

석유코크스/석탄 혼합 가스화를 이용하는 액화 공정의 경제성 평가

신지훈 · 이루세 · 이시훈[†]

전북대학교 자원에너지공학과
54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567
(2015년 12월 19일 접수, 2016년 2월 3일 수정본 접수, 2016년 3월 2일 채택)

Economic Assessment of a Indirect Liquefaction Process using a Gasification with Petroleum Coke/Coal Mixtures

Ji-Hoon Shin, Lu-Se Lee and See-Hoon Lee[†]

Department of Mineral Resource & Energy Engineering, National University of Chonbuk, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju, Jeonbuk, 54896, Korea

(Received 19 December 2015; Received in revised form 3 February 2016; accepted 2 March 2016)

요 약

황함유량이 높아 독성 폐기물로서 분류되는 석유코크스를 역청탄 및 아역청탄과 혼합하여 가스화 공정을 통해 액체 연료를 생산하는 공정의 경제성을 분석하였다. 공정의 경제성을 분석하기 위한 2,000 톤/일 규모의 액화 공정은 가스화, 정제, Fischer-Tropsch 전환 등으로 이루어진다. 기발표된 자료들로부터 적절한 검토 기준을 통해 건설비용 및 매출액을 산정하였고 석유코크스/석탄의 혼합비에 따른 경제성을 평가하였다. 경제성 평가 결과, 원소황의 생산과 판매 증가로 인해서 석유코크스의 경제성이 석탄보다 우수했으며 수분 함량이 낮은 역청탄과의 혼합이 보다 높은 경제성을 가지는 것으로 나타났다. 아역청탄의 경우, IRR (Internal rate of return)이 10% 이상이 되기 위해서는 석유코크스와의 혼합이 적어도 40 wt% 이상이 되어야 함을 확인하였다.

Abstract – The economic feasibility of a commercial indirect liquefaction process with the co-gasification process of petroleum coke which has been recognized as hazardous waste because of high sulfur content and bituminous coal and sub-bituminous coal mixtures was assessed. The 2,000 ton/day scale indirect liquefaction process including co-gasification, clean up, Fischer-Tropsch conversion and so on was assumed and used to analyze economical efficiencies with various conditions. Financial data from previous studies were modified and used and economical sensitivities with various mixture ratios were evaluated in this study. As a result, economic values of petroleum coke were superior than those of coals because of increasing sulfur sale. Also, mixtures with petroleum coke and bituminous coal was more favorable than those with petroleum coke and sub-bituminous coal due to lower moisture content. In case of sub-bituminous coal, the mixture ratio with petroleum coke had to be over 40wt% for the IRR of mixture to surpass 10%.

Key words: F-T Process, Coal, Petroleum Cokes, Sensitivity Analysis, Economic Evaluation

1. 서 론

전세계의 인구가 지속적으로 증가하고 각국의 경제사회 구조가 고도화됨에 따라서 세계 각국의 에너지 소비는 지속적으로 증가하고 있고 이의 대부분을 담당하는 화석연료의 사용량도 지속적으로 증가하고 있다. 이에 세계 각국은 강화되는 환경 규제와 화석연료의 고갈에 대응하기 위해 친환경적인 에너지 생산을 위해 노력하고 있

다. 특히 수소, 메탄올과 같은 기초화학물질부터 휘발유, 경유 등의 액체연료, 전력 등을 생산하면서도 동시에 이산화탄소를 경제적으로 포집할 수 있는 가스화 응용 공정들이 널리 개발되고 있다[1,2]. 더불어 가스화 공정은 탄소를 포함하고 있는 대부분의 고체 탄화수소 물질들을 원료로 이용할 수 있어 매우 경제적이다. 이로 인해서 21 세기의 환경 규제를 만족하는 청정 에너지 전환 기술로 인정받고 있으며 향후 예상되는 수소경제사회에서 가장 가능성 높은 수소 공급 기술로 평가받고 있다[3-9].

친환경 에너지 전환을 위해 이용되는 연료는 오랫동안 개발되어온 석탄에서 벗어나 바이오매스, 폐기물, 석유코크스 등으로 확장되고 있다[3,10]. 바이오매스, 폐기물은 재생에너지 자원으로서의 가치가 높게 인정받고 있으며 석유코크스는 경제적인 측면이 부각되고 있

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: donald@jbnu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다. 일반적으로 석유코크스는 석유 정제 공정에 포함되어 있는 코킹 반응기에서 고체 물질로서 생산되고 있으며 7~8 wt%의 높은 황 함량과, 바나듐 등의 높은 중금속 함량 등으로 인해 유독성 폐기물로서 처리되고 있다. 그러나 석유 정제 공정의 지속적인 경쟁력 약화와 친환경적인 에너지 전환이 강조되면서 석유코크스를 유독성 폐기물로 처리하지 않고 하나의 자원으로 이용하려는 시도가 꾸준히 진행되고 있다. 이는 석유코크스가 석탄에 비해 높은 열량, 낮은 회재 함량, 저렴한 비용 등의 강점이 부각되기 때문이다. 하지만 석탄 코크스의 낮은 반응성으로 인해 단독으로 이용하지 않고 석탄, 바이오매스 등의 혼합 이용을 통해 열량 제어 및 황 함량 제어 등의 연료적 성상을 보완하는 시도가 진행되고 있다[11-14]. 더불어 석유화학 산업의 속적인 발전에 따라 석유코크스의 생산량은 계속해서 증가할 것으로 보이며, 석유코크스의 효율성을 높이기 위해서 석탄 또는 바이오매스를 혼합하여 수소, 일산화탄소 등의 석유화학 산업의 기초 원료와 석유 대체 연료를 생산할 수 있는 공정 개발도 적극적으로 시도되고 있다[14-16].

다양한 가스화제로 이용하여 석유 코크스를 이용한 혼합물질들의 가스화 반응과 합성가스 특성이 다양한 연구진들에 의해서 고찰되었다. 국진우 등[3]은 TGA를 이용하여 석유코크스와 톱밥, 왕겨 등의 바이오매스 혼합 가스화를 1,100~1,400 °C의 온도범위에서 고찰하였다. 공수진 등[17]은 열천칭반응기(Thermobalance)에서 목재칩, 갈탄, 역청탄, 무연탄, 석유코크스를 600~850 °C 범위에서 수증기 가스화 반응특성을 비교하여 Modified volumetric reaction model에 적용하여 가스화 kinetic 정보를 도출하였다. Hernández 등[18]은 750~1,150 °C 온도범위에서 entrained flow gasifier를 이용하였고, 석탄과 코크스 1:1 비율로 혼합한 시료에 바이오매스(dealcoholized grape marc)를 다양한 무게비로 혼합한 시료와 Air를 반응해 생성된 가스의 H₂와 CO, CO₂ 수율변화를 관찰하였다. Feroso 등[19]은 고압의 950~1,000 °C 온도범위에서 stainless steel tubular reactor를 이용하여 역청탄, 석유코크스, Almond shells, Olive stones, Eucalyptus의 혼합연료와 스팀 가스화를 통해 생성된 합성가스의 가스조성비에

다른 H₂와 CO 수율변화의 변화를 고찰하였다.

그러나 친환경적인 에너지 생산으로 각광받은 석탄가스화복합발전에 비해 석유코크스를 이용한 액화 공정은 아직까지 실현되지 못하고 있다. 이는 석유코크스로부터 석유화학 기초 원료 또는 액체 연료를 얻기 위해서 많은 공정이 요구되고 있기 때문이다. 특히 높은 황함량으로 인해서 가스화를 통해 생산되는 합성가스의 고순도 정제 및 Claus 공정이 반드시 필요하다. 이와 같은 많은 단위 공정들의 이용으로 인해서 초기투자 비용이 다른 에너지 전환 기술들에 비해서 높아 경쟁력 확보가 의문시되기 때문이다.

이에 본 연구에서는 석유 대체 연료를 생산하는 석유코크스-석탄 혼합 가스화를 통한 액화 공정의 경제성을 평가하였다. 경제성 평가는 기존에 발표된 Fischer-Tropsch 공정이 연계된 가스화 공정 자료를 이용하여 단위 공정을 구성하였으며 이를 기준으로 초기투자비용, 연간 운영비 등을 계산하고 경제성 분석 모형을 수립하였다. 수립된 경제성 분석 모형을 이용하여 석유코크스와 석탄의 혼합 비율에 따른 공정의 경제성을 분석하였으며 핵심 단위 공정들의 초기투자 비용이 전체 공정의 경제성에 미치는 영향을 분석하여 향후 기술 개발이 가장 시급히 요구되는 분야를 분석하였다.

2. 혼합 가스화-액화 공정

2-1. 혼합 가스화-액화 공정

석유코크스-석탄 혼합 가스화를 통한 액화 공정의 경제성 분석은 기존 공정의 경제성 비용을 기초로 하여 진행되었으며 이를 위하여 비슷한 대상 공정으로 미국 DOE/NETL에서 발표한 석탄 액화 공정을 이용하였다[16]. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 혼합 가스화 공정의 간략한 개략도이다. 석탄과 석유코크스는 전처리를 통해 슬러리로 전환되어 석탄 가스화기에 주입된다. 가스화기는 GE Energy의 radiant quench slurry feed gasifier이며 클라우스 황회수 공정(claus sulfur recovery)이 연계된 Selexol이 산성가스 제거를 위해 이용된다. GE 가스화기는 순산소를 이용하며 분류층 방식으로 조업되고 연속적인

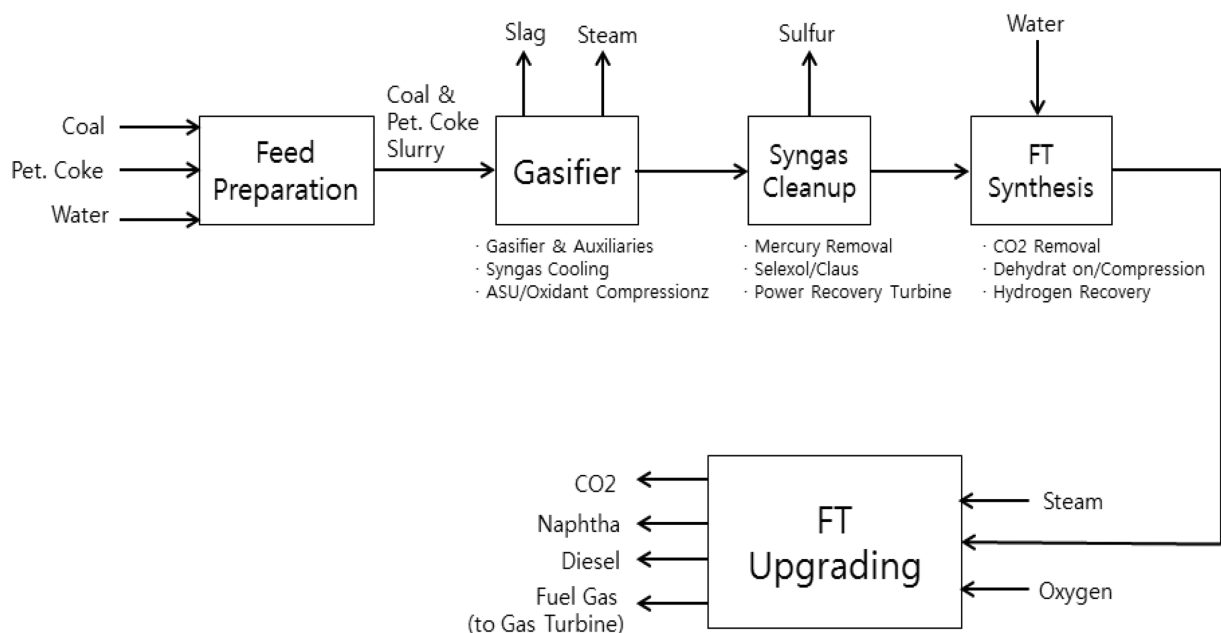


Fig. 1. F-T process of indirect liquefaction process with the co-gasification of petroleum coke and coal mixture.

슬래그 제거 방식을 통해 회재를 제거하게 된다. 석탄 슬러리는 대략 1,340 °C 이상의 온도에서 조업되는 가스화기 내부에서 산소와 반응한다. 순산소 분리 단계에서는 95%의 순도를 가지는 산소가 가스화기 내부에 공급되도록 조업되며 분리되는 질소는 가스 터빈에 공급되어 전력 생산에 이용되게 된다. 가스화기에서 배출되는 고온의 합성가스는 내부에 연결되어 있는 복사 합성가스 냉각기를 통해서 냉각되어 외부에 배출된다. 이후 합성가스는 입자상 물질 및 기타 환경 오염물질들이 제거되고 F-T 공정에 주입된다.

냉각된 합성가스는 COS 전환 반응기에 주입되어 H₂S로 전환되어 Selexol 공정에 주입되게 된다. 제거된 합성가스 내의 H₂S는 클라우스 공정을 통해서 원료황으로 생산되고 부산물로 판매된다. 이 공정을 통해서 H₂S의 농도가 1 ppb 이하로 제어된다. F-T 공정의 1회 전환율이 100%에 미치지 못하기 때문에 F-T 반응기에서 배출되는 공정 가스는 재순환하게 된다. F-T 공정에서 배출되는 액체 생산물은 증류탑으로 보내져 휘발유와 경유로 생산된다. 또한 기상 생산물들에 있는 이산화탄소는 포집되어 반응기 외부로의 이산화탄소 배출을 최소화하게 된다. 이산화탄소가 제거된 미반응 가스들은 압축되어 탄화수소 회수 플랜트에서 처리된다. 탄소수가 4 보다 낮은 제품들은 연소 터빈에 보내져 전체 공정에 필요한 열 및 전기를 생산하고 공급한다.

경제성 분석에 사용된 연료는 석유코크스, 역청탄(WH탄), 아역청탄(LG탄)이며 이들의 공업 및 원소 분석 결과는 Table 1에 나타내었다. 연료의 탄소량을 기준으로 한 전체 공정의 탄소 전환율은 각각의 단위 공정들의 전환율을 이용하여 계산하였다. 가스화기에서 98.27%가 전환되고 정제를 거치면서 90%만이 후속공정으로 전달된다. 더불어 이산화탄소로 41.7%의 탄소가 제거되기 때문에 전체 공정을 통해 제품으로 생산되는 탄소는 액화 공정에서의 36.86%와 전력 생산에서의 5.01%로 나타나 전체 전환율이 41.87%로 나타났다[16]. 이와 같은 전환율은 가장 최신 공정으로 알려진 초초임계압 발전과 유사하며 가스화 공정의 목표 전환율과도 일치함을 확인할 수 있다. 또한 석유코크스 및 석탄에 주입되어 있는 황은 거의 100%의 전환율로 H₂S와 COS로 전환되어 클라우스 공정을 통해 최종적으로 황으로 생산된다고 가정하였다. 이를 통해 클라우스 공정을 통해 생산되는 황은 기존의 F-T 액체 및 전력과 더불어 판매됨으로써 전체 공정의 경제성을 향상시킬 수 있다.

2-2. 경제성 평가기법

공정의 경제성 분석은 지출에 해당되는 투자비와 제품 생산에 따른 매출액과 순이익의 분석을 통해서 이루어진다. 이를 위한 가장 정확

한 방법은 동일한 공정을 이용하는 기존 플랜트의 비용을 이용하는 것이 가장 정확하다. 총 비용은 설계, 건설, 공장, 공장 부지의 준비 및 관련된 행위의 총비용인 고정비와 공정의 운전을 위해 매년 소요되는 운전 비용으로 구분할 수 있다. 그러나 설계, 건설, 공장, 공장 부지 등의 정확한 비용 자료는 기업의 핵심 정보이기 때문에 실제로 확보하는 것이 매우 어렵다. 따라서 공정 비용에 대한 예측을 위한 가장 빠른 방법은 동일한 기술을 사용하는 기존의 공장이나 문헌상의 알려진 비용에 비례하여 산출하는 것이다[15,16,20,21].

경제성 분석에 이용되는 비용 자료의 정확도는 설계의 상세정도, 가격 자료의 정확성, 산출을 위해 사용한 시간에 따라서 변하게 된다. 고정비에서 가장 큰 비용이 소요되는 공장 비용은 모든 공정의 조달, 설치 및 이를 위한 토목 공사, 설치, 감독 등이 포함된 간접 비용도 포함되어 있다. 일반적으로 공장 비용의 40%로 예측되는 공장 부지의 시설과 개량 등에 포함된 부대 비용, 공장 비용과 부대 비용의 10~30%로 예측되는 공정의 상세설계 및 프로젝트 수행을 위한 기술 비용이 포함된 기술비와 공장 비용과 부대 비용의 10% 이상으로 검토되는 예비비 등으로 나누어지며 이를 모두 포함한 총비용 정보를 얻어 경제성 분석에 이용하게 된다[16,20].

경제성 분석을 위해 본 연구에서는 기발표된 석탄 액화 공정 자료로부터 단위 공정들의 비용자료를 확보하였다. 그러나 기발표된 자료의 규모는 본 연구에서 검토하고 있는 단위 공정의 규모와 다르기 때문에 규모에 맞게 비용을 재산정해야 한다. 이를 위하여 미국 에너지부에서는 에너지 전환 시설들에 적용되는 비용의 규모 인자(Scaling factor)를 발표하였으며 본 연구에서는 이 인자를 이용하여 규모 변화에 따른 총 비용을 재산출하였다[16,20,21].

$$C_2 = C_1 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^n \quad (1)$$

여기서 n = scaling factor

C₂ = 생산능력이 S₂인 공장의 총비용

C₁ = 생산능력이 S₁인 공장의 총비용

또한 비용 산출을 위해 이용되는 자료들은 최근 자료가 아니기 때문에 이를 현재 자료로 재산정해야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 2000년 이후의 Chemical engineering magazine의 플랜트 비용 지수를 분석하고 이를 이용하였다. Fig. 2에 나타난 대로 2000년대 초반의 플랜트 비용은 큰 변화가 없었으나 2005년부터 급격하게 증가하기 시작하였다. 이후 2008년의 경제 하강 이후에 큰 폭의 감소가 있었으나 이후 다시 상승하여 2008년 수준에 도달해 있는 상태이다. 새로운 공정의 비용은 참고로 삼고 있는 비용과 참고 자료의 연도를 새로운 연도와 비교하여 공정 비용을 다음과 같이 계산하였다.

$$C_{2015} = C_Y \left(\frac{I_{2015}}{I_Y} \right) \quad (2)$$

여기서 C₂₀₁₅ = 2015년으로 환산된 비용

C_Y = Y년의 비용

I₂₀₁₅ = 2015년 Plant index

I_Y = Y년 Plant index

석유코크스-석탄 혼합 가스화를 통한 액화 공정의 경제성 분석을 위해 필요한 혼합비에 따른 총고정비용 자료를 Table 2에 나타내었

Table 1. Petroleum coke and Coals

Analysis		Raw material (dry basis)		
		Petroleum coke	WH	LG
Proximate Analysis (wt%)	N	1.1	1.3	1.0
	C	87.0	67.4	55.1
	H	3.5	4.5	5.1
	S	7.9	0.8	0.6
	Cl+O+Ash	0.6	26.0	38.1
Ultimate Analysis (wt%)	Moisture	1.34	4.4	19.3
	Volatile	10.3	30.7	43.1
	Ash	0.4	18.4	6.8
	Fixed Carbon	88.0	46.5	30.8

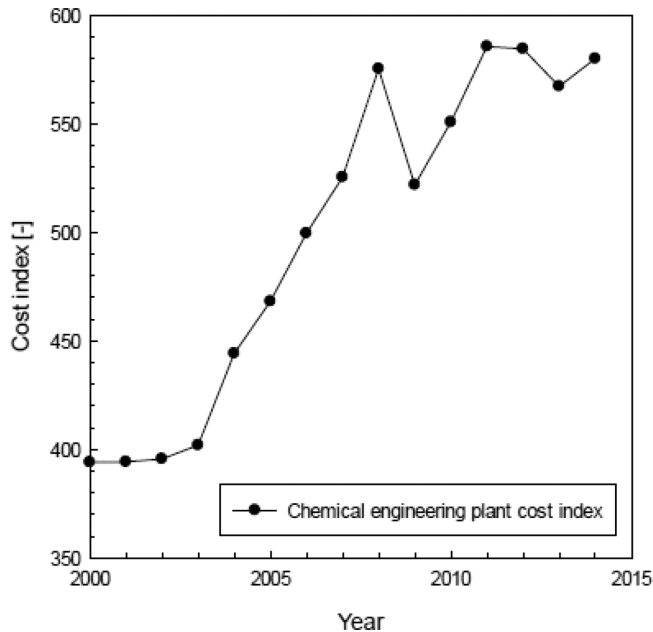


Fig. 2. Cost index of chemical engineering plant after the year 2,000.

다. Table 2의 비용은 Bibber 등[16]에서 주요 공정에 따른 비용을 참고하여 식 (1), (2)를 적용하였을 때, 석유코크스를 이용한 총 투자비는 7,460억원이다. Table 2에서 보듯이 총 비용은 석유코크스의 혼합이 증가함에 따라서 가스 정제 비용이 급격하게 증가하여 전체 비용이 상승하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 가장 비용이 많이 드는 가스화 공정의 비용은 큰 변화가 없어 전체 비용 상의 차이는 대략 3% 정도로 나타났다. 이는 석탄보다 반응성이 낮다고 알려졌으나 대형 플랜트에서의 전환율이 동일하다는 가정에 의해서 나타난 현상으로 석유코크스 이용 증가에 따라 탄소 전환율이 낮아진다면 비용도 변경될 수 있다.

본 연구에서는 기존 상업 공정[16,20]과 동일한 효율로서 전체 공정이 이루어진다고 가정하였다. 또한 F-T 공정에서 이용되지 못하는 탄소는 모두 다 터빈에서 연소되어 전력을 생산한다고 가정하고

계산하였다. 대상 공정과 본 과제에서 분석하고 있는 공정의 차이는 부산물로서 생산되는 황이 상대적으로 높고 이에 따라서 H_2S 공정 및 클라우스 공정의 부하가 상대적으로 많이 걸릴 것으로 예상된다. 그러나 이에 대한 명확한 운전 및 경제성 자료가 없어 H_2S 및 COS의 생산량에 따라서 공정 및 운전 비용이 증가한다고 가정하고 이를 경제성 분석에 포함시켰다.

간접액화공정 시스템을 신축운영 시 기반투자비, 유지보수비, 인건비, 이자 등의 비용과 생산된 경유, 납사, 황 등에 따른 수입이 발생한다. 비용과 수입 발생의 결과를 NPV 법, IRR 법을 통해 경제성을 분석하였다. NPV는 자본예산기법의 하나로 투자로부터 공정의 최종년도까지 얻게되는 이익에서 이자 및 운영비를 제외한 순이익의 흐름을 현재가치로 계산하고, 이를 합계한 것이다. NPV 법은 사업수행도중에 현금흐름이 발생했을 때 이를 자본비용으로 재투자하는 것을 가정하며, NPV 계산에서 할인율로 사용되는 자본비용의 정확한 추정이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 NPV의 단점을 보완할 수 있는 방법으로는 IRR 법이 있다. IRR은 투자로부터 기대되는 미래 현금 수익이 현재 투자에 소요되는 지출의 투자 가치와 같아지도록 하는 할인율이며, 투자회수기간은 최초 공장 가동일로부터 생산품 판매가격에서 원료구입비, 세금, 제세공과금, 운영비 등의 지출을 제외한 연간 순이익의 합이 초기투자비용을 초과하는 시점까지의 기간을 계산하는 방법이다[15,22].

공정의 주요 생산품들의 판매가격은 납사 ₩98,560/bbl, 경유 ₩123,530/bbl, 황 ₩137,500/ton이며, 판매가격의 3%로 생산품들의 판매 및 광고 금액을 선정하였다[23]. 원료 구입단가는 석탄은 역청탄의 경우 ₩100,100/ton, 아역청탄의 경우 역청탄의 60%인 ₩60,060/ton으로 선정하였으며, 석유코크스는 ₩97,900/ton으로 결정하였다[23,24]. 공정을 운영하는 인력은 기존 상업 플랜트([16])와 동일하게 30명이 필요한 것으로 가정하였으며 ₩0.6억/명의 인건비로 선정하였다. 감가상각비는 총 투자비의 15년 균등분할 상환을 원칙으로 하였다. 본 플랜트의 소득세는 국내법규를 적용하여 24.2%로 하였으며, 유지비는 투자비의 3%로 선정하였다. 또한 본 연구에서는 모든 가격을 인플레이션 효과가 제거된 불변가격(real price)을 사용하였다. 총 공사기간은 3년으로 하였으며, 건설기간 중의 투자비 배분은 건설기간이

Table 2. Total Investment cost with Items

Item/Description	Standard Cost [16] (1,000\$)	Coal : Pet. Coke mixture ratio (10%₩)		
		100 : 0	50 : 50	0 : 100
Coal & Sorbent Handling	23,889	21,510	21,510	21,510
Coal-Water Slurry Prep & Feed	36,368	32,746	32,746	32,746
Feedwater & Misc Bop Systems	10,140	9,130	9,130	9,130
Gasifier & Accessories	366,322	329,835	329,835	329,835
Gas Cleanup	99,527	84,896	92,069	98,887
Fischer-Tropsch Systems	131,061	111,794	121,240	130,218
Combustion Turbine Generator	19,559	16,684	18,093	19,433
Hrsg, Ducting & Stack	7,311	6,236	6,763	7,264
Steam Turbine Generator	22,837	19,480	21,126	22,690
Cooling Water System	9,854	8,405	9,116	9,791
Ash/Spent Sorbent Handling Systems	33,584	30,239	30,239	30,239
Accessory Electric Plant	8,964	7,646	8,292	8,906
Instrumentation & Control	10,231	9,212	9,212	9,212
Improvements to Site	9,547	8,596	8,596	8,596
Building & Structure	8,432	7,592	7,592	7,592
Direct Investment Cost	797,626	704,001	725,558	746,047

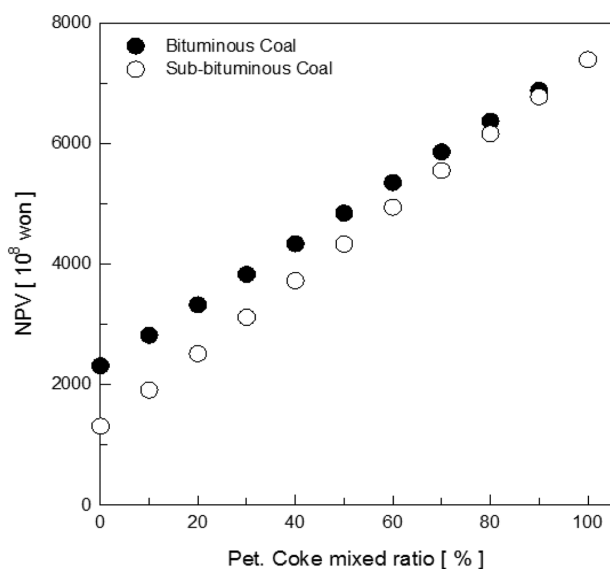
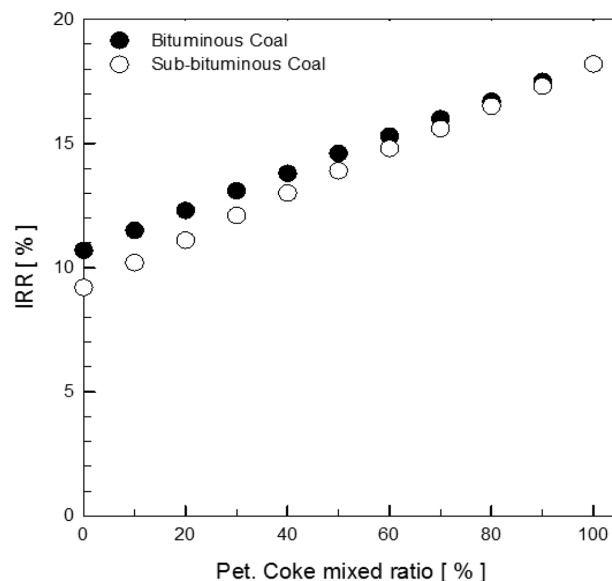
Table 3. Economic parameter and evaluation

BASIC Definition	
Project start year	2015
Investment Inflation (%)	3.0
Rate of interest (%)	7.0
Interest (%)	7.0
Depreciation (Year)	15
Maintenance, % of Investment	0.03
Income Tax, % of Income before Taxes	24.2%
Investment & Operating Cost	
Direct Investment Cost	7,040
Incremental Gross Revenue (BKRW/Y)	2,858
Incremental Raw Material Cost (BKRW/Y)	731
Sales and Marketing Cost (BKRW/Y)	86
Variable Cost (Raw Water, Fuel, Power) incl. UCC	26
Direct operating labor (Person)	30
Annual Average Salary (BKRW/Y)	18.0

끝나는 년도에 모두 하는 것으로 하였다. 자세한 가정 및 주요 경제성 분석 인자들은 Table 3에 나타내었다.

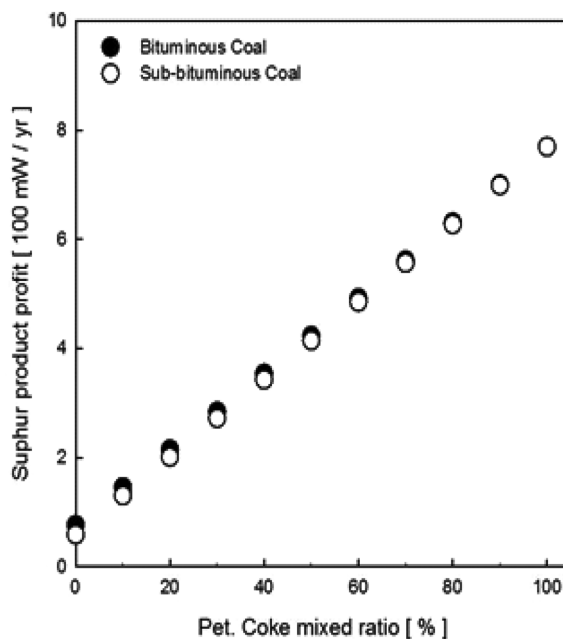
3. 결과 및 검토

석유코크스와 석탄의 혼합 비율에 따른 경제성의 변화를 고찰하기 위하여 NPV와 IRR을 검토하였다. Fig. 3은 아역청탄 또는 역청탄과 석유코크스의 혼합 비율이 변경됨에 따라서 변하는 NPV 값을 나타내었다. 그림에서 보면, 석탄의 종류와는 상관없이 석유코크스의 혼합 비율이 증가함에 따라서 NPV값이 증가하는 경향을 보이고 있다. 역청탄의 NPV값은 최저 2,300억원에서 7,000억원 이상으로 증가하고 있으며 아역청탄의 NPV값은 최저 1,300억원에서 7,000억원으로 증가한다. 역청탄의 경우는 석유코크스와 혼합하지 않아도 NPV값이 2,311억원이었으며, 아역청탄의 NPV값은 겨우 1,307억원으로 나타났다. 특히 아역청탄의 경우 석유코크스와 혼합이 20%이상의 석유코크스와 혼합이 되어야 100%의 역청탄의 NPV값과 비슷해졌다.

**Fig. 3. Effective of petroleum coke ratio on Net Present Value (NPV).****Fig. 4. Effective of petroleum coke ratio on Internal Rate of Return (IRR).**

석유코크스와의 혼합 비율 증가에 따른 IRR 값의 변화를 나타낸 Fig. 4를 보면, 아역청탄의 IRR값은 9%에서 최대 18%까지 석유코크스 혼합 비율의 증가에 따라 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 일반적으로 상용화 공정의 IRR 값 기준으로 선정되는 11%를 기준으로 석탄의 품질에 따라 검토하면, 각각의 석탄에 따라 석유코크스와의 혼합 비율은 역청탄은 10% 이상, 아역청탄은 20% 이상이 되어야만 경제성을 가지는 것으로 조사되었다. 즉, 탄소량이 매우 적은 아역청탄은 석유코크스와의 혼합이 필수적으로 요구되고 있음을 확인할 수 있다.

고유황의 석유코크스를 이용한 간접액화 공정만이 가질 수 있는 장점을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 산성 가스 제거를 통해 얻어지는

**Fig. 5. Sulphur output in accordance with the pet. coke mixed ratio.**

황의 판매를 통해 얻는 수익을 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 석탄 100%를 이용할 경우는 Sulphur 생산품을 판매하여 얻을 수 있는 판매 수익은 역청탄, 아역청탄은 각각 0.78억원/y, 0.6억원/y으로 계산되었다. 그러나 석유코크스를 10%씩 추가로 혼합할 경우, 역청탄은

매 년 0.7억원의 판매수익이 증가하였으며, 아역청탄의 경우는 매 년 0.6억원의 판매수익이 증가하는 것으로 분석 되었다. 이상과 같이 일반적으로 알려진 석탄 액화보다 석유코크스의 액화가 보다 좋은 경제성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 Table 1에서 보듯이 석유

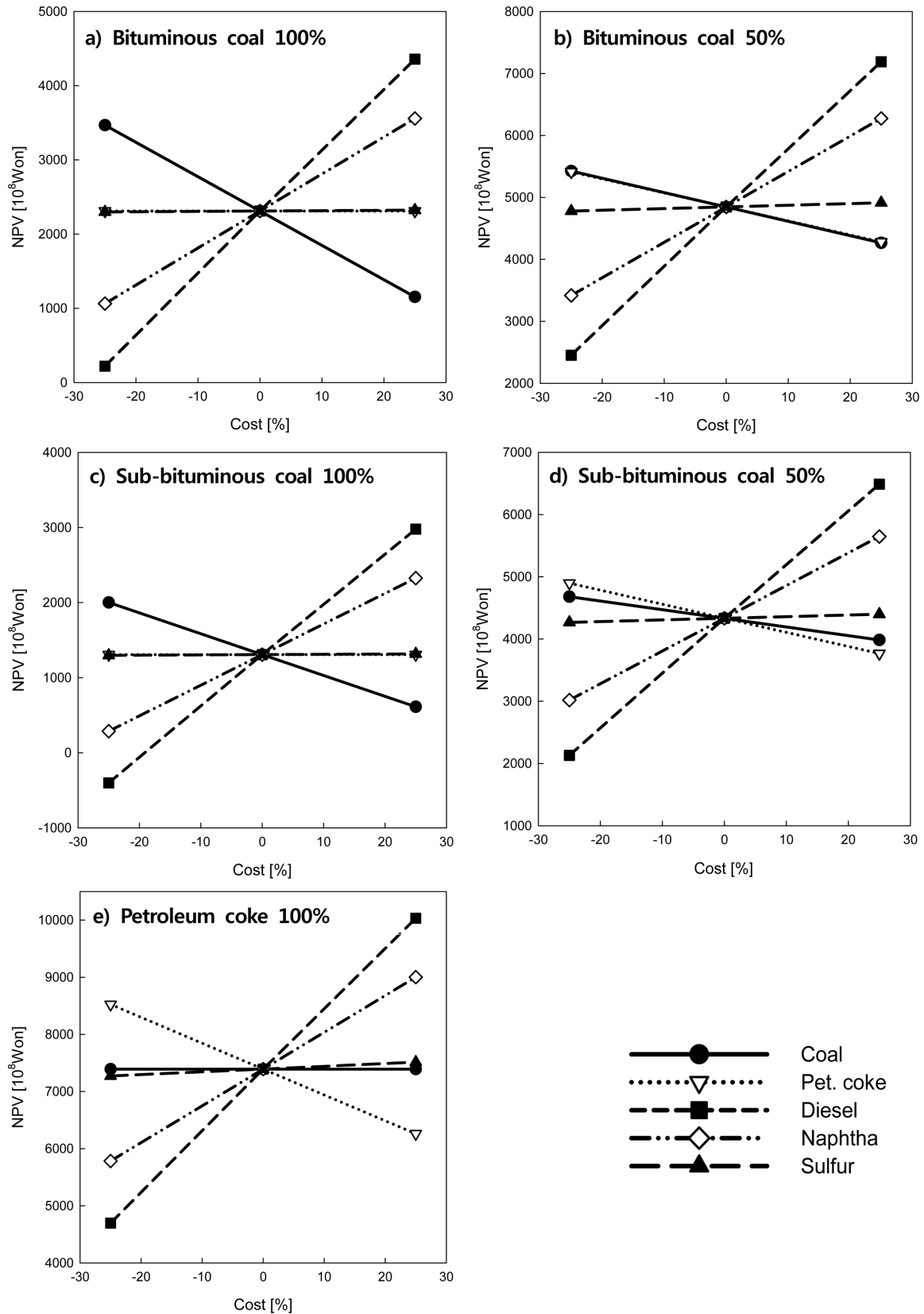


Fig. 6. Net Present Value (NPV) changes depending on coal, petroleum coke, diesel, naphtha and sulfur price.

코크스의 탄소 함유량이 역청탄 또는 아역청탄보다 20~32 wt% 이상 높기 때문에 액체 연료의 생산성이 비약적으로 개선되기 때문이다. 또한 거의 8 wt%에 이르는 황도 부가적으로 판매됨으로써 전체적인 경제성을 향상시키는 요인이 되기 때문이다.

석유 정제 공정에서 부가적으로 발생되는 석유코크스의 액화 공정을 대상으로 원료 물질인 석탄, 석유코크스와 주요제품인 경유, 납사 부제품인 황의 공급 및 판매가격의 변화에 따른 경제성 변화를 분석하여 Fig. 6과 7에 나타내었다. Fig. 6은 석탄, 석유코크스, 경유,

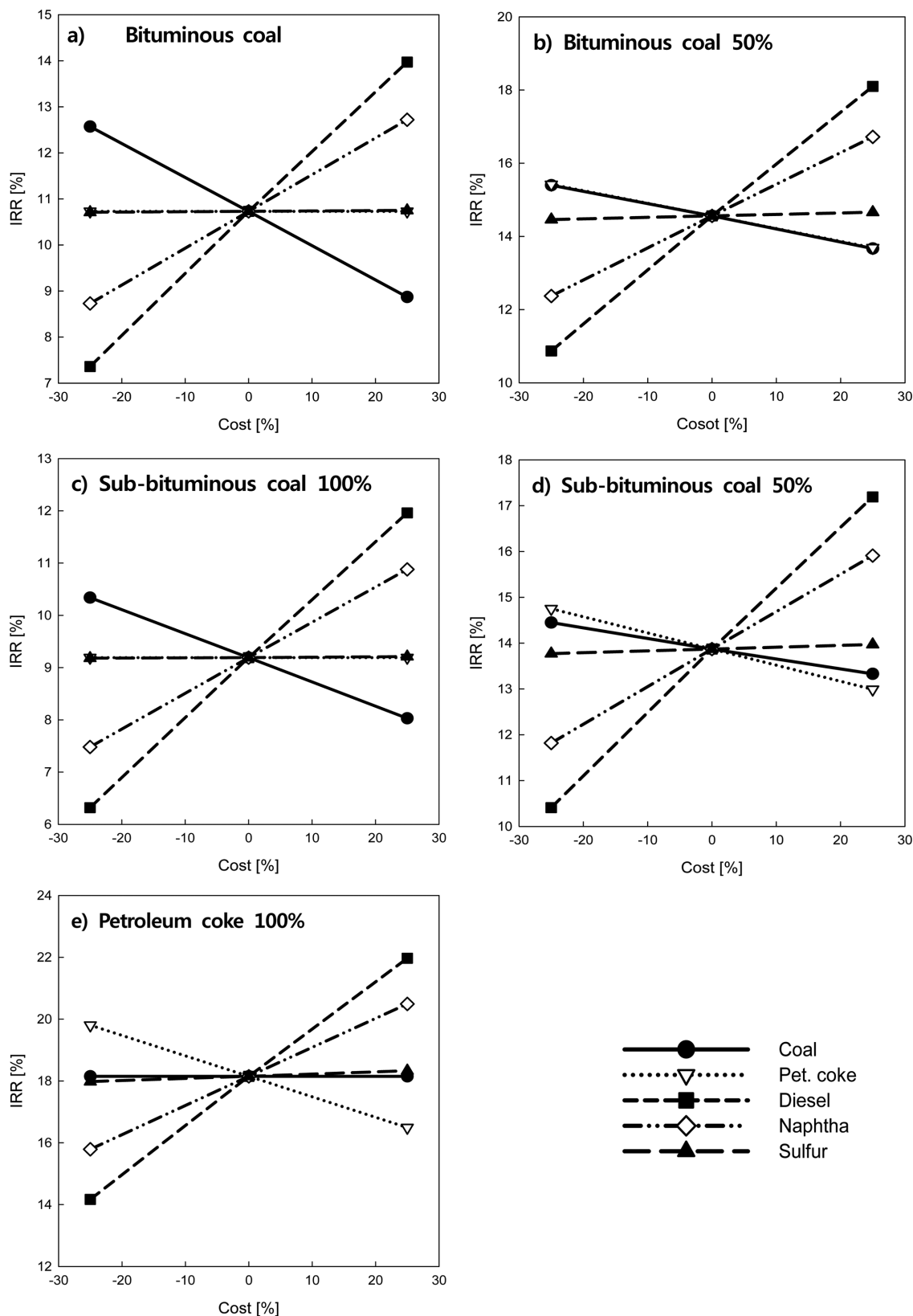


Fig. 7. Internal Rate of Return (IRR) changes depending on coal, petroleum coke, diesel, naphtha and sulfur price.

납사, 황의 가격을 기준가격보다 $\pm 25\%$ 변경되는 경우의 NPV 변화 값을 나타내었다. 그림에서 보면 역청탄, 아역청탄, 석유코크스의 가격이 25% 증가하면 NPV값이 각각 1,100억원, 1,150억원, 1,100억원 감소하고 반대로 25% 감소하면 1,100억원, 1,150억원, 1,100억원 씩 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 주제품인 경유와 납사의 가격이 25% 증가하면 NPV값이 역청탄과 석유 코크스의 혼합의 경우, 각각 2,100억원, 1,250억원씩, 아역청탄과의 혼합한 연료는 1,700억원, 1,050억원씩 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 부제품인 황의 가격은 $\pm 25\%$ 의 증감에도 불구하고 NPV값에 큰 영향을 끼치지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 NPV값들의 변화폭은 원료구입가격에 대한 영향보다 생산제품의 판매가격의 변화가 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

석탄, 경유, 석유코크스, 경유, 납사, 황의 가격 변동에 따른 IRR의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보면 석탄, 석유코크스의 가격이 $\pm 25\%$ 변동됨에 따라서 IRR은 1.2~1.8%씩 감소하였으며, 경유 가격의 변동에 따라서는 2.8~4.0%, 납사는 1.7~2.3% 정도의 변동이 발생함을 볼 수 있다. 황의 경우에는 가격이 25%씩 상승하여도 최대 0.2%의 IRR변화만을 보였다. 이를 통해 각 원료, 제품들의 가격 변동에 따른 변화 값들과는 다르게 석유코크스의 혼합비가 증가할수록 NPV, IRR의 절대 값은 증가하는 경향을 알 수 있었다. 또한 석유코크스-석탄 혼합 가스화를 통한 액화 공정의 경제성 확보의 가장 큰 변수는 제품으로 생산되는 경유의 가격이며, 석유코크스에 많이 첨가되어 있어 부가적인 이익을 창출하는 황은 경제성에 거의 영향을 끼치지 못함을 확인할 수 있다. 그리고 탄소를 많이 함유하고 있는 석유코크스의 가격도 $\pm 1.5\%$ 이상으로 IRR을 변화시킬 수 있어 보다 저렴한 석유코크스의 확보가 경제성 확보에 매우 큰 영향을 끼침을 확인할 수 있다. 이는 액화연료유의 판매가격이 공정에 가장 큰 영향을 끼치며 원료로 사용되는 석탄은 비교적 전체 경제성에 낮은 영향을 끼친다는 간접석탄액화 공정의 경제성 분석 결과와 일치한다[15].

Fig. 1에 나타난 석유코크스-석탄 혼합가스화를 통한 액화 공정의 핵심 단위 공정들의 비용 변동에 따른 NPV와 IRR의 변화를 고찰하여 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 고체 연료들을 통해 합성가스를 생

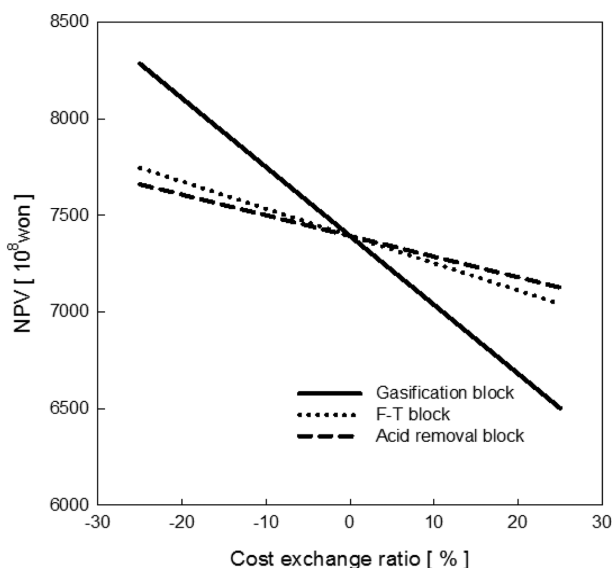


Fig. 8. Net Present Value (NPV) changes depending on process unit cost.

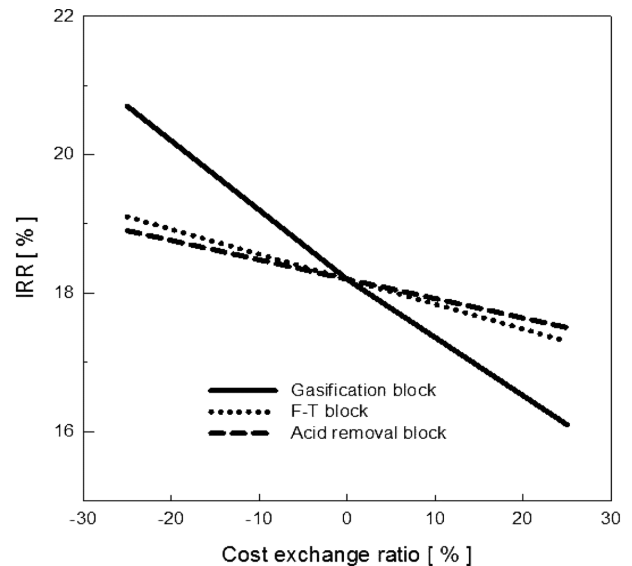


Fig. 9. Internal Rate of Return (IRR) changes depending on process unit cost.

산하는 가스화와 합성가스로부터 액체 연료를 생산하는 액화 공정, 액화 공정에 필요한 가스 조성을 맞추는 산성가스 제거 공정을 주요 공정으로 선정하였으며 Table 2에 제시한 단위 공정들의 비용 변화에 따른 NPV 값의 변동을 Fig. 8에 나타내었다. 고체 연료를 이용하여 합성가스를 생산하는 가스화 공정 비용이 $\pm 25\%$ 변동됨에 따라서 NPV값은 $\pm 1,700$ 억원이 변동되는 것으로 평가되었다. 이에 비해 액화 공정과 산성가스 제거 공정은 ± 600 억원 정도의 차이를 가져오는 것으로 평가되었다.

주요 공정들의 비용 변동에 따른 IRR값의 변동을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8에서 보듯이 가스화 공정이 가장 큰 IRR 변동을 야기할 것이다. 가스화 공정 비용이 $\pm 25\%$ 변동되면 IRR이 거의 $\pm 3\%$ 정도의 변동을 가져왔으며 액화 공정 및 산성가스 제거 공정은 $\pm 1\%$ 의 변동을 가져오는 것으로 평가되었다. 따라서 가격 경쟁력을 가지는 석유코크스의 액화 공정을 확보하기 위해서는 보다 저렴한 가스화 공정 개발이 최우선으로 진행되어야 할 것으로 평가되었다. 부가적으로 판매되는 황은 Fig. 7-8에서 보듯이 NPV, IRR에 거의 영향이 없지만 액화 공정에 필요한 가스 조성을 맞추기 위해 반드시 필요한 산성가스 제거 공정 비용은 전체 공정의 경제성에 큰 영향을 끼칠 것으로 평가되었다.

4. 결 론

고유황의 석유코크스를 역청탄 및 아역청탄과 혼합하는 혼합 액화 공정의 경제성을 NPV, IRR을 이용하여 분석하였다. 탄소 함량이 높은 석유코크스의 혼합이 증가함에 따라서 경제성이 향상되었으며 아역청탄보다는 역청탄이 보다 우수한 경제성을 보이는 것으로 나타났다. 혼합비율이 10% 증가할수록 NPV값은 5~600억원 증가하였고 IRR은 0.8~1.0%가 증가하였다. 아역청탄의 NPV값은 석유코크스와의 혼합이 20% 이상이 되어야 역청탄과 경쟁할 수 있을 것으로 평가되었다. 또한 고유황의 석유코크스 이용이 증가함에 따라서 황의 판매량도 증가하여 전체적인 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 분석되었다. 그러나 경유 가격의 변동이 석유코크스-석탄 혼합 액화 공정의

경제성 변동에 가장 큰 영향을 끼쳤으며 황의 가격 변동은 큰 차이를 야기시키지 못했다. 더불어 혼합 액화 공정에서 이용되는 핵심 단위 공정들의 비용 변동에 따른 경제성 분석을 통해 가스화, 액화, 산성 가스 제거 공정 순으로 경제성에 영향을 끼치는 것으로 평가되었다. 이와 같은 경제성 분석을 통해 기존의 유독성 폐기물로 취급되었던 고유황의 석유코크스를 단순히 소각/처리하지 않고 하나의 자원으로 이용할 수 있을 것으로 평가되었다.

감 사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2012R1A1A1009749)와 2015년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원(No. CRC-15-07-KIER)으로 수행되었습니다.

References

- Higman, C., "State of the Gasification Industry: Worldwide Gasification Database 2014 Update," *Gasification Technology Conference*, October, Washington, DC, USA(2014).
- Park, S. H., Chung, S. W., Lee, S. K., Choi, H. K. and Lee, S. H., "Thermo-economic Evaluation of 300 MW Class Integrated Gasification Combined Cycle with Ash Free Coal (AFC) Process," *Applied Thermal Engineering*, **89**, 843-852(2015).
- Kook, J. W., Shin, J. H., Gwak, I. S. and Lee, S. H., "A Reaction Kinetic Study of CO₂ Gasification of Petroleum Coke, Biomass and Mixture," *Appl. Chem. Eng.*, **26**(2), 184-190(2015).
- Ra, H. W., Lee, S. H., Yoon, S. J., Choi, Y. C., Kim, J. H. and Lee, J. G., "Entrained-flow Coal Water Slurry Gasification," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(2), 129-139(2010).
- Kim, S., "Analysis of Economic Feasibility of Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) as a Next Generation Power Supply in Korea," *Journal of economic research*, **13**, 149-174(2008).
- Lee, S. H., Yoon, S. J., Choi, Y. C., Kim, J. H. and Lee, J. G., "Characteristics of Coal Methanation in a Hydrogasifier," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(6), 631-635(2006).
- Lee, S. H., Choi, K. B., Lee, J. G. and Kim, J. H., "Gasification Characteristics of Combustible Wastes in a 5 ton/day Fixed Bed Gasifier," *Korean J. Chem. Eng.*, **23**(4), 576-580(2006).
- Holt, N. A. H., "Coal Gasification Research, Development and Demonstration-needs and Opportunities," *Gasification Technologies*, October, San Francisco(2001).
- Mantripragada, H. C. and Rubin, E. S., "Performance, Cost and Emissions of Coal-to-liquids (CTLs) Plants Using Low-quality Coals Under Carbon Constraints," *Fuel*, **103**, 805-813(2013).
- Seo, M. W., Kim, S. D., Na, J. G. and Lee, S. H., "Pyrolysis, Partial Oxidation, and Combustion Characteristics of Micro Algae," *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**(6), 734-739(2009).
- Yoon, S. J., Choi, Y. C., Lee, S. H. and Lee, J. G., "Thermogravimetric Study of Coal and Petroleum Coke for co-gasification," *Korean J. Chem. Eng.*, **24**(3), 512-517(2007).
- Yoon, S. J., Choi, Y. C., Hong, J. C., Ra, H. W. and Lee, J. G., "Gasification of Coal-petroleum Coke-water Slurry in a 1 ton/d Entrained Flow Gasifier," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**(3), 561-566(2008).
- Yoon, S. J., Choi, Y. C. and Lee, J. G., "The Effect of Additive Chemicals on the Viscosity of Coal-petroleum Coke-water Slurry Fuel for a Gasification Process," *Korean J. Chem. Eng.*, **26**(5), 1259-1264(2009).
- Lee, S. H., Yoon, S. J., Ra, H. W., Son, Y. I., Hong, J. C. and Lee, J. G., "Gasification Characteristics of Coke and Mixture with Coal in An Entrained-flow Gasifier," *Energy*, **35**(8), 3239-3244(2010).
- Park, J. W., Bae, J. S., Kweon, Y. J., Kim, H. J., Jung, H. and Han, C., "Economic Evaluation of DCL/ICL Processes," *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**(6), 781-787(2009).
- Bibber, L. V., Shuster, Erik, Haslbeck, J., Rutkowski, M., Olson, S. and Kramer, S., "Technical and Economic Assessment of Small-scale Fischer-tropsch Liquids Facilities," DOE/NETL-2007/1253, National Energy Technology Laboratory, USA(2007).
- Gong, S. Zhu, J., X., Kim, Y. J., Song, B. H., Yang, W., Moon, W. S. and Byoun, Y. S., "A Kinetic Study of Steam Gasification of Low Rank Coal, Wood Chip and Petroleum Coke," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(1), 80-87(2010).
- Hernández, J. J., Aranda-Almansa, G. and Serrano, C., "Co-gasification of Biomass Wastes and Coal-coke Blends in an Entrained Flow Gasifier: An Experimental Study," *Energy Fuels*, **24**(4), 2479-2488(2010).
- Fermoso, J., Arias, B., Plaza, M. G., Pevida, C., Rubiera, F., Pis, J. J., Garcia-Penam F. and Casero, P., "High-pressure co-gasification of Coal with Biomass and Petroleum Coke," *Fuel Process Technol.*, **90**(7), 926-932(2009).
- Phillips, S., Aden, A., Jechura, J. and Dayton, D., "Thermochemical Ethanol Via Indirect Gasification and Mixed Alcohol Synthesis of Lignocellulosic Biomass," NREL/TP-510-41168, National Renewable Energy Laboratory, USA(2007).
- NETL, "Capital Cost Scaling Methodology," DOE/NETL-341/013113, National Energy Technology Laboratory, USA(2013).
- Lee, J. M., Kim, D. W., Kim, J. S., Kim, J. J. and Kim, H. S., "Economic Feasibility of Conversion of the Pulverized Coal Firing Boiler Using Korean Anthracite Into A Circulating Fluidized Bed Boiler," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(5), 489-497(2006).
- <http://www.kcoal.or.kr/info/info05.php>.
- <http://www.platts.com/market-data>.