

# 상호연결망 $HCN(n,n)$ 과 $2n$ -hypercube 사이의 임베딩 알고리즘

김종석\*, 이성재\*, 이형옥\*\*, 허영남\*

\*순천대학교 컴퓨터학과

\*\*한국전산원 국가망사업부

e-mail:rockhee@sunchon.ac.kr

## Embedding Algorithms among Interconnection Network $HCN(n,n)$ and $2n$ -hypercube

Kim Jong-Seok\*, Lee Sung-Jae\*,

Lee Hyeong-Ok\*\*, Heo Yeong-Nam\*

\*Dept of Computer Science, Sunchon National University

\*\*Dept of KII Management, National Computerization Agency

### 요약

본 논문에서는 하이퍼큐브보다 망비용이 개선된  $HCN(n,n)$ 과  $2n$ -hypercube 사이의 임베딩을 분석한다.  $2n$ -hypercube를  $HCN(n,n)$ 에 연장을 3에 임베딩 가능함을 보이고,  $HCN(n,n)$ 을  $2n$ -hypercube에 임베딩하는 비용이  $O(n)$ 임을 보인다.

### 1. 서론

최근 이미지 파일, 동화상, 실시간 처리 등의 많은 응용 분야에서 고성능의 컴퓨터에 대한 요구가 증가하고 있다. 고성능을 얻기 위한 방법으로 병렬 처리에 대한 필요성이 크게 증가하여 병렬컴퓨터에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 병렬처리 컴퓨터는 다중프로세서(multiprocessor) 시스템과 다중컴퓨터(multicomputer) 시스템으로 분류하는데 다중컴퓨터 시스템은 자신의 기억장치를 갖는 프로세서들을 상호 연결망(interconnection network)으로 연결하고, 프로세서들 간의 통신은 상호 연결망을 통하여 메시지 전송 방식으로 구동되는 시스템이다. 상호 연결망은 전체 시스템의 성능과 시스템의 확장성에 큰 영향을 미친다. 널리 알려진 상호 연결망으로 메쉬, 하이퍼큐브, 스타 그래프 등이 있으며, 상호 연결망을 평가하는 척도로는 분지수(degree), 연결도(connectivity), 대칭성(symmetric), 지름(diameter), 망비용(network cost), 방송(broadcasting), 임베딩(embedding) 등이 있다[5,6].

하이퍼큐브는 노드 및 에지 대칭이고, 임베딩 관점에 있어서 링, 트리, 메쉬 등과 같은 다른 연결망 구조들이 효율적으로 임베딩 될 수 있다는 장점이 있지만, 노드 개수의 증가에 따른 분지수의 증가로 인해 네트워크의 망비용이 증가하는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하고자 하이퍼큐브의 장점을 가지면서 망비용을 개선한 상호 연결망인 Hierarchical cubic Network  $HCN(n,n)$ [2,3]이 제안되었다.

본 논문에서는 하이퍼큐브보다 망비용이 개선된  $HCN(n,n)$ 과  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$  사이의 임베딩 알고리즘을 제안하고 분석한다.

다양한 연결망 구조에서 여러 가지 문제들을 풀기 위한 수많은 병렬 알고리즘들이 설계되고 있는데 이러한 알고리즘들을 원래와는 다른 연결망 구조에서 실행시킬 수 있는지는 병렬처리에서 중요한 문제이다. 이러한 방법 중에서 널리 쓰이는 것에 임베딩이 있다. 임베딩은 한 연결망의 프로세서와 통신링크를 다른 연결망의 프로세서와 통신링크들로 사상(mapping)시키는 방법을 일컫는다.

본 논문의 연구결과는  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 를  $HCN(n,n)$ 에 연장을 3에 임베딩 가능성을 보이고,  $HCN(n,n)$ 을  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 에 임베딩하는 비용이  $O(n)$ 임을 보인다.

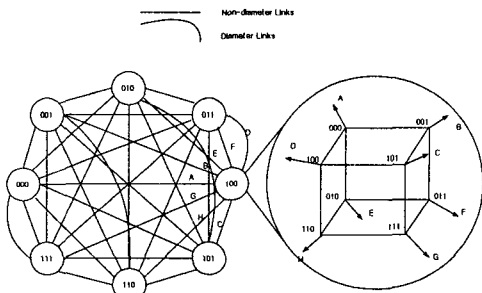
본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련연구에 대하여 논하고 3장에서는  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 와  $HCN(n,n)$  사이의 임베딩을 보이고 4장에서 결론을 맺는다.

2. 관련연구

하이퍼큐브 연결망은 노드 및 에지 대칭이고 단순한 재귀적 구조를 가지고 있어서 각종 응용 분야에서 요구하는 통신망 구조를 쉽게 제공할 수 있는 장점이 있어 기존의 연구용 및 상용 시스템에 널리 사용되고 있다.

$n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_n$ 는 분지수와 지름이 각각  $n$ 을 가지면서 망비용이  $n^2$ 을 갖고[1,7,9],  $2^n$  개의 노드와  $n2^{n-1}$  개의 에지로 구성된다. 각 노드의 주소는  $n$ -비트 이진수로 표현될 수 있고, 임의의 두 노드의 주소가 정확히 1 비트만 다를 때 그들 사이에 에지가 존재한다[4,8].

하이퍼큐브의 단점은 분지수에 비해 지름과 노드간의 평균 거리가 짧지 않다는 것이다. 이것은 하이퍼큐브가 에지를 효율적으로 사용하지 못함을 의미한다. 이러한 문제를 극복하기 위한 연결망으로 Folded-하이퍼큐브,  $HCN(n,n)$ ,  $HFN(n,n)$  등이 제안되었다.



(그림1)  $HCN(3,3)$ 의 구조

$HCN$ 은 하이퍼큐브를 기본 모듈로 사용한다.  $HCN(n,n)$ 은  $2^{2n}$ 개의 노드들을 포함하고  $(n+1)2^{2n-1}$ 개의 링크들을 포함하며, 분지수는  $n+1$ 이다. 각 노드는  $(I,J)$ 와 같이 두 개의 주소로 구성이 된다.  $I$ 는 기본 모듈을 인식하고,  $J$ 는 기본 모듈 내의 노드를 인식한다. 기본 모듈 안의 링크들은 내부 링크라고

말한다. 두 개의 기본 요소 사이의 링크들은 외부 링크(external link)라고 한다. 이 외부 링크들은 diameter link들과 non-diameter link들로 나뉜다. diameter link는 조건  $0 \leq I \leq (2^n-1)$ 와  $0 \leq J \leq (2^n-1)$ 을 만족하는 노드  $(I,I)$ 와  $(J,J)$  사이의 외부 링크를 말하는데  $I$ 와  $J$ 는 보수관계에 있다. diameter link가 아닌 외부 링크는 non-diameter link로 불리운다.  $m < n$ 이고 하이퍼큐브가  $2^m$  개가 있을 때  $HCN(m,n)$ 과 같은 불완전한  $HCN$ 을 가질 수도 있는데, 본 논문에서는  $HCN(n,n)$ 과 같은 완전한  $HCN$ 만을 말하겠다.

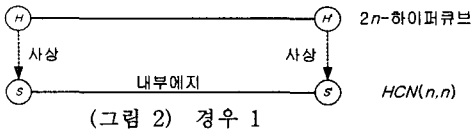
3.  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 와  $HCN(n,n)$  사이의 임베딩

정리 1  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 는  $HCN(n,n)$ 에 연장을 3에 임베딩 가능하다.

증명  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 의 노드  $H=(h_1h_2...h_nh_{n+1}...h_{2n})$ 와  $H'=(h'_1h'_2...h'_nh'_{n+1}...h'_{2n})$ 는  $i$ -차원 에지( $1 \leq i \leq 2n$ )에 의해 인접한 노드라 가정하고,  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S=(s_1s_2...s_n,s_{n+1}...s_{2n})$ ,  $S'=(s'_1s'_2...s'_n,s'_{n+1}...s'_{2n})$ 라 가정하자.

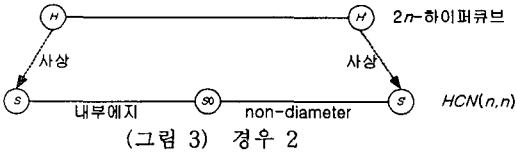
$Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 를  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 로  $Q_{2n}$ 의 노드  $H'$ 를  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S'$ 로 사상했을 때,  $S$ 의 비트스트링에서  $S'$ 의 비트스트링을 연결하는데 적용되는  $HCN(n,n)$ 의 에지의 개수를 통하여 연장율을 분석한다. 노드  $H$ 와 인접한  $H'$ 의 비트스트링에 따라서 아래의 경우로 나눌 수 있다.

경우 1.  $h_1h_2...h_n=h'_1h'_2...h'_n$ 이고  $h_{n+1}...h_{2n} \neq h'_{n+1}...h'_{2n}$  일 때 : 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 가 사상된  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 의 비트스트링은  $(s_1s_2...s_i...s_n,s_{n+1}...s_j...s_{2n})$ 이고, 노드  $H'$ 가 사상된 노드  $S'$ 의 비트스트링은  $(s'_1s'_2...s'_i...s'_n,s'_{n+1}...s'_j...s'_{2n})$ 이다( $1 \leq i \leq n, n+1 \leq j \leq 2n$ ). 노드  $S$ 와  $S'$ 의 비트스트링에서  $s_i=s'_i, 1 \leq i \leq n$ 이고, 오직  $j$  번째에 있는 비트만 서로 보수 관계이므로, 노드  $S$ 와  $S'$ 는  $HCN(n,n)$ 의 동일한 기본 모듈 내부에 있는 노드임을 알 수 있고,  $HCN(n,n)$ 의 정의에 의해 노드  $S$ 와  $S'$ 는 서로 인접한 노드이다. 따라서  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 와  $H'$ 를  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 와  $S'$ 에 각각 사상할 때 연장율 1에 임베딩 가능성을 알 수 있다.



(그림 2) 경우 1

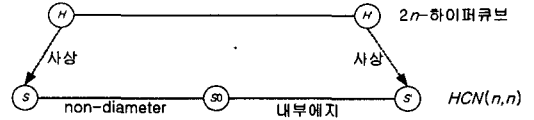
경우 2.  $h_1h_2...h_n \neq h'_1h'_2...h'_n$  이고  $h_1h_2...h_n = h'_{n+1}...h'_{2n} = h_{n+1}...h_{2n}$  일 때 : 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 가 사상된  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 의 비트스트링은  $(s_1s_2...s_i...s_n, s_{n+1}...s_j...s_{2n})$ 이고, 노드  $H'$ 가 사상된 노드  $S'$ 의 비트스트링은  $(s'_1s'_2... \overline{s'_i}...s'_n, s'_{n+1}...s'_j...s'_{2n})$ 이다 ( $1 \leq i \leq n, n+1 \leq j \leq 2n$ ). 노드  $S$ 와  $S'$ 의 비트스트링에서  $s_i \neq s'_i, 1 \leq i \leq n$ 이므로  $S$ 와  $S'$ 는  $HCN(n,n)$ 의 기본 모듈 외부에 있는 노드임을 알 수 있다. 사상된  $HCN(n,n)$ 의 노드  $(s_1s_2...s_i...s_n, s_{n+1}...s_j...s_{2n})$ 를 기본 모듈 내부에 있는  $(s_1s_2...s_i...s_n, s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n)$ 에 연결한다. 연결된 노드  $(s_1s_2...s_i...s_n, s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n)$ 는 non-diameter link에 의해  $(s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n, s_1s_2...s_i...s_n)$ 에 연결이 된다.  $s_1s_2...s_i...s_n$ 와  $s'_{n+1}...s'_j...s'_{2n}$ 는 같다고 했으므로  $(s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n, s_1s_2...s_i...s_n)$ 와  $(s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n, s'_{n+1}...s'_j...s'_{2n})$ 는 같다. 따라서  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 와  $H'$ 를  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 와  $S'$ 에 각각 사상할 때 연장을 2에 임베딩 가능함을 알 수 있다.



(그림 3) 경우 2

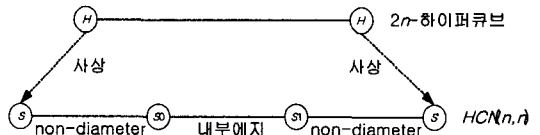
경우 3.  $h_1h_2...h_n \neq h'_1h'_2...h'_n$  이고  $h'_1h'_2...h'_n = h_{n+1}...h_{2n} = h'_{n+1}...h'_{2n}$  일 때 : 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 가 사상된  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 의 비트스트링은  $(s_1s_2... \overline{s'_i}...s_n, s_{n+1}...s_j...s_{2n})$ 이고, 노드  $H'$ 가 사상된 노드  $S'$ 의 비트스트링은  $(s'_1s'_2...s'_i...s'_n, s'_{n+1}...s'_j...s'_{2n})$ 이다 ( $1 \leq i \leq n, n+1 \leq j \leq 2n$ ). 노드  $S$ 와  $S'$ 의 비트스트링에서  $s_i \neq s'_i, 1 \leq i \leq n$ 이므로  $S$ 와  $S'$ 는  $HCN(n,n)$ 의 기본 모듈 외부에 있는 노드임을 알 수 있다. 사상된  $HCN(n,n)$ 의 노드  $(s_1s_2... \overline{s'_i}...s_n, s_{n+1}...s_j...s_{2n})$ 를 non-diameter link에 의해  $(s_{n+1}...s_j...s_{2n}, s_1s_2... \overline{s'_i}...s_n)$ 에 연결한다. 연결된 노드  $(s_{n+1}...s_j...s_{2n}, s_1s_2... \overline{s'_i}...s_n)$ 를 모듈 내부에 있는  $(s_{n+1}...s_j...s_{2n}, s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n)$ 에 연결한다.  $s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n$ 와  $s_{n+1}...s_j...s_{2n}$ 와  $s'_{n+1}...s'_j...s'_{2n}$ 는 같다고 했으므로  $(s_{n+1}...s_j...s_{2n}, s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n)$ 은  $(s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n, s'_{n+1}...s'_j...s'_{2n})$ 와 같다. 따라서  $Q_{2n}$ 의

노드  $H$ 와  $H'$ 를  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 와  $S'$ 에 각각 사상할 때 연장을 2에 임베딩 가능함을 알 수 있다.



(그림 4) 경우 3

경우 4.  $h_{n+1}...h_{2n} = h'_{n+1}...h'_{2n}$  이고  $h_1h_2...h_n \neq h'_1h'_2...h'_n$  일 때 : 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 가 사상된  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 의 비트스트링은  $(s_1s_2...s_i...s_n, s_{n+1}...s_j...s_{2n})$ 이고, 노드  $H'$ 가 사상된 노드  $S'$ 의 비트스트링은  $(s'_1s'_2... \overline{s'_i}...s'_n, s'_{n+1}...s'_j...s'_{2n})$ 이다 ( $1 \leq i \leq n, n+1 \leq j \leq 2n$ ). 사상된  $HCN(n,n)$ 의 노드  $(s_1s_2...s_i...s_n, s_{n+1}...s_j...s_{2n})$ 를 non-diameter link에 의해  $(s_{n+1}...s_j...s_{2n}, s_1s_2...s_i...s_n)$ 에 연결한다. 연결된 노드  $(s_{n+1}...s_j...s_{2n}, s_1s_2...s_i...s_n)$ 를 모듈 내부에 있는 노드  $(s_{n+1}...s_j...s_{2n}, s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n)$ 에 연결한다. 연결된 노드  $(s_{n+1}...s_j...s_{2n}, s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n)$ 를 non-diameter link에 의해  $(s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n, s_{n+1}...s_j...s_{2n})$ 에 연결한다.  $s_{n+1}...s_j...s_{2n}$ 와  $s'_{n+1}...s'_j...s'_{2n}$ 는 같다고 했으므로  $(s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n, s_{n+1}...s_j...s_{2n})$ 와  $(s'_{1s'_2}... \overline{s'_i}...s'_n, s'_{n+1}...s'_j...s'_{2n})$ 는 같다. 따라서  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 와  $H'$ 를  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 와  $S'$ 에 각각 사상할 때 연장을 3에 임베딩 가능함을 알 수 있다.



(그림 5) 경우 4

이상의 4가지 경우에서 증명한 바와 같이 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 를  $HCN(n,n)$ 에 임베딩을 하기 위해 필요한 연장은 3이다.

정리 2  $HCN(n,n)$ 을  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 에 임베딩하는 비용은  $O(n)$ 이다.

증명  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 의 노드  $H=(h_1h_2...h_nh_{n+1}...h_{2n})$ 와  $H'=(h'_1h'_2...h'_nh'_{n+1}...h'_{2n})$ 는  $i$ -차원 예지( $1 \leq i \leq 2n$ )에 의해 인접한 노드라 가정하고,  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S=(s_1s_2...s_n, s_{n+1}...s_{2n})$ ,  $S'=(s'_1s'_2...s'_n, s'_{n+1}...s'_{2n})$ 라 가정하자.

$HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 를  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 로  $HCN(n,n)$

의 노드  $S'$ 를  $Q_{2n}$ 의 노드  $H'$ 로 사상했을 때,  $H$ 의 비트스트링에서  $H'$ 의 비트스트링을 생성하는데 적용되는  $Q_{2n}$ 의 에지의 개수를 통하여 연장율을 분석한다. 노드  $S$ 와 인접한  $S'$ 의 비트스트링에 따라서 아래의 경우로 나눌 수 있다.

경우 1.  $s_1s_2...s_n = s'_1s'_2...s'_n$ 이고  $s_{n+1}...s_{2n} \neq s'_{n+1}...s'_{2n}$ 일 때 :  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 가 사상된 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 의 비트스트링은  $(h_1h_2...h_i...h_n h_{n+1}...h_j...h_{2n})$ 이고, 노드  $S'$ 가 사상된 노드  $H'$ 의 비트스트링은  $(h'_1h'_2...h'_i...h'_n, h'_{n+1}...h'_{j...}h'_{2n})$ 이다( $1 \leq i \leq n, n+1 \leq j \leq 2n$ ). 노드  $H$ 와  $H'$ 의 비트스트링에서  $h_i = h'_i, 1 \leq i \leq n$ 이고, 오직  $j$  번째에 있는 비트만 서로 보수 관계이므로, 노드  $H$ 와  $H'$ 는  $Q_{2n}$ 의 동일한 기본 모듈 내부에 있는 노드임을 알 수 있고,  $Q_{2n}$ 의 정의에 의해 노드  $H$ 와  $H'$ 는 서로 인접한 노드이다. 따라서  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 와  $S'$ 를  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 와  $H'$ 에 각각 사상할 때 연장율 1에 임베딩 가능함을 알 수 있다.

경우 2.  $s_1s_2...s_n \neq s'_1s'_2...s'_n$ 일 때 :  $HCN(n,n)$ 의 노드  $S$ 가 사상된 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 의 노드  $H$ 의 비트스트링은  $(h_1h_2...h_i...h_n h_{n+1}...h_j...h_{2n})$ 이고, 노드  $S'$ 가 사상된 노드  $H'$ 의 비트스트링은  $(h'_1h'_2...h'_i...h'_n h'_{n+1}...h'_j...h'_{2n})$ 이다( $1 \leq i \leq n, n+1 \leq j \leq 2n$ ). 노드  $H$ 와  $H'$ 의 비트스트링에서  $h_i \neq h'_i, 1 \leq i \leq n$ 이므로, 노드  $H$ 와  $H'$ 는  $Q_{2n}$ 의 기본 모듈 외부에 있는 노드임을 알 수 있다.  $Q_{2n}$ 의 정의에 의해 노드  $H$ 와  $H'$ 가 연결되기 위해서는 서로 다른 비트스트링만큼의 에지가 필요하다. 노드  $H$ 와  $H'$ 의 비트스트링은  $2n$ 개이므로 노드  $H$ 와  $H'$ 가 보수관계일 때 두 노드의 연결을 위해 필요한 에지의 개수는  $2n$ 이다. 그러므로 경우 2는 연장율이  $2n$ 이다.

이상의 2가지 경우에서 증명한 바와 같이  $HCN(n,n)$ 을  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 에 임베딩을 하기 위해 필요한 비용은  $O(n)$ 이다.

#### 4. 결론

상호 연결망의 임베딩은 어떤 연결망  $G$ 가 다른 연결망  $H$ 에 포함 혹은 어떻게 연관되어 있는지를 알아보기 위해 어떤 특정한 연결망을 다른 연결망에 사상하는 것이다. 연결망  $G$ 가 연결망  $H$ 에 적은 비용으로 임베딩 가능하다는 것은 연결망  $G$ 가 다양한

응용 분야에서 효율적으로 이용될 수 있기 때문에 상호 연결망에서 임베딩 문제는 매우 중요하다.

본 논문에서는 하이퍼큐브보다 망비용이 개선된  $HCN(n,n)$ 과  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 사이의 임베딩 알고리즘을 제안하고 분석했다.  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 를  $HCN(n,n)$ 에 연장율 3에 임베딩 가능함을 보였고,  $HCN(n,n)$ 을  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 에 임베딩하는 비용이  $O(n)$ 임을 보였다. 이러한 결과는 하이퍼큐브와  $HCN(n,n)$  사이의 임베딩 결과를 분석함으로써,  $2n$ -차원 하이퍼큐브  $Q_{2n}$ 에서 이미 개발된 여러 가지 알고리즘을  $HCN(n,n)$ 에서 효율적으로 이용할 수 있음을 의미하고, 하이퍼큐브의 변형된 연결망과  $HCN(n,n)$ 의 관계를 분석할 수 있음을 의미한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] N. Corp, "NCUBE/ten : an Overview," November
- [2] K. Ghose and K. R. Desai "The Design and Evaluation of the Hierarchical Cubic Network," Proc. 19th Int'l Conf. Parallel Processing, vol. I, pp.355-362, 1990.
- [3] K. Ghose and K. R. Desai "Hierarchical Cubic Networks," IEEE Trans. Parallel Distributed syst., Vol.6, No. 4, pp.427-436, 1995.
- [4] F. Harary, J. P. Hayes, and H-J. Wu, "A Survey of the Theory of Hypercube Graphs," Comput. Math. Appl., Vol. 15, pp.277-289, 1988
- [5] F. T. Leighton, Introduction to Parallel Algorithms and Architectures : Arrays, Hypercubes, Morgan Kaufmann Publishers, 1992.
- [6] V. E. Mendia and D. Sarkar, "Optimal Broadcasting on the Star Graph," IEEE Trans. Parallel Distributed syst., Vol.3, No.4, pp.389-396, 1992.
- [7] S. Ranka, Y. Won and S. Sahni, "Programming a Hypercube Multiprocessor," IEEE Software, Vol. 5, pp. 69-77, 1988.
- [8] Y. Saad and M. H. Schultztz, "Topological Properties of Hypercubes," IEEE Trans. Comput., Vol.37, pp.867-872, 1988.
- [9] A. S. Vaidya, P. S. N. Rao and S. R. Shankar, "A Class of Hypercube\_like Networks," Proc. of the 5th IEEE Symposium on Parallel and Distributed Processing, pp. 800-803, Dec. 1993.