

화상분석법을 통한 경화 콘크리트의 미세 공극 구조 분석

윤경구^{1)*} · 정원경¹⁾ · 전인구²⁾ · 이봉학¹⁾

¹⁾ 강원대학교 토목공학과 ²⁾ 농업기반공사

(2004년 2월 5일 원고접수, 2004년 9월 30일 심사완료)

Analysis of Air Voids System Using Image Analysis Technique in Hardened Concrete

Kyong-Ku Yun^{1)*}, Won-Kyong Jeong¹⁾, Hyouk-Chan Kwon¹⁾, In-Koo Jun²⁾, and Bong-Hak Lee¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University, Cuncheon, , Korea

²⁾ Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation, Kan

(Received February 5, 2004, Accepted September 30, 2004)

ABSTRACT

Air voids in hardened concrete have an important influence on concrete durability such as freeze-thaw resistance, surface scaling resistance, and water permeability, and they have been characterized by spacing factor. Linear traverse and point count methods in ASTM standard have been used in estimating an air void system in hardened concrete. However, these methods require lots of time and efforts, further they are not repeatable. Image analysis method could be utilized in estimating an air void systems in hardened concrete with a developments of microscope, digital camera and computer program. The purpose of this study was to develop image analysis method and provide a guideline by comparing the results from ASTM method and image analysis method. The concerns were at air void content and diameter distribution, air voids system as well as spacing factors. The experimental variables included air content by air entrained agent (0, 0.01, 0.03 %) and depth of specimen (top, middle, bottom). The result showed that it was possible to calculate spacing factor using image analysis technique, as well as air content, air diameter distribution, and air structure. This study also contributed in developing an reasonable and repeatable image analysis method.

Keywords : concrete, air void, spacing factor, image analysis, entrained air

1. 서 론

콘크리트는 다른 건설재료에 비하여 내구성이 비교적 우수한 재료로 인식되어 왔다. 그러나 최근 콘크리트 구조물이라도 충분한 내구성을 가지지 않는 경우가 종종 보고되고 있다. 이러한 콘크리트 내구성 저하는 구조물의 노후화에 따른 부수적 현상이 아닌 경우, 구조물 전체에 악영향을 줄 수 있는 중요한 문제를 야기하게 된다. 따라서 콘크리트의 내구성 평가 및 예측은 오늘날 매우 중요한 연구분야로 인식되고 있다¹⁾. 이러한 콘크리트의 내구성에 영향을 미치는 인자는 크게 환경적 요인과 재료적 요인으로 구분할 수 있다. 특히, 재료적 요인의 경우 열화 메커니즘을 이해함으로써 내구성을 향상시킬 수 있는 중요한 요인이 된다. 이러한 콘크리트의 내구성을 지배하는

재료적 인자로서 가장 큰 비중을 차지하는 것이 바로 콘크리트 내부에 산재되어있는 공극이다^{7,9)}. 그러나 현재 국내에서는 콘크리트 구조물에 대하여 비파괴 검사, 코어 채취 등의 방법으로 강도를 추정하며 추정된 강도를 통하여 간접적으로 내구성을 평가하고 있는 실정이다. 이러한 콘크리트의 강도만을 이용한 내구성 평가는 재료의 복잡성 및 영향인자의 최소화로 인하여 보다 정확한 내구성 평가에 한계가 있을 수 있다. 또한, Linear Traverse Method와 Point Count Method 등과 같이 이러한 간접적 내구성 평가의 문제점을 해결하고자 현미경을 통하여 육안으로 콘크리트의 공극 구조를 직접 분석하는 방법이 있으나, 이러한 방법들은 분석하는데 시간과 노력이 너무 많이 소요되어 현재에는 거의 사용되지 않고 있다^{4,6,12)}. 근래에 들어서는 현미경과 컴퓨터의 프로그램을 통하여 화상을 획득한 뒤 그 화상을 분석하는 화상분석법이 많은 연구자에 의해 연구되고 있으⁸⁻¹⁶⁾ 국내에서는 연구실적이 매우 미비한 실정이다^{2,3)}. 그러나 이러한 화상분석법은 공극간

* Corresponding author

Tel : 033-250-6240 Fax : 033-255-6241

E-mail : kkyun@kangwon.ac.kr

의 거리로 설명되는 간격계수(spacing factor)를 산정하여 콘크리트의 공극 구조의 특성을 평가하는 방법으로써, 공극 직경의 영향에 따른 간격계수의 차이를 무시하는 오차를 유발할 수 있으며¹¹⁻¹³⁾ 더욱이 국내에서는 실험 절차 및 정확성에 대하여 명확하게 규정되어 있지 않다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 화상분석법을 이용하여 좀 더 합리적이고 객관적인 방법으로 경화 콘크리트의 내구 특성을 평가하며, 이를 위해서 간격계수 뿐만 아니라 경화 후 공기량, 공극 직경에 따른 공극 분포 및 공극 구조 상태 분석 등 다양한 분석을 파악함으로써 국내에서의 화상분석법 체계화를 도모하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 공극이 콘크리트에 미치는 영향

콘크리트의 내부에는 미시적으로 스펀지와 같이 많은 공극 즉, 모세관 공극(capillary pore), 겔공극(gel pore), 작은 기포(micro pore), 큰 기포(air void) 등이 산재해 있다⁹⁾. 이러한 각종 공극의 크기, 모양, 직경별 함유량 등의 분포상태는 콘크리트 구조물의 강도뿐만 아니라 내구성능(노후화)을 결정하는 중요한 역할을 하고 있다. 특히, 동해에서는 기포의 분포정도가 수분함유량을 좌우하여 동결될 수 있는 수분량을 결정하고 그 다소에 따라 동해의 정도는 현저한 차이를 나타낸다. 경화 된 콘크리트에 오랜 기간 동안에 걸쳐 나타나는 동해의 현상은 콘크리트 중의 물이 동결융해를 되풀이하여 균열이 발생하고 표층부가 떨어져 나가며 표층 가까운 부분에서 파괴되기 시작하여 결국 구조물 전체의 성능 저하를 가져온다²⁾. 물은 동결할 때 자유롭게 팽창하고 약 9%의 체적팽창이 생기지만 시멘트페이스트 내부에서는 페이스트 벽에 의해 체적팽창이 구속된다. 그러므로 이러한 체적팽창을 완화시키는 자유공극이 존재하지 않는다면, 이러한 큰 압력이 구조물 성능 저하의 원인으로 작용한다. 또한, 콘크리트의 투수성능(Permeability) 또한 내부기포의 분포상태가 중요한 역할을 하고 있다. 일반 콘크리트의 경우 염화물 이온이 콘크리트내의 미세 공극을 통과하여 침투하므로 공기량이 증가하면 투수성도 증가한다.

그러므로, 콘크리트 내부의 기포 크기나 분포상태는 콘크리트의 내구성을 결정하는 중요한 요인으로 작용하며, 구조물의 성능을 판단하는데 중요한 지표로서 사용된다.

2.2 콘크리트 내부의 공극 측정 방법 (ASTM C 457)

이 방법은 현미경에 의해 확대된 콘크리트 표면상에 나타난 공극의 크기, 개수 등을 육안으로 관측하여 하나씩

세어서 필요한 계수 등을 계산해 내는 방법이지만, 측정에 많은 시간이 소요되어 최근에는 거의 사용하지 않게 되었다. 아래의 Fig. 1은 ASTM C 457의 개략도로서, 연마된 공시체를 광학 현미경 아래 수직, 수평 방향으로 이동 가능한 장치 아래 놓고 관측한다⁹⁾. 이 방법은 공시체 전체 표면에 분포된 횡선의 수만큼 현미경의 십자선을 따라서 측정한다. 정밀한 측정을 위해서 실험에 의해 처리된 표면의 상태에 관해서 ASTM C 457 기준에서 최소한의 요구조건을 규정하고 있다. 횡선의 전체 길이와 수정 포인트 카운트법을 위한 포인트의 수는 골재의 최대 크기를 구하기 위해 꼭 필요한 것이며 요구조건은 Table 1과 같다⁹⁾.

리니어트레버스법의 공기량 A(일반적으로 콘크리트의 전체 체적에 대한 비율로서 표시)는 공극에 걸쳐있는 각 선의 총합(L_v)에 대한 횡선의 전체 길이(L_t)에 대한 비율과 같다⁹⁾.

$$A = \frac{L_v}{L_t} \times 100 \quad (\text{리니어트레버스법})$$

$$A = \frac{S_v}{S_t} \times 100 \quad (\text{수정포인트카운트법})$$

L_t : 횡선의 전체길이

L_v : 공극에 걸쳐진 선의 누적길이

L_p : 시멘트페이스트에 걸쳐진 선의 길이

S_t : 전체 포인트 수, S_v : 공극에 걸쳐진 포인트 수

S_p : 시멘트페이스트에 있는 포인트 수

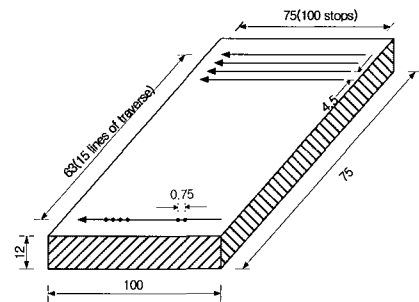


Fig. 1 Schematic description of typical test procedure for the ASTM C 457 (Unit : mm)

Table 1 Minimum requirements of the ASTM C 457

Nominal maximum size of aggregates(mm)	Minimum surface area of observed(cm ³)	Minimum length of traverse(mm)	Minimum number of points
150	1613	4064	2400
75	419	3048	1800
38	155	2540	1500
25	77	2413	1425
19	71	2286	1350
13	65	2032	1200
10	58	1905	1125
5	45	1397	1000

공극의 표면적 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{4N}{L_v} \quad (\text{리니어트레버스법})$$

$$\alpha = \frac{4N}{S_v I} \quad (\text{수정포인트카운트법})$$

여기서, N : 측정된 공극수,

I : 포인트간 거리($L_v = S_v \times I$)

간격계수 \bar{L} 는 외주사이 거리의 반으로 규정한다. 실제로 \bar{L} 는 시멘트페이스트 중의 물이 이동하기 위한 평균 최대거리를 나타낸다⁵⁾.

T.C. Powers에 따르면⁵⁾ 간격계수는 두 가지 방식으로 계산할 수 있다. 첫째, 시멘트페이스트가 차지하는 체적은 공극 주위의 시멘트페이스트의 두께를 구하여 공극의 전체 표면적으로 나눔으로서 구할 수 있다.

$$\bar{L} = \frac{L_p}{4N} \quad (\text{리니어트레버스법})$$

$$\bar{L} = \frac{S_v I}{4N} \quad (\text{수정포인트카운트법})$$

두 번째 방식은 Fig. 2에서와 같이 시멘트페이스트를 통해서 잘 배치된 입방체로 분포되는 모든 공극은 같은 직경을 가진다는 가설을 바탕으로 간격계수(다시 말하면, 시멘트페이스트 속의 가장 먼 점으로부터 가장 가까운 공극벽에 대한 거리)는 입방체의 반대편에 위치한 두 공극의 외주 사이의 거리를 반으로 나눈 것과 같다.

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \left(\frac{P}{A} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right]$$

P/A : paste/air ratio (L_p/L_v or S_p/S_v)

위의 식은 Paste/Air ratio(P/A)가 4.342와 같을 때, 기포 간격 계수가 과대평가 되어지므로 ASTM C 457에서는 가장 작은 값을 갖는 식의 사용을 권장하고 있다.

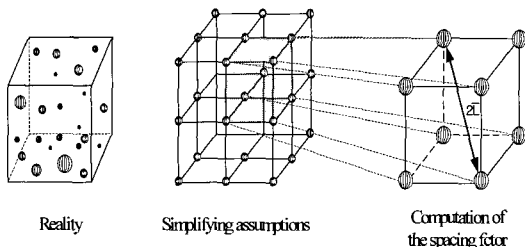


Fig. 2 Cubic arrangement of the air voids in cement paste which is hypothesized for the computation of the spacing factor using equation(Pigeon,1995)

P/A가 4.342보다 작을 때

$$\bar{L} = \frac{L_p}{4N} \quad \text{or} \quad \frac{S_v I}{4N} \quad (1)$$

P/A가 4.342보다 클 때

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \left(\frac{P}{A} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (2)$$

2.3 화상분석법

화상분석시험장치는 크게 전처리 과정에 필요한 장치와 후처리 장치 2가지로 구분된다. 전처리 장비로는, 콘크리트 시편 표면을 관찰할 수 있는 현미경, 콘크리트 시편을 촬영할 수 있는 CCD 카메라나 디지털 카메라와 같이 화상을 입력하는 구성장치로 구성된다. 후처리 장비로는, 촬영된 화상을 하나하나의 픽셀로 분할하여 분석을 할 수 있는 컴퓨터와 분석 Program으로 구분할 수 있다.

본 연구에서 사용된 화상분석시험장치는 실제 현미경(국내 D사), 디지털 카메라(N사), 컴퓨터와 시편의 상하좌우 이동이 가능한 받침대로 전처리 장비를 구성하였으며, 화상 분석프로그램(국내 O사)을 사용하여 분석을 실시하였다.

본 연구에서는 20× 배율로 콘크리트 시편을 관찰하였다. 이 경우, 1화면을 프로그램 상에 입력하면 2560×1704 pixels을 가진 화상으로 컴퓨터에 인식되며, 이는 9.275 mm×6.173 mm의 약 57.25 mm²의 면적을 나타낸다. 이 배율에서 1 pixel의 크기는 3.6 μm로 인식된다. 본 연구에서는 미세 공극 구조의 분석 범위를 10 ~ 10⁴ μm로 정하였으므로 측정 범위에서 벗어나지 않고 타당한 것으로 판단된다.

2.4 화상분석법의 절차

콘크리트의 내부의 미세 공극 구조를 화상분석방법으로 측정하기 위해서는 화상분석 시험 전, 시편의 표면에 많은 처리 절차를 거친 후 시험을 수행하여야 한다. 화상분석법을 수행하기 위한 일련의 과정을 Fig. 3에 나타내었다.

- (1) 시편 절단(specimen cutting) : 콘크리트 공시체는 위치별 특성을 파악하기 위하여 각각 상·중·하단을 절단하여 분석하였다. 공시체 절단기는 원형톱날 방식(diamond-saw)을 사용하였으며, 이때 시편 표면에 절단 속도로 인한 단차 및 표면 경사가 발생되지 않도록 하였다.
- (2) 표면 연마와 표면 처리 : 절단 직후 콘크리트 표면 연마 재료로서 SiC(탄화규소) 연마제를 사용하였다. SiC 파우더는 최초 60번 연마제에서 시작하여 100번, 200번, 320번, 420번의 연마제를 거쳐 최종 600번 연마제 순서로 연마를 실시하였다¹⁷⁾(ASTM C 457). 위의 과

정을 거친 시편 표면의 공극은 화상분석시 컴퓨터에 인식이 용이하도록 하여야 한다. 본 연구에서는 시편 표면을 흑색 수성 잉크로 도색, 건조시킨 이후에 백색 분말을 압입하여 충전시키는 방법을 사용하였다¹⁴⁾.

(3) 화상 입력과 화상 처리 : 전처리 과정이 끝난 시편은 내부 공극 구조분석을 위하여 컴퓨터에 화상을 입력시켜야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 현미경을 통한 디지털 카메라를 사용하였다. 시편 전단면을 순차적으로 촬영한 화상은 프로그램 상에서 color와 brightness, contrast 조절 과정을 거쳐 분석되었다. Fig. 4는 프로그램 상에서 화상을 처리하는 과정을 나타낸 것이다.

(4) 화상분석(image analysis) : Program 상에서 처리가 끝난 화상은 프로그램을 이용하여 분석되어지며, 결과 데이터로는 실험에서 요구되는 각각의 공극 평균 직경과 최대, 최소 직경, 각 공극의 면적, 한 화상에서의 공극이 차지하는 전체 면적 및 평균 면적, 그리고 공극이 차지하는 비율 등과 같은 항목이 측정된다. 이렇게 분석된 데이터는 파일로 저장되며, 필요한 항목의 조합으로 여러 가지 변수들에 대한 측정이 가능하다. 이렇게 측정된 변수를 살펴보면, 측정된 총 기포수 (NA), 전체 화상면적(S), 그리고 전체 기포면적(a)으로 구별되며 이러한 변수를 통해 다음과 같은 식³⁾으로 평균 기포면적(\bar{a}), 공기량(A), 그리고 비표면적(α)을 구할 수 있다.

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=0}^{NA} a_i (mm)}{NA} : \text{평균 기포면적 (mm)}$$

$$A = \frac{\sum_{i=0}^{NA} a_i}{S} \times 100 (\%)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{6\pi}{a}} : \text{비표면적 (mm}^{-1}\text{)}$$

이를 통하여 공극간의 간격계수를 산출하기 위하여 식 (1)과 (2)를 사용한다.

3. 실험

3.1 실험 변수

본 연구에서는 화상분석을 통한 콘크리트의 내부 공극 구조분석을 위하여 다음과 같은 실험변수를 설정하였다. 콘크리트 타설 시 발생할 수 있는 깊이별 공기량의 차이를 확인하기 위하여 시편의 깊이에 따른 분석을 실시하였다. 그리고, 공기량의 대·소에 따른 공극 구조 특성을 파악하기 위하여 공기량을 변수로 두어 실험을 수행하였다.

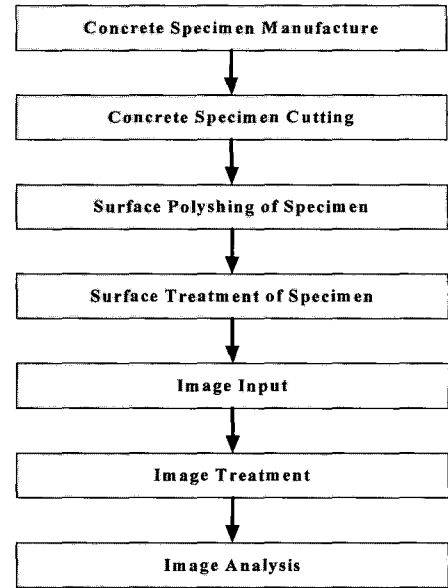
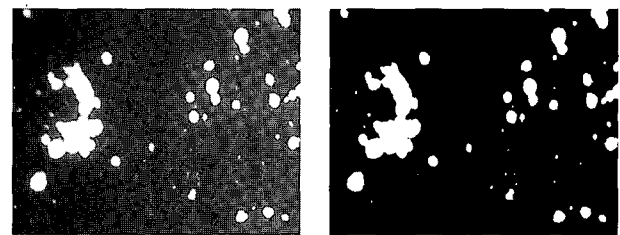


Fig. 3 Procedures of image analysis test



(a) Before

(b) After

Fig. 4 Comparison of image treatment before and after

또한, 실내실험과 현장시편과의 차이를 확인하기 위하여 중부고속도로상의 콘크리트 포장에서 시편을 채취하여 공극 구조를 분석하였다. 현장 시편을 통해 화상분석법에 의한 공극 구조분석방법이 기존의 방법에 비해 어떠한 장점을 가지고 있으며 어떠한 의미가 있는지 확인하고자 하였다. Table 2는 주요 실험 변수를 정리하여 나타낸 것이다.

3.2 사용재료 및 콘크리트 배합

시멘트의 분말도 차이에 따른 내부공극 구조 변화를 관찰하기 위하여 국내 생산 시멘트를 사용하였다. 굵은골재는 최대치수 25mm, 13mm인 레미콘용 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 천연 강모래를 사용하였으며 자세한 사항은 Table 3과 같다.

Table 4는 본 실험에 사용된 OPC에 대한 배합설계표이며 도로공사에서 사용되는 표준배합을 사용하였다. 실험을 위한 양생은 상대습도 80%, 양생온도 20℃의 동일한 조건에서 실시하였다.

Table 2 Experimental variables

Ordinary Portland Concrete	
AE contents (%)	Specimen depth
0	Top, Middle, Bottom
0.01	Top, Middle, Bottom
0.03	Top, Middle, Bottom
Field specimen	Top, Middle, Bottom

Table 3 Physical properties of aggregate used

Type	Max. size (mm)	Specific gravity	Absorption	F.M
Fine Aggregate	< 5	2.6	0.71	2.98
Coarse Aggregate	25, 13	2.7	0.97	6.3

Table 4 Concrete mix proportion(kg/m³)

W/C (%)	S/a (%)	C	W	G	S	AE Contents
45	41	392	177	1072	714	0 %
						0.01 %
						0.03 %

3.3 실험 방법

콘크리트 내부에 산재해있는 미세 공극 구조를 분석하기 위하여 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험과 재령에 따른 강도, 그리고 화상분석을 통한 콘크리트의 미세 공극 구조를 비교·분석하는 실험을 실시하였다.

압력법을 통한 공기량 측정은 KS F 2421에 따라 수행하였다. 콘크리트의 재령 경과에 따른 강도 특성을 파악하기 위하여 KS F 2405에 의거하여 압축강도를 측정하였다. 시험은 시험체가 파괴점에 도달할 때까지 하중제어로 실험을 실시하였다. 이때 압축강도 측정 시 시편의 편심에 의한 오차를 최소화하기 위하여 시편 양단을 콘크리트 연마기를 사용하여 수평하게 제작하였다.

3.4 공기량 측정 결과

공기량은 콘크리트의 강도 및 내구성에 많은 영향을 미치는 중요한 인자로서 보통 콘크리트의 경우 공기량이 적으면 강도 및 투수저항성 등은 커지나 동해에 의해 발생되는 내부 팽창압에 대한 저항성이 적게 되어 동결융해 및 Scaling에 대한 저항성이 떨어지게 된다. 반면, 공기량이 많아지면 동결융해 저항성 및 Scaling 저항성이 증가하지만 경화된 콘크리트에서 공극이 상대적으로 증가하여 강도 및 투수저항성이 저하된다.

따라서 적정 공기량을 유지하는 것은 내구성 측면에서 중요한 요소이며, 일반적으로 약 3~7%의 공기량을 포함할 것을 권고하고 있다¹⁾.

Fig. 5는 보통 콘크리트의 굳지 않은 상태에서 압력법으로 측정한 공기량과 경화 된 후 화상분석법으로 측정한 공기량을 비교한 그래프이다. 전체적으로 경화 전 압력법으로 측정한 공기량이 경화 후 화상분석을 통한 공기량보다 다소 높게 측정되는 것으로 나타났다. 보다 자세히 이를 살펴보면, 약 3% 내외의 공기량에서는 두 측정방법 간에 차이가 미소하였으나, 공기량이 6% 이상인 경우 측정방법 간의 결과 차이가 더 크게 나타났다. 이러한 경화 전·후의 공기량 차이는 공시체 제작 시 다짐의 영향, 콘크리트 자체의 불균질성, 압력법 시 미세 기포의 용해 및 시멘트의 수화반응으로 인한 공극의 감소 등의 원인으로 판단된다³⁾.

또한, 화상분석법으로 측정한 공기량과 압력법으로 측정한 공기량과의 차이가 약 40% 감소되어 측정되는 것으로 나타났다.

3.5 압축강도 측정 결과

Fig. 6은 AE제의 첨가량에 따른 압축강도를 나타낸 그래프이다. 이를 살펴보면, AE제의 첨가량이 증가함에 따라 공기량이 증가하여 압축강도가 감소하는 일반적인 경향을 나타내고 있다.

보통 콘크리트의 경우 공기량이 1% 증가할 경우 강도는 약 4~6% 정도 감소한다고 알려져 있다. 공기량의 변화에 따른 강도 변화에 대한 본 연구의 결과를 Fig. 7에 나타냈으며, 그래프에서 확인할 수 있듯이 공기량이 1% 증가함에 따라 강도는 평균 4.1% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 공기량 변화에 따른 강도 감소결과는 초기 재령과 장기재령 모두에서 동일하게 나타나 콘크리트 내부 공극량이 콘크리트 성능에 미치는 영향이 매우 높은 것을 확인할 수 있었다.

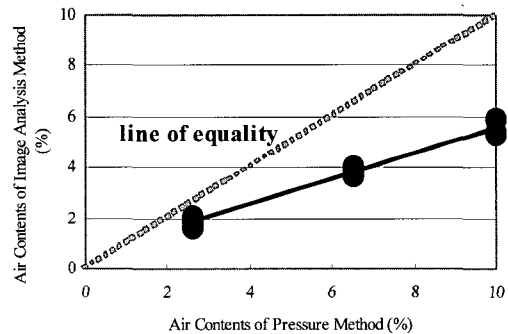


Fig. 5 Comparison of air contents by test methods

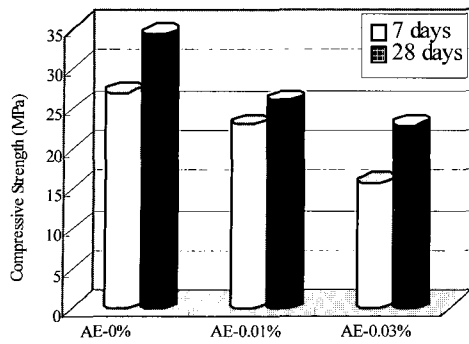


Fig. 6 Compressive strength with AE contents

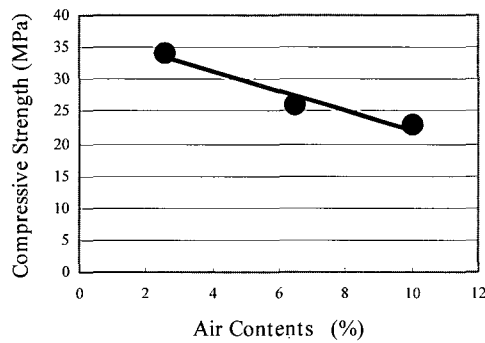


Fig. 7 Compressive strength with air contents

4. 화상분석

4.1 화상분석법과 ASTM법과의 비교분석

화상분석법은 컴퓨터의 발달과 프로그램의 개발로 인하여 보다 발전된 분석방법이다. 기존의 연구는 이러한 화상분석법을 이용하여 간격계수를 산정하고 산정된 간격계수만으로 경화 콘크리트의 내구성을 평가하고자 하였다. 그러나 이러한 방법은 공극 직경의 영향에 대한 오차를 범할 우려가 있기 때문에 간격계수만으로 공극 구조를 평가하는 것은 정도가 낮아질 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 간격계수 뿐만 아니라, 공극 직경에 따른 공극 분포와 1000 μm를 기준으로 한 공극 구조를 분석함으로써 화상분석법을 좀더 합리적이고 체계적으로 이용하고자 하였다. 화상분석법을 통하여 얻어진 데이터의 정확성을 검증하기 위하여, ASTM C 457의 방법(linear traverse method)과 화상분석법으로 측정된 결과를 비교하였다. Fig. 8은 ASTM 법으로 공기량을 측정하는 개요를 나타낸 그림으로써, 시편의 표면에 일정한 선을 그어 공극을 지나는 선의 총 길이를 전체 선의 길이로 나눈 것이 공극의 전체 부피가 된다. 따라서, ASTM법에서의 공기량은 다음과 같이 식(3)으로 표현된다.

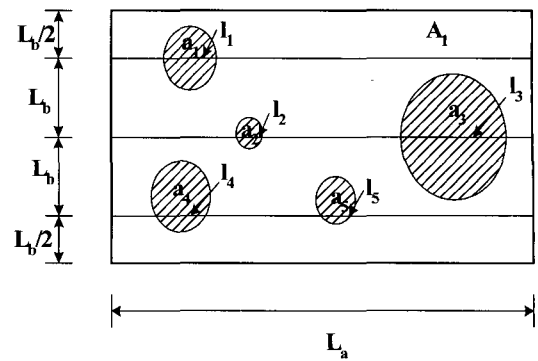


Fig. 8 Concept of linear traverse method

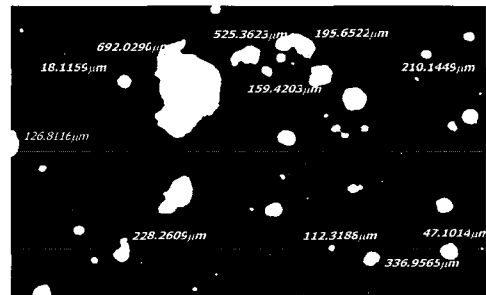


Fig. 9 Measurement of air contents by ASTM method

$$\text{공기량 } (V_a) (\%) = \frac{\sum l_n}{L_i} \times 100 \quad (3)$$

본 연구에서는 Fig. 9에서와 같이 획득된 화상에 일정한 간격의 선을 그어 공극을 지나는 총 길이를 측정하였다. 선의 간격은 2058 μm로 120개의 화상에 동일하게 적용하였고, 이때 화상을 지나는 선의 총 길이는 3338mm로서, 굵은골재의 최대치수가 25mm일 경우 ASTM 규정에서 요구되는 최소길이 2413mm를 만족하였다.

Table 5와 Fig. 10은 ASTM 방법 중 하나인 Linear traverse 법으로 측정된 결과와 화상분석법에 의하여 측정된 결과를 표와 그래프로 나타낸 것이다. 결과에서 확인할 수 있듯이 화상분석법에 의하여 측정된 공기량과 ASTM 법에 의하여 측정된 공기량은 매우 유사하게 나타났다. AE제가 첨가되지 않은 경우, ASTM 방법에 의한 공기량분석과 화상분석법과는 약 11%의 공기량 차이가 나타났으나 AE제가 첨가될수록 측정치의 차이는 감소되어 AE 0.03% 첨가 시에는 약 2.2%의 차이로 근사한 값을 나타내었다. 이는, Linear traverse method의 측정 방법에 의한 것으로 화상에 걸처지는 공기량이 적을 경우 분석 결과값의 신뢰도가 낮아질 수 있음을 의미한다. 이를 통해, 화상분석법을 이용하여 경화 콘크리트의 내부 공극 구조를 분석하는 방법으로도 정도 높은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

Table 5 Comparison of air contents between image analysis and ASTM method

Air contents (%)	AE 0%	AE 0.01%	AE 0.03%
Image analysis method	2.06	3.65	5.42
ASTM method	1.85	3.43	5.30
Difference	11%	6%	2.2%

4.2 공극 직경별 공극분포 분석

동결기에 콘크리트는 기온의 변화와 함께 동결융해의 반복 작용을 받는다. 동결 작용으로 인하여 경화 콘크리트 내부의 자유수는 표면으로부터 동결하기 시작하며, 동결 시 약 9%의 체적이 팽창 현상을 수반한다. 이러한 경우, 콘크리트 내부에는 큰 팽창압력이 발생되어 콘크리트 조직이 열화될 수 있다. 그러나, 콘크리트 내부에 일정한 크기와 분포를 갖는 연행공기가 존재한다면, 자유수 동결에 따른 내부구속압력의 발생을 완화시키고, 자유수의 이동을 가능하게 하여 열화 저항성이 현저히 개선될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 연행공기의 분포를 알아보기 위하여 공기량에 변화를 두어 시편을 제작한 후 각각 직경에 따른 분포를 분석하였다.

Figs. 11, 12는 AE제 첨가 유무에 따른 직경별 공극의 수를 정리하여 나타낸 것이다. 이를 살펴보면, AE제의 첨가로 인하여 미세 공극의 수가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 13은 공기량에 따른 공극 직경별 분포에 대한 결과로서, AE제가 첨가되어 콘크리트 내부에 공기량이 증가할수록 약 200~600 μm의 비교적 미세한 공극이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 또한 AE제가 첨가되지 않은 OPC는 공극 직경별 분포가 매우 낮아 자유수의 동결 시 이에 대한 저항성이 낮아지는 현상을 알 수 있었다. 그러나 AE제의 첨가로 인하여 100~500 μm의 연행공기량이 2~7배로 증가, 분포하여 콘크리트 내부 압력 완화에 기여함을 알 수 있었다.

4.3 콘크리트 내부의 공극 구조상태 분석

콘크리트 내부에 존재하는 공극은 그 크기에 따라 갇힌 공기(Entrapped Air)와 AE제의 작용으로 인하여 발생하는 연행공기(Entrained Air)로 구분된다. 갇힌공기는 연행공기와는 달리 콘크리트 내부에 불규칙적으로 산재하여 균열 발생, 강도 저하 및 내구성능 저하 등의 원인으로 작용하는 인자이다⁹⁾. 그러므로 콘크리트 내부의 갇힌공기량 및 분포 상태를 연행공기와 비교하는 것은 큰 의의가 있다고 할 수 있다.

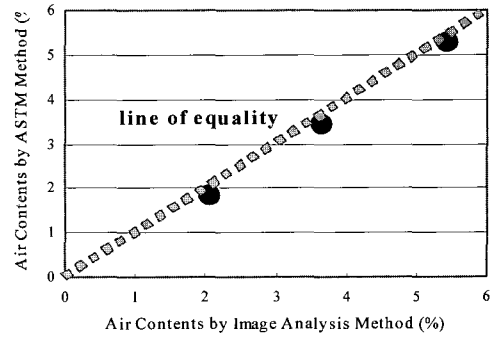


Fig. 10 Comparison of air contents

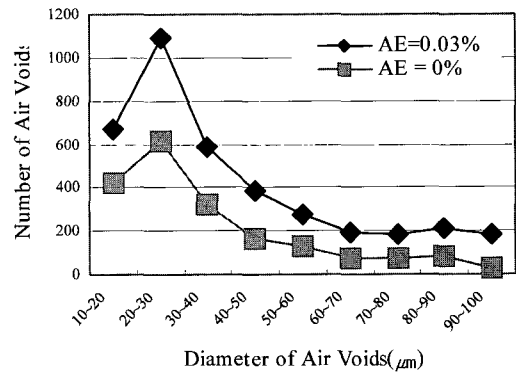


Fig. 11 Size distribution of micro-air voids

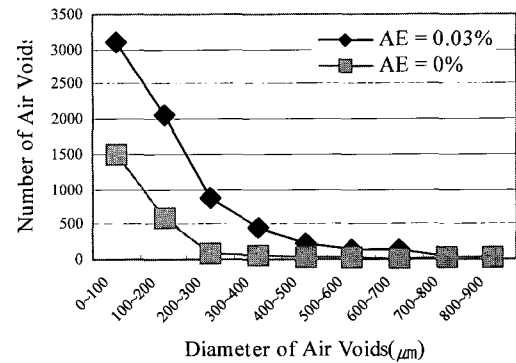


Fig. 12 Size distribution of total air voids

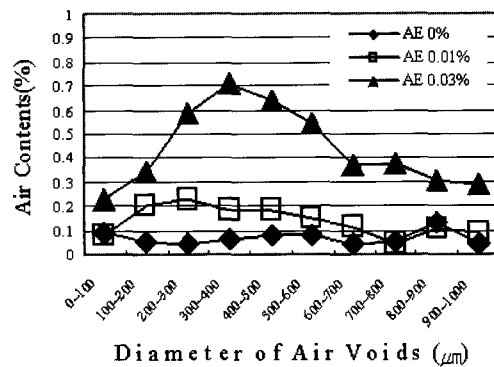


Fig. 13 Size distribution of air voids

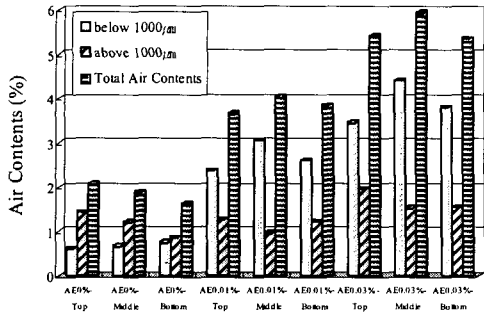


Fig. 14 Comparison of entrapped air & entrained air

Fig. 14는 공극 구조 상태를 1000 μm 를 기준으로 분석한 결과로써, 그래프에서 확인할 수 있듯이 AE제가 첨가되지 않은 콘크리트는 연행공기가 차지하는 비율보다는 갇힌공기의 비율이 큰 것을 알 수 있다. 그러나 AE제가 첨가됨으로 인하여 연행공기가 차지하는 비율이 점차 증가됨을 확인하였다.

4.4 간격계수 산정

AE제를 첨가하여 제조한 공기연행 콘크리트에서 내동결융해성에 있어서 중요한 인자는 연행된 기포의 형태 외에도 기포의 크기, 분포, 기포의 비표면적(α : 단위기포체적당 기포의 표면적)과 간격계수(\bar{L} : 기포간의 거리)이며 일반적으로 기포가 작을 때 α 값은 커지고 \bar{L} 값은 작아진다. 기포간의 거리가 가까울수록(간격계수가 작을수록) 동결시의 팽창압력의 분산이 용이하여 동결융해 저항 성능이 향상된다⁹⁾. 공극간의 간격계수를 측정된 결과를 굳지 않은 상태에서 측정된 공기량과 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 공기량이 증가됨에 따라 간격계수는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 AE제의 첨가에 따른 연행공기의 증가로 인하여 미세한 공극이 다량으로 분포되므로, 그만큼 공극간의 거리는 감소하므로 간격계수 또한 감소하는 것으로 평가된다. Fig. 15로부터 공기량의 증대에 따른 간격계수의 감소 정도를 파악할 수 있으며, 결정계수도 89%로 비교적 높게 평가되었다. 콘크리트 내부 연행공기량의 증감이 간격계수에 미치는 영향이 지배적임을 확인할 수 있었다.

4.5 깊이에 따른 공극 분포 특성 고찰

콘크리트 중의 공기량은 제작시의 다짐, 성형의 과정에서 기포의 이동이나, 생성, 소멸 될 수 있으며, 높이 혹은 골재의 분포에 따라 달라질 수 있다. 특히, 콘크리트 포장체의 경우는 포설 장비의 진동으로 인하여 포장체 상·하

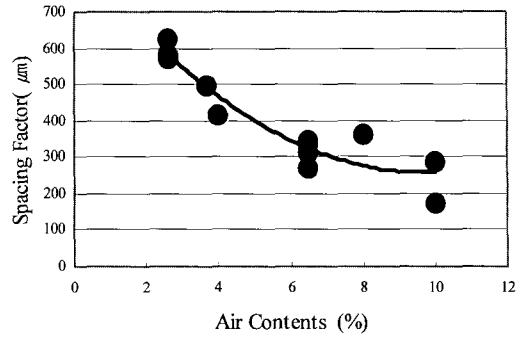
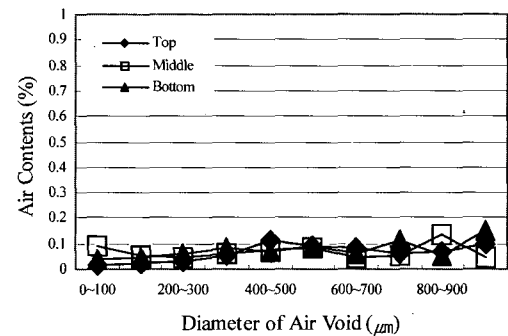
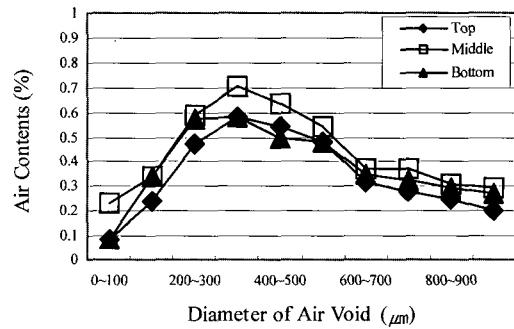


Fig. 15 Comparison of spacing factor



(a) AE 0%



(b) AE 0.03%

Fig. 16 Size distribution of air voids with depth

부의 공극 구조 상태가 많이 다를 수 있으며 또한, 대기 환경에 직접 노출되어 있는 상부부터 열화가 시작되며 점차 하부로 진전되므로 콘크리트 깊이에 따른 공극 구조의 파악은 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 16은 AE제 첨가량에 따른 공시체 깊이별 공극 구조를 1000 μm 이하의 연행 공극 직경에 따라 나타낸 그래프이다. 그래프에서도 확인할 수 있듯이, 깊이에 따른 뚜렷한 특성 변화는 확인되지 않으며, 비교적 유사한 공극 분포를 나타내고 있다. Figs. 17, 18은 중부고속도로 현장에서 획득한 시편으로 공극 직경에 따른 분포 특성과 공극 구조 상태를 확인하고자 화상분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다.

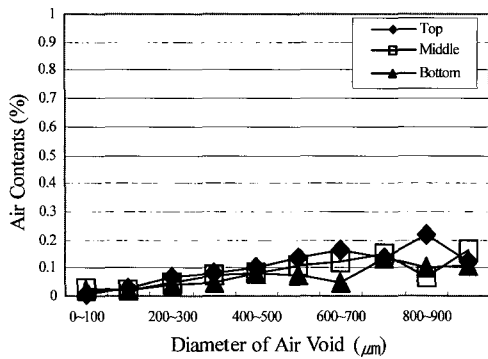


Fig. 17 Comparison of size distribution of air voids with depth (field)

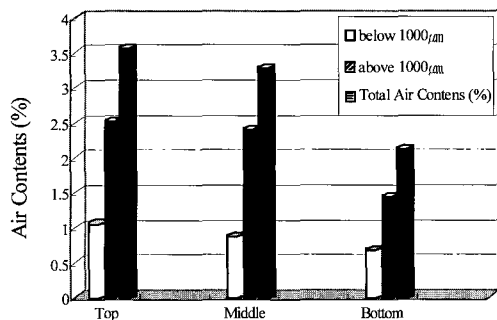


Fig. 18 Comparison of air voids system (field)

Fig. 17에서 확인할 수 있듯이, 1000 μm 이하의 비교적 미세한 공극의 직경에 따른 분포 특성의 차이는 뚜렷이 확인되지 않았으나, Fig. 18에서와 같이 연행공극과 갇힌공극을 구분한 공기량은 확연한 차이가 나타났다. 전체 공기량의 차이는 연행공극량 보다는 갇힌 공기량에 의하여 차이나 나타나는 것으로 나타났다. 상부와 하부의 시편을 비교해 보았을 때, 전체 공기량에는 약 1.5% 정도 차이가 있으며, 그 중 약 1.1%가 갇힌 공기량의 차이로 확인되었다. 그러나, 모든 깊이에서 갇힌 공기량과 연행공극량의 비율은 7:3으로 유사하게 나타났다. 그래프에서와 같이, 전체 공기량은 상부가 가장 크며, 하부가 가장 작은 공극 구조를 나타내었다. 이는 실내 실험과는 달리 콘크리트 다짐을 위한 건설 장비의 과도한 진동의 영향으로, 콘크리트 타설 시 공기가 상부로 이동되는 블리딩(bleeding) 현상과 같은 영향으로 평가된다.

5. 결 론

본 연구에서는 화상분석법을 통하여 경화 콘크리트의 공기량 및 공극 직경에 따른 분포 특성, 공극 구조 상태 분석, 간격계수를 산정함으로써 좀 더 합리적이고 체계적

인 방법으로 콘크리트의 내부 공극 구조를 평가하고자 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 콘크리트 공극 구조분석을 위해 적용한 화상분석법의 경우 기존의 실험방법에서는 확인할 수 없었던 공극크기 및 공극분포상태, 연행공극 및 갇힌공극의 구분, 직경별 공극수 등 매우 다양한 정보의 추출이 가능하였으며 이를 통해 콘크리트 성능에 미치는 공극 영향을 보다 심도있는 연구할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 2) 공기량의 변화에 따른 공극 구조의 특성을 파악하기 위하여 실험을 실시한 결과, AE제 첨가량이 증가함에 따라 약 200~600 μm 정도의 미세한 연행공극량이 증가함을 알 수 있었다. 그리고 압력법과 화상분석법으로 측정된 공기량의 차이는 경화 전·후 공기량 차이로 판단되며, 경화 후 ASTM 방법(linear traverse method)과 화상분석법으로 측정된 공기량은 거의 유사하게 평가되었으므로 화상분석법으로도 경화 콘크리트의 공기량을 정도 높게 측정할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 공기량 감소에 따른 강도감소 영향은 기존의 연구와 일치하는 결과를 나타내었다.
- 3) 콘크리트 깊이에 따른 공극 구조의 특성을 파악하기 위하여 공시체를 깊이별(상, 중, 하)로 절단하여 공극 구조를 분석한 결과, 실내에서 실험한 동일 변수의 경우, 깊이에 따른 공극 직경별 분포 특성이나 공극 구조 상태가 유사하게 나타났다. 그러나 현장에서 획득한 시편을 분석한 결과, 전체 공기량은 상부가 가장 크며, 하부로 갈수록 작아지는 경향을 나타내었다. 이는 콘크리트 다짐을 위한 장비의 과 진동에 의한 영향으로 공기가 상부로 이동되는 현상(bleeding)의 결과로 사료된다.
- 4) 연구 결과 기존의 연구에서와 마찬가지로 간격계수를 산정하는 것뿐만 아니라 경화 콘크리트의 공기량, 공극 직경별 공극 분포, 공극 구조 상태를 분석함으로써 좀 더 합리적이고 객관적인 방법으로 화상분석법을 통하여 경화 콘크리트 내부의 공극 구조를 평가하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김생민, "고강도콘크리트의 동결융해저항에 미치는 기포조직의 영향", 콘크리트학회지 4권 1호, 1992, pp.89~95.
2. 임정호, "플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성 및 기포조직에 관한 연구", 박사학위논문집, 명지대학교, 1997.
3. 김기철, "화상분석기를 이용한 경화 콘크리트의 기포측정법 개발에 관한 연구", 석사학위논문집, 대구대학교, 1998.

4. Verbeck G.J., "The Camera Lucida Method for Measuring Air Voids in Hardened Concrete," *Research Laboratories of the Portland Cement Association*, Vol.43, 1947, 1025pp.
5. Powers T. C., "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete," *Research Laboratories of the Portland Cement Association*, Vol.29, 1949.
6. Brown L. S. and Pierson C. U., "Linear Traverse Technique for Measurement of Air in Hardened Concrete," *Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association*, Vol.47, 1951, 117pp.
7. Powers T. C., "Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete," *Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association*, Vol.50, 1954, 741pp.
8. Hansen, W., "Quantitative and Rapid Measurement of the Air-Void System in Fresh Concrete," Strategic Highway Research Program, Washington D.C. 1991.
9. Pigeon M., Pleau R., "Durability of Concrete in Cold Climates," E & FN SPON, 1995, pp.43~115.
10. Bui Dinh and Choi T. S., "Application of image processing techniques in air/water two phase flow," *Mechanics Research Communications*, Vol.26, No.4, 1999, pp.436~468.
11. Cady P. D and Aligizaki K.K., "Air content and size distribution of air voids in hardened cement pastes using the section-analysis method," *Cement and Concrete Research* 29, 1999, pp.273~280.
12. Ammouche A., Breyse D., Hornain H., Didry O., and Marchand J., "A new image analysis technique for the quantitative assessment of microcracks in cement-based materials," *Cement and Concrete Research*, Vol.30, 2000, pp.25~35.
13. Pleau R, Pigeon, M, and Laurecot J. L., "Some findings on the usefulness of image analysis for determining the characteristics of the air-void system on hardened concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol.23, 2001, pp.237~246.
14. Peterson K.W, Swartz R.A, Sutter L.L, and Van Dam T.J., "Air Void Analysis of Hardened Concrete with a Flatbed Scanner," Transportation Research Board, Washington, D.C. 2001.
15. Elsen J., "Automated air void analysis on hardened concrete Results of a European intercomparison testing program," *Cement and Concrete Research*, Vol.31, 2001, pp.1027~1031.
16. Monteiro P. J. M., Corr D. J., Lebourgeois J., Bastacky S. J., and Gartner E. M., "Air void morphology in fresh cement pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol.32, 2002, pp.1025~1031.
17. American Society for Testing and Materials, "Microscopical Determination of Air-Void Content and Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete," Annual book of ASTM Standards, Vol.4. No.2, 1982.

요 약

경화 후 콘크리트 내부 공극은 간격계수로 특정지어질 수 있으며 이는 동결융해 저항성, 표면박리 저항성 그리고 투수성과 같은 콘크리트의 내구성에 매우 중요한 영향을 주게 된다. ASTM에 규정되어 있는 리니어트래버스방법과 수정포인트카운트 방법은 이러한 콘크리트의 공극 구조를 분석하기 위하여 사용되어져 왔다. 그러나, 이들 방법은 많은 시간과 노력을 필요로 하며 반복측정성 또한 신뢰성이 높지 못한 단점을 가지고 있다. 화상분석방법은 미세현미경, 디지털카메라 그리고 컴퓨터 프로그램을 이용하여 경화 후 콘크리트의 내부 공극 구조에 활용되어 질 수 있는 방법이다. 본 연구의 목적은 화상분석법의 개발과 기존의 ASTM방법에 의한 결과를 비교분석하여 사용성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 공기량과 공극분포, 공극 구조 및 간격계수와 연관성을 분석하였다. 실험적 변수는 공기연행계의 첨가률에 따른 공기량 변화와 시편 깊이에 따른 공극 구조를 비교분석하였다. 실험결과 화상분석기법을 사용할 경우에도 간격계수의 산출이 가능하였으며 또한, 공기량, 공극크기분포, 공극 구조 등을 분석할 수 있었다.

핵심용어 : 콘크리트, 공극, 간격계수, 화상분석, 연행공기