



AI 2024-T3재에 있어서 Shear Lip의 생성과 그 영향에 관한 연구

A Study on the Effect and Formation of Shear Lip for AI 2024-T3 Materials

최 병 기* · 오 환 교*

Byung-Ky Choi · Hwan-Gyo Oh

ABSTRACT

This paper aims to examine the effect of shear lip formation from cross-sections on fatigue crack propagation rate in order to study the fatigue fracture behavior of the high strength aluminum material(AI 2024-T3).

The following tests were achieved from this research.

1. As a result of depressing shear lip artificially by adding a side groove to a specimen, it is shown that the propagation rate of fatigue crack is faster than that of general specimen.
2. Through the two-step load test, the phenomenon that the shear lip decreases in the part of changed load gets observed. Consequently it is shown that the crack propagation rate gets faster.

1. 서 론

알루미늄 합금의 거시적 파면을 관찰하면 크랙 진전에 대응해서 평탄부, 평탄부 + 경사부, 경사부, 최종 파단부로 구성되어 있는 것을 알 수 있다¹⁾. 다시 말해서 최초 크랙이 평탄하게 진전하다가 어느 정도의 길이가 되면 비스듬하게 진전하여 파단됨을 알 수 있다. 이와같은 경사부를 "Shear lip"²⁻³⁾이라고 하는데, J. Schijve, D. P. Wilhelm등⁴⁾은 위에서 서술한 평탄부(Transition zone)에 관하

여 보고하고 있는데, J. Schijve³⁾는 "Shear lip"의 크기를 측정하여 파괴역학적 파라미터와 비교한 결과, W. Elber가 발표한 크랙 열림현상을 기초로 유효응력확대계수폭 ΔK_{eff} 와 Shear lip의 크기가 서로 의존하는 성질이 있음을 고찰하였고, R. A. H. Edwards¹⁾, J. Zuidema⁵⁾는 J. Schijve의 연구 결과를 바탕으로 Shear lip의 크기와 파괴역학적 파라미터와의 관계를 정량화하였다. 그러나 이들의 연구는 대부분 일정 하중하에서 생성되는 Shear lip에 관한 것으로 하중의 변동시에 생성되는 Shear lip에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 이와

* 조선대학교 기계공학과

같이 피로파괴의 매카니즘을 규명하기 위하여 국내 외에서 많은 연구자들이 관심을 갖고 연구를 계속하고 있으나 아직까지 Shear lip에 착안한 연구는 극소수에 불과하며 국내에서는 거의 진행되고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 실생활과 밀접한 관계가 있는 불규칙 하중^{1)~4)}을 대상으로 하중의 변화에 따른 피로파괴실험을 통하여 알루미늄 합금재의 파단면으로부터 Shear lip의 생성과 이 Shear lip의 지배인자를 찾아냄으로써 피로크랙 진전속도에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용하고자 하는 시험편의 재료는 고강도 알루미늄 합금재 Al2024-T3의 압연판재인데 이는 항공기 구조물의 대부분을 구성하고 있다. 본 연구에서는 Al2024-0를 구입하여 용체화처리 및 냉간압연과정을 거쳐 Al2024-0재료부터 Al2024-T3재의 물성치를 얻었다. Al2024-T3의 처리공정은 Fig. 1에 나타난 것처럼 저온용 염욕제를 사용하여 493°C의 온도에서 45분간 유지 후 냉각수로

Quenching하고 다시 약 10분간 유지 후 냉간압연하였다. 냉간압연 후 상온에서 48시간 이상 방치하여 자연시효시켜 일고자 하는 Al2024-T3처리를 완료하였다.

용체화 과정에서의 염욕제의 성분은 Table 1에 나타났으며, Al2024-T3 처리 후의 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 2 및 Table 3과 같으며 각 Table에서의 SPEC은 A. S. M. (American Society for Metals)에 실려 있는 것을 나타냈으며 Table 2와 Table 3에서 시험편의 두께가 두 종류인 것은 Side groove를 부여한 시험편이 동일한 K값이 되게 하기 위해서 시험편의 두께를 같게 한 것과는 다르기 때문에 두 종류를 택하였다.

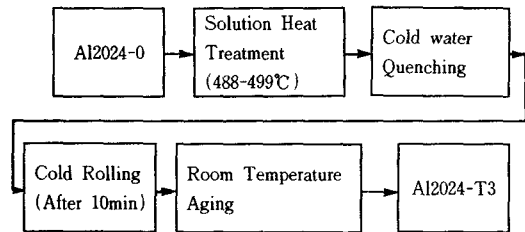


Fig. 1 Process diagram for Al2024-T3 treatment

Table 1 Salt bath flux

| Chemical component | Composition ratio(mol%) | Melting point(°C) | Specific gravity | Moisture content (%) | Temperature |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------|------------------|----------------------|-------------|
| NaNO ₃ -KNO ₃ | 45.8 : 54.2 | 218 | 1.9(200°C) | 0.2 | 250-550 |

Table 2 Chemical Compositions of Al2024-T3. (Wt%)

| COMP. ITEM TEST PICE | Chemical composition | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|------|-----|------|-----|-------|------|-------|
| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti |
| t = 4.2mm | 0.28 | 0.21 | 4.1 | 0.55 | 1.2 | 0.016 | - | 0.03 |
| t = 8.4mm | 0.06 | 0.14 | 3.8 | 0.45 | 1.2 | 0.005 | - | 0.027 |
| SPEC | 0.50 | 0.50 | 3.8 | 0.30 | 1.2 | 1.10 | 0.25 | 0.15 |
| | Max | Max | 4.9 | 0.9 | 1.8 | Max | Max | Max |

시험편의 규격은 A. S. T. M. E647-83에 준하여 압연방향과 크랙의 진전방향이 직각이 되도록 채취하고 두께 4.2mm와 8.4mm의 판재로 하중 제어방식에 적합한 C-T시험편(Compact tension type specimen)을 제작하였으며, 이때 기계가공에 의한 소성변형층의 영향을 최소화하기 위해 C. N. C.

Table 3 Mechanical Properties of Al2024-T3

| TEST ITEM TEST PIECE | Tension Test | | | Hardness Test | |
|-------------------------|---------------------|---------------------|------------|---------------|--------|
| | Yield Strength | Tensile Strength | Elongation | | |
| | kgf/mm ² | kgf/mm ² | % | HR | |
| t = 4.2mm | No.1 | 30.4 | 45.1 | 24.6 | 95-97 |
| | No.2 | 30.9 | 45.3 | 24.2 | 95-97 |
| t = 8.4mm | No.1 | 31.4 | 46.5 | 21.2 | 99-101 |
| | No.2 | 30.9 | 45.7 | 21.0 | 99-101 |
| SPEC | | 30.0 | 45.0 | 15.9 | 94 |
| | | Min | Min | Min | 103 |

Wire Cutting Machine(WIRE 직경 0.25mm)으로 방전가공하였으며 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2, Fig. 3과 같다.

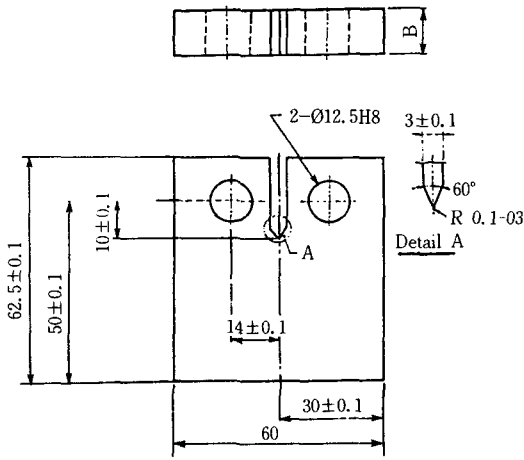


Fig. 2 Shape and dimensions of specimen

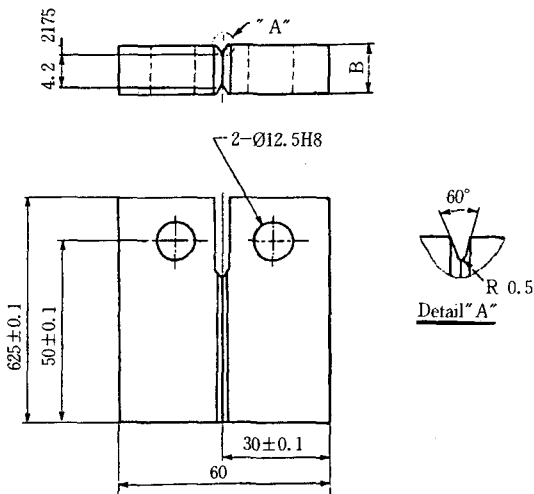


Fig. 3 Shape and dimensions of specimen with side groove

크랙 길이의 측정을 위해 기계 가공된 시험편의 표면은 Sand paper # 1200까지 연마하고 산화크롬 분말로 Buffing하여 경면이 되도록 하였으며 Height gage를 사용하여 예크랙(pre-crack)선단으로부터 직각방향으로 0.5mm간격으로 슬립 마킹(Slip Marking)하여 사용하였다.

2.2 실험방법

실험에 사용한 시험기는 용량 ±10ton 전기유압식 인장압축피로시험기(SERVOPULSER type pull-push fatigue testing machine)이며 반복하중은 하중제어에 의한 정현파형을 사용하였다. 크랙 길이의 측정은 하이트게이지(Height gage)를 사용하여 0.5mm간격으로 Slip Marking한 시험편을 0.01mm까지 측정이 가능한 눈금이 부착되어 있는 이동식 현미경으로 관찰하였으며 크랙이 진전됨에 따라 정확한 사이클 수를 측정하기 위하여 점진적으로 반복 속도를 낮추어 실험을 진행하고 이렇게 얻어진 실험결과를 응력확대계수폭 ΔK와 크랙 진전속도 da/dN으로 정량화시키기 위하여 다음 식에 의하여 응력확대계수폭 ΔK를 산출하였으며 크랙의 진전속도 da/dN와 응력확대계수폭 ΔK는 7점 다항식근사법(Seven point incremental polynomial method)으로 구하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} f(\alpha),$$

$$\alpha = \frac{a}{W} (0.25 < \alpha < 0.60)$$

$$f(\alpha) = \frac{W}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.2\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

α : 크랙길이, W : 시험편의 폭, ΔP : 하중폭, B : 시험편 두께

실험에 사용된 하중조건은 Table 4와 같이 설정하였다.

Table 4 Load conditions of fatigue test

| R(Stress ratio) | Pmax(kg) | Pmin(kg) | Remark |
|-----------------|----------|----------|--------|
| 0.1 | 120 | 12 | |
| 0.2 | 130 | 26 | |
| 0.3 | 160 | 48 | |
| 0.4 | 240 | 96 | |

2단 반복하중 시험으로는 Fig. 4와 같이 최대하중을 일정하게 하고 최소하중만을 변화(R을 0.3에서 0.7로)시켜가면서 크랙 길이가 3mm진전함에 따라 응력비 0.3에서 0.7로 높여 측정하다가 응력비 0.7에서 크랙 길이가 0.5mm진전함에 따라 다시 응력비를 0.3으로 낮춰가면서 반복 실험하였다. 반면, Side groove 시험편의 실험은 일정 진폭하중 조건으로 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Side groove를 부여한 시험편의 피로크랙 진전속도

Fig. 3에서와 같이 두께 8.4mm의 시험편을 두께 4.2mm가 되도록 기계 가공하여 시험편의 표면에 Side groove를 부여하게 되면 표면의 평면변형(plane strain)상태로 바뀌게 되면서 보통의 일정하중 조건하의 피로실험에서 생성되는 Shear lip의 발생을 인위적으로 억제시킬 수 있다. Photo. 1은 보통 시험편과 Side groove를 부여한 시험편의 거시적 파면 양상을 나타낸 것이다. 사진으로부터 알 수 있는 바와 같이 Side groove를 부여한 시험편의 경우는 Shear lip의 생성이 억제되어 평탄하게 파단된 것을 인지할 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6은 보통의 시험편과 Side groove를 부여한 시험편의 피로크랙 진전실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 5는 크랙길이 a 와 사이클수 N 의 관계를 나타낸 것이고,

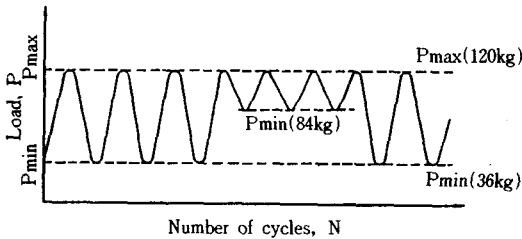


Fig. 4 Model of load fluctuation.

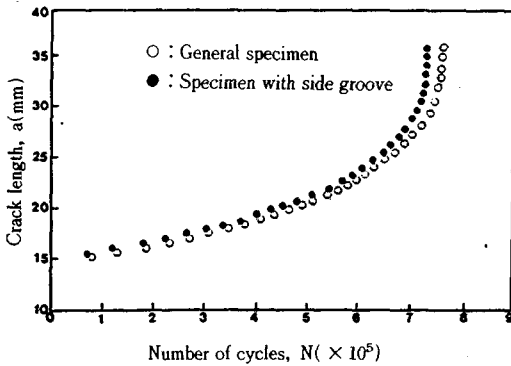


Fig. 5 Relationship between crack length and number of cycle under constant amplitude load ($R = 0.1$)

Fig. 6은 응력확대계수폭 ΔK 와 크랙 진전속도 da/dN 의 관계를 나타낸 것인데 두 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 Side groove를 부여한 시험편이 보통의 시험편보다 더욱 빠르게 진전하였음을 알 수 있다. 다시말해서 Shear lip이 생성됨으로써 크랙 진전속도가 늦어지게 됨을 알 수 있다.

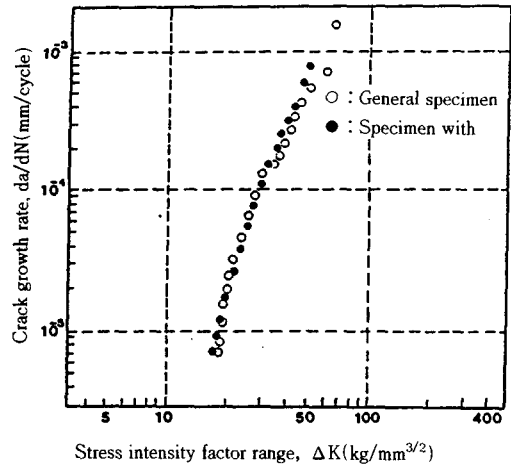
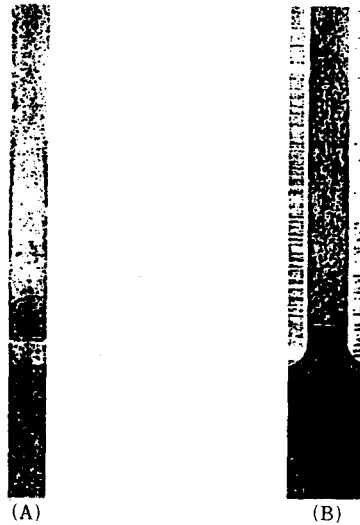


Fig. 6 Relationship between crack growth rate and stress intensity factor range ($R = 0.1$)



General specimen Specimen with side groove

Photo. 1 Shapes of shear lip in general specimen and side groove specimen.

3.2 2단하중 시험에서의 크랙 진전속도

불규칙 하중하의 Shear lip의 영향을 평가하기 위하여 2단하중 실험을 행하여 실험결과로부터 얻어진 파단면 사진을 Photo. 2에 나타냈다. 사진중 →로 표시한(2단하중으로 인하여 Beach mark가 나타남) 영역은 하중이 변화하여 응력비가 높아진 것으로 주의깊게 살펴보면 일단 생성된 Shear lip이 다시 감소하였음을 알 수 있다. 다시 말해서 하중의 변동으로 인하여 Shear lip이 감소된 것을 알 수 있다. 전절에서 밝힌 바와 같이 Shear lip의 생성은 크랙 진전속도를 저지시키므로 2단하중 실험 결과처럼 Shear lip이 감소된다고 하는 것은 보통의 일정하중 조건보다 크랙 진전속도가 빨라진다고 볼 수 있다. Fig. 7은 같은 조건의 일정하중 시험결과와 2단하중 시험결과를 나타낸 것으로 2단하중 시험으로부터 얻어진 크랙 진전속도가 일정하중 조건보다도 약간 빠름을 알 수 있다. 이상으로부터 하중이 변동될 경우, 다시 말해서 불규칙 하중 조건하에서는 일정하중 조건보다 크랙의 진전속도가 빠름을 알 수 있으며, 일정하중 실험결과로부터 등가의 불규칙 하중 조건의 구조물의 피로크랙 진전속도를 평가할 경우 일정하중 조건에서보다 보수적인 평가를 하도록 주의할 기울여야 한다.



Photo. 2 Shapes of shear lip in constant amplitude load and two-step load.

4. 결 론

본 연구는 Al합금에 있어서 피로크랙 진전과정에서 생성되는 Shear lip이 피로크랙 진전속도에 미치는 영향을 평가하기 위한 것으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 시험편에 Side groove를 부여하여 인위적으로 Shear lip을 억제시킨 결과 피로크랙 진전속도가 보통의 시험편보다 빨라짐을 알 수 있었다.
- 2) 2단하중 시험결과 거시적 파단면의 관찰로부터 하중이 변동된 부분에서 Shear lip이 감소된 현상을 발견했으며 그 결과 크랙 진전속도가 빨라짐을 밝혀냈다.

이러한 결과로부터 불규칙 하중의 경우 일정하중 조건보다 Shear lip의 생성이 저하되어 크랙 진전속도가 빨라지게 됨을 알 수 있었다. 그러므로 일정하중 조건의 피로크랙 진전속도 실험결과로부터 등가의 불규칙 하중조건의 기계구조물의 피로크랙 진전속도를 평가할 경우 일정하중 조건보다 보수적인 평가를 해야 함은 주목할 점이라 하겠다.

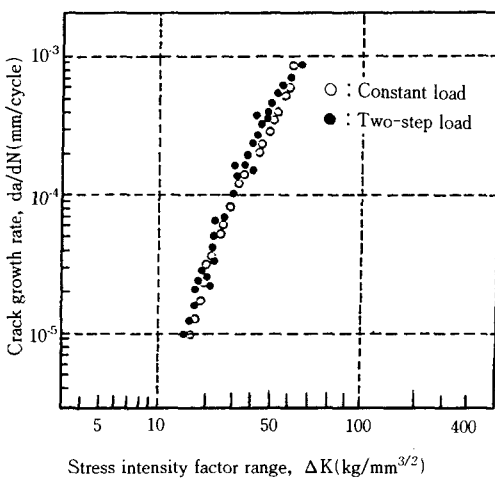


Fig. 7 Relationship between crack growth rate and stress intensity factor range($R = 0.35$)

참 고 문 헌

- 1) R. A. H. Edwards and J. Zuidema, "Factors Controlling the Shear Lip in Fatigue Crack Growth", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 22., No. 5, pp. 759~771, 1985.
- 2) J. Schijve, "Four Lectures on Fatigue Crack Growth", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11, pp. 167~221, 1979.
- 3) J. Schijve, "Shear Lips on Fatigue Fractures in Aluminium Alloy Sheet Material", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 34, pp. 789~800, 1981.
- 4) D. P. Wilhelm, "Investigation of Cyclic Crack Growth Transitional Behavior", *ASTM STP* 415, pp. 363~380, 1967.
- 5) J. Zuidema and H. S. Blaauw, "Slant Fatigue Crack Growth in Material", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 29, No. 4, pp. 401~413, 1988.
- 6) 菊川眞, 城野政弘, "平面ひすみ条件下の疲労き裂進展き裂と開閉口挙動", *材料*, 第29卷, 317號, pp. 155~161, 1979.
- 7) 小寺澤良一, 本上免, "變動荷重下の疲労き裂傳ばとき裂の開口に關するフラクトクラフイ", *材料*, 제23卷, 252號, pp. 730~736, 1974.
- 8) 田中道七, 臟井免, "長壽命域の疲労壽命分佈に關する統計的考察", *材料*, 第25卷, 第25卷, 第276號, pp. 909~914, 1976.
- 9) Yozo Sawaki and Shuji Tada, "Fatigue Fracture Toughness and Crack Propagation Rate", *International Journal of Fracture*, Vol. 35, pp. 125~137, 1987.
- 10) M. Katcher and M. Kaplan, "Effects of R-Factor and Crack Closure on Fatigue Crack Growth for Aluminum and Titanium Alloys", *ASTM STP*. 559, pp. 264~282, 1974.
- 11) 菊川眞, 城野政弘, "ラソタムさ含む定常變動荷重のき裂開閉口挙動とき裂進展速度の推定法", *日本機械學會論文集*, 第48卷, 436號, pp. 1496~1504, 1982.
- 12) 城野政弘 宋智浩, "ラソタム荷重下の疲労き裂進展とき裂開閉口挙動", *材料*, 第33卷, 第372號, pp. 1179~1185, 1984.
- 13) R. Arone, "A Statistical Model for Fatigue Fracture under Constant Amplitude Cyclic Loading", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 14, pp. 189~194, 1981.
- 14) R. G. Forman, "Numerical Analysis of Crack Propagation Cyclic-Loaded Structures", *Transactions of the ASME*, pp. 459~464, 1967.
- 15) 國尾武, "破壊力學實驗法", 朝倉書店, pp. 31-45, pp. 58~72, pp. 134~136, pp. 157~171, 1984.