

<그림-3> Floating tire

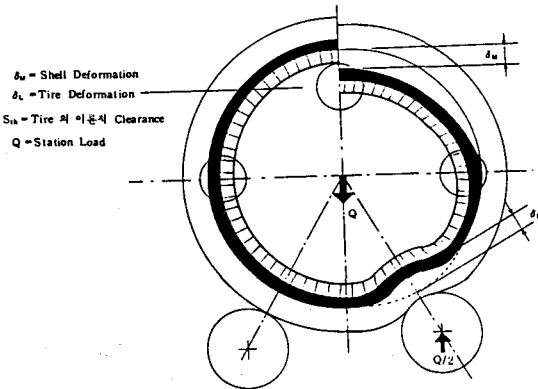
2-2 Kiln shell의 원주방향의 변형

Kiln shell의 원주방향 변형, 즉 1회전하는 동안 위치에 따라 각각 다른 곡률 반경을 취하는 현상은 rotary kiln의 모든 부분 특히, 그 tire zone에서 불가항력적인 일이다.

이 변형은 크게 두가지로서,

- 1) roller의 반력 Q/2에 의한 tire의 변형· δ_L
- 2) 정점에서의 shell과 tire간 극에 의한 shell의 변형 또는 편편해짐. δ_M

이며, 이 두 변형은 내화연좌에 전달되어 주기적으로 축정관리되어 적절한 시기에 적절한 명에 치명적 영향을 미치게 되는데 그 문제를 예방하기 위하여는 두 변형의 크기가 주기적으로 축정 관리되어 적절한 시기에 적절한 대책이 시행되어야만 한다.



<그림-4> Kiln의 원주방향 변형

2-3 Rotary kiln의 ovality정의

Ovality는 변형의 정도를 의미하는데 정원

의 kiln shell이 타원으로 변형된 이론적인 model의 경우에는 장반경과 단반경의 차이의 2배로 정의할 수 있다. ovality를 kiln size에 따라 비교할 수 있도록 kiln shell의 내경에 대한 %로 나타낸 것을 상대적 ovality라고 한다.

원주의 둘레 U_K = 타원의 둘레 U_E

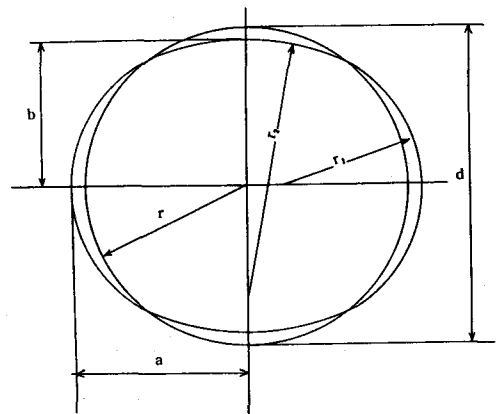
$$U_K = d \cdot \pi \quad U_E = (a + b) \cdot \pi$$

$$d = a + b$$

d: 외경 absolute ovality $Wa = 2(a - b)$ (mm)

dN: nominal diameter relative ovality

$$Wr = \frac{Wa}{dN} \times 100 (\%)$$



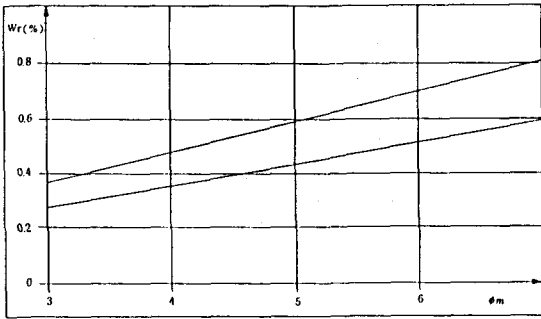
<그림-5> Ovality의 정의

2-4 Ovality의 한계치

내화연좌의 손상이나 탈락을 방지하기 위하여는 운전 중 ovality가 초과해서는 안되는 한계가 있다.

이 ovality의 한계치의 결정은 어려우며 실제에 있어서는 kiln의 size와 coating 조건 등에 의하여 좌우된다.

<그림-6>은 coating 상태가 양호한 경우의 ovality 허용치와 kiln size의 관계를 예시하고 있는 Holderbank사의 표준이나, 이는 2 r.p.m 정도에서 운전되는 S.P. kiln에 대한 것이므로 3 r.p.m으로 운전되는 N.S.P kiln의 경우에만 speed의 영향과 coating 부착 여부를 포함한 각 kiln 별 특성이 추가로 감안되어야 한다. Swed-



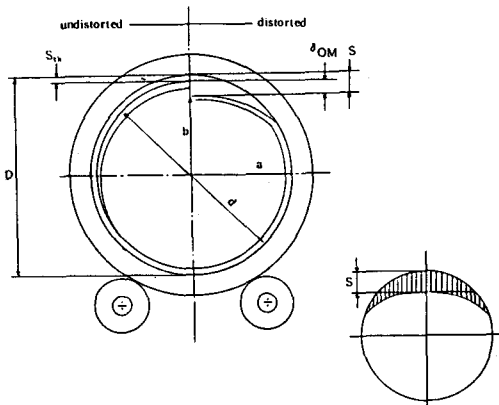
<그림-6> Kiln size 별 ovality 한계치

en의 Cementa 사의 Slite 공장은 5.2 mφ kiln 건설 당시 3번 tire의 kiln shell ovality를 0.2% 이하로 guarantee 할 것을 제시하기도 하였다.

2-5 Tire clearance 의 의미

2-5-1 Tire clearance

Kiln tire의 내경은 tire liner를 포함한 kiln shell의 외경보다 크므로 그 차이로 인하여 tire와 kiln shell의 원주방향 상대운동이 야기된다. tire clearance는 kiln shell 변형의 중요한 측도가 되므로 운전상 매우 중요하다. <그림-7>에서 이론적 clearance와 실제 clearance와의 차이에 대한 정확한 이해가 가능할 것이다.



<그림-7> 이론적 tire clearance S_{th}와 실제 tire clearance S.

2-5-2 이론적 Clearance

이론적 clearance S_{th}는 다음과 같이 정의된다.

$$S_{th} = D - d$$

D : tire 내경

d : liner 포함한 shell 외경

단, D와 d는 변형되지 않은 상태의 직경

S_{th}는 tire와 liner 1회전 중의 상대운동 거리 U를 측정하여 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta U = (D - d) \pi = S_{th} \cdot \pi$$

$$S_{th} = \frac{\Delta U}{\pi}$$

상대운동거리 ΔU의 측정법은 다음과 같다.

- 1) tire와 liner 표면에 백묵으로 표시
- 2) N회전(N=5 or 10) 이후 이동거리 측정 X
- 3) $\Delta U = \frac{X}{N}$

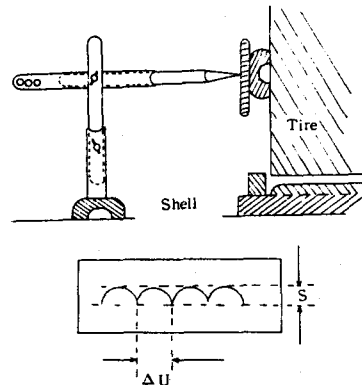
최근에는 상대운동 또는 clearance가 연속적으로 측정되어 C.O.P의 digital 장치에 display 되는 자동설비가 공급되고 있다.

2-5-3 실제의 Tire clearance

실제의 tire clearance S는 정점에서의 tire와 liner의 실제 clearance로서 이론적 clearance S_{th}보다는 크다. $S = \frac{\Delta U}{2.0 - 2.5} = S_{th} + S_0$

$$S = \frac{\Delta U}{2.0 - 2.5} = S_{th} + S_0$$

ΔU와 S는 <그림-8>과 같은 방법으로 운전 상태에서도 정확히 측정할 수 있는데, 이는 Belgium의 Ciments Obourg사에서 개발하였으며 시판되고 있지 않으나 간단히 자체 제작할 수 있다.

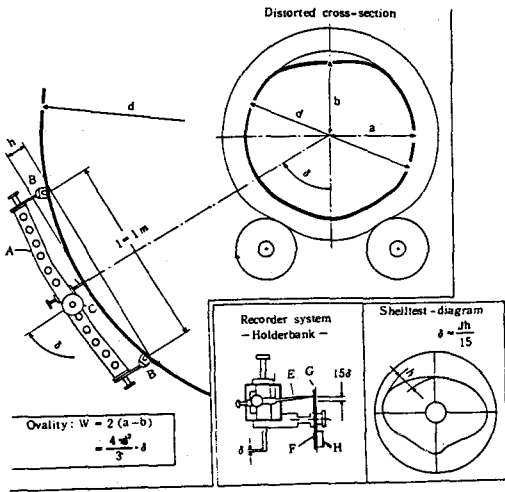


<그림-8> Tire clearance 측정 장치 bourg Instrument

3. Shell test 장비

3-1 측정장비 및 원리

Shell test 측정장비는 Sweden 의 Nordstroms holderbank 사의 제품이 있는데, kiln shell 의 반경 방향 변형을 정상 운전 조건하에서 측정 기록할 수 있는 편리한 장비로서, 그 원리는 같다. 본고에서는 Holderbank 사 제품에 대해서 취급 하기도 한다.

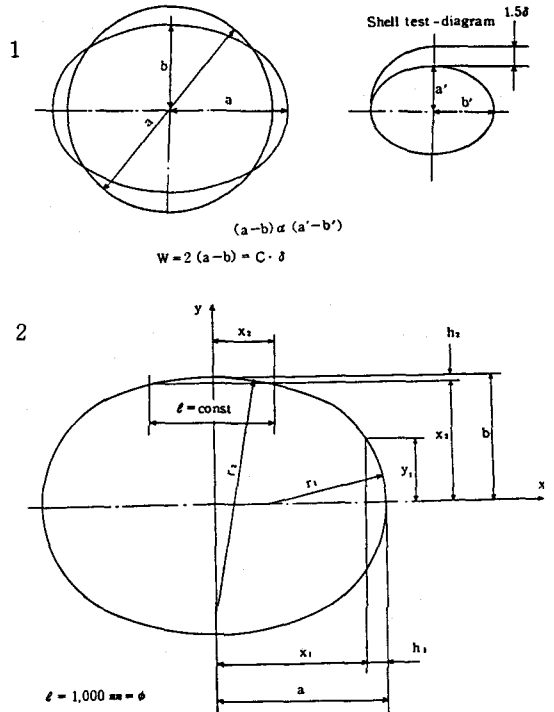


<그림 - 9> Holderbank shell test instrument

자석 B에 의하여 kiln shell 에 부착된 멩에모 양의 A는 kiln shell 에 기선 $\ell = 1\text{ m}$, 높이 h의 활꼴을 이룬다. 회전 도중 kiln shell 의 변형으로 곡률반경이 달라지며 이 변화가 A의 중앙에 설치된 접촉핀 D에 의하여 감지되어 C에 기록된다. 접촉핀 D는 활꼴의 높이 h의 변화를 연필 E에 의하여 diagram 용지 F에 1:15의 비율로 기록한다. diagram 용지를 고정시킨 pendulum disc G는 추 H에 의하여 kiln 회전에 따라 회전하여 1회전 후 변형된 kiln shell 과 유사한 shell test diagram이 그려진다. 활꼴의 높이 변화폭 h는 장경과 단경의 최대차를 15배한 값과 같으므로 정량적 계산이 가능해진다.

Kiln의 수직방향과 shell test diagram의 수직방향(구멍부분이 수직상부)은 일치하므로 그

분석이 간편하다. 예를 들면, tire가 충분히 견고하지 못할 경우 roller 부근에서 뚜렷한 변형이 관찰되며, tire와 shell의 clearance가 클 경우 정점부근에서의 kiln shell 변형이 관찰된다. 실제 발생하는 변형의 구체적인 값을 측정할 수는 없고, 활꼴의 높이변화가 기록됨으로써 타원의 장경과 단경의 최대변화를 계산하는 식이 Rosenblad에 의하여 <그림 - 10>과 같이 유도되었다.



$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

$$y_1 = \ell/2$$

$$x_2 = \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - y_1^2} = \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - (\ell/2)^2}$$

$$x_2 = \ell/2$$

$$y_2 = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x_2^2} = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\ell/2)^2}$$

$$\Delta h_{max} = h_1 - h_2$$

$$h_1 = a - x_1 = a - \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - (\ell/2)^2}$$

$$h^2 = b - y_2 = b - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\ell/2)^2}$$

$$\Delta h_{max} = a - \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - (\ell/2)^2} - b + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\ell/2)^2}$$

$W = 2(a - b)$ $d = a \div b$	By development of series, a and b can be eliminated
-------------------------------	---

$$W = \frac{4d^2}{3\ell^2} \cdot \delta \sqrt{1 + \frac{5}{12}(\ell/d)^2 + \frac{7}{24}(\ell/d)^4 + \frac{15}{64}(\ell/d)^6 + \dots}$$

simplified form, since root strives towards 1

$W = \frac{4 \cdot d^2}{3 \cdot \ell^2} \cdot \delta$

d = kiln shell diameter (측정위치 외경)

δ = greatest measuring amplitude

= diagram · 측정치 ÷ 배율

ℓ = 1 m

<그림 - 10 > Ovality according to Rosenblad

3-2 측정순서

3-2-1 준비

Kiln의 변형은 tire 부분에서 최대가 되고 tire 와 tire 의 center 에서 최소가 된다. 변형의 측정은 tire 바로 옆에서 수행되어야 하며 방열판이 kiln shell 에 너무 가깝게 설치되었을 때는 이를 제거시켜야 한다. 확실한 data 를 얻기 위하여 kiln 단면을 120°씩 나눈 3개 위치에서 측정하며, 다음번 측정 때에도 같은 위치에서 측정하여 비교하는 것이 좋다.

- 1) 측정할 위치를 표시
- 2) 자석의 접촉 부위 이물질 제거
- 3) diagram 용지 부착
- 4) 연필 부착 및 kiln 직경에 따라 support 조정

3-2-2 측정의 수행

- 1) 측정점에 장비를 설치하여 자석 접촉상

태 확인, 이 때 diagram 용지에 항상 일정한 방향(inlet 또는 outlet)으로 오게해야 한다.

- 2) 연필 위치를 조정
- 3) 2~3회 회전시켜 연필의 팽창에 의하여 diagram 용지가 힘을 받지 않게 한다.
- 4) 연필을 눌러서 측정시작
- 5) 1회 또는 2회 회전 후 철거
- 6) 다음 위치 측정을 계속

3-3 측정결과의 계산

diagram 에서 중심으로부터 가장 가까운 거리와 먼 거리의 차를 측정하여 배율로 나누면 ovality 를 구할 수 있다.

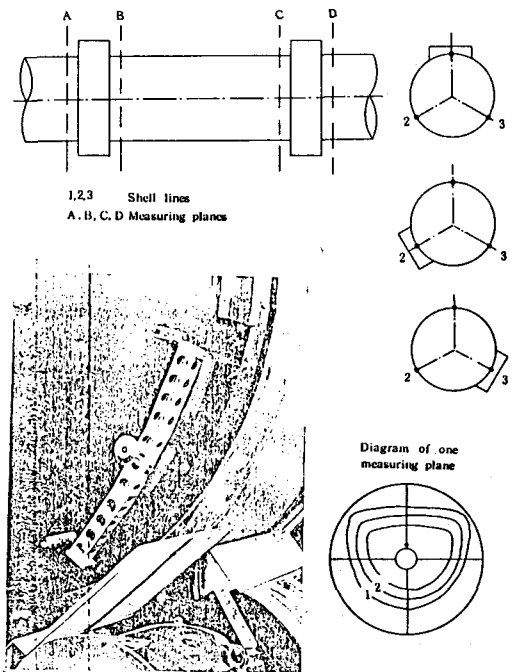
absolute ovality $W_a = \frac{4d^2\delta}{3}$ (mm)

relative ovality $W_r = \frac{4}{3} \cdot \frac{d^2}{dN} \cdot \delta \cdot 100$ (%)

d : 측정점의 kiln shell 외경 (m)

dN : kiln 내경 (mm)

<그림 - 11 >과 같이 측정된 결과를 <그림 -



<그림 - 11 > 측정의 순서

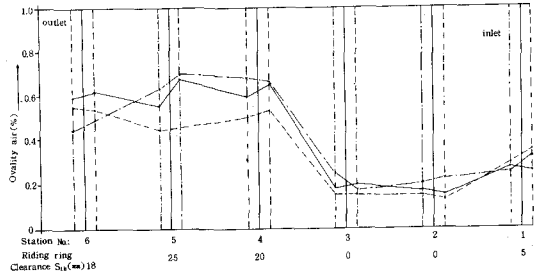
12>와 같이 계산하여 absolute ovality W_a 나 relative ovality W_R 을 구한다. ovality 측정결과를 <그림-13>과 같이 graph에 요약하면 변형을 한눈에 파악하기 좋을 뿐만 아니라 다음 사항을 알 수 있다.

- 1) 이상적인 kiln의 경우 한 단면에서 측정된 3개의 측정치가 일치하겠지만 실제로는 약간의 차이가 있는데 이는 위치별로 kiln shell의 정도에 차이가 있거나 liner의 부분적 마모 tire하부 kiln shell의 국부적 변형을 나타낸다.
- 2) 길이 방향의 연결선의 교차는 kiln축의 휨 변형을 의미하며 그림 중의 1·2, 2·3, 5·6번 tire 사이가 그러하다.

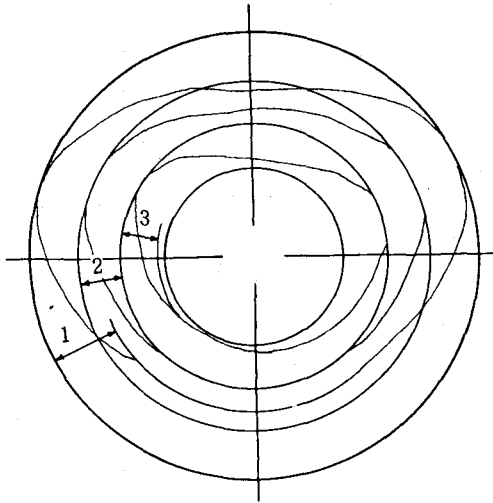
$$= \frac{29.65}{5,600} \cdot 100 = 0.53 \%$$

$$3) = \frac{4}{3} \cdot 5.76^2 \cdot 0.53 = 23.45 \text{ mm}$$

$$= \frac{23.45}{5,600} \cdot 100 = 0.42 \%$$



<그림-13> Graphical representation of a measurement



<그림-12> 측정 결과의 계산

evaluation : $\delta_1 = 15/15 = 1 \text{ mm}$
 $\delta_2 = 10/15 = 0.67 \text{ mm}$
 $\delta_3 = 8/15 = 0.53 \text{ mm}$
 $d = 5.76 \text{ m}$
 $dN = 5,600 \text{ mm}$

$$1) = \frac{4}{3} \cdot 5.76^2 \cdot 1 = 44.24 \text{ mm}$$

$$= \frac{44.24}{5,600} \cdot 100 = 0.79 \%$$

$$2) = \frac{4}{3} \cdot 5.76^2 \cdot 0.67 = 29.65 \text{ mm}$$

3-4 측정결과 해석

측정치 diagram 용지가 inlet 쪽을 향했다면 diagram의 판독은 inlet 쪽에서 쳐다보는 방향이어야 좌우가 맞게 된다. 또한 위치포시 hole은 12시 방향의 정점을 지시한다.

다음은 일반적 shell test 결과의 해석이다.

단, dN = nominal kiln diameter

t = shell thickness

d = kiln 외경

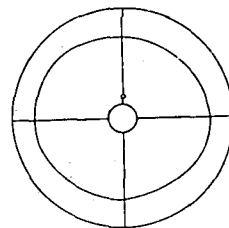
W_L = 계산된 tire ovality

J_L = tire의 관성능률 (moment of inertia)

W = shell test 장비에 의한 ovality

ΔU = 상대운동

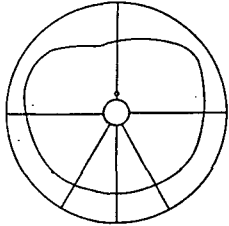
S_{th} = 이론적 tire clearance



Kiln data:
 $dN = 7,600 \text{ mm}$
 $d = 7.76 \text{ m}$
 $t = 80 \text{ mm}$
 $W_L = 0.18 \%$
 $W = 0.22 \%$
 $\Delta U = 0$
 $S_{th} = 0$

<그림-14> Shelltest diagram

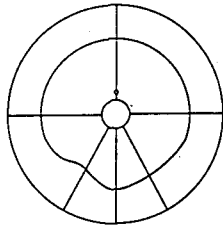
- Diagram은 약간 타원
- 극히 미세한 ovality
- clearance가 없으며 정점에서의 변형이 없음
- tire의 dimension 충분
- roller와 접촉부에서 변형이 없음



Kiln data :
 $dN = 7,600 \text{ mm}$
 $d = 7.76 \text{ m}$
 $t = 80 \text{ mm}$
 $W_L = 0.20 \%$
 $W = 0.13 \%$
 $\Delta U = 30 \text{ mm}$
 $S_{th} = 15 \text{ mm}$

<그림-15> Shelltest diagram

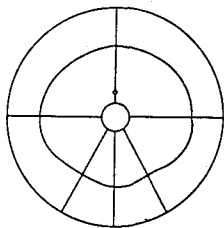
- 정점에서의 shell 변형으로 큰 ovality
- tire clearance에 기인함
- tire의 dimension 충분
- roller 접촉부에서 변형이 없음



Kiln data :
 $dN = 4,200 \text{ mm}$
 $d = 4.34 \text{ m}$
 $t = 70 \text{ mm}$
 $W_L = 0.33 \%$
 $W = 0.45 \%$
 $S_{th} = 0$

<그림-16> Shelltest diagram

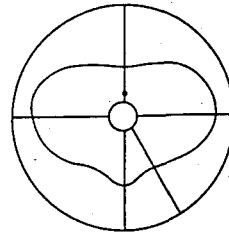
- tire의 변형이 크므로 비교적 큰 ovality
- tire dimension 결함.
- clearance 없음
- roller 부하 불균형, 좌측 과부하



Kiln data :
 $dN = 4,200 \text{ mm}$
 $d = 4.34 \text{ m}$
 $t = 70 \text{ mm}$
 $W_L = 0.33 \%$
 $W = 0.44 \%$
 $S_{th} = 0$

<그림-17> Shelltest diagram

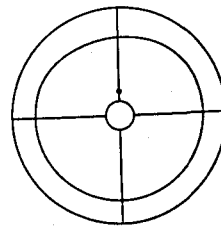
- tire 변형이 크므로 비교적 큰 ovality
- clearance 없음
- roller 부하 좌우, 균형



Kiln data :
 $dN = 4,200 \text{ mm}$
 $d = 4.34 \text{ m}$
 $t = 70 \text{ mm}$
 $h_L = 225 \text{ mm}$
 $J_L = 6.16 \times 10^9 \text{ mm}^4$
 $W_L = 0.46 \%$
 $W = 1.4 \%$
 $\Delta U = 50 \text{ mm}$
 $S_{th} = 25 \text{ mm}$

<그림-18> Shelltest diagram

- tire 변형, shell 변형 및 ovality 극심
- clearance 큼



Kiln data :
 $dN = 4,200 \text{ mm}$
 $d = 4.34 \text{ m}$
 $t = 70 \text{ mm}$
 $h_L = 300 \text{ mm}$
 $J_L = 14.6 \times 10^9 \text{ mm}^4$
 $W_L = 0.2 \%$
 $W = 0.25 \%$
 $\Delta U = 0$
 $S_{th} = 0$

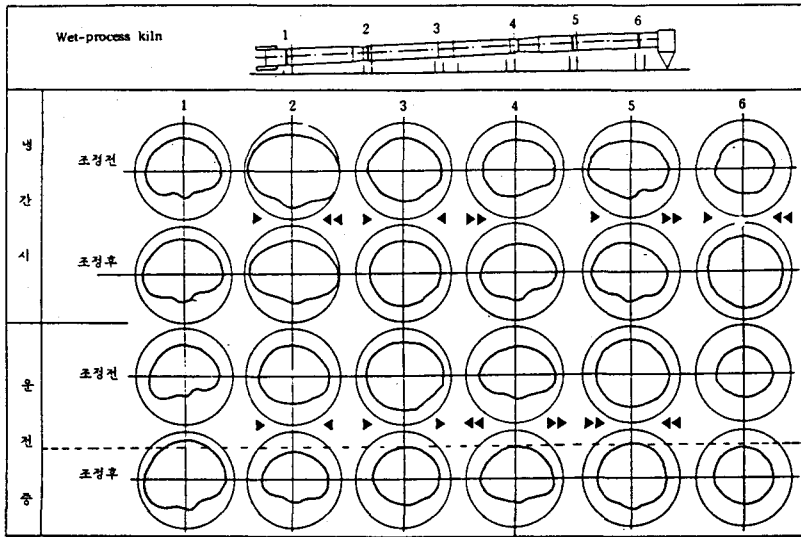
<그림-19> Shelltest diagram

- 적정 dimension의 tire 교체 및 clearance 교정 이후 <그림-18>과 같은 위치에서 측정된 diagram

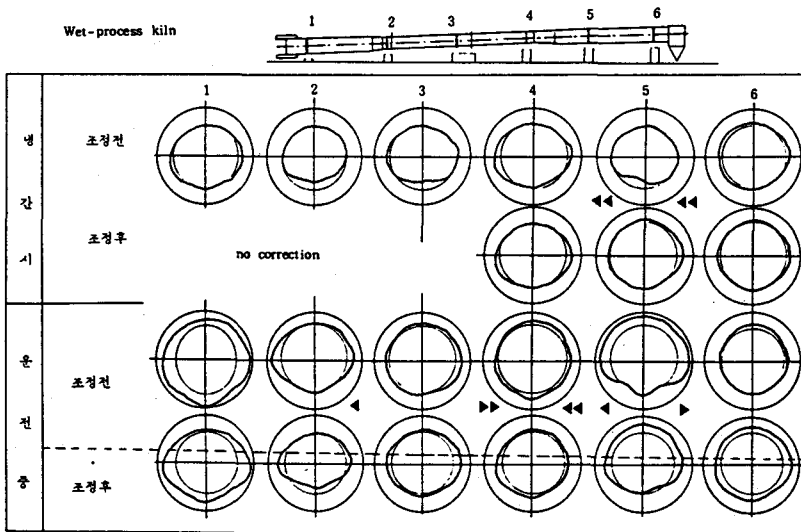
3-5 측정결과에 대한 평가 및 응용

Roller 부근에서의 변형이 미세하고 정점에서의 변형이 없을 경우 kiln은 기계적으로 정상적인 상태라고 말할 수 있다. 측정된 diagram은 약간 타원이거나 원에 가깝다. 한편, tire 부근 뿐만 아니라 상당한 거리가 떨어진 위치에서도 뚜렷한 변형이 나타날 경우 kiln은 불안정되고 soft하다. 이때 변형 측정 diagram은 타원이 아니라 원에서 큰 편차를 보이며, 오목볼록한 curve를 동시에 포함한다.

Shell test 장비는 근본적으로 전단력에 의한 변형만 측정할 수 있고, 길이 방향의 장력에 의한 영향은 특수한 상황에서만 관찰된다. 강력한 인장력은 원으로부터 두드러지게 벗어날 정도의



< 그림 - 20 > Shell test 결과에 의한 roller 조정



< 그림 - 21 > Shell test 결과에 의한 roller 조정

상당한 shell 변형을 야기시키는데, 한쪽의 roller에만 과부하가 걸리거나 tire 사이에서 kiln shell이 지나치게 변형되었을 때 그런 현상이 생긴다. 대체로, tire에서 멀어질수록 변형은 감소되어서 tire와 tire 중앙에서 최소가 된다. tire가 충분히 견고하고, 조립조건(no clearance)이 만족스러울 때 kiln shell은 비교적 얇아도 무관

하게 된다. kiln의 내화면과 보수 직후에 kiln shell test를 실시해 보면, 이전의 측정치보다 훨씬 낮은 ovality가 측정되는 일이 종종 있는데 특히 tire liner의 보강작업이 동시에 시행되었을 때 그 영향이 더욱 뚜렷하다. 이때, 취해진 조치의 결과라고 단정할 위험이 있으나 수일 후 다시 측정해 보면 ovality 측정치가 꽤 증가된

것을 알 수 있을 것이다. 이는 새로 축로된 내화연와가 kiln shell 변형을 극소화하도록 stress를 주기 때문이다.

지난 수년간 kiln shell 변형의 전형적인 현상이 얼마간 바뀌었다. 오래된 소형 kiln에서는 supporting roller 부근의 변형이 뚜렷하였으며 tire의 유연성이 문제되는 반면 shell은 상대적으로 견고하여 tire clearance에 의한 변형은 거의 없었으나 <그림-17>의 경우 최근에는 clearance가 문제시되고 있다. <그림-15>의 경우 .

<그림-16>은 하중분포가 불균형 상태에 있는 한 보기이며 <그림-17>은 균형된 보기이다.

<그림-20, 21>은 습식 long kiln의 shell test 측정에 의한 roller 조정을 나타낸 것이다.

4. Ovality 방지대책

4-1 Shell test ovality, Tire ovality 및 Tire clearance의 상관관계

Maintenance 나 operation 담당자에게 tire clearance, 상대운동, ovality 등의 상호관계는 변형의 측도가 될 뿐 아니라 대책수립의 방안을 제시해 준다는 관점에서 대단히 중요한 요소이다. 직경이 다른 여러 kiln에서 측정한 결과를 종합해 보면, tire clearance와 ovality는 선형 관계에 있음이 나타난다.

$$W = a \cdot W_L + b \cdot S_{th}$$

$$W_L = \text{tire ovality (\% of dN)}$$

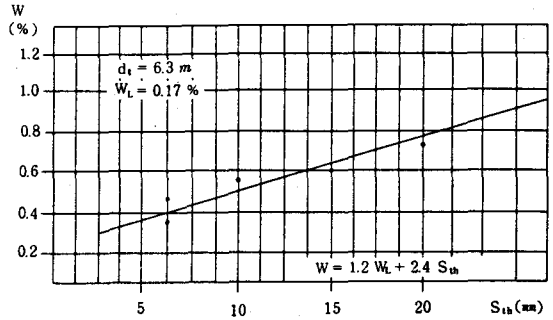
$$S_{th} = \text{tire clearance (\% of dN) (이론적)}$$

$$a = \text{상수 } 1 - 1.25$$

$$b = \text{상수 } 1 - 3$$

Factor는 shell 견고성, coating 상태, 연와의 특성 등에 따라 변하므로 kiln의 tire station 별로 <그림-22>와 같은 특성 curve를 구할 수 있다.

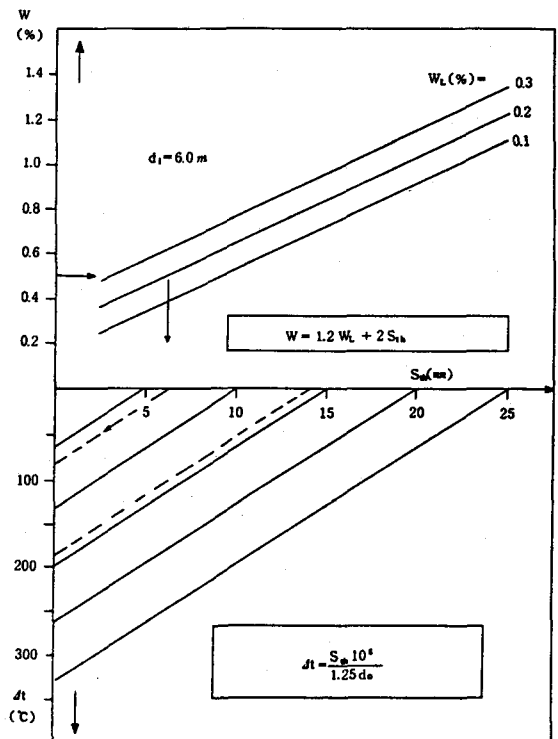
<그림-23>은 직경 6 m kiln을 기준하여 ovality에 영향을 미치는 중요한 factor들의 관계를 도시하였다. 운전상태에서 ovality가 0.5% 이하이기 위해서는 tire가 충분히 견고하여 Tire ovality가 0.2% 이하이고, clearance S_{th} 가 6.5 mm 이하이어야 함과 동시에 tire와 Shell



<그림-22> Tire clearance와 ovality의 상관

의 온도차이가 82.5℃ 이하이어야 하며, 이를 초과하면 clearance가 없어져서 tire 하부 kiln shell의 영구수축변형이 발생한다. 냉각된 상태에서 clearance는 tire와 shell 온도차이가 180℃까지 허용되도록 하기 위하여는 직경 6 m kiln에서 14 mm 정도가 요구된다.

Tire와 kiln shell의 관계가 양호했던 profiled sectional tire에 비해 최근의 full sectional tire를 쓰는 kiln에서는 kiln shell의 수축 위험성이 더 증가했으며, 특히 heating-up 이후



<그림-23> Tire clearance S_{th} , ovality W , 온도차 Δt 의 상관

원료 투입 전후하여 한계상황에 도달하게 된다. 차가운 원료에 의한 열의 소비를 연료에 의하여 보상해야 하므로 촛점부위 kiln shell 온도가 상승하고 clearance가 급속히 감소한다. 따라서, 소성대 부근의 tire 상대운동에 대하여 특히 start-up 시간 중에는 잘 관리하여야 하는 것이다.

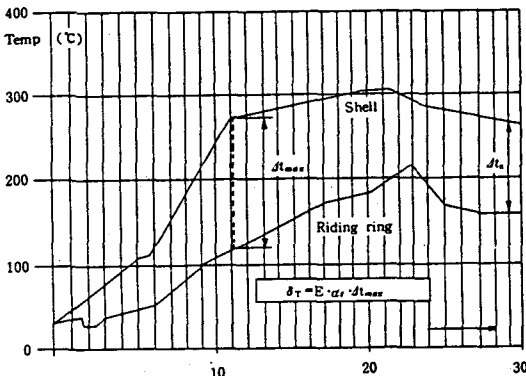
4-2 Tire clearance의 보정

4-2-1 Clearance 증가의 원인

생각된 상태에서 tire와 kiln shell 사이의 clearance는 tire 조립을 위해서라도 꼭 필요하다. Tire와 shell의 열팽창 차이를 보상하기 위하여 운전상태에서 뜨거울 때 clearance가 최소가 되도록 tire는 설계되어 있다. tire가 kiln shell을 수축시키지 않는 범위에서 꼭 끼는 것이 가장 이상적이겠지만 실제 운전상태에서 kiln shell의 온도를 정확히 예측하는 것은 불가능한 일이다.

Tire부분 연와탈락의 발견이 늦을 경우도 심각하지만, 지나치게 빠른 heating-up으로 가장 유감스러운 결과가 초래되는 사실은 더욱 중요하다. tire의 온도가 상대적으로 낮은 상태에서 kiln shell이 급히 열을 받으면 kiln shell이 수축변형을 일으키고, 그 결과로 tire온도가 상승된 이후에는 clearance가 한계치를 벗어나게 되는 것이다.

<그림-24>는 heating-up 중의 kiln shell 및 tire 온도상승을 예시한 것으로 Δt_{max} 는 최대



<그림-24> Heating-up 기간 중의 tire와 shell 온도상승 pattern

온도차를 표시한 것이다.

Kiln shell의 팽창이 tire에 의하여 저지되면 열적응력 σ_T 가 항복점 σ_F 를 초과할 경우 tire하부 kiln shell의 영구수축변형이 발생한다. 냉각상태의 clearance S_{th} 가 너무 작거나 급속한 heating-up으로 Δt_{max} 가 허용치를 초과하는 경우이다.

$$\sigma_T = E \cdot \alpha_T \cdot \Delta t_{max} < \sigma_F$$

4-2-2 Liner 보강방법 1. (Holderbank의 방법)

Tire부분의 ovality 감소를 위하여 설계 측면에서 허용되는 한도 내에서 clearance를 줄여야 하는데 liner를 보강하는 방법이 주로 사용되며 이때 보강 철판의 두께 결정이 중요하다. 그 안전한 절차는 다음과 같다.

1) 1주일 동안 매일 3회 정도 상대운동 ΔU 를 측정 (<그림-25> 참조)

2) 기간 중 측정치 중 최소 ΔU 를 근거로 사용

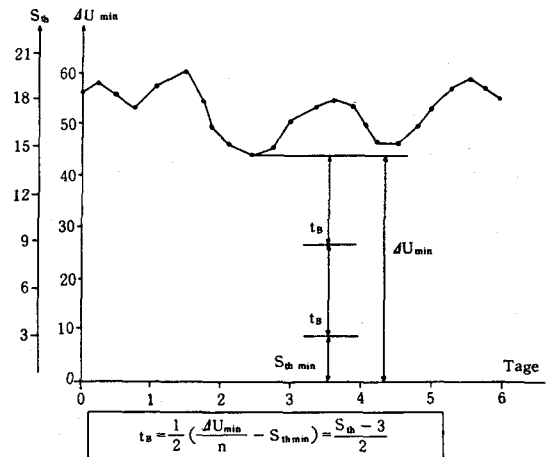
3) 이론적 clearance 계산

$$S_{th} = \frac{\Delta U}{\pi} \text{로 계산}$$

4) 여유 3mm 정도의 clearance를 고려하여 보강철판 두께를 결정

$$t_B = \frac{S_{th} - 3}{2}$$

5) 기존 liner의 kiln shell 쪽으로 보강할 철판을 부착시키고 부분적으로 용접한다.



<그림-25> 보강철판 두께 결정 방법

4-2-3 Liner 보강방법 2. (Refratechnik의 방법)

앞에서 언급한 Holderbank의 방법과 달리 Refratechnik사의 report는 Obourg instrument에 의한 다른 방법을 제시하고 있다.

- 1) Tire clearance S와 slip ΔU 를 <그림-7>의 Obourg instrument를 사용하여 정상운전 중 날짜를 달리하여 3회 측정한다.
- 2) 측정치로부터 다음 식과 같이 평균 factor K를 계산한다.
- 3) 2주 이상 매일 1~2회씩 정상운전 상태에서 ΔU 를 측정하여 그 최소치를 ΔU_{min} 이라 한다.
- 4) 보강철판 두께 T_B 를 다음과 같이 계산한다.

$$T_B = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U_{min}}{K} - S_{min} \right)$$

S_{min} : 최소의 여유 clearance (이론적 개념이 아님, 아래표 참조)

Tire liner 보강 철판의 두께 결정 방법에는 최근에도 많은 의견들이 있으므로 kiln 공급자에게 문의하여 그 설계 기준에 맞는지 확인할 필요가 있다. Refratechnik사 report의 tire clearance의 대소판단을 위한 기준은 다음과 같았다.

Tire clearance guidelines

(obourg instrument에 의한 측정치)

구분 clearance 상태	small kiln < 4.5 M ϕ		large kiln > 4.5 M ϕ	
	outlet tire	inlet tire	outlet tire	inlet tire
과 소	< 5mm	< 3mm	< 3mm	< 2mm
허용 가능	5~15mm	3~10mm	3~12mm	2~10mm
과 대	> 15mm	> 10mm	> 12mm	> 10mm

4-2-4 Liner 보강의 결과

5개의 tire가 설치된 3.66 - 4.27 m ϕ × 133 m_L 습식 kiln에서의 liner 보강 전후 결과를 예로 들기로 한다. 이 공장에는 Obourg instrument가 없으므로 보강 두께를 Holderbank 방법으로 결정하든지 6~8개월 이후 Obourg instrument의 결과로 결정하든지 양자택일을 해야했

으나 다소의 오차가 있더라도 기간 중의 연와 trouble을 막기 위하여 전자를 택하였는데, 그 결과 tire clearance가 만족스럽게 조정되지 않았긴 했으나, 그 선택이 더 합리적이었다고 생각된다.

5번 tire의 경우 <그림-26> slip이 42 mm/rev, ovality 0.66%에서 6.35 mm liner 보강으로 tire slip 2mm, ovality를 0.29로 만들었다. 정상운전 중 약간의 slip이 있긴하나 tire의 clearance가 너무 작으므로 이 공장의 엔지니어들은 이 문제를 염려하여 start up이나 coating 탈락시 각별히 유의하고 있다.

4번 tire <그림-27>의 경우 5mm 철판으로 보강하여 slip 37mm/rev, ovality 0.74%에서 slip 17mm ovality 0.56%로 되었는데 이곳도 Obourg instrument를 응용하여 좀더 두꺼운 철판을 사용했다면 더 나은 결과를 기대할 수 있었다고 생각된다.

2번 tire <그림-28>의 경우도 5번 tire와 비슷한 상황이나 kiln shell 온도 변화가 burning zone처럼 급변하지 않으므로 5번 tire처럼 심각한 문제는 아니라고 본다.

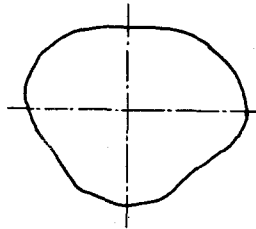
1번 tire <그림-29>에서는 모든 결과가 만족스럽게 얻어졌다고 판단할 수 있겠다.

4-3 Kiln 휨의 교정

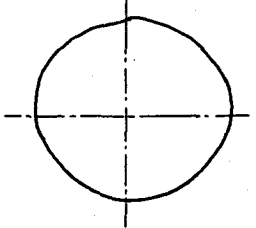
4-3-1 휨 변형의 고찰

Kiln shell의 영구적 휨 변형은 kil 회전 중 tire가 roller와 접촉하지 않고 위크 리는 현상으로 쉽게 판단할 수 있다. 이렇게 tire가 위로 들리는 현상은 냉각 상태에서 발생했다가 운전상태에서 없어지는 것이 보통이다. kiln shell이 crank 축과 같이 되므로 bearing에 충격을 주어 허용 부하를 초과할 뿐 아니라, 변형에도 비교적 큰 영향을 준다. kiln의 휨은 shell test 측정으로 정확하게 측정할 수 있다.

Kiln 둘레를 120°씩 분할하여 3개의 측정line을 설정한 다음 tire에 가장 가까운 위치에서 각각의 측정을 실시한 결과를 <그림-13>과 같은 graph에 기록한다. 정상적인 탄성 변형에 비해서 ovality 측정치는 한 단면에서의 3개 측정점이 각각 다른 차이를 나타내며 이들을 연결

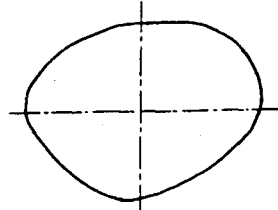


before
 × : 1.35
 ○ : 24.08
 % : 0.66
 tire slip :
 42 mm / rev

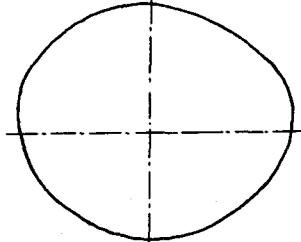


after
 × : 0.60
 ○ : 10.70
 % : 0.29
 tire slip :
 2 mm / rev
 shim used :
 6.35 mm

<그림-26> 5번 tire

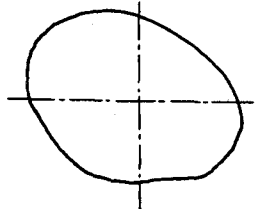


before
 × : 1.53
 ○ : 27.20
 % : 0.74
 tire slip :
 37 mm / rev

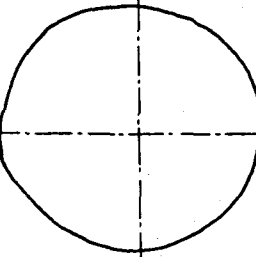


after
 × : 1.15
 ○ : 20.44
 % : 0.56
 tire slip :
 17 mm / rev
 shim used :
 5 mm

<그림-27> 4번 tire

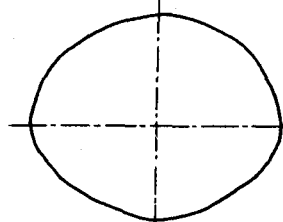


before
 × : 1.30
 ○ : 23.19
 % : 0.63
 tire slip :
 45 mm / rev

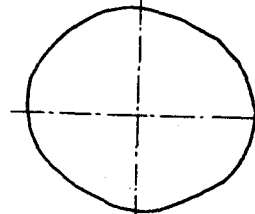


after
 × : 0.70
 ○ : 12.49
 % : 0.33
 tire slip :
 1 mm / rev
 shim used :
 6.35 mm

<그림-28> 2번 tire



before
 × : 1.10
 ○ : 26.71
 % : 0.63
 tire slip :
 49 mm / rev



after
 × : 0.55
 ○ : 13.36
 % : 0.32
 tire slip :
 7 mm / rev
 shim used :
 6.35 mm

<그림-29> 1번 tire

한 선이 서로 교차하는데 휨 변형이 없는 kiln의 경우는 이들이 일직선이 될 것이다.

4-3-2 휨 변형의 교정절차

Kiln 휨이 대체로 미세하면 간단히 교정할 수 있다. 한 단면을 30°씩 잘라서 shell test 측정을 실시하고 <그림-30>과 같이 graph에 결과를 도시하여 평균치에서의 편차를 조사한다. tire liner를 다음식에 의하여 교환하거나 보강하는 절차가 필요하다.

교환 또는 보강될 liner의 두께 L_k 는

$$L_k = L \pm L \cdot \frac{\phi}{2}$$

단, L_k : 수정된 liner 두께 (mm)

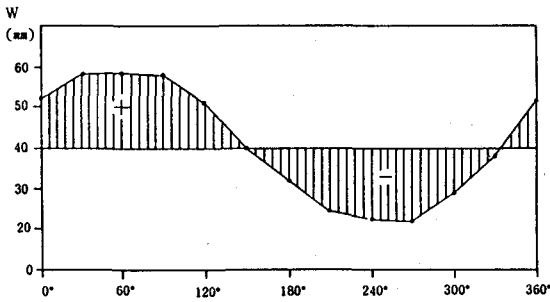
변형이 평균보다 클 때 (-)

변형이 평균보다 작을 때 (+)

$$\phi = \frac{W_g - W_k}{W_g}$$

W_g : 높은 ovality

W_k : 낮은 ovality (높은 ovality의 반대쪽 ovality)



<그림-30> 위치별 ovality

이런 교정은 용접된 liner보다 bolt로 고정된 kiln에서 수행하기 쉬운 것은 두말할 필요도 없다.

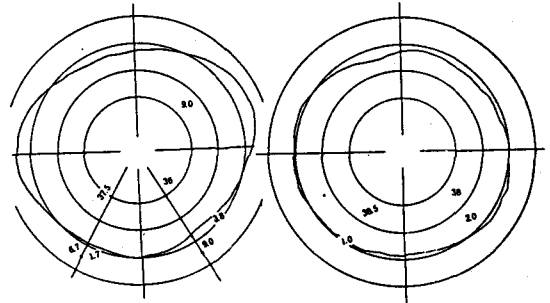
5. 동해공장 kiln의 ovality 측정 및 관리

5-1 Ovality 측정 data 및 분석

'85.4월 중에 측정한 동해공장 4-7호 kiln의 kiln shell ovality 측정결과는 표 4-7과 같았다.

1) 4호 kiln 1번 tire는 측정 당시 shell과의 온도차 180℃에서 거의 slip이 없었으나 재 측정시에는 온도차 115℃에서 slip이 20mm였다. 온도차 65℃에서 slip감소는 $5,200 \times \pi 65 \times 1.25 \times 10^6 = 13.3 \text{ mm}$ 임을 감안할 때 측정 당시의

slip 0 현상은 tire 윤회의 불량으로 사료된다.
2) 5호 kiln 1번 tire는 roller 위치의 좌우 unbalance가 발견되었으며 조정 이후 해결되었다.



측정 당시 roller 조정 이후

<그림-31> Roller 조정 전후의 5호 kiln 측정 diagram

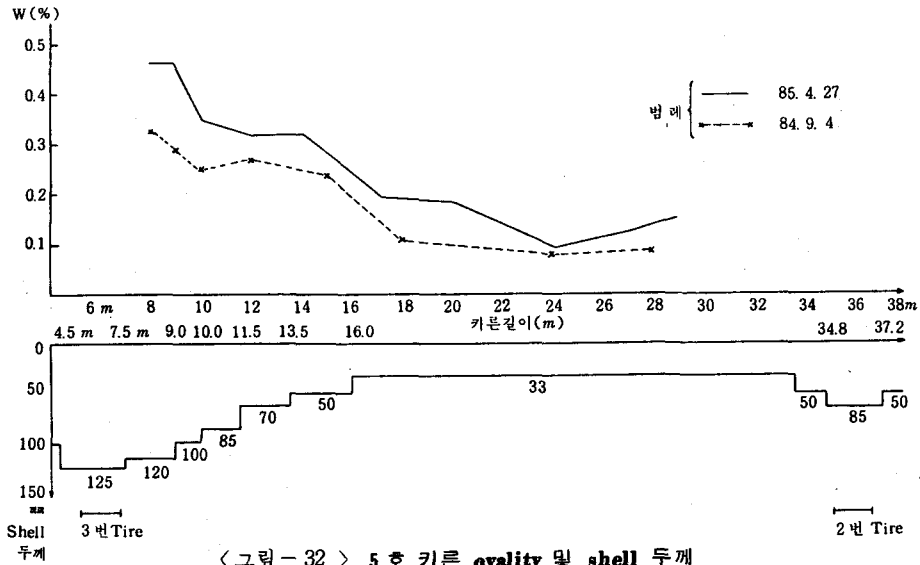
3) 5호 kiln의 3번 tire는 정상 운전시 tire slip의 최소치가 30mm이므로 Holderbank 방법에 의한 계산에 의하면,

$$\frac{\frac{30}{\pi} - 3}{2} = 3.27 \text{ (mm)}$$

이므로 3.2mm 철판 삽입에 의한 liner는 가능하

<표 4-7> Kiln ovality 측정치

kiln	tire	ovality (%)		tire slip (mm)	이론적 tire clearance(mm)	온도 (%)	
		pre 측	cooler 측			kiln shell	tire
4	1	0.115	0.073	0	0	330	150
	2	0.290	0.251	45	14.3	130	80
	3	0.371	0.310	25	8.0	180	115
5	1	0.461	0.245	27	8.6	320	150
	2	0.213	0.142	35	11.2	135	90
	3	0.403	0.329	32	10.2	210	105
6	1	0.170	0.101	15	4.8	190	100
	2	0.115	0.087	42	13.4	90	60
	3	0.367	0.287	27	8.6	180	90
7	1	0.319	0.179	22	7.0	290	125
	2	0.128	0.158	24	7.6	180	90
	3	0.334	0.274	15	4.8	330	150



〈그림-32〉 5호 키른 ovality 및 shell 두께

나 heating up 시 3번 tire 부위 shell 과 tire 의 최고 200℃에 이르는 현실을 감안하여 추후 slip이 더 커질 때 보강하도록 당분간 보류함이 타당하다고 사료된다.

4) '84년 7월에 liner를 교환하고 '85년 2월에 3.2mm 철판을 삽입한 7호 kiln 3번 tire의 경우 slip 15mm에서도 ovality가 0.3%를 상회하므로 3번 tire에서 kiln shell ovality를 0.3% 이하로 관리하기는 어려운 것으로 사료된다.

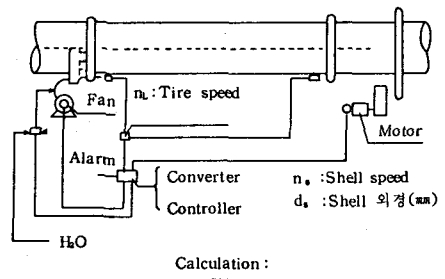
5-2 향후대책

1) Tire로부터의 거리와 kiln shell의 ovality를 조사한 결과 그림과 같았다. 3번 tire 부위의 slip은 15mm 이후에서 비로소 급격히 감소하므로 연와 수명 연장을 위하여 이 부분에 stiffening ring의 설치를 신중히 검토해야 할 것으로 사료된다.

2) 〈그림-28〉에 나타난 바와 같이 적절한 두께의 철판 삽입에 의한 tire liner 보강은 ovality감소를 위해 효과가 지대하다고 판단된다. 이는 또한 tire liner를 교환하는 것보다 더 정확히 slip량이 조정될뿐 아니라 경제적으로 더 유리하다. 따라서, slip이 일정한계치를 초과하면 liner 보강에 의하여 이를 일정 수준으로 관리해야 할 것으로 사료된다.

	재료비	노력비	계
liner 교환	15,400	2,480	17,880
철판보강(3.2mm기준)	260	910	1,170

3) Tire ovality를 근본적으로 낮추기 위하여는 〈그림-33〉과 같은 원리로 tire slip을 자동감지하여 cooling fan가동 여부를 자동조작하고 message alarm을 낼 수 있는 설비를 구입 또는 연구 개발하여 활용해야 할 것으로 사료된다.



$$\Delta U = \frac{(n_s - n_L) \cdot n \cdot d_s}{n_s} \quad (\text{mm})$$

〈그림-33〉 Tire slip 자동 관리설비

4) Tire 운행을 강화하여 운행 불량에 의한 tire 및 liner 마모 및 손상을 감소시켜 slip이

점차 증대되는 것을 방지하여야 겠다.

6. 결 언

Kiln shell ovality는 내화연와의 손상에 미치는 관리 가능한 기계적 요인의 하나이므로 이를 적정 수준으로 관리하는 것이 연와 수명 안정을 위하여 필수적인 사항이다. tire slip을 적정 수준으로 유지하는 것이 그 첩경이며 이를 위하여는 적정 size의 철판 보강이 가장 좋은 방법으로 판단된다.

REFERENCES

- 1) Resenblad, G.: "Radiale Deformation von Drehofenmanteln", ZKG 7(1954), Publication No. 4.
- 2) Nies W.: "Die Berechnung der Drehofen-Laufringe" Zement 31(1942), publication 12.
- 3) Ramamurty V., Gupta L.S.: "Design of ratary Kiln tries" ZKG No. 12 1978.
- 4) M. Durr, Neubeckum: "Verfugbarkeit und Futterhaltbarkeit grosser Drehofen" Zement-Kalk-Gips Nr. 12/1976.
- 5) H. Xeller und H. Johnk, Heidelberg: "Udverwachung, Planmassige Warung und vorbeugend Instandhaltung bei Laufringen" Zement-Kalk-Gips-Nr. 12/1976.
- 6) Elastizitatstjeoretische Bestimmung der Ofenovallitat und ihr Einfluss auf die Futterstandzeit Zement-Kalk-Gips Nr. 12/1976.
- 7) E. Steinbiss, Dusseldorf: "Messung der Ovalitatsverformung und des Laufrungspiels von Drehofen" Zement-Kalk-Gips Nr. 7/1976.
- 8) H. Erni.: "Work Experience with Large Rotary Kilns and Conclusions for Design and Control", Part 2. Cement Technology, May/June 1975.
- 9) F. G. Rosenblad: "Detecting and Measuring Deformations of Rotary Kilns", Rock Products, August 1954.
- 10) H. Hilbert.: "Dimensional Stability Measurements on Rotary with the Shell Test Instrument" Zement-Kalk-Gips, 14. 1. 67.
- 11) L. G. Huggert.: "Radial Deformation in Rotary Kilns". British Ceramic Society, Febuary 1967.
- 12) B. Saxer.: "Kiln Shell Deformation Test System Holderbank". Holderbank Technical Center Report No. VA75/4469/E.
- 13) E. B. Thorn, K. E. Peray: "Kiln Aligmnt and Shell Ovality Test". I.E.E.E. Tech. Conference, Tucson, Arizona 1976.
- 14) H. Erni.: "Deformations of Rotary Kilns and their Effect on Refractory Linings - part 2. "Cement Technology, January 1980.
- 15) W. Bonn.: "Shelltest-Messungen and Grossen Drehofen" Zement-Kalk-Gips No. 7. 1976.