

# 와이어 본더 시스템의 Z 축 표면 접촉 검출 알고리즘 개발

김정한<sup>#</sup>

## Contact Detection Algorithm of the Z-axis of a Wire Bonder

Jung-Han Kim<sup>#</sup>

### ABSTRACT

A new design of contact detection algorithm is proposed for the z-axis of a wire bonder that interconnects between pads and leads in semiconductor manufacturing processes. Fast and stable contact detection of the z-axis is extremely important for maintaining proper quality in the fine pitch gold wire bonding process, which has a small pad size of below 70um. The new method is based on a statistical approach and designed for the discrete Kalman filter. Real wire bonding experimental results are presented to demonstrate the advantages of the proposed algorithm.

**Key Words :** Detection algorithms(검출알고리즘); Stochastic parameters(확률변수); Kalman filters(칼만필터); Filtering problem(필터응용문제)

### 기호설명

$\mathbf{x}_k$  = System state vector  
 $z_k$  = Measurement value  
 $\mathbf{b}_k$  = Input matrix  
 $\mathbf{h}_k$  = Observation matrix  
 $\mathbf{F}_k$  = State transition matrix  
 $\mathbf{P}_k$  = Error covariance matrix  
 $\mathbf{Q}_k$  = Covariance of process noise  
 $\mathbf{R}_k$  = Covariance of measurement noise  
 $v_k$  = Measurement noise  
 $\mathbf{v}_k$  = Innovation process  
 $q_k$  = Chi-square test parameter  
 $Q_k(k)$  = Contact test function

### 1. 서론

최근의 반도체 패키징 프로세스는 비약적인 발전을 거듭하여, 외부로 연결되는 금속 리드의 간격은 더욱 더 미세화하며, 같은 면적에 더 많은 연결부위를 형성하기 위하여 각종 아이디어가 테스트 되고 공정이 개발되고 있다<sup>1</sup>. 따라서 패키지 내부의 반도체 칩상에 존재하는 연결 단자인 패드의 간격(pad pitch) 또한 50 $\mu\text{m}$  미만의 제품의 비중이 점점 커지고 있는 상황이다. 와이어 본더 공정은 다이(die)에 올려진 반도체 칩상의 패드와, 외부로 연결되는 리드프레임의 리드(lead)를 금실(gold wire)로 연결해 주는 공정으로서 반도체 후공정 중에서 매우 중요한 공정이며, 생산성의 향상을 위하여 매우 빠른 가감속과 속도의 작업이 요구되는 정밀한 공정이다. 이러한 와이어 본더 공

<sup>#</sup> 접수일: 2004 년 11 월 03 일; 게재승인일: 2005 년 5 월 13 일  
 # 교신저자: 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 정밀기계기술연구소  
 E-mail [hankim@snut.ac.kr](mailto:hankim@snut.ac.kr) Tel.(02) 970-6397

정은 초고속 XYZ 테이블과 초음파 본딩기술, 비전 검사 기술, EFO(electronic flame off) 기술 등 많은 요소 기술이 필요한데, 특히 XYZ 테이블 중 Z 축은 제어의 모드가 위치추종 제어모드, 접촉 검출(contact detection) 모드 및 힘 제어(force control) 모드 등으로 변화하면서 와이어 본딩 작업을 수행하므로 Z 축은 매우 정교한 제어 시스템을 필요로 하며, 빠른 가속과 작은 시정수를 위하여 보이스코일 모터를 사용한다<sup>2</sup>.

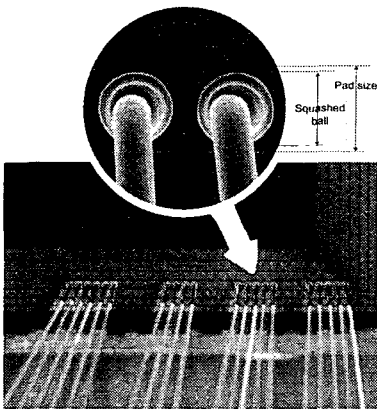


Fig. 1 Pad side of gold wire bonding

Fig. 1 은 반도체 칩상에서 와이어 본딩이 이루어지는 패드쪽을 확대한 사진이다. 상부의 원안의 사진은 패드쪽의 본딩 후 모습을 확대한 것인데, 본딩 후 패드쪽은 원안의 그림과 같이 눌림볼(squashed ball)이 형성된다. 패드의 크기와 패드간의 간격인 패드 간격(pad pitch)는 고집적을 위하여 매년 점점 감소하며, 따라서 이러한 특징은 점점 더 높은 와이어 본딩의 고정밀화를 요구한다.

본딩시 Z 축의 표면 접촉 검출은, 반도체 칩의 패드의 표면높이가 에폭시 두께 및 클램핑의 기술기 등의 차이로 매 본딩마다 약간씩 변화하므로 반드시 필요로 하는 기능인데, 패드 간격이 작은 미세 패키징일수록 Z 축의 접촉 검출 지연 시간의 변화가 와이어 본딩 프로세스의 품질에 결정적인 영향을 준다<sup>3</sup>. 특히 100G 이상의 고가속도로 움직이는 Z 축에서는 수많은 기계적인 진동이 존재하므로, 이러한 환경 아래에서도, 안정된 접촉 검출을 수행할 수 있는 알고리즘이 반드시 필요하다.

와이어 본딩의 표면 접촉 검출 알고리즘은 Z 축

의 등속운동을 이용하여 이루어지므로, 등속으로 움직이는 시스템 모델의 변화를 판단하는 문제라고도 정의할 수 있는데, 이는 칼만 필터가 장착된 목표 위치 추종 문제와 시스템의 변화 검출이라는 점에서 유사점을 찾을 수 있다. 목표 위치 추종 문제에서의 시스템의 변화 검출 접근방법은 잡음이 존재하는 측정치로부터 특정한 파라미터를 예측 및 학습하는 방법이 주로 사용되는데, Blair<sup>4</sup>는 2 단의 예측기를 개발하고, 시스템의 변화 검출에 기본적으로 바이어스 벡터(bias vector)를 이용하였고, Bogler<sup>5</sup>는 칼만필터의 residual 을 이용하여 시스템의 변화 혹은 외란의 유무를 판단하였다. 그런데 이러한 방법은 원래 비행체의 추적용으로 개발된 알고리즘으로 일반 상용 제어기안에 탑재되기 매우 어렵고, 또 오검출 확률(probability of false alarm)을 조정하는 것이 매우 복잡하여 일반 민수용 상용 시스템에 적용하는 것이 곤란하였다.

본 연구에서는 칼만 필터상에서의 시스템의 변화를 이용하여, 와이어 본딩의 Z 축 표면 접촉 검출을 위한 새로운 검사 파라미터를 개발하였다. 이후에 전개되는 내용은 검출 알고리즘의 유도 및 증명과 실제 와이어 본딩 실험을 통한 결과의 검증이며, 본 연구에서 제시한 Z 축의 표면 접촉 검출 알고리즘의 중요한 특징은, 일반 제어용 DSP 에 장착가능하며, 칼만 필터가 정상상태 이전에도 시스템의 변화 검출이 가능하다는 것과, 표준 카이 제곱(chi-square) 테이블을 이용하여 간단하게 오검출 확률을 설계할 수 있다는 데 큰 장점을 지닌다.

## 2. Gold wire bonding process

### 2.1 와이어 본딩 프로세스

금실을 이용하여 칩의 패드와 칩의 다리부분이 되는 리드를 연결해주는 와이어 본딩 프로세스는 온도와 초음파(ultrasonic) 그리고 힘의 3 가지 에너지를 이용하여 FAB(free air ball)이라고 불리는 구 형태의 금실의 끝 부분을 패드에 접촉시킨다. Fig. 2 는 이러한 자동 와이어 본딩 프로세스를 단계별로 도시한 것이다. 이전 와이어의 본딩 후 고전압(EFO)에 의하여 순간적으로 와이어의 끝부분을 녹여서 와이어의 끝부분을 구의 형태로 만드는데, 이를 FAB 이라 칭한다. 금실이 통과 되고 FAB 이 위치한 캐필러리(capillary)는 패드 위의

접촉감지높이(search level)까지 빠르게 하강 접근하고(a), 이후부터는 등속 운동하면서 표면 접촉을 검출한다. Z 축은 등속도로 하강하면서 표면접촉이 인지되면, Z 축의 제어 모드는 힘제어(force control) 모드로 바뀌어 본딩을 행한다(b).

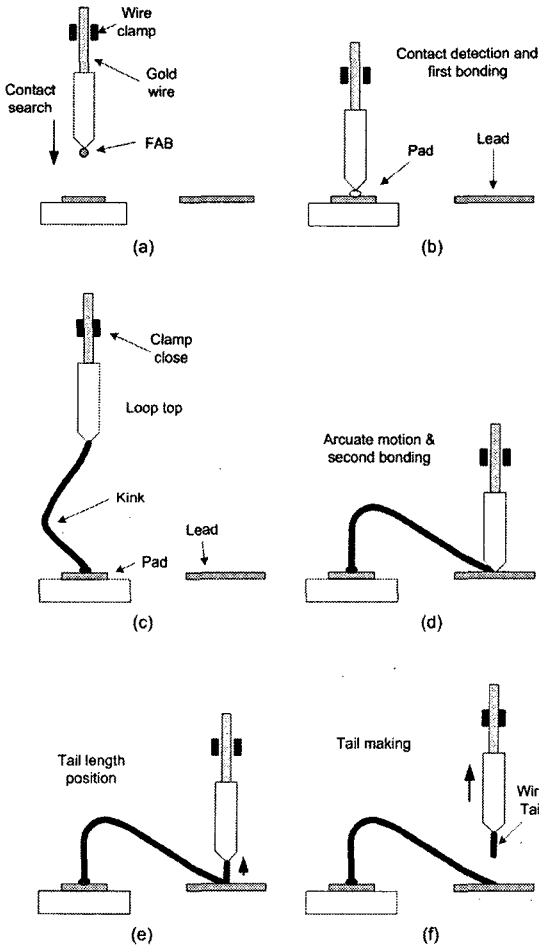


Fig. 2 Gold wire bonding sequence;  
 (a) capillary descends with gold ball,  
 (b) contact and make first bonding,  
 (c) make kink and proceed to loop top,  
 (d) arcuate motion and second bonding,  
 (e) proceed to tail length position,  
 (f) close clamp and make tail.

본딩 작업은 와이어당 보통 2 번 행해지는데, 먼저 패드에 본딩 후 와이어 루프의 모양을 형성하기 위한 굴절동작(kink) 후 상승하고(c), 다시 리

드쪽에 동일한 방법으로 본딩한다(d). 리드쪽에 본딩후 Z 축은 다시 상승하는데, 특정 순간에 캐필러리 윗쪽에 부착된 와이어 클램프가 와이어를 잡아서(e) 캐필러리 바깥쪽으로 일정량 와이어를 돌출시키고(f), 그 부분이 다음 패드를 위한 FAB을 형성하여 연속적인 본딩이 가능하게 된다.

다음의 Fig. 3은 Fig. 2의 (a) 부분에서 패드 표면 접촉 검출 알고리즘이 사용되는 부분을 확대 도시한 것이다.

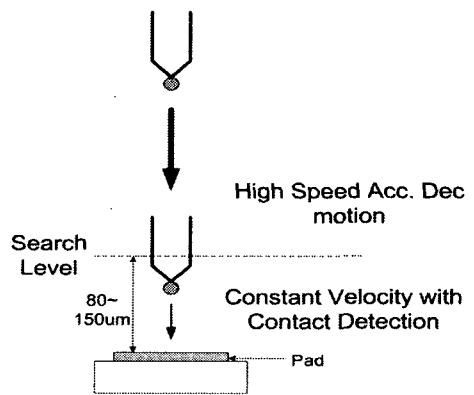


Fig. 3 Capillary descends for contact detection

Z 축은 본딩시 접촉감지높이(search level)까지 빠른 가감속을 이용하여 내려온 후, 패드와 접촉될 때까지 약 15mm/s 이하의 정속 구동을 하면서 하강한다. 패드의 표면 접촉이 인지되면 Z 축의 제어 모드는 즉시 힘제어 모드로 바뀌며 초음파 용접기(ultrasonic generator)가 동작하게 된다.

## 2.2 표면 접촉 검출에 대한 방해요인

상기한 바와 같이 와이어 본딩의 Z 축은 초고속 위치제어 모드, 등속제어 및 표면 접촉 검출모드, 힘제어 모드를 순차적으로 사용하게 된다. 이중 표면 접촉 검출 후 힘제어 모드로 전환하는 시간은 매우 중요한데, 이는 FAB이 눌러서 Fig. 1에 도시된 바와 같이 눌림볼을 형성하는 과정에 많은 영향을 준다. 즉 실제로 표면에 접촉하였는데, 이의 검출이 늦어지게 되면, FAB이 더 눌러서 눌림볼의 사이즈가 증가하여 옆의 패드에 전기적 영향을 주게 된다. 또한 이러한 검출 시간이 진동등의 영향을 받아 수시로 변화하면, 균질한 와이어 본딩 품질을 달성하지 못하게 된다.

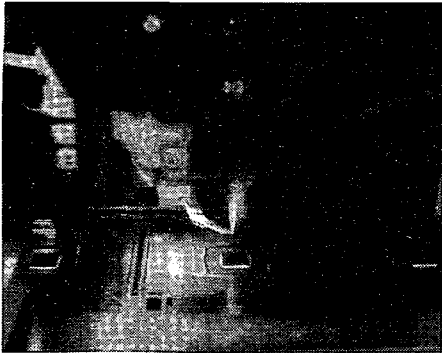


Fig. 4 Front view of the head of the wire bonder

Fig. 4 는 캐필러리가 부착된 Z 축의 모습을 보여 주는데, 매우 빠르게 움직이는 와이어 본더의 구조상 안정된 표면 접촉 검출에 방해가 되는 요소는, 첫째 기구물에 의한 진동과, 엔코더 채배기에서 발생하는 잡음, 그리고 와이어 텐서너의 흡입시 발생하는 진동등으로 요약될 수 있다. Fig. 5 는 엔코더에서 검출되는 이러한 진동 잡음을 보여준다.

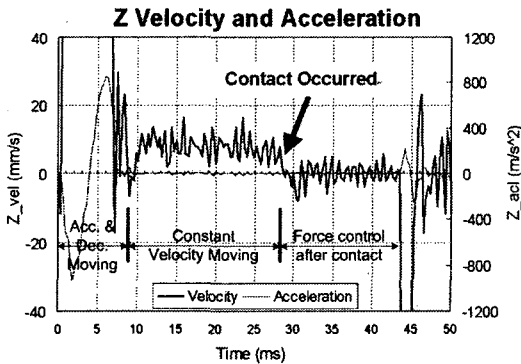


Fig. 5 Z velocity and acceleration when the capillary contacts a pad

### 3. Z 축의 칼만 필터 디자인

와이어 본더의 Z 축은 허용되는 위치 추종 오차가 5 $\mu$ m 이하의 고정도 시스템이므로 제어 밴드폭이 매우 넓어야 한다. 또한 Fig. 5 와 같은 진동에 의한 잡음 때문에, 칼만 필터와 같은 속도 관측기의 설계가 매우 중요하다. 여기서 캐필러리를 포함한 Z 축은 정속 구동시 다음과 같이 모델링된다(기호 설명 참조).

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{b}_k u_k \quad (1)$$

$$z_k = \mathbf{h}_k \mathbf{x}_k + v_k \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} x_p \\ x_v \end{bmatrix}, \mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{h}_k^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 각각  $\Delta t$ 는 샘플링 시간,  $u_k$ 는 가속도 입력(감가속이 있을 경우),  $v_k$ 는 엔코더의 노이즈이며,  $x_p$ 는 위치,  $x_v$ 는 속도의 상태(State)를 나타낸다. 일반적으로 와이어 본더의 Z 축은 주로 2 ~ 20 $\mu$ m 해상도의 라운드형 엔코더를 사용하는데, 신호의 해상도를 높이기 위하여 25~128 배정도의 채배기를 사용한다. 이러한 노이즈와 상기한 기구적인 진동에 의하여 발생하는 측정 잡음  $v_k$ 는 분산 값  $R_k$ 를 가지는 가우시안(Gaussian)으로 모델링될 수 있으며, 정형화된 일반적인 이산 칼만 필터는 식(4)-(8)과 같이 요약된다.

시간 전개(Time update):

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} = \mathbf{F}_{k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1/k-1} + \mathbf{b}_k u_k \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1/k-1} \mathbf{F}_{k-1}^T + \mathbf{G}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{G}_{k-1}^T \quad (5)$$

측정전개(Measurement update):

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{h}_k^T (\mathbf{h}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{h}_k^T + R_k)^{-1} \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k} = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (z_k - \mathbf{h}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{k/k} = \mathbf{P}_{k/k-1} - \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{h}_k^T (\mathbf{h}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{h}_k^T + R_k)^{-1} \mathbf{h}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \quad (8)$$

여기서 보편화된 표기법을 따라  $\mathbf{P}_k$ 는 오차 공분산,  $\mathbf{K}_k$ 칼만 게인,  $\mathbf{Q}_k$ 는 프로세스 잡음이다. 상기와 같이 5 개의 기본 수식으로 이루어진 이산 칼만 필터는 시스템의 모델에 의해서 계산되는 시간전개(Time update)와, 실제 측정값이 칼만 게인에 의해서 반영되는 측정전개(Measurement update)의 두 단계로 크게 나누어진다.

이산 칼만 필터 디자인은 측정 잡음의 분산  $R_k$ 와 프로세스 잡음의 분산  $\mathbf{Q}_k$ 를 정하는 작업이 중요한데, 와이어 본더에서의 Z 축의  $R_k$ 의 측정 은 Z 축을 지그에 고정시키고, XY 테이블을 정지 제어상태에서 측정한다. 프로세스 잡음의 분산

$\mathbf{Q}_k$ 의 결정은 실제 원 데이터와 필터링된 데이터의 차이를 비교하여, 필터 수렴의 스펙을 정하여 디자인하며, 일반적으로 인터럽트의 몇 배수 안에 일정 오차 안으로 수렴하도록 설계한다.

#### 4. 표면 접촉 검출 알고리즘의 설계

Z 축에 장착된 캐필러리가 접촉감지높이(search level)에 도달하면, Z 축은 등속운동을 하게 되는데, 이 때의 칼만 필터의 오차 분산의 전개는 식(5)와 식(8)을 거치면서 진동하는 형상을 보여준다. 이것은 시간 전개에 따른 불확실성의 증가로 에러의 기대값이 증가했다가, 다시 측정치를 어느 정도 반영함으로써 오차의 기대치가 감소하게 된다<sup>6</sup>.

Fig. 6은 이러한 칼만 필터에서의 진동현상을 도시한 것이다. 여기서 각 스텝안에서의 두 개의 프로세스(식(5)와 식(8))의 차이량은 Fig. 6에서의 선분의 길이로 나타나는데, 이러한 선분의 길이는 시스템이 유효할 때, 즉 등속운동을 수행중일 때 통계적으로 구할 수 있는 파라미터이다. 만약 이 때 Z 축에 부착된 캐필러리가 표면에 접촉하여 등속운동의 모델이 더 이상 적합하지 않게 된다면 이러한 두 개의 프로세스의 차이가 달라지게 되며, 더 이상 Fig. 6에 도시된 데이터가 유효하지 않게 된다.

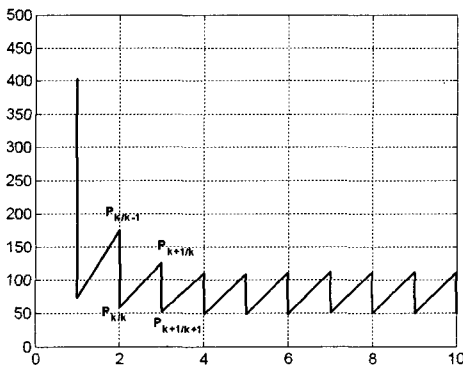


Fig. 6 Error covariance propagation of Kalman filter

정리하면 매 스텝당 식(5) 및 식(8) 두 개의 프로세스의 차이는 시스템의 변화가 없을 때, 통계적인 특성에 의하여 계산이 가능한 통계량이다. 따라서 이러한 정보량을 기준으로 삼고, 실제 측정치를 이용한 검사 파라미터를 설계하여 이를 비교할 수

있으면, 실시간으로 시스템의 유효성을 판단할 수 있다. 여기서 시스템이 유효하지 않다는 것은, 더 이상 시스템이 등속 운동을 하지 않는다는 뜻이며, 이는 캐필러리 끝부분이 패드의 표면에 접촉이 이루어졌음을 뜻한다. 식의 전개를 위하여 다음과 같은 가정을 수립한다.

$H_0$ : 시스템은 등속운동을 한다.

표면 접촉 검출 알고리즘은 상기와 같은 가설을 매 샘플링 시간마다 검사하게 되며, 만약 가설의 검증에 실패하면, 표면 접촉이 일어났음을 출력한다. 다음의 Theorem 1은 상기한 시간전개와 측정전개의 차이를 실제 측정치와 칼만게인의 곱으로 구성된 파라미터와의 관계를 이어준다.

Theorem 1. 이산 칼만 필터의 오차 공분산의 시간전개와 측정전개의 차이는 식(9)와 같이 이노베이션(Innovation) 프로세스와 최적 칼만 게인의 곱의 기대값으로 표현된다.

$$\mathbf{P}_{k/k-1} - \mathbf{P}_{k/k} = E[\mathbf{K}_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T \mathbf{K}_k^T], \quad (9)$$

여기서 이노베이션  $\mathbf{v}_k$ 는 식(10)과 같이 정의된다<sup>7</sup>.

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{h}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} \quad (10)$$

증명: 부록 A에 수록.

Theorem 1은 통계량으로 구성된 두개의 공분산 차이의 값과 실제 센서에 의하여 실시간으로 측정된 값의 기대치와의 관계를 정의해 준다. 식(10)에서 정의된 이노베이션 프로세스  $\mathbf{v}_k$ 는 측정 노이즈  $\mathbf{v}_k$ 를 포함하며, 측정 노이즈가 가우시안이면 마찬가지로 이노베이션 프로세스도 가우시안 특성을 가진다<sup>7</sup>. 검사식의 전개를 위하여 본 연구에서는 (11)과 같은 프로세스  $c_i$ 를 제안하였다.

$$c_i = \mathbf{h}_i \mathbf{K}_i \mathbf{v}_i \quad (11)$$

프로세스  $c_i$ 는 이노베이션의 특성에 따라 정규분포를 따르며, 영(zero)의 평균을 가진다. 따라서 프로세스  $c_i$ 의 제곱은 카이 제곱 분포를 가지는데, 카이 제곱 분포를 실시간으로 검사하기 위한 피어슨(Pearson)의 검사 파라미터를 도입하면<sup>8</sup>,

$$q_k = \sum_{k-n}^k \frac{(c_i - E[c_i])^2}{\text{var}(c_i)} \quad (12)$$

여기서 n 은 샘플 윈도우의 사이즈이다. 여기서  $c_i$  의 분산을 구하면,

$$\begin{aligned} E[(c_i - \bar{c}_i)(c_i - \bar{c}_i)^T] &= E[c_i c_i^T] \\ &= E[\mathbf{h}_i \mathbf{K}_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{K}_i^T \mathbf{h}_i^T] \end{aligned} \quad (13)$$

Theorem 1 에 의하여  $c_i$  의 분산은 시간 전개의 분산 식(5)와 측정 전개의 분산 식(8)의 차이로 나타내어질 수 있다. 식(12)의 분모에 Theorem 1 을 이용하여 분산값을 사용하면 식(14)와 같다.

$$q_k = \sum_{k-n}^k \frac{(c_i)^2}{\mathbf{h}_i (\mathbf{P}_{i|i-1} - \mathbf{P}_{i|i}) \mathbf{h}_i^T} = \sum_{k-n}^k \frac{(\mathbf{h}_i \mathbf{K}_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{K}_i^T \mathbf{h}_i^T)}{\mathbf{h}_i (\mathbf{P}_{i|i-1} - \mathbf{P}_{i|i}) \mathbf{h}_i^T} \quad (14)$$

본 연구에서 제시된 가설 검사 파라미터  $q_k$  를 계산하는데 있어서 기본적으로 구성 행렬들 모두가 칼만필터를 업데이트 하는데 필요하기 때문에, 식(14)의 계산시 추가적으로 소요되는 계산량은 그리 많지 않으며, 카이 제곱 분포의 자유도(degree of freedom) n-1 은 샘플링 시간과 접촉 검출 지연 허용시간을 고려하여 정하면 된다.

상기의 접촉 검출 과정 즉, 가설  $H_0$  의 검증과정을 정리하면, 와이어 본더의 Z 축이 등속운동을 하고 있을 때 프로세스  $c_i$  의 제곱은 카이 제곱 분포를 따르며, 만약 표면에 Z 축이 접촉하여 시스템의 등속 운동이 불가하게 되면 이의 값은 카이 제곱 분포를 벗어나게 된다. 따라서 상기의 검증 파라미터  $q_k$  를 이용하면 표준 카이 제곱 테이블을 이용하여, 가설  $H_0$  의 검증을 정해진 오검출 확률로 수행하는 것이 가능하다. 예를 들면 샘플링 주파수가 4kHz 이고, 윈도우 사이즈가 6 일때(자유도는 5), 95%의 신뢰도를 가지고  $H_0$  을 검증한다면, 카이 제곱 표준 테이블에 의하여 검사 기준값은 11.070 이 된다. 따라서 이때 구해진 표준화(normalized)된  $q_k$  의 값이 11.070 이상이 되면 그 순간 해당 신뢰도로 표면접촉을 판단할 수 있으며, 또한 이때의 검출 지연은 윈도우 사이즈가 6 이므로 대략 1.5ms 정도의 검출지연이 생긴다. 따라서 이때 임계값을 11.07로 정하면, 95%의 신뢰도로 표

면 접촉을 인지할 수 있다. 본 연구에서 제시한 검증 파라미터  $q_k$  는 기존의 연구와는 달리 카이 제곱 형태로 표준화 되어 있기 때문에, 칼만 필터가 수렴하기 전에도 검출이 가능하며, 시행착오 없이도 오검출 확률의 값을 카이 제곱 기본 테이블을 사용하여 사전 설계하는 것이 가능하다.

와이어 본더 시스템에서는 95%의 신뢰도는 너무 부족하므로 본 연구에서는 다음과 같은 검증 파라미터  $q_k$  의 시리얼 함수  $Q(k)$  를 제안하였다. 다음과 같은 단위계단함수  $1(k)$  를 고려하면,

$$1(k) = \begin{cases} 1 & k \geq 0 \\ 0 & k < 0 \end{cases} \quad (15)$$

최종 검증 함수  $Q(k)$  는

$$\begin{aligned} Q(k) &= 1(q_k - \alpha_k) \times 1(q_{k-1} - \alpha_{k-1}) \times 1(q_{k-2} - \alpha_{k-2}) \\ &\times \dots \times 1(q_{k-n} - \alpha_{k-n}) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $\alpha_k$  는 표준 카이 제곱 테이블에서 정해진 임계값이다. 예를 들면 3 개의 시리얼  $q_k$  가 사용되고, 각각 2%, 2%, 1%의 임계치를 가진다면 최종적으로 오검출 확률은 4ppm 이 될 것이며, 이는 최근에 많은 주목을 받고 있는  $6\sigma$  프로세스와 유사한 값이다. 샘플 주파수가 높으면 많은 윈도우를 사용하는 것이 가능해지므로, PFA 를 더 줄이는 것도 가능하게 되는데, Table 1 은 윈도우의 사이즈가 3 일 경우의 오검출 확률(PFA)을 정리한 것이다.

Table 1 Example table of PFA (n=3)

Confidential level $\alpha_k$			Probability of False Alarm PPM (Part Per Million)
k	k-1	k-2	
3%	3%	2%	18 ppm
3%	2%	1%	6 ppm
2%	2%	2%	8 ppm
2%	2%	1%	4 ppm

### 5. 실험 및 결과

Fig. 7 은 실험 장치의 구성도이다. Z 축의 캐필러리 팁에서의 엔코더 해상도는  $0.438 \mu\text{m}$  이며, 표면

접촉 검출 시스템의 샘플링 주파수는 4kHz 이다. 특히 Z 축의 감속시 발생하는 기계적인 진동에 의한 영향을 줄이기 위해 Z 축의 엔코더 신호는 노치 필터(notch filter)가 반드시 필요하다. 노치 필터의 설계는 다이내믹 신호 분석기(DSA)를 이용하여 기구부의 공진 측정 후 설계되는데, Fig. 8 은 본 실험에 사용된 750Hz 의 차단 주파수를 가지는 노치 필터의 보드 선도이다.

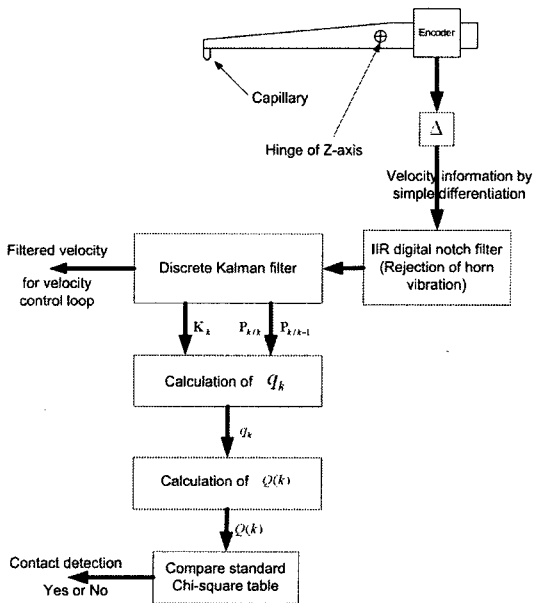


Fig. 7 Block diagram of the experimental system

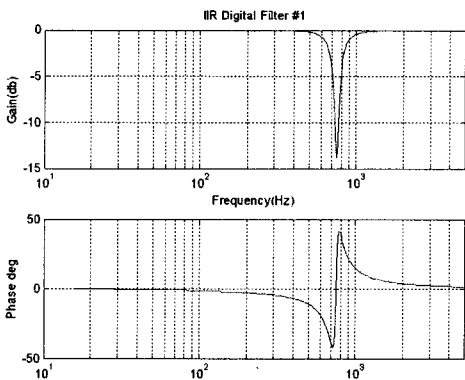


Fig. 8 Bode plot of digital IIR filter for vibration rejection

실험에 사용된 반도체 자재는 126 개의 패드를

가지는 자재와 208 개의 패드를 가지는 자재 2 종류를 사용하였으며, 패드 간격은 둘 다 70 $\mu$ m 의 자재를 사용하였다. 신호의 측정은 Z 축을 제어하는 DSP 보드에 추가의 4 채널 D/A 를 장착하여 실시간으로 DSP 내부의 파라미터 값을 출력하였다. Fig. 9 는 실제 본딩 실험시 내부 파라미터 값을 측정 한 것이다.

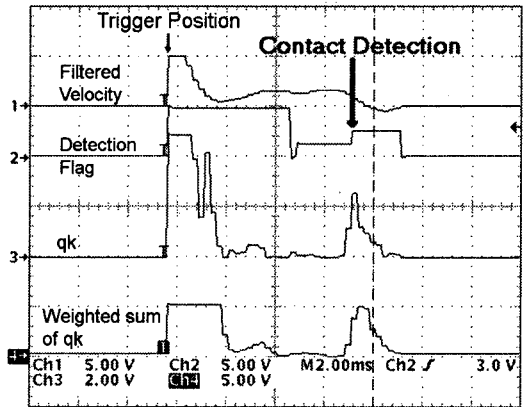


Fig. 9 Contact detection parameters;

- Ch.1: velocity from Kalman filter,
- Ch.2: detection status of the proposed algorithm,
- Ch.3: test parameter  $q_k$ ,
- Ch.4: weighted summation of the  $q_k$ .

$q_k$  의 윈도우 사이즈는 3, 오검출 확률은 8ppm 을 사용하였다. Fig. 9 는 Z 축이 접촉감지높이를 지나 패드 표면에 접촉할 때까지의 접촉 인식 알고리즘 내부의 파라미터를 측정 한 것이다. Fig. 9 의 채널 1 은 칼만 필터링된 속도 정보이고, 채널 2 는 접촉 인식 플래그인데, 1 V 상태는 표면 접촉 알고리즘이 동작 중인 상태임을 나타낸다. 채널 3 은 식(9)의 검증 파라미터  $q_k$  의 값을 표기하였고 이때의 검증 임계값(threshold)의 전압 출력치는 약 1.2 V 로 세팅하였다. 마지막의 채널 4 는 참고로 도시한  $q_k$  의 가중 필터링 궤적이다. 그림에서 볼 수 있듯이 채널 3 의  $q_k$  값은 매우 빠른 응답특성을 가지고 있으며, 깨끗한 신호 파형의 특성을 가지고 있다.

제안된 알고리즘의 보다 엄밀한 비교평가를 위하여 식(16)으로 구성된 검증 함수에  $q_k$  를 사용하지 않고 칼만 필터링된 속도정보와 해당하는 임계값을 사용하여 비교 테스트 하였다. 이러한 종래

의 방법은 필터링된 속도가 일정 이하로 떨어지면, 식 (16)의 한 셀이 '1' 이 되도록 구성되며, 실제로 현재 와이어 본더의 Z 축 접촉 검출 알고리즘으로 널리 사용된다. 이러한 방법은 속도 정보에 잡음이 존재할 경우 오동작하여 검출 시간에 지연 및 오검출을 일으키는 경우가 발생하는데, Fig. 10 은 이러한 경우의 데이터를 측정된 것이다.

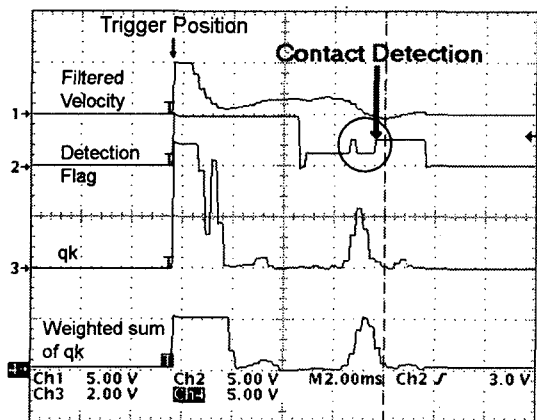


Fig. 10 Contact detection parameters;

- Ch.1: velocity information from Kalman filter,
- Ch.2: detection status by the constant threshold,
- Ch.3: test parameter  $q_k$ ,
- Ch.4 weighted summation of  $q_k$ .

원안에 표시된 부분은 오검출된 상황을 보여주는데, 비록 칼만 필터링된 속도 정보를 이용하더라도 약간의 잡음은 반드시 포함되므로, 이러한 상황에서의 속도치의 비교는 반드시 채널 2 와 같은 접촉 검출 지연을 불규칙하게 발생시키며, 이는 장비의 상태나 환경의 변화에 매우 민감하게 반응한다. 만약 표면 검출 지연이 일어나게 되면, Z 축은 지속적으로 아래로 힘을 가하게 되어 Fig. 1 에서 설명한 눌림볼의 크기가 커지게 되고 이러한 현상은 직접적으로 불량률을 증가시키고 패키지 공정의 수율을 감소시킨다.

반면에 Fig. 10 의 채널 3 에 도시된  $q_k$  의 값은 동일한 조건 하에서 안정된 검출 패턴을 보여주고 있으며, 제시된 알고리즘에는 검출지연이 발생하지 않은 것을 보여 준다. 미세 패드 간격으로 갈수록 FAB 크기의 감소로 검출시간의 지연이 눌림볼 사이즈를 증가시키는 영향 계수가 증가하므로 검출 시간의 지연과 변화는 와이어 본더 공정에서 매우

중요하며, 품질에 직접적인 영향을 준다.

제안된 알고리즘과 기존의 알고리즘의 수치적인 평가를 위하여 128 핀 패드 자재 3 개와 208 핀 패드 자재 2 개의 2 가지 종류의 자재에 대한 다량의 실험을 거쳐서 표면 검출 데이터를 추출하였다. 다음의 Table 2 는 상기한 800 번의 표면 접촉 사건에 대하여 2 가지 알고리즘의 출력력을 측정하여 데이터를 수집하여 각각의 알고리즘에 대한 검출 시간의 평균과 분산을 측정 및 정리한 것이고, Fig. 11 은 측정된 검출시간에 대한 분산을 나타내는 그래프이다.

Table 2 Experimental result of the detection time

	Constant threshold		Proposed detection algorithm	
	126	208	126	208
Device	126	208	126	208
Mean time $\bar{t}_d$	3.23 ms	3.32 ms	3.04 ms	3.07 ms
Standard deviation $\sigma$	0.1233	0.1344	0.0615	0.0781
Average	$\bar{t}_d = 3.28$ ms, $\sigma = 0.1289$		$\bar{t}_d = 3.06$ ms, $\sigma = 0.0698$	

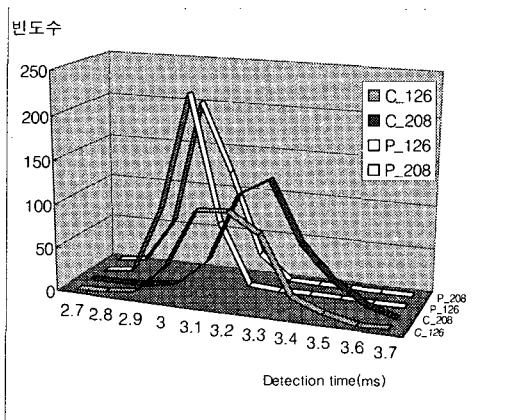


Fig. 11 Covariance plot of detection times

제안된 알고리즘의 경우 접촉 인지 시간이 대략 6.7% 빨라진 향상된 것을 보여주는데, 와이어본딩 공정에서 접촉인지시간의 상승은 초음파 용접기 (USG)의 설정폭을 넓혀주어 보다 단단한 본딩을 가능하게 할 수 있다. 또한 인지 속도의 향상과 더불어, 접촉인지 시간의 개개의 시행에 따른 분



산 값이 기존의 경우의 약 50% 정도에 불과하여, 매우 안정된 접촉 검출 결과를 Fig. 11 에서 관찰할 수 있다. 이러한 특징은 와이어 본딩 공정의 MTBA (mean time between assist)의 값을 늘려주어 생산 비용을 절감하는 효과가 있다.

### 6. 결론

미세 피치를 위한 와이어 본딩 공정에는 Z 축의 패드 표면 접촉 검출 지연 시간이 매우 중요한 공정 변수이다. 표면 접촉 검출시간이 변동하거나 불안하면 바로 놀림볼 사이즈와, 본딩이 잘 되었는지를 나타내는 척도인 당김 검사값(pull test value)에 영향을 준다. 본 연구에서 제시한 표면 접촉 검사 알고리즘은 기존의 방법에 비하여 약 7%의 검출 속도 향상과 약 45%의 검출시간 변동의 분산 감소를 보여 주었다.

본 연구에서 제시한 검출 알고리즘은 표준화된 카이 제곱 테이블을 이용하여 칼만필터가 수렴 전에도 유효한 값을 출력하며, 검출 구간의 등속 운동의 속도 변화에 영향을 받지 않는다. 또한 시행착오 없이 오검출 확률(PFA)을 원하는 값으로 설계할 수 있는 장점을 지닌다. 실제 생산 라인에서 수행된 측정 실험 결과는 본 검출 알고리즘이 빠르고 안정적으로 동작함을 보여준다.

### 참고문헌

1. Hwang, D.Y., Jeon, S.J. and Kim, K.B., "Development of the Flip-Chip Bonder using multi-DOF motion stage and vision system," Proc. of KSPE, pp.1717-1722, 2003.
2. Kwon, K.H., Oh, S.H., Cho, N.G.. and Yoon, J.Y., "Development of small loading and positioning device using VCM," Journal of KSPE, Vol. 20, No.12, pp.64-72, 2003.
3. Leonhardt, D. A., "Fine pitch packaging: Trends and technology," Semicon west, 1997.
4. Blair, W. D., "Fixed-gain two stage estimators for tracking maneuvering targets," IEEE transactions on aerospace and electronic system, Vol-29, pp1004-1014, 1993.
5. Bogler, P. L., "Tracking a maneuvering target using input estimation," IEEE transaction on aerospace

- and electronic systems, AES-23, pp298-310, 1987.
6. Kim, J.H. and Oh, J.H., "A land vehicle tracking algorithm using stand-alone GPS," Control Engineering Practice, 8, pp1189-1196, 2000.
7. Kailath, T., "An innovation approach to least squares estimation part I: Linear filtering in additive white noise," IEEE Transaction on Automatic control, AC-13, pp.646-660, 1968.
8. Harvey, A.C., "Time Series Models," second edition, the MIT press, 1992.

### 부록

#### A. Theorem 1 의 증명

Define,

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k/k} \equiv \hat{\mathbf{x}}_{k/k} - \mathbf{x}_k, \tag{17}$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} \equiv \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} - \mathbf{x}_k, \tag{18}$$

and the innovations process as  $\mathbf{v}_i = \mathbf{z}_i - \mathbf{h}_i \hat{\mathbf{x}}_{i/i-1}$ . (19)

$$\begin{aligned} & E[(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k/k})(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k/k})^T] = \\ & E[(\tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} - \tilde{\mathbf{x}}_{k/k})(\tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} - \tilde{\mathbf{x}}_{k/k})^T] \tag{20} \\ & = E[\tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1}^T - \tilde{\mathbf{x}}_{k/k} \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1}^T - \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} \tilde{\mathbf{x}}_{k/k}^T + \tilde{\mathbf{x}}_{k/k} \tilde{\mathbf{x}}_{k/k}^T] \tag{21} \end{aligned}$$

Since

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k/k} = \hat{\mathbf{x}}_{k/k} - \mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{h}_k) \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{v}_k, \tag{22}$$

$$E[\tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1}^T - \tilde{\mathbf{x}}_{k/k} \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1}^T - \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} \tilde{\mathbf{x}}_{k/k}^T + \tilde{\mathbf{x}}_{k/k} \tilde{\mathbf{x}}_{k/k}^T] \tag{23}$$

$$\begin{aligned} & = \mathbf{P}_{k/k-1} + \mathbf{P}_{k/k} - E[(\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{h}_k) \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1}^T \\ & \quad + \mathbf{K}_k \mathbf{v}_k \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1}^T + \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1}^T (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{h}_k)^T \\ & \quad + \tilde{\mathbf{x}}_{k/k-1} \mathbf{v}_k \mathbf{K}_k^T] \tag{24} \end{aligned}$$

$$= \mathbf{P}_{k/k-1} + \mathbf{P}_{k/k} - 2\mathbf{P}_{k/k} = \mathbf{P}_{k/k-1} - \mathbf{P}_{k/k}. \tag{25}$$

Eq. (20) can be described in another form as

$$E[(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k/k})(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k/k})^T] \tag{26}$$

$$= E[\mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{h}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})(\mathbf{z}_k - \mathbf{h}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})^T \mathbf{K}_k^T],$$

where

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k/k} = -\mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{h}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) = -\mathbf{K}_k \mathbf{v}_k \tag{27}$$

$$= E[\mathbf{K}_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T \mathbf{K}_k^T]. \tag{28}$$

■