

폐유 캐비티 소각기 개발을 위한 수치해석

전영남[†] · 이귀주* · 김미환

조선대학교 공과대학 환경공학부, *항공 · 조선공학부
(2002년 1월 25일 접수, 2002년 7월 22일 채택)

Numerical Simulation for the Development of Waste Oil Cavity Incinerator

Young Nam Chun[†], Kwy Joo Lee* and Mi Hwan Kim

Dept. of Environmental Engineering, *Dept. of Naval Architecture, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea
(Received 25 January 2002; accepted 22 July 2002)

요 약

수분이 일부 함유된 폐유를 소각하기 위하여 새로운 형태의 캐비티 소각기를 제안하였다. 캐비티 소각기는 저 발열량의 폐유를 고온영역에서 완전연소 시키기 위해 캐비티 내에 열재순환 영역이 형성되고, 캐비티 좌측의 열회수기는 배기 폐열을 회수하여 보조연료의 화염을 안정화 시키는 구조로 되어 있다. 반복 수치해석 결과에 의해 얻어진 기준 소각기에 대하여 수치해석을 수행한 결과 캐비티 소각기의 연소 및 배출특성이 우수한 것을 알 수 있었다. 또한 폐유 주입구의 폐유와 공기의 주입속도, 주입온도 및 주입위치에 대하여 변수별 연구를 수행하여 운전조건을 제시하였다.

Abstract – We proposed advanced cavity incinerator to incinerate waste oil which is contained water. The cavity incinerator has heat recirculation region in the cavity to be burnt out completely in high temperature zone. And heat recuper, being left side of cavity, plays a role in the flame stabilization of auxiliary burner flame by heat recovery of exhaust gas. The results in standard incinerator, which was selected by iterative calculation, showed that the combustion and emission characteristics of cavity incinerator are excellent. And operating conditions were proposed by parametric screening studies about injection velocity, injection temperature and injection point of waste oil and air.

Key words: Cavity, Incinerator, Waste Oil, Combustion, Emission

1. 서 론

최근 연근해의 개발이 활발해지고 연안 시설물이 증가하면서 유조선 사고, 각종 선박 사고, 유류저장 탱크와 송유관으로부터의 기름유출, 선박 폐유, 각종 공장폐수에 포함된 유류 배출 등이 해양오염의 원인이 된다. 기름이 바다에 유출되면 용해 성분은 해수로 녹아들고 휘발성분은 대기 중으로 증발한다. 휘발성분이 날아가고 점성이 높아진 기름은 50-80% 정도의 수분을 함유하는 갈색의 끈적끈적한 에멀션을 형성한다. 이는 유희수장치에 의해 회수되어 우수분리기로 수분을 분리시키면 10% 정도의 수분을 함유한 폐액이 된다. 우수 분리된 폐액은 불순물이 함유되어 있어 원래의 순수기름으로 환원하기 위해서는 복잡한 공정을 거쳐야 하므로 처리비용이 많이 든다. 따라서 별도의 기름환원 비용 없이 선상에서 분리 수거된 기름을 직접 소각시켜 폐열을 회수하여 열에너지로 이용 가능한 고효율 소각 시스템의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 수분을 일부 함유한 저 발열량의 폐유를 효율적으로 소각하기 위해 열 재순환영역이 존재하는 새로운 형태의 캐비티 소각기를 제안하였으며, 최적의 운전조건을 제시하기 위해 연소 및 배출특

성에 영향을 주는 변수에 대해 수치 해석적 연구를 수행하였다.

2. 수치모델 및 수치해석방법

2-1. 지배방정식

2-1-1 이상 연속방정식(Two phase transport equation)

폐유 연소는 이상연소로 액상인 액적과 연소가스인 혼합기체가 공존하여 연소된다. 따라서 각 제어체적의 질량보존은 국부 부피분율(local volume fraction) r_j 로 표현되며 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_j r_j) + \nabla \cdot (\rho_j r_j V_j) - \nabla \cdot (\Gamma_{r_j} \nabla r_j) = \dot{m}_{j \rightarrow i} \quad (1)$$

여기서 ρ_j 는 각 상의 밀도, V_j 는 각 상의 속도, Γ_{r_j} 는 확산계수, $\dot{m}_{j \rightarrow i}$ 는 단위시간당 액상 j에서 기상 i로 전달되는 물질의 양, r_j 는 각 상의 부피분율이고 식 (2)와 같다.

$$r_1(x, y) + r_2(x, y) = 1 \quad (2)$$

2-1-2. 이상 보존방정식(Two phase conservation equation)

각 변수에 대한 Eulerian 보존방정식은 식 (3)과 같다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ynchun@chosun.ac.kr

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_i r_i \phi_i) + \nabla(\rho_i r_i V_i \phi_i) - \nabla(\Gamma_{r_i} \nabla \phi_i) - \nabla(\Gamma_{r_i} \phi_i \nabla r_i) \\ & = \|\dot{m}_{j \rightarrow i}\| \phi_+ - \|\dot{m}_{i \rightarrow j}\| \phi_- + f_{i \rightarrow j}(\phi_j - \phi_i) + S_\phi \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 ϕ_i 는 일반적인 종속변수로 속도(V_i), 압력(p), 엔탈피(h_i), 혼합분율(f), 복사유속(R), 국부체류시간(t)이다. ϕ_+ 는 액상 j 에서 기상 i 로 유입되는 질량유량이 $\dot{m}_{j \rightarrow i}$ 일 때 변수 ϕ 의 값이고, ϕ_- 는 동일한 의미로 반대로 기상 i 에서 액상 j 로 유출되는 질량유량이 $\dot{m}_{i \rightarrow j}$ 일 때 변수 ϕ 의 값이다. 식 (3)의 double bar인 “ $\|\cdot\|$ ”는 Power-low operator이고 $f_{j \rightarrow i}$ 는 ϕ_i 의 bulk-to-bulk transport에 대한 마찰계수이다. 따라서 운동방정식의 경우는 입자의 항력이고, 에너지 방정식의 경우 열전달이다.

2-2. 연소모델

2-2-1. 폐유 연소모델

연소모델을 단순화하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다. 연소 혼합기체는 고온의 가스이므로 이상기체로 해석하고, 확산계수 및 비열은 동일하고 반응열은 산화반응이 빠르기 때문에 확산에 의해 지배된다고 보았다.

폐유의 연소는 2단계 반응을 거쳐 연소가 진행된다. 첫째는 반응(4-6)과 같이 연료와 공기 중의 산소, 연소에 의해 생성된 이산화탄소 또는 수분과 반응하여 일산화탄소 또는 수소가 생성된다.



둘째는 반응(7-8)과 같이 미연된 일산화탄소와 연료 및 연소 중 생성된 수소가 완전 연소되어 이산화탄소 또는 수분이 생성된다.



연소가스의 농도는 확산에 지배되기 때문에 혼합분율 f 를 계산하고 $O_2, N_2, CO_2, CO, H_2O, H_2$ 의 농도를 구하였다. 가스의 온도는 각 반응에 대한 반응열을 고려하여 식 (9)와 같이 구하고, 폐유의 온도는 에너지 방정식에 의해 구한 엔탈피를 이용하여 식 (10)과 같이 구하였다.

$$T_g = \frac{1}{C_p} \times (H_{mix} - H_{fu}) \quad (9)$$

$$T_{oil} = \frac{H_{oil}}{C_p} \quad (10)$$

가스의 밀도는 이상기체 방정식에 의해 식 (11)과 같이 구하였다.

$$\rho_g = \frac{P}{RT_g} \quad (11)$$

2-2-2. 가스-액적 열전달

가스와 액적의 열전달은 Nusselt number로 표현되는 bulk-to-bulk 모델을 이용하였다. 에너지 보존 방정식인 h_1, h_2 방정식의 생성/소멸항은 식 (12)와 같다.

$$q_{j \rightarrow i} = 6 \frac{r_j}{D} \rho_1 N_u k_g (T_j - T_i) \quad (12)$$

여기서 Nusselt number는 식 (13)과 같다.

$$N_u = 2.0 + 0.65 Re^{0.5} Pr^{0.333} \quad (13)$$

2-2-3. 입자항력(Interface drag)

가스와 액적 사이의 항력은 가스에 고립되어 있는 액적에 작용하는

힘으로 운동방정식의 생성항으로 다음 식 (14)와 같다.

$$f_{i \rightarrow j} = f_{j \rightarrow i} = C_f \times \rho_1 \times r_1 \times r_2 \times Vol \times |V_1 - V_2| \quad (14)$$

2-3. 복사모델

연소 시 발생하는 연소 생성물 중 CO_2, H_2O 는 강한 흡수(absorber) 및 방사체(emitter)이지만 산란복사(scatter radiation)는 거의 없다. 또한 N_2, O_2, H_2 는 흡수가 거의 없이 복사열전달이 이루어진다.

본 연구에서 사용한 Radiosity 복사모델은 Spalding[1]에 의해 제안된 것으로 P-1 구조화 근사법(P-1 spherical-harmonics approximation)에서 복사강도(radiation intensity)가 RTEs(radiative transfer equations) [2]에 사용된 것과 같다. 복사유속(R)은 복사지배방정식 (15)에서 구한다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{4}{3} (a + s) \frac{\partial R}{\partial x_i} \right] + 4a(E - R) = 0 \quad (15)$$

흡수계수(absorption coefficient; a)와 산란계수(scattering coefficient; s)는 $1.45 m^{-1}$ 와 $0 m^{-1}$ 를 적용하였다. 또한 E 는 흑체방사력(black-body emissive power)으로 식 (16)과 같다.

$$E = \sigma T^4 \quad (16)$$

여기서, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수(즉, $5.6678E-8 \frac{W}{m^2 K^4}$)이고, T 는 유체 절대온도이다. 정미복사 열유속(net radiative heat fluxes)은 다음 식 (17)과 같다.

$$Q_{ri} = - \left[\frac{4}{3} \frac{1}{(a + s)} \right] \frac{\partial R}{\partial x_i} \quad (17)$$

여기서, Q_{ri} 는 i 방향의 열유속 벡터이다.

복사 열전달에 의한 열손실을 고려하기 위해 에너지 방정식 (15)의 생성항에 아래 식 (18)이 적용된다.

$$S_{rad} = - \frac{\partial Q_{ri}}{\partial x_i} \quad (18)$$

여기서, S_{rad} 는 단위 부피당 열원(volumetric energy source)이다. 따라서 생성항은 식 (18)에 식 (16)을 대입하여 정리하면 식 (19)와 같다.

$$S_{rad} = 4a[R - E] \quad (19)$$

2-4. 국부 체류시간(Local residence time)

저발열량의 폐유를 완전히 소각하기 위해서는 소각기내에서의 국부 체류시간(local residence time)은 중요하다. 국부 체류시간은 일반 지배방정식 (3)의 종속변수 ϕ 를 국부 체류시간 t 로 하고, 생성항 S_ϕ 는 식 (20)과 같이하여 계산한다.

$$S_\phi = \Delta t \sum_j \dot{m}_{inj} = \frac{\rho Vol}{\sum_j \dot{m}_{inj} j} \sum_j \dot{m}_{inj} = \rho Vol \quad (20)$$

여기서, Vol은 셀의 체적, \dot{m}_{inj} 는 j 면을 통하여 셀에 유입되는 질량 유량, \sum 는 모든 면에서 합을 의미한다.

2-5. 수치해석방법

식들 (1), (3)과 같이 표현된 일반적인 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서는 검사체적에 기초한 유한차분법(control-volume based finite difference method)을 이용하여 전형적인 이산화방정식을 유도하였다. 이 방정식은 line-by-line TDMA(tridiagonal matrix algorithm)에 의해 해를 구하였으며 압력-속도의 상호연계 방법은 빠른 수렴을 위하여 SIMPLE(Semi-Implicit Methods for Pressure-Linked Equation)에 의

해 변형된 SIMPLEST 알고리즘[3]을 사용하였고, 격자점 사이에서 임의의 함수값 보정은 Power-low Scheme[4]에 의해 실행되었다. 소각기의 난류 수치모사를 위하여 k-ε 모델[5]을 사용하였다. 격자의 갯수는 47×42이며 Fig. 1에 캐비티 소각기의 형상과 크기와 함께 나타내었다. 복사열유속의 계산시에는 대류항이 생략되며, 체류시간을 계산할 경우는 유체의 대류에만 관련되므로 확산항이 생략된다.

3. 연구방법

수분을 일부 함유한 저발열량의 폐유를 효율적으로 소각하기 위해 열 재순환 영역이 존재하는 새로운 형태의 캐비티 소각기를 제안하였다 (Fig. 1참조). 수치 반복계산을 수행하여 기준 소각기의 크기와 운전조건을 도출하여 기준조건으로 하고 유동, 온도 및 연소가스분포를 계산하였다. 또한 연소 및 배출특성에 영향을 미치는 인자인 폐유 주입기의 폐유와 공기 주입속도, 주입온도, 주입위치 변화에 대해 변수별 연구를 수행하였다.

본 연구에 사용되어진 폐유의 조성은 중량비로 고정탄소(C) 79%, 수소(H₂) 9%, 수분(H₂O) 7%, 질소(N₂) 1%, 산소(O₂) 3%이다. 기준 소각

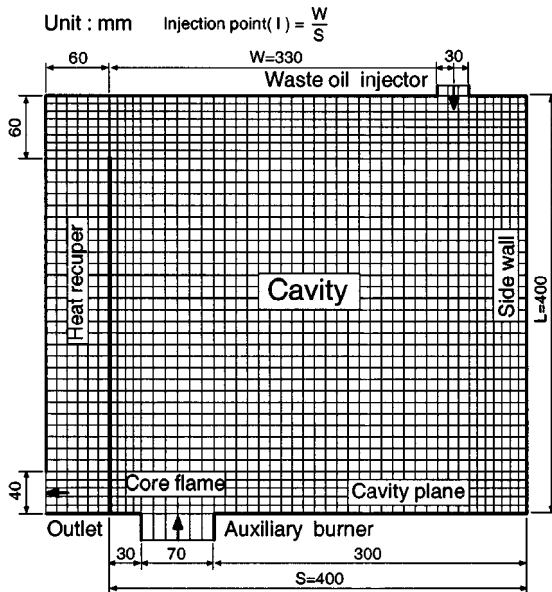


Fig. 1. Computational grid generation and physical dimensions.

기의 운전조건은 보조버너의 오일과 공기의 유입속도 5 m/s, 유입온도 25 °C이고, 폐유 주입기의 폐유와 공기의 주입속도 15 m/s, 주입온도 25 °C, 주입위치(I) 5/6이다. 주입위치(injection point)는 캐비티 출구로부터 폐유 주입기 중심까지의 거리 W를 캐비티 측벽(side wall)까지의 거리 S로 나눈 값이다(Fig. 1참조). 총공기비는 1.2로 일정하게 유지하였다. 벽면 경계조건은 온도를 400 °C로 하고 방사능(emissivity)은 내화벽돌로 가정하여 0.75로 하였다.

4. 수치해석 결과

4-1. 기준 소각기

수분이 다량 함유된 저 발열량의 폐유를 효과적으로 소각시키기 위해 열 재순환영역이 존재하는 컴팩트한 캐비티 소각기를 제안하였다. 캐비티 소각기는 보조버너로 보조연료인 경우가 공급되고 폐유 주입기로 폐유가 공급되는 구조로 되어있다. 또한 열 회수기(heat recuper)가 캐비티 좌측면에 존재하기 때문에 배기 폐열을 연소실 내로 회수하여 보조버너의 화염을 안정화 시킬 수 있다.

Fig. 2는 캐비티 소각기 내의 속도벡터를 나타낸 것으로 (a)는 기준조건에서 보조버너의 보조연료만 연소할 경우이고 (b)는 보조연료와 폐유 주입기의 폐유를 동시에 주입하여 연소한 경우이다. Fig. 2(a)의 속도벡터에서 볼 수 있듯이 보조버너에 보조연료가 연소되어 캐비티면(cavity plane)에서 코어형태의 화염이 유지되면서 급격한 팽창이 일어나기 때문에 캐비티 내에 큰 재순환 영역이 형성된다. 이 고온 재순환 영역의 형성은 Fig. 2(b)와 같이 폐유 주입기로부터 폐유가 공급됨에 따라 화염 양측면에 고온의 재순환 영역이 유지되어 폐유의 연소성을 증가시켜 저 발열량의 폐유가 완전연소가 가능하도록 한다.

Fig. 3은 국부체류시간과 유선을 나타내었다. 국부 체류시간은 식 (20)의 생성항에서도 알 수 있듯이 미소제어체적에 대하여 질량유량으로 계산한 값이므로 제어체적의 크기에 따라 값이 다소 변하므로 절대값의 의미는 크지 않으나 캐비티 소각기 내의 국부 위치에 대한 체류시간 분포를 알 수 있다.

Fig. 3(a)는 국부체류시간을 나타낸 것으로 캐비티 내에서 보조버너의 코어화염을 제외한 국부체류시간이 상대적으로 큰 값을 갖는데, 이는 캐비티 내에 완전연소에 충분한 체류시간을 갖는 재순환 영역이 유지된다는 것이다. 따라서 폐유 주입기로 유입되는 폐유가 코어화염에 비해 고온의 연소가스와 지속적으로 접촉할 수 있는 기회가 크므로 연소반응을 더 촉진시켜 완전연소를 이룰 수 있다. 캐비티 내의 체류시간(bulk residence time)은 약 2.2초로 국내 폐기물 관리법상 스토커형 소

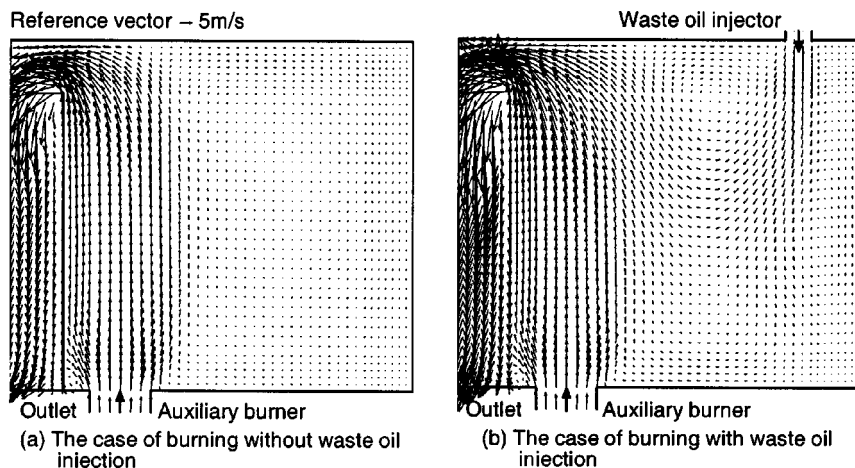


Fig. 2. Calculated velocity fields for standard incinerator.

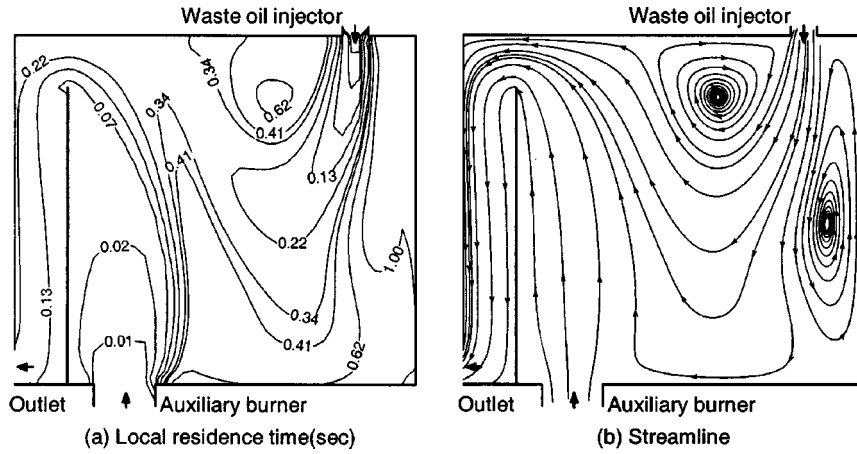


Fig. 3. Local residence time and streamline for standard incinerator.

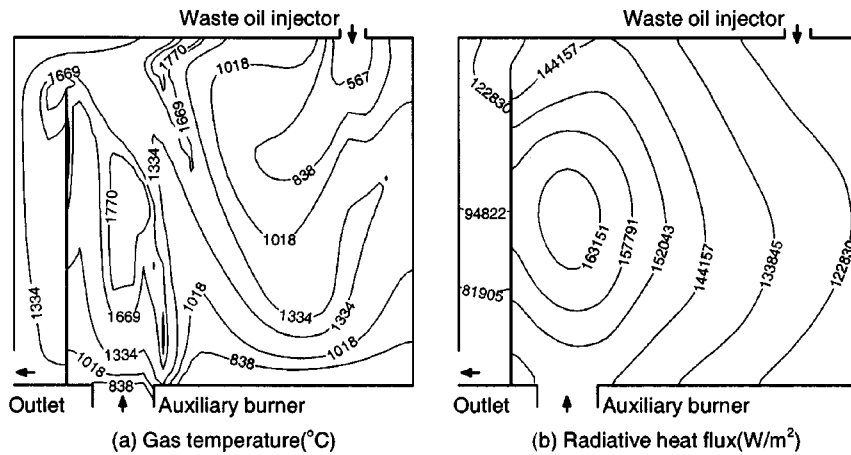


Fig. 4. Gas temperature and radiative heat flux for standard incinerator.

각로의 우수 연소방안[6]으로서 2차 연소실 체류시간이 2초로 되어있는데 이 값 보다 다소 큰 값을 갖는다.

Fig. 3(b)의 유선에서 알 수 있듯이 캐비티 내의 폐유 연소가스 흐름 양측에 재순환영역이 형성되며, 보조버너의 연소가스 입자는 열회수기로 바로 배출되지만 폐유 연소가스는 입자재순환 영역으로 유입되던가 캐비티 내에서 충분한 연소시간을 가진 후 배출되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 가스온도와 Radiosity 복사모델의 열플럭스를 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)는 연소가스의 온도분포를 나타낸 것이다. 보조버너의 경우 캐비티면에 코어형태의 화염이 유지된다. 보조버너 선단으로부터 후류측으로 갈수록 연소가 진행되어 점차 온도가 증가하여 화염대(flame front)에서 최대온도 약 1,770 °C를 보인 후 감소한다. 액체연소 특성상 노즐로부터 연료가 분사되어 무화된 후, 기화되어 산화용 공기 중 산소와 결합되어 연소가 진행되므로 가스연료에 비해 연소가 지연되기 때문에 화염길이 가 기체연료에 비해 다소 길어 고온의 화염대가 화염면 후류 쪽에 위치상태의 코어화염을 유지한다. 폐유 주입기로부터 유입되는 폐유의 경우는 15 m/s의 고속으로 유입되므로 코어화염이 형성되지 못하고 자발화 온도(ignition temperature)이상이 되는 지점에서 연소가 지속적으로 유지되면서 연소온도(combustion temperature)까지 증가되어 연소실 출구 부근에서 최대온도를 보인다.

Fig. 4(b)는 복사 열플럭스를 나타낸 것으로 연소 생성물 중 강한 방사체인 CO₂, H₂O가 최대농도(Fig. 5참조)를 보이는 코어 화염대에서 최대값을 가지며 주위로 갈수록 점차 감소된다. 이는 보조버너의 화염으로부터 재순환영역 내로 복사열전달이 지속적으로 이루어져 고온을 유

지시키는 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 연소생성물인 CO₂와 H₂O의 농도를 나타내었다. 연료 중 가연 성분인 탄소와 수소가 연소되어 생성되는 CO₂와 H₂O의 농도분포의 형태는 거의 유사하다. 보조버너 화염의 경우 코어 후류에서 최대 농도를 보이고, 폐유 주입기 화염의 경우는 주입기 후류 쪽으로 가면서 증가하여 캐비티 중앙부에서 최대농도를 보인다. 이는 이미 언급한 바와 같이 폐유 주입기로 주입된 폐유가 캐비티에서 충분한 체류시간을 가지고 완전히 연소가 되는 것을 의미한다.

4-2. 변수별 연구

4-2-1. 유입속도

Fig. 6은 폐유 주입기의 유입속도를 15 m/s에서 5 m/s로 감소시켰을 때 속도벡터와 가스온도분포를 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)는 속도벡터를 나타낸 것이다. 폐유 주입기 부근의 속도벡터가 좌우측으로 분산되고 캐비티면 하단까지 침투되지 못한다. 또한 폐유 주입기 화염 우측(즉, 캐비티 측벽 상단)에 형성되었던 재순환 영역이 캐비티 측벽 하단부로 밀려 있으며, 캐비티 내의 극부체류시간이 기준화염에 비해 다소 증가되었다. 이는 Fig. 6(b)의 온도분포에서도 알 수 있듯이 유입속도의 감소로 인해 화염대가 폐유 주입기 부근에서 형성되어 고온이 유지되기 때문에 열팽창으로 인해 속도벡터가 캐비티면의 하부쪽으로 침투되지 못하고 폐유 주입기 좌우측으로 팽창되어 화염대 우측의 재순환 영역이 하부로 밀리게 되며, 또한 재순환 영역의 하부의 온도도 기준화염에 비해 낮은 것을 알 수 있다.

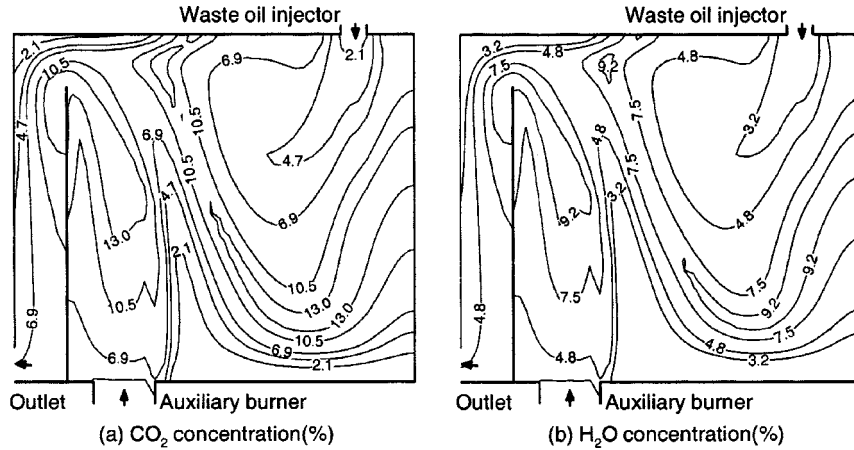


Fig. 5. CO₂ and H₂O concentrations for standard incinerator.

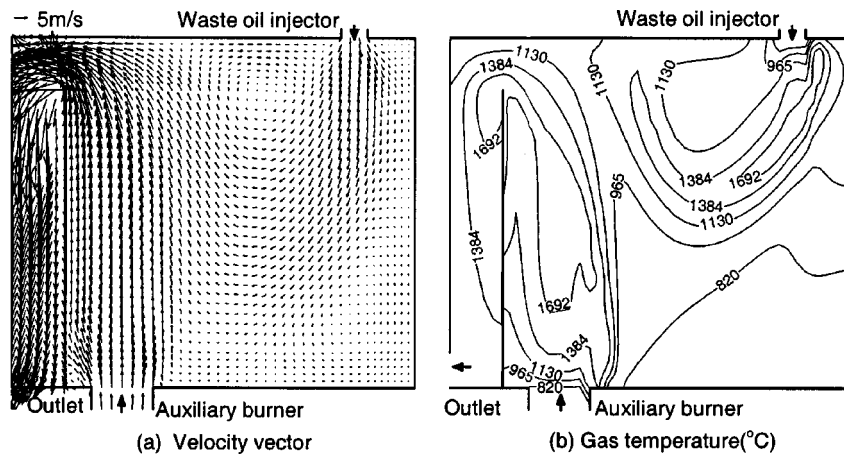


Fig. 6. Velocity vector and gas temperature for changed injection velocity at waste oil injector.

결과적으로 폐유 주입기로 유입되는 폐유와 공기의 속도를 감소시킬 경우 캐비티의 고온영역을 충분히 활용할 수 없어 효과적이지 못하다. 반면, 폐유 주입기로 유입되는 폐유와 공기의 속도를 증가시키는 것은 폐유의 처리량이 증가되어 유리하지만 캐비티 내 국부체류시간의 저하로 충분한 연소가 진행되지 못하므로 캐비티의 부피 등을 고려하여 선정되어야 한다는 것을 알 수 있다.

4-2-2. 유입온도

Fig. 7은 폐유와 공기의 유입온도를 상온인 15 °C에서 325 °C로 증가하였을 경우 가스온도와 CO₂ 농도를 나타낸 것이다.

Fig. 7(a)의 온도분포에서 알 수 있듯이 폐유 주입기의 주입유체 온도를 증가시키에 따라 유입되는 유체의 엔탈피가 증가되기 때문에 캐비티 내 화염온도가 증가된다. 이 고온의 연소가스가 열회수기를 거치면서 보조버너의 화염으로 열전달이 이루어져 화염의 온도가 기준화염에 비해 다소 상승된 것을 알 수 있다. 또한 캐비티 내 온도증가로 연소성이 증가하여 연소생성물인 CO₂의 농도가 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 기준화염 보다 다소 증가된 것을 알 수 있다. 따라서 폐유의 주입온도를 증가시킬수록 연소성이 좋아 유리하다. 하지만 폐유의 온도를 증가시키기 위한 예열 비용의 문제가 있으므로 열회수기의 배기 폐열을 이용하는 방안을 모색하는 것이 유리하다.

4-2-3. 주입위치

Fig. 8은 폐유의 주입위치를 I=5/6에서 I=3/4로 변화시켜 폐유를 주입

할 경우 속도벡터와 CO₂농도 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 8(a)와 같이 폐유가 기준 화염보다 연소실 안쪽에서 주입됨에 따라 캐비티 내 아래쪽에 데드존의 재순환영역이 새로 형성되어 캐비티 내에서 폐유가 연소할 수 있는 충분한 연소시간을 갖지 못한다. 따라서 Fig. 8(b)의 CO₂ 농도분포에서도 알 수 있듯이 기준화염에 비해 연소실 출구쪽에서 연소가 진행되는데, 이는 캐비티에서 폐유의 주입위치가 폐유의 연소성에 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 따라서 폐유를 효과적으로 연소하기 위해서는 폐유의 흐름이 캐비티로 충분히 침투되도록 폐유의 주입위치를 설정하는 것이 중요하다.

5. 결 론

해상에 유출된 기름을 수거하여 유수분리된 폐유를 선상에서 직접 소각하기 위하여 새로운 형태의 캐비티 소각기를 제안하여 연소 및 배출 특성을 규명하고, 운전조건의 제시를 위해 주요 영향변수에 대한 수치 해석적 연구를 수행하였다.

본 연구에서 제안되어진 캐비티 소각기는 수분을 일부 함유한 저발열량의 폐유를 효율적으로 소각하기 위해 열재순환 영역이 존재하는 구조로 되어 있으며 출구 측의 열회수기는 보조연료의 화염을 안정화시킨다. 반복 수치계산을 수행하여 크기와 운전조건을 도출하여 기준 소각기로 하고 연구를 수행한 결과 연소 및 배출특성이 우수한 것을 알 수 있었다.

또한 운전조건의 제시를 위해 변수별 연구를 수행한 결과 다음과 같다.

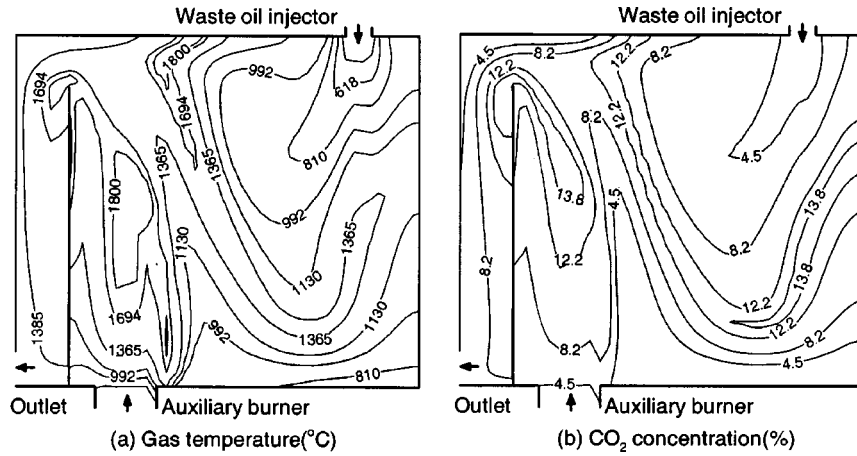


Fig. 7. Gas temperature and CO₂ concentration for changed injection temperature at waste oil injector.

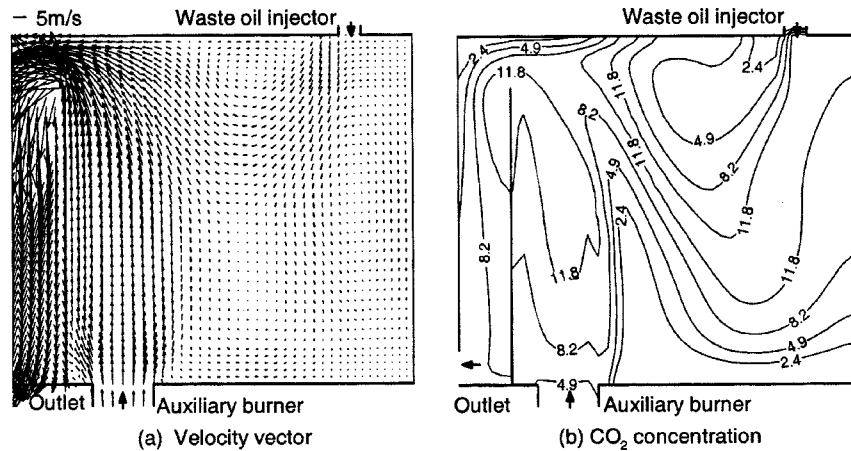


Fig. 8. Velocity vector and CO₂ concentration for changed waste injection point at waste oil injector.

- (1) 폐유 주입기의 주입속도는 캐비티의 부피와 보조버너 화염의 특성에 따라 고려되어야하며 최적의 주입속도가 존재한다.
- (2) 폐유 주입기로 주입되는 폐유와 공기를 예열하여 온도를 올리는 것이 좋다.
- (3) 폐유 주입위치는 캐비티 내의 유동 및 연소성에 큰 영향을 미치며, 본 연구에서 I=5/6인 경우가 우수한 것으로 나타났다.

감 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 2000-2-30500-001-2) 지원으로 수행되었음.

사용기호

- a : absorption coefficient [m⁻¹]
- C_f : friction coefficient
- C_p : constant gas heat capacity J/kg/K
- D : particle diameter [m]
- E : block-body emissive power [W/m²]
- f : mixture fraction
- f_{i→j} : friction coefficient
- f_{i→j} : particle drag
- H : enthalpy [J/kg]

- k : turbulent kinetic energy [m²/s²]
- k_g : heat transfer coefficient
- m_{i→j} : mass transferred from phase i to j [kg/m³]
- m_{j→i} : mass transferred from phase j to i [kg/m³]
- m_{inj} : mass inflow to the control volume [kg/s]
- N_u : Nusselt number
- P : pressure [N/m²]
- Pr : Prandtl number
- q_{j→i} : gas particle heat transfer
- Q_{ri} : heat flux vector in i direction
- R : universal gas constant [kJ/mol/K]
- radiation flux [W/m²]
- Re : Reynolds number
- r_i : volume fraction
- r₂ : particle radius
- s : scattering coefficient [m⁻¹]
- S_{rad} : volumetric radiation energy source [W/m²]
- S_φ : source term for local residence time [sec]
- S_{φi} : source term for general equation [kg/m³]
- t : local residence time [sec]
- T : temperature [K]
- V_i : phase velocity vector [m/s]
- Vol : control volume [m³]

그리스 문자

ε	: dissipation rate [m^2/s^3]
ρ_i	: phase density [kg/m^3]
σ	: Stefan-Boltzmann constant [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]
Γ_{ri}	: diffusion coefficient [m^2/s]
ϕ_i	: general dependent variable

하첨자

g	: gas phase
oil	: oil phase
rad	: radiation
1	: gas
2	: liquid

참고문헌

1. Spalding, D. B.: "Proposal for a Diffusional Radiation Model, Unpublished technical memorandum," CHAM, London(1994).
2. Viskanta, R. and Menguc, M. P.: *Prog. Energy Combust. Sci.*, **13**, 127(1987).
3. Spalding, D. B.: "PHOENICS Training Course Notes," CHAM TR/300(1988).
4. Patankar, S. V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flows," Hemisphere, Washington, D.C(1980).
5. Launder, B. W. and Spalding, D. B.: *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, **3**, 269(1974).
6. Environmental Management Corporation: "Technical Guide for the Establishment of MSW Incineration Facilities"(1998).