

# 디젤 엔진 로커 암의 피로 내구성 평가

김호경<sup>†</sup> · 양경탁<sup>\*</sup> · 김현준<sup>\*</sup>

서울산업대학교 자동차공학과 · \*서울산업대학교 대학원  
(2007. 1. 2. 접수 / 2007. 5. 17. 채택)

## Evaluation of Fatigue Endurance for a Rocker Arm of Diesel engine

Ho-Kyung Kim<sup>†</sup> · Kyoung-Tak Yang<sup>\*</sup> · Hyun-Jun Kim<sup>\*</sup>

Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology

<sup>\*</sup>Graduate School, Seoul National University of Technology

(Received January 2, 2007 / Accepted May 17, 2007)

**Abstract** : In order to evaluate fatigue endurance for the rocker arm of a diesel engine, stress measurements were performed using the strain gages attached near the neck, where is one of the most critical region in the rocker arm, in variation of the engine speed. The fatigue life experiments were carried out on miniature specimens from the rocker arms. For evaluating the fatigue endurance of the rocker arm, the S-N data were compared with the stress analysis results through FEM analysis of the rocker arm. The effective stress of the neck region was determined 17.7MPa through FEM analysis of the rocker arm. Conclusively, on the basis of fatigue limit, the rocker arm has a safety factor of 2.8 or 3.4 from the stress measurement or FEM results, respectively.

**Key Words** : rocker arm, fatigue endurance, safety factor, FEM analysis

### 1. 서 론

자동차 엔진의 로커 암(rocker arm)은 캠축의 회전 운동을 흡입 밸브 및 배기 밸브가 수직으로 상·하 운동을 하도록 하여 결과적으로 엔진 실린더로 공기를 흡입하거나 연소된 배출가스를 밖으로 내보내게 하는 역할을 한다. 로커 암은 보통 다이캐스팅 공법에 의해 알루미늄합금(ALDC10 혹은 ALDC12)으로 제작되어 양극화 표면처리를 한다. 각 부품간의 접촉 부위는 로커 암 내부의 탄성유막에 의한 습식 윤활이 이루어지나 부적절한 차량의 오일 관리로 인해 윤활막이 파괴되어 접촉부위에 건식 윤활이 발생하는 경우도 종종 발생한다. 이로 인하여 로커 암축과 미끄럼 접촉을 하는 부위, 특히 윤활 구멍 주위에서 반복적인 건식 접촉 미끄럼에 의하여 프래팅 피로파괴<sup>1)</sup>가 일어나 파단이 발생하게 된다. 또한 장시간 사용 중 로커 암의 핀에 의해 작용하는 압축 하중에 의해 로커 암의 목 부위에서 종종 피로 파괴가 발생하고 있다. 따라서 밸브의 개폐시기를 결정하

는 중요한 역할을 하는 로커 암은 엔진의 성능 및 내구성의 향상 그리고 최종적으로는 차량의 안전성 확보를 위하여 우수한 피로 내구성과 신뢰성이 요구된다.

지금까지 로커 암에 대한 국내외의 연구는 다수 있으나 대부분이 부품에 대한 트라이블로지 측면에서의 연구<sup>2)</sup> 및 동특성 평가<sup>3,4)</sup> 등에 관한 것이며 내구성에 관하여 다룬 연구<sup>5)</sup>는 매우 제한적이다.

본 연구에서는 현재 디젤 차량에서 사용 중에 로커 암의 목 부위에 파단현상이 발생하여 교체되는 로커 암의 피로내구성을 평가하고자 한다. 이를 위하여, 실제 차량의 로커 암의 가장 취약한 부위로 알려진 목 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 목 부위에서의 엔진 회전속도별 응력을 측정하였다. 또한, 기구학적 해석을 통하여 결정된 하중 값을 이용하여 유한요소 해석을 수행하여 로커 암에 작용하는 응력 해석을 실시하였다. 한편, 실제 차량의 로커 암에서 채취한 소형 시험편으로 피로 시험을 실시하여 응력-피로 수명 선도(S-N선도)를 얻었으며 그것을 토대로 최종적으로 구조 해석 결과와 비교분석하여 본 로커 암의 피로 내구성을 평가하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kimhk@snut.ac.kr

## 2. 실험 및 유한요소해석 방법

### 2.1. 밸브 스프링 상수 및 작용 하중 결정

밸브의 스프링의 상수를 측정하기 위하여 전기 유압식 만능 재료 시험기인 Instron 8516을 사용하여 측정된 결과 스프링 상수는 29.6N/mm으로 측정되었다.

한편, 로커 암에 작용하는 하중을 결정하기 위해서는 역으로 캠이 회전하는 상태에서의 밸브 스프링에 작용하는 압축하중을 결정하여야 한다. 이를 위하여 실제 도면 Fig. 1(a)를 토대로 Fig. 1(b)와 같은 개략도를 작성하였다. Fig. 1(b)에서 각도  $\alpha$ 는  $\tan\alpha = 13.91/18.95 = 0.73$ 을 계산하여 36.3°로 결정하였다.

또한, 캠의 회전 시 양정에 의한 밸브 스프링의 압축하중을 결정하기 위하여 캠 양정이 최대치에 도달하는 최대 변위를 실제 차량에 다이얼 게이지를 장착하여 캠 샤프트를 수동으로 회전시키면서 측정된 결과 6mm로 측정되었다. 그러므로 실제 밸브 스프링을 수직으로 압축을 가하는 캠의 유효 수직 이동거리  $L = 6\cos 36.3^\circ = 4.84\text{mm}$ 로 결정하였다. 따라서 Fig. 1(b)에서 로커 암에 의하여 캠 반대쪽의 실제 밸브 스프링에 작용하는 압축 변위량  $X$ 는 지렛대 원리를 적용하면  $23.50\text{mm} : 43.06\text{mm} = 4.84\text{mm} : X\text{mm}$ 이므로  $X = 8.87\text{mm}$ 로 결정된다. 통상적인 밸브 유격 0.25mm를 고려할 경우 실제 캠의 회전에 의한 밸브 압축 변위량은  $8.87\text{mm} - 0.25\text{mm} = 8.62\text{mm}$ 가 된다. 그러므로 이에 해당하는 스프링 압축하중은 압축 변위량에 스프링 상수를 곱한 값, 즉  $8.62\text{mm} \times 29.6\text{N/mm} = 255.2\text{N}$ 이 된다. 한편, 밸브에 장착된 초기 상태가 압축 하중으로 눌린 상태에서의 하중을 구하기 위해 스프링 길이를 측정된 결과 다음과 같다.

- 밸브 스프링 자유 길이 = 48mm
- 밸브 장착된 상태의 스프링 길이(심재 두께 1.6mm 포함) = 42.85mm
- 밸브가 장착된 상태의 순 스프링 길이 = 41.25mm

따라서 밸브에 장착된 초기 상태에서의 스프링에 가해진 압축 하중은 밸브 스프링 자유 길이에서 밸브가 장착된 상태의 순 스프링 길이를 제외한 길이인 6.75mm에 대한 스프링 상수를 곱한 값( $= 6.75\text{mm} \times 29.6\text{N/mm}$ )인 199.6N이 된다. 최종적으로 밸브 스프링에 작용하는 압축하중은 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 밸브에 장착 시 초기에 작용하는 압축하중(= 199.6N)에 캠 양정에 의해 작용하는 압축하중(= 255.2N)을 더한 값으로 454.8N으로 결정하였다.

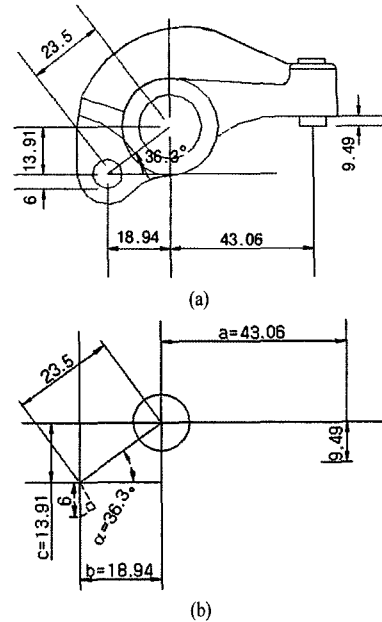


Fig. 1. (a) Dimensions and (b) schematic of the rocker arm investigated in the current study.

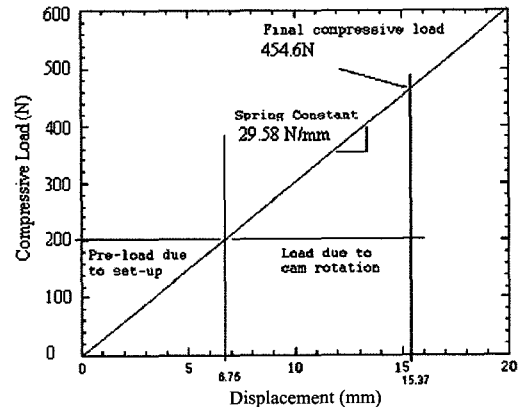


Fig. 2. Determination of the compressive force of the valve spring.

### 2.2. 로커 암 목 부위의 응력 측정 실험

로커 암의 취약 부위인 목 부위의 엔진 운행 중의 응력을 측정하기 위하여 쿼터 브리지 회로 방식으로 길이 5mm, 게이지 계수 2.13의 스트레인 게이지(Kyowa Co.)를 이용하였다. 스트레인 게이지의 리드선을 위하여 Fig. 3과 같이 Rocker Cover를 탈착한 상태에서 목 부위에 스트레인 게이지를 부착하고 기름이나 물과 같은 이물질의 혼입을 방지하기 위하여 이를 에폭시 수지를 이용하여 스트레인게이지의 표면을 코팅하였다.

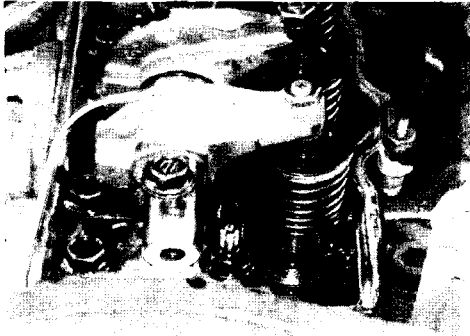


Fig. 3. Strain gages mounted on the rocker arms of the diesel engine.

엔진 작동중의 스트레인의 양을 측정하기 위하여 다이내믹 앰프(Measurements Group 2310)와 디지털 오실로스코프(Lecroy Corporation 9304A)를 사용하였으며 엔진의 회전수를 아이들링, 약 1000, 1330, 2180, 2400, 3000rpm으로 증가시키면서 스트레인의 양을 측정하였다. 이때 엔진 작동시 로커 암의 온도 상승에 의한 열팽창으로 인한 스트레인의 증가를 방지하기 위하여 각 회전수당 약 10초간의 측정 후 엔진 작동을 중단하고 대기 중에서 충분히 냉각 후 영점을 조정 후 다시 회전수를 증가시켜 측정하였다.

### 2.3. 로커 암 재료 시편의 피로 강도 실험

로커 암 재료의 인장 강도 및 피로 강도를 평가하기 위하여 밸브 스프링 상수 측정에 사용된 10ton 용량의 전기 유압식 만능 재료 시험기(Instron 8516)를 사용하였다. 로커 암에서 인장 및 피로 시험용 소형 시험편을 채취하였으며 채취한 시편은 게이지 길이 12.7mm, 시편 폭 6.3mm, 시편 두께 4mm로 가공하였다. 이를 이용하여 인장실험은 변위 제어방식으로 1mm/min의 속도로 수행하였다. 피로시험은 인장실험에서 사용한 시편과 형상 및 치수가 동일한 시편을 이용하여 응력비( $R = P_{min}/P_{max}$ )가 -1인 12Hz의 정현파형(sine wave form)의 반복 하중을 일정하게 가하여 수행하였다.

### 2.4. 구조해석

본 연구에서는 로커 암의 응력해석을 위하여 3차원 CAD 소프트웨어인 Pro-engineer<sup>6)</sup>로 3D 모델링을 실시한 후 이를 범용 전처리(pre-processor) 프로그램인 HyperMesh v6.0<sup>7)</sup>으로 전환하여 해석을 위한 전처리 과정을 실시하였다. 해석을 위한 하중조건

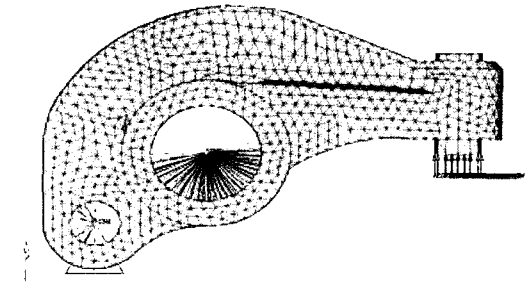


Fig. 4. Boundary condition for FEM analysis of the locker-arm.

은 집중하중 476.3N에 해당하는 값을 핀에 작용하는 분포하중으로 가정하여 핀의 각 절점에 나누어 분산하여 적용하였으며 여기에 사용한 요소 수는 4309개, 절점 수는 16269개였다. Fig. 4는 해석 시의 경계조건을 나타내는 것으로 두개의 핀 구멍 모두 구멍 중앙에 rigid 요소를 생성하여 이 rigid 요소는 큰 핀 구멍의 경우 안쪽 하단의 절점을 연결하고 작은 핀 구멍의 경우 안쪽 상단의 절점들을 연결하여 핀의 축방향인 오직 Z방향의 회전이 가능하도록 구속하였다. 한편 Solver로 선형해석용 Optistruct를 사용하였으며 요소는 Tetra 4 node elements를 사용하였으며 재료 물성치로는 알루미늄 다이캐스팅재의 탄성계수  $E = 68.6\text{GPa}$ , 포아송비  $\nu = 0.33$ 을 적용하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1. 로커 암 목 부위의 응력측정

각기 다른 엔진 회전수에 대한 엔진 작동중의 로커 암 목 부위의 응력을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 이용하였으며 쿼터 브리지 회로에 해당하는 다음과 같은 식을 이용하여 스트레인( $\epsilon$ )을 계산하였다.

$$\epsilon = \frac{4V_o}{V_s \cdot GF} \tag{1}$$

여기서  $V_s$ 는 인가 전압,  $GF$ 는 스트레인 게이지 팩터로 본 실험에서는 각각 2volts, 2.13이며  $V_o$ 는 출력전압, 증폭은 100배를( $\times 100$  scale) 적용하여 측정하였다. Fig. 5는 아이들링 상태에서 측정하여 디지털 오실로스코프로 기록한 예이다. 선도 상단의 수평선과 평행한 부분은 로커 암과 캠의 접촉이 없는 순간에 해당하며 선도 하단의 골짜기 부분은 실제 로커 암이 캠에 의한 접촉으로 압축하중을 받는 순

간에 해당한다. 여기서 수직 축의 작은 눈금 하나는 20mV로 사이클 선도의 최상단 정상에서 최 하단 골짜기까지의 진폭은 32.6mV에 해당한다. 즉,  $V_0 = 0.0326V$ 이다. 식 (1)에 의해  $\epsilon = 0.0306$ 이다. 증폭비 100과 하중방향을 고려하면  $\epsilon = -0.000306$ 이다. 그러므로 최종적으로 로커 암 목 부위에 작용하는 압축 응력은 탄성계수  $E = 68.6GPa$ 로 가정하여  $\sigma = E \cdot \epsilon = -68,600MPa \times 0.000306 = -209.7MPa$ 이 된다.

한편, Fig. 5 선도의 수평축의 한 눈금은 50ms로 선도에서 한 사이클은 175ms 즉 0.175초에 해당한다. 이를 rpm으로 환산하면 0.175초 : 1cycle = 60초 : x cycles에 의하여 343 cycles/min으로 계산이 가능하다. 이를 실제 엔진의 정적 사이클을 이용하여 2회에 한번의 로커 암이 작용하므로 최종 rpm은  $2 \times 343 = 686$  cycles이 된다. 그러므로 아이들링 상태에서의 rpm은 686으로 측정되며 본 측정이 적절히 수행되었다고 할 수 있다.

엔진 회전수를 약 1000, 1330, 2180, 2400, 3000 rpm으로 증가시키면서 로커 암의 목 부위의 응력 상태를 다이내믹 앰프와 디지털 오실로스코프를 이용하여 각 회전수에 대한 최대 압축응력을 결정하여 그래프로 나타낸 것은 Fig. 6과 같다. 그림에서 보듯이 아이들 상태에서 응력이 가장 크며 엔진 rpm이 증가하면서 응력이 감소함을 알 수 있다. 그러나 엔진 회전수가 증가하면서 로커 암 목 부위에 압축 응력이 감소하는지는 정확히 알 수 없으며 로커 암의 관성력의 영향으로 인한 동적인 영향으로 판단되며 추후 이에 대한 동역학적 연구가 필요하다.

### 3.2. 구조해석 결과

로커 암에 집중하중 476.3N이 핀에 작용하며 윤활이 정상적으로 되는 상태를 가정하여 로커 암의

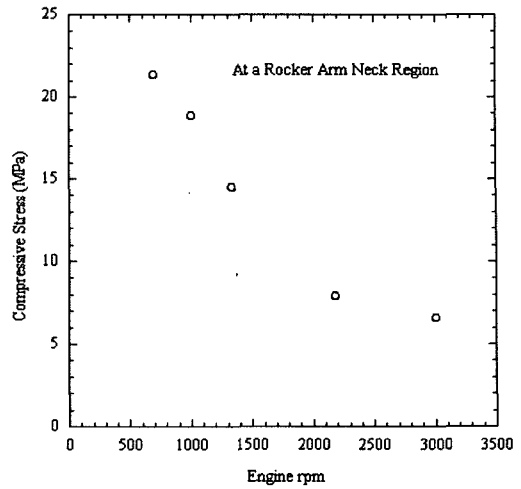


Fig. 6. Compressive stresses at a rocker arm neck region as a function of engine rpm.

응력 분포를 von-Mises응력으로 나타낸 결과는 Fig. 7과 같다. 해석 결과 최대 응력 18.3MPa이 로커 암 축과 미끄럼 접촉을 하는 부위인 윤활 구멍 주위에서 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 윤활이 적절히 이루어지지 않는 상태에서는 건식 반복 미끄럼 접촉에 의한 프레팅 피로를 동반할 경우 이 부위에서 피로 파괴가 발생할 것으로 판단되며 실제 현장에서 이와 같은 파괴가 종종 발생하고 있다. 또한, 본 연구에서 실제 엔진 작동 중에 측정된 목 부위는 17.7MPa의 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이 결과 값은 실제 스트레인 게이지를 이용하여 측정된 아이들링 상태에서의 21.4MPa과 비교하여 낮은 값이다. 그러나 유한요소 해석에 의한 응력 값은 거의 정적인 상태에서의 로커 암에 가해지는 하중에 의한 결과 값으로 직접적인 비교가 어렵다고 본다.

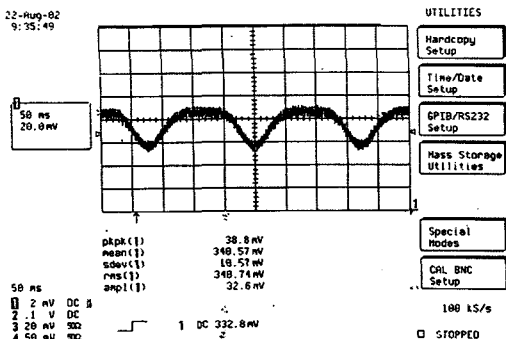


Fig. 5. An example of dynamic applied stress pattern on a point of the rocker arm at idle speed (~686rpm).

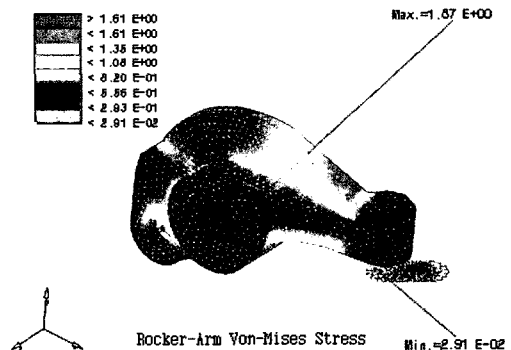


Fig. 7. The von-Mises stress distribution of the rocker arm with a compressive spring force of 476.3N.

### 3.3. 로커 암 재료의 피로강도 평가

인장 실험을 실시한 결과 최대 인장강도는 164.0MPa, 연신율은 2.5%로 나타났다. 이는 유사한 알루미늄 다이캐스팅재의 인장강도 결과와 비교하여 인장강도는 약간 낮으나<sup>8)</sup> 다이캐스팅 재료의 주조 공정 특성상 채취전의 대상물의 크기 및 형상과 관련이 있어 직접적으로 비교가 곤란하다. 로커 암 재료를 이용한 시험편에 대한 응력비  $R=-1$ 에서의 응력-수명선도는 Fig. 8과 같다. Fig. 8을 통하여 로커 암 재료의 피로한도는 58.8MPa 이상인 것으로 인장강도의 약 36%로 나타났다. 이는 알루미늄 다이캐스팅 재의 피로한도에 대한 연구에 나타난 다른 연구자들의 연구결과<sup>9)</sup>와 유사하다.

알루미늄의 피로한도인 58.8MPa를 고려할 때 유한요소 해석 결과에 의한 로커 암 목 부위의 최대 응력 17.7MPa이나 스트레인 게이지를 이용한 응력 실험 결과 엔진 작동중의 최대 응력 21.4MPa은 낮은 값으로 피로 한도를 기준으로 안전계수(Safety Factor, SF)는 각각 약 3.4, 2.8에 해당한다. 그러나 현장에서 사용 중에 종종 파단이 발생하는 경우가 있다. 이와 같은 문제에 대한 가장 큰 원인중의 하나는 다이캐스팅 공정 중에 나타나는 주조 결함으로 판단된다. 다이캐스팅은 일종의 주조 공법으로 불순물 혹은 개재물 혼입과 기공(pores)과 같은 주조 결함이 발생할 가능성이 있다. 일례로 본 연구에서 피로 실험을 위해 로커 암에서 피로 시험편을 채취하여 시험편을 가공 시 Fig. 9와 같은 직경 약 800 $\mu$ m 크기의 작은 기공들을 발견하였다. 만일 이와 같은 기공과 같은 결함이 존재 시 로커 암 재료의 피로 한도는 급격히 감소할 것이다. 특히 장수명(high cycles)에 해당하는 피로 한도의 경우 단수명에 비하여 결함의 영향은 지대하다.<sup>10)</sup> 따라서, 로커 암의 가장 큰 응력이 발생하는 목 부위에 존재 시 목 부위 재료의 피로한도가 로커 암의 최대 응력 이하로 감소할 가능성이 있다. 이 경우 사용 중 목 부위의 주조 결함인 기공에서 균열이 발생하여 결국 피로 파괴에 이르게 될 것이다.

결론적으로, 본 연구를 통하여 스프링 상수, 로커 암 재료의 피로강도, 엔진 작동중의 로커 암 목 부위의 응력측정 실험과 더불어 로커 암의 구조해석을 통하여 본 로커 암은 피로 한도 기준으로 각각 약 2.8과 3.4의 안전계수를 확보한 부품으로 피로강도 측면에서는 안전한 부품이라 할 수 있다. 통상적인 환경에서 작동하는 보통의 재료에 대한 안전 계수가 2~2.5인 것<sup>11)</sup>을 감안하면 적절하다고 할 수 있다. 그러나 앞서 언급했듯이 다이캐스팅 공정 중에

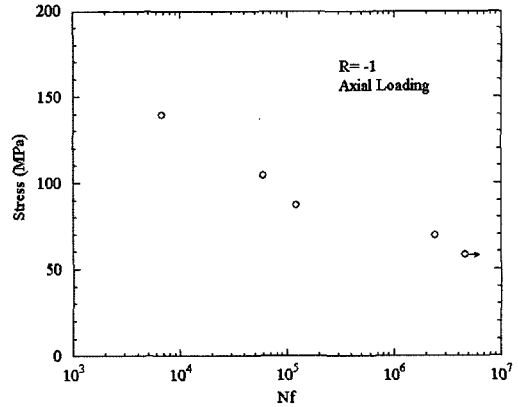


Fig. 8. Stress-number of cycles curve for the rocker arm alloy.

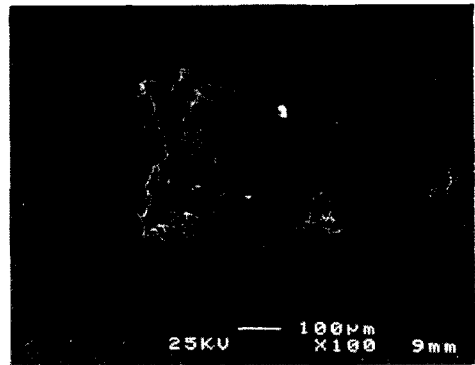


Fig. 9. An example of casting pores of the rocker arm alloy.

발생하는 기공과 같은 결함이 종종 발생하여 이로 인한 피로파단이 발생한 것으로 사료된다. 따라서 본 부품의 안전성 확보를 위하여 안정된 다이캐스팅 공정의 확립이 요구된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 현재 디젤 차량에서 사용되는 로커 암의 피로내구성을 평가하고자 실제 차량의 로커 암의 가장 취약한 부위로 알려진 목 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 목 부위에서의 엔진 회전속도별 응력을 측정하였다. 또한 유한 요소 해석으로 로커 암의 응력 해석결과와 실제 로커 암 재료의 응력-피로 수명 선도를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 로커 암 스프링의 스프링 상수는 29.6N/mm이며 정역학적 해석 결과 로커 암의 핀에 작용하는 정적 압축 하중은 476N으로 나타났다.

2) 로커 암 재료의 인장강도는 164.0MPa, 응력비 R=-1에서 피로한도는 58.8MPa로 나타났다.

3) 스트레인 게이지를 이용한 응력 실험결과 엔진 작동중의 로커 암의 목 부위의 최대 압축응력은 아이들 상태에서 최고치로 21.4MPa이 이었으며, 엔진의 회전수가 증가하면서 압축 응력이 감소하였다. 한편, 로커 암에 대한 유한요소 해석 결과 암 목 부위에 압축 응력이 17.8MPa이었다.

4) 엔진 작동중의 로커 암 목 부위의 응력측정 실험과 더불어 로커 암의 구조 해석을 통하여 본 로커 암은 피로 한도 기준으로 각각 약 2.8과 3.4의 안전계수를 확보한 부품이며 다이캐스팅 공정 중에 발생하는 기공과 같은 결함이 내재하여 이에 대한 안정된 다이캐스팅 공정의 확립이 내구성을 위하여 필요하다.

### 참고문헌

- 1) B. Alfredsson, and A. Cadario, "A study on fretting friction evolution and fretting fatigue crack initiation for a spherical contact", *Int. Journal of Fatigue*, Vol. 26, No. 10, pp. 1037~1052, 2004.
- 2) 장시열, 이희락, "로커암 밸브 트레인의 동적 탄성 유체윤활 유막 연구", *윤활학회지*, 제19권, 제4호, pp. 195~202, 2003.
- 3) J. Rhee and A. Akay, "Dynamic response of a revolute joint with clearance", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 31, No.1, pp. 121~134, 1996.
- 4) Y.S. Ünlüsoy and S. Tümer, "Non-linear dynamic model and its solution for a high speed cam mechanism with coulomb friction", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 169, No. 3, pp. 395~407, 1994.
- 5) Z.W. Yu and X.L. Xu, "Failure analysis of diesel engine rocker arms", *Eng. Failure Analysis* Vol. 13, No. 4, pp. 598~605, 2006.
- 6) Pro/ENGINEERING® Advanced Tutorial(Release 20/2000i), ConnectPress, Ltd.
- 7) Altair® Hypermesh Basic Training - Vol. 1~2, Altair Engineering.
- 8) Databook on Fatigue Strength of Metallic Materials, ASME, Vol. 2 Elsevier, p. 1730, 1996.
- 9) K. Saruki, S. Hotta, K. Ogawa, *J. JSSFM*, Vol. 23, No. 3, pp. 93~104, 1988.
- 10) A.S. Tetelman and A.J. McEviky, *Fracture of Structural Materials*, Jr., John Wiley & Son, New York, p. 144, 1967.
- 11) R.C. Juvinall and K.M. Marshek, *Fundamentals of Machine Component Design*, John Wiley & Son, New York, 1999.