

## CAM/TAPPET 재료조합에 따른 마찰·마모특성 비교

송근철 (Keun-Chul Song)

김경운 (Kyung-Woon Kim)

대우종합기계 중앙연구소 소재개발팀

### Comparison with Properties of Friction and Wear for Cam/Tappet Material

#### Abstract

The valve train system of engines has long been a sensitive area with respect to wear performance because of the high contact loads and surface sliding speeds encountered. In particular, wear problems of load-carrying components in relative motion, such as cam and tappet in valve train system, have made troubles. To overcome these problems, combination of proper materials is important, as well as selecting of high wear performance materials.

This paper presents the experimental result of friction and wear properties of cam/tappet materials. To investigate friction and wear properties for several combinations of materials, using commonplace tribometer(Plint 77, reciprocating type), we make a selection of a optimum material combination .

Key words-diesel engine, valve train, wear, friction

#### 1. 서론

최근 자동차에는 지구환경 오염문제, 안정성 등에 대한 규제가 강화되고 있는 가운데, 고출력화, 고연비, 고신뢰성 등에 대한 시장의 요구도 상당히 강화되고 있는 실정이다. 이러한 규제나 시장요구에 대응하기 위해 밸브 트레인 계통의 효율향상을 도모하기 위한 고밸브 리프트화와 밸브 개폐시기의 최적화, 다밸브화 등의 밸브 트레인계의 개선이 진행되고 있지만, 이들의 개선이 진행될수록 캠과 타펫 사이의 습동면 하중이 점차 증가하게 되어 타펫 습동면의 핏팅마모와

스커핑 마모가 증대됨으로써 엔진에 심각한 문제가 야기되고 있다. 특히 습동면 하중 증대에 따라 습동면에 발생하는 열량이 증가하게 되어 스커핑 마모의 발생이 더욱 우려되고 있다. 스커핑과 같은 이상 마모의 발생과 캠 및 타펫 재질의 내마모성 부족으로 인한 과다마모는 엔진 소음 증가의 원인이 되며, 밸브 개폐시기 및 밸브의 기밀 유지를 깨뜨리게 되어 연료의 불완전 연소가 발생하고 배기가스 증대 등의 문제가 발생한다 [1, 2].

마찰 마모 현상은 둘 이상의 부품의 상대운

동에 의해 발생하는 것으로 그 재질 선정에 있어서 각 재질의 독자적인 특성만으로 기준을 삼을 경우 예기치 못한 오류가 발생할 가능성이 높다. 아무리 우수한 마찰 마모 특성을 가진 재료라도 상대운동하는 재질의 특성 혹은 마찰 마모의 형태와 그 메커니즘이 달라짐에 따라 그 재료의 우수한 특성을 충분히 발휘하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 습동 부품의 재질 선정에 있어서, 직접 마찰 마모를 일으키는 각 재료의 특성과 함께 사용환경 및 상대운동의 형태 및 조건을 통합적으로 고려하여 하나의 시스템으로 접근하여야만 적절한 재질을 선정하는 것이 가능하다[3, 4].

본 논문은 범용 마모시험기를 이용한 소규모 벤치테스트를 통해 비교적 단시간에 여러 재질의 내마모성, 내스커핑성 등의 마찰 마모 특성을 비교할 수 있는 실험조건을 설정하고, 밸브 트레인계 부품에 있어서 캠, 타펫 시스템에 적용되고 있는 여러 재질들 상호간의 마찰 마모 특성을 비교하여 캠, 타펫 시스템에 있어서 최적의 재료조합을 선정하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시험편

시험편은 현재 고마력 디젤 엔진의 캠샤프트 및 타펫에 적용되고 있는 재질중에 각각 2가지씩을 선정하여 제작하였다. 캠 시험편으

로는 고주파열처리 재질과 침탄연질화 처리 재질을 선정하였으며, 타펫 시험편은 Chill 주물 타펫과 초경재 타펫을 선정하였다. Table 1에 시험에 사용된 시험편의 경도 및 표면조도를 나타내었다.

캠 시험편의 형상 및 규격을 Fig. 1에 나타내었다. 캠 시험편은 편마모를 방지하고 충분한 접촉면압을 구현하기 위해서 운동방향 및 수직방향으로 모두 round가 된 도우넛 형태로 제작하였다. 타펫 시험편은 실제 제품에 사용되고 있는 양산 부품을 입수하여 습동 부분을 절취하여 직경 32mm, 두께 3mm의 디스크 형태로 제작하였다.

### 2.2. 마모시험

시험장비는 Plint77 왕복동 마모시험기(Fig. 2)를 사용하였다. 마모시험은 Fig. 3에 나타

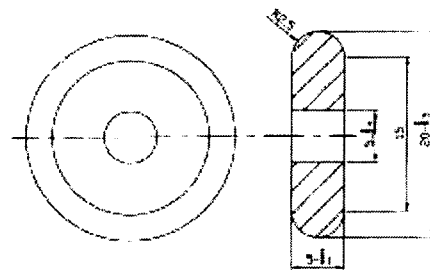


Fig. 1. The shape and dimension of cam specimens.

낸 것과 같이 하중이 가해진 상태에서 이동

Table 1. Hardness and surface roughness of specimens

|        | Material            | Hardness(Hv) | Surface roughness(R <sub>y</sub> ) |
|--------|---------------------|--------------|------------------------------------|
| Cam    | Induction hardening | 650          | 1.2                                |
|        | Carbonitriding      | 630          | 0.8                                |
| Tappet | Chill cast iron     | 1200         | 0.5                                |
|        | WC cermet           | 1400         | 0.4                                |

자가 왕복운동을 하는 형태로 진행된다. 캠 시편을 이동자 타펫 시편을 고정자로 하여 시험을 행하였다. 효과적인 가속실험을 위하여 마모시험중 시편에 작용하는 접촉면압을 실제 사용환경보다 높게 설정하였으며[5], 엔진오일을 유기용매에 희석한 윤활유를 사용함으로써 스커핑이 단시간에 용이하게 일어날 수 있도록 하였다. 내스커핑성의 평가는 마모시험중 마찰계수가 급격한 변화가 발생하는 순간까지의 시간으로 평가하였다. 유기용매와 윤활유의 비율, 하중 등의 변수를 조정하여 예비실험을 행하고 이를 토대로 최종 결정한 시험조건을 Table 2에 나타내었다. 캠, 타펫 각 2종류를 조합하여 4가지의 조합에 대하여 마모시험을 행하고, 각각의 재질조합에 대하여 3회씩 동일조건으로 반복실험을 행하였다. 각 실험의 구성을 Table 3에 나타내었다.

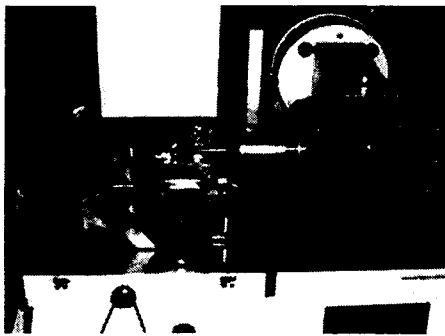


Fig. 2. Reciprocating type tribometer.

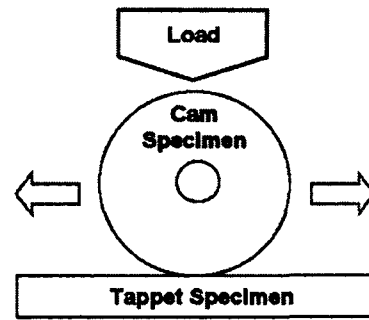


Fig. 3. Schematic diagram of sliding test.

Table 2. Test conditions

|                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| Load           | 100 N                          |
| Contact stress | Chill : 260 kg/mm <sup>2</sup> |
|                | 초경 : 330 kg/mm <sup>2</sup>    |
| Stroke         | 10 mm                          |
| Speed          | 5 Hz(300 rpm)                  |
| Test time      | 10 hr(run-in time 100 sec)     |
| Lubrication    | Dilute engine oil(Emerged)     |
|                | Oil/Toluene=1/20               |

Table 3. Lineup of Experiment.

| Exp. | Cam   | Tappet |
|------|-------|--------|
| A    | 고주파   | Chill  |
| B    | 고주파   | 초경     |
| C    | 침탄연질화 | Chill  |
| D    | 침탄연질화 | 초경     |

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 내스커핑성

고주파 캠/Chill 타펫 조합의 경우 3차에 걸친 시험에서 각각 2.7, 3.0, 1.5 시간 만에 시험이 중단되었다. 1차와 3차의 경우 급격한

마찰계수의 증가에 의해 순간적으로 시험이 중단된 반면 2차 시험의 경우 0.2 이상의 높은 마찰계수를 어느 정도 유지한 후에 시험이 중단되었다. 즉 1, 3차 시험은 비교적 스커핑 발생 초기에 시험이 중단되었으나 2차 시험의 경우는 스커핑 발생 후에도 상당 시간 마모가 계속 된 것으로 보여진다. 나머지 3조합, 고주파 캠/초경 타펫, 침탄연질화 캠/Chill 타펫, 침탄연질화 캠/초경 타펫의 경우 10시간 동안 안정된 마찰계수를 유지하였으며 본 실험 조건하의 3차례의 반복시험에서 모두 스커핑이 발생하지 않았다.

이상의 결과로부터 고주파 캠/Chill 타펫 조합이 다른 조합에 비해 내스커핑성이 현저히 떨어지는 것을 확인하였으며, 나머지 3개의 조합의 경우 본 실험에서 설정한 가속시험 환경 하에서 내스커핑성에 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

### 3.2. 마찰계수

Fig. 4에 각 재료조합의 시험구간에 있어서의 마찰계수 변동을 나타내었다. 시험구간 동안 각 재료 조합의 평균마찰 계수를 비교한 결과 고주파 캠/Chill 타펫 조합의 경우 0.1 이상의 비교적 높은 마찰계수를 나타내었으나, 나머지 조합에 있어서는 0.06-0.07 정도의 낮은 마찰계수를 나타내었다. 이 정도 수준의 마찰계수는 본 실험에 사용한 마모시험기에서 유체윤활조건에서의 마찰계수와 동등한 수준이다. 즉 충분히 윤활유가 공급 되었을 때의 상태와 거의 유사한 마찰거동을 나타낸다고 판단된다.

또한 시험구간에서의 마찰계수의 변동 정도

도 고주파 캠/Chill 타펫의 경우가 다른 조합에 비해 매우 큰 값을 나타내었다. 기타 조합들의 경우 마찰계수나 그 변동 폭에 있어 의미 있는 차이를 나타내지는 않았지만 Chill 타펫인 경우보다 초경 타펫의 경우가 마찰계수의 안정성에 있어서 좀 더 양호한 것으로 나타났다.

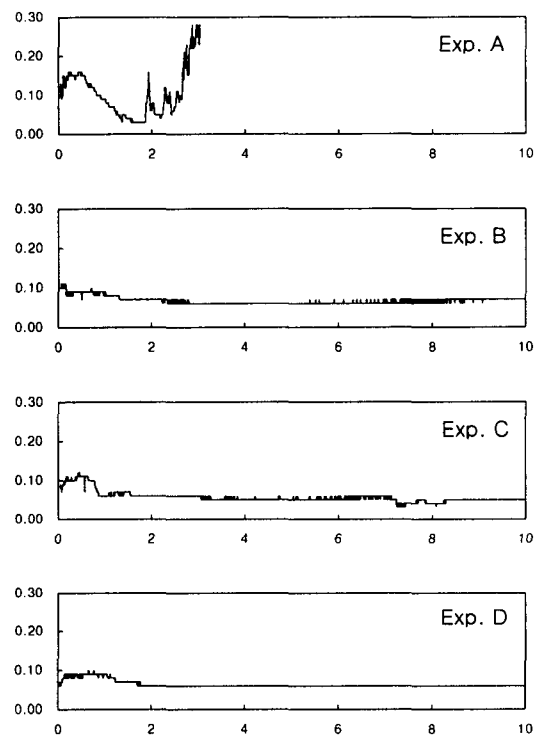


Fig. 4. Variation of friction coefficient during sliding test.

### 3.3. 마모면 분석

Fig. 5는 시험 후 캠 및 타펫 마모면의 광학현미경 사진이다. 사진에서 가로방향으로 마모시험을 진행하였다.

고주파 캠과 Chill 타펫 조합의 마모면을 관

찰한 결과(Exp. A) 캠재의 표면은 스커핑의 영향으로 표면이 뜯겨져 나간 형상이 관찰되었다. 타펫의 표면은 스커핑이 상당히 진전되어 거의 대부분의 면적에서 metal transfer가 발생했고 이들이 산화된 것이 관찰된다.

고주파 캠과 초경 타펫 조합의 경우(Exp. B)는 캠, 타펫 양쪽 모두 부분적으로 burning이 관찰되는 것을 제외하면 양호한 마찰면

상태를 나타내고 있다. 마찰면의 온도상승의 결과로 부분적인 burning이 발생했지만 스커핑의 증거인 metal transfer는 관찰되지 않는다.

침탄연질화 캠의 경우(Exp. C, D) Chill, 초경 두 가지 타펫과의 조합에서 모두 양호한 마모면 상태를 나타내었다. 고주파캠/초경타펫 조합의 경우와 유사한 수준이었다.

### 3.4. 마모량

Scuffing이 발생하여 시험이 중단된 고주파 캠/Chill 타펫 조합을 제외한 나머지 세가지 조합에 대하여 10시간 시험후의 캠 및 타펫의 마모량을 측정하여 상대적인 내마모성을 비교하였다.

캠 마모량은 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 마모시험 후 타원형으로 형성된 캠의 마모흔으로부터 타원의 장축 및 단축의 길이를 측정하여 이를 이용해 마모된 체적을 계산하여 구하였다[6].

마모시험 후 캠재의 마모량을 비교해 본 결과 고주파 캠/Chill 타펫의 경우 짧은 시험시간(1.5-3시간)에도 불구하고 현저히 큰 마모량을 나타내었다. 이는 스커핑이 발생함에 따라 캠재의 마모가 가속적으로 진행되어진 것으로 판단된다. 동일하게 10시간 동안 시험한 나머지 조합에서의 캠재의 내마모성을 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 마모량을 비교해본 결과 고주파 캠/초경 타펫의 조합이 침탄연질화 캠의 경우보다 내마모성이 다소 우수한 것으로 나타났다.

두 종류의 캠에 있어서 표면경도의 차이가 거의 없음에도 불구하고 내마모성에서 차이

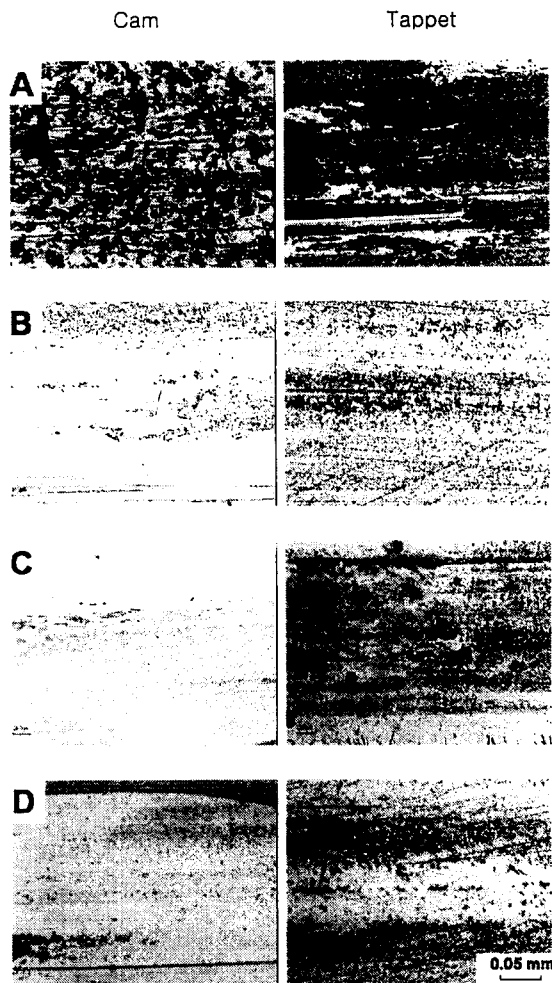


Fig. 5. Optical macrographs on worn surface. (from Top to downward, Exp. A, B, C, D)

를 보이는 것은 두 재료의 표면부의 미세조직의 차이에 기인한 것으로 판단된다. Chill 타펫과의 조합에서 비교되는 바와 같이 침탄연질화 표면층이 금속계 재질과의 상대마찰에 있어서 우수한 내스커핑 특성을 보여 주나 밸브 트레인계에 작용하는 높은 하중과 진동등에 상대적으로 취약하여 내마모성의 면에 있어서는 고주파처리에 비해 다소 약점을 가지는 것으로 판단된다.

타펫의 마모량은 Surface Profiler를 이용하여, 단면의 Profile로 표시하였다. Fig. 8에 마모시험 후 타펫 시험편의 wear track에 대한 단면 Profile을 나타내었다. 캠의 마모와 전반적으로 비슷한 경향을 나타내고 있다. 고주파 캠/Chill 타펫 조합에서의 타펫의 마모가 가장 현저하다. 초경 타펫의 경우는 캠 재질에 관계없이 거의 마모가 발생하지 않았다. 약간의 scratch 흔적만 나타난다. 침탄연질화 캠/Chill 타펫의 조합의 경우 어느 정도 마모가 진행된 것을 알 수 있다. wear track은 대략 폭 500 $\mu$ m, 깊이는 약 1 $\mu$ m정도이다.

캠 및 타펫의 마모를 복합적으로 고려해 보면, 스커핑이 발생하지 않고 정상적으로 마모가 진행될 경우 캠의 내마모성은 고주파 캠이 침탄연질화 캠보다 우수한 것으로 판단된다. 타펫의 경우는 캠 재질에 관계없이 초경 타펫이 Chill 타펫보다 탁월한 내마모성을 보인다. 이상의 실험결과에서 안정적인 마찰특성(우수한 내스커핑성)과 내구성(우수한 내마모성)을 나타낼 수 있는 조합은 고주파 캠/초경 타펫으로 판단된다.

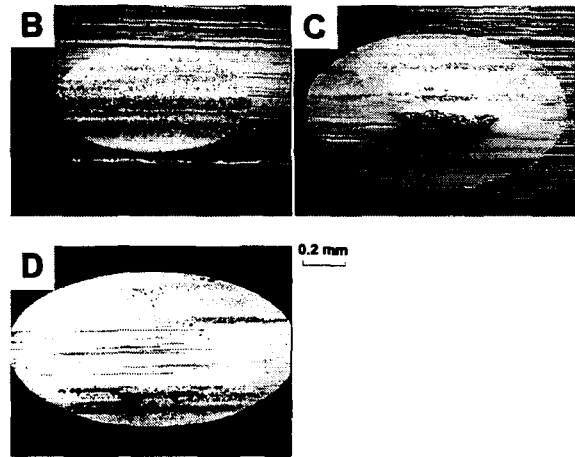


Fig. 6. Worn areas of cam specimen after sliding test.

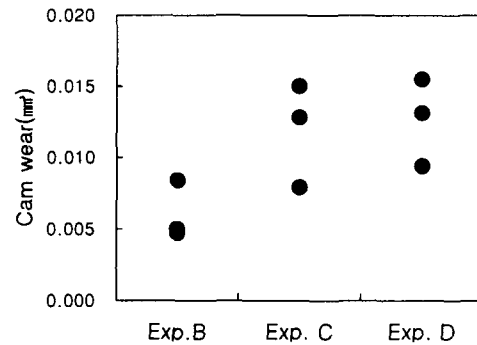


Fig. 7. Comparison of cam specimen wear loss after sliding test.

#### 4. 결론

(1) 재료 조합에 따른 캠/타펫 시험편의 내스커핑성을 비교한 결과 고주파 캠/Chill 타펫 조합의 경우 3차례의 시험에서 모두 3시간 이내에 스커핑이 발생한 반면, 나머지 고주파 캠/초경 타펫, 침탄연질화 캠/Chill 타펫, 침탄연질화 캠/초경 타펫의 조합에서는 10시간까지도 스커핑이 발생하지 않았다.

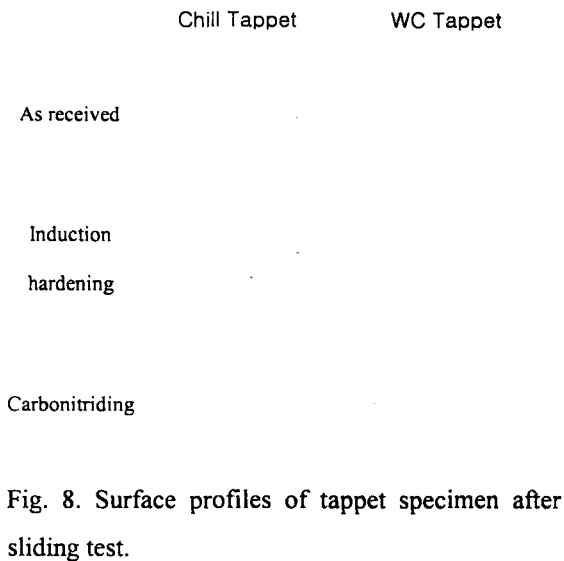


Fig. 8. Surface profiles of tappet specimen after sliding test.

(2) 시험구간동안 각 재료 조합의 평균마찰계수를 비교한 결과 고주파 캠/Chill 타펫 조합의 경우 0.1이상의 비교적 높은 마찰계수를 나타냈으며 나머지 조합에서는 0.06-0.07 정도의 낮은 마찰계수를 나타내었다. 또한 시험구간에서의 마찰계수의 변동 정도도 고주파 캠/Chill 타펫의 경우가 다른 조합에 비해 매우 큰 값을 나타내었다.

(3) 마모시험 후 캠재의 마모량을 비교해 본 결과 고주파 캠/Chill 타펫의 경우 짧은 시험시간(1.5-3시간)에도 불구하고 현저히 큰 마모량을 나타내었다. 이는 스커핑이 발생함에 따라 캠재의 마모가 가속적으로 진행되어진 것으로 판단된다. 동일하게 10시간 동안 진행된 나머지 조합에서의 캠재의 내마모성을 비교해 본 결과 고주파 캠/초경 타펫의 조합이 침탄연질화 캠의 경우보다 내마모성이 다소 우수한 것으로 나타났다.

(4) 마모시험 후 타펫의 마모량을 비교해 본 결과 캠의 경우와 유사한 경향을 나타내

는 것을 확인하였다.

(5) 고주파 캠/초경 타펫 조합은 침탄연질화 캠 조합 수준의 내스커핑성과 안정적인 마찰특성과 함께 우수한 내마모성을 가지는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. C. W. Roper and J. C. Bell, "Review and Evaluation of Lubricated Wear in Simulated Valve Train Contact Conditions," SAE Technical paper series, pp. 68-83, 1995.
2. D. Cooper and A. J. Moore, "Wear Control in Automotive Diesel Engines," '94, the 4th International Tribology Conference, Perth, Australia, pp 206-211, 1994.
3. P. J. Blau, "A Retrospective Survey of the Use of Laboratory Tests to Simulate Internal Combustion Engine Materials Tribology Problems," Tribology: Wear Test Selection for Design and Application. ASTM STP 1199, 1993.
4. Makoto Kano, "Wear Resistance Materials for Engine Cam Follower," Tribology, Vo 43, No 8, pp 23-28, 1998.
5. Williams J. A, "Engineering Tribology," pp 341-362. Oxford, 1995.
6. Erick Oberg, "Machinery's Handbook," pp 50-65, 23rd ed. Industry press INC., 1988.