

시멘트 R/K Ovality 증가가 내장연외에 미치는 영향

강덕용*·엄창중·박훈근

〈포철로제(주) 기술연구소〉

1. 서론

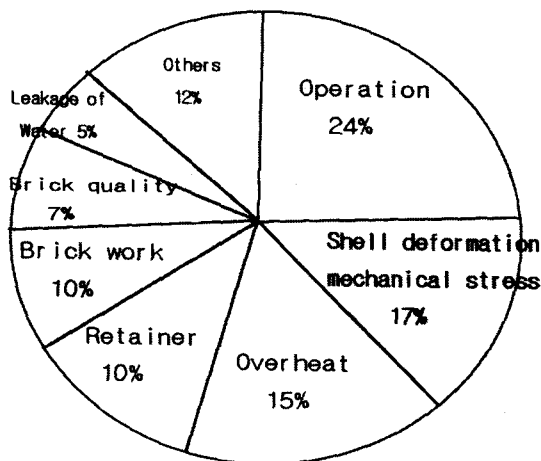
시멘트 Rotary Kiln에 있어서 내화물의 손상은 화학적 및 물리적 요인이 복합되어 생기는 경우가 대부분이며, 특히 최근에는 각종 부·폐기물 사용량 증가에 의한 Alkali 물질의 순환, 침식 및 Kiln 노후화에 따른 Shell Bending 현상이 증가함에 따라 내화물 수명을 단축시키고 있다.

따라서 금번 보고서에서는 기계적 응력에 의한 연외손상에 중점을 두었으며 특히 Shell Ovality에 의한 내장연외의 손상관계를 검토하였다.

2. Cement Kiln용 연외의 손상원인

가. 휴전원인

- 조업 : 원료 및 연료의 변동, Coating 부착성



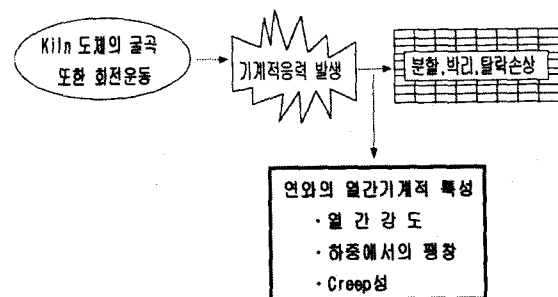
〈그림 1〉 내화물 수명저하 원인

불량, 설비개조로 인한 Trouble, Burner의 조절불량 등

- 기계적 Stress : 철판변형, Under Roller의 Support 현상, Kiln Twisting 현상, 동체진동 등
- Over Heat : Kiln 화입, 화지시 급열·급냉에 의한 Spalling 발생
- Stopper : 내부 Stopper에 의한 응력으로 연외 손상
- 연외 : 신제품 개발 Test시 기존대비 품질저하 및 불량품 축조시
- 누수현상 : Manhole부에서 누수에 의한 스프링 연외의 소화 및 장기재고 사용에 의한 불량품 사용시

나. 기계적 응력에 대응한 구비조건

Rotary Kiln에서는 내화물 Lining과 동체와 함께 회전운동을 하기 때문에 그때 내장연외 Lining의 굴곡이나 회전운동 차에 의한 기계적 응력의 손상을 받는다. 그런 조건에 대하여 내장연외는 일반적으로 다음과 같은 조건이 요구되어진다.



〈그림 2〉 Stress에 의한 손상진행

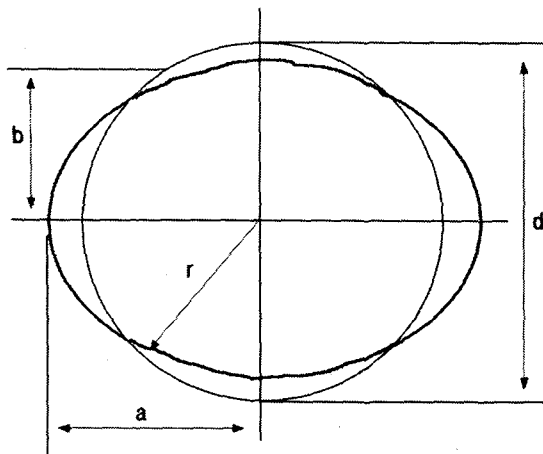
3. Ovality의 이해

가. Ovality의 이론적 개념

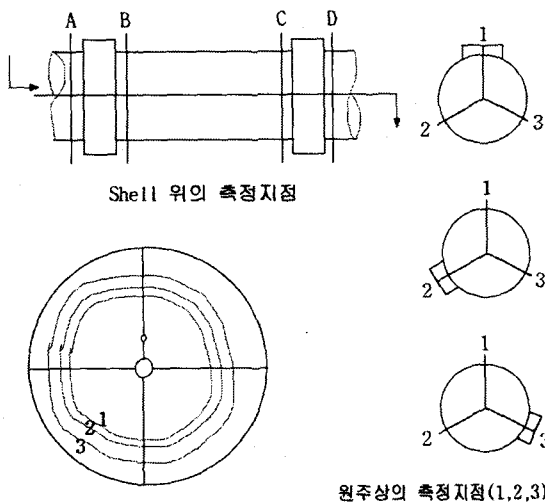
Ovality는 변형의 정도를 의미하는데 원래의 Kiln은 정원에서 가동하여 열적, 기계적 Stress에 의해 정원의 Kiln Shell이 타원으로 변형된 이론적인 Model의 경우에는 장반경과 단반경의 차이의 2배로 정의할 수 있으며 이것을 절대적 Ovality라 정의하며, Ovality를 Kiln Size에 따라 비교할 수 있도록 Shell의 내경에 대한 %로 나타낸 것을 상대적 Ovality라고 한다.

$$\text{Relative Ovality} = (4/3) \cdot d_2 \cdot \sigma \cdot (dn/100)$$

$$d(\text{Outside Diameter}) = a + b$$



<그림 3> Ovality의 정의



<그림 4> Ovality 측정지점 및 위치

dn : Nominal Diameter

σ : ($\Delta H/15$) Shell Deformation $\rightarrow \Delta H(a - b/mm)$

Wa (Absolute Ovality) = $2(a - b)$

Wr (Relative Ovality) = $(Wa/dn) \cdot 100(\%)$

나. Ovality 측정방법

- 통상적으로 Ovality 측정지점은 용력전달이 가장 심한 부위로 Tire에서 1~1.5m 지점이 적당하며, Shell 위의 세 지점을 삼등분하여 그 측정값의 평균을 구한다. 측정시 원주상의 위치는 정확히 일치해야 오차가 적다.

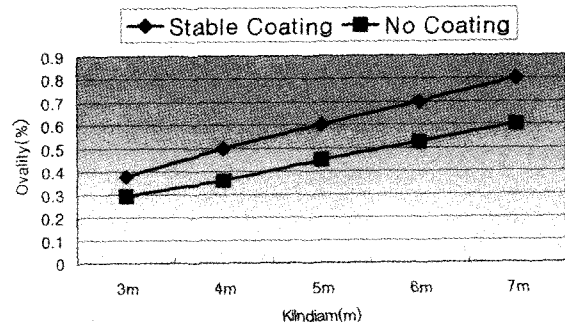
4. Ovality 관리범위

가. Kiln 내경 크기에 따른 관리범위

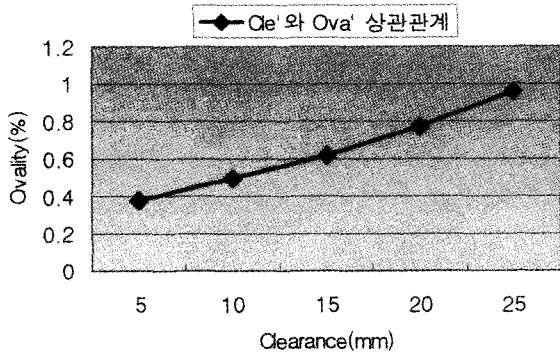
- 통상적으로 가동중 Ovality 관리범위는 Kiln 내경 (1/10) 한계내에서 관리하며 만약 5m Kiln의 경우 0.5% 이내로 관리한다. <그림 5>에서 알 수 있듯이 내부 Coating이 부착될 경우 Shell에 하중이 가해지므로 Ovality가 증가하는 경향임.
- 또한 Ovality 증가는 Shell 내경이 클수록 증가하며 Shell 두께가 증가할수록 감소하는 경향을 보임.

나. Ovality와 Tire Clearance의 상관관계

- 일반적으로 Tire Clearance가 증가함에 따라 Ovality도 비례하여 증가하는 것이 일반적이지만 Clearance가 증가하여도 Ovality가 비례하여 증가하지 않은 경우가 있는데 이것은 Shell



<그림 5> Ovality 관리범위



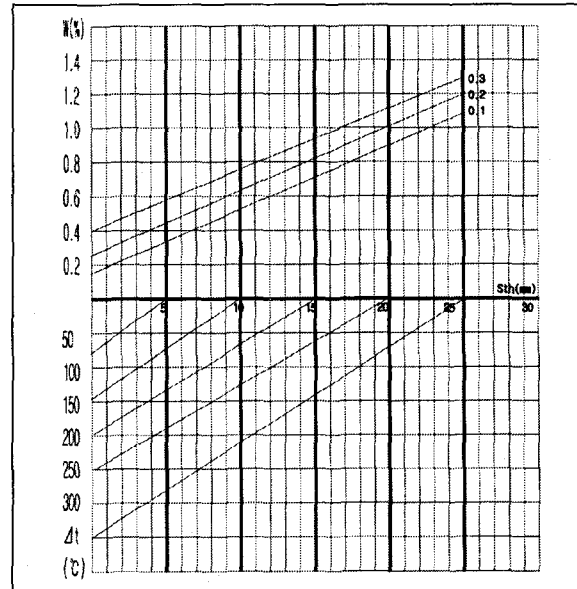
〈그림 6〉 Clearance와 Ovality 상관관계

표면온도 저하로 인하여 Shell 강성이 유지되고 있기 때문이다.

- 하지만 이런 현상이 장기화 될 경우 응력분산이 제대로 이뤄지지 않아 Kiln 휨현상 및 진동이 가중되므로 적당한 Clearance 관리가 필수적으로 요구되고 있음.

다. Clearance 증가에 따른 상관관계

- 〈그림 7〉의 Data는 이론적인 계산에 의한 상관관계를 나타낸 것이므로 현장 조업과 약간의 차이는 있으나 Clearance가 증가함에 따라 Ovality 수치도 증가하며, Tire와 Shell 온도



〈그림 7〉 Clearance 증가에 따른 Kiln 상관관계

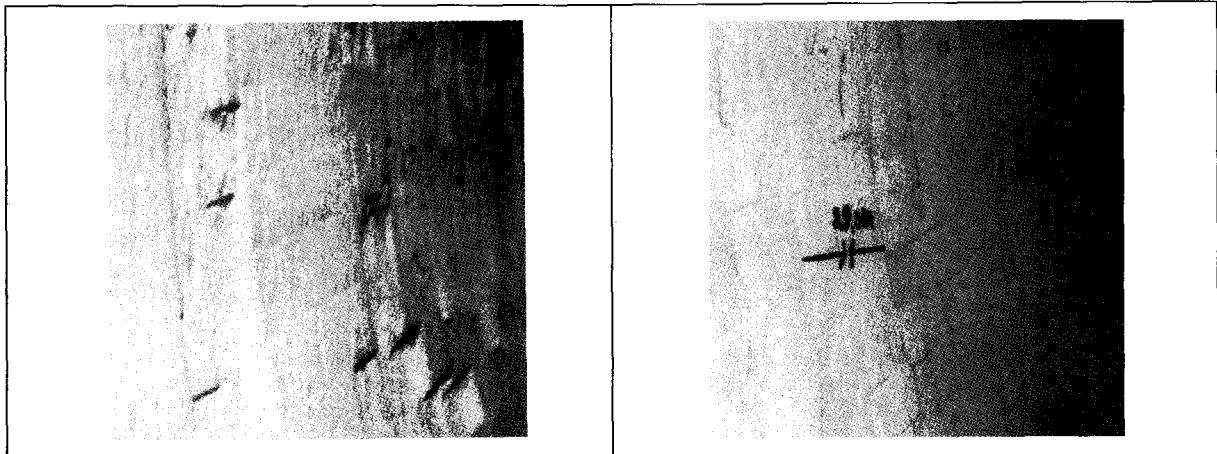
차이가 증가함에 따라 Tire Clearance도 크게 해야 한다.

5. 기계적 Stress에 의한 내화물 영향

가. Ovality에 의한 손상사례

손상형태 및 현황	<ul style="list-style-type: none"> - 배면에서 가동면 방향으로 연와 내부를 관통하고 있음 - 썩기 모양으로 가동면이 박리되어 부서짐 - 가동면 이물질 침적흔적은 거의 없으며 초기 가동시 발생 가능성이 높음
수명저하 원인	<ul style="list-style-type: none"> - Ovality 증가로 인한 Shell Stress의 증가 - Kiln Twisting 및 휨현상으로 가동면 압축응력 증가 - 내화물 열간 곡강도 저하 및 열간 Creep을 저하
개선 방향	<ul style="list-style-type: none"> - Clearance 일정관리로 Ovality 및 Shell Bending 최소화 - Ovality 및 Alignment 정기 측정으로 Twisting 최소화 - Mortar 축조유도 및 Creep을 향상품 사용 - 화지, 화입시 급격한 내부온도 변화는 피한다.

〈사진 1〉 가동면 손상 및 수직 Crack 발생

	
손상형태 및 현황	<ul style="list-style-type: none"> - 가동면 부위가 20~40mm 정도 일정하게 박리되어 떨어져짐 - 발생구간은 대부분 전이대 구역이며 탈락연와의 부위가 여러군데 산만하게 분포되어 있음
수명저하 원인	<ul style="list-style-type: none"> - Tire Slip 부족으로 인한 Kiln 목졸림 현상 - 상기 현상은 대부분 전이대 구역으로 연와 가동부위 고열에 의한 열응력 증가 - 마무리 축조시 무리한 Steel 삽입으로 인한 팽창대 부족 - Ovality 증가로 인한 Shell 압축응력 전달
개선 방향	<ul style="list-style-type: none"> - 화지, 화입 시간 적정 유지로 가동면 열응력 최소화 - Clearance 적정관리 유지 - 무리한 Liner 보강을 피한다

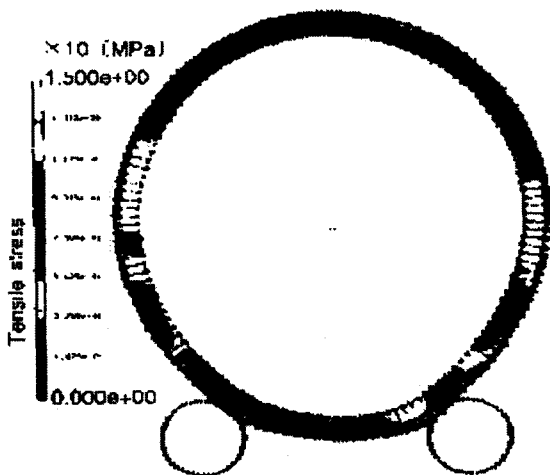
〈사진 2〉 가동면 박리현상

나. 하중에 의한 영향

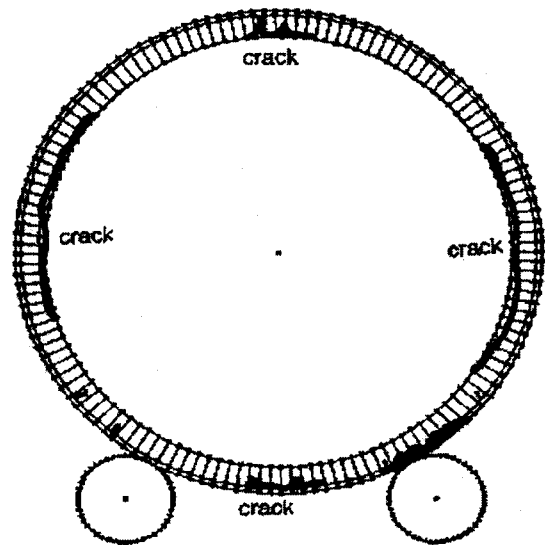
Kiln 장기간 가동에 따라 Shell 강성이 저하함에 따라 철판 탄성율이 감소하고 그 결과 철판 변형율이 점차 증가하게 된다. 상부는 하중무게가 증가함으로써 가동면 인장응력이 생기고 측면

에는 압축응력이 가동면에 작용하여 균열을 발생시킨다.

또한 하부 S/Roller의 편중현상으로 배면에 압축응력이 증가하게 된다.



〈그림 8〉 상·하부 인장응력과 측면 압축응력이 작용



〈그림 9〉 상부 배면 Crack 및 측면 가동면 박리현상

6. Clearance 관리방안

가. 적정 Clearancelity 관리범위

	Small Kill (<4.5 ϕ m)		Large Kill (>4.5 ϕ m)	
	Outlet Tire	Inlet Tire	Outlet Tire	Inlet Tire
과 소	< 5	< 3	< 3	< 2
허용가능	5~15mm	3~10mm	3~12mm	2~10mm
과 대	> 15mm	> 10mm	> 12mm	> 10mm

- 상기 관리방안은 Refratechnic사의 Clearance의 대소판단을 기준으로한 측정치이며 일반적으로 국내 Kiln의 Clearance 관리범위는 열간에서 3~12mm 정도이다. Clearance 적정관리는 조업안정 및 내화물 수명에 직접적인 관계가 있으므로 필수적으로 관리해야 한다.

나. Liner 보강방법 Clearance 관리

- Tire 부분의 Ovality 감소를 위하여 설계 측면에서 허용되는 한계내에서 Clearance를 줄여야 하는데 Liner를 보강하는 방법이 주로 사용되며 이때 보강 철판의 두께는 대단히 중요하며 그 절차는 다음과 같다.

- 1) 일주일 동안 매일 3~4회 정도 상대운동 Slip (ΔU) 을 측정한다.
- 2) 기간중 최소 (Min : ΔU) 를 근거로 사용
- 3) 이론적 Clearance 계산
 $S_{th} = (\Delta U / \pi)$ 로 계산
- 4) 3~4mm 정도의 Clearance 여유를 감안하여 보강철판 두께를 설정
- 5) 기존 Liner의 Kiln Shell쪽으로 보강할 철판을 부착시키고 부분적으로 용접한다.

7. Stress에 대한 연와 구비조건

가. Kiln Shell로부터 받는 응력

열충격이나 외래 성분의 침입 외에 열팽창에 의해 일어나는 압축응력은 연와의 온도증가에 의해 생기며 Hook's Law에 의해 다음과 같이 나타낸다.

$$\sigma_D = \alpha \cdot \Delta t \cdot ED$$

σ_D (N/mm²) : 압축응력

α (°C⁻¹) : 열팽창 계수

Δt (°C) : 온도차

ED (N/mm²) : 탄성을

따라서 열팽창에 의해 생기는 연와의 압축응력은 열팽창 계수, 온도차이, 재료의 탄성계수가 커질수록 증가한다. 염기성 연와의 열팽창 계수는 대부분 비슷하기 때문에 연와의 탄성계수를 적절하게 조절함으로써 온도증가에 의한 열팽창 응력을 감소시킬 수 있다.

동일한 연와의 경우 탄성계수가 증가함에 따라 열팽창 흡수율이 감소하기 때문에 연와에 생기는 열응력이 증가함으로 연와의 열응력 흡수용량을 증가시키기 위해서는 연와의 탄성계수를 가능한 낮게 유지해야 한다.

나. Kiln Shell의 Ovality에서 받는 압축응력

Kiln Shell의 타원형적인 변형에 대해서 생기는 Ovality는 다음과 같은 내화물에 응력을 전달하게 된다.

$$\sigma_D = E_D \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\omega_s \cdot h}{R^2} \right) \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

σ_D : 압축응력 (Compressive stress, N/mm²)

E_D : 탄성계수 (Modulus of elasticity, kN/mm²)

ω_s : Shell Ovality (mm)

h : 내화물 잔존 (mm)

R : 킬른 반지름 (mm)

대체적으로 킬른 Shell의 Ovality, 내화물의 두께, 탄성계수가 증가함에 따라 내화물에 전달되는 응력은 증가한다. 따라서 Kiln Ovality로부터 응력을 흡수하기 위해서는 내화물의 탄성계수가 작아야 한다.

다. Top Clearance 적정관리

- Tire 및 Shell Gap (Top Clearance)의 안정관리를 위해서 Kiln 가동시 Ovality 발생을 최대한으로 방지하기 위해서 Liner를 조정해야 하며 만약 Tire 내경이 5.2 ϕ m Kiln의 경우

$$\alpha \cdot l \cdot \Delta t = (1.25 \times 10^{-5}) \times 5,200 \times 120^\circ\text{C} = 7.8\text{mm}$$

α : 철선팽창 계수 (1.25 $\times 10^{-5}$ /°C)

l : Tire 내경

Δt : Tire와 Shell의 평균온도차

상기와 같이 Liner 교체시 냉간 Gap량을 7.8mm 유지시켜야 함.

8. 검토 결과 및 결론

가. 검토 결과

이상의 결과에서 연와의 박리발생 주요 요인으로서 다음과 같은 추정이 가능해진다.

- 1) 연와 가동면에 평행한 균열은(Case.1) 연와 팽창 또는 Kiln의 변형에 의한 압축응력(박리), 회전에 의해 생기는 전단응력이 주요인으로 사료됨.
- 2) 연와 배면에 수직하게 생기는 분할(Case. 2, 4) 요인은 Kiln 변형 또는 회전에 의해 생기는 인장응력 및 변형과 회전의 복합화에 의한 전단응력이라고 사료됨.
- 3) 연와 배면측의 Kiln 원주방향에 평행한 분할(Case. 3, 4)은 Kiln 회전에 변형이 가해짐으로서 전단응력이 작용한 것으로 사료됨.

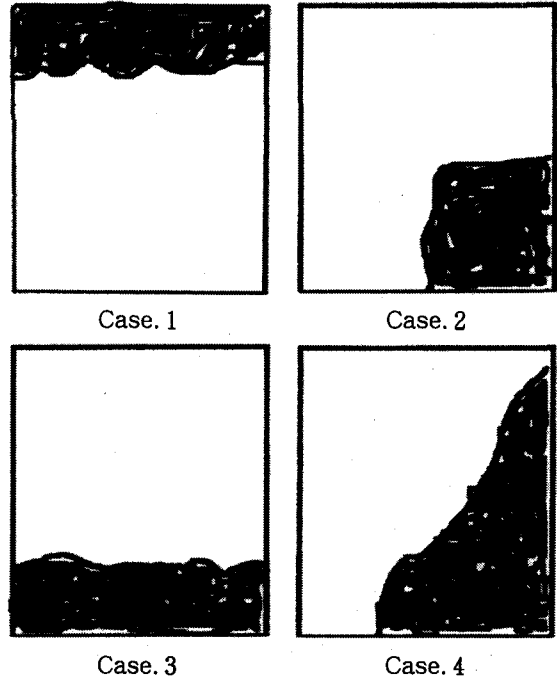
상기 내용을 종합하면 가동면 및 비가동면 전단응력 작용에 의한 손상이나 썩기모양의 탈락은 기계적 Stress에 영향이 크다.

나. 결 론

지금까지 기술한 내장연와에 발생하는 응력의 대책을 정리하자면 다음과 같다.

- 1) 연와는 Ring당 목지수가 많을수록 응력분산 능력이 좋으므로 연와 규격은 VDZ 형상에 Mortar 축조를 한다.

..... Hot face side



<그림 10> 응력에 의한 손상부위 및 형태

- 2) 연와 전체의 하중은 균일하게 분포하며 동일 높이로 축로한다.
- 3) Kiln Ovality는 Kiln 내경의 1/10 이하로 관리한다.
- 4) Kiln 승온속도는 0.5(°C/min) 이하로 관리하며, 연와 표면의 온도는 1,500°C 이하에서 유지함.
- 5) 연와와 철판의 Slip을 피한다.
- 6) 발생응력을 최소화 하기 위해서는 Creep율이 높은 연와를 사용한다.