

퍼지 QFD를 이용한 원자력 품질보증 요건의 중요도 결정

박찬국* · 최기련*

한국원자력연구원, *아주대학교 에너지학과
(2007년 6월 4일 접수, 2007년 9월 5일 채택)

A Fuzzy QFD Approach to the Determination of Importance Weights of Nuclear Quality Assurance Requirements

Park Chan-Gook* and Choi Gi-Ryun*

Korea Atomic Energy Research Institute

*Dept. of Energy, Ajou Univ.

(Received 4 June 2007, Accepted 5 September 2007)

요 약

원자력 연구개발사업의 품질보증은 사업 고유의 속성을 반영하지 못하는 무분별한 품질보증요건의 선정 및 적용으로 인해 불필요한 요건이 포함되거나 필요한 요건이 배제될 가능성이 있을 뿐만 아니라, 이로 인한 자원낭비의 비경제성이 우려되고 있다. 본 연구에서는 원자력 연구개발사업의 속성을 반영하는 품질보증요건의 중요도 평가방법론을 제시하였다. 이 방법론은 기본적인 분석틀로서 QFD(Quality Function Deployment)를 활용하며, 계산과정에서 퍼지개념을 도입하여 인간 판단의 모호함에 따른 불확실성을 결과에 반영하고, 피설문자의 응답확신도를 활용함으로써 설문의 내용을 보다 유용하게 분석에 반영할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 특정 원자력 연구개발사업에 제시된 방법론을 적용함으로써 그 실용성을, 다양한 시나리오 분석을 통해 유효성을 확인하였다. 시나리오 분석 결과에 따르면, 퍼지개념과 응답확신도를 활용함에 따라 기존의 방법론과 비교하여 품질보증요건의 중요도에 유의할만한 수준의 변화를 가져올 수 있음을 확인하였다. 또한, 사업 속성요인의 수준변화가 품질보증요건의 중요도에 직간접적으로 반영되고 있음을 확인하였다. 본 연구는 원자력 연구개발사업의 속성을 반영하는 품질보증요건 중요도 산출방법론이라는 점과 QFD의 새로운 응용분야를 개척하였다는 점에서 그 의미를 찾을 수 있다.

주요어 : 품질보증요건 중요도, QFD, 퍼지 AHP

Abstract — Quality assurance (QA) for nuclear R&D project is very concerned about the poor economy due to the improper selection of QA requirements. This paper proposes a new methodology for determining the relative importance weights of QA requirements considering the attributes of nuclear R&D project. QFD (Quality Function Deployment) is used as a conceptual framework and fuzzy number is introduced to capture the vagueness uncertainty existing in human judgement. Also we use a confidence attitude of decision-maker in order to improve the reliability of extracted attribute level of R&D project. Case study on a nuclear R&D project and scenario analysis are carried out to verify the usefulness and effectiveness of proposed methodology.

Key words : Importance weights of QA requirements, QFD, Fuzzy AHP

*To whom correspondence should be addressed.
Korea Atomic Energy Research Institute
Tel: 042-868-2213
E-mail: cgpark@kaeri.re.kr

Table 1. Nuclear quality assurance requirements.

R ₁ : 조직	R ₂ : 품질보증계획	R ₃ : 설계관리
R ₄ : 구매서류관리	R ₅ : 지서서, 철차서 및 도면	R ₆ : 서류관리
R ₇ : 구매품목 및 용역의 관리	R ₈ : 품목의 식별 및 관리	R ₉ : 특수공정 관리
R ₁₀ : 검사	R ₁₁ : 시험관리	R ₁₂ : 측정 및 시험장비의 관리
R ₁₃ : 취급, 저장 및 운송	R ₁₄ : 시험, 검사 및 제조현황	R ₁₅ : 부적합품목의 관리
R ₁₆ : 시정조치	R ₁₇ : 품질보증기록	R ₁₈ : 감사

1. 서 론

원자력시설의 건설, 운영 및 개조를 위해서는 원자력 법령에 의거 원자력 품질보증의 적용이 요구된다. 원자력 품질보증(Quality Assurance)이란 원자력시설의 구조물, 계통 또는 기기가 가동 중에 만족하게 기능을 수행할 것이라는 확신을 주기 위하여 필요한 계획적이고 체계적인 모든 활동으로 정의되며^[1], 이를 위해 Table 1과 같은 18개 품질보증요건이 활용된다.

최근에는 연구개발 결과의 신뢰성 제고와 안전한 연구수행을 위해 원자력 연구개발사업에 대한 품질보증 적용 요구가 증가하고 있다. 하지만, 원자력 연구개발사업을 대상으로 하는 품질보증은 현재 국내에서 그 적용기준이 마련되어 있지 않아 원자력시설에 적용되는 Table 1의 품질보증요건이 무분별하게 준용되고 있는 형편이다. 또한, 원자력 연구개발사업에 적용되는 품질보증요건들이 체계적인 방법이 아닌 관련 전문가들의 주관적 판단에 의해 결정되고 있다. 이로 인해 효율적인 원자력 연구개발을 위해 반드시 필요한 요건이 배제되거나, 불필요한 요건들이 적용됨으로써 연구의 신뢰도를 저해하거나 자원낭비를 초래할 가능성이 상존하고 있다. 따라서 효율적이고 안전한 원자력 연구개발의 수행과 자원 낭비를 방지하기 위해서는 해당 연구개발사업의 속성을 감안하여 필요한 품질보증요건만을 선정할 수 있는 체계적인 방법론이 요구된다.

미국 품질관리학회(American Society for Quality Control)는 연구 형태를 소규모/분석연구, 기초연구, 응용연구로 분류하고, 위험정도를 높은 위험, 중간 위험, 낮은 위험으로 구분하여 연구형태 및 위험정도에 따라 ASQC의 17개 품질보증요건을 선별 적용하기 위한 가이드를 제시하고 있다^[2]. 이와 유사하게 미국 기계학회(American Society of Mechanical Engineers)는 원자력 연구개발의 형태를 기초연구, 응용연구, 개발연구, 연구지원 업무로 구분하고, 이들 형태별로 원자력 품질보증 18개 요건 중 적용가능한 요건들을 제시하고 있다^[3]. 이들은 연구개발의 형태를 포괄적으로 분류하여 적용가능한 품질보증요건을 제시하고 있으나, 연구개발사업의 개별속성을 고려하지 못하는 한계점을 가지고 있으며, 불

필요한 요건이 포함되거나 필요한 요건이 배제될 가능성이 여전히 존재한다.

이에 반해, 원자력시설운영 과정에서 적용 가능한 품질보증요건을 선정하기 위한 방법은 연구개발의 경우보다 구체적인 방안들이 제시되어 있다. 캐나다 표준협회(Canadian Standards Association)에서는 시설 및 업무의 특성을 고려하여 캐나다의 4개 품질보증 프로그램 기준인 CAN3-Z299.1~CAN3-Z299.4 중 하나를 선택하기 위한 두 가지 방법을 제시하고 있다^[4]. 첫 번째 방법인 Factor Rating Method는 6가지 특성요인(설계과정의 복잡성, 설계 성숙도, 생산과정의 복잡성, 품목의 특성, 경제성, 안전성)별로 점수를 부여하고 이의 합계를 이용하여 상기 4개 품질보증 프로그램 중 하나를 선택한다. 두 번째 방법인 Program Element Method는 플로우차트상의 연속되는 질문에 응답해 나가면서 4개 품질보증 프로그램 중 하나가 선택되도록 하는 방법이다. 국제원자력기구에서는 업무영역(설계, 구매, 제작, 설치, 관리)별로 안전/운전의 중요도, 성숙도, 복잡성 측면의 점수를 부여하고, 이들의 합계로 품질수준 I, II, III 중 하나를 결정하여 각 품질수준별로 미리 결정된 품질보증요건을 선택하도록 유도하는 방법을 제안하고 있다^[5]. 미국 DOE(Department of Energy)에서는 환경, 안전, 보건 및 품질측면의 16개 위험요인을 평가하고 이에 따라 4가지 위험수준을 결정하여, 위험수준별로 미리 결정된 품질보증요건을 차등 적용하는 방법을 제안하였다^[6]. 최근 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency)에서는 연구용원자로의 시스템과 구성요소에 대하여 원자력안전, 신뢰성, 복잡성, 설계성숙도, 경험 측면에서 점수를 부여하고, 합계점수로 4가지 품질등급으로 분류하여 각 등급별로 미리 선정된 품질보증요건에 따라 업무를 수행하도록 하는 방법을 검토한 바 있다^[7].

위의 방법들은 대부분 몇 가지 속성요인들을 기준으로 원자력시설의 시스템이나 구성요소를 평가하고 이의 합계점수로 품질등급 또는 위험수준을 결정하여 이에 따라 미리 선정된 품질보증요건을 적용하도록 하고 있다. 따라서 이들 방법 역시 연구개발사업이나 원자력시설 품목의 속성상 불필요한 요건이 포함되거나 필요한 요건이 배제될 개연성이 충분하다. 또한, 이러한 방법들은 특

정 품질보증요건을 적용하더라도 그 세부요건들의 적용 여부나 관리상의 엄격성 등을 결정할 수 있는, 즉, 품질보증요건의 적용 수준을 결정할 수 있는 어떠한 정보(예, 품질보증 요건별 중요도)도 제공하지 못하고 있다. 따라서 원자력 연구개발사업이나 원자력시설의 품목별로 품질보증 관련 속성요인을 고려하여 각 품질보증요건의 적용가능성 및 중요도를 체계적으로 평가할 수 있는 방법의 개발 필요성은 여전히 남아있다.

QFD(Quality Function Deployment)는 제품의 개발 및 생산단계에서 고객의 요구사항을 적절한 기술특성으로 전환시키기 위한 수단을 제공하는 분석틀로 사용되는 의사결정도구이다. 고객의 요구사항을 충족시키기 위한 제품기술특성의 중요도를 평가하기 위해서 QFD에 다양한 분석기법들을 접목하는 연구들이 활발하게 이루어지고 있으며, Lu *et al.*^[8], Aswad^[9], Ammacost *et al.*^[10], Chuang^[11] 등의 연구에서 보는 바와 같이 고객요구사항의 중요도 결정을 위해서 AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법이 광범위하게 활용되고 있다. 최근에는 고객의 요구사항이 모호하고 내포된 의미가 다양하며, 인간 판단과정에 내재된 모호성 불확실성을 고려하여 Kwong and Bai^{[12][13]}, Gülçin Büyükoğzkan *et al.*^[14] 등과 같이 AHP에 퍼지이론을 가미한 퍼지 AHP를 활용하는 연구가 주목을 받고 있다.

한편, QFD의 분석결과가 피설문자의 설문결과에 크게 의존하는 상황에서 QFD에 퍼지개념이 도입되더라도 여전히 개선의 여지가 남아있다. 즉, 각 피설문자의 설문능력이 동일하게 가정되고, 한 피설문자의 여러 설문항목들에 차별을 두지 못하고 있다는 점이다. 피설문자별로 전문성과 경험이 서로 다르기 때문에 각각의 설문결과에 다른 가중치를 두어야 함에도 불구하고 그렇지 못하고 있다. 또한, 한 피설문자의 설문결과라 하더라도 항목에 따라 그 신뢰도가 다를 수 있는데 기존의 QFD 분석과정에서는 이를 고려하지 못하고 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해서 김승남 등^[15]은 응답 확실성 정도를 설문분야 이 척도를 이용하여 해당 응답치 퍼지함수를 집중화(Concentration) 또는 팽창화(Dilation)함으로써 차별을 두는 방법을 제시하였다. 조근태^[16]는 피설문자의 경험과 지식에 대한 평가항목을 선정하여 이를 기준으로 피설문자 별로 상이한 가중치를 부여할 수 있도록 AHP 기법의 개선방법을 제시하였다. 김성철 등^[17]은 베이지안 의사결정론을 이용하여 피설문자들의 전문성 정도에 따라 등급을 산정함으로써 피설문자 의견의 신뢰성을 높이고 전문성 정도 결정의 객관적인 척도 및 그 이용방법을 제시하였다. 광승준 등^[18]과 문혜선 등^[19]은 각 피설문자가 응답한 설문 확신도를 이용하여 각 피설문자가 전반적으로 설문에 대해 얼마나

신뢰하고 있는가를 나타내는 척도인 퍼지 신뢰지수를 계산하였다. 하지만 이러한 방법들은 피설문자별로 신뢰성 지수에 해당하는 척도를 계산하여 해당 피설문자의 설문치에 일괄 적용하는 한계를 가지고 있으며, 여전히 한 피설문자의 각 설문항목별로 차별화된 가중치를 부여하지 못하고 있다.

QFD의 연구사례를 살펴보면, 고객요구사항은 제품기술특성의 중요도를 평가하기 위한 기본 입력자료로 활용되고 있음을 알 수 있다. 따라서 QFD의 고객요구사항을 대신하여 원자력 연구개발사업의 속성요인을 입력자료로 이용하고, 중요도의 평가대상인 제품기술특성을 대신하여 원자력 품질보증요건을 이용한다면, 고객요구사항을 반영한 제품기술특성의 상대중요도 평가과정이 원자력 연구개발사업의 속성요인을 반영한 품질보증요건의 상대중요도 평가과정으로 전환될 수 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 원자력 연구개발사업의 개별 속성을 고려하는 품질보증요건의 상대중요도 평가 방법론을 제안하고자 하며, 이를 위한 기본 분석틀로서 QFD를 이용하고자 한다. 특히, QFD 분석과정에 퍼지개념을 도입하여 인간의 주관적인 판단과 모호함으로 인한 불확실성을 고려하고, 각 설문항목별로 응답확신도를 개별 반영할 수 있는 방법을 제안하여 QFD 분석결과의 신뢰도를 향상시키고자 한다. 단, 각 피설문자의 설문능력을 동일하게 가정하여 피설문자별 가중치는 고려하지 않기로 한다. 또한, 특정 원자력연구개발사업을 대상으로 하는 사례연구와 다양한 시나리오 분석을 통하여 제안된 방법론의 유용성과 유효성을 확인한다.

2. 이론적 배경

2-1. QFD

HOQ(House of Quality)는 QFD^[20]를 의미하는 용어로 혼용되기도 하는 QFD의 대표적인 도구로서 고객의 요구사항을 제품의 기술특성으로 변환시키는 기능을 하는 시각적 도표이다. Fig. 1에 주어진 HOQ 구조는 아래와 같이 7개의 구성요소로 이루어지며, 활용목적에 따라 선택적으로 항목을 가감하여 이용된다.

첫째, 고객요구사항(Customer Requirement)은 품질에 대한 고객의 요구사항이다. 대부분 고객이 사용하는 언어로 표현되기 때문에 정성적이고 모호한 경우가 많으며, 설문조사, 면담, 실험 등을 통해 정보를 얻을 수 있다. QFD의 활용에 있어 매우 중요한 정보를 제공하며, 일반적으로 전체 노력의 절반가량이 고객요구사항을 추출하고 고객요구사항의 중요도를 결정하는데 사용된다.

둘째, 공학특성(Engineering Characteristics)은 제품생

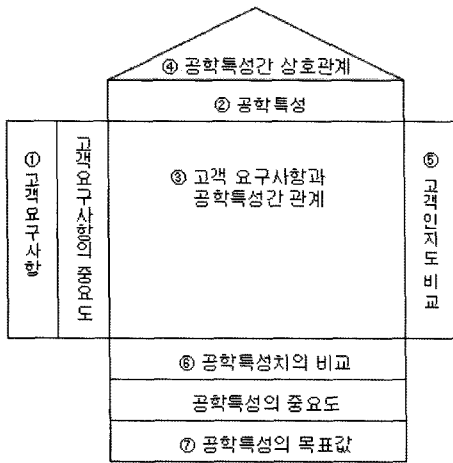


Fig. 1. Structure of HOQ.

산을 위한 설계 및 공학 특성으로 적어도 하나 이상의 고객요구사항에 영향을 미치는 요소로서, 고객요구사항을 달성할 수 있는 수단이 된다.

셋째, 고객요구사항과 공학특성간의 관계는 고객요구사항을 충족시키기 위한 공학특성의 기여도 또는 상관성을 의미한다. 이는 고객요구사항과 공학특성이 적절히 선정되었는지를 점검하는 기회를 제공하며, 비어있는 행과 열이 많은 경우(즉, 상관관계가 없는 고객요구사항과 공학특성이 많은 경우) 고객요구사항과 공학특성의 선정에 문제가 있음을 의미한다.

넷째, 공학특성간 상호관계는 공학특성간의 긍정적 혹은 부정적 영향의 정도를 의미한다. 공학특성간의 상호영향은 물론, 상충관계를 파악하여 획기적 품질향상을 위한 잠재적 기회를 제공하기도 한다.

다섯째, 고객 인지도 비교는 자사 및 주요 경쟁사 제품에 대한 각 고객요구사항별 고객 평가 결과를 의미한다. 제품 시장에서 자사 제품의 경쟁력을 의미한다고 볼 수 있다.

여섯째, 공학특성치의 비교는 자사와 경쟁사의 현 기술수준에 대한 비교 평가를 의미한다. 또는 공학적 제한사항을 포함시켜 최종 공학목표치 결정을 위한 제약요인으로 활용할 수도 있다.

일곱째, 공학특성의 목표치는 HOQ의 모든 정보를 이용하여 고객의 요구사항을 최대로 만족시킬 수 있는 공학특성의 달성 목표치를 의미한다.

본 연구에서는 고객요구사항을 원자력 연구개발사업의 속성요인으로 대체하여 이들의 중요도를 도출하며, 공학특성을 품질보증요건으로 대체한다. 그리고 원자력 연구개발사업의 속성요인과 품질보증요건간의 상관관계를

고려하여 품질보증요건의 중요도를 도출해내는 방식으로 HOQ를 활용한다.

2-2. 퍼지 AHP

T.L Saaty에 의해 제안된 AHP는 복잡한 의사결정의 문제를 작은 문제로 계층화하여 합리적인 의사결정이 가능하도록 체계적으로 분석하는 기법이다. 즉, 의사결정 문제를 계층화한 후 각 평가 기준의 관점에서 대안들의 상대적인 중요도와 평가 기준들간의 상대적인 중요도를 쌍대비교(Pairwise Comparison)하여 최위 계층에 있는 대안들의 가중치 혹은 우선순위를 구할 수 있도록 하는 의사결정 도구이다^[21].

쌍대비교 과정은 인간 판단의 불명확하고 모호한 불확실성이 내재되어 있기 때문에 최근에는 이러한 불확실성을 다루기 위해 쌍대비교 결과를 퍼지수(Fuzzy Number)로 취급하여 분석을 수행하는 퍼지 AHP가 많은 관심을 받고 있다.

퍼지이론은 Zadeh^[22]를 통해 체계적으로 발전한 이론으로서 “0 또는 1”, “예 또는 아니오”로 확실하게 표현되는 이분법적 논리와는 달리 “0에 가깝다”, “아마도 그럴 것이다”와 같은 모호한 대상을 표현하는데 활용된다. 즉, 인간의 언어나 사고와 같은 모호함을 표현하는 질적이고 정성적인 자료를 정량적인 수치로 변환시킬 수 있기 때문에 모호한 불확실성을 본질적으로 내포하고 있는 인간의 가치판단을 보다 정확히 표현하는데 효과적이다^[19].

퍼지수 M은 변수 x에 대응되는 퍼지집합을 의미하며, 소속함수(Membership Function) $\mu_M(x) : R \rightarrow [0, 1]$ 에 의해 정의된다. 소속함수는 x가 M에 속할 가능성의 정도를 나타내주는 것으로서, 함수는 여러 가지 형태로 정의될 수 있으나, 본 연구에서는 아래와 같이 개념적으로 접근하기 용이한 삼각퍼지수(Triangular Fuzzy Number)를 사용하기로 한다. 삼각퍼지수 $M=(l, m, u)$ 의 소속함수는 아래의 식으로 표현된다.

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m \leq x \leq u \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 $l \leq m \leq u$ 이며, l 과 u 는 각각 삼각퍼지수 M의 하한값과 상한값을 의미한다. Table 2는 AHP의 쌍대비교에서 활용되는 언어표현 척도와 각각에 해당하는 삼각퍼지수의 예를 보여주고 있다.

비퍼지 쌍대비교 행렬로부터 중요도 결정을 위해서는 고유벡터법(Eigenvalue Method), 대수최소자승법(Logari-

Table 2. Linguistic terms and triangular fuzzy numbers for pairwise comparison.

언어척도	crisp수 ¹⁾	crisp수의 역수 ²⁾	삼각퍼지수 ¹⁾	삼각퍼지수의 역수 ²⁾
동등하게 중요하다	1	-	(1, 1, 2)	-
약간 중요하다	3	1/3	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
상당히 중요하다	5	1/5	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
매우 중요하다	7	1/7	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
절대적으로 중요하다	9	1/9	(8, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/8)

¹⁾근접한 척도간의 사이값은 중간 중요도를 의미함.

²⁾한 요소가 다른 요소보다 중요한 경우, 후자의 중요도는 전자의 중요도와 비교하여 그 역수의 값을 가짐. 단, '동등하게 중요하다'의 경우, 전자와 후자의 중요도가 동일하기 때문에 역수값의 의미가 없음.

thmic Least Squares Method), 가중최소자승법(Weighted Least Squares Method), 목적계획법(Goal Programming Method) 등의 방법을 이용할 수 있다^{[23][24]}. 그러나 쌍대 비교행렬이 퍼지수로 이루어지는 퍼지 AHP에서는 이러한 방법들이 이용될 수 없으며, 퍼지 쌍대비교행렬로부터 평가기준이나 대안의 중요도를 결정하기 위한 몇 가지 방법들이 제안되었다. Van Laarhoven and Pedrycz^[25]는 삼각퍼지수 쌍대비교행렬로부터 퍼지 대수최소자승법을 이용하여 퍼지 중요도를 계산하였으며, Wagenknecht and Hartmann^[26]은 최소자승법을 이용하여 퍼지 중요도를 계산하는 방법을 제안하였다. Buckley^[27]는 사다리꼴 퍼지수를 이용하는 기하평균법에 기초하여 퍼지 중요도를 계산하였으며, Chang^[28]은 삼각퍼지수로 이루어진 쌍대비교행렬에서 산술평균을 이용하여 퍼지 중요도를 계산하였으나, 이 방법은 쌍대비교행렬이 일관성을 유지하는 경우에만 적용할 수 있다는 단점을 가지고 있다^[29].

이상의 퍼지 AHP 방법들은 기존의 중요도 도출방법론에 퍼지이론을 도입함으로써 다음과 같은 한계점을 가지고 있다^[29]. 첫째, 쌍대비교행렬의 구축시 퍼지수의 역수가 이용됨으로 인해 최종 중요도가 왜곡될 수 있다. 심지어는 퍼지수의 역수가 비대칭 형태를 보임에 따라 중요도의 순위가 바뀌는 경우도 발생한다. 예를 들어, 대안 1에 대한 대안 2의 중요도가 crisp수로 $a_{12}=2$ 일 때, 퍼지수로는 $A_{12}=(1, 2, 3)$ 으로 표현된다고 가정하자. 이때 대안 2에 대한 대안 1의 중요도는 $a_{21}=1/2$, $A_{21}=(1/3, 1/2, 1)$ 과 같이 역수형태로 표현된다. 대안 1, 2의 중요도는 crisp수의 경우 각각 $w_1=2/3$, $w_2=1/3$ 이 되며, 퍼지 기하평균법^[27]을 이용하는 경우 $W_1=(0.367, 0.667, 1.098)$, $W_2=(0.210, 0.333, 0.634)$ 로 계산된다. 중요도의 비율을 계산해 보면, crisp수의 경우 $r_{12}=w_1/w_2=2$ 가 되어 쌍대비교 설문치 $a_{12}=2$ 와 동일함을 알 수 있다. 하지만, 퍼지수의 경우 $R_{12}=W_1/W_2=(0.577, 2.0, 5.196)$ 이 되어 쌍대비교 설문치 $A_{12}=(1, 2, 3)$ 과 비교해 보면 상당히 비대칭적이고 상한값과 하한값의 폭이 넓어진 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, W_1 , W_2 를 Center of Area^[31] 방법에 의해 비퍼지화하면 $W_1=0.71$, $W_2=0.393$

으로 변환되고, $R_{12}=W_1/W_2=1.808$ 이 되어 비퍼지 쌍대비교 설문치($r_{12}=2$)와 상당한 차이를 보이게 됨을 알 수 있다. 둘째, 계산과정에서 많은 퍼지수의 합과 곱이 이루어짐에 따라 퍼지수의 상한값과 하한값의 폭이 넓어지고(상기 예제 참조), 심지어는 정규화된 하한값이 정규화된 상한값이나 중간값보다 커지는 경우도 발생하게 된다. 셋째, 상기 퍼지 AHP 방법들은 최종 중요도가 퍼지수의 형태로 계산되기 때문에 퍼지수의 순위를 결정하는 방법에 따라서 우선순위가 바뀔 수도 있다.

본 연구에서는 이러한 한계점들을 극복하기 위하여 Mikhailov^[29]가 제안한 비선형 FPP(Non-linear Fuzzy Preference Programming) 방법론을 이용하기로 한다. 이 방법은 쌍대비교 설문치만을 이용하며, 상기 예제와 같이 설문된 퍼지수의 역수를 이용하는 완전한 형태의 쌍대비교행렬을 요구하지 않는다. 즉, 대안 1에 대한 대안 2의 중요도 a_{12} 의 설문치만을 이용하며, a_{12} 의 역수인 대안 2에 대한 대안 1의 중요도 $a_{21}(=1/a_{12})$ 은 계산에 이용되지 않는다. 또한, 중요도가 crisp수로 계산되어 추가로 퍼지수의 순위결정 방법을 이용할 필요가 없으며, Microsoft Office Excel 프로그램의 '해찾기(Solver)' 기능을 이용하여 쉽게 중요도를 구함으로써 복잡한 계산 과정이 불필요하다는 장점을 가지고 있다. Mikhailov는 대안 i 와 j 의 쌍대비교 퍼지수 $a_{ij}=(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$, ($i, j=1, 2, \dots, n$)로부터 각 대안의 중요도를 구하는 문제를 다음과 같은 비선형 최적화 문제로 수식화하였다.

$$\begin{aligned} & \text{maximise } \lambda \\ & \text{subject to } (m_{ij}-l_{ij}) \cdot \lambda \cdot w_j - w_i + l_{ij} \cdot w_j \leq 0, \\ & (u_{ij}-m_{ij}) \cdot \lambda \cdot w_j + w_i - u_{ij} \cdot w_j \leq 0, \\ & \sum_{k=1}^m w_k = 1, w_k > 0, k=1, 2, \dots, n, \\ & i=1, 2, \dots, n-1, j=2, 3, \dots, n, j > i. \end{aligned}$$

여기서 λ 는 일관성 지표로서, 양수인 경우에는 계산된 모든 중요도 값이 퍼지 쌍대비교 범위를 만족시키며(즉, $l_{ij} \leq w_i/w_j \leq u_{ij}$), 음수인 경우에는 근사적으로 만족시키고 있음을 의미한다.

예를 들어, 대안 1, 2, 3에 대한 쌍대비교 삼각퍼지수가 각각 , , 인 경우, 각 대안의 중요도를 구하기 위한 비선형 최적화 문제는 아래와 같이 수식화 된다.

$$\begin{aligned} & \text{maximise } \lambda \\ & \text{subject to } (3-2) \cdot \lambda \cdot w_2 - w_1 + 2 \cdot w_2 \leq 0 \\ & \quad (4-3) \cdot \lambda \cdot w_2 + w_1 - 4 \cdot w_2 \leq 0 \\ & \quad (2-1) \cdot \lambda \cdot w_3 - w_1 + 1 \cdot w_3 \leq 0 \\ & \quad (3-2) \cdot \lambda \cdot w_3 + w_1 - 3 \cdot w_3 \leq 0 \\ & \quad \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\right) \cdot \lambda \cdot w_3 - w_2 + \frac{1}{3} \cdot w_3 \leq 0 \\ & \quad \left(1 - \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \cdot w_3 + w_2 - 1 \cdot w_3 \leq 0 \\ & \quad w_1 + w_2 + w_3 = 1 \end{aligned}$$

위의 최적화 문제를 Microsoft Office Excel의 ‘해찾기’ 기능을 이용하여 중요도를 구하면, $w_1=0.538$, $w_2=0.170$, $w_3=0.292$, 그리고, $\lambda=0.838$ 이 된다. 여기서 λ 값이 양수이므로, $w_1/w_2=3.162$, $w_1/w_3=1.838$, $w_2/w_3=0.581$ 에서 보는 바와 같이, 모든 중요도 값이 해당 쌍대비교 퍼지수의 범위안에 포함되고 있음을 알 수 있다.

2-3. EFWA(Efficient Fuzzy Weight Average)

설문에 참여한 각 피설문자들의 전문성과 경험 등이 다를 수밖에 없음에도 불구하고 이들의 설문결과를 동일하게 취급하는 것은 설문치에 크게 의존하는 AHP 또는 QFD 분석결과의 신뢰성을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 또한, 같은 피설문자의 설문결과 중에서도 자신의 전문분야와 경험에 따라 설문항목별로 응답의 정확성이 다를 수 있는데 계산과정에서 이러한 차별성을 두지 못하는 것 또한 분석결과의 신뢰도를 저하시키는 요인이 될 수 있다. 조근태^[16], 문혜선 등^[19], 박승준 등^[18], 김승남 등^[15]이 피설문자별로 신뢰지수를 도출하여 피설문자의 설문결과에 일괄 적용하는 방법을 이용하였으나, 여전히 같은 피설문자의 각 설문항목을 차별화시키지 못하는 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 피설문자별로 설문의 신뢰수준을 달리 함과 동시에 동일 피설문자의 설문항목별로 신뢰수준을 차별화하기 위해 각 설문항목별로 응답확신도에 해당하는 가중치를 부여하는 방법을 제안한다. 즉, 피설문자에게 각 설문항목에 대하여 추가로 응답확신도의 수준을 표시하도록 하고, 피설문자별 동일 설문항목에 대하여 응답확신도를 가중치로 하는 가중평균을 계산한다. 이렇게 계산된 값은 한 설문항목에 대하여 여러 피설문자가 응답한 값을 종합한 설문치가 된다. 그러나, 설문에 퍼지 개념을 도입하는 경우, 설문결과가 퍼지수 형태이기 때문에 퍼지수에 대한 가중평균의 계산법이 요구된다.

본 연구에서는 Lee and Park^[30]이 제안한 EFWA 방법을 사용하여 퍼지가중평균을 계산하기로 한다. 이 방법에 대한 상세설명은 해당 문헌을 참고하기로 하며, 여기서는 아래와 같은 계산 알고리즘을 이용하기로 한다. 퍼지수 x_i 와 w_i 를 각각 (l_i, m_i, u_i) , (a_i, b_i, c_i) 라고 할 때, w_i 를 가중치로 하는 x_i 의 퍼지가중평균 $[L, M, U]$ 의 계산과정은 다음과 같다.

step 1: 퍼지수 x_i 의 하한값으로 이루어지는 행렬 (l_1, l_2, \dots, l_n) 을 구한다. 단, $l_1 \leq l_2 \leq \dots \leq l_n$ 이다. first=1, last=n으로 결정한다.

step 2: $k=(\text{first}+\text{last})/2$ 이며(소수점 이하 값은 버림), 다음 규칙에 의해 $L_k=(e_1, e_2, \dots, e_n)$ 을 계산한다.

$$\begin{aligned} e_i &= c_i (i=1, 2, \dots, k), \\ e_i &= a_i (i=k+1, \dots, n) \end{aligned}$$

step 3: 다음 식에 의해 $F(L_k)$, $F(L_{k+1})$ 값을 계산한다.

$$F(L_k) = \frac{(l_1 - l_k)e_1 + (l_2 - l_k)e_2 + \dots + (l_n - l_k)e_n}{e_1 + e_2 + \dots + e_n}$$

step 4: $F(L_k) > 0$ 이고 $F(L_{k+1}) \leq 0$ 이면, $L = L_k + F(L_k)$ 이며, Step 5로 이동한다. 이외의 경우에는 last=k로 변경하여 Step 2로 이동한다.

step 5: 퍼지수 x_i 의 상한값으로 이루어지는 행렬 (u_1, u_2, \dots, u_n) 을 구한다. 단, $u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_n$ 이다. first=1, last=n으로 결정한다.

step 6: $k=(\text{first}+\text{last})/2$ 이며(소수점 이하 값은 버림), 다음 규칙에 의해 $U_k=(e_1, e_2, \dots, e_n)$ 을 계산한다.

$$\begin{aligned} e_i &= a_i (i=1, 2, \dots, k), \\ e_i &= c_i (i=k+1, \dots, n) \end{aligned}$$

step 7: 다음 식에 의해 $F(U_k)$, $F(U_{k+1})$ 값을 계산한다.

$$F(U_k) = \frac{(u_1 - u_k)e_1 + (u_2 - u_k)e_2 + \dots + (u_n - u_k)e_n}{e_1 + e_2 + \dots + e_n}$$

step 8: $F(U_k) > 0$ 이고 $F(U_{k+1}) \leq 0$ 이면, $U = U_k + F(U_k)$ 이다. 이외의 경우에는 last=k로 변경하여 Step 6으로 이동한다.

step 9: l_i 값을 m_i 으로, a_i 와 c_i 값을 b_i 로 설정하여 step

Table 3. Questionnaire answered fuzzy numbers and confidence attitudes (example).

피설문자 (i)	설문결과 (l_i, m_i, u_i)	응답확신도 (a_i, b_i, c_i)
피설문자 1	(4, 5, 6)	(0.7, 0.8, 0.9)
피설문자 2	(1, 2, 3)	(0.3, 0.4, 0.5)
피설문자 3	(5, 6, 7)	(0.6, 0.7, 0.8)

1-step 4를 반복하여 L을 구하고 이를 M으로 한다.

예를 들어, 특정 설문항목에 대한 피설문자 3명의 설문결과와 응답확신도가 다음과 같다고 가정할 때, EFWA 방법에 의한 퍼지가중평균의 계산과정은 다음과 같다.

Step 1: 피설문자별 설문결과 퍼지수의 하한값으로 이루어지는 비감소 행렬 (l_1, l_2, \dots, l_n) 은 $(1, 4, 5)$ 이고, $first=1, last=3$ 이다.

Step 2: $k=(1+3)/2=2$ 이고, $L_2=(c_1, c_2, a_3)=(0.5, 0.9, 0.6)$ 이 된다.

Step 3: $F(L_2)$ 와 $F(L_3)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$F(L_2) = \frac{(1-4)0.5 + (4-4)0.9 + (5-4)0.6}{0.5 + 0.9 + 0.6} = -0.45$$

$$F(L_3) = \frac{(1-5)0.5 + (4-5)0.9 + (5-5)0.6}{0.5 + 0.9 + 0.6} = -1.45$$

Step 4: $F(L_2) > 0, F(L_3) < 0$ 의 조건이 성립되지 않으므로, $last=2$ 로 설정하여 Step 2로 이동한다.

Step 2: $k=(1+2)/2=1.5$ 이므로 $k=1$ 이 되고, $L_1=(0.5, 0.7, 0.6)$ 이 된다.

Step 3: $F(L_1)$ 과 $F(L_2)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$F(L_1) = \frac{(1-1)0.5 + (4-1)0.7 + (5-1)0.6}{0.5 + 0.7 + 0.6} = 2.50$$

$$F(L_2) = \frac{(1-4)0.5 + (4-4)0.7 + (5-4)0.6}{0.5 + 0.7 + 0.6} = -0.50$$

Step 4: $F(L_1) > 0, F(L_2) < 0$ 의 조건을 만족하므로, $L=I_1$ 와 $F(L_1)=1+2.5=3.50$ 가 된다.

Step 5: 피설문자별 설문결과 퍼지수의 상한값으로 이루어지는 비감소 행렬 (u_1, u_2, \dots, u_n) 은 $(3, 6, 7)$ 이고, $first=1, last=3$ 이다.

Step 6: $k=(1+3)/2=2$ 이고, $U_2=(a_1, a_2, c_3)=(0.3, 0.7, 0.8)$ 이 된다.

Step 7: $F(U_2)$ 와 $F(U_3)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$F(U_2) = \frac{(3-6)0.3 + (6-6)0.7 + (7-6)0.8}{0.3 + 0.7 + 0.8} = -0.06$$

$$F(U_3) = \frac{(3-7)0.3 + (6-7)0.7 + (7-7)0.8}{0.3 + 0.7 + 0.8} = -1.06$$

Step 8: $F(U_2) > 0, F(U_3) < 0$ 의 조건이 성립되지 않으므로, $last=2$ 로 설정하여 Step 6으로 이동한다.

Step 6: $k=(1+2)/2=1.5$ 이므로 $k=1$ 이 되고 $U_1=(0.3, 0.9, 0.8)$ 이 된다.

Step 7: $F(U_1)$ 과 $F(U_2)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$F(U_1) = \frac{(3-3)0.3 + (6-3)0.9 + (7-3)0.8}{0.3 + 0.9 + 0.8} = 2.95$$

$$F(U_2) = \frac{(3-6)0.3 + (6-6)0.9 + (7-6)0.8}{0.3 + 0.9 + 0.8} = -0.50$$

Step 8: $F(U_1) > 0, F(U_2) < 0$ 의 조건을 만족하므로, $U=U_1$ 와 $F(U_1)=3+2.95=5.95$ 가 된다.

Step 9: I 값을 m_I 으로, a_i 와 c_i 값을 b_i 로 설정하여 Step 1부터 Step 4를 반복하면 $L=4.74$ 가 되고 이 값을 M 으로 한다.

결국, 3명의 피설문자가 응답한 설문결과를 퍼지가중평균한 값은 $(3.50, 4.74, 5.95)$ 가 되며, 이는 각 피설문자의 설문항목별 응답확신도를 고려한 설문결과임을 의미한다.

3. 원자력 품질보증요건의 중요도 결정 방법

일반적으로 QFD는 고객요구사항을 파악하여 이들의 중요도를 평가하고, 선정된 기술특성과의 관련성을 고려하여 기술특성의 중요도를 도출한다. 이러한 기법을 이용하여 품질보증요건의 중요도를 도출하기 위해서는 QFD의 핵심요소인 고객요구사항과 기술특성을 대체할 수 있는 요소가 준비되어야 한다. 본 연구에서는 고객요구사항을 대신하여 원자력 연구개발사업의 속성요인을 이용하고, 기술특성을 원자력 품질보증 18개 요건으로 대체한다. 이를 통해, 고객요구사항을 반영한 기술특성의 중요도를 도출하는 QFD 과정이 원자력 연구개발사업의 속성요인을 반영한 품질보증요건의 중요도 도출과정으로 대체될 수 있다. 원자력 연구개발사업의 속성요인을 고

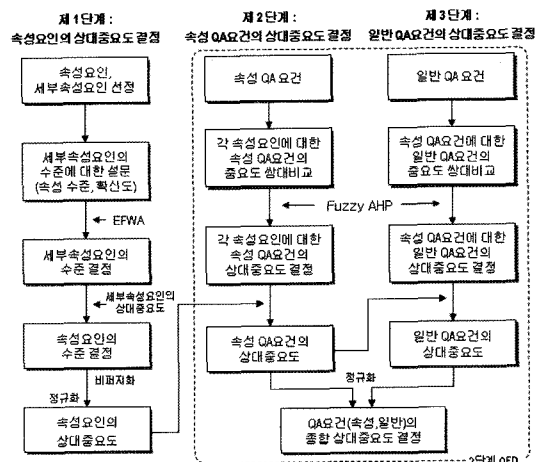


Fig. 2. Methodology for determining the importance weights of the QA requirements.

려한 원자력 품질보증요건의 상대중요도 평가 절차는 Fig. 2와 같으며, 세 단계로 구분될 수 있다.

제1단계는 원자력 연구개발사업 속성요인의 수준 및 중요도를 결정하는 단계이다. 이를 위해 평가대상 원자력 연구개발사업의 세부속성요인 수준과 응답확신 정도를 설문받아 EFWA 방법을 적용하여 세부속성요인의 수준을 결정한다. 결정된 속성요인별 세부속성요인의 수준은 각 세부속성요인의 상대중요도를 가중치로 활용하여 속성요인의 수준으로 변환되고, 비퍼지화 및 정규화 과정을 통해 속성요인의 상대중요도가 결정된다.

제2단계는 속성 품질보증요건의 상대중요도를 결정하는 단계이다. 이를 위해 퍼지 AHP를 이용하여 각 속성요인에 대한 관련 속성 품질보증요건의 중요도를 결정하고, 제1단계에서 결정된 속성요인의 상대중요도와 곱하여 속성 품질보증요건의 상대중요도를 결정한다.

제3단계는 일반 품질보증요건의 상대중요도를 결정하는 단계이다. 이를 위해 퍼지 AHP를 이용하여 속성 품질보증요건에 대한 일반 품질보증요건의 중요도를 결정하고, 제2단계에서 결정된 속성 품질보증요건의 상대중요도와 곱하여 일반 품질보증요건의 상대중요도를 결정한다.

이상에서 결정된 속성 품질보증요건과 일반 품질보증요건의 중요도를 정규화하여 전체 품질보증요건의 상대중요도를 결정한다. 제2단계와 제3단계의 기본 분석틀로서 QFD가 사용되며, 특히, 제2단계의 1차 QFD 결과를 제3단계의 2차 QFD의 입력자료로 활용하는 2단계 QFD를 활용한다. 2단계 QFD 모형에 따른 각 단계별 계산 절차는 Fig. 3과 같으며, 구체적인 계산방법 및 예시는 아래에서 살펴보기로 한다.

3-1. 제1단계: 속성요인의 상대중요도 결정

원자력 연구개발사업을 대상으로 평가되어야 할 속성요인은 IAEA의 기술보고서^[17]와 CAN3-Z299.0-86^[4]의 평가요인들을 종합하여 Table 4와 같이 체계화 하였다. 원자력 연구개발사업의 속성요인을 설계, 구매, 시험, 제작, 설치/건설 등 5가지로 대분류하고, 각 속성요인에 대하여 대중의 건강과 안전에 미치는 영향, 사업의 성과에 미치는 영향, 사업의 비용과 일정에 미치는 영향, 성숙도, 경험, 복잡성 등 6가지 세부속성요인으로 세분화하였다. 또한, 품목의 제작과 품목의 설치/건설 속성요인에 대해서는 열처리, 용접, 비파괴검사 등 특수작업의 중요도를 세부속성요인에 추가하였다.

제 1 단계 : 속성요인의 상대중요도 결정

속성요인	세부속성요인	세부속성요인 수준에 대한 설문응답치, 확신도	세부속성요인 수준	속성요인에 대한 세부속성요인의 중요도	속성요인 수준	정규화된 속성요인 수준
R ₁	F ₁₁	QFL ₁₁ ^h , CQFL ₁₁ ^h	FL ₁₁	w(F ₁ , F ₁₁)	FL ₁	w(F ₁)
	F _{1n}	QFL _{1n} ^h , CQFL _{1n} ^h	FL _{1n}	w(F ₁ , F _{1n})		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
F _m	F _{m1}	QFL _{m1} ^h , CQFL _{m1} ^h	FL _{m1}	w(F _m , F _{m1})	FL _m	w(F _m)
	F _{mn}	QFL _{mn} ^h , CQFL _{mn} ^h	FL _{mn}	w(F _m , F _{mn})		

$FL_{mn} = \text{Weight Aver.}(QFL_{mn}^h, CQFL_{mn}^h)$, h : 설문응답자 수
 → Efficient Fuzzy Weight Average 방법론 이용

$FL_m = \text{Weight Aver.}(FL_{m1}, w(F_m, F_{m1}))$

$w(F_m) = \text{norm.}(FL_m)$

$w(F_m, R_j)$: 각 속성요인에 대한 속성QA요건의 상대중요도
 → Fuzzy AHP 이용

$w(R_j, R_g)$: 각 속성QA요건에 대한 일반QA요건의 상대중요도
 → Fuzzy AHP 이용

$w(F_m, R_j) = \sum_m (w(F_m) \cdot w(F_m, R_j))$

$w(R_j, R_g) = \sum_j (w(F_m, R_j) \cdot w(R_j, R_g))$

$w_g = \text{norm.}(w(F_m, R_j), w(R_j, R_g))$

제 2 단계 : 속성 QA요건의 상대중요도 결정(1차 QFD)

속성요인의 상대중요도	속성 QA요건 : R _f (f = 3,4,7,8,9,10,11,12,13,14,15)				
	R ₃	R ₄	R ₇	⋮	R ₁₅
w(F ₁)	w(F ₁ , R ₃)	w(F ₁ , R ₄)	w(F ₁ , R ₇)	⋮	w(F ₁ , R ₁₅)
w(F ₂)	w(F ₂ , R ₃)	w(F ₂ , R ₄)	w(F ₂ , R ₇)	⋮	w(F ₂ , R ₁₅)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
w(F _m)	w(F _m , R ₃)	w(F _m , R ₄)	w(F _m , R ₇)	⋮	w(F _m , R ₁₅)
속성 QA요건의 상대중요도	w(F _m , R ₃)	w(F _m , R ₄)	w(F _m , R ₇)	⋮	w(F _m , R ₁₅)

제 3 단계 : 일반 QA요건의 상대중요도 결정(2차 QFD)

속성 QA요건의 상대중요도	일반 QA요건 : R _g (g = 1,2,3,6,16,17,18)				
	R ₁	R ₂	R ₃	⋮	R ₁₈
w(F _m , R ₃)	w(R ₃ , R ₁)	w(R ₃ , R ₂)	w(R ₃ , R ₃)	⋮	w(R ₃ , R ₁₈)
w(F _m , R ₄)	w(R ₄ , R ₁)	w(R ₄ , R ₂)	w(R ₄ , R ₃)	⋮	w(R ₄ , R ₁₈)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
w(F _m , R ₇)	w(R ₇ , R ₁)	w(R ₇ , R ₂)	w(R ₇ , R ₃)	⋮	w(R ₇ , R ₁₈)
일반 QA요건의 상대중요도	w(R ₃ , R ₁)	w(R ₄ , R ₂)	w(R ₇ , R ₃)	⋮	w(R ₃ , R ₁₈)

Fig. 3. Calculation flow in the 2-stage QFD.

Table 4. Attributes of nuclear R&D project.

속성요인(F_m)	세부속성요인(F_{mn})	중요도 ^{*)} ($w(F_m, F_{mn})$)
F ₁ : 품목의 설계	F ₁₁ : 설계품목의 최종 용도가 일반대중 및 작업자의 건강과 안전에 미치는 영향	0.3
	F ₁₂ : 품목의 설계 성패가 사업성과에 미치는 영향	0.2
	F ₁₃ : 품목의 설계 실패가 사업의 비용 및 일정에 미치는 영향	0.2
	F ₁₄ : 기 입증된 설계의 활용가능성	0.1
	F ₁₅ : 유사 또는 동일 품목의 설계 경험	0.1
	F ₁₆ : 설계업무의 복잡성	0.1
F ₂ : 품목의 구매	F ₂₁ : 구매품목의 최종 용도가 일반대중 및 작업자의 건강과 안전에 미치는 영향	0.3
	F ₂₂ : 품목의 구매 성패가 사업성과에 미치는 영향	0.2
	F ₂₃ : 품목의 구매 실패가 사업의 비용 및 일정에 미치는 영향	0.2
	F ₂₄ : 구매품목의 상품화 수준	0.1
	F ₂₅ : 구매품목의 공급가능 업체(들)의 관련 기술수준	0.1
	F ₂₆ : 구매품목의 제조/제작 관련 기술의 복잡성	0.1
F ₃ : 품목의 시험	F ₃₁ : 시험의 최종 용도가 일반대중 및 작업자의 건강과 안전에 미치는 영향	0.3
	F ₃₂ : 품목의 시험 성패가 사업 성과에 미치는 영향	0.2
	F ₃₃ : 품목의 시험 실패가 사업의 비용 및 일정에 미치는 영향	0.2
	F ₃₄ : 기 입증된 시험방법의 활용가능성	0.1
	F ₃₅ : 유사 또는 동일한 시험 경험	0.1
	F ₃₆ : 시험방법의 복잡성	0.1
F ₄ : 품목의 제작	F ₄₁ : 제품품목의 최종 용도가 일반대중 및 작업자의 건강과 안전에 미치는 영향	0.3
	F ₄₂ : 품목의 제작 성패가 사업성과에 미치는 영향	0.2
	F ₄₃ : 품목의 제작 실패가 사업의 비용 및 일정에 미치는 영향	0.2
	F ₄₄ : 기 입증된 제작 기술/공정의 활용가능성	0.1
	F ₄₅ : 유사 또는 동일 품목의 제작 경험	0.05
	F ₄₆ : 관련 제작기술/공정의 복잡성	0.1
	F ₄₇ : 열처리, 용접, 비파괴검사 등 특수작업의 중요도	0.05
F ₅ : 품목의 설치/건설	F ₅₁ : 설치품목의 최종 용도가 일반대중 및 작업자의 건강과 안전에 미치는 영향	0.3
	F ₅₂ : 품목의 설치/건설 성패가 사업성과에 미치는 영향	0.2
	F ₅₃ : 품목의 설치/건설 실패가 사업의 비용 및 일정에 미치는 영향	0.2
	F ₅₄ : 기 입증된 설치/건설 기술/공정의 활용가능성	0.1
	F ₅₅ : 유사 또는 동일 품목의 설치/건설 경험	0.05
	F ₅₆ : 관련 설치/건설 기술/공정의 복잡성	0.1
	F ₅₇ : 열처리, 용접, 비파괴검사 등 특수작업의 중요도	0.05

*중요도는 속성요인(F_m)에 대한 세부속성요인(F_{mn})의 상대중요도를 의미함.

Table 5. Questionnaire form for attribute F₁₁'s level and confidence attitude.

세부속성요인	세부속성요인의 수준					응답의 확신도 수준				
	小, 少, 低 ↔ 大, 多, 高					低 ↔ 高				
	매우	상당히	약간	보통	상당히	매우	매우	약간	보통	매우
F ₁₁ : 설계품목의 최종용도가 일반대중 및 작업자의 건강과 안전에 미치는 영향										
F ₁₂ : 품목의 설계 성패가 연구성과에 미치는 영향										
F ₁₃ : 품목의 설계 성패가 연구비용 및 일정에 미치는 영향										
F ₁₄ : 기 입증된 설계의 활용가능성										
F ₁₅ : 유사 또는 동일 품목의 설계 경험										
F ₁₆ : 설계업무의 복잡성										

Table 6. Linguistic terms and triangular fuzzy number for evaluating the attributes.

구분	언어척도	삼각퍼지수
세부속성요인 수준	매우 작다(적다, 낮다)	(0, 0, 1)
	상당히 작다(적다, 낮다)	(0, 1, 2)
	약간 작다(적다, 낮다)	(1, 2, 3)
	보통이다	(2, 3, 4)
	약간 크다(많다, 높다)	(3, 4, 5)
	상당히 크다(많다, 높다)	(4, 5, 6)
응답 확신도 수준	매우 크다(많다, 높다)	(5, 6, 6)
	매우 낮다	(0.00, 0.00, 0.25)
	약간 낮다	(0.00, 0.25, 0.50)
	보통이다	(0.25, 0.50, 0.75)
	약간 높다	(0.50, 0.75, 1.00)
	매우 높다	(0.75, 1.00, 1.00)

사업 참여자를 대상으로 평가대상 원자력 연구개발사업에 대한 각 세부속성요인의 잠재적 위험수준과 설문 항목별 피설문자의 응답확신 정도를 설문 받는다. Table 5는 속성요인 ‘F₁ : 품목의 설계’의 세부속성요인인 F₁₁~F₁₆의 수준 및 응답확신도에 대한 설문예시이다.

각 세부속성요인 F_m의 잠재적 위험수준에 대한 설문 응답치와 응답확신도는 “상당히 높다”, “보통이다” 등의 언어척도로 표현된다. 이러한 언어척도들은 퍼지분석의 입력자료로 활용되기 위해서 Table 6에 의해서 삼각퍼지수로 변환된다.

“F₁₄ : 기 입증된 설계의 활용가능성”과 “F₁₅ : 유사 또는 동일 품목의 설계 경험” 등과 유사한 F₂₄, F₂₅, F₃₄, F₃₅, F₄₄, F₄₅, F₅₄, F₅₅ 등의 세부속성요인들은 다른 세부속성요인과는 달리 그 수준이 높을수록 품질보증 관리의 필요성이 낮아진다. 따라서 상기 10개 세부속성요인의 수준에 대한 언어척도를 삼각퍼지수로 변환할 때는 해당 세부속성요인의 수준이 높을수록 상대적으로 낮은 삼각퍼지수로 변환하여 분석에 반영해야 한다(예를 들면, F₁₄의 수준에 대하여 설문된 언어척도가 “상당히 크다”인 경우에 해당 삼각퍼지수는 (4, 5, 6)이 아닌 (0, 1, 2)로 변환된다). 이는 품질보증 관리의 필요성이 높을수록 큰 수의 삼각퍼지수로 변환되어 높은 중요도를 가지게 되고, 관련 품질보증요건의 중요도에 높게 반영되도록 하기 위함이다.

삼각퍼지수로 변환된 세부속성요인 수준에 대한 여러 피설문자의 설문응답치(QFL_m^h)와 해당 응답확신도(CQFL_m^h)는 EFWA 방법에 의해 하나의 퍼지수로 계산된다. 예를 들어, 세부속성요인 F₁의 수준에 대한 3명의 설문치

가 각각 “약간 크다”, “상당히 크다”, “상당히 크다”이고, 각 설문치에 대한 응답 확신도 수준이 “약간 높다”, “약간 높다”, “매우 높다”라고 가정하자. 이를 Table 6에 의해 삼각퍼지수로 변환하면, QFL₁₁^h=(3, 4, 5), QFL₁₁^h=(4, 5, 6), QFL₁₁^h=(4, 5, 6), CQFL₁₁^h=(0.50, 0.75, 1.00), CQFL₁₁^h=(0.50, 0.75, 1.00), CQFL₁₁^h=(0.75, 1.00, 1.00)이 된다. 각 CQFL₁₁^h를 가중치로 하는 QFL₁₁^h의 가중평균을 계산하기 위하여 EFWA 방법을 적용하면, 세부속성요인 F₁₁의 수준 FL₁₁은 (3.56, 4.70, 5.80)이 된다.

이와 같이 계산된 각 세부속성요인 F_m의 수준 FL_m은 crisp수로 표현되는 속성요인의 상대중요도로 계산되기 위해서 비퍼지화 과정이 요구된다. 퍼지수를 비퍼지화하는 방법에는 Mean of Maximum, Center of Area, a-cut 방법 등이 있으며^[10], 본 연구에서는 이 중 널리 사용되는 Center of Area 방법을 사용한다. Center of Area 방법에 따르면, 삼각퍼지수 A=(l, m, u)의 비퍼지화된 값 a는 다음과 같이 계산된다.

$$a = \frac{(u-l)+(m-l)}{3} + l = \frac{l+m+u}{3}$$

위에서 예시된 FL₁₁=(3.56, 4.70, 5.80)을 Center of Area 방법에 의해 비퍼지화한 값 FL₁₁은 (3.56+4.70+5.80)/3=4.6852이다.

비퍼지화된 세부속성요인의 수준 FL_m은 속성요인(F_m)에 대한 세부속성요인(F_m)의 중요도 w(F_m, F_m)를 가중치로 하는 가중평균값에 의해 각 속성요인의 수준 FL_m로 변환된다. 예를 들어, 속성요인 F의 비퍼지화된 세부속성요인의 수준이 각각 FL₁₁=4.6852, FL₁₂=3.6104, FL₁₃=3.8631, FL₁₄=3.3896, FL₁₅=4.6852, FL₁₆=4.0000이라고 하면, Table 4에 제시된 속성요인 F₁에 대한 각 세부속성요인 F_m의 상대중요도 값을 이용하여 속성요인 F₁의 수준 FL₁은 다음과 같이 계산된다.

$$FL_1 = 4.6852 \times 0.3 + 3.6104 \times 0.2 + 3.8631 \times 0.2 + 3.3896 \times 0.1 + 4.6852 \times 0.1 + 4.0000 \times 0.1 = 4.1077$$

이상과 동일한 과정을 거쳐 계산된 각 속성요인의 수준 FL_m은 정규화과정을 통해 각 속성요인의 상대중요도(w(F_m))로 변환된다. 예를 들어, 계산된 각 속성요인의 수준 값이 각각 FL₁=4.1077, FL₂=1.8296, FL₃=3.4222, FL₄=2.3253, FL₅=4.4508이라고 하면, 속성요인 F₁의 상대중요도(w(F₁))는 다음과 같이 계산된다.

$$w(F_1) = \frac{FL_1}{FL_1 + FL_2 + FL_3 + FL_4 + FL_5} = \frac{4.1077}{4.1077 + 1.8296 + 3.4222 + 2.3253 + 4.4508} = 0.2546$$

같은 방법으로 각 속성요인의 중요도는 $w(F_2)=0.1134$, $w(F_3)=0.2121$, $w(F_4)=0.1441$, $w(F_5)=0.2758$ 이 된다. 속성요인의 수준이 높을수록 해당 속성요인의 상대중요도가 크게 계산되어 관련 품질보증요건의 중요도에 반영됨을 알 수 있다.

3-2. 제2단계: 속성 품질보증요건의 상대중요도 결정

이 단계에서는 퍼지 AHP를 이용하여 각 속성요인에 대한 관련 속성 품질보증요건의 중요도를 결정하고, 제1단계에서 결정된 원자력 연구개발사업의 속성요인 중요도를 이용하여 속성 품질보증요건의 상대중요도를 결정한다.

각 속성요인에 대하여 18개 품질보증요건의 중요도를 쌍대비교 한다면, 한 속성요인에 대한 쌍대비교 수가 $18C2=153$ 회에 이르게 되고, 5개 속성요인을 고려하면 총 $18C2 \times 5=765$ 회의 쌍대비교가 요구된다. 이렇게 많은 쌍대비교를 수행하기 위해서는 현실적으로 많은 어려움이 따를 뿐만 아니라, 설문내용의 신뢰도를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각 속성요인과 직접 관련이 있는 품질보증요건을 선별하여 속성 품질보증요건(R_i)이라 하고, 나머지 품질보증요건들을 일반 품질보증요건(R_j)이라 하여 중요도 계산과정을 분리하고자 한다. 속성 품질보증요건은 속성요인과 직접 관련된 품질보증요건으로 각 속성요인의 수준에 따라 중요도가 결정되는 요건을 의미하며, 일반 품질보증요건은 속성요인과 직접 관련이 없는 관리차원의 요건들로서 속성 품질보증요건의 중요도에 의해 중요도가 결정되는 품질보증요건을 의미한다. Table 7은 각 속성요인과 직접 관련된 속성 품질보증요건을 나타내고 있다. 한편, 속성요인 F_i 와 직접 관련된 속성 품질보증요건은 R_3 하나이기 때문에 F_i 에 대한 R_3 의 중요도($w(F_i, R_3)$)는 항상 1이 된다.

속성요인에 대한 관련 속성 품질보증요건의 중요도를 도출하기 위해서 퍼지 AHP(비선형 FPP)를 이용하며, 이를 위해 품질보증 전문가를 대상으로 각 속성요인에 대한 관련 속성 품질보증요건의 중요도를 쌍대비교 설문

Table 7. QA requirements related to the R&D attributes F_m .

속성요인 (F_m)	속성 품질보증요건(R_i)														
	R_3	R_4	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}				
F_1	○														
F_2		○	○												
F_3								○	○						○
F_4					○	○	○		○	○	○	○	○	○	○
F_5					○	○	○		○	○	○	○	○	○	○

받는다. Table 8은 속성요인 F_3 에 대한 관련 속성 품질보증요건의 중요도 쌍대비교 설문 예시이다. 설문 결과는 언어척도로 표현되며, Table 2에 따라 삼각퍼지수로 변환된다.

품질보증 전문가들의 설문결과를 이용하여 퍼지 AHP를 적용하기 위해서는 동일한 설문항목에 대한 품질보증 전문가들의 설문치들을 하나의 삼각퍼지수로 통합하는 과정이 요구된다. 예를 들어, 품질보증 전문가 3명의 쌍대비교 설문치가 각각 “ R_{11} 이 R_{12} 보다 약간 중요하다”, “ R_{11} 과 R_{12} 가 동일하다”, “ R_{12} 가 R_{11} 보다 약간 중요하다”라고 하면, 3명의 설문을 평균하면, “ R_{11} 과 R_{12} 가 동일하다”라는 결과를 얻을 수 있어야 한다. 그러나 이를 삼각퍼지수로 변환하여 평균하면, 설문치의 삼각퍼지수는 Table 2에 따라 각각 (2, 3, 4), (1, 1, 2), (1/4, 1/3, 1/2)이 되고, 이를 평균하면 (1.083, 1.444, 2.167)이 된다. 결국 삼각퍼지수를 이용하여 3명의 설문치 평균을 구하면, R_{11} 이 R_{12} 보다 조금 더 중요한 것으로 계산된다. 이는 crisp수의 경우에서도 동일하게 나타나며, 앞의 삼각퍼지수 중앙값만을 살펴볼 때 설문 평균이 1이 아닌 1.444로 계산됨을 통해서 확인할 수 있다.

이러한 문제점은 AHP의 쌍대비교시 중요도 값으로 역수가 이용됨으로 인해 나타난다. 본 연구에서는 다음과 같은 방법(이하에서 ‘설문 평균법’이라 함)을 이용하여 퍼지 쌍대비교 설문치의 평균을 계산함으로써 상기의 문

Table 8. Questionnaire form for the pairwise comparison of R_i with respect to F_3 .

품질보증요건 A	요건 A가 B보다 중요					요건 B가 A보다 중요					품질보증요건 B
	절대적	매우	상당히	약간	동일	약간	상당히	매우	절대적		
R_{11} : 시험관리											R_{12} : 측정 및 시험장비 관리
R_{11} : 시험관리											R_{14} : 검사, 시험 및 운전상태
R_{12} : 측정 및 시험장비관리											R_{14} : 검사, 시험 및 운전상태

Table 9. Questionnaire answered fuzzy numbers and importance weights of R_i with respect to F_3 .

F_3 : 품목의 시험	R_{i1}	R_{i2}	R_{i4}	중요도 $w(F_3, R_i)$
R_{11}		(6, 7, 8) (4, 5, 6) (6, 7, 8)	(7, 8, 9) (8, 9, 9) (6, 7, 8)	0.7359
(설문평균)		(5.3, 6.3, 7.3)	(7.0, 8.0, 9.0)	
R_{12}			(4, 5, 6) (5, 6, 7) (4, 5, 6)	0.1944
(설문평균)			(4.3, 5.3, 6.3)	
R_{14}				0.0698
(설문평균)				

제점을 없애고자 한다. 어떤 설문항목에 대한 명의 퍼지 쌍대비교 설문치 삼각퍼지수를 $(l_i, m_i, u_i), i=1, 2, \dots, h$ 라 하면, 각 m_i 에 대한 설문 평균치 m_A 는 다음 절차에 의해 계산된다.

- step 1 : if $m_i \geq 1$ then $m'_i = m_i + 8$
 if $m_i < 1$ then $m'_i = 10 - 1/m_i$
- step 2 : $m'_A = \text{average}(m'_i)$
- step 3 : if $m'_A \geq 9$ then $m_A = m'_A - 8$
 if $m'_A < 9$ then $m_A = 1 / (10 - m'_A)$

계산된 m_A 는 Table 2와 같은 방식으로 다시 삼각퍼지수로 변환된다. 앞의 예제를 이용하면, $m_1=3, m_2=1, m_3=1/3$ 이며, $m'_1=3+8=11, m'_2=1+8=9, m'_3=10-1/(1/3)=7$ 이 된다. $m'_A = \text{average}(11, 9, 7) = 9$ 이며, $m_A = m'_A - 8 = 9 - 8 = 1$ 이 되어, 이를 Table 2의 방법에 따라 삼각 퍼지수로 변환하면 “ R_{11} 와 R_{12} 가 동일하다”라는 언어척도를 의미하는 (1, 1, 2)가 됨을 알 수 있다.

예시된 Table 8의 설문에 대하여 피설문자 3명의 설문결과 삼각퍼지수가 Table 9와 같다고 하면, 피설문자 3명의 설문치 평균은 위에서 설명한 ‘설문 평균법’에 의해 Table 9의 ‘설문평균’ 값과 같이 계산되어 진다.

속성요인 F_3 에 대한 속성 품질보증요건 R_{11}, R_{12}, R_{14} 의 중요도는 Mikhailov의 비선형 FPP 방법에 의해 결정되며, Table 9에서 보는 바와 같이 완전한 쌍대비교 행렬이 아닌 설문 응답치만으로 중요도가 계산된다. Table 9의 설문평균을 이용하여 Microsoft Office Excel 프로그램의 “해찾기” 기능에 의해 중요도를 계산하면, 속성요인 F_3 에 대한 속성 품질보증요건 F_{11} 의 중요도 $w(F_3, R_{11})=0.7359$ 이며, 마찬가지로 $w(F_3, R_{12})=0.1944, w(F_3, R_{14})=0.0698$ 임을 알 수 있다.

이상과 같은 방법을 통해 각 속성요인에 대한 해당 속성 품질보증요건의 중요도를 계산할 수 있으며, 각 속성요인의 상대중요도가 반영된 속성 품질보증요건의 상

대중요도 $w(F_M, R_i)$ 는 다음 식에 의해서 계산된다.

$$w(F_M, R_i) = \sum_m (w(F_m) \cdot w(F_m, R_i)),$$

$$f=3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, m=1, 2, \dots, 5$$

예를 들어, 각 속성요인의 상대중요도가 반영된 속성 품질보증요건 R_{12} 의 상대중요도는 다음 식에 의해 계산된다.

$$w(F_M, R_{12}) = w(F_3) \cdot w(F_3, R_{12}) + w(F_4) \cdot w(F_4, R_{12}) + w(F_5) \cdot w(F_5, R_{12})$$

3-3. 제3단계: 일반 품질보증요건의 상대중요도 결정

제2단계가 각 속성요인의 중요도($w(F_m)$)가 반영된 속성 품질보증요건의 상대중요도($w(F_M, R_i)$)를 계산하는 과정인데 반해, 제3단계는 제2단계에서 계산된 속성 품질보증요건의 상대중요도($w(F_M, R_i)$)를 반영한 일반 품질보증요건(R_g)의 상대중요도($w(R_f, R_g)$)를 계산하는 단계이다. 따라서, Fig. 3에 있는 1차 QFD에서 속성요인의 상대중요도 $w(F_m)$ 을 속성 품질보증요건의 상대중요도 $w(F_M, R_i)$ 로 대체하고(QFD의 세로축), 속성 품질보증요건 R 를 일반 품질보증요건 R_g 로 대체하여(QFD의 가로축) 제2단계와 동일한 계산과정을 거치면, 속성 품질보증요건의 상대중요도가 반영된 일반 품질보증요건의 상대중요도 $w(R_f, R_g)$ 를 계산할 수 있다(Fig. 3 참조).

제2단계와 제3단계를 거치면, 속성 품질보증요건의 상대중요도 $w(F_M, R_i)$ 와 일반 품질보증요건의 상대중요도 $w(R_f, R_g)$ 가 계산된다. 이들 중요도의 합계는 각각 1이기 때문에 속성 품질보증요건의 상대중요도 $w(F_M, R_i)$ 와 일반 품질보증요건의 상대중요도 $w(R_f, R_g)$ 를 정규화하여 전체 품질보증요건의 상대중요도를 구할 수 있다.

이상의 계산과정을 살펴보면, 최초의 평가대상 원자력 연구개발사업의 속성요인 수준이 속성 품질보증요건의

중요도에 반영되고, 속성 품질보증요건의 중요도가 일반 품질보증요건의 중요도에 반영됨으로써 결과적으로는 원자력 연구개발사업의 속성이 반영된 품질보증요건의 중요도가 얻어짐을 알 수 있다.

4. 사례연구 및 유효성 검증

4.1. 사례연구

특정 원자력 연구개발사업을 선정하고 제안된 방법론을 이용하여 원자력 품질보증요건의 상대중요도를 도출하기로 한다. 본 연구에서 선정된 원자력 연구개발사업은 시험시설을 설계하고 주요 구성품을 제작 및 구매하여 시설을 설치하며, 설치 후에는 성능확인 시험을 수행하는 업무를 주요내용으로 하고 있어, 제안된 방법론의 5가지 속성요인을 두루 갖추고 있다. 또한, 실제로 원자력 품질보증 18개 요건을 모두 적용하고 있어, 본 연구에서 도출된 품질보증요건의 상대중요도 의미를 확인할 수 있는 사업이기도 하다.

제1단계에서는 원자력 연구개발사업 참여자 3명을 대상으로 속성요인의 수준 및 응답확신도에 대한 설문

수행하고, 제2단계는 품질보증 전문가 3명을 대상으로 속성요인에 대한 해당 속성 품질보증요건의 중요도를 평가하도록 하였으며, 제3단계에서는 동일한 품질보증 전문가 3명을 대상으로 속성 품질보증요건에 대한 일반 품질보증요건의 중요도를 평가하도록 하였다. 피설문자 수가 많아지면 여러 전문가의 의견을 고루 반영할 수 있을 것이다. 하지만, 원자력 품질보증 및 연구개발사업 전반에 대한 광범위하고 종합적인 설문에 적합한 전문가는 현실적으로 제한되어 있으며, 부적합한 전문가에 의한 설문은 오히려 분석결과의 신뢰성을 저하시킬 수 있기 때문에 본 논문에서는 설문에 적합한 전문가 3명씩을 선정하여 설문을 실시하였다.

제1단계의 속성요인 수준 및 응답확신도에 대한 설문과 계산 결과를 Table 10에 나타내었다. 각 속성요인별로 계산과정이 동일하므로, 본 논문에서는 지면 관계상 속성요인 F₁에 대한 계산결과만을 수록하기로 한다.

FL_{mn}은 EFWA를 이용하여 각 세부속성요인의 퍼지수준을 계산한 결과이며, 이를 Center of Area 방법으로 비퍼지화한 값이 FL_{mn}에 나타나 있다. Table 4에서 제시된 속성요인에 대한 세부속성요인의 중요도를 이용하

Table 10. Importance weights of attribute F₁.

F _m	F _{mn}	QFL ^h _{mn}	CQFL ^h _{mn}	FL _{mn}	FL _{mn}	w(F _m , F _{mn})	FL _m
품목의 설계 (F ₁)	F ₁₁	(3, 4, 5)	(0.50, 0.75, 1.00)	(3.33, 4.57, 5.75)	4.5516	0.3	4.1542
		(4, 5, 6)	(0.50, 0.75, 1.00)				
		(4, 5, 6)	(0.00, 0.25, 0.50)				
	F ₁₂	(2, 3, 4)	(0.50, 0.75, 1.00)	(2.88, 4.11, 5.29)	4.0906	0.2	
		(3, 4, 5)	(0.25, 0.50, 0.75)				
		(4, 5, 6)	(0.75, 1.00, 1.00)				
	F ₁₃	(2, 3, 4)	(0.50, 0.75, 1.00)	(2.57, 3.88, 5.14)	3.8631	0.2	
		(3, 4, 5)	(0.50, 0.75, 1.00)				
		(4, 5, 6)	(0.25, 0.50, 0.75)				
	F ₁₄	(1, 2, 3)	(0.50, 0.75, 1.00)	(1.88, 3.11, 4.29)	3.0906	0.1	
		(2, 3, 4)	(0.25, 0.50, 0.75)				
		(3, 4, 5)	(0.75, 1.00, 1.00)				
	F ₁₅	(3, 4, 5)	(0.50, 0.75, 1.00)	(3.86, 5.13, 5.75)	4.9107	0.1	
		(4, 5, 6)	(0.00, 0.25, 0.50)				
		(5, 6, 6)	(0.75, 1.00, 1.00)				
	F ₁₆	(2, 3, 4)	(0.50, 0.75, 1.00)	(2.67, 4.13, 5.14)	3.9782	0.1	
(2, 3, 4)		(0.25, 0.50, 0.75)					
(5, 6, 6)		(0.50, 0.75, 1.00)					

F_m : 원자력 연구개발사업의 속성요인
 F_{mn} : 각 속성요인의 세부속성요인
 QFL^h_{mn} : 피설문자 의 세부속성요인 수준에 대한 설문치
 CQFL^h_{mn} : 피설문자 의 세부속성요인 수준 설문에 대한 확신도
 FL_{mn} : 퍼지가중평균(EFWA)에 의해 계산된 세부속성요인의 수준
 FL_{mn} : Center of Area 방법에 의해 비퍼지화된 세부속성요인의 수준
 w(F_m, F_{mn}) : 속성요인 F_m에 대한 세부속성요인 F_{mn}의 중요도
 FL_m : 속성요인 F_m의 수준
 w(F_m) : F_m의 상대중요도(FL_m을 정규화)

Table 11. Importance weights of attribute F_m .

속성요인(F_m)	속성요인 수준(FL_m)	속성요인의 상대중요도($w(F_m)$)
F_1 : 품목의 설계	4.1542	0.2455
F_2 : 품목의 구매	3.8969	0.2303
F_3 : 품목의 시험	3.3834	0.2000
F_4 : 품목의 제작	2.4751	0.1463
F_5 : 품목의 설치/건설	3.0103	0.1779

여 기중평균을 구한 속성요인의 수준이 FL_m 이다. Table 11에는 제1단계에서 계산된 각 속성요인의 수준(FL_m)과 이들을 정규화한 각 속성요인의 상대중요도($w(F_m)$)를 나타내었다.

제2단계에서는 품질보증 전문가 3명이 각 속성요인에 대한 해당 속성 품질보증요건의 중요도를 쌍대비교 하였다. 이들의 설문결과로부터 앞서 설명된 '설문 평균법'

Table 12. Importance weights of the QA requirements R_i .

속성요인(F_m)		속성 품질보증요건(R_i)										
구분	상대중요도 ($w(F_m)$)	R_3	R_4	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}
F_1	0.2455	1.0000										
F_2	0.2303		0.2308	0.7692								
F_3	0.2000							0.7359	0.1944		0.0698	
F_4	0.1463				0.0983	0.0532	0.3156		0.1131	0.0983	0.0444	0.2771
F_5	0.1779				0.2177	0.2177	0.2437		0.0608	0.1115	0.0458	0.2668
상대중요도 $w(F_m, R_i)$	0.2455	0.0531	0.1772	0.0531	0.0174	0.0895	0.1471	0.0662	0.0342	0.0286	0.0880	

Table 13. Questionnaire answered fuzzy numbers and importance weights of R_i with respect to R_j .

R_3	R_4	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	중요도 $w(R_i, R_j)$
R_1	(1/6, 1/5, 1/4) (1/4, 1/3, 1/2) (1/4, 1/3, 1/2)	(1/8, 1/7, 1/6) (1/6, 1/5, 1/4) (1/6, 1/5, 1/4)	(1/6, 1/5, 1/4) (1/6, 1/5, 1/4) (1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 2) (1, 2, 3) (1/4, 1/3, 1/2)	(1/6, 1/5, 1/4) (1/4, 1/3, 1/2) (1/8, 1/7, 1/6)	(1/4, 1/3, 1/2) (1/4, 1/3, 1/2) (1, 1, 2)				0.0409
(설문평균)	(0.2, 0.3, 0.4)	(0.2, 0.2, 0.2)	(0.2, 0.2, 0.3)	(0.4, 0.8, 1.0)	(0.2, 0.2, 0.3)	(0.3, 0.4, 0.8)				
R_2		(1/4, 1/3, 1/2) (1/4, 1/3, 1/2) (1/6, 1/5, 1/4)	(1/4, 1/3, 1/2) (1/6, 1/5, 1/4) (1/6, 1/5, 1/4)	(4, 5, 6) (2, 3, 4) (4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4) (1/8, 1/7, 1/6) (1/4, 1/3, 1/2)	(2, 3, 4) (1, 1, 2) (4, 5, 6)				0.0738
(설문평균)		(0.2, 0.3, 0.4)	(0.2, 0.2, 0.3)	(3.3, 4.3, 5.3)	(0.2, 0.2, 0.3)	(2.0, 3.0, 4.0)				
R_5			(4, 5, 6) (2, 3, 4) (6, 7, 8)	(6, 7, 8) (5, 6, 7) (6, 7, 8)	(1/4, 1/3, 1/2) (1, 1, 2) (2, 3, 4)	(4, 5, 6) (4, 5, 6) (2, 3, 4)				0.3941
(설문평균)			(4.0, 5.0, 6.0)	(5.7, 6.7, 7.7)	(1.0, 1.0, 2.0)	(3.3, 4.3, 5.3)				
R_6				(2, 3, 4) (6, 7, 8) (4, 5, 6)	(1, 1, 2) (1, 1, 2) (1, 2, 3)	(2, 3, 4) (6, 7, 8) (4, 5, 6)				0.1752
(설문평균)				(4.0, 5.0, 6.0)	(1.0, 1.3, 2.3)	(4.0, 5.0, 6.0)				
R_{16}					(1/4, 1/3, 1/2) (1/6, 1/5, 1/4) (1/6, 1/5, 1/4)	(1, 1, 2) (2, 3, 4) (1/3, 1/2, 1)				0.0419
(설문평균)					(0.2, 0.2, 0.3)	(1.0, 1.3, 2.3)				
R_{17}						(4, 5, 6) (3, 4, 5) (5, 6, 7)				0.2186
(설문평균)						(4.0, 5.0, 6.0)				
R_{18}										0.0556
(설문평균)										

에 의해 설문 평균치를 구하고, 이것에 비선형 FPP를 적용하여 속성요인별 해당 속성 품질보증요건의 중요도를 계산하였다. 앞에서 예제로 살펴본 Table 9에는 속성요인 F_3 에 대한 해당 속성 품질보증요건의 중요도 쌍대비교 설문결과와 설문평균치, 그리고 비선형 FPP를 적용한 속성 품질보증요건의 중요도($w(F_3, R_i)$)의 계산결과가 나타나 있다. 나머지 속성요인에 대한 속성 품질보증요건의 중요도 계산 과정은 동일하므로 생략한다.

Table 12에는 제2단계 결과를 요약한 것으로 각 속성요인에 대한 속성 품질보증요건의 중요도($w(F_m, R_i)$)와 각 속성요인의 상대중요도($w(F_m)$)가 반영된 속성 품질보증요건의 상대중요도($w(F_m, R_i)$) 계산 결과가 나타나 있다.

제3단계는 제2단계와 유사한 계산과정을 거치며, 속성 품질보증요건 R_3 에 대한 일반 품질보증요건의 중요도에 대한 쌍대비교 설문결과 및 비선형 FPP 적용결과는 Table 13과 같다. 나머지 속성 품질보증요건에 대한 일반 품질보증요건의 계산과정은 동일하므로 생략한다.

Table 14에는 제3단계의 결과를 요약한 것으로 각 속성 품질보증요건에 대한 일반 품질보증요건의 중요도($w(R_3, R_g)$)와 각 속성 품질보증요건의 상대중요도가 반영된 일반 품질보증요건의 상대중요도($w(R_3, R_g)$) 계산 결과가 나타나 있다.

Table 15에는 제2단계에서 계산된 속성 품질보증요건의 상대중요도($w(F_m, R_i)$), 제3단계에서 계산된 일반 품

Table 14. Importance weights of R_g with respect to R_i .

속성 품질보증요건(R_i)		일반 품질보증요건(R_g)						
구 분	상대중요도 $w(F_m, R_i)$	R_1	R_2	R_3	R_6	R_{16}	R_{17}	R_{18}
R_3	0.2455	0.0409	0.0738	0.3941	0.1752	0.0419	0.2186	0.0556
R_4	0.0531	0.1690	0.3168	0.0482	0.2230	0.0810	0.0810	0.0810
R_7	0.1772	0.1145	0.1145	0.1145	0.3327	0.0900	0.1780	0.0559
R_8	0.0531	0.0133	0.0380	0.2574	0.0380	0.2574	0.1386	0.2574
R_9	0.0174	0.0395	0.3053	0.2883	0.1619	0.0742	0.0565	0.0742
R_{10}	0.0985	0.1398	0.3329	0.1077	0.0874	0.0367	0.2081	0.0874
R_{11}	0.1471	0.0563	0.2495	0.3691	0.0546	0.0578	0.1549	0.0578
R_{12}	0.0662	0.0207	0.4990	0.0637	0.0544	0.0507	0.1353	0.1762
R_{13}	0.0342	0.0367	0.3125	0.2810	0.1391	0.0423	0.0721	0.1163
R_{14}	0.0286	0.0553	0.3504	0.2756	0.1071	0.0842	0.0435	0.0840
R_{15}	0.0880	0.2879	0.2879	0.0487	0.0364	0.0397	0.2025	0.0969
상대중요도 $w(R_3, R_g)$		0.0910	0.2082	0.2282	0.1491	0.0680	0.1698	0.0857

Table 15. Normalized relative importance weights of 18 QA requirements.

구 분	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9
속성 품질보증요건 중요도 ($w(F_m, R_i)$)			0.2455	0.0531			0.1772	0.0531	0.0174
일반 품질보증요건 중요도 ($w(R_3, R_g)$)	0.0910	0.2082			0.2282	0.1491			
품질보증요건 상대중요도 (w_R)	0.0455	0.1041	0.1228	0.0266	0.1141	0.0746	0.0886	0.0266	0.0087
우선순위	8	3	1	14	2	6	4	15	18
구 분									
속성 품질보증요건 중요도 ($w(F_m, R_i)$)	0.0895	0.1471	0.0662	0.0342	0.0286	0.0880			
일반 품질보증요건 중요도 ($w(R_3, R_g)$)							0.0680	0.1698	0.0857
품질보증요건 상대중요도 (w_R)	0.0448	0.0736	0.0331	0.0171	0.0143	0.0440	0.0340	0.0849	0.0429
우선순위	9	7	13	16	17	10	12	5	11

질보증요건의 상대중요도($w(R_i, R_k)$), 그리고 이들을 정규화한 전체 품질보증요건의 상대중요도(w_R)와 우선순위를 나타내었다.

품질보증요건의 상대중요도 도출 결과를 살펴보면, 5개 속성요인 중 설계 관련 속성요인의 수준이 가장 높으며($w(F_1)=0.2455$), 설계 관련 속성 품질보증요건이 한 개 밖에 없어 그 영향을 모두 받는 R_1 의 중요도가 가장 높은 것으로 평가되었다. 반면, R_9, R_{13}, R_{14} 는 속성요인의 수준이 가장 낮은 F_4, F_5 와 관련된 속성 품질보증요건이며, 이들과 관련된 속성 품질보증요건 7개 중에서 F_4, F_5 에 대한 중요도가 가장 낮은 관계로 그 최종 우선순위가 가장 낮은 것으로 나타났다.

위의 사례연구 결과에 따르면, 최소한 R_9, R_{13}, R_{14} 등의 품질보증요건은 그 중요도가 아주 낮기 때문에 평가 대상 원자력 연구개발사업에 적용하지 않아도 무방한 품질보증요건이라 할 수 있다. 하지만, 연구현장에서는 이러한 체계적인 평가 없이 품질보증요건의 적용여부가 결정되고 있기 때문에, 중요도가 낮은 이들 품질보증요건의 수행을 위한 인력 및 자원의 낭비가 초래될 가능성이 있다. 따라서 연구개발사업의 속성요인을 고려한 품질보증요건의 상대중요도는 품질보증 정책을 수립하고 관리하기 위한 중요 의사결정 자료로 활용되어 질 수 있을 것으로 판단된다.

4.2. 방법론의 유효성 검증

일반적으로 AHP나 QFD의 결과로 나타나는 대안이나 요인들의 중요도 참값은 알 수 없다. 따라서 AHP나 QFD의 방법론적 개선에 따른 참값에의 근접 효과를 측정하는데 많은 어려움이 따른다. 본 연구에서는 기존의 방법론에 퍼지이론이나 응답확신도를 도입함으로써 서론에서 언급된 현실적인 문제를 극복할 수 있다는(즉, 중요도의 참값에 좀 더 근접할 수 있다는) 전제하에, 제안된 방법론에 의한 계산결과를 기존 방법론의 계산결과와 비교하여 제안된 방법론의 유효성을 간접적으로 확인하고자 한다. 또한, 각 세부속성요인들의 수준변화가 품질보증요건의 중요도에 제대로 반영되는지를 확인하고자 한다. 이를 위해 다음과 같이 3가지 시나리오를 설

정하고, 각각의 경우에 대하여 속성요인의 수준 및 품질보증요건의 상대중요도를 비교하기로 한다.

시나리오 1 : 퍼지수 이용 vs crisp수 이용

시나리오 2 : 응답확신도 반영 vs 응답확신도 미반영

시나리오 3 : 세부속성요인의 수준변화

■ 시나리오 1 : 퍼지수 이용 vs crisp수 이용

이 시나리오는 퍼지개념을 분석에 도입하는 경우와 그렇지 않은 경우의 결과를 비교함으로써 퍼지분석의 효과성을 확인하기 위한 시나리오이다. 제안된 방법론의 제 1, 2, 3단계에서 동일한 설문지를 대상으로 비교가 이루어져야 하며, 퍼지수를 이용한 결과는 사례연구의 결과 (Table 11, Table 15)와 같다.

퍼지수를 이용하지 않는 경우에는 제 1단계에서 퍼지수의 가중평균 방법을 이용하여 세부속성요인의 수준이 퍼지수로 결정되고, Center of Area 법에 의해 비퍼지화되는 계산과정이 crisp수의 계산과정으로 대체되어야 한다. 이를 위해 각 세부속성요인 수준과 응답확신도의 설문치 삼각퍼지수의 중앙값을 가중평균하여 각 세부속성요인의 수준을 crisp수로 계산한다. 따라서 Center of Area 방법을 이용하는 비퍼지화 과정은 불필요하게 된다.

또한, 제 2단계, 제 3단계에서 퍼지 AHP에 의해 결정되는 각 품질보증요건의 중요도는 비퍼지 AHP에 의해 결정되어야 한다. 이를 위해 Saaty의 고유벡터법^[24]을 이용하며, 삼각퍼지수 설문치의 중앙값을 이용한다. 분석 과정에 퍼지수를 도입하는 경우와 그렇지 않은 경우의 각 속성요인의 상대중요도는 Table 16에, 품질보증요건 상대중요도와 우선순위는 Table 17에 비교하였다.

분석에 퍼지개념을 도입한 경우와 그렇지 않은 경우의 계산결과를 살펴보면, 속성요인의 중요도 값은 최대 5% 정도의 변화가 생겼으며, 몇몇 품질보증요건의 우선순위가 변동되었음을 알 수 있다. 퍼지수를 이용하는 경우에는 R_3 가 가장 중요하게 평가되었지만, 퍼지수를 이용하지 않는 경우에는 R_2 가 가장 중요한 품질보증요건으로 평가되었다. 또한, 퍼지계산 결과 대비 비퍼지계산 결과의 변화율을 살펴보면 6개의 품질보증요건 중요도

Table 16. Change of importance weights of attributes (scenario 1).

속성요인	퍼지 계산결과		비퍼지 계산결과		중요도 변화율(%)
	속성요인 수준	속성요인 중요도	속성요인 수준	속성요인 중요도	
F_1	4.1542	0.2455	4.2048	0.2455	0.0
F_2	3.8969	0.2303	4.0626	0.2372	3.0
F_3	3.3834	0.2000	3.3885	0.1978	-1.1
F_4	2.4751	0.1463	2.3839	0.1392	-4.8
F_5	3.0103	0.1779	3.0877	0.1803	1.3

Table 17. Change of importance weights of the QA requirements (scenario 1).

구분		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉
폐지	품질보증요건 상대중요도	0.0455	0.1041	0.1228	0.0266	0.1141	0.0746	0.0886	0.0266	0.0087
	우선순위	8	3	1	14	2	6	4	15	18
비폐지	품질보증요건 상대중요도	0.0523	0.1276	0.1227	0.0274	0.1082	0.0703	0.0912	0.0242	0.0090
	우선순위	8	1	2	13	3	7	4	15	18
폐지 대비 비폐지의 중요도 변화율(%)		15	22.6	0.0	3.0	-5.2	-5.7	3.0	-8.7	3.7
구분		R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₁₆	R ₁₇	R ₁₈
폐지	품질보증요건 상대중요도	0.0448	0.0736	0.0331	0.0171	0.0143	0.0440	0.0340	0.0849	0.0429
	우선순위	9	7	13	16	17	10	12	5	11
비폐지	품질보증요건 상대중요도	0.0501	0.0742	0.0334	0.0171	0.0124	0.0381	0.0242	0.0777	0.0396
	우선순위	9	6	12	16	17	11	14	5	10
폐지 대비 비폐지의 중요도 변화율(%)		12.0	0.9	0.9	0.2	-13.6	-13.4	-28.7	-8.4	-7.6

가 10% 이상의 변화를 보였으며, 이 중 R₂와 R₁₆은 각각 22.6%, 28.7%의 중요도 변화가 나타나는 것으로 계산되었다. 이는 QFD 분석에 폐지개념을 도입함으로써 충분히 유의미한 수준의 중요도 변화를 가져올 수 있음

을 의미한다고 볼 수 있다.

■ **시나리오 2 : 응답확신도 반영 vs 응답확신도 미반영**
 시나리오 2는 응답확신도를 분석에 반영함으로써 나

Table 18. Change of importance weights of attributes (scenario 2).

속성요인	응답확신도 반영		응답확신도 미반영		중요도 변화율(%)
	속성요인 수준	속성요인 중요도	속성요인 수준	속성요인 중요도	
F ₁	4.1542	0.2455	4.1778	0.2425	-1.2
F ₂	3.8969	0.2303	3.4000	0.1974	-14.3
F ₃	3.3834	0.2000	3.5222	0.2045	2.2
F ₄	2.4751	0.1463	2.7389	0.1590	8.7
F ₅	3.0103	0.1779	3.3889	0.1967	10.6

Table 19. Change of importance weights of the QA requirements (scenario 2).

구분		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉
응답확신도 반영	품질보증요건 상대중요도	0.0455	0.1041	0.1228	0.0266	0.1141	0.0746	0.0886	0.0266	0.0087
	우선순위	8	3	1	14	2	6	4	15	18
응답확신도 미반영	품질보증요건 상대중요도	0.0455	0.1064	0.1213	0.0228	0.1149	0.0705	0.0759	0.0292	0.0095
	우선순위	10	3	1	15	2	7	5	14	18
응답확신도 반영 대비 미반영의 중요도 변화율(%)		0.0	2.3	-1.2	-14.3	0.7	-5.4	-14.3	10.1	9.7
구분		R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₁₆	R ₁₇	R ₁₈
응답확신도 반영	품질보증요건 상대중요도	0.0448	0.0736	0.0331	0.0171	0.0143	0.0440	0.0340	0.0849	0.0429
	우선순위	9	7	13	16	17	10	12	5	11
응답확신도 미반영	품질보증요건 상대중요도	0.0490	0.0752	0.0348	0.0188	0.0152	0.0483	0.0339	0.0848	0.0440
	우선순위	8	6	12	16	17	9	13	4	11
응답확신도 반영 대비 미반영의 중요도 변화율(%)		9.6	2.2	5.2	9.8	6.1	9.7	-0.3	-0.1	2.6

Table 20. Change of importance weights of attributes (scenario 3).

구분	기준 (설문)	F ₁			F ₂			F ₃			F ₄			F ₅		
		상	중	하	상	중	하	상	중	하	상	중	하	상	중	하
F ₁	0.2455	0.3074	0.1903	0.0254	0.2223	0.2593	0.3110	0.2163	0.2512	0.2995	0.2066	0.2381	0.2811	0.2122	0.2457	0.2917
F ₂	0.2303	0.2114	0.2472	0.2975	0.3032	0.1872	0.0250	0.2029	0.2357	0.2810	0.1938	0.2234	0.2637	0.1991	0.2305	0.2736
F ₃	0.2000	0.1836	0.2146	0.2583	0.1810	0.2112	0.2533	0.2951	0.1814	0.0240	0.1682	0.1939	0.2289	0.1728	0.2001	0.2375
F ₄	0.1463	0.1343	0.1570	0.1890	0.1324	0.1545	0.1853	0.1289	0.1497	0.1785	0.2818	0.1720	0.0226	0.1264	0.1464	0.1738
F ₅	0.1779	0.1633	0.1909	0.2298	0.1611	0.1879	0.2254	0.1568	0.1820	0.2170	0.1497	0.1726	0.2037	0.2895	0.1774	0.0234

타나는 효과를 살펴보기 위한 시나리오이다. 이를 위해 제1단계에서 응답확신도를 고려하는 경우와 그렇지 않은 경우의 속성요인 수준 및 중요도, 품질보증요건의 중요도 계산결과를 비교한다.

응답확신도를 고려하지 않는 경우, 세부속성요인의 수준은 이에 대한 3명의 설문치 삼각퍼지수를 단순평균하여 이를 Center of Area 방법으로 비퍼지화하여 결정한다. 응답확신도를 고려하는 경우, 세부속성요인 수준의 계산은 사례연구에서 살펴본 바와 같이 응답확신도의 설문 삼각퍼지수를 가중치로 하는 세부속성요인 설문 삼각퍼지수의 퍼지가중평균 방법인 EFWA 계산절차에 의해 결정된다. Table 18은 응답확신도를 고려하는 경우와 그렇지 않은 경우의 속성요인 수준 및 중요도의 계산 결과이며, Table 19는 품질보증요건의 상대중요도 및 우선순위의 계산결과이다. 응답확신도를 반영하지 않은 경우의 계산결과를 살펴보면, 속성요인의 중요도는 최대 15% 정도의 변화를 보였으며, 7개 품질보증요건의 중요도가 10% 정도의 변화를 보였다.

시나리오 1에 비해 속성요인에서 많은 변화를 보였음에도 불구하고 품질보증요건의 중요도가 작은 변화를 보인 것은, 시나리오 1은 퍼지 AHP 대신 비퍼지 AHP를 이용함으로써 제2단계, 제3단계에서 각 품질보증요건의 중요도에 변화를 보인 반면, 시나리오 2에서는 제1단계에서의 속성요인 중요도만 변화하고 제2단계, 제3단계에서의 계산결과에는 변화를 주지 않았던 요인으로 평가된다. 하지만, 제1단계에서 응답확신도를 반영하는 경우와 미반영하는 경우에 품질보증요건의 중요도에 미치는 영향은 유의할만한 수준이라고 판단할 수 있다.

■ 시나리오 3 : 세부속성요인의 수준변화

시나리오 3은 세부속성요인의 수준이 변화함에 따라 속성요인의 중요도 및 품질보증요건의 중요도에 미치는 영향을 살펴보기 위한 시나리오이다. 이를 통해 세부속성요인의 수준변화가 품질보증요건의 중요도에 제대로 반영됨을 확인함으로써 방법론의 유효성을 확인하기 위한 것이다.

이를 위해 각 속성요인별로 소속된 세부속성요인의

수준을 각각 상/중/하 수준으로 변화시킨다. 각 수준별 삼각퍼지수는 각각 (5, 6, 6)/(2, 3, 4)/(0, 0, 1)로 설정하며, 응답확신도 수준은 중간정도인 (0.25, 0.50, 0.75)로 동일하게 적용한다. 특정 속성요인의 세부속성요인 수준이 상/중/하로 변화할 때, 나머지 속성요인들의 세부속성요인 수준은 사례연구의 설문결과를 그대로 유지시킨다. 각 속성요인의 세부속성요인 수준의 변화에 따른 속성요인의 중요도 변화는 Table 20과 같으며, 품질보증요건의 중요도 및 우선순위의 변화는 Table 21과 같다.

세부속성요인의 잠재 위험수준 변화에 따른 속성요인의 중요도 변화(Table 20)를 살펴보면, 세부속성요인의 잠재 위험수준이 상→중→하로 변함에 따라 해당 속성요인의 중요도가 감소함을 볼 수 있으며, 나머지 속성요인의 수준은 반대로 증가하고 있음을 알 수 있다.

세부속성요인의 수준변화에 따른 품질보증요건의 중요도 변화(Table 21)를 살펴보면, 세부속성요인의 수준이 상→중→하로 변화됨에 따라 관련 속성 품질보증요건의 중요도가 감소하고 이에 따라 우선순위가 낮아짐을 볼 수 있다. 특히, 속성요인에 대한 관련 속성 품질보증요건의 중요도가 높은 품질보증요건들(R₃, R₇, R₁₀, R₁₁, R₁₅)의 경우에는 중요도의 변화폭이 다른 품질보증요건에 비해 큰 것으로 나타났다. 즉, 속성요인에 대한 중요도가 높은 품질보증요건일수록 속성요인의 변화에 민감하게 작용함을 알 수 있다. 또한, 속성요인에 대한 관련 속성 품질보증요건의 중요도가 상대적으로 낮은 품질보증요건들(R₄, R₈, R₉, R₁₂, R₁₃, R₁₄)의 경우에는 중요도의 변화폭이 상대적으로 작게 나타났다. 한편, 속성요인 F₄, F₅와 관련된 품질보증요건들(R₈, R₉, R₁₀, R₁₂, R₁₃, R₁₄, R₁₅)은 중요도 변화가 상대적으로 작게 나타났는데, 이는 속성요인 F₄, F₅ 관련 속성 품질보증요건의 수가 많아(7개) 이들 속성요인의 중요도 변화 영향이 여러 품질보증요건에 분산되어 상대적으로 적은 영향을 받기 때문인 것으로 분석된다.

이상에서 살펴본 바에 따르면, 세부속성요인의 수준변화가 관련 속성요인의 중요도 변화를 가져오며, 이러한

Table 21. Change of importance weights of the QA requirements (scenario 3).

구분	기준 (설문)	F ₁			F ₂			F ₃			F ₄			F ₅		
		상	중	하	상	중	하	상	중	하	상	중	하	상	중	하
R ₁	0.0455 (8)	0.0435 (8)	0.0474 (9)	0.0528 (9)	0.0472 (8)	0.0445 (10)	0.0407 (11)	0.0430 (8)	0.0460 (8)	0.0501 (9)	0.0491 (10)	0.0462 (10)	0.0423 (8)	0.0477 (10)	0.0455 (8)	0.0424 (8)
R ₂	0.1041 (3)	0.0986 (3)	0.1090 (1)	0.1237 (1)	0.1019 (4)	0.1045 (3)	0.1103 (3)	0.1098 (2)	0.1030 (3)	0.0934 (4)	0.1120 (1)	0.1056 (3)	0.0969 (4)	0.4079 (2)	0.1041 (3)	0.0988 (4)
R ₃	0.1228 (1)	0.1537 (1)	0.0951 (3)	0.0127 (17)	0.1111 (1)	0.1296 (1)	0.1555 (1)	0.1082 (4)	0.1256 (1)	0.1498 (1)	0.1033 (3)	0.1191 (1)	0.4106 (1)	0.1061 (3)	0.1228 (1)	0.1458 (1)
R ₄	0.0266 (14)	0.0244 (14)	0.0285 (14)	0.0343 (13)	0.0350 (12)	0.0216 (15)	0.0029 (18)	0.0234 (14)	0.0272 (14)	0.0324 (12)	0.0224 (15)	0.0258 (15)	0.0304 (11)	0.0230 (15)	0.0266 (14)	0.0316 (12)
R ₅	0.1141 (2)	0.1209 (2)	0.1080 (2)	0.0899 (4)	0.1080 (3)	0.1177 (2)	0.1313 (2)	0.1186 (1)	0.1132 (2)	0.1059 (3)	0.1067 (2)	0.1127 (2)	0.1209 (2)	0.1094 (1)	0.1141 (2)	0.1207 (2)
R ₆	0.0746 (6)	0.0756 (6)	0.0736 (7)	0.0708 (6)	0.0821 (6)	0.0701 (7)	0.0534 (8)	0.0692 (7)	0.0756 (6)	0.0846 (6)	0.0686 (6)	0.0734 (6)	0.0800 (7)	0.0693 (6)	0.0746 (6)	0.0818 (7)
R ₇	0.0886 (4)	0.0813 (5)	0.0951 (4)	0.1144 (2)	0.1166 (1)	0.0720 (6)	0.0096 (17)	0.0781 (6)	0.0906 (4)	0.1081 (2)	0.0745 (5)	0.0859 (4)	0.1014 (3)	0.0766 (5)	0.0886 (4)	0.1052 (3)
R ₈	0.0266 (15)	0.0244 (15)	0.0285 (15)	0.0343 (14)	0.0240 (15)	0.0280 (14)	0.0336 (12)	0.0234 (15)	0.0272 (15)	0.0324 (13)	0.0301 (14)	0.0272 (14)	0.0233 (15)	0.0377 (12)	0.0265 (15)	0.0111 (16)
R ₉	0.0087 (18)	0.0080 (18)	0.0093 (18)	0.0112 (18)	0.0079 (18)	0.0092 (18)	0.0110 (16)	0.0076 (18)	0.0089 (18)	0.0106 (16)	0.0115 (18)	0.0092 (18)	0.0061 (18)	0.0112 (18)	0.0087 (18)	0.0053 (18)
R ₁₀	0.0448 (9)	0.0411 (10)	0.0480 (8)	0.0578 (7)	0.0405 (10)	0.0473 (8)	0.0567 (6)	0.0394 (11)	0.0458 (9)	0.0546 (7)	0.0627 (7)	0.0482 (8)	0.0284 (14)	0.0552 (9)	0.0447 (9)	0.0303 (13)
R ₁₁	0.0736 (7)	0.0657 (7)	0.0790 (6)	0.0950 (3)	0.0666 (7)	0.0777 (5)	0.0932 (4)	0.1086 (3)	0.0667 (7)	0.0088 (18)	0.0619 (8)	0.0714 (7)	0.0842 (6)	0.0636 (7)	0.0736 (7)	0.0874 (5)
R ₁₂	0.0331 (13)	0.0304 (13)	0.0355 (12)	0.0428 (11)	0.0300 (14)	0.0350 (12)	0.0419 (10)	0.0407 (10)	0.0316 (13)	0.0190 (15)	0.0368 (12)	0.0338 (13)	0.0297 (13)	0.0327 (14)	0.0331 (13)	0.0336 (10)
R ₁₃	0.0171 (16)	0.0157 (16)	0.0184 (16)	0.0221 (15)	0.0155 (16)	0.0181 (16)	0.0217 (14)	0.0151 (17)	0.0175 (16)	0.0209 (16)	0.0222 (16)	0.0181 (16)	0.0125 (17)	0.0224 (16)	0.0171 (16)	0.0098 (17)
R ₁₄	0.0143 (17)	0.0131 (17)	0.0153 (17)	0.0185 (16)	0.0129 (17)	0.0151 (17)	0.0181 (15)	0.0167 (16)	0.0138 (17)	0.0098 (17)	0.0156 (17)	0.0145 (17)	0.0132 (16)	0.0155 (17)	0.0143 (17)	0.0127 (15)
R ₁₅	0.0440 (10)	0.0404 (10)	0.0472 (10)	0.0568 (8)	0.0398 (11)	0.0465 (9)	0.0557 (7)	0.0388 (12)	0.0450 (10)	0.0537 (8)	0.0590 (9)	0.0468 (9)	0.0303 (12)	0.0561 (8)	0.0439 (10)	0.0272 (14)
R ₁₆	0.0340 (12)	0.0329 (12)	0.0349 (13)	0.0378 (12)	0.0349 (13)	0.0334 (13)	0.0313 (13)	0.0334 (13)	0.0341 (12)	0.0351 (11)	0.0338 (13)	0.0340 (12)	0.0342 (10)	0.0356 (13)	0.0340 (12)	0.0318 (11)
R ₁₇	0.0849 (5)	0.0869 (4)	0.0831 (5)	0.0778 (5)	0.0842 (5)	0.0853 (4)	0.0868 (5)	0.0833 (5)	0.0852 (5)	0.0878 (5)	0.0843 (4)	0.0848 (5)	0.0854 (5)	0.0840 (4)	0.0849 (5)	0.0862 (6)
R ₁₈	0.0429 (11)	0.0416 (9)	0.0440 (11)	0.0473 (10)	0.0417 (9)	0.0435 (11)	0.0461 (9)	0.0427 (9)	0.0429 (11)	0.0432 (10)	0.0455 (11)	0.0434 (11)	0.0405 (9)	0.0462 (11)	0.0429 (11)	0.0383 (9)

* ()안은 우선순위를 의미함.

* 굵은글씨는 각 속성요인과 직접 관련된 속성 품질보증요건을 의미함.

변화는 관련 품질보증요건의 중요도에 크고 작은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 특히, 속성요인에 대한 중요도가 높은 품질보증요건들이 민감하게 변화하고 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 본 연구에서 제시된 방법론은 원자력 연구개발사업의 속성요인 수준변화를 관련 품질보증요건의 중요도에 제대로 반영하고 있음을 간접적으로 확인할 수 있다.

5. 결 론

원자력 연구개발사업의 품질보증은 원자력시설의 운영과는 달리 별도의 적용기준이 마련되어 있지 않아 원자력시설운영 품질보증 18개 요건이 준용되고 있다. 또한, 연구개발사업의 개별 속성을 고려하지 못하고 관련 전문가들의 협의하에 품질보증요건을 선정하여 적용함

으로써 불필요한 요건이 포함되거나 필요한 요건이 배제될 가능성이 있으며, 이로 인한 자원낭비의 비경제성이 우려되고 있다.

이에 본 연구에서는 원자력 연구개발사업의 속성을 반영할 수 있는 품질보증요건의 중요도 평가방법론을 제시하였다. 기본적인 분석틀로서 1차 QFD 결과를 2차 QFD의 입력치로 활용하는 2단계 QFD를 활용하였다. 특히 본 연구에서 제시된 방법론은 계산과정에 퍼지개념을 도입하여 인간 판단의 모호함에 따른 불확실성을 결과에 반영하고, 피설문자의 응답확신도를 활용함으로써 설문의 내용을 보다 정확하게 분석에 반영하였다는 특징을 가지고 있다.

품질보증 18개 요건을 모두 적용하고 있는 특성의 원자력 연구개발사업을 대상으로 제시된 방법론을 이용하여 사례연구를 수행한 결과, R₃, R₅, R₂, R₇, R₁₇, R₆, R₁₁, R₁의 품질보증 요건들이 상대적으로 중요한 것으로 평가됨으로서 방법론의 유용성을 확인하였다. 또한, 다양한 시나리오 분석을 통해 제시된 방법론의 유효성을 확인하였다. 시나리오 분석의 주요결과에 따르면, 퍼지개념을 도입하여 품질보증요건 중요도에 최대 약 30% 정도의 변화를 야기할 수 있음을 확인하였으며, 응답확신도를 분석에 반영함에 따라 10% 이상의 중요도 변화를 가져오는 품질보증요건이 존재함을 확인하였다. 또한 세부속성요인의 잠재 위험수준 변화가 관련된 품질보증요건의 중요도에 직간접적으로 반영되고 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구는 원자력 연구개발사업의 다양한 속성들을 체계적으로 반영하여 품질보증요건의 중요도를 도출하는 시도라는 점에서 중요한 의미를 부여할 수 있다. 또한, 기본 분석틀로서 품질경영 도구로 다양한 분야에 널리 활용되고 있는 QFD를 활용함으로써 QFD의 새로운 응용분야를 개척하였다는데 가치가 있다고 할 수 있다. 다만, 본 논문에서 제시된 방법론을 발전시키기 위해서는 속성요인간의 상호연관성과 품질보증요건간의 상호연관성을 분석에 반영하고, 퍼지수를 연산하는 과정에서 증가할 수 있는 불확실성을 줄일 수 있는 연구가 향후에 수행되어야 할 것이다. 본 연구의 결과가 효율적이면서도 효과적인 원자력 품질보증 정책 입안을 위한 초석으로 활용될 수 있기를 바란다.

참고문헌

1. 대한전기협회. 전력산업기술기준(2000년판): QA 품질보증, 2000.
2. ASQC. Quality Assurance Guidelines for Research and Development, 1992.
3. ASME. Quality Assurance Requirements for Nuclear

- Facility Applications Subpart 4.2 Guidance on Graded Application of Quality Assurance(QA) for Nuclear-Related Research and Development, 2001.
4. Canadian Standards Association. Guide for Selecting and Implementing the CAN3-Z299-85 Quality Assurance Program Standards, CAN3-Z299.0-86, 1986.
5. IAEA. Grading of Quality Assurance Requirements: A Manual, Technical Reports Series No. 328, 1991.
6. US DOE. Implementing the Graded Approach at Department of Energy Facilities, Energy Facility Contractors Group, 2002.
7. IAEA. Implementation of a Management System for Operating Organizations of Research Reactors, IAEA-TECDOC-XXX DRAFT C, 2004.
8. Lu, M.H.; Madu, C.N., Kuei, C.; Winokur, D. "Integrating QFD, AHP and benchmarking in strategic marketing", Journal of Business & Industrial Marketing, 1994, 9(1), 41.
9. Aswad, A. "Quality function deployment: a systems approach", Proceedings of the 1989 IIE Integrated Systems Conference, Institute of Industrial Engineers, Norcross, GA, 1989, 27.
10. Armacost, R.T.; Compton, P.J.; Mullens, M.A.; Swart, W.W. "An AHP framework for prioritizing custom requirements in QFD: an industrialized housing application", IIE Transactions, 1994, 26(4), 72.
11. Chuang, P.T. "Combining the analytic hierarchy process and quality function deployment for a location decision from a requirement perspective", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18(11), 842.
12. Kwong, C.K.; Bai, H. "A fuzzy AHP approach to the determination of importance weights of customer requirements in quality function deployment", Journal of Intelligent Manufacturing, 2002, 13, 367.
13. Kwong, C.K.; Bai, H. "Determining the importance weights for the customer requirements in QFD using a fuzzy AHP with an extent analysis approach", IIE Transactions, 2003, 35, 619.
14. Büyüközkan, G.; Ertay, T.; Kahraman, C.; Ruan, D. "Determining the importance weights for the design requirements in the house of quality using the fuzzy analytic network approach", International Journal of Intelligent Systems, 2004, 19, 443.
15. 김승남; 김철홍; 정영배; 김연수. "사용자 요구품질 추출과 분류방법의 개선에 관한 연구", 산업경영시스템 학회지, 2001, 24(67), 77.
16. 조근태. "기술대안의 전략적 평가를 위한 AHP 적용에 있어서 평가자 신뢰성을 고려한 가중치 통합", 경영과

- 학, 2002, 19(2), 139.
17. 김성철; 어하준. "AHP 가중치 결정에서의 다수 전문가 의견종합 방법", 한국경영과학회지, 1994, 19(3), 41.
 18. 박승준; 유승훈; 허재용; Clifford Russell. "퍼지다기준 의사결정기법을 이용한 댐건설영향에 대한 지역주민들의 의견평가", 국토연구, 2003, 38, 107.
 19. 문혜선; 이정동. "국가종합과학기술지수의 도출과 적용: 종합지수를 통한 주요 선진국과의 국가과학기술활동 비교", 기술혁신연구, 2005, 13(1), 1.
 20. 김연성; 박영택; 서영호; 유왕진; 유한주. 품질경영, 박영사, 1999.
 21. 이덕주; 황주호; 김상국; 박광현; 강진수. "AHP를 이용한 수출유망 원자력 기술 분야 선정", 기술혁신연구, 2004, 12(1), 271.
 22. Zadeh, L.A. "Fuzzy Sets", Information and Control, 1965, 8, 338.
 23. Barzilai, J. "Deriving weights from pairwise comparison matrices", J. Oper. Res. Soc., 1997, 48, 1226.
 24. Saaty, T.L. Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process, RWS Publications, Pittsburgh, PA, 1996.
 25. Laarhoven, P.J.M.; Pedrycz, W. "Fuzzy extension for Saaty's priority theory", Fuzzy Sets and Systems, 1983, 11, 229.
 26. Wagenknecht, M.; Hartmann, K. "On fuzzy rank ordering in polyoptimisation", Fuzzy Sets and Systems, 1983, 11, 253.
 27. Buckley, J. "Fuzzy hierarchical analysis", Fuzzy Sets and Systems, 1985, 17, 233.
 28. Chang, D.A. "Application of the extent analysis method on fuzzy AHP", European J. Oper. Res., 1996, 95, 649.
 29. Mikhailov, L. "Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements", Fuzzy Sets and Systems, 2003, 134, 365.
 30. Lee, D.H.; Park, D.H. "An efficient algorithm for fuzzy weighted average", Fuzzy Sets and Systems, 1997, 87, 39.
 31. Zhao, R.; Govind, R. "Algebraic characteristics of extended fuzzy number", Information Science, 1991, 54, 103.