Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering
Vol. 32, No. 4, pp.184－191, December 2009.

기술발전에 따른 생존모형 선정

오현승*† ・김종수*・이한교*・임동순*・조진형**

*한남대학교 공과대학 산업경영공학과
**금오공과대학교 산업시스템공학과

Selection of Survival Models for Technological Development

H. S. Oh*† ・C. S. Kim*・H. K. Rhee*・D. S. Yim*・J. H. Cho**

*Department of Industrial and Management Engineering, Hannam University
**Department of Industrial Engineering, Kumoh Institute of Technology

In a technological driven environment, a depreciation estimate which is based on traditional life analysis results in a decelerated rate of capital recovery. This time pattern of technological growths models needs to be incorporated into life analysis framework especially in those industries experiencing fast technological changes. The approximation technique for calculating the variance can be applied to the six growth models that were selected by the degree of skewness and the transformation of the functions. For the Pearl growth model, the Gompertz growth model, and the Weibull growth model, the errors have zero mean and a constant variance over time. However, transformed models like the linearized Fisher-Pry model, the linearized Gompertz growth model, and the linearized Weibull growth model have increasing variance from zero to that point at which inflection occurs. It can be recommended that if the variance of error over time is increasing, then a transformation of observed data is appropriate.

Keywords : Life analysis, Technological Growth Models

1. 서 론

산업 설비의 자산가치가 감소하는 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나, 다음 원인 중 하나 또는 복합적인 원인에 의해 발생한다. 첫째, 물리적 훼손(Wear and tear from use)과 둘째, 기술상의 변화(Technological obsolescence) 및 경영이나 생산조건의 변화(Management policy) 등이다. 과거 산업 설비의 폐기에서는 이러한 여러 원인 중 물리적 훼손이 가장 중요한 원인이었고, 정확한 설비 자산의 생존모형을 추정하기 위해서 Iowa형 생존모형(Iowa type survivor curves)이 가장 널리 사용되고 있다[13, 15, 16, 23]. 그러나 최근의 첨단 설비들은 물리적 훼손보다는 기술상의 진부화나 새로운 기술과의 경쟁력이 설비자산 폐기의 주요한 원인이 되고 있다[14]. J. C. Fitch[5]와 F. Wolf [24]는 설비 폐기의 원인들을 개별화 시켜 적절한 생존모형을 구하고자 하였고, R. E. White[22]는 경제적인 원인들을 고려함으로써 가장 경제적인 생존모형을 구할 수 있다고 예를 들어 제시하였다. M. Dandekar[3]는 생존모형 개발 시 사용수명뿐만 아니라 연대기적인 시간을 고려하여야 한다고 주장하였으며, 제품수명주기(Product life cycle)를 고려한 생존모형을 제안하였다. H. S. Oh[10]는 기술예측모형을 이용한 생존모형을 제시하고 설비의 자

논문접수일 : 2009년 10월 13일　　논문수정일 : 2009년 10월 08일　　게재확정일 : 2009년 10월 22일
† 교신저자 hsoh@hnu.kr
※ 이 논문은 2009년도 한남대학교 교비학술연구 조성비 지원에 의하여 연구되었음.

산 감소 형태에 따른 각각의 기술예측모형을 선정하는 절차를 제안하였다. 이에 새로운 첨단설비의 생존형태를 추정하기 위하여 기술의 성장 형태를 고려한 생존모형을 고려하기 시작하였다. 따라서 본 연구에서는 기술상의 진부화에 따른 설비 자산의 폐기 형태를 추정하기 위하여 기술예측모형을 분석하여 가장 적절한 생존모형을 선정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 기술성장곡선

기술발전에 있어서 같은 기능을 갖는 제품이나 기술은 성능이 전혀 새로운 방법으로 탁월하게 뛰어난 새로운 제품이나 기술로 인하여 기존의 제품이나 기술을 대체시켜 나가게 된다. 이러한 기술의 발전이나 제품의 성능향상은 생물학적 성장의 추세를 따르는 경우가 많고 대체할 기존의 기술이 존재하지 않을 때 기술예측의 전문가들은 그 추세예측을 성장곡선(Growth curve)에 의해 시행한다.

성장곡선은 생물학에서 먼저 사용된 모형으로 미국의 생물학자이며 인구학자인 R. Pearl[17]에 의해 연구되어 로지스틱스(Logistics) 곡선 또는 Pearl 곡선으로 알려지게 되었다. 그의 연구에 의하여 생물기관의 성장은 시간에 따라 일정한 형태를 갖는다는 사실을 발견하였고 그 곡선의 형태가 S자와 유사하다고 하여 S곡선이라고도 한다. 성장곡선의 특징은 초기에는 증가율이 완만하다가 곧 급격히 증가되어 포화상태에 가까워지면 다시 증가 속도가 완만해지는 것으로 이러한 성질을 갖는 모든 곡선을 기술성장곡선이라 한다[20]. J. C. Fisher and R. H. Pry[4]는 기술의 대체 또는 확산은 초기단계에서 지수적 성질에 의하여 기술이 대체되며 그 형태는 S곡선 형태를 따른다고 설명한다. 이 모형은 기존기술보다 신기술이 우월할 때 적절한 모형으로 알려져 있다[9]. Gompertz 곡선은 B. Gompertz[1]가 고장률에 대한 규칙을 연구하면서 고안해 낸 곡선으로 모수 추정이나 수학적 조작이 간편하여 응용이 쉽고 다양한 왜도성(Skewness)이 있어 현실을 비교적 잘 반영시킨다[8]. Weibull 곡선은 진공튜브의 고장율이나 볼 베어링의 고장률 등의 산업재의 수명특성을 예측하기 위하여 경험에 의하여 발견된 분포형태이다. 이 분포는 이 분포를 발견한 W. Weibull [21]의 이름을 따라서 Weibull 분포로 명명되었다. 이 분포는 이후 그 이용 범위가 확장되어 자극과 반응시간과 같은 생물학적 현상 등에 적용되어져 왔다[18]. M. N. Sharif and M. N. Islam[19]은 기술예측을 위한 모형으로써 Weibull 성장곡선을 제안하였다.

기술예측에 관한 연구는 대부분 위와 같이 S곡선 형태인 기술성장곡선 모형을 가정하고 있다. H. S. Oh와 G. J. Moon[11]에 의하면 기술성장곡선은 크게 나누어 대칭적 형태를 갖는 곡선과 비대칭적 형태를 갖는 곡선 모형으로 구분할 수 있다. 대부분의 기술성장곡선은 지수함수 형태를 취하고 있기 때문에 로그변환을 하여 선형화시켜 단순 선형분석을 하여 모수들을 추정한다. 예를 들어 비선형함수인 Pearl 성장곡선은 로그변환을 하면 선형화된 Fisher-Pry 성장곡선의 형태와 동일하다[12]. 비선형함수 형태의 Gompertz 성장곡선도 로그변환을 하면 -ln{-ln[Y(t)/L]}인 선형 함수로 변환할 수 있다. Weibull 성장곡선은 ln{-ln[[L-Y(t)]/L]}으로 선형 함수화 된다. 그러나 확률변수인 오차항 $\varepsilon(t)$를 고려하면 선형화된 기술성장곡선은 비선형 기술성장곡선과 상이한 오차 형태를 갖게 되어 동일한 모형으로 간주할 수 없다. 예를 들어 선형화 된 Fisher-Pry 성장곡선의 종속변수는 Y(t)/[L-Y(t)]이므로 단순 선형분석을 하여 모수들을 추정한 후 다시 Y(t)의 형태로 변환시켜야 되나 선형 함수 형태의 Pearl 성장곡선은 Y(t)의 형태에서 직접 모수들을 추정할 수 있으므로 서로 다른 값을 갖게 된다.

3. 오차분석의 근사법

일반적인 선형 모형이 아래와 같고,

$$Y = \beta_o + \beta_1 X \tag{1}$$

여기서 $X \sim (\mu,\ \sigma^2)$이고 Var(X) = σ^2이라면 Y의 분산은,

$$\mathrm{Var}(Y) = (\beta_1)^2 \cdot [\mathrm{Var}(X)] = (\beta_1)^2 \cdot \sigma^2 \tag{2}$$

이다. 그러나 Y가 X에 대해 비선형적인 함수라면 위의 방법은 사용될 수 없다. 만약 Y = g(X)라고 정의하면, Taylor 급수[7]를 이용하여 Y는 아래와 같이 확장할 수 있다.

$$g(X) = g(\mu) + (X-\mu)g'(\mu) + \frac{1}{2}(X-\mu)^2 g''(\mu) + \cdots + \frac{1}{n!}(X-\mu)^n g^n(\mu) + \cdots \tag{3}$$

여기서 $g^n(\mu)$는 n차 미분하여 μ값을 대입한 것이다. g(X)에 대한 기대값은

$$E[g(X)] = g(\mu) + \frac{1}{2}g''(\mu)\,E(X-\mu)^2 + \cdots \tag{4}$$

이므로 $E(X-\mu) = 0$이고, $E(X-\mu)^2 = \mathrm{Var}(X) = \sigma^2$라 하면

식 (4)는

$$E[g(X)] = g(\mu) + \frac{1}{2}g''(\mu)\sigma^2 + \cdots \tag{5}$$

이다. g(X)에 대한 분산은

$$\begin{aligned} Var[g(X)] &= E[\,g(X) - E[\,g(x)\,]\,]^2 \\ &= E[g^2(X)] - [E[g(X)]]^2 \end{aligned} \tag{6}$$

이며 식 (3)을 이용하여,

$$\begin{aligned} g^2(X) &= g^2(\mu) + \\ &[[g'(\mu)]^2 + g(\mu)g''(\mu)](X-\mu)^2 + \cdots \end{aligned} \tag{7}$$

이며 또한,

$$\begin{aligned} E[g^2(X)] &= g^2(\mu) + \\ &[[g'(\mu)]^2 + g(\mu)g''(\mu)]\sigma^2 + \cdots \\ &= g^2(\mu) + \frac{1}{2}[g^2(\mu)]''\sigma^2 + \cdots \end{aligned} \tag{8}$$

여기서,

$$\begin{aligned} Var[g(X)] &\simeq g^2(\mu) + \frac{1}{2}[g^2(\mu)]''\sigma^2 - \\ &[g(\mu) + \frac{1}{2}g''(\mu)\sigma^2]^2 + \cdots \\ &= \sigma^2[\frac{1}{2}[g^2(\mu)]'' - g(\mu)g''(\mu)] + \cdots \end{aligned} \tag{9}$$

이므로 식 (8)을 이용하면,

$$[g'(\mu)]^2 = \frac{1}{2}[g^2(\mu)]'' - g(\mu)g''(\mu) \tag{10}$$

이 되어,

$$Var(Y) = Var[g(X)] \simeq \sigma^2 \cdot [g'(\mu)]^2 \tag{11}$$

으로 구해진다.

위 식은 변수 X의 평균값과 분산값이 주어지면 X의 선형함수 형태인 Y의 분산은 X의 분산값과 g(X)를 미분하여 평균값을 대입하여 구한 값을 자승하여 이 값들을 곱해서 근사적으로 구할 수 있다는 것을 보여준다.

4. 기술성장곡선의 오차 형태

4.1 Pearl 성장곡선

비선형 함수 형태인 Pearl 성장곡선은

$$Y(t) = \frac{L}{1 + \alpha\exp(-\beta t)} + \epsilon(t) \tag{12}$$

여기서 Y(t) = t시점에서의 기술발전 정도,
L = 기술발전의 상한 값,
t = 관측시점,
α ($\alpha > 0$) = 위치 모수,
β ($\beta > 0$) = 형태 모수,
$\varepsilon(t) \sim i.i.d.\ N(0,\ \sigma^2)$,

이고, 위 모형에 대한 기대값은 E[Y(t)} = L/[1 + exp($-\beta t$)] 이며 분산은 Var[Y(t)] = Var[$\varepsilon(t)$] = σ^2이 된다. 이러한 결과는 Y(t)에 대한 오차항의 형태가 시간에 따라 일정함을 시사한다.

4.2 선형화된 Fisher-Pry 성장곡선

선형 함수 형태인 Fisher-Pry 성장곡선은,

$$\frac{Y(t)}{L - Y(t)} = e^{2a(t-t_0)} \tag{13}$$

여기서 Y(t) = t시점에서의 기술의 성장 비율
L = 기술성장의 상한 값,
a = 초기년도 기술성장의 1/2,
t = 관측시점,
t_0 = 신기술이 50%를 대체하는 시간.

이 모형은 Pearl 모형으로 변환될 수 있으나[12] 모수 추정 과정은 동일하지 못하다. 즉, Fisher-Pry 성장곡선의 Y(t)에 대한 분산의 형태는 일정한 값으로 주어지지 않는다. 식 (11)에서 구해진 Taylor 급수를 이용하여야 한다.

만약 Fisher-Pry 성장곡선을 아래와 같이 선형화하면,

$$U(t) \equiv \ln[\frac{Y(t)}{L - Y(t)}] = \beta_0 + \beta_1 t + \epsilon(t) \tag{14}$$

여기서 U(t) = 선형화된 Fisher-Pry 성장곡선,
$\varepsilon(t) \sim i.i.d.\ N(0,\ \sigma^2)$,

이라면 선형화된 모형의 분산은 Var[U(t)] = Var[$\varepsilon(t)$] = σ^2으로 일정한 값을 갖는다. 그러나 구하고자 하는 것은 Y(t)에 대한 분산이므로 Y(t)에 대한 함수 형태로 변환시키면,

$$Y(t) \equiv g[U(t)] = \frac{L}{1 + \exp(-U(t))} \tag{15}$$

1차 미분을 하면,

$$g'[U(t)] = \frac{L\exp[-U(t)]}{[1+\exp[-U(t)]]^2} \quad (16)$$

이고, $u_t \equiv E\{g[U(t)]\} = L/\{1+\exp[-U(t)]\}$라 하면 식 (11)에 의해 Y(t)에 대한 분산은

$$\begin{aligned} Var[Y(t)] &\simeq \sigma^2[g'[U(t)]]^2 \quad (17)\\ &= \sigma^2 L^2 \left| \frac{L\exp[-2U(t)]}{[1+\exp[-U(t)]]^4} \right| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{at } g[U(t)] &= u_t \\ &= \frac{\sigma^2 u_t^2 (L-u_t)^2}{L^2} \end{aligned}$$

이 된다. 그러므로 $c = (variance)^{0.5}/\sigma$라 하면 식 (16)은

$$c = u_t - \frac{1}{L}u_t^2 \quad (18)$$

로 치환되며 이 함수를 미분하면,

$$\frac{dc}{du_t} = 1 - \frac{2}{L}u_t \quad (19)$$

이 된다. 식 (19)의 해를 구하면 $u_t = L/2$이 된다. 식 (19)를 미분하면,

$$\frac{d^2}{du_t^2} = -\frac{2}{L} < 0 \quad (20)$$

이므로 이 함수는 변곡점인 L/2에서 최대값을 갖는다. 위에서 보는바와 같이 선형화된 Fisher-Pry 성장곡선에서는 Y(t)의 분산은 일정한 값을 갖는 형태가 아니고 변곡점에서 최대값을 갖는 증가함수 형태를 보인다.

4.3 Gompertz 성장곡선

선형함수 형태의 Gompertz 성장곡선은,

$$Y(t) = L \cdot \exp(-G \cdot e^{-kt}) + \epsilon(t) \quad (21)$$

여기서 $Y(t)$ = t시점에서의 기술성장 정도,
L = 기술성장의 상한 값,
t = 관측시점,
$\varepsilon(t) \sim i.i.d.\ N(0,\ \sigma^2)$,

이고, 위 모형의 기대값은 $E[Y(t)] = L \cdot \exp[-G \cdot \exp(-kt)]$이고 분산은 $Var(Y(t)) = Var[\varepsilon(t)] = \sigma^2$이다. 이 결과는 Y(t)에 대한 분산이 변수 t에 대하여 일정한 값을 갖고 있다는 것을 제시한다.

4.4 선형화된 Gompertz 성장곡선

선형화된 Gompertz 성장곡선의 분산분석은 앞에서 논의 되었던 Fisher-Pry 성장곡선과 동일한 방법으로 해석할 수 있다. 만약 이 모형이 아래와 같이 선형 함수로 변환되면,

$$V(t) \equiv -\ln[-\ln(\frac{Y(t)}{L})] = \beta_0 + \beta_1 t + \epsilon(t) \quad (22)$$

여기서 V(t) = 치환된 선형 Gompertz 성장곡선, $\epsilon(t) \sim i.i.d.\ N(0,\ \sigma^2)$,

이 되고 식 (22)에서,

$$Y(t) \equiv g[V(t)] = L \cdot \exp[-e^{-V(t)}] \quad (23)$$

1차 미분을 하면

$$g'[V(t)] = L \cdot \exp\{-[V(t) + \exp[-V(t)]]\} \quad (24)$$

이고, $v_t \equiv E\{g[V(t)]\} = L \cdot \exp\{-\exp[-V(t)]\}$라 하면 식 (11)에 의해 Y(t)에 대한 분산은,

$$\begin{aligned} Var[Y(t)] &\simeq \sigma^2 \cdot [g'[V(t)]]^2 \quad (25)\\ &= \sigma^2 \cdot L^2 \left| \exp[-2[V(t)+\exp[-V(t)]]] \right| \\ \text{at } g[V(t)] &= v_t \\ &= \sigma^2 \cdot v_t^2 \cdot [\ln\frac{L}{v_t}]^2 \end{aligned}$$

이 된다. 만약 $c = (variance)^{0.5}/\sigma$라 하면, 식 (25)는,

$$c = v_t \cdot \ln L - v_t \cdot \ln v_t, \quad (26)$$

이 된다. 식 (26)를 미분하면,

$$\frac{dc}{dv_t} = \ln L - \ln v_t - 1 \quad (27)$$

이 된다. 식 (27)에서 해를 구하면 $v_t = L/e$인 변곡점이 된다. 위와 같이 선형화된 Gompertz 성장곡선에서의 Y(t)에 대한 분산값은 변곡점에서 최대값을 갖는 증가 형태를 취한다.

4.5 Weibull 성장곡선

Weibull 성장곡선은 식 (28)과 같이 표시된다.

$$Y(t) = L - L \cdot \exp[-(\frac{t}{\alpha})^{\beta}] + \epsilon(t) \quad (28)$$

여기서 Y(t) = 시점 t에서의 기술성장 정도,
L = 기술성장의 상한 값,
t = 관측시점,
α ($\alpha > 0$) = 위치 모수,
β ($\beta > 0$) = 형태 모수,
$\varepsilon(t) \sim i.i.d.\ N(0,\ \sigma^2)$,

이고 이 모형의 분산은 Var[Y(t)] = Var[$\varepsilon(t)$] = σ^2으로 변수 t에 대하여 일정한 값을 갖는다.

4.6 선형화된 Weibull 성장곡선

선형화된 Weibull 성장곡선의 Y(t)에 대한 분산 값은 일정한 값의 형태가 아니므로 Taylor 급수를 이용하여 구하여야 한다. 만약 Weibull 성장곡선이 아래와 같이 선형화 되면,

$$W(t) \equiv \ln[-\ln(\frac{L - Y(t)}{L})] \quad (29)$$

$$= \beta_0 + \beta_1 t + \epsilon(t)$$

여기서 W(t) = 치환된 선형 Weibull 성장곡선
$\epsilon(t) \sim i.i.d.\ N(0,\ \sigma^2)$,

이고 식 (29)를 Y(t)의 함수로 변환하면,

$$Y(t) \equiv g[W(t)] = L - L \cdot \exp[-e^{W(t)}] \quad (30)$$

1차 미분을 하면,

$$g'[W(t)] = L \cdot \exp\{-[\exp(W(t)) - W(t)]\} \quad (31)$$

이고 $w_t \equiv$ E{g[W(t)]} = L-L · exp{-exp[W(t)]}라 하면 식 (11)에 의해 Y(t)에 대한 분산은,

$$Var[Y(t)] \simeq \sigma^2 \cdot [g'[W(t)]]^2 \quad (32)$$

$$= \sigma^2 \cdot L^2 \mid \exp[-2[\exp[W(t)] - W(t)]] \mid$$

at g[W(t)] = w_t

$$= \sigma^2 \cdot (L - w_t)^2 \cdot [\ln(\frac{L}{L - w_t})]^2$$

이 되어 앞에서 보는바와 같이 일정한 값을 갖는 형태가 아니다.

5. 분석결과 및 결론

5.1 Kruskal-Wallis 검정

최적의 생존모형을 선정하기 위하여 과거 기술수준에 대한 시계열 자료<부록 A>를 이용하여 추정된 모수를 반영한 성장곡선 모형의 예측치와 실측치 차이인 잔차 분석을 한다. 구해진 첨단장비나 설비들의 시계열 자료에 대하여 예측력이 가장 좋은 성장곡선의 선정은 수정된 평균추정오차(MEE : Mean estimate error)가 가장 최소가 되는 모형을 선정한다.

$$MEE = \frac{\sum_{t=1}^{N} (Y_t - y_t)^2}{N} \quad (33)$$

여기서 Y_t = 시간 t에서의 실제 자료
y_t = 추정된 생존모형에 의한 자료

추정된 각 생존모형에 관하여 비모수적인 Kruskal-Wallis 검정[2]을 한 결과는 <표 1>과 같다.

<표 1> 성장곡선의 평균추정오차

모형	LFP	LGZ	LWB	PL	GZ	WB
1	5.217	5.575	2.436	3.105	2.609	2.342
2	4.712	0.620	1.770	1.189	0.595	0.613
3	4.076	1.160	1.157	1.964	1.130	1.100
4	0.278	6.849	9.851	0.235	0.698	0.394
5	4.504	0.748	1.063	1.456	0.709	1.063
6	1.210	8.781	5.612	0.680	0.599	0.965
7	4.286	1.582	1.906	1.582	0.784	1.050
8	3.010	1.789	4.767	1.644	1.457	1.771
9	16.672	1.945	6.035	3.094	0.820	1.281
10	3.580	17.712	7.260	0.189	1.535	0.313
11	1.298	2.699	7.138	1.216	2.302	2.255
12	3.169	9.507	10.651	1.706	4.079	2.455
13	8.639	1.434	3.944	3.170	1.089	2.259
14	15.847	2.468	6.049	4.110	1.345	1.850
15	4.928	1.250	10.203	1.823	1.030	0.917
16	2.592	10.276	16.168	1.169	3.374	1.422
17	2.163	7.709	10.148	1.634	3.370	2.338
18	10.712	1.656	6.763	1.577	0.425	0.792
19	12.121	0.392	6.585	1.448	0.323	1.231
20	11.585	2.134	4.393	3.357	1.246	1.195
21	6.596	2.101	2.168	3.902	1.988	2.036
22	9.916	2.730	3.747	4.838	2.141	2.885
23	6.232	4.142	5.855	2.049	1.529	1.478
24	3.748	1.499	2.028	1.465	0.951	1.055
25	2.168	0.822	1.037	0.619	0.494	0.448

key : LFP = 선형 Fisher-Pry 성장곡선
LGZ = 선형 Gompertz 성장곡선
LWB = 선형 Weibull 성장곡선
PL = Pearl 성장곡선
GZ = Gompertz 성장곡선
WB = Weibull 성장곡선

<표 1>에서 보는 바와 같이 성장곡선의 Y(t)에 대한 평균추정오차 값에는 많은 차이가 있다.

5.2 Goldfeld-Quandt 검정

각 모형에 차이가 있어 최적의 생존모형을 선정하기 위하여 선형화된 성장곡선과 비선형화된 성장곡선의 오차분석에 대한 Goldfeld-Quandt[6] 검정을 한다. 오차분산에 대한 분산분석의 결과는 <표 2>와 같다.

<표 2> 오차항의 검정 결과

성장곡선	예측오차	F-value	유의수준
LFP PL	6.3432 2.0978	25.34	0.0001
LGZ GZ	4.1532 1.5398	9.57	0.0050
LWB WB	5.9034 1.5011	29.25	0.0001

<표 2>에서 보는 바와 같이 성장곡선들을 선형화하여 기술성장을 예측하였을 경우와 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 기술예측모형을 사용하여 기술성장을 예측할 경우 계산의 편이를 위하여 무조건 선형 함수로 변환하여 추정하면 정확한 기술성장곡선을 선정할 수 없다. 본 연구의 결과를 이용하여 오차항의 분산이 일정할 경우에는 Pearl 성장곡선, Gompertz 성장곡선 및 Weibull 성장곡선을 사용하여야 한다. 그러나 오차항의 분산이 증가하거나 감소할 때에는 선형화 하여 Fisher-Pry 성장곡선, 선형화된 Gompertz 성장곡선 및 선형화된 Weibull 성장곡선을 사용하여야 한다.

참고문헌

[1] Booth, H.“Transforming Gompertz’s Function for Fertility Analysis : The Development of a Standard for the Relational Gompertz Function,” *Population Studies*, 38 : 495-506, 1993.

[2] Conover, W. J.Practical Non-parametric Statistics, 2nd Edition, John Wiley and Sons, 1980.

[3] Dandekar, M.; “Investigation the Product Life Cycle Concepts : An Application to Capital Recovery, Evaluation within the Telephone Industry,” Ph.D. Dissertation, Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, U. S. A., 1987.

[4] Fisher, J. C. and Pry, R. H.; “A Simple Substitution Model of Technological Change,” *Technological Forecasting and Social Change*, 3 : 75-88, 1971.

[5] Fitch, J. C.; “Conceptual Framework for Forecasting the Useful Life of Industrial Property,” Proceedings of the Iowa State University Regulatory Conference, Ames, Iowa, U.S.A., 1984.

[6] Goldfeld, S. M. and Quandt, R. E.; “Some Test for Homoscedasticity,” *Journal of the American Statistical Association*, 60(310) : 539-547, 1965.

[7] Hayes, J. G.; Numerical Approximation to Functions and Data, University of London, The Athlone Press, 1970.

[8] Lakani, H.; “Diffusion of Environment-Saving Technological Change : A Petroleum Refining Case Study,” *Technological Forecasting and Social Change*, 7(1) : 33-35. 1975.

[9] Martino, J. P.; Technological Forecasting For Decision Making, Elsevier, New York, U.S.A., 1975.

[10] Oh, H. S.; “The Selection of Technological Forecasting Models in Life Analysis,” Ph.D. Dissertation, Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, U.S.A., 1988.

[11] Oh, H. S. and Moon, G. J.; “A Comparison of Technological Growth Models,” *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 22(2) : 51-68. 1994.

[12] Oh, H. S., Yim, D. S. and Moon, G. J.; “Error Structure of Technological Growth Models,” *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 23(1) : 95-105, 1995.

[13] Oh, H. S., Kim, C. S. and Cho, J. H.; “Estimation of Retirement Rate on Domestic Industrial Property,” *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 25(4) : 79-85, 2002.

[14] Oh, H. S., Kim, H. K., Rhee and K. T., Kim.; “A Study on the Application of Mixed Weibull Function to Estimate Survivor Curves of Industrial Property,” *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 30(1) : 66-73, 2007.

[15] Oh, H. S., Kim, C. S., Suh, J. Y. and Cho, J. H.; “A Study on the Estimation of Economic Service Life on Semiconductor Equipment,” *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 30(4) : 164-169, 2007.

[16] Oh, H. S., Kim, C. S., Rhee, H. K., and Cho, J. H.; "A Study on the Estimation of Depreciation Rate on Petrochemical Equipment," *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 32(1) : 130-136, 2009.

[17] Pearl, R.; The Biology of Population, New York : Alfred A. Konpf 1925.

[18] Sharif, M. N. and Uddin, G. A.; "A Procedure for Adapting Technological Forecasting Models," *Technological Forecasting and Social Change*, 7 : 99-106. 1975.

[19] Sharif, M. N. and Islam, M. N.; "The Weibull distribution as a General Model for Forecasting Technological Change," *Technological Forecasting and Social Change,* 18 : 247-256, 1980.

[20] Tingyan, X.; "A Combined Growth Model for Trend Forecasts," *Technological Forecasting and Social Change*, 8 : 175-186, 1990.

[21] Weibull, W.; "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *Journal of Applied Mechanics*, 18 : 293-297, 1951.

[22] White, R. E.; "A Test Procedure for Simulated Plant Record Method of Life Analysis," J*ournal of the American Statistical Association*, 70 : 1204-1212, 1970.

[23] Winfrey, R.,; Statistical Analysis of Industrial Property Retirement, Revised edition : ERI Bulletin 125, Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, U.S.A., 1967.

[24] Wolf F.; "Forecasting Force of Mortality," Proceedings of the Iowa State University Regulatory Conference, Ames, Iowa, 1985.

<부록 A> 시계열자료의 목록

1. Rayon and nylon for cotton as tire cord in tire manufacture(1958~1982)
2. Nylon, polyester and fiberglass for rayon and cotton as tire cord in tire manufacture(1982~1992)
3. Catalytic and hydro-cracking for thermal cracking in crude oil processing(1968~1996)
4. Steam and motor for sail in the United Kindom registered shipping(1968~1988)
5. Percent of underground bituminous coal automatically loaded(1943~1990)
6. Diesel for coal and fuel oil consumption on American railroads(1958~1990)
7. Percent of independent telephone companies connecting with the Bell system(1939~1997)
8. Open hearth for bessemer in raw steel production in the United States(1906~1990)
9. Percentage of U.S. corn acreage planted with corn hybrids (1963~1990)
10. Diesel for steam locomotives(1969~1992)
11. Percentage of Pennsylvania anthracite mined by stripping (1947~1996)
12. Steam and motor for sail in the U.S. Merchant Marine (1850~1990)
13. Basic oxygen process for bessemer and open hearth in raw steel production in the U.S.(1975~2001)
14. Color for B&W television in the United Kindom(1988~2004)
15. Percentage of iron ore pelletized in the U.S.(1973-1993)
16. Percentage of farm dwelling units with electric service (1960~1996)
17. By-product coke for oven coke in the U.S.(1930~1992)
18. Percentage of households in the U.S. with a television set(1956~1990)
19. Percentage of households in the U.S. with a radio receiver(1947~1990)
20. Percentage of households in the U.S. with a color television set(1965~1994)
21. Percentage of homes in the U.S. with at least a mechanical refrigerator(1965~1992)
22. Basic oxygen for bessmer and open hearth pig iron total consumption in the U.S.(1967~1994)
23. 국내 제과업 제조설비(1983~1998)
24. 국내 석유화학 제조설비(1974~2005)
25. 국내 반도체 제조설비(1997~2007)