

콘크리트 배합설계 프로그램 개발 연구

최 재 진

The Development of a Computer Program for Concrete Mix Design

Jae Jin Choi

요약 콘크리트 배합설계의 목적은 사용 조건에 따라 요구되는 성능을 만족시키는 콘크리트를 만들기 위하여 가장 경제적이고 실용적인 재료의 혼합비율을 결정하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 배합설계에 대한 깊은 이해가 필요한데 실제로는 배합설계가 매우 어렵고 복잡한 일로 인식되어 있다. 따라서 본 연구에서는 배합설계이론을 고찰하고 비주얼 베이직으로 배합설계 프로그램을 작성함으로써 콘크리트 공학의 초보자도 이 프로그램을 이용하여 쉽게 배합설계를 할 수 있도록 하였다.

Abstract The purpose of concrete mix design is to determine the most economical and practical combination of materials in order to produce a concrete that will satisfy the performance requirements at any particular conditions of use. Mix design is regarded as a very complicated work, because for fulfilling this purpose deep understanding about the mix design is required. Mix design procedure of concrete is discussed in this study and a computer program for mix design using visual basic as language was developed. Even though beginners about concrete engineering, they can determine concrete mix proportions easily with the program.

Key Words : Concrete mix design, Computer program, Visual basic

1. 서 론

콘크리트는 주지하는 바와 같이 시멘트, 골재, 물 및 혼화재료를 기본재료로 하여 만들어지는 것으로 각종 구조물의 건설에 가장 많이 사용되는 자재로서 그의 품질은 일정하지 않으며, 경우에 따라서는 구조물의 안전상의 문제, 내구성 결여 등 심각한 결과를 초래하기도 한다.

일정한 품질의 콘크리트를 만들기 어려운 것은 콘크리트의 품질에 영향을 미치는 요인이 매우 많은 데에 있다. 다시 말해서 골재와 시멘트 및 혼화재료의 품질변동, 플랜트의 가동상태, 운반조건, 기후, 타설조건 및 양생방법 등이 모두 콘크리트의 품질에 영향을 미치는 요소들이다. 따라서 콘크리트의 품질을 일정하게 유지시키기 위해서는 이들 요인들을 고려한 콘크리트의 합리적인 배합설계와 더불어 즉시 그 결과를 배치플랜트에서 이용할 수 있는 체계의 확립이 매우 중요하다.

본 연구에서는 ACI 콘크리트 지침[1,2], 콘크리트 표준시방서[3], KS F 4009(레디믹스트 콘크리트)[4] 및 일본건축학회의 경량콘크리트 관련 지침[5]에 의한 보통 콘크리트와 경량콘크리트 및 유동화 콘크리트의 배합설

계방법에 대하여 분석하였다. 그리고 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 요인의 배합설계상의 고려방법 및 콘크리트의 배합설계 시에 적용하고 있는 물-시멘트비와 강도와와의 관계식 등을 검토하고 배치플랜트의 가동상황을 반영할 수 있는 배합설계 프로그램을 개발하였다[6]. 이 프로그램은 Visual Basic으로 작성하였으며, 일반 콘크리트의 배합설계 외에 경량콘크리트, 유동화 콘크리트 등의 배합설계가 가능하도록 하였다.

2. 콘크리트 배합설계방법에 대한 고찰

2.1. 콘크리트 배합강도의 결정

구조물에 사용될 콘크리트의 압축강도가 설계기준강도보다 작아지지 않도록 현장 콘크리트의 품질변동을 고려하여 콘크리트의 배합강도(f_{cr})를 설계기준강도(f_{ck})보다 충분히 크게 정해야 한다.

콘크리트 표준시방서(1999년 개정)에서는 현장 콘크리트의 압축강도 시험값이 설계기준강도 이하로 되는 확률은 5% 이하라야 하고 또한 압축강도 시험값이 설계기준강도의 85% 이하로 되는 확률은 0.13% 이하라야 한다고 규정하고 있다.

배합강도는 이 조건을 충족시키기 위해서 다음 두 식에 의한 값 중 큰 값을 적용하면 된다.

*천안공인대학 토목과

$$f_{cr} \geq f_{ck} + 1.645s \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$\text{또는 } f_{cr} \geq \frac{f_{ck}}{1 - \frac{1.645V}{100}} \quad (1)$$

$$f_{cr} \geq 0.85f_{ck} + 3s \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$\text{또는 } f_{cr} \geq \frac{0.85f_{ck}}{1 - \frac{3V}{100}} \quad (2)$$

여기서 s : 강도의 표준편차 (kgf/cm²)
 V : 변동계수 (%)

KS F 4009(레디믹스트 콘크리트)에서는 다음의 두 가지 규정을 만족시키는 것이어야 한다고 규정하고 있다. 즉,

- ① 1회의 시험결과는 구입자가 지정한 호칭강도 값의 85% 이상이어야 한다.
- ② 3회 시험결과의 평균치는 구입자가 지정하는 호칭강도의 값 이상이어야 한다.

이 규정을 만족시키기 위해서 배합강도는 다음 식 중 큰 값을 적용한다.

$$f_{cr} \geq 0.85f_{ck} + 3s \text{ 또는 } f_{cr} \geq \frac{0.85f_{ck}}{1 - \frac{3V}{100}} \quad (3)$$

$$f_{cr} \geq f_{ck} + \frac{3s}{\sqrt{3}} = f_{ck} + \sqrt{3}s \text{ 또는}$$

$$f_{cr} \geq \frac{f_{ck}}{1 - \frac{3V}{100\sqrt{3}}} = \frac{f_{ck}}{1 - \frac{\sqrt{3}V}{100}} \quad (4)$$

여기서,

f_{ck} : 호칭강도 값 (kgf/cm²)

앞의 식에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트의 배합강도를 구하기 위해서는 강도의 변동계수를 알고 있어야 한다. 이때 변동계수는 설계기준강도에 따라 다른 값을 적용하는 예가 많으나 같은 값을 적용하는 경우도 있을 수 있다. 그래서 이를 고려하여 배합설계 프로그램에서는 Figure 1과 같이 변동계수의 입력방법을 필요에 따라 선택하도록 하였다.

2.2. 물-시멘트비의 결정

물-시멘트비는 소요의 강도와 내구성을 고려해서 정하여야 하며, 수밀을 요하는 구조물에서는 특히 콘크리트의 수밀성에 대해서도 고려해야 한다.

2.2.1. 콘크리트의 압축강도를 기준으로 물-시멘트비를 정하는 경우

콘크리트의 압축강도를 기준으로 하여 물-시멘트비

를 정할 경우 압축강도와 물-시멘트비와의 관계는 시험에 의하여 정하는 것이 원칙이다. 그러나 콘크리트 표준시방서는 구조물이 소규모이거나 높은 강도를 필요로 하지 않는 공사 등에서는 시험을 하지 않을 경우 혼화제를 쓰지 않고 보통포틀랜드시멘트로 만드는 콘크리트에 한하여 다음의 물-시멘트비와 제령 28일 압축강도(f_{28})의 관계식으로 구한 물-시멘트비 중 작은 값을 사용해도 좋다고 하고 있다.

$$W/C = \frac{215}{f_{28} + 210} \text{ 또는 } f_{28} = -210 + 215C/W \quad (5)$$

$$W/C = \frac{61}{f_{28}/K + 0.34} (\%) \quad (6)$$

여기서, K : KS L 5105에 따라 시험한 제령 28일의 시멘트 강도(kgf/cm²)

식(5)는 종래에 토목분야에서 작은 규모로서 큰 강도를 필요로 하지 않는 공사 등에서 시험을 하지 않을 경우 물-시멘트비를 구할 때 사용한 식으로 보통포틀랜드시멘트를 쓰고 혼화제를 쓰지 않는 보통콘크리트에 적용하였다. 그런데 이 식은 품질관리가 만족스럽지 못한 곳에서의 시험결과까지를 포함하여 거의 최저선을 나타낸 것이기 때문에 경제적이지 못하다. 식(6)은 현재 건축분야와 레미콘 공장 등에서 물-시멘트비를 구할 때 널리 사용하고 있는 식으로 이 식은 당초 일본건축학회에서 제안한 것이었으나, 현재 동 학회에서는 물-시멘트비를 구하는 식으로 다시 식(7)을 제안하고 있다.

$$W/C = \frac{71}{f_{28}/K + 0.43} (\%) \quad (7)$$

한편 시멘트 강도(이하 시멘트 K강도라 함)의 시험에 있어서, 시멘트와 골반을 혼합한 시험은 공시체 제작상의 어려움과 시험결과와 산포가 크기 때문에 각국마다 일정한 기준의 모래를 사용한 모르타 시험을 규정하고 있다.

시멘트의 품질평가를 위한 자국의 대표적인 시험방법을 나타내면 Table 1과 같으며, BS 4550 : 1978과 같이 콘크리트에 의한 시험방법을 규정한 경우도 있다.

이 표에서 알 수 있는 바와 같이 시멘트 강도를 결정하는 방법이 나라마다 다르며, 일본과 우리나라는 모르타의 배합비등 상당한 차이가 있다. 따라서 일본에서 제안된 식(6)이나 식(7)을 우리나라에서 그대로 적용하는 것은 상당한 문제가 있다.

배합설계 프로그램에서는 시멘트 K강도가 포함되지 않는 1차식을 사용하여 물-시멘트비를 구하는 것을 기본으로 하였으나, KS F 4009를 적용하는 레미콘의 경우는 업계의 실정을 고려하여 시멘트 K강도를 사용한 물-시멘트비의 계산이 가능하도록 하였다(Figure 2~Figure 4 참조).

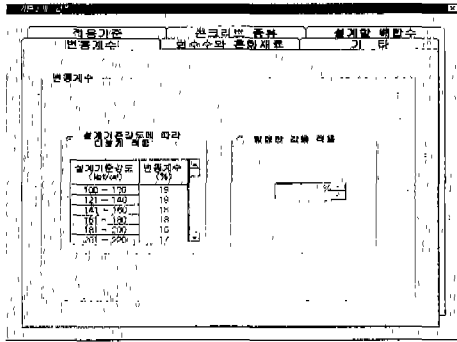


Figure 1. 변동계수 입력.

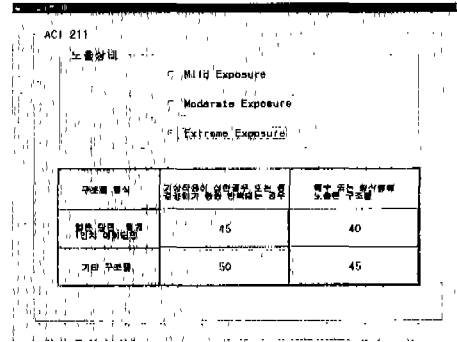


Figure 5. ACI 콘크리트 지침에 따라 내구성을 고려한 배합설계를 할 때의 최대 물-시멘트비의 선택.

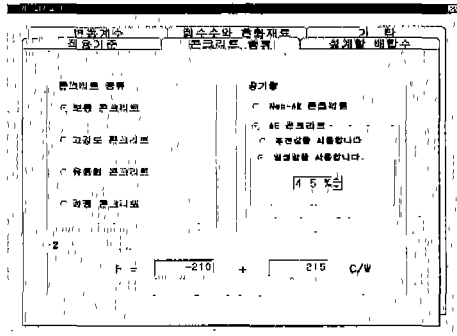


Figure 2. 시멘트 K강도를 사용하지 않고 물-시멘트비를 구할 때의 계수값 입력.

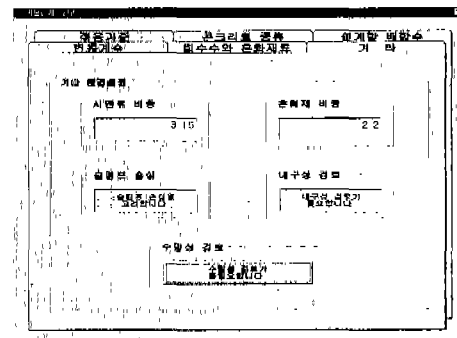


Figure 6. 내구성과 수밀성 등의 고려여부 선택.

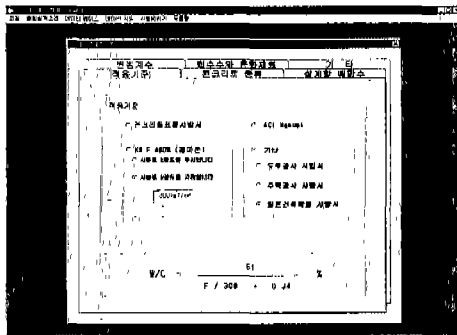


Figure 3. 시멘트 K강도의 입력.

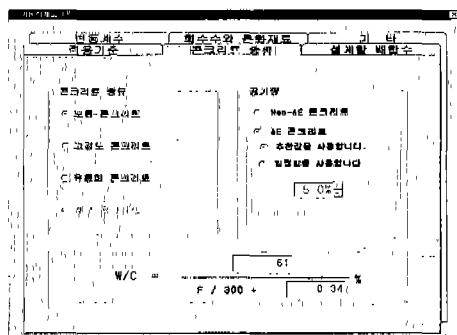


Figure 4. 시멘트 K강도 사용시의 계수값 입력.

2.2.2. 내구성을 고려하여 물-시멘트비를 정하는 경우
 콘크리트의 내구성을 증가시키기 위해서 물-시멘트비는 가능한 작게 하는 것이 좋다. 또 AE콘크리트는 기상작용에 대한 내구성이 우수하므로 기상작용이 심한 경우에는 AE콘크리트를 사용하는 것이 원칙이다. 콘크리트의 내내용성을 기준으로 하여 물-시멘트비를 정할 경우에는 Table 2의 값 이하의 물-시멘트비를 사용하도록 콘크리트 표준시방서에 규정하고 있다. 또한 황산염을 포함한 흙이나 물에 접하는 콘크리트, 融氷劑의 사용이 예상되는 곳의 콘크리트, 해양 콘크리트, 포장 콘크리트 및 맨 콘크리트에 대해서는 물-시멘트비의 최대치에 대한 별도의 규정이 있다. 한편 ACI 콘크리트 지침에서는 가혹한 환경 하에서 Table 3의 물-시멘트비를 넘지 않도록 규정하고 있다.

예로서 Figure 5는 ACI 콘크리트 지침에 따르는 경우, 내구성을 고려할 때 최대 물-시멘트비를 선정하기 위한 프로그램의 화면으로 Extreme Exposure의 노출 상태에서만 물-시멘트비의 선택이 가능하도록 하였다.

경량콘크리트의 경우는 일본건축학회에서 제안한 「경량콘크리트 조합설계 시공 지침안」 [5]을 적용하여 배합설계 프로그램을 작성하였으며, 이 지침에서도 내

Table 1. 시멘트 K강도의 표준시험방법[7~10]

	배 합	공시체 및 양생방법	비 고
한국 (KS L 5105 : 1987)	시멘트 : 표준사 = 1 : 2.45 물-시멘트비 = 48.5% (개정 전에는 110~115가 되는 수량 사용)	i) 공시체 : 50 mm 입방체 ii) 양생 : 23±2 °C의 수중 양생	다만 포틀랜드시멘트가 아닌 다른 시멘트는 흐름값 105~115가 되는 몰량 사용
미국 (ASTM C 109-95)	시멘트 : 표준사 = 1 : 2.75 물-시멘트비 = 48.5%		
일본 (JIS R 5201)	시멘트 : 표준사 = 1 : 2 물-시멘트비 = 65%	i) 공시체 : 4×4×16 cm 각주 공시체를 먼저 휜시험을 한 다음 그 절편으로 압축시험을 한다. ii) 양생 : 20±1 °C의 수중 양생	
유럽연합 (European Standard EN 196-1 : 1987)	시멘트 : 표준사 = 1 : 3 (표준사 입도범위 : 80 μm~1.6 mm) 물-시멘트비 = 50%		

주) 시멘트 강도시험에 사용하는 표준사로는, KS에서는 주판진 향오리산 표준사골, JIS에서는 豊浦標準砂骨, ASTM에서는 Ottawa sand를, BS에서는 Leighton Buzzard sand를 각각 규정하고 있다.

Table 2. 내동해성을 기준으로 하는 경우의 AE콘크리트의 최대 물-시멘트비 (%) (콘크리트 표준시방서)

구조물의 노출상태	기상 조건	기상작용이 심한 경우 동결융해가 종종 반복되는 경우		기상작용이 심하지 않은 경우, 빙점 이하의 기온으로 되는 일이 드문 경우		
		단면	얇은 경우	보통의 경우	얇은 경우	보통의 경우
① 계속해서 또는 종종 물로 포화되는 부분			50	55	50	60
② 보통의 노출상태에 있으며 ①에 해당되지 않는 경우			55	60	55	60

Table 3. Extreme Exposure에서 AE콘크리트의 최대 물-시멘트비 (ACI 콘크리트 지침)

구조물 종류	계속적으로 또는 종종 습윤상태에 있으며, 동결융해를 받는 구조물	바다물 또는 황산에 노출된 구조물
얇은 부재 또는 피복두께가 25 mm이하인 부재	0.45	0.40
위에 속하지 않는 구조물	0.50	0.45 ^U

주 1) : 내황산염 포틀랜드시멘트를 사용할 경우는 이 값을 0.05 증가시킬 수 있다.

구성을 기준으로 물-시멘트비를 정하는 경우 그 값의 최대치에 대한 규정을 두고 있다.

2.2.3. 수밀성을 고려하여 물-시멘트비를 정하는 경우 물-시멘트비가 55~60% 이상이 되면 다지기 및 양생을 충분히 한 콘크리트라도 수밀성은 감소한다. 또 일반적으로 물-시멘트비가 큰 콘크리트는 재료분리의 경향이 크고 쳐 넣은 콘크리트에 결함이 생기기 쉽다. 그래서 콘크리트 표준시방서에서는 수밀성이 요구되는 경우

55%이하의 물-시멘트비를 표준으로 하고 있다.

배합설계 프로그램에서는 내구성과 수밀성의 검토여부를 묻고 검토가 필요할 경우 물-시멘트비의 최대값을 메뉴 상에서 선택하도록 하였다(Figure 6 참조).

2.3. 단위수량의 결정

단위수량은 작업이 가능한 범위 내에서 될 수 있는 대로 적게 되도록 정해야 하며, 그 값은 굵은골재의 최대치수, 골재의 입도와 입형, 혼화재료의 종류, 콘크리

트의 공기량 등에 따라 다르므로 사용되는 재료에 관해서 시험을 실시하여 정하는 것이 원칙이다.

2.3.1. ACI 콘크리트 지침

ACI 콘크리트 지침은 보통 콘크리트에 대한 단위수량의 대략값으로 Table 4의 값을 제시하고 있다. 배합설계 프로그램에 이용하기 위하여 이 표를 수식화하였는데, 그 예로 Figure 7은 Non-AE콘크리트의 단위수량을 나타내는 식과 그림을 보인 것이다.

2.3.2. 콘크리트 표준시방서

콘크리트 표준시방서에서는 단위수량과 잔골재율의 대략값으로 Table 5를 제시하고 있다.

Table 5로부터 굵은골재 최대치수(Gmax, mm)에 따라 단위수량(W, kg/m³)을 나타내는 식을 구하면 다음 식과 같다.

$$\text{Non-AE콘크리트} : W = 152.9521 + 75.9433 \times \text{Exp}(-0.0466 \times G_{\text{max}}) \quad (8)$$

AE콘크리트 (양질의 AE감수제를 사용한 경우)

$$: W = 152.3843 + 57.595 \times \text{Exp}(-0.07831 \times G_{\text{max}}) \quad (9)$$

배합설계 프로그램에서는 조건변화에 따른 단위수량의 보정방법으로 Table 6을 적용하였다. 또한 Table 4와 Table 5의 단위수량이 콘크리트 온도 23 ℃를 기준값으로 보고 콘크리트 온도에 따른 보정이 가능하도록 하였다. 이때 콘크리트의 온도가 10 ℃ 변화하면 같은 반죽질기를 얻기 위하여 소요되는 단위수량이 5 kg 정도 차이가 생기는 것으로 보았다.

2.3.3. 경량콘크리트

일본건축학회의 「경량콘크리트 조합설계·시공 지침안」은 경량콘크리트의 단위수량의 표준값으로 Table 7을 제시하고 있다.

Table 7에 대한 보정방법으로 굵은골재 최대치수가 20 mm인 경우는 단위수량을 1%적게 하며 잔골재의 조립률이 3.3 또는 2.2 인 경우는 조립률 2.8의 경우에 비하여 단위수량을 2%적게 또는 많게 하도록 추천되고 있다. Table 7에서 한 예로 보통잔골재와 인공경량굵은골재를 사용하는 경우의 단위수량을 그림과 수식으로 나타낸 것이 Figure 8이다.

2.4. 잔골재율 또는 단위굵은골재 부피의 결정

잔골재율은 소요의 워커빌리티를 얻을 수 있는 범위 내에서 단위수량이 최소가 되도록 정해야 하며 공사 중에 잔골재의 입도가 변화하여 조립률이 0.20이상 차이가 있을 경우에는 소요의 워커빌리티를 가지는 콘크리트를 얻을 수 있도록 잔골재율이나 단위수량을 변경해

Table 7. AE제를 사용하는 경우 보통포틀랜드시멘트를 사용한 경량콘크리트의 단위수량의 표준값 (kg/m³)

물-시멘트비 (%)	슬럼프 (cm)	경량콘크리트	
		보통잔골재 +인공경량굵은골재	인공경량잔골재 ¹⁾ +인공경량굵은골재
40	8	168	166
	12	175	171
	15	181	175
	18	189	181
	21	200	190
45	8	166	164
	12	172	168
	15	178	172
	18	186	178
	21	197	187
55~65	8	164	162
	12	169	165
	15	173	169
	18	183	175
	21	193	183

주1) 인공경량잔골재에 보통잔골재를 가한 것도 포함된다. 굵은골재 최대치수는 15 mm, 잔골재의 조립률은 2.8을 기준한 값이다.

야 한다. 유동화콘크리트의 경우에는 슬럼프 증대량을 고려하여 잔골재율을 결정해야 한다.

2.4.1. 콘크리트 표준시방서

Table 5의 배합설계를 위한 참고표로부터 굵은골재의 최대치수에 따른 잔골재율의 관계는 다음과 같다. 즉,

$$\text{Non-AE콘크리트} : S/a(\%) = 32.5822 + 43.0520 \times \text{Exp}(-0.06377 \times G_{\text{max}}) \quad (10)$$

AE콘크리트(양질의 AE감수제를 사용한 경우)

$$: S/a(\%) = 38.6114 + 29.4888 \times \text{Exp}(-0.07634 \times G_{\text{max}}) \quad (11)$$

배합설계 프로그램에서는 조건변화에 따른 잔골재율의 보정방법으로 Table 6을 적용하였다.

2.4.2. ACI 콘크리트 지침

ACI 콘크리트 지침에서는 Table 8에 나타난 바와 같이 잔골재율 대신에 콘크리트 단위부피당의 굵은골재 부피에 의해 골재량을 계산하도록 하고 있다.

이 표에서 잔골재의 조립률이 2.80일 때의 콘크리트 단위부피당 굵은골재의 부피(Vg)를 나타내는 식을 구하면 다음과 같다.

$$Vg = 0.6166 (1 - \text{Exp}(-0.1308 \times G_{\text{max}})) + 0.2406 (1 - \text{Exp}(-0.0147 \times G_{\text{max}})) \quad (12)$$

Table 4. 콘크리트 단위수량의 대략값

슬럼프(mm)	굵은골재 최대치수에 따른 단위수량 (kg/m ³)							
	9.5 ¹⁾	12.5 ¹⁾	19 ¹⁾	25 ¹⁾	37.5 ¹⁾	50 ¹⁾²⁾	75 ²⁾	150 ²⁾
Non-AE콘크리트								
25 ~ 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 ~ 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 ~ 175	243	228	216	202	190	178	160	-
간헐 공기량(%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
AE콘크리트								
25 ~ 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 ~ 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 ~ 175	216	205	197	184	174	166	154	-
전체 공기량(%)								
Mild exposure	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Moderate exposure	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Extreme exposure	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

주1) AE콘크리트에서 단위수량은 Moderate exposure 상태를 기준으로 한 값이다. 굵은골재는 부순돌을 기준으로 하였으며, 강자갈을 사용하는 경우는 단위수량을 Non-AE콘크리트에서 18 kg 적게, AE콘크리트에서 15 kg 적게 한다. 용도는 20~25 °C류 기준으로 한다.
 주2) 40 mm 이상의 골재를 포함한 콘크리트는 슬럼프 측정 시 이철 제거한 후 측정한다.

Table 5. 콘크리트의 단위굵은골재용적, 잔골재율, 단위수량의 대략값

굵은골재의 최대치수 (mm)	단위굵은골재용적 (%)	AE제를 사용하지 않은 콘크리트			AE콘크리트				
		간헐공기 (%)	잔골재율 S/a (%)	단위수량 W (kg)	공기량 (%)	양질의 AE제를 사용한 경우		양질의 AE감수제를 사용한 경우	
						잔골재율 S/a (%)	단위수량 W (kg)	잔골재율 S/a (%)	단위수량 W (kg)
15	58	2.5	49	190	7.0	47	180	48	170
20	62	2.0	45	185	6.0	44	175	45	165
25	67	1.5	41	175	5.0	42	170	43	160
40	72	1.2	36	165	4.5	39	165	40	155

주) 이 표의 값은 골재로서 보링 입도의 모래(조립률 2.80정도) 및 자갈을 사용한 물-시멘트비 55%정도, 슬럼프 약 8 cm의 콘크리트에 대한 것이다. 사용재료 또는 콘크리트의 품질이 이 조건과 다를 경우에는 Table 6과 같이 보정한다.

Table 6. 배합보정방법

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

주) 단위굵은골재용적에 의하는 경우에는 모래의 조립률이 0.1만큼 늘(작을) 때마다 단위굵은골재용적을 1%만큼 작게(크게) 한다.

Table 8. 콘크리트 단위굵은골재의 부피

굵은골재 최대치수(mm)	잔골재 조립률에 따른 건조한 굵은골재의 부피			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Table 9. 굵지 않은 콘크리트의 단위중량 추정값

굵은골재 최대치수 (mm)	콘크리트 단위중량 추정값(kg/m ³)	
	Non-AE콘크리트	AE콘크리트
9.5	2280	2200
12.5	2310	2230
19	2345	2275
25	2380	2290
37.5	2410	2350
50	2445	2365
75	2490	2405
150	2530	2435

한편 굵지 않은 콘크리트의 단위중량 추정값 (Cw, kg/m³)은 Table 9가 제시되어 있으며 이를 식으로 나타낸 것이 식(13)과 식(14)이다.

$$\text{Non-AE콘크리트} : Cw = 2218.1512 + 316.3533(1 - \text{Exp}(-0.0262 \times G_{\text{max}})) \quad (13)$$

$$\text{AE콘크리트} : Cw = 2117.7088 + 316.7564 (1 - \text{Exp}(-0.0338 \times G_{\text{max}})) \quad (14)$$

2.4.3. 경량콘크리트

일본건축학회의 「경량콘크리트 조합설계·시공지침안」은 경량콘크리트에 보통포틀랜드시멘트를 사용하는 경우의 단위굵은골재 겹보기 부피의 표준값으로 Table 10을 제시하고 있다.

Table 10의 보정방법으로, 굵은골재 최대치수 20 mm의 골재를 사용하는 경우는 굵은골재 최대치수가 15 mm인 경우에 비하여 단위굵은골재 겹보기 부피를 4% 크게 한다. 잔골재의 조립률이 3.3 또는 2.2인 경우는 조립률 2.8의 경우에 비하여 단위굵은골재 겹보기 부피를 8% 적게 또는 많게 한다.

Table 10. 단위굵은골재 겹보기 부피의 표준값(AE제를 사용하는 경우)

물-시멘트 비 (%)	슬럼프 (cm)	단위굵은골재 겹보기부피	
		보통잔골재 + 인공경량굵은골재	인공경량잔골재 ¹⁾ + 인공경량굵은골재
40	8	0.63	0.62
	12	0.61	0.61
	15	0.59	0.59
	18	0.56	0.56
	21	0.53	0.53
45	8	0.63	0.62
	12	0.61	0.60
	15	0.59	0.59
	18	0.56	0.56
	21	0.53	0.53
65	8	0.60	0.60
	12	0.59	0.58
	15	0.57	0.56
	18	0.54	0.54
	21	0.50	0.50

주 1) 인공경량잔골재에 보통잔골재를 가한 것도 포함된다. 굵은골재 최대치수 15 mm, 잔골재의 조립률 2.8에 대한 값이다.

한편 AE감수제를 사용하는 경우는 잔골재율을 2% 정도 작게 하는 것이 좋다고 하며, 이것은 단위굵은골재 겹보기 부피로 환산하면 0.005~0.012 m³/m³ 크게 하는 결과가 된다.

단위굵은골재 겹보기 부피를 구하는 방법으로 활용하기 위하여 Table 10을 그림 및 수식으로 나타낸 예가 Figure 9이다.

한편 시방배합에 기초한 기건단위중량의 추정치(Wd)로서 다음 식을 제시하고 있다.

$$Wd = G_o + S_o + S_o' + 1.25C_o + 120 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (15)$$

여기서

G_o : 시방배합에서의 굵은골재량 (절대건조상태) (kg/m³)

S_o : 시방배합에서의 경량잔골재량 (절대건조상태) (kg/m³)

S_{o'} : 시방배합에서의 보통잔골재량 (절대건조상태) (kg/m³)

C_o : 시방배합에서의 시멘트량 (kg/m³)

한편 Figure 10과 Figure 11은 배합설계 프로그램에서의 골재의 물성값을 입력하는 화면을 보인 것이다. 경량콘크리트의 경우는 잔골재로서 보통잔골재와 인공경량잔골재를 혼합 사용할 때 그의 혼합비율 및 각각의 물성값을 입력하도록 하였다.

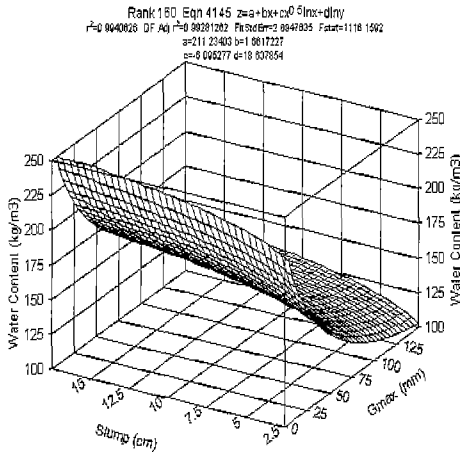


Figure 7. Non-AE콘크리트의 단위수량(ACI 콘크리트 지침).

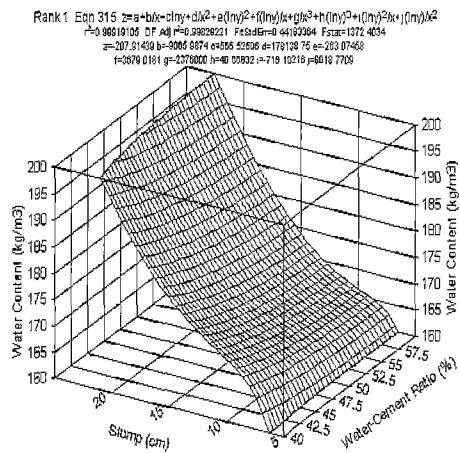


Figure 8. 경량콘크리트의 단위수량(보통잔골재와 인공경량굵은골재를 사용하는 경우).

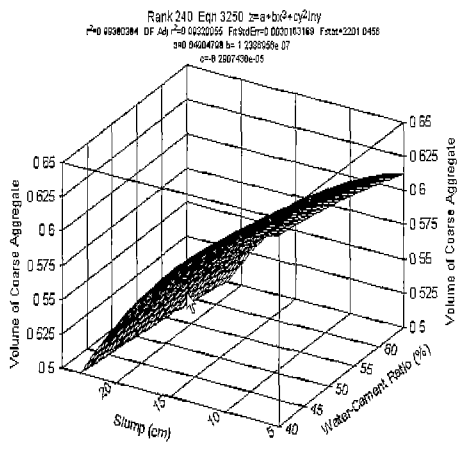


Figure 9. 보통잔골재와 인공경량굵은골재를 사용한 경량 콘크리트의 단위굵은골재 결보기부피.

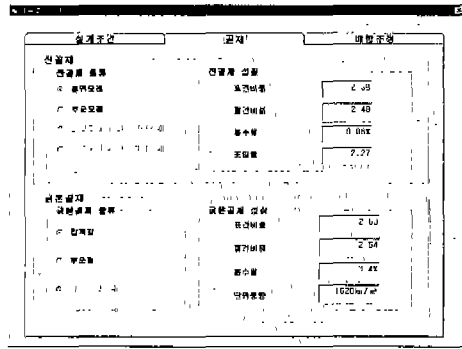


Figure 10. 보통콘크리트의 골재 물성값 입력.

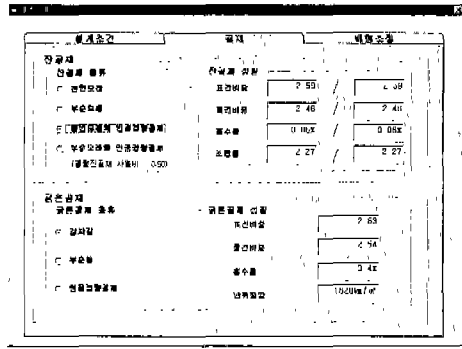


Figure 11. 경량콘크리트의 골재 물성값 입력.

2.5. 공기량 결정

콘크리트 표준시방서는 Table 5의 배합설계 참고표에서 나타난 바와 같이 굵은골재최대치수에 따라 AE콘크리트의 공기량 추천값을 제시하고 있으며, ACI 콘크리트 지침에서는 Table 4에 나타난 값을 추천하고 있다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

2.5.1. 콘크리트 표준시방서

Non-AE콘크리트 : $Air(\%) = 1.0830 + 7.1856 \text{ Exp}(-0.1073 G_{max})$ (16)

AE콘크리트 : $Air(\%) = 4.3058 + 15.5781 \text{ Exp}(-0.1160 G_{max})$ (17)

2.5.2. ACI 콘크리트 지침

Non-AE콘크리트 : $Air(\%) = 0.1743 + 4.3437 \text{ Exp}(-0.047 G_{max})$ (18)

AE콘크리트(Mild exposure) : $Air(\%) = 0.9983 + 4.5255 \text{ Exp}(-0.0306 G_{max})$ (19)

AE콘크리트(Moderate exposure) : $Air(\%) = 3.0180 + 3.6016 \text{ Exp}(-0.0280 G_{max})$ (20)

AE콘크리트(Extreme exposure) : $Air(\%) = 4.0633 + 4.4080 \text{Exp}(-0.0329 G_{max})$ (21)

한편 레미콘에 관한 한국산업규격 (KS F 4009)에서 공기량은 표준품의 경우 보통콘크리트 4.5%를, 경량콘크리트는 5.0%를 규정하고 있다. 따라서 배합설계 프로그램은 Figure 4에 보인 바와 같이 각 시방서가 추천한 공기량과 더불어, 특별히 지정한 공기량 값도 입력하는 것이 가능하도록 하였다.

2.6. 기타 고려 사항

2.6.1. 슬럼프 손실

운반에 따른 슬럼프의 저하는 사용하는 골재의 품질, 슬럼프값, 기온, 혼화제의 종류, 운반시간 등에 따라 다르며 특히 기온이 높은 경우 슬럼프의 저하가 크다. 운반시간에 따른 슬럼프 저하량(Y)의 추정식으로 다음 식이 제안되어 있다[11].

$Y(\text{cm}) = 0.001X_1X_2 - 0.0006X_1X_3 + 0.02X_1X_4 + 0.03X_1 - 0.95$ (22)

여기서

X_1 : 운반시간 (분)

X_2 : 콘크리트 온도 (°C)

X_3 : 혼합직후의 슬럼프 (cm)

X_4 : 혼화제 사용유무 (사용한 경우 : 1, 사용하지 않은 경우 : 0)

배합설계 프로그램에서는 사용자가 슬럼프 손실을 고려할지의 여부를 선택하도록 하고, 슬럼프 손실을 고려하는 경우 식(22)를 적용하도록 하였다.

2.6.2. 회수수

회수수(回收水)는 애지테이터 드럼에 남아있는 잔유물 또는 배치 플랜트의 믹서 세척시에 생기는 배수에서 골재를 제거한 것으로 상정수와, 슬러지를 포함한 슬러지수로 구성된다. 일반적으로 단위시멘트량에 대한 슬러지 고형분 중량의 비율(슬러지 고형분율)이 1% 미만인 경우에는 보정을 할 필요가 없으며 슬러지 고형분율이 3% 이상인 경우는 사용하지 않아야 한다.

Table 11. 슬러지 고형분율 2%에 대한 배합보정방법[12]

콘크리트의 종류	보통, 경량콘크리트	
	8cm 이하	9cm 이상
지정 슬럼프	8cm 이하	9cm 이상
단위수량	+ 3%	+ 2%
잔골재율	- 1%	- 1%
AE제 사용량	+ 15%	+ 15%
물-시멘트비	수정전과 동일	수정전과 동일

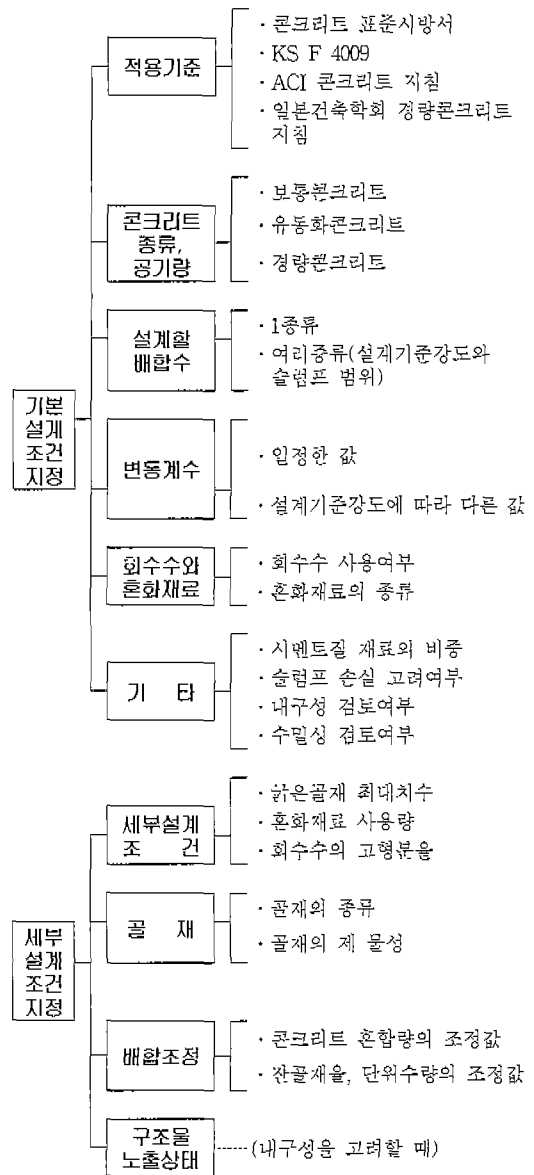


Figure 12. 배합설계조건 입력내용.

The screenshot shows a detailed output table with columns for material names and their respective quantities. The table includes data for cement, water, admixtures, and aggregates, along with calculated values for various parameters.

Figure 13. 배합설계 프로그램의 실행결과의 예.

회수수 사용시의 배합보정에 대하여 일본의 전국레미콘공업조합연합회는 Table 11과 같이 지도하고 있는데 배합설계 프로그램에서도 이것을 적용하였다.

3. 배합설계 프로그램의 구성 및 실행 예

본 연구결과로서 얻어진 배합설계 프로그램은 Visual Basic 5.0으로 작성하였으며, 한국소프트웨어 진흥원에 등록하였다.(프로그램 등록번호 : 99-01-12-2365)

이 프로그램은 Windows 95 및 98에서 작동되며, 초기화면으로 파일, 배합설계조건, 데이터 베이스, 데이터 시트, 시험 비비기 및 도움말 메뉴로 구성된다. 배합설계조건은 기본설계조건, 세부설계조건, 구조물 노출상태로 구분하여 Figure 12의 내용을 포함하도록 하였다. 이때 세부설계조건에서 배합조정이란 콘크리트의 부피 부족 또는 시방서에 제시된 단위수량 및 잔골재율이 시공현장의 실결과 잘 맞지 않는 경우 인위적으로 그의 조정이 가능하도록 한 것이다.

Figure 13은 콘크리트 배합설계 프로그램의 실행결과 예이다. 이것은 여러 종류의 배합을 계산한 것으로 그림의 좌측은 설계조건을, 우측 상단은 시방배합 그리고 우측 하단은 현장배합을 나타낸다.

4. 결 론

본문에서 관련 규격 및 시방서를 분석 검토하고 이를 이용하여 실무에서 쉽게 활용할 수 있는 콘크리트 배합설계 프로그램을 작성하였다. 그러나 이 프로그램을 사용하기에 앞서 사전에 파악하고 있어야 할 사항이 몇 가지 있다. 그것은 콘크리트의 물-시멘트비와 강도와의 관계식, 시멘트 K강도가 콘크리트 강도에 미치는 영향 그리고 콘크리트 강도의 품질변동에 대한 정확한 데이터의 확보가 무엇보다 중요하다.

국내에서는 이들 자료를 확보하기 위한 본격적인 검토가 이루어진 일이 없기 때문에 앞으로 이들에 대한

면밀한 검토가 시급히 요구되는 실정이다. 또한 이를 위해서는 방대한 양의 실험에 의해 신뢰성을 확보하는 것이 필요하므로 콘크리트 관련 기관이 참여하여 공동실험을 실시하는 것이 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] ACI, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", ACI 211.1-91, ACI Manual of Concrete Practice, 1994.
- [2] ACI, "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete", ACI 211.2-91, ACI Manual of Concrete Practice, 1994.
- [3] 건설교통부, 콘크리트 표준시방서, 1999.
- [4] KS F 4009(레디믹스트 콘크리트), 1997.
- [5] 日本建築學會, "輕量コンクリート調合設計・施工指針案・同解説", 技報堂, 2月, 1978.
- [6] 한국소프트웨어 진흥원(프로그램 등록번호 : 99-01-12-2365)
- [7] KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법), 1992.
- [8] ASTM C 109(Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar), 1995.
- [9] 長瀬重義外, "新體系土木工學28-コンクリート材料", 技報堂, p.54, 2月, 1980.
- [10] A. M. Neville, "Properties of Concrete (4th Edition)", Longman, pp.53-56, 1996.
- [11] 문한영, 최재진, "레디믹스트 콘크리트의 슬럼프 손실량의 추정 및 슬럼프 손실에 영향을 미치는 요인분석", 대한토목학회 논문집, 제 6권 2호, pp.23-34, 6월, 1986.
- [12] 고려산업개발(주)역, "레디믹스콘크리트 제조와 품질관리", 원기술, p.39, 7월, 1994.