IE Interfaces
Vol. 24, No. 3, pp. 258-266, September 2011.

프린터 카트리지 충전생산라인의 생산성향상 사례연구

양주만[1] · 양문희[2†]

[1]Toner&OPC R&D Division, 신도리코 / [2]단국대학교 산업공학과

A Case Study of Productivity Improvement in Filling a Print Cartridge with Toner

Joo Man Yang[1] · Moon Hee Yang[2]

[1]Toner&OPC R&D Division, SINDO Co., Ltd., Asan, 336-852
[2]Department of Industrial Engineering, Dankook University, Cheonan, 330-714

In this paper, we deal with a problem improving the productivity of a discrete production line for filling a printer cartridge with toner. We develop a new technology for controlling the weight of toner which must be filled in a cartridge and reform the current line based on our new control technology to result in more than 35% improvement of productivity as well as the control accuracy.
In detail, first, we find a bottleneck process, the toner-filling process which gives the current production cycle times. Second, we divide the processing time of the bottleneck into several work elements and find the rotation time of an AC servomotor to be further reduced. Third, in order to reduce the rotation time, we develop a mathematical control-time model for determining the rotation time. Finally, we reform the current line partially as required by the change of the new control method.

Keyword: productivity, print cartridge, toner

1. 서 론

토너(Toner)는 입자의 직경이 약 6~15㎛인 검은색의 분말체이며, 프린터 카트리지(Printer cartridge)는 토너를 담는 일종의 용기로 프린터 종류별로 모양이 다양하다(<그림 1>). 충전(充塡) 생산라인은 일정한 중량의 토너를 카트리지에 주입하기 위하여 필요한 일련의 작업들로 구성되며, 충전제어방식에 따라 공정의 흐름이 결정된다. 일정한 중량의 토너를 카트리지에 주입할 때, 토너는 부유특성(토너를 흔들면 공기를 함유하여 기체처럼 부유하는 특성)과 침하특성(차분하게 놓아두면 흙덩어리처럼 단단해지는 특성, 응집된 분체의 chip을 압편이라 함)이 있어 비중이 변하기 때문에, 중량제어에 어려움이 있으며, 또한 원가측면에서 고속으로 충전하여야 하므로 중량제어의 난이도를 배가시킨다.

토너 중량제어방식은 펄스제어방식, 칭량충전방식 등 다양하며 본 연구의 대상이 된 S사의 경우 2가지 제어방식을 활용한 PCM(Pulse Count Method)-2 제어방식을 사용하고 있었다. 그러나 기존의 충전생산라인으로 증가하는 프린터 카트리지의 수요량을 만족시킬 수가 없었으며, 생산라인 당 240개/시간을 생산하는 기존의 생산속도보다 30% 높은 생산라인을 구축하여야 할 상황이었으며, 신제품인 70g, 110g, 195g의 불량률을 낮추기 위하여, 최고경영진과 연구팀에 의하여 결정된 전략은 새로운 생산라인을 구축하는 생산전략보다 기존 생산라인을 개선하는 전략으로 결정되었다. 즉 생산속도의 증대, 균형손실(Balancing Loss)의 감소를 달성하는 충전생산라인의 구축이었다.

충전생산라인의 불량품은 충전된 중량이 규격충전량(제품

†연락저자 : 양문희 교수, 330-714 충남 천안시 안서동 산29번지 단국대학교 산업공학과,
Fax : 041-559-7869, E-mail : myfriend@dankook.ac.kr
투고일(2010년 10월 11일), 심사일(1차 : 2010년 11월 17일, 2차 : 2011년 06월 09일), 게재확정일(2011년 07월 27일).

사양에 표시된 중량임)보다 적거나 카트리지 끝단에 있는 토너주입구를 막는 캡(Cap)의 상태가 불량인 제품이다. 불량률 최소화문제는 일반적으로 기업체의 중요한 문제이지만 충전생산라인의 경우 충전된 중량이 규격충전량보다 적은 경우 라인 제어기에서 설정된 중량(이를 설정충전량이라 함)을 약간 높게 설정하거나, 티스푼으로 재충전작업을 한다. 캡의 상태가 불량인 경우 거의 발생하지 않지만 발생할 경우 수작업으로 다시 잘 닫아주면 되므로 사실상의 불량률관리는 의미가 없었다.

본고의 목표는 기존 충전생산라인의 생산속도가 낮은 근본적인 원인을 분석한 후, 개선된 생산라인을 구축하는 과정에서 중요한 부분을 체계적으로 서술하고, 단위시간당 양품 생산성의 향상 정도를 추정하여 기존 라인생산성과 비교분석하는 데에 있다. 본고의 연구목표를 달성하기 위하여 도움이 되는 논문이나 보고서는 전무한 실정이었으며, 분체공학 교재나 충전작업방법에 대한 기술 보고서(Kang(1991, 2004), Bae(2000), Samryunsungung(1983) 등)는 다수 있었으나 실질적 도움이 되는 논문이나 보고서는 찾을 수 없었다.

제 2장에서는 재래식 충전생산라인의 공정흐름과 생산속도를 분석하고, 그 원인을 분석한 후 생산속도 향상을 위하여 해결하여야 할 문제점과 개선방향을 정립하며, 제 3장에서는 개선된 충전생산라인의 공정흐름과 개념설계의 중요한 부분을 서술하며, 제 4장에서는 개선된 충전생산라인의 생산성을 추정한 후, 기존 라인과 비교하여 분석한다.

1,000배율의 토너	카트리지	카트리지 주입구	고정구

그림 1. 토너, 카트리지, 고정구의 모양

2. 재래식 충전라인의 현황분석

2.1 재래식 충전생산라인의 공정흐름 및 생산성 분석

<그림 2>에서 제시 된 바, 재래식 충전생산라인은 용기투입작업, 1차 충전, 1차 중량검사, 2차 충전, 2차 중량검사, 1차 세척작업, 캡핑작업(Capping), 2차 세척작업, 캡검사, 코딩작업(Coding)으로 구성되어 있다.

용기투입작업은 1인 수작업으로 대차에 실려 온 빈 카트리지를 고정구(<그림 1>)에 올려놓은 후 컨베이어에 투입하는 작업이다. 투입된 빈 카트리지는 1호 충전기(Auger Filler)로 이송되며, 설정충전량의 90%를 빈 카트리지에 주입하는 1차 충전작업이 자동적으로 수행된다. 1차 충전작업이 완료된 카트리지는 컨베이어를 타고 전자저울로 이송되며, 전자저울을 이용하여 빈 카트리지와 고정구의 중량과 1차 충전량의 합을 자동측정하며 측정된 중량정보는 라인 제어기에 전달된다. 1차 중량검사가 종료된 카트리지는 컨베이어를 타고 2호 충전기로 이송되며 2호 충전기는 동일한 방법으로 충전 미달량(약 10% 수준)을 2차로 카트리지에 주입한다. 2차 검사작업은 1, 2차 충전기에서 충전된 중량을 최종적으로 계측하는 작업이며, 계측결과 합격품은 주라인 컨베이어로 이송되며, 불합격품(규격충전량에 미달하는 제품)은 보조라인 컨베이어로 이송된다. 불합격품은 저장된 후 배치(Batch)로 처리되며, 작은 스푼으로 토너를 주입한 후 1차 세척작업을 위해 컨베이어에 올려진다.

합격품과 재충전된 중간제품은 컨베이어를 타고 1차 세척, 캡핑, 2차 세척, 캡검사, 코딩작업을 거친다. 캡핑작업은 카트리지의 주입구를 캡으로 닫는 작업이며, 세척작업은 카트리지의 주입구에 약간씩 묻어 있는 토너분말을 압축공기로 세척하는 작업이며, 캡핑 전후에 수행한다. 캡검사작업은 캡의 상태를 검사하는 작업으로 불합격품은 보조라인 컨베이어로 이송되며, 합격품은 주라인으로 이송된다. 불합격품은 저장된 후

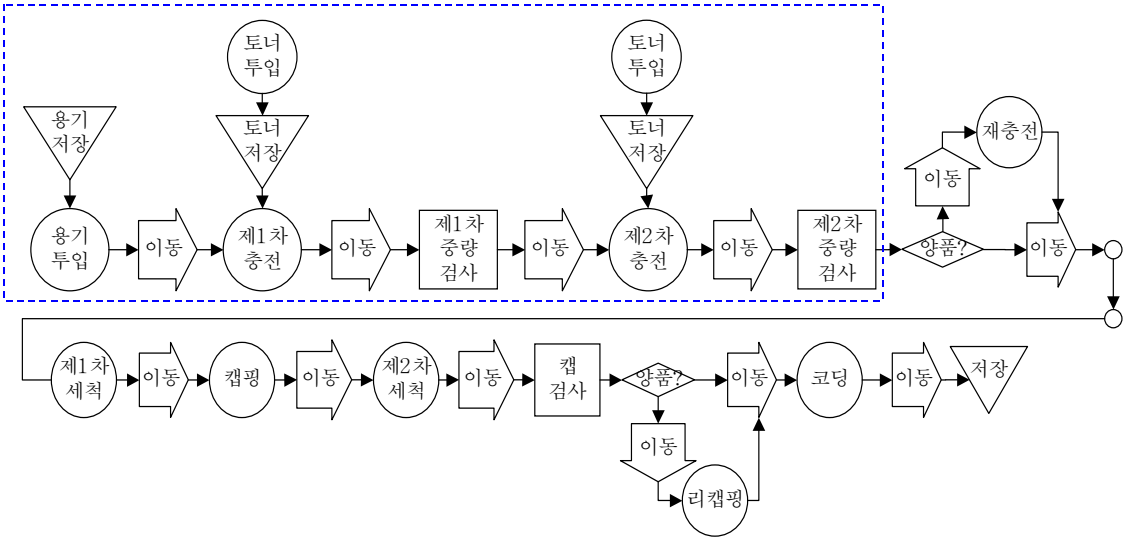

그림 2. 재래식 충전생산라인의 공정흐름도

배치로 처리되며, 캡을 조정한 후 코딩작업을 위해 주라인 컨베이어에 올려진다. 코딩작업은 제조연월일을 인쇄하는 작업이다.

85g과 215g의 카트리지를 생산하는 재래식 충전생산라인의 공정별 표준작업시간은 <표 1>에 제시된 바, 1차 충전작업은 애로공정이며, 1, 2차 충전작업을 제외한 다른 작업시간은 규격충전량에 관계없이 동일한 것을 알 수 있다. 참고로 재충전작업과 리캡핑작업은 생산주기와 거의 관련이 없다고 판단되어 제외하였다.

85g과 215g에 대한 라인의 생산속도는 각각 358개/시간, 187개/시간이었고, 라인의 균형손실은 각각 48.5%, 68.0%로 낮게 추정되었다. 균형손실의 정의는 Whang(1999)를 참조한다. 85g과 215g의 생산수량비율은 약 3 : 7로 평균생산속도는 약 238개/시간, 평균 균형손실은 62%로 매우 낮게 추정되었다. 이론적으로 판단한다면 문제점이 많은 생산라인이었으나 대부분의 수작업을 자동화하였으며, 과거의 수요량을 충분히 공급하였다는 데에 의의를 둘 수 있을 것이다.

표 1. 재래식 충전생산라인의 공정별 표준작업시간 현황 및 분석

공정	표준작업시간(초/개)		비고
	85g 기준	215g 기준	
용기투입	5.0	5.0	수작업, 1인 기준
1차 충전	10.1	19.3	자동식, 애로공정
1차 중량검사	4.0	4.0	자동식
2차 충전	5.1	6.6	자동식
2차 중량검사	4.0	4.0	자동식
1차 세척	5.0	5.0	자동식
캡핑	6.0	6.0	자동식
2차 세척	5.0	5.0	자동식
캡핑검사	4.0	4.0	자동식
코딩	4.0	4.0	자동식
대차적재	5.0	5.0	수작업, 1인 기준
소계	57.1	67.8	초
생산주기	10.1	19.3	초/개
라인생산속도	356	187	개/시간
균형손실	48.5	68.0	%

2.2 재래식 충전생산라인의 문제점 분석 및 개선방향의 정립

2.2.1 1, 2차 충전작업시간의 분석

애로공정에 해당하는 1차 충전작업이 1차 개선대상이 되었다. 215g의 경우 1차 및 2차 충전작업시간은 19.3초, 6.6초로 추정되었으며, 요소작업분석 결과 충전작업시간은 충전 전 작업시간, 순수충전시간, 충전 후 작업시간으로 분류할 수 있었다(<표 2> 참조).

충전 전 작업시간은 카트리지의 위치제어시간(Cartridge positioning time, 충전기 앞의 버퍼 컨베이어에 대기 중인 카트리지가 이동하기 시작하는 시점에서 카트리지의 토너 주입구와 노즐(Nozzle)을 일치시키기 시점까지 소요되는 시간), 노즐하강시간(Nozzle elevating-down time, 토너를 주입하기 위하여 노즐이 아래로 움직이기 시작하는 시점에서 주입구의 특정 위치까지 내려가서 정지하는 시점까지 소요되는 시간), 셔터열림시간(Shutter opening time, 노즐이 정지된 시점에서 셔터가 개방되는 시점까지 소요되는 시간)의 합으로 구성되어 있었다. 노즐과 셔터의 위치는 <그림 3>을 참조한다. 위치제어시간은 1.5초, 노즐하강시간은 0.2초, 셔터열림시간은 0.3초로 추정되었으며, 충전 전 작업시간은 충전량에 관계없이 2.0초로 추정되었다.

충전 후 작업시간은 셔터닫힘시간(Shutter closing time, 순수충전작업이 종료되는 시점에서 셔터가 닫히는 시점까지 소요되는 시간), 노즐상승시간(Nozzle elevating-up time, 셔터가 닫히는 시점에서 노즐이 상승하여 주입구 위의 특정 지점까지 올라가서 정지하는 시점까지 소요되는 시간)의 합으로 구성되어 있었다. 셔터닫힘시간은 1.1초, 노즐상승시간은 1.0초로 추정되었으며, 충전 후 작업시간은 충전량에 관계없이 2.1초로 추정되었다. 한편 knocker 작업시간(토너의 유동성이 좋지 않는 경우 토너는 노즐 안쪽에 묻어있는 경우가 발생하므로 토너를 망치로 쳐서 떨어뜨리는 작업이 필요하며 이 때 소요되는 시간)은 가변적으로 순수충전시간과 충전 후 작업시간 동안에 동시에 발생하므로 생산속도에는 영향을 미치지 않아서 제외하였다.

충전량과 거의 선형관계에 있는 순수충전시간은 셔터가 열린 시점에서 셔터가 닫히는 시점까지의 작업시간으로, 85g인 경우 1, 2차 순수충전시간은 각각 6.0초, 1.0초로, 215g인 경우 1, 2차 순수충전시간은 각각 15.2초, 2.6초로 추정되었다. 연구팀의 토론결과, 충전 전후의 작업시간 4.1초를 줄이는 전략은 경제적인 측면에서 타당성이 없는 것으로 결론을 맺었으며, 기존의 1, 2차 충전비율 90% : 10%에서 50% : 50%로 변경한다면 순수충전시간을 줄일 수 있을 것으로 판단되었다. 따라서 순수충전시간을 추정할 수 있는 이론적 모형을 개발하고 1, 2차 충전비율이 90% : 10%로 설정된 원인을 밝히는 방향으로 연구가 진행되도록 결정하였다.

표 2. 1, 2차 충전작업시간 분석표

구 분	요소작업	요소작업 표준시간(초/개)			
		85g 기준		215g 기준	
		1차	2차	1차	2차
충전 전 작업시간	위치제어시간	1.5	1.5	1.5	1.5
	노즐하강시간	0.2	0.2	0.2	0.2
	셔터열림시간	0.3	0.3	0.3	0.3
순수충전시간		6.0	1.0	15.2	2.6
충전 후 작업시간	셔터닫힘시간	1.1	1.1	1.1	1.1
	노즐상승시간	1.0	1.0	1.0	1.0
충전작업시간		10.1	5.1	19.3	6.7

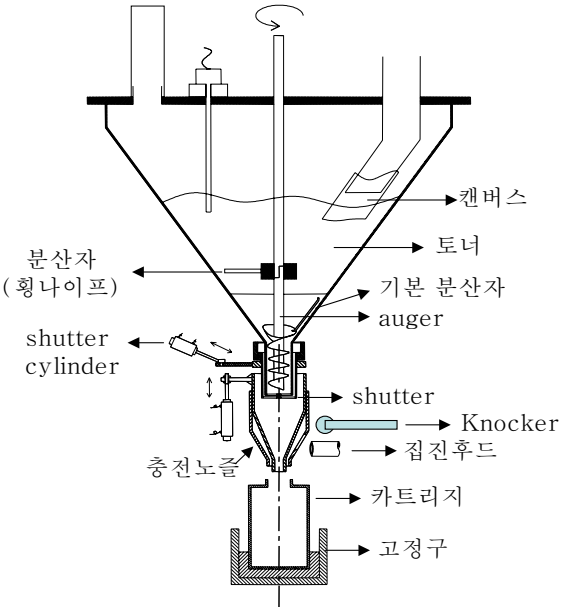

그림 3. 오거식 충전장치의 상세구조

2.2.2 순수충전시간의 이론적 모형과 추정

오거가 일회전할 때 카트리지에 투입되는 중량을 M_{rev}(단위 : g/rev), 설정충전량을 M_{set}(단위 : g), M_{set}을 충전하기 위하여 필요한 오거의 회전수를 $N_{rev}(M_{set})$이라고 하면, M_{set}은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M_{set} = M_{rev}\, N_{rev}(M_{set}) \tag{1}$$

식 (1)에서 제시된 바, $N_{rev}(M_{set})$은 AC 서보모터로 제어가 가능한 입력변수이나 M_{rev}은 토너의 밀도, 오거가 일회전 할 경우 주입되는 토너의 부피, 공장의 온습도, 충전기의 상태 등에 따라 변하므로 충전기술은 M_{rev}의 추정치를 정확하게 추정할 수 있는 기술에 달려있다. 참고로 AC 서보모터는 모터 제어기에서 발생되는 펄스모양과 주파수로 속도제어와 위치제어를 할 수 있어 $N_{rev}(M_{set})$은 M_{set}의 함수로 가정할 수 있다.

AC 서보모터의 축과 오거 사이에 기어장치가 없이 연결되어 있으므로 모터의 회전속도는 바로 오거의 회전속도가 된다. 오거의 속도는 <그림 4>에서 제시된 바, 가속구간, 등속구간, 감속구간으로 구분할 수 있으며, 오거의 최대등속속도를 S_{max}(단위 : rev/sec), 가속시간을 T_a(단위 : 초, 특별한 언급이 없는 한 본고의 시간단위는 초로 함), 등속시간을 T_{cs}, 감속시간을 T_d로 정의하고, $T_f(M_{set}) = T_a + T_{cs} + T_d$이라고 하면, 오거의 속도(f(t))를 다음과 같이 일차선형 함수형태로 가정할 수 있다.

$$f(t) = \begin{cases} a_1 t & 0 \le t \le T_a \\ S_{max} & T_a \le t \le T_a + T_{cs} \\ -a_2 t + \dfrac{S_{max}\, T_f(M_{set})}{T_d} & T_a + T_{cs} \le t \le T_f(M_{set}) \end{cases} \tag{2}$$

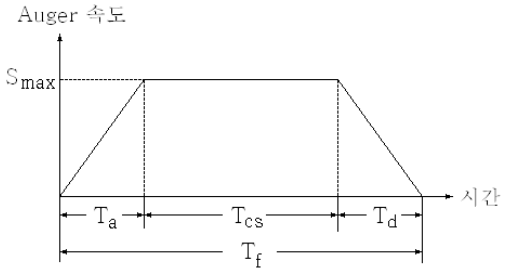

그림 4. 오거의 속도변화

$S_{max} = a_1 T_a = a_2 T_d$이므로, $T_f(M_{set})$초 동안 $N_{rev}(M_{set})$과 M_{set}은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} N_{rev}(M_{set}) &= \int_0^{T_a} f(t)dt + \int_{T_a}^{T_a+T_{cs}} f(t)dt \\ &\quad + \int_{T_a+T_{cs}}^{T_a+T_{cs}+T_d} f(t)dt \\ &= \frac{a_1 T_a^2}{2} + S_{max} T_{cs} + \frac{a_2 T_d^2}{2} \\ &= S_{max}\left\{\frac{1}{2}(T_a + T_d) + T_{cs}\right\} \\ &= S_{max}\left\{T_f(M_{set}) - \frac{1}{2}(T_a + T_d)\right\} \end{aligned} \tag{3}$$

$$M_{set} = M_{rev}\, S_{max}\left\{T_f(M_{set}) - \frac{1}{2}(T_a + T_d)\right\} \tag{4}$$

따라서 식 (4)로부터 $T_f(M_{set})$는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_f(M_{set}) = \frac{M_{set}}{M_{rev}\, S_{max}} + \frac{1}{2}(T_a + T_d) \tag{5}$$

재래식 충전제어 방식에서 사용된 AC 서보모터와 모터 제어기는 구형으로서 $T_a = T_d = 0.02$초, 1차 충전기의 S_{max}는 150rpm, 2차 충전기의 S_{max}는 100rpm이므로, <표 2>에 제시된 순수충전시간의 값은 식 (5)를 이용하여 근사적으로 해석이 될 수 있었다.

2.2.3 문제점 분석

전개의 편의를 위하여 카트리지가 비어 있을 때의 중량을 M_{cart}(단위 : g), 고정구의 중량을 M_{fix}(단위 : g), 1, 2차에 충전된 량을 각각 M_1(단위 : g), M_2(단위 : g)로 정의하자. 재래식 제어방식은$(M_{cart} + M_{fix})$의 값은 일정한 상수값 c로 가정하였고(<그림 2>에서 제시된 바, $(M_{cart} + M_{fix})$를 계측하는 공정은 없음), M_{rev}값이 충전할 때 마다 변동한다고 가정하였으며, M_{rev}값을 추정하기 위하여 다음 식을 이용하였다.

$$M_{rev} = \frac{(M_{cart} + M_{fix} + M_1) - c}{N_{rev}(M_1)}$$

따라서 1차 중량검사에서 $(M_{cart}+M_{fix}+M_1)$값을 계측할 필요성이 있었으며, c값은 라인 제어기에 저장하였고, $N_{rev}(M_1)$ 값에 해당하는 변수를 라인 제어기에서 설정하였다. M_{rev}값의 신뢰성은 $N_{rev}(M_1)$값이 커질수록 높으므로 그 신뢰성을 확보하기 위하여 충전비율을 50% : 50%가 아닌 90% : 10%로 설정하였던 것이며, 신뢰성 제고에 따라 길어진 1차 순수충전시간은 AC 서보모터를 최대속도로 설정하여 가능한 줄였다.

1차 중량검사를 통하여 M_1값을 $(M_{cart}+M_{fix}+M_1-c)$로 추정하였고, 저장된 M_{rev}값을 이용하여 2차 충전에 필요한 $N_{rev}(M_2)$는 $(M_{set}-M_1)/M_{rev}$으로 추정하였으며, M_2는 적은 값이므로 AC 서보모터의 낮은 속도로 설정하여도 2차 순수충전시간은 애로공정이 되지 않았다. 즉 M_{rev}추정값의 신뢰성 제고를 위하여 1차에서 설정충전량의 90%를 충전하고 2차 충전 시 잔량인 M_2를 천천히 충전하는 제어방식이었다.

따라서 기존의 제어방식인 "PCM-2"제어방식을 탈피하기 위하여, 즉 90% : 10%의 기존 충전비율을 50 : 50의 충전비율로 변경하기 위하여, 첫째로 $N_{rev}(M_1)$과 $N_{rev}(M_2)$은 AC 서보모터로 완벽하게 제어가 가능하므로, 정확한 M_{rev}값의 추정작업이 선행되어야 할 것으로 판단되었다. 둘째로, $(M_{cart}+M_{fix})$의 값은 거의 일정하지만 약간씩 차이가 있으므로 $(M_{cart}+M_{fix})$을 계측하는 공정을 1차 충전작업 전에 삽입하고, 재래식 충전생산라인의 1, 2차 충전공정 사이에 있는 중량계측공정을 라인에서 제거하여야 할 것이며, 삽입과 제거되는 공정으로 인하여 발생할 수 있는 제반 공정흐름을 재조정하여야 할 것으로 판단되었으며, 공정흐름의 변경에 따른 라인 제어기의 제어 프로그램을 변경하여야 할 것으로 판단되었다. 한편 개선된 제어방식을 "PCM-3" 제어방식으로 명명하였다.

3. 개선된 충전생산라인의 개념설계와 제작

3.1 개선된 충전생산라인의 공정흐름과 개념설계

<그림 5>에서 제시된 바, 개선된 충전생산라인에 용기검사 작업(충전이 완료된 카트리지가 순환 컨베이어를 타고 재투입되는 경우가 있으며, 이러한 카트리지를 실린더형 센서를 이용하여 검출하는 자동식 작업으로 만약 발견된다면 Stopper 장치에 의하여 라인의 일부가 정지됨)이 추가 되었고, $(M_{cart}+M_{fix})$를 계측하는 1차 중량검사공정과 $(M_{cart}+M_{fix}+M_1+M_2)$를 계측하고 불합격품을 배출하는 2차 중량검사공정을 추가로 삽입하였다. 1차 충전 후 $(M_{cart}+M_{fix}+M_1)$을 측정하여 라인 제어기에 중량정보를 보낼 수도 있으나 M_{rev}값이 매우 정확하다는 가정 하에 1, 2차 충전작업 사이에 있었던 중량검사공정을 제외하였으며, 나머지 공정은 재래식 공정과 동일하게 설계하였다. <그림 5>에서 변경된 공정들을 점선으로 표시된 직사각형 내에 표시하였다.

3.2 하드웨어, 소프트웨어의 개념설계와 제작

3.2.1 오거의 설계와 제작

오거가 일회전할 때 카트리지에 투입되는 부피를 $V_{rev}(cm^3)$, 토너의 밀도를 $D(g/cm^3)$라 하면 $M_{rev} = DV_{rev}$가 된다. 따라서 제어가 상대적으로 쉬운 V_{rev}를 일정하게 유지할 수 있는 장치의 설계가 관건이 되었으며, V_{rev}에 직접적으로 영향을 미치는 오거의 설계가 우선적으로 연구대상이 되었다. 여러 가지 크기의 오거를 실험하여야 하지만 제한된 실험비용으로 ∅28, ∅38, ∅48(오거의 직경은 <그림 6> 참조)인 세 종류가 제안

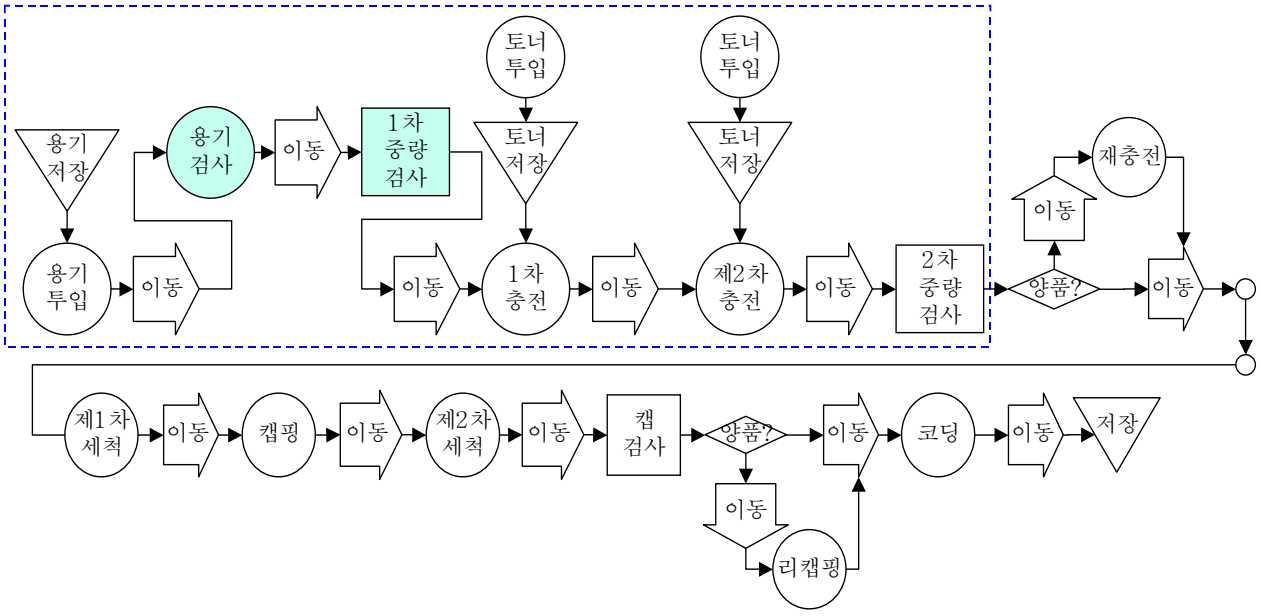

그림 5. 개선된 충전생산라인의 공정 흐름도

되었으며, 실험결과 ⌀28 오거는 충전시간이 길어져서 폐기하였고, ⌀48 오거는 V_{rev} 값이 너무 커서 Overflow 현상(충전 시 D가 0.5g/cm^3 이하가 되면 카트리지 내에 이미 주입된 토너의 부유현상으로 규격충전량을 채울 수 없는 현상임. 충전 시 D를 토너의 고유밀도인 0.5g/cm^{3}로 또는 일정하게 유지하는 기술이 필요함)으로 양품허용오차 범위를 만족시키지 못하여 폐기하였고, ⌀38 오거는 적정하다고 판단하여 채택하였다.

그러나 ⌀38 오거는 간헐적으로 규격충전량을 만족시키지 않았다. 그 원인은 토너의 밀도에 있었으며, 오거의 회전속도, 모양 등도 밀도에 영향을 미쳤다. 수많은 시행착오 끝에 ⌀38 오거에 기본 분산자와 횡나이프 분산자(<그림 3>)를 부착하고, 메인호퍼에서 원추형 호퍼로 연결된 관 밑에 캔버스(천으로 만든 원통형 모양, <그림 3> 참조)를 부착한 결과, 토너의 밀도를 일정하게 유지 할 수 있었으며, M_{rev}는 5.16g/rev으로 추정되었다.

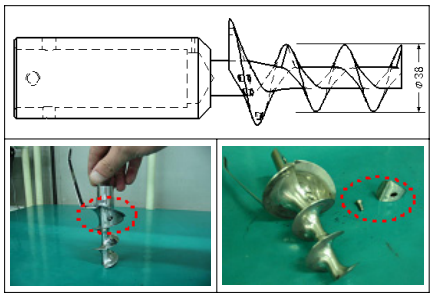

그림 6. 개선된 오거의 모양

3.2.2 모터 및 라인 제어기의 입력변수 설정방법과 제작

M_{set}으로 설정된 후 2차 충전까지 주입된 토너 중 k번째 토너의 중량을 X_k(k = 1, 2, ⋯, n), 규격충전량을 M_{spec}이라고 하면, $X_k < M_{spec}$이면 불합격품이 된다. $X_k < M_{spec}$인 경우 재충전작업이 발생하므로 충전제어 시 M_{spec}보다 약간 높은 값인 M_{set}으로 설정하여야 한다. 따라서 $M_{set} = (1+r)M_{spec}$인 양수 r이 존재한다.

평균을 $\overline{X}(=\sum_{k=1}^{n} X_k/n)$, 분산을 $S_X^2(=\sum_{k=1}^{n}(X_k-\overline{X})^2/(n-1))$이라고 하자. X_k는 정규분포인 $N(\overline{X}, S_X^2)$을 따른다고 가정하며, $\overline{X}$와 S_X^2을 상수로 가정하고, $Z=(X_k-\overline{X})/S_X$로 정의하면 불량률(q)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$q = \mathrm{Prob}\{X_k < M_{spec}\} = \mathrm{Prob}\left\{\frac{X_k-\overline{X}}{S_X} < \frac{M_{spec}-\overline{X}}{S_X}\right\}$$
$$= \mathrm{Prob}\left\{Z < \frac{M_{spec}-\overline{X}}{S_X}\right\} \quad (6)$$

현장에서 공장의 온습도, 비산손실현상(토너의 부유현상으로 토너의 일부가 대기 중으로 비산되는 현상), 침하현상, 충전기의 노후화 정도 등에 의하여 $\overline{X}$는 M_{set}과 항상 일치하지 않으므로 $\overline{X} = M_{set}+\delta$인 δ가 존재한다. 중량제어의 실질적 어려움은 δ에 있으며 δ는 확률변수이나 본 제어에서는 상수로 가정하였다. Z는 표준정규분포를 따르므로, 식 (6)은 다음과 같이 전개된다.

$$q = \mathrm{Prob}\left\{Z < \frac{M_{spec}-M_{set}-\delta}{S_X}\right\}$$
$$= \mathrm{Prob}\left\{Z < \frac{-rM_{spec}-\delta}{S_X}\right\} = \Phi\left(\frac{-rM_{spec}-\delta}{S_X}\right) \quad (7)$$

여기서 $\Phi(\cdot)$은 표준정규분포의 누적함수이다. 식 (7)에서 경영정책변수로 $q = q^*$가 주어지면 $r^* = -\{S_X\Phi^{-1}(q^*)+\delta\}/M_{spec}$가 되며, M_{set}은 다음과 같이 전개된다.

$$M_{set} = (1+r^*)M_{spec}$$
$$= \left[1-\frac{1}{M_{spec}}\{S_X\Phi^{-1}(q^*)+\delta\}\right]M_{spec} \quad (8)$$

따라서 라인을 제어하기 위하여 (q^*, S_X^2, δ)를 추정하여 입력하여야 한다. S사의 경우 초기생산단계에서 $\delta = 0$를 가정하여 M_{spec} = 215g인 경우(1.2%, S_X^2 = 0.7744, 0)으로, M_{spec} = 85g인 경우, (7.3%, S_X^2 = 0.3033, 0)으로 설정하였으나 후에 재조정하였다.

M_{set}값이 결정되면 식 (1)에 의하여 오거의 회전수, 즉 $M_{rev}(M_{set})$가 결정된다. 오거 1회전 당 AC 서보모터 제어기에서 8,000펄스가 필요하므로 M_{set} 값에 해당하는 펄스수는 8,000 $M_{rev}(M_{set})$가 된다. 라인 제어기에서는 펄스수 제어를 위하여 COUNT 변수를 설정하였으며, 8,000펄스가 COUNT값 100에 대응하도록 PLC 프로그램 알고리즘을 설계하였다. 따라서 COUNT 값은 $100N_{rev}(M_{set})$으로 설정하여야 한다. 예를 들어, 만약 $N_{rev}(M)$ = 13.4 rev이라면, 즉 M = 69.144g이면, COUNT = 1,340으로 설정되어야 한다.

<그림 7>에서 제시된 바, 라인 제어는 PLC를 이용하였으며, 라인 제어기의 LCD 화면에 제어입력변수로 설정충전량(입력단위는 g), COUNT1(1호 충전기 서보모터 제어기에 보내는 값), COUNT2(2호 충전기 서보모터 제어기에 보내는 값), 1호 충전기의 서보모터 속도 및 과부하율, 2호 충전기의 서보모터속도 및 과부하율, 2차 중량검사에서 불합격품을 배출하기 위한 충전량 UL(Upper limit)과 충전량 LL(Low limit) 등의 변수에 입력하도록 설계하였고, 컨베이어 제어와 Stopper, 노즐, 셔터, 센서 등을 제어하는 기타 입력변수들은 PLC 프로그램(라인 제어용)에 삽입하였다. 1, 2호 충전기 서보모터의 속도 및 과부하율은 150 rpm, 20%로 설정하였다(150 rpm 이상이면 부유현상이 발생하였음). 상기 입력변수에서 COUNT1과 COUNT2 변수를 도입한 이유는 δ이며, 현장에서 상황에 따라 제어를 손쉽게 변경이 가능하도록 설계하였기 때문이다.

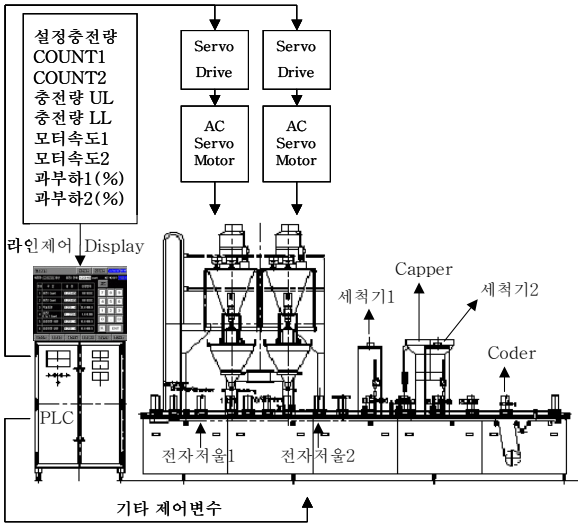

그림 7. 라인 제어기, 모터 제어기, 서보모터 및 1, 2호 충전기의 연결도

3.2.3 초기생산단계의 실험결과

M_{spec} = 215g, M_{set} = 217g, r = 0.9302%, n = 30개로 실험한 결과표는 <표 3>과 <그림 8>에 제시되었다. $\overline{M}$ = 217.11g, S_X^2 = 0.7744로 산출되어, 회사가 제품 하나당 0.11g 정도 손해를 보는 것으로 판단되었다. 30개 표본 중 최대 충전량은 218.6g으로 M_{spec}보다 1.6g 초과하였으며, 최소 충전량은 215.0g으로 M_{spec}보다 미달된 표본은 없었으므로 q = 0이 되었다. M_{spec} = 85g, M_{set} = 85.8g, r = 0.9412%, n = 30개로 실험한 결과표는 <표 3>과 <그림 9>에 제시되었다. $\overline{M}$ = 86.05g, S_M^2 = 0.3033으로 산출되어, 회사가 제품 하나당 0.25g 정도 손해를 보는 것으로 판단되었다. 30개 표본 중 최대 충전량은 87.0g으로 M_{spec}보다 2.0g 초과하였으며, 최소 충전량은 85.2g으로 M_{spec}보다 미달된 표본은 없었으므로 q = 0이 되었다. <그림 8>과 <그림 9>에서 제시된 바, 신규라인은 양품 허용오차범위(규격충전량 ±1%)를 만족하였다.

표 3. 규격충전량에 따른 실험값

번호	토너 충전량		번호	토너 충전량		번호	토너 충전량	
	217g	85.8g		217g	85.8g		217g	85.8g
1	216.8	86.2	11	217.2	86.6	21	217.8	86.4
2	216.2	86.4	12	217.4	85.6	22	215.0	86.2
3	215.6	86.0	13	217.6	85.2	23	217.2	85.6
4	217.6	85.8	14	218.6	85.8	24	216.0	85.6
5	216.8	85.6	15	218.0	85.2	25	218.2	85.6
6	217.4	86.0	16	217.0	85.8	26	216.8	87.0
7	216.8	85.2	17	218.2	86.6	27	218.0	86.6
8	215.8	85.2	18	217.0	86.0	28	217.8	86.4
9	216.0	85.8	19	216.4	87.0	29	218.4	86.2
10	217.2	86.8	20	216.8	87.0	30	217.6	86.2

추정된 분산이 변하지 않는다는 가정 하에 식 (8)에서 $\delta = 0$을 가정하여 r값에 따른 q값을 <표 4>에 요약하였다. 예를 들면, 85g의 경우 r값을 2.0%로 설정할 경우 회사의 재료비는 증가하나 q는 1011 PPM으로 낮아질 것으로 판단되었으며, 215g의 경우 r값을 1.5%로 설정할 경우 q는 124PPM으로 낮아질 것으로 판단되었다. 따라서 85g의 경우 r = 1.5%(q = 1.0299% 예상)로, 215g의 경우 r = 1%(q = 0.7280% 예상)로 초기 생산 시 설정하였다.

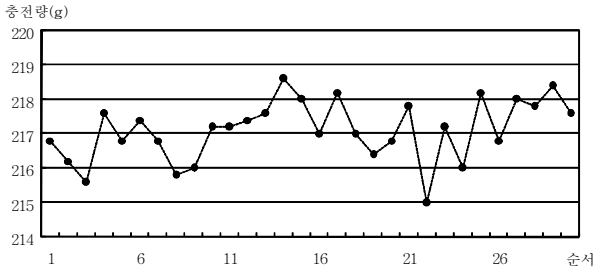

그림 8. 설정충전량 217g 기준 30개 표본의 순번에 따른 충전량 변화

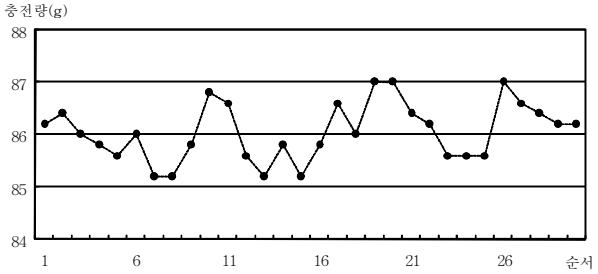

그림 9. 설정충전량 85.8g 기준 30개 표본의 순번에 따른 충전량 변화

표 4. r값에 따른 q의 변화

r(%)	85g	215g	r(%)	85g	215g
0.900	8.2393%	1.3946%	1.700	0.4346%	0.0016%
1.000	6.1354%	0.7280%	1.800	0.2732%	0.0005%
1.100	4.4767%	0.3600%	1.900	0.1680%	0.0002%
1.200	3.1998%	0.1685%	2.000	0.1011%	0.0001%
1.300	2.2398%	0.0747%	2.100	0.0595%	0.0000%
1.400	1.5351%	0.0313%	2.200	0.0342%	0.0000%
1.500	1.0299%	0.0124%	2.300	0.0193%	0.0000%
1.600	0.6763%	0.0046%	2.400	0.0106%	0.0000%

4. 개선된 PCM-3 충전생산라인의 생산성 추정 및 비교분석

1, 2호 충전기의 서보모터속도는 150rpm, T_a와 T_d는 각각

0.01sec, 0.01sec이므로 식 (1)과 식 (5)로부터 $M_{set}= 5.16N_{rev}$ $N_{rev}(M_{set})$으로 추정되었으며, $T_f(M_{set})= 0.0775M_{set}+0.01$로 추정되었다. 생산속도와 균형손실은 신제품을 포함하여 <표 5>에 요약하였으며, 향상정도는 <표 6>에 요약하였다. <표 6>에서 제시된 바, 생산속도는 85g의 경우 35.9%, 215g의 경우 53.8%가 향상될 것으로 추정되었고, 균형손실은 85g의 경우 16.7%, 215g의 경우 15.2%가 감소될 것으로 추정되었다.

표 5. 개선된 충전생산라인의 공정별 표준작업시간 추정 및 분석

공정	표준작업시간(초/개)					비고
	70g	85g	110g	195g	215g	
용기투입	5	5	5	5	5	수작업, 1인 기준
용기중량검사	4	4	4	4	4	자동식
1차 중량검사	4	4	4	4	4	자동식
제1차 충전	6.85	7.44	8.42	11.74	12.53	자동식
제2차 충전	6.85	7.44	8.42	11.74	12.53	자동식
2차 중량검사	4	4	4	4	4	자동식
1차 세척	5	5	5	5	5	자동식
캡핑	6	6	6	6	6	자동식
2차 세척	5	5	5	5	5	자동식
캡핑검사	4	4	4	4	4	자동식
코딩	4	4	4	4	4	자동식
대차적재	5	5	5	5	5	수작업, 1인 기준
계	59.7	60.9	62.8	69.5	71.1	-
생산주기	6.85	7.44	8.42	11.74	12.53	초/개
생산속도	525.5	484.0	427.7	306.5	287.4	개/시간
균형손실	27.45	31.8	37.8	50.7	52.7	%

표 6. 충전생산라인의 비교분석표

구 분		생산주기 (초/개)	생산속도 (개/시간)	균형손실
85g	재래식 방법	10.11	356.1	48.5
	개선된 방법	7.44	484.0	31.8
	비교	-	35.9% 향상	16.7% 감소
215g	재래식 방법	19.27	186.8	68.0
	개선된 방법	12.53	287.4	52.7
	비교	-	53.8% 향상	15.2% 감소

5. 결 론

본고에서는 1, 2차 충전비율이 90% : 10%인 재래식 충전생산라인의 생산속도가 낮은 근본 원인이 순수충전시간에 있었다는 사실을 밝혔으며, 순수충전시간과 관련된 중량제어의 이론적 모형을 구축하였고, 현장에서 필요한 제어수준에 맞도록 순수충전시간을 단순한 공식으로 도출하였다. 즉 토너의 중량제어 방식으로, 오거의 일회전에 주입되는 중량은 일정하다는 가정하에 설정충전량에 해당하는 회전수를 곱하는 PCM-3 제어방식을 제시하였다.

재래식 충전생산라인이 PCM-2 제어방식에서 PCM-3 제어방식으로 변경됨으로서 초래된 오거의 설계 및 제작과정과 라인의 설계 및 제작과정에서 핵심적인 이론을 제시하였다. 또한 순수충전시간의 공식을 이용하여 개선된 충전생산라인의 생산성을 추정하여 제시하였고 재래식 충전생산라인과 비교하였다. 비교결과, 생산속도는 85g의 경우 35.9%가, 215g의 경우 53.8%가 향상될 것으로 예측되었고, 균형손실은 85g의 경우 16.7%, 215g의 경우 15.2%가 감소될 것으로 예측되었다. 2005년 현재, 현장에서 집계되는 결과는 본고에서 제시된 결과와 0.5% 전후의 차이가 발생하고 있으나 무시할 수 있는 수준이었다. 약간의 차이가 발생한 원인은 공장의 온습도로 인한 비산손실율로 분석되고 있으며 향후 정밀한 이론모형을 전개 한 후에 조정되어야 할 것이다.

본고에서 제시한 충전생산라인은 라인밸런싱 측면에서 본다면 아직까지 개선의 여지가 충분히 있으며, 3대의 충전기를 일렬로 배치한다면 투자비용은 증가하겠지만 균형손실은 분명히 감소할 것이고 생산속도는 증가할 것이 자명하다. 그러나 보통의 중소기업체들이 그러하듯이, 제한된 비용으로 현재의 수요량을 충족할 수 있으면 성공적으로 평가하는 경향이 있다. 중량제어를 위한 충전생산라인은 제어방식의 발달에 따라 지속적으로 진화할 것이며, 새로운 제어방식은 향후 지속적으로 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

Bae, S. H. *et al*. (2000), Vacuum Engineering, Publisher of Hankyung.

Kang, S. H. (1991), Powder-Collecting Engineering, Heejung-dang.

Kang, S. H. (2004), Theory and Practice of Powder-Collecting Technology, Yeungnam University Publication.

Samryunsungung (1983), Particle Engineering, Press of Daily Engineering.

Whang, H. (1999), Work Management, Youngchi Publisher.

양 주 만
단국대학교 생산기술학과 석사
신도리코 Toner&OPC R&D Division 차석 연구원
관심분야 : 생산기술응용

양 문 희
서울대학교 자원공학 학사
서울대학교 산업공학 석사
Georgia Institute of Technology 산업공학박사
현재 : 단국대 산업공학과 교수
관심분야 : OR응용 및 공장자동화