

콘크리트 공극 분석을 위한 평면간격계수의 제안

Proposal of Plane Spacing Factor for Analyzing Air Void System in Concrete

정 원 경* 최 성 용** 김 성 환** 윤 경 구***
Jeong, Won-Kyong Choi, Sung-Yong Kim Sung-Hwan Yun, Kyong-Ku

Abstract

Air void systems in hardened concrete has an important influence on concrete durability such as freeze-thaw resistance, water permeability, surface scaling resistance. Linear traverse method and point count method described at ASTM are the routine analysis of the air void system that have been widely used to estimate the spacing factor in hardened concrete. Recently, many concretes often have a spacing factor higher than the generally accepted 200-250 μ m limit for the usual range of air contents. This study is proposed to estimate the plane spacing factor by calculation of simplicity. The plane spacing factor need two parameters that are air content and numbers of air voids in the hardened concrete. Those obtained from the standard air-void system analysis of the ASTM C 457. The equation is valid for all values of paste-to-air ratio because the estimation of paste content is unnecessary at the using ASTM C 457. The plane spacing factor yields a similar estimate of the standard spacing factor.

키워드 : 공극 구조, 내구성, 평면간격계수, 공기량

Keywords : *air void system, durability, plane spacing factor, air content*

1. 서 론

콘크리트 내부 공극 시스템과 내동결성의 상관성은 이미 1930~40년대에 인식되어 공극 형성메카니즘과 콘크리트 내구성에 관한 연구가 이루어져 왔다[4]. 물이 있는 공극 내에서 얼음이 형성될 때, 인장응력은 시멘트페이스트 내에서 산출된다. 인장응력발생 원인은 수분이 액체상태에서 고체상태로 변화할 때는 발생하는 9%의 체적증가 현상에 의한 것이다. 시멘트페이스트에 의해 구속된 공극이 포화된 조건에서 동결하게 되면 공극 내부의 얼음은 점진적으로 형성되고 잉여수분이 공극의

외벽방향으로 밀려나가는 현상이 생기게 된다. 동결과정에서 발생하는 현상은 수분을 모세관 밖으로 밀어내어 시멘트페이스트 내부로 수분을 침투시키게 된다. 이때 콘크리트 내부에서는 정수압에 의한 응력과 침투압에 의한 응력집중이 발생하게 된다. 공극 외벽을 통과한 수분은 다공성의 시멘트페이스트를 통해 근접한 경계로 흐르려는 경향을 보인다. 이때 콘크리트 공극 시스템인 공기 연행은 시멘트페이스트 내부의 수분흐름 통로로 작용하게 된다. 수분흐름 통로로 작용하는 내부 연행 공극의 거리와 양이 시멘트페이스트의 인장응력을 초과하지 않는 정수압과 침투압 범위 내에 위치하여 응력을 감소시킨다면 콘크리트는 내동결성을 유지할 수 있게 된다[8]. 즉, 공극들이 충분히 근접해 있다면 수분흐름에 따른 압력은 피해를 주지 않을 것이며 물은 심각한 내부 압력의 발생 없이 공극 내에서 동결할 수 있게 된다.

* 강원대학교 토목공학과 대학원 공학박사

** 강원대학교 토목공학과 대학원, 박사과정

*** 강원대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

콘크리트의 내동결성과 관련된 많은 연구에서 물-시멘트비 및 단위시멘트량, 단위골재량, 특수혼화제 등으로 내동결성 향상이 가능한 것으로 보고되고 있으나 콘크리트 공극 구조 변화를 통한 내동결성의 향상이 가장 경제적이며 효과적인 것으로 보고되고 있다[3].

이러한 내부 공극의 특성을 규정짓는 것이 공극간의 거리를 실제적으로 측정하는 것이다. 공극간의 거리로 표현되는 간격계수는 Powers에 의해 최초로 제안되었으며[10] 콘크리트 내부 공극을 특성짓는 규정치로 정의되어 ASTM C 457에 측정방법과 그 의미를 구분하고 있으며[6] 이를 근거로 오늘날까지 널리 활용되고 있다. 그러나 Powers에 의해 제안되고 ASTM에 규정된 간격계수의 경우 실제 공극간 거리 산출을 위한 가정의 부정확성과 복잡한 실험방법 그리고 지난 50여 년 전에 규정된 제한값 등으로 오늘날의 발전된 건설 현실에서의 내동결성과 연관된 신뢰도가 떨어지고 있다[4, 5].

본 연구에서는 콘크리트 공극간의 간격을 실제적인 접근보다 간편하고 단순화된 개념으로 산출하는 새로운 평면간격계수 모델식을 제안하고자 하였다. 콘크리트 내부에 존재하는 공극분석을 위한 방법으로는 ASTM 규정법과 화상분석법 모두에서 측정변수를 최소화하여 측정과정 발생되는 복잡성과 오차를 줄이고자 하였다. 제안된 평면간격계수는 기존의 모델식과는 달리 실제 콘크리트 내부 공극간의 거리 산출이 아니며 측정된 최소한의 변수에 의해 공극시스템을 재평가하여 특성치를 부여하는 것이다.

2. 공극 구조특성 분석 방법 및 분석계획

콘크리트의 공극 시스템을 분석하는 방법은 ASTM C 457에서 제시하고 있는 방법 중 리니어 트레버스방법과 수정포인트카운트방법이 유일하며, 이들 방법은 이미 50년여 전에 제시된 방법으로 현재까지 사용되어져 오고 있다[10]. 그러나, 이들 방법은 간격계수(Spacing factor)를 산정하기 위해 관찰하여야할 변수가 너무 많아 측정 및 분석에 소요되는 시간과 오차발생 가능성이 높은 단점을 가지고 있다[8].

이를 개선하고자 최근에 도입되고 있는 방법이 화상분석을 이용한 콘크리트의 미세공극 분석법이다[7]. 화상분석은 현장시편의 직접적인 관찰, 비전문인력활용가능, 분석장비의 단순화, 분석과정의 간편성, 보다 다양한 정보 획득 등의 장점[1, 2, 3]을 가지고 있으나, 분석과정 상 객관화된 기준이 없는 관계로 인하여 사용에 제한을 받고 있다. 본 연구에서는 화상분석과 ASTM C 457에 의해 간격계수를 산출하였으며 이를 제안된 평면간격계수와 비교분석하고자 하였다.

2.1 화상분석 방법

ASTM C 457에 규정된 리니어트레버스방법과 수정포인트카운트방법은 시간과 노력이 많이 소요되어 사용에 한계를 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 현미경을 통하여 화상을 획득한 뒤 컴퓨터에 의해 화상을 분석하는 화상분석법이 몇몇 연구자에 의해 연구되고 있다[3]. 화상분석법은 공극간의 거리로 설명되어지는 간격계수 산정도 가능하며 공극이 갖는 정보 제공도 가능하다. 분석된 데이터는 컴퓨터 파일로 저장되며, 필요한 항목의 조합으로 여러 가지 측정 변수들의 측정이 가능하다. 측정된 변수를 살펴보면, 측정된 총 기포수(NA), 전체 화상면적(S), 그리고 전체 기포면적(ai)으로 구별되며 이러한 변수를 통해 다음과 같은 식으로 평균 기포면적, 기포면적, 그리고 비표면적을 구할 수 있다[2].

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^{NA} a_i}{NA} : \text{평균 기포면적}$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{NA} a_i}{S} : \text{공기량}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{6\pi}{a}} : \text{비표면적}$$

이를 통하여 공극간의 간격계수를 산출하기 위한 식은 ASTM에 의한 다음과 같이 계산된다.

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

p/A : paste/air ratio

2.2 실험계획

본 연구에서는 제안된 평면간격계수를 검증하기 위하여 화상분석법과 기존의 간격계수 발표자료를 이용하여 제안된 평면간격계수값과 비교검토하여 콘크리트 내부 공극 특성 평가 가능성을 고찰하였다. 화상분석법 연구를 위한 실험은 총 67개의 시편을 제작하여 분석에 적용하였다. 각 시편의 재료적 변수는 무시하였으며 내부 공극 구조 변화에 기초하여 시편을 제작하였다. 또한 ASTM C 457에 의해 산출된 간격계수와의 비교분석을 위하여 기존 발표자료를 인용하였다.

표 1은 화상분석에 사용된 콘크리트 배합특성을 나타낸 것이다. 시멘트 종류에 변화에 주어 수화생성물의 차이에서 오는 내부 공극의 변화를 목적으로 하였다. 또한, 콘크리트의 내부 구조에 변화를 주기 위하여 AE제량 및 폴리머 혼합물을 사용하였다. 그러나, 본 연구에서는 재료적 차이에서 오는 내부 공극 구조 변화만을 연구하였으며 재료적 변수에서 오는 경화 후 콘크리트의 성능은 무시하였다.

표 1 시방배합표

| | W/C (%) | S/a (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | | Anti-foam (%) | AE (%) |
|---------|---------|---------|----------------------------------|-----|-----|------|-----|---------------|--------|
| | | | W | C | S | G | L | | |
| OPC | 45 | 51 | 177 | 392 | 714 | 1072 | | | 0 |
| | | | | | | | | | 0.01 |
| | | | | | | | | | 0.03 |
| LMC | 33 | 58 | 81.5 | 390 | 958 | 737 | 122 | | |
| VES | 38 | 58 | 148 | 390 | 779 | 997 | | | |
| VES LMC | 38 | 58 | 43 | 390 | 918 | 706 | 122 | 1.0 | |
| HES | 31 | 50 | 59 | 400 | 824 | 908 | 125 | . | |
| | 32 | 50 | 61 | 400 | 821 | 905 | 125 | 0.5 | |
| LMC | 34 | 50 | 71 | 400 | 809 | 891 | 125 | . | |
| | 35 | 50 | 73 | 400 | 806 | 888 | 125 | 0.5 | |

3. 평면간격계수 모델식 제안 및 분석

3.1 행렬을 이용한 내부 공극 구조 평가 제안

본 연구에서 제안되는 평면간격계수의 전개에 있어서 기본이 되는 가정은 다음과 같으며 그림 1과 2에 따라 순차적으로 전개된다. 제안되는 평면간격계수의 전개에 있어서 기본이 되는 가정은 다음과 같다. 첫 번째, 공극은 콘크리트 내에 균질하게 분포하며 골재량에 영향을 받지 않는다. 두 번째, 측정된 공극은 단위면적당 행렬관계로 재배열되며 이때 모든 공극은 직경과 배열되는 거리가 동일하다. 마지막으로 측정된 공기량은 동일 콘크리트의 미소면적에서도 동일하게 분포한다. 본 연구에서 제안되는 평면간격계수의 산정에 기초된 가정은 기존의 제안 모델식에서도 적용되었던 것들이다. 평면간격계수는 기존 모델과는 달리 불균질성의 콘크리트에서 측정가능한 변수를 최소화하여 콘크리트 공극 구조를 재평가한 것이다. 이를 위한 수학적 모델의 전개는 다음과 같다.

평면간격계수로 특성지어지는 콘크리트 내 공극 구조의 재평가방법은 단위면적당 n개의 공극수를 갖는 단면의 공기량을 평균공극수로 나누어 m×m 행렬로 배열한 후 행렬간 거리를 통해 간격계수를 구하는 것이다. 화상분석법을 이용할 경우, 단위면적당(cm²) 공극수(n)는 측정된 전체면적(A_t)과 그 과정에서 측정된 모든 공극수를 통해 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{단위면적당 공극수 } (n) = \frac{N}{A_t} \quad (1/cm^2) \quad (1)$$

측정된 공기량은 전체공극수에 대한 평균공극면적으로 바꾸어 계산하고, 공기량이 모든 미소면적

에서 동일하다는 가정을 설정하게 되면 공기량은 모든 단위면적당(cm²) 공극수에 의한 식(2)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} A.C(\%) &= \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{A_t} \times 100 = \frac{A_D N}{A_t} \times 100 \\ &= \frac{A_D n}{1} \times 100 \end{aligned}$$

$$A_D(\text{공극평균면적}) = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N} \quad (2)$$

단위면적당 존재하는 공극수(n)를 동일한 크기의 공극으로 환산하기 위하여 공극의 평균면적을 구한다. 이때, 식(2)를 이용하여 측정된 공기량을 단위면적당 공극수로 나누면 식(3)과 같이 단위면적당 동일한 크기로 분포되는 n개의 공극에 대한 평균면적을 구할 수 있게 된다.

$$\text{공극평균면적 } A_D = (A.C/100)/n \quad \text{cm}^2 \quad (3)$$

따라서, 공극의 평균직경(D)은 다음의 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{\left(\frac{4A_D}{\pi}\right)} = \sqrt{\left(\frac{4A.C}{100n\pi}\right)} \\ &= \sqrt{\left(\frac{A.C}{25n\pi}\right)} \quad (\text{cm}) \quad (4) \end{aligned}$$

측정된 공기량에 대하여 단위면적(cm²)에 존재하는 동일한 크기로 가정된 직경 D를 갖는 n개의 공극을 구하였다. 이러한 n개의 공극을 1×1cm²의 면적에 동일한 간격으로 배치하기 위하여 n개의 공극을 갖는 정방행렬을 구하면 식(5)와 같다. 이때, 정방행렬은 옆 단면의 공극과의 거리를 동일하게 평가하기 위하여 단면의 각 경계부에 추가된 공극 행렬로 계산한다. 그러나, 추가된 행과 열은 식 2의 공기량과 단위행렬에 영향을 주지 않는다.

$$\text{공극행렬} = \sqrt{n} + 1 \quad (\text{정방행렬}) \quad (5)$$

이때 배열된 공극의 직경에 의해 차지되는 행과 열의 길이는 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{공극 행 총길이}(L_v) &= (\sqrt{n} + 1) \times D \quad (\mu\text{m}) \\ \text{남는 행 길이}(L_L) &= 10000 - L_v \quad (\mu\text{m}) \quad (6) \end{aligned}$$

따라서, 공극이 차지하는 행과 열의 길이를 뺀 나머지의 행과 열의 길이를 식(5)에서 구한 정방행

렬간의 거리로 놓게 되면 행렬간의 거리는 $\sqrt{n} + 1$ 의 정방행렬을 $\sqrt{n} + 2$ 의 간격으로 균등하게 분할하여 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{공극간 행 길이}(L_m) &= \frac{L_L}{\sqrt{n} + 2} \\ &= \frac{10000 - L_v}{\sqrt{n} + 2} \mu\text{m} \quad (7) \end{aligned}$$

식(7)의 거리로 각각 배열된 공극의 행렬에서 공극간 거리는 각 공극의 외주에서 서로 인접한 최단거리이므로 식(7)을 반으로 나누어 평가할 수 있으며, 이를 식(8)과 같이 표현하며 평면간격계수(plane spacing factor:P.S.F)라 한다.

$$\text{P.S.F} = \frac{L_m}{2} (\mu\text{m}) \quad (8)$$

이렇게 구한 평면간격계수를 식(4)~식(6)에서 인용된 변수를 대입하여 정리하면 다음과 같은 식(9)로 평면간격계수를 간편하게 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{P.S.F} &= \frac{[(1 - 0.113\sqrt{A}(1 + \frac{1}{\sqrt{n}})]}{2(\sqrt{n} + 2)} \text{cm} \\ &= \frac{5000[1 - 0.113\sqrt{A}(1 + \frac{1}{\sqrt{n}})]}{\sqrt{n} + 2} \mu\text{m} \quad (9) \end{aligned}$$

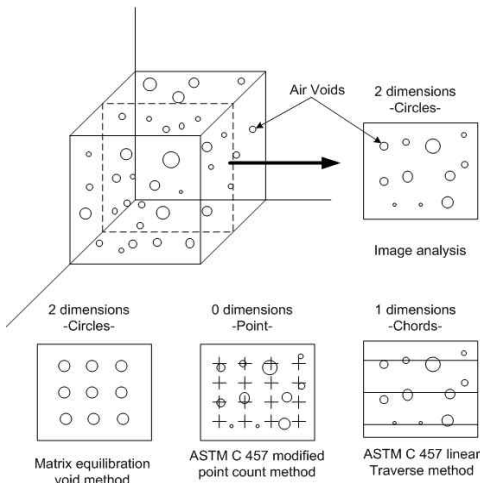


그림 1 콘크리트 내부 공극 분석을 위한 분석 방법(Pigeon, 1992)

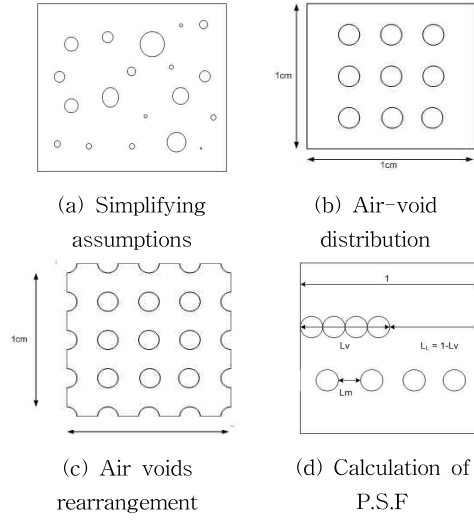


그림 2 평면간격계수 계산을 위한 내부 공극 이상화 및 분석 단계

3.2 평면간격계수의 민감도 분석

콘크리트 내부 공극 구조를 특성짓기 위한 방법으로 본 연구에는 기존의 관찰방식을 이용하여 관측이 가능한 공기량과 공극수를 측정한 후 시멘트 페이스트 내 배열되는 행렬 공극식을 유도하여 평면간격계수를 제안하였다. 평면간격계수는 시멘트 페이스트 내에만 존재하는 공극에 대하여 동일한 크기로 환산한 후 단위면적에 대하여 동일한 직경을 갖는 공극이 최소한의 거리를 유지하도록 행렬식으로 배열한 후 공극간의 외주로부터의 거리를 구한 후 그 거리의 절반을 평면간격계수로 정의하였다.

그림 3은 공기량 변화 1~8%에 대하여 단위면적당 공극수로 계산된 평면간격계수를 나타내고 있다. 이를 살펴보면, 공기량이 증가함에 따라 계산되어지는 평면간격계수가 감소됨을 알 수 있다. 즉, 단위면적당 존재할 수 있는 공극수의 크기에 따라 공극간 거리가 감소됨을 알 수 있다.

동일한 공극간 동일 거리로 정의되는 평면간격계수는 적정공기량에 대하여 연행되어질 수 있는 공극수를 제한할 수 있는 장점을 가지고 있다. 단위면적당으로 표현되는 공극수를 각 공기량에 대해서 제한범위를 제시함으로써 콘크리트 내부에 존재하는 공극의 필요수준을 보다 정량화하여 표현할 수 있으며 각 공기량에 대하여 적정 평면간격계수를 만족하기 위한 공극수의 범위를 통해 콘크리트 내부 공극구조와 내구성 지표에 새로운 평가방법이 될 수 있을 것이다. 평면간격계수에서 요구되는 공기량, 단위면적당 공극수와 직경과의 함수관계를 나타내면 그림 4와 같이 표현된다.

표 2는 화상분석법을 통해 얻어진 변수를 통해

평면간격계수를 구하는 방법을 나타낸 것이다. 이를 살펴보면, 시편전체의 면적은 약 65.65cm^2 이며 관찰된 총 공극수는 9408개, 이때의 공기량은 6.6%였다. 따라서, 전체 미소면적에 동일한 공극수가 존재한다고 가정하면 단위면적당 공극수는 143개이며, 이러한 미소면적당 공극수에 의한 공기량이 전체 면적에 대한 공기량과 일치한다는 또다른 가정에 의해 공극의 평균면적은 0.00046cm^2 로 계산되어지며 기하학을 통해 평균공극직경은 $243\mu\text{m}$ 의 값을 얻을 수 있게 된다. 이렇게 구한 평균공극을 단위면적에 대해 동일한 거리를 갖도록 배열하기 위하여 공극을 정방행렬로 배열한다. 즉, 그림 2(b)와 같이 $\sqrt{143} \approx 12 \times 12$ 행렬로 배열한 후 공극의 직경을 통해 행과 열의 간격을 구한다. 여기서 인접한 미소 단위면적에서의 공극간 거리를 고려하여 단위면적의 경계부에 그림 2(c)와 같이 공극을 배열하여 모든 미소 단위면적을 통하여 연결된 공극간 거리를 동일하다는 가정을 만족시켜주어야 한다. 따라서, 단위 행 또는 열 길이 1cm에서 공극이 차지하는 길이는 $13 \times 243\mu\text{m} = 3159\mu\text{m}$ 이며 공극간 총 길이는 $6841\mu\text{m}$ 이다. 공극간 총길이를 공극간 거리로 균등하게 배열하게 되면, 공극이 13배열일때 이들 간격은 총 14등분이므로 이들 간격 거리는 $6841/14=489\mu\text{m}$ 이고 평면간격계수는 공극간 거리의 이등분값이므로 $245\mu\text{m}$ 로 계산된다.

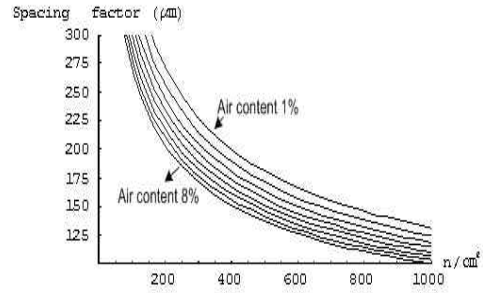


그림 3 공기량과 공극수에 따른 평면간격계수

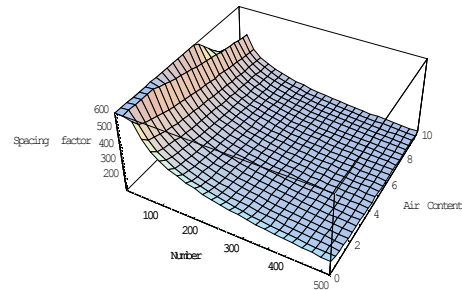


표 2 평면간격계수 계산과정

| Information of specimen by image analysis test | | | |
|--|-------|---------------------------------------|------|
| total area of pixel(cm^2) | | 65.65 | |
| total area of voids(cm^2) | | 4.36 | |
| total # of air voids | | 9408 | |
| ave. area of air void(mm^2) | | 0.046 | |
| ave. diameter of air void(μm) | | 243 | |
| air content(%) | | 6.6 | |
| ASTM spacing factor | | Plane spacing factor | |
| p | 0.385 | # of air void($1/\text{cm}^2$) | 143 |
| A | 0.066 | matrix | 13 |
| $\alpha(\text{mm}^{-1})$ | 20.15 | line of air length(μm) | 3159 |
| p/A | 5.79 | line over line space(μm) | 489 |
| Spacing factor(μm) | 245.8 | plane spacing factor(μm) | 245 |

량을 변수로 하여 구한 평면간격계수의 결과는 193~873 μm 로 분석되어졌다. 규정식에 의한 간격계수와 평면간격계수에 의한 보다 자세한 상관성을 분석하기 위하여 시편 67개에 대한 상관성 결과를 표 4에 나타내었다. 분석결과 Peterson 상관계수는 두 간격계수에 대하여 0.948로 나타나 두 결과값에 대하여 직선적 상관성이 매우 높은 것으로 분석되었다. 화상분석기법에서 얻은 시편의 정보를 이용하여 규정식과 평면간격계수를 산출한 후 그 결과값을 비교한 결과, 상관성은 매우 높게 평가되었으며, 그림 5에서 공기량의 변화에 따른 간격계수와 평면간격계수의 변화는 동일하게 나타났다.

표 3 간격계수와 평면간격계수 계산 결과

| | ASTM standard spacing factor | | | | Plane spacing factor | |
|----|------------------------------|-----------|--|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| | A (%) | p/A ratio | α (mm^2/mm^2) | S.F (μm) | n ($/\text{cm}^2$) | P.S.F (μm) |
| 1 | 2.06 | 15.6 | 13.3 | 579 | 19 | 625 |
| 2 | 1.21 | 26.0 | 27.9 | 344 | 50 | 474 |
| 3 | 5.42 | 6.6 | 18.5 | 284 | 98 | 298 |
| 4 | 2.06 | 15.7 | 9.8 | 792 | 10 | 754 |
| 5 | 1.21 | 26.0 | 22.4 | 428 | 32 | 556 |
| 6 | 5.41 | 6.6 | 15.5 | 340 | 69 | 343 |
| 7 | 2.05 | 15.7 | 7.3 | 1056 | 6 | 873 |
| 8 | 1.21 | 26.0 | 18.7 | 514 | 22 | 632 |
| 9 | 5.39 | 6.6 | 13.6 | 388 | 53 | 379 |
| 10 | 1.88 | 17.1 | 31.7 | 253 | 100 | 346 |
| 11 | 1.87 | 17.1 | 29.9 | 268 | 89 | 362 |
| 12 | 5.93 | 6.1 | 29.2 | 173 | 269 | 193 |
| 13 | 1.86 | 17.2 | 20.7 | 390 | 42 | 484 |
| 14 | 1.86 | 17.3 | 22.4 | 360 | 49 | 456 |
| 15 | 5.88 | 6.1 | 21.4 | 238 | 142 | 253 |
| 16 | 1.83 | 17.5 | 13.0 | 623 | 16 | 668 |
| 17 | 1.85 | 17.3 | 19.9 | 405 | 39 | 499 |
| 18 | 5.81 | 6.2 | 15.9 | 321 | 78 | 322 |
| 19 | 1.63 | 19.6 | 19.8 | 429 | 34 | 532 |
| 20 | 2.36 | 13.8 | 22.0 | 333 | 60 | 411 |
| 21 | 5.35 | 6.6 | 18.6 | 283 | 98 | 299 |
| 22 | 1.62 | 19.6 | 14.9 | 572 | 19 | 647 |
| 23 | 2.35 | 13.8 | 17.1 | 429 | 36 | 497 |
| 24 | 5.34 | 6.7 | 16.2 | 327 | 74 | 334 |
| 25 | 1.61 | 19.7 | 11.9 | 717 | 12 | 744 |
| 26 | 2.34 | 13.9 | 13.9 | 527 | 24 | 573 |
| 27 | 5.32 | 6.7 | 14.7 | 361 | 61 | 361 |
| 28 | 1.49 | 20.47 | 20.31 | 427 | 33 | 544 |
| 29 | 1.49 | 20.43 | 22.35 | 388 | 39 | 507 |
| 30 | 1.49 | 20.42 | 23.71 | 365 | 44 | 485 |
| 31 | 1.78 | 17.55 | 15.84 | 513 | 24 | 597 |
| 32 | 1.79 | 17.38 | 20.32 | 398 | 39 | 499 |
| 33 | 1.81 | 17.28 | 27.19 | 297 | 71 | 398 |
| 34 | 2.28 | 13.87 | 18.43 | 398 | 41 | 477 |

| | ASTM standard spacing factor | | | | Plane spacing factor | |
|----|------------------------------|-----------|--|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| | A (%) | p/A ratio | α (mm^2/mm^2) | S.F (μm) | n ($/\text{cm}^2$) | P.S.F (μm) |
| 35 | 2.31 | 13.75 | 22.21 | 329 | 60 | 413 |
| 36 | 2.32 | 13.68 | 27.46 | 265 | 93 | 348 |
| 37 | 2.56 | 13.48 | 12.68 | 571 | 22 | 586 |
| 38 | 2.58 | 13.34 | 18.65 | 386 | 48 | 445 |
| 39 | 2.60 | 13.23 | 27.84 | 258 | 120 | 309 |
| 40 | 4.55 | 8.00 | 14.16 | 405 | 48 | 405 |
| 41 | 4.56 | 7.98 | 15.81 | 362 | 61 | 372 |
| 42 | 4.57 | 7.96 | 18.42 | 311 | 82 | 331 |
| 43 | 6.62 | 5.82 | 17.52 | 283 | 108 | 275 |
| 44 | 6.64 | 5.80 | 18.64 | 266 | 122 | 261 |
| 45 | 6.65 | 5.80 | 20.16 | 246 | 143 | 245 |
| 46 | 4.77 | 7.78 | 24.0 | 236 | 145 | 261 |
| 47 | 4.77 | 7.78 | 24.0 | 236 | 145 | 261 |
| 48 | 4.75 | 7.80 | 20.0 | 284 | 101 | 303 |
| 49 | 4.73 | 7.83 | 17.8 | 319 | 80 | 333 |
| 50 | 4.67 | 7.65 | 24.3 | 232 | 146 | 261 |
| 51 | 4.67 | 7.65 | 24.2 | 232 | 146 | 261 |
| 52 | 4.66 | 7.67 | 21.9 | 257 | 119 | 285 |
| 53 | 4.64 | 7.70 | 20.1 | 281 | 99 | 307 |
| 54 | 0.94 | 35.76 | 39.5 | 277 | 78 | 406 |
| 55 | 0.94 | 35.76 | 39.5 | 277 | 78 | 406 |
| 56 | 0.92 | 36.49 | 21.6 | 511 | 23 | 642 |
| 57 | 0.90 | 37.18 | 13.2 | 842 | 8 | 875 |
| 58 | 2.41 | 13.97 | 14.0 | 525 | 25 | 563 |
| 59 | 2.41 | 14.00 | 11.5 | 642 | 17 | 641 |
| 60 | 2.41 | 13.98 | 12.2 | 604 | 19 | 617 |
| 61 | 2.41 | 14.00 | 11.5 | 642 | 17 | 641 |
| 62 | 3.57 | 9.0 | 14.5 | 416 | 40 | 452 |
| 63 | 3.57 | 9.0 | 11.3 | 534 | 24 | 537 |
| 64 | 3.56 | 9.0 | 9.7 | 625 | 18 | 593 |
| 65 | 2.57 | 14.3 | 41.7 | 178 | 237 | 232 |
| 66 | 2.52 | 14.6 | 27.3 | 275 | 99 | 335 |
| 67 | 2.44 | 15.0 | 13.4 | 567 | 23 | 577 |

또한, 그림 6에 나타낸 것과 같이 평면간격계수와 간격계수는 단위면적당 공극수에 대하여 일정한 경향을 보이고 있다. 규정식의 경우 공기량, 시멘트페이스트, 공극면적과 개수를 통한 비표면적의 변수 등 계산에 요구되는 많은 측정치로 인하여 간격계수와 상관성분석이 매우 어려운 상황이다. 그러나, 본 제안식의 경우 공기량과 단위면적당 공극수를 시멘트페이스트에 한정하여 보다 용이한 분석이 가능하게 되었다. 단위면적당 공극수와 평면간격계수의 관계를 살펴보면, 단위면적당 공극수가 50개 미만일 경우 계산되어지는 평면간격계수는 350 μm 이상으로 매우 큰 공극간의 간격을 보이고 있으나 50개 이상일 경우는 350 μm 이하로 공극

간의 거리가 규정식의 제한치에 근접함을 알 수 있다. 그림 7은 동일한 해석값을 이용하여 분석한 규정식의 간격계수와 평면간격계수의 결과를 비교 분석하여 나타낸 것이다. 제안된 평면간격계수의 경우 모든 해석범위 내에서 규정식의 간격계수와 유사한 경향을 보이고 있어, 본 연구에서 제안된 평면간격계수가 새로운 콘크리트 내부 공극 구조 분석식으로 사용이 가능할 것으로 판단되었다.

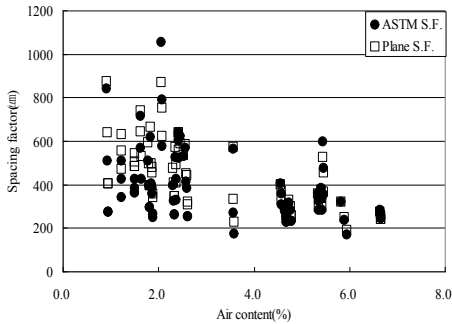


그림 5 공기량에 따른 계수 변화

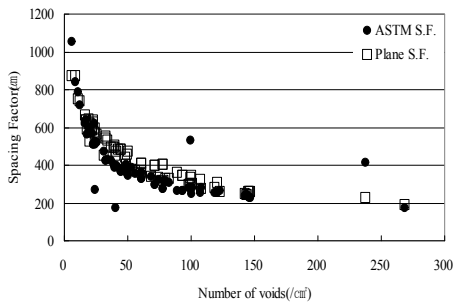


그림 6 단위 공극수에 따른 계수 변화

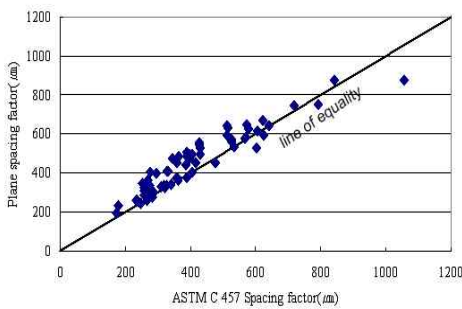


그림 7 간격계수와 평면간격계수의 상관성

표 4 간격계수와 평면간격계수의 상관성분석

| | | Standard S.F | Plane S.F |
|---------------|---------------------|--------------|-----------|
| Standard S.F. | Pearson correlation | 1 | .948(**) |
| | Sig. (2-tailed) | . | .000 |
| | N | 67 | 67 |
| Plane S.F. | Pearson correlation | .948(**) | 1 |
| | Sig. (2-tailed) | .000 | . |
| | N | 67 | 67 |

4.2 ASTM C 457에 의한 평가방법

Pigeon(1990)은 실내실험과 현장실험에서 가수에 따른 퇴비비에 의해 공극 특성과 초기 배합된 AE제 이외에 추가되는 AE제에 의한 공극 변화에 관하여 시간에 따른 공극 특성 변화를 연구 발표하였다.⁹⁾ Pigeon은 분석하고자 하는 콘크리트 시편에 대해 ASTM의 수정포인트카운트방법을 사용하여 변수를 측정한 후 비표면적과 간격계수를 발표하였다.

기하학적 개념에서 비표면적이란 표면적을 체적으로 나눈 값으로 정의된다. 즉, 원에 대한 비표면적은 원의 표면적 πD^2 과 원의 체적 $\frac{\pi D^3}{6}$ 의 관계

로 정의된다. 따라서, 이미 제시된 비표면적은 $\frac{6}{D}$ 이며, 공극평균직경과 공기량의 변수를 갖는 평면간격계수는 식(9)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{공극평균직경}(D) = \frac{6}{\alpha}$$

$$\text{P.S.F} = \frac{[(1 - 0.113\sqrt{A} - D)]}{(0.226\sqrt{A}/D + 4)} \text{ (cm)}$$

기존에 제안된 공극특성식들은 과거에 연구되어 발표된 자료를 활용할 수 없는 단점을 가지고 있다. 즉, 과거 연구자료에는 ASTM을 이용하여 계산되어진 공기량, 간격계수와 공극직경 혹은 비표면적의 결과값만을 제시함으로 제안된 특성식들과 비교분석할 수 있는 정보가 극히 제한적이다. 따라서, 제안된 공극 특성식을 활용하기 위해서는 과거 연구자료를 분석할 수 없어 많은 시간과 노력을 기울여 다시 검증해야하는 과정을 걸치게 된다. 그러나 평면간격계수로 정의되는 본 연구의 제안식은 과거 연구자료에서 제시한 값만으로도 계산이 가능하며 이를 간격계수와 비교분석함으로써 단위면적당 배열되는 공극간 행렬거리로 정의되는 평면간격계수를 콘크리트 내부 공극 구조 분석에 대한 평가지수로 활용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

과거 Pigeon의 연구자료에 의해 계산된 평면간

격계수와 Pigeon이 수정포인트카운트방법을 사용하여 직접 계산한 간격계수와 상관성을 분석한 것이 표 5이다. 73개 결과자료에 의해 분석된 두 계수간의 상관성은 0.978로 나타나 그림 8과 같이 직선관계임을 알 수 있다. 그림 9는 공기량에 따른 평면간격계수를 나타낸 것으로 공기량의 증가함에 따라 평면간격계수가 감소되는 일반적인 경향을 잘 나타내고 있다. 또한 그림 10은 제시된 연구자료에 의해 계산된 단위면적당 공극수와 평면간격계수 그리고, 간격계수와 상관성을 나타내고 있다. 이를 살펴보면, 간격계수 250 μ m이하를 만족하는 단위면적당 공극수는 약 60~70개로 평가되며, 이에 해당하는 평면간격계수는 약 350 μ m로 나타났다. 단위면적당 공극수에 대하여 간격계수와 평면간격계수의 변화는 동일한 경향을 보이고 있다.

본 연구에서 제안된 평면간격계수는 과거의 연구자료에 제시된 결과로 계산이 용이하므로 이를 통해 다양한 연구자료 분석이 가능하며 콘크리트 내부 공극 특성과 연계하여 하나의 지수로 표현이 가능하다. 평면간격계수는 ASTM에 의한 공극 측정변수를 사용할 수 있으며, 이렇게 산정된 규정식과는 다소 차이를 갖고 있으나 공기량 변화 및 공극수에 따른 경향은 동일하게 평가되었다.

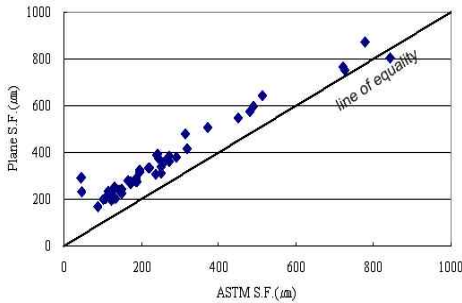


그림 8 간격계수와 평면간격계수의 상관성

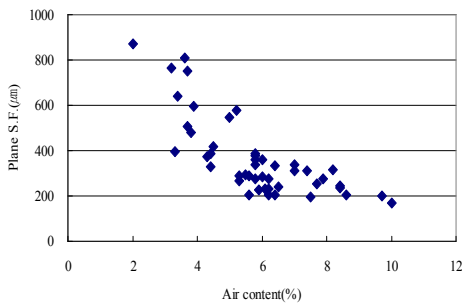


그림 9 공기량에 따른 평면간격계수 변화

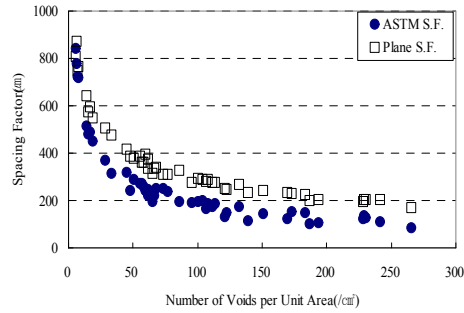


그림 10 단위공극수에 따른 계수 변화

표 5 간격계수와 평면간격계수 상관성분석결과

| | | Plane S.F | Standard S.F |
|-------|---------------------|-----------|--------------|
| P.S.F | Pearson correlation | 1 | .978(**) |
| | Sig. (1-tailed) | . | .000 |
| | N | 73 | 73 |
| S.F | Pearson correlation | .978(**) | 1 |
| | Sig. (1-tailed) | .000 | . |
| | N | 73 | 73 |

5. 결론

본 연구는 콘크리트 공극구조를 정의하고 평가함에 있어서 기존의 방식에서 다루지 않았던 단위공극수를 이용하였다. 관찰된 모든 공극은 시멘트 페이스트 내에만 존재한다는 가설을 기초로 2차원 평면에서 동일 공극으로 환산한 후 행렬개념을 이용하여 간격거리를 제안하였다. 제안된 식에서의 측정변수는 공기량과 전체공극수이며 이는 콘크리트 내부 공극 분석에 사용되고 있는 화상분석법을 사용할 경우 매우 용이하고 정확하게 구할 수 있게 된다. 제안된 평면간격계수에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 콘크리트 공극 구조에 대한 특성을 규정짓는 간격계수를 구하기 위해서는 공기량, 시멘트페이스트, 비표면적, 공극수 등의 변수를 측정하여야 한다. 그러나, 본 연구에서 제안된 평면간격계수의 경우 측정변수를 공기량 및 공극수로 하여 실내시험 측정에서 발생가능한 오차를 감소시켰다.

2. 평면간격계수는 콘크리트 내부 공극 구조를 보다 단순화하고자 하였으며, 사용된 가정은 첫째 모든 측정 공극은 시멘트페이스트 내에만 존재하며 둘째, 측정된 전체 면적에서 조사된 공기량은 미소 단위면적당 공기량과 동일하며, 셋째, 공극의

크기는 개수와 공기량의 관계를 통해 동일 공극으로 전환이 가능하다는 가정을 전제로 전개되었다.

3. 규정식과의 상관성을 분석하기 위하여 콘크리트 시편 67개에 대하여 화상분석을 실시하였다. 내부 공극 구조를 달리한 콘크리트 시편 67개의 규정식과 평면간격계수를 비교분석한 결과, 두 결과값에 대한 상관성은 0.948로 매우 높게 측정되었으며, 공기량 분포에 따른 규정식과 평면간격계수의 변화는 동일한 것으로 나타났다.

4. 본 연구에서 제안된 평면간격계수에 대한 수치해석결과, 공기량 변화와 평면간격계수, 공극직경 변화와 평면간격계수 변화의 결과를 얻었다. 이러한 공기량과 공극수에 따른 평면간격계수의 예상치를 활용한다면 콘크리트 내부 공극구조의 정량적 표현과 각 조건에서의 내구성 지수를 알 수 있다면 내구성 예측에 대한 또다른 표현이 가능할 것으로 판단되었다.

5. ASTM C 457 중 수정포인트카운트방법을 이용하여 측정된 데이터와 이 자료에 의해 산출된 평면간격계수를 평가한 결과, 공기량이 매우 미소할 경우 행렬 간 간격은 간격계수보다 약 13% 높게 해석되었다. 그러나, 전체적인 공기량에서 공기량과 공극수에 의한 평면간격계수로도 콘크리트 내부 공극 구조를 특성 지을 수 있는 하나의 설정값으로 사용이 가능함을 알 수 있었으며 특히, 적정 공기량 범위에서는 평면간격계수값이 간격계수값과 동일한 값을 나타내는 것으로 분석되었다.

6. Pigeon의 연구자료에 수록된 수정포인트카운트 방법에 의해 측정된 비표면적과 간격계수만을 이용하여 제안된 평면간격계수를 산출하고 두 결과값만을 비교분석하였다. 73개 결과자료에 의해 분석된 두 계수간의 상관성은 0.978로 직선관계로 표현되었으며, 공기량의 증가함에 따라 평면간격계수가 감소되는 일반적인 경향을 잘 나타내었다. 또한 단위면적당 공극수에 대하여 간격계수와 평면간격계수의 변화는 동일한 경향을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] 권혁찬, "화상분석법을 통한 경화 콘크리트의 내부 공극 구조 분석", 강원대학교, 2004, 석사학위논문.
- [2] 김기철, "화상분석기를 이용한 경화콘크리트의 기포측정법 개발에 관한 연구", 대구대학교, 1998, 석사학위논문.
- [3] 전인구, "콘크리트 공극구조 분석을 위한 화상분석법 개발 및 적용", 강원대학교, 2004, 박사학위논문.
- [4] Attiogbe, E. K., "Predicting Freeze-Thaw

Durability of Concrete-A New Approach", *ACI Materials Journal*, Vol.93, No.5, 1996, pp.457-464.

- [5] Attiogbe, E. K., "Mean Spacing of Air Voids in Hardened Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.90, No.2, 1993, pp.174-181.
- [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, pp.117.
- [7] Snyder, K. A., "A Numerical Test of Air Void Spacing Equations", Volume 8, Issue 1, 1998, pp. 1~44.
- [8] Pigeon, M., Pleau, R., "Durability of Concrete in Cold Climates", E & FN SPON, 1995, pp.43~115.
- [9] Pigeon, M. Saucier, F and Plante, P., "Air-Void Stability, Part IV:Retempering", *ACI Materials Journal*, Vol.87, No.3, 1990, pp.252-259.
- [10] Powers, T. C., "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete", *Research Laboratories of the Portland Cement Association*, Vol. 29, 1949, pp.1~28.
- [11] 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, pp.741.