

불합격 제품을 재가공할 때 정규 및 로지스틱 모형하에서 경제적 선별검사

홍성훈[†]

전북대학교 산업시스템공학과

Economic Screening Procedures in Normal and Logistic Models when the Rejected Items are Reprocessed

Sung Hoon Hong

Department of Industrial and Systems Engineering, Chonbuk National University, Chonju, 561-756

In this paper, economic screening procedures with dichotomous performance variable T and continuous screening variable X are considered when the rejected items are reprocessed. Two models are considered; normal and logistic models. It is assumed that X given T is normally distributed in the normal model, and $P(T=1|X=x)$ is given by a logistic function in the logistic model. Profit models are constructed which involve four price/cost components; selling price, cost from an accepted nonconforming item, and reprocessing and inspection costs. Methods of finding the optimal screening procedures are presented and numerical examples are given.

Keywords: screening procedures, logistic model, normal model, performance variable, screening variable

1. 서론

과거에는 자동차의 브레이크나 보석류 등과 같이 불량으로 인해 안전성이나 경제적인 면에서 큰 손실이 생길 위험이 있는 제품들에 한해서만 전수검사가 실시되어 왔다. 그러나 품질에 대한 고객의 높은 관심과 자동화된 검사 시스템의 발달로 인해 최근 들어 전수검사가 널리 활용되고 있다. 특히 레이저, 초음파, 그리고 패턴인식기법 등을 활용한 검사기법들의 개발은 산업체에서 전수검사의 도입을 확산시키고 있으며, 이에 대한 연구도 많은 학자들에 의해 진행되고 있다 (Tang, 1988; Hui, 1990; Duffuaa and Al-Najjar, 1995; Hong and Elsayed, 1998). 한편, 제품 특성에 따라서는 전수검사가 불가능한 경우가 있는데, 파괴검사를 요하는 제품이 대표적인 예이다. 이러한 경우 주품질특성과 높은 상관관계를 갖고 비파괴검사가 가능한 대

용특성이 존재한다면, 대용특성을 측정함에 의해 제품을 검사할 수 있다. 예를 들어, 자동차 본체에 용접되어 있는 시트의 용접강도 측정은 파괴검사를 필요로 하므로 용접강도 대신 자동차 시트에 초음파검사를 하여 그 결과에 의해 제품의 합격 여부를 판정할 수 있다. 이러한 검사를 대용특성을 활용한 선별검사라 한다. 선별검사는 주품질특성이 연속형 변수인지, 아니면 양품/불량품으로만 구분 가능한 이치형 변수인지에 따라 연구 분야를 구분할 수 있는데, 연속형 변수에 대한 연구로는 Owen *et al.* (1975) 이후, Tang (1987), 그리고 Drezner and Wesolowsky (1995) 등이 있으며, 이치형 변수에 대한 연구로는 Boys and Dunsmore (1987) 이후, Kim and Bai (1990), Bai *et al.* (1995), 그리고 Hong *et al.* (2001)이 있다. 특히 Tang and Tang (1994)은 이 분야의 연구 결과들을 요약 정리해 소개하는 논문을 발표한 바 있다.

전수검사나 대용특성을 활용한 선별검사에서 불합격된 제

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-041-E00123).

[†] 연락저자: 홍성훈 교수, 561-756 전북 전주시 덕진구 전북대학교 산업시스템공학과, Fax: 063-270-2333, e-mail: shhong@moak.chonbuk.ac.kr
2002년 2월 접수, 2회 수정(4주 소요) 후, 2002년 5월 게재 확정.

품들은 그 특성에 따라 재가공, 폐기처분, 할인판매 등 여러 가지 방법으로 처리할 수 있다. 그런데 위에서 언급한 이제까지의 연구들은 대부분 폐기처분 또는 할인판매의 경우를 고려하여 모형을 설정하였다. 즉, 불합격된 제품들에 대해서는 모두 일정한 양의 고정비용이 발생한다는 가정을 하였다. 본 논문에서는 검사에서 불합격된 제품을 재가공하는 상황에서 최적 검사방식을 구하고자 한다. Tang (1988)이 불합격된 제품을 재가공한다는 가정을 한 바 있으나, 여기서는 재가공한 제품의 품질특성이 항상 목표값(ideal value)과 일치한다는 비현실적인 가정을 한 바 있다. 그러나 실제로 재가공한 제품도 생산조건에 따라 품질수준에 차이가 나는 것은 당연하다. 본 논문에서는 불합격된 제품들은 가공 이전의 상태로 환원된다고 가정한다. 이때 재가공한 제품의 품질특성은 최초 가공에 의해 생산된 제품과 마찬가지로 동일한 확률분포를 갖게 된다. 이러한 공정의 예로서 핸드폰의 부품 중 하나인 듀플렉서 도금 공정을 생각할 수 있다. 듀플렉서는 핸드폰에서 통화음의 수신 및 송신 기능을 수행하는 핵심 부품으로, 도금시 소체와 도금액 사이의 밀착력이 중요한 품질특성인데, 밀착력이 낮은 소체에 대해서는 도금액을 벗겨 내고 재도금을 한다. 물론 도금액을 벗겨 내는 과정에서 화학 처리를 하게 되는데, 화학 처리의 목적은 소체를 도금 전 상태로 만드는 것이다. 이와 같은 상황에서 재가공된 소체의 품질특성은 최초 작업에 의해 생산된 소체의 품질특성과 동일한 확률분포를 갖게 됨은 물론이다. Golhar (1987), Golhar and Pollock (1988), 그리고 Hong and Elsayed (1999) 등은 이와 같은 재가공 가정하에서 공정평관을 경제적으로 결정하는 문제를 고려한 바 있다.

한편, Hong *et al.* (1998)은 이와 동일한 가정하에서 대응특성을 활용한 선별검사를 구한 바 있는데, 이 논문에서는 주품질특성과 대응특성이 모두 연속형 변수인 경우를 고려하였다. 본 논문에서는 주품질특성 T 는 양·불량으로만 구분 가능한 이치형 변수이고, 대응특성 X 는 연속형 변수인 상황에서 대응특성의 검사에 기초해 제품의 합격·불합격 여부를 판정하기 위한 선별검사를 구하고자 한다. 예를 들어, 자동차 연료분사 시스템의 정상적인 작동 여부는(이치형 주품질특성) 시스템에 장착된 노즐을 통한 공기유출량(연속형 대응특성)을 측정함에 의해 검사할 수 있다. 대응특성을 활용한 선별검사에서는 주품질특성 T 와 대응특성 X 의 관계를 올바르게 설정하는 것이 중요한데, 본 논문에서는 정규 모형과 로지스틱 모형의 두 가지 모형을 고려하고자 한다. 두 모형 모두에 대해 제품의 판매가격, 불량품의 합격으로 인한 손실 비용, 불합격 제품의 재가공 비용, 그리고 품질검사 비용 등으로 구성된 이익함수모형을 설정하고 이를 최대화하는 선별검사방식을 구하고자 한다.

2. 정규 모형

검사대상이 되는 제품의 주품질특성을 T 라 정의하자. 양품일

때 $T=1$, 불량품일 때 $T=0$ 을 취하는 이치형(dichotomous) 확률변수이다. 또한 주품질특성과 높은 상관관계를 갖고 상대적으로 저렴한 검사 비용을 갖는 대응특성을 X 라 하자. 정규 모형에서는 $T=i, i=0, 1$ 일 때, X 의 조건부 확률분포를 평균 $\mu_i (\mu_0 < \mu_1)$, 분산 σ_i^2 인 정규분포를 따른다고 가정한다. 물론 $\mu_0 > \mu_1$ 인 경우도 동일한 방법에 의해 최적 검사방식을 구할 수 있다. Boys and Dunsmore(1987), Bai *et al.* (1995), Hong *et al.*(2001), 그리고 Kwon *et al.* (2001)과 같이 주품질특성이 이치형 변수일 때를 고려한 이 분야의 다른 연구 논문들도 동일한 가정을 한 바 있다.

제품의 합격 여부는 대응특성 X 의 측정 결과에 기초해 판정하게 되는데, $X \geq L$ 이면 제품을 합격시키고 단위당 A 의 가격에 판매한다. 하지만 주품질특성 T 가 아닌 대응특성 X 의 측정 결과에 기초해 판정하므로 합격된 제품 중에는 불량품이 포함될 수 있으며, 불량품이 출하되는 경우 단위 제품당 a 의 손실 비용이 발생한다. 한편, $X < L$ 인 경우 제품은 불합격되는데, 이들에 대해서는 재가공을 실시한다. 재가공한 제품과 최초 가공에 의해 생산된 제품의 품질특성이 동일한 확률분포를 갖는다고 가정하였으므로, 단위 제품당 이익함수 TP 는

$$TP = \begin{cases} A - s_x, & x \geq L, T = 1 \\ A - s_x - a, & x \geq L, T = 0 \\ ETP - r - s_x, & x < L \end{cases} \quad (1)$$

이 된다. 단, 식 (1)에서 s_x 는 대응특성 X 의 측정비용, r 은 재가공 비용, 그리고 ETP 는 단위 제품당 기대이익이다.

$g(x|T=i)$ 를 $T=i, i=0, 1$ 일 때 X 의 조건부 확률밀도함수라 정의하면 기대이익함수는

$$ETP = \int_L^\infty (A - s_x)g(x|T=1)P(T=1)dx + \int_L^\infty (A - s_x - a)g(x|T=0)P(T=0)dx + (ETP - r - s_x) \left\{ 1 - \int_L^\infty \ell(x)dx \right\} \quad (2)$$

가 된다. 단, $\ell(x)$ 는 X 의 주변확률밀도함수로서 품질검사 전 불량품의 비율 $P(T=0) = p$ 라 정의하면

$$\ell(x) = p \frac{1}{\sigma_0} \phi\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma_0}\right) + (1 - p) \frac{1}{\sigma_1} \phi\left(\frac{x - \mu_1}{\sigma_1}\right) \quad (3)$$

이 된다. 단, $\phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 확률밀도함수이다. 식 (2)를 ETP 에 대해 재정리하면

$$ETP = (A + r) - \frac{ap\{1 - \Phi(\xi)\} + s_x + r}{1 - p\Phi(\xi) - (1 - p)\Phi\left(\frac{\sigma_0\xi + \mu_0 - \mu_1}{\sigma_1}\right)} \quad (4)$$

이 된다. 단, 식 (4)에서 $\xi = \frac{L - \mu_0}{\sigma_0}$ 이며, $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 누적확률분포함수를 의미한다.

기대이익함수 (4)가 ξ 에 대해 위로 볼록한 단봉함수라면 $\frac{\partial ETP}{\partial \xi} = 0$ 를 만족하는 ξ 값이 ξ^* 가 된다. 그러나 기대이익함수는 분모에 $1 - p\Phi(\xi) - (1-p)\Phi\left(\frac{\sigma_0\xi + \mu_0 - \mu_1}{\sigma_1}\right)$, 분자에 $ap(1 - \Phi(\xi))$ 를 포함하고 있으므로, 기대이익함수가 위로 볼록한 단봉함수임을 수학적으로 증명할 수는 없었다. 따라서 Golhar (1987)이나 Hong and Elsayed (1999)에서와 동일한 방법에 의하여 기대이익함수에 포함된 모수들의 여러 값에서 수리적으로 분석하였다. 그 결과 $\frac{\partial ETP}{\partial \xi} = 0$ 를 만족하는 ξ 값은 단지 하나만 존재하였으며, 이 값에서 $\frac{\partial^2 ETP}{\partial \xi^2} > 0$ 임을 알 수 있었다. <그림 1>은 ($\mu_0 = 10.0$, $\mu_1 = 15.0$, $\sigma_0 = \sigma_1 = 3.0$), $p = 0.1$, 그리고 ($A = 150$, $a = 500$, $r = 25$, $s_x = 10$)일 때 ξ 값에 따른 기대이익함수 ETP의 형태를 도시한 것으로 ETP는 ξ 의 단봉함수임을 알 수 있다. 따라서 ξ^* 는 $\frac{\partial ETP}{\partial \xi} = 0$ 를 만족하는 다음 식

$$p\phi(\xi) \left[a(1-p) \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\sigma_0\xi + \mu_0 - \mu_1}{\sigma_1}\right) \right\} - (s_x + r) \right] = (1-p) \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \phi\left(\frac{\sigma_0\xi + \mu_0 - \mu_1}{\sigma_1}\right) [ap(1 - \Phi(\xi)) + (s_x + r)] \quad (5)$$

으로부터 구할 수 있다.

최적 기각치 L^* 는 기대이익함수 (4)를 최대로 하는 ξ^* 를 구한 후

$$L^* = \mu_0 + \sigma_0 \cdot \xi^* \quad (6)$$

의 관계식으로부터 구할 수 있으며, 선별 후 불량품의 비율은

$$P(T=0 | X \geq L^*) = \frac{P(T=0, X \geq L^*)}{P(X \geq L^*)} = \frac{p(1 - \Phi(\xi^*))}{(1-p) \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\sigma_0\xi^* + \mu_0 - \mu_1}{\sigma_1}\right) \right\} + p(1 - \Phi(\xi^*))} \quad (7)$$

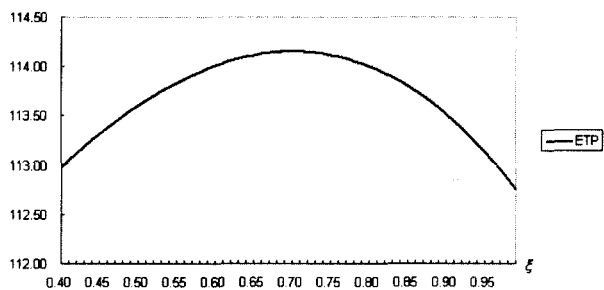


그림 1. ξ 값에 따른 기대이익함수 ETP.

가 된다.

<예제 1> 핸드폰의 부품 중 하나인 듀플렉서는 통화음의 수신 및 송신 기능을 수행하는 핵심 부품이다. 이 부품은 성형, 소성 공정을 거쳐 동 도금을 하게 된다. 이 부품의 주품질특성 중 하나가 원하는 주파수를 만족하면서 올바른 전기적 특성을 주는가이다. 하지만 듀플렉서를 핸드폰에 장착한 후에도 이 특성의 측정이 가능하기 때문에 도금 공정 후에는 대응특성으로 소체와 도금액 사이의 밀착력을 측정한다. 밀착력이 높을수록 올바른 전기적 특성을 가질 확률이 높는데, 과거의 검사 기록들을 토대로 분석한 결과 올바른 전기적 특성을 갖는 듀플렉서의 밀착력은 평균 15.0이고, 표준편차는 3.0인 정규분포를 따르고, 듀플렉서가 불량일 때의 밀착력은 평균 10.0, 표준편차 3.0인 정규분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 또한 선별 전 불량 듀플렉서의 비율 $p = 0.1$ 로 알려져 있다.

밀착력이 낮은 소체에 대해서는 도금액을 모두 벗겨 내고 재도금을 하게 된다. 도금액을 벗겨 내는 과정에서는 소체에 화학 처리를 하게 되는데, 화학 처리의 목적은 소체를 도금 전 상태로 만드는 것이다. 이와 같은 상황에서 재가공된 제품의 품질특성은 최초 작업에 의해 생산된 제품의 품질특성과 동일한 확률분포를 따르게 된다. 물론 밀착력이 높은 제품 중에도 불량 듀플렉서는 존재하는데, 불량 듀플렉서는 검사에서 발견되지 않을 시, 핸드폰에 최종적으로 장착되고 더욱 나쁜 경우는 고객에게 불량 핸드폰이 전달된다. 이러한 점을 감안할 때 불량 듀플렉서는 평균적으로 단위당 500 (단위: 백원)의 손실 비용을 유발한다. 듀플렉서 한 단위의 판매가격 $A = 150$, 불량 듀플렉서 재가공 비용 $r = 25$, 품질검사 비용 $s_x = 10$ 이라 할 때, 듀플렉서의 합격·불합격 여부를 판정하는 최적 기각치 $L^* = 12.10$ 을 얻을 수 있다. 이때의 기대이익은 114.15이며, 선별 후 불량률은 3.13%로 줄어들게 된다.

제품의 판매가격에 대해서는 정확한 값을 알 수 있으나, 불량제품의 판매로 인한 손실 비용 등 일부 비용 항목의 추정치는 오류의 가능성을 갖고 있다. 본 모형이 비용항목의 추정값에 얼마나 민감하게 반응하는지를 알기 위하여 a , r , 그리고 s_x 의 잘못된 사용에 따른 기대이익의 감소율을 <표 1>에 정리하였다. 기대이익 감소율은 다음과 같이 계산한 값이다.

$$\text{기대이익 감소율} = \frac{ETP^* - ETP}{ETP^*} \times 100(\%) \quad (8)$$

단, 식 (8)에서 ETP^* 는 올바른 비용항목 추정값을 사용했을 때의 기대이익이고, ETP 는 잘못된 비용항목 추정값을 사용했을 때의 기대이익이다. <표 1>은 a , r , 그리고 s_x 의 값을 $\pm 20\%$ 잘못 추정하였을 때의 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 모든 경우에 대해 기대이익의 감소율은 2%를 초과하지 않는다는 것을 알 수 있었으며, 따라서 본 모형이 비용항목에 대해 민감하지 않음을 알 수 있었다.

정규분포의 모수인 (μ_0 , μ_1 , σ_0 , σ_1)의 변화에 따른 최적 기각치 L^* 와 기대이익의 감소율을 파악하기 위해 (μ_0 , μ_1 ,

표 1. a, r , 그리고 s_x 의 변화에 따른 기대이익 감소율

번호	a	r	s_x	L^*	기대이익 감소율(%)
1	400	20	8	12.10	0.01
2	400	20	12	11.90	0.05
3	400	30	8	11.62	0.33
4	400	30	12	11.46	0.48
5	600	20	8	12.69	0.55
6	600	20	12	12.51	0.24
7	600	30	8	12.25	0.04
8	600	30	12	12.10	0.01

표 2. $(\mu_0, \mu_1, \sigma_0, \sigma_1)$ 의 변화에 따른 최적 기각치와 기대이익 감소율

번호	μ_0	μ_1	$\sigma_0 = \sigma_1$	L^*	기대이익 감소율(%)
1	8.5	12.75	2.55	10.29	3.62
2	8.5	12.75	3.45	9.59	6.20
3	8.5	17.25	2.55	13.00	1.31
4	8.5	17.25	3.45	12.90	1.01
5	11.5	12.75	2.55	9.10	8.13
6	11.5	12.75	3.45	6.40	16.18
7	11.5	17.25	2.55	14.32	9.76
8	11.5	17.25	3.45	13.92	6.16

σ_0, σ_1 의 값을 각각 $\pm 15\%$ 잘못 추정했을 경우 L^* 와 기대이익 감소율을 <표 2>에 정리하였다. 물론 기대이익 감소율은 식 (8)에 정의된 것과 같다. 표에서 보는 바와 같이 $(\mu_0, \mu_1, \sigma_0, \sigma_1)$ 의 변화에 따른 기대이익 감소율은 16%에까지 이르게 됨을 알 수 있었다. 즉, 분포의 모수추정이 비용항목의 추정보다 중요하다라는 것을 알 수 있었다.

<그림 2>는 선별 전 불량 듀플렉서의 비율 p 의 변화에 따른 최적 기각치 L^* 의 변화를 나타낸 것으로 p 값이 증가함에 따라 L^* 도 완만히 증가함을 알 수 있다.

본 논문의 기본적인 가정은 불합격 제품을 재가공한다는 것이다. 하지만 경우에 따라서는 불합격 제품을 할인판매 또는 스크랩 처리할 수도 있다. 이러한 경우의 최적 기각치 L^* 및 기대이익을 부록에 유도하였으며, 할인판매 가격 B 의 값에 따른 최적 기각치 및 기대이익의 변화를 <그림 3>에 정리하였다.

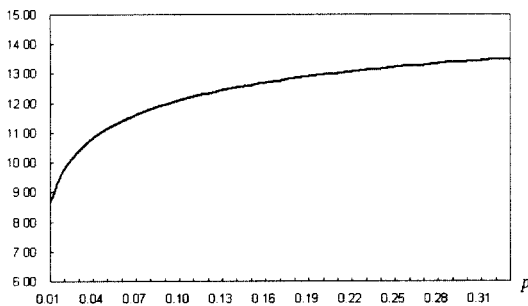
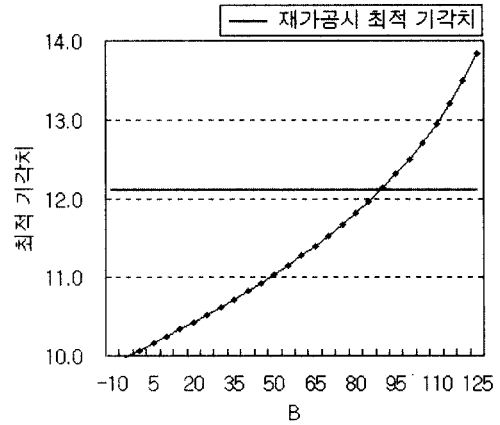
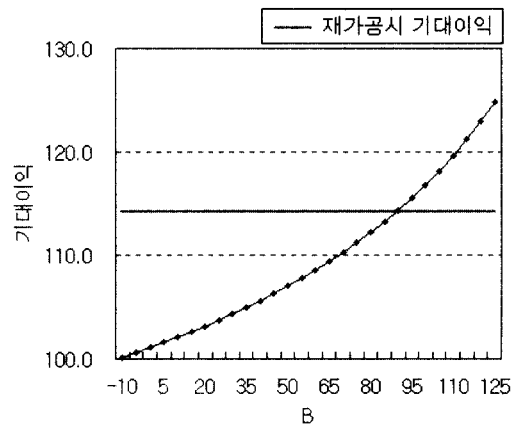


그림 2. p 의 변화에 따른 최적 기각치 L^* .



(a) 최적 기각치



(b) 기대이익

그림 3. 정규 모형에서 할인판매 가격의 변화에 따른 최적 기각치 및 기대이익의 변화.

다. 그림에서 B 가 $A - r = 125$ 이라면 Tang (1988)의 모형에서와 같이 재가공 제품은 항상 양품이 된다는 가정을 한 것과 동일한 모형이 된다. 또한 B 가 음수값을 갖는 경우도 분석하였는데, 이는 불합격품을 일정 비용을 들여 스크랩 처리한 것을 말한다. 그림에서 보는 바와 같이 할인판매 가격이 높을수록 최적 기각치와 기대이익 모두 증가한다는 것을 알 수 있다. 특히 본 예제의 경우, 할인판매 가격이 90보다 작다면 할인판매보다 재가공하는 것이 더 경제적이란 것을 알 수 있다.

3. 로지스틱 모형

로지스틱 모형에서는 대응특성 $X = x$ 라는 가정하에 $T=1$, 즉 양품일 확률로 다음의 로지스틱 함수를 사용한다.

$$P[T = 1 | X = x] = \frac{1}{1 + e^{-\xi_0 - \xi_1 x}} \quad (9)$$

위에서 ξ_0 와 ξ_1 은 모두 상수이며, 특히 $\xi_1 > 0$ 의 조건이 만

족된다면 $X=x$ 일 때 $T=1$ 일 확률은 x 의 증가함수가 되고, $\xi_1 < 0$ 일 때는 감소함수가 된다. 본 연구에서는 $\xi_1 > 0$ 이라 가정한다. 물론 $\xi_1 < 0$ 인 경우도 동일한 방법을 적용할 수 있다. 로지스틱 모형은 Boys and Dunsmore (1987), Kim and Bai (1990), 그리고 Bai *et al.* (1995)과 같이 주품질특성이 이치형 변수일 때를 고려한 이 분야의 다른 연구 논문들에서도 사용된 바 있다.

식 (1)과 (9)를 조합해 기대이익을 구하면

$$ETP = \int_L^\infty (A - s_x) P[T=1|X=x] f(x) dx + \int_L^\infty (A - s_x - a) P[T=0|X=x] f(x) dx + (ETP - r - s_x) \left\{ 1 - \int_L^\infty f(x) dx \right\} \quad (10)$$

가 된다. 여기서 $f(x)$ 는 X 의 주변확률밀도함수로 평균 μ_x , 표준편차 σ_x 인 정규분포를 따른다고 가정한다. 식 (10)을 정리하면 기대이익함수 ETP 는

$$ETP = (A + r) \frac{a \int_L^\infty P[T=0|X=x] f(x) dx + s_x + r}{\int_L^\infty f(x) dx} \quad (11)$$

이 된다.

기대이익함수 (11)이 L 에 대해 위로 볼록한 단봉함수라면 $\frac{\partial ETP}{\partial L} = 0$ 를 만족하는 L 값이 L^* 가 된다. 그러나 기대이익함수는 분모에 $\int_L^\infty f(x) dx$, 분자에 $\int_L^\infty P[T=0|X=x] f(x) dx$ 를 포함하고 있으므로, 기대이익함수가 위로 볼록한 단봉함수임을 수학적으로 증명할 수는 없었다. 따라서 정규 모형에서와 동일한 방법에 의하여 기대이익함수에 포함된 모수들의 여러 값에서 수리적으로 분석하였고, 그 결과 $\frac{\partial ETP}{\partial L} = 0$ 를 만족하는 L 값은 단지 하나만 존재하였으며, 이 값에서 $\frac{\partial^2 ETP}{\partial L^2} > 0$ 임을 알 수 있었다.

따라서 L^* 는 $\frac{\partial ETP}{\partial L} = 0$ 를 만족하는 다음 식

$$P[T=0|X=L] \int_L^\infty f(x) dx - \int_L^\infty P[T=0|X=x] f(x) dx = \frac{s_x + r}{a} \quad (12)$$

으로부터 구할 수 있다. 한편, 선별 후 불량품의 비율은

$$P(T=0|X \geq L^*) = \frac{\int_{L^*}^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\xi_0 - \xi_1 x}} \right) f(x) dx}{\int_{L^*}^\infty f(x) dx}$$

가 된다.

표 3. $(\mu_x, \sigma_x, \xi_0, \xi_1)$ 값의 변화에 따른 최적 기각치 L^* 와 기대이익 감소율

번호	μ_x	σ_x	ξ_0	ξ_1	L^*	기대이익 감소율 (%)
1	8	1.6	-3.6	0.64	7.49	0.54
2	8	1.6	-3.6	0.96	6.03	0.22
3	8	1.6	-2.4	0.64	6.56	0.02
4	8	1.6	-2.4	0.96	5.01	0.87
5	8	2.4	-3.6	0.64	7.64	0.80
6	8	2.4	-3.6	0.96	5.95	0.27
7	8	2.4	-2.4	0.64	6.54	0.02
8	8	2.4	-2.4	0.96	4.91	0.93
9	12	1.6	-3.6	0.64	9.15	8.81
10	12	1.6	-3.6	0.96	6.43	0.04
11	12	1.6	-2.4	0.64	7.60	0.72
12	12	1.6	-2.4	0.96	5.19	0.75
13	12	2.4	-3.6	0.64	9.04	7.76
14	12	2.4	-3.6	0.96	6.39	0.03
15	12	2.4	-2.4	0.64	7.51	0.57
16	12	2.4	-2.4	0.96	5.17	0.77

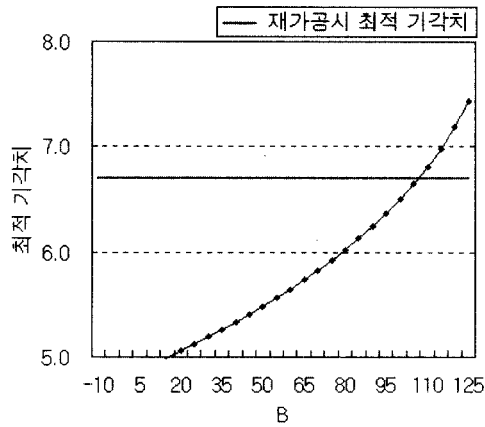
<예제 2> 로지스틱 모형의 최적 해를 구하는 방법을 예시하기 위해 <예제 1>과 동일한 예제를 사용한다. 단, 밀착력이 x 일 때, 듀플렉서가 올바른 전기적 특성을 가질 확률은 $\xi_0 = -3.0$, $\xi_1 = 0.8$ 을 갖는 로지스틱 함수, 즉 $P[T=1|X=x] = \frac{1}{1 + e^{3.0 - 0.8x}}$ 로 가정한다. 또한 밀착력 X 는 평균 $\mu_x = 10.0$, 그리고 표준편차 $\sigma_x = 2.0$ 인 정규분포를 사용한다.

이외의 모든 비용 모수들은 <예제 1>에서와 동일한 값을 사용한 결과 최적 기각치 $L^* = 6.70$ 을 얻을 수 있다. 이때의 기대이익은 131.78이며, 선별 후 불량률은 1.28%가 된다. <표 3>은 로지스틱 모형의 모수들인 $(\mu_x, \sigma_x, \xi_0, \xi_1)$ 값을 $\pm 20\%$ 잘못 추정하였을 경우의 최적 기각치 L^* 와 기대이익 감소율을 정리한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 기대이익 감소율은 10%를 초과하지 않음을 알 수 있다.

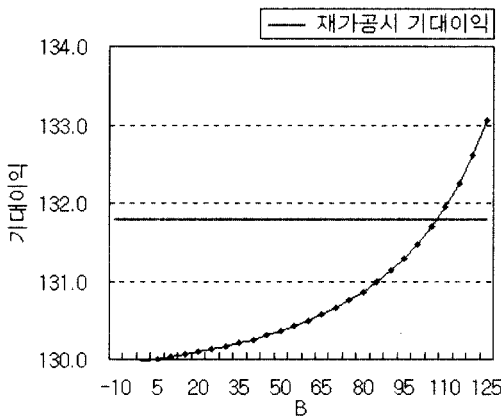
<그림 4>는 할인판매 가격 B 의 변화에 따른 최적 기각치 및 기대이익의 변화를 정리한 것이다. 정규 모형에서와 같이 할인판매 가격이 높을수록 최적 기각치와 기대이익 모두 증가한다는 것을 알 수 있다. 특히 본 예제의 경우 할인판매 가격이 110보다 작다면 재가공하는 것이 더 경제적이라는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 불합격 제품을 재가공하는 상황에서 대응특성을 활용한 선별검사를 고려하였다. 주품질특성 T 는 양·불량으로만 구분 가능한 이치형 변수이고, 대응특성 X 는 연속형 변수라 가정하였으며, 정규 모형과 로지스틱 모형의 두 가지



(a) 최적 가격치



(b) 기대이익

그림 4. 로지스틱 모형에서 할인판매 가격의 변화에 따른 최적 가격치 및 기대이익의 변화.

를 고려하였다. 제품의 판매가격, 불량품의 합격으로 인한 손실 비용, 불합격 제품의 재가공 비용, 그리고 품질검사 비용 등으로 구성된 이익함수모형을 설정하였으며, 기대이익을 최대화하는 최적 가격치 L^* 를 구하였다. L^* 를 구하는데 있어서 기대이익함수가 L 에 대해 위로 볼록한 단봉함수임을 수학적으로 증명할 수는 없었다. 그러나 L 의 의미 있는 구간에서 수리적으로 분석한 결과 단봉함수임을 알 수 있었다. 수리적인 분석과정에서는 486 펜티엄급 PC를 사용하였으며 IMSL 소프트웨어와 FORTRAN 언어를 활용하였는데, L^* 를 구하는 시간은 대부분의 경우 10초를 초과하지 않았다. 예제를 통해 분석한 결과 비용 항목을 잘못 추정하더라도, 최적 가격치나 기대이익은 크게 변하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 즉, 본 모형은 비용모수들에 둔감함을 알 수 있었다. 하지만 두 가지 모형 모두에서 분포와 관련된 모수들에 대해서는 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있었으며, 특히 정규 모형의 경우 평균 및 분산의 올바른 추정이 매우 중요함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 정규 모형 및 로지스틱 모형의 분포와 관련

된 모수들인 (μ_i, σ_i) , ξ_i , $i=0,1$, 또는 (μ_x, σ_x) 를 모두 알고 있다고 가정하고 최적 가격치를 구하였다. 추후 연구과제로는 위의 모수들을 모르는 상황에서 모형을 고려할 수 있으며, 또한 품질검사에서 측정오차의 영향을 파악하는 문제도 고려할 수 있을 것으로 생각된다.

부록. 불합격품을 할인판매 또는 스크랩하는 경우의 모형 설정

검사에서 불합격된 제품을 B 의 가격에 할인판매한다면, 단위 제품당 이익함수는 다음과 같이 된다.

$$TP = \begin{cases} A - s_x, & x \geq L, T = 1 \\ A - s_x - a, & x \geq L, T = 0 \\ B - s_x, & x < L \end{cases} \quad (A1)$$

만일 R 의 비용으로 스크랩 처리한다면 $B = -R$ 로, 또한 Tang (1988)과 같이 재가공품은 항상 양품이 된다는 가정을 하면 $B = A - r$ 로 설정하면 된다. 이러한 가정하에서 정규 모형 및 로지스틱 모형에 대해 기대이익함수 및 최적 가격치는 다음과 같이 구할 수 있다.

정규 모형

기대이익함수는 다음과 같이 되며,

$$\begin{aligned} ETP &= (A - s_x) \int_L^{\infty} g(x|T=1)P(T=1)dx \\ &+ (A - s_x - a) \int_L^{\infty} g(x|T=0)P(T=0)dx \\ &+ (B - s_x) \int_{-\infty}^L \ell(x)dx \\ &= A - s_x - ap - (A - B - a)p\Phi\left(\frac{L - \mu_0}{\sigma_0}\right) \\ &- (A - B)(1 - p)\Phi\left(\frac{L - \mu_1}{\sigma_1}\right) \end{aligned} \quad (A2)$$

이로부터 $\frac{\partial ETC}{\partial L} = 0$ 를 만족하는 L^* 는 다음 식을 만족하는 L 값이다.

$$\begin{aligned} p \frac{1}{\sigma_0} (-A + B + a) \phi\left(\frac{L - \mu_0}{\sigma_0}\right) \\ + (1 - p) \frac{1}{\sigma_1} (-A + B) \phi\left(\frac{L - \mu_1}{\sigma_1}\right) = 0 \end{aligned} \quad (A3)$$

로지스틱 모형

기대이익함수는 다음과 같이 되며,

$$\begin{aligned}
 ETP &= \int_L^\infty (A - s_x) P[T=1|X=x] f(x) dx \\
 &+ \int_L^\infty (A - s_x - a) P[T=0|X=x] f(x) dx \\
 &+ \int_{-\infty}^L (B - s_x) f(x) dx \\
 &= A - s_x - (A - B) \Phi\left(\frac{L - \mu_x}{\sigma_x}\right) \\
 &- a \int_L^\infty P[T=0|X=x] f(x) dx \quad (A4)
 \end{aligned}$$

이로부터 $\frac{\partial ETC}{\partial L} = 0$ 를 만족하는 L^* 는 다음과 같다.

$$L^* = \frac{-\xi_0 - \ln\left\{\frac{A-B}{a-(A-B)}\right\}}{\xi_1} \quad (A5)$$

참고문헌

- Bai, D. S., Kwon, H. M. and Lee, M. K. (1995), An Economic Two-Stage Screening Procedure with a Prescribed Outgoing Quality in Logistic and Normal Models, *Naval Research Logistics*, **42**, 1081-1097.
- Boys, R. J. and Dunsmore, I. R. (1987), Diagnostic and Sampling Models in Screening, *Biometrika*, **74**, 356-374.
- Drezner, Z. and Wesolowsky, G. O. (1995), Multivariate Screening Procedures for Quality Cost Minimization, *IIE Transactions*, **27**, 300-304.
- Duffuaa, S. O. and Al-Najjar, H. J. (1995), An Optimal Complete Inspection Plan for Critical Multicharacteristic Components, *Journal of Operational Research Society*, **46**, 930-942.
- Golhar, D. Y. (1987), Determination of the Best Mean Contents for a Canning Problem, *Journal of Quality Technology*, **19**, 82-84.
- Golhar, D. Y. and Pollock, S. M. (1988), Determination of the Optimal Process Mean and the Upper Limit for a Canning Problem, *Journal of Quality Technology*, **20**, 188-192.
- Hong, S. H. and Elsayed, E. A. (1998), Economic Complete Inspection Plans with Multi-Decision Alternatives, *International Journal of Production Research*, **36**, 3367-3378.
- Hong, S. H. and Elsayed, E. A. (1999), The Optimum Mean for Processes with Normally Distributed Measurement Error, *Journal of Quality Technology*, **31**, 338-344.
- Hong, S. H., Kim, S. B., Kwon, H. M. and Lee, M. K. (1998), Economic Design of Screening Procedures When the Rejected Items Are Reprocessed, *European Journal of Operational Research*, **108**, 65-73.
- Hong, S. H., Lee, M. K., Kwon, H. M. and Kim, S. B. (2001), A Continuous Screening Procedure Using the Performance and Surrogate Variables, *International Journal of Production Research*, **39**, 2333-2340.
- Hui, Y. V. (1990), Economic Design of a Complete Inspection Plan for Bivariate Products, *International Journal of Production Research*, **28**, 259-265.
- Kim, S. B. and Bai, D. S. (1990), Economic Screening Procedures in Logistic and Normal Models, *Naval Research Logistics*, **37**, 895-904.
- Kwon, H. M., Hong, S. H., Lee, M. K. and Kim, S. B. (2001), A Process Monitoring Procedure based on a Surrogate Variable for Dichotomous Performance Variable, *IIE Transactions*, **33**, 1129-1133.
- Owen, D. B., McIntire, D. and Seymour, E. (1975), Tables Using One or Two Screening Variables to Increase Acceptable Product Under One-Sided Specifications, *Journal of Quality Technology*, **7**, 127-138.
- Tang, K. (1987), Economic Design of a One-Sided Screening Procedure Using a Correlated Variable, *Technometrics*, **29**, 477-485.
- Tang, K. (1988), Economic Design of Product Specifications for a Complete Inspection Plan, *International Journal of Production Research*, **26**, 203-217.
- Tang, K. and Tang, J. (1994), Design of Screening Procedures: A Review, *Journal of Quality Technology*, **26**, 209-226.