

## 최대 밀도 이론을 이용한 고성능콘크리트의 배합 설계

이승한<sup>1)\*</sup> · 정용욱<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>계명대학교 토목공학과

### Mix Design of High Performance Concrete Using Maximum Density Theory

Seung-Han Lee<sup>1)\*</sup> and Yong-Wook Jung<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

**ABSTRACT** In recent years the field application of high performance concrete has been increased to improve the quality and reliability of concrete structures. The mix design of the high performance concrete includes the 2 set-off mixture theory of mortar and coarse aggregate and that of paste and aggregate. The 2 set-off mixture theory of mortar and coarse aggregate has a problem of having to determine its value through repeated experiments in applying the rheological characteristics of mortar. The 2 set-off mixture theory of paste and aggregate has never been applied to high performance concrete since it doesn't take into account the relationship between optimum fine aggregate ratio and unit volume of powder nor does it consider the critical aggregate volume ratio. As the mixture theory of these high performance concretes, unlike that of general concrete, focuses on flowability and chargeability, it does not consider intensity features in mix design also, the unit quantity of the materials used is determined by trial and error method in the same way as general concrete. This study is designed to reduce the frequency of trial and error by accurately calculating the optimum fine aggregate ratio, which makes it possible to minimize the aperture of aggregate in use by introducing the maximum density theory to the mix design of high performance concrete. Also, it is intended to propose a simple and reasonable mix design for high performance concrete meeting the requirements for both intensity and flowability. The mix design proposed in this study may reduce trial and error and conveniently produce high performance concrete which has self-chargeability by using more than the minimum unit volume of powder and optimum fine aggregate with minimum porosity.

**Keywords :** maximum density theory, high performance concrete, mix design, minimum porosity, critical aggregate volume ratio

#### 1. 서 론

최근 콘크리트의 품질 향상 및 구조물의 신뢰성을 향상시키기 위한 방안으로 고성능콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행<sup>1,2)</sup>되고 있다. 고성능콘크리트는 콘크리트의 고강도화 이외에 고유동화에 따른 시공성 향상과 품질 향상으로 인한 내구성 향상을 도모하는 것으로, 고성능 감수제로 유동성을 확보하고, 재료 분리 저항성의 증진 방안에 따라 증점 체계, 결합 체계 및 병용계로 구분<sup>3)</sup>된다.

고성능콘크리트는 접근 방법에 있어서 미국, 유럽 및 캐나다 등지의 구미에서는 물-결합재비 40% 이하의 고내구성을 갖는 고강도콘크리트를 제조하여 콘크리트의 미세구조를 치밀화시키고 이에 따라 고내구성을 달성하려는 방향으로 연구<sup>4,5)</sup>되고 있다. 반면 일본 및 국내에서는 고유동성에 초점을 맞춘 다짐이 필요 없는 초유동콘크리트로서 강도와 내구성을 확보하려는 방향으로 연구<sup>6,8)</sup>되어 지고 있다.

이들 연구는 대부분이 유동성에 바탕을 둔 실험적 연구로 굵은골재의 분산 정도를 요인으로 하는 모르타르-굵은골재 2상계 배합 이론<sup>9)</sup>과 잉여 페이스트로 유동성과 충전성을 확보하는 페이스트-골재 2상계 배합 이론<sup>10)</sup>을 따르고 있다. 그러나 모르타르-굵은골재 2상계를 바탕으로 한 실험적 연구는 잔골재의 영향이 고려되지 않고, 굵은골재의 단위 용적을 20 mm 쇄석의 경우 0.285-0.325 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 정도로 제한하고 있어 일반콘크리트에 비해 굵은골재 단위 용적이 작게 평가되고 있으며, 모르타르의 레올로지 특성을 부여함에 있어 반복적인 실험을 통해서 그 값을 결정해야 하는 문제점<sup>11)</sup>을 가지고 있다. 또한, 콘크리트의 유동성, 재료 분리 저항성, Plasticity 등의 성질 및 경화 후의 콘크리트 성질이 시멘트페이스트의 성질에 의해 결정된다고 보는 페이스트-골재의 2상계 배합 이론<sup>10)</sup>은 최적 잔골재율과 단위결합재량과의 관계 및 콘크리트의 충전성을 확보할 수 있는 한계 골재 용적비 등이 정의되어 있지 않아 고성능콘크리트에의 적용 예가 없는 실정이다.

또한 이들 고성능콘크리트의 배합 설계 이론은 일반콘크리트와는 달리 유동성 및 충전성에 중점을 두고 있으

\*Corresponding author E-mail : lsh@kmu.ac.kr  
Received April 24, 2007, Accepted May 30, 2007  
©2007 by Korea Concrete Institute

며, 유동성 및 충전성 확보를 위해 사용되는 결합재량의 증가에 의해 고강도는 자연스럽게 달성된다는 전제를 두고 배합 설계에서 강도 특성을 고려하지 않고 있다. 대신 강도 특성을 증점 제제, 결합 재제 및 병용제 등 제조 방법을 달리하여 고려하고 있다. 또한 고성능콘크리트의 배합 설계에서도 사용 재료의 단위량은 일반콘크리트와 같이 시행착오법으로 결정하고 있다. 이러한 배합 설계법은 사용 재료의 변동과 배합 조건, 배합 설계자 등의 차이에 의해 변동 요인이 많이 발생되므로 바람직한 배합 설계법이 아니라고 사료된다.

따라서 본 연구에서는 고성능콘크리트의 배합 설계에 최대 밀도 이론을 도입하여 사용 골재의 공극이 최소가 되는 잔골재를 산정으로 배합 설계시 시행 착오를 줄이고자 하였으며, 물-결합제 산정에 있어 강도를 고려하고 최소 단위 결합재량의 결정 등으로 강도와 유동성을 동시에 배합 설계에 고려하여 합리적이며 간편한 고성능콘크리트의 배합 설계법을 제안하고자 하였다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용 재료 특성

#### 2.1.1 결합재

실험에 사용한 시멘트는 A사의 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였으며, 플라이애쉬(FA)는 분말도 3,024 cm<sup>2</sup>/g인 충남 보령산으로 정제한 것을 사용하였다. 또한 쇠석분(CS)은 경북 고령산으로 분말도 5,503 cm<sup>2</sup>/g인 것을 사용하였다. 이들 사용 결합재의 물리·화학적 성질을 Table 1에 나타내었다.

#### 2.1.2 골재

잔골재 및 굵은골재는 경북 왜관 낙동강사로 굵은골재 최대치수는 20 mm로 하였다. 이들 사용 골재의 물리적

성질을 Table 2에 나타내었다.

#### 2.1.3 혼화제

본 실험에서는 사용한 혼화제로서 폴리칼본산계 고성능감수제와 셀룰로오스계 증점제 및 로진계 공기연행제를 사용하였다. 이들 혼화제의 주성분 및 특성은 Table 3과 같다.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 공극률 시험

공극률 시험은 KS F 2505 「골재의 단위용적질량 및 실적을 시험 방법」에 준하여 잔골재를 변화에 따른 공극률을 측정<sup>12)</sup>하였으며, 결정된 잔골재율(S/a)에 결합재량을 변화시켜 단위질량이 최대인 최소 결합재량을 결정하였다.

### 2.2.2 유동성, 충전성 및 상대유하속도 시험

고성능콘크리트의 유동성 평가를 위해 Fig. 1과 같이 슬럼프플로우 실험과 50 cm 도달 속도를 측정하였으며, 재료 분리 저항성 및 충전성 평가는 Fig. 2와 같은 높이 590 mm, 폭 280 mm인 용기의 중앙부에 이형철근 D13을 50 mm간격으로 3개 배치한 U형 충전 시험 장치로 실험을 실시하였다. 또한 상대 유하 속도는 Fig. 3과 같은 형상의 V로드 시험 장치로 유하 시간을 측정하였다. V로드 시험 장치는 유출구에 개폐 장치를 설치하였으며, 시험은 연직으로 세운 로드 에 콘크리트를 주입하여 평면으로 한 후, 유출구를 개방하여 콘크리트를 유하시키고 밀면이 보이는 시점을 유하 시간의 중점으로 하여 이 때의 시간을 유하 시간( $V_t$ )으로 하였으며, 상대 유하 속도는 식 (1)로 구하였다.

$$\text{상대 유하 속도} = \frac{10}{V_t} \quad (1)$$

여기서,  $V_t$  = 유하 시간 (sec)

Table 1 Chemical composition and physical properties of binders

Classification	Density	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	lg.loss (%)	Chemical composition (%)					
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
OPC	3.15	3,169	1.03	22.9	5.57	3.4	64.1	2.85	0.6
FA	2.67	3,024	4.36	58.5	23.4	-	-	-	-
CS	2.72	5,503	4.90	57.4	12.8	9.8	4.7	2.4	-

Table 2 Physical properties of aggregates

Classification	Density	Absorption (%)	F.M.	Ratio of absolute volume (%)
Fine aggregate	2.56	1.22	2.54	-
Coarse aggregate	2.65	1.25	6.64	59.6

Table 3 Properties of admixtures

Classification	Characteristic	Main component	Density	pH
Super plasticizer	Dark brown (liquid)	Polycarbonic acid	1.25±0.05	8.5±1.5
Viscosity agent	White (powder)	Cellulose	1.02±0.02	7±0.1
Air entraining agent	Soft yellow (liquid)	Rosine	-	1±0.005

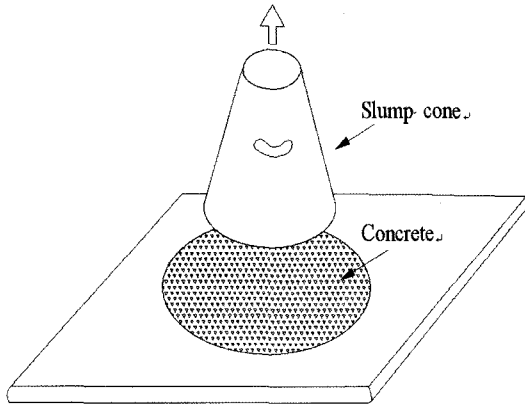


Fig. 1 Slump flow

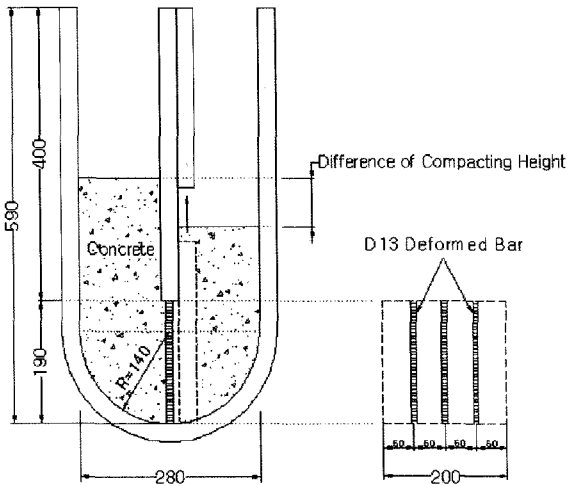


Fig. 2 U type compacting test apparatus

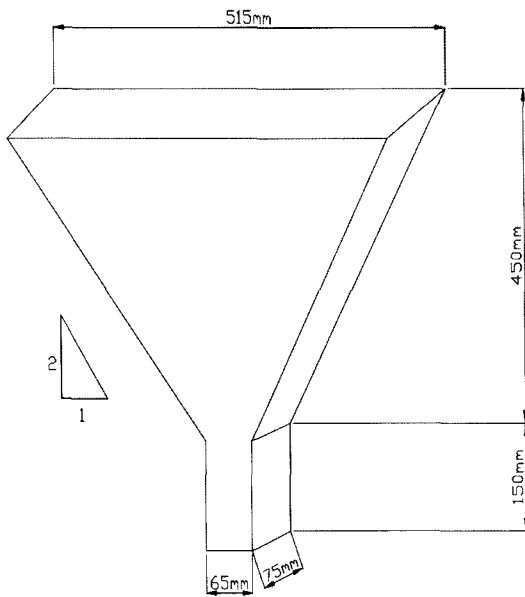


Fig. 3 V type funneling test apparatus

### 2.2.3 배합

콘크리트의 배합은 50l 강제식 믹서를 사용하여 시멘트 및 플라이애쉬를 잔골재와 함께 60초간 건비빔을 한 후 1차수를 투입하고 90초간 믹싱하였다. 이 후 2차수와 혼화제 및 굵은골재를 투입하여 150초간 믹싱하였다.

배합 후 굳지 않은 콘크리트의 공기량을 비롯한, 슬럼프플로우, 충전성 평가 및 V로드 유하 시험을 실시하였다.

또한 고성능콘크리트의 최적 배합비 도출을 위하여 슬럼프플로우와 충전고차와의 관계, 상대 유하 속도와 충전고차와의 상관 관계를 검토하였다. 이를 위해 단위 결합재량의 변화, 고성능감수제와 증점제량의 변화 등을 통해 유동성과 충전성과의 상관 관계를 도출하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 최적 잔골재율(S/a)의 산정

콘크리트는 골재 입자간의 공극을 시멘트페이스트로 채워서 만들어지므로, 공극률이 작은 즉 실적률이 큰 골재를 사용하는 것이 시멘트페이스트의 소요량을 적게 할 수 있다.<sup>13)</sup> 골재의 입도가 적당하면 공극이 작아지므로 골재 입자를 둘러싼 시멘트페이스트량이 적게 들어 단위 시멘트량, 단위수량이 일정한 콘크리트에서는 워커빌리티가 좋아진다. Fig. 4는 잔골재율 (S/a)을 35~55%로 변화시켜 잔골재와 굵은골재 혼합시 잔골재율 변화에 따른 공극률을 측정 한 것이다.

Fig. 4와 같이 잔골재와 굵은골재를 혼합하여 잔골재율 변화에 따른 공극률 실험 결과 공극률이 가장 작은 잔골재율은 41%로 나타났다. 이와 같이 사용 골재가 선정되면 굵은골재와 잔골재를 혼합하여 잔골재율 변화에 따른 단위 용적 질량 실험을 통해 최소 공극을 갖는 잔골재율을 결정하면 된다. 현행 배합 설계에서는 참고표를 참조하여 잔골재율 (S/a)을 결정한 후 예비 실험을 통하여 육안 평가를 통한 시행착오법에 의해 잔골재율을 결정하고 있다. 이것은 배합 설계에서 동일 배합이라도 사용 재료가 달라지게 되면 잔골재율도 달라져야 하지만 골재 종류에 따른 최적 잔골재율이 고려되지 않고 있음을 나타내고 있다.

따라서 본 연구에서와 같은 잔골재율 산정 방법을 이용한 배합 설계법은 잔골재와 굵은골재가 결정되면 혼합 골재의 최소 공극을 갖는 최적 잔골재율을 결정함으로써 잔골재율 산정을 위한 시행착오를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

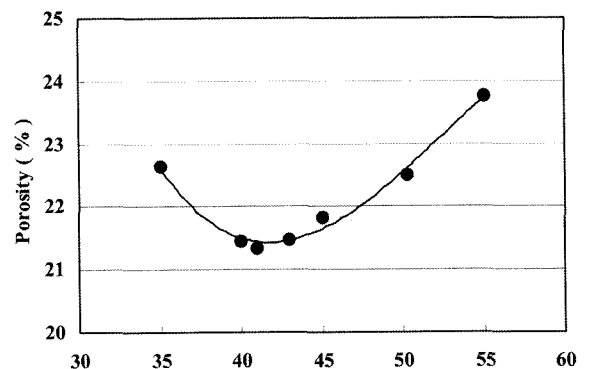


Fig. 4 Porosity according to fine aggregate ratio

### 3.2 결합재 골재비 (B/a)의 결정

잔골재율 (S/a)이 결정되면, 최적 잔골재율에서 결합재량을 변화시켜 최소 공극을 갖는 즉, 단위 용적 질량이 최대인 결합재량을 결정할 수 있으며, 이것이 콘크리트에 요구되는 최소 단위 결합재량이 된다. Fig. 5는 Fig. 4에서 결정된 최적 잔골재율에 결합재량의 치환율에 따른 단위 용적 질량의 변화를 나타낸 것이다.

실험 결과, 최적 잔골재율 41%에서 결합재량을 변화시켰을 경우 최대 단위 용적 질량은 16%에서 나타났다. 이 값은 콘크리트 제조에 요구되는 최소의 단위 결합재량으로 콘크리트에 요구되는 강도 및 작업 성능 등을 고려하여 사용 결합재량의 증가가 필요하다.

특히, 고성능콘크리트의 제조를 위해서는 높은 유동성과 재료 분리 저항성을 동시에 확보하여야 하므로 비교적 높은 단위 결합재량이 요구된다. 일반적으로 콘크리트의 물-결합재비가 일정한 조건하에서 단위 결합재량이 증가하면 골재 사이의 공극을 충전하는 페이스트량이 늘어나 골재간의 평균 거리가 증대하며, 골재의 마찰과 응집에 의한 콘크리트의 유동 폐쇄는 줄어들게 된다.

본 실험에서는 고성능콘크리트의 충전성을 만족하는 최소 단위 결합재량을 결정하기 위하여 잔골재율 41%에서 슬럼프플로우 650±50 mm로 고정하고, 단위 결합재량을 450, 470, 500, 550, 650 kg/m<sup>3</sup>으로 증가시켜 충전성을 만족하는 최소 단위 결합재량을 산정하였다. Fig. 6에 단위 결합재량에 따른 U형 충전고차를 나타내었다.

Fig. 6에서 단위 결합재량 470 kg/m<sup>3</sup> 이상에서는 30 mm 이내의 우수한 충전성을 보이고 있으나, 단위 결합재량 450 kg/m<sup>3</sup>에서는 충전고차가 180 mm로 급격히 증가하고 있다. 이것은 단위 결합재량 감소로 인한 페이스트와 골재간의 상대량 감소에 따른 폐쇄 현상에 의한 것으로 판단된다. 따라서 잔골재율 41%에서 자기충전성을 갖는 고성능콘크리트의 배합 설계에서는 단위 결합재량을 470 kg/m<sup>3</sup> 이상 사용하는 것이 바람직하다고 제안 할 수 있다. 단위 결합재량 470 kg/m<sup>3</sup>에서의 골재 용적이 충전성을 만족하는 최대 골재 용적이므로 한계 골재 용적은 0.657 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>이라 할 수 있다. 이와 같이 자기충전성을 갖는 고성능콘크리트의 제조를 위한 단위 결합재량 산정은 충전성을

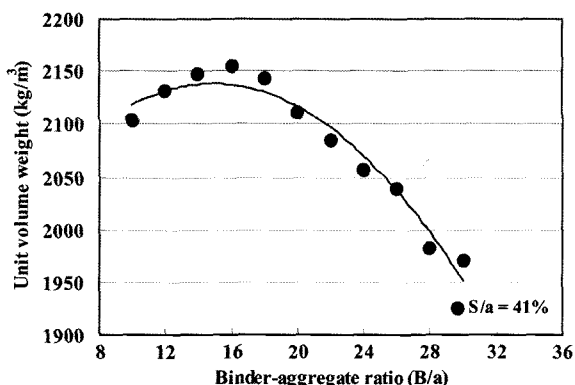


Fig. 5 Unit volume weight according to cement content

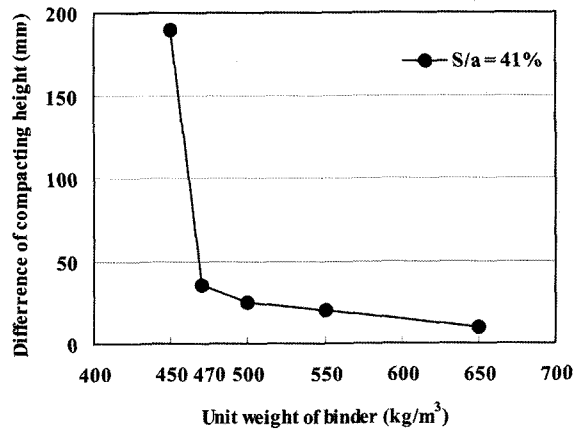


Fig. 6 Difference of compacting height according to unit weight of binder

만족하는 최소 단위 결합재량 이상을 사용하면 된다.

### 3.3 물-결합재비 (W/B)의 산정

일반적으로 보통콘크리트의 물-결합재비는 콘크리트의 압축강도를 기준으로 결정하고 있다. 먼저 시험에 의하여 압축강도와 물-결합재비와의 관계에서 압축강도와 시멘트 물비 (C/W)의 관계는 1차 함수로서  $f_{cu} = A + B \cdot C/W$ 로 표시된다.

반면, 고성능콘크리트에서 사용하는 물-결합재비의 선정은 대부분이 岡村 甫 등<sup>11)</sup>이 제안한 물구속비 ( $\beta_p$ )에 의한 상대플로우 면적비 ( $\Gamma_p$ )와 변형계수 ( $E_p$ )와의 관계식으로 결정하고 있다. Fig. 7은 고성능콘크리트의 제조를 위해 결합재로서 플라이애쉬 및 쇄석분 치환율 0, 10, 20, 30, 40%에서 현행 물구속비에 의한 물-결합재비 산정 흐름에 따라 결합재 치환율에 따른 물-결합재비의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 7에서 물구속비에 의한 고성능콘크리트의 물-결합재비 산정은 물-결합재비 약 34%를 기준으로 플라이애쉬 치환율이 10%씩 증가할 때마다 물-결합재비가 약 0.2%씩 감소하는 것으로 나타났으며, 쇄석분 치환율이 10%씩 증가할 때마다 약 0.5%씩 물-결합재비가 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 플라이애쉬 및 쇄석분 치환

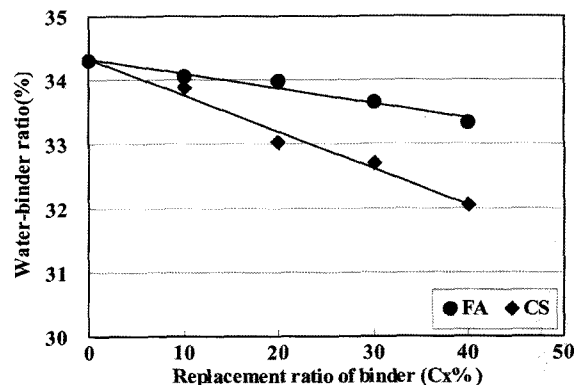


Fig. 7 Water-binder ratio according to replacement ratio of binder

시 유동성 향상에 따른 것으로 사료된다. 그러나 물-결합재비의 감소량이 0.2%~0.5%로 결합재 치환량의 증가 폭에 비해 비교적 작게 나타나고 있다. 이와 같이 물구속비 산정 방법에 의한 물-결합재비 (W/B)의 결정은 사용 결합재에 따라 약간의 차이가 있지만 약 30~40% 범위에서 결정된다. 결합재계 및 병용계 고성능콘크리트의 경우에는 물-결합재비 (W/B)가 35% 근처에서 결정되어 비교적 물-결합재비가 낮게 산정된다. 반면 증점제계 고성능콘크리트는 물-결합재비 (W/B)가 40%에서 많게는 50% 정도로 높게 선정하고 있다. 그러나 이러한 물구속비에 의한 물결합재 용적비의 산정은 콘크리트의 강도를 고려하지 않고 있으며, 시험이 복잡해 이용에 번거로움이 있다. 원칙적으로 콘크리트의 물-결합재비 (W/B)는 요구되는 강도 및 건조수축 등을 고려하여 결정하는 것이 타당하다고 본다. 따라서 고강도의 고성능콘크리트가 요구되는 구조물에서는 물-결합재비를 30% 이하로 낮게 산정하고, 저강도의 고성능콘크리트가 요구되는 구조물에서는 40% 이상으로 높게 산정하면 된다. 그러나 너무 낮은 물-결합재비의 산정은 자기수축<sup>14)</sup>을 유발할 수 있으며, 높은량의 물-결합재비는 증점제 등의 사용량이 증가<sup>15)</sup>하여 비경제적일 수 있다.

### 3.4 공기량의 산정

공기량은 동결융해에 대한 저항성을 고려하여 산정한다. 구조물이 놓이는 환경 조건 및 내구성 등을 고려하여 적정량의 공기량을 산정하면 된다. 고성능콘크리트에서 공기량은 콘크리트 용적의 4~7%가 적절하다고 보고하고 있다<sup>16)</sup>.

### 3.5 유동성 및 충전성 평가

지금까지 나타낸 바와 같이 최소 공극을 갖는 각각의 단위 재료량을 앞의 순서로 결정하여 구조물에 요구되는 고성능콘크리트의 각 재료의 단위량을 결정하면 된다. 그 후 고성능콘크리트의 유동성과 재료 분리 저항성을 평가하게 되며, 사용 재료로서 적정 유동성과 재료 분리 저항성을 만족시킬 수 없다면 사용 재료의 개선정이 필요하다.

고성능콘크리트의 유동성 평가는 일반적으로 슬럼프플로우 시험을 통해 결정하고 있으며 슬럼프플로우 600 mm 이상을 기준으로 하고 있다. 또한 충전성 평가는 L로드 시험, O형 로드 시험, U형 충전 시험 등 기타 여러 방법들이 사용되고 있지만, 재료 분리 저항성과 철근 사이의 간극 통과성 측정이 동시에 가능한 U형 충전 시험 장치가 일반화되어 있으며, 충전고차의 기준 값은 50 mm 이내로 보고 있다. Fig. 8에 고성능콘크리트의 제조시 각 재료량의 변동에 따른 슬럼프플로우와 충전고차의 상관 관계를 나타내었다.

Fig. 8에서 충전 고차 50 mm를 만족하는 슬럼프플로우의 분포는 600~700 mm의 범위에 집중되어 있다. 슬럼프

플로우가 600 mm 이하에서는 콘크리트의 유동성 부족으로 충전 고차 50 이내를 만족시킬 수 가 없었으며, 700 mm를 초과하는 경우에도 재료 분리 현상이 일어나 폐쇄 현상 발생으로 충전 고차가 높게 나타났다.

Fig. 9는 50 cm 플로우 면적 도달 속도와 충전 고차의 상관 관계를 나타낸 것으로 50 cm 플로우 면적 도달속도가 130 cm<sup>2</sup>/sec 이하에서는 콘크리트의 유동성 부족으로 인한 폐쇄에 의해 충전 고차가 크게 나타난 반면, 충전 고차 50 mm 이내의 범위를 만족하는 50 cm 플로우 면적 도달 속도는 130~530 cm<sup>2</sup>/sec의 범위에 분포하고 있다. 따라서 고성능콘크리트의 충전성을 만족하는 50 cm 플로우 면적 도달 속도는 130~530 cm<sup>2</sup>/sec의 범위가 적정 수준인 것으로 사료된다. 이것을 50 cm 플로우 도달 시간으로 나타내면 3.1~12.7sec가 된다.

Fig. 10은 V로드 유하 시험에서 구한 상대 유하 속도와 충전 고차의 상관 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 상대유하 속도가 낮으면 점성 부족으로 유하 시간이 길어지고, 너무 높으면 콘크리트의 유동성 부족과 점성이 증가하여 유하 속도가 길어지게 된다. 따라서 슬럼프플로우 650±50 mm인 고성능콘크리트의 적정 상대 유하 속도는 0.4~1.2의 범위가 적당하다고 보고<sup>11)</sup>하고 있다. 이것을 유하 시간으로 나타내면 적정 유하 시간은 7~20초가 된다.

Fig. 10에서 상대 유하 속도 0.5~1.5의 범위에서 충전고차 50 mm 이내를 만족하고 있으며, 상대 유하 속도 1.5

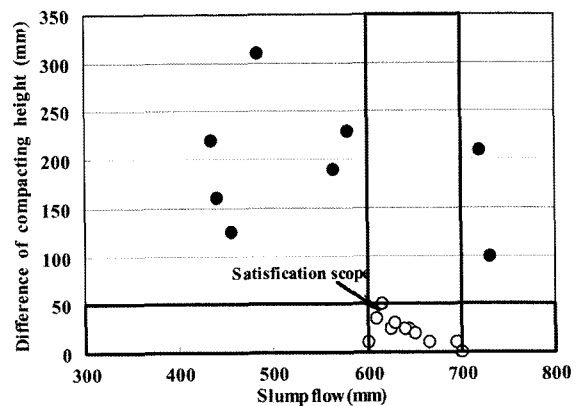


Fig. 8 Difference of compacting height and slump flow

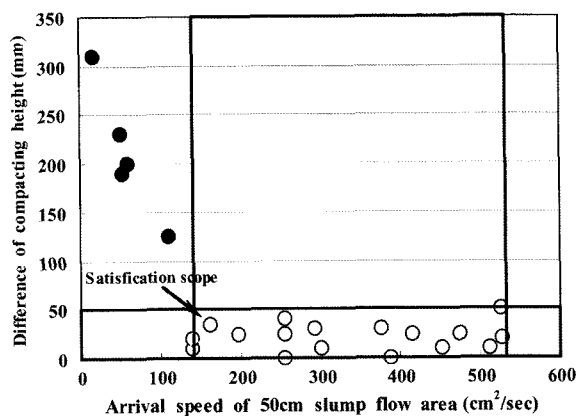


Fig. 9 Difference of compacting height and arrival speed of 50 cm slump flow area

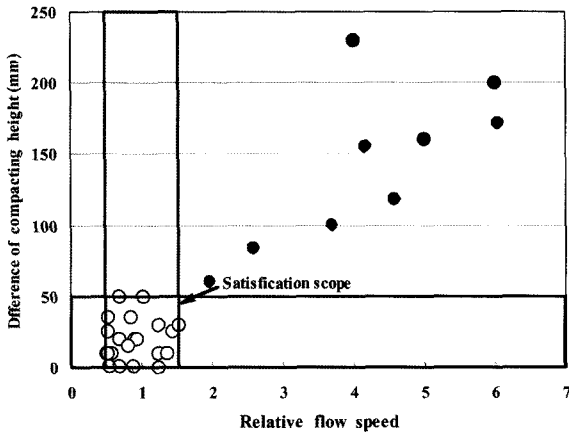


Fig. 10 Difference of compacting height and relative flow speed

이상에서는 콘크리트의 유동성 부족과 점성 증가로 인해 충전성이 나빠지게 되는 것을 알 수 있다. 따라서, 고성능콘크리트의 충전성을 만족하기 위한 상대 유하 속도는 0.5~1.5의 수준이 적당할 것으로 사료된다. 그러나 슬럼프 플로우 650±50 mm의 범위에서 U형 충전 고차가 50 이내의 범위를 만족한다면 V로드 시험에 의한 상대 유하 속도를 만족시킬 수 있다. 따라서 V로드 유하 시험은 U형 충전고차 시험과 중복성이 있는 것으로 배합 설계의 간단화를 위해 슬럼프 플로우 시험에 의한 유동성 평가와 U형 충전고차 시험에 의한 충전성 평가로도 자기충전성 고성능콘크리트의 제조가 가능하다.

### 3.6 고성능콘크리트의 배합 설계

본 연구에서는 최대 밀도 이론을 이용하여 고성능콘크리트의 배합 설계시 유동성과 강도 특성을 고려하고, 각 제조 방법에 관계없이 고성능콘크리트를 제조할 수 있는 배합 설계법을 제안하고자 하였다. 제안된 배합 설계 흐름도는 Fig. 11과 같다.

Fig. 11에서 제조 방법에 따라 사용되지 않는 재료는 배합 설계시 무시하면 되며, 하나의 배합 설계 흐름으로 고성능콘크리트의 제조 방법별 배합 설계법을 나타내고자 하였다. Fig. 11에 따른 고성능콘크리트의 배합 설계 흐름을 설명하면 다음과 같다.

- 1) 고성능콘크리트의 배합 설계를 하기 위한 사용 재료를 선정한다.
- 2) 굵은골재와 잔골재를 혼합하여 공극률이 최소가 되는 잔골재율을 산정한다.
- 3) 구조물이 놓이는 환경 조건 및 내구성에 따른 공기량을 산정한다.
- 4) 강도, 건조수축을 기준으로 물-결합재비 (W/B)를 결정한다.
- 5) 콘크리트의 유동 폐쇄가 발생하지 않는 최소 단위 결합재량 이상이 되도록 단위 결합재량을 결정한다.
- 6) 슬럼프 플로우 650±5 mm, U형 충전 고차 50 mm 이

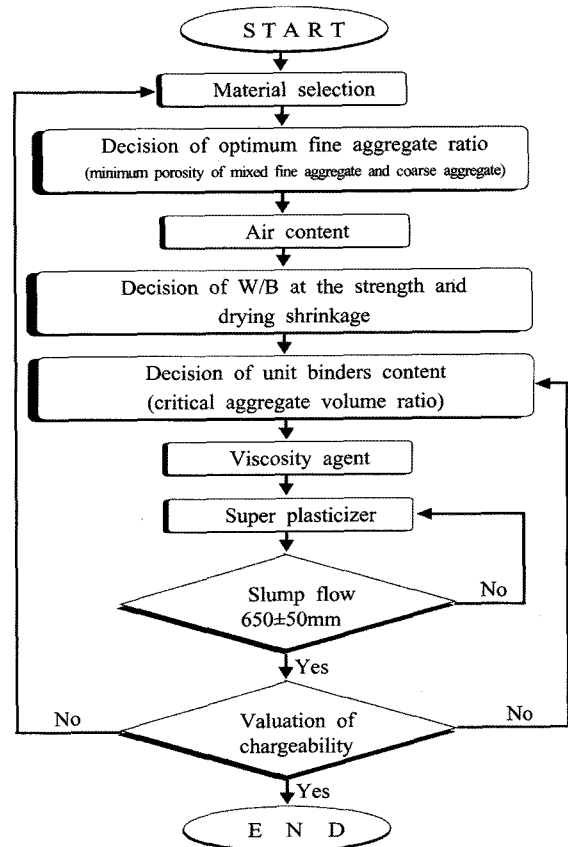


Fig. 11 Mx design flow chart

내의 범위에 들도록 증점제 및 고성능감수제량을 결정한다.

- 7) 제조된 콘크리트는 슬럼프 플로우 시험을 통해 유동성을 검토하고 만족할 수 없다면 고성능감수제 사용량을 조절한다. 단, 증점제계 고성능콘크리트에서는 물-결합재비 (W/B)로 조절한다.
- 8) 제조된 콘크리트는 U형 충전성 시험기를 사용하여 충전성 평가를 실시하여 충전성을 검토하고, 만족할 수 없다면 단위결합재량 및 증점제량을 조절한다.
- 9) 고성능감수제, 증점제량 및 단위결합재량 등의 조절로도 유동성 및 충전성을 만족시킬 수 없다면 재료의 선정을 다시 실시한다.

## 4. 결 론

본 연구는 최대 밀도 이론을 이용한 고성능콘크리트의 배합 설계법을 제안한 것으로 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 제안된 배합 설계법은 최적 잔골재율 사용과 최소 단위 결합재량 이상의 결합재를 사용함으로써 시행착오를 줄여 자기충전성을 갖는 고성능콘크리트를 합리적이며 간편하게 제조할 수 있다.
- 2) 최대 밀도 이론을 바탕으로 한 고성능콘크리트의 실증 실험 결과 최적 잔골재율 41%인 골재를 사용한 고성능콘크리트의 최소 단위 결합재량은 470 kg/m<sup>3</sup>

이며, 최대 골재 용적으로는  $0.657 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 이다.

- 3) 물-결합재비(W/B)의 산정은 물구속비에 의한 산정보다 강도 및 건조수축 등을 고려하여 산정하는 것이 바람직하다.
- 4) 고성능콘크리트의 배합에 있어서 충전성을 만족하기 위한 슬럼프플로우는  $650 \pm 50 \text{ mm}$ , 50 mm 플로우 도달 시간은 약 3~13 sec, V로드 상대 유하 속도는 0.5~ 1.5의 범위가 적정하다.

## 참고문헌

1. 이승한, 정용욱, “쇄석분을 사용한 고성능콘크리트의 특성에 관한 연구”, 콘크리트학회 논문집, 13권 5호, 2001, pp.476-483.
2. 이승한, 김희중, 정용욱, “굵은골재 입형 개선이 고성능콘크리트의 충전 특성에 미치는 영향”, 콘크리트학회 논문집, 12권 4호, 2000, pp.103~111.
3. 小澤一雅, 岡村 甫, “自己充填コンクリートの配合の考え方”, 콘크리트工学論文集, Vol.32, No.7, 1994, pp.56~59.
4. Kovler, K., Schamban, I., Igarashi, S. I., and Bentur, A., “Influence of Mixture Proportions and Curing Conditions on Compressive Strength of High-Performance Concrete”, *ACI Materials Journal*, 2000, pp.21~26.
5. Larrard, F. D. and Belloc, A., “The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete”, *ACI Materials Journal*, 1997, pp.417~426.
6. 박철림, 권영호, “고성능콘크리트의 개발 및 실용화 연구”, 콘크리트학회지, 7권 5호, 1995, pp.42~50.
7. 岡村 甫, 小澤一雅, “締古め不要コンクリートの可能性と課題”, 콘크리트工学論文集, Vol.30, No.2, 1992, pp.5~14.
8. 長瀧重義, “土木におけるコンクリートの高性能化・高機能化”, 콘크리트工学論文集, Vol.32, No.7, 1994, pp.9~13.
9. 長瀧重義, 長瀧重義先生環曆記念 最終講義と研究の歩み, 技報堂出版(日本), 1997, pp.5~40.
10. 村田二郎, 岩崎訓明, 兒玉和巳, 콘크리트の科學と技術, 山海堂(日本), 1996, pp.73~94.
11. 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅, ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版(日本), 1993, pp.35~47.
12. 한국산업규격(KS), KS F 2505 골재의 단위용적질량 및 실적률 시험 방법, 2002, pp.1~5.
13. Seung-Han Lee and Hyung-Sub Han, “Effect of Powder and Aggregate on Compactability of High Performance Concrete”, *An International Journal of Korea Concrete Institute*, Vol.11, No.3, 1999, pp.19~28.
14. 田澤榮一, “自己收縮研究委員會報告”, 콘크리트工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, 1996, pp.1~10.
15. 近松龍一, 竹田宣典, 十河茂幸, “超流動コンクリートの流動性と分離抵抗性にする一考察”, 콘크리트工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992, pp.37~39.
16. 川口修宏, 黒瀬悦成, 古山美宏, 馬越唯好, “フリアッシュを多量に使用したコンクリートの耐久性”, 콘크리트工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, 1996, pp.909~914.

**요약** 최근 콘크리트의 품질과 구조물의 신뢰성을 향상시키기 위해서 고성능콘크리트의 현장 적용이 늘고 있다. 이러한 고성능콘크리트의 배합 설계 방법으로는 모르타르-굵은골재 2상계 배합 이론과 페이스트-골재 2상계 배합 이론이 있다. 이 중 모르타르-굵은골재 2상계 배합이론은 모르타르의 레올로지 특성을 부여함에 있어 반복적인 실험을 통해서 그 값을 결정해야 하는 문제점을 가지고 있다. 페이스트-골재 2상계 배합 이론은 최적 잔골재율과 단위결합재량과의 관계 및 콘크리트의 충전성을 확보할 수 있는 한계 골재 용적비 등이 고려되어 있지 않아 고성능콘크리트에의 적용 예가 없는 실정이다. 또한 이들 고성능콘크리트의 배합 설계 이론은 일반콘크리트와는 달리 유동성 및 충전성에 중점을 두고 있어 배합 설계에서 강도 특성을 고려하지 않고 있으며, 사용 재료의 단위량은 일반콘크리트와 같이 시행착오법으로 결정하고 있다. 이에 본 연구에서는 고성능콘크리트의 배합 설계에 최대 밀도 이론을 도입하여 사용 골재의 공극이 최소가 되는 최적 잔골재율 산정으로 배합 설계 시 시행착오를 줄이고, 강도를 고려한 최소 단위 결합재량의 결정으로 강도와 유동성을 동시에 만족할 수 있는 합리적이며 간편한 고성능콘크리트의 배합 설계법을 제안하고자 하였다. 연구 결과 본 연구에서 제안된 배합 설계법은 최소 공극을 갖는 최적 잔골재율 사용과 최소 단위 결합재량 이상의 결합재를 사용함으로써 시행착오를 줄일 수 있어 자기충전성을 갖는 고성능콘크리트를 간편하게 제조할 수 있다.

**핵심용어** : 최대 밀도 이론, 고성능콘크리트, 배합 설계, 최소 공극률, 한계 골재용적비