

## 선회 및 기하학적 형상 변화에 따른 중잔유 가스화 반응 특성 연구

나혜령<sup>†</sup> · 윤용승 · 이진목\* · 유진열\*\*

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

\*ATES(주) 컨설팅사업부

\*\*대우조선공업(주) 선박해양기술연구소

(2000년 4월 10일 접수, 2001년 3월 23일 채택)

## A Study on the Characteristics of the Heavy Residual Oil Gasification with Varying Swirl and Geometry

Hyeyoung Na<sup>†</sup>, Yongseung Yun, Jin Wook Lee\* and Jin Yeol Yu\*\*

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

\*Consulting Division, ATES Ltd.

\*\*Ship & Ocean R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.

(Received 10 April 2000; accepted 23 March 2001)

### 요 약

본 연구에서는 원유 정제후 남는 고유황 함유 물질인 중잔유를 가지고 전산해석방법론을 적용하여 고온/고압 가스화기내에서의 가스화 반응 특성을 파악하고자 하였다. 특히, 가스화기 설계의 주요 인자인 이차주입노즐에서의 선회 강도(선회수)와 원통형 반응로의 형상(L/D)을 해석 변수로 설정하여 반응 유동장의 패턴 변화를 고찰해 봄으로써 중잔유 가스화기의 적절한 설계 및 운전 조건의 설정에 중요한 역할을 하는 변수들의 영향을 파악하고자 하였다. 전산해석 결과, 선회수가 커질수록 화염 안정화에 도움을 주는 가스화기 중심축 세준환영역의 크기가 증가하고, 연료와 산화제의 혼합을 향상시켜 가스화기 내 유동을 균일화시킴으로써 전체적인 반응 완료 시간이 빨라지는 경향을 확인할 수 있었다. 그리고, L/D 비가 작을수록 반응로내 연료의 반응 완료 시간이 길어지고, 선회에 의한 영향력이 상대적으로 약화됨을 확인할 수 있었다. 따라서, 중잔유 가스화기 설계시 화염안정화 및 산화제와 연료의 적절한 혼합을 유지하고 내화재 손상을 최소화하기 위해서는 L/D 비와 선회 강도의 조합을 최적화하는 것이 필수적이라고 판단되었다.

**Abstract** – Numerical study of the turbulent reacting flow in a high-temperature and high-pressure gasifier has been carried out to analyze the characteristics of gasification reaction of heavy residual oil, which has high sulfur content. In this study, the effect of swirl strength of the secondary nozzle and reactor geometry(L/D), known to be the crucial design parameters of gasifier, has been extensively studied. Especially, we intended to find the effect of operating and design parameters by observing the reacting flow pattern as the key parameters have changed. It is shown that there is progressive increase in the length of central toroidal recirculation zone which plays an important role in flame stabilization and the increase in the reactivity of heavy residual oil as the swirl number increases. In addition, required time for the complete reaction increases and the swirl effect is relatively weakened as the L/D ratio decreases. Most of all, it is found that the optimal combination of L/D ratio and swirl strength is essential to maintain the flame stabilization and efficient mixing ratio of fuel and oxidizer, and to minimize the damage of wall refractory.

Key words: Swirl Effect, L/D, Heavy Residual Oil, Gasification, Integrated Gasification Combined Cycle, Computational Fluid Dynamics

### 1. 서 론

중잔유(Heavy Residual Oil)는 원유를 정제한 후 남는 잔여 물질로서 정제 공정을 거쳐 재사용되고 있다. 그러나, 중잔유는 다른 유류나 석탄에 비해 높은 황 함유율을 나타내므로 환경적인 측면을 고려해 볼 때

유황제거 효율이 높은 시스템의 연료로 사용하는 것이 타당하며, 한 예로서 가스화 복합발전시스템을 들 수 있다. 석탄 및 기타 연료를 이용하여 에너지를 생산하는 가스화 복합발전시스템은 현재 환경 오염의 심각성에 대처하기 위한 해결책으로 연구 개발되고 있는 분야중 대표적인 기술로 기존의 미분단 발전시스템에 비해  $\text{CO}_2$ 는 15%이상,  $\text{SO}_x$ 는 90%이상,  $\text{NO}_x$ 는 60%이상의 저감 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 따라서, 고유황 함유 물질인 중잔유를 가스화 복합발전시스템(Integrated

<sup>†</sup>E-mail: hrna@iae.re.kr

Gasification Combined Cycle, 이하 IGCC)의 발전 연료로서 활용하게 되면 지속적으로 강화되고 있는  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  등의 대기오염물질의 환경 규제를 만족시킬 수 있으며, 중간유의 활용 방안으로도 매우 유리한 점을 가지게 된다. 특히, 전량 수입에 의존하고 있는 원유의 활용을 극대화해야 하는 우리의 입장에서는 환경적인 측면 및 경제적인 측면을 고려하여 중간유가 발전 원료로서 적합한지를 판단하고 가스화 반응을 통한 전력 생산의 타당성을 고려해 보는 것은 매우 필요하다고 생각된다. 현재, 이태리에서는 중간유를 사용하는 500 MW급 발전소 2기와 250 MW급 2기를 1998년부터 2000년 사이의 완공을 목적으로 플랜트를 건설중에 있으며, 일본에서도 340-550 MW급 2기를 2001년과 2003년까지 완공을 위해 플랜트 건설이 진행되고 있다[1, 2].

본 연구에서는 중간유를 연료로 사용하는 가스화기를 대상으로 하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)방법에 의한 수치해석을 수행하였다. 고온/고압으로 운전되는 가스화기는 내부의 반응을 상세히 관찰하는데 제한적이고, 실험적인 연구를 위한 갖은 설계 변경 또한 현실적으로 어려움이 따른다. 그러나, 가스화기 내부에서 일어나는 복잡한 물리·화학적 현상에 대한 충분한 이해와 데이터의 확보를 통해서만 최적 조건의 가스화기 설계가 가능하므로, 본 연구에 적용된 CFD 방법론은 실험적인 연구의 제한성을 극복하고 반응로 내부의 복잡한 난류 유동장의 화학 반응 특성을 파악하는데 적절한 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 이러한 수치해석을 통해 가스화기 내부에서 일어나는 중간유의 화학 반응, 특히 가스화 반응의 특성을 파악하고, 가스화기의 주요 설계 변수들인 원통형 반응로의 형상과 이차주입노즐의 회전방향 속도변화, 즉, L/D 비 및 선희수의 변화가 반응 유동장에 미치는 영향을 파악함으로써 가스화기의 적절한 설계 및 운전 조건을 제시하고자 하였다.

## 2. 수학적 모델 및 해법

### 2-1. 기상 지배방정식

중간유 가스화기 내부에서는 난류반응유동장이 형성되며, 이에 따른 기상 지배방정식을 2차원 축대칭 좌표계에서 다음과 같은 편미분방정식의 형태로 나타낼 수 있다[3, 4]. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\rho u \phi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\overline{r \rho v \phi}) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_{\phi}$$

윗 식에서  $\phi$ 는 해석하고자 하는 일반 종속 변수로서 각 방향에 대한 속도 성분, 레이놀즈응력, 엔탈피 및 각종 화학종 등을 대표하고 있으며,  $x$ 는 축방향 거리,  $r$ 은 직경방향 거리,  $\rho$ 는 기체의 밀도,  $\Gamma_{\phi}$ 와  $S_{\phi}$ 는 종속 변수에 대한 확산 계수와 생성항을 각각 나타낸다. 그리고, 연료의 반응에 의해 기상으로 전달되는 질량, 엔탈피, 운동량의 변화 등을 지배방정식의 생성(소멸)항에 포함되어 해석된다. 난류 모델은 RSM(Reynolds Stress Model)을, 복사열전달 모델은 복사에너지의 흡수와 산란을 고려한 P-1 모델을 사용하였다. 기상의 난류 반응장을 해석하기 위한 현상학적 모델을 위해서는 ‘fast chemistry model’중 혼합 분율과 밀도 합수를 이용한 보존 스칼라 모델을 사용하였으며, 반응 생성물의 조성은 주어진 제어 체적내에서 ‘Gibb's free energy minimization’ 방법에 의하여 계산되도록 하였다[5, 6].

### 2-2. 액적 거동 지배방정식

난류유동장내에 존재하는 고상 또는 액상의 입자 물질이 주변의 산화제와 반응하면 물질 및 열전달이 상호간에 일어나게 되므로 유동장의 변화에 커다란 영향을 미치게 된다. 따라서 난류반응장내에서의 입자의 진행 상태를 해석하는 것은 매우 중요하며, 본 연구에서는 중간유 액적의 반응유동장내에서의 거동을 해석하기 위해 초기에 유입된 액적의 온

도가 반응 온도까지 상승한 후 증발(vaporization) 및 비등(boiling)을 통해 기화되어 기상으로 전달된 후 반응하도록 하는 액적반응모델을 사용하여 계산을 수행하였다[6, 7].

### 2-3. 선희수(Swirl Number, SN)

연소로 및 가스화기 등에서 물리적으로 아주 중요한 변수인 선희수는 반응로 중앙에 재순환 영역을 형성시킴으로써 화염 안정화에 도움을 주며, 특히 연료와 산화제의 혼합을 증가시키는 중요한 역할을 한다. 난류 요동향 및 압력향을 무시하면 선희수에 대한 정의는 아래와 같다[8].

$$S_N = \frac{\int \rho u w r dr}{R_o \int \rho u u dr}$$

$$S_{N_{nozzle}} \approx \frac{2w(D_0^2 + D_0 D_i + D_i^2)}{3u(D_0^2 + D_0 D_i)}$$

$$S_{N_{reactor}} \approx S_{N_{nozzle}} \cdot \frac{T_{in}}{T_{out}} \cdot \frac{D_{nozzle}}{D_{reactor}}$$

여기서  $D_i$ 와  $D_0$ 는 일차 및 이차주입노즐의 직경을 각각 의미한다.

### 2-4. 경계 및 해석 조건

본 연구의 적용 대상인 중간유 가스화기는 총 3기의 가스화기로 이루어진 SARLUX 플랜트[9]를 참고로 하여 1,200 T/D 용량의 가스화기 1기로 기준을 설정하였다. 해석 대상 가스화기는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 2차원화된 상단공급방식 원통형 가스화기로, 매우 좁은 노즐 입구를 통해 산화제와 연료가 유입되는 유동장의 특성상 제어체적의 급격한 변화를 막기 위하여 입구 주변에 밀집된 격자계를 생성하여 해석에 이용하였다. 가스화기의 연료인 중간유는 일차주입노즐 영역에서 분사되며, 이차주입노즐에서는 산화제만이 공급되도록 하였다. 산화제 및 스팀과 연료의 비는 Texaco공정을 기준으로 각각 1.04, 0.31로 설정하였으며, 대상 연료의 조성 및 변수 연구를 위한 표준 조건은 아래의 Table 1과 2에 간략히 나타내었다. 이중 연료에 미량으로 포함되어 있는 수분과 재(ash)는 가스화 반응 모델링 시 제외하였고, 수치해석의 주요 변수로 이차주입노즐의 회전방향속도와 L/D 비를 변화시켜 봄으로써 선희수와 L/D 비가 가스화기내 반응 유동장에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 전산해석을 위해 상용 열유체 해석 소프트웨어인 Fluent V.4.5를 사용하여 HP9000/770 Workstation에서 계산을 수행하였다.

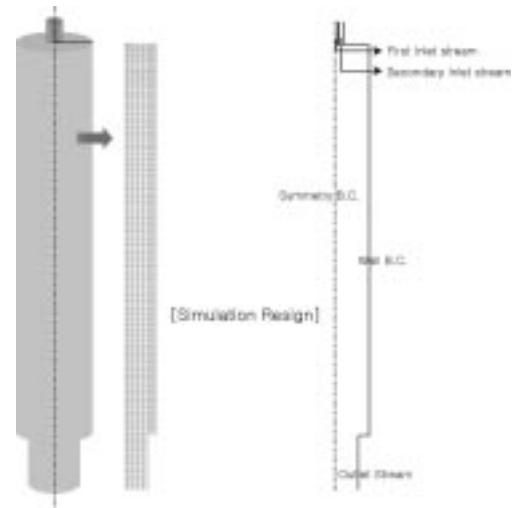


Fig. 1. Schematic diagram of gasifier and computational domain.

**Table 1. Composition of heavy residual oil**

Proximate analysis(%)	Moisture	0.01
	Volatile matter	79.71
	Ash	0.20
	Fixed carbon	20.08
Ultimate analysis(%)	C	83.03
	H	9.77
	N	0.68
	S	6.27
	O	0.04
	Ash	0.20
	Moisture	0.01
Gross heating value(kcal/kg)		9628

**Table 2. Standard condition for numerical calculations**

Fuel feeding rate(T/D)	1200
Oxidizer	95% O <sub>2</sub> + 5% N <sub>2</sub>
Oxidizer/Fuel(kg/kg)	1.04
Steam/Fuel(kg/kg)	0.31
Oxidizer injection velocity(m/s)	20
Swirl number(-)*	0.0
L/D(-)*	10

\*Simulation Parameters.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 CFD 방법론을 적용하여 주요 설계 변수에 따른 중간 유 가스화기내 반응 유동장의 특성을 고찰해 봄으로써 설계 인자들이 가스화 반응장의 형성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. Fig. 2는 산화제와 연료의 비가 1.04, 스팀과 연료의 비가 0.31로 유입되는 중간유 가스화기내에서 공간시간(space time)이 약 4.5초이며, Table 1에 나타낸 표준 조건을 갖는 반응 유동장에서의 생성 가스 몰분율을 나타낸 결과이다. 결과로부터 연료인 중간유가 분사되는 가스화기 초기의 입구 영역에서는 산화제와 빠르게 반응하여 연소 반응이 활발히 일어나기 때문에 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 높게 생성됨을 알 수 있다. 특히, 일차주입노즐에서 분사되는 산화제와 연료가 혼합되는 경계면에서는 CO, H<sub>2</sub>가 높게 생성되며, 이차주입노즐로 분사되는 산화제에 의해 외벽쪽으로 갈수록 산화 반응이 계속 진행되므로 국부적으로 가스화기 중심축보다는 입구 벽면

근처에서 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 높게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 또한, 연소 반응에 의한 열역학으로 가스화기내 온도가 충분히 고온으로 유지되고, 연소 생성물이 다시 가스화 반응의 산화제 역할을 하므로 일단 연소 반응 영역 이후부터는 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O는 감소하는 반면, CO와 H<sub>2</sub>는 증가하기 시작하는 가스화 반응이 진행되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3은 이차주입노즐에서의 선회수 변화에 따른 가스화기내 속도장을 나타낸 것이다. 가스화기내로 분사되는 산화제와 연료의 혼합 효과를 증대시켜 반응성을 향상시키기 위한 방안으로 이차주입노즐의 선회수를 변화시켰을 때의 유동장의 특성 변화를 파악해 보았다. Fig. 3의 (a)는 선회가 존재하지 않는 경우에 대한 해석 결과이다. 결과로부터 알 수 있듯이 연료와 산화제와의 반응에 의한 가스 유량의 급팽창으로 인해 가스화기 입구 영역에서 급격한 속도 변화가 나타나고 있으며, 속도 변화에 의해 입구 벽면쪽에는 긴 재순환영역(Corner Recirculation Zone, 이하 CRZ)이 형성되고, 중심축을 따라 가스가 출구쪽으로 진행되고 있는 평이한 유동장을 나타내고 있다. (b)는 이차주입노즐에서의 선회 속도가 1.2 m/s로 미약한 선회의 효과가 존재할 때의 속도장으로 (a)와 비교해 볼 때 선회에 의한 원심력으로 유동이 약간 벽쪽으로 치우쳐져 CRZ 영역의 크기가 상당히 줄어들었음을 확인할 수 있다. 또한, 가스화기의 중심축 부근에서 아주 미약하지만 유동장의 변화가 일어나고 있음을 보여준다. 선회 속도가 2.3 m/s로 선회가 비교적 강해진 (c)의 경우를 보면, 입구 근처의 CRZ 영역의 크기가 더욱 줄어들고, 화염 안정화에 도움을 주는 중심축 부근의 재순환영역(Central Toroidal Recirculation

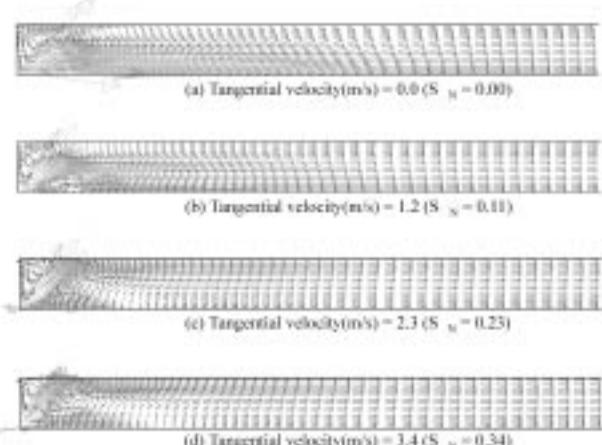


Fig. 3. Velocity vector plots in accordance with SN at the L/D=10.

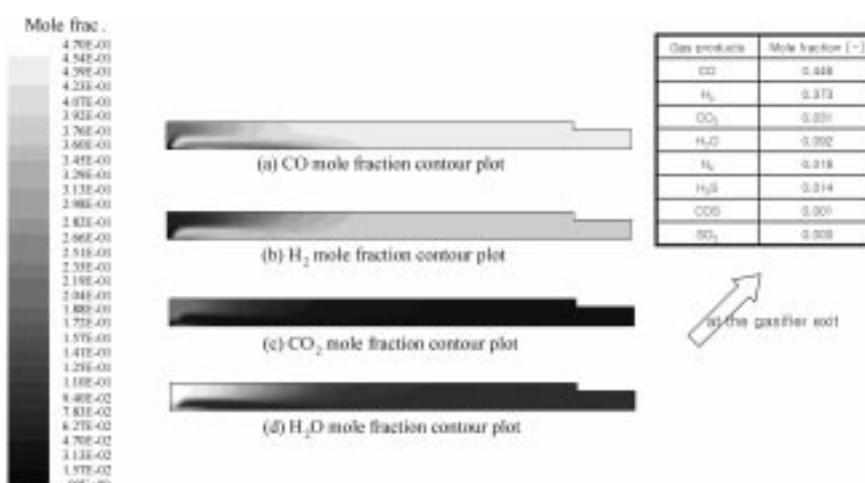


Fig. 2. Species distribution in the gasifier at the standard condition.

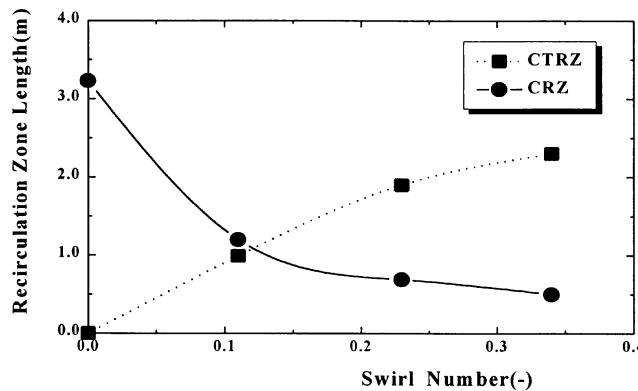


Fig. 4. Effect of swirl number on recirculation zone length at the L/D = 10(CTRZ: Central Toroidal Recirculation Zone, CRZ: Corner Recirculation Zone).

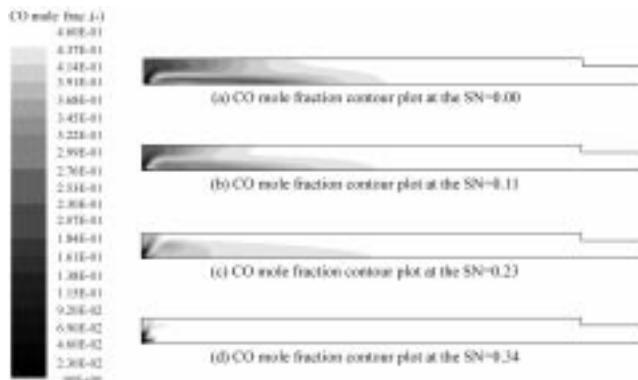


Fig. 5. CO mole fraction contour plots in accordance with SN at the standard condition.

Zone, 이하 CTRZ)의 형성이 커지고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 선희 속도가 3.4 m/s로 선희가 더욱 강해진 (d)의 유동장을 살펴보면, 가스화기 입구 벽면쪽으로 유동이 상당히 치우쳐져 있어 벽쪽에 반응이 집중되어 가스화기 내화재에 손상을 입힐 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 고온/고압의 가스화기의 경우 내화재가 일종의 화염 안정화 역할을 하기 때문에 CTRZ 영역이 지나치게 크게 형성될 필요는 없다고 판단된다.

Fig. 4는 선희수 변화에 따른 재순환영역의 크기를 비교한 것으로, 결과에서 볼 수 있듯이, 선희수가 증가할수록 체류시간을 감소시키고 벽면쪽으로 반응의 국부적인 집중을 야기시켜 전체적인 반응에 도움을 주지 않는 CRZ 영역의 크기는 감소하는 반면, 화염 안정화에 도움을 주어 가스화기내 반응을 향상시키는 역할을 하는 CTRZ 영역의 크기는 증가하고 있음을 확인해 알 수 있다.

Fig. 5는 선희수 변화에 따라 가스화기내에서 연료와 산화제의 혼합 정도에 따른 반응 속도의 변화를 보고자 가스화 반응의 대표적인 생성물인 CO가스의 몰농도를 비교한 결과이다. (a)-(d)로부터, 산화제와 연료가 유입되는 가스화기 입구 초기에서 일어나는 연소 반응에 의해 생성된  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$  등이 다시 가스화 반응의 산화제로 작용하여 가스화기 후류 영역에서는 CO의 농도가 높게 생성되는 것을 볼 수 있으나, 선희 속도가 증가할수록 가스화 반응에 의해 CO 농도가 생성되기 시작하는 초기 영역이 가스화기의 입구쪽으로 빠르게 이동하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 선희 속도가 커질수록 산화제와 연료의 혼합이 증가하기 때문에 화학 반응이 점차적으로 빨리 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 선희가 없는 유동장을 기준으로 가스화기의 L/D 비를 변화

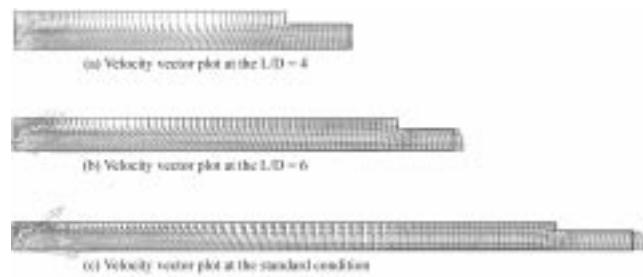


Fig. 6. Velocity vector plots in terms of L/D effect at the SN=0.00.

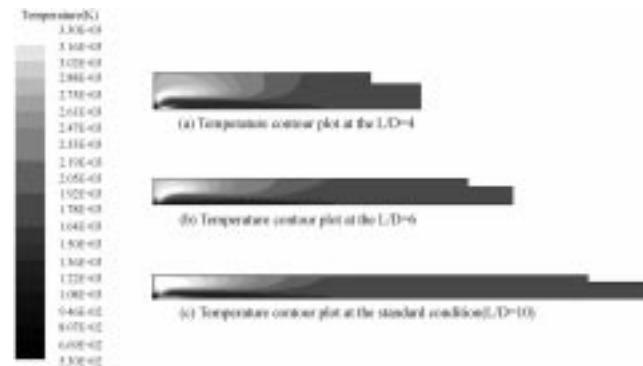


Fig. 7. Temperature contour plots in terms of L/D effect at the SN=0.00

시켰을 때의 유동장 해석 결과이다. 전체적인 유동장 패턴은 L/D 비에 관계없이 비슷한 양상을 보이고 있으나, 가스화기 입구 영역에서 볼 때 L/D 비가 가장 작은 (a)의 경우, 체류시간을 감소시키는 CRZ 영역의 크기가 벽면쪽에 상당히 넓게 분포되고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 가스화기내 체류시간이 큰 폭으로 감소하여 충분한 가스화 반응이 일어날 수 없을 것으로 판단된다. 그러나, L/D의 비가 증가할수록 유동 패턴은 입구 초기 영역에서 벽면에 치우치면서, CRZ 영역의 크기가 감소하는 경향을 보이고 있으므로 가스화기의 입구 근처에서부터 빠르게 반응이 시작되어 가스화 반응이 충분히 일어날 수 있을 것으로 기대된다.

또한, Fig. 7의 온도장을 살펴보면 L/D의 비가 4인 (a)의 경우, (b)와 (c)에 비해 가스화기내 최대온도영역이 벽면에 치우치지 않고 상대적으로 입구에서 길게 형성되고 있으므로 L/D 비가 작을수록 산화제와 연료의 상대적인 반응 완료 시간이 증가하고 있는 것으로 판단된다. 또한, L/D 비가 증가할수록 가스화기내 최대온도영역이 입구 근처에서 나타나고 있으므로 전체적으로 반응이 빠르게 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 그런데, 현 수치해석 결과로 볼 때 벽면 근처에 고온 영역이 집중되는 현상을 보이므로 실제 운전시에는 수증기를 산화제 노즐 바깥쪽으로 분사함으로써 벽면 근처의 온도가 지나치게 증가하여 내화재에 손상을 주는 현상을 방지하는 개념이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 8의 CO가스 몰분율 분포 결과를 보면, 중심축을 기준으로 L/D 비가 4일 때 최대 농도치가 출구 영역 근처에서 나타난 반면, L/D 비가 증가할수록 CO의 최대 농도치가 나타나는 지점이 가스화기 앞쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있는데, 이 결과로부터 L/D 비가 클수록 가스화기 입구 영역에서 반응이 빠르게 완료되는 경향을 보이고 있으므로 현 수치해석 조건에서 L/D 비가 10일 경우가 가스화 반응을 일으키는데 충분한 체류시간을 갖는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 각각 다른 L/D 비를 갖는 가스화기내에서 선희 속도가 유동장 형성에 미치는 효과를 파악하고자 한 것으로 선희수 0.23을 기준으로 비교하여 보았다. L/D 비가 4인 (a)의 경우를 보면, 선희에 의해 입구 근처에서 중심축에 아주 미약한 CTRZ 영역이 나타난 것을 볼 수 있다. 그러나, 벽면 근처에서는 CRZ 영역 또한 길게 나타나고 있는데, 이

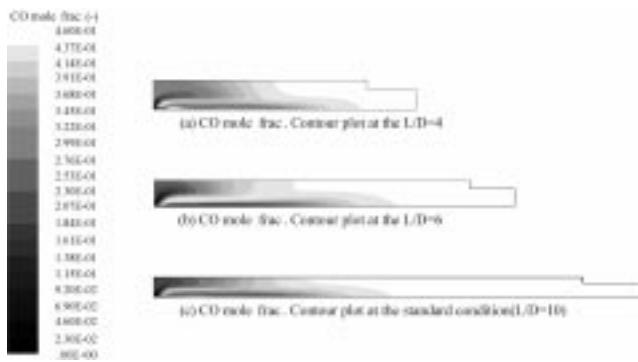


Fig. 8. CO contour plots in terms of L/D effect at the SN=0.00.

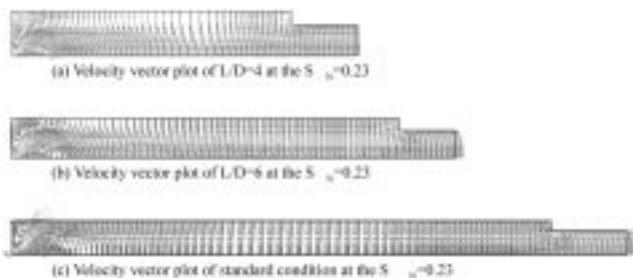


Fig. 9. Velocity vector plots in terms of L/D effect at the SN=0.23.

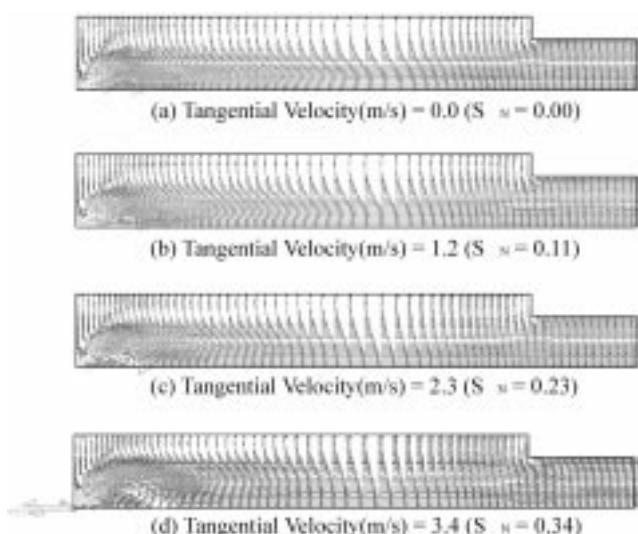


Fig. 10. Velocity vector plots in terms of SN at the L/D=4.

는 (a)의 경우 선회가 유동장에 미치는 영향력이 비교적 약한 것으로 판단된다. 그러나, L/D 비가 증가한 (b)와 (c)의 유동장 패턴을 각각 살펴보면 (a)와 같은 선회 속도를 가질 때 점차적으로 CRZ 영역의 크기는 줄어드는 반면, 중심축에 형성되는 CTRZ 영역의 크기는 상대적으로 커지고 있음을 알 수 있다. 즉, L/D 비가 작을수록 가스화기내 유동장 패턴에 영향을 미치는 선회 효과는 약화되고 있음을 알 수 있으며, 선회 효과는 가스화기의 직경(D)과 반비례 관계가 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 L/D 비가 4인 가스화기내에서 선회 속도 변화에 따른 유동장을 나타낸 결과이다. L/D 비가 10인 Fig. 3의 유동장과 비교해 볼 때 Fig. 9에서 설명한 바와 같이 동일한 선회 속도에서 나타나는 재순환영역의 크기는 차이를 보이고 있음을 알 수 있으나, 선회 속도가 증가할수록 가스화기내 중심축에 형성되어 화염 안정화 역할을 하는 CTRZ

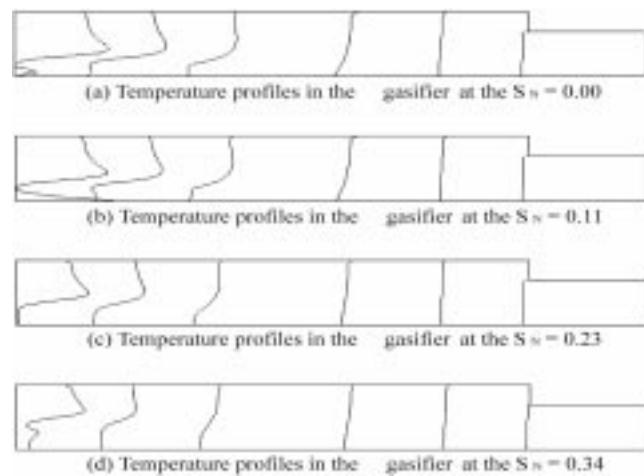


Fig. 11. Temperature profiles in terms of SN at the L/D=4.

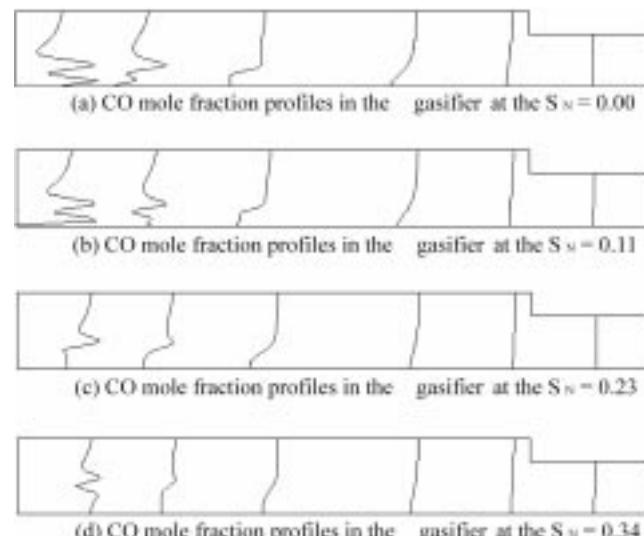


Fig. 12. CO mole fraction profiles in terms of SN at the L/D=4.

영역의 크기가 점차적으로 커지는 동일한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 선회 유동이 산화제와 연료의 혼합에 도움을 주고 가스화기내 유동장을 균일화하여 전체적인 반응 속도를 향상시키는 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 11에서 나타낸 가스화기내 직경 방향의 온도 분포를 보면, 선회가 존재하지 않는 (a)의 경우 가스화기 상단부 즉, 입구 근처에서는 직경 방향의 온도 구배가 큰 반면에, 유동이 하류로 진행되면서 가스화기 하단부 즉, 출구 근처에서는 온도 구배가 거의 사라지는 경향을 보이고 있다. 그런데, 선회 속도를 증가시켰을 때 (a)-(d)를 일정한 지점에서 각각 비교해 보면, (a)에서 나타났던 가스화기 상단부의 온도 구배는 선회수가 증가하면서 상당히 감소하고 있으며, 후류로 갈수록 더 빠른 속도로 균일화되고 있음을 볼 수 있다. 즉, 선회수가 큰 유동장에서의 온도 분포가 더 빨리 균일해지며 출구쪽에 가까워질수록 선회수 변화에 따른 직경 방향의 온도 차이가 거의 사라지는 양상을 명확히 확인할 수 있는데, 이 현상은 선회가 산화제와 연료의 혼합을 증가시킴으로써 가스화기내 유동장을 균일화시키는데 커다란 역할을 하고 있음을 확인시켜주는 결과라 할 수 있다. Fig. 12에서 나타낸 CO가스 분포도 선회 속도가 존재하지 않는 (a)와 비교해 볼 때, 선회 속도가 증가할수록 가스화기 상단부에서 빠르게 CO 농도 분포가 균일해지며 출구쪽에서는 농도

구배가 거의 없어지는 상태를 볼 수 있다. 또한, 가스화기 내부의 같은 지점에서 CO 농도를 비교해 보면 선희수가 작은 경우에 비해 농도가 높게 나타나므로 선희수가 클수록 혼합 효과의 향상에 의해 반응 속도가 상대적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 가스화 복합발전시스템의 대상 연료로서 원유 정제후 남는 고유황 함유 잔여 물질인 중간유를 가지고 전산해석방법론을 적용하여 고온/고압 가스화기내에서 일어나는 가스화 반응 특성을 파악하고자 하였다. 특히, 가스화기 설계의 주요 변수인 이차주입노즐에서의 선희 속도와 L/D 비의 변화에 따른 해석을 통해 설계 인자들이 중간유의 가스화 반응 특성에 미치는 영향을 고찰해 보았다. 전산해석 결과, 표준 조건하의 약 4.5초의 공간시간이 중간유 가스화 반응을 완료시키는데 이론적으로 적합한 시간으로 계산되었으며, 선희수 0.23 부근에서 형성된 유동장이 가스화기 외벽쪽에 반응을 집중시키지 않고, 내화재에 손상을 주지 않을 것으로 판단되는 적절한 패턴을 보였다. 선희수가 커질수록 화염 안정화에 도움을 주는 CTRZ 영역의 크기는 증가하고, 가스화기내 체류시간을 감소시키는 역할을 하는 CRZ 영역의 크기는 작아지고 있음을 뚜렷히 나타내었으며, 연료와 산화제의 혼합이 향상되어 가스화기내 유동이 균일화됨으로써 전체적인 반응 완료 시간이 빨라지는 경향을 확인할 수 있었다. 그리고, L/D 변화에 따른 해석 결과를 통해, L/D 비가 작을수록 반응로내 연료의 반응 완료 시간이 길어지고, 선희에 의한 영향력이 상대적으로 약화됨을 확인할 수 있었다. 따라서, 중간유 가스화기 운전시 가스화 반응이 충분히 완료되는 공간시간을 유지시키면서 가스화기 벽면의 내화재 손상을 최소화하고, 적절한 크기의 CTRZ 영역을 형성시키고 산화제와 연료의 혼합을 증대시키기 위해서는 L/D 비 및 선희수의 조합을 최적화하는 것이 주요한 필요 조건의 하나라고 판단되었다.

#### 감 사

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단 R&D본부에서 지원하는 “석탄가스화 복합발전 기반기술개발(II)” 연구의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Liebner, W. and Hauser, N.: "Optimizing/Costing Study for a 500 MW IGCC Power Plant Based on the Shell Gasification Process," EPRI, Gasification Technologies Conference(1996).
2. Lee, S. J., Yun, Y., Yu, J. and Seo, I. J.: *HWAHAK KONGHAK*, 37, 775(1999).
3. Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N.: "Transport Phenomena," John Wiley and Sons, New York(1960).
4. Patankar, S. V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere publishing, Washington(1980).
5. Smoot, L. D. and Smith, P. J.: "Coal Combustion and Gasification, Plenum Press," New York(1985).
6. Na, H., Lee, J. and Yun, Y.: *Energy Engg. J.*, 8(2), 309(1999).
7. Modak, S. A. and Alexander, A. J.: *J. of Fluid Mech.*, V.55(part2), 193(1972).
8. Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N.: "Swirl Flows," Abacus Press (1984).
9. Collodi, G., Allevi, C., Jones, R. M. and Racine, R. F.: "The SAR-LUX IGCC Project," EPRI Conference(1997).
10. Texaco Gasification Process for Gaseous or Liquid Feedstocks (1993).