

# 경제성을 고려한 RC 휨부재의 최적철근비 결정

## Practical method for determination of optimal steel ratio in RC flexural members

정 제 평\*      김 대 중\*\*      모 귀 석\*\*\*      이 상 희\*\*\*\*      김 우\*\*\*\*\*  
Cheong, Jae-Pyong      Kim, Dae-Joong      Mo, Gui-Suk      Lee, Sang-Hee      Kim, Woo

### Abstract

This paper proposes a practical method for determining the most economical steel ratio in RC flexural members. The costs of individual material and labor are considered. Then, an equation for determining the optimal steel ratio is proposed. It was found that a relevant steel ratio is recommended to be 0.95~1.0% for designing singly reinforced rectangular beam.

### 1. 서론

국내의 토목 구조물의 구조 형태에는 많은 형태가 있으나 그중 RC 구조가 다수를 차지하고 있다. 그 중 도시철도와 공동구, 압거 등과 같이 연장이 긴 구조물의 단면가정은 총공사비와 직결되지만 그에 따른 공사비를 추론한 설계는 실제 반영되지 않고 있다. 일반적으로, RC 휨 부재의 경우 사용 철근량이 작을수록 경제적인 것으로 알려져 있지만 항상 사실이 아니다. 왜냐하면, 철근과 콘크리트의 설계 비용이 각기 달라 공사비가 달라지기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 지하철과 공동구, 압거와 같이 동일 형태의 단면이 긴 연장으로 구성된 구조물에 대해, 경제성 검토를 수행하기 위한 구조물 형태와 재료강도에 따른 경제적인 단면 가정 수립과정과 최적의 휨 철근비( $\rho$ )를 제시하고자 한다. 다만, 구조물 설계시 구조물의 내공 기준을 사용하기 때문에 구조물 단면 변화로 인해 토공과 가시설공, 부대공 공사비가 동시에 변화되어 새로운 공사비함수가 생성되어 상당히 복잡하게 되는데, 본 연구에서는 구조물공의 관점에서만 접근하였다. 또한, 구조물의 형식으로는 웅벽식 구조물과 교량, 라멘등의 상부구조물, 지하철, 공동구, 압거 등의 1방향 슬래브 형식 구조로만 분류하였고, 재료적 구분으로는 철근과 콘크리트의 강도에 따라 인건비와 경비를 포함한 공사비 목적함수를 구성하여 이에 따른 공사비가 가장 작은 최적 단면결정 시스템을 제시하고자 한 것이다.<sup>3)</sup>

### 2. 목적함수 설정

부재단면 설정과 공사비함수 최적화를 설정하기 위해 강도별 부재 두께와 휨 철근비를 공사비 함수와 연관하여 설정하기 위해 최소부재두께 산정과 공사비 최소화의 기본 조건을 설정한다.

#### 2.1 최소부재두께 기준

콘크리트 휨부재의 경우 부재 두께 증가는 수화열 발생으로 인한 균열 증가, 건조수축 증가 등의 내구성 저감요인을 배제하기 위해 단면의 안전성과 사용성을 확보하고, 공사비 함수가 최저 값이 발생하는 휨 철근비에 의한 최소단면 설계가 되도록 구성하였다.

\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

\*\* 정희원, 남도대학교 토목공학과 교수

\*\*\* 정희원, 대불대학교 토목공학과 교수

\*\*\*\* 정희원, 하이콘엔지니어링(주) 구조팀 전무

\*\*\*\*\*정희원, 전남대학교 토목공학과 교수

## 2.2 설계공사비 함수 설정

공사비를 지배하는 설계내역서의 구성 요소를 살펴보면, 구조물공의 철근 항목과 레미콘 항목이 가장 큰 인자이며, 철근 항목에는 자재대와 철근가공조립비(매우복잡, 복잡, 보통, 간단)가 있고, 레미콘 항목에는 레미콘 재료비와 운반 및 타설비(철근, 무근)가 있다. 하지만, 이들 변수 모두가 물가 변동에 따라 변하는 변수이므로 매년 평균물가를 토대로 재 산정 되어야 한다. 이러한 기본 단가를 콘크리트와 철근의 사용강도에 따라 표 1과 같이 구성하여 각각의 물량을 고려하면 식 (1)과 같이 구성할 수 있다. 이때, 사용철근비는 그림 1에서와 같이 시방서 규정을 적용하여 최소철근비와 최대철근비 사이 값을 사용할 수 있고, 부재 단면두께 함수를 구성 할 수 있다. 이를 통해 콘크리트 체적과 철근량의 관계를 단위길이 당 공사비로 계산하여 구조물의 순공사비 함수  $f(\rho)$ 를 산출하였다.

$$f(\rho) = (\sum V_c \times C_1 + \sum V_s \times C_2 \times k) \dots \dots \dots \text{식(1)}$$

여기서,  $\sum V_c$ 은 콘크리트량( $m^3$ ),  $\sum V_s$ 은 철근량( $=\rho bd \times 7.85t/m^3$ , tonf),  $k$ 은 압축철근 조정계수로  $1 + \rho'/\rho$ 으로 표현되고,  $C_1$ 은 콘크리트의 단위공사비로 재료비, 운반 및 타설비로 구성되며,  $C_2$ 은 철근의 단위공사비로 재료비, 철근가공 조립비, 반입비가 포함된다.

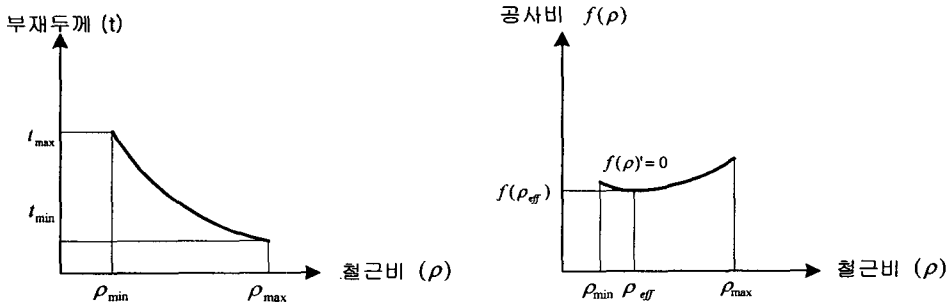


그림 1. 공사비를 고려한 RC 단면의 최적단면(t) 결정도

## 2.3 재료적 변수에 의한 공사비 설정

구조물의 형태별로 철근가공조립은 매우복잡, 복잡, 보통, 간단 구조로 분류되며, 레미콘 타설시 무근과 철근으로 구분하여 공사비를 구성한다. 표 1은 2000년도 물가자료를 토대로 작성하였다.

표 1 재료적 변수에 의한 설계공사비<sup>4)</sup>

구분	규격	단위	적용분야	단위공사비 (천원)	비고
철근	매우복잡	SD40	교각, 지하철터널, 구조식교대	672	1. D16 이상 2. 재료비+인건비+반입비
		SD30		663	
	복잡	SD40	교광슬래브, 암거, 우물통, 부벽식옹벽	628	
		SD30		619	
	보통	SD40	수문, 교대, 반중력식옹벽	593	
		SD30		584	
	간단	SD40	측구, 중력식옹벽	554	
		SD30		545	
콘크리트	철근(진동)	$f_{ck}=210$	철근구조	57.7	1. 레미콘 기준 2. 재료비+운반 및 타설비
		$f_{ck}=240$		59.3	
		$f_{ck}=270$		61.2	
	무근	$f_{ck}=135$	무근구조	56.7	

2.4 단면결정 방법

철근의 배근 방법에 따라 보통 단철근과 복철근로 구분하는데 주로 인장 철근에 영향을 받는다. 일반적인 설계의 경우, 압축 철근량은 인장 철근량의 50% 정도를 사용하는데 이는 장기 처짐을 저항하는 역할을 한다. 도로교표준시방서의 휨철근 규정(p.385)<sup>1)</sup>을 살펴보면,  $\rho - \rho' < \rho_b \times d'/d$  이고, 압축철근이 항복하지 않을 경우 단철근으로 해석할 수 있다는 규정에서 볼 수 있듯이 일반적인 1방향 슬래브의 단면 설계는 단철근으로 해석할 수 있다. 따라서, 콘크리트 설계강도, 철근의 항복강도, 구조물 폭, 초기 설계모멘트 만 주어지면, 단철근보의 공칭휨강도 식으로부터 소요 휨철근량을 식(3)과 같이 산출할 수 있으며, 사용 철근비로 모든 매개변수를 구성시키면 콘크리트량을 의미하는 유효깊이 함수를 구성할 수 있다. 즉, 단철근보의 공칭휨강도( $\psi M_n$ ) 식을 철근비( $\rho$ )로 구성된 함수를 구성하여, 단면의 유효높이를 계산하는 식(2)을 유도할 수 있다. 즉, 매개변수  $K_1, K_2, K_{\rho 1}, K_{\rho 2}$ 를  $K_1=0.85 f_y \cdot d, K_2=f_y^2/(f_{ck} \cdot b), K_{\rho 1}=\rho \cdot b, K_{\rho 2}=f_y/(0.85 f_{ck} \cdot b)$ 와 같이 구성하고,  $A_s(=\rho bd=K_{\rho 1} \cdot d), a(=K_{\rho 2} \cdot K_{\rho 1} \cdot d)$ 를 공칭휨강도  $\psi M_n = \psi A_s f_y (d - \frac{a}{2})$ 에 대입하여 정리하면 다음 식(2), (3)과 같이 표현 할 수 있다.<sup>5)</sup>

$$d(\rho) = \sqrt{\frac{M_u \times (F.S)}{\phi \cdot f_y \cdot K_{\rho 1} (1 - 0.5 K_{\rho 1} \cdot K_{\rho 2})}} \dots \dots \dots \text{식(2)}$$

$$A_s(d) = \frac{K_1 - \sqrt{K_1^2 - 2K_2 \cdot M_u}}{K_2} \dots \dots \dots \text{식(3)}$$

여기서,  $F.S$  = 설계안전율

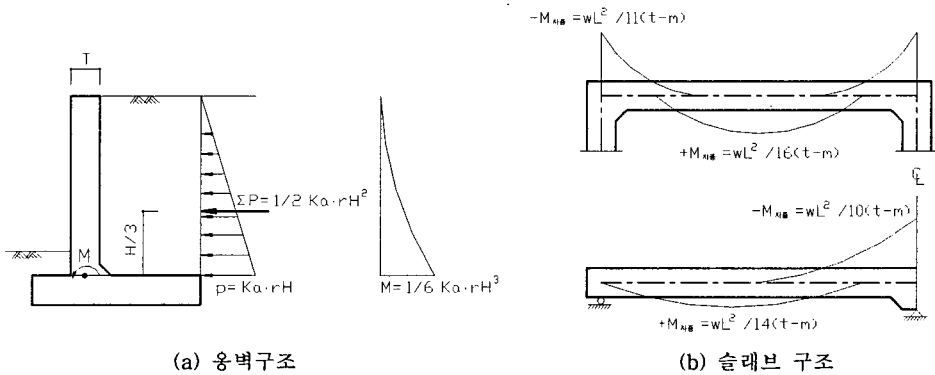


그림 2. 구조물형식에 따른 모멘트 변화

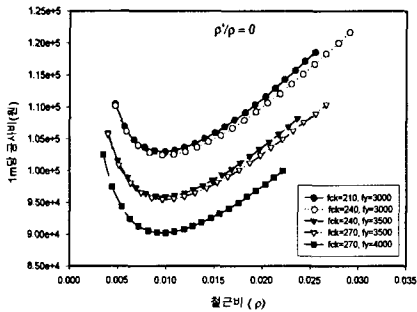
이때, 모멘트는 철근비의 변화에 따라 단면두께(=유효깊이+피복두께)에 의해 자중에 의한 설계모멘트가 변한다. 따라서, 구조물과 경계조건에 따라 자중에 의한 모멘트를 그림 2와 같이 자중모멘트 변화량을 계산하여, 설계모멘트를 다음 식(4)과 같이 변화시키면서  $d(\rho)$  함수를 구할 수 있다.

$$M_u = M_o + \Delta M \dots \dots \dots \text{식(4)}$$

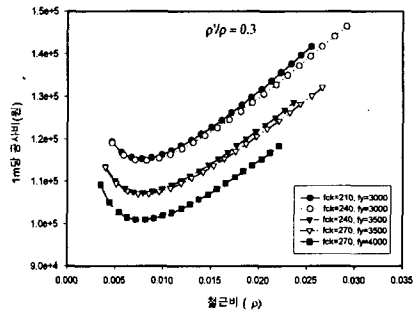
여기서,  $M_o$  은 최소 철근비에 의한 단면두께로 산정된 설계 모멘트이고,  $\Delta M$  은 자중 증분에 따른 모멘트 변화량이다.

### 2.5 강도조합과 압축철근 유무에 따른 공사비 변화

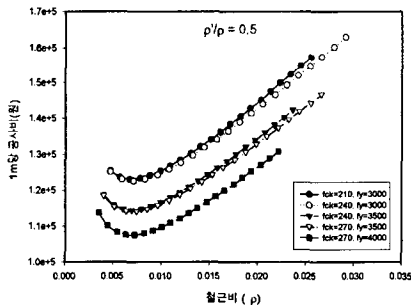
공사비는 표 1에서 보듯이 콘크리트와 철근 중 주로 철근단가에 지배받는다. 일반적인 설계의 경우, 압축철근은 설계모멘트를 저항하기 보다 콘크리트의 장기적인 변화량(크리프, 처짐)을 저항하는 역할이 크며, 보통 인장철근의 50% 범위를 사용하고 있다. 그림 3에서 보듯이 압축철근을 많이 사용할수록 공사비는 직선 형태에 가까워지며, 최소공사비를 발생시키는  $\rho$ 가 최소철근비 값으로 이동한다. 그리고,  $\rho'/\rho$ 이 1이 되면 완전 직선형태의 공사비 함수가 발생된다. 즉, 압축철근이 증가할수록 콘크리트 단면 변화는 거의 없고 공사비가 증가하는 현상이 나타난다. 그림 3은 RC 휨부재의 단면에  $M_u=130tonf \cdot m$ 가 작용할 때,  $\rho'/\rho$ 와 콘크리트와 철근강도조합을 5가지로 구분하여 동일한 설계안전률(F.S) 1.3을 확보하는 공사비 변화량을 도시화 한 것이다.



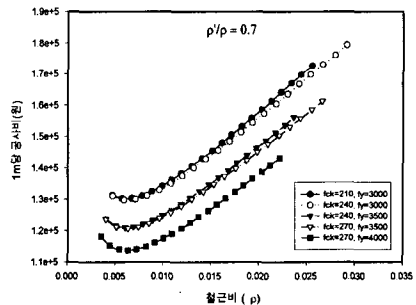
(a)  $\rho' / \rho = 0$



(b)  $\rho' / \rho = 0.3$



(c)  $\rho' / \rho = 0.5$



(d)  $\rho' / \rho = 0.7$

그림 3. 재료강도와  $\rho' / \rho$  에 따른 공사비 변화

### 3. 회귀분석을 통한 최적설계 제안

#### 3.1 강도(콘크리트, 철근)에 따라 회귀분석 유도

그림 3에서 보듯이 공사비 함수는 콘크리트 강도에 따라 큰 영향을 받지 않으며, 철근의 강도에 따라 영향을 크게 받는다. 즉, 공사비 함수는 철근의 항복강도에 영향을 받으므로 철근비의 함수로 표현 할 수 있다. 따라서, 역귀분석을 통해 3차포물선 함수로 표 2와 같이 표현 할 수 있다. 이때, 최소 공사비와 최적 휨철근비( $\rho_{opt}$ )는 공사비 함수  $f(\rho)'=0$ 에 의해 얻어 질 수 있다.

표 2. 재료강도 조합에 따른 공사비합수

구분	$f_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	공사비합수 $f(\rho)$ (원)	계산 $\rho_{eff}$ (%)	추정 $\rho_{eff}$ (%)	제안 $\rho_{eff}$ (%)
$\rho'/\rho=0$	210	3000	$125808 - 4871283\rho + 313458529\rho^2 - 5267035067\rho^3$	0.99	1.10	1.00
	240	3000	$122990 - 4117102\rho + 248495639\rho^2 - 3758071943\rho^3$	0.96	1.10	
	240	3500	$122039 - 5785083\rho + 387235141\rho^2 - 7127798196\rho^3$	0.99	1.10	
	270	3500	$119404 - 4995147\rho + 313435673\rho^2 - 5241638236\rho^3$	0.96	1.10	
	270	4000	$118807 - 6580684\rho + 459469757\rho^2 - 9130009559\rho^3$	1.00	1.04	
$\rho'/\rho=0.3$	210	3000	$130029 - 3732259\rho + 287969662\rho^2 - 4872769772\rho^3$	0.78	0.82	0.77
	240	3000	$127371 - 3029225\rho + 226404146\rho^2 - 3453910787\rho^3$	0.83	0.82	
	240	3500	$125737 - 4676066\rho + 359508744\rho^2 - 6662298468\rho^3$	0.79	0.85	
	270	3500	$123253 - 3934139\rho + 289240227\rho^2 - 4876680988\rho^3$	0.74	0.87	
	270	4000	$122129 - 5504059\rho + 430293869\rho^2 - 8609401169\rho^3$	0.82	0.86	
$\rho'/\rho=0.5$	210	3000	$132841 - 2972630\rho + 270957279\rho^2 - 4609497161\rho^3$	0.67	0.66	0.67
	240	3000	$130291 - 2303762\rho + 211664284\rho^2 - 3250955841\rho^3$	0.71	0.64	
	240	3500	$128204 - 3937136\rho + 341053030\rho^2 - 6352585784\rho^3$	0.69	0.72	
	270	3500	$125819 - 3226587\rho + 273097505\rho^2 - 4633169290\rho^3$	0.74	0.72	
	270	4000	$124343 - 4786170\rho + 410840827\rho^2 - 8262549822\rho^3$	0.72	0.75	
$\rho'/\rho=0.7$	210	3000	$135657 - 2213701\rho + 253990847\rho^2 - 4347155517\rho^3$	0.57	0.50	0.59
	240	3000	$133213 - 1578738\rho + 196946996\rho^2 - 3048311729\rho^3$	0.59	0.45	
	240	3500	$130671 - 3198353\rho + 322609387\rho^2 - 6043112263\rho^3$	0.60	0.60	
	270	3500	$128383 - 2518843\rho + 256942305\rho^2 - 4389406045\rho^3$	0.63	0.57	
	270	4000	$126558 - 4068769\rho + 391429920\rho^2 - 7916671757\rho^3$	0.63	0.65	

주)  $\rho$  : 인장철근비,  $\rho'$  : 압축철근비

위의 결과로부터 상관분석 한 결과 실제 계산치와 회귀분석에 의한 추정치가 96.9%의 선형상관성을 갖고 있으며, 이로부터 최적철근비를 식(5)과 같이 유추하였다.

$$\rho_{eff} \approx \frac{1.0}{1 + \frac{\rho'}{\rho}} (\%) \dots\dots\dots \text{식(5)}$$

제안 식 (5)을 상관분석한 결과, 98%선형상관성을 갖고 있어 신뢰성이 매우 높다고 판단된다.

### 3.2 사용성과 내구성을 확보한 설계안전을 도입

콘크리트 단면의 가정시, 설계안전율(F.S)을 극한단면력/공칭강도에 의한 산정은 사용성과 내구성 확보를 항상 충족시키지는 못한다. 일반적으로 단면의 설계안전율이 1.1(110%) 이하의 단면은 사용성 검토에서 허용균열폭과 철근응력( $f_a \leq 0.6f_y$ )을 초과하는 확률이 높아 이에 대한 보정을 해야 한다. 즉, 사용하중 상태에서 사용응력과 균열폭에 규정을 충족시키는 설계안전율을 도입하여야 한다.

$$F.S = M_d/M_u \text{ or } \omega_d/\omega_{\text{반생}} \dots\dots\dots \text{식(6)}$$

여기서, 설계안전율을 설정 할 때는 설계안전율이 1.1이상 되도록 추천한다.

#### 4. 결론

- 가. 공사비에 영향을 주는 인자 중 철근단가가 가장 큰 영향을 주며, 공사비함수는 휨인장철근비에 관한 3차 포물선 함수로 나타나며, 압축철근이 증가할 수록 공사비는 직선형태로 발생한다.
- 나. 강도설계법을 사용한 RC부재의 최적 인장철근비( $\rho$ )는  $\rho_{eff} = 1.0 / (1 + \frac{\rho'}{\rho})$ 로 산출할 수 있으며, 단철근보의 경제적인 단면의 휨철근비는 0.95~1.0% 로 추정할 수 있다.
- 다. RC 휨부재의 콘크리트와 철근의 강도 5가지 조합중  $f_{ck}=270 \text{ kgf/cm}^2$  과  $f_y=4,000 \text{ kgf/cm}^2$ 의 강도 조합이 가장 경제적인 것으로 판단된다.
- 라. RC 단면 가정을 하는 기본 및 실시설계용역에, 공사기간 내 물가변동을 반영하여 단면설계를 할 수 있도록 경제성 검토 수행의 의무화 조치가 필요하다고 판단된다.
- 마. RC부재 뿐만 아니라 PC부재까지 경제성검토 범위가 확장되도록 후속 연구가 필요하다고 판단되며, 장기거동에 따른 압축철근의 최적산정과 병행한 공사비 함수 연구가 더 필요함.

#### 참 고 문 헌

1. 건설교통부, “도로교표준시방서”, 대한토목학회, 1996, pp.381~387.
2. 건설교통부, “콘크리트구조설계기준”, 한국콘크리트학회·대한건축학회, 1999, pp.110~113.
3. E. Atrek, “*New Directions in Optimum Structural Design*”, A Wiley-Interscience Publication, 1984, pp.12~35.
4. 광주광역시, “광주도시철도 1호선 2구간 1-6공구 토목실시설계용역 설계서”, 2000, pp.250~310.
5. 변동균외 2인, “철근콘크리트”, 동명사, 2000, pp.113~138.