

## 석탄-물 혼합연료(CWS) 기관개발

### Development of Coal-Water Slurry(CWS) Fueled Diesel Engines

최 경 호  
G. H. Choi



최 경 호  
· 1960년 9월생  
· 정회원  
· 계명대학교 자동차공학과  
· 디젤엔진, 대체에너지이용

#### 1. 서 론

내연기관에서 석탄연료를 사용하려는 생각은 최근의 일이 아니다. 약 100년전 독일의 Rudolf Diesel이 압축착화기관을 발명하였을 때 석탄연료를 사용하려고 처음 시도하였으나 석탄을 작은 알갱이로 부순 미분탄을 사용하는 어려움과 안정성, 그리고 석탄의 회분으로 야기되는 문제로 좌절되었다. 압축착화기관에서 석탄연료를 사용하려는 다른 노력은 1920년대 후반에 Pawlikowski로 이어져 11,000시간이 넘는 실험을 성공적으로 수행하여 상업화를 준비하였으며<sup>1)~3)</sup>, 독일의 다른 연구자들이 이 분야를 연구하는데 밀거름이 되었다. 그러나 이런 연구들은 제 2차 세계대전이 끝남과 동시에 단절되었고 제 2차 세계대전 이후에는 석탄연료를 사용하려

는 대부분의 연구는 연료를 슬리러 형태로 하여 미국에서 이루어졌다. 슬리러상태, 즉 석탄-물 혼합연료(CWS : Coal-Water Slurry)는 고체인 미분탄을 물과 혼합하여 액체 상태로 변형하여 연소시킴으로써 Rudolf Diesel이 겪었던 많은 문제점들을 완화할 수 있을 뿐아니라 석탄가스화(gasification)나 액화(liquefaction) 기술에 비하여 경제성이 높은 것으로 알려지고 있다. 따라서 CWS연료 이용 연구는 최근 10여년동안 기관차와 화력발전소의 에너지원으로 수행되어져 부분적으로는 상용화단계에 도달한 것으로 알려지고 있다. 이러한 연구 가운데 많은 결과가 미국의 General Electric(GE)사의 주관으로 실험되어 얻어졌으며 그 이외의 고무적인 결과를 낸 연구들은 표 1<sup>4)</sup>과 같다.

이들 연구에 사용되어진 CWS연료는 50%의 미분탄과 49%의 물 그리고 연료의 안정성을 높이고 점도를 낮추기 위한 소량의 첨가제로 구성되어 있다. 미분탄의 크기는 보통 10 $\mu$ m 미만이며 CWS연료의 유동을 증가시키기 위해 사용되는 첨가제는 주로 물에 녹는 계면 활성제(water soluble surfactant)가 많이 사용된다.

표 1 석탄-물 연료 엔진 개발

연구기관	용도
Arthur D Little	단위전기설비
General Electric	열병합 발전소, 기관차
General Motors	화력발전소, 기관차
Adiabatics	실험실

그러나 아직도 CWS연료 공급 엔진에서 기술개발이 필요한 분야는 연료의 착화·연소, 그리고 고체인 미분탄에서 야기되는 마모성, 끝으로 연료자체의 조성으로 인한 미립자(Particulate)와 관련된 배기가스 문제는 더 많은 연구가 수행되어야 할 것이다. 따라서 본 내용에서는 CWS연료 엔진개발과 관련된 전반적인 연구에 대한 이해를 돕기 위하여 전문적인 해석보다는 현재까지 발표된 연구 결과를 시대적 구분과 앞서 언급한 세 분야의 기술개발 분야로 분류 정리하였다.

## 2. 연구 활동

### 2.1 1945~1980년의 연구활동

2차세계대전후의 석탄연료 엔진개발에 관한 연구는 대부분 미국에서 수행되어졌으며 초기의 연구는 1949년에 Hanse<sup>5)</sup>에 의해 이루어졌다. 초기에는 미분탄을 디젤유와 혼합한 형태인 COM(Coal Oil Mixture)를 사용하였는데 Hanse는 미분탄-디젤유의 비율을 20 : 80으로 하였다. 이 실험은 기존분사펌프를 이용하였는데 노즐의 마모로 실험을 계속할수 없었다.

Hanse의 실험과 비슷한 연구가 South-west Research Institute(SWRI)<sup>6)</sup>에 의해 1957년에 수행되어졌으며 1959년에는 Virginia Polytechnic Institute<sup>7)</sup>에 의해 수행되어졌으나 마모와 분사계의 오작동으로 인해

수시간 밖에는 실험을 진행할 수 없었다.

그후 1970년부터 1980년대 초까지 석탄연료 이용에 관한 연구는 SWRI에 의해 주도되었으며 이 시기에는 COM을 연료로 사용하였으며 미분탄의 양을 10%에서 40%까지 증가시키면서 실험을 하였다. 결과로는 미분탄의 양이 증가되어 질수록 분사계의 오작동과 마모문제가 현격히 대두되었으며 연소특성이 저하되었다<sup>8)~11)</sup>.

Thermo Electron<sup>12)</sup>사에서 1981년에 2행정, 120rpm의 대형엔진을 이용하여 석탄연료로 야기되던 기존의 문제점들을 완화 시킴으로 Pawlikowski 이후에 가장 좋은 결과를 얻은 것으로 기록되고 있다. 석탄연료를 사용한 엔진의 성능수준은 디젤유를 사용하였을때와 비슷한 수준이었으며 후연소도 발생하지 않았다. 그러나 마모와 분사계의 오작동등은 계속 문제화되었다.

### 2.2 1980년대의 연구활동

1980년대의 석탄연료엔진 개발연구는 석탄가격과 중동의 오일속으로 수급 불안정을 완화하기 위함이 그 주된 동기가 되었다. 특히, 이시기에는 미국 Morgantown에 소재한 에너지성(DOE)의 적극적 지원으로 연구활동이 활성화 되었으며 이 시기의 활동들을 간략히 표 2에 나타내었다.

### 2.3 1988~현재의 연구활동

이 시기에는 주로 CWS연료가 사용되어졌으며 미국 에너지성의 지원이 확대되었고 환경규제 만족을 위하여 연구에 박차를 가하는 시기가 되었다. 이 시기의 연구결과들을 세 분야로 분류하여 정리하였으며 그 분야는 1)연료의 연소·착화분야, 2)마모분야, 3)대기오염분야 등이다.

#### 1) 연소·착화 관련 연구

CWS연료는 무게비로 50%의 수분을 포

표 2 1980년대 연구활동

연구자, 연도	사용엔진과 연료	연구 결과
- F. Robben <sup>13)</sup> , 1984	- 가시화용 CLR 엔진 - CWS 연료	- 파일럿 연료없이 착화 가능 - 흡입공기온도가 착화에 영향을 줌
- D. Siebers and M. Dyer <sup>14), 15)</sup> , 1984	- 정적 연소기 - 디젤유, CWS	- 압축착화 기간이 디젤유에 비하여 길다.
- Clingerpeel <sup>16)</sup> and Gurney <sup>17)</sup> , 1985	- 1Y73 단기통 엔진 - 석탄-디젤유, 메탄올, 물 혼합	- 모든 실험중 마모 발생 - 착화 보조 장치가 필요
- S. Shang <sup>18)</sup> , 1983	- 4행정 단기통, 2기통엔진 - COM 사용	- 분사계의 문제 발생 - 윤활계통의 오염이 심각
- T. Ryan and L. Dodge <sup>19)</sup> , 1984	- 직·간접 분무 CLR 엔진 - Charcoal, Coke를 DF2와 혼합	- IDI 엔진이 DI엔진보다 마모면에서 유리 - 다공노즐이 성능면에서 더 유리
- R. Kamo <sup>20)</sup> , 1986	- 4행정, 단기통 세라믹 엔진 - 미분탄을 흡기관을 통해 흡입	- 착화 보조원이 없이 압축착화 가능 - 피스톤 링의 마모가 심함
- H. Steiger <sup>21)</sup> , 1985	- 2행정, 저속 IRSA76 엔진 - CWS	- CWS 연료를 성공적으로 사용 - 엔진성능면에서 디젤유의 경우와 같음
- G. Leonard and G. Zipperman <sup>22)</sup> , 1986	- 정적 연소기 - CWS	- 착화지연 기간이 디젤유보다 길다. - 연소성격은 두 연료가 비슷하다.
- R. Zipperman <sup>23)</sup> , 1986	- 중속 디젤엔진 - CWS, Coal-Water Methanal	- Coal Water Methanal은 자연 착화 가능 - 실험엔진은 CWS연료 사용이 부적합
- W. Likos and T. Ryan <sup>24)</sup> , 1987	- 리카르도 스웰 디젤 엔진 - CWS	- 자연착화 가능 - 착화 지연기간의 대부분이 물증발 기간
- D. Brehob and R. Sawyer <sup>25)</sup> , 1987	- 단기통 CLR엔진 - 석탄-물, 디젤, 메탄올 혼합물	- CWS는 자연착화가 안됨 - 석탄-메탄올 혼합물은 자연착화가 가능
- B. Zhou, et. al. <sup>26)</sup> , 1987	- MIT 금속압축기 - CWS	- 연료분사압력이 무화에 큰 영향이 없음
- B. Hsu <sup>27)</sup> , 1988	- GE-7FDL 2기통엔진 - CWS	- 연료분사압력 증가가 연료 분무를 개선 시킴

함하고 있기 때문에 수분의 건조 과정이 포함된 다음의 4단계 과정을 거쳐서 연소가 이루어진다. 즉, 가) 분무된 CWS액적의 가열 과정, 나) 연료중에 포함된 수분의 증발과정, 다) 휘발유의 방출 및 연소과정, 라) 탄소의 연소 및 회분의 생성과정 등이며 석탄자체 연소 시간이 내연기관의 빠른 속도에 비하여 길기 때문에 대형기관이나 저속엔진에 적합한 것으로 나타나 있다. 연소와 착화 개선을 위하여는 착화보조원을 사용하거나 다른 형태의 분무장치, 그리고 CWS연료의 조성변화를 통하여 착화·연소 개선을 꾀하고 있다.

Rao<sup>28)</sup>는 단기통 디젤기관을 사용하여 CWS 착화·연소 개선에 대하여 실험하였다. 실험에 사용된 엔진헤드는 착화보조 연료인 천연가스로 사용할수 있도록 개조되었다. 착화를 용이하게 하기 위하여는 최소 3%의 천

연가스가 분사되어야 함을 발견하였다.

GE의 Hsu<sup>29)</sup>는 축압식 분무장치를 이용하여 분무초기의 분사압을 상승시켰으며 인젝터의 구조는 그림 1에 나타내었다. 상승된 초기 분사압은 슬러리 액적을 작게 만들어 착화 지연시간을 단축시켰다. 또한 기존의 분무장치는 80%이하의 연소효율을 얻을때 개발된 축압식 분무장치로는 거의 완전연소를 이루었다.

석탄연료의 착화·연소에 밀접한 관계를 가지고 있는 CWS분무와 관련된 실험을 MIT<sup>30)</sup>의 급속압축기에서 수행하였으며 실험장치 개략도를 그림 2에 나타내었다. 실험에 사용한 두가지 조성의 연료, 즉 53~47% 그리고 48~52%의 석탄-물 혼합연료를 사용하여 분무와 분사 실험을 하였다. 후자의 연료가 전자의 것보다 조성의 비로 인하여 점도가 낮으므로 분무가 개선되어짐을 알 수 있었으며 액적의 크기도 줄어들어 관통 속도는 늘어난 것으로 밝혀졌다.

General Motors(GM)<sup>31)</sup>는 2행정 기관차 디젤엔진에 CWS연료를 사용하였다. 이 엔진을 이용하여 파일릿 연료인 디젤유의 분사

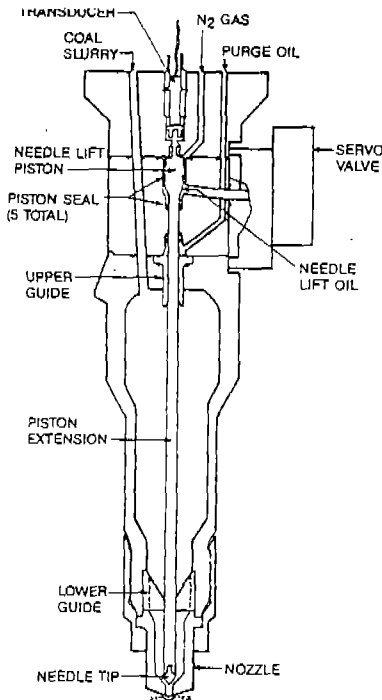


그림 1 Coal-slurry injector

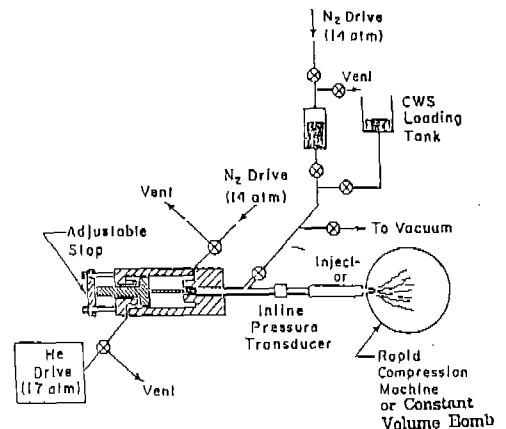


그림 2 Schematic of high pressure injection system

시기, 분사량, 그리고 CWS연료 분사량이 착화·연소에 미치는 영향을 관찰하였다. 파일럿 연료의 분사시기를 40, 34, 28, 24 BTDC로 변화시키며 실험하였다. 이 실험의 결과로는 파일럿 연료 분사시기를 진각 시킬수록 최고 실린더 압력과 최고 실린더 온도가 증가하는 것을 발견하였다.

GE<sup>32)</sup>에서는 그 동안의 실험들을 통합하여 4000Hp급 시작품 기관차를 제작하여 실험실이 아닌 현장에서 기관차를 구동시켜 주행하였다. 이러한 실험은 전부하에서 부분부하까지 90%의 연소 효율을 나타내었다. 이 실험은 중·장기적으로 해결하여야할 기술문제와 배기가스 문제에 실질적으로 접근하고자 노력하였다.

Kakwani<sup>33)</sup>는 전자식 CWS분무장치를 개발하여 CWS연료와 석탄 미분탄을 연료로 단기통엔진에 사용하였으며 전자식 분무장치를 그림 3에 나타내었다. 연료는 20.7Mpa에서 분사되어졌으며 실험 되어진 엔진은 세라믹으로 코팅이 되어 기관으로 부터의 열방출을 줄였다. 이 실험의 결과는 디젤연료에 비해 CWS와 미분탄 연료의 경우는 더 높은 실린더 압력을 나타내었다.

GM<sup>34)</sup>의 단기통기관에서 엔진속도, 흡기온도, CWS연료 분사시기 등을 변수로 실험을 하였다. 연료분사시기를 10 크랭크각도 진각

시켰을때 실린더 압력과 온도는 상승하고 누적발열량도 상승하였다. 흡기온도를 상승시키면 흡입되는 공기의 엔탈피증가로 최고와 총합 열발생율이 증가하였다.

GE<sup>35)</sup>에서는 9가지의 CWS연료로 실험을 하였다. 9가지 연료를 표 3에 나타내었다. 석탄 종류와 산지 그리고 첨가제 종류에 따라서 다른 9가지 연료를 의미하며 2가지 다른 첨가제는 Lignosul과 MCG-32A를 실험에 사용되었다. MCG-32A는 CWS의 점도를 낮추고 유동을 개선시키며 Lignosul은 연소를 개선시키는 확산첨가제이다. MCG-32A 첨가제를 혼합한 연료는 Lignosul을 첨가한 연료에 비해 연소 속도가 높고 실린더 압력도 낮았다. 또한 9가지 연료에 대한 성능과 배기성능을 표 4에 자세히 나타내었다.

2) 마모분야 연구

석탄연료가 고체입자이기 때문에 석탄사용엔진을 개발하는데 커다란 장애가 되어 왔다. 마모에 가장 많이 노출 되어진 부분은 피스톤링과 실린더 라이너로 알려져 있으며 최근에는 착화 연소를 개선하기 위해 분무압력을 높이므로 분무노즐 끝의 마모 문제가 새로이 대두되고 있다.

Arthur D Little와 Cooper Bessemer<sup>36)</sup>는

표 3 실험에 사용된 연료

	제조업체	석탄생산지	석탄종류	미분탄크기 (μm)	첨가제
1	OTISCA	Kentucky	역청탄	4.6	Lignosul
2	OTISCA	Kentucky	역청탄	4.8	MCG32A
3	OTISCA	Kentucky	역청탄	3.1	Lignosul
4	OTISCA	Kentucky	역청탄	3.2	MCG32A
5	OTISCA	Pern	역청탄	2.5	MCG32A
6	UNDERC	Wyoming	아역청탄	13.9	MCG32A
7	UNDERC	Wyoming	아역청탄	14.7	
8	UNDERC	Wyoming	아역청탄	14.9	
9	AMAX	Kentucky	역청탄	8.2	

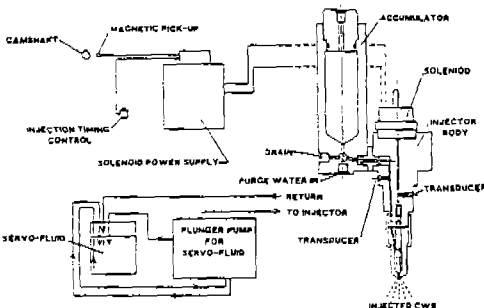


그림 3 Schematic of CWS injection systeme

표 4 GE 실험결과

연료 종류	성 능			배 기 성 능 (ppm)			
	최고압력(MPa)	SFC(KJ/IKwh)	연소 효율(%)	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	HC	CO
1	16.9	8,448	99.2	680	252	205	195
2	15.7	8,812	98.8	672	236	218	302
3	17.1	8,707	98.7	717	323	221	183
4	16.7	8,342	99.2	—	—	—	—
5	16.2	8,362	98.7	—	—	—	—
6	16.1	8,470	99.5	522	994	223	280
7	16.0	8,952	99.0	583	208	193	403
8	16.0	8,407	99.2	574	163	203	243
9	15.5	8,769	97.7	721	301	277	330

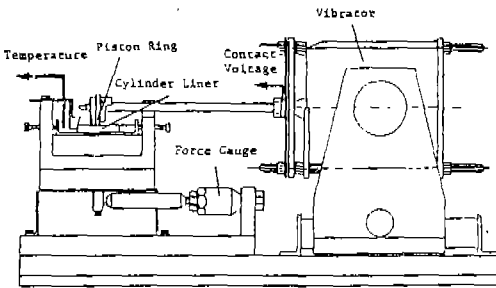


그림 4 Schematic of the cameron-plint rig

노즐 끝 부분과 압축링을 카본 텅스텐 사 파이어, 카본 실리콘 등으로 만들어 실험하였다. 그 결과 카본 텅스텐으로 만든 버트 형 압축링은 37시간 동안 사용 하여도 마모의 정도가 심하지 않았지만 사파이어로 만든 노즐은 사용한지 20분 만에 파손되었다. 피스톤 링에 사용된 카본텅스텐은 30시간을 무사히 사용하였으며 1000시간을 목표로 개발해 나갈 것이다.

SWRI<sup>(37)~(38)</sup>에서는 CWS가 마모에 미치는 영향을 실험하기 위해 실린더 라이너와 피스톤링에 여러가지 다른 이물질을 사용하여 마모정도를 실험하였다. 실험은 기관내에서 이루어진 것이 아닌 기관의 왕복운동을 모사한 고속마찰기를 이용하였으며 그 구조는 그림

4에 나타내었다. 이 물질인 탄소 알갱이를 CWS연료에 5, 10, 15% 첨가시켜 실험을 진행하였다. 4시간 실험후 마모의 정도를 살펴본 결과는 피스톤링보다 실린더 라이너의 마모가 더 심하였으며 이물질의 크기가 작을 수록 마모의 정도가 심한 것으로 나타났다. 그 이유는 이 물질의 입자가 클수록 마모가 일어나는 곳까지 침투하지 못하므로 생기는 결과로 판단하고 있다.

또 다른 마모실험은 Arthur Little과 Cooper Bessemer<sup>39)</sup>에 의하여 노즐 끝부분, 압축링, 실린더 라이너에 대한 마모 실험이 수행되었다. 텅스텐 카바이드나 사파이어를 삽입한 노즐 끝 부분에 대한 마모 실험이 수행되었다. 이 실험 결과로 최소한의 마모가 발견되었으며 다른 종류의 노즐 팁에 비하여는 5~10배 정도의 긴 수명이 발견되었다. 텅스텐 카바이드를 압축행정 말기에 110시간 동안 실험을 진행하였다. 이런 실험결과로 2000~5000시간 정도 사용 가능한 것으로 판단되어진다.

### 3) 배기가스분야 연구

CWS연료를 사용하는 기관을 개발하는 과정에서 배기가스를 제어하는 기술은 필수적이라 할 수 있다. 그러나 CWS엔진 개발과정

에서 많은 실험이 착화와 마모개선에 투자되어 배기 제어기술은 상대적으로 많은 진보가 없는 편이다. 초기의 실험들은 CWS연료에 50%가 물이 함유되어 있어서 연소온도가 낮아 NO<sub>x</sub>의 양이 현격히 줄어 드는 것을 발견하였지만 반면에 석탄연료의 특성상 미립자 배출과 SO<sub>x</sub>가 문제시 되고 있다.

GM의 후원으로 SWRI<sup>40)</sup>에서는 CWS연료 엔진의 배기성능 실험을 수행하였다. 이 실험을 진행하기 위하여 디젤 파일릿을 착화 보조원으로 사용하였으며 엔진의 실린더 직경은 9.5인치였다. 실험 결과 디젤연료를 사용하였을 때 보다 HC발생은 더 많았으며 CO는 디젤연료를 사용했을 때 비슷한 수준이었다. 문제시 되고 있는 미립자 배출은 10~30배 가량 더 배출하였으나 NO<sub>x</sub> 배출수준은 디젤유를 사용했을 때와 비교하여 절반 수준에 머물렀다.

Cooper Bessemer<sup>41)</sup>에서 흡기관 온도, 분사 노즐 구멍크기를 변수로, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 등 배기성능 실험을 수행하였다. 흡기관의 온도를 100F에서 200F로 올렸을 때 디젤연료에 비하여 NO<sub>x</sub>의 수준은 32%에서 68%를 나타냈으며 분사노즐의 크기가 0.3mm 일 때는 노즐크기가 0.25mm일 때와 비교하여 NO<sub>x</sub>가 30% 수준에 머물렀다. CWS연료를 사용하였을 경우는 CO가 100ppm에서 180ppm이지만 디젤유는 345ppm으로 나타났다. 이

러한 결과를 표 5에 정리하였다. 그리고 문제시 되고 있는 Particulate는 디젤유를 사용한 경우 65 $\mu$ g/L인데 비하여 CWS연료인 경우는 600~1,000 $\mu$ g/L으로 10배 이상을 나타내고 있다. 이러한 Particulate를 저감하는 기술에는 고온 bag 필터기술, SO<sub>2</sub>를 저감하는 기술로는 분사기술 개선을 제안하였다.

끝으로 GE<sup>42)</sup>에서는 CWS엔진에서 문제시 되고 있는 SO<sub>x</sub>와 Particulate 저감 기술을 실험하였다. SO<sub>2</sub> 저감기술로 칼슘흡수제와 CuO granular bed을 평가하였다. 실험 결과로는 배기파이프에서 Ca/s를 2:1의 비율로 섞은 칼슘 흡수제로 분사했을 때 SO<sub>2</sub>가 40% 가량 저감됨을 발견하였으며 수산화 칼슘은 CWS와 연소 전에 섞는 경우는 전부하 상태에서 약 25%저감 효과가 있음을 발견하였다.

### 3. 맺음말

본 내용에서는 CWS연료엔진 개발과 관련된 전반적인 연구에 대한 이해를 돕기 위하여 전문적인 해석보다는 시대적 분류에 의하여 현재까지 진행된 연구들에 대하여 살펴보았다. 이들 연구에 나타난 CWS엔진의 문제점은 연료의 연소·착화의 용이성, 마모문제, 그리고 배기가스를 제어하는 기술개발등이 문제점으로 지적되고 있다. 이러한 문제점들은 미국 에너지성(DOE)의 적극적인 지원으로 많이 해소되어진 것으로 볼수 있다. 따라서 상업화가 되기 위한 조건인 CWS엔진의 경제성에 대하여 간략히 살펴보고 본 내용을 마치고자 한다.

실제적인 상업화는 기술적인 면과 더불어 경제적인 면을 고려하여야 한다. 최근의 보고에 의하면 2MW에서 200MW급 화력발전소나 기관차용 디젤기관은 1990년 후반이나

표 5 실험 결과

연 료	노즐크기 (mm)	미립자 성분 ( $\mu$ g/L)	NO (ppm)	CO (ppm)
디젤유	0.30	65	1,400	345
CWS	0.30	580	1,125	100
CWS	0.25	1,000	1,090	135
CWS	0.25	720	800	130
Ultrafine CWS	0.25	1,000	1,100	180

2000년초에는 경제성이 있을것으로 예측하고 있다. 이러한 예측은 석유가격이 배럴당 25불내지 30불정도가 되는 것을 가정하고 있다. 천연가스도 다음 대체에너지로 유력하지만 매장량에 있어서는 석탄연료의 15% 불과하여 향후 10~20년정도는 가격경쟁력이 있을것으로 보며 그 후에는 석탄연료의 가격경쟁력이 탁월할 것으로 예측하고 있다. 그러나 석탄을 사용하는 엔진이 현존 엔진에 비해 마모로 인한 유지비와 배기가스제어를 위한 장치설치비등을 고려할때 5,500원/kwh 가 들것으로 예상하므로 결국 CWS연료가격이 1,500원/백만 Btu정도이며 기존 석유가격이 4,000원/백만 Btu일때 CWS엔진이 경쟁력이 있을 것으로 예측되며 그 시기는 1990년 후반이나 2000년초 일것으로 예측하고 있는 것이다.

### 참 고 문 헌

1. E. E. Soehngen, "The Development of the Coal Burning Diesel in Germany", US ERDA Report No. WA 76-3387.
2. R. Pawlikowski, "The Coal Dust Upsets Tradition", Power, Vol. 68, 1928.
3. L. H. Morrison, "The Coal Dust Engine: Details of the Design", Power, Vol. 68, 1928.
4. M. H. McMillian and Hoplmes A. W., "Coal-Fueled Diesels: Systems Development", ASME-ETCE, ICE-Vol. 7, pp. 1~8., 1989.
5. D. J. Hanse, "Coal-Oil Mixture as a Diesel Fuel", Master of Science Thesis, University of North Carolina, 1949.
6. E. W. Tracy, "Feasibility Study of the Use of Powdered Coal as a Fuel for Diesel Engines", SWRI Report No. 8-681-1, 1957.
7. H. P. Marshall and C. Shelton, "The Coal Burning Piston Engine", Virginia Polytechnic Institute, Engineering Experiment Station, Vol. 53, 1959.
8. K. Tataish and C. D Wood, "Performance of Coal Slurry Fuel in a Single Cylinder Diesel Engine", The Combustion Institute, CSS/CI 80-06, 1980.
9. T. W. Ryan, W. E. Likos and C. A. Moses, "The Use of Hybrid Fuel in a Single Cylinder Diesel Engine", SAE Paper No, 801380.
10. T. W. Ryan, T. J. Callahan, and L. G. Dodge, "Injector Atomization and Combustion of Carbon Slurry Fuels", SAE Paper No. 821199.
11. J. B. Dunley, "Coal Diesel Fuel of the Future?", Power, Vol. 125, 1981.
12. F. Robben, "Coal Fueled Diesel Engines", SAE Paper No. 831747.
13. D. L. Siebers, "Ignition Delay Characteristics of Alternative Diesel Fuels: Implications on Centane Number", SAE Paper No. 852102.
14. D. L. Siebers and T. M. Dyer, "The Autoignition and Combustion of Coal Water Slurry Under Simulated Diesel Engine Conditions", ASME Paper No. 85-DGP-15.
15. J. M. Clingenpeel, M. D. Gurney, and D. B. Eccleston, "A Combustion and Wear Analysis of a Compression Ignition Engine Using Coal Slurry Fuels in Diesel Engines", ASME Paper No. 84-DGP-8.
16. M. D. Gurney, J. M. Clingerpeel and D. B. Eccleston, "A Program to Exam-



- ine the Use of Coal Slurry Fuels in Diesel Engines”, ASME Paper No. 831361.
17. S. Shang, et al., “The Combustion and Emissions of Coal Oil Mixture with Water as an Alternative Fuel for Diesel Engines”, SAE Paper No. 831361.
  18. T. W. Ryan and L. G. Dodge, “Diesel Engine Injection and Combustion of slurries of Coal, Charcoal, and Coke in Diesel Fuel”, SAE Paper No. 840119.
  19. R. Kamo et al., “Introduction of Micronized Coal in the Intake Air of a Medium Speed Adiabatic Diesel Engine”, ASME No. 86-ICE-19.
  20. H. A. Steiger, “Sulzer Single Cylinder Test Results with Various Coal Water Slurries”, Cogeneration Seminar, Rosement, 1985.
  21. G. L. Leonard and G. H. Fiske, “Combustion Characteristics of Coal Water Mixtures in a Simulated Medium Speed Diesel Engine Environment”, ASME No. 86-ICE-15.
  22. R. A. Zimperman, “Combustion of Coal Water Slurry Fuels in Conventional Diesel Engines”, DOE Contract No. DE-AC 2184MC21100, 1986.
  23. W. E. Likos and T. W. Ryan, “Combustion Characteristics of Coal Fuels in a High Temperature Diesel Engines”, ASME No. 87-ICE-56, 1987.
  24. D. D. Brehob and R. F. Sawyer, “Compressing Ignition of Coal Slurry Fuels”, ASME No. 87-ICE-11, 1987.
  25. B. Zhou et al., “Parametric Studies of Coal Water Slurry Combustion in a Rapid Compression Machine”, ASME No. 87-ICE-9, 1987.
  26. B. D. Hsu, “Progress and the Investigation of Coal Water Slurry Fuel Combustion in a Medium Speed Diesel Engine Part 1, Ignition Studies”, ASME No. 88-ice-4, 1988.
  27. A. K. Rao and R. P. Wilson, “Cooper Bessemer Coal Fueled Engine System Progress Report”, Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 111, pp. 498~506, 1989.
  28. B. D. Hsu, G. L. Leonard and R. N. Johnson, “Progress on the Investigation of Coal Water Slurry Fuel Combustion in a Medium Speed Diesel Engine : Part 3, Accumulator Injector Performance”, Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 3, pp. 516~520, 1989.
  29. T. V. Yu, et al., “Injection and Atomization of Coal Water Slurry in High Pressure Diesel Engine Environment”, ASME-ETCE, ICE-Vol. 7, pp. 51~60, 1989.
  30. T. Uzkan and C. E. Horton, “Combustion of Coal Water Slurry in a Two Cycle Diesel Engine: Test System Design”, ASME-ETCE, ICE-Vol. 12, pp. 23~30, 1990.
  31. P. L. Flynn, B. D. Hsu, and G. L. Leonard, “Coal Fueled Diesel Engine Progress at GE Transportation System”, Engineering Gas Turbine and Power, Vol. 112, pp. 369~375, 1990.
  32. R. M. Kakwari, P. R. Badgley, and W. C. Smith, “Development of Fuel Injection and Combustion Systems for Coal

- Water Slurry Fueled Diesel Engines”, ASME-ETCE, ICE-Vol. 2, pp. 41~50, 1990.
33. T. Uzkan and C. E. Horton, “Effects of Engine Speed, Inlet Air Heating and Slurry Timing on the Combustion of Coal Water Slurry in a Diesel Engine”, ASME-ETCE, ICE-Vol. 14, pp. 9~15, 1991.
  34. B. D. Hsu and G. L. Confer. “Progress on the Investigation of Coal Water Slurry Fuel Combustion in a Medium Speed Diesel Engine: part 4 Fuel Effect”, ASME-ETCE, ICE-Vol. 14, pp. 1~8, 1991.
  35. P. R. Badgley and D. C. Doup, “Combustion Optimization of High Speed Coal Water Slurry Fueled Diesel Engine”, ASME-ETCE, ICE-Vol. 14, pp. 17~22, 1991.
  36. J. A. Schwalb, T. W. Ryan, and W. C. Smith, “Lube Oil Contamination Induced Wear in Coal Fueled Diesel Engine”, ASME-ETCE, ICE-Vol. 12, pp. 51~58, 1990.
  37. R. A. Mayville, A. K. Rao and R. P. Wilson, “Durable Component Development Progress for the Cooper Bessemer Coal Fueled Diesel Engine”, ASME-ETCE, ICE-Vol. 14, pp. 23~27, 1991.
  38. J. A. Schwalb, and T. W. Ryan, “Surface Finish and Particle Size Effects on Wear in Coal Fueled Diesel Engines”, ASME-ETCE, ICE-Vol. 14, pp. 29~37, 1991.
  39. E. R. Fanick and M. N. Ingalls, “Coal Fueled Diesel Engine Exhaust Emission Assessment”, SWRI Topical Report for DOE/METC, 1987.
  40. K. R. Benedek and K. T. Menzies, “Emissions Characteristics and Control Technology for Stationary Coal Fueled Diesel Engines”, Engineering. Gas Turbine and Power, Vol. 111, pp. 507~515, 1989.
  41. D. Slaughter and E. Samuel, “Control of Emissions in the Coal Fueled Diesel Locomotive”, ASME ETCE, ICE Vol. 12, pp. 11~16, 1990.