

소프트웨어 품질평가를 위한 정성적 선호이론의 적용

이종무* · 정호원**

An Application of Qualitative Preference to Software Quality Evaluation

Jong Moo Lee* · Ho-Won Jung**

■ Abstract ■

For rational human value judgement and evaluation, provision of clear evaluation data, objective value judgement criteria, and properly generalized evaluation methods are required. For instance, this is true for software quality evaluation, and the measure of software quality and the weighting method of evaluation target directly affect final decisions. However it is not easy to find a generalized method for the software quality evaluation or product selection, because of its complex characteristics. In this paper, we apply the qualitative preference method based on quantitative belief functions to find a general weighting method for the software quality evaluation. In particular, the qualitative preference method, in which the differentiated preference expression is possible, is conceptually expanded for general applications in future. For this purpose, we hierarchically differentiate the strong preference relation from the weak preference relation, and show an example of quantification of software quality evaluation on different applications, by comparing the qualitative preference method with AHP. We believe that the application domain of this method is not limited to the software quality evaluation and it is very useful to apply this results to other SE areas, e.g., metric selection with different views and priority determination of practices to be assessed in the SPICE.

I. 서 론

을바른 소프트웨어의 품질평가를 위해서는 명확하

고 객관적인 방법과 기준의 제공[36]이 요구되며, 제품의 사용목적이나 요구사항 및 표준과의 일치 [13]가 무엇보다 중요하다. 또한 객관적인 평가방

* 한라대학교 경상학부

** 고려대학교 경영학과

법의 적용과 풍부한 선정경험도 함께 요구되지만, 현실적으로 대부분의 사용자들은 이에 관한 지식과 경험이 부족하다[9]. 이를 보완하기 위해 전문가의 판단이나 평가 지식이 소프트웨어 품질평가와 제품선정에 활용될 수 있는데, 이 경우 사용자의 요구사항이나 사용목적과의 일치, 주관적 평가의 객관적 정량화의 확인이 필요하다.

소프트웨어의 평가와 선정문제의 복잡성은 대체로 소프트웨어 제품의 특성에서 비롯된다. Zahedi [36]는 특히 전문가시스템 소프트웨어의 선정문제를 기술하면서 소프트웨어 제품의 짧은 생명주기에서 오는 최신성, 평가 표준의 문제, 그리고 제품의 다양성을 복잡성의 원인으로 지적하였다. 결국 복잡한 특성을 구조적으로 파악하고 이를 객관적인 평가로 연결하기 위해서는, 예를 들어 ISO/IEC 9126(: 소프트웨어 품질특성과 메트릭[21])에서 언급하는 품질모형과 해당특성과 같은 체계적인 품질모형의 이해와 이에 근거한 현실적인 적용이 필요하다. 또한 품질특성의 중요도를 결정하는 방법이 객관적이어야 하며, 체계적인 평가과정[3, 22]을 거쳐 최종 평가결과가 도출되어야 한다. 이를 위해서는 인간의 합리적인 의사도출을 위한 의사결정이론, 효용이론에 입각한 가치 판단이론, 그리고 인공지능 분야의 불확실성에 관한 연구들이 응용될 수 있다.

대부분의 소프트웨어 품질평가 연구에서는 평가 가중치 결정과 관련하여 일정값을 가정하거나, 임의의 우선순위를 이용한 품질평가 결과를 제시하고 있다[2, 4, 8, 10, 28]. 현재 ISO/IEC 9126[20, 21]에서는 평가자의 주관적 판단이나 선호를 객관화하고, 상대적 중요도(: 이하 가중치)를 결정하는 구체적인 방법을 제시하고 있지 않다. 또한 신뢰성이 있는 가중치 결정을 위해서는 평가자의 지식수준과 측정 척도(scale)의 문제를 고려하여 정량적 가중치 결정이 가능한 평가방법이 마련되어야 한다. 예를 들어 단순히 중요도를 숫자나 비율 등의 정량적 값으로 표시한 후 평가대상의 가중치를 결정하는 단순평점 부여(simple rating) 방법[36], 혹은 각 계층 요소간의 이원비교를 통해 상대적 우선순위

를 계산해 내고 이를 상하 계층적으로 다시 영향을 주는 AHP 방법[32, 33] 등을 활용할 수 있다. 그러나 이러한 기수적(cardinal) 척도의 적용을 위해서는 평가자가 정확한 수치나 등간격 혹은 비율 등의 직접적인 선호표시가 가능해야 한다. 또한 평가대상에 관한 지식과 평가자의 주관적 이해수준이 다르고, 소프트웨어의 경우처럼 관점상의 이해가 서로 다른 경우에는, 인간의 보편적인 선호표시 형태인 단순 순위나 언어 형태의 선호[38]를 가중치로 결정할 수 있는 방법이 필요하다. 즉, 서수적(ordinal) 척도의 활용이 가능하고, 소프트웨어 품질평가자가 제시한 정성적인 주관적 선호를 정량적인 객관적 가중치로 연결시켜 줄 수 있는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 정성적 사용자 선호이론[35]을 이용한 가중치 결정방법(: 이하 정성적 선호법)을 살펴보고, 이를 소프트웨어 품질모형에 입각한 특성 평가에 적용해 본다. 구체적으로 제2장에서는 소프트웨어 품질평가를 위한 가중치 결정방법, 특히 정성적 선호법의 특징과 가중치 결정절차, 구체적인 신뢰함수 값 도출의 예를 함께 살펴본다. 그리고 제3장에서는 실제 소프트웨어 품질평가를 위한 서수적선호 자료에 입각한 정성적 선호법의 적용을 자세히 설명한다. 이를 위해서 정성적 선호법을 강약의 차별화된 계층적 선호로 구분 적용하고, 그 결과를 기수적 척도를 활용한 AHP의 경우와 비교해 본다. 또한 가중치 산출의 효과성을 예시하기 위해 기존 소프트웨어 응용영역별 품질특성의 선정 평가에 적용해 보고, 마지막으로 제4장은 향후 소프트웨어 공학적 응용을 위한 연구방향 제시와 결론으로 구성한다.

2. 소프트웨어 품질평가 가중치 결정방법

2.1 가중치 결정방법의 특징

소프트웨어 품질에 관한 평가는 우선 품질모형의 특징에 따른 다양한 기존연구[1, 6, 17]와 다중속

성 의사결정이론에 입각한 다양한 방법론[16, 27, 36]을 참고할 수 있다. 기본적으로 표준 품질모형에 관한 기존 연구[14]로부터 품질특성의 선정, 품질모형과 특성별 자원할당, 지원도구 개발[5, 7, 24], 기타 방법론의 활용과 관련해 정보통신기술, SI 프로젝트 선정[15, 29, 34, 37] 등 매우 다양한 기존 연구가 있다. 특히 품질모형과 특성평가 연구[2, 4, 8, 10, 28]를 참고하면, 대부분의 품질평가에서는 영역별 혹은 환경파의 관계성 등에 따른 부분적 품질특성을 우선 고려하고 있으며, 평가 결과에 직접적인 영향을 미치는 가중치 결정을 중심으로 보면 대부분 기수적 척도에 따른 주관적 평점부여 혹은 전문가에 의한 임의의 정량값을 가정하는 것이 보편화되어 있다. 예를 들면, 소프트웨어 제품, 응용별 사용자 환경간의 관계성을 고려한 연구[10]에서는 임의의 주관적 가중치 기준을 적용한 품질평가를 하고 있다. 또한 장애 관리나 재사용 소프트웨어 등과 같은 구체적인 분야의 일부 품질특성만을 대상으로 한 연구[4, 8]에서도 임의의 주관적 가중치를 적용하고 있다. 일부 ISO/IEC 9126의 품질모형을 이용한 연구[2, 28]에서는 상대적인 하위특성별 가중치를 측정 메트릭의 수에 비례한 단순 평가방법이나 임의의 가중치를 가정해 평가하고 있다.

한편 기존 평가연구에서 참고할 수 있는 대표적인 가중치 결정방법의 예로는 앞서 언급한대로, 기수적 척도를 활용하여 다중속성 의사결정분야에서 유용하게 활용되어온 AHP[31, 32, 33, 38]를 들 수 있다. 다중목표 혹은 다속성 최적안 선정에 관한 연구는 오랜 기간동안 사회과학적 의사결정 분야에서 많은 전척을 이루어 왔다. 특히 시설이나 입지 혹은 자원 평가와 선정에 관한 연구[19, 25]는 경제적 기술적 환경적 그리고 사회적 요소 등을 고려한 다중의사결정의 대표적인 예로 꼽을 수 있다. 다중목표 의사결정 규칙은 개괄적으로 가중치법, 연속제거법, 수학적 프로그래밍법, 기타 공간적 근접법 등으로 구분할 수 있다[27]. 이 가운데 다속성 의사결정 분야에서 흔히 사용되는 의사결정 규칙은 가중치 합계 혹은 선형모형 방법[17]이다. 이는

각 요소의 가치 평가값에 중요도 혹은 가중치를 선형적으로 곱하여 전체 가치를 평가하는 방법으로 사용이 용이한 특징을 갖는다[9, 38]. 이에 근거하여 소프트웨어 품질평가에 활용될 수 있는 객관적인 가중치 결정방법을 간략히 정리해 보면 <표 1>과 같다.

<표 1> 주요 가중치 결정방법의 특징과 예
(Hobb의 연구[19]참조)

| 유형 | 주요 특징과 결정 방법의 예 |
|-----------|--|
| 순위/범주 부여 | <ul style="list-style-type: none"> 평가자의 주관적 중요도에 따른 순위 혹은 범주별 구분, 사용상의 용이성 가중치부여법, 순위합계법, 순위역수법 [16, 36] |
| 평점/비율 부여 | <ul style="list-style-type: none"> 정확한 가중치 결정가능, 직접 평점부여, 평가자의 명확한 전문지식 요구 100만점 비율질문 및 평점할당법[11, 19] |
| 이원비교 | <ul style="list-style-type: none"> 구조적 방법, 1~9 척도 선호, 상대적 이원비교의 가능 전제 AHP방법[31, 32, 33] |
| 효용함수 적 판단 | <ul style="list-style-type: none"> 효용함수적 무차별 상쇄이론 근거, 현실의 제한적 가정의 한계, 주관적 판단의 일관성을 가정, 효용가치에 의한 가중치 결정[16, 19] |
| 선호측정 | <ul style="list-style-type: none"> 주관적인 사용자의 선호 표현에 근거 정성적 선호법[35] |
| 우위기준 | <ul style="list-style-type: none"> 비용과 같은 경제적 우위기준 비교 비용기준의 우위 비교방법[17] |
| 나열비교 | <ul style="list-style-type: none"> 사전식 나열에 따른 상대적 비교방법 사전편찬식 나열방법(lexicographic)[17] |

순위법이나 범주부여법에서는 중요도에 따라 예를 들어 0부터 10사이의 점수를 부여한다. 두 방법은 모두 사용상 용이한 장점이 있으나 평가자간의 주관적 판단의 일관성이나 이론적 타당성 여부 등의 문제가 있다. 반면에 평점부여법은 정확한 가중치 결정이 가능하나 정확한 평가자의 지식이 요구되므로 일반적 적용에는 어려움이 있다. 이에 비해 AHP 방법과 같은 비율질문법은 구조적 특징이 있고 객관적 가중치 결정이 가능해 일반적으로 많이 선호된다. <표 1>의 예시된 방법 이외에도 다양한 가중치 결정방법들[19]이 있으나, 이를 대부분의 공통된 특징은 가중치의 결정이 효용 함수적 개념을 활용한 평가자의 정량적 가치표현에 의존하여, 평가대상의 수가 많아지면 이용이 복잡해지는 문

제가 있다.

현실적으로 평가자들의 정량적 가치 표현이 가능한 경우도 있지만, 상호 가치비교가 애매한 경우나 정확히 모르는 경우가 대부분이다. 이러한 경우에는 불확실한 의사결정의 문제로 귀착되며, 따라서 이를 정량적 평점부여나 이원비교, 효용 함수적 결정방법들의 획일적인 채택만으로 해결하는 것은 결코 바람직하지 못하다. 특히 소프트웨어의 경우처럼 복잡한 제품특성으로 인해 품질평가나 제품 선정이 쉽지 않은 경우에는 가중치의 결정방법이 최종결과에 결정적인 영향을 끼치게 되므로, 가중치의 객관적 정량화가 가능한 결정방법의 선택은 매우 중요하다. 유일한 최상의 가중치 결정방법의 선택은 어렵지만, 평가선정의 목표와 여건 그리고 제공정보의 정도에 따라 보다 합리적인 방법의 선택은 가능할 것이다.

본 연구에서는 소프트웨어 품질평가의 특징[21]을 고려하고 평가자의 다양한 관점과 수준[22]에 관계없는 합리적인 평가를 전제로 하여, 현실적으로 요구되는 정성적 평가에 가장 적합한 선호 측정 방법을 활용하고자 한다. 특히 서수적 척도에 입각하여 주관적 판단정보를 합리적인 정량화 과정을 통해 가중치로 쉽게 환산할 수 있는 정성적 선호법을 도입하여 기존의 방법과 비교해보고, 소프트웨어의 경우처럼 기수적 척도뿐만 아니라 서수적 척도에 의한 정성적 평가가 필요한 경우에도 합리적인 가중치 도출이 가능한 방법을 찾아본다.

2.2 정성적 선호법의 주요 내용

Wong과 Lingras의 정성적 선호법은 신뢰함수 (belief function)에 입각하여 주관적 선호를 객관적 수치로 정량화 할 수 있는 특징을 갖고 있다. 이는 주관적 판단에 의한 가중치 결정방법인 선호법의 한 유형으로서, 평가자로 부터 주관적 선호관계만을 입력받아 이를 상대적인 가중치로 환산하여 정량적 평가를 가능케 한다. 일반적으로 사람들은 자신의 신뢰나 믿음에 관한 정도를 정확히 표현하는데 많은 어려움을 느낀다. 특히 주관적 판단을 정

량화 하여 수치로 직접 표현하기는 상당히 어렵다. 이러한 점에서 주관적 선호표시만으로 객관적 가중치 결정이 가능한 정성적 선호법은 인간의 의사 결정에 유용하게 활용될 수 있다. 그 주요 내용은 신뢰함수와 기초확률 할당값(basic probability assignment ; bpa)[35], 그리고 선호관계의 표현 등으로 요약 설명할 수 있다

(1) 신뢰함수와 bpa

일반적인 확률적 방법이론으로는 표본 도수에 의해 실제 확률을 추정하는 객관적 도수 해석방법과 주관적 신뢰도에 의한 베이지안 접근방법이 있다. 전자의 방법은 객관적 도수자료의 이용이 가능한 일반적인 의사결정에 두루 사용되고, 후자의 방법은 전문가의 신뢰도를 바탕으로 비교적 간단한 의사결정에 주로 이용된다. 그러나 대부분의 의사결정은 다양하고 복잡한 특징을 가지므로 확률론적 접근방법만으로는 해결이 불가능하다. 따라서 계층적 트리 구조상의 가설 공간(hypothesis space)에 대한 사전 확률과 유사율(likelihood ratio)을 이용한 Pearl의 방법과 신뢰함수와 증거이론(evidence theory)에 의한 Dempster-Shafer의 방법[18,30]들이 등장하였다. 이는 불확실성을 수용하고 베이지안 확률이론을 보완하기 위한 것이다. 증거이론에서는 구간(interval)의 개념이나 확률이론과는 다른 확률 개념을 도입 사용한다 즉, 확률이론과 달리 가설 h 의 진리 여부에 관한 확률 $p(h)$ 와 $p(\neg h)$ 의 합은 반드시 1일 필요는 없다.

신뢰함수에서는 예를 들어 한 문제에 대한 가능한 해들의 집합을 T 라고 하고, 이 가운데 어느 한 해가 질문에 대한 정답임을 가정한다. 여기서 T 를 인식영역(discernment frame)이라고 한다. 만일 $T = \{t_1, \dots, t_n\}$ 라 가정하고 이를 n 개의 각 해 $t \in T$ 에 관한 신뢰의 정도를 알아내려고 한다면, bpa 는 $m : 2^T \rightarrow [0, 1]$ 과 같은 함수로 정의 할 수 있다 [18,30,35]. 만일 부분집합 $S \subseteq 2^T$ 의 bpa 값이 양수이면, 이러한 S 를 전체 2^T 에 영향을 주는 중요 부분집합이라는 의미에서 중심요소(focal element)라고 하고, 전체 중심요소 집합 S 의 각 요소 S_i 에 대한

bpa $m(S_i)$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$m(\emptyset) = 0, \sum_{S_i \in 2^T} m(S_i) = 1.$$

여기서 $m(S_i)$ 값은 각 중심요소 S 를 증거 전체에 대하여 정답이라고 믿는 확신의 정도, 즉 가중치를 나타내는 것으로 해석할 수 있다[12,36]. 그리고 중심요소 S 에 대한 신뢰함수 $Bel(S)$ 의 값은 bpa 즉, $m(S_i)$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$Bel(S) = \sum_{S_i \in S} m(S_i).$$

중심요소에 대한 증거의 신뢰 정도는 앞서 말한 대로 구간으로 표시하는데, 하한값은 신뢰함수값 $Bel(S)$ 으로 상한값은 가능값(plausibility) $Pls(S)$ 로 정의하여 사용한다.

$$Pls(S) = 1 - Bel(\neg S).$$

(2) 정성적 선호의 표현

평가자가 주관적 선호를 수량화하여 표현하는데 익숙치 않은 경우, 이를 확률값으로 나타내기는 더욱 어렵다. 이 때 증거이론의 신뢰함수를 이용하면 한 요소가 다른 요소보다 더 중요하거나 혹은 선호됨을 쉽게 표현할 수 있다. 정성적 선호법에서는 선호관계의 표현(: 이하 선호명제)[35]을 위해 이진적(binary) 관계기호 $\cdot >$ 와 무차별(indifference) 관계기호 \sim 를 사용한다.

예를 들어 인식영역 T 의 부분집합 $A, B \subseteq 2^T$ 에 대하여 평가자의 선호명제가 $A \cdot > B$ 로 표시되면, 이는 평가자가 문제에 대한 가능한 해 가운데 A 가 B 에 비하여 정답일 것이라고 믿는 정도가 크다 혹은 더 선호된다는 의미이다. 또한 상호 관계가 동일하게 정답으로 믿어지는 즉, 동일한 선호명제의 경우에는 $A \sim B$ 로 표시한다. 이상의 두 선호명제는 다음과 같이 재 정의할 수 있다.

$$A \sim B \leftrightarrow (\neg(A \cdot > B)) \& (\neg(B \cdot > A)).$$

그리고 이진적 관계기호에 의한 선호명제는 정리[29]에 의해 다음과 같은 신뢰함수의 관계로 나

타낼 수 있다. 이는 정성적 선호명제가 신뢰함수를 통해 수치에 의한 정량적 선호로 대체될 수 있음을 뜻한다.

$$A \cdot > B \leftrightarrow Bel(A) > Bel(B).$$

정성적 선호법의 또 다른 특징은 선호명제의 표현에서 다중적 선호구조[35]가 가능하다는 점이다. 예를 들어 A 를 B 보다 선호하는 정도가 C 를 D 보다 선호하는 정도보다 더욱 크다면 다음과 같은 다중적 선호 구조로 표현할 수 있다. 이는 만일 B 와 D 가 같은 중요도를 갖는다면 분명히 A 는 C 보다 더 큰 중요도를 가져야 함을 의미한다.

$$Bel(A) - Bel(B) > Bel(C) - Bel(D).$$

이와 아울러 평가자의 구체적인 수치에 의한 정량적 선호표시도 가능하다. 예를 들어 E 에 관한 신뢰정도가 0.5보다 큰 값으로 확신할 수 있다면, $Bel(E) > 0.5$ 와 같이 표현할 수 있다. 이는 불명확한 관계뿐만 아니라 구체적이고 명확한 선호명제를 결합시켜 정량화할 수도 있음을 의미한다.

이처럼 정성적 선호법은 예를 들어 비율질문방법과는 달리, 비교 혹은 평가 대상요소들의 1 대 1 비교뿐 아니라 1 대 m 혹은 m 대 n , 즉 복수의 요소들로 구성되는 그룹간의 계층적인 강한 선호비교도 가능한 특징을 갖는다. 따라서 관계요소의 수가 많은 경우라도 유연하게 사용될 수 있는 장점을 있으며, 이에 관한 계층적 선호의 설명과 품질평가를 위한 적용은 3장에서 기술한다.

2.3 정성적 선호법의 가중치 결정의 예

(1) 중심요소의 구분과 결정 절차

정성적 선호법의 적용을 위해서는 우선 중심요소와 신뢰함수의 구분이 선행되어야 하며, 이를 바탕으로 상대적인 가중치의 결정이 가능해 진다. 기본적으로 중심요소는 다음의 보조정리[35]를 기준으로 구분되어 진다. 만일 $A, B \subseteq 2^T$ 와 $B \subset A$ 를 만족하는 인식영역 T 의 부분집합 A, B 에 대해

여 $A \sim B$ 의 동일 선호명제가 표현된다면 다음 정리에 근거하여, 부분집합 A 는 중심요소가 아니다.

보조정리 : $Bel : 2^T \rightarrow [0,1]$ 를 신뢰함수라 하고 만일 A 가 중심요소이면, 모든 $B \subset A$ 에 대하여 $Bel(A) > Bel(B)$ 가 성립 한다.

예를 들어 선호명제가 $\{t_1\} \cdot > 0$, $\{t_1, t_2\} \cdot > \{t_1\}$, $\{t_3\} \cdot > \{t_4\}$, $\{t_3\} \sim \{t_2\}$, $\{t_2, t_3\} \sim \{t_3\}$ 등으로 주어 졌다면, 보조정리에 따라 중심요소는 $\{t_2, t_3\}$ 을 제외한 $\{t_1\}$, $\{t_1, t_2\}$, $\{t_2\}$, $\{t_3\}$, $\{t_4\}$ 의 5가지이다. 이러한 중심요소의 구분이 선행된 후, 구체적인 가중치값 도출을 위한 bpa 의 결정은 4개 절차와 하위 단계 [35]의 적용을 통해 이뤄진다. 이에 관한 구체적인 bpa 의 행렬연산과 선호명제의 표시, 그리고 균등알고리즘과 인식알고리즘[35]의 적용에 관한 내용은 다음과 같이 요약해 볼 수 있다.

① 절차 1 : bpa 의 행렬연산 표시

bpa 값의 결정은 평가자에 의해 표현된 선호명제의 중심요소를 다음과 같은 행렬로 표시함으로서 쉽게 할 수 있다. 만일 k 개의 중심요소가 존재하면 각 선호명제는 k 비트의 튜플(tuple) 즉, $1*k$ 행렬로 나타낼 수 있다. 해당 선호명제가 만일 i 번째 중심요소를 포함하고 있으면 튜플의 i 번째 비트의 값을 1로, 포함하고 있지 않으면 0을 부여한다. 이렇게 표시된 선호명제들은 행렬의 연산으로 표시될 수 있다. 위 예와 정의를 이용하면 bpa 값은 아래와 같이 표시된다. 그리고 이 가운데 한 중심요소 $\{t_1, t_2\}$ 의 신뢰함수값은 다음과 같은 행렬로 나타낼 수 있다.

$$bpa = [m(\{t_1\}) \ m(\{t_1, t_2\}) \ m(\{t_2\}) \ m(\{t_3\}) \\ m(\{t_4\})]^T.$$

$$Bel(\{t_1, t_2\}) = [11100] \cdot [m(\{t_1\}) \ m(\{t_1, t_2\}) \\ m(\{t_2\}) \ m(\{t_3\}) \ m(\{t_4\})]^T.$$

② 절차 2 : 선호명제의 E, IE 행렬 표시

각 선호명제들은 불균등(inequality) 혹은 균등(equality) 선호 즉, $A \sim B \rightarrow Bel(A) = Bel(B)$ 혹은

$A \cdot > B \rightarrow Bel(A) > Bel(B)$ 중의 하나로 표시할 수 있다. 이를 bpa 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$[(A - B) \cdot bpa = 0, \text{ for all } A \sim B] \text{ 혹은} \\ [(A - B) \cdot bpa > 0, \text{ for all } A \cdot > B].$$

그리고 선호명제들의 연산을 위하여 이를 행렬연산 균등행렬(equality matrix : E)과 불균등행렬(inequality matrix : IE)로 정의해 보면 다음과 같다.

$$E_i = (A - B), \text{ for all } A \sim B, A, B \in 2^T.$$

$$IE_i = (A - B), \text{ for all } A \cdot > B, A, B \in 2^T.$$

여기서 E_i 와 IE_i 는 각각 E 와 IE 의 i 번째 행을 의미한다.

③ 절차 3 : 균등 알고리즘의 적용

이제 선호명제들의 간소화를 위하여 E 와 IE 의 행렬에 가우스 소거법을 적용한다. 이를 자세히 설명하면 다음과 같은 3단계의 균등 알고리즘(equality algorithm)[35]으로 나타낼 수 있다.

단계 1 : 모두 0값만을 가지는 행을 제거한다. 그리고 E 와 IE 로부터 중복되는 행은 제거한다.

단계 2 : E 의 모든 행에 대하여 다음을 수행한다.

a) 만일 i 번째 행의 모든 요소가 0으로 구성되면 i 행을 제거하고, 제거한 행의 수만큼 E 행의 수를 줄인다.

b) E 의 i 번째 행의 모든 요소가 양수가 아니거나 혹은 음수가 아닐 때 E 로부터 0이 아닌 j 번째 해당 열을 확인하여, E 와 IE 로부터 j 번째 열을 제거한다. 그리고 bpa 로부터 해당 j 번째 해당 행을 제거하고, 제거한 수만큼 E 와 IE 의 열의 수를 줄인다.

c) 만일 해당사항이 없으면 E 의 i 번째 행에서 첫 번째 0이 아닌 k 번째 요소를 확인한다. 그리고 k 번째 중심요소를 제거하기 위하여 가우스 소거법을 사용한다.

단계 3 : 중복된 행을 제거하고, E 와 IE 로부터 모든 요소가 0인 행을 제거한다.

④ 절차 4 : 인식 알고리즘의 적용

균등 알고리즘을 통해 E 와 IE 를 간소화한 후 인식 알고리즘(perceptron algorithm)[35]을 통해 bpa 의 값을 결정할 수 있다. 인식 알고리즘은 간소화된 E 와 IE 를 이용하여 중심요소들의 가중치가 모두 얻어질 때까지, 반복과정을 통하여 bpa 를 누적 증가시킨다. 이러한 인식 알고리즘은 다음의 4가지 세부단계의 완성으로 종료된다.

단계 1 : bpa 의 모든 값, 즉 $m(S_i)$ 에 0값을 부여한다. 이를 bpa_0 이라 한다.

단계 2 : IE 의 모든 행에 대하여 누적조건($IE_i \cdot bpa_i > 0$)을 만족할 때까지 bpa 행렬을 반복 누적한다. i 번째 반복과정을 거친 bpa 를 bpa_i 라 하면, 다음의 공식에 의해 최종 bpa 값을 결정한다.

$$bpa_{i+1} = bpa_i + \sum_{IE_i \cdot bpa_i \leq 0} IE_i$$

단계 3 : E 행렬을 단계 2에서 구한 값으로 치환하고 나머지 $m(S_i)$ 을 계산한다.

단계 4 : bpa 의 값을 정규화하여 상대적 가중치와 신뢰함수값을 결정한다.

(2) 가중치 결정의 예

상기의 선호명제를 중심으로 정성적 선호법을 적용하여, 상대적 가중치 결정을 위한 bpa 도출을 설명해 보면 다음과 같다.

① 절차 1 - bpa 의 행렬연산 표시

2.3 (1)절에서 예시한 선호명제들의 bpa 및 Bel 을 식으로 나타내면, Bel 은 5개의 중심요소에 대한 bpa 의 행렬연산 곱[35]으로 표시할 수 있다.

$$Bel = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot bpa, \quad bpa = \begin{bmatrix} m(\{t_1\}) \\ m(\{t_1, t_2\}) \\ m(\{t_2\}) \\ m(\{t_3\}) \\ m(\{t_4\}) \end{bmatrix}$$

② 절차 2 - 선호명제의 E , IE 행렬 표시

주어진 선호명제에 따라 E 와 IE 를 구성하면 다

음과 같다. 정의에 의해 $E(0)$ 는 세 번째와 네 번째 중심요소 즉, $m(\{t_2\})$ 와 $m(\{t_3\})$ 의 해당 튜플 원소 값의 차이로 구성된다. $IE(0)$ 도 선호명제의 정의대로 각각 구성되는데, $IE(0)$ 의 세 번째 이후 행들은 $m(\{t_1, t_2\})$, $m(\{t_2\})$, $m(\{t_3\})$, $m(\{t_4\})$ 의 비음수 조건을 만족시키기 위해 삽입한 것이다[35].

$$E(0) = [001 -10], \quad IE(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

③ 절차 3 - 균등 알고리즘의 적용

이상의 $E(0)$ 와 $IE(0)$ 를 가지고 균등 알고리즘을 적용한다.

단계 1의 경우 해당이 없으므로, 이어 단계 2를 적용한다. $E(0)$ 행렬은 한 개의 행으로 구성되므로 행의 요소 가운데 0이 아닌 첫 번째 요소를 확인하면 세 번째 요소이다. 따라서 $IE(0)$ 로부터 세 번째 열을 제거하기 위한 가우스 소거 연산을 행하면 다음과 같은 $IE(1)$ 이 나타난다. 이때 $IE(1)$ 의 세 번째 열은 모두 0이고 다섯 번째 행과 여섯 번째 행이 중복됨으로 이를 제거하면 $IE(2)$ 와 같은 최종 불균등 행렬을 얻게된다 그리고 단계 2-b)에 의해 5 by 1 행렬인 bpa 의 세 번째 행 즉, $m(\{t_2\})$ 을 제거하고 4 by 1 행렬로 bpa' 를 재구성한다. 단계 3은 해당이 없으므로 다음 인식 알고리즘을 적용한다.

$$IE(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$IE(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad bpa' = \begin{bmatrix} m(\{t_1\}) \\ m(\{t_1, t_2\}) \\ m(\{t_3\}) \\ m(\{t_4\}) \end{bmatrix}$$

④ 절차 4 - 인식 알고리즘의 적용

간소화된 $IE(2)$ 와 재구성된 bpa' 를 이용하여 단

계 1과 단계 2를 적용하면 bpa 의 값은 다음과 같다. bpa_2 는 $IE(2)$ 의 각 열별 합계값 1, 2, 3, 0의 값을 갖는다. 그리고 bpa_3 은 누적조건에 해당되는 $IE(2)$ 의 여섯 번째 행의 값 즉, [0 0 0 1]을 합하여 얻을 수 있다. 여기서 bpa_3 의 값은 더 이상 누적조건에 해당되는 않으므로 최종 기초확률 할당값으로 결정한다.

$$bpa_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, bpa_2 = bpa_1 + \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$bpa_3 = bpa_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

최종적으로 $m(\{t_1\})$, $m(\{t_1, t_2\})$, $m(\{t_2\})$, $m(\{t_3\})$ 은 각각 1, 2, 3, 1이며, $E(0)$ 에 의해 $m(\{t_2\}) = m(\{t_3\}) = 3$ 이다. 이와 같은 최종 bpa 값 1, 2, 3, 3, 1은 각각 $\{t_1\}$, $\{t_1, t_2\}$, $\{t_2\}$, $\{t_3\}$, $\{t_4\}$ 의 상대적인 중요도를 정량화한 것이다. 즉, $\{t_1\}$ 의 중요도가 1일 때 각각 $\{t_1, t_2\}$, $\{t_2\}$, $\{t_3\}$, $\{t_4\}$ 의 중요도는 2, 3, 3, 1로 표시될 수 있음을 의미한다. 그리고 마지막으로 단계 4의 정규화를 거치면 5개 중심요소간의 상대적인 중요도, 즉 가중치는 다음의 bpa'' 와 같이 결정된다.

$$bpa = \begin{bmatrix} m(\{t_1\}) \\ m(\{t_1, t_2\}) \\ m(\{t_2\}) \\ m(\{t_3\}) \\ m(\{t_4\}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}, bpa'' = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.3 \\ 0.1 \end{bmatrix},$$

$$Bel = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1+0.2+0.3 \\ 0.3 \\ 0.3 \\ 0.1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.6 \\ 0.3 \\ 0.3 \\ 0.1 \end{bmatrix}.$$

3. 소프트웨어 품질평가를 위한 계층적 선호의 적용

앞서 언급한대로 대부분의 소프트웨어 품질평가

에서는 모든 품질특성을 고려한 평가보다는 영역별 혹은 환경과의 관계성 등에 따라 부분적인 품질특성을 우선 고려하고 있다. 특히 응용분야에 따라서는 일부 동일한 품질선호도 가능하지만, 대부분 차별적인 품질선호의 적용이 나타나는 것이 일반적이다[10]. 예를 들어, 경영관리 분야의 소프트웨어의 경우에는 사용성과 이식성이 ISO/IEC 9126 [20, 21]상의 다른 4개 주품질특성보다 우선 중요시 될 수 있다[26].

만일 주품질특성 사용성만이 경영관리용 소프트웨어의 품질평가에서 우선 고려된다면, 하위의 4개 부품질특성[21] 즉, 이해성(Understandability ; Un), 학습성(Learnability : Le), 운용성(Operability ; Op), 그리고 호감성(Likability ; Li)의 상대적 중요도 즉, 가중치에 따른 선별적인 특성 선정[5]과 해당 매트릭의 개발과 적절한 측정 및 절차[3, 22]에 따른 평가가 요구된다

본 연구의 사례 적용에서는 이러한 소프트웨어 품질평가를 위한 표준 지침[22]에 근거한 품질특성의 평가와 선정에 적합한 선호유형과 가중치 결정방법을 살펴본다. 우선 정성적 선호법의 유용성과 특징의 이해를 위해, 소프트웨어 주품질특성 사용성의 하위 부품질특성에 관한 품질선호를 바탕으로, 계층적 선호에 따른 정성적 선호법과 이원비교에 의한 AHP방법을 각각 동일한 평가에 비교 적용해 본다. 이를 위해서 응용 시스템 개발경험이 있는 소프트웨어 공학 전문가 2인에게 공통으로 질문하여 합의된 선호를 바탕으로 결과값을 도출하여, 보다 유연한 가중치 결정과 소프트웨어 품질평가 가능성 찾아본다. 최종적인 4개 부품질특성의 가중치는 일반적인 서수적 선호표시에 따른 기존 응용영역별 선호값을 상위 6개 주품질특성에 대하여 적용하여 도출한 후, 상호 비교해 본다.

3.1 계층적 선호의 구분과 가중치 결정

신뢰함수를 이용하여 평가자의 주관적 선호를 정량화할 수 있는 정성적 선호법은 개별 속성간의

일반적인 약한 정성적 선호뿐만 아니라, 다수속성의 그룹별 비교선호를 통한 강한 정성적 선호의 정량화도 가능하다. 여기서 약한 선호관계란 각 개별 속성의 선호관계만을 1 대 1로 단순히 비교하여 일반적인 강도의 가중치를 표현하는 경우를 의미한다. 이에 비해 강한 선호관계는 1 대 m 혹은 m 대 n의 복수의 속성들의 선호를 통해 상대 속성의 중요도를 강조하려는 경우에 해당된다. 본 절에서는 이를 각각 실제 평가자 합의에 의한 주품질특성 사용성 하위의 4개 부품질특성에 관한 다음과 같은 선호를 이용하여, 이를 정성적 선호법의 강약의 선호관계(: 이하 계층적 선호관계)로 구분해 설명한 후 가중치를 결정해 제시한다.

평가자 합의에 의해 제시된 선호는 <표 2>와 같으며, 이 가운데 (1)~(4)의 선호는 모두 개별 품질특성에 입각한 언어적 형태[38]의 단순 선호이고, (5)는 복수 품질특성에 관한 차별적인 선호이다. 이에 정성적 선호법을 적용하면 (1)~(4)의 선호는 약한 선호관계로, (5)는 추가적인 강한 선호관계로 구분해 볼 수 있다. (실제로 (5)의 선호는 특정 평가자 1인에 의해 제시된 것으로, 본 절에서는 강한 선호의 경우 공통적으로 합의된 다른 선호에 추가해 설명한다). 이를 앞서 설명한 일반적인 균등, 불균등한 정성적 선호표현으로 바꾸어 정리해보면 <표 3>과 같다. <표 3>의 약한 선호관계

<표 2> 부품질특성에 관한 언어적 선호의 예

| 소프트웨어 부품질특성에 관한 언어적 선호 표시의 예 | 선호구분 |
|---|------|
| (1) “4개 부품질특성 가운데 소프트웨어 사용을 위한 손쉬운 이해성이 단계적인 학습효과성보다 높아야 한다” | 약한선호 |
| (2) “소프트웨어 사용상의 호감성의 중요도는 학습성보다는 덜 중요하다” | 약한선호 |
| (3) “학습성과 사용상의 운용성의 중요도는 유사하지만 상대적으로 어느정도 중요 한가는 판단하기가 불명확하다” | 약한선호 |
| (4) “이해성에 대한 중요도는 소프트웨어 호감성에 대한 것보다 더 중요시해야 한다” | 약한선호 |
| (5) “전반적으로 사용상의 높은 이해성은 예를 들어 학습성이나 호감성보다는 훨씬 더 중요하다” | 강한선호 |

(1)은 <표 2>의 (1)~(3)의 선호를, 약한 선호관계 (2)는 (4)를, 그리고 강한 선호관계는 (5)를 추가적으로 적용한 결과이다.

<표 3> 계층적 선호관계의 예

| 선호 종류 | 약한선호관계 (1) | 약한선호관계 (2) | 강한선호관계 |
|-------|--------------------------------|---|--------------------------------|
| 불균등 | {Un} · > {Le} {Le} · > {Li} | {Un} · > {Le} {Le} · > {Li} {Un} · > {Li} | {Un} · > {Le} {Le} · > {Li} |
| 균등 | {Le} ~ {Op} | {Le} ~ {Op} | {Le} ~ {Op} |

(1) 약한 정성적 선호의 경우

<표 3>과 같이 주어진 사용자 선호관계로부터 다음과 같은 BEL과 bpa를 정의할 수 있다. 앞서 설명한 균등알고리즘과 인식알고리즘을 적용하면 약한 선호관계의 가중치를 결정해 낼 수 있다.

$$Bel = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, bpa = \begin{bmatrix} m(\{U_n\}) \\ m(\{L_e\}) \\ m(\{O_p\}) \\ m(\{L_i\}) \end{bmatrix}.$$

초기의 균등, 비균등행렬은 다음의 E(0)와 IE(0)과 같이 구성되며, 균등알고리즘에 의한 간소화된 결과는 다음의 IE(1)과 IE(2), 그리고 bpa'와 같다.

$$E(0) = [0 1 -1 0], \quad IE(0) = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$IE(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad IE(2) = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$bpa' = \begin{bmatrix} m(\{U_n\}) \\ m(\{O_p\}) \\ m(\{L_i\}) \end{bmatrix}.$$

그리고 인식알고리즘에 의한 bpa값은

$$bpa_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad bpa_2 = bpa_1 + \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$bpa_3 = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \dots, bpa_7 = bpa_6 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix},$$

과 같이 계산된다.

이 때 주어진 균등행렬에 의하여 $m(\{Le\}) = m(\{Op\}) = 1$ 으로, 최종 bpa 는 $[3 \ 2 \ 2 \ 1]^T$ 가 된다. 여기서 평가의 일관성 확인과 관련하여 추가적인 예를 들 수 있다(<표 3> 약한 선호관계(2) 참조). 만일 위의 선호에 평가자가 또 다른 선호 $\{Un\} \succ \{Li\}$ 를 추가하였다면, 해당 bpa 는 앞서의 경우와 동일한 결과를 유지하여야 한다. 왜냐하면 추가된 선호는 앞서의 불균등선호($\{Un\} \succ \{Le\}$ 와 $\{Le\} \succ \{Li\}$)로 부터 추론해 낼 수 있기 때문이다. 이 경우 최종 bpa 결과는 다음과 같이 동일한 값으로 나타난다. 따라서 불필요한 일관성의 확인은 정성적 선호법에서는 특수한 경우가 아니면 요구되지 않음을 알 수 있다.

$$E(0) = [0 \ 1 \ -1 \ 0], \ IE(0) = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$IE(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \ IE(2) = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$bpa' = \begin{bmatrix} m(\{U_n\}) \\ m(\{O_p\}) \\ m(\{L_i\}) \end{bmatrix}.$$

$$bpa_2 = bpa_1 + \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \dots,$$

$$bpa_6 = bpa_5 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}, \ bpa = \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

이상의 최종 도출된 bpa 의 값을 정규화를 해보면, 4개 부품질특성의 가중치는 각각 0.375, 0.25,

0.25 그리고 0.125이다.

(2) 강한 정성적 선호의 경우

만일 다수속성의 계층별 비교선호가 <표 3>에서와 같이 추가로 $\{Un\} \succ \{Le, Li\}$ 이 주어졌다 면, 이 경우의 Bel 및 bpa 의 값은 다음과 같이 변한다. 추가된 선호는 앞서의 일반적인 약한 선호에 비해 상대적으로 보다 강한, 즉 높은 선호를 나타낸다 의미한다.

$$Bel = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot bpa, \ bpa = \begin{bmatrix} m(\{U_n\}) \\ m(\{L_e\}) \\ m(\{L_e, L_i\}) \\ m(\{O_p\}) \\ m(\{L_i\}) \end{bmatrix}.$$

$$E(0) = [0 \ 1 \ 0 \ -1 \ 0], \ IE(0) = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$IE(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$IE(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \ bpa' = \begin{bmatrix} m(\{U_n\}) \\ m(\{L_e, L_i\}) \\ m(\{O_p\}) \\ m(\{L_i\}) \end{bmatrix}.$$

$$bpa_2 = bpa_1 + \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \ bpa_3 = \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}, \dots,$$

$$bpa_{11} = bpa_{10} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}, \ bpa = \begin{bmatrix} 5 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

최종적으로 얻은 bpa 값을 바탕으로 개별 부품질특성의 상대적인 가중치를, 정규화를 통해 계산해 보면 각 부품질특성의 가중치는 0.5, 0.2, 0.2 그리

고 0.1 등으로 결정된다.

3.2 정성적 선호법과 AHP 적용결과의 비교

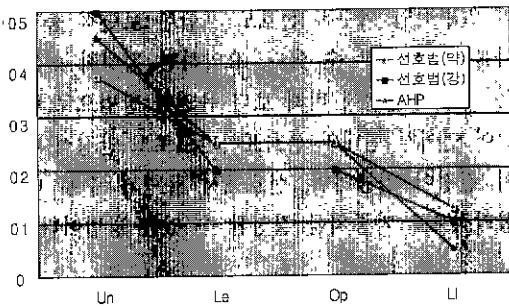
소프트웨어 품질평가를 위한 가중치 결정방법 가운데 품질모형의 품질특성을 반영하기 쉬운, 대중속성 의사결정이론의 대표적인 방법[16, 27, 36]으로는 AHP[31, 32, 33, 38]를 들 수 있다. 기본적으로 이 방법을 응용한 연구는 앞서 언급한대로, 표준 품질모형, 특성의 선정, 자원 할당, 지원도구 개발 등[5, 7, 14, 15, 24, 29, 34, 37]의 다양한 영역에서 찾아 볼 수 있으나, 대부분의 경우 해당 가중치의 결정은 기수적 척도에 따른 주관적 평점부여 혹은 전문가에 의한 임의의 정량값을 제시받아 활용되는 것이 일반적이다. 특히 기수적 척도를 활용한 대표적인 이원비교 가중치 결정방법의 하나인 AHP는 문제의 계층적 구조와 손쉬운 이원비교에 의한 정량적 가중치 결정의 용이함 등의 장점 때문에 많이 활용되고 있다[1, 5, 36].

본 절에서는 소프트웨어 및 정보시스템 평가에서 일반적인 방법으로 활용되는 AHP방법을 본 사례에 적용시켜, 그 결과를 앞서 도출한 정성적 선호법에 의한 결과와 비교해 상대적인 특징을 살펴본다. 그러나 AHP적용을 위해서는 <표 2>에서 제시한 평가자들의 서수적 선호를 직접 반영할 수 없으므로, 소프트웨어 주품질특성 가운데 사용성에 한정된 하위 4개 부품질특성에 관한 선호를 앞서 제시한 <표 2>의 자료를 바탕으로 동일 평가자에게 이원비교에 의한 비율로 평가하도록 한 후, 해당 가중치를 도출하였다. 이러한 AHP방법을 적용한 결과 가중치를 정리해 보면, Un, Le, Op 그리고 Li의 중요도는 각각 0.45, 0.25, 0.25, 그리고 0.05 이다(<표 4> 참조).

<표 4> 부품질특성간의 이원비교표

| | Un | Le | Op | Li | 가중치 |
|----|--------|-----|-----|----|------|
| Un | 1 | 1.8 | 1.8 | 9 | 0.45 |
| Le | 0.5556 | 1 | 1 | 5 | 0.25 |
| Op | 0.5556 | 1 | 1 | 5 | 0.25 |
| Li | 0.1111 | 0.2 | 0.2 | 1 | 0.05 |

가중치 산출의 예시를 위해 제시한 두 가지 선호관계와 AHP의 적용 결과를 비교해 보면 [그림 1]과 같다. 강한 선호표시의 경우에는 약한 선호에 비하여 부품질특성 이해성의 상대적 선호도의 결과가 3에서 5로 (가중치는 0.375에서 0.5로) 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 당연한 결과로 평가자가 적절히 구분해 표현한 강약의 선호에 따라, 해당 가중치가 조절되는 정성적 선호법의 특징을 보여주는 것이다.



[그림 1] 계층적 선호와 AHP 적용 결과

AHP에 의한 가중치 결과는 약한 선호관계만을 고려한 경우보다는 크지만, 강한 선호관계를 함께 고려한 결과보다는 상대적으로 작은 값으로 나타났다. 이는 1-9 비율의 척도를 사용함으로서 정성적 선호법의 평균적 가중치에 비해서 상, 하위 가중치간의 간격이 조금 크게 나타난 결과로 볼 수 있다([그림 1] 참조). 결과적으로 정성적 선호작용의 경우와 AHP의 적용결과는 본 사례에 적용한 비율척도에서 기인하는 절대값의 차이가 있을 뿐, 상대적인 중요도 관점에서 보면 동일한 결과를 나타낼 수 있다.

그러나 일반 제조상품과 달리 무형의 특징과 개발상의 복잡성 등의 특징을 갖는 소프트웨어의 경우, 실제로 짧은 시간 내에 전문지식이 부족한 일반 사용자들이 기수적 척도를 통해 직접적인 선호로 표시해 내기는 그리 쉽지 않다. 왜냐하면 <표 2>와 같은 언어적 형태가 아닌 비율 혹은 등간 척도 등에 따른 평가를 위해서는, 사전에 외부 품질

특성에 관한 확고한 이해가 갖춰지고, 척도로서 사용되는 수나 비율에 대한 개념이 일치하는 것으로 가정되어야 하기 때문이다. 실제로 본 사례적용의 경우에도 평가자에 따라 기수적 선호활용의 어려움을 표시한 경우가 나타난 바 있다. 이에 비해 만일 정성적 선호법의 경우 더욱 강한 복수의 그룹 선호 관계를 통하여 강한 선호관계를 표시하면 보다 명확한 가중치의 결정이 가능하다 또한 이러한 계층적 선호와 아울러 각 속성의 다중적 선호구조[35]를 활용하면, AHP등과 같은 기수적 선호뿐만 아니라 일반적인 서수적 선호도 포함한 보편적 품질평가를 가능케 할 수 있다. 요약하면 정성적 선호법은 기존의 방법에 비해 보다 유연한 방법으로 예를 들어 언어적 형태의 선호표시만으로도 안정적 가중치 결정이 가능하며, 선호표시 유형과 수에 따라 합리적으로 가중치를 결정할 수 있는 방법이다.

3.3 소프트웨어 응용분야별 품질평가를 위한 적용

이상의 제시된 계층적 선호관계를 활용하여 구체적으로 소프트웨어 응용분야별 품질특성의 중요도를 결정해 보면 다음과 같다. 우선 응용영역별 주품질특성의 중요도는 Lac과 Raffy[26]의 응용분야별 세부 부품질특성들의 구분을 ISO/IEC 9126 [20, 21]의 주품질특성 하위의 부품질특성들과 연결한 후, 본 연구의 정성적 선호표현에 적합하게 일단 상, 중, 하(H, M, L)값으로 환산 구분해 적용해 본다(<표 5> 참조). 소프트웨어 제품의 정성적 요인들이 특히 언어적 형태의 선호표시에 의해 결정되는 경우 품질모형상의 주품질특성의 명확한 중요도 구분이 가능해야 하나, 현실적인 대부분의 평가[2, 4, 8, 14, 26, 28]에서 보듯이 불분명한 구분이나 혹은 일부 특성을 제외한 나머지 특성들간의 관계가 정확하게 구분되지 않는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 앞서 제시한 계층적 선호관계를 실제 기준 평가사례[26]에 적용하여 그 효과성을 확인해 보고자 한다.

최종 결과는 구체적으로 앞 절에서 제시한 주품질특성 사용설에 관련된 하위 4개 부품질특성의 가중치를 소프트웨어 응용영역별로 6개 주품질특성의 경량적인 가중치로 계산한 후, 해당 사용설의 가중치를 배분하여 상호 비교해 보고, 이를 위한 산술계산은 정규화를 통하여 소수점이하 4자리 기준 반올림 처리한다. <표 5>의 각 주품질특성별 3 가지 유형의 비교 값은 정성적 선호에서는 L, M은 약한 선호관계, H는 강한 선호관계를 적용해 각각 결과를 산출하였다.

<표5> 응용분야별 주품질특성의 중요도

| ISO/IEC 9126 주품질특성 | 응용 분야 | | | | |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 실시 처리 | 경영 관리 | 일반 공통 | 이공 계산 | 보안 관련 |
| 기능성(F) | L | L | M | L | M |
| 신뢰성(R) | L | L | L | H | L |
| 사용성(U) | L | H | H | L | L |
| 효율성(E) | L | L | L | L | L |
| 유지보수성(M) | M | L | H | L | L |
| 이식성(P) | M | M | H | L | L |

앞서 언급한 대로 정성적 선호법의 경우, 강한 선호관계가 다수 제시될수록 가중치의 차이는 비례해 합리적으로 증가한다. 예를 들어 <표 5>의 이공계산분야 응용의 경우와 같이 한 특성(신뢰성)의 선호가 상대적으로 기타 다른 특성에 비해 클수록, {R} · >{F, U}, {R} · >{F, E}, {R} · >{U, E, M, P} 등과 같은 다수의 강한 선호의 표시가 가능하다 이 경우 가중치 결과는 강한 선호관계의 수에 비례해 합리적으로 더욱 증가한다.

그러나 본 연구에서는 각 결정방법별 차이와 소프트웨어 응용분야별 적용으로의 가능성을 쉽게 예시하기 위해 단수의 불균등 선호관계만을 사용하였고, 6개 주품질특성 가운데 사용설의 하위 4개 부품질특성을 대상으로 결과를 도출하였다. 3개 응용분야의 가장 높은(H)값의 강한 선호는 상대적으로 중간과 낮은(M과 L)값 한 쌍의 주품질특성을 <표 2>의 (5)와 같은 언어적 선호로 선택하여, 평가자가 제시하도록 하였다(<표 6> 마지막 행 선호

명제 참조), 그리고 나머지 실시처리와 보안관련 영역의 경우에는 약한 선호관계를 고려하여, 이를 1~9 비율에 의한 AHP 결과와 함께 비교해 본다 (<표 6> 및 <표 7> 참조).

<표 6> 소프트웨어 응용분야별 주품질특성 가중치

| 주품질 특성 | 실시처리 | | 경영관리 | | 일반공통 | | 이공계산 | | 보안관련 | |
|--------|----------|----------------|----------------|----------------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | 약한 선호 | AHP | 강한 선호 | AHP | 강한 선호 | AHP | 강한 선호 | AHP | 약한 선호 | AUP |
| F | 0.1250 | 0.0714 | 0.1000 | 0.0655 | 0.1250 | 0.1471 | 0.1250 | 0.0715 | 0.2857 | 0.5000 |
| R | 0.1250 | 0.0714 | 0.1000 | 0.0565 | 0.0925 | 0.0924 | 0.3750 | 0.6429 | 0.1429 | 0.1000 |
| U | 0.1250 | 0.0714 | 0.4000 | 0.5000 | 0.2500 | 0.2647 | 0.1250 | 0.0714 | 0.1429 | 0.1000 |
| E | 0.1250 | 0.0714 | 0.1000 | 0.0566 | 0.0625 | 0.0294 | 0.1250 | 0.0714 | 0.1429 | 0.1000 |
| M | 0.2500 | 0.3572 | 0.1000 | 0.0565 | 0.2500 | 0.2647 | 0.1250 | 0.0714 | 0.1428 | 0.1000 |
| P | 0.2500 | 0.3572 | 0.2000 | 0.2778 | 0.2500 | 0.3647 | 0.1250 | 0.0714 | 0.1459 | 0.1000 |
| - | - | [U] · > [F, P] | [U] · > [F, R] | [R] · > [F, U] | - | - | - | - | - | - |

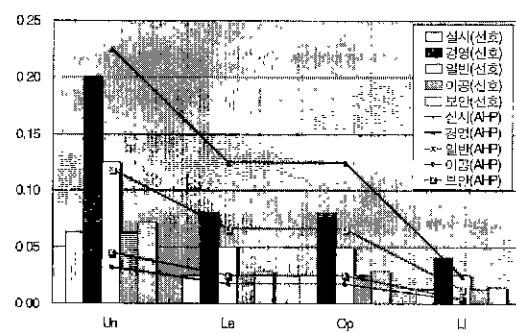
<표 7> 소프트웨어 응용분야별 부품질특성 가중치 (사용성 관련)

| 부품질 특성 | 실시처리 | | 경영관리 | | 일반공통 | | 이공계산 | | 보안관련 | |
|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | 약한 선호 | AHP | 강한 선호 | AHP | 강한 선호 | AHP | 약한 선호 | AHP | 약한 선호 | AUP |
| Un | 0.0625 | 0.0321 | 0.2000 | 0.2250 | 0.1250 | 0.1191 | 0.0625 | 0.0321 | 0.0715 | 0.0450 |
| Le | 0.0250 | 0.0179 | 0.0800 | 0.1250 | 0.0500 | 0.0362 | 0.0250 | 0.0179 | 0.0286 | 0.0250 |
| Op | 0.0250 | 0.0179 | 0.0800 | 0.1250 | 0.0500 | 0.0362 | 0.0250 | 0.0179 | 0.0286 | 0.0250 |
| Lu | 0.0125 | 0.0063 | 0.0400 | 0.0250 | 0.0250 | 0.0132 | 0.0125 | 0.0036 | 0.0143 | 0.0060 |

이를 정리해보면, 불확실한 평가자의 판단이 최종 의사결정에 영향을 주는 경우에는 안정적 가중치를 확보하기 위해 약한 선호 관계를 기본으로 한 평가가 가능하나, 만일 보다 확실한 평가자의 품질 선호의 제시가 가능한 경우에는 강한 선호의 확대 적용을 통한 정성적 선호법의 활용이 바람직하다. 즉, 소프트웨어 품질 평가자들이 불확실한 품질 선호를 제시하여 객관적인 합의도출이 어려운 경우에는 가급적 단순한 약한선호를 바탕으로 안정적인 가중치 결정을 유도할 수 있고, 보다 명확한 특성간의 선호에 근거한 차등적 혹은 제한적 품질 선호를 반영할 수 있는 경우에는 강한 계층적 선호를 적극 활용하는 것이 좋을 것이다.

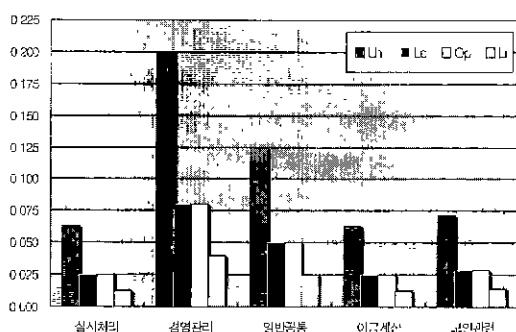
최종 주품질특성 사용성 관련 하위 4개 부품질 특성간의 가중치 차이는 <표 7>과 같이 요약할 수 있다. 각 응용분야별 부품질특성의 최종 가중치는 각 응용분야의 사용성에 관한 해당 가중치를 앞서

결정한 부품질특성별 가중치로 배분하여 결정하였다(3.1 절 및 <표 4> 참조). 이를 분석해 보면 최종 품질특성의 상대적 우선순위면에서는 거의 동일한 결과를 나타냈고, 다만 앞서 언급한대로 AHP의 경우에는 상위와 하위 가중치간의 차이가 상대적으로 더 크게 나타났다(<표 6>과 <표 7>, [그림 2] 참조).



[그림 2] 가중치 결정방법에 따른 부품질특성 가중치 비교

이를 소프트웨어 응용영역별로 재 구분해 보면, [그림 3]과 같이 도식화할 수 있다. 실시처리, 이공계산, 그리고 보안관련 분야의 경우에는 주품질특성 사용성(U)의 상대적 중요도가 낮게 평가되어 작은 값으로 나타났고, 반면에 경영관리 분야 및 일반공통분야는 사용성의 중요도가 매우 높아 결과적으로 각 부품질특성의 가중치 절대값이 큰 차이를 나타내고 있다.



[그림 3] 정성적선호법에 의한 응용영역별 부품질특성 가중치 비교

참고로 이러한 결과는 실제로 대표성 있는 부품

질특성의 선별과 해당 특성을 이용한 소프트웨어 품질평가에서 직접 활용될 수 있다 즉, 전체적인 부품질특성 상호간의 중요도를 비교하여 일정 기준값[5]이상에 해당되는 대표적인 부품질특성을 선별해내고, 또한 이에 따라 해당 품질메트릭[21, 22]을 개발하면 고객관점의 소프트웨어 품질평가[5, 21, 22]를 할 수 있다. 평가에서의 시간과 자원의 제약[5]을 고려한다면, 품질모형의 전체 21개 부품질특성[21] 가운데 예를 들어, 가중치가 0.03이상인 대표적인 특성만을 선정한 품질평가를 수행할 수 있다. 이러한 경우에 주품질특성 사용성 관련 하위 4개 부품질특성 가운데 실시처리, 이공계산, 그리고 보안관련 소프트웨어 제품의 평가를 위해서는 부품질특성 이해성(Un)만을 우선 고려하면 될 것이다(<표 7>과 [그림 3]의 결과참조). 이에 비해 경영관리 분야의 소프트웨어 제품이라면 이해성, 학습성, 운용성, 호감성 4개 특성 모두를, 그리고 일반공통분야의 경우라면 호감성을 제외한 3개 특성만을 고려한 품질측정과 평가가 가능할 것이다.

이상과 같은 사례 적용에서 볼 수 있듯이, 정성적 선호법은 기존의 AHP와 같은 방법의 적용결과와도 호환성을 유지할 수 있을 뿐 아니라 선호관계의 유형에 따른 합리적인 중요도 결정이 가능하고, 또한 평가자의 단순한 언어적 형태의 서수적 선호라 하더라도 이를 가중치 결정으로 연결시킬 수 있다. 특히 소프트웨어 제품의 품질평가나 프로세스의 심사 등과 같이 다양한 관점과 상이한 능력을 가진 관련자(고객, 공급자, 구매자, 혹은 제 3자[3, 22])가 관계되거나, 정확한 비율이나 점수부여가 가능하지 못한 경우, 혹은 짧은 시간 내에 다수특성의 상대적인 중요도를 판단해야 하는 경우에도, 척도의 종류나 중요도표시의 제한 없이 사용할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 일부 품질특성의 경우만을 적용하였으나 전체 품질특성을 모두 평가해야 하는 경우에도, 정성적 선호법은 평가 투입 시간과 자원을 절약하면서 유연하게 품질 가중치를 결정해 낼 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구방향

일부 전문가의 주관적 판단과 제한된 평가방법에 의한 의사결정은 평가대상 해당 가중치가 평가자 주관에 지나치게 의존되어, 평가결과 자체의 신뢰성이 문제된다 특히 소프트웨어 품질평가에서는 품질모형과 품질특성, 측정 기준, 가중치와 평점의 결정방법[1, 16, 17]등이 평가결과에 많은 영향을 준다. 예를 들어, 평가시간과 자원투입, 중요도 혹은 선호의 표시, 척도 등의 제약조건으로 인하여, 일부 주관적 판단에 따른 평가가 수행된다면, 아무리 평가기준과 절차가 객관적이라 하더라도 그 결과의 객관성과 신뢰성을 보장할 수 없다. 이런 점에서 소프트웨어 품질평가에서 일반적으로 채택하고 있는 주관적 평점부여나 순위방법, 기타 제한적인 척도에 의한 평가로는 올바른 결과를 기대하기 어렵다.

본 연구에서는 신뢰함수에 근거한 정성적 선호법을 세로이 강약의 계층적 선호관계로 구분하고, 이를 소프트웨어 품질평가를 위한 응용분야별 주 품질특성의 가중치결정에 적용하였다. 현재 보편적으로 활용되는 AHP와 같은 정량적 이원비교를 통한 가중치 결정방법들은 현실적으로 평가요소의 수가 증가하거나, 평가자간의 중요도 개념인지에 관한 견해가 확실치 않으면 평가에 큰 어려움을 갖게 된다[31, 38].

정성적 선호법은 본 연구결과에서 보듯이 평가 척도나 선호유형에 관계없이 객관적 정량화가 가능하고, 특히 계층적 선호나 언어형태의 서수적선호라도 가중치 결정이 가능한 장점이 있다. 평가대상이 다수인 경우에는 문제 자체를 그룹별로 묶어 단순한 평가문제로 해결할 수도 있고, 또한 절대 수치에 의한 선호표현도 가능하여 기존의 방법들보다 훨씬 유연한 가중치 결정방법이다. 그러나 본 연구결과의 일반성 확인을 위해서는 보다 다양한 기준 방법과의 비교가 필요하며, 이와 함께 절대적인 수치부여 방법과의 결합을 통한 간편한 결과 도출방법의 개발도 요구된다.

향후 본 결과는 기준의 외부환경에 따른 소프트웨어 품질특성의 상관관계[10,14] 분석과 평가편집에 따른 다양한 중요도를 고려한 소프트웨어 품질평가에 직접 활용될 수 있다. 또한 프로세스 개선과 능력결정을 위한 SPICE[23] 심사의 프로세스 관리 활동의 평가나 심사 투입요소의 우선순위 결정에도 유용하게 사용될 수 있다. 실제로 SPICE 심사에서 일부항목의 우선순위 도출에 사후 적용해 본 결과, 상대적으로 순위부여방법이나 AHP와 같은 정량적 이원비교의 방법보다 쉽게 심사결과의 합의도출이 가능하였다. 이에 관한 실증적 연구와 다양한 가중치 결정방법의 비교적용, 선호의 유형에 따른 민감도 분석 등은 지속적인 연구과제이다.

참 고 문 헌

- [1] 박호인, “소프트웨어 제품 평가와 선정을 위한 모형 비교 및 적용에 관한 연구”, 「고려대학교 대학원」, 박사학위논문, 1996.
- [2] 양해술, “분석단계 산출물에 대한 품질평가 툴킷의 설계 및 구현”, 「한국정보처리논문지」, 제4권 제7호(1997), pp.1719-1732.
- [3] 양해술, 이하용, “ISO/IEC 14598-3을 적용한 개발자의 제품평가 방법”, 「한국정보과학회지」, 제17권 제1호(1999), pp.44-52.
- [4] 양해술, 이하용, 안유환, “정책관리를 중심으로 한 품질관리 지원 시스템의 구현”, 「한국정보처리논문지」, 제4권 제8호(1997), pp.1995-2006.
- [5] 이종무, 정호원, “AHP를 이용한 소프트웨어 내부품질특성의 선정방법”, 「한국정보과학회논문지」, 제24권, 제6호(1997), pp.640-649.
- [6] 이종무, 정호원, “소프트웨어 품질평가의 투입 요소 선정모형”, 「한국경영과학회 추계학술대회 발표논문집」(1996), pp.166-169.
- [7] 이하용, 양해술, “설계단계에서의 품질평가 툴킷의 개발”, 「한국정보과학회 봄학술 발표논문집」, Vol.23, No.1(1996), pp.705-708.
- [8] 최은만, 남윤석, “재사용 소프트웨어 품질평가 도구 개발”, 「한국정보처리논문지」, 제4권 제8호(1997), pp.1948-1960.
- [9] Anderson, E.E., “Choice Models for the Evaluation and Selection of Software Packages,” *Journal of Management Information Systems*, Vol.6, No.4(1990), pp.123-138.
- [10] Behforooz, A., “Software Quality Metrics : Defining and Measuring the Quality of a Computer Program”, *IEEE*(1996), pp.80-87.
- [11] Comrey, A.L., “A Proposed Method for Absolute Ratio Scaling”, *Psychometrika*, Vol.15, No.3(1950), pp.317-325.
- [12] Curley, S.P. and J.I. Golden, “Using Belief Functions to Represent Degrees of Belief”, *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, Vol.58(1994), pp.271-303.
- [13] Daily, K., *Quality Management for Software*, NCC Blackwell, Oxford, UK, 1992.
- [14] Deutsch, M.S. and R.R. Willis, *Software Quality Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1988.
- [15] Douligeris, C. and I. Pereira, “A Telecommunications Quality Study Using the Analytic Hierarchy Process”, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Vol.12, No.2(1994), pp.241-250.
- [16] Edwards, W. and J.R. Newman, *Multi-attribute Evaluation*, pp.56-58, Sage Pub., Beverly Hills, 1982.
- [17] Fritz, C.A. and B.D. Carter, *A Classification and Summary of Software Evaluation and Selection Methodologies*, Tech. Report #940823, Dept. of Computer Science, Mississippi State University, Aug. 1994.
- [18] Gordon, J. and E.H. Shortliffe, “A Method for Managing Evidential Reasoning in a Hierarchical Hypothesis Space”, *Artificial*

- Intelligence*, Vol.26(1985), pp.323-357.
- [19] Hobbs, B.F., "A Comparison of Weighting Methods, in Power Plan Siting", *Decision Sciences*, Vol.11(1980), pp.725-737.
- [20] ISO/IEC 9126-1, *Information Technology - Software Quality Characteristics and Metrics - Part 1 : Quality Characteristics and Sub - Characteristics*, ISO, 1995.
- [21] ISO/IEC 9126-1, *Information Technology - Software Quality Characteristics and Metrics - Part 1 : Quality Characteristics and Sub - Characteristics*, ISO, May. 1996.
- [22] ISO/IEC draft DIS 14598-1, *Information Technology - Software Product Evaluation - Part 1 : General Overview*, ISO, May. 1996.
- [23] ISO/IEC TR2 15504, *Software Process Assessment*, ISO, 1998.
- [24] Jung, H. and M. Yoon, "A Software Product Quality Evaluation and Resource Allocation Model", *The 5th European Conference on Software Quality*(1996), pp.286-294.
- [25] Keeney, R.L., "Evaluation of Proposed Storage Sites", *Operations Research*, Vol.27, No. 1(1979), pp.48-64.
- [26] Lac, C. and J. Raffy, "A Tool for Software Quality", *IEEE*(1992), pp.144-150.
- [27] Minch, R.P. and G.L. Sanders, "Computerized Information Systems Supporting Multicriteria Decision Making", *Decision Sciences*, Vol.17(1986), pp.395-413.
- [28] Miyoshi, T. and M. Azuma, "An Empirical Study of Evaluating Software Development Environment Quality", *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol.19, No.5 (1993), pp.425-435.
- [29] Muralidhar, K., R. Santhanam, and R. Wilson, "Using the Analytic Hierarchy Process for Information System Project Selection", *Information & Management*, Vol.18(1990), pp.87-95.
- [30] Pearl, J., "On Evidential Reasoning in a Hierarchy of Hypotheses", *Artificial Intelligence*, Vol.28(1986), pp.9-15.
- [31] Saaty, T.L., "Homogeneity and Clustering in AHP ensures the Validity of the Scale", *European Journal of Operational Research*, Vol.72(1994), pp. 598-601.
- [32] Saaty, T.L., "How to make a decision : The Analytic Hierarchy Process", *European Journal of Operational Research*, Vol.48 (1990), pp. 9-26.
- [33] Saaty, T.L. and L.G. Vargas, *The Logic of Priorities*, Kluwer-Nijhoff Publishing, London. 1982.
- [34] Schniederjans, M. and R. Wilson, "Using the Analytic Hierarchy Process and Goal Programming for Information System Project Selection", *Information & Management*, Vol.20(1991), pp.333-342
- [35] Wong, S.K. M. and P. Lingras, "Representation of Qualitative User Preference by Quantitative Belief Functions", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol.6, No.1(1994), pp.72-78.
- [36] Zahedi, F., *Intelligent Systems for Business*, Wadsworth Pub. Co., 1993.
- [37] Zahedi, F. and N. Ashrafi, "Software Reliability Allocation Based on Structure, Utility, Price, and Cost", *IEEE Transaction on Software Engineering*, Vol.17, No.4(1991), pp.345-356.
- [38] Zeleny M., *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill Co., New York, 1982.