

연소 후 탄소 포집: 열역학 모델링



POST COMBUSTION CARBON CAPTURE Thermodynamic Modelling

101010-00686 – PM-REP-0001

19 February 2013



Image: 62V11 Digital Drive, 2nd Cir, View from 62V11 2nd Cir, 11/19/12, 2nd Cir Plr Lot



본 보고서는 편의를 위해 영어에서 한국어로 번역되었다. 글로벌CCS연구소는 한국어로 번역된 보고서의 정확도, 진위성능 완성도를 보장하지 않는다.

면책조항

본 보고서는 글로벌 CCS 협회를 대신하여 작성되었으며, 협회가 배타적인 사용권을 가진다. WorleyParsons는 제3자의 본 보고서 사용 혹은 인용에 대한 어떤 법적 책임이나 권리도 인정하지 않는다.

글로벌 CCS 협회나 WorleyParsons의 허가 없이 본 보고서를 무단 복제하는 행위는 허용되지 않는다.

PROJECT 101010-00686 - POST COMBUSTION CARBON CAPTURE							
REV	DESCRIPTION	ORIG	REVIEW	WORLEY-PARSONS APPROVAL	DATE	CLIENT APPROVAL	DATE
0	Issue for Use	YB Chan	L Gebert	M Robinson	19 Feb 2013	D Van Puyvelde	19 Feb 2013

요약

동 분야 최초로 시행되는 탄소 포집 프로젝트로 인해 프로젝트 개발자와 포집 기술 공급업체 뿐만 아니라 프로젝트 재무 담당자나 규제 담당자들도 독특한 도전에 직면하고 있다.

프로젝트 개발자들과 재무 담당자들은 자본 및 운영 비용의 정확한 추산을 요구하고 있으며, 규제 담당자들은 프로젝트 허가에 앞서 프로세스와 필요한 자원 수준, 그리고 배출 감축량에 대해 심층적으로 파악해야 한다.

발전소 다수에 신규 장착한 배기 가스 탈황(Flue Gas Desulphurization, FGD)과 같이 “시판 중인” 기술이라면, 재무 모델이나 성능 보장의 지표로 활용될 수 있는 성능 관련 자료가 충분히 누적되어 있다. 그러나 CCS와 같이 동 분야 최초 기술일 경우 프로젝트 개발자들, 재무 담당자들과 관리자들도 기술 공급업체들의 지적재산권 보호 차원에서 기술 평가에 활용할 수 있는 공개 자료의 부족에 직면하게 되는 것이다.

본 보고서는 연소 후 포집(Post Combustion Capture, PCC) 기술 개조가 발전소 성능에 미치는 영향과 그 투입값에 관한 독자적인 검증법을 제공한다. 이는 미개발 구역에서 이미 적용되는 방식이며, 시설 운영 시 성능 리스크 평가와 잠재적 수익 파악의 근거를 파악한다.

보고서에서는 방법론 전개 및 설명을 위해 Loy Yang A 발전소에 5000 tpd PCC를 장착한 사례를 연구하고 거기에서 도출되는 결론을 제시할 것이다.

본 보고서에서 제시하는 방법론 및 결론은 CCS 포집 기술 전문가가 심도있게 검증한 것으로, 성능 자료를 제시하고 기술 공급업체의 지적재산권을 보호하는 동시에 프로젝트 평가 시 CCS 업계에 충분한 신뢰감을 주는 타당한 접근 방식이라는 평을 받았다.

이를 달성하기 위해, 검증을 시행했던 회사(독립 엔지니어링 업체)는 기술 공급업체와 CCS 프로젝트 참여 업체들의 충분한 지원을 받았다.¹

WorleyParsons는 프로젝트의 전체 시행을 맡은 공학업체로, 발전소 모델링 작업, PCC 플랜트 통합과, 석탄 건조, 습식과 건식 배연 가스 냉각(flue gas cooling)의 추가에 따른 프로세스 개선 사례의 평가를 담당했다. 또한 WorleyParsons는 주 발전소(host unit), PCC와 석탄 건조 플랜트를 포함한 전체 시스템의 운영 성능 자료를 책임졌다.

¹ 이 연구는 WorleyParsons가 프로젝트 참여 업체들, 탄소 포집 기술 공급업체 미쓰비시 중공업(Mitsubishi Heavy Industries, MHI)과 공동으로 수행하였다. MHI가 PCC 공정 자료를 WorleyParsons에 제공하였지만, 기밀 프로세스 자료는 공개 보고서에서 포함되지 않았다. 본 공개 보고서에 사용된 모든 기밀 자료는 발전소 최적화의 상대적 효과를 증명하기 위해 표준화되었다.

기술 공급업체 미쓰비시 중공업(Mitsubishi Heavy Industry, MHI)은 PCC 플랜트 장착 시의 입출력량과 발전소 전체 효율을 높이기 위한 석탄 건조 기능의 추가로 포집 발전소의 운영 환경에서 변경된 사항 등의 자료를 아낌없이 제공했다.

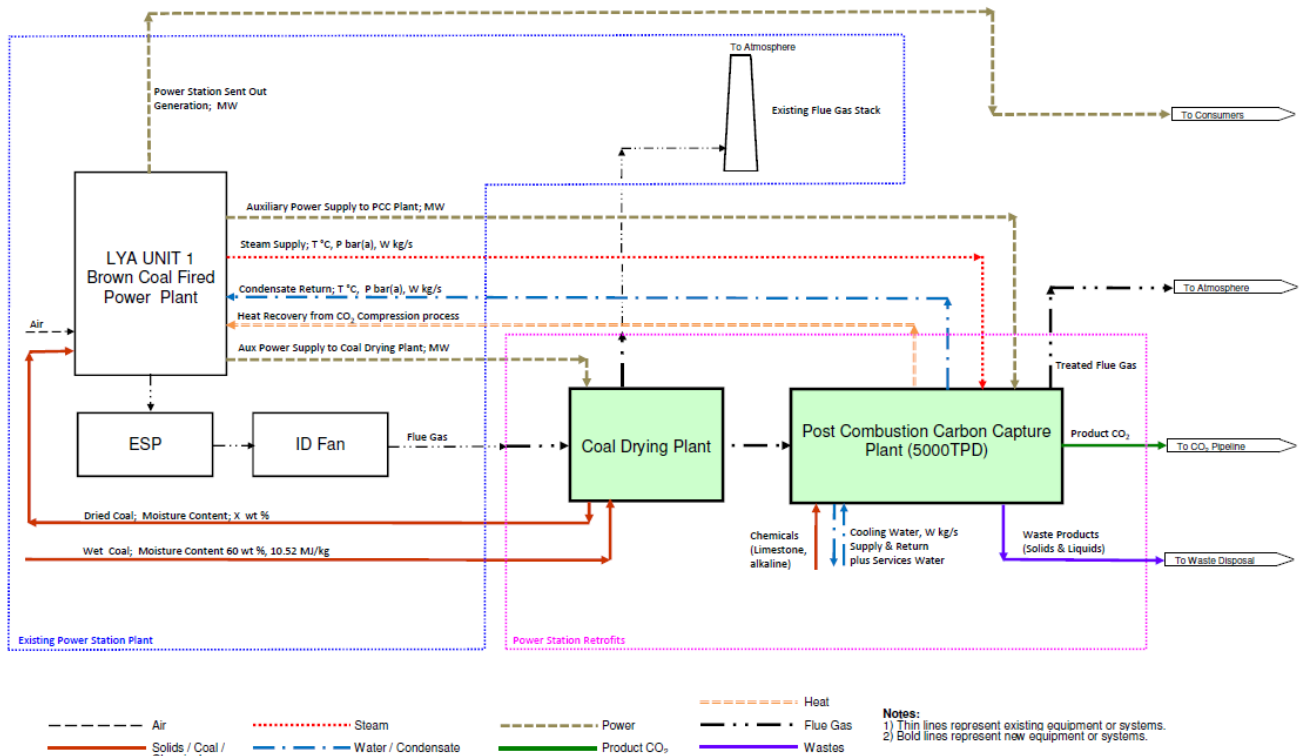
발전소 소유주인 Loy Yang Power는 주 발전소의 모델링에 필요한 운영 자료 일체를 제공하였다.

이와 같은 범주로 기술 공급업체의 지적재산권은 보호하는 한편, 전체 성능에 대한 독립적 평가가 가능했다. 채택된 방법은 기술 공급업체의 "블랙 박스"를 최소화하였고 특정 포집 기술 관련 쟁점 사항과 발전소 전체 성능 및 발전소 통합 쟁점을 최대한 분리해낼 수 있었다. 발전소 측면에서, 각 부분과 전체 프로세스는 프로젝트의 성능 리스크를 줄이면서도 이론적으로 도달가능한 수준 이상에 도달할 수 있었다.

프로젝트 범위

본 연구는 기존 미임계 PC(갈탄) 화력 발전소에 CO₂ 일부를 포집하는 석탄 건조 플랜트와 상업 규모(5000tpd)의 PCC 플랜트를 장착하는 내용에 초점을 두었다. 아래의 블록 구성도는 석탄 건조 플랜트 및 PCC 플랜트를 장비한 발전소를 구조화한 것이다. 도표에서는 발전소와 석탄 건조 및 PCC 플랜트 간 통합이 요구되는 중요 프로세스(입출력)도 표현하였다.

석탄 건조 및 PCC 플랜트를 장착한 발전소 블록 흐름도

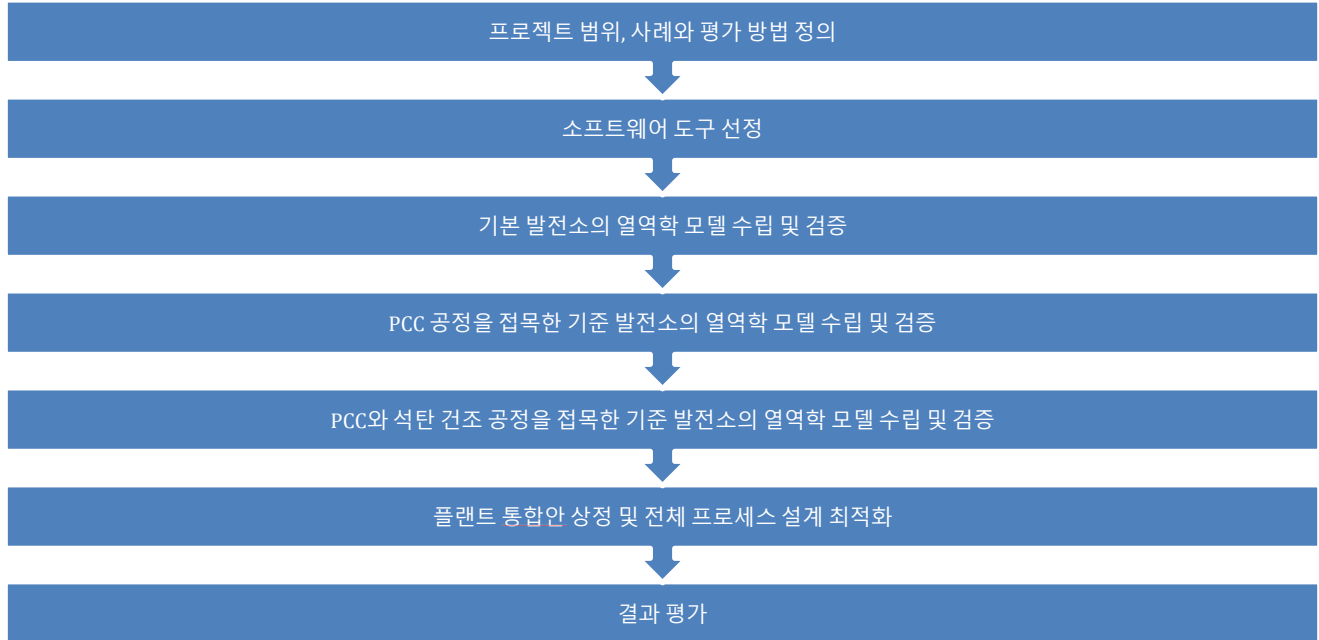


출처: WorleyParsons

방법론

연구에서 사용된 방법론의 전개도는 아래 그림과 같다.

연구 방법 개요



출처: WorleyParsons

여러 기술 솔루션의 방법론을 실검증하기 위해 5가지 사례가 선정되었다. 아래 표에 정리된 사례는 본 사례 연구를 위해 선별된 것으로, 각 기술 옵션이 성능에 미치는 영향을 파악하고 그 정도를 비교하는 데 목적이 있다. 실제로, 해당 사례들은 질문에 따라 다른 결과값을 내놨는데, 특정 발전소에 가장 적합한 PCC 기술을 선정해야 하는 경우 사례별로 이를 다르게 해석했다. 본 연구의 선별 사례들은 선정된 PCC 기술, 석탄 건조 공정과, 습건식 배연 가스 냉각을 적용한 개조 발전소의 최대 성능을 평가하는 데 역점을 뒀다.

사례 연구 매트릭스

	기존 플랜트	PCC 플랜트	석탄 건조	플랜트 최적화	공랭식 운영
기준 사례	X				
사례 1	X	X			
사례 2	X	X	X		
사례 3	X	X	X	X	
사례 4	X	X		X	
사례 5	X	X	X	X	X

출처: WorleyParsons

현재 상용 가능한 프로세스 플랜트 모델링상용 소프트웨어의 주요 단점은 랭킨 사이클(Rankine power cycle), PCC 플랜트와 석탄 건조 플랜트 등의 다중 기술을 하나의 유기적 모델로 엮어낼 수 있는 툴이 존재하지 않는다는 것이다. 이에 따라, 공학 업체가 모델링에 쓸 수 있는 소프트웨어 패키지와 툴 등을 파악하여 프로젝트 목표를 달성할 수 있을지 여부가 가장 중요한 점으로 꼽힌다. 여기에는 모델링 결과물의 통합을 위해 위의 소프트웨어 패키지 등을 한데 묶을 수 있는 역량도 포함된다.

기준 사례 검증법은 아래 표와 같다. 전부하(全負荷) 사례와 저부하 사례를 모두 검증하여 기준 발전소 모델의 정확성을 기하는데, 해당 모델의 높은 정확성을 추구하기 위해 대상 발전소의 실제 운영 자료와 두 가지 사례를 비교-검증하였다.

기준 사례 검증법 흐름도

기준 사례 접근법

프로세스 모델링

1단계:

소유주 플랜트 관련 최근 자료를 수집하고 기준 사례를 모델링할 대상 플랜트 유닛과 운영 환경을 논의 및 확정함.

2단계:

기준 사례로 선정된 플랜트 유닛의 모델링

(예) 플랜트 기초 환경; 568MW에 밸브 완전개방 시 37kg/s SH Spray와 12kg/s RH spray)

3단계:

저부하(低負荷) 시 기준 사례 모델 검증 (예) 426MW에 27.75kg/s SH와 9kg/s RH spray

4단계:

향후 사례 모델링의 기준 사례로 활용할 수 있도록 플랜트 소유주와 결과를 검토, 확정함.

출처: WorleyParsons

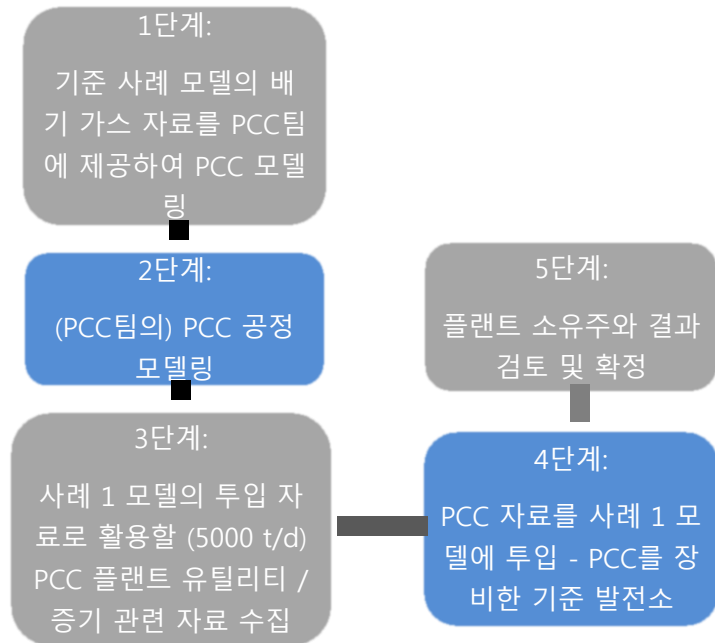
기술 공급업체가 “블랙 박스”의 프로세스 입출력값을 정의할 수 있도록 기준 플랜트(기준 사례)의 배기 가스 환경 및 특성 자료가 PCC 공정 기술 소유업체에 제공되었다. 기술 소유업체에서 제공받은 5000tpd PCC 플랜트 모델에서의 속성 데이터는 사례 1 모델링을 마무리 지을 수 있도록 기준 플랜트 모델로 재투입되었다.

사례 1 검증법은 아래 표와 같다.

사례1 검증법 흐름도

사례1 - PCC를 장착한 기준 발전소 검증법

프로세스 모델링



출처: WorleyParsons

기타 사례 2~5는 이와 유사한 방식으로 모델링되었으나 플랜트 통합 수준이 높아지고, 개조 발전소의 전체 성능 최적화 문제도 있어 복잡성은 더 높아졌다.

여러 사례의 결과 비교를 위해 핵심 성능 지표를 선별하기도 했는데, 이는 연구 사례나 질문 유형에 따라 달라지기도 한다. 모델링에서 요구되는 산출값 정의 때문에 프로젝트 착수 단계에서 명확한 일련의 KPI(Key Performance Indicator, 주요 성능 지표)를 확정해두는 것은 매우 중요하다. 이를 통해 이미 수립한 모델링을 다시 논의하지 않고도 결과물을 비교 검토할 수 있게 된다.

본 사례 연구에서, 사례별 평가 시 활용된 주요 성능 지표는 다음과 같다:

- PCC 플랜트로의 증기 공급량, MW
- PCC 플랜트로의 보조 전력 공급량, MW
- CO₂ 압축 동력, MW
- 석탄 건조 플랜트로의 보조 전력 공급량, MW
- 외부로 공급된 순 발전량, MW

- 플랜트 순 효율, %
- 단위 전력량 페널티, CO₂ kWh/톤

위의 지표들은 여러 유형의 연소 후 탄소 포집 기술 평가에도 활용될 수 있다.

본 사례 연구가 현 갈탄 화력 발전소의 PCC 개조 사업 타당성 전(前) 단계에서 이행되었음은 주지해야 할 사실이다. 이와 같은 독자적인 검증은 프로젝트의 주요 의사 결정이 필요할 때마다, 특히 최종 투자 결정(final investment decision) 시 이행되어야 함을 권고한다. 이 과정을 통해 기술의 변동 사항이나 최종 투자 결정까지의 프로젝트 평가 단계별로 높아지는 공학적 정의는 결과에 충분히 반영되고, 프로젝트 참가 주체들은 개발 시 각 단계에서 비용이나 성능 영향을 명확히 파악하였다.

방법론에 대한 독자적 검토

적용된 검증법은 산업 기준을 마련하기 위해 Kelly Thambimuthu 박사(IEA 온실가스 연구 개발 프로그램 회장)에 의해 검토되었다. 여기에서는 검증법만 검토하였고, 발전소나 PCC 공정의 성능 데이터를 검토하거나 검증하지 않았다.

Kelly 박사는 실제 결과값이 아닌 방법론의 심층 검증 차원에서, 발전소나 기술 소유주들의 영리 정보에는 접근하지 못했다. 검증은 Kelly 박사가 적극 참여 하에 다음의 단계들로 진행되었다:

- 프로젝트 착수 시 킥오프 회의와 방법론 정의
- 기준 사례 선정 후 방법론 중간 검토
- 프로젝트 완료 시 방법론 최종 검토

결과

다음 표는 열역학 모델링 결과값과 주요 성능 지표를 요약한 내용이다. 독자적 검증 결과는 플랜트 소유주나 기술 공급업체의 예측값과 동일하게 기록되었으며 모든 당사자들의 개조 발전소의 예상 성능을 입증하는 자료이다.

이와 같은 공정 성능 지표로 사례 간 비교가 가능하지만, 경제나 환경적 요인까지 고려한 최상의 배치안을 만들기에는 부족한 느낌이 있다. 그러나 해당 지표들은 중요한 투입값으로, 기술 솔루션이나 투자안을 궁극적으로 정의할 후속 기술-경제성 혹은 환경 영향 평가의 기반을 구성한다.

최적화 PCC 솔루션 시행(사례 4)에서는 보다 높은 플랜트 순 산출값을 얻어 플랜트 운영업체의 수익성이 증대되었다. 그러나 석탄 건조를 포함한 최적화 사례(사례 3)에 비해 효율성이

저감되어 CO₂ 배출비와 연료비의 순비용이 증가했다. 이렇듯 추가 기술-경제성 평가를 병합하기 위해서는 열역학 모델링 기반 방법론 확장의 중요성이 강조된다.

열역학모델링 결과 개요

시스템 구성	기준	사례 1	사례 2	사례 3	사례 4	사례 5
기준 플랜트	X	X	X	X	X	X
PCC 플랜트		X	X	X	X	X
석탄 건조			X	X		X
플랜트 최적화				X	X	X
공기 냉각(PCC 플랜트만 해당)					X	
전력 생산량	kW	kW	kW	kW	kW	kW
주 증기 기관 생산량	568,960	530,810	527,700	528,840	549,390	528,840
확장 기관 생산량				5,320	3,130	5,320
총 전력 생산량	568,960	530,810	527,700	534,160	552,520	534,160
순 전력 생산량	521,380	446,460	445,840	452,380	468,270	452,480
순 전력 송출 감소량	-	74,920	75,540	69,000	53,110	68,900
플랜트 총 효율, %	31.46%	29.35%	30.74%	31.12%	30.53%	31.12%
플랜트 순 효율, %	28.82%	24.68%	25.97%	26.36%	25.88%	26.36%
보조 전력 부하	kW	kW	kW	kW	kW	kW
기준 플랜트 보조 전력 부하	47,580	47,450	44,350	44,270	47,350	44,170
PCC 플랜트 보조 전력 부하	-	36,900	34,500	34,500	* 36,900	* 34,500
석탄 건조 플랜트 보조 전력 부하	-	-	3,010	3,010	-	3,010
플랜트 총 보조 전력 부하	47,580	84,350	81,860	81,780	* 84,250	* 81,680
CO₂ 포집량	기준	사례 1	사례 2	사례 3	사례 4	사례 5
CO ₂ 포집량, (tpd)	-	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000

시스템 구성	기준	사례 1	사례 2	사례 3	사례 4	사례 5
CO ₂ 생성량, (tpd)	14,831	14,831	14,081	14,081	14,854	14,081
CO ₂ 배출량, (tpd)	14,831	9,831	9,081	9,081	9,854	9,081
총 단위 배출량, (kg/kWh)	1.086	0.772	0.717	0.708	0.743	0.708
순 단위 배출량, (kg/kWh)	1.185	0.917	0.849	0.836	0.877	0.836
단위 전력 량 패널티, (kWh/t CO ₂)	-	419.89	274.70	233.60	284.36	233.60

주: (*) 사례 4와 5의 PCC 플랜트 보조 전력 부하량과 플랜트 총 보조 전력 부하량은 실제로 위 표의 수치보다 같거나 적을 것이다. 연구 목적상 PCC 보조 전력 부하량의 세부 평가는 시행하지 않았다.

출처: WorleyParsons

결론

제시된 방법론으로 실제 발전소에 PCC 플랜트 장착 시 발생할 수 있는 성능 영향을 독자적으로 검증한다는 당초 목적을 달성했다. PCC 플랜트와 석탄 건조 플랜트의 결과치는 플랜트 소유주의 예상치에 근접한 것으로 판명되었고, 기술 소유업체가 제공한 자료로는 검증 절차를 통해 얻은 예상 성능과 데이터가 부합한다는 사실을 확인할 수 있었다.

지적재산권 소유업체의 “블랙 박스”에서 제공된 기술의 독자적 검증 개념을 통해 기술 중심의 성능과 플랜트 총 성능 데이터가 높은 투명성 신뢰성을 확보하는 동시에, 기술 공급업체의 지적재산권을 보호하였다. 또한, 프로세스를 통해 기술 소유업체들이 제공한 자료가 예상 수치에 부합하는지에 대해 평가하고 신뢰 범위 내에 있는지를 확인하는 개별 절차에서 검증 가능하다는 것을 거듭 확인하였다. 이는 화학 및 열역학 공정의 성능 신뢰에 대해 모든 이해 당사자들을 납득시킬 수 있는 핵심적인 부분이기도 하다.

적합한 소프트웨어와 호환되는 소프트웨어 툴의 선정은 전 프로젝트에 걸쳐 사용할 수 있는 통합 소프트웨어 패키지가 없다는 점에서 중요성을 가진다. 선정된 소프트웨어 툴은 선정된 사례 연구 뿐만 아니라 미개발 구역이나 초임계 혹은 초초임계 증기 사이클을 활용한 보일러 기술 등의 연구에도 활용할 수 있을 만큼 범용성을 지닌다.

본 연구가 지적재산권을 보유하고 있는 특정 기술에 기초하였음에도 불구하고, 해당 검증법은 미개발 석탄 화력발전소나 기존 화력 발전소에 기타 연소 후 포집, 석탄 건조 그리고/혹은 복합 기술 장비를 장착하는 연구에도 충분히 적용가능하다는 점도 주지할만한 점이다.

석탄 건조 그리고/혹은 PCC 개조에 특화된 포괄적 열역학 공정 소프트웨어 패키지의 부재로, 본 연구의 방법론은 동일 발전소 개조 모델링에서 최상의 실례라고 볼 수 있다.

이와 같은 플랜트 성능에 대한 독자적 검증법으로 동 분야 최초로 플랜트에서 성능을 검증함으로써 대규모 PCC 프로젝트 수행 시 리스크 프리미엄을 경감할 수 있을 것으로 기대된다. 또 한가지 괄목할만한 점으로는, 플랜트 소유주와 프로젝트 참여 업체들, 이해 당사자들을 대상으로 성능 영향과 운영 비용에 대한 높은 투명성을 보장하기 위해 이를 프로젝트 중요 단계마다 적용해볼 수 있다는 점이 있다.

본 연구에서의 핵심 제안은 PCC 개조 프로젝트에 참여하는 주체들이 본 보고서에 기술된 방법론을 연구하고, 본 보고서에서의 PCC 계획과 예정된 PCC 계획 간의 차이점을 인지하며, 해당 플랜트 조건에 적절하도록 맞춤형 방법론을 개발하기 위해 본 방법론을 변형해야 한다는 총 3가지이다.