고강도 재료의 최근 현황과 적응

이병구 | 기술개발부과장 | 02)3433-7732 | E-mail: leebg@ssyenc.co.kr
강지훈 | 기술개발부대리 | 02)3433-7729 | E-mail: jhkang@ssyenc.co.kr

1. 배경

우리가 흔히 얘기하는 첨단분야, 특히 컴퓨터같은 제품은그발전속도가매우빠르다. 286 컴퓨터로아래아 한글을 쓰던 일이 불과 몇년전이었는데 이제는 펜티엄Ⅳ를 사용하고 있다. 몇년후에는 이것도 옛날 얘기가 되겠지만…. 그런데이제는이러한현상에익숙해져가고 있다. 이러한 시점에서 건설현장을 보면 우리는참으로보수적이며변화에미온적이다.

콘크리트는 240kgf/㎠이 주류를 이루고 철근은 3000, 4000kg/㎠의 범위를 벗어나지 못하고 있다. 물론, 콘크리트는 150, 180, 210kgf/㎠을 주재료로 사용하던때도있었고, 철근도 2400, 3000kgf/㎠, 원형철근을 주로 사용하던 때가 있었다. (사실, 아직도 잘사용하고있다.) 어쨌든그이상의강도를가진 재료나콘크리트, 철근이아닌재료는여전히생소하다.

대략 10여년 전쯤부터 고강도의 콘크리트와 철근에대한연구나실험이한참진행되던때가있었는데, 외환위기 전후의 건설경기침체로 연구활동이나 건설실적과 규모가 줄어들어 이러한 재료는 일단 책이나 연구자료로만가지고있었다. 그러나, 최근몇년간고층오피스텔, 주상복합건물이계속해서계획되고착공되면서 이러한 고강도의 재료들이 끊임없이 요구되고또실제로 큰무리없이적용되는상태에이르렀다. 물론, 이러한 배경에는 10여 년전부터의 개발과 시행착오등의과정이축적된결과이다.

우리회사도최근아래와같은고층오피스텔건물을 수주하면서건축계획이나법규를만족하기위해불가피하게고강도의재료를사용해야하는현장이등장하게 됐다. 이제는 우리도 재래식 재료만을 고집하기에는건설시장에서적응하기어려운때가된것이다.

[표1] 최근철근콘크리트구조물적용사례

프로젝트	기둥최대크기	기둥최대철근	콘크리트강도	철근강도
부산S 오피스텔	800×800	HD25	350	4000
부산H 오피스텔	2000×800	HD32	300	4000
서울D 오피스텔	1000×1000	HD35	400	4000(5000)*
서울S 오피스텔	1000×1500	HD35	300	4000

* 계획예정

이러한 시점에서 최근 접하게 된 고강도 콘크리트와고강도철근에대한간단한고찰을통해어렵지않게새로운재료에적응할수있다고본다.

2. 고강도 콘크리트의 실용화

2.1 정의

시방서에서는 어떤 콘크리트를 고강도 콘크리트라고 하는가? 고강도 콘크리트 설계 · 시공요령(콘크리트 건설 제요령 1부)에 따르면 설계기준 강도가 400kgf/㎠이상인콘크리트를고강도콘크리트라고정의하고, 사용에 따른 방법을 서술하고 있다. 그 이하는 보통강도콘크리트이다. 즉, 현재까지당사에서 국내 건축현장에 고강도 콘크리트를 주재료로 사용한 사례는없다고볼 수있다. 해외현장이나국내건축현장의일부분, 토목현장에서사용한사례는있다.

2.2 사용하는이유

강도가높다고무조건좋은것은아니므로이를사용하기 위해서는 적합한 이유가있어야한다. 콘크리트는 압축에는강한반면 인장에는매우약해대표적인취성재료이다. 즉, 인장력에의해내력을발휘하는 휨재인보와슬래브에서는고강도콘크리트를사용했다고크게효과적이지않다.

[표2] 보에고강도콘크리트를사용한경우의내력비교

콘크리트강도 (kgf/㎠)	휨모멘트(tonf·m)		전단력(tonf)	
	값	비율	값	비율
180	93.47	0.99	47.75	0.95
240	94.48	1.00	50.41	1.00
300	95.29	1.01	52.75	1.05
400	96.43	1.02	56.17	1.11
500	97.31	1.03	59.19	1.17

(단면: 40×80, 상단철근: 4-HD25, 하단철근: 8-HD25, 스터럽: HD13@200 적용시)

내력비교 예제를 보면 보의 휨모멘트 내력증가는 사실 거의 없는 편이며, 전단내력은 콘크리트강도가 두배가될경우 17%정도증가하였다. (이수치도전단보강근인 스터럽 철근량을 증가하면 더 떨어질 것이다.) 휨과 전단력을 모두 만족해야 하는 보에서 전단력에서 약간 유리한 결과를 보이므로 강도의 증가에비해 내력의증가는작은편이라고할 수 있다. 이외에도보나슬래브는사용성(진동)문제, 건조수축문제, 최소철근배근등을 고려해야 하므로 사실물량을 줄이는효과가거의없어진다.

그러나압축재인기둥에사용했을경우에는직접적인 효과가 있다. 다음 예는 축력 1000ton을 지탱하고 유사한 크기의 휨내력을 가지는 기둥이 콘크리트 압축강도의 변화에 따라 어떤 크기가 되는지 개략적으로살펴본결과이다. ([표3] 참조)

비교결과를보면, 콘크리트압축강도가2배증가하면 단면적은 거의 절반으로 줄어드는 효과가 있음을 알수있다. 즉, 지하층에서주차대수를 몇대라도 더 확보하거나임대면적을조금이라도더확보하려는발주처는필사적으로고강도콘크리트를사용하라고할 것이다. 맞는 말이다. 물론, 단면이 작아지면 동일한 철근량을적용해도철근간격이좁아져서시공성은떨어진다. 그렇지만 재료의 강도를높여서얻는 효과는 너무도뚜렷하다.

[표3] 기둥에고강도콘크리트를사용한경우의내력비교

콘크리트강도	단면크기(㎝)	단면적비율	필요철근량
180	100×100	1.23	*20-D25
240	90×90	1.00	16-HD25
300	80×80	0.79	18-HD25
400	70×70	0.60	20-HD25
500	65×65	0.52	20-HD25

(철근은SD40 적용시, *180강도의경우SD30 적용)

2.3 시공을하려고보니…

(1) 공사비증가

공사비를생각하지않을수없다. 240과 350강도의 콘크리트가 가격이 비슷할 수는 없다. 상식적으로 350/240 만큼비쌀것이다. 최근자료를보면가격대(비율로표시)는대략다음과같다. [표4]에서알수있듯이강도증가비율에비해가격증가비율은낮은편이다.

[표4] 콘크리트강도에따른가격비교

콘크리트강도	180	240	300	350	400
강도비율	0.75	1.00	1.25	1.46	1.67
가격비율	0.88	1.00	1.10	1.15	1.36

강도가 증가함에 따라 가격은 증가하지만 기둥의 경우단면축소량을 고려하면, 이가격비율은 비싼것이 아니다. 실제로 일정한 사용량이 계속되어 사용되고 배합이 안정적이 되면 가격은 더 낮아질 것이다. 불과 몇년전에는 350kgf/㎠의 제품가격이 210, 240kgf/㎠제품에비해가격이두배가넘었다.

공사비문제는이보다는수직재와수평재의분리라는 문제에서 직접적으로영향을 준다. 앞에서도 언급했듯이 수평재인 보와 슬래브에 고강도 콘크리트를 사용하는 것은 효과가 낮은데 이들 수평재의 물량은

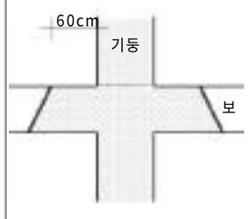
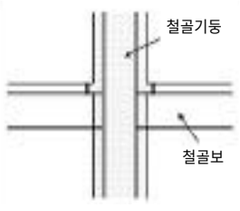
수직재인기둥, 벽체의3배가넘는다.

따라서, 우리가국내에서흔히사용하는수직, 수평동시타설방법을 적용하여 수직재와 수평재에 동일하게 고강도 콘크리트를 적용한다면 효과도 낮은 수평재에 3배 이상의 물량이 소모되고 당연히 비용은 증가한다. 분리타설방법을고려해야만하는것이다.

(2) 분리타설

국내에서 가설재 비용문제로 인해 수직재타설, 수평재타설을 완전분리하여 시공할 수 없다. 거푸집을 한번에 설치하는것이일반화돼 있으며이 문제는 설계단계에서반영하지않으면공사에서적용하기어렵다. 즉, 수직재와수평재를분리해서타설하되강도가 다른 콘크리트를 사용해야 한다. 고강도 콘크리트 시공지침서(삼성건설, 1992.6)에 따르면 수직부재(기둥 · 벽등)와수평부재(보 · 슬래브)에타설하는콘크리트강도의차가 1.4배이상일경우에는수직부재에 타설하는콘크리트를수평부재쪽으로어느정도내민 길이를유지해야한다고되어있다. 내민길이는적어도 60cm를확보하는것이좋다고기술하고있다.

[그림1] 철근콘크리트조와철골철근콘크리트조의비교

철근콘크리트조	철골철근콘크리트조
	
동시에 타설하는 경우엔 내민길이 부분은 두 가지 강도의 콘크리트가 섞일수있다.	슬래브에전달되는하중은철골보를 통해서 기둥으로 전달되는 것으로 본다.

국내 타사의 경우엔 이러한 관리방법이 통용되고 있으므로 우리의 경우에도 이와 유사한 방법으로 철저한 관리방안을가지고접근해야한다. 국내에 적용하거나알려져있는 방법을 도식화하면다음과같다.

이음부위는메탈라스등을이용하여처리하고있다.

2.4 그밖의문제점

사실 콘크리트는 쉽기도 하고 어렵기도 하다. 성형도잘되고내구성도높은데비해무겁고균열이잘발생한다. 즉, 품질관리가매우중요하며강도가높은콘크리트를사용할경우엔이점이더욱중요한사항으로 다가온다. 콘크리트 배합관리, 시공 중의 다짐, 슬럼프, 공기량과타설후의양생, 거푸집존치등잘알고 있는사항을좀더세심히관리해야하는것이다.

일반적으로 고강도 콘크리트는시멘트량이많으므로수화열발생량과건조수축량은더클것이다. 수량이작고혼화제량이높은편이고단면크기가작고철근이 많을 것이므로 콘크리트의 타설이 보통콘크리트에비해서는어려울것이다. 그러나, 철저한품질관리로우수한품질을확보할수있다고본다.

2.5 고강도콘크리트의전망

40층이상의초고층건물을비교적값싼가격으로건설하려고한다면고강도콘크리트를사용하는것도좋은 방법이다. 사실 최근의 20 ~ 30층대의 고층오피스텔의 경우도 철골조로 할 경우 골조에 소모되는 비용은 더 높을 것이다. 레미콘공장이나 시멘트산업의 경우도보통콘크리트에비해부가가치가높을것으로예상되는 고강도 콘크리트의 사용에 대해 불만이 없을 것이다. 따라서, 이제는 필요와여건에따라서 콘크리트를골라서사용하는것이지강도가바뀌었다고해서 거부감을가질필요는없는 상태가되어가고있다. 설계방법도700kgf/㎠까지는기존의설계방법과크게다르지않으므로설계의신뢰도는문제가없다고본다.

3. 고강도철근의 실용화

3.1 서론

최근의 건축물이 초고층화, 다용도화되는 추세에 따라 필연적으로 구조부재의 Slim화 및 재료의 고강도화가절실히 요구되고 있는실정이다. 초고층건축물에 기존에사용되고있는SD40 이하철근을적용할경우, 과밀한배근이되므로써시공이곤란하고, 공기및공사원가가상승하게된다. 그러므로, 내력이높은철근을사용하여철근수를줄이는것이시공성및공기, 공사원가를 개선할 수 있는 한가지 방법이다. 이에 고강도 철근 SD50을국내에서개발, 제공하고있는INI STEEL㈜의 고강도철근연구및현장적용사례를소개하고자한다.

3.2 SD50 철근의화학적성분과 기계적성질

(1) 화학적성분(KS D 3504)

구분	화학성분(%)						
	C	Si	Mn	P	S	C + Mn/6	기타
SD40	0.29 이하	0.55 이하	1.80 이하	0.05 이하	0.05 이하	0.05 이하	X
SD50	0.32 이하	0.55 이하	1.80 이하	0.55 이하	0.55 이하	0.60 이하	O

(2) 기계적성질(KS D 3504)

구분	하복점또는 0.2% 내력 kg/㎟ (N/㎟)	인장강도 kgf/㎟ (N/㎟)	연신율 (%)	굽힘성	
				굽힘각도	안쪽반지름
SD40	40 ~ 52 (392 ~ 510)	57 이상 (559 이상)	16 이상	180°	공칭지름의 2.5배
			18 이상		
SD50	50 ~ 64 (490 ~ 628)	63 이상 (618 이상)	12 이상	90°	공칭지름의 2.5배(D25 이하)
			14 이상		공칭지름의 3.0배(D25 초과)

(3) SD50 철근의 항복비및연신율평가

철근번호	항복점(N/㎟)	인장강도(N/㎟)	항복비	연신율
D25	517	698	0.74	22%
D29	516	688	0.75	24%
D32	565	711	0.79	23%

(4) SD50 철근의 성능평가

- 항복비: 0.74 ~ 0.79로우수한성능을보유함
- 가공성능 : 110 °구부림 시험결과, 크랙 등 기타 결점이 발견되지 않음. SD40 이하 철근과 같이 90를 초과하는 구부림 시험은 규준에 명시되어 있지 않으며, 현장적용시 90°초과되는구부림은 피하는것이바람직하다.

3.3 SD50 철근관련규준분석및적용

(1) 일반사항

① 철근의 설계기준항복강도 f_y는 5,500kgf/㎠을 초과할수없음

② 철근의설계기준항복강도f_y가 4,000kgf/㎠을초과할 때 f_y값을변형률 0.003에상응하는응력값으로 사용할 수 있음. (SD50철근은 변형률 0.0025 정도에서f_y값에도달하므로규준을만족함)

③ 전단철근의 설계기준항복강도는 4,000kg/㎠를 초과할수없음

④ 따라서, 전단철근 이외의 철근을 SD50으로 사용하는데규준상문제는없음

(2) 휨재강도

단근장방형보의휨강도:

$$M_n = \rho \times f_y \times bd^2 \times (1 - 0.59\rho \times f_y / f_{ck})$$

- SD40 대비SD50 철근량20% 절감가능

(3) 압축재강도

나선철근압축재:

$$P_n = 0.85 \times \{0.85 f_{ck} \times (A_g - A_{st}) + f_y \times A_{st}\}$$

띠철근압축재:

$$P_n = 0.80 \times \{0.85 f_{ck} \times (A_g - A_{st}) + f_y \times A_{st}\}$$

- SD40 대비 SD50 철근량20% 절감가능하나 휨재와 달리 압축재는 콘크리트의 하중부담 비율이 크기 때문에 철근강도 상승과 비례하여전체부재내력이상승하지는않음

(4) 균열및처짐

①균열폭: $w = 1.08 \times \beta \times f_s \times \sqrt[3]{d_c \times A} \times 10^{-5}$ (mm)

- SD50 철근을 사용할 경우 f_s가 증가하고 A의 값도 증가하기 때문에균열폭은SD40 철근보다다소커짐

②최소두께규정에따른1방향보/슬래브처짐보정계수: $0.43 + f_y/7000 = 0.43 + 5000/7000 = 1.144$

- 단순규정적용: 상기계산대로SD40 철근대비SD50 철근적용할경우, 1방향보/슬래브두께14% 증가

- 정밀처짐계산: 철근강도가처짐량에직접영향을주지않으나휨철근비가 감소하여 균열단면 2차모멘트가 증가하므로써, 처짐이 약6~7% 증가

(5) 이음및정착

①압축철근이음길이

SD40 이하이음길이= $0.0072 f_y \times d_b$ 이상

SD40 초과이음길이= $(0.013 f_y - 24) \times d_b$ 이상

- SD40 철근대비SD50 철근의이음길이가37~42% 증가

②압축철근이음을제외한이음길이및정착길이

- SD40 철근대비 SD50 철근의 이음길이가 25% 증가 (50/40=1.25)

(6) 수축및온도철근

①SD40 이상이형철근철근비

$= 0.002 \times (4{,}000/f_y)$

- SD40 철근대비SD50 철근량20% 감소(40/50 =0.8)

(7) 휨최소철근량및최대철근량

①최소철근량

$A_{s,\min} = 0.8 \times \sqrt{f_{ck}} \times b_w \times d \div f_y$ - 1)

$A_{s,\min} = 14 \times b_w \times d \div f_y$ - 2)

1), 2)식중큰값적용

콘크리트강도 f_{ck}가 306.25kg/㎠보다 크면 1)식, 작으면 2)식에의해최소철근량이 결정되며, 일반적으로 휨재의 콘크리트강도는 300kg/㎠ 이하이므로 2)식으로검토하면최소철근비는아래표와같다.

[표5] 최소철근비

SD40 철근사용	SD50 철근사용	철근비감소율
0.35%	0.28%	20%

②최대철근량

$$\rho_{max} = 0.75 \times \left\{ 0.85 \times \beta_1 \times \frac{f_{ck}}{f_y} \times \frac{6000}{(6000 + f_y)} \right\}$$

[표6] 최대철근비와최대공칭강도의비교

콘크리트강도(kg/㎠)		210	240	300	350	400
휨재의최대 철근비	SD40	1.71%	1.95%	2.44%	2.84%	3.25%
	SD50	1.24%	1.42%	1.77%	2.07%	2.36%
휨재의최대 공칭강도	SD40	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	SD50	92.7%	93%	92.7%	93%	92.8%

최대철근비(ρ_{max})는 철근강도(f_y)에 정비례하지는 않는다. 최대철근비나 최대공칭강도를 비교해보면 SD40철근보다 SD50철근이 작게 나타나고 있으나, 실제로 최대철근비까지 배근하는경우가적고, 대부분휨재의철근비는1% 내외에서결정되므로최대철근비감소는실제설계에큰영향을주지않으나, 과밀배근에의한최대철근비를높일필요가있을때, 콘크리트강도를높여해결할수있다.

(8) 부재별설계적용및비교

①개요 - 몇가지 Project를 Sample로 해SD40 철근과 SD50 철근 적용시 상대비교를 통해 각 부재별 철근량의증감을확인했다. 특수한경우는제외하고, 일반적인경우를설계기준에맞춰배근설계해철근량을계산했으므로약간의Data의변화는고려돼야한다.

②보- 보철근감소율은경간과콘크리트강도, 철근직경에 의해 변화되며, 철근직경이 늘어날수록 스팬이작아질수록SD40 철근대비SD50 철근량은감소한다. 보에서SD50 철근사용에따른이음길이증가에 의한 철근량 증가는 전체철근량의 약 1.2~4.1%이고, 이러한증가율을감안하여SD40 철근대비 SD50 철근의 전체량의 증감을 검토한 결과, 약12~14%정도감소함을알수있다.

[표7] SD40 철근대비SD50 철근의감소율(f_{ck}=240kg/㎠일때)

경간	D22		D25		D29		D32	
	상부근	하부근	상부근	하부근	상부근	하부근	상부근	하부근
ls(SD40)	1.82	1.40	2.07	1.59	2.40	1.85	2.65	2.04
ls(SD50)	2.28	1.75	2.59	1.99	3.01	2.31	3.32	2.55
6m	13.3%	12.5%	13.0%	12.2%	12.8%	11.8%	12.6%	11.5%
8m	13.7%	13.1%	13.5%	12.8%	13.3%	12.5%	13.1%	12.3%
10m	13.9%	13.4%	13.9%	13.2%	13.6%	13.0%	13.5%	12.8%

[표8] SD40 철근대비SD50 철근의감소율(fck=270kg/㎠일때)

경간	D22		D25		D29		D32	
	상부근	하부근	상부근	하부근	상부근	하부근	상부근	하부근
ls(SD40)	1.72	1.32	1.95	1.50	2.27	1.74	2.50	1.92
ls(SD50)	2.15	1.65	2.44	1.88	2.83	2.18	3.13	2.41
6m	13.4%	12.6%	13.1%	12.3%	12.9%	12.0%	12.7%	11.7%
8m	13.7%	13.2%	13.6%	12.9%	13.4%	12.7%	13.2%	12.4%
10m	14.0%	13.5%	13.9%	13.3%	13.7%	13.1%	13.5%	12.9%

③ 기둥 - 기둥의 경우 건축적인 요구때문에, 단면의증대가불가능한경우가종종발생하게되며, 부족한 콘크리트 단면을 보완하기 위하여 다수의 철근을 배근하게 되고 과밀한 배근에 의해 시공성및 품질이 열악해지고, 공기에 영향을 미치게 되는 바, 이러한 단점을보완하기위하여고강도의SD50 철근을사용하여 과밀배근을 피할 수 있고, 시공성 및 품질을 개선할수있다.

SD40 철근대비 SD50 철근량의 증감여부를 검토하면, 강도증가에 의해철근량이일부 감소되나 이음길이가 증가하므로 전체철근량의 감소는 미미하다. 단, 당초 이음설계가 기계적 이음으로 되어 있는 경우, 이음길이 증가분을 배제할 수 있으므로 약 20%의철근감소가가능하다.

④ 기초 - 이음길이를 고려하지 않는 경우, SD40 철근대비 SD50 철근량 감소율은 20%이나, SD50 철근사용시이음길이가증가하므로감소율은보와같이 20%보다작게된다.

⑤ 코아벽 - 내부전단벽의 최소철근비 제한규정은 fy와는 관계가 없기 때문에, 최소철근비로 설계된 벽체에 SD50 철근을 적용시 철근량 절감효과는 미미하다.

⑥슬래브- 이음길이를고려하지않는경우, SD40 철근 대비 SD50 철근량 감소율은 20%이나 슬래브는보에비해철근비가낮고두께가얇기때문에처짐이나 균열폭 제한에 대해서 불리하고 실제로 균열이 많이발생하는부재이므로SD50 철근을사용하는효과는적다.

3.4 결론

휨재에SD50 철근을사용할경우, SD40 철근사용시보다 부재의 강도가 25% 증가하므로 철근량을 20% 줄일 수 있다. 그러나 이음길이 및 정착길이가 증가하므로 실제 철근감소량은 약 14~16% 정도이며, 균열 및처짐등의사용성 문제가주의깊게검토되어야한다.

보부재중춤에비해폭이아주큰보의경우, 균열폭제한에의해다소배근량이증가하나, 일반적인보에서는균열폭제한에의한철근량증가는거의없다. 기둥의 경우 이음개소가 많고, 철근직경이 다른부재에 비해크므로이음길이도증가한다. 이러한이음길이를고려하였을때철근량의감소는약10%정도로예상된다.

따라서 기둥에 SD50 철근사용효과를 높이기 위해서는 기계적이음이 필수적이라고 판단된다. 또한, SD50 철근사용시철근량감소효과뿐만아니라단면적감소효과가더클것으로기대된다. 코아벽이최소배근규정에 의해 배근될 경우, SD50 철근의 사용효과가 적다.그러나 휨응력이큰 외부벽체의 경우 상당한철근량감소효과를얻을수있다.

단, SD50 철근은전단철근으로 사용할 수 없으며, 90°를 초과하는 구부림은 피하는 것이 바람직하다. 현재까지국내건축물에적용된 사례가 많지 않아현장실증자료가부족하므로, 향후계속적인연구 · 조사를 통하여, 현장적용시 문제점을 파악 · 개선해 나가야할것이다.

참고문헌

1. INI Steel㈜, 고강도철근(SD50위실용화에대한연구 , 2002.4
2. 대한콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 , 1999
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트건설제요령 1부, 2000
4. 삼성종합건설㈜기술연구소, 고강도콘크리트시공지침서 , 1992