종이 헬리콥터 실험을 통한 개발단계 성능변동의 이해와 개선

신병철 * · 김시웅 * · 정순민 * · 변재현 *[†] · 남용석 **

* 경상대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

** 국방기술품질원 품질경영본부

Understanding and Reducing Performance Variation in New Product Development Using Paper Helicopter Experiment

Byung-Cheol Shin* · Si-Ung Kim* · Sun Min Jeong* · Jai-Hyun Byun*[†] · Yong-Seog Nam**

* Department of Industrial and Systems Engineering and Engineering Research Institute,
Gyeongsang National University

** Quality Management Bureau, Defense Agency for Technology and Quality

ABSTRACT

Purpose: In developing new products, reducing performance variation is important for competitiveness factors such as quality, cost, and delivery. This paper aims at evaluating three performance variations: measurement, performance evaluation, and manufacturing variations, and then improving product and process design, focused on paper helicopter making case study.

Methods: For measurement system analysis, gage R&R (repeatability and reproducibility), linearity, stability are evaluated. Since gage R&R are not satisfactory, the measurement system is improved by adopting voice memos application of iPhone and providing standard measurement procedure. To evaluate performance variation, product deterioration and environment factor (wind speed) is considered. Since the existing design is sensitive to these noise factors, a new product design is developed, which is proven to be robust to the noise factors. Finally, manufacturing variations are evaluated with five factors which can cause variation in flight time. To reduce the impact of three significant factors, three improvement methods are applied.

Results: Three performance variations are evaluated and robust paper helicopter design is presented.

Conclusion: To reduce measurement and process variations, improved measurement method and paper helicopter making procedure are proposed. A new product design is also presented which is robust to deterioration

● Received 5 October 2015, 1st revised 2 November 2015, accepted 11 November 2015

† Corresponding Author(jbyun@gnu.ac.kr)

© 2015, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

※ 본 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2013062959).

and environmental variation. This paper is expected to benefit students and practitioners who want to have hands-on knowledge on new product quality improvement.

Key Words: Product Development Quality, Measurement System Analysis, Performance Evaluation Variation, Manufacturing Variation, Paper Helicopter Experiment

1. 서 론

제품을 개발함에 있어서 제품의 주요성능이 원하는 수준을 달성하도록 설계변수의 최적조건을 구하는 것은 중요한 일이다. 이에 못지않게 노력을 기울여야 하는 것은 주요성능이 제 기능을 꾸준히 발휘할 수 있도록 성능변수의 변동 요인을 찾아내고 성능변동을 줄이기 위해 제품 및 공정을 개선하는 것이다.

제조공정을 대상으로 성능변동을 이해하고 이를 줄이기 위한 문헌조사를 위하여 품질공학 분야의 대표 학술지인 Quality Engineering, Journal of Quality Technology, Quality and Reliability Engineering International에 게재된 논문을 중심으로 정리하고 요약해 보았다. Escalante(1999)는 제품이나 공정의 변동과 결함에 대한 품질대가들의 의견, 주장과 관점을 요약했는데, 변동의 정의, 영향, 측정, 변동 감소와 공정 개선을 위한 처방과 기법, 변동 감소 활동의 혜택 등을 정리하여 제시하였다. 그는 기업의 품질 실무자들이 효과적으로 변동을 측정하고 제어하며 이를 줄이기 위해서는 기술적이고 과학적인 사고를 갖출 것을 주문하였다. Anand(1998)는 제조공정의 기본적인 변동요인인 사람, 재료, 기계, 작업방법, 측정의 5가지를 대상으로, 공정변동의 감소를 위한 방법을 사례 중심으로 제안하였다. MacKay and Steiner(1997)는 기업체 컨설팅 경험에 근거하여 품질특성치의 변동을 줄이기 위한 방법이 품질특성 검사 방법의 도입과 개선, 피드백 제어의 도입과 개선, 프로세스 입력의 변동 감소, 피드포워드 제어의 도입과 개선, 프로세스 입력의 변동에 대한 강건성 확보의 5가지로 분류될 수 있음을 주장하였다. Lawless et al.(1999)은 다단계(Multistage) 제조공정을 거치는 제품의 성능에 영향을 미치는 주요 단위 공정을 찾기 위하여 회귀분석과 분산분석을 이용한 변동전이(Variation Transmission) 모형을 제안하고, 이를 자동차 부품제조와 조립공정에 적용하였다. Agrawal et al.(1999)은 이러한 변동전이 분석방법이 측정오차가 있을 때에는 적합하지 못한 결론을 이끌어 낼 수 있다는 것을 보이고, 측정오차를 포함한 공정데이터를 이용한 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation Method)을 제시하였다. Heredia1 and Gras(2010)는 Lawless et al.(1999)의 변동전이 모형을 확장하여 공정이 항상 관리상태에 있을 수 없을 때와 공정변수를 직접 측정할 수 없는 경우에 통계적 공정관리 방법을 통합한 접근법을 제시하였다. Liu(2010)는 변동흐름(Stream-of-Variation)과 통계적 공정관리를 변동전파(Variation Propagation) 모형, 공정 모니터링, 진단 능력 측면에서 비교하고, 차체조립 공정의 사례를 통하여 이 두 가지 방법에 대한 최근의 연구 성과가 다단계 제조공정의 변동을 효과적으로 줄일 수 있음을 보였다. Palumbo et al.(2011)은 통계적, 기술적 해석을 통하여 다단계 공정에서 전이되는 변동과 추가되는 변동을 구분하여 최종 단계의 성능변동에 크게 기여하는 변동요인을 찾는 방법을 제시하였다. 위와 같이 성능변동을 이해하고 이를 줄이기 위한 방법에 대한 일부 연구는 있지만, 개발단계에서 성능변동의 요인을 탐색하고 개선하기 위한 연구 결과는 현재까지 발견할 수 없었다.

본 논문에서는 제품의 개발단계에서 검토해야 할 변동으로서 측정시스템, 성능평가, 생산공정의 변동을 고려한다. 측정변동은 동일한 환경과 조건을 유지한 상태에서 제품의 성능변수를 측정할 때, 측정시스템에 의해 발생하는 변동을 의미한다. 부적합한 측정시스템으로 얻은 데이터는 성능평가의 오류를 발생시킨다. 즉 이러한 측정시스템으로 제

품의 성능을 측정하게 되면, 좋지 않은 제품이 합격하거나 좋은 제품이 불합격될 확률이 증가한다(Mader et al. 1999). 따라서 측정시스템의 변동을 체계적으로 파악하고 관리하여 측정시스템의 신뢰성을 확보하는 것은 매우 중요하다.

성능평가변동은 개발품이 운용환경에서 목표한 성능을 제대로 발휘하는지 평가하는 시험평가 시에 여러 가지 잡음요소에 의해 발생한다. 성능에 영향을 미치는 잡음은 외부잡음과 내부잡음으로 나눌 수 있는데, 외부잡음은 사용 온도, 습도 등과 같이 제품의 운용 환경에서 발생하는 것이고, 내부잡음은 제품의 사용기간이 길어짐에 따라 발생하는 노후화, 마모에 의한 것이다. 제품 운용 시에 이러한 잡음을 직접 통제하는 것은 불가능하거나 가능하다고 하더라도 고난이도의 기술이나 고비용을 초래하므로, 개발단계에서 잡음에 강건하도록 제품을 설계하는 것이 필요하다.

제작변동(생산공정 변동)은 실제 양산에서 발생할 수 있는 재료, 공정변수, 작업자의 산포에 의해 제품 간 발생하는 변동이다. 이러한 제작변동을 줄이기 위해서는 생산단계에서 지속적인 관리를 하는 것도 중요하지만 개발단계 완료 후 양산으로 이관하기 전에 주요 변동 요인을 파악하여 그에 대한 대응책을 마련하거나 재료 및 공정의 변동을 감소시키면 양산공정의 부담을 현격하게 줄일 수 있다(Taylor, 1991).

본 논문에서는 종이 헬리콥터 낙하실험을 이용하여 이러한 세 가지 변동요인을 이해하고 변동요인의 영향을 줄이기 위한 방법을 제시하고자 한다. 각 변동요인의 영향을 이해하고 개선안을 내기 위하여 낙하실험 데이터를 확보하고, 통계 소프트웨어인 Minitab 16버전을 이용하여 이들 데이터를 분석하였다(Minitab, 2010). 우선 데이터 측정환경의 변동요인을 파악하고 적합한 측정시스템을 구축하기 위한 개선안을 제시하였다. 그 다음 잡음을 고려한 성능시험을 통해 성능평가변동을 분석하고 잡음에 강건한 설계방안을 고안하였다. 세 번째로 제작 프로세스를 분석하여 양산환경에서 발생할 수 있는 제작변동 요인을 도출하고 제작변동을 줄이기 위한 개선방안을 제안하였다. 본 연구의 결과는 품질 관련 교과목을 공부하는 학생이나 기업의 제품개발자들에게 개발단계의 성능변동 요인을 찾고 제품의 성능변동을 줄이기 위한 방법을 모색하는 데에 참고가 될 수 있으리라 기대한다.

제 2장에서는 종이 헬리콥터 낙하실험을 통하여 측정시스템의 변동요인을 파악하고 문제가 있는 부분을 개선하여 정확하고 정밀한 측정시스템을 구축하는 방법을, 제 3장에서는 잡음을 고려한 성능시험을 통해 성능평가 시 변동요인을 확인하고 개선하는 방법을 제안한다. 제 4장에서는 제작 프로세스를 분석하여 양산공정에서 발생할 수 있는 제작변동 요인을 추출하여 그에 대한 개선안을 기술하고, 본 논문의 결론은 제 5장에 요약한다.

2. 측정변동 분석

측정시스템의 변동은 정확도(Accuracy)와 정밀도(Precision)로 구분할 수 있는데, 정확도는 치우침(Bias), 선형성(Linearity), 안정성(Stability)으로 분류되고, 정밀도는 반복성(Repeatability)과 재현성(Reproducibility)으로 분류된다. 정확도는 측정값이 참값과 일치하는 정도를 나타내는 것으로서 측정값의 평균과 관련된 문제이고, 정밀도는 측정값의 산포와 관련된 Gage R&R(Repeatability and Reproducibility)에 대한 것이다(Bai et al. 1999; Montgomery, 2013). 본 연구에서는 종이 헬리콥터 낙하시간 측정에 사용되는 측정시스템의 분석을 통해 문제가 있는 부분을 확인하고 개선안을 제시하였다.

실험은 높이 265cm의 실험실 천장에서 종이 헬리콥터를 떨어뜨린 후 바닥에 닿을 때까지의 시간을 초시계로 측정하였다. <Figure 1>에 종이 헬리콥터의 형상 및 각 부분 명칭을, <Table 1>에 Gage R&R 측정에 사용된 10개의 서로 다른 제품의 사양을 나타내었다. 이들은 일정한 범위 내 다양한 제품을 통해 측정시스템의 올바른 평가를 위한 것으로 날개, 허리, 몸통 길이를 변화시켜, 전체 길이가 16.3~18.1cm 범위에 있도록 하고, 날개너비(3.7cm)는 동일

하게 유지하였다. 낙하실험 데이터는 2명의 측정자가 10개의 제품을 임의로 하나씩 선택하여 측정하였고, 이를 2명의 측정자가 2회 반복 수행하였다.

Figure 1. Paper Helicopter Design

Table 1. Sample Dimensions of Paper Helicopters for Gage R&R

번호	날개길이 (cm)	허리길이 (cm)	몸통길이 (cm)	전체길이 (cm)
1	9.6	2.3	5.9	17.8
2	9.1	2.3	6.3	17.7
3	8.2	1.7	7.0	16.9
4	8.3	1.4	8.1	17.8
5	8.4	1.3	7.0	16.7
6	8.6	1.4	7.2	17.2
7	9.0	2.2	5.7	16.9
8	8.6	1.1	6.6	16.3
9	8.1	1.8	7.2	17.1
10	9.0	1.8	7.2	18.0

(날개너비: 3.7cm)

종이 헬리콥터의 경우에는 실험에 필요한 소량의 제품만 생산하기 때문에 공정의 변동량을 잘 대변할 수 없으므로

공차대비 측정시스템의 정밀도를 나타내는 %공차(%Tolerance)를 평가지표로 활용한다. 종이 헬리콥터는 낙하시간이 길수록 좋은 성능을 가진 제품이므로 식 (1)과 같이 규격하한(Lower Specification Limit)만 주어진 경우의 %공차 계산식을 이용해야 한다. 식 (1)에서 $\hat{\sigma}_{R\&R}$ 은 Gage R&R의 표준편차이고, $\bar{x}$ 는 측정된 데이터의 총 평균이다. 상수값 5.15는 표준정규분포에서 99%범위를 포함하는 구간으로 Gage R&R을 규격의 폭(공차)과 비교하기 위한 값이고, 한쪽 범위만 비교하기 위해 2로 나누었다. 낙하시간에 대한 규격하한을 2.5초로 정하고 %공차를 구해 평가하기로 하였다.

$$\%공차 = \frac{(5.15/2) \hat{\sigma}_{R\&R}}{\bar{x} - LSL} \quad (1)$$

본 논문에서는 Gage R&R 평가를 위해 %공차와 더불어 구별범주, 즉 측정시스템이 구별할 수 있는 부품군의 수를 평가 지표로 삼았다. %공차와 구별범주의 평가 기준은 <Table 2>와 같다(Lee, 2006).

Table 2. Gage R&R Evaluation Criteria

항목	평가 기준	평가 지침
%공차	10% 미만	합격
	10%~30%	개선을 전제로 조건부 합격
	30% 이상	불합격
구별범주	1~4	부적합
	5 이상	적합

<Table 3>과 <Figure 2>에 Gage R&R의 분석결과를 나타내었다. <Table 3>을 보면 총 Gage R&R의 %공차 = 25.08%, 구별범주 = 8이므로 구별범주는 만족스럽지만 %공차의 값이 좋지 못해 측정시스템의 개선이 필요하다고 판단하였다. 총 Gage R&R을 세부적으로 살펴보면 반복성과 재현성 모두 변동이 크므로 각각에 영향을 주는 원인을 찾고 조치를 취해야 한다.

Table 3. Gage R&R Study Before Improvement

요인	%공차
총 Gage R&R	25.08
반복성	16.19
재현성	18.52
부품 대 부품	148.56
총 변동	150.66
구별범주 = 8

Figure 2. Gage R&R for the Flight Time Before Improvement

앞서 수행한 Gage R&R 측정방법에는 두 가지 문제점이 있다. 첫째, 낙하시간을 측정자의 감각(눈, 귀)에 의존해서 측정하기 때문에 측정자 간 변동이 발생하였다. 둘째, 종이 헬리콥터를 낙하하는 자세의 변화에 따라 불필요한 손동작이 바람을 일으켰다. 첫 번째 문제점을 개선하기 위해 아이폰의 음파측정기(Voice Memos Application)로 낙하 시작 시점과 낙하 종료 시점에 소리를 인지하여 그 간격을 계산하였다. 실험자는 낙하를 시작함과 동시에 특정 소리를 냈고, 종이 헬리콥터가 바닥에 닿아 소리가 발생할 때를 낙하 종료 시점으로 정하였다. 두 번째 문제점에 대해서는 측정매뉴얼을 표준화하여 이를 충분히 숙지한 측정자를 통해 체계적인 실험을 수행하였다. 개선방안을 도입하여 수집한 데이터로 분석한 결과를 <Table 4>와 <Figure 3>에 나타내었다. <Table 4>의 결과를 보면 %공차 = 9.74, 구별범주 = 19로 산출되어 <Table 2>의 평가 기준을 모두 만족한다. 따라서 우수한 반복성과 재현성을 가진 측정시스템을 구축하였다.

Table 4. Gage R&R Study After Improvement to be Applied

요인	%공차
총 Gage R&R	9.74
반복성	6.19
재현성	7.53
부품 대 부품	138.14
총 변동	138.49
구별범주 = 19

Figure 3. Gage R&R for the Flight Time After Improvement

Gage R&R 평가 이후에는 치우침과 선형성 분석이 수행되어야 한다. 치우침 분석은 측정값의 평균이 기준값과 일치하는지를 평가하기 위한 것이고, 선형성 분석은 계측기의 측정 일관성을 평가하기 위한 것으로 기준값의 변화에 따른 치우침의 변화량을 관찰한다. 기준값을 모를 때는 기준값을 정의하는 활동이 선행된다. AIAG(2010)에 의하면 측정 수준이 높은 계측기로 수집한 데이터는 그 평균을 기준값으로 삼을 수 있다. 본 연구에서는 음파측정기를 이용하여 4곳의 높이에서 20번 반복 측정된 값을 기준값으로 삼았다. <Table 5>에 낙하높이에 따른 낙하시간의 기준값을 정의하였다.

Table 5. Reference Values of the Flight Time for Measurement Systems Analysis

높이(cm)	250	200	150	100
기준값(sec)	3.80	3.03	2.27	1.50

<Table 5>에 나타난 각각의 높이에서 낙하시간을 10번씩 반복 실험한 데이터로 치우침과 선형성을 분석한 결과를 <Figure 4>에 나타내었다. 치우침에 대한 평가는 공정 변동 백분율이 1% 이하이면 치우침이 양호하다고 판정하고, 선형성은 가설검정(H_0 : 회귀선에 대한 기울기와 상수의 값이 0이다, H_1 : 회귀선에 대한 기울기와 상수의 값이 0이 아니다)을 통해 귀무가설이 사실이면 양호한 것으로 판정한다(Lee, 2006; AIAG, 2010). 결론적으로 <Figure 4>의 분석 결과를 보면 공정 변동 백분율이 0.01% 이하로 나타나 치우침이 거의 없고, 선형성에 대한 상수와 기울기의 P값이 각각 0.998, 0.628이므로 선형성이 양호한 것으로 판정하였다.

Figure 4. Gage Linearity and Bias Study Results

안정성 분석의 목적은 시간의 경과에 따라 변화하는 온도, 습도, 진동 등 각종 환경 요소에 성능특성의 측정값이 어느 정도 영향을 받는지를 파악하고자 함이다. 사양이 서로 다른 3개의 종이헬리콥터로 실험실에서 측정 가능한 시간대를 고려하여 오전 9시, 오후 12시, 오후 3시, 오후 6시, 오후 9시로 나누고 각 시간대에 3회 반복 측정하였다. 2일 동안 시간의 변화에 따른 측정값을 Xbar-R 관리도로 나타내었다(Figure 5). 측정값이 모두 관리한계선 내에 존재하고, 특별한 주기나 경향성을 보이지 않으므로 안정성이 양호한 것으로 판정하였다.

Figure 5. Xbar-R Control Chart for Stability Evaluation

3. 성능평가변동 분석

성능평가변동 분석은 잡음을 고려한 성능시험을 통해 잡음요소가 성능변동에 얼마나 크게 영향을 미치는지 파악하고자 하는 것이다. 성능변동이 높게 나오면 변동을 줄이기 위한 방안을 모색하고, 잡음에 강건하도록 재설계를 해야 한다(Taguchi and Wu, 1981). 본 연구에서는 종이 헬리콥터의 성능인 낙하시간에 주요하게 작용할 것으로 예상되는 잡음요소 두 개를 선정하였다. 내부잡음으로는 날개의 노후화를 선정하고, 종이 헬리콥터의 날개를 접었다 편

횃수에 따라 0회, 100회로 수준을 정하였다. 외부잡음으로는 바람의 영향을 인자로 정하고, 천장에 달린 히터에서 나오는 바람의 세기에 따라 수준을 구분하였다. 잡음인자와 수준은 <Table 6>과 같이 나타낼 수 있다.

Table 6. Noise Factors and Their Levels

수준	날개의 노후화	바람의 영향
고수준	100	강풍
저수준	0	약풍

잡음이 낙하시간에 얼마나 영향을 미치는지 파악하기 위해 날개, 허리, 몸통 길이가 각각 9.0, 1.8, 7.2cm이고, 날개너비가 3.6cm인 헬리콥터를 대상으로 요인배치법을 이용하여, <Table 7>과 같이 2인자 2수준의 2회 반복실험을 수행하였고, 실험순서는 <Table 7>의 랜덤순서를 따랐다. <Table 8>에 나타난 분산분석의 결과를 보면 바람, 노후화, 바람과 노후화의 교호작용이 모두 성능 저하에 유의한 효과임을 알 수 있다.

Table 7. A Replicated 2^2 Design for Evaluating Noise Factors

표준 순서	랜덤 순서		바람	노후화	낙하시간	
					반복 1	반복 2
1	3	6	약풍	0	3.94	3.95
2	7	5	강풍	0	3.11	3.21
3	4	8	약풍	100	3.56	3.52
4	2	1	강풍	100	2.30	2.22

Table 8. Analysis of Variance Table for the Noise Factors

요인	제곱합	자유도	평균제곱	F	P-value
바람	2.132	1	2.132	942.37	0.000
노후화	0.852	1	0.852	376.36	0.000
‘바람’*‘노후화’	0.123	1	0.123	54.150	0.002
오차	0.009	4	0.002		
계	3.115	7			

변동을 줄이기 위해 잡음이 성능에 미치는 근본 원인을 분석한 후 개선 방안을 도출하였다. 바람이 없는 실험조건에서 종이 헬리콥터를 낙하하면 몸체의 흔들림 없이 낙하중심을 유지하지만, 바람이 불면 낙하중심이 흔들리면서 낙하시간의 산포가 커졌다. 낙하중심을 유지하기 위한 방법으로 종이 헬리콥터의 몸통 끝에 클립(Clip)을 끼움으로써 바람의 영향을 덜 받도록 하였다. 날개의 노후화는 날개의 처짐 현상을 발생시켜 제 기능을 발휘하지 못하게 하므로, 처짐 현상이 발생하는 부분에 테이프(Tape)를 붙이기로 하였다. 이렇게 나온 개선안을 적용하여 실험을 하였으나 클립의 무게로 인해 낙하시간이 현저히 감소하는 결과를 초래하였다. 클립을 끼워 낙하중심이 흔들리는 것은 방지할 수 있었지만 종이 헬리콥터의 낙하시간은 크게 줄어든 것이다. 그래서 클립을 끼워 균형을 유지하면서도 낙하시간을 늘릴 수 있는 설계 방안을 새롭게 구상하였다. 몇 번의 시험 결과, 낙하 시 균형이 유지되는 상태에서는 날개의 단면적이 넓을수록 낙하시간이 길어지는 것을 알 수 있었다. 이에 균형을 유지하는 한도 내에서 날개의 길이를 최대한으로 늘리고, 몸통은 최소한으로 줄였으며, 날개의 너비도 2배 이상 늘였다. 종이 헬리콥터의 전체길이는 거의 동일하

게 유지하면서 몸통의 길이는 줄이고, 날개의 길이와 너비를 늘려 제품을 재설계하였다(<Figure 6>). 치수 변경에 대한 사항은 <Table 9>에 나타내었다.

Figure 6. Paper Helicopter Redesign Compared with Original One

Table 9. Change in Dimensions

단위(cm)	설계변경 전	설계변경 후
전체길이	18.0	19.0
날개길이	9.0	16.0
허리길이	1.8	1.5
몸통길이	7.2	1.5
날개너비	3.6	8.7

재설계 한 종이 헬리콥터는 클립을 끼운 상태에서만 제 성능을 발휘하였다. 클립은 크기에 따라 ‘소형’과 ‘대형’이 있고, 테이프는 붙이는 횟수에 따라 ‘1번’ 붙이는 것과 ‘2번’ 붙이는 것이 있다. 클립과 테이프가 어떤 조합에서 가장 우수한 성능을 발휘하는지를 확인하기 위해 4가지 설계 대안을 마련하고, 날개의 노후화와 바람의 영향을 모두 반영하여 4가지 잡음조합에서 실험을 수행하였다(<Table 10>).

Table 10. Experimental Data of Four Redesign Alternatives

설계 대안	클립	바람	약풍		강풍		평균	표준편차
		노후화	0	100	0	100		
		테이핑	y1	y2	y3	y4		
설계1	소형	1번	3.62	3.39	2.92	2.65	3.14	0.45
설계2	대형	1번	2.42	2.22	2.10	2.06	2.20	0.16
설계3	소형	2번	3.39	3.13	2.78	2.50	2.95	0.39
설계4	대형	2번	1.89	1.85	1.87	1.78	1.85	0.05

설계변경 전 4개의 잡음을 고려한 낙하시간 실험 데이터의 평균과 표준편차는 각각 3.23, 0.72 이었으므로, 설계 변경 후 평균의 변화가 거의 없으면서 산포를 줄일 수 있는 설계안은 “설계1”이다. 즉, 종이 헬리콥터에 소형 크기의 클립을 끼우고 테이프를 1번 붙임으로써 외부잡음(바람의 영향)과 내부잡음(날개의 노후화)에 보다 강건한 종이 헬리콥터를 만들 수 있다.

성능변동을 줄이기 위한 설계개선 사례는 국내 개발 항공기에서도 살펴볼 수 있다. 경공격기 FA-50의 전방동체 안에는 레이더가 장착되는데, FA-50과 구조체가 동일한 T-50(고등 훈련기)의 경우에는 훈련용으로 사용되기 때문에 고가의 레이더를 장착하지 않는다. 레이더가 없는 T-50은 본래의 균형을 잃고 비행 시 흔들림이 발생한다. 이는 조종 안정성에 문제가 되어 성능변동의 요인이 된다. 따라서 비행 시 조종 안정성을 유지하기 위해 전방동체 안에 구조용 강재(Structural Steel)와 밸리스트 분동(Ballast Weight)을 부착하여 레이더의 무게를 대체하였다.

Figure 7. T-50 Advanced Trainer

4. 제작변동 분석

제품의 생산단계에서는 개발단계와 달리 작업자의 숙련도, 재료의 불균일성, 생산시간의 제약 등 여러 가지 제작 변동 요인들이 발생하는데, 개발단계에서 시험생산 데이터를 분석하여 주요한 변동요인들을 파악하고 이를 개선하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 제작변동 분석을 위해 종이 헬리콥터의 제조 프로세스를 <Figure 8>과 같이 세분화 하고, 제작실험을 수행하여 각 프로세스에서 발생한 변동 요인들을 추출하였다. 실험계획법을 이용하여 성능저하에 영향을 크게 미치는 주요 변동 요인을 선별하고 이를 개선하였다.

Figure 8. Paper Helicopter Making Process

기업경영의 경제적 측면에서 실제 생산단계에서는 제품별 생산시간을 최소한으로 할당한다. 하지만 생산능력 이 상으로 생산시간을 줄이면 제품 간 오차가 증가하게 되고 이에 따라 성능도 저하된다. 이러한 원리를 이용하여 생산 시간의 제한을 두고 제품의 성능을 저하시키는 제작변동요인을 도출할 수 있다. 본 실험에서는 제작변동 요인을 찾 기 위해 <Figure 8>의 제조 프로세스를 모두 완료하는 데 걸리는 시간을 5분, 4분, 3분으로 제한하고, 실험자 3명이 제작실험을 수행하였다. 그 결과 제한시간이 4분 이상일 경우에는 오차가 거의 없었지만, 3분 일 때에 확연히 눈에 띄는 오차들이 발생하였다. 각 프로세스별로 발생한 오차들을 파악하여 날개자르기, 날개접기, 몸통접착, 테이프 위 치, 클립위치의 5가지 변동요인을 선정하였다. 이 중 낙하시간에 주요하게 영향을 미치는 요인을 찾기 위해 5인자 2수준의 2^{5-2}_{III} 부분요인배치법을 이용하였다. 부분요인배치법을 이용하면 두 가지 이상의 요인 효과가 섞이는 현상 인 교락(Confounding)이 발생하는데, 2^{5-2}_{III} 부분요인배치 실험계획에 존재하는 교락현상을 나타내기 위해 주효과와 2인자 교호작용의 효과 간 별명구조(Alias Structure)를 <Table 11>에 나타내었다. 예를 들어, E와 AC는 별명관계 에 있다고 말하고, 이들 효과는 분리하여 파악할 수 없다.

Table 11. Alias Structure of the 2^{5-2}_{III} Design

A	+	BD	+	CE
B	+	AD		
C	+	AE		
D	+	AB		
E	+	AC		
BC	+	DE		
BE	+	CD		

2^{5-2}_{III} 부분요인배치 실험계획을 <Table 12>에 나타내었다. 코드화된 5개 인자의 ‘-1’ 수준은 모두 오차가 없음

의미하고, ‘+ 1’ 수준의 의미는 다음과 같이 정의하였다.

- 몸통접착 변동 – 몸통을 접어서 폴로 붙일 때 폴이 부족하여 완전히 붙지 않은 것
- 클립위치 변동 – 클립을 몸통의 정중앙으로부터 좌측 또는 우측으로 3mm정도 치우치도록 끼운 것
- 테이프 위치 변동 – 날개가 접히는 부분에 테이프를 기울여서 붙이는 것
- 날개접기 변동 – 날개를 2mm정도 비스듬히 접는 것
- 날개자르기 변동 – 날개를 2mm정도 대각선으로 자르면서 허리의 일부를 더 자르는 것

Table 12. A Replicated 2_{III}^{5-2} Design for Analyzing Manufacturing Variation

표준 순서	랜덤 순서	몸통 접착	클립 위치	테이프 위치	날개 접기	날개 자르기	낙하시간	
							반복 1	반복 2
1	4	15	-1	-1	-1	1	2.83	2.70
2	2	10	1	-1	-1	-1	3.42	3.26
3	5	6	-1	1	-1	1	2.53	2.50
4	1	9	1	1	-1	1	3.01	3.31
5	3	8	-1	-1	1	1	3.15	2.90
6	7	16	1	-1	1	-1	2.86	3.05
7	11	13	-1	1	1	-1	3.31	3.48
8	12	14	1	1	1	1	2.62	2.55

A: 몸통접착, B: 클립위치, C: 테이프 위치, D: 날개접기, E: 날개자르기라 할 때, 유의한 효과는 <Figure 9>에서 볼 수 있듯이 E, BE(교호작용효과), D로 나타났다.

Figure 9. Pareto Chart of Effects of Manufacturing Variation

분석 결과를 해석하는 데 있어서 3인자 이상의 교호작용 효과는 고려하지 않았다. <Table 11>에서 보는 바와 같이, BE효과는 CD효과와 교락되어 있기 때문에 BE+CD로 합쳐져 나온 효과를 분리할 필요가 있다. 교락된 효과를 분리하기 위해서는 설계접기(Fold-Over)를 해야 하는데, 설계접기의 대상으로는 주효과가 가장 큰 인자인 E를 선택하여 추가 실험을 수행하였다. 인자 E를 대상으로 설계접기는 <Table 12>의 설계행렬에서 인자 E의 수준만 반대로,

즉 ‘-1’ 수준은 ‘+1’ 수준으로, ‘+1’ 수준은 ‘-1’ 수준으로 바꾸어 실험을 하는 것인데, 이렇게 실험을 하면 별명관계가 <Table 13>과 같이 된다(Montgomery, 2012).

Table 13. Alias Structure of the Augmented Design

A	+	BD
B	+	AD
C	+	ABCD
D	+	AB
E	+	ABDE
AC	+	BCD
AE	+	BDE
BC	+	ACD
BE	+	ADE
CD	+	ABC
CE	+	ABCDE
DE	+	ABE

실험 후 <Figure 10>의 파레토 차트로 분석한 결과 CD효과와 크기가 매우 작고 BE효과가 유의한 것으로 밝혀졌다. 추가적으로 B의 효과도 유의하게 나타났다. 결과적으로 클립위치(B), 날개접기(D), 날개자르기(E) 요인의 변동을 줄이기 위한 개선책이 필요하였다.

Figure 10. Pareto Chart of Effects of Manufacturing Variation After Fold-over

날개자르기 변동은 날개를 자르는 방향을 바꾸고, 자르는 도구를 교환함으로써 개선할 수 있었다. 날개 중앙의 끝 부분에서 허리 방향으로 자를 때, 실수로 더 자르는 경우를 방지하기 위해, 허리와 날개의 경계선에서 날개의 끝 방향으로 자르는 방향을 바꾸었다. 그리고 일반 커터칼(Cutter)을 이용할 때 작업자의 숙련도에 따라 발생하는 자르기 오차를 줄이기 위해 자와 칼이 일체형인 모형제작 커터칼(Replica Production Cutter)을 활용하기로 하였다(<Figure 11>). 이 커터칼을 이용하면 자의 옆선을 따라 칼날의 경로가 고정되어 있어 누구나 일직선으로 정확하게 자를 수 있다. 날개접기와 클립위치의 변동은 종이 헬리콥터의 날개 접는 부위와 클립을 쏙는 위치에 미리 스케치를

함으로써 오차를 줄일 수 있었다. 이러한 제작변동 개선안을 정리하여 나타내면 <Table 14>와 같다.

Figure 11. Replica Production Cutter

Table 14. Improvements for Reducing Manufacturing Variation

제작변동 요인	개선안
날개자르기	자르는 방향 변경 모형제작 커터칼 사용
날개접기	접는 부위 스케치
클립위치	뽑는 부위 스케치

개선안들이 실제로 성능변동 감소에 효과가 있는지를 검증하기 위해 <Table 15>와 같이 제조회사의 변화에 따라 3가지로 구분하여 실험 후 낙하시간의 평균과 산포를 비교 분석하였다.

Table 15. Changes in Manufacturing Environment for Verification of Improvement

제조회사의 변화	개선안 적용 여부	제작 소요시간	낙하시간의 평균	낙하시간의 표준편차
Y1	X	5분	3.67	0.054
Y2	X	3분	2.94	0.114
Y3	O	3분	3.65	0.064

2-표본 t검정으로 평균의 변화를 분석하였고, 등분산 검정으로 산포의 변화를 확인하였다. Y1과 Y2의 평균을 비교한 결과 ($H_1: \mu_1 > \mu_2$), p값은 0.000, 등분산 검정 결과의 p값은 0.037로서, 평균과 분산이 서로 다르다고 할 수 있다(<Figure 12>). 즉, Y2가 Y1보다 평균이 작고 분산이 크다고 할 수 있다. Y2와 Y3을 비교한 결과에서는 H_1 을 $\mu_2 < \mu_3$ 로 둔 평균 검정의 p값은 0.000이고, 등분산 검정의 p값은 0.097으로 나타났다(<Figure 13>). 즉, Y3가 Y2보다 평균은 크고 산포는 작다고 할 수 있다. Y1과 Y3의 평균 검정 ($H_1: \mu_1 = \mu_3$)과 등분산 검정의 결과, p값이 각각 0.748과 0.642로 나와 Y1과 Y3의 평균과 분산이 서로 차이가 없는 것으로 나타났다(<Figure 14>). 결론적으로 제작변동을 줄이기 위한 개선안은 통계적으로 유의한 효과를 나타내고 있으며, 제작시간을 5분에서 3분으로 단축하여도 제작변동을 줄이기 위한 개선안을 적용하면 낙하시간이 감소하지 않는다.

Figure 12. Means and Standard Deviations of Y1 and Y2

Figure 13. Means and Standard Deviations of Y2 and Y3

Figure 14. Means and Standard Deviations of Y1 and Y3

기업의 제조현장에서는 제작변동을 줄이기 위한 다양한 활동들을 하고 있다. T50의 제조과정 중 실수방지(Fool Proof) 활동을 통해 제작변동을 개선한 사례를 살펴보자. <Figure 15>에 T50의 부품으로 이용되는 일부 철제 구조물의 홀(Hole) 가공작업의 개선 전 후를 나타내었다. 개선 전 홀(Hole) 가공에서는 철제 구조물을 고정하기 위해 클램프(Clamp)를 사용하였는데, 매번 동일하게 고정되지 않아 작업 도중 홀(Hole) 위치의 오차가 발생하였다. 이를 개선하기 위해 블록 스톱퍼(Block Stopper)를 사용함으로써 철제 구조물의 홀(Hole) 위치를 일정하게 고정할 수 있었다.

Figure 15. Improved Hole Working of T50 Steel Structures

5. 결 론

제품의 개발단계에서 검토해야 할 변동으로서 측정시스템, 성능평가, 생산공정의 변동을 고려하여, 종이 헬리콥터 낙하실험을 통해 확보한 데이터를 이용하여 변동이 발생하는 원인을 이해하고 변동을 줄이기 위한 방안을 제시하였다. 성능변동의 요인을 분석한 결과를 바탕으로 종이 헬리콥터 낙하실험의 개선안을 요약하면 다음과 같다. 정밀한 측정시스템을 구축하기 위해 음파측정기를 사용하였고, 측정매뉴얼을 표준화 하였다. 성능평가변동을 줄이기 위한 방안으로는 몸통에 클립을 끼우고, 날개 접는 부분에 테이프를 붙여 잡음에 둔감하도록 재설계하였다. 제작변동을 개선하기 위하여 날개 끝부분에서부터 허리 방향으로 향하던 날개자르기 작업을 반대방향으로, 즉 허리에서 시작하여 날개 끝부분으로 자름으로써 허리가 더 잘리는 것을 방지할 수 있었고, 모형제작 커터칼을 사용함으로써 자르기 작업의 정확성을 향상시켰다. 또한 클립 끼우기와 테이핑 작업을 개선하기 위해 해당 부분에 스케치를 하여 제조 작업의 산포를 줄였다.

본 논문에서 기술한 성능변동 분석 및 개선 과정을 통해 성능변동이 왜 발생하고 어떻게 개선해야 하는지를 학습할 수 있다. 본 논문의 결과를 바탕으로 개발 및 설계 부문 엔지니어들이 개발단계에서 발생하는 주요 성능변동을 이해하고, 개발품질 향상을 위해 성능변동을 줄이기 위한 기초계획을 수립하는 데에 도움이 될 것이다.

향후 연구분야는 1) 품질공학을 배운 학생들이 신제품을 설계하고 제작하는 캡스톤 디자인 (Capstone Design) 과제를 수행할 때에 주요한 변동 요인을 파악하여 성능변동을 감소하는 방법을 제안하는 것, 2) 기업의 실무자들이 성능변동과 관련하여 해당 기업의 상황에 맞는 실습 방법을 개발하는 것, 3) 위의 캡스톤 디자인이나 기업의 실습 방법 개발에 있어서, MacKay and Steiner(1997)가 제시한 피드백 또는 피드포워드 제어를 이용한 분산 감소 방법과 다수의 성능특성을 고려해야 할 때 성능변동을 줄이는 문제가 될 것이다.

REFERENCES

- AIAG(Automotive Industry Action Group). 2010. Measurement Systems Analysis Reference Manual, 4th ed. USA.
- Agrawal, R., Lawless, J. F., and MacKay, R. J. 1999. "Analysis of Variation Transmission in Manufacturing Processes – Part II." *Journal of Quality Technology* 31(2):143-154.

- Anand, K. N. 1998. "Dispersion Control: A Company Philosophy to Meet Competitive Challenges." *Quality Engineering* 10(4):605–615.
- Bai, D. S., Ryu, M. C., Kwon, Y. I., Yun, W. Y., Kim, S. B., Hong, S. H., and Choi, I. S. 1999. *Statistical Quality Control*, 2nd ed. Seoul: Youngjimunhwasa.
- Escalante, E. J. 1999. "Quality and Productivity Improvement: A Study of Variation and Defects in Manufacturing." *Quality Engineering* 11(3):427–442.
- Heredia, J. A., and Gras, M. 2010. "Empirical Procedure for Modelling the Variation Transmission in a Manufacturing Process" *Quality Engineering* 22(3):150–156.
- Lawless, J. F., MacKay, R. J., and Robinson, A. J. 1999. "Analysis of Variation Transmission in Manufacturing Processes – Part I." *Journal of Quality Technology* 31(2):131–142.
- Lee, S. H. 2006. *MINITAB Measurement System Analysis*. Gunpo, Seoul: Eretec Inc.
- Liu, J. 2010. "Variation Reduction for Multistage Manufacturing Processes: A Comparison Survey of Statistical-Process-Control vs Stream-of-Variation Methodologies." *Quality and Reliability Engineering International* 26(7):645–661.
- MacKay, R. J., and Steiner, S. H. 1997. "Strategies for Variability Reduction." *Quality Engineering* 10(1):125–136.
- Mader, D. P., Prins, J., and Lampe, R. E. 1999. "The Economic Impact of Measurement Error." *Quality Engineering* 11(4):563–574.
- Minitab Inc. 2010. *MINITAB Software*, Release 16. PA: State College.
- Montgomery, D. C. 2012. *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed. USA: Wiley.
- Montgomery, D. C. 2013. *Statistical Quality Control*, 7th ed. USA: Wiley.
- Palumbo, B., De Chiara, G., Sansonea, F., and Marroneb, R. 2011. "Technological Scenarios of Variation Transmission in Multistage Machining Processes." *Quality and Reliability Engineering International* 27(5):651–658.
- Taguchi, G., and Wu, Y. 1981. *Off-Line Quality Control*. Central Japan Quality Control Association, Tokyo.
- Taylor, W. A. 1991. *Optimization and Variation Reduction in Quality*. USA: McGraw-Hill.