

◆특집◆ 지능형 정밀 장비

소형 납 볼 제조장비의 제어기 개발

김 성 권\*

Development of Solder Sphere Manufacturing Equipment Controller

Sungkwun Kim\*

**Key Words** : Solder Sphere(납볼), BGA, Controller(제어기)

1. 서론

반도체가 메모리, 마이콤, 시스템 온 칩, 등 용량이 커지고 복잡화 됨에 따라 반도체 조립 기술도 계속 발전되어 가고 있다. 최근에는 핸드 폰, 노트북 컴퓨터, PDA 등과 같이 소형화 되고 있는 상품에는 BGA(Ball Grid Array) 칩의 사용이 급격히 증가되고 있다. BGA 칩을 PCB에 조립하기 위해서는 BGA용Ball이 칩과 PCB 사이에 필요하게 된다. 현재 주로 사용되고 있는 볼의 크기는 762 $\mu$ m이고, 점차 600 ~ 100 $\mu$ m로 소형화 되고 있다. BGA볼 제조 기술도 반도체에서 사용되는 볼의 요구에 따라 지속적인 연구가 필요하다

수작업으로 볼 생산하는 방법은 용융된 납의 용기(turndish) 내부에 있는 진동자의 전압과 주파수 조정하여, 용융된 납이 용기의 연구 노력이 계속되고 있다.

하부의 오리피스를 통하여 토출되어 냉각되면서 볼이 생성되고, 생성된 볼의 크기 측정은 비전 카메라로 연속 측정하고, 측정된 볼의 평균크기에 따라 작업

자가 진동자의 전압과 주파수를 조정하여 볼을 생산하고 있다. 자동제어기를 적용한 시스템은 측정된 볼의 평균 크기와 기준 볼의 크기를 비교하여 제어기에서 자동적으로 진동자의 전압과 주파수를 제어하는 시스템이다. 제어기는 볼을 측정하는 부분과 측정된 볼의 크기와 목표 크기와의 차이를 최소화 하기 위한 진동자의 주파수와 진폭을 조절하는 부분으로 구성된다. 측정하는 방법과 진동자를 제어하는 방법이 제어기의 연구 과제이다. 또한 볼의 크기가 적어 짐에 따라 볼의 공차가 작아지므로 볼 생산 수율 저하가 발생한다. 이에 따라 정밀한 볼의 생산하는 조건과 제어할 수 있는 방법의 본 연구에서는 볼 생산 장비 시스템을 분석하여 장비의 자동제어 방법을 제안하고, 장비 시스템을 제어하기 위한 제어기를 개발하여 생산 장비에 적용하려고 한다. 볼 크기 측정은 비전 측정 시스템의 측정 정도를 분석하여 측정 알고리즘을 보완하고 실험을 통해 측정 정밀도와 측정 속도를 높인다. 그리고 현재 수동으로 진동자에 공급하는 전원과 진동수를 조정하여 볼을 생산하고 있는 시스템을 수동과 자동으로 최적의 볼을 생산하기 위한 자동 제어 시스템을 개발하여 적용한다. 연구된 모든 내용을 실제 시스템에 적용하여 높은 수율을 유지하면서 생산 관리할 수 있는 방안을 제시한다.

2. 볼 제조 장비 시스템

\*한국산업기술대학교, 제어계측공학과

Tel: 031-496-8250, Fax: 031-496-8258

E-mail: skim@kpu.ac.kr

로봇틱스, 메카트로닉스 시스템, 제조장비 등의 연구

### 2.1. 볼 제조 장비 시스템 구성

볼 제조 시스템의 구성은 Fig.1과 같이 구성되어 있으며, 장비 시스템은 Fig. 2의 사진과 같다. 시스템의 상부에 있는 탱크(Turndish)는 230°C로 용융된 상태의 납을 탱크의 하부로 분출하면서 볼을 만드는 중요한 부분이다. 용해로(melting furnace)는 240°C로 용해된 납을 탱크(Turndish)에 공급한다. 이 탱크의 상부에는 탱크 내의 피스톤의 상하 운동을 발생 시키는 진동 발생 장치(Exciter)가 있다. 이 진동 발생 장치에 연결된 피스톤이 상하 진동을 하면서 탱크 하부에 있는 오리피스(Orifice)를 통해 용융된 납이 토출되어 볼이 된다. 탱크 외부에는 히터가 설치되어 탱크 내부의 온도가 230~235°C를 유지시켜 주고 있다. 탱크 하부의 오리피스(Orifice)크기와 피스톤의 진동수와 진동크기에 따라 볼의 크기가 정해진다. 이 탱크의 하부에는 생성

일부 모아 카메라를 통하여 볼의 크기와 진원도 등을 측정할 수 있는 구조로 되어 있다. 오일탱크 하부는 밸브를 설치하여 주기적으로 생산된 볼을 수거 할 수 있도록 되어 있다. 볼 제조 제어기는 측정된 볼의 영상과 크기는 모니터 화면에 표시 된다. 작업자는 모니터 화면상의 볼의 크기를 보면서 진동자에 공급되는 전압과 주파수를 조정하여 볼의 크기를 조정하면서 작업을 하는 수동식 제어 시스템이다. 카메라에서 측정된 볼의 크기를 기준이 되는 볼의 크기와 비교하여 진동 발생장치에 주파수와 진동 크기를 function generator를 거쳐 증폭장치(amplifier)를 통해 진동 발생 장치에 전달된다. 제어반(Control device)은 각 탱크 내부의 온도를 일정하게 유지시키기 위해 전기 히터의 온도 제어, 시스템 전체에 전원공급, 오일 탱크 내의 오일 공급 및 순환, 냉각수 공급등 시스템에 필요한 모든 제어를 하는 장치이다.

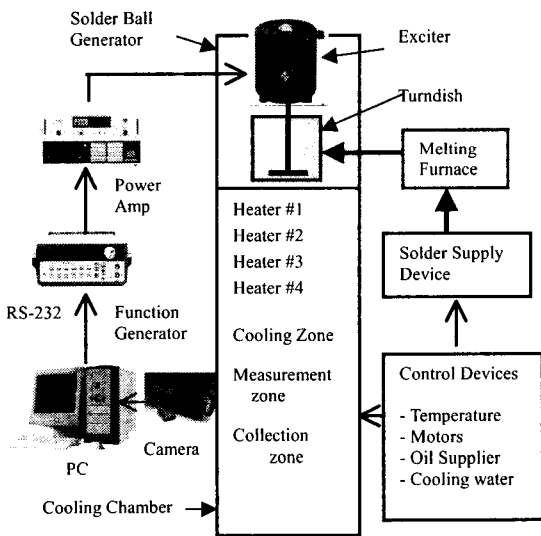


Fig. 1 Schematic Structure of a Solder Ball Generat

된 볼을 단계적으로 냉각해 주는 오일 탱크가 있다. 오일 탱크 외부에는 다단계의 히터를 설치하였다. 오일 탱크의 상부는 온도가 높고, 하부는 온도가 낮은 구조이다. 230°C 높은 온도의 납 볼이 점차적으로 냉각되면서 구형을 이루고 구의 표면의 상태가 결정되므로 중요한 부분이며 탱크의 하부에는 생산된 볼을

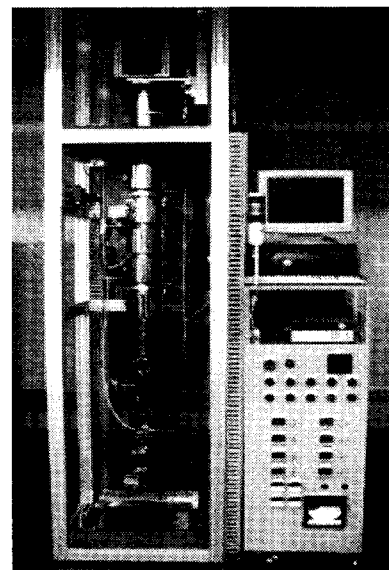


Fig. 2 Solder ball Manufacturing System

### 2.2 볼 생성 공정

볼 생성 장치의 구조는 Fig. 3과 같다. 탱크 (Turndish) 하부에 오리피스(Orifice)가 있고, 오리피스에서 4~6 mm 떨어진 상부에 위치한 피스톤이 상

하 진동하면서 탱크 내부에 용해된 납을 리피스로 통해 납을 분출시켜 납 볼을 생성하는 구조이다. 피스톤은 상부의 진동자(Exciter)에 고정되어 있다. 진동자는 외부에서 공급되는 주파수와 전압에 의해 진동을 한다. 탱크(Turndish)와 진동자 사이에는 N<sub>2</sub> 가스를 공급하여 용융된 납 표면의 산화를 최소화 하고, 또한 납의 열이 진동자에 전달을 차단하는 역할을 한다. 탱크로 납의 공급은 용해로에서 용해된 납이 공급되는 구조이다. 원하는 크기의 볼을 생산하기 위해서는 오리피스스의 크기, 진동자에 공급되는 전압과 진동폭에 의해 결정된다. 실제 생산은 과정에서 용융된 납속에서 움직이는 피스톤의 운동과 납 유동의 복합적인 유동, 특히 오리피스 주위의 모형과 오리피스 하부의 온도 등 해석 하기가 난해한 부분이 많아 실험을 통해 가능한 적용 범위를 찾아 그 범위 내에서 제어하고 있다. 볼 생산 숫자는 피스톤의 상하 운동 주파수와 같다

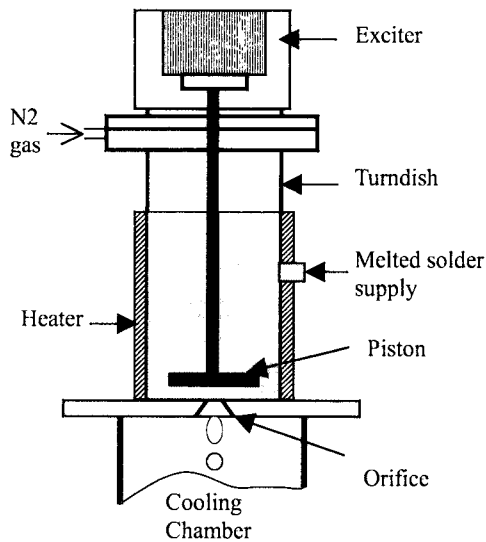


Fig. 3 Schematic Structure of a Solder Ball Generator

### 2.3 볼 측정 구조

납이 오리피스에서 분출된 후 낙하하여 오일에서 냉각되면서 구형이 생성된다. 볼은 오일 속에서 냉각되면서 탱크의 하부에서 볼의 일부가 샘플링 되어 카메라에서 측정된다. 생성된 볼이 가능한 빠른 시간 내에

볼 크기가 측정될 수 있도록 볼이 수거되어 측정 부위까지 이동 경로를 Fig4. 과 같은 구조로 구성되어 있다. 생성된 볼의 일부가 볼 수거부(Ball Collector)를 거쳐 볼이 미끄럼 판을 거쳐 볼이 하부로 내려간다. 볼 수거부는 상부에서 떨어지는 볼이 곧 바로 미끄럼 판으로 내려가고 기타 볼은 미끄럼 판 밖으로 떨어지는 구조이다. 카메라에서 미끄럼판에서 내려오는 볼을 측정한다. 미끄럼 판은 투명한 재질이며, 조명은 광파이버를 통해 미끄럼판 뒷면에서 조사된다. 볼의 측정은 1 초당 10~20 개로 초당 볼 생산 1000~2000개를 고려하면 샘플링 수는 약 100개중 1개이다

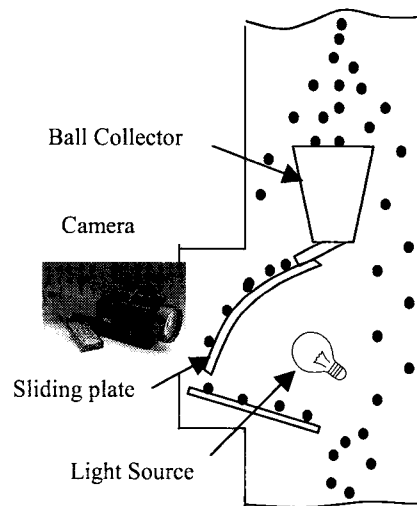


Fig. 4 Schematic Structure of Ball Measurement Device

### 3. 제어 시스템 설계

볼 생산 과정을 간단하게 요약하면, 첫째, 볼 생성되어 분출되어 나오는 줄기가 하부로 직선으로 떨어지도록 진동자에 공급되는 전압과 진동 주파수를 조정한다. 둘째, 생성된 볼의 직경을 카메라를 통해 측정하고, 측정된 볼의 크기가 목표 크기로 조정하기 위해서 진동자에 공급되는 주파수나 전압을 미세 조정한다. 볼 생성장치에서 생성된 볼이 냉각 챔버내의 오일속에서 하부로 떨어져서 볼 측정 위치에 도달하는 시간이 약 20초 걸린다. 그러므로 볼 측정은 볼 생성 후 약 20초 지연되어 측정되고, 측정 수량은 1 초당

10~20 개로 샘플링 수가 약 100개당 1개로 제어 방법에 전략이 필요하다.

### 3.1. 불 생성 모델링

불 제조 장치에서 생성되는 불의 직경 $db$ 는 식(1)과 같이 많은 인자들의 복합적인 영향에 의해 결정되어진다.

$$db = F(t, p, f, a, do, g, h, c) \quad (1)$$

여기서  $t$ 는 탱크내의 용융 납의 온도,  $p$ 는 피스톤의 모양, 직경, 자체 진동, 무게 등,  $f$ 는 피스톤의 상하 진동 주파수,  $a$ 는 피스톤의 상하 진동 폭,  $do$ 는 오리피스 직경, 두께, 모양,  $g$ 는 오리피스와 피스톤 머리와의 간격,  $h$ 는 용융된 납의 높이(탱크 내),  $c$ 는 탱크의 내경이다.

식(1)에서와 같이 생성되는 불의 크기를 결정하는 변수가 많아 이들 변수를 가능한 고정하여 단순화한 모델을 적용하여야 한다. 많은 변수들은 그동안 많은 실험을 거쳐 상수로 표시한 불 크기  $db$ 는 식(2)와 같이 단순화하여 나타낼 수 있다<sup>1</sup>.

$$db = 1.88 * dS \quad (2)$$

여기서  $dS$ 는 오리피스에서 분출되는 줄기의 직경이다.

또한  $dS$ 는 오리피스 직경 $do$ 와의 관계는 식(2)와 같다<sup>1</sup>.

$$dS = 0.93 * do \quad (3)$$

식(3)을 식(2) 대입하여 불의 직경과 오리피스 직경과의 관계는 식(4)와 같다.

$$db = 1.748do \quad (4)$$

그러나 식(4)의 상수항은 불 생성에 영향을 주는 많은 요소는 고정된 상태의 대표적인 값이다. 이 상수 값은 불의 크기에 따른 오리피스 크기를 정하는데 적용할 수 있는 값이다.

오리피스에 작용하는 압력과 주파수를 적용한 모델은 다음 식(5)으로 표현 된다<sup>2,3</sup>.

$$db = co(pt + gh)^{1/6} f^{-1/3} \quad (5)$$

여기서  $co$ 는 상수이고,  $pt$ 는 탱크 내의 압력, 는 용융된 납의 밀도,  $g$ 는 중력 가속도,  $h$ 는 탱크내의 용융된 납의 높이이다.  $co$ 는 식(1)에 있는 많은 요소들을 내포하고 있는 특정 시스템의 계수이다. 즉  $co$ 는 시스템에 따라 변화된다. 식(5)에서 생성되는 불의 크기는 피스톤 진동자 진동수의 1/3승에 반비례하고, 외피스에 가해지는 압력의 1/6승에 비례한다. 즉, 탱크내에 가하는 압력  $pt$ 와 탱크내의 용융된 납의 높이  $h$ 는 일정하게 유지하면서 주파수를 입력으로 제어할 수 있는 모델이다.

### 3.2. 제어 시스템 모델

불 생성 장치에서 불 크기에 영향을 줄 수 있는 변수를 고정하고, 특히 오리피스에 가해지는 압력( $pt + gh$ )은 탱크 내부의 압력과 용융된 납의 높이가 일정할 경우는 상수가 될 것이다. 그러나 진동자의 진폭에 의해 순간적으로 오리피스에 가해지는 압력의 변화가 일어날 수 있다. 즉, 진동자에 주파수가 높아지면 진폭이 적어지고, 또한 진동 장치에 가해지는 전압에 의해 진폭도 변화하게 된다. 그러므로 시스템 제어를 할 수 있는 요소는 진동자의 주파수와 진폭의 크기를 결정하는 전압이다. 따라서 제어 모델 식(5)을 변형하여 공급 전압  $v$  와 주파수  $f$  에 의해 불 크기  $db$  가 결정하는 제어 모델로 식(6)와 같이 표현할 수 있다.

$$db = co v^{1/6} f^{-1/3} \quad (6)$$

여기서  $co$  는 많은 요소가 포함된 상수이다. 이 상수를 파악하는 것은 어려운 문제이므로 실험을 통해서 입력과 출력의 관계로부터  $co$  를 추정하여 사용하는 것이 실질적으로 효과적이다.

### 3.3. 제어기 설계

식(6)에서 출력(Output)인 불 크기  $db$ 은 하나인데 입력(input)은 전압  $v$ 와 주파수  $f$  로 과잉(redundant)한 시스템이므로, 하나의 입력을 고정하고 다른 입력을 변화시키면서 결과를 측정하여 제어하려는 입력의 범위를 정하여 제어하는 제어기를 설계하였다. 즉, 진동자(Exciter)의 진폭은 부가 전압의 범위를 주로 3~5 V 에서 고정하고 주파수를 변화하면서 불의 크기의 측정 결과를 보면서 불이 정상적으로 생성되는 주파수의 범위를 측정하였다. 그 결과로부터 주파수의 변화에 따른 불 크기의 변화 관계를 추출하여 제어기에

적용하였다. 제어기에 적용되는 볼 측정 결과는 생성된 볼이 측정될 때 까지 시간 지연이 20초가 되고, 볼 측정 샘플링은 4초간 측정된 40~80개의 평균을 하나의 개체로 간주하였다. 따라서 적분 항의 영향을 고려하지 않고 PD(Proportional Derivative) 제어기를 채택하였다.

기준 볼의 크기를  $d_d$ , 측정된 볼의 크기를  $d_a$ 로 정의하면, 오차(error)는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$e = d_d - d_a \quad (7)$$

오차에 대한 PD제어기는 다음 식(8)과 같다.

$$k_p e + k_d \frac{de}{dt} = 0 \quad (8)$$

여기서  $k_p$ 는 비례(proportional) gain,  $k_d$ 는 미분 gain이다.

볼의 크기  $d_b$ 는 식 (6)에서 전압을 주어진 시간 내에서 동일하게 공급하면 식 (9)으로 전환할 수 있다. 주파수를 일정하게 두면 식 (10)과 같다.

$$d_b = C_1 f^{1/3} \quad (9)$$

$$d_b = C_2 v^{1/6} \quad (10)$$

여기서  $C_1$ 과  $C_2$ 은 상수이다.

식 (9)와 (10)은 다음식으로 정리할 수 있다.

$$f_d = C_{11} d_b^{-3} \quad (11)$$

$$v_d = C_{22} d_b^{1/6} \quad (12)$$

여기서  $C_{11}$ 과  $C_{22}$ 는 상수이다.

일반적으로 진동자에 공급되는 주파수 범위가 크므로 전압을 고정하고 주파수 제어를 한다. PD 제어기에서 공급되는 제어 주파수  $f_c$ 는 PD항과 기준 주파수  $f_d$ 로 다음식과 같이 구성하였다.

$$f_c = k_p e + k_d \dot{e} + f_d \quad (13)$$

본 연구에서는  $f_d$ 는 실험에서 얻은 값을 적용하였다. 또한 생성된 볼이 측정될 때까지의 시간이 약 20초

소요 됨으로 샘플링 시간을 최소한 20초 이상이 필요하다. Error를 구하기 위해서 측정된 값을 피드백 할 때 볼의 크기  $d_a$  마지막의 4초간 측정된 볼의 평균값을 사용하였다.

오리피스 크기의 변화, 온도의 변화, 용융된 납의 높이 변화 등에 의한 error를 보완하기 위해 항 F()를 추가하여 식 (13)을 보완한 식은 다음과 같다.

$$f_c = k_p e + k_d \dot{e} + F() + f_d \quad (14)$$

## 4 실험 결과

### 4.1. 제어기 구성

설계된 제어 알고리즘을 적용하기 위한 제어기는 Fig.5와 같이 구성하였다. 주 제어기로 PC를 사용하고, Machine vision board는 Matrox(모델 Meteor2-MC/4) 보드를 PC에 interface(32 bits PCI bus)하여 사용하였다. 제어 알고리즘은 PC에서 비주얼 C++로 프로그램하여 RS 232 포트를 통해 Function generator의 주파수와 진폭(전압크기)를 제어하였다. Function generator에서 발생된 신호는 Power Amp를 통해 진동자에 전달된다. 볼의 측정은 초당 60 Frame의 영상을 취득할 수 있는 카메라와 확대 렌즈를 적용하였다. 측정된 볼은 PC에서 영상을 처리하여 ball 크기의 목표값과 비교하여 제어할 값 즉, 주파수와 전압을 PC의 RS232 port를 통해 function generator로 신호를 내보내는 시스템이다. 카메라에서 측정된 볼은 모니터를 통해 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 Fig.6과 같이 구성하여 볼 생산 모니터링도 하고, 제어기에서 볼 생성을 제어 하는데 사용할 수 있는 데이터를 피드백 하도록 하였다. 화면에는 생산개수, 양품개수, 평균직경, 최대직경, 최소직경, 직경표준편차, 검사시간, 평균 진원도, 최대 진원도, 최소 진원도 등이 실시간으로 표시 된다. 제어기 관련 환경 설정은 주파수 범위, 전압범위, 이득 설정, 볼의 기준 공차, 측정 값과 실제 측정된 값과의 차이 보상과 그 외의 제어 관련 조정 기능이 있다.

### 4.2. 시험 결과

설계된 볼 생성장치에 오리피스 크기의 종류에 따라 전압을 고정하고 주파수를 변화하여 볼이 정상적으로 생성되는 주파수 범위와 그 주파수에서 볼의 크기를 실험하였다. 실험 결과 요약은 Table 1 과 같

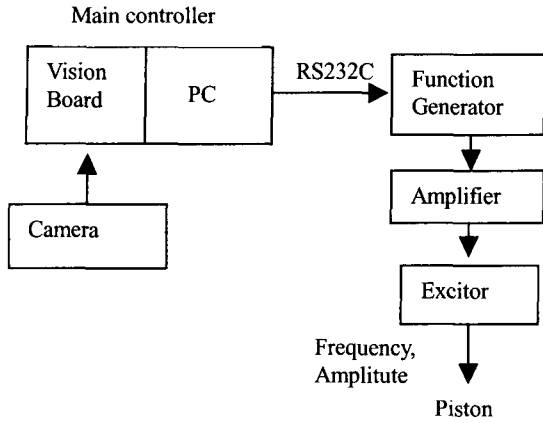


Fig. 5 Structure of the Controller for a Solder Ball Generator

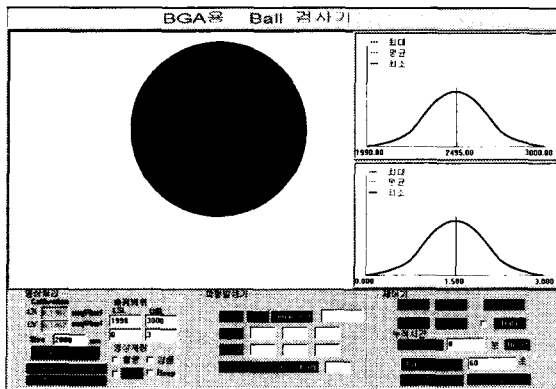


Fig. 6 Typical image of a ball and Monitor Display of Controller

다. 오리피스 크기에 따른 볼의 크기는 약  $d_b = 13 \sim 1.7d_o$  로 식 (2)의 값보다 다소 작은 크기의 볼이 생성되고 있다. 이것은 오리피스에 걸리는 압력 (3.7 PSI) 이 낮고, 또한 오리피스 판의 두께의 영향에 기인한 것으로 판단된다. 주파수 변화에 따른 볼 크기의 변화는 주파수가 약 5 ~ 10Hz 감소하면 Ball 크기는 1 $\mu$ m 커지는 것을 보여 준다. Ball의 크기는 오리피스의 크기와 두께에 영향을 받는 것으로 추정되고 있다. 오리피스 가공 상태가 균일하지 않아 Ball 생성에 영향을 주고 있는 것으로 판단되어 오리피스 가공을 균일하게 하여야 한다.

Table 1. Ball size and Frequency Relationship

Orifice size ( $\mu$ m)	volt	Frequency (Hz)	Ball size ( $\mu$ m)	Reference (Hz/ $\mu$ m)
250	3.2	1175 ~ 1757	450 ~ 355	6
300	3.5	986 ~ 2000	533 ~ 427	10
350	3.15	1000 ~ 1580	590 ~ 482	5
400	4.1	1266 ~ 1519	585 ~ 537	5

Table 2는 본 연구에서 제안된 제어 알고리즘을 적용한 자동제어기를 사용한 실험 생산한 결과로 수요가 많은 762 $\mu$ m 볼의 수율 및 각종 품질 지표이다. 적용한 알고리즘의 이득은 볼의 크기에 변화를 보상하기 위해 주파수를 자동 조정하는 방법을 채택하였다. 이득은 table 1의 참고치 Hz/ $\mu$ m관계를 기준으로 이득을 적용하였다. 그리고 볼 생성 장치에서 생산되는 볼의 크기는 점진적으로 축소되는 경향이 나타난다. 그러므로 시간이 지나면서 주파수가 적어지므로 어느 한계 이하로 주파수가 떨어지면 고전압을 0.1초 동안 적용하여 피스톤의 이동거리를 늘려서 오리피스 주위에 있는 파티클을 제거할 수 있는 제어방법을 적용하였다. 볼은 760m  $\pm$  1m 기준으로 선별하고, 타원형 볼, 두 볼이 붙어 있는 볼 등을 선별하는 여러 공정을 거친 결과이다. 최종 수율은 70% 이상으로 안정적으로 생산되고 있다. 실제 기준 공차가  $\pm$  25m를 고려한다면 수율은 85% 이상이라고 예상된다

Table 3은 볼의 진원도와 볼 크기의 편차와 관련된 표로서 진원도가 높고, C<sub>p</sub>K 값도 높아 생산성이 높은 것을 보여 주고 있다. 이 측정값은 제어 알고리즘이 완벽하게 구현되지 않은 상태에서 실험한 중간 결과이기 때문에 전체 알고리즘과 오리피스, Melt 높이 등 장비의 조건이 최적의 상태로 설정된다면 수율 80%, c<sub>p</sub>k 1.8 이상의 생산 능력을 갖는 장비가 될 수 있을 것이다.

### 5. 결론

BGA 볼 생산 장비를 완전 자동으로 제어할 수 있

Table 2. Yield of the Ball Produced by Automatic Control

classificati	Sieving	Twin Ball	Elliptic Ball	Over size Ball	Under size Ball	Total
Input(QTY)	352	340	332	328	319	352
Output(QTY)	340	332	328	319	248	248
Yield(%)	96.6	97.6	98.8	97.3	77.7	70.5

Table 3. Mean Roundness and CPK of Balls

	Before Sorting	After Sorting
Mean(mm)	0.7608	0.7607
Standard Deviation	0.0051	0.0042
C <sub>p</sub>	1.66	2.02
C <sub>pk</sub>	1.58	1.91
Mean Roundness	0.0075	0.0076

\* C<sub>p</sub> : Process Capability; C<sub>pk</sub>: C<sub>p</sub> index

는 제어기를 개발, 적용하여 수율과 생산성을 크게 향상 시켰다. 작업자에 의해 수동으로 2분~ 10분 단위로 볼 생성 장치에 공급되는 전압과, 주파수를 조정하던 장비를 컴퓨터에서 제어하는 완전 자동 제어기이다.

자동 제어기에 필요한 비전측정기술, 측정된 볼의 크기를 이용하여 진동자의 진동 주파수와 전압을 자동으로 조정하여 크기를 제어하는 제어 방법이 제시되었다. 본 연구에서 개발한 제어기를 적용한 결과는 수율이 수동시 30 ~ 40%에서 70% 이상으로 향상되었다. 실험에 적용한 장비는 실험실 수준에서 제작된 장비에 자동제어기를 적용하여 수작업에서 오는 문제점을 해결하는데 중점을 주었다. 즉, 제어기의 제어 성능 중심으로 연구되어 소형볼(300 μm이하)급의 생산 실험에 한계가 있었다.

볼 생산 주파수와 볼 크기의 관계는 주파수가 5 ~ 10Hz 감소하면 볼의 크기는 약 1 μm 커지고 있어 주파수 조정으로 볼 크기를 조정하는 제어를 할 수 있음을 보여 주었다.

차후 연구는 소형 볼 생산을 위한 볼 생성 장치의 구조를 보완한 시스템에서 100 ~ 300 급의 볼 생산에 적용 실험이 필요하다.

### 후 기

본 연구는 MKE 전자의 지원으로 수행한 연구의 일부분입니다. 본 연구를 지원해 주신 김 일 태 사장

님과 본 과제에 필요한 현장의 자료와 시험에 공동 참여한 연구소장 이진 상무님, 안형기 부장에게 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. F. Aldinger, E. Linck, and N. Claussen, "A melt-drop technique for the production of high-purity metal powder"
2. Pyonwon Yim, Jung-Hoon Chun, teiichi Ando, and Vinod K. Sikka, "Production and Characterization of Mono-Sized Sn-Pb Alloy Balls", International Powder Metallurgy, vol. 32. No. 2, pp. 155-164, 1996
3. Jung-Hoon Chun, Juan Carlos Rocha, Jae-Hyuk Oh "Synthesis and Analysis of a Digital Droplet-size Control System" MIT report