

롤러 분쇄기용 테이블 라이너의 파손 해석에 관한 연구

이동우* · 홍순혁* · 이경영* · 조석수** · 주원식†

A Study on on Failure Analysis of Table Liner for Roller Mill

Dong Woo Lee, Soon Hyeok Hong, Kyoung Young Lee, Seok Swoo Cho, and Won Sik Joo

Key Words: Fatigue Fracture(피로 파괴), Grinding roller(분쇄 롤러), Hole-drilling method(구멍 뚫기법), Table Liner(테이블 라이너), Vertical Roller Mill(수직형 롤러 분쇄기)

Abstract

The vertical roller mill is the important machine grinding and mixing various crude materials in the manufacturing process of portland cement. Table liner is one of grinding elements of vertical roller mill and is subjected to the cyclic bending stress by rollers load and the centrifugal force by rotation of table. It demands 4×10^7 cycle but has $4 \times 10^6 \sim 8 \times 10^6$ cycle. It fractures at the edge of grinding path of outside roller. The repair expense for it amounts to 30% of total maintenance of vertical roller mill. Therefore, this study shows the fracture mechanism of table liner for vertical roller mill using HDM and fatigue analysis

1. 서 론

포틀랜드 시멘트(Portland cement)는 석회석, 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3)등을 함유하는 원료를 킬른(Klin)에서 약 1450°C 로 소성하여 소결성 클링커(Clinker)를 만든 뒤 응결조절을 위해 석고 3~5%를 첨가하여 아주 미세하게 분쇄한 무기질 접착제이다.⁽¹⁾ 따라서 포틀랜드 시멘트의 제조과정 중 각종 혼합 형태의 원료를 분쇄하는 분쇄기(Mill)는 매우 중요한 설비이다.

또한 국내에 도입된 대부분의 포틀랜드 시멘트용 분쇄기는 독일과 일본등 선진국에서 도입된

고가의 대형 기계이다. 따라서 이에 대한 체계적 정비 및 보수가 원활히 진행되어야 포틀랜드 시멘트의 생산설비에 대한 안정성을 확보할 수 있다. 한편 국내에 도입된 수직형 롤러 분쇄기(Vertical roller mill)는 포틀랜드 시멘트의 원료인 석회석의 시간당 생산량이 5.5MN이나 되는 세계 최대 규모의 분쇄기로서 테이블 라이너의 설계 수명이 4×10^7 사이클 정도이나 대략 $4 \times 10^6 \sim 8 \times 10^6$ 사이클 정도에서 파괴되고 있어 계획 예방정비에 대한 어려움이 있다. 특히, 수직형 롤러 분쇄기의 경우 테이블 라이너의 보수 비용이 전체 분쇄기 보수 비용의 30%이상을 차지하고 있어 이에 대한 비용을 절감하기 위하여 테이블 라이너의 파손 사고 원인을 구체적으로 구명한 뒤 이에 대한 내용을 구조 설계에 충분히 반영할 필요가 있다.⁽²⁾ 그러나 본 연구에서는 연구 범위를 테이블 라이너의 파손 원인 구명에 한정하며 구조 설계는 차후의 연구과제로 남기고자 한다.

한편, 파손된 구조물에 대한 파손 해석은 파괴역학적 방법을 이용하는 것이 일반적이다. 그러

† 책임저자, 회원, 동아대학교 기계·산업시스템공학부
E-mail : wsjoo@mail.donga.ac.kr
TEL : (051)200-6844 FAX : (051)200-7656

* 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 삼척대학교 기계·정밀기계·자동차공학부

나 대상 구조물의 사용조건의 차이로 인하여 손상 상호간의 중첩 효과가 발생하여 파손 해석에 상당한 어려움이 있으며 이에 대한 기존의 연구 결과는 다음과 같다.

Nishjima 등⁽³⁾은 2개의 블레이드와 허브로 구성된 항공기 프로펠러에 대한 피로 파손을 광학 현미경과 주사형 전자현미경을 이용하여 파손된 허브에 대하여 작용하는 공칭응력을 구하였다. 그러나 파손된 표면의 경우 상당한 오염이 유발되어 있어 상술의 방법은 적용에 한계를 가지고 있다. 또한, Chiaki 등⁽⁴⁾은 자동차용 컨넥팅 로드(Connecting rod)에 대하여 X선 잔류응력에 의한 정량적 해석을 수행하여 파괴를 일으킨 실제 작용 응력을 구함으로써 X선 파라미터가 실기 부품의 파손해석에 적용할 수 있음을 밝혔다.

그러나 X선 파라미터에 의한 파손해석의 경우 시편 결정립 크기에 따른 측정의 제약 및 다결정일 경우의 측정의 어려움, 파면의 전해연마 정밀도 및 실험의 번거로움 등의 문제가 있으며 실험 시간이 오래 걸리는 등의 문제를 수반한다.

따라서 본 연구에서는 잔류응력측정법의 하나인 구멍뚫기법을 파손해석에 적용하여 파면하의 스트레인 변화로부터 소성역깊이를 검토함으로써 소성역깊이와 최대응력확대계수의 파괴역학 파라미터 관계를 이용하여 부재의 파괴시 부하응력을 추정하고자 한다.

2. 수직형 롤러 분쇄기의 파손 사고

Fig. 1 및 Fig. 2는 수직형 롤러 분쇄기의 테이블 라이너의 파손 사례와 파손 양상을 나타낸 것이다. 완전 파괴된 테이블 라이너와 부분적으로 파괴된 테이블 라이너의 파손 양상을 관찰하면 외측 테이블 라이너의 모서리에서 균열이 발생하여 테이블 라이너의 원주 방향과 축 방향으로 성장하여 최종 파단에 이르게 된다.

3. 시험편 및 시험방법

3.1 재료 및 시험편

Fig. 2은 수직형 롤러 분쇄기의 테이블 라이너의 인장 시편의 채취 방향을 나타낸 것이다. 인장 시편은 수직형 롤러 분쇄기의 파손 양상을 고

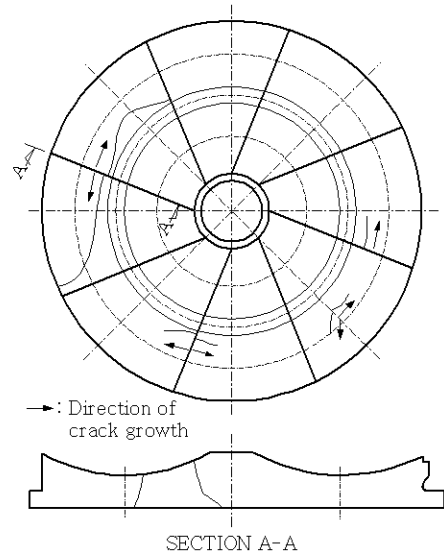


Fig. 1 Fracture aspect of table liner for vertical roller mill

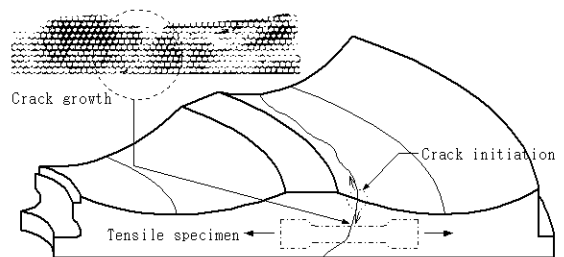


Fig. 2 Sampling direction of tensile and bending specimen and fracture process of table liner

려하여 그림에서 보는 것처럼 테이블 라이너의 반경 방향으로 채취하였다. 인장시험은 정격하중 98kN인 만능재료 시험기(INSTRON model 1337)와 표점거리 25mm인 신장계(INSTRON model 2630-004)를 사용하여 수행하였다.

Table 1, 2는 수직형 롤러 분쇄기의 테이블 라이너에 사용한 SC450강으로 화학적 조성과 기계적 성질을 나타낸 것으로 미사용 테이블 라이너와 파손된 테이블 라이너의 건전부에서 각각 채취하여 실험하였다.

3.2 피로균열진전실험

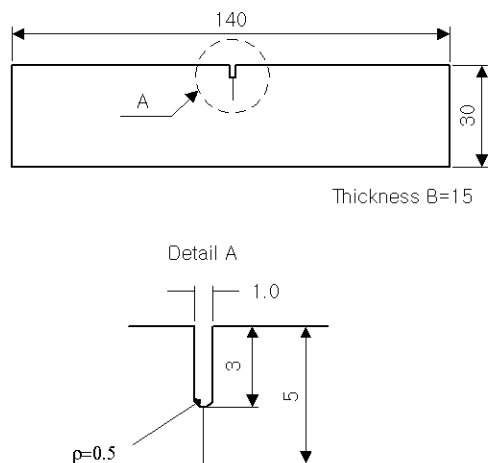
파손해석을 수행하기 위한 피로균열진전실험은 정격하중이 98 kN인 동적서보피로시험기(Instron model 1337)를 이용하였다. ASTM E647-95에서 제안하고 있는 일정하중 범위실험의 경우 모든 실험조건에 대하여 하중폭은 일정한 상태로 유지

Table 1 Chemical composition of SC450 steel (wt.%)

C	Cr	Si	Mn	Ni	P	S
0.22	0.10	0.8	0.7	0.015	0.04	0.06

Table 2 Mechanical properties of SC450 steel

Properties	Unused	Used
Yield strength σ_{ys} (MPa)	238.2	241.6
Tensile strength σ_{ts} (MPa)	480	474
Poisson's ratio ν	0.300	0.306
Elongation ϵ_f (%)	24	22.7
Young's modulus E (GPa)	203	206
Density ρ (kg/mm ³)	7.85×10^{-6}	7.85×10^{-6}

**Fig. 3** Geometry and dimension of SEB specimen of SC450 steel(unit : mm)

하면서 응력비의 영향을 평가하는 것이 일반적인 피로균열성장시험법이다.⁽⁵⁾ 따라서 실험은 일정진폭 하중제어방식으로 반복 굽힘하중을 가하였다. Fig. 3은 실험에 사용된 SEB(single edge cracked pure bending)시험편의 형상 및 치수를 보이고 있다.⁽⁶⁾ 실험조건은 상온대기 중에서 피로시험기의 서보밸브의 한계작동 주파수를 고려하여 반복속도는 10 Hz, 정현파형, 응력비는 R=0.13 및 0.3으로 하였으며, 하중폭 ΔP 는 각 응력비에서 모두 11,476 N으로 일정하게 고정하여 실험하였다. 균열길이 측정시 주파수는 0.1Hz로 낮추었고, 배율 50배인 이동식 망원현미경을 시험편 양측면에 배치하여 균열길이를 측정하였다.

파괴역학 파라미터로 사용하는 응력확대계수

K는 균열 길이 a 및 작용하중에 의하여 결정되며 다음 식 (1)로 결정된다.⁽⁶⁾

$$K_I = (6M/BW^2)(\pi a)^{1/2} \cdot F(a/W)$$

$$F(a/W) = 1.122 - 1.40(a/W) + 7.33(a/W)^2 - 13.08(a/W)^3 + 14.0(a/W)^4 \quad (1)$$

여기서, M : 모우멘트, a : 균열길이, W : 시험편폭, B : 시험편두께 이다.

3.3 구멍뚫기법에 의한 소성역깊이 측정실험

3.3.1 실험 장치 및 방법

피로 파손된 테이블 라이너에 대한 파면해석을 수행하기 위한 측정 장비는 현재 가장 널리 보급되어 있는 Micro-Measurements Group사의 RS-200을 사용하였다. 본 실험에서는 구멍 정렬이 용이하고 구멍을 비교적 정확하게 뚫을 수 있는 Milling guide와 High speed air turbine system을 채택하였다. 응력측정에 사용된 스트레인 게이지(strain gage)는 미국 Micro-Measurement사 제품의 로제트 스트레인 게이지(rossette strain gage)이다.

실험은 스트레인 게이지를 시험편에 부착한 후, 구멍을 뚫어서 스트레인을 측정하였으며, 구멍의 지름과 깊이는 ASTM E837-95에 따라 실시하였다.⁽⁷⁾

3.3.2. 재료 및 실험

(1) 쇼트피닝시험편

구멍뚫기법에 의한 소성역깊이 검증을 위하여 본 실험에 사용한 시험편 재료는 SC450 강으로 테이블 라이너의 건전부에서 채취하여 쇼트피닝 처리하였다. Table 3은 쇼트피닝 가공조건을 나타내었다. 또한 구멍깊이가 스트레인 원의 지름의 0.4배가 될 때까지 100 μ m씩 반복적으로 피로파면에서 깊이 방향으로 구멍을 뚫으면서 스트레인을 측정하였다.

Table 3 Conditions of shot peening

Content	Condition
Shot ball diameter	$\varnothing 0.6$ mm
Impeller velocity	49 m/s
Impeller diameter	360 mm
Exposure time	800 sec

(2) 피로균열진전시험편

Fig. 4는 SC 450 강을 피로파단면에 대한 스트레인 게이지의 부착위치 및 방향에 대한 모식도를 나타내었다. 파면하의 소성역깊이 측정은 응력비 $R = 0.13$ 에서는 최대응력확대계수 $K_{max} = 14.28$, $26.66 MPa\sqrt{m}$ 에서, 응력비 $R = 0.3$ 에서는 최대응력확대계수 $K_{max} = 14.28$, $20.47 MPa\sqrt{m}$ 에서 각각 측정하였다. 또한 구멍깊이가 스트레인 원의 지름의 0.4배가 될 때까지 $100\mu m$ 씩 반복적으로 피로파면에서 깊이 방향으로 구멍을 뚫으면서 스트레인을 측정하여 스트레인의 경사가 급격히 변하지 않는 부분을 소성역깊이로 결정하였다.

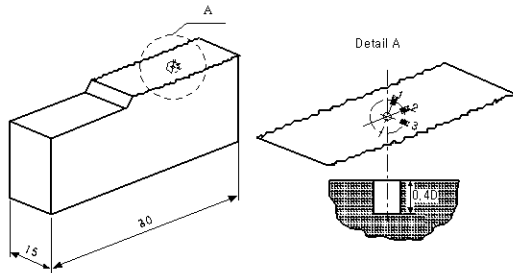


Fig. 4 Schematic illustration of HDM on fatigue fractured surface of SEB

(3) 테이블 라이너 실기품

Fig. 5는 테이블 라이너의 피로 파단면에 구멍 뚫기 장비를 장착한 것을 나타내고 있다. 또한 파면하의 소성역깊이 측정은 균열발생부의 파단면에서 깊이 방향으로, 구멍깊이가 스트레인 원의 지름의 0.4배가 될 때까지 $100\mu m$ 씩 반복적으로 구멍을 뚫으면서 스트레인을 측정하여 스트레인의 경사가 급격히 변하는 부분을 소성역깊이로 결정하였다.



Fig. 5 View of HDM attached to fatigue fractured surface of table liner

4. 실험결과 및 고찰

4.1 구멍뚫기법에 의한 소성역깊이 검증

구멍뚫기법은 응력을 받고 있는 부재에 구멍을 뚫어 그 주변의 스트레인 변화로부터 부재내에 존재하고 있는 응력을 구하는 방법이다.

따라서 이러한 잔류응력과 이완스트레인과 상관을 이용하여 파단된 부재의 피로파면 하에 존재하는 잔류응력의 변화에 따른 소성역깊이를 추정하는 것이 가능하리라 생각된다.

구멍뚫기법을 이용한 피로파면의 소성역깊이를 측정하기 위한 타당성을 입증하기 위해 깊이에 따른 응력의 변화를 쉽게 알 수 있는 쇼트피닝 처리한 재료를 이용하였다. 쇼트피닝재는 테이블 라이너의 건전부에서 채취하여 쇼트피닝 처리하였다.

쇼트피닝재의 응력분포와 구멍뚫기법에 의한 이완스트레인과 관계를 알아보기 위하여 Fig. 6에는 일반적인 쇼트피닝재의 응력분포를 나타낸 것이다.

또한, Fig. 7은 쇼트피닝한 SC450 강을 깊이 방향으로 $100\mu m$ 씩 일정 간격으로 구멍을 뚫었을 때의 이완스트레인의 변화를 나타낸 것이다. 쇼트피닝한 SC450 강의 압축잔류응력이 존재하는 깊이는 $400\mu m$ 로 추정된다.

또한 Fig. 7의 이완스트레인의 변화량에 의해 측정된 압축잔류응력이 존재하는 영역의 깊이에 대한 타당성을 입증하기 위해 잔류응력과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있는 경도를 이용하여 확인하였다.⁽⁸⁾

Fig. 8은 쇼트피닝한 SC450 강의 단면을 절단한 후 마이크로 비커스(micro vickers)를 이용하여 깊이 방향으로 $100\mu m$ 씩 일정 간격으로 측정된 경도값과 구멍뚫기법에서 구한 이완스트레인을 동시에 양쪽을 쉽게 비교하기 위해 Fig. 7에 나타난 이완스트레인을 음수로 변환하여 표현하였다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 경도의 변화와 이완스트레인의 변화가 거의 동일하게 변하는 것을 알 수 있으며 마이크로 비커스로 측정된 압축잔류응력의 깊이는 $400\mu m$ 로 구멍뚫기법으로 구한 값과 일치하였다.

4.2 균열진전피로파면하의 변형률 분포 특성

4.2.1 피로파면하의 변형률 분포 특성

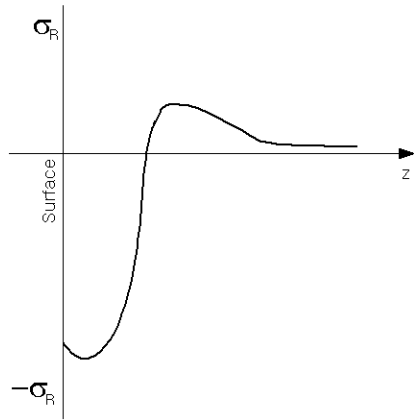


Fig. 6 Typical residual stress of shot-peening

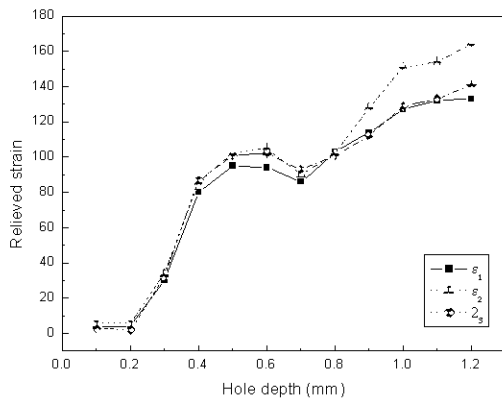


Fig. 7 Relieved strain plotted against the depth from fatigue fractured surface for shot-peening

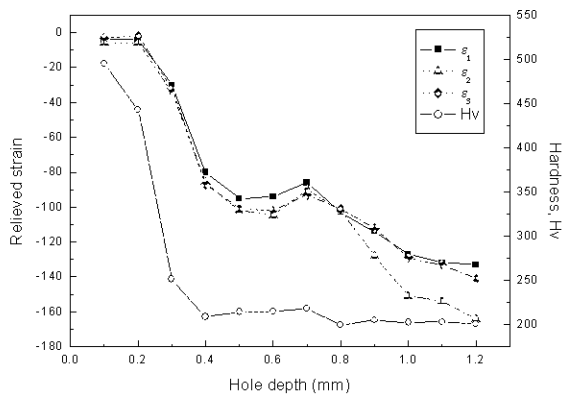
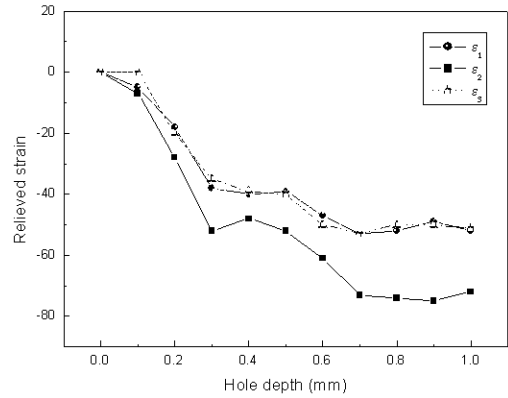
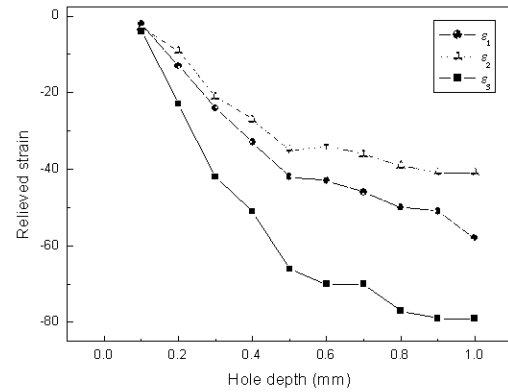


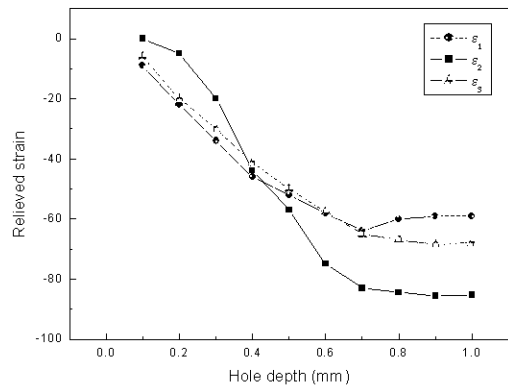
Fig. 8 Comparison between relieved strain and microhardness for shot-peening



(a) $\Delta K = 14.28 \text{ MPa m}^{1/2}$



(b) $\Delta K = 20.47 \text{ MPa m}^{1/2}$



(c) $\Delta K = 26.66 \text{ MPa m}^{1/2}$

Fig. 9 Relieved strain plotted against the depth from fatigue fractured surface for SEB

파면하의 소성역깊이는 구멍을 뚫었을 때 이완

되는 변형률이 급격하게 변하지 않는 초기값 즉, 일정하게 증가하는 초기값 부근의 파면 깊이로 정할 수 있으며, 본 연구의 경우는 Fig. 9 (a)의 $K_{max} = 14.28 MPa\sqrt{m}$ 에서는 0.3 mm, (b)의 $K_{max} = 20.47 MPa\sqrt{m}$ 에서는 0.5 mm, (c)의 $K_{max} = 26.66 MPa\sqrt{m}$ 에서는 0.7 mm를 각각의 소성역깊이로 결정하였다.

4.2.2 소성역깊이 w_y 와 최대응력확대계수 K_{max} 와의 관계

피로파면에 부하된 하중을 구하기 위해서는 파괴역학 파라미터 사이의 상관관계를 얻는 것은 중요한 일이다. 이것은 균열진전 후의 파면부근에 최대소성역깊이 w_y 가 잔류하여 최대응력확대계수 K_{max} 와의 사이에 파괴역학 관계식이 성립하며, 최대소성역깊이 w_y 는 소규모항복조건하에서 (K_{max}/σ_y) 의 제곱에 비례하여 증가하고, 다음 식 (2)와 같은 관계가 성립한다.⁽⁹⁾

$$w_y = a(K_{max}/\sigma_y)^2 \quad (2)$$

여기서, σ_y 는 항복응력, a 는 재료에 대한 정수이며 실험에 의하여 결정한다.

Fig. 10은 최대소성역깊이 w_y 와 (K_{max}/σ_y) 와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 σ_y 는 Table 2에서 나타낸 것과 같이 241.6 MPa이고, a 값을 최소자승법으로 구하면, $a=0.0514$ 가 된다. 이 값은 Levy⁽¹⁰⁾등의 유한요소해석값 $a=0.15$ 나 von Mises의 항복조건에 의한 평면변형률 조건하에서의 균열면의 수직방향의 소성역치수 $a=0.132$ 보다 작은 값으로 되고 있다.⁽¹¹⁾

a 값은 재료 특성에 의존하여 실험적으로 구하여지는데⁽¹²⁾ 대체로 항복점이 높은 강이 낮은 강보다 크게되는 경향이 있으며, 본 실험에서의 $a=0.0514$ 로 S48C재 $a=0.126$ 보다 작게되는 경향을 보였다.

따라서 식 (2)에서 알 수 있듯이 파면아래의 잔류응력 분포로부터 구해진 최대소성역깊이 w_y 로부터 최대응력확대계수 K_{max} 의 추정이 가능하다.

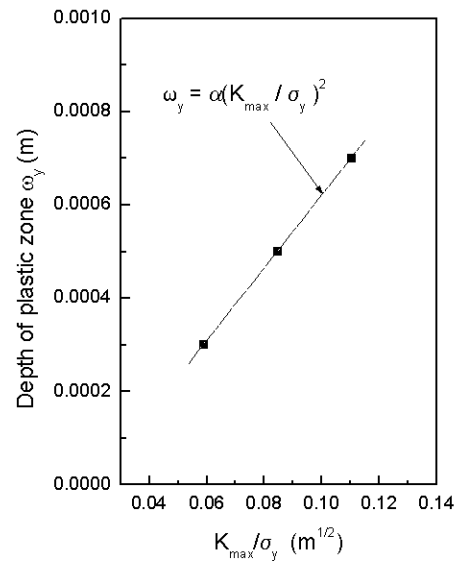


Fig. 10 Relationship between plastic zone depth and maximum stress intensity factor to yield strength

5. 테이블 라이너 피로파면의 정량해석

재료의 파단면에는 파괴의 진행상황을 나타내는 고유의 형상이 남게 되며, 이것을 해석함으로써 파괴기구나 파괴의 원인에 관한 중요한 정보를 얻을 수 있다. 특히 파괴의 진행 중에 대한 관찰이 아니라, 파괴 후에 남겨진 흔적의 관찰로 파괴의 원인을 분석 및 평가하게 된다.

이러한 파단면 분석에 있어서 몇 가지 기본 원칙을 가지고 있으며 가장 기본적인 방법이 육안에 의한 방법이며 본 연구에서도 테이블 라이너의 피로파면에서 균열발생지점부분, 균열성장부분 및 급속파단부분을 육안으로 확인할 수 있었다. 테이블 라이너에 작용하는 하중 형태를 고려할 때 테이블 라이너와 롤러와의 접촉부위에서 국부적인 응력집중이 발생하며 이 부위에서 균열이 발생되어 점진적으로 피로파괴가 진행되어 최종적으로 잔존면적이 작용하중에 견디지 못하는 시점에서 급속파괴가 진행한 것으로 생각된다. 또한 파면에서의 소성역깊이 측정위치는 테이블 라이너에 작용하는 하중의 형태를 고려하여 균열 발생기점 부분에서 측정하였다.

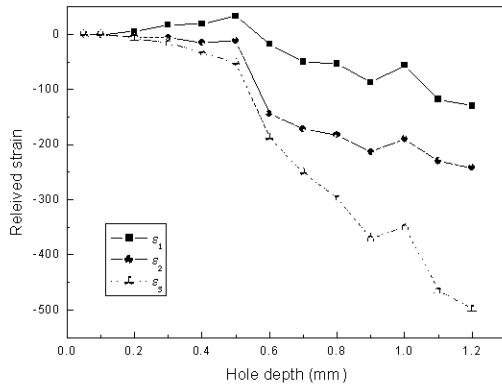


Fig. 11 Relieved strain plotted against the depth from fatigue fractured surface for table liner

파면의 균열개시점에서의 소성역깊이는 Fig. 11에 나타낸 것과 같이 소성역깊이 $\omega_y = 600 \mu\text{m}$ 가 구해지고, 이것을 파괴역학 관계식 (2)에 적용하면 파면의 최대응력확대계수 $K_{\text{max}} = 26.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이 얻어진다.

구조물이 동일한 굽힘응력 σ_b 를 받는 경우 응력확대계수 K 는 뉴만(Newman)의 식 (3)으로 나타낼 수 있다.⁽¹³⁾

$$K_A = \sigma_b \sqrt{\pi b} \cdot \frac{M}{\Phi} H_2 \tag{3}$$

$$K_B = \sigma_b \sqrt{\pi b} \cdot \frac{M}{\Phi} S H_1$$

단, σ_b : 공칭굽힘응력

$$M = (1.13 - 0.09\alpha) + (-0.54 + 0. \frac{89}{0.2 + \alpha})\beta^2 + \left\{ 0.5 - \frac{1}{0.65 + \alpha} + 14.0(1 - \alpha)^{24} \right\} \beta^4$$

$$\Phi^2 = 1 + 1.464\alpha^{1.65}$$

$$S = (1.1 + 0.35\beta^2)\sqrt{\alpha}$$

$$H_2 = 1 - (1.22 + 0.12\alpha h p a)\beta +$$

$$(0.55 - 1.05\alpha^{0.75} + 0.47\alpha^{1.5})\beta^2$$

$$H_1 = 1 - (0.34 + 0.11\alpha)\beta$$

$$b/a = \alpha, \quad b/t = \beta$$

여기서 a, b 는 균열길이, W 는 시험편폭, t 는 시험편 두께를 나타낸다.

테이블 라이너 파면의 작용응력을 추정하면, 균열발생지점부의 위치에서 균열형상을 측정하여 $a = 0.0256 \text{ m}$, $b = 0.02 \text{ m}$ 로 하였고, 두께 t 는 테이블 라이너의 균열발생지점부분의 두께 $t = 0.423 \text{ m}$ 로 하였다. 균열발생지점부의 소성역깊이로부터 구한 최대응력확대계수 K_{max} 를 식 (3)에 대입하면 균열발생지점부의 파손시에 부하된 최대응력은 표면부근지점에서 $\sigma_{\text{max}} = 147.1 \text{ MPa}$, 깊이방향에서 $\sigma_{\text{max}} = 144.7 \text{ MPa}$ 의 추정값을 구할 수 있으며, 따라서 테이블 라이너의 균열지점에 부하된 최대파손응력 σ_{max} 의 추정값은 147.1 MPa이다.

6. 결론

본 연구는 포틀랜드 시멘트용 수직형 롤러 분쇄기의 파손원인을 구명하고자 실기부품 재료인 SC450 강에 대한 피로균열성장실험과 구멍뚫기법을 수행하여 파손해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) SC450 강의 피로균열진전실험 결과, 파면의 소성역깊이 ω_y 와 최대응력확대계수 K_{max} 및 항복장도 σ_y 사이에는 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$\omega_y = 0.0514(K_{\text{max}}/\sigma_y)^2$$

2) 테이블 라이너의 파손해석 결과, 최대응력확대계수 K_{max} 는 $26.1 = \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이고, 최대파손응력 σ_{max} 는 147.1 MPa로 추정되었다.

참고문헌

- (1) 박병철, 1979, “시멘트 기술자 핸드북”, 공학사, pp. 1~10. .
- (2) 동양 시멘트 (주) 삼척공장, 1993, “수직형 롤러의 테이블 라이너의 정비 사례”, 동양 시멘트(주), pp. 16~19.

- 이하 생략 -