

배연탈질을 위한 저온 SCR 기술 도입에 따른 시나리오별 경제성 분석

홍성준*[†] · 이유아* · 정순관**

*한국에너지기술연구원 정책연구실, **한국에너지기술연구원 미세먼지연구단
(2020년 5월 11일 접수, 2020년 6월 8일 수정, 2020년 6월 12일 채택)

A Study on the Economic Analysis of Low-Temperature SCR Technology for NOx Reduction by Scenarios

Sungjun Hong*[†] · Youah Lee* · Soonkwan Jeong**

*Energy Policy Research Team, Korea Institute of Energy Research(KIER)

**Fine Dust Research Department, Korea Institute of Energy Research(KIER)

(Received 11 May 2020, Revised 8 June 2020, Accepted 12 June 2020)

요 약

미세먼지 문제 해결에 대한 국민적 요구가 높아짐에 따라 정부에서는 강도 높은 미세먼지 관련 대책을 발표하고 있다. 그래서 최근에 미세먼지의 전구체 중에서 질소산화물을 제거하기 위한 배연탈질기술로서 선택적 촉매 환원법(SCR)이 주목받고 있다. 본 연구에서는 미세먼지 관련 정부정책과 시장 및 기술개발 현황을 조사하고, SCR 기술이 산업체에 적용되는 경우를 Case별로 구분하여 시나리오별 경제성 분석을 실시하였다. 시나리오별 경제성 분석의 결과는 NPV로 산출하였으며, 탈질설비가 구축되어 있지 않은 기업(Case 1)이 일반 SCR 기술을 신규로 도입하는 경우(Scenario 1-1)와 저온 SCR 기술을 신규로 도입하는 경우(Scenario 1-2)를 분석하였다. 그리고 탈질설비가 이미 구축되어 있는 기업(Case 2)이 일반 SCR 기술을 그대로 사용하는 경우(Scenario 2-1)와 저온 SCR 기술로 대체하는 경우(Scenario 2-2)로 구분하여 분석하였으며, 모든 시나리오별 NPV 결과를 바탕으로 비교 분석을 실시하였다.

주요어 : 미세먼지, 질소산화물, 배연탈질, 선택적 촉매환원법, 경제성 분석

Abstract - As the national demand for solving the fine dust problem has increased, the government has announced intensive measures to deal with fine dust. So recently, selective catalytic reduction(SCR) has attracted attention as a technology for removing nitrogen oxides from precursors of fine dust. In this study, the government's policies related to fine dust and the current status of market and R&D were investigated, and economic analysis by scenarios was conducted by dividing cases where SCR technology was applied to industries. The results of economic analysis for each scenario were calculated using NPV, and companies with no denitrification facilities(Case 1) introduced general SCR technologies(Scenario 1-1) and low-temperature SCR technologies(Scenario 1-2). In addition, companies that have already installed denitrification facilities(Case 2) analyzed the two categories, using the general SCR technology as it is(Scenario 2-1) and replacing it with low-temperature SCR technology(Scenario 2-2). Comparative analysis was performed based on the results of each NPV.

Key words : Fine dust, Nitrogen oxides, NOx reduction, Selective catalytic reduction, Economic analysis

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-42-860-3478 E-mail : sjhong@kier.re.kr

1. 서론

국내 대기오염은 최근 10년 사이 점점 악화되어 대기오염으로 인한 사망자가 18,200명에 이르러 경제협력개발기구(OECD) 회원국 중에서 최악의 수준이다. 대기오염물 중에서 1급 발암물질로 분류된 미세먼지는 2018년의 경우 미세먼지 매우 나쁨($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상) 5일, 나쁨($35\sim 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 72일로 대폭 증가하여 국민 삶의 질을 저하시키는 가장 큰 요인이다. 미세먼지 문제 해결을 요구하는 국민들의 니즈가 증가함에 따라 정부는 「미세먼지 관리 종합대책」을 통해 2022년까지 산업부문의 오염물질 배출량 중 43%(52,791톤)를 줄이는 목표로 배출허용기준을 강화하였다[1].

미세먼지는 발생원에서 입자 상태로 나오는 직접 배출과 화석연료 연소과정에서 배출되는 질소산화물 및 황산화물이 화학반응을 통해 미세먼지가 되는 간접 배출로 구분되는데, 간접 배출이 전체 배출량의 73%를 차지하고 있다[2].

우리나라 PM10 미세먼지의 연평균 오염도는 최근 정체 상황인데 반해, PM2.5 이하의 초미세먼지 평균 농도는 2016년 세계보건기구(WHO) 권고기준인 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 선진 주요도시(도쿄 $13.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 런던

$11 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 2배 이상 높은 것으로 조사되었다. 초미세먼지는 암모니아, 오존, OH라디칼 등이 NOx 및 SOx 등과 반응하여 생성되며, 생성 메커니즘은 다음과 같다.

초미세먼지 제거를 위해서는 질소산화물, 황산화물 등의 처리가 필수적하며, 특히 인구 밀집 지역인 수도권에서는 전체 미세먼지 생성 원인의 40%를 차지하는 질소산화물 저감이 중요한 이슈로 부각되고 있다. 이러한 질소산화물(NOx)을 제거하기 위한 대표적인 배연탈질기술은 암모니아를 환원제로 사용하여 질소산화물을 촉매 상에서 무해한 질소와 수분으로 전환하는 선택적 촉매환원법(SCR, Selective Catalytic Reduction)이 가장 주목받고 있다. 탈질설비는 연료 및 공기 중에 포함된 질소(N) 성분이 연소조건에서 발생하는 질소산화물(NOx)을 제거하는 설비이며, 질소산화물 제거방법 중 연소조건 개선방법은 저감 효율에 기술적 한계가 있기 때문에 연소 후 별도의 처리설비가 요구된다. 그래서 현재 연소 후 처리방법으로 선택적 촉매환원법이 가장 신뢰도가 높고 질소산화물 제거설비 시장의 대부분을 차지하고 있다.

현재 에너지다소비 산업체에 적용된 Tail-end SCR 설비는 공정 유지와 안정성을 고려하여 탈황

Table 1. Fine dust component analysis

| 구분 | 합계 | 직접배출 | 간접배출 | | | |
|-----|--------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| | | | 소계 | NOx | SOx | VOCs |
| 수도권 | 53,634톤 (100%) | 14,427톤 (27%) | 39,207톤 (73%) | 21,348톤 (40%) | 10,857톤 (20%) | 7,002톤 (13%) |
| 전국 | 324,109톤 (100%) | 91,460톤 (28%) | 262,629톤 (72%) | 90,416톤 (28%) | 118,418톤 (37%) | 23,817톤 (7%) |

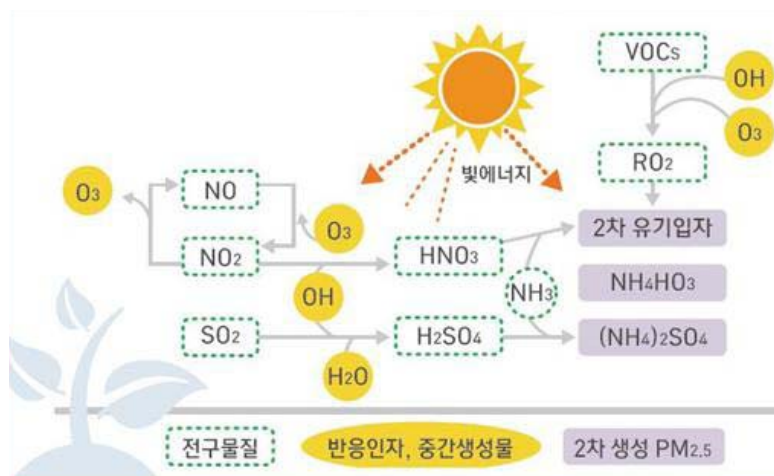


Fig. 1. Fine dust(PM2.5) secondary generation process.

Table 2. Domestic NOx emission charge

| 기간 | ‘20.1.1부터 ‘20.12.31 까지 | ‘20.1.1부터 ‘20.12.31 까지 | ‘22.1.1 부터 |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|
| 1kg 당 부과 단가 | 1,490원 | 1,810원 | 2,130원 |
| 부과금 부과 대상 (배출허용기준의 백분율 대비) | 70% 이상 | 50% 이상 | 30% 이상 |

Table 3. Coefficient of imposition by region

| 구분 | I 지역 | II 지역 | III 지역 |
|------|-----------|--------------------|------------------------------|
| | 주거지역·상업지역 | 공업지역·개발진흥지구·산업단지 등 | 녹지지역·관리지역·농림지역 및 자연환경보전지역 |
| 부과계수 | 1.5 | 0.5 | 1.0 |

설비 후단부에 설치되는데, 대부분의 보일러나 소각로 등에서는 열에너지가 최대한 회수되거나 후처리 설비 운전이 진행되는 동안 배가스의 온도가 급격히 감소하게 된다. SCR 촉매가 활성을 갖는 온도는 250~400℃ 사이의 고온 영역으로 후단의 탈황 공정을 거치면서 온도가 감소한 Tail-end SCR 설비의 배가스에서 최적의 탈질 효율을 얻기 위해서는 재가열 시스템(Reheating system)이 필요하다. 재가열을 통해 배가스의 온도를 100℃ 이상 승온시키기 위하여 발전소 전체 발전량의 2~5%에 해당하는 막대한 에너지가 소비되고 있다. 따라서 최근에는 이러한 시장 수요를 반영하여 200℃ 이하에서도 우수한 활성을 보이는 저온 SCR 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 하지만 저온 SCR 기술은 현재 상용화된 SCR 기술과 비용적인 측면에서 여전히 경제성을 높여야 하는 숙제를 안고 있다. 그럼에도 불구하고 비용효과적인 저온 SCR 기술이 개발된다면 산업체는 막대한 잉여 에너지 비용을 절감하는 동시에 미세먼지의 전구체인 질소산화물을 효과적으로 제거할 수 있다.

본 연구에서는 미세먼지 관련 정부정책과 시장 및 기술개발 현황을 조사하였다. 그리고 저온 SCR 기술이 산업체에 적용되는 경우를 Case별로 구분하여 기술도입에 따른 효과를 시나리오별로 경제성 분석을 실시하였다.

2. 정책 및 시장 동향

2-1. 정책동향 분석

질소산화물은 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(미세먼지법)에서 미세먼지를 생성하는 물질로 정의하고 있으며, 대기환경보전법에서는 질소산화물을 대기오염물질로 정의하여 대기오염물질배출

시설에서 나오는 대기오염물질의 배출허용기준을 배출시설별로 규정하고 있다. 2019년 현대제철 당진제철소는 대기오염물질의 방지시설 없이 운영하다가 대기환경보전법 위반으로 조업정비 및 검찰고발 사례가 있다.

국내 질소산화물 배출부과금은 대기오염물질을 배출한 사업자나 배출시설 설치허가·변경허가를 받지 않고 배출시설을 설치·변경한 자에게 배출부과금을 부과하고 있다(「대기환경보전법」 제35조제1항) [4]. 배출부과금은 기본부과금과 초과부과금으로 구분하여 부과하고 있다(「대기환경보전법」 제35조제2항). 기본부과금은 대기오염물질을 배출하는 사업자가 배출허용기준 이하로 배출하는 대기오염물질의 배출량 및 배출농도 등에 따라 부과하는 금액을 말하며, 기본부과금 산정방법은 다음과 같다(「대기환경보전법」 제35조제2항제1호 및 규제「대기환경보전법 시행령」 제28조제1항)[4][6].

$$\text{기본부과금} = \text{배출허용기준 이하로 배출하는 오염물질배출량} \times \text{오염물질 1kg당 부과금액} \times \text{연도별 부과금산정지수} \times \text{지역별 부과계수} \times \text{농도별 부과계수}$$

배출허용기준 이하로 배출하는 오염물질배출량 산정방법은 자가측정 결과가 없는 경우와 자가측정 결과가 있는 경우로 나누어 산정하며, 굴뚝 자동측정기기의 측정결과에 따라 산정하는 경우는 제외한다. 오염물질 1kg당 부과금액은 오염물질, 즉 질소산화물 1kg당 부과금액은 배출허용기준의 백분율 대비 30~70% 이상 배출되는 배출량에 따라 산정하는데 질소산화물의 배출부과금은 금액과 배출량에 따라 2022년까지 연도별로 단계적 시행이 도입된다.

연도별 부과금산정지수는 최초의 부과연도를 1로 하고, 그 다음 해부터는 매년 전년도 지수에 물가상승률 등을 고려하여 환경부장관이 고시하는 가격

Table 4. Coefficient of imposition by emission allowance base excess rate

| 초과율 | 20%미만 | 20%이상 40%미만 | 40%이상 80%미만 | 80%이상 100%미만 | 100%이상 200%미만 | 200% 이상 300% 미만 | 300% 이상 400% 미만 | 400%이상 |
|-------------|-------|----------------|----------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------------|--------|
| 농도별 부과계수 | 1.2 | 1.56 | 1.92 | 2.28 | 3.0 | 4.2 | 4.8 | 5.4 |

Table 5. Coefficient of imposition by number of violations

| 위반횟수 | 0회 | 1회 | 2회 이상 |
|------|----|------|-------------------|
| 부과계수 | 1 | 1.05 | 위반 직전의 부과계수의 1.05 |

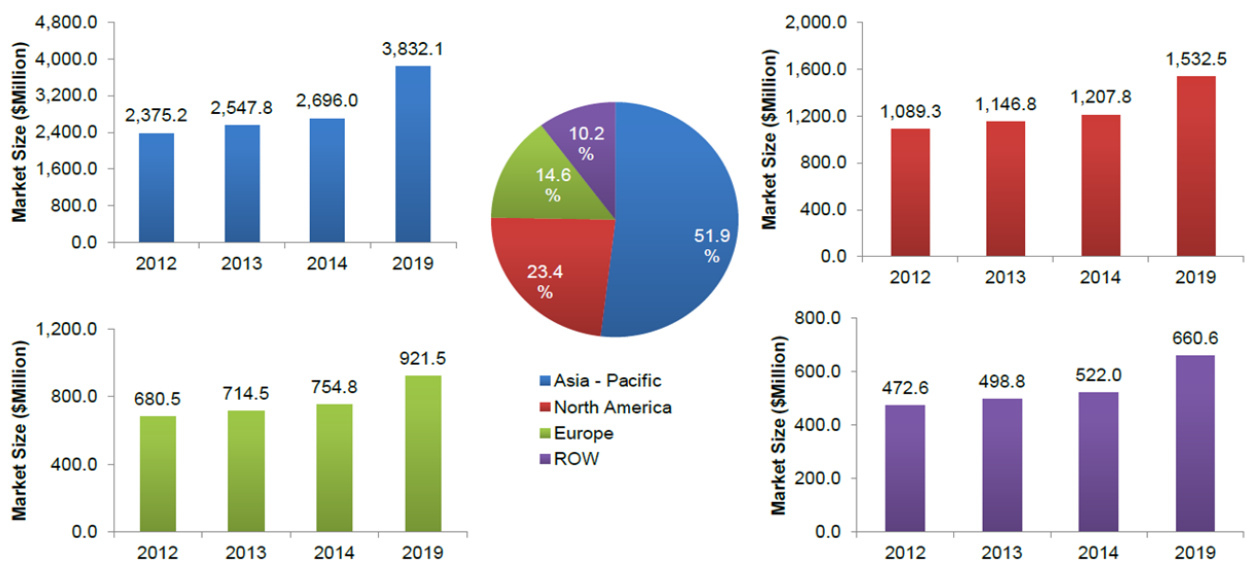


Fig. 2. Global market size for DeNOx systems and services by region
Source : Global Trends & Forecast to 2019

변동계수를 곱하여 산정한다(「대기환경보전법 시행령」 제28조제3항)[4]. 2019년 대기 기본부과금 부과금산정지수는 1.7360이며, 2018년 가격변동지수는 1.0180이었다[5]. 지역별 부과계수는 다음과 같이 3개 지역으로 구분하여 산정하고 있다[6].

농도별 부과계수는 2022년까지 연도별로 단계적 시행이 도입될 예정이며, 해당 연도에 따라 농도별 부과계수를 산정하고 있다[6].

초과부과금은 대기오염물질을 배출하는 사업자가 배출허용기준을 초과하여 배출하는 경우에 대기오염물질의 배출량과 배출농도 등에 따라 부과하는 금액이며, 초과부과금 산출방법은 다음과 같다[4][6].

$$\begin{aligned} \text{초과부과금} = & \text{오염물질 } 1\text{kg} \text{ 당 부과금액} \times \text{배출허용기준 초과} \\ & \text{오염물질배출량} \times \text{배출허용기준 초과율별 부과계수} \\ & \times \text{지역별 부과계수} \times \text{연도별 부과금산정지수} \\ & \times \text{위반횟수별 부과계수} \end{aligned}$$

오염물질 1kg당 부과금액은 기본부과금의 산정 금액과 동일하며, 배출허용기준 초과율별 부과계수는 다음과 같다[6]. 지역별 부과계수와 연도별 부과금산정지수는 기본부과금과 동일한 기준을 적용하고 있다[6].

위반횟수별 부과계수는 다음의 구분에 따른 비율을 곱하여 산정한다[6].

2-2. 시장동향 분석

질소산화물 저감(DeNOx) 시장은 SCR 기술을 중심으로 발전해 왔으며, 기후변화에 대응하기 위한 전 세계적인 대기환경 규제로 인해 질소산화물 저감 기준이 크게 강화되고 있다. SCR 기술은 선박, 발전소, 제철소 등과 같이 굴뚝산업이라 불리는 전통 제조산업 전반에 적용될 수 있다. 특히 금속 구조체 기반 SCR 촉매는 반응기 크기를 기존 세라믹

Table 6. SCR catalyst major manufacturers and operating temperatures

| Company | Type | Compounds | Operating Temp. (°C) |
|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| KOPEC (KoNOx), 대영C&E | Honeycomb/Plate/Corrugated | Ti, V, W | 250~400 |
| (주)나노 | Extrudate | Ti, V, W | 250~400 |
| (주)두산엔진 | | | |
| 세라콤 | Extrudate | Ti, V, W | 250~400 |
| Babcock-Hitachi | Plate | Ti, W, V | 240~415 |
| Camet Company | Metal Honeycomb | Ti, V and Zeolite Dual Function | 225~275 |
| Cormetech | Ceramic Extrudate | Ti, V, W | 200~450 |
| Engelhard Company | Monolith Ceramic | Ti, V Zeolite Precious metal | 300~440 440~590 175~320 |
| W.R Grace & Co. | Ceramic Extrudate | Ti, V, W, Mo, Si | - |
| Haldor Topsoe | Ceramic Extrudate | Ti, V | - |
| Hitachi Zosen | Metal Mesh Plate/ Extrudate | Ti, V, W Ti, V | 330~420 330~420 |
| Ishikawajima-Harima Heavy Industries | Ceramic Extrudate | Ti, V, W | 200~400 |
| Johnson Matthey | Metal Honeycomb | Al, Ti, V, W | 340~425 |
| Kawasaki Heavy Industries | Ceramic Extrudate | Ti, V, W | 300~400 |
| Mitsubishi Heavy Industries | Ceramic Extrudate | Ti, V, W | 200~400 |
| Nippon Shokubai | Ceramic Extrudate | Ti, V, Zr, Si | - |
| Siemens | Plate | V, W, Ti | - |
| Steuler | Ceramic Block | Zeolite | 300~520 |
| UBE | Extrudate | Ti, V | 250~400 |

기반 SCR 촉매의 60%까지 축소시킬 수 있고, 제조 단가 또한 30% 정도 낮출 수 있어서 산업부문의 미세먼지 저감 뿐만 아니라 관련 시장의 확대가 기대된다.

DeNOx 시스템 및 서비스의 세계 시장 규모는 2012년 46억 달러에서 2019년 69억 달러로 연평균 5.1% 성장하고 있는 시장이다. 미국이 가장 높은 성장률을 보이고 있으며, 중국은 신규 석탄화력발전소에 DeNOx 시스템을 설치할 예정임에 따라 가장 큰 잠재시장이 될 것으로 전망된다. 중국은 제12차 5개년계획에서 SOx, NOx 및 입자상 물질과 같은 유해가스의 배출을 제어하기 위한 종합 계획을 추진해 왔으며, 이러한 입법화가 중국의 DeNOx 시스템 시

장을 견인하고 있는 요인으로 작용하고 있다.

국내 대표적인 SCR 촉매 제조 기업으로는 두산중공업, (주)나노, (주)신성, (주)세신, 대영C&E 등이 있으며, 해외 SCR 촉매 제조 기업으로는 BASF, Cormetech, Ceram-Ibiden, Johnson Matthey, Haldor Topsoe, Hitachi Zosen 등이 있다[7]. 200°C 이하의 저온 SCR 촉매 중 망간산화물(MnOx)을 활성물질로 사용한 촉매가 비교적 낮은 온도에서도 높은 활성을 나타내고 있어 중국을 중심으로 많은 연구들이 진행되고 있다. Kwang Hee Park와 Wang Seog Cha는 Mn, Cu가 포함된 탈질촉매의 경우 저온에서 성능이 우수함을 증명하였으며[8], Quan Xu, Wenjing

Yang, Shitong Cui 등은 타이타니아 담지 Ce-Mn 촉매가 180℃에서 99.7%의 질소산화물 정화 성능을 보여준 결과를 발표하였다[9].

한국전력기술에서는 170~550℃의 넓은 온도영역에서 질소산화물 제거효율이 우수한 KoNOx®을 개발하였으며[10], 생산기술연구원은 150~200℃의 저온에서 활성화되는 금속 구조체 기반 SCR 촉매와 One-Step 코팅기술개발을 완료하여 상용화 단계에 이르렀다[11]. HSD엔진은 선박 내 최적화된 배치기술과 글로벌 선주와 선사, 조선소 등 고객의 다양한 요구사항을 반영해 터보과급기 후단에 설치되는 저온 SCR을 독자적으로 개발해 상용화 시켰다[12]. 국내 제품은 외국 기업들에 비해 상대적으로 낮은 제거효율과 촉매의 재현성 그리고 SOx에 대한 내구성 측면에서 부족한 수준이었으나, 최근 다양한 연구결과를 통해 촉매의 경쟁력이 강화되었다.

3. 연구방법론

본 연구에서는 저온 SCR 기술이 산업체에 적용되는 상황을 가정하여 경제성 분석을 실시하였다. 경제성 분석은 비용과 편익을 산출하여 경제적 타당성을 평가하는 방법론이다. 하지만 본 연구에서는 저온 SCR 기술이 산업체에 적용되는 다양한 여

건을 가정하여 기술 자체의 도입 여부에 따른 경제성을 상대적으로 비교하는데 초점을 맞추었다. 경제성 분석은 분석 대상 선정, 기술의 경제적 수명 산정, 할인율 결정, 경제성 지표 산출, 경제성 비교의 순으로 진행하였다.

3-1. 분석 대상 선정

분석 대상은 기존에 탈질설비가 구축되어 있지 않은 기업(Case 1)과 구축되어 있는 기업(Case 2)으로 구분하였으며, 기술의 도입효과를 비교하기 위하여 탈질설비가 구축되지 않은 기업이 기술을 도입할 계획이 없는 경우(Case 0)를 대조군으로 설정하였다. 분석 시나리오는 탈질설비가 구축되지 않은 기업(Case 1)이 일반 SCR 기술을 도입하는 경우(Scenario 1-1)와 저온 SCR 기술을 도입하는 경우(Scenario 1-2), 그리고 탈질설비를 이미 구축한 기업(Case 2)이 일반 SCR 기술을 그대로 사용하는 경우(Scenario 2-1)와 저온 SCR 기술로 대체하는 경우(Scenario 2-2)로 구분하여 설계하였다.

3-2. 기술의 경제적 수명 산정

기술의 경제적 수명은 SCR 기술과 관련된 특허 인용수명 및 기술/시장 영향요인을 반영하여 산정하였다. 기술의 경제적 수명이란 기술의 수명에 부

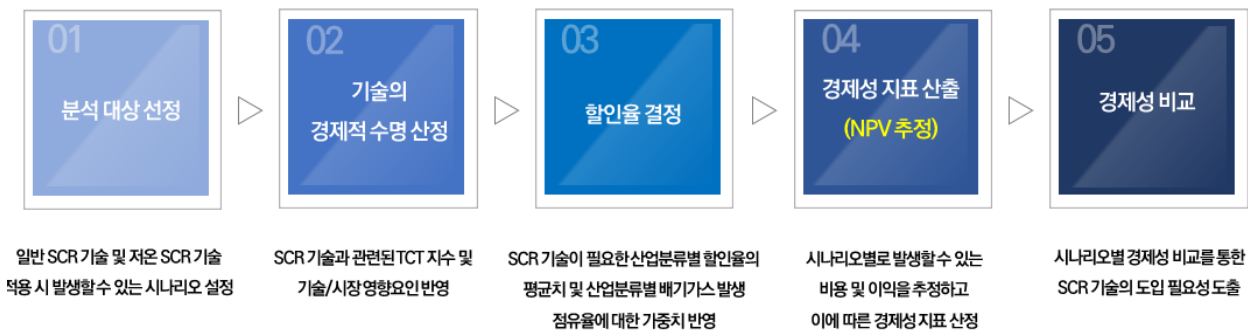


Fig. 3. Process of economic analysis method

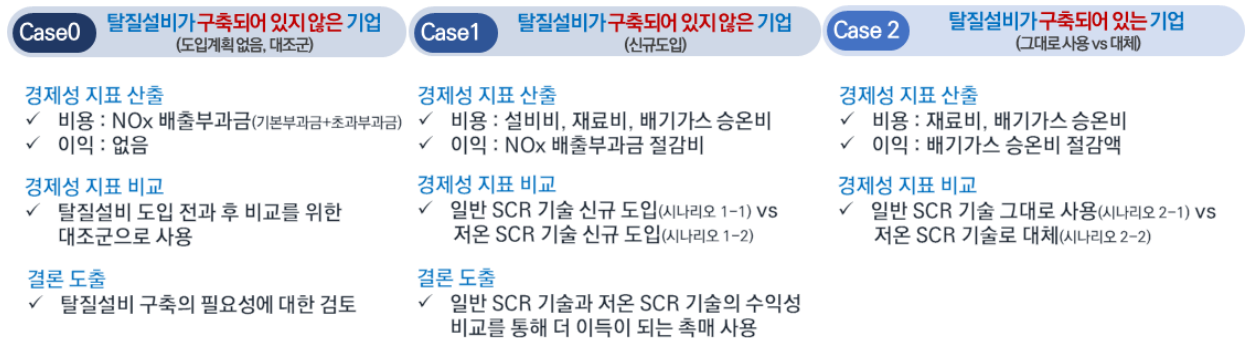


Fig. 4. Selection of analysis targets and scenario design

Table 7. TCT index of IPC code

| IPC | 기술명 | 평균 | Q1 | Q2 | Q3 |
|------|--------------------|------|----|----|----|
| B01J | 화학적, 물리적 방법에 의한 촉매 | 8.63 | 4 | 8 | 13 |



Fig. 5. Discount rate determination

정적 영향을 미치는 요인들이 발생하여 기술이 경쟁우위를 잃게 되는 미래의 평균시점까지를 의미하는 것으로 특정기술로 인하여 경쟁우위를 지니는 기간으로 정의한다[13]. 일반적으로 기술의 경제적 수명을 추정하는 명확한 기준이나 방법은 없지만, 본 연구에서는 특허인용수명(TCT, Technology cycle time) 지수에 기술요인, 시장요인을 고려하여 아래의 산식을 이용하여 추정하였다. TCT는 특허 DB를 분석하여 개별기술에 대한 특허의 연차별 인용 빈도수를 측정하고 평균 인용빈도 등의 기준치를 상회하는 기간을 수명추정에 활용하는 방법이다. 분석 대상 기술은 IPC 코드 B01J(화학적, 물리적 방법에 의한 촉매)로 분류되며, 이 기술에 대한 특허인용수명 지수는 다음과 같다[14].

TCT 지수와 함께 기술수명 결정에 영향을 주는 기술수명 영향요인은 해당분야 전문가그룹의 설문 조사를 통해 기술 및 시장 요인 분석 결과를 바탕으로 도출하였다. 이러한 정보들을 토대로 개별기술의 경제적 수명은 TCT 지수(Q1, Q2, Q3), 기술수명 영향요인 평가결과를 이용하여 9.2년으로 산출되었다.

$$\begin{aligned}
 \text{기술의 경제적 수명} &= TCT\text{지수} \times \left(1 + \frac{\text{영향요인 평점 합계}}{20}\right) \\
 &= 8\text{년}(\text{특허인용수명 중앙값}(Q2)) \times \left(1 + \frac{3}{20}\right) \\
 &= 9.2\text{년}
 \end{aligned}$$

3-3. 할인율 결정

할인율은 미래의 비용 및 이익을 현재가치로 환산할 때 사용하는 환원율을 의미하는 것으로, 이는 사업과 관련된 위험을 정량화한 것이기 때문에 해당 기술의 사업위험을 분석한 결과가 할인율에 반영되어야 한다. 이에 본 연구에서는 SCR 기술 사용 시 발생할 수 있는 잠재적인 위험을 정량화한 것으로 해당 사업이 갖는 기술위험, 시장위험 및 사업위험 등을 분석하여 경제성 산출 시 반영하였다. 할인율 적용 방법은 SCR 기술 적용이 가능한 산업분류별 할인율의 평균치를 반영하였고, 이 때 산업분류별로 배기가스 배출 점유율을 가중치로 고려하여 최종 할인율을 결정하였다. 경제성 분석에 활용된 할인율은 가중평균자본비용(WACC, Weighted Average Cost of Capital), 기술사업화 위험 프리미엄 및 규모 위험 프리미엄을 합산하여 결정하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{할인율}(\%) &= \text{가중평균자본비용}(WACC) \\
 &+ \text{기술사업화 위험 프리미엄}(\%) \\
 &+ \text{규모 위험 프리미엄}(\%)
 \end{aligned}$$

WACC는 산업분야별 가중치를 적용하였고, 기술사업화 위험 프리미엄은 전문가그룹의 평가의견을 반영하여 산정하였다. 그리고 규모 위험 프리미엄은 중기업 규모일 때 위험 프리미엄과 산업분야별 가중치를 적용하여 산정하였다. 기술사업화 위험 프리미엄의 경우, 기술과 시장, 사업 관점에서 해당 기술의 사업화 위험수준을 평가하여 자기자본 비용에 반영하는 것으로 평가항목은 평가요인(기술

성/권리성/시장성/사업성)의 분석 결과에 근거하여 평가하였다. 사업화 위험 평가표에서 산출한 평점과 위험 프리미엄 사이의 함수관계는 평점이 증가할수록 일정한 비율로 위험 프리미엄이 감소하는 선형함수 보다는 평점이 증가할수록 위험 프리미엄이 오목한 곡선 형태를 갖는 자연로그함수를 고려하였다. 할인율 산정 결과 WACC는 5.93%, 기술사업화 위험 프리미엄은 2.93%, 규모 위험 프리미엄은 9.64%로 산출되었다.

3-4. 경제성 지표 산출

경제성 지표는 시나리오별로 발생할 수 있는 비용 및 이익을 세부 지표로 산정하여 경제성을 산정하였다. 경제성을 비교 가능하도록 정량화하기 위하여 기술의 경제적 수명 기간 동안에 발생하는 비용과 이익을 현재가치로 환산하여 산정하는 순현재가치(NPV, Net Present Value)를 이용하였다.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{n\text{년차 이익 합계}}{(1 + \text{할인율})^n} - \sum_{t=0}^n \frac{n\text{년차 비용 합계}}{(1 + \text{할인율})^n}$$

4. 분석 결과

4-1. Case 0 : 탈질설비가 구축되어 있지 않은 기업 (도입 계획 없음, 대조군)

비용 추정은 NOx 배출부과금에 따라 추정하였으며, Case 0에서의 이익은 발생하지 않는 것으로 가정하여 분석하였다. NOx 배출부과금의 기본부과금 및 초과부과금은 「대기환경보전법」 제35조 및 「대기환경보전법 시행령」 제24조 및 제28조를 참고하였으며, NOx 배출량은 환경부에서 제공하는 「대기오염물질 배출시설 및 굴뚝TMS 부착사업장 배출량 현황」(2018) 통계 자료를 활용하여 산정하였다[6].

- Case 0(탈질설비가 구축되어 있지 않은 기업 (도입 계획 없음, 대조군)의 NPV는 다음과 같이 -5,229억원으로 분석되었다.

Table 8. Cost estimation method for Case 0

| 세부내용 | | 추정방법 |
|--------------|-----------|--|
| NOx 배출부과금 | 기본 부과금 | 배출허용기준 이내 질소산화물 배출량 × 배출부과금단가(2,130원/kg) × 연도별 부과금 산정지수(2018년 기준 : 1.7) × 농도별부과계수(배출허용기준의 90%이상 100% 미만으로 가정 : 0.95) × 지역별 부과계수(II지역 : 0.5) |
| | 초과 부과금 | 배출허용기준 초과 질소산화물 배출량 × 배출부과금단가(2,130원/kg) × 연도별 부과금 산정지수(2018년 기준 : 5.7) × 배출허용기준 초과율별 부과계수(배출허용기준의 400% 이상으로 가정 : 5.4) × 지역별 부과계수(II지역 : 1) × 위반횟수별 부과계수(0회로 가정 : 1) |

Table 9. NPV results for Case 0

(단위 : 억원)

| 구분 | 세부내용 | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | Y8 | Y9 | 합계 |
|---------|------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 비용 | 기본부과금 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 50 |
| | 초과부과금 | 759 | 759 | 759 | 759 | 759 | 759 | 759 | 759 | 759 | 759 | 7,592 |
| 비용 합계 | | 764 | 764 | 764 | 764 | 764 | 764 | 764 | 764 | 764 | 764 | 7,641 |
| 이익 | NOx 배출부과금 절감액 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 이익 합계 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 현재가계수 | | 1 | 0.91 | 0.83 | 0.76 | 0.69 | 0.63 | 0.58 | 0.53 | 0.48 | 0.44 | - |
| 비용 현재가치 | | 764 | 697 | 636 | 580 | 529 | 482 | 440 | 401 | 366 | 334 | 5,229 |
| 이익 현재가치 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NPV | | -5,229 | | | | | | | | | | |

4-2. Case 1 : 탈질설비가 구축되어 있지 않은 기업 (신규도입)

Case 1은 탈질설비가 구축되어 있지 않은 기업에 SCR 플랜트를 설치한 후, 일반 SCR 기술을 사용하는 경우(Scenario 1-1)와 저온 SCR 기술을 사용하는 경우(Scenario 1-2)로 구분하여 NPV 분석을 진행하였다.

일반 SCR 기술(신규도입)을 사용하는 Scenario 1-1의 비용은 다음과 같이 설치비와 연간 촉매 구매비, 연간 배기가스 승온비로 구성하였다. 설치비는

500MW급 플랜트 설치비와 덕트버너 설치비의 합이며, 연간 촉매 구매비는 일반 SCR 촉매 평균단가에 평균 사용량을 곱하여 산출하였다. 단, SCR 촉매의 경제수명 내 촉매 교환 기간(평균 4년)에 따른 추가 비용도 포함하였다. 연간 배기가스 승온비는 승온에 필요한 연료 및 전기비를 적용하였다.

Scenario 1-1의 이익은 일반 SCR 촉매 사용 전 NOx 배출량에 따른 배출부과금에서 일반 SCR 촉매 사용 후 NOx 배출량에 따른 배출부과금을 제외한 값으로 산출하였다. 단, 2022년부터 시행되는 1kg당 부과단가인 2,130원을 적용하였다. NOx 배

Table 10. Cost estimation method for Scenario 1-1

| 세부내용 | 추정방법 |
|-------------|--|
| 설치비 | 500MW급 플랜트 설치비(0.5억원/MW) + 덕트버너 설치비(0.5억원) |
| 연간 촉매 구매비 | 일반 SCR 촉매 평균단가(650만원/㎡) × 평균 사용량(400㎡) *SCR 촉매의 경제수명 내 촉매 교환 기간(평균 4년)에 따른 추가 비용 포함 |
| 연간 배기가스 승온비 | 연간 배기가스 승온에 필요한 연료 및 전기비(360억원/년) |

Table 11. Benefit estimation method for Scenario 1-1

| 세부내용 | 추정방법 |
|---------------|--|
| NOx 배출부과금 절감액 | 일반 SCR 촉매 사용 전 NOx 배출량에 따른 배출부과금 - 일반 SCR 촉매 사용 후 NOx 배출량에 따른 배출부과금 *2022년부터 시행되는 1Kg 당 부과단가인 2,130원으로 적용하여 산정 |

Table 12. NPV results for Scenario 1-1

(단위 : 억원)

| 구분 | 세부내용 | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | Y8 | Y9 | 합계 |
|---------|---------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 비용 | 설치비 | 255 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 255 |
| | 연간 촉매 구매비 | 26 | 0 | 0 | 0 | 26 | 0 | 0 | 0 | 26 | 0 | 78 |
| | 연간 배기가스 승온비 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 3,600 |
| 비용 합계 | | 641 | 360 | 360 | 360 | 386 | 360 | 360 | 360 | 386 | 360 | 3,933 |
| 이익 | NOx 배출부과금 절감액 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 277 |
| | 이익 합계 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 277 |
| 현가계수 | | 1 | 0.91 | 0.83 | 0.76 | 0.69 | 0.63 | 0.58 | 0.53 | 0.48 | 0.44 | - |
| 비용 현재가치 | | 641 | 328 | 299 | 273 | 267 | 227 | 207 | 189 | 185 | 157 | 2,775 |
| 이익 현재가치 | | 28 | 25 | 23 | 21 | 19 | 18 | 16 | 15 | 13 | 12 | 190 |
| NPV | | -2,585 | | | | | | | | | | |

Table 13. Cost estimation method for Scenario 1-2

| 세부내용 | 추정방법 |
|-------------|--|
| 설치비 | 500MW급 플랜트 설치비(0.5억원/MW) |
| 연간 촉매 구매비 | 저온 SCR 촉매 평균단가(2,500만원/m³) × 평균 사용량(400m³) *SCR 촉매의 경제수명 내 촉매 교환 기간(평균 4년)에 따른 추가 비용 포함 |
| 연간 배기가스 승온비 | 일반 SCR 촉매의 연간 배기가스 승온비×(1-절감률(70%)) |

Table 14. Benefit estimation method for Scenario 1-2

| 세부내용 | 추정방법 |
|---------------|--|
| NOx 배출부과금 절감액 | 저온 SCR 촉매 사용 전 NOx 배출량에 따른 배출부과금 - 저온 SCR 촉매 사용 후 NOx 배출량에 따른 배출부과금 *2022년부터 시행되는 1Kg 당 부과단가인 2,130원으로 적용하여 산정 |

Table 15. NPV results for Scenario 1-2

(단위 : 억원)

| 구분 | 세부내용 | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | Y8 | Y9 | 합계 |
|---------|---------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 비용 | 설치비 | 250 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 |
| | 연간 촉매 구매비 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 300 |
| | 연간 배기가스 승온비 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 1,080 |
| 비용 합계 | | 458 | 108 | 108 | 108 | 208 | 108 | 108 | 108 | 208 | 108 | 1,630 |
| 이익 | NOx 배출부과금 절감액 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 277 |
| | 이익 합계 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 277 |
| 현가계수 | | 1 | 0.91 | 0.83 | 0.76 | 0.69 | 0.63 | 0.58 | 0.53 | 0.48 | 0.44 | - |
| 비용 현재가치 | | 458 | 99 | 90 | 82 | 144 | 68 | 62 | 57 | 100 | 47 | 1,206 |
| 이익 현재가치 | | 28 | 25 | 23 | 21 | 19 | 18 | 16 | 15 | 13 | 12 | 190 |
| NPV | | -1,016 | | | | | | | | | | |

출량은 환경부에서 제공하는 「대기오염물질 배출 시설 및 굴뚝TMS 부착사업장 배출량 현황」(2018) 통계 자료를 활용하여 산정하였다.

일반 SCR 기술(신규도입)을 사용하는 Scenario 1-1의 NPV는 다음과 같이-2,585억원으로 분석되었다.

저온 SCR 기술(신규도입)을 사용하는 Scenario 1-2의 비용도 다음과 같이 설치비와 연간 촉매 구매비, 연간 배기가스 승온비로 구성된다. 설치비 중에서 승온에 필요한 덕트버너는 필요가 없기 때문에 Scenario 1-2에서는 500MW급 플랜트 설치비만 적용된다. 연간 촉매 구매비는 저온 SCR 촉매 평균 단가에 평균 사용량을 곱하여 산출하였다. 단, SCR

촉매의 경제수명 내 촉매 교환 기간(평균 4년)에 따른 추가 비용도 동일한 조건으로 포함하였다. 연간 배기가스 승온비는 일반 SCR 촉매의 연간 배기가스 승온비에서 절감률을 고려하여 산정하였다.

Scenario 1-2의 이익은 저온 SCR 촉매 사용 전 NOx 배출량에 따른 배출부과금에서 저온 SCR 촉매 사용 후 NOx 배출량에 따른 배출부과금을 제외한 값으로 산출하였다. 단, 2022년부터 시행되는 1kg당 부과단가인 2,130원을 적용하였다.

저온 SCR 기술(신규도입)을 사용하는 Scenario 1-2의 NPV는 다음과 같이-1,016억원으로 분석되었다.

4-3. Case 2 : 탈질설비가 구축되어 있는 기업

Case 2는 탈질설비가 구축되어 있는 기업이 기존에 사용하고 있던 일반 SCR 기술을 그대로 사용하는 경우(Scenario 2-1)와 저온 SCR 기술로 대체하는 경우(Scenario 2-2)로 구분하여 NPV 분석을 진행하였다.

일반 SCR 기술(그대로 이용)을 사용하는 Scenario 2-1의 비용 중에서 설치비는 기존 SCR 기술을 그대로 이용하기 때문에 발생하지 않으며, 연간 촉매 구매비는 일반 SCR 촉매 평균단가에 평균 사용량을 곱하여 산출하였다. 단, SCR 촉매의 경제수명

내 촉매 교환 기간(평균 4년)에 따른 추가 비용은 포함하였다. 연간 배기가스 승온비는 승온에 필요한 연료 및 전기비를 적용하였다. 그리고 Scenario 2-1의 이익으로 연간 배기가스 승온비 절감액은 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

일반 SCR 기술(그대로 이용)을 사용하는 Scenario 2-1의 NPV는 다음과 같이 -2,520억원으로 분석되었다.

저온 SCR 기술로 대체하는 Scenario 2-2의 비용 중에서 설치비는 기존 SCR 기술을 그대로 이용하기 때문에 발생하지 않으며, 연간 촉매 구매비는

Table 16. Cost estimation method for Scenario 2-1

| 세부내용 | 추정방법 |
|-------------|--|
| 설치비 | 없음 |
| 연간 촉매 구매비 | 일반 SCR 촉매 평균단가(650만원/m ³) × 평균 사용량(400m ³) *SCR 촉매의 경제수명 내 촉매 교환 기간(평균 4년)에 따른 추가 비용 포함 |
| 연간 배기가스 승온비 | 연간 배기가스 승온에 필요한 연료 및 전기비(360억원/년) |

Table 17. NPV results for Scenario 2-1

(단위 : 억원)

| 구분 | 세부내용 | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | Y8 | Y9 | 합계 |
|---------|-----------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 비용 | 설치비 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 연간 촉매 구매비 | 26 | 0 | 0 | 0 | 26 | 0 | 0 | 0 | 26 | 0 | 78 |
| | 연간 배기가스 승온비 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 3,600 |
| 비용 합계 | | 386 | 360 | 360 | 360 | 386 | 360 | 360 | 360 | 386 | 360 | 3,678 |
| 이익 | 연간 배기가스 승온비 절감액 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 이익 합계 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 현가계수 | | 1 | 0.91 | 0.83 | 0.76 | 0.69 | 0.63 | 0.58 | 0.53 | 0.48 | 0.44 | - |
| 비용 현재가치 | | 386 | 328 | 299 | 273 | 267 | 227 | 207 | 189 | 185 | 157 | 2,520 |
| 이익 현재가치 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NPV | | -2,520 | | | | | | | | | | |

Table 18. Cost estimation method for Scenario 2-2

| 세부내용 | 추정방법 |
|-------------|--|
| 설치비 | 없음 |
| 연간 촉매 구매비 | 저온 SCR 촉매 평균단가(2,500만원/m ³) × 평균 사용량(400m ³) *SCR 촉매의 경제수명 내 촉매 교환 기간(평균 4년)에 따른 추가 비용 포함 |
| 연간 배기가스 승온비 | 연간 배기가스 승온에 필요한 연료 및 전기비(360억원/년) |

Table 19. Benefit estimation method for Scenario 2-2

| 세부내용 | 추정방법 |
|-----------------|--|
| 연간 배기가스 승온비 절감액 | 일반 SCR 촉매 그대로 이용 시 연간 배기가스 승온비 - 저온 SCR 촉매 사용 후 연간 배기가스 승온비 *저온 SCR 촉매 사용 후 연간 배기가스 승온비는 일반 SCR 촉매에 비해 70% 절감되는 것으로 가정 |

Table 20. NPV results for Scenario 2-2

(단위 : 억원)

| 구분 | 세부내용 | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | Y8 | Y9 | 합계 |
|---------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 비용 | 설치비 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 연간 촉매 구매비 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 300 |
| | 연간 배기가스 승온비 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 3,600 |
| 비용 합계 | | 460 | 360 | 360 | 360 | 460 | 360 | 360 | 360 | 460 | 360 | 3,900 |
| 이익 | 연간 배기가스 승온비 절감액 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 2,520 |
| | 이익 합계 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 2,520 |
| 현가계수 | | 1 | 0.91 | 0.83 | 0.76 | 0.69 | 0.63 | 0.58 | 0.53 | 0.48 | 0.44 | - |
| 비용 현재가치 | | 460 | 328 | 299 | 273 | 318 | 227 | 207 | 189 | 220 | 157 | 2680 |
| 이익 현재가치 | | 252 | 230 | 210 | 191 | 174 | 159 | 145 | 132 | 121 | 110 | 1724 |
| NPV | | -956 | | | | | | | | | | |

저온 SCR 촉매 평균단가에 평균 사용량을 곱하여 산출하였다. 단, SCR 촉매의 경제수명 내 촉매 교환 기간(평균 4년)에 따른 추가 비용은 포함하였다.

Scenario 2-2의 이익은 일반 SCR 촉매 그대로 이용 시 연간 배기가스 승온비에서 저온 SCR 촉매 사용 후 연간 배기가스 승온비를 제외한 값으로 산출하였다. 여기서 저온 SCR 촉매 사용 후 연간 배기가스 승온비는 일반 SCR 촉매에 비해 70% 절감되는 것으로 가정하였다.

저온 SCR 기술로 대체하는 Scenario 2-2의 NPV는 다음과 같이 -956억원으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 최근 미세먼지 문제 해결에 대한 국민적 요구가 높아짐에 따라 정부에서 발표한 미세먼지 관련 대책과 시장 및 기술개발 현황을 조사하였다. 그리고 저온 SCR 기술이 산업체에 적용되는 상황을 가정하여 시나리오별 경제성 분석을 실시하였다. 시나리오별 최종 결과를 NPV로 나타낸 결과는 다음과 같다. 시나리오별 객관적 비교를 위

하여 NPV 산정 시 이익 항목으로 NOx 배출부과금 절감액과 연간 배기가스 승온비 절감액을 활용하였으며, 실제 플랜트의 생산활동을 통해 얻을 수 있는 최종제품의 수익은 제외하였기 때문에 NPV는 마이너스의 값으로 구해졌다. 따라서 NPV의 상대적인 값을 비교하여 시나리오별 경제성을 분석할 수 있다.

탈질설비가 구축되어 있지 않은 기업(Case 1)이 일반 SCR 기술을 신규로 도입하는 경우 NPV는 도입 전에 비해 102% 더 높았으며, 저온 SCR 기술을 신규로 도입하면 415% 더 높은 것으로 분석되었다. 그리고 저온 SCR 기술 도입에 따른 NPV는 일반 SCR 도입에 비해 154% 더 높은 값이 도출되었다. 반면에 탈질설비가 구축되어 있는 기업(Case 2)이 기존에 보유하고 있던 일반 SCR 기술에서 저온 SCR 기술로 대체하여 사용하는 경우, 일반 SCR 기술을 사용할 때보다 경제성이 164% 더 높은 것으로 분석되었다.

정부의 미세먼지 관리 종합계획에 따르면, 앞으로 미세먼지 저감을 위한 강도 높은 정책이 시행될 것으로 예상된다. 대기관리권역 확대, 배출허용기준 강화 등 배출규제는 더욱 강화될 것이고, 특히

Table 21. NPV results for All Scenarios

(단위 : 억원)

| 구분 | Case 0 | Case 1 | | Case 2 | |
|-----|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| | 탈질설비 미도입 (대조군) | Scenario 1-1 (일반 SCR 신규 도입) | Scenario 1-2 (저온 SCR 신규 도입) | Scenario 2-1 (일반 SCR 계속 이용) | Scenario 2-2 (저온 SCR로 대체) |
| NPV | -5,229 | -2,585 | -1,016 | -2,520 | -956 |

대기관리권역 내 일정기준 이상 배출사업장에 NOx 배출허용총량을 할당하고 그 이내로 배출을 허용하는 총량제(Cap & Trade)가 확대 강화될 것이다. 이에 기업들은 배연탈질을 위한 SCR 기술의 도입을 고민할 것이다. 이 때 본 연구에서 도출한 시나리오별 기술도입에 따른 경제성분석 결과가 의사결정하는데 판단근거로 활용이 가능할 뿐만 아니라, 연구자들도 저온 SCR 기술을 상용화하는데 비용적인 측면에서 기술개발 목표를 설정하고 기술이전하는데 참고자료로도 활용도가 높을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(B9-2462-01)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

References

1. 관계부처 합동, 2019, 미세먼지 관리 종합계획 (2020~2024)
2. 관계부처 합동, 2018, 비상·상시 미세먼지 관리 강화대책
3. 관계부처 합동, 2017, 미세먼지 관리 종합대책
4. 「대기환경보전법」법률 제16306호, 2019. 4. 2. 일부개정, 2020. 4. 3. 시행
5. 「2018년도 가격변동지수 및 2019년도 부과금(과징금)산정지수」환경부고시 제2018-222호, 2018. 12. 24. 발령, 2019. 1. 1. 시행
6. 「대기환경보전법 시행령」대통령령 제30589호, 2020. 3. 31. 일부개정, 2020. 4. 3. 시행
7. Selective Catalytic Reduction Catalyst(SCR Catalyst) Market 2019 With Top Countries Data, Market Watch 2019
8. Kwang Hee Park, Seung Han You, Young Ok Park, Sang Wung Kim, Wang Seog Cha, 2011, NOx Conversion of Mn-Cu Catalyst at the Low Temperature Condition, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 12, No. 9, pp. 4250-4256
9. Quan Xu, Wenjing Yang, Shitong Cui, Jason Street, Yan Luo, 2018, Sulfur resistance of Ce-Mn/TiO₂ catalysts for low-temperature NH₃-SCR, <https://doi.org/10.1098/rsos.171846>
10. 한국전력기술 홈페이지 <https://www.kepco-enc.com/portal/contents.do?key=1288>
11. 생산기술연구원 홈페이지 <https://www.kitech.re.kr/webzine/view.php?idx=290&m=03>
12. HSD엔진 홈페이지 <http://www.hsdengine.com/>
13. Jongtaik Lee, Hyunwoo Park, 2018, Study for charge of economic life of technology(TCT, technology cycle time), Korea Technology Innovation Society, pp. 496-505
14. 산업통상자원부, 2017, 기술가치평가 실무가이드