

콘크리트 배합설계에 대하여

권 순 옥

(한일시멘트 대전공장 품질관리실장)

1. 콘크리트 배합설계

콘크리트의 배합설계는 소요의 강도, 내구성, 수밀성 및 작업에 적합한 워커빌리티를 갖는 범위 내에서 단위수량이 될 수 있는 대로 적게 되도록 각 재료의 비율을 정하는 것을 말한다.

콘크리트는 강재와 같이 처음부터 그 품질이 정해지는 것이 아니다. 따라서 배합을 잘하면 좋은 품질의 콘크리트를 얻을 수 있지만 좋은 재료라 하더라도 배합을 잘못하면 소요품질의 콘크리트를 얻을 수 없는 것이 콘크리트의 특징이다.

콘크리트의 배합은 중량 배합으로 함을 원칙으로 하며, 배합에는 시방배합, 현장 배합, 그리고 중량배합 및 용적배합이 있다. 소요의 특성을 얻기 위한 콘크리트 배합설계 방법은 토목학회시방서(콘크리트시방서), 건축공사표준시방서, 미국 ACI 및 개척국 등에 나와 있으며, 본 보고는 예제를 들어 가며 상호 각 규격의 배합 절차방법을 기술하고자 한다.

(예제) 기상작용을 받는 철근콘크리트 구조물의 콘크리트 25-210-15를 배합설계하시오. 잔골재 표면건조포화상태 비중 : 2.55, 잔골재조립율 : 2.70(2.5mm), 콘크리트 공기량 : 5%를 확보하기 위해서 양질의 AE제를 사용, 굵은골재(부순돌) 표면건조포화상태 비중 2.65, 보통포틀랜드시멘트이며 시멘트 K강도 : 330kg/cm², 시멘트 비중 : 3.15

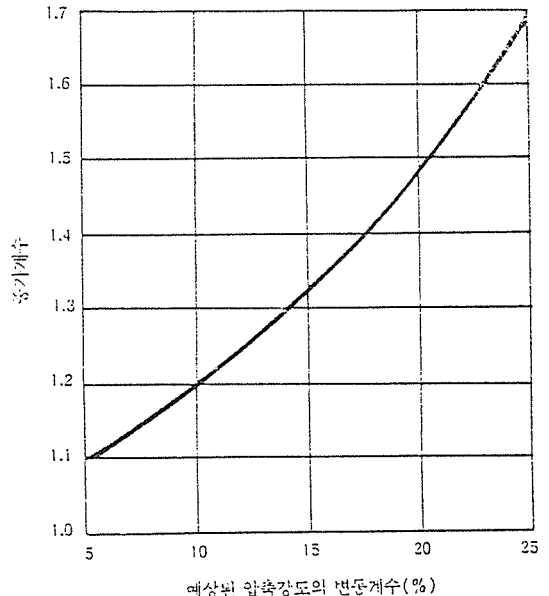
시공장소 및 시기 : 부산 11월 1일~2일

1.1 토목학회 시방서 방법

1) 배합강도의 결정

변동계수 10%로 하면 (그림 1)로 부터 증가계수 1.2

배합강도 $\sigma_f = \alpha \times \sigma = 1.2 \times 210 = 252 \text{kg/cm}^2$



〈그림 1〉 일반적인 경우의 증가계수

2) W/C 결정

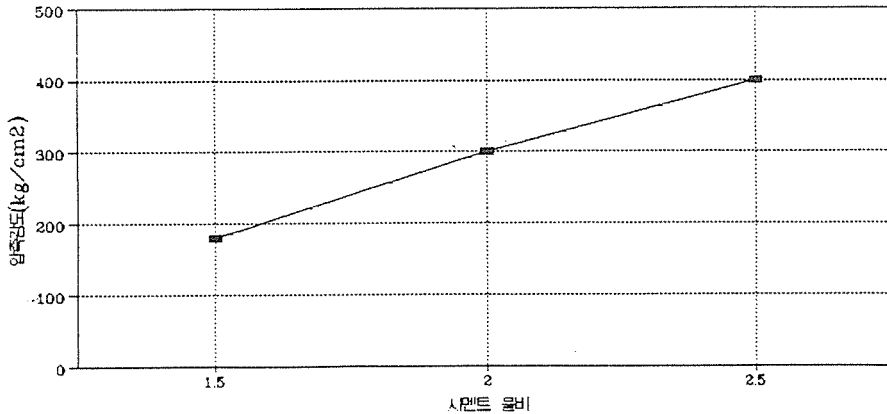
① 3종류의 시멘트 물비에 의한 압축강도 시험결과는 (그림 2)와 같으며, 그림으로 부터 배합강도 252kg/cm²에 해당 하는 시멘트 물비

C/W=1.8이 구해지므로 역수인 W/C=55.5%가 된다.

1)에 나타냈으며 최소 W/C가 55%이다.

③ 본 배합은 안정성을 고려하여 55%로 한

② 콘크리트의 내구성을 고려한 W/C는 (표 다.



〈그림 2〉 시험 배합에 의한 시멘트 물비와 압축강도

〈표 1〉 콘크리트의 내동해성을 기준으로 하여 물-시멘트비를 정하는 경우의 AE콘크리트의 최대 물-시멘트(%)

구조물의 노출 단 면	기상조건	기상작용이 심한 경우 또는 동결융해가 종종 반복되는 경우		기상작용이 심하지 않은 경우, 빙점이 하의 기온으로 되는 일이 드문 경우	
		얇은 경우 2)	보통의 경우 3)	얇은 경우 2)	보통의 경우 3)
① 계속해서 또는 종종 물로 포화되는 부분		55	60	55	65
② 보통의 노출상태에 있으며 ①에 해당하지 않는 경우		60	65	60	70

주 1) : 수로, 수조, 교대, 교각, 옹벽, 터널의 라이닝공 등으로서 수면에 가까워 물로 포화되는 부분 및 이들 구조물 외에 보, 슬래브 등으로서 수면으로부터 떨어져 있기는 하나 용설(融雪), 유수 등 때문에 물로 포화되는 부분

주 2) : 단면의 두께가 약 20cm이하인 구조물의 부분

주 3) : 단면이 두꺼운 경우에도 보통의 경우와 같다.

〈참조〉 소규모로 큰 강도를 필요로 하지 않는 공사 등에서 시험을 하지 않는 공사 등에서 시험을 하지 않을 경우에는 보통포틀랜드 시멘트를 쓰고, 혼화재를 쓰지 않는 보통콘크리트에 대해서는 다음식을 사용해도 좋다. $\sigma_{28} = -210 + 215 C/W$

다음은 미국개척국의 C/W와 σ_{28} 의 관계식을 나타낸 것이다.

1. AE제를 사용하지 않은 경우

$$\sigma_{28} = 160 \sim 230 \text{ kg/cm}^2 \text{인 경우 } \sigma_{28} = -139 + 230 C/W$$

$$\sigma_{28} = 231 \sim 330 \text{ kg/cm}^2 \text{인 경우 } \sigma_{28} = -76 + 190 C/W$$

$$\sigma_{28} = 331 \sim 385 \text{ kg/cm}^2 \text{인 경우 } \sigma_{28} = 22 + 144 C/W$$

2. AE제를 사용한 경우

$$\sigma_{28} = 140 \sim 250 \text{ kg/cm}^2 \text{인 경우 } \sigma_{28} = -74 + 162 C/W$$

$$\sigma_{28} = 251 \sim 320 \text{ kg/cm}^2 \text{인 경우 } \sigma_{28} = -18 + 134 C/W$$

3) 배합의 보정

〈표 2〉 콘크리트의 단위굵은골재용적, 잔골재용 및 단위수량의 대략의 값

굵은골재의 최대치수 (mm)	단위굵은골재용적 (%)	AE제를 사용하지 않은 콘크리트			A E 콘 크 리 트				
		간헐공기 (%)	잔골재용 S/a (%)	단위수량 W (kg)	공기량 (%)	양질의 AE제를 사용한 경우		양질의 AE감수제를 사용한 경우	
						잔골재용 S/a (%)	단위수량 W (kg)	잔골재용 S/a (%)	단위수량 W (kg)
16	58	2.5	49	190	7.0	46	170	47	160
19	62	2.0	45	185	6.0	42	165	43	155
25	67	1.5	41	175	5.0	37	155	38	145
40	72	1.2	36	165	4.5	33	145	34	135
50	75	1.0	33	155	4.0	30	135	31	125
80	81	0.5	31	140	3.5	28	120	29	110

- (1) 이 표의 값은 골재로서 보통의 입도의 모래(조립률 2.80정도) 및 자갈을 사용한 물-시멘트비 55% 정도, 슬럼프 약 8cm의 콘크리트에 대한 것이다.
 (2) 사용재료 또는 콘크리트의 품질이 (1) 조건과 다를 경우에는 상기의 표의 값을 아래 표와 같이 보정한다.

구 분	S/a의 보정 (%)	W의 보정 (kg)
모래의 조립률이 0.1만큼 클(작을) 때마다	0.5만큼 크게(작게) 한다.	보정하지 않는다.
슬럼프값이 1cm만큼 클(작을) 때마다	보정하지 않는다.	1.2%만큼 크게(작게) 한다.
공기량이 1%만큼 클(작을) 때마다	0.5-1.0 만큼 작게(크게)한다.	1.2%만큼 작게(크게) 한다.
물-시멘트비가 0.05 클(작을) 때마다	1만큼 크게(작게) 한다.	보정하지 않는다.
S/a가 1% 클(작을) 때마다	—	1.5kg만큼 크게(작게) 한다.
부순돌을 사용할 경우	3~5만큼 크게 한다.	9~15만큼 크게 한다.
바순모래를 사용할 경우	2~3만큼 크게 한다.*	6~9만큼 크게 한다.

비고 : 단위굵은골재용적에 의하는 경우에는 모래의 조립률이 0.1만큼 커질때(작아질) 때마다 단위굵은골재용적을 1%만큼 작게(크게) 한다.

* 바순모래의 미립분이 특히 많은 경우에는 1~2%만큼 작게 한다. 여기서, 미립분이란 배합에 영향을 주는 No.100체를 통과하는 정도를 말한다.

(표 2)의 조건과 일치 하지 않은 부분의 배합 조정을 (표 3)과 같이 한다.

단위수량 $W=180\text{kg}/\text{m}^3$, 잔골재용 $S/a=40.5\%$ 로 정해졌으며 각 재료의 단위량을 구하면

$$\text{단위시멘트량 } C = \frac{180}{0.55} = 327\text{kg}$$

$$\text{골재의 절대용적 } a = 1000(-327/3.15 + 180 + 50) = 666 \text{ l}$$

$$\text{단위잔골재량 } S = 666 \times 0.405 \times 2.55 = 688\text{kg}$$

$$\text{단위굵은골재량 } G = 666 \times (1 - 0.405) \times 2.65 = 1050\text{kg}$$

$$\text{단위 AE제량 } AE = C \times 0.03\% = 327 \times 0.0003 = 98.1\text{g}$$

〈표 3〉 배합의 보정

조 건	잔골재율 (%)	단위수량 (kg)
표2의 값	37	155
모래조립율 2.70	$37 \times \frac{2.80-2.70}{0.1} \times 0.5 = 36.5$	155
슬럼프 15cm	36.5	$155 + 155(15-8) \times 0.012 = 168$
부순돌사용	$36.5 + 4 = 40.5$	$168 + 12 = 180$

〈표 4〉 시방 배합표

굵은골재의 최대치수 (mm)	슬럼프의 범위 (cm)	공기량의 범위 (%)	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량 (kg/m³)				
					W	C	S	G	혼화제
25	15	5	55	40.5	180	327	688	1050	0.098

〈표 5〉 콘크리트의 기온에 따른 보정값 T(현장수중양생의 경우)의 표준값

시멘트의 종류	콘크리트를 부어넣은 날로부터 28일간의 예상 평균기온의 범위 (°C)				
	18 이상	15 이상 18 미만	7 이상 15 미만	4 이상 7 미만	2 이상 4 미만
조강 포틀랜드 시멘트	18 이상	15 이상 18 미만	7 이상 15 미만	4 이상 7 미만	2 이상 4 미만
보통 포틀랜드 시멘트 플라이애시 시멘트 A종 고로슬래그 시멘트 특급	18 이상	15 이상 18 미만	9 이상 15 미만	5 이상 9 미만	3 이상 5 미만
플라이애시 시멘트 B종	18 이상	15 이상 18 미만	10 이상 15 미만	7 이상 10 미만	5 이상 7 미만
고로슬래그 시멘트 1급 ¹⁾	18 이상	16 이상 18 미만	14 이상 16 미만	12 이상 14 미만	10 이상 12 미만
콘크리트 강도의 기온에 따른 보정값 T(kgf/cm²)	0	15	30	45	60

(주) 1) 고로슬래그의 분량이 45% 이하인 경우는 플라이애시 시멘트 B종과 같은 보정치로 하여도 좋다.

σ : 콘크리트강도의 표준편차

안전측으로 50%로 한다.

(표 6)에서 시공급을 A로 하면 25kg/cm²가 된다.

3) 참고 배합표에 의한 배합비 결정

2) W/C의 결정

$$W/C = \frac{61}{F/K + 0.34} = \frac{61}{283/330 + 0.34} = 50.9\%$$

4) 시방배합을 현장배합으로 환산

1.2 건축학회방법 (참고배합표에 의한)

1) 배합강도의 결정

$$F \geq F_c + T + 1.73\sigma = 210 + 30 + 1.73 = 283 \text{ kg/cm}^2$$

$$F \geq 0.8(F_c + T)3\sigma = 0.8(210 + 30) + 3 \times 25 = 267 \text{ kg/cm}^2$$

안전측으로 283kg/cm²를 배합강도로 한다.

F : 콘크리트배합강도

F_c : 설계기준강도

T : 구조체콘크리트의 강도관리를 위한 공시체의 양생방법을 현장 수중 양생으로 한 경우, 콘크리트 투입 일로부터 28일까지 동안의 예상 평균기온에 의한 콘크리트강도의 보정치(kg/cm²)

부산의 11월 월평균 기온이 11°C이므로 (표 5)에 의해서 30kg/cm²를 T로 한다.

〈표 6〉 시공급별에 의한 콘크리트 강도의 표준편차의 표준치(kg/cm²)

시공급별	시 공 관 리 의 정 도	표준편차 σ (kg/cm ²)
A	전자동식 배척프랜트, 레디-믹스트 콘크리트 등에 의한 경우로 시공관리가 아주 우수하고 제시험을 수행하면서 시공하는 경우	25
B	간이 배척프랜트, 레디-믹스트 콘크리트 등에 의한 경우, 또는 보통 공사 현장 비법의 경우로 시공 관리가 우수하고 제시험을 수행하면서 시공하는 경우	35
C	보통의 공사 현장 비법의 경우로 시공관리의 정도는 보통으로 어느 정도의 제시험을 행하는 경우	45

〈표 7〉 보통포틀랜드시멘트를 사용한 모래, 자갈 콘크리트의 참고 배합표

물시멘트비 (°/wt)	슬럼프 (cm)	잔골재율 (°/v1)	단위수량 (kg/m ³)	단위시멘트 (kg/m ³)	절대용적 (l/m ³)		
					시멘트	잔골재	굵은골재
45	8	35.9	168	373	118	253	451
	12	34.2	179	398	126	234	451
	15	32.6	188	418	133	218	451
	18	35.8	199	442	140	233	418
	21	38.0	215	478	152	237	386
50	8	37.1	167	334	106	266	451
	12	35.8	176	352	112	251	451
	15	34.7	183	366	116	240	451
	18	37.9	194	388	123	255	418
	21	40.4	209	418	133	262	386
55	8	38.0	166	302	96	277	451
	12	37.0	174	316	100	265	451
	15	36.1	180	327	104	255	451
	18	39.3	191	347	110	271	418
	21	42.0	206	375	119	279	386
60	8	38.9	165	275	87	287	451
	12	37.9	173	288	91	275	451
	15	37.0	179	298	95	265	451
	18	40.4	189	315	100	283	418
	21	43.1	204	340	108	292	386
65	8	40.2	165	254	81	299	445
	12	39.4	172	265	84	289	445
	15	38.6	178	274	87	280	445
	18	42.0	188	289	92	298	412
	21	44.8	204	314	100	307	379
70	15	40.1	178	254	81	293	438
	18	43.5	188	269	85	312	405
	21	46.3	204	291	92	321	323

(표 7)에 의해 W/C 50% 슬럼프 15cm의 참 고 절대용적은 (표 8)과 같다.

〈표 8〉 참고절대용적 (l /m³)

W/C (%)	slump (cm)	S/a (%)	W	C	S	G
50	15	34.7	183	116	240	451

〈표 9〉 굵은골재로서 갠 자갈을 사용하는 경우, 또는 AE제를 사용하는 경우의 참고 배합표의 배합량(1m³당)

콘크리트의 종류	시멘트량	모래량 (절대용적)	수 량
모래.자갈AE콘크리트	보정하지 않음	15 l 감	8% 감
모래.부순돌 콘크리트	"	25 l 증	8% 증
모래.부순돌 AE콘크리트	"	10 l 증	보정하지 않음

본 배합은 모래.부순돌 AE 콘크리트 이므로 (표 9)에 의한 보정을 하면 (표 10)과 같다.

〈표 10〉 참고절대용적 (l /m³)

W/C (%)	slump (cm)	S/a (%)	W	C	S	G
50	15	36.2	183	116	250	441

용적비를 중량비로 고치면

$$W=183\text{kg/m}^3$$

$$C=116 \times 3.15=365\text{kg/m}^3$$

$$S=250 \times 2.55=638\text{kg/m}^3$$

$$G=441 \times 2.65=1169\text{kg/m}^3$$

$$AE=365 \times 0.0003=109\text{g/m}^3$$

〈표 11〉 배합표

배합강도 (kg/cm²)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물시멘트 (%)	굵은골재의 최대 치수(mm)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m³)	절대용적 (l /m³)			중량 (kg/m³)			AE제 (g/m³)
							C	S	G	C	S	G	
283	15	5	50	25	36.2	183	116	250	441	365	638	1169	109

1.3 ACI 방법

1) 배합강도

콘크리트 구조물의 안전을 고려하여 배합강도를 250kg/cm²로 한다.

2) 배합수량의 결정

(표 12)는 ACI에서 권장하는 슬럼프 및 굵은골재 최대치수를 따른 단위수량결정 방법이다.

〈표 12〉 슬럼프 및 굵은골재 최대치수에 따른 소요단위수량과 공기량

슬럼프 (cm)	굵은골재 최대 치수(mm)							
	10	12.5	20	25	40	50	70	150
Non AE 콘크리트								
3~5	205	200	185	180	160	155	145	125
8~10	225	215	206	195	175	170	160	140
15~18	240	230	210	205	185	180	170	-
간헐공기량(%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
AE 콘크리트								
3~5	180	175	165	160	145	140	135	120
8~10	200	190	180	175	160	155	150	135
15~18	215	205	190	185	170	165	160	-
공기량(%)	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

본 배합은 AE콘크리트이며 25-210-15의 콘크리트이므로 (표 12)에 의거 $W=185\text{kg/m}^3$ 이다.

3) W/C의 결정

(표13)은 ACI에서 권장하는 물시멘트비와 압축강도의 관계이다.

(표13)에 의하여 W/C : 53%로 한다.

$$C=185/0.53=349\text{kg}$$

4) 굵은골재 용적량 계산

(표15)에 의하면 굵은골재용적은 0.68이며 굵은골재의 단위용중은 1750kg/m^3 이라 하면 $G=0.68 \times 1750=1190\text{kg}$

〈표 13〉 물 시멘트비와 압축강도와의 관계

재령 28일 압축강도(kg/m^2)	W/C	
	Non AE콘크리트	AE콘크리트
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

〈표 14〉 콘크리트 단위용적에 대한 굵은골재용적

굵은골재최대치수 (mm)	잔골재 조립율			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.76	0.74	0.72	0.70
50	0.78	0.76	0.74	0.72
70	0.81	0.79	0.77	0.75
150	0.87	0.85	0.83	0.81

(표 15)에 의하면 굵은골재 최대치수는 25mm

의 굵지않은 콘크리트 단위중량은 2290kg 이다.

〈표 15〉 굳지않은 콘크리트의 단위중량(kg/m³)

굵은골재최대치수 (mm)	Non AE콘크리트	AE 콘크리트
10	2280	2200
12.5	2310	2230
20	2345	2275
25	2380	2290
40	2410	2320
50	2445	2345
70	2490	2405
150	2530	2435

공기량=50 l

계=795 l

잔골재의 절대용적=1000-795=205 l

S=205×2.55=523kg

1.4 개척국의 방법

1) 배합강도 : 안전을 고려하여 245kg/cm²로 한다

2) W/C의 결정

5) 잔골재량 계산

현재까지의 단위재료량은

W=185kg

C=349kg

G=1190kg

계=1724kg

그러므로 잔골재량은 2290-1724=566kg(중량기준)

절대용적기준

W=185 l

C=1190/2.65=449 l

〈표 16〉 물시멘트비와 압축강도

W/C (%)	재령 28일 압축강도	
	AE 콘크리트	Non AE 콘크리트
0.40	300	380
0.45	275	345
0.50	245	300
0.55	218	265
0.60	190	240
0.65	170	210
0.70	155	190

(표16)으로부터 W/C=50%로 결정

3) 배합의 보정

〈표 17〉 콘크리트의 단위굵은골재용적, 잔골재용 및 단위수량의 대략의 값

굵은골재의 최대치수 (mm)	단위굵은 골재용적	AE 콘크리트			Non AE 콘크리트		
		공기량 (%)	단위수량 (kg)	잔골재용 (%)	간헐공기량 (%)	단위수량 (kg)	잔골재용 (%)
10	41	8	191	59	3.0	209	61
15	52	7	182	50	2.5	199	53
20	62	6	168	42	2.0	187	45
25	67	5	158	37	1.5	178	41
40	73	4.5	145	33	1.0	166	36
50	76	4	136	30	0.5	158	33
80	81	3.5	121	28	0.3	144	31
150	87	3	97	24	0.2	125	28

(주) 이 표에서는 잔골재는 자연산으로 조립을 2.75이고, 굵은 골재는 평균품질을 가지는 경우이며, 슬럼프는 믹서의 위치에 따라 7.5~10cm이다. 위 표 이외의 조건에 대한 수정치는 다음과 같다.

구 분	수치의 수정		
	W	S/a	단위굵은골재용적(%)
모래조립을 0.1 증/감	-	±0.5	±1
슬럼프 1cm 증/감	±1.2%	-	-
공기량 1% 증/감	±3%	±(0.5~1.0)%	-
W/C 0.05 증/감	-	±1%	-
잔골재율 1% 증/감	±1%	-	±2
부순돌 사용	+(7~10)	+(3~5)%	-
포장콘크리트와 같이 저슬럼프	-3	-3	+6

(주) 골재의 용적계산시 잔골재율은 단위수량과 잔골재율로 하며, 골재의 용적계산시 단위굵은골재용적은 단위수량과 단위굵은골재용적으로 계산 한다.

(표 17)로 부터 W=158kg, S/a=37%이며 배합의 보정은 다음과 같다.

〈표 18〉 배합의 보정

조 건	단위수량 (kg)	잔골재율 (%)
표 14	158	37
모래의 조립을 2.70	158	$37 - \frac{2.75-2.70}{0.1} = 36.8$
슬럼프 15cm	$158+158(15-8) \times 0.012=171$	36.8
부순돌 사용	$171+9=180$	$36.75+4=40.8$

$$\begin{aligned}
 W &= 180\text{kg}/\text{m}^3 \\
 C &= 180/0.5 = 360\text{kg}/\text{m}^3 \\
 S_v &= 1000 - (360/3.15 + 180 + 50) = 655.7 \text{ l} \\
 S &= 655.7 \times 0.408 \times 2.55 = 682\text{kg}/\text{m}^3 \\
 G &= 655.7 \text{ l} \times (1 - 0.408) \times 2.65 = 1029\text{kg}/\text{m}^3 \\
 AE &= C \times 0.03\% = 360 \times 0.0003 = 108\text{g}/\text{m}^3
 \end{aligned}$$

2. 고강도 콘크리트의 배합설계

2.1 개 요

건설신재료로서 각광을 받고 있는 고강도콘크리트는 보통강도콘크리트에 비해 구성재료와 여타의 배합변수가 강도발현에 미치는 영향이 큰데 이는 다시 말해서 고강도콘크리트의 품질변동이 보통강도콘크리트의 경우에 비해 크다는 것을 의미 한다.

이러한 이유 때문에 고강도콘크리트의 강도발현 및 여타성질은 보통강도콘크리트의 경우에 적용 되는 품질관리상의 변수인 물/시멘트비, 최대골재치수, 단위시멘트량 등 일반적인 사항 외에도 생산 및 타설과정에서의 불필요한 변동성을 제어하고 혼화제나 슬럼프 손실과 같은 세부적인 사항까지 고려해야 한다.

고강도콘크리트의 배합은 보통강도콘크리트에 비해 물/시멘트 비가 낮고 단위시멘트량이 크기 때문에 공정상 작업성 저하가 문제되는데 이러한 작업성 확보를 위해 혼화제를 투입할 경우에 따른 품질의 변동을 파악하여야 하며 슬럼프 손실도 고려해야 한다.

고강도콘크리트에 대한 정의가 국내에서는 명확하게 정의 되어 있지 않으나 레미콘의 경우는 증기양생 또는 오토클레이브양생을 하지 않은 자연양생 한 콘크리트는 400kg/cm² 이상을 고강도로 분류하는 것이 일반적이다.

고강도콘크리트는 고층건물의 콘크리트시공 및 장경간콘크리트 교량의 건설 등 종래에 불가능 했던 일들을 가능하게 하고 있으며 부재 단면 감소로 인한 자중의 감소로 인하여 구조물이 내진 성능향상에도 많은 기여를 하고 있다.

2.2 고강도콘크리트의 배합선정 방법

좋은 콘크리트란 요구되는 강도, 내구성 및 경제성을 지닌 것을 말한다. 이중에서도 콘크리

트의 강도가 가장 중요한 성질이라 할 수 있고, 단순히 콘크리트 강도라는 말은 일반적으로 압축강도를 의미 한다. 그 이유는 압축강도가 다른 강도에 비하여 상당히 크고, 압축강도가 콘크리트 부재의 설계에서도 유효하게 이용되며 압축강도로부터 다른 강도의 크기와 강도 이외의 굳은 콘크리트의 성질을 개략적으로 추정할 수 있기 때문이다.

콘크리트는 W/C 60% 이상에서는 시멘트페이스트의 강도가 콘크리트를 대표하지만 W/C 40% 이하에서는 즉, 고강도화 될수록 전체재료의 균일성 때문에 시멘트페이스트, 시멘트페이스트와 골재간의 부착강도, 골재자체 강도가 동시에 파괴되는 직선파괴 양상으로 바뀌게 된다. 다시말하면 콘크리트는 시멘트페이스트라고 하는 결합재와 골재로 이루어진 2상계 복합재료라고 할 수 있기 때문에 고강도화 하기 위해서는 다음과 같은 방법에 의해 가능할 것이다. 1) 결합재 자체의 고강도화 2) 결합재와 골재계면의 결합력 증강 3) 최적골재의 선택 등과 같은 효

과에 기초하여 고강도화가 가능하다. 따라서 배합선정시 재료의 선택 방법등을 연구 보고의 인용 및 당연구소 실내시험에 의해 얻은 데이터를 중심으로 기술하였다.

2.2.1 결합재 자체의 고강도화

콘크리트의 결합재인 시멘트페이스트는 시멘트수화물(시멘트겔), 미반응 시멘트, 모세관공극, 겔공극 및 잠재공기(entrapped air)에 기인한 공극으로 구성되고 있다. 위 공극중에서 시멘트페이스트의 강도에 영향을 주는 것은 (표 19)에 나타낸 것과 같이 주로 모세관공극과 잠재공기에 기인한 공극이다. 따라서 콘크리트의 결합재인 시멘트페이스트의 고강도화를 위해서는 모세관 공극과 잠재공기에 의한 공극으로 이루어진 10mm 이상의 공극을 효과적으로 감소시킬 필요가 있다. 이것이 시멘트페이스트 고강도화 원리이다. 시멘트페이스트의 공극을 감소시키기 위해서는 W/C의 저감과 수화물량의 증가에 의한 모세관공극의 감소 및 충전제에 의한 공극의

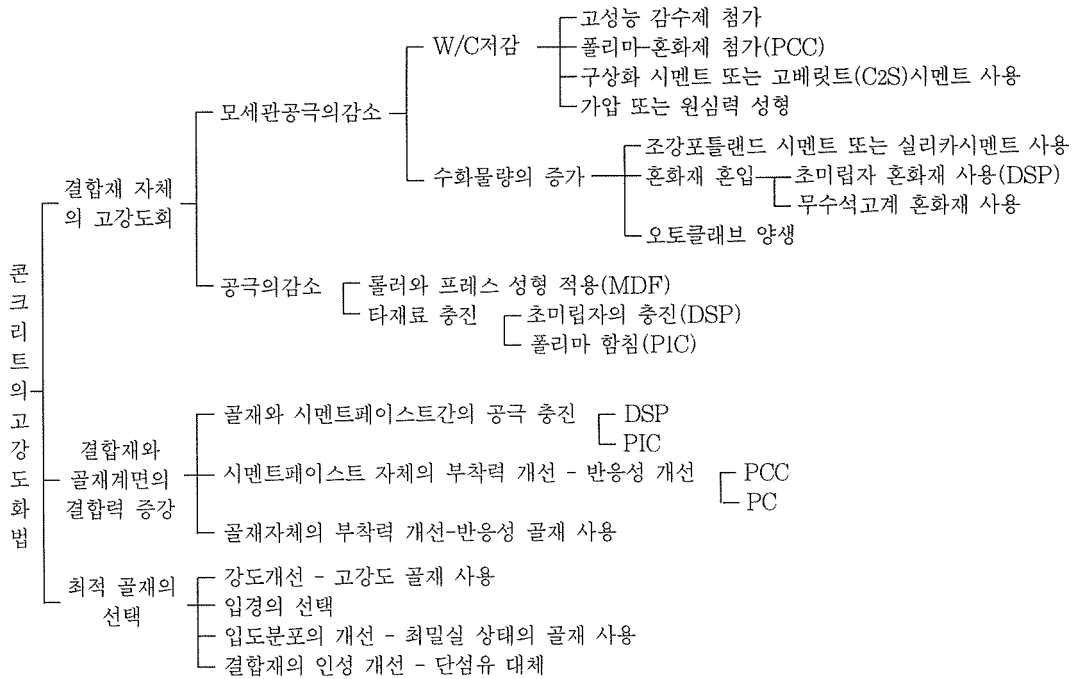
〈표 19〉 시멘트페이스트의 공극 분류

Designation	Diameter	Description(name of corresponding)	Role of water	Paste propertids affected
Macropores	1000~15 μ m	Large spherical voids	Behaves as bulk water	Sternngth, prrmeability
Capillary	15~0.05 μ m	Large capillaries	Behaves as bulk water	Sternngth, prrmeability
	50~10	Medium capillaries Capillary cavity Inter gel-particle pores	Moderate surafce tension forces generated	Sternngth, prrmeability shrinkage at high humidities
Gel pores	10~2.5nm	Small (gel) Capillaries	Stronglyadsorbe water, no menisci form	Shrinkage, creep
	2.5~0.5nm	Micropores Gel pores Inter-crystallite pores	Strongly adsorbed water, no menisci form	Shrinkage, creep
	< 0.5nm	Micropores "interlayer" (interlayer space) Intra-crystallte pores	Structural water involved in bonding	Shrinkage, creep

감소가 유리하다. 보통강도콘크리트의 경우에는 동결융해저항성 때문에 10~100 μ m의 공기포를 콘크리트 중에 연행시키는 것이 일반적이나 (표 19)에 나타난 것과 같이 10 μ m 이상의 공극을 효

과적으로 줄이므로써 고강도가 가능한 것을 나타내고 있다. (표 20)은 고강도콘크리트화 방법을 나타낸 것이다. 또한 (표 21)은 현장 타설의 고강도콘크리트 제조법을 나타낸 것이다.

〈표 20〉 콘크리트의 고강도화 방법



〈표 21〉 현장타설의 고강도콘크리트 제조법

설계기준강도 (kg/cm ²)		420~480	600	1000	1200
배합강도 (kg/cm ²)		600	800	1200	1400~1500
재료선정	시멘트	시판 시멘트로 제조 가능 품질은 JIS등의 규정에 적합	시판 시멘트로 제조 가능 품질은 JIS등의 규정에 적합	시판 시멘트로 제조 가능 품질은 JIS등의 규정에 부적합함	시판 시멘트로 제조 가능 품질은 JIS등의 규정에 적합
	골재	JASS 5의 품질규정에 적합	JASS 5의 품질규정에 적합	JASS 5의 품질규정 뿐아니라 골재의 품질기준이 필요함	JASS 5의 품질규정 뿐아니라 골재의 품질기준이 필요함
	혼화제	고성능감수제사용 품질은 JASS 6204에 적합	고성능감수제사용 품질은 JASS 6204에 적합	고성능감수제사용 품질기준, 사용기준을 작성함	초고성능 감수제 필요
	혼화제	JASS 5의 품질규정에 적합	실리카흙, 고로슬래그 미분말 사용 JASS 5의 품질규정의 적합	실리카흙, 고로슬래그 미분말 사용이 불가피함 품질기준, 사용기준을 작성함	실리카흙, 고로슬래그 미분말 사용이 불가피함 품질기준, 사용기준을 작성함

배 합	물결합제비 (%)	30~35 (시공)	25~30 (시공) 30~35 (시험실)	20~25 (시공) 25 (시험실)	20 (시공) 21 (시험실)
	단위결합제량	500kg/m ³ 이하	600kg/m ³ 이하	700kg/m ³ 이하	700kg/m ³ 이하
비 고		시공예가 증가함	시공되고 있음		시험실에서 제조 가능

2.2 결합재와 골재계면의 결합력 증강

콘크리트 강도 발현에 있어서 최대의 약점은 결합재인 시멘트페이스트와 골재간의 부착력이다. 이것이 콘크리트 강도의 주된 지배요인으로 되어 있다. 결합재와 골재의 계면영역을 거시적으로 보면, 일반적으로 그 계면 영역의 구조는 골재의 입경과 입도에 의존한다. 그러나 결합재와 골재의 계면결합력은 그 계면 영역의 거시구조 보다도 미세구조에 크게 지배된다. 따라서 혼화재료(실리카흙, 플라이애쉬와 같은 포조란 반응성이 있는 재료 또는 슬래그분말 같은 잠재수경성이 있는 재료)의 사용 등에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 결합재와 골재 계면의 결합력을 증가하기 위해서는 그 계면 영역에 존재하는 많은 공극을 혼화재에 의해 충전하는 것을 고려해야 한다. 이 경우 실리카흙 등의 초미립자를 이용하면 그 계면 영역에 존재하는 수산화칼슘과 반응해서 규산칼슘 수화물 등이 생성될 뿐 아니라 공극을 충전시키기 때문에 시멘트페이스트와 골재와의 부착력이 개선된다. 또한 골재자체의 부착력을 개선 하는데는 반응성을 가진 골재로서 크랑카를 이용하는 시도 등도 있다.

2.3 최적 골재의 선택

일반적으로 최적선택의 요인은 골재의 자체강도, 골재의 종류, 입경, 입도분포 및 표면거칠기등이다.

2.3.1 잔골재

고강도콘크리트는 단위시멘트량이 많은 부배합이므로 좋은 시공성을 얻기 위해서는 No.50,

No.100체를 통과하는 미립분의 양이 적어야 한다. 또한 조립율이 2.5이하이면 콘크리트가 점착성을 많이 띄어 다짐하기가 어렵고 3.0 정도에서 가장 좋은 강도와 시공성을 얻을 수 있다고 보고 되고 있다. 모래의 입도가 일정할때 잔골재 공극이 1%증가하면 배합수량이 약 5kg/m³ 만큼 증가된다. 통상 콘크리트에서 잔골재의 주요한 역할중의 하나는 작업성과 마감성을 제공해 주는 일이다. 고강도콘크리트는 많은 양의 시멘트페이스트가 있기 때문에 작업성과 마감성을 제공하는데에 대한 잔골재의 역할이 별로 중요하지 않다.

2.3.2 굵은 골재

고강도 콘크리트를 제조하기 위해서는 견고하고 입자가 비교적 둥근 굵은골재의 선택이 중요하며 강자갈 보다는 표면이 거칠고, 표면적이 넓어서 시멘트풀과의 부착성능이 좋은 쇄석이 권해지고 있으나 워커빌리티의 저하가 고려되어야 한다.(그림 3)는 굵은 골재의 종류에 따른 강도발현 특성을 나타낸 것으로 쇄석이 강자갈보다 유리함을 알 수 있다.

2.4 배합수

배합수는 기름, 산, 유기불순물, 혼탁물 등 콘크리트나 강재의 품질에 나쁜 영향을 미치는 유해물을 함유해서는 안된다. 차가운 배합수가 사용되면 슬럼프는 매우 증가하는 것으로 보고되고 있다. 낮은 W/C와 높은 시멘트 성분을 갖는 고강도 콘크리트에 대해 작업성과 다짐성 관점에서의 슬럼프 증가는 바람직하다. 차가운 배합수를 사용하면 또한 강도의 증가도 가능하

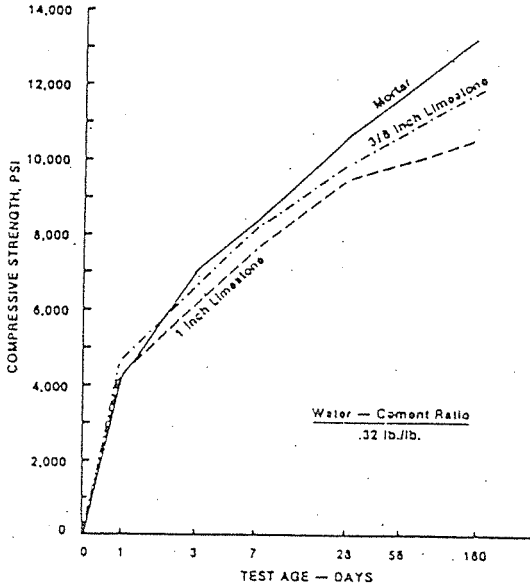
게 되는데, 이에 대한 이유는 첫째, 차가운 배합수를 사용하여 작업성이 증가 하였기 때문에 보통 다짐방법을 사용하여도 더 좋은 다짐도를 얻을 수 있으며 둘째, 굳지않은 콘크리트의 온도가

내려감에 따라 좀더 강하고 보다 안정된 화합물이 될 수 있는 수화시간을 주기 때문이다.

2.5시멘트

강한 시멘트가 강한 콘크리트를 만든다는 것은 당연하다. 시멘트가 풍화되면 비중이 감소하고 강열감량이 크게 증가 하며 강도 발현이 둔화되므로 비중을 측정하여 풍화의 정도를 확인한 다음 사용하는 것이 바람직하며 풍화한 시멘트의 강열감량과 콘크리트 강도와의 관계를 (표 22)에 나타냈다.

(표 22)에 타나낸 것과 같이 강열감량이 증가될 수록 강도가 저하되는 경향을 보여주고 있다. 시멘트의 특성중 분말도가 콘크리트의 성질에 미치는 영향은 매우 크다. 시멘트의 분말도가 높을 수록 압축강도가 증가 하는 경향이 있으며, 콘크리트의 공기량에 미치는 영향은 분말도가 증가함에 따라 AE제의 소요량을 늘려야 공기량을 확보 할 수 있다고 한다. 연구보고에 의하면 시멘트의 비교면적 $3750\text{cm}^2/\text{g}$ 인 경우는



〈그림 3〉 붉은 골재 종류에 따른 강도 발현

〈표 22〉 풍화한 콘크리트의 강열감량과 강도의 관계표

Condition of cement	ignition loss(%)	3days		7days		28days	
		bend. str.	comp. str.	bend. str.	comp. str.	bend. str.	comp. str.
fresh cement	1.16	100	100	100	100	100	100
aerated cement A	1.41	83	98	98	92	93	97
aerated cement B	2.16	80	90	83	80	89	88
aerated cement C	3.16	68	68	70	70	72	65
aerated cement D	4.16	61	61	61	58	67	61

비표면적이 $2750\text{cm}^2/\text{g}$ 인 시멘트를 사용한 경우 보다 동일한 공기량을 얻는데 AE제량이 약 1.5 배 정도 더 소요 된다고 한다.

또한 시멘트의 분말도가 높을수록 콘크리트의 블리딩을 감소시키는 효과도 있다. 그러나 시멘

트의 분말도가 높을 수록 입자의 반응성이 커지므로 분말도가 높아짐에 따라 응결 경화후의 수축이 크게 되며 균열 발생의 가능성을 크게하는 요인이 되고 풍화를 촉진하는 결점이 있기 때문에 시멘트의 분말도가 너무 큰 값도 콘크리트에

는 오히려 좋지 않은 경우도 있다. 그리고 시멘트 강도가 변동하게 되면 콘크리트강도도 따라서 변동하게 되므로, 시멘트는 콘크리트의 품질을 지배하는 요인 중에서 가장 중요한 요소로서 저장이나 취급시 세심한 주위를 기울여 시멘트의 반응성이 활발한 상태를 유지할 수 있도록 하여야 한다.

고강도화 하기 위해서는 보통 강도 콘크리트에 비해 단위용적당 시멘트의 증가가 필요하다. 일반적으로 콘크리트의 강도는 단위시멘트량에 비례하는 것으로 알려져 있다. 그러나 단위시멘트량이 어느 단계를 넘으면 단위시멘트량 증가에 따른 콘크리트 강도 증가 비율은 둔화 되며 경우에 따라서는 오히려 강도가 감소되는 경우도 발생한다는 보고가 있다. 이러한 상한선은 배합재료, 최대골재치수, 작업성수준, 시멘트의 분말도 공기연행량에 의해 영향을 받는데 이러한 인자를 조정하여 단위시멘트량을 조절하여야 한다.

2.6 혼화재료

2.6.1 고성능감수제(유동화제) : 고성능 AE감수제

고강도 콘크리트 제조를 위해서는 보통강도 콘크리트와는 달리 소요원재료 중 단위수량을 대폭 감소시킬 수 있는 고성능감수제의 사용이 필수적이다. 종래의 콘크리트용 화학 혼화제의 경우, 그 감수율은 AE제에서 8%, 감수제에서 5%, AE 감수제에서 13% 정도를 하한치로 규정하고 있다. 고성능 감수제에서는 20%이상의 감수효과가 얻어진다. 고성능 감수제와 유동화제는 그 사용목적에 따라 구별되는데 ACI 212 위원회는 그 보고에서, 고성능 감수제의 사용목적은 다음의 3가지로 서술하고 있다.

- 1) 콘시스턴스를 감하는것 없이 또한 응력시간에 나쁜 영향을 주는것 없이 모르타르, 콘크리트의 단위수량을 대폭감소하기 위해서 사용한다.
- 2) 원배합의 단위수량을 증가시키지 않고, 슬럼프를 현저하게 증대시키기 위해 사용한다.
- 3) 1) 및 2)를 병용할 목적으로 사용하기도 하

고, 중정도의 감수와 슬럼프를 증대 시키기 위해 사용한다. 위와 같이 ACI의 분류에서 1)의 목적을 위해 사용하는 것이 고성능 감수제이고 2)의 목적으로 사용하는 것이 유동화제라고 말할 수 있다.

고성능 감수제의 주성분은 나프탈렌 술폰산염 축합물, 멜라민 수지 술폰산염, 변성 리그닌 술폰산염, 카르본산염 등으로 분류 되고 있다.

고성능 감수제의 주성분은 나프탈렌 술폰산염 축합물의 작용기구는 시멘트 입자에 흡착하여 전기적인 반발력을 증대시켜, 시멘트 입자의 분산상태를 유지하는 역할을 한다고 하며 이것은 나프탈렌 술폰산염 축합물의 첨가에 의해 시멘트 입자가 큰 부전하를 가지게 되는 것이 많은 연구자에 의해 실증 되고 있는 것에서도 분명하다. 고성능 감수제의 명확한 정의는 없으나, 일반적으로 시멘트 입자를 효과적으로 분산시켜 응결지연, 과도한 공기도입 및 강도저하 등의 나쁜영향을 미치는 것 없이 높은 혼입율로 사용되며, 수량을 대폭 감수시키는 것이 가능한 혼화제를 고성능감수제라고 한다.

콘크리트에서 단위수량의 증가는 아직 굳지않은 콘크리트에서 블리딩의 대량발생을 초래하고 레이턴스나 콜드조인트가 증가함과 동시에 경화후의 콘크리트의 건조수축을 증대시켜 콘크리트 구조물의 균열을 많이 발생 시키므로 콘크리트 구조물의 내구성을 저하시키는 원인이 되고 있다. 유동화콘크리트는 건조수축의 저감, 블리딩의 감소, 수밀성 및 기밀성의 개선, 수화발열량의 감소, 내구성의 향상 등 콘크리트의 품질개선과 펌프압송시 등의 시공능률의 향상, 공기의 단축, 초기강도의 증대, 콘크리트 바닥 마감등의 마감시간의 단축등 콘크리트의 시공성 개선을 목적으로 하여 사용하게 된 것이다. 유동화제는 일본의 경우 토목, 건축 두 학회에서 통일된 품질규준이 (표 23)에 나타낸 것과 같이 규정되어 있다.

한편 일본에서는 높은 감수율과 함께 장시간 동안 슬럼프손실을 방지하는 고성능AE감수제가 개발되어 사용 되고 있다.

2.6.3 혼화제

실리카흙, 플라이애쉬, 슬래그분말 및 무수석고와 같은 혼화제는 시멘트페이스트의 공극을

충진하고, 시멘트페이스트와 골재계면의 공극을 충전시킬뿐만 아니라 실리카흙과 플라이애쉬는 수화시 발생하는 유리석회와 포졸란반을 일으켜

〈표 23〉 유동화제의 품질규준

항 목		유동화제의 종류	표 준 형	지 연 형
슬럼프 (cm)	베이스콘크리트		8±1	
	유동화콘크리트		18±1	
공기량 (%)	베이스콘크리트		4.5±0.5	
	유동화콘크리트		4.5±0.5	
블리딩 양의 차(cm ³ /cm ³)			0.1이하	0.2이하
응결시간의 차 (min)	초결		-30~+90	+60~+120
	중결		-30~+90	+210이하
슬럼프의 경시(15분간) 저하량 공기량의 경시(15분간) 저하량			4.0이하 1.0이하	4.0이하 1.0이하
압축강도비 (%)	재령 3일		90이상	90이상
	재령 7일		90이상	90이상
	재령 28일		90이상	90이상
길이변화비(%) 동결융해에 대한 저항성(%) (상대동탄성계수비)			120이하 90이상	120이하 90이상

고강도화를 촉진하기 때문에 고강도콘크리트를 손쉽게 제조할 수 있는 재료들이다. (표 24)는 당 연구소에서 진행중인 고강도콘크리트 실험의 일부를 소개한 것이다. 슬래그분말을 평균입경 10 μ m로 분쇄하여, 시멘트의 30% 중량을 대체하여 시험한 배합비 및 압축강도를 나타내고 있다. 또한 실리카흙을 사용하여 1000kg/cm² 강도 이상의 초고강도콘크리트의 제조가 가능함을 나

타내고 있다.

(표 24)에 나타난 것과 같이 슬래그분말을 첨가함으로써 초기재령의 강도는 떨어짐을 알 수 있으나, 28일 강도는 역전 되고 있음을 알 수 있었다. 또한 슬래그분말을 사용하여 고강도콘크리트를 안정하게 제조할 수 있음을 알 수 있었다.

〈표 24〉 콘크리트배합비 및 압축강도

W/B (%)	S/a (%)	단 위 량 (kg/m ³)							압축강도 (kg/cm ²)		
		W	C	S	G	slag	silica fume	S.P	3d	7d	28d
33	42	182	550	694	977	-	-	6.6	405	483	551
33	42	182	385	688	968	165	-	6.6	368	471	580
22	37	127	522	658	1138	-	58	11.6	579	821	1020
22	37	127	534	658	1138	-	46	11.6	539	792	1007