

케미컬루핑 연소시스템을 위한 산소전달입자의 상온-상압 고체순환특성

윤주영¹ · 김하나¹ · 김정환¹ · 이도연¹ · 백점인² · 류호정^{1,†}

¹한국에너지기술연구원, ²한국전력공사 전력연구원

Solid Circulation Characteristics of Oxygen Carrier for Chemical Looping Combustion System at Ambient Temperature and Pressure

JOOYOUNG YOON¹, HANA KIM¹, JUNGHWAN KIM¹, DOYEON LEE¹, JEOM-IN BAEK², HO-JUNG RYU^{1,†}

¹Korea Institute of Energy Reserach, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

²Korea Electric Power Corporation (KEPCO) Research Institute, 105 Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

†Corresponding author :
hjryu@kier.re.kr

Received 29 July, 2017
Revised 22 August, 2017
Accepted 30 August, 2017

Abstract >> Effects of operating variables on solid circulation rate were measured and discussed using two-interconnected circulating fluidized bed system at ambient temperature and pressure. OCN 706-1100 particles were used as oxygen carrier. The measured solid circulation rates increased as the lower loop seal gas flow rates and the solid height in the fuel reactor increased. Suitable operating conditions to avoid choking of the air reactor were confirmed. Continuous long-term operations of steady-state solid circulation were also demonstrated at two different conditions based on the operating window.

Key words : Chemical Looping(케미컬루핑), Solid circulation rate(고체순환속도), Lower loop seal(하부 루프실), Solid height(고체층 높이), Steady-state operation(정상상태 운전)

1. 서론

케미컬루핑(chemical looping) 연소기술은 연료의 연소와 연소배가스중의 이산화탄소 포집이 동시에 이루어질 수 있는 신개념 연소기술로서 기존의 연소기를 공기반응기와 연료반응기로 나누어 별도의 반응기에서 산소전달입자(oxygen carrier)의 산화반응과 환원반응이 일어나도록 하는 기술이다¹⁾. Fig. 1에는 케미컬루핑 연소기술의 개념을 나타내었다. 전체 공정은 공기반응기(air reactor)와

연료반응기(fuel reactor)로 구성되며 공기반응기에서는 식 (1)과 같이 금속입자(M)가 공기 중의 산소와 반응하면서 산화되어 금속산화물(MO)로 변화하면서 산소를 흡수하게 된다. 이 금속산화물은 연료반응기로 이동되어 식 (2)와 같이 금속산화물에 포함된 산소를 내어주면서 연료(CH₄, H₂, CO, C_nH_{2m}, 천연가스, 석탄, 바이오매스, 바이오가스 등)를 연소시키게 되며 금속산화물(MO)은 원래 형태인 금속(M)으로 환원되게 된다²⁾.

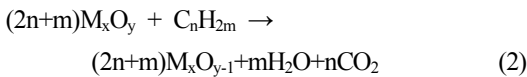
케미컬루핑 연소시스템의 공기반응기에서의 반

응은 화염이 없는 조건에서 일어나는 기체-고체 반응이므로 thermal NOx의 발생을 최소화할 수 있으며, 주입되는 기체인 공기에서 산소가 소모되므로 배출되는 기체는 질소와 소량의 산소만을 포함하게 된다. 또한 연료반응기에서 배출되는 기체는 CO₂와 H₂O만을 포함하고 있으므로 H₂O를 응축하여 제거하면 고농도의 CO₂를 원천적으로 분리할 수 있으므로 별도의 이산화탄소 포집설비가 필요 없는 장점이 있다³⁾. 또한 기존의 순산소 연소기술과는 달리 공기분리설비(air separation unit, ASU) 없이 연료반응기에 산소를 공급할 수 있는 장점이 있다⁴⁾.

산화반응



환원반응



케미컬루핑 연소시스템의 공정 구성으로는 기체-고체 간의 접촉효율이 좋고 열 및 물질전달이 우수하며 공정 유지가 쉬운 유동층 반응기가 주로 고려되고 있다⁵⁾. 특히 산소전달입자의 산화반응을 위해 필요한 공기와 기체연료의 유량을 계산하면

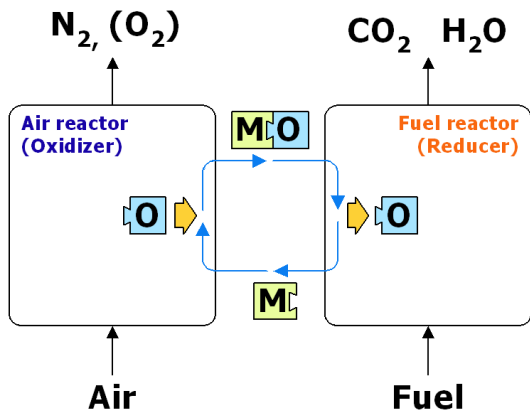


Fig. 1. Conceptual diagram of chemical looping combustion system

공기반응기에 주입되는 공기 유량이 연료반응기에 주입되는 연료(메탄, 천연가스) 유량의 11배 정도이고 두 반응기 사이의 고체순환을 위해서는 두 반응기 중 하나가 고속유동층 형태가 되어야 한다. 또한 연료반응기의 경우 전체 시스템의 성능 개선을 위해서는 주입된 연료의 대부분이 연소되어야 하므로 반응기 내부의 산소전달입자량과 기체 및 고체 체류시간의 확보가 용이한 기포유동층을 이용하는 것이 유리한 것으로 보고되고 있다⁵⁾. 또 다른 공정구성 방식으로 공기반응기와 연료반응기를 난류유동층 형태로 구성하는 방법도 제시된 바 있으나 난류유동층 조건인 연료반응기에서의 연료전화율이 낮은 단점이 있다⁶⁾.

고속유동층 및 기포유동층으로 구성된 케미컬루핑 시스템을 구현하기 위해서는 두 반응기 사이의 고체순환이 원활하게 이루어질 수 있는지에 대한 확인과 함께 연료반응기로의 산소공급속도, 즉 산소전달입자의 고체순환속도를 제어할 수 있는지에 대한 확인이 필수적이다.

케미컬루핑 시스템에서 고체순환속도에 대한 연구로 Alghamdi 등⁷⁾은 고속유동층 형태의 공기반응기와 기포유동층 형태의 연료반응기로 구성된 시스템에서 차압 측정에 의해 고체순환속도를 예측하는 방법에 대한 연구를 수행하였으나, 그들이 고려한 시스템의 경우 하부루프실로 고체가 공급되는 관이 연료반응기에서 overflow되는 고체를 받아들이는 형태로 구성되어 있어 본 연구에서 고려하는 하부 루프실과는 차이가 있다. 또한, Linderholm 등⁸⁾의 경우에는 고속유동층-고속유동층으로 구성된 시스템에서 고체순환속도에 대한 연구를 진행한 바 있으나 고체연료를 이용한 케미컬루핑 시스템에 대한 연구 결과이므로 기체연료의 경우에는 필요하지 않은 carbon stripper의 영향이 함께 반영되어 있어 그들의 결과를 본 연구에서 고려하고자 하는 시스템에 적용하기에는 무리가 있다.

한편, Lee 등⁹⁾은 chemical looping hydrogen production (CLH) 시스템에서 고체순환속도에 미치는

루프실 유량의 영향을 측정 및 해석하였으나, 그들의 시스템은 기포유동층 조건이라기보다는 이동층(moving bed) 조건에서 운전된 결과로 본 연구에 적용하기에는 무리가 있으며, 각 연구자들마다 사용한 입자의 특성(입자크기, 입자밀도)이 차이가 있으므로 루프실 형태와 입자 공급, 배출방법, 산소전달입자의 특성에 따른 수력학특성의 변화를 고려하기 위해서는 개별 장치에서 고체순환속도를 측정하는 방법이 가장 정확한 방법이 될 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 0.5 MW급 케미컬루핑 연소기의 설계를 위한 전 단계로 아크릴 재질의 상온-상압 2탑 유동층 시스템에서 산소전달입자의 고체순환속도에 미치는 조업변수의 영향을 측정 및 해석하였으며, 공기반응기의 폐쇄이 없는 조건에서 고체순환 유지가 가능한 운전조건 범위를 선정하였고 정상상태 조건에서 안정적인 고체순환 유지가 가능한지를 실험적으로 확인하였다.

2. 실험

2.1 산소전달입자

고체순환속도 측정과 연속적인 고체순환 실험을 위한 산소전달입자로 기존 연구에서 사용되었던 OCN 706-1100 입자를 사용하였다¹⁰⁾. OCN 706-1100 입자는 NiO를 무게기준 70% 함유하고 있으며 분무건조법(spray drying method)에 의해 성형하였으며 1,100°C에서 소성하였다. 입자의 평균입자크기는 120 μm , 입도분포는 34-245 μm 이며, 입자의 벌크밀도(bulk density)는 1,651 kg/m^3 로 측정되었고 상온-상압 조건에서 최소유동화속도는 0.0091 m/s로 측정되었다. Fig. 2에는 입자의 현미경 사진을 나타내었으며 제조된 입자는 구형을 나타내었다.

2.2 2탑 연결 순환유동층 실험장치

고체순환속도에 미치는 조업변수의 영향 및 연

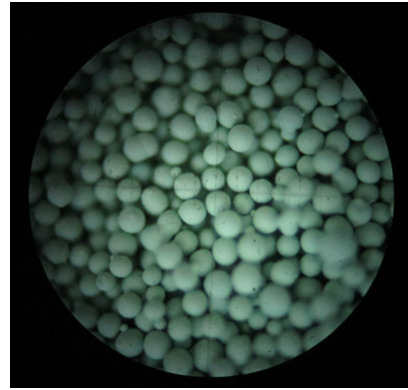
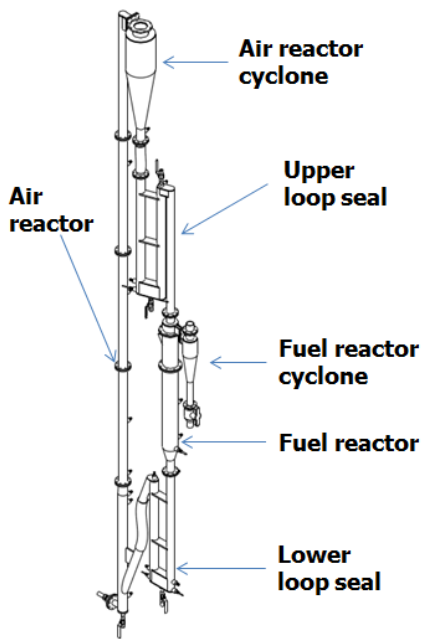


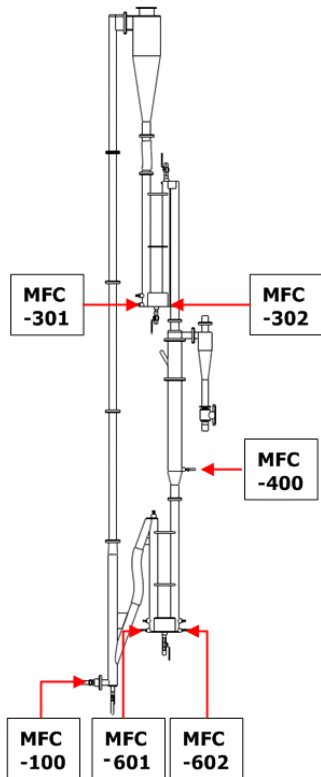
Fig. 2. Microscopic image of OCN 706-1100 particles

속적인 고체순환 유지 실험을 위해 Fig. 3에 나타난 2탑 연결 순환유동층 실험장치를 사용하였다. 시스템의 3차원 형상을 Fig. 3(a)에 나타내었으며 시스템의 유동화를 위해 공기를 주입하는 질량유량계(MFC)의 배치를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 전체 시스템은 공기반응기를 모사하는 고속유동층, 공기반응기 사이클론, 상부 루프실(upper loop seal), 연료반응기를 모사하는 기포유동층, 연료반응기 사이클론, 하부 루프실(lower loop seal)로 구성되어 있으며 아크릴 재질로 제작하였다. 공기반응기는 바닥부터 1 m까지는 내경 0.06 m이며, 0.1 m 길이의 축소부(tapered zone)를 거치면서 내경 0.05 m로 축소되도록 하였으며, 내경 0.05 m인 구간의 총 길이는 4 m로 공기반응기의 총 높이는 5.1 m이다. 공기반응기 사이클론의 내통경은 0.2 m이며 총 높이 0.8 m로 설계하였다. 상부 루프실과 하부 루프실의 수직관 내경은 0.05 m이며, 수직관 바깥쪽 사이의 거리는 0.1 m로 설계하였다. 연료반응기의 경우 내경 0.1 m, 높이 1.05 m이며 연료반응기 사이클론의 내통경은 0.09 m, 총 높이 0.36 m로 설계하였다.

공기반응기, 상부 루프실, 연료반응기 및 하부 루프실의 유동화를 위해 총 6개의 질량유량계를 사용하였으며, 공기압축기에서 압축된 공기를 질량유량계와 스파저(sparger)를 통해 각 부분에 주입하였다.



(a)



(b)

Fig. 3. (a) 3D view of two-interconnected circulating fluidized bed system, (b) mass flow controller arrangement

2탑 연결 순환유동층 실험장치에 산소전달입자를 장입한 후, 상부 루프실과 연료반응기를 먼저 유동화시킨 후 공기반응기에 공기를 주입하였다. 이후 하부 루프실을 유동화시키면 산소전달입자는 연료반응기에서부터 중력에 의해 하강하면서 하부 루프실을 거쳐서 공기반응기로 이송되며 공기반응기 사이클론에서 입자가 포집되어 상부 루프실을 거쳐서 연료반응기로 재순환된다.

공기반응기, 상부 루프실, 하부 루프실 및 연료반응기에 존재하는 고체의 양을 간접적으로 파악하기 위해 각 위치에 차압형 압력변환기(differential pressure transducer)를 설치하였다. 공기 주입을 위한 질량유량계의 유량 및 차압형 압력변환기에서 측정되는 차압값은 PLC를 거쳐서 PC에 저장되도록 하였다.

주어진 조업조건에서 고체순환속도 측정을 위해 고체가 연속적으로 순환되는 조건에서 상부 루프실의 MFC를 통한 기체유입을 정지하여 상부 루프실을 유동화 상태에서 고정층 상태로 변화시켰으며 이를 통해 공기반응기 사이클론에서 포집된 입자가 상부루프실과 사이클론 사이에 쌓이도록 하였고 연료반응기로의 고체순환이 없는 조건에서 시간 변화에 따른 연료반응기 고체층 높이의 변화를 측정하여 입자의 벌크밀도로부터 단위시간 동안 단위면적당 고체순환량인 고체순환속도($\text{kg/m}^2\text{s}$)를 계산하였다. 고체순환속도 측정 실험에 앞서 본 연구의 실험조건 내에서 공기반응기 사이클론으로부터 상부 루프실로 유입되는 고체를 모두 연료반응기로 이송시킬 수 있는 상부 루프실 최소유량을 결정하였으며, 모든 실험조건에서 MFC-301과 302는 4.0 NL/min 의 조건에서 운전하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고체순환속도에 미치는 조업변수의 영향

Fig. 4에는 연료반응기 내부의 고체층 높이가 0.6 m인 조건에서 공기반응기의 유량(MFC-100)이 324

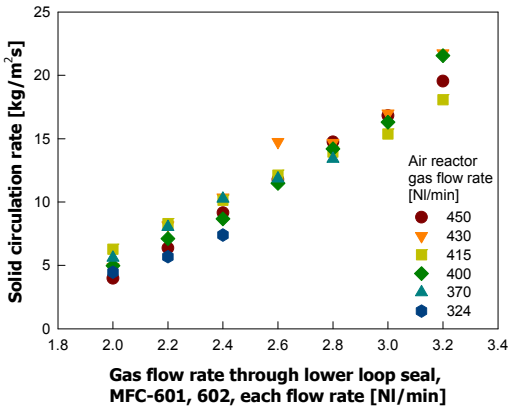


Fig. 4. Effect of lower loop seal gas flow rates on solid circulation rate at different air reactor gas flow rate (solid height in bubbling bed: 0.6 m)

부터 450 NI/min까지 변화할 때 하부 루프실 왼쪽(MFC-601)과 오른쪽(MFC-602)의 유량을 함께 변화시켰을 때 고체순환속도의 변화를 나타내었다. 그림에서 x축은 MFC-601과 602를 통해 주입되는 각각의 공기유량을 의미한다. 그림에 나타난 바와 같이 하부 루프실의 유량이 증가함에 따라 연료반응기로부터 하부 루프실을 통해 공기반응기로 주입되는 고체량이 증가하므로 고체순환속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 한편 공기반응기 유량 변화에 따른 고체순환속도의 변화는 일정한 경향성을 나타내지 않았으며, 공기반응기 유량이 낮고 하부 루프실의 유량이 높은 경우 연속적인 고체순환을 유지하지 못하고 공기반응기 내부에 존재하는 고체량이 증가하여 더 이상 고체순환이 일어나지 않는 현상이 발생하였다. 이는 공기반응기로 주입되는 고체량이 많은 경우 공기반응기의 유량이 낮으면 주입되는 고체를 충분히 비산시키지 못하기 때문에 공기반응기가 폐색(choking)되는 것을 의미한다.

Fig. 5에는 공기반응기의 유량이 324 NI/min이고, 연료반응기 내부의 고체층 높이가 0.5 m인 조건에서 하부 루프실 오른쪽의 유량을 일정하게 유지하면서 왼쪽의 유량을 변화시켰을 때의 고체순환속도의 변화를 나타내었다. 그림에 나타난 바와

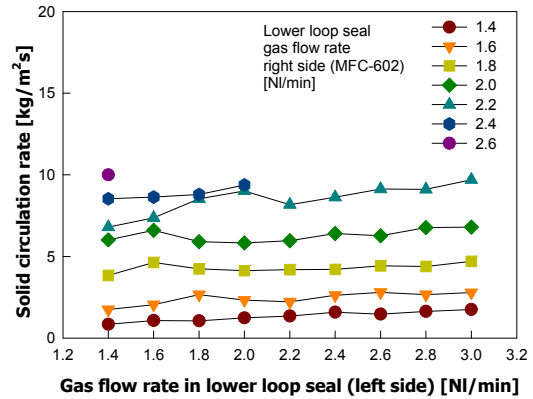


Fig. 5. Effect of lower loop seal gas flow rates on solid circulation rate (riser gas flow rate: 324 NI/min, solid height in bubbling bed: 0.5 m)

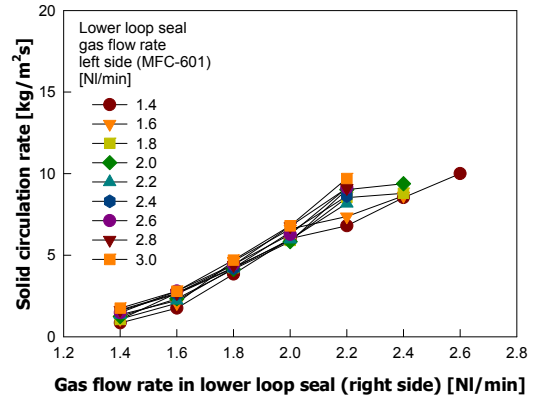


Fig. 6. Effect of lower loop seal gas flow rates on solid circulation rate (riser gas flow rate: 324 NI/min, solid height in bubbling bed: 0.5 m)

같이 하부 루프실 오른쪽의 유량이 일정할 때 하부 루프실 왼쪽의 유량을 증가시키는 경우 유량이 증가함에 따라 고체순환속도가 다소 증가하는 경향을 나타내었으나 증가폭은 크지 않았다. 한편, Fig. 5에서 하부루프실 오른쪽의 유량이 2.6 NI/min인 경우 하부루프실 왼쪽의 유량이 1.4 NI/min 이상으로 증가하면 고체순환속도가 증가하여 주어진 상승관 유량 조건에서 더 이상 안정적인 고체순환을 유지할 수 없는 조건에 도달하여 한 조건의 결과만을 얻을 수 있었다.

Fig. 6에는 같은 조건에서 하부 루프실 왼쪽의 유량을 일정하게 유지하면서 오른쪽의 유량을 변

화시켰을 때 고체순환속도의 변화를 나타내었다. Fig. 5와는 달리 하부 루프실 오른쪽 유량이 증가함에 따라 고체순환속도가 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6을 함께 고려하면, 하부 루프실 왼쪽 유량보다는 오른쪽 유량이 고체순환속도에 더 영향을 미치며, 이는 하부 루프실 왼쪽 유량은 하부루프실로 유입되는 고체를 단순히 공기반응기로 전달하는 역할을 하며, 하부 루프실 오른쪽 유량이 증가함에 따라 연료반응기로부터 하부 루프실로 유입되는 고체량이 증가하기 때문으로 사료되었다.

Fig. 7에는 공기반응기 유량이 450 NI/min일 때 연료반응기 고체층 높이를 변화시키면서 하부 루프실 양쪽 MFC의 유량을 동시에 변화시켰을 때 측정된 고체순환속도의 변화를 나타내었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 하부 루프실 양쪽의 유량이 증가함에 따라 고체순환속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 연료반응기 내부의 고체층 높이가 증가함에 따라 고체순환속도가 증가하였는데 이는 연료반응기 내부 고체층 높이가 증가함에 따라 하부로 작용하는 압력이 증가하여 하부 루프실로 유입되는 고체속도가 증가하기 때문으로 사료되었다.

Fig. 4부터 Fig. 7에 나타난 실험을 수행하는 동안 고체순환속도가 높은 조건, 즉 하부루프실의 유량이 높거나 연료반응기 내부 고체층 높이가 높은 조건에서 공기반응기의 유량이 낮을 때에는 공기반응기 내부에 존재하는 고체량이 급격히 증가하여 고체순환을 유지할 수 없는 현상이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 안정적인 고체순환을 유지할 수 있는 운전조건을 결정하기 위해 연료반응기 고체층 높이, 공기반응기 유량 변화에 따라 하부 루프실의 유량을 증가시킬 수 있는(즉, 고체순환속도를 증가시킬 수 있는) 조업조건을 선정하고자 하였다.

Fig. 8에는 연료반응기 내부 고체층 높이와 공기반응기 유량 변화에 따라 고체순환을 유지할 수 있는 최대 하부 루프실 유량의 변화를 나타내었

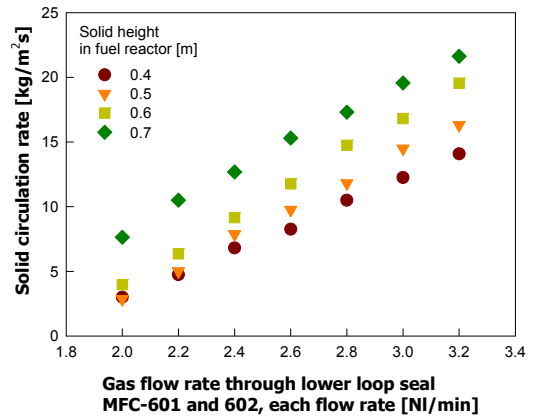


Fig. 7. Effects of lower loop seal gas flow rates and solid height in the fuel reactor on solid circulation rate (riser gas flow rate: 450 NI/min)

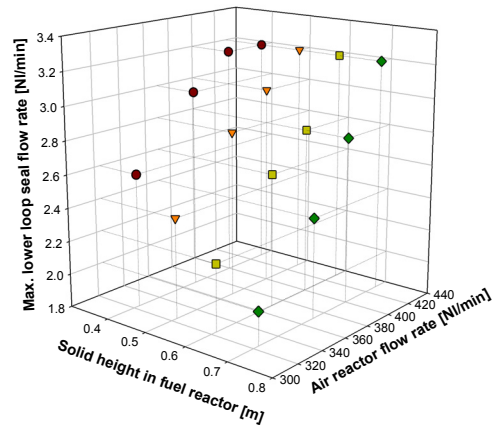


Fig. 8. Operating ranges of each variables without choking in the air reactor

다. 그림에서 하부 루프실 유량이 증가하면 고체순환속도가 증가하는 것으로 고려할 수 있으며 그림에 나타난 바와 같이 동일한 공기반응기 유량 조건에서 연료반응기 내부의 고체층 높이가 증가함에 따라 조업 가능한 최대 하부 루프실 유량이 감소하는 경향을 나타내었으며 동일한 고체층 높이 조건에서 공기반응기의 유량이 증가함에 따라 최대 조업 가능한 최대 하부 루프실 유량이 증가하는 경향을 나타내었다. 결과적으로 하부 루프실 유량과 연료반응기 내부의 고체층 높이가 증가하면 두 반응기 사이의 고체순환량을 증가시킬 수

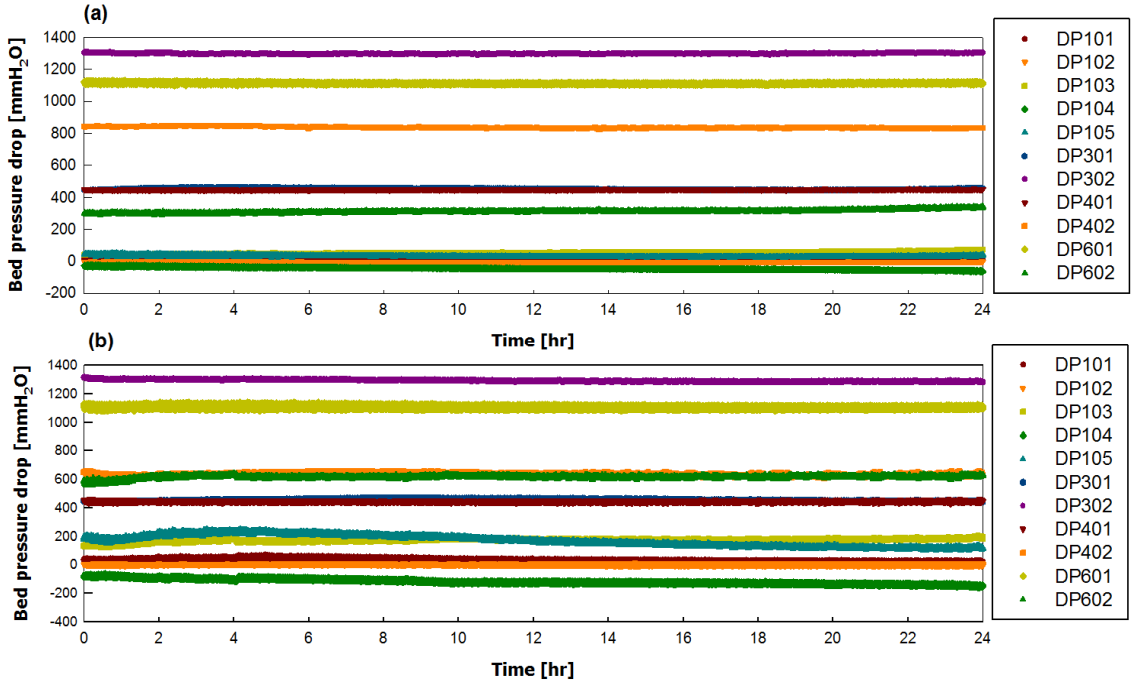


Fig. 9. Trends of bed pressure drop in the two-interconnected circulating fluidized bed system at different solid circulation conditions (a) 4.0 kg/m²s, (b) 19.5 kg/m²s

있으나 안정적인 고체순환을 위해서는 공기반응기 유량을 함께 증가시키는 것이 유리한 것으로 나타났다.

Fig. 9에는 Fig. 8에서 고체순환 유지가 가능한 조건으로 선정된 조업조건 중 고체순환속도가 비

교적 낮은 조건과 높은 조건에서 안정적인 장기 고체순환유전이 가능한지의 여부를 확인한 실험결과를 나타내었다. 그림에 나타난 차압형 압력변환기(DP101-602)의 위치 및 공기 반응기 바닥으로부터의 높이를 정리하여 Table 1에 나타내었다. 공기 반응기 유량은 450 NL/min, 연료반응기 유량은 26 NL/min, 상부 루프실 유량은 각각 4 NL/min, 연료반응기 내부 고체층 높이는 0.6 m에서 조업하였으며 Fig. 9(a)에는 하부 루프실 유량을 각각 2.0 NL/min으로 유지하여 고체순환속도가 4.0 kg/m²s인 조건, Fig. 9(b)에는 하부 루프실 유량을 각각 3.2 NL/min으로 유지하여 고체순환속도가 19.5 kg/m²s인 조건에서 실험한 결과를 나타내며, 시간 변화에 따라 실험장치의 각 부분에서 측정된 차압, 즉 고체량의 변화를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 차압의 큰 변화 없이 안정적인 고체순환이 가능한 것을 알 수 있었으며, 두 경우 모두 24시간 동안 안정적인 고체순환이 가능함을 실증하였다.

Table 1. Summary of location of each differential pressure transducer

Notation	Location	Height from bottom of the air reactor [m]	
		(+) point	(-) point
DP 101	Air reactor	0.01	0.90
DP 102	Air reactor	0.97	1.15
DP 103	Air reactor	1.60	2.70
DP 104	Air reactor	2.70	3.81
DP 105	Air reactor	0.10	4.91
DP 301	Upper loop seal left	2.96	5.22
DP 302	Upper loop seal right	2.96	3.82
DP 401	Fuel reactor	1.67	1.97
DP 402	Fuel reactor	1.67	2.56
DP 601	Lower loop seal left	0.48	1.25
DP 602	Lower loop seal right	0.48	1.36

4. 결론

고속유동층 및 기포유동층으로 구성된 케미컬 루핑 연소시스템의 구현을 위해 아크릴 재질의 상온상압 2탑 순환유동층 시스템에서 산소전달입자의 고체순환속도에 미치는 조업변수의 영향을 측정 및 해석하였으며, 정상상태 조건에서 안정적인 고체순환 유지가 가능한지를 실험적으로 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 하부 루프실 유량이 증가하고, 연료반응기 내부 고체층 높이가 증가함에 따라 고체순환속도가 증가하는 경향을 나타내었다.
- 2) 하부 루프실 유량과 연료반응기 내부의 고체층 높이가 증가하면 두 반응기 사이의 고체순환량을 증가시킬 수 있으나 안정적인 고체순환을 위해서는 공기반응기 유량을 함께 증가시키는 것이 적합한 것으로 나타났다.
- 3) 안정적인 고체순환을 유지할 수 있는 하부 루프실 유량, 연료반응기 내부의 고체층 높이 및 공기반응기 유량조건을 결정하였다.
- 4) 본 연구에 사용된 2탑 연결 순환유동층 시스템을 이용하여 두 가지 고체순환속도 조건에서 장기 연속 고체순환이 가능함을 실증하였다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제이다(20152010201840).

References

1. J. Adanez, A. Abad, F. Garcia-Labiano, P. Gayan, and L. F. de Diego, "Progress in Chemical Looping Combustion and Reforming Technology", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 38, 2012, pp. 215-282.
2. H. Kim, D. H. Lee, J. I. Baek, and H. J. Ryu, "Selection of Oxygen Carrier Candidates for Chemical Looping Combustion by Measurement of Oxygen Transfer Capacity and Attrition Loss", *Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy*, Vol. 27, No. 4, 2016, pp. 404-411.
3. J. I. Baek, H. Jo, T. Eom, J. Lee, and H. J. Ryu, "The Effect of CBB(CaO · BaO · B₂O₃) Addition on the Physical Properties and Oxygen Transfer Reactivity of NiO-based Oxygen Carriers for Chemical Looping Combustion", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 1, 2016, pp. 95-105.
4. H. J. Ryu, N. Y. Lim, D. H. Bae, and G. T. Jin, "Minimum Fluidization Velocity and Transition Velocity to Fast Fluidization of Oxygen Carrier Particle for Chemical Looping Combustor", *HWAHAK KONGHAK*, Vol. 41, No. 5, 2003, pp. 624-631.
5. J. H. Kim, D. H. Bae, J. I. Baek, Y. S. Park, and H. J. Ryu, "Effect of Pressure on Minimum Fluidization Velocity and Transition Velocity to Fast Fluidization of Oxygen Carrier for Chemical Looping Combustor", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 1, 2017, pp. 85-91.
6. C. Geng, W. Zhong, Y. Shao, D. Chen, and B. Jin, "Computational Study of Solid Circulation in Chemical-looping Combustion Reactor Model", *Powder Technology*, Vol. 276, 2015, pp. 144-155.
7. Y. Alghamdi, Z. Peng, K. Shah, B. Moghtaderi, and Elham Doroodchi, "Predicting the Solid Circulation Rate in Chemical Looping Combustion Systems Using Pressure Drop Measurements", *Powder Technology*, Vol. 285, 2015, pp. 572-581.
8. C. Linderholm, M. Schmitz, and A. Lyngfelt, "Estimating the Solid Circulation Rate in a 100-kW Chemical Looping Combustor", *Chemical Engineering Science*, Vol. 171, 2017, pp. 351-359.
9. D. Y. Lee, M. W. Seo, T. D. B. Nguyen, W. C. Cho, and S. D. Kim, "Solid Circulation Characteristics of the Three-reactor Chemical-looping Process for Hydrogen Production", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, 2014, pp. 14546-14556.
10. H. J. Ryu, S. S. Park, J. H. Moon, W. K. Choi, and Y. W. Rhee, "Effects of Temperature, Pressure, and Gas Residence Time on Methane Combustion Characteristics of Oxygen Carrier Particle in a Pressurized Fluidized Bed Reactor", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 2, 2012, pp. 173-183.