

RC 휨부재의 경제적 철근비 설계

정제평* · 이창기** · 유희중***

Jeong, Je Pyong* · Lee, Chang Kee** · Ryu, Heui Joong***

Design of Economical Steel Ratio in RC Flexural Members

ABSTRACT

This paper is on a practical method for determination of the economical steel ratio in RC flexural members with an equal safety factor. The cost functions of each material and labor are considered to construct the cost function. Then, an equation for determination of the economical flexure steel ratio with the lowest construction cost were proposed. It was found that a relevant steel ratio is recommended to be 0.65~1.0% for designing singly reinforced rectangular beam.

Key words : Effective Steel Ratio, Construction Cost, Economic Design, RC Member Thickness, Subway Structures

초 록

본 연구는 RC 휨부재에서 동일한 안전율을 갖으면서 경제성을 확보할 수 있는 휨 철근비를 결정하는 방법에 관한 실용적 연구이다. 재료비 및 인건비를 고려하여 공사비 함수를 구성하였고, 최저공사비를 유도하는 경제적 휨 철근비를 결정하는 식을 제안하였다. 제안식을 통해 단철근보의 최적 철근비는 0.65~1.0%를 추천하였다.

검색어 : 최적 휨 철근비, 공사비, 경제적 설계, RC부재두께, 지하철 구조물

1. 서론

최근 도시미관, 소음문제 및 버스 등의 대중교통과의 환승용이성 때문에 도로하부 토피고가 낮거나 저심도(5~7m)에 설치하는 지하철에 대한 관심이 증가되고 있다. Fig. 1(a)의 지하철과 같이 연장이 긴 구조물에 대한 단면가정은 총공사비와 직결되지만 그에 따른 공사비를 추론한 최적설계는 거의 반영되지 않고 있다. 일반적으로 RC 휨 부재의 경우 휨 철근량이 작을수록 경제적인 것으로 알려져 있지만 실제로 정량적 분석을 통해 적용된 사례는 거의 없다(Jeong, 2000). 철근과 콘크리트로 합성된 RC 구조물의 최소공사비를 유발하는 최적단면은 설계기준의 하중계수(Fig. 2(a)) 변화와 재료강도 조합에 따라 매년 평균물가를 토대로 재 산정하면 변화하며, 시공 도중에도 낙찰 이후 건설사의 설계변경 여건 부족과 발주처의 관료주의와 보수주의 등으로 변경된 사례는 찾아보기 힘들다. 1997년 IMF 이전 국내 건설경기는 재료비와 인건비의 급격한 변화 없이 안정적 흐름을 보여 이러한 공사비 관점의 최적단면에 관해 큰 문제가 발생하지 않았다. 하지만 Figs. 2(b) and 2(c)에서 보는 바와 같이 2008년 리먼브라더스 사태 이후 재료의 급격한 물가변동이 발생하였지만 낙찰 후 공사비를 재변경하거나 최적단면으로 재검토 한 현상은 거의 없었고 그 피해를 건설회사가 부담하게 된 경우가 대부분이었다. 이처럼 급격한 물가변동이 있었던 시기에 국제 경기의 하락과 더불어 공사기간이 긴 특성을 갖는 지하철공사 등에서는 반드시

* 정희원 · 교신저자 · 호남대학교 토목환경공학과 조교수 (Corresponding Author · Honam University · safecon@honam.ac.kr)

** 정희원 · 호남대학교 토목환경공학과 박사과정 (Honam University · cklee1@kumhoenc.com)

*** 정희원 · 호남대학교 토목환경공학과 교수 (Honam University · hjryu@honam.ac.kr)

Received August 8, 2014/ revised October 14, 2014/ accepted December 14, 2014

RC 휨부재의 경제적 철근비 설계

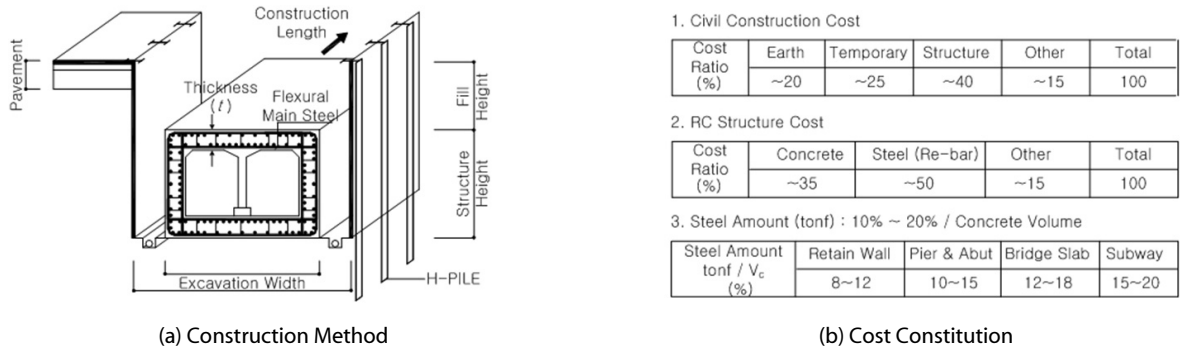
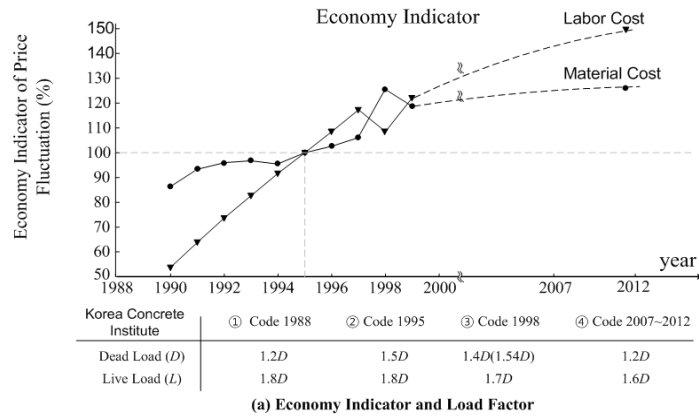
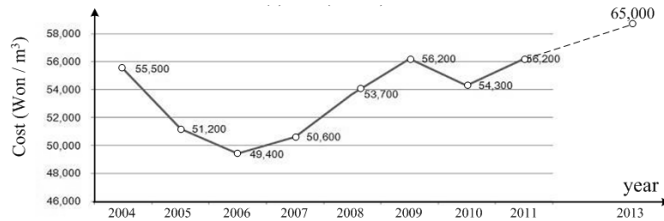
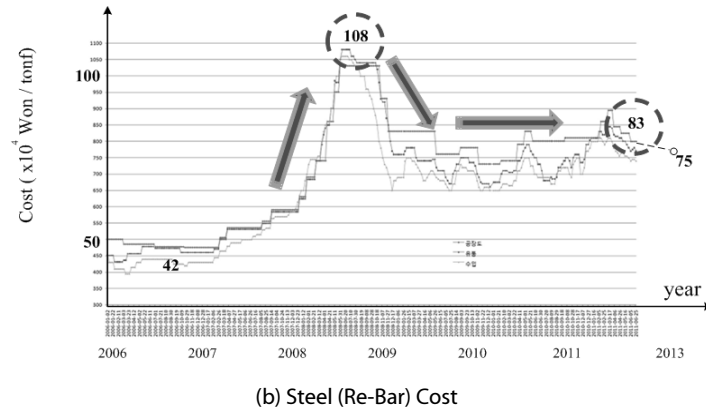


Fig. 1. Construction Method and Cost Constitution in Subway



(a) Economy Indicator and Load Factor



(c) Concrete (remicon) Cost

Fig. 2. Economy Indicator of Price Fluctuation and Material Cost

물가변동에 의한 최적 공사비를 재검토 할 필요가 있다. Fig. 1과 같이 연장이 수십 킬로미터(km)의 지하철에서 토목공사비는 토공, 가시설, 구조물공, 부대공으로 크게 구성되며, 그 중 구조물공은 35~45%를 차지한다(Jeong et al., 2012).

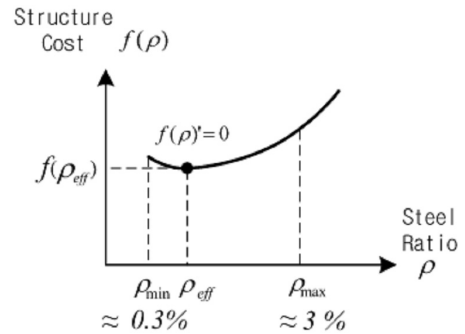
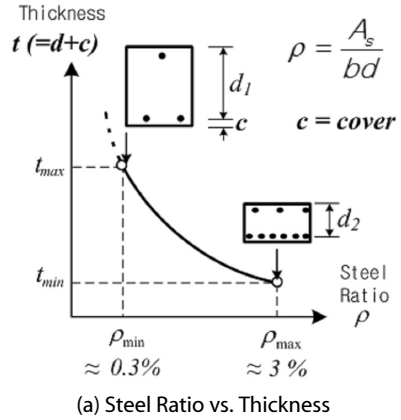
예를 들어 저심도 도시철도의 토목공사비가 2조원(연장 40km, 정거장 40여개)이라고 가정하면, 구조물공 공사비는 약 8000억원 정도이다. 최근 연구에 따르면 최적 철근비를 고려할 경우 5%~10% 정도의 구조물 공사비 차이가 발생할 수 있어(Jeong et al., 2012), 약 400억~800억원의 구조물 공사비를 절약할 수 있다. 본 연구에서는 연장이 긴 지하철 구조물과 같은 RC 휨부재에서 사용재료(콘크리트와 철근)강도 조합에 따른 경제적인 단면 산출을 위한 공사비 함수 수립과정과 최저 공사비를 확보할 수 있는 최적의 휨 인장철근비(ρ)를 제시하고자 한다. 연구방법으로는 구조물 공사비 함수에 가장 큰 영향을 주는 철근과 콘크리트의 단가를 구성하는 재료비, 인건비 그리고 경비 즉 기존 설계자료(Gwangju City, 1997; Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 2013)의 일위대가를 사용하여 공사비 목적함수를 구성하고 이에 따른 공사비가 가장 작은 최적 단면결정 방법을 제시하고자 한 것이다.

2. 구조물 공사비 함수

2.1 공사비 함수

연장이 긴 지하철과 같은 지하구조물의 토목 구조물 공사비(Gwangju City, 1997)의 구성 요소를 살펴보면, 구조물공에서는 철근 항목과 레미콘 항목이 가장 큰 인자이며, 철근 항목에는 Table 1과 같이 재료비와 철근가공 조립비(매우복잡, 복잡, 보통, 간단)가 있고, 레미콘 항목에는 레미콘 재료비와 운반 및 타설비(철근,

무근)가 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 2013). 이러한 기본 단가를 콘크리트와 철근의 사용강도에 따라 Table 1과 같이 구성한다. 이때 인장철근비는 Fig. 3과 같이 시방서 규정을 적용하여 최소철근비와 최대철근비 사이 값을 사용할 수



(a) Steel Ratio vs. Thickness
(b) Steel Ratio vs. Structure Cost Function
Fig. 3. Steel Ratio vs. Structure Cost Function

Table 1. Material Cost by Design Specifications

Specification		Unit	Applied Structure	Cost ($\times 10^3$ Won)		Remark
				1997 Year	2013 Year	
Steel	Very Complicated	SD400	Pier	672	1,080	1. D16 above 2. Material +Labor +Transportation
		SD300		663	1,070	
	Complicated	SD400		628	1,000	
		SD300		619	990	
	Normal	SD400		593	970	
		SD300		584	963	
Simple	SD400	554	950			
	SD300	545	945			
Concrete	$f_{ck}=21\text{ Mpa}$		with Steel	57.7	90.5	1. Remicon
	$f_{ck}=24\text{ Mpa}$			59.3	92.3	2. Material +Labor +Transportation
	$f_{ck}=27\text{ Mpa}$			61.2	93.2	
	$f_{ck}=13.5\text{ Mpa}$			56.7	88.5	
		m ³	without Steel			

있고(Korea Concrete Institute, 2013), 부재 단면두께 함수를 구성하여 구조물 공사비함수를 유도할 수 있다(Atrek, 1984; Jeong et al., 2000).

2.2 최소공사비 휨단면 결정

RC 휨부재의 철근배치 방법은 보통 단철근과 복철근으로 구분하며, 주로 인장 철근에 영향을 받는다. 일반적인 경우, 장기처짐을 저항하기 위한 목적으로 압축 철근량은 인장 철근량의 50% 정도를 사용하고 있다. 도로교설계기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 2012)과 콘크리트구조설계기준(Korea Concrete Institute, 2013)에서 휨철근 규정을 살펴보면, 인장철근비 ρ 와 압축 철근비 ρ' 의 차이 $(\rho - \rho')$ 가 $(\rho_b \times d' / d)$ 보다 작고 압축철근이 항복하지 않을 경우 단철근보로 해석할 수 있다는 규정과 복철근으로 고려하더라도 단철근보로 계산한 설계휨강도와 3% 미만으로 계산되기 때문에 일반적인 1방향 슬래브의 단면 설계는 단철근보로 해석할 수 있다.

따라서 콘크리트 설계기준강도 f_{ck} , 철근 항복강도 f_y , 구조물 폭 b , 계수 휨모멘트 M_u 가 주어지면, 단철근보의 설계휨강도 $\phi M_n = \phi A_s f_y (d - \frac{a}{2})$ 식으로부터 철근량 A_s 과 등가응력깊이 a 를 매개변수 $A_s (= \rho b d = K_{P1} d)$, $a (= K_{P2} K_{P1} d)$ 로 정리하면 소요 휨철근량을 Eq. (1)과 같이 유도할 수 있다(Jeong, et al., 2014).

그리고 사용 철근비로부터 매개변수 K_{P1} , K_{P2} 을 사용하여 콘크리트량을 의미하는 유효깊이 함수를 구성할 수 있다. 이때 인장지배 단면으로 가정하면 휨 강도감소계수 ϕ (Korea Concrete Institute, 2013)는 0.85가 된다. 즉 단철근보의 설계휨강도(ϕM_n) 식으로부터 매개변수를 정리하면 인장철근비(ρ)로 구성된 RC단면의 유효깊이 함수 $d(\rho)$ 인 Eq. (2)를 유도할 수 있다(Jeong et al., 2000; 2012).

$$A_s(d) = \frac{K_1 - \sqrt{K_1^2 - 2K_2 M_u}}{K_2} \tag{1}$$

여기서, $K_1 = 0.85 f_y d$, $K_2 = f_y^2 / (f_{ck} b)$

$$d(\rho) = \sqrt{\frac{M_u \times (F.S)}{\phi f_y K_{P1} (1 - 0.5 K_{P1} K_{P2})}} \tag{2}$$

여기서, $K_{P1} = \rho b$, $K_{P2} = f_y / (0.85 f_{ck} b)$

이때, 철근비의 변화에 따라 콘크리트 단면두께(=유효깊이+피복두께)가 계산될 수 있기 때문에 단위폭과 단위길이당의 콘크리트량(m^3)과 철근량(톤)을 Eqs. (3) and (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\sum V_c = B \times [d(\rho) + C] \times L \quad (m^3) \tag{3}$$

여기서, B 는 횡방향 단위폭, C 는 피복, L 은 종방향 길이

$$\sum W_s = \rho \times b \times d(\rho) \times 7.85 \times [1 + \rho' / \rho] \quad (tonf) \tag{4}$$

위 Eqs. (3) and (4)을 이용해 콘크리트 체적(m^3)과 철근량(톤)을 계산하면 구조물의 순공사비 함수 $f(\rho)$ 를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$f(\rho) = (\sum V_c \times C_1 + \sum W_s \times C_2) \tag{5}$$

여기서, $\sum V_c$ 은 콘크리트량(m^3), $\sum W_s$ 은 인장철근량(톤), C_1 은 콘크리트의 단위공사비로 재료비, 운반 및 타설비로 구성되며, C_2 는 철근의 단위공사비로 재료비와 철근가공 조립비 및 반입비가 포함된다.

유한요소해석과 같이 정밀한 구조해석을 통해 계수 휨모멘트 M_u 를 계산할 수 있으나, Fig. 4에서와 같은 구조물은 구조형식과 경계조건에 따라 고정하중에 의한 모멘트에 변화량을 계산한 후, 다음 Eq. (6)을 이용하면 설계모멘트를 계략적으로 산정할 수 있어

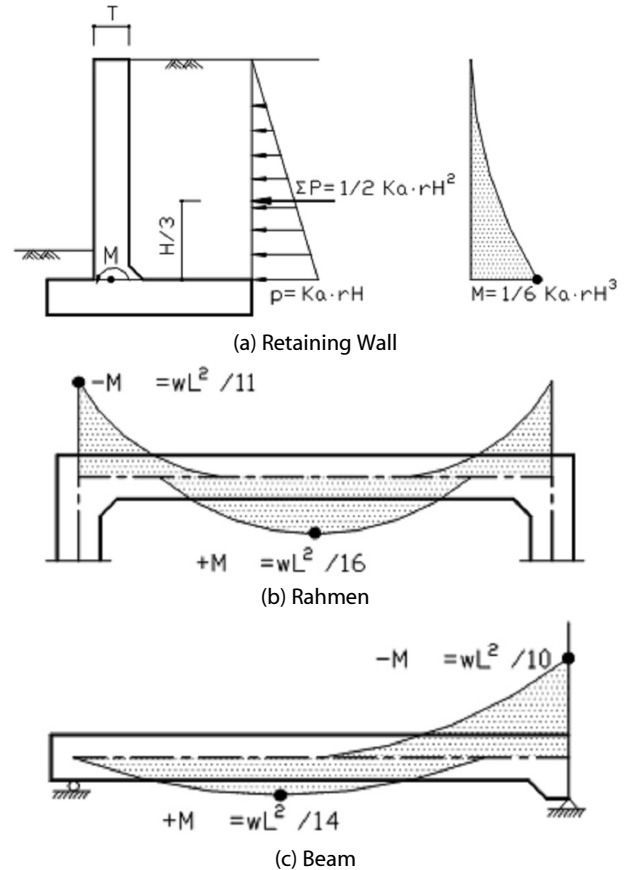


Fig. 4. Approximation Moment as Structural Type

RC단면의 최적유효깊이 $d(\rho)$ 함수를 쉽게 계산 할 수도 있다.

$$M_u = M_o + \Delta M \quad (6)$$

여기서, M_o 는 최소 철근비에 의한 단면두께로 산정된 설계 모멘트 이고, ΔM 은 자중 증분에 따른 모멘트 변화량이다(Jeong et al., 2000; 2012).

3. 해석결과

지하철과 같은 연장이 긴 도시철도 RC 구조물의 단위 m당(중방 향 길이 1m, 횡방향 폭 1m) 공사비는 콘크리트와 철근 중 주로 단가가 높은 철근의 지배를 받는다. 2 Cycle를 사용하는 일반적인 설계의 경우, 압축철근은 설계모멘트를 저항하기보다 콘크리트의 장기적인 변형량(크리프, 처짐)을 저항하는 역할이 크며, 보통 인장

철근의 50% 범위를 사용하고 있다. Fig. 5에서 보듯이 압축철근을 많이 사용할수록 구조물공 공사비는 직선 형태에 가까워지며, 최소 공사비를 발생시키는 인장철근비 ρ 가 최소철근비 값 방향으로 이동한다. 그리고 ρ'/ρ 이 1이 되면 완전 직선형태의 공사비 함수가 발생된다. 즉, 압축철근이 증가할수록 콘크리트 단가에 의한 변화는 거의 없고 철근에 의한 공사비 증가현상이 지배하게 나타난다. Fig. 5는 기 설계된 지하철의 설계자료(Gwangju City, 1997; 2000)로부터 RC 횡부재 단면에 $M_u = 1,300 \text{ kNm}$ 가 작용할 때, ρ'/ρ , 콘크리트 및 철근강도의 조합을 5가지로 구분하여 동일한 설계안전률($F.S$) 1.3을 확보하도록 하는 구조물 공사비 변화량을 도시화 한 것이다.

4. 회귀분석을 통한 최적설계 제안

Fig. 5에서 보듯이 공사비 함수는 콘크리트 강도에 따라 큰 영향을 받지 않으며, 철근 강도에 따라 영향을 크게 받는다. 콘크리

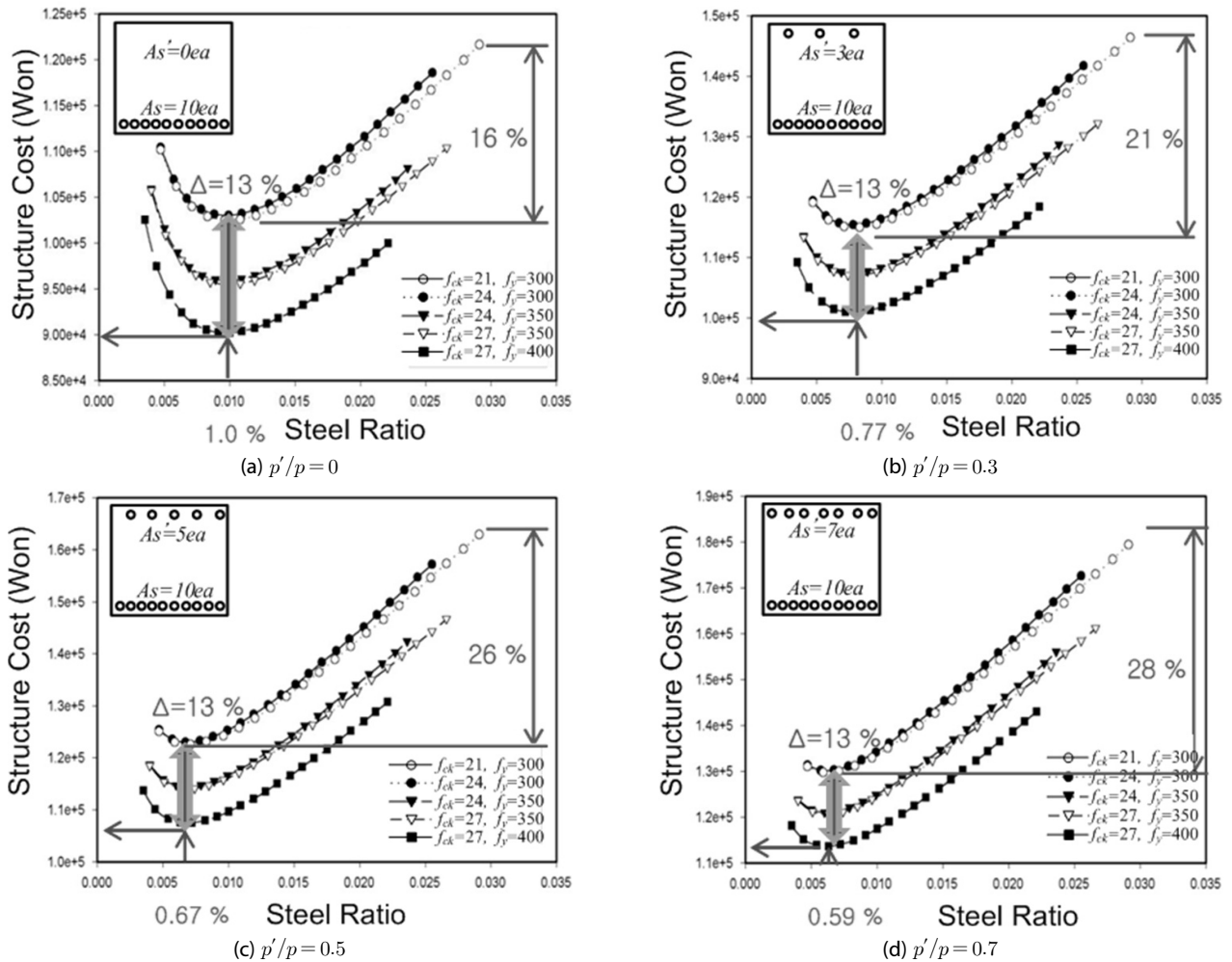


Fig. 5. Structure Cost Function as Material Combination

Table 2. Regression Analysis by Material Combination

Spec.	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	Cost Function $f(\rho)$ (Won)	Economical Steel Ratio ρ_{eff} (%)		
				Calculated	Estimated	Proposed
$\rho'/\rho = 0$	21	300	$125808 - 4871283\rho + 313458529\rho^2 - 5267035067\rho^3$	0.99	1.10	1.00
	24	300	$122990 - 4117102\rho + 248495639\rho^2 - 3758071943\rho^3$	0.96	1.10	
	24	350	$122039 - 5785083\rho + 387235141\rho^2 - 7127798196\rho^3$	0.99	1.10	
	27	350	$119404 - 4995147\rho + 313435673\rho^2 - 5241638236\rho^3$	0.96	1.10	
	27	400	$118807 - 6580684\rho + 459469757\rho^2 - 9130009559\rho^3$	1.00	1.04	
$\rho'/\rho = 0.3$	21	300	$130029 - 3732259\rho + 287969662\rho^2 - 4872769772\rho^3$	0.78	0.82	0.77
	24	300	$127371 - 3029225\rho + 226404146\rho^2 - 3453910787\rho^3$	0.83	0.82	
	24	350	$125737 - 4676066\rho + 359508744\rho^2 - 6662298468\rho^3$	0.79	0.85	
	27	350	$123253 - 3934139\rho + 289240227\rho^2 - 4876680988\rho^3$	0.74	0.87	
	27	400	$122129 - 5504059\rho + 430293869\rho^2 - 8609401169\rho^3$	0.82	0.86	
$\rho'/\rho = 0.5$	21	300	$132841 - 2972630\rho + 270957279\rho^2 - 4609497161\rho^3$	0.67	0.66	0.67
	24	300	$130291 - 2303762\rho + 211664284\rho^2 - 3250955841\rho^3$	0.71	0.64	
	24	350	$128204 - 3937136\rho + 341053030\rho^2 - 6352585784\rho^3$	0.69	0.72	
	27	350	$125819 - 3226587\rho + 273097505\rho^2 - 4633169290\rho^3$	0.74	0.72	
	27	400	$124343 - 4786170\rho + 410840827\rho^2 - 8262549822\rho^3$	0.72	0.75	
$\rho'/\rho = 0.7$	21	300	$135657 - 2213701\rho + 253990847\rho^2 - 4347155517\rho^3$	0.57	0.50	0.59
	24	300	$133213 - 1578738\rho + 196946996\rho^2 - 3048311729\rho^3$	0.59	0.45	
	24	350	$130671 - 3198353\rho + 322609387\rho^2 - 6043112263\rho^3$	0.60	0.60	
	27	350	$128383 - 2518843\rho + 256942305\rho^2 - 4389406045\rho^3$	0.63	0.57	
	27	400	$126558 - 4068769\rho + 391429920\rho^2 - 7916671757\rho^3$	0.63	0.65	

ρ = Tensile steel ratio, ρ' = Compressive steel ratio

트는 압축강도에 따라 단가 차이가 많이 나타나지 않지만, 철근 항복강도에 따른 RC 유효단면 두께의 감소분은 구조물 공사비에 더 큰 영향을 미치므로 인장철근비가 공사비의 주영향인자가 된다. 따라서 본 연구에서는 3차포물선 함수를 사용한 회귀분석을 통해 Table 2과 같이 표현하였고, 이때 최소 공사비와 최적 휨철근비 (ρ_{eff})는 공사비 함수 $f'(\rho) = 0$ 에 의해 계산하였다.

Table 2의 상관분석 한 결과, 실제 계산값과 회귀분석에 의한 추정치가 98%의 선형상관성을 갖고 있으며, Fig. 6과 같이 압축철근비 증가에 따라 최적철근비가 감소하였고 이로부터 최적철근비를 Eq. (7)과 같이 제안하였다.

$$\rho_{eff} = \frac{1.0}{1 + \frac{\rho'}{\rho}} (\%) \quad (7)$$

Fig. 7은 시간 경과에 따른 최적철근비 변화를 분석한 것으로 15년 전보다 콘크리트와 철근의 기본단가(Table 1 참조)가 1.5배 이상 증가하면서, 최적 공사비가 최소 철근비 방향으로 발생하고 있다. Fig. 2(b)의 2008년 리먼 사태와 같이 철근단가가 급격히

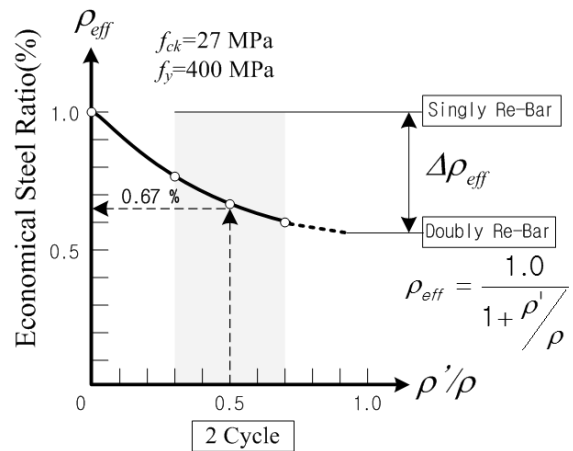


Fig. 6. Economical Steel Ratio as ρ'/ρ

상승할 경우 최적철근비는 더욱 낮은 부분에서 발생한다는 것을 알 수 있다.

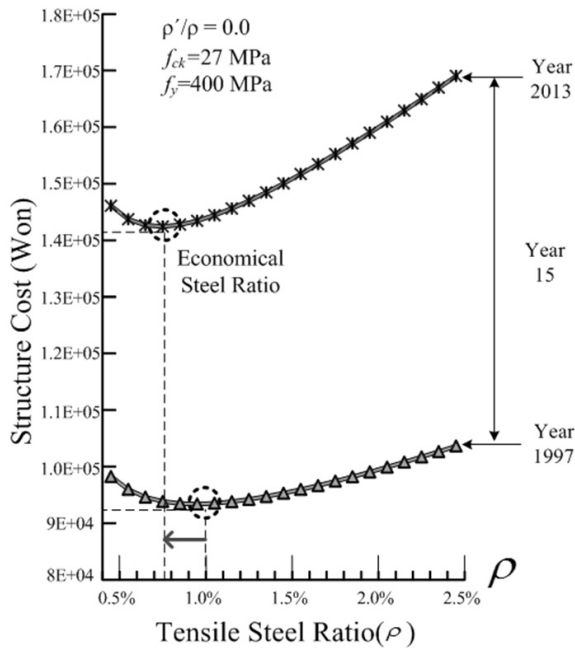


Fig. 7. Economical Steel Ratio as Time Lag

5. 결론

저심도 도시철도 RC 구조물의 공사비는 콘크리트 단가 보다 철근단가에 의해 큰 영향을 받으며, 공사비함수는 횡인장철근비에 관한 U형의 3차 포물선 함수에 가깝게 표현할 수 있었으며, 압축철근량이 증가할수록 공사비 곡선은 직선형태를 나타냈다. 강도설계법을 사용한 RC부재의 최적 인장철근비(ρ)는 $\rho_{eff} = 1.0 / (1 + \frac{\rho}{\rho'})$ 로 산출할 수 있으며, 단철근보의 경제적인 단면의 횡철근비는 0.65~1.0%로 추정할 수 있다. 또한 RC 휨부재의 콘크리트와 철근의 강도에 대한 5가지 조합 중 $f_{ck} = 27\text{MPa}$ 와 $f_y = 400\text{MPa}$ 의 고강도 조합이 가장 경제적인 것으로 나타났다.

또한 2008년 리먼사태 이후와 같이 급격한 물가변동이 발생하는 경우 철근단가 변화가 공사비에 영향을 크게 주기 때문에 연장이

긴 지하철 공사의 설계에서는 공사기간 내 물가변동을 반영하여 최적단면설계로 재변경을 할 수 있도록 경제성 검토에 대한 의무화 조치가 필요하다고 판단된다.

향후 RC부재 뿐 만 아니라 PSC부재까지 경제성검토 범위가 확장되도록 후속 연구가 필요하며, 연속교와 같이 정부모멘트가 동시에 발생하는 단면에서 지배변수를 다양화하여 구조물 공사비를 낮출 수 있는 최적단면 연구가 필요하다 판단된다.

References

- Atrek, E. (1984). *New directions in optimum structural design*, A Wiley-Interscience Publication, pp. 12-35.
- Gwangju City (1997). *Construction cost sheet of Gwangju subway 1st-1 construction 1-4 zone civil design engineering*, pp. 250-310 (in Korean).
- Gwangju City (2000). *Construction cost sheet of Gwangju subway 1st-2 construction 1-9 zone civil design engineering*, pp. 220-256 (in Korean).
- Jeong, J. P., Kim, D. J., Kim, H. J., Lee, K. R. and Choe, S. W. (2014). "Reinforced concrete by 2012 refined concrete structural design code." *Goomibook*, pp. 32-82 (in Korean).
- Jeong, J. P., Kim, D. J., Mo, G. S., Lee, S. H. and Kim, W. (2000). "Practical method for determination of optimal steel ratio in RC flexural members." *2000 Fall Conference Journal of Korea Concrete Institute*, pp. 259-264 (in Korean).
- Jeong, J. P., Ryu, H. J. and Kim, W. (2012). "Practical method for determination of optimal steel ratio in subway RC flexural members with low fill height." *2012 Conference Journal of Korea Society of Civil Engineering*, pp. 191-194 (in Korean).
- Korea Concrete Institute (2013). *Concrete structural design code*, Kimoondang, pp. 110-113 (in Korean).
- Korea Road & Transportation (2012). *Road bridge design code*, GunsulBook, pp. 5(1)-5(169) (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013). *Construction cost sheet of civil design eng. for new Bun-Dang subway 3 zone construction between Gang-Nam station and Jeong-Ja station*, pp. 152-306 (in Korean).