

論文2003-40SD-11-8

# 선형프로그래밍에 의한 최소 혼신 배선간 간격조정방법

## (A Minimum Crosstalk Wire Spacing Method by Linear Programming)

全宰漢\*, 林鍾錫\*\*

(Jae-Han Jeon and Chong-S Rim)

## 요약

본 논문은 배선간의 간격 조정을 통하여 혼신을 최소화하는 방법을 다룬다. 제시된 방법은 선형 프로그래밍을 이용하며, 정확한 혼신 계산을 위해 수평 배선 조각과 수직 배선 조각에서의 혼신을 모두 고려한다. 본 논문에서는 최장 길이 경로 문제를 이용하여 수직 배선 조각 간의 결합 길이를 예측하는 방법을 제안한다. 이를 이용하면 실수 변수만으로 선형 프로그래밍 문제를 생성할 수 있으므로 문제 해결 시간이 매우 빠르다. 제시된 방법은 기존의 연구 결과인 wire perturbation 방법에 비해 실행 시간과 혼신 최소화율에서 보다 나은 성능을 보였다. 혼신 최소화율의 경우, 제안된 방법은 wire perturbation 방법에 비해 최고 혼신의 경우 평균 11.2% 향상된 결과를 보였고, 전체 혼신의 경우 3% 향상된 결과를 얻었다. 또한 제시된 방법의 수행 시간은 회로 Deutsch의 경우 11초 이내에 해결하는 빠른 속도를 보였다.

## Abstract

This paper deals with a crosstalk minimization method by wire spacing. The suggested method uses linear programming method and consider crosstalk of both horizontal segments and vertical segments. In this paper, we suggest a method which can predict the coupling length between vertical segments in the final routing result using longest path algorithm. By the suggested method, we can make LP problem without integer variable. Therefore, it is much faster to solve the problem. In the case of crosstalk optimization, the suggested method optimized peak crosstalk 11.2%, and 3% total crosstalk more than wire perturbation method. The execution time of the suggested method is as fast as it takes 11 seconds when Deutsch is optimized.

**Keyword** : routing, post processing, crosstalk, wire spacing, linear programming

## I. 서론

반도체 공정 기술의 지속적인 발달로 VLSI 회로의

크기는 계속적으로 줄어들고 있다. 이에 따라 기존의 배선 과정에서 고려하지 않았던 혼신(crosstalk)과 같은 문제가 새롭게 제기되고 있다. 혼신은 회로의 지연시간을 증가시키고, 회로의 오동작을 유발하므로 회로의 제작 과정에서 반드시 고려해 주어야만 한다. 이러한 추세에 맞추어 혼신에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 배선 과정에서 혼신을 최소화하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

\* 正會員, 삼성전자주식회사

(Samsung Electronics Co., LTD.)

\* 正會員, 西江大學校 컴퓨터學科

(Sogang University, Computer Science and Engineering)

接受日字:2002年12月23日, 수정완료일:2003年10月29日

배선 단계에서의 혼신의 최소화는 개략 배선 단계, 상세 배선 단계, 그리고 후처리 단계로 나누어 고려되고 있다. 개략 배선 단계<sup>[3, 19, 22]</sup>에서는 배선의 위치에 대한 자세한 정보가 없어 최적화가 어렵지만 전체적인 혼신의 최소화를 피할 수 있다. 상세 배선 단계<sup>[4, 18, 21]</sup>에서는 배선의 위치 정보를 파악하고 있으므로 혼신의 양을 정확하게 예측할 수 있지만, 먼저 배선된 네트에 따라 배선의 결과가 달라지므로 전체적인 혼신의 최소화는 어렵다. 마지막으로 후처리 단계<sup>[6, 8, 12, 15]</sup>는 배선의 위치 조절이 극히 제한되어 있는 반면, 혼신의 정확한 측정이 가능하다는 장점이 있다.

후처리 단계에서의 혼신 최소화는 배선 재배열<sup>[3, 6, 8]</sup>, 배선층 변경<sup>[3, 16]</sup>과 배선간 간격 조정<sup>[12, 15]</sup>의 세 가지 측면에서 연구 결과가 발표되었다. Gao는 정수 선형 프로그래밍을 이용하여 트랙 전체의 배선을 다른 트랙으로 옮김으로써 혼신을 최소화하는 track permutation 방법을 제시하였다<sup>[6]</sup>. 트랙 전체의 배선을 옮길 경우, 수직 제약 조건에 의해 가능한 경우의 수가 매우 작으므로 혼신의 최소화가 불가능하다. 이를 극복하기 위해 Gao는 wire permutation 방법을 제안하였다<sup>[7]</sup>. 이는 track permutation과는 달리 배선 조각의 위치를 변경하는 방법으로 track permutation에서보다 배선 조각이 이동할 수 있는 경우의 수가 많아 보다 최적화된 결과를 얻을 수 있다. 그러나 track permutation과 wire permutation은 정수 선형 프로그래밍을 이용하므로 문제 해결에 많은 시간이 필요하다. Jhang은 휴리스틱 알고리즘에 의한 배선 재배열 방법을 제시하였다<sup>[8]</sup>. 이 알고리즘은 교환 가능한 수평 배선 조각을 찾고 교환이 이익이 가장 큰 교환을 수행한다. 이익이 있는 교환이 존재하지 않는 경우에도 일정 횟수 이상의 교환을 허용하여 최적의 결과를 얻도록 하였다. Chen은 기존의 HV또는 VH 채널 배선환경과는 달리 HVH 채널 배선 환경에서 배선층 변경과 배선 재배열을 동시에 수행하는 휴리스틱 알고리즘을 소개하였다<sup>[3]</sup>. 위에서 소개한 배선 재배열 방법<sup>[3, 6, 8]</sup>은 격자 기반 배선 환경에서 수행되므로 배선 환경의 특성상 혼신의 최소화 한계가 있다.

Thakur는 VHV 채널 배선 환경에서 혼신 최소화를 위한 수직 배선의 배선 층 할당 방법을 최소 길이 경로문제를 이용하여 해결하였다<sup>[16]</sup>. 그러나 이는 dogleg를 고려하지 않고 HVH 채널 배선 환경에는 적용할 수 없는 단점이 있다. 또한 수직 배선만을 고려하고 할당

가능한 경우의 수도 한정되어 있으므로 뛰어난 성능을 기대하기는 어렵다.

Onozawa는 IPLP(iterative parametric linear programming)을 이용하여 배선간의 간격 조정을 통해 혼신을 최소화해 피하였다<sup>[12]</sup>. IPLP방법을 이용하기 위해 먼저 회로의 혼신을 측정하고 임계 네트(critical net)를 찾는다. 임계 네트에는 각 네트에서의 혼신 초과분에 비례하도록 척력 제약조건(repulsive constraint)을 주고, 이를 이용하여 선형 프로그래밍 문제를 해결한다. 혼신 초과분이 더 이상 존재하지 않을 때까지 위의 과정을 반복한다. IPLP방법은 선형 프로그래밍을 반복하여 푸는 형식이므로 실행 시간이 늘어난다. 또한 수직 배선에 의한 혼신의 변화는 고려하지 않고 있으며, 혼신을 직접 계산하는 방식이 아니므로 정확한 혼신 최소화라 보기 어렵다. Saxena는 수평 배선 조각간의 간격 조정 시 네트의 혼신 변화량을 수식을 이용하여 계산하는 wire perturbation방법을 제안하였다<sup>[15]</sup>. 이는 임계 네트의 혼신 여유분을 증가시키기 위해 임계 네트의 수평 배선 조각과 이에 이웃하는 수평 배선 조각의 위치를 변경하는 휴리스틱 알고리즘이다. IPLP 방법과는 달리 수평 배선 조각과 수직 배선 조각에서의 혼신을 모두 고려하므로 혼신을 정확하게 계산한다. 본 논문에서 제시하는 방법은 배선 조각 간의 간격 조정을 통한 혼신 최소화 방법이다. 이를 위하여 선형 프로그래밍 방법을 사용하였다. 정확한 혼신 계산을 위해 수평 배선간의 혼신과 수직 배선간의 혼신을 모두 고려한다. 기존의 정수 선형 프로그래밍 방법<sup>[6, 7]</sup>에서는 수직 배선간의 결합 길이를 계산하기 위해 0-1 정수변수를 이용하였다. 그러나 간격 조정문제의 특성을 파악하면 수직 배선간의 결합 길이는 미리 예측할 수 있으므로 정수 변수의 사용 없이 선형 프로그램으로의 형식화가 가능하다. 본 논문에서는 결합 길이의 예측을 위해 최대 길이 경로 탐색 문제를 이용하는 방법을 소개한다. 본 논문에서 제시된 방법은 정수 변수를 전혀 사용하지 않고 선형 프로그래밍 문제를 한번만 풀어내므로 반복 수행이 필요한 IPLP방법 보다 빠른 수행 시간을 기대할 수 있다. 또한 최적화 기법인 선형 프로그래밍 방법을 이용하므로 휴리스틱 알고리즘을 사용한 wire perturbation보다 효과적인 혼신의 최소화를 기대할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 II장에서는 혼신에 대하여 설명하고 본 논문에서 설명하고자 하는

간격 조정을 통한 혼신 최소화 문제를 정의한다. III장에서서는 간격 조정 문제를 선형 프로그래밍으로 형식화하는 방법을 기술하고, IV장에서는 실험 결과를 보이며, 마지막으로 V장에서 결론을 내린다.

II. 문제 정의

<그림 1(a)>와 같이 인접한 두 네트의 혼신은 <그림 1(b)>와 같은 모델을 이용하여 계산한다. 그림에서 V1과 V2는 입력의 파형, R1과 R2는 구동 저항(driver resistance), X는 두 네트간의 결합 정전 용량(coupling capacitance), C1과 C2는 그 외 정전 용량을 나타낸다. 혼신이 네트 2에 미치는 영향은 네트 1의 신호가 바뀌거나 바뀌지 않을 때 정점 O에서 전압의 변화로 볼 수 있다. 따라서 두 배선간의 혼신은 두 배선 사이의 결합 정전 용량(coupling capacitance), 부하 정전 용량(load capacitance), 구동 저항(driver resistance), 신호의 전압, 신호의 파형 등에 의해 결정된다<sup>[17]</sup>.

혼신에 영향을 주는 여러 가지 요인들 중에서 배선 단계에서 조절이 가능한 것은 결합 정전 용량이다. 인

접하지 않은 두 배선간의 결합 정전용량은 두 배선 사이에 놓인 다른 배선에 의해 차단되고, 차단되지 않은 부분에서는 결합 정전용량이 발생한다. 그러나 두 배선간의 거리가 멀어질수록 그 양이 급격하게 감소하므로 본 논문에서는 인접한 두 배선 간에만 결합 정전용량이 발생한다고 가정한다.  $C_{unit}$ 을 단위 길이 당 결합 정전용량, L을 인접한 두 배선간의 결합 길이, S를 인접한 두 배선간의 거리라고 할 때, 두 배선간의 결합 정전용량  $C_c$ 는 다음과 같이 계산한다:

$$C_c = C_{unit} \cdot \frac{L^\alpha}{S^\beta} \tag{1}$$

식 (1)에서  $\alpha, \beta$ 는 상수로 그 값에 따라 몇 가지 혼신 모델이 제시되었다. Sakurai가 제시한  $L/S^{1.38}$  모델<sup>[14]</sup>은 Jhang<sup>[8]</sup>과 Onozawa<sup>[12]</sup>의 논문에서 이용되었고 Parakh<sup>[13]</sup>는 실험을 통하여  $L^2/S$  모델을 제시하였다. 본 논문에서는 가장 많은 연구 결과<sup>[6,7,18,19,21]</sup>에 이용된  $L/S$  모델을 사용한다. 이는 결합 길이에 비례하고 배선간 거리에 반비례하는 일반적인 정전 용량 공식을 따른다. 본 논문에서는 결합 정전용량과 혼신을 동일한 의미로 사용한다.

입력의 배선 조각에서의 혼신은 이와 인접한 다른 모든 배선 조각 간에 발생하는 혼신의 합으로 얻어진다. 단위 길이 당 혼신  $C_{unit}$ 을 1이라고 가정할 때, <그림 2>의 배선 결과 중 수평 배선 조각  $T_3$ 에서의 혼신은  $T_3$ 와 수평 배선 조각  $T_1, T_2$ , 그리고  $T_4$ 와의 혼신을 모두 더한 값으로 계산하며, 그 결과는 8.72이다.

본 논문에서 고려하는 배선 환경은 배선 영역이 사각형으로 이루어진 채널 배선 환경이다. 채널 배선 환경에서는 편이 채널의 위와 아래에 놓이며 그 위치는 고정되어있다. 사용하는 배선 층은 수평 배선을 위한 배선 층과 수직 배선을 위한 배선 층의 두 개이다.

입력으로 주어지는 초기 배선 결과에는  $n$ 개의 네트  $N_1, N_2, \dots, N_n$ 이 배선되어 있고  $t$ 개의 수평 배선 조각  $T_1, T_2, \dots, T_t$ 와  $v$ 개의 수직 배선 조각  $V_1, V_2, \dots, V_v$ 로 이루어져 있다고 가정한다. 가상의 수평 배선 조각인  $T_{top}$ 과  $T_{bottom}$ 은 각각 채널의 위와 아래를 나타낸다. 각 네트  $N_i$ 는  $t_i$ 개의 수평 배선 조각과  $v_i$ 개의 수직 배선 조각으로 구성되어 있다. 올바른 배선 결과인 경우,  $T_{top}$ 과  $T_{bottom}$ 을 제외한 모든 수평 배선 조각과 수직 배선 조각에 대하여 서로 다른 네트에 속하는 배선 조각은 서로 겹치지 않으며 배선 간의 최소 거리 이상의

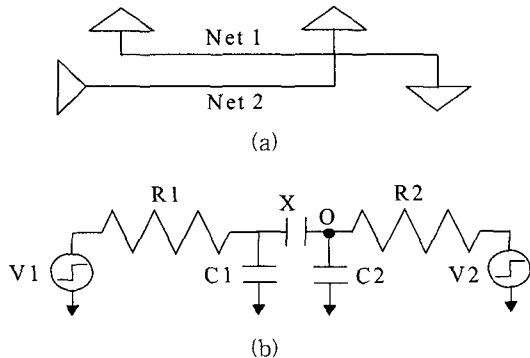


그림 1. 인접한 두 네트의 혼신 모델.  
Fig. 1. A crosstalk model of two adjacent nets.

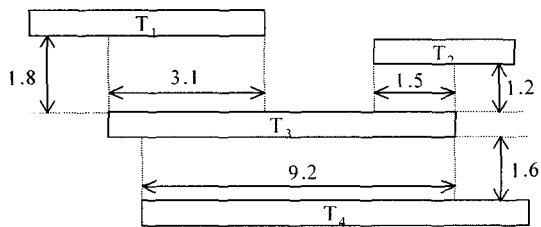


그림 2. 수평 배선 조각  $T_3$ 에서의 혼신 계산.  
Fig. 2. The Crosstalk computation of horizontal segment  $T_3$ .

간격을 유지한다. 네트  $N_i$ 의 혼신  $X_i$ 는  $N_i$ 에 속하는 모든 수평 배선 조각에서의 혼신과 수직 배선 조각에서의 합으로 이루어진다. <그림 3(a)>에서  $N_i$ 의 혼신  $X_i$ 은  $T_1$ 에서의 혼신,  $V_1$ 에서의 혼신과  $V_2$ 에서의 혼신의 합이다.

초기 배선 결과에서 수평 배선 조각  $T_i$ 가  $T_j$ 보다 위에 배선되어있는 경우, 최종 배선 결과에서도  $T_i$ 가  $T_j$ 보다 위에 배선되어야 한다. 이를  $T_i$ 에서  $T_j$ 로의 수직 제약 조건(vertical constraint)라고 한다.  $T_i$ 에서  $T_j$ 로의 수직 제약 조건과  $T_j$ 에서  $T_k$ 로의 수직 제약 조건은  $T_i$ 에서  $T_k$ 로의 수직 제약 조건을 암시한다. <그림 3(a)>의 배선 결과를 예로 들면,  $T_1$ 에서  $T_3$ 으로의 수직 제약 조건과  $T_3$ 에서  $T_4$ 로의 수직 제약 조건은  $T_1$ 에서  $T_4$ 로의 수직 제약 조건을 암시한다. 다른 수직 제약 조건에 의해 암시되는 수직 제약 조건을 암시 수직 제약 조건(implied vertical constraint)라 하고, 그렇지 않은 수직 제약 조건을 필수 수직 제약 조건(essential vertical constraint)라고 한다.

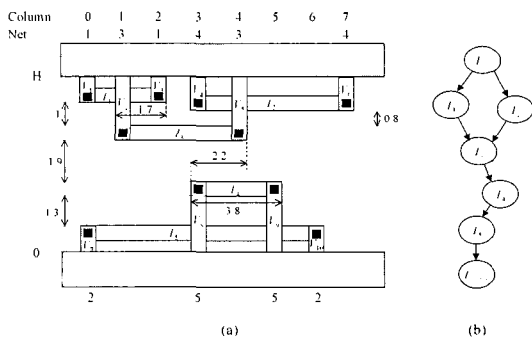


그림 3. 배선 예제와 제약 조건 그래프 (a) 배선 예제 (b) 제약 조건 그래프  
Fig. 3. A routing result and its constraint graph. (a) a routing result (b) a constraint graph

제약 조건 그래프는 수평 배선 조각을 정점으로 하고 수평 배선 조각 간의 필수 수직 제약 조건을 방향 간선으로 하는 그래프이다(<그림 3(b)>). 초기 배선 결과에서 수평 배선 조각을 채널의 위에서 아래로 검색 하면서 수평 배선 조각 간의 겹침을 조사하면 필수 수직 제약조건을 찾을 수 있다. 검색된 필수 수직 제약 조건을 이용하면 제약 조건 그래프를 쉽게 만들 수 있다. 배선 결과가 배선 규칙을 만족하는 경우, 제약 조건 그래프에는 사이클(cycle)이 존재하지 않는다.

본 논문에서는 인접한 배선 조각 간에 혼신이 발생한다고 가정한다. 혼신 계산을 위한 배선간의 인접 조건은 수평 배선 조각의 경우 필수 수직 제약 조건이 존재할 때, 수직 배선 조각의 경우 이웃한 컬럼에 배선 되었을 때로 가정한다.  $C_{unit}$ 을 1이라 가정할 때, <그림 3(a)>에서 수평 배선 조각  $T_3$ 에서의 혼신은  $T_1$ 과  $T_3, T_2$ 와  $T_3$ , 그리고  $T_3$ 와  $T_4$ 간의 혼신의 합으로 계산하며, 그 값은  $1.7/1 + 2.2/0.8 + 2.2/1.9 = 3.13$ 이다. 수평 배선 조각  $T_1$ 과  $T_3, T_2$ 와  $T_1, T_2$ 와  $T_3$ 간의 혼신은 주어진 배선 조각이 서로 인접하지 않으므로 계산하지 않는다.

네트의 혼신은 네트를 구성하는 모든 배선 조각에서의 혼신의 합으로 구한다. <그림 3(a)>에서, 네트  $N_i$ 의 혼신  $X_i$ 는  $N_i$ 를 구성하는 수평 배선 조각  $T_2$ 에서의 혼신과 수직 배선 조각  $V_4$ 와  $V_6$ 에서의 혼신의 합이 된다. 회로 전체의 혼신, 즉 모든 네트의 혼신의 합은  $X_{total}$ 로 나타낸다. 각 네트에는 설계자에 의하여 네트의 최대 혼신 허용량이 주어진다. 네트  $N_i$ 의 최대 혼신 허용량을  $M_i$ 라고 할 때,  $M_i - X_i$ 를 네트  $N_i$ 의 혼신 여유분이라고 하고  $\delta_i$ 라고 나타낸다. 모든 네트의 혼신 여유분 중 최소값을 최소 혼신 여유분이라 하고  $\delta_{min}$ 으로 나타낸다. 각 네트에서 혼신 여유분이 클수록 혼신에 대한 네트의 안정성은 커지게 된다. 따라서  $\delta_{min}$ 을 최대화할수록 회로의 안정성이 높아진다. 본 논문에서는  $X_{total}$ 의 최소화과  $\delta_{min}$ 의 최대화를 동시에 이루는 것을 목적으로 한다. 목적함수는  $w_1 \cdot X_{total} - w_2 \cdot \delta_{min}$ 의 최소화과 나 타낸다. 가중치  $w_1$ 와  $w_2$ 의 값에 따라 전체 혼신의 최소화과 최소 혼신 여유분의 최대화 정도를 조절할 수 있다.

본 논문에서 설명하는 최소 혼신 배선 간 간격 조정 문제를 다음과 같이 정의한다 :

**문제1: 최소 혼신 배선 간 간격 조정 문제**

$n$ 개의 네트  $N_1, N_2, \dots, N_n$ ,  $l$ 개의 수평 배선 조각  $T_1, T_2, \dots, T_l$ , 그리고  $v$ 개의 수직 배선 조각  $V_1, V_2, \dots, V_v$ 를 갖는 초기 배선 결과와 가중치  $w_1$ 와  $w_2$ 가 입력으로 주어졌을 때, 수직 제약 조건을 만족하는 범위 내에서 수평 배선간의 간격을 조정하여  $w_1 \cdot X_{total} - w_2 \cdot \delta_{min}$ 을 최소화하는 배선 결과를 찾는다.

**III. 선형 프로그래밍 형식화**

본 논문의 알고리즘은 초기 배선 결과가 주어졌을 때 수평 배선 조각 간의 간격을 조정함으로써 혼신을

줄이는 것을 목적으로 한다. 간격 조정 문제에서 수평 배선 조각 간의 결합 길이는 고정되어 있으므로 두 배선 조각 간의 거리를 계산하는 방법이 필요하다. 수평 배선 조각 간의 거리를 측정하기 위해서는 먼저 수평 배선 조각의 채널에서의 위치를 알아야 한다. 이를 위해 각 수평 배선 조각  $T_i$ 에 변수  $y_i$ 를 할당한다. 변수  $y_i$ 의 범위는 다음과 같이 주어진다:

$$S_H + W_H/2 \leq y_i \leq H - (S_H + W_H/2) \quad (2)$$

이 때, 수평 배선 층에서 배선의 최소 두께는  $W_H$ , 배선간의 최소 거리는  $S_H$ , 채널의 높이는  $H$ 이다.

두 수평 배선 조각  $T_i$ 와  $T_j$ 에 대하여,  $T_i$ 에서  $T_j$ 로의 필수 수직 제약 조건이 존재하는 경우,  $T_i$ 는  $T_j$ 의 위쪽에 위치하여야 한다. 배선 규칙을 고려할 때, 필수 수직 제약 조건은 다음과 같이 나타낸다:

$$y_i \geq y_j + W_H + S_H \quad (3)$$

두 개의 수평 배선 조각  $T_i$ 와  $T_j$ 가 인접한 경우, 즉  $T_i$ 에서  $T_j$ 로의 필수 수직 제약 조건이 존재하는 경우,  $T_i$ 와  $T_j$ 간의 거리를 계산하고 이를 변수  $s_{ij}$ 로 나타낸다. 변수  $s_{ij}$ 가 갖는 값은  $T_i$ 와  $T_j$ 의 중점간의 거리에서 배선의 두께를 제외한 거리이고 다음과 같이 구한다:

$$s_{ij} = y_i - y_j - W_H \quad (4)$$

수평 배선 조각 간의 혼신을 계산하려면 인접한 두 수평 배선 조각 간의 결합 길이와 거리를 구하여야 한다. 간격 조정 전후를 통해 두 수평 배선 조각 간의 결합 길이는 변하지 않고 고정되어 있으므로 미리 계산할 수 있다. 인접한 두 수평 배선 조각  $T_i$ 와  $T_j$ 간의 결합 길이를  $L_{ij}$ 라고 표시한다. 결합 길이  $L_{ij}$ 와 식 (3)에서 얻은 배선간 거리  $s_{ij}$ 를 이용할 때, 두 수평 배선 조각  $T_i$ 와  $T_j$ 간의 혼신  $\tau_{ij}$ 는  $\tau_{ij}$  다음과 같이 계산한다:

$$\tau_{ij} = C_{unit} \cdot \frac{L_{ij}}{s_{ij}} \quad (5)$$

식 (5)는  $1/s_{ij}$ 항에 의하여 비선형이다. 이를 선형화하기 위하여 본 논문에서는 4개의 중점인  $S_H$ ,  $1.3 \cdot S_H$ ,  $2 \cdot S_H$ ,  $3 \cdot S_H$ 를 이용한 1차 Taylor 급수를 이용한다<sup>[13]</sup>. 항  $1/s_{ij}$ 을 여유변수(slack variable)  $q_{ij}$ 와 1차 Taylor 급수를 이용하여 선형화한 식은 다음과 같다:

$$q_{ij} = \frac{2 \cdot c - s_{ij}}{(c \cdot S_H)^2} \quad (6)$$

여기서  $c$ 는 Taylor 급수에서의 중점을 나타낸다. 식 (6)를 이용할 때 수평 배선 조각 간의 혼신은 다음과 같이 계산한다:

$$\tau_{ij} = C_{unit} \cdot L_{ij} \cdot q_{ij} \quad (7)$$

식 (6)에서 변수  $s_{ij}$ 와 상수  $c$ 의 차가 클수록  $q_{ij}$ 와  $1/s_{ij}$ 간의 오차가 커진다. 오차를 줄이기 위해서 실험을 통하여 구한 4개의 중점  $S_H$ ,  $1.3 \cdot S_H$ ,  $2 \cdot S_H$ ,  $3 \cdot S_H$ 를 이용하여  $q_{ij}$ 를 계산한다:

$$q_{ij} \geq \frac{2 \cdot x \cdot S_H - s_{ij}}{(x \cdot S_H)^2} \quad ; x = \{1, 1.3, 2, 3\} \quad (8)$$

<그림 4>는 항  $1/s_{ij}$ 의 선형화를 보인다. 점선은  $1/s_{ij}$ 의 그래프이고 4개의 실선은 중점이  $S_H$ ,  $1.3 \cdot S_H$ ,  $2 \cdot S_H$ ,  $3 \cdot S_H$ 일 때 변수  $q_{ij}$ 의 값을 나타낸다. 식 (8)에 사용된 4개의 중점이 근사식의 사용에 따라 발생하는 오차를 효율적으로 줄임을 알 수 있다.

수평 배선 조각의 경우, 두 배선 조각의 결합 길이는 고정되어 있으므로 두 배선 조각 간의 거리를 구하는 조건이 필요하다. 반면에 수직 배선 조각의 경우, 배선 조각 간의 거리는 고정되어있으나 두 배선 조각의 결합 길이는 각 수직 배선 조각의 길이 변화에 따라 달라진다.

Gao는 배선 재배열 문제에서 수직 배선 조각 간의 결합 길이를 계산하는 수식을 제안하였다<sup>[6,7]</sup>. 배선 재배열 문제의 경우, 최종 배선 결과에서 수직 배선 조각 간의 상대적 위치 관계를 예측할 수 없다. Gao는 두개의 0-1 정수 변수를 이용하여 모든 경우에 대하여 수직 배선 간 결합 길이를 계산할 수 있는 수식을 제안하였다. 그러나 간격 조정 문제의 경우, 수평 배선 조각 간의 상대적 위치가 고정되어 있는 특성이 있다. 수직 배선 조각의 위치는 이에 연결된 수평 배선 조각의 위치에 따라 달라지므로, 간격 조정문제에서는 수직 배선 조각 간의 상대적 위치를 예측할 수 있다. 이러한 간격 조정문제의 특성을 이용하면, Gao의 방법과는 달리 정수 변수를 사용하지 않고서도 수직 배선 조각 간의 결합 길이를 계산할 수 있다. 본 절에서는 인접한 두 수직 배선 조각 간의 결합 길이의 계산 방법에 대하여 설명한다.

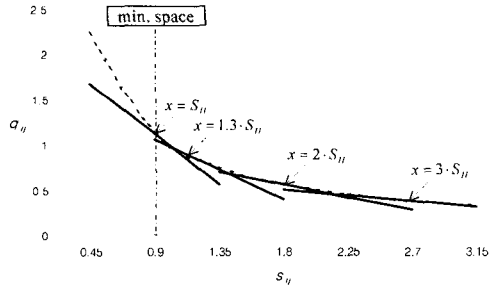


그림 4.  $1/S_{ij}$ 의 선형화.  
Fig. 4. Linearization of  $1/S_{ij}$ .

수직 배선 조각 간의 결합 길이를 계산하기 위해서는 우선 채널에서 수직 배선 조각의 위치를 알아야 한다. 수직 배선 조각  $V_i$ 의 위쪽 끝의 좌표를  $u_i$ , 아래쪽 끝의 좌표를  $d_i$ 로 나타내고 다음의 제약 조건을 이용하여 그 값을 구한다:

$$u_i \geq y_k \text{ for every } T_k \text{ connected to } V_i \quad (9)$$

$$d_i \leq y_k \text{ for every } T_k \text{ connected to } V_i \quad (10)$$

모든 수직 배선 조각의  $u_i, d_i$ 값과 인접한 두 수직 배선 조각 간의 상대적 위치 관계를 알면 두 배선 조각 간의 결합 길이를 구할 수 있다. 수직 배선 조각 간의 상대적 위치 관계를 파악하기 위해 다음과 같은 작업을 수행한다. 초기 배선 결과를 이용하여 각 수평 배선 조각과  $T_{top}, T_{bottom}$ 을 정점으로 하고 수평 배선 조각 간의 필수 수직 제약 조건 관계를 방향 간선으로 하는 제약 조건 그래프를 생성한다. 방향 간선의 비용을 1이라고 할 때, 각 정점은  $T_{top}$  정점에서부터 해당 정점까지의 최장 길이 경로의 비용을 나타내는 변수  $\varphi_T$ 와 각 정점에서부터  $T_{bottom}$  정점까지의 최장 길이 경로의 비용을 나타내는 변수  $\varphi_B$ 를 갖는다. 수평 배선 조각  $T_i$ 에 해당하는 정점의  $\varphi_T$ 값은  $\varphi_T(T_i)$ 로,  $\varphi_B$ 의 값은  $\varphi_B(T_i)$ 로 나타낸다. 제약 조건 그래프의 간선의 수를 E라고 할 때, 각 정점에서의  $\varphi_T, \varphi_B$ 값의 계산에 필요한 시간복잡도는 최장 길이 경로 탐색 알고리즘을 이용하면  $O(E)$ 이다.

최종 배선 결과에서 수평 배선 조각 간의 상대적인 위치는 각 정점이 갖는  $\varphi_T, \varphi_B$ 값의 비교를 통하여 알 수 있다. 두 수평 배선 조각  $T_i$ 와  $T_j$ 에 대하여,  $\varphi_T(T_i) < \varphi_T(T_j)$  이고  $\varphi_B(T_i) > \varphi_B(T_j)$ 이면 최종 배선 결과에서  $T_i$ 가  $T_j$ 보다 위쪽에 위치하게 된다. <그림 5(b)>는 <그림 5(a)>의 초기 배선 결과를 이용하여 구성된 제약 조건 그래프에서 모든 정점의  $\varphi_T, \varphi_B$ 값을 구한 결과

를 나타낸다. 두 수평 배선 조각  $T_1$ 과  $T_3$ 의 위치 관계를 살펴보면,  $\varphi_T(T_1) < \varphi_T(T_3)$  이고  $\varphi_B(T_1) > \varphi_B(T_3)$ 이므로  $T_1$ 이  $T_3$ 보다 위쪽에 놓인다.

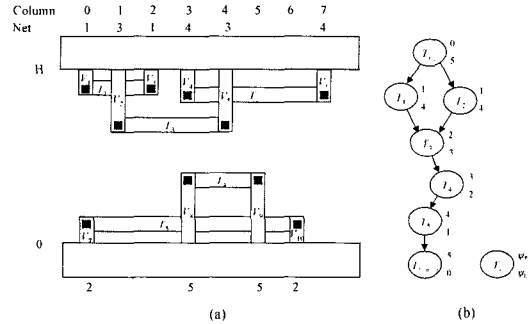


그림 5. 제약 조건 그래프의 탐색 (a) 초기 배선 결과 (b) 탐색 후 제약 조건 그래프

Fig. 5. The search of a constraint graph. (a) a initial routing result (b) a constraint graph after search

탐색을 통해 얻어진 수평 배선 조각의  $\varphi_T, \varphi_B$ 값을 이용하여 수직 배선 조각의  $\varphi_T, \varphi_B$ 값을 구한다. 임의의 수직 배선 조각  $V_i$ 에 연결된 모든 수평 배선 조각을  $T_k$ 라 할 때,  $V_i$ 의  $\varphi_T, \varphi_B$ 값을 다음과 같이 계산한다:

$$\varphi_T(V_i) = \min(\varphi_T(T_k)) \text{ for every } T_k \text{ connected to } V_i \quad (11)$$

$$\varphi_B(V_i) = \min(\varphi_B(T_k)) \text{ for every } T_k \text{ connected to } V_i \quad (12)$$

최종 배선 결과에서 두 수직 배선 조각  $V_i$ 와  $V_j$ 의 결합 길이  $l_{ij}$ 는  $V_i$ 와  $V_j$ 의  $\varphi_T, \varphi_B$ 값을 이용하여 예측할 수 있다. 결합 길이  $l_{ij}$ 를 구하기 위한 제약 조건은 다음과 같다:

$$l_{ij} \geq \begin{cases} u_i - d_j & \text{if } \varphi_T(V_i) \geq \varphi_T(V_j) \text{ and } \varphi_B(V_i) \leq \varphi_B(V_j) \\ u_i - d_i & \text{if } \varphi_T(V_i) \geq \varphi_T(V_j) \text{ and } \varphi_B(V_i) \geq \varphi_B(V_j) \\ u_j - d_j & \text{if } \varphi_T(V_i) \leq \varphi_T(V_j) \text{ and } \varphi_B(V_i) \leq \varphi_B(V_j) \\ u_j - d_i & \text{if } \varphi_T(V_i) \leq \varphi_T(V_j) \text{ and } \varphi_B(V_i) \geq \varphi_B(V_j) \end{cases} \quad (13)$$

<그림 6>은 간격 조정 문제에서 두 수직 배선 조각  $V_i$ 와  $V_j$ 의  $\varphi_T, \varphi_B$ 값과 두 배선 조각 간의 상대적 위치 관계를 보여준다. 식 (13)의 네 가지 경우는 각각 <그림 6(a), (b), (d)> 그리고 <그림 6(e)>에 해당한다. <그림 6(c)>와 <그림 6(e)>의 경우, 식 (13)의 모든 경

우에 대하여  $l_{ij}$ 의 값이 음수가 되므로 결합 길이는  $l_{ij}$ 의 하한 값인 0이 된다.

선형 프로그래밍 방법에서는 식 (13)과 같은 경우에 다른 조건을 표현하지 못한다. 이를 프로그래밍에 의해 해결한다. 작성된 프로그램은 각 수직 배선 조각의  $\varphi_T$ ,  $\varphi_B$ 값을 미리 계산하고, 각각의 경우에 따라 알맞은 제약 조건을 할당함으로써 배선 간 간격 조정 문제를 선형 프로그래밍 문제로 표현한다.

식 (13)을 이용하여 수직 배선 조각 간의 결합 길이를 계산할 때, 두 수직 배선 조각  $V_i$ 와  $V_j$ 의  $\varphi_T$  또는  $\varphi_B$ 값이 같은 경우, 결합 길이  $l_{ij}$ 는 실제보다 크게 계산될 수 있다. <그림 7>의 경우,  $l_{ij}$ 는  $u_i - d_j$ 의 값을 갖지만  $\varphi_T(V_i) = \varphi_T(V_j)$ 이고  $\varphi_B(V_i) > \varphi_B(V_j)$ 이어서 식 (13)의 첫 번째 경우에 해당하므로  $u_i - d_j$ 로 계산된다. 결합 길이가 실제보다 크게 계산되면 해당 네트의 혼신이 좀더 줄어들게 되므로 항상 혼신의 최소화가 이루어진다. 또한 실제 회로에서도 위와 같은 경우의 발생 빈도와 결합 길이의 오차가 매우 작아서 간격 조정 결과에 영향을 끼치지 못했다.

$G_{size}$ 를 컬럼 간의 거리,  $W_V$ 를 수직 배선 층에서의 최소 배선 두께라고 할 때, 두 수직 배선 조각  $V_i$ 와  $V_j$  간의 혼신  $\xi_{ij}$ 는 다음과 같다:

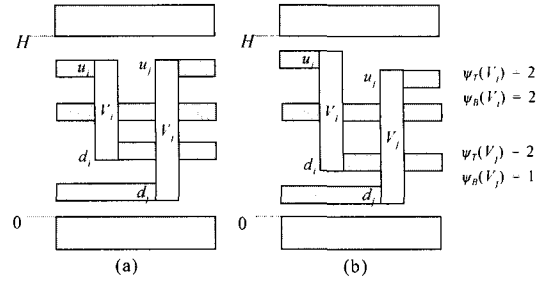


그림 7. 수직 배선간의 결합길이가 실제보다 크게 계산될 수 있는 경우 (a) 초기 배선 결과 (b) 최종 배선 결과

Fig. 7. An example that coupling length can be computed more than actual length. (a) an initial routing result. (b) the final routing result.

$$\xi_{ij} = C_{min d} \cdot \frac{l_{ij}}{G_{size} - W_V} \quad (14)$$

모든 네트는 수평 배선 조각과 수직 배선 조각으로 구성되어 있다. 따라서 네트  $N_i$ 의 혼신  $X_i$ 는  $N_i$ 를 구성하는 모든 배선 조각에서의 혼신의 합으로 얻어진다.

이는 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$X_i = \sum_{T_k \in N_i} \sum_{T_l \in N_i} \tau_{kl} + \sum_{V_k \in N_i} \sum_{V_l \in N_i} \xi_{kl} \quad (15)$$

식 (15)에서 첫째 항은 네트  $N_i$ 에 속하는 모든 수평 배선 조각에서의 혼신의 합을, 둘째 항은 네트  $N_i$ 에 속하는 모든 수직 배선 조각에서의 혼신의 합을 의미한다. 회로 전체의 혼신  $X_{total}$ 은 회로를 구성하는 모든 네트의 혼신을 더하여 구한다:

$$X_{total} = \sum_{i=1}^n X_i \quad (16)$$

네트  $N_i$ 의 최대 혼신 허용치  $M_i$ 는 설계자에 의해 입력으로 주어진다고 가정하였다. 이때, 네트  $N_i$ 의 혼신 여유분  $\delta_i$ 는 최대 혼신 허용치  $M_i$ 에서 네트  $N_i$ 의 혼신  $X_i$ 를 뺀 값이다. 각 네트의 혼신 여유분 중 최소값인  $\delta_{min}$ 을 계산하기 위한 제약 조건을 추가한다:

$$\delta_{min} \leq M_i - X_i \text{ for all net } N_i \quad (17)$$

지금까지 설명한 제약 조건과 목적함수를 이용하여 제 II장에서 정의한 문제1을 선형프로그래밍으로 형식화하면 다음과 같다:

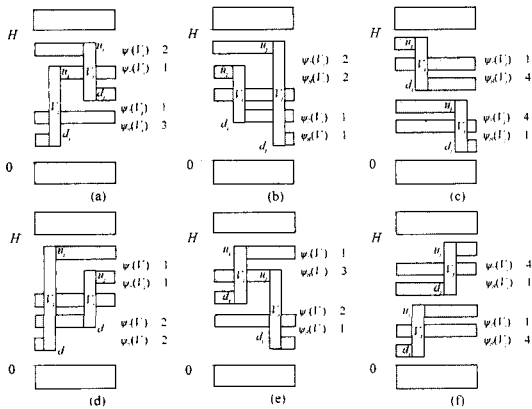


그림 6. 배선 간 간격 조정 문제에서 수직 배선 조각 간의 상대적 위치 관계 (a) 상대적 위치1 (b) 상대적 위치2 (c) 상대적 위치3 (d) 상대적 위치4 (e) 상대적 위치5 (f) 상대적 위치6

Fig. 6. Relative positions of vertical segments in the wire spacing problem. (a) relative position 1. (b) relative position 2. (c) relative position 3. (d) relative position 4. (e) relative position 5. (f) relative position 6.

**문제 2 : (문제 1의 선형 프로그래밍 형식화)**

목적 :  $u_k \cdot X_{total} - u_k \cdot \delta_{min}$ 의 최소화

제약조건 :

$T_i$ 에서  $T_j(1 \leq i, j \leq t)$ 로의 필수 수직 제약조건을 갖는 모든 수평 배선 쌍에 대하여,

$$y_i \geq y_j + W_H + S_H \quad (3)$$

$$s_{ij} = y_i - y_j - W_H \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = C_{unit} \cdot L_{ij} \cdot q_{ij} \quad (6)$$

$$q_{ij} \geq \frac{2 \cdot x \cdot S_H - s_{ij}}{(x \cdot S_H)^2}, x = \{1, 1.3, 2, 3\} \quad (7)$$

인접한 모든 수직 배선 조각  $V_i$ 와  $V_j (1 \leq i, j \leq v)$ 에 대하여,

$$u_i \geq y_k \text{ for every } T_k \text{ connected to } V_i \quad (9)$$

$$d_i \leq y_k \text{ for every } T_k \text{ connected to } V_i \quad (10)$$

$$l_{ij} \geq \begin{cases} u_i - d_j \text{ if } \varphi_T(V_i) \geq \varphi_T(V_j) \text{ and } \varphi_B(V_i) \leq \varphi_B(V_j) \\ u_i - d_i \text{ if } \varphi_T(V_i) \geq \varphi_T(V_j) \text{ and } \varphi_B(V_i) \geq \varphi_B(V_j) \\ u_j - d_j \text{ if } \varphi_T(V_i) \leq \varphi_T(V_j) \text{ and } \varphi_B(V_i) \leq \varphi_B(V_j) \\ u_j - d_i \text{ if } \varphi_T(V_i) \leq \varphi_T(V_j) \text{ and } \varphi_B(V_i) \geq \varphi_B(V_j) \end{cases} \quad (13)$$

$$\xi_{ij} = C_{unit} \cdot \frac{l_{ij}}{G_{size} - W_V} \quad (14)$$

회로의 모든 네트  $N_i(1 \leq i \leq n)$ 에 대하여,

$$X_i = \sum_{T_k \in N_i} \sum_{T_l \in N_i} \tau_{kl} + \sum_{V_j \in N_i} \sum_{V_k \in N_i} \xi_{kj} \quad (15)$$

$$X_{total} = \sum_{i=1}^n X_i \quad (16)$$

$$\delta_{min} \leq M_i - X_i \text{ for all net } N_i \quad (17)$$

문제 2에서 제시된 방법은 두 개의 배선 층을 사용할 때 적용되는 방법이다. 혼신 계산시의 오차를 어느 정도 감수한다면 제시된 방법을 다층 배선 환경으로 적용할 수 있다. 이 경우, 각 배선 층별로 제약 조건 그래프를 생성하고 방향 간선의 비용은 해당 배선 층에서 배선 간 최소 거리와 배선의 최소 두께를 더한 값으로 준다. 각 배선 조각의  $\varphi_T, \varphi_B$ 값은 해당 배선 조각이 가질 수 있는 최대, 최소 위치를 의미한다. 다층 배선 환경에서 추가적으로 고려해 주어야 할 것은 수직 배선 조각 간의 겹침을 방지하는 것이다. 이는 수직 배선 조각의 위치가 서로 다른 두 배선 층에 존재하는 수평 배선 조각에 의해 결정되기 때문이다. 해당 수평

배선 조각 간의 최소 거리 조건을 설정하면 이러한 문제를 해결할 수 있다.

제시된 방법을 다층 배선 환경에 적용할 때, 수직 배선 간의 결합 길이 계산 시 오차가 발생할 가능성이 커진다. 즉, <그림 7>에서와 같이 수직 배선 조각 간의 상대적 위치를 실제보다 크게 예측하는 경우가 많아진다. 그러나 대부분의 경우, 채널의 배선 밀도가 매우 크고, 배선 조각이 움직일 수 있는 범위가 한정되어 있으므로 그 오차는 매우 작다. 또한 수직 배선 조각이 네트의 혼신에 기여하는 정도는 수평 배선 조각에 의한 것보다 상대적으로 작다. 이러한 특성을 살펴볼 때, 혼신 최소화 과정에서 오차에 의한 영향은 작다고 볼 수 있다. 이를 감수한다면 본 논문에 제시된 방법을 다층 배선환경에 적용할 수 있다.

**IV. 실험결과**

본 논문에서 제시된 방법은 MS Windows 98 환경에서 C++로 구현되었다. 실험에 사용한 컴퓨터는 Pentium IV, 1500Mhz의 CPU와 1GB의 기억 용량을 갖는다. 선형 프로그래밍 해결기는 공개 소프트웨어인 LP Solve<sup>[9]</sup>를 사용하였다.

<표 1>은 실험에 사용된 회로의 정보를 나타낸다. 회로 Ex1은 Gao의 논문[6, <그림 5(b)>]에 인쇄된 결과이고, Ex2는 Jhang의 논문[8, <그림 3>]에 인쇄된 결과이다. 회로 YK1, YK3A, YK3B와 YK3C는 Yoshimura의 논문<sup>[19]</sup>에 인쇄된 결과를 이용하였다. 회로 Deutsch는 Deutsch's Difficult Example<sup>[5]</sup>을 Burstein의 배선기<sup>[2]</sup>로 배선한 결과[11, <그림 19>]를 이용하였다.

실험을 위하여 배선 규칙은 0.5um 공정 규칙을 이용하였다<sup>[10]</sup>. 사용된 공정 규칙에서 배선의 최소 두께와

표 1. 실험에 사용된 회로 정보.

Table 1. Circuit information.

회로명	초기 배선 결과		
	네트 수	트랙 수	컬럼 수
Ex1	10	5	20
Ex2	12	5	23
YK1	21	12	35
YK3A	45	15	62
YK3B	47	17	61
YK3C	54	18	79
Deutsch	72	19	174



표 2. 최고 혼신의 감소 비교( $G_{size} = 2.0$ ).  
Table 2. A comparison of peak crosstalk( $G_{size} = 2.0$ ).

회로명	초기 $X_{max}$	최종 $X_{max}$ ( $G_{size} = 2.0$ )	
		Wire perturbation	LP method
Ex1	14.02	10.86	10.15
Ex2	12.90	11.45	9.31
YK1	58.49	52.69	45.85
YK3A	75.02	65.56	59.71
YK3B	89.72	81.71	73.68
YK3C	110.83	95.25	72.10
Deutsch	232.61	212.99	200.49
전체	593.59	530.51	471.29

표 3. 전체 혼신의 감소 비교( $G_{size} = 2.0$ ).  
Table 3. A comparison of total crosstalk( $G_{size} = 2.0$ ).

회로명	초기 $X_{total}$	최종 $X_{total}$ ( $G_{size} = 2.0$ )	
		Wire perturbation	LP method
Ex1	97.68	82.60	76.85
Ex2	84.43	81.10	70.88
YK1	537.08	518.52	505.51
YK3A	1107.47	1091.03	1039.88
YK3B	1383.04	1374.01	1327.36
YK3C	1703.56	1672.81	1641.08
Deutsch	4235.34	4147.63	4037.97
전체	9148.60	8967.70	8699.53

배선 간 최소 거리는 두 배선 층 모두 0.9um이다. 혼신의 비례상수( $C_{unit}$ )는 0.3fF/um로 주었다[1, <그림 4.4>]. 입력으로 주어진 초기 배선 결과는 격자기반이므로, 초기 배선 결과에서의 격자의 크기( $G_{size}$ )는 2.0um의값을 갖는다고 가정하였다. 혼신의 최적화를 조절하기 위한 가중치의 값은  $\omega_1$ 는 1,  $\omega_2$ 는 10으로 주고 실험하였다.

본 논문에 제시된 방법의 효율성을 알아보기 위해 본 논문의 방법과 wire perturbation 방법<sup>[15]</sup>의 실험결과를 비교하였다. 비교를 위하여 wire perturbation 방법에 제시된 프로그램을 직접 작성하였다. <표 2>는 최고 혼신( $X_{max}$ )의 감소 정도를 비교한 것이다. 실험 결과, 본 논문의 방법은 초기 최고 혼신에 비해 평균 20.6%, wire perturbation에 비해 평균 11.2% 향상된 결과를 보였다.

<표 3>은 전체 혼신( $X_{total}$ )의 감소 정도를 비교한 것이다. 제시된 방법은 초기 전체 혼신에 비해 평균

4.9%, wire perturbation에 비해 평균 3%가 향상된 결과를 보였다. Wire perturbation 방법은 최고 혼신의 감소만을 목적으로 하기 때문에 전체 혼신은 크게 줄어들지 않는다. 그러나 본 논문에 제시된 방법은 전체 혼신과 최고 혼신의 감소를 가중치를 통하여 조절할 수 있으며, 전체 혼신의 감소율 또한 wire perturbation 방법보다 뛰어나다.

<표 4>는 격자 크기를 0.5um공정에서의 최소 값인 1.8um으로 주었을 때의 결과이다. 이 경우 배선 조각이 움직일 수 있는 범위가 지극히 한정되어 있어 혼신의 최소화 비율은 낮아지지만 배선 밀도가 낮은 부분에서 혼신의 최소화가 이루어진다. 격자 크기가 2.0um일 때와 마찬가지로 본 논문에서 제시된 방법이 wire perturbation에 비해 효율적임을 알 수 있으며, wire perturbation에 비해 평균 13.4% 향상된 결과를 보였다.

<표 2, 3, 4>의 결과를 통해 본 논문에서 제시한 방법이 wire perturbation 방법보다 혼신의 감소율이 높음을 알 수 있다. Wire perturbation 방법은 간격을 조

표 4. 최고 혼신의 감소 비교( $G_{size} = 1.8um$ ).  
Table 4. A comparison of peak crosstalk( $G_{size} = 1.8um$ ).

회로명	초기 $X_{max}$	최종 $X_{max}$ ( $G_{size} = 1.8$ )	
		Wire perturbation	LP method
Ex1	15.47	12.54	11.72
Ex2	14.10	13.24	10.64
YK1	64.54	64.39	55.23
YK3A	82.41	82.41	68.95
YK3B	98.44	95.74	86.15
YK3C	121.80	121.63	93.48
Deutsch	255.90	255.75	233.10
전체	652.66	645.70	559.27

표 5. 실행 시간 비교  
Table 5. A comparison of execution time.

회로명	실행 시간 (초)	
	Wire perturbation	LP method
Ex1	0.15	0.02
Ex2	0.1	0.02
YK1	1.3	0.18
YK3A	3	0.46
YK3B	11.3	0.66
YK3C	7.4	0.80
Deutsch	64.6	10.23

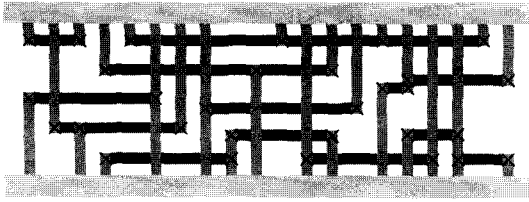


그림 8. 회로 Ex1의 간격 조정 결과.

Fig. 8. The wire spacing result of the circuit Ex1.

정하고자 하는 네트의 혼신 여유분이 이웃한 네트의 혼신 여유분보다 큰 경우 혼신의 감소가 이루어지지 않는 단점이 있으나 본 논문의 방법은 선형 프로그래밍이라는 최적화 기법에 의해 높은 혼신 감소율을 얻을 수 있었다.

<표 5>는 프로그램의 실행 시간을 나타낸 것이다. 본 논문에 제시된 방법은 회로의 크기에 따라 작은 회로는 1초 이내에 해결되고, Deutsch와 같은 큰 회로는 11초 이내의 수행시간이 걸린다. Wire perturbation 방법의 경우, 최적화에 필요한 반복 횟수가 많을수록 실행 시간이 증가하였고 Deutsch의 경우 1분 정도의 시간이 필요하였다. <표 5>에서 보는 바와 같이 본 논문의 방법은 빠른 시간 내에 문제를 해결하였다. 이는 선형 프로그래밍의 해결에 정수 변수가 사용되지 않았기 때문에 가능하다. <그림 8>은 회로 Ex1의 간격 조정 결과를 보인다.

## V. 결 론

본 논문에서는 혼신 최소화를 위한 간격 조정 문제를 선형 프로그래밍으로 형식화하는 방법을 소개하였다. 실험 결과 혼신의 감소가 매우 높은 비율로 발생함을 알 수 있었다. 0.5 $\mu$ m 공정에서 초기 배선 결과의 격자 크기를 2.0 $\mu$ m으로 주었을 때, 초기 배선 결과에 비해 전체 혼신은 평균 4.9%, 최고 혼신은 평균 20.6% 향상된 결과를 보였다. 또한 기존 연구 결과인 wire perturbation 방법과 비교한 경우, 본 논문의 방법이 wire perturbation 방법에 비하여 전체 혼신의 경우 평균 3%, 최고 혼신의 경우 평균 11.2%의 향상된 결과를 보였다.

본 논문에서의 방법을 다층 배선 환경에 적용할 경우, 수직 배선 조각 간의 혼신 계산 시 오차 발생 빈도가 커진다. 그러나, 대부분의 경우 배선 밀도가 매우 높

아 배선 조각의 이동 범위는 매우 작으므로 이러한 오차에 의한 영향은 작다고 볼 수 있다. 이를 감소한다면 본 논문에 제시된 방법을 다층 배선 환경에 적용할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] Bakoglu, H. B., Circuits, Interconnections and Packaging for VLSI, Addison-Wesley, 1990.
- [2] Burstein, M., Pelavin, R., "Hierarchical Wire Routing," IEEE Trans. on CAD., Vol. CAD-2, No. 4, pp. 223-234, 1983.
- [3] Chen, Z. and Koren, I., "Crosstalk Minimization in Three-Layer HVH Channel Routing," IEEE Int. Symp. on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, pp. 38-42, Oct. 1997.
- [4] Chen, H. H. and Wong, C. K., "Wiring and Crosstalk Avoidance in Multi-chip Module Design," Proc. Custom-Integrated Circuits Conf., pp. 28.6.1-28.6.4, May 1992.
- [5] Deutsch, D. N., "A Dogleg Channel Router," Proc. Design Automation Conf., pp. 425-433, Jun. 1976.
- [6] Gao, T. and Liu, C. L., "Minimum Crosstalk Channel Routing," IEEE Trans. Computer-Aided Design, Vol. 15, No. 5, May. 1996.
- [7] Gao, T. and Liu, C. L., "Minimum Crosstalk Switchbox Routing," Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 610-615, 1994.
- [8] Jhang, K. S., Ha, S. and Jhon, C. S., "COP : A Crosstalk Optimizer for Gridded Channel Routing," IEEE Trans. Computer-Aided Design, Vol. 15, No. 4, pp. 424-429, Apr. 1996.
- [9] LP Solve, <ftp://ftp.pics.ele.tue.nl>
- [10] MOSIS, <http://www.mosis.org>
- [11] Ohtsuki, T., Layout Design and Verification, North-Holland, 1986.
- [12] Onozawa, A., Chaudhary, K. and Kuh, E. S., "Performance Driven Spacing Algorithms Using Attractive and Repulsive Constraints for Sub-micron LSI's," IEEE Trans. Computer-Aided Design, Vol. 14, No. 6, pp. 707-719, Jun. 1995.

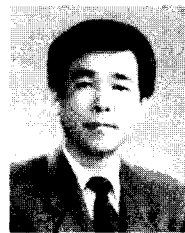
- [13] Parakh, P. N. and Brown, R. B., "Crosstalk Constrained Global Route Embedding," Proc. Int. Symp. Physical Design, pp. 201-206, Apr. 1999.
- [14] Sakurai, T. and Tamaru, K., "Simple Formulas for Two- and Three-Dimensional Capacitances," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-30, No. 2, pp. 183-185, Feb. 1983.
- [15] Saxena, P. and Liu, C. L., "A Postprocessing Algorithm for Crosstalk-Driven Wire Perturbation," IEEE Trans. Computer-Aided Design, Vol. 19, No. 6, pp. 691-702, Jun. 2000.
- [16] Thakur, S., Chao, K. Y. and Wong, D. F., "An Optimal Algorithm for Minimizing Crosstalk for Three Layer VHV Channel Routing," Proc. IEEE Intl. Symp. on Circuits and Systems, pp. 207-210, 1995.
- [17] Vittal, A. and Marek-Sadowska, M., "Crosstalk Reduction for VLSI," IEEE Trans. Computer-Aided Design, Vol. 16, No. 3, pp. 290-298, Mar. 1997.
- [18] Wang, D. and Kuh, E. S., "A Performance-driven MCM Router with Special Consideration of Crosstalk Reduction," Proc. Design Automation and Test in Europe, pp. 466-470, 1998.
- [19] Xue, T., Kuh, E. S. and Wang, D., "Post Global Routing Crosstalk Synthesis," IEEE Trans. Computer-Aided Design, Vol. 16, No. 12, pp. 1418-1430, Dec. 1997.
- [20] Yoshimura, T. and Kuh, E. S., "Efficient Algorithms for Channel Routing," IEEE Trans. Computer-Aided Design, Vol. CAD-1, No. 1, pp. 25-35, Jan. 1982.
- [21] Zhou, H. and Wong, D. F., "Crosstalk-Constrained Maze Routing Based on Lagrangian Relaxation," Proc. Int. Conf. Computer Design, pp. 628-633, 1997.
- [22] Zhou, H. and Wong, D. F., "Global Routing with Crosstalk Constraints," IEEE Trans. Computer-Aided Design, Vol. 18, No. 11, pp. 1683-1688, Nov. 1999.

## 저 자 소 개



全宰漢(正會員)

2000년 : 서강대학교 컴퓨터학과(공학사). 2002년 2월 : 서강대학교 컴퓨터학과(공학석사). 2002년 3월~현재 : 삼성전자주식회사 CAE 센터 근무



林鍾錫(正會員)

1981년 : 서강대학교 전자공학과 학사. 1983년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1989년 : Univ. of Maryland, College Park, 전기공학과 박사. 1983년 3월~1990년 8월 : 한국전자통신연구소 연구원. 1990년 9월~현재 : 서강대학교 컴퓨터학과 교수