J. Soc. Korea Ind. Syst. Eng Vol. 44, No. 2 : 102-114, June 2021
https://doi.org/10.11627/jkise.2021.44.2.102
ISSN : 2005-0461(print)
ISSN : 2287-7975(online)

Mobile Device NDF(No Defect Found) Cost Estimation

Jewang Lee* · Jungwoo Lee** · Chang Hee Han***†

*School of Management Consulting, Hanyang University
**Financial Research Institute, Nonghyup Financial Group
***School of Business Administration, Hanyang University

모바일 디바이스의 원인불명고장에 관한 비용 추정

이제왕* · 이정우** · 한창희***†

*한양대학교 일반대학원 경영컨설팅학과
**NH농협금융지주 NH금융연구소
***한양대학교 경상대학 경영학부

NDF (No Defect Found) is a phenomenon in which defects have been found in the manufacturing, operation and use of a product or facility, but phenomenon of defects is not reproduced in the subsequent investigation system or the cause of the defects cannot be identified. Recently, with the development of the fourth industrial revolution, convergence of hardware and software technologies in various fields is spreading to products such as aircraft, home appliances, and mobile devices, and the number of parts is increasing due to functional convergence. The application of such convergence technologies and the increase in the number of parts are major factors that lead to an increase in NDF phenomena. NDF phenomena have a significant negative impact on cost, reliability, and reliability for both manufacturers, service providers and operators. On the other hand, due to the nature of NDF phenomena such as difficult and intermittent cause identification and ambiguity in judgment, it is common to underestimate the cost of NDF or fail to take appropriate countermeasures in corporate management. Therefore, in this paper, we propose a methodology for estimating NDF costs by the PAF model which is a quality cost analysis model and ABC (Activity Based Costing) technique. The methodology of this study suggests a detailed procedure and the concept to accurately estimate the NDF costs, using ABC analysis, accounting system information, and IT system data. In addition case studies have validated the methodology. We think this could be a valid methodology to refer to when estimating the cost of other parts. And, it is meaningful to provide important judgment information in the decision-making process based on quality management and ultimately reduce NDF costs by visualizing them separately by major variable factors.

Keywords : NDF(No Defect Found), NDF Cost, Quality Cost, Cost Estimation Model

Received 25 May 2021; Finally Revised 20 June 2021;
Accepted 21 June 2021
† Corresponding Author : chan@hanyang.ac.kr

1. 서 론

NDF(No Defect Found)란 제품이나 설비의 제조·운영 및 사용 과정에서 결함이 발견되었으나 이후 조사시스템에서 결함의 현상이 재현되지 않거나 결함의 원인을 밝히지 못하는 현상을 의미한다[7, 15, 22]. 따라서 NDF는 사용자 관점에서 품질 결함이라 할 수 있다. 최근 4차 산업혁명 발전에 따라 항공기, 가전제품 및 모바일 디바이스 등의 제품에 여러 분야의 하드웨어(HW, Hardware), 소프트웨어(SW, Software) 기술의 융복합화 현상이 확산되고 있으며[28], 기능 컨버전스로 인하여 부품 수도 증가하고 있다. 이러한 융·복합 기술 적용 및 부품수 증가는 NDF 현상을 증가하게 하는 주요 요인이다[7, 12, 15].

항공우주 산업은 NDF 비율의 증가로 추가적인 경제적 비용이 발생 되고 있다[7, 15]. 'TechSee'의 조사에 의하면 가전 전자제품의 시장 Return 불량의 41%가 NDF로 나타났으며[22, 31], L사 모바일 디바이스의 시장 Return 불량 샘플 분석결과, NDF 비율이 40.5%인 것으로 나타났다[22]. NDF 현상의 발생은 OEM(Original Equipment Manufacturing) 제조사, 서비스 제공자, 운영자 및 사용자 모두에게 비용, 신뢰성 및 안전성에 부정적인 영향을 크게 미친다[22, 29]. L사의 사례에서도 NDF 발생을 미연에 방지하기 위한 예방활동, 제품의 품질보증을 확보하기 위한 평가활동과 시장에서 발생하는 NDF 현상에 대응하기 위한 활동의 비용이 큰 것으로 분석되었다[22].

반면에 명확한 원인규명이 어렵고 간헐적으로 재현이 되지 않는 현상, 판정의 모호함과 같은 NDF 현상의 특성으로 인해 기업 경영에 있어 NDF로 인한 비용을 과소평가하거나 NDF 대응의 중요성을 간과하여 적절한 대응방안을 취하지 못하는 것이 현실이다. 따라서 본 논문에서는 품질비용분석 모델인 PAF(Prevention-Appraisal-Failure) 모델과 가치사슬(Value chain)별 활동기준 비용분석법(ABC : Activity Based Costing) 및 회계시스템의 데이터를 활용하여, 기업 실무자 관점에서 NDF 비용을 추정할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다. 또한 이를 주요 변동 인자별로 구분하여 시각화함으로써 품질경영을 위한 의사결정 과정에 중요한 판단 정보로 활용될 수 있을 것이다. 궁극적으로는 NDF 비용을 절감시키는 효과가 있다고 하겠다.

본 논문의 연구내용을 요약하면 다음과 같다. 먼저 제 2장의 선행연구를 통해 NDF 현상과 NDF 현상에 의한 영향을 고찰하였다. 또한 비용 추정을 위한 비용의 경제학적 개념과, 비용 추정 방법론, 비용추정 관련 사례연구를 소개하였다. 제 3장은 NDF 비용추정 프레임과 방법론을 정의하였다. NDF 비용 추정 프레임은 기존 품질비용 산출 모델로 활용되는 PAF 모델을 적용하였다. NDF 비용 추정 방법론으로 비용분석 대상의 Value Chain단계별 NDF 비용을 유발하는 활동(Activity)과 비용 요소(Cost element)를 식별하고 ABC분석과 회계시스템을 활용하는 비용 추정 방법론과 절차(Process)를 제안한다. 제 4장에서는 모바일 디바이스를 제조 판매하는 L사의 NDF 비용 사례분석을 다루었다. 마지막 제 5장에서는 연구결과와 리뷰 의견, 향후 계획에 대해 기술하였다.

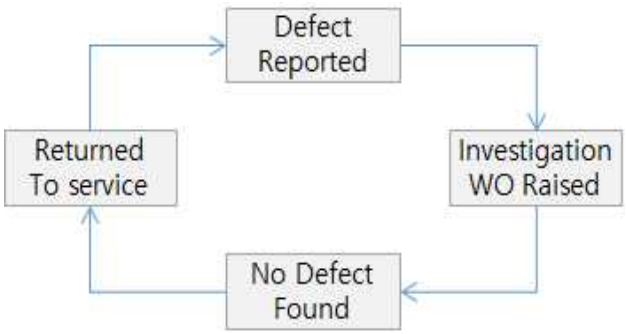
2. 이론적 배경

2.1 NDF 현상

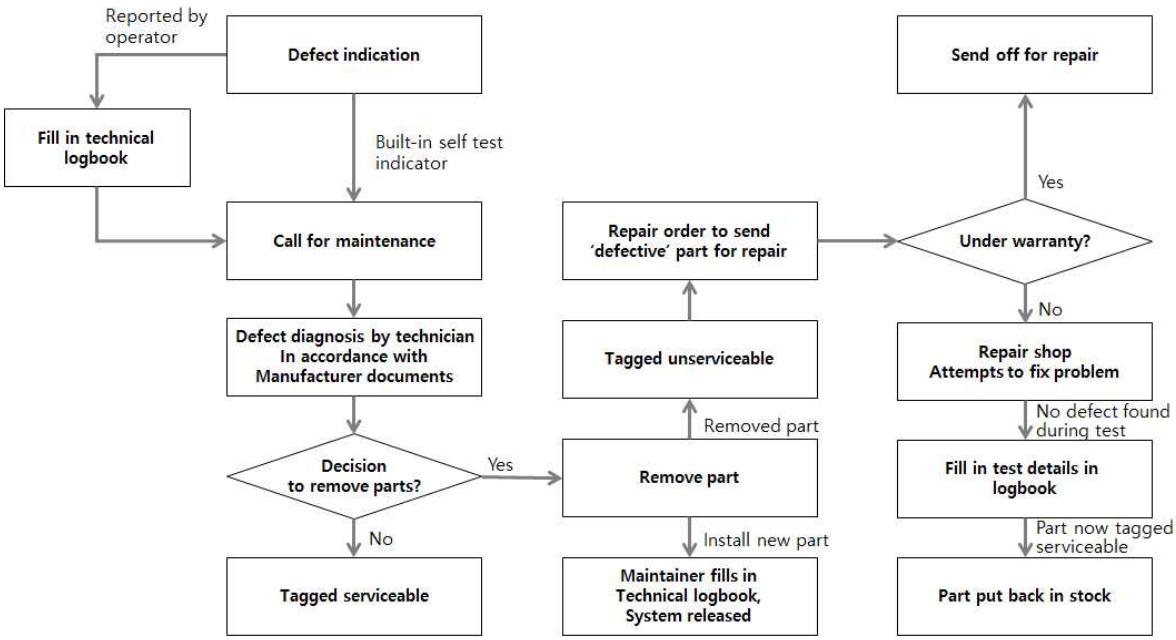
2.1.1 NDF 정의 및 현상

NDF(No Defect Found)란 <Figure 1>에 나타낸 바와 같이 작업자 또는 내장 테스트(BIT : Built-In-Test)가 제품이나 장치의 고장에 대해 결함을 감지해 내지만 이상 원인을 찾지 못하고 결과적으로 해결되지 않은 상태로 장치가 재가동되는 것을 의미한다[22, 29]. 경우에 따라서 숨겨져 있는 결함이 해결되지 않은 상태에서 고객에게 인도되어 애프터서비스를 위해 재접수 될 수도 있다[22, 33]. L사는 NDF를 '불량으로 접수된 스마트폰이 이상 없이 정상 동작하는 것'으로 정의하고 있다.

Khan et al.[15]은 NDF 현상을 의미하는 명확하고 표준화된 용어의 부재로 국가 간에 단일 용어 사용에 대한 합의가 이루어지지 않았다고 주장한다. 영국 및 유럽에서는 일반적으로 'NFF'라는 용어가 채택되었고, 미국에서는 재테스트 OK(RETOK), 재현 불가(CND) 등의 약어를 사용한다[15]. 그러나 NFF(No Fault Found), NDF(No Defect Found), NTF(No Trouble Found), NFI(No Fault Indicated), CND(Can Not Duplicate), RETOK(Re Test OK) 등은 일반적으로 유사한 의미로 사용된다[15, 22, 34]. 본 연구에서는 독자들의 혼란을 줄이기 위하여 'NDF'란 용어로 통일하여 사용하였다.



<Figure 1> Depiction of the No Fault Found Cycle[22]



<Figure 2> Repair Process During a Maintenance Action[15]

NDF 현상의 발생은 <Figure 2>의 일반적인 유지보수 프로세스로 설명할 수 있다[7, 15, 22]. 고장이 발생하면 유지보수 담당자가 고장의 원인분석을 요청한다. 이후 매뉴얼화된 문서에 준하여 원인을 찾는다. 부품 변경 여부를 판단하여 부품을 제거 후 심층 유지보수 부서로 보낸다. 심층 분석에서 결함이 발견되지 않으면 부품 변경 이유에 대한 의심이 제기되고 NDF태그가 부여된다. 따라서 NDF는 '제품이나 설비의 제조·운영 및 사용 과정에서 결함이 감지되었으나 이후 조사시스템에서 결함이 재현되지 않거나 결함의 원인을 밝히지 못하는 현상을 의미한다'로 정의할 수 있다[7, 15, 22].

2.1.2 NDF의 영향

NDF 발생의 영향은 제품의 이해관계자인 제조사, 서비스 제공자, 운영자 및 사용자들에게 영향을 미친다[7, 22, 29]. NDF의 영향은 단순한 불안에서 금전적 비용, 안전 위험까지 다양하게 나타날 수 있다[12]. NDF 영향을 비용, 신뢰성 및 안전성 측면으로 구분하면 다음과 같다[22, 29].

첫째로 비용 측면에서 살펴보면 NDF는 재고, 제조 파이프 라인 시간 증가, 작업 및 인력 비용 증가 등의 공급 및 유지 보수 시스템의 부담을 증가시키며, 이는 예비 부품의 양을 증가하게 하여 비용을 유발시킨다[22, 29]. Erkoyuncu et al.[7]은 NDF 현상으로 인한 비용을 다음의 세 가지 범주로 분류하였다. 먼저 예비비용으로 원인 불명의 결함과 관련된 모든 비용으로 진단 시간, 추가 테스트로 인한 인력 손실 및 작동 가능한 서비스 부품 교체 등이 이에 해당된다. 다음으로 2차 비용이다. 결함이 의심되어 제거된 부품의 테스트 및 분석과 관련된 모든 비용이다. 환경 테스트, 간헐적인 오류 감지 및 불량품 격리를 수행할 수 있는 엔지니어의 역량이 전반적인 유지보수 비용에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 마지막으로 3차 비용이다. 서비스 부품 지원과 관련된 모든 비용이다. 공급망 내에서 이와 관련된 비용은 재고 관리에 미치는 영향이 고려되어야 한다[7, 22].

두 번째로 신뢰성 측면의 영향에 관한 것이다. 여기서 신뢰성은 성능의 가용성, 성능의 신뢰성, 유지보수 및 유지보수 지원 성능에 영향을 주는 총체적인 의미이다. 실제로 NDF를 줄이면 해당 시스템의 고장률이 낮아지는 것보다 시스템 가용성에 훨씬 큰 영향을 미친다[22, 29]. NDF 반품은 고객의 문제가 해결되지 않았음을 나타내므로 고객 만족도가 떨어지고 브랜드 가치가 약화된다[22].

세 번째로 안전성 측면에서 살펴보면, 항공 우주산업에서 NDF는 비용 증가보다 더 심각한 결과, 즉 유지 보수 관행이 열악하여 잠재적으로 결함이 있는 장치가 가동 상태로 돌아와 안전문제를 초래할 수 있다는 것이다[22, 29].

2.2 비용 추정

2.2.1 비용추정을 위한 경제학적 개념

Lee et al.[21]는 비용은 여러 의미로 사용되며, 입장이나 관점에 따라 그 개념이나 정의도 달라진다고 하였다. 비용은 경제적 가치 부여 여부에 따라 기회비용과 매몰비용으로 구분된다. 기회비용은 어떤 행위를 선택함으로 말미암아 포기할 수 할 수밖에 없는 선택 가능한 여러 행위 중 가장 가치가 큰 행위의 가치이다[4]. 기회비용은

다시 명시적 비용과 암묵적 비용으로 구분할 수 있다. 명시적 비용은 현금지출이 필요한 비용으로 회계적 비용이다. 암묵적 비용은 들어올 돈이 안 들어오는, 현금 지출이 필요하지 않은 비용이다. 그리고 매몰비용은 이미 지출된 비용으로 되돌릴 수 없는 비용이다[4].

개별 경제행위를 수행한 경제주체가 부담하는지 그 외의 불특정 다수가 부담하는지에 따라 사적비용과 사회적 비용으로 구분할 수 있다. 사적비용은 경제행위를 수행한 경제주체가 부담하는 비용이며, 사회적 비용은 그 경제행위를 수행하지 않은 불특정 다수의 경제 주체가 부담하는 외부 비용을 포함하는 비용이다[17, 25]. 사회경제적 비용의 범위에 대해서는 두 범주의 합으로 정의하는 의견과 외부비용만을 포함시키는 의견으로 나누어져 있다[17, 25]. 이전비용은 한 사람에게서 다른 사람에게로 가치가 이전되는 것을 의미하며, 사회적 손실로 인식하지 않는다.

2.2.2 비용추정을 위한 방법

비용을 추정하는 방법은 비용 추정의 목적과 비용 측정의 수단·방법에 에 따라 다양하게 적용되고 있다. 비용 측정의 수단 및 방법에 따라 계량경제학 방법과 원단위 접근법으로 구분할 수 있다. 계량경제학 방법은 경제이론, 수학, 통계적 추론 등의 분석도구를 실제 현상을 분석하는데 응용하는 사회과학적 접근방법이고, 원 단위 접근법은 비용항목을 분할한 후 표본조사를 통해 필요한 파라미터를 추정하여 전체 규모를 논리적으로 파악하는 접근법이다[35]. 사회적 비용을 추정하는 데 주로 사용되는 가상가치 접근법(CVM)은 측정하고자 하는 재화의 가치를 이용자 혹은 재화에 노출된 비 이용자들에게 설문을 통해 직접 도출하는 방식으로 계량경제학적 방법이라 할 수 있다[26, 35].

Lee et al.[23]는 품질비용 측정 시 프로세스를 기준으로 투입원과 산출물을 명확하게 하여 정확한 비용 측정이 가능한 활동기준 원가 계산과 회계시스템의 인건비, 재료비, 경비의 항목의 데이터를 활용하여 비용을 측정하였다. Esawi and Ashby[8]는 제조구성 요소 및 시스템 비용 추정 모델로 기능 비용 또는 매개변수 방법, 유사경험 방법, 활동기반 비용분석 방법, 리소스 기반 모델링으로 구분하였다. Lee et al.[21]는 제품/서비스 개발 전에 사업 추진 타당성 분석 목적의 비용 추정 방법으로 전문가 판단법, 매개변수 모델링, 유추 기반 추정법, Top-Down/Bottom-up 추정법으로 구분하여 기술하였다.

2.2.3 품질비용 추정

품질비용의 개념은 Juran[13]의 저서 'Quality Control Handbook'에서 "회피 가능 비용"으로 처음 소개되었으며, Feigenbaum[9], Crosby[5], Grooccock[10], Dale and Cooper[6] 등 많은 연구자에 의해 다양하게 정의되었다[1, 17, 23]. 이는 학자마다 품질비용을 정의할 때 적용범위, 원가의 분류 관점의 차이에서 비롯된다. 이러한 초기 연구를 통해서 대표적인 품질비용 모델로 부각된 것이 예방, 평가, 실패 비용으로 구분하는 PAF 모델이다[1, 23]. 실패 비용은 다시 내부 실패비용과 외부 실패비용으로 구분된다[1, 23]. PAF 모델의 품질비용을 분류하는 업무 구분도 연구자에 따라 다르게 정의하고 있다. Lee et al.[23]는 ASQ(미국품질협회)가 제시한 품질비용 분류 연구 사례를 참조하여 품질비용의 분류를 <Figure 3>과 같이 제시하였다.

NDF는 결함이 발견되었으나 이후 조사 시스템에서 결함이 재현되지 않거나 결함의 원인을 밝히지 못하는 것이므로 NDF는 해결하기 어려운 품질 문제의 한 부류라 할 수 있다. 따라서 NDF 비용은 장비의 가용성 측면과 비지니스 평판에 큰 손상을 주는 품질비용의 특수한 형태라 할 수 있다.

P.1.0 Prevention Cost Elements	P.1.1 Customer/User Analysis P.1.2 Product/Service Design & Deployment P.1.3 Purchasing Quality Assurance P.1.4 Operations Quality Assurance P.1.5 Quality Management P.1.6 Quality Risk Assurance P.1.7 Safety Accident Prevention P.1.8 Environment Pollution Prevention
A.2.0 Appraisal Cost Elements	A.2.1 Supplier/Product Appraisal A.2.2 Internal Operations Appraisal A.2.3 Product and Field Evaluation A.2.4 Test, Inspection Data Review A.2.5 System Appraisal
IF.3.0 Internal Failure Cost Elements	IF.3.1 Product/Service Design Failure IF.3.2 Purchasing Failure IF.3.3 Operations Failure IF.3.4 Internal System Operation Failure
EF.4.0 External Failure Cost Elements	EF.4.1 Complaint Investigations EF.4.2 Returned Goods EF.4.3 Retrofit Costs(Recall) EF.4.4 Warranty Claims EF.4.5 Liability Costs EF.4.6 Penalties EF.4.7 Customer/User Goodwill EF.4.8 Lost Sales EF.4.9 Asset Management Failure

<Figure 3> ASQ's COQ Collection and Classification[23]

2.3 비용추정 연구 사례 요약

비용 관련 국내외 연구사례 확인 결과 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째 불특정 다수의 사람에게 영향을 주는 사고 발생에 따른 비용추정, 둘째 제품 또는 서비스 개발 비용을 추정하여 사업 추진 타당성 분석을 위한 제조 및 개발에 따른 비용 추정, 셋째 제품이나 서비스 제공 과정 및 결과에 따르는 미흡한 품질로 인한 품질비용으로 구분할 수 있다. 그 외 교통혼잡에 따른 사회적 비용, 도서관 등 공공시설 이용에 따른 편익분석 등이 있다[7, 8, 17-21, 23-26, 30, 35].

비용 측정방식 및 산출 로직은 계량경제학적 방법과 원 단위 접근법을 적용했다. 불특정 다수의 사람에게 영향을 미치는 사고나 교통 혼잡, 도서관 등의 비용 추정 및 공공시설 이용 편익의 추정에는 대부분 계량경제학적 방법인 가상가치접근법을 적용했다. 반면에 제품 및 서비스 개발 비용과 품질비용 측정에는 원 단위 접근법 및 원 단위 접근법을 근간으로 하는 전문가 판단법, 매개변수 모델링, 유추 기반 추정법 등을 적용하고 있다.

비용 추정 프레임은 연구대상에 따라 다양하게 정의하여 적용하고 있는 것으로 나타났다. Gordon & Loeb의 정보보호 침해사고 비용 구조에서 직접비용과 간접비용, 명시적 비용과 잠재적 비용의 Matrix프레임을 제안하였다[35]. 사회적 비용 추정에는 개인비용과 외부비용으로 구분하여 적용했으며, 품질비용은 일반적으로 PAF 모델을 적용하고 있다.

<Table 1> Cost Estimation Case Study

Paper	Subjects of Research	Cost Estimation Frame	Cost Estimation Methods and Logic
1) Estimating Direct Costs of Enterprises by Personal Information Security Breaches [35]	Information Security Incidents	• Gordon & Loeb Conceptual Cost Structure - Direct vs Indirect Costs - Explicit Cost vs Implicit Cost	• An overview approach from a practitioner's point of view - Explicit Cost : Survey - Implicit Cost : Legal Liability Case Study
2) Study on Development of Social Cost Estimating Model for Aids to Navigation Accident(II) [25]	Aids to Navigation Accident	• Define the cost frame for Navigation accidents - Encounter cost - Administration cost - Risk cost	• Similar empirical methods & Contingent Valuation Method Mixed - Encounter cost : Similar empirical methods - Risk cost : Contingent Valuation Method
3) A Study of Exploring and Selecting Estimation Methodologies for Costs of Chemical Accidents [19]	Chemical Accident	• Describe and apply virtual scenarios for calculating the amount of damage from chemical accidents	• Contingent Valuation Method - WTP, Interview Survey
4) Estimation Method of the Social Costs of the Internet Addiction [17]	Internet Addiction	• Define Internet addiction as a social pathology - Personal Costs : Direct, Indirect Cost - External Costs : Direct, Indirect Cost	• Present an estimation method by comparing the actual state and the virtual state
5) A Cost Estimation Model to Assess The Feasibility of Li-Ion Battery Development based on Targeted Cost by Market Approach [30]	Battery Development Cost	• Variable Cost, Fixed Cost: - Variable Cost: Direct labor, Material, Overhead Cost - Fixed Cost: R&D, Procurement, Test & Safety, General & Adm.	• Parametric Cost Estimation Model - Bill of Material - Identification the Composition of Cost - The Cost Estimation Model
6) A Cost estimates to guide pre-selection of processes [8]	Manufacturing System Cost Estimation	• The generic resources that are inputs to a manufacturing process - Materials, Capital, Time, Energy, Information	• Resource-based modeling : The manufacture of a component consumes resources, each of which has an associated cost.
7) A Study on the Factors of the Hardware Cost Estimation for Service Robot Development [21]	Service Robot Development Costs	• Derivation of cost items using FGI technique - Functional factors : Mobile, Load Capacity, Operating Time, etc. - Adjustment factors : Dust/Water proof, Heat/Cold Resistance, Safety, Test, Technological Innovation	• Top-Down/Bottom-Up Estimation • Partial application of Expert Decision
8) A Method of Forecasting Estimate At Completion Employing Monte Carlo Simulation [20]	Construction Cost	• Measure costs with flow of work	• Introducing Monte Carlo simulation to EVM techniques • Modeling historical project costs with probability distributions
9) A Research on the Development of Quality Cost Management System for Power Industry [23]	Quality Cost	• Cost of Quality PAF Model - Prevention Cost - Appraisal Cost - Internal Failure, External Failure Cost	• Utilize the accounting system (Labor, Materials, Overhead) • Utilize Accounting Statements : Similar to ABS Analysis Model
10) Development of Quality Cost Measurement Items in Service Industry [24]	Service Quality Cost	• Cost of Quality PAF Model - Prevention Cost - Appraisal Cost - Internal Failure, External Failure Cost	• Applying the PAF model to the service industry
11) Analysis of Relationship between Software Engineering Levels and Software Quality Costs [18]	Software Quality Cost	• Software Quality Cost - Conformance : Prevention, Appraisal - Non-Conformance : Internal Fail, External Fail	• Applying the PAF model to the SW industry • SW Engineering Level Survey
12) A framework to estimate the cost of No-Fault Found events [7]	NDF Cost	• the cost impact of NFF on a given system • the cost to mitigate NFF	• ABM(agent based modeling) Technique

Note: 1)~4) Cost estimation for incidents, 5)~8) Cost estimation for business promotion feasibility analysis, 9)~12): Quality cost estimation.

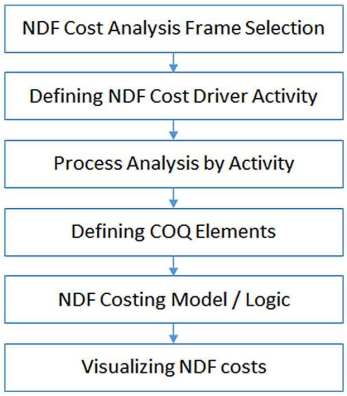
3. 연구 방법

본 연구의 목적은 기업의 실무자 관점에서 NDF 비용을 정확하게 추정할 수 있는 방법론을 제시하고, 이를 시각화하여 품질경영의 의사결정 정보를 제공하기 위함이다. 먼저 NDF 비용 추정 프레임을 정의한 후, 제품의 가치사슬(Value chain) 또는 생애 라이프사이클에 따라 NDF 비용을 유발하는 Cost Driver Activity와 비용 요소를 찾아 정의한 후 NDF 비용 요소별 파라미터 값을 측정하여 NDF비용을 산출하는 함수식을 정의한다. 이후 NDF 비용을 시각화하는 순서로 진행한다.

본 연구의 방법론은 기업의 실무에서 ABC 분석, 회계시스템 정보 및 IT시스템 자료를 활용하여 NDF 비용을 정확하게 추정하기 위한 절차와 개념을 사례연구를 통해 구체적으로 제시하였다. 이는 다른 부분의 비용을 추정할 때에도 참고할 수 있는 유효한 방법론이 될 수 있다고 생각한다.

3.1 NDF 비용 추정 연구 절차

먼저 NDF 비용 분석의 프레임을 정의한다. 프레임 정의는 연구대상과 목적에 따라 다양하게 정의할 수 있으며 비용의 전체 모습을 직관적으로 이해하기 쉽게 정의한다. 연구범위를 정의하고 연구범위 내 단계별로 비용을 유발하는 Cost Driver Activity를 도출한다. 다음으로 각각의 활동(Activity)별 기능전개 맵 또는 WBS(Work Breakdown Structure) 등의 기법을 사용하여 절차(Process)를 분석하고 이어서 단위 업무별로 비용요소를 정의한다. 그리고 매개변수 및 상수를 도출하여 비용을 산정하기 위한 함수 및 산식을 정의한다. 마지막으로 비용의 성격별 시각화하여 표현한다. 비용 추정 연구절차를 도식화하여 표현하면 <Figure 4>와 같다.



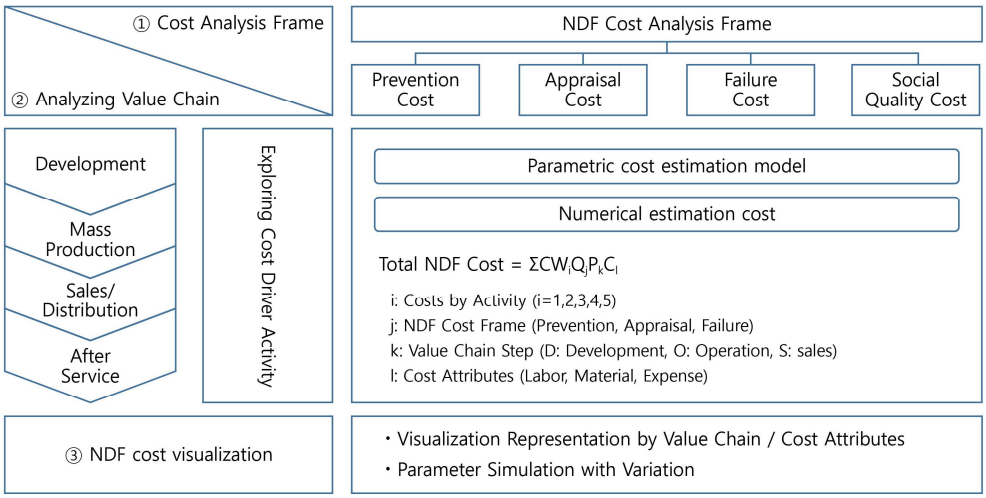
<Figure 4> Cost Estimation Procedure

3.2 NDF 비용 추정 방법의 개념

NDF도 사용자 관점에서는 품질결함임에 틀림없다. 따라서 일반적으로 품질비용을 산출하는 프레임으로 사용하고 있는 PAF 모델을 NDF 비용을 산출하는 프레임으로 활용하였다. NDF 현상의 특징인 재현 안 되는 현상 또는 RETOK(Re-Test OK) 등으로 인한 소비자 Risk를 사회적 품질비용으로 프레임의 한 항목을 추가하여 제안한다.

이후 분석대상의 가치사슬(Value chain) 단계와 Frame 항목의 Matrix로 Cost Driver Activity와 비용 요소(Cost element)를 탐색하여 정의한다. NDF 비용 발생 활동(Activity)별 Cost Parameter의 변수와 상수를 도출하여 비용을 산정하기 위한 함수 및 산식을 정의한다. 비용의 프레임, 비용 발생의 가치사슬(Value chain) 단계, 비용의 속성을 차원으로 정의하고 각 차원별 비용의 합계를 총비용으로 추정한다.

마지막으로 주요 변동요소를 변수로 설정하여 변동 요소가 변함에 따라 전체 비용의 변화를 Simulation 할 수 있도록 Shiny R을 사용하여 시각화를 구현한다. 비용 추정의 개념을 도식화하여 표현하면 <Figure 5>와 같다.



<Figure 5> NDF Cost Estimation Conceptual Plot

3.3 Cost 측정방법 및 Process

활동(Activity)별 NDF 비용 요소를 도출한 이후, 비용의 속성을 인건비, 재료비, 경비로 구분하여 비용측정 방법 및 절차를 제시한다. 또한 목적과 필요에 따라 취사선택하여 적용할 수 있도록 NDF 영향에 의한 사회적 품질비용 측정방법도 제시한다.

인건비 성격의 비용 측정은 기능 전개 맵, Work Blueprint, WBS분석을 통하여 투입되는 공수를 산정하고 관련 인원의 임금을 회계시스템에서 확인하여 인원×시간×임금으로 산식을 정의한다. 재료비 산정은 NDF 비용요소에 사용되거나 낭비되는 부품, 반제품, 제품을 BOM 분석을 통해 정의하고 제품 또는 부품 수×단가로 산정한다. 경비는 인건비 및 재료비 이외의 운영비, 감가상각비, 기타 소모품 비용 성격의 비용을 의미하며, 통상적으로 특정 비용에 한정하여 정확하게 산정할 수 없는 경우가 많다. 이때 ABC 분석에 기초하여 전체 비용 중에 NDF 비용이 차지하는 점유율을 반영하여 경비를 산정한다. 사회적 품질비용은 계량경제학 방법 중 하나인 가상가치 접근법을 통하여 조사방법 설계 및 조사 실시 결과를 분석하여 비용을 측정한다. 비용 측정 방법 및 절차(Process)는 <Figure 6>과 같다.

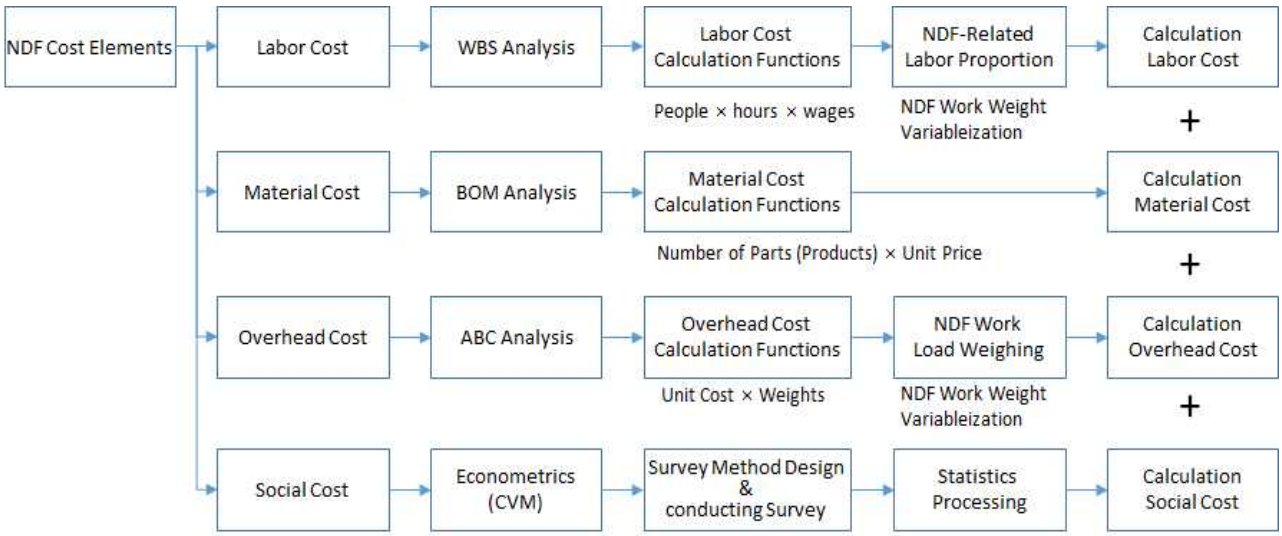
4. 사례 연구

사례 연구 기업인 L사는 스마트폰 제조 및 판매회사로 R&D 및 설계, 생산, 판매 및 서비스까지 일련의 Business Process를 운영하고 있는 글로벌 기업이다.

NDF 비용 분석 영역은 스마트폰 사업의 가치사슬(Value chain) 전체 단계로 하였다. NDF 비용 측정을 위한 데이터 추출은 '20년 1월에서 12월까지 1년간의 데이터를 사용하는 것을 원칙으로 하였다. 시장에서 발생하는 NDF 결함비율, NDF 서비스 건수는 사내 IT 시스템에서 추출했으며, 인건비, 경비 계산에 필요한 비용 파라미터는 회계시스템의 '20년 수치의 평균치를 적용하였다. 단위 활동(Activity) 중 NDF 비용 업무만으로 특정할 수 없는 경우에는, 관련 업무를 수행하는 리더들의 Interview를 통해 NDF 관련 업무 비중을 측정한 후, 이를 고려하여 NDF 비용을 추정하였다.

4.1 NDF 판정 기준

본 연구의 이론적 배경에서 'NDF는 제품이나 설비의 제조·운영 및 사용 과정에서 결함이 발견되었으나 이후 조사시스템에서 결함의 현상이 재현되지 않거나 결함의 원인을 밝히지 못하는 현상을 의미한다.'고 기술하였다. 사례기업에서의 NDF 발생은 주로 제품의 사용과정에서 결함이 발견되었으나 이후 조사시스템에서 결함의 재현이 되지 않거나 근본 원인을 밝히지 못하는 형태로 나타난다. 사례 연구 기업은 NDF를 '불량으로 접수된 스마트폰이 이후 이상 없이 정상 동작하는 것'으로 정의하고 있다. 사례 기업의 시장 NDF 처리는 신제품 출시 초기 Lot에서 DOA(Dead On Arrival)로 입고되는 단계와 애프터서비스 단계에서 불량으로 입고된 폰에서 불량 재현이 안 되는 경우이다. 사례 기업의 NDF 판정 상세 기준은 <Figure 7>에 나타낸 바와 같다. 출시 초기 제품의 NDF 판정은 DOA로 입고된 제품에 대해 품질 안정화 Task팀이 현장에서



<Figure 6> NDF Cost Measurement Methods and Processes

확인하여 불량이 재현되지 않은 제품에 대해 NDF로 판정한다. 시장 애프터서비스 단계에서의 NDF 판정은 소비자가 제기한 불량제품이 수리 엔지니어가 재확인한 결과, 불량 재현이 되지 않는 경우 IT 시스템에 입력하여 처리한다. 그리고 시장에서 불량으로 입고된 시료 중에서 일정 수량을 심층 원인 분석을 위해 사내 연구소로 입고된 샘플에서 불량이 재현되지 않거나, 의심되는 부품을 제거 후 부품 상세분석에서 결함이 아닌 것으로 판명되었을 때, 그리고 간헐적 불량으로 확인될 때 NDF로 판정한다.

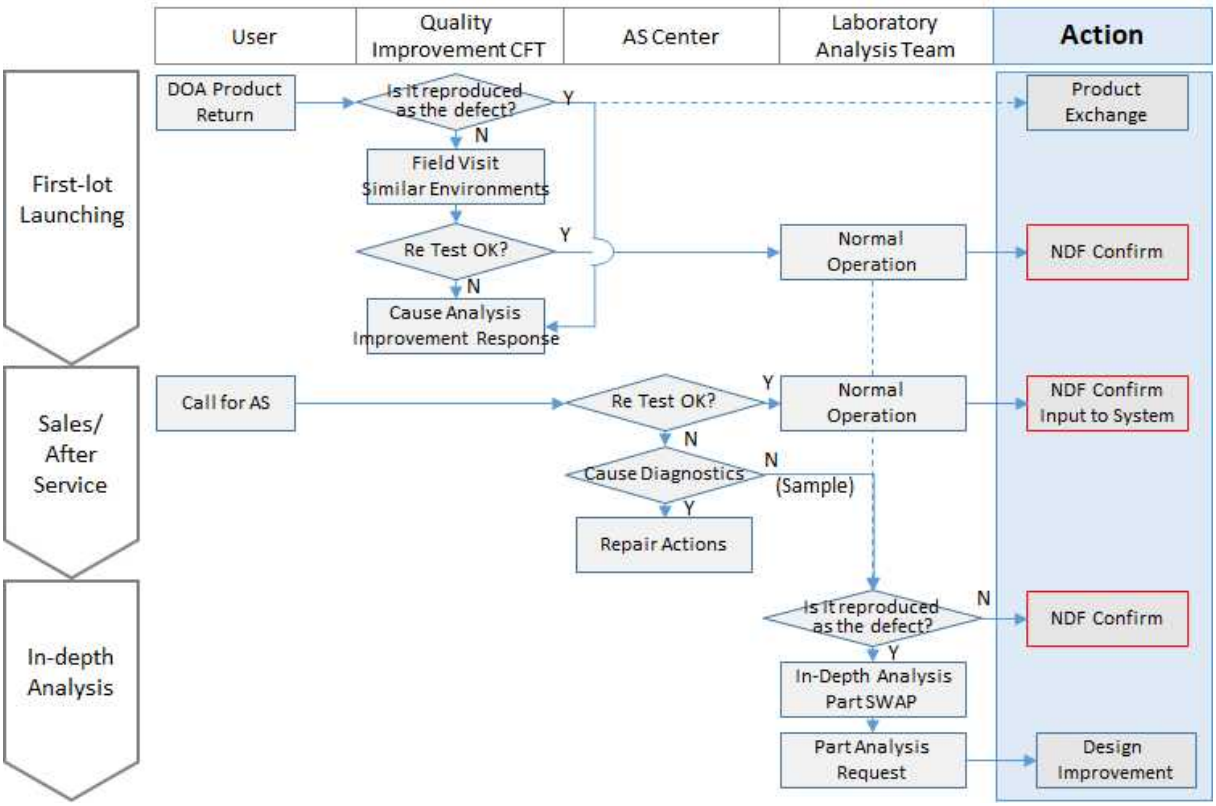
4.2 NDF Cost Driver Activity 도출

NDF 비용을 유발하는 활동을 제품 개발에서 판매 및 애프터서비스까지 Business Operation 전 영역에서 품질비용 산출 모델인 PAF 모델의 프레임을 근간으로 도출하였다. 먼저 2장에서 언급한 <Figure 3>의 'ASQ's COQ Collection and Classification'에 나타낸 품질비용을 유발하는 단위 업무를 잠재적인 NDF 비용 유발 업무로 정의하였다. 이어 NDF 현상과 연관 있는 활동(Activity)을 최종 NDF Cost Driver Activity로 정의하였다.

개발단계에서의 품질비용을 발생시키는 잠재적인 NDF 비용 유발 업무로는 고객/시장분석, 유사 모델 분석, 제품 Design 및 Deployment, 품질보증 기획 등의 업무 활동(Activity)이 존재한다. 이 중 제품 Design 및 Deployment 업무 내에 있는, NDF 현상을 포함한 품질 이슈를 미연에 방지하기 위한 활동인 DRBFM(Design Review Based on Failure Mode) 활동을 NDF Cost Driver Activity로 선정하였다. 그리고 NDF 현상 등의 제품의 품질을 보증하기 위한 인정시험/신뢰성시험을 NDF Cost Driver Activity로 정의하였다.

양산단계에서의 품질비용을 발생시키는 잠재적인 NDF 비용 유발 업무로는 공급처 품질 및 제품 시험·평가, 제품의 필드 성능 검사, 입고 품질 평가, 양산단계 Operation Failure 등의 업무가 있다. 이 중 수입검사, 공정품질관리 업무, 출하검사업무를 잠재적인 NDF Cost Driver Activity로 정의하였다. 이어 사내 NDF 관련 업무 리더들과 논의 과정을 거쳐 NDF 현상과 관련성이 매우 적은 수입검사 업무와 출하검사업무는 제외하고 NDF 현상의 일종인 가성 불량과 연관이 있는 공정품질관리 업무를 NDF Cost Driver Activity로 정의하였다.

판매·애프터서비스 단계에서의 NDF Cost Driver Activity로 양산 1'st Lot 출시 후 품질 안정화 활동과, 시장 품질 Claim대응 활동을 NDF Cost Driver Activity로 정의하였다. 사례연구 기업의 NDF Cost Driver Activity 도출 결과는 <Figure 8>과 같다.



<Figure 7> Company A's Criteria for NDF Judgment

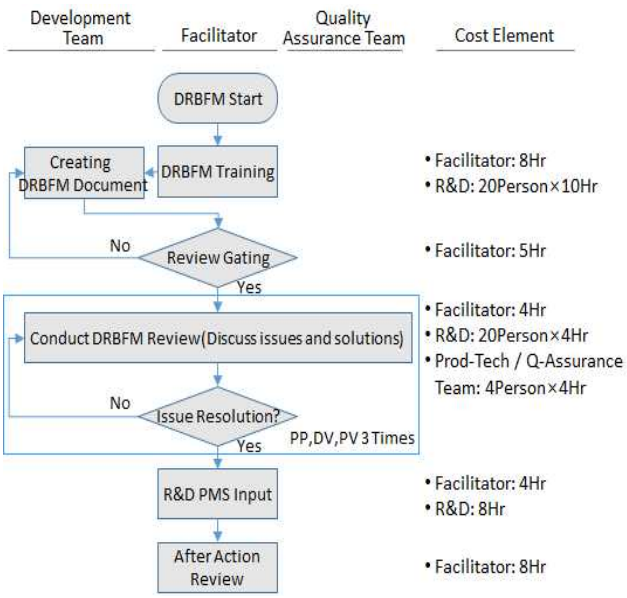
	NDF Drive Activity	Labor Cost / Overhead Cost	Material Cost	Related Variables
Development – CP	• DRBFM	• Design Review to prevent NDF Phenomena(P)		• R&D Input personnel
Development – PP	• Product Assurance Test (PP,DV,PV)	• Product Certification Test Work(A) (3 times)	• Test Sample Product Cost(A)	• NDF Defect Rate
Development – DV	• Reliability and environmental testing(PP,DV,PV)	• Reliability and Environmental Test Work(A)	• Test Sample Product Cost(A)	
Development – PV				
Mass Production	• Parts Test, Inspection • Process Quality Management • Shipment Product Inspection	• NDF-related tasks are minimal • NDF-related Fake Defect Managing Facility Operating Costs (A) • NDF-related tasks are minimal		• Fake Defect Rate
Sales / After Service	• Initial Quality Stabilization Activity • Quality Response in the Marketplace(After Service)	• First Product Quality Stabilization TFT(F) • Return Product In-depth Analysis(P) • After Service Response	• NDF Phenomenon Products in DOA(F) • NDF Phenomenon Product(F)	• Percentage of NDF in DOA • NDF rate in the marketplace

<Figure 8> NDF Cost Driver Activity by Value Chain Step

4.3 Activity Process 분석 및 NDF Cost Element 정의

NDF Cost Driver Activity별로, 단일 속성의 업무로 분해 가능한 수준까지 WBS를 전개한다. 이를 바탕으로 관련 부서와 일의 흐름에 따라 Process Map 형식으로 정리한다. 이후 단위 업무별로 비용 관련 파라미터를 정의하고 각각의 파라미터 값을 직접 측정하거나 사내 IT시스템에서 데이터를 추출하였다. 여기서 파라미터는 인건비, 재료비, 가공비를 산출할 때 필요한 비용 요소이다.

예시적으로 DRBFM 업무에 대한 절차(Process) 분석과 비용 요소(Cost element) 분석에 대해 기술하면 다음과 같다. 동 업무에 대하여 Work Breakdown 하면 DRBFM 사전교육, DRBFM 사전자료(예상되는 품질 Risk에 대하여 이슈와 대책 기술) 작성, Review Gating, Review 회의체 운영, Issue논의, R&D PMS 등록, AAR(After Action Review) 실시 등으로 구분할 수 있다. 그리고 일의 흐름에 따라 실행 주체별로 구분하여 플로우 형태로 정리하였다. 이후 각각의 단위 업무와 연관되어 있는 인원, 장비 사용, 재료 사용 등과 관련 있는 비용 요소(Cost element)를 정의한다. 그리고 비용과 연관이 있는 파라미터인 투입인원, 투입시간, 연간 활동 진행 회수, 계층별 Pay 등을 측정 또는 조사하였다. 이때 투입인원과 투입시간은 ABC 분석을 근간으로 하여 산정하였고, Pay와 개발모델 수는 회계시스템에서 데이터를 추출하였다. DRBFM업무 중 NDF와 관련된 업무는 DRBFM 전체 업무의 일부인 점을 고려하여 개발리더들의 설문 및 Interview를 통해 NDF업무비율을 측정하였다. DRBFM업무에 대한 절차(Process) 분석 및 비용 요소(Cost element)별 Parameter 측정 결과는 <Figure 9>와 같다.



<Figure 9> BRBFM Processes Analysis Results

4.4 NDF 비용 산출 함수 정의

NDF Cost Driver Activity 및 단위업무의 비용 구성 요소에 따라 비용 산출 함수식이 다르다. 품질비용의 PAF 모델, 가치사슬(Value chain)의 비용 발생 단계, 비용의 속성을 차원으로 정의하고 각 차원별 비용의 합계를 총비용으로 추정하였다. 품질비용의 PAF 모델은 예방, 평가, 실패비용으로 구성되어 있다. 가치사슬(Value chain) 단계는 개발, 양산, 판매 · 서비스 단계로 구분하였다. 비용 속성은 인건비, 재료비, 경비로 구성되어 있다. 사례연구 기업의 NDF 총비용은 아래 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$TC = \sum CW_i Q_j P_k C_l \quad (1)$$

TC : Total NDF Cost
$CW_iQ_jP_kC_l$: 업무별, 품질 PAF 모델별, Value Chain 단계별, 비용 속성별 비용
i = {1, 2, 3, 4, 5} 'NDF Cost Driver Activity'별 Work의 일련번호
j = {p, a, f} 예방, 평가, 실패 비용
k= {d, o, s} 개발, 양산, 판매·서비스 단계
l = {l, m, e} 인건비, 재료비, 경비

DRBFM업무의 NDF Cost는 NDF 현상을 미연에 방지하기 위하여 개발 단계에서 품질 Risk 검토 및 Design Review에 소요되는 인건비 비용으로 식 (2)와 같다.

$$CW_1 Q_p P_d C_l = (HR_1 \times PR + HS_1 \times PS) \times (NDP + NDM) \times RNDF_1 \quad (2)$$

HR_1 : Work1의 R&D Man Hour
PR : 개발인원의 시간당 Pay
HS_1 : Work1의 Staff Man Hour
PS : Staff 인원의 시간당 Pay
NDP : 프리미엄 모델 개발 프로젝트 수
NDM : 보급형 모델 개발 프로젝트 수
$RNDF_1$: Work1의 NDF 업무 비중

인정시험업무의 NDF Cost는 신뢰성 및 융·복합 기술 적용에 따른 간헐적 재현 안 되는 현상 등의 NDF 현상을 예방하고 보증하기 위한 시험업무에 소요되는 비용이다. 인정시험에 소요되는 인건비와 보증 시험을 위한 제품 시료의 재료비가 이에 해당된다. 산출 함수식은 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$CW_2 Q_a P_d C_l = (HR_2 \times PR + HO_2 \times PO) \times (NDP + NDM) \times RNDF_2 \quad (3)$$

$$CW_2 Q_a P_d C_m = NT_2 \times MC_2 \quad (4)$$

HR_2 : Work2의 R&D Man Hour
HO_2 : Work2의 Operator Man Hour
PO : Operator인원의 시간당 Pay
$RNDF_2$: Work2의 NDF 업무 비중
NT2 : Work2의 Test 시료 수량
MC_2 : Work2의 Test 시료의 재료비
※ 앞에서 표기한 항목 중복 표기 생략

양산단계 공정품질관리업무의 NDF 비용은 가성 불량 및 NDF 현상을 수리하는데 소요되는 재작업 인건비와 설비 운영 손실비용이다. 산출 함수식은 각 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$CW_3 Q_f P_o C_l = NPRD_3 \times NPRO_3 \times TC_3 \div 3600 \times RNDF_3 \times PO \quad (5)$$

$$CW_3 Q_f P_o C_e = CO_3 \times RNDF_3 \quad (6)$$

$NPRD_3$: 연간 생산 수량
$NPRO_3$: Work3 공정수
TC_3 : Work3 Cycle Time
$RNDF_3$: 가성불량률
PO : Operator의 시간당 Pay
CO : 대당 연간 설비 운영비

시장 품질 안정화 Task 업무는 DOA제품 중 NDF결함을 처리하는데 소요되는 인건비와 완제품 교환 비용이 이에 해당된다. 각 함수식은 식 (7), 식 (8)과 같다.

$$CW_4 Q_f P_s C_l = (HR_4 \times PR + EW_4) \times (NOP_4 + NOM_4) \times RNDF_4 \quad (7)$$

$$CW_4 Q_f P_s C_m = (NOP_4 + NOM_4) \times RFNDF_4 \times PS_4 \quad (8)$$

HR_4 : Work4의 R&D Man Hour
EW_4 : Work4의 Task팀 해외출장비
NOP_4 : 안정화 활동 프리미엄 Project 회수
NOM_4 : 안정화 활동 보급형 Project 회수
$RNDF_4$: Work4의 NDF 업무 비중
$RFNDF_4$: DOA제품 중 NDF비율
PS_4 : 제품의 평균 판매가

시장 불량 대응 업무의 NDF 비용은 시장 불량 심층 분석에 소요되는 인건비와 NDF제품에 대한 서비스 대행료로 각 함수식은 식 (9), 식 (10)과 같다.

$$CW_5 Q_f P_s C_l = (HR_5 \times PR) \times NA_5 \times RNDF_5 \quad (9)$$

$$CW_5 Q_f P_s C_e = (NSP_5 + NSM_5) \times RFNDF_5 \times ESVC_5 \quad (10)$$

HR_5 : Work5의 R&D Man Hour
NA_5 : Return 불량 심층 분석 시료수
$RNDF_5$: Work5단계 NDF 업무 비중
NSP_5 : 프리미엄 제품 판매대수
NSM_5 : 보급형 제품 판매대수
$RFNDF_5$: NDF결함 비율(판매 수량 대비)
$ESVC_5$: 제품 대당 서비스 대행 수수료

4.5 NDF 비용 산출 결과

NDF 비용을 유발하는 활동(Activity) 및 단위업무별 비용 요소(Cost element)를 정의한 후, Cost와 연관이 있는 파라

미터인 투입인원, 투입시간, 연간 진행 회수, 계층별 Pay 등의 데이터를 측정 또는 사내 시스템에서 추출하였다. 투입인원과 투입시간은 Active Base로 분석하여 산출하였고, Pay와 개발모델 수는 회계시스템에서 데이터를 추출하였다. 설비운영비용에 관한 파라미터 측정은 ABC분석과 회계시스템을 복합적으로 사용하였다. DRBFM업무 중 NDF 관련 업무는 전제 업무의 일부의 비율인 점을 고려하여 개발 리더들의 설문 및 Interview를 통해 NDF업무 비중을 측정하였다. 측정 또는 추출된 파라미터 값을 4.4절에서 제시한 함수식에 대입하여 최종 NDF 비용을 산출하였다. 산출결과는 <Table 2>와 같다.

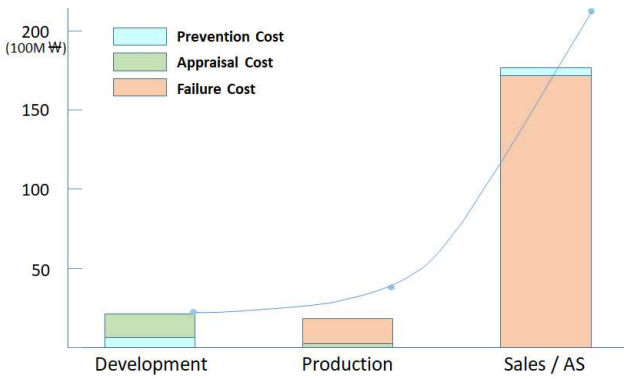
<Table 2> NDF Costing Results

Step	Activity	P Cost	A Cost	F Cost	SUM
R&D	DRBFM	168			168
	A-Test (L) A-Test (M)		493 1,345		1,838
MP	Process Quality(L) Process Quality(O)			231 1,321	1,344
Sales AS	Quality CFT(L) Quality CFT(M)			245 4,228	4,474
	Market Response (L) After Service (O)	66		13,698	13,765
Total		234	1,838	19,517	21,591

Unit : million won.

4.6 NDF 비용 시각화

<Table 2>와 같이 도출된 NDF 비용을 가치사슬(Value chain) 단계와 품질비용의 PAF 항목을 구분하여 그래프로 표현하면 <Figure 10>과 같다. 또한 프리미엄 모델과 보급형 모델을 구분하여 비용을 확인할 수 있으며, Shiny R 기법을 사용하여 파라미터의 변동요소의 변화에 따라 총 NDF 비용의 변화를 Simulation이 가능토록 구현하였다.



<Figure 10> NDF Cost Graph

4.7 NDF 비용 분석 결과 Review

사례연구 기업의 연간 NDF 비용 산출 결과, 매출액의 0.44% 수준으로 큰 비중을 차지하고 있다. NDF 비용 구성 측면에서 시장에서 발생하는 실패비용이 전체 NDF 비용의 90% 이상 점유하고 있어 개발단계에서의 예방활동과 양산단계 NDF에 대한 검사 강화 활동이 필요할 것으로 판단된다. 품질비용의 한 부류인 NDF 비용이 전체 품질 비용 중 점유율이 매우 높은 것으로 확인됐다. 그러나 원인규명이 어렵고 재현이 안 되는 NDF 특성으로 인해, NDF로 인한 비용을 과소평가하거나 NDF 대응의 중요성을 간과하여 적절한 대응 활동이 미흡한 것이 현실이다. 여러 분야의 기술이 융복합화 되고 많은 부품이 직접화되어 적용된 전자제품 제조 판매 기업에서는 NDF 비용을 개선하는 활동을 강화할 필요가 있다.

5. 결 론

최근 4차 산업혁명 발전에 따른 융·복합 기술 적용 및 부품수 증가는 NDF 현상을 증가하게 하는 주요 요인이다. NDF 현상도 소비자 관점에서 품질불량임에 틀림이 없고 품질경영의 주요한 목표로 설정하여야 한다. 품질경영에 입각하여 품질목표를 달성하는데 드는 비용을 면밀하게 관리하여 NDF 개선에 따른 질적 효과가 조직에 미치는 장기적인 영향이 바람직한 것이 되도록 해야 한다.

본 연구에서는 품질비용분석 모델인 PAF 모델과 가치사슬(Value chain)별 ABC분석 및 회계시스템의 데이터를 활용하여, 기업 실무자 관점에서 NDF 비용을 정확하게 추정할 수 있는 방법론을 제시하였다. 또한 이를 주요 변동요소별로 구분하여 시각화 표현하는 방안을 제시하였다.

사례연구 기업의 연간 NDF Total 비용을 산출한 결과, 매출액의 0.44% 수준으로 큰 비중을 차지하고 있다. NDF 비용 구성 측면에서 시장에서 발생하는 실패비용이 전체 NDF 비용의 90% 이상 점유하고 있으며, NDF 비용이 품질비용의 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 분석됐다.

본 연구의 의의를 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 품질비용 산출 모델인 PAF 모델을 기반으로 ABC분석과 기업의 IT시스템의 데이터를 활용하여 기업의 실무관점에서 NDF 비용 정확하게 추정할 수 있는 방법론을 제시하였다. 둘째, NDF 비용의 변동요소별로 파라미터가 변함에 따라 NDF 비용을 Simulation하여 시각화 표현하는 방안을 제시하였다. 셋째, NDF 비용의 체계적인 관리가 가능하게 하여 품질경영에 입각한 의사결정 과정에서

중요한 판단 정보를 제공하고 궁극적으로는 NDF 비용을 절감시키는데 의미가 있다 하겠다.

그리고 본 연구에서의 다음과 같은 한계점과 향후 연구 방향을 제시하고자 한다. 첫째, 여타 품질활동 비용대비 NDF 비용이 미미한 활동(Activity)은 금번 사례연구에서 제외했다. 이에 대한 보완이 필요하다. 둘째, NDF로 인한 사용자의 사회적 품질비용을 회사의 Brand 충성도 저하와 연관시키는 비용 측정 관련 사례연구도 향후 과제로 남긴다. 셋째, 장기간의 데이터를 확보한 후에 가능한 NDF 실패비용과 예방활동과 실패비용의 연관관계를 규명하는 과제도 흥미로운 주제가 될 것이라고 생각한다.

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2019S1A5C2A04083153).

References

[1] Baek, J.H., A Study on the Development of Analysis Model for Quality Cost, *Korean Association of Business Education*, 2010, pp. 1-14.

[2] Beniaminy, I. and Joseph, D., Reducing the 'No Fault Found' Problem : Contributions from Expert-System Methods, *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, 2002.

[3] Cho, H.S., Min, W.H., and Kim, H.M., Estimates of the Social Costs of Crime in Korea -Considering the Seriousness Index of Crime, *Korea Social Policy Review*, 2010, Vol. 17, No. 2, pp. 163-199.

[4] Choi, Y.K., A Study on Decision-Related Costs : Opportunity Costs & Sunk Costs, *Business Management Review*, 2004, Vol. 37, No. 1, pp. 251-270.

[5] Crosby, P.B., Don't Be Defensive about The Cost of Quality, *Quality Progress*, 1983, Vol. 16, No. 4, pp. 38-39.

[6] Dale, B.G. and Cooper, C.L., Total Quality and Human Resources : An Executive Guide, Blackwell : Oxford, 1992.

[7] Erkoyuncu, J.A., Khan, S., Hussain, S.M.F., and Roy, R., A Framework to Estimate the Cost of No-Fault Found Events, *International Journal of Production Economics*, 2016, Vol. 173, pp. 207-222.

[8] Esawi, A.M.K. and Ashby, M.F., Cost Estimates to Guide Pre-Selection of Processes, *Materials and Design*, 2003, Vol. 24, No. 8, pp. 605-616.

[9] Feigenbaum, A.V., Total Quality Control, *Harvard Business Review*, 1956, Vol. 34, No. 6, pp. 93-101.

[10] Groocock. J.M., Chain of Quality, Market Dominance Through Product Superiority, New York : John Wiley & Sons, 1986.

[11] Hockley, C. and Lacey, L., A Research Study of No Fault Found(NFF) in the Royal Air Force, *Procedia CIRP*, 2017, Vol. 59, pp. 263-267.

[12] James, I., Lumbard, D., Willis, I., and Goble, J., Investigating No Fault Found in the Aerospace Industry, *In : Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2003.

[13] Juran, J.M., Quality Control Handbook 3ed., New York : McGraw-Hill, 1979.

[14] Khan, S., Farnsworth, M., and Erkoyuncu, J., A Novel Approach for No Fault Found Decision-Making, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, Vol. 17, pp. 18-31.

[15] Khan, S., Phillips, P., Jennions, I., and Hockley, C., No Fault Found Events in Maintenance Engineering Part 1 : Current Trends, Implications and Organizational Practices, *Reliability Engineering and System Safety*, 2014, Vol. 123, pp. 183-195.

[16] Khan, S., Phillips, P., Jennions, I., and Hockley, C., No Fault Found Events in Maintenance Engineering Part 2 : Root Causes, Technical Developments and Future Research, *Reliability Engineering and System Safety*, 2014, Vol. 123, pp. 196-208.

[17] Kim, H.G. and Koh, Y.S., Estimation Method of the Social Costs of the Internet Addiction, *Ordo Economics Journal*, 2011, Vol. 14, No. 1, pp. 39-58.

[18] Kim, S.G., Ko, B.S., Cho, S.H., and Lee, S.E., Analysis of Relationship between Software Engineering Levels and Software Quality Costs, *The Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, 2011, Vol. 38, No. 10, pp. 512-523.

[19] Kwak, S.Y. and Suh, Y.W., A Study of Exploring and Selecting Estimation Methodologies for Costs of Chemical Accidents : Focusing on Estimating Costs of Human Health and Ecosystem Damages, *Innovation Studies*, 2017, Vol. 12, No. pp. 27-44.

[20] Lee, D.J., Kim, W.Y., Son, B.S., and Lee, H.S., A Method of Forecasting Estimate at Completion Employing Monte Carlo Simulation, *Architectural Institute of Korea*, 2002, Vol. 22, No. 2, pp. 547-550.

[21] Lee, J.S., Sohn, D.S., Choi, Y.S., Park, M.J., and Min,

J.T., A Study on the Factors of the Hardware Cost Estimation for Service Robot Development, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2018, Vol. 19, No. 5, pp. 35-44.

[22] Lee, J.W. and Han, C.H., The Improvement of NDF(No Defect Found) on Mobile Device Using Datamining, *J. Soc. Korea Ind. Syst. Eng.*, 2021, Vol. 44, No. 1, pp. 60-70.

[23] Lee, M.C., Hwang, B.S., Park, S.J., Kim, M.G., Kim, D.C., and Shin, W.S., A Research on the Development of Quality Cost Management System for Power Industry, *J. Korean Soc. Qual. Manag.*, 2016, Vol. 44, No. 4, pp. 713-733.

[24] Lee, M.J., Park, J.O., and Chung, Y.B., Development of Quality Cost Measurement Items in Service Industry, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2012, Vol. 35, No. 3, pp. 148-154.

[25] Moon, B.S. and Kim, T.G., Study on Development of Social Cost Estimating Model for Aids to Navigation Accident(Ⅱ), *J. Navig. Port Res.*, 2019, Vol. 43, No. 3, pp. 166-171.

[26] Pyo, S.H., The Comparative Study of Public Library Valuation Using CVM : Case of the Payment Vehicles, *Journal of the Korean Society for Information Management*, 2012, Vol. 29, No. 2, pp. 173-191.

[27] Schiffauerova, A. and Thomson, V., A Review of Research on Cost of Quality Models and Best Practices, *International Journal of Quality and Reliability Management*, 2006, Vol. 23, No. 4, pp. 647-669.

[28] Schwab, K., The Fourth Industrial Revolution, Crown Pub, 2016.

[29] Soderholm, P., A System View of the No Fault Found (NFF) Phenomenon, *Reliability Engineering & System Safety*, 2007, Vol. 92, pp. 1-14.

[30] Sutopo, W., Atikah, N., Purwanto, A., Danardono, D.P. T.D., and Nizam, M., A Cost Estimation Model to Assess The Feasibility of Li-Ion Battery Development based on Targeted Cost by Market Approach, *IEEE International Conference on Electrical Engineering and Computer Science*, 24-25 November 2014, Bali, Indonesia.

[31] TechSee, https://techsee.me/blog/nff-survey.

[32] Thomas, D.A., Ayers, K., and Pecht, M., The "Trouble Not Identified" Phenomenon in Automotive Electronics, *Microelectronics Reliability*, 2002, Vol. 42, No. 4-5, pp. 641-651.

[33] Wikipedia, https://ko.wikiarabi.org/wiki/No_fault_found.

[34] Williams, R., Banner, J., Knowles, I., Dube, M., Natishan, M., and Pecht, M., An Investigation of 'Cannot Duplicate' Failures, *Quality and Reliability Engineering International*, 1998, Vol. 14, No. 5, pp. 331-337.

[35] Yoo, J.H., Jie, S.H., and Lim, J.I., Estimating Direct Costs of Enterprises by Personal Information Security Breaches, *Journal of the Korea Institute of Information Security & Cryptology*, 2009, Vol. 19, No. 4, pp. 63-75.

ORCID

Jewang Lee | https://orcid.org/0000-0003-1906-9609
Jungwoo Lee | http://orcid.org/0000-0003-2700-0601
Chang Hee Han | http://orcid.org/0000-0003-2414-8125