

디젤機關의 斷熱化에 依한 燃料事情에의 對應

Capabilities of Heat Insulated Diesel Engine for Future Fuel Requirement

趙 珍 鎬

(漢陽大學校 工大)

1. 머 리 말

燃料의 價格이 높아지고 代替燃料의 開發이 急速度로 進展되고 있는 오늘날 디젤機關은 熱效率의 向上과 將來燃料에의 對應이 중요한 課題로 되어있다.

代替燃料로서 有望視되고있는 石炭液化燃料, 알코올, 셸오일(Shell Oil) 등이 앞으로 實用化되면 製法이나 플랜트의 規模에 따라서는 價格뿐만 아니라 品質에도 큰 차이가 있게되고 粘度나 比重의 變化등으로 大幅의인 세단價의 低下가 豫想되어서 現狀 디젤機關의 燃燒方式 그대로는 이에 對應 할 수 없게될 可能性이 높다.

이들에 對應하기위한 하나의 方法으로서 機關을 斷熱化함으로써 冷却損失을 低減시키고, 높아진 排氣에너지를 軸出力으로서 다시 回收하는 斷熱터보 컴파운드엔진의 概念이 있다. 이렇게 하면 熱效率의 大幅의인 改善과 아울러 斷熱化하여서, 연소실의 壁溫이 높아지므로 低세단價 燃料의 燃燒도 可能하게된다.

斷熱기관的 着想은 1940年代 용커어스社의 2-사이클 水平對向기관에 이미 一部 採用되었었고, 또 터보 컴파운드에 의한 排熱의 回收도 Lycoming社 R 3350 엔진 등에서 實用化되었던 例가있다. 그러나 이들을 同時에 採用하여 大幅의인 燃費低減效果를 追求한 實際의 例로서는 近年 美國 陸軍의 委託으로 Cummis社가 研究成果를 發表하고 있는것 뿐이다.⁽¹⁾

그리고, 日本의 Komatsu社가 또한 獨自의으로 이 斷熱터보 컴파운드기관의 研究를 하고 있다.

다음은 그 機關을 紹介하고 또한 多種燃料性等 斷熱엔진의 特性에 대하여 설명한다.

2. 斷熱터보 컴파운드 기관

2-1 시스템의 概念

表 1은 베이스가 되는 在來形 디젤기관의 諸元이고, 그림 1은 一般的인 디젤기관의 熱精算을 표시한 것이다. 표에서 보는바와 같이 過給機付 디젤機關은 排氣와 冷却水로의 放熱量이 全供給에너지의 약 2/3를 차지하고 있으며 이들을 低減시켜서 有效軸出力으로서 回收하고자 하는 것이 斷熱터보 컴파운드 기관이다.

表 - 1 베이스기관 主要諸元

種 類	水冷 4 사이클 過給機付
보어 × 스트로크 × 실린더數	105 × 125 × 6 (mm)
定格 出力/速度	162/2,500 ($\frac{PS}{rpm}$)
壓 縮 比	16 : 1

機關의 斷熱化된 部分은 그림 2에 표시되어 있으며 주로 실린더헤드, 실린더라이너, 피스톤에 대하여 하고 있다. 그 方法은 燃燒室 및 排氣通路壁面에 熱傳導率이 낮은 材料, 例로서 세라믹(Ceramic) 등을 使用함과 同時에 外部로부터의 強制冷却을 廢止하는등의 方法을 取하고 있다.

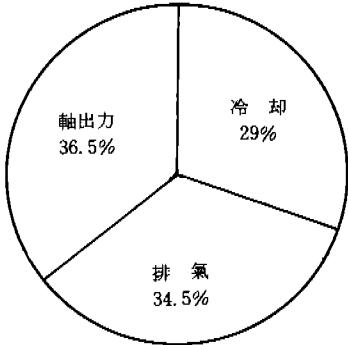


그림 1 一般的인 過給디젤기관의 熱精算例

燃焼室 壁面은 斷熱의 정도에 따라서 高温化 되므로 材料強度, 耐腐蝕性 및 潤滑등이 限界内 에 들도록 그 材質과 斷熱方法등을 選擇하여야 한다.

排氣에너지의 回收는 그림 3에 표시된 바와 같이 터보 차아저의 下流에 排熱回收터보빈을 設置하여 回轉토키를 減速기어, 流体커플링등을 거쳐서 出力軸에 되돌리도록 되어있다.

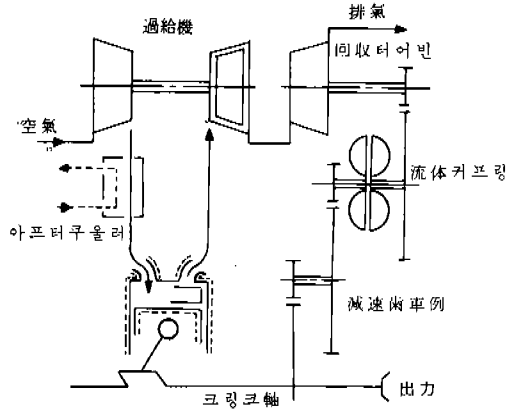


그림 3 斷熱터보 콤파운드기관

2-2 性能豫測 (시뮬레이션 計算)

斷熱化 및 터보 콤파운드化에 의한 機關의 性能과 燃焼室周圍의 部品溫度를 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 豫測한다.

計算條件으로는 燃焼에 의한 熱發生率 (Cal/deg)의 패턴 (Pattern)을 베이스엔진 그대로를 사용하였다. 그리고 그림 4, 5는 燃焼室의 壁面材料나 外部로부터의 冷却條件을 變更하는 것을想定하여 機關名部로부터의 放熱量의 低減率 (斷熱度)과 燃焼室壁面溫度의 關係를 求한것을 圖示한 것이다.

計算은 燃焼室壁溫을 固定하고, 機關의 사이클 시뮬레이션에 의하여 各部材로부터의 放熱量을 求한 것이다. 또한, 피스톤의 頂面溫度는 均一한 것으로 하고 실린더 라이너는 軸方向으로 7部分으로 分割하여 溫度分布를 賦與한다.

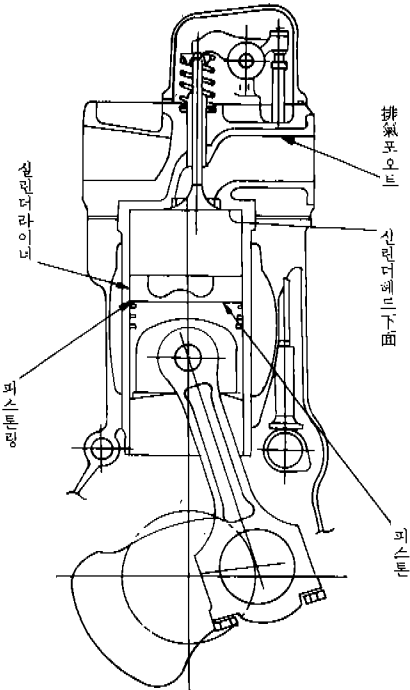


그림 2 엔진 斷熱化部品

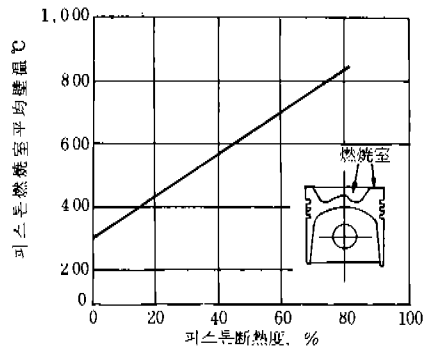


그림 4 피스톤溫度 (計算值)

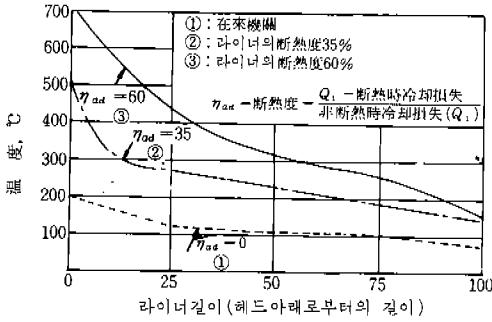


그림 5 라이너의 斷熱度

그리고, 斷熱度는 아래와 같이 정의한다.

$$\text{斷熱度} = \frac{\text{斷熱前的 放熱量} - \text{斷熱後的 放熱量}}{\text{斷熱前的 放熱量}}$$

즉, 斷熱度 = 0 이 베이스엔진(水冷)의 狀態를 나타내고, 斷熱度的 上昇에 따라 表面溫度가 현저하게 높아짐을 알 수 있다.

機關全體의 斷熱度(總合斷熱度)와 定格點燃料消費率을 比較하면 그림 6 과 같이 된다. 이 경우, 總合斷熱度和 燃料消費率 共히 在來기관을 0 으로 하였을 때 이에 對한 相對값으로 表示하고 있다. 機關 單位出力에 대하여 冷却팬을 包含하는 正味出力에서는 總合斷熱度가 커짐에 따라 팬의 所要動力이 減少되고 燃料消費率의 改善效果가 일단 크게 나타난다. 斷熱化만으로 排氣에 너지를 回收하지 않는 경우라도 팬馬力低減의 效果를 더하면 약 12g/psh(斷熱度 60%일 때)의 燃料消費率 低減效果가 期待된다.

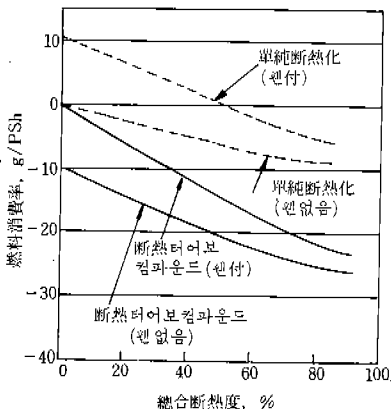


그림 6 기관斷熱度和 燃料消費率(시뮬레이션計算)

3. 기관의 斷熱化

2. 1 斷熱度的 目標

斷熱度는 熱傳導率이나 冷却을 어디까지 내릴 수 있는가 하는 것과 同時에 壁面의 溫度上昇이 어느 溫度까지 許容될 수 있는가에 따라서 決定된다. 표 2 는 在來 機關에서의 冷却損失量의 比率(摩擦損失分을 包含하지 않는다)을 各 燃燒室 部品別로 나타낸 것이다. 그리고, 各 燃燒室 部品の 斷熱度的 設定값도 同時에 표시되어 있다.

表-2 燃燒室部品の 斷熱度(設定值)

No.	部 品	在來機關의 冷却 損失比率, %	斷熱度, % 設定值
1	피스톤	27	75
2	라이너	40	35
3	배 排氣오우트	9	90
4	드 燃燒室面	20	75
5	其 他	4	75
燃 燒 室 總 計		100*1	60*2

*1. 機關摩擦損失에 대한 發熱分은 包含하지 않음.

*2. 各部의 斷熱度에 따라 補正한 後的 總合斷熱度

本 機關에서는 潤滑面에서 機關의 運轉上 가장 問題로 되는 실린더라이너 溫度를 되도록 抑制하기 위하여 실린더의 斷熱度는 낮게하고 다른 部分의 斷熱度を 높게 잡도록 目標을 정하였다.

이것이 實現되면 그림 1 에 표시된 바와 같은 熱精算의 機關으로는 軸出力이 2% 增加하여 38.5%로, 排氣損失은 12% 增加하여서 46.5%로 되고, 나머지가 運轉유 그밖의 放熱로 되어서 燃料消費率로 약 5.4%(正味出力으로서의 比率)改善되는 것이 된다. 그런데 이 값들은 排熱을 回收하지 않은 경우의 값들이다.

3. 2 斷熱化部品

(1) 피스톤

세라믹크라운과 알루미늄製の 스커어트를 보울트로 結合한 콤포지트型 피스톤을 採用하였으며 그림 7은 피스톤 Ass'y의 사진이다.

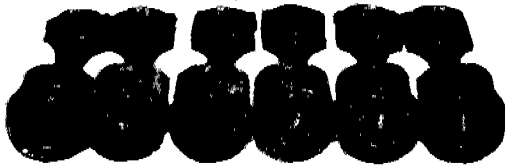


그림 7 斷熱피스톤(세라믹콤포지트)

세라믹의 材質은 耐熱衝擊性, 高溫強度, 熱傳導率等 斷熱엔진用 피스톤으로서 우수한 特性을 가진 窒化珪素(Si₃N₄)를 選定하였다. 표 3은 高溫기관部材로서 一般의 珪素에 對하여 메이커가 提示한 物性值을 표시한 것이다.

窒化珪素는 耐熱衝擊性이 높고 韌性 強度도 斷熱기관에서의 使用範圍인 800~900℃에서는 炭化珪素보다 우수하다. 그 밖의 物性值 로서는 必要條件을 充足시키고 있으나 實用上으로는 몇 가지의 問題가 있다.

그 중에서 가장 큰 것은 窒化珪素뿐만 아니라 一般 세라믹의 경우 製造時 內在하는 微細한 龜裂이 使用時 進展하여 破壞에 이르는 일이 많고 따라서 使用前 龜裂의 發見이 重要한 課題이다.

그를 위하여 여러 研究機關 등에서 여러가지 非破壞檢査法이 試圖되고 있으나 아직 實用化의 領域까지는 到達하지 못하고 있는 實情이다.

그래서 지금으로는 하나씩 實際相當의 負荷를 걸어서 個別 檢査를 하여 要求品質을 確認하고 있는 것이 現狀이다. 實際엔진에서는 표 3 중의 常壓燒結 및 핫프레스의 窒化珪素를 써서 시험을 하고 어느것이나 問題가 없었다.

그중 핫프레스材로서 高負荷條件(軸平均壓力 15kg/cm² 2500rpm, 最高筒內壓 130kg/cm², 冷却水없음)으로 250時間의 連續運轉을 完了하고 있으며, 세라믹 콤포지트 피스톤의 機能上的 實用性이 實證되고 있다. 그림 8은 이 運轉을 完了한 뒤의 피스톤이다. 在來의 機關보다 카아본의 附着이 많으나 運轉上的 支障은 없는것으로 되어 있다.

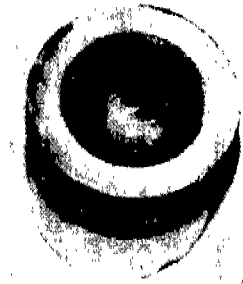


그림 8 세라믹피스톤(250時間시험後)

표 - 3 피스톤用 세라믹材의 特性

項目	材 質	세 라 믹				
		Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	SiC	SiC
材 質 記 號		Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	SiC	SiC
製 法		常壓燒結	常壓燒結	핫프레스	常壓燒結	핫프레스
영 率 (kg/mm ²)		2.7×10 ⁴	(2.4×10 ⁴)	3.0×10 ⁴	4.0×10 ⁴	4.8×10 ⁴
포 아 손 비		(0.24)	(0.24)	-	-	-
密 度 (kg-sec ² /mm ⁴)		0.32×10 ⁻⁹	0.36×10 ⁻⁹	0.33×10 ⁻⁹	0.32×10 ⁻⁹	0.33×10 ⁻⁹
線 膨 脹 係 數 (1/℃)		3.3×10 ⁻⁶	3.4×10 ⁻⁶	3.0×10 ⁻⁶	4.2×10 ⁻⁶	5.3×10 ⁻⁶
熱 傳 導 率 (kcal/mmh℃)		0.0108	(0.0108)	0.013	0.033	0.025
굽 힘 強度 (kg/mm ²)		65 (800℃)	59 (800℃)	100 (800℃)	40~45 (1,200℃)	50 (1,200℃)
壓 縮 強度 (kg/mm ²)		-	-	-	180~200	-

(2) 실린더 라이너

실린더 라이너의 斷熱度는 潤滑性을 確保하기 위하여 높게 잡을 수 없으므로 여러가지로 斷熱方法을 바꾸어서 斷熱度를 調節한다. 그림 9에 機關의 運轉條件變化에 따른 피스톤 上死點의 톱링位置에 相當하는 라이너 미끄럼 운동면의 溫度變化를 표시한다. 定格點에서는 400℃ 以上으로 되어있으며 在來기관의 許容值를 크게 넘고 있어서 耐熱融着性, 耐摩減性등의 高溫下에서의 미끄럼性能을 確保하기 위하여, 라이너와 피스톤링에 特殊한 材料를 採用하고, 더우기 特殊한 表面處理를 한다. 그리고, 潤滑油도 礦物油 및 合成油 또한 거기에 各種의 添加劑를 씌으로써 蒸發特性, 淸淨分散性 및 總合的인 高溫 潤滑特性을 評價, 選定하여 使用하고 있다.

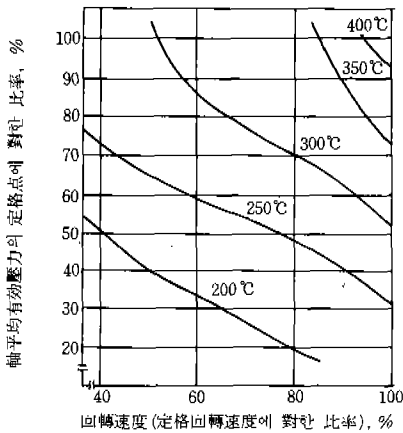


그림 9 라이너溫度 (測定位置는 피스톤 上死點時의 톱링의 닿는곳)

(3) 실린더 헤드

실린더 헤드로부터의 放熱量도 대단히 크므로 이 部分의 斷熱도 중요하다.

헤드部分은 可動部로서 밸브驅動機構, 燃料噴射裝置가 있고, 斷熱에 의한 高溫化로 부터 이들을 보호하여야 한다. 실린더 헤드는 斷熱化를 위하여 冷却水 通路를 완전히 없게하고, 排氣포트 및 燃燒室面에 斷熱材를 鑄込한다.

無冷却水化에 따라서 高溫에 接하는 燃料噴射用 노즐은 潤滑油에 의하여 直接冷却을 함으로써, 그 性能과 耐久性을 確保하고 있다. 헤드의

斷熱度의 測定은 대단히 어렵고 精確하게 把握할 수 없으나 燃燒가스에 接하는 面의 溫度測定으로부터 排氣포트는 약 90%, 헤드 下面에서는 약 60%로 推定된다.

4. 排熱回收시스템

排氣에너지의 回收시스템은 터어보 차아저의 下流에 設置한 파워 리커버링 터어빈과 터어빈 出力을 出力軸에 되돌리기 위한 減速比 24 : 1의 減速齒車列, 그것에 크랭크軸의 비틀림振動을 吸收하여 高速기어를 保護하기위한 流体커프링으로 되어있다.

設計는 시스템의 機械效率를 確保하기 위하여 베어링의 形狀과 冷却, 潤滑方法뿐만 아니라 流体커프링의 미끄럼率等の 最適化에 주의를 傾注하였다. 同시스템의 單體테스트(기관에 裝着하지 않은 상태)에서 求한 機械效率는 定格點에서 약 90%이다. 現在까지는 1000時間 以上の 運轉實績이 있으나 齒車나 커프링의 耐久性에 關한 基本的인 問題는 생기지 않고 있다.

5. 斷熱기관의 燃燒

5. 1 斷熱燃燒

燃燒室을 斷熱化하여 壁溫을 높은狀態에서 燃燒을 시키게되면 從來의 水冷디이젤機關과는 다른 燃燒過程을 밟는다.

그 例로서 베이스엔진의 그대로의 燃料噴射系 燃燒室 및 同一燃料噴射時期下에서, 運轉한 機關의 실린더內 壓力을 基礎로 하여, 熱發生率의 概略值를 計算하면 水冷機關과 斷熱엔진과 그림 10과는 相違하게 표시된다. 즉, 斷熱燃燒는

- a) 初期熱發生率이 낮아진다.
- b) 主燃燒期間中의 熱發生率이 떨어진다.
- c) 後期熱發生率이 높아지고, 燃燒期間이 길어진다.

이 主要한 原因은 燃燒室 溫度가 높아져 있으므로 着火遲延期間을 顯著하게 短縮시킨다. 이로써 실린더內에서 形成되는 空氣와 噴霧와의 混合量이 적어지고 初期 熱發生率이 低下된 것으로 생각된다.

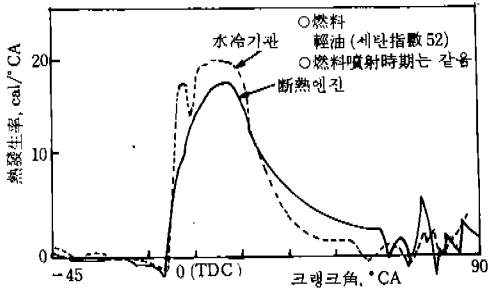


그림 10 斷熱엔진의 熱發生率 (나쁜例)

그러므로 壓力上昇率(dp/deg)은 낮아지고, 騒音에 對하여는 바람직하나 初期燃焼에 依한 실린더 內의 亂流促進이 적기 때문에 다음에 계속되는 燃焼는 混合不良으로 되어서 燃焼期間을 길게하여 燃料消費率(g/psh)이 惡化되는 結果가 된다.

이의 改善을 위하여 着火後의 燃料과 空氣의 混合을 促進시키기 위하여 燃焼室의 空氣流動과 噴霧의 最適化 및 燃焼室形狀等을 바꾸어서 거의 베이스엔진과 同等의 燃料消費率을 얻었다.

5. 2 低質燃料에의 對應

斷熱엔진은 燃焼室의 溫度가 높으므로 前述한 바와 같이 着火性이 大端히 좋다.

그러므로 在來의 水冷디젤機關에서는 使用이 不可能하였던 低세탄燃料도 使用할 수 있으며 今後의 代替燃料의 燃焼에 適合한 것으로 생각된다. 표 4 에 代表的인 代替燃料인 石炭液化

표 4 低質燃料에 對한 기관特性

機關		水冷기관		斷熱엔진	
		分解輕油 (세탄30)	石炭液化 (SRCII)	分解輕油 (세탄30)	石炭液化 (SRCII)
高速	高負荷	○	×	○	○
	低負荷	○	×	○	○
中速	高負荷	○	×	○	○
	低負荷	○	×	○	○
低速	高負荷	△	×	○	○
	低負荷	△	×	○	△
로우아이들		×	×	○	×

○正常運轉, △가벼운노킹, ×甚한 노킹 또는 失火

燃料(세탄指數 10以下) 및 分解輕油和 從來輕油를 混合시킨 輕油(세탄指數30) 등을 써서 單실린더의 斷熱엔진으로 運轉한 結果를 나타낸 것이다.

이에 따르면 세탄指數30의 輕油를 使用할 경우 從來의 水冷機關에서는 아이들링 및 始動運轉이 不能이었으나 斷熱엔진에서는 高세탄燃料의 使用時와 燃焼狀態가 거의 同等하였다. 石炭液化燃料를 使用하는 경우의 水冷機關과 斷熱엔진을 比較하면 效果가 보다 顯著하며 斷熱엔진에서는 運轉範圍의 거의 全域에 걸쳐서 使用이 可能하였다. 다만, 아이들링 時에 있어서는 燃焼室溫度가 낮아지고, 노킹이 發生하였다. 이에 對하여 水冷機關에서는 低負荷運轉은 물론 高負荷의 領域에 있어서도 運轉이 전혀 不可能하였다.

그림 11은 세탄指數30의 輕油和 石炭液化燃料를 使用한 경우의 壓力上昇率의 最大值의 變化를 機關의 各回轉速度에 있어서의 最大負荷時에 對하여 나타낸 것이다. 壓力上昇率의 最大值는 着火遲延期間의 길이에 거의 比例하여 커지나, 斷熱엔진에서는 세탄指數 30의 경우일지라도, 水冷機關에서 세탄指數 52의 경우와 同等하기까지 低下되어있다.

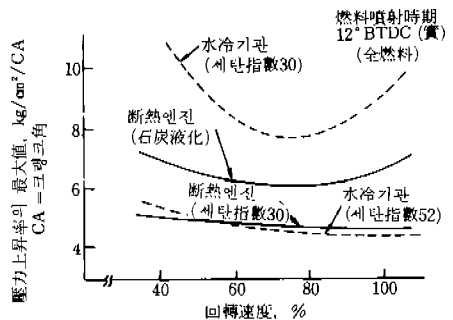


그림 11 各燃料에 對한 壓力上昇率

또한, 그림 12에 기관定格點負荷時에 있어서 各 燃料의 熱發生率을 표시한 것이다. 在來의 水冷機關에서는 세탄價의 低下와 더불어 初期燃焼(豫混合 燃焼)의 比率이 增加되어 있음을 알수 있다. 이와 比較하여 斷熱엔진에서는 低세탄燃料일지라도 水冷機關의 高세탄指數 52와 거의 같은 燃焼패턴을 나타내고 있음을 알수 있다.

以上 斷熱엔진에 있어서는 세탄指數의 낮은 燃

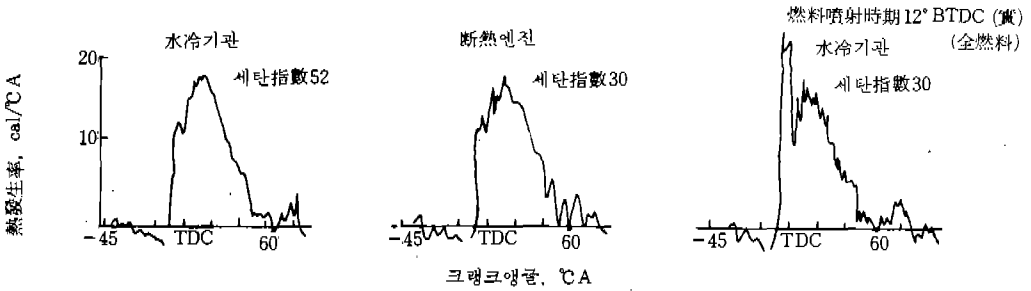


그림 12 断熱엔진의 多種燃料性

료에 對하여도 過大한 壓力上昇率을 同伴하지 않고, 從來의 세탄指數의 燃料을 使用한 水冷機關과 同等의 燃焼가 期待됨을 알수있다.

6. 機關性能

断熱터보 콤팩운드 엔진의 開發에서는 베이스엔진의 断熱化와 터보 콤팩운드化를 別途로 進展시키고, 이들을 組合하여 最終인 機關을 完成시키는 方法을 取하고 있다. 여기서는 이 断熱化만을 하는 경우와 터보 콤팩운드化만을 하는 경우에 對하여 說明한다.

機關을 断熱化하였을때 前述한 바와같이 베이스엔진 그대로의 燃焼系를 使用하면 性能이 顯著하게 惡化되었으나, 그뒤의 改良에 의하여 燃料消費率은 거의 베이스엔진 水準의 性能으로 되었다.

그림 13은 베이스엔진과 그의 断熱化後 改良된 다음의 性能을 나타낸 것이다.

시뮬레이션에서 假定한 바와 같이 베이스엔진과 熱發生率이 전혀 同一하게 된다면 다시 얼마간의 燃料消費率의 向上이 期待되는 것으로 생각된다.

排氣溫度는 定格點에서 약 130°C 上昇하고 있다. 断熱化와 同時에 터보차아저의 매칭을 變更하여 充填空氣量이 變化되었으므로 이 排氣溫도의 上昇이 그대로 排氣에너지의 增加로 된 셈은 아니다. 特히 排氣터빈을 入口溫도의 上昇뿐 아니라 空氣量의 增大도 回收出力의 增加로 되기 때문에 排氣에너지의 增加는 壓縮機의 空氣流量을 增加시켜서 排氣溫度를 抑制하여 燃焼의 改善, 熱負荷의 抑制에도 役割할 것이 可能하다.

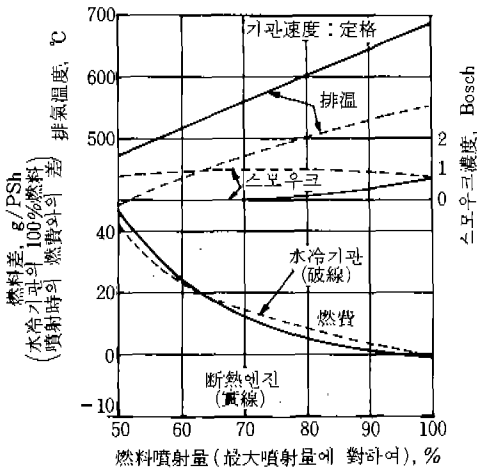


그림 13 機關의 性能

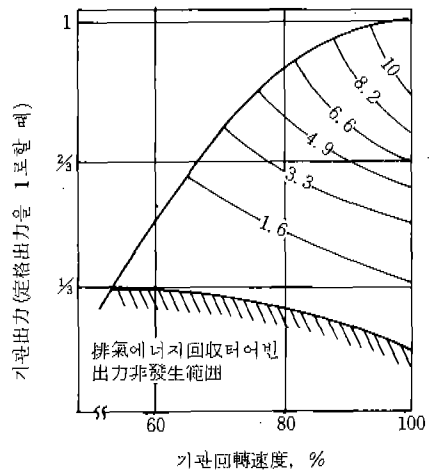


그림 14 排氣에너지의 回收率: 定格出力에 對한 回收比率로 表示한다. 回收率 = $\frac{\text{回收出力}}{\text{定格出力}}$

그림 14는 터보 콤파운드화에 대하여는水冷機關 그대로 排熱回收 터빈을 부착한 경우의 排氣에너지의 回收比率를 나타낸 것이다.

定格點에서는 定格出力의 약 12%의 排氣에너지가 軸出力으로서 回收되었음을 알 수 있다. 다만 이 값에는 排熱回收 터빈의 裝着에 의하여 背壓이 높아져서 機關出力이 低下된 것은 포함되어 있지 않다.

한편, 低速, 低負荷에서는 機關과의 매칭에 따른 制約으로 터빈의 膨脹比를 잡기가 곤란하여서 排熱의 回收比率가 減少되고 있다. 특히 약 30% 이하의 低負荷에서는 排熱回收量이 減速比등 回收系統의 摩擦損失쪽이 커지게 되어서 오히려 軸出力을 消費하는 傾向으로 된다.

또, 그림 14에 나타낸 排熱回收效果를 얻기 위하여는 단지 回收터빈만을 裝着하는 것 뿐만 아니라, 排氣에너지가 有効하게 回收될 수 있도록 排氣系의 損失低減이나 터보기구의 매칭 및 動力傳達系의 高効率化가 必要하다.

7. 맺 음 말

이상과 같이 斷熱터보 콤파운드 엔진은 低燃費, 低質燃料의 면에서 우월함이 實證되었다. 그러나 한편, 그 實用化에는 아직도 몇 가지의 課題가 남아있다.

(1) 세라믹의 實用化

機關의 斷熱化를 위하여 세라믹을 使用할 경우 그 品質의 保證이 대단히 어렵다. 最近의 세라믹材料의 開發은 크게 發展되었으며 過去 5年 사이에 燒結窒化珪素(Si₃N₄)의 公稱強度는 약 2倍以上 伸張하고, 實用應力에 對하여도 4~5倍로 되어있다. 그러나 엄밀한 檢査를 하지 않고 이것을 쓸 경우에는 致命的인 破壞를 일으키는 일이 있으며 材料強度의 不均一性에 對한 改良, 더우기 非破壞檢査技術의 確立이 바람직하다.

(2) 高温潤滑

斷熱엔진의 경우 실린더 미끄럼面은 심한 高温으로 된다. 따라서 材料, 潤滑材, 潤滑法등 在來機關의 概念을 초월하는 對應이 必要하다. 여기에 소개한 機關의 경우는 그의 可能性이 충분히 實證되었으나 在來機關의 耐久性이나, 信賴性을 생각할때 즉, 建設機械用的 機關을 想定하면 약 10,000時間에도 미치는 信賴性的 確保가 實現될 수 있는가의 如否는 아직 未確認이다. 따라서 앞으로의 그 評價와 보다 우수한 高温潤滑技術의 開發이 期待되는 바이다.

參 考 文 獻

- 1) R. Kamo and W. Bryzik : SAE Paper 780068
- 2) 平木彦三郎 : 小松技報 Vol. 26, No. 90