

# FEM과 Striation을 이용한 로커 암 축의 파손응력 추정

이수진<sup>#</sup>, 이동우<sup>\*</sup>, 홍순혁<sup>\*\*</sup>, 조석수<sup>\*\*\*</sup>, 주원식<sup>\*</sup>

## Prediction of Failure Stress of Rocker Arm Shaft using FEM and Striation

Soo Jin Lee<sup>#</sup>, Dong Woo Lee<sup>\*</sup>, Soon Hyeok Hong<sup>\*\*</sup>, Seok Swoo Cho<sup>\*\*\*</sup> and Won Sik Joo<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

As a result of vehicle maintenance of rocker arm shaft for 4-cylinder SOHC engine, failure stress analysis of rocker arm shaft is needed. Because more than 30% of vehicles investigated have been fractured. Failure stress analysis is classified into an naked eyes, microscope, striation and X-ray fractography etc. Failure stress analysis by using striation is already established technology as means for seeking cause of fracture. But, although it is well known that striation spacing corresponds to the crack growth rate  $da/dN$ , it is not possible to determine  $\sigma_{max}$  and  $\sigma_{min}$  under service loading only from striation spacing. This is because the value of striation spacing is influenced not only by  $\Delta K$  but also by the stress ratio  $R$ .

In the present paper, we determine the stress ratio using orthogonal array and ANOVA, and propose a prediction method of failure stress which is combined with FEM and striation.

**Key Words** : Rocker arm shaft(로커 암 축), Failure stress(파손응력), ANOVA(분산분석)

### 1. 서론

기계구조물의 파손사고는 그 원인의 80% 이상이 피로에 의한 파단으로 알려져 있다. 그러나 사고가 발생할 경우, 사고에 이르기까지의 하중양식을 정확히 기록되어 있는 경우는 극히 드물기 때문에 사고의 원인 규명은 상당히 힘들다. 이러한 이유로 파면을 해석하고 그때 가해진 부하응력을 추정하는 것은 사고의 재발 방지를 위하여 매우 중요하다 할 수 있다. 특히 4기통 SOHC 엔진용

로커 암 축(rocker arm shaft)은 로커 암의 중앙을 관통하여 로커 암을 지지해 주는 축으로서 보통 흡기 및 배기밸브 축의 축으로 보통 2개로 구성된다. 이러한 로커 암 축이 주행 중에 파손이 되는 경우 차량사고의 원인이 될 수 있다. 이러한 로커 암 축의 파손이 특정 지역의 차량 운행 결과로 보이나 영동지방에 거주하는 차량정비업체의 설문조사 결과 연구 대상 엔진의 약 30% 이상의 차량이 로커 암 축 파손을 일으키는 것으로 밝혀졌다. 따라서 로커 암 축의 효과적인 설계를 통하여 이러한 파손을 방지하여야 할 것이다.

접수일: 2006년 5월 30일; 게재승인일: 2007년 1월 2일

# 교신저자: 동아대학교 대학원 기계공학과

E-mail soojin.lee@dongkuk.com Tel. (051) 640-5411

\* 동아대학교 기계공학부

\*\* 부경대학교 공동실험실습관

\*\*\* 강원대학교 자동차공학과

이러한 파손 부품의 원인 분석에는 육안으로 하는 방법, 주사식 전자 현미경을 이용하는 방법, X선 프랙토그래피(X-ray fractography) 등과 같은 다양한 방법이 사용되고 있다. 이 중 주사식 전자 현미경으로 관찰 가능한 피로파면 상의 스트라이에이션으로 파손시 부하된 응력범위를 추정하는 것은 손쉽고 비교적 명확하게 파손시의 응력범위를 파악할 수 있으나 응력범위의 경우 응력비와 관계되며, 실제적으로 기계구조물에 부하된 응력비를 구할 수 없는 경우가 많다.

MURAKAMI 등<sup>1</sup>은 파손시 부하된 최대응력과 최소응력 즉, 응력비를 결정하기 위하여 응력비가 스트라이에이션 간격에 대한 스트라이에이션 높이 관계에 영향을 미친다는 예상에 기초하여 스트라이에이션이 비교적 명확히 나타나는 2017-T4 알루미늄 합금에 적용하여 파손시 부하응력을 예측하였다. 또한 조 등<sup>2,3</sup>은 응력확대계수와 소성역깊이의 상호 연관성을 이용한 X선 프랙토그래피를 각 파손 부품 표면에 적용함으로써 오염이나 부식된 부품 및 세라믹등과 같은 무특징파면의 파손 해석으로의 적용 가능성을 제시하였다.

그러나 이상의 연구 결과는 실제 파손된 부품에 대하여 파손 형태를 예측할 수 있어 정성적 파손 해석으로는 상당한 유용성을 가지고 있으나 전자는 파면에서 스트라이에이션 높이를 명확히 결정할 수 없는 경우에 적용이 불가능하며, 후자는 무특징 파면에는 효과적이나 스트라이에이션이 뚜렷이 관찰되는 경우에는 많은 실험과 실험비용 및 실험기간으로 인하여 부적당하다.

따라서 본 연구에서는 파손된 로커 암 축에 부하된 응력을 정량적으로 해석하기 위하여 직교배열표를 이용하여 로커 암 축의 파손경계조건을 결정한 후, 주사식 전자 현미경에서 관찰한 스트라이에이션 간격과 유한요소해석을 이용하여 파손시의 부하응력을 추정하였다.

## 2. 로커 암 축의 파손사고

### 2.1 로커 암 축의 구조

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 4기통 SOHC 엔진용 로커 암 축의 조립도를 나타낸 것으로서 로커 암 축은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 실린더 헤

더에 볼트로 조립되고 로커 암은 로커 암 축에 배기 및 흡기용으로 각각 4 개씩 조립된다.

그리고 Fig. 2(a)는 캠이 1 회전하는 동안 로커 암 축에 부하되는 하중 A, B, C, D를 나타낸 것이다. 로커 암 축의 하중부하양식은 Fig. 2(b)에 나타난 것처럼 타이밍 벨트에 의해서 캠 축이 회전하면 로커 암에 의하여 하중을 받는 구조로 되어 있으며, 로커 암 축에 발생하는 최대하중은 Fig. 2(b)의 캠 축의 캠이 최대양정일 때 발생한다.

### 2.2 로커 암 축의 파손사고

Fig. 3(a)는 주행 거리가 115,320 km인 차량의

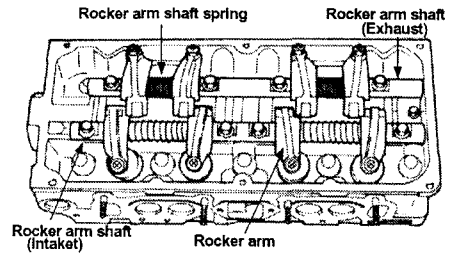
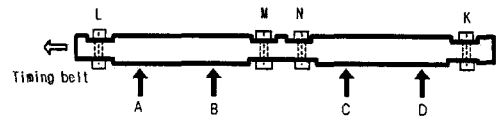
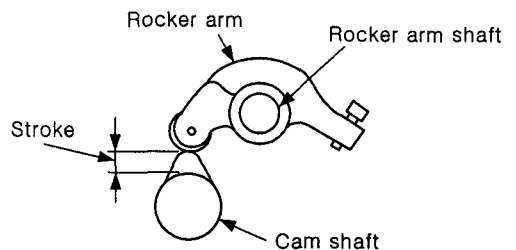


Fig. 1 Assembly drawing of rocker arm shaft



(a) Loads applied to rocker arm shaft



(b) Load mechanism of rocker arm shaft

Fig. 2 Load types applied to rocker arm shaft

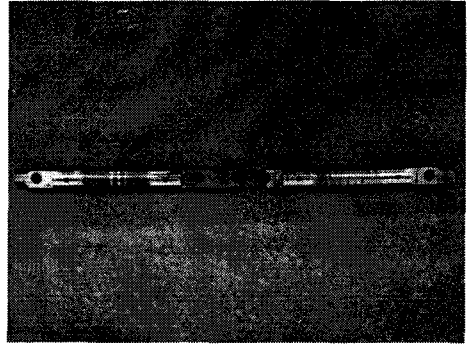
로커 암 축이 파손된 것을 나타낸 것으로 중앙 부분의 볼트 구멍에서 균열이 생성되어서 성장되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 특정 지역의 차량 운행 결과로 보이나 강원도 영동 지방에 거주하는 차량 정비 업체의 설문 조사 결과 연구 대상 엔진의 대략 30 %이상의 차량이 로커 암 축 파손을 일으키는 것으로 밝혀졌다. 이러한 결과를 통하여 대상 로커 암 축의 효과적인 설계를 통하여 이러한 파손을 방지하여야 할 것이다. Fig. 3(b)는 실제 파손된 로커 암 축의 파면을 나타낸 것으로 피로 균열생성영역인 A 부분과 피로균열성장영역인 B 부분 및 두 단면이 압착되어진 파면 C 부분으로 나눌 수 있다. 이러한 결과는 로커 암 축이 특정 캠 축의 운동에 따른 인장압축하중을 받아 피로 균열이 생성 및 성장되어 파손되나 로커 암 축의 불안정한 경계조건에 의하여 다른 캠 축의 운동에 따른 압축압축하중에 의하여 형성되는 것으로 보인다.

Fig. 4는 파손된 로커 암 축의 파단면을 주사식 전자 현미경 (JEOL, JSM6300)으로 관찰한 것을 나타낸 것으로 파면에 전형적인 피로균열성장거동을 나타내는 스트라이에이션을 보이고 있어 피로에 의한 파손임을 알 수 있다.

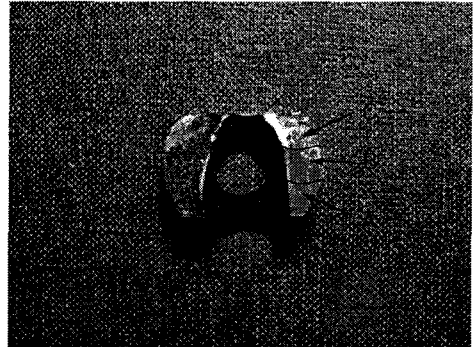
### 3. 직교배열표를 이용한 파손경계조건 평가

로커 암 축의 파손경계조건을 분석하기 위하여 로커 암 축의 각 볼트 체결 부분의 경계조건을 인자로, 반응치를 Fig. 3(b)에서 나타낸 파손 부위의 최대응력으로 설정하여  $L_9(3^4)$ 의 직교배열표를 이용하여 실험을 수행한 후 분산분석을 통해 통계학적으로 가장 위험한 경계조건을 결정하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 2는 실제 파손시의 경계조건을 나타낸 것이다. 여기서 경계조건은 1의 경우 로커 암 축에 볼트가 19.6 N·m로 체결된 상태를, 2의 경우 로커 암 축에 볼트가 0 N·m로 체결된 상태를, 3의 경우 로커 암 축에서 볼트가 풀린 상태로 분류하였다.

### 4. 스트라이에이션, 응력확대계수와 유한요소 해석을 이용한 로커 암 축의 파손해석



(a) Failure of rocker arm shaft at the 4-Cylinder SOHC engine



(b) Actually fractured surface of rocker arm shaft

Fig. 3 Photography of rocker arm shaft

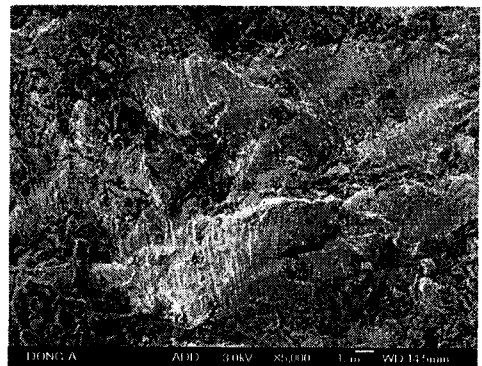


Fig. 4 SEM photographs of fatigue crack growth stage at rocker arm shaft

Table 1 The most dangerous failure boundary condition of rocker arm shaft

Load	Level of factor			
	L	M	N	K
A	3	2	1	1
B	3	2	1	1
C	2	2	1	2
D	3	2	1	3

Table 2 Tightening condition of rocker arm shaft under actual failure boundary condition

Load	Level of factor			
	L	M	N	K
D	1	2	1	3
	1	3	1	3

피로파면에 나타나는 스트라이에이션의 대부분은 응력 사이클과 잘 대응하고 특히 스트라이에이션 간격( $S_t$ )과 균열진전속도( $da/dN$ )는 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 따라서 균열진전속도 및 스트라이에이션과 응력확대계수범위( $\Delta K$ )와의 관계는 Paris 법칙을 만족하기 때문에 파면에 잔류하는 스트라이에이션 간격으로부터 실제 부하된 응력 범위를 추정하는 것은 실험으로 가능하다. 그러나 스트라이에이션 간격과 응력확대계수범위만으로는 실제 파손시 부하되어진  $\sigma_{max}$ 와  $\sigma_{min}$ 을 결정하는 것은 불가능하다. 이것은 스트라이에이션 간격이 응력확대계수범위 뿐만 아니라 응력비(R)에 의하여 영향을 받기 때문이다. 따라서 응력비를 알 수 있다면 스트라이에이션과 응력확대계수범위와의 관계는 1 대 1로 정해질 수 있기 때문에 파손시 부하된 실제 응력을 추정할 수 있다.

#### 4.1 주사식 전자현미경에 의한 파면 해석

실제의 기계·구조물이 파손된 경우, 그 사고경과 상황의 조사 및 사고원인의 구명은 사고의 재발 방지에 필요하며 이러한 실용기기의 파손원인의 해석 및 파손하중의 추정에 관한 연구는 주로 전자현미경 프랙토그래피법 및 X선 프랙토그래피법에 의하여 이루어져 왔다. 그러나 전자현미경 프랙토그래피법의 경우는 파면 극표면층의 산화

혹은 부식 또는 오물 등의 2차 손상 때문에 파면의 요철의 원형이 보존되지 않는 경우나 2차 손상이 없는 경우에도 고강도 강이나 주철 등에서의 무특징 파면이나 유사파면일 때는 종래의 전자현미경에 의한 해석은 극히 곤란하게 된다. 하지만 파면에서 스트라이에이션이 관찰되는 경우 전자현미경에 의한 방법은 가장 간단하게 균열진전부의 스트라이에이션 간격과 응력확대계수범위 사이의 파괴역학적 관계를 이용하여 파손하중을 추정할 수 있다.

Fig. 3(b)의 피로균열성장영역인 B 부분을 주사식 전자 현미경으로 관찰한 Fig. 4의 로커 암 축의 파면에서 전형적인 피로균열성장거동을 나타내는 스트라이에이션이 관찰되어 피로에 의하여 로커 암 축이 파손되었음을 알 수 있으며 이 때의 스트라이에이션 간격은  $2.5 \times 10^{-4}$  mm 이다.

#### 4.2 로커 암 축 피로파면의 정량해석

##### 4.2.1 스트라이에이션 간격과 응력확대계수범위와의 파괴역학적 관계

스트라이에이션 간격( $S_t$ )과 균열진전속도( $da/dN$ )와의 관계 및 균열진전속도( $da/dN$ )와 응력확대계수범위( $\Delta K$ )와의 관계로부터 일반적으로 식 (1)의 파괴역학적 관계가 성립한다.<sup>5</sup>

$$S_t = 9.4(1 - \nu^2) \frac{\Delta K^2}{E} \quad (1)$$

여기서,  $\nu$ 는 프와송비,  $E$ 는 영계수를 나타낸다. 따라서, 식 (1)에 재료시험에서 구한 Table 3의  $\nu$ 와  $E$ 값과  $S_t$ 를 대입하면  $\Delta K = 34.93 MPa \sqrt{m}$ 을 얻는다.

Table 3 Material properties of rocker arm shaft

Tensile Strength, $\sigma_t$ (MPa)	769
Yield Strength, $\sigma_y$ (MPa)	710
Young's modulus (GPa)	205
Poisson's ratio	0.29
Elongation (%)	6.27

4.2.2 응력확대계수범위와 응력범위와의 관계

Fig. 5와 같은 축이 동일한 굽힘응력범위  $\Delta\sigma_b$  를 받는 경우 응력확대계수범위  $\Delta K$ 는 식 (2)으로 나타낼 수 있다.<sup>6</sup>

$$\Delta K_I = \Delta\sigma_B \sqrt{\pi a} \cdot F_I \left( \frac{a}{W} \right) \quad (2)$$

$$F_I = 1.122 - 1.40\xi + 7.33\xi^2 - 13.08\xi^3 + 14.0\xi^4$$

$$\xi = \frac{a}{W} \quad (3)$$

여기서,  $\Delta\sigma_b$  : 굽힘응력범위,  $a$  : 균열길이,  $W$  는 시험편 판폭이다.

Fig. 6은 로커 암 축의 파단면의 형상을 나타낸 것으로 일반적으로 Fig. 6과 같이 시편의 중앙에 큰 구멍을 가진 경우는 균열로 가정하기 때문에 로커 암 축의 파단면은 Fig. 5의 단면으로 가정할 수 있다.

따라서 로커 암 축 파면의 작용응력범위를 추정하기 위하여 균열발생지점부의 위치에서 균열형상을 측정하여  $a = 0.001$  m,  $W = 0.013$  m로 하였다.

균열발생지점부의 응력확대계수범위  $\Delta K$ 를 식

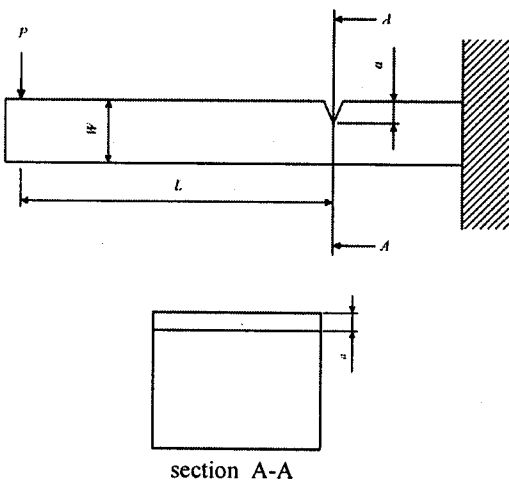


Fig. 5 Geometry of stress intensity factor under bending loads

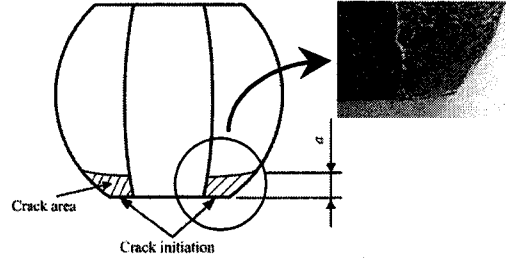


Fig. 6 Fractured section of rocker arm shaft

(2)에 대입하면 파손시 부하된 응력범위  $\Delta\sigma = 592.42$  MPa의 추정값을 구할 수 있다.

4.2.3 유한요소법을 이용한 로커 암 축의 최대 부하응력 추정

스트라이에이션 간격과 응력확대계수범위의 파괴역학적 관계에서 구한 응력범위만으로는 로커 암 축의 파단시에 부하된 최대응력을 구할 수 없다. 따라서 로커 암 축이 파손될 당시의 부하된 응력이력, 즉 응력비를 알아야만 최대응력을 구할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 파손된 로커 암 축에 부하된 응력을 정량적으로 해석하기 위하여 앞 연구<sup>3</sup>에서 구한 직교배열표와 분산분석을 이용한 로커 암 축의 파손경계조건에 대하여 유한요소해석을 수행함으로써 로커 암 축의 파손시 응력부하이력을 구하였다.

Fig. 7은 로커 암 축의 해석에 사용된 유한요소 모델, 파손조건에 대한 경계조건 및 하중조건을 나타낸 것이다

로커 암 축의 응력 해석은 ANSYS Ver. 7.0의 선형 해석을 이용하였다. 로커 암 축의 유한요소 모델을 나타낸 것으로 해석에 사용한 요소는 3차원 구조용 솔리드 요소로서 10절점 4면체 요소 (3-D 10-Node tetrahedral structural solid)이며, 각 절점에서 X, Y, Z 축 방향의 3자유도를 가지고 있으며 선형 정적해석 모델에 대한 요소의 수는 각 42,754와 25,203 개 이다. 해석에 사용된 재료 물성치는 Table 3의 값을 적용하였다.

또한, 로커 암 축의 볼트 체결 부분에 대한 경계조건은 볼트가 정상 상태와 볼트가 완전히 이완

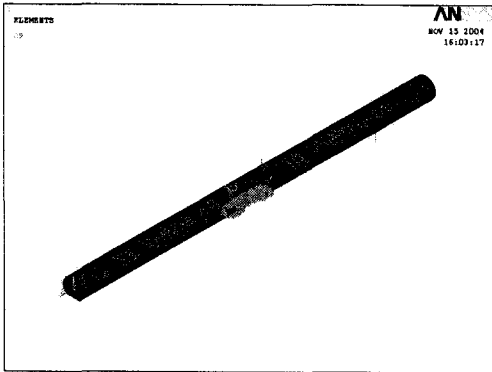


Fig. 7 Loading and boundary condition of rocker arm shaft

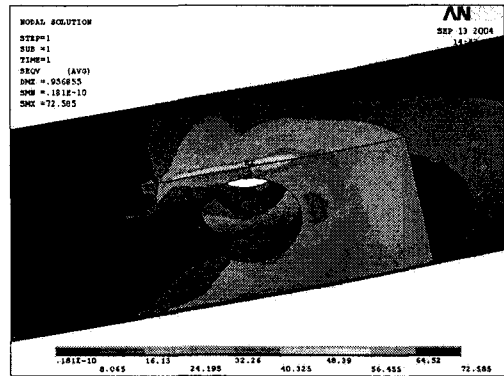


Fig. 8 FEM analysis result of rocker arm shaft

되기 직전 상태 및 볼트가 완전히 풀린 상태의 3가지로 분류하였다. 볼트가 정상 상태인 경우는 볼트 체결 아래 부분의 y축 방향 변위를 구속함과 동시에 볼트와 접촉하는 위 부분에 하중을 부하하였다. 그리고 볼트가 완전히 이완되기 직전 상태는 볼트 아래 부분은 y축 방향 변위만을 구속하고 볼트 체결부 위의 자유도는 모두 구속하였으며 하중은 부하하지 않았다. 볼트가 완전히 풀린 상태는 구속 및 하중을 모두 부여하지 않았다. 그리고 로커 암 축에 부하되는 하중은 크게 볼트 체결력과 캠 축에 의해 부하되는 하중으로 나눌 수 있다. 또한 캠의 회전에 의하여 로커 암에 부하되는 하중은 549 N으로 이를 로커 암과 로커 암 축의 접촉부에 부분분포하중으로 부하하였다.

Fig. 8은 유한요소해석 결과를 나타낸 것으로 최대응력은 직교배열표와 분산분석에서 구한 파손경계조건을 이용하여 구하였으며 이 때의 응력은 711 MPa이고 최소응력은 로커 암 축이 볼트체결력만에 의하여 하중을 받는 경우로서 이 때의 응력은 161 MPa이다. 그리고 응력범위  $\Delta\sigma = 550$  MPa이다.

또한 Fig. 9는 파괴역학적 관계에서 구한 응력범위와 유한요소해석에서 구한 응력부하이력 즉, 응력범위를 비교한 것으로 그 오차가 7% 정도로 작아, 직교배열표와 분산분석을 이용한 파손경계조건 평가에 대한 타당성을 확인할 수 있었다.

따라서 로커 암 축의 파단시 부하된 최대응력

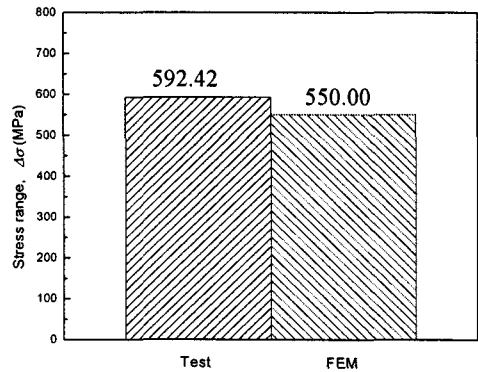


Fig. 9 Comparison between test and FEM results for stress range

은 711 MPa 정도로 추정할 수 있다.

## 5. 결론

전자현미경에서 관찰한 스트라이에이션 간격과 유한요소법을 이용하여 로커 암 축의 파손시 응력 이력을 구명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 직교배열표를 이용하여 구한 로커 암 축의 파손경계조건에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과, 로커 암 축에서 발생하는 최대 응력과 최소 응력은 각각 711 MPa과 161 MPa로 나타나 파손시의 응력범위  $\Delta\sigma = 550$  MPa로 추정된다.

(2) 스트라이에이션과 응력확대계수와의 파괴역

학적 관계에서 구한 피로파면상의 응력범위  $\Delta\sigma$   
= 592.42 MPa 이다.

(3) 파괴역학적 관계에서 구한 응력범위와 유한 요소해석에서 구한 응력부하이력 즉, 응력범위를 비교한 결과 그 오차가 7 % 정도로 작아, 실기품의 파손응력이력 평가시 유한요소법과 스트라이에이션 간격을 이용한 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

1. Murakami, Y., Furukawa, K. and Shiraishi, N., "Prediction of Service Loading from the Width and Height of Striation of 2017-T4 Al Alloy," J. of Society Material Science, Vol. 39, No. 443, pp. 1113~1118, 1990.
2. Cho, S. S., Jang, D. Y. and Joo, W. S., "A Study on Residual Stress for Fatigue Fracture Surface in General Purpose Structural Steel using X-ray Diffraction," J. of KSAE, Vol. 7, No. 8, pp. 248~261, 1999.
3. Hong, S. H., Lee, D. W., Cho, S. S. and Joo, W. S., "A Study on the X-Ray Fractography of Turbine Blade under Fatigue Load," J. of KSPE, Vol. 19, No. 2, pp.65~71, 2002.
4. Lee, S. J., Lee, D. W. Hong, S. H., Cho, S. S. and Joo, W. S., "An Estimation on Failure Boundary Condition of Rocker Arm Shaft for 4 Cylinder SOHC engine using Orthogonal Array," J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 29, No. 9, pp. 1161~1168, 2005.
5. Matsui, K., Hirose, Y., Chadani, A. and Tanaka, K., "Application of X-Ray Fractographic Technique to Actual Failure Analysis," J. of Society Material Science, Vol. 24, No. 4, pp. 117~128, 1975.
6. Brown, W. F. Jr. and Strawley, J., "ASTM STP 410," pp. 1~65, 1966.