

技術論叢

# Bunker-C 重油

国立工業研究所

才二部長 具 信 燮

## <內 容>

- |                     |                   |
|---------------------|-------------------|
| 1. 序 言              | 4. Burner 重油의 問題点 |
| 2. 無煙炭과 Bunker-C 重油 | 5. 燃燒裝置           |
| 3. Bunker-C 重油의 性状  | 6. 結 語            |

### 1. 序 言

今般 政府는 燃料需給의 円滑과 國內無煙炭資源의 消尽防止等을 目的으로 過去의 産業用無煙炭燃料를 Bunker-C 重油로 代替할 것을 決定하고 그 実行을 強力히 勸奨하고 있으며 이 燃料轉換에 따르는 여러가지 問題点이 技術的 或은 經濟的 等등의 側面에서 眞摯하게 檢討 評價되고 있다. 따라서 此際에 Bunker-C 重油에 關한 知識을 整理하고 有効適切한 使用法을 確立함은 時期的으로나 實利面에 있어서나 意義가 크다고 아니할수 없다.

以下 小稿는 實用的인 立場에서 Bunker-C 重油의 一般的인 事項을 整理한 것이다.

### 2. 無煙炭과 Bunker-C 重油

重油와 石炭은 熱經濟的인 立場에서 長期間 優位를 다투어 왔으며 石炭이 普遍的으로 埋藏되어 있는데 反해 石油는 特定地域에 偏在되어 있어 石油資源이 貧弱 또는 欠如되어 있는 國家들은 共

1)의으로 不得已 石炭置重을 強行한 時期도 있었으나 2次大戰后 激한 技術과 輸送手段의 發達로 因한 豊富하고 廉價의 供給과 여 1가지 利点이 認定되어 急速度로 石炭에서 重油로 燃料轉換이 進 行되어 가고 있다.

石炭을 重油로 代替할 때에 그 得失은 經濟的 技術的인 여러 方面에서 檢討, 評價되어야 할 것으로 본다.

(a) 發熱量

無煙炭과 Bunker-C重油의 發熱量은 各各 5,000~6,000, 0,000~10,500 kcal/Kg 程度로 볼수가 있으며 따라서 一定熱量 얻기爲한 燃料所要量은 大體的으로 無煙炭 : Bunker-C重油 = 2 : 1의 比率이 된다.

(b) 熱效率

無煙炭은 火床焚燒의 境遇 所要되는 多量의 過剩空氣와 灰分 依한 熱損失과 無火焰 乃至 短火焰等의 欠陷으로 그 熱效率은 高 30~40%以上은 期待할수가 없으나 이에 比해 Bunker-C 重油는 그 欠陷이 僅少하며 따라서 適當히 管理하면 70~85%의 率을 期待할 수가 있다.

(c) 消費量

(a)와 (b)를 檢討컨데 發熱量과 熱效率에 있어서 越等한 Bunker-C가 無煙炭보다 그 消費量에 있어서 懸隔한 節減의 可能性을 쉽게 予想할 수가 있으나 定量的으로는 無煙炭과 Bunker-C 重油의 發熱量 및 燃燒裝置의 熱效率의 正確한 數值로 精算될 間 隔이다.

(d) 燃燒操作

重油는 簡單히 點滅과 火焰調節을 할수가 있으며 油量의 增

減도 容易하고 不要時에는 곧 消火할수도 있어 Boiler-의 負荷 變動에 急激히 適應시킬수가 있으나 無煙炭은 쉽지 않다.

(e) 品質鑑別

石炭은 產地에 따라서 品質에 相當한 差異가 있으며 混炭使用하는 境遇가 많음으로 常時 同品質炭을 購入한다는 것은 幾히 不可能하나 이에 對해 Bunker-C重油는 比較的 品質이 均一하며 比重測定으로 簡單히 發熱量도 알수가 있다.

直溜重油發熱量  $Btu/lb = 17010 + 90 \times \text{°API}$

分解重油發熱量  $Btu/lb = 17645 + 54 \times \text{°API}$

Table 1 Heats of Combustion of Residual Fuel Oils

Crarity		Density lb per gal	Total heat of combustion at constant volume Q <sub>v</sub>			Total heat of combustion at constant pressure Q <sub>p</sub>		
°API at 60°F	Specific at 60°/60°F		Cal per g	Btu per lb	Btu per gal	Cal per g	Btu per lb	Btu per gal
0	1.0760	8.962	9,970	17,950	160,900	9,470	17,050	152,800
1.0	1.0679	8.895	10,010	18,010	160,200	9,500	17,100	152,100
2.0	1.0599	8.828	10,040	18,070	159,500	9,530	17,150	151,400
3.0	1.0520	8.762	10,080	18,140	158,900	9,560	17,210	150,800
4.0	1.0443	8.698	10,110	18,200	158,300	9,590	17,260	150,100
5.0	1.0366	8.634	10,140	18,250	157,600	9,620	17,320	149,500
6.0	1.0291	8.571	10,180	18,320	157,000	9,650	17,370	148,900
7.0	1.0217	8.509	10,210	18,380	156,400	9,670	17,410	148,200
8.0	1.0143	8.448	10,240	18,430	155,700	9,690	17,450	147,400
9.0	1.0071	8.388	10,270	18,490	155,100	9,720	17,500	146,800
10.0	1.0000	8.328	10,300	18,540	154,400	9,740	17,540	146,100
11.0	1.9930	8.270	10,330	18,590	153,700	9,770	17,580	145,500
12.0	0.9861	8.212	10,360	18,640	153,000	9,790	17,620	144,800
13.0	0.9792	8.155	10,390	18,690	152,400	9,810	17,670	144,100
14.0	0.9725	8.099	10,410	18,740	151,800	9,840	17,710	143,500

Table 1 Heats of Combustion of Residual Fuel Oils

Crarity		Density lb per gal	Total heat of combustion at constant volume Qv			Total heat of combustion at constant pressure Qp		
°API at 60°F	Specific at 60°/60°F		Cal per g	Btu per lb	Btu per gal	Cal per g	Btu per lb	Btu per gal
15.0	0.9659	8,044	10,440	18,790	151,100	9,860	17,750	142,900
16.0	0.9593	7,989	10,470	18,840	150,500	9,880	17,790	142,200
17.0	0.9529	7,935	10,490	18,890	149,900	9,900	17,820	141,500
18.0	0.9465	7,882	10,520	18,930	149,200	9,920	17,860	140,800
19.0	0.9402	7,830	10,540	18,980	148,600	9,940	17,900	140,200
20.0	0.9340	7,778	10,570	19,020	147,900	9,960	17,930	139,500
21.0	0.9279	7,727	10,590	19,060	147,300	9,980	17,960	138,900
22.0	0.9218	7,676	10,620	19,110	146,600	10,000	18,000	138,200
23.0	0.9159	7,627	10,640	19,150	146,000	10,020	18,030	137,600
24.0	0.9100	7,578	10,660	19,190	145,400	10,040	18,070	137,000
25.0	0.9042	7,529	10,680	19,230	144,800	10,050	18,100	136,300
26.0	0.8984	7,481	10,710	19,270	144,100	10,070	18,130	135,700
27.0	0.8927	7,434	10,730	19,310	143,500	10,090	18,160	135,100
28.0	0.8871	7,387	10,750	19,350	142,900	10,110	18,190	134,500
29.0	0.8816	7,341	10,770	19,390	142,300	10,120	18,220	133,900
30.0	0.8763	7,296	10,790	19,420	141,600	10,140	18,250	133,200

(f) 計 量

無煙炭은 購入時의 檢收量, 使用量 및 殘量의 正確한 計量은 大部分의 境遇 거이 不可能하며 概略值가 一般的으로 通用되고 있는 實情이나 重油는 貯油 Tank의 計量器 또는 드럼數로 簡單迅速하게 正確한 計量이 可能하다.

(g) 貯藏, 運搬

無煙炭의 겉보기比重도 重油보다는 크며 發熱量, 熱效率을 同時에 생각하면 同一熱量에 對한 重油는 無煙炭의 容積의 30~40

%以下로 足하며 石炭은 長期貯藏하면 品質이 炭種에 따라서 差異는 있으나 低下되며 水分이 增加되어 熱效率이 減少되고 野積時에는 雨水에 依한 流失도 無視할수 없는 量이 된다. 그러나 重油는 貯藏과 運搬이 大端히 簡便하다.

(h) 勞 力

貯藏, 運搬 및 燃燒管理가 容易하므로 重油는 無煙炭에 比해 勞力要求가 작으며 大概의 境遇 1/3 以下로 足하다고 본다.

(i) 灰分, 煤煙

石炭燃料은 共通的으로 石炭灰滓는 不可避하며 特히 有煙炭인 境遇에는 煤煙을 完全히 없애기는 困難하나 重油는 完全燃燒가 容易하므로 煤煙發生이 極히 작고 衛生的이며 灰分이 없어 그 處理나 勞力費가 不必要하다.

(j) 燃料費

燃料費의 比較는 發熱量, 熱效率等 比較的 數字化가 容易한 側面뿐만 아니라 管理費, 衛生性等도 勘案하여 綜合的으로 檢討되어 야 할것으로 본다.

國際競爭力強化를 爲하여 生産原價切下에 血眼인 獨逸, 日本等에서 도 石炭燃料에서 急速히 重油로 轉換하는 것을 보면 石炭보다 重油가 全体的으로 보아서 經濟的이라고 보는 것이 妥當할 것으로 생각된다.

以上을 綜合컨데 적어도 産業用燃料라는 面에서 考察할때 無煙炭보다 Bunker-C 重油가 優秀하다고 보아야 될것이다.

### 3. Bunker-C 重油의 性状

重油(Heavy oil)란 輕油(Light oil)에 對應하는 稅法上的

用語이며 Bunker-C 重油는 原油의 常圧蒸溜로 輕油까지를 溜出시킨 殘油 (Residual oil, Bottom oil, Bottoms, Thick oil) 에 必要에 따라서는 이 殘油를 真空蒸溜하여 아스팔트를 製造할 때에 溜出되는 真空蒸溜油를 混合하여 規格에 맞도록 調節하여 製造되는 直溜重油 (Straight bottoms) 와 分解蒸溜의 循環油 (Recycle stock) 에서 얻은 分解重油 (Cracked bottom) 로 区分되고 또한 用途에 따라 Burner 用燃料로 使用되는 燃料重油와 Diesel engine 用燃料로 쓰이는 Diesel 重油로 大別된다.

石油類의 性狀은 觀点에 따라서 여러가지面으로 考察할수가 있으나 여기서는 實用的 見地에서 國內外的 規格을 紹介하기로 한다.

Table 2 大韓石油公社 Bunker-C 社内規格과 製品試驗値

	比重 (°API)	粘 度 (Futol, 122 °F)	引 火 点 (Pensky, °F)	流 動 点 (°F)	黃 分 (%)
規 格	>11.0	< 250	> 150	<+60	<4.5
試驗値	15	200	300	+50	3.5

Table 3 重油 JIS K 2205(1958)

種 類	反應	引火点 (°C)	粘 度 (50° C)		流 動 点 (°C)	殘 炭 (%)	水 分 (%)	灰 分 (%)	黃 分 (%)					
			CST	R W										
1 種	1号	中性 >60	< 20	<85.8	< 5	< 4	<0.3	<0.05	<0.5					
	2号								<2.0					
2 種		中性 >60	< 50	< 205	<10	< 8	<0.4	<0.05	<3.0					
3 種	1号	中性 >70	50~150	250~612	-	-	<0.5	<0.1	<1.5					
	2号							<0.1	<3.5					
	3号							150~400	612~1630	-	-	<0.6	<0.1	<1.5
	4号							< 400	<1630	-	-	<2.0	-	-

1種(A重油) 1号: 蠶業, 金屬製鍊用

2号: 小型內燃機関用

2種(B重油): 小, 中 Diesel 機関用

3種(C重油):

1号: 鉄鋼用(低黄重油)

2号: 大型 Boiler, 大型 Diesel 機関用

3号: 鉄鋼用(低黄重油)

4号: 一般用

重油에 對한 美國規格은 그 種類가 많으나 우리와 比較的 關聯이 많은 것을 紹介하던 Table 4 의 軍用規格과 Table 5 의 California 州規格이 있다.

Table 4 U.S.Navy Residual Fuel oil Spec.

Requirements	Grade	
	Special	Heavy
比重 °API	>11.5	>10.0
粘度		
SSU, 85° F	> 225	-
SSF, 122° F	-	< 150
引火点 P-M °F	> 150	> 150
發火点 O.C, °F	> 200	> 200
流動点 °F	< 15	< 50
流動性 °F	< 32	-
黄分 %	< 3.5	-
灰分 %	< 0.10	< 0.12
殘炭 %	< 0.15	-
夾染物(抽出) %	< 0.12	< 0.15
물, 夾染物 %	< 0.5	-
水分(蒸溜) %	< 0.5	< 0.5
熱安定性(NBTC)	合格	合格
爆免性 %	< 50	< 50

Table 5. Pacific Coast Spec. (ASTM D 396-48T)

F.S. NO.	ASTM NO.	比重 A.P.I.	粘 度		引火点 C.C.P. (°F)	流动点 (°F)	含 夾染物	灰分 (%)	炭化分 (%)	蒸溜性状 (°F)		日本規 格相当
			100°F S.U.S.	122°F S.F.S.						10% 終点	90% 終点	
-	1	>36	-	-	>100	< 0	Trace	-	<0.15	<420	<625	輕油
100	-	-	-	-	100-165	-	<0.25	-	-	350-420	450-550	-
-	2	>26	<40	-	>100	<20	<0.10	-	<0.55	-	-	重質 輕油
200	-	-	35~55	-	>150	-	<0.50	-	-	<425	<675	-
-	4	-	45~125	-	>130	<20	<0.50	<0.1	-	-	-	A重油
-	5	-	>150	<40	>130	-	<1.00	<0.1	-	-	-	B重油
500	-	-	-	25~40	>150	-	<1.00	-	-	-	-	-
-	6	-	-	45~300	>150	-	<2.00	-	-	-	-	C重油
400	-	-	-	<60	>150	-	<2.00	-	-	-	-	-



#### 4. Burner 重油의 問題点

Burner 重油는 使用目的과 燃燒設備等에 따라 여러가지 性状이 要求되나 여기서는 그 一般的인 面을 檢討하기로 한다.

##### (a) 粘 度

重油는 油滴狀態로는 燃燒되지 않음으로 먼저 Burner로 微細한 油霧를 만들고 蒸發이 容易하게 하여 空氣와 잘 混合시킨다. 따라서 Burner 重油로서 가장 重要的 性質의 하나는 기름을 霧化시키는 데에 適當한 粘度和 表面張力이라고 할수가 있다. 霧化最適 粘度は Burner 種類에 따라서 다르나 大体的으로 20~30 CST 程度이며 따라서 高粘度油는 予熱하여 粘度를 그 線까지 낮출 必要가 생긴다.

霧化油는 粒徑이 50 $\mu$  以下가 되어 完全燃燒하며 그 以上인 境遇에는 不完全燃燒로 發煙하게 된다. 油霧粒子的 크기는 噴壓과 關係되며 一般的으로 噴壓이 크고 粘度가 낮으면 작아지나 너무 噴壓이 크던지, 粘度가 작으면 噴霧의 微分散化에는 좋으나 貫徹力이 弱해져서 不完全燃燒를 하게 되고 發煙하게 된다.

石油公社製 Bunker-C 油는 400~440 CST/50°C의 高粘度며 氣溫이 낮으면 完全히 凝固되므로 使用에 앞서 予熱이 不可避하게 되는데 予熱로 粘度를 必要線까지 낮추기 爲해서는 安全上 重油의 引火點이 높아야(60~70°C以上) 된다.

##### (b) 夾雜物

Bunker-C 重油는 蒸溜殘油를 主成分으로 하므로 여러가지 夾雜物을 含有하게 된다. 普通 重油를 10倍量의 네프사로 稀釈하고 遠心分離했을 때의 析出物量(即 沈澱數)으로 表示한다.

重油中の 夾雜物은 i) 原油에 基因되는 泥水分, 塩水 ii) 貯藏中에 混入되는 雜物로서 이 夾雜物은 濾過器를 適切하게 하고 喷嘴나 노즐 (nozzle)을 損傷시킴으로 加熱后 遠心分離機로 大部分을 除去하고 濾過하여 使用할 必要가 있으며 水分은 2%以上이 되면 燃燒狀態가 不安定하게 되고 5%以上이면 거의 燃燒가 不可能하게 되므로 水分이 混入되지 않도록 特別히 注意가 必要하며 不得已 水分이 混入된 重油를 使用時에는 水分分散劑의 混用이 要求된다.

### (c) 灰 分

重油에 含有된 無機物質은 대부분 酸化物로 하여 灰分으로 定量되고 있으나 그것은 重油속에 含有된 狀態와는 全然 다른 것이다.

重油속의 無機物質은 (i) 原油의 鹹水 또는 取扱中에 混入된 塩水에 基因되는 것 (Na, Ca, Mg) (ii) 製油 또는 取扱中에 混入되는 雜物, 泥水分等에 基因하는 것 (Fe, Al, Si, Ca) 와 (iii) 原油中에 溶解되어 있는 것 (黃化合物等) 들 이다.

이들 無機成分은 Burner 燃燒時 酸素, 黃과 化合하여 揮發性과 融點이 相異한 여러가지 化合物을 만들며 燃燒裝置, 加熱體에 惡影響을 준다. 一般적으로 融點이 높은 것은 微粉化되어 害가 없으나 融點이 낮은 것은 燃燒室內에 融着되어 所謂 스크일이 된다. 특히 Na는 燃料中の 黃과 化合하여 低融點黃酸鹽 ( $\text{NaHSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$  等) 이 되고 炉內棟瓦, 加熱管等에 두꺼운 스크일로 附着된다.

또 V는 Na와 함께  $500 \sim 700^\circ\text{C}$ 의 低融點物質 ( $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot \text{Na}_2\text{O}$ )를 만들고 甚한 腐蝕障害를 이끈다.

(d) 黃 分

現在 重油의 經濟的인 脫黃法은 確立되어 있지 않음으로 黃分은 原油에 依해서 自然決定된다. 우리나라에 輸入되는 原油는 含黃率이 높은 것으로 有名한 中東産으로 Bunker-C重油의 黃分은 3~4%程度로 高率이다.

黃分은 使用에 있어 注意하면 別로 支障이 없다. 卽 燃料油中의 黃化合物은 特別한것(클로이드黃, 黃化水素)을 除外하고는 直接 腐蝕의 原因은 안된다.

그러나 燃燒시켰을때  $SO_2$ 가스가 되며 燃燒가스가 露点以下로 冷却되면 水分과 結合하여  $H_2SO_3$ 가 되고 強한 腐蝕性을 表示하게 되며 黃分이 많을수록 露点이 높아진다. 따라서 燃燒裝置의 溫度가 露点以上이면 腐蝕은 進行되지 않는다.

以上과 같이 黃分의 腐蝕性 以外에도 灰分의 融点を 낮추고 스켈을 增加시키는 弊端은 前述한 바와 같다.

한편 黃分이 많은 것은 加熱製品의 品質을 劣化시키는 境遇가 있음으로 製鋼用, 窯業用, 食品製造用에는 低黃重油(Low Sulfur Fuel-L.S. 重油)가 使用된다. 스마트라原油로 만든 重油는 L.S. 重油의 代表的인것(黃分 0.5%以下)이다.

黃分은 大氣汚染에도 重大한 關係가 있으며 이점에 關해 先進諸國에서는 眞摯하게 研究檢討가 進行되고 있다.

(e) 安定度

重油는 아스팔트, 樹脂質等이 濃縮된 1種의 클로이드(알)이며 特別히 分解重油는 熱分解되어 不安定狀態이므로 貯藏中 또는 取扱中에 酸化, 凝集, 析出되기 쉽고 輕油로 稀釈하던지 他重油와 混合할 때에 溶解狀態가 不安定하게 되어 多量의 析出物이 沈澱할

때가 있으며 이로 인해 貯藏탱크, 送油管, 濾過器 및 噴孔에 不意의 障害을 출때가 있다.

(i) 重油를 輕油로 稀釈하던지 또는 重油끼리 混油할 때에는 質的組合에 留意할 必要가 있으며 直溜重油는 問題가 別로 없으나 分解重油는 相當히 汚다. (ii) 分解重油는 貯藏中 40°以上이 되지 않도록 注意해야 되며 특히 空氣와 接觸되면 슬러지를 析出하기 쉽다.

#### (f) 發熱量

重油는 燃料로 利用되는 以上 發熱量은 가장 重要한 性質이며 比重에 따라서 小差는 있으나 Bunker-C 重油의 發熱量은 10,000~10,500 kcal/Kg 程度다.

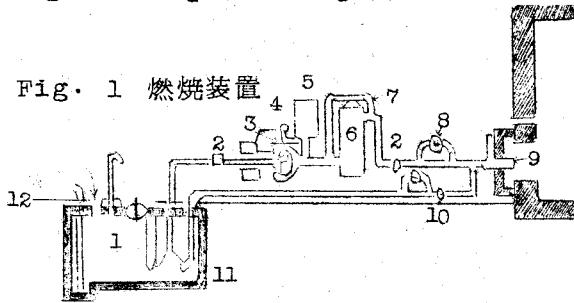
發熱量은 實測하는 것이 가장 正確하나 比重으로도 簡單히 알수가 있음은 既述한 바다.

#### (g) 使用狀況

Bunker-C 重油의 實際 使用狀況의 一例를 紹介하면 于先 原油탱크에서 펌프로 重油를 헤드(Head) 탱크에 보내서 여기서 50~60°C로 予熱하여 粘度를 SUS 100~200로 낮추고 遠心分離機(Purifier)로 水分과 雜物을 除去하고 이어 淸淨機(Clarifier)에 보내 微小夾雜物을 除去한 다음 燃料펌프로 버어너·노즐에 圧送한다. 노즐에 들어가기 前에 予熱器로 기이 引火點에 가까운 80~90°C로 加熱하여 粘度 SUS 50~70로 噴射한다. 萬一 水分·夾雜物의 除去가 不充分하면 燃燒狀態가 不安定하게 되며 予熱이 不充分하면 噴霧가 粗大하여 燃燒狀態가 나빠진다.

### 4. 燃燒裝置

燃燒裝置를 Fig. 1과 같이 例示한다.



- |          |            |
|----------|------------|
| 1. 油 槽   | 7. 溫度計     |
| 2. 濾過器   | 8. 流量計     |
| 3. 펌 프   | 9. 버이 너    |
| 4. 펌프調節機 | 10. 逃出辯    |
| 5. 空氣室   | 11. 加熱코일   |
| 6. 加熱器   | 12. 물리上用펌프 |

#### (1) 油 槽

貯藏탱크와 써어비스·탱크가 있으며 前者는 長期使用(1週~1個月), 后者는 1~2日分씩의 量을 貯藏하기 爲한 것이나 小規模施設에는 이와 같은 區別이 없는 것도 있다.

油槽에는 排氣管, 液面計, 掃除孔, 加熱管, 드레인口 및 非常排出辯 등을 갖추어야 하며 油注入管은 上部에 出油管은 底部에서 各各 20~30 Cm 되는 곳에 붙인다.

#### (11) 濾過器

2個를 並列로 1組로 하여 設置하고 運轉中에도 交代로 掃除할수 있게 한다. 普通 펌프앞과 버어니앞에 붙인다.

往復펌프, 기어 펌프의 2種이 있으며 往復펌프에는 出口에 空氣室을 만들어서 脈動的 吸收와 壓力의 自動調節을 꾀한다.

(IV) 加熱裝置

蒸氣, 電氣 및 炉壁으로 부러의 放散熱이 熱源으로 利用된다.

(V) 버어너型式

霧化型버어너가 쓰이며 重油를 空氣 또는 蒸氣壓力으로 噴孔에서 油霧狀으로 噴出시켜서 燃燒시킨다.

버어너의 種類에는 (i) 自然流下 또는 펌프로 流送된 重油를 噴孔에서 壓縮空氣로 微分散시키는 空氣噴射式 (Air Atomizing) 버어너, (ii) 加壓水蒸氣로 噴射시키는 蒸氣噴射式 (Steam Jet) 버어너, (iii) 高速度로 廻轉하는 접시의 中央에서 燃料를 供給하여 遠心力으로 分散시키는 回轉式 (Rotary) 버어너 그리고 (iv) 燃料를 加壓分散시키는 壓力噴射式 (Pressure Jet) 버어너 등이 있다.

6. 結 語

以上 Bunker-C 重油에 關해 實用的인 立場에서 그 性狀, 問題點 등을 考察하였거니와 貧弱하고 不充分한 內容을 謝過하며 이 小考가 Bunker-C 重油로의 轉換에 있어 若干이라도 參考되는 바가 있으면 多幸으로 생각한다.

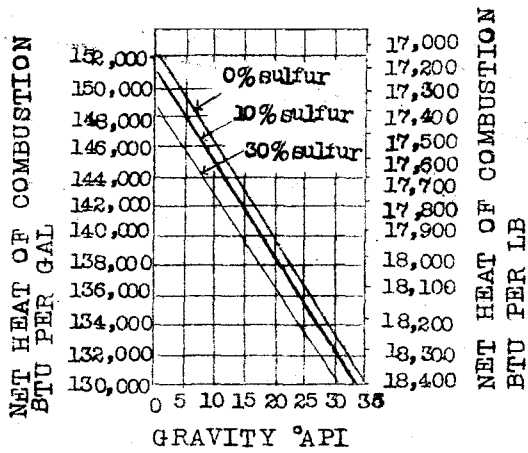


Fig. 8 Heating value of fuel oils

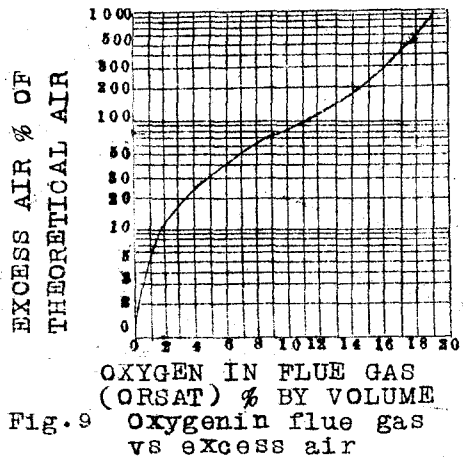


Fig. 9 Oxygen in flue gas vs excess air

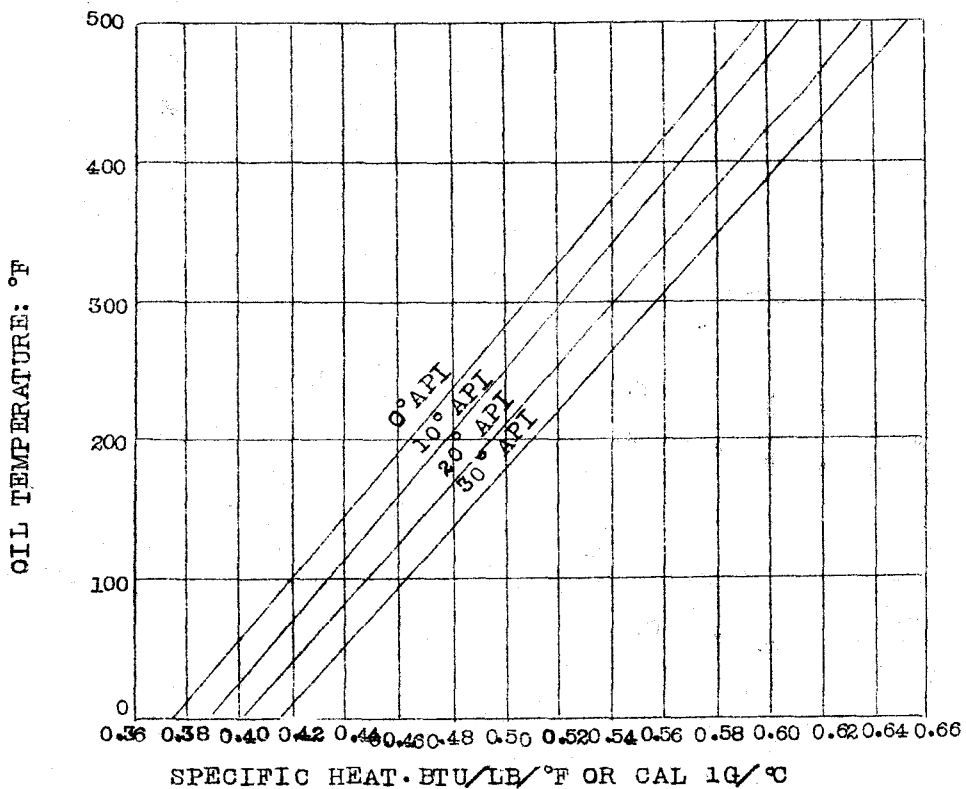


Fig. 10 Specific Heat of fuel oils

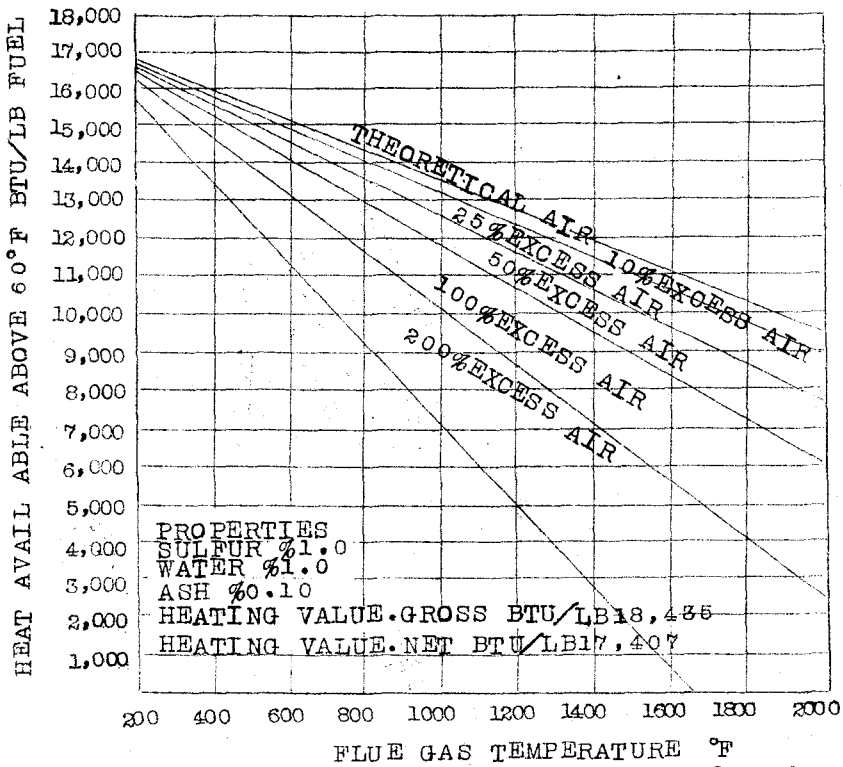


Fig. 6 Heat available from the combustion of a 15°API fuel oil

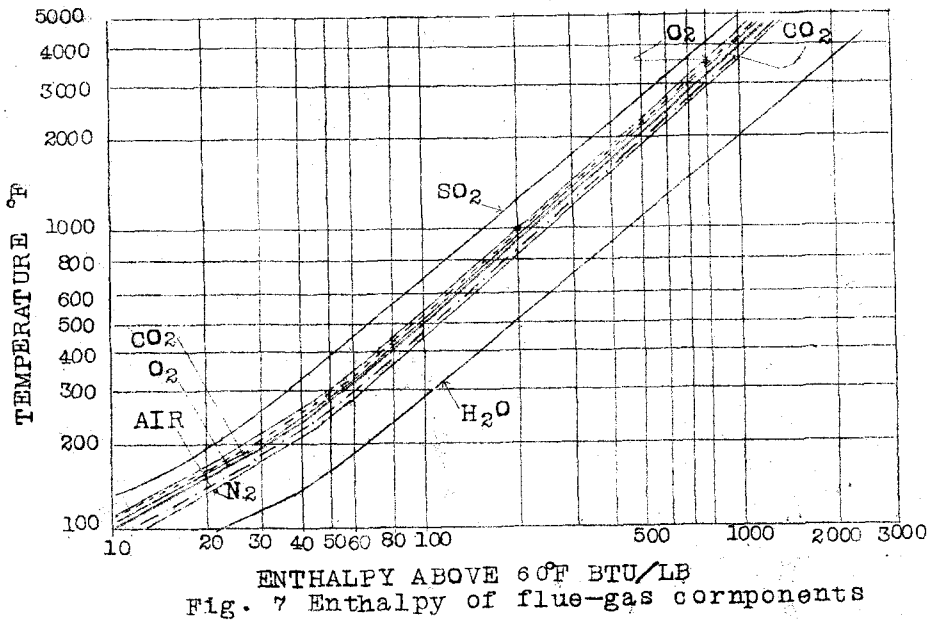


Fig. 7 Enthalpy of flue-gas components