

# 퍼지 集合論을 이용한 危險分析 시스템 -Risk Analysis System in Fuzzy Set Theory-

洪 象 佑\*

## ABSTRACT

An assessment of risk in industrial and urban environments is essential in the prevention of accident and in the analysis of situations which are hazardous to public health and safety. The risk imposed by a particular hazard increases with the likelihood of occurrence of the event, the exposure and the possible consequence of that event. In a traditional approach, the calculation of a quantitative value of risk is usually based on an assignment of numerical values of each of the risk factors. Then the product of the values of likelihood, exposure and consequences called risk score is derived. However vagueness and imprecision in mathematical quantification of risk are equated with fuzziness rather than randomness.

In this paper, a fuzzy set theoretic approach to risk analysis is proposed as an alternative to the techniques currently used in the area of systems safety. Then the concept of risk evaluation using linguistic representation of the likelihood, exposure and consequences is introduced. A risk assessment model using approximate reasoning technique based on fuzzy logic is presented to derive fuzzy values of risk and numerical example for risk analysis is also presented to illustrate the results.

## 1. 序 論

産業 및 都市의 環境에 潛在하고 있는 危險에 대한 評價는 事故의 豫防 그리고 公衆 保健과 安全에 暫定的인 危險을 招來하고 있는 狀況에 必需的인 것이다. 危險이란 넓게는 '바람직스럽지 못한 不確實性의 內包'라는 뜻으로 정의할 수 있는데, 이러한 不確實性을 分析하는 觀點은 다음과 같은 두가지 分野 大別된다. 첫째는 이러한 不確實性을 確率의으로 취급하는 것이며, 둘째는 이러한 問題가 事實상 確率的인 것이 아니라 人間의 생각과 認識過程의 모호함 및 調查對象 시스템의 複雜性과 관련된 不正確性에 의하여 이러한 不確實性이 惹起된다는 것이다.

既存의 시스템 安全分野에서는 危險要因을 管理하고 危險水準을 計算하기 위한 數學的 評價過程에서 각 事件의 集合에 確率的 尺度를 부과함으로써 計量化가 이루어진다. 그러나 많은 境遇에 있어서 어떤 事件에 대한 精確한 確率值를 決定하는 것은 事實상 不可能하다. 왜냐하면 事件에 관한 證據가 不足하거나 安全管理者가 그 事件의 發生頻度を 有意的으로 評價할 수 없기 때문이다[1]. 換言하면, 事件이 發生할 確率이란 分明하지 못하기 쉬우며, 危險分析者들은 흔히 明確한 數值 대신에 '다소 可能性이 있다(more or less likely)' 또는 '可能性이 희박하다(remotely possible)' 등의 모호하고 不正確한 表現을 사용한다. 따라서 이러한 判斷에 內包되어 있는 不確實性은 無作爲性(randomness)이라기 보다 模糊性(fuzziness)으로 취급해야 한다.

최근에 퍼지集合論(fuzzy set theory)의 發達로 인하여 模糊性이 包含된 複雜하고 不分明한 시스템에 관한 研究가 가능하게 되었다[2]. 따라서 본 研究에서는 시스템 安全分野에서 이용되고 있는 既存의 計量的 分析技法 대신에 危險分析에 대한 퍼지集合論의 理論的 接近을 試圖하며, 言語變數(linguistic variable)[3]를 利用한 近似推論法(approximate reasoning methods)에 의해 潛在的 危險狀況을 分析함으로써 危險評價의 模糊性에 관한 새로운 計量化 概念을 提示함과 同時에 앞으로의 危險評價에 관한 새로운 數理的 研究方向을 提示한다.

\*東明專門大學

접수 1990년 4월 20일

## 2. 危險分析에 관한 既存研究의 考察

産業 및 環境에 潛在하고 있는 危險狀況에 대한 評價는 安全工學分野에서 重要な 領域을 차지하고 있으며, 특히 致命的인 大型事故의 發生可能性이 높은 大規模 裝置産業, 航空運送, 核發電 등에 있어서 더욱 危險評價가 必要하다.

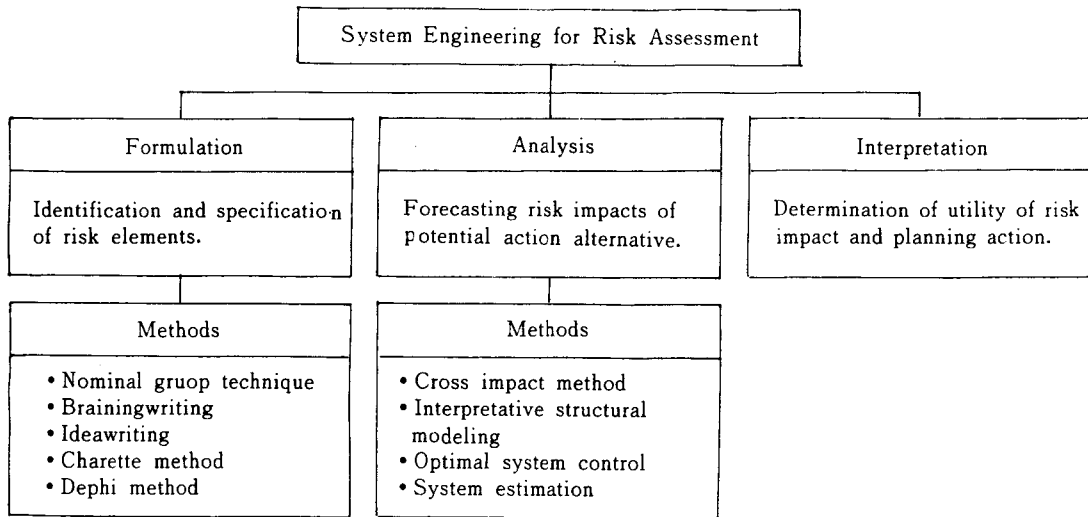


Fig. 1. Graphic illustration of system engineering approach and method for risk assessment

이런 觀點에서 危險分析에 관한 一般의인 形態로서 Fig.1[4]과 같은 시스템 工學的 接近法을 利用하고 있으며, 이러한 問題의 解決을 위한 具體的 危險評價方法으로서 다음과 같은 技法이 提示되었다.

- 1) 체크 리스트(Check list)
- 2) FMEA(Failure Mode & Effect Analysis)[5]
- 3) FMECA(Failure Mode, Effect Criticality Analysis)[6]
- 4) 신뢰성 블록 다이어그램(Reliability block diagram)
- 5) OTA(Objective Tree Analysis)[6]
- 6) 상호관계행렬(Interactive matrices technique)[7]
- 7) FTA(Fault Tree Analysis)[8]
- 8) THERP(Technique for Human Error Rate Predictive)[9].

상기의 技法中에서 4), 5), 6), 7) 그리고 8)은 數學的 評價過程에서 確率의 尺度를 부과하여 計量化를 試圖하고 있으나, 많은 경우에 있어 複雜한 시스템의 어떤 危險狀況에 대한 正確한 確率值를 부여하는 것은 사실상 不可能하다. 危險이란 本質적으로 客觀的 概念이라기 보다는 相對的이고 主觀的인 概念이므로 危險認識 또한 環境과 評價者간의 相互作用으로 認識하여야 한다[5]. 따라서 實質的인 危險分析에서는 定量的 方法보다는 定性的 方法을 利用하여야 하며, 危險의 認識에 影響을 주는 因子로서는 危險에 따른 개인의 제어정도, 우연한 事件의 潛在性과 災害事件이 發生할 可能性을 포함한다[6].

이런 觀點에서 Fine[7]은 어떤 特定한 危險狀況에 부과되는 危險要素를 세가지 危險因子(risk factor) 즉 發生可能性(likelihood of occurrence), 發生頻度(exposure) 및 가능한 結果(consequences)로 分類하였으며, Graham과 Kinney[8]는 Fine[7]의 研究를 바탕으로 危險狀況의 管理를 위한 實質的인 安全分析 시스템을 開發하였다. 이들의 研究에서는 Table 1, 2 및 3과 같이 각 危險因子의 等級을 危險狀況의 發生可能性, 露出程度(發生頻度) 및 가능한 結果에 해당하는 數值的 곱을 比較하여 그 危險狀況을 위한 暫定的인 危險水準을 導出하였으며, 이런 過程의 實質的인 活用을 위한 nomograph를 提示하였다.

Table 1. Assigned values for hazard event likelihood

Numeric	Descriptive
10	Might well be expected
6	Quite possible
3	Unusual but possible
1	Only remotely possible
0.5	Conceivable but highly unlikely
0.2	Practically impossible
0.1	Virtually impossible

Table 2. Assigned values for exposure factors

Numeric	Descriptive
10	Continuous
6	Daily during working hours
3	Weekly or occasionally
2	Monthly
1	A few times per year
0.5	Very rare

Table 3. Assigned values for possible consequences

Numeric	Descriptive	Monetary
100	Catastrophe, many fatalities	>\$10 <sup>7</sup>
40	Disaster, multiple fatalities	\$10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>
15	Very serious, a fatality	\$10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>
7	Serious, serious injury	\$10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>
3	Important, disability	\$10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>
1	Noticeable, first and may be needed	\$10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>

Table 4. Risk score values

Numeric	Descriptive
>320	Very high risk : consider discontinuing operation
160-320	High risk : immediate correction required
70-160	Substantial risk : correction required
20-70	Possible risk : attention needed
<20	Some slight risk : perhaps acceptable.

### 3. 퍼지 言語變數에 의한 危險因子的 分析

危險水準(S)의 計量的 計算에 관한 傳統的인 接近方式은 대개 各 危險因子에 數值를 指定하는 것을 바탕으로 하고 있다. 즉 어떤 危險狀況의 發生可能性, 發生頻度 및 가능한 結果를 計量的으로 표현한 값의 곱에 의해 危險水準(risk score)이 導出된다. 專門家들의 判斷에 의하여 여러가지 危險狀況에 대한 서로 다른 危險水準이 부과되며 그 危險의 深刻性에 따라 順序가 指定되고 이와같은 危險水準 總括表(risk score summary)가 安全管理者에게 傳達된다. 이 總括表에 의해서 安全管理者는 危險水準의 順序에 따른 措處를 취하며 現存하는 危險狀況을 줄여나간다.

危險狀況의 管理를 위한 實質的인 安全分析方法을 開發하기 위해서는 危險評價의 模糊한 特性 및 生소한 經驗에 의한 判斷의 重要性을 항상 認識하여야 한다[9,10]. 危險의 概念은 本質的으로 絶對的인 客觀性을 가지는 것이 아니며[9], 相對的이고 主觀的이기 때문에 그 對象(object;environment)과 主觀(subject;individual assessor) 사이의 相互關聯的인 項目으로써 考察되어야 한다. 더우기 Feagans[11]가 言及한 바와 같이 一定 期

間內에 어떤 危險한 事件이 發生할 별도의 危險性은 存在하지 않는다는 觀點에서 보면, 危險狀況이란 퍼지概念이 된다. 危險分析이란 本來 不正確하고 未來值가 不確實한 計量值와 관련된 것으로서 主觀的인 判斷을 根據로 하며, 특히 非數值的 데이터와 관련시킬 때는 더욱 그러하다.

따라서 人間의 判斷에 관한 퍼지集合模型을 利用하면 危險狀況에 관한 言語表現을 數值, 즉 퍼지變數의 對應函數(compatibility function)로 變換[12]시킬 수 있으며, 事件의 發生에 관한 表現의 不正確性和 連結이 가능하므로, 本 研究는 危險分析시스템에 관한 퍼지言語模型을 開發하였다. Table 5는 Grapham과 Kinney[8]의 危險分析에 관한 言語表現과 本 研究의 퍼지言語變數를 對應시킨 例이다.

Table 5. Descriptors in risk analysis and fuzzy linguistic variable

Verbal descriptors	fuzzy linguistic variables
1. Likelihood	
might well be expected	[very likely]
quite possible	[likely]
unusual but possible	[more-or-less likely]
only remotely possible	[unlikely]
conceivable, but highly unlikely	[very unlikely]
practically impossible	[very very unlikely]
2. Exposure	
continuous(many times daily)	[very high]
frequently(once a day)	[high]
occasionally(one per week or month)	[moderate]
monthly(one per month/year)	[more-or-less low]
rarely	[low]
very rare	[very low]
3. Consequences	
catastrophe(extensive damage, over \$10 <sup>7</sup> , many fatalities)	[extremely high]
disaster(\$10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup> , fatalities)	[very high]
very serious(\$10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup> , a fatality)	[high]
serious(\$10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup> , serious injury)	[medium]
important(\$10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup> , disability)	[more-or-less medium]
noticeable(\$10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup> , first aid)	[low]

Table 6. Compatibility functions of individual terms

Individual term	Compatibility function						
high	0	0	0.1	0.3	0.7	0.9	1
medium	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0
low	1	0.9	0.7	0.3	0.1	0	0
more or less high	0	0	0.3	0.55	0.85	0.95	1
very low	0	0	0	0.1	0.5	0.8	1
likely	0	0.1	0.5	0.7	0.9	1	1
unlikely	1	1	0.9	0.8	0.5	0	0

그리고 Table 6은 Table 5의 몇가지 퍼지언어변수를 대응함수로 표현한 예이며, Fig.2, Fig.3은 Table 5 및 6을 이용하여 結果의 정도 및 露出 程度에 대한 몇 개의 言語變數값(linguistic value)을 나타낸 것으로서 Table 5 및 6에 없는 言語變數값은 主述語에 대한 集中 및 擴張演算으로써 그 값을 구할 수 있다.

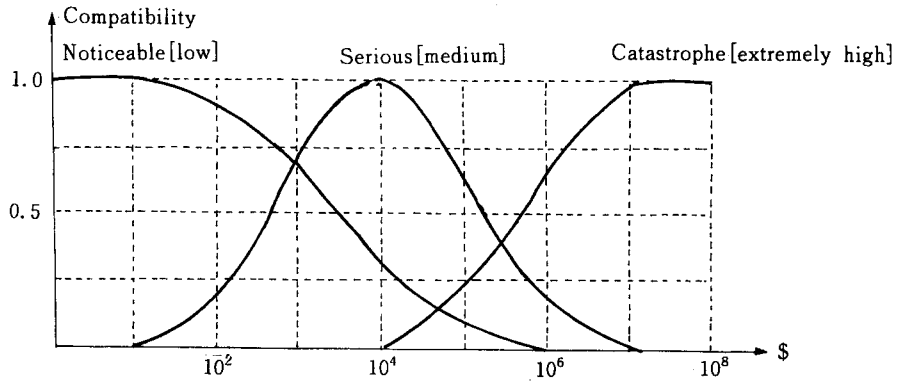


Fig. 2. Linguistic values for consequences

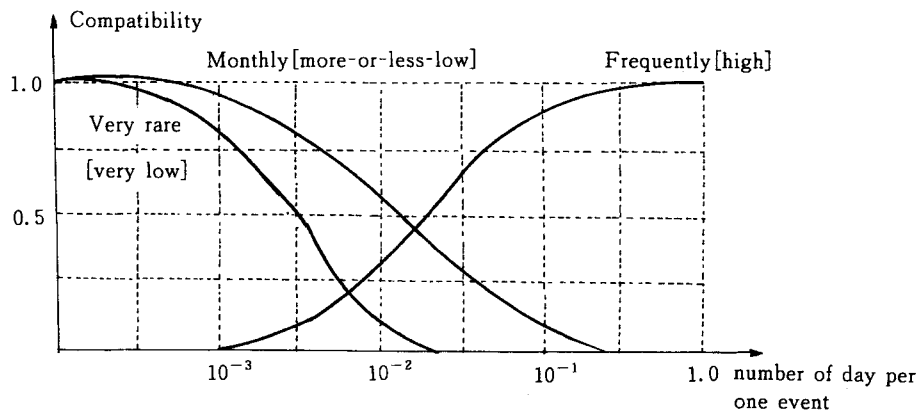


Fig. 3. Linguistic values for exposure

#### 4. 近似推論法에 의한 危險水準의 評價

危險分析에 대한 傳統的 接近方法에서는 [7, 8], 特定한 危險狀況(hazard)으로 부터 기인되는 危險의 深刻性 (seriousness of the risk)을 세가지 危險因子 즉 事件의 發生可能性(likelihood of occurrence; L), 露出程度 (exposure; E) 및 가능한 結果(consequences; C)에 대하여 부과되는 數值等級의 倂에 의해서 計算하였다. 그리고 이렇게하여 決定된 危險水準(risk score)을 미리 作成된 危險水準 總括表(risk score summary)와 比較하여 現存하는 危險狀況을 縮小 또는 除去하기 위한 妥當한 措處를 講究하였다.

비록 上記 過程의 첫 段階에서는 세가지 危險因子에 관한 몇가지 言語表現(verbal descriptor)을 選擇할 수 있지만, 두번째 段階에서는 이것들을 하나의 特定한 숫자로 바꾸고 이 숫자들의 倂(risk score)은 危險水準의 總括表 措處欄에 의해서 危險의 深刻性에 관한 言語表現으로 다시 轉換된다. 따라서 危險의 深刻性에 관한 同一한 言語 表現에 대해서도 危險水準의 範圍가 너무 廣大해지기 쉽다. 따라서 本 研究은 세가지 危險 因子에 대한 表現을 하나의 特定한 수치로 변환시키는 것이 아니라 퍼지言語變數(fuzzy linguistic variable)를 이용하며, 各 因子의 퍼지變數값(fuzzy linguistic value)을 近似推論法(approximate reasoning)에 의해 合成함으로써 從來의 危險分析方法보다 더욱 精密하게 危險水準을 評價하는 方法을 提示한다.

從來의 危險分析은 다음과 같은 論理的 前提를 根據로 한다.

IF likelihood=(l) and exposure=(e)  
and consequences=(c), THEN risk=(s)

여기서 l, e, c는 각각 發生可能性, 露出程度, 가능한 結果에 대한 言語變數이며 s는 'very high', 'some light risk' 등의 危險水準을 나타내는 言語變數이다. 그러나 上記 命題의 意味는 매우 모호하며 따서 古典의 論理의 規則을 적용할 수 없다. 따라서 本 研究에서는 Zadeh[3,13,14,15]의 퍼지推論法(fuzzy reasoning)을 利用하여 危險水準(risk score)을 近似的으로 推論한다.

Zadeh [15]에 의하여, 퍼지近似的推論이란 不正確한 全體의 集團으로 부터 不正確한 結論을 類推하는 過程이다.

本 研究에서는 퍼지 條件文(fuzzy conditional statement)과 合成規則(compositional rule)을 利用한 近似的推論法(approximate reasoning)[30,32]을 바탕으로 하는 危險分析技法을 提示한다. 다음과 같은 퍼지 條件文을

$$\text{'IF A THEN B 또는 } A \rightarrow B\text{'}$$

考慮하면 이것은 퍼지變數 A와 B의 퍼지關係(fuzzy relation) R을 나타낸다. 여기서 A가 母集合(universe of discoures) U의 퍼지 部分集合(fuzzy subset)이고 B가 母集合 V의 퍼지部分集合이면 A와 B의 커티션곱(cartesion product)은 퍼지關係 R로 정의된다.

$$A \times B = \int_{R=U \times V} (\mu_A(u) \wedge \mu_B(v)) / (u, v) \quad (1)$$

그리고 A가 U의 퍼지部分集合, U에서 V로의 퍼지關係가 R이면, A에 의해 推論되는 V의 퍼지部分集合의 B는 다음과 같은 R과 A의 合成(composition) 즉 최대-최소곱(max-min product)에 의해 決定된다.

$$B = A \cdot R \rightarrow f_B(v) = \sup(\mu_A(u) \times \mu_R(u, v)) / (v) \quad (2)$$

例를 들면, 發生頻度='high' 그리고 發生頻도와 危險水準間의 關係 R이 주어지면 推論의 合成規則(compositional rule)을 利用하여 危險水準을 알수 있다. Table 7에서와 같이 세가지 危險因子(risk factor) 및 危險水準의 對應函數(compatibility function)을 고려한다. 여기서 E, L, C 및 S는 각각 露出程度(exposure), 發生可能性(likelihood), 結果(consequence) 및 危險水準(risk score)에 대한 述語集合이며 또한 E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, ..., E<sub>m</sub>, L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, ..., L<sub>m</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, ..., C<sub>m</sub> 및 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, ..., S<sub>m</sub>은 각 因子의 等級을 나타내는 퍼지部分集合(fuzzy subset)이다. 어떤 特定한 危險狀況에 대해서 다음과 같은 퍼지條件文이 성립하는 境遇를 考慮하자.

$$\text{IF exposure='E}_a\text{' , lakelihood='L}_b\text{' , consequences='C}_c\text{'}$$

$$\text{THEN risk='S}_d\text{'}$$

이에 관하여 다음과 같은 命題를 正義할 수 있다.

$$P_{E_i}: E = 'E_a' = (e_{a1}, e_{a2}, \dots, e_{an})$$

$$P_{L_j}: L = 'L_b' = (l_{b1}, l_{b2}, \dots, l_{bn})$$

$$P_{C_k}: C = 'C_c' = (c_{c1}, c_{c2}, \dots, c_{cn})$$

$$P_{S_l}: S = 'S_d' = (s_{d1}, s_{d2}, \dots, s_{dn})$$

단, 여기서 P<sub>E<sub>i</sub></sub>, P<sub>L<sub>j</sub></sub>, P<sub>C<sub>k</sub></sub>, P<sub>S<sub>l</sub></sub>는 각각 E, L, C, S에 관한 퍼지命題이며 j=1, 2, ..., n에 대하여 0 < e<sub>aj</sub>, l<sub>bj</sub>, c<sub>ck</sub>, s<sub>dl</sub> < 1이 성립한다.

Table 6. Compatibility functions for risk analysis

Individual terms		Compatibility function	
E	E <sub>1</sub>	e <sub>11</sub> e <sub>12</sub> .....	e <sub>1j</sub> ..... e <sub>1n</sub>
	E <sub>2</sub>	e <sub>21</sub> e <sub>22</sub> .....	e <sub>2j</sub> ..... e <sub>2n</sub>
	⋮		
	E <sub>a</sub>	e <sub>a1</sub> e <sub>a2</sub> .....	e <sub>aj</sub> ..... e <sub>an</sub>
	E <sub>m</sub>	e <sub>m1</sub> e <sub>m2</sub> .....	e <sub>mj</sub> ..... e <sub>mn</sub>
L	L <sub>1</sub>	l <sub>11</sub> l <sub>12</sub> .....	l <sub>1j</sub> ..... l <sub>1n</sub>
	L <sub>2</sub>	l <sub>21</sub> l <sub>22</sub> .....	l <sub>2j</sub> ..... l <sub>2n</sub>
	⋮		
	L <sub>b</sub>	l <sub>b1</sub> l <sub>b2</sub> .....	l <sub>bj</sub> ..... l <sub>bn</sub>
	L <sub>m</sub>	l <sub>m1</sub> l <sub>m2</sub> .....	l <sub>mj</sub> ..... l <sub>mn</sub>
C	C <sub>1</sub>	c <sub>11</sub> c <sub>12</sub> .....	c <sub>1j</sub> ..... c <sub>1n</sub>
	C <sub>2</sub>	c <sub>21</sub> c <sub>22</sub> .....	c <sub>2j</sub> ..... c <sub>2n</sub>
	⋮		
	C <sub>c</sub>	c <sub>c1</sub> c <sub>c2</sub> .....	c <sub>cj</sub> ..... c <sub>cn</sub>
	C <sub>m</sub>	c <sub>m1</sub> c <sub>m2</sub> .....	c <sub>mj</sub> ..... c <sub>mn</sub>
S	S <sub>1</sub>	s <sub>11</sub> s <sub>12</sub> .....	s <sub>1j</sub> ..... s <sub>1n</sub>
	S <sub>2</sub>	s <sub>21</sub> s <sub>22</sub> .....	s <sub>2j</sub> ..... s <sub>2n</sub>
	⋮		
	S <sub>d</sub>	s <sub>d1</sub> s <sub>d2</sub> .....	s <sub>dj</sub> ..... s <sub>dn</sub>
	S <sub>m</sub>	s <sub>m1</sub> s <sub>m2</sub> .....	s <sub>mj</sub> ..... s <sub>mn</sub>

上記의 命題들을 퍼지論理[31]에 의하여 퍼지條件文으로 변환시키면,

$$IF(E=P_S) \cap (C=P_C) \cap (L=P_L) THEN S=P_S \tag{3}$$

가 되고 이 條件文의 前提條件은  $P=P_E \cap P_C \cap P_L$ 이다. 따라서 (3)에서의 퍼지關係 R은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R=R_E \cap R_C \cap R_L \tag{4}$$

단, R<sub>E</sub>, R<sub>C</sub> 및 R<sub>L</sub>은 각각 危險狀況에 대한 露出程度, 가능한 結果와 發生可能性과 危險水準과의 퍼지關係를 나타내는 것으로 다음과 같은 條件文으로 풀이할 수 있다.

$$\begin{aligned} IF E=P_E THEN S=P_S \rightarrow R_E &= P_E \times P_S, \\ IF L=P_L THEN S=P_S \rightarrow R_L &= P_L \times P_S, \\ IF C=P_C THEN S=P_S \rightarrow R_C &= P_C \times P_S, \end{aligned} \tag{5}$$

式(1) 및 Table 4-1에 의하면 R<sub>E</sub>, R<sub>C</sub> 및 R<sub>L</sub>은

$$\begin{aligned} R_E &= \int_{x_E \times x_S} (e_a \wedge s_d) / (x_E, x_S) \\ R_L &= \int_{x_L \times x_S} (l_b \wedge s_d) / (x_L, x_S) \\ R_C &= \int_{x_C \times x_S} (c_c \wedge s_d) / (x_C, x_S) \end{aligned} \tag{6}$$

와 같이 계산한다.

이상과 같은 過程에 의해 危險狀況에 대한 露出程度, 가능한 結果 및 發生可能性과 危險水準과의 關係가 導出되었으므로, 危險因子에 관한 條件이 變할때 퍼지合成規則(fuzzy compositional rule)에 의한 近似推論法(approximate reasoning)을 이용하여 새로운 危險狀況에 대한 危險水準을 추론할 수 있다. 여기서 危險因子의 條件이  $E=P'_E$ ,  $L=P'_L$  및  $C=P'_C$  로 變했다고 가정하면, 式(2)의 合成規則에 의해 決定되는 危險水準은

$$S = \bigcap_{i=E,K,C} (P'_i \cdot R_i) \\ (P'_E \cdot R_E) \cap (P'_L \cdot R_L) \cap (P'_C \cdot R_C) \tag{7}$$

로 표현되며, 따라서 式(7)은 다음과 같이 計算된다.

$$S(x_s) = \bigwedge_{i=E,K,L} \{ \bigvee_{x_i \in X_i} [P'_i(x_i) \wedge r_i(x_i; x_s)] \} \tag{4.8}$$

지금까지 危險分析을 위한 퍼지模型을 定立하는데 있어서 危險因子들과 危險水準間的 關係들을 導出하였으며 이것을 이용하여 危險因子의 變化에 따르는 새로운 危險狀況의 危險水準을 決定하였다. 그러나 危險狀況의 퍼지값(fuzzy value of risk)과 關聯되는 是正措置를 決定내리기 위해서는 式(8)의 結果에 意味를 부여시키는 問題가 남아 있다. 言語近似法(linguistic approximation)이라 불리우는 이 過程은 近似推論(approximate reasoning)에 의해 도출된 危險水準의 퍼지값을 危險水準에 관한 述語集合 S 중의 한 퍼지部分集合과 근사시키는 것이다. 本 研究에서는 Kaufmann[16]의 hamming distance의 概念을 導入하여, 近似推論에 의한 危險水準의 퍼지部分集合과의 hamming distance를 最小化하는 S內的 한 퍼지部分集合을 選擇한다.

A와 B가 集合 X의 퍼지部分集合이라 하면 A와 B간의 hamming distance는

$$d(A, B) = \sum_{j=1}^n | \mu_A(x_j) - \mu_B(x_j) | \tag{9}$$

로 정의된다. 그러므로 式(4.8)에 의해 導出된 퍼지集合을  $S_d^\circ = (s_{d1}^\circ, s_{d2}^\circ, s_{d3}^\circ, \dots, s_{dn}^\circ)$ 이라 하면 여기에 近似되는 S 內的 한 퍼지部分集合  $S_d^*$ 는 다음과 같다.

$$S_d^* = \underset{d \in \{1, 2, \dots, m\}}{\text{Min}} d(S_d^\circ, S_d) \\ = \underset{d \in \{1, 2, \dots, m\}}{\text{Min}} \sum | s_{dj}^\circ - s_{dj} | \tag{10}$$

Fig. 4는 近似推論法(approximate reasoning)을 통하여 세 危險因子로 부터 危險水準(risk score)을 導出하고, 言語推論(linguistic approximation)에 危險水準을 다시 言語表現으로 轉換시키는 過程을 나타낸 것이다.



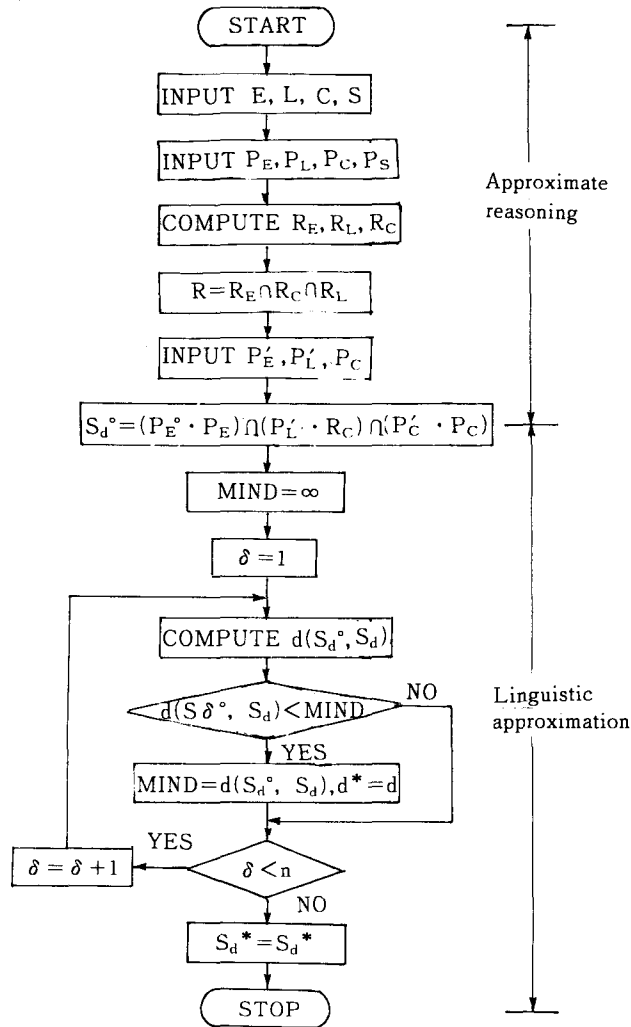


Fig. 4. Flowchart for approximate reasoning and linguistic approximation

### 5. 危險分析에 관한 例題

Table 7는 各 危險因子(risk factor), 危險水準(risk score) 및 퍼지部分集合의 對應函數(compatibility function)를 나타낸 것이며, Table 8은 各 퍼지部分集合의 퍼지言語값과 Graham과 Kinney[8]의 言語變數[verbal discriptor]에 대한 數值를 對應시킨 것이다.

Table 7. Compatibility function for risk factors

Risk factor	Fuzzy subset	Compatibility function							
L	L <sub>1</sub>	0	0	0.25	0.5	0.8	1	1	
	L <sub>2</sub>	0	0.1	0.5	0.7	0.9	1	1	
	L <sub>3</sub>	0	0.3	0.7	0.85	0.95	1	1	
	L <sub>4</sub>	1	1	0.9	0.8	0.5	0	0	
	L <sub>5</sub>	1	1	0.8	0.65	0.25	0	0	
	L <sub>6</sub>	1	1	0.65	0.4	0.05	0	0	
E	E <sub>1</sub>	0	0	0	0.1	0.5	0.8	1	
	E <sub>2</sub>	0	0	0.1	0.3	0.7	0.9	1	
	E <sub>3</sub>	0	0.2	0.7	1	0.7	0.2	0	
	E <sub>4</sub>	1	0.95	0.85	0.55	0.3	0	0	
	E <sub>5</sub>	1	0.9	0.7	0.3	0.1	0	0	
	E <sub>6</sub>	1	0.8	0.5	0.1	0	0	0	
C	C <sub>1</sub>	0	0	0	0	0.25	0.65	1	
	C <sub>2</sub>	0	0	0	0.1	0.5	0.8	1	
	C <sub>3</sub>	0	0	0.1	0.3	0.7	0.9	1	
	C <sub>4</sub>	0	0.2	0.7	1	0.7	0.2	0	
	C <sub>5</sub>	0	0.45	0.85	1	0.85	0.45	0	
	C <sub>6</sub>	1	0.9	0.7	0.3	0.1	0	0	
S	S <sub>1</sub>	0	0	0	0	0.5	0.8	1	
	S <sub>2</sub>	0	0	0.1	0.3	0.7	0.9	1	
	S <sub>3</sub>	0	0	0.3	0.55	0.85	0.95	1	
	S <sub>4</sub>	0	0.2	0.7	1	0.7	0.2	0	
	S <sub>5</sub>	1	0.9	0.7	0.3	0.1	0	0	

Table 8. Fuzzy linguistic values in risk analysis

Risk factor	Fuzzy subset	Fuzzy linguistic value	Graham and Kinney's numeric values
L	L <sub>1</sub>	[very likely]	10
	L <sub>2</sub>	[likely]	6
	L <sub>3</sub>	[more-or-less likely]	3
	L <sub>4</sub>	[unlikely]	1
	L <sub>5</sub>	[very unlikely]	0.5
	L <sub>6</sub>	[very very unlikely]	0.1
E	E <sub>1</sub>	[very high]	10
	E <sub>2</sub>	[high]	6
	E <sub>3</sub>	[moderate]	3
	E <sub>4</sub>	[more-or-less low]	2
	E <sub>5</sub>	[low]	1
	E <sub>6</sub>	[very low]	0.5
C	C <sub>1</sub>	[extremely high]	100
	C <sub>2</sub>	[very high]	40
	C <sub>3</sub>	[high]	15
	C <sub>4</sub>	[medium]	7
	C <sub>5</sub>	[more or less medium]	3
	C <sub>6</sub>	[low]	1

S	S <sub>1</sub>	[very high]	>320
	S <sub>2</sub>	[high]	160-320
	S <sub>3</sub>	[more-or-less high]	70-160
	S <sub>4</sub>	[medium]	20-70
	S <sub>5</sub>	[low]	<20

E=E<sub>2</sub>, C=C<sub>4</sub> 및 L=L<sub>2</sub>인 危險狀況을 고려하자. 여기에 해당하는 各 數値는 6, 7 및 6 이므로 危險値는 252로서 'high risk'가 된다. 따라서 이 狀況은 퍼지條件文

IF exposure='very high'  
 consequences='more-or-less high'  
 likelihood='likely',  
 THEN risk='high'

를 適用할 수 있으며, Table 7, 8에서 다음과 같은 命題를 정의할 수가 있다.

$$\begin{aligned}
 P_E : E=E_2 &= (0, 0, 0.1, 0.3, 0.7, 0.9, 1) \\
 P_C : C=C_4 &= (0, 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0) \\
 P_L : L=L_2 &= (0, 0.1, 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1) \\
 P_S : S=S_2 &= (0, 0, 0.1, 0.3, 0.7, 0.9, 1)
 \end{aligned}$$

式(6)에 의해서

$$R_E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$R_C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 1.0 \end{bmatrix}$$

이 된다.

여기서 危險因子의 水準이 E=E<sub>3</sub>, C=C<sub>5</sub>, L=L<sub>2</sub>로 變化되었다고 假定하면 Graham과 Kinney[8]에 의한 危險値는 54로서 發生可能性이 'likely'인데도 불구하고 全體의인 危險水準이 비교적 낮게 나타나고 있다. 한편

으로는 變化된 퍼지命題는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P'_E &: E = E_3 = (0, 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0) \\
 P'_C &: C = C_5 = (0, 0.45, 0.85, 1, 0.85, 0.45, 0) \\
 P'_L &: L = L_2 = (0, 0.1, 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1)
 \end{aligned}$$

式(7) 및 式(8)에 의하여,

$$\begin{aligned}
 S_d^0 &= (E_3 \cdot R_E) \cap (C_5 \cdot R_C) \cap (L_2 \cdot R_L) \\
 &= (0, 0, 0.1, 0.3, 0.7, 0.7, 0.7) \\
 &\quad \cap (0, 0, 0.1, 0.3, 0.7, 0.9, 1) \\
 &\quad \cap (0, 0, 0.1, 0.3, 0.7, 0.9, 1) \\
 &= (0, 0, 0.1, 0.3, 0.7, 0.7, 0.7)
 \end{aligned}$$

이 된다. 式(10)에 의하여 危險水準(risk score)에 관한 퍼지部分集合  $S_1, S_2, \dots, S_7$ 과 hamming distance를 구하면

$$1.0, 0.5, 1.15, 2.7, 4.5$$

이므로

$$S_d^* = S_2$$

가 되어 危險水準이 'high'로 나타났으며, 이것은 Graham과 Kinny[2]의 結果에 비해 더욱 現實의임을 보이고 있다. Table 9는 세 危險因子 中에서 한 因子는 水準이 높고 나머지 두 因子는 비교적 水準이 낮은 경우 危險水準을 導出한 結果이다. 여기서 세 因子 中에 두 因子는 水準이 비교적 낮다 하더라도 한 因子만 水準이 높으면 全體의 危險水準이 상당히 높다는 것을 알 수 있으며, 따라서 危險因子 모두에 대한 各별한 管理가 이루어져야 한다.

Table 9. Risk scores with one high level factors

Fuzzy condition	$E_2 \cap C_5 \cap L_5$	$E_3 \cap C_2 \cap L_5$	$E_3 \cap C_5 \cap L_2$
Compatibility function	(0, 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.5, 0.5)	(0, 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.5, 0.5)	(0, 0, 0.1, 0.3, 0.7, 0.7, 0.7)
Hamming distance	$S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ S_5$	$S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ S_5$	$S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ S_5$
	1.3, 1.1, 1.75, 2.5, 3.9	1.3, 1.1, 1.75, 2.5, 3.9	1.0, 0.5, 1.15, 2.7, 4.5
$S_d^*$	$S_2$	$S_2$	$S_2$

## 6. 結 論

既存의 시스템 安全分野에서는 危險狀況의 不確實性에 관한 數學的 評價過程에서 주로 確率의 尺度를 부과하는 計量化 模型을 이용하고 있다. 그러나 이러한 模型은 危險狀況에 대한 安全專門家들의 主觀的 判斷의 模糊性을 表現하기가 매우 困難하다.

따라서 本 研究에서는 퍼지集合論의 理論的 特性을 이용하여 危險評價過程에서의 人間의 主觀的 判斷에 관한 模糊性과의 連結를 試圖하였다. 어떤 危險狀況의 危險水準을 決定하는 危險因子를 分類하는 여러가지 方法이 있지만 本 研究에서는 發生可能性, 露出程度(發生頻度), 가능한 結果를 危險因子로 採擇하였다. 傳統的 危險分析에서는 이러한 危險因子들에 부과되는 數值等級의 冪(또는 組合)에 의하여 危險水準을 決定하고 있으나 모호성이 內包된 各 因子에 主觀的 特定數值를 指定하고 더우기 이들의 冪에 의해 危險水準을 表現하는 것은 不適合하다. 따라서 이러한 모순점을 除去하기 위하여 本 研究에서는 各 因子들의 水準에 대한 安全專門家들의 主觀的 判斷을 퍼지言語論의 論理를 根據로 한 近似推論法을 이용하여 시스템 全體의 危險水準을 導出하는 危險評價模型을 設定하였다.

그 결과 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

첫째, 既存의 危險分布分析에서는 危險因子の 數를 더 늘일 경우에 그 組合의 어려움으로 인하여 危險水準의 決定이 困難하지만, 本 研究와 같이 퍼지關係 및 퍼지合成을 이용하면 危險因子の 數가 아무리 많아도 危險水準의 導出이 可能하다.

둘째, 各 危險因子에 대하여 몇 가지 중요한 퍼지集合의 對應函數가 결정되면, 集中, 擴張, 퍼지화연산등의 퍼지演算 및 AND, OR, NOT 등의 부울演算을 통하여 危險因子에 관한 等級의 細分화가 가능하다.

셋째, 既存의 分析方法에서는 危險因子 中の 한 因자의 等級이 높고 다른 因子들의 等級이 낮은 경우 그 危險水準이 비교적 낮게 표현되고 있으나, 本 模型의 結果에 의하면 어떤 危險狀況의 危險水準이 等級이 높은 한 因子에 의해 支配되는 傾向이 있다.

産業現場에서는 災害를 豫防하기 위한 危險狀況의 事前評價가 거의 이루어지지 않고 있으며 비록 危險評價를 實施한다고 하더라도 事件의 發生可能性 및 災害의 強度를 組合한 行列에 의하여 危險水準을 決定하고 있으나, 本 研究의 模型을 바탕으로 한 危險評價 專門家시스템을 導入한다면 産業現場의 災害豫防에 상당한 效果가 있으리라 기대된다. 그러나 各 危險要因의 等級 및 危險水準에 관한 퍼지對應函數를 보다 現實적으로 表現하는 方法의 開發이 必要하며, 本 研究에서는 近似推論에 의해서 導出한 危險水準을 言語近似法에 의하여 言語로 換言시키는 過程에서 hamming distance를 最小化하는 方法을 利用하였으나 이에 관한 보다 效率的인 方法이 要求된다.

## REFERENCES

1. Brown, C. B., "A Fuzzy Safety Measure," *J. of Engrg. Mech. Div.*, Vol. 5, pp. 855-872, 1979.
2. Smithson, M., "Applications of Fuzzy Set Concepts to Behavioral Sciences," *Math. Social Sci.*, Vol. 2, pp. 257-274, 1982.
3. Zadeh, L. A., "The Concept of Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning," *Infoma. Sci.*, Part I : Vol. 8, pp. 199-249, Part II : Vol. 8, pp. 301-357, Part III : Vol. 9, pp. 43-80, 1975.
4. Sage, A. P. and White, E. B., "Methodologies for Risk and Hazard Assessment : A Survey and Status Report", *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.*, Vol. 10, pp. 425-445, 1980.
5. Barron, F. H. and Meckenzie, K. D., "A Constrained Optimization Model of Risk Decision," *J. Math. Psychol.*, Vol. 10, pp. 56-62, 1974.
6. Chapman, C. B. and Cooper D. F., "Risk Analysis : Testing Some Perjudices," *European J. Oper. Res.*, Vol. 14, pp. 238-247, 1983.
7. Fine, W. T., *Mathematical Evaluation for Controlling Hazards.*, Academic Press, 1973.
8. Graham, K. T. and Kinney G. T., "A Practical Safety Analysis System for Hazards Control," *J. Safety Research*, Vol. 12, pp. 13-20, 1980.
9. Blockley, D. I., "Analysis of Subjective Assessment of Structured Failures," *Internat. J. Man-Machine Stud.*, Vol. 19, pp. 185-195, 1978.
10. Yao, T. T. P., "Damage Assessment of Existing Structures," *J. Engrg. Mech. Div.*, Vol. 4, pp. 785-799, 1980.
11. Feagans, T. B. and Biller, W. F., *Fuzzy Concepts in the Analysis of Public Health Risks*, Plenum Press, New York, 1980.
12. Zimmer, A. C., "A Model for the Interpretation of Verbal Predictions," *Internat. J. Man-Machine Stud.*, Vol. 20, pp. 121-134, 1984.
13. Zadeh, L. A., "A Fuzzy Algorithmic Approach to the Definition of Complex and Imprecise Concepts," *Internat. J. Man-Machine Stud.*, Vol. 8, pp. 249-291, 1976.
14. Zadeh, L. A., "Fuzzy Logic and Approximate Reasoning," *Synthese*, Vol. 30, pp. 407-428, 1975.
15. Zadeh, L. A., "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.*, Vol. 3, pp. 28-44, 1973.
16. Kaufmann, A., *Introduction Theroy of Fuzzy Subsets*, Vol. I, Academic Press, New York, 1975.