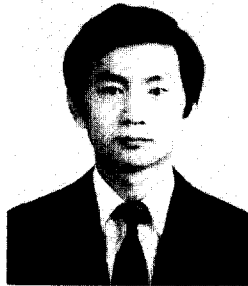
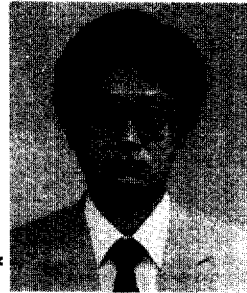


良質의 콘크리트 生産을 위한 配合設計 最適化

Optimum Mix Design for the Production of High Quality Concrete



吳炳煥*



嚴柱勇**

1. 서언

콘크리트의 기능은 시대의 변천에 따라 다양하게 분화되어 왔고 그 성능 역시 각종 연관된 산업의 발전에 맞추어 급속히 개선되어 왔다. 이러한 발전은 콘크리트의 구성재료 특히, 시멘트의 성능 개선에 힘 입은바 크며 근래에 들어서는 각종 혼화재료의 개발이 일익을 담당하고 있다. 하지만 콘크리트의 이와 같은 발전이 전적으로 구성재료 물성의 개선에 의한 것만은 아니며 구성재료를 적절히 배합하는 설계개념과 기법의 개발이 또한 관건이 되어왔다. 이러한 배합설계는 그 시대에서 정의하는 콘크리트의 성능 범위내에서 최적의 결과를 도출하고자 하는 노력이며 이를 통해 각종의 요구에 부응하는 콘크리트를 개발하고자 하는 연구의 과정이라 할 수 있다. 단적으로 말해 배합설계의 개선은 콘크리트가 제 기능을 발휘하도록 하는데 있어 "소프트웨어"적인 비중을 차지한다고 할 수 있다. 콘크리트 개발 초기와 그 후 상당기간 콘크리트의 배합설계는 주로 강도와 사용성의 증진에 초점을 두고 연구 되어 왔는데 이는 콘크리트의 물성에 대한 이해가 확립되지 않은데 기인한다. 다시 말해서 콘크리트

의 장기거동이나 열화에 대해 깊은 연구가 수행되지 못한 단계에서 막연히 콘크리트는 오랫동안 튼튼하리라는 가정 아래, 각종의 요구에 부합되는 강도의 증진만을 꾀했기 때문이다. 그 이후로 콘크리트의 역학적 거동과 특성이 점차 밝혀지면서 콘크리트의 배합설계는 내구성문제에 눈을 돌리기 시작했고 이러한 관점을 염두에 두고 설계기법의 개발을 수행하게 되었다. 지금에 이르러서는 이러한 발전에 힘입어 콘크리트의 장기거동과 열화현상까지를 고려하여 배합설계를 수행, 내구성을 확보하고 나아가 이러한 배합설계의 신뢰성을 높일수 있는 방안에 대한 연구가 각국에서 활발히 진행중이다. 따라서 본 연구에서는 각 배합설계가 갖는 특성을 살펴보고 이를 통해 최적의 배합설계를 유도하는데 필요한 제언을 하고자 한다. 아울러 콘크리트 구성재료의 기준과 이들 구성재료 상호간의 작용에 대해 살펴보기로 한다.

2. 콘크리트 배합설계의 기본개념

2.1 양질의 콘크리트란 무엇인가?

양질의 콘크리트 생산을 논하기에 앞서 우선 콘크리트의 성능과 품질에 대한 정의가 필요한데 사실 이 두 단어

* 서울대학교 토목공학과 교수

** 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

는 지금까지 별 구별없이 쓰여왔다고 볼 수 있다. 콘크리트의 성능은 요구되는 조건에 부응하는 능력이라고 말할 수 있는데 여기에는 유동화 콘크리트, 고강도 콘크리트, 초속경 콘크리트 등 해당 요구사항을 만족시킬 수 있는 재료와 그에 맞는 배합설계가 필요하다. 그러나 “성능”이 좋은 콘크리트라고 해서 모두 양질의 콘크리트라고는 말할 수 없는데 콘크리트의 특정 성능만을 강조한 경우 특히 그러하다. 즉, 콘크리트의 품질이 우수하다는 것은 특별히 요구되는 성능외에도 콘크리트 특유의 각종 성질이 균형잡힌 상태를 유지하여 상대적으로 균질한 품질을 가지는 것을 말한다.

이와 같은 양질의 콘크리트를 얻기 위해서는 배합설계에 우선 각각의 구성재료가 전체 콘크리트 품질에 미치는 영향, 특히 재료 상호간의 작용에 대한 지식이 필요하다. 예를 들어 워커빌리티를 향상시키고 콘크리트 제조비를 절감하기 위해 플라이 애쉬를 사용한다고 할 때 어떤 사전 지식없이 과도하게 첨가한다면 콘크리트의 응결 자체가 어려워지는 부작용을 낳게 된다. 이는 고성능 감수제 등을 사용할때도 마찬가지로 주의해야 할 사항이다. 또 콘크리트의 강도를 증진시키기 위해 실리카흄등을 첨가할 경우에도 어느 범위 이상 사용하게 되면 워커빌리티에 심각한 저해를 주는 것은 물론 기대하는 강도 자체도 얻을 수 없게 되고 이는 콘크리트의 소정 “성능”을 얻기 위해 콘크리트 전체 “품질”을 희생하는 우를 범하는 것이 된다. 따라서 양질의 콘크리트를 생산하기 위해서는 어느 재료를 많이 넣으면 어떤 성능이 좋아진다는 단편적인 논리보다는 구성재료간의 상호작용에 대한 지식을 기초로 하여 배합설계에 이를 반영하여야 한다.

2.2 콘크리트 배합설계의 기본 개념-내구성을 포함하여

앞에서 살펴보았듯이 콘크리트의 배합설계는 단순히 구성재료를 취합하는 개념이 아니라 콘크리트의 제 기능을 충분히 발휘하도록 하는 기법이다. 이를 위해서는 콘크리트의 성능을 저해하는 제 요건을 파악하고 이를 감안하여 배합설계를 수행해야 하는데 여기에는 최근 들어 제기되고 있는 콘크리트의 내구성분제가 반드시

고려되어야 한다. 물론 콘크리트의 배합설계는 기본적으로 강도 발현에서부터 시작하여 수밀성 및 내구성까지 검토하여야 한다. 본 고에서는 이러한 강도와 수밀성등의 문제를 내구성과 연관지어 살펴보기로 한다.

콘크리트에 내구성 문제를 야기시키는 요인은 외적인 면과 내적인 면으로 나누어 생각할 수 있는데 이중 외적 요인으로는 물리적, 화학적, 기계적 요인을 들 수 있다. 콘크리트 내구성 문제의 외적요인은 콘크리트의 투수·투기성, 즉 투과성의 문제라고도 볼 수 있는데 이 투과성이 클 경우 콘크리트의 내구성능이 크게 감소하게 된다. 따라서, 콘크리트 구조물에 나타나는 각종 劣化現象을 최대한 방지할 수 있는 효율적인 배합이 되도록 노력해야 한다. 황산염에 의해 피해, 동결융해 작용, 알칼리골재 반응등 중요한 내구성문제를 소홀히하고 강도만을 기준으로 한다면 차후 콘크리트의 사용성에 커다란 문제를 유발할 수 있기 때문이다.

황산염은 점토질 토양의 지하수나 산업폐수,또 공기오염으로 인한 빗물등에 주로 함유되어 있어 근래들어 더욱 그 영향이 커지고 있는 요인이다. 황산염에 의한 열화는 콘크리트 부재의 모서리 부분부터 시작되어 점차 확산되는데 중국에는 콘크리트의 균열과 박리를 유발한다. 이러한 피해는 배합설계시 시멘트 성분중 C_3A 를 낮추거나 내 황산염 시멘트를 사용하여 줄일 수 있으며, 또 포졸란 성분을 첨가하여 $Ca(OH)_2$ 성분을 억제함으로써도 비슷한 효과를 기대할 수 있다.

물리적 작용에 의한 콘크리트 내구성 문제의 가장 대표적인 것으로 동결융해에 의한 열화를 들 수 있는데 일차이로 인한 열화가 발생하면 이는 시간의 경과에 따라 점차 증가하여 결국 균열을 일으킨다. 이러한 동결융해작용이 발생한 것으로 추정되는 지역에 콘크리트를 타설할 경우에는 배합설계 단계에서 공기량의 조절등으로 이에 대한 고려를 해주어야 한다.

내부요인으로 유발될 수 있는 콘크리트 내구성 약화현상중 가장 일반적인 것으로 알칼리-골재반응을 들 수 있다. 알칼리-골재반응은 골재에 함유된 반응성 실리카 성분과 시멘트의 알칼리성분이 화학적으로 반응, 콘크리트에 손상을 미치는 현상인데 이 현상이 발생하면 콘크리트는 기의 회복이 어려운 균열을 일으키고 결국 사용이

불가능해지는 심각한 열화를 유발한다. 이 현상을 억제하기 위한 배합설계 단계의 대처방안은 시멘트의 알칼리 성분조정과 반응성 골재를 사용하지 않을 것과 포졸란 사용을 통한 반응 억제등을 들 수 있다.

2.3 콘크리트 구성재료의 조건 - 콘크리트 열화의 사전 제어

(1) 시멘트

시멘트는 기본적으로 석회암과 점토로 이루어지고 여기에 규석과 석고를 첨가하여 구성되는 복합재료이다. 이들 성분의 조정으로 각종 용도에 맞게 생산이 가능하며 실리카나 플라이 애쉬, 고로슬래그등을 첨가하여 용도를 확장할 수 있다. 시멘트의 구성성분에는 여러 제한조건, 예를 들어 산화 마그네슘과 3산화황등에 함량제한 등이 있는데 본 절에서는 배합설계시 고려되어야 할 품질을 위주로 살펴보기로 한다. 제3종 조강 시멘트는 비교적 초기에 소정의 강도를 얻을 수 있는 잇점이 있어 긴급히 강도를 얻어야 할 경우에 쓰이는데 반면, 입자의 분말도 즉, 비표면적이 상대적으로 큰 편이어서 동일 슬럼프를 얻기위해 소요되는 단위 수량이 증가할 수 있다. 또 수화열이 상대적으로 큰 편이므로 건조수축이 우려되는 지역에서 사용할 경우에는 배합설계에 이를 감안해야 한다. 앞서 언급한 황산암에 의한 침식은 경화 시멘트 중의 칼슘 알루미네이트 수화물과 반응하여 발생하므로 C_3A (알루미나산 3석회)성분을 줄인 내 황산염시멘트를 사용하는데 이때의 제한량은 일반적으로 4%이내이다.

(2) 골재

골재는 콘크리트 구성재료중 가장 큰 부분을 차지하며 또 그만큼 함유량과 입도, 품질등의 조정으로 배합설계에 많이 반영될 수 있는 항목이다. 본 절에서는 골재의 세부적인 규정보다는 배합설계시 반영되어야 할 사항을 중심으로 간략히 살펴보기로 한다. 골재의 품질은 비중, 흡수율 및 단위수량, 단위 용적 중량 및 실적률, 입도 및 최대치수, 유해물질의 함유정도 등으로 나누어 규정된다.

일반적으로 입도가 적당하다면 굵은 골재의 최대치수가

큰수북 단위수량과 단위시멘트량을 줄이는 효과를 얻을 수 있으므로 수화열과 건조수축도 아울러 줄일수 있는 반면, 강도가 저하되고 관리상 지장을 초래할 수 있다. 따라서 골재의 치수는 공사의 종류와 특성에 따라 적절히 선택하여야 한다. 최소치수에 대한 별도 규정은 없지만 프리캐스트 콘크리트의 경우에는 조골재의 크기가 너무 작으면 모르터 주입이 어려울 수 있으므로 최소치수를 15mm이상으로 규정하고 있다. 이 밖에도 유기 불순물 함유정도와 해사사용에 따른 여러가지 제한이 있으므로 이에 대한 신중한 고려가 필요하다.

(3) 혼화재료

콘크리트의 여러 성능을 개선하기 위해 각종용도에 맞는 혼화재료가 대단히 많이 개발되어 왔는데 본 고에서는 이러한 혼화재료 사용시의 유의점만 간략히 지적하고자 한다. 우선 콘크리트의 유동성을 극대화하여 폼프시공등을 용이하게 해주는 유동화제는 표준형과 지연형으로 나눌수 있는데, 표준형의 경우는 별 문제가 없지만 지연형의 경우 슬럼프의 시간 경과에 따른 변화가 상대적으로 큰 경향이 있으며 베이스 콘크리트에 사용된 다른 혼화제와 상호 작용하여 과다한 지연을 유발할 수 있다. 다음으로 고성능 감수제를 들 수 있는데, 이는 AE(공기연행)제와 병용하지 않는 경우 그 첨가량에 따라 내 동해성이 저해될 우려가 있다. 플라이 애쉬는 상당히 오랜기간 사용되어 왔고 또 그만큼 그 효용이 입증된 혼화제라 할 수 있는데 양질의 플라이 애쉬를 적절히 사용할 경우 입자가 球形性이므로 콘크리트의 워커빌리티를 개선하여 단위수량을 감소시킬수 있고 수화열을 떨어뜨리며 장기재령강도를 확보할 수 있는 잇점이 있으나 이 역시 첨가량이 과다하면 초기응결이 지연되고 초기 강도가 많이 떨어지는 경우가 있으므로 사전에 이를 감안하여 배합설계에 반영해야 한다. 콘크리트 팽창제도 균열발생 지감과 균열에 대한 내벽증진에 효과가 있으나 그 첨가량에 따라 오히려 나쁜 결과를 초래하기도 한다. 이밖에도 실리카 흙같은 혼화제의 경우 강도와 내구성 증진에 효과가 크지만 이 역시 과용하면 단위 수량증가, 강도발현저해, 건조수축증가등의 결과를 초래할 수 있다.

3. 콘크리트의 配合設計方法 - 각국의 규정과 비교

본 장에서는 우리나라, 미국, 영국의 배합설계 방법을 간략하게 살펴보고 이를 비교 고찰하기로 한다. 이 규정들은 각 국의 실정에 맞추어 오랜 기간의 경험에 기초한 것이므로 동일한 조건에 대해 약간 다른 배합설계 결과를 보일수 있으며, 반드시 어느 방법이 최선이라고 말하기는 어렵다.

3.1 ACI(미국)배합설계

ACI code에 의한 배합설계는 슬럼프, 최대골재치수, 배합수량과 공기량, W/C비, 단위 시멘트량, 골재량등을 차례로 결정하고 골재 함수량에 따라 배합을 조정한 후 시험배치를 통해 현장 배합 설계를 한다. 이러한 절차를 각 단계별로 간략히 살펴보기로 한다.

(1) Step 1; 슬럼프값의 선택

슬럼프가 특별히 요구되지 않는 경우 아래 표1을 참조할 수 있는데 이 값은 콘크리트를 진동다집한 경우이다.

표1. 구조물 종류별 추천 슬럼프값

Types of Construction	Slump(in)	
	Maximum	Minimum
Reinforced foundation walls and footing	1	1
Plain footing, caissons and substructure walls	3	1
Beams and reinforced walls	4	1
Building Column	4	1
Pavements and slabs	3	1
Mass concrete	2	1

이 표를 사용할 때는 타설 가능한 범위 내에서 최대로 된 반죽으로 제작할 수 있는 슬럼프를 채택해야 한다.

(2) Step 2; 최대 골재치수의 선택

입도가 양호할 경우에는 최대 골재치수를 가능한한 크게 잡는 것이 좋다. 어떤 경우라도 최대치수는 다음 규정을 만족해야 한다. 즉, 골재치수는 철근순간격의 3/4

이하, 부재최소치수의 1/5이하로 해야 한다.

철근이나 PC덕트등으로 혼잡한 부위는 콘크리트에 과도한 재료분리나 공극이 없는 범위내에서 최대골재치수를 선정해야 한다.

(3) Step 3; 배합수량과 공기량의 계산

배합수량은 최대골재크기, 입자모양, 골재 입도, 연행 공기량, 화학혼화재의 사용등에 따라 좌우된다. 이들 요소 각각에 따라 소요수량의 차이가 발생하는데 이 차이가 반드시 강도발현에 반영되는 것은 아니다. 아래 표2는 공기연행 유무와 슬럼프값 및 골재 최대치수에 따른 배합수량을 나타내고 있다.

(4) Step 4; 물 - 시멘트비의 선정

이 항목의 변수는 강도와 내구성, 마감성 등인데 골재나 시멘트 등의 변화에 따라 상이한 강도 발현을 보임으로 실제적인 강도-물시멘트비 관계를 실험으로 정립하는 것이 필요하다. 이러한 자료가 부족할 경우 아래 표3을 참조한다.

포졸란 재료를 사용할 경우에는 물 시멘트비를 보통 W/(C+P)로 두는데 이를 정하는 방법에는 등가중량법과 등가절대용적법이 있다.

(5) Step 5; 시멘트량의 계산

앞에서 물-시멘트비와 소요단위수량이 결정되면 자동적으로 시멘트량이 결정된다. 시방서에 내구성등을 감안하여 소요시멘트량이 제시된 경우에는 이를 고려한다.

(6) Step 6; 굵은 골재량의 계산

작업성정도가 같은 경우 굵은 골재부피는 공칭최대치수와 잔골재의 조립률에 의해 결정되는데 이를 아래 표4에 나타내었다. 작업성의 정도가 좀더 요구되는 경우 즉, 펌프타설이나 복잡한 배근인 경우에는 표4에 나타낸 골재량에서 10%정도 감하는 것이 허용된다.

(7) Step 7; 잔골재량의 계산

콘크리트 구성재료의 함량선정으로는 마지막 순서가 되는데 이 양은 중량법이나 절대용적법으로 결정한다. 이 방법들은 공히 중량과 용적에 대해 이미 결정된 量들

표2. 슬럼프 및 골재 최대치수에 따른 소요단위수량과 공기량

Slump(in)	Water, lb per cu yd of concrete for indicated nominal maximum sizes of aggregate								
	3/8 in.	1/2 in.	3/4 in.	1 in.	1-1/2 in.	2 in.	3 in.	6 in.	
non-air entrained concrete (非 AE 콘크리트)									
1 to 2	350	335	315	300	275	260	220	190	
3 to 4	385	365	340	325	300	285	245	210	
6 to 7	410	385	360	340	315	300	270	-	
감힌공기량(%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2	
Air-entrained concrete (AE 콘크리트)									
1 to 2	305	295	280	270	250	240	205	180	
3 to 4	340	325	305	295	275	265	225	200	
6 to 7	365	345	325	310	290	280	260	-	
노출정도에 따른 전체소요공기량(%)	경미한 노출상태	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
	보통의 노출상태	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
	심각한 노출상태	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

(주: 1 in. = 2.54cm, 1 lb = 0.4536kg)

표3. 콘크리트의 소요 압축강도에 따른 물-시멘트비

Compressive strength at 28 days, psi(kg/cm ²)	Water-cement ratio, by weight	
	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
6,000(420)	0.41	-
5,000(350)	0.48	0.40
4,000(280)	0.57	0.48
3,000(210)	0.68	0.59
2,000(140)	0.82	0.74

표4 단위 체적당 굵은 골재 체적비

Nominal maximum size of aggregate (in)	Volume of dry-rodded coarse aggregate per unit volume of concrete for different fineness moduli of fine aggregate			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
1	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2	0.75	0.73	0.71	0.69
2	0.78	0.76	0.74	0.72
3	0.82	0.80	0.78	0.76
6	0.87	0.85	0.83	0.81

(주: 1 in. = 2.54cm)

표5. 굳지 않은 콘크리트의 단위중량

Nominal maximum size of aggregate, (in)	First estimate of concrete weight, lb per cu yd(kg/m ³)	
	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
3/8	3,840(2280)	3,710(2200)
1/2	3,890(2310)	3,760(2230)
3/4	3,960(2345)	3,840(2275)
1	4,010(2380)	3,850(2290)
1 1/2	4,070(2410)	3,910(2320)
2	4,120(2445)	3,950(2345)
3	4,200(2490)	4,040(2405)
6	4,260(2530)	4,110(2435)

(주: 1 lb/yd³ = 0.5933kg/m³)

의 중량을 빼준 값을 산 골재량으로 결정하는 것이다. 이를 위해서는 굳지 않은 콘크리트의 무게가 사전에 결정되어 있어야 하는데 이러한 자료가 없다면 아래 표5를 사용할 수 있다.

(8) Step8: 골재 함유량의 조정

골재는 어느정도 흡수성을 가지며 어느정도 함유 상태

이므로 배합수는 이 골재의 표면수량만큼 감해서 조정해야 한다. 또, 골재의 흡수율이 1% 이상이고 초기 응결전에 이러한 흡수가 모두 진행될 경우에는 슬럼프가 과대평 가될 수 있고 실제적으로 유효한 수량은 감소된다.

(9) Step 9: 시험 배합 수정

이상의 과정을 통해 얻어진 배합설계는 ASTM C 192 규정이나 실볼크기의 현장배치로 실험을 수행하여 검토한다. 우선 시험배치의 슬럼프가 심각하게 낮지 않다면 슬럼프 linch(2.5cm)를 가감하기 위해서는 배합수 10lb(4.536kg)를 가감하여 재계산한다. 다음으로 공기 연행 콘크리트에 대하여 소정의 공기량의 얻어지지 않으면 적정공기량을 얻기 위해 혼화제량을 재 계산해야 하며 공기량이 1% 증감함에 따라 5 lb의 배합수량을 조정해야 한다.

3.2 BS(영국)배합설계

BS 배합설계는 우선 여러 사항을 고려하여 평균 배합 강도를 결정하고 이어 W/C비를 구한다. 다음으로 배합수량, 단위 시멘트량, 잔골재비, 콘크리트 단위중량등을 결정하여 배합설계를 구성한다.

(1) Step 1: 평균배합 강도의 결정

시멘트, 골재의 계량장비 정밀도와 콘크리트 배합에 대한 감독상태 및 결손율에 따라 K값을 결정하는데 이 기준은 아래 표6과 같다.

표6. 계량장비의 정밀도, 감독상태, 강도 결함율에 따른 K값

계량장비의 정밀도	콘크리트 배합의 감독상태		콘크리트 강도의 결함율(%)		
	강	감독상태	5.0	2.5	1.0
매우정밀	불량	양	0.82	0.78	0.75
	우수	양	0.85	0.82	0.79
	우수	수	0.88	0.86	0.84
보통	불량	양	0.79	0.75	0.71
	보통	양	0.83	0.78	0.76
	우수	수	0.86	0.83	0.81

평균배합강도는 목표 설계 강도를 위 K값으로 나누어 구한다.

(2) Step 2: W/C 비의 결정

BS에서는 28일 강도를 기준으로 시멘트 종류와 골재형태에 따라 강도-W/C 관계곡선에서 물-시멘트 비를 구한다.

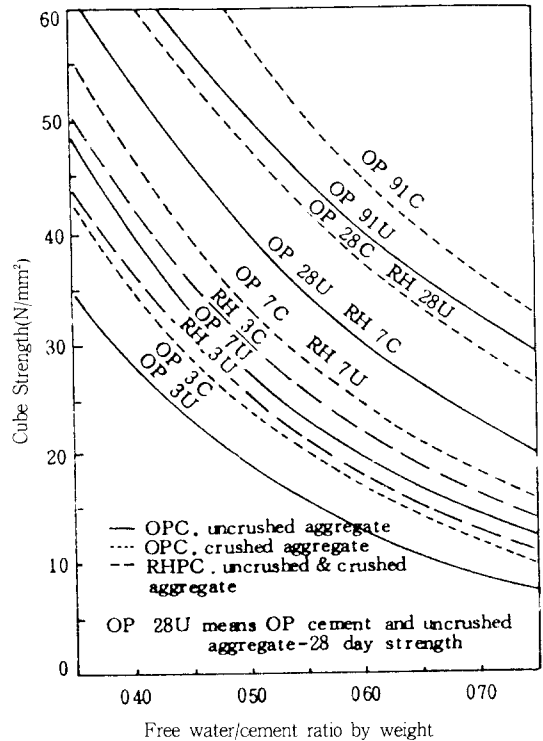


그림 1. 콘크리트 강도와 물 시멘트비의 관계

(3) Step 3: 단위수량의 결정

작업성, 최대골재치수, 골재형태등에 따라 요구 단위수량을 결정하는데 작업성은 매우 낮음 부터 높음까지 4 단계이며 이때 슬럼프값은 0에서 60~150mm까지이다. 굵은 골재의 최대치수는 10mm, 20mm, 40mm이며 골재는 표면건조포화상태를 기준으로 한 값이므로 이에 벗어날 경우에는 적절한 보정을 해주어야 한다.

(4) Step 4: 시멘트량의 결정

시멘트량 C는 다음식으로 구한다.

$$C = \frac{W}{(W/C)} \quad (\text{kg/m}^3)$$

위 식을 통한 시멘트량과 W/C비는 각각 최소와 최대 로 잡은 것이기 때문에 외부의 노출환경에 따라 내구성 관점에서 검토해야하는데 이를 표7에 보였다.

표7. 내구성 기준에 따른 소요 단위시멘트량(kg/m³)

외부노출조건	최대 골재 치수(mm)			최대 물-시멘트비 (Maximum free w/c ratio)
	40(mm)	20(mm)	10(mm)	
미 소(mild)	220	250	290	0.65
보 통(moderate)	260	290	340	0.55
극 심(extreme)	320	360	410	0.45
염기성(salt for de-icing)	260	290	340	0.55

(5) Step 5: 잔 골재량의 결정

이 값은 최대골재치수, 작업성, 잔골재 범위(Sand Zone)에 따라 결정된다. 여기서 잔골재 범위는 아래 그림 2에서 1,2,3,4 로 나누어진 직선으로서 그 기준은 조립률 이다. 그림 2는 최대골재크기 10mm인 경우에서의 W/C 비와 S/a의 관계를 도시한 것이다. 여기서, 잔골재 범위1 은 조립률 2.69~3.98, 2는 조립률 1.86~3.31, 3은 1.7 0~2.70, 4는 1.35~1.72를 나타낸다.

(6) Step 6: 콘크리트의 단위 중량결정

이 항목은 골재량 계산을 위해 필요한 과정으로써 골재 의 상대비중을 통해 결정된다. 아래 그림 3은 필요수량과 콘크리트 단위중량과의 관계로써 이를 통해 콘크리트 단위 중량을 결정한다. 이 그림에서 $\gamma = 2.8, 2.7$ 등은 골재 의 상대비중을 나타낸다.

(7) Step 7: 골재량의 결정

$$A = D - W - C \quad (\text{kg/m}^3)$$

여기서, A: 단위 골재량 D: 콘크리트 단위중량

W: 단위 수량 C: 시멘트량

(8) Step 8: 굵은 골재량 및 잔골재량의 결정

$$S = A (y/100) \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$G = A - S \quad (\text{kg/m}^3)$$

여기서, S = 잔골재량, G = 굵은 골재량, Y = 잔골재율이다.

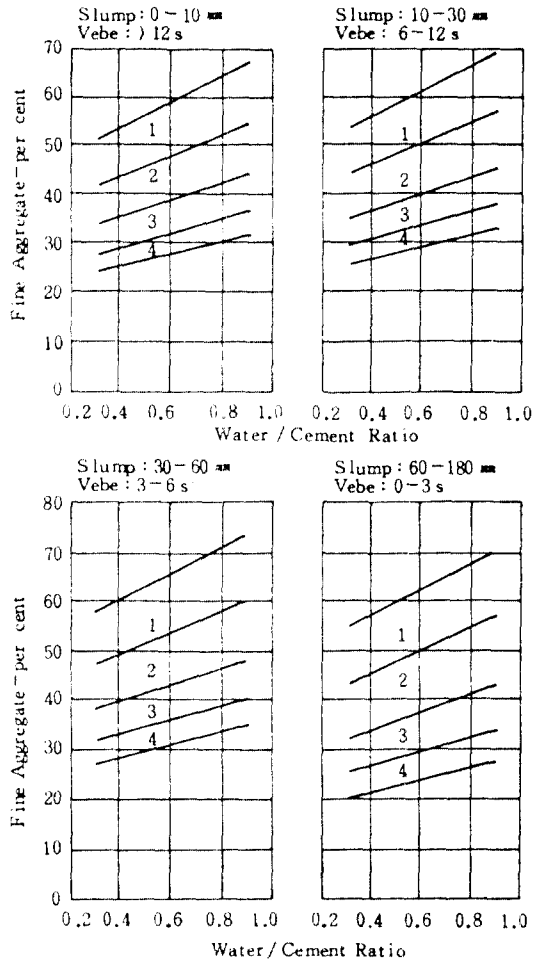


그림 2. 최대 골재치수 10mm 인 경우 W/C비와 잔골재율의 관계

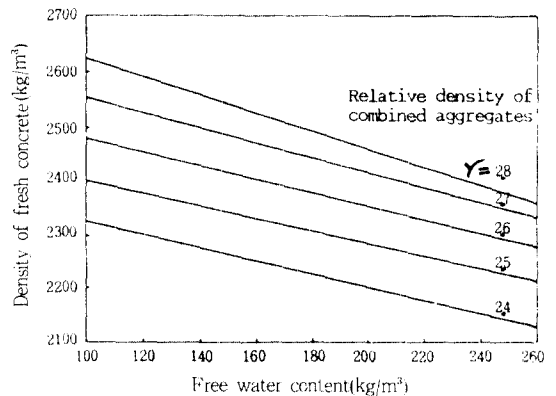


그림 3. 필요수량과 콘크리트 단위중량의 관계

(9) Step 9: 배합비 결정 및 현장배합설계

실제 현장에서 시험배합(대략 0.3m³)을 시행하고 여기서 W/C비, 다짐계수(0.78~0.99), 단위중량을 구하여 현장배합시 고려한다.

3.3 우리나라의 배합설계

우리나라의 KS code는 다음과 같은 절차를 거쳐 배합설계를 수행한다.

(1) Step 1: W/C비의 결정 및 단위수량 결정

소요의 강도와 내구성을 고려하여 결정하는데 구조물의 용도에 따라 압축강도, 내 동해성, 내 화학성, 수밀성등을 기준하여 정한다. 압축강도를 기준할 때는 이 경우 배합강도 σ_r 은 설계기준 강도 σ_{ck} 에 증가계수 α 를 곱하여 얻는다. 계수 α 는 현장에서 예상되는 압축강도의 변동계수로 부터 얻는다. 아래 그림 4는 일반적인 경우의 압축강도 변동계수에 따른 증가계수이다.

또한 굵은골재크기와 단위수량 및 잔골재율의 관계가 표8에 요약되어있고, 콘크리트의 내 동해성을 기준할 때는 아래 표9를 참고한다.

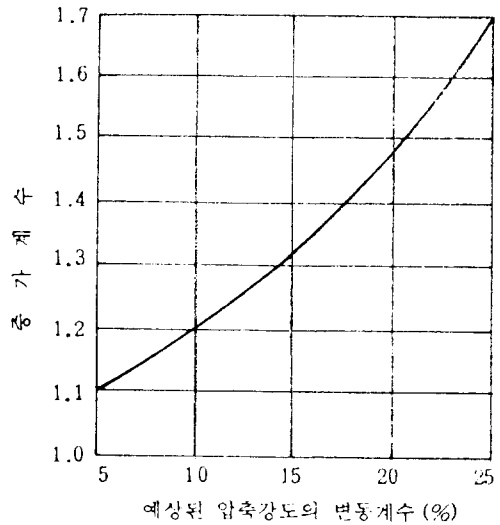


그림 4. 일반적인 경우의 압축강도 변동에 따른 증가계수

(2) Step 2: 굵은 골재 최대치수의 결정

될 수 있는대로 큰 값을 취하는 것을 원칙으로 하고 시방서에 규정된 구조물의 종류, 치수에 따른 제한 사항을 준수한다.

(3) Step 3: 슬럼프의 결정

일반적인 경우 5~12cm, 단면이 큰 경우는 3~10cm, 무근콘크리트는 3~8cm를 대체적인 슬럼프로 취하고 특별한 경우 유동화제 첨가등을 고려한다.

(4) Step 4: 공기량의 결정

심한 기상작용하에서는 3~6%의 공기량이 일반적이 다. 콘크리트의 공기량은 운반, 진동다짐과정에서 1/4 ~ 1/6 정도 감소되므로 이에 유의한다.

(5) Step 5: 잔골재율 및 단위수량의 보정

다음 기준 조건과 사용재료나 콘크리트 품질이 틀릴경우 아래 표10에 의거 수정한다. 여기서 기준조건을 W/C = 0.55, slump = 8cm, 잔골재 조립률 = 2.8을 기준으로 작성된 것이다.

표8. 골재크기에 따른 단위수량

굵은 골재의 최대치수 (mm)	단위 (°)	AE제를 사용하지 않은 콘크리트					AE 콘크리트			
		간 현 (°)	잔골재율 (°)	단위수량 (kg)	공기량 (°)	양질의 AE제를 사용한 경우		양질의 AE제를 사용하지 않은 경우		
						S/a (°)	W (kg)	S/a (°)	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	

콘크리트의 수밀성을 기준으로 삼을때는 구조물의 종류와 주위환경에 따라 여러 제한조건이 있는데 이는 지면판계상 여기서는 생략하기로 한다.

표9. 내구성을 고려한 물 시멘트 비의 범위

내구성 형태	기상조건	기상작용이 심한 경우 또는 동결융해가 종종 반복되는 경우			기상작용이 심하지 않은 경우 빙점이하의 기온으로 되는 일이 드문 경우		
		맑은 경우	보통의 경우	뚜꺼운 경우	맑은 경우	보통의 경우	뚜꺼운 경우
내해동성	구조물의 노출 1) 계속해서 또는 물로 포화되는 경우 2) 보통의 노출상태에 있으며 1)에 해당하지 않은 경우	55	60	60	55	65	65
		60	65	65	60	70	70
내화학적 또는 해양환경 수밀성	시공조건	일반 현상시공의 경우			공상제품 또는 재료의 선정 및 시공에서 공상제품과 동등이상의 질이 보증될 때		
	화장조건 또는 콘크리트 화학작용						
	황산, SO ₂ 로써 0.2% 이상의 황산염을 함유하는 흙이나 물에 접하는 콘크리트	50			50		
	용방제를 쓸 것이 예상되는 콘크리트	45			50		
	해 중	50			50		
	해중대기중	45			50		
	물 보 다	45			45		
모든 경우	55			55			

표10. 기준배합에 대한 잔골재물 및 단위수량의 보정

구분	S/a의 보정(%)	W의 보정(kg)
모래의 조립률이 0.1 mm 클(작을)때마다	0.5mm 크(작게) 한 보정하지 않는다.	
슬럼프값이 1cm만큼 클(작을) 때마다	보정하지 않는다.	1.2%만큼 크(작게)한다.
공기량이 1% 만큼 클(작을) 때마다	0.5~1.0만큼 작(크)게한다.	3%만큼 작(크)게한다.
물-시멘트비가 0.05 클(작을) 때마다	1만큼 크(작게)한다.	보정하지 않는다.
S/a가 1% 클(작을)때마다	-	1.5kg만큼 크(작게)한다.
부순돌을 사용할 경우	3~5만큼 크(작)게 한다.	9~15만큼 크(작)게 한다.
바순모래를 사용할 경우	2~3만큼 크(작)게 한다.	6~9 만큼 크(작)게 한다.

비고: 단위 굵은 골재 용적에 의하는 경우에는 조립률이 0.1mm 클(작)때(작)아질) 때마다 단위굵은골재 용적을 1%만큼 작(크)게(작)한다.

(6) Step 6: 단위 시멘트량과 혼화 재료량의 결정

상기에서 결정된 물-시멘트비와 단위수량에 따라 단위 시멘트량을 결정하고, 가능한 한 소요 강도, 내구성, 수밀성을 갖도록 시험에 의하여 결정한다.

(7) Step 7: 굵은 골재와 잔골재량의 결정

Step 1~6까지 결정된 구성재료의 부피를 전체 콘크리트

부피에서 빼주고 남은 값을 전체 골재량으로 취하고 여기에 잔 골재물을 곱하여 잔 골재량을 결정한다.

(8) Step 8: 시험배치 및 결과분석

(9) Step 9: 현상배합으로의 수정

3.4 각 배합설계 방법의 비교

앞서 언급했듯이 각 배합설계 방법은 경험에 기초한 것이므로 각 방법간의 우열은 논할수 없다. 특히 내구성과 관련된 문제에서 각국의 상한치가 틀리므로 이에 따라 물-시멘트비나 단위 시멘트량이 달라지게 된다. 내구성과 수밀성이 많이 요구되는 구조물일 경우 상기 절차를 걸쳐 계산해보면 ACI[방법이 W/C비가 상대적으로 낮고 이에 따라 단위 시멘트량이 크다.

기존의 배합설계는 거의 구성재료를 차례로 결정해나가는 "흐름"적인 절차를 밟고 있다고 할 수 있다. 따라서, 배합설계가 진행되는 도중에 복합적인 요인에 의해 문제가 발생하면 이에 대한 제어가 어려운 점이 있다.

최근의 추세는 구조설계 방법을 최적화하여 경비를 절감하는 경제성에 초점을 맞추고 있는 만큼 콘크리트의

배합설계 역시 내구성과 작업성이 확보되는 한 경제적인 방안을 제시해야 한다. 이를 위해서는 콘크리트 구성재료의 개발 속도 만큼 이들의 상호작용에 대한 많은 연구가 필요하다고 본다.

4. 고강도콘크리트의 배합설계 - 보통콘크리트와의 차이점을 중심으로

최근들어서는 고강도 콘크리트의 사용이 급속히 확대되고 있는 추세인데 이는 보통 콘크리트보다도 더 공정관리상의 기술을 요하는데 우선 재료의 선정에서부터 좀 더 엄격한 제한을 두고 있으며 배합설계 역시 세부적인 사항에서 보다 정밀한 과정을 기친다. 따라서 본 고에서는 이러한 고강도 콘크리트의 배합설계가 갖는 배합설계상의 특징을 배합설계에 영향을 미치는 인자를 중심으로 살펴보기로 한다.

4.1 고강도 콘크리트 구성재료의 선정

고강도 콘크리트는 보통콘크리트에 비해 강도의 발현을 포함한 세 성질이 불균일한 편인데 이는 일차적으로 사용재료성능이 약간이라도 변할 경우 그 영향이 직접적으로 콘크리트 성질에 미치기 때문이다. 따라서 고강도 콘크리트 생산시의 재료선정에는 균질성을 임무에 두어야 한다. 우선 미국에서 시멘트의 경우 시멘트 공급업자는 ASTM C 917 규정에 의거, 시멘트의 균질성을 보고해야 한다. 시멘트 중 C_3A 성분은 초기 수화열 발생의 요인이므로 그 양은 5% 미만인가를 확인하고 SO_3 성분 역시 시멘트 경화시 부피팽창의 원인이 되므로 1~3%내외로 유지하는 것이 필요하다.

고강도 콘크리트의 경우 단위 시멘트량이 상대적으로 큰 데 이로인한 수화열 증가 역시 주목해야할 사항이다. 예를 들어 Water Tower Place의 경우, 시멘트량 502kg/㎡을 써서 1.2m의 정방형 기둥을 만들었을 때 수화열인한 온도가 24℃에서 66℃까지 상승하는 것이 관찰된 바 있다. 다음으로 관심을 기울여야 할 사항은 시멘트-혼화재료 시스템을 여하히 최적화하는가 하는 것이다. 단위 수량과 관련 감수제가 미치는 영향은 시멘트의 특성

에 따라 달라지며, 강도 발현 양상 역시 달라진다.

배합수의 규정 역시 좀 더 엄격하여 비교적 오염이 우려되는 물을 사용하는 것이 불가피한 경우도 있는데 이 경우에는 증류수를 넣어 제작한 시편과 재령7일, 28일 강도를 비교하여 최소 90% 이상의 강도가 얻어지면 ASTM C 94규정 조건을 만족시킨다고 간주한다.

골재의 경우에는 보통 콘크리트에 사용되는 규정외에 추가되는 사항이 있는데 이를 입도, 흡수율, 골재의 강도 등의 측면을 통해 간략히 살펴보기로 한다.

우선 산골재의 입도는 요구 배합수량에 영향을 미치는데, 한 보고서는 조립을 2.5이하일 경우에는 점성이 높아져서 배합이 어려워지고 조립률이 약 3.0인 경우 작업성과 강도발현이 최적으로 된다고 실험결과를 밝히고 있다. 굵은 골재의 경우 고강도 콘크리트 특유의 W/C비와 부배합을 감안할 때 최소치수는 12.7~9.5mm, 최대치수는 19.0~25.4mm 정도를 유지하는 것이 좋다. 최근 들어 사용이 급증하고 있는 부숴돌의 경우 강도증진에 어느정도 기여하는 것으로 밝혀져 있는데 이는 입자의 형상때문에 기계적 부착력이 증진되기 때문인 것으로 보인다. 그러나 지나치게 모난 부숴돌의 경우 단위 수량을 저감시키고 작업성을 저해시키므로 깨끗하고 입방체인 골재가 가장 우수한 것으로 알려져 있다.

고강도 콘크리트를 구성하는 재료중에서 혼화재료를 빼놓을 수 없을 만큼 근래들어서는 사용이 확산되었고 그 성능 또한 많이 개선되었다. 이러한 혼화재료 사용으로 얻을 수 있는 개선효과는 상당히 광범위한데 우선 혼화제 사용으로 압축강도 증가, 경화의 억제, 급속한 강도발현을 기대할 수 있고 각종 혼화제 사용을 통해 작업성 및 내구성 향상과 밀실화를 꾀할 수 있다.

4.2 배합설계인자 결정의 기준

본 절에서는 W/C비나 단위 시멘트량 같은 인자가 가져야 할 성질에 대해 살펴보기로 한다. 우선 W/C비의 경우 가능한 한 낮을수록 강도 증진이 기대되는데 물론 여기에는 포틀랜드 시멘트의 수화작용이 진행될 수 있을 정도의 최저치는 확보되어야 한다. 여러 연구에 따르면 압축강도 420~630kg/cm²을 얻기위해 실용적으로 채택할 수 있는 W/C비의 상한선은 아래 표11와 같다.

표 11. 압축강도에 따른 물 시멘트비의 상한

압축강도 (kg/cm ²)	W/C
420	0.38
525	0.36
630	0.34

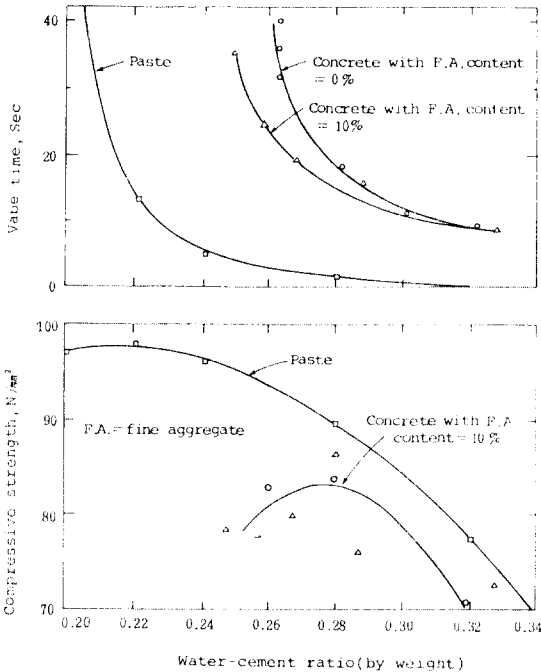


그림 5. 물 시멘트비가 콘크리트 압축강도와 작업성에 미치는 영향

물-시멘트 비가 콘크리트의 압축강도와 작업성에 미치는 영향을 아래 그림 5에 나타내었다.

첫번째 그림은 W/C비의 변화에 따른 시멘트 페이스트와 콘크리트의 작업성저하를 나타내는데 W/C비가 0.28이하로 내려가면 작업성확보에 걸리는 시간이 급증함을 보이고 있다. 이는 콘크리트 강도와의 연관이 되는데 작업성 확보에 필요한 시간이 20초를 넘어 가면 강도발현 역시 저해됨을 알 수 있다. 따라서 현장에서 수공할 만한 최소한의 작업성을 이해하는 것이 W/C비의 결정에 중요한데 배합시 작업성과 강도를 최적으로 발휘할 수 있는 W/C비를 선정해야 한다.

이상에서 살펴본 낮은 물-시멘트 비와 아울러 고강도

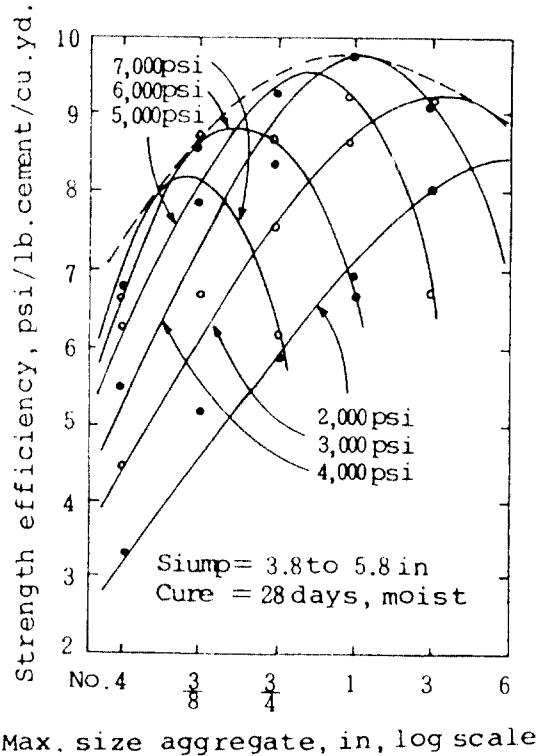


그림 6. 최대 골재치수와 시멘트 효율의 관계

콘크리트의 특성중 하나로 시멘트량이 많은 무배합을 들 수 있다. 그러나 이의 한계이상은 시멘트량의 증가에도 불구하고 강도의 증진은 없는 "임계적"인 상한선이 있다. 이러한 상한선은 배합재료, 골재종류, 최대 골재치수, 배합조건, 작업성 수준, 시멘트의 분말도, 공기인행량에 의해 영향을 받는데 이러한 인자를 조정하여 단위 시멘트량에 의한 효과를 상쇄할 수 있다.

최적 골재치수와 시멘트 효율과의 관계를 아래 그림 6에 나타내었는데 여기서 시멘트 효율이란 콘크리트 압축강도를 단위 시멘트량으로 나눈 값이다.

여러 연구를 통해 밝혀진 바로는 W/C비가 낮으면서도 적절한 작업성을 갖기 위해서는 2:1내외의 골재 시멘트비를 취하는 것이 유리하다는 것이다. 이 골재 시멘트비가 낮아질수록 동일 W/C비 아래서 강도는 감소한다. 그러나 이러한 감소는 작업성증진과 연결되므로 반드시 부정적인 것은 아니며 따라서 이 양자간의 적절한 균형을 갖도록 해야한다.

이상에서 골재량이 결정되면 다음으로 잔골재율을 정해야 하는데 이는 여러 사항을 감안하여 최소로 잡아야 한다. 왜냐하면 최대 골재치수가 이미 결정된 상태에서 잔골재율이 커질수록 요구되는 단위수량이 증가하기 때문이다. 아래 그림 7은 잔골재량이 작업성과 강도에 미치는 영향을 보인 것이다.

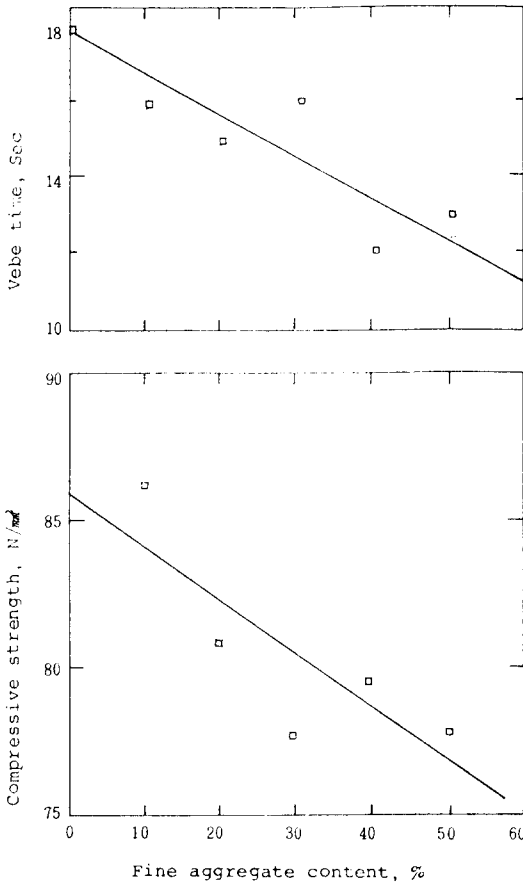


그림 7. 잔골재량이 작업성과 강도에 미치는 영향

다음으로 굵은 골재량의 결정이 필요한데 이 경우 작업성이 확보되는 한도내에서 최대한으로 잡아주어야 한다. 아래 그림 8은 굵은 골재량이 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 재령에 따라 보인 것인데 강도감소가 크지 않은 범위에서 크게 잡아주는 것이 유리하며 굵은 골재량에 의한 강도 효과는 재령이 경과함에 따라 둔화됨을 알 수 있다.

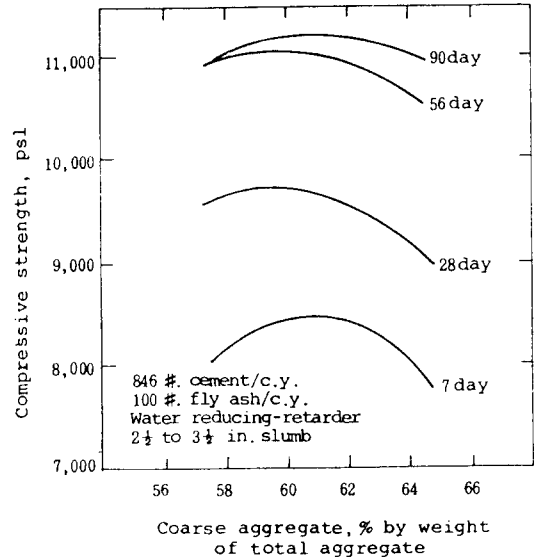


그림 8. 굵은 골재량이 콘크리트 강도에 미치는 영향

지금까지 고강도 콘크리트의 배합설계가 갖는 특징을 간략히 살펴보았는데 이는 결국 낮은 W/C와 부배합으로 인한 영향을 여하히 제어하는가로 압축된다고 볼 수 있다. 물론 이에 앞서 재료의 품질이 균질하다는 것이 전제되어야 한다. 실용적으로 사용될수 있는 고강도 콘크리트의 기준은 아직도 개발중이라고 할 수 있다. 따라서 고강도 콘크리트의 배합설계가 좀 더 안정적으로 정립되기 위해서는 이 부분에 대한 더 깊은 연구가 필요하다.

5. 결론

본 고에서는 콘크리트의 효율적인 배합설계를 위하여 콘크리트 배합설계에 영향을 미치는 외적, 내적요인을 중심으로 이들 각각의 영향과 상호작용을 살펴보았다. 또한 미국, 영국, 우리나라의 배합설계 방법을 소개하였으며 이들이 실무에 많은 도움이 되기를 기대한다. 본질적으로 콘크리트의 배합시 다음사항에 유의해야한다.

- (1) 콘크리트 구성재료는 각 용도에 맞게 선정되어야 한다. 이 단계에서 예상되는 열화를 제어할 수 있는 재료를 선정해야 한다.
- (2) 콘크리트 구성재료는 특정 성능에 초점을 맞추어

선정할 경우 그 양에 따라 부작용을 유발할 수 있으므로 이에 유의한다.

(3) 콘크리트 구성재료 상호간의 작용에 의한 복합적인 효과를 사전에 고려하여야 한다.

이와 같은 관점에서 각 용도에 맞는 최적의 배합설계를 도출해야하고 이를 위해서 구성인자 각각의 작용에 대한 연구와 아울러 상호작용에 대한 영향을 깊이 이해하는 과정이 앞으로의 과제라 할 수 있다.

이러한 연구를 통해 앞으로는 내구성이나 콘크리트 성능의 저하없이 경제적인 배합을 할 수 있으리라 기대한다.

참 고 문 헌

1. ACI Committe 211, "Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal and Heavyweight Concrete", (ACI 211.1-77), Detroit, Mic(1977)
2. ACI Committe 211, " Recommended Practice for Selecting Proporthions for No-slump Concrete"(ACI 211.3-75), J.ACI., 71, No.4, pp.153-70(1974)
3. ACI "Manual of Concrete of Practice", Part 2, (1988)
4. Cameron M., "Special Techniques for Producing High strength Concrete". J.ACI, December, pp.996-1002., (1970)
5. Gebler S.H., "Effect of Fly Ash on Physical Properties of Concrete", ACI SP 91, Vol.1.(1986)
6. Kosmatka S.H., "Design and Control of Concrete Mixtures", 3rd edition, PCA, (1988)
7. Malhotra, V.M., "Superplasticizers; Their effect on Fresh and Hardened Concrete". Concrete International, Vol.3, No.5, pp.66-81., May.(1981)
8. Neville A.M., "Properties of Concrete". 1981. Pitman Publising.
9. Teychenné D.C. et al, "Design of Normal Concrete Mixes, pp.3. Department of the Environment, London, H.M.S.O., (1975).