

압흔가공위치에 따른 피로균열 전파거동

The Behavior of Fatigue Crack Propagation by Position of Indentations

송 삼홍(고려대 기계공학과), 최 진호*(고려대 대학원)

S.H Song(Korea Univ. The 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 : The effective way for repairing a fatigue crack is making indentations around fatigue crack tip. In this paper, we performed fatigue test to investigate the optimal position of the indentations, and observed crack opening behavior at the same time. The indentation positions of specimens were on the crack tip, front and back of the crack tip. The results of the experiment showed that it was very effective way to increase fatigue life that making indentations on the crack tip, and it was the optimal position that making indentations on the crack tip.

1. 서론

구조물이나 기계부품들은 사용중의 계속적인 반복하중의 작용으로 피로균열이 발생, 전파하여 최종파단에 이르는 경우가 많다. 피로균열은 불완전한 용접이음으로 인한 용접부 결함이나 재료중의 개재물, 미소결합등에서, 또는 설계상의 불가피한 응력집중부등에서 발생한 후 반복하중의 작용으로 성장하여 결국 최종파단에 이르게 되는데, 현재에는 여러가지 비파괴 검사법이 발달하여 내재한 초기균열이나 성장하는 피로균열들을 검출할 수 있으나, 피로균열의 검출즉시 교체하는것이 여러가지 이유로 어려운 경우 균열의 성장을 지연시켜 피로수명을 연장시키는 방법이 필요하다고 생각된다.

피로균열의 성장속도를 지연시키는 방법에는 드릴로 균열선단에 구멍(stop hole)을 뚫어 에리한 노치선단에 걸리는 응력집중을 완화시키는 방법이 있으나, Brock⁽¹⁾에 의하면 균열선단에 stop hole을 뚫는 방법은 구멍가까이에서의

균열전파속도의 가속과 전체적인 균열의 일부로 볼 수 있는 구멍으로 인해 증가된 결함의 크기때문에 상쇄되어 큰 지연효과는 나타나지 않는다고 하였다.

한편 압축잔류응력을 이용하여 피로균열의 발생, 또는 전파를 지연시키는 방법은 De Rijk⁽²⁾, Van Leeuwen⁽³⁾, Eggwirts⁽⁴⁾등에 의해 연구되었는데 그들은 균열선단에 stop hole을 뚫은 후 구멍을 팽창시키거나 균열선단에 강철볼을 눌러 자국을 낸 결과 인위적인 국부적 압축잔류응력장이 생겨 큰 지연효과가 생기는 것을 보고하였으며, 宮川浩臣⁽⁵⁾, 宮川浩臣⁽⁶⁾, 後藤眞宏⁽⁷⁾, 後藤眞宏⁽⁸⁾은 강철볼 자국의 지연효과를 연구하여 압흔가공이 판재의 강화법으로 유효하다고 하였다.

본 연구에서는 균열선단에 압흔을 가공하는데 있어 압흔가공의 위치와 각각의 위치에 대한 피로균열 전파거동을 균열열림거동을 고려하여 연구하였고, 최적의 압흔가공위치를 알아보았다.

2. 실험

본 연구에 사용한 재료는 포항제철(주)에서 생산된 두께 6mm의 중기용 고강도강 POSTEN 60RE이며 그 화학적 성분은 Table 1과 같고, KS B 0801의 규정에 따라 압연방향으로 행한 인장시험에서 얻은 결과들을 Table 2에 나타내었다. 재료는 항복점 $\sigma_s=542\text{MPa}$, 인장강도 $\sigma_t=638\text{MPa}$ 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

시험편은 판재를 길이 150mm, 폭 50mm, 두께 3mm로 가공한 다음, 두께 0.5mm의 휠커터로 14mm의 노치를 인장직각방향으로 가공하여 편측노치시험편(Single Edged Notched Specimen)으로 기계가공하였으며, 시험편의 모양과 치수는 Fig. 1와 같다.

실험은 노치선단에서 4mm까지 피로균열을 전파시킨 다음, 브린넬 경도계를 응용하여 균열선단부근에 양측에서 지름 10mm의 강철볼로 압흔을 가공하였다. 이때 압입하중은 4.6kN로 하였으며 압흔크기는 지름 약1.8mm이다. 이때 압흔가공 위치에 따른 피로균열 전파거동의 변화를 알아보기 위해 압흔의 가공위치를 달리 하였는데, Fig. 2에 각각의 압흔가공 위치를 나타내었으며, 균열선단의 전,후방에 압흔을 가공한 것을 각각 IF시험편, IB시험편이라 하였으며 균열선단에 바로 압흔을 가공한 것을 IM시험편이라 하였고, 압흔을 가공하지 않은 시험편을 B시험편이라 하였다.

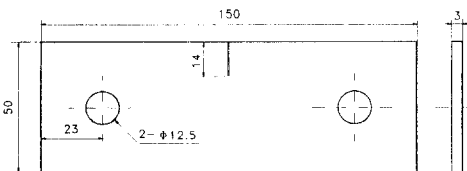


Fig. 1 Specimen configuration

이때 압흔가공에 의한 균열열림과 피로균열 전파거동과의 관계를 알아보기 위해 균열열림을 고려하였는데, 균열열림은 시험편 측면에 클립온계이자를 부착하여 변위신호를 얻고, 로드셀에서 하중값을 받아 컴퓨터로 처리하여 얻은 하중-감산변위 선도에서 균열열림하중을 구하였다.

본 실험에 사용한 시험기는 전기유압식 인장압축 시험기로서 반복속도는 10Hz이며, 실험하중은 응력비 0.2로 정하였고, 노치선단에서의 응력확대계수범위 ΔK 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. 균열길이와 하중반복수

Fig. 3은 압흔을 가공한 각각의 시험편에 대한 균열길이와 하중반복수와의 관계를 나타낸 그림이다. 압흔이 가공되지 않은 B시험편의 결과에 비해 압흔이 가공된 나머지 세 시험편 모두가 정도의 차이는 있으나 모두 큰 지연효과가 생겨서 피로수명이 향상된 것을 볼 수 있다. 시험편 각각의 수명을 보면, 균열선단에 압흔을 가공한 IM시험편이 가장 수명이 길고 다음이 균열선단 전방에 압흔을 가공한 IF시험편, 다음 균열 선단 후방에 압흔을 가공한 IB시험편의 순서임을 알 수 있다. 압흔이 가공된 균열길이 18mm부터 균열전파속도가 B시험편만큼 충분히 회복된 균열길이 22mm까지의 수명을 비교해 보면 압흔이 가공되지 않은 B시험편이 하중반복수 $\Delta N = 10080$ (cycle)인데, IB시험편은 $\Delta N = 67330$ (cycle), IF시험편에서는 $\Delta N =$

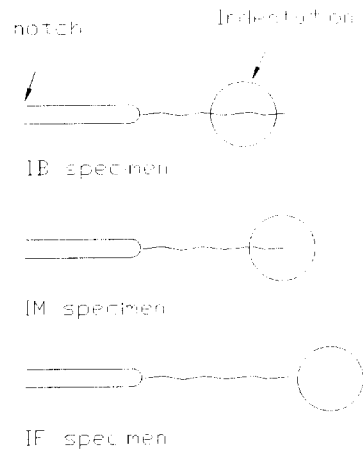


Fig. 2 Specimen identification

151810(cycle), IM시험편이 $\Delta N = 181110(\text{cycle})$ 로 피로수명이 대폭 향상되는데 그 정도는 압흔이 가공된 IB, IF, IM의 세 시험편은 B시험편에 비해 수명이 각각 6.7배, 15.1배, 18.0배로 수명이 대폭 향상됨을 알 수 있다.

압흔이 가공된 세 시험편중에서 균열 전방에 압흔을 가공한 IF시험편은 수명은 IM시험편의 약 83%정도로서 큰 차이는 없으나, IF시험편에서는 IM시험편에서 비해서 균열의 전파가 지연되는 동안의 피로균열의 성장길이가 상대적으로 크므로, IM시험편이 가장 수명도 길고 균열의 성장이 지연되는 동안의 균열의 성장길어도 가장 작으므로, 압흔가공으로 균열의 성장을 억제시킬 때 압흔속에 균열선단이 위치하도록 가공하는 것이 피로수명연장에 가장 효과적이라고 생각된다.

3-2. 균열전파속도와 균열열림

Fig. 4는 균열전파속도를 균열 길이에 대하여 나타낸 것으로 압흔이 가공되지 않은 B시험편에서는 균열길이 증가에 대해 균열 전파속도가 선형적으로 증가하는데 비해 압흔이 가공된 세 시험편 모두에서 압흔가공후 균열전파가 지연되며, 균열전파속도의 감소 구간과 회복구간을 갖는 것을 볼 수 있다.

압흔 가공후 IB시험편이 가장 즉각적인 지연 반응을 보

이며 가장 느린 반응을 보이는 것은 IF시험편이고 IM시험편은 중간정도에 속한다. 반면 균열전파 지연구간의 크기는 그와 반대인 것을 Fig. 3와 Fig. 4에서 확인 할 수 있으며, 압흔 가공위치에 관계없이 균열 선단이 압흔의 끝에 이를때까지는 균열전파속도가 저하하고 그 이후 차차로 균열전파속도를 회복해간다.

이러한 균열전파속도의 변화는 Fig. 5의 유효응력확대계수비 $U = (K_{max} - K_{op}) / (K_{max} - K_{min})$ 로 확인할 수 있다. Fig. 5에서 유효응력확대계수비 U는 Fig. 4의 균열전파속도의 변화를 충실하게 반영하고 있다. 하지만 IB시험편과 IM시험편의 경우 균열길이 18mm조금뒤에서 U의 변화가 비슷함에도 균열전파속도의 차이를 보이는 것은 IB시험편의 경우는 균열선단후방의 압흔가공으로 인한 압축응력만이 균열전파를 방해하고 그 영향범위도 작지만 IM시험편의 경우는 압축응력의 영향범위도 크고 균열전파경로의 압흔가공에 의한 소성변형으로 인해 국부적인 강도향상도 원인이 되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6은 IB시험편에서의 균열길이에 따른 ΔK 의 변화를 나타내었는데, Paris의 균열전파속도계산식에 균열전파속도 da/dN 을 대입하여 역산한 $\Delta K_{da/dN}$, 그리고 U와 ΔK 를 이용해 계산한 K_{eff} 를, 압흔의 영향을 고려하지 않을때의 ΔK 와 같이 나타내었는데, 압흔가공으로 인해 균열선단의 응력확대계수범위가 감소하는 것을 확인할 수 있고, 유효

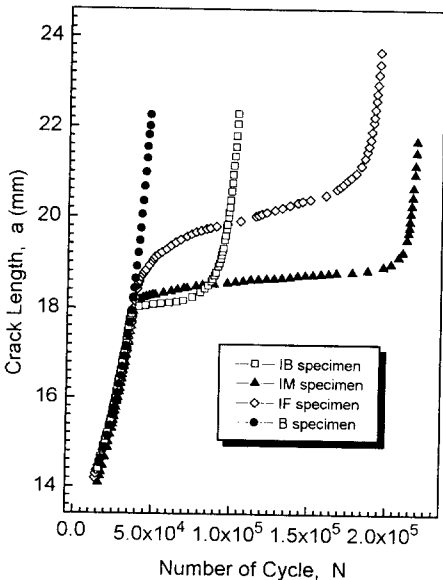


Fig. 3 Crack length and cycles

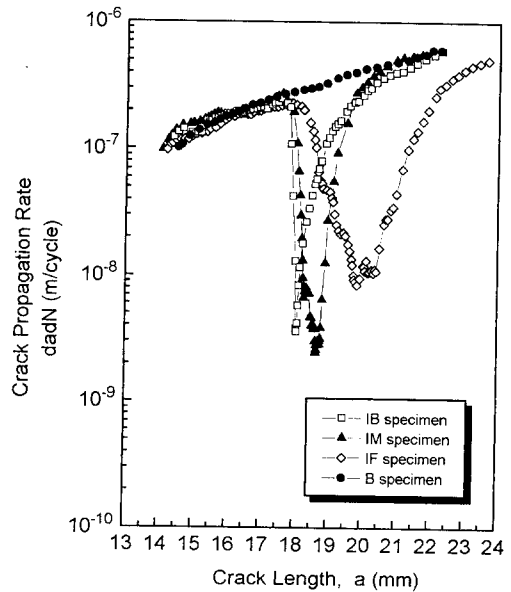


Fig. 4 Crack propagation rate and crack length

응력확대계수범위도 비슷한 경향을 보이는데, 이들은 압흔가공부위에 작용하는 압축잔류응력이 원인이라고 생각된다.

한편 Fig. 7에는 압흔가공으로 인한 시험편의 감산변위의 변화를 나타내기 위해 압흔을 가공하지 않은 B 시험편과 압흔을 부가한 IM 시험편의 경우의 하중-감산변위선도를 비슷한 균열길이에 대해 나타내었다. 감산변위는 컴퓨터에서 신호를 처리하여 하여 계산하였으며, (a)의 경우는 압흔을 가공하지 않은 B 시험편의 경우로서 균열이 열릴 때와 닫힐때의 감산변위의 차가 균열진전에 따라 차차 커지며 균열열림하중이 거의 일정한데 비해, 압흔을 가공한 IM 시험편의 (b)의 경우는 $a=18.42\text{mm}$, $a=19.46\text{mm}$ 의 경우 다른선도보다 5배로 척도를 줄인 것으로 컴프라이언스 변화가 매우 큰데, 이는 압흔으로 인한 압축응력이 균열의 열림을 크게 방해하기 때문이라고 생각된다.

4. 결론

지름 10mm의 강철구름 시험편의 양측에서 피로균열선단의 전방, 후방, 가운데에 브린넬경도계를 이용해서 4.6kN의 압축력으로 압흔을 가공하여 피로시험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

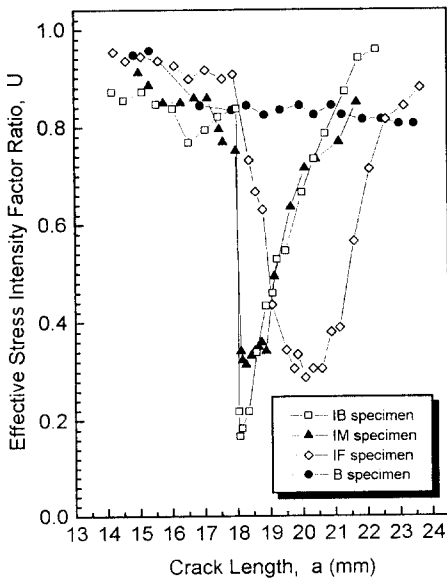


Fig. 5 Effective stress intensity factor ratio and crack length

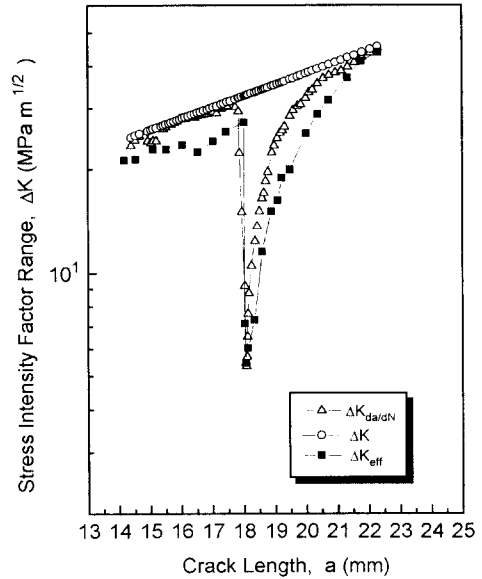


Fig. 6 Stress intensity factor and crack length

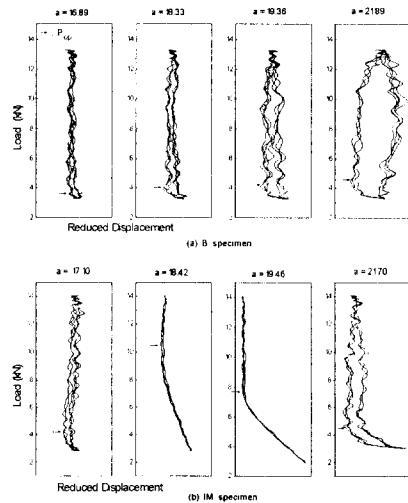


Fig. 7 Load and reduced displacement

(1) 균열선단근방에 압흔을 가공하면 균열의 전파를 지연시켜 피로수명이 대폭 향상되므로 응력집중부를 가진 판재의 강화법으로 유용하다.

(2) 압흔의 부가후 균열전파속도는 크게 저하하였으며 균열선단이 압흔의 끝을 지나가며 다시 증가하기 시작한다. 균열선단의 전방, 또는 후방에 압흔을 가공하는것보다 균열선단에 압흔을 가공하는 것이 균열의 전파지연효과가 가장 크다.

(3) 균열전파속도의 저하는 하중-감산변위선도에서 얻은 유효응력확대계수비로 확인할 수 있었으며 압흔부가후 유효응력확대계수범위가 극적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Broek, D., 1986, "Elementary Engineering Fracture Mechanics." Martinus Nijhoff Publishers, pp.370-373.
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 Fatigue 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 Inst. FFA Rept. TN-HE-1270.
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効果," 日本機械學會論文集 (A編) 51卷 462號, pp.445-449.
6. 宮川浩臣, 西谷弘信, 後藤眞宏, 光永公一, 1987, "切欠をもつ板材の壓こん付加による疲労き裂傳ば遅延効果," 日本機械學會論文集 (A編) 53卷 486號, pp.220-224.
7. 後藤眞宏, 西谷弘信, 宮川浩臣, 今戸啓二, 1990, "き裂を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號, pp.1348-1353.
8. 後藤眞宏, 西谷弘信, 宮川浩臣, 三浦篤義, 今戸啓二, 1991, "切欠きを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號, pp.2873-2878.