

Eurocode 2 도표에 의한 구속된 부재의 균열폭 결정방법

Graphical Determination of Crack Widths Due to Restrained Imposed Deformations in Accordance with Eurocode 2

윤 우 현*

- 본 소고는 Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992), H.8에 투고된 내용을 번역, 요약한 것임 -

원 저자 : Rolf Drozella, Otto Hansen, Karl-Heinz Lüßenhop 3인임.

1. 머리말

철근 콘크리트 구조물에서 발생하는 균열폭을 예측하기 위해서 지금까지는 균열공식을 이용하여 왔다. 이러한 균열공식에는 여러가지 계수가 고려되어서 균열폭이 계산되어지나 계수들 값의 범위가 크고, 인장력 특히 구속력에서의 콘크리트의 거동이 매우 균일하지 않기 때문에 실제 발생하는 균열폭과는 상당한 차이가 있다. 따라서 대부분의 시방서에는 콘크리트 표면균열폭 제한을 위해서 계산에 의한 방법보다는 최소 철근비를 도입하여 설계하도록 되어 있다. 한편 일부 학자에 의하여 제안된 균열공식에는 여러 기본적인 계수들이 최소화되어 있는 경우가 대부분이다. 따라서 이 공식으로 계산하면 약간의 철근량을 감소시키는 경제적인 이유로 실제 사용되어지나, 이것 역시 실무자가 이용하기에는 복잡한 계수로 이루어진 수학적인 모델이다. 최근 이러한 계산상의 어려움을 보완하기 위하여 균열예측이 가능하도록 균열

공식의 각계수가 도표로 되어 이용되어 지고 있다. 이번에 소개되는 Eurocode 2는 균열공식에 고려되는 모든 계수의 상호 관련성을 분석, 이용하여 입력자료를 최소화 하므로써 간단한 도표를 이용하여 실무자가 구속된 부재의 균열예측을 손쉽게 할 수 있도록 하였다. 본 소고에서는 Eurocode 2에 있는 도표를 이용한 균열 예측방법을 균열공식에서부터 예제까지 기술하고자 한다.

2. 균열공식

지속하중 상태의 이형철근을 사용한 콘크리트의 구속력에 의한 균열공식은 Eurocode 2의 4.4.2절에 의하면 다음과 같다.

$$w_k = \beta s_{rm} \epsilon_{sm} \quad (1)$$

여기서 s_{rm} 은 평균균열간격, ϵ_{sm} 은 철근의 평균 변형도로서 다음과 같이 표시된다.

$$s_{rm} = 50 + k_2 k \phi_s / 5 \rho_s \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

$$\epsilon_{sm} = \sigma_s / 2E_s \quad (3)$$

각각의 기호들의 의미는 다음과 같다.

β : 계산된 균열폭의 평균값에 대한 비. $\min(b;h) \geq 800\text{mm}$ 에서는 $\beta=1.7$, $\min(b;h) \leq 300\text{mm}$ 에서는 $\beta=1.3$, $\min(b;h)=300 \sim 800\text{mm}$ 에서는 보간법에 의해 β 를 결정

b: 부재단면의 폭

* 정회원, 대전대학교 토목공학과 교수

h : 부재단면의 높이

$\min(b;h)$: b, h 값의 최솟값

k_2 : 균열부의 변형도 분포 영향을 고려한 계수.

일축인장의 경우 $k_2=1.0$, 휨의 경우 $k_2=0.5$

k : 부재높이 h 에 따른 고유응력의 비선형 분포를 고려한 계수. $h \leq 0.3m$ 의 경우 $k=0.8$, $h \geq 0.8m$ 의 경우 $k=0.5$, $0.3m < h < 0.8m$ 의 경우 $k=0.5+1.2(0.8-h)^2$

ϕ_s : 철근직경(mm)

ρ_r : 유효철근비, $\rho_r = A_s / A_{c,eff}$

$A_{c,eff}$: 인장철근부의 콘크리트의 유효인장단면적. 철근중심과 인장단면과의 거리가 d_1 이라면 $A_{c,eff}/bh = 2.6 d_1/h$. 일축인장의 경우 $A_{c,eff} \leq bh/2$, $d_1/h \leq 0.20$, 휨의 경우 $A_{c,eff} \leq b(h-x)/3 \leq 0.3bh$, $d_1/h \leq 0.12$

ρ : 철근비 $\rho = A_s/bh$. 일축인장 구속시에는 $\rho = 2.5\rho_r(d_1/h)$

ρ_k : 변형된 철근비 $\rho_k = \rho/k$

σ_s : 균열발생 직후의 철근의 허용응력. σ_s 는 철근의 항복강도 f_{yk} 를 초과할 수 없음.

$$A_{ct} = bh/2 \text{ 에서 } \sigma_s = 0.15 k_c f_{c,eff}^{2/3} / \rho_k$$

A_{ct} : 균열발생 직전의 콘크리트의 인장단면적

k_c : 균열발생부의 응력분포 영향을 고려한 계수.

일축인장의 경우 $k_c=1.0$, 휨의 경우 $k_c=0.4$

$f_{c,eff}$: 균열발생시 콘크리트의 유효압축강도. 콘크리트의 유효인장강도 $f_{ct,eff} = 0.30 f_{c,eff}^{2/3}$

E_s : 철근의 탄성계수(200kN/mm²)

상기값에 의해서 식(2)와 식(3)은 각각 다음과 같이 표시된다.

$$s_{rm} = 50 + k_2 \phi_s (d_1/h) / 2\rho_k \quad (4)$$

$$\epsilon_{sm} = 0.075 k_c f_{c,eff}^{2/3} / \rho_k E_s \quad (5)$$

이에 따라 균열공식 (1)은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$f_1 \rho_k^2 - \rho_k - f_2 = 0 \quad (6)$$

$$\text{여기서, } f_1 = w_k / \beta f_{c,eff}^{2/3} E_s / 3.75 k_c \quad (7)$$

$$f_2 = \phi_s (d_1/h) k_2 / 100 \quad (8)$$

3. 균열공식의 도표화

식(6)은 7개의 변수로 구성되었는 ρ_k 의 제곱항으로 되어있고, 이중 6개의 값을 알면 미지수는 한개가 된다. 만일 f_1, f_2 를 단지 한변수의 함수로 본다면 식(6)은 Fig.1과 같은 2개의 평행한 준선(제1, 제2 준선)을 가진 계산도표로 나타낼 수 있다.

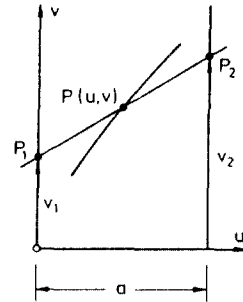


Fig. 1 Nomogram

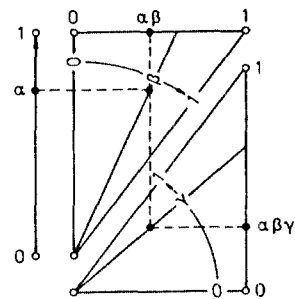


Fig. 2 Graphical multiplication

여기서 v_1 은 좌표축 v 에, v_2 는 원점으로 부터 좌표축 u 상에서 a 만큼 떨어진 곳에 기입하고, 이 두점 $P_1(0, v_1), P_2(a, v_2)$ 를 연결하여 제3준선과 교차하는 점을 $P(u, v)$ 라 할 때 다음과 같은 간단한 기하학적인 관계식이 성립된다:

$$(v - v_1)/u = (v_2 - v_1)/a \quad (9)$$

또는

$$v_1(a/u-1)-av/u+v_2=0$$

여기에 $v_1=bf_1$, $v_2=c-df_2$ (b, c, d는 임의의 상수)를 대입하면

$$f_1(a/u-1)b/d-(av/u-c)/d-f_2=0 \quad (10)$$

만일 $\rho_k^2=(a/u-1)b/d$, $\rho_k=(av/u-c)/d$ 또는 이것을 u, v에 관한 식

$$u=ab/(d\rho_k^2+b), v=b(d\rho_k+c)/(d\rho_k^2+b) \quad (11)$$

으로 표시되면 Fig.1의 도표는 식(6)과 일치하고, ρ_k 의 함수인 제3준선을 구할 수 있다. 식 (7), (8)의 함수 f_1 , f_2 는 Fig.2와 같은 방법으로 도표화 되었다.

4. 콘크리트의 유효인장강도

균열계산에서는 최초 균열발생시의 콘크리트의 인장강도 $f_{ct,eff}$ 가 균열결과에 아주 중요한 영향을 준다. 따라서 균열공식에 콘크리트의 인장강도가 도입되어야 하나 인장강도는 $f_{ct}=0.30f_{ck}^{2/3}$ 와 같이 콘크리트의 압축강도로 나타낼 수 있고, 또한 압축강도가 콘크리트의 중요한 특성치이기 때문에 콘크리트 설계기준강도 f_{ck} 에 감소계수 k_d 를 곱한 유효압축강도 $f_{c,eff}$ 를 균열공식에 사용하기로 한다.

$$f_{c,eff}=k_d f_{ck} \quad (12)$$

여기서, k_d 는 Table 1에 나타난 바와 같다.

Table 1 Reduction factors k_d for determination of the effective compressive strength for restrained contraction during efflux of the heat of hydration (ambient temperature 15 to 25°C)

시멘트 등급(강도)	부재 두께 (m)		
	$h < 0.5$	$0.5m \leq h \leq 1.0$	$h > 1.0$
Z25, 35L	0.25	0.35	0.35
Z35F, Z45L	0.35	0.35	0.45
Z45F, Z55	0.35	0.45	0.60

5. 도표에 의한 균열폭 결정

Fig.3, Fig.4에는 공식(1)이 7개의 계수와 함께

도표화 되어있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 여기에는 3개의 준선이 있고, 이중 제1, 제2 준선은 양측 도표상의 연직 실선으로, 제3준선은 중간 도표상의 사선으로(도표상의 Leitlinie) 표시되어 있다. 실제 설계시에는 주어진 허용균열폭 w_k 에 따른 철근비 ρ 또는 사용될 철근의 직경 ϕ_s 를 구하는 것이 문제이고, 검산 과정에서는 역으로 설계된 부재에서 발생하는 균열폭이 허용치 범위 내에 있는지를 검토하는 것이 문제이다. 허용균열폭 w_k 에 따른 철근비 ρ 를 도표에 의해 결정하는 순서를 열거하면 다음과 같다:

- ① $f_{c,eff}$, $\min(b;h)$, w_k 에 의한 제1준선의 교점을 구한다.
- ② d_1/h , ϕ_s 에 의한 제2준선의 교점을 구한다.
- ③ 위의 두교점을 연결시켜 제3준선과 교차하는 점을 구한다.
- ④ 이 교점에서 하향 연직점선을 그어 부재두께 h 와의 교점을 필요한 철근비 ρ 로 결정한다.
- ⑤ 그리고 최초균열이 발생했을 때의 철근응력 σ_s 는 상향 연직점선과 $f_{c,eff}$ 와의 교점으로 결정한다.

그러면, 아래의 예로써 그 과정을 설명한다.

예제 1: 일축 인장 구속(Fig.3)

재료: 콘크리트 등급 C 35/45, 시멘트등급 Z45L, 부재두께 $h=0.50m$

$\Rightarrow f_{ck}=35N/mm^2$, $k_d=0.35 \Rightarrow$ 최초 균열 발생시 콘크리트 유효압축강도 $f_{c,eff}=35k_d=12N/mm^2$.

이형철근의 항복강도 $f_{yk}=500N/mm^2$

단면: $b=0.80m$, $d_1=d_2=6cm$, $h=0.50m \Rightarrow d_1/h=d_2/h=0.12$

철근직경: $\phi_s=16mm$

허용균열폭: $w_k=0.2mm$

예제 1을 푸는 순서는 Fig.3에서 보듯이 우선 좌측도표에서 $f_{c,eff}=12N/mm^2$ 되는 점에서 우측으로 수평점선을 그어 $\min(b;h)=0.50m$ 와의 교점을 찾고, 이점에서 연직하향의 점선과 $w_k=0.2mm$

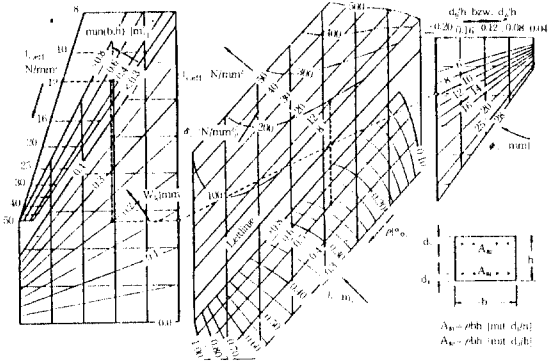


Fig. 3 Crack width due to restrained imposed axial deformation

와 만나는 점에서 우측으로 수평점선을 그어 제1준선과의 교점을 구한다. 우측도표에서는 $d_1/h = d_2/h = 0.12$ 되는 점의 연직하향 점선과 $\phi_s = 16\text{mm}$ 과 만나는 점에서 좌측으로 수평점선을 그어 제2준선과의 교점을 구한다. 이들 두교점을 연결하여 제3준선과 만나는 점에서 연직점선을 그으면 최초 균열발생시 철근응력 $\sigma_s = 195\text{N/mm}^2 < f_{yk}$, $\rho = 0.25\%$ 를 얻는다. 따라서 필요한 철근량 $A_{s1} = A_{s2} = \rho bh = 10.0\text{cm}^2$ 가 된다.

예제 2: 휨 인장 구속(Fig.4)

재료: 콘크리트 등급 C 40/50, 시멘트등급 Z45F, 부재두께 $h = 0.80\text{m}$
 $\Rightarrow f_{ck} = 40\text{N/mm}^2$, $k_d = 0.45 \Rightarrow$ 최초 균열 발생시 콘크리트 유효압축강도 $f_{c,eff} = 40k_d = 18\text{N/mm}^2$.
 이형철근의 항복강도 $f_{yk} = 500\text{N/mm}^2$

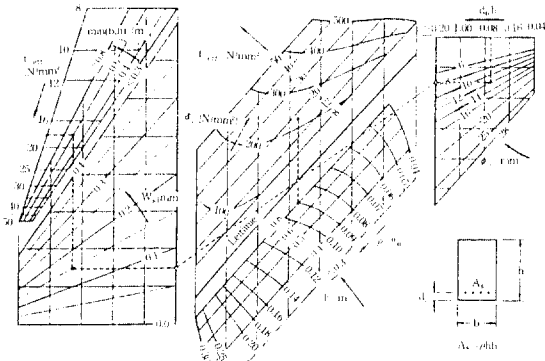


Fig. 4 Crack width due to restrained imposed bending deformation

단면: $b = 0.60\text{m}$, $d_1 = 6\text{cm}$, $h = 0.80\text{m} \Rightarrow d_1/h = 0.075$

철근직경: $\phi_s = 12\text{mm}$

허용균열폭: $w_k = 0.15\text{mm}$

예제 2의 풀이도 예제 1과 같은 순서대로 한다. 이에 따른 결과는 $\sigma_s = 230\text{N/mm}^2 < f_{yk}$, $\rho = 0.09\%$ 가 되고, 따라서 필요한 철근량 $A_{s1} = \rho bh = 4.4\text{cm}^2$ 가 된다.


6. DIN 1045와 비교

Eurocode 2는 균열공식에 콘크리트 압축강도 f_{ck} 를 사용하나, DIN 1045는 β_{WN} 을 사용한다. 이들 두값의 관계식은 $f_{ck} = 0.76\beta_{WN}$ 으로서 Eurocode 2에 이값을 대입하여 계산할 경우 필요 철근량은 DIN 1045에 의한 값의 65~80% 정도로 작아진다. 한편 Eurocode 2에는 철근 탄성계수가 DIN 1045와는 달리 감소되어있지 않기 때문에 필요한 철근량이 DIN 1045에 비해 75~90% 정도 작게 계산된다. 또한 Eurocode 2는 정상적인 환경 조건에서의 균열폭을 0.3mm로 제한하기 때문에 DIN 1045의 0.25mm와 비교하면 계산된 철근량이 60~70% 정도로 작게 된다. 이와같이 동일한 이론에 근거한 두가지 방법으로 계산된 필요철근량이 차이가 나는 것은 실무자에게는 쉽게 파악될 수 없는 것으로서 앞으로 여기에 충분한 이론적인 보충 설명이 필요하다.

참고 문헌

1. DIN V 18932 Teil 1. Eurocode 2. Planung von Stahlbeton-und Spannbetontragwerken, Teil 1 : Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau(Ausgabe Oktober 1991). Englische Fassung vom Dezember 1989 abgedruckt im Beton-kalender 1991. Teil II, pp.90.
2. ENV 1992-1-1(December 1991) Eurocode 2 Teil 1.
3. Schießl, P., "Grundlagen der Neuregelung zur Beschränkung der Rißbreite," Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, H.400, pp.157-175. Berlin/Köln: Beuth-Verlag 1989.

4. DIN 1045(Ausgabe Juli 1988)–Beton-und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung.
 5. Windels, R., "Graphische Ermittlung der Riβbreite für Zwangm.," Beton-und Stahlbetonbau 87(1992), H.2, pp.29–32.
 6. Meyer, G., "Riβbreitenbeschränkung nach DIN 1045", Diagramme zue direkten Bemessung.

Düsseldorf : Beton-verlag 1989.
 7. Hilsdorf, H.K., "Beton, Beton-Kalender 1992, Teil I. pp.1. Berlin : Ernst & Sohn 1992.
 8. Litzner, H.-U., "Grundlagen der Bemessung nach Eurocode 2. Vergleich mit DIN 1045 and DIN 4227. Beton-Kalender 1992. Teil II, pp.281. Berlin : Ernst & Sohn 1992. 

전문서적 보급 안내

“최신콘크리트공학”

(한국콘크리트학회 編 · 4×6배판, 총 684쪽)

• 본 학회는 콘크리트 관련기술의 가장 기본이 되는 콘크리트 재료의 제반특성을 집대성한 전문서적 「최신콘크리트공학」을 출간하고 여러분에게 보급하고 있습니다.

- 주요내용 :
- | | |
|---------------------|----------------------|
| (1) 콘크리트 정의 및 발달사 | (12) 콘크리트의 시험 |
| (2) 시멘트 | (13) 품질관리 |
| (3) 콘크리트 골재 | (14) 내구성 |
| (4) 배합수 | (15) 콘크리트의 균열 및 파괴역학 |
| (5) 혼화재료 | (16) 특수콘크리트 |
| (6) 배합설계 | (16.1) 고강도 콘크리트 |
| (7) 굳지 않은 콘크리트의 성질 | (16.2) 경량 콘크리트 |
| (8) 혼합, 운반 및 타설 | (16.3) 섬유보강 콘크리트 |
| (9) 양생 | (16.4) 콘크리트-폴리머 복합체 |
| (10) 굳은 콘크리트의 강도 특성 | (16.5) 중량콘크리트 |
| (11) 콘크리트의 역학적 특성 | |

• 구입방법 : 본 서적이 필요하신 분은 학회사무국에서 구입하시기 바라며 직접 오시기 어려운 분은 밑에 기재된 은행계좌로 송금하시면 우송해 드립니다.(송금자명 필히 기재요망)

• 보급가격 : 15,000원(회원은 10% 할인해 드립니다), 우편발송시 우송료 1,500원 별도 부담해야 함.

• 은행계좌 : 한일은행(096-132587-01-501)(예금주 : 최신콘크리트공학)

• 문의처 : 한국콘크리트학회 사무국

주 소 : 서울시 강남구 청담동 134-20(삼익빌딩 419호)

전 화 : 546-5384, 543-1916, 545-0199