

연소 관점에서 본 연료 품질 판단 방법

김정도⁺·조권희¹·최재성¹

Methodology to evaluate Fuel Quality in terms of Ignition and Combustion

Jeong Do, Kim⁺, Kwon Hae, Cho¹ · Jae Sung, Choi¹

Abstract : The ignition quality in diesel engines is one of the most important factors influencing their performance. While the ignition quality of distillation fuels is judged with Cetane Number, Cetane Index, and Diesel Index, that of residual fuels blended with distillation fuels is done by using CCAI. Since the 1980s, because of the development in the blending technology and the complexity, it has been difficult to make a judgement on the ignition quality of the fuels with CCAI. Hence, in order to solve the problems, it is ECN that researchers are studying in depth. In this paper, After reviewing the values such as Cetane Number, Cetane Index, Diesel Index, CCAI, and CII, we will introduce ECN and predict the possibility of using it.

Key words : CN(Centane Number), Calculated Cetane Index, Diesel Index, CCAI(Calculated Carbon Aromaticity Index), CII(Calculated Ignition Index), ECN(Estimated Cetane Number)

1. 서론

연료의 착화성(Ignitionability 또는 Ignition quality)은 디젤기관의 연소 성능을 판단하는 중요한 요인이다. 착화성을 가늠하는 척도로써의 착화지연은 그 기간이 길어질 경우 연소실 내 미연 연료 축적으로 인해, 착화가 일어 날 때 상대적으로 빠른 압력 상승을 촉발하며 이는 디젤 녹크 및 기관의 손상을 야기한다. 착화 이후, 연소기간에서 연소상태가 불량할 경우 낮은 최대폭발 압력 및 불완전 연소로 인한 과대한 soot 등을 발생 시키며 기관 운전에 장애를 일으킬 수 있다.

상선의 경우 주로 사용되는 연료는 잔사유(Residual fuel oil)에 증류과정을 통해 얻어진 연료유를 배합(blending)한 제품을 사용하고 있다[1]. 대부분의 경우, 착화성이 좋지 않으면 착화 이후의 연소과정 또한 불량하지만 착화성과 연소 성능은 반드시 일치된 상관 관계를 보이는 것은 아니다.[2] 다음의 그림1[3]은 경질유와 잔사유를 배합한 연료의 착화성과 연소특성을 보여주고 있다.

그림1의 우측 상, 하 그래프는 경질유와 잔사유 각각의 증발 온도에 따라 착화가 두 단계로 나누어져 이루어지고 있음을 보여준다. 배합과정을 거친 상선의 연료는 배합이후 즉, 공급받은 연료의 착화성 및 연소 성능을 판별 할 수 있는 연료 평가 방법이 필요하다.

2. 기존의 연료품질 평가 방법

(1) 세탄가(CN, Centane Number)

세탄가는 증류과정을 통해 획득한 디젤기관용 연료의 착화성과 착화 이후의 연소 특성을 정량적으로 나타내기 위해 1930년대부터 도입된 측정치이다.

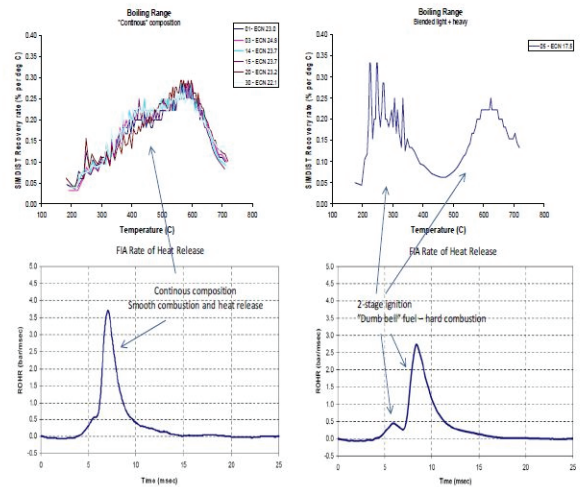


그림 1. 배합한 연료의 착화 및 연소 특성

세탄가의 측정과정은 CFR기관을 이용하여 상사점 전 13° 를 연료분사 시점으로 정하고 측정하고자 하는 시료를 착화 시켜, 착화 시점이 상사점이 될 때까지 압축비를 조정한다. 압축비의 조정이 완료된 후 변경된 압축비에 해당하는 지침 값을 읽고 도표를 통해 해당하는 표본 연료의 세탄가를 인지한 후 보간법[4]을 이용하여

⁺ 한국해양대학교 대학원, E-mail:number101@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4875

¹ 한국해양대학교

구한다.[5]

$$CN = n - \text{cetane} + 0.15 \times \text{HMN} \quad (2.1)$$

식 (2.1)은 표본 연료의 세탄가를 얻는 식이며 우측 항에 두 번째 항의 경우, 기존 알파메칠 나프타렌(α -methyl naphthalene, $C_{11}H_{10}$)이었으나 화학적으로 더 안정한 헵타메틸노네인(heptamethylnonane)으로 변경되었다.[6]

(2) 세탄지수(Cetane Index), 디젤지수(Diesel Index)

세탄가의 경우 측정 과정의 시간적, 물적 비용의 문제가 있으므로 보다 간편한 식 (2.2)의 세탄지수가 개발되었으며 CCI(Calculated cetane index)라고도 한다.[7]

$$\text{Cetane Index} = 454.74 - 1641.416D + 774.74D^2 - 0.554B + 97.803(\log B)^2 \quad (2.2)$$

세탄지수는 증류과정을 통해 획득한 디젤연료의 물성치를 통해 사용 연료의 착화성을 판별하는 지수이다. 그리고 디젤지수의 경우 API 비중과 각 탄화수소와 용해되는 최저 온도 값이 다른 아닐린을 이용하여 사용 연료의 착화성을 판별하는 지수이다. 이를 통해 파라핀성, 나프텐성, 방향족성의 여부를 판단할 수 있으며 식은 다음과 같다.[8]

$$\text{Diesel index} = \text{aniline point} \times \text{API gravity} \times \frac{1}{100} \quad (2.3)$$

세탄가, 세탄지수, 디젤지수의 경우 증류과정을 통해 생산한 디젤연료의 착화성을 판단하는 척도로 이용되고 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 현재 상선의 연료유로 사용되는 제품의 경우 잔사유(Residual fuel oil)에 증류과정을 통해 얻어진 연료유를 배합(blending)한 것을 사용하고 있으므로 이 값들은 선박에서 사용되는 연료유의 착화성을 판별함에 있어 뚜렷한 한계점을 가지고 있다. 이에 대한 해결책으로 1983년 Zeelenber는 CCAI 도입의 적절성을 언급한 바 있다.[9]

3. 배합된 잔사유의 품질 평가 방법

(1) CCAI(Calculated carbon aromaticity index), CII(Calculated ignition index)

Zeelenber는 밀도-착화지연, 점도-착화지연, 및 방향족성-착화지연 등의 상관관계를 조사하여 배합된 잔사유의 착화성을 CCAI를 통해 판별하였다.[10]

$$\text{CCAI} = D - 140.7 \log(\log(V + 0.85)) - 80.6 - 483.5 \log\left(\frac{T + 273}{323}\right) \quad (3.1)$$

CCAI는 배합된 잔사유에서 탄화방향족성(carbon aromaticity)과 착화지연은 상관관계가 있다는 점과 탄화방향족성은 밀도, 점도와 상관관계가 있다는 점을 전제로 한다. 세탄지수의 도입과 동일한 이유로 아래의 CII 또한 배합된 잔사유의 착화성을 판별하는 지수로 사용된다.

$$\text{CII} = (270.795 + 0.1038 T) - 0.254565D + 23.708 \log(\log V + 0.7) \quad (3.2)$$

CCAI와 CII는 사용 연료의 물성치를 통해 획득할 수 있으므로 사용자에게 편리한 지수로 여겨져 왔으나 배합기술이 발전함에 따라 배합된 잔사유들 중 유사한 CCAI의 값을 나타내는 연료들일지라도 착화성은 상당한 차이가 발생하는 사례들이 늘어나게 되었으며 이에 따라 배합된 잔사유의 착화성을 판별하는 새로운 지수의 개발을 요구 받게 되었다.

4. 검토 중인 배합된 잔사유 품질 평가 방법

(1) ECN(Estimated Cetane Number)

배합된 잔사유의 착화성과 착화이후의 연소특성을 나타내기 위해 현재 ECN(Estimated Cetane Number)을 검토 중에 있다. 정적연소실(CVCC)하에서 배합된 잔사유를 연소시키는 IP 541/06[11] 방법과 장치인 연소분석기(FCA, Fuel Combustion Analyzer)의 개략도는 그림2[12]와 같다.

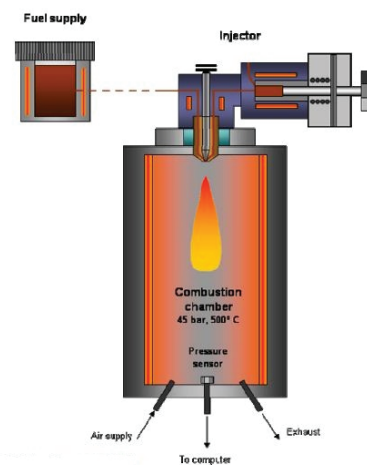


그림 2. 연소분석장치

그림3, 4[13]에서 ID(Ignition Delay)는 연료 분사 시점에서 최대연소압력의 1%가 되는 시점까지의 기간을 말하며, MCD(Main Combustion Delay)는 연료 분사 시점에서 최대연소압력의 10%가 되는 시점까지를 의미한다. MCP(Main Combustion Period)의 경우 최대연소압력의 10% 시점에서 90%까지를 가리킨다. 배기 배출물 발생에 주요한 영향을 미치는 ABP(After Burning Period)는 현재 종료 시점의 결정에 대해 논의 중이다. 그림3, 4의 각 약어들은 용어설명 부분을 참조하기 바란다.

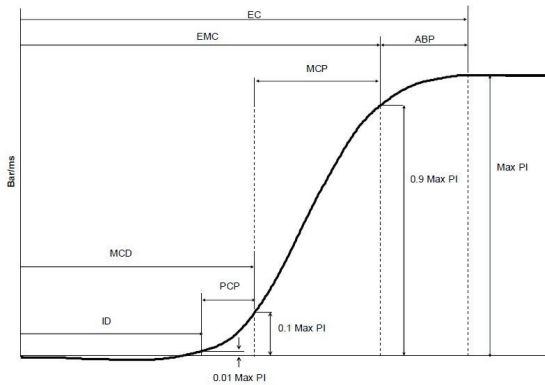


그림 3. IP541/06 시험방법을 통해 얻어진 연소 특성
관별 관련 파라미터 1

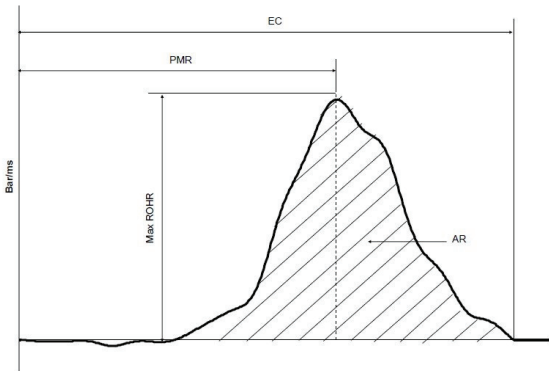


그림 4. IP541/06 시험방법을 통해 얻어진 연소 특성
관별 관련 파라미터 2

이러한 과정을 통해 얻어진 ECN의 식은 다음과 같다.[14]

$$ECN = 15315e^{-0.2861MCD} \quad (4.1)$$

식 (4.1)에서 나타나 있는 바와 같이 ECN값을 결정짓는 변수는 MCD이고, CCAI와 ECN과의 상관관계와 CCAI, ECN과 착화성에 대한 개략도는 다음과 같다.

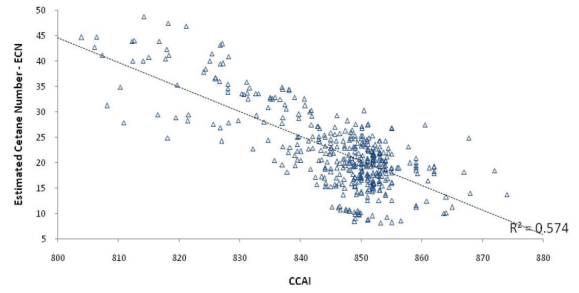


그림 5. CCAI와 ECN의 상관관계

CCAI와 ECN의 대체적인 상관관계는 반비례이다. 그러나 그림5[15]에 나타나 있는 바와 같이 배합된 잔사유들의 CCAI값이 동일함에도 불구하고 각기 다른 ECN값을 가진다. 이는 같은 CCAI값을 가지는 연료라도 CCAI의 주요변수인 밀도와 점도가 같지 않음을 인지할 수 있다.

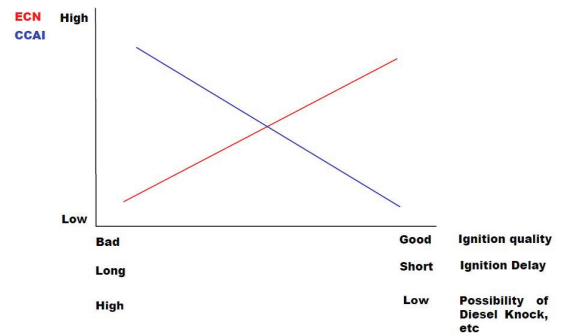


그림 6. ECN, CCAI와 착화성과의 관계

IP541/06 시험방법을 통해 착화 및 연소 시 압력의 변화를 측정하여 얻어지는 ECN은 시험 장치의 시험 조건과 실제 사용 중인 선박 디젤 기관의 운전 조건과의 상이함으로 인해 몇 가지 문제점을 안고 있다.

5. ECN의 문제점 및 전망

문제점과 관련하여 ECN을 구하는 과정에서 발생할 수 있는 문제점과 ECN을 구한 후 적용 측면에서 야기 될 수 있는 문제점에 대해 언급하고자 한다.

- 1) 선박용 디젤 기관의 압축행정에서 연소실 온도는 정적연소실에서의 온도보다 높다.
- 2) 선박용 디젤 기관의 연료분사 기간은 착화 이후에도 지속이 된다.
- 3) 배합된 잔사유별 ECN의 제한값(limits)에 대한 적절성 문제

1), 2) 사항은 ECN의 실효성에 대한 의문을 불러일으킬 수 있으며, 마지막 항의 경우 적절치 못한 제한값은 기관의 운전범위에 영향을 미치므로 충분한 연구와 논

의가 필요할 것으로 사료된다.

배합한 잔사유의 착화성을 판별하기 위해 CCAI의 도입을 한 경우를 반추해 보면 1980년대 이후 현재까지 배합 기술의 발전과 그에 따른 복잡성으로 인해 CCAI에서 ECN으로 교체될 가능성은 꽤 높다고 판단한다. 다만, CCAI는 1983년 Zeelenger가 언급한 이후 상당한 논의 기간을 거친 후 도입된 것이다. 위의 문제점들에 대한 해명 및 연이은 연구와 배합된 잔사유에 따른 적절한 제한값이 도출되기까지 심도 있는 논의 시간이 필요하다고 판단된다.

Nomenclature

ABP	After burning period
aniline point [°F]	애니린점
API gravity	API비중
	$\frac{141.5}{60^\circ\text{F에서비중}} - 131.5$
B [°C]	시료의 전체 양 중 50% (용적비율)로 증류되는 온도
CCAI	Calculated carbon aromaticity Index
CFR engine	Cooperative fuel research manufactured by Dresser Waukesha, USA
CP	Combustion period
CVCC	Constant volume combustion chamber
D [kg/m ³]	밀도, 15°C에서
ECN	Estimated Cetane Number
EMC	End main combustion
FCA	Fuel combustion analyzer
HMN [%]	heptmethylnonane, [용적비율]
ID	Ignition delay
MCD	Main combustion delay
MCP	Main combustion period
n -cetane [%]	세탄가 [용적비율]
SIMDIST	Simulated distillation
T [°C]	점도온도
V [cST]	동점도

참고문헌

[1] 외교통상부 국제경제국 에너지기후변화과, “OPEC 개황”, 외교통상부, 2009, pp. 71-73

[2] CIMAC, “Fuel quality guide - ignition and combustion”, The International Council on Combustion Engines, 2011, pp. 5

[3] CIMAC, “Fuel quality guide - ignition and combustion”, The International Council on Combustion

Engines, 2011, pp. 6

[4] ASTM, ASTM D613, “Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil”, pp. 8

[5] John B. Heywood, “Internal combustion engine fundamentals”, McGRAW-HILL International Editions, 1988, pp. 542

[6] John B. Heywood, “Internal combustion engine fundamentals”, McGRAW-HILL International Editions, 1988, pp. 541

[7] ASTM, ASTM D976, “Standard Test Method for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels”, pp. 2

[8] John B. Heywood, “Internal combustion engine fundamentals”, McGRAW-HILL International Editions, 1988, pp. 542

[9] Zeelenberg, “The ignition performance of fuel oils in marine Diesel engines”, CIMAC Conference, 1983

[10] ISO, ISO8217, “Petroleum products-Fuels (class F) - Specification of Marine Fuels”, pp. 18

[11] Energy Institute, “IP541/06 - Determination of Ignition and Combustion Characteristics of Residual Fuel”, Energy Institute, 2006

[12] CIMAC, “Fuel quality guide - ignition and combustion”, The International Council on Combustion Engines, 2011, pp. 18

[13] CIMAC, “Fuel quality guide - ignition and combustion”, The International Council on Combustion Engines, 2011, pp. 17

[14] CIMAC, “Fuel quality guide - ignition and combustion”, The International Council on Combustion Engines, 2011, pp. 17

[15] CIMAC, “Fuel quality guide - ignition and combustion”, The International Council on Combustion Engines, 2011, pp. 14