콘크리트의 공극 간격 데이터를 활용한 실측간격계수 개발

이진범¹⁾ · 전성일¹⁾ · 권수안¹⁾ · 안지환^{1)*}

¹⁾한국건설기술연구원 도로연구실

Development of Actual Measurement Spacing Factor Using Spacing Data of Air Void in Concrete

Jin-Bum Lee,¹⁾ Sung-Il Jeon,¹⁾ Soo-Ahn Kwon,¹⁾ and Ji-Hwan An^{1)*}

¹⁾Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT One of the typical evaluation models of concrete air-void system is spacing factor (SF), which was suggested by Power. Power Spacing Factor (PSF) has a disadvantage of the result being different from the actual case due to the existence of entrapped air, because PSF uses average single spacing factor. Therefore, the Actual Measurement Spacing Factor (AMSF) using actually measured data of air void spacing was developed from this study. PSF and AMSF were compared and evaluated in this study by using the image analysis test result of concrete mixture. This study results showed that PSF and AMSF are generally similar, but AMSF had a larger value when PSF was greater than 400 μm . The results indicated a possibility of PSF giving false measurement estimation where the measurement is less than the actual value in the concrete mixture containing less air. Also, in the result of PSF and AMSF analysis according to the existence of entrapped air, AMSF showed a larger value in the analysis without entrapped air. But PSF showed a smaller value in the analysis without entrapped air, which was different from the actual case. Because PSF used average single spacing factor, it tended to give a false result. The study results showed that AMSF gave more accurate analysis results.

Keywords : concrete, air void, PSF, AMSF

1. 서 론

콘크리트 내부의 수분은 동결시 약 9%의 체적이 팽창하게 된다. 수분에서 얼음으로 변화함에 따라 모세관 공극 내에서 미동결의 물이 이동하게 되는데 이때 점성저항에 의한 정수압이 발생한다. 이 정수압이 콘크리트 인장파괴의 한계치 이하면 균열은 일어나지 않게 된다. 하지만 콘크리트 내부조직의 투수성이 낮거나 콘크리트 내부의 정수압을 소산시키기에 적정한 공극특성을 갖지 않는다면 미동결수의 이동에 따른 정수압이 콘크리트의 한계인장강도에 도달하게 됨으로 동결융해에 의한 콘크리트의 열화가 발생하게 된다.¹⁾

콘크리트 내부 공극이 갖는 중요성은 1920대에 북미를 중심으로 반복적인 동결융해의 작용을 받는 구조물의 열화현상에 대한 해석에서부터 시작되었다. 이를 통해 콘크리트의 내부 공극을 통해 내동결성 향상이 가능하다는 것이 밝혀졌다.²⁾ 이후 콘크리트 내부 공극변화에 따른

공극 평가 모델식 제안과 콘크리트 내구성과의 상관성 연구가 활발히 이루어지고 있다.

콘크리트의 공극구조를 평가하기 위한 대표적인 모델 중 하나가 Power가 제안한 간격계수(SF : spacing factor)이다. 현재까지 여러 연구자들에 의해 다양한 간격계수가 정의되었으나, 일반적으로 간격계수하면 Power가 제안한 것을 의미하며, ASTM C 457에 Power가 제안한 모델이 규정되어 있다.

PSF(power spacing factor)는 평균크기의 공극을 입방체에 배치시켜 이방체의 반대편에 위치한 두 공극의 외주 사이의 거리를 반으로 나눈 값을 의미한다.³⁾ 그러나 PSF는 평균크기의 공극 개념을 사용하기 때문에 논리적 모순에 봉착되는 경우가 발생한다. 일례로, 공극 직경 1,000 μm 이상의 갇힌 공극(entrapped air)을 포함시키지 않은 PSF가 갇힌 공극을 포함시킨 PSF 보다 대체적으로 작게 나타나는데, 실제로는 더 크게 나타나야 한다. 물론 갇힌 공극의 분포 정도에 따라 차이가 있을 수 있으며, 그 분포 정도가 극히 작다면 PSF에 크게 영향을 미치지 않을 수 있다.

PSF가 이와 같은 현상을 보이는 이유는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 상대적으로 공극이 큰 갇힌 공극의 존재

*Corresponding author E-mail: jenix@kict.re.kr

Received December 27, 2010, Revised May 16, 2011,

Accepted September 29, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

Fig. 1 The influence of entrapped air voids on the computation of the spacing factor⁴⁾

MICROSCOPIC DETERMINATION OF AIR CONTENT

Fig. 2 Relationship between spacing factor neglecting entrapped air voids and usual spacing factor⁴⁾

여부가 평균 단일공극의 평균직경에 영향을 주기 때문이다. 다시 말해 갇힌 공극을 포함할 경우 평균 공극 직경은 커지고 공극간 간격도 커지게 되며, 갇힌 공극을 포함시키지 않으면 이와 반대되는 경향으로 분석되는데, 이

는 실제와 다르다는 것이다. Pleau et al⁴⁾는 갇힌 공극의 포함 여부에 따라 간격계수를 분석하였는데, Fig. 2에 나타난 바와 같이 갇힌 공극을 포함시키지 않을 경우 간격계수가 크게 감소하며, 최대 200~300 μm 까지 감소할 수 있는 것으로 보고하였다.

또한 PSF 계산 시 페이스트 면적을 산정하기 위해 정확한 배합비를 알고 있어야 하는데, 임의의 현장에서 채취한 코어시편의 경우 이 배합비를 가정해야 한다. 이때 배합비에서 바인더량, 바인더와 골재 비중에 따라 간격계수값이 영향을 받을 수 있다.

이에 이 연구에서는 PSF가 가지고 있는 한계점을 극복할 수 있는 AMSF(실측간격계수: actual measurement spacing factor)를 개발하였으며, PSF와의 비교를 통해 그 차이점을 분석하였다.

2. 기존의 간격계수 평가 방법

2.1 콘크리트 공극 구조 분석 방법

콘크리트의 공극구조를 분석하기 위한 방법은 ASTM C 457에 규정되어 있으며, linear traverse method과 modified point count method가 제시되어 있다. linear traverse method는 횡방향으로 선을 일정하게 그리고 공극에 걸리는 선의 길이를 측정하여 분석하는 방법이고, modified point count method는 공극에 중첩되는 횡방향 선을 따라 일정하게 점을 찍어 그 수를 측정하여 분석하는 방법이다. 하지만 이와 같은 방법은 정밀한 분석이라 보기 어려우며, 최근에 소프트웨어 기술의 발달로 공극의 정확한 직경, 둘레, 면적 등을 추출할 수 있는 화상분석법(image analysis)이 사용되어지고 있다. 최근 콘크리트 공극 구조를 분석한 대부분의 연구에서 이 화상분석법을 사용하고 있으며, 이 연구에서도 이 방법을 사용하였다. Fig. 3은 이와 같은 콘크리트의 공극구조 분석 방법을 보여주고 있다.

2.2 Power spacing factor

간격계수는 평균크기의 공극을 입방체에 배치시켜 이 방체의 반대편에 위치한 두 공극의 외주 사이의 거리를 반으로 나눈 값을 의미한다. Fig. 4는 간격계수의 개념을

Fig. 3 Schematic description of the three different methods used in order to assess the characteristics of the air-void system in hardened concrete⁵⁾

Fig. 4 Schematic description of the simplifying assumptions used in the computation of the spacing factor⁶⁾

보여주고 있다.

이 간격계수 개념은 Power에 의해 정립되었으며, ‘Power Spacing Factor’라는 용어로 사용되기도 한다. 간격계수는 다음과 같은 식에 의해 구할 수 있다.

P/A가 4.342보다 작거나 같을 때, 식 (1)과 같이 계산되어 질 수 있다.

$$\bar{L} = \frac{P}{A\alpha} \quad (1)$$

P/A가 4.342보다 클 때,

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

여기서, P/A = paste/air ratio

α = specific surface of the air voids

$\bar{L}$ = spacing factor

3. AMSF 개념 및 산출 방법

이 연구에서 개발한 AMSF는 기존 기하학적 모델들이 가지고 있는 한계를 극복하고, 실제 콘크리트의 공극 구조를 반영할 수 있는 인자이다. AMSF는 화상분석을 통해 얻어진 실제 공극간 간격의 실측 데이터를 이용하여 공극 각각의 개체마다 가장 인접한 공극간의 거리를 평균하여 반으로 나눈 값으로 정의된다. 이 연구에서 사용된 화상분석용 프로그램은 콘크리트 화상으로부터 개별

공극의 면적, 직경, X·Y 절대좌표 데이터 등등을 추출할 수 있는데, 이 좌표값을 이용하여 각각의 공극간 거리를 계산할 수 있다. 이 연구에서는 공극간 거리를 자동 계산할 수 있는 ‘Void-Distance Calculation’ 프로그램을 개발하였으며, 이를 통해 각각의 공극마다 가장 인접한 공극의 거리를 산출할 수 있다. Fig. 5는 이 연구에서 사용된 ‘Void-Distance Calculation’ 프로그램을 나타내고 있으며, AMSF의 계산식은 아래와 같다.

$$\bar{L}_1 = \frac{L_s - (R_1 + R_x)}{2} \quad (3)$$

$$\bar{L}_n = \left(\frac{L_s - (R_s + R_x)}{2} + \dots + \frac{L_n - (R_n + R_x)}{2} \right) / n \quad (4)$$

여기서, $\bar{L}_1$ = Spacing between air voids

$\bar{L}_n$ = Actual measurement spacing factor

L_s = Distance between R_1 and R_x

R_s = Radius of standard air void

R_x = Radius of the nearest air void from standard air void

n = Total number of air voids

4. 실험 계획

4.1 실험 개요

이 연구에서는 실내에서 정확한 배합비를 통해 제조된 콘크리트 시편과 배합비를 확인할 수 없는 공용중인 콘

Fig. 5 Void-distance calculation program

Table 1 Concrete mix proportions

	W/C (%)	S/a (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	High-range water reducers	Air-entraining admixtures	Air contents in fresh concrete (%)
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
Mix45-4	45	45	360	162	767	925	-	3%	8.0
Mix40-1	40	45	360	144	787	950	0.5%	-	2.8
Mix40-2	40	45	360	144	787	950	0.5%	0.15%	3.5
Mix40-3	40	45	360	144	787	950	0.5%	0.30%	5.6
Mix40-4	40	45	360	144	787	950	0.5%	1%	8.0

크리트 포장의 코어시편의 화상분석 실험을 통해 AMSF와 PSF의 비교 평가를 수행하였다.

실내배합에서는 간격계수에 영향을 주는 연행공극과 공극분포를 조절하기 위해 물-시멘트비 45%, 40%에 따라 AE제 함량을 달리하여 Table 1에 나타난 바와 같이 8가지 배합을 실시하였다. 굵은 골재 최대치수는 20 mm이며, 콘크리트의 물리적 특성을 확인하기 위해 공기량, 압축강도 실험을 실시하였고, 콘크리트의 공극구조 평가를 위해 화상분석 실험을 실시하였다.

현장코어시편은 국도 37호선 서파-봉수 콘크리트 포장 구간에서 채취하였으며, 이 구간은 최근 동결융해파손이 심각하게 발생된 곳이다. 이 구간에서 채취된 코어시편을 이용하여 압축강도 실험과 화상분석 실험을 수행하였다. Fig. 6은 국도 37호선 서파-봉수간 현장조사 전경을 보여주고 있다.

4.2 화상분석실험 방법

4.2.1 콘크리트 시편 표면처리

시편의 표면연마작업은 화상분석을 하기 앞서 시행하는 전처리 작업으로서 시편의 표면 상태를 결정짓는 매우 중요한 작업이다. ASTM C 457은 SiC 파우더를 이용하여 최초 60번 연마제에서 시작, 100번, 200번, 320번, 420번의 연마제를 거쳐 최종 600번 연마제 순서로 콘크리트 표면을 연마한다. 이 방법은 많은 시간과 인력작업으로 진행되기 때문에 시편에 따라 거칠기와 평탄성에 영향 준다. 하지만 이 연구에서는 Fig. 7과 같은 자동 연

Fig. 7 Concrete polishing machine

마장치를 이용하여 정해진 시간동안 일정한 회전속도를 유지하며 표면을 연마하였고, 이를 통해 매 시편마다 동일한 평탄성과 거칠기를 갖는 화상분석용 시편을 제작하였다. 연마된 시편은 빨간색 락카도료(air brush 장비 사용)를 표면에 분사하여 건조시킨 후 백색 파우더를 충전하여 공극의 윤곽을 구분 지었다. Fig. 8은 콘크리트에 표면처리 후 시편의 형상을 보여주고 있다.

4.2.2 화상 촬영 및 분석

Fig. 9는 화상 촬영기를 보여주고 있다. QICAM 디지털

Fig. 6 Field survey in national highway number 37 near seopabongsu intersection

Fig. 8 Surface image of concrete after polishing and treatment

Fig. 9 Image scanner of concrete

털카메라(1.4 million, 1392 × 1040)에 현미경렌즈(optical 0.5-5x)를 부착하였으며, 사진촬영에 일정한 광량을 조도할 수 있는 조명장치를 장착하였다. 화상면적 41.057 cm²에 총 88장의 사진이 촬영되며, 컴퓨터 프로그램에 의해 z축 보정이 되는 auto stage를 사용함으로써 최종적으로 모자이크된 한 화상의 이미지를 얻을 수 있다. 촬영된 이미지는 흑백사진으로 변환 후 'Image-pro' 프로그램을 이용하여 공극구조 분석에 필요한 공극의 좌표, 공극의 직경 및 면적 등의 결과값을 얻는다.

5. 압축강도 실험 결과

Fig. 10은 실내에서 제작된 콘크리트의 재령 28일 압축강도 실험 결과를 나타내고 있다. AE제 함량이 증가함에 따라서 강도가 전반적으로 감소하는 경향을 나타냈으며, 물-시멘트비가 큰 배합이 압축강도가 더 작게 나왔다.

Fig. 11은 현장에서 채취한 코어시편의 압축강도 실험 결과를 나타내고 있다. 그림에서 나타낸 바와 같이 압축강도는 약 26~29 MPa 정도를 나타내었다. 일반적인 포장용 콘크리트의 28일 압축강도가 30~40 MPa을 나타내는 것으로 볼 때, 이와 같은 결과는 5년 이상된 콘크리트 포장 재료의 압축강도 수치로는 약간 작은 값을 나

Fig. 10 Compressive strength of lab samples (28 days)

Fig. 11 Compressive strength of field samples

타내고 있으며, 이에 대한 원인은 동결융해 사이클에 의해 콘크리트의 강도가 저하된 것으로 추정된다.

6. 화상 분석 결과 비교 분석

6.1 실내 콘크리트 시편 분석

6.1.1 공극 크기별 분포

Figs. 12~14는 콘크리트 혼합물별 공극크기 분포를 나타내고 있다. 공극 크기 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 크기⁷⁾를 나타내기 때문이다.

6.1.2 공기량과 간격계수 결과 비교

이 연구에서는 총 8가지 배합에 대하여 콘크리트의 공극구조 특성을 분석하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. AE제 첨가량이 증가함에 따라 전반적으로 전체 공기량은 증가하고, PSF와 AMSF는 감소하는 결과를 나타내어, AE제양의 증가에 따라 콘크리트의 공극구조가 개선됨을 알 수 있다. 그러나 Mix45-3와 Mix45-4, Mix40-2와 Mix40-3 결과를 비교하여 보면 공기량은 큰 차이를 보이지 않으나 PSF와 AMSF는 AE제의 첨가량이 많은 혼합물이 더 작게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 결과는 추가된 AE제에 의해 발생된 미세한 크기의 연행공극이 전체 공기량에 미치는 영향보다 간격계수에 미치는 영향이 더 크기 때문이다. 또한 공시체의 상단부, 중간부, 하단부로 나누어 분석을 하였는데, 표에서 나타낸 바와 같이 전반적으로 약간의 편차가 존재함을 알 수 있다. 특히 간격계수의 경우 편차가 너무 크게 나타난 Mix45-1의 상단부 시편 결과를 제외하면 시편 위치별 약 30~100 μm 정도의 편차를 나타낸다. 이는 연행공극과 갇힌 공극의 양에 따라 차이를 보이는 것으로, 이 분석이 3차원 전체를 보는 것이 아닌 2차원 평면을 관측하는 것이기에 시편의 절단면 위치에 따라 차이를 나타낼 수 있다.

Fig. 12 Air void size distributions (the top of lab sample)

Fig. 13 Air void size distributions (the middle of lab sample)

Fig. 14 Air void size distributions (the bottom of lab sample)

6.2 현장 콘크리트 코어시편 분석

현장 코어시편의 공극구조를 분석하기 위해 콘크리트

배합비를 단위시멘트 함량 340 kg/m^3 , 물-시멘트비 42%, 잔골재를 38%로 가정하였으며, 그 결과를 Table 3과 Fig. 15에 나타내었다. 표에서 'C'는 슬래브 중앙부를 의미하

Table 2 Analysis results of PSF and AMSF (lab sample)

	Air contents in fresh concrete (%)	Image analysis results in harden concrete								
		Top			Middle			Bottom		
		Air contents (%)	PSF (μm)	AMSF (μm)	Air contents (%)	PSF (μm)	AMSF (μm)	Air contents (%)	PSF (μm)	AMSF (μm)
Mix45-1	1.0	2.9	326	303	1.9	536	389	1.6	507	518
Mix45-2	3.1	3.6	269	245	3.0	332	284	2.7	250	235
Mix45-3	6.1	4.5	175	152	6.0	210	193	5.5	169	152
Mix45-4	8.0	5.3	126	103	4.0	163	123	5.0	220	193
Mix40-1	2.8	3.5	227	212	2.7	317	281	2.6	260	246
Mix40-2	3.5	4.2	226	219	3.0	280	251	3.7	220	217
Mix40-3	5.6	3.9	222	210	2.9	249	233	3.7	208	184
Mix40-4	8.0	4.1	160	131	5.8	191	161	7.8	138	123

Table 3 Analysis results of PSF and AMSF (field sample)

	Air contents (%)	PSF (μm)	AMSF (μm)
C-1	1.0	544	650
C-2	1.0	520	575
C-3	1.9	461	417
C-4	2.3	502	523
E-1	0.9	576	719
E-2	1.9	550	572
E-3	4.0	400	396
E-4	1.9	441	477

며, ‘E’는 슬래브 끝단부를 의미한다. 또한 ‘1’은 상단부, ‘2’, ‘3’은 중간부, ‘4’는 하단부를 의미한다.

분석 결과, 현장 코어시편은 공기량이 작고 PSF와 AMSF는 크게 나타났으며, 이에 이 현장의 파손원인은 적절한 공극구조를 확보하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

위에서 언급한 바와 같이 현장 코어시편 분석 시 배합비를 가정하여야 하는데, 단위 시멘트량이 50 kg/m^3 변할 때 PSF는 약 $30 \mu\text{m}$, 골재밀도가 0.1 g/cm^3 변할 때 PSF는 약 $15 \mu\text{m}$ 정도 변하는 것으로 나타났으며, 이는 PSF

분석 시 배합비 가정에 의해 오차가 발생할 수 있음을 의미한다. 그러나 AMSF는 실제 공극간 간격을 측정하여 나타낸 지수로 이러한 가정이 필요가 없는 것이 장점이다.

6.3 PSF과 AMSF의 비교 평가

Fig. 16은 PSF와 AMSF의 관계를 분석한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 PSF가 $400 \mu\text{m}$ 이하일 때 PSF와 AMSF는 거의 유사한 경향을 나타내며, 전반적으로 AMSF가 약간 작은 값을 나타내고 있다. 그러나 PSF가 $400 \mu\text{m}$ 이상일 때 전반적으로 AMSF가 좀 더 큰 값을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 AMSF가 실제 콘크리트의 공극 구조를 반영한 기준치로 본다면 공기량이 작은 콘크리트 혼합물을 PSF 모델로 분석할 경우 어느 정도의 오차가 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

물론 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있으며, 특히 간격계수의 기준치를 $200\sim 250 \mu\text{m}$ 이하로 규정하고 있어 그 이상에서 발생하는 변동성은 크게 의미가 없을 수 있다. 그러나 분명한 것은 PSF 모델은 한계점을 가

Fig. 15 Air void size distributions (field sample)

Fig. 16 Relationship between PSF and AMSF

지고 있으며, 이를 극복하기 위한 실제적인 분석기법이 AMSF라는 것이다.

이에 대한 논리를 좀 더 입증하여 주는 것이 Figs. 17과 18의 분석 결과이다. 이 그림은 갇힌 공극의 유무에 따른 PSF와 AMSF를 비교한 그래프이다. PSF의 경우, section I 구간($400\ \mu\text{m}$ 이하)에서는 거의 유사한 값을 나타내고 있으나, section II 구간($400\ \mu\text{m}$ 이상)에서는 갇힌 공극을 포함하지 않은 PSF가 갇힌 공극을 포함한 일반적인 PSF보다 좀 더 작게 나타났다. 이는 서두에서도 언급한 바와 같이 평균단일공극 개념을 사용한 PSF 모델이 가지는 한계 때문이다. AMSF의 경우, 갇힌 공극을 포함하지 않은 AMSF가 갇힌 공극을 포함한 AMSF보다 전반적으로 크게 나타났으며, 이는 실제와 유사한 경향을 나타내고 있는 것이다.

이와 같이 갇힌 공극의 유무에 따른 분석을 통해 AMSF가 좀 더 실제에 가까운 분석기법이라는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 17 Relationship between PSF neglecting entrapped air voids and usual PSF

Fig. 18 Relationship between AMSF neglecting entrapped air voids and usual AMSF

7. 결 론

이 연구에서 새롭게 제안한 AMSF는 기존의 간격계수 모델에서 사용하는 수학적 이론식을 사용하지 않고 실측된 공극간격을 사용하여 분석한 지수이다. 이 연구에서는 AMSF의 검증을 위해 실내/현장 콘크리트 시편에 대한 화상분석을 수행하여 AMSF와 PSF를 비교·평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) AE제 첨가량이 증가함에 따라 전반적으로 전체 공기량은 증가하고, PSF와 AMSF는 감소하는 결과를 나타내어, AE제양의 증가에 따라 콘크리트의 공극 구조가 개선됨을 알 수 있었다.
- 2) 콘크리트 배합비를 알지 못하는 코어시편의 경우, PSF 분석 시 배합비를 가정하여야 한다. 콘크리트 배합비에서 단위 시멘트량이 $50\ \text{kg/m}^3$ 변할 때 PSF는 약 $30\ \mu\text{m}$, 골재비중 $0.1\ \text{g/cm}^3$ 가 변할 때 PSF는 약 $15\ \mu\text{m}$ 정도 변동될 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나 AMSF는 실제 공극간 간격을 측정하여 나타낸 지수로 이러한 가정이 필요가 없는 장점이 있다.
- 3) PSF와 AMSF는 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 PSF가 $400\ \mu\text{m}$ 이상일 때 전반적으로 AMSF가 좀 더 큰 값을 나타내고 있어, 공기량이 작은 콘크리트 혼합물의 경우 PSF는 실제보다 좀 더 작은 값으로 예측할 가능성이 있는 것으로 나타났다.
- 4) 갇힌 공극의 유무에 따른 PSF와 AMSF 각각을 분석한 결과, PSF는 실제와 다르게 갇힌 공극을 포함하지 않고 분석한 값이 더 작게 나타났으며, AMSF는 갇힌 공극을 포함하지 않고 분석한 값이 더 크게 나타나, AMSF가 좀 더 실제에 가까운 분석기법임을 확인할 수 있었다. PSF가 이와 같이 실제와 다르게 나타나는 이유는 평균단일공극 개념을 사용하기 때문이다.

5) 이후, 좀 더 다양한 혼합물에 대한 분석과 동결융해 실험 결과와의 비교를 통해 AMSF의 종합적인 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Mindess, S., Young, J. F., and Darwin, D., Concrete, Second Edition, Prentice Hall, 2002, pp. 500~501.
2. Snyder, K. A., "A Numerical Test of Air Void Spacing Equations," *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 8, Issue 1, 1998, pp. 28~44.
3. Powers, T. C., "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete," *Proceedings of the Highway Research Board*, Vol. 29, 1949, pp. 184~211.
4. Pleau, R., Pigeon, M., Faure, R. M., and Sedran, T., "Micro Air Voids in Concrete: A Study of the Influence of Superplasticizers by Means of Potical Microscopy and Scanning Electron Microscopy," *ACI Special Pub. SP-122*, 1990, pp. 105~124.
5. Pleau, R., Pigeon, M., Laurencot, J. L., "Some Findings of the Usefulness of Image Analysis for Determining the Characteristics of Air-Void System on Hardened Concrete," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 23, Issues 2~3, 2001, pp. 237~246.
6. Pigeon, M. and Pleau, R., Durability of Concrete in Cold Climates, E&FN SPON, 1995, pp. 98~110.
7. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., *Concrete (Microstructure, Properties, and Materials)*, Third Edition, McGraw-Hill, 2006, 31 pp.

요 약 콘크리트의 공극구조를 평가하기 위한 대표적인 모델 중 하나가 Power가 제안한 간격계수(SF : spacing factor)인데, 이 PSF(power spacing factor)는 평균단일공극 개념을 사용하여 간헐 공극의 존재 여부에 따라 그 결과값이 실제와 상이하게 나올 수 있는 단점이 있다. 이에 이 연구에서는 실측된 공극 간격 데이터를 이용하여 지수화한 AMSF(실측간격계수 : actual measurement spacing factor)를 개발하였으며, 콘크리트 혼합물의 화상 분석 결과를 이용하여 PSF와 AMSF를 비교·평가하였다. 이 연구 결과, PSF와 AMSF는 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있으나, PSF가 400 μm 이상일 때 전반적으로 AMSF가 좀 더 큰 값을 나타내고 있어, 공기량이 작은 콘크리트 혼합물의 경우 PSF는 실제보다 좀 더 작은 값으로 예측할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 또한 간헐 공극의 유무에 따른 PSF와 AMSF 각각을 분석한 결과, AMSF는 간헐 공극을 포함하지 않고 분석한 값이 더 크게 나타났고, PSF는 실제와 다르게 간헐 공극을 포함하지 않고 분석한 값이 더 작게 나타났다. 이와 같이 PSF가 이와 같은 경향을 나타내는 이유는 평균단일공극 개념을 사용하기 때문이며, 이 분석 결과를 통해 AMSF가 좀 더 실제에 가까운 분석기법임을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 콘크리트, 공극, 파워간격계수, 실측간격계수