

## Optimal pricing and spare parts manufacturing strategy for EOL (end-of-life) services

Bowon Kim · Deoksoo Ko

*KAIST Graduate School of Management*

*Seoul, 130-722 Korea*

### Abstract

We study the firm's strategy to price its products and plan the spare parts manufacturing so as to maximize its profit and at the same time to fulfill its commitment to providing the customers with the key parts continuously over the relevant decision time horizon, i.e., *the production plus warranty period*. To examine the research question, we developed and solved a two-stage optimal control theory model. Our analysis suggests that if the cost to produce the spare part during the warranty period is more expensive than that during the production period, the firm should increase its sales price gradually throughout the production period to control its sales. In addition, during the production period it is optimal for the firm to produce the spare parts more than needed so that the overproduced spare parts can be used to partially meet the demand during the warranty period. We conducted numerical analysis to investigate the sensitivity dynamics among key variables and parameters such as inventory holding cost, unit spare part production costs, part failure rate, and parameters in the demand function.

### 1. Introduction

글로벌 시장에서의 경쟁이 심화됨에 따라서 제품수명주기는 점점 더 짧아지고, 기업은 핵심대응전략으로써 새로운 제품을 더욱더 자주 출시하게 되었다. 또한 기업은

고객들에게 광범위한 워런티를 제공하고 있다. 시장에서의 또 다른 중요한 현상은 소비자들이 환경적인 문제들에 관심을 가지게 됨으로써 기업은 소비자들에게 단순히 제품을 판매하는 것에 그치는 것이 아니라, 고장난 부분에 대해서 어떻게 교체를 하고, 어떻게 재활용을 할 것인지 등의 제품의 전 수명주기에 걸쳐서 주의를 기울이게 되었다.

시장에서의 이러한 동태적 현상에 대응하기 위해서 기업은 경쟁전략을 결정하는데 있어서 EOL(end of life) 서비스를 고려해야만 한다.

### 2. Research motivation and Literature Review

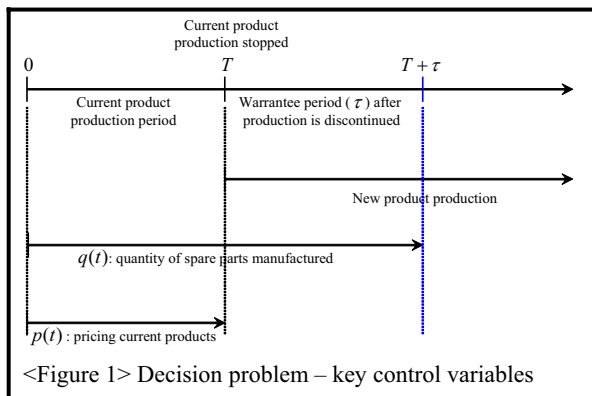
#### 2.1. Research motivation

기존제품과는 현격히 다른 새 제품을 출시하여, 기존제품의 생산을 끝내고, 새 제품을 생산하려는 기업이 있다. 기존제품에는 새 제품과 호환되지 않는 키 파트가 있어서, 나머지 부분은 쉽게 오픈 마켓에서 구할 수 있지만, 키 파트만은 그 기업을 포함하여 몇 개의 기업만이 생산하며 가격이 매우 비싸다. 기업은 소비자가 제품을 구입할 때 워런티 기간 동안 키 파트에 대해서 한 번의 무상 수리를 보장한다.

<Figure 1>은 이 상황을 묘사한다. 예를 들어, 자동차 시장에서 한 기업은 모델 U라는 자동차를 판매해왔고, 차세대 제품인

모델 V는  $t=T$  시점부터 판매를 시작한다. 모델 U와 모델 V의 가장 큰 차이점은 엔진으로써, 기업은 소비자에게 워런티  $\tau$ 의 기간 동안 엔진을 한 번 무상으로 교체를 해준다. 우리는  $\tau \geq T$ 를 가정하며, 이것은 엔진에 대해서는 7년간의 워런티 기간을 보장해주지만, 실제 모델 U의 생산기간은 4년인 경우를 의미한다. 이러한 상황에서 기업의 중요한 의사결정은 다음과 같다.

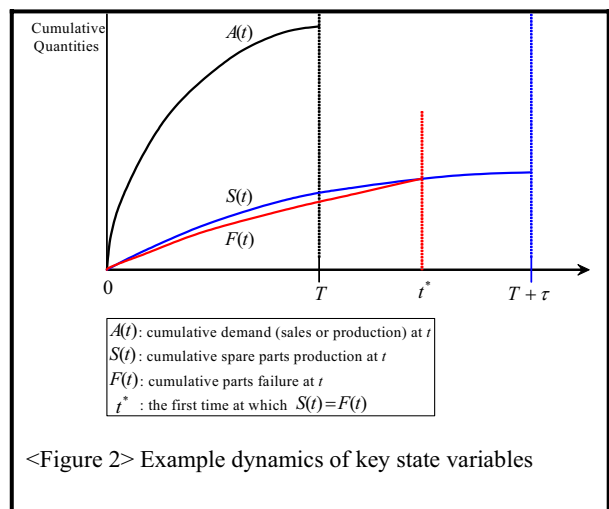
- $t=T+\tau$  시점에서의 기업 이윤을 극대화하기 위해서  $0 \leq t \leq T$  기간 동안 몇 대의 모델 U를 팔아야 할까? 또한 생산한 모든 제품을 판매하기 위해서  $0 \leq t \leq T$  동안 어떻게 가격을 책정할 것인가?
- $0 \leq t \leq T+\tau$  동안 보장한 워런티를 충족시키기 위해서 얼마만큼의 예비용 부품, 즉, 엔진을 생산할 것인가?



기업이 최적 가격 정책과 예비용 부품 생산전략을 결정하는 데에는 몇 가지 고려해야 할 요소가 있으며, <Figure 2>는 state variable인  $A(t)$ 와  $S(t)$ 의 dynamics를 보여준다.

$T$  시점까지 기업은 모델 U를 생산해서 판매한다. 모델 U의 누적 생산량(판매량)은  $A(t)$ 로 표현하며, 이는 기업의 가격 전략인  $p(t)$ 에 의하여 결정된다.  $F(t)$ 는 부품 교체

가 필요한 첫번째 엔진 불량 발생량의 누적이며,  $S(t)$ 는 워런티 기간의 서비스를 수행하기 위해서 기업이 생산하는 엔진의 누적 생산량이다. 우리는 첫번째 엔진 불량 발생에 대해서는 엄격하게 수요를 충족시켜야하기 때문에  $S(t) \geq F(t)$ 를 반드시 만족시켜야 한다. 또한 비용 dynamics에 따라서  $T \leq t^* \leq T+\tau$ 에  $S(t) = F(t)$ 를 만족시키는 시점이 존재할 것이다.



<Figure 2> Example dynamics of key state variables

## 2.2. EOL(end of life) 서비스

EOL 서비스는 서비스 전기간에 걸쳐 소비자가 요구하는 예비용 부품(spare parts)을 공급하는 것을 의미하며, 제품의 생산이 끝나는 시점에 시작하여 계약상의 워런티 기간이 종료되는 시점에서 끝나게 된다. (Teunter and Fortuin 1998).

Hesselbach et al.(2002)은 EOL 서비스가 많은 비용이 드는 이유에 대해 생산기간에 누렸던 규모의 경제를 누릴 수 없으며, 생산 유용성의 한계로 인하여 제품세대가 다른 경우 비용이 많이 들며, 외부부품공급자가 EOL 서비스 전기간에 걸쳐서 지속적으로 예비용 부품 제공을 보장하지 못한다는 것을 들었다.

EOL 서비스를 수행하기 위해서 기업은 EOL 서비스가 시작되는 시점에서 부품 수요를 예측하여 공급자에게 대규모의 마지막 주문(final order)를 하게 된다. 또한 예비용 부품을 공급하지 못할 경우에는 새 제품으로 교환해주는 상업적 해결 방법(commercial solution)을 사용한다(Teunter and Fortuin 1999). 또 다른 방법으로 Laan et al.(1995)은 소비자가 다 쓴 제품(scrap)으로부터 예비용 부품을 재활용, 재생산하는 정책을 제시하였다.

이상의 연구에서는 공통적으로 EOL 서비스 기간에는 예비용 부품을 생산할 수도 주문할 수도 없다는 가정을 두고 수요예측에만 초점을 맞추었다(Fortuin 1980; Teunter and Fortuin 1998, 1999; Cattani and Souza 2003). 또한 대부분의 연구들이 제품수명주기, 제품의 판매량(sales)과 그에 따른 제품 회수율 등의 동적 측면(dynamics)에 대해서는 고려하지 못하였다(Spengler and Schroter 2003).

### 2.3. Two-stage optimal control theory

경제학에 있어서의 제도나 새로운 기술의 세대교체문제와 같이 두 개의 서로 다른 결정 시간대를 포함한 optimal control problem을 다루는 optimal control theory가 있다. 이는 기존의 one-stage optimal control theory 문제가 아닌, two-stage optimal control problem으로써 다루어져야 하며, 일반적 형태는 다음과 같다(Makris 2001).

Maximize

$$\int_0^{t_1} \exp[-\theta s] F^1(x(s), u(s)) ds + \int_{t_1}^{\infty} \exp[-\theta s] F^2(x(s), u(s)) ds - \exp[-\theta t_1] \phi(x(t_1))$$

subject to

$$\dot{x} = f^1(x(s), u(s)), 0 \leq s \leq t_1$$

$$\dot{x} = f^2(x(s), u(s)), t_1 \leq s \leq \infty$$

$$x_l(0) = x_{l0}, l = 1, \dots, l_1,$$

$$x_l(0) \text{ free}, l = l_1 + 1, \dots, n,$$

$$x(t_1) \text{ free}$$

$$\lim_{t_1 \rightarrow \infty} \exp[-\theta t_1] \phi(x(t_1)) = 0$$

$x(s)$  는 연속이며, 구분적 연속 미분 가능한 state variable이며,  $u(s)$  는 control variable이다.  $F^i, i=1, 2$  는 한 번 미분 가능한 실함수이며,  $\exp[-\theta t_1] \Phi(x(t_1))$  는 1<sup>st</sup> stage에서 2<sup>nd</sup> stage로 문제가 바뀔 때의 switching cost를 의미한다(Tomiyama 1984).

### 3. Model development

#### 3.1. A two-stage optimal control model for optimal pricing and manufacturing

우리의 연구문제에 대한 답을 구하기 위하여 다음과 같은 two-stage optimal control theory 모델을 만들었다.

$$\max \int_0^T \left[ (p - c_1)(d_1 - d_2 p) - h \{ S(t) - F(t) \} - \frac{k_1}{2} q(t)^2 - c_2 \{ \alpha(A(t) - F(t)) \} \right] dt \dots(1a)$$

$$+ \int_T^{T+\tau} \left[ -h \{ S(t) - F(t) \} - \frac{k_2}{2} q(t)^2 - c_2 \{ \alpha(A(T) - F(t)) \} \right] dt + \pi_R (S(T+\tau) - F(T+\tau)) \dots(1b)$$

First stage constraints

$$\dot{A}(t) = d_1 - d_2 p \quad (2) \quad \dot{A}(t) = 0 \quad (7)$$

$$\dot{S}(t) = q(t) \quad (3) \quad \dot{S}(t) = q(t) \quad (8)$$

$$\dot{F}(t) = \alpha \{ A(t) - F(t) \} \quad (4) \quad \dot{F}(t) = \alpha \{ A(T) - F(t) \} \quad (9)$$

$$S(t) \geq F(t) \quad (5) \quad S(t) \geq F(t) \quad (10)$$

$$S(0) = 0, A(0) = 0, F(0) = 0 \quad (6)$$

모형에서 사용한 variables와 parameter의 정의는 다음 Table 1. 과 같다.

Table 1. Definitions of variables and parameters in the two-stage optimal control model

Variables	
$A(t)$	: cumulative sales/production (state variable), $A(0) = 0$
$S(t)$	: cumulative spare parts production (state variable), $S(0) = 0$
$F(t)$	: cumulative parts demand/failure (state variable), $F(0) = 0$
$p(t)$	: sales price at $t$ (control variable)
$q(t)$	: amount of spare parts produced at $t$ (control variable)
Parameters	
$d_1, d_2$	: exogenous parameters in the demand function (2)
$c_1$	: unit production cost
$c_2$	: unit part's replacement cost
$h$	: unit inventory holding cost
$\alpha$	: parts failure rate
$k_1$	: unit part's production cost for $0 \leq t \leq T$
$k_2$	: unit part's production cost for $T \leq t \leq T + \tau$
$\pi_R$	: unit salvage value of the spare part

목적식은  $0 \leq t < T$  (1a)와  $T \leq t < T + \tau$  (1b)의 두 부분으로 이루어진다. (1a)를 살펴보면 모두 네 부분으로 이루어지는데,  $(p - c_1)\dot{A}(t) = (p - c_1)(d_1 - d_2 p)$ 는 제품 판매에 따른 net profit을 의미하며,  $\{S(t) - F(t)\}$ 는  $t$ 시점에 수리를 해주고 남아있는 예비용 부품의 양이다. 따라서,  $h\{S(t) - F(t)\}$ 은 예비용 부품 재고비용을 의미한다.  $\frac{k_1}{2}q(t)^2$ 는 예비용 부품 생산비용을 의미하며,  $(A(t) - F(t))$ 는 팔렸지만 아직 고장이 나지 않은 제품의 수를 의미하며,  $\alpha(A(t) - F(t))$ 는  $t$ 시점에 고장난 제품의 수이다. 따라서  $c_2\{\alpha(A(t) - F(t))\}$ 는 제품 교체 비용을 의미한다.

마찬가지로  $T \leq t \leq T + \tau$  시점을 살펴

보면 세 부분으로 이루어져있는데, 재고비용은  $h\{S(t) - F(t)\}$ , 예비용 부품 생산비용은  $\frac{k_2}{2}q(t)^2$ 로써 앞에서 살펴본 규모의 경제를 누릴 수 없는 등의 이유에 따라서  $k_2 > k_1$ 를 가정한다.  $c_2\{\alpha(A(t) - F(t))\}$ 는 수리비용을 의미한다. 마지막으로 decision horizon이 끝나는 시점에서 남은 예비용 부품에 대한 salvage value가 존재하며  $\pi_R(S(T + \tau) - F(T + \tau))$ 로 표현된다.

제약식을 살펴보면, 1<sup>st</sup> stage의 (2)는 기업이 결정하는 가격에 따른 제품의 수요함수를, (3)은 예비용 부품 생산의 dynamic equation으로써  $p(t)$ 와  $q(t)$ 는 모두 control variable, 즉 decision variables이다. (4)는 부품 불량 발생을 설명하며, (5)는 워런티 기간 동안 서비스 실패는 없다는 것을 의미하며, (6)은 state variables의 초기조건을 결정한다.

2<sup>nd</sup> stage의 경우 (8)은 (3)과 같고, (10)은 (5)와 같다. (7) 또한 제품의 수요함수를 의미하는데,  $T < t$ 에서는 기업이 제품 생산을 중단하므로 0이 된다. 따라서 (9) 또한 (4)와 같은 의미의 식이지만  $A(t)$  대신에  $A(T)$ 를 사용한다.

### 3.2. Solutions to the two-stage optimal control model

위 문제의 최적해에 대한 필요조건을 이용하여 해를 구하면 아래와 같다.

최적가격정책의 dynamics를 구하면 (11)과 같다.

$$p^*(t) = \frac{d_1 + c_1 d_2 - d_2 \lambda(t)}{2d_2} = \frac{d_1}{2d_2} + \frac{c_1}{2} + \frac{ht}{2} + \frac{Ye^{\alpha t}}{2} - \frac{Z}{2} \dots (11)$$

Where

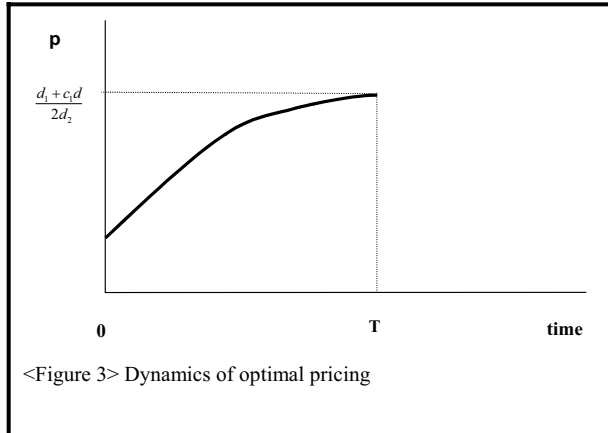
$$Y = \left( \frac{4\alpha}{2d_1 e^{\alpha T} - d_2 e^{2\alpha T} - d_2} \right) \left\{ \frac{h - \pi_R}{\alpha^2 k_2} e^{\alpha(T+\tau)} - \left( \frac{d_1}{2} - \frac{c_1 d_2}{2} + \frac{d_2 h T}{2} \right) \left( \frac{1 - e^{\alpha T}}{\alpha} \right) + \frac{d_2 h e^{\alpha T}}{4} \left( -\frac{2T}{\alpha} + \frac{2}{\alpha^2} - \frac{2e^{-\alpha T}}{\alpha^2} \right) \right\}$$

$$Z = hT + \left[ \left( \frac{4\alpha}{2d_1 e^{\alpha T} - d_2 e^{2\alpha T} - d_2} \right) \left\{ \frac{h - \pi_R}{\alpha^2 k_2} e^{\alpha(T+\tau)} - \left( \frac{d_1}{2} - \frac{c_1 d_2}{2} + \frac{d_2 h T}{2} \right) \left( \frac{1 - e^{\alpha T}}{\alpha} \right) + \frac{d_2 h e^{\alpha T}}{4} \left( -\frac{2T}{\alpha} + \frac{2}{\alpha^2} - \frac{2e^{-\alpha T}}{\alpha^2} \right) \right\} \right] e^{\alpha t}$$

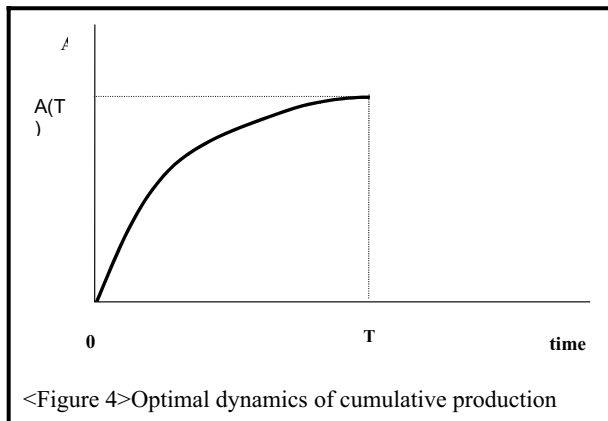
<Figure 3>에서 알 수 있듯이 최적가격 정책은  $0 \leq t < T$ 에서 증가하며, decreasing rate

인 것을 알 수 있다.

(11)의 최적가격정책의 dynamics에 따라서 누적제품생산량(판매량) 또한 (12)와 같이 유도되며, 그 형태는 <Figure 4>와 같다.



$$A^*(t) = \left(\frac{d_1}{2} - \frac{c_1 d_2}{2} + \frac{d_2 Z}{2}\right)t - \frac{d_2 h t^2}{4} - \frac{d_2 Y e^{\alpha t}}{2\alpha} + \frac{d_2 Y}{2\alpha} \dots (12)$$



제품의 누적불량발생량은 (13a), (13b)와 같으며 그 형태는 <Figure 5>와 같다.

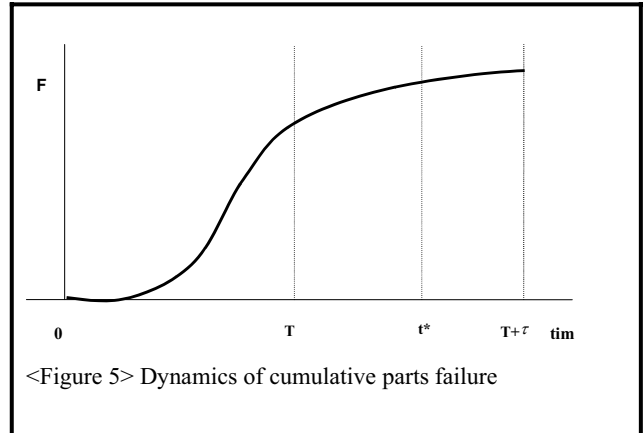
For  $0 \leq t \leq T$

$$F^*(t) = \left(\frac{d_1}{2} - \frac{c_1 d_2}{2} + \frac{d_2 Z}{2}\right)\left(t - \frac{1}{\alpha}\right) - \frac{d_2 h}{4}\left(t^2 - \frac{2t}{\alpha} + \frac{2}{\alpha^2}\right) - \frac{d_2 Y e^{\alpha t}}{4\alpha} + \frac{d_2 Y}{2\alpha} + \left(\frac{d_1 - c_1 d_2 + d_2 Z}{2\alpha} + \frac{d_2 h}{2\alpha^2} - \frac{d_2 Y}{4\alpha}\right)e^{-\alpha t} \dots (13a)$$

For  $T \leq t \leq T + \tau$

$F^*(t) = A(T) + C e^{-\alpha t}$ , C는 적분상수로써 다음과 같다.

$$C = \left(\frac{d_1}{2} - \frac{c_1 d_2}{2} + \frac{d_2 Z}{2}\right)\left(\frac{1 - e^{\alpha T}}{\alpha}\right) - \frac{d_2 h e^{\alpha T}}{4}\left(-\frac{2T}{\alpha} + \frac{2}{\alpha^2}\right) + \frac{d_2 Y e^{2\alpha T}}{4\alpha} + \frac{d_2 h}{2\alpha^2} - \frac{d_2 Y}{4\alpha} \dots (13b)$$



<Figure 5>의  $t^*$ 는  $S(t) = F(t)$ 가 일어나는 시점을 의미하며 그 식은 다음으로부터 유도된다.

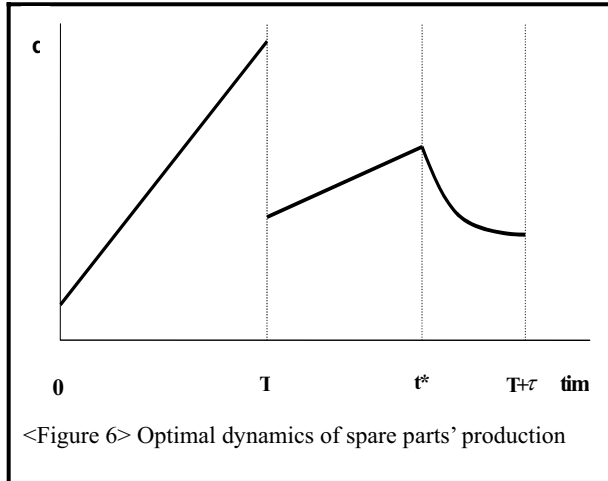
$$\begin{aligned} & -\frac{h}{2k_2} t^{*2} - \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}\right) h T t^* - \frac{(h - \pi_k)}{\alpha k_2} t^* e^{\alpha(T+\tau-t^*)} - \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}\right) \frac{(h - \pi_k) T}{\alpha} e^{\alpha(T+\tau-t^*)} - \frac{h - \pi_k}{\alpha^2 k_2} e^{\alpha(T+\tau-t^*)} \\ & = \left(\frac{d_1}{2} - \frac{c_1 d_2}{2} + \frac{d_2 Z}{2}\right) T - \frac{d_2 h T^2}{4} - \frac{d_2 Y e^{\alpha T}}{2\alpha} + \frac{d_2 Y}{2\alpha} - \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}\right) \frac{h T^2}{2} \end{aligned}$$

최적 예비용 부품 생산전략은 다음과 같고 형태는 <Figure 6>과 같다.

$$q^* = \frac{\gamma(t)}{k_1} = \frac{ht + X}{k_1} \text{ for } 0 \leq t \leq T \dots (15a)$$

$$q^* = \frac{\phi^*(t)}{k_2} = \frac{ht + X}{k_2} \text{ for } T \leq t \leq t^* \dots (15b)$$

$$q^*(t) = -\alpha C e^{-\alpha t} \text{ for } t^* \leq t \leq T + \tau \dots (15c)$$



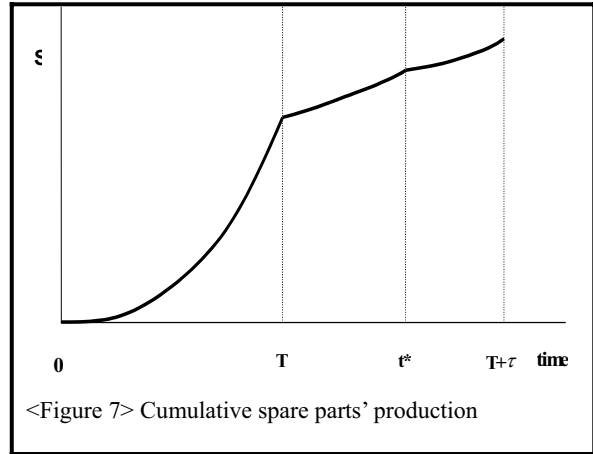
$0 \leq t \leq T$ 의 시간 사이에서의 예비용 부품 생산은 linear하게 증가하다. 그 후,  $T \leq t \leq t^*$  동안에도 linear하게 증가하지만 그 차이점은 기울기가 더 작다는 것이다. 이것은 우리가 가정한 예비용 부품 생산비용의 차이, 즉,  $k_1 < k_2$  에서 기인한다. 마지막으로  $t^* \leq t \leq T + \tau$  동안에는 convex pattern으로 감소하게 된다.

이러한 예비용 부품 생산전략에 따라서 누적 예비용 부품 생산량은 다음과 같다.

$$S^*(t) = \frac{ht^2}{2k_1} + \frac{X}{k_1}t \quad \text{for } 0 \leq t \leq T, \quad (17a)$$

$$S^*(t) = \frac{ht^2}{2k_2} + \frac{X}{k_2}t + \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}\right)\left(\frac{hT^2}{2} + XT\right) \quad \text{for } T \leq t \leq t^*, \quad (17b)$$

$$S^*(t) = A(T) + Ce^{-\alpha t} \quad \text{for } t^* \leq t \leq T + \tau. \quad (17c)$$



#### 4. Numerical analysis

##### 4.1. Optimal dynamics of state and control variables

앞장에서 구한 analytical solutions를 바탕으로 managerial implications를 얻기 위하여 numerical analysis를 수행하였다. 모수값은 Table 2와 같으며, 앞의 자동차 케이스를 바탕으로 production period는 4 years, 워런티 기간은 7 years로 정하였다.

Table 2. Parameters in the numerical analysis

$T$	$\tau$	$c_1$	$c_2$	$k_1$	$k_2$	$h$	$d_1$	$d_2$	$\alpha$	$\pi_R$
4	7	4	1	1	4	1	30	1	0.1	1.5

##### 4.2. Sensitivity analysis

모수들과 변수들과의 관계를 알기 위해서 numerical analysis를 수행하였다.  $t^*$ 가 작아진다는 것은 그만큼 생산 기간 동안 예비용 부품을 많이 생산할 유인이 떨어지는 것을 의미하며, 반대로  $t^*$  값이 커진다는 것은 생산 기간 동안의 비용 이득이 충분히 커서 미리 여분의 예비용 부품을 많이 생산해놓은 뒤 그것이 소진되는 데까지 좀 더 많은 시간이 걸리는 것을 의미한다.

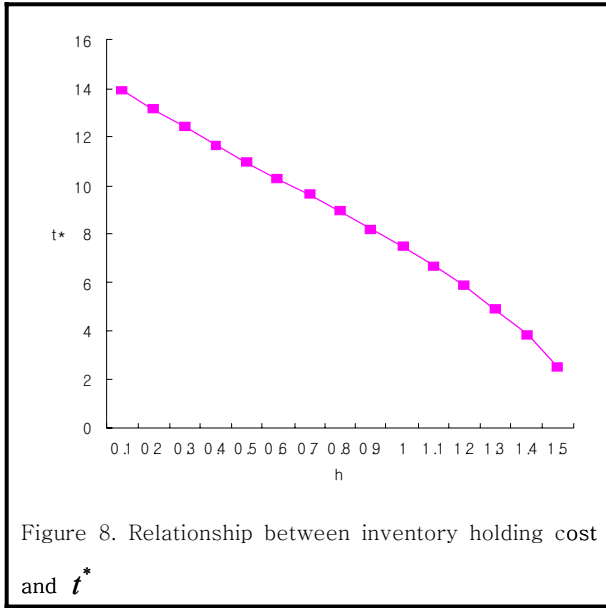


Figure 8을 보면 재고비용이 커짐에 따라서  $t^*$ 의 값은 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 재고비용이 높은 산업의 경우, 생산기간과 서비스 기간의 예비용 부품 생산비용 차이에도 불구하고, 미리 여분의 예비용 부품을 생산하는 것보다는 발생하는 수요만큼을 생산하는 것이 최적 예비용 부품 생산전략임을 알 수 있다.

Figure 9는 불량률과  $t^*$ 의 관계를 나타내는데 불량률에 있어서의 critical region이 존재하여 이 내에서는  $t^*$ 의 값이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 기업 입장에서 불량률을 얼마만큼 줄일 수 있는지가 EOL 서비스 수행에서 중요함을 의미한다. Figure 10은 이러한 불량률에 따라서 발생하는 누적 예비용 부품 수요량과 생산량을 의미한다.

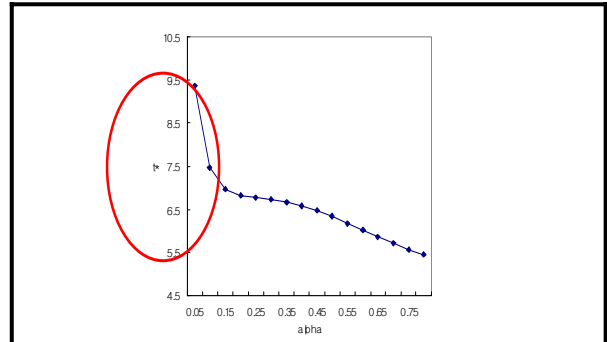


Figure 9. Relationship between  $t^*$  and  $\alpha$

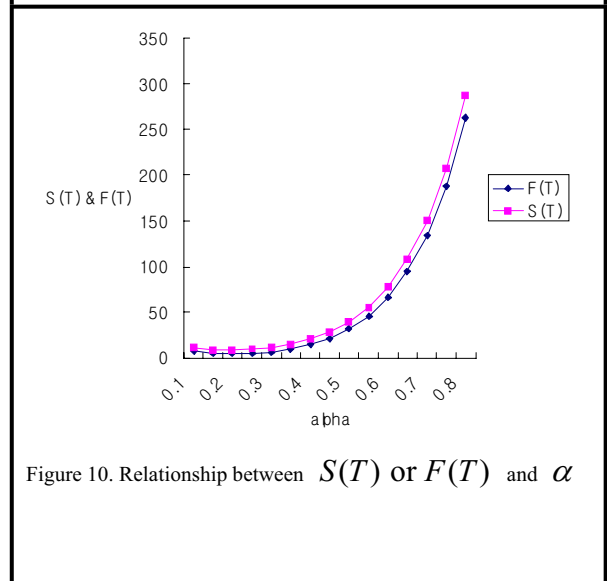
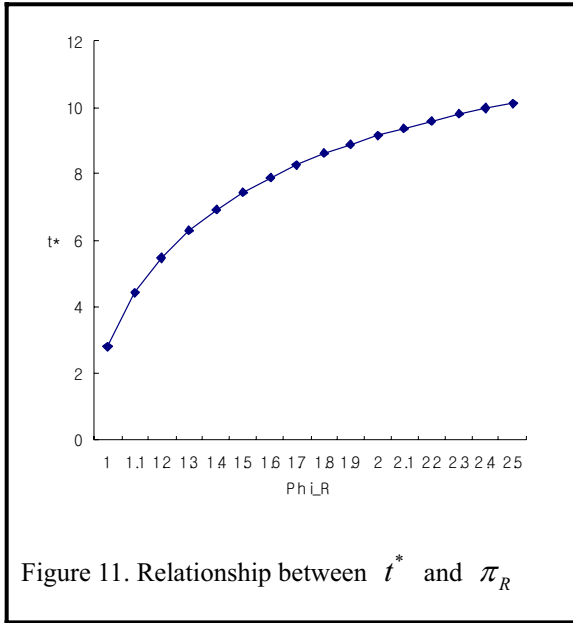
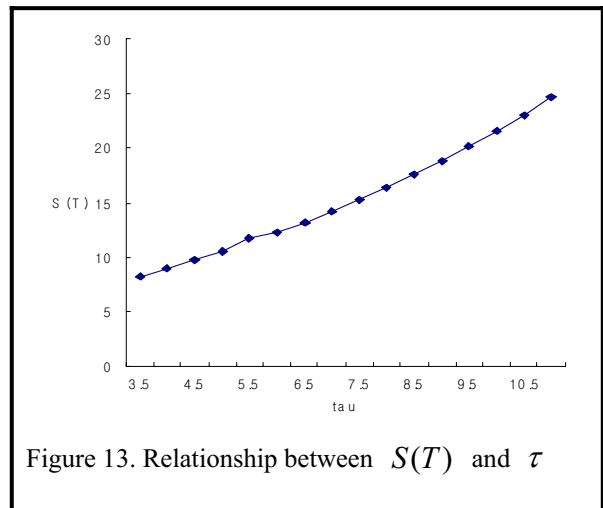
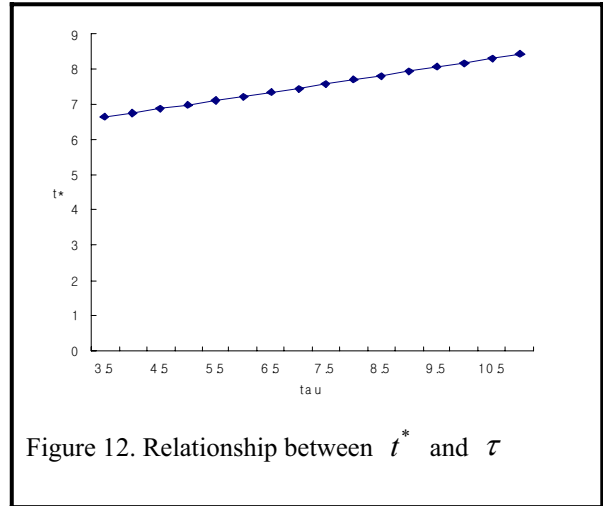


Figure 10. Relationship between  $S(T)$  or  $F(T)$  and  $\alpha$

예비용 부품의 잔존 가치(salvage value)와  $t^*$ 의 관계를 Figure 11를 통해 살펴보면, 예비용 부품의 잔존가치가 커짐에 따라서  $t^*$ 는 급격하게 증가함을 알 수 있다. 잔존가치가 커질수록, 기업 입장에서는 여분의 부품을 생산할 유인이 커지게 되는 것을 의미한다. 이는 잔존가치의 의미가 여분의 부품을 처분할 때 기업이 얻게 되는 가치이기 때문에 예비용 부품 재고비용, 예비용 부품 생산비용 등과 상쇄되는 값이라고 할 수 있다.



보증기간이 길어짐에 따라서 좀 더 초반에 적은 비용으로 여분의 예비용 부품을 생산할 유인이 커지는 것을 알 수 있다. 보증 기간의 증가에 대해서는  $t^*$ 가 선형적으로 증가하는 것 외에 좀 더 자세한 분석을 위하여 누적 예비용 부품 생산량을 살펴보았다. 그 결과  $t^*$ 는 선형적으로 증가하였지만, 그 사이 누적 예비용 부품 생산량은 지수적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 기업 입장에서 소비자에게 좀 더 긴 보증기간의 EOL 서비스를 제공하기 위해서는 얼마나 적은 비용으로 예비용 부품을 생산할 수 있는 생산 역량을 가지는 지가 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. 보증 기간에 따른 누적 예비용 부품 생산량 그래프는 아래와 같다.



### 5. Conclusions

본 연구에서는 일반적으로 받아들여질 수 있는 가정들을 사용한 수리적 모형을 통하여 EOL(end of life) 서비스 기간을 고려한 기업의 최적가격정책 및 예비용 부품생산전략을 살펴보았다. 또한 numerical analysis를 통하여 수요 발생률, 재고비용, 보증 기간, 잔존 가치에 따라 통제변수들이 민감하게 반응하며 결정적 영역이 있어 이 영역 안으로 위의 계수들을 조절할 수 있는 생산자의 역량이 매우 중요함을 알 수 있었다. 또한 생산기간과 서비스 기간의 생산비용의 경우에 그 페널티가 얼마나 작은지에 따라서 즉 얼마나 싸게 서비스 기간에서도 예비용 부품을 생산할 수 있는 지에 따라 기업의 비용을 많이 절감할 수 있음을 알



수 있었다.

## Reference

- Cattani, K. and G. C. Souza (2003). "Good buy? An analysis of end-of-life purchases." *European Journal of Operational Research*, 146, 1, 216-228.
- Fortuin, L. (1980). "The all-time requirement of spare parts for service after sales-theoretical analysis and practical results." *International Journal of Operations and Production Management*, 1, 1, 59-69
- Hasselbach, J., M. Mansour, and R. Graf (2002). "Reuse of components for the spare part management in the automotive electronics industry after end-of-production." *Proc. 9th CIRP Internet. Sem. Life Cycle Engrg. LCS 2002. Erlangen, Germany*, 191-197.
- Laan, E. v.d., M. Salomon, and R. Dekker (1995). "Production planning and inventory control for remanufacturable durable products.", Report 9531/A, Erasmus University Rotterdam.
- Makris, M. (2001). "Necessary conditions for infinite-horizon discounted two-stage optimal control problems." *Journal of Economic Dynamics & Control*, 25, 1935-1950.
- Spengler, T. and M. Schroter (2003). "Strategic Management of Spare Parts in Closed-Loop Supply Chains-A System Dynamics Approach.", *Interfaces*, 33, 6, 7-17
- Teunter, R. H. and L. Fortuin (1998). "End-of-life service: A case study.", *European Journal of Operational Research*, 107, 19-34.
- Teunter, R. H. and L. Fortuin (1999). "End-of-life service.", *International Journal of Production Economics*, 59, 487-497.
- Tomiyama, K. (1984). "Two-stage optimal control problems and optimality conditions.", *Journal of Economic Dynamics and Control*, 9, 317-337.