

**환경제약을 고려한 동북아 전력계통 연계의 경제성 평가**

정 구 형    강 동 주\*    김 발 호  
 홍익대학교    \*한국전기연구원

**Evaluation of Economic Impacts of the Interstate Electric Power System in Northeast Asia Considering CO2 Emission**

Chung, Koohyung    Kang, Dongjoo\*    Kim, Balho  
 Hongik Univ.    \*KERI

**Abstract** - ORIRES developed by ESI, Russia is a linear programming (LP) model to optimize electric power system operation and planning. Since ORIRES requires data relatively less than other models, it is suitable for northeast asia where imposes restriction against data acquisition.

In this paper, we analyze the economic impacts of the environmental regulation on the interstate electric power system in northeast asia. For the rational evaluation of environmental effectiveness, CO2 emission constraints are incorporated into ORIRES.

**1. 서    론**

국가 간 계통연계는 지역 간 경제블록화에 따른 에너지 협력방안의 하나로서 전력산업 구조개편 이전부터 전 세계 지역별로 활발히 적용되고 있으며, 1990년대 이후 급속한 증가추세를 나타내고 있다. 이미 전력계통이 연계되어 운영되고 있는 북미와 유럽지역 외에도 남미, 동남아, 아프리카 등 여러 지역에서 경제적인 전력공급, 계통신뢰도 향상, 환경/임피던스 해결 및 국제적인 긴장완화 등의 이유로 계통연계를 활발하게 추진하고 있다.

동북아 지역 국가 간 전력계통 연계의 필요성에 대해서도 1980년대 후반 이후 꾸준히 논의되어 오고 있다. 이는 동북아 지역이 자원보유, 부하곡선, 전원구성 등의 측면에서 상호 보완성이 높으며 세계 여타 지역보다 계통연계로 인한 경제적 유용성이 클 것이라는 예상에 기인하고 있다.

한편, 동북아 지역 국가 간 전력계통 연계는 향후 지속적으로 강화될 기후변화협약에 효과적으로 대처할 수 있는 대안이 될 수 있다. 아직 논란이 되고는 있지만 온실가스 배출량은 에너지 생산량을 기준으로 산정되기 때문에, 다른 지역에서 생산된 전력을 공급받게 되면 이에 해당하는 온실가스는 그 지역에서 배출한 것으로 결정된다. 따라서, 이와 같이 계통연계를 통해 전력을 소비하면서도 온실가스를 배출하지 않는 이익을 얻을 수 있다면, 보다 효과적으로 기후변화협약에 대응할 수 있다. 또한, 러시아와 중국과 같은 풍부한 수력 및 비화석 에너지를 소유하고 있는 지역은 이러한 자원을 이용하여 발전함으로써 온실가스 배출제약에 대한 불편없이 전력공급이 가능하며 잉여 전력을 다른 지역에 판매함으로써 충분한 경제적 이익을 얻을 수 있다. 뿐만 아니라, 교도 메커니즘에 의해 자본과 기술력을 가진 선진국은 개도국에 투자하여 발생한 온실가스 저감량을 자국의 온실가스 저감실적으로 인정받을 수 있기 때문에, 이 지역의 수력 및 비화석 에너지의 전력자원화 프로젝트는 다른 국가의 기후변화협약 대응을 위한 투자대상이 될 가능성이 높을 것으로 예상된다.

따라서, 기후변화협약의 대응으로써 동북아 전력계통 연계를 고려하기 위해서는 우선적으로 환경제약이 동북아 지역의 전원구성에 어느 정도의 영향을 미치는지를 파악해야 한다. 이를 위해, 본 논문에서는 온실가스 배출

제약을 ORIRES 모형에 추가하여 그 결과를 비교/분석하였다.

**2. 동북아 전력계통 연계로 인한 환경적 측면에서의 편의 발생요인**

현재 전 세계적으로 지역 간 전력계통 연계가 활발히 논의되고 있다. 이미 전력계통을 연계하여 운영하고 있는 북미와 유럽지역 외에도 동남아, 남미, 아프리카 등 여러 지역에서 전력계통 연계를 추진하고 있다. 이러한 전력계통 연계의 가장 큰 이유는 경제적인 전력공급을 위한 것이지만, 이 외에도 다양한 이유로 계통연계를 추진하고 있다. 특히, 계통연계에 의한 환경적 측면의 편의는 다음과 같다.

첫째, 환경친화적인 에너지 자원의 활용이 가능하다. 이는 각 국가별로 에너지 자원의 부존현황이 다르기 때문에 발생하는 편의이다. 동북아 지역의 경우, 한국과 일본은 자국 내 부존하는 에너지 자원이 희소하여 대부분의 에너지를 해외에 의존하고 있다. 한편, 중국과 러시아의 경우, 에너지 자원이 비교적 풍부하나 부존 현상은 약간 다르다. 중국은 석탄자원이 풍부하며 동시베리아 및 극동러시아 지역에는 석탄을 비롯하여 수력, 천연가스 등의 에너지 자원이 풍부하게 매장되어 있다. 한국은 경제적인 이유에서 유연탄 발전소가 대규모로 건설되어 운영되고 있다. 따라서, 동북아 지역의 전력계통이 연계되어 러시아 지역의 대규모 수력 전원에 의한 전력공급이 가능하다면, 동북아 지역 전체의 환경친화적인 전력공급이 가능하게 될 것이다.

둘째, 반환경적인 전원의 발전을 억제할 수 있다. 반환경적인 전원이 인구 밀집지역에 입지할 경우, 환경비용의 증가로 인해 발전비용이 높아지게 된다. 이와 같은 경우, 환경친화적인 전원의 상대적 경제성이 향상되어 급전순위가 높아짐과 동시에 이용률 또한 증가하게 된다. 상대적으로, 반환경적인 전원의 급전순위는 낮아지게 되며 이용률 또한 감소하게 된다. 이러한 현상이 신규로 건설되는 전원선택 과정에 반영될 경우, 원거리 송전에 따른 비용으로 인해 선택되지 못했던 환경친화적인 전원이 반환경적 전원을 대체할 수 있게 된다. 이에 따라, 온실가스 배출, 석탄재(Ash) 등 공해물질의 배출이 억제될 수 있다.

셋째, 인구가 희소한 지역의 전원입지 선택이 가능하다. 전력계통의 통합으로 넓어진 역내 지역에서 상대적으로 인구가 희소하여 발전소 건설 및 운영이 용이한 전원입지의 선택이 가능하게 된다.

넷째, 신재생 에너지 전원개발이 촉진될 수 있다. 풍력 및 수력 등 부존자원이 부족한 국가에서는 타국의 부존 자원을 공동으로 개발하여 활용함으로써 신재생 전원의 경제성을 향상시킬 수 있고 동시에 그 활용을 촉진시킬 수 있다.

다섯째, 국제적 환경보전 관련 움직임에 공조할 수 있는 기회를 창출할 수 있다. 주변 국가 간 연계계통을 통해 화력발전설비의 운영을 감소시킴으로써 환경오염을 방지하고, 나아가 국제환경협약에 대처하는 방법의 하나

로 이산화탄소 배출을 국가 간에 거래하는 배출권거래제를 실현시킬 수 있다.

이러한 편익을 얻기 위해서는 무엇보다 환경계약이 동북아 전력계통 연계형태에 미치는 영향을 파악하는 것이 중요하다. 즉, 환경계약을 고려한 동북아 지역의 전원구성 형태가 위에서 언급한 바와 같이 보다 환경친화적인 전원구성을 유도한다면, 향후 기후변화협약에 대비한 보다 실질적인 전원구성의 포트폴리오 수립이 가능할 수 있을 것이다.

### 3. 환경계약을 고려한 동북아 전력계통 연계의 경제성 평가를 위한 모형 설계

본 논문에서는 환경계약을 고려한 동북아 지역의 전력계통 연계에 따른 경제성 분석을 수행하기 위해, 러시아의 ESI에서 개발한 ORIRES 모형을 이용하였다. ORIRES 모형은 현재까지 동북아 지역의 전력계통 연계 계획 수립과 관련된 연구를 수행함에 있어 가장 많이 사용되었기 때문에, 이 방법으로 프로그램을 개발하여 분석을 수행할 경우 검증할 수 있는 기존의 연구결과가 존재한다. 또한, 자료의 제약이 심한 동북아 지역 국가의 여건 하에서 자료에 대한 요구(data requirement)가 다른 모형에 비해 비교적 적기 때문에, 이와 같은 제약 하에서도 정책적 의사결정을 수행할 수 있는 결과 제시가 가능하다는 장점을 갖는다.

#### 3.1 ORIRES 모형의 특징

ORIRES 모형은 다음과 같은 사항을 고려하여 최적화 문제를 구성한다.

- 동북아 지역 내 계통 간 연간 최대부하 발생 계절 및 일일 최대부하 발생 시간대에서의 비동시성(non-coincidence) 즉, 동북아 지역 국가 간 부하패턴의 차이(load diversity)를 고려해야 한다. 이를 위해, 계절별 근무일 및 비근무일 24시간 각각에 대한 부하를 적용한다.
- 부하수요를 충족시키기 위해서는 신규 발전설비를 증설하거나 인접 지역의 잉여용량을 이용하기 위한 연계선로를 건설할 수 있다. 이 때, 각각의 대안에 대한 경제성 평가를 수행하기 위해서는 비용 관점에서 이를 비교할 수 있어야 한다. 이를 위해, 각 발전설비 및 연계선로 증설용량을 모형의 결정변수로 반영한다.
- 발전설비 및 연계선로와 관련된 비용을 비교하기 위해서는 해당 대안의 투자비용뿐만 아니라 운영비용 또한 고려해야 한다. 따라서, 시간대별 발전출력과 계통 간 송전용량 또한 모형에서 결정될 수 있어야 한다.
- 미래의 부하성장을 고려한 장기 전원계획모형으로써, 목표연도의 필요 발전용량과 송전용량 및 관련 비용을 비교할 수 있도록 해야 한다.

이를 바탕으로 계산의 단순화를 기하기 위해, ORIRES 모형은 목표연도까지의 연도별 신규 설비증설의 최적화를 수행하는 대신 특정 목표연도에서의 최적 설비수준을 도출하는 정적 선형계획문제로 정식화된다.

#### 3.2 ORIRES 모형의 목적함수

ORIRES는 특정 목표연도의 최적 발전용량 및 국가 간 송전용량을 산출하는 모형으로, 다음의 식에서 보여 주고 있는 바와 같이 연계지역 전체의 기존 발전설비의 운전비용과 신규 발전설비 투자비용 및 송전선로 투자비용 지출을 최소화하는 해를 도출한다.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T c_{ij} \tau_{it} x_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I K_{ij} (\gamma_j + b_{ij}) X_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{i_0=2}^I K_{j_0} (\gamma_j + b_{j_0}) X_{j_0} \quad (1)$$

단,  $i$ 는 전원유형을 나타내며,  $j$ 는 연계된 전력계통의 노드(node) 수를 나타낸다. 이 때, 계통이 연계되는 국가 또는 지역을 하나의 노드로 간주한다.  $y$ 는 계절을 나타내는 지수이며,  $t$ 는 해당 계절 내 근무일 및 비근무일

의 각 시간대를 나타낸다.  $\tau_{it}$ 는 해당 계절의 총 근무일 수와 비근무일 수를 나타낸다.  $c_{ij}$ 는  $j$ 노드,  $i$ 전원유형 설비의 운전(평균 연료)비용을 나타낸다.  $K_{ij}$ 는  $j$ 노드,  $i$ 전원유형의 설비증설 시 소요되는 단위용량 당 투자비를 나타내며,  $K_{j_0}$ 는  $j$ 노드와  $j_0$ 노드 간 송전선로 단위 용량 당 투자비를 나타낸다.  $\gamma_j$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{j_0}$ 는 각각  $j$ 노드의 투자보수율(rate of return),  $j$ 노드,  $i$ 전원유형 발전설비의 연간 고정비용,  $j$ 노드와  $j_0$ 노드 간 송전선로의 고정비용을 나타낸다.

또한,  $x_{ij}$ ,  $X_{ij}$ ,  $X_{j_0}$ 는 결정변수로, 각각 기존의  $j$ 노드,  $i$ 전원유형 발전설비의  $t_y$  시간대 운전용량,  $j$ 노드,  $i$ 전원유형 발전설비의 신규 증설용량 및  $j$ 노드와  $j_0$ 노드 간 신규 송전선로 증설용량을 나타낸다.

이와 함께, 오염물질 배출에 따른 환경비용 지출 수준을 반영하기 위해, 다음과 같은 환경관련 비용에 대한 항을 목적함수에 추가한다.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{ij} \tau_{it} EF_{ij} \alpha_j \quad (2)$$

단,  $EF_{ij}$ 는  $j$ 노드  $i$ 전원유형 발전설비의 단위 발전당 당 오염물질 배출계수를 나타내며,  $\alpha_j$ 는 각 노드별 환경비용을 나타낸다.

#### 3.3 제약조건

ORIRES 모형은 다양한 제약조건 하에서 목적함수를 최소화하는 최적해를 도출한다. 모형 내에서 정식화되는 제약조건은 계통 내 총 설비용량, 연중 첨두부하 수준, 노드별·계절별·시간대별 수급균형 제약, 각 노드의 발전설비 형태별 신규 발전설비의 증설과 송전용량 증설 규모, 각 노드별 발전설비 형태별·계절별 운전용량, 기술적인 특성을 감안한 시간대별 송전용량 차이, 수력발전의 발전량에 대한 제약, 양수발전 설비특성 제약 등을 포함하고 있다.

ORIRES 모형의 최적해는 이러한 제약조건을 고려한 특정 목표연도의 연계계통 운전 결과를 도출하며, 연계 지역 내 각 계통의 계절별·시간대별 발전출력 및 다른 계통과의 송전/수전 전력, 신규 발전설비 및 송전선로 증설용량, 총 연료비용, 그리고 신규 설비에 대한 투자비용 등에 대한 정보를 제공한다.

#### 3.4 환경계약조건의 추가

ORIRES 모형에는 계통연계에 따른 환경개선 효과를 명시적으로 고려하는 부분이 존재하지 않는다. 따라서, 각각의 계통에 부과되는 환경규제에 대한 내용을 반영하기 위해서는 목적함수에 환경관련 비용을 포함하거나 아니면 이를 추가적인 제약조건으로 정식화해야 한다. 그러나, 환경규제에 대한 내용을 환경관련 비용으로 정식화하여 목적함수에 포함시킬 경우에는 동북아 지역 전체의 오염물질 배출총량을 제어하게 되기 때문에, 각 국가의 개별적인 환경영향 평가가 곤란하게 된다. 따라서, 각 노드별로 다음과 같은 환경계약조건을 정식화하여 모형에 추가하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{ij} \tau_{it} EF_{ij} \leq TE_j \quad (3)$$

단,  $TE_j$ 는  $j$ 노드의 환경오염 배출규제 총량을 의미한다.

## 4. 사례 연구

본 논문에서는 위에서 기술한 ORIRES 모형을 GAMS/CPLEX solver를 이용하여 구현하였으며, 이를 바탕으로 한국, 북한, 극동러시아, 동시베리아 계통을 대상으로 하는 동북아 지역 계통연계의 경제성 평가를 수행하였다. 이 때, 각각의 계통은 하나의 노드로 고려하였다.

본 사례연구에서는 2005년을 기준으로 2010년과 2020년에서 환경계약을 고려하지 않은 계통연계의 계통운영 결과와 환경계약을 고려한 계통연계 시의 계통운영

결과를 비교함으로써 환경제약이 동북아 연계계통에 미치는 영향을 분석하였다. 이 때, 환경제약조건으로는 각 노드별 CO2 배출총량 수준을 이용하였다. 그러나, 실제 CO2 배출관련 자료의 확보가 곤란하기 때문에, 본 사례 연구에서 적용된 배출총량 수준은 환경제약조건을 고려하지 않을 경우에 발생한 CO2 배출총량에 대해 2010년에는 이 값의 2%, 2020년에는 5% 감축하는 것으로 가정하였다. 단, 전원별 CO2 배출계수는 한국의 자료를 일괄 적용하였으며, CO2 배출비용은 Nord Pool에서 거대되고 있는 CO2 배출권 거래가격을 일괄 적용하였다.

또한, 본 논문에서는 한국-북한, 북한-극동러시아, 극동러시아-동시베리아를 연결하는 단일 연계선로를 가정하였으며, 각 연계선로의 최대용량은 2010년에는 5GW, 2GW, 1.5GW로, 2020년에는 7GW, 4GW, 3GW로 설정하였다.

동북아 지역 계통연계 시 환경제약조건을 고려하게 되면, 전원구성 형태에 있어서 상당한 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 특히, 석탄, 석유 및 가스와 같은 CO2 배출이 많은 화석연료 전원의 설비용량은 감소하는 반면, 수력, 양수 및 원자력과 같은 비화석연료 전원의 설비용량은 최대증설가능 수준까지 증가하게 되는 것을 확인할 수 있다. 한국의 경우, 석탄전원의 설비용량 감소로 양수발전설비가 대체하고 있음을 <표 2>에서 보여주고 있다.

<표 1> CO2 배출제약조건에 따른 한국의 전원유형별 발전설비용량 비교결과

		(단위: MW)					
		수력	양수	석탄	석유	가스	원자력
2010년	비제약	1,583	2,300	21,961	4,708	16,372	18,716
	제약	1,583	2,666	21,595	4,708	16,372	18,716
2020년	비제약	1,583	2,300	23,832	3,329	16,372	29,437
	제약	1,583	3,192	22,940	3,329	16,372	29,437

한편, 환경제약조건을 고려할 경우 대부분의 지역에서는 발전설비 투자비용이 증가하게 됨을 확인할 수 있다. 이는 화석연료 전원을 대체하게 되는 수력 및 원자력 발전설비의 투자비용이 상대적으로 높기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 한국은 발전설비 투자비용이 오히려 감소하는 현상이 나타나고 있는데, 그 이유는 한국의 경우 석탄전원을 대체하는 수력 및 원자력 발전설비가 이미 포화상태이므로 석탄전원이 담당하고 있는 기저부하를 다른 지역에서 생산된 융통전력으로 대체하기 때문인 것으로 추측할 수 있다.

<표 2> CO2 배출제약조건에 따른 발전설비 투자비용 비교결과

		(단위: 백만\$)					
		2010년			2020년		
		비제약	제약	증감률	비제약	제약	증감률
한국		1,121	1,088	-2.9%	4,643	4,563	-1.7%
북한		497	497	0.0%	847	1,291	52.5%
극동러시아		0	0	0.0%	52	457	778.3%
동시베리아		434	462	6.4%	1,973	1,973	0.0%
계		2,052	2,047	-0.2%	7,515	8,284	10.2%

송전설비용량의 경우 다른 지역에서는 변화가 없지만, 북한과 극동러시아 연계선로에서는 상당히 다른 결과가 유도되었다. <표 3>에서 보여주고 있는 바와 같이, 환경제약을 고려할 경우 2010년에는 이 선로의 송전용량이 증가하지만, 2020년에는 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 이는 2010년에는 북한의 발전설비용량이 상대적으로 부족하기 때문에 한국의 하계 부하수요를 공급하기 위해서 한국의 석탄전원이 감소한 만큼 보다 많은 전력을 러시아에서 공급하지만, 2020년에는 북한의 발전설비에서의 여유가 많기 때문에 오히려 러시아 지역에서 공급하는 전력이 상당히 감소하기 때문인 것으로 추측된다. 실제 연계선로를 통한 계절별 융통전력량은 환경제약조건 유무에 따라 상당히 다른 결과를 도출하였다. 그러나, 전반적으로 연간 총 융통전력량은 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그 결과, 환경제약조건이 오히려 동북아 지역 국가 간 계통연계에 장애요소가 될 수도 있음을 예

상할 수 있다.

<표 3> CO2 배출제약조건에 따른 연계선로용량 비교결과

	2010년			2020년		
	비제약	제약	증감률	비제약	제약	증감률
한국-북한	5,000	5,000	0.0%	7,000	7,000	0.0%
북한-RFE	1,930	2,000	3.6%	3,698	2,415	-34.7%
RFE-ES	1,500	1,500	0.0%	3,000	3,000	0.0%

<표 4> CO2 배출제약조건으로 인한 계절별 융통전력량에서의 증감 수준 계산결과

		(단위: GWh)					
		한국->북한	북한->한국	북한->RFE	RFE->북한	RFE->ES	ES->RFE
2010년	겨울	758.9	-	140.1	-344.9	-361.2	-448.5
	봄	82.3	8.5	-	151.9	-	-534.0
	여름	-	47.6	-	155.3	-	-529.6
	가을	881.3	-154.1	282.9	-704.0	3.2	-92.8
	연 총계	1,722.5	-98.1	423.1	-741.7	-357.9	-1,604.9
2020년	겨울	-6,660.6	52.1	-767.3	1,961.6	158.1	151.8
	봄	-554.4	403.4	8.7	-2,409.7	24.9	-3,705.1
	여름	-25.0	639.9	21.4	-3,132.6	209.3	-4,633.4
	가을	-5,080.7	180.2	-415.2	1,307.8	72.9	-400.1
	연 총계	-12,320.7	1,275.5	-1,152.4	-2,272.8	465.1	-8,586.8

## 5. 결 론

동북아 지역은 자원보유, 부하패턴, 전원구성 등의 측면에서 상호 보완성이 높기 때문에 세계 여타 지역보다 계통연계로 인한 경제적 유용성이 클 것으로 예상하고 있다. 한편, 이와 같은 지역 간 상호 보완성은 동북아 계통연계가 향후 지속적으로 강화될 기후변화협약에 효과적으로 대처할 수 있는 대안이 될 수 있도록 하는 유인을 제공한다. 따라서, 기후변화협약의 대안으로써 동북아 전력계통 연계를 고려하기 위해서는 우선적으로 환경제약이 동북아 지역의 전원구성에 어느 정도의 영향을 미치는지를 파악해야 한다.

이를 위해, 본 논문에서는 동북아 전력계통 연계의 경제성을 분석하기 위해 개발된ORIRES 모형에 오염물질 배출에 따른 환경비용과 이에 대한 배출제약조건 반영하여 구현하였으며, 그 결과를 비교/분석하여 제시하였다. 그 결과, 환경제약조건으로 인해 동북아 지역의 전원구성 형태가 상당히 변화하며, 특히 한국의 경우에는 연계선로를 통한 융통전력을 이용하여 화석연료 전원의 설비용량을 감소함으로써 친환경적인 전원구성을 유도할 수 있음을 확인하였다.

동북아 지역 국가의 실제 환경제약 관련 자료의 확보가 곤란하여 본 논문에서는 다소 비현실적인 가정을 적용하였으나, 본 논문에서 기술한 분석결과가 향후 기후변화협약을 위한 대안을 수립함에 있어 기본적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, 제4차 전력수급기본계획, 2004.
- [2] 에너지경제연구원, 동북아 에너지 협력 연구, 산업자원부, 2003.
- [3] 에너지관리공단, 온실가스 배출권거래제 시범사업 연구, 2003.
- [4] L.S.Belyaev, et. al., "A mathematical model for effectiveness assessment of interstate electric ties in northeast asia," Proc. Power Con '98 Beijing, Vol.1, pp.730-734, Aug., 1998.

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업(과제번호 : R-2002-1-319-0-00)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.