콘크리트 기술자를 위한 배합설계 이론(1)

이 상 수
〈(주)대우 건설기술연구소 선임연구원, 공학박사〉

원 철
〈(주)대우 건설기술연구소 주임연구원〉

김 동 석
〈(주)대우 건설기술연구소 주임연구원〉

박 상 준
〈(주)대우 건설기술연구소 주임연구원〉

1. 골재의 입도특성

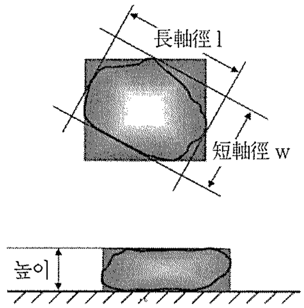
1.1 입자치수의 표시법

(1) 단독입자의 크기를 나타내는 방법

(a) 계측치에 기초한 粒子徑

입자의 형상이 구형, 또는 입방형인 경우를 제외하고, 단지 한 가지 계측결과로 입자의 크기를 하나라고 정하는 것은 불가능 하다. 그래서, 입자치수의 대표치로 입자의 크기를 나타내는 방법이 여러 가지로 고려되고 있다. 短軸徑, 長軸徑, 三軸平均徑 등이 그 代表例이다.

단축경 u는 입자를 평면상에 가장 안정하다고 생각되는 위치에 놓고, 그 투영상을 2본의 평행선으로 끼웠을 때의 최소간격이고, 장축경 i은 단축경과 직각방향으로 끼운 평행선의 간격이다. 3축평균경은 제3의 지름으로서 높이 h를 사용한다.〔그림 1.1〕



〔그림 1.1〕 입자치수 계측법의 일례

(b) 球體等價徑

입자의 실제치수를 사용하지 않는 입자경의 예로서 구체등가경이 있다. 이것은 입자와 체적이 같은 구의 직경으로 정의된 지름으로서, 다음식으로 나타낸다.

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6v_p}{\pi}} \quad \text{------------------------(1.1)}$$

여기에서,

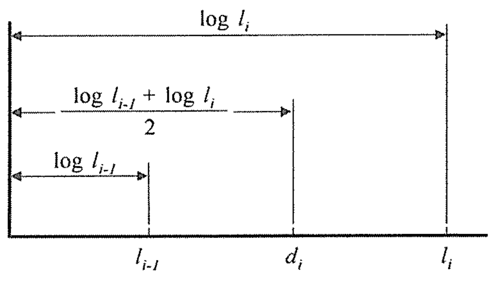
d_{eq} : 구체등가경, v_p : 입자의 체적

이 지름은 입자가 비교적 큰 경우에는 중량과 밀도에서 체적 v_p 를 구함으로써 정확한 값을 얻을 수 있다.

(c) 체가름 지름

실용적인 입자경으로서 널리 사용되고 있는 것은 입자가 통과하는 최소의 체눈금 치수와 입자가 머무르는 최대의 체눈금 치수의 평균치로 나타내는 체가름 지름이다.

평균치는 相加平均 또는 相乘平均으로 하지만, 일반적으로 일련의 체눈금 치수가 등차수열이 될 때는 상가평균, 등비수열이 될 때는 상승평균을 사용한다.



〔그림 1.2〕 대수눈금의 중점좌표

체눈금 치수의 변화가 등비적인 경우, 그 대수는 등차적으로 되기 때문에, 서로 인접해 있는 체눈금의 치수를 l_{i-1} 및 $l_i(>l_{i-1})$로 해서 이것을 對數座標上에 취했을 때, 중점의 좌표를 d_i라 하면, 〔그림 1.2〕에 따라

$$\log \ d_i = \frac{\log \ l_{i-1} + \log \ l_i}{2}$$

$$\therefore \quad d_i = \sqrt{l_{i-1} l_i} \quad \text{------------------(1.2)}$$

또한, l_{i-1}과 l_i의 相加平均値 또는 調和平均値를 사용하면, 평균경은 각각 다음과 같이 된다.

$$d_i = \frac{l_{i-1} + l_i}{2}$$

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{l_{i-1}} + \frac{1}{l_i}\right)$$

(2) 입자군의 평균경

(a) 단일입군의 호칭지름

다양한 크기의 입자가 混在하는 입자군을 체가름할 때, 체눈금 치수가 l_i체를 통과하고, 그 다음으로 작은 치수 l_{i-1}체에 머무르는 입자전체를 입군 i로 호칭하는 것으로 한다. 체분석을 실시하는 경우, 포함되어 있는 입자치수의 범위가 넓을 때는 체눈금 크기가 등비적으로 되는 일련의 체를 사용한다. 그래서, 단독입자의 경우와 마찬가지로 입군 i의 입자치수를 체가름 지름으로 나타내고, 이것을 입군의 호칭지름 l_i라 하면, 식(1.2)에 따라

$$d_i = \sqrt{l_{i-1} l_i} \quad \text{-------------------------(1.3)}$$

체눈금 치수비를 k라 하면,

$$l_{i-1} = \frac{l_i}{k}$$

$$\therefore \quad d_i = \frac{1}{\sqrt{k}} l_i \quad \text{------------------} (1.4)$$

이다.

콘크리트용 골재에 쓰이는 체의 경우에, 치수비는 2이기 때문에,

$$d_i = \frac{1}{\sqrt{2}} l_i = 0.707 l_i \quad \text{-------------} (1.5)$$

이다.

(b) 전입자군의 평균경

(i) 평균경의 종류

입자경의 분포가 광범위한 입자군을 체가름할 때, 작은 쪽부터 계산해서 i번째 입군의 호칭지름이 d_i, 체적비가 $p_i(\sum p_i = p_1 + p_2 \cdots \cdots\cdots = 1)$인 것으로 한다. 이 입자군 전체의 입자치수를 단 1개의 수치로 나타낸 것이 전입자의 평균경이지만, 평균경은 평균치를 취했을 때의 기준에서 相加平均徑, 表面積平均徑, 體積平均徑, 加重平均徑 등이 있고, 이러한 값들은 각각 달라진다.

(ii) 상가평균경

호칭지름이 d_i인 입군에 속하는 입자수를 n_i라 하면, 입자수에 대해서의 상가평균경은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{상가평균경} \quad \overline{d_i} = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \quad \text{------------} (1.6)$$

전입자의 형상이 1가지라 하고, 전입자의 총체적을 V_p, 입자총수를 N_p, 체적형상계수를 $\phi_v(\phi_v = v_p / d_p^3$, 입자체적, d_p : 입자경)라 하면,

$$n_i = \frac{p_i V_p}{\phi_v d_i^3} \quad \text{--------------------------} (1.7)$$

$$N_p = \sum n_i = \sum \frac{p_i V_p}{\phi_v d_i^3} \quad \text{--------------} (1.8)$$

$$\therefore \ \overline{d_i} = \frac{\sum n_i d_i}{N_p} = \sum \frac{p_i}{d_i^2} / \sum \frac{p_i}{d_i^3} \quad \text{---} (1.9)$$

(iii) 표면적평균경과 체적평균경

이것에 대해서 결과만을 나타냈다.

$$\text{표면적평균경} \quad \overline{d_s} = \sqrt{\sum \frac{p_i}{d_i} / \sum \frac{p_i}{d_i^3}} \quad (1.10)$$

$$\text{체적평균경} \quad \overline{d_v} = \sqrt[3]{1 / \sum \frac{p_i}{d_i^3}} \quad \text{-------} (1.11)$$

(iv) 가중평균경

입자체적을 체적비에 대해서 가중평균한 평균체적을 $\overline{V_w}$라 하면,

$$\overline{V_w} \sum p_i = \sum p_i v_i$$

평균경을 $\overline{d_w}$라 하면,

$$\overline{V_w} = \phi_v (\overline{d_w})^3$$

$$\therefore \overline{d_w} = 3\sqrt{\sum p_i d_i^3} \quad \text{---------------} (1.12)$$

(v) 각평균의 특징

식(1.9)~(1.12)는 분모에 입자총수에 관

계하고 있는 $1/d_i^3$ 를 포함하고 있고, 이것은 d_i 가 작아지면 급격하게 커지는 것에 대하여, 식(1.12)에서는 입자체적에 관계하고 있는 d_i^3를 포함, 이것은 k_i 가 커지면 급격하게 커진다.

따라서, $\overline{d_i}$, $\overline{d_s}$, $\overline{d_v}$ 는 작은 입자의 영향을 크게 받는 평균경이고, d_w는 큰 입자의 영향을 크게 받는 평균경이다.

〔例 題〕

호칭지름이 0.21㎜인 입군과 1.73㎜인 입군을 중량비로 1 : 3의 비율로 혼합했을 때, 상가평균경, 체적평균경을 구하시오. 단, 각입군 입자의 밀도는 같은 것으로 한다.

〔略 解〕

$$d_1 = 0.21mm, \quad p_1 = 0.25$$
$$d_2 = 1.73mm, \quad p_2 = 0.75$$

$$\therefore \ \overline{d_i} = \sum \frac{p_i}{d_i^2} / \sum \frac{p_i}{d_i^3} = \left(\frac{0.25}{0.21^2} + \frac{0.75}{1.73^2}\right) /$$

$$\left(\frac{0.25}{0.21^3} + \frac{0.75}{1.73^3}\right) = 0.22mm$$

마찬가지로, $\overline{d_v} = 0.22mm$

$\overline{d_w} = 1.57mm$

$\overline{d_w}$ 는 다른 평균경에 비해서 상당히 큰 값으로 되고 있다는 것을 알 수 있다.

(c) 체적비와 중량비의 관계

각입군 입자의 밀도가 동일할 때, 체적비 p_i 는 중량비 w_i 와 동등하다.

각입군 입자의 밀도가 ρ_i 에서 중량비가 w_i 일 때, 체적비 p_i 와 중량비 w_i 의 관계는 다음식이 된다.

$$p_i = \left(\frac{w_i}{\rho_i}\right) / \sum \frac{w_i}{\rho_i} \qquad \text{----------------(1.13)}$$

$$w_i = \frac{\rho_i p_i}{\sum \rho_i p_i} \qquad \text{----------------(1.14)}$$

콘크리트 공학에서는 입자체적비를 용적비로 부르는 경우가 있고, 용적을 체적과 동의어로 사용하는 경우도 일반적이지만, 「단위용적중량」의 용적은 골재를 용기에 넣었을 때의 공극을 포함한 全體積, 「절대용적」의 용적은 굳지 않은 콘크리트중에 점하는 각재료의 용적이다. 본장에서는 입자가 점하는 공간(입자내부의 공극을 포함)을 입자체적으로 하고, 입자체적의 總和에 대한 각입자, 또는 각입군의 적비를 체적비라 부르는 것으로 한다. 콘크리트용 골재의 경우, 잔골재와 굵은골재로 밀도를 구별하지만, 각골재에 대해서 입자밀도는 1가지라고 생각하기 때문에, 이후, 체적비 p를 대신해서 중량비 w를 사용한다.

1.2 골재의 입도

(1) 입도의 표시방법

(a) 입도와 입도곡선

입도, 다시말해서 입자군 입경의 분포상황은 어느 입자를 a로 했을 때, $P(d)$를

$P(d)$ = 입자경이 a 이하인 입자의 중량비 ------------------------------------(1.15)

로 정의하고, a와 $P(d)$의 관계로 나타낼 수 있다.

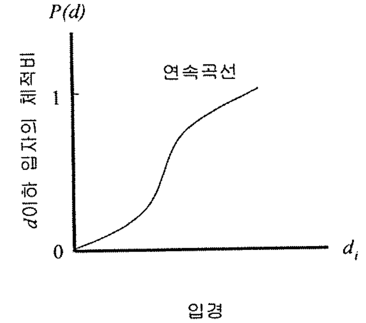
이론상은 a와 $P(d)$의 관계는 連續關數로 나타낼 수 있지만, 실제로 입자군의 입도를 구할 때는 체분석에 따라 불연속적인 점을 구하는 것으로 된다. 호칭지름이 d_i인 입군의 중량비가 w_i일 때, 이 입군의 최대경은 l_i〔1.1 (2) (a) 참조〕이기 때문에 식(1.15)의 a는 l_i가 된다. 따라서, 체분석결과에서 얻은 입도는 다음식으로 표현할 수 있다.

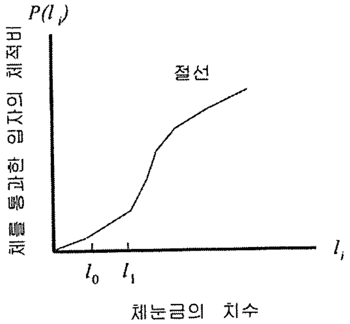
$$P(l_i) = \sum_{i=0} w_i = w_0 + w_1 + w_2 + \cdots\cdots \text{-----------------} (1.16)$$

이 식에서 $i = 0$일 때의 $l_i(= l_0)$는 눈금의 치수가 가장 작은 체에 대응하고, $w_i(= w_0)$는 그체를 통과하는 전입자의 중량비를 나타내고 있다.

식(1.15) 또는 식(1.16)을 도시한 것이 입도곡선으로, 식(1.15)는 연속곡선으로 나타내고, 식(2.16)은 折線으로 나타낼 수 있다〔그림 1.3〕.

어떤 체를 통과하는 입자의 중량비와 그 체에 머무르는 입자의 중량비 사이에는 항상 다음의 관계가 있다.





〔그림 1.3〕 입도곡선

$$p(l_i) + R(l_i) = 1 \text{-----------------} (1.17)$$

여기에서,

$R(l_i)$: 눈의 치수가 l_i인 체에 머무르는 입자의 중량비

입자경에 대해서 식(1.17)은

$$P(d) + R(d) = 1 \text{-----------------} (1.18)$$

여기에서,

$P(d)$: 입자경이 a이하인 입자의 중량비

$R(d)$: 입자경이 a보다 큰 입자의 중량비

가 된다.

(b) 수치에 따른 입도의 표시방법

골재의 입도를 나타내는 경우, 전술한 바와 같이 입경분포 전체를 수식으로 나타내던가, 또는 입도곡선으로 나타내는 방법, 특히, 입도곡선은 입경 분포상태의 상세, 특징, 양부 등을 인식하거나 비교하거나 하는데에 적용하고 있다. 그러나, 입경분포 전체를 1개의 특성치로해서 콘크리트의 배합설계시의 판정기준으로 도입하는 것은 곤란하다. 이와 같은 목적에 대해서는 평균경을 사용하는 것도 불가능하지는 않지만, 전항에서 서술한 바와 같이 평균경

은 정의에 따라 큰 입자를 중시한 계산결과로 되는 것과 작은 입자를 중시한 계산결과로 되는 것이 있고, 콘크리트 배합설계의 요인으로서 어떠한 정의의 평균입경을 사용하는 것이 적절한가는 별로 연구되지 않았다. 이것에 대한 것으로서 체가름 지름을 추상화 하고, 입경분포 전체를 1개의 수치로 나타낸 조립율이 입도의 지표로서 널리 이용되고 있다. 이에 대해서는 뒤의 1.3항에서 서술한다.

(2) 自然粒度

(a) 指數粒度

분쇄기에서 만들어진 파쇄입자는 균일한 입경으로 되지 않고, 指數關數的인 입경분포가 된다.

지수입도는 다음과 같이 표현된다.

$$R(d) = e^{-ad^b} \qquad \text{-----------} (1.19)$$

여기에서,

$R(d)$: 입경이 a 이상인 입자의 중량비

a, b : 정수

$R(d)$ 를 R 로 약기하고, 양변의 대수를 취하면

$$\ln(1/R) = ad^b \qquad \text{-----------} (1.20)$$

사용대수로 변환시켜, 또 한번 대수를 취하면

$$\log\left(\log\frac{1}{R}\right) = \log\frac{a}{2.303} + b\log a \qquad \text{-----------} (1.21)$$

체분석을 실시한 경우에 대해서는 입경 a 를 체눈의 치수 l_i 로 바꾸어 놓으면 좋다. 〔표 1.1〕 및 〔그림 1.4〕에 Fero-Nickel 슬래그 쇄사에 대해서 l_i 와 $\log\left(\frac{1}{R}\right)$ 의 관계를 나타내고, JIS A 5004에 규정되어 있는 콘크리트용 쇄사의 입도의 중앙치와 비교하였다.

그림중의 {○}으로 표시된 규정치를 제외하고, 식(2.19)는 실측치에 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 회귀직선에서 정수를 구해 통과중량비로 나타내면, 쇄사 3에서는

$$p(l_i) = 1 - e^{-1.15 l_i^{1.43}} \qquad \text{-----------} (1.22)$$

으로 된다.

(b) 放物線粒度

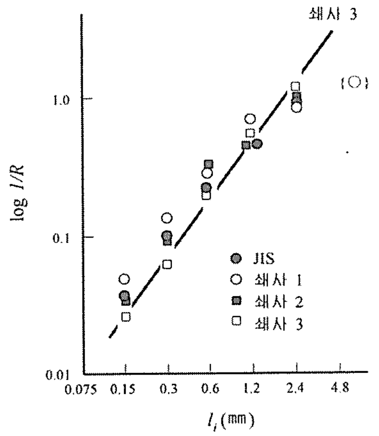
1개의 암괴를 강고한 용기에 넣어서 고압을 가하고, 파쇄물이 용기에서 점하는 체적이 원래의 암석체적과 같게 되도록 하면, 큰 입자의 공극을 작은 입자가 메우고, 그 공극을 더욱 작은 입자가 메우는 상태로 된다. 그 결과, 입자의 중량비(입경에 따른 밀도차는 없는 것으로 한다)는 입경이 작을수록 작아지고, 입도는 다음 식으로 표현되는 放物線粒度

〔표 1.1〕 슬래그 쇄사에 대한 지수입도 분석결과

잔골재		l(mm)*	0.15	0.30	0.60	1.18	2.36	4.75
슬래그 쇄사**	1	R	0.89	0.73	0.49	0.19	0.11	0
		log(1/R)	0.0506	0.1367	0.3098	0.7212	0.9586	–
	2	R	0.91	0.75	0.43	0.30	0.07	0
		log(1/R)	0.0410	0.1249	0.3665	0.5229	1.1549	–
	3	R	0.93	0.84	0.56	0.23	0.05	0
		log(1/R)	0.0315	0.0757	0.2518	0.6383	1.3010	–
쇄사의 JIS중앙치		R	0.91	0.78	0.55	0.30	0.10	0.05
		log(1/R)	0.0410	0.1079	0.2596	0.5229	1.000	1.3010

* 표준망체의 기준치수

** Ferro-Nickel 슬래그의 수쇄물, 데이터는 秋山[1]의 값을 따른다.



〔그림 1.4〕 슬래그쇄사에 대한 지수입도 분석결과

로 된다.

$$P(d) = \left(\frac{d}{D}\right)^q \quad \text{------------------ (1.23)}$$

여기에서,

D : 최대입경

a : 방물선의 차수

방물선입도는 공극율을 최소로 하는 입도라고 하는 것이 가능하지만, 콘크리트용 골재의 良否에는, 다음회의 배합이론(2)에서 설명하겠지만, 공극율 외에 비표면적도 관계하기 때문에, 반드시 방물선입도가 콘크리트용 골재의 최적입도이라고는 한정지을 수 없다. 또한, 식(1.23)은 잔골재와 굵은골재의 구분을 하지않고, 전골재에 대해서의 입경분포를 나타낸 식이다.

(3) 조정입도

(a) 입도의 조정

해사 등의 천연사는 알맹이의 크기가 비교적 고르게 모여 있어, 그 대로의 입도로 콘크리트용 잔골재로서는 별로 적합하지 않기 때문에, 입도조정을 하는 경우가 많다. 일반적으로는, 표준시방서 등에 나타나 있는 표준입도의 범위내에 들도록 입도가 다른 2~3종류의 골재를 적당한 비율로 혼합하지만, 몇가지 입군에 체가름한 것을 재혼합해서 원하는 입도가 되도록 하는 것도 가능하다.

콘크리트용 골재에 가장 적합한 입도는 골재 이외의 사용재료나 콘크리트의 배합에 따라서 다르기 때문에, 최적입도를 나타내는 관수에 대해서는 아직 정해진 것이 없다. 이하에 입도관수를 2가지의 예로 나타냈다.

(b) 等比粒度

입경이 작은 입군일수록 체적비가 작아지도록 어느 입군의 중량과 그 보다 입경이 1단계 큰 입군의 중량의 비를 일정하게 한 것이 다음 식으로 나타낸 等比粒度이다.

$$\frac{m_{i-1}}{m_i} = \frac{1}{\gamma} \quad \text{------------------------(1.24)}$$

여기에서,

m_{i-1} , m_i : 작은 쪽부터 $i-1$ 번째와 i 번째 입군의 중량

$r(>1)$: 정수

최소의 입군을 $i=1$, 최대의 입군을 $i=1$ 로 하면

$$m_i = m_{i-1}r = m_{i-2}r^2 = \cdots\cdots = m_i r^{i-1}$$

$$m_I = m_1 r^{I-1}$$

이기 때문에, 입군 i의 중량비 w_i 는

$$w_i = \frac{m_1 + m_2 + \cdots + m_i}{m_1 + m_2 + \cdots + m_I} =$$

$$\frac{m_1(1 + r + \cdots + r^{i-1})}{m_1(1 + r + \cdots + r^{I-1})} = \frac{r^i - 1}{r^I - 1} \quad \text{---(1.25)}$$

이다. 이 식은 플럼(Plum)의 식이라 불린다. 입군 i이하 입자의 중량비는

$$W_i = w_1 + w_2 + \cdots\cdots + w_i = \frac{1}{r^I - 1}[(r-1)$$

$$+(r^2 - 1) + \cdots\cdots + (r^i - 1)]$$

$$= \frac{r(r^i - 1) - i(r-1)}{(r-1)(r^I - 1)}$$

------------------------------------(1.26)

로 된다.

따라서, 입도를 나타내는 식은 입군 i의 체치수 l_i를 사용해서 다음과 같이 된다.

$$P(l_i) = \frac{r(r^i - 1) - i(r-1)}{(r-1)(r^I - 1)} \quad \text{------ (1.27)}$$

식의 형태가 약간 복잡하지만, 이 입도는 방물선입도와 마찬 가지로 가장 입경이 큰 입군의 입자치수와 1개의 정수만으로 정해진 입도이다.

(c) 볼로미-퓰러(Bolomey-Fuller)의 입도

방물선입도에 있어서 정수 q를 0.5로 선택하면 다음식으로 된다.

$$P(d) = \sqrt{\frac{d}{D}}$$

그러나, 이 입도의 골재는 조립분이 너무 많아져서 콘크리트에는 적합하지 않다. 이것을 수정한 것이 다음식으로 표현되는 볼로미-퓰러(Bolomey-Fuller)의 입도이다.

$$P(d) = f + (1 - f)\sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{----------(1.28)}$$

이 식에서 f를 크게 할수록 세립분이 많아진다.

1.3 골재의 조립율

(1) 조립율의 특성

(a) 조립율의 기본식

체분석에 사용되는 1조의 체눈금 치수가 등비적이고, 치수비가 k일 때, 체가름 지름 d_i는 식(1.2)에 따라

$$d_i = \sqrt{l_{i-1} l_i} = \sqrt{l_{i-1} \cdot k l_{i-1}} = \sqrt{k l_{i-1}}$$

------------------------------------(1.29)

이다. 그래서, k를 대수의 밑으로 선택해서

$$f_i = A + log_k d_i, \quad f_1 = 0 \quad \text{-----(1.30)}$$

로 f_i를 정의하면, f_i는

$$f_i = A + \log_k \sqrt{k l_{i-1}} = A + \log_k l_{i-1} + \frac{1}{2}$$

$$f_{i+1} = A + \log_k d_{i+1} =$$

$$A + \log_k \sqrt{k l_{i-1} \cdot k^2 l_{i-1}}$$

$$= A + \log_k l_{i-1} + \frac{3}{2}$$

로 되어 다음의 漸化式이 얻어진다.

$$f_{i+1} = f_i + 1 \quad \text{-----------------------} (1.31)$$

이것은 입군이 1단계 커질 때 마다 f는 1씩 커진다는 것을 의미하고, $f_1 = 0$을 고려하면 식(1.31)에서 다음식을 얻을 수 있다.

$$f_i = i - 1 \quad \text{------------------------} (1.32)$$

(b) 복수의 입도에 있어서의 f의 평균치

넓은 범위의 입경분포를 가진 입자군에 대하여, 체분석을 실시한 결과, 각입군의 체적비가 $p_i(i = 1,\ 2,\quad \cdots\cdots p_1 + p_2 + \cdots\cdots = 1)$ 이었다고 하면, 전입자군에 있어서의 f의 평균치는

$$\bar{f} = \frac{p_1 f_1 + p_2 f_2 \cdots\cdots}{p_1 + p_2 + \cdots\cdots}$$
$$= p_1 f_1 + p_2 f_2 + \cdots \quad \text{--------------} (1.33)$$

이다.

따라서, $\bar{f}$는 입자군의 평균치를 나타내는 지수가 된다.

각입군의 입자밀도가 일정한 경우에는 체적비의 대신으로 중량비를 사용해서

$$f = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \cdots \quad \text{--------------} (1.34)$$

이다.

(2) 골재입도지수로서의 조립율

(a) 골재 조립율의 정의

조립율은 식(1.30)~(1.34)에서 일반적으로 나타냈지만, 콘크리트용 골재의 체분석에 쓰이는 표준망체는 치수비가 2이기 때문에, 식(1.29) 및 식(1.30)에서 $k = 2$로 하고, 그 때의 f_1를 F_i로 나타내면,

$$d_i = \sqrt{2} l_{i-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} l_i \quad \text{--------------} (1.35)$$

$$F_i = A + \log_2 d_1,\quad F_1 = 0 \quad \text{-------} (1.36)$$

로 된다.

식(1.36)에 있어서 $i = 1$로 하면,

$$F_1 = A + \log_2 d_1 = 0$$

이기 때문에, 정수 A는

$$A = -\log_2 d_1 = -\log_2 \sqrt{l_0 l_1}$$

이다.

표준망체의 기준치수는 0.075㎜, 0.15㎜, 0.30㎜, ······이기 때문에

$$A = -\log_2 \sqrt{0.075 \times 0.15} = 3.237$$

또한, 대수의 밑을 변환시키면,

$$\log_2 d_i = 3.322 \log d_i$$
$$\therefore F_i = 3.237 + 3.322 \log d_i$$
$$= 3.237 + 3.322 \log \sqrt{l_{i-1} l_i} \quad \text{------} (1.37)$$

$$= 3.237 + 3.322 \log \frac{1_i}{\sqrt{2}}$$
$$= 2.737 + 3.322 \log l_i \quad \text{--------} (1.38)$$

F에 대해서도 다음식이 성립된다.

$$F_{i+1} = F_i + 1 \quad \text{--------------------} (1.39)$$

$$F_i = i - 1 \quad \text{------------------------} (1.40)$$

이상이 표준망체를 사용해서 골재를 체가름 했을 때의 각입군의 조립율에 대한 정의와 관계식이다.

이 경우, $i = 1$ 인 입군의 입경범위는 0.075 ~0.15㎜이기 때문에, 1번째 체는 0.15㎜체이다. 또한, 식(1.38)의 l_i는 0.15㎜체에서부터 계산해서 i번째체의 기준치수이다.

(b) 골재의 조립율

실제의 잔골재, 굵은골재는 넓은 입경분포를 갖기 때문에, 전체로서의 조립율을 F라 하면

$$F = p_1F_1 + p_2F_2 + \cdots\cdots \quad \text{---------} (1.41)$$

이지만, 체가름 시험을 중량을 실시하기 때문에

$$F = w_1F_1 + w_2F_2 + \cdots\cdots \quad \text{---------} (1.42)$$

이다.

(c) 호칭지름과 조립율의 관계

조립율의 수치가 F인 입군의 호칭지름을 d_F라 하면, 식(1.37)에서

$$d_F = 10^{\frac{F-3.237}{3.322}} \quad \text{-------------------} (1.43)$$

이다.

또한, 입군의 호칭지름과 체눈금의 치수의 관계는

$$l_i = \sqrt{2}d_i, \qquad l_{i-1} = \frac{1}{\sqrt{2}}d_i$$

이기 때문에, 조립율의 값이 F인 골재를 단일의 입도로 간주하면, 이 가상입군의 입경(체가름 지름)의 범위는

$$\frac{1}{\sqrt{2}}d_F \sim \sqrt{2}d_F \quad \text{-----------------} (1.44)$$

이다.

〔例 題〕

조립율이 2.75인 잔골재와 동일한 조립율을 가진 단일의 입군을 고려했을 때, 이 가상입군의 입경범위를 구하시오.

또한, 콘크리트 표준시방서에서는 잔골재의 조립율이 0.20이상 변화했을 때는 콘크리트의 배합을 변경해야 한다고 하고 있지만, 조립율의 변화 0.20은 입경으로 해서 어느 정도의 변화인가 계산하시오.

〔略 解〕

조립율 $F = 2.75$ 인 입군의 호칭지름은

$$d_F = 10^{\frac{F-3.237}{3.322}} = 10^{-0.1466} = 0.71mm$$

$$\therefore \frac{1}{\sqrt{2}}d_F \sim \sqrt{2}d_F = 0.50 \sim 1.00mm$$

조립율이 F_A 인 잔골재와 $F_A \pm 0.20$ 인 잔

골재의 호칭지름을 각각 d_A, d_B로 하면

$$d_A = 10^{\frac{F_A - 3.237}{3.322}}$$

$$d_B = 10^{\frac{F_A \pm 0.20 - 3.233}{3.322}}$$

$$\therefore \frac{d_B}{d_A} = 10^{\frac{\pm 0.20}{3.322}} = 1.15, \quad 0.87$$

조립율이 0.2 커지는 것은 입군의 호칭지름이 15% 증대한 것에 상당하고, 0.2 작아지는 것은 호칭지름이 13% 작아진 것에 상당한다.

(3) 체가름 시험결과로부터의 조립율 산출 방법

골재를 표준체로 체가름했을 때, 각입군의 중량비가 $w_i (i = 1, 2 \cdots)$ 이었다고 하면, 전체의 조립율은

$$F = w_1F_1 + w_2F_2 + w_3F_3 + \cdots\cdots \quad \text{------------------------------------} (1.45)$$

$$F_i = i - 1 \quad \text{------------------------} (1.46)$$

이다. 따라서, 최대의 입군을 $i = 1$ (입경범위 $l_{i-1} \sim l_l$로 하면, F는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F &= 0w_1 + 1w_2 + \cdots\cdots + (I-1)w_1 \\ &= (w_2 + w_3 + \cdots\cdots + w_I) \\ &+ (w_3 + w_4 + \cdots\cdots + w_I) \\ &+ \cdots\cdots + (w_{I-1} + w_I) + w_I \end{aligned}$$

=(l_1체에 머무르는 것의 중량비)
+(l_2체에 머무르는 것의 중량비)
+······+l_{I-1} 체에 머무르는 것의 중량비
=(각체에 머무르는 것의 중량%의 總合)/100

최종식이 나타내고 있듯이, 0.15㎜이상으로 치수비가 2인 계열에 속하는 체에 머무르는 입분의 누가중량%를 합계해서 100으로 나눈 것이 조립율이 된다.

단, 표준망체는 1.2㎜와 2.5㎜로 체의 치수비가 정확하게 2로 되지 않기 때문에, 정의에 따라서 식(1.37)에서 각입군의 조립율을 구하고, 식(1.42)에 따라 골재전체의 조립율이 산출된 결과와 상기의 방법을 이용해서 산출한 결과로 수치가 조금 차이가 나는 경우가 있다.

그러나, 상기의 방법이 간편하고 실용적이기 때문에, 실제의 조립율은 이와 같이 해서 구하고 있다.

1.4 골재의 입도와 비표면적의 관계

(1) 입자군의 비표면적과 체적비표면적

입자군의 비표면적을 구할 때는 먼저, 체분석을 실시하고, 각입군의 중량비와 비표면적을 구한다.

골재전체의 총표면적은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$S = M(w_1S_{A1} + w_2S_{A2} + \cdots\cdots) \quad \text{------------------------------------} (1.47)$$

여기에서,
S : 골재의 총표면적(㎠)
M : 골재의 총중량(g)
w_i : 각입군의 중량비
S_{Ai} : 각입군의 비표면적(㎠/g)

각입군의 입자밀도가 동일한 것으로 해서, 이것을 ρ라 하면, 입자군의 총체적은

$$V = \frac{M}{\rho}$$

여기에서,
V : 골재전체의 총입자체적(㎤)
ρ : 골재의 밀도(g/㎤)

따라서, 골재전체로서의 평균비표면적 및 평균체적비표면은 다음식이 된다.

$$\overline{S_A} = \frac{S}{M} = w_1 S_{A1} + w_2 S_{A2} + \cdots\cdots \quad (1.48)$$

$$\sigma = \frac{S}{V} = \rho \overline{S_A} = \rho(w_1 S_{A1} + w_2 S_{A2} + \cdots\cdots)$$
$$= w_1 \sigma_1 + w_2 \sigma_2 + \cdots\cdots$$
------------------------------------- (1.49)

여기에서,
σ_i : 각입군의 체적비표면적(㎠/㎤)

(2) 각입군의 체적비표면적

식(1.49)의 σ_i를 구할 때는 실측에 따른 방법과 입군의 호칭지름에 따른 방법이 있지만, 어느 경우도 입자를 구형으로 간주한 체적비표면적을 구하고, 이것에 입자형상에 대해서의 수정을 실시한다.

실측에 따른 방법에서는 각입군에 대해서 단위중량당 입자의 수를 계산하고, 밀도와 개수에서 1입자당 평균체적을 구한다. 입자를 구형으로 간주하지 않으면 구체등가경은 식(1.1)에 따라

$$d_{eq,i} = \sqrt[3]{\frac{6\overline{v_i}}{\pi}}$$

이고, 체적비표면적은 다음식으로 된다.

$$\sigma_i = \frac{6}{d_{eq,i}}$$

여기에서,
σ_i : i번째 입군의 체적비표면적(㎠/㎤)
$d_{eq,i}$: i번째 입군의 구체등가경(㎝)
$\overline{v_i}$: i번째 입군의 평균입자체적(㎤)

일반적으로, 골재입자는 구형이 아니기 때문에, 구형도 ϕ_0를 사용해서 보정하면,

$$\sigma_i = \frac{1}{\phi_0}\frac{6}{d_{eq,i}} \quad \text{---------------------} (1.50)$$

구형도 ϕ_0는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi_0 = \frac{\text{입자와 체적이 같은 구의 표면적}}{\text{입자의 표면적}}$$
------------------------------------- (1.51)

골재의 체가름 시험결과를 이용하는 경우에는 입군의 평균경으로서 식(1.3)의 호칭지름을 사용하는 것이 간편하다. 즉,

$$d_i = \sqrt{l_{i-1} l_i}$$
$$\sigma_i = \frac{6}{d_i}$$

로 한다.

입자형상이 구형이 아닌 경우의 보정에는 다음식으로 정의된 구형계수를 사용한다.

$$\Psi_L = \frac{\text{호칭지름을 직경으로 하는 구의비표면적}}{\text{입군의실제 비표면적}}$$
------------------------------------- (1.52)

$$\sigma_i = \frac{1}{\Psi_L}\frac{6}{d_i} \quad \text{---------------------} \quad (1.53)$$

(3) 골재의 체적비표면적 산출방법

골재의 체가름 시험결과에서 평균체적비표면적을 구하는 경우, 각입군의 입자형상과 밀도가 동일하다고 하면,

$$\sigma_i = \frac{1}{\Psi_L}\frac{6}{\sqrt{l_{i-1}l_i}} = \frac{1}{\Psi_L}\frac{6\sqrt{2}}{l_i}$$

이므로,

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}} = \frac{l_{i-1}}{l_i} = \frac{1}{2}$$

$$\therefore \sigma_i = \frac{1}{2}\sigma_{i-1} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sigma_{i-2} = \cdots = \frac{1}{2^{i-1}}\sigma_1$$

$$\text{--------------------------------------} \quad (1.54)$$

σ_1은 $i=1$의 입군, 즉 0.075~0.15㎜인 입군의 체적비표면적이기 때문에,

$$\sigma_i = \frac{1}{\Psi_L}\frac{6}{d_1} = \frac{1}{\Psi_L}\frac{6\sqrt{2}}{l_1} = \frac{1}{\Psi_L}\frac{6\sqrt{2}}{0.015}$$

$$= \frac{566}{\Psi_L} cm^2 / cm^3$$

따라서, 골재전체의 평균체적비표면적은 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\overline{\sigma} \cong \frac{566}{\Psi_L}\sum\frac{w_i}{2^{i-1}}$$

$$= \frac{566}{\Psi_L}(w_i + \frac{1}{2}w_2 + \frac{1}{4}w_3 + \cdots)$$

$$\text{--------------------------------------} \quad (1.55)$$

입경이 0.075㎜보다 작은 미분까지를 대상으로 해서 체적비표면적을 구하는 경우에는 0.038~0.075㎜인 입군을 $i=0$의 입군

0.019~0.038㎜인 입군을 $i=-1$의 입군

등으로 해서, 식(1.55)의 제 1식을 이용하는 것이 가능하다.

(4) 골재의 형상계수

(a) 라우든(Loudon)의 형상계수

식(1.52)로 정의된 형상계수 Ψ_L는 라우든(Loudon)의 구형계수로 불린다. 정의로부터 입자형상이 구에 가까울수록 Ψ_L는 커져 1에 가까워 진다. 이것의 역수 $1/\Psi_L$은 구에 대한 체적비표면적의 배율이고, 둥근 형상의 것에서 1.1정도, 각진 것에서 1.4이상이다.

(b) 입자형상과 공극율의 관계

입경분포가 일정할 때, 골재의 공극율은 입자가 구형일 때에 가장 작고, $1/\Psi_L$과 공극율 사이에 다음 실험식으로 나타낼 수 있는 직선관계가 있다.

$$\frac{1}{\Psi_L} = 1 + \varphi(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad \text{------------} \quad (1.56)$$

여기에서,

ε : 공극율(%)/100

φ, ε_0 : 실험정수

이 식을 ε을 나타내는 식으로 고쳐 쓰면,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{1}{\varphi}\left(\frac{1}{\Psi_L} - 1\right) \quad \text{------------ (1.57)}$$

로 되고, $(1/\Psi_L - 1)$은 에서의 형상거리를, 또한, ε_0는 구형골재의 공극율을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

$1/\Psi_L$은 각짐계수로 불리고, 구에 비교했을 때의 입자 체적비표면적의 배율이므로, 공극율은 입자의 비표면적과 직선관계에 있고, 정수의 값으로서 $\varepsilon_0 = 0.42$[(2)], $\varphi = 4.44$; $\varepsilon_0 = 0.38$[(3)], $\varphi = 4.93$을 얻을 수 있다.

〔例 題〕

체가름 시험결과가 〔표 1.2〕와 같은 잔골재의 체적비표면적을 구하시오. 단, 이 골재의 입형판정실적율은 53.5%로 한다.

〔표 1.2〕 잔골재의 체가름 시험결과

i	입경범위(mm)	중량비 w_i
0	0.075이하	0
1	0.075~0.15	0.02
2	0.15~0.30	0.13
3	0.30~0.6	0.25
4	0.6~1.2	0.32
5	1.2~2.5	0.20
6	2.5~5	0.07
7	5~10	0.01

〔略 解〕

식(1.56)에 있어서 $\varepsilon_0 = 0.38$, $\varphi = 4.93$을 이용하면, $\varepsilon = 0.465$에 대한 각짐계수는

$$\frac{1}{\Psi_L} = 1 + \varphi(\varepsilon - \varepsilon_0)$$

$$= 1 + 4.93(0.465 - 0.38) = 1.42$$

식(1.55)에 따라,

$$\bar{\sigma} \cong \frac{566}{\Psi_L}\sum\frac{w_i}{2^{i-1}} = 1.42 \times 566(2 \times 0 + 1 \times 0.02 + \frac{0.13}{2} + \frac{0.25}{4} + \frac{0.32}{8} + \frac{0.20}{16} + \frac{0.07}{32} + \frac{0.01}{64}) = 163 cm^2 / cm^3$$

참고문헌

(1) 秋山 淳, 山本泰彦 : コンクリート用細骨材としてのフェロニッケルスラグの利用, 土木學會論文集 No.366/V-4, pp.103~112, 1986.2

(2) T. C. Powers : The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons Inc.,p.34, 1968

(3) 沼田晉一 : 水碎スラグのコンクリート細骨材への實用化に관する研究, p.155, 1982.