

# 퍼지 개념 계층을 이용한 다중 수준 연관 규칙 마이닝의 상향식 접근

손봉기, 한상훈, 이진명  
충북대학교 컴퓨터학과, 첨단정보기술 연구센터  
e-mail:dobest@aicore.chungbuk.ac.kr

## A Bottom-Up Approach for Mining Multiple-Level Association Rules Using Fuzzy Concept Hierarchies

Bong-Ki Sohn, Sang-Hun Han, Keon-Myung Lee  
Dept. of Computer Science, Chung-Buk National University, and AITrc

### 요약

이 논문에서는 개념 간의 애매한 관계를 적절히 표현할 수 있는 퍼지 개념 계층을 참조하여 최하위 개념 수준에서부터 최상위 개념 수준까지 각 수준에서 연관 규칙을 추출하는 다중 수준 상향식 연관 규칙 마이닝 방법을 제안한다. 상위 개념 수준에서 빈발 항목 집합을 구하는데 필요한 상위 개념 수준의 트랜잭션 데이터베이스를 생성하는 방법을 소개한다. 또한 제안한 방법의 응용성을 보이기 위해 실험 과정과 결과를 보인다.

### 1. 서론

연관 규칙 마이닝(mining association rule)은 많은 트랜잭션 항목들(transaction items)에 대해 "트랜잭션에서 몇 가지 항목이 나타나면 같은 트랜잭션에 다른 항목들이 나타난다"와 같이 항목들 사이의 중요한 연관성을 찾아내는 것이다[1]. 연관성 정도는 지지도(support degree)와 신뢰도(confidence degree)로 측정한다. 지지도는 전체 트랜잭션 개수 중 해당 연관 규칙이 지지하는 트랜잭션의 비율을 나타내며, 최소 지지도(minimum support) 이상의 항목들을 식별하는데 사용된다. 신뢰도는 연관 규칙의 강도(strength)를 의미하며, 전제부(antecedent)를 만족하는 트랜잭션이 결론부(consequent)까지를 만족하는 비율로서, 최소 신뢰도(minimum confidence) 이상의 연관 규칙을 도출하는데 사용된다.

연관 규칙 마이닝에 대한 연구는 단일 개념 수준에서만 아니라 항목들 사이의 일반화 관계를 나타내는 개념 계층(concept hierarchy)을 도입한 다중-수준에서의 연관 규칙 마이닝에 대한 시도도 있었다[2][3]. 다중-수준에서의 연관 규칙 마이닝은 개념 계층을 이용해 하위 개념 수준에서의 규칙들뿐만 아니라 상위 개념 수준에서도 중요한 연관 규칙을 발견할 수 있다. 개념 계층을 이용한 다중-수준에서의 연관 규칙 마이닝은 하위 개념 수준에서의 규칙들이 최소 지지도를 갖지 못해 찾을 수 없는 규칙을 상위 개념 수준에서 찾을 수 있고, 추출한 연관 규칙 중에서 개념 계층을 이용해 중복되는 규칙(redundant rule)을 가지치기(pruning)할 수 있는 장점이 있다. 그러나 실제로 개념들 사이의 관계는 명확하지 않고 애매한 경우가 많은데, 이러한 관계를 개념 계층에 적절히 반영할 필요가 있다[4]. 기존의 연구에서는 개념들 사이의 관계가 명확한 경우만을 다루는 일반 개념 계층을 다중-수준의 연관 규칙 마이닝에 이용하고 있다.

이 논문에서는 개념들 사이의 애매한 관계를 적절히 반영하는 퍼지 개념 계층을 참조해 최하위 개념 수준에서부터

### 원으로 수행된 것임

최상위 개념 수준까지 수준별로 연관 규칙을 마이닝하는 상향식 다중 수준 연관 규칙 마이닝 방법을 제안한다. 또한 퍼지 개념 계층을 이용함으로써 생길 수 있는 연산의 증가를 제한하는 척도(measure)를 소개하고, 실제 예를 통해 제안한 방법의 응용성을 보인다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 다중 수준의 연관 규칙을 마이닝하는데 참조되는 퍼지 개념 계층에 대해 기술한다. 3절에서는 퍼지 개념 계층에 의한 상향식 다중 수준 연관 규칙 마이닝 방법을 제안하고, 4절에서는 제안된 방법으로 다중 수준에서 연관 규칙을 추출하는 과정을 예를 통해 알아본다. 5절에서는 결론과 향후 연구 과제를 제시한다.

### 2. 퍼지 개념 계층

개념 계층(concept hierarchy)은 영역 개념들 사이의 일반화 관계를 표현하는데 사용된다. 일반 개념 계층은 개념들 사이의 명백한 일반화 관계를 나타낸다. 개념 계층은 비순환 유한 그래프  $(N, A)$ 로 표현되는데,  $N$ 은 개념 노드의 집합이고  $A$ 는 일반화 관계를 나타내는 간선  $(n_i, n_j)$ 의 집합이다. 간선  $(n_i, n_j)$ 는  $n_i$ 가  $n_j$ 의 일반화 개념이라는 것을 의미한다. 일반 개념 계층에서는 일반화 관계를 나타내는 모든 간선들은 명백하다.

퍼지 개념 계층은 퍼지 간선  $(n_i, n_j, \gamma_{n_i, n_j})$ 로 표현되는데,  $\gamma_{n_i, n_j}$ 는  $n_i$ 의  $n_j$ 로의 일반화 정도이다. 퍼지 간선  $(n_i, n_j, \gamma_{n_i, n_j})$ 의  $n_j$ 는  $\gamma_{n_i, n_j}$  정도로  $n_i$ 를 부분적으로 일반화한 개념이라는 것을 의미한다. 퍼지 개념 계층에서의 개념은 부분적으로 여러 개의 일반화 개념으로 일반화되는 관계를 가질 수 있다. 퍼지 개념 계층은 애매한 개념들 사이의 일반화 관계를 적절하게 표현할 수 있기 때문에, 트랜잭션을 구성하는 개념들이 상위 개념으로 제대로 반영되어 상위 개념 수준에서도 의미 있는 연관 규칙의 마이닝

본 연구는 첨단정보기술센터(AITrc)를 통해 과학재단 지

이 가능하다. (그림 1)은 퍼지 개념 계층의 예를 보인 것인데, 간선에 기입된 숫자는 해당 개념들 사이의 일반화 정도를 나타낸다. 예를 들어, G는 1정도로 D에 속하고, 0.3정도로 E에 속한다는 것을 의미한다.

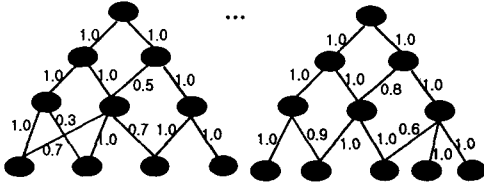


그림 1. 퍼지 개념 계층

3. 퍼지 개념 계층에 의한 상향식 다중-수준 연관 규칙 마이닝

상향식 다중 수준 연관 규칙 마이닝 과정은 포함 정도를 갖는 최하위 개념 수준의 트랜잭션 데이터베이스에 대한 빈발 항목 집합(frequent itemset)을 구하고, 각 트랜잭션을 구성하는 개념을 퍼지 개념 계층을 참조하여 상위 개념으로 대체하여 상위 개념 수준의 트랜잭션 데이터베이스를 생성한다. 이러한 과정을 최상위 개념 수준까지 반복하여 모든 수준에서의 빈발 항목집합을 구한다. 이러한 빈발 항목 집합에 대해 기존의 방법으로 연관 규칙을 추출한다[5]. 이 논문에서 제안한 퍼지 개념 계층에 의한 상향식 다중 수준 연관 규칙 마이닝 방법에서 사용하는 몇 가지 개념을 다음과 같이 정의한다.

- 일반화 정도  $\gamma_{ab}$   
개념 a가 개념 b로 일반화되는 정도
- 포함 정도(coverage degree)  $C_a$   
트랜잭션의 한 개념 a에 대해 하위 개념이 표현되는 정도
- 최소 포함 정도  $\theta_c$   
트랜잭션의 한 개념이 가져야할 최소 포함 정도
- 만족 정도(satisfaction degree)  $S_A$   
빈발 항목 집합 A의 구성 개념들의 평균 포함 정도의 최소값
- 최소 만족 정도  $\theta_s$   
빈발 항목 집합이 가져야할 최소 만족 정도

주어지는 트랜잭션 데이터베이스의 트랜잭션은  $\langle TID, \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \rangle$ 으로 표현되는데, TID는 트랜잭션 식별자이고,  $a_n$ 는 개념을 나타낸다. 포함 정도는 하위 개념이 상위 개념으로 대체될 때, 표현되는 정도를 나타내는데, 최소 포함 정도 이하인 개념은 그 트랜잭션에서 제거함으로써 연산을 줄인다. 따라서 트랜잭션을 포함 정도를 갖는 트랜잭션으로 변환하여 빈발 항목 집합을 찾아내게 된다. 즉, 각 트랜잭션의 구성 개념들에 대해 퍼지 개념 계층을 참조하여 포함정도를 나타내는 트랜잭션  $\langle TID, \{(a_1, C_{a_1}), (a_2, C_{a_2}), \dots, (a_n, C_{a_n})\} \rangle$ 으로 구성한다. 여기서  $C_{a_n}$ 은 트랜잭션의 개념  $a_n$ 에 대한 하위 개념의 포함 정도를 의미한다. 최하위 개념 수준의 모든 개념은 포함 정도를 모두 1.0으로 한다.

3.1 상위 트랜잭션 데이터베이스의 생성

하위 개념 수준의 트랜잭션 데이터베이스에 대한 빈발 항목집합을 구한 후 상위 개념 수준의 트랜잭션 데이터베이스에 대한 빈발 항목 집합을 구하기 위해 퍼지 개념 계층을 참조하여 각 트랜잭션의 구성 개념들을 상위 수준의 개념들로 대체한다. 상위 개념으로 대체할 때, 하나의 하위 개념이 여러 상위 개념으로 대체될 수 있다. 즉, 하위 개념 수준 트랜잭션  $\langle TID, \{(a_1, C_{a_1}), (a_2, C_{a_2}), \dots, (a_n, C_{a_n})\} \rangle$ 이 상위 개념 수준의 트랜잭션  $\langle TID, \{(a'_{11}, C_{a'_{11}}), (a'_{12}, C_{a'_{12}}), \dots, (a'_{1m}, C_{a'_{1m}}), (a'_{21}, C_{a'_{21}}), (a'_{22}, C_{a'_{22}}), \dots, (a'_{2m}, C_{a'_{2m}}), (a'_{n1}, C_{a'_{n1}}), (a'_{n2}, C_{a'_{n2}}), \dots, (a'_{nm}, C_{a'_{nm}})\} \rangle$ 으로 대체될 수 있다. 대체된 상위 개념의 포함 정도는  $C_{a'_{nm}} = \textcircled{1}(C_{a_n}, \gamma_{a_n, a'_{nm}})$ 으로 표현된다. 예를 들어, (그림 1)에서 G의 상위 개념 E로 대체될 때, E의 포함 정도는 G의 포함 정도와 G의 E로의 일반화 정도를 t-norm함수를 이용해 결정한다. 즉,  $C_E = \textcircled{1}(C_G, \gamma_{GE})$ 로 결정되어 포함정도가 0.7이 된다.

상위 개념으로 대체된 트랜잭션의 개념들 중에는 포함 정도는 다르지만 동일한 개념이 있을 수 있기 때문에 이들을 합병하는 방법이 필요하다. 상위 개념 수준으로 대체된 트랜잭션  $\{(a_1, C_{a_{11}}), (a_1, C_{a_{12}}), \dots, (a_1, C_{a_{1n}}), (a_2, C_{a_{21}}), \dots, (a_2, C_{a_{22}}), \dots, (a_n, C_{a_{n1}}), (a_n, C_{a_{n2}}), \dots, (a_n, C_{a_{nm}})\}$ 는 동일한 개념을 합병한 트랜잭션  $\{(a_1, C_{a_1} = \textcircled{2}(C_{a_{11}}, C_{a_{12}}, \dots, C_{a_{1n}})), (a_2, C_{a_2} = \textcircled{2}(C_{a_{21}}, C_{a_{22}}, \dots, C_{a_{2n}})), \dots, (a_n, C_{a_n} = \textcircled{2}(C_{a_{n1}}, C_{a_{n2}}, \dots, C_{a_{nm}}))\}$ 으로 표현될 수 있다. 예를 들어 (표 1)의 트랜잭션 데이터베이스의 TID 400인 경우 G와 H는 동일한 상위개념 E로 일반화되어 같은 트랜잭션에 나타난다. 이렇게 중복되는 개념들은 G로부터의 E로의 개념과 H로부터 E의 개념을 t-conorm함수에 의해 하나의 개념으로 합병한다. 즉, 동일한 개념 E는  $(E, \textcircled{3}(C_E = \textcircled{1}(C_H, \gamma_{HE})), C_E = \textcircled{1}(C_I, \gamma_{IE}))$ 로 합병한다. 이러한 과정을 통해 상위 개념 수준 트랜잭션 데이터베이스를 생성한 후 이 데이터베이스를 기반으로 하여 빈발 항목집합을 구한다.

3.2 빈발 항목 집합 생성 알고리즘

다음은 퍼지 개념 계층을 이용해 상향식으로 빈발 항목집합을 구하는 과정을 기술하는 알고리즘이다.

procedure Fuzzy\_Frequent\_Itemset

입력  
트랜잭션 데이터베이스 D  
수준 l의 퍼지 개념 계층 집합  
최소 포함 정도  $\theta_c$   
최소 만족 정도  $\theta_s$   
최소 지지도  
출력  
다중 수준에서 최소 지지도와 최소 만족 정도  $\theta_s$  이상의 빈발 항목집합

begin  
트랜잭션 데이터베이스로부터 포함정도를 갖는 트랜잭션 CT[l] 생성.  
즉, 각 트랜잭션에 대해 포함정도를 나타낸

```

< TID, ((a1, 1.0), (a2, 1.0), ..., (an, 1.0)) >을 생성.
for( ; L[l,1] ≠ 0 and l > 1; ) do(
  L[l,1] := get_frequent_l_itemsets(CT[l]);
  for(k := 2 ; L[l,k-1] ≠ 0; k++) do(
    Ck := get_candidate_set(L[l,k-1]);
    foreach transaction t ∈ CT[l] do(
      Ct := get_subsets( Ck,t);
      foreach candidate c ∈ Ct do(
        c.support++;
        foreach item c.item ∈ c do
          Sc.item += Cc.item ;
        )
      Sc.item = Sc.item/c.support;
      Sc = min( Sc.item );
    )
    L[l,k] := { c ∈ Ck | c.support ≥ minsup[l] and
              Sc ≥ θs }
  }
  LL[l] := Uk L[l,k];
  CT[l-1]; //상위 개념 수준의 트랜잭션 데이터베이스
  생성
}
end

```

이 알고리즘에서 빈발 항목집합을 구하는 get\_frequent\_l\_itemset(CT[l]), 새로운 후보를 생성하는 get\_candidate\_set(L[l,k-1])과 트랜잭션으로부터 후보와 일치하는 부분을 추출하는 get\_subsets( C<sub>k,t</sub>) 함수는 기존 연구에서와 같은 방법을 적용한다[5]. 각 수준에서의 빈발 항목집합의 만족정도 S<sub>c</sub>는 구성 개념 각각의 만족정도를 구한 후 개념의 만족 정도 중 최소값을 그 빈발 항목집합의 만족정도로 결정한다. LL[l]은 수준 l에서 frequent\_k\_itemset을 의미하며, LL[l]은 모든 수준에서의 빈발 항목집합을 의미한다.

### 3.3. 연관 규칙의 추출

빈발 항목집합이 구해지면, 이로부터 최소 신뢰도 이상의 연관 규칙을 기존의 방법에 의해 추출할 수 있다[5]. 이 논문에서 제안한 방법으로 빈발 항목 집합을 구할 때, 최소 포함 정도로 각 수준에서 최하위 개념의 반영 정도가 적은 개념을 제거하고, 최소 만족 정도로 최하위 개념의 반영 정도가 평균적으로 적은 항목 집합(itemset)을 빈발 항목집합에서 제외시킴으로서 연산의 횟수를 줄이고, 추출된 연관 규칙의 가지치기의 필요성을 줄여준다. 그러나 일반 개념 계층을 이용한 경우보다 추출된 연관 규칙이 많다. 이는 일반 개념 계층을 이용한 경우 찾지 못했던 의미있는 연관 규칙을 발견했다는 의미도 있지만 중복되는 규칙도 있을 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 퍼지 개념 계층을 이용해 추출한 연관 규칙에 대해 효과적으로 가지치기(pruning)할 수 있는 방법이 필요하다.

### 4. 실험

퍼지 개념 계층에 의한 연관 규칙 마이닝의 응용성을 보이기 위해, 이 절에서는 수준 l의 퍼지 개념 계층이 주

어지고, 트랜잭션 데이터베이스와 최소 신뢰도 및 수준별 최소 지지도, 최소 만족 정도가 주어질 때 상향식 방법에 의한 다중-수준 연관 규칙 마이닝 과정을 보인다. 실험에서 사용되는 퍼지 개념 계층은 (그림 1)과 같이 주어지고, 트랜잭션 데이터베이스는 (표 1)로 주어진다. 수준 l에서 최소 지지도가 2(19%), 최소 포함 정도가 0.5, 최소 만족 정도가 0.75로 주어졌다고 가정하자. 먼저 수준 l에서 빈발 항목집합을 구하기 위해, 트랜잭션 데이터베이스 (표 1)을 포함 정도를 갖는 트랜잭션 데이터베이스 (표 2)로 변환한다.

TID	Items
100	{G,R}
200	{H,S}
300	{I,T}
400	{G,H,Q}
500	{I,J,T}
600	{G,R,U}
700	{H,U}

표 1. 트랜잭션 데이터베이스 D

Items
{ (G,1.0),(R,1.0) }
{ (H,1.0),(S,1.0) }
{ (I,1.0),(T,1.0) }
{ (G,1.0),(H,1.0),(Q,1.0) }
{ (I,1.0),(J,1.0),(T,1.0) }
{ (G,1.0),(R,1.0),(U,1.0) }
{ (H,1.0),(U,1.0) }

표 2. 수준 l의 트랜잭션 데이터베이스 CT[l]

(표 2)에 대해 프로시저 Fuzzy\_Frequent\_Itemset를 적용하여 수준 l에서의 빈발 항목집합을 구하면 (표 3)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Itemset	support	만족정도
G	3	1.0
H	3	1.0
I	2	1.0
R	2	1.0
T	2	1.0
U	2	1.0
GR	2	1.0
IT	2	1.0

표 3. 수준 l에서의 빈발 항목집합s LL[l]

수준 l에서의 빈발 항목 집합이 구해지면 l-1수준에서의 빈발 항목집합을 구하기 위해 퍼지 개념 계층을 참조하여 트랜잭션의 각 항목을 상위 개념으로 대체하고 동일한 개념은 합병한다. 수준 l-1에서의 최소 지지도는 3(43%)로 하였을 때, 빈발 항목집합은 (표 4)와 같다. 최소 지지도를 만족하지만 최소 만족 정도를 만족하지 않는 항목 집합은 빈발 항목 집합에서 제외한다. 수준 l-1에서 빈발 항목집합을 구하고 l-2수준에서의 빈발 항목집합을 구하기 위해 수준 l-1의 트랜잭션 데이터베이스를 퍼지 개념 계층을 참조하여 l-2 수준의 트랜잭션 데이터베이스로 대체한다.

Itemset	support	만족정도
D	3	1.0
E	7	0.83
N	3	0.93
O	3	1.0
P	5	1.0
DE	3	0.9
DN	3	0.93
EP	5	0.82
DEN	3	0.8

표 4. 수준-1에서의 빈발 항목집합s L[l-1]

(표 5)는 1-2수준에서의 트랜잭션 데이터베이스를 나타낸다. 1-2수준에서의 최소 지지도를 5(71%)로 했을 때, (표 5)에 대해 빈발 항목집합을 구한 결과는 (표 6)과 같다.

Items
{ (B,1.0),(L,1.0),(M,0.8) }
{ (B,1.0),(C,0.5),(L,1.0),(M,0.8) }
{ (B,0.7),(C,1.0),(M,1.0) }
{ (B,1.0),(C,1.0),(M,1.0) }
{ (B,0.7),(C,1.0),(M,1.0) }
{ (B,1.0),(C,0.5),(L,1.0),(M,1.0) }
{ (B,1.0),(C,0.5),(M,1.0) }

표 5. 수준 1-2의 트랜잭션 데이터베이스 CT[l-2]

Itemset	support	만족정도
B	7	0.9
C	6	0.75
M	7	0.9
BC	6	0.75
BM	7	0.9
CM	6	0.75
BCM	6	0.75

표 6. 수준 1-2에서의 빈발 항목집합s L[l-2]

위와 같이 각 수준에서의 빈발 항목 집합이 구해지면 최소 신뢰도 이상의 연관 규칙을 추출할 수 있다. 최소 신뢰도가 60%라 했을 때, (그림 1)의 퍼지 개념 계층에 의한 트랜잭션 데이터베이스 (표 1)에 대한 연관 규칙 마이닝 결과는 (표 7)과 같다. 여기에서 세 번째 연관 규칙은 "전체 트랜잭션의 43%에서 90%정도 D에 속하는 품목을 사는 사람은 90%정도 E에 속하는 품목을 100% 산다."라고 해석할 수 있다. 이와 같이 개념 간의 애매한 관계를 적절히 표현한 퍼지 개념 계층을 이용하여 수준별로 의미 있는 연관 규칙을 추출할 수 있다는 것을 실험을 통해 보였다.

5. 결론

연관 규칙 마이닝은 사건들 사이의 연관성을 찾아내는 것으로서 많은 연구가 있었다. 또한 개념들 사이의 관계를 나타내는 개념 계층을 참조하여 하위 개념 수준에서 찾을 수 없는 연관 규칙을 상위 수준으로 일반화시킴으

Itemset	support	만족정도	confidence
G=>R	2	1.0	66.6%
I=>T	2	1.0	100%
D=>E	3	0.9	100%
D=>N	3	0.93	100%
E=>P	5	0.82	71%
DE=>N	3	0.82	100%
DN=>E	3	0.82	100%
EN=>D	3	0.82	100%
DE=>EN	3	0.82	100%
NE=>DE	3	0.82	100%
B=>C	6	0.75	86%
B=>M	7	0.9	100%
C=>M	6	0.75	100%
BC=>M	6	0.75	100%
CM=>B	6	0.75	100%
BM=>C	6	0.75	86%
C=>BM	6	0.75	100%
M=>BC	6	0.75	86%
B=>CM	6	0.75	86%

표 7. 최종 연관 규칙

로서 의미 있는 연관 규칙을 찾을 수 있는 다중 수준 연관 규칙 마이닝에 대한 많은 연구가 있었지만 개념들 사이의 애매한 관계를 표현할 수 있는 퍼지 개념 계층을 적용한 연구는 시도되지 않았다. 이 논문에서는 퍼지 개념 계층에 개념들 사이의 애매한 관계를 적절히 표현하고, 이를 참조해 다중 수준에서 연관 규칙을 마이닝하는 상향식 방법을 제안하였다. 또한 실험을 통해 퍼지 개념 계층을 이용한 연관 규칙 마이닝이 의미있는 규칙을 추출한다는 것을 확인할 수 있었다. 퍼지 개념 계층에서의 하위 개념은 부분적으로 여러 개의 상위 개념으로 일반화되는 관계를 가질 수 있다. 이는 방대한 트랜잭션 데이터베이스를 대상으로 하는 연관 규칙 마이닝에 있어 저장장소와 효율성 문제를 야기할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 일반 개념 계층을 이용한 방법보다 많은 연관 규칙이 생성된다. 따라서 하위 개념을 상위 개념으로 대체할 때 저장 공간을 최소화할 수 있는 방법과 생성된 연관 규칙에 대한 가지치기 방법에 대한 추가 연구가 필요하다.

참고 문헌

[1] Ming-Syan Chen, Jiawei Han, Philip S.Yu, Data Mining: An overview from Database Perspective. IEEE Trans.on Knowledge and Data Engineering, 1997.  
 [2]R. Srikant, R. Agrawal: "Mining Generalized Association Rules", Proc. of the 21st Int'l Conference on Very Large Databases, Zurich, Switzerland, Sep. 1995.  
 [3] Jiawei Han, Yongjian Fu, Discovery of Multiple-level Association Rules from Large Databases.  
 [4]손봉기, 이진명, 퍼지 개념 계층과 퍼지 언어항을 이용한 데이터베이스 요약, 한국 퍼지 및 지능시스템 학회 추계학술대회, 1999.11.  
 [5] Rakesh Agrawal and Ramakrishnan Srikant. Fast algorithms for mining association rules. In proc. of the VLDB Conference, Santiago, Chile, September 1994. Expanded version available as IBM Research Report RJ9839, June 1994.