

# 負荷平準料金과 에너지 貯藏에 관한 研究\*

金 邦 龍\*\*

## < 目 次 >

- I. 序論
- II. 模型
- III. 模型의 分析
  - 1. 이동피크의 경우
  - 2. 고정피크의 경우
- IV. 要約 및 結論

## I. 序 論

通信, 電力, 交通 등 대다수의 公益事業은 需要의 週期性和 設備의 制約에 직면해 있으며, 이는 負荷平準 問題를 야기시키는 요인이 되기도 한다. 한편 郵便, 交通 등의 分野에서는 피크기간 동안의 수요를 충족시키기 위하여 非피크期間 동안 생산되는 산출물을 저장하는 데에는 매우 높은 비용이 들기 때문에 생산물의 저장이 어렵지만, 電力과 通信分野에서는 최근 저장기술 발전으로 생산물의 저장이 어느 정도 가능한 것으로 알려져 있다. 본 論文에서는 貯藏設

\* 本 論文을 작성하는 과정에서 귀중한 아이디어를 제공해 주시고, 유익한 논평과 지적을 해주신 Atsumi Hiroshi 교수(日本 中央大學)와 Odagiri Hiroyuki 교수(日本 쓰쿠바大學)께 감사드린다. 그러나 본 논문에 내용상의 오류나 미비한 점이 있다면 전적으로 필자의 책임임을 밝혀 둔다.

\*\* 한국전자통신연구소 기술경제연구부 책임연구원

備를 갖추고 있으면서 동시에 負荷平準 料金制度를 採擇하고 있는 電力 會社의 經濟的 行動을 중점적으로 분석하고자 한다.

생산물의 저장에 가능하게 되면, 設備制約은 그다지 심각하게 고려할 문제가 아니라고 생각할 수도 있을 것이다. 그러나 실제로 저장에는 다소의 비용이 들기 때문에 설사 기업이 저장기술을 갖고 있다 하더라도 負荷平準 問題는 피할 수 없게 된다. 負荷平準 料金 및 投資政策과 관련하여 에너지 저장 문제는 많은 이슈를 제기하고 있다. 예를 들면, 에너지 저장기술의 발전에 기인한 에너지 저장량의 증가는 負荷平準 料金과 經濟 厚生에 어떠한 影響을 미칠 것인가? 에너지 貯藏量과 設備水準은 代替關係에 있는가? 에너지 轉換效率, 피크 기간의 길이, 저장비용 등의 변화는 에너지 貯藏量 또는 設備水準에 대하여 어떠한 영향을 미칠 것인가? 하는 등의 問題이다.

에너지의 저장이 피크/非피크요금 격차 및 경제후생에 미치는 효과에 대해서는 이미 Gravelle(1976)와 Nguyen(1976)에 의하여 연구된 바 있다. 그들의 연구결과에 의하면, 에너지의 저장은 피크요금과 비피크요금의 격차를 축소시키고 후생을 증진시키는 것으로 나타나 있다. ‘에너지 저장량과 설비수준의 대체관계에 관한 분석’과 ‘저장비용의 인하가 에너지 저장과 설비에 미치는 영향에 관한 연구’도 Gravelle(1976)에 의하여 이미 분석이 완료되어 있지만, ‘에너지 轉換效率의 改善 및 피크기간의 變動이 에너지 저장과 설비에 미치는 영향에 관한 연구’는 아직까지 시도된 바가 없다. 發電에 의하여 생산된 저장에너지를 다시 전력으로 환원하는 데에는 에너지의 손실이 수반된다. 본 논문에서는 이러한 점에 착안하여 Gravelle(1976)의 모델에 에너지 轉換效率이라는 概念을 새로이 導入하여 그의 모형을 확장하였다. 본 연구에서는 이러한 형태의 모형을 토대로 하여 피크/비피크料金 格差 및 經濟厚生에 관한 側面을 除外하고, 위에서 제기한 모든 의문점을 분석하였는데, 특히 에너지 전환효율과 피크 기간 길이의 변화가 設備水準 및 에너지 貯藏量에 미치는 效果를 重點으로 다루었다.

分析을 통하여 얻어낸 중요한 結果는 다음과 같다. 直觀的으로는 技術發展으로 인한 에너지 轉換效率의 改善은 에너지 저장량의 증가와 설비수준의 감소, 피크期間의 延長은 設備水準의 增加와 에너지 貯藏量の 減少를, 貯藏費用의 引下는 에너지 貯藏量の 增加와 設備水準의 減少를 招來할 것으로 기대된다. 그러나 이러한 直觀은 固定피크(firm peak)의 경우에는 들어맞지만, 移

動피크(shifting peak)의 경우에는 반드시 그대로 성립되지 않는다. 즉 移動피크의 경우에는 에너지 전환효율의 개선은 에너지 貯藏量의 增加를 가져오기는 하지만 設備水準에 대한 효과는 명확하지 않으며, 피크기간의 연장은 설비수준의 증가를 초래하기는 하나 에너지 저장량에 대한 효과는 명확하지 않다. 한편 저장비용의 인하는 에너지 저장량의 增加를 가져오기는 하나 설비 수준에 대해서는 그 효과가 불분명하다. 따라서 固定피크의 경우에는 에너지 저장량과 설비 수준 사이에 代替關係가 成立된다고 볼 수 있지만, 移動피크의 경우에는 完全한 代替關係가 成立되지 않음을 알 수 있다.

본 논문에서는 제Ⅱ절에서 연구모형을 제시하고, 제Ⅲ절에서는 이 모형을 根幹으로 하여 負荷平準 요금제도를 채택하고 있으면서 저장설비를 갖추고 있는 企業에 대하여 固定피크와 移動피크로 케이스를 나누어 企業行動을 분석하였으며, 제Ⅳ절에서는 研究結果를 요약하는 한편, 설비제약에 직면하고 있는 기업의 투자정책과 관련한 몇 가지 시사점을 살펴보았다.

## Ⅱ. 模 型

하나의 기술로 단일 상품을 생산하고 있는 독점 공기업이 피크 수요와 비피크 수요로 이루어지는 두개의 상호 독립적인 수요함수에 직면해 있는 시장을 가정해 보자.<sup>1)</sup> 年間 수요는  $x_i$  ( $i=1, 2$ )이며, 各 期에 상응하는 逆需要函數는  $p_i = p_i(x_i)$ 이다. 여기에서  $p_i$ 는  $x_i$  한 단위의 가격을 나타내며, “1”은 피크期를, “2”는 非피크期를 나타낸다. 그러므로  $x_1 = x_2$ 일 때  $p_2(x_2) < p_1(x_1)$ 의 관계가 성립된다.  $z$  ( $0 < z < 1$ )는 수요 사이클에서 차지하는 피크期의 상대적 길이이며, 연간 생산량은  $y_i$  ( $i=1, 2$ )이다. 한편  $K$ 는 설비 수준을 나타내며, 기업의 설비 제약은 다음과 같이 주어진다고 가정하자.

$$K - y_i \geq 0 \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

企業이 生産活動을 하는데 있어서는 設備 한 단위당 연간  $\beta$ 만큼의 일정한

1) 電力會社의 경우, 火力, 水力, 原子力 등의 技術을 複合的으로 活用하여 生産活動을 전개할 수 있으나, 본 논문에서는 分析의 單純化를 위하여 獨占의인 지위를 누리고 있는 電力 會社가 이들 技術 중 어느 한 가지 技術을 이용하여 生産活動을 하는 경우만을 다루기로 한다.

설비비와 생산물 한 단위당  $b$ 만큼의 일정한 운영비가 요구된다고 가정하자. Steiner(1957)는 固定피크(firm peak)와 移動피크(shifting peak)로 케이스를 둘로 나누어 피크기간과 비피크기간의 길이가 동일한 負荷平準 模型을 分析하였다. 이동피크라 함은 피크 및 비피크 兩 期間의 需要量이 生産設備(capacity)에 일치되는 경우이고, 고정피크라 함은 피크기간 동안의 수요량은 設備水準에 일치되지만, 비피크기간 동안의 수요량은 設備水準에 훨씬 미달하는 경우를 일컫는다.

본 論文에서는 Steiner(1957)의 모델을 Williamson(1966)이 처음 시도한 바 있는 피크 및 비피크의 兩 期間 길이가 서로 다른 모델로 확장하고, 負荷平準 問題를 에너지 貯藏과 結付시켜 分析하고자 한다.

만약 生産物의 貯藏이 可能하다고 한다면, 각 기간에 있어서의 생산량은 각기에 각각 대응하는 소비량보다 커야 한다고 하는 통상의 制約은 通用되지 않는다. 따라서 貯藏이 가능한 경우에는 負荷平準만을 取扱하는 料金모델과는 달리 두 기간에 걸친 消費와 生産의 흐름은 다음과 같은 제약식으로 나타나게 될 것이다.

$$\alpha(1-z)(y_2 - x_2) + z(y_1 - x_1) = 0 \quad (2)$$

여기에서  $\alpha$ 는 에너지 轉換效率을 나타낸다. 비피크期 동안 저장해 둔 에너지를 피크期 동안 100% 電力으로 환원시켜 사용할 수 있다면  $\alpha=1$ , 저장 에너지를 電力으로 전혀 환원시킬 수가 없다면  $\alpha=0$ 의 값을 가지게 되어,  $\alpha$ 는 에너지 轉換效率의 정도에 따라 0에서 1사이의 값을 가지게 된다.<sup>2)</sup>

(2)식에서 좌변의 제1항은 피크期 동안 생산량을 초과하는 소비량을 충족시킬 목적으로 비피크기간 동안 蓄積possible한 貯藏量을 나타낸다. 이를  $s$ 로 표시하면,  $s$ 는 비피크기 동안의 생산량에서 소비량을 뺀 값에 에너지 전환효율과 비피크期の 상대적 길이를 곱한 값과 같아진다.

2) 차후에 電力으로 轉換시킬 目的을 가지고 生産된 에너지를 貯藏하는 方法에 관한 研究가 最近까지 工學者들에 의하여 持續적으로 추진되어 왔다. 예를 들면, 水力發電에는 비피크期에 剩餘發電 施設을 가지고 물을 高地帶에 끌어 올려 두었다가 貯藏된 位置에너지를 利用하여 피크期에 쓰일 電力을 生産하는 貯藏 方法이 흔히 利用되고 있다. 이 貯藏 方法은 hydro-electric pumped storage scheme으로 알려져 있으며, 피크 수요를 충족시키는데 있어서 현재까지 개발된 방법 중 가장 값싼 貯藏 技術로 알려져 있다. Jenkin(1974)에 의하면, 이 방법은 약 76%의 에너지 전환효율을 가지는 것으로 밝혀져 있다.

$$s = \alpha(1-z)(y_2 - x_2) \quad (3)$$

그러므로 (2)의 제약식은 다음과 같이 표현할 수도 있다.

$$s + z(y_1 - x_1) = 0 \quad (4)$$

실질적으로 저장과 관련된 현실적인 가정은 매우 複雑할 수도 있겠지만, 앞서도 밝힌 바와 같이 分析의 簡便을 기하기 위하여 기업은 하나의 貯藏技術만을 가지고 生産活動에 임하는 것으로 가정한다. 여기에서 최대화하고자 하는 함수는 弱分離 가능한(weak separable) 部分厚生函數(partial welfare function)이다. 즉 消費者 需要曲線 아래의 領域으로 測定되는 消費者 剩餘에서 電力을 生産하는데 드는 運營費, 貯藏費, 設備費로 이루어지고 있는 費用을 뺀 값이다. 그러므로 풀어야 할 문제는 (1), (3), (4)식의 制約 하에서 다음의 (5)식을 最大化함으로써 最適의 消費, 生産, 貯藏 및 設備水準을 구하는 것이 될 것이다.<sup>3)</sup>

$$W = z \left[ \int_0^{x_1} p_1(x_1) dx_1 - by_1 \right] + (1-z) \left[ \int_0^{x_2} p_2(x_2) dx_2 - by_2 \right] - \beta K - cs \quad (5)$$

(5)식에서  $c$ 는 전 기간을 통하여 산출량 한 단위를 일정한 비율로 에너지로 저장했다가 다시 전력으로 還元시키는데 드는 일정한 貯藏費用을 나타낸다.

이 문제에 대한 라그랑즈 함수는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$L = W + \sum_{i=1}^2 \lambda_i (K - y_i) + \mu_1 [s + z(y_1 - x_1)] + \mu_2 [\alpha(1-z)(y_2 - x_2) - s]$$

여기에서  $\lambda_i$ 와  $\mu_i$ 는 각각 설비 및 저장제약과 관련된 非負의 라그랑즈 승수들이다. 問題에 대한 最大값이 存在하고 微分可能 條件이 充足된다고 假定하면,

3) 이러한 형태의 效用函數는 電力과 複合財(composite commodity)간 需要의 相互 依存性이 거의 무시해도 좋을 만큼 적다는 假定에 토대를 두고 있는데, 전력과 같은 公共財의 經濟的 分析에서는 자주 採擇되는 假定이다. 이 경우에는 所得 效果가 제로로 나타나기 때문에 Marshallian demand와 Hicksian demand가 一致하게 된다.

$L$ 에 대한 偏導函數를 제로에 一致시킴으로써 最適解를 구할 수 있다.  $x_1, x_2, K, y_1, y_2$ 에 관련된 最適解는 모두 플러스의 값을 가진다고 가정하면, 最適解는 다음의 一階條件으로부터 誘導된다.

$$\begin{aligned} \partial L / \partial x_1 &= z(p_1 - \mu_1) = 0 \\ \partial L / \partial x_2 &= (1-z)(p_2 - \alpha\mu_2) = 0 \\ \partial L / \partial y_1 &= z(\mu_1 - b) - \lambda_1 = 0 \\ \partial L / \partial y_2 &= (1-z)(\alpha\mu_2 - b) - \lambda_2 = 0 \\ \partial L / \partial K &= \sum_{i=1}^2 \lambda_i - \beta = 0 \\ \partial L / \partial s &= \mu_1 - \mu_2 - c \leq 0, s \geq 0, s(\partial L / \partial s) = 0 \\ \partial L / \partial \lambda_i &= \begin{cases} K - y_i = 0, & \text{if } \lambda_i > 0; \\ K - y_i \geq 0, & \text{if } \lambda_i = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

위의 一階條件들은 貯藏이 不可能한 경우에도 最適解로서 存在하게 될 것이다. 왜냐하면 貯藏이 不可能한 케이스는 限界貯藏費用이 極端的으로 높은 케이스로 간주할 수 있기 때문이다. (5)식에서 볼 수 있는 바와 같이  $c$ 값이 極端的으로 클 때 最適 貯藏量은 제로가 된다.

### III. 模型의 分析

#### 1. 이동피크의 경우

이동피크의 경우에는  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 가 플러스의 값을 가지기 때문에, II절에서 구한 1階 必要條件으로부터  $y_1 = y_2 = K$ 의 값을 얻게 된다. 이 값을 적절히 활용하면  $p_1$ 과  $p_2$ 에 대하여 다음과 같은 最適解를 구할 수 있다.

$$p_1 = \frac{\beta + b + (1-z)\alpha c}{z + \alpha(1-z)} \quad (6)$$

$$p_2 = \frac{\alpha(\beta+b-zc)}{z+\alpha(1-z)} \quad (7)$$

한편 (3), (4)식 및  $y_1 = y_2 = K$ 를 (2)식에 대입하면 設備水準에 대하여 다음과 같은 最適値를 얻게 된다.

$$K = \frac{zx_1 + \alpha(1-z)x_2}{z + \alpha(1-z)} \quad (8)$$

(8)식을 (3)식 또는 (4)식에 대입하면 最適貯藏量에 대하여는 다음과 같은 값을 얻게 된다.

$$s = \frac{\alpha z(1-z)(x_1 - x_2)}{z + \alpha(1-z)} \quad (9)$$

#### (1) 에너지 轉換效率의 變動 效果

電力은 需要가 發生하는 時點에 生産되지 않으면 안된다는 制約을 안고 있다. 그래서 수요가 한꺼번에 몰리는 피크期의 需要에 대비하기 위하여 非피크期 동안 에너지를 저장하여 두는 방법에 관한 연구가 최근까지 지속적으로 이루어져 왔다. 그러나 이와 같이 저장된 에너지를 다시 電力으로 바꾸는 데에는 現在까지 開發된 技術水準으로는 아무리 우수한 방법을 채택한다 하더라도 에너지의 손실이 수반될 수 밖에 없다.

여기에서의 목적은 技術開發에 의하여 에너지 轉換效率이 현재의 상태보다 개선되었을 때, 이것이 에너지 저장량과 설비수준에 어떠한 영향을 미칠 것인가를 분석하는 것이다. 直觀的인 判斷으로는 에너지 轉換效率이 改善되면 貯藏量은 늘어나지만 設備水準은 減少될 것으로 보인다. 그러나 이러한 直觀的인 판단은 에너지 轉換效率의 改善에 따른 費用減少 誘引만을 고려하면 들어맞지만, 消費에 미치는 誘引까지 추가하여 고려하면 빗나갈 가능성이 있다. 즉 에너지 轉換效率의 改善은 實際로 貯藏量은 늘려 주지만, 設備水準에는 어떠한 영향을 미치게 될지 불확실하다고 하는 사실이다.

(6)식과 (7)식을 각각  $\alpha$ 로 미분하면,  $dp_1/d\alpha < 0$  및  $dp_2/d\alpha > 0$ 를 얻게 된

다.<sup>4)</sup> 이는 에너지 전환효율이 개선됨에 따라 피크수요는 늘어나지만 非피크수요는 감소됨을 의미한다. (8)식에서 볼 수 있는 바와 같이, 설비수준은 피크수요와 非피크수요의 加重重疊으로 나타나기 때문에 設備水準에 대한 에너지 전환효율의 개선 효과는 어떻게 나타나게 될 지 불분명하다. 이와는 대조적으로 에너지 저장량은 (9)식에서 볼 수 있는 바와 같이 피크수요에서 非피크수요를 뺀 크기에 비례하여 증가할 것이므로, 피크요금의 引下와 非피크요금의 引上에 따른 피크수요의 增加 및 非피크수요의 減少로 蓄積可能한 貯藏量의 增加를 가져오게 될 것이다.

위의 방법과는 다른 증명방법을 사용하여 에너지 전환효율의 개선이 에너지 저장량과 설비수준에 미치는 효과를 보다 구체적으로 살펴보기로 하자. 相互獨立인 需要函數를 가정하였으므로  $x_i$ 는  $i$ 期 동안의 需要曲線에 따라  $p_i$ 에 의존적으로 움직이게 될 것이다. (6)식과 (7)식을  $\alpha$ 로 미분하여 구한  $dp_i/d\alpha$ 의 값을 (9)식을  $\alpha$ 로 미분한  $ds/d\alpha$ 에 대입하면 다음과 같은 값을 얻게 된다.

$$\frac{ds}{d\alpha} = \frac{z(1-z)}{[z+\alpha(1-z)]^2} \left[ z(x_1-x_2) - \frac{\alpha(\beta+b-cz)}{z+\alpha(1-z)} \left( (1-z) \frac{dx_1}{dp_1} + z \frac{dx_2}{dp_2} \right) \right]$$

위의 식의 부호는 플러스로 나타날 것이므로 에너지 전환효율의 改善은 蓄積可能한 에너지 貯藏量을 增加시킨다는 사실을 알 수 있다. 한편 위와 같은 방법을 이용하면, (8)식으로부터는 아래와 같은 해를 얻게 된다.

$$\frac{dK}{d\alpha} = \frac{z(1-z)}{[z+\alpha(1-z)]^2} \left[ x_2 - x_1 + \frac{\beta+b-cz}{z+\alpha(1-z)} \left( \alpha \frac{dx_2}{dp_2} - \frac{dx_1}{dp_1} \right) \right]$$

위의 해에서 피크期の 需要曲線과 非피크期の 需要曲線이 가지는 기울기의 상대적 크기가 명시적으로 주어지지 않는 한,  $\alpha(dx_2/dp_2) - (dx_1/dp_1)$ 의 부호가

4) (6)식과 (7)식을  $\alpha$ 로 미분한 값은 각각 다음과 같다.

$$dp_1/d\alpha = -(1-z)(\beta+b-cz)/[z+\alpha(1-z)]^2 < 0$$

$$dp_2/d\alpha = z(\beta+b-cz)/[z+\alpha(1-z)]^2 > 0$$



플러스로 나타나게 될지 마이너스로 나타나게 될지 알 수 없고, 따라서  $dK/d\alpha$ 의 부호도 어떻게 나타나게 될 지 명확하지 않다. 일반적으로는  $dx_1/dp_1$ 의 절대치가  $dx_2/dp_2$ 의 절대치보다 클 것으로 기대되며, 에너지 전환효율  $\alpha$ 도 제로에서 1까지의 값을 가질 것이므로  $\alpha(dx_2/dp_2) - dx_1/dp_1$ 의 부호는 플러스가 될 가능성이 높다. 그러나  $x_2$ 는  $x_1$ 보다 적은 값을 가질 것이므로  $dK/d\alpha$ 의 부호에 대한 명시적인 판단을 내리기는 불가능하다. 물론  $\alpha(dx_2/dp_2) - dx_1/dp_1$ 의 부호가 마이너스의 값을 가진다면  $dK/d\alpha$ 도 마이너스가 될 것이다.

## (2) 피크期間 길이의 變動 效果

直觀的인 判斷으로는 피크기간의 延長은 에너지 貯藏量을 減少시키고 設備水準을 增加시킬 것으로 보인다. 이러한 직관적 판단이 타당성을 가지는가를 살펴보기로 하자. 먼저  $dp_1/dz$ 의 값을 얻기 위하여 (6)식과 (7)식을  $z$ 로 미분하면 다음과 같은 값을 얻게 된다.

$$\frac{dp_1}{dz} = - \frac{(1-\alpha)(\beta+b)+\alpha c}{[z-\alpha(1-z)]^2} < 0$$

$$\frac{dp_2}{dz} = - \frac{\alpha[(1-\alpha)(\beta+b)+\alpha c]}{[z-\alpha(1-z)]^2} < 0$$

피크기간의 延長은 피크요금뿐만이 아니라, 非피크요금까지도 낮추게 된다. 이러한 사실은 피크기간이 연장됨에 따라 兩 期間에서의 소비량이 증가하게 되고, 이는 설비수준의 증가를 가져올 것이라는 것을 의미한다. 한편 非피크期の 消費量의 增加는 蓄積可能한 貯藏量에 대해서 마이너스 效果를 가져오나, 피크期の 消費量의 增加는 蓄積可能한 貯藏量의 增加를 招來한다. 그 결과 피크기간연장이 저장량에 어떠한 영향을 미칠 지에 대해서는 明確한 결론을 내리기가 어렵게 된다.

## (3) 貯藏 費用의 變動 效果

일반적인 常識으로는 貯藏費用의 引上은 貯藏量의 減少와 設備水準의 增加를 가져 올 것으로 豫想된다. 그러나 (1), (2)항에서 살펴 본 바와 같은 類似한 이유로 이러한 직관은 部分的으로 妥當性을 喪失한다. 즉, 에너지 貯藏費用의

引上은 實際로 에너지 貯藏量을 減少시키나 設備水準에는 어떠한 影響을 미치지 그 효과가 不確實하다. 이러한 結果는 Gravelle(1976)가 얻어낸 結果와 동일하다.

먼저  $dp_i/dc$ 의 값을 얻기 위하여 (6)식과 (7)식을  $c$ 로 미분하면,

$$\frac{dp_1}{dc} = \frac{\alpha(1-z)}{z+\alpha(1-z)} > 0$$

$$\frac{dp_2}{dc} = \frac{-\alpha z}{z+\alpha(1-z)} < 0$$

를 얻게 된다. 이와 같이하여 에너지 貯藏費用의 引上은 피크요금을 引上시키고 非피크요금을 引下시키는 效果를 지닌다. 그래서 에너지 저장비용의 인상은 피크수요를 떨어뜨리고 非피크수요를 끌어올리는 역할을 하게 된다. 결과적으로 에너지 저장비용의 변화가 설비수준에 미치는 효과는 不明確한 것으로 나타나게 되는데, 이는 (8)식에서 볼 수 있는 바와 같이 設備水準은 피크수요와 非피크수요의 加重重으로 나타나기 때문이다. 한편 에너지 저장비용의 인상에 따른 피크수요의 감소와 非피크수요의 증가는 (9)식을 통해서 類推할 수 있듯이 蓄積可能한 貯藏量의 減少를 가져오게 될 것이다.

貯藏費用 引上에 따른 貯藏量 增加 誘引만을 고려하면, 에너지 貯藏량과 設備水準은 代替關係에 있는 것처럼 보이지만, 이러한 추측은 消費 誘引을 追加적으로 考慮하면 빗나갈 수 있음을 證明해 보였다. 그러므로 設備水準은 一般적으로 에너지 貯藏량과 代替關係에 있다고 斷定할 수 없다.

## 2. 고정피크의 경우

固定피크의 境遇에는 다음과 같은 直觀이 通用된다. 첫째, 에너지 轉換效率의 改善은 設備水準을 減少시키고 蓄積可能한 貯藏量을 增加시킨다. 둘째, 에너지 貯藏費用의 引下는 蓄積可能한 貯藏量을 늘리고 設備水準을 줄이는 效果를 지닌다. 셋째, 피크期間의 延長은 蓄積可能한 貯藏量을 減少시키고, 設備水準을 增加시킨다. 마지막으로 이상의 결과들로부터 設備水準과 蓄積可能한 貯藏量은 代替關係에 있음을 알 수 있다. 각 사안에 관한 보다 자세한 證明은 附錄을 參考하라.

#### IV. 要約 및 結論

負荷平準 문제와 에너지 貯藏을 結付시킨 研究는 현재까지 소수의 학자에 의하여 論議되어 왔을 따름이다. 특히 '에너지 轉換效率의 改善과 피크기간의 延長이 蓄積可能한 貯藏量 및 設備水準에 미치는 效果'에 관한 分析은 현재까지 시도된 적이 없는 研究이다. 本考에서는 Gravelle(1976)의 모델에 에너지 轉換效率의 概念을 새로이 導入하고, 이러한 두가지 효과를 중점적으로 분석하였다.

본 분석을 통하여 얻어낸 중요한 결과는 다음과 같다. 通常的인 直觀으로는 에너지 轉換效率의 改善은 저장량을 증가시키고 설비수준을 감소시킬 것처럼 보인다. 그러나 에너지 저장에 미치는 비용감소 유인뿐만 아니라 소비 유인도 고려한다면, 이러한 직관은 移動피크의 경우에는 상당한 수정을 요하게 된다. 즉, 통상의 직관이 固定피크의 경우에는 그대로 들어맞지만, 이동피크의 경우에는 실제로 에너지 저장량은 증가시키지만 설비수준에 대해서는 어떠한 영향을 미치게 될지 그 효과가 不明確하다는 사실이다. 直觀的인 판단으로는 피크기간의 延長은 蓄積可能한 에너지 貯藏量을 감소시키고 설비수준을 증가시킬 것으로 기대된다. 固定피크의 경우에는 이러한 직관이 통용된다. 그러나 移動피크의 경우에는 피크기간이 길어짐에 따라 설비수준은 증가하게 되나 에너지 저장량은 어떻게 변화하게 될 지 불분명하다. 한편, 에너지 貯藏費用의 상승은 에너지 저장량의 감소와 설비수준의 증가를 초래할 것이라는 것이 통상적인 직관인데, 고정피크의 경우에는 그대로 통용된다. 그러나 위에서 언급한 유사한 이유로 인하여 이러한 직관은 移動피크의 경우에는 역시 부분적으로 오류를 범할 가능성이 있다. 貯藏費用의 상승은 에너지 저장량을 감소시키나 설비수준에 대한 효과는 그다지 명확하지 않다. 移動피크의 경우에는 에너지 저장과 설비수준은 代替關係에 있음이 판명된다. 그러나 移動피크의 경우에는 에너지 저장과 설비수준 사이에 代替關係가 성립한다고 단정할 수 없다.

아래에서는 본 분석을 통하여 얻은 결과를 토대로 하여, 설비제약에 직면하고 있는 기업의 투자정책과 관련한 몇 가지 시사점을 살펴 보기로 한다. 고정피크의 경우를 가정한다면, 에너지 전환효율 개선, 피크기간 단축, 저장비용 인하는 共に 비축가능한 저장수준을 늘리고, 설비수준을 감축시키는 효과가 있음을 확인하였다. 그러나 이동피크의 경우에는 위에서와 같은 동일한 효과

가 나타나지 않음을 확인하였다. 즉, 피크기간이 단축되는 경우에는 설비수준을 감축시킬 수 있지만, 에너지 전환효율이 개선되거나 저장비용이 인하되는 경우에는 설비수준을 반드시 감축시킬 수 있는 것은 아니다. 따라서 設備投資의 餘力이 전혀 없는 기업에 대하여, 고정피크의 경우에는 에너지 전환효율 개선, 피크기간 단축, 저장비용 인하가 유효하게 작용하지만, 이동피크의 경우에는 소비자들을 피크기로부터 非피크기로 분산시키는 방법만이 추가적으로 설비투자를 하지 않고도 생산활동을 지속할 수 있는 가장 확실한 정책이 될 수 있을 것이다.

## 附 錄

설비제약이 피크기간에만 묶여 있는 고정피크의 경우에는  $\lambda_1$ 은 플러스의 값을 가지나  $\lambda_2$ 는 제로의 값을 가지기 때문에, II 절에서 구한 1階 必要條件으로부터  $y_1 = K$ 와  $y_2 \leq K$  값을 얻게 된다. 이 값을 적절히 활용하면  $p_1$ 과  $p_2$ 에 대하여 다음과 같은 最適解를 구할 수 있다.

$$(a) \quad p_1 = (\beta/z - ac) / (1 - \alpha)$$

$$(b) \quad p_2 = \alpha(\beta/z - c) / (1 - \alpha)$$

식 (a), (b)로부터 식 (c)에서 (h)에 이르는 도함수를 얻게 된다.

$$(c) \quad dp_1/dc = -\alpha(1 - \alpha)$$

$$(d) \quad dp_1/d\alpha = (\beta/z - c) / (1 - \alpha)^2$$

$$(e) \quad dp_1/dz = -\beta / (1 - \alpha)^2$$

$$(f) \quad dp_2/dc = -\alpha / (1 - \alpha)$$

$$(g) \quad dp_2/d\alpha = (\beta/z - c) / (1 - \alpha)^2$$

$$(h) \quad dp_2/dz = -\alpha\beta / (1 - \alpha)^2$$

식(2), (3) 및  $y_1 = K$ 를 이용하면, 설비수준과 에너지 저장량에 대하여 다음과 같은 해를 명시적으로 얻을 수 있다.

$$(i) \quad K = x_1 + \alpha(1 - z)(x_2 - y_2) / z$$

$$(j) \quad s = \alpha(1 - z)(y_2 - x_2)$$

식 (c)와 (f)의 값을 이용하여 에너지 저장비용의 微小한 引上에 따른 에너지貯藏量의 變動分을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{ds}{dc} &= \alpha(1-z) \left[ \frac{dy_2}{dx_2} \frac{dx_2}{dp_2} \frac{dp_2}{dc} - \frac{dx_2}{dp_2} \frac{dp_2}{dc} \right] \\ &= \frac{\alpha^2(1-z)}{1-\alpha} \left( \frac{dx_2}{dp_2} \right) < 0\end{aligned}$$

同一한 方法으로 에너지貯藏費用의 微小한 引上에 따른 設備水準의 變動分을 구하면

$$\frac{dK}{dc} = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \left( \frac{dx_1}{dp_1} \right) - \frac{\alpha^2(1-z)}{z(1-\alpha)} \left( \frac{dx_2}{dp_2} \right) > 0$$

에너지 轉換效率의 改善이 에너지貯藏量 및 設備水準에 미치는 影響을 分析하기 위하여 (d)와 (g)의 값을 이용하면 (j)와 (i)로부터 각각 다음과 같은 해를 얻게 된다.

$$\frac{ds}{d\alpha} = (1-z) \left[ y_2 - x_2 - \frac{\alpha(\beta/z-c)}{(1-\alpha)^2} \left( \frac{dx_2}{dp_2} \right) \right] > 0$$

$$\frac{dK}{dz} = \frac{\beta/z-c}{(1-\alpha)^2} \left( \frac{dx_1}{dp_1} \right) + \frac{1-z}{z} \left[ x_2 - y_2 + \frac{\alpha(\beta/z-c)}{(1-\alpha)^2} \left( \frac{dx_2}{dp_2} \right) \right] < 0$$

피크期에 소비자의 수요량이 증가하여 피크기간이 연장되는 경우, 에너지 저장량과 설비수준에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하기 위하여 (e)와 (h)의 값을 이용하면 (j)와 (i)로부터 각각 다음과 같은 해를 얻게 된다.

$$\frac{dK}{dz} = \frac{1}{z} \left[ \frac{-\beta}{1-\alpha} \left( \frac{dx_1}{dp_1} \right) + \alpha \left( y_2 - x_2 - \frac{\alpha\beta(1-z)}{z(1-\alpha)} \left( \frac{dx_2}{dp_2} \right) \right) \right] > 0$$

$$\frac{ds}{dz} = \alpha \left[ x_2 - y_2 + \frac{\alpha\beta(1-z)}{z^2(1-\alpha)} \left( \frac{dx_2}{dp_2} \right) \right] < 0$$

### 參 考 文 獻

1. Gravelle, H., "The peak load problem with feasible storage", *The Economic Journal*, Vol. 86, 1976, pp. 256-277.
2. Jenkin, F. P., "Pumped storage is cheapest way of meeting peak demands", *Electrical Review*, Vol. 16, 1974, pp. 323-325.
3. Nguyen, D. T., "The problems of peak loads and inventories", *Bell Journal of Economics*, Vol. 7, 1976, pp. 232-241.
4. Steiner, P. O., "Peak load and efficient pricing", *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 71, 1957, pp. 585-610.
5. Williamson, D. E., "Peak load pricing and optimal capacity under indivisibility constraints", *American Economic Review*, Vol. 56, 1966, pp. 810-827.