

# 행렬간격계수 제안식에 의한 콘크리트 내구성 평가

## Estimation of Concrete Durability for Proposed Matrix Spacing Factor Equation

정원경\* · 홍창우\*\* · 이봉학\*\*\* · 윤경구\*\*\*\* · 최상릉\*\*\*\*\*

Jeong, Won Kyong · Hong, Chang Woo · Lee, Bong Hak · Yun, Kyong Ku · Choi Sang Leung

### 1. 서 론

콘크리트 내부 공극을 특성짓기 위해 제안된 식들은 상호보충적이거나 수학적 모델 전개에 차이를 두고 있다. 이들 제안식들은 ASTM에서 규정한 방법에 의해 산출되기도 하지만 모델식에 의한 내부 공극 시스템 평가를 위해 새로운 장비가 요구되기도 하다(Pigeon,1995). 이들 제안식들은 콘크리트의 실제적인 공극 구조 특성 규명에 목적이 있으나, 이와 연관된 콘크리트의 동결융해 등과 내구성과의 상관성 분석연구는 전무한 상태이다. 이러한 결과로 제안된 모델식들의 사용은 극히 제한적이며 결과에 대한 검증이 이루어지지 못하고 있다. 콘크리트 내부 공극과 연관된 콘크리트의 동결융해 실험은 꾸준히 이루어져 왔으며 내구성에 대한 특성치 부여를 위한 관찰은 ASTM 규정식(Powers, 1949)만을 사용하였다. ASTM 방법에 의한 관찰만으로는 다른 제안식에서 필요로 하는 변수의 계산이 매우 복잡하여 비교분석이 불가능하였다. 따라서 콘크리트의 내구성 평가에 있어 Powers의 간격계수만이 사용되어지고 있다. 그러나, 내구성에 대한 간격계수의 제한치는 과대평가로 신뢰성에 의문을 주고 있다(Attigbe, 1993).

본 연구에서는 콘크리트 내부 공극 구조에 대한 새로운 평가 지표인 행렬간격계수를 활용하여 동결융해 내구성과의 상관성을 연구하였다. 본 연구에서 제안된 행렬간격계수는 공기량과 공극수(공극직경 또는 비표면적)만을 가지고 평가가 가능하므로 기존의 콘크리트 동결융해 실험 자료를 통해 콘크리트 동결융해성과의 상관성을 분석이 가능하다. 이러한 상관성 분석을 기초로 하여 행렬간격계수와 콘크리트 내구성지수와의 상관성과 콘크리트 내구성에 요구되는 행렬간격계수 및 내부 공극 구조 특성을 제안하고자 하였다.

### 2. 동결융해 내구성과 행렬간격계수

본 연구에서는 행렬간격계수를 이용하여 콘크리트의 내구성 평가 가능성을 연구하고자 하였다. 행렬간격계수는 측정된 공기량과 공극수를 이용하여 단위면적당 동일공극크기로 재배열한 후 각각 배열된 공극의 행렬에서 공극간 거리는 각 공극의 외주에서 서로 인접한 최단거리의 반으로 나누어 평가하며, 이를 행렬 간격계수라 한다.

$$\text{공극평균면적 } A_D = (A.C/100)/n \text{ cm}^2 \dots\dots\dots (1)$$

공기량과 단위공극수(n)를 갖는 행렬간격계수는 다음과 같이 계산되어지며 이는 직경(D)과 공기량(A)에 의해 다음과 같이도 계산되어진다.

\* 정희원 · 강원대학교 토목공학과 박사과정 (033-250-6240, E-mail : wonkyong@hanmail.net)  
\*\* 정희원 · 충주대학교 건설도시공학과 전임강사 · 공학박사 (043-841-5418, E-mail : cwhong@hanmail.net)  
\*\*\* 정희원 · 강원대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (033-250-6234, E-mail : bonghak@kangwon.ac.kr)  
\*\*\*\* 정희원 · 강원대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (033-250-6236, E-mail : kkyun@kangwon.ac.kr)  
\*\*\*\*\* 정희원 · 한석엔지니어링 부사장 공학박사 (033-730-8877, E-mail : sangrc@iwbs.co.kr)

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

### 3. 콘크리트의 동결융해 저항성과 행렬간격계수의 상관성 분석

Attiogbe(1996)은 ASTM C 666 규정에 의해 실험된 동결융해관련 자료 10개를 조사하여 물-시멘트비 조건(0.25~0.35, 0.35~0.45, 0.45~0.55)으로 구분한 후 총 176개의 시편에 대한 동결융해저항성 결과와 측정된 공극 구조와의 상관성에 대하여 분석·연구하였다. 본 연구에서는 Attiogbe는 분석한 자료하여 제시된 각 시편 공극 특성 중 공기량과 비표면적을 이용하여 행렬간격계수를 산정한 후, 동결융해 저항성과의 상관성을 평가하고자 하였다.

#### 3.1 낮은 물-시멘트비조건

기존의 동결융해 연구자료 중 물-시멘트비가 0.25~0.35에 해당하는 실험결과를 정리하여 Attiogbe가 제시한 자료와 이를 활용하여 ASTM 규정식에 의한 간격계수와 행렬간격계수(식2)를 산출하였다. 공기량과 비표면적을 통해 계산된 행렬간격계수와 간격계수의 결과값을 비교하여 그림 1에서와 같이 동일한 결과값을 얻는 것을 알 수 있다. 그림 2는 제시된 내구성 지수와 행렬간격계수에서 산출되는 단위면적당 공극수의 관계를 나타낸 것이다. 내구성지수가 60 이하로 측정된 경우는 ASTM C 666 규정에 의거하여 동결융해 저항성을 상실한 내구성저하로 평가하였으며 내구성 지수가 60 이상인 경우는 내구성이 양호한 것으로 분류하였다.

내구성 지수 60을 기준으로 분류하였을 때, 공기량 특성에서와 같이 내구성 지수가 저하되는 단위면적당 공극수의 경계를 설정할 수 있다. 즉, 단위면적당 공극수가 16개 이하인 콘크리트 시편에서는 내구성지수가 60이하의 내구성 상실 결과를 가져오는 시편이 발생하고 있으나 단위면적당 공극수가 16개 이상 콘크리트 시편에서는 내구성 지수가 60이상으로 모두 양호한 내구성지수를 나타내고 있다. 이를 통해 행렬간격계수를 활용한 내동결성 평가가 가능한 것으로 나타났으며 물-시멘트비가 0.25~0.35인 경우에 최소 단위면적당 공극수는 16개 이상이 되어야 함을 알 수 있었다.

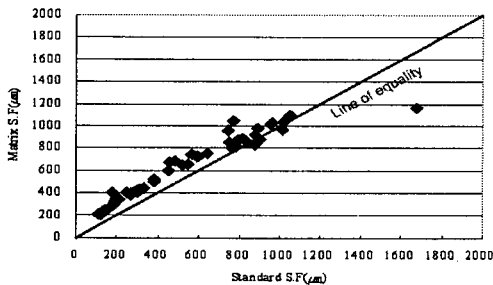


그림 1. 간격계수와 행렬간격계수의 상관성  
(0.25 ≤ w/c < 0.35)

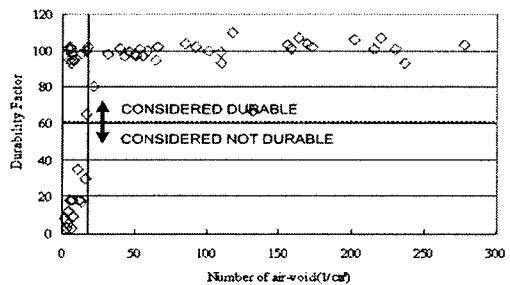


그림 2. 단위면적당 공극수와 내구성지수 상관성  
(0.25 ≤ w/c < 0.35)

#### 3.2 보통 물-시멘트비 조건

물-시멘트비가 0.35~0.45에 해당하는 실험결과를 정리하여 Attiogbe가 제시한 자료에서 이들 시편이 갖는 재료적 변수는 무시되었으며 단지 내부 공극 구조만을 가지고 내동결성과 비교분석하였다. 그림 3은 제안된 행렬간격계수와 간격계수의 결과값을 비교하여 나타낸 것으로 두 계수의 결과값 사이에 큰 차이가 없으나 행렬간격계수가 다소 크게 평가됨을 알 수 있다.

그림 4는 내구성 지수 60을 기준으로 단위면적당 공극수와 내구성지수와의 상관성을 나타낸 것으로, 낮은 물-시멘트비 조건의 결과에서와 같이 내구성 지수가 저하되는 단위면적당 공극수의 경계가 명확하게 나타나



며 이때의 단위면적당 공극수는 약 29개로 평가되었다. 물-시멘트비가 높아짐에 따라 단위면적당 배열되어져야 할 행렬단위공극수가 16개에서 29개로 증가하는 현상을 나타내었으며, 이들 조건보다 낮은 단위면적당 공극수에서는 내구성 지수가 60이하로 낮아지는 결과를 보이고 있으나, 적정 공극수를 만족할 경우 내구성 지수의 저하는 특정시편 1~2개를 제외하고는 보이지 않고 있다.

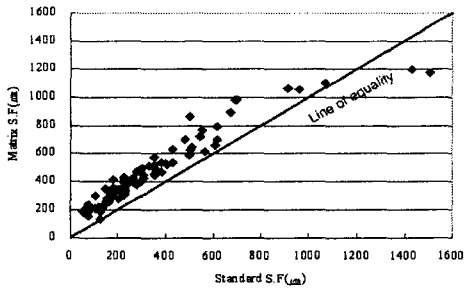


그림 3. 간격계수와 행렬간격계수의 상관성 (0.35 ≤ w/c < 0.45)

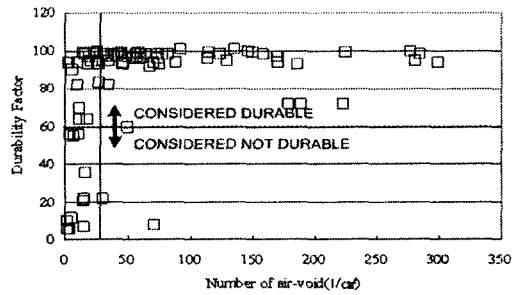


그림 4. 단위면적당 공극수와 내구성지수 상관성 (0.35 ≤ w/c < 0.45)

### 3.3 높은 물-시멘트비조건

물-시멘트비가 0.45~0.55에 해당하는 실험결과를 정리하여 높은 물-시멘트비 조건에서의 내동결성에 관한 상관성을 연구하였다. 그림 5는 제안된 행렬간격계수와 간격계수의 결과값을 비교하여 나타낸 것으로 낮은 물-시멘트비조건과 마찬가지로 두 계수의 결과값 사이에는 차이를 보이지 않고 있다.

내구성 지수 60을 기준으로 그림 6은 공기량과 내구성 지수의 상관성을 분석한 결과, 물-시멘트비가 0.25~0.45인 콘크리트에서와는 달리 내구성 지수 60을 경계로 하는 임계공기량 설정이 불가능한 것으로 나타났다. 즉, 공기량 6% 내외에서 일정한 공기량값에 상관없이 모든 내구성 지수가 평가되어 높은 물-시멘트비에서는 공기량에 의한 내구성 평가가 불가능하였다. 내구성을 고려하여 규정되고 있는 콘크리트 내 공기량 3~7%범위는 일정 범위의 물-시멘트를 갖는 콘크리트에서는 유효하나 높은 물-시멘트비 조건의 콘크리트에서는 적합하지 못한 것으로 나타났다.

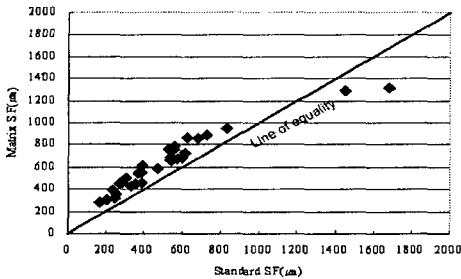


그림 5. 간격계수와 행렬간격계수의 상관성 (0.45 ≤ w/c < 0.55)

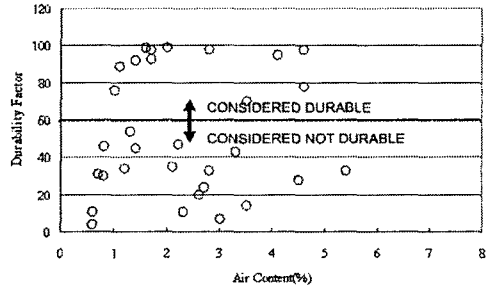


그림 6. 공기량과 내구성지수 상관성 (0.45 ≤ w/c < 0.55)

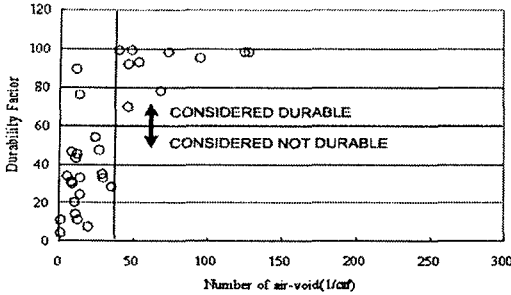


그림 7. 단위면적당 공극수와 내구성지수 상관성 ( $0.45 \leq w/c < 0.55$ )

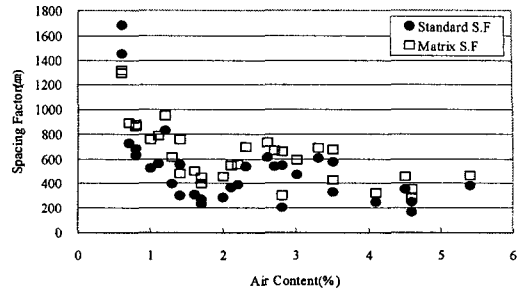


그림 8. 공기량과 간격계수 상관성 ( $0.45 \leq w/c < 0.55$ )

그러나, 그림 7에서 내구성 지수 60을 기준으로 단위면적당 공극수와 내구성지수의 상관성을 나타낼 경우, 공기량만으로는 구분할 수 없었던 내구성 저하 임계값의 설정이 가능하다. 즉, 단위면적당 공극수가 35개 이하인 경우에서 내구성지수의 저하를 나타내고 있으며 이상일 경우 60이상의 양호한 내구성을 보이고 있다. 콘크리트 내구성확보를 위한 기존의 공기량 범위는 매우 유효하나 물-시멘트비가 높은 콘크리트에 대해서는 임계공기값을 보이지 못하고 있다. 그러나, 행렬간격계수에서 계산되는 단위면적당 공극수의 경우 평가된 모든 물-시멘트비 조건에서 내구성 지수 60에 대한 임계공극수의 구분이 가능하였으며, 낮은 물-시멘트비 조건에서는 16개 이상 높은 물-시멘트비 조건에서는 35개 이상의 단위면적당공극수의 분포를 기준으로 내구성 평가가 가능한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 제안된 행렬간격계수를 이용한 내구성 지수의 임계값 제안과 평가가 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

#### 4. 행렬간격계수에 의한 내구성 지수 평가

그림 9~11은 본 연구에서 제안된 행렬간격계수를 기준으로 급속 동결융해실험에 따른 내구성 지수와 상관관계를 물-시멘트비 조건으로 각각 구분하여 나타낸 것이다. 이를 살펴보면, 물-시멘트비 조건이 높아질수록 내구성 저하로 평가되는 내구성 지수 60이하를 나타내는 행렬간격계수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 물-시멘트비 조건이 높아짐에 따라 콘크리트 내동결성을 결정하는 임계행렬간격계수는  $658\mu\text{m}$ ,  $524\mu\text{m}$ ,  $462\mu\text{m}$ 로 감소되어지는 것으로 나타났다. 행렬간격계수는 콘크리트의 내구성 평가에 있어서도 기존의 간격계수와 동일한 경향을 나타내고 있으며 이를 통해 행렬간격계수를 이용한 콘크리트 내구성 예측 및 평가가 가능한 것으로 나타났다.

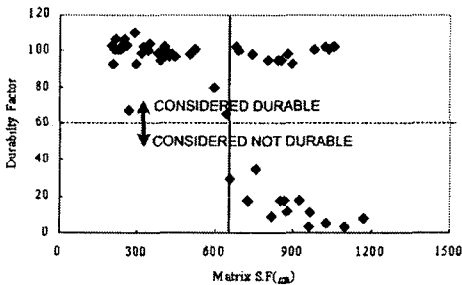


그림 9. 행렬간격계수와 내구성지수 상관성 ( $0.25 \leq w/c < 0.35$ )

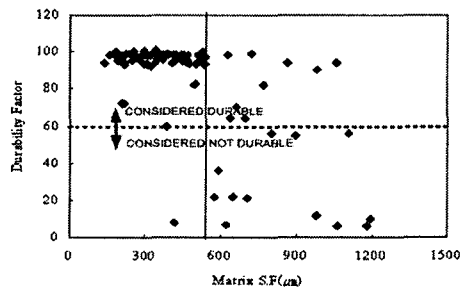


그림 10. 행렬간격계수와 내구성지수 상관성 ( $0.35 \leq w/c < 0.45$ )

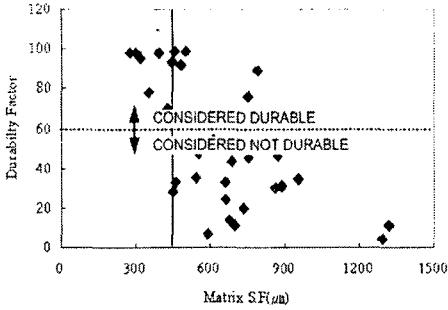


그림 11. 행렬간격계수와 내구성지수 상관성 (0.45 ≤ w/c < 0.55)

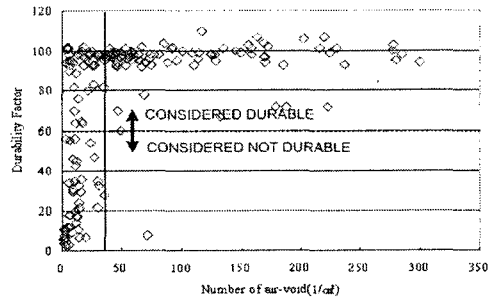


그림 12. 단위면적당공극수와 내구성지수 상관성

분석결과, 공기량 범위 3~7%는 일반적으로 시행되고 있는 0.35~0.45의 물-시멘트비 조건에서는 유효한 범위이나 물-시멘트비가 낮거나 높을 경우 적절한 기준값이 되지 않는 것으로 나타났다. 또한, 내동결성 확보를 위한 간격계수 250 $\mu$ m는 모든 물-시멘트비 조건에서 이보다 높은 값을 나타내었으며 특히 낮은 물-시멘트비 조건은 두배 이상의 간격계수를 기준으로 내구성 저하 평가가 이루어졌다. 본 연구에서 시행된 행렬간격계수를 이용할 경우 그림 12와 같이 각 물-시멘트비 조건에서 내동결성 확보를 위한 기준은 단위면적당 공극수와 행렬간격계수로 나타낼 수 있으며 단위면적당공극수의 경우 공기량만으로는 평가가 어려운 높은 물-시멘트비 조건에서도 내구성 저하를 나타내는 임계치 설정이 가능하였다. 행렬간격계수는 기존의 간격계수보다 높게 평가되었으나 행렬간격계수만으로도 충분한 콘크리트 내동결성 평가가 가능한 것으로 연구되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 내부 공극 시스템 평가에 있어서 새롭게 제안된 행렬간격계수를 이용하여 콘크리트 내동결성과 관련된 자료를 수집, 분석하여 상관성을 연구하였다. 이를 위해 기존에 연구된 물-시멘트비 조건에 따른 174개의 콘크리트 내동결성 결과를 이용하여 공기량, 간격계수 그리고 단위면적당 공극수 등으로 구분하여 내동결성 확보를 위한 행렬간격계수 및 내부 공극 구조 특성을 제안하고자 하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기존의 동결융해 연구자료를 활용하여 ASTM 규정식에 의한 간격계수와 행렬간격계수를 비교분석한 결과, 매우 유사한 결과값을 보였으며 공기량이 증가함에 따라 변화하는 간격계수와 행렬간격계수의 감소 경향이 매우 잘 일치하는 것으로 나타나 행렬간격계수를 통한 내부 공극 시스템 평가가 가능한 것으로 판단되었다.

2. 콘크리트 내동결성 저하를 위한 기준값과 도출된 결과를 비교분석한 결과, 공기량 범위 3~7%는 일반적으로 시행되고 있는 0.35~0.45의 물-시멘트비 조건에서는 유효한 범위이나 물-시멘트비가 낮거나 높을 경우 적절한 기준값이 되지 않는 것으로 나타났다. 또한, 내동결성 확보를 위한 간격계수 250 $\mu$ m는 모든 물-시멘트비 조건에서 이보다 높은 값을 나타내었으며 특히 낮은 물-시멘트비 조건은 두배 이상의 간격계수를 기준으로 내구성 저하 평가가 이루어져 내동결성 확보를 위한 간격계수의 새로운 제안이 필요한 것으로 판단되었다.

3. 본 연구에서 시행된 행렬간격계수를 이용할 경우 각 물-시멘트비 조건에서 내동결성 확보를 위한 기준은 단위면적당 공극수와 행렬간격계수로 나타낼 수 있으며 단위면적당공극수의 경우 공기량만으로는 평가가 어려운 높은 물-시멘트비 조건에서도 내구성 저하를 나타내는 임계치 설정이 가능하였다. 행렬간격계수는 기존의 간격계수보다 높게 평가되었으나 행렬간격계수만으로도 충분한 콘크리트 내동결성 평가가 가능한 것으로 연구되었다.



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.