단열보완에 의한 Kiln 및 Preheater 방열손실 감소사례

추 대 영
〈쌍용양회(주) 동해공장〉

1. 서 론

Clinker 소성에 소요되는 열량 중 Kiln Shell 및 Preheater 표면으로 방산되는 열량이 차지하는 비율이 약 10%로 열소모량 절감을 위해 방열손실 감소대책이 절실하게 요구되었다.

본고에서는 각 부위별 단열보완 방법 및 절감가능 열량을 각론 형식으로 정리하였다.

2. Kiln Shell 에서의 열소모량 분석

Kiln 계에서 각 부문별 소비열량을 보면 〈표-1〉과 같다. 우선 Clinker 소성에 필요한 이론소성열량을 들 수 있는데, 이 열량은 Clinker module 에 따라 다소 차이가 있으나 대체로 420 kcal/kg·cli 수준으로 전체의 약 56%를 차지한다. 한편 Preheater 배Gas에 의한 손실열량이 약 180 kcal/kg·cli로 약 24%, Clinker 현열에 의한 손실열량이 약 23 kcal/kg·cli로 3%를 차지하고 Kiln Shell 및 Preheater 표면을 통한 방열손실 열량이 약 10%를 차지하며 나머지 약 10%가 Cooler 및 기타 손실열량이 된다.

3. 방열손실 감소 방안

Kiln 및 Preheater 에서의 방열손실을 감소시키기 위해서는 내화재료를 통한 전열량을 감소시킬 필요가 대두된다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 단열을 보완하는 방법과 사용 내화재료의 열전도율을 저하시키는 방법이 있다.

그러나 내화재료의 사용 특성상의 이유 때문에 후자방법의 적용에는 문제가 있어 전자의 방법이 주로 적용되고 있다.

각 부위별 단열보완 방법으로는 다음과 같은 방법을 들 수 있다.

① Kiln 동체 : 단열형 연와 사용
② Castable 시공부위 : Precasted block과 단열재 사용
③ Preheater : 단열재 추가사용

Kiln System 의 각 부문별 소요열량(Planetary Cooler 부 Kiln 의 경우)

〈표-1〉

항 목		이론소성열량	배 Gas 손실열량	Clinker 현열	표면손실열			계
					Kiln	Preheater	Cooler	
출열	Kcal/kg·cli	420	180	23	37	34	*50	744
	%	56	24	3	5	4	8	—

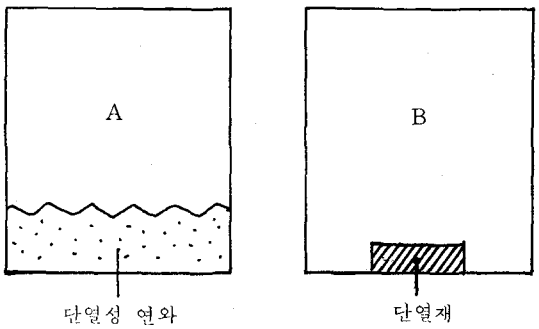
주 : * 표면 손실열은 Planetary Cooler 의 외부 Water Spray 에 의한 손실열량을 포함함.

3-1. Kiln Shell 표면 손실열 감소방안

Kiln Shell 표면온도 절감은 방열손실량의 감소라는 측면외에 Girth gear 등 기계장치의 보호라는 관점에서도 절실히 요구되고 있다. 표면온도 절감방안으로는 다음의 두 방법이 실용화되고 있다.

그 한 방법은 연와의 구조를 〈그림-1 (A)〉와 같이 열전도율이 낮은 재질을 결합시킨 이중구조의 연와를 사용하는 방법이다.

또 다른 방법은 〈그림-1 (B)〉와 같이 연와의 비가동면에 단열재를 부착 또는 삽입 가능하도록 홈을 제작하여 단열을 보완하는 방법이 있다. 그런데 위의 두 방법 중 (A)의 방법은 단열성 연와의 취약성과 제작비 상승 등이 예상되어 국내 제작구입이 용이한 (B)의 연와를 사용하였다.



〈그림-1〉 **Kiln 단열형 연와**

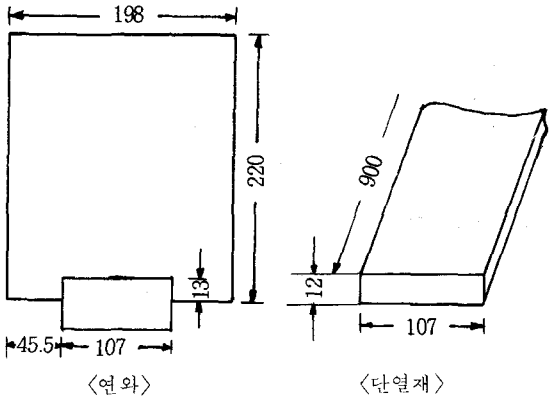
1) 사용연와 및 단열재의 규격 및 재질

Kiln 단열보완 부위에 사용된 연와는 종래부터 사용해오던 재질의 연와를 단열재 사용이 가능토록 형상을 변경하여 사용하였다. 단열재로는 국산재질인 Silica-Alumina계 섬유로 제조된 Board를 사용하였다. 각각의 재질은 〈표-2〉와 같으며 단열형 연와의 형상은 〈그림-2〉와 같다.

연와 및 단열재 재질표

〈표-2〉

	재 질	기공율	열전도율 (kcal/m·℃·hr)	사용온도	비중
연 와	Direct bonded basic	17%	2.7	SK40<	3.0
단열재	Silica-Alumina 계		0.1	1300℃	0.25



〈그림-2〉 **단열형 연와 형상**

2) 단열형 연와 사용시 Kiln Shell 표면온도

사용연와의 열전도율이 2.7 kcal/m·℃·hr 인 경우 Kiln 내부온도를 1300℃라 가정하면 이론적으로 단열재를 사용하지 않은 경우 Kiln Shell 표면온도는 407℃가 되는 반면, 단열재를 사용할 경우 Kiln Shell 표면온도는 281℃가 되어 표면온도가 126℃ 저하된다.

단열형 연와 사용시 온도저하 효과는 단열재를 사용한 부위만 나타나게 되어 실제 Kiln Shell 표면온도는 단열면적 비율(54%)만큼인 68℃가 저하될 것으로 예상되나 실제 사용시 측정한 결과로는 약 40℃ 정도로 나타났다. 이는 단열재와 연와의 접경부의 온도상승으로 인한 미단열부로의 열흐름이 발생되어 Kiln Shell 표면온도가 상승되기 때문인 것으로 판단된다.

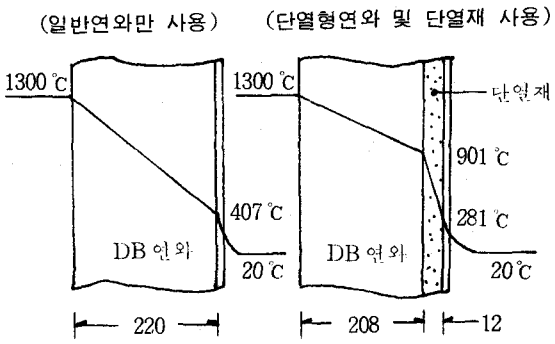
3) 단열형 연와 사용시 경제성

5.2 mϕ, 4500 T/D Kiln에 단열형 연와를 10 m 축로한 경우 재료비는 약 50 만원 증가하는 반면 방열손실 감소에 의한 연료비는 약 1,200 만원이 절감되어 년간 Kiln 4 기에서 4,600만원의 비용절감 효과가 예상된다.

Kiln Shell 표면온도

〈표-3〉

구 분	계산온도(℃)	실측온도(℃)
일 반 형	407	395
단 열 형	339	353
차 이	▼68	▼42



〈그림-3〉 **단열재 사용여부에 따른 전열 특성도** (D.B연와의 경우)

주) Kiln Shell 두께는 무시.

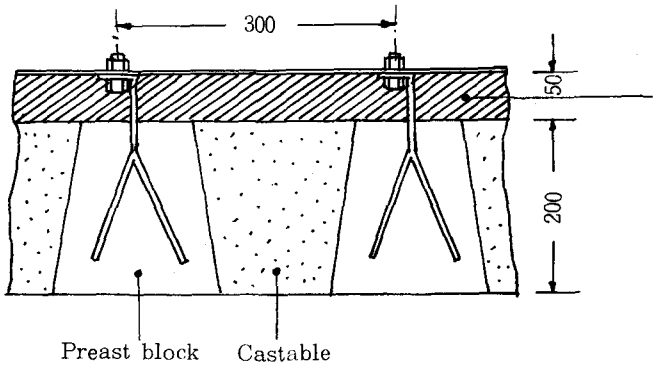
3-2. Castable 시공부 단열(천정부위)

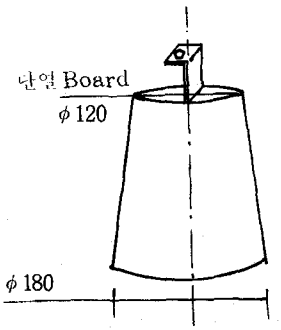
현재까지의 Castable시공방법으로는 단열재를 사용하는데 어려움이 있어 시공부위의 단열을 실시하지 못하였으나 Castable 사용부위를 통한 방열손실 감소의 중요성이 점차 인식됨에 따라 단열재의 사용이 가능한 방법을 고안하였다.

즉 종래의 Castable anchor 대신에 Precasted block을 사용함으로써 단열재를 사용할 수 있게 되었다. 〈그림-4〉와 같이 Precasted block을 Castable 시공부 위에 bolt로 조립하고 block과 casting 사이에 단열재를 삽입하고 casting 하는 방법을 응용하였다.

1) **Castable 및 단열재 재질**

Precasted block용 Castable은 종래 사용하





주) Precasted block의 제작은 자체 제작하여 추가 소요제작비는 없었음.

〈그림-4〉 **Precasted block을 사용한 단열재 시공방법**

5.2 mϕ, 4500 T/D Kiln의 경우 10 m 축로시 경제성

〈표-4〉

구 분	축로 재료비 (천원/년)	표면 온도 (℃)	방열손실열량	
			kcal/ m^2·hr	kcal/ kg·cli
일반형 (A)	64,704	395	10,232	8.9
단열형 (B)	65,222	353	8,110	7.1
차이(B-A)	▲518	▼42	▼2,122	▼1.8
금액적효과	절감액 = 11,477 천원/년·기			

주 : 1. 축로비용은 단열형의 연와 수명이 일반형(18개월)보다 20% 감소하는 것으로 가정하여 계산.

2. 방열손실열량 및 금액적 효과는 실측온도를 기준으로 계산.

3. 열소모량 절감효과는 70%만 회수되는 것으로 가정하여 계산.

4. 금액적 효과

절감액 = 방열손실 절감액 − 축로비 절감액

= 1.8 × 0.7 × 1,360 천톤(cli)/년·기 × 7 원/ 10^3kcal − 518 천원

= 11,477 천원/년·기

던 재질을 그대로 사용하고 단열재는 Calcium-Silicate계 board를 사용하였으며 각각의 재질은 〈표-5〉와 같다.

Castable 및 단열 Board의 재질

〈표-5〉

	재 질	열전도율 (kcal/m·℃·hr)	비중	사용온도 (℃)
Castable	SiO_2, 51%	0.63	1.85	1,400
단열Board	규산, 칼슘계	0.05	0.22	1,000

단열재 사용시 표면온도(Castable 경우) 및 방열손실 열량

〈표-6〉

구 분	표면온도 (℃)	방열손실열량 (kcal/m^2·hr)
Castable만 사용시(A)	187	2,553
Precasted block 및 단열Board 사용시(B)	91	842
차 이 (B−A)	▼96	▼1,711

2) Procasted block 및 단열재 사용시 표면온도

사용 Castable의 열전도율이 0.63kcal/m·hr·℃인 경우 내부온도 1200℃일 때 Castable만 사용한 경우 표면온도는 187℃가 되는 반면, 단

5.2 mϕ, 4,500 T/D Kiln 에서 Castable 시공부위 100 m^2 사용시 경제성

〈표-7〉

구 분	소요비용 (천원/년)	표면온도 (℃)	방열손실열량		금액적 효과
			10^3kcal/day	kcal/kg·cli	
Castable만 사용시(A)	7,708	187	6,127.2	1.36	절감액 = 3,023 천원/년·기
Precasted block 및 단열 Board 사용시(B)	10,569	91	2,020.8	0.45	
차 이 (B−A)	▲2,861	▼96	▼4,106.4	▼0.91	

주 : 1. 소요비용은 Castable 수명이 Precasted block 및 단열 Board를 사용할 경우가 Castable만 사용할 경우(18개월)보다 25% 감소하는 것으로 가정하여 계산.

2. 열소모량 절감효과는 70%만 회수되는 것으로 가정 계산.

3. 금액적 효과 계산근거는 전과 동일.

열재를 사용한 경우 표면온도는 91℃가 되어 표면온도가 96℃ 저하되는 것으로 나타났다(〈표-6〉).

3) Precasted block 및 단열재 사용시 경제성

Precasted block과 단열 Board를 100㎡ 시공할 경우 소요비용은 약 280만원 증가하는 반면 방열손실 감소에 의한 연료비 절감액은 600만원으로 Kiln 4기에서 년간 약 1,200만원의 비용절감 효과가 있다. 한편 Precasted block 사용시 단열효과 외에도 Castable 시공부위 보수가 용이한 장점이 있다.

3-3. Cyclone 및 벽체 단열재 추가사용

Preheater 표면을 통한 방열손실 열량은 Kiln System 전체 열소모량의 약 5%를 차지하고 있으며 이의 감소방안으로는 Preheater 외부 단열방법과 내부 단열방법이 있으나 전자는 Preheater 표면 즉, Casing의 부식, 외관 및 시공문제 등이 있어 후자를 택하고 있는 추세이다.

이 방법은 아래 〈그림-5〉와 같이 Preheater Casing 측에 단열재(단열mat 또는 board)를 추가 시공하여 전체 전열계수를 낮추는 것으로서 방법 1은 구조적으로 취약한 벽 부분과 Cyclone에 적용하였으며, 방법 2는 Cyclone 입구 바닥 등 구조적으로 안정된 부분에 적용하였다.

1) 사용 내화재료의 재질

단열 보완 전·후에 사용된 내화재료의 재질은 〈표-8〉과 같다.

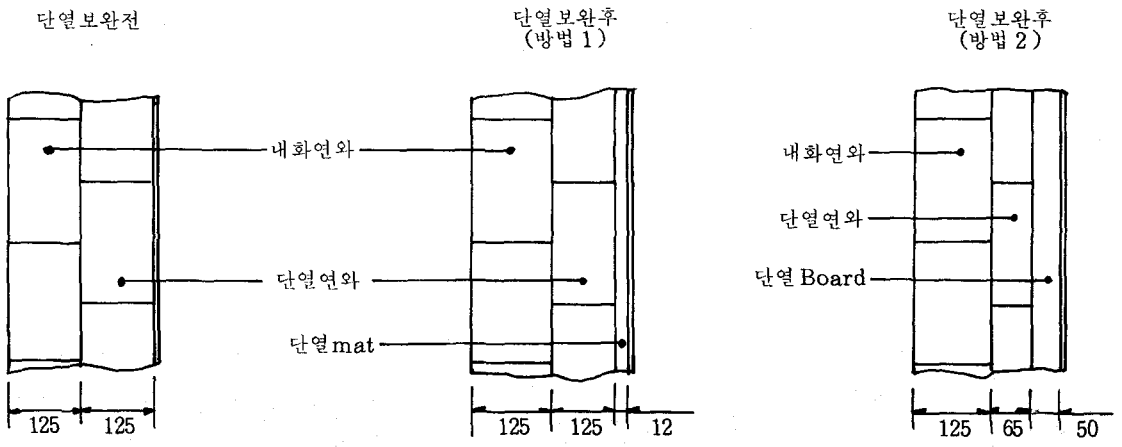
사용 내화재료의 재질

〈표-8〉

	재 질	비중	열전도율 (kcal/m·hr·℃)	사용온도 (℃)
본 연 와	Chamotte		1.0	1,300
단열연와	--	0.7	0.2	900
단 열 재	Ceramic mat	0.13	0.05	1,000
	단열 Board	0.22	0.05	650

2) 단열보완시 표면온도

단열보완 방법에 따라 표면온도는 〈표-9〉와



〈그림-5〉 **Preheater내부 단열 보완도**

5.2mϕ, 4,500 T/D Kiln에서 Preheater 100m^2 단열보완시 경제성

〈표-10〉

		소요비용 (천원/년)	표면온도 (℃)	방열손실열량		금액적 효과
				10^3kcal/day	kcal/kg·cli	
단열보완전(A)		5,606	106	2,542	0.56	절감액 방법 1 : 64천원/년·기 방법 2 : 1,788 천원/년·기
단열보완후	방법 1(B)	6,275	92	2,042	0.45	
	방법 2(C)	5,550	71	1,373	0.30	
차이	B−A	▲669	▼14	▼ 500	▼0.11	
	C−A	▼ 56	▼35	▼1,169	▼0.26	

주 : 1. 단열방법 2의 효과는 시공비 절감이 기대된다.
2. 열소모량 절감효과는 70%만 회수되는 것으로 가정 계산.
3. 금액적 효과 계산근거는 전과 동일.

단열보완시 표면온도 및 방열손실 열량

〈표-9〉

		표면온도 (℃)	방열손실열량 (kcal/m^2·hr)
단열보완전 (A)		106	1,059
단열보완후	방법1(B)	92	851
	방법2(C)	71	572
차이	B−A	▼14	▼208
	C−A	▼35	▼487

같다. 즉 방법 1의 경우 표면온도는 단열보완전에 비해 약 10℃ 저하되었으며 방법 2의 경우 표면온도는 단열보완전에 비해 약 30℃ 저하되는 것으로 나타났다.

3) 단열보완시 경제성

단열보완 방법에 따라 단열보완전과 비교하여 단위 Kiln 당 각각 100m^2 시공시 아래 표에서와 같이 방법 1의 경우는 소요비용이 67만원 증가하는 반면 방열손실 감소에 의한 연료비 절감액이 73만원으로 년간 약 24만원의 비용 절감효과 있고, 방법 2의 경우 소요비용이 6만원 감소하고 방열손실 감소에 의한 연료비 절감액이 173만원으로 년간 720만원의 비용절감 효과가 있는 것으로 나타났다.

또한 Preheater의 단열보완 필요면적이 Kiln 4기 전체가 약 2,800m^2 정도에 이르고 있어 단열보완시 방열손실 감소로 연료비 절감에 크게 이바지한 것으로 판단된다.

4. 결 론

이상과 같은 방열손실 감소를 위해 실시한 단열보완 방법으로,

첫째 : 5.2mϕ, 4,500T/D Kiln에서 단열형 연와를 10m 축로할 때 연와 수명을 감안 Kiln Shell을 통한 방열손실 열량은 약 2,100kcal/m^2·hr 절감효과가 있다.

둘째 : Precasted block을 제작 사용함으로써 보수가 어려웠던 Castable 시공부위의 보수가 용이하게 되었고 단열재 사용이 가능하게 되어 5.2mϕ 4,500T/D Kiln에서 표면을 통한 방열손실 열량을 약 1,700kcal/m^2·hr 절감이 가능하였다.

셋째 : Preheater의 Cyclone 및 Calcinator의 단열보완을 통하여 표면을 통한 방열손실 열량을 약 700 kcal/m^2·hr 절감이 가능하게 되어 단열보완 필요면적이 Kiln 4기 전체가 약 2,800m^2 정도에 이르고 있어 방열손실 열량 절감효과는 매우 큰 것으로 판단되었다. ♣