

크링카 사일로에서의 傳熱 計算法

K. Hering

徐 一 榮 譯

<漢陽大學校 窯業科>

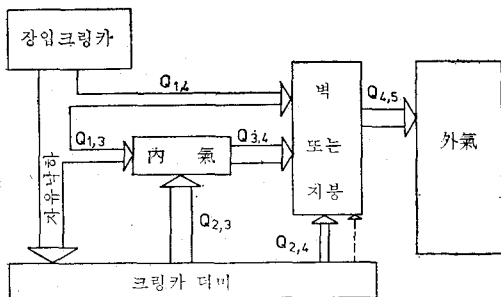
시멘트 공업에서는 차츰 rotary kiln 의 용량이 커감에 따라 silo 등 저장설비에 대한 크링카의 냉각정도를 경제적 관점에서 조정하기에 여러 가지 문제점들이 있다.

大型 silo 에서 실제 어느 정도 高溫상태가 되는가에 대해 최근 여러가지 측정이 행해져 왔으며, 열응력 (thermal stress) 의 계산에도 여러가지 방법이 제시되어 왔다.^{1,2)} 이러한 연구방법에 대한 보완으로 silo 에 시멘트 크링카 적재중 일어나는 열의 거동에 대한 계산법 몇가지를 제시하고자 한다.

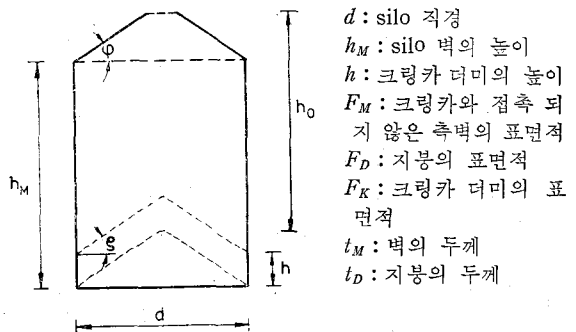
크링카 적재도중 일어나는 열평형 계산은 필요에 따라 定性的인 관계만 지적하겠으며, 非正常狀態 또는 위치에 따라 온도가 변할 때 등에 대해 좀더 정밀한 분석은 하지 못했다.

열은 다음 세가지 방법 즉,

- ① 전도(코체 내부의 입자와 입자간의 열전달).
- ② 대류(유체 각 부분의 온도차에 따른 비중차로 인한 물질 자체 이동에 의한 열전달)
- ③ 복사(복사에너지 형태로의 열전달)에 의해 전달된다.



<그림-1> silo 내부 열전달의 개략도



<그림-2> 크링카 silo 의 개략도

- d : silo 직경
- h_M : silo 벽의 높이
- h : 크링카 더미의 높이
- F_M : 크링카와 접촉되지 않은 벽의 표면적
- F_D : 지붕의 표면적
- F_K : 크링카 더미의 표면적
- t_M : 벽의 두께
- t_D : 지붕의 두께

이와같은 모든 열전달 형태가 크링카 silo 에서 일어나게 되며, 그 열전달 통로도 <그림-1>에 간단히 나타낸 바와 같이 여러가지 길로 일어나게 된다.

silos 에 장입되는 크링카가 보유한 열의 일부는 silos 中の 內氣에 전달되며, 일부는 silos 의 벽과 천정면에 전달되었다가 점차 外氣에 전달되게 된다.

이 열전달 과정의 계산을 위해서 다음 항목을 가정하고자 한다.

- (a) 대부분의 열은 크링카 표면으로부터 內氣에 전달되어진다.
- (b) 크링카로부터 silos 벽에 직접 전달되는 열은 무시한다.

1) Martens : Überschlägige Ermittlung der Temperaturen in Klinkersilos (미발표)
 2) Klischat : Temperatur messungen an einem Stahlbeton-Klinkersilo, Zement-Kalk-Gips, 25 (1972), 494.

(c) 저장된 크링카 내부에 있어서의 열교환은 고려하지 않는다.

이 가정의 타당성은 silo 에 오랜동안 보존한 내부의 크링카가 아직 뜨겁다는 사실로서 입증된다. 이는 silo 에 저장도중에는 크링카 더미 내부에서는 거의 열 교환이 일어나지 않는다는 것을 의미한다.

따라서 크링카가 보유하는 열의 전달은 다만 다음 경우를 생각할 수 있다.

① 크링카가 silo 내부에서 낙하할 때의 열교환

② silo 에 쌓여진 크링카 더미의 표면에서 內氣와의 열교환,

크링카 덩어리가 silo 内部에서 자유낙하할 때 內氣와 접촉상태에 있기 때문에, 이때 크링카가 보유하는 열의 일부분은,

④ 內氣에 전달되며

⑤ 열복사로서 silo 의 벽면과 천정에 전달되게 된다.

여기서 낙하시 크링카 덩어리들이 서로 접촉되지 않고 각각 완전히 內氣로 둘러 싸여있다고 가정한다.

크링카 장입속도 G (t/h)와 낙하시간 t ($=\sqrt{2(h_0-h)/g}$)에서 환산비표면적 (reduced specific surface area)은 다음식에서 구해진다.

$$f^*(h) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{g}} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{G}{\gamma} \cdot f \cdot \sqrt{h_0-h}$$

$$= 0,000125 \frac{G}{\gamma} \cdot f \cdot \sqrt{h_0-h} \dots \dots \dots (1)$$

단 f : 크링카의 비표면적

γ : 부피비중 ($=1.5t/m^3$)

g : 중력가속도

h_0, h : <그림-2> 참조

Pieper³⁾는 부유에열기附 kiln 에서 제조된 크링카의 비표면적 $f=1500m^2/m^3$ 라 하였다.

silo 입구에서의 크링카의 온도를 T_1 이라 하고 silo 바닥에 쌓인 크링카 더미 위에 낙하하여 부딪칠 때 크링카 온도를 T_2 , 內氣의 온도를 T_4 라 하면, 낙하할 때 크링카의 평균온도는

$$T_{1,2} = \frac{(T_1+T_2)}{2} \dots \dots \dots (2)$$

전달된 열량은

$$Q_{1,3} = \alpha_1 \cdot f^*(T_{1,2} - T_4) \dots \dots \dots (3)$$

단 α_1 : 공기에 대한 크링카의 전열계수 ($=10,3kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$)

f^* : 환산비표면적

복사전열은 다음과 같이 추산된다.⁴⁾ 절대온도 $\theta_{1,2} (=T_{1,2}+273^\circ)$ 인 크링카로부터 내부표면절대온도 $\theta_6 (T_6+273)$ 인 silo 內面에 대한 복사전열량은

$$Q_{1,4} = f^* \cdot C_{1,4} \left[\left(\frac{\theta_{1,2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_6}{100} \right)^4 \right] \dots \dots \dots (4)$$

유효복사전열계수 $C_{1,4}$ 는 두 매질의 복사전열계수 C_1, C_4 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$C_{1,4} = \frac{1}{1/C_1 + \varphi(1/C_4 - 1/C_s)} \dots \dots \dots (5)$$

단 φ : 면적비 (f^*/F_i)

F_i : silo 의 內表面積

크링카와 접촉되지 않은 측벽의 표면적을 F_M , silo 지붕의 표면적을 F_D 라 하면

$$F_i = F_M + F_D$$

크링카의 복사전열계수 C_1 은 흑체의 복사전열계수 $C_s=4.96Kcal/m^2h(^\circ K)^4$ (Stefan 상수)와 灰色體의 흡수율 $Agr(\sim 0.90)$ 로부터 구할 수 있다.

$C_1 = Agr \cdot C_s = 0.90 \times 4.96 = 4.46kcal/m^2h(^\circ K)^4$
silo 벽의 복사전열계수는

강철 벽일 경우 ($Agr \sim 0.65$)

$$C_4 = 0.65 \times 4.96 = 3.22kcal/m^2h(^\circ K)^4$$

콘크리트 벽일 경우 ($Agr \sim 0.85$)

$$C_4 = 0.85 \times 4.96 = 4.21kcal/m^2h(^\circ K)^4$$

이상의 결과로부터 크링카가 silo 中에서 자유낙하할 때 열전달 계산은 다음식으로 구할 수 있다.

$$C_K \cdot G \cdot (T_1 - T_2) = Q_{1,3} + Q_{1,4}$$

$$= \alpha_1 \cdot f^* \cdot \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_4 \right) + f^* \cdot C_{1,4} \left[\left(\frac{T_1 + T_2}{2} + 273 \right)^4 - (\theta_6)^4 \right] \cdot 10^8 \dots \dots \dots (6)$$

단 C_K : 크링카의 비열 (0.20 kcal/kg)

크링카가 silo 바닥에 쌓인 크링카 더미 위에 떨어진 후 열전달은 silo 中 內氣와 직접 접촉하

3) Pieper, K.: Vorschläge zur Neufassung der Silonormen (미발표)

4) —: Hütte I. 27. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1950, S. 599.

고 있는 부분에서만 일어나게 된다.

원추형 크링카 더미의 표면이 평탄하지 못하다는 관점에서 Martens¹⁾는 이 경우 크링카의 표면적으로부터 복사표면적을 계산하는데 다음식을 제시하고 있다.

$$F_{eff} = 0.75 F_K \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{3}} = 2.72 F_K \dots (7)$$

단 F_K : silo에 쌓인 크링카 더미의 표면적이 식에서 중점을 두고 있는 기하학적인 관점이 몇가지 불분명한 점에 기초를 두고 있기 때문에, 원추형 크링카 더미로부터 內氣에 대한 전열에 관계되는 계수 α_2 를 실측에 의해 결정하는 것이 훨씬 간단할 것 같다(실측으로 $\alpha_2=2.5\alpha_1$ 이었음).

크링카 더미의 표면에서 silo 內面 벽에 전달되는 복사전열을 고려하면 전체적인 열지수는 다음식과 같다.

$$C_K \cdot G(T_2 - T_3) = Q_{2,3} + Q_{2,4}^* = \alpha_2 F_K (T_3 - T_4) + F_K \cdot C_{2,4}^* [(T_3 + 273)^4 - (\theta_0)^4] \cdot 10^8 \dots (8)$$

$$\text{여기서 } C_{2,4}^* = \frac{1}{1/C_1 + \varphi^*(1/C_4 - 1/C_3)} \dots (9)$$

$$\varphi^* = F_K / F_i$$

T_3 : 크링카 더미의 평균표면온도

이 식은 角關係를 고려한 정밀한 것은 아니다.

또 silo 벽 및 천정으로부터의 전열을 고려하려면, silo 벽 및 천정면으로부터 外氣에 대한 放熱, silo 벽 내부에 있어서의 열전도, 벽면에 의한 열량흡수를 생각해야 된다.

$$Q_{4,5} = \alpha_1 \cdot F_i (T_7 - T_5) = \frac{\lambda}{d} \cdot F_i (T_6 - T_7) = Q_{3,4} + Q_{1,4} + Q_{2,4} = \alpha_3 \cdot F_i (T_4 - T_6) + Q_{1,4} + Q_{2,4} \dots (10)$$

단 T_5 : 外氣의 온도

T_7 : silo 外部 벽면의 표면온도

α_3 : 內氣의 벽(또는 천정)에 대한 열전달계수

α_4 : silo 벽(또는 천정)의 外氣에 대한 열전달계수

결과적으로 內氣의 열수지 면에서 볼 때

$$Q_{3,4} = Q_{1,3} + Q_{2,3} = \alpha_3 \cdot F_i (T_4 - T_6) = \alpha_2 F_K (T_3 - T_4) + \alpha_1 \cdot f^* \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_4 \right) \dots (11)$$

전열계수 α_3 와 α_4 는 다음과 같이 추정된다.

	강화 콘크리트	강 철
α_3	6	7 kcal/m ² ·h·°C
α_4	10	12 kcal/m ² ·h·°C

(6), (8), (10), (11)식을 사용하면 既知數 T_1, T_5 로부터 T_2, T_3, T_4, T_6, T_7 을 구하는 5개의 방정식을 만들 수 있다.

복사전열을 고려한다는 것은 크링카의 silo 입구에서의 온도 T_1 과 外氣온도 T_5 로부터 계산하려는 이 5개의 방정식이 非線形 4차 방정식이 되므로 해답을 얻기가 매우 어렵다.

실제 계산에 있어서는 T_6 를 추정하여 (6)식과 (8)식으로부터 T_2, T_3 를 구하고 (10)식을 사용하여 外氣온도 T_5 를 T_6 의 함수로 구하고, 보간법을 사용하여 외기온도로부터 실제 벽면의 온도를 구할 수 있다.

實例

계산상 몇개의 변수에 의한 영향을 실험을 통해 조사해 보겠다. 특히 크링카 장입 속도, silo 입구 크링카 온도, silo 중의 크링카 적재 높이가 특히 흥미로운 결과를 나타냈다.

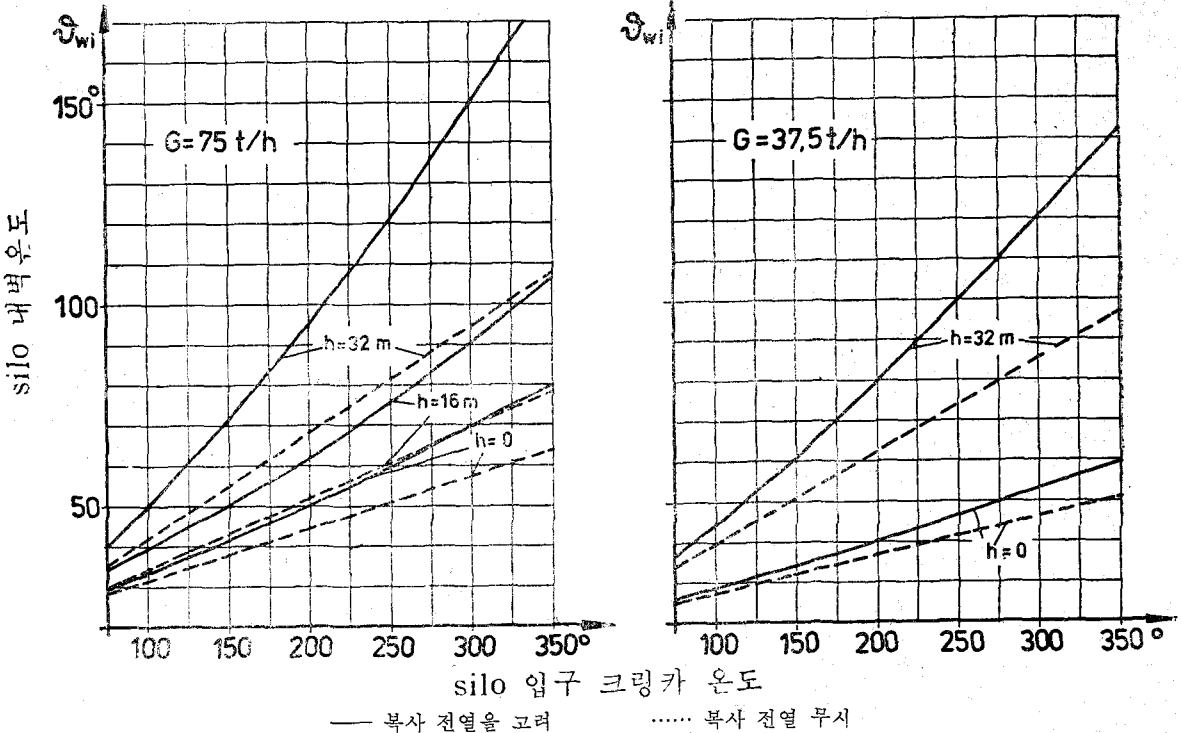
복사전열의 효과도 잘 알 수 있었다. 이들 자료는 <표-1>과 <그림-3>에 나타냈다. 이 실험은 10mm 두께의 강판제 silo(직경 25m)에서 두 가지의 크링카 장입속도로 실험을 행한 결과다. <그림-3>은 각각 장입속도 $G=75t/h$ 와 $37.5t/h$ 일때 silo 벽의 평균온도를 입구의 크링카 온도에 대한 함수로 나타낸 것이다. 그림 중 세가지의 곡선은 크링카 적재 높이가 다를 경우를 나타낸 것이고, 실선은 복사전열을 고려하였을 경우며 점선은 무시한 경우를 나타낸 것이다.

이 결과에 의하면 복사전열도 신중히 고려해야 될 것으로 나타나 있다. 크링카의 장입속도도 silo 벽온도 상승에 큰 영향을 미치고 있으며, silo 벽의 過熱을 피하려면 특히 마지막 단계의 크링카 장입속도를 낮추어야 한다는 것으로 추론할 수 있다.

이 실험에 있어서 여러가지 자료들은 실험적인 것으로 實證된 것은 아니지만, 각 변수의 定性的인 관계를 나타내는데는 지장이 없다.

silo $\phi=25\text{m}$, $h_M=h_0=32.5\text{m}$, $t_D=t_M=10\text{mm}$, $\theta=35^\circ$, $\varphi=35^\circ$, $T_5=20^\circ$

크링카 더미의 높이	$F_i(\text{m}^2)$	$G = 75 \text{ t/h}$			$G = 37.5 \text{ t/h}$		
		f^*	φ	$C_{1,4}$	f^*	φ	$C_{1,4}$
$h = 0$	3152	53.4	0.017	4.43	26.7	0.008	4.44
$h = 16 \text{ m}$	1895	38.1	0.020	4.43	19.1	0.010	4.44
$h = 32 \text{ m}$	638	6.6	0.010	4.44	3.3	0.005	4.45



<그림-3> silo 입구 크링카 온도 및 크링카 적재 높이에 대한 silo 내벽의 평균 온도의 변화

<기 호>

- T_1 : silo 입구의 크링카 온도
- T_2 : silo 中에 쌓인 크링카 더미 위에 부딪칠 때 크링카 온도
- T_3 : 크링카 더미의 평균 표면 온도
- T_4 : 內氣의 온도 (silo 內에서 어느 곳이나 일정하다고 가정)
- T_5 : 外氣의 온도
- T_6 : 크링카 더미와 접하지 않은 silo 벽 및 천정 내면의 온도
- T_7 : silo 천정 및 벽 외면의 온도
- α_1 : 크링카의 공기에 대한 열전달 계수 ($=10\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)
- α_2 : 크링카 더미의 공기에 대한 열전달 계수
- α_3 : 內氣의 silo 벽 (또는 천정)에 대한 열전달 계수

- α_4 : silo 벽의 外氣에 대한 열전달 계수
- λ : silo 벽의 耐熱度
- C_K : 크링카 비열 (0.20 kcal/kg)
- G : 크링카 장입속도
- γ : 부피비중 ($=1.5 \text{ t/m}^3$)
- t : 낙하 시간
- g : 중력가속도
- f : 크링카의 비표면적
- $f^*, f^*(h)$: 환산 비표면적
- F_i : silo의 內面積
- F_K : silo 內 크링카 더미의 표면적
- φ : 면적비 f^*/F_i
- φ^* : 면적비 F_K/F_i
- $C_{1,4}$: 면적비 φ 일 경우 유효 복사전열계수
- $C_{2,4}$: 면적비 φ^* 일 경우 유효 복사전열계수