Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 30, No. 5 pp.645-650 October 2011 http://dx.doi.org/10.5143/JESK.2011.30.5.645

A Sampling Inspection Plan with Human Error: Considering the Relationship between Visual Inspection Time and Human Error Rate

Yong-Hwa Lee, Seung-Kweon Hong

Department of Industrial and Management Engineering, Chungju National University, Chungbuk, 380-702

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to design a sampling inspection plan with human error which is changing according to inspection time. **Background:** Typical sampling inspection plans have been established typically based on an assumption of the perfect inspection without human error. However, most of all inspection tasks include human errors in the process of inspection. Therefore, a sampling inspection plan should be designed with consideration of imperfect inspection. **Method:** A model for single sampling inspection plans were proposed for the cases that visual inspection error rate is changing according to inspection time. Additionally, a sampling inspection plan for an optimal inspection time was proposed. In order to show an applied example of the proposed model, an experiment for visual inspection task was performed and the inspection error rates were measured according to the inspection time. **Results:** Inspection error rates changed according to inspection time. The inspection error rate could be reflected on the single sampling inspection plans for attribute. In particular, inspection error rate in an optimal inspection time may be used for a reasonable single sampling plan in a practical view. **Conclusion:** Human error rate in inspection tasks should be reflected on typical single sampling inspection plans. A sampling inspection plan with consideration of human error requires more sampling number than a typical sampling plan with perfect inspection. **Application:** The result of this research may help to determine more practical sampling inspection plan rather than typical one.

Keywords: Visual inspection task, Human errors, Inspection time, Single sampling inspection plans for attribute

1. Introduction

전통적인 샘플링 검사방식은 검사과정에서 검사오류가 없는 완벽한 검사를 가정하며 설계되었다. 그러나 현장에서는 다양한 검사오류가 발생하고 있다. 특히 사람이 검사의 주체가 되는 관능검사(인간의 시각 청각 촉각 후각 미각을 사용한 검사)에서는 필연적으로 검사원의 검사오류가 발생한다. 인간의 육체적 또는 정신적 한계성 때문일 것이다. 심지어 경험이 풍부한 검사원도 45% 이상의 검사오류를 범하고 있다고 보고되고 있다(Jacobson, 1952). 이러한 검사원의 검사오류를 품질검사 방법을 설계할 때 고려해야 한다는 인식은 오래 전부터 시작되었다(Juran, 1935; McKenzie, 1958).

따라서 계량형 샘플링 검사에 검사오류가 미치는 영향에 대한 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되었다(Boubekeur and Foote, 1982; Mensefricke, 1984). 이들은 AOQ (Average Outgoing Quality)로 측정된 수행도에 검사오류의 영향을 조사하였다. 또한 다른 연구에서는 ATI(Average Total Inspection)에 검사오류의 영향을 조사하였다(Case et al., 1973, Case et al., 1975). 이 연구에서는 샘플에 포함된 불량품이 양품으로 대체되어야 하는데 대체되지 못하는 오류로 인해 생기는 문제를 기술하였다.

한편 검사오류를 고려하여 검사방식을 재설계하기 위한 모델들도 제안되었다. Case et al.(1973)는 단일 샘플링 계

Corresponding Author: Seung-Kweon Hong. Department of Industrial and Management Engineering, Chungju National University, Chungbuk, 380-702.
E-mail: skhong@cjnu.ac.kr
Copyright@2011 by Ergonomics Society of Korea(pISSN:1229-1684 eISSN:2093-8462). All right reserved.

획에 대해서 연구하였으며, Colin et al.(1976)은 연속 샘플링 계획에 대해, Kulapatrapa and Case(1976)는 순차적 샘플링 계획에서 검사오류를 고려한 모델을 제시하였다. 그러나 이러한 모델들은 고정된 검사오류을 상정한 모델이었다. 그러나 검사원의 검사오류는 로트에 포함된 불량률의 변화에 따라 변화할 수도 있고, 검사를 위해 주어지는 시간에 따라서도 검사오류의 확률이 변할 수 있다. 기존연구에서 이렇게 검사원의 검사오류가 작업환경에 따라 변하는 동적인 특성을 반영하는 모델을 제시한 경우는 드물다. 이러한 모델개발이 수행되려면 먼저 인간의 품질검사 특성에 대한 모델링이 인간공학(Human Factors) 분야에서 선행되어야 하고, 이 모델을 적절하게 품질검사 방식 개발에 접목시키는 학제적 연구가 수행되어야 한다. 아마 이러한 이유 때문에, 관련 연구가 다양하게 수행되지 못했을 것이다.

Sylla and Drury(1995)의 연구는 검사오류의 동적인 변화를 고려한 품질검사 방식 설계에 대한 연구의 하나의 예다. 한 로트에 포함된 불량률의 변화에 따라 변할 수도 있는 인적오류 즉 품질검사 오류를 고려하였다. 불량률 변화에 따라 인간의 판단의 변화를 신호검출이론(Signal Detection Theory)을 적용하여 제시하였으며, 이를 반영한 품질검사 방식을 제시하였다.

본 연구에서는 검사오류의 동적인 변화가 검사시간에 따라 변하는 상황을 고려하고 이때에 적합한 품질검사 방식을 설계하는 방법을 제시하고자 한다. 시각적 품질검사에서 검사시간에 따라 품질검사의 정확성이 변할 수 있는 전형적인 품질검사다. 예를 들어, 품질검사 과정에서 눈이 제품을 시각적으로 탐색할 수 있는 충분한 시간을 허용하지 않는다면, 제품에 결함이 있음에도 불구하고, 품질검사를 끝내야 할 것이다. 이러한 상황은 품질검사 시간을 비용으로만 생각할 때 발생할 수 있는 흔한 예일 것이다.

본 연구에서는 기존연구에서 제시된 시각적 품질검사 시간과 검사오류의 상관관계 모델을 이용하여 검사시간 변화에 계수 규준형 1회 샘플링 검사방식을 설계하는 방법을 제시하며, 최적의 검사시간 설정모델을 이용하여 시각적 품질검사를 위한 최적의 계수 규준형 1회 샘플링 검사방식을 제시하고자 한다. 한편, 제시된 방법의 유용성을 설명하기 위해 시각적 품질검사에 대한 실험을 통해 제안된 샘플링 검사방식 설계의 실험적 사례를 제시하고자 한다.

2. Human Error in Visual Inspection and Inspection Time

인간이 수행하는 시각적 품질검사는 일반적으로 제품에 대한 탐색과정과 의사결정과정으로 구성되어 있다(Drury 1992). 그리고 시각적 품질검사의 유형에 따라 탐색과정이 품질검사의 정확성에 더 큰 영향을 미치는 경우와 의사결정과정이 더 큰 영향을 미치는 경우가 있다. 예를 들어, PCB (Printed Circuit Board) 검사나 철판(Sheet materials)에 대한 품질검사에서는 불량으로 의심이 되는 부분을 시각적으로 탐색하는 과정에 더 많은 시간이 요구되며, 탐색과정 중에 인적오류로 의해 불량으로 의심되는 부분을 발견하지 못하는 경우가 빈번하다. 의심되는 부분을 발견한 후에는 이 부분으로 인해 불량으로 처리해야 할 것인지 양품으로 처리해야 할 것인지를 결정하게 된다. 의사결정과정에서 생기는 인적오류는 충분한 탐색시간이 주어지지 않아서 생기는 탐색오류 보다 적을 수 있다. 반면에 시각적 탐색과정이 거의 없는 시각적 품질검사 유형도 있다. 일정한 크기 이상의 사과만을 양품으로 처리하는 품질검사의 경우에는 대상물을 탐색하는 과정은 거의 없고, 대상물이 양품인지 불량품인지 구분하는 의사결정과정이 검사원의 주 업무가 된다.

본 연구는 전자의 경우와 같이 탐색과정이 중요시 되는 시각적 품질검사에서의 검사시간이 검사의 정확성 즉 검사시간과 검사오류 사이에 일정한 관계가 있는 시각적 품질검사를 대상으로 한다.

그러나 시각적 품질검사는 품질검사를 위해 주어지는 시간에 따라 검사원의 검사오류(정확성)가 현저하게 차이를 나타낸다. 즉, 검사시간과 검사의 정확성간에는 일정한 상관관계를 보이고 있다(Morawski et al., 1980).

주어진 시간에 불량품을 찾을 확률을 나타내는 함수는 식(1)과 같다.

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

한편 시각적 검사작업에서 작업을 정지해야 할 시점을 찾는 것은 쉬운 일이 아니다. 100%의 확률을 갖고 검사작업을 수행하려고 한다면, 요구되는 검사시간은 식(1)에 따라 거의 무한대일 것이다. 따라서 비용과 효과라는 경제적 관점에서 최적의 정지시점을 설정할 필요가 있다. 이러한 최적 정지시점의 설정은 검사원들이 스스로 검사작업의 정지시점 결정하는 심적 부담도 줄일 수 있고 검사작업의 표준시간결정에도 도움이 될 것이다.

최적화 이론에 의하면, 주어진 제약조건하에서 목적함수를 최대화 또는 최소화하는 독립변수를 찾는 것이 최적화이다. 시각적 검사작업에서는 기대이익을 최대화하는 목적함수가 설정될 수 있다. 그리고 제약조건은 검사시간에 따른 비용과 결함을 발견하는 이익과 결함을 발견하지 못하는 손해를 나타내는 함수가 될 것이다. 이러한 제한조건하에서 목적함수를 최대로 하는 검사시간은 최적의 정지시점이 된다. 아래

의 식(2)는 시각적 검사작업의 기대치를 나타낸다.

$$E[g(t)] = E[\text{이익/발견된결함}] - E[\text{비용/발견하지못한결함}] - \text{검사시간비용} \quad (2)$$

결함을 발견할 확률은 Pr(결함발견) = 1−Exp(−λt)이고, 결함이 있음에도 불구하고 발견하지 못할 확률은 Pr(결함발견 못함) = Exp(−λt)이다. t = 검사시간, k = 단위시간당 비용, V = 이익, C = 비용, p' = 검사대상에 결함이 있을 확률로 설정한다면, 표 1과 같은 결과를 도출할 수 있다. 기대함수는 식(3)로 나타낼 수 있다.

Table 1. Probabilities and payoffs in visual inspection tasks

Outcomes		Probability	Value
Defect present	Detected	p'(1-exp(-λt))	V-kt
	Not detected	p'exp(-λt)	-(C+kt)
Defect not present		1-p'	-kt

$$E[g(t)] = -p'(V+C)e^{-\lambda t} + Vp' - kt \quad (3)$$

식(3)가 최대값을 갖는 최적의 검사시간은 식(4)가 된다.

$$t_{opt} = \frac{1}{\lambda}\ln(p'\frac{(V+C)}{k}) \quad (4)$$

3. A Sampling Plan and Inspection Error

2절에서는 시각적 검사작업에서의 검사시간과 검사오류에 대하여 기술하였다. 3절에서는 검사오류를 고려한 샘플링 검사방식의 설계에 대해 기술하고자 한다.

검사원은 두 가지 오류를 범할 수 있다. 양품을 불량품으로 판단하는 오류인 유형 I 오류(E_1)와 불량품을 양품으로 판단하는 유형 II 오류(E_2)다(Collins et al., 1976). 두 가지 오류를 고려하여 제품이 불량품으로 판정되는 경우를 다음과 같이 정의할 수 있다.

E_1 = 양품을 불량품으로 분류하는 사건
E_2 = 불량품을 양품으로 분류하는 사건
A = 제품이 불량품인 경우
B = 제품이 불량품으로 판정되는 경우

그러면 $P(B) = P(A)P(\overline{E}_2) + P(\overline{A})P(E_2)$ 이다. 즉, 에러가 고려된 실효적 불량확률은 식(5)로 정의될 수 있다.

$$p_e = p(1-e_2) + (1-p)e_1 \quad (5)$$

여기서
p = P(A), 실제 불량률,
p_e = P(B), 실효적 불량률,
e_1 = P(E_1), E_1이 일어날 확률,
e_2 = P(E_2), E_2가 일어날 확률.

Collins et al.(1973)는 식(5)를 이용하여 5%의 불량품을 함유하는 로트를 품질검사할 때, 검사에러가 $e_1 = e_2 = 0.10$인 경우에, 불량률이 14%를 함유하는 로트를 에러가 없는 검사원이 검사를 하는 경우와 같음을 보였다.

시각적 탐색이 중요한 시각적 품질검사에서는 충분히 주어지지 않은 검사시간으로 인해서, 불량품을 합격으로 처리할 확률(e_2)는 시간에 따라 변한다. 그러나 합격을 불량으로 처리하는 확률(e_1)은 시간에 따라 변하지 않는다. 식(1)을 고려하면 실효적 불량확률은 식(6)과 같다. 실효적 불량확률은 샘플링 검사를 설계할 때 통상적인 불량률을 대치하여 사용할 수 있는 불량확률이다.

$$p_e = p(1-e^{-\lambda t}) + (1-p)e_1 \quad (6)$$

샘플링 검사란 로트로부터 시료로서 제품을 몇 개를 채취할 것인가 또 로트의 합격 불합격의 판정기준을 어떻게 정할 것인가를 결정하는 것이다. 시료의 수(n)의 결정과 판정기준(c)의 결정은 사전에 결정된 생산자 위험과 소비자 위험을 동시에 만족시키는 것이다. 즉 설계되는 검사방식의 OC곡선(검사특성곡선)은 사전에 결정된 생산자 위험점(p_0, $1-\alpha$)과 소비자 위험점(p_1, β)을 통과하여야 한다. 수학적으로 OC곡선상에 두 개의 점을 지정하는 것은 하나의 특정한 샘플링 검사방식을 결정하는데 필요한 조건을 제시하는 것이 된다. 따라서 α, β를 동시에 만족시키는 샘플링 검사방식(n, c)는 다음 관계식을 만족시켜야 한다.

$$1-\alpha = \sum_{x=0}^{c}\binom{n}{c}p_0^x(1-p_0)^{n-x}$$

$$\beta = \sum_{x=0}^{c}\binom{n}{c}p_1^x(1-p_1)^{n-x}$$

일반적으로 p_0, p_1, α, β는 사전에 결정된 수치이므로 이식을 풀어서 (n, c)의 값을 구할 수 있다.

계수형 샘플링 검사방식에서 p_0는 합격품질 수준(AQL:

acceptable quality level)이라고 하며, p_1은 한계품질 수준(LQL: Limiting quality level)이라고 한다. 검사원의 검사오류가 있을 때, AQL과 LQL은 실효적 불량률(p_e)로 전환되어야 한다. 식(6)에 의하여 AQL_e과 LQL_e는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$AQL_e = p_{e,1-\alpha} = p_{1-\alpha}(1-e^{-\lambda t}) + (1-p_{1-\alpha})e_1 \quad (7)$$

$$LQL_e = p_{e,\beta} = p_{\beta}(1-e^{-\lambda t}) + (1-p_{\beta})e_1 \quad (8)$$

식(7)과 식(8)에 의하면, 실효적 AQL과 LQL값은 검사시간에 따라 변하는 시간함수가 된다. 샘플링 검사방식의 설계자는 AQL_e, LQL_e, α, β를 결정하고, (n, c)값을 구하면 된다.

4. Method

위에서 제시된 계수형 샘플링 방식을 설계하는 방법을 사례를 보이기 위하여 시각적 검사작업 실험을 실시하였다. 실험결과를 이용하여 검사시간의 변화에 따른 계수형 샘플링 검사방식의 변화를 살펴보고, 인적오류가 없는 경우의 검사방식과 비교하였다. 또한 최적 검사시간이 설정되었을 때의 검사방식도 제시하였다.

피실험자로 15명의 학부학생이 참여하였다. 이들의 연령은 22세에서 30세 사이의 4학년 학생이었다. 시각적 검사작업을 위한 실험장치는 Visual basic 6.0을 사용하여 제작되었고, 모니터 상에 나타난 탐색공간 (특수문자 −, !, @, #, $, %, ^, &, *, (,)로 구성)에서 표적 'A'를 찾는 실험이었다. 'A'가 제품을 불합격시킬 수 있는 결함으로 가정하였다. 탐색공간은 빈 공간과 채워진 공간의 비율을 0.7로 설정하였다. 탐색공간의 크기는 160*180mm^2(25*50개 기호)였으며, 피실험자가 표적을 발견하면 마우스로 그 표적을 클릭하도록 하였다. 탐색공간이 나타난 시점에서 표적을 클릭한 시점 사이의 시간이 결함 발견을 위한 검사시간으로 간주되었다. 표적을 클릭하면 다음 탐색공간이 나타났으며, 다음 검사작업이 시작되었다. 그림 1은 시각적 검사작업을 위해 사용된 탐색공간을 표시하고 있다. 한 명의 피실험자는 시각적 탐색작업을 30회 실시하였다.

Figure 1. Visual search space for visual inspection experiments

5. Results

5.1 Relationship between inspection time and inspection accuracy

먼저 시각적 품질검사 시간과 검사의 정확성(검사오류) 간의 관계를 나타내는 관계식을 도출하기 위하여 수집된 검사시간을 검사시간의 크기 순으로 정렬하였다. 그리고 가장 긴 검사시간이 주어지면, 탐색공간에 있는 모든 표적(결함)을 발견할 수 있다는 가정하에 정렬된 검사기간 데이터와 균일하게 올림차 순으로 정렬된 확률 값의 상호관계를 도출하였다(Monk 1974). 그림 2는 이렇게 도출된 그래프다.

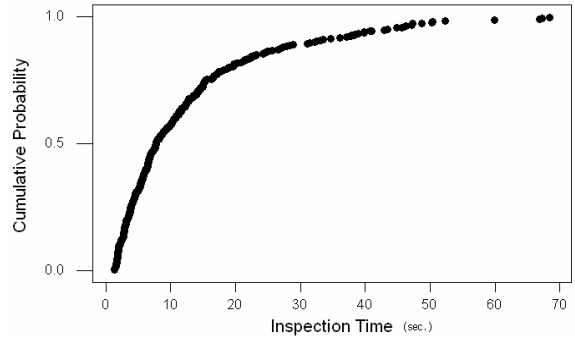

Figure 2. Cumulative probability and inspection time

확률과 검사시간의 관계는 식(1)과 같은 형태를 취하고 있으며, 이 관계식의 평균값은 29.74초(λ=1/29.74)가 된다. 따라서 시각적 품질검사 실험에서 도출된 검사의 정확성과 검사시간과의 관계식은 다음과 같다.

$$F(t) = 1 - e^{-0.03363t}$$

최적 검사정지 시점은 식(4)에 의해서 도출될 수 있다. 만약 로트 내에 불량품이 0.5% 포함되어 있고, 검사비용이 초당(k) 100원이고, 불량품을 발견했을 때 이익(V)이 100원

이며 불량품을 발견하지 못했을 때 손해(C)가 500원이라면, 최적의 정지시점은 50.7초가 된다.

5.2 Single sampling inspection plans for attribute

인간의 오류를 고려한 계수 규준형 1회 샘플링 검사 계획은 식(7)과 식(8)에 의해 AQL과 LQL의 실효적 불량률(p_e)을 도출해야 한다. 본 실험에서 수행된 품질검사의 결과는 불량품을 양품으로 오판하는 경우는 없었다. 즉 e_1은 없었다. 따라서 AQL_e, LQL_e는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$AQL_e = p_{e,1-\alpha} = p_{1-\alpha}(1-e^{-0.03363t})$$

$$AQL_e = p_{e,1-\alpha} = p_{1-\alpha}(1-e^{-0.03363t})$$

통상적으로 사용되는 α와 β값인 0.05, 0.10을 사용하고, 전통적인(검사오류가 없는) AQL과 LQL을 1%와 10%로 설정한다면, 계수 규준형 1회 샘플링 검사는 n=40, c=1로 계획되어야 한다. 그러나 검사오류가 존재할 때, 샘플링 검사방식은 표 2와 같이 바뀐다. 앞 절에서 도출된 최적의 검사정지 시점까지 검사를 실시한다고 가정한다면 n=50, c=1로 샘플링 검사방식을 설정해야 한다.

Table 2. Sampling plans and inspection time

Inspection time(sec)	AQL = 1%	LQL = 10%	n	c
5	0.15477296	1.547729589	250	1
10	0.28559125	2.85591249	120	1
15	0.39616241	3.961624052	100	1
20	0.48962014	4.896201364	80	1
25	0.56861314	5.686131381	60	1
30	0.63538016	6.353801591	60	1
35	0.69181345	6.918134508	60	1
40	0.73951239	7.395123949	50	1
45	0.77982883	7.798288323	50	1
50	0.81390538	8.139053754	50	1
55	0.84270779	8.42707791	50	1
60	0.86705237	8.670523716	50	1

6. Conclusion

본 연구에서는 시각적 품질검사의 계수 규준형 샘플링 검사방식의 설계방안을 제시하였다. 일반적으로 시각적 품질검사는 많은 검사오류가 존재하지만, 통상적인 샘플링 검사방식의 설계는 완벽한 검사를 가정하고 수행되어 왔다. 본 연구에서는 시각적 품질검사에서 검사오류가 품질검사 방식의 설계에 어떠한 영향이 있는지 조명하였다. 특히, 검사오류와 검사시간간의 상관관계를 이용하여, 검사시간의 변화에 따른 샘플링 검사의 변화를 제시하였다. 검사시간이 짧을 경우에는 더 엄격한 품질검사를 수행하여야 할 것이다. 또한 최적의 검사시간 설정하는 방법을 제시하고 이때의 최적의 품질검사 방식도 제시하였다. 본 연구는 인간공학 연구를 품질관리에 접목시켰다는데 의의가 있다. 그러나 본 연구에서 실험적으로 수행한 시각적 품질검사 작업은 시각적 품질검사의 특성을 묘사하고는 있지만, 실제 현장에서 수행하는 품질검사 작업이 아니었다. 추후연구에서는 현장에서의 품질검사 데이터를 수집하여 분석하는 보완연구가 수행되어야 할 것이다.

Acknowledgements

The research was supported by a grant from the Academic Research Program of Chungju National University in 2011.

References

Boubekeur, R. and Foote, B. L., An approach to compensate for uncertainty in knowledge of inspection error, *Journal of Quality Technology*, 14(4), 190-195, 1982.

Case, K. E., Bennett G. K. and Schmidt, J. W., The Dodge CSP-1 continuous sampling plan under inspection error, *AIIE Transactions*, 5, 193-202, 1973.

Case, K. E., Bennett G. K. and Schmidt, J. W., The effect of inspection error on average outgoing quality, *Journal of Quality Technology*, 7(1), 28-33, 1975.

Colin, R. D., Case, K. E. and Bennett, G. K., The distributions of observed defectives in attribute acceptance sampling plans under inspection error, *AIIE Transactions*, 8, 376-378, 1976.

Drury, C. G., Inspection performance, Handbook of Industrial Engineering, Edited by G. Salvendy, John Willey & Sons, Inc. 1992.

Jacobson, H. J., A study of inspector accuracy, *Industrial Quality Control*, 9, 16-25, 1952.

Juran, J. M., Inspector's errors in quality control, *Mechanical Engineering*, 57, 643-644, 1935.

Kulapatrapa, S. and Case, K. E., Sequential attribute sampling: Inspection error, effects and compensation, Proceedings of AIIE Systems

Engineering Conference, 187-196, 1976.
McKenzie, R. M., On the accuracy of inspectors, *Ergonomics*, 1(3), 258 -272, 1958.
Menzefricke, U., The effects of variability in inspector error, *Journal of Quality Technology*, 16(3), 131-135, 1984.
Monk, T. H., Sequential effects in visual search, *Acta Psychologica*, 38, 315-321, 1974.
Morawski, T. B., Drury, C. G. and Karwan, M. H., Predicting search performance for multiple targets, *Human factors*, 22, 707-718, 1980.
Sylla, C. and Drury, C. G., Signal detection for human error correction in quality control, Computer in Industry, 26, 147-159, 1995.

Author listings

Yong- Hwa Lee: yhlee@cjnu.ac.kr
Highest degree: PhD, Department of Management, Cheongju University
Position title: Professor, Department of Industrial & Management Engineering, Chungju National University
Areas of interest: Safety Engineering, Product Quality Management

Seung-Kweon Hong: skhong@cjnu.ac.kr
Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, State University of New York at Buffalo
Position title: Associate Professor, Department of Industrial & Management Engineering, Chungju National University
Areas of interest: HCI, Macroergonomics, Cognitive Engineering

Date Received : 2011-06-09
Date Revised : 2011-09-22
Date Accepted : 2011-09-22