

퍼지추론을 이용한 해체공정 중 리스크 요인의 통합 평가

임현교[†] · 김현정

충북대학교 안전공학과

(2014. 5. 30. 접수 / 2014. 8. 19. 채택)

Comprehensive Assessment on Risk Factors using Fuzzy Inference in Decommissioning Process

Hyeon Kyo Lim[†] · Hyunjung Kim

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received May 30, 2014 / Accepted August 19, 2014)

Abstract : Decommissioning process of nuclear facilities consist of a sequence of problem solving activities, because there may exist not only working environments contaminated by radiological exposure but also industrial hazards such as fire, explosions, toxic materials, and electrical and physical hazards. Therefore, not a few countries in the world have been trying to develop appropriate counter techniques in order to guarantee safety and efficiency of the process. In spite of that, there still exists neither domestic nor international standard. Unfortunately, however, there are few workers who experienced decommissioning operations a lot in the past. As a solution, it is quite necessary to utilize experts' opinions for risk assessment in decommissioning process. As for an individual hazard factor, risk assessment techniques are getting known to industrial workers with advance of safety technology, but the way how to integrate those results is not yet. This paper aimed to find out an appropriate technique to integrate individual risk assessment results from the viewpoint of experts. Thus, on one hand the whole risk assessment activity for decommissioning operations was modeled as a sequence of individual risk assessment steps which can be classified into two activities, decontamination and dismantling, and on the other, a risk assessment structure was introduced. The whole model was inferred with Fuzzy theory and techniques, and a numerical example was appended for comprehension.

Key Words : decommissioning, risk assessment, analytic hierarchical process (AHP), fuzzy inference

1. 해체공정의 리스크평가

원자력 관련시설의 해체(decommissioning)란 단순히 시설물의 해체를 가리키는 것이 아니라, 방사능에 오염되었을지도 모르는 원자력 관련시설의 구성물들을 국제적 기준에 따라 분류하고, 오염물질을 제거(제염)하여 정리한 후, 한정된 구역으로 운송하여 영구적으로 보관하는 일련의 과정을 말한다. 그러므로, 세계 어느 곳에 있는 원자력 관련시설이든지 수명이 다한 후에는 해체과정을 겪게 된다. 현재, 지구상에는 원자력 발전소, 연구용원자로, 핵연료순환시설, 연구 및 산업적 시설 등 해체 중이거나 해체 계획 중인 다양한 종류의 원자력시설들이 있으며, 특히 그 중의 많은 시설들의 수명이 다하여 가까운 시일 내에 폐쇄되는 원자력 발전소 및 연구용원자로가 많아질 것으로 예상된다¹⁻³⁾.

이러한 모든 시설에 대한 해체 시 해체활동이 안전하게 수행되기 위해서는 사전에 적절한 계획, 평가 및 실증 과정이 필요하다^{2,3)}.

해외 원자력선진국의 원자력 관련시설 해체 완료 보고서에 의하면 해체 작업 중 작업자에게 피해를 가하는 재해 발생형태는 작업자 피폭, 화재/폭발, 유해물질 취급, 물리적/전기적 위험 작업 등이라고 보고되고 있다^{4,5)}. 또한, 해체 작업 중의 위험작업형태는 방사선학적 위험작업이 67.2%, 물리적 위험작업이 17.6%, 화학적 위험작업 14.8%의 순으로 나타나고 있다. 즉, 원자력시설 해체공정에는 방사선학적 위험 작업과 비방사선학적 위험 작업이 공존한다^{6,7)}. 따라서, 원자력시설 해체시 작업자를 보호하고 사고를 예방하기 위해서는 방사선학적 위험요인은 물론, 비방사선학적 위험요인을 고려한 적절한 해체계획과 위험 저감 대책을 수립

[†] Corresponding Author : Hyeon Kyo Lim, Tel : +82-43-261-2462, E-mail : hklm@chungbuk.ac.kr

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 52, Naesudong-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk 361-763, Korea

하여야 한다.

원자력시설 해체 분야의 연구는 우리나라는 물론 원자력선진국에서도 주로 해체공사 일정, 방사성물질의 제거, 방사성폐기물의 관리, 방사선 환경영향 평가 및 대책, 품질보증 등에 중점을 두고 수행되어 온 반면, 비방사선학적인 위험요인에 대해서는 상대적으로 소홀히 취급되어 왔다⁸⁾.

그 결과, 세계적으로 원자력시설 해체사례가 다수 있지만, 실제로 작업 중 사고예방을 위한 위험요인과 평가에 관한 자료는 거의 없다고 할 수 있다. 즉, 통계적으로 분석하거나, 시뮬레이션 분석에 활용할 수리적 파라미터 자료가 존재하지 않는다는 의미이다. 이와 같은 상황에서 해체공정의 작업계획을 구성하려면 과거에 유사 경험을 한 전문가들의 의견과 판단에 따라 위험성을 추정하는 방법밖에 없다. 그러나 실제로는 위험요인의 발생가능성과 피해규모가 불확실하여 통상적인 리스크평가에서와 같이 단일 등급으로 표현할 수 없는 경우가 많으며, 인간의 판단은 주관적인데다 때와 장소에 따라 확신도가 달라질 수 있다는 문제점을 안고 있다. 결과적으로 인간의 경험과 판단은 근본적으로 애매성(fuzziness)을 안고 있는 셈이다. 이 때문에 애매한 개별적 리스크를 평가하여 결과를 통합함으로써 최종적인 공정의 위험성을 평가하는 데에는 너무나 많은 애매함이 포함되지 않을 수 없다. 이 때문에 해체공정 리스크 평가를 수행하기 위해서는 전문가의 추론과정에 존재하는 여러 가지의 애매함을 체계적으로 정리할 수 있는 평가 방법이 필요하게 된다.

원자력 관련시설의 설계 및 운영분야에서는 확률론적 위험성 평가방법을 적용하고 있다. 이 방법은 원자력발전소의 노심 손상빈도 평가, 격납건물 파손확률 평가, 파손격납 방사능 누출로 인한 환경영향 평가 등 기기 성능과 고장확률에 대한 신뢰도 평가 기술이며 적용 분야는 시설 운영 측면이다⁹⁾. 그러나 이것은 어느 정도 분석가능한 자료가 축적되었을 때 활용 가능한 방법이므로, 해체공정과 같은 드문 사상에 적용하기에는 적합하지 않다. 원자력 관련규정에 따르면 해체계획은 해체작업 전에 수립되어야 하고, 규제기관에 의하여 안전성 기준을 준수하는지 평가되어야 한다⁷⁾. 따라서 가능한 한 논리적이고 과학적이어야 한다.

본 연구는 원자력 관련시설의 해체계획을 수립함에 있어서, 전문가들의 경험과 판단이 갖는 애매함이나 모호성을 극복할 수 있는 방법을 개발하고자 수행되었다. 구체적으로는, 통계적 추론이나 시뮬레이션 등 다른 방법을 이용할 수 없는 상황에서, 결정론적(deterministic) 리스크평가 과정을 리스크 평가에 적용


하는 과정 중에 발생하는 전문가 판단의 애매함을 지적하고, 이 문제를 해결하기 위한 퍼지접근법을 모색하였다.

2. 위험요인의 리스크평가 - 분석적 접근방법

2.1 개별적 측면의 리스크평가

본 연구의 기본적 리스크 평가개념은 MIL-STD 882의 개념을 이용하였다¹⁰⁾. 이때 위험요인의 리스크 평가에는 빈도, 강도 등이 고려되는 것이 일반적이며 각각 몇 개의 수준으로 구분된다. 방사선학적 측면에서 보아 가장 문제시되는 것은 방사성 물질로 인한 방사선 노출강도와, 노출 발생가능성 즉 발생빈도로서 위험요인의 리스크는 이 두 변수의 곱으로 표현되는 것이 일반적이다^{11,12)}. 이때, 기술적인 자료에 따라서는 다소 차이가 있으나, 국내의 연구로 2호기 KRR-2와 우라늄 변환설비 해체작업에서의 경험, 그리고 해외의 ICRP (International Commission on Radiological Protection)와 INES (International Nuclear and radiological Event Scale) 등의 자료¹³⁾를 참고로 하여, 위험요인의 발생강도와 발생빈도를 각각 5단계로 구분한 결과를 이용하는 것이 보통이다⁷⁾. Fig. 1은 그 결과를 나타낸다. 따라서 리스크 평가지수(risk index)는 ‘발생강도수준 × 발생빈도수준’을 이용하여 5×5, 즉 25가지 경우가 발생하며, 효율적 관리를 위하여 5개의 그룹으로 분류하여 관리한다.

Rating	Severity	Description (mSv/h)	Rating	Frequency
1	Negligible	< 0.1	1	Rare
2	Low	< 2	2	Unlikely
3	Moderate	<10	3	Possible
4	High	<20	4	Likely
5	Very High	>50	5	Almost Certain



Severity	Frequency				
	Rare	Unlikely	Possible	Likely	Almost Certain
Very High	Very Low	Medium	High	Very High	Very High
High	Very Low	Medium	High	High	Very High
Moderate	Very Low	Low	Medium	High	High
Low	Very Low	Low	Low	Medium	Medium
Negligible	Very Low	Very Low	Very Low	Very Low	Very Low

Fig. 1. Risk Assessment Matrix for Radiological Hazards⁷⁾.

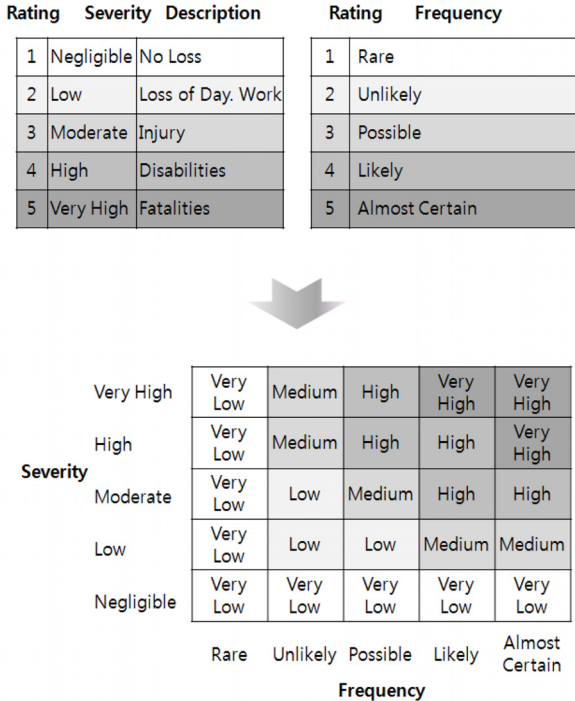


Fig. 2. Risk Assessment Matrix for Non-radiological Hazards⁷⁾.

마찬가지로 비방사선학적 리스크평가도 Fig. 2에서 보는 바와 같이 5개 발생강도수준과 5개 발생빈도수준으로 나누었으므로, 리스크 평가지수에는 25개의 경우가 발생하며, 역시 5개의 그룹으로 나누어 방사선학적 측면의 리스크관리와 같은 형태를 취한다⁷⁾.

이렇게 위험요인이 하나인 경우에는 한 가지 측면의 위험성을 반영하는 지수로 평가할 수 있다. 그러나, 위험요인이 다양해지면, 한 가지 측면의 위험성을 반영하는 지수들을 여러 가지 모아놓는다고 해서 그 결과가 전체 상황의 리스크를 종합적으로 평가한다고 말하기는 곤란하다.

예를 들어, 방사선학적 위험요인과 비방사선학적 위험요인만 보더라도, 두 요인의 특이성이 존재한다. 또한 비방사선학적 리스크에도 추락, 충돌, 협착, 감전 등 다양한 요인이 포함되므로 동시에 이들을 평가한다는 것은 무리이다.

따라서, 개별적 요인에 대하여 리스크가 평가된 뒤, 그 결과들을 하나의 지표로 통합하는 것이 현실적이다.

2.2 방사선학적 요인 리스크평가와 비방사선학적 요인 리스크평가의 통합

방사선학적으로 오염된 모든 대상물과 환경은 해체 작업 전에 제염되어야 한다. 만약 그렇지 못하면 작업자들은 두렵고 무거운 중장비를 착용하고 작업함으로써 작업 중 부자연스러운 자세가 불가피하며, 그 결과

새로운 위험요인을 감수하지 않으면 안 된다. 따라서, 통상 방사선학적 리스크평가는 비방사선학적 리스크평가를 선행하는 것이 일반적이다. 그러나, 방사선학적 리스크평가와 비방사선학적 리스크평가, 어느 한 쪽도 소홀히 할 수는 없기 때문 두 가지 측면의 종합적인 결과로서 단일 평가지수를 도출하는 것은 평가과정의 전후 문제가 아니라, 어느 쪽 리스크평가를 얼마나 중시하느냐 하는 문제로 귀결된다. 즉, 두 가지 측면 리스크평가의 상대적인 비중을 결정하는 것이다.

이와 같은 문제를 해결하는 데에는 분석적 계층과정 (Analytic Hierarchical Process; AHP)이 효과적이라고 알려져 있다. 이 기법은 다기준 의사결정 (multi-criteria decision making) 기법으로 정성적이고 다면적 기준을 가진 복잡한 문제를 계층화하여 주요 요인과 세부 요인들로 나누고, 이러한 요인들에 대한 쌍대 비교를 통해 중요도를 결정해 가는 과정 속에서 각 요인들이 갖는 상대적 중요도를 비교할 수 있게 되기 때문이다.

이 기법에 따라 만약 방사선학적 리스크가 비방사선학적 리스크에 비하여 ‘매우 강한 중요도 (very strong importance)’를 갖는다면,

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_2/w_2 \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 7 \\ 1/7 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A : 비교행렬

a_{ij} : 비교행렬 A 중 i행 j열의 구성 요소

w_i : 비교행렬 A 중 i번째 요인의 중요도 (가중치)라고 표현되므로^{14,15)}, 비방사선학적 리스크는 방사선학적 리스크에 비하여 약 1/7의 가중치를 갖는다는 것을 쉽게 알 수 있다.

3. 위험요인의 리스크평가 - 퍼지이론적 접근방법

해체공정 리스크평가 중 퍼지추론의 필요성은 기본적으로 신뢰할 만한 경험적 자료가 충분치 않다는 데 기인한다. 그 까닭에 이제까지 원자력 관련시설 분야는 통상 이전 연구자들의 데이터를 받아들여 분석하거나, 전문가의 경험에 의한 공학적 판단에 의존해 왔다. 그러나, 분석자의 판단은 주관적이고 애매하기 때문에, 분석자가 분석대상을 정확하고 엄밀하게, 그리고 객관적으로 평가한다는 것은 불가능에 가깝다. 과오율과 같은 수치 값에 의해 표현되는 신뢰도 척도는 객관적이고 정확해 보이지만, 실제로는 분석 대상의 현실적 조건을 반영하지 못하는 불확실성과, 분석자 판단에 의한 애매함과 주관성이 내재되어 있는 것이다. 퍼지 집합이론(Fuzzy Sets Theory)은 분석자의 불확실성, 애

매함, 주관성을 반영할 수 있는 수학적 방법으로 다음과 같이 리스크평가에 활용될 수 있다.

3.1 개별적 측면의 리스크평가

개별적 요인, 예를 들어 방사선학적 리스크 평가에는 기본적으로 위험요인의 발생빈도, 발생강도에 대한 평가를 전제로 한다. 어느 쪽이나 분석적 방법에서는 5 단계 중 어느 한 단계의 값으로 특정되는 것이 일반적이지만, 퍼지이론을 도입하여 분석하는 경우에는 1과 5 사이의 소속함수로 표현된다. 예를 들어, 위험요인의 발생빈도(frequency)의 소속함수를, 가장 일반적으로 사용되는 삼각퍼지수 $F = (l_F, m_F, u_F)$ 를 이용하여 표현하면, 발생빈도는 소속함수 $\mu_F(x) : R \rightarrow [0, 1]$ 에 의해 정의되며 $l_F \leq m_F \leq u_F$ 의 범위에서 다음과 같다.

$$\mu_F(x) = \begin{cases} \frac{x - l_F}{m_F - l_F}, & l_F \leq x \leq m_F \\ \frac{u_F - x}{u_F - m_F}, & m_F \leq x \leq u_F \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

여기서, 퍼지수(Fuzzy Number) F 는 변수 x 에 대응하는 퍼지집합을 의미하며, 해당 변수값이 퍼지집합에 속할 가능성의 정도를 나타낸다. 또한, 출력은 해당 언어 변수에 대응하여 0과 1 사이의 값을 갖는 퍼지 소속도이다. Table 1은 쌍대비교(Pairwise Comparison)에 이용되는 삼각퍼지수의 전형적인 예를 보여주고 있는데, 삼각퍼지수의 세 숫자는 각각 (l_F, m_F, u_F) 를 나타낸다.

발생강도(severity)의 경우에도 같은 방식으로 표현된다^{16,17)}. 즉, 발생강도는 소속함수 $\mu_S(x) : R \rightarrow [0, 1]$ 에 의해 정의되며, $l_S \leq m_S \leq u_S$ 에서 다음과 같다.

$$\mu_S(x) = \begin{cases} \frac{x - l_S}{m_S - l_S}, & l_S \leq x \leq m_S \\ \frac{u_S - x}{u_S - m_S}, & m_S \leq x \leq u_S \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

Table 1. Crisp numerical value and fuzzy numbers for importance comparison

Relative Importance	Crisp Number	Triangular Fuzzy Number
equivalent importance	1	(1,1,2)
weak importance	3	(2,3,4)
strong importance	5	(4,5,6)
very strongly importance	7	(6,7,8)
absolute importance	9	(8,9,9)

결과적으로, 분석적 방법에서 두 변수의 곱으로 표현되는 리스크 평가지수는 다음과 같이 퍼지함수의 곱을 나타내는 수식으로 표현된다.

$$\mu_R(x, y) = \mu_{F \times S}(x, y) = \min \{ \mu_F(x), \mu_S(y) \} \quad (4)$$

한편, 같은 결과를 초래할 수 있는 여러 가지 요인의 리스크 평가결과를 통합하는 것은 퍼지수의 합으로 표현된다. 사고란 어느 한 가지 요인이 잘못되더라도 발생하므로, 모든 위험요인은 대등하게 취급될 필요가 있기 때문이다. 여기에서 $\mu_T(x, y) : R \rightarrow [0, 1]$ 에 의해 정의되며 Z 는 리스크 R 이 정의되는 공간을 말한다.

$$\mu_T(x, y) = \bigcup_{z \in Z} \mu_R(x, y) = \max [\mu_{F \times S}(x, y)] = \max [\min \{ \mu_F(x), \mu_S(y) \}] \quad (5)$$

3.2 방사선학적 요인 리스크평가와 비방사선학적 요인 리스크평가의 통합

방사선학적 리스크와 비방사선학적 리스크는 전혀 특성이 다른 데에도 불구하고 분석적 접근방법에서는 Fig. 1과 Fig. 2에서 보는 바와 같이 각각의 리스크 평점을 1부터 5까지의 정수값을 갖는 빈도평점과, 역시 1부터 5까지의 정수값을 갖는 강도평점의 곱으로 표현하기 때문에, 양쪽이 모두 대등한 수치값을 갖게 되어 두 측면의 위험성을 통합하여 하나의 위험성으로 인식하기 곤란하다.

두 가지 측면의 어느 쪽 요인에 의해서든 사고가 발생한다고 생각하는 경우, 즉 당면상황을 비판적으로 이해하는 경우 통합 리스크는 개별적 리스크를 나타내는 두 퍼지수의 합성으로 표현된다. 여기서 합성이라는 각 규칙의 출력을 나타내는 퍼지집합들이 하나의 퍼지집합으로 통합되어 가는 과정을 의미한다.

그러나, 두 가지 측면에서 발생하는 사고의 영향이 비교할 수 없을 만큼 큰 차이를 나타낸다면 양쪽 리스크의 가중평균(weighted average)은 불가피한 동시에, 절대적으로 필요하다고 할 수 있다. 가중평균을 이용할 때에는 여러 가지 해법이 제시되고 있지만, 본 연구는 그 중에서도 가장 단순하고 이해하기 쉬운 Efficient Fuzzy Weight Average (EFWA) 알고리즘¹⁸⁾을 이용한다.

3.3 비퍼지화 - 단일 명료수치의 도출

통합 리스크를 단일 수치로 제시하고자 하는 경우에는 비퍼지화 기법을 이용한다. 비퍼지화 기법은 합성

된 퍼지집합을 가장 잘 표현하는 단일 수치를 추출하기 위한 것이다. 비퍼지화 기법에는 여러 가지가 있다. 특히, 당면 상황에서의 리스크를 단일 수치로 나타낼 때에는 비관적으로 판단하는 경우 출력집합 최대값의 최대값(largest of maximum), 낙관적으로 판단하는 경우 출력집합 최대값의 최소값(smallest of maximum)을 제시하는 방법도 있다. 그러나, 일반적으로는 여러 의견의 구심점을 반영한다는 의미에서 중심점(centroid, center of gravity; COG)을 제시하는 것이 가장 일반적이라 알려져 있다.

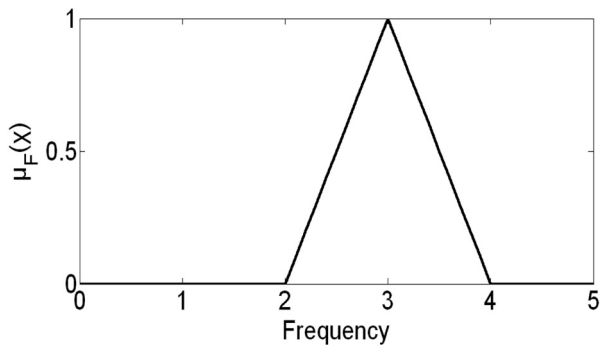
중심점이 의미하는 바를 수식으로 표현하면 다음과 같다¹⁶⁾.

$$z^* = \int \frac{\mu_{R_T}(z)z dz}{\mu_{R_T}(z) dz} \tag{6}$$

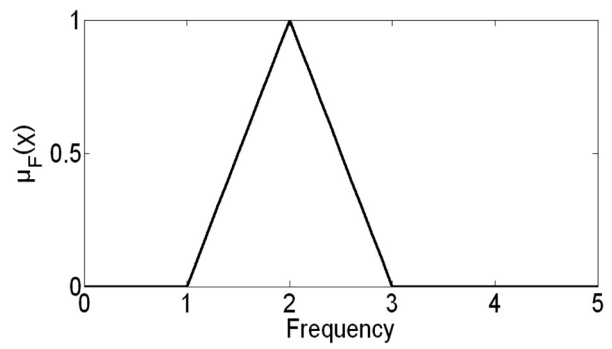
더욱이, 이 값은 퍼지함수 α 절단(α -cut)을 이용하면, 전문가의 확신도가 저하된다 하더라도 퍼지수의 남은 부분을 이용하여 의사결정결과를 예측할 수 있다. 여기서 퍼지함수의 α 절단(α -cut)이란 소속함수가 α 수준 이하인 부분만의 퍼지함수를 말한다¹⁶⁾.

3.4 리스크평가의 통합 - 계산에

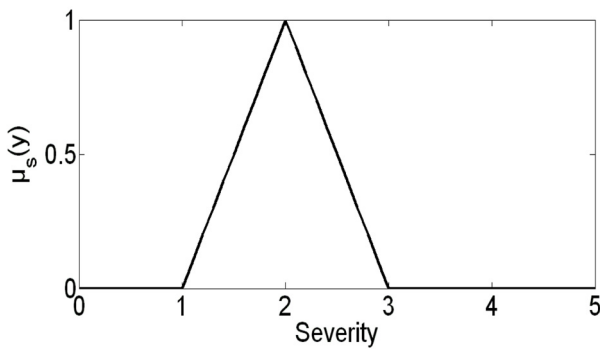
위험요인 A에 대한 전문가의 판단이 빈도 3등급, 강도 2등급으로 주어졌다고 하자. 이때, 빈도평가에 대한



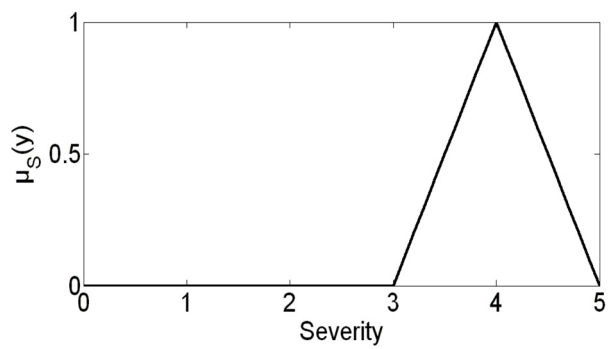
(a) Frequency membership function of factor A



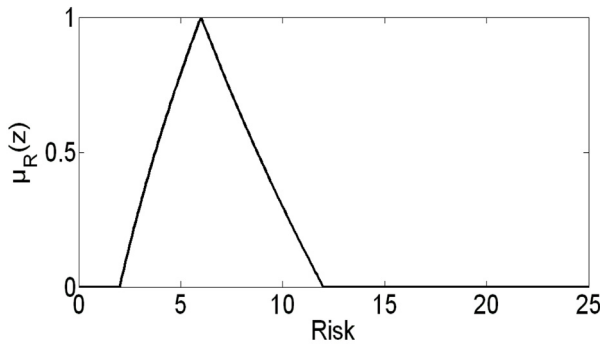
(d) Frequency membership function of factor B



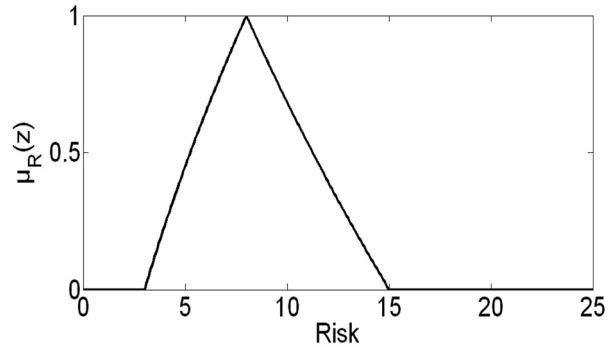
(b) Severity membership function of factor A



(e) Severity membership function of factor B



(c) Risk membership function of factor A



(f) Risk membership function of factor B

Fig. 3. Procedure for Risk Estimation.

퍼지소속함수는 식(2)를 이용하여 Fig. 3(a)와 같이 표현될 수 있다. 강도평가에 대한 소속함수도 마찬가지로 식(3)을 이용하여 Fig. 3(b)와 같이 표현되며, 결과적으로 위험요인 A에 대한 리스크는 두 함수의 곱을 나타내는 식(4)를 이용하여 퍼지수 (2, 6, 12)를 갖게 되고, Fig. 3(c)와 같이 표현된다. 마찬가지로 위험요인 B의 경우에는 (d), (e), (f)의 과정을 거쳐 퍼지수 (3, 8, 15)를 가지게 된다.

위험요인 A와 B가 모두 동질성을 갖는 비방사선학적 위험요인이라면 전체 리스크는 식(5)에 따라 Fig. 3의 두 함수 (c)와 (f)의 합집합인 Fig. 4와 같은 형태를 갖게 된다.

그러나, 두 위험요인이 전혀 다른 요인, 예를 들어 방사선학적 위험요인과 비방사선학적 위험요인이라면 가중치에 의한 가중평균을 구한다. Fig. 5는 Fig. 3(c)로 평가된 위험요인 A의 리스크에 대한 확신도가 퍼지수 (0.7, 0.8, 0.9)로 높은 반면, Fig. 3(f)로 평가된 위험요인 B의 리스크에 대한 확신도가 퍼지수 (0.3, 0.4, 0.5)로 상대적으로 낮을 때, 두 리스크 퍼지수를 EFWA 알고리즘에 따라 가중평균한 결과이다. 두 그림을 비교해서 알 수 있는 바와 같이, 가중평균을 이용하는 쪽이 계산과정은 복잡하지만, 리스크의 예측에 있어서 변동이 적어 활용상에 부작용이 적을 것으로 예상된다.

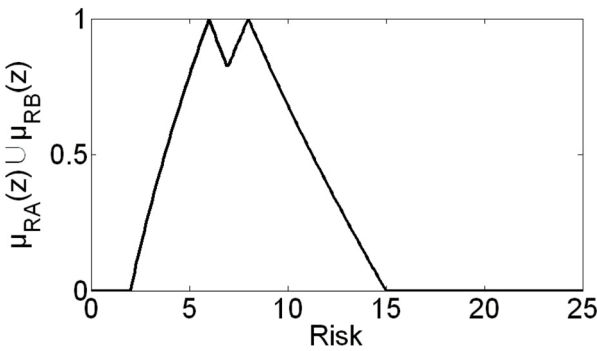


Fig. 4. Membership function of estimated total risk – union.

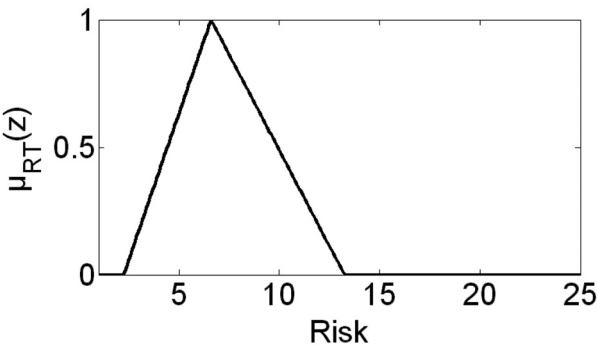


Fig. 5. Membership function of estimated total risk – weighted average by EFWA technique.

또한, 중심점(COG)으로 상징되는 비퍼지화 수치는 Fig. 4 합집합의 경우 7.79, Fig. 5 가중평균법의 경우 7.37의 값을 얻게 되어, 의사결정 전략에 따라 민감하게 변화한다는 것도 간접적으로 확인할 수 있다. 이 수치는 리스크 평가지표에 해당되기 때문에, 애매하거나 모호한 상황에서도 리스크를 판단하는 데 중요한 지표로 기능한다.

4. 고찰 및 결론

리스크 평가지수가 단일평점으로 제시되는 경우에는 ‘빈도평점×강도평점=리스크평점’이라는 단순식으로 계산되어, 결과적 수치 이외에는 파악할 수 있는 정보가 없으며, 평가자의 확신도가 저하되는 경우에는 결과가 어떻게 변화할지 예측하기 어렵다. 또한, 두 가지 측면의 리스크평점을 통합하여야 하는 경우, 각기 다른 차원의 평점을 어떻게 통합할 것인가, 그렇게 통합할 경우 발생할 수 있는 평점의 변화 범위를 어떻게 예측할 것인가 하는 데에도 적지 않은 문제가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 결정론적인 리스크평가방법에 의한 문제점을 지적하고, 그 대안으로 리스크평가에 퍼지함수를 도입하여 이용하면, 다음과 같은 이점이 있다는 사실을 확인하였다.

첫째, 전문가의 정확한 정보가 아니라 대략적인 의견만 알더라도 그 범위에 대응하는 함수를 설정함으로써, 의사결정 특성을 파악할 수 있다.

둘째, 직접 비교가 곤란한 위험요인의 리스크는 퍼지수의 가중평균을 이용하여 상대적 경중을 파악할 수 있다.

셋째, 명료수치(crisp numeric value)를 원할 때에는 언제든지 비퍼지화 기능을 이용하여 원하는 값을 제시할 수 있다.

넷째, 퍼지함수 α 절단(α -cut)을 이용하면, 전문가의 확신도가 저하된다 하더라도 퍼지수의 남은 부분을 이용하여 의사결정결과를 예측할 수 있다.

본 연구는 원자력분야의 시설물 해체과정의 문제해결을 위하여 시도되었지만, 기본적인 논리는 어떤 분야의 리스크평가에든 활용될 수 있을 것으로 판단되므로, 활용가능한 통계 자료의 부족을 항상 경험하고 있는 인적 요인 관련 분야에서 전문가 판단을 활용하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글: 이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음 (This

work was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2012)

References

- 1) World Nuclear Association, "http://www.worldnuclear.org", WNA, 2010.
- 2) International Atomic Energy Agency, Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors, Standard Safety Series No. WS-G-2.1, IAEA, 1999.
- 3) International Atomic Energy Agency, Decommissioning of Facilities using Radioactive Material (WS-R-5), IAEA, 2006.
- 4) American Society of Mechanical Engineers, Decommissioning Handbook, ASME, 2004.
- 5) U.S. Defence Of Energy, "Statistical Evaluation of DOE D&D Occurrences", DOE/EH-0578, 1998.
- 6) K. S. Jeong, D. G. Lee, K. W. Lee, and H. K. Lim, "A Qualitative Identification and Analysis of Hazards, Risks and Operating Procedures for a Decommissioning Safety Assessment of a Nuclear Research Reactor", *Annals of Nuclear Energy*, 35, pp.1954-1962, 2008.
- 7) K. S. Jeong, K. W. Lee, and H. K. Lim, "Risk Assessment on Hazards for Decommissioning Safety of a Nuclear Facility", *Annals of Nuclear Energy*, 37, pp.1751-1762, 2010.
- 8) M.H. Han, Y.B. Lee, E.H. Kim, K.S. Seo, W.T. Hwang, and Y.G. Choi, "Development of a Real-Time Radiological Dose Assessment System", KAERI/RR-1737/96, 1996.
- 9) S.G. Kang, "Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants", KEPCO E&C, 2005.
- 10) U.S. DOD, System Safety Program Requirements, DC US Department of Defense, MIL-STD-882D.
- 11) N. J. Bahr, "System Safety Engineering and Risk Assessment: A Practical Approach", Taylor & Francis, NY, 1997.
- 12) M. Bateman, "Tolley's Practical Risk Assessment" Handbook, 5th ed., Elsevier, Oxford, UK, 2006.
- 13) The International Nuclear Event (INES) Scale User's Manual, IAEA and OECD/NEA, 2001.
- 14) T. L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process", New York, NY: McGraw-Hill, 1980.
- 15) T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process", *Int. J. of Services Sciences*, 1(1), 2008.
- 16) S. N. Sivanandam, S. Sumathi, and S. N. Deepa, "Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB", Springer, 2006.
- 17) K.H. Lee and G.R. Oh, "Fuzzy Theory and Application", Hongrung Publishing Company, 1991.
- 18) D.H. Lee and D. Park, "An Efficient Algorithm for Fuzzy Weight Average," *Fuzzy Sets and Systems*, 87, pp.39-45, 1997.