

국내 제조업 부문 공급지장비용(VoLL) 분석 및 유연성 자원 확보를 위한 시사점*

진태영** · 이태의***

요약

공급지장비용(Value of Lost Load, VoLL)은 전력공급지장을 피하기 위해 기회비용 측면에서 전력공급의 가치를 추정한 가상의 가격이다. 향후 탄소중립 전력시장에서 안정적인 전력공급을 위해 유연성 자원의 확대가 요구되며, 이에 대한 보상체계를 마련하는 기준으로서도 VoLL은 중요한 역할을 할 것으로 보인다. 하지만 아직 국내에서는 적정 VoLL 수준에 대한 연구가 선행된 사례가 적다. 본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 국내 제조업 부문을 대상으로 진출선호법의 일환인 조건부 가치측정법(Contingent Valuation Method, CVM)을 활용해 VoLL을 추정하였다. 분석 결과 제조업 전반의 VoLL은 약 384.5원/kWh로 계산되었으며, 이는 대표적 유연성 자원들의 균등화저장비용(LCOS) 수준과 비교했을 때 보상하기에 충분한 수치가 아닌 것으로 나타났다. 따라서 CVM을 활용한 주기적인 VoLL 추정과 함께 VoLL에 대한 인식을 제고할 필요가 있을 것으로 보인다. CVM을 활용한 VoLL 결과는 향후 유연성 자원 확보를 위해 필요한 비용 상승에 있어 사회적 수용성과 연관되어 있기 때문이다.

주요 단어 : 공급지장비용(VoLL), 유연성 자원, 탄소중립, 균등화저장비용(LCOS)
경제학문헌목록 주제분류 : Q41, Q43

* 본 연구는 에너지경제연구원의 2022년도 기본과제 “전력시장 탄소중립에 요구되는 유연성 자원의 확보를 위한 공급지장비용(VoLL) 연구”의 내용을 수정·보완하였습니다.

** 에너지경제연구원 집단에너지연구팀 부연구위원(주저자) (e-mail: tyjin@keei.re.kr)

*** 에너지경제연구원 집단에너지연구팀 연구위원(교신저자) (e-mail: lte@keei.re.kr)

I. 서 론

공급지장비용(Value of Lost Load, VoLL)은 국내에서는 생소한 개념이다. VoLL은 “수요가 공급보다 커서 공급지장이 발생할 경우, 계속 전력공급을 받기 위해 수용가가 기꺼이 지불하려는 의사가 있는 예상가격. 즉, 공급 부족분을 회피하기 위하여 소비자가 치르도록 가정된 가격”을 말한다(한국에너지공단, 2023). 우리나라에서는 전력계통이 통합되어 있음에도 불구하고 국소적인 지역에서만 간헐적인 정전이 발생해 왔으며, 대규모 정전이 일어난 사례는 거의 없다. 현재까지는 전력수요 대비 전력공급 설비 예비력이 높은 상태였으며, 대부분의 발전원이 인위적으로 출력조정이 가능한 화력발전설비였기 때문에 수요변동에 공급이 적절히 대처할 수 있었기 때문이다.

하지만, 기후변화 대응을 위해 온실가스 감축이 필수적인 과제로 지목되면서 전력계통에 다양한 문제가 발생할 것으로 예상되고 있다(IEA, 2018). 전세계적으로 탄소중립 달성을 위한 정책에서는 온실가스 배출량의 2/3 이상을 차지하는 에너지 부문에서의 정책이 중심을 이루고 있다. 에너지 부문의 탄소중립 주요 수단으로는 최종에너지 부문의 전력 소비비중을 증가시키는 전기화(electrification)와 재생에너지 확대를 통한 전력부문의 탈탄소화(decarbonization)가 있다(IEA, 2021). 우리나라에서도 2021년 대한민국 2050 탄소중립 전략과 탄소중립 시나리오 등에서 탄소중립 달성을 위한 에너지 부문의 노력을 강조하였다(관계부처합동, 2021; 2020). 또한 2023년 발표된 제10차 전력수급기본계획에 따르면 전력부문의 탈탄소화를 위해 변동성 재생에너지(variable renewable energy, VRE)의 확대가 지속적으로 추진될 전망이다.

VRE 확대는 전력망의 불안정성을 필연적으로 수반한다. 기존 전통발전원의 경우 필요에 따라 출력조정이 가능한 반면 태양광과 풍력자원은 일조량과 풍량에 영향

을 크게 받아 간헐성(intermittency)이 존재하기 때문에 출력을 인위적으로 조절하거나 예측이 어렵기 때문이다(전우영 외, 2019). 또한, 전력은 생산과 동시에 소비되어야 한다는 동시성(simultaneity)이라는 특징이 있어 실시간 전력망 수급 균형은 더욱 중요해진다. 그러나 VRE 확대에 의해 증가하는 공급 불안정성을 해결하면서 안정적으로 수급균형을 유지하기 위해 더 많은 노력, 즉 비용이 증가할 것을 예상할 수 있다(김남일·이성규, 2021). 결국, 전력계통을 백업하기 위한 유연성 자원을 확보하고, 유연성 자원이 적절하게 보상받을 수 있는 보조서비스(Ancillary Service, AS) 시장을 설계하는 것이 재생에너지가 확대된 전력시장에서 안정성을 확보하기 위한 필요조건이 된다(이유수, 2020).

VoLL은 VRE가 확대된 미래 전력시장에서 필요한 유연성자원이 보상받을 수 있는 체계를 마련하는 기반으로서 활용된다. 정전이 발생하기 직전에는 전력공급이 부족한 상태이기 때문에 해당 시간대 전력의 희소가치를 산정할 필요가 있으며, 이는 기회비용 관점에서 전력공급지장 시 발생할 수 있는 예상 피해액을 기반으로 추정할 수 있다. VoLL은 공급지장 시 발생가능한 사회적 손실비용을 바탕으로 전력시장에서 유연성 자원의 보상 가격상한을 정하는 참고가격으로 사용한다(이윤경, 2016). 텍사스의 전력신뢰도위원회(ERCOT)에서는 VoLL을 상한으로 하여 예비력에 따른 유연성 자원의 수요곡선(Operating Reserve Demand Curve, ORDC)¹⁾을 작성해 사용하고 있다. 향후 우리나라에서도 AS시장이 확대됨에 따라 VoLL을 활용한 ORDC 구축이 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 앞서 기술한 연구의 배경과 필요성에 따라 국내 VoLL을 시범적으로 도출하기 위해 설문에 기반하여 제조업 부문의 VoLL을 도출하였다. 도출 방법론으로는 비시장재의 가치추정에 활용되는 진술선호법의 일환인 조건부가치측정법(Contingent Valuation Method, CVM)을 활용하였으며, 이중경계 양분선택형(double-bounded dichotomous choice, DBDC)과 직접질문법(open-ended)을 함께 활용해 제조업 전반의 VoLL과 업종별 VoLL을 함께 추정하였다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 진술선호법에 기반하여 VoLL을 추

1) ORDC는 예비력 수준에 따른 유연성 자원 보상가격으로써 활용됨(4장 내용 참고).

정한 선행연구를 분석한다. 3장에서는 본 연구에서 활용된 CVM 방법론을 설명한다. 4장에서는 VoLL 추정 결과와 추정된 값의 활용도를 살핀다. 마지막으로, 5장에서는 결론과 정책적 시사점을 제시한다.

II. 선행연구

전력공급 지장에 따른 기회비용을 측정하기 위해 해외에서는 다양한 VoLL 추정이 이루어졌다. VoLL 추정은 다양한 방법론을 통해서 이루어질 수 있는데, 특히 전력공급지장으로 인해 발생하는 사회적 손실비용을 바라보는 방향에 따라 나눌 수 있다(Schröder and Kuckshinrichs, 2015). 추정 방법론은 설문을 통해 전력공급 지장을 방지하기 위해 지불의사액(willingness-to-pay, WTP)을 도출하여 경제적 가치를 도출하는 CVM 이외에도 정전 시 예상되는 경제적 손실을 도출하는 생산측면 방법론이 있다. 여기서 생산측면 방법론은 부문별 자료를 활용하는지, 개별기업의 미시적 자료를 활용하는가에 따라 거시적 및 미시적 방법론으로 구분할 수 있다(이태의·진태영, 2022).

본 연구에서는 VoLL 추정을 위해 CVM을 활용한 정전방지를 위한 지불의사액을 추정한다. 마찬가지로, 선행연구도 진술선호법을 활용해 VoLL을 정리한 연구들에 초점을 맞추었다. 진술선호법을 활용한 VoLL 관련 연구는 크게 정전방지를 위한 지불의사액에 기반한 VoLL 추정 연구와 정전 발생 시 잠재비용을 추정한 정전비용(outage cost) 연구로 나눌 수 있다. 두 가지 방식은 정전 시 발생할 수 있는 잠재적 손실을 추정한 것은 동일하나 VoLL은 가치표현을 전력의 가치로 나타내기 위해 전기요금 단위인 원/kWh로 나타낸 반면 정전비용은 정전 시 발생할 수 있는 피해액을 화폐가치로 나타냈다는 차이가 있다.

두 연구방식은 나타내는 방식에만 차이가 있을 뿐 중점적으로 살펴보는 것은 동일하다. VoLL과 관련된 대부분의 연구에서 정전에는 여러 가지 영향요인(attribute)이

있으며, 영향요인을 세분화하고 설문기법을 구체화하면 추정된 VoLL 값이 상당히 달라질 수 있음을 제시하고 있다(Ovaere et al., 2019). 대표적으로 우리나라 산업부문의 정전비용을 추정한 Kim and Cho(2017)의 연구에서는 지불의사액 혹은 수용의사액 설문에 앞서 예상되는 정전 피해액을 세분화하여 설문에 제시한 결과 약 1.24배에서 1.3배 높은 정전비용을 도출할 수 있음을 밝혔다. 두 번째로 중요하게 지적받는 요소는 정전의 사전고지 여부인데, 공급지장비용 관련 연구들은 대부분 정전의 사전고지 여부에 따라 줄어드는 잠재적 손실을 추정하였다(Kim and Cho, 2017; Pepermans, 2011).

유승훈 외(2017)에서는 산업용 전력의 가치 추정을 위해 CVM에 기반한 VoLL을 추정한 후 공급지장을 방지하기 위해 지불해야 할 전기요금을 추정하였다. 산업부문 1,150개 기업을 대상으로 직접질문법을 활용해 WTP를 설문한 결과 평균 월 전기요금의 약 1.86%의 추가적인 지불의사액이 있는 것으로 나타났으며, 이로부터 VoLL을 추정한 결과 약 900원/kWh의 VoLL이 도출되었다. 또한, 이 연구에서는 선택실험법(CE)을 결합하여 정전의 속성별로 달라지는 다양한 시나리오에 따라 한계 WTP를 도출했다는 특징이 있다.

Kim et al.(2014)에서는 산업부문과 가정부문에 대해 VoLL을 추정하였는데, 산업부문의 경우 작업 중단비용 관점에서 추정하여 생산손실을 추정한 반면 가정부문은 CVM을 활용하였다. 이 연구에서는 직접질문법보다는 응답자의 선택을 단순화시키기 위해 양분선택형 모형을 사용하였으며 이에 따라 지불저항자의 응답을 통계적으로 처리할 수 있도록 스파이크 모형을 결합하여 추정하였다. 총 1,000개 샘플 추정 결과 가구당 월 3,394원의 정전방지 지불의사액이 있는 것으로 나타났다. 우리나라 가구당 월평균 전력소비량은 약 300~500kWh로, 지불의사액을 VoLL과 동일한 단위로 수정할 경우 10원/kWh 미만의 VoLL이 도출되는 것으로 보이나 설문 설계 과정부터 분석에 대한 가정까지 전부 다를 것이기 때문에 직접적으로 수치를 비교하기엔 무리가 있다. 동일한 프레임워크를 활용한 최근 연구로는 Kim et al.(2019)의 연구가 있으며, 이 연구에서는 우리나라 가정부문의 VoLL이 월평균 1,522원인 것으로 도출되어 Kim et al.(2014)대비 VoLL이 줄어들었음을 시사하였다.

반면, 해외 사례를 살펴보면 우리나라의 사례분석 대비 상당히 높은 VoLL 수치가 도출되었음을 알 수 있다. Caves et al.(1992)의 연구에서는 미국 산업부문을 대상으로 1시간 정전을 방지하기 위한 지불의사액을 기반으로 VoLL을 추정한 결과 \$4/kWh를 도출하였다. London Economics(2013)에서는 영국의 산업부문을 대상으로 VoLL을 도출한 결과 WTP와 WTA 간에 상당한 간극이 존재함을 보였다. WTP는 약 £ 1.7/kWh가 도출된 반면 WTA의 경우 약 6배에 가까운 £ 10.3/kWh가 계산되었다. 이러한 결과는 Praktijnjo(2014)의 독일 가정부문을 대상으로 한 연구에서도 동일하게 관찰되었다.

이탈리아 가정부문을 대상으로 한 연구인 Bertazzi et al.(2005)와 Abrate et al.(2016)의 연구에서는 각각 12.89 €/kWh 와 25.37 €/kWh의 결과를 도출하였다. PwC(2018)에서는 뉴질랜드의 주거, 산업, 상업부문을 대상으로 각각 WTP에 기반한 VoLL을 추정하였는데, 정전발생 시기와 사업 규모에 따라 VoLL이 달라지기는 하지만 주거부문을 제외하고는 \$10/kWh 이상의 값이 도출되었다. 주거부문과 산업부문의 선행연구 결과는 흥미로운 결과가 나타나는데, 독일의 기업과 가정부문을 모두 대상으로 한 Wolf and Wenzel(2016)의 연구에서는 기업의 VoLL이 6.15 €/kWh인 반면 가정부문에서 오히려 더 높은 10.29 €/kWh의 수치가 나타났다. 반면 뉴질랜드를 대상으로 한 PwC(2018)의 연구에서는 정반대 결과가 도출된다. 실제로 우리나라의 선행연구 결과는 가정부문의 VoLL이 산업 대비 낮은 것으로 보인다. 향후 국가별로 VoLL의 역전현상이 발생하는 이유에 대해 심층적으로 탐구해 볼 필요가 있다.

요약하면, 산업부문을 대상으로 한 연구 중 설문을 바탕으로 실증분석을 수행한 연구들은 분석 시점에 따라 다르게 나타나지만 \$4~10/kWh의 범위를 가지는 것으로 나타난다. 우리나라의 경우 한 개의 선행연구가 있으며 \$1/kWh 미만으로 해외에 비해 상당히 작은 수치이다. 표본 수가 많지는 않으며 산업부문은 대부분 생산측면 기법을 활용하는 것으로 보이며, 설문 기반 추정법은 가정부문에서 활용도가 높다. 그러나 산업부문에서 오히려 기회비용이 높을 것이라 생각되는 통념과 달리 대부분의 국가에서 가정부문 VoLL이 높게 나타났으며, \$10~30/kWh인 것으로 나타난다. 뉴

질랜드를 대상으로 한 연구에서만 산업부문 VoLL이 더 높은 정반대 결과가 나타난 것이다.

우리나라를 대상으로 한 산업부문 VoLL 선행연구는 상기 기술한 대로 세 건이 존재한다. 이 중 Kim and Cho(2017)의 연구는 정전피해 세분화와 Tobit 분석을 통해 잠재 정전피해액에 영향을 미치는 요인을 밝혀내는 데 집중하였으며, 피해액은 수용의사액(willingness-to-accept, WTA) 도출 과정에 가까워 과대추정의 여지가 있다. 유승훈 외(2017)의 연구에서는 제조업 업종별로 VoLL을 추정하여 본 연구와 가장 유사하나 CV 질문으로 직접질문법만을 사용하여 설문응답자별로 편이가 크게 발생할 수 있다는 한계가 있다. Kim et al.(2014)의 연구에서는 가정부문에 대해서만 본 연구와 같이 DBDC 모형을 활용한 반면 산업부문의 연구에 대해서는 생산측면 방법론에 가까운 추정법을 사용하였다. 이와 같이 국내 산업부문 VoLL 연구에서는 각각의 한계점이 존재한다. 이렇게 해외 문헌과 차별되는 연구 격차를 해소하기 위해, 본 연구에서는 양분선택형 CVM을 활용해 WTP 기반으로 국내 제조업 부문의 VoLL을 도출하였다.

선행연구를 검토한 결과 CVM을 활용해 VoLL을 추정한 연구는 상당수 존재하며, 가정부문 뿐 아니라 산업부문을 대상으로도 많이 이루어졌던 것으로 보인다. 다만 국가, 부문, 시나리오별로 VoLL의 규모에는 차이가 있는 것으로 나타나며, 우리나라의 경우 VoLL 결과가 \$1/kWh 으로 도출된 반면 해외 사례는 \$10/kWh 이상이며 높은 경우 \$30/kWh까지도 증가하는 것으로 나타난다. VoLL의 기준 수치는 전기요금과 해당 국가/부문에서 전력의 안정적인 공급에 대해 가지고 있는 인식에 따라 달라질 수 있기 때문이나, 향후 우리나라에서도 기준 수치로 제시할 벤치마크 VoLL을 구축할 필요성이 있다.

Ⅲ. 분석 방법론

1. VoLL 추정과정

VoLL 추정을 위해서는 먼저 VoLL에 대한 정의를 명확히 할 필요가 있다. VoLL은 앞서 기술한 대로 전력 공급이 손실됨에 따라 발생할 수 있는 예상 피해액이다. 본 연구에서는 CVM을 활용해 VoLL을 추정하고자 하고 있으나 주로 CVM이 활용되는 영역은 환경재와 같은 비시장재에 대한 가치추정으로, 비시장재에 대한 지불의사액을 질문하여 수용가의 응답으로부터 평균 가치를 도출한다. 그러나 VoLL의 경우 통화(monetary) 개념만으로 접근해 지불의사액을 추정해 가치를 환산하기는 어려우며 전력의 단위 당 가치로 추정할 필요가 있다. VoLL의 단위는 원/kWh으로 나타나며, 정의가 전력 공급 지장에 따른 사회적 손실비용이라는 점을 감안할 때, 정전 시의 VoLL은 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$VoLL(\text{원}/kWh) = \frac{\text{정전비용(원)}}{\text{공급지장전력량}(kWh)} \quad (1)$$

즉, 전력 공급지장이 발생했을 때 전력 수용가에서는 공급받아야 했던 전력량만큼 손실이 있을 것이며, 정전이 지속되는 기간 동안 정전으로 인한 사회적 손실은 지속적으로 발생할 것이다. 이 사회적 손실가치를 공급지장전력량으로 나눈 값이 VoLL이 된다. 가장 직접적으로 접근하는 방식으로는 1시간 동안의 정전으로 인한 피해를 방지하기 위한 WTP 혹은 WTA를 질문한 후, 개별적으로 정전 시 공급에 지장이 생길 수 있는 전력량을 도출하는 것이나 이를 전부 설문 과정에서 도출하는 것은 불가능에 가깝다. 따라서 VoLL을 도출하기 위해서는 응답자에게 지불의사액으로 월 전기요금의 비율(%)을 질문한 후, 수용가 전체의 WTP를 도출한 뒤 수용가의 전체 전

기요금과 정전 시 공급지장전력량을 활용해야 한다.

CVM을 타 비시장재의 가치추정에 사용할 때와 VoLL 추정에 활용할 때의 차이점은 VoLL에 대한 개념을 일반 전력소비자들에게 일일이 이해시키기는 불가능에 가깝다는 것이다. VoLL을 활용해 유연성 자원의 가치를 판단하는 과정은 전력시장 구조와 경제학, 전기공학에 대한 기초적인 지식까지 필요로 하기 때문이다. VoLL의 단위인 원/kWh의 형태로 CVM 설문을 구성하면 설문 결과를 해석하는 작업은 매우 쉽게 진행될 수 있으나 응답자별로 받아들이는 VoLL의 개념 간 격차가 발생할 가능성이 높다. 때문에 CVM을 활용해 VoLL을 추정할 때에는 전력소비자에게 익숙한 월 전기요금 개념으로 WTP 기반 ‘정전비용’을 추정하며, 연구자가 사후적으로 공급지장전력량(kWh) 자료를 활용해 보정하는 과정을 거친다.

본 연구에서 VoLL을 도출하기 위해 활용한 수식은 아래와 같다(식 (2) 참조). VoLL 산정을 위해서는 설문응답자에게 기준 시나리오로서 제시할 수 있도록 조업 시간, 그 중에서도 가장 전력이 필요한 시간인 피크 시간대의 ‘1시간’ 정전이 발생했을 때 이를 방지하기 위한 지불의사액(WTP)을 질문하는 것이다. 따라서 ‘1시간’ 전력 공급 지장 시 발생하는 공급지장 전력량(kWh)을 도출하기 위해서는 월별 총 전력소비량(kWh/월) 자료가 있어야 하며, 이를 월별 총 전기사용시간(시간/월)으로 보정한다. 본 연구에서는 이 시간을 ‘조업시간’으로 활용하였다. 즉, 식(2)의 분모 부분을 계산하면 1시간 정전 시 공급지장전력량(kWh)을 도출할 수 있게 된다. 식(1)과 식(2)의 분자 부분은 각각 정전비용을 나타내고 있으며, CVM으로 도출한 WTP를 반영한 월별 전기요금 추가 지불의사액이 정전으로 발생하는 비용을 반영한다고 가정한다.

$$VoLL = \frac{\text{월별 전기요금(원/월)} \times WTP(\%)}{\text{월별 총 전력소비량(kWh/월)} \div \text{월별 총 전기사용시간(시간/월)}} \quad (2)$$

위 수식으로부터 VoLL을 도출하기 위해 필요한 자료는 수용가의 월평균 전기요금, 월 전력소비량, 그리고 월 전기사용시간이 된다. 월 전기사용시간의 경우 1시간 전력공급지장 시 공급지장전력량을 도출하기 위한 변수로, 제조업의 경우 24시간 전

력을 소비하는 기저부하가 있을 것으로 생각되나 VoLL의 특징을 반영하기 위해서는 전력소비가 높은 시간대인 조업시간을 대상으로 분석한다. 조업시간 외의 경우 선택실험법을 활용해 WTP를 다변화시키거나 전력부하곡선을 활용한 시간대별 VoLL 모델링 등을 활용해 따로 도출할 수 있다(Shivakumar et al., 2017).

식(2)는 복잡한 것으로 보이거나 단순화하면 아래 식(3)과 같이 요약된다. VoLL 도출을 위해 필요한 자료는 세 가지만 수집하면 된다면 의미이다. 월 전기요금을 월 전력소비량으로 나눈 값이 한국전력공사에서 업종별로 모니터링하는 평균 전기요금이기 때문이다. 따라서, 식(3)과 같이 CVM을 활용해 월평균 전기요금에 대한 비율 형태로 지불의사액을 도출한 후 업종별 평균 전기요금과 조업시간 자료를 결합하면 VoLL을 계산할 수 있다. 산정된 VoLL은 유연성 자원의 보상체계 마련을 위한 가격상한 기준으로 활용되며 업종별로 다르게 나타날 수 있다. 업종별 VoLL은 계약종별 요금 개편에 활용될 수 있을 것이다.

$$VoLL(\text{원}/kWh) = \text{평균 전기요금}(\text{원}/kWh) \times WTP(\%) \times \text{조업시간} \quad (3)$$

2. 이중경계 양분선택형 조건부가치측정법(DBDC CVM)

본 연구에서는 이중경계 양분선택형(DBDC) CVM 모형을 활용해 제조업 회사를 대상으로 정전을 회피하기 위한 월 전기요금의 지불의사액 수준을 질문하였다. DBDC CVM은 첫 질문으로 지불의사액을 질문한 후, 응답에 따라 두 번째 질문으로 두 배의 금액(double bid) 혹은 절반(half bid)에 대한 지불의사를 묻는다. 직접질문법은 지불저항자를 제외한 응답자에게만 적용되는데, 두 번째 지불의사 질문 후 응답자의 응답 조합에 따라 범위를 한정시킨 후 응답을 한정하게 한다. 만약 첫 번째 질문금액이 A이고, 여기에 지불의사가 있음을 밝혀 두 번째 질문으로 2A 지불의사를 질문했으나 거부한다면, 마지막 질문으로 WTP 범위를 A와 2A 사이로 한정한 후 구체적인 지불의사 수치를 묻는 방식이다. 이외에도 만약 응답자가 연속적으로 질문에 대해 지불거부의사를 밝힌다면 마지막으로 지불저항자(protest bidder) 확인 질문을

한 후 설문이 종료된다. 지불저항자에 대한 처리로는 표본에서 제외시키거나 지불저항자를 고려한 WTP 분포를 생성하여 평균 WTP를 도출하는 스파이크(Spike) 추정법이 있는데 본 연구에서는 지불저항자 비율이 높아 표본 제외 시 WTP 과대추정의 위험성이 있어 스파이크 모형을 결합하여 처리하였다(Krström, 1997).

DBDC CVM 방식을 활용해 WTP를 도출하는 과정은 McFadden(1974)의 확률효용모형(random utility model)에 뿌리를 두고 있다. 이후 양분선택형 질문기법이 Bishop and Herberlein(1979)의 연구에서 제안되었으며, 양분선택형 질문은 간접효용함수를 활용해 지출상황의 차이에 따른 효용 차이를 살피는 효용격차모형에 기반한다. 대안상황(i)을 가정할 때 설문응답자(j)의 간접효용함수(v_{ij}) 간 격차에 따라 설문응답자의 선택이 결정된다는 뜻이며, 본 연구에서의 대안상황(i)은 정전을 방지하기 위해 월 전기요금의 일부를 추가적으로 지출하는 상황($z_i = 1$)과 추가적인 지출 없이 정전피해를 감수하는 상황($z_i = 0$)으로 나눌 수 있다. 아래 식 (4)와 같이 A 라는 지출이 발생함에도 불구하고 효용이 높다면 응답자는 CV 질문에 ‘예’라고 응답한다는 의미이다. y 는 응답자의 소득을 가리키며, ω 및 ϵ 는 인구통계학적 특성과 관찰할 수 없는 오차항을 가리킨다.

$$v_{1j}(y_j - A, w_j, z_i = 1, \epsilon_{1j}) > v_{0j}(y_j, w_j, z_i = 0, \epsilon_{0j}) \quad (4)$$

위와 같은 효용차이가 있을 때 응답자들이 CVM 설문에서 주어진 시나리오를 기반으로 CV 질문에 ‘예’라고 응답할 가능성은 아래와 같은 확률함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pr(\text{예}) &= \Pr[\Delta v_{ij} + (\epsilon_{1j} - \epsilon_{0j}) > 0] = \Pr[\Delta v_{ij} + \epsilon_j > 0] \\ &= \Pr[\alpha_1 + \beta_1(y_j - A_j) - (\alpha_0 + \beta_0 y_j) + \epsilon_j > 0] \\ &= \Pr[\alpha - \beta A_j > \epsilon_j] = F_\epsilon(\Delta v_{ij}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{where } \epsilon_j = \epsilon_{1j} - \epsilon_{0j}, \quad \alpha = \alpha_1 - \alpha_0$$

위 식에서 Δv_{ij} 는 선택상황에 따른 응답자의 효용격차를 나타낸다. F 는 확률변수 ϵ 의 누적확률분포로, 확률변수가 표준분포를 따른다고 가정하면 프로빗 모형으로, 표준로지스틱분포를 따른다고 가정하면 로짓 모형을 활용해 추정할 수 있다. 위 식에서 효용격차함수의 계수인 α 와 β 를 최우추정법에 기반하여 도출할 수 있으며, WTP의 평균값은 두 계수 간의 비율로 계산할 수 있다($WTP^{mean} = \hat{\alpha}/\hat{\beta}$).

위 내용은 일반적인 양분선택형 모형에 대한 CVM 방법론의 이론적 기반을 나타낸다. 이중경계형 양분선택형 모형의 경우 응답자의 응답에 따라 질문 조합이 달라질 수 있으므로 지시함수를 활용해 응답자를 구분해야 한다. 확률변수 $WTP(X)$ 가 주어졌을 때, 응답자의 선택이 ‘예’인 경우 주어진 $WTP(A)$ 보다 X 가 높다는 뜻이므로, $Pr(\text{‘예’}) = Pr(A \leq X) = F(\Delta v_{ij}) = 1 - G_X(A)$ 로 나타낼 수 있다. F 는 응답자의 선택에 따른 효용격차 누적분포함수이며, G_X 는 WTP 확률변수의 누적분포함수를 나타낸다. 응답자의 응답에 따라 스파이크가 결합된 DBDC CVM은 여러 질문 조합이 도출되므로 누적분포함수 추정을 위한 로그-우도함수는 식 (6)과 같이 나타난다. I 는 응답자의 응답 조합을 나타내는 지시함수이다.

$$\ln L = \sum_{i=1}^N \left(I_i^{YY} \ln[1 - G_X(A_i^u)] + I_i^{YN} \ln[G_X(A_i^u) - G_X(A_i)] \right. \\ \left. + I_i^{NY} \ln[G_X(A_i) - G_X(A_i^l)] + I_i^{NN} \ln[G_X(A_i^l) - G_X(0)] + I_i^{NNN} \ln G_X(0) \right) \quad (6)$$

$$\begin{cases} I_i^{YY} = 1 (\text{j번째 응답자의 응답이 ‘예-예’}) \\ I_i^{YN} = 1 (\text{j번째 응답자의 응답이 ‘예-아니오’}) \\ I_i^{NY} = 1 (\text{i번째 응답자의 응답이 ‘아니오-예’}) \\ I_i^{NN} = 1 (\text{i번째 응답자의 응답이 ‘아니오-아니오’}) \\ I_i^{NNN} = 1 (\text{i번째 응답자의 응답이 ‘아니오-아니오-아니오’}) \end{cases}$$

스�파이크를 결합한 경우 로그우도함수로부터 도출하는 모수의 형태가 WTP의 구간에 따라 다르게 지정된다. 스파이크 모형 자체가 WTP 분포가 음(-)의 부분이 없으며, 영값의 WTP에서 갑자기 튀어오르는 형태이기 때문이다(이주석·최은철, 2013).

따라서 식 (7)과 같이에서 절단된 로지스틱 분포의 형태를 가지며, 평균 WTP 값은 식 (8)을 활용해 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_{WTP}(A) &= [1 + \exp(\alpha - \beta A)]^{-1} & \text{if } A > 0 \\
 F_{WTP}(A) &= [1 + \exp(\alpha)]^{-1} & \text{if } A = 0 \\
 F_{WTP}(A) &= 0 & \text{if } A < 0
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$WTP^{mean} = (1/\beta) \ln [1 + \exp(\alpha)]
 \tag{8}$$

상기 기술한 내용은 DBDC Spike 모형을 활용해 WTP를 도출하는 CVM 분석법을 다루고 있으며, 본 연구에서는 DBDC Spike 뿐 아니라 직접질문법 기법을 함께 사용한다. DBDC Spike 모형은 설문 응답자의 응답에 따라 양분선택을 할 수 있는 기회를 최대 세 번까지 제공하여 설문 응답으로부터 발생할 수 있는 편의를 최대한 줄이고자 하는 노력이 반영되어 있다고 할 수 있다. 응답자는 본인의 WTP 수준을 직접 고민할 필요 없이 제시된 수치에 대한 ‘예’ 혹은 ‘아니오’의 대답을 선택함으로써 지불의사를 표현할 수 있으며 전체적인 WTP는 통계적인 기법을 활용해 추정된다. 한편, 직접질문법의 경우 개방형 주관식 질문으로 설문응답자에게 직접 지불의사액 수준을 묻는 방식이다. 본 연구의 경우 월 전기요금의 몇 %를 지불할 의사가 있는지 질문하는 방식을 사용했다.

본 연구에서 DBDC 질문기법 외에 직접질문법을 함께 사용해야 하는 이유는 업종별 WTP를 추정하기 위해서이다. DBDC CVM 설문 결과로부터 계량경제학적 방법론으로 평균 WTP를 도출하기 위해서는 약 1,000개 정도의 표본수가 권장된다 (Arrow et al., 1993). 그러나, 제조업체를 대상으로 설문함에 있어 예산 제약 등의 문제로 인해 총 제조업체에 대한 샘플은 충분한 개수를 확보할 수 있으나 업종별로는 확보가 어려웠다. 때문에 DBDC 설문을 얻는 과정에서 마지막 질문으로 직접질문법을 활용하게 되었다. 이 방식은 완전한 개방형 질문은 아니며, DBDC 설문 결과로부터 응답자별 WTP 범위를 한정시킨 후 구체적인 수치를 설문하여 일종의 제한적 직접질문법이라 할 수 있다. CV 질문 과정에 대한 예시가 아래 나와 있다.

〈DBDC-직접질문 예시〉

<Q1> A원의 지불용의가 있습니까?	응답: 예
<Q2> 2A원의 지불용의가 있습니까?	응답: 아니오
<Q3> 어느 정도의 지불용의가 있습니까? A~2A 값을 응답해주세요. [응답: 1.5A원]	

자료: 이태의·진태영(2022)

위와 같은 가정을 통해 각 제조업체의 응답자로부터 개별적으로 WTP 응답을 도출하였다. 전체 표본에서는 효용격차모형에 기반하여 평균 WTP 값을 추정한 반면, 업종별 표본에서는 개별적 WTP 값의 평균값을 사용하였다. 지불거부자의 경우 이미 0이라는 지불의사가 나와 있기 때문에 별도로 지불용의 직접질문을 시도하지 않았으며, WTP 과대추정을 피하기 위해 지불거부자도 전부 포함시켜 평균 WTP 값을 도출하였다. 업종별 WTP의 경우 직접질문법의 평균을 사용한 만큼 지불저항자의 응답 영향이 매우 크게 발생할 수 있다는 한계가 있다.

IV. 분석 결과

1. 설문 결과

본 연구에서는 VoLL을 추정하기 위해 제조업 부문을 대상으로 설문을 수행하였다. 이 과정에서 설문을 수행하는 표본집단이 모집단의 특징을 반영할 수 있도록 표본집단의 업종별, 매출액별 분포는 에너지총조사의 분포를 따르도록 가정하였다. 2022년 5월부터 7월까지 수행된 설문으로부터 총 1,023개의 제조업체 응답을 수집하였고, CV 질문 외에 지불의사액에 미치는 영향을 추정하기 위해 다양한 사회통계학적 변수를 별도로 수집하였다. <표 1>에 수집한 변수의 기초통계량이 나와 있다. 본 연구에서는 이외에도 정전에 미치는 영향에 주요 원인으로 업종별 전력 백업장치 보유여부, 업종별 정전 피해 중요도 평가, 전력 공급 중단 대응방안 등에 대한 설문²⁾

을 추가적으로 수행하였다.

〈표 1〉 제조업 부문 설문 응답 통계(1,023 표본)

변수	구분	응답자수	비율(%)
일평균 설비 가동시간	8시간 이하	678	66.3
	9시간 이상~16시간 이하	260	25.4
	17시간 이상	85	8.3
전기요금 비중(2021년)	5% 이하	689	67.4
	6~10%	198	19.4
	11~20%	64	6.3
	20% 초과	72	7.0
1년 내 정전피해 횟수	있음	113	11.0
	없음	910	89.0
전기 주 사용 계절	여름	263	25.7
	겨울	213	20.8
	고루 사용	547	53.5
전력 백업장치 보유여부	보유	46	4.5
	미보유	977	95.5

자료: 이태의·진태영(2022)

첫 번째 주요변수인 일평균 설비 가동시간에 대한 설문 결과를 살펴보면, 전체 대비 약 2/3의 제조업체는 일평균 설비 가동시간이 8시간 이하인 것으로 나타난다. 9시간 이상 16시간 이하인 그룹이 그 다음으로 전체의 1/4를 차지하는 것으로 나타난다. 17시간 이상 설비를 가동하는 업체의 경우 교대근무를 통해 상시 설비가동을 하는 제조업체를 의미하는 것으로 보이며, 전체 대비 약 8%의 비율을 차지한다. 설비 가동시간의 경우 단위시간 정전 시 공급지장 전력량을 산정하기 위한 변수로, 해당 수치가 높을수록 VoLL이 높게 계산된다. 두 번째 주요변수는 영업비 중 전기요금 비중으로, 제조업체를 운영함에 있어 발생하는 비용 중 전기요금이 차지하는 비중이 높을수록 조업에서 전력이 가지는 가치가 높음을 의미한다. 예상과는 다르게 영업

2) 상세한 설문지에 대한 내용은 이태의·진태영(2022)을 참고할 수 있다.

비 중 전기요금 비중이 5% 이하인 제조업체가 대부분으로 약 67%를 차지한다. 6% 이상 10% 이하인 제조업체가 20%를 차지하며, 11% 이상 20% 미만 업체와 20% 이상 업체의 비율은 거의 동일한 것으로 도출되었다.

세 번째 변수는 정전피해 횟수인데, 정전피해 횟수는 대부분의 참고문헌에서 VoLL과 양의 상관관계를 가진다고 보고된 바 있다(Carlsson et al., 2011). 본 연구에서도 이를 반영하기 위해 변수로 투입하였으며, 전체 제조업체 표본 중 약 11%의 업체가 정전피해 경험이 있는 것으로 보고하였다. CVM 분석을 수행함에 있어 정전 경험이 있을수록 응답자가 정전 상황에 잘 몰입할 가능성이 높으며, 안정적 전력 공급에 대한 가치를 높게 평가할 가능성이 높다. 전기 주 사용 계절은 전력 소비자가 계절별로 VoLL에 있어 다른 인식을 가지고 있는지 확인하기 위해 조사된 변수로서, 여름 계절의 비중이 겨울 대비 높은 것으로 나타나며, 과반수 이상의 제조업체가 고루 사용한다고 보고했다. 조사 결과와 산업용 전력수요는 계절성이 크지 않다는 점을 고려할 때 전기 주 사용 계절이 VoLL에 유의미한 영향을 미치기는 어려울 것으로 보인다. 마지막으로 고려된 주요 변수는 전력 백업장치 보유여부로, 전력 백업장치를 보유한 제조업체는 정전에 대한 대응방안을 별도로 보유하기 때문에 정전비용을 과소평가할 가능성이 있다. 반면, 정전 피해에 대한 높은 인식이 백업장치 투자를 결정했을 수도 있다. 따라서, 해당 변수가 VoLL에 미치는 두 가지 방향성이 혼재되어 있을 가능성이 높다.

<표 2>에는 CV 질문에 대한 응답 결과가 나와 있다. 본 연구에서는 지불의사액을 묻기 위한 첫 번째 질문으로 월평균 전기요금의 6% 추가액을 질문하였으며, 응답자가 지불의사를 표할 경우 12%를, 응답자가 첫 번째 질문에서 지불의사를 거부할 경우 3%의 지불의사를 질문하였다. 응답자가 연속으로 ‘아니오’를 답할 경우 마지막으로 응답자의 지불거부 여부 질문을 한 뒤 CV 설문을 종료하였다. 연속으로 ‘예’를 답할 경우 해당 응답자의 지불의사는 월 전기요금의 12% 이상인 구간을 가리키며, ‘예-아니오’ 순서로 대답할 경우 WTP는 6% 이상 12% 미만의 구간에 존재한다. 반면, ‘아니오-예’ 순서는 3% 이상 6% 미만의 지불의사를 가리킨다.

총 1,023개 제조업체 응답 중, 지불저항자는 무려 738개 기업으로, 표본 중 72.1%

를 차지한다. 대부분의 제조업체가 정전을 방지하기 위한 추가 전기요금 지출의사가 없음을 밝히고 있다. 지불의사가 0에 가깝지만 지불의사가 있다고 밝힌 제조업체는 약 8%가 있다. 첫 번째 제시 지불의사액보다는 낮지만 절반의 지불의사액보다 높은 지불의사를 표시한 제조업체는 134개 기업으로, 13.1%를 차지한다. 반면, 첫 번째 CV 질문에 지불의사를 표시한 기업은 총 70개(6.9%)로 전체 표본 중 극히 일부를 나타내며, 그 중에서도 지불의사가 매우 높은 수준인 제조업체는 총 1,023개 중 11개로 1.1%에 불과하다. 이는 기본적으로 제조업체들이 정전 방지를 위한 추가 전기요금 지불에 거부감을 가지고 있을 가능성을 보여준다.

〈표 2〉 제조업 부문 설문 응답 통계(1,023 표본)

응답 조합	WTP 수준	응답자 수	비율(%)
“예-예”	$WTP > A_i^Y$	11	1.1
“예-아니오”	$A_i < WTP \leq A_i^Y$	59	5.8
“아니오-예”	$A_i^N < WTP \leq A_i$	134	13.1
“아니오-아니오-예”	$0 < WTP \leq A_i^N$	81	7.9
“아니오-아니오-아니오”	$WTP = 0$	738	72.1
합계		1,023	100.0

자료: 이태의·진태영(2022)

2. CVM 분석 결과

<표 2>에서 도출된 CV 설문 결과를 바탕으로 DBDC 스파이크 모형을 추정하였다. <표 3>에 WTP 답변의 영향요인을 고려하지 않고 CV 설문 결과만을 활용해 추정된 결과가 나와 있다. 상수항과 제시 WTP에 대해 1% 유의수준 하에서 통계량이 유의미한 것으로 나타났으며, 모형 정규성 검정도 귀무가설을 기각하는 것으로 나타나 모형이 설명력을 가지기 충분한 것으로 보인다. 추정 스파이크 비중은 71.45%로 도출되었는데, CV 설문 결과 지불저항자 비중이 약 72%인 점을 감안하면 스파이크 비중도 합리적으로 도출된 것으로 보인다. 상수항의 경우 음의 값으로 도출되었

는데, 이는 응답자가 CV 설문에 대해 잠재적으로 지불거부 의향을 가지고 있음을 나타내어 실제 CV 설문 결과 분포를 반영한 것으로 보인다. 제시 WTP의 계수가 양의 값을 갖는 것은 초기에 제시되는 WTP가 높을수록 ‘예’라고 답할 확률이 높음을 가리킨다.

<표 3>의 아래 부분은 공변량을 제외한 DBDC Spike 모형 추정 결과와 식 (8)을 활용해 평균 WTP를 도출한 결과이다. 제조업 전체에서 정전을 방지하기 위해 평균적으로 월 전기요금에 추가 지출 지불용의는 약 1.35%인 것으로 나타난다. 상한과 하한의 경우 Krinsky and Robb(1986)의 몬테 카를로 모의실험 방법론을 활용해 신뢰구간 95%의 상한과 하한값을 의미한다. 즉 제조업 평균 WTP는 1.15%와 1.58% 범위 사이에 존재한다. 이는 72.1%의 지불저항자를 로지스틱 분포로 가정하고 도출한 평균 WTP로, 지불저항자를 제외하고 WTP를 산정할 경우 지불의사액은 4.85%까지 증가한다. 그러나, 본 연구의 표본설계가 모집단의 성향을 반영하고 있다는 점을 고려할 때 우리나라 제조업 수용가의 정전방지 WTP는 1.35%라 보는 것이 합당하다.

<표 3> 공변량 제외 DBDC Spike 모형 추정 결과

변수	계수 (P-value)	모형 정규성 검정 (Chi-square, P-value)	추정 스파이크 비중
상수항	-0.9171 (0.0000)***	481.7 (0.0000)***	71.45%
제시 WTP	25.0941 (0.0000)***		
부문	평균 WTP	상한	하한
제조업 전체	1.35%	1.15%	1.58%

주: ***는 유의수준을 나타냄. ***: 추정된 계수가 1% 유의수준 하에서 유의할 경우
 자료: 이태의·진태영(2022)

기준 수치가 되는 WTP를 공변량을 제외한 모형으로 추정한 후, 추정된 WTP 모형이 강건성을 확보했는지 살펴봄과 동시에 WTP의 영향요인을 식별하기 위해 공변량을 포함시켜 추정한 결과가 <표 4>에 나와 있다. 공변량으로는 업종, 매출액, 영

업비 중 전기요금 비율, 정전 경험, 전력 주 사용 계절, 전력 백업장치 보유여부, 생산 설비 가동시간이 포함되었다. 추정모형의 변화가 있음에도 불구하고 주요 변수인 상수항과 WTP의 경우 차이가 없어 추정 결과의 강건성을 보이고 있다.

각 제조업체의 업종과 매출액을 설명변수로서 포함시켰으나 WTP에 통계적으로 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 나타난다. 업종과 매출액이 유의미하게 통계적으로 CV 질문 채택률에 영향을 주지 못했다는 뜻이다. 제시된 공변량 중 영업비 중 전기요금 비율, 생산설비 가동시간만 5% 유의수준 하에서 통계적으로 유의한 것으로 도출되었으며, WTP 채택률과 양의 상관관계가 있는 것으로 도출되었다. 이는 전기요금 비중이 커 전력공급 중요도가 높을수록, 그리고 생산설비를 가동하는 시간이 높은 제조업체일수록 전력공급지장을 방지하고자 하는 의지가 강함을 나타낸다.

〈표 4〉 공변량 포함 DBDC Spike 모형 추정 결과

변수	계수 (P-value)
상수항	-1.6503 (0.0000)***
제시 WTP	25.4959 (0.0000)***
부문(업종)	-0.0154 (0.5618)
매출액(2021년)	0.0104 (0.4495)
영업비 중 전기요금 비율	0.0145 (0.0020)**
정전 경험	0.1578 (0.1491)
전력 주 사용 계절	0.0280 (0.7334)
전력 백업장치 보유여부	-0.1708 (0.5577)
생산설비 가동시간	0.0394 (0.0024)**

주: ***는 유의수준을 나타냄. ***: 추정된 계수가 1% 유의수준 하에서 유의할 경우, **: 추정된 계수가 5% 유의수준 하에서 유의할 경우.

자료: 이태의·진태영(2022)

반면, 선행연구에서 주요 VoLL의 영향요인으로 분류한 정전 경험과 전력 백업장치 보유여부는 WTP 채택률에 통계적으로 유의한 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 정전 경험의 경우 종속변수와 양의 상관관계를 가질 것으로 예상되었으나 정전 경험을 가진 제조업체들의 WTP가 유의미하게 높게 나타나지 않는다는 뜻이다.

전력 백업장치 보유여부는 앞서 기술한 대로 종속변수에 미치는 영향에 있어 두 가지 방향성이 혼재하여 나타났기 때문에 통계적으로 유의미한 결과가 도출되지 않은 것으로 보인다. 전력 주 사용 계절 변수의 경우 조사된 통계와 마찬가지로 주 사용 계절에 따른 WTP가 유의미한 차이를 보이지 않았다. WTP의 영향요인을 심층적으로 살피기 위해 향후 VoLL 관련 설문에서는 전기요금체계 인지 정도 등의 독립적 변수를 수집할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. VoLL 추정 결과 및 활용도

<표 5>에 제조업 부문 기업들의 WTP에 기반하여 VoLL을 추정한 결과가 나와 있다. 이 표에는 업종별 지불의사액이 함께 나와 있다. 제조업 전체에 대한 WTP는 1.35%로 DBDC 추정 결과를 활용하였으며, 업종별 결과는 직접질문법 결과에서 나온 WTP 값의 단순평균 수치를 활용한다. 이는 지불저항자의 영향도 함께 고려하기 위해 지불저항자를 모수에 포함시켜 추정한 결과이다. 즉, 3장 2절에서 기술한 바와 같이, 본 연구에서는 모든 제조업체의 CV 질문에 DBDC 질문 구조와 직접질문법을 결합해서 사용하였다. 결과적으로 전체 표본에는 DBDC 질문에 대한 ‘예’ 혹은 ‘아니오’ 응답을 통해 WTP를 추정하나, 업종별 표본에 있어서는 직접질문법 결과로부터 도출한 WTP에 대해 평균치를 활용한다. 본 연구에서 활용한 제조업 업종은 총 10개 업종으로, 1,023개 전체표본에서 업종별 표본수는 100개 내외이거나 50개 미만인 업종도 존재하여 DBDC CVM 설문 결과로부터 평균 WTP를 도출하기는 어렵기 때문이다.

업종별 WTP를 살펴보면, 철강 및 비철금속의 지불의사액이 월평균 전기요금의 2.26%로 가장 높은 것으로 나타나며, 식품 및 담배업종, 비금속광물 업종이 각각 1.74%, 1.54%로 그 뒤를 잇는다. 최소 WTP는 0.52%로 화학 및 석유화학 업종에서 나타나며 그 외에 섬유 및 가죽, 기계류 업종의 지불의사액이 상당히 낮은 것으로 나타난다. 업종별 WTP에는 일정한 추세가 나타나는 것으로 보이지는 않는다. 대표적인 전력 다소비업종인 수송장비, 화학 및 석유화학, 철강 및 비철금속 중 화학 및 석

유화학은 매우 낮은 수준의 WTP를 보이기 때문이다. 화학 및 석유화학 업종은 전력 백업설비를 다수 보유할 정도로 전력에 대한 의존도가 높지만, 낮은 수준의 WTP를 보인다. 오히려 전력소비가 적어 생산활동에서 전력의 의존도가 높지 않을 것으로 예상되는 식품 및 담배업종에서 WTP가 높게 나타났다는 점은 전력의 의존도보다 생산활동에서 전력의 역할이 중요하게 작용할 것으로 보인다. 예를 들어, 일반적인 제조업종에서는 전력공급이 중단되어도 조업시간이 미뤄질 뿐 완제품에 손상이 가는 경우는 그리 크지 않다. 그러나 식품관련 업종의 경우 전력공급이 중단될 경우 완제품에 손상이 발생할 수 있기 때문이다. 이는 전력공급 중단에 대응할 방안에 따라 변화하는 WTP를 살펴봐야 할 것으로 생각된다.

〈표 5〉 제조업 업종별 지불의사액

업종	기업수	지불의사액(%)	월평균 전기요금단가 (원/kWh)	월 조업시간 (시간/월)	VoLL (원/kWh)
식품 및 담배	108	1.74	111.7	226.4	440.1
섬유 및 가죽	94	0.68	103.7	300.0	211.5
목재 및 나무제품	45	0.80	114.1	205.3	187.4
제지 및 인쇄	58	1.50	107.9	276.7	447.9
화학 및 석유화학	107	0.52	100.4	309.0	161.3
비금속광물	48	1.54	115.7	233.8	416.4
철강 및 비철금속	164	2.26	99.6	291.6	656.5
기계류	268	0.72	113.5	254.6	208.0
수송장비	61	1.33	113.8	344.3	521.1
기타제조	70	1.60	117.7	252.9	476.3
전체	1,023	1.35	105.5	270.7	384.5

자료: 이태의·진태영(2022)

VoLL은 해당 업종의 WTP, 전기요금단가, 월평균 조업시간에 따라 달라진다. 도출된 WTP와 식 (3)을 이용한 계산 결과로 추정된 업종별 VoLL 추정 결과는 <표 5>에 제시되어 있다. CVM을 활용해 도출한 제조업 전체의 VoLL은 약 384.5원/kWh

인 것으로 나타났다. 업종별로 살펴보면 가장 낮은 지불의사액을 보인 화학 및 석유 화학업종부터 2.26%의 가장 높은 지불의사를 나타낸 철강 및 비철금속 업종까지 VoLL은 161.3 ~ 656.5원/kWh의 범위를 가진다.

VoLL을 활용하면 지불의사액을 바탕으로 정전 시 예상 피해액을 도출할 수 있다. 2021년 기준 연간 제조업 전체 전력소비량은 약 262.3TWh로(한국전력공사, 2022), 시간당 부하는 달라지겠지만 1시간 전력공급 중단 시 평균 약 29,950MWh의 전력 소비량이 손실된다. VoLL을 활용해 예상 피해액을 도출하면 1시간 정전 시 제조업에는 약 115억 원의 피해액이 발생한다고 할 수 있다. 각 업종별로 VoLL이 다르게 도출되었으므로 공급지장으로 인한 피해액은 업종별로 달라질 수 있다. 또한, 본 연구에서는 CVM을 활용해 WTP를 기준으로 VoLL을 도출하였으나 예상 피해액의 경우 WTA를 활용한 분석이 더 적합할 수 있다.

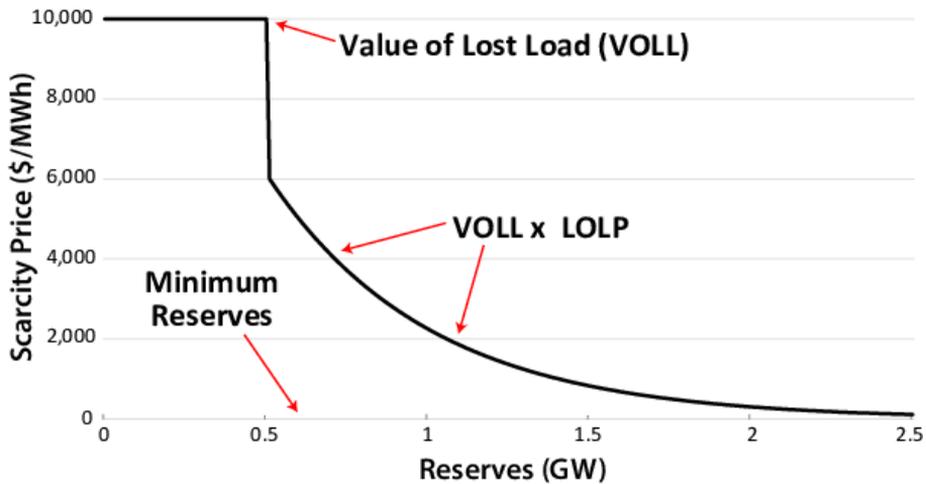
1) VoLL의 활용도: 유연성 자원 보상체계 구축

VoLL의 또 한 가지 활용도는 앞서 기술한 대로 유연성 자원의 보상체계 구축에 활용될 수 있다. 이를 가장 잘 활용하고 있는 곳이 텍사스의 ERCOT이며, ORDC는 아래 [그림 1]의 예시와 같이 구축된다. ORDC는 예비력 수준(x축)에 따라 달라지는 유연성 자원의 수요곡선으로, 곡선을 이루는 수식은 간단하게 VoLL과 정전확률(Loss of Load Probability, LOLP)을 곱한 형태로 정리된다. LOLP가 예비력 수준에 따라 달라지기 때문에, 예비력에 따른 정전 확률을 선형 혹은 곡선으로 모델링한 후, 구간별 LOLP에 VoLL이 곱해지면 ORDC가 완성된다. 즉, 가장 기반이 되는 것은 예비력 수준에 따른 정전 확률을 분포로 도출하는 것이며, 여기에 VoLL은 곡선의 기울기 영향요인으로 역할하는 것이다. [그림 1]의 그래프 좌측 부분과 같이 VoLL은 예비력이 충분하지 않아 공급지장이 발생할 위험이 있는 경우 상한으로 작용한다. 예비력 수준이 충분할 때 ORDC는 우하향 곡선으로 LOLP 분포에 따라 유연성 자원의 보상 수준이 낮아진다.

우리나라에 대해 시범적으로 제조업 부문에 한정하여 VoLL을 도출한 결과 384.5 원/kWh이 나타났다. 향후 타 부문의 결과를 결합하면 수치는 달라질 수도 있겠지만

일단 현재 VoLL을 384.5원/kWh로 가정해볼 수 있다. 이러한 경우 유연성 자원의 운영비용을 보상받는 상한이 VoLL로 작용하므로 유연성 자원의 운영비용이 VoLL 보다 높을 경우 유연성 자원 사업자는 계통에 예비력을 제공할 경제적 유인이 발생하지 않을 것이다. 최소한 384.5원/kWh 이하의 운영비용을 보유한 유연성 자원만이 AS 시장에 참여할 수 있을 것이다.

[그림 1] VoLL을 활용한 ORDC



자료: Moyo and Meyn(2018)

향후 AS시장에 참여할 수 있는 유연성 자원을 식별하기 위해 에너지저장장치(ESS), 양수발전 등 유연성 자원의 균등화저장비용(Levelized Cost of Storage, LCOS)을 비교해볼 수 있다. 국내에서 계통상황을 구체적으로 고려한 LCOS가 공식적으로 발표된 바는 없지만 다양한 문헌에서 LCOS를 소개하고 있다. <표 6>에 출처와 함께 다양한 유연성 자원의 LCOS가 정리되어 있다. 균등화 저장비용을 살펴보면 양수발전의 경우 155~229원/kWh의 범위를 가질 것으로 보이며, 리튬이온 배터리는 그보다 높은 309~825원/kWh의 범위에서, 나트륨황 배터리는 327원/kWh, 액체공기는 263-320원/kWh인 것으로 나타난다. 압축공기의 경우 가장 낮은 수준의

LCOS를 가져 137~179원/kWh 부근이며, 카르노 배터리와 고온 전력저장의 경우 다음으로 낮은 수준의 LCOS를 보유한 것으로 보인다.

〈표 6〉 유연성 자원의 LCOS 비교분석

유연성 자원	저장용량 (MW)	시스템수명 (년)	효율(%)	균등화비용 (원/kWh)	참고문헌
양수	500-8,000	40-60	70-85	172-229	인세환 외(2019)
	500	30-100	70-85	155	김진후(2022)
리튬이온	10 이하	5-15	75-90	309-641	인세환 외(2019)
	-	-	-	825	김진후(2022)
나트륨황	-	-	-	327	김진후(2022)
압축공기	1,000 이하	20-40	40-70	137-160	인세환 외(2019)
	1,200 이하	20-30	50-70	179	김진후(2022)
액체공기	25-1,200	30년 이상	60% 이상	263-320	인세환 외(2019)
고온 전력저장	100-200	20	40-80	192-460	노철우 외(2019)
카르노 배터리	50-1,000	-	60	135-270	조준현 외(2020)

주: 환율은 2021년 기준 1,144.61 원/USD 사용

자료: 참고문헌 바탕으로 저자 작성

이와 같은 범위에서 유연성 자원의 균등화비용이 설정된다고 보았을 때, 본 연구에서 도출한 384.5원/kWh의 보상수준 상한에서 가동이 가능할 것으로 보이는 유연성 자원은 압축공기, 고온 전력저장, 카르노 배터리, 양수발전일 것으로 보인다. 사실, 리튬이온 배터리를 제외하고 대부분이 VoLL 수준에서는 보상이 가능할 것으로 분석된다. 문제는 VoLL이 현실적인 유연성 자원의 보상수준이 아니라는 데 있다. VoLL은 상기 기술한 대로 유연성 자원 보상의 ‘상한’으로서 작용한다. [그림 1]과 같이 x축(유연성 자원 예비력)이 일정 수준 이하로 떨어지면 수요곡선은 수평이 되며 그 수평곡선의 값이 VoLL을 가리킨다. ORDC는 VoLL에 LOLP를 곱한 형태이다.

즉, 유연성 자원 예비력이 부족할 경우 정전이 무조건 일어난다는 뜻이며 (LOLP=1), 정상적인 보조서비스 시장 하에서 유연성 자원은 VoLL보다 훨씬 낮은

수준에서 보상받는다. [그림 1]을 참조하면 최소 예비력 이상에서 유연성 자원 보상 가격인 희소가격(scarcity price)이 수직하락하고, 60% 수준(VoLL \$10/kWh 대비 \$6/kWh)부터 수요곡선이 시작된다. 본 연구에서 도출한 VoLL을 기준으로 생각하면 정상 상태의 전력시장 보상액은 230.7원/kWh 이하가 된다. 예비력이 충분한 AS 경쟁시장을 가정하면 적정 보상액은 판단되는 이보다 낮은 수준이며 VoLL의 40% 수준을 가정하면 153원/kWh이 된다. 이 수준에서는 대부분의 유연성 자원이 경제성을 확보하지 못한다. 게다가 <표 6>의 유연성 자원들도 이용률이 충분한 상황을 가정하고 균등화비용을 도출한 것으로, LCOS에 가장 크게 영향을 미치는 요인인 이용률이 부족해질 경우 경제성을 확보하기 위한 균등화비용은 더욱 증가할 가능성이 높다.

이러한 점을 고려했을 때, 현재 유연성 설비들의 균등화비용을 본 연구에서 도출된 VoLL 수준으로부터 보상하기는 어려울 것으로 판단된다. 심지어 상한인 VoLL을 적용해도 주요 유연성 자원인 리튬이온 배터리 등 시장에 참여하지 못하는 설비들이 다수 존재할 것으로 보인다. 요약하면 현재 VoLL 수준을 기준으로 시장이 설계되면, 유연성 자원의 부족 상황에서도 유연성 자원을 시장에 참여시킬만한 유인을 제공하지 못하므로 공급지장을 허용하게 된다. 이는 정전으로 인한 사회적 손실이 유연성 설비를 AS 시장에서 참여시키는 비용 대비 작다는 의미이다. 전력계통의 안정성을 유지하기 위해서는 향후 VoLL에 대한 인식 제고를 통해 유연성 설비의 필요성을 증가시키고, 전기요금 측면에서 유연성 자원을 확대하기 위한 사회적 수용성을 확보할 필요가 있다.

V. 결론 및 시사점

본 연구에서는 향후 전력시장 탄소중립을 위해 필요한 유연성 자원에 대한 보상체계 마련을 위해, 그 기준이 될 수 있는 VoLL을 제조업 부문에 대해 추정하였다. 분석

방법론으로는 DBDC Spike 모형을 활용한 CVM을 활용하였다. 총 1,023개의 제조업체를 대상으로 CV 설문을 수집, 지불의사액을 바탕으로 VoLL을 추정하였다. 제조업 전반의 정전방지를 위한 지불의사는 월 전기요금의 1.35%인 것으로 나타났으며, 업종별로는 0.52부터 2.26%까지 지불의사액이 분포하는 것으로 나타났다. 이 지불의사액을 바탕으로 VoLL을 도출한 결과 제조업 전반의 VoLL은 약 384.5원/kWh인 것으로 나타났으며, 업종별로는 161.3~656.5원/kWh의 범위에 있는 것으로 도출되었다.

VoLL이 국내에서는 생소한 개념이기 때문에, 본 연구에서는 제조업 부문의 VoLL 도출에 덧붙여 VoLL의 활용도를 제시하였다. 첫째로, CVM 기반 VoLL은 수용가에서 정전피해 방지를 위한 WTP를 질문하기 때문에, VoLL을 활용해 정전 발생 시 예상 사회적 손실액을 추정할 수 있다. 우리나라의 경우 2021년 기준 1시간 전력공급 중단 시 평균 약 29,950MWh의 전력공급이 손실되므로 예상 피해액을 도출하면 1시간 당 약 115억원의 사회적 손실액이 발생한다. 다만, 본 연구에서는 WTP를 활용하였으나 정전 시 사회적 손실액을 기준으로 보상하고자 할 경우 WTA가 더욱 적합할 수 있다. 한국개발연구원(2012)의 연구에서 비시장재의 가치추정 시 CVM을 활용할 경우 WTA는 과대추정의 여지가 있어 WTP가 더 적합하다는 점을 고려할 때, 현재 과소 추정된 것으로 보이는 WTP와 WTA를 기준으로 예상 피해액의 범위를 추정할 수 있을 것이다. 따라서 향후 WTA 기준의 VoLL도 함께 도출할 필요가 있다.

둘째로, VoLL은 전력시장에서 예비력을 확보하기 위해 유연성 자원의 보상체계를 구축하는 데 활용될 수 있다. VoLL과 LOLP를 활용하여 ORDC를 구성하면, 전력시장에서 전력공급지장을 방지하기 위해 도입되는 유연성 자원에게 제공할 적절한 보상액이 추정된다. VoLL은 이 ORDC에서 보상 상한액으로 작용하므로, 본 연구에서 추정된 VoLL와 문헌조사를 통해 수집한 유연성 자원의 LCOS를 비교하였다. 그 결과 추정된 VoLL로 보상가능한 유연성 자원에는 한계가 있는 것으로 나타났으며, 특히 LOLP에 따라 보상액이 더욱 하락할 경우 가용한 유연성 자원은 더욱 줄어들 것으로 분석되었다.

결론적으로, 본 연구에서 추정된 VoLL을 바탕으로 ORDC를 구성하면 예비력 확보가 어렵다. 전력공급을 안정적으로 수행하기 위한 유연성 자원 확보비용보다 정전시 발생할 수 있는 잠재 피해액이 낮게 분석되었기 때문이다. 향후 CVM을 기반으로 한 VoLL을 향상시키기 위한 다양한 노력이 요구될 것으로 보인다. 물론 CVM이 아닌 생산측면 추정법을 활용해 전려공급지장 시 부가가치 피해액을 기준으로 VoLL을 산정할 수도 있으나, CVM이 사회적 수용성과 연관이 깊기 때문에 CVM 기반 VoLL이 적정 수치를 확보하는 것이 정책적 측면에서 중요할 것이다.

본 연구에서 도출한 VoLL은 제조업 부문에 한정시켜 도출한 자료로 수용가를 확대해 볼 경우 VoLL 수치는 달라질 것으로 보인다. 전력은 제조업 외 산업부문, 건물 부문(가정 및 상업공공), 심지어 수송에서도 활용되기 때문이다. 전력을 생산하는 부문별로 VoLL을 추정하고 각 부문별 전력소비량을 기준으로 가중평균하는 것이 수용가 전체의 벤치마크 VoLL을 작성할 수 있을 것으로 보인다.

또한 연구의 한계점으로 지적될 수 있는 부분은, 본 연구에서 VoLL을 추정하기 위해 사용한 WTP의 결정요인을 찾아내는 데 미흡했다는 점이다. 실제로 설문 결과를 다방면으로 활용하여 WTP의 결정요인을 찾아내고자 했으나 대부분의 변수가 유의미하지 않은 것으로 나타났다. 이로 말미암아 생각해 볼 수 있는 가설은 설문 외적 변수가 WTP에 크게 작용했다는 점이다. 본 연구의 설문 시기가 2022년 5월경으로, 전기요금 인상에 대한 언론 보도가 이루어지고 있던 때였으므로, 이에 대한 응답자의 보수적인 태도가 편의를 발생시켰을 수 있다. 향후 전기요금 관련 설문에서는 이러한 편의를 제거하기 위한 다양한 노력이 요구된다.

접수일(2023년 2월 20일), 수정일(2023년 3월 22일), 게재확정일(2023년 3월 23일)

◎ 참고 문헌 ◎

- 관계부처합동(2020). 대한민국 2050 탄소중립 전략.
- 관계부처합동(2021). 2050 탄소중립 시나리오안.
- 김남일·이성규(2021). 유럽 국가의 변동적 재생에너지 비중 증가와 국가 간 전력거래와의 연관성 분석: 동북아 지역에 대한 시사점. 자체연구보고서 21-02. 울산: 에너지경제연구원.
- 김진후(2022). “양수발전, 저장용량 중 ‘으뜸’... ‘압축공기식’도 경제성 뛰어나.” 대한경제. 12월 6일. <https://www.dnews.co.kr/uhtml/view.jsp?idxno=202212032346026590787> (검색일: 2023.02.19.).
- 노철우·조준현·신형기·백영진·이길봉·조종재·이범준·최봉수(2019). “재생에너지 변동성 완화를 위한 고온 전력저장 시스템의 성능 특성 및 경제성 비교에 관한 연구.” 대한설비공학회지 31(5) : 206-215.
- 유승훈·김효진·박소연·이혜정·진세준(2017). 경제학적 기법을 활용한 산업용 전력의 경제적 가치 연구. 서울과학기술대학교, 한국전력거래소 장기수요전망팀.
- 이유수(2020). “재생에너지 확대에 따른 전력시장제도의 문제점 및 개선방향.” 전기저널 525 : 34-39.
- 이윤경(2016). “국내·외 수요자원시장 동향과 시사점.” 에너지경제연구원 에너지포커스 2016년 여름호 : 34-60.
- 이주석·최은철(2013). “조건부 가치측정법에서 영(0)의 응답처리를 위한 모수적 추정법과 비모수적 추정법의 비교연구.” 자원·환경경제연구 22(2) : 281-307.
- 이태의·진태영(2022). 전력시장 탄소중립에 요구되는 유연성 자원의 확보를 위한 공급시장비용(VoLL) 연구(1/3). 기본연구보고서 22-17. 울산: 에너지경제연구원.
- 인세환·박지호·염한길·고준석·박성제·염충섭·허광범(2019). “대용량 에너지저장을 위한 액체공기 에너지저장 시스템.” 기계저널 59(4) : 30-35.
- 전우영·조상민·조일현(2019). “태양광 및 풍력 확률모형을 이용한 2030 재생에너지 순

- 수요 불확실성 추정 연구.” 신재생에너지 15(4) : 28-38.
- 조준현·신형기·노철우·백영진·이길봉·최봉수·조종재·이범준·허균철·나호상(2020). “열펌프를 활용한 카르노 배터리 기술 동향 분석.” 대한설비공학회 2020 하계학술발표대회 논문집 : 106-109.
- 한국개발연구원(2012). 예비타당성조사를 위한 CVM 분석지침 개선 연구. KDI 공공투자관리센터, 한국환경경제학회.
- 한국에너지공단(2023). 에너지용어사전. http://www.energy.or.kr/web/kem_home_new/info/dictionary/voca/kem_view.asp?sch_search=%E3%84%B1&sch_key=&sch_value=&h_page=23&q=1448 (검색일: 2023.02.15.).
- 한국전력공사(2022). 2021년 한국전력통계(제 91호). https://home.kepco.co.kr/kepco/KO/ntcob/ntcobView.do?pageIndex=1&boardSeq=21057408&boardCd=BRD_000099&menuCd=FN05030103&parnScrpSeq=0&categoryCdGroup=®DateGroup2 = (검색일: 2023.02.18.).
- Abrate, G., Bruno, C., Erbetta, F., Fraquelli, G. and Lorite-Espejo, A.(2016). “A choice experiment on the willingness of households to accept power outages.” *Utilities Policy* 43 : 151-164.
- Arrow, K., Solow, R., Portney, P. R., Leamer, E. E., Radner, R. and Schuman, H.(1993). “Report of the NOAA panel on contingent valuation.” *Federal register* 58(10) : 4601-4614.
- Bertazzi, A., Fumagalli, E. and Schiavo, L.L.(2005). “The use of customer outage cost surveys in policy decision-making: The Italian experience in regulating quality of electricity supply.” CIRED 2005.
- Bishop, R.C. and Heberlein, T.A.(1979). “Measuring Values of Extramarket Goods: Are Indirect Measures Biased?.” *American Journal of Agricultural Economics Proceedings Issue* (Dec., 1979) 61(5) : 926-930.
- Carlsson, F., Martinsson, P. and Akay, A.(2011). “The effect of power outages and cheap talk on willingness to pay to reduce outages.” *Energy Economics* 33 : 790-798.
- Caves, D.W., Herriges, J.A. and Windle, R.J. 1992. “The cost of electric power

- interruptions in the industrial sector: estimates derived from interruptible service programs.” *Land Economics* 68(1) : 49-61.
- IEA(2018). “World Energy Outlook 2018.” International Energy Agency, Paris.
- IEA(2021). “Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector.” International Energy Agency, Paris.
- Kim, C., Jo, M. and Koo, Y.(2014). “Ex-ante Evaluation of Economic Costs from Power Grid Blackout in South Korea.” *Journal of Electrical Engineering Technology* 9(3) : 796-802.
- Kim, J., Lim, K. and Yoo, S.(2019). “Evaluating Residential Consumers’ Willingness to Pay to Avoid Power Outages in South Korea.” *Sustainability* 11 : 1258.
- Kim, K. and Cho, Y.(2017). “Estimation of power outage costs in the industrial sector of South Korea.” *Energy Policy* 101 : 236-245.
- Krinsky, I. and Robb, A.L.(1986). “On approximating the statistical properties of elasticities.” *The Review of Economics and Statistics* 68(4) : 715-719.
- Kriström, B.(1997). “Spike models in contingent valuation.” *American Journal of Agricultural Economics* 79(3) : 1013-1023.
- London Economics(2013). “The Value of Lost Load (VoLL) for Electricity in Great Britain.” Final report for Ofgem and DECC.
- McFadden, D.(1974). “Conditional logit analysis of qualitative choice behavior.” In: Zarembka, P. (Ed.), *Frontiers in Econometrics*. Academic Press, New York.
- Moye, R. and Meyn, S.(2018). “The Use of Marginal Energy Costs in the Design of U.S. Capacity Markets. *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences* : 2575-2584.
- Ovaere, M., Heylen, E., Proost, S., Deconinck, G. and Hertem, D.V.(2019). “How detailed value of lost load data impact power system reliability decisions.” *Energy Policy* 132 : 1064-1075.
- Pepermans, G.(2011). “The value of continuous power supply for Flemish households.” *Energy Policy* 39 : 7853-7864.

- Praktijnjo, A.J.(2014). “Stated preferences based estimation of power interruption costs in private households: An example from Germany.” *Energy* 76 : 82-90.
- PwC(2018). “Estimating the Value of Lost Load in New Zealand.” Transpower New Zealand Limited.
- Schröder, T. and Kuckshinrichs, W.(2015). “Value of Lost Load: An Efficient Economic Indicator for Power Supply Security? A Literature Review.” *Frontiers in Energy Research* 3 : 55.
- Shivakumar, A., Welsch, M., Taliotis, C., Jakšić, D., Baričević, T., Howells, M., Gupta, S. and Rogner, H.(2017). “Valuing blackouts and lost leisure: Estimating electricity interruption costs for households across the European Union.” *Energy Research & Social Science* 34 : 39-48.
- Wolf, A. and Wenzel, L.(2016). “Regional diversity in the costs of electricity outages: Results for German counties.” *Utilities Policy* 43 : 195-205.

ABSTRACT

Value of lost load (VoLL) estimation for the manufacturing sector in Korea and implication on securing flexible reserves*

Taeyoung Jin** and Tae Eui Lee***

The Value of Lost Load (VoLL) is an estimate of the social loss expected when power supply is disrupted. It is a hypothetical price that would compensate necessary facilities in the electricity market to prevent supply disruption. As the expansion of flexible resources is required in the future carbon-neutral electricity market, VoLL is expected to play an important role as a standard for preparing a compensation system. However, limited research has been conducted on the appropriate VoLL level in Korea. To address this research gap, this study estimated VoLL for the domestic manufacturing sector using the Contingent Valuation Method (CVM), which is a type of stated preference method. The empirical analysis found that VoLL for the manufacturing industry was approximately 384.5 KRW/kWh, which is less than the levelized storage cost (LCOS) of representative flexible resources. It implies the necessity of increasing CVM based VoLL by improving the recognition on stable electricity supply. The increase in system cost for securing flexible reserves would be inevitable. The public acceptance related to such cost increase are related to the CVM based VoLL.

Key Words : Value of Lost Load, Flexible Reserve, Net zero, Levelized Cost of Storage

* Acknowledgements: This study extends the basic research of Korea Energy Economics Institute in 2022, "A study on value of lost load (VoLL) to secure flexible resource required to carbon neutrality of electricity market".

** Associate Research Fellow, District Heating and Power Research Team, Korea Energy Economics Institute (First author), tyjin@keei.re.kr

*** Research Fellow, District Heating and Power Research Team, Korea Energy Economics Institute (Corresponding author), lte@keei.re.kr