

## 판두께에 따른 압흔가공에 의한 피로크랙 전파거동

### The Effect of Thickness of Plate on Fatigue Crack Propagation Behavior by Indentations

송 삼홍(고려대 기계공학과), 최 진호\*(고려대 대학원)

S. H. Song (Korea Univ. Dept. of Mechanical Engineering), J. H. Choi \*(Korea Univ. Graduate School)

**Keywords :** Fatigue(피로), Indentation(압흔), Fatigue Crack Propagation Rate(피로균열전파속도), Crack Opening Load(균열열림하중), Effective Stress Intensity Factor Ratio(유효응력확대계수비), Residual Stress(잔류응력)

**Abstract :** Making Brinell indentations facing each other near the crack tip is very effective method in increasing fatigue life. In this paper, fatigue test was performed after indentation to investigate the effect of thickness of specimen. The results show that fatigue lives increased by making indentation and retardation cycle is inverse proportional to thickness of specimen.

## 1. 서 론

산업 현장에서의 구조물이나 기계 부품 등은 사용 중의 계속적인 반복하중의 작용으로 피로 균열이 발생, 전파하여 최종파단에 이르는 경우가 많다. 피로 균열은 불완전한 용접 이음으로 인한 용접부 결함이나 재료 중의 개재물, 미소 결합, 기공 등의 초기 결함에서, 또는 구멍 등의 설계상의 불가피한 응력집중부등에서 발생한 후 반복하중의 작용으로 성장하여 최종파단에 이르는 경우가 많으나, 현재에는 여러 가지 비파괴 검사법이 발달하여 내재한 초기 균열이나 성장하는 피로 균열들을 검출할 수 있다. 하지만, 여러 가지 이유로 피로 균열을 발견 한 즉시 교체하는 것이 어려운 경우 균열의 성장을 지연 시켜 피로 수명을 연장시키는 방법이 필요하다고 생각된다.

피로 균열의 성장 속도를 지연시키는 방법에는 드릴로 균열선단에 구멍(stop hole)을 뚫어 예리한 노치선단에 걸리는 응력 집중을 완화시키는 방법이 있으나, Brock<sup>(1)</sup>에 의하면 균열선단에 stop hole을 뚫는 방법은 구멍 가까이에서의 균열전파속도의 가속과 전체적인 균열의 일부로 볼 수 있는 구멍으로 인해 증가된 결함의 크기 때문에

상쇄되어 큰 지연 효과는 나타나지 않는다고 하였다.

한편 압축잔류응력을 이용하여 피로 균열의 발생, 또는 전파를 지연시키는 방법은 De Rijk<sup>(2)</sup>, Van Leeuwen<sup>(3)</sup>, Eggwirts<sup>(4)</sup>등에 의해 연구되었는데 그들은 균열선단에 stop hole을 뚫은 후 구멍을 팽창시키거나 균열선단에 강철 볼을 눌러 자국을 낸 결과 인위적인 국부적 압축잔류응력 장이 생겨 큰 지연 효과가 생기는 것을 보고하였으며, 宮川浩臣等<sup>(5)</sup>, 宮川浩臣等<sup>(6)</sup>, 後藤眞宏等<sup>(7)</sup>, 後藤眞宏等<sup>(8)</sup>은 강철볼 자국의 지연 효과를 연구하여 압흔 가공이 판재의 강화법으로 유효하다고 하였다.

한편 송<sup>(9)</sup>등은 피로균열의 선단에 위치를 달리한 압흔을 가공하여 피로 시험을 수행하면 압흔가공위치에 따라 정도의 차이는 있으나 피로 균열 전파 지연 구간이 생겨 피로 수명이 대폭 향상된다고 하였다.

본 연구에서는 피로균열선단에 가공한 압흔으로 인한 피로 균열 전파지연현상에 대한 시험편의 두께의 영향을 알아보았으며, 이를 피로균열 전파속도의 변화와 균열 열림거동을 고려하여 연구하였다.

## 2. 실 험

## 2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용한 재료는 포항제철(주)에서 생산된 두께 6mm의 중기용 고강도강 POSTEN 60RE이며 그 화학적 성분은 Table 1과 같고, KS B 0801의 규정에 따라 시험편을 가공하여 압연 방향으로 행한 인장 시험에서 얻은 기계적 성질들을 Table 2에 나타내었는데, 재료는 항복 응력  $\sigma_y = 542 \text{ MPa}$ , 인장 강도  $\sigma_u = 638 \text{ MPa}$ 이다.

Table 1. The chemical composition of POSTEN 60RE (Wt %)

C	Si	Mn	P	S
0.097	0.268	1.479	0.021	0.0054

Table 2. The mechanical properties of POSTEN 60RE

Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)	Poisson's Ratio
542	638	29	0.28

피로 시험편은 판재를 길이 150mm, 폭 50mm로 가공한 다음, 판 두께를 2.30mm, 3.10mm, 4.05mm로 하여 평판 가공한 후, 두께 0.5mm의 휠커터로 14mm의 노치를 인장 직각방향으로 가공하여 편측 노치 시험편(Single Edged Notched Specimen)으로 시험편을 제작하였으며, 시험편의 모양과 치수는 Fig. 1와 같다.

## 2.2 실험 방법

실험은 각각의 시험편에 대해 노치 선단에서 4mm까지 일정 하중진폭상태에서 피로 시험을 하여 피로 균열을 전파시킨 다음, 시험편 양측에서 지름 10mm의 강철구를 브린넬 경도계로 시험편 양측에서 4.6kN의 하중으로 눌러 균열선단에 압흔을 가공한 후 피로 시험을 수행하였는데, 본 연구에서는 압흔가공시 판두께의 피로균열 전파거동

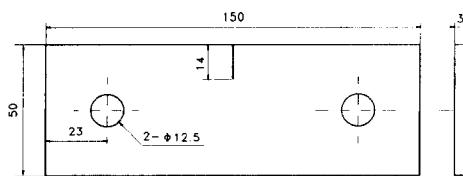


Fig. 1 Specimen configuration

에 대한 영향을 알아보기 위해서 판두께를 2.35mm, 3.10mm, 4.05mm로 변화시켜 실험을 수행하였다.

피로 시험 시 압흔 가공에 의한 균열 열림과 피로 균열 전파 거동과의 관계를 알아보기 위해 균열 열림을 고려하였는데, 균열 열림은 시험편 측면에 클립게이지를 부착하여 변형율 신호를, 로드셀에서 하중 신호를 컴퓨터의 A/D 컨버터로 받아 컴퓨터로 처리하여 얻은 하중-감산 변위 선도에서 균열열림 하중을 정하였다.

본 실험에 사용한 시험기는 전기유압식 인장 압축 시험기로서 반복 속도는 10Hz이며, 실험하 중은 응력비 0.2로 정하였고, 노치 선단에서의 응력확대계수범위  $\Delta K$ 가 실험시작시  $24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 가 되도록 하였다. 그리고 균열길이는 0.01mm까지 측정이 가능한 금속현미경으로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 피로수명의 변화

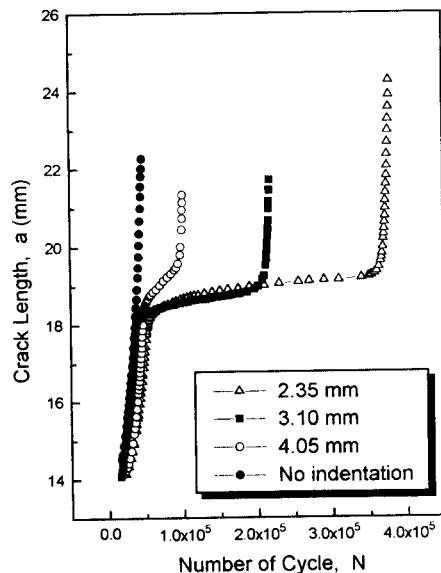


Fig. 2 Crack length and number of cycle with various thickness

시험편 두께를 변화시켜서 실험했을 때의 균열길이와 하중반복수와의 관계를 Fig. 2에 나타내었는데, 압흔이 가공되지 않은 시험편과 비교해 볼 때 시험편 두께에 관계 없이 압흔이 가공된 모든 시험편에서 압흔이 가공된 균열길이 18mm이후 피로균열 전파지연현상이 일어나 피로수명이 향상된 것을 알 수 있으며, 어느정도 지연된 이후 다시 균열길이가 증가하기 시작한다. 이 때 지연정도, 즉 피로수명 향상정도는 시편의 두께가 얕을수록 더 커서 시험편 두께 2.35mm의 경우가 가장 지연시간이 길고 다음 3.10mm, 4.05mm의 순이다.

피로균열의 전파지연에 의한 피로수명향상을 더 잘 알아보기 위하여, Fig. 3에 피로균열 전파속도를 하중반복수에 대해 나타내었다. 압흔이 가공되지 않은 시험편의 결과와 비교해보면 압흔이 가공된 시험편에의 피로균열 전파 지연부분은, 압흔이 가공된 18mm에서 피로균열 전파속도가 급격히 감소하는 피로균열 전파속도의 감소부분, 전파속도가 크게 변하지 않는 평탄부, 그리고 다시 급격히 속도를 회복해 가는 증가부분으로 나눌 수 있다.

여기서 압흔을 가공한 시점이후의 지연구간에서, 급격한 전파속도 변화를 보이는 감소 부분과 증가하는 부분을 무시할 수 있으며, 압흔가공에 의한 피로수명의 향상정도는 평탄부로 근사할 수 있다. 각각의 시험편에서의

평탄부는 시험편 두께 2.35mm일때 가장커서 평탄부의 하중반복수  $\Delta N = 307000$  (cycles)이며, 두께 3.10mm일때  $\Delta N = 170000$  (cycles), 두께 4.05mm에서는  $\Delta N = 43000$  (cycles)로서 압흔을 가공하지 않은 시험편에서의 전체수명이 약 48000 cycle인데 비추어 보면 피로수명이 대폭 향상된 것을 알 수 있다.

이때 압흔지름  $d$ 를 시험편두께  $B$ 로 나눠 무차원한 변수  $d/B$ 에 대해 지연구간의 하중반복수를 나타내어 보면 Fig. 4와 같이 지연되는 하중반복수가  $d/B$ 에 선형적으로 비례하는데, 지연구간의 하중반복수과 무차원수 ( $d/B$ )은  $\Delta N = 737821*(d/B)-299856$ 의 선형적인 관계를 가지는 것을 알 수 있다.

다시말해 압흔지름과 시험편 두께가 비슷한 경우 시험편두께의 변화에 의한 압흔가공의 영향은 지연구간의 하중반복수가 시험편 두께의 역수에 선형적으로 비례하는 것으로 나타난다.

### 3-2. 피로균열 전파속도와 균열열림거동

Fig. 5는 피로균열 전파속도를 균열길이에 대해 나타낸 것이다. 시험편 두께에 관계없이 노치선단에서부터 균열길이 18mm까지는 모든 시험편에서 피로균열 전파속도가

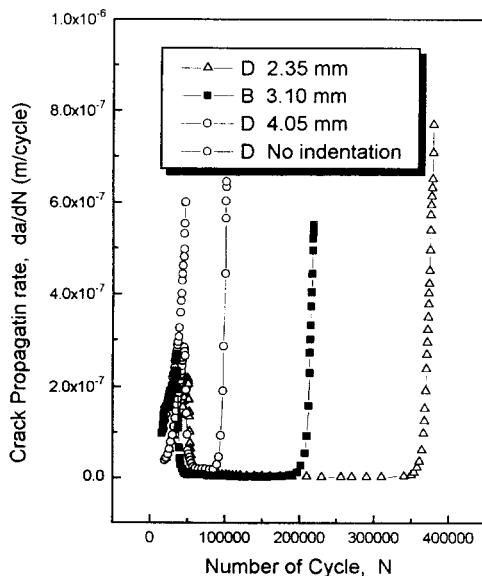


Fig. 3 Crack propagation rate and number of cycle with various thickness

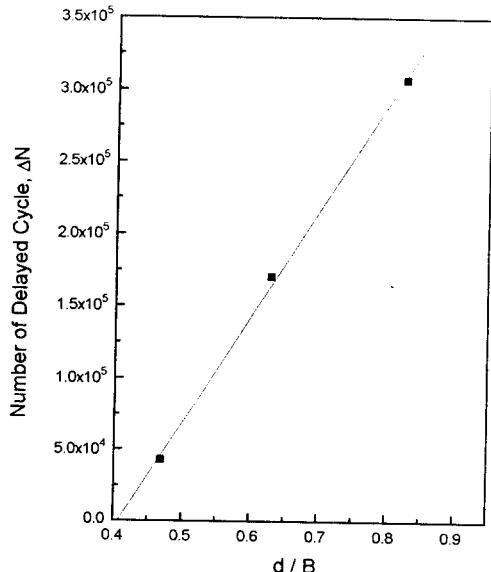


Fig. 4 Thickness effect on retardation

계수범위비  $U = (K_{\max} - K_{\min}) / (K_{\max} - K_{\min})$ 의 변화로도 확인할 수 있다. Fig. 6은 유효응력확대계수범위비  $U$ 를 균열길이에 대해 나타낸 것으로 유효응력확대계수범위비  $U$ 는 Fig. 5의 피로균열 전파속도의 변화를 잘 반영하고 있는것을 알 수 있으며, 이 때 최저  $U$ 값의 순서는 Fig. 5의 순서와 동일하다.

이러한 사실로부터 압흔을 가공하였을 때의 피로균열 전파지연 현상은 균열선단에 적용되는 응력확대계수범위의 감소가 직접적인 원인이며, 응력확대계수범위의 감소 원인은 압흔가공으로 인해 균열선단에 생긴 압축잔류응력이라고 생각된다.

#### 4. 결론

여러가지 두께를 가진 시험편에서, 이미 발생하여 전파하고 있는 피로균열의 선단에 지름 10mm의 강철구를 시험편의 양측에서 눌러 압흔을 가공하여 피로균열 전파거동을 관찰하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 피로균열 선단근방에 압흔을 가공하면 균열의 전파를 지연시켜 피로수명이 대폭 향상되므로 균열이나 결함등의 응력집중부를 가진 판재의 강화법으로 유용하다.

- (2) 피로수명의 향상정도는 피로균열 전파속도를 하중반복수에 대해 나타내었을때의 평탄부로 근사할 수 있다.
- (3) 피로수명의 향상정도는 시험편두께의 역수에 선형적으로 비례한다.
- (4) 압흔의 가공후 균열전파속도는 크게 저하하였으며 균열선단이 압흔의 끝을 지나가며 다시 균열전파속도를 회복하기 시작한다.
- (5) 피로균열 전파속도의 변화는 하중-감산변위선도에서 얻은 유효응력확대계수범위비의 변화로 확인할 수 있었으며 이는 균열선단에 작용하는 응력확대계수범위가 변화가 원인이다.

#### 참고문헌

1. Broek, D., 1986, "Elementary Engineering Fracture Mechanics," Martinus Nijhoff Publishers.
2. De Rijk, P., 1970, "Empirical Investigation on Some Methods for stopping the Growth of Fatigue Cracks," Nat. Aerospace Inst. Amsterdam, Rept. TR 70021
3. Van Leeuwen, H.P., et. al., 1970, "The repair of Fatiguc Cracks in Low-Alloy steel Sheet," Nat. Aerospace Inst. Amsterdam, Rept. TR 70029.
4. Eggwirts, S., 1969, "Review of Some Swedish Investigations on Fatigue During the Period 1937-1969," Swedish Aerospace

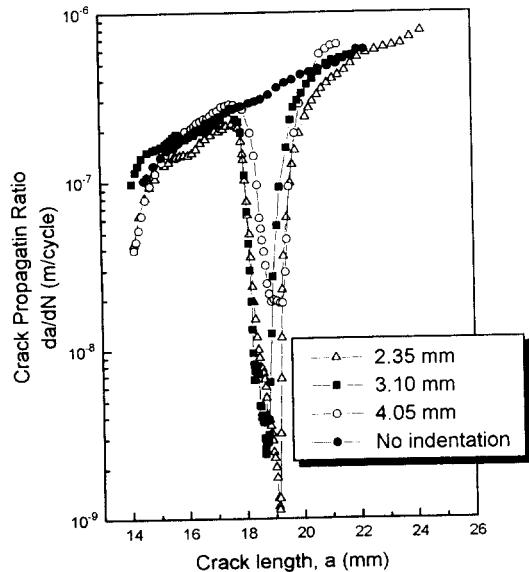


Fig. 5 Crack propagation rate and crack length with various thickness

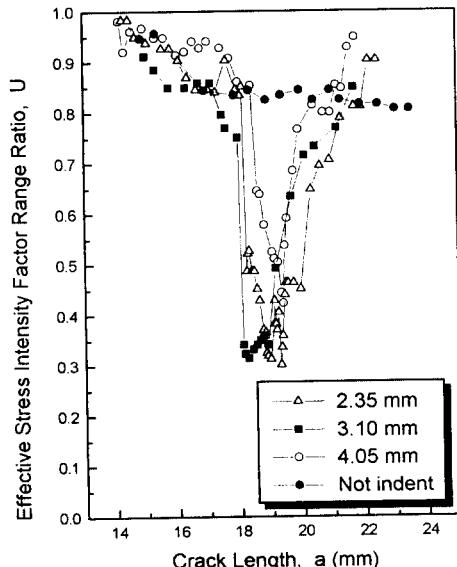


Fig. 6 Crack length and effective stress intensity factor ratio with various thickness

5. 宮川浩臣, 西谷弘信, 1985, "穴または壓こんの付加による板材の疲労き裂傳ば遅延效果," 日本機械學會論文集 (A 編) 51 卷 462 護, 445-449.
6. 宮川浩臣, 西谷弘信, 後藤真宏, 光永公一, 1987, "切欠おもつ板材の壓こん付加による疲労き裂傳ば遅延效果," 日本機械學會論文集 (A 編) 53 卷 486 護, 220-224.
7. 後藤真宏, 西谷弘信, 宮川浩臣, 今戸啓二, 1990, "き裂おもつ板材の疲労強度に及ぼす壓こん付加の影響," 日本機械學會論文集 (A 編) 56 卷 526 護, 1348-1353.
8. 後藤真宏, 西谷弘信, 宮川浩臣, 三浦篤義, 今戸啓二, 1991, "切欠きおもつ板材の疲労強度に及ぼす壓こん付加の影響," 日本機械學會論文集 (A 編) 57 卷 544 護, 2873-2878.
9. 송삼홍, 최진호, 1995, “압흔가공위치에 따른 피로균열 전파거동,” 95 년 한국정밀공학과 춘계학술대회 논문집, p. 32