

케미컬루핑 연소시스템을 위한 두 가지 산소전달입자들의 고체순환 특성

류호정^{1,†} · 이도연¹ · 남형석¹ · 조성호¹ · 백점인²

¹한국에너지기술연구원, ²한국전력공사 전력연구원

Solid Circulation Characteristics of Two Oxygen Carriers for Chemical Looping Combustion System

HO-JUNG RYU^{1,†}, DOYEON LEE¹, HYUNGSEOK NAM¹, SUNG-HO JO¹, JEOM-IN BAEK²

¹Korea Institute of Energy Research, 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 19 July, 2018
Revised 5 August, 2018
Accepted 31 August, 2018

Abstract >> To confirm the operating range of two oxygen carriers for chemical looping combustion system, the effects of operating variables on solid circulation rate were measured and discussed using a two-interconnected circulating fluidized bed system at ambient temperature and pressure. Moreover, suitable operating ranges to avoid choking of the fast fluidized bed (air reactor) were confirmed for two oxygen carriers. A continuous long-term operation of steady-state solid circulation more than 24 hours was also demonstrated within the operating windows. Finally we could confirm that those two oxygen carriers are suitable for chemical looping combustion system with high solid circulation rate and smooth solid circulation.

Key words : Chemical looping combustion(케미컬루핑연소), Oxygen carrier(산소전달입자), Solid circulation(고체순환), Operating range(운전범위), Choking(폐색)

1. 서론

대형 이산화탄소 배출원으로부터 이산화탄소를 포집하기 위한 기술은 크게 연료의 연소 후에 배출되는 배가스 중에서 이산화탄소를 포집하는 연소 후 포집기술, 연료의 연소 전에 이산화탄소를 분리하고 수소만을 생산하여 연소하는 연소 전 포집기술, 연소 과정에서 순수한 이산화탄소만 배출되도록 하는 연

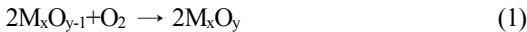
소 중 포집기술(순산소 연소기술)로 나눌 수 있다. 이중 연소 후 포집기술과 연소 전 포집기술의 경우, 연소기와는 별도로 이산화탄소를 분리하기 위한 설비가 필요한 반면, 순산소 연소기술은 연소기 자체가 CO₂ 분리설비이므로 주로 신규발전소 또는 기존 발전소의 retrofit을 위한 설비로 활용될 수 있다.

공기 중의 산소를 사전에 분리하여 연소기에 공급하는 기존의 순산소 연소기술과는 달리 케미컬루핑

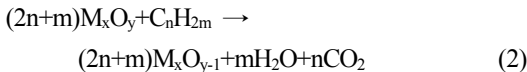
연소기술은 금속산화물을 이용하여 하나의 반응기에서는 공기 중의 산소를 흡수하고, 이를 다른 반응기로 이동시켜 연료와 산소를 반응시키는 분리연소 반응을 통하여 공기 중의 질소와 연소에 의하여 발생하는 이산화탄소의 혼합을 방지할 수 있으며 산소를 분리하기 위한 별도의 설비가 필요 없는 차세대 연소기술이다¹⁻³⁾.

Fig. 1에는 케미컬루핑 연소시스템의 기본적인 개념을 나타내었다. 전체 연소시스템은 공기반응기와 연료반응기로 구성되며, 공기반응기에서는 식 (1)과 같이 산소전달입자에 포함된 금속성분(M)이 공기 중의 산소와 반응하면서 산화되어 금속산화물(MO)을 형성하고, 산소전달입자가 연료반응기로 이송되면 연료반응기에서는 식 (2)와 같이 금속산화물(MO)이 연료(천연가스, 석탄, 합성가스, 바이오매스 등)와 반응하여 다시 금속산화물이 금속성분으로 환원되면서 CO₂, H₂O만을 발생시킨다. 연료반응기에서 환원된 산소전달입자는 공기반응기로 재순환되어 위의 과정을 반복한다⁴⁾.

산화반응:



환원반응:



이와 같이 두 개의 반응기로 분리된 케미컬루핑 연소시스템을 사용하는 경우, 공기반응기에서는 화염이 없는 조건에서 기체-고체 반응이 일어나므로 thermal-NO_x의 발생을 최소화할 수 있으며, 별도의 공기분리설비가 필요하지 않으며, 연료반응기에서 배출되는 기체는 CO₂와 H₂O뿐이므로 수분을 응축하여 분리하면 별도의 CO₂ 분리설비 없이도 고농도의 CO₂를 원천적으로 분리할 수 있는 장점이 있다^{5,6)}. 한편, 천연가스복합발전 시스템에 상압 케미컬루핑 연소시스템을 적용할 경우 스팀터빈을 구동하여 얻을 수 있는 발전효율은 40-42%인 반면 고압 케미컬

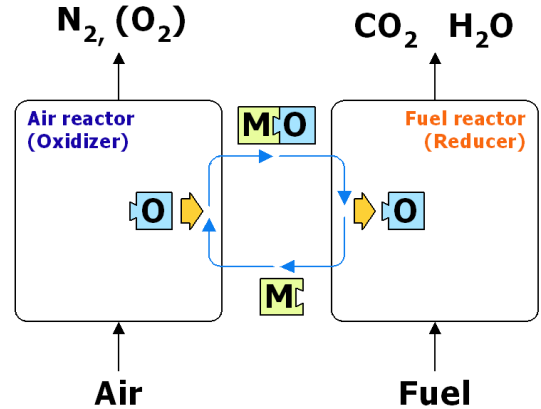


Fig. 1. Conceptual diagram of chemical looping combustion system

루핑 연소시스템을 적용할 경우 스팀터빈과 가스터빈을 함께 구동할 수 있어 52-53%의 발전효율을 얻을 수 있는 것으로 보고된 바 있다⁷⁾.

본 연구팀에서는 가압 케미컬루핑 연소시스템을 개발하기 위한 과정으로 0.5 MWth 케미컬루핑 연소시스템에서 가압 장기운전을 실증하고자 하며, 이를 위해 본 연구에서는 0.5 MWth 시스템과 유사한 장치규격을 갖는 상온-상압 아크릴 실험 장치를 이용하여 두 가지 산소전달입자의 고체순환속도에 미치는 조업변수의 영향을 해석하였으며, 이를 통하여 고속 유동층(공기반응기) 내부의 고체이송능력(solid carrying capacity) 범위 내에서 반응기의 폐색(choking)이 없이 운전할 수 있는 운전영역(operating range)을 선정하였다. 또한 결정된 운전영역 내에서 장기 고체순환 운전을 통하여 안정적인 고체순환이 가능함을 실험적으로 입증하였다.

2. 실험

2.1 산소전달입자

산소전달입자로는 한국전력공사 전력연구원에서 분무건조법(spray drying method)에 의하여 제조한 두 가지 산소전달입자(OCN 706-1100, N016-R4)를 사용하였다. OCN706-1100 입자는 상압조건에서 우

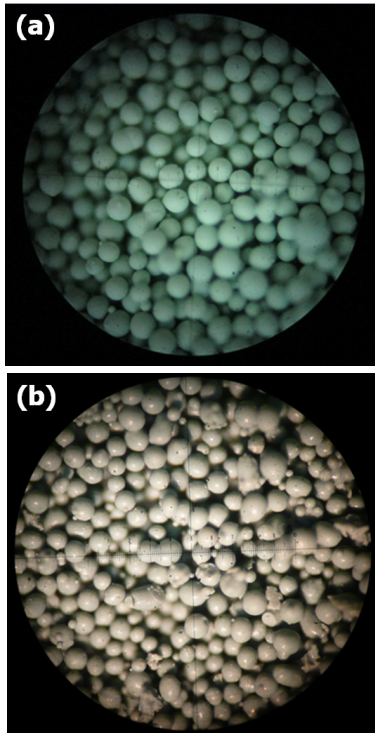


Fig. 2. Microscopic images of (a) OCN706-1100 and (b) N016-R4 particles

수한 성능을 나타낸 산소전달입자이며, N016-R4 입자는 상압 및 고압조건에서 우수한 성능을 나타내고 내마모도가 향상된 신규 산소전달입자이다. Fig. 2에는 두 가지 산소전달입자의 광학현미경 사진을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 두 입자 모두 구형을 나타내었다. Table 1에는 두 가지 산소전달입자의 입자특성을 요약하여 나타내었다. Table 1에 나타난 바와 같이 두 입자의 입자밀도와 벌크밀도는 거의 유사하였으나 평균 입자크기는 N016-R4 입자에 비해 OCN706-1100 입자가 다소 크게 나타났다.

2.2 실험 장치

고체순환속도에 미치는 조업변수의 영향 및 연속적인 고체순환 유지 실험을 위하여 Fig. 3에 나타난 2탑 연결 순환유동층 실험 장치를 사용하였다. 실험 장치의 3차원 형상을 Fig. 3(a)에 나타내었으며 유동

Table 1. Properties of oxygen carrier particles

Particle name	Raw materials (wt. %)		Apparent density (kg/m ³)	Bulk density (kg/m ³)	Mean particle size (μm)
	Metal oxide	Supporter/promoter			
OCN706-1100	NiO (70)	Confidential (30)	4,537	1,655	125
N016-R4	NiO (70)	Confidential (30)	4,594	1,615	104

화를 위하여 공기를 주입하는 질량유량계(MFC)의 배치를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 전체 시스템은 공기 반응기를 모사하는 고속유동층, 공기반응기 사이클론, 상부 루프실(upper loop seal), 연료반응기를 모사하는 기포유동층, 연료반응기 사이클론, 하부 루프실(lower loop seal)로 구성되어 있으며 내부를 관찰할 수 있도록 하기 위하여 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. 이러한 반응기 형태는 기존 반응기 형태와는 고압 유동층 조업조건에서 두 반응기 사이의 차압이 달라지는 경우에도 안정적인 고체순환이 가능하고 두 반응기 사이의 기체혼합을 막을 수 있도록 하기 위해 상부 루프실과 하부 루프실의 높이(즉, 고체층 높이)가 높게 설계된 특징이 있다.

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

2탑 연결 순환유동층 실험 장치에 산소전달입자를 장입한 후, 상부 루프실과 연료반응기를 먼저 유동화

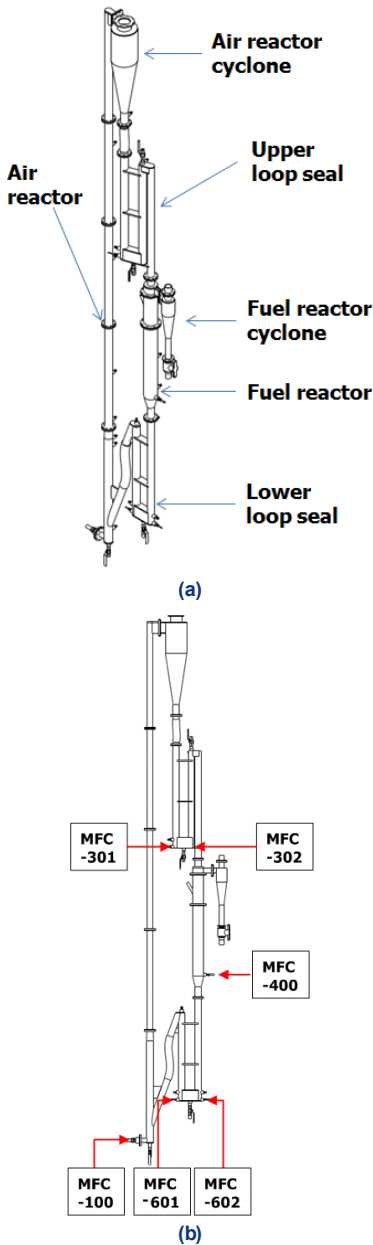


Fig. 3. (a) 3D view of two-interconnected circulating fluidized bed system, (b) mass flow controller arrangement

시킨 후 공기반응기에 공기를 주입하였다. 이후 하부 루프실을 유동화시키면 산소전달입자는 연료반응기에서부터 중력에 의하여 하강하면서 하부 루프실을 거쳐서 공기반응기로 이송되며 공기반응기 사이클론에서 입자가 포집되어 상부 루프실을 거쳐서 연료반

응기로 재순환된다.

공기반응기, 상부 루프실, 하부 루프실 및 연료반응기에 존재하는 고체의 양을 파악하기 위하여 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 위하여 고체가 연속적으로 순환되는 조건에서 상부 루프실의 MFC를 통한 기체유입을 정지하여 상부 루프실을 유동화 상태에서 고정층 상태로 변화시켰으며 이를 통하여 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 연료반응기로 안정적으로 이송시킬 수 있는 상부 루프실 최소유량을 결정하였으며, 이 실험 결과를 바탕으로 모든 실험조건에서 MFC-301과 302는 4.0 NL/min 의 조건에서 운전하였다.

3. 결과 및 고찰

두 가지 산소전달입자의 유동화특성을 확인하기 위해 먼저 최소유동화속도(minimum fluidization velocity)를 측정하였다. 상온, 상압조건에서 기포유동층 내부에 고체층 높이가 0.4 m에 해당하는 산소전달입자를 장입한 후 유속을 증가시켜가면서 고체층의 압력강하를 측정하였으며, 이 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 두 입자 모두 고정층 조건에서부터 유속이 증가함에 따라 층의 압력강하가 증가하여 최대값을 나타내었으며 이후 다소 감소한 후에 거의 일정한 값을 나타내었다. 최소유동화속도는 정의에 따라 층의 압력강하가 최대점을 나타내는 유속으로 결정하였다. 그림에 나타난 바와 같이 OCN706-1100 입자

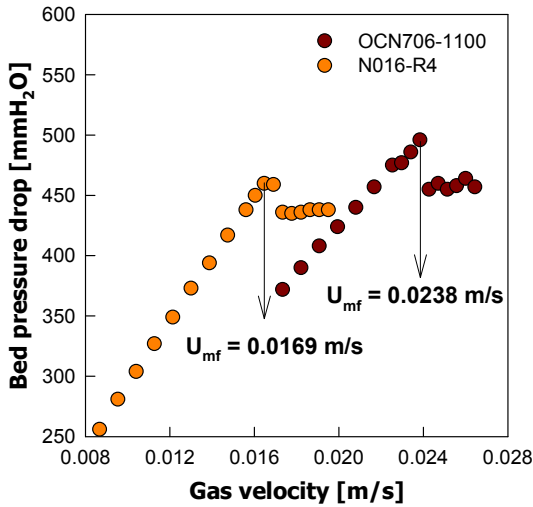


Fig. 4. Trend of bed pressure drop versus gas velocity (how to determine minimum fluidization velocity)

의 최소유동화속도는 0.0238 m/s, N016-R4 입자의 최소유동화속도는 0.0169 m/s로 측정되었으며, 이는 Table 1에 나타난 바와 같이 N016-R4 입자에 비하여 OCN706-1100 입자의 입자크기가 크기 때문에 사료되었으며, 이를 바탕으로 입자의 원활한 유동화를 위하여 필요한 유량이 OCN706-1100 입자의 경우가 더 많음을 짐작할 수 있었다.

다음으로 2탑 연결 순환유동층 실험 장치에서 고체순환속도에 미치는 조업변수의 영향을 해석하기 위하여 고체순환속도에 미치는 가장 중요한 조업변수인 하부 루프실의 유량변화에 따른 고체순환속도를 측정하였다. 본 연구팀의 기존 실험 결과⁸⁾에 의하면 동일한 2탑 순환유동층 실험 장치에서 하부 루프실 유량이 증가하고, 연료반응기 내부 고체층 높이가 증가함에 따라 고체순환속도가 증가하는 경향을 나타내었으며 이 경우, 안정적인 고체순환을 위해서는 공기반응기 유량을 함께 증가시켜야 하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 안정적인 고체순환이 가능한 조건에서 하부 루프실의 유량변화에 따른 고체순환속도의 변화를 먼저 측정하였다.

Fig. 4에는 두 가지 산소전달입자에 대하여 공기반응기(고속유동층)의 유량 450 Nl/min, 연료반응기(기포유동층) 유량 26 Nl/min, 상부 루프실 양측에서

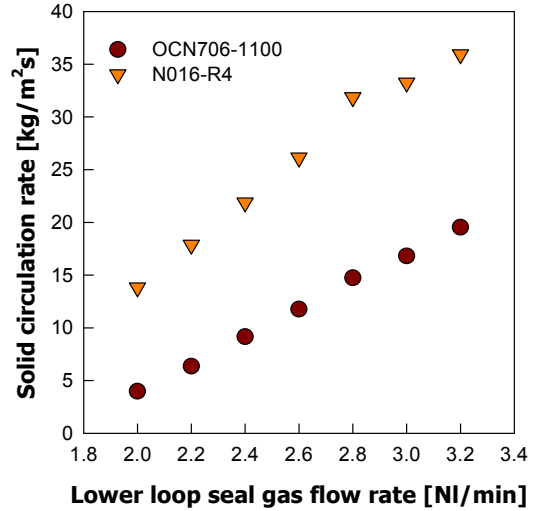


Fig. 5. Effect of lower loop seal flow rate on solid circulation rate for two oxygen carriers

주입되는 유량 4 Nl/min, 연료반응기 초기 고체층 높이가 0.6 m인 조건에서 하부 루프실의 유량 변화에 따라 측정된 고체순환속도의 변화를 나타내었다. 하부 루프실의 유량은 Fig. 3의 MFC-601, MFC-602의 유량을 의미하며, 양쪽 유량을 동일한 값으로 함께 증가시켰다. Fig. 5에서 하부 루프실 유량은 하부 루프실 한쪽의 유량을 의미한다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 두 입자 모두 하부 루프실 유량이 증가함에 따라 고체순환속도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 하부 루프실의 유량이 증가함에 따라 고체입자들의 움직임이 활발해져 연료반응기로부터 중력에 의하여 하강하는 입자들을 공기반응기로 더 쉽게 이송시킬 수 있음을 의미한다. 한편, 두 입자의 고체순환량을 비교하면, 동일한 하부 루프실 유량조건에서 N016-R4 입자의 고체순환속도가 OCN706-1100 입자에 비하여 높게 나타났으며 이는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 N016-R4 입자의 최소유동화속도가 OCN706-1100 입자에 비하여 낮으므로 동일한 유량이 주입될 경우, N016-R4 입자를 유동화시키고 남은 유량에 해당하는 만큼 고체입자에 추가적인 운동량을 전달할 수 있기 때문으로 사료되었다.

고체순환속도에 미치는 하부 루프실 유량과 각 고체입자의 최소유동화속도와와의 관계를 종합적으로 해

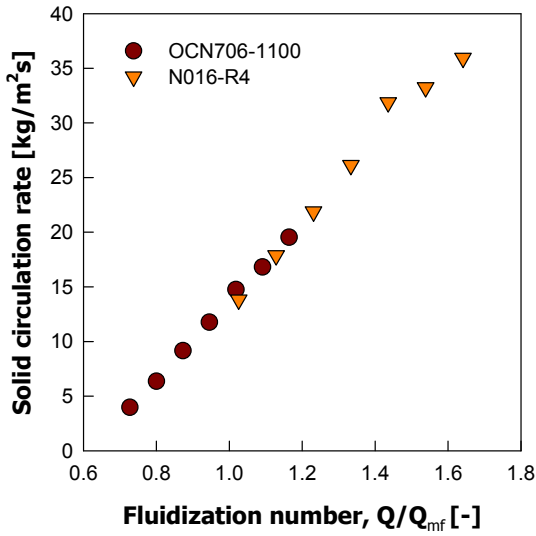


Fig. 6. Effect of fluidization number(Q/Q_{mf}) on solid circulation rate for two oxygen carriers

석하기 위하여 Fig. 4의 X축을 하부 루프실 유량이 아닌 하부 루프실 유량(Q)과 각 입자의 하부 루프실을 유동화시키기 위하여 필요한 최소 유량(최소유동화 유량, Q_{mf})의 비(fluidization number)로 표시한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 나타난 바와 같이, 두 가지 입자에 대한 실험 결과가 동일 연장선상에 위치하는 것을 알 수 있었으며, 동일한 (Q/Q_{mf}) 조건에서 두 입자의 고체순환속도가 유사한 값을 나타내었다. 결과적으로 하부 루프실을 유동화시키고 남은 유량이 많을수록 고체입자의 움직임이 활발해져 고체순환속도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 한편, Fig. 5와 Fig. 6을 함께 고려하면 두 가지 입자 중 N016-R4 입자의 경우가 더 낮은 유량으로 더 높은 고체순환속도를 얻을 수 있으므로 케미컬루핑 연소시스템의 경제성 측면(고체순환 및 기체혼합 방지를 위해 필요한 기체유량)에서 유리한 것으로 나타났다. 또한, 본 연구의 실험범위 내에서 하부 루프실 최소 유동화유량의 0.7-1.6배 유량 범위 내에서 고체순환속도를 4-36 kg/m^2s 로 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

다음으로 두 가지 산소전달입자에 대하여 안정적인 고체순환을 유지할 수 있는 조업조건을 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 본 연구팀의 기존 실험 결

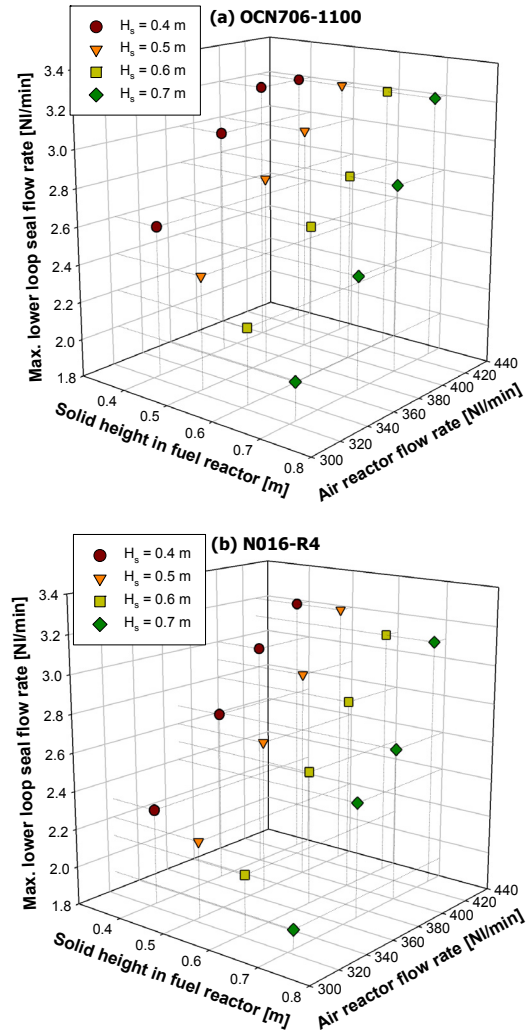


Fig. 7. Operating ranges of each variables without choking in the air reactor for two oxygen carriers

과⁸⁾에서 고체순환속도가 높은 조건, 즉 하부루프실의 유량이 높거나 연료반응기 내부 고체층 높이(H_s)가 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 위하여 연료반응기 고체층 높이, 공기반응기 유량을 변화시키면서 공기반응기의 폐색(choking) 없이 운전할 수 있는 하부 루프실 최대 유량을 결정하였다.

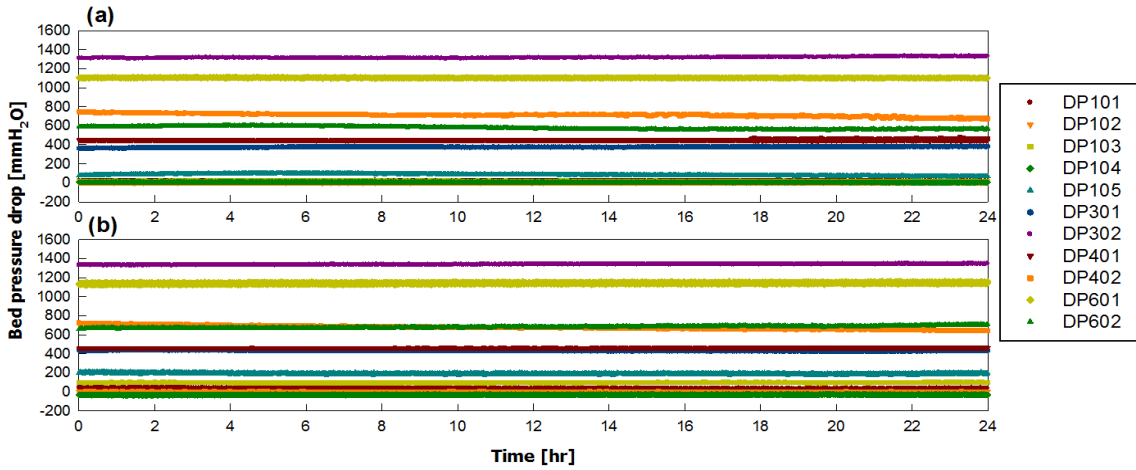


Fig. 8. Trends of bed pressure drop in the two-interconnected circulating fluidized bed system. (a) OCN706-1100, (b) N016-R4

Fig. 7에는 두 가지 산소전달입자들에 대하여 연료반응기 내부 고체층 높이와 공기반응기 유량이 변화할 때 안정적인 고체순환을 유지할 수 있는 하부 루프실 최대 유량의 변화를 나타내었다. Fig. 7에서 하부 루프실 유량이 증가하면 고체순환속도가 증가하는 것을 의미한다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 두 가지 산소공여입자 모두에 대하여 동일한 공기반응기 유량조건에서 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 있으나 안정적인 고체순환을 위하여서는 공기반응기 유량을 함께 증가시키는 것이 유리한 것으로 나타났다.

두 가지 산소공여입자에 대하여 하부 루프실 최대 유량 범위를 비교하면, 동일한 연료반응기 고체층 높이(H_s), 공기반응기 유량조건에서 N016-R4 입자의 경우가 더 넓은 하부 루프실 유량 범위에서 안정적인 고체순환이 가능하였으며, 이와 같은 결과로 미루어 N016-R4 입자를 사용하는 경우 고체순환속도를

Table 2. 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

더 많이 변화시키면서도 안정적인 운전이 가능할 것으로 사료되었다.

Fig. 8에는 Fig. 7에 나타난 안정적인 고체순환이 가능한 조건에서 실제로 장기적인 고체순환이 가능한지를 확인한 실험 결과를 나타내었다. 공기반응기, 연료반응기, 상부 루프실, 하부 루프실의 유량이 각각 430, 26, 4.0, 2.6 Nl/min이고 연료반응기 내부 고체층 높이가 0.6 m인 조건에서 장기 고체순환 실험을 수행하였다. Fig. 8에는 시간 변화에 따라 각 부분

에 존재하는 고체량을 나타내는 차압의 변화를 나타내었으며 각 위치의 차압은 차압형 압력변환기를 사용하여 측정하였다. 그림에 나타난 차압형 압력변환기(DP101-602)의 위치 및 공기반응기 바닥으로부터의 높이를 정리하여 Table 2에 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.

4. 결론

두 가지 산소공여입자에 대하여 2탑 연결 순환유동층 시스템에서 고체순환속도에 미치는 조업변수의 영향을 측정 및 고찰하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 하부 루프실 유량이 증가함에 따라 고체순환속도가 증가하였으며 N016-R4 입자의 경우가 같은 유량조건에서 더 높은 고체순환속도를 나타내었다. 이는 입자를 유동화시키고 남은 유량에 해당하는 만큼 고체입자의 움직임에 추가적인 운동량을 전달할 수 있기 때문에 사료되었다.

2) 두 가지 산소전달입자들에 대해 안정적인 고체순환을 유지할 수 있는 하부 루프실 최대 유량의 변화를 결정하였다.

3) 안정적인 고체순환이 가능한 조건에서 실제로 장기적인 고체순환이 가능한지를 실험적으로 확인하고자 하였으며, 두 가지 산소전달입자 모두에 대하여 24시간 동안 장기 연속 고체순환이 가능함을 실증하였다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로

한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제이다(20152010201840).

References

1. 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 the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 2, 2012, pp. 173-183.
2. H. J. Ryu, S. S. Park, D. H. Lee, W. K. Choi, and Y. W. Rhee, "Method for Improvement of Reduction Reactivity at High Temperature in a Chemical-looping Combustor", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 50, No. 5, 2012, pp. 843-849.
3. Y. Liu, Q. Guo, Y. Cheng, and H. J. Ryu, "Reaction Mechanism of Coal Chemical Looping Process for syngas Production with CaSO₄ Oxygen Carrier in the CO₂ Atmosphere", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 51, 2012, pp. 10364-10373.
4. H. J. Ryu, C. W. Lee, D. H. Lee, D. H. Bae, S. Y. Lee, and Y. S. Park, "Direct Combustion Characteristics of Coal by Oxygen Carrier", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 1, 2014, pp. 87-96.
5. Y. Liu, W. Jia, Q. Guo, and H. J. Ryu, "Effect of Gasifying Medium on the Coal Chemical Looping Gasification with CaSO₄ as Oxygen Carrier", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 22, 2014, pp. 1208-1214.
6. Q. Guo, X. Hu, Y. Liu, W. Jia, M. Yang, W. Man, H. Tian, and H. J. Ryu, "Coal Chemical Looping Gasification of Ca based Oxygen Carriers Decorated by CaO", *Powder Technology*, Vol. 275, 2015, pp. 60-68.
7. 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.
8. J. Y. Yoon, H. Kim, J. Kim, D. Lee, J. I. Baek, and H. J. Ryu, "Solid Circulation Characteristics of Oxygen Carrier for Chemical Looping Combustion System at Ambient Temperature and Pressure", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 4, 2017, pp. 384-391.