

정책 이슈페이퍼 12-05

에너지가격 변동의 위험을 고려한 효율적 전원믹스 계획의 분석

■ 이유수 외

목 차

- I. 배경 및 문제점 / 1
- II. 조사 및 분석 결과 / 4
- III. 정책 제언 / 12
- IV. 기대 효과 / 15
- <참고자료> / 16

I. 배경 및 문제점

1. 연구의 배경 및 필요성

- 일본의 후쿠시마 원전사고와 국내 9.15순환정전 사건을 계기로 안정적 전력공급을 위한 우리나라 전원믹스 계획에 대한 다각적 검토 필요
 - 일본의 원전사태는 원전에 대한 안전성 논란과 함께 원전에 대한 회의적인 시각으로 인하여 전원믹스에서 원전의 비중논란으로 이어짐.
 - 국내 정전사태는 전력공급에 대한 설비부족 문제를 대두시킴으로써 발전설비 투자계획에 대한 논의가 더욱 중요해짐
 - 이 사건들을 계기로 현행 우리나라 전원믹스 계획에 대한 보다 다각적이고 심층적인 검토를 통하여 향후 안정적 전력공급시스템의 구축에 대비 필요
- 최근 국제적 연료가격의 상승에 따른 외적 충격과 기술발전에 따른 비용의 변화요인 등 불확실성에 대비하는 방식의 전원믹스 계획 검토 필요
 - 과거 전력산업 환경은 에너지가격이 상대적으로 안정되고 기술적 변화의 예측가능성도 컸기 때문에 현재 상황에 비해서는 비교적 안정적임.
 - 전통적 방식으로 계획되는 전원구성의 최적화는 전체 전원구성의 비용최소화에만 의존하고 있음.
 - 불확실성이 크지 않은 상황 하에서 전원믹스 계획은 전체 비용의 최소화 전략이 효과적으로 작용함.
 - 최근 에너지시장은 경쟁적 환경 속에서 에너지가격 변동의 심화, 급격한 에너지기술 변화로 인한 신규 에너지자원의 개발 등 불확실성이 높아짐

- 과거 전통적 전원믹스 계획에서는 급격한 에너지 가격 및 기술적 변화 등을 반영하지는 못함
- 전력공급의 안정성이라는 측면에서 연료비용의 변동폭이 증가하는 등 위험이 높아지고 있으나 이에 대비하지 못하고 있는 상황임.
- 금융자산의 분산투자를 통하여 기대수익과 가격변동의 위험요인을 동시에 고려하는 포트폴리오 이론을 전원믹스 계획에 적용하여 분석할 필요
- 전원믹스 계획에서 연료가격 변동의 위험과 비용최소화를 동시에 고려함으로써 변화하는 에너지 환경을 반영할 수 있음.
- 연료조달의 어려움을 완화하고, 대체가 가능한 전원개발 등을 종합적으로 고려하는 전원믹스 계획을 고려해 볼 수 있음.

2. 현황 및 문제점

- 우리나라의 전원믹스계획은 전력산업 구조개편 이전에 시행된 중앙집중적 계획방식과 이후의 시장기능 중심의 자율적 방식이 혼재되어 있음.
- 우리나라의 발전원에 대한 전원믹스는 현재 2년마다 정해지는 전력수급기본계획에 의해서 결정됨
 - 2001년 4월 추진된 전력산업 구조개편 이전에는 수직통합적 독점기업인 한전의 주도하에 전원믹스 계획이 수립되어 최적화 전산모형이 이용됨.
 - 이후에는 발전도매시장의 형성으로 발전자회사와 민간사업자 등 다양한 발전사업자들의 설비건설 의향이 반영되어 전원믹스 계획이 진행됨.
 - 그러나 발전사업자의 건설의향을 평가하여 전원믹스 계획을 확정하므로 사업자의 완전한 자율적 의사에 의해 발전설비 건설이 이루어지지 않음.

- 이 과정에서 과거 기준의 전원믹스 계획에 활용되었던 전체 비용최소화를 목적으로 하는 최적화 전산모형이 여전히 이용되고 있음.
- 제한적 경쟁하의 전력운영 시스템에서 시장참여자들의 반응이 기준계획에 미반영됨으로써 기준계획과 실제계획의 차이로 인한 공급부족 문제의 발생을 야기할 가능성이 있음.
 - 전원믹스의 기준계획은 주어진 예측수요에 대비하여 최소한의 비용으로 공급설비를 충족하지만 발전사업자와 소비자의 이해관계가 달라질 수 있음
 - 발전사업자는 가능하면 수요예측 축소로 공급부족현상에 따른 이윤증가를 추구하고, 소비자는 공급과잉에 따른 전력가격 감소에 따른 편익향유 노력
 - 기준계획 수립시 어느 입장을 중요시하느냐에 따라 기준계획의 수립원칙이 달라질 수 있으나 이를 고려하지 않으므로 공정성과 객관성 문제가 있음.
 - 발전사업자의 평가기준도 자의적 판단에 따라 결정할 수 있으며, 기준계획에 의거하여 정부가 의사결정을 하므로 일부사업의 위험마저도 부담함
- 미래의 불확실성이 반영되지 않은 기존 전원믹스 계획은 미래 수요예측과 다른 미래 변수들의 불확실성에 대한 처리문제를 다루기 어려움
 - 미래 수요예측에 대한 오차는 불가피하지만 전체 공급능력 부족 하에서 예비율의 하락 시 신뢰성 유지를 위한 비용이 급증하므로 이를 반영할 필요.
 - 전원믹스 계획에서 수요예측 외에 연료가격, 환경비용, 수요패턴의 변화, 기술적 변화 등의 미래불확실성 요인에 대한 위험감소 방안이 없음.
- 전원믹스 계획에서 미래의 불확실한 변수들의 정확한 예측노력도 중요하지만 불확실성에 대비하여 최적 전원믹스를 설계하는 것이 바람직

II. 조사 및 분석 결과

- 포트폴리오 이론을 적용한 적원믹스 계획을 분석하기 위해서는 분석대상인 다양한 전원별 발전단가가 필요함.
 - 전원별 발전단가는 고정비 및 변동비에 대한 자료와 건설기간, 발전소 운영기간, 할인율 등의 자료를 통하여 전체기간에 대해 균등화하는 작업 필요
 - 그러나 비용자료의 가공과 원전의 비용자료 입수에 대한 어려움으로 전력거래소에서 발표하는 연간 발전원별 정산단가를 비용자료로 대체
 - 발전원별 정산단가는 각 발전원별 고정비와 변동비를 반영하여 전원별 비용을 보상하고 있으므로 전체 발전단가를 대체할 수 있음.

- 적원믹스 계획에서 기대비용과 위험을 동시에 고려하면서 효율적인 포트폴리오를 찾기 위한 작업과정이 필요함
 - 발전원별 정산단가의 평균을 구하여 각 발전원별 기대비용으로 사용하는 데, 원자력은 40년, 기타 발전원은 30년을 설비운영 기간으로 가정
 - 발전설비의 비용자료를 이용하여 각 전원별 위험을 나타내는 발전단가의 분산을 구하는데, 연도별 비용흐름인 Cash Flow의 표준편차를 구함
 - 각 발전원에 대한 기대비용과 위험수준을 나타내는 표준편차를 구함으로써 전체 적원믹스에서 기대비용과 위험을 동시에 고려할 수 있음.
 - <표 1>에서 원자력의 경우 다른 발전원에 비해 기대비용과 표준편차가 월등히 낮으며, LNG와 석유 등의 발전원은 기대비용과 표준편차가 높음.

<표 1> 전원별 기대 발전비용과 분산 및 표준편차

구분	원자력	유연탄	무연탄	LNG	석유	양수
기대비용(원/kWh)	39.07	60.18	89.66	128.92	187.70	156.46
분산(σ^2)	0.0026	0.0107	0.0724	0.0227	0.0542	0.0346
표준편차(σ)	0.0506	0.1032	0.2690	0.1506	0.2327	0.1859

- 전원믹스의 효율적 프런티어를 찾기 위해서는 전원믹스 구성의 분산을 구해야 하며, 이를 위한 기초 작업으로 전원별 비용의 상관계수를 도출함.
 - 발전원간의 상관관계에 따라서 전체 전원구성의 위험감소 효과의 정도를 예측해 볼 수 있음.
 - 석유와 LNG 발전원간의 상관계수가 0.863으로 가장 높고, 원자력과 다른 화석연료간의 상관계수는 낮은 편에 속하며, LNG 및 석유와 유연탄 발전원간의 상관계수는 상대적으로 크지 않음

<표 2> 발전원간 상관계수

구분	원자력	유연탄	무연탄	LNG	석유	양수
원자력	1.000	-0.291	0.060	-0.019	0.326	0.723
유연탄	-0.291	1.000	0.565	0.257	0.194	-0.446
무연탄	0.060	0.565	1.000	0.755	0.746	0.340
LNG	-0.019	0.257	0.755	1.000	0.863	0.213
석유	0.326	0.194	0.746	0.863	1.000	0.487
양수	0.723	-0.446	0.340	0.213	0.487	1.000

□ 전원믹스 전체의 위험을 고려하면서 기대비용을 최소화하기 위해서는 최적화 문제를 해결하는 모형을 설정하는 것이 중요함.

○ 본 모형의 설정은 최적화 문제의 해결을 통하여 위험요인이 고려된 전원믹스 구성의 효율적 배분을 달성하도록 함

- 전원구성 포트폴리오의 위험을 나타내는 기대비용의 표준편차가 주어졌을 때 전원구성 포트폴리오에 대한 기대비용을 최소화하는 가중치를 선택
- 전원구성 포트폴리오의 전체 기대비용은 각 개별 전원의 기대 발전비용에 각 전원비중을 곱하여 합한 값과 동일함
- 제약조건으로서 전체 전원구성 포트폴리오에 대한 분산의 일정한 목표치가 주어지고, 각각의 가중치는 0보다 크거나 같으며 가중치의 합은 1이 됨.

$$\text{Min } E(C_p) = \sum_{i=1}^N \omega_i E(C_i)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_i \omega_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j = \overline{\sigma_p^2} (\text{분산의 목표치})$$

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = 1 \quad (\omega_i \geq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, N)$$

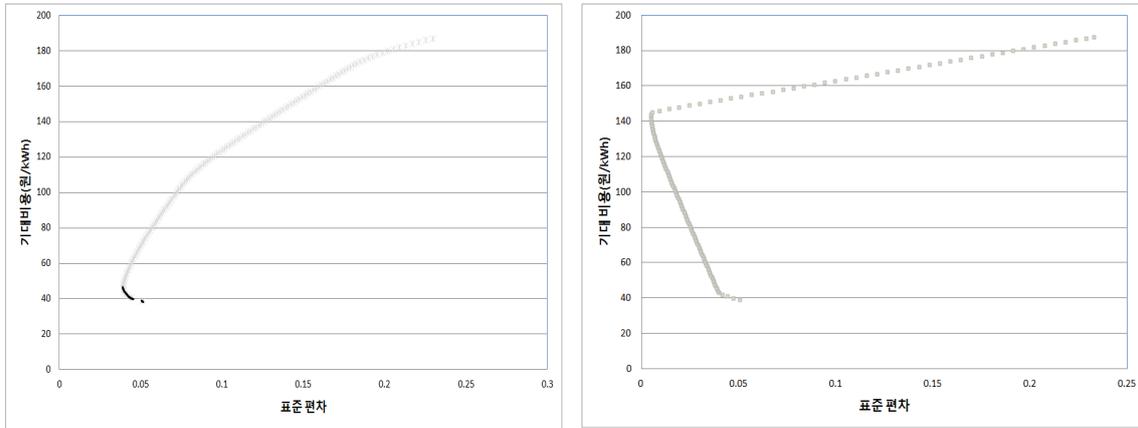
○ 위 식을 통하여 포트폴리오를 구성하는 많은 전원구성 조합들 중 효율적 프런티어 상에 있는 전원믹스 조합을 도출함으로써 동일한 위험 하에서 최소 비용을 가진 전원믹스의 포트폴리오 구성을 얻을 수 있음.

□ 신재생에너지를 제외한 대상 발전원에 대한 효율적 전원믹스 계획은 원자력 발전을 중심으로 기대비용과 표준편차의 움직임이 다르게 나타남.

○ 효율적 프런티어선상에서 전원믹스의 기대비용이 가장 낮은 점(39.1원/kWh)은 원자력 발전이 100%일 때이지만 표준편차는 가장 높음(0.05)

- 원자력 발전의 비중을 다소 줄이고 유연탄 발전의 비중을 약 9%로 늘리면 위험은 줄일 수 있으나 전체 기대비용이 다소 높아짐.
 - 유연탄 발전의 비중을 점차 높이면 위험은 계속 줄어들고, 기대비용이 높아지는데, 기대비용이 kWh당 45원이 될 때 LNG 발전이 도입됨.
 - 위험이 가장 최소가 되는 점(0.039)은 전원믹스의 기대비용이 kWh당 약 47원일때이며, 원자력 발전 73%, 유연탄 발전 24%, LNG 발전이 3%임.
- 원자력 발전에 대한 기대비용과 표준편차가 전원 중 가장 낮으므로 위험을 고려한 최적 전원믹스 구성에서 원전의 비중이 클 수밖에 없음.
- **신재생에너지 전원을 포함한 전원믹스 계획은 포함하지 않는 경우와 비교하면 전원구성에서 차이를 보이고 있음.**
- 신재생에너지 전원이 포함되지 않은 경우와 비교하였을 때 차이점은 점차적으로 기대비용은 더 증가하고 표준편차는 더 하락하는 모습을 나타냄
 - 효율적 프런티어상에서 원자력 발전의 비중이 100%일 때 기대비용이 가장 낮고, 표준편차가 가장 높다는 점은 동일함.
 - 그러나 원자력 발전의 비중이 줄어들면서 유연탄과 신재생에너지 발전이 증가하면서 기대비용은 증가하지만 표준편차는 더욱 하락하게 됨.
 - 효율적 프런티어상에서 가장 표준편차가 낮은 상태에서 원자력, 유연탄, 신재생에너지 등의 전원비중의 변화로 위험수준을 낮출 수 있음.
 - 기대비용이 39원/kWh에서 144원/kWh 사이에서 표준편차는 0.05에서 0.005로 줄어들면서 원자력 비중이 줄어들고, 신재생의 비중이 증가함.
 - 전원구성 포트폴리오의 기대비용이 144원/kWh가 되는 시점에서 위험수준이 최저가 되며, 대부분이 신재생에너지 전원으로 구성됨.

[그림 1] 신재생전원의 유(우)무(좌)에 따른 전원믹스의 효율적 포트폴리오



- 제5차 전력수급기본계획에 나타난 기존의 중장기 전원믹스 계획과 효율적 전원믹스 계획을 비교해보면 전원별 비중에 차이가 있음.
- 2010년 발전비중에 근거하여 전원믹스의 효율적 프런티어 라인에서의 전원별 구성과 비교하면, 기대비용이 높거나 위험이 높게 나타나고 있음.
 - 2010년의 발전비중은 원자력 31.4%, 석탄 41.9%, LNG 21.8%, 유류 3.2%, 양수 0.5%, 신재생에너지 1.3%로 기대비용은 74.3원, 표준편차는 0.065임.
 - 효율적 프런티어선에서는 동일한 기대비용 수준 하에서 표준편차는 0.027로 낮으며, 원자력 53.7%, 유연탄 16.2%, 신재생 30.1%로 나타남.
 - 동일한 기대비용 수준 하에서 위험을 낮추기 위해서는 원자력 비중과 신재생에너지 전원의 비중을 높이고, 유연탄 전원의 비중을 낮춰야함.

<표 3> 기존 전원믹스 계획과 전원믹스의 효율적 프론티어선 비교

(단위 : %)

구분	원자력	유연탄	무연탄	LNG	중유	양수	신재생
기존(2010년)	31.4	41.9		21.8	3.2	0.5	1.3
효율선	53.7	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0	30.1
기존(2024년)	48.5	31.0		9.7	0.5	1.3	8.9
효율선	60.1	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0	21.9

- 전력수급 계획의 최종 연도인 2024년을 중심으로 비교해 보면, 2010년과 동일하게 기존 계획이 기대비용과 표준편차에서 모두 높게 나타나고 있음.
 - 2024년의 기존 전원믹스의 전체 기대비용은 65.9원/kWh이고, 표준편차는 0.41이나 효율적인 전원믹스에서 같은 기대비용 하에 표준편차는 0.031임.
 - 기존 전원믹스에서 전원별 비중은 <표 3>에 나타난 바와 같지만 효율적인 전원믹스에서는 원자력 60.7%, 유연탄 18.1%, 신재생 21.9%의 비중을 보임.
 - 2024년의 기존 전원믹스 계획은 2010년에 비해 원자력 발전과 신재생에너지 발전비중이 증가할 계획이나 이들 비중을 더 높임으로써 전원믹스의 위험수준을 더 낮출 수 있는 개선의 여지가 있음.
- 원자력 발전에 대한 비용수준의 변화라는 전제 하에서 전체 전원믹스 계획을 분석해 보면, 이전의 결과와 차이가 있음.
- 우리나라의 경우 원자력 발전에 대한 사회적 비용반영에 따라서 비용의 상승가능성이 있으며, 이를 고려한 기대비용 상승 시나리오를 분석
 - 일본은 금년 에너지믹스의 재검토를 진행하면서 원자력발전에 대한 비용

산정에 사용후 핵연료 처리, 사고위험 비용등을 포함하여 하한값만 제시하고 상한값을 제시하지 않을 정도로 비용의 상승가능성을 시사하고 있음.

- 우리나라의 경우에도 이와 같은 비용들을 포함하여 재검증할 경우 현재의 발전단가보다는 상승할 가능성이 크므로 시나리오별 분석이 필요

○ 원자력 발전의 기대비용이 상승하여 각각 유연탄 발전과 LNG 발전 비용, 이들의 평균비용과 동일하다는 세 가지 가정 하에 위험수준의 변화 분석

- 유연탄 발전과 기대비용이 동일할 경우, 효율적 프런티어상에서 전원구성은 이전과 비슷하나 위험수준은 약간 더 높게 나타남

- LNG 발전과 기대비용이 동일할 경우, 이전보다 동일한 기대비용 하에서 더 높은 위험수준을 나타내며, 가장 낮은 기대비용하에서 원자력발전이 아닌 유연탄 발전의 비중이 대부분을 차지함.

- 이들의 평균비용과 동일할 경우, 위험수준은 앞의 두 경우의 중간정도에 해당되고, 기대비용이 가장 낮을 때 유연탄 발전의 비중이 대부분임.

○ 원자력 발전의 기대비용이 증가할수록 동일한 기대비용하에서 위험수준은 더욱 높아지며, 전원별 기대비용의 크기순에 따라 전원구성도 다름.

□ 원자력 발전의 비용상승과 함께 온실가스 감축에 따른 비용상승분을 적용할 경우 위험을 고려하는 효율적인 전원믹스 계획에 변화가 있음.

○ 온실가스 감축에 따른 비용상승분을 화석연료 발전에 적용할 경우 시나리오에 따라 전체 전원믹스의 위험수준과 전원구성이 다르게 나타나고 있음.

- 배출권 거래가격이 ①25,000원/CO₂톤일 경우 온실가스 감축비용을 적용한 발전원별 기대비용은 유연탄, 원자력, 무연탄, LNG 발전순으로 높음.

- 이전과 비교하면 발전원별 기대비용 크기순서는 변화가 없고 비용만 상승하였으며, 동일한 기대비용 하에서 위험수준은 더 높아짐.

<표 4> 화석연료 발전원별 온실가스 감축비용 산정¹⁾

구분	유연탄	무연탄	LNG ⁵⁾	석유
발전량 ²⁾ (GWh)	156,941.7	6,479.2	28,516.5	11,203.5
배출량 ³⁾ (천CO ₂ 톤)	146,151.0	6,656.0	11,394.9	9,219.5
배출계수 ⁴⁾ (CO ₂ 톤/MWh)	0.9312	1.0273	0.3996	0.8046
①25,000원/CO ₂ 톤 가정시 배출감축비용(원/kWh)	23.28	25.68	9.99	20.12
②50,000원/CO ₂ 톤 가정시 배출감축비용(원/kWh)	46.56	51.36	19.98	40.23

- 주 : 1) 전력거래소에서 제시한 2006~2010년 자료의 평균값을 사용하여 계산
 2) 발전량은 2006년에서 2010년까지의 발전원별 평균 발전량임.
 3) 배출량은 전원별 발전량과 배출계수를 근거로 연도별 배출량을 구한 후 그 평균값을 도출함.
 4) 배출계수는 각 전원별 평균 배출량을 전원별 평균 발전량으로 나누어 도출함.
 5) 원자료에서 가스 화력 및 복합으로 구분된 수치를 평균한 값임.

- 배출권 거래가격이 ②50,000원/CO₂톤일 경우 온실가스 감축비용을 적용한 발전원별 기대비용은 원자력, 유연탄, 무연탄, LNG 발전순으로 높음.
- 이전과 비교하면 유연탄 발전원의 기대비용이 원자력보다 높아짐에 따라 가장 낮은 기대비용 하에서의 위험수준은 ①보다 더 높게 나타나고 있음.
- 온실가스 감축비용을 적용하여 기대비용과 위험수준과의 관계를 분석한 결과 개별 발전원에 대한 기대비용의 상승만으로도 전체 전원믹스의 기대비용과 위험수준이 높아짐.
- 전원별 기대비용이 어떻게 산정되어 전원별 기대비용의 크기가 결정되는가에 따라서 위험수준의 관리와 전원별 구성에 큰 영향을 미치고 있음.

Ⅲ. 정책 제언

- 포트폴리오 이론을 적용한 전원믹스 계획의 분석결과는 기존 전원믹스에 비해서 원자력과 신재생 전원의 비중확대를 통하여 효율성 달성가능
 - 원자력 발전의 경우 다른 발전원에 비해 기대비용이 월등하게 낮으면서도 연료의 가격변동에 따른 위험수준이 낮으므로 이러한 결과가 도출
 - 신재생에너지 전원은 다른 전원대비 기대비용이 높지만 개별 전원별 위험수준이 가장 낮으므로 어느 정도 비중증대로 효율적 전원믹스 구성이 가능
 - 우리나라 원자력 발전의 경우 사용후 핵연료 처리비용, 사고위험에 대한 대응비용 등을 포함한 사회적 비용을 종합적으로 고려하면 현재의 발전단가 수준보다는 높아질 가능성이 있음.
 - 또한 온실가스 감축이라는 측면에서 배출권거래 가격을 설정하여 전원믹스 계획에 적용시켜 본 결과 전원별 기대비용의 상승과 위험수준이 높아짐
 - 기대비용이 높아지기 전의 경우와 비교하여 동일한 기대비용 하에서의 위험수준은 훨씬 더 높아지고, 동일한 위험에서는 기대비용이 더 높아짐.
 - 이뿐만 아니라 이전과 비교하여 기대비용 상승으로 인한 전원별 기대비용의 크기순서의 변화에 따라 전원구성에서도 변화가 나타남
- 전원믹스 계획에서 가장 중요한 것은 전원별 발전비용에 대한 정확한 추산이므로 전원별 사회적 발전비용을 종합적으로 검토하는 체계 필요
 - 그 동안 전원별 사회적 비용의 고려없이 발전원의 운영과 관련된 직접적 비용만을 고려하여 산정함으로써 전원믹스의 비중도 여기에 영향 받음
 - 전원별 자체 비용뿐만 아니라 사회적 비용까지도 반영하여 전원믹스 계획이 이루어지면 전원믹스의 구성도 달라질 것임

- 특히 원자력 발전의 비용추계나 온실가스 감축비용의 추정 등을 반영하여 전원별 사회적 발전비용을 종합적으로 검토하는 체계를 마련할 필요
- 발전비용의 정확한 추산에 근거하여 미래 불확실성에 대한 위험요인을 고려하여 전원믹스 계획에 반영할 필요
 - 향후 세계적인 에너지환경은 국제유가의 향방과 더불어 현재보다 불확실해질 가능성이 크므로 이를 반영할 수 있는 전원믹스 체계의 확립 필요
 - 국제에너지기관에서 중장기적으로 고유가 상황이 지속될 것으로 전망하고 있는 가운데 여타 에너지연료 가격의 변동성이 심해질 우려가 있음
 - 특히 자원부국의 정치적 갈등으로 인한 화석연료 공급의 불안정성이 커지고 있는 가운데 에너지공급의 안정성 측면에서 대비가 필요함
 - 전원믹스 계획도 이를 반영하여 미래 에너지가격의 불확실성에 따른 위험에 대비하고 관리할 수 있도록 하여야 함.
- 새로운 에너지기술 발전과 비전통자원의 개발 등에 따른 가격변화 또한 에너지비용에 미치는 영향이 크기 때문에 주목하며 차분한 대응 필요
 - 새로운 에너지기술 개발은 전원설비에 대한 효율을 증가시키며 비용감소에 영향을 줄 수 있기 때문에 향후 기술동향을 주목할 필요
 - 특히 에너지저장 장치의 개발과 상업화는 신재생에너지 전원의 추가적 도입과 확대를 적극적으로 이행할 수 있는 계기가 될 수 있음.
 - 비전통 셰일가스 개발과 국내도입 가격 등에 주목하여 장기적으로 미국의 LNG 도입으로 인한 LNG 발전소의 비중확대 가능성에 대한 검토 필요
 - 에너지기술의 발전과 비전통 셰일가스 개발 등이 전원별 발전원가에 미치는 영향에 따라서 장기적으로 전원믹스의 구성과 비중이 달라질 수 있음.

- 전원믹스 계획과 관련하여 또 다른 하나의 중요한 사안은 전기요금의 반영 및 사회적 수용성과 관련되어 있음.
 - 전원별 공급비용에서 차이가 있으며, 기저발전과 첨두발전 등 부하별 특성에 따라 담당수요가 다르지만 전기요금에 대한 전원별 공급비용의 반영여부가 전원믹스 계획에 영향을 미침
 - 신재생에너지원은 발전단가가 높지만 다른 문제점은 별도로 전기요금에 이를 반영하고 국민들이 요금상승을 수용한다면 비중확대를 고려할 수 있음.
 - 전원별 공급비용을 전기요금에 반영하되 사회적 수용성이 용이하다면 이에 따라 전원믹스의 계획도 변화될 수 있는 여지가 있음.

IV. 기대 효과

- 다양한 위험 및 가격변동 요인을 고려한 전원믹스 계획을 제시함으로써 전력공급의 안정성을 높일 수 있는 방안마련에 기여
 - 비용최소화에 근거한 전원믹스 계획과 포트폴리오 이론을 반영한 전원믹스 계획과는 전원별 구성과 비중에서 차이가 있음.
 - 기술수준의 변화, 신규 전원의 도입여부 등 다양한 요인을 전원믹스 계획에 반영함으로써 위험요인을 완화하는 데 기여할 수 있음.

- 기존 전원믹스 계획과 위험 및 비용최소화를 동시에 고려한 전원믹스 계획의 보완을 통하여 향후 전원믹스 계획에 참고자료로 활용
 - 연료가격 변동의 위험요인을 고려하지 못하는 기존 전원믹스 계획과 수요에 대한 정보 등을 고려하지 못하는 전원믹스 계획의 장단점을 파악
 - 전력부하에 대한 정보와 미래 불확실한 에너지환경을 모두 반영할 수 있는 전원믹스 계획의 검토에 있어서 참고자료로 활용 가능
 - 향후 전원믹스 계획에 고려해야 할 요인들과 전원믹스 관련 정책방향 정립에 기여할 수 있을 것임.

- 사전적인 전원별 비용검증 등을 위한 비용평가 체계를 마련하기 위한 기초자료로서의 역할 기대
 - 포트폴리오 이론을 활용한 전원믹스 계획에서 전원별 비중의 변화를 통하여 효율적 전원믹스 계획을 달성할 수 있으므로 기대비용 산정이 중요
 - 전원별 발전단가 등의 비용평가 체계를 마련하는 데 기초자료로 활용가능

< 참고자료 >

1. 이론적 근거

- 포트폴리오 이론은 다양한 금융자산에 적정하게 투자하여 손실위험을 분산시키기 위한 것으로 발전원의 구성에 있어서도 적용 가능함
 - 한 가지 발전원을 중심으로 발전설비 계획이 이루어지고 전력공급원이 집중될 경우 연료가격 상승 또는 고장 등 전력공급이 중단되는 위험 직면
 - 원자력, 석탄, 가스복합 발전설비, 신재생 전원 등 다양한 발전설비의 적정한 비중을 통한 설비계획은 특정 발전원에 문제가 있어도 어느 정도 극복
 - 기존의 전원믹스 계획은 비용최소화에 중점을 두기 때문에 미래의 불확실한 요인에 의한 전력공급 차질 가능성에 상대적으로 더 노출되어 있음
 - 이러한 상황에 대비하는 차원에서 위험요인을 고려하면서 전원믹스의 전체 비용을 최소화하는 포트폴리오 이론을 적용하여 미래 위험에 대비 가능
 - 특히 화석연료의 가격변동성이 심화되는 가운데 연료조달의 어려움으로 인한 전력공급의 차질이 발생할 가능성을 대비하는 차원에서 고려
- 포트폴리오 이론을 전원믹스 계획에 적용하기 위해서는 기본적인 가정이 필요함
 - 정규분포를 가진 모든 자산과 수익에 대하여 낮은 거래비용과 완전한 정보 등 거래자산에 대한 완전한 시장 존재한다고 가정
 - 금융자산에 비해 발전자산은 시장에서 거래가 용이하지 않으며, 상대적으로 불완전하며, 투자도 어렵지만 시장거래가 용이하다고 가정

- 금융자산은 거의 무한하게 분리가 가능하지만 발전자산은 연속성이 부족한 상태이므로 분리가 가능하다고 가정
- 전력부하 패턴이나 부하량에 대한 전제없이 전원믹스 계획을 논의하므로 수요에 대한 정보를 반영하지 못하는 한계가 있지만 전원구성의 비중 정도에 따라 전체 위험과 비용의 정도를 관리할 수 있음.

2. 이론소개 및 선행연구

- 포트폴리오 이론은 금융자산에 대한 투자자가 미래의 불확실한 상황 하에서 기대수익률을 극대화하기 위한 자산투자에 적용되는 방법론임.
- 미래의 불확실한 상황 하에서 투자자의 자산선택은 미래의 수익률뿐만 아니라 위험의 발생도 중요한 투자기준으로 작용하여 영향을 받게 됨.
 - 하나의 자산에 집중적으로 투자하기보다는 여러 자산에 분산투자하면 미래의 불확실한 상황으로 인한 투자손실의 위험을 어느 정도 줄일 수 있음.
 - 금융자산의 선택에서 여러 자산에 분산투자할 경우 전체 포트폴리오의 기대수익률은 개별자산의 수익률과 투자비율에 달려있음.
 - 전체 포트폴리오의 기대수익률은 개별자산 수익률과 투자비율의 곱을 합한 것으로 개별자산의 수익률 가중치는 0보다 크고 가중치의 합계는 1임.

$$E(r_p) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot E(r_i) \text{ (단, } \sum_{i=1}^n \omega_i = 1)$$

- 금융자산 투자에 대한 자산 포트폴리오의 위험은 분산 또는 표준편차로 나타나는데 여러 가지 자산에 분산투자하여 위험을 분산시킴.

- 단일 자산에 모두 투자할 경우에 비해서 포트폴리오를 구성하는 자산들의 움직임이 서로의 위험을 상쇄하므로 위험을 줄일 수 있음.

$$\sigma_p^2 = E[r_p - E(r_p)]^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_i \omega_j Cov(r_i, r_j)$$

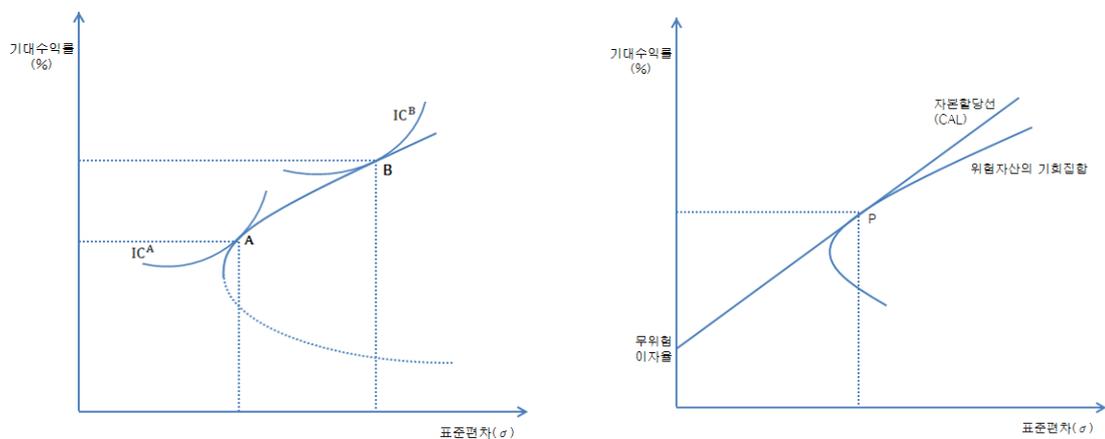
(단, $Cov(r_i, r_j) = \rho \sigma_i \sigma_j$)

- 분산을 구하는 식에서 상관계수(ρ)의 크기에 따라 기대수익률과 위험의 관계가 달라지는데 -1에서 1사이에서 움직이며, 상관관계가 크지 않을 때 위험 분산효과가 커지고, -1일 때 위험이 최소화됨.

□ 금융자산 선택의 효율적 포트폴리오는 이를 구성하는 자산들의 투자기회 집합중에서 지배원리를 만족시키는 효율적 투자기회의 집합임.

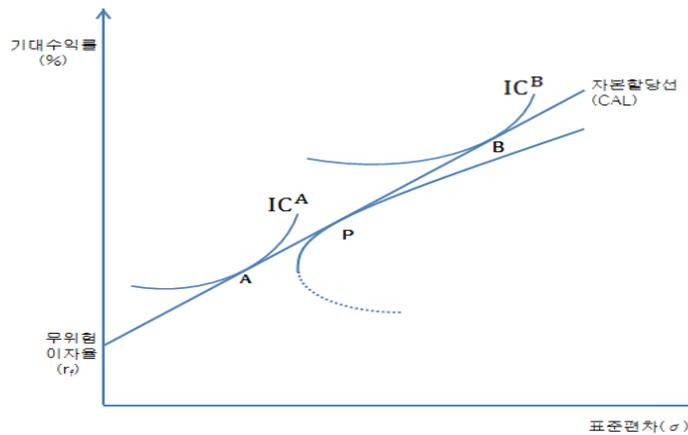
- 여러 가지 자산의 포트폴리오 중 동일한 기대수익률 하에서 분산이 작아서 낮은 위험을 달성하거나 동일한 위험하에서 높은 수익률을 달성하는 집합
- [그림 2]에서 실선부분에 있는 점들의 집합이 점선부분의 집합보다 동일한 위험수준 하에서 기대수익률이 더 높아서 효율적 포트폴리오 구성 집합임

[그림 2] 위험자산에 투자시 효율적 포트폴리오선(좌)과 최적 포트폴리오(우)



- 소비자들은 효율적 포트폴리오선과 접하는 점에서 그들의 효용을 극대화하며, 무위험이자율을 가진 자본할당선과 위험자산의 효율적 포트폴리오상에서 만나는 곳에서 최적 포트폴리오를 구성하여 금융자산의 비중을 결정
- 위험자산 외에 무위험자산에도 투자하여 포트폴리오를 구성하면 기대수익률은 위험자산만 투자할 경우와 다름
 - 금융자산 선택에서 무위험자산이 투자될 경우, 위험자산의 최적 포트폴리오를 선택한 후 무위험자산과 최적 포트폴리오 사이에서 투자비중 결정
 - 무위험자산이 존재할 경우 최적 포트폴리오의 선택은 위험회피 성향에 의존하는데 위험회피성향이 강하면 무위험자산과 P에 분산하여 투자하는 반면, 위험선호성향이 강하면 차입금과 자기자본을 결합하여 P에 투자

[그림 3] 위험자산과 무위험자산에 투자시 최적 포트폴리오



- 전원믹스 계획에 포트폴리오 이론을 적용하여 분석한 논문은 국내외에서 다수 발표되어 있으나 국내 전체 전원믹스 계획관련 논문은 없음.

- Beltran(2008)은 멕시코의 기존 전원믹스 계획과 포트폴리오 이론을 적용한 전원믹스 계획을 비교하여 전원믹스의 비중변화에 따른 위험완화 분석
- Awerbuch & Berger(2003)은 유럽연합의 효율적인 발전 포트폴리오의 개발을 위해서 평균-분산 포트폴리오 이론을 적용하여 잠재적 적용가능성 평가를
- 윤원철(2009)은 동서발전의 전원믹스와 관련하여 포트폴리오기법을 활용하여 신규전원의 선택문제 분석에 집중하고 있음.
- 노동석 · 이근대(2009)는 WASP 모형 운영을 통하여 최대 후회비용을 최소화하는 수급계획 수립방법에 대해서 논의
- 현재로서 우리나라 전체의 전원믹스 계획과 관련하여 포트폴리오를 적용하여 분석한 사례는 없음.

3. 참고문헌

노동석 · 이근대(2009), “변동비 반영시장에서 전력공급설비의 적정성 제고”, 에너지경제연구원 기본연구보고서.

문영석 · 노동석 · 조상민(2011), “에너지믹스 변화의 비용 추정: 신재생확대 시나리오”, 『에너지경제연구』, 제10권 제2호.

윤원철(2009), “포트폴리오 기법을 활용한 신규전원 선택”, 『에너지경제연구』, 제8권 제1호, pp. 59-90.

일본 에너지 · 환경회의 비용등검증위원회, 비용등검증위원회보고서, 2011. 12. 19.

지식경제부, 제3차 전력수급기본계획, 2006.

_____, 제4차 전력수급기본계획, 2008.

- _____, 제5차 전력수급기본계획, 2010.
- 한국자원경제학회(2010), 『전력수급기본계획 수립기법 및 절차 개선방안 연구』, 연구보고서(지식경제부).
- 한국전기연구원(2005), 『전력수급 기본계획수립을 위한 사업자 건설의향 평가 기준 개발 연구』, 연구보고서(산업자원부).
- Ansolabehere S. et al.(2003), The Future of Nuclear Power, An Interdisciplinary MIT Study, Massachusetts Institute of Technology.
- Awerbuch, S. & M. Berger(2003), "Applying Portfolio Theory to EU Electricity Planning and Policy-Making", IEA/EET Working Paper.
- Awerbuch, S(2006), "Portfolio-Based Electricity Generation Planning: Policy Implications for "Renewables and Energy Security", Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 11: 693-710.
- Beltran, H.(2008), "Modern Portfolio Theory applied to Electricity Generation Planning", Ingeniero, National Autonomous University of Mexico.
- Bodie, Z., A. Kane, & A. J. Marcus(2011), Investments, Ninth Edition, McGraw-Hill Irwin.
- Chen, W., K. Ho, & T. Hsu, Portfolio Optimization Models and Mean-Variance Spanning Tests, Prepared for Handbook of Quantitative Finance and Risk Management.
- Kwan, C. C.Y., Portfolio Analysis Using Spreadsheet Tools.

정책 이슈페이퍼 12-05
**에너지가격 변동의 위험을 고려한 효율적
전원믹스 계획의 분석**

2012년 11월 6일 인쇄

2012년 11월 7일 발행

저 자 이 유 수 외

발행인 김 진 우

발행처 에너지경제연구원

437-713 경기도 의왕시 내손순환로 132

전화: (031)420-2114(대) 팩시밀리 : (031)422-4958

등 록 1992년 12월 7일 제7호

인 쇄 범 신 사 (02)503-8737
