

## 극한기후에서의 엔진 냉간시동(cold starting)과 관련된 트라이볼로지

안 호 석

KIST Tribology연구실

### 1. 서 론

한·CIS(구 소련연방) 관계 정상화에 따라 국내기업의 러시아 진출이 다각도로 검토되고 있다. 이에 즈음하여 국산자동차, 건설중장비류의 러시아 진출도 예상할 수 있는데 이 경우 기술적으로 반드시 해결되어야 할 부분 중에 추운 기온하에서의 원활한 엔진시동을 빼놓을 수 없다. 따라서 본 해설을 통해 이에 대해 개략적으로나마 다루어 보고자 한다. 본 해설의 주된 내용은 러시아 과학원 산하 연구소로 시베리아 야쿠츠크(Yakutsk)에 소재한 비금속연구소(Institute of Nonmetallic Materials)의 기술자료를 토대로 했으며 과학기술처 조사연구사업 결과의 일부임을 밝힌다.

### 2. 저온시동시의 문제점에 대한 고찰

초기 냉간시동 시 발생하는 기계류에 발생하는 마모현상은 비교적 많은 실험 자료가 보고되고 있으나 그 자료들이 기계류의 종류 및 운전조건 등에 따라 많은 차이를 보이고 있어서 일반화하기는 어려운 상태이다. 그러나 저온 상태에서의 초기시동과 워밍업 과정에서의 운전조건이 엔진의 실린더 및 메인베어링 부품의 극심한 마모를 초래할 수 있다는 것은 잘 알려져 있다. 성능 및 수명 등에 미치는 극한지 악영향 등의 결과는 기계류를 동계기간 중 사용할 수 없게 하거나 이에 따른 생산성의 감소와 직결되게 되며, 이에따른 경제적 손실은 기계류의 마모손실이나 수명저하 등의 피해를 훨씬 상회하는 결과를 초래하게 된다.

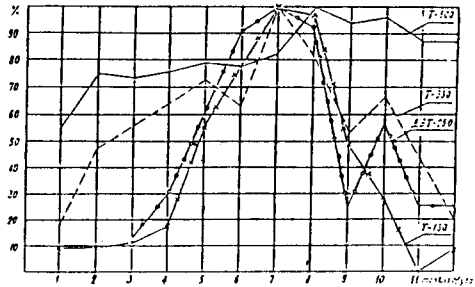
극한지에서 금채광산업과 관련된 기계류는 동계기간 중에는 사용이 계절적 이유로 감소하는 반면에, 산림벌목산업의 기계류는 같은 기간 중 그 사용이 급증하고 석탄채굴산업용은 계절변화와 상관없이 일정하게 가동되며, 자동차류는 계절과 관계없이 일상적으로 사용되고 있어서 예외적이기는 하나 동계기간 중에도 변함없이 사용되어야 한다는 점에선 공통적인 해결책이 주어

야 한다. 따라서 위에 열거된 기계류의 계절적 이용과 파생되는 복잡한 운전조건 및 문제점 등은 복합적으로 고려되어야 할 것이다.

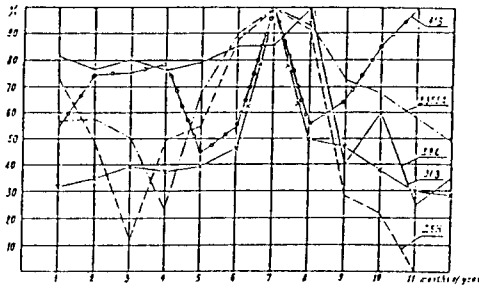
한 예로서 계절변화에 따른 트랙터류 운행 정도를 보면 다음과 같다. 동계기간 중 이 기계류의 사용은 지반 표면의 결빙에 의해서 사용이 급격하게 줄어들고 기계류 사용효율 또한 10~15% 정도로 낮게 떨어진다. 그림 1은 러시아의 금채광회사인 Severovostokzoloto에서 사용되고 있는 소련산 및 외국산 트랙터들의 월별사용효율 분포를 보인 예이다. 그림에서 알 수 있듯이 최고효율이 발휘되는 기간은 5,6월로 연중 가장 따뜻한 기간이다. 이와 대비하여 미국에서 사용되고 있는 T-500과 41 B 트랙터는 연중 큰 폭의 변화없이 항상 사용되고 있음이 큰 차이를 보이고 있다 하겠다. 이상의 실험결과들은 기존의 엔진오일이 -20℃(대기온도: -30℃) 정도에서도 초기시동하는데에 문제가 없다는 가정하에 얻어진 것인데, 극한지의 같은 기온에 관한 통계적 평균 데이터를 고려함으로써 실외에 자동차류를 주차시키는 평균 날짜수를 결정하는 것이 가능하다. 그림 1(c)를 보면, 새로 개발된 엔진오일을 사용하였을 경우, 기존의 경우보다 예열을 가하지 않고도 옥외에 주차시킬 수 있는 기일을 약 2배 가량 증가시켰음을 알 수 있다. 영하의 기온하에서 대기온도가 기계류에 미치는 영향은 시동과 관련된 모든 엔진 요소 부위에 모두 민감하게 미친다고 할 수 있으나, 특히 연료 및 윤활유에 매우 중요한 영향을 미친다. 그 직접적인 예로 기온이 0℃에서 -50℃로 떨어졌을 경우 금속 재료의 충격강도가 1.5~2배 가량 감소하는 반면, 연료 및 윤활유의 동점성계수는(마찰에너지와 직결됨) 100~200배로 증가한다.

지금까지 열거한 모든 점을 감안해 볼 때, 온도조건의 변화에 따른 디젤엔진의 시동방법 개선에 관한 문제는 엔진설계의 변경 이전에 다음의 사항들이 동시에 고려되어야 한다.

1. 최저 한계조건에서의 온도변화에 따른 사용재료 특성변화의 최소화



(a) Use home-produced tractors



(b) Use foreign tractors

Regime type	Frosty period of outdoor parking, days	including	
		cold parking use	of preheating
Before innovation	194	66	128
Copy innovation	194	107	87

(c) Conditions of outdoor machinery parking

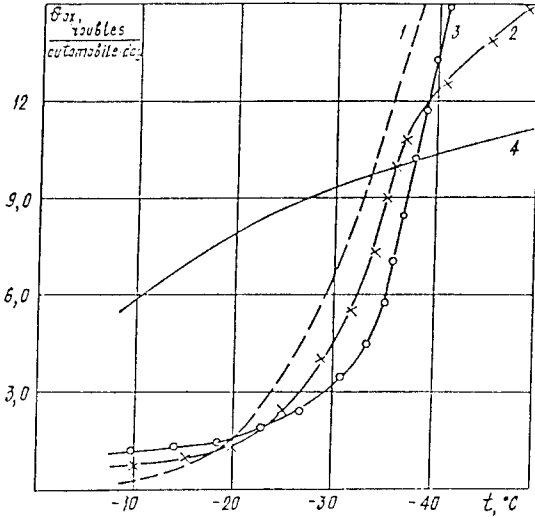
**그림 1. Magadan 지역에서 트랙터 사용의 월별 효율**

2. 기계예열의 최소화

3. 1, 2항을 동시에 고려한 복합적인 연구

기계의 예열정도를 낮추기 위한 경우에 있어서 가장 중요한 것은 연료와 윤활유의 물성을 안정화시키는 것인데, 이것이 더욱더 안정화 될 수록 예열을 하여야 하는 한계온도를 더욱더 낮출 수 있는 동시에 예열에 필요한 경제적 손실을 줄일 수 있기 때문이다.

옥외주차조건하에서 사용되고 있는 엔진류의 예열방법은 공기, 증기(steam), 전기 및 적외선 램프 등을 이용한 전, 후 가열이 있다. 이와 같이 효과적이며, 사용 가능한 방법 이외에도 가장 적용이 간단하고 종래부터 사용되어온 방법으로서 폐기처분한 엔진을 이용하여 아이들링(idling)함으로써 예열을 얻을 수 있기는 하나, 이 방법은 사실상 경제적이 못하다. 간혹 엔진을 간헐적으로 가동시켜 줌으로써 초기시동시에 예열을 해 줄 필요가 없도록 하는 방법은 경우에 따라서는 경제적인 방법이 될 때도 있다. 지적해야 할 것은 위의 어떠한 방법도 대기온도 0°C~60°C하에서 옥외주차 방법을 이



- 1-gas-air preheating- 7, 8 time
- 2-engine operation in the mode of "warming up"- 10 times
- 3-electric preheating- 7 times
- water preheating- 7, 3 time
- air preheating- 8, 5 time
- warming-up by hot air feed into case- 8, 4 time
- preheating by infrared burners- 5, 5 time

그림 2. 주차 조건에 따른 손실

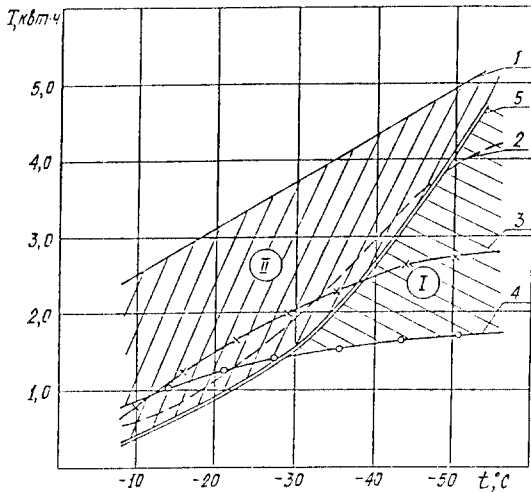
용하였을 때 발생할 수 있는 모든 문제점을 경제적이고 신속하며 신뢰도 높게 모두 해결해 주는 효과적 방법이 될 수 없다는 것이다. 실제적으로 대부분의 방법들은 대략 -40°C 정도 이하의 저온에서는 모두 한계성을 보이게 된다는 점도 문제이다.

그림 2는 옥외주차 조건에서 예열을 얻는 여러가지 방법들의 효과를 실내주차장을 사용했을 때와 비교하여 보인 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 대기조건이 영하 38°C 이하일 경우는 실내주차장 시설을 이용하는 방법이 어떠한 예열을 가하는 옥외 주차장 시설에 비해 유리함을 알 수 있다. 따라서 10~50°C 대기온도범위에서 기존의 방법대로 옥외 주차시설을 이용할 경우 주차에 필요한 경비는 필연적으로 증가할 것이다.

그림 3은 자동차의 대기온도 변화에 따른 열 특성곡선과 여러가지 예열 방법들의 열 공급 능력을 보인 것으로, 지역 I은 주어진 예열이 적어서 시동에 필요한 열기관의 열공급량을 충족시켜 주지 못함으로써 초기시동시의 부수적인 열에너지지를 요구하는 영역이며, 지역 II는 예열된 에너지가 반대로 과잉 공급된 영역을 나타내고 있다. 평균적으로 대기온도의 10°C 변화는 옥외주차시설 경비의 110~250% 증가를 초래하게 되는 것으로

나타나 있으므로 연료 및 윤활유 물성의 저온 안정화를 이룩함으로써 이에 따른 부수경비 절감효과는 매우 크다 하겠다.

저온하의 엔진을 단순히 시동할 수 있게하는 방법을 사용함으로써 모든 문제가 다 해결되는 것은 아닌데, 이는 저온하의 초기시동시 발생하는 극심한 기계요소



1-in-garage parking; 2-warming-up by engine idle running; 3-preheating by air; 4-electric heating; 5-total thermal characteristic of vehicle.

I-region of additional heat supply during the starting period; II-region of sufficient provided by the prestarting preparation during parking.

그림 3. 기계류에서 요구되는 가열준비 및 가열과정

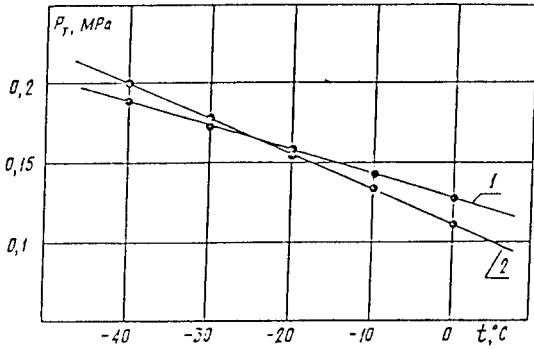
마모현상 때문이다. 한 예로 디젤엔진에서 일반적인 엔진유(M-8 B grade)를 사용할 경우, 예열을 하지 않은 상태에서 영하 10°C에서 시동한 후 아이들링한 경우의 엔진 마모량이 평균 운전상태하의 마모량보다 무려 4배 정도 증가하는 반면에, 25°C 정도를 유지하도록 엔진을 예열한 경우의 마모량은 1.5배 정도 밖에 증가하지 않는다. 그림 4는 온도변화가 엔진 손실 및 마모율과 수명에 미치는 영향을 잘 설명해 준다.

저온하에서 오일점도의 증가로 인해 오일순환이 효과적으로 이루어지지 못할 경우 기계요소 윤활부위의 오일공급이 지연되어지게 되는데, 이러한 현상은 기계요소 마모에 결정적인 악영향을 끼치게 될 것이 자명하다. 오일공급부족의 경우 마모량이 최고 85~90배 증가될 수도 있다 하며, 이와 같은 상태로 계속 운전이 될 경우를 가정하면 실린더라이너의 수명은 고작 20시간 정도를 넘지 못할 것이다.

실린더라이너는 물론이거니와 피스톤링, 피스톤, 크랭크샤프트 부싱 및 모든 윤활계통의 기계요소들에게도 유사한 결과가 나타날 수 있을 것이다. 표 1은 여러가지 방법들을 이용한 엔진시동시의 실린더-피스톤 간의 수명시간에 관한 실험결과를 보인 것인데, 표에 나타난 바와 같이 예열없이 엔진을 아이들링 함으로써 시동을 한 경우의 수명치가 4배 가량 감소한 반면, 예열 방법을 이용한 경우 1.4배의 소폭으로 감소한 것을 알 수 있다. 이 실험결과는 대기온도 -20°C에서 얻어진 것으로, 온도가 이 이하일 경우는 그 차이가 더욱 현격하게 높아질 것이다. 엔진시동에 요구되는 최적의 오일점도는 일반적으로 300-400 cSt가량 유지되도록 하는 것이 적절한 것으로 알려져 있다.

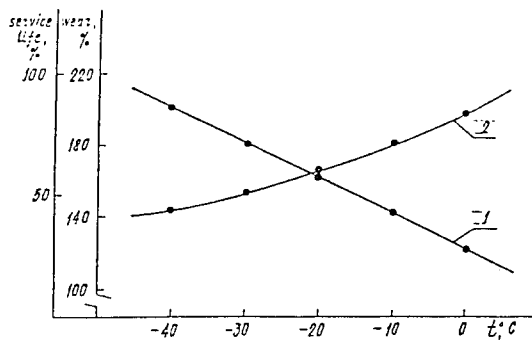
표 1. 시동조건에 따른 실린더-피스톤의 마모율과 수명

Mode of operation for internal combustion engine	Air temperature	Wear rate of sleeve,	Service life on	Service life vs mean
		mkm/min	wear rate, m/h	operational one, %
Cold starting	-20°C	0.533	20	1.2
Starting and warming-up at no-load running (without preheating)	-20°C	0.0247	432	26.0
Starting and warming-up at no-load running (after preheating of the unit to 25°C)	-20°C	0.0088	1210	72.0
Mean service life during the winter operation	-20°C	0.00635	1680	100



1-carburettor engines; 2-diesel engines.

그림 4. (a) 온도에 따른 엔진의 내부 손실



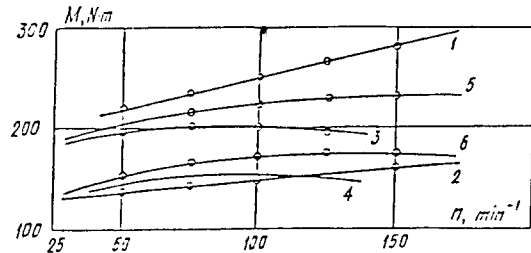
1-wear level; 2-service life.

그림 4. (b) 온도가 엔진의 마모와 수명에 미치는 영향

저온시의 엔진가동 문제는 비단 연료 및 윤활유에만 국한된 것은 아니고, 연소실 내 연료가 연소할 때 이상 압력이 발생을 초래하기도 하는데, 그림 4에서 예측할 수 있듯이 크랭크-커넥팅로드 하중증가 및 이에 따른 실린더-피스톤링 간의 마찰 손실을 초래하게 된다. 대기온도가 60°C 정도 떨어졌을 경우 (예로 20°C에서 -40°C로) 이에 따른 손실은 2~2.5배로 증가하게 된다.

이와 같은 영향들로 인하여 사실상 저온에서의 엔진 수명을 인자별로 독립해서, 특히 연료 및 윤활유 물성과 관련하여 그 정량적 효과를 얻기는 매우 힘든 일이 아닐 수 없다. 시베리아 소재 비금속연구소에서 극한기온과 관련된 엔진냉간시동에 대하여 수년간의 조직적인 연구가 진행되고 있다 하는데, 그 중점사업에서 윤활유 변화에 따른 엔진 성능변화 문제 연구를 들 수 있다.

그림 5는 구 소련내 주요 농경작용 트랙터(MTE-80)인 D-240 엔진을 이용하여 얻은 결과로써 윤활유변화 및 온도변화에 따른 크랭크 축의 토크값의 변화를 보인 것이다. 엔진변속기오일(Neste사의 SAE 5W/20, 혹은 MT-5/10 D)과 함께 엔진오일(M8G<sub>2</sub>, M4<sub>3</sub>/8G<sub>2</sub>, M10G<sub>2</sub>)



1-engine oil is M8G<sub>2</sub>, transmission oil is M10G<sub>2</sub>, T = -15°C; 2-engine oil is M4<sub>3</sub>/8G<sub>2</sub>, transmission oil is M10G<sub>2</sub>, T = -20°C; 3-engine oil is M4<sub>3</sub>/8G<sub>2</sub>, transmission oil is M10G<sub>2</sub>, T = -25°C; 4-engine oil is SAE SW/20, transmission oil is M10G<sub>2</sub>, T = -25°C; 5-engine oil is SAE SW/20, transmission oil is M10G<sub>2</sub>, T = -30°C; 6-engine oil is SAE SW/20, transmission oil is SAE SW/20, T = -30°C.

그림 5. 변속 장치와 조립된 상태에서의 D-240 엔진의 크랭크 축에 걸리는 토크

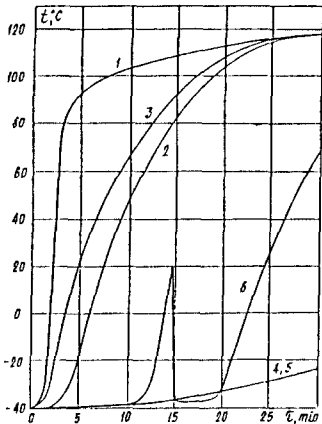
등이 상당한 효과를 보이는 것으로 나타났으며, 따라서 동계기간 중 M8G<sub>2</sub>, 혹은 M10G<sub>2</sub>오일을 사용하여 대기 온도 -5~-15°C하에서 운전한다면 시동마력이 현저히 증가될 수 있는 반면, M4<sub>3</sub>/8G<sub>2</sub> 혹은 SAE 5W/20 오일을 사용할 경우는 온도 -25°C하에서 단지 3~4%의 증가 밖에 없음을 알 수 있다. 따라서 엔진오일의 향상이 저온 엔진시동 문제를 해결하는 매우 유효한 방법 중의 하나인 것으로 사료된다. 그러나 현재의 상업화된 오일들을 사용해서는 어떤것을 쓰든지 북극 근처지역의 일상기온인 영하 60°C 이하의 대기조건하에서는 엔진시동을 담당할 수 없게 되며 이에따라 예열의 이용과 효과적인 개발이 필수적이다.

### 3. 예열방법의 개발

그림 6은 D-240엔진이 대기온도 -40°C하에서 예열 장치 PJB-200을 사용했을 경우 아래와 같은 각 요소들에서의 온도변화를 보인 것이다.

1. 가열 보일러 출구에서의 냉각수 온도
2. 실린더블록에서의 냉각수 온도
3. 실린더헤드에서의 냉각수 온도
4. 3번째 메인베어링 부위의 온도
5. 4번째 메인베어링 부위의 온도
6. 오일탱크 내 오일의 온도

GOST(구 소련 규격)에 따라, 크랭크케이스내의 오일을 엔진시동을 할 수 있도록 30분 정도 가열해서 영상의 온도가 되도록 하였다. 그러나 이때 베어링의 온도는 -30°C 정도에 머물렀는데, 이는 사용된 발열히터의 용



1-temperature of cooling liquid at the output of heater boiler; 2-temperature of cooling liquid in the cylinder block; 3-temperature of cooling liquid in the cylinder block head; 4-temperature in the 3rd main bearing bushing; 5-temperature in the 4th main bearing bushing; 6-temperature of oil in the oil pan under the oil sump tank.

그림 6. PJB-200 예열장치를 사용하였을 때 가열시간에 따른 D-240 엔진의 온도변화

\*운전단계 : 예열 \*냉각수 순환방식 : 표준 \*냉각수 : 부동액 \*실험조건 : -45°C \*엔진오일 : MT-53/10D

량이 충분치 못했음을 보여준다 하겠다. 보다 정확하게 표현한다면 이는 발열히터의 용량이 적어서라기보다는 엔진내부 용적에서의 불균일한 온도분포 때문인데, 결과적으로 크랭크케이스오일의 온도는 적당히 올라간 반면에 실린더헤드의 온도는 필요 이상으로 상승했으며, 베어링 접촉부의 온도는 거의 영향을 받지 못해 오일이 얼어버릴 정도의 균일치 못한 분포가 나타난다. 따라서 윤활부위에서는 건조마찰이 발생할 수 있게 되어 결과적으로 엔진 베어링 부위에서 초기시동 시 과도한 마모가 발생한다. 균일한 온도분포를 얻기위해 발열히터의 성능향상함이 요구되며 이는 저온 초기시동 문제 해결을 위한 매우 중요한 사항이다. 문제해결의 주안점은 무엇보다도 주요 엔진 윤활접촉부에 열을 고르게 가해주는 것이라 할 수 있겠는데, 한 예로 시베리아의 비금속연구소에서는, 전기대류현상을 가능케 하는 특수한 복합재료로 제작된 자체발전히터를 개발하였다.

#### 4. 고체윤활제의 효과적 적용

한편 초기시동 시 건조마찰이 발생하는 현상을 피할 수 없는 부득이한 경우를 생각하지 않을 수 없는데, 실제로 엔진을 예열할 시간적 여유가 없을 경우가 종종

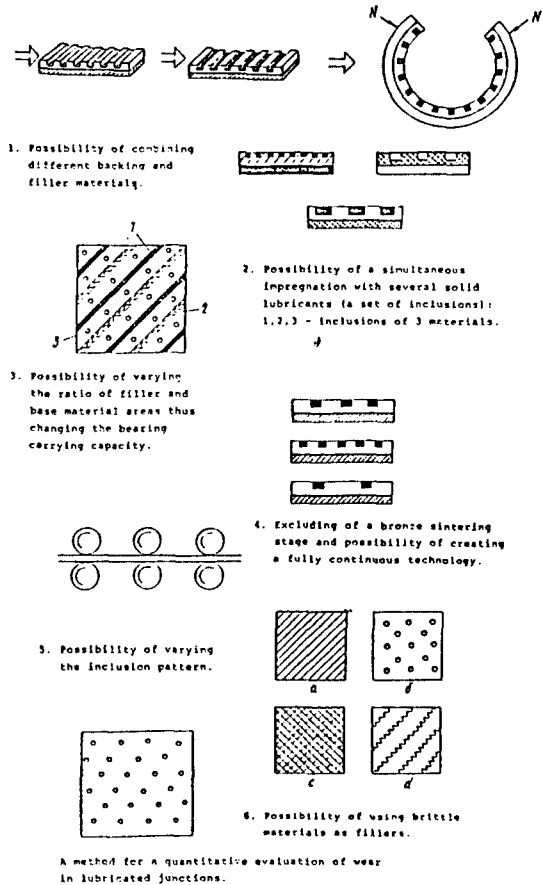


그림 7. 마찰표면의 마찰을 방지 시키는 기술개발

발생하기 때문이다. 이 경우 초기시동 시 마찰과 마모를 줄이기 위한 방법을 두가지 들수 있다. 그 첫째는 엔진 오일에 MoS<sub>2</sub> 등의 고체윤활제를 첨가하는 것이다. 유체 윤활막이 오일 공급지연에 의하여 불충분할 때, 고체윤활제의 역할로서 초기시동 시의 마찰 마모를 줄이는 것인데, 실제 소련에서 관련 공급업체의 시험결과에 의하면 엔진오일 공급 순환이 문제가 될 수 있는 초기 30 Km사이의 과도한 마모를 거의 줄일 수 있다고 보고하고 있다. 단점으로는 위와 같은 고체윤활제의 오일 분산 효과가 균일하지 못하고 엔진종류 및 운전조건, 사용유 등에 따라 그 효과가 크게 다르게 나타난다는 사실이다. 두번째 방법으로 베어링 재료에 자체윤활 성분이 함침

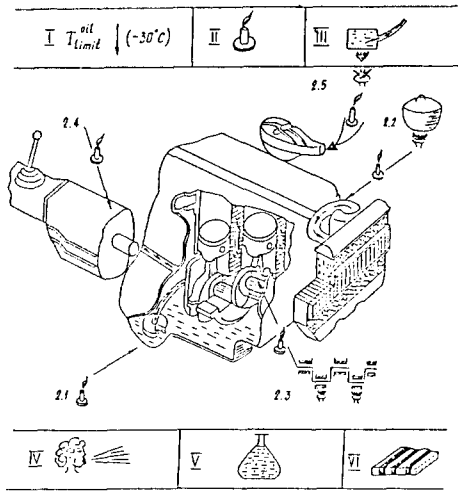


그림 8. 저온 시동 문제의 해결 방법

되어 있는 새로운 재질을 개발하는 것으로 그림 7에서 그 예를 볼 수 있다. 이들을 대별하면

1. 마찰면의 인위적 요철(artificial relief) 형성
2. 표면 기공들에의 고체윤활제 함침
3. 고체 윤활제 filler의 소결

고체윤활제가 표면에 함침되어 있는 복합재의 여러 예가 그림에 소개되고 있다. 위 기술들에 대한 장점을 살펴보면,

1. 여러가지 filler 및 backing재의 복합이 가능하며,
2. filler와 모재의 면적비를 변화해서 결론적으로 하중지지 능력을 쉽게 변경시킬 수 있으며,
3. filler로서 취성재료까지도 사용 가능하다.

최근 비금속연료소에서 이와 관련하여 다종의 고분자재료 및 비유기질 물질을 함유한 바이메탈릭 스트립(bimetallic strip)을 연구개발 중에 있다. 취성이 있는 재료를 사용할 수 있다는 것은 매우 큰 장점이라 할 수 있는데 일반적으로 고압축 강도를 지니는 고체윤활제가 취성을 띄고 있기 때문이다.

## 5. 원활한 저온시동을 위한 종합적인 검토

그림 8은 저온 엔진시동과 관련된 문제의 해결방안을 종합적으로 보인 결과로써,

- I. 사용온도의 최저치를 낮추기 위한 윤활제의 향상과,
- II. 효과적인 가열방법과 기구의 개발

- 1) 크랭크 케이스 오일의 워밍업. 종래의 방법 및 폴리머 가열 히팅을 사용한 전기히팅
- 2) 석유를 연소시키는 보일러를 이용한 냉각수 시스템의 가열
- 3) 전기 전도매개체를 사용한 크랭크축 베어링의 국부 가열
- 4) 감속기 부위의 전기 히팅
- 5) 전기 히터를 이용한 흡기 공기의 예열

III. 독립적으로 오일순환 장치를 구동함으로써 가열된 오일을 강제적으로 순환시키는 방법.

IV. 엔진 냉각시의 오일의 굳음을 방지하기 위해 오일 공급관내로 공기를 불어주는 방법

V. 오일공급지연 등에 따른 불충분한 유체유회환의 현상을 보완하기 위한 엔진오일 내 고체윤활제 첨가 방법과,

VI. 자체 윤활제를 함유한 크랭크축 베어링재질의 개발 방법

여기에서 알 수 있는 것은 어떠한 방법도 그 자체로는 저온시동을 해결할 수 있는 유일한 방법이 될 수 없는 것으로, 엔진, 변속장치 및 운전조건 등을 총체적으로 감안하여 위의 방법들의 최적 조합이 이루어져야 한다. 또한 위 방법들의 적용의 용이성 여부도 고려되어야 하겠다.

## 참 고 문 헌

1. Bogatin, O.B., "Problems of arctic tribology and the cold starting", Proc. Korea-USSR Tribology Seminar, 1991.
2. Bogatin, O.B. et al., "Simulation of thermal conditions and temperature diagnostics of friction in cylindrical junctions", Int. Soviet-Scandinavian Seminar(Abstract), 1991, pp. 23-24.
3. Chersky, I.N., "Influence of cold climate on the service properties of elastomers, polymers and composites used in mechanical engineering", Int. Conf. "Polartech 90", Denmark, 1990, pp. 603-613.
4. Valltila, Y., "Power transmission at arctic condition", Int. Soviet-Scandinavian Seminar(Abstract), 1991, pp. 45-47.
5. Chersky, I.N., "Arctic engineering climatology of polymer and composite materials", Proc. Korea-USSR Tribology Seminar, 1991.