

Rough Set 이론을 이용한 쓰레기 소각로의 퍼지 제어 시스템을 위한 입출력 관계 설정 및 규칙 생성

Determination of the Input/Output Relations and Rule Generation for Fuzzy Combustion Control System of Refuse Incinerator using Rough Set Theory

방원철, 변증남**

*한국과학기술원 전기및전자공학과 (Tel:042-869-3419; Fax:042-869-8750; E-mail: bang@ctrsys.kaist.ac.kr)

**한국과학기술원 전기및전자공학과 (Tel:042-869-3419; Fax:042-869-8750; E-mail: zbien@ec.kaist.ac.kr)

Abstracts It is proposed, for fuzzy combustion control system of refuse incinerator to find the relationship between inputs and outputs and to generate rules to control by using rough set theory. It is not easy to find out the corresponding inputs for each output and the control rules with incomplete or imprecise information consisting expert knowledge, process and manipulator values in the field, and operation manual for the given system. Most decision problems can be formulated employing decision table formalism. A decision table on fuzzy combustion control system for refuse incinerator is simplified and produces control algorithms(rules). The I/O relations and the control rules found by rough set theory are compared with the previous result.

Keywords Rough Set Theory, Decision Table, Rule Generation, Fuzzy Logic Controller, Refuse Incinerator

1 서론

1982년 Pawlak 에 의하여 러프 집합(rough set)의 개념이 도입된 이래 15년 동안 이의 이론과 응용에 있어 점진적인 발전이 있어왔다. 러프 집합 이론은 불충분하거나 일관성 없는 정보로부터 체계적이고 자동적인 방법으로 핵심적인 정보를 추려내려는 점과 실제로의 응용이 어렵지 않다는 점[1]에 있어서 점차 그 이목이 집중되고 있으며, 방대한 불분명한 자료-정보를 해석하는데 있어서 여러 속성(attributes)을 이용한 구분화 및 근사화를 효과적으로 제공하는 등 상당히 유용한 기법으로서 복잡한 제어 시스템의 설계 문제에 있어 상위 단계 구조 설계에의 응용도 가능하다[2].

판단 테이블(decision table) 기법은 특정 조건이 만족되었을 때 어떤 판단이 취해져야 하는지를 제시해주는 한 방법으로 대부분의 판단 문제는 판단 테이블 형태로 표현할 수 있다[1]. 시스템의 제어에 있어서 이를 적용한다면 전문가에 의해 운전되는 플랜트에서 얻은 현장의 데이터와 전문가의 지식 등을 판단 테이블 형태로 나타내어 특정 상태에서 원하는 출력을 얻기 위하여 어떠한 입력이 들어가야 하는지 그 제어 규칙들을 찾아낼 수 있을 것이다. 러프 집합 이론을 이용한 판단 테이블 기법을 시멘트 노(—cement kiln)의 제어에 적용한 예[4]에서는 노를 제어하는 급탄기(給炭機: stoker)의 동작을 관찰함으로써 급탄기의 성능을 모사하는 제어 규칙을 유도하였고 이를 실제의 시멘트 노에 적용하여 그 성능을 보였다.

본 연구에서는 퍼지 제어 기법으로는 제어된 사례[5]가 있는 쓰레기 소각로의 퍼지 제어를 구성하기 위한 입출력 변수의 설정과 규칙의 생성을 위해 러프 집합 이론을 적용함으로써 보다 효율적이고 비휴리스틱한 방법으로 접근해보고자 한다.

쓰레기 소각로의 제어를 위해서는 소각로에서 얻을 수 있는 출력 변수들과 소각로의 제어를 위한 입력 변수들에 대하여 각 출력 변수에 영향을 미치는 입력 변수들을 결정해야 하며 이는 상당히 어렵다[6]. 이를 러프 집합 이론을 적용하여 모든 입력 변수들을 조건 속성(condition attributes)으로 두고 출력 변수 각

각을 판단 속성(decision attributes)으로 두어 현장에서 얻은 데이터와 전문가의 지식을 토대로 만든 판단 테이블에서 속성의 의존도(dependency degree of attributes)를 그대로 유지하도록 하는 최소의 입력 변수의 집합들을 찾아냄으로써 각 출력 변수들에 영향을 미치는 입력 변수를 결정한다.

또한 소각로의 퍼지 제어를 위한 규칙 테이블은 전문가의 지식과 현장의 데이터를 통한 것이므로 여기에는 불완전하거나(incomplete), 모순이 있거나(inconsistent), 또는 불필요한(indispensable) 규칙들이 있을 수 있다. 이를 러프 집합 이론의 규칙 간소화 기법을 이용하여 필요로 하는 최소의 규칙을 얻어낸다.

본 논문에서는 2장에서 판단 테이블과 이에 관련된 몇 가지 용어들의 정의와 수학적 정리들을 다루고, 3장에서는 쓰레기 소각로의 퍼지 제어 시스템의 구조와 각 블럭에서의 입출력 변수들을 설명한다. 4장에서는 대상 시스템의 판단 테이블을 간략화함으로써 각각의 출력에 영향을 미치는 입력 변수들을 찾아낸 후 테이블 내의 불필요한 속성값을 제거함으로써 원하는 출력을 내기 위한 입력을 알려주는 제어 규칙을 찾아내고 이를 기존의 퍼지 제어 규칙들과 비교함으로써 러프 집합 이론을 이용한 방법의 타당성을 보인다. 본 논문의 결론과 러프 집합 이론의 이러한 응용의 의의를 5장에서 제시한다.

2 판단 테이블

러프 집합에 관한 자세한 내용은 [1,7-12]를 참조하고 여기서는 개략적인 용어와 정리만을 설명한다.

2.1 리덕트(Reduct)와 코어(Core)

공집합이 아닌 유한 집합인 전체집합 U 와 속성 집합 A 가 주어졌을 때, 지식베이스(knowledge base) K 는 $K = (U, A)$ 로 정의되고, $P, Q \subset A$ 인 조건 속성 P 와 판단 속성 Q 에 대해서 판단 테이블 T 가 $T = (U, A, P, Q)$ 로 정의된다. 임의의 $R \subset A$ 는 U 상에서 하나의 이진 관계(binary relation) $I(R)$ 를 결정하는데 이를 식별 불능 관계(indiscernibility relation)라고 하고 이는 모든

$a \in R$ 에 대하여 $x, y \in U$ 인 두 원소 x, y 의 속성값이 같을 때에만 $xI(R)y$ 가 성립하는 관계로 정의된다. R 에 의해 정해지는 분할(Partition)들의 집합을 $U/I(R)$ 이라고 표기한다.

이제 몇 용어들의 정의와 정리를 보인다.

정의 1. R 을 동치 관계들의 집합이라 하고 $R \in \mathbf{R}$ 라 할 때, $I(\mathbf{R}) = I(\mathbf{R} - \{R\})$ 이면 R 은 \mathbf{R} 내에서 불필요(dispensable)하다고 하고, 그렇지 않으면 필수 불가결(indispensable)하다고 한다.

정의 2. 모든 $R \in \mathbf{R}$ 이 \mathbf{R} 내에서 필수 불가결하면 \mathbf{R} 은 독립(independent)이라고 하고, 그렇지 않으면 종속(dependent)이라고 한다.

정의 3. $Q \subseteq P$ 가 독립이고 $I(Q) = I(P)$ 이면 Q 는 P 의 하나의 리덕트(reduct; $RED(P)$)라고 한다.

정의 4. P 의 모든 필수 불가결한 관계들의 집합을 P 의 코어(Core; $CORE(P)$)이라고 한다.

정리 1. $CORE(P) = \cap RED(P)$

정의 5. $\frac{RX}{\overline{RX}} = \cup \{Y \in U / R: Y \subseteq X\}$ / $\cup \{Y \in U / R: Y \cap X \neq \emptyset\}$ 를 각각 R -하한 근사

(lower approximation)와 R -상한 근사(upper approximation)라고 한다.

정의 6. $POS_P(Q) = \cup_{x \in U/Q} PX$ 을 Q 의 P -긍정 영역(positive region)이라고 한다.

Q 의 P -긍정 영역은 Q 로 분할된 각 블럭으로 유일하게 분류될 수 있는 원소들의 집합이다.

정의 7. P, Q 를 동치 관계들의 집합이라 하고 $R \in P$ 라 할 때, $POS_{I(P)}(I(Q)) = POS_{I(P-R)}(I(Q))$ 이면 R 은 P 내에서 Q -불필요하다고 하고, 그렇지 않으면 P 내에서 Q -필수 불가결하다고 한다.

정의 8. 모든 $R \in P$ 이 P 내에서 Q -필수 불가결하면 P 는 Q -독립이라고 하고, 그렇지 않으면 Q -종속이라고 한다.

정의 9. $S \subseteq P$ 가 Q -독립이고 $POS_S(Q) = POS_P(Q)$ 이면 Q 는 P 의 하나의 Q -리덕트($RED_Q(P)$)라고 한다.

정의 10. P 의 모든 Q -필수 불가결한 관계들의 집합을 P 의 Q -코어($CORE_Q(P)$)라고 한다.

정리 2. $CORE_Q(P) = \cap RED_Q(P)$

2.2 지식의 종속도(Dependency of Knowledge)

판단 테이블에서 판단 속성이 조건 속성에 얼마나 의존하고 있는지를 나타내는 속성 의존도를 정의한다.

정의 11. $I(P) \subseteq I(Q)$ 이면 Q 가 P 에 완전 종속(totally dependent)한다고 한다.

완전 종속은 Q 에 의한 분할보다 P 에 의한 분할이 더 미세(fine)함을 뜻한다. 부분 종속도도 다음과 같이 정의할 수 있다.

정의 12. $P, Q \subseteq A$ 에 대해서 P 에 대한 Q 의 속성 의존도(dependency degree of attributes) k 를

$$k = \frac{|POS_P(Q)|}{|U|}$$

로 정의한다.

2.3 규칙의 축소

앞 절에서 설명한 리덕트라는 개념을 이용하면 판단 테이블로부터 불필요한 속성과 속성값을 제거함으로써 간략화된 규칙을 얻을 수 있다. 이의 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1. 우선 정의 9의 상대 리덕트(relative reduct)를 판단 테이블의 각 규칙마다 적용하여 변형된 리덕트를 구한다. 이를 위해 첫번째 행에서 $\{a, b, c\}$ 를 리덕트 후보(reduct candidate)로 두고 이것이 다른 규칙과 일관성이 있는지의 여부를 확인한다. 있다면 한 속성씩 제거해 나가면서 남은 속성들의 집합을 다시 리덕트 후보로 두고 리덕트인지를 확인한다. 이와 같은 방법으로 점점 작은 개수의 속성만으로 구성된 집합이 다른 규칙과 일관성을 유지하는지를 확인하여 유지되지 않으면 이전의 리덕트 후보가 리덕트가 된다. 다른 규칙과의 일관성 여부를 확인하는 방법은 리덕트 후보에 속하는 조건 속성들의 속성값과 같은 값을 갖는 다른 행에 대하여 판단 속성의 속성값과 같으면 일관성이 있는 것이고 아니면 없는 것이다.

단계 2. 단계 1에서 구한 리덕트들로 규칙을 만든다. 여기서 규칙은 리덕트에 속하는 조건 속성들이 해당 속성값을 가질 때 판단 속성이 어떤 값을 갖는지를 나타낸다.

단계 3. 다음으로 각 행에서 구해진 규칙들 중에서 각 규칙마다 하나의 규칙만을 선택하되 이 때 선택된 총 규칙의 수가 최소가 되게 한다.

단계 4. 마지막으로 판단 속성의 속성값이 같은 규칙에 대해서는 OR를 이용하여 규칙을 하나로 묶는다.

다음의 판단 테이블로 예를 들어 본다.

표 1. 판단 테이블의 예
Table 1. Example of Decision Table

U	a	b	c	d
0	0	1	1	1
1	1	0	1	1
2	1	1	2	1
3	0	1	0	0
4	1	0	1	0
5	0	1	2	1

6개의 규칙과 4개의 속성이 있는 표 1에서 조건 속성 C와

판단 속성 D 를 각각 $C = \{a, b, c\}$, $D = \{d\}$ 라고 정한다.

이제 단계 1에서 설명한 대로 각 행에 대한 리덕트를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} RED_{(d)}^0 &= \{\{a, c\}, \{b, c\}\} \\ RED_{(d)}^2 &= \{\{a, b\}, \{c\}\} \\ RED_{(d)}^3 &= \{\{c\}\} \\ RED_{(d)}^5 &= \{\{c\}\} \end{aligned}$$

단계 2에 의하여 위에서 구한 리덕트들로 규칙을 구하면,

$$\begin{aligned} a_0 c_1 &\rightarrow d_1 \quad (0) \\ b_1 c_1 &\rightarrow d_1 \quad (0) \\ a_1 b_1 &\rightarrow d_1 \quad (2) \\ c_2 &\rightarrow d_1 \quad (2,5) \\ c_0 &\rightarrow d_0 \quad (3) \end{aligned}$$

와 같다. 단계 3으로서 최소의 수가 되도록 규칙을 선택하려면 2번 행과 5번 행이 공동으로 만든 규칙을 택함으로써 총 수를 다음과 같이 3개로 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} a_0 c_1 &\rightarrow d_1 \\ c_2 &\rightarrow d_1 \\ c_0 &\rightarrow d_0 \end{aligned}$$

마지막으로 앞의 두 규칙을 하나로 묶으면

$$\begin{aligned} a_0 c_1 + c_2 &\rightarrow d_1 \\ c_0 &\rightarrow d_0 \end{aligned}$$

을 얻는다.

3 쓰레기 소각로의 퍼지 제어 시스템

3.1 개요

쓰레기 소각로의 연소 조건을 만족시키기 위해서는 쓰레기의 주입량, 주입 연소 공기량 및 온도를 복합적으로 제어할 필요가 있다.

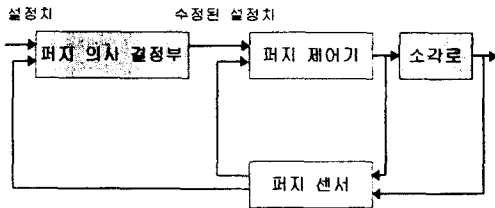


그림 1. 소각로 퍼지 제어 시스템의 구성도
Figure 1. Configuration of Fuzzy Control System for Incinerator

그러나 쓰레기의 소각 공정은 매우 복잡한 화학·물리 현상이므로 수학적 모델링을 얻기가 어렵고 쓰레기의 종류 및 상태,

질, 개별적인 요소 등이 복합적으로 연소에 영향을 미치므로 수학적 모델링을 바탕으로 한 제어를 구성할 경우에 원하는 제어 성능을 얻을 수 없어서[6] 현장의 오랜 경험을 가진 전문가들에 의하여 운전되고 있다.

퍼지 제어 기법은 전문가의 지식에 바탕을 둔 제어를 행하기에 용이한 구조로 되어 있으므로 사람이 잘 제어하는 시스템에 많이 적용되고 있다[13]. 쓰레기 소각로의 퍼지 제어를 위하여 [5][6]에서 구성한 퍼지 제어기는 그림 1과 같다.

3.2 각 블럭의 역할

각 퍼지 센서는 직접적으로 측정이 가능한 데이터로부터 직접 측정할 수 없는 정보나 인간이 사용하는 불명확한 정보로 표현하는 블럭으로 노내 압력, 피더(feeder)의 ON/OFF, 연소부 길이, 중발량 건조부 길이, CO, O₂로부터 쓰레기 두께, 쓰레기 연소량, 쓰레기 질, 발열량, 연소 상태, 역응답 등을 구해낸다.

퍼지 의사 결정부는 설정치와 측정치, 퍼지 센서 등에서 얻은 값들로부터 수정된 설정치를 구하여 퍼지 제어기에 건네주는 블럭으로 처리량 설정치, 현재 처리량, 중발량 설정치, 현재 중발량, 발열량, 쓰레기 질, 노온도로부터 연소 공기 온도 설정치, 처리량 설정치, 중발량 설정치 등을 결정한다.

퍼지 제어기는 연소 공기 온도 설정치, 현재 연소 공기 온도, 처리량 설정치, 현재 처리량, 중발량 설정치, 현재 중발량, 쓰레기 두께, 쓰레기 질, 연소부 길이, 연소 상태, 역응답 등으로부터 피더와 급탄기의 ON/OFF, 피더 속도, 피더 스트로크(feeder stroke), 급탄기 속도, 오리피스 댐퍼(orifice damper)의 열린 정도를 결정한다.

3.3 여러 방법에 의한 입출력 관계 및 규칙

이러한 입출력 관계와 각 블럭 내에서 출력 각각에 대한 퍼지 규칙 테이블의 구성을 위해 어떠한 입력이 이용되어야 하는가 하는 점과, 그 때의 규칙의 설정 등은 현장 전문가의 지식과 데이터의 분석을 통하여 이루어진 것이다. 이를 위하여 [6]에서는 두 명의 전문 운전원의 지식, 실제의 입출력 데이터, 운전 설명서를 바탕으로 입출력 관계와 퍼지 규칙을 만들고 그림 1과 같은 구조의 퍼지 제어기를 구성하였다.

[6]에서 제시하는 전문가의 지식, 실제의 입출력 데이터, 운전 설명서의 내용을 바탕으로 한 입출력 관계는 표 2와 같다.

표 2. 여러 방법에 의한 입출력 관계 및 규칙의 수
Table 2. I/O relation and the number of rules by several methods

출력	방법		실제 입출력	운전 설명서
	전문 운전원 1	전문 운전원 2		
피더 속도	노내온도 연소부 길이 (규칙 3 개)	중발량 쓰레기 두께 연소부 길이 (규칙 4 개)		
	쓰레기 질 (규칙 2 개)	쓰레기 질 (규칙 2 개)		쓰레기 질 (규칙 3 개)
중발량 설정치	노내온도 중발량 쓰레기 질 (규칙 4 개)	중발량 쓰레기 질 연소공기압력 O ₂ , CO (규칙 13 개)	중발량 변화 노내온도 노내온도변화 노내압력 노내압력변화 (규칙 12 개)	

급탕기 속도	연소부 길이 노내온도 (규칙 4 개)	쓰레기 질 쓰레기 두께 연소부 길이 (규칙 8 개)	노내압력 연소부 길이 O ₂ CO 중발량 노내온도 (규칙 6 개)	쓰레기 두께 연소부 길이 (규칙 1 개)
오리피스 열퍼	중발량 노내온도 O ₂ CO (규칙 4 개)	중발량 노내온도 O ₂ CO (규칙 9 개)	중발량변화 노내온도 노내온도변화 노내압력 O ₂ (규칙 16 개)	O ₂ (규칙 2 개)
연소공기온도	쓰레기 질 노내온도 (규칙 3 개)	쓰레기 질 노내온도 (규칙 7 개)		쓰레기 질 (규칙 3 개)
피더 ON/OFF	중발량 노내온도 연소공기압력 연소부길이 처리량 (규칙 7 개)	중발량 쓰레기 두께 쓰레기 질 (규칙 9 개)		

실제의 규칙의 예를 보이면 표 3 과 같다. 이것은 전문 운전 원 2 의 피더 속도에 관한 규칙이다.

표 3. 소각로 운전 규칙의 예

Table 3. Example of operation rules for refuse incinerator

중발량	쓰레기 두께	연소부 길이	피더 속도
없다	두껍다	길다	느리게
없다	?	길다	느리게
적다	없다	짧다	빠르게
없다	없다	길다	느리게

여기서 ?로 표시된 속성값은 알아 낼 수 없는 정보를 의미 한다. 이제 표 2 와 이에 관한 규칙들을 바탕으로 판단 테이블 을 구성하고 퍼지 센서, 퍼지 의사 결정부, 퍼지 제어기의 각 블럭을 구성하는 출력들에 대하여 어떠한 입력을 설정하여야 하는지와 그 때의 규칙을 유도하기로 한다.

4 판단 테이블 간략화 및 규칙 생성

4.1 판단 테이블의 간략화

표 2 와 이와 관련된 규칙들로부터 판단 테이블을 만들려면 입력들을 조건 속성으로 두고 출력들을 판단 속성으로 둔다. 속성값은 표 3 과 같은 규칙에서 "두껍다", "얇다", "증가", "감소" 등의 값이 될 것이다. 각 입력력 변수 즉 조건 속성, 판단 속성과 이들의 속성값들을 편의상 다음과 같이 표기하기로 한다.

조건 속성		판단 속성	
노내온도	a	피더 속도	n
노내온도변화	b	피더 스톱/크	o
노내압력	c	중발량 설정치	p
노내압력변화	d	급탕기 속도	q
중발량	e	오리피스 열퍼	r
중발량변화	f	연소공기온도	s
연소공기압력	k	피더 ON/OFF	l
연소부길이	h		

쓰레기 두께 : i
쓰레기 질 : j
처리량 : k
O₂ : l
CO : m

또한 표 3 의 예에 대한 각 속성값들에 대해서도 다음 예와 같이 표기하기로 한다.

속 성	속성값	
중발량	적다	0
	중간	1
	없다	2
쓰레기 두께	얇다	0
	중간	1
	두껍다	2
연소부 길이	짧다	0
	중간	1
	길다	2
피더 속도	매우 느리게	0
	느리게	1
	중간	2
	빠르게	3
	매우 빠르게	4

이와 같은 표기로 표 4 와 같은 판단 테이블을 만들 수 있다. 전체 테이블은 조건속성 13 개, 판단속성 7 개로 구성되어 있으며 규칙의 갯수는 122 개이다. 여기서는 일부만을 보이기로 한다.

표 4. 쓰레기 소각로 제어물 판단 테이블

Table 4. Decision table for refuse incinerator control

U	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	
0	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
92	2	2	0	0	2	2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
93	2	1	0	2	2	1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
94	2	1	1	2	2	1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
95	2	1	0	0	2	2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
96	2	0	1	1	2	2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
97	2	1	1	2	2	2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
98	2	2	1	2	2	2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

이제 2 장 2 절의 개념을 이용하여 표 4 의 판단 테이블을 간략화한다. 판단 테이블에서 각각의 판단속성에 대하여 속성 의 존도를 그대로 유지하는 최소의 조건속성들의 집합인 리덕트를 찾아냄으로써 각 출력 변수들에 영향을 미치는 입력 변수를 결정한다. 속성과 규칙의 갯수가 많아지면 프로그램을 작성하여 구하는 것이 유리하다. 7 개의 판단속성에 대한 상대 리덕트와 속성의존도를 구하면 다음과 같다.

$$RED_{\{n\}}(P) = \{\{h\}\} \text{ with } k = 1.000$$

$$RED_{\{o\}}(P) = \{\{j\}\} \text{ with } k = 1.000$$

$$RED_{\{p\}}(P) = \{\{a, b, e, f, g, j, k\}, \{a, d, e, f, g, j, k\}\} \text{ with } k = 0.813$$

$$RED_{\{q\}}(P) = \{\{a, c, h, i, j\}\} \text{ with } k = 0.873$$

$$RED_{\{r\}}(P) = \{\{a, b, c, e, f, l\}\} \text{ with } k = 0.765$$

$$RED_{\{s\}}(P) = \{\{a, j\}\} \text{ with } k = 0.958$$

$$RED_{\{t\}}(P) = \{\{e, g, i, j\}\} \text{ with } k = 0.904$$

$$\text{단, } P = \{a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m\}$$

위와 같이 리덕트를 구하고 나면 이제 각 출력 변수들에 영향을 미치는 입력 변수들이 어떠한 것인지 알 수 있으며 속성의 의존도의 값은 전체 조건 속성들의 속성값으로부터 각각의 판단 속성의 값을 결정하는데 있어 어느 정도의 의존도를 갖는지를 나타내므로 속성 의존도가 1인 위의 두 경우는 리덕트의 조건 속성의 속성값으로 완전히 판단 속성의 속성값을 결정할 수 있다는 뜻이 된다. 또한, 리덕트는 속성 의존도를 유지하는 최소의 조건 속성들의 집합이므로 판단을 위하여 더 이상의 속성은 필요하지 않음을 의미한다.

4.2 규칙의 생성

이제 2장 3절에서 다른 방법으로 판단 테이블로부터 쓰레기 조각들의 제어 규칙들을 찾아본다.

각 판단 속성에 대하여 리덕트를 구한 후 이에 속한 속성만으로 이루어진 규칙들을 축소하면 다음과 같은 규칙들을 얻을 수 있다. 여기서는 그 일부만을 보인다.

n (피더 속도)에 관한 규칙

$$\begin{aligned} h_2 &\rightarrow n_1 \\ h_0 &\rightarrow n_3 \end{aligned}$$

α (피더 스트로크)에 관한 규칙

$$\begin{aligned} j_0 &\rightarrow o_0 \\ j_1 &\rightarrow o_1 \\ j_2 &\rightarrow o_2 \end{aligned}$$

s (연소공기온도)에 관한 규칙

$$\begin{aligned} a_2j_2 &\rightarrow s_0 \\ a_1j_2 &\rightarrow s_1 \\ a_2j_1 &\rightarrow s_1 \\ a_0j_2 &\rightarrow s_2 \\ a_1j_1 &\rightarrow s_2 \\ a_2j_0 &\rightarrow s_2 \\ a_0j_1 &\rightarrow s_3 \\ a_1j_0 &\rightarrow s_3 \\ a_0j_0 &\rightarrow s_4 \end{aligned}$$

여기서 구한 규칙들을 살펴보면 α (피더 스트로크)와 s (연소공기온도)의 경우는 리덕트의 각 속성값들의 갯수의 곱(3×3)에 해당하는 수 만큼의 일관성 있는 규칙을 갖고 있어서 이를 퍼지 규칙 테이블로 사용할 경우 완전한(complete) 테이블을 얻을 수 있으나 n (피더 속도)의 경우는 규칙의 갯수가 하나 모자라므로 불완전(incomplete)테이블을 얻게 된다.

4.3 퍼지 규칙 테이블과의 비교

[6]에서는 전문가의 지식, 실제 데이터, 운전 설명서 등에서 정보를 이용하여 그림 1에서의 각 블럭에서 출력되는 각각의 출력에 대하여 하나씩의 퍼지 규칙 테이블을 만들었다. 예를 들어 퍼지 의사 결정부에서 내보내는 연소 공기 온도의 퍼지 규칙 테이블은 다음 표 5와 같다.

표 5. 연소 공기 온도에 관한 퍼지 규칙 테이블
Table 5. Fuzzy rule table for combustion air temperature

		노내온도		
		L	M	H
쓰레기질	Bad	PB	PS	ZO
	Md	PS	ZO	NS
	Good	ZO	NS	NB

이를 앞 절에서 구한 러프 집합 이론에 의하여 유도된 연소공기 온도에 관한 규칙과 비교하면 일치하는 것을 알 수 있다. 4장 1절에서 구한 리덕트를 보면 판단 속성 s (연소 공기 온도)는 두 개의 조건 속성 α (노내온도)와 j (쓰레기질)을 갖고 있으므로 표 5의 2차원 퍼지 규칙 테이블과 일치할 수 있는 것이다. 3개 이상의 조건 속성을 갖고 있는 리덕트의 경우는 3차원 이상의 퍼지 테이블로 나타내게 되며 이러한 경우는 [6]에서 제시하는 1-2차원의 퍼지 규칙 테이블과 일치하지 않게 된다. 이것은 러프 집합 이론을 이용하여 얻은 규칙은 전체 판단 테이블의 정보량을 그대로 유지한다는 것에 착안하면 이를 이용한 규칙이 더욱 정확한 제어 성능을 가져올 수 있을 것으로 기대할 수 있게 해준다.

5 결론

본 논문에서는 시스템의 입출력 변수 관계와 규칙을 인위적인 방법으로 하지 않고 자동적으로 찾아주는 방법을 이용하여 쓰레기 조각들의 퍼지 제어를 위해서 결정되어야 할 변수관계와 제어 규칙을 찾아내었다. 러프 집합 이론을 이용하여 판단 테이블 기법으로 특정 출력에 영향을 미치는 입력들을 리덕트를 구함으로써 결정하였고 러프 집합 이론의 자동 규칙 생성법을 이용하여 규칙들을 찾아내었다. 러프 집합 이론을 이용한 이러한 기법은 전문가의 지식과 현장의 데이터를 토대로 퍼지 제어를 구성할 경우 불가피하게 접하게 되는 휴리스틱한 접근을 체계적인 방법으로 전환하는 매우 유용한 방법이 될 것이다.

참고 문헌

- [1] Pawlak, Z., *Rough Sets: Theoretical Aspects and Reasoning about Data*. Kluwer Academic Publishers, 1991
- [2] 변중남, "제어 기술 분야의 최근 동향", 월간 CONTROL, February, 1997
- [3] Pawlak, Z., "Rough Sets and Decision Tables", *Proc. of the 5th Int Symp. on Computation Theory or Lecture Notes in Computer Science*. Goos, G. et al.(eds.), Vol.208, pp.187-196, 1984
- [4] Mrozek, A., "Rough sets and dependency analysis among attributes in computer implementations of expert inference models", *Int. Journal of Man Machine Studies*, Vol.30, No.4, pp.457-473, 1989
- [5] Young-Seuk Song, Jang-Geon Choi, Yong-Tae Kim, HeYoung

- Lee and Zeungnam Bien, "Development of Fuzzy Logic Controller for Automatic Combustion of Refuse Incinerator," *Proc. of KFIS Fall Conf. '96*, Vol. 6, No. 2, pp. 123-128, 1996
- [6] 송영석, "쓰레기 소각로 자동 연소를 위한 퍼지 센서 기반 퍼지 제어 시스템 설계," 한국과학기술원 석사학위논문, 1997
- [7] Grzymala-Busse, J.W., "On the Unknown Attribute Values in Learning from Example", *Proc. of the 6th Int. Symp. on Methodologies for Intelligent Systems or Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Ras, Z.W., et al.(eds.), Vol.542, pp.368-377, 1991
- [8] Orłowska, E., "A Logic of Indiscernibilities Relations", *Proc. of the 5th Int. Symp. on Computation Theory or Lecture Notes in Computer Science*, Goos, G., et al.(eds.), Vol.208, pp.177-186, 1984
- [9] Pawlak, Z., "Rough classification", *Int. J. of Man Machine Studies*, Vol.20, No. 5, pp.469-483, 1984
- [10] Pawlak, Z., "Rough Sets and Fuzzy Sets", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.17, pp.99-102, 1985
- [11] Pawlak, Z., Grzymala-Busse, J.W., Slowinski, R. and Ziarko, W., "Rough Sets", *Communications of the ACM*, Vol.38, No.11, pp.89-95, 1995
- [12] Pawlak, Z., "Data Analysis with Rough Set Theory", *Proceeding of KFIS Fall Conf. '96*, Vol.6, No.2, pp.3-19, 1996
- [13] 박민용, 최항식, "퍼지제어 시스템", 1990