

LMP(Locational Marginal Price) 방식에 의한 지역별 차등 전기요금 제도의 효율성 분석

송재도*

요약 : 지역별 차등 전기요금 제도의 도입이 논의되고 있으며, 그 방법론으로 LMP(Locational Marginal Price) 방식이 유력한 대안으로 언급되고 있다. 이런 배경하에서 본 연구는 수리모형을 통해 LMP 방식이 사회후생을 극대화하는 결과를 도출함을 제시한다. 분석 결과 사회후생 극대화 가격은 지역별 한계발전비용과 동일하며, 지역별 한계비용의 차이는 송전손실에 의해 사라지는 가치와 송전망 투자에 대한 보상을 반영한다. 그리고 송전용량이 최적 용량 미만인 경우 송전망 투자에 대한 보상액은 증분비용을 초과하여 송전망 투자의 유인이 제공된다. 반면 송전용량이 최적 용량을 초과할 경우 송전망 투자에 대한 보상액은 증분비용보다 낮아지며 용량이 상당히 큰 경우 0이 되어 투자액이 회수되지 않고 송전망 투자가 억제된다. 이는 LMP 개념하에서의 송전망 투자 보상 방식과 동일하며, 이 방식이 사회후생 극대화 및 최적 송전망 투자 시그널을 제공함을 의미한다. 이상의 분석결과는 LMP의 특성을 이해하는 데 기여하며, 추가로 본 연구에서는 LMP 개념의 도입 시 전력시장에 어떤 변화가 필요한지를 논의하였다.

주제어 : 계시별 요금, 입지선정 유인, 전송망, 지역별 차등요금, 지역한계가격, 최대부하

JEL 분류 : L51, Q41, Q48

접수일(2024년 4월 8일), 수정일(2024년 6월 4일), 게재확정일(2024년 7월 26일)

* 전남대학교 경영대학 경영학부 교수, 단독저자(e-mail: sjaedo@chonnam.ac.kr)

The Effect of Regional Differential Electricity Rate System using LMP (Locational Marginal Price)

Jaedo Song*

ABSTRACT : The introduction of a regional differential electricity rate system is being discussed, and the LMP (Locational Marginal Price) method is mentioned as a promising alternative. Under this background, this study analyzed a mathematical model and suggests that the LMP method produces results that maximize social welfare. The analysis was conducted separately for long-term decision-making where transmission capacity can be expanded, and for short-term decision-making in which transmission capacity is given. The analysis for short-term decision-making was conducted for peak load situations where capacity is insufficient and for non-load situations with spare capacity. The results of the analysis suggested that the price to maximize social welfare is equal to the marginal power generation cost by region, and the difference in marginal cost by region reflects the value lost due to transmission loss and compensation for transmission network investment. In addition, if the transmission capacity is less than the optimal capacity, the compensation for transmission network investment exceeds the incremental cost, providing an incentive to invest in the transmission network. If the transmission capacity exceeds the optimal capacity, the compensation for transmission network investment becomes lower than incremental cost or zero and the investment is not recovered, suppressing the investment in transmission networks. The results are the same as the LMP method suggests, and this means that this method maximizes social welfare and provides an optimal transmission network investment signal. The above analysis results contribute to understanding the characteristics of LMP. In addition, this study discussed what changes are needed in the electricity market when introducing the LMP concept.

Keywords : Differential rate by region, Locational marginal price, Peak-load, Location selection incentive, Time of use tariff, Transmission network

Received: April 8, 2024. Revised: June 4, 2024. Accepted: July 26, 2024.

* Professor, College of Business Administration, Chonnam National University, Sole author (e-mail: sjaedo@chonnam.ac.kr)

1. 서론

지역별 수요와 공급의 불균형 및 이에 따른 막대한 송전망 투자 필요성이 전력산업의 중요한 이슈로 부각되고 있다. 안재균(2021)에서는 수도권의 2019년 전력 자립도는 69.9%인 반면 비수도권의 전력자립도는 131.6%로 100%를 크게 상회하며, 더 상세한 지역별 전력자립도에는 상당한 편차가 나타나고 있음을 보여주었다. 이런 지역별 수급 불균형을 해소하기 위한 송전망 투자는 필요한 만큼 빠르게 이루어지지 못하고 있으며, 계통이 포화상태에 이르러 전압안정도, 과도안정도, 고장전류 등의 측면에서 기술적 한계에 직면하고 있다. 향후 비수도권에서 재생에너지 공급이 더욱 확대될 것이 예상되며, 이로 인해 수급 불균형과 송전망 투자 필요성은 더욱 증가될 것으로 예측된다. 이철휴(2023)의 경우 2022년 말 구축되어 있는 35,451C-km의 송전망 대비 2050년에는 약 2.3 배 규모의 전력망 구축이 필요하다고 주장하였다. 이 문제를 완화하기 위해서는 지역별로 전기요금을 달리함으로써 전기 수요와 공급의 효율적 입지선정 유인을 제공하여 지역별 전력 자립도의 편차를 감소시켜야 하며, 전송망 투자에 대한 합리적인 유인 제공 또한 필요하다.

관련하여 2023.6.14일 제정된 ‘분산에너지 활성화 특별법(시행 2024.6.14.)’의 제45조(지역별 전기요금)에서는 “전기판매사업자는 국가균형발전 등을 위하여 「전기사업법」 제16조제1항에 따른 기본공급약관을 작성할 때에 송전·배전 비용 등을 고려하여 전기요금을 달리 정할 수 있다”고 규정함으로써 지역별 차등요금을 도입할 수 있는 제도적 기반이 마련되었다.

한편 지역별 차등요금을 결정하기 위한 방법론으로는 LMP(Locational Marginal Price)와 송전이용요금(Transmission Charge)의 두 가지 방식이 주로 논의되고 있다. 두 방식 중 LMP의 경우 이론적으로 사회후생 극대화를 달성하는 방식이며, 이론적인 완결성을 갖추고 있다. 반면 송전이용요금 방식의 경우 사회후생 극대화를 담보하지 못한다. 따라서 미국의 상당수 지역들, 캐나다(Ontario), 뉴질랜드, 싱가포르, 아르헨티나, 칠레, 멕시코, 필리핀, 브라질, 러시아, 호주와 같은 많은 국가들에서 LMP 방식이 이용되고 있으며, 상대적으로 소수의 국가들(영국, 아일랜드, 북아일랜드, 노르웨이, 스웨덴)에서만 송전이용요금 방식이 이용되고 있다(안재균, 2023). 또한 NationalGridESO(2022) 등에

서는 송전이용요금 방식을 이용하고 있는 영국에서도 LMP 방식이 더 합리적이라는 공감대가 형성되어 있으나 기존 송전이용요금 방식에서 운영되어온 각종 제도의 변경이 어렵기 때문에 이 체제가 유지되어 오고 있다고 주장한 바 있다.

한국에서도 LMP 방식에 대한 검토가 진행되고 있으며, 과거에 이미 LMP 방식에 대한 많은 문헌들이 존재하지만 기존 문헌들은 LMP 개념의 특성을 효과적으로 전달하는데 한계가 있다고 판단된다. 전송가격은 두 지점의 전기 현물가격(Spot Price)의 차이를 반영해야 함을 설명함으로써 LMP의 이론적 토대를 제공한 Schweppe et al.(1988)의 경우 현실의 구체적인 이슈들을 모두 수리모형에 반영함으로써 모형의 이해가 용이하지 않을 뿐 아니라 LMP의 중요 특성을 체계적으로 정리하고 있지 못하였다. 반면 역시 LMP의 이론적 토대에 기여한 Hogan(1992, 1999)의 경우 정성적 설명만을 다루고 있다.

한편 수리모형을 이용해 LMP 방식의 기본적 특성들을 해설한 Hogan(2019)의 경우 LMP 방식이 사회후생을 극대화 한다는 것을 전제하고, LMP하에서 지역별 수요와 가격, 송전망 보상이 어떻게 발생하는지를 설명하고 있다. 그러나 사회후생을 정의하지 않았으므로 인해 LMP 방식이 사회후생을 극대화함을 명시적으로 보여주지는 않고 있으며, 지역별 발전한계비용을 상수로 가정했기 때문에 송전용량의 변화가 송전망 보상에 미치는 영향을 명시적으로 설명하지 못하였다. 기타 송전손실을 고려하지 않았다는 점 등 세부적인 모형에서 본 연구와는 차이가 있다.

이 외에 최근 LMP 관련 이론 연구들은 탄소배출 문제까지를 고려하는 LMP 방식 (González-Cabrera et al., 2019), 계통운영자(ISO, Independent System Operator)의 순이익 문제(Li and Tesfatsion, 2011), Nodal Pricing 대비 Zonal Pricing의 비효율성 문제 (Sarfati et al., 2019), 최적 계통운영을 통한 LMP 구현을 위한 알고리즘(Sioshansi et al., 2008), 발전기 및 수요자의 전략적 행동(Tang and Jain, 2013), 계통에 연계되는 발전기 수와 부하의 불확실성 증대 문제(Tesfatsion, 2024)와 같이 LMP를 구현하는 과정에서 발생하는 다양한 이슈들을 다루고 있으며, LMP의 기본적 특성들을 이해하는 데에는 적합하지 않다. 이 외에 국내 문헌들을 포함한 대다수 문헌들은 LMP가 사회후생 극대화를 달성함을 전제로 이를 현실에 적용하기 위한 이슈들을 정성적으로 다루고 있다(김승완, 2022; 안재균, 2023; NationalGridESO, 2022; Pollitt, 2023; Harvey and Hogan, 2022).

이런 배경하에서 본 연구는 2개 지역과 단일한 전송망만이 존재하는 단순한 상황을 가정한 수리모형을 이용하여 사회후생 극대화 의사결정이 LMP 방식과 동일한 결과를 산출함을 보여주며, 송전망 제약 여부 및 수준에 따라 후생 극대화 결과와 송전망 보상이 어떻게 변화하는지를 제시하고자 한다. 또한 수리모형 분석결과를 기반으로 한국의 기존 전력시장 제도하에서 LMP 방식의 지역별 차등요금 제도를 도입할 경우 고려되어야 할 이슈들을 논의할 것이다. 이를 통해 정성적 설명에 의존하거나 지나치게 복잡한 수리모형에 의해 다소 모호하게 설명되어온 LMP 개념을 명확히 설명하며, 국내 연구자들 또는 정책입안자들이 LMP의 특성을 총괄적으로 이해하고 관련 논의를 활성화하는데 기여하고자 한다.

II. LMP에 대한 개념 정리 및 기존 문헌 검토

Locational Marginal Pricing은 지역별로 상이한 전기의 가치, 부하, 발전용량, 송전망의 물리적 제약 등을 반영하여 지역별로 상이한 도매 전기가격 설정하는 방식을 의미하며, LMP는 Locational Marginal Pricing의 결과로 나타나는 지역별 도매가격이라고 할 수 있다. 이때 지역은 이론적으로 모선(송/배전선, 발전기, 변압기, 조상설비 등이 접속되어 있는 공동도체)으로 정의되지만 실제 적용의 용이성과 기타 정책적 목적을 고려하여 모선들의 지역별 군집으로 정의되기도 한다(Zonal Pricing). LMP는 지역별 도매가격의 설정에 사용될 뿐 아니라 지역별 LMP의 차이는 해당 지역 간 송전용량에 대한 보상액을 정의하는 데도 이용된다(New England ISO의 홈페이지 FAQ). 또한 소매가격이 도매가격을 반영하는 것이 사회후생을 증대시키는 방식임을 고려하면 LMP는 소매요금의 지역별 차등요금 제도를 사회후생 극대화 방식으로 구현하는 방법론이라고도 할 수 있다.

위의 설명에서 주목해야 할 것은 LMP는 지역별 가격이며, 지역별로 상이한 수요량, 발전용량, 송전 제약 등을 반영하여 지역별로 상이하게 결정된다는 것이다. 현재 우리나라의 전기가격(소매 및 도매)은 모든 지역에서 동일하게 결정되고 있으며, 지역별 상이한 여건을 반영하지 못함으로써 사회후생을 극대화하지 못하고 있다. LMP는 모든 지역에서 동일한 가격을 적용한다는 제약을 제거한 방식이며, 사회후생 증대를 가능케 한다.

LMP는 지역별로 주어진 수요하에서 한계발전비용 및 송전망 제약(Congestion)과 송전 손실을 고려한 비용최소화 급전계획하에서의 지역별 한계비용으로 결정되며(Hogan, 1992, 1999; Schweppe et al., 1988), 사회후생을 극대화하는 한계비용 가격설정 원칙을 따른다.

또한 지역별 LMP의 차이는 해당 구간의 송전망 투자에 대한 보상액을 결정한다. 만약 지역 1에서 전기를 생산하는 한계비용이 지역 2에서의 한계비용보다 높다면 송전망 투자를 통해 지역 2에서 지역 1로 송전을 가능케 할 경우 송전망은 두 지역의 한계비용(LMP) 차이만큼 부가가치를 창출한다. 따라서 송전망 단위용량의 경제적 가치는 두 지역의 LMP 차이로 정의할 수 있는 것이다(Hogan, 1992, 1999). Schweppe et al.(1988)에서는 송전망 부족에 의한 혼잡비용은 변동비용이 가장 싼 발전기를 동원한다는 급전순위(Merit Order) 원칙을 이행하지 못함에 따른 비용이라고 설명하고 있으며, 이 혼잡비용의 개념이 송전망의 경제적 가치를 설명하는 것이다.

안재균(2021)에서는 PPA(Power purchase Agreement)를 비롯한 개인 간 전력거래(P2P 거래)가 증대됨에 따라 합리적인 송·배전망 이용료 산정이 점차 중요해지고 있다고 주장한 바 있다. 그런데 기존 우리나라의 송·배전망 이용료 산정은 개념적으로 투자보수율 규제 방식에 가까우며, 이 방식은 LMP 방식과는 달리 경제적 가치를 반영하지 못한다는 점에서 한계를 가지고 있다. 이론적으로 타당한 송·배전망 이용료 산정을 위해서는 LMP 개념의 도입이 필요하다.

한편 김승완(2022)에서는 전력망 요금 계산에 반영 가능한 요소를 크게 인프라 비용, 망손실비용, 혼잡관리비용, 접속관리비용, 계통운영비용, 기타 정책비용으로 나눌 수 있다고 하였다. 이때 인프라 비용은 송전망 관련 자본비용을 의미하며, 혼잡관리비용은 선로의 물리적(용량) 제약으로 인해 추가적으로 발생하는 비용을 의미하기 때문에 개념적으로 상이하다. 그런데 송전망이 창출하는 가치는 이 혼잡관리비용의 감소이다. 즉, 단위 송전용량 증설이 감소시키는 혼잡관리비용이 송전용량 투자(인프라 비용)에 대한 적정 보상액이 되며, 앞서 언급된 지역별 LMP 차이가 그 보상액에 해당한다. 이런 해석에 따르면 혼잡관리비용은 LMP하에서는 인프라 비용을 보상하는 데 사용되는 개념이라고도 할 수 있다. LMP 개념은 김승완(2022)에서 언급된 6가지 요소 중 인프라 비용(혼잡관리비용)과 망손실비용을 명시적으로 반영하며, 기타 3가지 비용은 별도로 처리된다.

Hogan(1992)에서는 특정 지역 1에서의 LMP를 아래와 같이 개념적으로 정의하고 있다.

$$LMP_1 = \text{해당 지역의 한계발전비용} \\ = \text{송전지역 한계발전비용}(LMP_2) + \text{송전손실비용} + \text{혼잡비용}$$

이 표현에는 송전손실 개념이 포함되어 있다. 예를 들어 지역 1의 수요를 충족하기 위해 지역 2로부터 전력을 전송받는 경우 송전손실이 3%라면 지역 2에서 1.03kWh를 송전해야 송전손실 이후 지역 1에서 1.00kWh를 실제 이용할 수 있게 된다. 따라서 지역 2에서 한계발전비용이 x원/kWh라면 추가로 송전손실비용 0.03×x원/kWh이 더해져야 하며, 혼잡비용(송전망에 대한 자본비용 보상)이 더 추가되어 LMP_1 이 결정되는 것이다. 그리고 지역 1에서의 수요가 지역 1에서 생산된 전기와 지역 2에서 전송되는 전기의 합으로 충당되는 경우 “지역 2에서의 한계발전비용(LMP_2)+송전손실비용+혼잡비용”과 지역 1에서의 한계발전비용이 같아지며, 두 값 모두 LMP_1 을 정의한다. 그리고 이는 지역 1의 한계발전비용(LMP_1)과 지역 2의 한계발전비용(LMP_2)의 차이가 두 지역을 연결하는 송전망에 대한 보상을 정의함을 의미한다.

$$LMP_1 - LMP_2 = \text{송전손실비용} + \text{혼잡비용}$$

위 식에서 송전손실비용은 송전망 소유자에게 귀속되는 것은 아니며, 실제 전력 조달을 위해 발전사업자에게 지급되는 것으로 보아야 한다. 앞서 예에서 지역 1에 1kWh를 추가 공급하기 위해서 지역 2로부터 1.03kWh를 조달해야 한다면 0.03kWh의 전력구매비가 송전손실비용이며, 이 금액은 지역 2의 발전사업자에게 귀속되는 것이다. 그리고 이 비용은 송전손실로 인해 누군가의 가치로 귀속되지 않고 사라지는 비용이 된다.

또한 제2절의 분석에서 구체적으로 제시될 것인데 혼잡비용은 사회후생 극대화 상황에서 실제 송전망 1단위 증설에 필요한 투자비(증분비용 또는 장기한계비용)와 같거나 더 커지며, 송전망 보유자에게 귀속된다. 그러나 Hogan(1992, 1999)에서는 송전망에서 규모의 경제가 발생할 경우 LMP 개념에 의해 송전망 투자가 완전히 회수될 수 없으며, Read(1988)과 Read and Sell(1988)을 인용하면서 통상 송전망에는 규모의 경제가 작용한다고 언급하였다. 이 문제에 대해서 아래에서 다시 논의할 것이다.

한편 일부 문헌들에서는 LMP는 효율적 계통운영을 위한 지역신호를 제공하는 반면 전원 및 부하(수요)의 입지선정과 같은 장기 의사결정을 위한 가격신호는 LMP보다는 송전이용요금제에서 전달될 수 있다고 설명하고 있다. 그러나 이 주장은 Hogan(1992, 1999)과 Schweppe et al.(1988)의 설명 및 본 연구의 분석결과와는 다른 것으로 이해된다. 제2절에서 분석되는 사회후생 극대화 의사결정에서 발생하는 지역별 LMP는 사회후생 극대화 또는 주어진 수요하에서의 최소비용 계통운영의 결과 발생하는 지역별 한계비용을 반영한다. 그리고 지역별 가격이 지역별 한계비용을 반영할 때 최적의 입지 선정 유인이 전달된다는 것은 일반적인 원칙이다. 지역별 한계비용을 반영하는 LMP 방식은 이윤·효용 극대화를 추구하는 발전기 및 수용가의 입지 선정을 위한 최적 신호를 전달한다고 보아야 한다. 또한 LMP 차이에 의해 정의되는 혼잡비용보다 낮은 가격에 송전망을 구축할 수 있는지 여부에 근거한 송전망 증설 의사결정을 가능하게 한다는 점에서 LMP는 송전망 투자를 위한 최적 신호를 제공하는 것으로 이해된다.

이상의 논의와 관련하여 언급된 문헌들 외에도 LMP 관련 다수의 국내 문헌들이 있다. 김승완(2022)의 경우 한국의 실제 상황에서 LMP를 산출해 보았으며, 재생에너지 비중이 30% 수준이 될 때 유의미한 LMP 차이가 발생한다고 하였다. 그리고 박명덕(2015) 및 이상엽 등(2021)에서는 송전이용요금 방식으로 한국의 실제 상황에서 지역별 송전요금 수준을 분석/제시한 바 있다. 그리고 정성훈 등(2009)의 경우 LMP의 계산방식과 관련하여 계수값의 설정 방식에 관심을 두고 수리모형을 분석하였으며, 김상훈, 이광호(2007)에서는 송전제약은 고려하지 않고 송전손실만을 고려한 수리모형을 분석하였다. 그러나 실증분석들의 경우 LMP의 개념적 이해에 대한 설명이 매우 간략하여 LMP의 특성과 산출 과정을 이해하기 어려우며, 수리모형들은 LMP의 일부 특성들만을 반영하고 있어 LMP의 전반적 특성에 대한 이해를 도모하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 2개의 지역과 단일 송전선만을 고려한 단순 수리모형하에서 사회후생 극대화 결과를 분석함으로써 LMP의 구체적 특성의 이해를 도모하고자 한다.

Ⅲ. 수리모형 분석의 가정

본 연구의 수리모형은 2개 지역만 존재하며, 두 지역이 단일 송전선로로 연결된 상황

을 다룬다. Hogan(1992)에서는 두 지점 간 전력 거래가 발생할지라도 직접 두 지역을 연결하는 송전설비 이외에 연결된 다른 송전설비 또한 영향을 받는 Loop Flow 문제가 발생하며, 이것이 송전망 투자비 회수의 문제를 복잡하게 만드는 한 원인이 된다고 하였다. 따라서 두 지역만을 고려할 경우 현실의 Loop Flow의 문제를 고려할 수 없다는 문제가 발생한다. 그러나 Hogan(1992)는 또한 LMP 개념을 적용할 때에는 Loop Flow 문제를 고려치 않아도 된다고 설명하고 있으며, 이 설명에 따르면 두 지역만을 고려하는 단순화된 모형을 통해 LMP의 특성을 파악하는 것이 그다지 문제가 되지 않는다고 판단된다. 지역 1과 지역 2의 수요는 아래와 같이 주어진다고 가정한다.

$$Q_1 + c_L T = a_1 - b_1 P_1, \quad Q_2 - T = a_2 - b_2 P_2 \quad (1)$$

Q_1 과 Q_2 는 지역 1과 지역 2에서 생산되는 전기의 양을 의미하며, T 는 지역 2에서 지역 1로 전송되는 전기량을 의미한다. 그런데 송전 과정에서 손실이 발생하기 때문에($c_L < 1$) 지역 2에서 T 의 송전이 발생해도 지역 1에서 사용 가능한 전송량은 $c_L T$ 로 표현되는 것이다. 즉, 식에서 좌측항들은 각 지역의 수요량이 각 지역의 생산량과 전송량에 의해 충족된다고 표현된 것이다. 그리고 수요량은 가격의 선형 함수에 의해 결정된다고 가정된 것이다($a_i, b_i > 0$).

다음으로 발전비용 함수와 송전 비용함수는 아래와 같이 가정한다.

$$C_1(Q_1) = f_1 + cQ_1^2, \quad C_2(Q_2) = f_2 + c(Q_2 - Q_{2R})^2, \quad C(T) = f_T + c_T T \quad (2)$$

이 비용함수들 중 $C(T) = f_T + c_T T$ 는 송전비용을 표현한 것이다. 이때 $c_T (> 0)$ 는 통상의 변동비용이라기보다는 송전용량 증설에 따른 증분비용(장기한계비용)을 의미한다. 즉, 단기에서 송전용량은 주어진 것으로 보기 때문에 변동(한계)비용은 0으로 볼 수 있지만 용량을 변동시킬 수 있는 장기분석이나, 단기에서 최대부하 상황의 분석에서는 용량증설 비용을 변동비 형태로 인식하게 되며, 이를 증분비용이라고 표현하게 된다 (Crew et al., 1995). 반면 단기에서 송전제약이 발생하지 않는 비부하 상황에서는 용량증설 비용을 고려하지 않아야 하기 때문에 송전 증분비용 c_T 를 고려하지 않게 된다. f_T

는 송전망 건설의 고정비를 표현한 것이며, $f_T(> 0)$ 의 존재는 송전망 건설에서 규모의 경제가 있음을 표현하는 것이다.

다음으로 $C_i(Q_i)$ 는 각 지역의 발전비용을 표현한 것이다. f_1 과 f_2 의 고정비용을 표현한 것이며, 변동비는 2차함수를 사용하여 한계비용이 상승하는 것으로 가정되었다. 이 발전비용 함수에서 변동비는 발전 연료비에 해당하는 것으로 생각할 수 있으며, 연료비가 낮은 기전발전원과 가스, 유류발전 등이 연료비 순서에 따라 배열되어 한계비용이 우상향하는 급전순위를 반영한 것이다. 이 발전비용의 설명에서는 증분비용 개념을 사용하고 있지 않음에 주목해야 한다. 본 연구에서는 송전제약 문제에 집중할 것이며 발전용량에는 제약이 없다고 가정하여 발전의 한계비용이 c 의 함수로 정의된 것이다. 그리고 발전비용의 함수를 Q_i 의 이차함수로 가정하면서 Q_i 의 1차항에 대해서는 계수값을 0으로 설정하고 있다. 이는 비용함수를 최대한 단순화하여 분석을 편리하게 만들기 위한 것이다. 분석에서는 사회후생 극대화 상황에서 양 지역의 발전비용이 상이할 수 있음을 반영하는 것이 중요하다고 판단하였으며, 현실을 정확하게 묘사하기 위해서는 1차항의 계수도 포함하는 것이 바람직하겠지만 한계분석(Marginal Analysis)에서 1차항의 계수가 그다지 의미를 갖지 않은 것으로 판단하여 이를 반영하지 않은 것이다.

실제 지역별 발전비용의 차이를 유발하는 요인은 $C_2(Q_2)$ 에만 포함되어 있는 재생에너지 공급량 Q_{2R} 이다. 지역 2에서만 공급되는 Q_{2R} 의 재생에너지 한계비용이 0임을 가정하여 함수가 설정되었다. 이러한 가정은 향후 지역별 재생에너지 공급량의 차이가 지역의 한계발전비용을 결정하는 중요한 요인이 될 것이라는 판단을 반영하고 있다. 그리고 분석의 편리성을 위해 지역 2의 수요량이 충분히 커서 공급량이 Q_{2R} 일 때 $P_2 > 0$ 임을, 즉 $a_2 \geq Q_{2R}$ 을 가정한다. 이는 실질적으로 지역 2의 한계발전비용이 우상향함을 가정한 것과 같다.

한편 위 수요함수 및 비용함수의 가정에서 유의할 점은 송전이 지역 2에서 지역 1로만 발생한다고 가정한 것이다. 실제 상황에서는 지역 1에서 지역 2로의 송전도 가능하겠지만, 분석을 단순화하면서 LMP의 특성을 보여주기 위해 $T \geq 0$ 인 상황만을 분석 대상으로 삼은 것이다. 지역 2의 발전비용함수에 포함된 Q_{2R} 의 존재로 인해 지역 1과 지역 2의 수요량이 유사할 경우 지역 2의 한계발전비용이 낮아지며, 그로 인해 지역 2에서 지역 1

로 송전이 발생하게 된다. 따라서 ‘ $a_1 \ll a_2$ and/or $b_1 \gg b_2$ ’가 만족되지 않는 경우 지역 2에서 지역 1로 송전이 발생하게 될 것으로 판단된다. 다만 모형의 가정을 지나치게 제약하지 않기 위해 균형에서의 T 가 0보다 크거나 같은($T^* \geq 0$) 조건은 추후 분석에서 다루도록 한다.

이상의 수요함수와 비용함수에 기초하면 지역 1과 지역 2의 소비자잉여(Consumer Surplus)와 기업의 이윤은 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 CS_1 &= \int_0^{Q_1+c_L T} \frac{a_1-Q}{b_1} - \frac{a_1-(Q_1+c_L T)}{b_1} dQ = \frac{(Q_1+c_L T)^2}{2b_1}, \\
 CS_2 &= \int_0^{Q_2-T} \frac{a_2-Q}{b_2} - \frac{a_2-(Q_2-T)}{b_2} dQ = \frac{(Q_1-T)^2}{2b_2} \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Pi &= (Q_1+c_L T) \frac{a_1-Q_1-c_L T}{b_1} + (Q_2-T) \frac{a_2-Q_2+T}{b_2} \\
 &\quad - [f_1+cQ_1^2+f_2+c(Q_2-Q_{2R})^2+f_T+c_T T] \quad (4)
 \end{aligned}$$

또한 이에 따라 사회후생(Social Welfare)은 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 SW &= CS_1 + CS_2 + \Pi = \frac{Q_1^2 + 2c_L T Q_1 + c_L^2 T^2}{2b_1} + \frac{Q_2^2 - 2T Q_2 + T^2}{2b_2} \\
 &\quad + \frac{a_1 Q_1 - Q_1^2 - 2c_L T Q_1 + a_1 c_L T - c_L^2 T^2}{b_1} + \frac{a_2 Q_2 - Q_2^2 + 2T Q_2 - a_2 T - T^2}{b_2} \\
 &\quad - f_1 - cQ_1^2 - f_2 - c(Q_2 - Q_{2R})^2 - f_T - c_T T \quad (5)
 \end{aligned}$$

본 연구에서는 이상의 가정하에서 정부가 사회후생을 극대화하는 Q_1, Q_2, T 를 결정하는 상황을 다루도록 한다.

IV. 장기 의사결정 : 송전용량의 변동이 가능한 상황

이번 절에서는 정부가 사회후생을 극대화하는 송전용량 T 를 결정할 수 있는 장기 의사결정의 문제를 다루도록 한다. 이후의 분석결과 산출을 위한 계산은 상당히 복잡하며 Wolfram Mathematica v8.0을 이용하여 분석·검증을 진행하였다. 우선 사회후생 함수를 각기 Q_1, Q_2, T 로 편미분한 결과가 아래에 정리되어 있다.

$$\frac{\partial SW}{\partial Q_1} = \frac{2Q_1 + 2c_L T}{2b_1} + \frac{a_1 - 2Q_1 - 2c_L T}{b_1} - 2cQ_1 = \frac{a_1 - (1 + 2cb_1)Q_1 - c_L T}{b_1} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial SW}{\partial Q_2} &= \frac{2Q_2 - 2T}{2b_2} + \frac{a_2 - 2Q_2 + 2T}{b_2} - 2cQ_2 + 2cQ_{2R} \\ &= \frac{a_2 - (1 + 2cb_2)Q_2 + T + 2cb_2Q_{2R}}{b_2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial SW}{\partial T} = \frac{b_2c_L a_1 - b_1a_2 - b_2c_L Q_1 + b_1Q_2 - b_1b_2c_T - (b_1 + b_2c_L^2)T}{b_1b_2} \quad (8)$$

<별첨 1>에서는 사회후생함수가 음정부호(Negative Definite) 조건을 만족함을 보여주고 있으며, 따라서 1계조건을 연립하여 Q_1, Q_2, T 을 구한 결과는 사회후생을 최대화하게 된다.

$$Q_1^* = \frac{2ca_1 + c_L[2ca_2 - 2cQ_{2R} + (1 + 2cb_2)c_T]}{2c[1 + 2cb_1 + (1 + 2cb_2)c_L^2]} \quad (9)$$

$$Q_2^* = \frac{(1 + 2b_1c)(2cQ_{2R} - c_T) + c_L(2ca_1 + 2cc_La_2 + 4c^2b_2c_LQ_{2R})}{2c[1 + 2cb_1 + (1 + 2cb_2)c_L^2]} \quad (10)$$

$$T^* = \frac{2ca_1(1+2cb_2)c_L - (1+2cb_1)(2c(a_2 - Q_{2R}) + (1+2b_2c)c_T)}{2c[1+2cb_1 + (1+2b_2c)c_L^2]} \quad (11)$$

그런데 위 분석은 $T^* \geq 0$ 의 가정하에서 분석된 것이다. 식 11로부터 $T^* \geq 0$ 의 조건은 $2ca_1(1+2cb_2)c_L \geq (1+2cb_1)(2c(a_2 - Q_{2R}) + (1+2b_2c)c_T)$ 로 정리됨을 알 수 있으며, c_L (전송효율)이 지나치게 낮지 않은 경우 이 조건이 만족되는 것으로 이해된다. 또한 모형의 가정에서 언급된 바와 같이 a_1 이 a_2 대비 클수록, b_1 이 b_2 대비 작을수록, Q_{2R} 이 커질수록 이 조건이 만족되는 c_L 의 범위는 넓어진다.

이상의 사회후생을 최대화하는 Q_1^* , Q_2^* , T^* 를 이용하여 두 지역의 수요량과 가격을 구하면 아래와 같이 정리된다.

$$Q_1^* + c_L T^* = \frac{(1+c_L^2+2cb_2c_L^2)a_1 - b_1c_L[2c(a_2 - Q_{2R}) + (1+2cb_2)c_T]}{1+2cb_1 + (1+2cb_2)c_L^2} \quad (12)$$

$$Q_2^* - T^* = \frac{(1+2cb_1+c_L^2)a_2 - b_2(2cc_La_1 - 2cc_L^2Q_{2R} - (1+2cb_1)c_T)}{1+2cb_1 + (1+2cb_2)c_L^2} \quad (13)$$

$$P_1^* = \frac{2ca_1 + c_L[2c(a_2 - Q_{2R}) + (1+2cb_2)c_T]}{1+2cb_1 + (1+2cb_2)c_L^2} = MC_{Q_1^*} = (MC_{Q_2^*} + c_T)/c_L \quad (14)$$

$$P_2^* = \frac{2cc_L(a_1 + c_La_2 - c_LQ_{2R}) - (1+2cb_1)c_T}{1+2cb_1 + (1+2cb_2)c_L^2} = MC_{Q_2^*} = c_L MC_{Q_1^*} - c_T \quad (15)$$

$$P_1^* - P_2^* = c_T + (1-c_L)P_1^* \quad (16)$$

정리 1. 사회후생을 극대화하는 양 지역의 가격은 각 지역의 발전한계비용과 같으며, 그 차이는($P_1^* - P_2^*$) 송전손실에 대한 보상($(1-c_L)P_1^*$)과 송전 증분비용 c_T 의 합으로 나타난다.

분석결과 양 지역의 가격(P_i^*)은 각 지역의 한계발전비용과 같아진다. 그리고 지역 1의 가격 P_1^* 은 지역 2의 한계발전비용과 송전 증분비용의 합을 송전손실로 나눈 값 $((MC_{Q_2^*} + c_T)/c_L)$ 과 같다. 그리고 $P_1^* = (MC_{Q_2^*} + c_T)/c_L$ 의 관계에 $MC_{Q_2^*} = P_2^*$ 를 대입한 결과가 식 16으로 나타난다.

사업자는 한계발전비용이 지역 1보다 더 싼 지역 2에서 P_2^* 의 가격에 구매한 전력 (Q_2^*) 중 일부를 ($Q_2^* - T^*$) 지역 2에서 판매하고 남은 전력(T^*)을 지역 1로 송전한다. 그런데 송전손실로 인해 $(1 - c_L)T^*$ 는 사라지고 $c_L T^*$ 만큼만을 지역 1에서 P_1^* 의 가격으로 판매하게 된다. 따라서 사업자가 송전으로부터 발생시키는 이익은 $c_L T^* P_1^* - T^* P_2^*$ ($= \Pi_T$)이며, 이 값을 송전망 투자에 대한 보상으로 인식할 수 있다. 그리고 Π_T 를 재정리하면 $T^* [P_1^* - P_2^* - (1 - c_L)P_1^*]$ 로 정리되며, 여기에 식 16의 관계를 대입하면 $\Pi_T = c_T T^*$ 가 된다.

결국 정리 1이 의미하는 바는 사회후생을 극대화하는 각 지역의 가격은 각 지역의 한계발전비용과 같아지며, 이 경우 송전망에 대한 보상은 송전망 증분비용($c_T T^*$)으로 나타난다는 것이다. 이는 II장에서 설명된 바와 같이 송전망에 대한 보상이 각 지역의 한계비용(LMP)의 차이를 반영해야 한다는 LMP 개념과 동일한 결과이다. 유의할 점은 양 지역의 가격 차이에는 송전 증분비용(c_T) 외에 $(1 - c_L)P_1^*$ 이 포함되는데(식 16), $(1 - c_L)P_1^*$ 은 송전 손실에 의해 사라지는 비용이며, 소비자나 사업자 모두에게 귀속되지 않는다. 만약 송전손실을 가정하지 않는다면($c_L = 1$) 양 지역의 가격 차이는 송전 증분비용과 같아진다.

여기서 한 가지 주목할 부분은 LMP 개념하에서 송전부문에 대한 보상에는 증분비용만 포함된다는 것이다. 그런데 본 수리모형에서 가정한 것과 같이 송전부문에 규모의 경제가 존재한다면(모형에서 $f_T > 0$) 송전부문의 전체 비용이 회수될 수 없다. 이에 대해서는 추후 별도로 논할 것이다.

한편 식 14와 15를 살펴보면 송전 증분비용 c_T 가 증가할 경우 P_1^* 가 증가하며 ($\partial P_1^*/\partial c_T > 0$), P_2^* 는 감소한다($\partial P_2^*/\partial c_T < 0$). 이는 송전비용이 증가하면서 최적 송전

량이 감소하고 그에 따라 지역 1의 공급이 감소하고 지역 2의 공급이 증가하는 효과가 반영된 것으로 해석된다.

또한 Q_{2R} 이 증가할 경우 P_1^* 및 P_2^* 는 감소하는 것으로 나타난다($\partial P_1^*/\partial Q_{2R} < 0$, $\partial P_2^*/\partial Q_{2R} < 0$). 이는 한계비용이 매우 낮은(0으로 가정됨) 재생 전력의 공급이 증가할 경우 지역 2의 공급곡선(한계발전비용곡선)이 우측으로 이동하여 지역 2의 가격이 하락할 뿐 아니라, 송전량도 증가하여 지역 1의 가격 또한 낮아짐을 의미한다.

다음으로 <별첨 2>에서는 $T^* \geq 0$ 의 조건하에서 $\partial P_1^*/\partial c_L < 0$ 이며, $\partial P_2^*/\partial c_L$ 의 경우 일반적으로 양의 값을 갖지만 $b_2 \gg b_1$ 의 상황에서는 양의 값이 나타날 수 있음을 증명하였다. $\partial P_2^*/\partial c_L$ 와 관련하여 식 16을 재정리하면 $P_2^* = c_L P_1^* - c_T$ 로 표현되며, 이는 c_L 의 증가가 P_2^* 를 증가시키는 직접 영향과 함께 P_1^* 을 감소시킴으로써($\partial P_1^*/\partial c_L < 0$) P_2^* 를 감소시키는 간접 효과가 있음을 의미한다. 좀더 직관적으로 설명하면 c_L 이 커지는 경우 그 자체로 $c_L T^*$ 를 증가시키며, 이로 인해 적은 전송량(T^*)만으로도 P_1^* 이 더 많이 하락하게 되고 이로 인해 전송량이 줄어들면서 지역 2의 공급량이 늘어나 P_2^* 가 감소할 수도 있다는 것이다.

정리 2. 모수(Parameter)들의 변화에 따른 사회후생 극대화 가격의 변화는 다음과 같다.

- a) 송전 증분비용(c_T)이 증가할 경우 지역 1의 가격(P_1^*)이 증가하고 지역 2의 가격(P_2^*)은 감소한다.
- b) 지역 2의 재생에너지 발전량(Q_{2R})이 증가할 경우 양 지역의 가격(P_1^* 및 P_2^*)이 모두 감소한다.
- c) 송전효율이 증가할 경우(c_L 의 증가) 지역 1의 가격(P_1^*)이 감소한다. 지역 2의 가격(P_2^*)은 b_2 가 b_1 대비 상당히 큰 값이 아닌 경우 증가한다.

V. 단기 의사결정 : 송전 용량이 주어진 상황

1. 송전용량에 제약이 없는 경우

이번 장에서는 송전용량의 변동이 불가능한(송전용량이 \bar{T} 로 고정) 단기 사회후생 극대화 의사결정을 다룰 것이다. 그런데 단기 의사결정에서 송전망이 충분하여 송전제약이 발생하지 않는 경우와 송전제약이 발생하는 상황을 구분하여 분석할 필요가 있다. 따라서 우선 이번 절에서는 송전제약이 없는($T^{*,NoC} < \bar{T}$, $T^{*,NoC}$ 은 송전용량 제약이 없는 경우 사회후생 극대화 송전량) 단기 상황에서 사회후생 극대화 의사결정을 다룬다.

계통에서 수요 규모는 상시적으로 변화하며, 지역 1의 수요량이 상대적으로 작아지는(수요곡선의 좌측 이동, a_1 의 하락 또는 b_1 의 증가) 등 송전제약이 발생하지 않는 상황 또한 발생할 수 있다. 즉, 송전용량 관점에서 비부하(Non-peak Load) 상황이 발생함을 고려할 필요가 있다. 이 상황은 때로 송전망 투자가 지나쳐 부하가 최대인 상황에서도 용량 제약이 발생하지 않는 경우를 의미할 수도 있다.

이 상황의 분석은 단지 IV장의 분석에서 $c_T = 0$ 을 가정하는 것으로 충분하다. 이는 송전용량에 제약이 없기 때문에 송전량의 증가가 아무런 경제적 비용을 유발하지 않기 때문이다. <별첨 1>의 식 A1으로 정의된 헤시안 행렬식에 $c_T = 0$ 를 대입하여도 헤시안 행렬식에 변화가 없어 2계 조건은 만족된다. 이 가정하에서 사회후생을 극대화하는 $Q_i^{*,NoC}$, $T^{*,NoC}$ 는 식 9~11에 $c_T = 0$ 를 대입하여 구할 수 있으며, 그에 따라 $P_i^{*,NoC}$ 또한 아래와 같이 구해진다.

$$Q_1^{*,NoC} = \frac{a_1 + c_L(a_2 - Q_{2R})}{1 + 2cb_1 + (1 + 2cb_2)c_L^2} < Q_1^* \quad (17)$$

$$Q_2^{*,NoC} = \frac{c_L a_1 + c_L^2 a_2 + (1 + 2cb_1 + 2cb_2 c_L^2) Q_{2R}}{1 + 2cb_1 + (1 + 2cb_2)c_L^2} > Q_2^* \quad (18)$$

$$T^{*,NoC} = \frac{c_L(1 + 2cb_2)a_1 - (1 + 2cb_1)(a_2 - Q_{2R})}{1 + 2cb_1 + (1 + 2cb_2)c_L^2} > T^* \quad (19)$$

$$Q_1^{*,NoC} + c_L T^{*,NoC} = \frac{(1 + c_L^2 + 2cb_2c_L^2)a_1 - 2cb_1c_L(a_2 - Q_{2R})}{1 + 2cb_1 + (1 + 2cb_2)c_L^2} > Q_1^* + c_L T^* \quad (20)$$

$$Q_2^{*,NoC} - T^{*,NoC} = \frac{(1 + 2cb_1 + c_L^2)a_2 - 2cb_2c_L(a_1 - c_L Q_{2R})}{1 + 2cb_1 + (1 + 2cb_2)c_L^2} < Q_2^* - T^* \quad (21)$$

$$P_1^{*,NoC} = \frac{2c[a_1 + c_L(a_2 - Q_{2R})]}{1 + 2cb_1 + (1 + 2cb_2)c_L^2} = MC_{Q_1^{*,NoC}} = MC_{Q_2^{*,NoC}}/c_L < P_1^* \quad (22)$$

$$P_2^{*,NoC} = \frac{2cc_L[a_1 + c_L(a_2 - Q_{2R})]}{1 + 2cb_1 + (1 + 2cb_2)c_L^2} = MC_{Q_2^{*,NoC}} = c_L MC_{Q_1^{*,NoC}} > P_2^* \quad (23)$$

위 식 17~23에서는 IV장의 장기 의사결정 상황에서의 후생 극대화 값들과의 비교가 같이 제시되어 있다. 그런데 이 비교를 해석하는 데 유의할 필요가 있다. 앞에서 송전용량 관점에서 비부하 상황은 ① 지역 1에서의 상대적 수요가 최대부하 상황 대비 낮아지는 시점에서, ② 송전망 투자가 지나쳐서 송전용량 제약이 발생하지 않는 경우의 두 가지 상황에서 발생함을 언급하였다. ①의 상황은 수요함수에서 $a_1(a_2)$ 이 작아(커)지거나 또는 $b_1(b_2)$ 이 커(작아)지는 등의 상황에서 발생하는 것이며, ②의 상황은 수요함수에는 변화가 없더라도 송전망 투자가 매우 큰 경우에 발생하는 것이다. 따라서 ①의 상황에서 수요함수의 모수들은(a_i, b_i)은 VI장에서의 모수들과는 다른 값을 의미하는 것이기 때문에 균형값들을 IV장의 결과들과 직접 비교하는 것은 의미가 없다. 다만 ②의 상황을 고려할 때에는 이 비교가 의미가 있다.

②의 상황을 염두에 두고 해석하면 송전제약이 없어지고 송전망 증분비용 c_T 를 고려하지 않는 상황에서는 IV장의 후생 극대화 결과 대비 송전량이 증가하며, 지역 1의 수요량이 증가하고(식 20) 가격은 감소하며(식 22), 지역 2의 수요량은 감소하고(식 21) 가격은 증가한다(식 22). 이는 송전망 투자의 증가가 모든 지역의 가격을 하락시키지는 않는다는 것을 의미한다.

한편 앞 절들의 논의에서와 동일하게 $(P_1^{*,NoC} - P_2^{*,NoC}) - (1 - c_L)P_1^{*,NoC}$ 이 송전망 투자에 대한 보상을 정의한다. 그런데 $P_1^{*,NoC} = MC_{Q_1^{*,NoC}} = MC_{Q_2^{*,NoC}}/c_L = P_2^{*,NoC}/c_L$ 의 관계가 성립하기 때문에 이 보상액은 0이 된다. 즉, LMP 개념하에서 비부하 상황에서는 송전망 투자에 대한 보상이 없어진다. 이는 송전용량 제약이 없는 상황에서는 송전망 투자의 경제적 가치가 인식되지 않기 때문에 경제학적 원칙에 부합한다.

정리 3. 송전제약이 존재하지 않는 경우($T^{*,NoC} < \bar{T}$) 사회후생을 극대화하는 양 지역의 가격과 송전망 투자에 대한 보상은 다음과 같다.

- a) 양 지역의 가격은 각 지역의 발전한계비용과 같으며, 그 차이는 $(P_1^{*,NoC} - P_2^{*,NoC})$ 송전손실에 대한 보상 $((1 - c_L)P_1^{*,NoC})$ 과 동일하다. 즉, 송전망 투자에 대한 보상이 제공되지 않는다.
- b) 장기 사회후생 극대화 가격 대비 지역 1의 가격은 감소하고($P_1^{*,NoC} < P_1^*$) 지역 2의 가격은 증가한다($P_2^{*,NoC} > P_2^*$).

한편 정리 2-a와 관련하여 송전제약이 없는 단기 의사결정에서는 c_T 가 사회후생 극대화 값들에 영향을 미치지 않는다($\partial P_1^{*,NoC}/\partial c_T = 0, \partial P_2^{*,NoC}/\partial c_T = 0$). 이는 송전망 투자가 충분하여 송전망 투자에 대한 기회비용이 고려되지 않기 때문이다. 다음으로 정리 2-b와 유사하게 Q_{2R} 의 증가는 P_1^*, \bar{T} 및 P_2^*, \bar{T} 를 감소시킨다($\partial P_1^{*,NoC}/\partial Q_{2R} < 0, \partial P_2^{*,NoC}/\partial Q_{2R} < 0$). 마지막으로 정리 2-c와 유사하게 $T^{*,NoC} \geq 0$ 의 조건하에서 $\partial P_1^{*,NoC}/\partial c_L \leq 0$ 로 나타나며, $\partial P_2^{*,NoC}/\partial c_L$ 의 경우 일반적으로 양의 값을 갖지만 $b_2 \gg b_1$ 의 상황에서는 양의 값이 나타날 수 있다(별첨 3의 증명 참조).

정리 4. 송전제약이 존재하지 않는 경우($T^{*,NoC} < \bar{T}$) 모수(Parameter)들의 변화에 따른 사회후생 극대화 가격의 변화는 다음과 같다.

- a) 송전 증분비용(c_T)의 변화는 양 지역의 가격에 영향을 미치지 않는다.
- b) 지역 2의 재생에너지 발전량(Q_{2R})이 증가할 경우 양 지역의 가격($P_1^{*,NoC}, P_2^{*,NoC}$)이

모두 감소한다.

- c) 송전효율이 증가할 경우(c_L 의 증가) 지역 1의 가격($P_1^{*,NoC}$)이 감소한다. 지역 2의 가격($P_2^{*,NoC}$)은 b_2 가 b_1 대비 상당히 큰 값이 아닌 경우 증가한다.

2. 단기 의사결정 : 송전용량이 제약된 상황

이번 절에서는 송전용량의 추가 증설이 불가능한 단기 사회후생 극대화 의사결정 상황에서 송전용량 \bar{T} 가 $T^{*,NoC}$ 보다 작은 경우($0 < \bar{T} < T^{*,NoC}$)를 다룬다. \bar{T} 외의 가정들은 앞서와 동일하다. $0 < \bar{T} < T^{*,NoC}$ 의 상황은 송전망 관점에서 최대부하(Peak Load) 상황을 의미하는 것으로 볼 수 있는데 이는 발전량 관점에서 정의되는 최대부하와는 상이할 수 있음을 고려해야 한다. 발전에서의 최대부하는 계통의 수요량이 계통의 발전용량 대비 많고 적음을 기준으로 결정된다. 그러나 송전제약을 유발하는 최대부하 개념은 양 지역의 한계비용 차이에 의해 송전량이 커질 때 발생하는 것이며, 발전용량과는 직접 관련이 없다. 즉, 발전용량에 제약이 생기지 않을 때에도 지역 1과 2의 수요 차이가 일정 수준 이상 발생하면 송전제약이 발생하게 된다. 본 연구에서는 발전용량에 제약이 발생하지 않음을 가정하고 있기 때문에 발전용량 관점의 최대부하 문제는 고려하지 않고 송전용량 관점의 최대부하 문제만을 다루는 것이다.

이 상황에서는 송전용량이 주어져 송전관련 비용이 모두 매몰(Sunk)되었으므로 $c_T = 0$ 으로 가정하여 사회후생을 극대화하는 $T^{*,\bar{T}}, Q_i^{*,\bar{T}}, P_i^{*,\bar{T}}$ 구해야 한다. 그런데 V.1절에서 사회후생 함수는 2계 조건에서 음정부호(Negative Definite) 조건을 만족함을 설명하였기 때문에 주어진 상황($0 < \bar{T} < T^{*,NoC}$)에서는 송전량 T 를 \bar{T} 까지 증가시킬수록 사회 후생이 증가하는 것은 자명하다. 따라서 사회후생을 극대화하는 송전량 $T^{*,\bar{T}}$ 는 아래와 같이 구해진다.

$$T^{*,\bar{T}} = \bar{T} \tag{24}$$

그리고 IV장의 식 6과 7에 $T = \bar{T}$ 를 대입하여 사회후생을 극대화하는 $Q_i^{*,\bar{T}}$ 를 산출할 수 있다.

$$Q_1^{*,\bar{T}} = \frac{a_1 - c_L \bar{T}}{1 + 2cb_1}. \text{ If } \bar{T} \leq T^*, Q_1^{*,\bar{T}} \geq Q_1^*, \text{ else } Q_1^{*,\bar{T}} < Q_1^*$$

$$\left(\because \frac{\partial SW}{\partial Q_1} = \frac{a_1 - (1 + 2cb_1)Q_1 - c_L T}{b_1} \right) \quad (25)$$

$$Q_2^{*,\bar{T}} = \frac{a_2 + \bar{T} + 2cb_2 Q_{2R}}{1 + 2cb_2}. \text{ If } \bar{T} \leq T^*, Q_2^{*,\bar{T}} \leq Q_2^*, \text{ else } Q_2^{*,\bar{T}} > Q_2^*$$

$$\left(\because \frac{\partial SW}{\partial Q_2} = \frac{a_2 - (1 + 2cb_2)Q_2 + T + 2cb_2 Q_{2R}}{b_2} \right) \quad (26)$$

만약 식 25와 26에 $T = \bar{T}$ 가 아닌 $T = T^*$ 를 대입한다면 $Q_i^{*,\bar{T}} = Q_i^*$ 로 나타날 것이다. 그러나 \bar{T} 가 T^* 보다 작거나 큰 상황이기 때문에 $Q_i^{*,\bar{T}}$ 와 Q_i^* 의 관계가 식 25와 26에 표현된 것과 같이 나타나는 것이다. $Q_i^{*,\bar{T}}$ 와 T^*, \bar{T} 를 이용하여 $P_i^{*,\bar{T}}$ 또한 아래와 같이 구해질 수 있다.

$$Q_1^{*,\bar{T}} + c_L \bar{T} = \frac{a_1 + 2cb_1 c_L \bar{T}}{(1 + 2cb_1)}.$$

$$\text{ If } \bar{T} \leq T^*, Q_1^{*,\bar{T}} + c_L \bar{T} \leq Q_1^* + c_L T^*, \text{ else } Q_1^{*,\bar{T}} + c_L \bar{T} > Q_1^* + c_L T^* \quad (27)$$

$$Q_2^{*,\bar{T}} - \bar{T} = \frac{a_2 + 2cb_2(Q_{2R} - \bar{T})}{(1 + 2cb_2)}.$$

$$\text{ If } \bar{T} \leq T^*, Q_2^{*,\bar{T}} - \bar{T} \geq Q_2^* - T^*, \text{ else } Q_2^{*,\bar{T}} - \bar{T} < Q_2^* - T^* \quad (28)$$

$$P_1^{*,\bar{T}} = \frac{2c(a_1 - c_L \bar{T})}{1 + 2cb_1} = MC_{Q_1^{*,\bar{T}}}$$

$$\text{ If } \bar{T} \leq T^*, P_1^{*,\bar{T}} \geq P_1^* (\because Q_1^{*,\bar{T}} + c_L \bar{T} \leq Q_1^* + c_L T^*),$$

$$\text{ else } P_1^{*,\bar{T}} < P_1^* (\because Q_1^{*,\bar{T}} + c_L \bar{T} > Q_1^* + c_L T^*) \quad (29)$$

$$P_2^{*,\bar{T}} = \frac{2c(a_2 - Q_{2R} + \bar{T})}{1 + 2cb_2} = MC_{Q_2^{*,\bar{T}}}$$

If $\bar{T} \leq T^*$, $P_2^{*,\bar{T}} \leq P_2^*$ ($\because Q_2^{*,\bar{T}} - \bar{T} \geq Q_2^* - T^*$),

else $P_2^{*,\bar{T}} > P_2^*$ ($\because Q_2^{*,\bar{T}} - \bar{T} < Q_2^* - T^*$) (30)

식 25~30에서는 $\bar{T} \leq T^*$ 여부에 따라 $Q_i^{*,\bar{T}}$ 및 $P_i^{*,\bar{T}}$ 가 IV장에서 정의된 Q_i^* 및 P_i^* 대비 어떻게 달라지는지를 제시하고 있다. 우선 송전용량이 $0 < \bar{T} \leq T^*$ 로 주어진 상황에서는 송전용량의 제약에 의해 송전량이 감소($\bar{T} \leq T^*$)하는데, 이에 따라 다음과 같은 결과가 나타난다. 지역 1에서는 송전받는 전력($c_L \bar{T}$)이 감소함에 따라 자체 공급량 $Q_1^{*,\bar{T}}$ 를 Q_1^* 대비 증가시키는데 그 증가량은 송전량 감소 대비 크지 않아 전체 공급량 $Q_1^{*,\bar{T}} + c_L \bar{T}$ 는 $Q_1^* + c_L T^*$ 대비 감소한다. 따라서 가격 $P_1^{*,\bar{T}}$ 은 P_1^* 대비 증가한다. 반면 지역 2의 송전량(\bar{T})이 감소함에 따라 자체 공급량 $Q_2^{*,\bar{T}}$ 를 Q_2^* 대비 감소시키지만 그 감소량은 송전량 감소 대비 작아 전체 공급량 $Q_2^{*,\bar{T}} - \bar{T}$ 는 $Q_2^* - T^*$ 대비 증가하며, 지역 2의 가격 $P_2^{*,\bar{T}}$ 가 P_2^* 대비 감소한다.

한편 앞서 IV장에서는 양 지역에서의 가격 차이가 송전망 투자에 대한 보상과 송전손실에 의해 사라지는 가치($(1 - c_L)P_1^{*,\bar{T}}$)의 합으로 구성됨을 논의하였다. 그렇다면 $(P_1^{*,\bar{T}} - P_2^{*,\bar{T}}) - (1 - c_L)P_1^{*,\bar{T}}$ 를 송전망 투자에 대한 보상으로 정의할 수 있다. 그런데 이 값을 식 16과 연계하여 정리하면 송전망 투자에 대한 보상은 c_T 보다 크거나 같게 나타남을 알 수 있다.

$$(P_1^{*,\bar{T}} - P_2^{*,\bar{T}}) - (1 - c_L)P_1^{*,\bar{T}} \geq c_T = (P_1^* - P_2^*) - (1 - c_L)P_1^*$$

($\because P_1^{*,\bar{T}} \geq P_1^* \ \& \ P_2^{*,\bar{T}} \leq P_2^*$) (31)

즉, 송전용량이 $0 < \bar{T} \leq T^*$ 로 제약되어 있는 단기 상황에서 송전망 투자에 대한 보상이 송전망 투자의 증분비용 c_T 보다 크게 나타나며, 송전망에 규모의 경제가 없는 경우

($f_T = 0$) 송전망에 한정하여 보았을 때 초과이윤이 발생하게 된다. 이는 경쟁적으로 송전망 투자가 가능하다면 누군가는 송전망을 증설함으로써 초과이윤을 추구할 수 있는 기회가 있음을 의미한다. 결국 LMP 방식으로 송전망 투자에 대한 보상을 할 경우 최적 상황 대비 송전망 용량이 부족한 경우 송전망을 증설할 유인이 제공된다.

정리 5. 송전망 용량이 장기 후생극대화 송전용량보다 작게($\bar{T} \leq T^*$) 주어진 상황에서 사회후생을 극대화하는 양 지역의 가격과 송전망 투자에 대한 보상은 다음과 같다.

- a) 양 지역의 가격은 각 지역의 발전한계비용과 같으며, 그 차이는($P_1^*, \bar{T} - P_2^*, \bar{T}$) 송전 손실에 대한 보상($(1 - c_L)P_1^*, \bar{T}$)과 송전 증분비용의 합계(c_T)보다 크거나 같게 나타난다.
- b) 장기 사회후생 극대화 가격 대비 지역 1의 가격은 증가하고($P_1^*, \bar{T} \geq P_1^*$) 지역 2의 가격은 감소한다($P_2^*, \bar{T} \leq P_2^*$).

다음으로 송전용량이 $T^* < \bar{T} < T^*, NoC$ 로 주어진 상황을 검토해 보자. 이 상황에서는 송전량 \bar{T} 가 T^* 보다 많아진다. 장기 사회후생 극대화에서는 송전량 증가가 송전용량 증분비용 c_T 를 수반하지만 이미 송전용량이 T^* 대비 많은 \bar{T} 로 주어진 단기 사회후생 극대화에서는 c_T 를 고려할 필요가 없기 때문에 송전량이 T^* 대비 많아지는 상황이 발생하는 것이다. 이 상황에서는 송전량 증가에 따라 지역 1의 자체 공급량 Q_1^*, \bar{T} 가 Q_1^* 대비 감소하지만 이 감소량이 송전량 증가량보다 작기 때문에 전체 공급량 $Q_1^*, \bar{T} + c_L \bar{T}$ 는 $Q_1^* + c_L T^*$ 대비 증가한다. 따라서 가격 P_1^*, \bar{T} 은 P_1^* 대비 감소한다. 반면 지역 2의 자체 공급량 Q_2^*, \bar{T} 는 Q_2^* 대비 증가하지만 송전량이 더 크게 증가하여 전체 공급량 $Q_2^*, \bar{T} - \bar{T}$ 는 $Q_2^* - T^*$ 대비 감소하며, 결과적으로 지역 2의 가격 P_2^*, \bar{T} 가 P_2^* 대비 증가한다. 한편 송전망 투자에 대한 보상액 $(P_1^*, \bar{T} - P_2^*, \bar{T}) - (1 - c_L)P_1^*, \bar{T}$ 은 다음과 같이 나타난다.

$$(P_1^*, \bar{T} - P_2^*, \bar{T}) - (1 - c_L)P_1^*, \bar{T} < c_T = (P_1^* - P_2^*) - (1 - c_L)P_1^* \\ (\because P_1^*, \bar{T} < P_1^* \text{ \& } P_2^*, \bar{T} > P_2^*) \quad (32)$$

또한 정리 3에서는 $T^*, NoC = \bar{T}$ 일 경우 송전망 투자에 대한 보상액이 0이 됨을 보여 주었으며, 이를 감안하면 $T^* < \bar{T} < T^*, NoC$ 의 상황에서 송전망 투자에 대한 보상액은 0보다 크음을 알 수 있다. 결과적으로 송전용량이 $T^* < \bar{T} < T^*, NoC$ 로 제약되어 있는 단기 상황에서 송전망 투자에 대한 보상은 0보다 크고 c_T 보다 작게 나타나며, 송전망을 증설할 유인이 제거된다.

정리 6. 송전망 용량이 장기 후생극대화 송전용량보다 크지만 송전망 제약이 발생하는 상황($T^* < \bar{T} < T^*, NoC$)에서 사회후생을 극대화하는 양 지역의 가격과 송전망 투자에 대한 보상은 다음과 같다.

- a) 양 지역의 가격은 각 지역의 발전한계비용과 같으며, 그 차이는($P_1^*, \bar{T} - P_2^*, \bar{T}$) 0보다 크지만 송전손실에 대한 보상($(1 - c_L)P_1^*, \bar{T}$)과 송전 증분비용의 합계(c_T)보다 작게 나타난다.
- b) 장기 사회후생 극대화 가격 대비 지역 1의 가격은 감소하고($P_1^*, \bar{T} < P_1^*$) 지역 2의 가격은 증가한다($P_2^*, \bar{T} > P_2^*$).

한편 정리 2-a와 관련하여 식 29과 30을 살펴보면 송전제약이 있는 단기 의사결정에서는 c_T 가 사회후생 극대화 값들에 영향을 미치지 않는다($\partial P_1^*, \bar{T} / \partial c_T = 0, \partial P_2^*, \bar{T} / \partial c_T = 0$). 이는 송전망 투자의 증분비용 c_T 가 송전용량이 주어진 단기 의사결정에서 고려되지 않기 때문이다. 그러나 이는 단기 의사결정에서 송전망 투자의 기회비용이 반영되지 않음을 의미하는 것은 아니다. 송전망 투자의 기회비용은 양 지역의 한계발전비용 차이와 송전망 손실에 의해 결정될 뿐 c_T 에 영향을 받지 않는다.

그리고 정리 2-b와 관련하여 Q_{2R} 의 증가는 P_2^*, \bar{T} 를 감소시키지만($\partial P_2^*, \bar{T} / \partial Q_{2R} < 0$), P_1^*, \bar{T} 에는 영향을 미치지 못한다($\partial P_1^*, \bar{T} / \partial Q_{2R} = 0$). 이는 지역 2에서의 발전한계비용

하락이 지역 2의 공급량을 증가시키지만 송전제약으로 인해 지역 1로의 공급을 증가시키지 못하기 때문에 나타나는 결과이다. 마지막으로 정리 2-c와 관련하여 c_L (전송효율)의 증가는 P_1^*, \bar{T} 를 감소시키지만($\partial P_1^*, \bar{T} / \partial c_L < 0$), P_2^*, \bar{T} 에는 영향을 미치지 못한다($\partial P_2^*, \bar{T} / \partial c_L = 0$). 이는 송전효율이 증가하면 동일 회선용량(\bar{T})하에서 지역 1로의 송전량이($c_L \bar{T}$) 증가하여 지역 1의 공급량이 증가하지만 지역 2에서의 송전량은 \bar{T} 로 변화가 없어 지역 2에서의 공급에 변화가 없기 때문에 나타나는 현상이다.

한편 장기 또는 송전용량에 제약이 없는 단기 사회후생 극대화 의사결정에서는 T 를 외생변수로 볼 이유가 없지만 송전용량이 제약된 단기에서는 \bar{T} 의 변화를 고려할 필요가 있다. 식 29와 30을 살펴보면 $\partial P_1^*, \bar{T} / \partial \bar{T} < 0$, $\partial P_2^*, \bar{T} / \partial \bar{T} > 0$ 을 확인할 수 있다.

정리 7. 송전제약이 존재하는 경우($0 < \bar{T} < T^{*, NoC}$) 모수(Parameter)들의 변화에 따른 사회후생 극대화 가격의 변화는 다음과 같다.

- a) 송전 증분비용(c_T)의 변화는 양 지역의 가격에 영향을 미치지 않는다.
- b) 지역 2의 재생에너지 발전량(Q_{2R})이 증가할 경우 지역 2의 가격(P_2^*, \bar{T})을 감소시키지만 지역 1의 가격(P_1^*, \bar{T})에는 영향을 미치지 못한다.
- c) 송전효율이 증가할 경우(c_L 의 증가) 지역 1의 가격(P_1^*, \bar{T})을 감소시키지만 지역 2의 가격(P_2^*, \bar{T})에는 영향을 미치지 않는다.
- d) 송전용량 \bar{T} 가 $\bar{T} < T^{*, NoC}$ 를 만족하는 수준에서 증가할 경우 지역 1의 가격(P_1^*, \bar{T})은 감소하고 지역 2의 가격(P_2^*, \bar{T})은 증가한다.

VI. 분석결과의 요약 및 시사점

1. LMP 방식의 특성 및 영향

이상의 분석결과들은 전력시장 가격 결정 및 송전망 투자 보상과 관련하여 다양한 시사점들을 제공한다. 분석을 통해 정리된 사회후생을 극대화하는 양 지역의 가격과 송전

망 보상 방식의 특성은 다음과 같다.

- ① 지역별 가격은 송전용량 제약 여부와 무관하게 각 지역의 한계발전비용과 같다 (정리 1, 3, 5, 6).
- ② 비부하(송전망 제약 미발생, $T^{*,NoC} \leq \bar{T}$) 상황에서 양 지역의 가격 차이는 $(P_1^{*,NoC} - P_2^{*,NoC})$ 는 송전손실에 대한 보상 $((1 - c_L)P_1^{*,NoC})$ 만을 포함한다. 이 경우 송전망 투자에 대한 보상이 발생하지 않는다(정리 3-a).
- ③ 송전망 제약이 $T^* \geq \bar{T}$ 수준으로 발생하는 최대부하 상황에서 양 지역의 가격차이는 $P_1^{*,\bar{T}} - P_2^{*,\bar{T}} \geq c_T + (1 - c_L)P_1^{*,\bar{T}}$ 관계로 나타난다. 이 경우 송전망 투자에 대한 보상은 송전망의 증분비용($c_T \bar{T}$) 이상으로 나타난다(정리 5-a).
- ④ 송전망 제약이 $T^* < \bar{T} < T^{*,NoC}$ 수준으로 발생하는 최대부하 상황에서 양 지역의 가격차이는 $P_1^{*,\bar{T}} - P_2^{*,\bar{T}} < c_T + (1 - c_L)P_1^{*,\bar{T}}$ 관계로 나타난다. 이 경우 송전망 투자에 대한 보상은 0보다 크지만 송전망의 증분비용(c_T)보다 작게 나타난다 (정리 6-a).

이상의 특성은 LMP 방식에서 논의된 것과 같은 것이며, 결국 LMP 방식이 사회후생을 극대화 함을 의미한다. 그런데 본 연구의 모형은 어떤 지역에서는 항상 최대부하 상황이 발생하고 어떤 지역에서는 항상 비부하 상황이 발생하는 것으로 가정한 단순화된 것이다. 현실에서는 시점별로 비용 최소화(지역별로 수요량이 주어진 상황에서의 사회후생 극대화) 계통운영 분석이 이루어진 후에 사후적으로 최대부하 상황 여부가 결정되며, 동일 시점에서도 각 송전망 구간별로 최대부하 여부가 달라지고, 동일 구간에서도 시점별로 최대부하 여부가 달라진다. 따라서 사전적으로 어떤 구간의 최대부하 발생 여부를 정할 수 없다. ②~④로 정리된 모형의 분석결과는 최대부하 여부에 따라 사전적으로 가격결정 방법을 달리한다는 의미가 아니며, 비용최소화 계통운영 결과 지역별 한계비용이 정해지면 이를 지역별 가격으로 삼아야 하고 이를 통해 송전망 투자에 대한 보상도 정해짐을 의미하는 것이다. 즉, 사후적으로 정해진 지역별 한계비용과 그에 따른 송전망 투자 보상 수준을 살피으로써 최대부하 발생 여부를 식별할 수 있게 되는 것이다. 그리고 특정 전송구간에 대한 보상은 혼잡 발생 빈도와 혼잡 수준에 따라 정해지는 보상액의 기대값(가중평균)에 의해 정해진다. 이는 현재 한국에서 발전의 증분비용 보상 방

식(용량가격, Capacity Price)이 사전적으로 결정된 시간대별 최대부하 발생확률을 반영하는 것과는 상이한 것이다.

분석에서 보여준 송전망 투자에 대한 보상 방식은 Hogan(1992, 1999) 및 Schweppe et al.(1988)이 설명한 송전망이 발생시키는 부가가치를 반영한다. 그 부가가치는 송전용량이 (장기)사회후생 극대화 용량 대비 작으면서 최대부하 상황이 발생하는 시점에는 송전 증분비용 이상이며, 송전용량이 (장기)사회후생 극대화 용량 대비 크면서 최대부하 상황이 발생하는 시점에는 송전 증분비용보다 작고 0보다 크며, 비부하 시점에는 0으로 나타난다. 이를 다른 각도로 해석하면 송전망이 경쟁적인 상황에서 특정 송전구간에서 LMP 방식의 송전망 보상 결과가 송전망의 증분비용보다 높다면 송전망을 증설할 유인이 발생하고 송전망 증설이 사회후생을 증가시키며, 반대로 증분비용이 더 높다면 송전망 증설할 유인이 발생하지 않고 그것이 사회후생 관점에서 바람직하다는 것이다. 정리하자면 LMP 방식의 송전망 보상은 송전망 투자의 최적 유인을 제공한다.

한 가지 유의할 점은 사회후생 극대화 송전용량은 송전용량 제약이 없을 때의 송전량보다 작으며($T^* < T^{*,NoC}$), 이는 혼잡을 발생시키지 않는 송전용량이 사회후생을 극대화하는 것은 아님을 의미한다. Hogan(2019) 또한 같은 주장을 제시하고 있다.

한편 정리 3-b, 5-b, 6-b에서는 송전용량 수준의 변화가 지역별로 상이한 영향을 유발함을 보여준다. 송전용량이 사회후생 극대화 용량(T^*) 대비 작은 경우에는 장기 사회후생 극대화 결과 대비 송전받는 지역 1의 가격이 상승하고($P_1^*, \bar{T} > P_1^*$) 지역 2의 가격은 하락하며($P_2^*, \bar{T} < P_2^*$), 반대의 경우에는 송전받는 지역 1의 가격은 하락하고(P_1^*, NoC 및 $P_1^*, \bar{T} \leq P_1^*$) 지역 2의 가격은 상승한다(P_2^*, NoC 및 $P_2^*, \bar{T} \geq P_2^*$). 즉, LMP하에서는 송전용량의 확대가 전력 자급도가 낮은 수도권 지역의 가격을 하락시키고 지방의 가격을 인상시킬 수 있음을 의미하는 것이다(정리 7-d와도 연관됨). 송전망 투자 여부가 지역별로 상이한 이해관계를 만들어낸다는 점을 유의해볼 필요가 있다.

정리 2, 4, 7에서는 외생변수들의 변화가 사회후생 극대화 결과에 미치는 영향을 정리하고 있는데 이 또한 유사한 시사점을 제공한다. 송전망의 증분비용 c_T 의 증가는 단기 사회후생 극대화 결과에는 영향을 미치지 않지만 장기 후생극대화 상황에서는 P_1^* 을 상승시키고 P_2^* 를 하락시키며, 결과적으로 송전망 보상액을 증가시킨다(정리 2-a, 4-a,

7-a). 지역 2에서만 공급되는 한계비용이 0인 재생에너지 공급량 Q_{2R} 이 증가할 경우 장기 및 송전망 제약이 없는 단기 사회후생 극대화에서는 사회후생 극대화 P_1 과 P_2 를 모두 감소시키지만 송전망 제약이 있는 경우 P_1^*, \bar{T} 에는 영향을 미치지 못하고 P_2^*, \bar{T} 만을 하락시킨다(정리 2-b, 4-b, 7-b). 다음으로 송전효율을 증가시키는 경우(c_L 의 증가) 사회후생 극대화 P_1 을 감소시키지만 P_2 의 변화는 상황에 따라 상이하게 나타난다(정리 2-c, 4-c, 7-c). 마지막으로 송전망 제약이 있는 단기의 경우 \bar{T} 가 증가하면 P_1^*, \bar{T} 는 감소하고 P_2^*, \bar{T} 는 증가하며, 그에 따라 송전망에 대한 보상이 감소하게 된다. 이상의 결과들은 기술의 변화(c_T, c_L 의 변화) 및 투자량의 변화(T, Q_{2R})의 변화가 송전망 사업자 및 지역별 수요자들에게 상이한 방식으로 영향을 미침을 보여주는 것이다.

2. LMP 방식의 적용 관련 논점

본 연구의 분석결과들에 근거해 보면 LMP 방식을 한국의 현실에 적용함에 있어 유의할 점들이 있다. 우선 LMP 방식에 의한 송전망에 대한 보상이 기 투자된 송전망 투자비의 완전한 회수를 보장하지 않는다는 점이다. 앞서의 분석결과들은 송전망 투자에 대한 보상이 증분비용만을 반영하며, 별도로 가정된 f_T 는 보상되지 않음을 보여주고 있다. 즉, 송전망 투자에서 규모의 경제가 발생하는 경우 송전망 투자가 완전히 회수되지 못한다는 것이다. 따라서 LMP 개념하에서도 송전망 보유자의 원가회수를 보장하기 위해서는 송전망에 대해 총괄원가 보상(투자보수율 규제) 개념이 유지될 필요가 있다. LMP는 전력량요금(변동가격) 형태의 보상이다. 전기요금에는 기본료(고정가격)도 포함되며, LMP에 의해 보상되지 않은 잔여 투자비는 기본료에 반영되는 것이 타당할 것이다.

또한 앞서 LMP 방식이 송전망 투자의 적정 유인을 제공한다고 설명한 것은 경쟁적인 송전망 투자 상황을 가정한 것임에 유의해야 한다. VI.1절의 요약 ③의 설명은 독점적인 송전망 보유자가 과소투자를 함으로써 보상액을 $c_T T$ 이상으로 증가시킬 수 있음을 의미한다. Hogan(1999, 2019) 또한 독점적인 송전사업자에게 과소투자 유인이 있음을 지적한 바 있다. 따라서 총괄원가 규제는 이 문제를 완화할 수 있는 대안이 된다. 그러나 총괄원가 규제는 LMP 개념에 의한 최적 투자의 유인 또한 제거하기 때문에(비록 최적투자의 시그널을 제공할지라도) 송전망 상황에 대한 규제자의 모니터링과 관리는 한국과

같은 독점 송전망 사업자 상황에서는 필수적이라고 판단된다.

두 번째, 본 연구는 발전비용과 송전비용만을 가정하여 분석한 것으로 가격은 발전비용에 대한 보상(발전한계비용)과 송전망 투자에 대한 보상만을 포함하며, 배전 및 판매 부분 관련 비용의 회수는 고려하지 않았다. 따라서 본 연구의 결과를 마치 발전부문과 송전부문만을 대상으로 하는 도매시장(현재의 전력시장과 유사한)의 가격을 분석한 것과 같이 이해할 수도 있다. 그리고 실제 LMP 방식을 도매시장 가격의 결정방식으로 생각하여 적용하는 것도 가능하다. 즉, 현재 전력(도매)시장의 가격결정 방식인 전국 단일 SMP를 지역 단위의 LMP 방식으로 전환하여 발전과 송전부문 원가를 보상하는 방식으로 사용하되, 소매가격은 총괄원가(판매비용이나 배전비용과 같은 여타의 비용을 포함) 보상 관점에서 별도의 원칙, 예를 들어 전국 단일 요금 원칙을 적용하여 결정하는 것도 가능한 것이다. 이 방식은 현재의 SMP 및 전국 단일 소매요금 방식 대비 두 가지 측면에서 개선된 방식으로 이해할 수 있다. 우선 앞서 설명한 것과 같이 송전망 투자 여부를 LMP에 의한 보상 수준에 따라 결정할 수 있어 최적 송전망 투자를 위한 시그널이 생성된다는 점이다. 다음으로 한국전력의 전력구입비의 절감이 발생하게 된다. 현재 SMP 개념은 전체 동원된 발전기들에서 가장 비싼 발전한계비용을 가격으로 삼아 모든 동원된 발전기들을 보상하는 방식이다. 그렇지만 LMP 방식에서는 지역단위에서 가장 비싼 발전한계비용을 반영해 해당 지역의 발전기들의 보상액이 결정된다. 지역별 LMP들은 전국 단위의 SMP보다 같거나 작게 나타날 수밖에 없으며, 따라서 전력구입비는 감소하게 되는 것이다.¹⁾ 그리고 이는 발전사업자들의 이윤은 감소하지만 소매가격이 하락할 수 있음을 의미한다.

그러나 소매가격이 원가(한계비용)를 반영하는 것이 배분적 효율성을 극대화하는 방식임은 널리 알려진 사실이다. 도매가격은 LMP 원칙을 적용하되 소매가격은 전국 단일 요금 방식을 적용하는 경우는 LMP를 반영해 소매가격을 지역별로 상이하게 적용하는 방식 대비 사회후생을 감소시킬 것이다. 즉, 전국 단일 소매요금 방식은 $P_i = P_j$ 의 제약을 부여함으로써 사회후생을 감소시킨다. 또한 서론 및 II장에서 논의한 것과 같이 지역

1) 2022.9월 이전에는 운영 발전계획과 SMP를 결정하는 가격 발전계획이 분리되어 있었으며, 가격발전계획에서는 송전제약이 반영되지 않았었다. 따라서 실제 운영 발전계획에 의해 결정되는 한계발전기의 변동비가 SMP 대비 높아지는 경우가 발생하였다. 그러나 2022.9월 이후 송전제약을 반영하는 운영발전계획에 의해 SMP가 결정되도록 제도가 개선되었으며, 이 경우 SMP는 LMP들 중 가장 높은 가격이라고 볼 수 있다.

별 차등요금을 부과하려는 시도는 가격에 송전망 투자의 기회비용을 반영함으로써 최적의 입지신호를 제공하고 이를 통해 장기적으로 송전망 투자의 필요성을 감소시키려는 목적을 포함한다. 도매시장에만 LMP 개념을 적용하는 경우 발전기들에 대한 최적 입지신호를 제공할 수 있지만, 전국 단일 소매요금 체제는 수요에 대한 입지신호를 제공하지 못한다. 즉, 지역별로 가격을 달리해야만 수요가 가격(해당 지역의 한계발전비용)이 낮은 지역으로 이동할 유인을 제공하며, 이를 통해 동태적 관점에서 송전망 투자를 줄일 수 있게 되는 것이다. 따라서 LMP 개념은 도매시장의 보상뿐 아니라 소매가격을 결정하는 데에도 적용되는 것이 바람직하다.

세 번째, 본 연구에서는 발전에는 용량제약이 없는 상황을 가정하여 분석하였다. 그러나 현실에서는 발전용량 제약이 발생하고 있으며, 현재 최대부하의 개념은 발전용량 개념하에서 정의되고 있다. 그리고 현재의 최대부하요금제(계시별 요금제)는 시간대별 SMP의 차이뿐 아니라 앞서 언급하였듯이 시간대별로 최대부하 발생 확률을 감안하여 결정되는 시간대별 상이한 용량가격을 반영하여 결정되고 있다. 그런데 본 연구에서 최대부하 상황은 송전망 제약이 발생하는지 여부에 따라 정의된 것이다. 그리고 특정 구간(지역)에 송전망 제약이 발생하는지 여부는 발전용량 제약과는 별개로 발생할 수 있다. 따라서 LMP 개념을 반영하여 최대부하 요금제를 정하게 되는 경우 실질적으로 두 가지의 상이한 최대부하 개념이 적용되게 된다. 따라서 현재 발전 용량제약만을 반영하는 최대부하 요금제가 LMP 개념을 포함하는 방식으로 변화될 경우 시간대별 요금 격차가 현재 대비 더 증가될 개연성이 높음을 주목할 필요가 있다.

네 번째, 서론에서 언급하였듯이 지역별 차등요금의 구현 방법론으로 LMP뿐 아니라 송전이용요금 방식도 거론되고 있으며, 실제 송전이용요금 방식이 적용되는 국가들도 상당수 있다. 그런데 본 연구의 분석에 따르면 LMP 방식은 사회후생을 극대화할 수 있으며, 최적 송전투자 시그널 또한 제공한다. 반면 송전이용요금 방식은 사회후생 극대화 개념을 포함하지 않는 상대적으로 단순한 송전 원가의 배분방식이며, 최적 송전투자 시그널을 생성하지 못한다. 따라서 지역별 차등요금 방식으로 LMP 방식이 바람직하다고 할 수 있다.

그러나 LMP 방식은 지역별로 상이한 전기의 가치, 부하, 발전용량, 송전망의 물리적 제약 등을 반영한 사회후생 극대화 또는 비용최소화 계통운영을 전제로 한다. 그렇지만

현실의 계통운영은 비용 최소화뿐 아니라 망 안정성 유지 관점에서 실행되고 있어 현실의 계통운영과 최소비용 계통운영의 결과는 상이할 수 있다(Hogan, 1999). Hausman et al.(2006)에서는 LMP 방식이 이미 적용되고 있는 미국의 PJM에서의 실제 운영과 LMP 이론의 차이로 LMP는 비용기반(Cost-based) 최적화 알고리즘에 기초한 개념이지만 실제로는 입찰기반(Bid-based)으로 운영되고 있음(이는 시장지배력의 남용 가능성을 유발), LMP는 계통의 정확한 현황을 반영해야 하지만 이를 완전히 반영하지 못하기 때문에 최적 운영으로부터 괴리 발생, 보조서비스, Ramping constraints, Minimum up/down-times 등이 완전히 최적화 되지는 못하고 있음 등을 언급하고 있다. 즉, 완전한 LMP 방식의 구현은 상대적으로 단순한 총괄원가 배분 방식의 송전이용요금 방식 대비 어려운 면이 있다.

그럼에도 불구하고 Hogan(1992, 1999)에서는 현실의 망관리 방식하에서 발생하는 계통운영 결과를 최적 계통운영 결과로 가정하고 그에 근거하여 LMP를 산정하는 것이 가능하다고 주장한 바 있다. 실제 LMP 개념의 완전한 구현은 상당한 시간과 비용을 유발할 것이며, 완전한 구현 자체가 불가능할 수 있다. 그러나 Hogan(1992, 1999)의 주장과 같이 현실의 계통운영을 비용최소화 운영으로 간주하여 LMP 개념을 적용하는 것은 가능하다고 판단된다. 그리고 지속적으로 계통운영 방식과 전력시장 요금산정 방식을 개선해 나가는 것이 현실적인 방안으로 판단된다.

한편 미국의 PJM을 비롯해 LMP 개념을 적용하고 있는 전력시장에서는 송전망 보상을 수취할 수 있는 권한을 의미하는 FTR(Financial Transmission Rights)을 정의하고 이를 거래하는 방식이 운영되고 있다. Hogan(2018)에서는 이런 방식이 시장과 계통운영을 통합하며, 단기 운영의 최적화 유인 제공과 함께 시장과 장기투자를 지원하는 역할을 수행한다고 하였다. 한국에서도 LMP 개념의 도입과 함께 장기적으로 송전분야에 이런 시장기능의 도입 가능성을 검토할 필요가 있다. 그러나 Hogan(2019)에서는 앞서 언급한 송전망 사업자의 송전망 과소투자의 문제 또는 초과이윤 문제를 고려하여 송전망 투자에 대한 보상을 완전히 시장기능에 의해 결정하지 않음을 언급하고 있다. 송전망 분야에 대한 시장기능 도입은 장기적으로 논의해야 할 과제로 생각되며, 중단기적으로는 독점 송전망 체제하에서 LMP 개념을 구현하는 것이 선행되어야 할 것이다.

Ⅶ. 결론

본 연구는 기존 문헌들에서 산발적으로 정리하고 있는 LMP의 특성들을 이해가 용이한 간단한 수리모형을 통해 설명하였다. 특히 장기, 송전용량 제약이 없는 단기, 송전용량 제약이 있는 단기 사회후생 극대화 결과를 각기 보여줌으로써 LMP 방식이 지역별 가격과 사회후생에 어떤 영향을 미치는지를 명확히 설명하였다는 점에서 의미가 있다. 또한 본 연구에서는 송전 증분비용, 송전효율, 지역별 재생에너지 발전량의 변화에 따라 사회후생 극대화 결과가 어떻게 달라지는지를 보여주고 있으며(정리 2, 4, 7), 이러한 내용들은 LMP 방식에 대한 심화된 이해에 기여한다고 판단된다.

그러나 본 연구의 한계 또한 지적할 필요가 있다. 본 연구는 2개의 지역만이 존재하는 단순 모형을 분석하였다. 그러나 앞서 Hogan(1992)이 제기한 Loop Flow의 문제를 언급한 바 있으며, 이는 3개 이상의 지역이 존재할 경우 2개 지역만이 존재하는 모형에서 고려되지 못하는 이슈가 있음을 의미한다. Hogan(1992)에서는 Loop Flow의 문제를 고려하지 않고 LMP 개념을 적용할 수 있다고 주장하기도 하였으나 2개 지점만을 고려한 본 연구의 분석에는 분명 한계가 있다. 또한 Hogan(1992)에서는 특정 지역의 발전량이 없는 경우(발전량에 제약이 존재하는 경우) LMP가 해당 지역의 한계발전비용과는 상당히 다르게 나타날 수 있는 상황을 설명하고 있는데, 이 경우에도 LMP 방식을 전력수요의 기회비용을 반영하는 개념으로 해석할 때 LMP 방식이 사회후생을 극대화하는 것으로 제시하고 있다. 본 연구는 발전량에 제약이 존재하지 않는 상황을 분석하고 있지 않기 때문에 발전량에 제약이 없는 경우의 사회후생 극대화 결과를 보여주지 못했다는 점에서 한계가 있다. 이러한 논의는 본 연구에서 분석모형의 한계에 대한 일부 예시이며, 향후 더 일반화된 상황을 포괄하는 분석모형이 개발될 필요가 있다.

[References]

김상훈·이광호, “손실을 고려한 전력시장 균형점과 손실계수 적용에 관한 연구”, 「대한전기학회 하계학술대회」, 2007.

- 김승원, “효율적인 전력설비 투자 유도를 위한 송배전망 이용요금 규제방식 연구”, 산업통상자원부, 2022.
- 박명덕, “합리적 송전망 비용회수 방안 연구”, 에너지경제연구원, 2015.
- 안재균, “효과적인 분산형 전원 보급 및 활용을 위한 송배전요금제 도입방안 연구”, 에너지경제연구원, 2021.
- 안재균, “효과적인 전력망구축을위한비가공증설대안(NWAs) 모색”, 제58회전기의날기념특별포럼, 2023.
- 이상엽·이창호·임동순·석광훈·최영웅, “재생에너지 확산 이행방안 연구(II)”, 한국환경연구원, 2021.
- 이철휴, “계통 안정화를 위한 미래 전력망 구축방안”, 제58회 전기의 날 기념 특별포럼, 2023.
- 정성훈·민경일·문영현, “거래전략을 고려한 LMP(Locational Marginal Price) 산정”, 「2009년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집」, 2009.
- Crew, M. A., C. S. Fernando, and P. R. Kleindorfer, “The Theory of Peak-load Pricing: A Survey,” *Journal of Regulatory Economics*, Vol. 8, 1995, pp. 215~248.
- González-Cabrera, N., J. Torres-Jiménez, J. García-Guzmán, J. Serrano-Rubio, and J. Rodríguez-Rodríguez, “Reliability Nodal Pricing Considering CO₂ Emissions in a Multi Objective Function,” *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 17, No. 10, 2019, pp. 1616~1624.
- Harvey, S., and W. Hogan, *Locational Marginal Prices and Electricity Markets*, NYISO FERC Submission(17, October), 2022.
- Hausman, E. P., D. W. Peterson, and B. Biewald, *RPM 2006: Windfall Profits for Existing Base Load Units in PJM—An Update of Two Case Studies*, Prepared for Pennsylvania Office of Consumer Advocate, 2006 (Available at www.synapse-energy.com).
- Hogan, W. W., “Contract Networks for Electric Power Transmission,” *Journal of Regulatory Economics*, Vol. 4, 1992, pp. 211~242.
- Hogan, W. W., *Electricity Market Design: The Value of FTRs*, Platts 11th Annual Nodal Trader Conference, Proceeding, New York, NY, 2018.
- Hogan, W. W., *Fred Schwegpe Meets Marcel Boiteux: Transmission Pricing*, in Thomas-Oliver Léautier: *Imperfect Markets and Imperfect Regulation: An Interoduction to the Microeconomics and Political Economy of Power Markets*, Chap. 6, MIT Press, 2019.
- Hogan, W. W., *Market-based Transmission Investments and Competitive Electricity Markets*.

- Center for Business and Government*, John F. Kennedy School of Government, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 1999, 02138.
- Li, H., L. Tesfatsion, “ISO Net Surplus Collection and Allocation in Wholesale Power Markets under Locational Marginal Pricing,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 2, 2011, pp. 627~641.
- NationalGridESO, Net Zero Market Reform: Phase 3 Assessment and Conclusions, 2022.
- Pollitt, M. G., *Locational Marginal Prices (LMPs) for Electricity in Europe? The Untold Story*, Energy Policy Research Group, University of Cambridge, 2023.
- Read, E. G., and D. P. M. Sell, *Pricing and Operation of Transmission Services: Short Run Aspects. Report to Trans Power*, Canterbury University and Arthur Young, Clirist Church. New Zealand, 1988. 10.
- Read, E. G., *Pricing of Transmission Services: Long Run Aspects. Report to Trans Power*, Canterbury University, Christ Church, New Zealand, 1988. 10.
- Sarfati, M., M. R. Hesamzadeh, and P. Holmberg, *Production Efficiency of Nodal and Zonal Pricing in Imperfectly Competitive Electricity Markets*, Energy Policy Research Group, University of Cambridge, 2019.
- Schweppe, F. C., M. C. Caramanis, R. D. Tabors, and R. E. Bohn, *Spot Pricing of Electricity*, Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- Sioshansi, R., R. O’Neil and, S. Oren, “Economic Consequences of Alternative Solution Methods for Centralized Unit Commitment in Day-ahead Electricity Markets,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, 2008, pp. 344~352.
- Tang, W., and R. Jain, “Game-Theoretic Analysis of the Nodal Pricing Mechanism for Electricity Markets,” *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, December 10-13, 2013. Florence, Italy.
- Tesfatsion, L., “Locational Marginal Pricing: A Fundamental Reconsideration,” *Journal of Power and Energy*, 11(January), 2024, pp. 104~116.

[별첨 1] 장기 사회후생 극대화의 2계조건

식 (6)~(8)로 주어진 1계 편도함수들로부터 2계 편도함수를 구하여 헤시안 행렬식 (Hessian Determinant)을 정리하면 아래와 같다.

$$H = \begin{pmatrix} -(1+2cb_1)/b_1 & 0 & -c_L/b_1 \\ 0 & -(1+2cb_2)/b_2 & 1/b_2 \\ -c_L/b_1 & 1/b_2 & -(b_1+b_2c_L^2)/(b_1b_2) \end{pmatrix} \quad (A1)$$

그리고

$$|H_1| < 0, |H_2| = \frac{(1+2cb_1)(1+2cb_2)}{b_1b_2} > 0, |H_3| = -\frac{2c[1+2cb_1-(1+cb_2)c_L^2]}{b_1^2b_2} < 0$$

으로 나타나며, 사회후생함수는 음정부호(Negative Definite) 조건을 만족한다.

[별첨 2] 정리 2-c의 증명

식 14와 15로 주어진 F_i^* 를 c_L 로 편미분한 결과들이 아래에 제시되어 있다.

$$\frac{\partial P_1^*}{\partial c_L} = \frac{[1+2cb_1-(1+2cb_2)c_L^2][2c(a_2-Q_{2R})+(1+2cb_2)c_T]}{[1+2cb_1+(1+2cb_2)c_L^2]^2} - \frac{4cc_L(1+2cb_2)a_1}{[1+2cb_1+(1+2cb_2)c_L^2]^2} \quad (A2)$$

$$\frac{\partial P_2^*}{\partial c_L} = \frac{2c[1+2cb_1-(1+2cb_2)c_L^2]a_1}{[1+2cb_1+(1+2cb_2)c_L^2]^2} + \frac{2c_L(1+2cb_1)[2c(a_2-Q_{2R})+(1+2cb_2)c_T]}{[1+2cb_1+(1+2cb_2)c_L^2]^2} \quad (A3)$$

위 편미분 결과를 살펴보면 $\partial P_i^*/\partial c_L$ 의 분모는 양수이며, 분자는 $a_2 > Q_{2R}$ 의 조건하에서 c_L^2 의 계수값이 음수인 c_L 의 2차 식이다. 또한 $\partial P_1^*/\partial c_L$ 의 분자를 0으로 만드는 c_L 값 중 큰 값인 c'_{L1} 은 아래 와 같다. 식에서 X 는 표기의 편의를 위해 정의한 것이다.

$$c'_{L1} = - \frac{4ca_1(1+2cb_2) - \sqrt{(1+2cb_2)X}}{2(1+2cb_2)[2c(a_2 - Q_{2R}) + (1+2cb_2)c_T]} \quad (A4)$$

$$(X = 4c^2a_1^2(1+2cb_2) + (1+2cb_1)[2c(a_2 - Q_{2R}) + (1+2cb_2)c_T]^2)$$

만약 c_L 이 c'_{L1} 보다 크다면 $\partial P_1^*/\partial c_L$ 은 음의 값이 된다. 한편 수리모형은 $T^* \geq 0$ 의 조건하에서 분석된 것이며, 식 11에 따르면 $c_L \geq (1+2cb_1)[2c(a_2 - Q_{2R}) + (1+2cb_2)c_T] / [2ca_1(1+2cb_2)] = c'_L$ 이 만족되어야만 $T^* \geq 0$ 이 만족된다. 이제 $c'_{L1} - c'_L$ 을 정리하면

$$c'_{L1} - c'_L = \frac{-X + \sqrt{4c^2a_1^2(1+2cb_2)X}}{2ca_1(1+2cb_2)[2c(a_2 - Q_{2R}) + (1+2cb_2)c_T]} \quad (A5)$$

가 되며, $4c^2a_1^2(1+2cb_2) < X$ 이기 때문에 $c'_{L1} < c'_L$ 이 된다. 따라서 $T^* \geq 0$ 의 조건하에서 $\partial P_1^*/\partial c_L$ 은 음의 값을 갖으며, c_L 이 증가하면(전송 효율이 높아지면) P_1^* 이 감소한다.

마지막으로 식 A3로 정리된 $\partial P_2^*/\partial c_L$ 의 경우 부호를 식별하기 어렵다. 그런데 분자의 첫 번째 항 “ $2c[1+2cb_1 - (1+2cb_2)c_L^2]a_1$ ”을 제외한 부분은 양의 값을 갖는다. 그리고 첫 번째 항의 경우 $c_L = 0$ 인 경우 양수이며, c_L 이 증가할수록 값이 작아진다. 그런데 $c_L = 1$ 인 경우 첫 번째 항은 $4c^2(b_1 - b_2)a_1$ 로 정리된다. 결국 b_2 가 b_1 대비 상당히 큰 값이 아닌 경우 $\partial P_2^*/\partial c_L$ 은 $0 \leq c_L \leq 1$ 의 범위에서 양의 값을 갖는다. 이는 c_L 이 증가할 경우 지역 1로 송전되는 전력량(T^*)이 증가하여, 지역 2의 공급량이 감소하는 경향을 반영하는 것이다. 그러나 본 연구에서는 $T^* \geq 0$ 의 조건을 고려하고 있으며, 대체로 지역 1의 수요가 지역 2의 수요 대비 큰 상황($a_2 < a_1, b_2 > b_1$)을 염두에 두고 있다. 따라서 본 연구의 가정들에서 $\partial P_2^*/\partial c_L \leq 0$ 이 발생하는 $b_2 \gg b_1$ 의 상황을 배제할 수 없다.

[별첨 3] 정리 4-c의 증명

식 22에 제시된 $P_1^{*,NoC}$ 을 c_L 로 미분한 값이 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \partial P_1^{*,NoC} / \partial c_L = & \frac{-2c(1+2cb_2)(a_2 - Q_{2R})c_L^2 - 4c(1+2cb_2)a_1c_L}{[1+2cb_1+(1+2cb_2)c_L^2]^2} \\ & + \frac{2c(1+2cb_1)(a_2 - Q_{2R})}{[1+2cb_1+(1+2cb_2)c_L^2]^2} \end{aligned} \quad (A6)$$

그런데 위 분석은 $T^{*,NoC} \geq 0$ 을 전제로 진행되었으며, 그 조건은 $(1+2cb_2)a_1c_L \geq (1+2cb_1)(a_2 - Q_{2R})$ 으로 정리된다. 이제 $\partial P_1^{*,NoC} / \partial c_L$ 의 분자 중 맨 마지막 항의 $(1+2cb_1)(a_2 - Q_{2R})$ 를 $(1+2cb_2)a_1c_L$ 으로 대체하면 다음의 부등식이 만족된다.

$$\begin{aligned} \partial P_1^{*,NoC} / \partial c_L \leq & \frac{-2c(1+2cb_2)(a_2 - Q_{2R})c_L^2 - 4c(1+2cb_2)a_1c_L + 2c(1+2cb_2)a_1c_L}{[1+2cb_1+(1+2cb_2)c_L^2]^2} \\ = & \frac{-2c(1+2cb_2)[(a_2 - Q_{2R})c_L^2 + a_1c_L]}{[1+2cb_1+(1+2cb_2)c_L^2]^2} \leq 0 \end{aligned} \quad (A7)$$

따라서 $T^{*,NoC} \geq 0$ 의 조건하에서 $\partial P_1^{*,NoC} / \partial c_L$ 은 음의 값을 갖는다.

다음으로 $\partial P_2^{*,NoC} / \partial c_L$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\partial P_2^{*,NoC} / \partial c_L = \frac{2c_L(1+2cb_1)(a_2 - Q_{2R}) + 2ca_1[(1+2cb_1) - (1+2cb_2)c_L^2]}{[1+2cb_1+(1+2cb_2)c_L^2]^2} \quad (A8)$$

$\partial P_2^{*,\bar{T}}/\partial c_L$ 의 분자는 c_L 의 2차항의 계수가 음수인 2차 함수이며 $c_L = 0$ 일 때는 양수로 나타난다. 반면 $c_L=1$ 일 때

$$\partial P_2^{*,NoC}/\partial c_L = \frac{2(1+2cb_1)(a_2 - Q_{2R}) + 4c^2a_1(b_1 - b_2)}{[1 + 2cb_1 + (1 + 2cb_2)]^2}$$

로 정리된다. 그렇다면 $\partial P_2^{*,NoC}/\partial c_L$ 은 b_2 가 b_1 보다 매우 큰 값이 아니라면 역시 양수로 나타난다.