

가교 발포 폼 단열재 생산공정에서 생산방식의 결정을 통한 생산 수율의 향상에 관한 연구

(Increasing of the yield rate by selecting the processes in the
cross-linked foam production line)[†]

임준목*, 안응철**

* : 대전산업대학교 산업공학과

** : (주)영보화학

요 약

가교 발포 공정을 거치는 대부분의 단열재의 생산 제조 공정은 혼합→압출→성형→발포→권취→포장 과 같은 공정을 거치게 된다. 생산방식에 있어서는 크게 두가지 공정에 따라 대별된다. 하나는 “인-라인” 방식의 제조공정이며 다른 하나는 “오프-라인” 방식의 제조공정이다. “인-라인”의 생산방식은 공정불량의 감지가 용이하고 재공품의 재고가 적은 장점이 있는 반면에 생산수율은 높지 못한 편이다. 반면에 “오프-라인”의 생산방식은 생산수율은 상대적으로 매우 높지만 공정불량에 대한 위험이 크며 재공품의 재고가 증가하는 경향이 있다. 본 연구에서는 “인-라인” 생산방식과 “오프-라인” 생산방식의 장·단점을 분석하여 생산되는 제품에 따라서 적절한 생산방식을 채택하여 줌으로써 회사 전체의 생산성 향상을 제고 할 수 있는 방법론을 개발하고자 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 먼저 공정의 분석을 통한 수학적 모델을 제시하고 그 해법을 연구하며, 사례를 들어 설명한다.

1. 서 론

최근들어 전 세계적으로 자원의 고갈로 인해서 에너지 난이 가중되고 있으며 휘발류등의 에너지 가격의 급격한 상승으로 인해서 산업체 및 운송시스템의 운영에 있어서 효율성의 향상이 무엇보다도 중요시 되고 있다. 이러한 효율성 제고 방안 중의 하나로 냉·난방 및 방음에 있어서의 단열재의 사용을 들 수 있다. 단열재는 특성상 단열과 방음의 효과를 높이기 위해서 단열재 내부가 많은 기포를 가질 수 있도록 발포처리되며 주변환경 조건 및 발포로의 발포조건에 따라 그 품질이 좌우된다.

이러한 단열재는 건물의 벽 및 자동차의 내장재로 많이 사용되고 있는데, 특히 자동차의 단열·방음의 효과를 주기위해서 사용하는 단열재는 자동차 생산이 날로 증가함에 따라 급격히 증가하고 있는 추세이다. 그러나 국내의 발포 단열재의 생산 기술 수준은 선진 외국에 비해서 낙후되어 있으며 생산 단가가 비싼 편이어서 외국제품과의 가격 경쟁력에서 뒤쳐지고 있는 실정이다. 결국 발포 단열재 생산공정의 생산성 향상이야말로 다가오는 21세기에 대비하여 에너지를 절약하는데 일익을 담당함은 물론 우리기업의 세계 경쟁력강화에도 기여할 수 있으리라 생각된다.

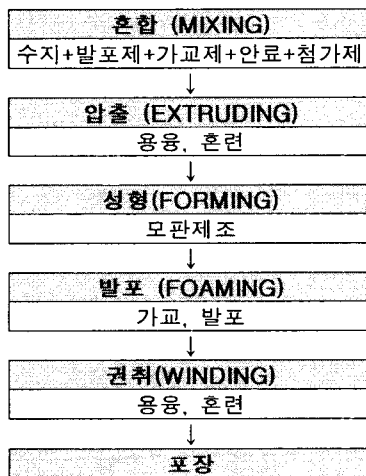
가교 발포 공정을 거치는 대부분의 단열재의 생산 제조 공정은 [그림 1]과 같은 공정을 거치게 된다.

[†] 이 논문은 1997년도 대전산업대학교 교내학술연구비 지원을 받았음

그러나, 생산방식은 공정에 따라 크게 두 가지로 대별된다. 하나는 “인-라인(In-Line)” 방식의 제조 공정이며 다른 하나는 “오프-라인(Off-Line)” 방식의 제조 공정이다.

인-라인(In-Line) 생산방식이란 압출기에서 생산된 모판이 연속적으로 발포로에 투입되어 발포가 되는 연속 생산을 말한다. 다시말해, 혼합→압출→성형→발포→권취의 모든 공정이 연속적으로 이루어짐을 뜻한다.

반면에, 오프-라인(Off-Line) 생산방식이란 압출·성형공정이 끝난 후에 곧바로 발포공정에 제품이 투입되지 않고 지정장소에 저장되어 있다가 운영 스케줄에 맞춰 발포공정에 투입되게 되는 생산 방식을 말한다. 연속생산이 이루어지지 않는다는 의미에서의 오프-라인 생산인 것이다.



[그림 1] 가교-발포-폼 단열재 제조 공정도
(화학-가교 폴리올레핀 시트 폼)

그런데, 여기서 주목할만한 것은 압출성형기의 시간당 생산량(예:130Kg/시간)은 발포로의 시간당 생산량(예:160Kg/시간)에 비해서 현저하게 떨어진다는 것이다. 그로 인해서, 인-라인 생산방식을 채택할 경우에 발포로는 대략 20%정도의 유휴시간이 발생하게 되어 생산성의 저하를 초래하는 원인이 되며, 인-라인 방식에 의한 생산은 압출기의 생산성에 의해서 전체 생산성이 좌우되게 된다.

이러한 인-라인 방식의 결점을 보완하기 위해서 발포로 앞에 저장공간을 두어 미리 생산하여 둬으로써 발포로가 제품이 없어서 유휴하게 되는 시간을 줄일 수 있는 방식이 오프-라인 방식이다. 그러나, 오프-라인 방식을 채택함으로써 발포로의 생산성은 올라가는 반면에 불량제품에 의한 손실비용이 크게 증가하게 된다. 이것은 인-라인 방식에서는 발포로에서 불량이 발생하면 즉시 전공정을 멈추고 조치를 취할 수 있었던 반면에 오프-라인 방식에서는 발포로에서 불량이 발생했을 경우 중간에 쌓여있는 재공품 재고가 모두 불량으로 처리되기 때문에 그로인한 불량 손실이 커지게 된다. 인-라인 방식과 오프-라인 방식의 장·단점을 요약하면 다음과 같다.

[표 1] 인-라인 생산방식과 오프-라인 생산방식의 장·단점 비교

생산 방식	인-라인	오프-라인
장점	·불량손실 감소 ·재공품재고 감소	·시간당생산량증가
단점	·시간당생산량저하	·불량손실 증가 ·재공품재고 증가

일반적으로 가교-발포 폼 단열재를 생산하는 업체에서는 제품의 종류가 워낙 많고(대략 500종에서 1000종에 이름) 각 제품에 대한 생산량도 각기 다르며 공정의 선택시 고려해야할 사항이 많기 때문에 각 제품에 따라 알맞은 생산방식을 정한다는 것은 그리 쉬운일이 아니다. 아직까지 대부분의 우리나라 업체(예: 대전에 위치한 (주)Y화학등)에서는 이것을 수년동안 생산을 담당해온 전문가의 직관과 수작업에 의해서 수행하고 있는 실정이어서 많은 시간과 노력이 요구되어 숙련된 작업자의 노동력을 허비하고 있는 실정이며 경험적인 방법에 의해서 결정되기 때문에 최적해와는 거리가 멀어서 생산성의 저하를 초래하고 있다. 더군다나, 수시로 생산되는 제품이 바뀌는 경우 매번 이것을 작성해야 되기 때문에 즉각적인 대응이 매우 어렵다.

본 연구에서는 인-라인 생산방식과 오프-라인 생산방식의 장·단점을 분석하여 생산되는 제품에 따라서 적절한 생산방식을 채택하여 줌으로써 회

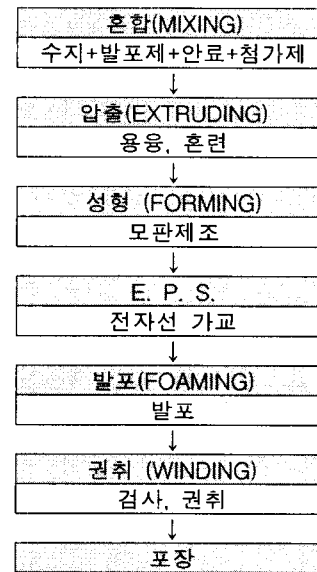
사 전체의 생산성 향상을 제고 할 수 있는 방법론을 개발하고자 한다.

2. 가교 발포형 단열재의 생산방식

가교-발포형 단열재는 크게 ① 화학-가교 폴리올레핀 시트 폼(Chemically Cross-Linked Polyolefin Sheet Foam)과 ② 전자선-가교 폴리올레핀 시트 폼(Irradiation Cross-Linked Polyolefin Sheet Foam)의 두 종류로 나뉜다. 각각의 제품의 종류에 따른 제조공정 특성을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 화학-가교 폴리올레핀 시트 폼 제조인데 이는 화학 가교 및 발포된 시트 상태의 반 경질 발포체로서 [그림 1]과 같은 제조 공정으로 생산이 된다. 혼합공정(Mixing)은 니더(Kneader)에 각종 원재료를 투입하여 1차 혼련을 시켜 마스터 배치(Master Batch:M/B)화 하며, 이를 재료 준비 공정이라 하고 압출 공정은 압출기(Extruder)에 마스터 배치(M/B)를 투입, 용융 및 2차 혼련을 시켜 티-다이(T-Die)를 통해 성형기를 거쳐 모판이 제조된다. 이때 만들어진 모판은 제품의 두께, 밀도 및 폭 등을 1차로 결정하게 된다. 생산될 제품의 규격이 1차로 결정된 모판을 발포하는 발포공정은 발포로를 이용하여 가교 및 발포를 하게 되는데, 이때 발포 온도 조건 및 발포 속도(Line Speed)에 따라 제품의 두께, 밀도 및 폭 등이 최종 결정된다. 생산된 제품은 권취기(Winder)를 통해 롤(Roll) 형태로 감으며, 검사원이 검사 기준에 따라 검사를 하여 합·부 판정을 하게 된다.

둘째, 전자선-가교 폴리올레핀 시트 폼 제조인데, 이는 폴리에틸렌(Polyethylene) 및 폴리프로필렌(Polypropylene)을 전자선 조사에 의해 가교·발포된 시트상의 발포체로서 [그림 2]와 같은 제조 공정으로 생산이 된다.



[그림 2] 전자선-가교 폴리올레핀 시트 폼 제조 공정도

생산 공정은 앞에서 설명한 화학-가교 폴리올레핀 시트 폼 제조 공정과 유사하나 크게 다른 점이 두 가지가 있다. 하나는 혼합 과정에서 가교제가 들어가지 않는다는 점이며, 둘은 전자선 조사기를 통해 전자선으로 가교를 시키며, 발포 과정에서는 가교가 되지 않고 발포만 되는 점이다.

이러한 두 종류의 제품에 있어서 화학 가교제를 사용하는 제품은 “인-라인” 공정과 “오프-라인” 공정 중에서 어느 하나를 선택하여 생산할 수 있는 반면에, 전자선-가교 제품은 반드시 “오프-라인”으로만 생산이 가능하다.

결국 본 연구의 대상이 되는 제품은 화학-가교제를 사용하는 제품이며 이것들에 한해서 “인-라인” 및 “오프-라인” 공정 중에서 적절히 선택하여 줌으로써 전체적으로 생산 수율을 향상시킬 수 있는 방법을 찾고자한다.

3. 생산방식간의 수율

최근들어 많은 업체에서 발포 생산성을 높이기 위해 오프-라인 방식으로 생산하는 경향이 많아졌다. 그 이유는 ‘A’ 라는 제품이 압출기에서의 최대 시간당생산량이 130Kg/Hr 인데 비해 발포 최

대 시간당생산량은 160Kg/Hr까지 생산이 가능 하다면, “인-라인”인 경우의 최대 발포 생산량은 130Kg/Hr 밖에 되지 않는다. 왜냐하면 발포는 압출량 만큼만 생산이 가능하기 때문이다. 따라서, 발포로의 생산능력의 80% 정도 만이 생산되므로 발포로의 생산성이 20% 만큼 저하 되게 된다. 그러나, 압출기와 발포로의 전체 생산능력을 감안하여 압출량과 발포량의 균형을 맞추면(예: 압출기 증설) 결국 발포 생산성은 크게 향상 되게 된다. 그런데, 여기에서 단순히 발포 생산성만을 고려하다 보니 예상하지 못했던 여러 가지 문제점이 발생된다. 이러한 문제점 들은 생산자의 입장에서는 대단히 중요한 관리 항목으로 인식 되고 있다.

첫째, 종합 수율이 떨어지고 불량 율이 높아 졌다는 점이다. 참고로, 종합수율의 계산방법은 다음과 같다.

$$\text{종합 수율}(\%) = (\text{압출 수율}) \times (\text{발포 수율}) \times 100\%$$

여기서,

$$\text{압출수율}(\%) = \frac{\text{모판생산중량}(Kg)}{\text{재료투입중량}(Kg)} \times 100$$

$$\text{발포수율}(\%) =$$

$$\frac{\text{제품생산량}(Kg)}{\text{모판총투입량}(Kg) \times (100 + \text{밀도증감률})} \times 100$$

인-라인의 경우 압출기에서 모판이 생산되어 바로 발포로에 투입 되는 관계로 발포 과정에서 제품의 두께나 폭이 규격에 맞지 않을 경우 즉시 압출기에서 모판 폭이나 두께를 조정, 불량을 최소화 하여 압출 및 발포 수율을 높이게 되어 종합 수율이 올라 가게 된다. 또한, 측면 트리밍(Side Trimming)을 해야 하는 경우에도 폭을 조절하여 트리밍 손실(Trimming Loss)을 최소화하여 발포 수율을 높일 수 있다. 여기서, 측면트리밍이란 발주자의 요구에 따라 제품의 양쪽 측면을 정확한 폭으로 잘라 내는 작업을 의미한다.

오프-라인의 경우는 모판을 발포 예정량 만큼 미리 압출 생산한 후(평균 1 드럼(Drum) : 약800 Kg) 발포로에 투입이 되므로 이미 폭이나 두께가 거의 결정된 상태에서 발포를 하게 되어 제품의 폭이나 두께가 규격을 벗어날 경우 비록 발포 담당자가 발포 조건을 조정한다고 해도 불량이 발생

할 확률이 현격히 높아 지게 되며, 경우에 따라서는 그 모판 자체가 전부 불량이 되어 압출 수율이 0 이 되는 경우도 발생 하게 된다. 그래서, 압출 작업을 진행 하면서 모판 샘플(Sample)을 발포 하지만, 이 경우 발포 손실이 많아 지고 발포 생산성이 떨어 지게 된다.

둘째는, 재공품 재고가 늘어 나게 된다.

오프-라인 체제로 전환이 되다 보니 드럼(Drum: 모판을 감아 보관하는 도구)이 많이 필요하며, 모 판 재고가 늘어 나게 된다.

4. 수학적 모형의 구성

인-라인 및 오프-라인의 장·단점은 앞서 설명한 바와같이 여러 가지가 있으나 그중 비중이 가장 큰 수율 및 생산성에 대해서만 수학적 모형화의 대상으로 하였다. 그 이유는 불량율이 낮아 지거나 트리밍 로스가 줄어 들게 되면 자연스럽게 수율이 향상되며 종합수율 및 생산성 향상이 업체의 가장 큰 목표이기 때문이다. 제품 i 는 인-라인이나 오프-라인 생산 방식중 반드시 한가지 방식으로만 생산되며 두 가지 방식을 혼용해 생산할 수 없다라고 가정한다.

(1) 기호의 정의

모수의 정의: 수학적 모형화에 필요한 모수들에 대한 정의는 다음과 같다.

n = 생산되는 서로 다른 제품 수

p_i^I = 인-라인 경우, 제품 i 의 생산성 1kg 증대로 인해 얻어지는 이익(원)

y_i^I = 인-라인 경우, 제품 i 의 수율 1kg 증대로 인해 얻어지는 이익(원)

p_i^O = 오프-라인 경우, 제품 i 의 생산성 1kg 증대로 인해 얻어지는 이익(원)

y_i^O = 오프-라인 경우, 제품 i 의 수율 1kg 증대로 인해 얻어지는 이익(원)

a_i^I = 제품 i 가 인-라인 방식으로 생산될 경우 발포 소요시간

a_i^O = 제품 i 가 오프-라인 방식으로 생산될 경우 발포 소요시간($a_i^I > a_i^O$)

B = 발포기의 가동 허용 시간

결정 변수: 수학적 모형화에 있어서의 결정 변수를 다음과 같이 정의한다. 제품 i 는 인-라인이나 오프-라인 방식 중 어느 한가지 방식의 선택은 가능하나, 두 가지 방식을 동시에 적용할 수는 없다. 따라서 결정 변수 x_i 는

$$x_i = \begin{cases} 0 & \text{제품 } i \text{가 오프라인 방식으로 생산되는 경우} \\ 1 & \text{제품 } i \text{가 인라인 방식으로 생산되는 경우} \end{cases}$$

로 정의한다.

(2) 수학적 모형화

목적 함수: 본 연구에서는 수율과 생산성 합 의 최대화를 목적으로 하는바 이것을 수식화하면 다음과 같다.

$$f(x_i; i=1, \dots, n) = \sum_{i=1}^n p_i^I \cdot x_i + \sum_{i=1}^n y_i^I \cdot x_i + \sum_{i=1}^n p_i^O \cdot (1-x_i) + \sum_{i=1}^n y_i^O \cdot (1-x_i)$$

제약식: 발포할 제품의 수는 많이 있으나 발포기의 가동시간은 제한이 있다. 즉, 발포기 가동 허용시간 B 에 제한이 있다는 것이다. 왜냐하면, 여러가지 제품에 대한 납기를 동시에 만족 시켜주기 위해서는 발포기 가동시간을 제한할 수밖에 없기 때문이다. 이를 식으로 만들면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n (a_i^I \cdot x_i + a_i^O \cdot (1-x_i)) \leq B$$

5. 해법

앞 절에서 제시된 수학적모형은 전형적인 0-1 정수계획법 형태를 취하고 있다. 일반적으로 '0-1정수계획법'모형은 결정변수의 수가 많아짐에 따라서 최적해를 단시간에 찾는다는 것은 불가능하게 된다. 그러나 앞에서 주어진 모형을 정리하고 변형하면 잘알려진 배낭문제(KnapSack Problem)가 된다. 앞 절의 모형을 변형하면 다음과 같다.

목적함수 식을 정리하면,

$$f(x_i; i=1, \dots, n) = \sum_{i=1}^n (p_i^I + y_i^I - p_i^O - y_i^O) \cdot x_i + \sum_{i=1}^n (p_i^O + y_i^O)$$

여기서, $c_i = p_i^I + y_i^I - p_i^O - y_i^O$,

$$K = \sum_{i=1}^n (p_i^O + y_i^O) \text{ 라 하면}$$

$$f(x_i; i=1, \dots, n) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i + K \text{ 이 된다.}$$

제약식을 정리하면,

$$\sum_{i=1}^n (a_i^I - a_i^O) \cdot x_i \leq B - \sum_{i=1}^n a_i^O \text{ 이 된다. 여기서}$$

$$S = B - \sum_{i=1}^n a_i^O \text{ 라 놓으면, } \sum_{i=1}^n (a_i^I - a_i^O) \cdot x_i \leq S$$

가되고, 다시 $d_i = (a_i^I - a_i^O)$ 라 놓으면,

$$\sum_{i=1}^n d_i \cdot x_i \leq S \text{ 가 된다.}$$

위의 결과로부터 다음의 생산방식 결정모형을 얻을 수 있으며 이 모형은 전형적인 배낭문제의 모형과 동일하다.

생산방식결정모형

$$\text{Max } f(x_i; i=1, \dots, n) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i + K$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n d_i \cdot x_i \leq S$$

$$x_i = 0 \text{ 또는 } 1$$

본 연구에서는 해법으로 다음과 같은 2가지 방법을 고려한다.

- (1) 제품의 수가 작은 경우는 0-1 정수계획법 문제를 상용화된 패키지를 이용하여 직접 푸는 방법
- (2) 배낭문제를 해결하기 위한 발견적기법의 적용

6. 사례연구

보은 단열재 및 자동차 내장재를 생산하는 Y사의 최근 생산현황으로부터 화학가교발포품의 92개의 제품에 대해서, 앞에서 제시된 수학적 모형과 해법을 적용하여 본 결과가 [표 2]와 같다. Y사의 경우 발포로 가용시간은 480시간이다.

이상의 생산방식 결정을 위한 수학적 모형에서 그 해법으로 발견적 기법(Heuristic Algorithm)중

하나인 그리디 법(Greedy Heuristic Algorithm)과 최적화 기법에서 사용되는 프로그램인 LINDO를 사용하였다.

[표 2] 결과요약

제안 방식	인-라인 제품 수	오프-라인 제품 수	목적 함수값
그리디법	24	68	27,565,836
LINDO	24	68	27,565,836

위의 [표 2]에서 보면 최적 생산 방식 결정을 위한 두 가지 방식에서 거의 같은 결과를 얻었다. 따라서, 어떤 방법을 적용하던 관계없으나 빠르고 쉽게 적용할 수 있는 그리디법을 적용하는 것이 유리하다.

위의 결과에 대해 전 제품을 인-라인 또는 오프-라인 그리고 제안한 방법으로 발표를 했을 경우를 [표 3]에서 비교 하였다.

[표 3] 생산성 및 수율 대비표

구분 발포 방식	발포 시간	생산성 (kg/hr)	수율 (%)	제조원가 (kg/원)	차 이
전체 인-라인	533.90	120.1	88.9	의미없음	-
전체 오프-라인	445.17	144.1	86.0	2,737.0	-
제안 발포 방식	459.57	139.5	87.0	2,705.3	31.7(원/kg) 절감

전체 인-라인방식은 발포로 가동허용 시간을 벗어나므로 비교의 의미가 없다. 제안발포방식을 적용했을 경우, 총생산예정량(64,129kg) x 절감액(31.7원/kg) = 2,032,889원/460시간 만큼의 절약이 가능하다. 즉, 106,064원/1일 절약 된다는 결론이다. 이것을 96년 생산량을 기준하면 2,127,950kg (총 3,869,000kg x 55%) x 31.7원/kg = 67,456,015원의 절약이 가능했다.

[표 3]에서 보듯이 제안발포방식을 적용할 경우, 생산성은 인-라인만을 적용했을 때 보다 19.4kg/hr (16.2%) 증가 되지만 수율은 1.9%떨어지고 오프-라인생산방식 만을 적용했을 때 보다 생산성은 4.6kg/hr(3.2%) 떨어지고 대신 수율은 1.0% 상승한

다는 사실을 알 수 있다.

따라서, 온-라인 생산방식과 오프-라인생산방식을 적절히 조합하는 발포 방식을 택하면 460시간의 제약 조건을 만족하는 범위 내에서 생산성과 수율의 합을 최대화한 방식이 되며 상당한 원가의 절감을 기대할 수 있다.

7. 참고문헌

- [1] 가고 폴리올레핀 폼 생산 매뉴얼, Y화학주식회사. 1997.
- [2] 導電性架橋폴리에틸렌폼 생산 매뉴얼, Y화학주식회사, 1997.
- [3] 아티론 보온재 기술자료, Y화학주식회사, 1997.
- [4] Taha, H. A., *Operations Research*, 1986.