

自動車の 燃費低減에 關한 考察(Ⅱ)

Review on Fuel Economy of Vehicle(Ⅱ)

張 炳 周*

Chang Byung-Ju

5. 燃費向上技術

5-1 輕量化

車輛의 輕量化 手段으로는 小型化, 構造의 合理化, 輕量材料의 적용 확대 등을 생각할 수 있는데 그 외에도 塔載機關의 排氣量의 適正化, 裝備規格의 制限 등 商品企劃의 車種

範圍를 限定하고 차량의 最適設計를 실시함으로 輕量化效果도 기대할 수 있다. 美國車의 小型FF(前輪驅動)化 動向에는 그림 5와 같은 方法을 사용하여 輕量化, 低燃費對策과 동시에 走行性能, 機能의 向上을 도모하며 價格을 유지시키는 사실은 중요한 사실이다.

構造合理化의 有效手段으로 FR에서 FF로의

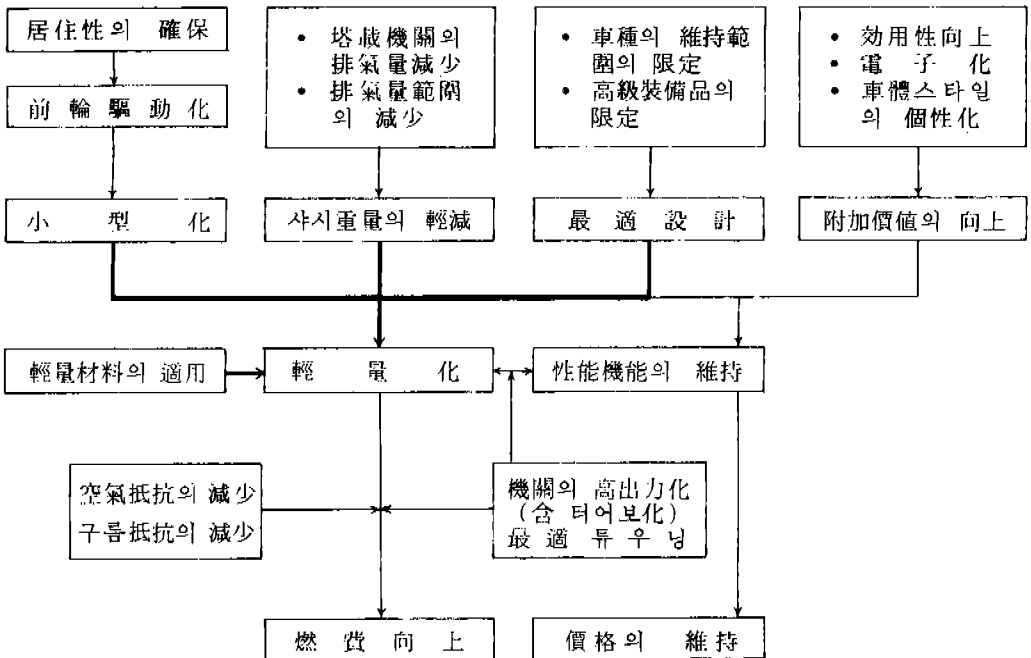


그림 5. 美國車의 輕量化 低燃費對策

변경이 고려되고 있고 이에는 動力系統 자체의 輕量化 외에도 居住空間의 効率向上으로 車體 크기가 줄어들므로 車輛重量의 3~5% 輕量化는 가능하다고 내다본다. 실제 미국차는 '75년에 2,041 kg이 든것이 FF車를 발표한 '80년에는 1,415 kg가 되어 30%나 輕量化한바 있다.

輕量材料의 利用으로는 高張力鋼, Al 등의 輕金屬, ฟู라스틱復合材가 고려되고 있다. 高張力鋼의 利用은 輕量效果가 7~8%로 한정되어 있으나 隣添加材, 二重面材의 등장으로 成形性이 개량되어 外板이나 內板에 폭넓게 이용되는 경향이다.

Al材는 베이스모델에 대해서 Al의 채용을 極限까지 진행시키면 22%의 輕量化가 되지만 生産性의 제한등으로 急伸長은 바라볼 수 없는 상태이다.

플라스틱材는 이미 車體의 5~6% 무게를 차지하고 있으나 다시 유리섬유첨가물의 復合材 등의 利用에 의한 鋼板部品の 代替 및 폴리카 아보네트코오드材의 出現으로 헤드램프등 유리材에 代替品으로 등장하고 있다.

輕量化는 자동차를 구성하는 全部品の 重量 輕減에다 素材價格의 문제까지 함께 생각해야 되므로 現實적으로 대단히 어려운 課題이다.

5-2 空氣抵抗의 減少

공기저항은 식(5)에 표시된바와 같이 車速의 제곱에 比例하기 때문에 低速走行에서는 機關出力의 20~30%이나 高速走行에서는 50%前後가 空氣抵抗에 의해 소비된다. 高速走行時의 燃費改良에는 空氣抵抗의 減少가 有力한 수단이기 때문에 특히 歐州에서는 空氣力學의 으로 우수한 스타일의 實現이 新型車의 開發時 제일 중요한 항목중의 하나이다. 空氣抵抗力, 空氣抵抗馬力은 다음식으로 표시된다.

$$R = C_D \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} V^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$P_R = R \cdot V = C_D \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^3 \dots\dots\dots (7)$$

R : 空氣抵抗力

A : 前面投像面積

V : 車速

C_D : 空氣抵抗係數

ρ : 空氣密度

P_R : 空氣抵抗馬力

P_R을 작게 하려면 前面投像面積A를 작게 해야되는데 결국은 C_D를 줄이는 이외는 方法이 없다. A는 車室內面積을 확보하기 위해서 制限이 있다.

C_D는 車의 형상에 의해 결정되는 係數로 앞으로 改善이 기대된다. 미국에서 판매된 '75~'78년 모델 33台的 測定結果를 보면 C_D의 평균치는 0.53으로 0.46~0.68범위이고, 한편 '68~'76년 모델의 歐州車 91台的 평균치는 0.46으로 0.37~0.52의 범위에 있다. 여기서 두例의 단순비교는 空氣抵抗測定用 風洞의 機差가 있기때문에 그대로 믿을 수 없으나 대체로 歐州車가 高速走行燃費를 중요시하기 때문에 작다. 空氣力學改良의 方法으로 제1단계는 VW社로 대표되는 車體各部分의 最適化形狀이다. 스타일리스트에 의해 原形모델이 제작된 후 車體各部分의 氣流의 剝離가 가장 작도록 小修正을 함으로 空氣抵抗을 감소시키는 方法이다. 國內車나 美國社도 적극적으로 채용되고 있다.

제2단계에서는 車體의 기본형태를 空力的으로 우수한 形狀으로 하고 그 기본형상에서 스타일링을 개시하는 方法이다. 流動속의 물체는 그 背後에 넓은 剝離層이 생기지 않도록 하는 것이다.

VW社의 調査에 따르면 歐美車의 C_D의 평균치는 0.46이고, 제1단계는 C_D = 0.40 부근, 제2단계의 채용에는 C_D = 0.30 부근이 實現되리라고 본다.

5-3 구름抵抗의 減少

타이어의 구름抵抗은 轉動時의 타이어의 트레드部, 사이드部의 히스테리시스損의 大小에 의해 左右되는 것으로, 이 低減을 위해 타이어의 構造, 形狀, 材質面에서 研究가 추진되고 있다.

구름抵抗發生機構로 발생요인은 ①타이어變形에 의한 内部損失, ②타이어와 路面사이의 미끄럼에 의한 摩擦抵抗, ③路面을 變形시키는 抵抗, ④空氣抵抗으로 나눈다. 이 중에서 ①의 變形에 의한 損失이 약 90% 정도를 차지한다.

한편 타이어 구름抵抗의 성질을 그림을 통해 살펴보면 다음과 같다.

速度: 車速이 증가하여 타이어의 變形 速度가 빨라지면 材料의 손실이 많아져 구름저항은 증가된다(그림 6)

負荷荷重: 負荷荷重의 증가로 구름저항은 증가된다(그림 7)

空氣壓: 같은 負荷時 공기압을 증가시키면 변형이 적어져 구름抵抗은 적어진다(그림 8)

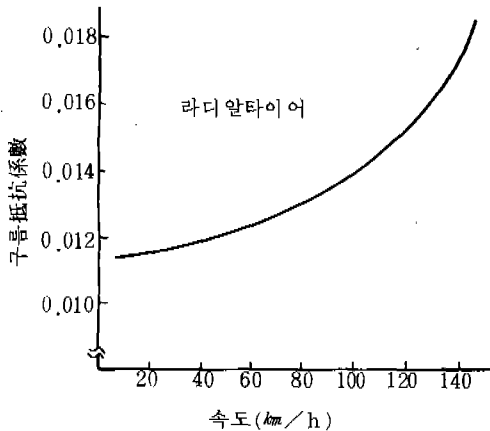


그림 6. 速度와 구름抵抗

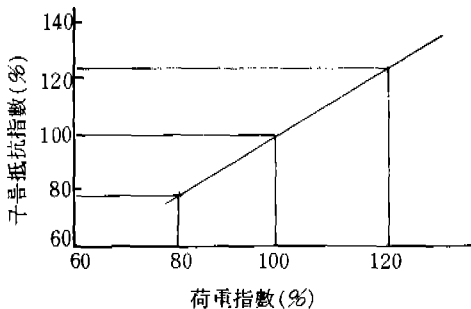


그림 7. 荷重과 구름抵抗

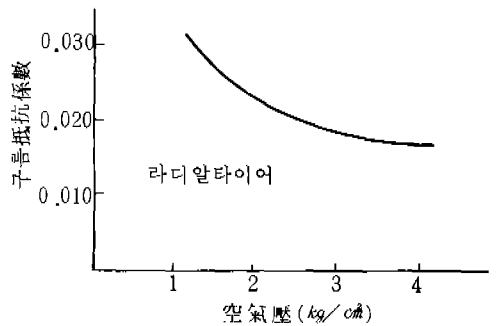


그림 8. 空氣壓과 구름抵抗

슬립·앵글: 自動車가 曲線走行을 할때 타이어 軋面과 타이어의 進行方向에 슬립·앵글이 생겨 橫力이 발생되고 이 橫力의 進行方向成分이 구름저항에 加算되어 구름저항이 증가된다(그림 9)

카아커스構造: 바이아스構造는 라디알構造보다 구름저항이 적다(그림 10)

偏平率: 타이어幅에 대해 타이어 높이의 比를 偏平率이라 하는데 偏平率을 작게하면 타이어의 剛性이 크게됨과 아울러 트레드幅이 넓게 되기때문에 接地길이 가 짧게되어 本質的으로 구름抵抗은 작게 된다(그림 11)

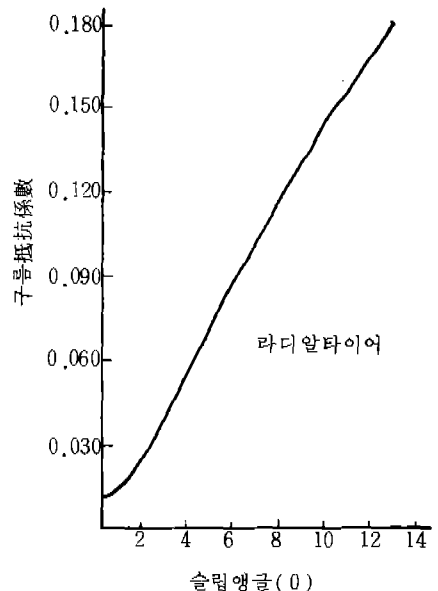


그림 9. 슬립앵글과 구름抵抗

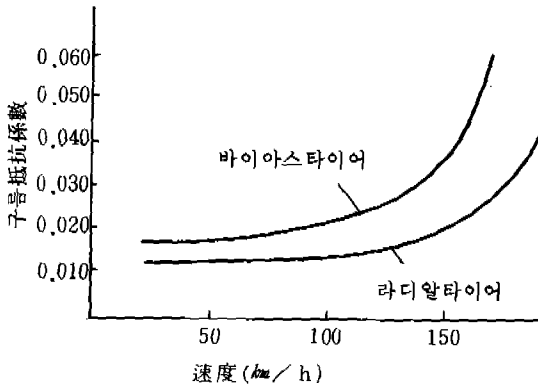


그림 10. 카이커스構造와 구름저항

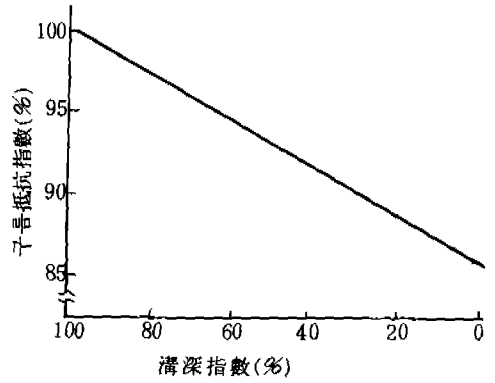


그림 12. 溝深과 구름저항

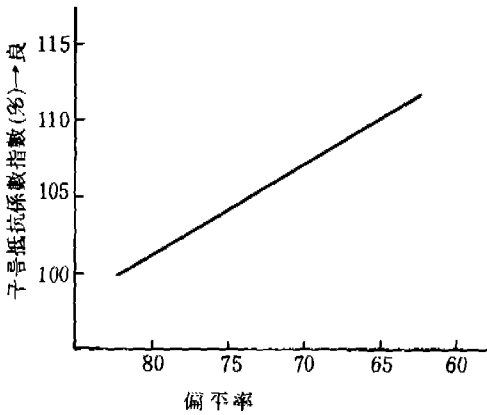


그림 11. 偏平率과 구름저항

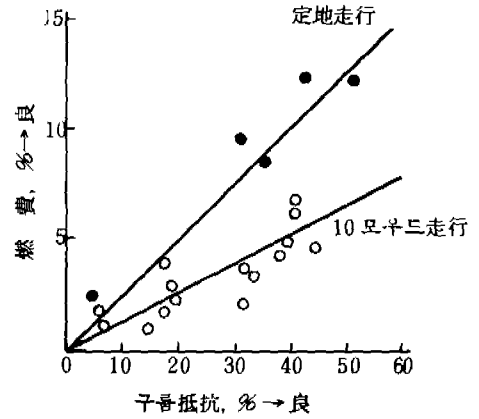


그림 13. 타이어 구름저항과 燃費

트레드溝深 : 타이어 트레드의 溝深이 얇아지면 損失을 발생시키는 體積이 줄어들기 때문에 구름저항은 작아진다(그림 12)

그러므로 구름저항을 줄이기 위해서는 타이어變形에 의한 内部損失을 減少시키면 된다. 따라서 變形에 의한 内部에너지를 줄이고, 使用材料의 損失特性을 줄이거나 損失發生部の 체적을 감소시키는 것이 解決策이다.

대체로 라디알·타이어는 바이아스·타이어에 비교하여 약 30% (40~50 km/h 走行時) 주행저항이 적고 코너링 성능이나 耐摩耗性이 좋고 수명이 길어 裝着率이 해마다 늘어나고 있으며 또 타이어의 구름저항과 燃費관계는 그림 13과 같다. 타이어의 구름저항이 10% 좋으면 10 mode 走行에 1~1.5%, 實地走行에서 약 2.5% 燃費가 向上된다.

5.4 潤滑油에 의한 燃費向上

機關内部의 滑動部の 마찰손실저감은 윤활유를 개선하는 方向에서 노력이 이루어졌다. 기관내부의 滑動部の 윤활상태는 流體潤滑域에 있는 것과 混合, 境界潤滑域에 있는 것이 있어 각각 低減法은 다르다.

流體潤滑域에서는 마찰손실은 윤활유의 粘度의 제곱근에 비례하기 때문에 低粘度化로 마찰손실을 줄일 수 있다. 따라서 7.5W-30의 低燃費오일이 外國에서는 市販되고 있다.

混合, 境界潤滑域에서는 오일의 低粘度化는 마찰손실이 증가되기 때문에 摩擦調整劑로 마찰저감을 檢討하고 있다. 이 摩擦調整劑로는 二硫化모리브덴, 크라화이트 등의 固體潤滑劑, MoDTC (모리브덴·카바이트)와 같은 油溶性有機金屬化合物, 硫化에스텔과 같은 油溶性

表 7. 潤滑油에 의한 燃費向上

走行사이클	高 粘 度		低 粘 度		燃費向上率 (%)	備 考
	기 관	차동기	기 관	차동기		
80 km/h 定常	20 W-50	90	10 W	90	1.8	
"	10 W	90	10 W	80 W	1.1	
"	20 W-50	90	10 W	80 W	2.9	
市街地 - 郊外 (暖始動)	20 W-50	90	10 W	80 W	0	
市街地 - 郊外 (冷始動)	20 W-50	90	10 W	80 W	5.4	
L A - 4	10 W-30	90	10 W	75 W	1.4	Combined 値는 2.3%
H F E T	10 W-30	90	10 W	75 W	3.0	

有機化合物등이 있다.

한편 變速機오일을 일정하게 하고 기관 및 차동기 오일의 粘度를 변화시킨 경우의 燃費向上例가 表 7 이다. 다른 조건을 一定하게 해서 기관오일을 SAE 20 ~ 50 W에서 SAE 10W 로 바꾼 경우 1.8%, 차동기 오일을 SAE 90 W에서 SAE 80 W로 바꾼 경우 1.1%의 燃費를 向上시켰다. 그런데 NHTSA 의 윤활유에 의한 燃費向上豫測은 2%로 보고 있다.

5-5 動力傳達機構에 의한 燃費向上

가솔린機關의 燃料消費率은 운전조건에 따라 다르며 그림 14 와 같이 같은 기관회전수로 보면 低出力에서 燃料消費率이 크고 出力이 높게 될수록 작고 全開상태에 가까우면 出力混合比로 空燃比가 濃厚하게 되기 때문에 다시 크게 된다. 같은 出力으로 走行할 경우 그림의 A點(高速, 低負荷)보다 B點(低速, 高負荷)으로 운전하는 경우가 燃費는 向上된다.

機關의 연료소비율이 좋은 점을 많이 사용하려면 變速機의 多段化가 필요하다. 前進3段에서 4段, 최근에는 高速走行에서 車內騒音의 低減의 要求와 때맞춰 前進5段을 裝着하는 차가 많아졌다. 自動變速機에서도 前進3段에서 前進4段으로 바뀌고 있다. 또 燃料消費率이 좋은 低速, 高負荷域을 사용하도록 最終

減速比를 작게 하고 있다.

燃料消費率이 좋은곳을 항상 사용하려면 無段變速機가 理想이기 때문에 VAN-DOREN 社가 steel belt 에 의한 無段變速機를 개발하고 日本에서 1000cc用의 無段變速機가 세계 최초로 實用化되었다.

最近에는 女性運轉者의 증가나 安全運轉의 見地에서 自動變速機의 裝着이 날로 늘어나는데 보통 자동변속기는 수동변속기와 비교하여 10 ~ 15% 燃費가 不良하다. 그 理由는 自動變速機는 토오크·콘버터와 補助變速機의 結合이며 토오크·콘버터의 損失이 燃費를

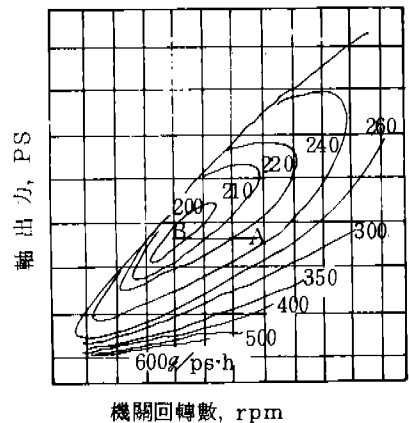


그림 14. 가솔린機關의 等燃料-消費率曲線

惡化시킨다. 그 해결책으로 토오코·콘버터의 効率向上외에 發進과 變速時이외는 기관의 出力側과 補助變速機를 直結하는 直結클러치가 있는 固着機構가 개발되어 보급되고 있다.

5-6 機關의 燃料消費率의 向上

5.6.1 圖示熱效率의 向上

壓縮比: 오토사이클의 理論熱效率은 $\eta = 1 - (1/\epsilon)^{K-1}$ 가 되고 壓縮비가 클수록 理論熱效率은 向上된다. 實機關의 燃料消費率과 壓縮比관계는 壓縮비가 클수록 燃料消費率은 向上되나 1氣筒當 행정체적이 작을수록 向上率은 작게된다. 그 原因은 같은 기관에서 壓縮비를 크게하면 燃燒室形狀이 扁平하게 되고 상대적인 冷却面積이 크게되어 冷却部損失이 증가되기 때문이다.

가솔린機關은 全開運轉時의 노킹으로 壓縮비가 制限된다. 1氣筒當 행정체적이 클수록 노킹은 일어나기 쉽고 壓縮비를 크게할 수 없다. 따라서 앞으로는 燃燒室改良에 의한 메카니칼·옥탄價向上, 안티노크성이 강한 燃料의 개발, 可變壓縮比機構의 개발 및 노크·센서에 의한 노크機出과 點火時期制御에 대해 努力을 기울여야 할것이다.

冷却損失의 低減: 기관에 공급되는 燃料에너지의 1/3이 冷却損失로 방출된다 이것을 有效하게 사용하고자하는 생각은 當然하며 특히 最近에 세라믹構造의 進歩로 斷熱機關이 거론되고 있으나 乘用車機關으로 斷熱機關 적용은 어려운 문제로 생각하고 있다.

최근에는 내연기관의 燃燒過程을 中心으로 性能을 예측하는 數學的모델의 精度가 높게되어 直接 실험이 곤란한 경우에도 性能豫測에 사용되고 있다. 이 數學的모델로 斷熱하여 燃燒室壁溫을 높게하면 冷却損失熱량이 크게 줄어든다고 밝혔다.

그런데 가솔린機關의 경우 燃燒壁溫의 高温化는 全開運轉時의 노킹을 일으키기 쉽기 때문에 壓縮비를 低下시켜야 한다. 壓縮比低下에 의한 燃料消費率의 惡化가 크고 斷熱비가

燃費와는 평형이 되지 않는다.

急速燃燒와 EGR: EGR이나 稀薄空燃比를 사용하여 NO_x를 低減시킬 경우 急速燃燒로 NO_x 低減과 燃料消費向上을 同時에 實現할수 있었다. 그림 15는 EGR의 경우로 急速燃燒에 의해 NO_x 低減限界的 擴大와 燃料消費率 向上이 兩立됨을 表示하고 있다.

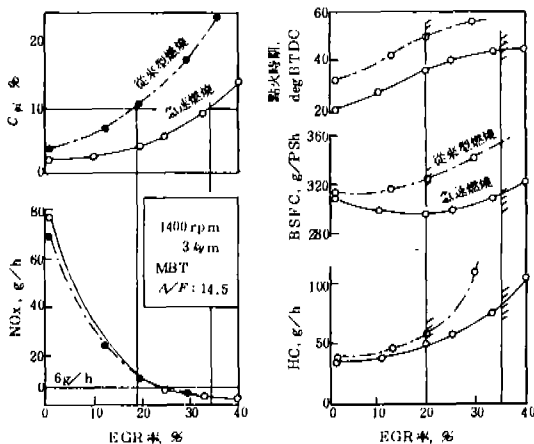


그림 15. 急速燃燒에 의한 NO_x 低減限界的 擴大와 燃料消費率의 向上

EGR이나 稀薄空燃比가 燃料消費率에 미치는 影響을 向上要因과 惡化要因으로 나누어 생각하여 본다. 向上要因으로는 作動가스량의 증가로 吸氣管内壓力이 大氣壓에 接近됨에 따르는 펌프損失의 低減, 作動가스量증가와 燃燒室內 가스比熱의 變化가 熱容量을 증가시킴으로 燃燒室內 가스溫度가 低下, 結果적으로 冷却損失과 排氣損失이 감소된다.

惡化要因으로는 燃燒速度的 低下로 사이클 平均의 等積度의 低下, 사이클變動의 增加가 있다. 하지만 燃燒를 빠르게 하면 사이클變動을 작게하고 惡化要因을 줄이기 때문에 結果로 燃料消費率은 向上된다.

이러한 燃燒의 實現方法으로는

① 燃燒室內 混合氣의 亂流強化로 인한 亂流燃燒速度的 增大(渦流, 스퀘쉬등에 의한 가스流動의 強化)

② 火炎面面積의 증대로 인한 燃燒期間의 短縮(燃燒室形狀, 點火플러그位置의 最適化및

復數點火등)

③ 副燃焼室을 설치하여 初期燃焼를 安定化함과 同時에 火災噴流에 의한 火災面面積의 增大와 混合氣의 亂流強化로 急速燃焼를 시킨다.

稀薄燃焼 : 최근의 燃焼改善研究와 여러가지 制御法의 진보에 따라 그림 16 과 같이 空燃比 24 ~ 25 에서 연소를 할 수 있게 되는것 같다. 여기까지 稀薄化된다면 NO_x의 규제치를 만족하며 또 燃料消費率이 向上되는 시스템이 實用可能하게 된다. 이러한 稀薄化로 燃料消費率의 向上은 5 ~ 8%에 이른다.

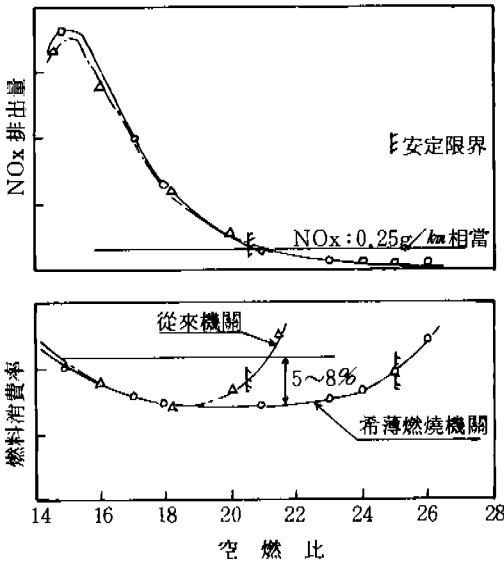


그림 16. 稀薄化에 의한 燃料消費率의 向上

稀薄空燃比 燃焼機關에서는 NO_x를 만족하는 범위와 稀薄安定度限界사이에서 空燃比를 설정하는 문제가 重要な 課題가 되고 있다.

펌프損失의 低減 : 吸入行程中の 어느 時點에서 吸氣壓力을 P 라 하면 P는 식(8)로 표시된다.

$$P = \frac{GRT}{V} \dots\dots\dots (8)$$

G : 吸入混合氣

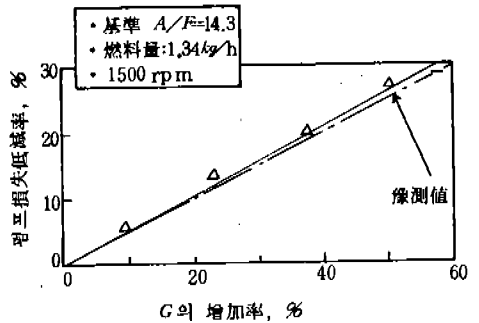
T : 混合氣溫度(K)

V = SA+C (S : 行程길이, A : 피스톤上面面積, C : 잔극體積)

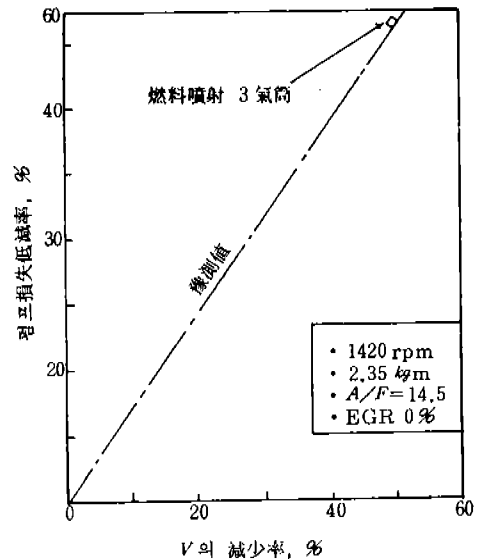
R : 가스定數

吸入損失을 줄이려면 出力을 변화시키지 않고 P를 크게하는데 식(8)에서 G의 增加, V의 減少, S의 短縮, T의 上昇을 생각해야 한다. 이들 因子를 變化시키는 具體的인 方法으로는 다음과 같이 생각할 수 있다.

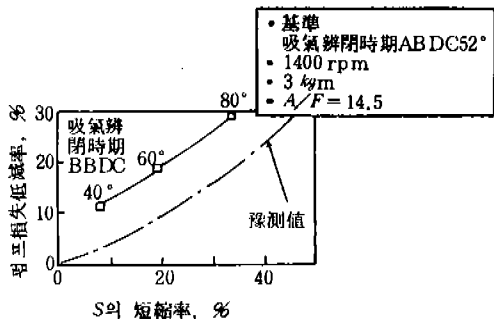
- (a) 混合氣의 稀薄化로 G의 增加
 - (b) 機關의 小型化 및 作動氣筒數의 減少로 總行程體積 V의 減少
 - (c) 吸氣밸브의 閉時期를 吸氣下死點前에 닫아 有效吸氣行程길이를 短縮시켜 S를 短縮
 - (d) 吸氣를 加熱하여 吸氣溫度T의 上昇
- 위의 (a)~(d)에 대응하는 펌프損失의 低減率을 표시하면 그림 17 과 같다.



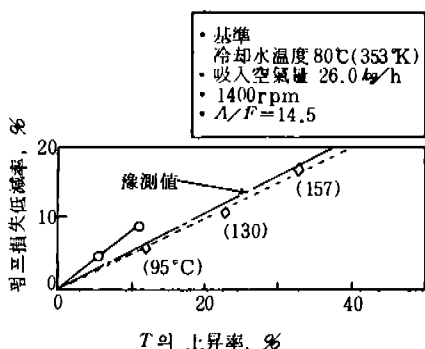
(a) 因子G에 의한 펌프損失



(b) 因子V에 의한 펌프損失의 變化



(c) 因子S에 의한 펌프損失



(d) 因子T의 영향

그림 17. 各要因에 의한 펌프損失低減率

5.6.2 機械效率의 向上

本體摩擦損失은 피스톤系와 크랭크軸이 크다. 마찰손실의 低減으로 効果가 큰 항목은 ① 피스톤·링의 張力低下 ② 動벨브系의 벨브스프링의 荷重減少 ③ 피스톤의 滑動面積의 低減 ④ 크랭크軸의 幅, 徑의 減少 ⑤ 往復운동부분의 輕量化를 들 수 있다. 摩擦損失低減에 대한 効果는 10 mode에서 마찰손실을 10%저감시키면 燃費는 약 2.5%低減된다는 자료가 있다.

補機驅動損失에서 팬의 마찰손실이 10%정도 차지하고 있다. 그러나 FF化된 차에는 電動팬이 되어 있어 필요할때에만 驅動토록 하고 있다.

補機驅動中에서 가장 손실이 큰것은 車內空調用 압축기이다. 中速一定速走行에서는 10~20%, 低速정체시에는 20~30%의 燃費增

가가 있어 압축기의 高効率化가 필요하다.

5.6.3 機關의 小排氣量化

美國車는 차량의 小型化에 의한 차량중량의 低減과 함께 機關의 排氣量, 氣筒數도 바뀌고 있다. 배기량은 '75년은 5,370 cc에 비해 '82년에는 3,270 cc로 2,100 cc가늘어들고 있다. 여기따라 氣筒數도 8氣筒에서 6氣筒, 6氣筒에서 4氣筒으로되어 氣筒數가 감소됨으로 기관의 마찰손실, 냉각손실이 줄어 燃料消費率이 向上된다.

同一出力, 同一回轉數로 비교한다면 小排氣量기관은 大排氣量기관보다 燃費가 向上된다. 이것은 펌프손실이나 마찰손실이 적기 때문이다. 例로 40 km/h 一定走行이나 아이들링을 4氣筒 1.8 l가솔린기관과 1.3l기관에서 운전할 경우의 연비를 비교하여 볼때 각각의 운전조건에서 11%, 27%燃費가 向上된다.

5-7 아이들링 및 減速時燃費의 低減

車의 주행에서 走行에 기여하지 않고 燃料를 소비하는 경우는 아이들링과 減速이다. 아이들링은 그림 18에서와 같이 아이들링回轉數를 낮게하면 燃費가 줄어드는데 實用上 견딜 수 있는 범위내에서 回轉數를 낮게한다. 市街地走行中の 아이들링時間比率은 30~35%이며 이 아이들링시간중에 기관을 정지시키고 走行直前에 기관을 再始動하는 아이들링停止시스템이 外國에서는 판매되고 있다. 이로 인한

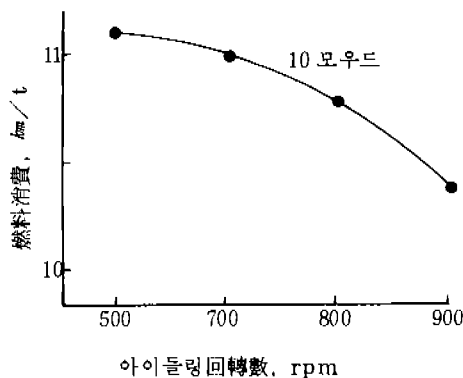


그림 18. 아이들링回轉數와 燃料消費

燃費向上은 10 ~ 15 %이다. 그러나 機關停止 時的 補機驅動이나 暖房 및 축전지의 充電 등 문제가 있다.

減速中에는 연료를 機關에 공급하지 않도록 하는 燃料遮斷方法이 많은 機關에 채용되고 있다.

6. 結 言

燃費의 向上은 기관에 있어 옛날부터의 課題이고 出力, 排氣, 價格, 資源 등과 함께 機關研究의 계속된 目標로 볼 수 있다.

최근 10 여년간 乘用車燃費(CAFE 值)는 미국에서는 거의 2 배, 일본만 해도 35 %란 큰 값으로 向上되었다. 그러나 最近의 미국 燃費 傾向은 燃料事情의 好轉과 需用家가 燃費보다는 快適性이나 쉬운 運轉性을 선택하게 됨에 따라 燃費向上에 대한 개발의욕이 低下되고 있다고 한다.

燃費向上은 차량이 가져야할 基本性能의 하나이며 高速化, 運轉性, 低騒音 등의 性能과 均衡을 유지하면서 向上에 대한 努力은 계속해야 할 것으로 본다.

여기서 說明한 技術內容은 에너지資源 절약이란 관점에서 技術情報로 소개하였음을 알려드립니다.

參 考 文 獻

1. B.H. Eccleston, R.W. Hurn, Ambient Temperature and Trip length Influence on Automotive Fuel Economy and Emissions SAE 780613 pp. 2251-2260.
2. Clayton Lapointe, Factors Affecting Vehicle Fuel Economy SAE 730791 pp. 2702-2711.
3. T.M. Naman, Automotive Fuel Economy-Potential Improvement Through Selected Engine and Gear Lubricants SAE 800438 pp. 1-20.
4. Thomas C. Austin, Karl H. Hellman, Passenger Car Fuel Economy Trends and Influencing Factors SAE 730790 pp. 2678-2701.
5. J.D. Murrell, J.A. Foster, and D.M. Bristor, Passenger Car and Light Truck Fuel Economy Trends Through 1980 SAE 800853 pp. 1-94.
6. 金原, 杉浦, 自動車의 燃費低減について の 一考察 自動車技術 Vol. 32, No.5 pp. 379~387 (1978)
7. 小野田陸男, カソリンエンジンの 燃料消費低減策について 自動車技術 Vol. 33, No. 5 pp. 308~315 (1979)
8. 町田忠太郎, 自動車潤滑油의 燃費에 及ぼす影響 自動車技術 Vol. 33, No. 5 pp. 317~322 (1979)
9. 井川昭夫, 自動車의 燃料消費低減について 自動車技術 Vol. 33, No. 5, pp. 301~307
10. 難波江延治, 走行パターンと燃費 內燃機關 Vol. 18, No. 224 pp. 71~76 (1979)
11. 山田, 伊東, 自動車의 燃費改良について 自動車技術 Vol. 34, No.10 pp. 1004~1012 (1980)
12. 絹谷, 堀田, 宮里, 車輛輕重化 動向 自動車技術 Vol. 34, No. 10, pp. 1044~1051 (1980)
13. 原田忠和, 低燃費化のためのタイヤ技術動向 自動車技術 Vol. 37, No. 3 pp. 260~265 (1983)
14. 松尾, 新保, 空氣抵抗と 省燃費 自動車技術 Vol. 37, No. 3 pp. 255~260 (1983)
15. 中島泰夫, 乘用車의 燃費低減 についての 諸問題
 - (I) 機械の研究 Vol. 36, No. 8 pp. 43~49 (1984)
 - (II) 機械の研究 Vol. 36, No. 9 pp. 40~44 (1984)