

초음파 수첨가 연소에 의한 석유 켄 히터의 배기가스 특성 고찰

An Investigation of Combustion Emission Characteristics of Kerosene Fan Heater with Addition of Water Droplets by Ultrasonic Atomizer

김 장 권 · 정 규 조

J. K. Kim and K. J. Jeong

Key Words : Kerosene Fan Heater(석유 켄 히터), Turbo Fan(터보 켄), Ultrasonic Atomizer(초음파 무화기), Water Droplets(물방울), Combustion Emission(연소생성물), Exhaust Gas(배기가스)

Abstract : This study is concerned with the emission characteristics of kerosene fan heater, which is burned with kerosene and water droplets simultaneously in the burner, in order to prohibit the emissions of harmful exhaust gas and reduce smell caused by incomplete combustion, and the addition of water droplets to the conventional kerosene fan heater was performed by ultrasonic atomizer. For the investigation of this study, the measurement of exhaust gas components and exhaust gas temperature was carried out by using an automatic combustion gas analyser and NO_x analyser, and the measurement of consumption weight of oil and water was obtained by using electric digital balance. Consequently, according as the water percent weight ratio of about 21~23 % was supplied for this study, it was found that the combustion-generated NO_x and CO emissions were reduced very largely, but the emissions of O₂ and CO₂ and the temperature of exhaust gas were not changed.

기호설명

- G : 연료 소비량 (gr/hr)
- G_w : 물 소비량 (gr/hr)
- N : 켄 회전수 (rpm)
- P₁ : 정유면기에 걸리는 압력 (mmAq)
- P₂ : 연소용 공기압력 (mmAq)
- Q : 석유 켄 히터의 난방 능력 (kcal/hr)
- Q_{AIR} : 연소용 터보 켄에 의한 풍량 (m³/hr)
- T : 배기가스의 온도 (°C)
- W_{PR} : 연료대비 물의 백분율비 (%)
- μ : 석유 켄 히터의 과잉 공기비 (-)

1. 서 론

산업이 급속히 발달되어 국가경제가 성장함에 따라 국민수준은 향상되나, 환경오염에 미치는 영

향은 날로 심화되고 있다. 이에 따라 선진국에서는 오래 전부터 환경오염을 해결하고자 많은 기술개발과 연구가 계속적으로 활발하게 진행되고 있다.

또한 현대사회가 복잡하게 발달되어짐에 따라 연소기를 사용하는 사람들의 욕구도 다양해져서 최근 건강에 관한 인식이 매우 대두되고 있는 현상도 생활수준의 향상과 산업발달로 인한 환경오염에서 오는 결과인 것 같다.

따라서 최근 연소 기기의 개발에 있어서 요구되는 새로운 기술은 인간생활에 쾌적한 환경을 조성시키며 완전연소를 통해 열효율 극대화 및 유해배기가스 성분과 냄새를 완전히 제거시켜 주는 것이라고 생각할 수 있다. 이런 목적으로 본 연구에서는 기존의 석유 켄 히터의 연소에 미세한 물 입자들을 혼합시켜 연소시키는 기술을 채택하였다.

연소시 물을 첨가시키는 연구는 1791년에 수증기(steam)를 가스터빈(gas turbine)에 투입하여 연소제어기술을 도모한 것이 최초의 물 첨가 특허로 출원되었으며¹⁾, 19세기 중반까지만 해도 액체연료가 석탄사용을 대체하기 시작하였기 때문에 수증

접수일 : 1999년 6월 14일

김장권, 정규조 : 군산대학교 기관공학과

기의 사용은 연료의 분무화를 향상시키는 수단으로서 도입되었다. 그러나, 물 첨가에 있어서 가장 관심을 끌었던 것은 내연기관에 관한 것이었다. 특히 1944~1959년에 걸쳐 물 첨가에 대한 수많은 논문들이 발표된 이래¹⁾, 최근까지 내연기관, 항공기관 및 각종 산업용 보일러(boiler) 등에서 응용되고 있다. 이들 연구는 주로 연소실 냉각작용과 폭발억제(anti-knock제) 및 유해 방출물 억제 등의 환경오염제어 측면에서 물이 연소과정에 미치는 물리적, 화학적 효과를 강하게 부각시켜 발표하여 왔다.

지금까지 액체연료의 연소시 물을 활용하는 형태는 주로 유화액(emulsion) 상태로 연구되어 발표되었다²⁾. 이들 논문은 기존 액체연료연소에 비해서 유화액이 더욱 빠르게 연소되고, 연소를 향상시키며, 질소산화물(NO_x)³⁻¹¹⁾과 검댕(soot)의 형성¹²⁻¹⁴⁾을 감소시킨다고 발표되었다.

Shaw³⁾는 가스터빈 연소기에서 물에 의한 질소산화물의 저감 크기를 예측할 수 있는 수식을 발표했으며, 메탄올(methanol) 연소로부터 발생하는 NO_x 발생량은 등유(kerosene) 형태 연료의 연소공기에 8.7%의 물을 첨가시킴으로써 얻어진 양과 일치하였고, 이 양은 등유형태 연료로부터 얻어진 NO_x 량에 4배 더 낮은 크기라고 발표하였다. Nicholls 등⁴⁾은 불꽃점화기관(spark ignition engine)으로부터 질소산화물의 방출량을 제어하기 위해서는 입구 매니폴드(manifold)에 물분사(water injection)를 하는 것이 효과적이라고 했으며, 이론적인 예측과 실험적 측정으로부터 엔진의 연료소비율과 비교할 수 있는 비율로 물을 분사시킴으로써 90%이상의 질소산화물이 저감될 수 있다고 발표하였다. Hilt 등⁵⁾은 가스터빈 연소기에서 질소산화물 방출량이 공기역학적인 수단과 물분사 수단이 결합됨에 따라 현저히 저감될 수 있다고 발표하였다. Dibelius 등⁶⁾도 가스터빈 연소기에서 질소산화물의 생성에 물분사의 영향을 검토한 결과, 전체 공기량에 2%의 수증기를 분사시켰을 때 질소산화물은 50%까지 저감되었고, 수증기량을 4%로 증가시키면, 질소산화물이 25%로 감소되어 줄어드는 것으로 발표하였다. 또 Marchionna⁷⁾는 가스터빈 연소기로부터 공기중 질량분율의 습증기당 19%의 일정한 지수비율로 습도를 증가시킴에 따라 NO_x 방출물 지표가 감소되며, NO_x 방출물에 대한 입구공기의 습도 영향은 시험된 온도범위(450~1050°C)에서 연소기 입구공기온도에는 무관하다는 것을 발표하였다. Turner 등¹¹⁾은 유화액 연소가 열적으로 발생된 NO_x (thermal NO_x)는 감

소시키나, 연료중 함유된 질소로부터 형성된 NO_x (fuel NO_x)에는 영향을 미치지 않는다고 발표하였다. 이 밖에도 많은 논문들^{3,8-10,16,18)}에서 물 첨가에 따른 질소산화물이 저감된다는 사실이 밝혀져 왔다.

Muller-Dethlefs 등¹²⁾은 액체연료의 연소시 첨가된 수증기는 반응과정에서 불활성 희석제로만 작용하는 것이 아니라 실질적인 역할을 하며, 탄소와 일산화탄소의 방출은 수증기가 첨가됨에 따라 감소된다고 발표하였다. 그리고, Rao 등¹³⁾은 층류화산화염에서 첨가된 물 농도의 증가에 따라 화염으로부터 검댕의 방출은 꾸준히 감소되며, 동시에 최대화염온도도 점진적인 감소가 뒤따라, 결국 물을 첨가한 화산화염에서 검댕의 감소 경향은 주로 열 효과에 기인한다고 발표하였다. 또한 Okada 등¹⁴⁾은 유화액 연료 입자들의 연소과정에서 미세폭발(mini-explosion) 현상을 관측하였으며, 이것이 연료를 공기에 보다 많이 노출시켜 연료만의 연소보다 연소속도를 급속히 진행시키는 것으로 제안하였으며, 연료속의 유화액으로 된 물은 검댕의 형성뿐만 아니라 화학반응에도 영향을 미친다고 발표하였다.

본 연구의 연소형태는 유화액 연료상태가 아닌 별도의 액체 연료분사에 미세한 물입자들을 연소용 공기에 실어 연소실내에서 강제 혼합시키는 형태로, 연소시 얻어지는 수(水)첨가 효과는 유화액 연료연소의 효과와 유사할 것으로 생각된다. 한편, 유화액 연료연소나 수첨가시 연소에 큰 영향을 미치는 것은 분사되는 물 입자의 크기로 대두되었다. 지금까지 물을 첨가하는 방법은 매우 다양하지만, 주로 노즐(nozzle)을 통한 가압분사 방식이 이용되었다. 노즐을 이용할 경우, 상온에서 분사되는 물 입자의 크기는 약 50~150 μm 로 매우 불규칙적으로 얻어지기 때문에, 연소과정시 많은 기화잠열(latent heat)이 필요하며, 증발시간이 길어지고, 또한 연소온도의 현저한 저하로 인해 불완전 연소의 원인이 되기도 한다.¹⁵⁾ 이에 따라 노즐 분사를 이용할 경우는 보통 수증기 상태로 분사하게 되나, 분무되는 입자가 크기 때문에 입자가 적은 경우보다는 연소특성이 저하하게 된다. 한편, 물의 분무 입자 크기를 약 3 μm 이하로 더욱 미세하게 확산시키면, 적은 양의 상온상태일지라도 연료와의 충분한 혼합으로 표면적이 증대하기 때문에 기화잠열이 적게 필요하며, 증발시간이 짧아지고, 연소온도의 현저한 저하가 초래되지 않아 연소특성을 개선하게 된다. 따라서 위의 조건을 가장 만족시키는 것은 초음파(ultrasonic wave) 진동자에 의한 분무화

이다.¹⁵⁾ 더욱이 초음파 무화장치내에 고속의 공기를 분사시킴으로써 대류유동(convective flow)으로 인한 미세한 물방울의 증발현상을 촉진시켜 약 3 μm 의 평균크기 이하로도 물방울 크기를 더 줄일 수 있다. 본 연구에서도 이 초음파 진동자를 이용하여 미세한 물입자들을 이용할 수 있었다.

초음파 진동자를 이용한 분무화 현상이 1927년 Wood & Loomis에 의해 최초로 보고된 이래 이에 대한 실험적 및 이론적 연구는 많은 사람들에 의해 관심사가 되어 왔다.¹⁹⁻²³⁾ Smith²⁰⁾는 기포(bubble)가 공진(resonant) 직경을 가지며, 이것이 초음파 영역에 도달할 때 격렬한 진동운동으로 표면을 교란시키고, 이어 유사한 영향을 미칠 수 있는 기포들을 계속 발생시킨다고 제시하였으며, Rozenberg와 Eknadiosyants²⁰⁾는 단일확산 물방울(monodisperse droplet)의 방출은 모세관과 이론에 의해 설명되고, 불규칙으로 추진되는 방출은 캐비테이션의 영향으로 가정한 바 있다. 한편, Sollner^{20,21)}는 캐비테이션(cavitation)이 액체 표면 근처에서 직접 발생되어 안개무(fog or mist)를 형성시킨다고 주장하였다. 또, Bisa 등²¹⁾은 작은 물방울(droplet) 직경이 주파수의 함수임을 보였으며, 모세관 표면파(capillary surface waves)는 분무화 과정속에 포함된다고 주장하였다. Crawford²²⁾는 물거품의 존재는 캐비테이션에 의해 공기가 액체 속으로 흡수된다고 했으며, Lang과 Esche²²⁾는 작은 물방울이 액체 표면에 존재하는 모세관과로부터 형성된다고 주장하였다. 이처럼 초음파 분무를 지배하는 이론에는 지금까지 여기상태(excited state)인 액체표면상에서 모세관과의 진폭이 성장함으로서 물방울들이 형성된다는 모세관과 이론과 분무는 단지 캐비테이션의 영향으로 발생된다는 캐비테이션 이론이 존재하는 것이라고 집중적으로 논의되어 왔다.

본 연구에서는 기존 석유 켄 히터를 개조하여 초음파에 의한 미세한 물입자들을 연소용 공기에 실어 연소실로 보낸 다음 연료와 함께 강제로 증발 혼합시켜 연소가 이루어지도록 하였으며, 물 첨가에 의한 연소시 배기가스의 특성이 어떻게 변화하는지를 알아보기 위해 물을 첨가하지 않은 기존 석유 켄 히터와 비교 검토하였다.

2. 초음파 진동자에 의한 분무화 원리

초음파 진동자의 출력이 증가함에 따라 얻어진 초음파의 압력은 대칭적으로 팽창하고, 수축하는 작용을 계속하기 때문에 액체를 진동시키게 되어,

초기에는 액체표면을 잔물결(ripple)로 만들다가, 이후 진동자 중심부위의 액체를 부풀리어 원뿔 액기둥을 형성시킨다. 출력이 더욱 증가할 때, 초음파에 의한 관성력이 액체의 점성력을 현저히 초과하게 되면, 액체 표면 근처에서 모세관 표면파가 수반되는 캐비테이션이 발생된다. 공기기포가 발생할 때까지 압력이 급격히 감소하게 되므로, 여기서 발생한 액체의 거품(기포)은 초음파 진동으로 높은 에너지를 함유한 채 유동을 한다. 따라서 압력이 높은 곳에 이르렀을 때, 공기기포들은 상호충돌과 함께 터져서 생기는 충격파로 인해 급작스런 부분적 고압을 형성하여 높은 주파수대 소음으로 “좌좌”소리가 발생됨에 따라 액체는 비틀리며 쪼개져, 부풀어진 액체기둥의 정점(crest)으로부터 액체막을 분열시키며, 폭발적으로 산란되어 액체의 분무(spray)가 연속적으로 발생된다. 이때 액체속에 포함된 미소 공기기포들은 캐비테이션 핵으로서 작용하며, 진동자가 더욱 강하게 진동함에 따라 미세한 공기기포는 부력의 작용에 의해 상승되고, 액체의 표면장력 때문에 구(sphere)를 형성한다. 또한 초음파가 작용하는 전체 유동장은 미세한 공기기포와 액체 상태로 존재하는 2상유동(two-phase flow)을 형성하게 된다. Lang²⁰⁾은 초음속으로 여기된 판위의 얇은 액체 층으로부터 발생한 평균입자크기는 액체표면상에 작용하는 모세관 파장에 비례한다는 것을 관측하여, 물방울 직경 D 를 진동자에 가해진 여기주파수(Exciting frequency) F 와 액체의 밀도 ρ , 표면장력 T 를 이용하여 식(1)로 제시하였다.

$$D = 0.34 \left(\frac{8\pi T}{\rho F^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

3. 수첨가 연소시 제반 연소특성

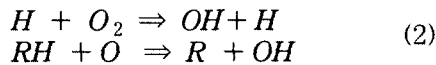
3.1 물리적 효과^{1,15)}

액체 연료 연소시 물을 첨가시켜 연소시켰을 때, 물리적 효과를 살펴보면 첫째, 연소실내에서 미세한 물방울의 급작스런 증발(evaporation) 현상과 미세폭발에 기인하여 액체 연료 입자가 큰 상태에서 매우 작은 크기로 분리되면서 연소용 공기와 접촉면적을 넓혀 연소상태를 개선시킨다는 연료의 2차 미립화 현상 촉진이 보고되고 있으며, 두 번째로 연료속에 물을 첨가시킴에 따라 혼합연료 속의 연료체적은 감소되며, 이때 검댕 입자들을 발생시키는 탄소 수는 감소하게 된다. 따라서 공기의 연

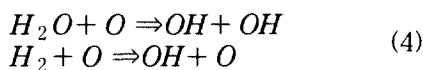
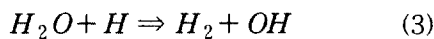
료 접촉비율이 증가되어 화염이 팽창되며, 화학적 반응이 가속되기 때문에 연료속의 물을 증가시킴에 따라 검댕 농도와 크기는 현저히 줄어든다는 검댕의 형성 억제 이론¹²⁾이 보고되고 있다. 또 세 번째로 화염온도의 감소현상을 들 수 있는데 연료속에 물을 첨가시킴에 따라 연소시 증발에 필요한 잠열이 필요하기 때문에 일반적으로 화염 온도가 낮아진다는 것이다.

3.2 화학적 효과¹⁾

액체 연료 연소시 물을 첨가시켜 연소시켰을 때 얻어지는 화학적 효과를 살펴보면, 첫째 NO_x 생성이 억제된다는 것이다. NO_x는 연소시 발생하는 질소화합물 NO, NO₂, N₂O₄, N₂O₅ 등을 총칭해서 말하는데, 주로 발생하는 질소화합물 중에는 Zel'Dovich 이론에 의한 NO가 대부분을 차지하게 된다. 이때 NO_x 발생은 국부적으로 높은 화염온도와 과잉공기 조건에 의해 주로 열적(thermal) NO_x 형태로 발생된다. 대부분의 NO는 매우 높은 온도가 존재하는 화염속에서 형성되므로 전체적으로 화염온도를 낮춤에 따라 NO_x 발생을 현저히 낮출 수 있다는 것이다. 두 번째로 일산화탄소가 억제된다는 것이다. 일반적으로 액체연료의 연소 반응식을 살펴보면, 반응식(2)로 나타낼 수 있다.

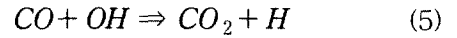


여기서 R은 탄화수소기(hydrocarbon radical)를 나타낸다. 반응식(2)에서 산소가 부족하게 되면, 반응식 중에서 OH기(hydroxyl radical)의 생성률이 무시되기 때문에 불완전 연소가 초래된다. 따라서 액체연료 연소중에 물을 첨가하게 되면, 다음 반응식들과 같은 물의 촉매효과(catalytic effect) 반응식으로 나타낼 수 있다.



이때 연소반응식(3)의 경우가 반응식(4)의 경우보다 더 빠르게 진행되어 액체연료 연소시 물을 첨가하게 되면 반응식(3)이 지배적으로 이루어진다고 가정할 수 있다. 따라서 액체연료 연소중에 물을 첨가시키게 되면, 반응식(2)에서 부족한 OH

기의 양이 반응식(3)에 의해 증가한다. 여기서 OH기는 탄소생성을 막아주는 역할을 하기 때문에¹⁾ 다음 반응식에 의해 CO와 반응하여 CO₂가 된다.



일반적으로 확산 화염속의 수첨가의 영향은 주로 열에 대한 것이다. 수첨가로 인해 낮아진 화염온도는 연료의 열분해(pyrolysis)율과 탄소형성률을 감소시키게 된다. 또한 탄소 생성시 수첨가에 따라 감소하는 것은 OH기의 농도가 수첨가에 의해 증가되고, 이 과잉의 OH기는 탄소입자와 급격히 반응하여 탄소생성을 억제해 주기 때문이다. 과농연료연소(fuel-rich combustion)에 있어서는 OH기 농도가 낮기 때문에 물의 첨가에 의해 증가된 OH기는 가스 상태의 검댕이 형성을 억제시켜 탄소의 중합반응(polymerization)과 핵반응률(nucleation rate)을 감소시키게 된다.

4. 수첨가 석유 쉐น 히터의 연소 원리

Fig. 1은 본 연구에 사용하였던 초음파에 의한 수첨가 석유 쉐น 히터(HFN-451SN, LG 전자)의 연소 과정의 원리를 나타내는 것으로서, 주요 구성 요소들은 등유와 미세 물입자들을 기화시켜 연소시키는 버너부, 등유를 공급하는 연료 탱크부, 미세 물방울을 공급하는 물탱크와 초음파 무화기 등으로 구성되어 있다.

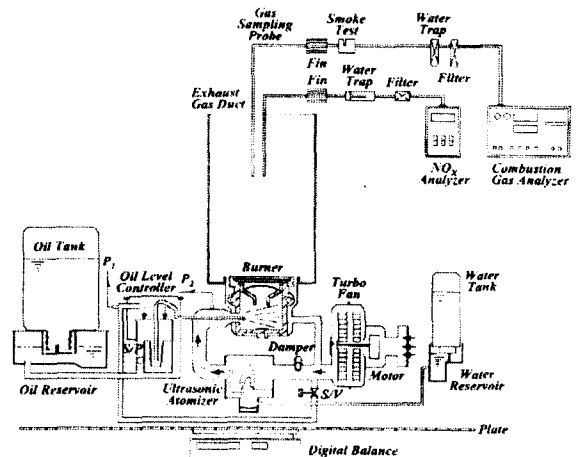


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

한편, 초음파에 의한 수첨가 석유 쉐น 히터의 연소과정을 살펴보면, 연소용 공기는 터보 팬으로 부

터 댐퍼(damper)와 분무 노즐부, 초음파 무화기를 거쳐 기화통 내로 들어간다. 한편으로는 터보 팬으로부터 송풍된 일부 공기는 가압 전자(電磁) 밸브(S/V; solenoid valve)를 거쳐 정유면기(oil level controller) 내의 등유를 가압시키게 된다. 이 등유는 연료 탱크, 오일관(oil pipe)을 거쳐 전자(電磁) 펌프(solenoid pump)에 의해 정유면기에 모여진 것으로 여기에 일정 압력이 작용되면 이 등유는 니들(needle)을 통해 기화통 내로 분출된다. 한편, 정유면기에서 일정 유면을 채운 등유는 계속적으로 전자 펌프가 동작하기 때문에 흘러 넘치게 되어 다시 오일관으로 돌아오게 된다. 터보 팬에 의한 연소용 공기가 초음파 무화기를 거치면서 공기와 물방울들이 분무 노즐부를 통해 기화통 내로 압송되기 때문에, 등유는 니들로부터 분출되는 순간 니들 주변의 공기와 물방울로 혼합된 유체의 빠른 유동속도에 의해 미립화로 무화(霧化)된다. 기화통은 내장된 시스히터(sheath heater)에 의해 등유가 증발하기 쉬운 증발 온도 부근으로 약 230℃까지 예열 되어 있어, 무화된 등유와 물방울들은 기화통 내에서 순간적으로 가스와 수증기가 되어 연소용 공기와 혼합이 이루어진 후 버너 헤드를 빠져나가면서 연소실로 들어온 2차 연소용 공기와 함께 연소하게 된다.

5. 실험 장치 및 실험 방법

본 실험에서 사용한 석유 팬 히터의 작동 특성은 터보 팬을 직접 구동하여 각 발열량을 설정하였기 때문에 입력전압의 변동에 매우 큰 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 실험 자료의 재현성을 최대한 확보하기 위해서 외부 입력전원을 자동적으로 보상할 수 있는 자동전압조정기(AVR)를 사용하였다. 또한 팬 히터가 작동되면, 실내공기를 연소용 공기로 직접 이용하기 때문에 연소된 배기가스 성분을 측정할 때 얻어진 데이터는 실내공기의 조성비에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 팬 히터에 입력되는 실내공기는 매 실험조건마다 동일하게 유지되도록 노력하였다. 본 실험에서 사용한 팬 히터는 운전시 마이크 기능에 의해 작동되기 때문에 터보 팬의 회전수를 각각 독립적으로 변화시키기 위해, 터보 팬의 입력 전원을 별도로 빼내어 슬라이드스(slidacs)에 연결하여 사용하였다. 그리고 초음파 진동자에 의한 미세한 물입자들을 기존 팬 히터의 연소실에 투입하기 위해서는 Fig. 1에서와 같이 가습기의 구조를 참고로 하여

별도의 물탱크부를 설치하고 낙차에 의해 초음파 무화기에서 적정량의 수면 45mm를 유지하도록 설계하였다. 또 초음파 무화기는 기존 팬 히터의 연소용 공기관로 중간에 설치하여 최대용량이 발휘되도록 동작시켰으며, 그 양은 터보 팬의 회전수에 따라 얻어진 공기량에 의해 투입량이 결정되도록 하였다. 한편, 초음파 무화기에 사용한 진동자와 구동 회로부는 가습기(GH-601UA, LG전자)의 것을 이용하였으며, 사용한 진동자 사양은 Table 1에 나타내었다.

Table 2 Specifications of ultrasonic vibrator

Item	Specification
Material	Ceramic
Thickness	1.25 mm
Excitation frequency	1.65 MHz
Optimum water level	45 mm
Atomization capacity	400 cc/hr(25℃)
Maker	TDK

한편, 본 실험에 사용된 연소가스 포집덕트는 Fig. 1에서와 같이 측정센서 주위에서 연소된 배기가스가 주위공기와 혼합되는 것을 막기 위해 외경 210mm, 높이 550mm, 두께 1mm인 스테인레스(stainless) 판을 관으로 제작하여 연소실 출구에 설치하여 사용하였다. 또한 연소가스 포집 프로브(probe)는 덕트 내부의 연소실 출구 상단으로부터 약 260mm 떨어진 위치에 설치하였다. 또 프로브와 가스분석기 사이에는 수분이 제거될 수 있도록 물분리 필터와 배기가스를 상온으로 유지시키기 위해 흰(fin)을 각각 설치하여 상온의 건조된 배기가스 성분으로 가스분석기에 입력되도록 하였다.

본 연구에서 먼저 팬 히터의 터보 팬의 회전에 따른 연료측에 미치는 공기압력과 연소용 공기측에 미치는 공기압력을 측정하기 위해서 사용한 측정기기로서는 최소 0.01mmAq까지 정밀측정이 가능한 마이크로 마노미터(micro-manometer : FC-012, Furness Co.) 2대를 사용하였다. 또 연소용 터보 팬의 회전수 측정은 디지털 스트로보 스코프(digital stroboscope : DX-521, SEORIM Electric, Korea)를 사용하였다. 또 연소된 배기가스 성분들을 측정하기 위해서는 CO, CO₂, O₂, 온도 등을 동시에 측정할 수 있는 자동연소가스분석기(EES, Model 942-XP)를 사용하였으며, 연소가스중 NO_x

성분을 측정하기 위해서는 NO_x 분석기(EES, Model 80)를 사용하였다. 한편 팬 히터의 연료소비량과 물소비량을 측정하기 위해서는 최소 0.1g, 최대 16kg까지 무게측정이 가능한 전자식저울(Santorius, Model 3862 MP 8-1)을 사용하였다.

6. 실험 결과 분석

6.1 연소시 시스템 기본 특성

Fig. 2는 석유 팬 히터의 정상 연소 조건에서 만족되는 연소용 터보 팬의 회전수 변화에 따른 정유면기에 작용하는 압력(P₁)과 연소용 공기 공급 압력(P₂) 그리고 압력비 P₂/P₁의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 압력 P₁과 P₂는 석유 팬 히터의 실제 연소시에 각 발열량 조건들에 해당하는 연소용 터보 팬의 회전수 변화에 대해 얻어진 것으로서, 회전수 증가에 따라 증가하는 양상을 보이고 있으나, P₂/P₁은 비교적 일정한 크기를 유지하고 있으며, 평균적으로 약 0.844 값을 나타내고 있다. 이 압력비는 Fig. 1에서와 같이 터보 팬에 연결되어 있는 연소용 공기 공급 관에 설치된 댐퍼(damper)의 설정 위치에 따라 결정되는데, 결국 이 압력비는 연료 소비량과 연소용 공기량에 영향을 미쳐 난방능력 및 과잉 공기비(excess air ratio)를 결정하게 된다.

Fig. 3은 Fig. 1과 같은 실험으로부터 얻어진 석유 팬 히터의 정상 연소 조건에서 만족되는 연소용 터보 팬의 회전수 변화에 따른 1차 연소에 요구되는 연소용 공기량 그리고 1차 과잉 공기비 분포들을 나타낸 그림이다. 여기서, 등유의 이론 공기량은 11.31m³/kg 이므로^{24,25)}, 1차 과잉 공기비는

식(6)에 의해 구하였다.

$$\mu = \frac{Q_{AIR}}{11.31 * G * 10^3} \quad (6)$$

Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 각 발열량 조건에 따른 터보 팬 회전수 증가에 따라 1차 연소용 공기량 증가는 Fig. 2에서의 압력 P₁과 P₂의 증가에 따라 얻어진 것이다. 1차 과잉 공기비 μ 는 약 0.84~1.11의 범위로 나타나 있으나, 발열량 증가에 따라 1보다 작아져, 1차 연소시 실제 공기량은 이론 공기량보다 적게 사용되고 있음을 알 수 있다. 이것은 질소 산화물 생성을 최소화하기 위한 방법으로서 보고되고 있다.²⁵⁾ 그러나, 석유 팬 히터의 연소 시스템은 1차 연소시 완전연소를 하기에 부족한 공기량을 연소실 벽면에 확보된 다량의 공기 공급 구멍으로부터 대류용 축류 팬에 의해 2차 연소용으로 확보되도록 구성되어 있다.

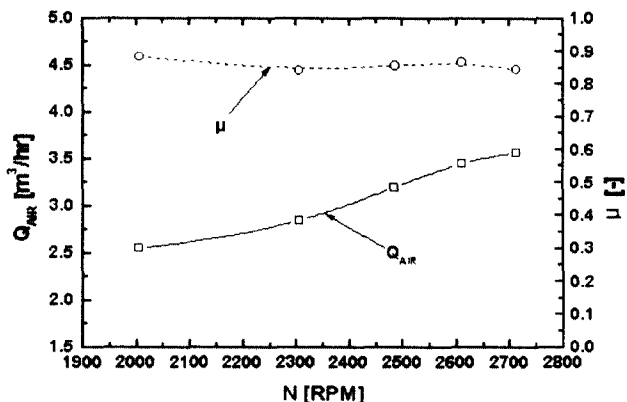


Fig. 3 Distributions of air flowrate for combustion and primary excess air ratio

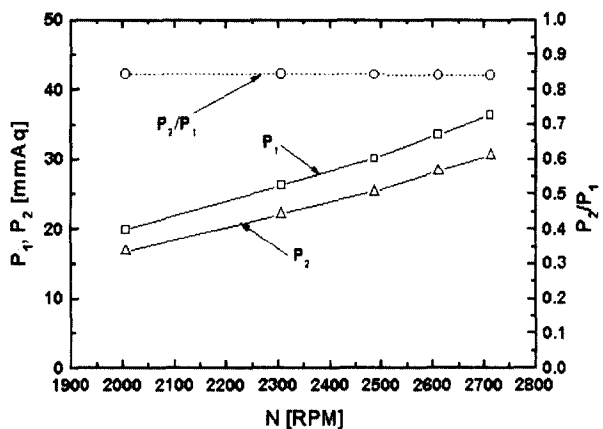


Fig. 2 Distributions of P₁, P₂ and P₂/P₁ during combustion of kerosene fan heater

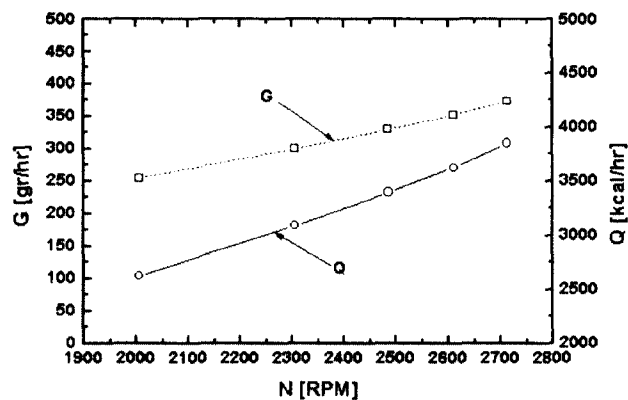


Fig. 4 Distributions of oil consumption weight and heating performance of kerosene fan heater

Fig. 4는 석유 랜 히터의 각 발열량 조건에 따른 연료소비량과 난방 능력을 나타낸 것으로, 터보 랜 회전수 증가에 따라 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 석유 랜 히터의 최소 난방 능력과 최대 난방 능력은 Fig. 4로부터 각각 약 1,494kcal/hr, 3,852kcal/hr임을 알 수 있다. 여기에서 사용된 석유 연소 기기의 능력 계산에서는 일반적으로 연료의 저위발열량을 사용하므로, 등유의 저위발열량인 8,240kcal/l 을 사용하였으며, 등유의 비중은 0.78~0.82중에서 편의상 0.8로 사용하였다.^{24,25)} 따라서 단위 시간당 유효 발열량인 석유 랜 히터의 난방 능력은 산출 공식 <난방능력(kcal/hr) = 연료소비량(kg/hr) x 등유발열량(kcal/kg) x 연소효율>로부터 연소 효율을 100%로 가정하고, 식(7)로 계산하였다.

$$Q = G * \frac{8.24}{0.8} * 1 = 10.3 * G \quad (7)$$

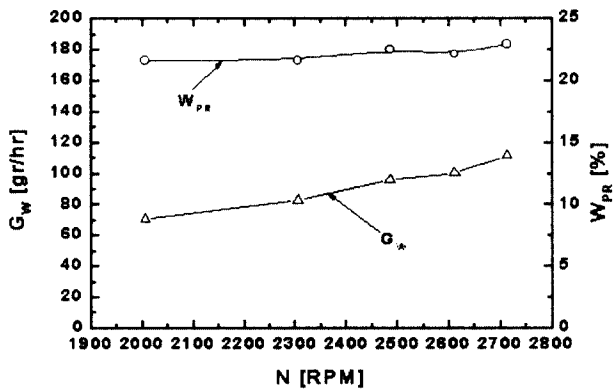


Fig. 5 Distributions of water consumption weight and water percent weight ratio

Fig. 5는 석유 랜 히터의 각 발열량 조건에 따른 터보 랜의 연소용 공기량에 의해 초음파 무화기에서 발생한 미세한 물방울들이 연소실에 투입되어 소모된 물 소비량과 체적비로 계산된 등유에 대한 물의 비율을 백분율^{12,15)}로 나타낸 그림이다. 터보 랜의 회전수 증가에 따라 연소용 공기량이 증가하므로 동일 크기의 관내 속도가 증가하게 되어, 그만큼 무화기내의 물방울 양도 연소용 공기에 의해 더 많이 실어가므로 증가하게 됨을 알 수 있다. 한편 본 연구에서 소모되는 물의 양을 살펴보기 위해 식(8)로 계산한 등유대비 물의 소모 비율은 발열량 증가에 따라 약간 증가하지만, 약 21~23%의 양이 석유 랜 히터의 연소과정에 첨가되었

음을 알 수 있다.

$$W_{PR} = \frac{G_w * 100}{G_w + G} \quad (8)$$

6.2 배기가스의 제반 특성 고찰

Fig. 6은 Fig. 1에서와 같이 포집덕트 내에서 측정된 배기가스의 온도를 물을 첨가했을 때와 등유만 연소시켰을 때를 각각 측정하여 나타낸 것이다. 랜 히터의 터보 랜 회전수 증가에 따라 발열량도 증가하므로 배기가스의 온도 역시 증가하는 모습을 보여주고 있다. 그러나, 물을 첨가시켜 연소시킨 경우 배기가스 온도나 등유만을 연소시킨 경우 온도가 모두 비교적 유사한 크기로 나타나고 있어, 일반적으로 물을 첨가시켜 연소시키면 물 입자가 증발하는데 필요한 잠열을 화염으로부터 충당하게 되므로 화염온도가 저하되고, 배기가스의 온도 역시 저하된다는 내용이 본 실험의 범위 내에서는 전적으로 일치하지 않음을 알 수 있다.

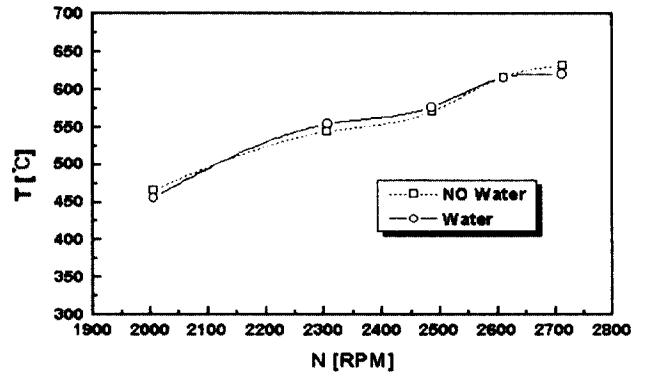


Fig. 6 Distributions of exhaust gas temperature with and without water respectively

한편, 물을 첨가하지 않은 상태의 석유 랜 히터의 정상 연소시 화염색깔은 내심이 거의 푸른색으로 나타나고, 외심은 약간 붉은 색으로 섞여 나타나고 있으나, 물을 첨가시킨 경우에는 화염색깔이 내심이나 외심에서 거의 모두 동일한 주황색으로 나타나, 화염온도가 낮아졌음을 추정할 수 있다. 그러나, 배기가스 온도에서는 현재의 자료로서는 물 첨가에 의한 온도 감소현상이 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 수첨가 연소시 발생하는 배기가스의 냄새는 거의 자극이 없는 매우 부드러운 것이며, 특히 소화시와 점화시에 발생하는 냄새가 현저히 감소됨을 감지할 수 있었다. 그리고 배기가스로 방출되는 수분량 또한 현저히 증가됨을 감지

할 수 있었다.

Fig. 7은 Fig. 1에서와 같이 포집덕트 내에서 측정된 배기가스의 이산화탄소의 양을 물을 첨가했을 때와 물을 첨가시키지 않고 등유만 연소시켰을 때를 각각 측정하여 나타낸 것이다. 터보 핵의 회전수 증가에 따라 발열량이 증가하게 되므로 이산화탄소의 양도 증가하고 있음을 알 수 있다. 또 물을 첨가한 경우나 첨가하지 않은 경우 모두 이산화탄소의 양이 거의 동일한 크기로 나타나 있다. 이론상 물을 첨가시켜 연소하게 되면 식(5)에 의해 이산화탄소는 증가하여야 하나 본 실험에서는 이와 같은 현상을 찾아볼 수 없었다.

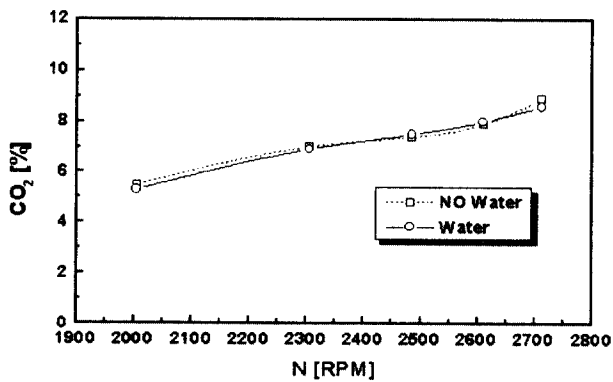


Fig. 7 Distributions of CO₂ concentration with and without water respectively

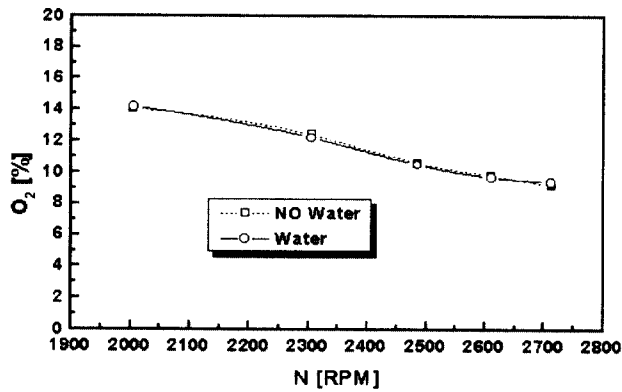


Fig. 8 Distributions of O₂ concentration with and without water respectively

Fig. 8은 Fig. 1에서와 같이 물을 첨가했을 때와 물을 첨가시키지 않고 등유만 연소시켰을 때의 배기가스중 산소의 양을 포집덕트 내에서 각각 측정하여 나타낸 것이다. 터보 핵의 회전수 증가에 따라 산소의 양은 점차 감소해 가는 경향을 보여주고 있다. 이것은 발열량이 증대됨에 따라 배기가스중의 산소의 양이 점차 감소해진다는 의미인데 Fig.

3에서와 같이 연소에 필요한 1차 과잉 공기량이 발열량 증대에 따라 작은 변화차이지만 점차 감소하게 투입되었기 때문에 사료된다. 그러나, 산소의 양에 있어서도 물을 첨가시킨 연소의 경우와 물을 첨가시키지 않은 경우 모두 거의 동일한 크기 분포를 나타내고 있어, 수첨가 효과가 산소량의 변화에 영향을 미치고 있다고는 판단되지 않는다.

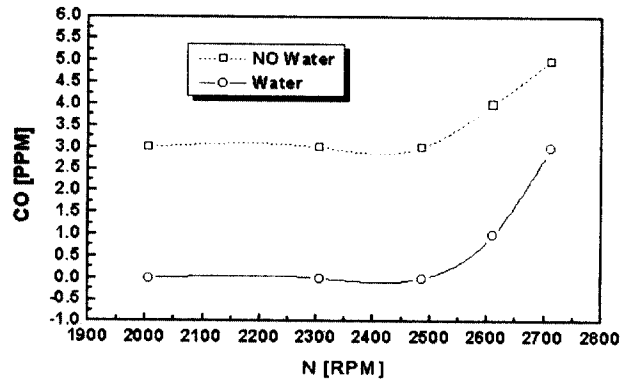


Fig. 9 Distributions of CO concentration with and without water respectively

Fig. 9는 Fig. 1에서와 같이 물을 첨가했을 때와 물을 첨가시키지 않고 등유만 연소시켰을 때의 배기가스중 일산화탄소의 양을 포집덕트 내에서 각각 측정하여 나타낸 것이다. 터보 핵의 회전수 증가 즉 발열량 증가에 따라 일산화탄소의 양은 물을 첨가시킨 경우나 물을 첨가시키지 않은 경우 모두 약 2500rpm 정도(약 3350kcal/hr)까지는 비교적 일정한 크기를 유지하나, 그 이후부터는 급속히 증가하는 양상을 보이고 있다. 그러나 물을 첨가시켜 연소시킬 경우 일산화탄소의 양이 줄어들어 나타남을 알 수 있다. 즉 물을 첨가시키지 않고 연소시킬 경우 일산화탄소의 양은 터보 핵의 회전수 2500rpm까지는 약 3ppm 수준을 나타내지만, 물을 첨가시킨 경우는 전혀 검출되지 않았다. 또 회전수가 2500rpm 이후부터는 계속 증가되어 최대 회전수에서는 물을 첨가시키지 않은 경우가 약 5ppm수준을 보이고 있으나, 물을 첨가시킨 경우 약 3ppm 수준을 나타내고 있다. 따라서 물을 첨가시켜 연소시키는 경우 반응식(5)에 의해 일산화탄소량의 감소에는 효과가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 Fig. 1에서와 같이 물을 첨가했을 때와 물을 첨가시키지 않고 등유만 연소시켰을 때의 배기가스중 질소산화물의 양을 포집덕트 내에서 각각 측정하여 나타낸 것이다. 발열량 증대에 따라 질소산화물의 양은 계속적으로 증가하는 양상을

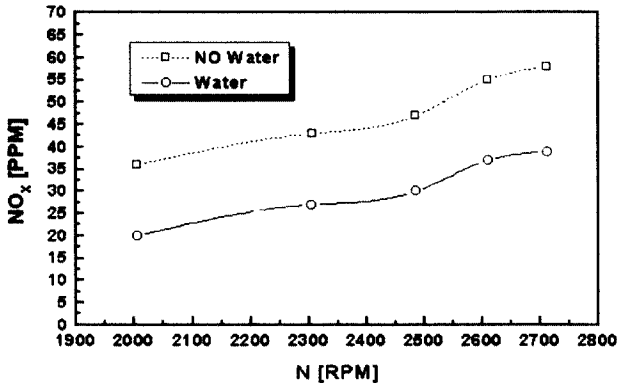


Fig. 10 Distributions of NO_x concentration with and without water respectively

보이고 있다. 특히 물을 첨가시킨 경우 질소산화물의 양이 물을 첨가시키지 않은 경우보다 전체적으로 약 45%정도 감소 양상을 보이고 있어, 수첨가 연소가 질소산화물의 감소에 효과적이라는 점을 확인하였으며, 이것은 이론적인 배경^{3, 11)}과도 일치하고 있음을 알 수 있다.

7. 결 론

초음파 진동자에 의해 물을 첨가시켜 석유 펌 히터에서 등유와 함께 연소시켰을 때, 각종 배기가스의 특성치들을 측정하여 물을 첨가시키지 않고 등유만 순수하게 연소시켰을 때와 상호 비교하여 수첨가 효과를 검토한 결과, 다음과 같은 내용으로 요약 정리할 수 있었다.

- 1) 초음파 진동자에 의해 첨가된 물의 양은 약 2~3%이었으며, 수첨가 연소시 화염색깔은 연료만의 정상적인 연소시 화염색깔과는 전혀 다른 전 화염이 주황색을 보이고 있어, 화염의 표면온도가 감소됨을 추측할 수가 있으나, 배기가스의 온도에서는 거의 차이가 없었다.
- 2) 수첨가 연소시 배기가스중 질소산화물의 발생량은 발열량 증가에 따라 동일 발열량 기준 약 45% 정도 감소되었으며, 일산화탄소와 냄새의 발생량도 상당히 감소됨을 알 수 있었다.
- 3) 배기가스중 이산화탄소와 산소의 발생량은 물을 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우 거의 동일하며, 터보 펌의 회전수 증가에 따라 CO₂의 발생량은 증가하나, O₂의 발생량은 감소한다.

이밖에 물을 첨가시켜 연소시킴으로써 석유 펌 히터에서 발생하는 문제점은 먼저, 높은 온도에 노출된 물방울로부터 발생하는 고형분, 즉 칼슘, 마

그네슘, 각종 광물질(mineral)성분, 오염물질 등이 연소실내에 흰 색깔로 쌓이게 되어 이것이 계속적으로 장기간 사용시 불꽃이 형성되는 염공부나 연소용 공기통과 노즐부의 단면적을 축소시켜 기본적인 연소기 성능을 악화시킬 염려가 있으며, 현재 펌 히터에서 산소 결핍을 감지하기 위해 설치한 염검지봉에서 얻어지는 염전류는 물을 첨가시킬 경우 매우 크게 흔들리게 나타나, 기존의 염전류 검출방식의 제어가 재고되어야 한다. 따라서 향후에는 본 연구의 결과들이 실용화되는데 있어서 필요한 보완연구들을 살펴보면, 물방울 크기가 약 3 μ m이하로 균일하게 얻어지는 초음파 방식에 의한 수첨가의 양이 과연 얼마가 투입되어야 적정한지를 밝혀야 하며, 또 어떤 형태의 물을 사용하여야 적정한지를 연구해야 할 필요성이 있다.

참고문헌

1. F. L. Dryer, "Water addition to practical combustion systems-concepts and applications", The Combustion Institute, Power Systems, 16th Symposium (International) on combustion, pp. 279~295, 1976
2. J. Taylor Beard and R. E. Hall, "Performance and air pollutant emissions of an experimental water/residual oil emulsion burner in a commercial boiler", Transactions of the ASME, Vol. 103, pp. 788~796, 1981
3. Henry Shaw, "The effect of water on nitric oxide production in gas turbine combustors", ASME Paper No. 75-GT-70, pp. 1~9, 1975
4. J. E. Nicholls, I. A. El-Messiri and H. K. Newhall, "Inlet manifold water injection for control of nitrogen oxides-theory and experiment", SAE 690018, pp. 167~176, 1969
5. M. B. Hilt and R. H. Johnson, "Nitric oxide abatement in heavy duty gas turbine combustors by means of aerodynamics and water injection", ASME Paper No. 72-GT-53, pp. 1~8, 1972
6. N. R. Dibelius, M. B. Hilt and R. H. Johnson, "Reduction of nitrogen oxides from gas turbines by steam injection", ASME Paper No. 71-GT-58, pp. 1~4, 1971
7. Nicholas R. Marchionna, "Effect of inlet-air humidity on the formation of oxides of nitrogen in a gas-turbine combustor", NASA

- TM-X-68209, 1973
8. P. P. Singh, "Formation and control of oxides of nitrogen emissions from gas turbine combustion systems", ASME Paper No. 72-GT-22, pp. 1~8, 1971
 9. R. D. Klapatch and T. R. Koblisch, "Nitrogen oxide control with water injection in gas turbines", ASME Paper No. 71-WA/GT-9, pp. 1~8, 1971
 10. T. Miyauchi, Y. Mori and T. Yamaguchi, "Effect of steam addition on NO formation", The Combustion Institute, Combustion Generated Pollution, 18th Symposium (International) on combustion, pp. 43~51, 1981
 11. D. W. Turner and C. W. Siegmund, "Control of NO_x from fuel oil combustion: Water in oil emulsions", presented at the winter symposium of the IEC Division of the American Chemical Society, Jan., 1973
 12. K. Muller-Dethlefs and A. F. Schlader, "The effect of steam on flame temperature, burning velocity and carbon formation in hydrocarbon flames", Combustion and Flame 27, pp. 205~215, 1976
 13. V. K. Rao and M. F. Bardon, "The effect of water on gas phase soot formation in laminar diffusion flames", Combustion and Flame 55, pp. 73~78, 1984
 14. Hiroshi Okada, Hiroshi Utsumi and Shinzo Nakano, "Soot formation in the combustion of emulsion fuel-droplets", Bulletin of the M.E.S.J., Vol. 8, No. 4, pp. 346~351, 1980
 15. Arne Sjogren, "Burning of water-in-oil emulsions", The Combustion Institute, Power Systems, 16th Symposium (International) on combustion, pp. 297~305, 1976
 16. G. Greeves, I. M. Khan and G. Onion, "Effects of water introduction on diesel engine combustion and emissions", The Combustion Institute, Power Systems, 16th Symposium (International) on combustion, pp. 321~336, 1976
 17. M. T. Jacques, J. B. Jordan, A. Williams and L. Hadley-Coates, "The combustion of water-oil emulsions and the influence of asphaltene concept", The Combustion Institute, Power Systems, 16th Symposium (International) on combustion, pp. 307~319, 1976
 18. S. S. Lestz, W. E. Meyer and C. M. Colony, "Emissions from a direct-cylinder water-injected spark-ignition engine", SAE 720113, pp. 392~398, 1972
 19. Chikashi CHIBA, "Atomization of liquid by immersed and convergent ultrasonic vibrators", Bulletin of the JSME, Vol. 18, No. 118, pp. 376~382, 1975
 20. Michael N. Topp, "Ultrasonic atomization-a photographic study of the mechanism of disintegration", Journal of the Aerosol science, Vol. 4, pp. 17~25, 1973
 21. H. Scott Fogler and Klaus D. Timmerhaus, "Ultrasonic atomization studies", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 39, No. 3, pp. 515~518, 1966
 22. J. D. Bassett and A. W. Bright, "Observation concerning the mechanism of atomization in an ultrasonic fountain", Journal of the Aerosol science, Vol. 7, pp. 47~51, 1976
 23. John V. Droughton, Aaron D. Deutschman and Larry E. Usman, "The effect of ultrasonic mixing of fuel and air on the performance of an internal combustion engine", SAE 840238, pp. 1~6, 1984
 24. 김장권, "석유 환 히터의 연소실 주변 열전달 특성", 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제4호, pp. 551~561, 1998
 25. 김장권, 정규조, "석유 환 히터의 난방능력 고찰", 한국동력기계공학회지, 제1권, 제1호, pp. 51~60, 1997