

시멘트 現場에서의 粒度分布

— Particle size distribution —

三中交易産業株式會社

技術部 成 秀 慶

◀ 내 용 ▶	
1. 序	
2. 粉體粒度와 시멘트現場	
3. 一般粒度表示論	
4. 시멘트現場의 粒度分布	
5. 結 論	

1. 序

시멘트工業에서는 粉粒體의 熱間化學反應, 粉碎, 分級, 集塵, 輸送, 壓力損失 等 제반操作에서 粒子群의 粒度特性이 매우 중요시되고 있다.

이 粒子群의 성질규명을 위한 研究로서 粉粒體의 여러特性中 粒度分布特性에 對하여는 그동안 거의 完全한 說明이 加해졌다고 할 수 있으며 實際 이러한 研究結果가 시멘트 現場및 시멘트用裝置 메이커 等に 導入되어 활발히 利用되고 있다.

結局, 現場에서의 粉體取級은 單一粒子가 아니라 粒子群이므로 이들의 粒子徑은 절대均一할 수가 없으며 程度의 차이는 있으나 各種 粒徑을 가지는 粒子들의 混合物로서 存在하므로 이들이 갖고 있는 特性은 시멘트 研究에 매우 重要한 意味를 갖고있다.

여기서는 시멘트現場에서의 粒度分布表示方法과 粒度分布特性에 對한 여러 理論과 方法을 調査하여 實際의 데이터를 使用하여 그 結果를 살펴보고자 한다.

2. 粉體粒度와 시멘트現場

現在까지의 상황으로 보아 도대체 粒子란 무엇인가에 對하여는 特別한 定義를 할 수가 없기 때문에 보통 생각하고 있는 程度의 概念만을 바

탕으로 하여 지금까지 粒體에 對한 考察이 進行되어 왔다. 拙者가 이미 現場에서 경험한 바로도 粒子들이 갖고 있는 여러特性들 例를들면 粒子의 型狀, 전기적 성질, 各種反應상태, 유동상황 等 광범위한 面에서 확실한 特性을 규명키 곤란하였으며 實際문헌에도 충분한 언급이 不足한 상태이다.

그러나 이들 粒度分布特性에 對하여는 比較的 충분한 說明이 加해졌다 할수 있기 때문에 시멘트用 裝置설계, 現場運轉, 品質관리等에 많은 도움을 주고 있으며 특히 現場의 경우 各種 工程改善 즉 海外에서 導入된 plant 단위장치의 容量을 技術檢討한다든가 혹은 처리능력(T/h)을 올리기 위한 제반 技術調査等 구체적으로 말하여 Mill, Seperator 등에서 그 處理 능력을 最大化시키고 또한 능력한계와 정밀도 等を 파악하려는데는 시멘트의 粒度分布의 特性파악이 必要하며 시멘트의 物理的성질을 豫見하려는데도 그 粒度分布상태의 파악을 必要로 한다.

그러나 문제점은 바로 이러한 粒度表示方法과 수단이 現在 극히 일부를 제외하고는 거의 導入되지 않은 상태여서 그 應用이 이루어지지 못하고 있다는 점이다.

그러므로 본 자료정리의 目的은

1. 一般으로 海外에서 使用중인 시멘트現場에서의 粒子群의 粒徑分布式에 對하여 考察해 본다.

2. 石灰石, 크링카, 시멘트 等に 각각 잘 들어맞는 粒徑分布式을 擇하여 現場에서 取해진 레이더 들을 利用하여 解析해 본다.

3. 이들 문제에 對하여 흥미있는 分들은 끝에

<소개되는 참고 문헌, 혹은 집필자에> 문의하기 바란다.

3. 一般粒度 表示論

粉體取級 工業에서는 이들 粒子들에 어떤 定量的인 解析을 加하려는 경우 보통 크게 나누어 다음과 같은 方法으로 그 粒度를 表示하게 된다.

즉 (1)比表面積, (2)粒度分布, (3)平均粒子徑들로 大別하여 볼 수 있겠는데 勿論 이들 세가지 기본 方法은 매우 중요한 기초적 事項이 될 것이다.

3-1. 比表面積

① 質量比表面積

이른바 Blaine 값으로 통칭되며 粒子單位質量의 表面積을 말하는 것으로서 $[cm^2/g]$ 으로 表示된다. 시멘트 現場에서 가장 平凡하게 使用되며 이는 粉粒體가 化學反應을 받을 경우(시멘트에서 소성, 水和等) 粒子의 比表面積이 직접 관계되고 있다고 生覺되므로 그러한 意味에서 모순이 없는 타당한 表示方法이라 할 수 있다.

② 體積比表面積

이는 粒子群의 單位容積當 그 表面積을 나타내는 것으로서 $[cm^2/cm^3]$ 으로 表示된다. 시멘트 現場에서는 使用되지 않는다.

3-2. 粒度分布(size distribution)

粒度分布상태는 粉粒體의 종류, 그리고 그 粒體의 造成原因에 따라 常異하게 되는 것이 보통이나 실제 工業에서는 어느 一定한 素材로부터 一定한 操作으로 微粒化 되는것이 그 大部分이므로 이들의 分布는 確率의 法則을 따르는 경우가 많다. 따라서 이들 粒徑分布表示式에 對하여는 많은 研究發表가 있는바 이들을 살펴보면,

- ① 頻度分布
- ② 累積粒度分布
- ③ 正規分布(Normal distribution)
- ④ Roller 分布(半對數紙)
- ⑤ 對數 定規分布(Logarithmic Normal distribution)
- ⑥ Gaudin-Schuhman 의 分布
- ⑦ Rosin-Rammler 分布

등의 分布式이 나와있다.

그러나 위의 分布式들중 ①~⑤式들은 모두 시멘트 工業粒度分布에는 쓰이지 않는다.

Herden 에 依하던 主로 殼物, 기타晶析, 昇華等 化學過程에서 만들어지는 粉體가 ③式의 分布를 따르며 규석, 방해석, 화강암, 석회석 등을 粉粹하여 얻는 粉體는 ⑤式을 따르는 것으로 되어 있다.

그러나 ⑥式과 ⑦式은 시멘트 現場에서와 같은 粉粹장치로 生成된 粉體粒度分布에 잘 따르는 式으로서 Coal Dust 및 Cement Dust 등에 잘 맞아 들어가고 있다. 그러므로 이들 分布式에 對하여는 확실히 살펴볼 必要가 있다.

3-3. 平均粒子徑

一般으로 平均粒子徑을 表示하는데는

- ① 算術平均粒子徑
- ② 表面積 平均粒子徑
- ③ 體積平均粒子徑

등의 式이 있으나 이들은 모두 시멘트 工業 現場에서는 使用되지 않는다.

4. 시멘트 現場의 粒度分布

4-1. Gaudin-Schuhman 의 式(log-log paper)

$$D=100cx^m$$

where

D: 통과 백분율 (wt %)

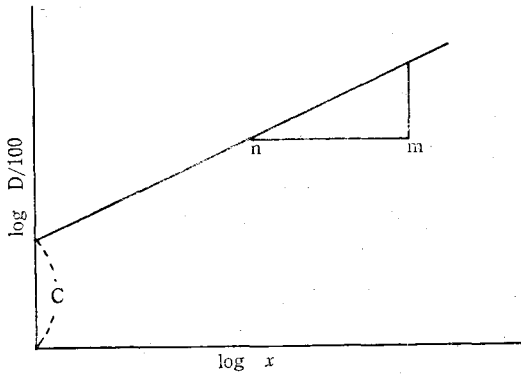
x: 粒子徑 (μ)

c, m: 定數

이 Gaudin 의 式은 시멘트 現場에 잘 따르는 式으로서 主로 美國, 英國 등에서 많이 채택되고 있다. 이 式에서 직선의 기울기를 나타내는 m 의 값은 대체로 0.5~1.0 사이이다.

4-2. Rosin-Rammler 의 分布 (R-R 分布)

Rosin 과 Rammler 에 依해 1933년에 제안된 式으로서 그동안에 계속된 확인끝에 式의 전개 方法이나 그 結果值에 모순이 없음이 밝혀졌으므로 Cement 現場에서는 중요시 되어 使用되고 있다. 즉 Ball mill 粉粹, 分級장치의 성능과약 및 정밀도 調査, 그리고 시멘트의 物理的性質等



◀Fig 1▶ Gaudin의 粒度分布線

을 예측 하려는 데에도 매우 강력한 도움이 되고 있는 수단중의 하나로서 美國, 英國 等에서는 Gaudin의 式이 많이 쓰여지는데 反하여 R-R 式은 일본, 독일, 이태리 等에서 널리 쓰여지고 있다. 그러므로 이 R-R 式에 對하여는 現場의 應用 범위를 고려하여 구체적으로 살펴볼 必要가 있다고 본다.

따라서 S 시멘트 工場, S-D Plant 에서 sampling 된 資料에 依해 이를 살펴본다면,

Rosin-Rammler의 式은

$$\begin{aligned}
 R &= 100 \cdot \exp(-kx^n) \\
 &= 100 \cdot e^{-kx^n} \\
 &= 100 \times 10^{-Kx^n} \dots\dots\dots [1]
 \end{aligned}$$

여기서 R은 잔분 %, x는 粒徑(μ)이며 K와 n은 실험으로 決定되는 定數이다.

[1]식에 Log를 取하면,

$$\text{Log } R = \text{Log } 100 e^{-Kx^n} \text{Log } e$$

◀표 1▶

S-D Plant Cement Mill 粒度分析

(1968. 3. 26)

試料	Screen 分 (%)													Blaine (cm ² /g)
	沈降天秤法 (μ)						Sieve (μ)							
	8	10	16	20	30	40	44	62	74	88	149	210	297	
Mill 出口粉	93.8	91.6	85.3	81.7	73.4	64.1	61.4	48.6	41.4	34.4	15.6	8.8	4.6	1,358
Sep 粗粉	98.2	96.9	93.9	90.8	84.7	74.7	71.6	55.2	46.6	38.6	18.4	10.6	5.8	828
Sep 精粉	72.3	63.8	51.0	43.1	29.2	20.2	16.2	8.8	6.0	4.2	0.8	0.4	0.2	2,920
Bag. F 粉	88.7	86.2	79.1	73.8	62.4	53.5	44.8	31.0	23.8	17.6	3.2	0.8	0.2	1,800
비고	시멘트와 같은 Fine Powder의 粒度分析은 매우 정밀조작을 要하는데 40 μ이하의 침강법을 사용하고 있다. 이 分析치는 日本 三菱에 보내져 行해진 후 그 結果를 통보받은 것임.													—

이를 변형시켜

$$2 - \text{Log } R = K \cdot x^n \text{Log } e$$

여기에서 두번째 Log를 取한다.

$$\text{Log}(2 - \text{Log } R) = \text{Log } K$$

$$+ n \text{Log } x + \text{Log } \text{Log } e \dots\dots\dots [2]$$

이 [2]式에서 Log(2 - Log R)과 Log x와의 관계를 Log-Log 紙에 Plot 하면 기울기와 절편으로부터 n과 K를 구할 수 있게 되는데 一般적으로 n의 값이 클수록 粉粒體의 粒徑이 均一함을 의미하며 K가 클수록 粒徑이 작음을 나타낸다.

이 n과 K를 구하는 제일 간단한 方法은 粉體의 粒度分析結果를 R-R 線圖上에 Plot 하고 얻어진 직선으로부터 R-R 線圖上에 표시되어 있는 極(Pol)方向으로 平行 이동 한 후 같은 기울기인 n(n=tan α)을 읽고 또한 K' 값을 판독함이 가장 간단한 方法이다.

拙者들은 S-D Plant 에서 1968年 3월에 Ball mill (50t/h)과 Separator의 성능과 정밀도를 調査하기 위해 Cement Dust를 각각 sampling 한 뒤 이를 粒度分析한 結果 [표 1]과 같았다.

표 1中 精粉의 粒度分析結果를 가지고 R-R 式을 通하여 n과 K를 구하여 본다던

◀표 2▶ Sep fine 粉의 粒度

粒徑 (μ)x	16	20	30	40
殘分 (%)R	51.0	43.1	29.2	20.2

(표 2)의 데이터를 式 [2]에서 計算하면,

$$16 \mu \text{은 } \text{Log}(2 - \text{Log } 51.0)$$

$$= \text{Log } k + n \text{Log } 16 + \text{Log } \text{Log } e \dots\dots\dots ①$$

$$20 \mu \text{은 } \text{Log}(2 - \text{Log } 43.1)$$

$$= \text{Log } k + n \text{Log } 20 + \text{Log Log } e \dots\dots\dots ②$$

30 μ 은 $\text{Log}(2 - \text{Log } 29.2)$

$$= \text{Log } k + n \text{Log } 30 + \text{Log Log } e \dots\dots\dots ③$$

40 μ 은 $\text{Log}(2 - \text{Log } 20.2)$

$$= \text{Log } k + n \text{Log } 40 + \text{Log Log } e \dots\dots\dots ④$$

以上 ①~④式의 計算은

$$\text{Log}(2 - 1.707)$$

$$= \text{Log } k + 1.2038 n + \text{Log Log } e \dots\dots\dots ①'$$

$$\text{Log}(2 - 1.634)$$

$$= \text{Log } k + 1.3010 n + \text{Log Log } e \dots\dots\dots ②'$$

$$\text{Log}(2 - 1.465)$$

$$= \text{Log } k + 1.4771 n + \text{Log Log } e \dots\dots\dots ③'$$

$$\text{Log}(2 - 1.305)$$

$$= \text{Log } k + 1.6021 n + \text{Log Log } e \dots\dots\dots ④'$$

위의 ①'~④'의 式을 平均法에 따라 ①'와 ②'

式을, ③'와 ④'式을 각각 舍하여 정리한다.

$$-0.971 = 2 \text{Log } k + 2.5048 n + 2 \text{Log Log } e \dots\dots ⑤$$

$$-0.431 = 2 \text{Log } k + 3.0792 n + 2 \text{Log Log } e \dots\dots ⑥$$

上記 ⑤⑥式을 소거하여 우선 n 값을 구하면

$$0.540 = 0.5744 n$$

$$n \approx 0.942$$

또한 ⑤式에서 k 를 구한다.

$$(n \approx 0.942)$$

$$-0.971 = 2 \text{Log } k + 2.5048 n + 2 \text{Log Log } e$$

$$\therefore \text{Log } k = -1.3015$$

그러므로

$$K \approx 0.040460$$

$$= 40.6 \times 10^{-3} \quad (\text{但 } k = 0.4346 k)$$

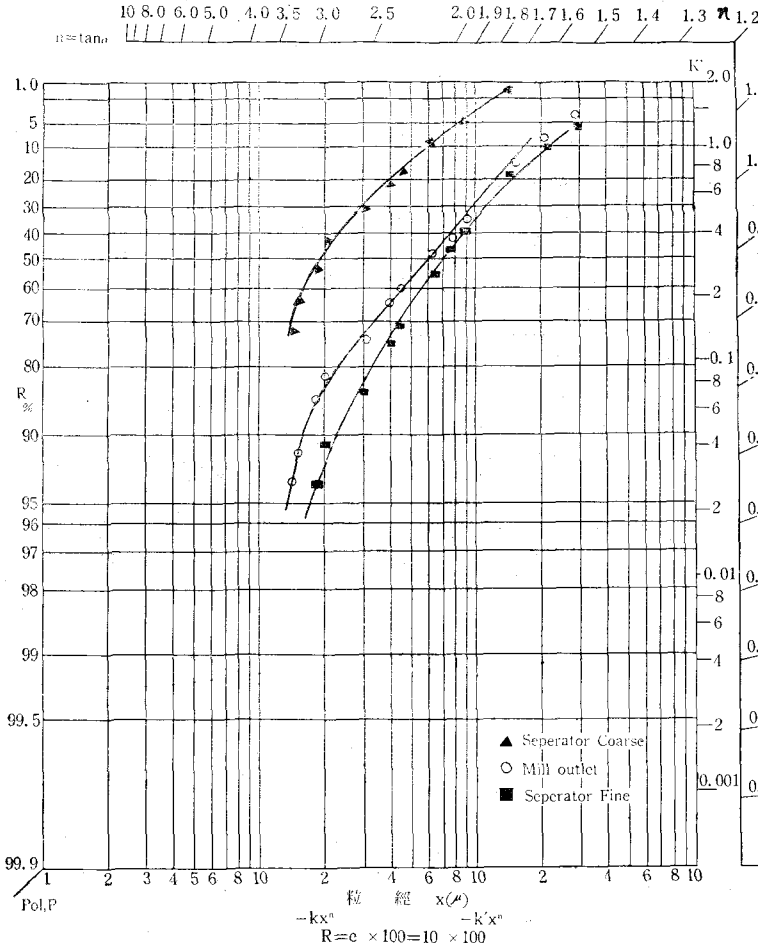
그러므로 R-R 粒徑分布의 실험식은

$$R = 100 e^{-0.0406 x^{0.942}} \text{가 된다.}$$

이와같은 計算을 通하여 본 R-R 式의 항수 n 과 k 값들은 R-R 그래프 위에 Plot 해본 結果와 同一하다. (Fig 2의 R-R 線圖)

結局 당시의 S-D Plant 3號 Cement mill (1968. 3. 26)의 製粉평가로는 n 값이 一般 범위 보다 적은 것으로 미루어 보아 다소 粒徑이 不均一하다고 볼 수 있겠으며 k 값이 一般 범위 보다 큰 점으로 보아서는 그 전체적인 粒徑이 작음을 알 수 있다.

open circuit (開回路) mill 에서의 n 값은 一般的으로 $n = 0.80 \sim 1.30$ 의 범위이며 Closed Circuit (閉回路)에서는 이보다 좀 높은 값인 $n = 0.90 \sim 1.40$ 로서 開回路보다 閉回路쪽이 평균 0.07~0.10 정도 높은 것으로 알려져 있으나 Mill의 粉碎 狀況, 粉級 장치의 종류 및 성능, 그리고 Feeding 物 等の 製 粉 狀 態에 따라 變化가 유발 될 수 있으므로 간단히 결론짓기는 곤란하다.



◀Fig 2▶ Rosin-Rammlor 線

그러나 보통의 포트랜드 시멘트는 $n=1$, $k'=13 \times 10^{-3}$ 으로 보고 있다.

4-3. 石灰石과 크링카의 粒度分布

시멘트 現場에서 원료 石灰石 等에 對한 粒度를 論하는 경우에는 粗粒率 (F.M)에 依한 表現方法이 一般的으로 채택되고 있는데 이는 본래 토목분야에서 骨材의 粒度를 表示하기 위한 方法으로 考案된 것으로서 시멘트 工場에도 채택되어 사용하는 이유는 表示方法이 合理的이기 때문이다.

① 粗粒率(F.M)에 依한 石灰石의 粒度

粗粒率을 구하는 데는 보통 0.15, 0.3, 0.6, 1.2, 2.5, 5, 10, 20, 40, 80 mm의 Size로 되어 있는 Sieve 1 Set에서 一定方法으로 Sampling된 試料를 가지고 Screening을 行한다음 각각 Size 체상에 잔류하는 시료의 중량백분율을 구한다음 그 合計를 100으로 다시 나눈 값을 말한다.

보통 粗粒率의 범위는 F.M=1~10으로서 그 最大値는 F.M=10이 되며 이는 80 mm Sieve上 100%를 의미한다.

《표 3》

S-A Plant 石灰石의 粒度分布

(1969. 12)

Sieve Size m/m	0.15	0.3	0.6	1.2	2.5	5	10	20	40	80
粒度分布 (%)	0	0	0	0	0	4	20	39	33	4
누적분 (%)	0	0	0	0	0	4	24	63	96	100
殘留分 (%)	100	100	100	100	100	96	76	37	4	0

지 않는 대신 시멘트의 경우처럼 R-R 分布法側에 따르고 있으므로 Sieve Test 結果를 R-R Paper上에 Plot 한후 직선의 方向을 調査한 다음 n 과 k 값을 考察하므로써 그 전체적인 粒徑分布의 특징을 살피는 것이 가장 확실한 方法이다.

4-4. 기타 方法

앞에 論한 구체적 方法外에도 시멘트 現場에서 一般化되어 있는 것은 어떤 粒徑의 一定크기 Screen上的 잔류백분율로 간단히 표현하는 것, 즉 例를들면 시멘트에서 「88 μ 잔사 3%」 혹은 크링카, 석회석 등에서는 「最大粒徑 30 mm」 혹은 「25 mm under size 90%」 등과 같이 매우 간단히 표현하여 사용되고 있는 바 이는 어느 粒子群의 粒度分布를 그 粒徑전역에 걸쳐 파악하는 것이 사실상 적지 않은 노력과 時間을 必要로

원료석회석 粒度表示에서 粗粒率이 合理的인 이유는 石灰石이 同心 장소에서 채석되어 같은 과정을 거쳐 生成된 粒體群이므로 이들의 粒度分布상태는 대체로 骨材와 비슷한 경향을 나타내게 되기 때문에 F.M으로 나타내기 시작한 것에 유래한다.

다음은 S-A Plant에서 調査된 實績(1969. 12)으로서 粒度分布는 [표 3]과 같았다.

따라서 粗粒率(F.M)은

$$F.M = (100 + 100 + 100 + 100 + 100 + 96 + 76 + 37 + 4) / 100 = 7.13$$

이 값은 비교적 높은 편에 속하는 것으로서 결국 원료石灰石의 粒徑이 一般的으로 굵음을 의미하며 이밖에도 粘土 및 石灰石+粘土의 混合物의 粒度表示에도 이 F.M을 사용할 수가 있다.

시멘트 工場 원료용 石灰石(원료치장분)의 F.M 값은 Mill의 종류, 용량, 분쇄조건, 채석 및 원료조건 등에 따라 상이하지만 보통 F.M=4.5~6.5 범위이다.

② 크링카의 粒度分布

크링카의 粒度分布表示에는 粗粒率이 적용되

하기 때문에 이러한 간단한 方法의 채택 사용이 一般化되었다고 볼 수 있을 것이다.

5. 結 論

시멘트 現場에서 粒度分布특성을 확실히 파악 조사하려는 의도는 製品의 品質改善 및 品質追定, 그리고 粉碎, 分級裝置 等の 성능조사와 능력向上 等を 위한 제반 操作資料 등을 얻으려는데 있으므로 이들의 보다 광범위한 應用方法이 계속 研究될 것이 요망된다.

文 獻

- ① G. Herdan; Small particle statistics (1953)
- ② R. Rosin; J. Inst. Fuel, 7, 29 (1933)
- ③ 藤田重文外 1人; 化學工學 II (1967)
- ④ 東畑平一郎外 2人; 化學裝置 (3) (1967)
- ⑤ 南宮寔; 化學機械設計原論 (1965)