

內燃機關의 摩擦損失에 關與하는 諸因子 (Factors for Friction Loss in Internal Combustion Engines)

金 光 琳
(韓國油類試驗檢査所 檢査部長)

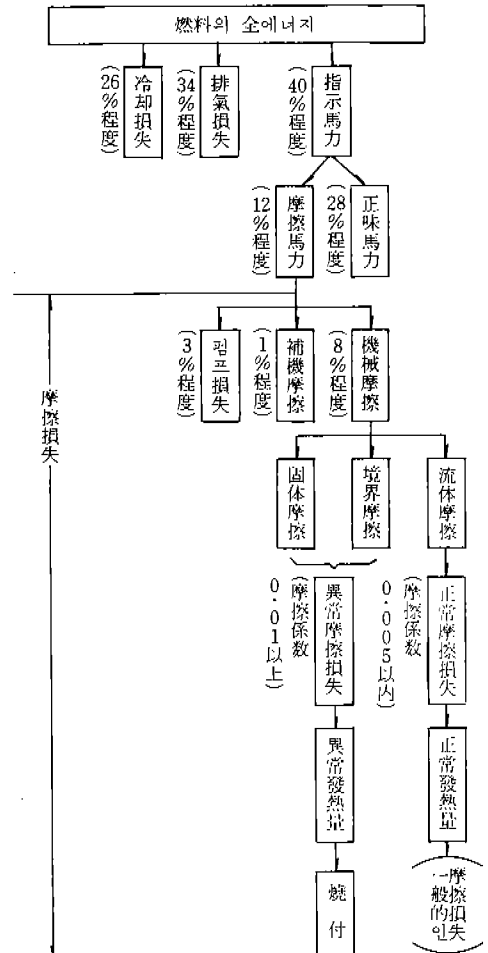
1. 摩擦損失의 思考方式

機關의 出力과 燃料消費率을 向上시키기 위해 여러가지 手段이 講究되고 있지만 그중의 하나로서 摩擦損失의 低減은 가장 重要한 因子이다.

摩擦損失은 잘 알려지지 않은 因子가 많고 특히 內燃機關은 機械要素가 많기 때문에 現象이 複雜하여 그의 低減은 쉽지 않다. 그러함에도 불구하고 지금까지 많은 努力을 기울인 結果 어느 程度의 成果를 나타내고는 있으나 今後는 省資源化의 側面에서 摩擦의 低減은 더욱 더 重要視된다고 볼 수 있다.

Fig 1에 나타난 것과 같이 摩擦損失로는 一般의으로 機械摩擦損失, 펌프損失, 補機의 驅動損失등의 總和를 말하는 것이지만 그의 最大部分은 機械摩擦이다.

Fig. 2에 自動車用機關의 全에너지에 대한 摩擦損失의 比率를 나타냈다. 機關의 摺動部는 大部分이 소위 미끄럼 베어링이라고 말할 수 있으며 그의 負荷能力은 潤滑油와 摩擦面에 켜기모양으로 끌려 들어가서 高壓이 發生하고 그것에 의하여 얻어지는 것이므로 本質的으로는 流体摩擦이라고 생각되나 摺動面의 거칠름(粗面) 등의 影響으로 部分的으로는 境界摩擦 또는 固体摩擦을 수반하게 된다. 流体摩擦로부터 境界摩擦로, 특히 固体摩擦로 移行되면 Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 摩擦損失은 飛躍的으로 增大하여 타서 늘어붙는 現象에 이르는 것도 있다.



註: ()內 數値는 正常的인 摩擦損失의 경우의 概略值, 다만 異常全負荷運轉의 경우

Fig. 1. 全에너지에 대한 摩擦損失

部分的으로는 상당히 境界摩擦 또는 固体摩擦 이 共存하고 있는 경우에도 荷重의 大部分은 流体摩擦域에서 分擔되어 있고 特히 重要な 것은

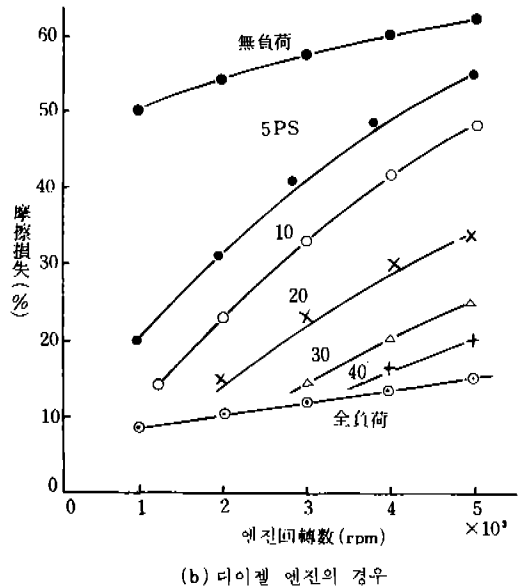
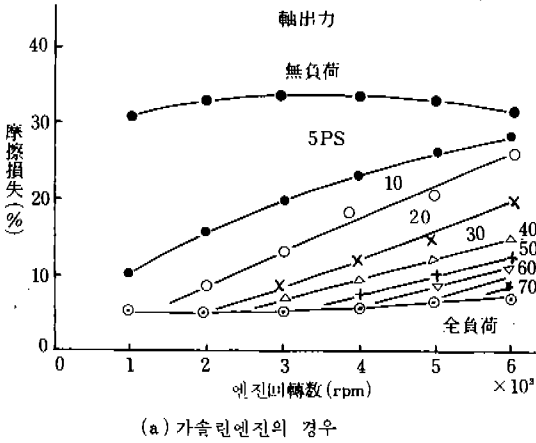


Fig. 2. 自動車機關의 摩擦損失比率(全에너지에 대한)

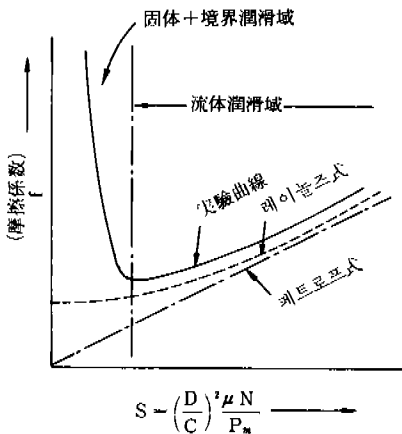


Fig. 3. 潤滑狀態와 摩擦係數와의 關係

摩擦熱量 즉, 摩擦損失이 큰 部分은 固体摩擦 및 境界摩擦에서 發生되고 있다는 事實이다.

Fig. 4에 曾田씨의 計算法에 의해서 算出된 摩擦係數에 대한 荷重分擔比 및 摩擦發熱比의 關係를 나타냈다. 이 그림에서는 混合摩擦係數 f는 各 潤滑狀態의 混合比率를 나타낸 것이므로

f → 큰 경우는 境界 + 固体摩擦域이 支配的 이고

f → 작은 경우는 流体摩擦力이 支配的 이다 라고 생각해도 좋다.

예를들면 f = 0.01의 경우 荷重 分擔力의 97%는 流体摩擦域에서 發生하고 摩擦發熱 즉, 摩擦損失의 73%는 固体 및 境界摩擦域에서 發生하고 있다. 똑같이 f = 0.05의 경우는 荷重分擔力의 76%가 流体摩擦域, 摩擦損失의 95%는 固体 및 境界摩擦域에서 發生하고 있다. 따라서 摩擦損失을 減少시키기 위해서는 摺動面을 可能한 限 流体潤滑狀態로 維持시키는 일이 무엇보다 重要하다.

摺動部の 潤滑狀態는 潤滑油, 油溫, 油壓 오 일클리어런스(oil clearance), 摺動部形狀, 表面粗度, 加工精度, 負荷등에 影響을 받는다. 現在 內燃機關의 경우는 流体潤滑이 支配的 이라고 생각되지만 여러가지의 惡條件이 加해져 타서 늘어붙는 現象에 이르는 것도 드물지는 않다.

流体潤滑時의 摩擦은 摩擦面間에 潤滑油膜이 完全히 形成되어 있기 때문에 摩擦力은 모두 潤滑油의 粘度 μ에 의한 것이다 (註: 粘度의 定義는 單位速度勾配를 發生시키는 베에 要하는 單位面積當의 剪斷力).

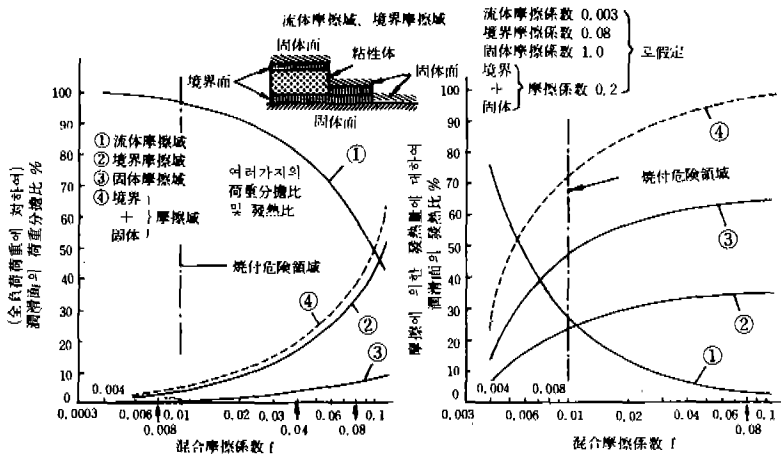


Fig. 4. 潤滑面の 荷重分擔比와 發熱比(會田의 計算式에 의 한)

Fig. 5와 같이 摺動面間에 두께 y 의 油膜이 있고, 相對速度 u 로 움직일 때 F 로 되는 抵抗力이 作用한다. 그 面積을 A 라고 하면 다음 식이 成立한다.

$$\frac{F}{A} = \mu \cdot \frac{du}{dy}$$

大部分의 摺動面은 이와 같이 二面間의 距離가 적을 때에는 速度는 直線의 變하기 때문에,

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{u}{y} \text{로 된다.}$$

그러나 大部分의 摺動面의 油膜은 상당히 얇아서 摩擦面의 形狀이 조금만 變하여도 摩擦에 상당히 影響을 준다. 따라서 負荷가 걸려있는 경우의 變形은 無視되지 않고 摺動部의 剛性이 重要視되는 것은 쉽게 推察된다.

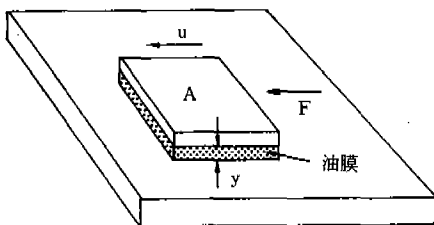


Fig. 5. 流体潤滑摩擦面의 模型

2. 摩擦損失의 內譯과 諸因子의 影響

內燃機關에 있어서 摩擦損失의 內譯은 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 大別해서 機械 摩擦損失(摺動部損失), 補機驅動損失, 펌프損失이고 그比率는 機械摩擦이 約 70%, 補機驅動 10%, 펌프損失이 約 20~25%를 차지하고 있어 機械摩擦이 大部分을 차지하고 있다.

機械摩擦은 피스톤系, 그랭크主軸, 連接棒, 動 밸브系 등으로 이루어져 있다. 以下에 機械摩擦의 分配 및 여러가지의 要因에 의한 影響을 알아본다.

(1) 機械摩擦에 대한 機關各部의 比率

Fig. 6은 內燃機關의 摩擦損失實驗例를 나타낸 것이지만 피스톤 및 피스톤링의 摩擦損失이 壓倒的으로 크다. 이것은 피스톤의 미끄럼면이 크고 相對速度가 높고 速度變化를 수반하는 運動을 행함과 동시에 高溫으로 되어 潤滑狀態가 円滑하지 못한다 그 原因이 있다. 運轉條件이 一定한 경우 피스톤系의 摩擦은 피스톤의 높이, 실린더와의 클리어런스, 링數, 張力, 潤滑油粘度 등에 影響을 받는다.

피스톤系 以外에서는 摩擦損失은 크랭크 베어링, 連接棒베어링 등이 크고 캠등의 밸브系는 그다지 크지 않다. 크랭크 베어링에서는 5베어링, 3베어링 또는 구름베어링 등의 有意差가 뚜렷하

고 또한 밸브에서는 OHC의 摩擦損失은 OHV의 2~3倍인 것이 試驗結果로부터 알 수 있다

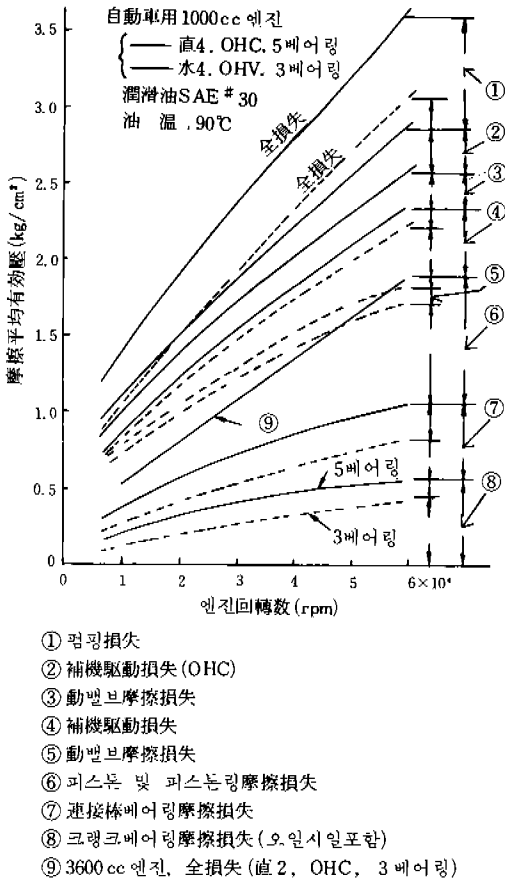


Fig. 6. 內燃機關의 摩擦損失 實驗例

(2) 실린더內壓, 回轉速度, 負荷의 影響

실린더의 內壓이 높아짐에 따라 피스톤의 드레스트荷重이나 베어링荷重이 增加하기 때문에 摩擦力이 커진다. 回轉速度 또는 피스톤 速度가 높아지면 慣性力이 增加하기 때문에 機械摩擦은 增加한다.

2 사이클機關에서는 慣性力의 一部가 가스壓에 의해서 消滅되기 때문에 回轉數의 增加에 의한 摩擦損失增加比率는 크지 않다는 것이 알려지고 있다.

慣性力을 적게 하기 위해서는 往復運動部의 輕量化를 圖謀하는 것이 必要하고 이것이 摩擦損失을 減少시킬 수 있다.

Fig. 7에 실린더內壓, 피스톤의 速度, 負荷(平均有效壓)와 摩擦壓과의 關係를 나타 냈다.

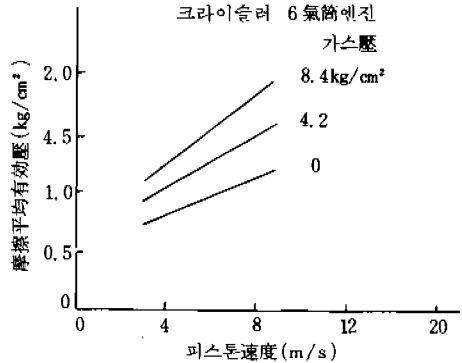


Fig. 7. 가스壓이 機械摩擦에 미치는 影響

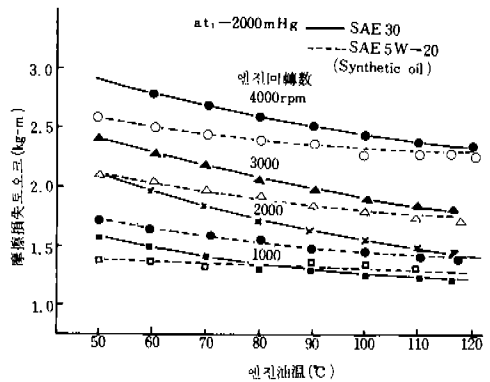


Fig. 8. 油温 油種과 摩擦損失의 關係

(3) 潤滑油粘度의 影響

Fig. 8은 潤滑油粘度, 溫度에 대한 摩擦損失을 나타낸 것이지만 粘度가 높으면 摩擦力이 增加한다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 油温의 上昇은 必然的으로 油의 粘度를 低下시키므로 摩擦損失의 減少는 當然하다.

(4) 行程 / 안지름比의 影響

近年 行程 / 안지름比는 1 내지 그 以下로 되지만 이것은 摩擦을 減少시키려는 要求 때문이다. Fig. 10은 거의 同一한 안지름을 갖는 2臺의 自動車用機關의 機械摩擦損失이지만 같은 피스톤 速度일 때 行程은 거의 影響을 받지 않는다. 勿論 같은 回轉數일 때는 行程의 長短이 機械摩擦

은 크다. 이러한 것로부터 行程/안지름비를 작게 하면 피스톤摩擦의 低減에 연결된다. 그러나 안지름增加에 随伴해서 크랭크베어링, 크랭크핀 베어링등이 大幅的으로 커지면 이러한 摩

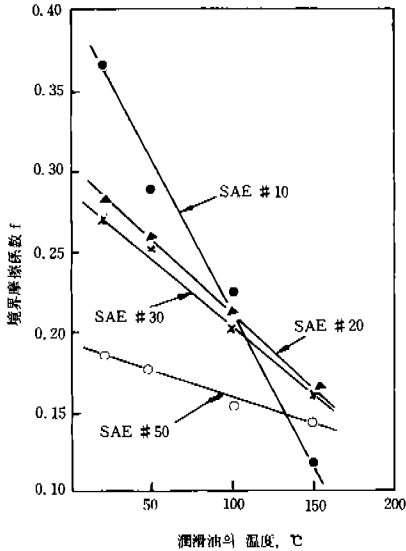


Fig. 9. 各種潤滑油의 境界摩擦係數에 미치는 油温의 影響

| 系筒數 | 보아 | 스트로크 | S/B |
|-----|----|------|------|
| ○ 6 | 84 | 121 | 1.43 |
| × 8 | 86 | 82.5 | 0.96 |

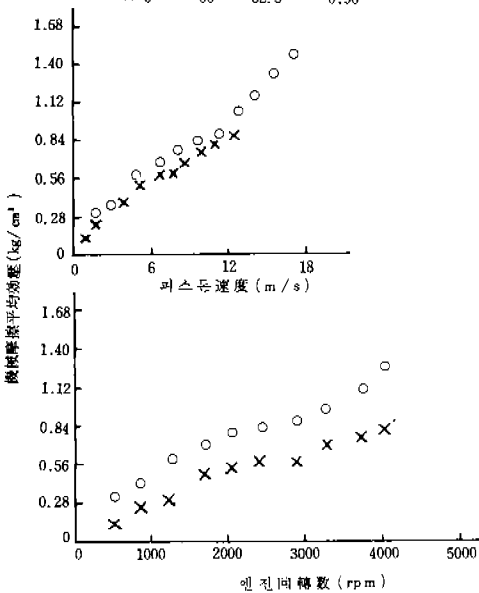


Fig. 10. 機械摩擦에 대한 行程/안지름비의 影響

擦力이 相殺되어 行程/안지름비의 低下의 效果를 減少시킨다.

[5] 베어링幅 및 오일클리어런스의 影響
저어널베어링의 摩擦係數 f는 다음 式으로 나타내진다.

$$f = f_0 + f_1 \left(\frac{d}{c} \right) \left(\frac{\mu N}{P} \right)$$

- 여기서 f_0 : min 摩擦係數
 f_1 : 베어링形狀에 依한 定數
 d : 軸徑
 c : 오일클리어런스
 P : 베어링面壓
 N : 回轉數

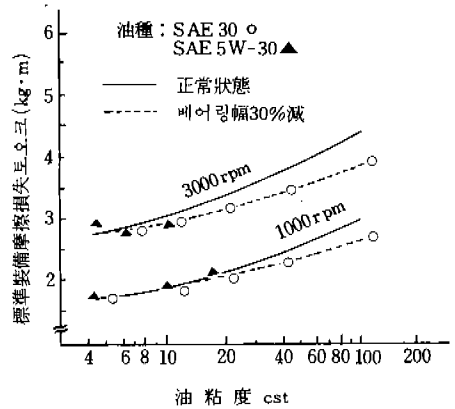


Fig. 11. 連接棒·크랭크베어링幅의 減少가 摩擦損失토크에 미치는 影響

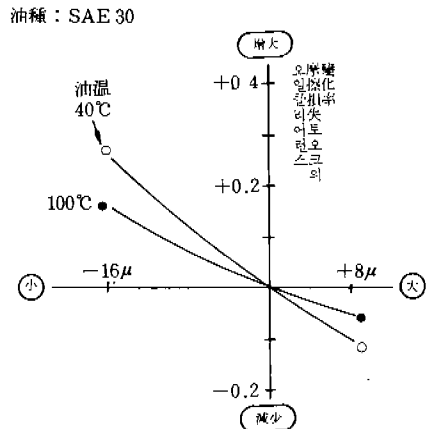


Fig. 12. 오일클리어런스와 摩擦損失토크의 平均變化率의 關係

앞의 식으로부터 베어링幅을 減少시킴에 따라서 베어링面壓이 增加하여 油膜이 얇아져서 摩擦係數가 적어진다. 또한 오일클리어런스를 크게 함에 따라서 摩擦係數는 적어져 摩擦力은 低下한다.

Fig. 11, 12에 크랭크베어링幅을 短縮한 경우와 오일클리어런스를 바꾼 경우의 摩擦損失의 關係를 나타냈다. 다만 自動車 등의 機關에서는 騒音關係로 오일클리어런스를 너무 크게 해서는 안된다.

[6] 機關치수의 影響

비슷한 機關에서 피스톤速度 圖示有效壓이 같은 경우는 摩擦力은 機關치수에 關係없이 同一하다. Fig.13은 MIT의 3台的 유사 機關의 試驗結果이다. 실린더 헤드를 떼어낸 경우 안지름이 크면 摩擦損失이 약간 낮아지는 傾向이 보이지만 實驗誤差가 없으면 熱傳達의 關係로부터 안지름이 커질수록 실린더壁의 油膜溫度가 높아진다.

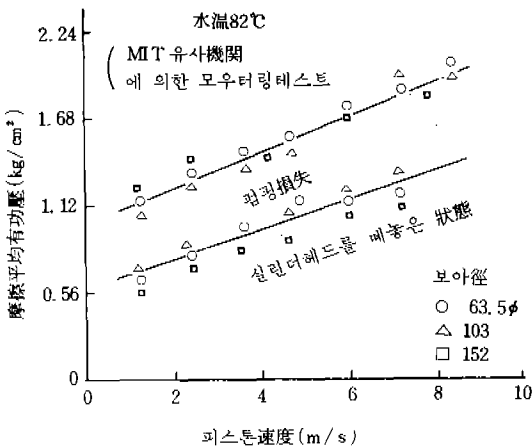


Fig. 13. 機械摩擦에 대한 機關치수의 影響

(7) 모우터링時와 發火運轉時의 摩擦損失의 比較

Fig.14에 나타낸 것과 같이 發火運轉과 모우터링時의 摩擦損失의 傾向이 달라지는 것은 피스톤 및 링背面, 크랭크베어링 등에 作用하는 가스壓이나 溫度上昇에 따른 潤滑油粘度變化 때문

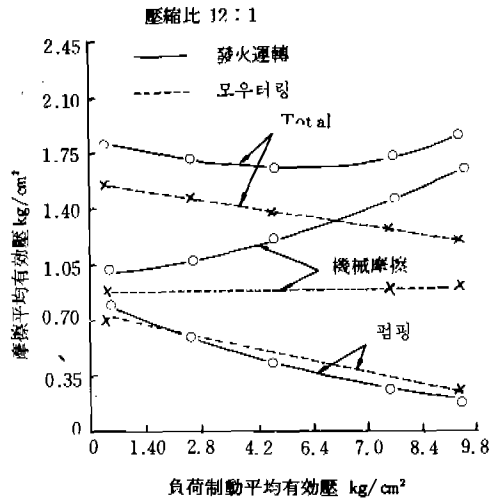


Fig. 14. 負荷制動平均有效壓 kg/cm²

이다. 發火時의 機械摩擦은 負荷의 增加와 함께 커지고 모우터링時는 負荷에 關係없이 거의 一定하다.

(8) 펌프損失의 影響

펌프損失은 소위 摩擦의 問題는 되지 않지만 摩擦損失中에는 큰 比重을 차지한다.

一般的으로 펌프損失을 減少시키는 데는 機關의 給氣比를 增加시키는 方法을 取하면 된다. 이를 위해서는 밸브의 開口面積을 크게 하면 된다. 한편 給氣比를 높히도록 하는 要因이 펌프損失을 함께 增加시키는 것이다. 예를 들면 Fig.15는 吸氣管길이가 給氣比를 增大시키지만 한편 펌프損失을 함께 增加하는 것을 나타내고 있다.

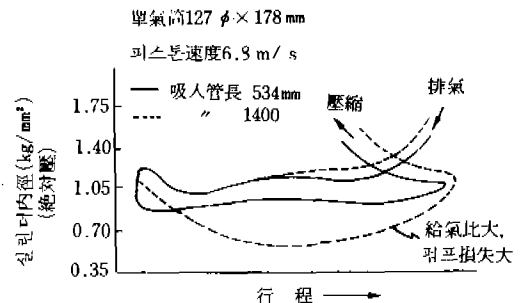


Fig. 15. 吸氣管이 긴 펌프損失에 미치는 影響

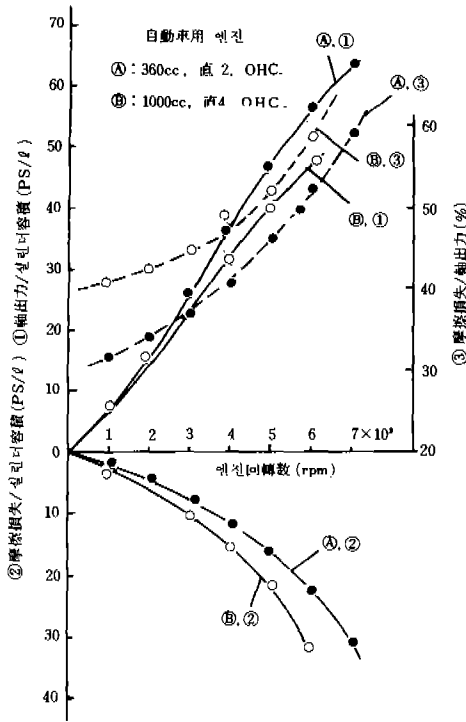


Fig. 16. 內燃機關出力에 대한 摩擦損失

3. 摩擦에 의한 經濟的 損失

內燃機關의 高速, 高出力化를 妨害하는 諸因子로서는

- (1) 피스톤加速度의 制約에 依한 出力限界
- (2) 吸入空氣量의 制約에 依한 出力限界
- (3) 밸브機構의 制約에 依한 出力限界
- (4) 機械摩擦損失의 制約에 依한 出力限界
- (5) 燃燒效率의 制約에 依한 出力限界 등이 있

지만 어떤것 보다도 機械摩擦이 가장 크고 Fig. 16과 같이 最大出力時에서는 軸出力의 50~60% (機械效率로서 0.65~0.75 程度)을 차지하는 것이 普通이다. 그 性質을 充分히 理解하면 어느 程度 低下되지만 그의 大部分은 레시프로엔진에 課해진 不可避의 要素이다.

Fig. 17에 摩擦損失의 경우를 나타냈지만 單純히 軸出力을 低下시키는 程度만이 아니고 燃料消費量增加, 發熱量增大, 摩擦量增加 등에 依한 經濟的 損失이 크다.

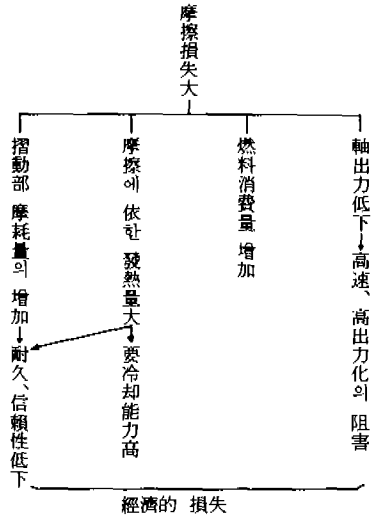


Fig. 17. 摩擦에 의한 經濟的 損失

| 피스톤, 실린더 | | | 배어링 |
|----------|----|------|--------|
| 보아徑 | 行程 | 실린더수 | |
| ● 80 | 64 | 4 | 미끄럼배어링 |
| ○ 82 | 60 | 4 | |
| × 76 | 60 | 4 | |
| △ 63 | 58 | 2 | |
| ⊙ 66 | 52 | 2 | 구름배어링 |

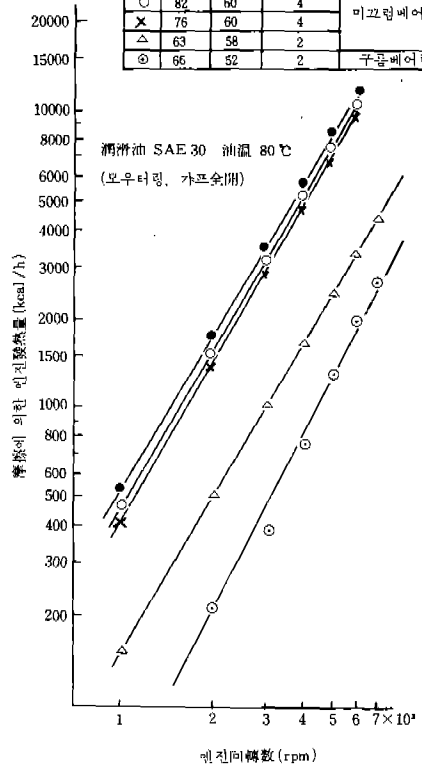


Fig. 18. 摩擦에 의한 엔진發熱量

Fig. 18에 摩擦에 依한 引擎發熱量의 試驗結果를 나타냈다. 1000~1300cc의 引擎에서 10,000 Kcal/h 程度 發熱하지만 이것은 모두 冷却系를 크게하여 處理하지 않으면 안된다. 自動車의 경우는 燃料消費量, 摩耗量增加에 對해서는 말할 必要도 없이 스타이링에도 影響을 미치게 한다.

이러한 對策을 爲해서는 前述한 것과 같이 그 의 代表的인 摩擦損失, 즉 피스톤, 피스톤링에 依한 往復摺動部와 크랭크, 連接棒 베어링 등의 回轉摺動部에서의 摩擦에 대하여 더욱 알 必要

가 있다.

參 考 文 獻

- 曾田; 摩擦と潤滑, 岩波全書(1954).
坂口, 加藤; エンジン摩擦損失低減に関する一考察, トヨタ技術, 24卷, 4号
C. F. Taylor; The International Combustion Engine in the Theory and Practice.
小川; 金屬の潤滑摩耗について, 潤滑, 15卷, 5号