

원전용 디지털 인디케이터의 검증 규정 EPRI TR-106439에 관한 고찰*

배창호¹ · 이동희¹ · 김규로² · 장중순^{3*}

¹한국산업기술시험원, ²경기과학기술대학교 메카트로닉스공학과, ³아주대학교 산업공학과

A Study on EPRI TR-106439 for Digital Indicator of Nuclear Power Plant

Chang-Ho Bae¹ · Dong-Hee Lee¹ · Kyu Ro Kim² · Joong Soon Jang^{3*}

¹Korea Testing Laboratory

²Gyeonggi College of Science and Technology

³Graduate school of Ajou University

Nuclear power plants may use commercial grade items if they can pass special tests or inspections, which is called Commercial Grade Item Dedication (CGID). Digital items, however, should follow EPRI TR-106439 to be applied to nuclear power plants. This paper explains the scheme and requirements of the EPRI TR-106439 and introduces some guidelines. Firstly, in order to clarify requirements of the EPRI TR-106439, code interpretation is performed. And through case study of digital indicator, limitations of EPRI TR-106439 are mentioned, and improvement direction is proposed.

Keywords: Commercial Grade Item Dedication(CGID), Digital Indicator, Nuclear Power Plant, Software Validation&Verification, Reliability

1. 서론

국내 원자력발전소는 1970년대 미국의 원자력발전소 건설 및 운영기술을 도입한 고리호기를 시작으로 현재 가동원전 23기, 건설원전 5기를 운영하고 있다. 따라서 국내 원자력발전산업 기술이 발전함에 따라 노후 원전의 교체 대상 기기들은 디지털화 된 제품으로 교체되고 있다. 특히 신규 건설원전의 경우 디지털화된 주제어실(MCR, Main Control Room)에 적용될 예정이므로 원전에 적용되는 디지털기기에 대한 수요는 날로 증가할 것으로 예측되고 있다. 이러한 변화는 과거 아날로그 기기 생산 중심의 원자력 산업을 디지털 제품 생산 중심으로 바꿔놓았고, 이는 결국 디지털 제품의 검증 수요 증가로 이어지므로 검증의 신뢰성 향상을 위해 코드(규격)에 명시된 검증방법에 대한 체계적인 고찰 및 개선은 지속적으로

진행되어야 한다.

미국 원자력발전소의 경우 1980년대 원자력발전소의 안전성의 문제로 원자력 산업계의 쇠퇴기를 거치면서 원자력발전소 품질프로그램(10CFR50 Appendix. B)을 운영하는 회사들이 도산하거나 시장을 일반산업규격품 제작으로 전환함에 따라 안전성등급 품목의 구매가 어렵게 되었다. 이에 따라 미국 원자력규제위원회(USNRC, US Nuclear Regulatory Commission)는 미국 전력연구소(EPRI, Electric Power Research Institute)에서 개발한 일반산업규격품으로 생산된 품목을 검증하는 개발 지침을 채택하여 원전 산업계 설비에 적용하고 있다. 국내의 경우 원자력안전위원회 규제지침 17.12(안전성관련품목 대체사용을 위한 일반규격품의 품질검증)에 명시되어 있는 EPRI NP-5652(Guideline for the Utilization of Commercial Grade Items In Nuclear Safety Related Applications)와 EPRI TR-106439

* 본 논문은 2014년도 산업통상자원부 기술혁신사업(국제상호인정 시험평가능력기반구축사업)으로 지원받아 작성되었음.

† 교신저자 jsjang@ajou.ac.kr

2014년 9월 20일 접수; 2014년 11월 14일 수정본 접수; 2014년 11월 23일 게재 확정.

(Guideline on Evaluation and Acceptance of Commercial Grade Digital Equipment for Nuclear Safety Applications)를 준용하고 있다. 하지만 디지털기기에 대한 EPRI TR-106439는 디지털기기의 전반적인 요건에 대해서만 기술하고 있으며 구체적인 요건 및 시험 방법론이 정의되지 않아 시험원에 따라 다르게 적용되고 있는 실정이다. 이를 보완하기 위해 현재 원자력 산업계에서는 디지털 기기들의 객관적이고 합리적인 보증을 위하여 많은 연구를 진행하고 있다.

본 논문에서는 일반규격품목 검증기준 EPRI NP-5652와 디지털기기 검증 기준 EPRI TR-106439의 차이점을 분석하고 규격에 명시된 내용 중 시험 및 검사에 필요한 항목을 기술하고 이에 대한 정의와 물리적 의미를 분석한다. 또한 기기의 물리량 계측을 위해 원전 내부에 널리 적용되고 있는 디지털 전력량계에 대한 검증 방법의 고찰을 통하여 현재의 문제점과 개선 방향을 제안하고자 한다. 해당 검증 절차의 고찰을 위해 기기가 실제 현장에서 적용될 때의 환경 및 요구기능 고려하여 검증을 실시하고, 현재 코드의 한계 및 문제점을 분석한 후 향후 나아가야 할 방향을 제시한다.

2. 정의

2.1 일반규격품목 품질검증(CGID)

국내 원자력 발전소에 적용되어지는 안전성관련 제품 및 기기는 원자력 품질보증 프로그램(KEPIC QAP, Quality Assurance Plan)에 명시되어 있는 요건에 따라 품질보증계획 수립 및 이행 되어야 한다.

원자력 품질보증요건은 총 18개 요건으로 정의되어 있으며 1. 조직, 2. 품질보증계획, 3. 설계관리, 4. 구매문서관리, 5. 지시서, 절차서 및 도면, 6. 문서관리, 7. 구매품목 및 역무의 관리, 8. 품목의 식별 및 관리, 9. 공정관리, 10. 검사, 11. 시험관리, 12. 측정 및 시험장비의 관리, 13. 취급, 저장 및 운송, 14. 검사, 시험 및 운전상태, 15. 부적합품목의 관리, 16. 시정조치, 17. 품질보증기록, 18. 품질보증감사로 이루어져 있다. 이에 따라 원자력발전설비 제작업체는 품질보증 프로세스를 유지해야 한다. 하지만 원전산업계의 높은 시장진입장벽과 원자력 품질보증 프로그램을 운영하기 힘든 제작업체들로 인해 제품의 확보가 어려운 실정이다. 이와 같은 상황으로 인해 원자력 발전 산업계는 요구되는 성능에 대해서 품질검증을 통해 성능이 입증된 일반규격품목에 국한하여 대체사용하고 있다.

일반규격품목 품질검증(CGID, Commercial Grade Item Dedication)이란 일반산업규격품으로 생산된 품목에 대하여 성능검증을 통한 기술적인 평가 및 문서화를 기준으로 원전 산업계 설비에 사용될 수 있도록 규정된 방법이다. 이는 성능검증을 통하여 제품의 신뢰성을 확인하는 수단으로 제품의 생산부터 원자력발전소에 적용되기 이전까지의 전방위적인 행위이다. 따라서 일반규격품목을 적용하기 위해서는 전력

산업기술기준에 따라 KEPIC QAP “원자력 품질보증계획 일반기준”에 명시되어 있는 3S-1 “설계관리”, 7S-1 “구매품목 및 역무의 관리”, 7A-2 “일반규격품에 관한 임의요건”을 충족하여야 하며 EPRI TR-5652에 기술된 요구사항을 적용하도록 명시되어 있다.

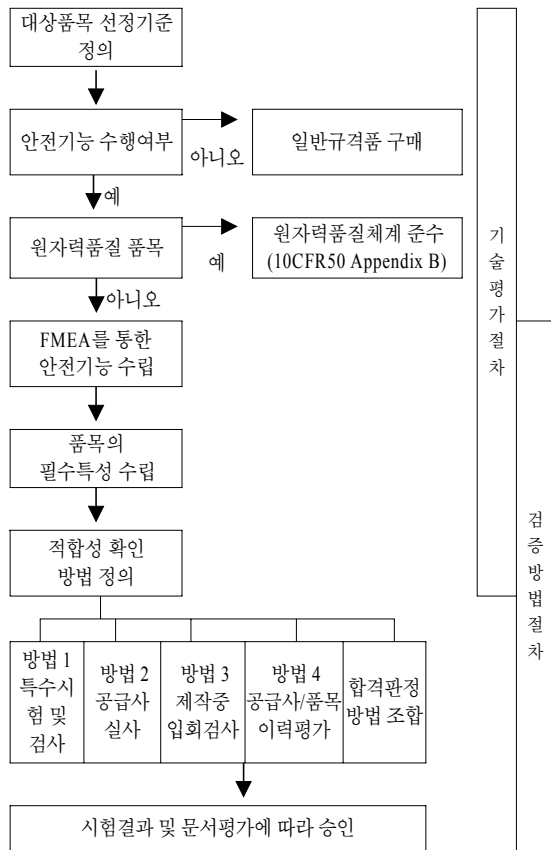
2.2 EPRI NP-5652 규격개요

디지털기기의 검증방법 규격인 EPRI TR-106439는 EPRI NP-5652를 준용하여 이루어졌다. 따라서 EPRI NP-5652의 기술적 요건을 파악하여 EPRI TR-106439의 추가요건에 대하여 파악하고자 한다.

일반규격품목 검증규격 EPRI NP-5652는 일반규격품을 품질검증 하고자 할 때 적용되는 규격으로 설비가 요구하는 성능 및 기기의 신뢰성을 평가하기 위한 규격이다. 따라서 기기가 적용되는 설비의 특성을 파악하여 기술평가보고서(Technical Evaluation Report)를 작성하고 제품의 요구 성능 및 판정기준을 정의하도록 되어 있다. 이는 일반규격품이 적용되는 설비 특성에 부합되는지 확인하기 위해 이루어진다. 설비특성은 설비의 설계필수특성, 즉 설비의 요구 성능기준을 말하며 설비의 중요 기능을 뜻한다. 검증필수특성은 설비의 설치환경에 대한 환경적 영향분석을 말하며 설계사고 및 요구환경에 따라 기기가 만족함을 입증해야 한다. 위에서 언급한 일반규격품의 기술평가보고서는 설비의 안전기능(Safety Function)에 영향을 미치는지, 규격에서 제시하는 일반규격품목의 정의에 적합한지, 일반규격품목의 필수특성(Critical Characteristics)을 도출하여 합격판정방법(특수시험 또는 검사, 일반규격품 공급자 실사, 제작 중 입회검사, 공급자 및 공급품목의 성능이력 분석)을 작성하여 평가하여야 한다. 따라서 일반규격품목의 평가 및 검증과정의 모든 행위는 문서화 하여야 하며 작성된 기술평가보고서를 기준으로 품질검증이 이루어져야 한다.

일반규격품을 안전성등급 품목으로 사용하기 위해선 <그림 1>과 같은 검증절차가 이루어져야 하며 각 세부사항에 대한 기술적 분석 평가 방법은 <표 1>과 같다.

EPRI NP-5652 CGID Process에 정의된 바와 같이 일반규격품은 적용설비의 안전기능(Safety Function)에 영향을 미치는지 확인하기 위해 고장모드 및 영향분석(FMEA, Failure Mode and Effect Analysis)를 통한 일반규격품의 필수특성(Critical Characteristics)을 도출하여야 한다. 이를 통해 FMEA는 제품의 고장유형 및 영향성분석을 수행하여 제품 또는 프로세스에서 일어날 수 있는 잠재적인 고장유형들과 그에 따른 영향을 찾아내어 이를 문서화 하고 객관적인 평가를 할 수 있다. 따라서 FMEA를 통해 분석된 기준과 설비의 환경요구조건을 바탕으로 적합성확인방법을 선정하는 기술평가보고서를 작성하고 적합한 검증이 이루어져야 한다. 이러한 검증과정은 문서화 되어야 하며 작성된 기술평가보고서를 기준으로 품질검증이 이루어진다.



〈그림 1〉 EPRI NP-5652 CGID Process

〈표 1〉 EPRI NP-5652 분석 평가 방법

항목	정의
대상품목 선정기준 정의	교체 품목이 CGI정의에 적합한지 평가하여 기존 원자력제품의 안전등급 및 동등성 평가를 진행한다.
안전기능 수행여부	원자력등급 분류
원자력품질	원자력품질 제작요건 평가
안전기능	교체품목이 요구 기능을 만족하는지 확인하고 FMEA를 통한 기능특성을 정의한다.
필수특성	품목의 필수특성을 정의
적합성확인	EPRI NP-5652에 정의된 합격판정방법을 적용하여 평가하여야 한다.
특수시험 및 검사	필수특성에 대한 시험수행 및 평가
공급사 실사	조직의 QA구성
	설계/개발 프로세스 평가
	설계문서 검토 평가
제작 중 입회검사	품목의 설계, 제작, 시험시 구매자가 입회하여 평가
공급사/품목 이력평가	교체품목 업체의 평가
	제품의 운전경험 평가

EPRI NP-5652에서는 발전소 설비의 교체품목으로 적용되는 일반규격품목에 의도된 안전기능 특성을 물리적 특성, 성능특성(Product Identification and Physical Characteristics)으로 정의하고 있으며 검증특성을 크게 2가지로 구분하여 정의하고 있다.

첫째, 제품의 물리적 특성 확인이다. 물리적 특성이란 제품의 설치특성, 기계적인 구조, 컬러특성, 크기와 같이 하드웨어적인 특성을 말한다. 이는 제품의 사양에 맞는 적절한 표시, 제품의 하드웨어특성, 제품동작 상태 등을 확인하여 EPRI NP-5652의 합격판정방법 중 방법 1. 특수시험 또는 검사를 적용하여 확인한다.

둘째, 동작 특성 확인을 통하여 기능의 건전성(Stability)을 입증하는 과정이다(Performance Characteristics). 동작특성 확인은 제품의 기능항목들에 대한 신뢰수준 및 환경적인 영향에서 건전성을 입증하기 위해 수행되는 절차이다. 이는 제품 고유의 기능과 안전성이 원자력 발전설비 이상 현상(Event) 발생 시에도 유지될 수 있는지를 평가하는 것이다. 기능의 건전성은 기술평가보고서를 기초로 수행되며 성능과 관련된, 습도 및 지진과 같은 환경적 요구사항을 만족하는지 평가한다. 이러한 방법은 규격 내 정의되어진 방법 1. 특수시험 또는 검사, 방법 2. 일반규격품 공급사 실사, 방법 3. 제작 중 입회검사, 방법 4. 공급사 및 공급품목의 성능이력 분석방법을 적용함으로써 확인될 수 있다.

2.3 EPRI TR-106439 규격개요

본 장에서는 EPRI NP-5652와 EPRI TR-106439의 차이점을 분석하고 디지털기기의 검증규정 EPRI TR-106439에 명시된 요건을 분석하여 고찰을 수행한다.

디지털기기의 검증방법 규격인 EPRI TR-106439는 EPRI NP-5652를 바탕으로 이루어 졌다. 서론에서 언급하였듯이 원자력발전 산업 기술이 발전함에 따라 노후 원전의 교체 대상 기기들은 과거 아날로그 기반의 기기에서 디지털화 된 제품으로 교체되어질 전망이다. 따라서 EPRI TR-106439에서 정의하고 있는 특성을 파악하여 구체적인 시험방법론을 고찰할 필요가 있다.

EPRI TR-106439에서 제시하는 디지털기에 대한 적합성 확인방법은 EPRI NP-5652적합성확인방법을 적용하여 기기의 평가가 이루어진다. 하지만 EPRI TR-106439는EPRI NP-5652에서 제시하는 물리적 특성 및 동작특성뿐만 아니라 디지털 기기에 탑재된 소프트웨어의 평가기준을 접목하고 있어 기존 EPRI NP-5652에서 배제되어 있던 평가요소들을 추가적으로 반영하고 있다. 따라서 EPRI TR-106439에서는 디지털기기의 검증특성을 크게 3가지로 구분하여 정의하고 있다(Verifying Critical Characteristics).

첫째 제품의 물리적 특성 확인이다(Physical Characteristics). EPRI NP-5652에서 요구하고 있는 제품의 설치특성, 기계적

인 구조, 전기적 특성, 크기와 같이 하드웨어적인 특성뿐만 아니라 소프트웨어 버전, 모듈 및 보드의 버전, 제품의 초기 성능요건 등을 추가적으로 확인토록 되어있다. 기존 물리적 특성 방법과 달리 디지털기기는 버전관리에 따라 기기의 동 특성이 달라질 수 있기 때문에 소프트웨어 및 기기의 버전에 따른 물리적 식별이 중요하며 EPRI NP-5652에서 제시하는 방법 1. 특수시험 및 검사로 평가되어야 한다.

둘째 동작특성 확인이다(Performance Characteristics). EPRI TR-106439에서의 동작특성 확인은 EPRI NP-5652 규격개요에서 언급된 바와 마찬가지로 제품의 기능항목 및 정확도에 대한 신뢰수준 및 환경적인 영향에서 건전성을 입증하기 위해 수행되는 절차이다. 하지만 EPRI TR-106439에서는 추가적으로 HMI(Human Machine Interface) 및 전자파 영향평가(EMI/RFI/ESD)를 추가적으로 제시하고 있다. 이는 과거 아날로그 제품과는 달리 인간공학 측면과 전자파 영향 평가를 추가함으로써 작업자와 기기간의 발생할 수 있는 인적요소들을 포함하여 검증기준을 정의 하였다. 따라서 원자력 산업 설비의 규격 및 규제지침에 적용되는 제품은 특성 및 요구 환경에 맞는 규격을 정의하여 환경적 영향, 전자파 영향, 내진에 의한 영향 등의 요구조건을 충족하는 평가를 수행하여야 한다.

동작특성 검증방법의 평가는 EPRI NP-5652에서 정의하고 있는 방법 중 방법 1. 특수시험 및 검사, 방법 2. 공급자실사, 방법 3. 제작 중 입회검사, 방법 4. 공급사/품목이력평가로 규정되어 있다.

셋째 신인성 특성(Dependability Characteristics)에 대한 평가이다. EPRI TR-106439에서 소프트웨어가 적용된 디지털 장비 입증하기 위한 가장 중요한 사항은 신인성이라 할 수 있다. 신인성이란 제품의 기능과 그에 영향을 미치는 요인들을 설명하기 위해 사용되는 용어로서 신뢰성(Reliability), 보전성(Maintenance), 보전지원성(Maintenance Support)으로 국제전기기술위원회(IEC, International Electrotechnical Commission)에서 정의하고 있다.

EPRI TR-106439에서 말하는 신인성이란 디지털 품질검증의 일반적으로 시험 또는 검사를 통해 검증할 수 없는 프로세스에 의한 영향을 평가하는 것이다. 하드웨어의 고장은 일반적으로 제조수명, 제조결함에 의해 발생되지만 소프트웨어는 기계적 손상이나 마모가 일어나지 않는다. 이에 따라 디지털장치의 신뢰성은 장치의 설계상의 오차를 반영하여 어플리케이션의 요구사항 및 설계요건 사이의 불일치 정도를 평가함으로써 확인될 수 있다. 또한 업체의 품질프로그램에 작성된 기기의 설계, 개발, 검증 타당성 등이 포함된 문서를 통하여 품질체계가 적절히 이루어지고 있는지를 평가할 수 있다. 따라서 시험 및 검사를 통한 정량적, 정성적인 측면뿐만 아니라 제품제작의 적용되는 프로세스 및 설계요건 등을 파악하여 제품의 영향을 미치는 요인들을 파악하고 이를 문서

화로 입증하는 것이다.

디지털기기의 소프트웨어는 제품의 기능 및 환경적인 요구사항이 만족할지라도 제품의 설계문서 확인 및 성능을 뒷받침할 수 있는 문서가 적용되지 않는다면 결과적으로 원자력발전소에 적용되기 어렵다. 기존 하드웨어 기준의 성능검증에서 소프트웨어가 접목된 디지털제품을 입증하기 위해서는 소프트웨어가 적용된 제품의 특성을 파악하여 기능적, 프로그램의 복잡도, 설계입력소스 등을 평가하여 합리적인 보증이 이루어져야 한다.

EPRI TR-106439에서는 독립기능(Single Function)을 수행하는 디지털기와 상호연동기능(Multi Function)을 수행하는 디지털기로 분류하여 예를 들고 있다. 명시된 예를 기준으로 디지털기기의 동작 및 설계특성이 독립기능으로 구현되어 적용설비의 성능특성에 영향을 주지 않는 제품의 한해서는 소프트웨어 검증확인(V&V, Validation & Verification)을 수행하지 않고 소프트웨어 에러보고서 및 품질보증 측면의 소프트웨어 설계문서로서 보증할 수 있다는 것을 예로 볼 수 있다. 하지만 디지털 제품의 기능이 상호연동 및 다른 기기의 영향을 줄 수 있는 제어기능 기기라면 반드시 KEPIC EME-3100 컴퓨터 소프트웨어 검증기준에 따라 소프트웨어 검사와 타당성 검사 V&V를 수행하여야 한다. 소프트웨어 검증은 소프트웨어 요구요건의 정당성, 완결성, 정확성, 일관성 및 시험성 여부를 기준으로 판단한다.

소프트웨어는 원자력산업계 뿐만 아니라 일반산업에서도 품질을 보증할 수 있는 명확한 시험방법 및 기준의 표준화가 이루어지지 않아 불명확하다. 따라서 소프트웨어 검증방법은 소프트웨어의 프로세스를 분석하고 평가하는 것으로 소프트웨어의 검증이 이루어지고 있는 것이다. 현재 소프트웨어 검증에 대해 학회 및 산업계 전반에서 많은 연구가 진행되고 있으며 향후 소프트웨어 검증 및 시험방법에 대한 명확한 평가기준이 정립되어야 할 것이다.

EPRI NP-5652 및 EPRI TR-106439의 문제점은 규격을 바탕으로 작성된 문서의 평가기준이 정량적이거나 정성적인 평가기준이 아닌 기술적 평가(Engineering Judgment)로 이루어졌다는 점이다. 따라서 검토자의 주관적인 평가에 따라 평가기준이 크게 달라질 수 있다는 점이다.

본 논문에서는 적용사례를 통해 EPRI TR-106439에서 제시하는 요건 및 EPRI NP-5652의 요건을 취합하여 다음과 같이 제시하였다.

독립기능을 수행하는 디지털기기의 합리적 보증을 위한 기준으로 품질보증 문서와 EPRI NP-5652에 따른 검증수행 보고서, 업체평가, 공급실적 등을 통한 정성적인 보증을 목적으로 하고 있으며 규격에 명시된 원자력 품질요건(KEPIC QAP & 10 CFR 50 Appendix B)에 따라 설계관리, 구매품목 및 역무의 관리 등의 디지털 전력망계의 품질을 입증하기 위해 다음과 같은 문서를 제시하였다.

- 제작업체의 설계품질 평가
- 고장모드 및 고장관리
- 공급실적
- 적용설비의 기술평가 보고서
- 제품사양서
- 품질검증수행 보고서
- 품질보증확인서
- 소프트웨어 기능설명서

이와 같은 평가는 독립기능을 하는 디지털기기의 신뢰성을 입증하기 위한 평가기준으로써 IEC 60050-191의 신인성정의를 포함하고 있다.

본 논문의 적용사례에서는 독립기능을 수행하는 기기의 신뢰성을 파악하기 위해 사용조건의 시간에 따른 변화 및 환경조건을 적용하여 고장의 유형(Bathtub Curve)중 품질고장(초기고장)과 내구수명(우발고장)이 요구 성능에 적합한지를 파악하였다. 또한 보전성을 파악하기 위해 고장모드(Error Code) 및 고장관리 문서를 적용하여 기기의 보전성을 입증하였다. 마지막으로 기기의 보전지원성을 파악하기 위해 기기 제작업체의 설계품질평가 및 조직평가를 수행하였다.

3. 적용사례

디지털전력량계는 적산전력계, 전기미터, 전기계량기라고도 하며 시간에 따른 전력량을 기록하는 기기이다.

위에서 언급한 바와 같이 원자력기기용 디지털 전력량계는 먼저 EPRI NP-5652에 근거하여 제조사의 공정능력, 제품 설계특성, 고장모드에 따른 고장유형, 장치와 소프트웨어의 연동기능, 환경적합성, 이상조건에 대한 특성 등을 종합적으로 평가하였고 이에 따른 필수특성항목 및 검증항목 등을 정의하고 기술평가를 시행하였다. 그리고 현재 국내 및 해외에서 원자력발전소운영의 큰문제로 대두되고 있는 위변조제품(CFSI: Counterfeit, Fraudulent, Suspect, Item) 문제를 보완하기 위해 원자력 안전 위원회 규제지침 17장 “운영 및 품질보증에 위변조 및 모조품에 대한 방지대책”을 적용하여 식별기준에 따른 하드웨어적인 신뢰수준을 높일 수 있도록 문서화하였다.

3.1 물리적 특성

디지털 전력량계의 CGID를 수행하기 위해서는 설비의 영향성이 평가되어야 하므로 제품사양서 내에 정의된 사양 및 물리적 특성 기준으로 기술평가서에 반영하였다. 이는 EPRI TR-106439 규격에 명시되어져 있는 바와 같이 제품의 요구 기능 및 필수특성을 도출하는 것이 목적으로 이러한 과정은 평가기준을 반영하여 CGID를 수행하기 위함이다. 따라서 기

술평가 보고서를 기준으로 EPRI NP-5652에서 제시하는 성능 검증방법 4가지 중 방법 1에 해당하는 특수시험 및 검사기준으로 디지털 전력량계에 대한 측정 및 시험을 실시하였으며 <표 2>의 검사기준에 따라 수행되었다.

<표 2> 물리적 특성 검점항목

물리적 특성	합격 기준	검증확인 방법
제품번호	제품사양 기준	특수시험 및 검사
치수	제품사양 기준	특수시험 및 검사
설치방법	제품사양 기준	설계문서 확인
입력전압	제품사양 기준	특수시험 및 검사
입력 전류	제품사양 기준	특수시험 및 검사
전원	제품사양 기준	특수시험 및 검사
표시상태	제품사양 기준	특수시험 및 검사
소프트웨어 버전	제품사양 기준	성능이력평가

3.1.1 제품식별

제품식별은 사양서에 명시된 기준으로 식별번호확인, 설계변경이나 사양 변경 확인과 추가적으로 이동 시에 발생할 수 있는 물리적 결함요소를 확인하는 과정으로 이루어진다.

식별번호 확인은 CGID에서 가장 먼저 선행되어야 하는 절차이다. 이는 일반규격품 선정내역 상의 제품과 실제 기기에 적용되는 제품의 일치 여부를 판단하기 위함으로 제품의 모델 번호와 해당 제품이 적용됨을 보여주는 문서와의 비교를 통해 확인 하였다.

제품식별은 단순한 물리적인 특성 확인의 범주를 넘어서 위변조제품에 대한 방지활동으로 반드시 검사 및 서류검토를 수행하여야 한다.

다음은 제품에 대한 육안 검사 및 치수 측정 과정이다. CGID는 반드시 미 사용된 신제품으로 수행되어야 하므로 파손 및 사용흔적 여부를 확인하여야 한다. 뿐만 아니라 <그림 2>와 같이 제품 품질의 균일성을 확인하기 위해 제품의 가로, 세로 길이 및 높이 등을 측정하여 전 제품이 동일한 품질로 생산되었는지 확인하였다.



<그림 2> 치수측정 사진

식별확인의 마지막 절차는 소프트웨어 버전 확인 절차이다. 해당 절차는 소프트웨어가 적용되는 제품군에 한하여 실시되는 절차로 문서상의 소프트웨어 버전과 실제 제품에 탑재되어 있는 버전이 일치하는지 여부를 확인하는 것이 주목적이라 할 수 있다. 소프트웨어는 제품을 구동시키고 성능을 결정하는 매우 중요한 요소이므로 이에 대한 검증은 필수적으로 수행되어야 한다. 하지만 실제 소프트웨어 버전에 대한 확인은 CGID 수행 과정에서 확인하기에는 기기의 구동환경에 따라 확인이 불가능한 경우가 대부분이다. 따라서 본 논문의 적용사례에서는 EPRI NP-5652에 명시된 공급자 설계문서평가로 대체 하였다.

3.1.2 제품 인터페이스

제품 인터페이스는 EPRI TR-106439에 정의 되어 있는 분류에 따라 확인되어야 한다. 따라서 디지털 전력량계의 인터페이스를 확인하기 위하여 전원 단자에 요구 전압을 인가하여 전면부의 표시화면 상태를 확인하였다. 또한 디지털 전력량계의 입력단자에 제품의 성능사양과 동일한 정격전압 및 전류를 인가하여 정상사용조건에서의 제품의 동작을 확인하였다. 이는 정상동작 상태를 확인하기 위함이며 초기 제품의 구동상태를 파악하고 추후 진행되는 시험들에 대한 기준으로 적용하기 위함이다.

3.2 동작특성

디지털 전력량계는 연결되어 있는 유효 전력을 시간에 따라 적산하여 측정하고 표시하는 계기로써 요구되는 필수특성은 <표 3>과 같다.

<표 3> 동작특성 검점항목

기능 및 환경 특성	합격 기준	검증확인 방법
정밀도	제품사양 기준	특수시험 및 검사
범위	제품사양 기준	특수시험 및 검사
전력량	제품사양 기준	특수시험 및 검사
초기화	제품사양 기준	특수시험 및 검사
절연저항	제품사양 기준	특수시험 및 검사
노화분석	설계사양 기준	특수시험 및 검사
지진	설계사양 기준	특수시험 및 검사
전류상실	제품사양 기준	특수시험 및 검사
전압상실	제품사양 기준	특수시험 및 검사
신호이상	제품사양 기준	특수시험 및 검사

본 사례에서 적용된 디지털 전력량계와 같은 일반규격품의 경우 원자력에서 요구하는 품질보증 시스템에 따라 제작된 것이 아니라 일반산업의 대량생산 기준으로 생산되었으므로 제품별, 로트별 동특성의 차이가 나타난다. 따라서 시험수행

후 승인된 품목에 한해서만 원자력 설비에 적용될 수 있다. 그러므로 동일모델 시험이력이 있다하더라도 동일 로트가 아닌 경우 재시험을 통해서 성능인증이 되어야 하는 것을 간과하여서는 안 된다.

3.2.1 동작시험

일반적으로 정밀도 및 선형성 측정은 제품에 입력되어지는 전압 및 전류의 오차(accuracy)를 확인하기 위해 수행된다. 따라서 본 사례에서는 디지털 전력량계의 정밀도와 선형성 측정을 위해 교정된 장비를 이용하여 입력단자에 선형적으로 변화하는 전압 및 전류를 인가하였고 제품 표시창의 출력되는 값과 측정 장비의 측정치를 비교함으로써 제품의 성능을 평가하였다.

디지털 전력량계의 가장 중요한 기능을 하는 전력량은 제품에 인가되는 전압 및 전류의 소비전력을 적산하여 표시하는 기능이다. 제작사가 제시한 카탈로그의 시간당 전력량을 평가하기 위해 제품의 정격전압 및 정격전류를 인가한 후 1시간 동안 동작 상태를 유지시킨 후 기록된 전력량과 실제 인가된 전압 전류에 대한 유효전력 계산 값을 비교 및 오차를 확인하였다.

초기화기능은 전력량계에 누적된 전력량 및 현재의 상태 표시상태를 초기화시키는 기능을 뜻하며 입력값 오류로 인한 표시상태의 초기화 기능을 수행한다. 초기화기능 및 신호 이상 확인은 제품의 입력단자에 비정상 결선을 하여 오류 출력화면을 확인한 후 매뉴얼에 명시된 초기화 기능 작동 방법을 이용하여 기능의 건전성을 확인하였다.

절연저항 확인은 제품의 전류가 도체에서 외부로 누설되지 않도록 설계되어있는 구조에 대한 측정 장비를 사용하여 정량적인 표현을 하는 시험이다. 일반적으로 절연저항측정은 절연물 내부의 체적절연저항과 제품외부 표면의 면적 절연저항을 기준으로 측정된다. 이에 따라 디지털전력량계의 절연저항을 확인하기 위해 제품의 단자와 외함간의 절연상태를 파악하였다.

3.2.2 환경시험

환경시험은 제품이 설치되는 환경에서의 온, 습도 혹은 가혹한 환경에서의 기능시험과 지진이 발생되는 환경에서의 제품의 건전성을 확인하는 내진시험으로 나눌 수 있다. 이러한 시험은 제품에 대한 노화를 진행한 이후 또는 노화해석 이후에 수행한다. 이는 제품이 설치된 후 설계수명 만큼의 시간이 지난 이후에도 제품이 기능을 구현하는 데에 어떠한 문제도 없다는 것을 입증하기 위함이다.

원자력 발전설비의 노화는 크게 열적노화, 기계적 노화, 방사능 노화 이렇게 3가지로 분류 할 수 있다. 노화는 발전소 설계수명까지의 제품설계수명이 적용될 수 있는지 제품의 교체수명주기를 제시하기 위해 수행되어 진다 일반적으로 제품의 열적 및 방사선노화는 재질 및 환경에 따라 고유의 수명

이 결정되어지기 때문에 열적노화 해석은 자체발열 영향과 가동 중 제품 주위온도가 고려되어야 하고, 방사선노화는 제품이 설치환경에서 받는 선량 및 노출기간을 고려하여 수행된다. 기계적 노화는 기기의 기계적 동작횟수에 따른 기계적 피로(Fatigue)에 의하여 노화메커니즘을 갖는다.

본 사례에서는 일반 규격품 제작사에서 제공한 재질확인 문서(BOM, Bill Of Material)를 기준으로 각 재질에 따른 설계 수명을 분석하는 것으로 해석을 수행하였다. 열적노화의 경우 기기의 재질에 따른 활성화 에너지(Activation Energy)를 적용하여 해당 기기의 제품이 설치되는 환경에서의 예측수명을 계산하는 방법으로 다음과 같은 아레니우스(Arrhenius) 방정식을 적용하여 평가를 진행하였다.

$$R(T) = A_e^{-\frac{E_a}{k_B T}}$$

$R(T)$: Reaction rate

A : Constant to be determined by the experiment

k_B : Boltzmann constant

$(8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}^\circ)$

T : Absolute reaction temperature, K^0

E_a : Reaction activation energy, eV

방사선은 물질과 반응하여 물리적 변화를 일으킨다. 따라서 방사선에 의한 물리적 변화에 따른 정량적 표현으로 임계치(Threshold)로 표현하며 금속소재질은 각 재질별 임계치가 다르게 나타나며 금속소재질의 경우 방사선 메커니즘이 없는 것으로 분류된다. 이에 따라 설치 주변 방사선량을 기준으로 제시된 BOM의 재질분석을 통해 방사선 영향평가를 수행하였다. 기계적 노화는 기계적 동작 메커니즘을 가진 제품에서 반복적인 동작에 의한 부품의 마모로 발생하는 기능저하 현상을 뜻한다. 본 사례에 적용된 디지털 전력량계는 기능 수행을 위하여 어떠한 기계적 메커니즘도 수반되지 않으므로 영향성을 평가하지 않았다. 따라서 노화는 일반적으로 제품에 적용된 재료 및 부품 중 검증수명이 가장 짧은 기준으로 제품의 수명이 결정된다.

지진시험은 원자력 발전소의 최종안전성분석보고서(FSAR, Final Safety Analysis Report)를 기준으로 KEPIC END-2000 전기 1급기기 내진검증(IEEE-344)에서 제시하는 설계기준 사고 시 일어나는 지진에 대하여 수행을 하였다.

원자력발전소의 설계기준사고 시 일어날 수 있는 내진환경은 운전기준 지진(OBE, Operating Basis Earthquake)과 이후에 발생하는 안전정지 지진(SSE, Safe Shutdown Earthquake)으로 분류되어 평가하고 있다. 이는 발생기간 동안 기기의 안전기능 수행 및 정상동작 요건을 수행하는지 판단하기 위해 이루어지며 디지털 전력량계가 적용되는 설비에 설치하여 요구 성능을 유지하는 상태를 구성, 원자력 발전소의 설치공간에 대한 요구응답스펙트럼(RRS, Required Response Spectrum)을

적용하여 <그림 3>과 같이 수행하였다. 따라서 설치환경에 따른 노화 및 지진시험을 수행하기 위해서 제품의 재질분석 및 설계과악이 선행되어야 하며, 이를 문서화하여 입증해야 한다. 본 사례에서는 이를 반영하여 적용하였으며 실제 실증시험을 통해 제품의 구조적 및 기능의 건전성을 확인하였다.



<그림 3> 내진시험 수행모습

3.3 신인성 특성

독립기능을 수행하는 제품을 대상으로 EPRI TR-106439에 제시된 보증요건의 만족여부를 평가하기 위해서는 소프트웨어가 적용된 기기의 설계, 개발, 검증타당성 등이 포함된 문서를 검토하여 품질보증체계가 적절히 이루어졌는지 평가해야 한다. 따라서 본 사례에서는 일반적인 시험 및 검사를 통해 과악이 어려운 다음과 같은 사항을 확인하였다. 1. 제작업체의 제작능력, 2. 설계 및 개발프로세스, 3. 에러코드 및 소프트웨어 버전관리, 4. 제작업체 품질보증체계, 5. 제출문서 진위여부 확인을 평가하여 신뢰성을 입증하고 합리적으로 품질보증하기 위해서 제작사의 과거 원자력산업설비 공급실적과 품질보증확인서를 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 기존 일반규격품목 품질검증 규격 EPRI NP-5652에서 제시하는 물리적, 기능적인 특성 검증뿐만 아니라 디지털기기들의 품질검증 수행 시 제품의 설계문서 적용된 소프트웨어의 신뢰성을 제시하기 위한 에러코드, 버전관리, 소프트웨어정보, 공급실적 등의 문서들을 포함하는 합리적인 보증이 이루어져야 한다는 것을 제시하였다. 이를 바탕으로 EPRI TR-106439에서 제시하는 디지털제품 검증방법 중 독립기능에 대한 제품의 검증방안 및 보증요건을 기술하여 실제 시험을 통한 적용방법 및 요건을 분석, 물리적 특성, 동작특성, 신인성 등을 기준으로 적용사례를 소개하였다.

상호연동 기능(Multi Function)을 갖는 제품에 대해 EPRI TR-106439에서 제시한 검증방법 V&V는 제품에 적용된 소프트웨어의 설계코드 및 설계요건을 파악하고 요건에 따른 설계가 이루어 졌는지를 평가하여야 한다. 하지만 기기제작업체는 소프트웨어에 설계에 대해 대외적으로 공개하는 것에 대해 기술적대외비로 정의하여 공개를 하지 않고 있으며 V&V에 대한 수행을 적용하지 않고 있는 것이 현실이다. 또한 원자력 발전사업의 특성상 소량구매에 따른 과도한 요구조건을 반영하기 어렵다고 판단하는 업체들이 많아 원자력발전설비 제작업체의 기기 설계 시 제품선정에 어려움이 있거나 제품의 V&V 수행에 따른 추가비용을 지불함으로써 제품을 구매하고 있는 실정이다. 따라서 원자력 발전 산업에서 디지털제품들의 수요가 많아지는 현 추세에서 원자력 발전설비에 적용되는 디지털장비 검증요건 방법론을 원자력발전산업설비 제작업체가 적용할 수 있도록 기기의 동특성을 기준으로 소프트웨어의 평가가 이루어질 수 있도록 재정비 할 필요가 있으며 소프트웨어의 평가기준이 정량적이고 정성적인 기준으로 적용되어 주관적인 기술적 평가(Engineering Judgment)보다는 객관적 평가가 가능한 검증프로세스가 확립되기를 바란다.

참고문헌

- [1] 대한전기협회 (2003), 원자력 품질보증계획QAP.
- [2] 대한전기협회 (2000), 전기 1급 전동기 제어반 검증 END 3220.
- [3] 대한전기협회 (2000), 전기 1급 기기검증END 1100.
- [4] 대한전기협회 (2000), 전기 1급 내진검증END 2000.
- [5] 대한전기협회 (2003), 컴퓨터 소프트웨어 검증기준 EME 3100.
- [5] 산업자원부 기술표준원 (2005), 신뢰성용어 해설서.
- [6] 원자력안전위원회 (2011), 경수로형 원전 규제지침 제17장 운영 및 품질보증.
- [7] Electric Power Research Institute (2014), *Plant Engineering Guideline for the Acceptance of Commercial-Grade Items in Nuclear Safety-Related Applications*, Revision1 to EPRI NP-5652 and TR-102260.
- [8] Electric Power Research Institute (1996), *Guideline on Evaluation and Acceptance of Commercial Grade Digital Equipment for Nuclear Safety Applications*, TR-106439.