

講演



# 엔진베어링의 윤활과 손상

工學博士 韓 東 哲 教授

서울대학교 工科大學機械設計學科

## 1. 서 론

동수압적 미끄럼베어링의 작동원리는, 두개의 서로 경사진 면이 윤활제를 그 사이에 두고 상대적인 운동을 함에 있어서 두면사이에는 윤활유 막이 형성되어 압력이 형성되고 두면에 작용하는 하중을 지지하게 되므로 직접적 마찰없이 상대적 미끄럼운동을 한다는 것이다. 동수압적 유체윤활은 윤활층내의 윤활유동에 동수압적 점성유체역학 이론을 적용하며 베어링윤활유막의 압력분포를 계산하기 위한 편미분 방정식의 발견이 그 근본을 이루고 있고, 미끄럼베어링에 대한 기본적인 연구는 1900년 이래로 계속 수행되

고 있다. 크랭크샤프트와 피스톤 연결봉 사이의 베어링은 동하중을 크게 받으며 회전하므로 (그림 1) 저어널과 축의 상대운동은 회전운동과 윤활면의 수직운동으로 나누어 해석할 수 있다. 이 경우의 레이놀즈 방정식과 등식 오른편의 각각의 term에 대응하는 압력분포 형태는 그림 2와 같다. 이 방정식의 유도에 있어서 매끈한 윤활

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6 \left[ \epsilon \sin(\varphi - \gamma) - 2\epsilon \gamma \sin(\varphi - \gamma) - 2\epsilon' \cos(\varphi - \gamma) \right]$$

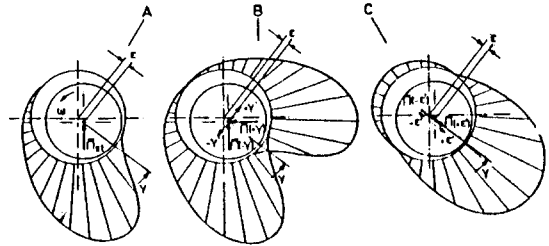


그림 2. 베어링 압력분포

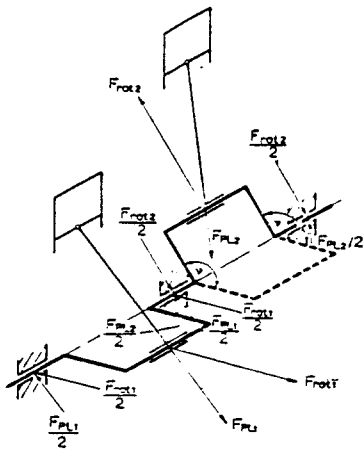


그림 1. 크랭크 샤프트의 엔진베어링에 작용하는 힘

면과 윤활유의 순수성 또한 충분한 급유조건 등이 전제되고 있다.

오늘날 이 편미분 방정식의 해는 수치해석적으로 컴퓨터를 이용하여 구할 수 있으며 계산된 압력분포  $\pi(\varphi)$ 의 합력은 하중과 평형을 이룬다는 조건을 이용하여 저어널이 베어링내에서 그리는 궤적을 그림 3에서와 같이 구할 수 있다.

미끄럼 베어링의 재료는 윤활유막의 압력을

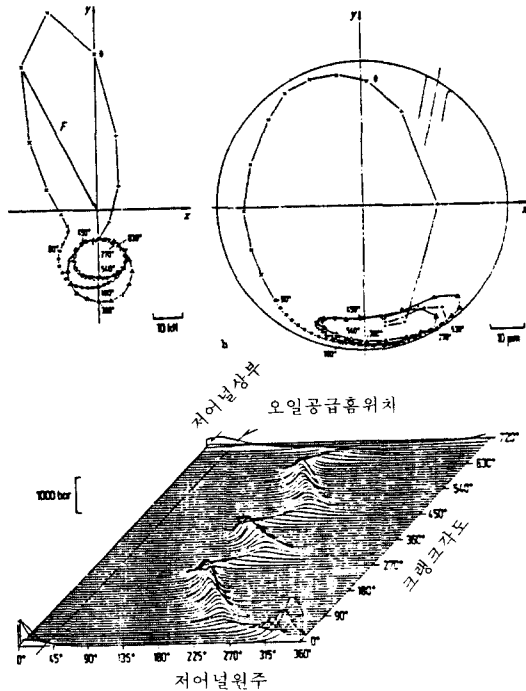


그림 3. 엔진베어링에 대한 線圖:  
a) 荷重線圖; b) 저어널의 편심선도  
c) 베어링중심 평면상의 압력분포

받아내는 강성, 유막의 특수한 유동상태에 따른 침식과 Cavitation 또 윤활유의 화학적 작용으로 인한 부식성에 대한 충분한 내구성을 가져야 하며 유막에서 발생하는 열을 밖으로 잘 전도시켜야 하고 만일의 윤활유 부족으로 인한 혼합마찰의 경우에도 미끄럼특성, 즉 유연성, 티끌매물성 등이 좋아야 한다는 요구를 만족시켜야 한다.

따라서 보통의 엔진베어링은 강철기관에 얇은 백철층이나 구리합금층 또는 알루미늄층을 입힌 것이며 위에 언급한 여러가지 요구조건을 동시에 만족시키기 위하여 강철기관에 청동층을, 그리고 그 위에 또한 얇은 백철층을 입힌 3층 베어링도 사용된다.

최적으로 설계된 미끄럼베어링, 그리고 운전 상태에서 요구되는 조건에 부합하는 材料를 선택하였다 하더라도 베어링의 손상은 완전히 배

제할 수는 없다. 가공시에 발생하는 형상오차와 조립 오차에서부터 유지보수상태 및 특수한 운전조건에 이르기까지 실제적인 운전조건들을 처음부터 모두 통찰하여 설계구상을 할 수 없기 때문이다. 그러므로 이에 종사하는 엔지니어들은 시험기간과 실제적인 사용기간에도 항상 마멸 및 손상상태를 파악하고 그 원인을 찾아내는데 노력하고 문제점을 근본적으로 해결해 나아가야 한다. 점진적 또는 전체적인 손상은 그 始初원인을 캐어내기가 어려우므로 의도적인 실험, 빈번한 보수 및 정비경험을 통하여 알 수 있는 것이다. 손상되는 주원인을 다음과 같이 열거하지만 대부분의 경우는 그중 여러개가 함께 원인이 되어 손상이 일어나는 것이다.

#### (1) 汚 染

오일필터가 거를 수 없는 자세한 마멸가루가 오일에 섞여 전체 윤활표면을 손상시켜 하중 지지력을 낮게 하고 마멸을 가져다 준다.

#### (2) 摩 滅

보통의 경우는 始初와 적용마멸이 있는데 이것은 이상적인 경우 압력이 높은 부위에만 나타나고 표면이 더 改善된다. 축과 베어링이 경사졌거나 오랜동안 사용하였을 경우에도 마멸이 계속되는데 축에 홈이 가고 열이 더욱 크게 발생하게 되면 마멸이 가속되고 드디어는 베어링을 파먹게 된다.

#### (3) 부 식

부적당한 윤활유의 선택, 윤활유의 老化 현상 또는 베어링材料의 잘못된 선택 등으로 인하여 화학적인 부식작용이 일어난다.

#### (4) Cavitation과 침식

윤활유막의 압력부분 다음에 형성되는 Cavitation현상으로 인한 부식과 오일공급흡 근처에 일어나는 유동에 의한 침식상태가 있다.

(5) 피로

동하중을 받는 베어링유막내의 압력이 베어링재료의 피로강도보다 높을 때 축 방향으로 금이 가게 되고 결국에는 여러 방향으로 금이 커져서 표면재료가 덩어리져 떨어져 나간다.

(6) 과 열

피로 또는 심한 마멸로 인하여 국부적으로 혼합윤활상태로 미끄럼면이 접촉을 하여 열이 심하게 발생하며, 금이 가게 된다.

(7) 結合불량

제조과정에 일어나는 결함으로서 표면전체가 들고 일어난다.

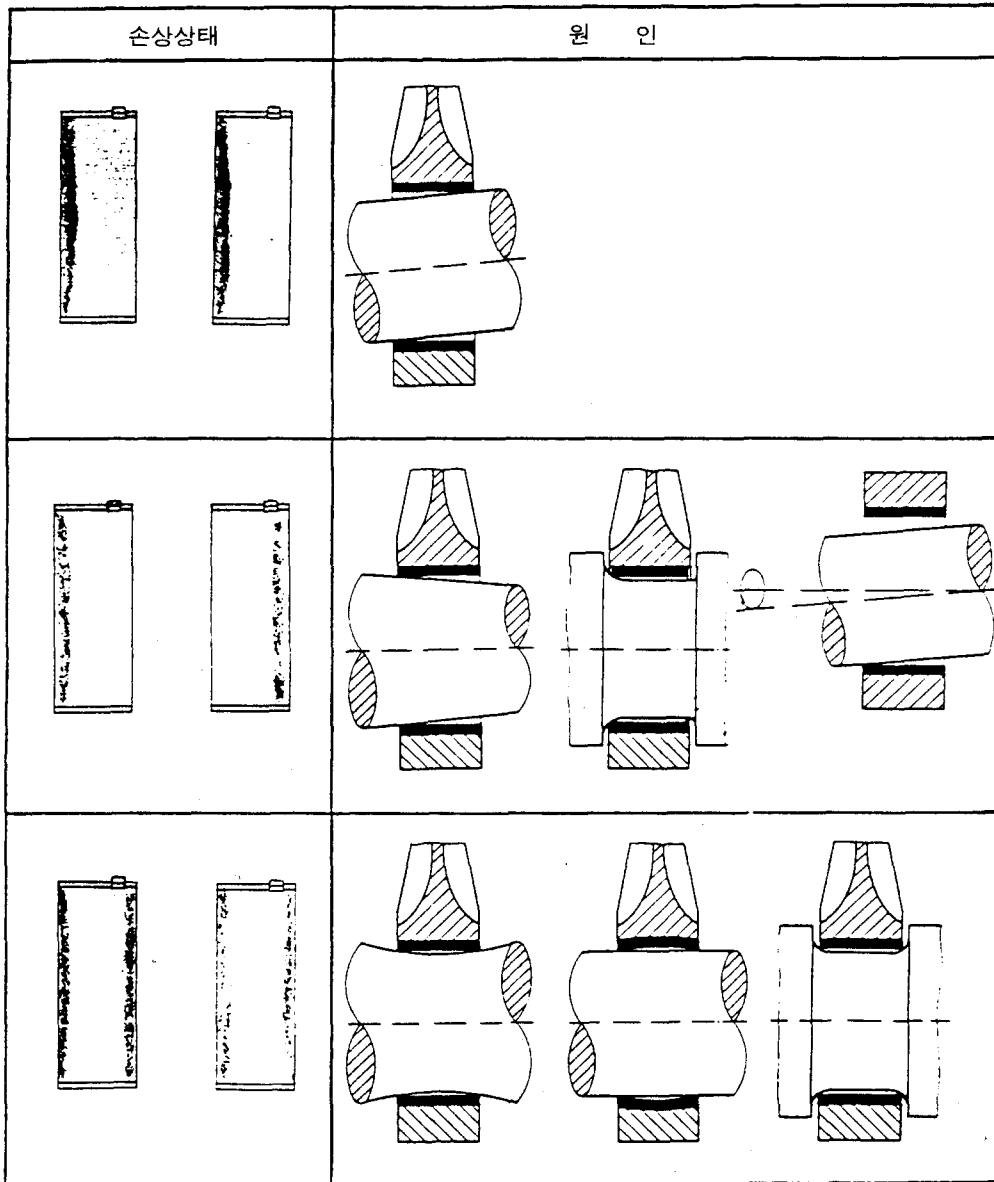


그림 4. 손상상태 와 원인

(8) 조립 불량

베어링의 반쪽들이 꼭 들어맞지 않게 조립되거나 기타 윤활틈새가 원 주위를 따라, 고르지 않으면 국부적인 파괴가 일어나거나 피로 파괴 상태가 온다.

본절에서는 베어링의 손상상태와 그 원인에 대하여 항속별로 열거하여 자세히 살펴 보기로 한다.

(1) 마 멸

표면의 평면형상을 유지하면서 재료가 예기치 않게 표면으로부터 분리되는 현상으로서 그림 4 에서와 같이 축과 베어링의 경사 또는 부적

2. 베어링의 손상 상태와 원인

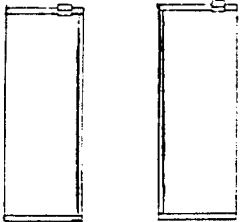
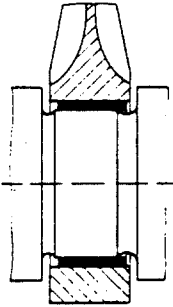
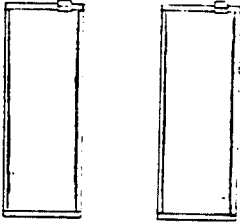
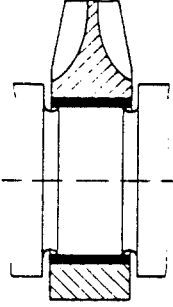
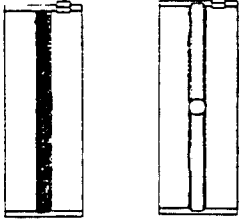
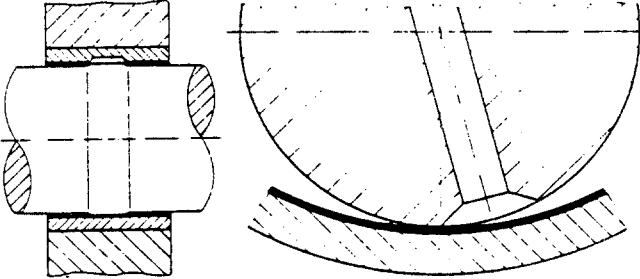
| 손상상태  | 원 인  |
|---|--|
|    |     |
|   |    |
|  |  |

그림 5. 손상상태 와 원 인

당한 추가공밋 베어링의 변형으로 인한 가장자리 마멸을 흔히 볼 수 있다. 그림 5는 축의 홈이 적절하지 않게 제작되었을 경우에 베어링에 발생하는 줄흠을 보여준다. 그림 6은 피스톤연결봉의 인장보울트를 잘못 조었을 경우의 베어

링변형으로 인한 마멸상태를 보여 주고 있다. 마멸로 생겨난 티끌이 좁은 윤활틈새내로 진입하면 틈새가 좁아져 국부적 발열이 심화되므로 충분한 냉각시간 여유를 줄 수 있도록 윤활유순환상태가 설계에 고려되어야 하며 시초 길

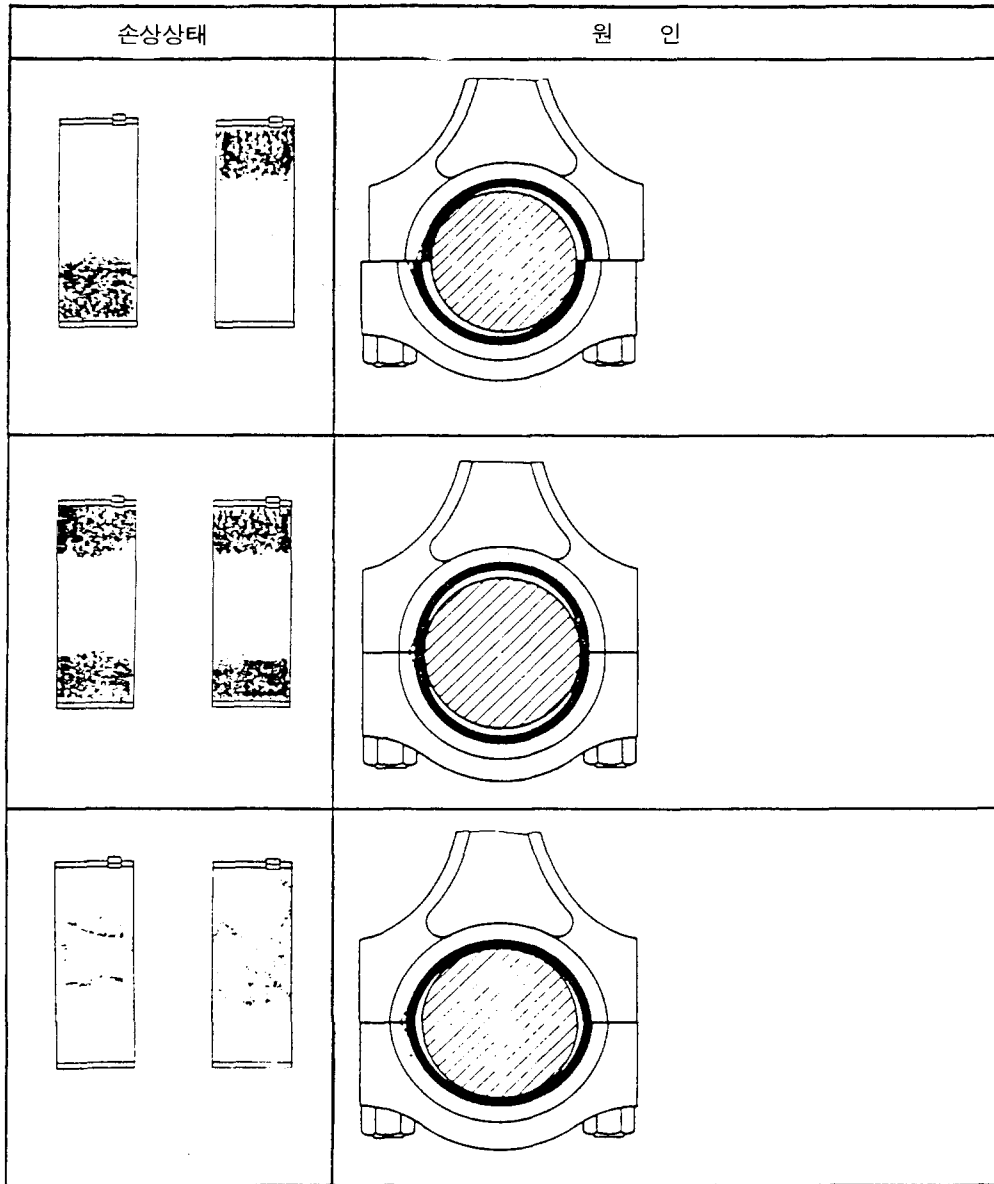


그림 6. 손상상태 와 원 인

들임 과정에서 과도한 하중 및 고속회전을 피하는 것이 좋다. 베어링재료는 결정입자가 미세하게 형성되도록 또한 충분한 연성을 갖음으로써 티끌이 파문힐 수 있도록 선정함으로써 방지할 수 있다. 또한 베어링형상이 연성을 갖도록 설계하여 축의 경사나 저어널의 열팽창에 쉽게 적응되도록 한다.

(2) 피로

저어널에 작용하는 하중으로 인한 유막의 압력이 베어링 재료의 피로강도보다 클 경우에는 장시간 운전후 베어링의 피로파괴현상이 나타나게 된다. (그림 7) 재료의 피로강도는 운전온도가 커질수록 현저히 낮아진다. 그림 8에서와 같은 길들임 과정에서 나타나는 국부적 피로균열

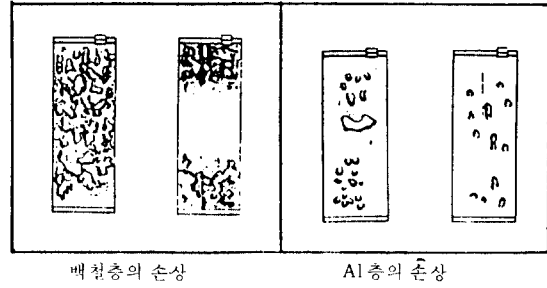


그림 7. 백철층의 손상 과 Al층의 손상

현상은 시간이 지남에 따라 적응되어 없어진다. 베어링재료로써 백철은 유연성과 미끄럼특성에서 뛰어나나 피로강도가 낮고 용융점이 200℃~320℃로서 디젤엔진 특히 소형고출력 엔진에서는 그의 사용이 제한을 받게 된다. 납 base의 청동 (22%납, 10%~1%주석, 나머지가리)

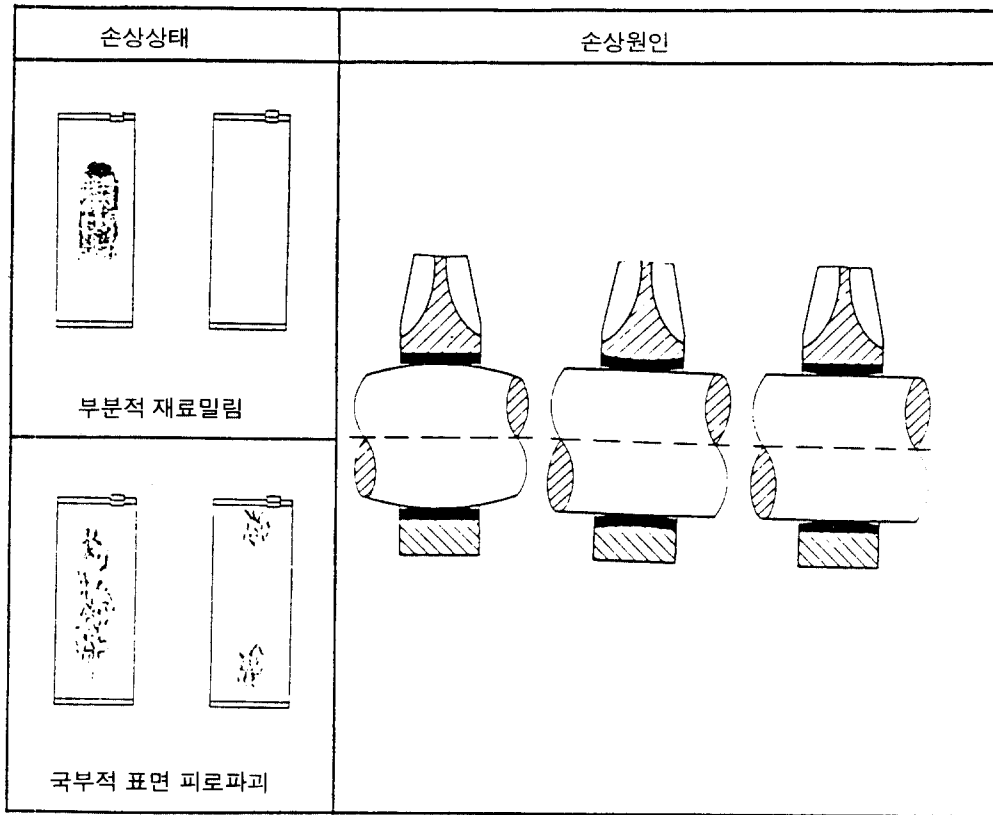
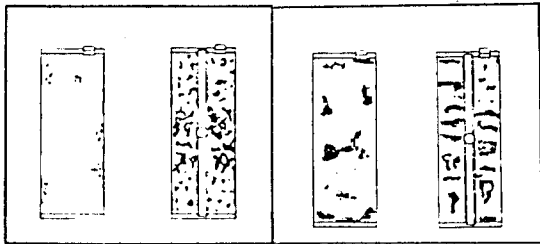


그림 8 손상상태 손상원인

을 사용하면 하중지지 용량은 좋으나 장시간 사용시 납이 표면으로 빠져나와 그위에 20~25 $\mu$ m의 백철 galvanic 층을 입혀 사용한다.

(3)부 식

화학적 침식상태로서 주로 윤활유에 황이나 알카리성 물질이 섞여 있을 경우에 문제가 된다. (그림 9)



납 Base청동의 부식      Al 합금의 부식

그림 9. 부 식

(4) 굽 힘

베어링표면이 윤활틈새내로 진입하는 티끌로 인하여 또는 축표면의 거칠기로 인하여 굽혀 깊은 홈을 원주방향으로 갖게 된다. 또한 저어널에 작용하는 높은 하중으로 인하여 축과 베어링의 부분적 마찰이 일어나는 경우가 있는데 축과 베어링의 표면조도를 낮게 함으로써 피할 수 있다.

(5) 침식과 Cavitation

디젤 엔진 베어링에서와 같이 유량이 많고 윤활유에 티끌이 많은 경우에 오일 공급 홈에서 부터 표면이 패여 들어가기 시작한다(그림10).

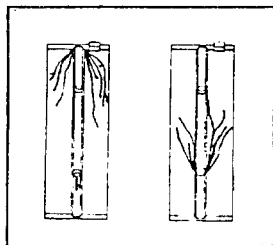
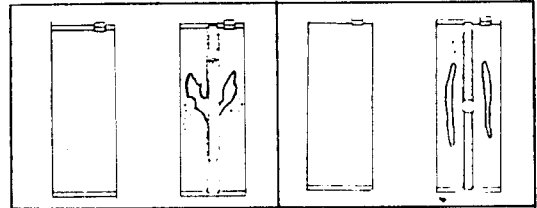
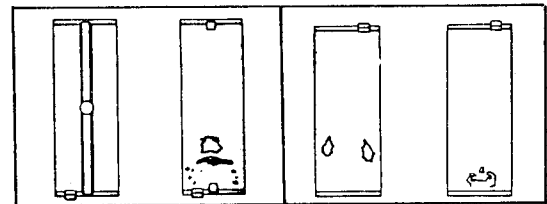


그림10. 침 식

일반적으로 는 침식과 Cavitation이 동시에 발생한다. 저어널의 원주속도가 높을 때에는 표면이 덩어리져 셋겨나가게 된다. (그림11)



크랭크축의 심한진동      연손실의 압력과다. 연료주입펌프조절



불충분한 윤활유공급

그림11. Cavitation

(6)마찰부식

베어링을 피스톤 연결봉에 끼워맞춘상태가 불량하거나 베어링의 수축작용이 심할 경우 베어

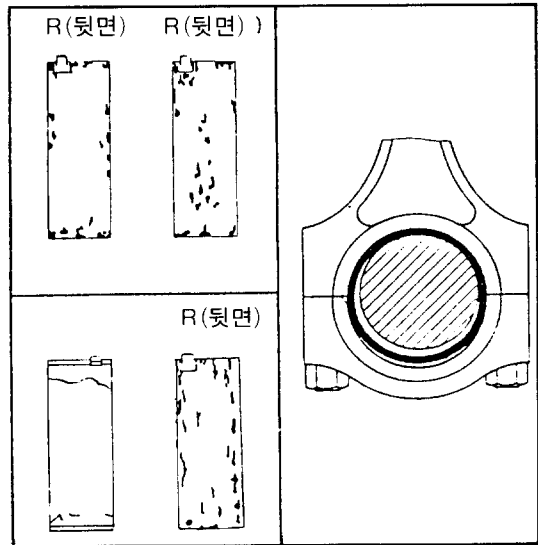


그림12. 마찰부식

링과 연결봉이 접촉하는 부분에 마찰로 인한 부식이 발생한다.(그림12). 조립시에 예압을 주었을 경우 이 예압은 시간이 지남에 따라 없어지는 것에 주의 하여야 하며 이러한 것은 고속엔진에서 많이 나타난다. 예압이 없을 경우에는 베어링 분리면에도 마찰부식상태가 발생한다.

#### (7) 완전손상

그림 13에서와 같은 베어링의 완전 손상은 그 시초원인을 알기 힘들므로 근처의 다른 베어링에 대한 조사 또는 오일공급선 및 오일 필터의 상태를 점검을 통하여 추측할 수도 있다.

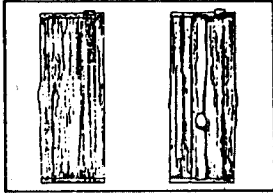


그림 13. 완전손상

### 3. 결 론

엔진베어링의 설계는 동수압적 유체윤활이론을 적용하여 계산함으로써 이룩할 수 있으며 가공 및 조립은 이론적 모델에서 가정한 바와 같이 진원도 및 표면조도에 있어 매끈한 윤활면 그리고 윤활유의 순수성 및 충분한 급유량을 보장하여야 한다. 베어링의 재료 선택에 있어서도 충분한 강성과 다른 한편 유연성 및 미끄럼 특성을 고려하여야 한다.

엔진의 보수시 또는 실험시에 베어링의 손상이 나타날 경우에는 그 원인을 근본적으로 규명하여야 한다. 이를 위한 여러가지 예를 들어 설명하였으며, 손상의 원인 규명을 통하여 베어링의 설계, 재료선택, 가공, 조립, 운전 및 유지보수에 대한 지침을 확립할 수 있다.