

원자로 안전사고 예방을 위한 스마트 의사결정 시스템

서 의 현

목원대학교 컴퓨터공학과 교수

Smart Decision Making System for Reactor Safety Accident Prevention

Euy-Hyun Suh

Professor, Department of Computer Engineering, Mokwon University, Daejeon 35349, Korea

[요 약]

원자력 발전소의 수소 가연성 문제는 중대 사고의 발생 요인 중 가장 대표적인 위협 요소이다. 따라서 수소 가연성의 위험을 보다 정확하고 신속하게 계산하고 판단하는 것이 필요하다. 본 논문은 수소 가연성 지수 값을 계산하여 위험 상태의 판단을 수행하는 운영자의 역할을 대신할 수 있는 스마트시스템을 제안한다. 이 시스템은 불규칙한 퍼지 집합을 사용하여 모호한 영역의 수소 가연성 지수 값을 정밀하게 계산하고 분석함으로써 위험 판단의 정확성을 높이고 위험시 경고음을 자동으로 발생시킨다. 또한 위협적인 환경에 대처하기 위해 DB에 저장된 이전의 결과를 기반으로 일정 시간 후의 수소 가연성 지수의 예측치가 제시된다.

[Abstract]

The problem of hydrogen flammability in nuclear power plants is the most representative threat factor among the causes of serious accidents. Therefore, it is necessary to calculate and judge the risk of hydrogen flammability more accurately and quickly. This paper proposes a smart system that takes place of the role of the operator determining the dangerous state by calculating the hydrogen flammability index value. This system uses an irregular fuzzy set to precisely calculate and analyze the hydrogen flammability index value in an ambiguous area, which leads to increasing the accuracy of risk judgment and generating automatically a warning sound in case of danger. In addition, the predicted value of the hydrogen flammability index value a certain time later, based on the previous results stored in the DB to cope with the threatening environment, is presented.

색인어 : 스마트 의사결정, 원자로 안전사고 예방, 퍼지, 예측지수, 수소 가연성

Keyword : Smart Decision Making, Reactor Safety Accident Prevention, Fuzzy, Predictive Index, Hydrogen Flammability

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2022.23.2.351>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 27 January 2022; **Revised** 21 February 2022

Accepted 21 February 2022

***Corresponding Author; Euy-Hyun Suh**

Tel: +82-42-829-7632

E-mail: ehsuh@mokwon.ac.kr

I. 서론

원자력 발전소는 한국에서 전기 에너지 생산에 크게 이바지하고 있다. 원자력의 비중은 2020년 현재 사용 전력의 29%를 차지한다. 원자력은 고효율이지만 안전관리에 만전을 기울여야 한다. 이에 안전을 위한 다양한 대책과 기법이 연구·시행되고 있으며, 그중 하나가 중대사고관리지도(SAMG)이다. 한국원자력연구원(KAERI)은 SAMG를 전산화 및 자동화하고 있고 이를 전자-SAMG라 한다.

원자력의 안전을 위협하는 요소 중 하나는 수소 가연성이다. 중대사고가 발생하는 과정에서 원자로 노심에서 수소가 발생될 수 있으며, 이러한 위험한 상황을 방지하기 위해 전자-SAMG에 수소 가연성 처리 방법이 포함되어 있으며 이러한 처리 방법은 운영자의 조치 기준이다. 운영자는 수소 가연성 표 및 그래프를 기반으로 위험 수준을 판단한다. 사고의 심각성을 신속하고 엄격하게 평가하기에는 충분하지 않다. 사고 상황은 시시각각 변할 수 있을 뿐만 아니라 원자력 발전소 운영자도 국가의 위협 여부를 스스로 판단하기 때문에 전자-SAMG는 스마트 판단 시스템이 필요하다.

그런데 중대사고는 한국원자력연구원이 관리하며 여러 연구[1][3][4][5]가 수행 중이다. SAMG를 전자-SAMG로 전환하는 과정에서 한국원자력연구원은 전자-SAMG 위험지역, 가연성 지역, 비가연성 지역으로 수소 가연성의 위험도를 분류하고, 수소 가연성의 위험도를 산정하는 판별 시스템을 개발했다[2]. 이러한 개선에도 불구하고 모호한 영역을 제어하는 방법은 여전히 해결되지 않은 채로 남아있다.

이러한 맥락에서 본 논문은 퍼지 집합[6]의 불규칙한 간격을 이용하여, 위험 상태를 운영자가 아닌 스마트하고 자동으로 판단하는 시스템을 제안한다.

II. 시스템 모델링과 구현

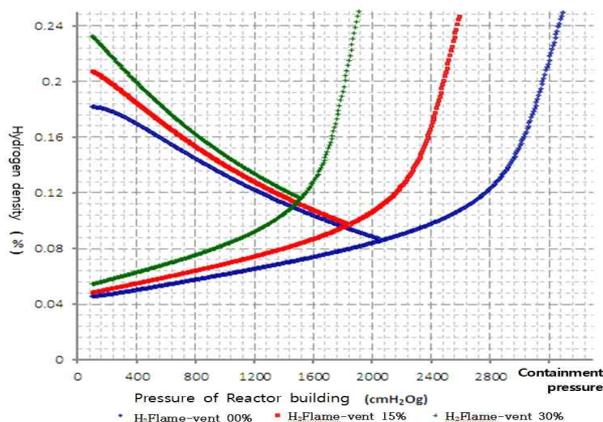


그림 1. 수소 가연성 위험 수준 경계
Fig. 1. Boundary on the level of risk of hydrogen flammability

그림 1은 세 가지 위험 수준 영역의 경계가 수소 밀도와 봉쇄 압력 모두에 의해 결정된다는 것을 보여준다.

운영자는 수소밀도와 봉쇄압력을 구하여 위험지역, 인화지역, 불연지역 중 수소인화위험도를 판단한다. 이 프로세스를 자동화하기 위해 본 논문은 생성규칙 기반의 퍼지 규칙과 수소 가연성에 대한 계산 절차로 구성된 퍼지 제어 시스템을 사용한다. 본 시스템은 DB에 저장된 이전의 수소 가연성의 계산 결과를 기반으로 위험도의 정량화 값과 다음 추정값을 제시한다.

2-1 시스템 모델

그림 2는 시스템이 DB, 지식 베이스, 퍼지 제어 시스템, 인터페이스 등으로 구성되어 있음을 보여준다. 지식 베이스에는 100개의 규칙이 생성 규칙 형태로 저장되어 있고, 계산된 수소 가연성 테이블이 DB에 저장되어 있다. 퍼지 제어 시스템에는 퍼지화, 응용 퍼지 제어 규칙, 비퍼지화의 순서가 있다. 인터페이스는 사용자와 컴퓨터 간의 통신 대화 창이다.

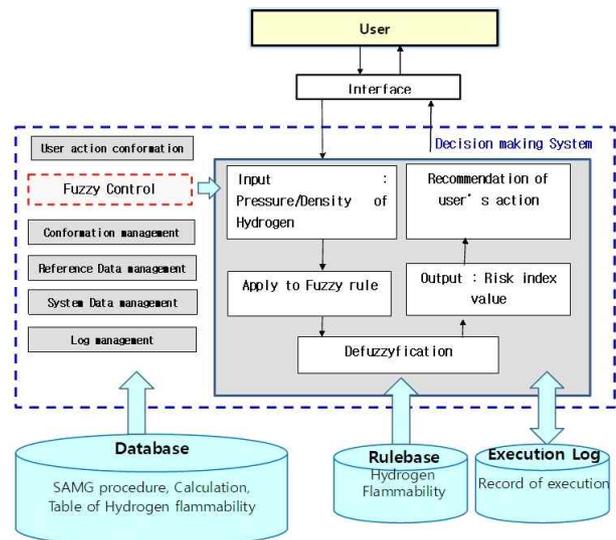


그림 2. 시스템 구조
Fig. 2. System structure

2-2 시스템 구현

퍼지화를 위해 식 (1)과 같이 삼각형 소속 함수가 사용된다.

$$u(x) = \begin{cases} \frac{1}{r-p}(x-r)+1, & p < x \leq r \\ -\frac{1}{q-r}(x-r)+1, & r < x \leq q \end{cases} \quad (1)$$

수소 밀도 및 봉쇄 압력과 관련하여 각 범위는 10개의 간격으로 나뉜다. 퍼지 설정 간격은 규칙적으로 또는 불규칙적으로 나눌 수 있다.

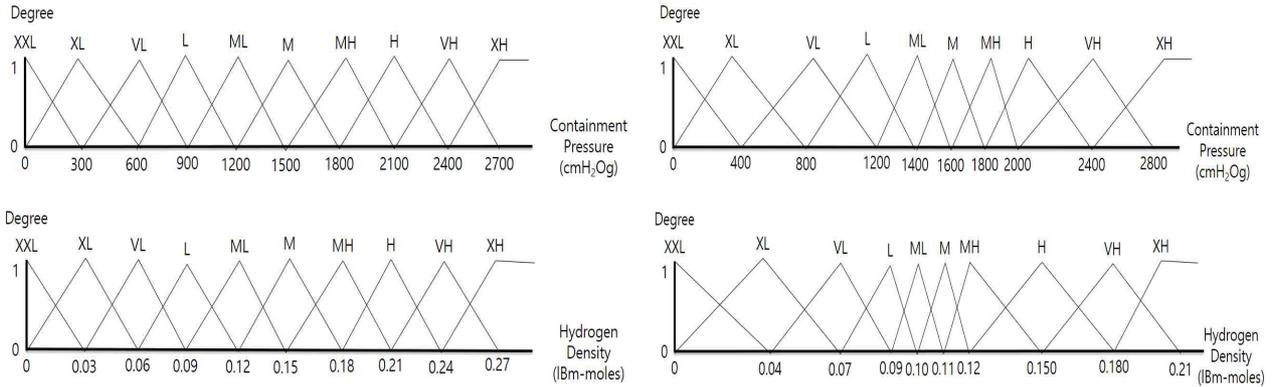


그림 3. 봉쇄 압력과 수소 밀도의 Fuzzy set 간격
 Fig. 3. Gap of fuzzy set between the containment pressure and the hydrogen density

그림 3에서 (a)와 (c)에서는 퍼지 간격이 규칙적인 반면 (b)와 (d)에서는 불규칙하다. 특히 (b)와 (d)는 그림 1에서 두 개 또는 세 개의 영역이 교차하는 부분에서 간격이 좁고 다른 부분에서 넓다. 식 (1)을 이용하여 수소 밀도 및 봉쇄 압력과 관련하여 소속함수의 값을 계산하였다.

위험도는 표 1과 같이 1부터 7까지이다. 값 1은 안전한 수준, 값 7은 매우 위협적인 수준이다.

표 1. 수소 특성 위험도의 값

Table 1. Risk degree of Hydrogen characteristics and values

Hydrogen characteristics	Value
High-threat(HT)	7
Threat(T)	6
Threat-caution(TC)	5
Combustion(C)	4
Combustion-caution(CC)	3
Minimum-combustion(MC)	2
Never-combustion(NC)	1

표 2. 봉쇄 압력/수소 밀도에 따른 수소 특성 위험도 값

Table 2. Hydrogen risk values according to the containment pressure and the hydrogen density.
 (1 : Containment pressure, 2 : Hydrogen density)

1 \ 2	XXL	XL	VL	L	ML	M	MH	H	VH	XH
XXL	HT	HT	HT	HT	HT	HT	HT	T	T	T
XL	T	T	HT	HT	HT	HT	HT	T	T	T
VL	T	T	T	T	HT	HT	HT	T	T	T
L	TC	TC	T	T	T	T	T	T	T	TC
ML	C	TC	TC	TC	T	T	T	T	T	TC
M	C	C	TC	TC	T	T	T	T	TC	TC
MH	C	C	TC	TC	TC	T	T	T	TC	MC
H	C	C	C	C	TC	TC	TC	TC	MC	MC
VH	CC	CC	CC	CC	CC	CC	MC	MC	MC	MC
XH	CC	CC	CC	CC	CC	CC	MC	MC	MC	MC

표 2는 봉쇄 압력 및 수소 밀도의 수준에 대한 수소 특성 위험도의 값을 나타낸 관계 표이다.

지식 베이스는 표 2를 기반으로 100개의 퍼지 제어 규칙을 다음과 같이 생성규칙 형태로 가지고 있다.

If (density = XH & pressure = XH)
 then risk_degree= MC
 If (density = L & pressure = M)
 then risk_degree = T

비퍼지화는 식 (2)를 사용하였다.

$$risk\ value = \frac{\sum_{i=1}^{100} (u[i]^* * w[i])}{\sum_{i=100} u[i]^*} \tag{2}$$

$$u[i]^* = \min(hydrogen\ density(u[i]),\ containment\ pressure(u[i]))$$

$$w[i] = risk\ value$$

그림 4의 인터페이스는 결과, 상태 표시줄 및 추정된 수소 가연성 지수 값을 보여준다. 결과는 식 (2)에 의해 계산된 위험 값이다. 상태 표시줄은 상대적 위험 수준을 나타낸다. 추정된 수소 가연성 지수 값은 과거 10개의 값을 기초로 식 (3)에 의해 계산된다.

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + \sqrt{\frac{\sum_{j=i-10}^{i-1} (x_j - \bar{x})^2}{10}} \\ x_{i+1} = x_i - \sqrt{\frac{\sum_{j=i-10}^{i-1} (x_j - \bar{x})^2}{10}} \end{cases} \tag{3}$$

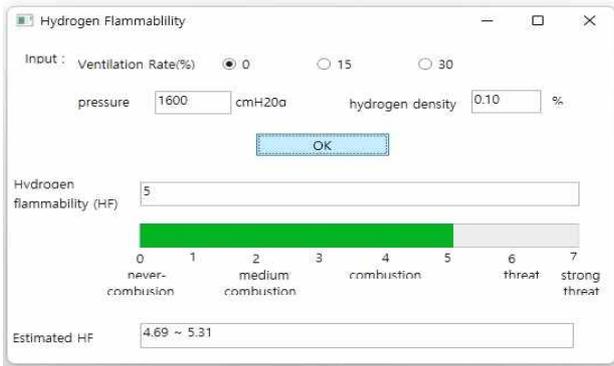


그림 4. 인터페이스
Fig. 4. Interface

본 시스템은 Visual Studio C# 및 Access DB를 사용하여 구현되었다. 운영자가 인터페이스 상단에 자료를 입력한 후 ok 버튼을 클릭하면 시스템은 인터페이스 하단의 수소 가연성 위험도와 다음 위험도 예측치를 제공한다.

2-3 구현 시스템의 성능

본 논문은 수소 환기율 0%에서 수소 가연성 위험도만을 보여준다. 환기율 10%, 30%에서 사용한 알고리즘은 0%와 동일하나, 각각 다른 퍼지 세트와 퍼지 규칙을 사용하였다.

표 3은 구현된 시스템에 다양한 압력과 밀도를 입력하여 계산한 위험도를 보여준다. 값 A는 일정한 간격의 퍼지 집합을 사용하여 계산된 위험도 값이고 값 B는 불규칙한 간격의 퍼지 집합을 통해 얻은 위험도 값이다. 두 가지 방법으로 얻은 위험도 값 중 유사한 값은 제외하고 모호한 부분에 가까운 위험도 값만 추출한다. 값 B는 값 A보다 더 정확하고 의미있는 위험도 값을 나타낸다. 왜냐하면 값 B는 민감한 영역의 수소 가연성 위험도 값의 급격한 변화를 표현할 수 있지만 값 A는 급격한 변화를 표현하지 못하기 때문이다. 표 3의 값 A와 값 B를 기준으로 그림 5의 그래프에서 이를 보여준다

표 3. 규칙/비규칙 퍼지세트에 기반한 수소가연성 위험도 비교
Table 3. Comparison of the risk of hydrogen flammability based on the regular/irregular fuzzy set

	Ventilation	Pressure	Density	Value A	Value B
1	0	1400	0.08	3.5	2.8
2	0	1400	0.09	5.5	3.0
3	0	1400	0.10	6.1	4.3
4	0	1400	0.11	6.4	5.3
5	0	1400	0.12	7.0	7.0
6	0	1800	0.08	3.0	1.0
7	0	1800	0.09	5.0	2.0
8	0	1800	0.10	5.6	7.0
9	0	1800	0.12	6.5	7.0
10	0	1800	0.15	7.0	7.0
11	0	2000	0.10	4.7	4.0
12	0	2000	0.11	5.3	5.0
13	0	2000	0.12	6.0	7.0
14	0	2000	0.13	6.3	7.0

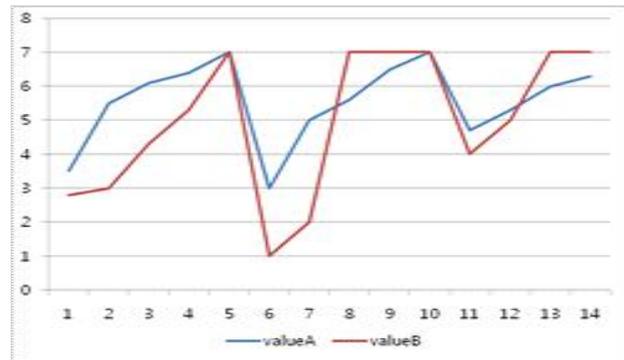


그림 5. 규칙/비규칙 퍼지세트에 기반한 위험도 값 비교
Fig. 5. Risk value comparison based on regular/irregular fuzzy set

3. 결 론

본 논문은 원자로 안전의 중대사고 요소 중 하나인 수소 가연성의 위험도를 나타내는 지수를 제안하고 통지하는 스마트 의사결정시스템을 구축하였다. 특히 위험지역, 가연지역, 불연지역의 경계선에 인접한 지수 값 산출의 정확도를 높이기 위해 퍼지집합을 재정렬하였다.

이 시스템은 불규칙한 간격을 기준으로 퍼지 세트를 정의하여 수소 가연성 밀도 및 봉쇄 압력의 작은 변화에도 위험 값의 급격한 변화를 나타내는 민감한 수소 가연성 위험도 값을 제공한다.

본 논문에서 제안한 시스템은 위험 상태에 대해 운영자를 대신하여 스마트하고 자동적이며 정확한 결정을 내린다. 또한 DB에 저장된 이전 10개 결과를 바탕으로 수소 가연성 지수 값의 급격한 변화에 대응하고 위협적인 환경으로 진전되지 않도록 하기 위해 다음 위험도 값을 추정하여 위험을 예방한다.

본 시스템은 데이터를 계속 수집하여 기계학습을 이용한 위험예측모델로 확장하는 후속 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] H. Y. Yang, et al., "Monitoring and Uncertainty Analysis of Feedwater Flow Rate Using Data-Based Modeling Methods", IEEE, Vol. 56, No.4, pp. 2426-2433. August 2009. <https://10.1109/TNS.2009.2022366>

[2] S. H. Park et al., "Comparison of Fuzzy Set Definition for Hydrogen Flammability during a Severe Accident", in proceeding of the 19th Pacific Basin Nuclear Conference, Vancouver, Canada, August, 2014

[3] M. Si Fodil, et al., "A Fuzzy Rule Base for the Improved Control of a Pressurized Water Nuclear Reactor", IEEE, Vol.8, February, 2000, pp. 1-10, <https://10.1109/91.824761>

- [4] N. H. Lee, et al., “A Design of radiation hardened common signal processing module for sensors in NPP”. JKIICE, Vol.19, no.6, pp. 1405-1410, June, 2015, <https://doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.6.1405>
- [5] S. M. Seo, C. E. Kim, “Development of HPS(Hydrogen Plasma-treatment System) using TRIZ”, Journal of the Korea Management Engineers Society, Vol 25, no.2, pp. 171-185, June, 2020, <https://doi.org/10.35373/KMES.25.2.10>
- [6] Sangfeel Kwak, Byung-jae Choi, “ Defuzzification Scheme and its Numerical Example for Fuzzy logic based Control System”, Journal of Korean institute of intelligent systems, Vol. 28, No. 4, pp.350-354, August, 2018, <https://doi.org/10.5391/JKIIS.2018.28.4.350>



서의현(Euy-Hyun Suh)

1980년 : 이화여자대학교 수학과 (이학사)
1985년 : 콩피에뉴공과대학교 컴퓨터공학 (DEA)
1988년 : 콩피에뉴공과대학교 컴퓨터공학 (공학박사-인공지능)

1980년~1982년: 한국개발연구원(KDI) 연구원
1999년~2000년: 한국전자통신연구원(ETRI) 초빙연구원
1990년~현 재 : 목원대학교 컴퓨터공학과 교수
※ 관심분야 : 인공지능, HCI, 빅데이터