

FCM을 이용한 프로세스 고장진단

이 기 상*, 박 태 홍**, 정 원 석*, 최 낙 원*
*단국대학교 전기공학과, **고려대학교 전기공학과

Diagnosis of Process Failure using FCM

Kee-Sang Lee*, Tae-Hong Park**, Won-Seok Jeong*, Nak-Won Choi*

* Dept. of Electrical Eng., Dankook University

**Dept. of Electrical Eng., Korea University

Abstract

In this paper, an algorithm for the fault diagnosis using simple FCM(Fuzzy Cognitive Map) is proposed. FCMs which store uncertain causal knowledges are fuzzy signed graphs with feedback.

The algorithm allows searching the origin of fault and the ways of propagating the abnormality throughout the process simply and has following characteristics.

First, it can distinguish the cause of soft failure which can degenerate the process as well as hard failure. Second, it is proper for the processes which have difficulties to establish the exact quantitative model. Finally, it has short computation time in comparison with the fault tree or the other AI methods.

The applicability of the proposed algorithm for the fault diagnosis to a tank or pipeline system is demonstrated.

1. 서 론

고장 진단은 프로세스내 상태 변수의 측정치의 집합 또는 이를 가공한 특징량(feature) 데이터의 집합이 주어진 경우 이들 데이터를 분석함으로써 프로세스의 고장여부를 검출하고 고장인 경우 그 원인을 식별하는 것이다. 따라서 고장진단 시스템 설계의 핵심은 측정치로부터 특징량을 추출하기 위한 기법 및 고장요소(소인)의 식별 알고리즘이라 할 수 있다. 이러한 고장 검출 진단 유닛(FDIU)는 매우 다양하게 분류되며 그 중 가장 큰 분류 방법의 하나는 사용된 모델에 따른 분류이다.

i) 계통에 대한 정량적 모델(QN model)에 근거한 해석적 추정기법(ARM)

ii) 정성적 모델(QL model)에 근거한 기법 및 AI 기법
이중 ARM은 상태 및 파라미터 추정에 근거한 것으로 A.S.Wilksy, R.Isermann등에 의해 70년 중반 이후 대단히 많은 연구결과가 보고된 바 있으며 지차 선형 계통의 고장 검출 및 진단에 효과적으로 사용되고 있다. 그러나 이 기법은 근본적으로 정량적 모델을 요구하므로 불확실성을 포함한 계통, 대규모 계통, 비선형성이 강한 계통에의 적용이 곤란하다.

한편 정성적 모델 접근 및 전문가 진단시스템은 고도로 발달된 컴퓨터 기술과 AI기법을 배경으로 80년 중반 이후 활발히 연구되기 시작하였다.[1] 이 기법들은 대부분 전문가의 지식, 경험으로부터 얻어진 신호흐름선도(SFG), 유량부호 그래프(SDG)등과 같은 정성적 모델을 이용한 탐색기법과 if-then 구조의 규칙기반(shallow knowledge based)에 근거한 규칙기반 진단시스템 또는 이 두가지 개념을 결합한 광의의 지식기반 진단시스템(deep knowledge based) 예를 들어 rule based signal digraph[2]으로 분류될 수 있다. 이들 각각은 화공 프로세스, 비행시스템, 원전 계통 등의 대규모 계통의 전반적인 FDIU설계에 도입된 바는 있으나 이중 deep knowledge 또는 structured knowledge를 이용한 진단 기법은 계통 특성의 모호성을 고려하는 동시에 계통 요소간의 인과 관계를 함께 고려할 수 있다는 측면에서 그 개발 의의가 대단히 크다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 문제영역(프로세스)내의 모든 변수간의 인과관계에 대한 지식의 표현 및 추론수단으로 매우 적합한 FCM을 이용한 FDIU를 설계하고 그 유용성을 입증함에 그 목적을 두었다.

2. FCM (Fuzzy Cognitive Map)

FCM은 제한 경로를 포함한 퍼지 유량 부호 그래프(FSDG)로서 불확실한 인과관계에 대한 전문가의 지식을 습득 및 추론하기 위하여 제안되었다.[3,4]

FCM은 계통의 상태(파라미터)를 나타내는 정점(node)과 방향성 가지(branch)로 구성되며 가지의 비중 e_{ij} 는 상태 x_i 가 상태 x_j 에 미치는 영향의 척도로서 [-1,1] 사이의 값을 가진다. $e_{ij}=0$ 는 x_i 와 x_j 간에 인과관계가 없음을 나타내고 $e_{ij}>0$ 는 x_i 가 증가(감소)할때 x_j 가 증가(감소)함을 나타내며 $e_{ij}<0$ 는 x_i 가 증가(감소)할때 x_j 가 감소(증가)함을 나타낸다. 또한 e_{ij} 가 [-1,1] 사이의 연속치를 갖지 않고 (-1,0,1)인 값만을 가질 경우가 FCM을 simple FCM이라 한다.

기존의 트리 탐색기법에 비하여 FCM은 다음 세가지 장점을 가진다.[3]

- ① 탐색 트리기법은 전향구조로써 많은 계통에 도입되어 있는 제한 경로를 포함시킬 수 없는 반면 FCM은 개념적 또는 실질적 제한이 가능하다.
- ② FCM을 이용한 추론과정은 간단한 벡터-행렬 연산에 의하여 수행되므로 온라인 실시간 적용이 가능하다.
- ③ 트리구조에서는 각 전문가가 별도로 작성한 트리들의 결합, 또는 Subblock별로 작성된 트리의 결합에 의한 전체 계통의 트리 작성이 불가능한 반면 FCM의 경우에는 위의 두가지 결합이 모두 가능하다.

3. Simple FCM을 이용한 기본 FDIU

본 연구에서 제안된 고장진단 문제는 상태 변수의 측정치 또는 이로부터 추출된 관측패턴과 simple FCM으로 계통 표현으로부터 고장요소를 식별하는 것이다.

3.1 고장패턴의 생성

진단의 첫 단계는 고장 관측패턴의 생성이다. 관측패턴 집합(W) 내의 요소(w_i)는 (-1,0,1)중의 한 값을 취한다고 가정한다. 여기서 "1"은 정상치로부터의 증가, "0"는 정상치, "-1"은 정상치로부터의 감소를 의미한다. w_i 의 결정을 위해 프로세스 상태가 정상동작 대역(N.O.P: Normal Operation Band)에서 벗어난 정도를 나타내는 편기 지표(DI:Deviation Index)를 식 (1)과 같이 정의하고 식 (2)의 임계치 검사에 의하여 FCM의 요소값(w_i)을 결정한다.

$$DI_i = \frac{\text{Measured Value} - N.O.P}{0.5 \cdot N.O.P} \quad (1)$$

$$w_i = \begin{cases} 1 & DI_i \geq 1 \\ 0 & |DI_i| < 1 \\ -1 & DI_i \leq -1 \end{cases} \quad (2)$$

여기서 첨자 i 는 i 번째 상태에 대한 지표임을 나타낸다. 정상적인 동작의 경우 DI_i 는 [-1,1]인 값을 갖는다.

3.2 Simple FCM에 의한 기본 고장진단 알고리즘

본질의 고장진단은 Shiozaki[6]등의 SDG기반에 근거한 매우 단순한 진단기법을 FCM에 대입한 것이다. 편이상 FCM 행렬 E 및 관측 패턴 W가 주어졌다고 가정한다. 고장 진단

알고리즘은 관측패턴과 FCM모형을 적절히 결합함으로써 관측 패턴과 관련된 고장의 영향을 받는 상태간의 인과관계를 추출하는 과정과 그 인과관계의 출발점 즉, 원인을 찾는 두번째 과정으로 이루어지며 각 과정은 다음과 같다.

step 1) 위에서 고장의 영향을 받는 상태간의 인과관계(cause-effect relation)행렬 CR은 다음 두가지 연산에 의하여 구해진다.

$$\textcircled{1} WE = \text{Diag}(W) \cdot E \cdot \text{Diag}(W)$$

$$\textcircled{2} CR(i,j) = T(WE(i,j))$$

여기서, T()는 임계치 검사로서 임계치 (Th)는 $0 < Th < 1$ 가 만족되도록 선정한다. CR관계 행렬은 단지 고장요소의 식별에만 이용하므로 CR(i,j)는 다음 식 (3)으로 정의될 수 있다.

$$CR(i,j) = \begin{cases} 1 & WE(i,j) \geq Th \\ 0 & WE(i,j) < Th \end{cases} \quad (3)$$

위 과정의 물리적 의미는 명백하다. 즉, $w_i \neq 0$ 인 모든 상태안에는 반드시 다음 관계가 성립한다.

$$w_i \cdot E(i,j) \cdot w_j > 0 \quad \text{for all nonzero } w_i, w_j$$

step 2) CR 행렬에서 고장원인을 찾는 과정은 다음과 같다.

CR(i,j), $1 \leq i, j \leq m$ 의 모든 요소에 대하여

$no(i) = \# \text{ of outdegree}$, $ni(j) = \# \text{ of indegree}$ 라면

```

initial : no(i) = 0, ni(j) = 0;
loop : for(i=1 to m){ for(j=1 to m){
        if(CR(i,j)=1) then no(i)=no(i)+1;
      }}
        for(j=1 to m){ for(i=1 to m){
        if(CR(i,j)=1) then ni(j)=ni(j)+1;
      }}
diagnosis : for(k=1 to m){
        if (no(i) ≥ 1 & ni(j)=0)
        then k'th node is fault source;
        if(# of failure source ≥ 2)
        then basic FDI fails;
      }
  
```

3.3 부분 관측 패턴에 대한 고장진단 응용

3.2절의 고장진단에서는 모든 상태가 측정되고 $w_i = (-1, 0, 1)$ 로 환산된다고 가정하였다. 그러나 실제 계통에서는 완전한 관측패턴의 발생이 항상 가능한 것은 아니며 측정 경비의 문제 또는 NOB의 부적절한 선정, 측정장치 고장등으로 인해 부분적인 관측패턴(partially observed pattern)만이 얻어질 수 있다. 사실상 전술한 고장진단의 step 2) ⑧에서 고장 요소가 두개 이상인 경우는 관측패턴 W에 오류가 있음을 의미한다. 이 센서고장의 검출은 다중센서 방식을 채택하든가 간단한 IFD 알고리즘에 의해 수행될 수 있다. 그러나 본절의 논의에서는 단순히 고장센서출력을 버리는 고전적인 방식을 가정하였으며 관측 패턴 벡터에서 이들은 미지값 즉, 비측정 변수로 취급한다. 이러한 경우 고장진단 적용과정은 다음과 같다.

step1) N개의 비측정변수에 대하여 발생 가능한 2^N 개의 모든 패턴을 발생시키고 이를 부분 관측패턴에 결합한다.

step2) 발생 가능한 모든 패턴벡터 $W^i (i=1, \dots, 2^N)$ 에 대하여 (3.2)절의 알고리즘을 적용한다.

step3) 한개의 원인을 갖는 W^i 에 대응하는 요소를 고장요소로 판별한다.

4. 중복분해에 의한 계층적 진단

많은 변수를 포함하는 화공 플랜트, 발전 시스템, 자동 비행 시스템등과 같은 대규모 계통의 정성적 모델링은 subblock 별 FCM을 작성하여 합성함으로써 전 계통에 대한 FCM모형을 구할 수 있으며 또한 FCM 모델링을 기능적 또는 구조적 관점에서 분해하면 계층적 진단을 가능케한다.

FCM의 합성 및 분할 구조의 예를 그림 1.에 보였다.

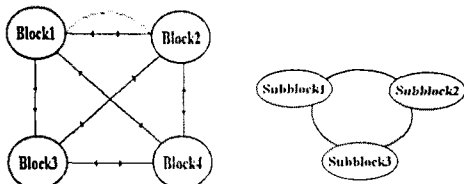


그림 1. FCM의 합성 및 분할 구조

특히 FCM의 분할시에는 각 블록의 입출력 역할을 하는 매개 변수들을 각 블록이 공유하게 하는 중복분해 방식이 바람직하다. 일단 FCM이 분할되면 다음 그림 2.에 보인 바의 계층적 진단이 가능하다.

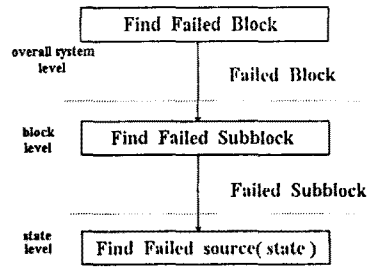


그림 2. 계층적 진단 구조

5. 수치 예

예제 1) 기본 고장진단 알고리즘의 적합성을 설명하기 위하여 그림 3.와 같은 간단한 tank-pipe 계통을 고려하자.[6]

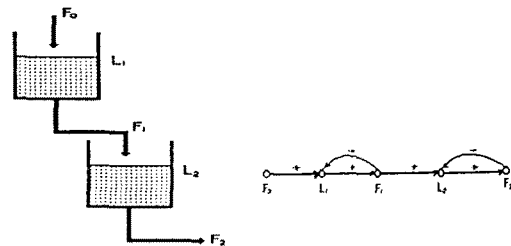


그림 3. 간단한 tank-pipe 계통 및 SDG

위의 계통에 대한 simple FCM은 식 (4)와 같다.

$$E = \begin{matrix} F_0 & L_1 & F_1 & L_2 & F_2 \\ F_0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ L_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ F_1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ L_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ F_2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{matrix} \quad (4)$$

i) 완전 관측 패턴 (fully observed pattern)인 경우 계통 운전중 다음 관측패턴이 얻어 졌다고 가정할 때, $W_o = [0 + - - -]$

(3.2) 절의 step 1) 적용 결과는 식 (5)와 같고,

$$CR_o = \begin{matrix} F_0 & L_1 & F_1 & L_2 & F_2 \\ F_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ L_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ F_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad (5)$$

step 2)를 적용하면 F_1 blockage가 고장 요소임이 밝혀진다.

ii) 부분 관측 패턴 (partially observed pattern)인 경우 다음의 관측 패턴을 고려하자.

$$W_o = [0 + ? ? -]$$

여기서 ? 는 실제적인 비측정, 센서고장 등으로 해당 센서 출력이 없거나 불확정적이어서 무시된 경우를 나타낸다. (3.3)절의 논의에 따라 발생가능한 모든 패턴을 구한 결과는 다음과 같다.

$$W_1 = [0 + \oplus \oplus -]$$

$$W_2 = [0 + \oplus \ominus -]$$

$$W_3 = [0 + \ominus \ominus -]$$

$$W_4 = [0 + \oplus \oplus -]$$

각 패턴에 대하여 (3.2)절의 step 1) step 2)를 적용하면 패턴 W_3 만이 한개의 고장 요인 $F_1(-1)$ 을 밝혀 주며 다른 패턴에 대한 CR등은 각 패턴이 consistent 하지 않음을 보여준다.

예제 2) 그림 4.와 같은 bypass pipeline 계통을 고려하자.

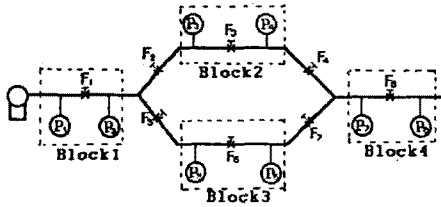


그림 4. pipeline 계통

i) 계통 모델링 및 분해(decomposition)
 위 계통에서 점선으로 표시한 바와 같이 4개의 블록으로 분해될 수 있으며 각 블록에 대한 sub-FCM은 다음과 같다.

$$FCM_1 = \begin{matrix} & P_1 & F_1 & P_2 & F_2 & F_5 \\ P_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ F_1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ P_2 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ F_2 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ F_5 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{matrix} \quad FCM_2 = \begin{matrix} & F_2 & P_3 & F_3 & P_4 & F_4 \\ F_2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ P_3 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ F_3 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ P_4 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ F_4 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{matrix}$$

$$FCM_3 = \begin{matrix} & F_5 & P_5 & F_6 & P_6 & F_7 \\ F_5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ P_5 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ F_6 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ P_6 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ F_7 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{matrix} \quad FCM_4 = \begin{matrix} & F_4 & F_7 & P_7 & F_8 & P_8 \\ F_4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ F_7 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ P_7 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ F_8 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ P_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

이를 합성하여 구한 전 계통에 대한 FCM은 표 1.과 같다.

표 1. 전 계통에 대한 FCM

	P1	F1	P2	F2	P3	F3	P4	F4	F5	P5	F6	P6	F7	P7	F8	P8
P1	1															
F1	-1	1														
P2		-1	1													
F2			-1	1												
P3				-1	1											
F3					-1	1										
P4						-1	1									
F4							-1	1								
P5								-1	1							
F5									-1	1						
P6										-1	1					
F6											-1	1				
P7												-1	1			
F7													-1	1		
P8															-1	1
F8																-1

위의 과정은 FCM의 합성 과정이지만 전 계통의 FCM을 sub-FCM으로 분할하는 과정도 같은 개념에 의해 수행된다. 계층적 진단을 위한 상부구조 즉, 블록간의 관계를 나타내는 FCM은 그림 5.와 같이 구해진다.

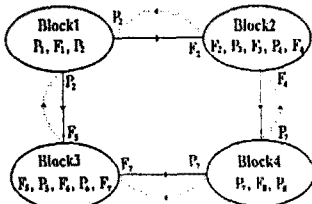


Fig. 5 First level FCM 구조

그림 5.에 대한 개념적인 FCM을 행렬로 표현하기 위하여는 각 블록의 입,출력간의 직접적 관계를 알아야 하며 이 관계는 실험적 데이터 또는 이미 구해진 각 블록에 대한 sub-FCM에서 쉽게 구해진다. 위 계통의 경우 블록 1, 4는 매개변수가 오직 하나뿐이므로 이 과정은 필요치 않으며 블록 2, 3의 경우에는 각각 $F_2=F_4$, $F_5=F_7$ 의 관계가 성립된다. 따라서 first level FCM 행렬은 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$E_{first} = \begin{matrix} & P_2 & F_2 & F_5 & P_7 \\ P_2 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ F_2 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ F_5 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ P_7 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{matrix} \quad (6)$$

ii) multi-level FCM에 의한 계층적 진단

위 계통은 two-level FCM모델을 가지며 따라서 계층적 진단 역시 2층 구조로 진행된다. first layer의 진단은 고장 블록을 찾아내는 과정이며 second layer의 진단은 first layer의 진단 결과 판명된 고장 블록내에서 고장 요소를 찾아내는 과정이다. 이 진단 기법의 타당성을 보이기 위하여 다음의 두 관측패턴을 고려하자.

$$W_1 = [0 - \ominus \ominus + - - - \ominus (+?) + (-?) + \ominus - 0]$$

$$W_2 = [0 - \ominus \ominus + - - - \ominus + - - + - \ominus - 0]$$

위의 관측패턴중 W_1 은 F_3 의 blockage(막힘; 감소(-)) 으로 인해 발생된 패턴이고 W_2 은 F_7 의 blockage(-)로 인해 발생된 패턴으로 진단 알고리즘의 타당성 검증에 의해 정상적 시뮬레이션에 의해 구하였으며 0로 표시된 이 변수는 first level FCM에 포함되는 블록간 매개변수임을 의미한다.

▷ first layer 진단

W_1 및 W_2 에서 first level FCM 변수만을 선택하여 관측패턴 \bar{W}_1, \bar{W}_2 을 생성하고 3.2절의 step 1)을 수행한 결과는 각각 다음과 같다.

$$\bar{W}_1 = [+ + + -]$$

$$\bar{W}_2 = [+ + - -]$$

$$CR_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad CR_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

step 2)를 수행한 결과는 고장블록을 각각 블록2, 블록3으로 판정한다.

▷ second layer 진단

second layer의 진단은 first layer 진단결과에 따라서 해당 블록의 FCM 및 포함된 변수에 의해 수행된다. 각 고장 블록의 관측패턴은 다음과 같다.

$$\bar{W}_{B2} = [- + - - -]$$

$$\bar{W}_{B3} = [- + - + -]$$

다시 3.2절의 step 1)을 수행한 결과는 다음과 같고,

$$CR_{B2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad CR_{B3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

step 2)에 의하여 고장요소가 각각 $F_3(-)$ 및 $F_7(-)$ 임을 판정한다.

6. 결 론

본 연구에서는 simple FCM을 이용한 고장 검출 및 진단 기법 및 복잡한 계통에 대한 계층적 구조의 진단 기법을 제안하였다. 제안된 FDIU는 기존의 고장 트리기법에 비하여 다음과 같은 특징을 가진다.

- ① 단순한 진단과정으로 빠른 계산시간
- ② 계층적 진단가능
- ③ 고장모델 생성가능
- ④ 고장모델로부터의 빠른 검증가능

그러나 이상의 알고리즘은 시간지연이 비교적 큰 프로세스의 경우 고장 요인의 조기 검출에 적합치 않다. 따라서 향후 지연시간등을 고려한 변형된 FCM의 도입으로 고장의 파급효과를 방지하기 위한 고장 조기검출 기법을 개발하고자 한다.

참고문헌

- [1] R.Patton, P.Frank, R.Clark, Fault Diagnosis in Dynamic Systems Theory and Application, Prentice Hall, 1989
- [2] Mark A. Kramer, "A Rule-Based Approach to Fault Diagnosis Using the Signed Directed Graph", AIChE Journal, vol.33, no.7, Jul., 1987
- [3] Bart Kosko, Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence, Prentice Hall, 1992
- [4] Y.Tsuge, H.Matsuyama, "Advanced Estimate of the Accuracy of the Diagnostic Result for the Fault Diagnosis by use of the Signed Directed Graph", Engineering, Kyushu Univ. vol.44, no.3, Sep., 1984
- [5] J.Shiozaki, H.Matsuyama, "Fault diagnosis of chemical processes by the use of signed directed graphs. Extension to five-range patterns of abnormality", Int. Chemical Eng. Vol.25, No.4, pp 651-659, Oct., 1985