

# cement 工業에 있어서의 air blending silo

朴 東 勳

<雙龍洋灰東海工場機械課長>

## I. 序 論

중래 cement 工業에 있어서 原料調合이 容易한 것, 製品의 物質性 保持가 容易한 것 등의 利點에서 濕式製造法을 많이 채용하여 왔다. 그러나 近年에 와서는 kiln 에서의 熱經濟性向上, cement 製品原價의 低減을 위하여 濕式에서 半乾式 또는 乾式製法으로 변천되는 경향이 있다.

이것은 kiln 燒成前의 豫熱方式의 개발에도 基因하지만 동시에 乾式의 경우 air blending의 採用에 의해 原料調合이 대규모이면서 쉽게 混合될 수 있게 되었기 때문이다.

kiln 에서 良質의 clinker를 계속 多量生産하려면 계속 均一한 원료를 공급하지 않으면 안된다. 따라서 air blending silo를 설비함으로써 製品의 品質向上을 기할 수 있다.

## II. 構成要素

air blending은 壓縮空氣를 整流하여 cement 粉末中에 送入시켜 粉末을 流動化시킴에 따라 均一하게 攪拌·混合을 행하는 것으로서 비교적 短時間에 大容量을 처리할 수 있어 混合效果에 대단히 優秀한 특징이 있다. 粉末의 流動化理論에 대해서는 紙面上 생략하겠으나 어떤 流動化開始速度의 값(值)을 가진 固體粒子群이 下部로부터의 整流空氣에 의해 浮遊와 同時 上向으로 加速度를 얻게 되어 粒子間에 多量の 공기를 介在시킴으로써 容積이 증대되며 單獨粒子運動의 自由度가 증가한다. silo 底部를 적당하게 나누어 各區劃間에 整流空氣를 적당히 加減하여 주면 粉體充填層中에는 自由度가 큰 부분과 적은 부분으로 차별이 생겨 自由度가 큰 범위에서의 層은 稀薄하게 된다. 말하자면 對流 현상과 같은 粉末

의 回轉移動이 행하여지게 된다. 이와 같이 air blending에 있어서는 送氣를 틀리게, 即 低壓送氣(aeration)와 強壓送氣(blending)로 분류할 필요가 있다. 低壓送氣와 強壓送氣의 面積比는 各社마다 틀리고 또 특성도 다르다.

blending aeration, cycle time과 순서를 여하히 잘 組合시키느냐에 따라 기대되는 혼합 效果를 얻을 수 있다. 한층 더 效果를 크게 하기 위해 脈動強壓送氣를 붙여 넣는 곳도 있다. 이것은 單調한 連續強壓送氣로는 粉體充填層中에 空氣의 도망갈 길, 즉 tunnel이 생겨 粉體回轉移動에 障礙물이 되므로 一定周期로 이를 붓고시킴 목적과 效果를 증대시키는 데 있다.

silo 底部는 排出을 쉽게 하기 위하여 出口를 향해 약간의 勾配를 주고 있고 그의 경사면에 放射狀으로 整流器(aeration unit)가 최대 有效送氣 면적이 확보되도록 배치된다. 이 unit群은 수개의 group으로 나누어져 있고 各 group마다 silo 壁을 관통하는 1本の 送氣主管이 설치된다. aeration과 blending을 위해 전용의 air compressor가 各 1基씩 배치되고 air 중의 水分 및 油分을 제거하는 separator, filter類가 부속되어 있다. 특히 壓縮空氣 중의 油分에 대해서는 완전히 제거되는 것이 이상적이며 만일 이것이 불완전하면 整流器의 심장부인 散氣板(aeration porous plate)이 막혀 通氣抵抗이 증대하여 混合 效果를 저해할 뿐만 아니라 porous plate의 수명을 단축한다. 油滴除去를 위한 예를 들면 coke, sponge, 羊毛, ceramics 등을 사용한 filter가 사용되고 있다. 淸淨化된 공기는 各弁을 통하여 主管에서 합류하고 silo에 유도된다. cycling

에 사용되는 valve 에는 直流低電壓으로 작동하는 直動式電磁弁을 사용하고 pannel 室 制御盤의 신호에 의해 一定周期로 개폐를 반복한다. 충분히 조합된 粉末은 silo 外로 연속적으로 뽑아내어 지지만 silo 內 充填量의 다소에 불구하고 排出量을 일정하게 保持하기 위해 rotary feeder 를 장치하고 있다.

### III. silo blending 의 設計 조건

1. blending silo 와 storage silo 의 合計容量 대체로 kiln 3 日分의 용량으로 한다.

2. silo 中の 원료와 비중

대체로 頂部 : 0.8, 底部 : 1.2,  
平均 : 1.0

3. blending silo 의 height/dia 의 비

H/D ; 1.2~1.5

4. blending silo 의 blending height

blending height 는 silo 直徑의 0.9~1.0 배가 가장 좋고 Max. 이라도 1.25, 때때로 3 배 이상을 사용하지만 그리 좋은 결과가 되지 않는다.

5. blending 에 있어서의 必要風向

全底面積當의 必要風量은 1~2 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> 사이로 정하고 있으며 보다 더 정확한 것은 원료에 따른 시험이 필요하지만 대체로 1.4 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> 정도의 것이 가장 많고 風壓은 1.5 kg/cm 정도가 한계라고 한다.

6. blending silo 의 引出用 roots blower

1) 壓力

어느 경우에서나 filling height 는 0.5 kg/cm<sup>2</sup> 를 사용하고 있고 storage silo 의 경우는 filling height 가 8 m 까지는 0.5 kg/cm<sup>2</sup>, 8 m 이상의 경우는 0.8 kg/cm<sup>2</sup> 의 roots blower 를 사용하며, blending silo 에서 blending 완료 후 30 분 이상 경과한 후 排出을 시작할 경우는 0.8 kg/cm<sup>2</sup> 의 roots blower 를 사용한다.

2) 空氣量

storage 는 放射狀 aeration unit 가 배치되어 있고 이 unit 의 2~3 列을 1 개의 group 으로 하여 동작시키고 15 분 후 다음 group 으로 移動한다. 또 15 분 후 다음 group 으로 가면서 차례로 배출하며 이때의 吹込空氣量은 (working area only 로 생각하여) 0.8~1.0 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> 가 필요하다.

### 7. blending 효과에 영향을 주는 因子

blending 효과에 영향을 주는 因子 중 水分은 1%까지 큰 영향은 없고 粒度는 88 μ, 節殘 10% 정도에서는 거의 混合效果에 차가 없으나 수분은 0.5% 정도로 하여 두는 것이 무난할 것이다.

### 8. operation time schedule

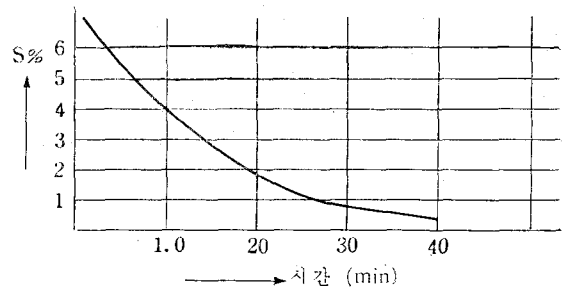
silos 充填 : 0.5 hr	} 90	Σ=90 hr
分析 : 0.25 "		
補正 : 1.0 "		
混合 : 1.0 "		
再分析 : 0.25 "		
曳出 : 6.5 "		

### 9. 電力

blending 에 있어서의 보증할 수 있는 動力消費는 0.4~0.5 kwh/ton/raw meal 이지만 실제로는 0.3~0.45 kwh/ton 의 범위에 있다.

### 10. 혼합에 의한 補正率

標準偏差 S 로서 6.2% 정도이며 blending time 과 S 와의 관계는 <그림-1> 과 같다.



<그림-1> 標準偏差와 blending 과의 관계

### IV. aeration unit

air blending silo 의 中樞部라고도 말할 수 있는 것으로 個個의 unit 는 鐵製 box 에 porous plate 를 接着 고정시킨 것이고 또는 porous plate 대신 canvas 를 넣은 곳도 있다. box 는 대개 銅板 press 成形品을 사용하여 製造原價의 降低와 寸法精度의 향상을 도모하고 있고 aeration tail 은 각사에 의해 여러 가지의 형상으로 제작하고 있으나 대개 正四角形이다. porous plate 는 주로 alumina 系 원료를 조합하여 加壓成形 후 소성한 것으로서 air blanding silo 의 기능에 적합하도록 그의 通氣度, 曲強度 등에 충분한 고려가 가해진 것이다. aeration porous plate 에는 粉末

의 유동화에 의해 下向으로 繰返動負荷를 받으므로 이 負荷 變動을 각 區劃에서 알 수 있으면 粉末의 回轉移動 즉 混合效果를 定量的으로 확인할 수가 있다.

### V. 空氣配管

silos 내 배관에 대해서 유의할 것은 silo 중심부에 대한 風量이 周邊部에 비해서 저하하지 않게 配管上의 연구가 필요하다. silo外 配管에 대해서도 일반의 配管과 같은 주의가 필요하지만 특히 compressor 吐出口에서 receiver까지는 脈動에 의한 氣柱振動과 共振을 일으키지 않게 管路의 길이를 결정하지 않으면 안된다.

### VI. air compressor 및 附屬品

管路의 설계가 적당하면 compressor의 吐出壓은 주로 silo 내 粉末充填 높이에 좌우된다(aeration porous plate의 通氣抵抗은 거의 문제가 안됨). silo內 粉末充填 높이는 경제적으로 봐서 14~15m 이상은 곤란하다. compressor 吐出壓으로서의 최대 2.0 kg/cm<sup>2</sup> 정도를 확보하면 충분하다. blending 所要風量은 silo 높이에 의해 약간 變動은 있지만 silo 單位底面積當 1~2 Nm<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> 정도가 적당하다고 생각된다.

blending 때 aeration의 風量比는 3:1 정도로 계산한다. air compressor의 부속품으로서의 이미 1항에 기재한 것과 같이 油除去 filter가 주

체가 되어 이것에 after cooler drain separator 등이 달려 있다. 이런 것을 선정하는 조건으로서는 기능적으로 충분히 만족할 수 있을 것은 물론 補修點檢 및 교환이 편리할 것도 잊어서는 안되는 요소이다.

### VII. 粉末定量 排出裝置

연속식 blending에서는 문제가 되지 않지만 batch 조작을 행할 때는 중요한 역할을 담당한다. 本裝置의 중심을 이루는 것은 silo 出口側에 설치된 service tank(또는 level box라고도 함)이고 이 중의 粉末 level을 일정하게 保持함으로써 出口 C.F.W에의 供給量은 불변이다. service tank 내부에는 level indicator 또는 부로프(電極)가 삽입되어 있다.

부로프의 장치를 간단히 설명하면 부로프와 tank 壁과의 사이에 靜電容量이 level의 상하에 의해 변화하는 것에 착안하여 이것을 電氣의 出力으로 잡아 내어 增幅한 후 電空變換하고 tank 前의 排出量制御弁에 空氣의 出力信號로서 送付하는 것이며 이 방식의 특징으로서의 連續制御가 가능하고 測定精度가 높으며 排出量의 설정이 아주 간단하다는 것을 들 수 있다. 더욱 이 電子式 靜電容量型 level 檢出計는 silo 자체에도 取付되어 粉末送込 및 배출시의 level 點檢을 용이하게 하고 있다.

<表-1>

各社의 blending 능력 비교표

項目	工場	Weislehner의 論文	Graf의 論文 A工場	Graf의 論文 B工場	雙龍 東海工場	三東 菱谷	野澤 Cement 根	麻田 生川	川重工業
型式	polysius 式	"	"	"	"	"	"	Fuller 式	川重式
silos 寸法	mφ 11.4×15	mφ 4.5×15	mφ mh 4.5×15	mφ mh 14×21	mφ mh 9×16	mφ mh 14×19	mφ mh 11×15	mφ mh 12×18	
silos 容量	600	160	160	1,700	700	2,150	760	1,350	
blower	motor (kw)	kw 100	—	—	kw 220×3	kw 220×2	kw 220×3	—	110 kw 37) ×2
	風量 (m <sup>3</sup> /min)	計 112	25	17.7~26	計 216	計 180	計 216	34.5	
	壓力 (kg/cm <sup>2</sup> )	0.8	1.05~1.25	0.9~1.3	1.5	1.2	1.5	—	1.5~2.0
多空板單位面積當風量 (m <sup>3</sup> /min/m <sup>2</sup> )	1.1	1.57	1.1~1.6	1.45	3.64	1.91	高低 1.75 1.4	0.32~0.5	
窯入原料의 HM 標準 偏差	0.3	—	—	—	0.0113	—	0.0248	0.02	
散度修正率 (s/st)	1/6.6						1/11.4		
ton當動力消費量 (blending kwh/t)	0.1	—	—	0.38	0.38	0.30	0.26		
混合總時間 (min)	60	—	—	60~180	85~100	60	360	—	

<表-2>

clinker 의 平均成分

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	ig. loss	In Sol	HM	SM	IM	Al
供給原料	23.03	5.22	3.22	66.23	1.45	—	34.42	—	2.11	2.73	1.62	4.42
clinker	22.82	5.31	3.20	65.47	1.42	0.62	0.25	0.08	2.09	2.68	1.66	4.30

VIII. blending 制御裝置

이 장치는 상술한 blending 조작을 행하는데 필요한 電磁弁의 開閉을 電氣的으로 制御하는 것이다. 종래의 장치는 接點繼電器를 사용했지만 요사이에는 transister 를 사용한 論理素子 및 磁氣增幅器와의 組合를 채용하여 接點式에서 문제가 되는 諸點, 즉 接點의 接觸不良, 短壽命, 補修의 繁雜 등을 일거에 해결하여 信賴度의 向上과 장치의 소형화를 달성했다.

IX. air blending silo 의 實例

1. 各社의 blending 能力 比較

各社의 blending 能力은 <表-1>과 같다.

2. P. plant 原料成分 調整법과 목표 성분

1) mill 入口 C.F.W 에서 조정

TL……窯入原料目標 TL-0.2%+목표로 배합한다. 실적은 75.5~76.5%의 범위내에 있다.

SM, IM……kiln 燒成過程에 있어서 drop 및 Hi-lime 補正에 의한 drop 를 보고 배합한다.

2) blending 에서 調整

blending 후 Hi-lime (TL=95~96%) 原料(補正原料)의 첨가에 의해 TL을 目標值 이내로 조정한다.

$$\text{補正 } t = \frac{(\text{TL 目標值}) - (\text{受入原料의 TL})}{(\text{補正原料의 T}) - (\text{TL 目標值})}$$

×受入量

窯入原料의 成分目標値는

TL=76.2±0.05%

SM=2.73

HM=2.11

3) 補正 후의 결과

補正 후의 窯入原料는 TL =76.2±0.05%, HM의 計測值 및 標準偏差가 0.0113 이었다.

4) 68년 8월분 원료 clinker 平均成分 및 clinker 強度

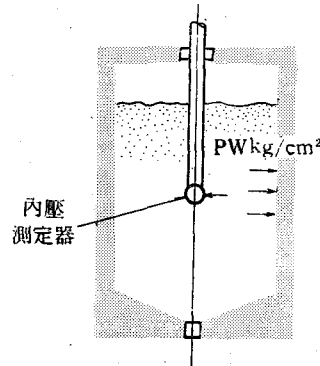
<表-2> 및 <表-3>과 같다.

<表-3> clinker 強度

日字	曲強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			壓縮強度(kg/cm <sup>2</sup> )			容量
	3 일	7 일	28일	3 일	7 일	28일	
max.	41.1	58.0	77.9	156	263	454	
min.	30.0	46.4	64.4	125	210	377	
mean	35.5	51.9	71.4	143	245	410	1180

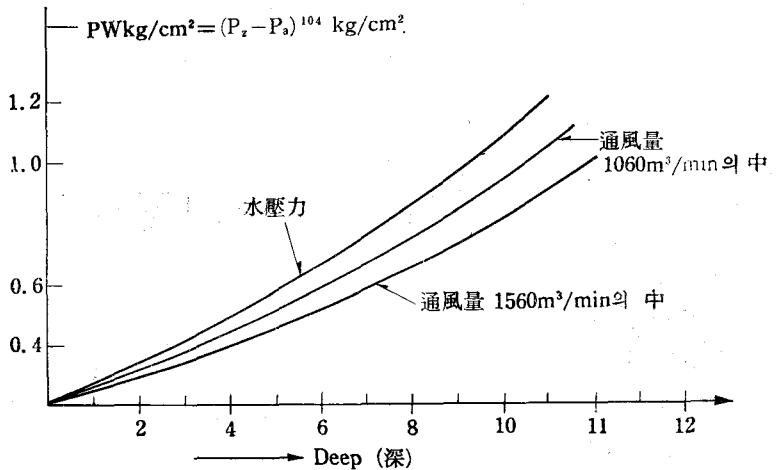
5) blending silo 內의 壓力(ZKG. 1963-11월의 Grof Weislehner 논문에서)

silo 내에 특수한 測定器具를 넣어 壓力을 측정한 결과(blending 실시 중)이다(<그림-2>, <그림-3> 참조).



<그림-2> ↑

<그림-3> ↓

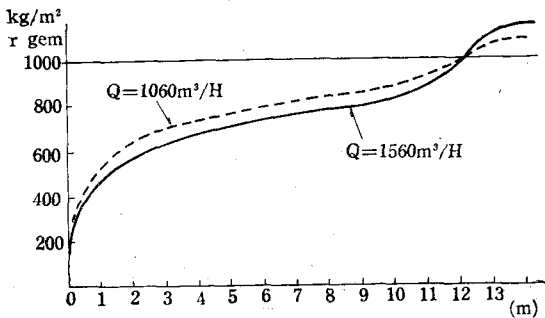


① PW와 깊이(deep)와의 관계는 <그림-3>과 같다. 通風量이 많아지면 PW는 내려 간다.

② silo 要目과 通風量

<表-4>

	A 工場	B 工場	
silos 形狀	圓形	圓形	
直徑 D(m)	4.5φ	4.5φ	
斷面積 FM	15.9φ	15.9φ	
高 H(m)	14.9	14.2	
H/D	3.31	3.15	
通風量 Q(m <sup>3</sup> /min)	1,500	1,060	1,560
" Q'(m <sup>3</sup> /min)	25	17.7	26
Q/F (m <sup>3</sup> /min)	94.4	66.7	96.1
Q'/F (m <sup>3</sup> /min)	1.57	1.11	1.6
送風壓 P(kg/cm <sup>2</sup> )	1.05~1.25	0.9~1.25	1.1~1.3
原料의 水分(%)	0.2	0~0.2	



<그림-4> 內容物의 嵩比重

③ 上記 결과에서 內容物의 嵩比重  $r_{gem}$  을 <그림-4>에서 積分하여 구하면 11~13 부근에서는  $r_{gem} > r_{MSV}$  에 달한다. 이 결과는 다음과 같은 가정하에서 행한 계산식과 아주 일치한다.

㉠ silo 底에서 표면까지의 공기의 압력 勾配는 직선적이다.

㉡ 공기는 等溫이다.

㉢ 粉末의 空氣負荷는 silo 높이에 대해서 一定하다.

6) air blending 의 혼합 효과(ZKG 1962-P社 kiln 의 논문)

① air blending 은 air 를 粉體 中에 flow-in

함으로써 발생하는 亂脈狀에 의해 행하여지고 亂脈이 크면 클수록 효과는 크다.

② 혼합의 효과에 미치는 인자

混合空氣量

通風方式

原料의 充填 높이

混合時間

混合 전의 標準偏差

③ Polysius식 blending 의 경우에 대해서 실험한 결과 混合時間과 標準偏差(石灰石 含有量의)와의 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\log \frac{SA}{SE} / t = A \dots\dots\dots ①$$

SA.....混合 전의 S

SE.....混合 後의 S

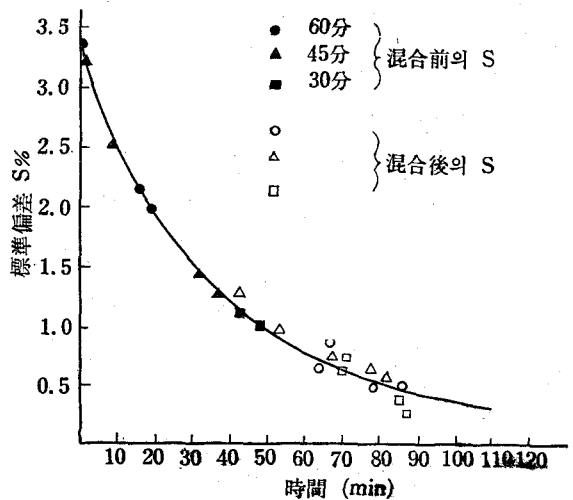
t.....min

A.....混合係數

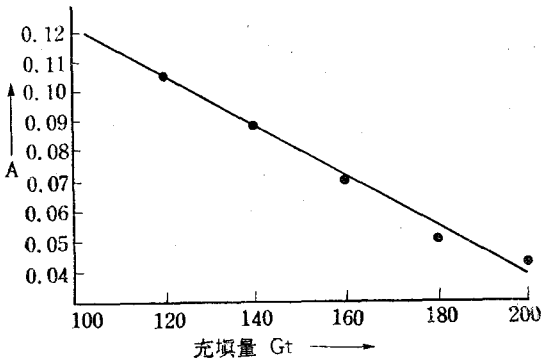
A 를 계산해 내므로 해서 混合時間을 미리 상당히 정확하게 결정할 수 있다.

④ 充填量과 混合係數와의 관계

充填量이 적을수록 當然히 A는 크게 되고 混合時間은 짧게 된다. 이것이 同一條件下에서 최대의 원료를 혼합하는 最適充填量 G max. 을 구하는 것이다.



<그림-5>



<그림-6>

즉 <그림-6>의 직선을

$$A = -Gm + b \dots\dots\dots ②$$

또 ①式에서 단위 시간당의 혼합량  $gr$  는

$$gr = \frac{G}{t} = \frac{GA}{\log\left(\frac{SA}{SE}\right)} \dots\dots\dots ③$$

①, ②식에서

$$\frac{dy}{ds} = \frac{-2Gm+b}{\log\left(\frac{SA}{SE}\right)} = 0 \text{ 으로 놓고 } G \text{ 의 최대치를 구하면}$$

$$G = \frac{b}{2m} \text{ 가 된다.}$$

7) air blending 을 평가하는 특성치(ZKG. Weislehner 氏의 논문)

blending 장치의 성능을 평가하는 特性値로서 half mixing valve  $T$  를 사용함이 좋다.  $T$  는 최초의 標準偏差  $SA$  를 1/2 로 하는데 필요한 시간을 표시한다. Klein 氏 논문의 식을 catalogue graph 로 표시하면 직선식이 되어  $S = e^{-At+b}$  또는  $SE = SA^{e^{-At}}$  이니까

$$SE/SA = 1/2 = e^{-At} \quad \therefore T = \frac{\log 2}{A}$$

또 送風機效率  $N$  을 사용하면

$$\text{比動力消費 } NS = \frac{N \cdot T}{Q} \dots\dots\dots ④$$

Gemunden 에 의한 3 개의 blending silo 에서 구하여진 값은

$$\text{silo 內徑 } 11.4 \text{ m } \phi \quad F=100 \text{ m}^3$$

$$\text{充填平均高 } 9.4 \text{ m} \quad I=940 \text{ m}^3$$

底面에 80%로 porous plate 가 깔려 있고 혼합 방식은 Polysius Kreising 방식

$$\text{混合風量 } 2 \times 56 \text{ m}^3/\text{min} \quad 0.8 \text{ atii(gauge)}$$

$$\text{消費動力 } 86 \text{ kw}$$

充填量 600 t

碎製物의 組成은 100 회, 혼합물의 조성은 60 회의 混合 test, 混合時間은 60 분이다.

$$\text{比動力消費 } NS = \frac{172 \times 21/60}{600} = 0.1 \text{ kwh/t}$$

또 다른 例로 보던 600t,  $SA=3.5$ ,  $SE=0.2$  의 경우  $NS=0.445 \text{ kwh/t}$  이다.

$$\text{이 때의 混合時間 } t = \frac{600 \times 0.445}{172} = 1.55 \text{ hr} \\ = 93 \text{ min}$$

<表-5>

	A silo	B silo	C silo
最初의 標準偏差 $SA(\text{CaCO}_3\%)$	2.18	2.60	2.92
最後의 標準偏差 $SE$	0.29	0.33	0.37
kiln 에 의한 混合係數 $\frac{A}{A}$	0.0336 min-1	0.0344	0.0338
$T = \frac{\log 2}{A}$	2.08 min	20.5	20.6

8) 終末速度 및 流動化 개시 速度

① 88  $\mu$  의 cement 원료가 60°C 의 공기 중 에서 自由落下하는 경우의 終末速度

$$PS=2.8 \text{ g/cm}^3 \quad DP=0.0088 \text{ cm}$$

$$PF=0.001026 \text{ g/cm}^2$$

$$\mu F=2.01 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{s}$$

$$C_o N_{rem} = \frac{4 \cdot G \cdot DP^3 \cdot PF \cdot (fS - fF)}{3 \cdot \mu F^2}$$

$$= \frac{4 \times 980 \times 0.0088^3 \times 0.001026 \times 2.8}{3 \times (2.01 \times 10^{-4})^2}$$

$$= 63.5$$

$$N_{rem} = \frac{PF \cdot DP \cdot \mu t}{\mu F} = 2.15$$

$$\therefore \text{終末速度 } \mu t = 48 \text{ cm/s} = 0.48 \text{ m/s}$$

② 見掛比重  $P_a=1$ ,

靜止空隙率

$$\epsilon_c = P_a - \frac{1}{\rho_s} = 1 - \frac{1}{2.8} = 0.643 \text{ 이면}$$

流動化開始速度는

$$\mu mf = 0.012 \times (\mu t \cdot \epsilon_c)^{1.5} = 2.06 \text{ cm/s}$$

$$= 1.24 \text{ m/min}$$

③ 流動化를 위한 風量 silo 直徑  $D=14 \text{ m}$  라 하면

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 \mu mf = 191 \text{ m}^3/\text{min}$$