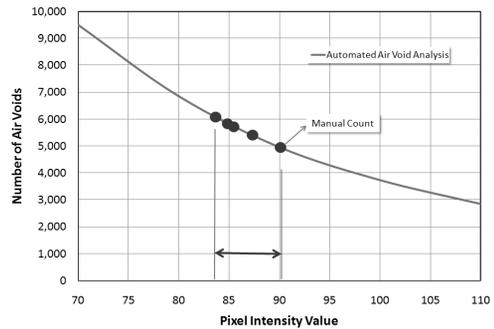


그림 11. 자동계산과 수계산을 통해 산정된 공극 수 비교 (Mix 40-2)

5. 화상분석결과 비교 분석

본 연구에서는 총 6가지 배합에 대하여 콘크리트의 공극구조 특성을 분석하였으며, 그 결과를 그림 12에 나타내었다. 분석 시 round robin test 결과를 바탕으로 pixel intensity values를 '90'으로 적용하였다. 그림에서 알 수 있듯이, AE제 첨가량이 증가함에 따라 전체 공기량은 증가하고, 간격계수는 감소하는 결과를 나타내었다. 공극크기 분포를 보면, 직경 10~50 μm 크기의 공극에서 가장 큰 값을 나타내며, AE제 첨가량이 증가함에 따라 약 10~200 μm 크기의 공극이 전반적으로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 일반적으로 AE제를 통해 발생된 연행공극 크기가 약 50~200 μm 정도의 크기(Mehta, 2006)를 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

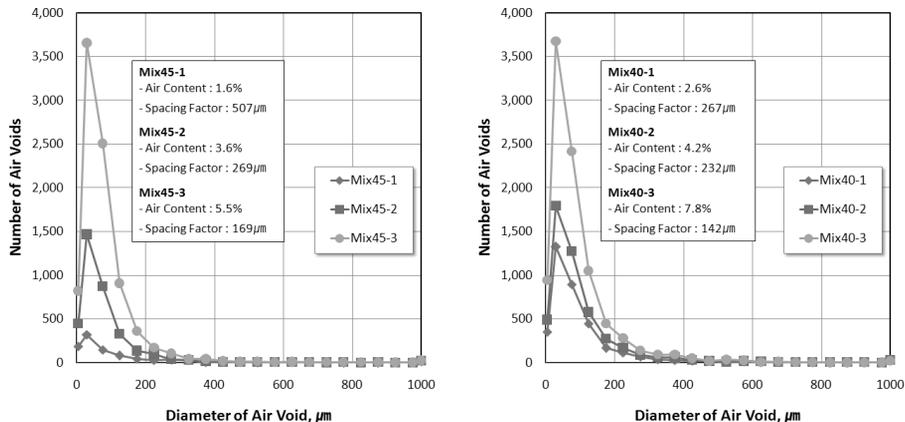


그림 12. 콘크리트 배합비 변화에 따른 화상분석결과

그림 13은 굳지 않은 상태와 굳은 상태 콘크리트의 공기량을 비교한 것이며, 그림 14는 공기량과 간격계수를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 굳지 않은 상태의 공기량이 굳은 상태의 것보다 약간 작게 평가되었으며, 공기량과 간격계수는 일정한 상관성을 나타내고 있다.

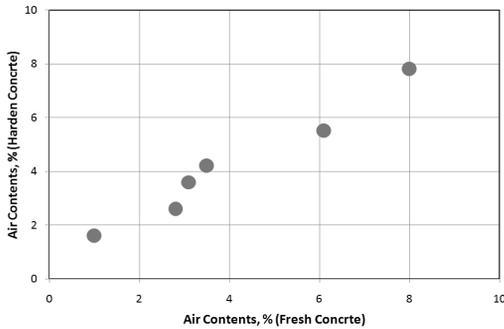


그림 13. 굳지 않은 상태와 굳은 상태 콘크리트의 공기량 비교

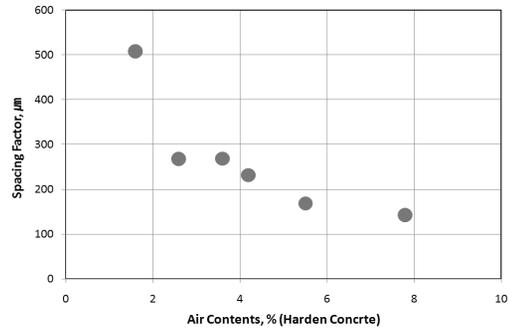


그림 14. 공기량과 간격계수 비교

6. 결론

본 연구에서는 공극구조 특성을 분석하기 위한 콘크리트 화상분석결과에 대한 변동성을 분석하고, 이를 보정함으로써 좀 더 신뢰성있는 분석이 가능한지 여부를 평가하였다. 화상분석프로그램에서 색상의 명암도를 수치화한 pixel intensity values의 변화에 따라 분석결과는 상당한 차이를 보일 수 있으며, 본 연구에서는 여러 사람이 직접 공극수를 측정한 round robin test 결과와 프로그램의 결과 값을 비교하여 pixel intensity values의 범위를 산정하였다. 이를 바탕으로 6가지의 배합에 따라 제작된 콘크리트 시편에 화상분석을 수행하였으며, 신뢰성 있는 결과를 도출한 것으로 판단된다.

그러나, round robin test에 사용된 샘플수가 너무 작고 배합조건이 유사하여, 추후 다양한 조건을 고려한 종합적인 분석이 요망된다.

참고 문헌

1. Cordon, W.A. and Merrill, D., "Requirements for Freezing and Thawing Durability for Concrete," Proceedings, ASTM vol. 63, 1963, pp. 1026-1036.
2. Richard Pleau, Michel Pigeon, Jean-Luc Laurecot., "Some Findings of the Usefulness of Image Analysis for Determining the Characteristics of Air-Void System on hardened Concrete", Cement&Concrete Composites 23, pp 237-246, 2001.
3. P. Kumar Mehta. and Paulo J.M. Monteiro., "Concrete(Microstructure, Properties, and Materials)", Third Editon, McGraw-Hill, 2006, pp 31.
4. Powers, T.C., J.Am. Ceram. Soc., Vol. 61, No. 1, pp 1~5, 1958;and Brunauer, S., Am. Sci., Vol. 50, No. 1, pp 210-229, 1962.