

원자력 발전산업의 기술경쟁력 평가 정성적 모델 개발

이용석(서울대 원자핵공학과 박사과정, ys028@plaza.snu.ac.kr)

곽상만(시스템믹스 연구원, skwak@townisp.co)

김도형(시스템믹스 연구원, dohyoung@alum.mit.ed)

1. 서론

현재 국내 원자력 발전산업은 외국으로의 기술 수출을 시도하고 있을 정도로 국가 경쟁력을 갖고 있다는 것이 지배적이다. 실제 한국전력, 원자력연구소 등에서는 원자력 기술을 해외에 수출하고자 노력하고 있다. 원자력 발전기술의 해외 수출이나 연구개발 사업에서 가장 중요한 지표 중의 하나가 원자력 발전산업의 기술경쟁력이다. 대외적으로는 동남아 국가를 중심으로 원자력의 국가간의 원자력발전 시장의 경쟁이 예상되고, 원자력 발전산업의 경쟁력 중 기술경쟁력이 이에 중요한 역할을 하게 된다. 국내로 보아도, 현재 한창 진행 중인 기술 개발 사업에서 기술경쟁력이 원자력발전의 효율적인 운영, 안전성 확보는 물론 다른 산업에의 파급효과 등에서 중요한 매개변수 역할을 한다.

본 연구에서는 국내 원자력 발전산업의 기술경쟁력을 평가하고, 미래의 기술경쟁력을 예측하기 위하여 SD(System Dynamics)를 사용하여 Casual Loop Diagram을 작성하였다. 추후에는 원자력 발전산업의 기술경쟁력을 정량적으로 평가하기 위하여, 실제 자료들을 입력한 Stock Flow Diagram을 개발할 예정이다. SD 모델링을 위한 도구는 Vensim 을 사용하였다.

2. 기술수준과 기술경쟁력

기술산업의 경쟁력을 평가하기 위하여 기술수준, 기술경쟁력이라는 어휘가 많이 사용되고 있다. 기술수준과 기술경쟁력에 대한 공통적인 기준은 없으며, 각 적용분야들마다 사례별로 다르게 정의되어 사용되고 있다.

일반적으로 기술수준과 기술경쟁력을 평가하는 방식은 연구비, 연구인력 수 등의

투입지표와 논문, 특허 수 또는 매출액 등의 산출지표를 사용하거나, 예를 들어 이들을 아래와 같이 종합하여 단일지표로서 사용하기도 한다.

$$\text{기술수준} = a \cdot \text{투입지표} + b \cdot \text{산출지표} \quad (a, b \text{는 가중치})$$

그러나 이러한 일반적인 방식은 투입지표와 산출지표를 독립적으로 보게 된다. 실제로는 투입지표와 산출지표는 시간지연을 포함한 인과관계를 나타낸다. 예를 들어, 연구비가 증가하면 일정시간이 지난 후 이에 의해 논문, 특허 수가 증가하고 이에 의해 매출액이 증가하는 효과가 나타난다. 기존의 일반적인 기술수준 평가방식에서는 이러한 지표간의 인과관계가 고려되지 않았다. 이러한 투입지표와 산출지표간의 인과관계는 SD를 사용하여 다음 그림 1과 같이 모델링할 수 있다.

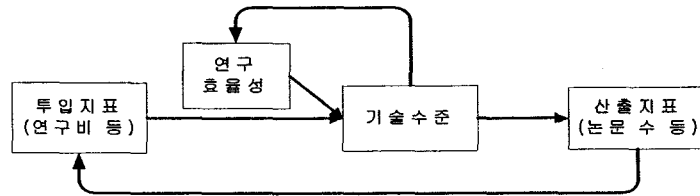


그림 1. 기술수준에 대한 인과지도

연구비 등의 투입지표는 기술수준을 향상시키는 역할을 한다. 그러나, 기술수준은 무조건 연구비를 많이 투자한다고 그에 비례하여 증가하는 것이 아니다. 기술수준 향상에는 현 시점에서의 기술수준이 영향을 미친다. 현 시점에서의 기술수준이 높아야 같은 연구비를 투자하더라도 연구효율성이 높아지므로 효율적으로 기술수준을 향상시킬 수 있는 것이다. 이런 과정을 거쳐 향상된 기술수준은 일정시간이 지난 후 논문 수나 매출액 등의 산출지표에 영향을 미친다. 또한 증가된 산출지표에 의해 연구비 등의 투자여력이 많아져 투입지표를 증가시키는 양의 피드백 구조를 나타내게 된다. 본 연구에서는 다음 절에 나온바와 같이 원자력 발전기술을 설계부문, 기자재부문 등 각 부문별로 나누고 각 부문에 대하여 그림 1과 같은 구조로 기술수준을 정의하였다.

또한 본 연구에서는 각 부문별 기술수준과 구분하여, 원자력 발전산업의 기술경쟁력을 따로 정의하였다. 기술경쟁력은 경제성경쟁력, 안전성경쟁력으로 구분하여 다음 절에서 타발전원대비 경쟁력 및 플랜트 수출 경쟁력을 평가하기 위한 변수로 사

용하였다.

3. 시스템 정의

경쟁력이란 상대적인 개념으로서, 국내 원자력 발전산업의 기술경쟁력을 평가하기 위해서는 벤치마킹 대상이 필요하다. 일차적인 벤치마킹 대상으로는 화력, 수력과 같은 국내 타발전산업이 될 수 있고, 이차적인 벤치마킹 대상은 미국, 프랑스 등 해외의 원자력 발전산업이 될 수 있다.

따라서, 국내 원자력 발전산업의 기술경쟁력을 평가하기 위한 모델의 시스템 경계를 국내 전력산업 및 세계 원자력산업으로 정의하였다.

본 SD 모델에서는 원자력 발전산업을 다음과 같이 총 6 부문으로 구분하였다. 이러한 원자력 발전산업의 구분에 있어서 원자력산업실태조사보고서, 산업자원부 원전기술고도화 계획등을 참조하였다.

- 설계 부문
- 기자재 부문
- 운전 부문
- 정비 부문
- 핵연료 부문
- 방사성폐기물 부문

또한 원자력 발전산업의 기술경쟁력 확보 효과를 다음과 같이 크게 4가지로 구분하였다.

- 국내 타발전원 대비 원자력 경쟁력
- 원자력 기술 국산화율
- 기술용역 또는 기자재 수출경쟁력
- 플랜트 수출경쟁력

이와 같은 원자력 발전산업의 기술경쟁력은 원자력 건설 및 운영사업비, 연구비 등에 의하여 영향을 받을 수 있다. 원자력 사업비 항목은 원자력산업실태조사 보고서에 나온 전기사업체 원자력 관련 지출액 항목을 참조하여 다음과 같이 구분하였

다.

- 정책연구비
- 국제공동연구비
- 국내연구비
- 원전사업비
 - 설계비, 시공비
 - 기자재비
 - 원전유지보수비
 - 원전연료비
 - 폐기물처리비

4. 주요인과지도

원자력 발전산업의 기술경쟁력을 평가하기 위한 전체적인 인과지도는 다음과 같다. 연구 및 원전사업으로 인하여 각 부문별 기술수준이 증가하고 이 기술수준에 의하여 1) 타발전원 대비 경쟁력, 2) 국산화율, 3) 기술 및 기자재 수출경쟁력, 4) 플랜트 수출경쟁력 이 증가한다. 이는 궁극적으로 신규원전 건설의 필요성을 증가시켜 연구 및 원전사업을 성장시키는 역할을 하는 양의 피드백 구조를 가진다.

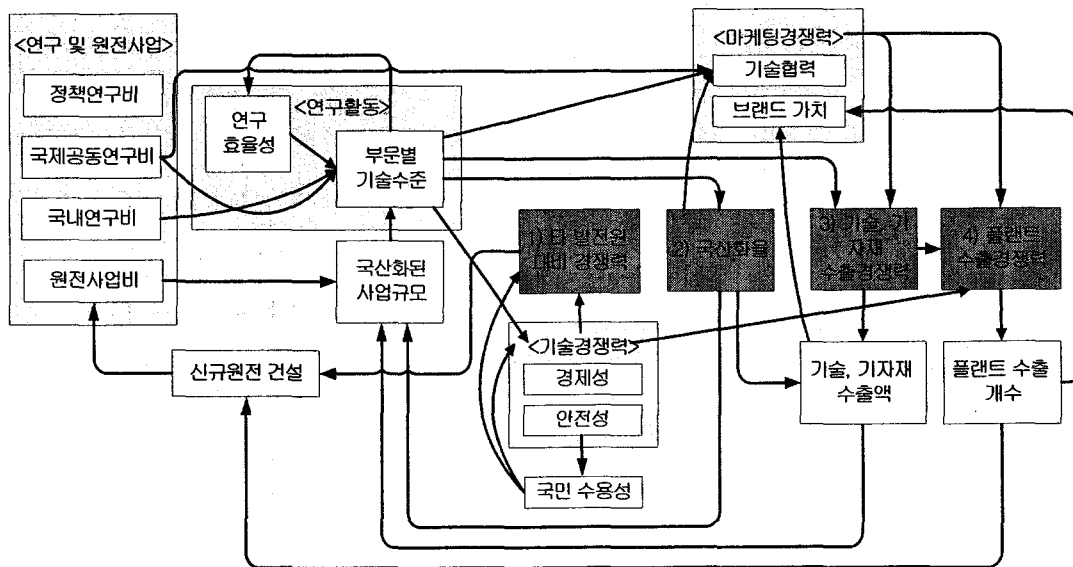


그림 2. 원자력발전산업 기술경쟁력 평가 종합 체계

1) 타발전원 대비 경쟁력

국내 원자력 발전산업이 성장하기 위해서는 1차적으로 국내에서 화력, 수력 등 타 발전원에 대한 경쟁력이 충분히 확보되어야 한다. 현재 2015년까지의 원전 건설 계획이 수립되어 있기는 하지만, 원자력 발전의 국내 타발전원 대비 경쟁력은 직간접적으로 향후 원전 건설 계획에 영향을 미칠 수 있다.

본 모델에서는 타 발전원 대비 경쟁력을 경제성 경쟁력, 안전성 경쟁력, 국민 수용성 경쟁력으로 나누었다. 경제성 경쟁력 지표는 타발전원 대비 발전원가, 안전성 경쟁력은 타발전원 대비 부상자 수 또는 타발전원 대비 환경영향(이산화탄소 배출량 등), 국민 수용성 경쟁력은 원자력을 선호하는 국민 비율 등으로 나타낼 수 있을 것이다.

원자력의 타발전원 대비 경쟁력 평가를 위해서는 설계부문 등의 각 세부 부문별 기술수준 보다는 전체적인 관점에서의 안전성, 경제성, 국민수용성 경쟁력을 평가할 필요가 있다. 따라서 본 모델에서는 각 부문별 기술수준이 원자력 안전성, 경제성, 국민수용성 경쟁력에 미치는 영향을 모델링 하였다.

아래 그림을 보면 연구 및 원전사업은 설계부문, 기자재부문, 운전부문, 정비부문, 핵연료부문, 폐기물부문과 같은 부문별 기술수준에 영향을 주며, 각 부문별 기술수준은 정량적 대리지표로 표현할 수 있는 기술능력에 영향을 준다. 또한 기술능력은 기술경쟁력 Factor에 영향을 주어 최종적으로는 원자력 안전성, 원자력 경제성, 국민 수용성으로 구성되는 타발전원 대비 경쟁력에 영향을 준다.

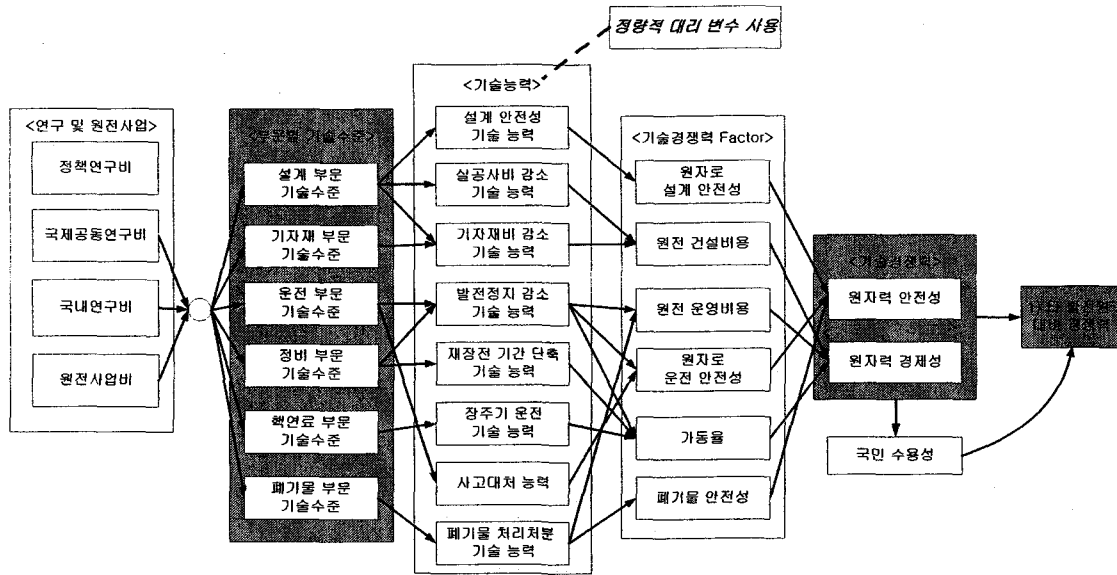


그림 3. 타발전원 대비 경쟁력 평가 종합 체계

각 기술능력들에 대한 정량적 대리 변수들은 그림 4 인과지도의 3번째 열에 나타내었다 (노심손상빈도, MWe당 발전소 실공사 비용...). 추후 이에 대한 자료들을 수집하여 기술능력들을 측정할 예정이다.

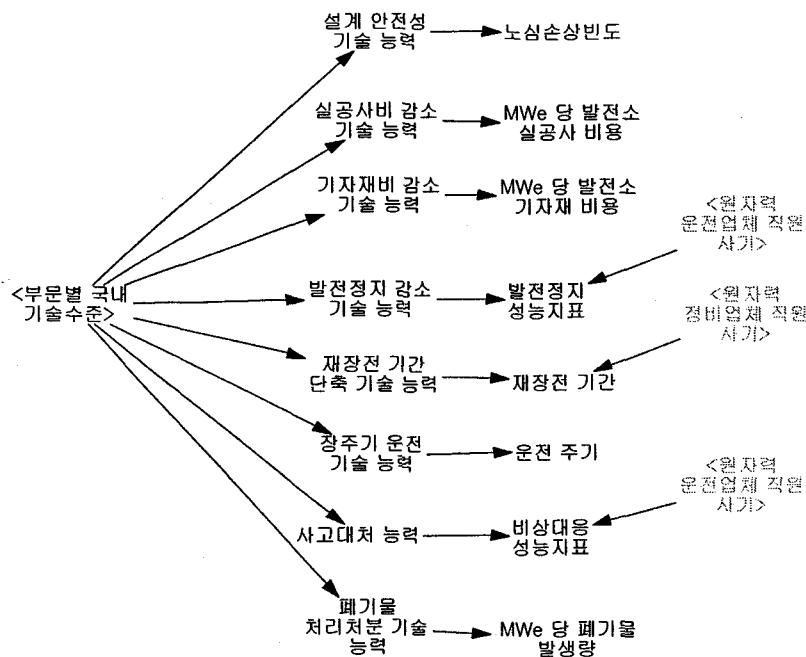


그림 4. 부문별 기술수준에 대한 정량적 대리변수 인과지도

타 발전원 대비 경쟁력은 그림 5 인과지도에 나타낸 바대로 타 발전원 대비 기술 경쟁력과 타 발전원 대비 국민수용성경쟁력으로 나뉜다. 이중 타 발전원 대비 기술 경쟁력은 타 발전원 대비 경제성 경쟁력 및 안전성 경쟁력으로 나뉘어 평가된다.

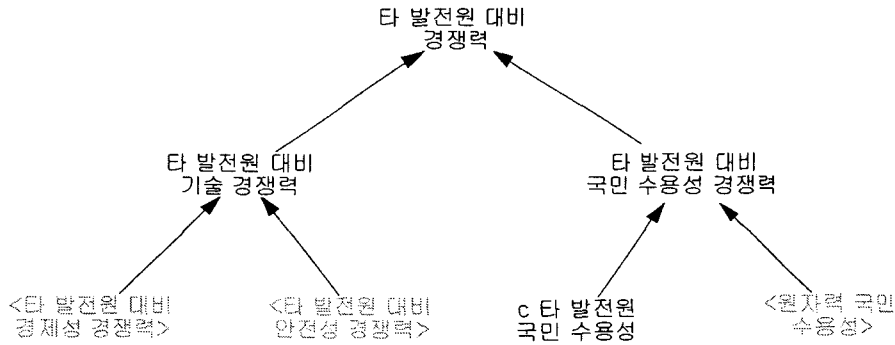


그림 5. 타발전원 대비 경쟁력 인과지도

타 발전원 대비 기술 경쟁력의 첫번째 요소인 경제성 경쟁력은 전력생산 기본단위인 Mwe당 발전비용으로 나타낼 수 있으며, 이는 건설비용에 의한 부분과 운영비용에 의한 부분으로 나뉠 수 있다. 건설비용에는 원전 부지 비용, 실공사 비용, 기자재 비용이 포함되며, 운영비용에는 운영보수비, 방사성폐기물처분비가 포함된다.

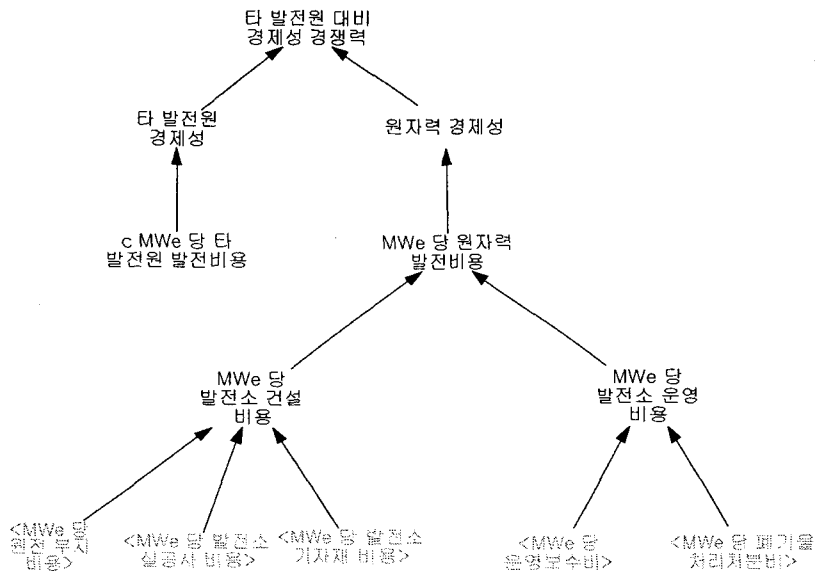


그림 6. 타발전원 대비 경제성 경쟁력 인과지도

타 발전원 대비 기술 경쟁력의 두번째 요소인 안전성 경쟁력은 경제성 경쟁력과 달리 타 발전원과의 직접 비교가 어려운 측면이 있다. 원자력발전의 안전성과 타발전원의 안전성을 비교할 때, 연간 사망자 수를 사용할 수도 있을 것이나 국내 원자력 발전에 의한 사망자가 발생한 적이 없으므로 이러한 척도를 비교에 사용하기는 어려울 것으로 보인다. 잠정적으로는 원자력 안전성을 나타내는데 사용되는 노심손상빈도, 발전정지 수 등의 지표를 사용하기로 하였으나, 추후 다른 지표를 사용할 수도 있다.

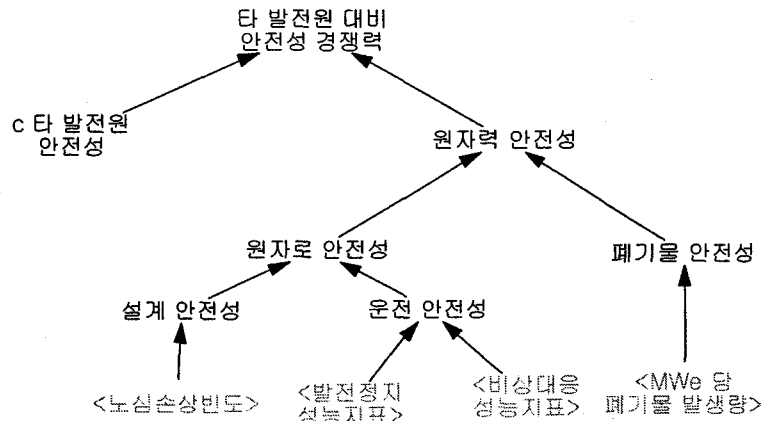


그림 7. 타발전원 대비 안전성 경쟁력 인과지도

마지막으로 타 발전원 대비 경쟁력을 갖추기 위한 요소로 국민 수용성 측면이 있다. 원자력 발전소의 경우 기술적인 안전성 뿐 아니라, 국민에게 인식되는 안전성 수준이 중요한 역할을 할 수 있다. 원자력에 대한 국민 수용성 수준은 원자력의 기술적인 안전성과 국민에 대한 홍보에 의해 영향을 받는다. 또한 원자력에 대한 국민 수용성 수준은 직접적으로 원자력 정책에 영향을 미치기도 하고, 원전 및 폐기물 부지확보 용이성, 원자력 종사자 사기 등에 영향을 주어 원자력 경제성에 영향을 미치기도 한다.

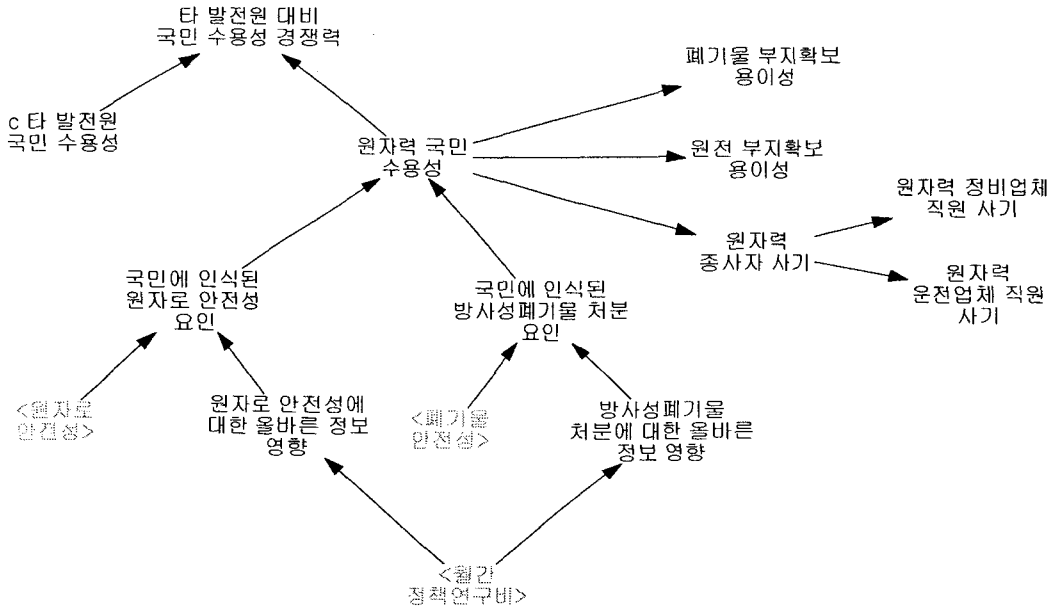


그림 8. 타발전원 대비 국민 수용성 경쟁력 인과지도

원자력의 경제성, 안전성, 국민수용성에 의해 결정된 타발전원 대비 경쟁력은 원자력 건설계획에도 영향을 미칠 수 있다고 가정하였다. 원자력이 타발전원 대비 경쟁력을 확보하게 되면 원자력 발전소가 많이 건설될 가능성이 높아지고 이에 따라 원자력에 대한 투자액이 증가하는 양의 피드백 구조가 형성된다.

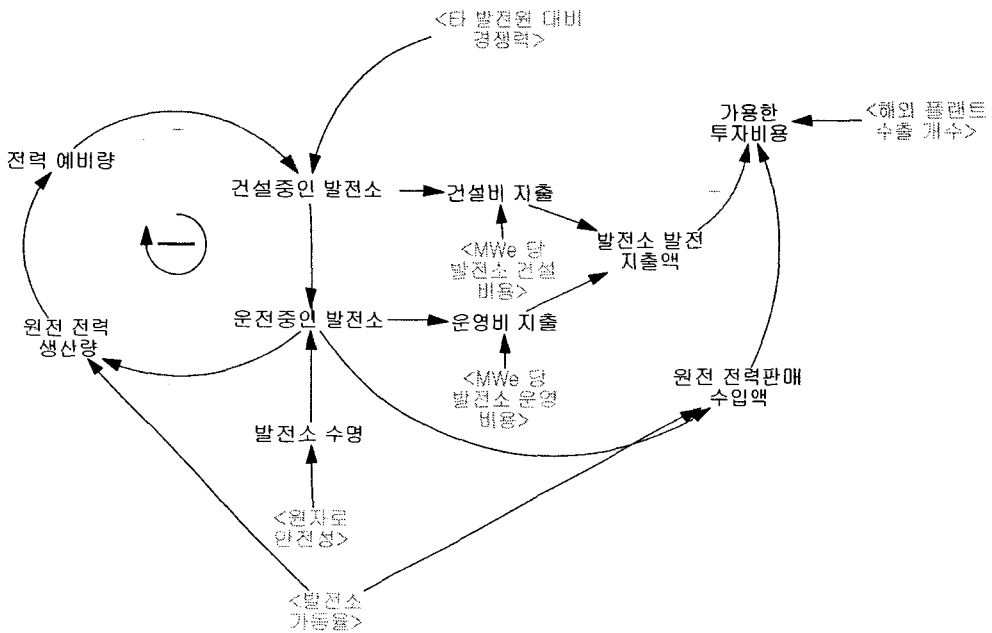


그림 9. 타발전원 대비 경쟁력이 원전 건설에 미치는 영향에 대한 인과지도

2) 국산화율

원자력 기술의 확보를 통하여 원자력 산업의 국산화율이 증가하면 해외로 유출되던 원자력 사업비를 국내로 흡수함으로써 국내 매출을 증대시킬 수 있고, 원자력 기술향상을 위한 투자비를 증대시킬 수 있다. 국산화율은 각 기술부문별로 나타낼 수 있으므로, 타발전원 대비 경쟁력 평가와는 달리 각 기술부문별 기술수준이 직접적으로 부문별 국산화율에 영향을 미치는 것으로 모델링하였다.

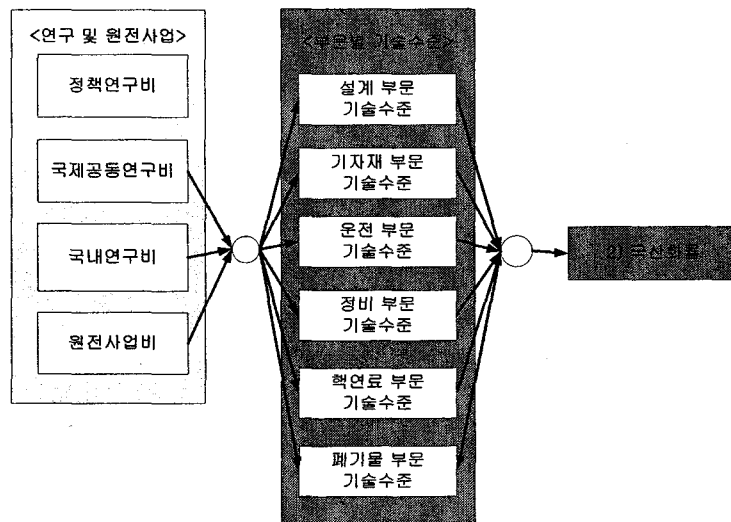


그림 10. 국산화율에 대한 종합 평가 체계

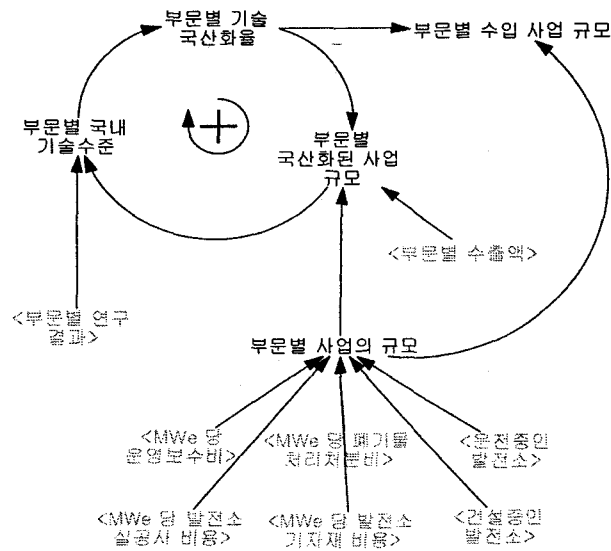


그림 11. 국산화율에 대한 인과지도

3) 기술, 기자재 수출 경쟁력

기술, 기자재 수출 경쟁력에 대한 인과지도는 2) 국산화율과 유사한 인과지도를 가진다. 이는 기술, 기자재 등의 수출은 각 기술부문별로 개별적으로 이루어지는 것으로 생각할 수 있기 때문이다.

기술, 기자재 수출 경쟁력 인과지도가 국산화율에 대한 인과지도와 다른 점은 마케팅 경쟁력 요소가 추가되었다는 것이다. 국내의 원자력 기술을 해외에 수출하기 위해서는 기술적 요소 뿐 아니라 국가간의 기술협력, 수출 경험에 의한 국내 업체의 브랜드 가치 상승 등이 필요하기 때문이다. 기술, 기자재 수출 경쟁력은 국내 원자력 산업의 매출 증대효과 뿐 아니라 수출경험 증가로 인한 국내 업체 브랜드 가치 상승 및 플랜트 수출 가능성 향상을 가져올 수 있다.

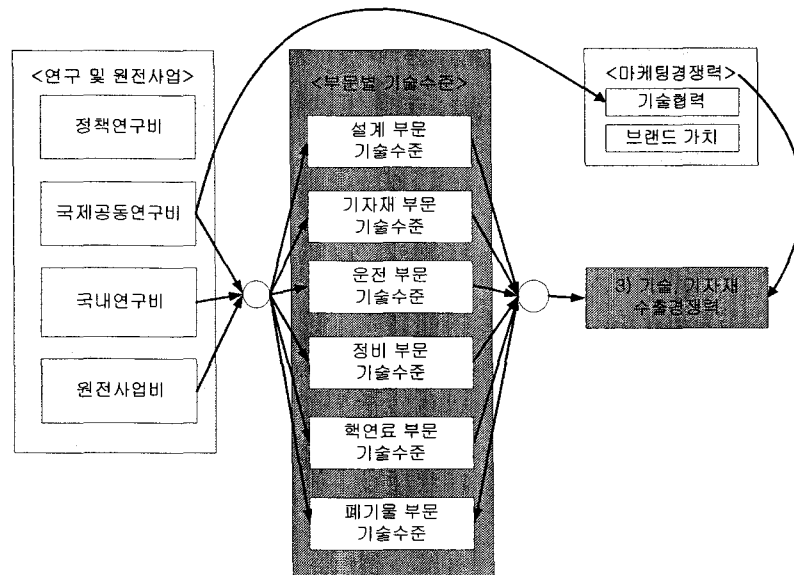


그림 12. 기술, 기자재 수출경쟁력에 대한 종합 평가 체계

그림 13에 기술, 기자재의 부문별 예상 수출액에 대해 작성한 Vensim 인과관계지도를 타내었다. 이와 같이 수출액은 수출시장의 크기와 수출경쟁력에 의해 결정되며, 수출경쟁력은 부문별 기술수준과 마케팅경쟁력에 의해 결정된다. 수출이 증가하면 부문별 기술협력 및 브랜드 가치가 증가하여 마케팅경쟁력이 증가하고, 이로 인해 다시 수출경쟁력이 증가하는 양의 피드백 구조를 가진다.

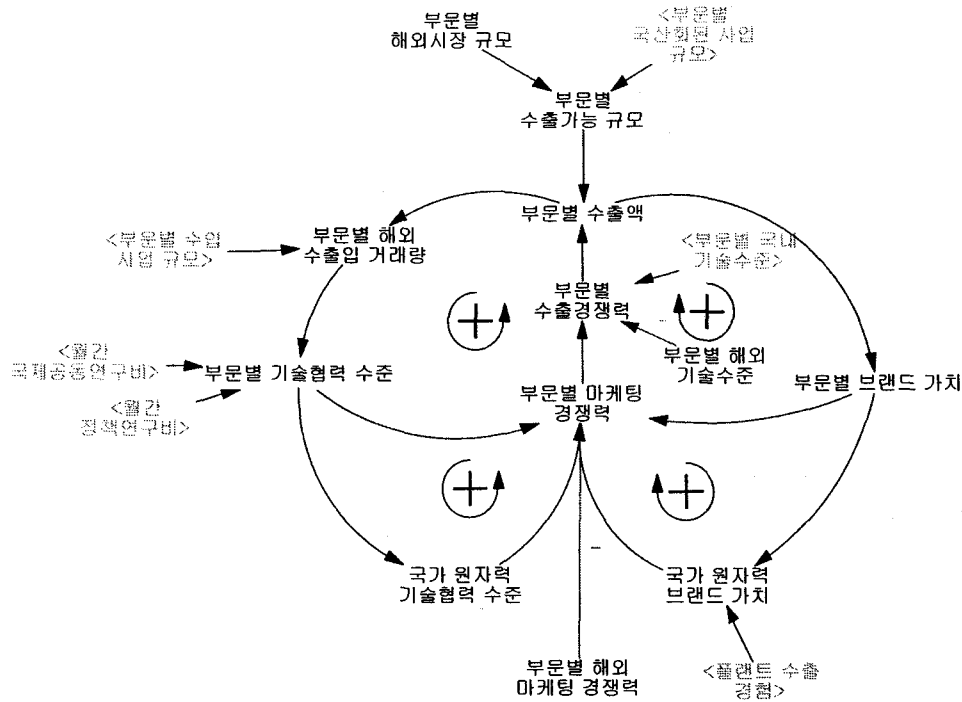


그림 13. 기술, 기자재 수출경쟁력에 대한 인과지도

4) 플랜트 수출 경쟁력

플랜트 수출 경쟁력에 대한 인과지도는 1) 타발전원 대비 경쟁력과 유사한 인과 지도를 가진다. 이는 플랜트 수출 경쟁력을 평가하기 위해서는 설계부문 등의 각 세부 부문별 기술수준 보다는 전체적인 관점에서의 안전성, 경제성 경쟁력을 평가 할 필요가 있기 때문이다.

플랜트 수출 경쟁력 인과지도가 타발전원 대비 경쟁력에 대한 인과지도와 다른 점은 국민 수용성은 제외되고 마케팅경쟁력 요소가 추가되었다는 것이다. 플랜트 수출의 경우 기술 및 기자재 수출의 경우보다 마케팅경쟁력이 더욱 중요하다. 플랜트 수출에는 플랜트 제공업체의 기술수준 뿐 아니라 브랜드 인지도 및 평소의 기술 협력이 주요한 역할을 할 수 있다.

한국형원전의 기술수준이 다른 원전들보다 만약 기술적으로 우수라고 하더라도, 한국의 원전이 해외에 수출된 경험이 없고 국내업체(한국전력)의 브랜드 인지도가 미국의 웨스팅하우스나 프랑스의 프라마툼 등 해외 유명 원자력업체의 브랜드 인지도에 비해 낮다는 것도 제약요소이다.

플랜트 수출의 경우는 이러한 기술적, 마케팅적 요소 뿐 아니라 정치적 요소가 많이 작용하게 되므로 실제로 플랜트 수출의 가능성을 예측한다는 것은 불확실성이 매우 클 수 밖에 없다. 그러나 기술적, 마케팅적 측면만을 고려해서라도 개략적이거나 현재의 플랜트 수출 가능성을 평가해보고 각 전략에 따른 미래의 플랜트 수출 가능성을 예측해보는 것은 나름대로 의미있는 작업이라고 보인다.

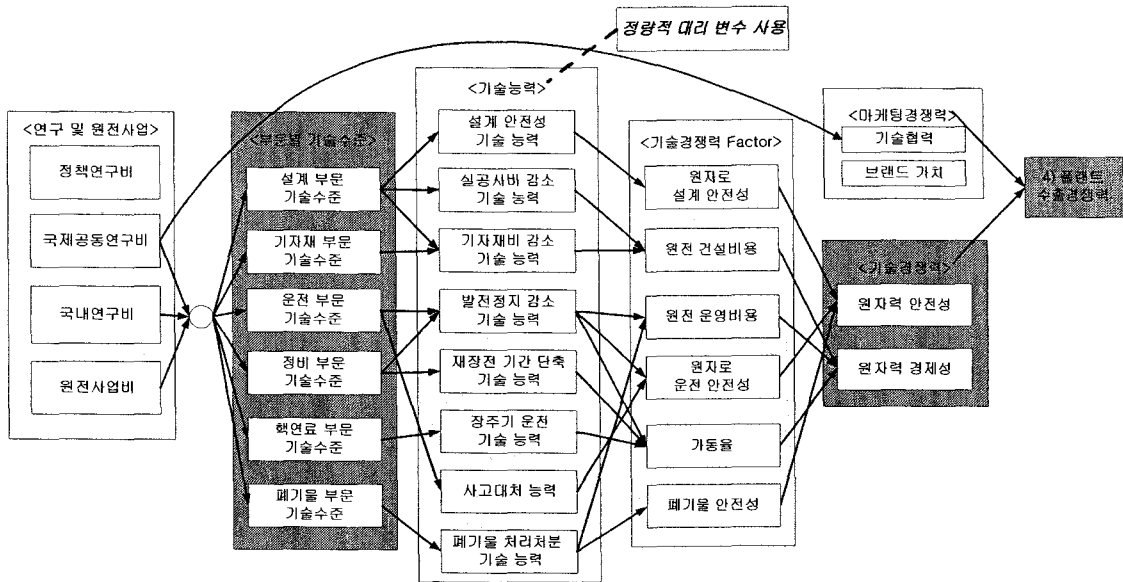


그림 14. 플랜트 수출경쟁력에 대한 종합 평가 체계

플랜트 수출 경쟁력을 평가하기 위해 작성한 인과지도는 그림 15와 같다. 해외에 플랜트를 수출하는데 영향을 미치는 요소는 정치적인 면을 제외하면 플랜트 수출 경험, 국내 원전에 대한 기술권리 비율, 국내 원전의 기술경쟁력, 원자력 마케팅 경쟁력, 기술이전능력, 차관제공능력 등이 있다.

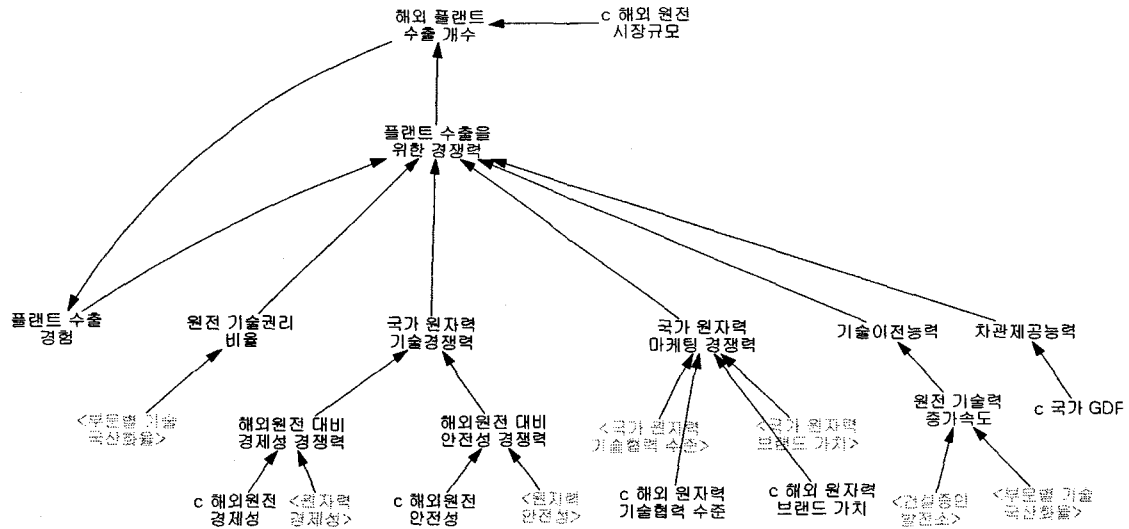


그림 15. 플랜트 수출경쟁력에 대한 인과지도

5) 종합 피드백 고리 예시

타발전원 대비 경쟁력, 국산화율 제고, 기술 및 기자재 수출경쟁력, 플랜트 수출 경쟁력을 포함한 인과지도들이 연결되면 수많은 피드백 고리들이 나타난다. 이러한 전체적인 피드백 고리들 중 하나를 예시하면 아래 그림과 같다.

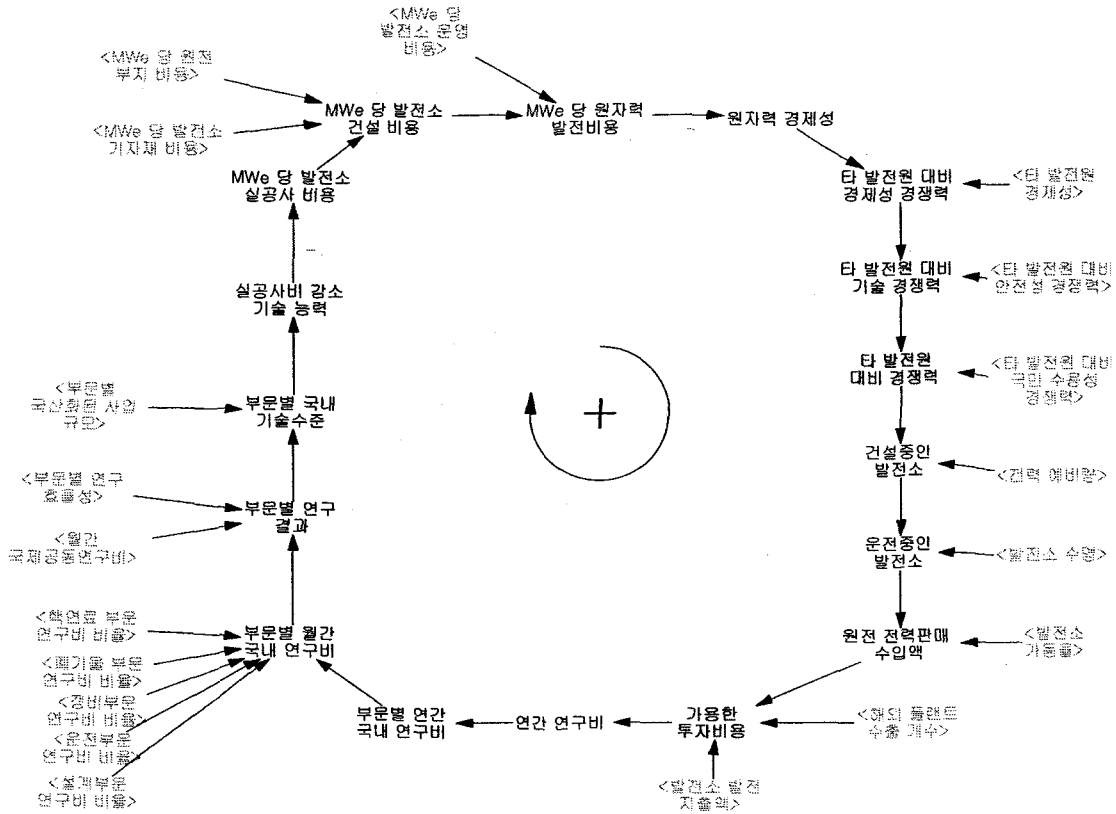


그림 16. 피드백 고리 인과지도 예

위의 그림을 오른쪽 부분에서 시작하여 설명하면, 타 발전원 대비 경쟁력 증가로 인해 건설 및 운전 중 발전소가 증가하고 가용한 투자비용이 증가하여 연구비가 증가하고 이로 인해 기술수준이 증가한다. 기술수준의 향상은 실공사비 감소 기술능력에 영향을 주어 결국 원자력 경제성을 향상시켜 타 발전원 대비 경쟁력을 향상시키게 된다.

5. 결론 및 시사점

본 연구에서는 원자력 발전산업의 기술경쟁력을 평가하고 예측하기 위한 정성적 인과지도를 개발하였다. 원자력 발전의 기술경쟁력에 의해 나타나는 효과를 타발전원대비 경쟁력, 국산화율, 기술 및 기자재 수출경쟁력, 플랜트 수출경쟁력으로 설정하고 이들의 상호연관관계들을 모델링하였다.

정성적 인과관계지도 모델링 과정을 통해 얻은 시사점 중 첫번째는 원전 기술수준의 향상을 위해서는 1차적으로 원자력의 타 발전원 대비 경쟁력 확보가 필요하다는 것이다. 이는 타 발전원 대비 경쟁력 확보를 통해 신규원전 건설의 확대 가능성을 높일 수 있기 때문이다. 지금까지 국내 원자력 기술수준이 향상된데에는 지속적인 신규원전 건설에 영향을 입은 바가 컸다. 앞으로도 원자력 기술수준을 향상시키기 위해서는 지속적인 신규원전 건설이 이루어져야 할 것이며, 이를 위해서는 원자력발전이 타 발전원 대비 경제성 경쟁력 뿐 아니라 안전성 및 국민수용성 경쟁력을 갖추도록 해야할 것이다. 타 발전원 대비 경쟁력 확보로 인한 신규원전건설 확대는 국산화, 기술 및 기자재 수출, 플랜트 수출 가능성 확대를 위해서도 필수적인 요소이다.

두번째 시사점은 수출 향상을 위한 국산화 전략수립이 매우 중요하다는 것이다. 일반적으로는 국산화율 향상은 수출액 향상에 양(+)의 영향을 주지만, 국산화율 향상이 기술협력 수준의 장애 요소가 되면서 수출액 향상에 음(-)의 영향을 주는 경로도 존재한다.

국산화율 향상이 수출액 향상에 양(+)의 영향을 주는 경로 중 하나는 다음과 같다.

부문별 국산화율 →+ 부문별 국산화된 사업규모 →+ 부문별 수출가능 사업규모
→+ 부문별 수출액

반면 국산화율 향상이 수출액 향상에 음(-)의 영향을 주는 경로 중 하나는 다음과 같다.

부문별 국산화율 →- 부문별 수입 사업규모 →+ 부문별 기술협력 수준 →+ 부문별 마케팅 경쟁력 →+ 부문별 수출 경쟁력 →+ 부문별 수출액

한국은 상당부분 원자력 기술을 미국의 원자력 업체에서 도입한 부분이 많으므로, 기술 수출 시 미국의 사전동의를 얻어야 하는 부분이 많아 이것이 수출통제요소가 되기도 한다. 반면, 한국의 원전시장은 미국을 비롯한 선진국의 원자력 메이커들에게는 매력적 대상이므로 이러한 점을 최대한 활용하여 국내 원전 사업을 선진국의 수출통제 수준 완화와 연계시키는 전략이 필요하다. 즉 원자력 기술 100% 국산화보다는 일정부분은 수입하면서 국내 원자력 기술의 해외진출 가능성을 높이는 것이 필요할 것으로 보인다.

마지막 시사점으로는 원자력 발전소를 해외로 수출하기 위해서는 국내 원자력 산업의 브랜드 가치를 높이기 위한 노력이 필요하다는 것이다. 해외 선진 원자력업체들의 경우 설계부터 주요설비 제작까지 동일 업체에서 수행하지만, 국내의 경우 설계는 한국전력기술, 주요설비는 두산중공업 등으로 메이커가 일원화되어있지 않다. 일원화되지 않은 메이커는 수출의 장애요소가 될 수 있으며, 따라서 수출 시에는 이 업체들이 일원화된 메이커로 진출하는 전략이 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 정성적인 SD 인과관계지도만을 그렸지만, 향후 본 논문에서 소개된 인과지도를 바탕으로 하여 Stock Flow Diagram 을 작성하고 정량적인 결과를 도출할 예정이다.

[참고문헌]

원자력산업회의, 원자력산업실태조사

산업자원부, 원전기술고도화계획

한국전력공사, 원전 기자재 국산화의 효율적 추진방안에 대한 연구, 2000

한국수력원자력, 우리나라 원자력산업의 경쟁력 제고를 통한 해외진출 방안에 대한 연구, 2001