

하이퍼 큐브 컴퓨터에서 효과적인 오류 허용 다중전송기법

(Efficient Fault-Tolerant Multicast on Hypercube Multicomputer System)

명 훈 주[†] 김 성 천^{**}
(Hunjoo Myung) (Sungchun Kim)

요약 하이퍼큐브 컴퓨터는 정규적 구조(regular structure)와 짧은 지름(short diameter) 등 병렬 처리에 적합한 특징을 지니고 있기 때문에 이에 대해 많은 연구가 있어 왔다. 하이퍼큐브의 성능을 좌우하는 중요한 요소 중 하나는 프로세서간의 통신인데, 이 중 다중전송(multicast)은 하나의 전송데이터의 복제, 신호처리 등과 같은 다양한 응용 프로그램에서 이용되는 중요한 통신패턴이다. 병렬 컴퓨터에서 프로세서의 수가 증가함에 따라 구성요소들이 오류가 날 확률도 높아졌다. 이러한 이유로, 오류 난 구성요소들이 있어도 다중 전송이 가능하게 효율적으로 설계하는 것이 중요하다. 이러한 오류 허용 라우팅과 다중 전송은 오류 정보에 따라, 국지적 오류 정보를 바탕으로 하는 전략, 전역적 오류 정보를 바탕으로 하는 전략, 제한된 오류 정보를 바탕으로 하는 전략 등이 있는데, 이 중에서 후자가 정보 수집비용이 적으면서도 좋은 성능을 보인다. 본 논문에서는 최근에 제안된 완전 도달성 정보와 새로 추가한 국지적 정보를 이용해서 라우팅 알고리즘을 제안하고, 이것을 바탕으로 다중 전송 성공률이 높은 새로운 다중 전송 알고리즘을 제안한다. 제안 기법은 완전 도달성 정보와 국지적 정보를 이용하여 우회하는 경우와 다중전송 실패하는 경우를 줄임으로써, 기존의 기법보다 통신량의 차이는 거의 없으면서도 다중전송 성공률을 향상시킬 수 있음을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

키워드 : 하이퍼큐브, 폴트 허용, 다중전송, 완전도달성, 국지적 정보

Abstract Hypercube multicomputers have been drawing considerable attention from many researchers due to their regular structure and short diameter. One of keys to the performance of Hypercube is the efficiency of communication among processors. Among several communication patterns, multicast is important, which is found in a variety of applications as data replication and signal processing. As the number of processors increases, the probability of occurrences of fault components also increases. So it would be desirable to design an efficient scheme that multicasts messages in the presence of faulty component. In fault-tolerant routing and multicast, there are local information based scheme, global information based scheme and limited information based scheme in terms of information. In general, limited information is easy to obtain and maintain by compressing information in a concise format. In this paper, we propose a new routing scheme and a new multicast scheme using recently proposed fully reachability information scheme and new local information scheme. The proposed multicast scheme increases multicast success possibility and reduce deroute cases. Experiments show that multicast success possibility can increase at least 15% compared to previous method.

Keywords : Hypercube, fault-tolerance, multicast, fully reachability, local information

· 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 R01-2001-000-00356-0(2002) 지원으로 수행되었음.

† 학생회원 : 서강대학교 공과대학 컴퓨터학과
luke@archilab.sogang.ac.kr

** 중신회원 : 서강대학교 공과대학 전자계산학과 교수
ksc@arqlab1.sogang.ac.kr

논문접수 : 2000년 4월 11일

심사완료 : 2003년 2월 12일

1. 서론

병렬 컴퓨터 중의 하나인 하이퍼큐브 컴퓨터는 정규 구조(regular structure), 짧은 지름(diameter) 등 병렬처리에 적합한 특징을 지니고 있기 때문에 이에 관한

연구가 많이 진행되었다[1,2,3]. 프로세서간 통신의 효율성은 하이퍼큐브의 성능을 좌우하는 한 요소이다[4,5]. 일반적으로 메시지는 목적지에 도달하기 위해 여러 중간노드를 거쳐야만 한다. 그렇기 때문에 라우팅 전략(routing scheme)은 프로세서간 통신 수행에 있어서 아주 중요하다[6]. 또한 대규모 병렬 컴퓨터 시스템에서 프로세서의 수가 증가함에 따라, 구성요소(component)에서 오류가 날 확률이 증가하게 된다. 그러므로 구성요소들이 오류가 난 상황에서도 효율적으로 우회경로를 찾을 수 있는 전략이 필수적이다[7,8]. 오류 허용 다중전송 알고리즘은 오류 정보에 따라 국지적 정보를 바탕으로 하는 다중전송기법, 전역적 정보를 바탕으로 하는 다중전송 기법, 제한된 전역적 정보를 바탕으로 하는 다중전송 기법 등으로 분류할 수 있다[9].

본 논문에서는 제한된 전역적 정보를 바탕으로 하는 다중전송 기법을 제안한다. 또한 최근에 제안된 완전 도달성(Full Reachability)의 개념을 도입함으로써 이전 기법보다 통신 단계에서 보다 나은 성능 향상을 기대한다. 추가적으로 국지적 정보를 이용하여 보다 효과적인 다중전송을 시도한다. 본 논문의 2장에서는 앞서 언급한 오류 정보에 따른 라우팅 전략과 다중전송 기법 전략들을 살펴보고, 3장에서는 기존의 오류 정보들의 단점을 보완한 라우팅 전략과 이것을 바탕으로 한 새로운 다중전송 기법을 제안한다. 4장에서는 제안한 기법을 기존의 방법들과 시뮬레이션을 통해 비교 분석하며, 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 기존 연구

n-차원의 하이퍼큐브(이하 n-큐브라 한다.)는 $N=2^n$ 개의 프로세서를 갖는다. 각 노드의 주소는 n-bit의 이진수로 표현되며, 임의의 노드 m은 n개의 이웃 노드를 갖는다. 이 이웃 노드들의 주소는 차원에 따라 노드 m의 주소와 한 비트씩만 다르다. 이 논문에서 알고리즘을 기술하는데 필요한 용어들을 설명하면 다음과 같다.

$N(s) = \{n | H(s,n)=1\}$ (단, $H(X,Y)$ 는 X와 Y의 해밍거리)

$N(s)$ 는 노드 s의 이웃 노드들의 집합을 나타낸다. 그리고 $D(s,t)$ 는 다음과 같으며

$$D(s,t) = \{n | H(n,t) = H(s,t) - 1, n \in N(s)\}$$

출발지 s보다 목적지 t에 더 가까운 s의 이웃 노드들의 부분 집합을 의미한다. $|D(s,t)| = H(s,t)$ 가 성립하고 $D(s,t)$ 에 속한 어떤 노드 c에 메시지를 전송할 수 있다 [10].

2.1 거리에 따른 완전 도달성과 그에 따른 라우팅 전략

이 절에서는 거리에 따른 완전 도달성 정보를 기존의 안정/불안정 노드 전략에 적용한 전략을 서술한다. 오류 노드가 아닌 모든 노드는 안정 노드와 불안정 노드로 구분되며, 불안정 노드는 다시 심하게 불안정한 노드와 일반적인 불안정 노드로 구분된다.

정의 1 : 안정 노드와 불안정 노드

두 개 이상의 오류 난 노드 혹은 불안정 노드들이 인접해 있다면, 그 노드를 불안정노드라고 한다. 오류가 나지 않고 불안정 상태가 아닌 노드를 안정 노드라고 한다.

정의 2 : 강한 불안정노드(strongly unsafe node)와 보통 불안정 노드(ordinary unsafe node)

이웃 노드들이 모두 불안정 혹은 오류 노드이면 그 노드를 심하게 불안정한 노드라고 한다. 반면 심하게 불안정한 노드가 아닌 불안정 노드를 일반적인 불안정 노드라고 한다.

정의 3 : 거리에 의한 완전 도달성(fully reachability with respect to distance)

오류가 아닌 임의의 노드 n을 기준으로 해밍 거리 h만큼 떨어져 있는 오류 나지 않은 모든 노드들이 거리 h의 경로로 도달 가능할 때 n을 h 거리로 완전 도달 가능하다고 한다.

R_h 를 h거리에 따른 완전 도달 가능한 노드들의 집합이라고 하자. 목적지 노드로부터 해밍거리 h+1만큼 떨어져 있는 노드 n이 메시지를 받고 이 메시지를 넘겨줄 노드를 찾으려고 할 때, $N(n) \cap R_h$ 집합을 알 수만 있다면 불필요한 우회를 피할 수 있다. 그러나 R_h 를 구하고 이에 따른 적합한 경로를 찾아내는 일은 매우 어려운 일이다. 이 [10]에서는 이것의 대안으로 R_h 의 근사값을 제안한다.

정의 4 : 거리에 의한 안정 노드

오류가 아닌 모든 노드들은 거리 1에 대해 안정 노드이다. 오류가 나지 않은 한 노드에 거리 h-1에 의한 안정 노드 d-h+1개(단, d는 차원을 의미함) 이상이 인접해 있다면 그 노드를 거리 h에 의한 안정 노드라고 한다.

이러한 정의를 기본으로 하는 Kaneko와 Ito가 제안한 FR 알고리즘은 route 알고리즘[10]에 다음 메시지를 전송할 노드를 찾을 때, $S_h(S_h$ 는 거리 h에 대해서 안정한 노드의 집합)을 추가적으로 고려하여 보다 정확한 라우팅 효과를 얻는다.

2.2 다중 전송 기법

다중전송 기법에서 우선 순위를 정하기 위한 여러 가지 방법이 [9]에서 제안되었다. 안정 노드/불안정 노드

를 기반으로 한 다중전송 기법(SLBM : Safety-elevated Multicasting), 수정된 안정 노드/불안정 노드를 기반으로 한 다중전송 기법(MSLBM:Modified SLBM), 주소의 합을 기반으로 한 다중전송 기법(ASBM: address-sum-Based Multicasting)이 그 방법들이다.

SLBM 방법에서 차원의 우선 순위는 각 차원을 따라 위치해 있는 이웃 노드의 safety level에 기반해서 미리 결정된다. safety level이 높을수록 그 차원의 우선 순위도 높아지게 되는데, 만일 그 값이 같아서 우선 순위를 가릴 수 없을 때는 해당 차원들 중에 하나를 임의로 선택한다. MSLBM은 SLBM과 똑같은 방식으로 우선 순위를 결정한다. 다른 점이 있다면 safety level이 같은 차원들 중에 우선 순위를 결정하는 부분이다. MSLBM의 경우는 목적지 주소 합(as)에서 해당 비트 값에 기반하여 결정을 하는데, as(d) 값이 큰 차원의 우선 순위가 높게 결정된다[9]. 다시 말하면 가장 많은 목적지로의 이동이 가능한 차원을 선택하는 것이다.

한편, ASBM 접근 방법에서 차원의 우선 순위는 주소의 합, 즉 as의 각 비트 값에 의해 결정된다. 본 논문에서는 이러한 접근 방법 중에서 구현이 가장 쉬우면서도 유사한 알고리즘 적용[9]에서도 성능이 좋다고 알려진 ASBM 접근 방법으로 알고리즘을 구현하였다.

3. FBM 다중전송기법

3.1 새로운 라우팅 전략

이 절에서는 제한된 전역 정보에 국지적인 정보를 추가하여 성능을 향상시키기 위한 새로운 라우팅 전략을 제시한다.

[그림 1]은 2차원 큐브에서 오류가 난 노드에 따라 나타나는 경우의 가지 수이다. 그림에서 화살표로 표시된 노드를 기준으로 보았을 때, 그림에서 보여지고 있는 경우의 수는 8개이나(화살표로 표시된 노드가 오류가 난 경우는 제외하였다.) 이 노드가 갖고 있는 상태 정보를 바탕으로 해서는 8개의 상황을 [그림 1]에서 등근사각형으로 표현된 4가지 상황으로 인식할 수 있다.

본 논문에서는 제한된 국지적 정보를 바탕으로 한 전략의 특징을 살리면서 단점을 개선하고자 한다. 2차원 큐브에서 화살표로 표시된 노드가 2차원의 상황을 보다 정확하게 파악할 수 있는 방법을 고려했다.

하이퍼큐브 네트워크가 완전히 불안정한 상태인 상황에서 라우팅을 할 때, 위험요소가 되는 상태를 찾아내게 되는데, 이를 다음과 같이 정의하였다.

정의 5. 반-불안정 상태

2차원 큐브 내에서 한 이웃 노드와 해밍 거리 2에 위

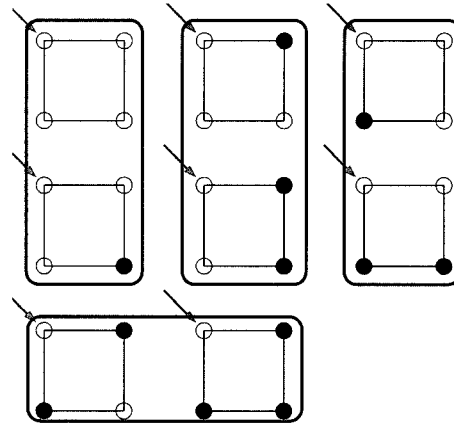


그림 1 2차원 하이퍼 큐브에서 오류 노드에 따른 경우의 수

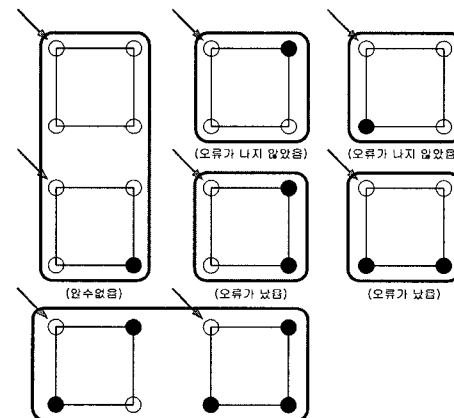


그림 2 반-불안정상태 도입으로 인한 2차원 하이퍼큐브의 상황

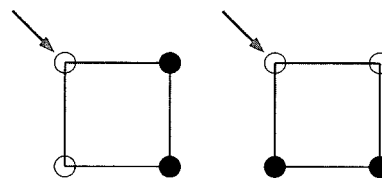


그림 3 2차원 하이퍼큐브에서의 반-불안정 상태

치하고 있는 노드가 오류 노드일 때 오류가 나지 않은 두 노드를 반-불안정 상태라 한다.

하이퍼큐브 네트워크가 완전히 불안정상태(모든 노드가 오류이거나 불안정한 노드인 경우)인 상황에서 한 노드가 반-불안정상태라는 것은 반-불안정상태가 아닌 노드들보다 그 노드 주변으로 오류가 난 노드들이 더 집중되어 있음을 의미이다. 이러한 반-불안정상태 정보

를 갖게 됨에 따라서 2차원 큐브관점에서 각 노드들은 [그림 2]와 같이 2차원 큐브가 가질 수 있는 8가지 상황을 6가지로 판단할 수 있게 됨으로써, 오류 노드를 거치는 라우팅의 시도를 줄일 수 있게 된다. 다시 말해서, 해밍거리 2에 있는 노드들의 상태는 오류가 났음, 오류가 나지 않았음, 알 수 없음의 3가지 상태로 파악될 수 있다. 해밍거리 2에 있는 노드들은 2장에서 언급한 식을 이용하여 구한다. 물론 2차원큐브 단위로 나누어 정보를 가지는 것이 가능하기 때문에 3차원, 4차원 등으로 큐브를 나눌 수도 있었으나, 그렇게 되면 나누어 생각할 차원의 수가 증가된다. 이는 국지적 정보보다는 오히려 전역적 정보가 더 가까워지는 것이다. 본 논문에서는 정보의 비용을 고려하면서 성능향상을 꾀하는 제한된 전역적 정보를 이용하는 전략을 사용하는 만큼, 정보 비용의 부담이 가장 적은 2차원 하이퍼큐브를 국지적 정보를 얻는 단위로 사용하였다.

3.2 새로운 다중전송기법 전략

이 절에서는 앞서 제안된 새로운 라우팅 전략을 바탕으로 ASBM 전략을 적용한 새로운 다중 전송 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 새로운 다중 전송 기법에서는 기본적으로 앞서 소개된 완전 도달성 오류 정보를 바탕으로 이루어지기 때문에 이 기법의 이름을 FBM (Full-reachability Based Multicast)이라고 명명하였다. 그리고 기존의 안정/불안정 노드 오류 정보를 바탕으로 ASBM 전략을 적용한 기법을 편의상 SBM(Safe node/

unsafe node Based Multicast)으로 지칭하겠다.

새로운 다중 전송 기법 FBM의 기본 아이디어를 소개하겠다. SBM 기법에서는 주소 합에 근거해서 다중 전송을 하기 때문에 특정 목적지 노드를 가진 메시지는 오류 난 노드 때문에 우회할 수밖에 없는 경로임에도 불구하고 그 경로로 전송될 수밖에 없는 경우가 종종 생긴다. FBM 기법에서는 이러한 점을 착안하여 주소 합에 근거해서 다중 전송을 하되 최단 거리로 라우팅이 가능한 차원 중에 S_k (S_k : 거리h로 안정한 노드들의 집합)에 속하는 이웃노드가 있다면(다른 노드들은 모두 보통 불안정 상태이거나 강한 불안정 상태인 경우) 그 노드로 전송을 함으로써 우회하는 경우를 최소화할 수 있다. 또한 앞 절에서 제안한 국지적 정보를 이용한다. 앞 절에서 소개된 방법과 마찬가지로 특정 메시지를 전송할 이웃노드를 결정함에 있어, 우회하지 않으면서 해밍거리 2만큼 떨어진 노드들의 상태가 오류라고 확인되는 경우에만 그 이웃 노드를 포기하고 다른 이웃 노드를 찾도록 설계하였다. [그림 4]는 FBM 다중전송 기법의 알고리즘이다. FBM 알고리즘은 주소 합 우선 순위로 다음 노드로 전송할 차원을 정하되, 다음으로 전송할 노드가 불안정노드이고 대체할 수 있는 노드들 중에 S_{k-1} 에 속하는 노드가 있다면 가능한 그 노드로 전송하게 한다. 그리고 우회해야 하는 메시지들은 가능한 우회하지 않는 메시지를 전송하기 위한 차원을 사용함으로써 통신량을 줄인다.

```

u: 메시지를 보내는 노드, u(i):다중전송을 해야하는 목적지 노드들(i는 index)
R: {u ⊕ u(i)} (목적지 노드들의 상대주소의 집합)
AS: ∑r (r∈R) 즉, 상대 주소의 합, K:각 차원의 AS가 0이 아닌 차원들의 집합 (k∈K)

While ( K != ∅ and R != ∅ ) {
  select MAX {AS(k)}
  While ( k가 오류가 아니다 ) {
    If ( k차원으로 최단거리 라우팅이 가능 )
      If ( k차원 이웃노드 불안정, 다른 차원 이웃 노드 중 S_k의 원소가 존재 )
        Then { k차원은 포기하고 다른 차원의 노드로 메시지 전송 }
      Else if ( k차원으로 최단 경로 중, 거리 2만큼 떨어진 노드가 모두 오류 )
        Then { k차원에서의 메시지 전송 포기 }
      Else { AS에서 r의 값을 빼고, k차원으로 가는 버퍼에 r 저장, R에서 r 제거 }
    }
    k를 K에서 제거
  }
}
If ( R != ∅ ) /* R의 원소들은 우회해야 하는 메시지 */
  Then { 버퍼로 메시지 전송 }
If ( R == ∅ )
  Then { 나머지 원소들은 전송 포기 }

```

그림 4 FBM 알고리즘

4. 시뮬레이션 및 성능평가

4.1 성능 평가 요소 및 가정

이 장에서는 새롭게 제안하는 FBM 다중전송 기법과 SBM 다중전송 기법을 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 시뮬레이션은 c언어로 프로그래밍 하였으며 성능 평가 기준은 다음과 같다.

- 평균 통신 단계 : 다중 전송할 때에 메시지가 각 목적지 노드까지 도달하는 거리의 평균
- 라우팅 비율 : 우회 라우팅과 실패 라우팅의 개수의 비율
- 통신량 : 다중 전송할 때에 사용되는 링크들의 합
- 다중 전송 성공률(%): 다중 전송할 때에 메시지가 모두 목적지 노드에 전달될 확률

그러나 본 논문에서는 평균 통신 단계를 사용하지 않고, 우회한 라우팅 개수와 라우팅을 실패한 개수로 대신 하였다. 그 이유는 비교하는 두 다중전송 알고리즘 모두 최단 거리로 목적지에 전송되는 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 월등히 높아서 각 통신 단계의 평균값으로는 성능을 비교하기가 어렵기 때문이다. 다중전송 성공률을 성능평가 기준으로 사용하는 이유는 다중 전송을 할 때 목적지 노드가 모두 메시지를 받지 못하는 상황이 발생하면 그 프로그램은 예측된 것에서 벗어나는 결과를 가져올 수 있기 때문이다.

본 논문에서 시뮬레이션을 수행하는데 사용한 가정들은 다음과 같다.

- 가정 1 : 출발지 노드는 0번으로 정하고 목적지 노드들은 임의로 정한다.
- 가정 2 : 목적지 노드들은 출발지 노드에서 도달 가능하다. 즉, 출발지 노드에서 오류노드들로 인하여 접근할 수 없는 노드들은 목적지 노드로 선정되지 않는다.
- 가정 3 : 오류가 난 노드들은 목적지 노드가 될 수 없다.

4.2 성능 평가 결과

앞 절에서 언급한 성능평가 요소와 가정을 바탕으로 수행한 시뮬레이션의 결과를 분석한 것이다. [그림 5]와 [그림 6]은 각각 7차원 하이퍼큐브에서 목적지 노드 개수가 40, 70일 때, 오류 노드 개수를 증가시키면서 다중전송 성공률을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 오류 노드가 증가할수록 FBM이 SBM보다 다중전송 성공률 측면에서 성능이 향상되었음을 알 수 있다.

다음의 [그림 7]과 [그림 8]은 7차원 하이퍼큐브에서 목적지 노드의 개수가 40, 70개일 때, 오류 노드 개수에 따른 우회 라우팅 개수와 실패 라우팅 개수를

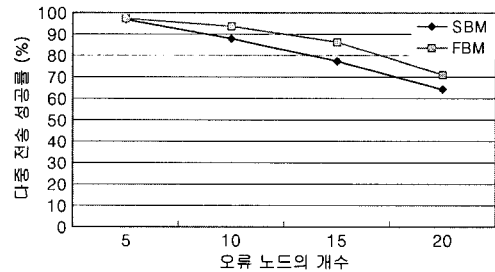


그림 5 7-큐브에서 오류 노드의 증가에 따른 다중 전송 성공률(목적지 노드가 40일 때)

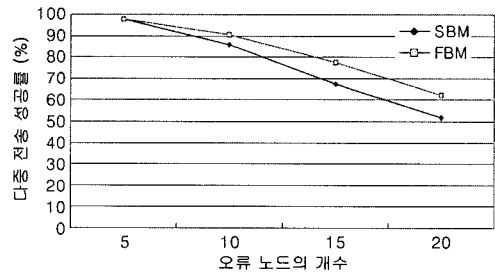


그림 6 7-큐브에서 오류 노드 증가에 따른 다중 전송 성공률(목적지 노드가 70개 일 때)

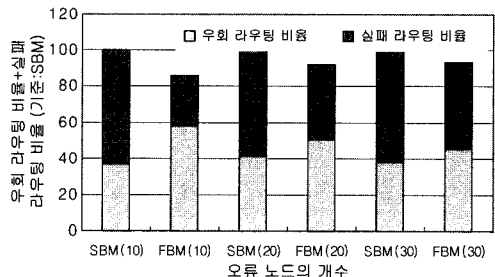


그림 7 7-큐브에서 오류 노드 증가에 따른 우회 라우팅과 실패 라우팅 비율(목적지 노드가 40개 일 때)

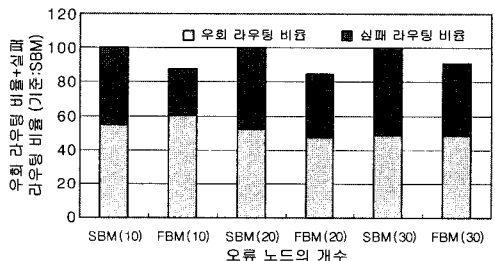


그림 8 7-큐브에서 오류 노드 증가에 따른 우회 라우팅과 실패 라우팅 비율(목적지 노드가 70개 일 때)

비교한 것이다. SBM에서 우회 라우팅 비율과 실패 라우팅 비율의 합을 100으로 하였을 때, SBM과 FBM의 우회 라우팅 비율과 실패 라우팅 비율을 상대적으로 나타낸 것이다. 이 그림을 통해서 FBM 다중전송 기법이 SBM 다중전송 기법보다 (우회 라우팅 비율+실패 라우팅 비율)은 적고, 실패 라우팅 비율이 적음을 알 수 있다.

다음 그림은 7차원 큐브에서 목적지 노드의 개수가 40개일 때, 오류 노드에 따른 통신량을 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 SBM 다중전송 기법과 FBM의 다중전송 기법의 통신량에 거의 차이가 없다.

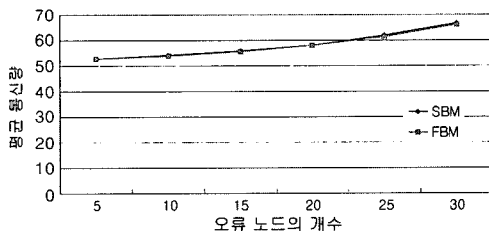


그림 9 7-큐브에서 오류 노드의 증가에 따른 통신량 비교 (목적지 노드가 40개 일 때)

5. 결론

기존의 완전 도달성 개념을 추가한 라우팅 기법은 기존 기법보다 상당히 좋은 성능을 보이나, 하이퍼큐브 네트워크가 완전히 불안정하게 되면 기존 기법과 같이 정확한 라우팅이 가능하지 않는 경우가 발생한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 완전 도달성 개념과 함께 2차원 큐브 관점에서 볼 수 있는 국지적 정보를 추가적으로 고려하여 이 단점을 보완하려 하였고, 이러한 오류 노드 정보를 바탕으로 ASBM을 적용한 다중 전송 기법 (FBM)을 제안하여 기존의 안정/불안정 노드 정보를 바탕으로 ASBM을 적용한 다중 전송 기법(SBM)과 비교 분석하였다. 본 논문에서 제안된 기법을 통해 얻을 수 있는 이점은 다음과 같다.

본 논문에서 제안된 FBM 다중전송 기법은 기존의 SBM 다중전송 기법에 비해 다중 전송 성공률이 최대 11%의 차이를 보인다. 이것은 기존의 기법은 안정/불안정 노드 상태에 의존하여 다중전송을 한 것에 비해, 본 논문에서 제안된 FBM 기법은 완전 도달성이라는 개념을 보다 정확하게 다중전송에 적용할 수 있고, 또한 해밍거리 2 만큼 떨어진 노드 상태를 파악할 수 있음으로 인해 우회 라우팅의 기회를 줄일 수 있음을 보여준다. 이러한 성능 향상에도 불구하고 통신량에서는 기존 기

법과 별 차이가 없음을 알 수 있었다.

본 논문에서 사용된 국지적 정보는 저차원 하이퍼큐브에서는 좋은 성능을 보이나 차원이 높아질수록 성능 향상 정도는 낮아진다. 앞으로의 계획은 이 정보를 개선하여 차원이 높은 하이퍼큐브에서도 좋은 성능을 보장할 수 있도록 하는 것이다.

참고 문헌

- [1] J. Bruck, R. Cypher, and D. Soroker, "Embedding cube-connected cycles graphs into faulty hypercube", IEEE Trans. Computers, 43(10), pp.1210-1220, October 1994.
- [2] C.-M. Chiu and K.-S. Chen, "Efficient Fault-Tolerant Multicast Scheme for Hypercube Multicomputers", IEEE Trans. parallel and distributed systems, 9(10), pp.952-962.
- [3] Y. Saad and M.H. Shultz, "Topological properties of hypercube," IEEE Trans. Computers, 37(7): 867-872, July 1988.
- [4] Silicon Graphics, "Origin 2000 and Origin 2000," technical report, Dec. 1996.
- [5] Y. Lan, A. H. Esfahanian, and L.M. Ni, "Multicast in hypercube mutliprocessors," J. Parrallel and Distributed Computing, vol. 8, pp. 30-40, 1990.
- [6] X. Lin and L.M. Ni, "Multicast communication in multicomputer networks," Proc. 1990 Int'l Conf. Parallel Processing, Vol III, pp. 114-118, 1990.
- [7] N.-F. Tzeng and H.-L. Chen, "Structural and tree embedding aspects of incomplete hypercubes," IEEE Trans. Computers, 43(12):1434-1439, December 1994.
- [8] G.-M. Chiu and S.-P. Wu, "A fault-tolerant routing strategy in hypercube multicomputers", IEEE Trans. Computers, 45(2), pp.143-155, February 1996.
- [9] Jie Wu and Kejun Yao, "A Limited-Global-Information-Based Multicasting Scheme for Faulty Hypercube", IEEE Trans. Computers, 44(9), pp. 1162-1166, September 1995.
- [10] Keiichi Kaneko and Hideo Ito, "Fault-Tolerant Routing Algorithms for Hypercube Networks," IPPS 1999, pp.218-224, March 1999.



명 훈 주

1998년 2월 서강대학교 공과대학 컴퓨터학과 공학사. 2000년 2월 서강대학교 공과대학 컴퓨터학과 공학석사



김 성 천

1975년 서울대학교 공과대학 공업교육학(전기전공)학사. 1979년 Wayne State Univ. 컴퓨터공학 공학석사. 1982년 Wayne State Univ. 컴퓨터공학 공학박사. 1982년~1984년 캘리포니아주립대 조교수. 1984년~1985년 금성반도체(주) 책임연구원. 1986년~1989년 서강대학교 공과대학 전자계산소 부소장. 1989년~1991년 서강대학교 공과대학 전자계산학과 학과장. 1985년~현재 서강대학교 공과대학 전자계산학과 교수(1992.9~현재). 1989년~현재 한국정보과학회 병렬처리시스템 연구회 부위원장(1989~1993), 위원장(1994~1997), 대한전자공학회 및 한국통신학회 논문지 편집위원(1991~현재, 1993~현재). 관심 분야는 병렬처리시스템 (Parallel Computer Architecture, Interconnection Network)