

구조적 P2P 시스템에서 효율적 콘텐츠 공유 기법 (An Efficient Content Sharing Scheme in Structured P2P Systems)

배준현^{*} 김상욱^{**}
(Joonhyun Bae) (Sangwook Kim)

요약 본 논문에서는 분산해시테이블 기반의 구조적 P2P 오버레이 네트워크에서 효율적인 콘텐츠의 공유와 검색을 위한 라우팅 기법을 제안한다. 기존의 익명성을 기반으로 하는 P2P 시스템과는 달리, 본 논문에서 제안하는 기법은 사회적 관계에 기반한 라우팅 테이블의 생성과 라우팅 알고리즘을 설계하고 이를 평가한다. 본 논문의 중요성은 사회적 관계에 기반한 분산 환경에서의 콘텐츠 공유를 통해, 무임승차의 문제를 완화하고 악성 피어에 의한 네트워크 공격 위험을 줄일 수 있다는 점에 있다.

키워드 : 분산해시테이블, P2P 라우팅, 콘텐츠 공유

Abstract In this paper, we propose an efficient content sharing scheme for structured P2P overlay network. The main idea of this paper is to exploit the identified routing table instead of anonymous one using social relationships among nodes. The contribution of this paper is to present a means of mitigating the problem of 'free riding' and the threat of misrouting attack by malicious nodes.

Key words : DHT, P2P Routing, Content Sharing

1. 서론

피어투피어(이하 P2P) 시스템은 대규모의 사용자가

* 이 논문은 2008 정보과학회강원지부 학술대회에서 '구조적 피어투피어 시스템에서의 효율적 콘텐츠 공유 기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

^{*} 학생회원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
jhbae@cs.knu.ac.kr

^{**} 종신회원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수
swkim@cs.knu.ac.kr

논문접수 : 2009년 1월 20일
심사완료 : 2009년 4월 13일

Copyright©2009 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지 : 컴퓨팅의 실제 및 레터 제15권 제6호(2009.6)

대량의 콘텐츠를 광범위한 네트워크를 통해 공유할 수 있는 분산 컴퓨팅 환경을 제공한다. 하지만 전통적인 비구조적 P2P 시스템들(Gnutella, FreeNet)은 공유된 자원의 탐색을 위해 플러딩(flooding)을 기반으로 하는 라우팅 기법을 이용함으로써 검색 쿼리의 범람으로 인한 성능과 확장성의 문제를 안고 있었다. 이에 대한 대안으로 분산해시테이블(이하 DHT)을 이용하는 구조적인 P2P 시스템들(Chord[1], CAN[2], Pastry[3])은 해싱 알고리즘을 이용한 오버레이 네트워크의 구성을 통해 라우팅의 효율성, 확장성, 안정성을 획기적으로 향상시킴으로써 기존의 비구조적 P2P 시스템의 문제점을 해결하였다. 그럼에도 불구하고 지금까지의 P2P 시스템들은 모두 네트워크 참여자들의 익명성을 기반으로 하고 있기 때문에, 여전히 무임승차[4], 악성 피어[5]와 같은 문제점을 안고 있다. 특히 구조적 P2P 시스템들이 제공하는 라우팅의 규칙성은 소수의 악성 피어로 인해 네트워크 전체가 붕괴할 수 있는 위험성[5]을 내포한다.

본 논문에서는 기존의 익명성을 기반으로 하는 P2P 시스템에 대한 대안으로서 사용자의 아이덴티티를 기반으로 구조적 오버레이 네트워크에서의 사회적 관계망을 이용하는 라우팅 기법을 제안하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 사용자 아이덴티티 중심의 오버레이 구성 및 라우팅 기법은 DHT의 특성을 활용하여 성능과 효율면에서 기존의 구조적 P2P 시스템의 장점을 최대한 살리고 사회적 관계망을 이용함으로써 신뢰성을 강화할 수 있다는 장점이 있다.

DHT 기반의 분산 시스템들의 성능 효율은 대부분 N 개의 노드를 가진 네트워크에서 $O(\log N)$ 의 시간 복잡도를 가진다[1,3]. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 이러한 DHT 시스템에서의 라우팅 테이블 외에 사회적 관계망을 이용하는 라우팅 테이블을 추가함으로써 성능을 향상한다. 여기서 우리는 지역적 라우팅과 무관하게 각 피어가 평균적으로 $O(\log N)$ 개의 사회적 연결을 가질 경우에 사회적 관계망을 이용하는 라우팅을 통해 $O(\log N)$ 의 성능 효율을 가질 수 있음을 증명하고 그 성능을 시뮬레이션을 통해 평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 이어지는 2절에서는 관련 연구를 검토한다. 3절에서는 본 논문에서 제안하고자 하는 오버레이 네트워크의 구성 및 라우팅 알고리즘에 대해서 설명한다. 4절에서는 제안한 알고리즘의 성능을 실험을 통해 평가하고 5절에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

콘텐츠 공유를 위한 P2P 시스템에서, DHT 기반의 구조적 P2P 오버레이 네트워크에 대한 연구가 활발하게 진행된 바 있다[1-3]. 이러한 연구들은 확장 가능하고

안정성 있는 구조적 P2P 오버레이 네트워크를 설계하고 효율적인 라우팅 알고리즘을 제공하여 기존의 비구조적인 P2P 네트워크에 대한 문제점을 극복할 수 있는 방안을 제시하였다. 하지만 이러한 구조적 P2P 시스템에서는 오버레이 네트워크의 구성을 위한 규칙적인 라우팅 프로토콜에 의해 소수의 악성 피어로 인한 라우팅 공격에 취약하게 되었고 이러한 문제점을 해결하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다[5].

한편, '네트워크 과학'이라는 이름의 새로운 과학 분야에서는 사회적 관계망(Social Network)에 대한 다양한 기초 연구들을 통해서, 사회적 맥락에서의 사용자 정체성을 이용한 검색의 문제들을 다룬 바 있다[6-8]. 이러한 짧은 경로가 존재하고(Small-World)[6], 척도가 없는(Scale-Free) 네트워크[7]에서는, 검색의 효율이 노드의 정체성에 대한 정보와 다수의 연결을 가진 소수의 노드들에 영향을 받는다는 것이 다양한 수학적 모델들을 통해 증명되었다. 이러한 연구 결과들은 기존의 익명성에 기반한 P2P 네트워크를 사용자의 사회적 정체성(Social Identity)을 인지하는 오버레이 네트워크로 대체함으로써, 검색의 성능적 효율과 함께 네트워크의 신뢰성을 확보할 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 최근의 일부 연구에서는 이러한 가능성을 기존의 P2P 오버레이 네트워크에 적용하기 위한 기법을 소개한 바 있다[9]. 하지만 본 논문에서 소개하는 기법은 기존의 연구와는 달리, 오버레이 망의 구성에 있어 해싱을 위한 노드의 아이디엔티티를 사회적 정체성에 종속적으로 설계한다는 데에 그 차별성이 있다.

3. 시스템 모델링

본 절에서는 구조적 P2P 오버레이 네트워크를 구성하기 위한 사용자 정체성의 적용과 사회적 관계에 기반한 라우팅 알고리즘을 설명한다.

3.1 사회적 관계망 모델

일반적으로 사회적 관계망은 사회적 정체성을 가진 사람들이 노드의 집합으로, 그리고 사람들간의 사회적 연결이 링크의 집합으로 표현되는 그래프의 형태를 가진다고 할 수 있다. 본 논문에서 제안하고자 하는 사회적 정체성 기반의 오버레이 네트워크는 각 피어들의 집합인 P 와, 각 피어들간의 연결들의 집합인 L , 그리고 각 피어들이 네트워크에서 공유하고자 하는 콘텐츠들의 집합인 C 로 구성된다.

$$G = (P, C, L) \quad (1)$$

여기서 L 과 C 의 원소들은 m -비트의 해시 함수에 의해 해싱된 키 값으로 구성되고, 이러한 해시 함수의 용도는 일반적으로 DHT 시스템에 사용되는 바와 같이 크기가 매우 큰 고정된 아이디엔티티 공간을 형성하고 사

용자, 혹은 콘텐츠의 아이디를 전체 공간에 공평하게 분산하기 위한 목적으로 사용된다. 이 아이디엔티티를 위한 공간 IDS 는 형식적으로 다음과 같이 정의한다.

$$IDS = \{k | 0 \leq k \leq 2^m - 1, k \text{는 정수}\} \quad (2)$$

여기서 사용자의 아이디는 이메일이나, 메신저, 혹은 OpenID 등을 이용할 수 있고, 콘텐츠의 아이디로는 URI 등을 이용할 수 있다. 이 아이디들은 SHA-1, 또는 MD5 등의 알고리즘을 이용하여 IDS 내에서의 특정 위치를 점유할 수 있다.

$$P = \{k | k = \text{hash}(uid), k \in IDS\} \quad (3)$$

$$C = \{k | k = \text{hash}(cid), k \in IDS\} \quad (4)$$

연결들의 집합 L 의 원소는 두 노드들 간의 명시적, 묵시적 연결을 표현하는 벡터로 정의할 수 있다. 명시적 연결은 두 노드 간의 직접적 사회적 연결을 의미하고, 묵시적 연결은 IDS 내의 인접성에 의해 연결되는 간접적 연결을 의미한다. 즉, 벡터 (i, j) 는 노드 i, j 간의 연결을 의미하고, $sd(i, j)$ 가 사회적 관계망에서의 거리, 다시 말해 두 노드 i, j 의 사회적 연결에서의 최단 경로 내에 존재하는 명시적 연결의 개수를 의미한다고 하자. 이 때 집합 L 은 다음과 같이 사회적(명시적) 연결들의 집합인 L_S 와 지역적(묵시적) 연결들의 집합인 L_L 의 합집합으로 정의할 수 있다.

$$L = L_S \cup L_L \quad (5)$$

$$L_S = \{(i, j) | i, j \in P, sd(i, j) = 1\} \quad (6)$$

$$L_L = \{(i, j) | i, j \in P, sd(i, j) > 1\} \quad (7)$$

3.2 구조적 오버레이 네트워크

사회적 연결망의 구성은 비구조적인 형태를 나타내기 때문에 구조적인 오버레이 네트워크를 구성하는 것은 지역적 연결들의 집합인 L_L 의 원소를 결정하는 방법에 의해 결정된다. 본 논문에서는 여러가지 DHT 시스템 중에서 Chord에서 사용되는 핑거 테이블[1]로 지역적 라우팅 테이블을 구성한다. 즉, 1차원적인 원형 아이디 공간에서 각 노드와 콘텐츠의 위치를 해시 값에 의해 결정적으로 부여한다.

여기에 사회적 연결들의 집합인 L_S 의 구성은 사용자들의 선택적 정보에 의해 임의적인 노드에 대한 연결로 구성되고 이러한 사회적 연결의 임의성으로 인해 효율적인 라우팅을 위한 아이디 공간 내에서의 근접성을 보장할 수 없으므로 지역적 연결을 통한 라우팅을 통해 짧은 경로를 통한 목적지로의 라우팅을 달성할 수 있다.

예를 들어, 그림 1과 같은 비구조적 사회적 연결망이 주어졌을 때 5-비트 해시 함수를 사용해서 사회적 연결망에서의 각 노드와 콘텐츠들은 그림 2에서 보는 바와 같이 각 해당 해시 키들이 아이디 공간내의 특정 위치에 분포하게 된다. 그림 2에서는 아이디 공간을 의미하

는 큰 원형 고리의 내부에 사회적 연결을 의미하는 실선이 표시되었고 외부에서는 지역적 연결을 의미하는 점선이 표시되었다. 다만, 지역적 연결의 전체 링크 대신에 공간적으로 인접한 노드에 대한 연결만을 추가하였다.

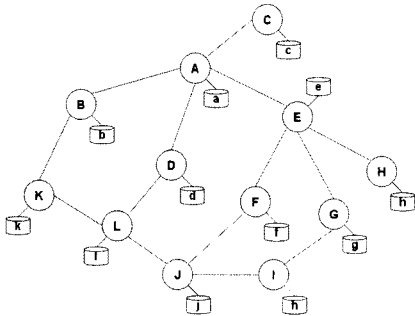


그림 1 비구조적 사회적 관계망

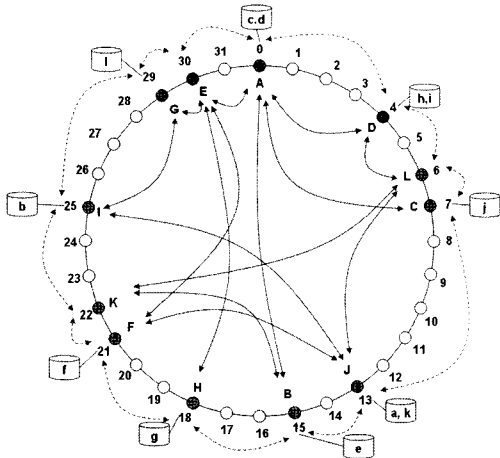


그림 2 구조적 오버레이 네트워크

3.3 사회적 관계 기반 라우팅 기법

이렇게 구조화된 오버레이 네트워크에서의 동작을 위해 가장 기본적인 기능은 주어진 임의의 해시 키 k 에 대해서 해당 키의 계승자(successor) 즉, 아이디 공간에서 k 값을 가진 콘텐츠 저장을 담당하는 노드를 찾는 것이다. 이 노드를 발견하기 위한 탐색(lookup) 알고리즘은 노드의 참여와 탈퇴, 콘텐츠의 저장과 추출 등에 모두 사용되므로 그 성능이 전체 시스템에서의 효율성에 결정적인 영향을 미치게 된다. 그러므로 여기서 우리는 두 개의 라우팅 경로, 즉 지역적 및 사회적 라우팅 테이블을 이용한 탐색 기법을 고안하고 이 알고리즘의 성능을 평가하도록 한다.

그림 3은 특정 키 k 가 주어졌을 때, 이 k 값에 대한 계승자를 찾기 위한 알고리즘을 나타낸다. 여기서 메시지의 전달을 담당하는 중간 노드들은 사회적 관계에 기반하는 라우팅 테이블(Social Routing Table, SRT)과, 지역적 관계에 기반하는 라우팅 테이블(Local Routing Table, LRT)를 선택적으로 이용할 수 있으며, 먼저, SRT에서 해당 키에 근접하는 노드들을 찾고 만약 해당 노드가 존재하지 않으면 LRT에서 해당 키에 근접하는 노드들을 찾아 메시지를 전달한다. 메시지의 전달은 해당 키 값을 담당하는 계승자를 발견할 때까지 반복적(iterative), 혹은 재귀적(recursive)으로 전달된다.

```

Algorithm 3.1 node.lookupSuccessor(k)
    if (k in (node.key, next.key))
        return node;
    follow ← node.closestInSocialLinks(k)
    if (follow = null)
        follow ← node.closestInLocalLinks(k)
    return follow.lookupSuccessor(k);
    
```

```

Algorithm 3.2 node.closestInSocialLinks(k)
    for i=SRT-1 downto 0
        if (k < SRT(node.key)[i].key)
            return SRT(node.key)[i]
    return null;
    
```

```

Algorithm 3.3 node.closestInLocalLinks(k)
    for i=LRT-1 downto 0
        if (k < LRT(node.key)[i].key)
            return LRT(node.key)[i]
    return null;
    
```

그림 3 탐색(lookup) 알고리즘

예를 들어, 앞에서 구성한 오버레이 망에서 LRT의 크기를 1로 제한한다고 했을 때 라우팅 테이블의 구성은 그림 4에서 보는 바와 같다. 이 때, 노드 D에서 17

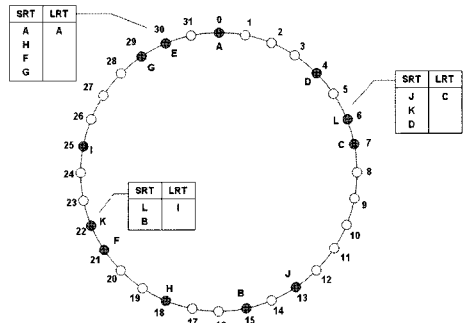


그림 4 라우팅 테이블의 구성

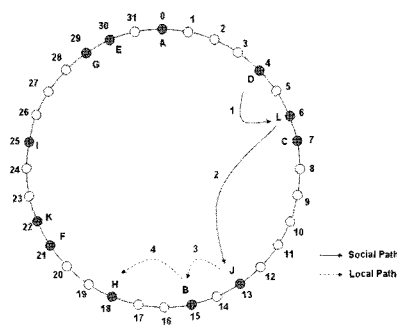


그림 5 탐색(lookup) 라우팅의 예

번 키에 대한 탐색을 수행하게 되면, 각각 D, L 노드들의 사회적 연결과 J, B 노드들의 지역적 연결을 통한 라우팅 경로를 거쳐 17번 키의 계승자인 H 노드에 재귀적인 호출을 통해 도달할 수 있게 된다(그림 5).

4. 분석 및 평가

본 절에서는 본 논문에서 제안한 라우팅 기법에 대해 그 성능과 효율성을 분석하고 이를 평가한다.

4.1 성능의 효율성 분석

본 논문에서 제안한 라우팅 알고리즘은 기존의 DHT 라우팅 프로토콜을 지역적 라우팅 테이블로 활용하고, 사회적 라우팅 테이블을 추가하여 신뢰성 있는 노드로의 선택적 라우팅을 수행하게 된다. 따라서 이러한 사회적 관계에 기반한 라우팅 경로의 추가가 성능적 효율면에서 어떤 효과가 있는 지가 분석의 대상이 된다.

Theorem 1. 사회적 연결을 우선하는 라우팅 기법에서 노드의 개수가 N 이고 각 노드가 $O(\log N)$ 의 사회적 연결을 가지고 있을 때 지역적 라우팅이 $O(N)$ 일 때 탐색을 위한 시간 복잡도는 $O(\log N)$ 이다.

Proof. 주어진 네트워크의 노드 수가 N 이라 하고 모든 노드에서 SRT에 존재하는 노드의 개수가 $O(\log N)$ 이라 가정하자. 이 때, 가정에 의해 $O(N)$ 의 성능을 가진 지역적 라우팅을 위해서 LRT의 크기는 1이 된다. 임의의 노드에서 주어진 k 값을 가진 키에 인접하는 노드 n' 을 찾기 위해서, 그림 3에서 주어진 알고리즘은 먼저 SRT에서 k 보다 작고 n 의 키 값보다 큰 노드들 중에서 가장 k 에 근접하는 노드로 메시지를 전달한다. 만약 SRT에서 노드를 발견한 경우에는 LRT에서 노드를 발견한 경우보다 더 가까운 임의의 노드로 메시지가 전달되므로 사회적 연결에 의한 라우팅은 greedy 방식으로 목적 노드에 근접한다. 여기서 해싱에 사용하는 암호화 알고리즘 즉, SHA-1 혹은 MD5는 매우 높은 확률

로 노드의 위치를 전체 아이디 공간에 분산하므로 [1] 사회적 연결에 의한 노드들의 위치도 전체 공간에 분산된다. 그러므로 전체 라우팅의 홉(hop)의 수를 h 라 할 때, SRT에 의한 라우팅은 각 홉에서의 검색의 공간이 평균적으로 N/c 의 크기로 감소한다. 따라서 주어진 가정에 의해서 각 노드가 평균적으로 $O(\log N)$ 의 사회적 연결을 가질 때 목적 노드를 발견하기 위해서 라우팅은 $N/c^d < 1$ 일 때까지 반복된다. 즉, $d = \lceil \log_c N \rceil$ 이다. 여기서 c 의 값은 사회적 라우팅으로 인해 단축되는 경로의 길이이므로 노드의 분산에 따라 탐색 비용에 대한 시간 복잡도는 $O(\log_c N) = O(\log N)$ 이다.

4.2 실험 환경

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서 우리는 Java 언어를 사용한 시뮬레이터를 구현하고 논리적인 라우팅의 홉수를 측정하였다.

본 실험에서 사용한 지역적 라우팅 방법은 Chord 알고리즘이며 이 알고리즘의 성능은 $1/2\log_2 N$ 으로 알려져 있다[1]. 여기서 본 논문이 제안하는 알고리즘을 비교분석하기 위해 두 가지의 라우팅 전략을 수립하였다. 첫째는 라우팅 경로를 선택할 때, 항상 사회적 연결을 우선 시하는 방법(SFR, Social Routing First)이고, 둘째는 지역적 라우팅과 사회적 라우팅을 서로 결합하여 더 근접성이 좋은 라우팅 경로를 선택하는 방법(LFR, Local First Routing)을 테스트하였다. SFR의 경우에는 더 많은 사회적 연결을 통한 라우팅을 수행하므로 라우팅의 신뢰성 측면에서 우수한 방법이라고 할 수 있고, LFR의 경우에는 항상 더 근접하는 노드를 선택함으로써 라우팅의 성능적인 측면을 강조하는 반면, SFR에 비해 신뢰성은 떨어지는 기법이라고 할 수 있다. 각 실험에서 사용한 해시 함수는 160-비트 SHA-1 알고리즘이며 노드의 개수는 $N=2^k$ 개이다. 여기서 k 의 값을 1에서 10까지 증가하면서 각 네트워크에서 100×2^k 개의 키값에 대한 탐색을 실행하였다. 사회적 연결의 크기는 모든 노드가 평균적으로 $\log_2 N$ 개의 임의적인 연결을 가지도록 랜덤값에 의해 생성된 키에 대한 계승자와의 사회적 연결을 설정하였다.

4.3 실험 결과

먼저, 첫번째 실험에서 우리는 노드 수의 증가에 따른 탐색 비용을 측정하였다(그림 6). 이 실험에서 기존의 Chord 알고리즘은 $1/2\log_2 N$ 에 근접하는 성능 효율을 보이고 있으며, LFR 알고리즘은 모든 경우에서 Chord보다 더 좋은 성능 효율을 가진 것으로 나타났다. 이것은 사회적 연결에 의한 라우팅이 항상 LFR보다 더 근접성이 높은 경우에만 선택되므로, 예측 가능한 결과였다고 할 수 있다. 다만 성능의 개선이 기대치보다 더

낮은 것은 사회적 연결의 분포가 균일하기 때문에, 홉(hop)수가 증가함에 따라 사회적 연결에 의한 라우팅 확률이 줄어들기 때문인 것으로 해석될 수 있다. SFR의 경우에는 LFR보다 크고 Chord보다 작은 것으로 나타나는데, 이것은 항상 사회적 연결만을 우선했을 경우에 일부의 라우팅은 더 근접하는 라우팅 경로가 LRT에 존재함에도 불구하고 사회적 경로를 선택하기 때문인 것으로 해석가능하다.

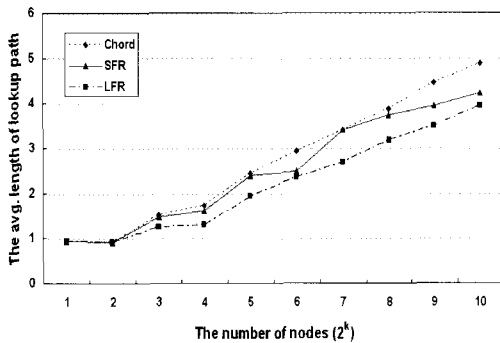


그림 6 노드 수의 증가에 따른 탐색 비용

두 번째 실험에서 우리는 노드 수를 2^{10} 개로 고정하고 사회적 연결의 개수를 증가시켜 보았다. 이 실험에서는 각 노드에서의 사회적 연결의 개수를 평균적으로 $k \log_2 N$ 으로 만들고 k 를 1에서 10까지 증가한다(그림 7). 이 실험은 사회적 연결의 개수가 많아질수록 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 성능이 개선됨을 보여주고 있으며, 성능의 개선은 SFR의 경우에도 동일하게 적용되고 있음을 알 수 있다.

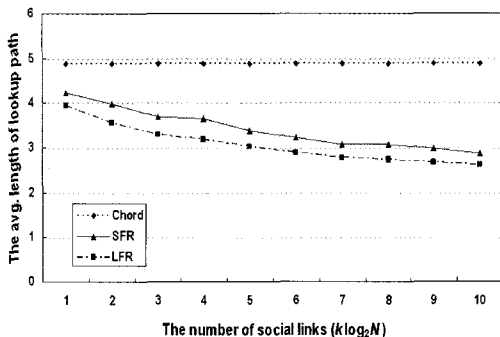


그림 7 사회적 연결과 탐색 비용의 관계

5. 결론

문제해결에 있어서 사람의 연산 능력을 이용하는 소셜 컴퓨팅(Social Computing)이 더욱 더 많은 관심을 받고 있는 가운데 사회적 관계를 이용한 P2P 시스템의 구성은 기존의 P2P 시스템이 갖고 있는 무임승차, 악성 피어의 문제점에 대한 해결책을 제시하는 유용한 연구 분야라 할 수 있다. 본 논문에서는 사회적 정체성을 이용한 DHT 기반의 오버레이 네트워크의 구성과 이를 통한 구조적 P2P 시스템에서의 인지적 라우팅을 통한 콘텐츠 공유 기법을 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 기법은 기존의 DHT 알고리즘을 지역적 라우팅으로 사용하고 추가적인 사회적 라우팅 테이블을 운용함으로써 공간 효율면에서의 비용이 추가되는 반면에 탐색 비용적인 측면에서의 효율성이 있다고 할 수 있다. 향후 연구에서 우리는 이러한 사회적 연결망을 통한 P2P 네트워크에서의 대량의 콘텐츠 공유를 위한 연구를 추가로 진행할 것이다.

참고 문헌

- [1] I. Stoica, R. Morris, D. Liben-Nowell, D. R. Karger, M. F. Kaashoek, F. Dabek, and H. Balakrishnan, "Chord: a scalable peer-to-peer lookup protocol for internet applications," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.11, No.1, pp. 17-32, 2003.
- [2] S. Ratnasamy, P. Francis, M. Handley, R. Karp, and S. Shenker, "A scalable content-addressable network," In *Proc. ACM SIGCOMM'01*, San Diego, California, USA, pp. 161-172, 2001.
- [3] A. Rowstron and P. Druschel, "Pastry: scalable, decentralized object location and routing for large-scale peer-to-peer systems," In *IFIP/ACM Internat. Conf. Dist. Syst. Platform (Middleware)*, Heidelberg, Germany, pp. 329-350, 2001.
- [4] E. Adar and B. A. Huberman, "Free Riding on Gnutella," *First Monday*, Vol.5, No.10, 2000.
- [5] M. Castro, P. Drushel, P. Ganesh, A. Rowstron, and D. Wallach, "Secure Routing for Structured Peer-to-Peer Overlay Networks," In *Proc. of OSDI'02*, Boston, Massachusetts, USA, 2002.
- [6] L. A. Adamic, R.M. Lukose, A. R. Puniyani, and B. A. Huberman, "Search in power-law networks," *Physical Review E*, Vol.64, 046135, 2001.
- [7] D. J. Watts, P. S. Dodds, and M. E. J. Newman, "Identity and search in social networks," *Science*, Vol.296, pp. 1302-1305, 2002.
- [8] L. A. Adamic and E. Adar, "How to search a social network," *Social Networks*, Vol.27, No.3, pp. 187-203, 2005.
- [9] S. Marti, P. Ganesan, and H. Garcia-Monila, "SPROUT: P2P Routing with Social Networks," *Current Trends in Database Technology, LNCS 3268*, 2005.