

# 사용성 및 내구성과 균열제어

## Serviceability, Durability and Crack Control

**이광명** Kwang-Myong Lee  
성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수

**이수권** Soo-Kueon Lee  
동양미래대학 건축과 교수

**이재훈** Jae-Hoon Lee  
영남대학교 건설시스템공학과 교수

### 1. 머리말

개정되는 콘크리트구조기준의 4장 사용성 및 내구성에서 4.3의 처짐 부분은 사용기호의 중복에 따른 기호의 변경과 고강도 철근의 사용을 반영한 것 이외에 주요 변경사항은 없다. 4.5 내구성 설계에서는 동결융해, 황산염, 낮은 투수성 요구, 염해 등의 노출 범주별로 등급에 따른 내구성 허용기준을 규정하였다. 2007년도 「콘크리트구조설계기준」에서 균열 제어는 4장, 6장, 부록 V에서 다루고 있다. 개정되는 기준에서 4.2 균열 부분은 문구의 표현이 일부 수정되는 외에 내용 상 개정된 것이 없다. 4장 사용성 및 내구성과 6장과 부록 III의 균열에 대한 기준 개정 내용은 다음과 같다.

### 2. 처짐 및 피로 기준의 개정 내용

기존의 장기처짐에 대한 계수의 기호로 사용되었던  $\lambda_{3.3.4}$ 의 경량콘크리트계수와 중복되므로  $\lambda_{\Delta}$ 로 변경하였으며, 경량콘크리트에 관한 사항은 식 (4.3.3)에  $\lambda_{\Delta}$ 로 포함시키고 이에 대한 세부사항은 3.4.4에서 정의하여 다른 모든 장에서도 공통으로 적용할 수 있도록 하였다.

$$f_r = 0.63\lambda \sqrt{f_{ck}} \tag{4.3.3}$$

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\xi}{1+50\rho'} \tag{4.3.4}$$

4.3.2의 2방향 구조에서 내부에 보가 없는 슬래브의 최소두께와 4.4.2 피로에 대한 검토에서 피로를 고려하지 않아도 되는 철근과 긴장재의 응력 범위에서 600 MPa의 고강도 철근의 사용을 반영하여 각각

표 1. 내부에 보가 없는 슬래브의 최소 두께

설계기준 항복강도 $f_y$ (MPa)	지판이 없는 경우			지판이 있는 경우		
	외부 슬래브		내부 슬래브	외부 슬래브		내부 슬래브
	테두리보가 없는 경우	테두리보가 있는 경우		테두리보가 없는 경우	테두리보가 있는 경우	
300	$l_n/32$	$l_n/35$	$l_n/35$	$l_n/35$	$l_n/39$	$l_n/39$
350	$l_n/31$	$l_n/34$	$l_n/34$	$l_n/34$	$l_n/37.5$	$l_n/37.5$
400	$l_n/30$	$l_n/33$	$l_n/33$	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$
500	$l_n/28$	$l_n/31$	$l_n/31$	$l_n/31$	$l_n/33$	$l_n/33$
600	$l_n/26$	$l_n/29$	$l_n/29$	$l_n/29$	$l_n/31$	$l_n/31$

표 2. 피로를 고려하지 않아도 되는 철근과 긴장재의 응력 범위

강재의 종류와 위치항복강도 $f_y$ (MPa)		철근 또는 긴장재의 응력 범위(MPa)
이형철근	$f_y = 300$ MPa	130
	$f_y = 350$ MPa	140
	$f_y = 400$ MPa 이상	150
긴장재	연결부 또는 정착부	140
	기타 부위	160

〈표 1(기준 표 4.3.3)〉, 〈표 2(기준 표 4.4.1)〉와 같이 수정하였다.

### 3. 내구성 기준의 개정 내용

#### 3.1 노출 등급 및 범주

구조용 콘크리트 부재에 대하여 예측되는 노출정도를 고려하여 다음과 같이 〈표 3(기준 표 4.5.1)〉의 노출범주

표 3. 노출 범주 및 등급

범주	등급	조건	
F (동결 응해)	무시 F0	동결응해의 반복작용에 노출되지 않음	
	보통 F1	간혹 수분과 접촉하고 동결응해의 반복작용에 노출된 콘크리트	
	심함 F2	지속적으로 수분과 접촉하고 동결응해의 반복작용에 노출된 콘크리트	
	매우 심함 F3	제빙화학제가 노출되며 지속적으로 수분과 접촉하고 동결응해의 반복작용에 노출된 콘크리트	
S (황산염)		토양 내의 수용성 황산염( $SO_4$ )의 질량비(%)	물속에 용해된 황산염( $SO_4$ ) (ppm)
	매우 S0	$SO_4 < 0.10$	$SO_4 < 150$
	보통 S1	$0.10 \leq SO_4 < 0.20$	$150 \leq SO_4 \leq 1,500$ , 해수
	심함 S2	$0.20 \leq SO_4 < 2.00$	$1,500 \leq SO_4 \leq 10,000$
	매우 심함 S3	$SO_4 > 2.00$	$SO_4 > 10,000$
P (낮은 투수성 요구)	무시 P0	낮은 투수성이 요구되지 않고 수분에 접촉되는 경우	
	적용 P1	낮은 투수성이 요구되고 수분에 접촉되는 경우	
C (철근 방식)	무시 C0	건조하거나 또는 수분으로부터 보호되는 콘크리트	
	보통 C1	수분에 노출되었지만 외부의 염화물에 노출되지 않은 콘크리트	
	심함 C2	제빙화학제, 소금, 염수, 해수 또는 해수 물보라 등과 같은 외부로부터 직접적으로 염화물에 노출된 콘크리트	

에 따라 등급을 정하도록 개정하였다.

- 1) 노출 범주 F - 제빙화학제가 사용되거나 혹은 사용되지 않으며 수분에 접촉되면서 동결응해의 반복 작용에 노출된 외부 콘크리트에 적용된다.
- 2) 노출 범주 S - 수용성 황산염이온을 유해한 정도로 포함한 물 또는 흙과 접촉하고 있는 콘크리트에 적용된다.
- 3) 노출 범주 P - 낮은 투수성이 요구되는 콘크리트가 물과 접촉하고 있는 경우에 적용된다.
- 4) 노출 범주 C - 철근 부식을 방지하기 위해 추가적인 방식이 요구되는 철근콘크리트와 프리스트레스트 콘크리트에 적용된다.

각각의 범주안에서 노출의 심각성에 따라 숫자의 값이 증가할수록 점점 더 심각한 노출 환경을 나타내는 것으로 등급을 정의하였다.

#### 3.2 내구성 허용기준

〈표 3〉에 따라 노출등급이 결정된 경우의 콘크리트 배합은 〈표 4(기준 표 4.5.2)〉에 규정된 최대 물-결합재비, 최소 설계기준 압축강도에 대하여 가장 제한적인 요구조건을 따르고 기타 추가 요구사항을 준수하여야 하는 것으로 개정하였다.

동결 응해 및 제빙화학제에 노출되는 일반 콘크리트나 경량 콘크리트는 〈표 5(기준 표 4.5.3)〉와 같이 노출등급 F1, F2, F3에 따라 요구되는 공기량으로 수정하여 제시하였다. 또한 노출등급 F3의 경우 콘크리트 배합에 사용되는 플라이 애쉬, 실리카 폼, 슬래그, 포졸란의 결합재의 전 질량에 대한 비율이 〈표 6(기준 표 4.5.4)〉의 요건에 적합하도록 하여야 한다고 규정하였다.

### 4. 균열 제어 기준의 개정내용

#### 4.1 6장 균열 제어 기준의 개정내용

보 및 1방향 슬래브의 휨철근 배치를 규정한 6.3.3은 철근의 간격을 검토하여 균열 제어를 대체하는 내용이다. 개정되는 기준에서는 (4)항의 철근 간격 기준식을 다음과 같이 수정하였다.

표 4. 노출등급에 따른 내구성 허용기준

노출 등급	최대 물-결합 재비	최소 설계 기준 압축 강도 $f_{ck}$ (MPa)	추가적인 최소 요구 사항		
			공기량	결합재 사용 제한	
-	-	-	공기량	결합재 사용 제한	
F0	-	21	없음	없음	
F1	0.45	30	표 4.5.3	없음	
F2	0.45	30	표 4.5.3	없음	
F3	0.45	30	표 4.5.3	표 4.5.5	
-	-	-	시멘트의 종류	염화칼슘 혼화제 사용 유무	
S0	-	21	제한없음	제한없음	
S1	0.5	27	보통 포틀랜드 시멘트(1종) + 포졸란 혹은 슬래그 <sup>1)</sup> 플라이 애쉬 시멘트(KS L 5211) 중용열 포틀랜드 시멘트(2종) (KS L 5201) 고로 슬래그 시멘트(KS L 5210)	제한없음	
S2	0.45	30	내황산염 포틀랜드 시멘트(5종) (KS L 5201) 고로 슬래그 시멘트(KS L 5210) + 플라이 애쉬	허용안됨	
S3	0.45	30	내황산염 포틀랜드 시멘트(5종) (KS L 5201) + 포졸란 혹은 슬래그 <sup>2)</sup>	허용안됨	
P0	-	21	해당사항 없음		
P1	0.50	27	해당사항 없음		
			콘크리트 내 최대 수용성 염소 이온(Cl) 함량 (시멘트 질량에 대한 %)	관련 규정	
			철근 콘크리트		프리스트레스 콘크리트
C0	-	21	1.00	0.06	없음
C1	-	21	0.30	0.06	
C2	0.40	35	0.15	0.06	콘크리트 구조설계 기준 5.4절

- 1) 1종 시멘트가 포함된 콘크리트에 사용될 때, 황산염에 대한 저항을 개선시킨 실적이 있거나 또는 실험에 의해 증명된 포졸란 또는 슬래그
- 2) 5종 시멘트가 포함된 콘크리트에 사용될 때, 황산염에 대한 저항을 개선시킨 실적이 있거나 또는 실험에 의해 증명된 포졸란 또는 슬래그

표 5. 동해 저항 콘크리트에 대한 전체 공기량

굵은 골재의 최대 치수(mm)	공기량(%)	
	노출 등급 F1	노출 등급 F2, F3
10.0	6.0	7.5
15.0	5.5	7.0
20.0	5.0	6.0
25.0	4.5	6.0
40.0	4.5	5.5

표 6. 노출등급 F3의 콘크리트에 대한 최대 혼화재 비율

결합재	결합재 전 질량에 대한 백분율(%)
KS L 5405에 따르는 플라이 애쉬 또는 기타 포졸란	25
KS F 2563에 따르는 고로슬래그 미분말	50
실리카 폼	10
플라이 애쉬 또는 기타 포졸란, 고로슬래그 미분말 및 실리카 폼의 합	50 <sup>1)</sup>
플라이 애쉬 또는 기타 포졸란과 실리카 폼의 합	35 <sup>1)</sup>

1) 플라이 애쉬 또는 기타 포졸란의 합은 25% 이하, 실리카 폼은 10% 이하 여야 한다.

$$s = 375 \left( \frac{k_{cr}}{f_s} \right) - 2.5c_c \quad (6.3.3)$$

$$s = 300 \left( \frac{k_{cr}}{f_s} \right) \quad (6.3.4)$$

여기서,  $k_{cr}$ 은 철근의 노출 조건을 고려한 계수로서 부록 III에 정의된 건조환경에 노출되는 경우에는 280이고, 그 외의 환경에 노출되는 경우에는 210이다. 2007년도 설계기준의 식 (6.3.3)과 (6.3.4)는  $k_{cr}$  대신 210의 상수로 표현되어 있는데, 이 값은 허용균열폭이 약 0.3mm 인 습윤환경을 대상으로 한 것이었다. 이에 대하여 건물의 내부와 같은 건조환경에도 동일한 기준을 적용하는 것은 너무 엄격하다는 의견이 있었다. 따라서 합리적인 기준의 적용을 위하여 두가지를 구분하여 적용할 수 있도록 수정하였다. 또한 부록 III(균열의 검증)에 따라 균열을 검증하는 경우 규정을 따르지 않아도 좋다는 것을 명확히 기술하였다.

#### 4.2 부록 III 균열 제어 기준의 개정내용

균열폭을 계산하고 허용균열폭과 비교하여 균열을 검증할 때에는 부록을 적용하는데, 2007년도 설계기준에서 부록 V에 규정된 '균열의 검증'은 설계기준의 편집상 부록 III으로 변경되었다. 또 V.3.1에서 '허용균열폭'이라는 제목으로 '허용균열폭'과 '균열폭 검증방법'을 모두 규정하던 것을 III.3.1 균열폭의 검증과 III.3.2 허용균열폭으로 분리하였다.

III.3.1 균열폭의 검증에서는 (2)항을 추가하여 '균열 검증에 적용하는 지속하중은 설계수명 동안 항상 작용하는 고정하중과 설계수명의 절반 이상의 기간 동안 지속

해서 작용하는 하중들의 합이다. 구조물의 특성을 고려하여 발주자 또는 건축주가 결정할 수 있다.'로 규정함으로써 유럽 설계기준의 개념을 반영한 지속하중의 정의를 명확히 하였고, 지속하중의 크기는 구조물의 특성을 고려하여 발주자 또는 건축주가 결정할 수 있도록 하였다.

부록 III.3.3(1)에서 균열폭의 계산식은 종전 기준이 CEB-FIP Model Code 90의 균열폭 해석모델을 기본으로 하여 수축에 의한 콘크리트의 변형률을 포함하고 있는데, 이 변형률을 구하는 과정이 매우 복잡하여 실무설계에서 적용하는데 어려움이 있다는 의견이 많았다. 따라서 이를 해소하기 위하여 철근과 콘크리트의 변형률 차이와 균열 간격의 계산식을 수정한 모델로서 수축에 의한 콘크리트의 변형률을 직접 계산하지 않고 균열폭을 해석하는 Eurocode 2 Part 1의 모델을 기본으로 다음과 같이 수정하였다.

$$w_d = k_{st} w_m = k_{st} l_s (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad \text{(III.3.2)}$$

여기서,  $w_d$ 는 설계 균열폭이고,  $w_m$ 은 평균 균열폭이며,  $l_s$ 는 평균 균열간격으로 식 (III.3.3) 또는 식 (III.3.4)에 따라 계산한다.  $k_{st}$ 는 균열폭 평가계수로서 III.3.3(4)에 따른다.  $\epsilon_{sm}$ 는 균열간격 내의 평균 철근 변형률이며,  $\epsilon_{cm}$ 는 균열간격 내의 평균 콘크리트 변형률이다.

개정 기준이 Eurocode 2의 모델을 기본으로 하였지만 Eurocode 2와 동일하지 않은 부분은 균열폭 평가계수  $k_{st}$ 를 도입하였다는 것과 균열 간격의 계산식 및 평균 변형률의 계산식이 다르다는 것이다.

부록 III.3.3(4)에 규정된 균열폭 평가계수  $k_{st}$ 는 균열폭의 변동폭을 고려하기 위한 것이다. 균열폭은 매우 변동폭이 큰 특성을 가지고 있으나 2007년도 기준에서는 이러한 특성이 반영되지 않은 측면이 있었다. 따라서 평균 균열폭과 최대 균열폭을 계산할 수 있도록 균열폭 평가계수  $k_{st}$ 를 도입하였다. 균열폭의 통계자료에서 상위 5% 분위수의 균열폭은 평균 균열폭의 1.7배에 해당한다. 식 (III.3.2)에서  $k_{st}$ 를 제외한 나머지 부분  $l_s(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ 는 균열폭 통계자료의 평균값을 나타낸다. 따라서 평균 균열폭을 계산할 때에는  $k_{st}$ 로 1.0을 적용하도록 하였고, 통계자료의 상위 5% 분위수의 균열폭을 최대 균열폭으로 하여 최대 균열폭을 계산할 때에는  $k_{st}$ 로 1.7을 적용하도록 하였다.  $k_{st}$ 는 발주자 또는 건축주가 구조물의 특성을 고려하여 균열 검증 수준을 결정하고, 그 결과에 따라 값을 선정할 수 있도록 하였다.

종전 기준에서는 균열 상태를 단일 균열 상태와 균열 안정 상태를 구분하여 균열간격을 달리 계산하도록 하고 있으나 개정 기준에서는 균열 상태를 구분하지 않도록 하였다. 왜냐 하면 학술적으로는 단일 균열 상태와 균열 안정 상태를 구분하는 것이 의미가 있지만, 실무 설계에서의 의미 있는 균열 검증 대상은 균열 안정 상태이므로 기준의 단순화를 위하여 Eurocode 2와 같이 단일 균열 상태에 해당하는 조항을 삭제하였다.

따라서 부록 III.3.3(2)에 규정된 균열간격 계산식은 균열폭의 변동성을 고려하고 CEB-FIP MC 78과 Eurocode 2 Part 1의 모델을 기본으로 하여 수정한 모델을 채택함에 따라 식의 형태와 계수를 조정하여 결정하였다. 즉, 균열폭 해석모델의 기본식을 평균 균열폭의 계산에 목표를 두고 평균 균열간격  $l_s$ 를 적용하도록 하였다. 평균 균열간격  $l_s$ 는 부착된 철근의 중심간격이  $5(c_c + d_b/2)$  이하인 경우는 식 (III.3.3)으로 계산하고, 부착된 철근의 중심간격이  $5(c_c + d_b/2)$ 를 초과하는 경우는 식 (III.3.4)로 계산한다.

$$l_s = 2c_c + \frac{0.25k_1 k_2 d_b}{p_e} \quad \text{(III.3.3)}$$

$$l_s = 0.75(h - x) \quad \text{(III.3.4)}$$

여기서,  $c_c$ 는 최외단 인장철근이나 긴장재의 표면과 콘크리트 표면 사이의 최소 피복두께이고,  $k_1$ 은 부착강도에 따른 계수로 이형철근은 0.8, 원형철근이나 긴장재는 1.6을 사용한다.  $k_2$ 는 부재의 하중작용에 따른 계수로 휨모멘트를 받는 부재는 0.5, 직접인장력을 받는 부재는 1.0을 사용한다. 편심을 가진 직접인장력을 받는 부재나 부재의 국부적인 부분의 균열을 검증할 때에는  $k_2 = (\epsilon_1 + \epsilon_2) / (2\epsilon_1)$ 로 한다. 여기서  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 는 단면 표면에서의 인장변형률로서 둘 중의 큰 값을  $\epsilon_1$ 으로 한다.  $d_b$ 는 철근의 지름이나 다발 철근의 등가 지름으로, 크기가 각기 다른 철근이 조합된 경우에는  $d_{beq} = (m_1 d_{b1}^2 + m_2 d_{b2}^2) / (m_1 d_{b1} + m_2 d_{b2})$ 로 계산되는 평균 철근지름  $d_{beq}$ 를 사용한다. 여기서,  $m_1$ 은 철근의 지름이  $d_{b1}$ 인 철근의 개수이고,  $m_2$ 는 철근의 지름이  $d_{b2}$ 인 철근의 개수이다.  $p_e$ 는 콘크리트의 유효 인장면적을 기준으로 한 철근비로 식 (III.3.5)에 의해 계산한다. 콘크리트의 유효 인장면적  $A_{cte}$ 는 식 (III.3.6)에 의해 계산한다. 여기서,  $d_{cte}$ 는 콘크리트 유효 인장깊이로서 휨모멘트를 받는 부재는  $2.5(h-d)$ 와  $(h-x)/3$  중 작은 값으로 하고, 직접인장력을 받는 부재는  $2.5(h-d)$ 와  $h/2$  중 작은 값으로 한다.

$$p_e = \frac{A_s}{A_{cte}} \quad (III.3.5)$$

$$A_{cte} = b d_{cte} \quad (III.3.6)$$

부록 III.3.3(3)에 규정된 평균 변형률의 계산식은 정확한 형태의 식을 이론적으로 유도하여 다음과 같이 수정하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} &= \frac{f_{so}}{E_s} \left[ 1 - \beta_1 \beta_2 (1 + n_i p_e) \left( \frac{f_{sr}}{f_{so}} \right)^2 \right] \\ &\geq 0.6 \frac{f_{so}}{E_s} \end{aligned} \quad (III.3.7)$$

여기서,  $f_{so}$ 는 균열단면의 철근응력이다.  $f_{sr}$ 은 균열이 발생한 직후 균열면에서 계산한 철근응력으로, 휨모멘트가 작용하는 경우 식 (4.3.2)로 계산한 균열모멘트  $M_{cr}$ 과 균열단면의 단면2차모멘트를 적용하여 계산한다.  $\beta_1$ 은 부차특성에 따른 계수로서, 이형철근은 1.0을 적용하고, 원형철근이나 강연선은 0.5를 적용한다.  $\beta_2$ 는 하중조건에 따른 계수로서, 반복하중에 대해서는 0.5를 적용하고 그 외의 경우에는 1.0을 적용한다.  $n_i$ 는 콘크리트의 초기 접선 탄성계수에 대한 철근의 탄성계수비이다.

평균 변형률의 계산식이 수정됨에 따라 III.3.3(5)에서 부과된 변형에 의해서도 균열이 발생하는 곳에서는 균열 위치에서의 철근 변형률(식 III.3.7)에서  $(1 + n_i p_e)(f_{sr}/f_{so})^2$ 을 부과된 변형에 의한 변형률 값만큼 증가시키도록 하였다.

철근이 직교 2방향으로 보강된 부재에 대한 III.3.3(6)은 주응력 축과 철근 방향 사이의 각이 15° 보다 클 때 식 (III.3.8)에 의해 최대균열간격  $l_s$ 를 산정할 수 있도록 수식을 추가하였다.

$$l_s = \left( \frac{\cos\theta}{l_{sx}} + \frac{\sin\theta}{l_{sy}} \right)^{-1} \quad (III.3.8)$$

여기서,  $\theta$ 는  $x$ 방향 철근과 인장 주응력 방향 사이 각이고,  $l_{sx}$ 와  $l_{sy}$ 는  $x$ 와  $y$ 방향으로 각각 계산한 균열 간격이다. □

저자약력



**이광명** 교수는 미국 MIT 토목환경공학과에서 고강도 콘크리트의 파괴거동에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 1994년부터 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 고성능 콘크리트, 내구성, 디지털 가상설계이며 우리학회 편집학회지위원회 위원장을 맡고 있으며, 특수환경콘크리트 위원회 위원으로 활동하고 있다.

leekm79@skku.edu



**이수권** 교수는 연세대학교 건축공학과 대학원을 졸업한 후 (주)삼우종합건축사사무소 구조설계팀에서 6년간 실무를 익히고 건축구조기술사를 취득하였으며, 1994년부터 동양미래대학 건축과 교수로 재직하고 있다. 제117기에 우리학회 학회발전위원회 위원장을 역임하였다.

sklee@dongyang.ac.kr



**이재훈** 교수는 Univ. of Wisconsin-Madison에서 철근콘크리트 장주설계를 주제로 박사학위를 취득하였고, 삼성건설 근무를 거쳐 1994년부터 영남대학교 교수로 재직하고 있다. 토목구조기술사, 미국 PE이며, 주 관심 연구 분야는 고강도 철근콘크리트구조, 내진설계, 프리캐스트 RC 및 PSC, FRP 합성구조 및 강 합성구조이다. 현재 우리학회 힘압축위원회 위원장을 맡고 있다.

jhl79@ynu.ac.kr

<http://www.kci.or.kr>



KOREA CONCRETE INSTITUTE