<학술논문> DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.3.149

MCFC 발전시스템 적용 촉매연소기의 혼합 특성 향상을 위한 Static Mixer 의 유동에 관한 수치적 연구

김종민* · 박남섭** · 김만영†

(2008 년 2 월 14 일 접수, 2009 년 2 월 10 일 수정, 2009 년 2 월 20 일 심사완료)

Numerical Investigation of the Flow and Mixing Characteristics with the Static Mixer in a Catalytic Combustor for the MCFC Power Plant System

Chongmin Kim, Namseob Park and Man Young Kim

Key Words : Static Mixer(스태틱 믹서), Mixing Process(혼합 과정), Catalytic Combustor(촉매 연소기), MCFC(용융탄산염 연료전지), Numerical Simulation(수치해석)

Abstract

In this work a numerical study to find the characteristics of the internal flow and mixing process has been conducted in a static mixer used in the system of catalytic combustor of the fuel cell power plant. After introducing the model description and final governing equations the present numerical approach is applied to the analysis of static mixer, which may have one or more helical elements inside the circular tube by changing such various parameters as incoming mass flow rates and the number of helical elements. The results show that although the static mixer is efficient in mixing fuel and air, more optimization processes are required to achieve the appropriate mixing characteristics in front of the honeycomb type catalytic combustor used in the MCFC power plant

기호설명

D : 질량 전달 계수
Re : 레이놀즈 수
J : 질량 플럭스
μ : 점성계수
τ : 전단응력

1. 서 론

혼합 제어(mixing control)는 산업 전반에 걸쳐서 매우 다양하게 적용되고 있는 기술이다. 예를 들어, 화학공업에서는 급속반응을 위한 반응물과 촉매의 혼합, 그리고 상하수도 처리시설의 경우 오염물질 제거를 위한 산소농도 증가작업 및 소독작업을 원활하게 하기 위한 염소 투입작업에 사용한다. 한편, 자동차 및 선박과 같은 수송기계 등에서 배출되는 NOx 저감을 위해 사용하는 Urea-SCR 촉매의 경우 배기관 내 분사된 urea 의 배기가스의 적절한 혼합율이 SCR 촉매의 NOx 전환율에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 다양한 유체의 혼합을 위한 혼합기(mixing components)는 크게 교반기(agitator)와 스태틱 믹서(static mixer)의 2 가지로 나눌 수 있다. 여기에서 교반기는 동력이 공급되는 교반익(impeller)를 이용하여 혼합과정을 수행하고, 스태틱 믹서는 원형관 내부의 헬리컬 엘리먼트(helical element)를 고정시키고 교반익을 작동시키

† 책임저자, 회원, 전북대학교 항공우주공학과
전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구센터
E-mail : manykim@chonbuk.ac.kr
TEL : (063)270-2473 FAX : (063)270-2472
* 전북대학교 대학원 항공우주공학과
** 유한대학 기계과

기 위한 별도의 외부동력공급 없이 2 가지 이상의 혼합대상 유체가 헬리컬 엘리먼트가 설치된 원형 관속을 연속적으로 흘러가면서 유동분할(flow division), 재순환(rotational circulation) 그리고 반경 반향 혼합(radial mixing)등의 복합적인 작용을 거쳐 혼합 과정이 완성된다. 이러한 경우 혼합 과정 시 발생되는 압력강하가 다른 장치와는 달리 매우 낮기 때문에 효율적인 혼합 공정에 유리하다.

본 연구에서 적용된 스태틱 믹서에 대한 연구동향을 살펴보자. Chandra and Kale[1]은 다양한 종류의 유동에 대한 레이놀즈 수와 압력강하에 대한 상관관계를 실험을 통하여 정량화하는 연구를 수행하였고, Hobbs and Muzzio[2~5]는 kenics 형 스태틱 믹서를 이용하여 낮은 레이놀즈 수에서의 혼합특성을 Lagrangian 방법을 사용하여 각 단면에서의 3D 혼합유동에 대한 수치적인 연구를 수행하였다.[2] 또한 엘리멘트의 주변 유동장에 추가로 6 개의 kenics 형 헬리컬 엘리먼트를 적용하여 혼합 특성에 대한 해석연구를 수행하였다.[3] 한편, 속도가 매우 낮은 유동(Re≤10) 조건에서 kenics 스태틱 믹서 내부 헬리컬 엘리먼트를 통과하는 유체의 흐름을 추적하여 믹서 내부의 유동특성을 파악하고,[4] 유체입자의 흐름 추적기법을 응용하여 표준 kenics 스태틱 믹서기의 혼합율을 향상시키는 연구를 수행하였다.[5] Fourcade and Wadley[6]는 CFD 입자 추적기법과 LIF(Laser Induced Fluorescence) 이미지 기법을 적용하여 kenics 형과 SMX 형의 스태틱 믹서에 대한 수치시뮬레이션과 실험연구를 병행하였다. Khinast and Bauer[7]는 촉매가 코팅된 원형관에 kenics 형 스태틱 믹서를 장착하여 CO 변환을 연구하였고, Song and Han[8]은 관 마찰손실계수와 레이놀즈 수를 변화시키면서 엘리먼트의 종횡비와 압력 손실과의 관계를 연구하였다. Rener and Östergren[9]은 kenics 와 KM 믹서기를 이용하여 형상에 따라 변하는 2 차유동(secondary flow)의 혼합과정을 수치적으로 연구하였다. 한편, Yang. And Park[10,11]은 스태틱 믹서를 개발하고 또한 압력강하에 대한 연구를 수행하여 압력 손실량에 대한 실험·수치적 연구와 혼합율 측정에 관한 연구를 수행한 바 있다. 그러나, 스태틱 믹서는 응용분야가 매우 다양하고 광범위함에도 불구하고 혼합부즉, 엘리먼트의 복잡성 때문에 체계적인 실험 연구나 수치 연구는 매우 제한적으로 수행되고 있다.

한편, 본 연구에 사용된 스태틱 믹서는 용융탄산염 연료전지(MCFC) 발전시스템의 BOP(balance of plant)의 촉매연소기에 사용되는 장치로서, 연료전지 스택(fuel-cell stack)에서 나오는 off-gas 가 촉매 연소기에서 안정적인 연소를 할 수 있도록 하기 위하여 산화제로 사용되는 공기와 높은 수준의 혼합율을 달성하는데 사용된다. 본 연구에서는 차세대 대용량 발전시스템으로 평가되고 있는 용융탄산염 연료전지 (MCFC) 발전시스템의 BOP 개발. 특히, 스택의 off-gas 를 안정적으로 연소시키는 촉매연소기의 개발을 위한 스태틱 믹서의 혼합특성을 파악하고자 한다. 이를 위하여 스태틱 믹서를 구성하는 헬리컬 엘리먼트의 개수와 다양한 유동조건에서 스태틱 믹서의 혼합특성을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

Fig. 1 은 본 연구에서 고찰하고자 하는 헬리컬 엘리먼트가 배열된 kenics 타입의 스태틱 믹서 내부의 유동의 한 예를 나타낸 것으로서, 돌출부위에서 유입된 off-gas 는 헬리컬 엘리먼트를 통과하면서 입구에서 들어오는 공기와 혼합이 되고 있는 형상을 나타낸 것이다. 관 내에 장착된 헬리컬 엘리먼트의 형상은 스테인리스 또는 플라스틱 평판의 왼쪽과 오른쪽 끝면을 180 ° 트위스트(twist) 되도록 설계 제작되어 있다. 이 트위스트 된 헬리컬 엘리먼트들은 90 ° 교차되어 이어지는 엘리먼트와 서로 연결되어 있다. 본 연구에서는 이러한 스태틱 믹서 내부의 유동 및 혼합특성을 고찰하기 위하여 FVM 을 기반으로 하는 FIRE(v8.4) 상용코드를 이용하였다. 특히 본 코드에 적용된 촉매반응 모듈을 이용하면 촉매연소를 타 코드에 비해 효과적으로 모사가 가능하여 본 연구에 사용하였다. 다음은 지배방정식과 해석 모델을 살펴본다.

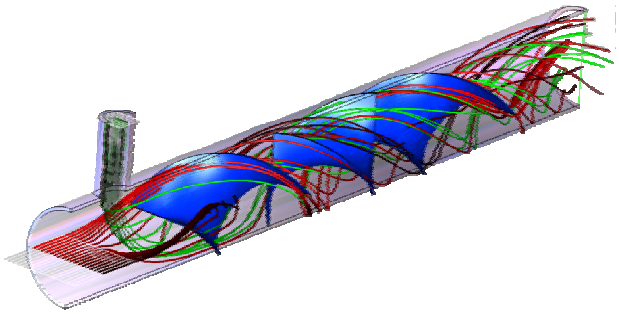


Fig. 1 Schematic of the internal flow in a kenics type static mixer

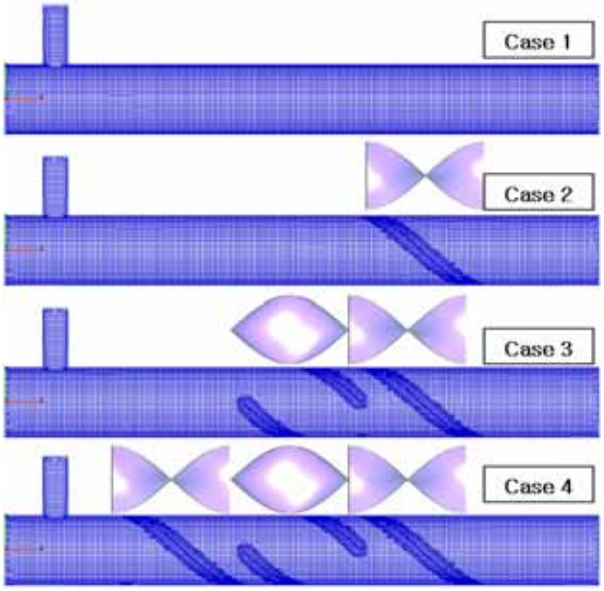


Fig. 2 Grid system used in this work

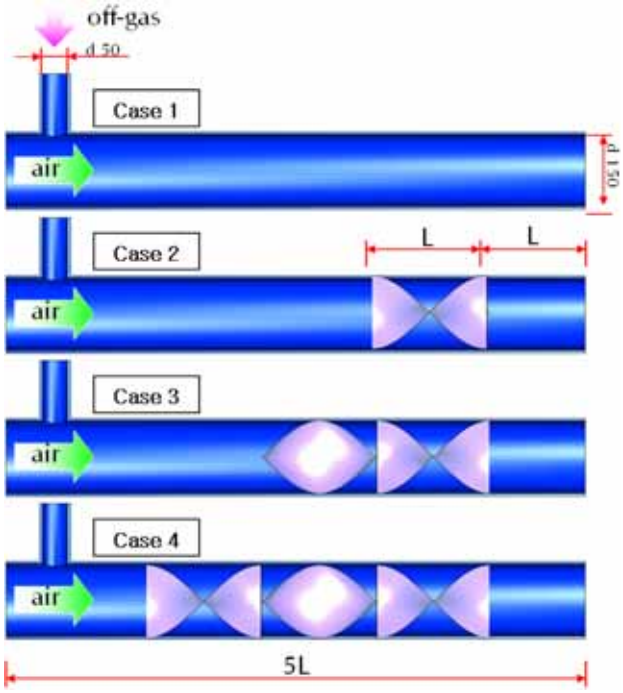


Fig. 3 Simulation case of the kenics type static mixer

2.2 지배방정식

스태틱 믹서 내부의 헬리컬 엘리먼트에 의한 혼합과정을 계산하기 위하여 아래와 같은 질량 보존과 운동량 보존 그리고 화학종 보존식을 이용하였다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j}\left(u_j u_i - \tau_{ij}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + S_c \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(u_j c\right) = \frac{\partial j_j}{\partial x_j} + S_c \tag{3}$$

여기서 τ_{ij} 와 j_j 는 Stoke's 와 Fick's 의 법칙을 이용한 속도와 농도의 구배(gradient)에 의하여 아래의 식과 같이 표현할 수 있다. 즉,

$$\tau_{ij} = -\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij} \tag{4}$$

$$j_j = -D\frac{\partial c}{\partial x_j} \tag{5}$$

한편, 난류유동은 $k-\varepsilon$ 난류모델[8]을 적용하였다.

2.3 해석 조건

3 차원 CAD 에서 생성된 형상(*.STL) 데이터를 FIRE 내부의 격자 생성 preprocessor 인 FAME Hybrid 를 이용하여 헬리컬 엘리먼트가 설치된 유동공간에 대하여 격자를 생성하였다. Fig.2 는 완성된 격자를 보여주고 있다. 엘리먼트 표면에는 정확한 계산을 위하여 조밀한 계산 격자를 적용 엘리먼트 표면에 의한 영향을 해석 가능하도록 하였다. 한편, Fig. 3 은 스태틱 믹서기의 수직 단면 형상을 나타낸 것으로서 스태틱 믹서가 없는 경우 및 1 개, 2 개, 그리고 3 개가 있는 경우를 보여주고 있다. 입구 윗부분에 돌출된 부분은 연료전지 스택에서 배출된 off-gas 의 스태틱 믹서 유입 유로인 직경 50mm 인 원형관을 나타내고 있는데, 입구에서 유입된 공기와 off gas 는 원형관 내부의 헬리컬 엘리먼트를 통과하면서 혼합된다. 생성된 각 Case 의 계산 격자 수는 Case 1, Case 2, Case 3, Case 4 가 각각 127,820 개, 186,257 개, 253,367 개, 그리고 321,996 개이다.

한편, 스태틱 믹서 해석에 사용된 해석조건은 헬리컬 엘리먼트의 수량 변화(Case2, Case3, Case4)와 레이놀즈 수에 의해 정의된 질량유량의 변화(Q1, Q2, Q3)로서 Table 1 에 정리하였다. 유입조건 Inlet A1 은 스태틱 믹서로 유입 되는 총 질량유량(λ=1)의 67.3%인 0.00578kg/s 의 공기가 유입되고 유입 조건 Inlet A2 에는 유입 총 유량의 32.7%인 off-gas 가 유입된다. 또한 유량 조건 Q2, Q3 도 기준이 되는 Q1 과 같은 조성비율로 정의된다.

Table 1 Boundary conditions of the static mixer

Name			Properties		Remarks
Inlet condition	Mass flow rate (kg/s)	Q1	0.00578	0.00389	air at Inlet A1
				0.00189	off-gas at Inlet A2
		Q2	0.0585	0.0394	Air at Inlet A1
				0.0191	off-gas at Inlet A2
		Q3	0.0878	0.0591	Air at Inlet 01
				0.0287	off-gas at Inlet A2
Outlet condition	Static pressure		0.1 MPa		Atmospheric Pressure
Properties	Media		Air		Internal Data
			Off-gas		Internal Data
	Density		0.31 kg/m^3		Internal Data
	Temperature		773.15 K		Internal Data

Table 2 Composition of the stack off-gas

Species	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2O
Mass Fraction	6.14E-03	9.77E-03	5.90E-01	1.45E-02	3.80E-01

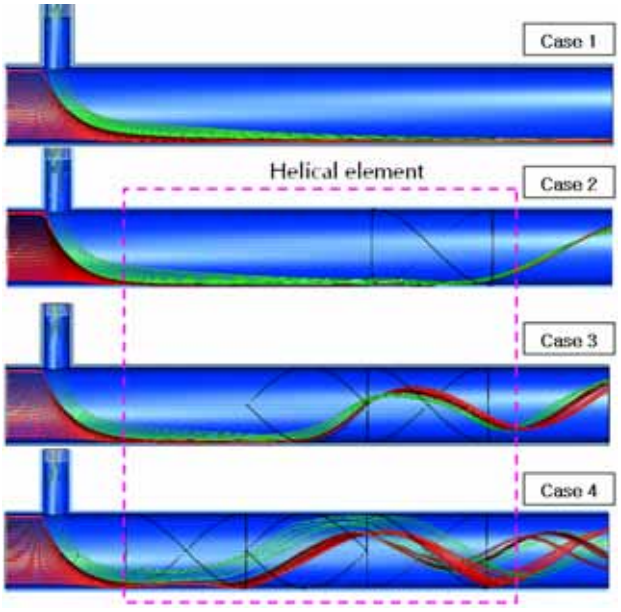


Fig. 4 Streak line profile in the static mixer cross section (flow direction)

여기에서, 유량 조건 Q1 은 5kW 급 용융탄산염 연료 전지 발전 시스템의 스택에서 배출되는 off-gas 의 계측된 조성 비율로 정의되고 있다. 그리고, Q2 와 Q3 는 유입되는 off-gas 의 레이놀즈 수가 3,500 과 5,250 일 때의 질량유량을 기준으로 하였다. Table 2 는 연료전지 스택에서 나오는 off-gas 의 조성을 보여주고 있다

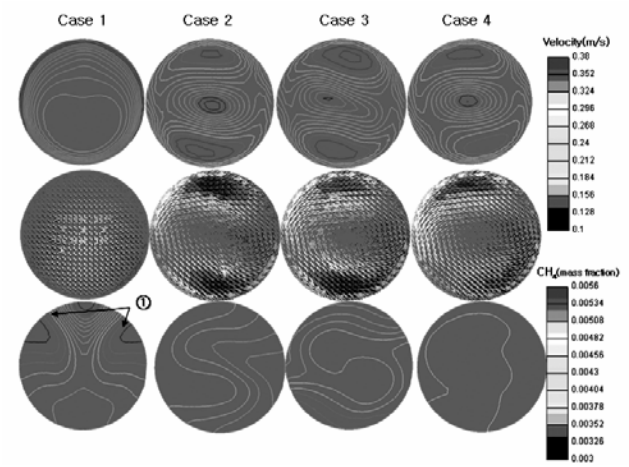
3. 결과 및 고찰

3.1 내부 유동

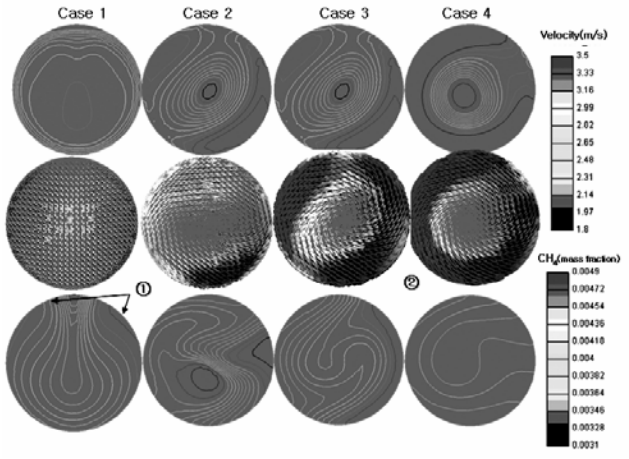
촉매연소기는 연료로 사용되는 off-gas 와 산화제로 사용되는 공기와의 적절한 혼합율을 필요로 한다. 불균일 혼합이 이루어질 경우 이상연소에 따른 고온영역(hot spot)의 발생에 의한 촉매의 파손을 일으킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 혼합율 향상을 위하여 Fig. 1 과 같은 혼합기 모델을 대상으로 수치해석 연구를 수행하였다. Fig. 4 는 헬리컬 엘리먼트의 유무 및 개수의 변화에 따른 유동 및 혼합 특성을 나타낸 것이다. Case 1 의 경우 입구에서 유입된 off-gas 는 좌측 공기입구에서 들어오는 공기와 충돌 후 혼합되지 않은 채 출구로 빠져 나가고 있음을 보여 주고 있다. 한편, 헬리컬 엘리먼트가 존재할 경우 스태틱 믹서로 인해 분사된 off-gas 와 외부에서 유입된 공기는 헬리컬 엘리먼트 형상에 따라 나선형 회전으로 인한 스월 성분을 갖게 되고, 이 때 이어지는 각 헬리컬 엘리먼트에 의하여 앞서 설명한 바와 같이 유동의 분할 및 재순환을 반복하면서 혼합과정이 완성된다. 이러한 혼합과정은 엘리먼트 개수만큼 반복되면서 off-gas 와 공기의 균일 혼합을 유도한다. 한편, Case 3 의 경우 수평으로 장착된 엘리먼트가 오히려 off-gas 의 분할을 억제하는 것(ⓐ)을 볼 수 있다.

3.2 혼합 특성

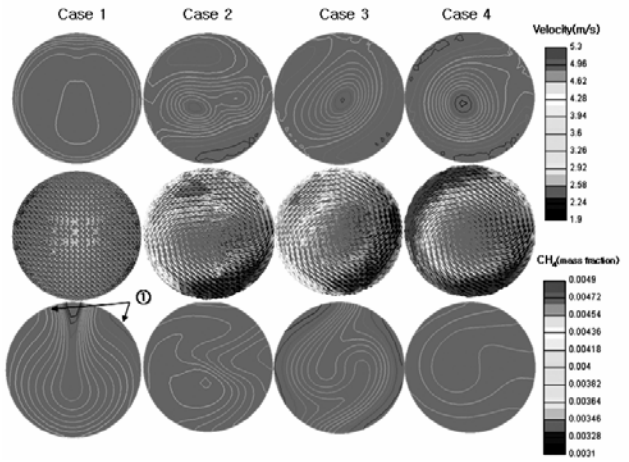
Fig. 5 는 스태틱 믹서의 헬리컬 엘리먼트가 설치 되어있는 지점의 출구 부분(Fig. 3 참조)에서의 등속선도와 유동벡터, 그리고 CH_4 의 농도를 각 Case 별로 나타낸 그림이다. 여기에서 질량유량은 각각 0.00578kg/s, 0.0585kg/s, 그리고 0.0878kg/s 이다. 헬리컬 엘리먼트가 설치되지 않은 Case 1 의 경우 믹서의 아랫부분에서 유속이 빠르지만 CH_4 농도는 유속이 빠르지 않는 부분인 양쪽 ① 지역에서 가장 높은 분포를 보이고 있다. 유량이 0.0585kg/s 인 (b)의 경우 벡터 그림을 살펴보면 (c)의 경우보다 더 큰 스월 현상이 관찰된다. 이는 스태틱 믹서 내의 한정된 공간(Fig. 2 참조)에서 유량이 증가할 경우(유속 증가) 일반적으로 헬리컬 엘리먼트에 의하여 스월이 발생한다. 하지만 유량이 큰 경우 스월을 발생시키는 반경 반향 속도성분보다 출구로 유출되려고 하는 축방향 속도성분이 크기 때문에 유량이 크게 증가할 때 스월이



(a) Q1 (0.00578 kg/s)



(b) Q2 (0.0585 kg/s)



(c) Q3 (0.0878 kg/s)

Fig. 5 Comparison of the velocity contour and CH_4 concentration at static mixer outlet

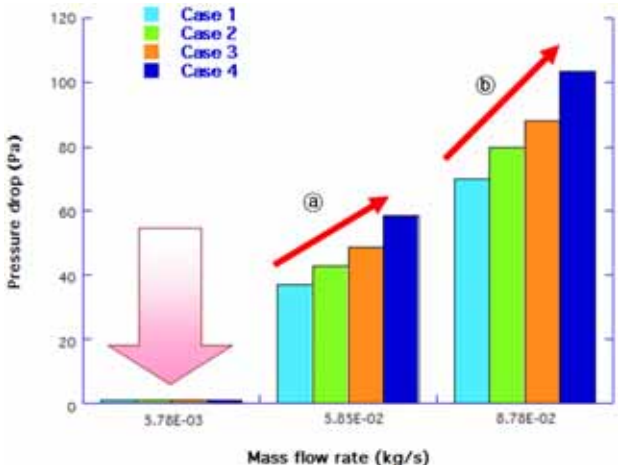


Fig. 6 Comparison of pressure drop

감소되는 현상으로 설명할 수 있다. 모든 유량조건에서 CH_4 의 농도는 헬리컬 엘리먼트의 수가 증가할수록 등고선의 개수가 적어지고 있는데 이것은 CH_4 의 농도차이가 크지 않다는 것을 의미하는 것으로서 엘리먼트의 개수가 많을수록 혼합의 정도가 우수함을 나타낸다. 특히 Fig. 5 의 (a), (b), 그리고 (c)에서 헬리컬 엘리먼트 수량이 3 개인 Case 4 에서 CH_4 농도는 모든 유량 조건에서 균일하고 동일한 혼합성능을 나타내고 있다. 한편, Q2 과 Q3 의 경우 Q1 과 유사한 혼합형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 특정 레이놀즈 수 이상의 스태틱 믹서에서는 그 이상의 혼합율 개선의 성능을 기대하기 어려움을 의미한다.

3.3 압력 강하

Fig. 6 은 off-gas 의 레이놀즈 수에 대한 헬리컬 엘리먼트의 개수를 변화시킨 경우의 압력강하 정도를 보여주고 있다. 여기에서 유량이 Q2 와 Q3 인 경우 압력강하는 헬리컬 엘리먼트 개수의 증가만큼 선형적으로 증가하지만 유량이 작은 Q1 의 경우 헬리컬 엘리먼트의 개수를 증가시켜도 압력강하는 1Pa 정도로 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 낮은 레이놀즈 수의 유동에서는 헬리컬 엘리먼트의 개수가 압력강하에 미치는 영향이 매우 작음을 알 수 있다. 이것은 Hobbs 등[3]의 연구와 같이 엘리먼트의 개수는 압력강하에 대수적인 영향을 미치지만 레이놀즈 수는 지수적인 영향을 주기 때문에 낮은 레이놀즈 수의 경우 엘리먼트의 개수가 압력강하에 미치는 영향은 작지만 레이놀즈 수가

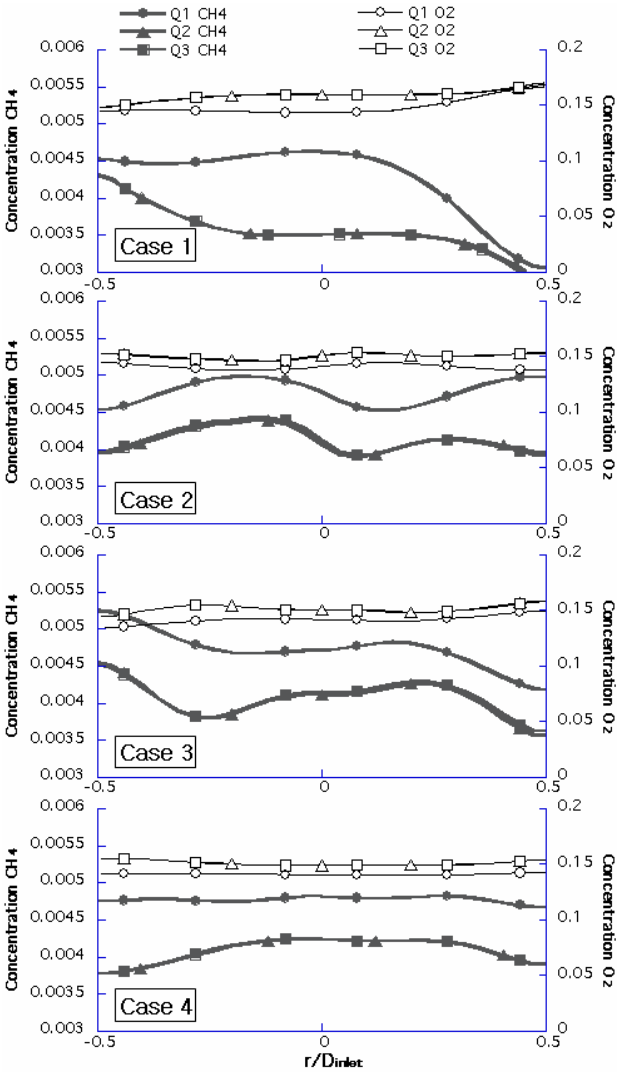


Fig. 7 Comparison of calculated concentrations of CH_4 and O_2 at mixer outlet

큰 유동의 경우 헬리컬 엘리먼트의 개수는 압력강하에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 헬리컬 엘리먼트의 형상 또한 압력강하에 직접적으로 영향을 끼침을 의미한다. 한편 Q1 의 경우 압력강하가 거의 없을 뿐만 아니라 Q3 의 경우 Q2 에 비하여 모든 Case 에서 평균 43.1%의 추가적인 압력강하가 발생하고 있다. 이와 함께, Q3 의 기울기 ⓑ 는 Q2 의 기울기 ⓐ 에 비하여 22.2% 증가하고 있는데, 이는 전술한 지수적인 증가를 나타낸다.

3.4 출구부 유동

Fig. 7 은 스태틱 믹서 출구의 횡단면(r)을 입구 반경(D_{inlet})으로 무차원화하여 출구에서의 O_2 와 CH_4 의 농도분포를 나타낸 것이다. 여기에서 O_2 는 산화제로써 공기 입구부에서 유입되고, CH_4 은 off-gas 의 성분으로서 용융탄산염 연료전지 발전시스템의 스택에서 배출되어 믹서 상단의 입구를 통하여 믹서 내부로 유입된다. 그리고 CH_4 는 촉매 연소기의 주된 연료성분으로서 off-gas 내의 가연성 성분 중 가장 많은 양을 차지한다. 헬리컬 엘리먼트가 3 개 설치된 Case 4 의 경우 헬리컬 엘리먼트가 없는 Case 1 의 경우에 비하여 농도 분포가 매우 균일함을 알 수 있다. 이는 off-gas 와 공기가 엘리먼트를 통과하면서 유동분할, 재순환, 그리고 반경반향 혼합 등의 과정을 거쳐 혼합이 고르게 되기 때문이다.

한편, 표준편차 기법을 이용하여 CH_4 의 혼합율을 비교하였는데, 유량이 작은 Q1 일 때 혼합율은 Case 1 에 비하여 Case 2 는 63.4%, Case 3 는 59.8% , 그리고 Case 4 는 97.5% 향상되는데, 엘리먼트의 개수가 증가함에 따라 혼합율이 크게 변하고 있다. 유량이 가장 큰 Q3 의 경우 Case 2 는 51.1%, Case 3 은 46.5% 그리고 Case 4 는 82.4% 의 혼합율을 보인다. 이와 같이 엘리먼트의 개수에 따라 혼합율의 변화를 보이지만 3 개의 엘리먼트를 사용한 경우 가장 높은 혼합율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 헬리컬 엘리먼트를 갖는 kenics 형 스태틱 믹서 내부에 장착되는 헬리컬 엘리먼트 수와 입구 off-gas 의 유량을 조건으로 하여 스태틱 믹서 내의 공기와 off-gas 의 유동 및 혼합 특성을 고찰하였다. 스태틱 믹서 내의 혼합 현상은 헬리컬 엘리먼트에 의해 유도된 스월에 의하여 발생하였고, 이후 유체는 유동분할, 재순환 그리고 반경방향 혼합을 반복함으로서 혼합이 증대됨을 확인하였다. 한편, 주연료인 CH_4 의 혼합율은 믹서 내부의 혼합부(cavity)의 길이와 엘리먼트의 장착 형상(수평/수직)에 따라 영향을 받고 있으며, 본 연구에서 적용한 3 개의 헬리컬 엘리먼트를 사용하였을 경우 최대 97.5%의 혼합율을 얻을 수 있었다.

참고문헌

(1) Chandra, K. G. and Kale, D. D., 1995, "Pressure Drop for Two-Phase Air-Non-Newtonian Liquid Flow in Static Mixers, " *The Chemical Engineering Journal*, Vol. 59, pp. 277~280.

(2) Hobbs, D. M. and Muzzio, F. J., 1997, "The Kenics Static Mixer : A Three-Dimentional Chaotic Flow,"

Chemical Engineering Journal, Vol. 67, pp. 153~166.
(3) Hobbs, D. M., Swanson, P. D. and Muzzio, F. J., 1997, "Numerical Characterization of Low Reynolds Number Flow in the Kenics Static Mixer," *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, pp. 1565~1584.
(4) Hobbs, D. M. and Muzzio, F. J., 1998, "Reynolds Number Effects on Laminar Mixing in the Kenics Static Mixer," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 70, pp. 93~104.
(5) Hobbs, D. M. and Muzzio, F. J., 1998, "Optimization of a Static Mixer using Dynamical Systems Techniques," *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, pp. 3199~3213.
(6) Fourcade, E., Wadley, R., Hoefsloot, H. C. J, Green, A. and Iedema, P. D., 2001, "CFD Calculation of Laminar Striation Thinning in Static Mixer Reactors," *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, pp. 6279~6741.
(7) Khinast, J. G., Bauer, A., Bolz, D. and Panarello, A., 2003, "Mass-Transfer Enhancement by Static Mixers in a Wall-Coated Catalytic Reactor," *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, pp. 1063~1070.
(8) Song, H. and Han, S. P., 2005, "A General Correlation for Pressure Drop in a Kenics Static Mixer," *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 5696~5704.
(9) Rener, M., Östergren, K. and Trägårdh, C., 2006, "Effect of Geometry and Flow Rate on Secondary Flow and the Mixing Process in Static Mixers - A Numerical Study," *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, pp. 6133~6141.
(10) Yang, H. C. and Park, S. K., 2002, "A Study for the Development of a Static Mixer," *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 26, pp. 589~595.
(11) Yang, H. C. and Park, S. K., 2003, "A Study for the Pressure Drop of a Static Mixer," *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 27, pp. 299~304.
(12) Lang, E. and Drtina, P., 1995, "Numerical Simulation of the Fluid Flow and the Mixing Process in a Static Mixer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 2239~2250.