

Al-5086의 균열선단에 가공한 압흔과 피로균열전파특성

송삼홍(고려대 기계공학과), 김병석*, 최병호(고려대 대학원)

Indentations near Crack Tip in Al-5086 and Characteristics of Fatigue crack Propagation

S. H. Song(Korea Univ.), B. H. Choi and B. S. Kim(Korea Univ. Graduate School)

ABSTRACT

It is useful way to make indentations near crack tip in order to increase fatigue life or repair a fatigue crack.

In this study, bending fatigue tests were performed to investigate the optimal position of the indentations near crack tip. The results shows that fatigue life of the specimen is dramatically increased by indentation and the most effective location is the back of the crack tip.

Key Words : Fatigue Crack(피로 균열), Indentation(압흔), Fatigue Crack Propagaion Rate(피로균열전파속도), Stress intensity Factor Range(응력확대계수범위), Retarded Cycle(지연 하중반복수), Residual Stress(잔류응력)

1. 서론

일반적으로 재료는 이론강도에 비하여 낮은 파괴강도를 가지는데, 이것은 재료들이 낮은 응력에서 소성변형을 일으키고, 결국 이러한 비가역적인 손상의 축적으로 인하여 파괴되기 때문이다. 더구나, 재료는 항상 결함을 내포하고 있는데, 결함은 재료가 원래부터 가지고 있는 개재물이나, 취약한 2상입자 및 입계층등이 있으며, 제조 과정이나, 가공 공정중에 발생하는 기공, 수축공, 담금질 크랙, 연삭 및 스탬핑 자국, 그리고 불완전한 용접이음으로 인한 용접부 결함 및 이와 연관된 크랙등이다⁽¹⁾. 이러한 재료는 반복되는 하중, 즉 피로하중을 받는 경우 탄성한도이하의 응력상태에서도 피로균열이 발생, 전파하여 최종파단에 이르게 된다. 이와 같은 피로파괴 현상은, 파괴에 의한 주요 원인 중의 하나이며, 피로균열은 대부분 부재의 결함이나, 설계상의 불가피한 응력집중부 등에서 발생한다.

한편 기계나 구조물 등에서 발생하여 성장하는 피로균열을 수리하는 방법에 대한 연구는 실용적으로 매우 유용하다고 생각된다.

Christensen⁽²⁾, Raymond⁽³⁾ 등은 피로균열 발생기점이 되기 쉬운 표면을 계속적으로 제거하면 피로수

명이 거의 무한대로 증가한다고 보고하였고, Sandor⁽⁴⁾, Wright⁽⁵⁾ 등은 사용중의 주기적인 열처리가 초기의 피로손상을 회복시킨다고 보고하였다. 그러나 이러한 방법들은 무결점 재료를 가정하고 있으므로 재료 내부에 개재물, 기공등의 내부결함이 있을 경우는 적용이 제한된다. 피로균열이 얇을 때 간단한 피로균열수리 방법은 표면에 발생한 피로균열을 그 부분의 재료와 함께 그라인딩(grinding)으로 제거하는 것이다⁽⁶⁾. 만약 그라인딩 방법 사용으로 인한 재료의 감소등이 원인이 되어 구조물을 현저하게 약화시킨다면 그라인딩 이후 그곳을 용접하거나 보강재를 용접하는 등의 방법으로 재료의 강도가 보강될 수 있다⁽⁷⁾. 그러나 용접은 슬래그 개재물, 불완전 용융, 언더컷 등 수많은 용접결함을 발생시킬수 있으며, 용접결함으로 인해 파단이라든가, 이러한 용접결함등에는 응력이 집중되어 피로파괴의 기점이 될 소지가 높으므로 용접으로 인한 잔류응력의 효과, 응력부식크랙킹과 수소취성등이 고려되어야 한다⁽⁸⁾. 또 균열선단에서의 응력의 특이성을 제거하기 위해 균열선단에 구멍(Stop Hole)을 뚫는 방법이 있는데^(9,10), 많이 쓰이는 방법이나 Stop Hole이 피로균열의 선단 후방에 가공되면 피로균열의 성장은 비약적으로 빨라진다는 보고도 있다⁽¹¹⁾. 또한 구멍 자체가 응력집

중부로서 균열발생을 야기한다. 또 압축잔류응력장을 이용한 균열수리 방법이 있다. 균열선단에 Stop Hole을 뚫은후 구멍을 팽창시키거나, 균열선단에 강철볼을 눌러 압자자국, 즉, 압흔을 가공하면 인위적인 국부적 압축잔류응력장이 생겨 큰 지연효과가 생긴다. Goto⁽¹²⁾ 등은 피로균열선단에 단일압흔을 가공하거나, 노치뿌리에 압흔을 가공한 결과 피로한도와 피로수명이 대폭향상됨을 보고 하였고, Miyagawa⁽¹³⁾ 등은 압흔가공에 의해 압축잔류응력장이 발생하여 피로균열 전파지연효과가 크게 생기며, 응력집중부에 대한 피로수명 연장방법으로도 유효하다고 보고 하였다. 또한, 송⁽¹⁴⁾ 등은 피로균열선단에 미소경도의 압흔을 가공할 경우, 피로균열 전파지연 현상이 현저히 나타난다고 하였다.

이상의 연구결과들을 종합해 볼때, 균열선단 주위에 압흔을 가공하는 방법은 피로균열의 전파속도를 현저히 감소시킬 수 있을 뿐 아니라 Stop Hole과 같이 오히려 균열발생의 기점이 되는 등의 부작용이 없으므로 매우 유용한 피로균열 수리방법이라고 생각된다.

본 연구에서는 인장-압축 반복굽힘하중을 받는 경 경우, 균열 선단에 압흔을 가공하는데 있어서 압흔가공의 위치에 따른 피로균열전파특성에 대해서 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험 재료 및 시편

본 실험에 사용한 시험편 재료는 내식용 알루미늄 합금인 Al-5086을 사용하였으며, 이에 대한 기계적 및 화학적 성질은 KS B 0801⁽¹⁵⁾의 규정에 따른 인장시험과 X선 스펙트라 분석법에 의하여 Table 1과 Table 2와 같은 결과를 얻었다. 재료의 항복응력은 $\sigma_y = 190\text{MPa}$, 인장강도 $\sigma_u = 260\text{MPa}$ 이다.

시험에 사용한 시험편과 형상은 Fig.1 과 같다. 균열발생의 재현성을 위하여 시편중앙의 좌단으로부터 0.7mm의 위치에 지름0.5mm, 깊이0.6mm로 가공한 다음, 표면균열 관찰을 위하여 표면을 경면가공 하였다.

2.2 실험 방법

압흔을 가공한 경우의 피로균열 전파특성을 고찰하기 위하여 우선 압흔을 가공하지 않은 시험편을 사용하여 피로균열전파시험을 수행 하였다. 압흔가공은 노치효과등을 고려하여 균열전파속도(da/dN)가 안정되는 크랙길이 a=5mm 까지 피로균열을 전파시킨 다음, 지름 10mm의 강철구를 브린넬경도계를 이용하여 균열선단 부근에 가공한 후, 피로시험을 수

Table 1 Mechanical properties of Al-5086

Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Elongation (%)	Elasticity Modulus (Gpa)	Poisson's ratio
260	190	22	62.4	0.32

Table 2 Chemical composition of Al-5086

Al	Mn	Mg	Cr
95.4	0.1	4.0	0.15

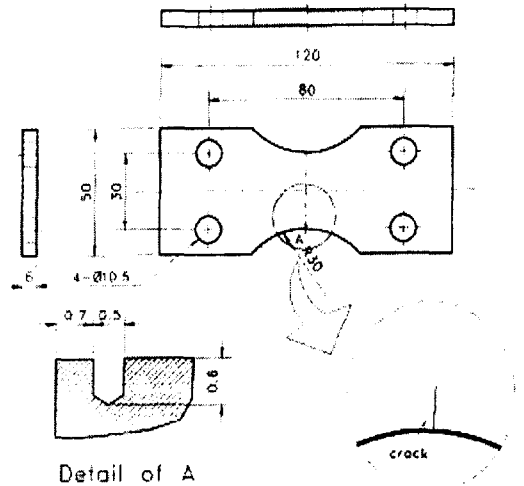


Fig.1 Geometries of Test Specimen

행 하였다. 이때 압흔가공 위치의 변화에 따른 피로균열 피로균열 전파특성을 알아보기 위해 압흔의 가공위치는 Fig.2와 같이 각각의 압흔가공위치를 달리 하였고, 균열선단 전,후방에 압흔을 가공한 것을 각각 IF시험편, IB시험편이라 하였으며, 균열선단에 바로 압흔을 가공한 것을 IM시험편이라 하였다. 그리고, 압흔가공하중은 6.33KN으로 하였다.

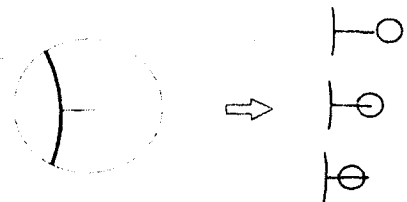


Fig. 2 Location of Indentation

본 실험에 사용한 시험기는 굽힘 및 비틀림 피로 시험기이며, 응력비 $R=-1(=P_{min}/P_{max})$ 로 정하였고, $\sigma_{max}=90\text{MPa}$ 의 면외 굽힘하중을 주었으며, 응력 형식은 주파수 33.3Hz의 정현파이다. ΔK 의 계산에는 아래 식(1)을 이용하였다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \left(1.12 - 0.231 \left(\frac{a}{W}\right) + 10.55 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.39 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right) \quad (1)$$

그리고, 균열길이는 0.01mm까지 측정가능한 금속 현미경을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시험편 위치변화에 따른 균열길이와 하중 반복수

압흔가공위치 변화에 대한 균열길이 a 와 하중반복수 N 의 관계를 Fig.3에 나타내었다. 보다 일반적인 표현을 위하여 균열길이는 시편폭 W 에 대해서 무차원화한 균열길이 a/W 에 대해서도 나타내었다. 압흔이 가공된 균열길이 $a=5\text{mm}$ 부터 균열전파가 지연되기 시작하며, 압흔이 가공되지 않은 시험편의 결과에 비해 압흔이 가공된 시험편 모두에서 큰 지연 효과가 생겨서 피로수명이 향상된 것을 볼 수 있다. 시험편 각각의 수명을 보면, 균열선단 후방에 압흔

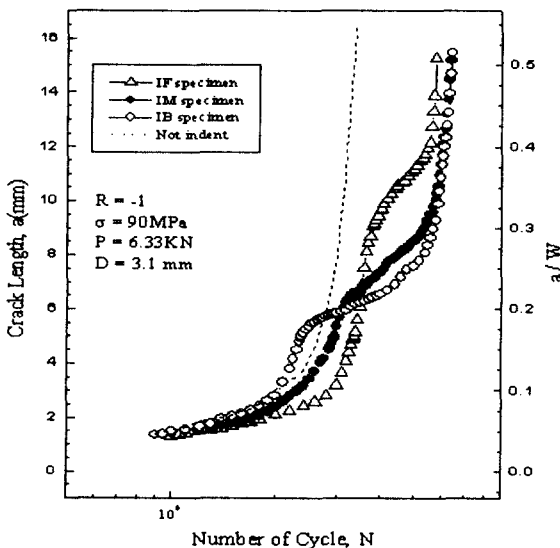


Fig. 3 The relation between crack length and number of cycle, N

을 가공한 IB시험편이 수명이 가장 길고, 다음이 균열선단에 압흔을 가공한 IM시험편, 그리고 균열선단 전방에 압흔을 가공한 IF시험편의 순서임을 알 수 있다. 압흔이 가공된 균열길이 5mm부터 균열전파속도가 압흔을 가공하지 않은 시험편만큼 충분히 회복된 균열길이 14mm까지의 수명을 비교해 보면, 압흔을 가공하지 않은 시험편의 하중반복수 $\Delta N=65000(\text{cycle})$ 인데, IB시험편은 $\Delta N = 398000(\text{cycle})$, IM시험편은 $\Delta N = 335000(\text{cycle})$, IF시험편은 $\Delta N = 238000(\text{cycle})$ 로 피로수명이 대폭 향상되는데, 압흔을 가공하지 않은 시험편에 비해 IB시험편은 수명이 6.12배, IM시험편은 5.15배, IF시험편은 3.66배로 크게 향상됨을 알 수 있다. 압흔이 가공된 세 시험편 중에서 IM시험편의 수명은 IB시험편의 약84%정도로서 큰 차이는 없으나, IB시험편이 가장 수명도 길고 균열성장이 지연되는 동안의 균열의 성장길이도 가장 작으므로, 인장-압축반복 굽힘하중을 받는 경우에 있어서 압흔가공으로 균열의 성장을 억제시킬 때 균열선단 후방에 가공하는 것이 피로수명 연장에 가장 효과적이라고 생각된다.

3.2 시험편 위치변화에 따른 균열전파속도와 응력세기계수범위

압흔가공위치 변화에 대한 균열전파속도 da/dN 과 균열길이 a 와의 관계를 Fig.4에 나타내었다. 압흔이 가공되지 않은 시험편에서는 균열길이 증가에 대해 균열 전파속도가 증가하는 데 비해 압흔이 가공된 세 시험편 모두에서 압흔가공 후 균열전파가 지

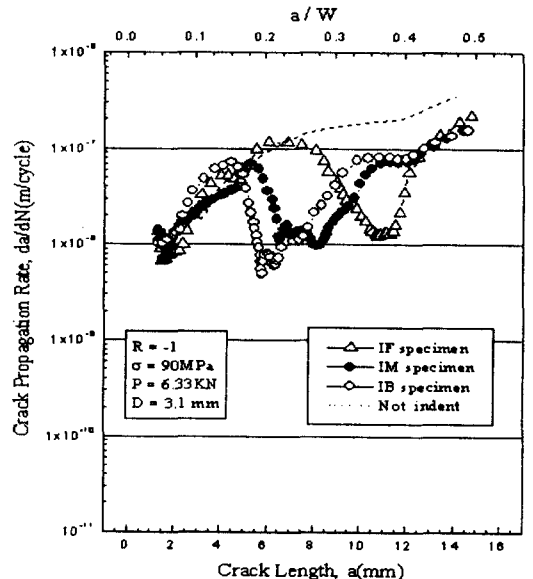


Fig. 4 The relation between crack propagation rate and crack length

연되며, 균열전파속도의 감소 구간과 회복구간을 갖는 것을 볼 수 있다. IB시험편의 경우 압흔 가공후 가장 즉각적인 반응을 보였으며 IF시험편은 가장 느린 반응을 보였고, IM시험편은 중간정도에 속한다.

Fig.5는 하중반복수의 증가에 따른 균열전파속도 da/dN 의 변화를 나타낸 선도이다. 압흔이 가공된 직후 균열전파속도는 급격히 감소하다 최저균열전파속도에 도달한 이후 다시 균열전파속도를 회복해 간다. 이때 압흔가공시의 균열전파속도를 회복하는 데 필요한 하중반복수를 지연하중반복수라고 정의하면,

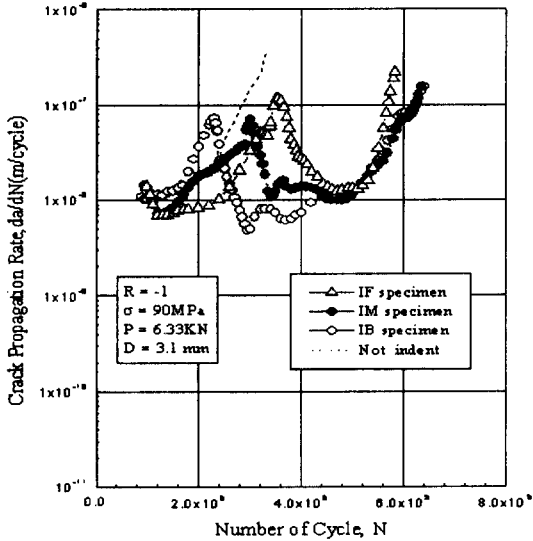


Fig. 5 The relation between crack propagaion rate and number of cycle.

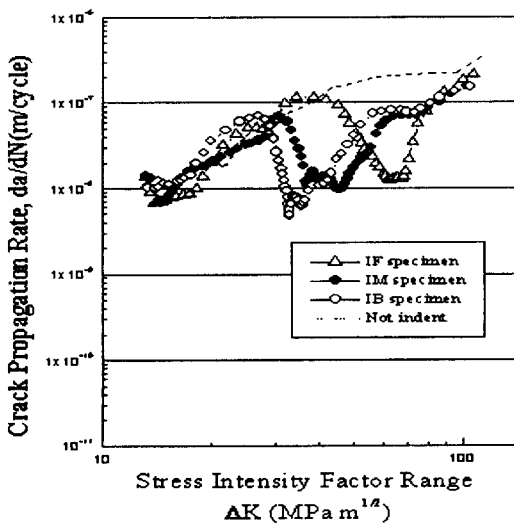


Fig. 6 The relation between crack propagation rate and stress intensity factor range

지연하중반복수의 크기는 IB, IM, IF시험편의 순서로 되는 것을 Fig.4와 Fig.5에서 확인 할 수 있다.

Fig. 6은 원공노치에서 균열이 성장하고, 압흔을 가공한 후 균열전파가 지연될 때, 응력확대계수범위 ΔK 와 균열전파속도 da/dN 와의 관계를 나타낸 선도이다. 압흔을 가공한 이후 응력확대계수범위 ΔK 의 감소구간을 볼수 있는데, 이러한 사실로부터 압흔을 가공하였을때의 피로균열전파 지연 현상은 균열선단에 적용되는 응력확대계수범위의 감소가 직접적인 원인이며, 응력확대계수 범위의 감소의 원인은 압흔가공으로 인해 균열선단에 생긴 압축잔류응력때문이라고 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 Al-5086판재에 응력비 $R=-1$ 의 반복 굽힘하중으로 인하여 발생, 전파한 피로균열의 균열선단, 선단의 후방 및 전방에 각각 압흔을 가공하고 이 압흔 가공에 의하여 피로균열은 어떠한 특성을 보이는가를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 균열선단 근방에 압흔을 가공하는 경우, 압흔을 가공하지 않았을 경우의 균열의 전파속도에 비하여 압흔가공 직후부터 균열전파속도는 급격히 감소하고 피로수명이 크게 향상됨을 확인할수 있었다.
- (2) 압흔을 균열선단, 선단의 후방, 전방에 각각 가공하고 피로시험을 수행한 결과 하중반복수는 압흔을 균열선단 후방에 가공한 경우가 가장 많았고, 전방에 가공한 경우가 가장 적었다.
- (3) 압흔가공의 위치 변화에 대한 균열전파속도는 압흔가공 후 급격히 낮아지는 감소구간과 회복구간을 갖는 것을 볼 수 있었다. 압흔을 균열선단, 선단의 전방에 가공하는 것보다 균열선단 후방에 가공하는 것이 지연효과가 가장 좋다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 압흔을 가공하였을때의 피로균열전파 지연 현상의 직접적인 원인은 응력확대계수범위의 감소때문이며, 압흔가공으로 인해 균열선단에 생긴 압축잔류응력 때문에 응력확대계수 범위가 감소한다고 생각된다.

참고문헌

1. 西谷弘信, 綜合材料強度學講座 Vol.6, 疲勞強度學, pp.1-12, 1984.
2. Christensen, R.H., 1959, Mental Fatigue, McGraw-Hill, pp. 376-412
3. Raymond, M.H. and Coffin, L.F., 1963, J. Basic Eng., Vol.85, No. 4, p.548

(이하 생략)