

# 평면간격계수를 이용한 콘크리트 포장 열화도 평가

## Damage Estimation of Concrete Pavement Using Plane Space Factor

정원경\* · 심도식\*\* · 김기현\*\*\* · 홍승호\*\*\*\*

Jeong, Won Kyong · Shim, Do Sik · Kim, Ki Hyun · Hong Seung Ho

### 1. 서론

콘크리트 포장은 지속적인 차량통행과 환경노출에 의해 다양하고 복잡한 하중조합 상태에 놓이게 되는 대표적인 구조체라 할 수 있다. 이러한 이유 등으로 콘크리트 포장의 열화원인을 분석하기 위해서는 다각도의 접근이 요구되고 있다. 특히 콘크리트 포장의 경우, 구조물 자체가 외부에 노출되어 동결융해 작용이나 겨울철에 제설용으로 쓰이는 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>)에 의해 표면박리 등이 발생되어 내구성이 저하되는 대표적인 구조물이라 할 수 있다. 따라서 콘크리트가 갖는 재료적 파손을 해석하기 위한 방법 중 하나는 내구성에 관련된 내부 공극 분석이 주요 해석방법이 될 수 있다. 이러한 콘크리트의 내구성을 지배하는 주요한 인자로서 콘크리트 내부에 산재하고 있는 많은 공극들은 콘크리트의 강도뿐만 아니라 동결융해 저항성, 투수 특성, 중성화 속도, 표면박리 저항성 등의 내구 특성에도 적지 않은 영향을 끼친다. 현재 노후된 콘크리트 포장은 파손등급에 따라 부분보수 또는 전단면 보수 등과 같은 방법으로 유지·보수되고 있으나 콘크리트 포장의 열화정도에 미치는 내부 공극 구조에 대한 연구는 많지 않으며 단지 굳지 않은 상태의 콘크리트에 함유된 공기량만을 측정, 관리하는 실정이다. 그러나 콘크리트의 내구성은 재료의 복합성 및 영향인자의 최소화로 인하여 콘크리트 내부에 존재하는 공극의 분포 상태, 크기 및 간격계수 등에 따라 현저한 차이를 갖게 되며 이를 공기량만으로 평가하는 현재의 방법은 열화된 콘크리트 포장의 원인해석에 큰 도움을 주지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 포장 중 재료적 파손에 의한 내구성 저하가 의심되는 콘크리트 포장 구간에서 시편을 직접 채취하여 내부 공극 구조를 분석한 후 상관성을 분석하고자 하였다.

### 2. 동결융해 내구성과 평면간격계수

(1) 분석방법 : 콘크리트 포장의 내구성 저하는 반복적인 동결융해에 의한 열화가 대표적이며 이를 평가하는 방법은 현재 실내실험에 의한 내구성지수 평가가 유일하다. 그러나 내구성지수 측정은 실내실험을 수행한 후 그 결과를 정리한 것으로 실험을 수행하지 않은 콘크리트에 대한 지수평가는 불가능하였으나 본 연구에서는 기존 논문의 평면간격계수를 이용하여 열화된 콘크리트의 내구성을 평가하였다. 평면간격계수는 측정된 공기량과 공극수를 이용하여 단위면적당 동일공극크기로 재배열한 후 각각 배열된 공극의 행렬에서 각 공극의 외주에서 서로 인접한 최단거리의 반으로 나누어 평가하며, 이를 평면간격계수라 한다.

$$P.S.F = \frac{[(1 - 0.113\sqrt{A}(1 + \frac{1}{\sqrt{n}}))]}{2(\sqrt{n} + 2)} \text{ cm} = \frac{[(1 - 0.113\sqrt{A} - D)]}{(0.226\sqrt{A}/D + 4)} \text{ cm} \dots\dots(1)$$

공기량과 단위공극수(n)를 갖는 평면간격계수는 다음과 같이 계산되어지며, 이는 직경(D)과 공기량(A)에 의해 다음과 같이도 계산되어진다. 또한, 공기량, 단위면적당 공극수 및 평면간격계수를 조합하여 다음과 같

\* 정회원 · 충주대학교 토목공학과 겸임교수 · 공학박사 (033-250-6240, E-mail : wonkyong@hanmail.net)  
\*\* 정회원 · 강원도립대학 · 건설시스템공학과 교수 · 공학석사 (033-660-3441, E-mail : civil@gw.ac.kr)  
\*\*\* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 박사수료 · 기술사 (02-402-2795, E-mail : kiheun@empal.com)  
\*\*\*\* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 공학석사 (031-371-3364, E-mail : HSH373@freeway.co.kr)

은 내구성지수의 예측이 가능한 것으로 알려졌다.

$$P.D.F = 124 - 0.28x - 0.03y - 0.08z \quad \dots\dots(2)$$

따라서 본 연구에서는 열화된 콘크리트 포장에서 시편을 채취한 후 화상분석법에 의해 내부 공극을 분석하고 이를 식(1)과 (2)를 통해 현재 콘크리트 시편의 내구성지수를 예측, 평가하고자 하였다.

(2) 시편특성 및 채취 : 본 연구에서 분석된 시편은 현재 공용 중인 중부고속도로 상에서 채취한 것으로 보다 자세한 특성은 표 1과 같다. 조사 현장에서 코어 채취기를 포장체에 고정시키고, 콘크리트 슬래브 전 깊이를 한번에 채취하는 방법으로 수행하였다. 이러한 코어채취는 ASTM C 42/C 42M-99 "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete"의 방법에 의해 준하여 수행하였으며, 가능한 한 시료 채취시 교란을 받지 않도록 주의를 하였다.

표 1. 콘크리트포장 코어 및 배합설계 특성

시편명	코어링장소	특징	설계강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	시멘트량 (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	S/A (%)
CC-1	중부선 CRCP 구간	종방향 균열	45	3~5	4	153	356	42.9	37.9
CC-2	중부선 CRCP 구간	횡방향 균열							
CP	제1중부고속도로	표면박리	45	5.5	4	156	368	42.4	31.9
CY	제1중부고속도로	표면박리							

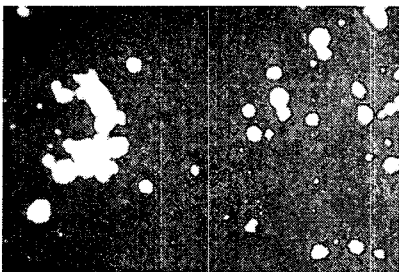
### 3. 화상분석 실험방법

본 연구에 사용된 화상분석 기기는 국내사의 OSM-1 모델을 사용하였으며, 디지털 카메라는 Nikon 사의 Coolpix 5000을 사용하였다. 분석장치로 사용된 Software는 TDI Scope eye라는 프로그램을 사용하여 분석하였다. 본 연구의 실험과정을 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다.

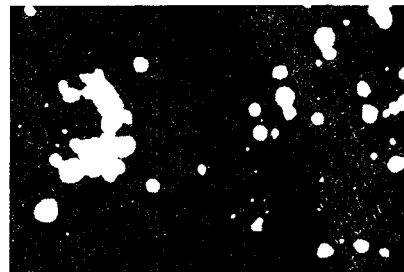
(1) 시편 절단(Specimen Cutting) : 공시체 절단기는 원형톱날 방식(diamond-saw)을 사용하였으며, 이때 시편 표면에 절단 속도로 인한 단차 및 표면 경사가 발생되지 않도록 하였다.

(2) 표면 연마(Polishing)와 표면 처리(Surface Treatment) : 절단 직후 콘크리트 표면 연마 재료 SiC 파우더는 최초 60번 연마제에서 시작하여 100번, 200번, 320번, 420번의 연마제를 거쳐 최종 600번 연마제 순서로 연마를 실시하였다(ASTM C 457, 1982). 위의 과정을 거친 시편 표면을 흑색 수성 잉크로 도색, 건조시킨 이후에 백색 분말을 압입하여 충전시키는 방법을 사용하였다.

(3) 화상 입력과 화상 처리 : 전처리 과정이 끝난 시편은 내부 공극 구조 분석을 위하여 컴퓨터에 화상을 입력 시켜야 한다. 그림 1은 프로그램 상에서 화상을 처리하는 과정을 나타낸 것이다.



(a) 화상 처리 전



(b) 화상 처리 후

그림 1. 화상처리 전·후의 비교



#### 4. 평면간격계수에 의한 내구성 지수 평가

그림 2는 CC-1,2에 대한 시편특성을 나타낸 것으로 콘크리트 포장 표면에 나타난 균열 폭과 공극을 분석한 것이다. CC 구간은 콘크리트 포장에 발생하는 균열을 허용하는 CRCP 구간으로 종방향 및 횡방향으로 균열이 발생한 시편을 채취하여 분석하였다. 또한, CP 및 CY 구간은 JCP 구간으로 육안관찰로 표면열화가 나타난 구간을 코어링하여 분석하였다. 표 2는 화상분석을 실시한 내부 공극 분석결과를 나타낸 것으로 이를 살펴보면 분석된 열화구간의 시편 모두 경화 후 공기량은 매우 낮은 것으로 평가되었다. 특히 CRCP 구간의 경우 2% 미만의 공기량을 나타내어 공기량 범위(4.5±1.5%)에 크게 미흡하였으며 JCP 구간 또한 규정에 미달되는 것으로 평가되었다. 이는 콘크리트 포장에 사용되는 콘크리트의 경우 슬럼프 4cm 미만의 매우 된반죽으로 이를 포설하기 위한 페이퍼의 과도한 진동으로 내부의 미세 공기가 이탈된 결과로 판단된다. 또한 화상분석에 따른 공극수와 평면간격계수를 이용한 내구성지수 예측결과 모든 시편이 내구성지수 70%이하로 나타나 잠재적인 내구성이 크게 상실된 것으로 나타났다.

이를 자세히 분석하기 위하여 내부 미세공극 특성을 그림 3과 4와 같이 공극직경별로 구분하여 나타내었으며 적정량의 공기량이 함유된 AE 콘크리트 시편을 분석하여 비교하였다. 공극의 구분은 직경 1000 $\mu$ m를 기준으로 연행공기와 갇힌공기로 구분하였으며 일반적으로 연행공기는 내동결성 향상에 크게 기여하며 갇힌공기는 콘크리트 강도 및 내구성 저하에 한 원인이 되는 것으로 알려져 있다. 분석결과, 그림 3에서와 같이 AE제를 통해 연행된 미세공극은 200~600 $\mu$ m의 직경을 갖는 공극이 다량분포하고 있으며 1000 $\mu$ m이하의 연행공극이 1000 $\mu$ m이상의 갇힌공극보다 그 함유량이 높음을 알 수 있다. 그러나 열화된 콘크리트 포장 시편에서는 1000 $\mu$ m 이하의 연행공극량이 미소하였으며 이러한 이유로 인하여 잠재적인 내구성 평가가 낮게 평가되었다. 따라서 본 연구에서 분석된 열화된 콘크리트 포장은 공기량의 적정량 함유 미달과 더불어 내부 공극 구조의 취약성으로 인하여 내구성이 저하된 것으로 판단되며 향후 콘크리트 재료 자체의 내구성 촉진 저하가 예상된다.



그림 2. 화상처리에 의한 균열폭 측정

표 2. 화상분석 결과 정리

시편명	CC-1	CC-2	CP	CY
분석결과				
경화 후 공기량	0.7%	1.8%	2.2%	1.4%
단위면적당 공극수(#/cm <sup>2</sup> )	19	19	7	15
평면간격계수	697 $\mu$ m	635 $\mu$ m	815 $\mu$ m	703 $\mu$ m
내구성 예측지수	64%	69%	53.5%	63%
비 고	종방향 균열 시편관통	횡방향 균열 상부로부터 5~8cm	-	-

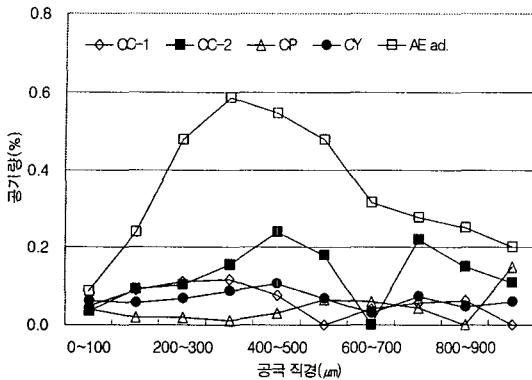


그림 3. 직경별 공극분포

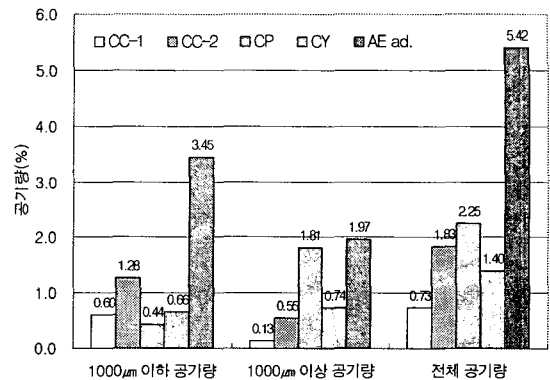


그림 4. 공극크기에 따른 분류

## 5. 결론

본 연구에서는 열화된 콘크리트 포장체에서 시편을 직접 채취하여 내부 공극 구조가 콘크리트 열화에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 JCP 및 CRCP 구간으로 공용 중인 중부고속도로 상의 열화 부위를 채취하여 화상분석에 의한 내부 공극 분석과 평면간격계수를 이용한 내구성지수 예측을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 콘크리트 포장 시편의 내부 공극 특성을 분석한 결과, 분석된 시편 모두에서 3.0% 이하의 매우 낮은 공기량을 나타내어 규정에 미달되었으며 향후 이에 대한 적합유무의 판정기준이 명확히 확립되어야 할 것으로 판단되었다.

2. 미세공극의 분포를 분석한 결과, 적정량의 공기량이 함유된 콘크리트는 직경 100~600 $\mu$ m 크기의 공극이 다량 분포하였으나 열화된 포장 시편에서는 미세공극의 함유량이 1.0% 미만으로 극히 저조한 것으로 나타났다.

3. 열화된 콘크리트 포장 시편의 내부 공극은 1000 $\mu$ m이하의 연행공극보다는 1000 $\mu$ m이상의 갇힌 공기가 지배적이었으며 이로 인해 내용결성과 관련된 내구성지수는 70%이하로 평가되었다. 이를 통해 콘크리트 포장의 열화진행에 미치는 공극 구조를 개선해야 될 것으로 분석되었다.

## 참고문헌

1. Pigeon, M. and R. Pleau(1995), "Durability of concrete in cold climates", pp. 98-112.
2. Powers T. C[1949], "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete", Research Laboratories of the Portland Cement Association, Vol. 29.
3. Attiogbe, E. K [1993], "Mean Spacing of Air Voids in Hardened Concrete", ACI Materials Journal, Vol.90, No.2, pp.174-181.
4. Attiogbe, E. K [1996], "Predicting Freeze-Thaw Durability of Concrete-A New Approach", ACI Materials Journal, Vol.93, No.5, pp.457-464.
5. ASTM C 457-82a(1982), "Standard Practice for Microscopical Determination of Air-Void Content and Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, ASTM.
6. 한국콘크리트학회(2001), "최신 콘크리트 공학", pp. 110-117
7. 정원경(2005), "콘크리트 동결융해 내구성 평가를 위한 평면간격계수 제안", 강원대학교 박사학위논문.