



물 10%가 혼합된 유화연료유를 적용한 Bunker-C유 보일러버너의 황산화물(SO₂)저감 실험적 연구

이태호 · 이지근[†]

한국폴리텍대학(교수) · [†]전북대학교(교수)

An Experimental Study on the SO₂ Reduction of Water 10% Mixed Emulsified Oil Applied to Boiler-Burner Using Bunker-C Oil

Tae-Ho LEE · Jee-Keun LEE[†]

Korea Polytechnic Colleges(professor) · [†]Chonbuk National University(professor)

Abstract

Recently air pollution is becoming a global environment issue. Especially, the smoke from engines and boiler systems, which burn fossil fuels directly, is an extremely serious issue. For this reason, IMO is tightening regulations for the control of NO_x and SO_x. Therefore, in this study, the SO₂ reduction effect of emulsified oil mixed with 10% of water was tested after applying the emulsified oil to an industrial boiler burner using Bunker-C oil. The study showed that the exhaust gas oxygen concentration of emulsified oil was nearly 1.3% high and this was identified by the effect of dissolved oxygen contained in water. Also, based on the standard oxygen concentration(4%), the average SO₂ reduction rates were 28.54%, which means the reduction efficiency was high.

Key words : Emulsified oil, Exhaust emission, SO_x, Bunker-C, Boiler burner, SO₂, NO_x

I. 서론

화석연료의 사용으로 인한 대기오염은 전 세계적으로 증가하고 있어 최근 그 문제점이 더욱 심각하게 인식되고 있다. 특히 선박, 차량, 항공기 및 열을 발생시켜 에너지를 생산하는 산업용 장치에서 사용된 각종 연료에 의해 매연 및 대기오염물질은 매우 심각한 수준으로 증가되고 있다. 또한 최근 국제해사기구(International Maritime Organization)는 선박에서 배출되는 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO₂) 및 이산화탄소(CO₂) 배출량이 전체 운송수단에서 발생하는 총 배출량 대비 각각 14%, 5% 및 2%를 차지하는 것으로 발표한

바 있다(IMO, 2005). 이에 국제해사기구는 선박용 엔진 및 발전기, 보일러 등 각종 연소장치에 의해 발생하는 대기오염물질의 심각성을 인지하고, 선박에서 발생하는 배기 배출물을 규제하기 위해 황 함유량이 낮은 저유황 연료유를 사용하여 황산화물을 절감하거나 국제해사기구가 규정하는 NO_x 배출 허용치를 만족할 수 있는 엔진 장치를 의무화하고 있다(Choi et al., 2013). 이러한 대기오염물질 및 배기 배출물을 저감하기 위하여 연구는 세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 그 중 화석연료를 개선하지 않고 특정한 장치를 적용시켜 배기 배출물을 저감할 수 있는 배기가스 재순환 장치(EGR)나 선택적 촉매 환원(SCR), 디젤 미

[†] Corresponding author : 063-270-2369, leejk@jbnu.ac.kr

립자 필터(DPF) 등이 가장 보편적으로 적용되고 있는 배기 배출물 저감장치이다(Lee et al., 2016).

상기와 같은 저감장치의 장착 외에 근본적인 기계적 기술의 개선뿐만 아니라 화석연료 자체의 개선을 통해 배기 배출물을 감소시키는 연구도 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 디젤유에 바이오연료를 적용한 바이오디젤이나 DME 방식(Dimethyl ether) 또는 물질 간 혼합을 통한 에멀전(Emulsified) 등이 있다(Yeom et al., 2019).

이러한 대체 연료는 기계장치의 구조를 변경하지 않고 바로 적용 하면서 비교적 높은 출력과 배기오염물질을 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 최근 Choi(2018)등은 팜유 기반 바이오 디젤 연료가 디젤기관 배기 배출물 및 매연 입자 특성에 미치는 효과에 대한 연구를 진행하였고, Kim (2019)등은 CRDI 기관에 20% 바이오디젤을 적용하여 다양한 조건에서 연속 운전한 결과를 통해 기관 내부 부품에 영향을 미치지 않아 바이오연료의 신뢰성을 확인하였다. 또한 Choi(2013)등은 유화제를 사용하지 않고 오직 균질기에 의해 혼합된 물과 병커유의 혼합유가 배기가스 배출 저감에 효과가 있다는 연구를 진행한 바 있다. 또한 Bunker-C유에 산업용 폐수와 축산 폐수를 혼합 연소하여 효율 안정성을 확보한 연구도 진행되었다(Chung, 2003).

본 연구에서는 기존의 바이오디젤유 및 균질기를 통한 액체 혼합유와 다르게 선박용 중유(Bunker-C Oil)에 10%의 물을 유화제를 통해 희석하고 약 90일간 유수분리가 되지 않도록 특수하게 제조한 유화연료유(Greens-tek. Co. Ltd, 2008)를 산업용 보일러 버너에 적용한 후 발생하는 배기가스 배출물인 황산화물(SO₂)의 저감 효과를 분석하고자 하였다.

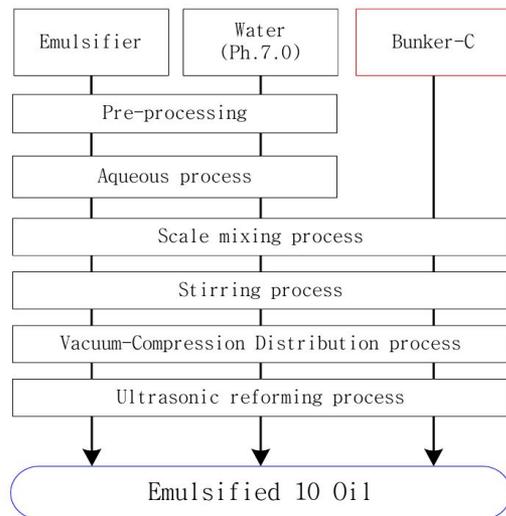
II. 연구 방법

1. 물-중유 혼합방식 유화연료유

실험에 적용된 두 연료는 기존 Bunker-C유와 국내 유화 연료유 생산업체인 ㈜그린텍에서 자체 개발한 Bunker-C유와 체적분율로 계상된 물 10%를 혼합한 유화연료유를 사용하였다. 본 유화연료유는 Bunker-C유와 카바이드수용액(물과 유화제)을 혼합 한 후 가열하여 교반하고, 이온 결합(초음파투사) 및 중유 보일러 사용 정도에 맞도록 용제를 첨가한 유수분리가 되지 않는 친환경 대체연료로 알려져 있다(Greens-tek. Co. Ltd, 2019).

특히 본 유화연료유는 석유 및 석유대체연료사업법에서 규정하고 있는 유화 연료유의 조건인 생산시점에서 약 90일간 유수 분리가 되지 않는 저장안정성을 확보한 혼합유이다(Korea Institute of Petroleum Quality, 2008).

[Fig. 1]은 유화연료유의 제조공정을 나타낸 것이고, <Table 1>은 국내 연료 측정 공인기관인 한국석유관리원에 시료분석 측정검사를 의뢰하여 Bunker-C유와 유화연료유 물성치를 서로 비교한 것이다(Korea Petroleum Quality and Distribution Authority, 2019).



[Fig. 1] Schematic diagram of Manufacturing Process of Emulsified 10 Oil.

<Table 1> Properties of Bunker-C Oil and Emulsified Oil Material

Specification	Oil Material		Standard Testing Method
	Bunker-C	Emulsified 10	
Water Content (Vol, %)	0.6	10.5	KS M ISO 3733:2008
Sulfur Content (m/m, %)	0.28	0.25	KS M ISO 2414:2011
Viscosity @ 50°C (cSt)	78.92	147.4	KS M ISO 3104:2008
Flash Point (°C)	172	100 (More than)	KS M ISO 2592:2007
Gravity API @60°F S.G @ 15/4°C	0.9171	0.9266	KS M ISO 12185:2003

분석 결과 두 연료의 수분함유량은 Bunker-C유는 0.6%인 반면 유화연료유는 10.5%로 측정되었다. 황 함유량은 0.28%, 0.25%로 감소하였고 이는 연료와 수분의 희석으로 판단되었다. 동점도는 Bunker-C유 78.92cSt, 유화연료유는 147.4cSt로 더 높게 나타났으며 이는 유화연료유 제조에 함유된 유화제의 계면활성성분이 가지고 있는 점성으로 인해 일부 상승한 것으로 판단하였다. 밀도는 각각 0.9171과 0.9266으로 측정되었다. 인화점은 Bunker-C유가 172°C, 유화연료유는 100°C 이상으로 나타났는데 이는 열을 가하는 ISO2592:2007 표준시험 특성상 100°C부근에서 연료 내에 포함된 수분의 증기 과량 발생 및 끓어오름 현상으로 인해 100°C 구간보다 높은 온도의 인화점 측정은 불가하였기 때문이며, Bunker-C유의 국제 표준 기준인 60°C 이상 조건을 충분히 만족하여 안정성을 확보하였다.

2. 배기가스 측정장치

실험을 위한 보일러 버너 연소장치는 산업용 Bunker-C유 보일러 전용으로 사용되고 있는 FBR사의 FNP-100(2) 건-타입 버너를 사용하였고 그 세부사양은 <Table 2>와 같다(F.B.R Korea, 2012).

산업용 보일러 버너와 측정을 위한 실험장치 및 실험과정을 [Fig. 2]에 나타내었다. 보일러 운

전으로 발생하는 배기 배출물을 실시간으로 측정하기 위하여 국립환경과학원 보일러 연소가스분석 형식승인을 받은 Testo-340을 사용하였으며 <Table 3>에 실험항목의 세부사양을 나타내었다 (Testo. Co. Ltd, 2010 and National Institute of Environmental Research, 2012).

<Table 2> Specifications of Burner FNP-100(2)

Specification	Technical Data
Thermal Power(kw)	455-1137
Fuel Oil	Heavy Oil
Fuel Consumption(kg/hr)	40-100
Max. Temperature Combustion Air(°C)	60
Weight Burner(kg)	100
Electric power(kw)	11.2
Motor Fan(kw)	2.2
Supply Voltage(V)	220-380

<Table 3> Specifications of Gas Analyzer

Measured	Capacity	Margin of Error(%)
O ₂ (Vol.%)	0-25	0.05
NOx(ppm)	0-500	0.12
SO ₂ (ppm)	0-5000	1.00



[Fig. 2] FNB-100(2) Gun-type Burner Assembly.

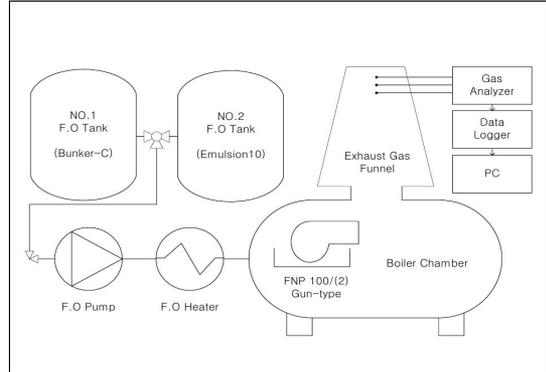
연소가스분석기의 승인된 공인측정 오차범위는 질소산화물(NOx) 0.12%, 황산화물(SO₂) 1.00%, 산소(O₂) 0.05% 수준이었다.

3. 실험 방법

본 실험은 보일러 내부와 주위환경이 서로 동일한 조건일 때 공급된 연료인 Bunker-C유와 수분 10% 혼합된 유화연료유로 변경하여 비교실험을 실시하였다. 연소 안정화를 위해 초기 점화 후 약 1시간 시점에서 10분간 연속으로 1초 단위 측정을 실시하였다. 또한 점화 후 연속운전 하였을 때 단위시간동안 발생하는 배기 배출물의 성

<Table 4> Experiment Condition and Set Value

Experiment Condition	Values
Test Oil Type	Bunker-C, Emulsion 10
Oil Pressure (kg/cm ²)	21.4
Oil Flow rate(l/hr)	45.4
Oil Temperature(°C)	124-135
Air Temperature(°C)	29.2-32.1
Operating Condition	Measurement was carried out for 10minutes per 1sec, continuously after 1 hour of operation



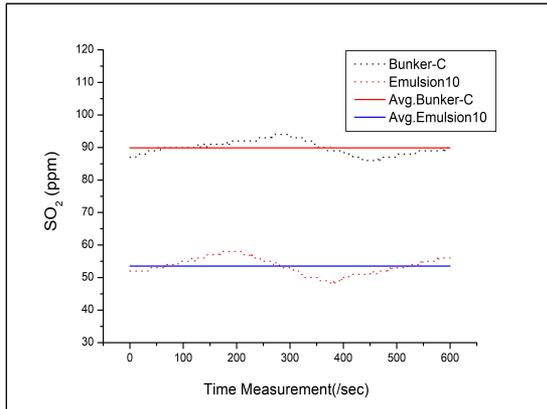
[Fig. 3] Schematic Diagram of Apparatus.

분 중 배기가스 함산소 농도(O₂), 황산화물(SO₂) 두 항목의 특성을 상호 비교 분석하였다. <Table 4>는 본 실험조건이며 [Fig. 3]은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

Ⅲ. 연구 결과

1. 황산화물(SO₂)

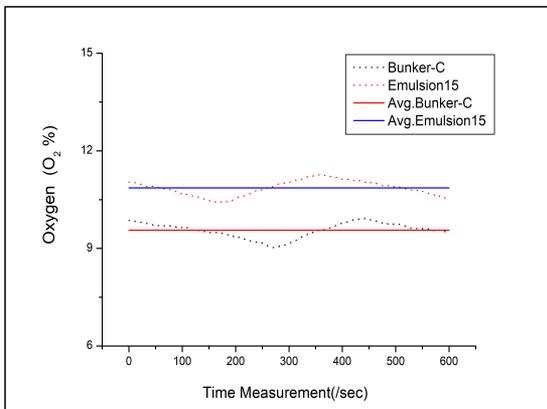
실험 환경이 서로 동일한 조건에서 두 연료의 10분간 연속 측정한 황산화물(SO₂)의 실제 측정 발생량(Actual data)을 [Fig. 4]에 나타내었다. Bunker-C유의 10분간 평균 발생량은 89.89ppm, 순간 최대 발생량 94ppm, 최소발생량 86ppm으로 나타났으며 표준편차는 ±4.0ppm이었다. 유화연료유는 평균 발생량 53.54ppm, 순간 최대 발생량 58ppm, 최소 발생량 49ppm으로 나타났고 표준편차는 ±4.5ppm이었다. 두 실측값을 비교한 결과 물 10%가 혼합된 유화연료유가 Bunker-C유에 비해 황산화물(SO₂)이 평균 40.4% 감소하였고 최대 47.9% 감소하여 저감 효과가 매우 높게 나타나고 있다. 이는 유화연료유가 Bunker-C유에 비해 황 성분이 없는 순수한 수분과의 혼합으로 인한 단위 체적 당 황 함유량이 낮아져 희석된 원인으로 알 수 있다(Lee, 2018).



[Fig. 4] Results of Actual Gas Emission for SO₂.

2. 배기가스 함산소 농도(O₂)

실험 환경이 서로 동일한 조건에서 두 연료의 10분간 연속 측정된 배기가스 함산소 농도를 [Fig. 5]에 나타내었다. 10분간 평균 발생량은 9.57%, 순간 최대 발생량 9.92%, 최소 발생량 9.03%으로 측정되었다. 유화연료유는 평균 발생량 10.87%, 순간 최대 발생량 11.27%, 최소 발생량 10.40%으로 나타났다. 연료의 두 실측값 모두 물 10%가 혼합된 유화연료유가 Bunker-C유에 비해 배기가스 함산소 농도(O₂)가 평균 1.3% 증가하였는데 이는 유화연료유 수분에 함유된 용존산소 등의 특성으로 판단된다.



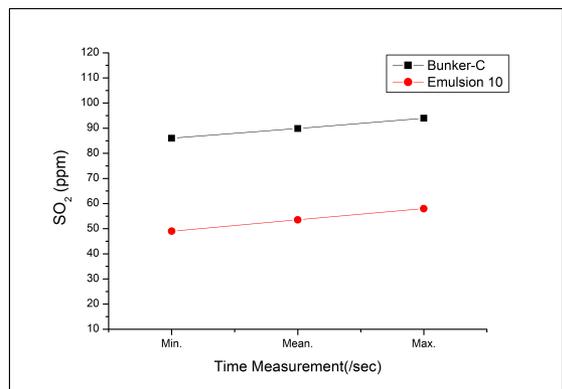
[Fig. 5] Results of Actual Gas Emission for O₂.

3. 표준산소농도기준 적용 황산화물

국내 대기환경보전법상 대기오염물질의 배출 허용기준(제15조 관련)에 따르면 액체연료를 사용하는 보일러의 질소산화물은 대기 중 산소가 21%일 때 표준산소농도 4%를 적용하여야한다 (Ministry of Environment, 2019). 이는 연료에 따라 발생되는 연소가스가 공급 공기와의 희석량과 성분비가 서로 다를 수 있기 때문이다. 따라서 [Fig. 4] 및 [Fig. 5]에 나타낸 황산화물과 배기가스 함산소 농도 실제 측정값(Actual data)을 식(1)에 나타낸 산출법을 활용하여 재계산하였으며 이때 산소농도 보정계수 4%를 적용하였다. 여기서 O₁₂는 대기 중 산소농도가 21%일 때의 표준산소

$$SO_2 [ppm, 4\%] = SO_{2(actual)} \cdot \frac{21 - O_{12}}{21 - O_{22}} \dots\dots\dots (1)$$

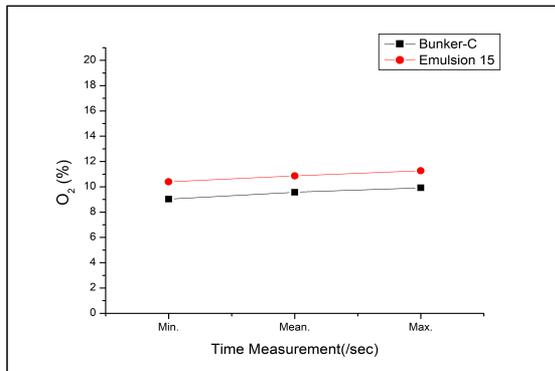
농도 4%, O₂₂는 실제 배기가스 산소농도 이며 SO_{2(actual)}은 실측된 황산화물이다. [Fig. 6]은 가스 분석장치로 실측된 두 연료의 황산화물 총 평균값(mean), 순간 최대값(max), 최소값(min)을 비교하여 나타내었고 [Fig. 7]은 배기가스 함산소 농도의 총 평균값, 순간 최대값, 최소값을 비교하여 나타내었다.



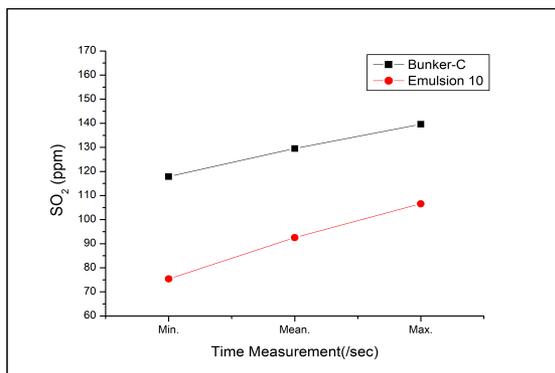
[Fig. 6] Results of Average Gas Emission for SO₂.

식(1)의 산출법을 통해 도출된 황산화물의 표

준 발생량은 [Fig. 8]과 같으며 표준산소농도 기준을 적용한 황산화물은 수분 10% 함유된 유화연료유가 Bunker-C유에 비해 평균 28.54% 감소하여 높은 저감 효과가 나타났다. 또한 본 연구의 실험조건 내에서 일부 순간 최대 46.01%까지 감소하였으나 이는 공기희석과 표준산소 농도에 따라 황산화물이 많은 영향을 받는 유동적인 순간 변동오차로 판단할 수 있었다.



[Fig. 7] Results of Average Gas Emission for O₂.



[Fig. 8] Experiment results for Standard Emission (4%) of Fuel Comparison.

IV. 결론

Bunker-C유를 사용하는 산업용 보일러버너에 물이 10% 혼합된 유화연료유를 연소하였을 때,

황산화물 저감 효과 및 배기가스 중 합산소 농도를 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 주위환경과 연소조건이 동일할 때 장치로 실제 측정된 두 연료의 황산화물은 유화연료유가 Bunker-C유에 비해 평균 40.4%, 최대 47.9% 감소되었다.

(2) 배기가스 합산소 농도는 유화연료유가 전반적으로 약 1.3% 높게 나타났으며 이는 연료 내에 존재하는 10% 수분에 포함된 용존산소 등의 영향으로 판단되었다.

(3) 실측된 두 값을 통해 표준산소농도기준 4%를 적용하여 산출하였을 때 배출된 황산화물은 유화연료유가 Bunker-C유에 비하여 평균 28.54% 감소되어 높은 저감 효과가 나타났으며, 이는 수분과 혼합으로 인한 단위 체적당 황 함유량이 낮아져 희석된 원인으로 알 수 있다.

(4) 본 연구의 실험범위 내에서 Bunker-C유에 비해 유 황산화물이 일부 최대 46.01% 감소되는 경향이 나타났으나 이는 공기희석과 표준산소농도의 유동적인 변화에 따른 순간 변동오차로 판단할 수 있었다.

본 실험의 건-타입 보일러 버너는 공급공기량의 비례제어가 불가능한 고정값 조건이므로 공급공기가 최적화상태로 비례제어가 가능할시 배기배출물 저감 효과는 더욱 개선될 것으로 판단되었다. 향후 완전연소 조건에 따라 공급공기 비례제어가 가능한 로터리식 액추에이터 버너에 두 연료를 적용한 실험을 실시할 계획이다.

References

Choi JH, Choi JS, Han SG, Park SK, Park RS and Kim DH(2013). A Study on Characteristics of Exhaust Gas Emissions of Water-Bunker Oil Mixed by Homogenizer, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 19(5), 518~524.
<http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.5.518>
 Choi NJ, Kim HY and Ge JC(2018). Effects of Palm Oil Biodiesel Blended with Diesel Fuel on the

- Exhaust and Soot Morphology Under Idle Speed Condition in a CRDI Engine, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 20(5), 580~588.
<http://dx.doi.org/10.17958/ksmt.20.5.201810.580>
- Choung JD(2003). An Experimental Study on the Combustion Characteristics of Wastewater-Emulsion Fuel, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 12(4), 267~273.
- F.B.R Korea(2012). Burner for Heavy Oil at Two Stages of Catalogues Data Sheet, 1.
- Greens-tek, Co. LTD(2019). Emulsified Fuel Oil Manual, Greens-tek, 2~17.
- IMO(2005). Prevention of Air Pollution from Ships: Reducing Shipping Emissions of Air Pollution Feasible and Cost-effective Options, MEPC 53/4/1, 3~4.
- Kim HS and Choi SH(2019). The application characteristics on biodiesel 20% with CITY MODE in a CRDI engine, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 21(2), 306~310.
<http://dx.doi.org/10.17958/ksmt.21.2.201904.306>
- Korea Institute of Petroleum Quality(2008). The Test Report of Emulsified Fuel Oil Product NO.12, 1~3.
- Korea Petroleum Quality and Distribution Authority(2019). The Test Report TSC2019-3201B, 1~3.
- Lee, JT, Son JH, Kim JH, Jung SW, Yoo HM, Hong HK, Mun SH, Choi KH, Lee JT and Kim JS(2016). Characteristics of Air Pollutants Emission from Medium-duty Trucks Equipped EGR and SCR in Korea, *Journal of ILASS-KOREA*, 21(3), 130~136.
<http://dx.doi.org/10.15435/JILASSKR.2016.21.3.130>
- Ministry of Environment(2019). Standard for Emission Acceptance of Air Pollutants Article 15, *Air Quality Conservation*, 5~8.
- National Institute of Environmental Research(2012). Type Approval Form of Environmental Measuring Instrument, ASGAM-2012-2, 1.
- Park KS, Lee CH and Kim HJ(2018). A study on Perception and Response Strategy of Korean Ship Owners on Global Sulphur Cap 2020, *Journal of Korea Port Economic Association*, 34(4), 141~160.
- Testo, Co. LTD(2010). Instruction Manual for Testo-340 Flue Gas Analyser, Testo Korea, 49~51.
- Yeom JK and Yoon JH(2019). Numerical Analysis on Behavior Characteristics of Evaporative Spray of Emulsified Fuel Impinging on a Heated Flat Plate, *Journal of Mechanical Science and Technology B*, 43(7), 471~477.
<https://doi.org/10.3795/KSME-B.2019.43.7.471>
-
- Received : 13 November, 2019
 - Revised : 02 December, 2019
 - Accepted : 09 December, 2019