HWAHAK KONGHAK Vol. 37, No. 6, December, 1999, pp. 850-856
(Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers)

전산유체역학을 이용한 시멘트 킬른 버너의 해석

주지선 · 신상백 · 이현수 · 이민우 · 홍창식†

동양중앙연구소

(1999년 1월 15일 접수, 1999년 7월 30일 채택)

Analysis of Cement Kiln Burners by Using Computational Fluid Dynamics

Ji Sun Ju, Sang Baek Shin, Hyun Soo Lee, Min Woo Lee and Chang Shik Hong

Tong Yang Central Laboratories, 38-1 Jung-Ri, Kusung-Myun, Yongin, Kyungki-Do 449-910, Korea

(Received 15 January 1999; accepted 30 July 1999)

요 약

본 연구에서는 전산유체역학을 이용하여 시멘트 킬른용 버너의 화염을 해석하였다. P사가 설계한 두 가지 형태의 버너를 대상으로 화염의 형태와 온도분포, NO_x와 HCN의 생성 등 버너의 성능파악에 필요한 자료를 예측하였다. P사의 A형 버너는 중심으로부터 와류와 석탄 투입구 그리고 외류의 세 채널로 구성되어 있으며, B형 버너는 중심부에 화염 안정화를 위한 채널이 추가되어 있고 와류와 석탄 투입구의 위치가 A형 버너와 반대이다. 두 버너 모두 선단부 가까이에서 내부 재순환 흐름을 형성하여 화염이 안정되고 점화거리가 짧은 특색을 보이지만, A형 버너는 내부의 강한 와류에 의해서 화염이 발산하는 양상을 보였고, B형 버너는 상대적으로 가늘고 긴 화염을 형성하였다. 화염온도와 NO_x 생성의 측면에서는 A형 버너가 화염 중심부에서의 고온, 산화성 분위기로 인해 고농도의 NO_x를 집중적으로 생성시키는 반면, B형 버너는 화염 중심부의 환원성 분위기가 NO_x 발생을 억제하고 2차 공기와 접촉하는 화염의 외곽에서 비교적 낮은 농도의 NO_x를 생성하였다. 본 연구에서 제시된 모사 방법과 결과는 버너의 설계는 물론이며 운전의 최적화에도 유효하게 적용될 수 있을 것이다.

Abstract – In this study, analysis of burner flame for cement kiln is performed by using computational fluid dynamics(CFD). Flame shape, temperature distribution and NO_x/HCN formation are predicted to determine the performance of burners which P company designed. Type A burner has three concentric channels for swirl air, pulverized coal, and axial air in radial order. Type B burner has a special flame stabilizer at the center and channel for pulverized coal is relocated between flame stabilizer and swirl air. Velocity contours of both types show internal recirculation near burner tip, which stabilizes the flame and assists early ignition. Due to strong swirling action, type A burner has a little divergent flame. On the contrary, the flame of type B burner is relatively slim and long. Temperature distribution and NO_x concentration profiles show NO_x is intensively formed at the oxidizing atmosphere in the high temperature core of type A burner flame. However, in the type B burner, NO_x is formed at the outer flame where secondary air is supplied and NO_x formation in the high temperature core is reduced by reducing atmosphere. The methodology and results suggested in this study could be successfully applied to not only design of burners but also optimization of operational conditions.

Key words: Cement Kiln, Burner, Clinker, Coal, Flame, NO_x, Computational Fluid Dynamics

1. 서 론

킬른은 시멘트 생산 공정에 있어서 품질과 에너지 측면으로 가장 중요한 장치이다. 연소장치는 소성과정에 필요한 적당한 양의 열을 킬른 내에 공급하고 안정된 화염을 형성해야 고품질의 클링커를 생산할 수 있다. 또한, 이는 연료와 전력 소비량, 킬른 조업 특성과 안정성, 클링커 품질, 오염물질 생성 등과 직접적인 연관성을 가지고 있기 때문에 적절한 연소장치의 선택이 매우 중요하다.

버너에 의해 형성된 화염이 부적절할 경우에는 수용성 알칼리의 감소, 28일 강도 감소, 작업성/응결 시간 감소와 같은 시멘트 품질상의 문제와 황산화물과 질소 산화물 배출량 증가, 일산화탄소와 탄화수소 증가, 예열기 코팅 증가, 연료와 전력 사용량 증가, 킬른 연와 수명 감소, 생산량 감소 등 공정상의 문제가 야기된다[1].

이러한 화염의 중요성에도 불구하고 실제로 화염을 관찰하거나 측정하기가 어렵고 화염과 연소에 대한 실질적인 지식의 부족으로 지금까지 킬른 버너의 운전은 대부분 시행착오나 경험에 의해 이루어져 왔으며 많은 연구자들이 이에 대한 수학적 해석을 위해 부단히 노력해 왔다. Traustel과 Ruhland[1]는 처음으로 시멘트 킬른에서 어떠한 현상이 일어나고 있는지 규명하기 위한 연구에 착수하였으며 Lowes와 Lorimer[2]는 1980년대 중반까지 이루어진 시멘트 킬른 버너의 화염에 대한 지식들을 요약 정리하였다. 화염의 중요성과 저가의 연료를 사용해 고품질의 클링커를 생산하고자 하는 욕구는 각국의 시멘트 회사와

†E-mail: cshong@pro.tycl.co.kr

버너를 개발하는 회사간의 국제 화염 연구 협회(IFRF: International Flame Research Foundation)를 조직하고 1990년에 킬른 버너 화염을 공동연구하기 위한 CEMFLAME 컨소시엄을 형성하기에 이르렀으며, 여기서 연구된 결과와 SO_x/NO_x에 대한 연구 결과, 그리고 1986년도에 Lowes와 Lorimer[2]가 보고했던 사항들을 수정하여 Lowes와 Evans[3]가 1993년에 발표하였다. 이 시기에 Rainer[4]는 화염과 킬른 버너에 관련된 기술과 적용 사례를 모아 보고하였으며 여러 연구자들이 기존에 개발된 킬른 버너의 운전 결과를 보고하였다[5-7].

최근에는 알고리즘과 컴퓨터의 발달, 그리고 난류와 연소 현상에 대한 이해가 깊어짐에 따라 공기역학적 관점에서 일련의 연구들이 활발히 진행되고 있다. Kolyfetis와 Markatos[8, 9]는 세 채널 버너에 의한 킬른 내에서의 유체 흐름과 연소, 그리고 열전달을 예측하기 위한 수학적 모델을 개발하고 실제 운전 중인 시멘트 킬른에서의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증한 바가 있으며, Abbas 등[10]은 가스/오일 연소 터빈을 장착한 복합발전 장치의 연소 특성을 규명하기 위해 실험실 규모의 SAO(Single Annular Orifice) 버너와 SCO(Single Central Orifice) 버너를 제작하여 성능을 비교 검토하고 수학적 모델링을 통해 화염의 안정성과 버너의 연소 공기역학이 밀접한 관계를 가지고 있음을 보고하였다.

Lans 등[11]은 노(furnace)에서 석탄이 연소될 때 생성되는 NO_x가 버너의 운전 조건, 버너의 구조, 그리고 연료 특성 등의 인자에 어떠한 영향을 받는지 연구하였으며 Bubenchikov와 Starchenko[12]는 노 내부로 석탄 제트(jet) 공기가 주입될 때 일어나게 되는 현상들을 해석하기 위한 수학적 모델과 해를 구하는 기법을 제시하였다.

기존의 연구에서는 주로 건조 공정이나 보일러, 그리고 노에 장착되어 운전되는 버너와 세 채널 버너에 관한 연구가 중점을 이루었으며 NO_x 저감에 주된 관심을 기울여 왔다. 하지만 시멘트 킬른에서의 화염은 버너의 기본 구조와 각 채널 공기의 분출 속도에 많은 영향을 받으며 양질의 클링커를 생산하기 위해서는 화염의 모양도 매우 중요하므로 본 연구에서는 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 버너에 의해 킬른 내부에서 일어나는 현상을 해석하였다. 이를 위해 현재 시멘트 생산공정에 널리 적용 중에 있는 멀티 채널 버너인 P사의 A형과 B형 버너를 연구 대상으로 정하였고, 내부에서 일어나는 현상을 파악하고 이들을 서로 비교하였다.

Kolyfetis와 Markatos[8, 9]를 비롯한 다른 연구자들의 시멘트 킬른 버너의 유동 해석은 버너와 킬른을 2차원적으로 고려한 것이 대부분이며 선단부 형태에 대한 상세 고려는 거의 이루어진 바가 없었으나 본 연구에서는 원통좌표계를 이용한 3차원 유동 방정식의 해를 구함으로써 실제의 화염에 대한 와류 성분 거동을 고려하고 있으며 선단부를 실제와 가깝게 구현하였다.

2. 이론적 고찰

2-1. 버너의 종류

버너는 시멘트를 생산하는데 있어서 연료 소비량, 킬른 운전의 안정성, 클링커 품질, 그리고 NO_x 발생량 등에 직접적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요하며 지속적인 관심과 연구의 대상이 되어왔다. 새로운 형태의 버너와 기술이 개발됨에 따라 화염의 형태도 조금씩 변화되었는데 화염의 형태에 따라 버너를 3개의 세대로 구분할 수 있다. 1세대는 가늘고 긴 화염을 형성하는 단일 채널 버너, 2세대는 격렬한 난류를 가진 짧고 발산하는 화염을 형성하는 멀티 채널 버너, 그리고 3세대에는 최소한의 난류로써 비발산 화염을 형성하는 멀티 채널 버너로 발전되었다[4]. 이에 따른 버너의 개발은 처음에 단일 채널 버너가 제시된 이후, 버너에 보조 공기 팬이 설치되어 있어 화염 조절이 가능한 두 채널 버너로 발전하였으며, 현재는 대부분의 시멘트 공장에서 세 채널 이상의 멀티 채널 버너를 사용하고 있다. 멀티 채널 버너는 P사가 처음으로 세 채널인 A형 버너를 개발한 이후, F사와 K사 등에서 고유 모델을 개발하였으며 이후 네 채널, 다섯 채널 버너가 개발되어 석탄, 오일, 가스를 동시에 사용할 수 있게 되었다. 멀티 채널 버너는 외류(axial)와 와류(swirl) 채널의 공기 유량과 속도 조절, 버너의 위치 조정에 의해 화염의 모양과 강도를 조절할 수 있는 유연성이 매우 크다[5].

석탄 버너에서의 연소 속도는 석탄 입자 표면에의 산소 확산에 의해 제한되기 때문에, 최근의 석탄 버너는 석탄 입자와 공기 흐름의 속도차를 크게 함으로써 확산 속도를 증가시키는 방향으로 개발되고 있다. 따라서 버너의 팁은 주입 노즐의 역할 뿐만 아니라 화염 표면적, 산소의 확산, 복사열 밀도를 증대시키는 방향으로 발전하고 있으며, 1차 공기와 2차 공기 사이의 운동량(momentum) 차이를 증가시켜 2차 공기가 화염 속으로 유입될 수 있도록 한다. 뿐만 아니라 최근의 석탄 버너는 제트 흐름을 발생시킴으로써 재순환 흐름을 만들어 화염의 연소밀도를 증가시킨다[7].

2-2. A형 버너

1970년대 석유파동 이후 대부분의 시멘트 공장에서는 주연료를 석유에서 석탄으로 대체하였다. 그래서 석탄을 연료로 사용할 수 있는 버너의 개발이 절실히 요구되었고 1982년에 P사에 의해 A형 버너가 개발되었다. 이 형태의 버너는 동심원상에 중심으로부터 와류, 석탄, 그리고 외류 순으로 3개의 채널을 가지고 있는데 이처럼 와류 채널이 석탄 채널보다 안쪽에 위치하고 있다는 것이 특징이라고 할 수 있다. 초기에는 하나의 1차 공기 팬만을 가지고 있었기 때문에 와류나 외류 공기를 독립적으로 조절할 수 없었고, 따라서 화염의 조절이 어려웠기 때문에 후에 팬을 추가로 장착하게 되었다.

좋은 연소 조건과 화염을 얻기 위해 1차 공기 유속은 80-120 m/s로 조절되었으며, 유량은 석탄연소에 필요한 총 공기량의 12-14% 정도이다. 화염의 모양은 외류나 와류의 공기량 보다는 분출 속도에 더 많은 영향을 받는다.

이 버너는 매우 짧은 화염을 형성하여 킬른 내부에 국부적으로 과도한 열 부하를 주며 비교적 코팅이 불안정하고 연와 수명과 NO_x 발생량에 대해 만족할 만한 결과를 보여주지 못했다[6, 13]. 이상에서 설명한 A형 버너의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

2-3. B형 버너

B형 버너는 P사에 의해 1989년에 개발되어 처음으로 시멘트 공장에 적용되었다. 이 버너의 특징은 가능한 작은 1차 공기량으로 화염의 안정성을 최대화하고 화염 중심에서 산소 농도를 낮추고 연료 농도는 상승시켜 NO_x 생성을 억제하며 화염 온도 분포를 균일화하는 것이다[5]. A형 버너와 가장 큰 차이점은 와류 채널이 석탄 채널보다 바깥쪽에 위치하는 것과 중심부에 central 공기라는 화염 안정장치

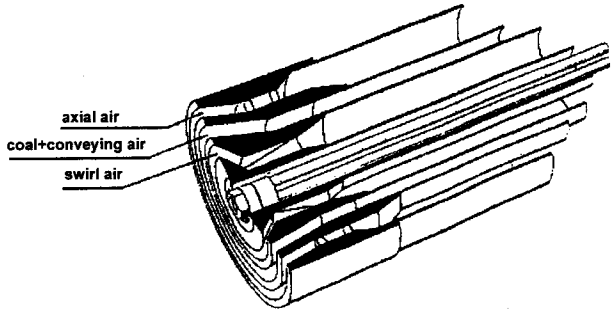


Fig. 1. Type A burner[7].

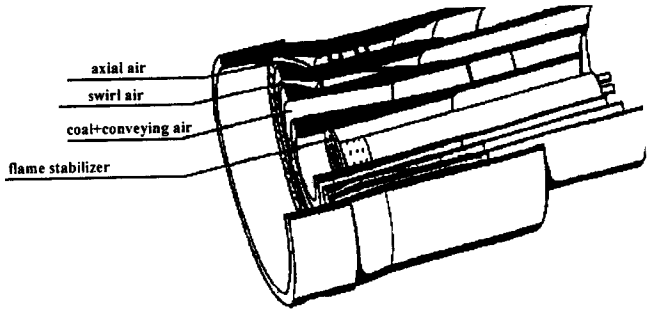


Fig. 2. Type B burner[7].

(flame stabilizer)가 있다는 것이다.

Fig. 2에 나타낸 것처럼 구조는 중심으로부터 central, 석탄, 와류, 외류 순으로 배치되어 있으며, 여기서 석탄 공급 채널이 외류, 와류보다 중심부에 위치하는 것은 석탄과 2차 공기의 혼합을 지연시킴으로써 화염온도를 낮추기 위한 것이다. 화염의 모양은 버너 선단부에서의 공기량과 비율, index 조절에 의한 각 노즐의 상대적 위치 조정에 의해 조절되며, 적은 양의 공기를 사용하는 화염 안정장치를 설치함으로써 화염의 안정화를 이룬다. 화염 안정장치에서 사용하고 있는 공기는 전체 연소 공기량의 0.3-0.5% 정도로 미미하지만 내부 재순환을 유도하여 점화가 신속하게 일어나게 하고 석탄재가 버너 중앙부를 막지 못하도록 석탄재를 제거해 주며, 질소 산화물 저감에 중요한 역할을 한다. 바깥쪽의 외벽은 "bowl 효과"를 얻기 위해 버너 팁보다 약간 튀어나와 킬른쪽으로 들어가 있음으로써 공기 흐름이 갑자기 팽창하여 조립의 석탄이 연소되지 않고 날라가는 것을 방지하고 화염의 모양을 더 좋게 만든다.

킬른이 냉각된 상태에서도 화염이 안정되기 때문에 가동 초기 단계에서 오일에서 석탄으로의 전환이 가능하며, 발산이 없는 화염과 매우 안정된 석탄/1차 공기의 흐름이 화염 중앙부에서의 연소 밀도를 높여 준다. 종래의 A형 버너에서 사용되던 1차 공기량보다 작은 수준인 약 5-7% 정도를 유지함으로써 질소 산화물의 생성을 억제하고 있다[6, 13]. 연료 가격 상승과 환경 오염에 대한 규제가 더욱 심화되고 있는 상황에서 B형과 같은 저 NO_x 버너의 중요성은 나날이 커져 가고 있다.

3. 전산 모사

3-1. 수학적 모델

수치해석적으로 유체현상을 해석할 경우 기본적으로 사용하는 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식(Navier-Stokes), 그리고 에너지식으로 다음과 같은 식 (1)-(3)으로 표현될 수 있다[16].

$$\text{(연속방정식)}\quad \frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{U})=0 \tag{1}$$

$$\text{(운동방정식)}\quad \frac{\partial(\rho\vec{U})}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{U}\otimes\vec{U})=\rho g-\nabla p'+\mu(\nabla\vec{U}+\nabla\vec{U}^{T}) \tag{2}$$

$$\text{(에너지식)}\quad \frac{\partial(\rho H)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{U}H)-\nabla\cdot(\lambda\nabla T)=\frac{\partial p}{\partial t}+Q_c \tag{3}$$

각 식에서 ρ, μ, λ는 각각 유체의 밀도, 점도, 열전도도이다. 식 (2)에서 p'는 modified pressure로서 $p'=p+[(2/3)\mu-\zeta]\nabla\cdot\vec{U}$ 이며, 식 (3)에서 H는 엔탈피로서 $H=h+(1/2)\vec{U}^2$와 같이 정적 엔탈피(static enthalpy)와 운동 에너지(kinetic energy)로 나타낼 수 있다. 식 (3)에서 Q_c는 연소 반응에 의한 발열항 또는 소멸항이다.

위 지배 방정식에 대해 정상상태를 가정하여 시간에 대한 미분항은 0으로 한다. 이러한 지배 방정식에 레이놀즈 평균을 취하여 난류 모델식을 사용하는데 본 연구에서는 일반적인 k-ε 난류 모델을 사용하였다. 연소 반응은 연소 반응 해석 방법 중의 하나인 혼합에 소요되는 시간 스케일이 반응보다 매우 커서 혼합되는 즉시 연소가 완료된다고 보는 Mixed is burnt 모델을 사용하였다. 일반적으로 이 모델에서는 연료 흐름과 산화제 흐름에 대해 보존되는 혼합 분율(mixed fraction)과 이에 대한 표준 편차를 정의하여 수송 방정식을 풀게 된다[16].

석탄 입자의 해석을 위해 각각의 입자에 대한 궤적을 시간에 대한 상미분 형태의 식을 구성하여 풀게 되고, 입자들은 온도 상승에 따라 연소에 직접 참여하게 되는 휘발물질을 발생시킨다. 본 연구에서는 유동장을 반복 계산하여 수렴시킨 후 석탄 입자의 해석으로 연소를 포함시키고 다시 유동장을 계산하는 방법을 사용하였다.

또한, NO_x 생성정도를 예측하기 위해 다음과 같은 사항을 고려하였다. NO_x와 HCN은 그 절대량이 다른 연료나 산소량에 비해 작기 때문에 그 함량이 다른 연소 반응이나 환원 반응에 영향을 주지 않으며, 추가적으로 몇 개의 수송 방정식만 추가해 같이 풀어주면 NO_x 생성을 예측할 수 있다. Thermal NO_x는 Zel'dovich 메커니즘에 의해 결정되며, prompt NO_x는 실험적인 반응식에 의해 결정되고, fuel NO_x는 휘발성분과 char가 HCN으로 바뀌는 반응, HCN이 NO로 바뀌는 반응, NO가 HCN과 반응하여 N_2를 생성하면서 NO가 소멸되는 반응, 이 세 가지 반응에 의해 결정될 수 있다[16].

NO에 대한 수송 방정식은

$$\frac{\partial \rho m_{NO}}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho U m_{NO})-\nabla\cdot\left[\left(\frac{\mu_T}{\sigma_T}+\frac{\mu}{\sigma_L}\right)\nabla m_{NO}\right]=\rho R_{NO} \tag{4}$$

이고, HCN에 대한 수송 방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial \rho m_{HCN}}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho U m_{HCN})-\nabla\cdot\left[\left(\frac{\mu_T}{\sigma_T}+\frac{\mu}{\sigma_L}\right)\nabla m_{HCN}\right]=\rho R_{HCN} \tag{5}$$

또한, thermal NO_x의 생성 반응 속도는 다음과 같고

$$R_{NO}=A_4 Z X_{N2} X_{O2}^{\beta}\exp\left(-\frac{E_4}{T}\right)\frac{W_{NO}}{W_{MEAN}}T^{\alpha} \tag{6}$$

prompt NO_x의 생성 반응 속도는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{NO}=A_p X_F X_{N2} X_{O2}^{BP}\exp\left(-\frac{E_P}{T}\right)\frac{W_{NO}}{W_{MEAN}}T^{\alpha} \tag{7}$$

HCN의 생성 반응 속도는 다음 식과 같이 표현된다.

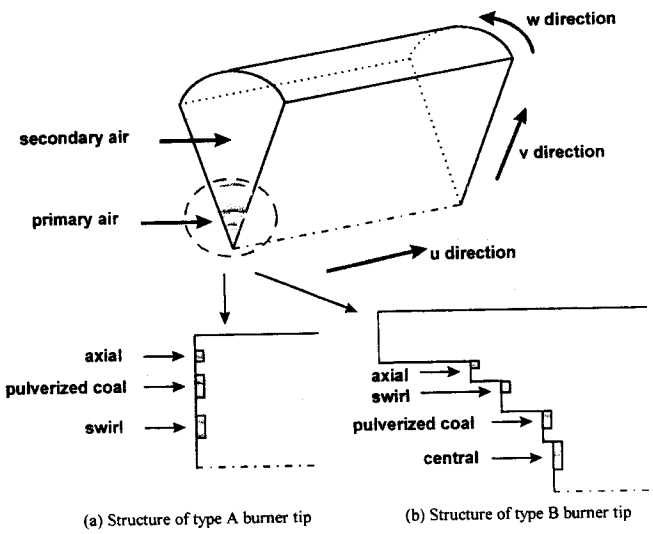
$$R_{HCN}=\frac{W_{HCN}}{W_N}\Omega_N\left(\frac{\sum S_v \varepsilon_v}{M_{FUEL}}+\frac{(1-\Sigma)S_c\varepsilon_c}{M_{CHAR}}\right)(M_{FUEL}+M_{CHAR}) \tag{8}$$

3-2. 모사 방법

두 버너를 전산 모사하기 위해 사용된 구조는 Fig. 3과 같으며 경계조건 및 관련 데이터는 Table 1에 나타내었다. 여기서 와류 공기 입력값은 와류 발생기가 가지고 있는 고유의 각도를 고려하여 속도 성분을 축 방향 u와 방위각 방향 w의 두 성분으로 나누어 사용하였다. 유속은 각 버너 설계상의 데이터를 이용하였다[6].

출구 경계에 대해서는 노이만 경계 조건을 사용하였으며 해가 발산하는 것을 방지하기 위하여 계산 초기에는 다중 격자(multi-grid) 해법을 사용하였고 해가 안정화된 이후에는 선형 해법 등을 사용하여 최종해를 도출하였다.

전산 모사를 위해 버너 팁 부분 내관의 형태를 실제와 같이 완전한 3차원으로 구현하기 위해서는 계산을 위한 격자의 수가 과도하게 증가하여 슈퍼 컴퓨터의 용량으로도 굉장히 많은 시간이 소요되며 화



(a) Structure of type A burner tip (b) Structure of type B burner tip

Fig. 3. Burner tip and kiln structure.

Table 1. Boundary condition and data for simulation

	A type burner	B type burner
Secondary air	10.0 m/s(1,073K)	10.0 m/s(1,073K)
Axial air	80.0 m/s(326K)	79.3 m/s(326K)
Swirl air	89.4 m/s(326K)	71.4 m/s(326K)
Coal	20.0 m/s(343K)	25.9 m/s(343K)
Central air	-	2.7 m/s(326K)
Swirl angle	60°	20°
Kiln radius	1.78 m	1.78 m
Tip index	-	axial 30, swirl 30 coal 40, central 10

염의 형태는 비록 2차 공기의 영향을 받지만 중심에 대해 대칭이며 주기적이라 볼 수 있기 때문에 Fig. 3에서 보여진 것처럼 계산 영역을 부채꼴 모양의 입체로 정하였으며 버너 팁 출구 부분을 입구로 선정하였다. Fig. 3의 (b)에 나타낸 것처럼 B형 버너에서는 각 채널의 상대적 위치를 고려하여 팁 출구 부분을 처리하였다.

킬른의 길이는 공기 흐름이 완전 발달되어 화염의 효과를 충분히 볼 수 있는 10 m로 설정하였으며 이렇게 설정된 총 계산 격자의 수는 A형 버너가 15,576개이고 B형 버너가 13,275개이다. 이들의 격자 구조를 Fig. 4에 나타내었다.

이렇게 설정된 문제에 대한 해를 구하기 위해 시스템 공학 연구소에 있는 슈퍼 컴퓨터 CRAY C90과 SGI workstation을 이용하였으며 상용 CFD 소프트웨어인 CFX4.2를 사용하였다.

4. 결과 및 토의

Fig. 5에 A형 버너와 B형 버너의 속도 등고선도로 표현된 유동특성을 각각 나타내었다. A형 버너의 경우에는 석탄 투입 채널의 안쪽에 위치한 와류 채널에서 토출된 강한 와류 성분에 의해서 화염이 발산하는 양상을 보여주고 있으며, 이에 비해 B형 버너의 경우 토출 직후 시점 약 2.25 m까지는 팽창하다가 이 후에 종모양의 화염을 형성

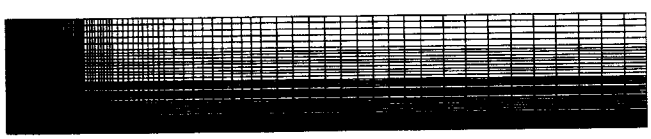
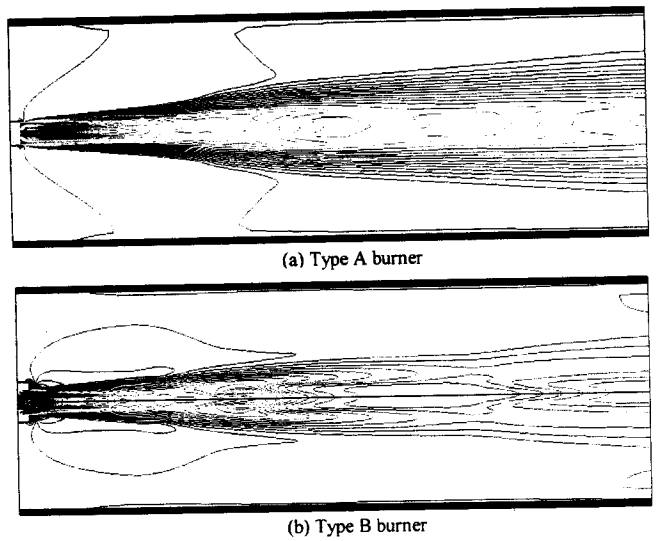


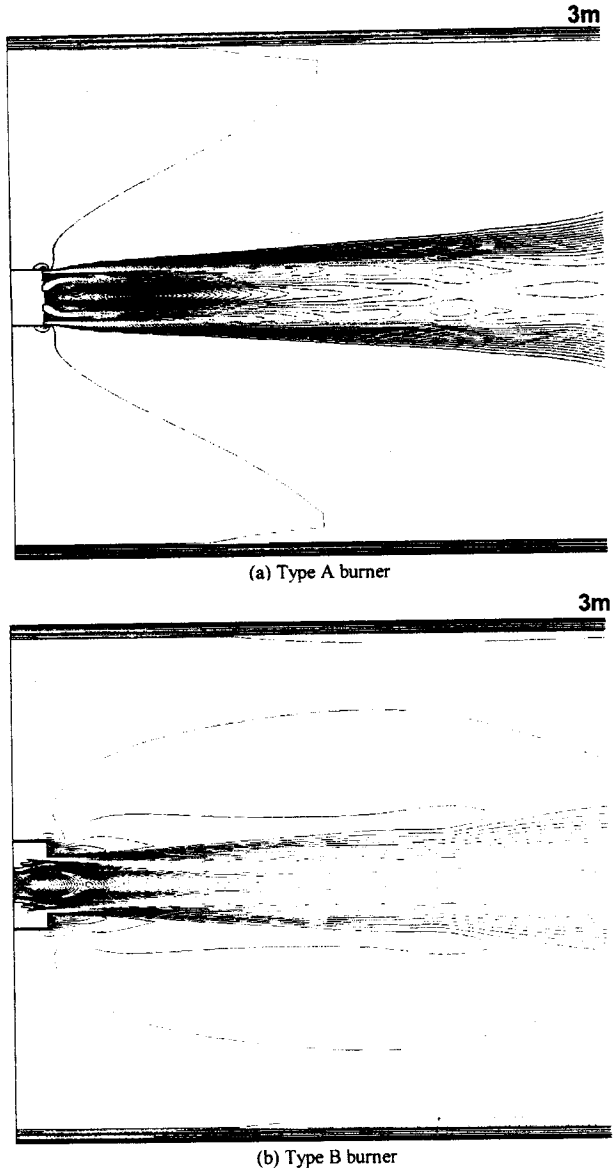
Fig. 4. Computational grids.



(a) Type A burner

(b) Type B burner

Fig. 5. Velocity contour diagram.



(a) Type A burner

(b) Type B burner

Fig. 6. Velocity contour near burner tip exit.

하며 전체적으로 A형 버너보다 상대적으로 가늘고 긴 화염을 형성하고 있다. 이러한 유동 특성을 더 자세히 살펴보기 위해 같은 속도 등고선도를 선단 부분 약 3 m까지 확대하여 Fig. 6에 나타내었다. 전술한 바와 같이 B형 버너의 경우 초기에 팽창하던 화염이 약 2.25 m 지점에서 수축하였다가 완만하게 팽창하는 종모양의 화염을 생성하는 반면, A형 버너의 경우 화염이 출구에서부터 지속적으로 발산하여 나팔모양의 화염을 형성하고 있음을 확인할 수 있다.

버너의 안정적인 운전에 필수적인 2차 공기의 혼입 양상과 내부 흐름 거동을 살펴 보기 위한 선단 부위에서의 속도 벡터도를 Fig. 7에 나타내었다. B형 버너의 경우 선단의 외벽 부위에서 와류가 형성되면서 2차 공기가 1차 공기로 바로 유입되고 있으나 A형 버너의 경우에는 2차 공기가 유입되지 않고 진행 방향으로 계속 이동하는 양상을 보이고 있다.

두 버너 모두 선단부에서 약 0.5 m 전면의 중심부에는 재순환 영역(IRZ: internal recirculation zone)을 형성시켜 화염을 안정화시키고 있다. 이는 안정적인 화염의 복사 강도를 증가시키는 요인이 되며 고온의 공기를 버너 선단부로 되돌려 화염의 점화 거리를 짧게 하여 NO_x 발생을 억제하는 효과가 있다[5]. 아울러 B형 버너의 경우에는 버너 선단부 중심부에서 적은 양의 central 공기를 통해 IRZ에 의해 석탄재가 버너 중앙부를 막는 현상을 방지하는 효과를 가지고 있다.

버너 선단에서 토출된 석탄과 1차 공기는 뜨거운 2차 공기, 킬른 벽면과 연소되는 석탄 입자의 복사 열전달에 의해 점화되면서 연소가 이루어 진다. 현재 세계적인 버너의 개발 방향은 이러한 고온의 2차 공기를 화염 내부로 유입시켜 환원분위기 상태에서 혼합함으로써 NO_x의 생성을 억제하는 추세에 있다.

위의 Fig. 5-7을 종합해 볼 때 B형 버너의 경우 고온의 느린 2차 공기와 최외류의 빠른 공기의 운동량(momentum) 차이에 의해 화염의 진행 방향으로 2차 공기를 끌어들이면서 A형 버너에 비해 짧은 거리에서 연소반응이 개시되기 시작하는 것을 알 수 있다[5].

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 A형 버너의 경우에는 석탄을 투입하는 채널이 와류 채널보다 바깥쪽에 있고, 내부의 발산하는 와류와 상대적으로 느린 최외류의 영향으로 지름이 큰 석탄 조분 입자가 연소반응이 완결되기 전에 화염의 바깥쪽으로 빠져나와 소성 반응 중에 있는 클링커 층에 떨어질 수 있다. 이는 클링커 물성 및 최종 제품인 시멘트의 품질에 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있다[14]. 그러나 B형 버너의 경우에는 버너의 최외각에 다른 채널보다 더 튀어나와 있는 외벽이 마치 그릇처럼 감싸주는 이른바 "bowl 효과"를 가지게 되고, 또한 최외류의 속도가 약 3배 가량 빠른 제트류를 형성하며, 결정적으로 석탄을 투입하는 채널이 와류보다 안쪽에 위치하고 있어서 클링커 층에 석탄 조분들이 떨어지게 되는 바람직하지 못한 현상을 막을 수 있을 것으로 사료된다.

이상의 논의에 대한 실제적인 확인으로서 Fig. 8에 석탄 입자의 궤적을 나타내었다. B형 버너의 경우 투입된 석탄 입자들의 궤적은 중심부를 따라 형성되며 외부로 향하던 입자들도 유선을 따라 다시 화염의 내부로 모아지고 있음을 알 수 있다. 이에 비해 A형 버너의 경우 입도 분포를 따라 석탄 입자들의 궤적이 두 가지 큰 특징을 보이는데 입자의 크기가 작은 미분들은 화염의 중심부에 궤적이 형성되나 입자의 크기가 큰 조분들은 강한 와류 성분에 의해 제공된 원심력에 의해 바깥 부분에 궤적이 형성되어 연소가 완결되기 전에 클링커 층에 떨어질 가능성이 있다.

Fig. 9에 화염의 온도 분포를 각각 나타내었다. 화염의 형태와 함께 살펴보면 B형 버너는 내부에 강하고 높은 온도 분포를 가진 화염을 형성하는 반면에 A형 버너의 경우에는 전반적으로 발산하고 약한 온도 분포를 보인다. 이는 석탄 입자들의 궤적을 나타낸 Fig. 8을 통해 알 수 있듯이 A형 버너의 경우 입자의 크기에 따라 석탄 입자가 분산되는 양상을 보인 반면 B형 버너의 경우 고온의 2차 공기와의 혼합과 석탄 입자의 집중으로 인해 중심부 최고 온도가 높은 것으로 판단된다.

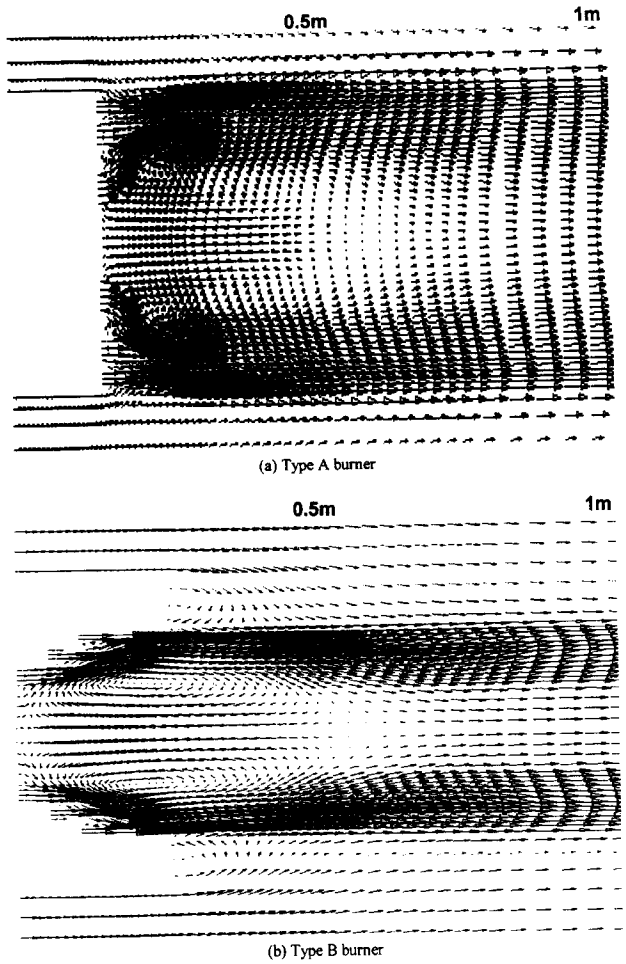


Fig. 7. Velocity vectors near burner tip exit.

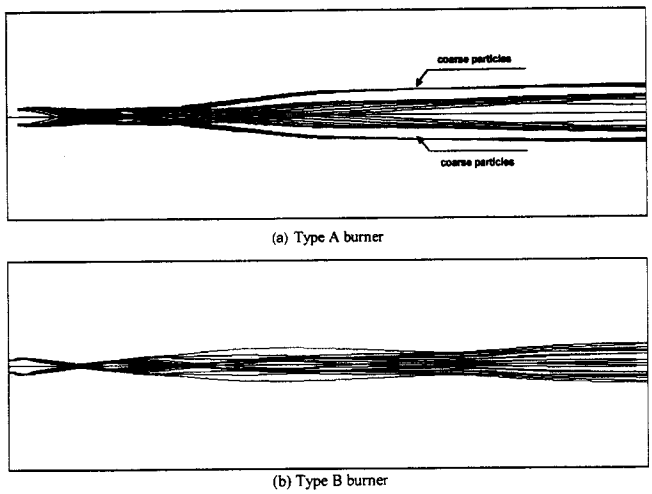


Fig. 8. Coal particle tracks in flame.

Fig. 10과 11에는 NO_x와 HCN 생성 정도에 대한 해석을 통해 B형 버너가 A형 버너에 비해서 저 NO_x 버너로서의 역할을 수행하고 있는지를 평가하였다. HCN은 그 농도에 따라 환원 또는 산화 분위기

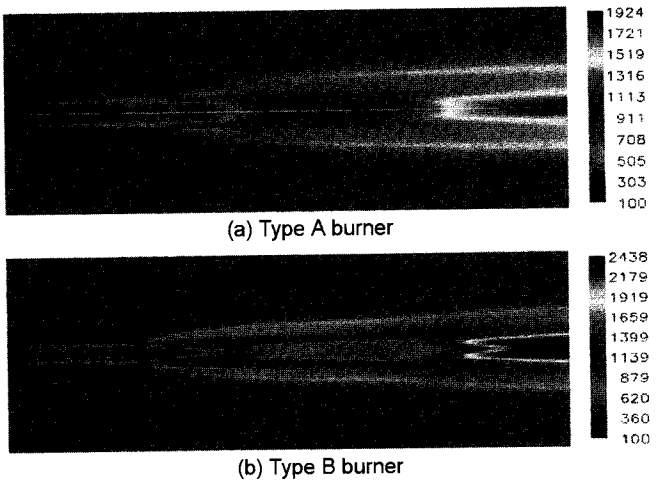


Fig. 9. Flame temperature profiles in flame(unit: K).

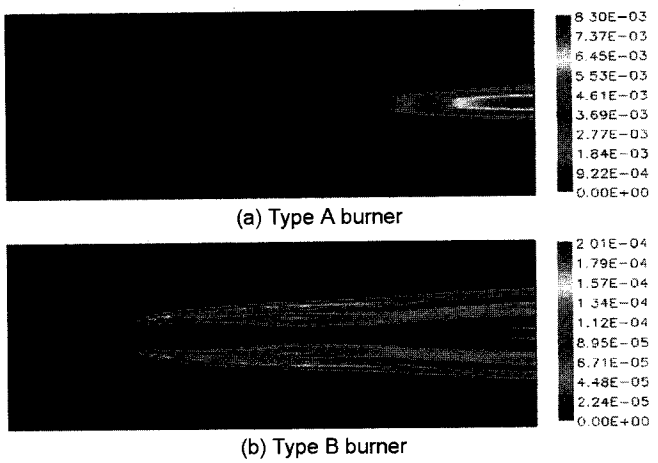


Fig. 10. NO_x concentration profiles in flame(unit: %).

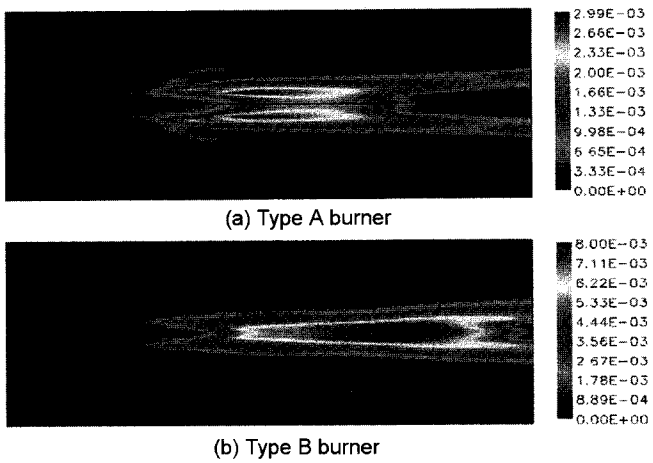


Fig. 11. HCN concentration profiles in flame(unit: %).

가 조성되기 때문에 NO_x가 어떠한 부분에서 발생하고 있는지 살펴보는데 중요한 단서가 된다. 먼저 A형 버너의 경우에는 석탄의 연소와 더불어 나타나는 HCN이 화염의 중심부 최고 온도 지점이 아닌 화염의 주변 지역에서 주로 생성되고, 이에 따라 화염의 중심에서는 산화분위기가 형성되며 온도가 높아 NO_x가 집중적으로 발생하고 있다. 반면에 B형 버너의 경우에는 이보다 10배 정도 적은 NO_x의 발생량을 보이고 있으며, 또한 최고 온도를 보이는 화염의 중심에서 발생하기보다는 2차 공기와 석탄이 만나게 되는 화염의 외곽에서 저 농도의 NO_x가 생성되고 있다. 이때 HCN의 농도 분포를 보면 내부의 화염 중심측에 주로 형성되어 고온 지역에서는 환원 분위기를 형성시키게 되고 결과적으로 NO_x의 발생량을 억제하는 경향을 가지고 있음을 알 수 있다. 물론 본 연구에서 도출된 결과는 버너 선단부부터 10m의 짧은 구간에 한정하여 얻어진 것이기 때문에 본격적으로 화염이 커지는 10-20 m 지점에서의 NO_x의 발생과 소멸을 고려해야만 전체 킬른에서 발생하는 연소 및 NO_x 발생량을 예측할 수 있을 것으로 판단되지만 10-20 m지점에서 형성되는 화염은 버너 선단부에서 발생하는 공기 역학적인 형태와 석탄 입자들의 거동에 의존할 수밖에 없기 때문에 이러한 일련의 결과들이 타당성을 가지고 있을 뿐만 아니라 버너 디자인에서 선단부의 화염 형태 및 거동은 매우 중요하며 결정적인 역할을 한다고 할 수 있다[15].

5. 결 론

본 연구에서는 CFD 기술을 이용하여 버너에 의해 킬른 내부에서 일어나는 현상을 해석하기 위해 많은 시멘트 공장에서 적용 중에 있는 P사가 개발한 A형 버너와 B형 버너의 화염 특성을 파악하고 이들을 서로 비교 분석하였다.

버너 선단부에서의 유동특성을 분석하여 A형 버너의 경우에는 내부의 강한 와류에 의해서 화염이 발산하는 양상을 보이며, 이에 비해 B형 버너는 비교적 강한 와류 성분이 존재하지만 석탄 채널보다 바깥쪽에 존재함으로 인해 전체적으로 A형 버너보다 상대적으로 가늘고 긴 화염을 형성하고 있음을 확인하였다. 두 버너는 모두 선단부에서 약 0.5 m 전면에 내부 재순환 흐름을 형성시켜 화염을 안정화시키고 점화거리를 짧게 하는 효과를 거두고 있다.

석탄 입자의 궤적을 비교하여 B형 버너의 경우에는 크기에 관계없이 화염 중심부를 따라 석탄 입자가 이동하며 A형 버너의 경우에는 석탄 조분이 강한 와류 성분에 의해 화염의 바깥쪽에 궤적을 형성함으로써 연소가 충분히 일어나기 전에 화염을 빠져 나와 클링커 층에 떨어질 가능성이 있음을 확인하였다.

또한, 화염의 온도 분포, NO_x와 HCN 농도 분포를 분석하여 A형 버너의 경우에 화염 중심부 최고 온도 지점에 산화 분위기를 형성시켜 NO_x가 중점적으로 발생하고 있고, B형 버너의 경우에는 2차 공기와 석탄이 만나게 되는 화염의 외곽에서 저 농도의 NO_x가 발생하며 화염 중심의 고온 지역에서는 환원 분위기를 형성시켜 NO_x 생성을 억제하는 경향을 보이고 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제시된 방법론과 결과는 버너의 설계 및 운전 최적화에 기여할 수 있으며 운전조건 변화시 사전에 화염의 모양을 예측하여 킬른 내에 바람직한 온도 분포를 조성함으로써 연료를 절감하고 시멘트 품질 안정화와 생산성 향상, 오염물질의 감소 등의 파급 효과를 가져올 수 있다.

사용기호

C_3S : alite ($3CaO \cdot SiO_2$)
C_2S : belite ($2CaO \cdot SiO_2$)
C_3A : aluminate ($3CaO \cdot Al_2O_3$)
C_4AF: ferrite ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$)
g : gravitational acceleration [m/s^2]
H : enthalpy [J/kg]
M_{FUEL}, M_{CHAR}: global sources of volatiles and char products
p : shear production [Pa]

R : reaction rate
S_V, S_C : local sources per unit mass of volatiles and char products
t : time [s]
T : temperature [K]
U : X-direction velocity [m/s]
W : molecular weight of the various species [g/mol]
X : mole fraction of the various species [-]

그리이스 문자

ρ : fluid density [kg/m^3]
μ : molecular fluid viscosity [Pa · s]
μ_T : turbulent fluid viscosity [Pa · s]
ζ : bulk viscosity [Pa · s]
λ : thermal conductivity [W/(m · K)]
σ_L, σ_T : equivalent Prandtl number [-]
Ω_N : nitrogen mass fraction in the coal particles [-]
ε_V : efficiency of conversion of N to HCN of the volatiles
ε_C : efficiency of conversion of N to HCN of the char products

참고문헌

1. Ruhland, W.: IFRF Doc. No. H 10/a/1.
2. Lowes, T. M. and Lorimer, A. D.: *Zement-Kalk-Gips*, **2**, 69(1986).
3. Lowes, T. M. and Evans, L. P.: *Zement-Kalk-Gips*, **12**, 761(1993).
4. Rainer, H. N.: *IEEE Transactions on industry applications*, **5**, 798 (1991).
5. Hoenig, V. and Gajewski, S.: *Zement-Kalk-Gips*, **10**, 462(1994).
6. Breitenbaumer, C.: *Zement-Kalk-Gips*, **7**, 187(1992).
7. Gerhard, E.: *World Cement*, **3**, 34(1993).
8. Kolyfetis, E. and Markatos, N. C.: *Zement-Kalk-Gips*, **1**, 24(1996).
9. Kolyfetis, E. and Markatos, N. C.: *Zement-Kalk-Gips*, **6**, 326(1996).
10. Abbas, T., Charoensuk, J., Costen, P. and Lockwood, F. C.: *Combust. and Flame*, 111(1997).
11. Lans, R. P., Glarborg, P. and Johansen, K. D.: *Prog. Energy Combust. Sci.*, **23**, 349(1997).
12. Bubenchikov, A. M. and Starchenko, A. V.: *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **33**, 41(1997).
13. Rosemann, H., Künne, P. and Lägerdorf : *Zement-Kalk-Gips*, **9**, 421 (1990).
14. HOLDERBANK Cement Seminar, Process Technology II, Chap. 6 (1997).
15. Lans, R. P., Glarborg, P. and Johansen, K. D.: Prog. *Energy Combust. Sci.*, **23**, 349(1997).
16. CFX 4.2 user manual, AEA Technology(1997).