

論文97-34C-7-2

대각선배선을 사용한 4층 채널배선에 관한 연구

(A new four-layer channel router using the diagonal routing)

李 丙 鎬 *

(Byung Ho Rhee)

요 약

본 연구에서는 채널그래프를 이용한 새로운 HVHD방식의 4층 채널배선 수법을 제안한다. 종래의 4층 채널 배선 모델(HVHV or HVHH)과 다른 대각선배선 모델을 도입하여, 웨이트를 가진 채널그래프를 사용한 알고리즘에 의해 대각선 배선할 네트를 한 개의 층에 배선하고 나머지 네트는 3개의 층에 HVH방식으로 배선한다. 벤치마크 데이터를 적용한 실험에서는 종래의 4층 채널배선 수법에 비해 10~25% 정도의 트랙수를 감소시킬 수 있었다.

Abstracts

This paper proposes a routing model based on the HVHD for four-layer routing problems. Differing from the HVHV and HVHH models, the proposed HVHD model permits diagonal routing on the fourth layer with a grid of 45° , 90° and 135° directions. The developed algorithm which uses a channel-graph including weights routes a layer using diagonal model and the other three layers using HVH model. Applications to several benchmark examples verify that approximately 10~25 percent reduction of channel density can be achieved compared to the conventional four-layer channel routing algorithms.

I. 서 론

VLSI레이아웃 설계에 있어서 채널배선 문제는 설계의 최종단계로서 중요한 문제이다. 칩면적에 대해서 채널배선 영역이 차지하는 비율이 크기 때문에 칩사이즈를 최소화하기 위해서는 채널배선영역의 삭감이 필수 불가결하다. 이 목적을 달성하기 위해 결선을

100%로 가능한 한 작은 면적의 채널 영역에 배선하는 문제에 대해 많은 연구가 행해지고 있다. 지금까지 2층 및 3층 채널배선 방법이 제안되어져 있고^[1-5], 더욱이 최근에는 제조 기술의 진보와 회로규모의 증대에 수반해서 4층 채널배선 문제에 대한 연구가 현실적인 문제로 대두되어, 앞으로 4층 채널배선이 더욱 폭넓게 사용되어 지리라 생각되며, 지금까지 이미 몇 가지 4층채널배선 방법에 관한 연구 결과가 발표되어져 있다^[6-9].

이들 방법 중에서 제1, 제3층은 수평성분 배선세그먼트를, 제2, 제4층은 수직성분 배선세그먼트를 전용으로 사용하는 HVHV(또는 VHVH)배선방식이 있다. 이 방식에서는 두 개의 층이 수평성분으로 사용되어지기 때문에, 4층 배선의 트랙수가, 2개의 층을 수평

* 正會員, 漢陽大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Engineering, HanYang University)

※ 본 연구는 서울대학교 반도체 공동연구소의 교육부 반도체분야 학술연구조성비(과제번호: ISRC 95-E-2009)에 의해 수행되었습니다.

接受日字:1996年9月20日, 수정완료일:1997年7月3日

성분으로 사용하는 HVH방식의 3층 채널배선방식의 결과와 동일하다. 그 이유로서는 일반적으로 배선트랙 수는 주로 각 칼럼별 수평방향의 배선세그먼트 수 (local density : 이하 D로 표기한다)의 최대값 (이하 Dmax로 표기한다)에 의해서 결정되어 지기 때문이다 [5, 7, 8].

또한, HVHH(혹은 HHVH)배선방식의 배선 모델을 채용하고 있는 경우는 수평성분에 3개의 층을 사용하고 있기 때문에 결과가 좋은 것으로 생각될 수 있으나 실제로는 그렇지 않다. 그 이유로는, 우선 수평성분용의 배선층이 겹쳐져 있기 때문에 같은 트랙위치에 있어서 수평 배선세그먼트가 제 3, 제 4 층에 평행해서 배선된 경우(overlap model)에는 트랙 커패시턴스의 증가나 크로스 토크 등이 생기는 문제가 있고^[10, 11] (일반적으로 오버랩 네트의 길이는 격자 2개분 정도까지 허용되어 진다), 두 번째 이유는 수직 성분에 1개의 층을 사용하고 있기 때문에 제4층의 수평 배선 세그먼트와 제2층의 수직 배선세그먼트를 비아에의해 연결할 때 비아의 중복(stacked contact)을 허용하지 않으면 안되는 크나큰 결점이 있기 때문이다. 결국 제 4층의 수평성분배선은 부자유스러운 면이 많아서 효과적이지 못하다. 따라서 이러한 4층 채널배선의 결과는 일반적으로 3층 채널배선의 결과와 같아진다^[7-9].

HVH방식 3층 채널배선의 트랙수의 하한값은 $\lceil D_{max}/2 \rceil$ ^[7, 8] ($\lceil a \rceil$ 는 a이상의 가장 작은 정수를 나타낸다)로 되고, HVHVH방식 5층 채널배선의 트랙수의 하한값은 $\lceil D_{max}/3 \rceil$ ^[7, 9]로 된다는 결과부터 생각한다면, 적어도 4층 채널배선의 경우의 트랙 수로서는 $\lceil D_{max}/3 \rceil$ 보다는 크더라도 $\lceil D_{max}/2 \rceil$ 보다는 작아야 한다.

이 문제에 대해서 본 연구에서는 HVHD배선 모델이라고 하는 새로운 4층 채널배선 모델과 채널그래프를 사용한 효과적인 HVHD배선 알고리즘을 제안한다. 여기에서 제4층째의 D는 스위치 박스 배선 등에 사용되고 있는 대각선 배선을 뜻한다^[11-14]. 배선모델에 관해서는 II장에서 자세하게 설명한다. 알고리즘은 본인이 제안한 3층 채널배선 알고리즘^[5]에서 사용한 채널그래프를 기본으로 하고 있다. 기본 방침은 웨이트가 부여된 채널그래프의 에지의 웨이트에 의해서 우선 대각선 배선할 네트를 선택해서 배선하고 다음에 남아있는 네트를 HVH 3개의 층에 배선한다. 본 알고리즘을 Deutsch's difficult문제를 포함한 몇 개의 벤

치마크 데이터에 적용한 실험 결과에서는 종래의 방법에 비해 약 10-25% 정도의 트랙수 삭감이 가능했다.

이하 II장에서 본 연구에서 가정한 배선 모델을 설명한 후, III장에서는 채널그래프 구성을, IV장에서는 대각선 배선할 네트의 선택 및 배선을, V장에서는 HVH의 3층 배선을 설명한다. VI장에서는 실험결과에 의한 본 방법의 유효성을 검증한다. 최후로 VII장에서는 결론과 금후의 과제에 대해 언급한다.

II. 배선모델

본 연구에서는 채널배선층이 4층인 게이트 어레이 혹은 스탠더드 셀 모델을 생각한다. 채널부분의 제1, 제2, 제3층의 배선 영역은 각각 수평, 수직, 수평성분의 배선격자를 가정하고 모든 배선은 이 배선격자상에서 행해진다. 제4층은 수직 및 양대각선 방향으로 배선이 가능하도록 수직 방향과 두 종류의 대각선 방향으로 된 배선 격자가 설정된 것으로 가정한다. 물론 대각선 방향 배선을 이용하면 배선 격자가 수직, 수평 방향으로만 배선할 때보다는 좁아지기 때문에 대각선 방향 격자간의 간격은 수직, 수평방향 배선격자의 최소 간격보다 최저 $\sqrt{2}$ 배 정도 증가시킬 필요성도 있을 수 있다^[15]. 그리고 제4층은 다른 층과의 사이에 비아를 허용하지 않는 단일층 배선으로 가정한다. 터미널핀은 같은 칼럼상의 제2층과 제4층의 두 개의 층에 설정되어 있는 것으로 한다. 또한 지그제그 배선을 한다면 멀리 떨어진 두 개의 단자 사이에도 배선이 가능하지만 제4층은 단일층의 배선으로 가정했기 때문에 수평성분이 길어지면 길어질수록 다른 배선과의 교차가 생길 가능성이 커진다. 따라서, 본 연구에서는 제4층상의 배선은 1회의 구부러짐만 허용하는 것으로 가정한다.

III. 채널그래프 구성

우선, 전처리로서 접속 요구가 기술된 입력 네트 리스트로부터 다단자 네트를 칼럼번호순으로 2단자 네트로 분할 한다. 단자가 같은 칼럼의 상하에 있는 경우 그 2단자 네트는 수평성분(수평방향의 배선세그먼트)이 없기 때문에 별도로 취급한다. 다단자 네트를 2단자네트(이하, 네트로 부른다)로 분할한 후에 입력 네트를 수직제약과 수평제약을 동시에 나타낼 수 있는 채

널그래프(그림 3 참조)로 표현한다. 여기서 수직제약은 네트의 수직성분(수직방향의 배선세그먼트)에 의해 생기는 네트의 수평성분의 상하관계의 제약을 나타내고, 수평제약은 서로 다른 네트의 수평성분은 같은 층의 같은 트랙상에 중복시켜서는 안된다는 제약으로 정의한다. 채널그래프의 노드와 그 속의 숫자는 각각 채널의 칼럼과 그 번호를 표시하고 에지는 접속요구를 갖는 네트를 나타낸다. 에지에 붙어 있는 $N_i(j)$ 에서, i 는 네트의 번호를 나타내고, j 는 그 네트의 웨이트를 나타낸다. 그리고 에지의 양단에 붙어 있는 숫자는 에지의 노드웨이트이다. 웨이트에 관해서는 뒤에서 다시 설명한다.

네트의 접속상태를 나타내는 에지는 무방향성에지, 일방향성에지, 양방향성에지의 세종류로 분류된다. 무방향성에지는 네트의 접속요구가 양쪽 모두 채널의 상측 핀과 접속되는 경우, 일방향성에지는 네트의 접속요구가 각각 상측과 하측 핀에 접속되는 경우(상측에서 하측으로 향하는 화살표로 된다), 양방향성에지는 네트의 접속요구가 양쪽 모두 하측 핀과 접속되는 경우를 나타낸다^[5].

따라서, 예를 들면 그림1의 입력 네트의 접속요구에 대응하는 채널그래프는 그림3과 같이 표현가능하다. 그림1에서 최상위 행의 숫자는 칼럼번호이고 다른 두 행의 숫자는 네트 번호를 나타낸다. 화살표는 그 방향으로의 접속요구를 나타낸다. 그리고 대각선 배선할 네트의 선택을 위해서, 또한 남은 네트를 HVH 3개의 층에 배선할 때 사용하기 위해서, 각각의 에지에 웨이트를 부여한다. 이 웨이트는 각 노드에 연결되어진 에지들의 상태에 의해서, 우선 각 에지의 양쪽 노드에서 노드웨이트를 부여한다. 그리고 양쪽 노드웨이트의 합을 그 에지의 웨이트(NWi)로 한다. 그림2와 같이 어떤 노드 M_k 에 있어서 화살표가 있는 에지(양방향성 에지, 혹은 노드 M_k 를 향하는 일방향성 에지)와 화살표가 없는 에지(무방향성 에지, 혹은 노드 M_k 로부터 출발하는 일방향성 에지)가 동시에 존재하는 경우는 화살표가 있는 에지에는 웨이트 "4"를 화살표가 없는 에지에는 웨이트 "0"을 할당한다. 노드 M_k 에 화살표가 없는 에지만이 존재하는 경우는 에지에 웨이트 "1"을, 화살표가 있는 에지만이 존재하는 경우에는 에지에 웨이트 "3"을 할당한다. 노드웨이트의 값으로서 이러한 수치를 할당하는 이유에 관해서는 IV장에서 설명한다. 입력 네트의 예에 대하여 모든 에지에 웨이트를 부여

한 결과는 그림 3과 같다.

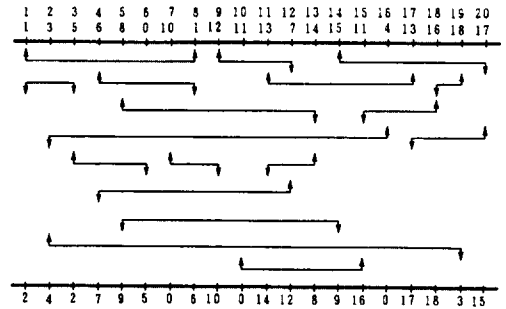


그림 1. 입력 네트의 일례
Fig. 1. An example of input netlist.

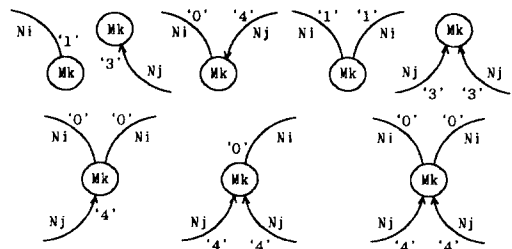


그림 2. 웨이트 부여 방법
Fig. 2. Weight assignment.

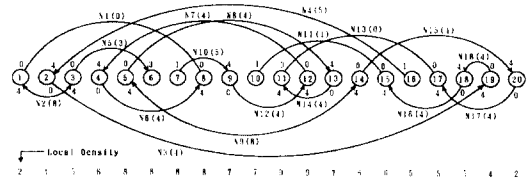


그림 3. 웨이트가 부여된 채널그래프
Fig. 3. Weight assigned channel-graph.

IV. 대각선배선을 할 네트의 선택 및 배선

1. 후보 네트의 선택

알고리즘 전체의 개략적인 흐름을 그림4에 나타내었다. 이하 이 흐름도를 따라서 설명한다. 대각선배선 할 네트의 수평성분의 길이와 채널영역의 폭과는 밀접한 관계가 있기 때문에, 대각선배선 할 후보네트를 선택하기 전에, 이를 고려하기 위해 L이라고 하는 길이를 나타내는 파라미터를 도입한다. 단, 길이는 수직 또는 수평 성분의 격자 수로 표현하는 것으로 한다. L값은 이하와 같은 방법으로 결정하고 그 L을 이용해서 대

각선 배선할 네트의 후보네트를 선택한다.

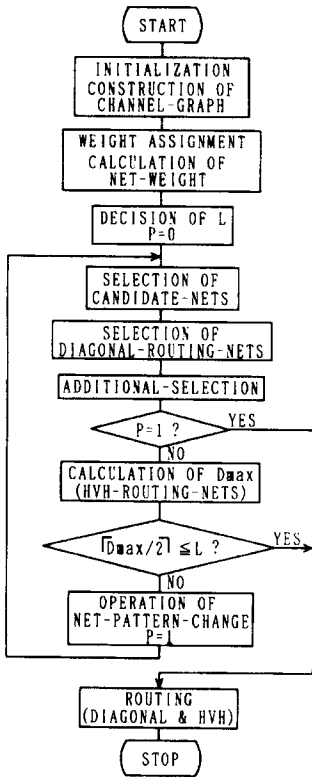


그림 4. 흐름도
Fig. 4. Flowchart.

L값의 결정: HVH방식의 3층 채널배선의 하한 트랙수는 $\lceil D_{max}/2 \rceil$ 가 되고, HVHVH방식의 5층 채널배선의 하한 트랙수는 $\lceil D_{max}/3 \rceil$ 가 된다. 따라서 본 연구에서 목표로 하고 있는 HVHD방식의 4층 채널배선의 경우에 배선 트랙수는 $\lceil D_{max}/2 \rceil$ 와 $\lceil D_{max}/3 \rceil$ 사이의 값으로 예측 할 수가 있다. 따라서 여기서 L 은, $\lceil D_{max}/2 \rceil > L > \lceil D_{max}/3 \rceil$ 를 만족하는 최소 정수로 한다. 만약 이 조건을 만족하는 정수가 없다면 $L = \lceil D_{max}/3 \rceil$ 로 한다. 이와 같이 한다면 이 4층 채널의 트랙수는 L 값 이상으로 된다고 생각할 수 있다. 그림 1의 예에서는 $D_{max} = 9$ 이기 때문에 $\lceil D_{max}/2 \rceil = 5$, $\lceil D_{max}/3 \rceil = 3$, 그러므로 L 은 4가 된다.

후보네트는 일방향성예지(예지의 웨이트가 $3 \leq N_{Wi} \leq 5$ 를 만족하는 네트) 가운데 네트의 수평성분의 길이가 $L+1$ 이하인 네트를 선택한다. $L+1$ 이라고 하는 이유는 채널영역의 트랙수를 L 이라고 한다면 채널의 수

직성분의 격자수가 $L+1$ 이 되고 대각선방향의 격자수도 $L+1$ 이 최대가 되기 때문이다. 이들 선택된 네트들이 제4층에 대각선 배선할 후보 네트가 된다. 이들 네트 중에서 실제로 대각선 배선할 네트를 결정하기 위해 그림 5의 (a)와 같이 대각선 배선 후보 네트의 채널그래프를 구성한다. 예지의 방향이 같은 것끼리 그림처럼 상,하로 나누어서 구성한다. 이들 후보 네트는 단일층에 배선하려는 네트이기 때문에 배선할 때에 교차가 되는 것은 허용되지 않는다. 따라서 배선할 때에 상호 교차가 되지 않고 배선할 수 있는 네트만을 선택하기 위한 알고리즘이 필요하게 된다.

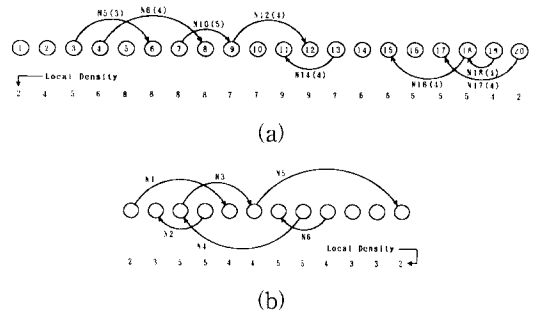


그림 5. 대각선배선 후보 네트의 채널그래프
Fig. 5. Channel-graph of routable nets in diagonal direction.

2. 대각선 배선할 네트의 선택

후보네트의 채널그래프 상에서 같은 방향의 예지끼리의 관계로서는

- ①상호 교차하고 있다.(그림 5 (a)의 N5, N6)
 - ②한 개의 예지가 다른 예지를 품고 있다.(그림 5 (a)의 N17, N18)
 - ③그 밖의 경우.
- 의 세 종류로 나눌 수 있다. 또한 서로 반대 방향의 예지끼리도
- ④상호 교차하고 있다.(그림 5 (a)의 N12, N14)
 - ⑤한 개의 예지가 다른 예지를 품고 있다.(그림 5 (b)의 N1, N2)
 - ⑥그 밖의 경우.

의 세 종류로 나눌수 있으며, 모두 6가지의 경우로 관계지을 수 있다. 같은 방향의 예지끼리는 ①과 ③의 경우만이 실제 배선에서 교차하지 않기 때문에 양쪽 네트 모두 대각선 배선이 가능하게 되고 (그림 6 (a) 참조), ②의 경우는 실제 대각선 배선할 때에 교차하기 때문에 한쪽 네트만이 배선 가능하게 된다(그림 6

(b)참조). 한편, 서로 반대 방향의 에지끼리는 ⑥의 경우만이 양쪽 네트 모두 배선 가능하게 되고, ④와 ⑤의 경우는 한쪽 네트만이 배선 가능하게 된다. (그림 6 (c), (d)참조) 한쪽 네트만이 배선 가능하게 되는 경우의 선택 우선 순위는, 우선 Dmax값을 갖는 칼럼을 많이 통과하고 있는 네트, 그 다음으로 큰 D값을 갖는 칼럼을 많이 통과하고 있는 네트, 그 다음으로 수평성분의 길이가 긴 쪽의 네트의 순으로 선택한다. 그 밖에, 3개 이상의 네트가 교차하고 있는 경우에는 2개의 네트 조합마다(3개의 네트인 경우 조합이 3가지)상기의 방법으로 각 네트의 배선가능여부를 판별한다.

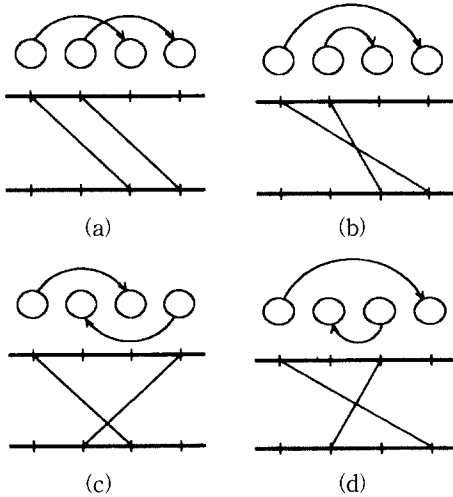


그림 6. 채널그래프와 배선의 관계
Fig. 6. Relation between channel-graph and routing.

대각선 배선할 네트의 선택을 위해서, 다른 네트보다 우선적으로 배선할 필요가 있는 씨드네트(seed net)를 결정한다. 씨드네트는 우선 후보네트 중에서 Dmax값 또는 큰 D값을 갖는 칼럼을 많이 통과하고 있는 네트를 선택한다. 그것이 같은 네트가 존재한다면, 수평성분의 길이가 긴 쪽을 선택한다. 이와 같이 선택한 씨드네트를 중심으로 해서 상기방법에 의해 배선가능한 네트를 순차적으로 선택한다.

그림 5 (a)의 예에서는, N12, N14가 Dmax값을 갖는 칼럼을 두개씩 통과하고 있다. 그 중에서 수평성분이 긴 N12가 씨드네트가 된다. 또한 N12와 N14는 ④의 경우에 해당하므로 한 개의 네트만이 선택 가능한 경우이기 때문에 N14는 선택 불가능하게 된다. 따라서 N12를 중심으로 해서 좌우로 선택을 계속하면 좌측에서는 N10, N6, N5가 모두 ①의 경우에 해당하

므로 선택 가능하게 된다. 또한 우측에서는 N16, N17이 ①의 경우로 선택 가능하게 되고 N18은 ②의 경우에 해당하기 때문에 선택 불가능하게 된다. 그러므로 이 예에서는 N5, N6, N10, N12, N16, N17이 선택된다. 만약 별도의 예로써 그림 5 (b)와 같은 후보네트가 존재한다고 가정하는 경우에는 N1, N3, N5의 네트 집합과 N2, N4, N6의 네트 집합이 선택 가능하게 되지만, 씨드네트가 N4가 되기 때문에 네트집합 N2, N4, N6을 선택하여야만 한다. 네트 길이의 총합은 N1, N3, N5의 쪽이 크지만, Dmax값을 보다 효과적으로 감소시킨다고 하는 면에서 이러한 선택이 보다 우선되게 된다.

3. 추가선택

일방향성예지를 대상으로 한 대각선 배선 네트 선택의 완료 후에는 무방향성예지와 양방향성예지를 대상으로 하는 추가선택 작업을 행한다. 이것은 에지의 웨이트 $NW_i \leq 2$ 혹은 $NW_i \geq 6$ 을 만족하고 있는 네트 중에서 길이가 2L이하의 네트만을 대상으로 해서 추가선택 가능 여부를 판별한다. 여기서 길이가 2L이하라고 하는 이유는 채널 영역의 폭이 L+1이기 때문에 추가선택에 의해서 배선되는 경우에는 네트의 길이가 최대 2L까지 배선가능하게 되기 때문이다.(그림 8 참조) 다음에 추가선택 가능 여부 판별방법에 대해서 설명한다.

(1) $NW_i \leq 2$ 을 만족하는 네트(무방향성예지)의 경우

앞에서 선택된 네트가 모두 일방향성예지로서 채널의 상측과 하측에 접속되어 있다. 이 때문에 지금 판별하려고 하는 네트의 좌측 칼럼 번호와 우측 칼럼 번호의 사이에, 앞에서 선택된 네트의 상측 칼럼번호가 존재하지 않는다면, 이 네트는 추가선택이 가능하게 된다. 추가선택이 가능한 네트 집합에 있어서, 그래프 상에서 상호 교차하고 있지 않다면 이 네트들은 모두 선택 가능하게 되고, 교차하고 있다면 교차하고 있는 네트 중에서 한 개의 네트만이 배선 가능하게 된다. 그 한 개의 네트의 선택 방법으로는, 웨이트 $NW_i = 0$ 인 네트는 양쪽 노드에서 수직제약을 갖는 네트를 나타내고 있기 때문에 한 개의 네트를 선택하는 경우에는 우선 $NW_i = 0$ 이고 또한 길이가 긴 쪽을 선택한다. 만일 $NW_i = 0$ 인 네트가 존재하지 않는다면 다음으로는 $NW_i = 1$ 인 네트의 가운데에서 길이가 긴 쪽을 선택한다.

(2) $NW_i \geq 6$ 을 만족하는 네트 (양방향성예지)의 경우

판별하려는 네트의 좌측 칼럼번호와 우측 칼럼번호의 사이에, 앞에서 선택되었던 하측 칼럼번호가 존재하지 않는다면 이 네트는 추가 선택이 가능하게 된다. 추가선택 가능한 네트끼리는 (1)의 경우와 마찬가지로 그래프 상에서 상호 교차하고 있지 않다면 모든 네트들이 배선가능하게 되고, 교차하고 있다면 교차하고 있는 네트 중에서 한 개의 네트만이 배선 가능하게 된다. 이때 $NW_i=8$ 인 네트는 양쪽 노드에서 수직제약을 갖는 네트를 표시하고 있기 때문에 선택은 $NW_i=8$ 이고 또한 길이가 긴쪽을 선택한다. 만약 $NW_i=8$ 인 네트가 존재하지 않는다면 $NW_i=7$ 인 네트 중에서 길이가 긴 쪽을 선택한다.

그리고 (1)과 (2)에서 각각 선택되었던 네트끼리 교차가 생기는 경우는 각 네트의 양쪽 노드에서 수직 제약(무방향성예지의 경우 $NW_i=0$, 양방향성예지의 경우 $NW_i=4$)이 적은 네트를 제외시킨다. 만약 그것이 같다면 수평성분이 짧은 쪽을 제외시킨다. 그림 3의 예를 대상으로 해서 추가선택 작업을 행한 결과 선택된 네트는 그림 8에 나타난 바와 같이 N_2, N_{13} 두개의 네트뿐이다. 이상으로서 제4층에 대각선 배선 할 네트의 선택이 모두 완료된다. 그림 3의 예에서는 $N_2, N_5, N_6, N_{10}, N_{12}, N_{13}, N_{16}, N_{17}$ 이 대각선 배선 할 네트가 된다.

이상과 같이 NW_i 의 값에 의해 네트를 크게 세개의 그룹으로 분할하고 네트의 수직제약 관계를 표현하기 위해서는 채널그래프 예지의 노드웨이트를 III장에서 설명한 바와 같이 부여할 필요가 있다. 이 목적을 만족하는 NW_i 의 경계치의 부여 방법으로는 다른 방법도 있을 수 있지만 그 중에서 분할이 가능하고 또한 네트의 수직제약 관계를 표현할 수 있는 최소치를 채용하고 있다.

한편, 최악의 경우, 입력으로 주어진 네트리스트 가운데서 2단자 네트의 일방향성예지로서 길이가 $L+1$ 이 하인 네트의 수가 상당히 적은 경우를 생각한다면, 그 경우는, 제4층의 대각선 배선할 네트의 대상 수가 적어지기 때문에 보다 적은 트랙수로 배선을 완료한다고 하는 본래의 목적이 달성되기 힘들어지는 경우가 된다. 이 문제에 대해서 본 연구에서는 다음과 같이 대처한다. 우선 제4층의 대각선 배선할 네트의 선택이 완료가 되면 남은 네트만을 대상으로 해서 새로운 D_{max} 를 계산한다. 그래서, 만약 $\lceil D_{max}/2 \rceil \leq L$ 을 만족

한다면, 남은 네트를 HVH의 세개의 층에 배선한다 해도 트랙수는 결과적으로 L 보다 커지지는 않는다. 그렇지만 만족하지 않는 경우는, 트랙수가 L 보다 커지기 때문에 배선 트랙수를 최대한 줄인다고 하는 본래의 목적을 위해서는 다음에 설명하는 네트형태 변경조작을 행하고, 다시 한번 제4층에 대각선 배선할 네트 선택작업을 실행하는 것으로 한다. 이러한 작업에 의해서 재차 대각선 배선할 네트가 선택되었던 후는 상기 조건을 만족하지 않는다 하더라도 그들 네트를 그대로 대각선 배선한다. 본 방법은 휴리스틱한 방법이기 때문에 대각선 배선할 네트의 선택 및 추가 선택의 해의 조합으로써 얻어지는 근사해가 항상 L 값이하의 배선 트랙수가 된다는 보장은 없다.

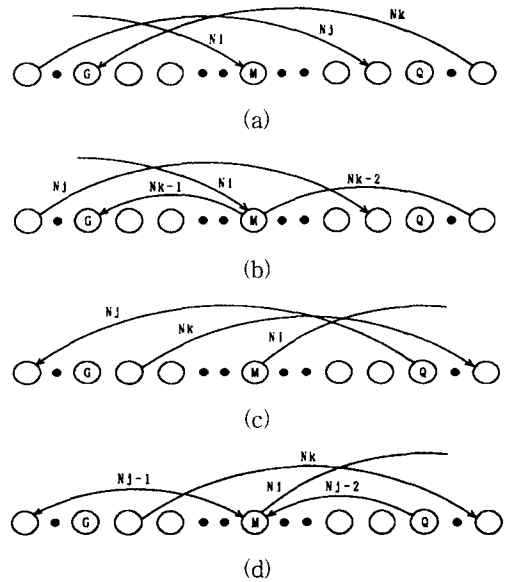


그림 7. 네트 형태 변경의 일례
Fig. 7. Examples of changed nets.

네트형태 변경조작 : 대각선 배선할 네트의 선택의 효율을 높이기 위해서 미사용 단자(vacant terminal)를 사용해서 일부의 네트형태를 변경한다. 네트의 변경은 미사용 단자의 사용에 의해서 길이가 $L+1$ 이상인 어떤 일방향성예지(네트)의 길이를 $L+1$ 이하가 되도록 하는 것이다. 변경조작은 다음과 같이 2가지 경우를 나누어 실시한다.

(1)미사용 단자가 채널의 상측에 존재하는 경우

그림 7 (a)처럼 그 칼럼번호를 M이라고 한다면(네트 N_i 는 노드M으로의 화살표가 있는 예지로서 끝나고 있기 때문에 노드 M에 대응하는 상측단자는 미사용

단자이다.) 채널 그래프의 노드 M에서는 그림처럼 화살표를 갖는 에지만이 존재한다.(이때의 에지의 노드웨이트는 3이다.) 변경 시키려는 네트의 선택으로는 이하의 2종류의 에지에 대응하는 네트가 후보가 된다. 우선 한가지는 노드 M을 중심으로 해서 M의 좌측에 있는 노드로부터 시작해서 M을 지나 M의 우측 노드 Q(Q=M+L+1)지점 이내에서 끝나는 에지 중에서, M으로 부터 더 멀리 떨어진 노드에서 끝나고 있는 에지(그림 7 (a)에서는 네트 Nj)이다. 그리고 또 한가지는 M의 우측에 있는 노드로 부터 시작해서 M을 지나 M의 좌측에 있는 노드 G(G=M-L-1)지점 이내에서 끝나는 에지 중에서, M으로 부터 더 멀리 떨어진 노드에서 끝나고 있는 에지(그림 7 (a)에서는 네트 Nk)이다. 상기 두 종류에 해당하는 에지 가운데서 한 개의 에지를 선택해서 변경한다. 선택은 네트가 끝나고 있는 노드로부터 M까지의 사이 (즉 Nk라면 G~M, Nj라면 M~Q-1)에 Dmax값 또는 큰 D값을 갖는 칼럼을 많이 통과하고 있는 네트를 선택한다. 만약 그것이 같다면 M으로 부터 더 멀리 떨어진 노드에서 끝나는 에지를 선택하고 그림 7 (b)처럼 변경한다.

(2)미사용 단자가 채널의 하측에 존재하는 경우

그림 7 (c) 처럼 그 칼럼 번호를 M이라고 한다면 채널 그래프의 노드M에서는 화살표가 없는 에지만이 존재한다.(이때의 에지의 노드웨이트는 1이다) 변경 시키려는 네트의 선택으로는 이하의 두 종류의 에지에 대응하는 네트가 후보가 된다. 우선 한가지는 노드 M을 중심으로 해서 M의 좌측 노드 G(G=M-L-1)지점 이내인 노드로 부터 시작해서 M을 지나 M의 우측에 있는 노드에서 끝나는 에지 중에서, M으로 부터 더 멀리 떨어진 노드로부터 시작하는 에지(그림 7 (c)에서는 네트 Nk)이다. 그리고 또 한가지는 M의 우측의 노드Q(Q=M+L+1)지점 이내에 있는 노드로부터 시작해서 M을 지나 M의 좌측에 있는 노드에서 끝나는 에지 중에서, M으로부터 더 멀리 떨어진 노드에서 시작하고 있는 에지(그림 7 (c)에서는 네트 Nj)이다. 상기 두 종류에 해당하는 에지 중에서 한 개의 에지를 선택해서 변경한다. 선택은 마찬가지로 네트가 시작하고 있는 노드로부터 M까지의 사이 (즉 Nk라면 G-1~M, Nj라면 M~Q)에 Dmax값 또는 큰 D값을 갖는 칼럼을 많이 통과하고 있는 네트를 선택한다. 만약 그것이 같다면 M으로부터 더 멀리 떨어진 노드로 부터 시작하는 에지를 선택해서 그림 7 (d)처럼 변경

한다. 이상과 같이 네트 형태변경을 행하면 그림 7 (b),(d)처럼 네트 Nk의 일부분인 Nk-1과 네트 Nj의 일부분인 Nj-2는 그 길이가 L+1이내의 네트가 되며 대각선 배선할 네트의 후보 네트가 된다.

4. 대각선 배선

대각선 배선할 네트의 선택이 완료된 후에는 다음과 같이 대각선배선을 행한다. 우선 일방향성 에지의 대각선 배선은 그림 8과 같이 두개의 터미널 핀 가운데에서 좌측의 핀 (칼럼 번호가 작은 쪽)으로부터 출발해서 오른쪽 방향의 대각선 (±45° 방향)으로 배선을 행해서 우측의 핀까지 배선하든가, 혹은 우측의 핀이 있는 칼럼에 도달한 경우에는 거기서부터 수직선으로 핀까지 배선을 행하는 것으로 한다. 다음으로 일방향성 에지가 아닌 경우(추가 선택작업에 의해 선택되어진 에지)는 그림 8처럼 좌측의 핀으로부터 출발해서 오른쪽 방향(±45° 방향)을 향한 배선과 우측의 핀으로부터 출발해서 왼쪽 방향(±135°)을 향한 배선이 합류하는 곳까지 배선을 행하는 것으로 한다. 그림 1의 예를 이상의 방법으로 대각선 배선 한 결과가 그림 8이다.

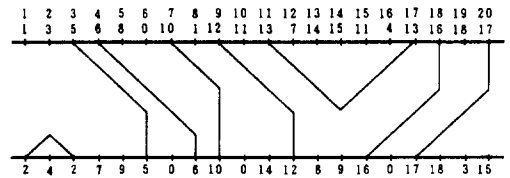


그림 8. 예제에 대한 대각선배선 결과
Fig. 8. Result of diagonal routing for an example.

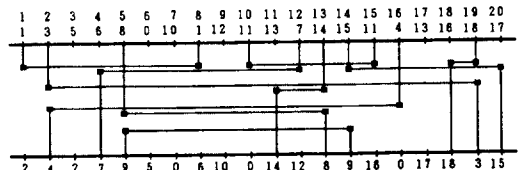


그림 9. 예제에 대한 HVH 3개층의 배선 결과
Fig. 9. Routing result of three layers(HVH) for an example.

V. HVH 3개 층의 배선

제4층의 대각선 배선이 끝나면 이어서 남은 네트를 HVH 방식으로 세개의 층에 배선한다. 이 문제는 일반적인 HVH 방식의 3층 채널배선 문제와 완전히 동

일하기 때문에 본 연구에서는 저자 등이 개발한 문헌 [5]의 3층 채널배선 알고리즘을 사용한다. 이 경우 채널그래프는 3장에서 설명한 바와 같이 에지의 웨이트 등을 새로운 값으로 경신한다. 그리고 알고리즘에 의해서 각 트랙에 대해 제1층, 제 3층의 순으로 네트 그룹을 선택해서 배선을 행한다. 그림 9는 예제로서 설명한 입력 네트 (그림 1)를 사용해서 대각선 배선을 완료한 후 남은 네트를 3층 채널배선 알고리즘에 의해 HVH방식으로 배선한 결과이다. 따라서 그림 9는 제1, 제2, 제3층의 수평, 수직, 수평성분의 배선이 되고 그림 8은 제4층의 대각선 배선이 되기 때문에 중첩시켜서 본다면 HVHD방식의 4층 채널배선이 된다.

표 1. 종래의 배선 방법과의 비교
Table 1. Comparison of 4-layer routing results.

Example	Density	HVH 3-layer	HVHV 4-layer	HVHD 4-layer	HVHVH 5-layer
YK3a	15	8	8	6 6*	5
YK3b	17	9	9	7 8*	6
YK3c	18	9	9	7 8*	6
Deutsch's difficults	19	10	10	9 10*	7

* 인접한 대각선에는 배선을 하지 않은 경우

VI. 실험결과

벤치마크 데이터로 Yoshimura & Kuh⁽¹⁾의 예제 3a, 3b, 3c와 Deutsch's difficult 예제를 적용해 실험한 결과를 표 1에 나타내었다. 표에 나타난 HVH방식의 3층 채널배선 결과^(5, 8)와 HVHV방식의 4층 채널배선 결과⁽⁷⁻⁹⁾ 그리고 HVHVH방식의 5층 채널배선 결과^(7,9)는 모두 하한값 (최적해)이다. HVHD방식의 4층 채널배선의 경우는 실험을 두 가지로 나누어 실시하였다. 첫 번째 실험은 대각선 배선을 행할 때 인접한 대각선의 그리드가 수직, 수평 방향의 그리드 간격보다 $\sqrt{2}/2$ 배로 가까워 지는것을 무시하고 그대로 배선한 결과이고, 두 번째 실험은 인접한 대각선의 그리드에는 배선을 하지 않은 경우이다. 전자의 경우는 표에 이태릭체로 나타내었고 후자의 경우는 아스터리스크를 붙여 나타내었다. 표에 의하면 본 방법은 종래의 4층 채널배선 결과와 비교해 볼 때 트랙수를 약 10-25% 정도 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

VII. 결 론

본 연구에서는 채널그래프를 이용한 새로운 HVHD 방식의 4층 채널배선 알고리즘을 제안하였다. 본 방법과 종래의 4층 채널배선 방법과의 비교에 의하면 본 방법은 종래의 방법에 비해서 트랙수를 약 10-25%정도 감소시킬 수 있다는 결과가 얻어졌다. 따라서 본 연구에서 제안하고 있는 HVHD 방식의 4층 채널배선 알고리즘에 의해 채널배선 트랙수를 대폭으로 감소시킬 수 있었고, 대각선 배선 방법에 채널그래프를 이용한 본 알고리즘의 유효성이 확인되었다. 금후의 과제로는 본 알고리즘을 확장해서 4층 이상의 임의의 n층에 적용 가능한 알고리즘을 개발하는데 있다.

참 고 문 헌

- [1] Yoshimura and E.S. Kuh: "Efficient algorithm for channel routing", *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integrated Circuits & Syst.*, CAD-1,1, pp. 25-35, (1982).
- [2] M. Burstein: "Hierarchical channel router", *Proc. 20th DA Conf.*, pp. 591-597, (1983).
- [3] T.Yoshimura: "An efficient channel router", *Proc. 21st DA Conf.*, pp. 38-44, (1984).
- [4] P.Bruell and P. Sun: "A 'greedy' three layer channel router", *Proc. ICCAD-85*, pp. 298-300, (1985).
- [5] B.H. Rhee, Y. Sugai and H. Hirata: "An Efficient Three-Layer Channel Routing Algorithm without Vertical Violation", *IEICE Trans.* J75-A, 1, pp. 56-64, (1992)
- [6] S. Hambrush: "Channel routing algorithms for overlap models", *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integrated Circuits & Syst.*, CAD-4,1, pp. 23-30, (1985).
- [7] D. Braun, et al.: "Techniques for multilayer channel routing", *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integrated Circuits & Syst.*, CAD-7,6, pp. 698-712, (1988).
- [8] J. Cong, D. F. Wong and C. L. Liu: "A new approach to three or four-layer

- channel routing”, *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integrated Circuits & Syst.*, CAD-7,10, pp. 1094-1104, (1988).
- [9] S. Fang, W. Feng and S.Lee : “A new efficient approach to multilayer channel routing problem”, *Proc. 29th DA Conf.*, pp. 579-584, (1992).
- [10] S. Haruyama, D. Wong and D. Fussell : “Topological channel routing”, *Proc. ICCAD-88*, pp. 406-409, (1988).
- [11] K. Chaudhary and P. Robinson : “Routing in and around a rectangle using the overlap model”, *Integration, the VLSI J.*, V. 11, pp 159-167, (1991).
- [12] C. Ravikumar and S. Sastry: “VYUHA: A detailed routing for multiple routing models”, *Integration, the VLSI J.*, V. 11, pp 141-157, (1991).
- [13] R. Enbody and D. Du: “SPYDER: A serial/parallel goal-directed router”, *Integration, the VLSI J.*, V. 7, pp 151-187, (1989).
- [14] E. Lodi, F. Luccio and X. Song “A 2d channel router for the diagonal model”, *Integration, the VLSI J.*, V. 11, pp 111-125, (1991).
- [15] H. H. Chen : “Routing L-Shaped Channels in Nonslicing-Structure Placement”, *PROC. 24ST DA Conf.*, pp. 152-158, (1987).

 저 자 소 개



李 丙 鎭(正會員)

1952년 10월 18일생. 1975년 한양대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사). 1977년 대학원 졸업(공학석사). 1993년 일본 국립지바대학 대학원 졸업(공학박사). 1980년 ~ 1981년 한국전자통신 연구소 연구원. 1990년 ~ 1991년 일본 도시바연구소에서 연구. 1981년 9월 ~ 현재 한양대학교 전자공학과 교수