

# 不確實성을 고려한 電力部門의 設備投資에 관한 研究

## (A Study on Electricity Generating Capacity Investment under Uncertainty)

南 輔 祐\*

### 目 次

- I . 序 論
- II . 期待負荷曲線 方法
- III . 韓國의 電力部門 設備投資 事例研究
- IV . 結 論

### I . 序 論

1970년대의 石油波動이후 석유가격 상승에 대처하기 위하여 많은 電力會社들이 油類發電 設備投資에서 原子力이나 有煤炭火力 發電所로 전환하였다. 이러한 전환에는 막대한 資本과 (원자력 발전소 하나의 건설비가 3조 4천억원에 달함) 時間이 (건설기간과 준비기간이 10년 이상임) 필요하며 투자의 危險이 크기 때문에 不確實성을 적절히 고려할 필요성이 높아졌다. 電力部門의 設備投資에서 불확실성의 영향은 특히 石油輸入 개발도상국에서 현저히 나타났다.

韓國의 경우는 1977년도에 2001년까지의 설비투자계획을 작성하였는데 연간 25%의 경제성장과 脫石油政策의 일환으로 44기가 넘는 원자력 발전소의 導入이 계획되었다. 그러나 현재에는 1977년 계획의 34%밖에 되지 않는 15기 이하의 원자력이 導入될 展望이다. 樂觀的인 설비투자계획의 조급한 적용과 豫測值만큼 需要가 성장하지 못한점, 그리고 긴 建設工期가 원인인 것으로 분석되는 현재 70%가 (過剩投資費用이 약 50억달러에 달함) 넘는 設備豫備率은 국가 경제에 커다란 損失을 초래 하였다. 不確實성에 對處하기 위하여는 정확한 豫測이 무엇보다도 필요하지만 長期的인 예측의 어려움을 감안할때 예측치를 활용한 最善의 投資方法을 모색하는 것도 중요한 문제가 된다.

\* 本 研究所 研究員, 社會科學大學 會計學科 助教授 (經營科學博士), 會計情報系 스태프

不確實성을 고려한 電力部門의 設備投資問題는 비단 한국의 경우만이 아니어서 각 국에 서 많이 연구되고 있다.<sup>1)</sup> Henault(1970), Booth(1972), Louveaux(1980), Borison (1982), Dapkus and Bowe(1984), Stremel(1980) 등이 전통적인 狀況計劃 方法을 제 시하고 있지만 시간이 지남에 따라 새로운 情報가 追加 되어야하고 이에따라 투자 계획이 修正되어야 한다는 점과 實務的으로 적용하기 어렵다는 점에서 이론 연구에 그치고 있다. 이러한 상황계획 방법과는 달리 총 期待費用을 最小化 할 수 있는 期待負荷曲線 방법이 Murphy(1982)에 의하여 제시되었지만 電力需要를 階段式으로 假定하였고 발전기의 事故 停止確率을 고려하지 않았으며 부자의 動的效果를 고려하지 않았다는 점에서 適用이 어렵 다.<sup>2)</sup> 본 연구는 非線型的 期待負荷持續曲線과 事故停止確率및 動的特性을 고려한 不確實 性下的 設備投資模型을 제시하고 한국의 사례연구 결과를 제시한다.

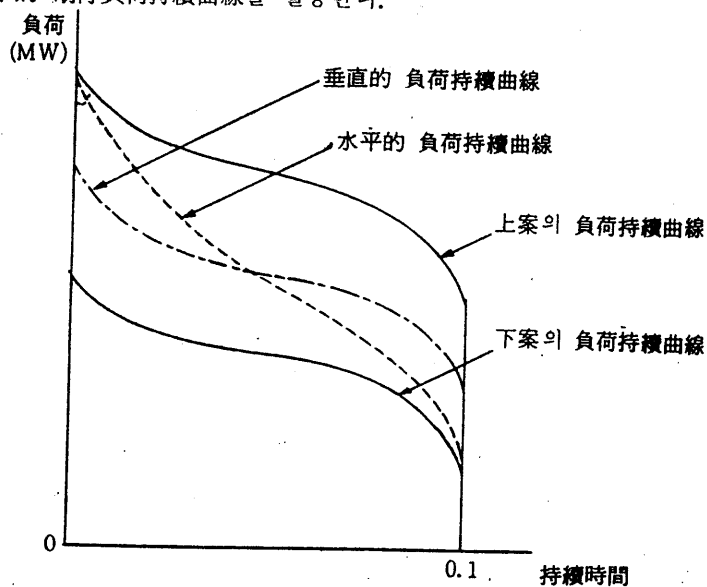
전력부문의 설비투자문제는 전력이라는 特殊性 때문에 매우 복잡하게 되는데 첫째로, 발전설비의 建設期間과 運轉期間을 합하면 40년 이상이 되므로 어떤 발전설비를 선택할 것인가에는 기존설비 뿐만 아니라 향후에 추가되는 설비들의 동적특성이 감안 되어야하고, 둘째로 전력수요는 매순간 변화하며 전력은 貯藏이 어렵기 때문에 수요의 표현에 非線型 특성이 내포되며, 셋째로 수십만개의 부품으로 구성되는 발전설비는 必然的으로 事故停止 가 일어나기 때문에 이러한 사고정지확율을 감안한 추계적 특성이 고려되어야 한다. 특히 동적특성과 관련하여 불확실성이 대두되고 있어 설비투자문제 뿐만 아니라 經營科學의 문 제에서 가장 복잡한 양상을 띄고 있다. 그럼에도 불구하고 전력부문의 설비투자에는 막대 한 자금이 소요되고 있어 最適의 投資方法에 대한 연구는 현실적으로 매우 필요한 실정이다.

## II . 期待負荷曲線 方法

이론적 전개를 하기전에 우선 본 연구에서 가장 중심적 역할을 하는 水平的 期待負荷曲 線의 개념을 소개하고자 한다. 전력수요를 표시하는 한가지 방법은 각 時點에서의 負荷를

- 
- 1) 남보우, 불확실성을 고려한 전원개발계획에 관한 연구(박사학위논문), 한국과학기술 원, 1987
  - 2) Murphy, F.H., Sen, S., and Soyster, A.L., "Electricity Utility Capacity Ex- pansion Planning with Uncerton Load Porecorts," AIIE Transactions, 14,1982.

표시하여 實時間 負荷曲線으로 표시하는 것이다. 설비투자계획에서 주로 사용되는 다른 한가지 표현방법은 실시간 부하를 크기의 순으로 정리한 負荷持續曲線으로 표시하는 것이다.<sup>3)</sup> 이러한 상황에서 전력수요의 불확실성은 出現確率이 推定된 몇가지 부하지속곡선으로 표시 될 수 있다. 예를 들어 [그림 1]과 같이 두가지 부하지속곡선이 있다면 期待負荷曲線은 두가지로 추정될 수 있는데 하나는 각 時點에서 부하의 크기를 加重平均하는 垂直的 期待值이고 다른 하나는 각 부하의 수준에서 각 부하의 持續值를 평균하는 水平的 負荷持續곡선이다. 비록 垂直的 負荷持續曲線이 계획에서 자주 사용되고 있지만 본 연구에서는 水平的 期待負荷持續曲線을 활용한다.



[그림 1]

水平的 負荷持續曲線의 概念

근본적으로 본 연구의 하나의 결과는 水平的 期待負荷持續曲線으로 전력수요의 불확실성을 統合하며 이를 사용한 設備投資計劃은 총 期待費用을 最小化 하는 방법임을 提示한 것이다. 이러한 결과의 중요성은 일단 수요의 시나리오가 작성되면 수평적 기대부하곡선을 推定하고 기존의 計劃模型에 입력하여 총 기대비용을 최소화하는 계획을 작성할 수 있다는 것이다.

3) Ahn, B.H. and Nam, B.W., "Multiperiod Optimal Power Plant Mix Under Demand Uncertainty," Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol. 31, No. 3, September 1988.

産業研究

이론적인 전개를 위하여 본 연구에서는 모두 火力로 구성된 전력시스템을 가정하여 定態인 모형에서 수요의 불확실성에 대한 결론을 유도하고자 한다. 이러한 결과는 動態인 모형에서도 같은 결과를 갖는다. 우선 전력수요의 불확실성을 고려하여 期待 총비용을 최소화하는 設備投資模型은  $i$ 를 발전소 운전順位,  $I$ 를 총 발전소의 수,  $c_i$ 를  $i$  발전소의 단위설비당 固定費,  $x_i$ 를 발전소  $i$ 의 시설규모,  $f_i$ 를 발전소  $i$ 의 단위 발전량당 變動費,  $P_i$ 를 발전소  $i$ 의 가동율,  $U_i$ 를 발전소  $i$ 까지를 포함한 累積設備容量,  $G_i(\cdot)$ 를 부하지속곡선,  $G_i(\cdot)$ 를  $i$  발전소의 等價負荷持續曲線,  $S$ 를 가능설비의 組合,  $v$ 를 供給中斷費用이라 할때 다음과 같이 구성된다.

$$(P_1) \min E \left[ \sum_{i=1}^I (c_i x_i + f_i p_i) \int_{u_{i-1}}^{u_i} G_i(Q) dQ + v \int_{u_I}^{\infty} G_{I+1}(Q) dQ \right]$$

$$\text{s. t. } x \in S$$

$$u_i = u_{i-1} + x_i, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad u_0 = 0,$$

$$G_{i+1}(Q) = p_i G_i(Q) + (1-p_i) G_i(Q - x_i), \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

( $P_1$ )에서  $E[\cdot]$ 는 期待值를 나타내며  $G_i(\cdot)$ 가 불확실한 전력수요를 나타내는 확률 변수이다. ( $P_1$ )의 確率的模型은 確率變數를 기대치로 대치한 確定的模型으로 전환이 가능하며 이를 요약한 것이 다음의 定理이다.

定理 1 : 각 부하의 수준  $Q$ 에서 불확실한 부하지속곡선  $G_i(Q)$ 가  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_K$ 의 확률을 갖는  $K$ 개의 부하지속곡선  $g_1(Q), g_2(Q), \dots, g_K(Q)$ 로 주어졌다고 하자. 그러면 確率的模型( $P_1$ )은 부하지속곡선  $E[G_i(Q)]$ 를 갖는 다음과 같은 確定的模型으로 전환된다.

$$(P_2) \min_x \sum_{i=1}^I (c_i x_i + f_i p_i) \int_{u_{i-1}}^{u_i} E[G_i(Q)] dQ + v \int_{u_I}^{\infty} E[G_{I+1}(Q)] dQ$$

$$\text{s. t. } x \in S$$

$$u_i = u_{i-1} + x_i, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad u_0 = 0,$$

$$G_{i+1}(Q) = p_i G_i(Q) + (1-p_i) G_i(Q - x_i), \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

證明,  $G_1(Q)$ 가 확률변수이므로  $G_i(Q)$ ,  $i = 2, 3, \dots, I+1$ , 도 확률변수이며 이는  $g_1^1(Q), \dots, g_i^k(Q)$ 로 표시되며 각각  $g_i^k(Q)$ 는 모든  $k$ 에 대하여 다음의 循環式에 의하여 표시된다.

$$g_{i+1}^k(Q) = p_i g_i^k(Q) + (1-p_i) g_i^k(Q - x_i)$$

$g_i^k(Q)$ 의 出現確率이  $\pi_k$ 이므로 다음식이 성립한다.

$$E[G(Q)] = \sum_{k=1}^K \pi_k g_i^k(Q)$$

어떤 임의의  $x$ 에 대하여  $u_i$ 는 유일하게 결정되므로 확률변수는 목적함수에만 나타나게 되고 기대치의 線型聯算作用을 적용하면 目的函數는 다음과 같이된다.

$$\begin{aligned} & E \left[ \sum_{i=1}^I (c_i x_i + f_i p_i) \int_{u_{i-1}}^{u_i} G_i(Q) dQ + v \int_{u_I}^{\infty} G_{I+1}(Q) dQ \right] \\ &= \sum_{i=1}^I (c_i x_i + f_i p_i) \sum_{k=1}^K \pi_k \int_{u_{i-1}}^{u_i} g_i^k(Q) dQ + v \sum_{k=1}^K \pi_k \int_{u_I}^{\infty} g_{I+1}^k(Q) dQ \\ &= \sum_{i=1}^I (c_i x_i + f_i p_i) \sum_{k=1}^K \pi_k \int_{u_{i-1}}^{u_i} g_i^k(Q) dQ + v \sum_{k=1}^K \pi_k \int_{u_I}^{\infty} g_{I+1}^k(Q) dQ \\ &= \sum_{i=1}^I (c_i x_i + f_i p_i) \int_{u_{i-1}}^{u_i} E[G_i(Q)] dQ + v \int_{u_I}^{\infty} E[G_{I+1}(Q)] dQ \end{aligned}$$

또한  $E[G_i(Q)]$ ,  $i = 2, \dots, I+1$ , 은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} E[G_{i+1}(Q)] &= \sum_{k=1}^K \pi_k g_{i+1}^k(Q) \\ &= \sum_{k=1}^K \pi_k (p_i g_i^k(Q) + (1-p_i) g_i^k(Q - x_i)) \\ &= p_i E[G_i(Q)] + (1-p_i) E[G_i(Q - x_i)] \end{aligned}$$

정리 1의 중요성은 전력수요의 불확실성을 고려한 기대 최소비용의 설비투자 방법은 確率的問題를 풀지않고도 전력수요의 水平的 期待負荷持續曲線을 전력수요 자료로 사용한 確定的模型으로 해결이 가능하다는 것이다. 이러한 결과는 기존연구에서 전력수요의 자료를 계단식의 線型으로 가정하고, 事故停止를 감안하지 않은 결과를 한단계 확장한 것이다. 특히 기대부하지속곡선에서 尖頭負荷는 전력수요의 上案과 비슷하고 基低負荷는 下案과 비슷하게 나타남으로써 초기투자가 큰 설비는 過剩投資의 위험을 줄이기 위하여 안전하게 투자하고 건설공기가 짧고 초기투자가 적은 설비로 불확실성에 대처하게 하는 작용을 한다.

### Ⅲ . 韓國의 電力部門 設備投資 事例研究

지난 몇년간 電力部門에의 投資額은 製造部門의 總投資額과 맞먹는 것이었으며 公共部門 資本投資額의 40% 이상을 차지하였다.<sup>4)</sup> 韓國電力은 국제적 수준에서 비교해 볼 때 높은 勞動生產性, 농촌의 電力化 사업의 완료 등에서 能率的으로 운영되고 있으나 이러한 높은 技術的 効率이 높은 經濟的 効率과 최적의 資源配分을 의미하지는 못한다. 전력 부문에서의 효율이란 무엇보다도 새로운 자본의 효율적 사용(즉, 올바른 投資選擇)을 의미하며 기존 발전소 및 시설의 효율적 이용은 次善의 문제가 되는 것이다. 신규 발전소의 건설에는 2 - 10년이 소요되고 일단 건설한 발전소는 25 - 40년 정도가 운전된다는 점을 감안하면 올바른 투자 선택에서 가장 문제가 되는것은 不確實性이다. 그 이유는 意思決定時點에서 30 - 40년후의 電力需要, 燃料價格등을 예측하기가 어려우며 특히 현실은 예측된 결과와는 상이하게 변할 수 있어서 어떤 시점에서 최적의 의사결정은 미래에는 최악의 의사결정이 될 수도 있기 때문이다.

본 연구에서는 電力需要의 불확실성 및 燃料價格과 建設費用의 불확실성하에서 한국의 전력부문 투자의 戰略을 추출한다. 수요의 불확실성은 기대부하곡선 방법을 적용하여 動的計劃法과 시뮬레이션 방법을 결합한 컴퓨터 모형인 WASP<sup>5)</sup>를 활용하였으며 경제변수의 불확실성은 전력부문 投資平價 電算模型인 KEPAS<sup>6)</sup>를 활용하였다. 기본자료로는

4) World Bank, Republic of Korea Energy Sector Issues, 1984.

5) Wein Automatic System Planning Package.

6) KEPCO Expansion Planning Analysis System.

不確實性を 고려한 電力部門의 設備投資에 관한 研究

투자모형입력자료 7), 1986년 전력수요시나리오 8), 1986년에 예측한 建設單價와 燃料價格 시나리오 9) 를 활용하였다.

<표 1>은 割引率 7%에서 각 전력수요 시나리오에 대한 최적의 선택과 수요의 불확실성을 고려한 期待需要下에서의 최적 신규 발전소 건설이 요약되어 있다. 원자력 발전소의 건설공기가 8년이고 유연탄 발전소의 건설공기가 5년인 것을 감안하면 基準案의 경우(수요의 불확실성을 고려하지 않은 경우 보통 기준안의 결과에 의하여 계획을 작성함) 3기의 유연탄 화력과 2기의 원자력을 착공하는 것이 최적인 것으로 나타나지만 전력수요의 불확실성을 감안한 경우 5기의 유연탄과 1기의 원자력을 착공하는 것이 최적인 것으로 나타난다. 이는 총 신규 설비용량은 3,300MW 와 3,400MW 로 거의 동일하지만 수요의 불확실성을 감안할 때 1기의 원자력대신에 유연탄 발전소 2기를 선택하는 것이 유리하게 되어 불확실성하에서는 초기투자가 크고 운전비용이 적게드는 원자력이 불리하다는 것을 나타낸다. 또한 전력수요의 불확실성을 고려할때 1995년과 1996년의 원자력의 신규 건설 수준은 전력수요의 下案 시나리오와 동일하여 基準案의 경우보다 1기, 下案의 경우보다 2기가 적게된다. 이러한 결과는 불확실한 수요에 안전하게 대처하기 위하여는 원자력의 1 - 2기정도 줄여야 함을 의미한다.

7) 韓國電力公社, 電源開發計劃을 위한 入力資料, 1986

8) 動力資源部, 長期電源開發計劃, 1986

基準案의 경우 1986년부터 1996년까지 7%의 GNP 성장율을 가정하고 上案의 경우 7.5%, 下案의 경우 6.5%를 가정하고 전력수요 예측

9) 韓國科學技術院, 원자력과 유연탄발전소의 경제성 비교, Report No. KRC-84E-T10, 1986

産業研究

<표 1>

최적 설비투자계획

단위 : 신규건설 기수

년 도	下案需要		基準案需要		上案需要		不確實性考慮	
	C 500	N 900	C 500	N 900	C 500	N 900	C 500	N 900
1992	1	0	3	0	5	0	5	0
1993	2	0	3	0	4	0	4	0
1994	3	0	4	0	4	0	4	0
1995	1	1	0	2	0	2	2	1
1996	1	1	1	1	0	2	2	1

다음으로는 경제적인 변수의 불확실성을 고려하여 장기적으로 신규 基底負荷 발전소를 어떻게 선택하는 것이 좋은지에 대한 분석결과를 <표 2>에 나타냈다. <표 2>에서는 신규 기저부하 발전소를 모두 석탄으로 하는 경우와 50% - 50%로 하는 경우, 모두 원자력으로 충당하는 경우에 대하여 총비용을 계산하였다. 경제 변수가 현실점에서 예측한 결과와 같이 나타나는 경우 적극적인 원자력도입 계획은 6억달러의 추가비용이 발생하며 이자율을 고려한 竣工時點인 1995년의 비용으로는 18억달러의 追加費用이 발생하는 것으로 분석된다. 여러가지 경제 변수의 시나리오에 대하여 계산한 결과 50% - 50% 대안은 전부 석탄으로 충당하는 경우보다 약간의 비용이 크게 되지만 에너지원의 多樣化등

<표 2>

경제변수의 불확실성하에서 투자대안 분석

단위 : 백만달러

경제변수 불확실성	石炭爲主	混合 (50% - 50%)	原子力爲主
基準案	30,619	30,774	31,217
割引率 10%	44,031	44,181	44,632
7%	69,399	69,329	69,505
건설비 下案	28,101	28,201	28,521
上案	34,158	34,832	36,485
핵연료비 下案	29,938	30,024	30,314
上案	31,092	31,290	31,838
석탄가격 下案	29,527	29,845	30,571
上案	31,985	31,919	32,006



의 차원에서 바람직한 것으로 나타나서 현재의 원자력위주의 신규기저부하용 발전소 건설 정책의 再考가 필요한 것으로 분석된다.

최적의 설비투자를 위하여 본 사례연구에서는 환경요인과 安全度에 대한 불확실성, 여론의 불확실성, 新技術의 發展, 타부분과의 관련, 정치적인 문제, 재무부담, 立地등의 불확실성을 고려하지는 못하였지만 미시경제적인 관점에서 두가지 결론에 도달할 수 있다.

첫째, 수요의 불확실성에 대처하기 위하여 초기투자가 크고 건설공기가 긴 설비는 과잉투자의 위험을 줄이기 위하여 下案의 전력수요 예측치에 의하여 계획되어야 하는 것으로 나타난다. 즉, 초기투자가 큰 원자력보다는 연료비는 많이 들지만 초기투자가 작은 유연탄화력이 수요의 불확실성하에서는 유리하다. 둘째, 경제변수의 불확실성을 감안하면 설비투자에서 分散投資가 바람직한 것으로 나타난다. 즉, 원자력이나 유연탄 일변도의 투자보다는 發電源의 多樣化가 필요하다.

#### IV . 結 論

본 연구에서는 불확실성을 고려한 전력부문의 설비투자방법으로 期待費用의 최소화방법을 제시하였다. 水平的 기대부하지속곡선을 사용한 확정적 모형으로 설비투자문제를 해결할 수 있다는 것을 보였으며 이는 기존연구에서 다루지 못한 비선형 부하곡선, 발전소의 事故停止確率問題를 포함하였다. 논리의 흐름을 명확히 하기 위하여 定態的인 방법으로 확률적모형이 確定的模型으로 전환됨을 보였으나 動態的인 모형에서도 이러한 결과는 쉽게 유도될 수 있다. 그러나 본 연구에서 채택한 기대비용의 최소화는 投資의 危險度를 다루지 못함으로써 전력부문의 투자규모를 고려할 때 위험도를 고려한 투자대안의 선택방법에 대한 연구는 향후의 중요한 연구과제가 될 것이다.

한국의 사례연구에서 전력수요의 불확실성과 경제변수의 불확실성에 대한 분석결과 원자력발전소의 消極的 導入과 發電源의 多樣化가 바람직한 것으로 나타났다. 그러나 전력수요나, 경제변수의 불확실성 이외에도 환경및 공해, 안전도, 공급가능성, 입지, 정치, 사회적인 여론, 규제등의 무수한 불확실성이 설비투자에 고려되어야 한다는 점에서 보다 深奧한 연구가 요구된다 하겠다.

參 考 文 獻

1. 南輔祐, 不確實性を 고려한 電源開發計劃에 관한 研究 (博士學位論文), 韓國科學技術院, 1987.
2. 動力資源部, 長期電源開發計劃, 1986.
3. 韓國科學技術院, 原子力과 有煤炭發電所의 經濟性比較, Report No. KRC-84E-T10, 1986.
4. 韓國電力公社, 電源開發計劃을 위한 入力資料, 1985.
5. Ahn, B. H. and Nam, B. W., "Using Expected Load Curves in Capacity Expansion Planning under Uncertainty: Methodological Review of Korean Experience," *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, Vol. 3, No. 2, 1986.
6. Ahn, B. H. and Nam, B. W., "Multiperiod Optimal Power Plant Mix under Demand Uncertainty," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 31, No. 3, 1988.
7. Booth, R. R., "Optimal Generation Planning Considering Uncertainty," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-91*, 1972.
8. Borison, A. B., *Optimal Electric Utility Generation Expansion Under Uncertainty*, Ph. D dissertation, Department of Engineering-Economics Systems, Stanford University, 1982.
9. Cazalet, E. G., Clark, C. E. and Keelin, T. W., *Costs and Benefits of Over/Under Capacity in Electric Power System Planning*, Decison Focus, Inc. (EPRI Report EA-927), 1978.
10. Dapkus, W. D. and Bowe, T. R., "Planning for New Electric Generation Technologies: A Stochastic Dynamic Programming Approach," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-103*, 1984.
11. Henault, P. H., Eastvedt, R. B., Peschon, J. and Hajdu, L. P., "Power System Long-Term Planning in the Presence of Uncertainty," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-80*, 1970.
12. Jenkins, R. T and Joy, D.S., *Wiem Automatic System Planning Package (WASP) - An Electric Utility Optimal Generation Expansion Planning Computer Coed*, Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL-4945, 1974.
13. Louveaux, F. V., "A Solution Method for Multistage Stochastic Programs with Recourse with Application to an Energy Investment Problem," *Operations Research* 28, 1980.
14. Murphy, F. H., Sen, S. and Soyster, A. L., "Electric Utility Capacity Expansion Planning with Uncertain Load Forecasts," *AIIE Transactions*, 14, 1982.
15. Stremel, J. P., "Generation System Planning Under Load Forecast Uncertainty," *IEEE Transactions on Power Apparatus System PAS-101*, 1980.
16. World Bank, *Republic of Korea Energy Sector Issues*, 1984.