

목재 바이오매스를 활용한 이중유동층 가스화기의 SNG 생산

윤형철 · 조성호* · 이덕진* · 문고영*[†] · 조순행**

포스코에너지, *포스코에너지, **아주대학교

(2016년 10월 4일 접수, 2016년 12월 8일 수정, 2016년 12월 12일 채택)

SNG Production from Wood Biomass with Dual Fluidized-Bed Gasifier

Hyungchul Yoon · Sungho Cho* · Dock-jin Lee* · Goyoung Moon*[†] · Soonhaing Cho**

POSCO ENERGY, *POSCO ENERGY, **Ajou University

(Received 4 October 2016, Revised 8 December 2016, Accepted 12 December 2016)

요 약

목재 바이오매스를 이용한 가스화 공정은 고열량의 합성가스를 통해 알콜류, SNG 등 다양한 에너지 자원으로 변환시킴으로써 자원의 재순환에 기여할 수 있으며, CO₂ 등의 온실가스를 감소시킴으로써 지구온난화 방지에 기여할 수 있다. 본 연구에서는 이중유동층 가스화기에 목재 바이오매스를 투입하여 가스화기의 최적운전 조건을 도출하고, SNG 생산효율을 검증함으로써 이중유동층 가스화기에 대한 국내 상용화 기반을 마련하고자 하였다. 목재 바이오매스에 대한 가스화기의 최적 운전조건 도출 결과, 운전온도 826°C에서 Steam 투입량 1,334g/hr, Air 투입량 5.56L/min일 때 탄소전환율이 81%로 확인되었으며, SNG 생산을 위한 CH₄가스 농도를 확인한 결과, 92%로 나타났다.

주요어 : 가스화, 바이오매스, 이중유동층, 타르, 대체천연가스

Abstract - Gasification is one of the important contribution to resource recycling by conversion of biomass to a variety of energy sources such as alcohol, SNG etc., and to global warming prevention by reduction of green house gases such as CO₂. The aim of this study is to draw the optimal operation condition of dual fluidized-bed gasifier with biomass fuel, to verify SNG production efficiency and to establish the basis for the domestic commercialization of dual fluidized bed gasification. As a result, dual fluidized-bed gasifier has the optimal conditions at 826°C with steam input 1,334 g/hr, air input 5.56 L/min. The carbon conversion is 81% and SNG production efficiency was CH₄ 92%.

Key words : Gasification, Biomass, Dual-Fluidized-Bed, Tar, Substituted Natural Gas

1. 서 론

신기후변화협약의 출범으로 전세계적으로 신재생에너지의 비중이 커질 것으로 예상되며, 이와 관련하여 향후 12조 달러가 넘는 에너지 시장이 열릴 것으로 예상된다. 이와 같은 추세에 따라 국내에서도 친환경기술 개발에 대한 수요가 늘어나고 있으나, 기술개발에 비해 상용화 실적은 낮은 상태이다. 이에 따라 상용화

가 가능한 친환경기술의 개발이 필요하며, 그 대표적인 분야가 가스화 분야이다. 기존 소각 방식의 기술은 질소화합물, 다이옥신 등의 대기오염물질과 CO₂ 등의 지구온난화 물질을 발생시킴에 따라 대기오염 방지시설이 반드시 필요하다. 이에 반해 가스화 기술은 CO₂ 발생량이 적고 생산된 합성가스를 전력, 메탄올, SNG 등의 다양한 에너지원으로 생산 가능한 장점이 있다. 다만, 국내에서는 경제성 및 기술 안정성 등의 이유로 상용화된 사례가 미미한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 목재 바이오매스를 활용하여 이중유동층 가스

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-32-550-8126 E-mail : gymoon@poscoenergy.com

화기의 최적 운전조건과 SNG 생산 효율을 검증함으로써 국내 상용화의 기반을 마련하고자 하였다.

2. 실험장치

2-1. 이중유동층 가스화기

Fig. 1은 이중유동층 가스화기의 구조도이다. 본 연구에서 사용된 가스화기는 가스화 반응이 진행되는 내측관과 가스화 후 미반응된 물질을 연소시키는 외측관의 2중관 형태로 구성되어 있다.

원료는 스크류 피더에 의해 투입되며, 가스화기 내측관에 스팀을 산화제로 투입하여 가스화 반응을 유도하고, 외측관에는 공기를 투입하여 연소반응을 유도한다. 가스화 반응을 통해 생성된 합성가스는 유동사와

함께 가스화기 상부의 Riser로 이송되고, Riser에서 합성가스와 고형물(미반응 원료, Char, 유동사 등)로 분리된다. 분리된 고형물은 유동사와 함께 외측관으로 이동되며, 외측관에서 공기와 반응하여 연소된다. 유동사는 가스화기 외부관 하단의 유동사 유입부에서 내부관으로 재투입되며, 이를 통해 가스화 반응에 필요한 열을 공급한다. 본 연구에서는 가스화기의 유동화를 위해 유동사로 올리빈(Olivine)을 사용하였으며, 가스화기의 초기 온도 상승을 위해 전기히터를 사용하였다.

2-2. 타르포집 장치

Fig. 2에 타르포집 방법과 포집장치의 구성도를 나타내었다. 일반적으로 가스화 반응을 통해서 생산된

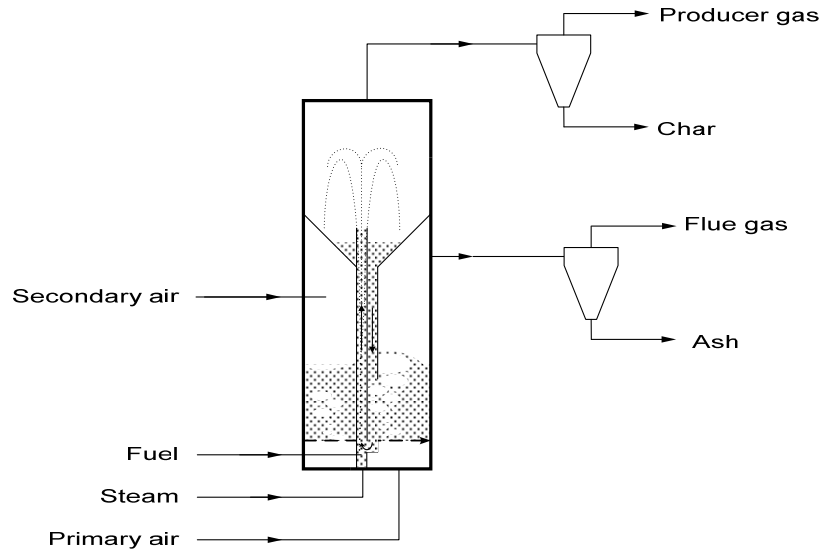


Fig. 1. Dual fluidized bed gasifier

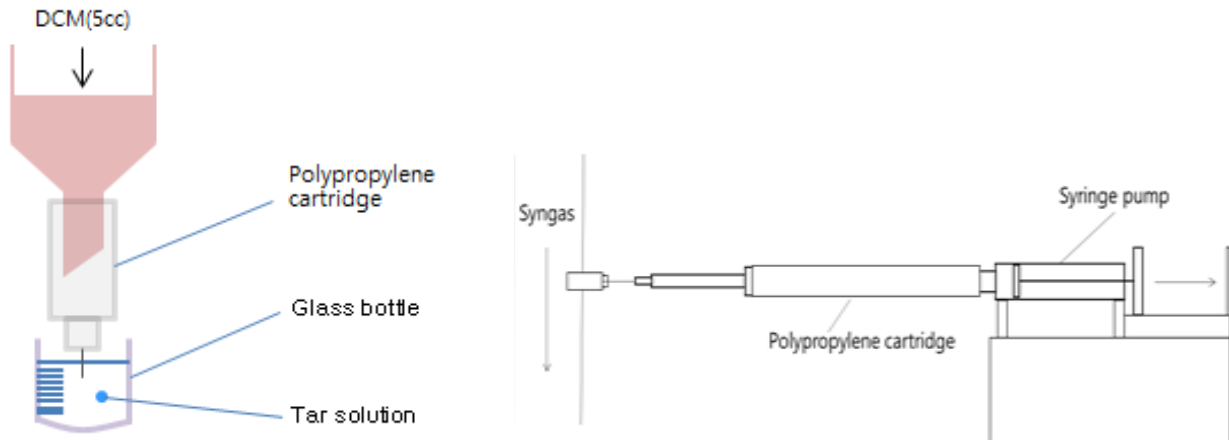


Fig. 2. Tar sampling method and tar collecting device

합성가스에는 타르물질 등을 포함하고 있으며, 이들 물질들은 가스엔진 등에 고장을 유발할 수 있기 때문에 타르 발생량에 대한 분석이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 합성가스내 타르성분을 분석하기 위하여 Solid Phase Adsorption(SPA) 방법을 활용하였다. SPA 방법은 합성가스내 타르성분을 정량할 수 있는 방법으로 Polypropylene 카트리지에 포함된 Silica gel에 의해 타르가 흡착되고, 흡착된 타르를 DCM(Dichloromethane)을 사용하여 분리한 후, GC-Mass를 통해 타르농도를 측정한다. 본 연구에서는 합성가스내 포함된 타르물질을 Polypropylene 카트리지에 흡착시키기 위하여 Polypropylene 카트리지를 실린지 펌프에 연결 후 합성가스 토출 라인을 통해 합성가스내 타르성분을 포집할 수 있도록 하였다.

2-3. 타르제거 장치

Fig. 3은 타르제거 장치에 대한 구성도이다. 이중 유동층 가스화기를 SNG 제조시스템과 연동하기 위하여

타르제거장치를 제작하였으며, 계면활성제 저장탱크, 스크러버, Demister로 구성되어 있다. 가스화기에서 생산된 합성가스는 스크러버로 인입되고, 스크러버 상부에서 투입되는 계면활성제와 반응하여 타르물질이 제거되며, 합성가스내 수분은 Demister에서 분리된다.

2-4. SNG 제조시스템

Fig. 4는 SNG 제조시스템에 대한 구성도이다. 가스화 반응을 통해 생산된 합성가스를 SNG로 변환시키기 위하여 SNG 제조시스템을 제작하였다. SNG 제조시스템은 Preheater, 수소화탈황 공정(Hydrodesulfurization), H₂S/COS 흡착반응기, 수성가스 전이반응기(Water gas shift reactor), 예비개질기(Pre-reformer), 메탄화반응기(Methanizer), Steam generator로 구성되어 있다. SNG 제조시스템으로 유입된 합성가스는 Preheater를 통해 180℃로 가열된 후, 수소화탈황 공정(Hydrodesulfurization)을 통해 유기황/염 화합물을 제거하고 합성가스내 불포화 Alkene과 Alkynes를 Alkane으로 변환

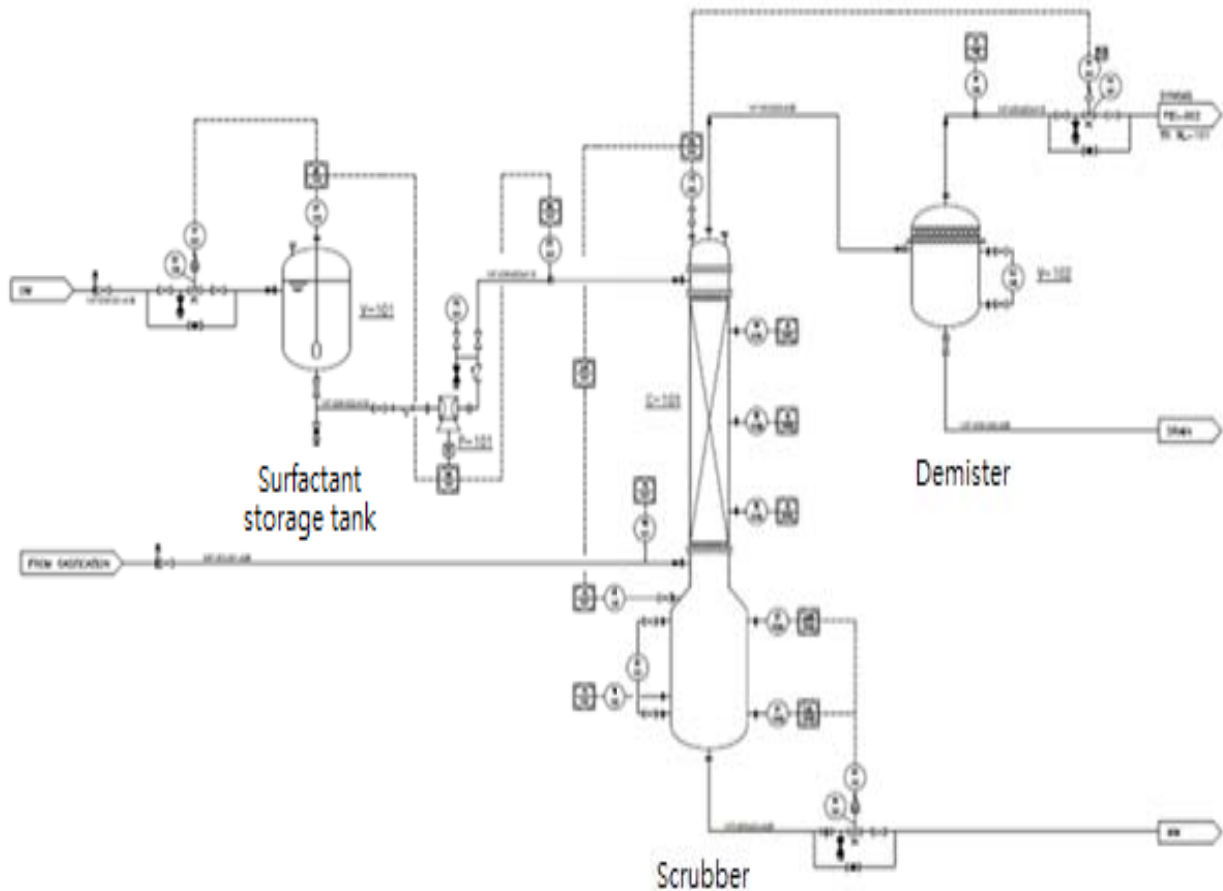


Fig. 3. Tar removal device

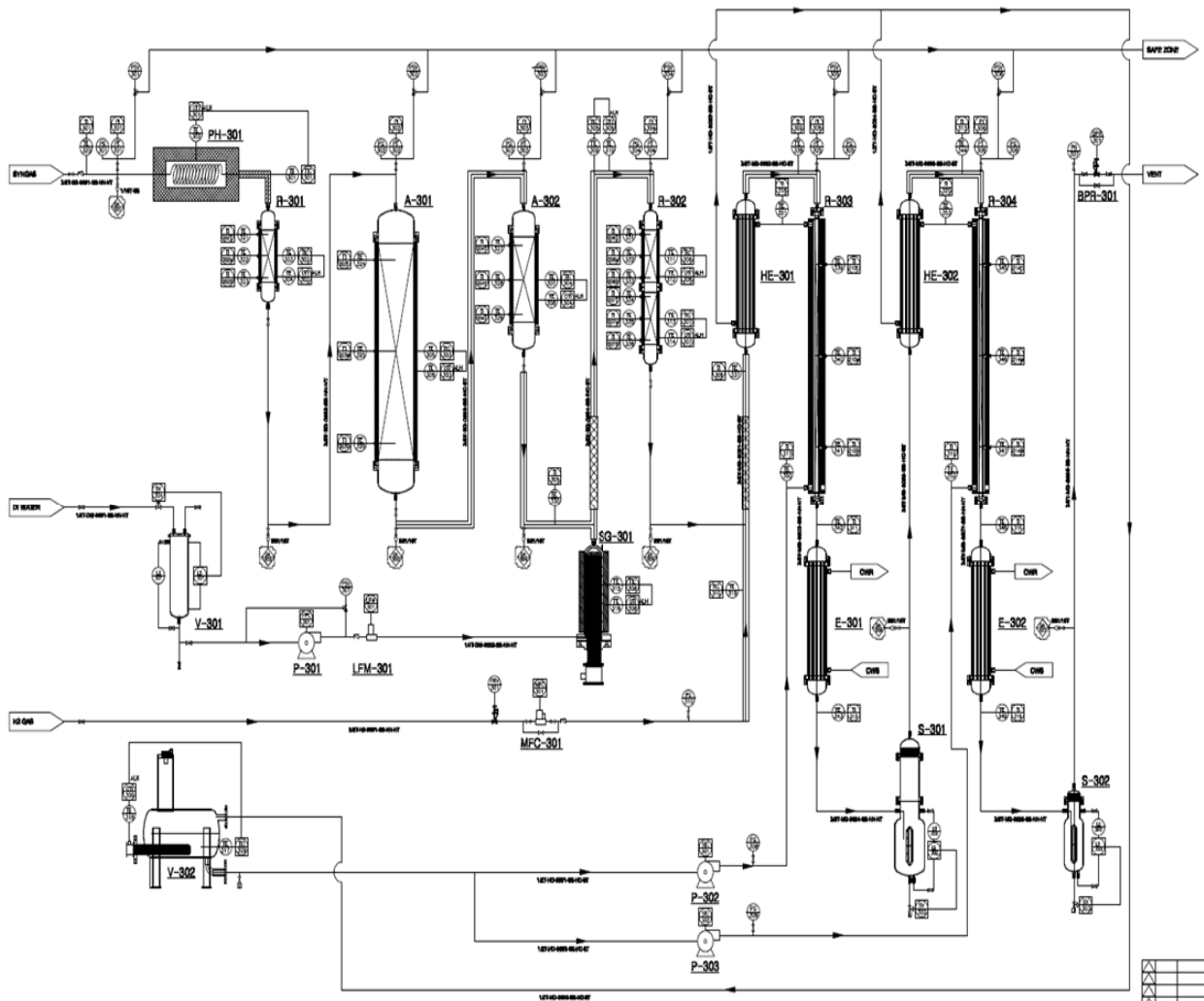


Fig. 4. SNG manufacturing system

시킨다. 수소화탈황공정 이후, 합성가스를 ZnO와 Alumina촉매가 설치된 2개의 흡착탑에 통과시켜 합성가스내 H₂S, COS, HCl등의 유기황/염이 제거된다. 흡착탑을 통과한 합성가스는 재가열되고, 수성가스 전화반응기를 통해 합성가스내 H₂ 농도를 증가시키고, NiO 촉매가 설치된 예비개질기(Pre-reformer)에 통과시켜 CH₄농도가 증가되도록 구성하였다.

3. 실험방법

3-1. 실험설계

목재 바이오매스에 대한 이중유동층 가스화기의 성능실험을 진행하기 위하여 실험계획법에 따른 실험설계를 진행하였다. 실험계획법은 통계학적 분석기반 방식으로 적은 실험횟수로 최적의 실험결과를 도출할 수

있는 방법이기 때문에 시간과 비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 실험계획법내 중심합성법을 이용하여 실험설계를 진행하였다. Fig. 5는 2인자와 3인자의 중심합성법을 비교한 그림이다. 일반적으로 인자들의 변화를 확인하기 위해 사용되는 실험계획법은 2K요인배치법이다. 그러나 이 방법은 변수의 수준변화에 따라 발생하는 반응량의 곡면적인 변화를 감지할 수 없다. 이와 같은 단점을 보완하여 개발된 방법이 중심합성법이다. 중심합성법은 반응표면이 곡면적인 특성을 나타낼 때 반응 공간을 추정하기 위하여 사용되는 실험계획법이다. 중심합성법은 최적의 조건을 찾기 위해 2차 다항식 모형을 구현하는데, 모형은 중심점, 축점, 상자점으로 구성되어 있기 때문에 적은 회수로 곡면을 효과적으로 추정할 수 있다. 이에 따라 중심합성법을 이용하여 실험설계를 진행하였다.

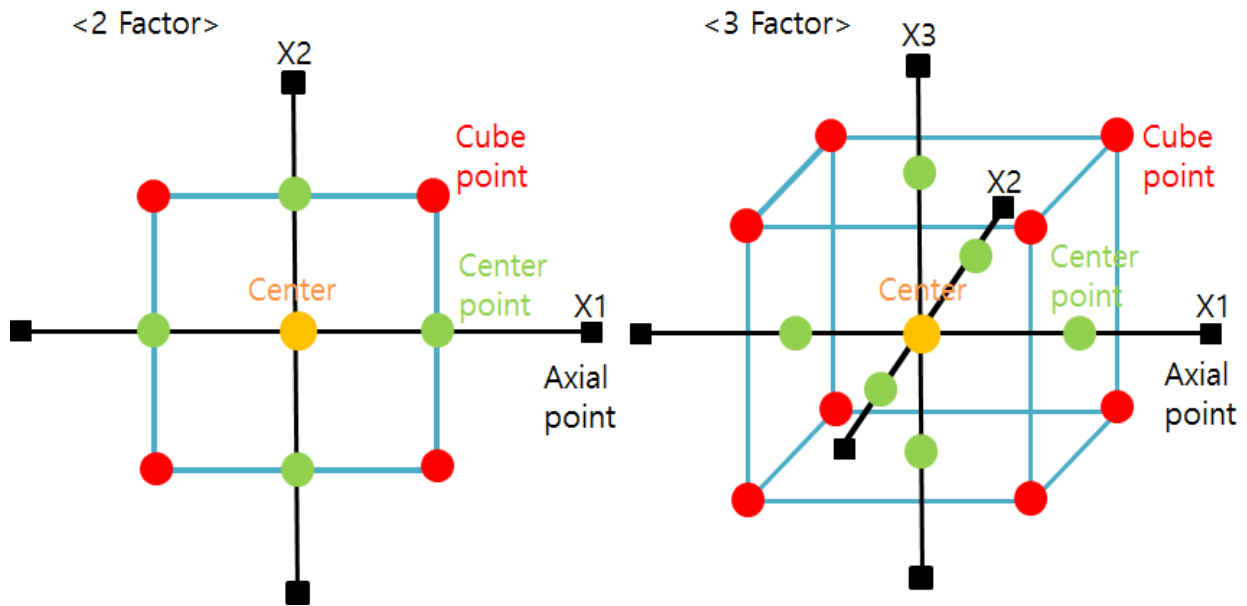


Fig. 5. Comparison of central composite method

Table 1. Design factor of dual fluidized bed gasifier

Item	Design factor
Combustor diameter(m)	0.25
Riser diameter(m)	0.036
Combustion Temperature(°C)	925
Operating pressure(bar)	1.1
Min. fluidization velocity in flue gas(m/sec)	0.05
Feeding rate(g/h)	5,000
Producer gas volume flow(m ³ /hr)	6
Bed material	Olivine

Table 1은 이중유동층 가스화기의 설계상 운전조건이다. 가스화기의 안전성 등을 고려하여 설계상 운전 범위내에서 성능실험을 실시하고자 하였다. 이중유동층 가스화기 성능실험을 위해 운전 온도를 최대 925℃, 운전압력은 1.1bar 이내, 이때 원료 투입속도는 5,000g/hr 이내로 투입하여 운전하도록 하였다. 또한, 타르물질의 제거를 위해 유동사로 올리빈을 사용하였다.

Table 2는 목재 바이오매스 투입시 가스화 성능실험 조건에 대한 실험설계 결과를 나타낸 것이다. Table 1의 원료 투입속도와 가스화기 특성 등을 고려하여 성능실험 조건을 도출하기 위한 실험설계를 실시하였다. 성능실험을 위한 주요인자로는 가스화 온도, 스팀 투입량, 공기투입량 등을 설정하였으며, 중심합성법에

의해 실험설계를 진행하였다. 총 20회의 성능실험 조건이 도출되었으며, 실험설계 결과에 따른 성능실험을 실시하였다.

3-2. 가스화기 성능실험

목재 바이오매스 투입시 이중유동층 가스화기의 성능 검증을 위해 투입 원료가 합성가스로 전환되는

효율에 대하여 평가가 필요하다. 이를 평가하기 위한 지표로 Reimert(1989)가 사용한 탄소전환율, 냉가스효율 등이 주로 이용된다. 이에 따라 본 연구에서는 목재 바이오매스 가스화의 탄소전환율과 냉가스효율 등을 확인하고 타르 생성농도 파악을 통해 이중 유동층 가스화기의 성능을 검증하고자 하였다. 식(1)은 탄

Table 2. Experimental design of biomass gasification test

Run	Temperature(°C)	Steam(g/hr)	Air(L/min)
1	650	1,334	0
2	750	735	7.0
3	750	735	7.0
4	750	1,334	7.0
5	850	1,334	0
6	750	735	7.0
7	650	1,334	14.9
8	850	0	14.9
9	850	0	0
10	750	0	7.0
11	850	1,334	14.9
12	750	735	7.0
13	750	735	7.0
14	850	735	7.0
15	650	0	0
16	750	735	7.0
17	750	735	0
18	650	735	7.0
19	650	0	14.9
20	750	735	14.9

소전환율에 관한 식이며, 투입 원료내 탄소성분이 합성가스내 탄소가스로 전환되는 효율로 정의된다. 가스화기에 투입되는 원료내 탄소성분은 가연성 물질로 가스화 반응을 통해 탄소가스(CO, CO₂ 등)로 전환되기 때문에 탄소전환율이 높으면 합성가스 생산이 높아지게 된다. 식(1)에서 S_c는 합성가스내 탄소질량 유속이며, B_c는 가스화기로 투입되는 목재 바이오매스의 탄소질량 유속이다.

$$\text{Carbon Conversion} = S_c/B_c \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

B_c = Carbon mass flow of biomass, kg/hr

S_c = Carbon gas flow in syngas, kg/hr

식(2)는 냉가스효율에 관한 식이며, 가스화기에 투

입된 목재 바이오매스의 발열량이 합성가스의 발열량으로 전환되는 효율로 정의된다. 합성가스를 내연기관에 사용할 경우, 합성가스의 발열량은 내연기관 가동의 중요한 인자이므로 냉가스효율은 가스화 효율의 중요한 척도로 활용된다. 식(2)에서 S_{cv}는 합성가스의 발열량, B_f는 목재 바이오매스의 가스화기 투입 속도, B_{cv}는 목재 바이오매스의 발열량이다.

$$\text{Cold gas efficiency} = S_{cv}/(B_f \times B_{cv}) \times 100 \dots \dots (2)$$

S_{cv} = Caloric value of syngas, kcal/hr

B_f = Feed rate of biomass, kg/hr

B_{cv} = Caloric value of biomass, kcal/kg

식(3)은 타르제거율에 관한 식이다. 타르제거율은 타르제거 장치 전, 후단의 타르농도를 분석하여 감소된 농도를 백분율로 나타내었다.

$$\text{Tar removal efficiency} = 1 - (T_i/T_o) \times 100 \dots \dots (3)$$

T_i = Tar concentration in syngas, mg/L

T_o = Tar concentration after tar removal device, mg/L

4. 결과 및 고찰

4-1. 원료 특성분석

이중유동층 가스화기의 성능실험을 진행하기 위해 투입 원료인 우드 바이오매스에 대한 특성분석을 실시하였다. Table 3은 우드 바이오매스의 공업 및 원소 분석 결과이다. 회분함량이 0.38%로 매우 낮은 반면, 수분함량이 10% 내외, 산소가 44.74%로 비교적 높은 것으로 분석되었다.

4-2. 가스화기 성능 실험결과

실험설계 결과에 따라 총 20회의 가스화 성능실험을 수행하였으며, 합성가스 생성농도, 냉가스효율, 탄

소전환율 분석을 통해 실험조건별 가스화기의 성능을 확인함으로써 이중유동층 가스화기의 최적 운전조건 도출을 위한 주요인자로 활용하고자 하였다. Fig. 6은 합성가스 생성농도 결과이다. 운전온도가 상승할수록 CO₂와 H₂의 농도가 증가되는 것으로 확인되었는데, 이는 가스화 반응중의 하나인 수성반응(4)에 의한 것으로 확인되었다. 운전온도가 증가됨에 따라 가스화 반응에서 생성된 CO가 산화제로 투입된 스팀과의 반응을 통해 CO₂와 H₂로 변화되는 것을 확인할 수 있었다.

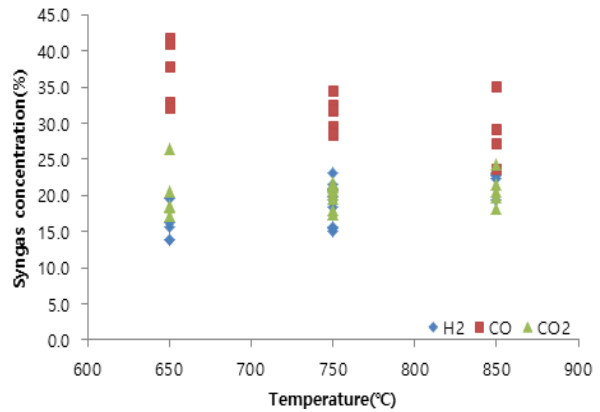


Fig. 6. Syngas concentration according to gasification temperature

Table 3. Characteristic of wood biomass

Component		Value
Size(mm)		2
Ultimate analysis (wt.%)	C	49.01
	H	6.23
	O	44.74
	N	0.01
	S	0.01
Proximate analysis (wt.%)	Moisture	9.79
	Volatile	76.62
	Ash	0.38
	Fixed Carbon	13.21
HHV(kcal/kg)		4,678
LHV(kcal/kg)		4,338

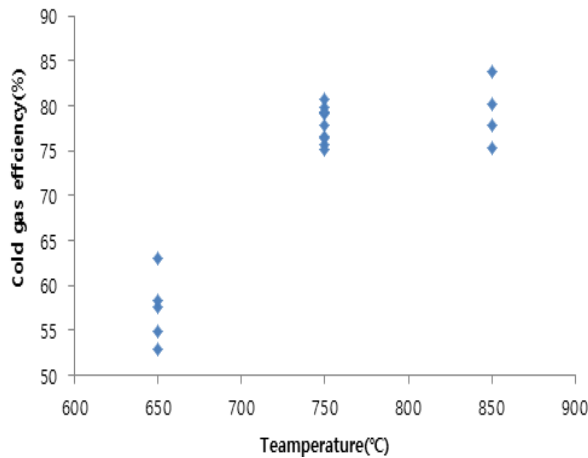


Fig. 7. Cold gas efficiency according to gasification temperature

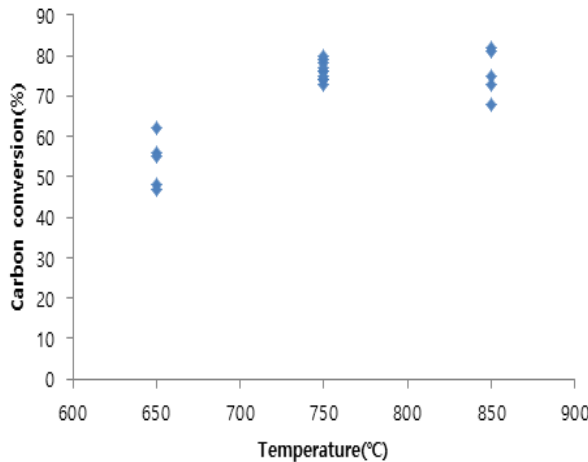


Fig. 8. Carbon efficiency according to gasification temperature

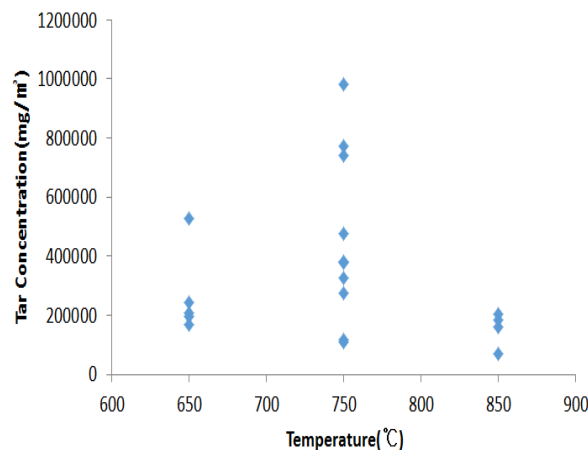
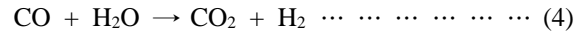


Fig. 9. Tar concentration according to gasification temperature



이러한 합성가스내 농도 변화는 냉가스효율과 밀접한 관계가 있다. 합성가스중 수소 발열량이 가장 높기 때문에 수소의 농도가 상대적으로 증가할수록 냉가스 효율에 영향을 미치기 때문이다. Fig. 7에 가스화 온도에 따른 냉가스효율을 나타내었다. 가스화 온도가 증가할수록 냉가스효율이 증가되는 것으로 나타났는데, 이는 합성가스내 H₂의 농도 증가에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 가스화기 성능실험의 탄소전환율 결과이다. 가스화 온도가 상승할수록 탄소전환율이 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 가스화 온도 상승에 따라 합성가스내 탄소가스(CO₂ 등)의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 목재 바이오매스 투입시 합성가스내 타르 생성농도를 나타낸 결과이다. 750°C까지는 타르 생성농도가 증가하다가 가스화 온도가 750°C보다 높아지면 타르 생성농도가 다시 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 유동사인 올리빈에 기인한 것으로 판단된다. Van der Meijden[1]은 “유동사 물질로 올리빈을 사용할 경우, 가스화 온도가 낮은 범위에서는 타르물질이 점차 증가하다가 가스화 온도가 증가하면, 올리빈에 포함되어 있는 마그네슘과 철이 타르 전구물질인 탄화수소의 분해반응 촉진을 통해 타르물질이 다시 감소한다”고 하였다.

4-3. 가스화기 최적 운전조건 도출

가스화기의 성능실험 결과를 토대로 반응표면분석(Response surface methodology)을 실시하였다. 가스화 제어인자의 변화에 따른 가스화 효율과의 상관관계 분석을 통해 최적 운전조건을 도출하고자 하였다. 가스화 효율에 대한 반응표면분석을 위해 반응표면모델식과 2차 다항 모델을 추정하였으며 가스화기 성능실험 결과와의 비교를 통해 모델의 적합성을 검증하였다. 식(5)와 식(6)은 냉가스효율과 탄소전환율에 대한 반응표면모델식이다.

$$\text{Cold gas efficiency (\%)} = 77.65 + 9.59X + 2.72Y - 2.84Z + 1.64XY - 10.80X^2 \dots \dots \dots (5)$$

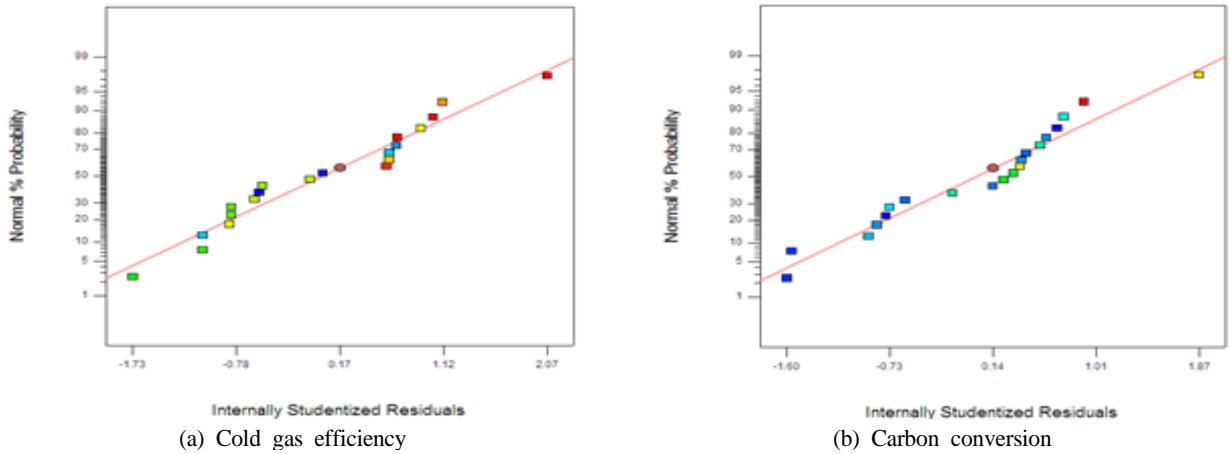


Fig. 10. Validation of RSM model equation

X = Temperature, °C
 Y = Steam input, g/hr
 Z = Air input, L/min

$$\text{Carbon conversion (\%)} = 75.43 + 11.06X + 1.96Y - 1.40Z + 3.06XY + 1.47XZ - 12.92X^2 + 2.67Z^2 \dots \dots \dots (6)$$

X = Temperature, °C
 Y = Steam input, g/hr
 Z = Air input, L/min

Fig. 10은 냉가스효율과 탄소전환율에 대한 반응표면모델의 적합성 검증결과이다. 모델 검증결과, 냉가스효율과 탄소전환율 모두 실제실험값과 반응표면모델의 예측값이 일치하는 것으로 나타남에 따라 모델의 신뢰도가 높은 것으로 확인되었다.

Fig. 11은 냉가스효율과 탄소전환율에 대한 반응표

면모델이다. 냉가스효율의 경우, 가스화 온도가 증가하고 스팀투입량이 많을수록 높은 것으로 나타났는데, 이는 투입된 스팀이 CO와 반응하여 H₂를 증가시켰기 때문으로 판단된다. 탄소전환율도 가스화 온도가 증가될수록 탄소전환율이 높아지는 것으로 확인되었는데, 이는 가스화 온도가 증가될수록 Water-gas-shift 반응에 의해 CO₂가 증가되고, 또한 고분자 탄소가스(C₂, C₃) 생성에 기인한 것으로 판단된다.

냉가스효율과 탄소전환율의 RSM(Response surface methodology)모델에 대한 반응표면분석과 타르 생성농도 분석을 통해 이중유동층 가스화기의 최적 운전조건을 도출하였다. Table 4는 목재 바이오매스 가스화시 반응표면분석에 의한 이중유동층 가스화기의 최적 운전조건 및 예상 효율이다. 최적 운전조건은 가스화 온도 826 °C, 스팀투입량 1,334 g/hr, 공기투입량이 5.56 L/min일때로 도출되었으며, 이때 가스화 효율은 냉가스효율 83%, 탄소전환율 81%, 타르생성 농도는 68,515 mg/m³로 예상되었다.

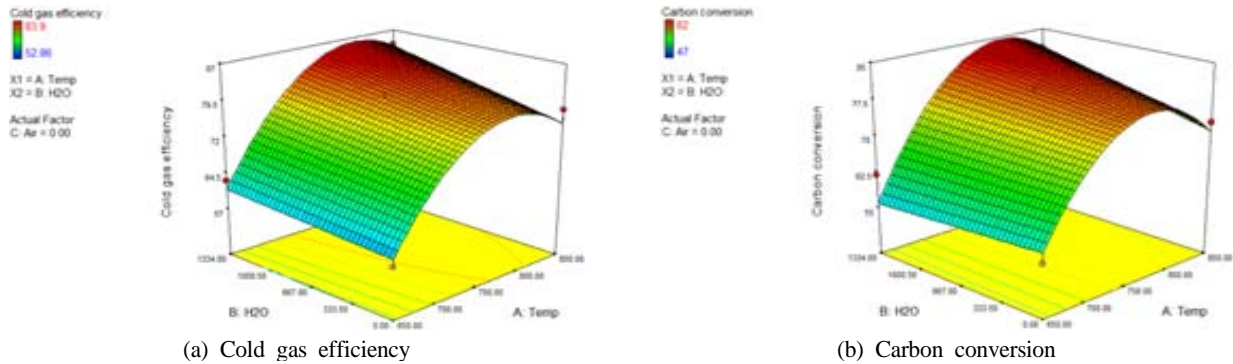


Fig. 11. RSM model of cold gas efficiency and carbon conversion

Table 4. Optimal operating conditions and efficiency of gasifier with wood biomass

Item	Operating condition			Efficiency		
	Temp(°C)	Steam(g/h)	Air(L/min)	Cold gas (%)	Carbon (%)	Tar(mg/m ³)
Range	826	1,334	5.56	83	81	68,515

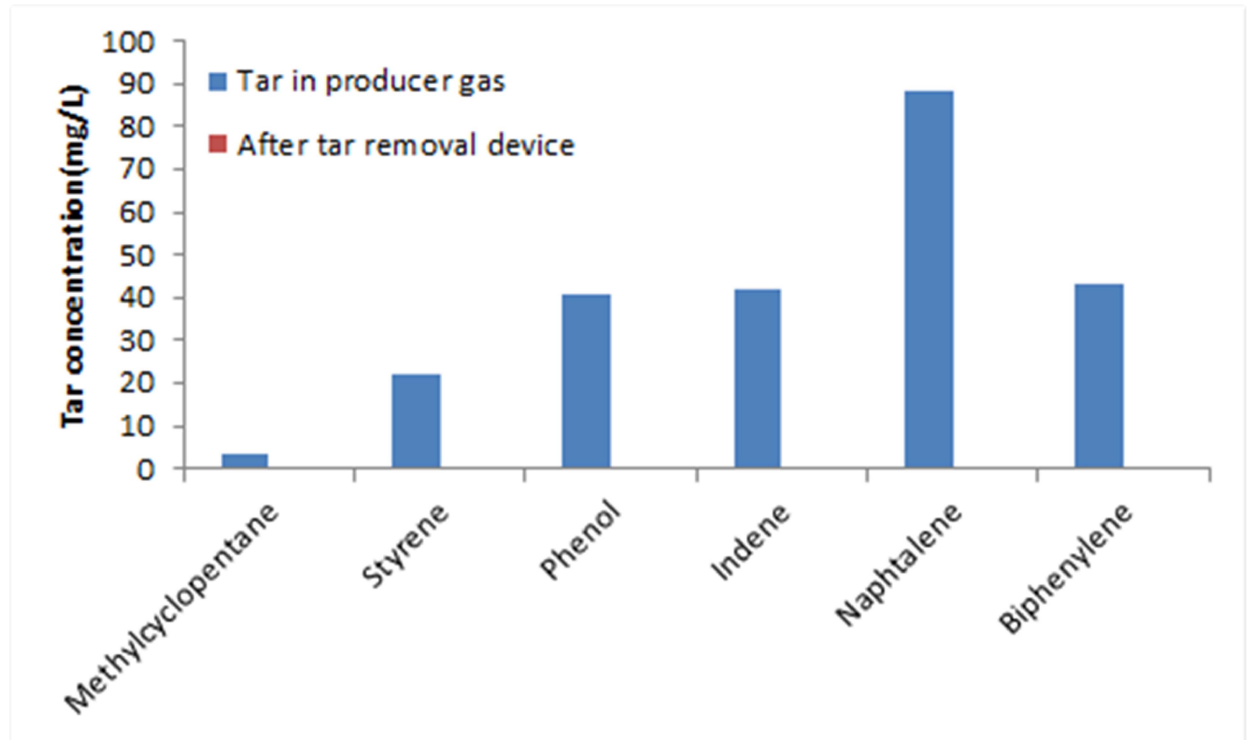


Fig. 12. Tar removal efficiency

4-4. 타르제거 효율평가

합성가스내 타르는 SNG 제조시스템내 가스배관의 막힘현상 등을 유발하여 SNG 제조효율을 떨어뜨릴 수 있다. 이에 따라 SNG 제조시스템 전단에 타르제거 장치를 설치함으로써 SNG 제조성능을 높이고자 하였다. 타르는 목재 바이오매스 가스화시 비교적 농도가 높은 Styrene, Phenol, Indene, Naphtalene, Biphenylene을 분석하였으며, 타르제거 장치의 전·후단에 타르포집 장치를 설치하여 합성가스내 타르를 포집한 후 GC-Mass로 농도를 분석하였다. 타르제거 효율은 타르제거 장치 전·후의 타르물질 농도차에 따른 효율을 평가하였다. 타르제거 효율 평가결과, 5가지 타르물질 모두 타르제거 장치에서 제거된 것으로 나타났다. 이는 타르제거 장치에서 사용된 계면활성제가 타르성분과의 흡착반응을 통해 제거된 것으로 사료된다.

4-5. SNG 제조시스템 성능평가

이중유동층 가스화기에서 생산된 합성가스를 타르 제거 장치와 연동을 통해 타르성분을 제거한 후, SNG 제조시스템의 성능을 평가하였다. SNG 제조시스템 입구, 흡착탑, 예비계질기, 메탄화반응기에서 합성가스를 샘플링하였으며, NDIR과 Micro GC를 이용하여 합성가스의 구성물질(CO, CH₄, H₂, CO₂) 농도 변화를 측정하였다. Fig. 13은 SNG 제조시스템내 합성가스 구성물질 변화에 대한 결과이다. 합성가스내 CO와 H₂는 수성가스전환반응에 의해 예비계질기까지 증가하였으나, 메탄생성단계에서 CH₄생성에 이용되면서 다시 감소되었다. CH₄의 경우, 수성가스전환반응과 예비계질을 거치면서 급격히 증가하여 메탄화 반응을 통해 92%까지 증가됨을 확인할 수 있었다.

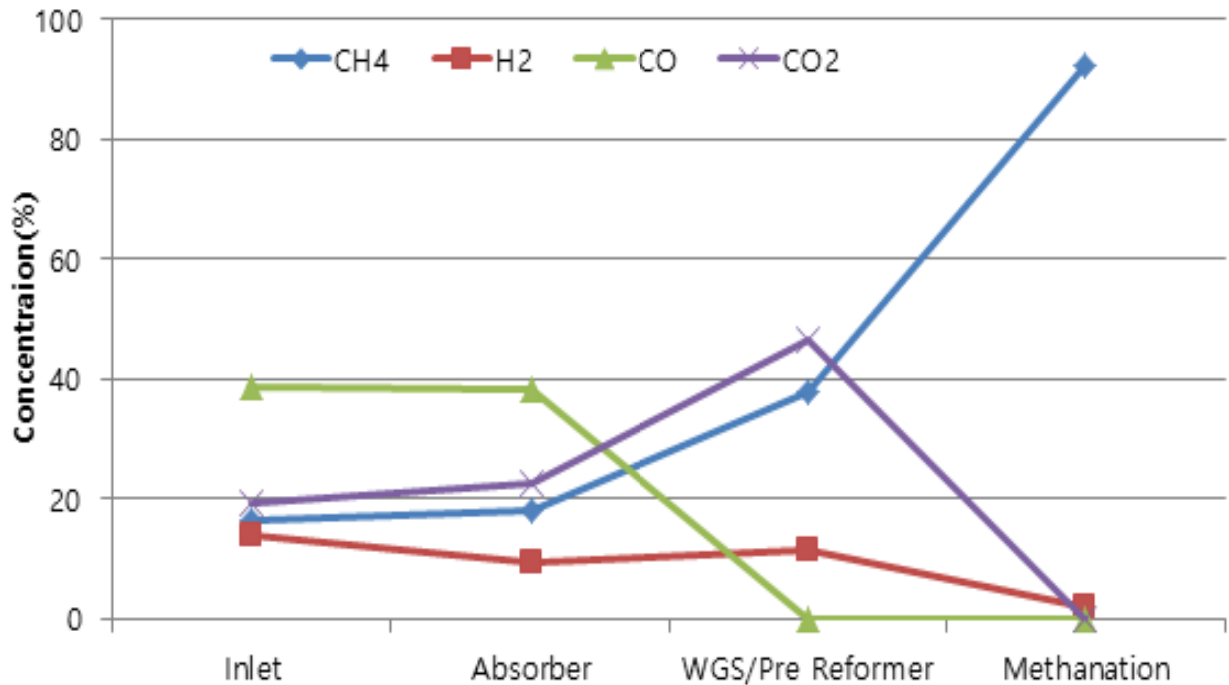


Fig. 13. SNG production efficiency

5. 결론

본 연구에서는 반응표면분석을 통해 목재 바이오매스 투입시 이중유동층 가스화기의 최적 운전조건과 SNG 생산효율을 검증함으로써 국내 상용화의 기반을 마련하고자 하였다. 가스화기 성능실험 결과, 가스화 온도가 높고, 스팀투입량이 많을수록 냉가스효율이 높은 것으로 나타났는데, 이는 가스화기의 온도가 증가할수록 수성반응에 의해 산화제로 투입된 스팀이 CO와 반응하여 H₂를 증가시키기 때문이다. 탄소전환율의 경우, 가스화기의 온도가 증가할수록 Water-gas-shift 반응에 의한 CO₂의 증가 및 고분자 탄소가스(C₂, C₃)생성에 기인한 것으로 확인되었다. 본 연구에서 목재 바이오매스 투입시 이중유동층 가스화기의 최적 운전조건을 반응표면분석으로 도출한 결과, 가스화 온도 826°C, 스팀투입량 1,334g/hr, 공기투입량이 5.56L/min 일때, 냉가스효율 83%, 탄소전환율 81%, 타르 생성농도는 68,515mg/L로 예상되었다. 이를 기반으로 SNG 제조시스템의 성능을 평가한 결과, CH₄생성이 92%까지 증가됨을 확인할 수 있었다.

References

1. Van der Meijden, C. M., 2010, Development of the MILENA gasification technology for the production of Bio-SNG. pp. 85-182
2. Van der Meijden, C. M., Veringa, H. J., Rabou. L. P., 2010, The production of syngas natural gas(SNG) : A comparison of three wood gasification systems for energy balance and overall efficiency, Biomass and bioenergy, 34, pp. 302-311
3. Reimert, R., 1989, Gas Production, In Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry, pp218-220
4. Arena, U., Gregorio, F. D., 2016, Fluidized bed gasification of industrial solid recovered fuels, Waste Management, 50, pp. 86-92
5. Molino, A., Chianese, S., Musmarra, D., 2016, Biomass gasification technology : The state of the art overview, Journal of Energy Chemistry, 25, pp. 10-25
6. Patra, T. K., Sheth, P. N., 2015, Biomass gasification models for downdraft gasifier : A state-of-the-art review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50, pp. 583-593

7. Barisano, D., Canneto, G., Nanna, F., Alvine, E., Pinto, G., Villone, A., Carnervale, M., Valerio, V., Battafarano, A., Braccio, G., 2016, Steam/oxygen biomass gasification at pilot scale in an internally circulating bubbling fluidized bed reactor, *Fuel processing Technology*, 141, pp. 74-81