

사출성형의 불량유형과 공정변수 간의 상관관계를 이용한 EVOP 절차[†]

변재현¹ · 김용균²

¹경상대학교 산업시스템공학부 · 생산기술연구소 / ²경상대학교 산업시스템공학과

An EVOP Procedure Using the Relationship Between Defect Types and Process Variables of Injection Molding

Jai-Hyun Byun · Yongyun Kim

Evolutionary Operation(EVOP) is a method for continuously monitoring and improving a full-scale process to get an optimal operating condition while production is under way. To avoid appreciable changes in the product quality characteristics only small changes are made in the levels of the process variables. One of the reasons why EVOP is not so popular is that people in charge of the EVOP is blamed when the EVOP does not produce good results. We present an EVOP procedure when prior information of the relationship between defect types and process variables is known. The procedure is illustrated with an injection molding case study.

1. 서 론

실험에 의해 새로운 제품 또는 기존의 제품 및 공정의 최적조건을 찾아가는 반응표면 분석법은 연구개발 단계에서 일반적으로 파일럿 플랜트(pilot plant)나 실험실에서 수행된다. 하지만 실험실 또는 파일럿 플랜트 단계에서 구한 최적공정조건은 실제 양산(full-scale manufacturing)에서는 최적이지 않을 가능성이 크다. 즉, 양산에서 이용하는 생산장비, 원재료, 환경 등의 변화에 의하여 파일럿 플랜트에서 구한 최적공정조건이 변하게 되는 경우가 많다. 국내 중소기업의 경우 예측하지 못한 상태에서 주문을 받고 일정에 쫓기다 보면 과거의 경험에 의하여 공정조건을 정해버리거나 단기간 체계적이지 못한 간이실험을 통하여 공정조건을 대략 설정한 다음 바로 양산에 들어가 수시로 공정개선을 하는 경우가 흔하다. Box [4]는 양산단계에

서 공정을 계속하여 감시하고 향상하여 궁극적으로는 최적조건을 찾아가거나, 파일럿 플랜트에서 구한 최적공정조건을 양산에 맞게 조정해 나가는 방법으로서 EVOP 절차를 제안하였다.

EVOP는 주로 생산공정의 담당자들을 중심으로 수행된다. EVOP이 현실적으로 유용한 품질개선 방법임에도 불구하고 널리 보급되지 못한 주원인은, 실제 생산현장에서 공정조건을 변화시키며 EVOP를 수행할 때, 만일 변화의 결과 제품품질이 저하되는 경우가 발생하면 EVOP 수행자에게 책임문제가 뒤따르기 때문이다[2]. 많은 경우에 공학적 지식이나 과거의 경험을 바탕으로 제품의 불량유형과 공정변수(공정인자)간의 상관관계가 어느 정도 알려져 있다. 예를 들어, 플라스틱 사출성형시 흑점불량을 줄이기 위해서는 사출속도는 높이고 실린더 온도는 낮추어야 하는 경우이다. 이런 때에는 흑점불량을 줄

[†]본 연구는 경상대학교 '97년 산·학·연 공동기술개발 지역 컨소시엄 연구결과임. 본 연구의 일부는 대한산업공학회 / 한국경영과학회 '98 춘계공동학술대회에서 발표되었음.

이기 위해 가능한 영역(feasible region)까지 온도는 낮추고 속도는 높여 가면서 탐사를 하는 것이 효율적이다. 본 연구는 불량품(defective item)을 결정하는 여러 개의 불량유형(defect types)이 있고 각각의 불량유형과 공정변수 간의 상관관계가 사전에 어느 정도 알려져 있을 때, 제품품질을 전반적으로 향상시키기 위한 EVOP의 적용절차를 제시한다. 실제 사출성형시 품질향상사례를 통하여 개발된 절차를 예시한다.

2. 일반적 EVOP 절차

EVOP은 실제생산을 수행하면서 공정개선을 도모하는 방법이기 때문에, 생산제품의 성능특성값들이 급격하게 변하지 않도록 공정변수들의 수준값을 조금씩 바꾸어 가며 최적조건을 탐사한다. EVOP이 이용되는 상황은 일반적인 실험계획법이 이용되는 실험실이나 파일럿 플랜트의 경우와는 크게 다르다. 공정변수의 수준값을 약간씩 움직이기 때문에 S/N비(signal to noise ratio)가 낮게 유지된다. 그러므로 공정변수의 효과를 파악하기 위해서는 공정변수의 수준조합에서 수차에 걸쳐 생산을 수행하여 특성값의 반복관측값을 얻어야 한다. 그리고 EVOP은 생산을 수행해 가면서 공정을 개선하고자 하기 때문

에 여러 개의 공정인자를 동시에 고려하기보다는 보통 제품의 성능특성과 관련이 있다고 알려져 있는 2개 또는 3개의 인자를 고려한다. 가장 일반적으로 이용되는 방법은 <그림 1>에 나타난 바와 같이 2^2 (또는 2^3) 요인배치와 중심점을 이용하는 것이다. 이러한 배치를 이용하여 공정인자들이 특성값에 미치는 영향을 파악하고 더 나은 방향으로 계속 탐사해 나가는 것이다[2], [5], [6], [7].

Spendley 등[9]은 보다 간단하게 공정을 개선하는 방법으로 삼각형(2개의 공정변수를 이용하는 경우) 또는 사면체(3개의 공정변수를 이용하는 경우)의 꼭지점을 공정조건으로 하는 Simplex EVOP을 제안하였다. <그림 2>에서 보는 바와 같이 Simplex EVOP을 이용하면, 적은 수의 공정운영조건을 고려함으로써 비교적 간단하고 신속하게 최적조건을 찾을 수 있다. 하지만 공정변수들의 교호작용효과를 명확하게 밝히기 힘들기 때문에 공정행태를 모형화하는 데에는 적합하지 않다[5].

EVOP을 이용하여 최적공정조건을 찾기 위해서는 장기간의 노력과 인내를 필요로 하나, 정상적으로 생산을 수행해 가면서 탐사를 하기 때문에 비용과 분석결과의 재현성 면에서는 일반적 실험계획법보다 훨씬 유용하다.

3. 상관관계를 이용한 EVOP

EVOP이 비용 및 재현성 면에서 일반적 실험계획법에 비하여 확실하게 유리함에도 불구하고 실제 생산현장에서 자주 적용되지 못하는 이유가 있다. EVOP 수행시 생산현장의 여러 가지 변동요인(잡음)이 공정변수의 수준변화에 따른 효과를 압도하는 경우에는 공정개선방향을 감지할 수 없거나 최악의 경우 어떤 단계에서는 개악의 방향으로 이끌 수가 있고 결과적으로 EVOP 수행자에게 책임을 물을 경우가 있기 때문이다. 이러한

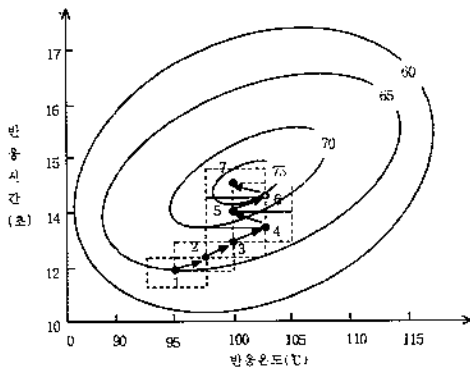


그림 1. 2^2 요인배치를 이용한 EVOP.

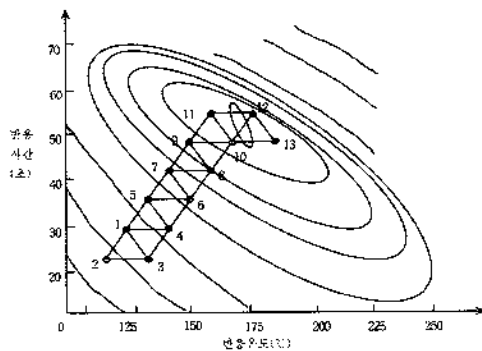


그림 2. Simplex EVOP.

표 1. 불량유형과 공정변수 간의 관계

불량 유형	공정 변수					
	X_1	X_2	...	X_i	...	X_n
D_1	↓			↑		↑
D_2		↑	↑			
⋮						
D_i			↓		↑	
⋮						
D_n		↓		↓		

위험성을 최소화하며 공정개선을 할 수 있는 방법을 모색해야 EVOP의 적용이 보다 용이해 진다. 많은 경우에 공학적 지식이나 과거의 경험을 바탕으로 제품의 불량유형과 공정변수(공정인자) 간의 상관관계가 알려져 있다. 즉, 어떤 구간에서 특정한 불량유형에 영향을 미치는 공정변수들이 파악되며, 각 공정변수의 증감이 불량률에 어떠한 영향을 주는지에 대한 개략적인 사전정보를 갖고 있을 때가 있다. 이 때에는 보다 단순하고 신속하게 최적공정조건을 파악할 수 있다.

<표 1>과 같이 제품의 불량에 영향을 미치는 공정변수가 잠재적으로 X_1, X_2, \dots, X_j 로 알려져 있고 그들의 증감이 불량유형 D_1, D_2, \dots, D_m 의 빈도에 주는 영향을 어느 정도 파악하고 있다고 하자. 각 불량유형별로 2개(또는 3개)의 공정변수를 조금씩 변화시켜 가면서 불량을 줄여나가고, 어느 공정변수가 최적조건이나 흥미영역(region of interest)의 경계(boundary)에 가면 그 공정변수의 값을 고정시킨다. 그리고 영향을 주는 다른 공정변수의 값을 조금씩 변화시켜 나가면서 궁극적으로는 해당 불량유형에 관하여 공정변수들의 최적조건을 찾아 나간다. 그런데 <표 1>처럼 여러 개의 불량유형이 있을 경우에는 각 공정변수의 증감이 불량유형에 미치는 영향이 종종 서로 상충하게 된다. <표 1>의 경우를 보면, 불량유형 D_2 를 개선하기 위해서는 X_1 의 값을 증가시켜야 하지만, D_m 을 개선하기 위해서는 그 값을 감소시켜야 한다. 이러한 상충현상을 해결하기

위하여 본 연구에서는 <그림 3>과 같은 최적공정조건 탐색 절차를 제시한다. <그림 3>의 탐색절차에서 불량유형의 중요성은 과거의 경험이나 시제품 개발단계에서 불량을 야기하는 정도에 따라 부여한다.

4. 적용사례

품질특성과 공정변수들 간의 상관관계가 어느 정도 파악이 되는 대표적인 제조공정이 사출성형이다([1], [8]). 사출성형 플라스틱 제품의 품질을 결정하는 요소는 크게 재료, 금형, 공정으로 구분된다. 플라스틱제품에 요구되는 성질은 용도에 따라 다르므로 사출성형 후에 반드시 검사되어야 한다. 플라스틱의 성질에는 대표적으로 유동성, 수축률, 흡습성, 휘발성 등이 있다. 플라스틱의 흐름정도를 나타내는 유동성은 그 용융온도에서 점도로 결정되며, 점도가 높은 플라스틱일수록 고압을 필요로 한다. 이와 같은 플라스틱의 성질들은 금형설계단계에서 반드시 고려되어야 불량원인을 사전에 어느 정도 제거할 수 있다. 금형은 본체, 케비티부, 런너 및 게이트부, 성형품의 돌출장치, 온도조절부, 성형기의 취부부 등으로 구성되는데 이들 각 부분이 제 기능을 발휘해야 한다. 특히, 용융수지가 직접 이동하는 런너와 게이트부는 그 형상과 굵기에 따라 용융수지의 유동성에 크게 영향을 미치므로 설계시 주의가 필요로 한다. 사출성형에서 나타나는 문제점, 원인 및 그 대응책에 관한 자세한 사항은 Rosato와 Rosato[8]을 참조하기 바란다. 본 연구는 사출성형의 공정개선에 중점을 둔다. 본 연구사례의 사출성형품의 품질은 주로 3가지 공정변수, 즉 실린더온도, 사출압력, 사출속도의 영향을 받는다. 이들 공정변수는 제품의 불량유형에 따라 적절하게 조절되어야 하는데, 하나의 불량유형을 낮추기 위한 공정변수의 조건이 다른 불량유형을 높일 수도 있으므로 보다 체계적으로 공정변수의 최적조건을 찾아야 한다. 일반적으로 공정변수들의 최적조건은 생산제품에 따라서 달라지므로, 기존의 제품생산에서 구한 최적공정조건은 새로운 제품에 대해서는 더 이상 적용되지 않는다. 그러므로 새로운 주문을 받아 생산을 할 때, 생산초기에 불량을 최소로 나타내게 하는 최적공정조건을 구해야 한다.

사출성형을 하는 회사는 대부분 다른 기업의 하청을 받아 플라스틱부품을 생산하는 중소기업인데, 이러한 회사는 수 대의 사출성형기를 갖고 있어서 고객으로부터 주문을 받으면 주어진 기간내에 플라스틱 사출성형품을 만들어 납품하게 된다. 고객이 요구하는 기간내에 사출품을 성공적으로 납품하기 위해서는, 일반적인 실험계획법을 수행할 수가 없고 생산을 계속 수행해 가면서 불량률을 줄여 나가는 방법을 이용하여야

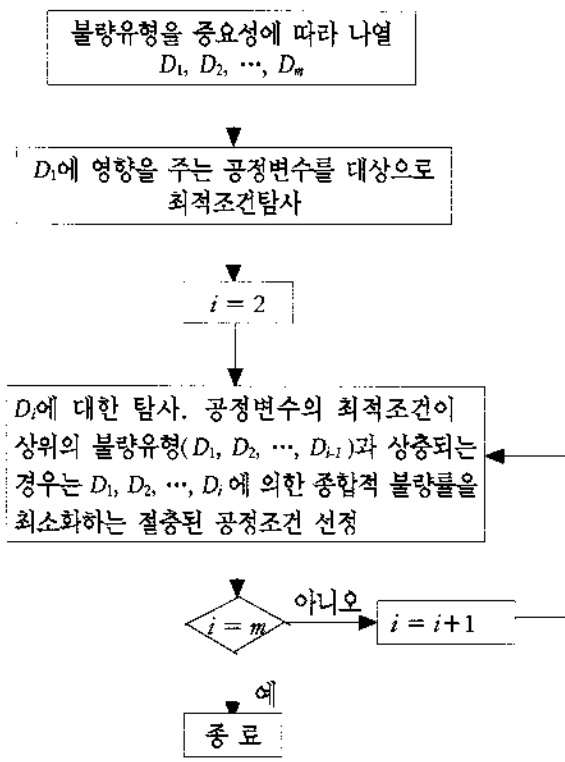


그림 3. 최적공정조건 탐색절차.

한다. 사출성형의 공정 담당자들은 일반적으로 불량유형에 따라서 영향을 미치는 공정변수를 미리 파악할 수 있고, 불량을 줄이기 위하여 각 공정변수의 값을 높여야 하는지 또는 낮추어야 하는지에 대하여 사전지식을 갖고 있다. 이러한 사전지식이 있음에도 불구하고 일반적 EVOP을 채택하는 것은 낭비이며, 보다 단순하고 신속하게 최적공정조건을 찾는 방법을 개발하여 이용하는 것이 바람직하다. 본 사례는 음향기기 및 컴퓨터 주변기기에 들어가는 다양한 플라스틱 부품을 사출성형으로 생산하는 중소기업인 D전자가 최근 수주한 자동차 음향조절용 부품의 품질개선에 관한 것이다.

사출성형은 기본적으로 “녹인다”, “흐르게 한다”, “단단하게 한다”의 3가지 단계를 거친다. 본 사례에서 다루는 열경화성 플라스틱을 생산하는 사출성형기는 플라스틱 재료를 녹여서 사출하는 사출기구와 금형을 고압으로 체결하는 형체기구, 이들을 자동적으로 동작시키는 제어기구로 구성된다. 플라스틱 재료를 호퍼에서 사출실린더에 주입한 후 스크류회전에 의해 앞으로 이송하면서 가소화하고 가소화된 플라스틱을 고압으로 금형내에 사출한 후 냉각시켜 성형품을 만든다. 사출성형기의 작동은

① 형조이기(형체) ⇨ ② 노즐터치 ⇨ ③ 사출 ⇨ ④ 냉각 ⇨ ⑤ 재료의 용융과 계량 ⇨ ⑥ 형개 ⇨ ⑦ 성형품의 돌출 ⇨ ① ⇨ ... ⇨의 순차적 단계로 이루어진다<그림 4>. 이러한 공정은 단속적으로 이루어지는 것이 아니라 서로 연결되면서 자동적으로 작동한다[8]. 사출품의 불량은 생산성 저하로 인한 비용의 상승을 가져올 뿐만 아니라, 경우에 따라서는 성

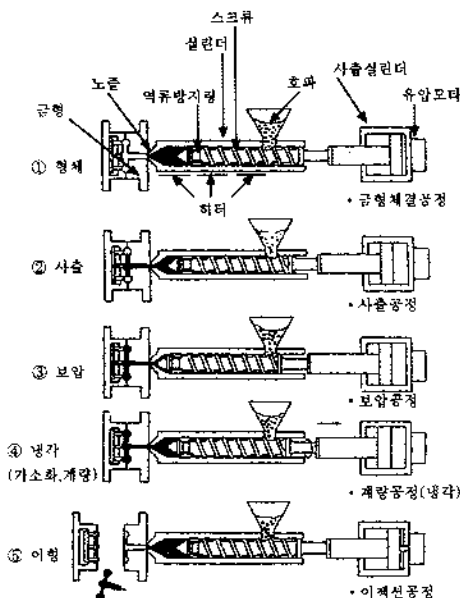


그림 4. 사출성형공정.

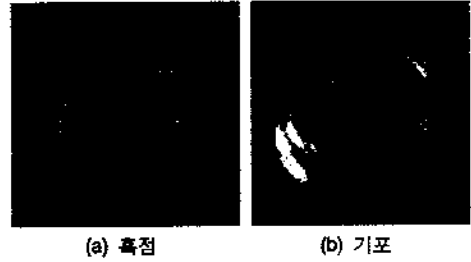


그림 5. 사출성형품의 불량유형.

표 2. 적용사례의 불량유형과 공정변수 간의 관계

불량유형	공정변수		
	속도	온도	압력
흑점	↑	↓	
기포		↑	↑

형기구나 금형에도 손상을 주는 수가 있으므로, 불량률의 형태와 추이를 면밀히 관찰할 필요가 있다. 본 연구의 대상제품인 열경화성 플라스틱의 불량률은 주로 흑점 또는 기포에 기인한다 <그림 5>. 생산현장의 사출기사 및 품질담당과장과 토의한 결과 성형품의 품질에 영향을 미치는 주요공정변수는 사출압력, 사출속도, 가열실린더온도로 파악되었다. 불량유형과 공정변수 간의 상관관계는 <표 2>와 같다.

<표 2>에서 화살표 ↑(또는 ↓)는 각 불량유형별로 불량을 줄이기 위한 공정변수의 바람직한 이동방향을 나타낸다. 예를 들어, 흑점불량을 줄이기 위해서는 속도는 높이고 온도는 낮추어야 함을 뜻한다. 본 사례에서 불량률의 대부분은 흑점불량에 기인하기 때문에 우선 흑점불량을 줄이기 위해 <그림 6>에 나타난 바와 같이 온도는 낮추고 속도는 높여 가면서 탐사를 했다. 중소기업의 문제점 중 하나가 작업자의 잦은 직장이동이다. D전자의 경우도 예외가 아니어서, 플라스틱 사출성형기의 담당기사가 입사한지 1개월 정도밖에 되지 않아서 공정조건을 잡는 데에 비교적 미숙했다. 최초의 공정조건은 온도 295℃와 속도 60%로서 12.00%의 불량률을 보였다. <그림 3>의 절차를 이용하여 탐사한 결과, 온도 275℃, 속도 96%에서 4.72%로 불량률이 줄었다. 온도를 275℃보다 더 낮출 경우 재료가 가소화 능력이 떨어져 재료의 유동성을 저하시킴으로써 스크류에 부담을 주고 결국 높은 스크류 마모를 야기한다. 흑점 불량을 낮춘 다음, 기포에 의한 불량률을 낮추기 위하여 최초의 압력 95(kg/cm)를 조금씩 높여 나갔다. 압력이 99에 달할 때 불량률이 3.80%로 낮아졌다. 압력을 더 이상 높이면 금형을 파손시키거나 금형의 수명을 크게 단축시킬 수 있으므로 압력은 99로 고정시키고 온도를 조금씩 높였다. 결국 온도 277℃일 때

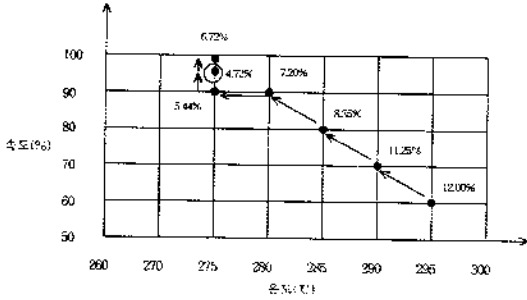


그림 6. 온도와 속도에 따른 불량률.

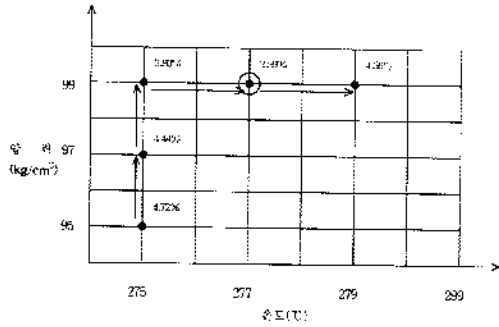


그림 7. 온도와 압력에 따른 불량률.

불량률이 2.59%로 낮아졌고 온도를 더 높였을 때는 불량률이 증가하므로 더 이상 탐사를 하지 않고 공정조건을 고정하였다 <그림 7>. 요약하면 본 사례연구에서 구한 최적공정조건은 온도 277℃, 속도 96%, 압력 99kg/cm²이며, 이 조건에서 불량률은 2.59%이다.

5. 토의 및 결론

사출성형의 경우처럼 과거의 경험을 바탕으로 제품의 불량유형과 공정변수 간의 상관관계를 알고 있을 때, 즉 각 공정변수의 증감이 불량유형에 어떠한 영향을 주는지에 대한 개략적인 사전정보를 갖고 있는 경우에, 제품품질을 전반적으로 향상시키기 위한 EVOP 적용절차를 제시하였다. 2개(또는 3개)의 공정변수를 조금씩 변화시켜 가면서, 불량유형의 빈도를 줄여 나간다. 어느 공정변수가 흥미영역의 경계(boundary)에 가면 그 공정변수의 값을 고정시키고, 영향을 주는 다른 공정변수의 값을 조금씩 변화시켜 나가면서 궁극적으로는 품질특성을 최

적화하는 최적공정조건을 찾아 나간다. 본 연구에서 제시하는 방법을 이용하면 주문이 불규칙적으로 접수되고 납기에 쫓기는 중소기업이 생산을 수행해 가면서 불량률을 줄여나가는 데에 도움이 되리라 기대된다. 본 연구의 결과는 다양한 플라스틱 부품을 사출성형으로 생산하는 중소기업의 자동차 음량조절용 부품의 품질개선에 적용하여 초기불량률 12.00%를 최종적으로 2.59%로 낮추었다. 사례연구에서는 기업 검사장비의 한계 때문에 계수값인 불량률을 특성값으로 삼았는데 계량특성값(예를 들면 흑점의 크기 및 개수, 기포의 크기 등)를 이용하여 분석을 수행하면 보다 심도있는 분석결과를 얻을 수 있으리라 여겨진다.

감사의 글

본 논문의 내용구성과 질적 향상을 위하여 귀중한 도움을 주신 경상대학교 고분자공학과 김전학 교수, 편집위원과 심사위원들께 감사드립니다.

참고문헌

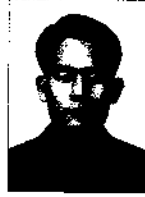
1. 김낙수, 임용택, 전종태, *공업재료 가공학*, 반도출판사, 1991.
2. 배도선, *최신 통계적 품질관리*, 영지문화사, 1992.
3. Barker, T. B., "The evolution of a system for teaching EVO P," *ASQC Quality Congress Transactions*, pp. 302-310, 1992.
4. Box, G. E. P., "Evolutionary operation: a method for increasing industrial productivity," *Applied Statistics*, Vol. 6, pp. 81-101, 1957.
5. Box, G. E. P. and Draper, N. R., *Evolutionary Operation*, John Wiley & Sons, NY, 1969.
6. Box, G. E. P., Hunter, W. G. and Hunter, J. S., *Statistics for Experimenters*, John Wiley & Sons, NY, 1978.
7. Myers, R. H. and Montgomery, D. C., *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons, NY, 1995.
8. Rosato, D. V. and Rosato, D. V., *Injection Molding Handbook*, 2nd ed., van Nostrand Reinhold, NY, 1995.
9. Spendley, W., Hext, G. R. and Himsworth, F. R., "Sequential application of simplex designs in optimization and evolutionary operation," *Technometrics*, Vol. 4, No. 4, pp. 441-461, 1962.



변재현

서울대학교 산업공학과 공학사(1983), 한국과학기술원 산업공학과 공학석사 및 박사(1985, 1989)를 취득하였다. 1994-1996년에 미국 Rutgers University, 1997년 University of Michigan에서 교환교수를 역임하였다.

현재: 경상대학교 산업시스템 공학부 부교수
관심분야: 품질공학, 계측시스템 관리, 공정 이상진단 및 품질정보시스템 등



김용균

경상대학교 산업공학과에서 공학사(1997)를 취득하였다.

현재: 경상대학교 산업시스템공학과 석사 과정
관심분야: 공정 이상진단 및 품질정보시스템