
반탄화 및 저회분 기술을 적용한 미이용 바이오매스 혼소비율에 따른 회 부착특성에 관한 실험적 연구

2021. 10. 28.

발표자 : 성기종

목 차

1. 연구배경
2. 연구목적
3. 실험장치
4. 실험결과
5. 결론

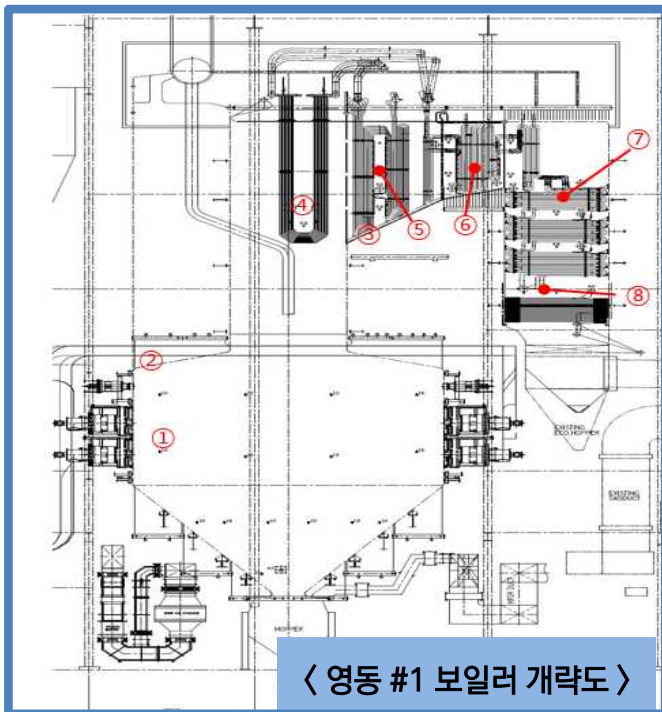
1. 연구배경

현황

- ❖ 영동 #1 우드펠릿 전소 이후 Slagging/Fouling 발생 급증으로 설비 정지/정비 횟수 증가
- ❖ 2019년 REC 가중치 2.0 적용 후 국내 미이용 바이오매스 사용량 증대로 현상 더욱 심화

구면

- ❖ (운영적 측면) Soot Blower 분사 압력 상향, 출력 조정으로 S/F 제거
- ❖ (기계적 측면) Soot Blower 추가 설치, Pulverizer 분쇄효율 증대를 위한 내부 개선공사
- ❖ (연료적 측면) 바이오매스 연료 개선에 많은 노력이 필요하여 아직까지 시도되지 않음

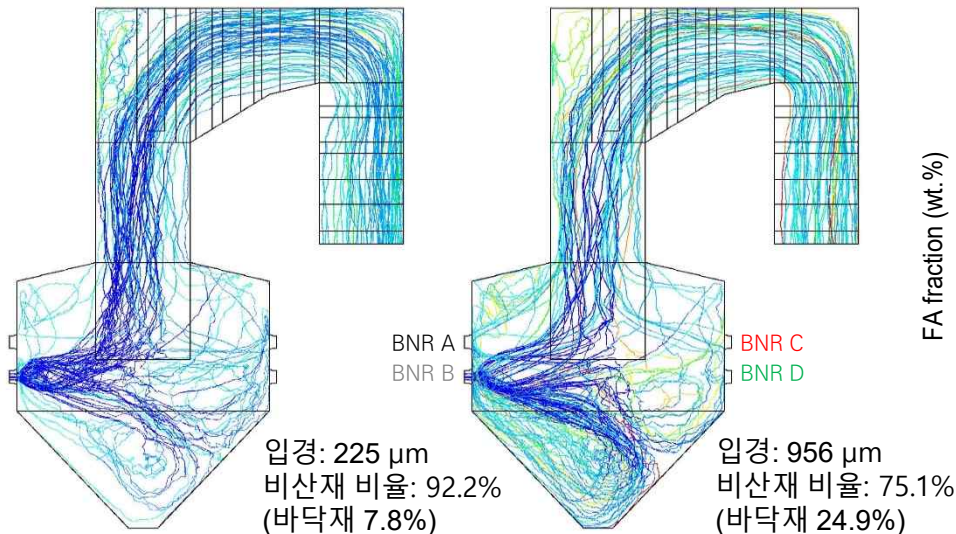


1. 연구배경

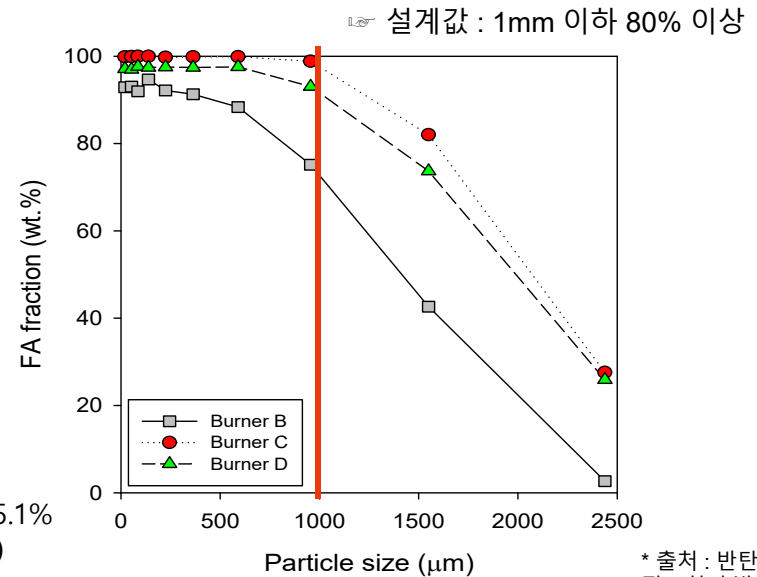
❖ 원인분석

- ① 우드펠릿 분쇄도 저하에 따른 연소성 저하
- ② 회성분에 알칼리 금속 및 토금속 등의 함량(Ca, K, P, Cl)이 높아 용융 온도가 낮음
- ③ 기존 무연탄 보일러를 Retrofit 하여 최적 보일러 설계가 이루어지지 않아 Fouling에 의한 영향이 심함

ex) RH tube 열흡수량 증대를 위해 tube 설치량 증가로 pitch 감소(10cm) → bridge 쉽게 생성 → 유로 차단



입경별 입자 거동



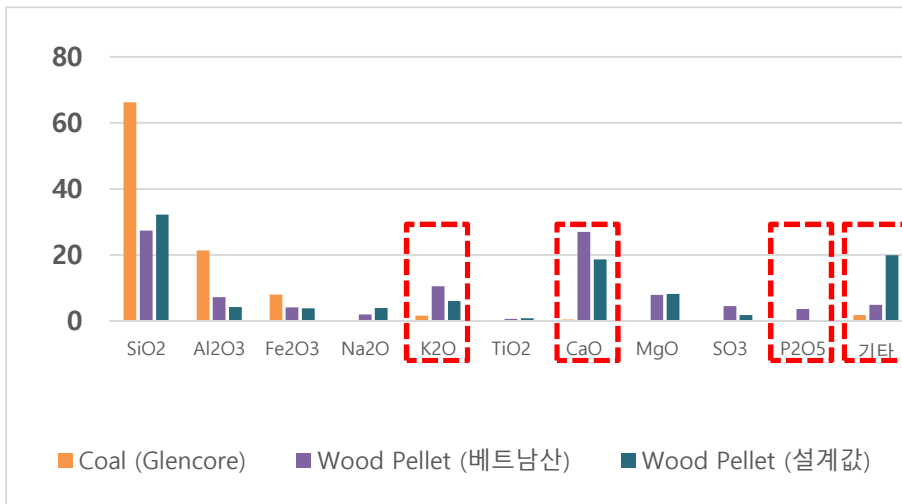
입경 및 버너별 비산재 비율

* 출처 : 반탄화과제
진도회의 발표자료
(성균관대 류창국 교수)

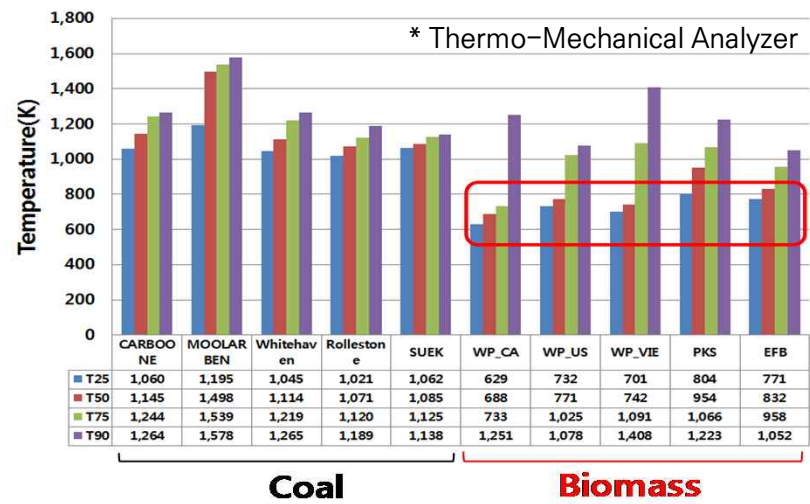
1. 연구배경

❖ 원인분석

- ① 우드펠릿 분쇄도 저하에 따른 연소성 저하
 - ② **회성분에 알칼리 금속 및 토금속 등의 함량(Ca, K, P, Cl)이 높아 용융 온도가 낮음**
 - ③ 기존 무연탄 보일러를 Retrofit 하여 최적 보일러 설계가 이루어지지 않아 Fouling에 의한 영향이 심함
- ex) RH tube 열흡수량 증대를 위해 tube 설치량 증가로 pitch 감소(10cm) → bridge 쉽게 생성 → 유로 차단



회성분 비교값



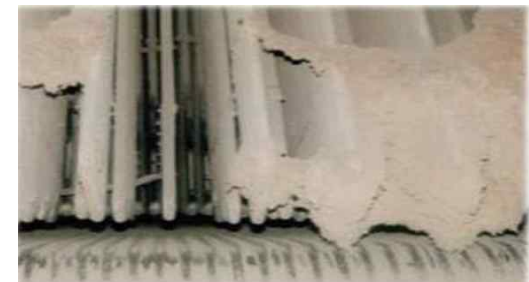
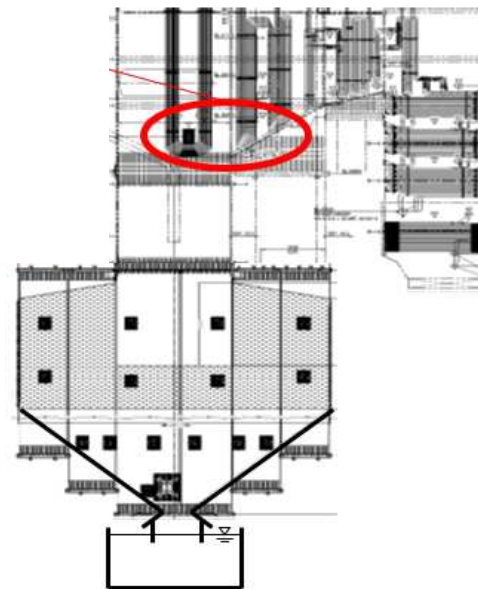
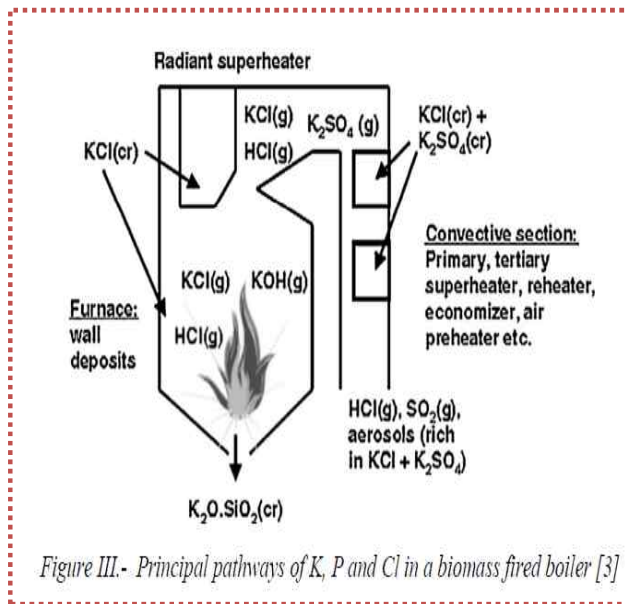
TMA*를 이용한 회용점 분석 결과

1. 연구배경

❖ 원인분석

- ① 우드펠릿 분쇄도 저하에 따른 연소성 저하
- ② 회성분에 알칼리 금속 및 토금속 등의 함량(Ca, K, P, Cl)이 높아 용융 온도가 낮음
- ③ 기존 무연탄 보일러를 Retrofit 하여 불가피하게 최적 보일러 설계가 이루어지지 않아 Fouling에 의한 영향이 심함

ex) RH tube 열흡수량 증대를 위해 tube 설치량이 많아져 pitch 감소(10cm) → bridge 쉽게 생성 → 유로 차단

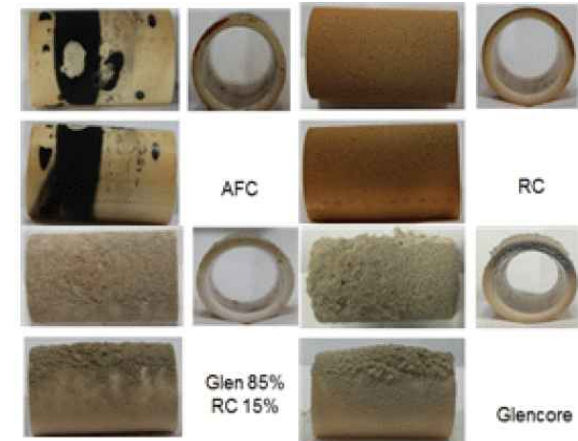


1. 연구배경(선행연구)

❖ DTF를 이용한 무회분 석탄과 잔탄의 연소 및 회 점착 특성에 관한 연구(2014, 문병호 등)

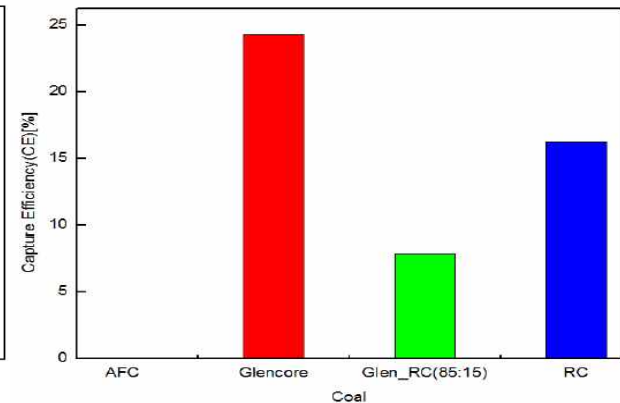
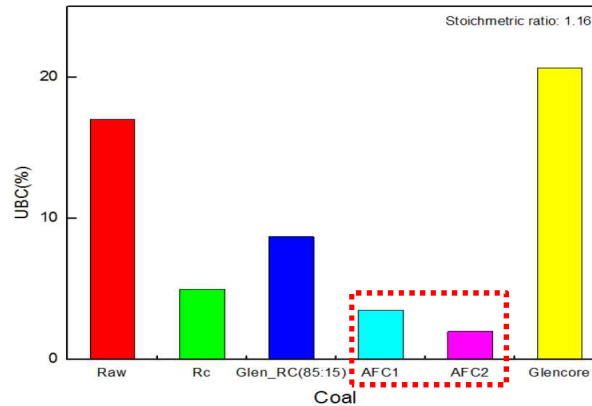
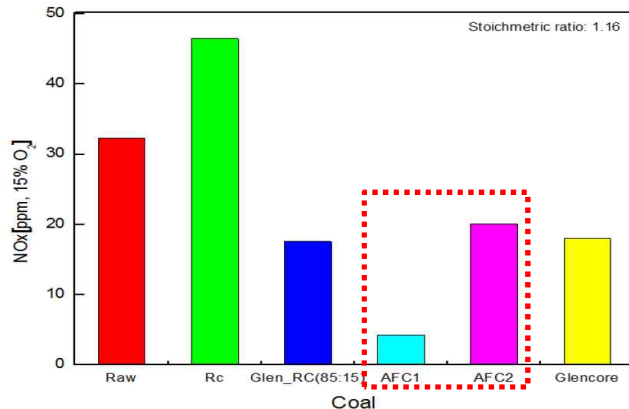
❖ 연구내용

- Lab-scale DTF(Drop Tube Furnace) 실험을 통하여
 - ① 연소특성(NO_x, UBC), ② 회 점착 특성 실험



❖ 연구결과

- 무회분탄은 원탄과 잔탄에 비해 현저히 낮은 NO_x 배출, 낮은 UBC
- 잔탄과 혼소의 경우 저열량탄보다 낮은 점착성



☞ 저등급 석탄 개선시 고등급 석탄으로 대체 가능성 확인

☞ 보일러 후단부 slagging/fouling 문제 해결 가능성

1. 연구배경(선행연구)

❖ 바이오매스 전처리 기술에 따른 혼소 특성에 관한 실험적 연구(2018, 김종호 등)

❖ 연구내용

- SUEK탄과 R.EFB, A.EFB, T.EFB 각각 10%, 20%, 30% (총 13case)
- **착(Char) 산화 반응성** (장비: DSC-TGA), **NOx 및 UBC 배출특성** (장비: DTF)

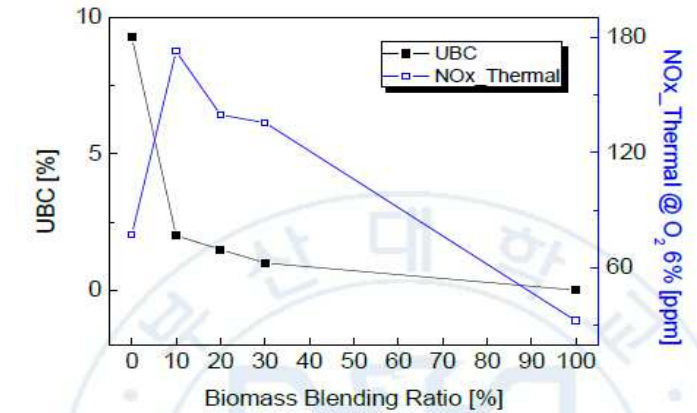
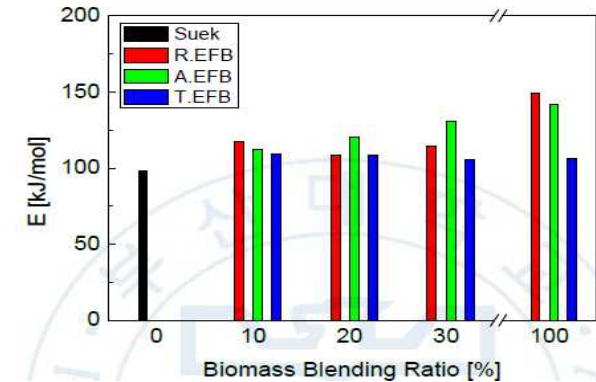
* EFB : Empty Fruit Bunch
 * R.EFB : Raw EFB
 * A.EFB : Ashless EFB
 * T.EFB : Torrefied EFB

❖ 연구결과

- EFB 단일시료의 반응성 : **T.EFB > R.EFB > A.EFB**
- 바이오매스 혼소율 증가에 따라 **반응성도 증가**
- NOx 및 UBC 배출 특성 : 혼소율 증가시 감소

❖ 시사점

- T.EFB는 시료의 구조 변화로 반응성이 증가하였으나,
- A.EFB는 촉매 역할을 하는 알칼리 성분이 제거되어 반응성이 감소하였음
- **바이오매스 연료 전처리시 반응성 및 NOx & UBC 배출특성 우수**



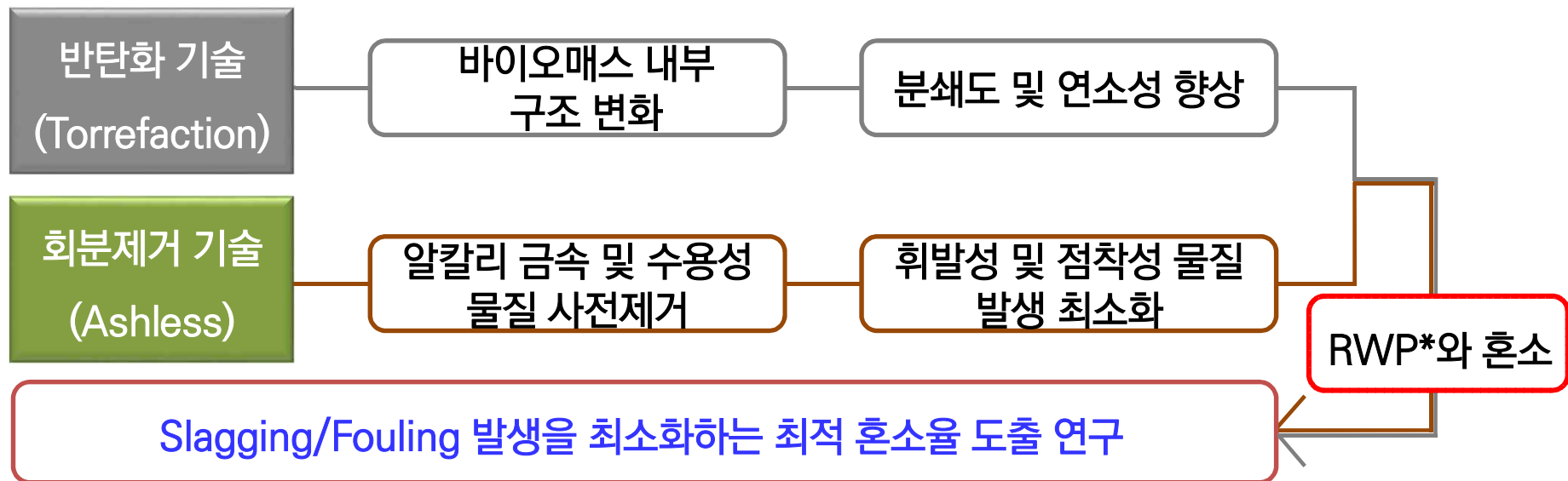
-
1. 연구배경
 - 2. 연구목적**
 3. 실험장치
 4. 실험결과
 5. 결론

2. 연구목적

❖ 국내 미이용 바이오매스 연료에 **고급화 기술(반탄화 및 회분제거 기술)**을 적용한 연료를 혼소했을 때 Slagging/Fouling 저감효과 및 **최적 혼소율 도출**

- ① 반탄화 기술 : 무산소 상태에서 200~300℃의 열을 가하여 바이오매스 내에 존재하는 수분 및 저열량의 휘발성분을 제거하여 단위 중량당 포함하고 있는 에너지를 증가시키는 기술
- ② 회분제거 기술 : 중온수와 산을 이용하여 바이오매스에 있는 회분 중 수용성 물질을 추출하여 연료를 고급화시키는 기술

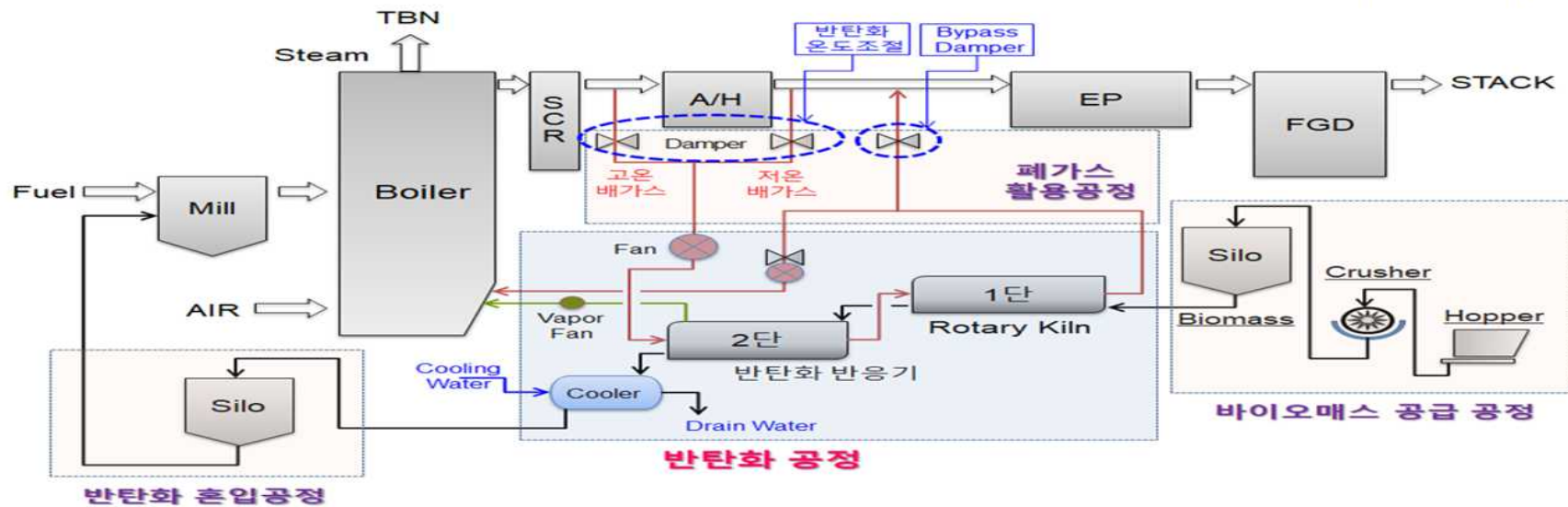
* RWP: Raw Wood Pellet



2. 연구목적

❖ 반탄화 기술 소개

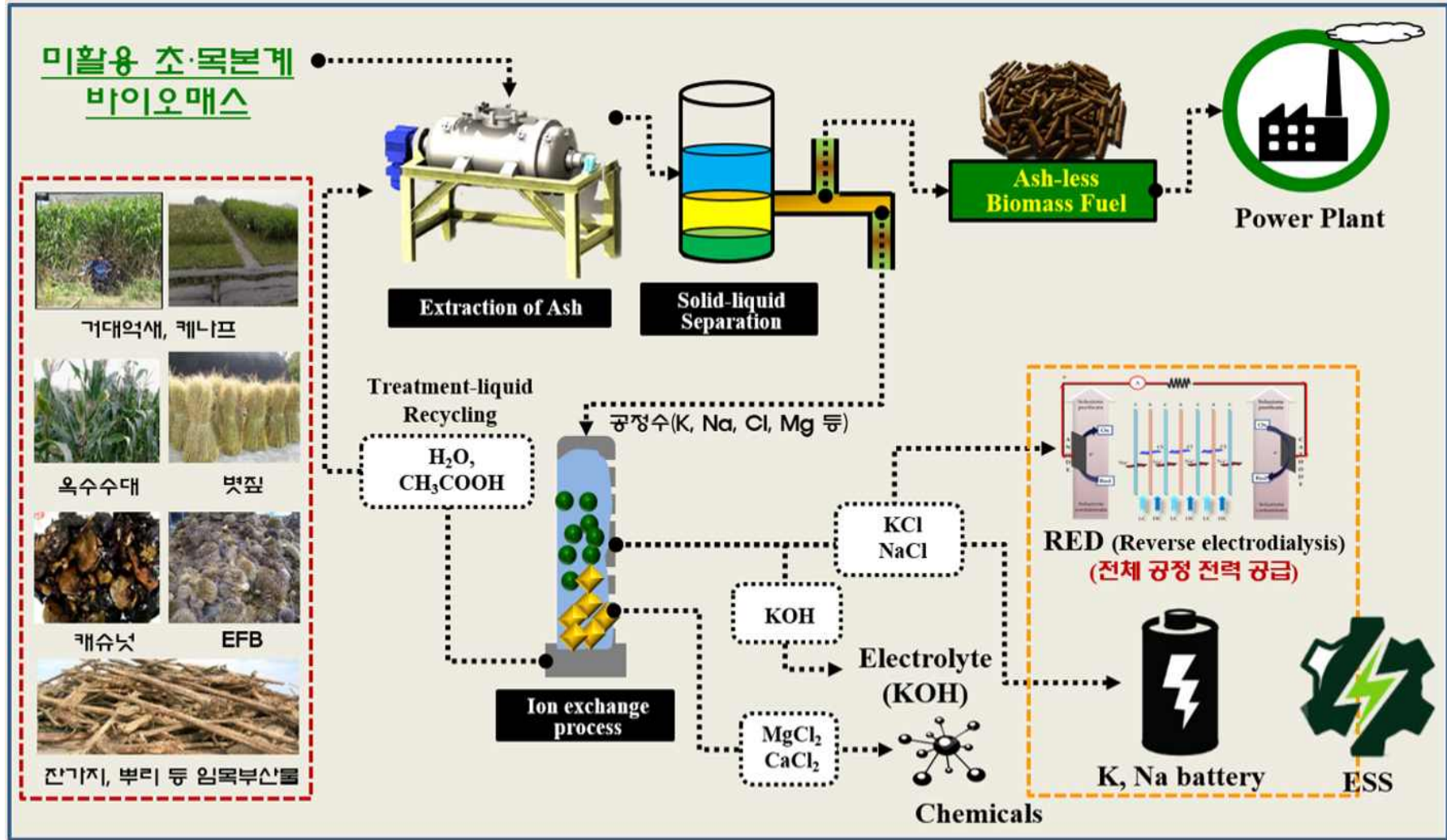
구분	국내·외		국외		영동화력	국외
	왕겨	벼짚	우드칩	우드펠릿	우드펠릿	반탄화 펠릿
함수량(wt %)	9~10	10~20	30~55	7~10	7.7	1~5
발열량(LHV)(kcal/kg)	3,095~3,570	3,809~4,286	1,6707~2,860	3,570~4,048	3,980	4,286~5,714
휘발분(wt %, db)	69~73	75~85	75~85	75~85	70	55~80
고정탄소(wt % db)	11~17	15~25	16~25	16~25	20	20~40
겉보기비중(kg/m ³)	100~120	50~120	200~300	550~650	600	650~800
에너지밀도(GJ/m ³)	1.3~1.8	0.8~2.2	1.4~3.6	8.0~11	10	12~19
회분함량(wt %, db)	13~19	0.1~0.7	3~5	3~5	3	4~5



〈 바이오매스 고품위화를 위한 고효율 반탄화 기술 실증 정부과제 시스템 개략도〉

2. 연구목적

❖ 회분 제거 기술 소개



* 출처 : 한국에너지기술연구원

2. 연구목적

- **시료준비**

영동에코발전본부에서 실제 사용되고 있는 **국내 미이용 바이오매스(R.W.P)**를 이용하여 **반탄화 시료(T.W.P)**, **저회분 시료(A.W.P)** 제조

- **혼소비율(중량비, %) : 총 9개 case**

- R.W.P : Raw Wood Pellet
- T.W.P : Torrefied Wood Pellet
- A.W.P : Ashless Wood Pellet

- | | | |
|---------------|-------------------------|-------------------------|
| ① R.W.P = 100 | ④ R.W.P : T.W.P = 90:10 | ⑦ R.W.P : A.W.P = 90:10 |
| ② T.W.P = 100 | ⑤ R.W.P : T.W.P = 80:20 | ⑧ R.W.P : A.W.P = 80:20 |
| ③ A.W.P = 100 | ⑥ R.W.P : T.W.P = 70:30 | ⑨ R.W.P : A.W.P = 70:30 |

- **분석항목**

- CE : Capture Efficiency(%)
- GRE : Energy Based Growth Rate(g_{dep}/MJ)

물성분석

- ① 발열량
- ② 공업분석 (IM, FC, VM, Ash)
- ③ 원소분석 (C, H, O, N, S)

회분석 및 융점예측

- ① 회성분
- ② 삼상도를 이용하여 회융점 예측 ($SiO_2-CaO-Al_2O_3$)
- ③ 시료 구조 SEM분석

회점착 특성

- ① DTF 회점착 시험
→ CE, GRE 값으로 평가
- ② Fouling Factor 적용 (B/A ratio, Si_R, TA, Fu)

-
1. 연구배경
 2. 연구목적
 3. 선행연구
 - 4. 실험장치**
 5. 실험결과
 6. 결론

4. 실험장치

❖ 실험장치(물성분석, 시료 제조)

공업분석



Model : LECO TGA 701

원소분석



Model : LECO CHN 628

발열량



Model : Parr 6100

시료 구조 분석 (SEM)



Model : Zeiss Supra 25

반탄화 시료 제조



- 〈제조 조건〉
- 250 °C
 - 질소 분위기
 - 승온속도 5°C/min
 - LECO TGA 701

회분 제거 시료 제조



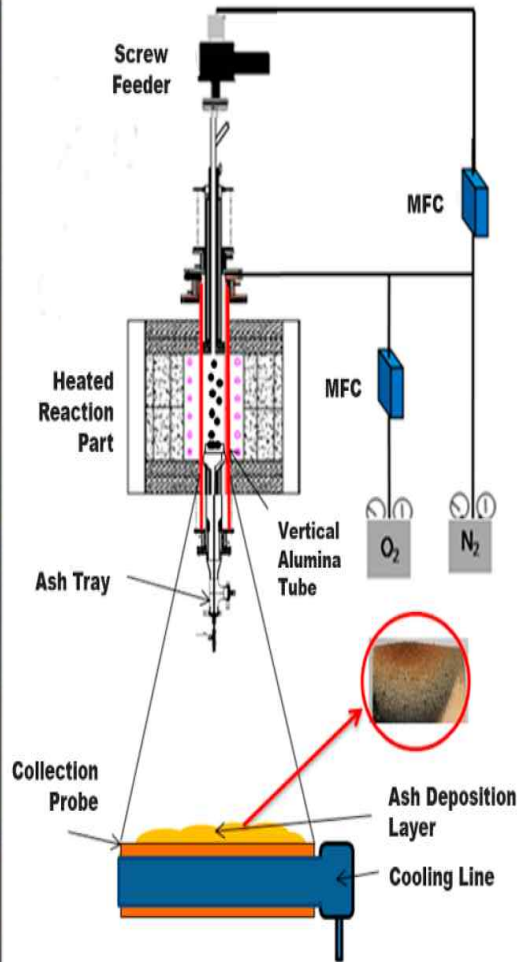
- 〈제조 조건〉
- Lab-scale
 - 90 °C, 10분
 - Citric acid 1wt% (물의 1wt%)
 - 원료:물 = 1:6 비율
 - 승온속도 5°C/min
 - Batch type

- 〈장치 Spec 및 실험 조건〉
1. 반응기 형태 : Batch type 반응기
 2. 반응기 용량 : 20L
 3. 고체시료 처리량 : 1kg/batch (0.1 ton/day)
 4. 반응 온도 : 100 °C 이하

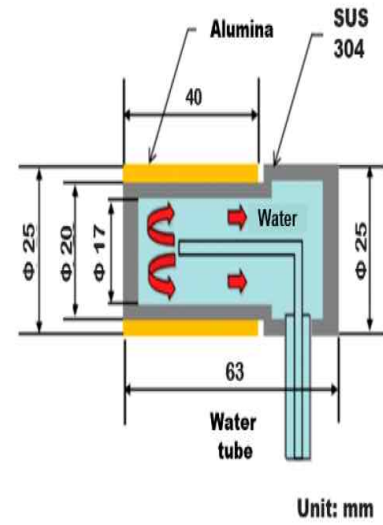
※ 시료제조 협조 : 한국에너지기술연구원

4. 실험장치

❖ 실험장치(DTF_Drop Tube Furnace)



- 〈 실험 조건 〉
- 반응기 Temp. : 1,100 °C
 - Screw Feeder 사용
 - 시료량 : 10 g
 - 주입율 : 0.2 g/min
 - 입자크기 : 150 μ m 이하
 - 이송용 : N₂, 연소용 : O₂
 - **Ash Deposition 특성 분석**
 - Deposit probe 장착



-
1. 연구배경
 2. 연구목적
 3. 선행연구
 4. 실험장치
 - 5. 실험결과**
 6. 결론

5. 실험결과

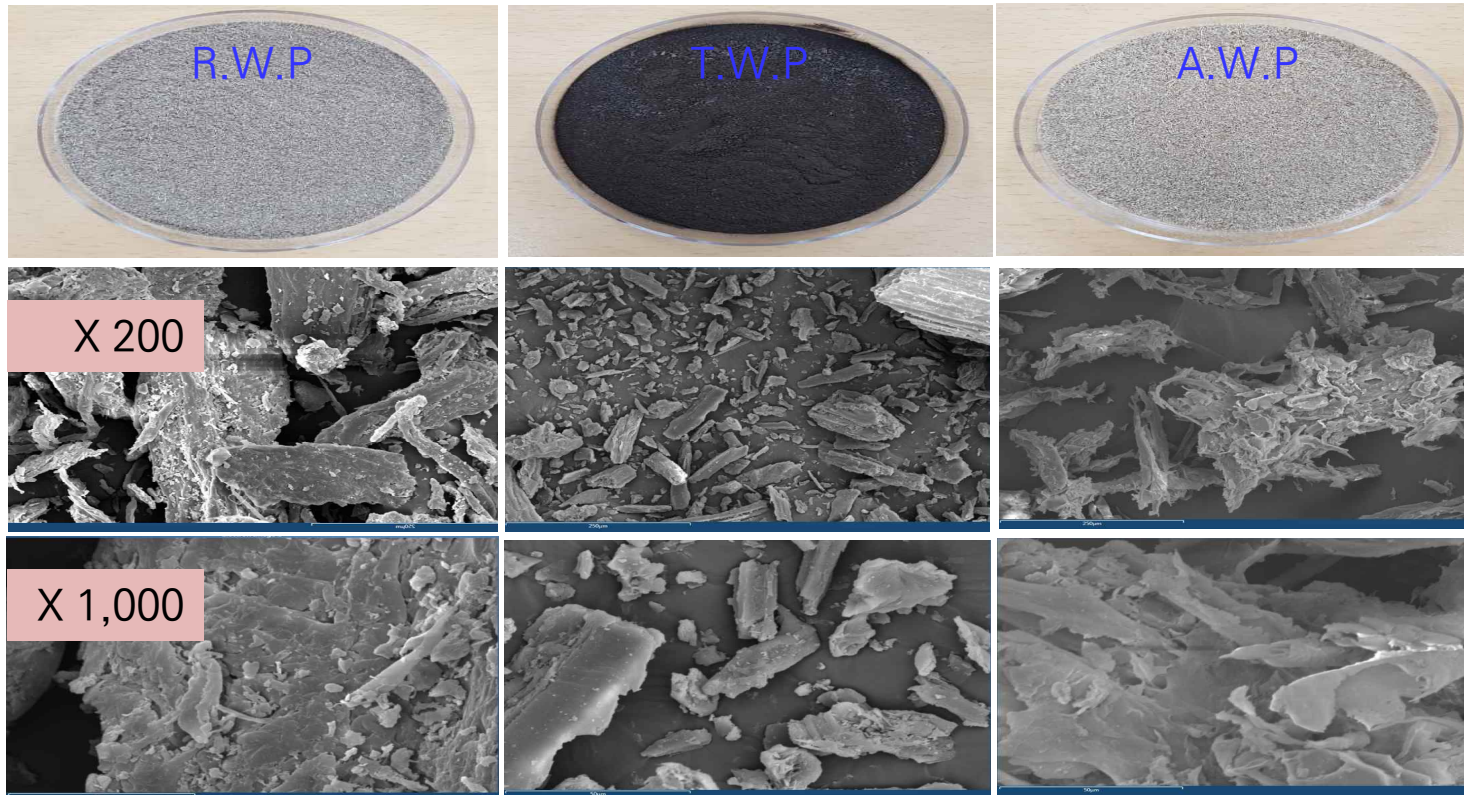
❖ 물성분석 결과

Sample		R.W.P	T.W.P	A.W.P
공업분석 (ADB)	수분	8.66	1.15	0.67
	휘발분	72.69	62.23	80.33
	고정탄소	16.78	33.98	17.90
	회분	1.87	2.64	1.10
원소분석 (DAF)	탄소	49.56	63.36	52.09
	수소	6.17	5.34	6.12
	산소	41.03	27.07	39.03
	질소	1.32	1.51	1.58
	황	0.05	0.08	0.08
저위발열량(kcal/kg) (DB)		3,930	5,430	4,170

- ADB : Air Dried Basis
- DAF : Dry and Ash Free
- DB : Dried Basis

5. 실험결과

❖ 시료 표면 분석 결과(SEM)



- 입자크기 : R.W.P > A.W.P > T.W.P
- (특징) R.W.P 와 A.W.P 는 섬유질 형태
T.W.P 는 석탄과 유사한 구조 ⇨ 분쇄성 高

5. 실험결과

❖ 회성분 분석 결과

※ 혼소시료는 원시료 회성분을 활용하여 혼소비율별 가중평균한 계산값 적용

Contents Fuel type	Constituent in biomass (%)									
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃
R.W.P	-	7.16	11.92	24.47	3.06	11.10	33.10	0.73	1.37	7.09
T.W.P	-	9.69	9.82	21.94	3.21	10.24	37.09	0.61	1.40	6.01
A.W.P	-	2.32	18.01	48.22	2.47	3.96	19.74	0.97	0.09	4.23
T.W.P 10%	-	7.41	11.71	24.21	3.08	11.02	33.50	0.72	1.37	6.98
T.W.P 20%	-	7.66	11.50	23.96	3.09	10.93	33.90	0.70	1.37	6.87
T.W.P 30%	-	7.92	11.29	23.71	3.11	10.84	34.30	0.69	1.38	6.77
A.W.P 10%	-	6.67	12.53	26.84	3.00	10.39	31.77	0.75	1.24	6.81
A.W.P 20%	-	6.19	13.14	29.22	2.94	9.67	30.43	0.78	1.11	6.52
A.W.P 30%	-	5.71	13.75	31.59	2.88	8.96	29.09	0.80	0.98	6.23

- (원 시 료) R.W.P 와 T.W.P는 CaO 성분이, A.W.P는 SiO₂가 가장 높은 함량을 보임
- (혼소시료) T.W.P 는 모든 혼소율에서 CaO 성분이 가장 높은 함량을 보임

A.W.P 혼소할 경우에는 30%에서 SiO₂가 높아 Slagging 저감 예상 가능

5. 실험결과

❖ 기초분석 결과(회성분)

● Traditional ash deposition indices and associated criteria

B/A ratio : Base/Acid ratio
 Si_R : Si Rate
 TA : Total Acid
 Fu : Fouling Factor

Indices	Formula	Criteria			
		LOW	Medium	High	Severe
B/A ratio	$(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O)/(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)$	<0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	>1.0
Si_R	$(SiO_2 \times 100)/(SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO)$	>50	30-50	5.0-30	<5.0
TA	$Na_2O + K_2O$	<2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	>4.0
Fu	$0.01 \times A_p^a \times B/A \text{ ratio} \times (Na_2O + 0.659 \times K_2O)$	<0.3	0.3-0.45	0.45-0.60	>0.6

구분	B/A ratio	Si_R	TA	Fu
R.W.P	1.57	34	11.10	0.22
T.W.P	1.95	29	10.24	0.35
A.W.P	0.45	65	3.96	0.01
T.W.P 10%	1.61	34	11.02	0.23
T.W.P 20%	1.64	33	10.93	0.24
T.W.P 30%	1.68	33	10.84	0.25
A.W.P 10%	1.39	37	10.39	0.17
A.W.P 20%	1.22	40	9.67	0.13
A.W.P 30%	1.08	44	8.96	0.10

- A.W.P 가 대체적으로 양호한 값을 나타내고 있음. 이는, 전처리를 통한 알칼리 물질(K₂O, CaO)을 제거한 것에 기인함. 또한, 상대적으로 SiO₂가 증가한 영향으로 B/A ratio, Si_R 값이 좋음
- 그러나, 현장 상황과 비교했을 때 Fu값의 criteria는 실제와 다소 차이가 있는 것으로 사료됨

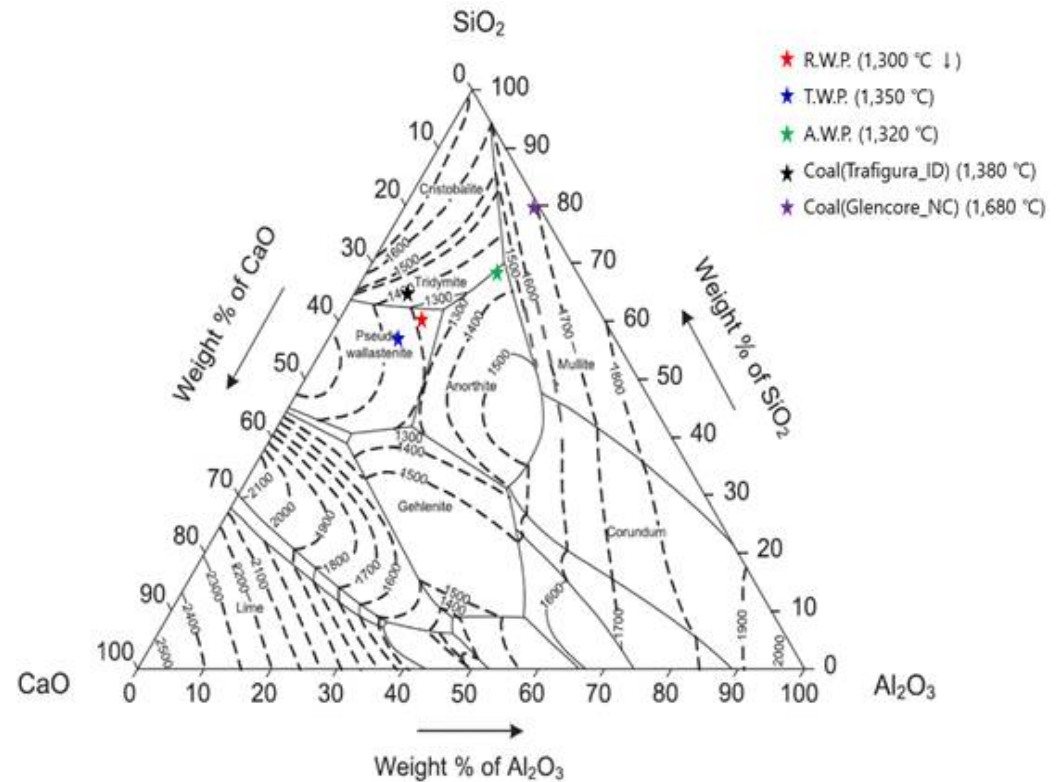
5. 실험결과

❖ 삼상도(Ternary phase diagram)를 활용한 회용점 예측

- 회성분 중 최대 함량 3성분 : SiO_2 , CaO , Al_2O_3
- 검증을 위해 아역청탄 1종, 역청탄 1종의 회성분 적용 ➡ AFT 결과와 유사
- 예측 결과

* AFT : Ash fusion Test

- R.W.P : 1,300°C
- T.W.P : 1,350°C
- A.W.P : 1,320°C
- Trafigura_ID : 1,380 °C
- Glencore_NC : 1,680°C

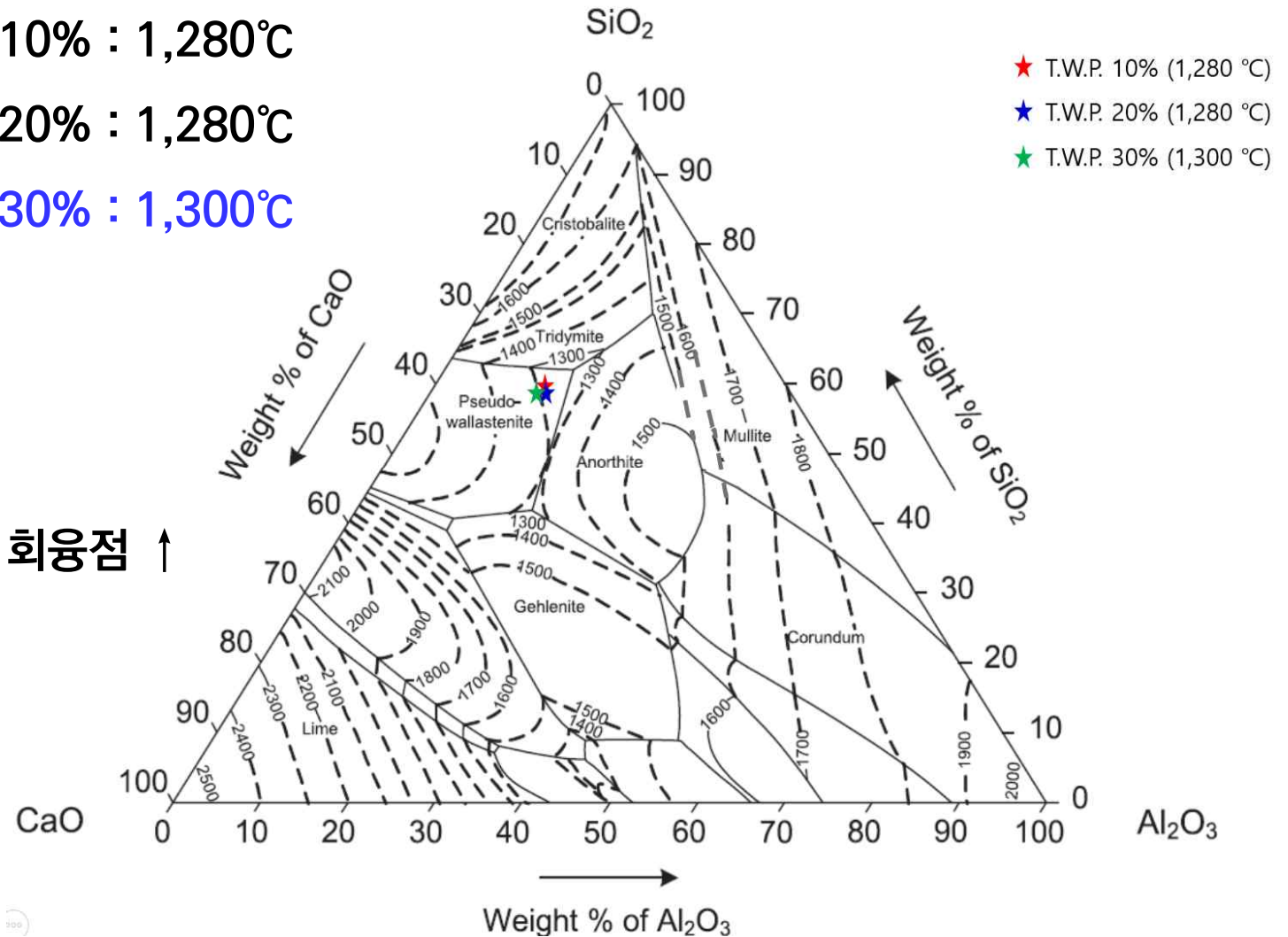


[50] Wu X, Zhou T, Chen Y, Zhang Z, Piao G, Kobayashi N, et al. Mineral melting behavior of Chinese blended coal ash under gasification condition. Asia-Pac J Chem Eng 2011;6:220–30.

5. 실험결과

- T.W.P 혼소 시료
 - T.W.P 10% : 1,280°C
 - T.W.P 20% : 1,280°C
 - T.W.P 30% : 1,300°C

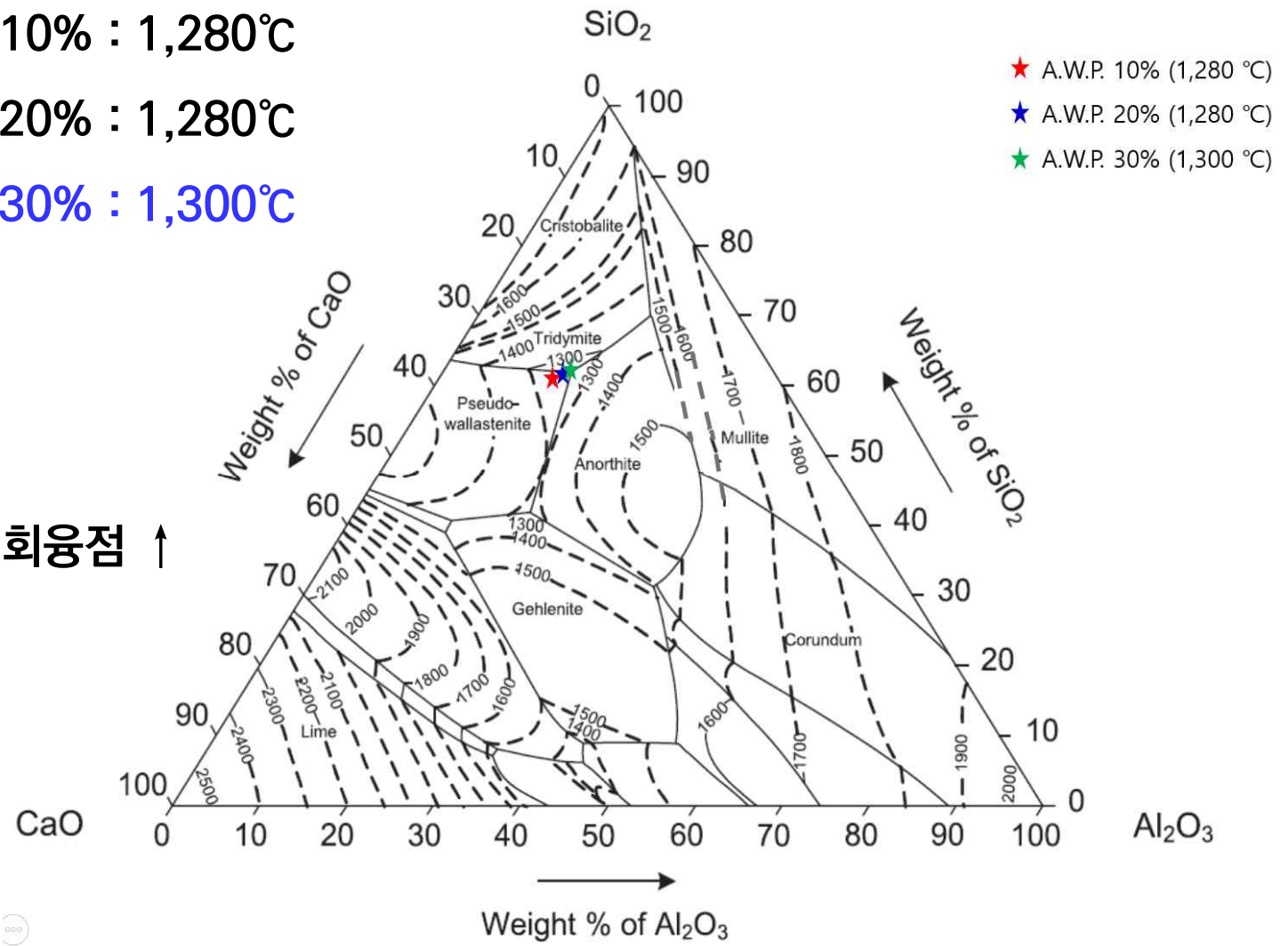
● 혼소율 ↑ → 회용점 ↑



5. 실험결과

- A.W.P 혼소 시료
 - A.W.P 10% : 1,280°C
 - A.W.P 20% : 1,280°C
 - A.W.P 30% : 1,300°C

● 혼소율 ↑ → 회용점 ↑



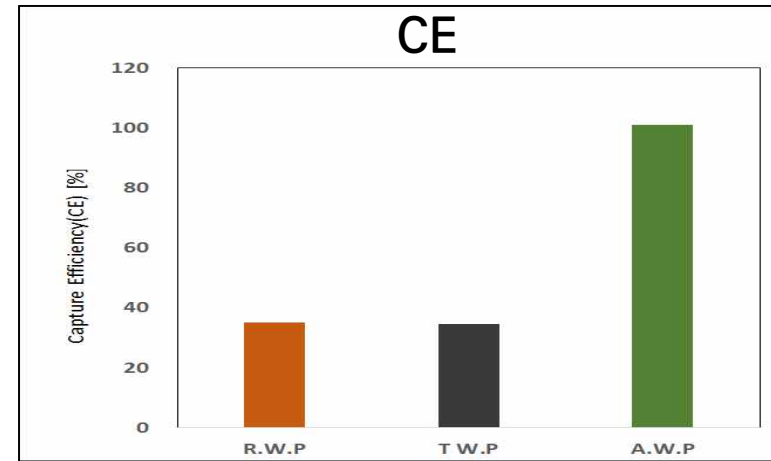
5. 실험결과

❖ 회 부착 시험(DTF Deposition) 결과

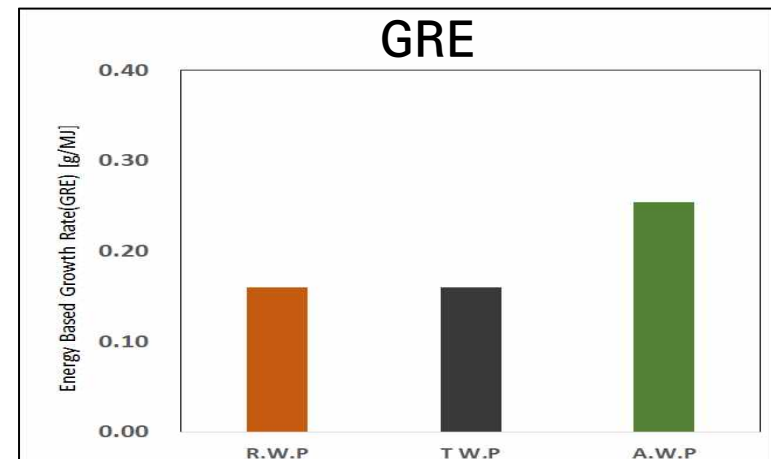
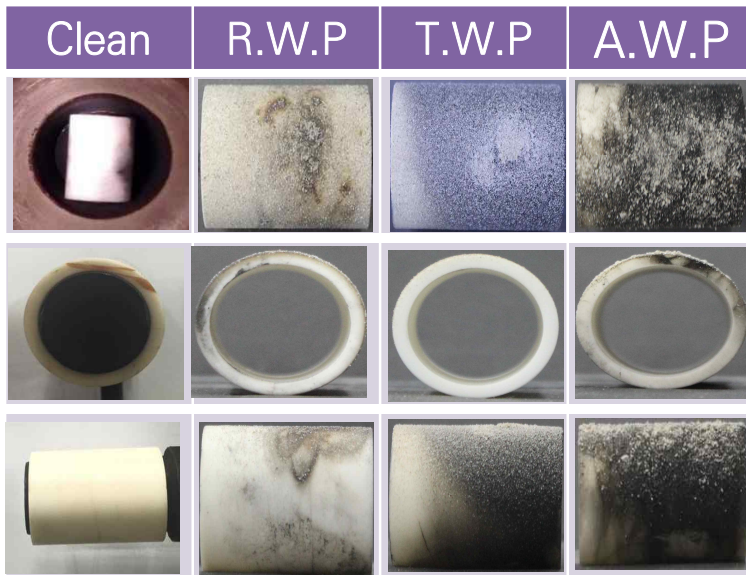
● 시료 3종 100%(미혼소)

① CE & GRE

Sample	R.W.P	T.W.P	A.W.P
CE	35.2	34.6	101.1
GRE	0.16	0.16	0.22



② Deposit probe 사진

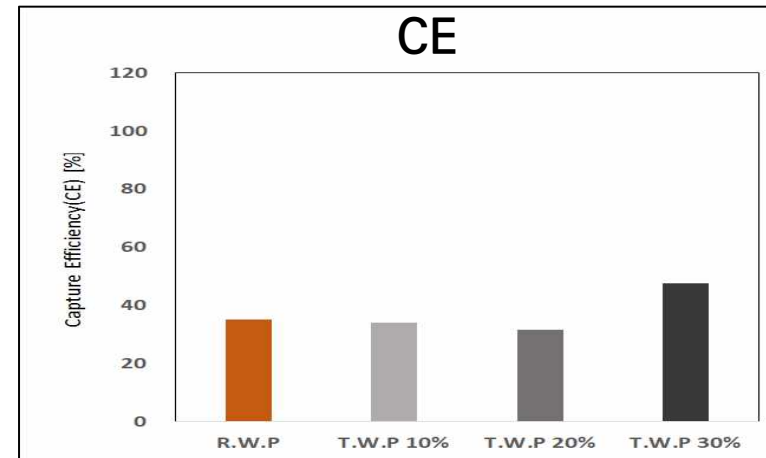


5. 실험결과

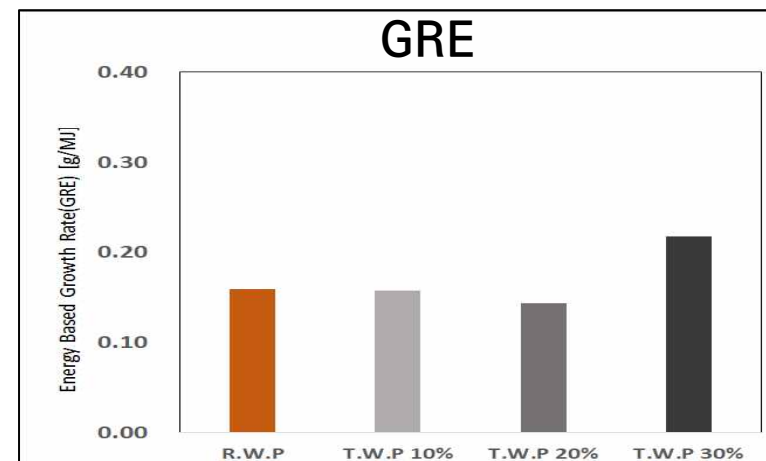
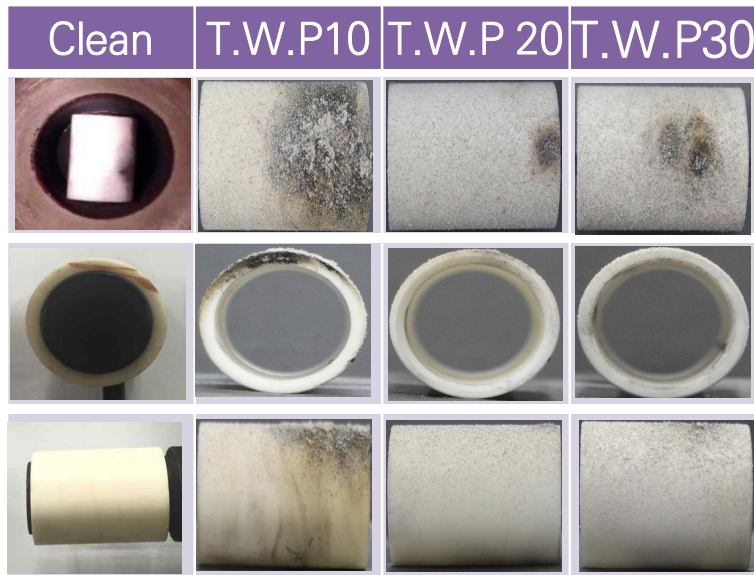
● T.W.P 10%, 20%, 30% 혼소

① CE & GRE

Sample	T.W.P10	T.W.P20	T.W.P30
CE	34.0	31.5	47.6
GRE	0.16	0.14	0.22



② Deposit probe 사진

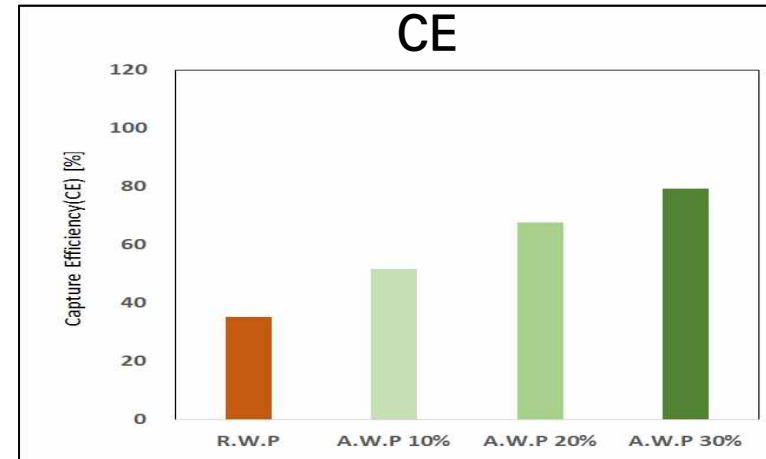


5. 실험결과

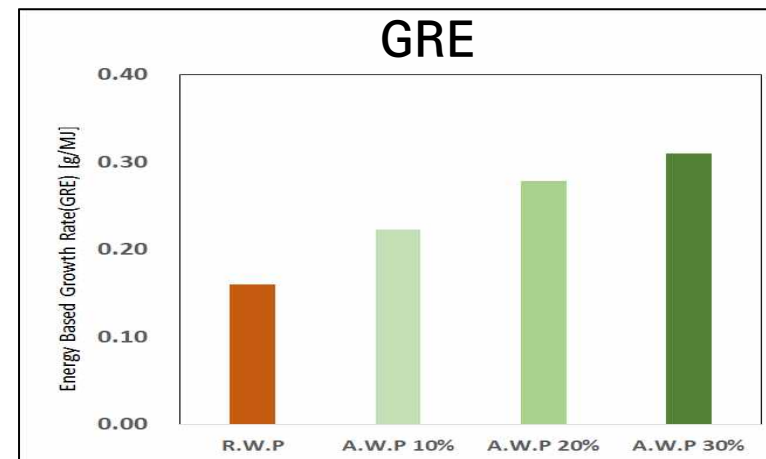
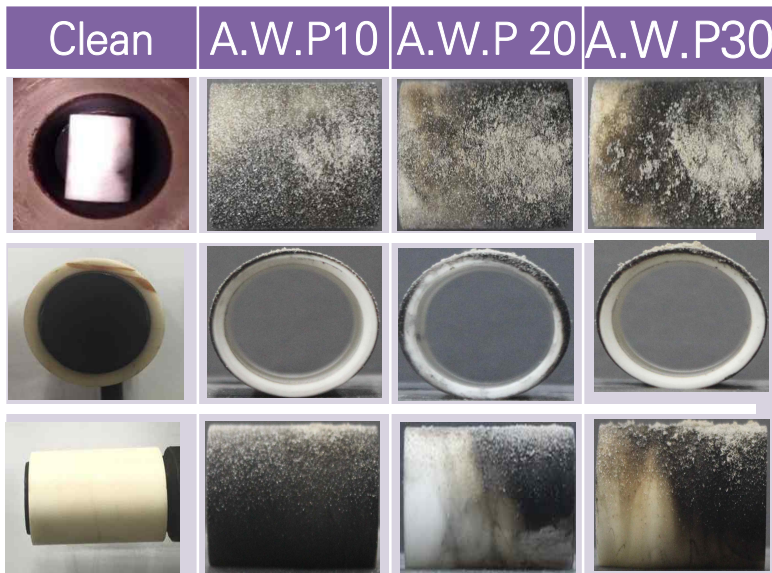
- A.W.P 10%, 20%, 30% 혼소

① CE & GRE

Sample	A.W.P10	A.W.P20	A.W.P30
CE	51.6	67.7	79.3
GRE	0.22	0.28	0.31



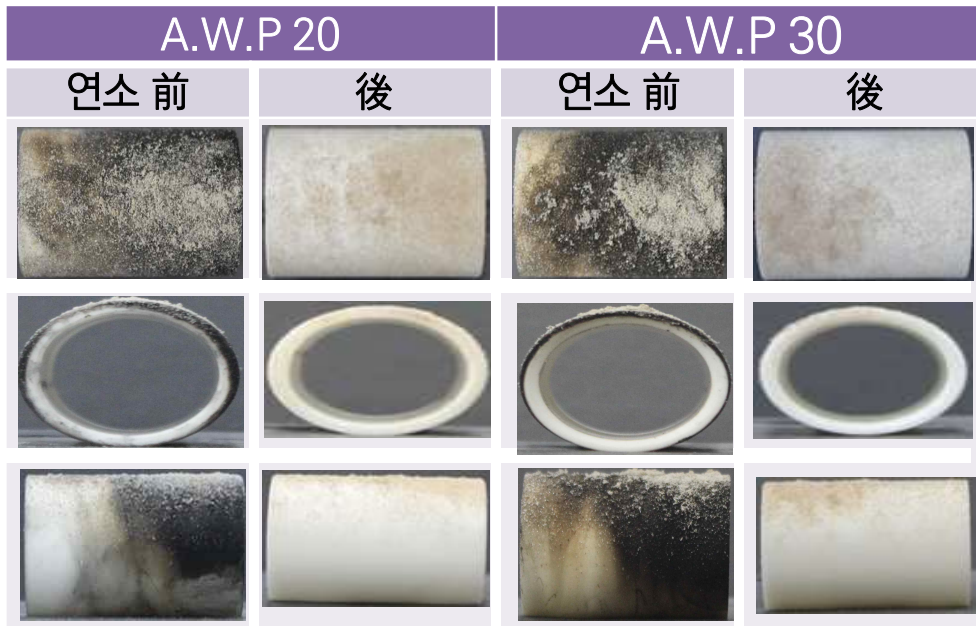
② Deposit probe 사진



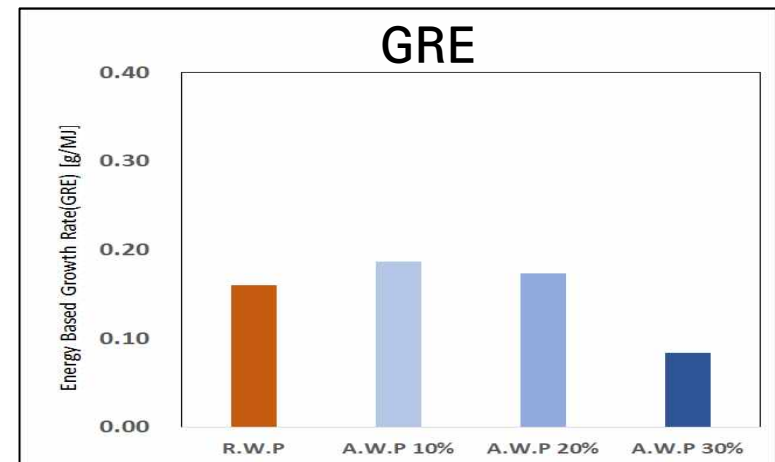
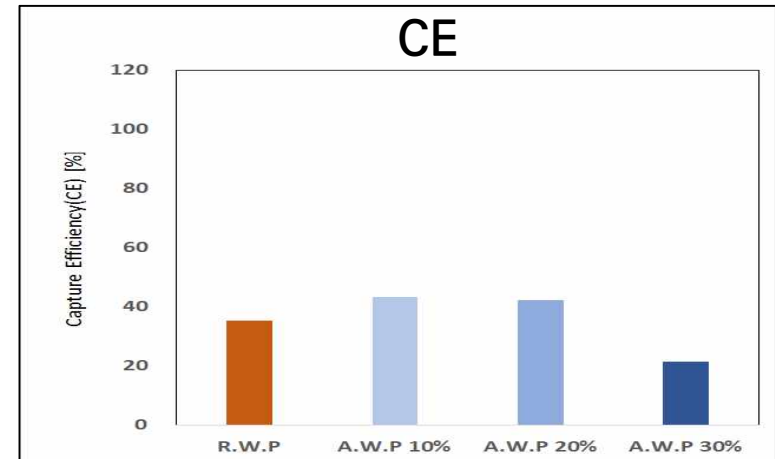
5. 실험결과

❖ Deposit probe 재연소_전기로(950℃, 1hr)

Sample	A.W.P	A.W.P10	A.W.P20	A.W.P30
CE	27.3	43.2	42.2	21.4
GRE	0.07	0.19	0.17	0.08



- A.W.P probe에 가연성분 다량 포함 확인
- R.W.P 및 T.W.P는 큰 변화 없음.



-
1. 연구배경
 2. 연구목적
 3. 선행연구
 4. 실험장치
 5. 실험결과
 - 6. 결론**

6. 결론

❖ (DTF 장치) 단일시료의 회 부착특성은 R.W.P 가 우수하나 T.W.P와 유사

☞ CE 값 기준 : T.W.P > R.W.P > A.W.P. GRE 값 기준 : R.W.P > T.W.P > A.W.P

☞ A.W.P 시료는 알칼리 성분의 제거로 인해 반응성이 감소하여, DTF 반응기 내에서 가열된 후 액화되면서 급속히 낙하하기 때문에 반응하지 못한 가연분이 Deposit probe에 부착되기 때문

❖ (Deposit probe 재연소) 단일시료의 회 부착특성은 **A.W.P 가 가장 우수**

☞ CE 값 기준 : A.W.P > T.W.P > R.W.P, GRE 값 기준 : A.W.P > R.W.P > T.W.P

❖ T.W.P 혼소시료의 회부착 특성은 20% 혼소율일때 가장 좋은 결과를 보였으며, 30% 혼소시 T.W.P 단일시료보다 좋지 않은 결과

❖ A.W.P 혼소시료의 회부착 특성은 30% 혼소율일 때 9개 case 중 가장 좋은 결과

❖ 전처리 기술을 적용한 시료 혼소시 Raw wood pellet 단독 연소보다 **특정 혼소비율에서 좋은 결과를 보였음. T.W.P의 경우 최대 20% 까지, A.W.P는 최소 20% 이상을 혼소하는 것이 회부착 특성면에서 좋은 것으로 분석됨**

Thank you