

차량용 연소식 난방기의 열 및 유동특성에 대한 수치연구

황창환* · 백승욱**†

Numerical Investigation on the Thermal and Flow Characteristics of Combustion Heater for Commercial Vehicle

Chang Hwan Hwang and Seung Wook Baek

ABSTRACT

The diesel pre-heater has being used in cabin heating and coolant heating of engine to reduce the engine warm up time for commercial vehicle. The pre-heaters are classified as diesel spray combustor and it forms diffusion flame. By using swirler, a recirculation flow of hot product gases is established near the fuel nozzle and it helps the maintaining of diffusion flame. The design difference of swirler can affect on reaction characteristics and temperature distribution inside pre-heater. The purpose of this study is the investigation of the effect of swirler configuration on combustion characteristics. To solve spray combustion problem, the Euler-Lagrange approach discrete model is used to track droplet trajectory and evaporation history. The PDF equilibrium model is used for chemical reaction model. These models are implemented into the FLUENT code.

Key Words : Pre-heater, Swirler, Spray combustion

기 호 설 명

Alphabets		u_p : particle velocity
a : absorption coefficient		Z : mixture fraction
C_p : constant pressure specific heat		
d_p : particle diameter		Greeks
D : diffusion coefficient		α : absorption coefficient
I : radiation intensity		ρ_p : particle density
J : diffusive flux		σ_s : scattering coefficient
n : refractive index		τ : time
P : probability density function		ϕ : scalar value
r : position vector		$\bar{\phi}$: density-weighted mean scalar value
Re_{sph} : spherical particle Reynolds number		Φ : scattering phase function
s : direction vector		Ω : solid angle
S_k : energy equation source term		

1. 서론

오늘날 자동차용 엔진은 전 세계적으로 강화된 배기가스 규제에 대응하기 위하여 고효율, 저공해를 목표로 개발되고 있다[1]. 이에 최신엔진의 높아진 열효율로 인하여 자동차의 난방열원으로 사용되는 엔

진 냉각수의 방출열량이 감소하고 있는 추세이며, 실내공간이 넓은 SUV 차량의 경우 엔진 냉각수를 이용한 난방이 어려워지고 있다[2,3]. 따라서 적절한 객실 난방이 이루어지기 위해서는 연소식 히터가 필요하며, 이미 버스의 경우에는 엔진 냉각수를 이용하여 객실을 난방 하기에는 냉각수의 방출열량이 부족하기 때문에 연소식 히터를 장착하여 사용하고 있고, 최근의 SUV 차량에는 연소식 히터가 옵션으로 장착되어 출시가 되고 있다. 또한 대형트럭의

* 한국과학기술원 기계항공 시스템 공학부

** 한국과학기술원 기계항공 시스템 공학부

† 연락처, swbaek@kaist.ac.kr

경우 엔진의 워밍업(warm-up)과 정차했을 때 실내난방을 위한 공회전(idling)으로 소모되는 연료량을 줄이기 위하여 연소식 히터가 장착되고 있다.

본 연구에서는 동환산업(주)의 DHP-140, 180과 Espar Heater Systems의 HYDRONIC 24를 연구대상으로 하였다. 이 연소식 히터들은 연료의 연소로 생성된 고온의 배기가스의 열을 자동차 엔진의 냉각수에 전달하여 냉각수의 온도를 70~90°C 범위로 유지하기 위한 장치이다. 연구대상인 히터는 연료를 액체 상태로 분무하여 연소시키는 분무연소방법을 적용하고 있고, 연료노즐의 하류에 확산화염이 형성된다. 화염의 안정화를 위한 방법으로 연소공기의 선회류(swirl flow)를 유도하게 되는데, 선회류를 이용하면 연료노즐 하류에 뜨거운 연소가스의 재순환유동이 형성되어 확산화염을 안정적으로 유지할 수 있다고 알려져 있다[4,5].

해석에 사용된 히터는 냉각수의 가열조건이 다르기 때문에 냉각수가 흐르지 않는 상태에서 비교가 이루어져야 한다. 하지만 세 장치 모두 냉각수가 흐르지 않는 상태에서 작동이 불가능하기 때문에 수치해석을 통해 연소로 내부의 물리현상을 비교, 연구하였다. 세 히터는 서로 다른 선회기(swirler) 형상을 가지고 있는데, 이것이 연소실 내부의 연소현상, 유동장형성과 온도분포에 끼치는 영향을 수치해석을 통하여 알아보려고 한다. 해석에는 상용 CFD(computational fluid dynamics) 코드인 FLUENT 6.3.26를 이용하였다.

2. 수치 해석

2.1. 연소식 히터

연구에 사용된 히터는 경유(diesel) 혹은 백등유(kerosene)를 연료로 사용한다. Fig. 1에 HYDRONIC 24의 3차원 CAD 단면도를 나타내었다. 히터의 중심부에 연소실이 있으며, 이곳에서 생성된 뜨거운 배기가스는 냉각수와 열교환을 하기 위해 방열판이 설치된 고리모양의 유로를 흐르게 된다. DHP-140, 180은 연소기 부분의 설계가 다를 뿐 구조와 작동원리는 이와 동일하다. Fig. 2 부터 4까지 세 히터의 선회기 부분의 실물사진과 격자를 나타내었다. HYDRONIC 24의 연소기는 방사상 선회기(radial swirler)와

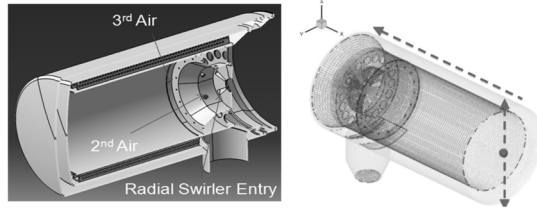


Fig. 1. Schematic of heater and flow direction of exhaust gas.

직경 3 mm의 방사방향 2차 공기노즐 6개, 직경 2 mm의 축방향 3차 공기노즐 18개를 가지고 있다. 반면에 DHP-140, 180의 연소기는 절선면 입구 선회기(tangential entry swirler)만을 가진다. 세 제품 모두 연소기의 중앙에 연료노즐이 위치하고 있다.

Table 1에 히터의 크기와 연소용량을 비교하였다. DHP-140과 HYDRONIC 24의 길이는 비슷하지만 HYDRONIC 24의 부피가 더 크므로 반경방향으로 크기가 크을 알 수 있으며, 연소용량 또한 55% 정도 큰 값을 가진다. 반면에 DHP-180은 HYDRONIC 24 보다 연소용량이 11% 정도 작은 값을 가지지만 연소실 부피는 오히려 35% 정도 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다.

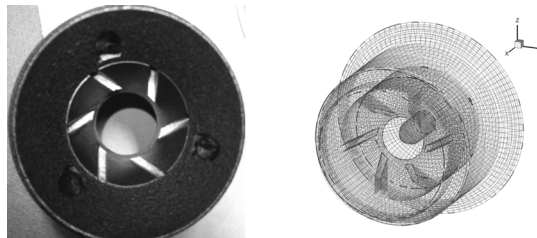


Fig. 2. Swirler of DHP-140.

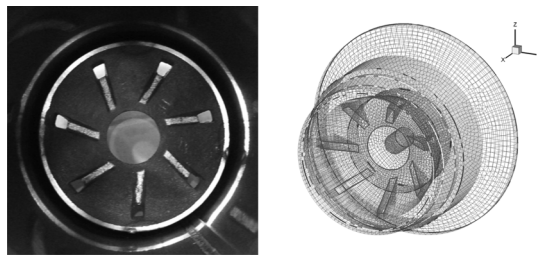


Fig. 3. Swirler of DHP-180.

Table 1. Operation conditions and burner configurations

	연소용량 (kW)	연료 소모량 (L/h)	히터 길이 (m)	연소실 부피 (L)
DHP-140	18.6	1.99	0.318	4.34
DHP-180	25.6	2.74	0.408	8.58
HYDRONIC 24	28.9	3.1	0.332	6.35

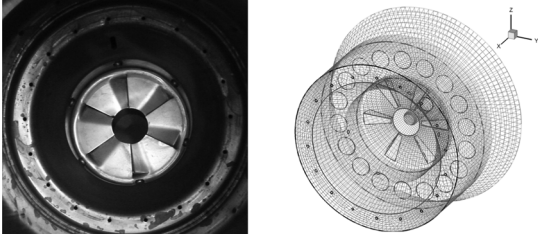


Fig. 4. Swirler of HYDRONIC 24.

2.2. 수치해석 모델

각 히터에서 냉각수가 지나가는 유로를 제외하고 공기와 연소 가스가 지나가는 공간에 대하여 3차원 격자를 생성하였다. 냉각수와 연소가스의 열교환이 이루어지는 벽면의 온도는 자연대류조건을 가정하여 대류 열전달계수를 추정하였다[6].

2.2.1. 지배 방정식

Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식이 모델되었으며, Boussinesq 가설을 이용하여 Reynolds 항과 turbulent heat flux 항을 난류점성계수와 난류 열전도율로 표현하면 다음과 같이 정상상태의 지배방정식을 기술할 수 있다[7].

$$\text{연속 방정식} \\ \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\text{운동량 방정식} \\ \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot ((\mu + \mu_t) \nabla \vec{V}) + \vec{\rho} g \quad (2)$$

$$\text{에너지 방정식} \\ \nabla \cdot (\vec{V} \rho C_p T) = \nabla \cdot \left((k + k_t) \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j \right) + S_k \quad (3)$$

$$\text{혼합기분율 방정식} \\ \nabla \cdot (\rho \vec{V} Z) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Z) \quad (4)$$

난류항을 다루기 위하여 realizable k-ε 모델이 이용되었으며, 화학종에 대한 지배방정식을 동일확산계수를 가정하면 식 (4)의 혼합기분율(mixture fraction)에 대한 식으로 표현할 수 있다[8].

2.2.2. 연소 반응 모델

경유는 여러 종류의 탄화수소물의 혼합물인데 연료에 포함된 모든 화학종을 고려하는 것은 공학 문제 해결에 바람직하지 않다. 따라서 본 연구에서는 경유와 물성이 비슷한 백등유(kerosene, C₁₂H₂₃, LHV 43.1 MJ/kg)으로만 연료가 이루어져 있다고 가정하였다. 혼합기분율에 대한 방정식을 풀게 되면 전

처리된 확률 밀도 함수표(preprocessed probability density function look-up table)를 참조하여 온도와 화학종이 계산되게 된다. 확률밀도함수는 혼합기분율 Z의 함수로써 β-확률밀도함수로 나타내어지며 다음과 같이 표현된다[7,8].

$$P(Z) \Delta Z = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_i \tau_i \quad (5)$$

t는 시간스케일이며 τ_i는 ΔZ 밴드에서 Z가 머무른 시간을 의미한다. 화학종의 질량분율, 밀도, 온도는 혼합기분율과 엔탈피의 함수로 나타내어진다[7,8].

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \phi_i(Z, H) P(Z) dZ \quad (6)$$

위와 같은 식을 이용하여 유동장에서 계산된 혼합기분율의 함수인 φ_i와 주어진 연료와 산화제의 화학조성 및 온도조건에 의한 화학적 평형(chemical equilibrium)으로부터 만들어진 참조표의 φ_i를 비교, 반복 계산하여 해를 계산하게 된다.

2.2.3. 분무 모델

분무연소의 해석을 위해 분사된 연료액적의 증발, 산화제와의 혼합과 연소, 집단연소와 같은 현상들을 고려한 액적과 기체의 관계에 대한 모델링이 필요하다. 이를 위하여 DPM(discrete phase model)을 적용하여 액적과 기체 사이의 상호간섭을 고려하였다[7].

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (7)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (8)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (9)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_{sph}} \left(1 + b_1 Re_{sph}^{b_2} \right) + \frac{b_3 Re_{sph}}{b_4 + Re_{sph}} \quad (10)$$

2.2.4. 복사 열전달 모델

복사열전달은 에너지 방정식에 원천항으로 더해져 계산에 반영이 된다. 여기서는 복사열전달 방정식을 풀기 위하여 DO(discrete ordinates) 모델을 채택하였다. 복사열전달은 복사강도(radiation intensity)에 대한 지배방정식을 풀어 계산된다[7,10].

$$\frac{\partial I}{\partial s} + (\alpha + \sigma_s)I = \frac{4\pi^2 \sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) \Phi(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega \quad (11)$$

파장대에 따른 혼합기의 흡수계수(absorption coefficient)를 고려하기 위하여 회체가스 가중합산 모델(weighted sum of gray gases model)이 이용되었다 [11,12].

2.3. 해석 조건

세 히터모두 연료와 공기의 공급온도를 300 K으로 가정하였다. 또한 당량비를 0.55로 같은 값을 설정하였고 이는 80%의 과잉공기에 해당되는 공기량이다. 실제 장치에서 냉각수와 열교환이 일어나는 벽면에 대류열전달계수 $h = 11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 와 대기온도를 300 K으로 설정하여 자연대류조건을 모사하였다.

Fig. 2와 3에서 확인하였듯이 HYDRONIC 24의 연소기에는 DHP-140에 없는 2차, 3차 공기노즐이 있다. 이는 다단연소를 시도하기 위한 형상이며, 일반적으로 공기 다단(air staging) 기법은 산화제를 분산시켜 공급하여 화염면의 온도를 낮추어 thermal NOx의 발생을 억제하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다[9]. 하지만 다단연소로 인한 thermal NOx 억제효과는 동일한 양의 연료와 산화제를 사용하면서 연소기 형상에 따른 비교가 이루어져야 하므로, 서로 상이한 형상과 연료 산화제량을 사용하는 제품들 사이에서는 의미 있는 비교가 되기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 다음의 두 항목에 중점을 두어 해석이 이루어졌다.

- 1) 연소기 및 선회기 형상으로 인한 연소, 유동현상 및 열교환면의 온도분포 비교
- 2) HYDRONIC 24의 2차, 3차 공기노즐에 의한 연소 현상 비교

3. 결과 및 토론

3.1. 연소기 및 선회기 형상의 영향

Fig. 5에 나타나는 바와 같이 DHP-140, 180은 연소기의 바로 앞에서 고온영역이 형성되어 연소실을 빠져나가는 반면에 HYDRONIC 24는 연소실 전체에 걸쳐 고온영역이 형성되었다. 여기서 연소실 중앙에 낮은 온도의 공기가 분포함을 확인할 수 있는데, 이는 공기입구의 형상을 살펴보아 원인을 찾을 수 있다. 전체 공기입구 중에서 연료노즐이 위치한 중앙공기입구 면적의 비율은 DHP-140 약 13%, DHP-180 약 11%, HYDRONIC 24 약 41%이다. 따라서 이곳을 통하는 질량흐름율의 비율을 계산해보았을 때

각각 12.7%, 11.62%, 43.7% 으로 연속방정식을 만족하는 결과를 보였고, 유속은 각각 7.4 m/s, 4.9 m/s와 22 m/s의 값을 가졌다. 이 값을 이용하여 중앙공기 입구를 통한 공기의 운동량 대 선회기를 통하는 공기의 운동량의 비율을 계산해보면, DHP-140은 1 : 36.5, DHP-180은 1 : 26.7, HYDRONIC 24는 1 : 0.91을 가진다. 이로 인해 DHP-140, 180은 연소실 내부에 중앙에 분사류가 없는 유동장을 형성하고 있고, HYDRONIC 24는 중앙에 분사류가 있고 그 주위에 재순환영역이 형성됨을 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

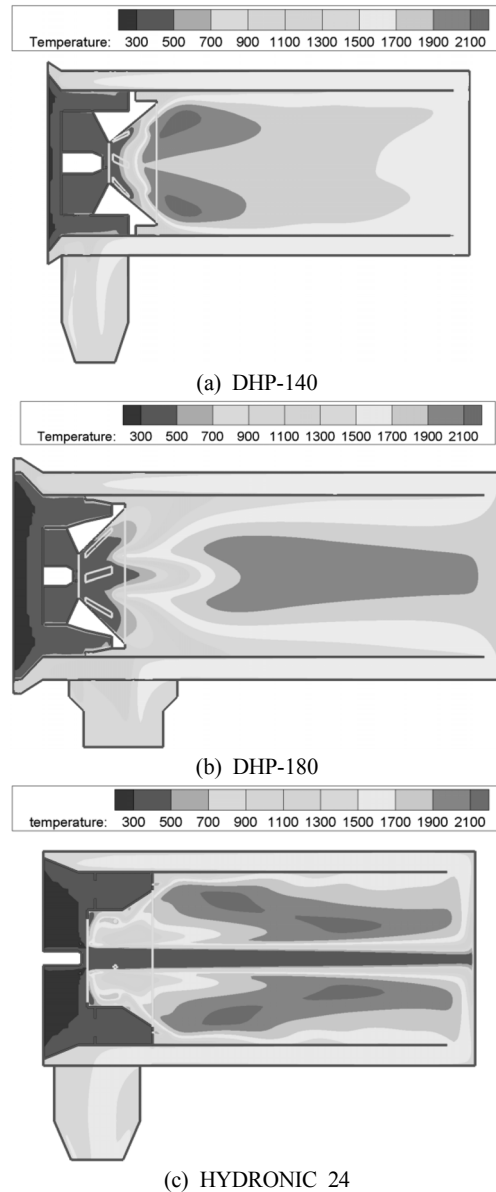


Fig. 5. Comparison of temperature distributions of the heaters.

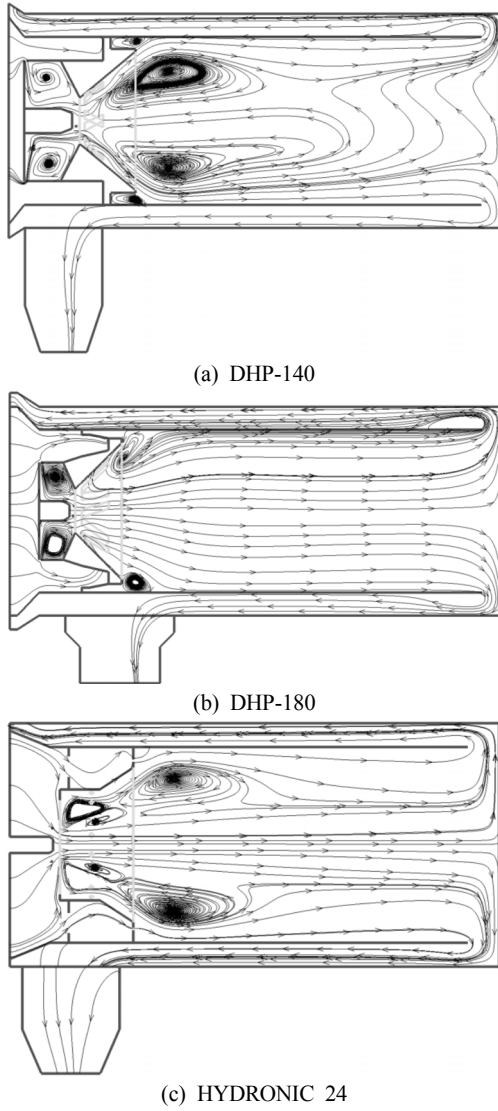
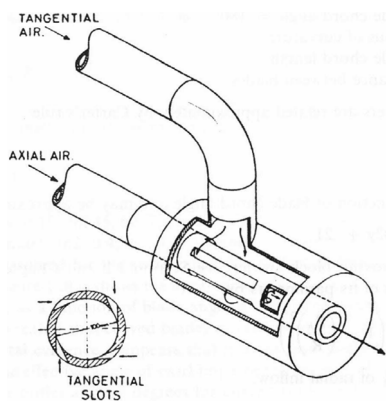


Fig. 6. Comparison of flow pattern of the heaters.

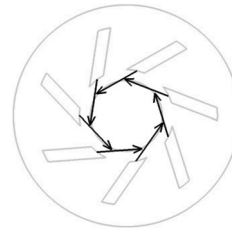
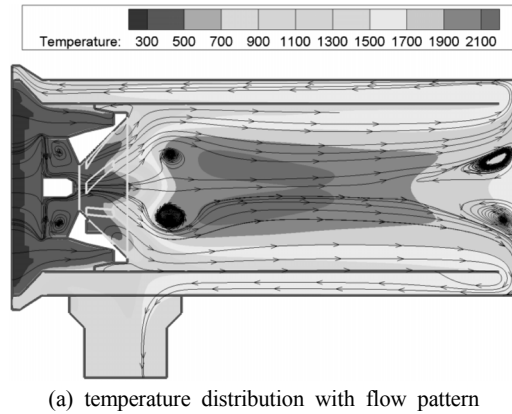


(a) Axial-plus-tangential entry swirl generator

Fig. 7. Comparison of swirler configuration.

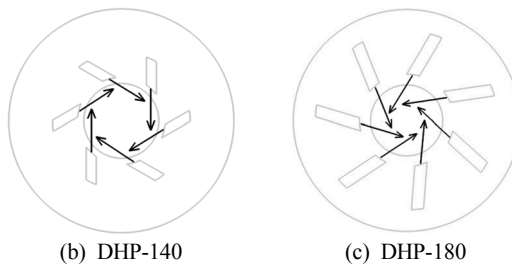
Fig. 6의 결과에서 DHP-180은 다른 두 모델과는 달리 선회기의 출구, 즉 연소실 상류지역에 재순환 영역이 형성되지 않음을 확인할 수 있는데, 이는 연소기 상류에 재순환유동을 형성시켜 안정된 화염을 형성하기 위한 선회기의 기능이 제대로 나타나지 않음을 의미한다[4,5,9]. 선회기에 의한 영향을 규명하기 위해 Fig. 7에 참고자료 [4]에 제시된 선회기와 DHP-140, 180의 선회기 출구의 유동방향을 비교하였다.

비교 결과 DHP-140은 중앙 공기입구를 통하는 유동에 절선면방향으로 속도성분을 가해줄 수 있는



(b) modified swirler direction of DHP-180

Fig. 8. Calculation results and swirler configuration of modified DHP-180.



형상인 반면에 DHP-180은 유동방향이 절선면뿐만 아니라 원주방향성분도 포함함을 확인할 수 있었다. 따라서 DHP-180은 선회기 출구지역에 재순환 유동을 형성할 수 있을 만큼 강한 선회유동이 발생하지 않았으며, 따라서 Fig. 6에서와 같은 결과를 보여주었다[4,5]. 이와 같은 결론을 확인하기 위해 선회기의 위치 및 면적은 그대로 하고 방향만 바꾸어 해석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그 결과 선회기 출구인 연소기 상류지역에 재순환영역이 형성되었으며 이 지역을 중심으로 고온부가 형성되고 있음을 확인하였다. 또한 연소기 하류에도 재순환영역이 뚜렷하게 발생함을 알 수 있는데, 이는 앞서 밝힌 바와 같이 운동량의 차이로 인하여 HYDRONIC 24와 다르게 중앙을 관통하는 유동이 없기 때문이며 이와 같은 경향은 Fig. 6(a)의 DHP-140에서도 확인할 수 있다. 유동장이 비대칭성을 가지는 이유는 연소기가 중력방향과 수직으로 설치되어있어 부력의 영향을 받기 때문이다.

온도분포의 특징이 냉각수로의 열전달에 어떠한 영향을 끼치는지 알아보기 위하여 열교환면의 축방향 온도분포를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 1에 연소가스의 흐름방향을 참고하면, 그래프의 오른쪽에서 왼쪽으로 연소가스가 흘러가는 것을 알 수 있다. 반면에 냉각수는 이와 반대방향으로 흘러가도록 설계되어 있으므로 냉각수의 입구인 0 m 부근의 온도를 높게 유지해야 높은 열전달율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.2. 2차, 3차 공기노즐의 영향

HYDRONIC 24의 공기 다단연소 효과를 확인하기 위해 2차, 3차 공기노즐을 없애고 벽면으로 처리하여 해석을 하였고, Fig. 10에 온도와 일산화탄소의 질량분율을 등고선으로 비교하였다. Fig. 10(a)의 온도는 등고선 내부 지역이 2,000 K 이상의 온도분포

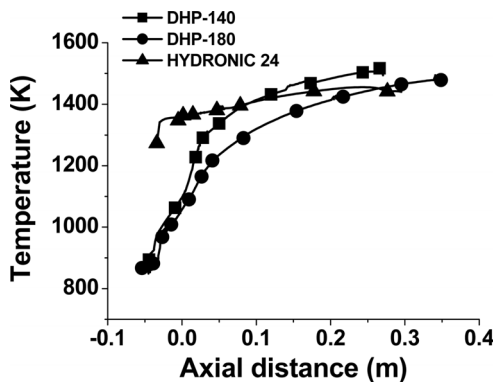


Fig. 9. Comparison of temperature distribution at heat exchange wall.

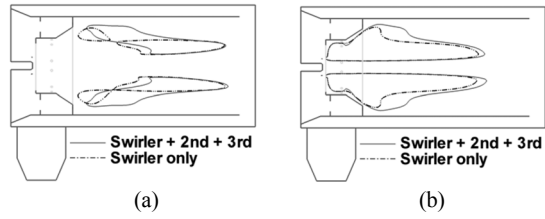


Fig. 10. Comparison of iso-contour line (a) temperature at 2000K, (b) CO mass fraction at 0.02.

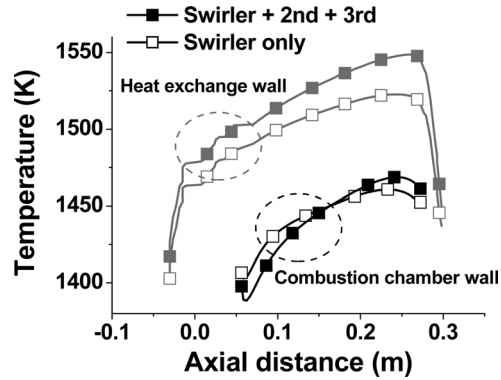


Fig. 11. Comparison of temperature distribution at heat exchange wall and combustion chamber wall.

를 나타내고 연소기 벽면방향으로 갈수록 작은 값을 가진다. Fig. 10(b)의 CO는 등고선 내부 지역이 0.02 이상의 질량분율, 연소기 벽면과 연소기 하류방향으로 갈수록 작은 값을 가지는 질량분율을 나타낸다. Fig. 10(a)에서 2차, 3차 공기노즐이 없이 선회기만 있을 때 고온부가 상류로 더 이동하였음을 확인할 수 있다. 이것은 공기의 공급량은 변하지 않았으므로 2차, 3차 공기노즐에 공급되던 공기가 중앙공기입구와 선회기입구로 공급되게 되는데, 공기의 공급속도와 질량흐름율이 증가하여 선회강도가 강해지기 때문이다. 선회강도가 강해지면 재순환영역이 상류로 이동하고 반응지역 또한 상류로 이동하게 된다[4,5,13].

Fig. 10(b)에서 다단연소가 적용되지 않은 경우의 CO 질량분율 등고선 내부의 넓이가 더 작으므로 더 좁은 공간에서 연소가 이루어졌고, 반응지역이 상류로 약간 이동하였음을 확인할 수 있다. 이런 반응지역의 이동이 열교환면과 연소실 벽면의 온도분포에 끼치는 영향을 Fig. 11에서 비교하였다. 그래프의 위쪽에 위치한 한 쌍의 선들은 열교환면의 온도를 나타내고, 나머지 한 쌍의 선들은 연소실 벽면온도를 나타낸다.

다단연소를 적용한 연소기의 계산결과에서 연소실 벽면의 온도가 상류에서는 낮고, 하류에서 높은 값을 보이고 있다. 이 현상을 연소실 벽면 바깥에 위

치하는 열교환면의 온도와 연계해서 살펴보면, 열교환면 온도가 다단연소가 적용이 되지 않은 경우보다 높음을 알 수 있다. 결과적으로 열교환면의 모든 위치에서 온도가 높으므로 다단연소를 연소기에 적용하면 히터의 가열성능을 높일 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

차량용 경유히터의 연소특성에 대한 수치해석 연구를 수행하였다. 해석 대상으로서 국내기업인 동환산업(주)의 DHP-140, 180과 국외기업인 Espar Heater Systems의 HYDRONIC 24를 선정하였다. 연구에 이용된 히터는 모두 경유를 분무연소하고 선회기를 이용하여 확산화염을 안정·유지시킨다. HYDRONIC 24는 2차, 3차 공기 노즐을 통해 다단연소 기술을 적용하였다. 이 차이점이 히터의 목적인 냉각수의 가열과 연소실 내부의 연소현상에 어떠한 영향을 끼칠 수 있는지 살펴보았고, HYDRONIC 24의 연소 및 열전달에 다단연소 방법을 적용함으로써 인해 발생하는 효과를 연구하였다. 결과는 다음과 같다.

1) DHP-140, 180과 HYDRONIC 24의 연료노즐이 위치한 중앙공기입구를 지나는 질량흐름율이 각각 12.7%, 11.6%, 43.7%의 비율을 가졌다. 또한 중앙공기입구와 선회기를 통하는 운동량의 비율은 각각 1 : 36.5, 1 : 26.7, 1 : 0.91을 가졌고, 이러한 차이로 인하여 HYDRONIC 24의 연소실 중앙에 낮은 온도의 분사류가 관통할 수 있었다.

2) 이로 인해 HYDRONIC 24에서 고온부가 연소실 전체에 걸쳐 유지되었고, 고온부가 연소실 전체에 걸쳐 분포하는 것이 열전달이 더 유리함을 확인하였다.

3) 선회기가 선회유동을 제대로 형성하지 못할 경우 연소실 상류에 재순환유동이 형성되지 못하였다. 이를 수정하여 선회유동을 유도할 경우 선회기 출구부분에 재순환유동이 형성되었으며, 이 지역을 중심으로 고온부가 형성되었다.

4) HYDRONIC 24 모델에서 2차, 3차 공기노즐을 제거하였을 때 강해진 선회유동으로 인해 고온부와 반응지역이 상류로 이동하였다.

5) 다단연소를 적용하여 반응영역을 넓게 유지하는 것이 열교환면에 높은 온도의 배기가스를 유지하여 냉각수의 가열에 유리함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20094010100050).

참고문헌

- [1] 전광민, 김병수, 박심수, 배충식, 이기형, 이영재, 조강래, "2007 자동차환경백서", Korea Auto Forum, 2007
- [2] 박승욱, 나병철, 김진용, 서준호, 김현철, 이봉현, 석경호, 최승배, "배출가스 분석을 통한 연소식 에어히터용 저온전용 시험에 관한 연구", 한국자동차공학회 2006년도 추계학술대회논문집, pp. 692-697
- [3] 이상석, 이진석, 이도형, 석경호, "디젤을 이용한 차량용 히터의 연소특성", Proceedings of The Fourth National Congress on Fluids Engineering, 2006, pp. 253-256
- [4] A. K. Gupta, D.G. Lilley, N. Syred, "Swirl Flows", Abacus Press, 1984
- [5] N. Syred and J. M. Beer, "Combustion in Swirling Flows: A Review", Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 143-201
- [6] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Wiley Press, 2007
- [7] Fluent, 2006, "Fluent 6.3 User's Guide", Fluent, Inc., Lebanon, PA.
- [8] N. Peters, "Turbulent Combustion", Cambridge University Press, 2000
- [9] C.E. Jr. Baukal, "The John Zink Combustion Handbook", ICRC press, 2001
- [10] M. F. Modest, "Radiative heat transfer, 2nd Edition", Academic press, 2003
- [11] T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model", Journal of Heat Transfer, Vol. 104, 1982, pp. 602-608
- [12] A. Coppalle and P. Vervisch, "The Total Emissivities of High-Temperature Flames", Combustion and Flame, Vol. 49, 1983, pp. 101-108
- [13] M. Y. Kim, "Prediction of Combustion Characteristics in a 3D Model Combustor with Swirling Flow", Transaction of the KSME(B), Vol. 27, No. 1, pp. 95-104