

백판지 제조 품질향상을 위한 다요소 강건설계

백계성¹ · 손소영² · 김세진²

¹한솔제지 / ²연세대학교 산업시스템 공학과

Multi-Attribute Robust Parameter Design to Improve White Board Paper Quality

Kae Sung Baek¹ · So Young Sohn² · Se Jin Kim²

In this paper, we analyze the calendaring operation in the process of paper manufacturing. Controllable parameters involved in the calendaring operation are the calendar material, temperature and pressure. Main objective of this paper is to find the robust design of these parameters which would provide consistent quality of paper in terms of the thickness, brightness, and roughness. We first use a split-plot design in the context of a central composite design for a preliminary analysis to find the proper calendar material. Next, response surfaces for the mean and variance of each quality attribute are fitted as functions of calendar temperature and pressure. Bootstrap resampling approach is used to find the robust parameter design.

1. 서론

품질 관리의 궁극적인 목적은 고객을 만족시키는 품질의 구현에 있다. 이러한 고객 만족을 위하여 제조 품질의 수준을 고객이 기대하는 수준에 맞추고 품질의 변화를 최소화할 수 있는 공정 조건을 찾는 노력이 지속적으로 요청된다. 대형 장치 산업인 종이 제조업의 경우도 가동 초기에 설정한 공정 조건이 운전자의 기능 숙달, 설비의 현장 적응, 지속적인 보수 성과의 증첩 등에 의한 내부의 요인과 시장 환경의 변화, 고객 선호 품질의 변화, 고객 요구 수준의 향상 등과 같은 외부 요인에 의해 공정 조건을 적절히 수정하고 최적화하게 마련이다.

일반적으로 문화용지라 불리는 신문용지나 백상·아트지는 필요한 정보가 인쇄된 후 고객의 손에 전달되지만, 본 논문의 대상이 되는 백판지는 산업용지로써 와이셔츠 포장이나 꼬깅 포장과 같이 인쇄된 후에 상품을 넣는 용기로 고객의 손에 전달된다. 고객이 좋은 상품이라 느낄 수 있도록 하기 위해서는 깨끗하고 선명한 인쇄와 종이 박스로서의 적절한 강도가 동시에 충족되어야 한다. 이러한 인쇄와 세함 과정에 영향을 미치는 종이의 품질특성은 여럿 있겠으나 그 기본적인 불성은 두께와 광택 그리고 거칠음도라고 할 수 있다(한국제지공업연합회, 1986).

이 논문은 핵심 설비인 두 개의 칼렌더의 Nip재질 조합 및 운전 조건 즉 온도도와 압력의 변화가 두께와 광택에 미치는 영향

을 밝혀 최적 조건을 찾는 데 그 목적이 있으며 A제지의 백판지 제조 공정을 사례로 다루었다. 이를 위해 중심복합설계를 이용하여 실험을 설계하고, 그 실험 결과를 토대로 품질 특성치의 평균과 분산에 대한 반응 표면 분석을 수행하였다. 이렇게 추정된 반응 표면 모형을 바탕으로 다요소 강건 설계 분석을 실시하였다. 또한 연구 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 강건설계시 Bootstrap Resampling 방법을 이용하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 대상이 되는 종이의 제조 공정과 품질 특성에 대해 논하고 제3장에서는 실험 설계 방법과 데이터 측정 방법에 대해서 알아 본다. 더불어 측정된 데이터를 통해 분산분석 및 반응 표면 분석을 수행하였다. 그 결과로 제4장에서 각 품질특성치(두께, 광택, 거칠음도)의 평균치는 목표값에 접근하도록 하고 분산치를 최소화하는 조건을 동시에 어느 정도 만족시킬 수 있는 공정변수의 값을 결정하는 다요소 강건설계를 소개하였다. 여기에 분석의 신뢰성을 높이기 위해 반응표면 분석결과를 토대로 Bootstrap Resampling 방법을 적용하였다. 제5장에서는 각 분석방법의 결과를 요약하고 미래연구분야에 대해 논하였다.

2. 종이 제조공정 및 품질

인류의 유장한 역사 속에서 지식과 경험의 전달 매체로 자리 잡고 있는 종이는 근대에 이르러 대량 생산을 할 수 있게 됨에

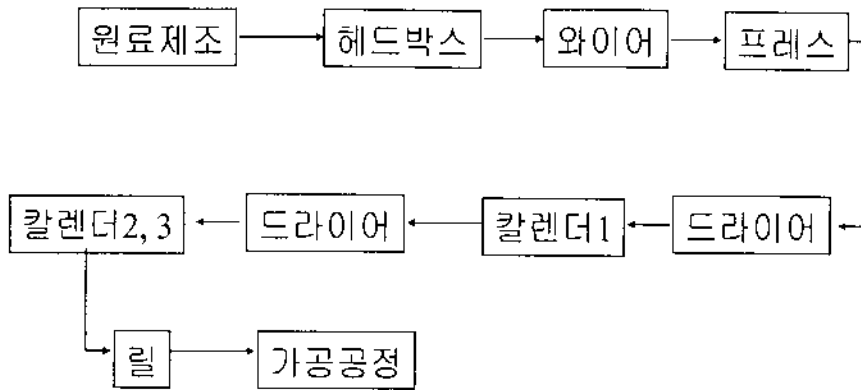


그림 1. 종이 제조공정.

따라 보다 더 싸게, 보다 더 편리하게 인류의 생활에 기여하게 되었다. 이러한 종이는 크게 두 가지로 분류할 수 있으니 그 첫째가 전통적인 의미에서의 종이 즉 문화의 용기로서의 종이(문화용지)를 말할 수 있으니 곧 신문용지, 백상지, 아뜨지 등의 각종 기록매체를 말하며 둘째로 생활의 용기(산업용지)로서의 종이를 들 수 있으니 의류나 과자 등의 용기로 쓰이는 백판지, 갈판지 등을 말한다.

종이의 제조공정은 크게 원료의 제조, 종이의 생산, 생산된 종이의 가공이라는 과정을 거쳐 소비자에게 전달된다 <그림 1>. 원료의 제조는 폐지라 불리는 신문이나 잡지를 회수한 것과 수입 펄프를 종류별로 구분하여 그 속에 포함되어 있는 각종 불순물, 즉 먹지나 풀, 철사 등을 제거한 다음 물에 풀어 여러 가지 잉크의 입자를 제거하게 된다. 이와 같이 하여 염료나 불순물이 제거된 섬유는 종이를 만들기에 적합하도록 가늘게 찢거나 적당한 길이로 자르게 되며 이 결과 생산된 것이 곧 원료이다.

생산된 여러 가지 종류의 원료는 99%의 물 속에 존재하게 되는데 생산하고자 하는 종이에 맞추어 일정하게 배합한 다음 여기에 각종 약품을 넣거나 필요한 염료를 넣어 원하는 색과 특성을 지닌 배합 원료가 된다. 이 배합 원료가 갖는 99%에 달하는 물을 8% 전후까지 순조롭게 감소시키는 과정이 종이의 생산, 즉 초지(抄紙) 공정이다. 배합 원료는 헤드 박스(Head Box)를 거쳐 와이어(Wire Part)에 분사되고 분사된 원료는 원심력에 의한 자연 탈수와 진공에 의한 강제 탈수를 거쳐 종이의 형태를 갖출 정도로 수분이 일차 제거된다. 이어서 종이는 프레스(Press Part)에 인가되어 서로 누르는 힘에 의한 압착 탈수를 거치게 되며 이 과정을 거친 종이는 50% 전후의 수분을 보유하게 된다. 이렇게 상당히 건조된 종이는 드라이어(Dryer Part)에 인가되어 스팀 온도에 의한 고온 건조 과정에 들어가서 목표하는 8% 대의 수분을 보유하게 된다. 이제 종이는 마무리 손질을 하는 과정에 들어가게 되는데 곧 칼렌더(Calender Part)와 릴(Reel Part)에 인가된다. 칼렌더는 제조된 종이의 표면을 매끄럽게 하기 위한 설비로 고온의 매끄러운 표면을 가지고

있어서 마치 종이에 다리미질을 하는 효과를 나타낸다. 또한 릴에서는 적당한 길이의 종이 롤(Roll)로 감아서 다음 공정에서 취급하기 좋은 형태로 분리된다. 통상 신문용지와 백상지의 제조는 이 과정에서 가공 공정으로 넘어가지만 아뜨지와 백판지의 경우는 도공(Coating) 공정을 거치게 되는데 이는 마치 화장하는 것과 같이 종이의 표면에 적당한 불성을 가진 안료를 적당량 도포하는 공정으로서 15~30 g/m² 전후로 도포한다. A제지의 제조공정에는 3개의 칼렌더를 운영하고 있다. 첫 번째 칼렌더는 드라이어(Dryer Part) 공정 사이에 놓여 있고 나머지 두 개의 칼렌더는 릴(Reel Part)의 앞에 있다. 끝으로 가공 공정 즉 생산된 롤 형태의 종이를 필요한 규격 즉 788×1092mm 등으로 제단하고 포장하는 공정을 거쳐 판매 활동에 진입하게 된다.

본 논문에서 다루고 있는 백판지는 2중의 품질 검사를 거치게 되는데 첫째가 공정에서의 제조 품질이다. 제조 품질의 특성은 평량, 수분, 두께, 광택도, (표면의) 거칠음도, 잉크 수리성, 백색도 등이 있으며 처음의 4가지는 On-Line으로 측정하고 뒤의 3가지는 Off-Line으로 실험실에서 주기적으로 측정하게 된다. 둘째가 시장 품질로서 지분, 총알림, 인쇄 불량, 티짐, 물결 침-커얼 및 제함 특성 등이 있으며 인쇄소에서 파악하게 된다. 이러한 모든 과정의 결과가 시장에서의 평판으로 피드백된다.

본 논문에서는 주로 제조 품질을 다루고 있으며 특히 On-Line 품질에 중점을 두고 있으며, 보조 요소로 Off-Line 특성인 거칠음도를 활용하고자 한다. On-Line 요소는 평량, 수분을 기본으로 하여 두께와 광택도를 측정한다. 평량은 사방 1m인 종이의 질량을 gram수로 표시하며 g/m²를 단위로 사용하며 일반적으로 종이는 그 구조가 금속처럼 긴밀하지 않으므로 미량의 공기가 포함되는데 이를 특별히 구분할 경우 g/m²air로 표시한다. 수분은 단위 중량의 종이에 포함된 물의 중량을 백분비 즉 %로 표시한다. 두께는 한 장의 종이의 두께를 micron 수로 표시한다. 광택도는 종이 표면에 75도의 입사각으로 조사된 빛을 반대편 75도의 각도에서 측정하여 반사된 빛의 양과 표준 샘플과의 비율을 %로 표시한다. Off-Line 요소인 거칠음도는

일정 압력을 가진 일정한 양의 공기를 종이의 표면에 가하여 종이 표면으로 빠져나가고 남은 공기의 양을 측정하여 이를 micron으로 표시한다.

백판지와 같이 도공과정을 거치는 종이의 품질에 영향을 미치는 여러 요인들에 대해서는 거의 규명이 되어 있다. 품질에 영향을 미치는 여러 요인들, 즉 안료에서의 피그먼트와 바인더의 종류에 따른 효과, 도공량의 영향들에 대해서는 거의 규명되어 있을 뿐만 아니라 현장 적용기술 역시 안정되어 있다고 평가된다. 본 논문에서 관심을 갖고 효과를 규명해보고자 하는 캘린더는 회전하는 두 개의 롤 사이에 종이를 통과시키는 기계인데 이 두 롤이 접촉하는 지점의 재질에 따라 기기가 달라진다. 즉 상부 롤은 언제나 Chilled Roll인데 하부 롤이 Chilled Roll이면 Hard Nip, 비금속인 폴리우레탄이나 Cotton이면 Soft Nip이라고 한다. 일반적으로 두께는 캘린더를 통과하면서 균일성이 현저히 개선되며 또한 종이 표면의 윤곽상태를 나타내는 평활도의 조절 혹은 개선이 이루어진다. 그리고 광택도는 제품의 인쇄품질과 밀접한 관계를 갖고 평활도에 영향을 상당히 받으며 일반적으로 소비자에게 종이를 고급스럽게 느끼도록 한다고 알려져 있다. 이러한 제조품질에 미치는 Hard Nip Calendar(HNC)의 역할은 알려져 있으나 Soft Nip Calendar(SNC)의 경우는 아직 신기술이어서 그 영향의 규명이나 현장 적용에 의한 피드백 역시 초보적인 단계라 할 수 있다. 현재까지 SNC의 효과를 논한 것을 살펴보면, 아트지의 경우 실험실적으로 시도한 결과 종이의 광택이 온도가 높을수록 높아지며 압력도 높을수록 높아지지만 그 변화 구배는 압력의 경우가 더 크며, 상대적으로 저질음도는 압력이 높을수록 낮아지나 온도의 영향을 일률적이라고 하기 어렵다고 하였다(Talbot and Larimer, 1992). 또한 미도공지(Light Weight Coated)의 경우 종이의 광택은 온도를 50℃에서 150℃로 변화시킬 때 압력의 변화에 관계없이 10 point가 증가한 반면 압력을 200 Kg/m²에서 340 Kg/m²로 변화시킬 때 온도의 변화에 관계없이 증가하지만 안료의 종류에 따라 3~4 point 혹은 8~10 point 증가하여 차등이

있음을 주장하였다. 따라서, SNC에 있어서의 온도, 압력의 변화에 따른 효과가 부분적으로 규명되고 있으나 백판지에 있어서의 효과 특히나 일정 이상의 두께를 유지하여 재함 특성을 확보하면서 소비자의 눈에 고급스럽다는 느낌을 전달하는 기본 요소인 광택을 높이는 공정조건을 적절한 캘린더의 재질 조합(Hard Nip 혹은 Soft Nip)하에서 찾는 것이 이제부터의 과제라 할 수 있겠다.

지금까지 알아 본 종이의 제조공정과 품질 요소에 따라 이러한 제조 품질의 변화에 영향을 주는 요인인 후단 캘린더 2, 3의 재질조합, 온도와 압력의 운전 조건과 제조 품질간의 관계를 검토하기로 한다.

3. 실험계획 및 분석

실측치 자료에서 공정 조건 및 품질 특성치의 표본을 추출하게 되면 제한된 정보만 얻게 됨으로 연구 목적을 달성하기 위해 계획된 실험을 실시하였다. 실험에 고려된 요인들은 캘린더 2, 3의 재질조합, 온도와 압력으로 실험배치 및 기본적으로 고려된 수준의 범위는 <그림 2>와 같다.

실험은 제품 평량 240 g/m²에 대하여 두 가지 캘린더 재질 조합조건하에 두 캘린더의 온도와 압력을 변화시켜가며 실시하였다. 캘린더 2와 3의 첫 번째 조합은 Hard Nip/Soft Nip(공정설비1)이고 두 번째 조합은 Hard Nip/Hard Nip(공정설비2)이다.

실험에 사용한 캘린더 설비는 다음의 두 가지이다.

Hard Nip 캘린더: 일본 Kumagai Riki Kogyo Co.가 제조한 Super Calendar로 30FC-270E 모델

Soft Nip 캘린더: 일본 Kumagai Riki Kogyo Co.가 제조한 Gloss Calendar로 45FR-150E 모델

실험 결과 품질 특성치들은 다음과 같은 기기들을 이용하여 측정하였다.

두께: High Bridge & Co에서 Takahashi System으로 제작한

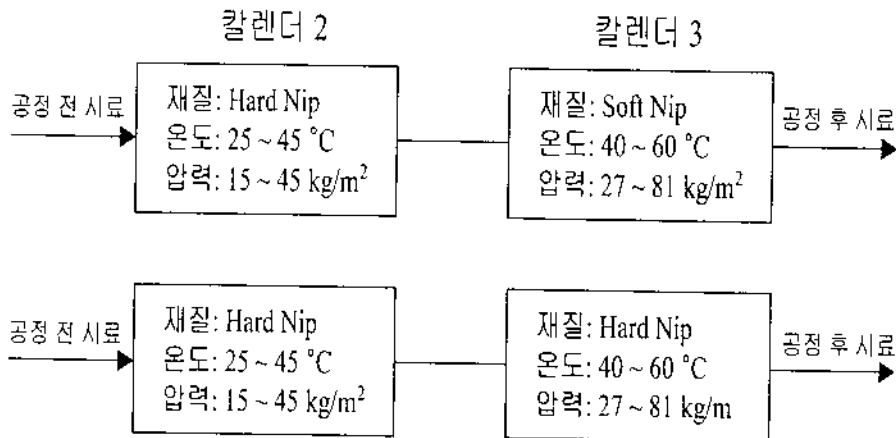


그림 2. 캘린더공정 실험상황도.

표 1. 백판지 제조공정을 위한 실험계획표

실험번호	V_1 칼렌더 2의 압력	V_2 칼렌더 2의 온도	V_3 칼렌더 3의 압력	V_4 칼렌더 3의 온도	Y_{ijk} 품질특성치
1	-1	-1	-1	-1	
2	1	-1	-1	-1	
3	-1	1	-1	-1	
4	1	1	-1	-1	
5	-1	-1	1	-1	
6	1	-1	1	-1	
7	-1	1	1	-1	
8	1	1	1	-1	
9	-1	-1	-1	1	
10	1	-1	-1	1	
11	-1	1	-1	1	
12	1	1	-1	1	
13	-1	-1	1	1	
14	1	-1	1	1	
15	-1	1	1	1	
16	1	1	1	1	
17	2	0	0	0	
18	0	2	0	0	
19	0	0	2	0	
20	0	0	0	2	
21	-2	0	0	0	
22	0	-2	0	0	
23	0	0	-2	0	
24	0	0	0	-2	
25	0	0	0	0	
26	0	0	0	0	
27	0	0	0	0	
28	0	0	0	0	
29	0	0	0	0	
30	0	0	0	0	
31	0	0	0	0	
32	0	0	0	0	
33	0	0	0	0	
34	0	0	0	0	
35	0	0	0	0	
36	0	0	0	0	

Automatic Micrometer

광택: Tokyo Denshoku Technical Center에서 제작한 Gloss Meter, Model TC108D

거칠음도: Messmer Instrument에서 제작한 Parker Print-Surf, Model M590(Ver.2.4)

실험은 칼렌더 2, 3의 재질 조합이 고정된 후 실험조건을 위한 각 칼렌더 별 압력과 온도 (X_1 : 칼렌더 2의 압력, X_2 : 칼렌더 2의 온도, X_3 : 칼렌더 3의 압력, X_4 : 칼렌더 3의 온도) 조건의 변화를 위해 우선 각각 세 수준을 고려했으나 요인 설계시 필요한 실험 수가 과다해 이를 줄이기 위해 전체에 대한 실험을 하지 않고 중심합성설계(Central Composite Design)을 이용하였다. 이에 따른 실험 설계는 <표 1>과 같다(Montgomery, 1991).

V_1 과 V_3 은 칼렌더 2, 3의 표준화된 압력 수준으로 고려할 수 있는 최대 범위 $X_1=15\sim45\text{kg/m}^2$ 와 $X_3=27\sim81\text{kg/m}^2$

에서 얻어진 것이다. V_2 와 V_4 는 칼렌더 2, 3의 표준화된 온도 수준으로, X_2 의 최대 범위 $25\sim45^\circ\text{C}$ 와 X_4 의 범위 $40\sim60^\circ\text{C}$ 에서 얻어진 것이다. V_i 와 X_i 의 관계는 식 (1)과 같다.

$$X_i = (Q_{U_i} - Q_{L_i})V_i/4 + (Q_{U_i} + Q_{L_i})/2 \quad (1)$$

여기서, Q_{U_i} = 각 칼렌더의 공정조건의 최대값

Q_{L_i} = 각 칼렌더의 공정조건의 최소값

$$i = 1, 2, 3$$

실험의 시행순서는 완전 랜덤화하는 것이 원칙이나 실험시 칼렌더 3의 재질을 Hard Nip과 Soft Nip으로 고정시켜 놓고 각 칼렌더의 온도의 수준을 랜덤하게 변화시키면 히스테리시스가 생기므로 온도의 수준을 정하여 놓고 압력을 변화시키는 분할구 설계를 하였다. 즉, 분할구 설계는 관심 요인이 둘 이상인 요인 실험 상황에서 실험 순서의 완전한 랜덤화가 불가능할 경우, 한 요인을 플랏으로 간주하는 형식의 제한된 랜덤화

과정을 사용하는 설계방식을 뜻하는데, 여기에서는 칼렌더 2, 3의 온도를 블록으로 지정하고 나머지 공정조건(압력)을 완전히 랜덤화시키는 설계 방식을 취했다.

표 2. 분할구 설계 분산분석표: 두께

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	P-Value
칼렌더3의 재질	68862.336	1	0.0001
온도	6873.612	8	0.3133
재질*온도(오차)	4815.695	8	
압력	6869.756	8	0.0162
재질*압력	5996.989	8	0.0241
압력*온도	0	8	1
재질*온도*압력(오차)	1335.788	8	

표 3. 분할구 설계 분산분석표: 광택

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	P-Value
칼렌더3의 재질	6605.757	1	0.0001
온도	167.687	8	0.3822
재질*온도(오차)	134.733	8	
압력	177.752	8	0.0060
재질*압력	167.708	8	0.0072
압력*온도	0	8	1
재질*온도*압력(오차)	25.108	8	

이렇게 계획된 실험을 실시한 후 품질 특성치를 얻기 위해 표

표 4. 분할구 설계 분산분석표: 거칠음도

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	P-Value
칼렌더3의 재질	64.161	1	0.0001
온도	2.777	8	0.8238
재질*온도(오차)	5.506	8	
압력	1.891	8	0.0001
재질*압력	3.028	8	0.0001
압력*온도	0.532	8	0.0001
재질*온도*압력(오차)	0	8	

본을 채취하는 방법은 정상 운전 상태에서 칼렌더 1은 그대로 유지하고 칼렌더 2와 칼렌더 3을 Open시키고 일정량의 표본을 얻은 다음 이것을 가로로 전, 중, 후로 구분하여 25×30 cm 크기의 표본을 각각 36매씩 취하였으며 실제 실험은 중의 36매로 실시하였다. 각 표본당 두께, 광택, 거칠음도는 5회씩 반복 측정하여 품질 특성치 Y_{ijk} 로 나타냈고, 여기서 i 는 품질 특성(두께=1 광택=2 거칠음도=3), j 는 실험조건, k 는 반복 측정치(1,2,3,4,5)를 나타낸다.

근래에 A제지회사에서는 백판지 제조를 위해 국내 최초로 SNC를 도입, 실용화 단계에 이르렀다. 본 장에서는 칼렌더 3의 재질이 Soft Nip(SN)으로 바뀌었을 때와 기존의 Hard Nip(HN)을 사용했을 때의 성능변화를 파악하기 위하여 실험결과 측정된 각 품질 특성치들에 대하여 분산분석을 수행하였다. 분할구 설계를 통해 얻어진 품질 특성치들에 관한 분산분석 결과는 <표 2>에서 <표 4>에 나타난 바와 같다.

<표 2>에서 <표 4>의 분산분석표를 보면 칼렌더 3의 재질을 어떻게 하느냐에 따라 각 품질 특성치의 평균이 유의하게 달라짐을 알 수 있다. 뿐만 아니라 각 특성치마다 칼렌더 3의

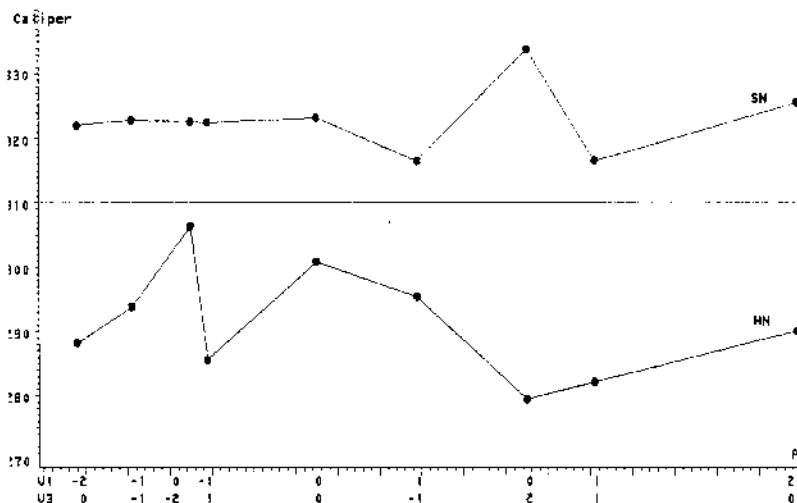


그림 3. 재질변화 및 압력수준에 따른 두께의 평균변화.

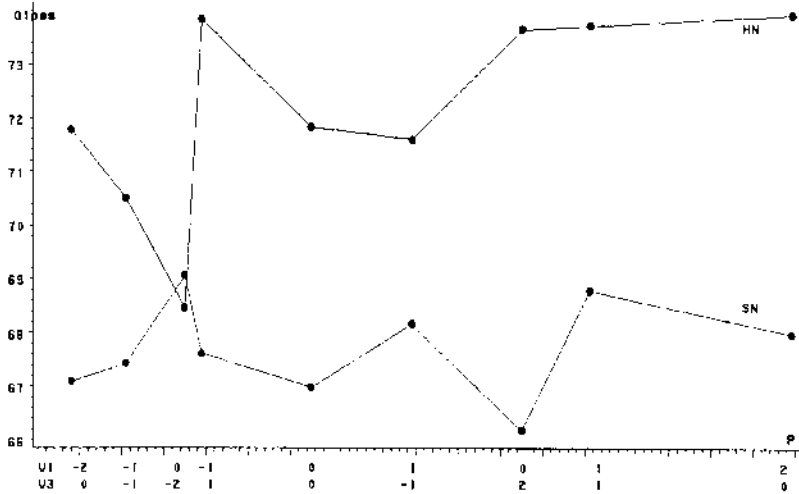


그림 4. 재질변화 및 압력수준에 따른 광택의 평균변화.

재질과 압력의 교호작용이 있다는 것을 *p*-Value값을 통해 추론할 수 있다.

각 칼렌더의 실비구성과 압력의 교호작용이 신재로 품질 특성치인 두께의 평균의 변화에 미치는 영향은 <그림 3>에서 <그림 5>에 나타난 바와 같다.

<그림 3>에서 <그림 5>를 통해 본 결과, 기대했던 대로 광택과 거칠음도면에 있어서는 칼렌더 3의 재질이 HN일 때 SN보다 더 우수하게 나타나고 있다. 그러나, 전문가들이 가장 중요시하는 두께에 있어서는 칼렌더 3의 재질이 HN일 때 만족해야 할 규격 조건인 310mm 이하로 규격에서 벗어남을 알 수 있다. 이를 통해 품질 특성치 중 가장 우선시되는 두께의 규격을 만족시키는 SN(Soft Nip)으로 칼렌더 3의 재질을 고정시킨 후 두께, 광택, 거칠음도의 평균치는 목표값에 가깝게 하고 분산치를 최소화시키는 것을 동시에 어느 정도 만족시킬 수 있

는 공정 조건을 찾고자 한다.

먼저, 각 품질 특성치에 대한 자료를 분석하기 위해 품질 특성치 Y_{ijk} 가 정규분포 $N(\mu_i, \sigma_i^2)$ 을 따르며 각 특성치의 평균 및 분산모형은 다음과 같다고 가정한다(Engel and Huele, 1982).

$$\mu_i = f(V_j)\alpha \tag{2}$$

$$\sigma_i^2 = \text{Exp}(f(V_j)\beta) \tag{3}$$

여기서 $f(V_j)$ 는 V_1, \dots, V_4 의 cross product term 들을 포함한 이차함수를 나타낸다. <표 1>의 중심합성설계를 바탕으로 얻어진 공정 후 자료 Y_{ijk} 를 이용하여 식 (2), (3)와 같은 반응표면모형들을 최우추정량을 이용하여 추정한 결과 중, 일례로 제품 평량이 $240g/m^2$ 인 백판지의 경우 추정된 두께의 평균과 분산의 반응표면모형이 <표 5>에 제시되었다.

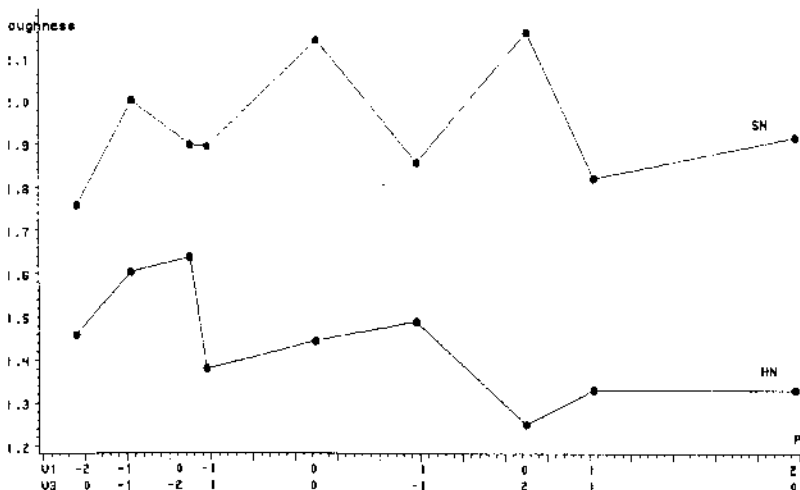


그림 5. 재질변화 및 압력수준에 따른 거칠음도의 평균변화.

표 5. 평량 240g/m²인 백판지의 두께에 대한 평균 및 분산의 반응표면모형

< 분산모형 - $\hat{\sigma}_i^2$ >

Cov Parm	Estimate	Std Error	Z	Pr > Z
EXP V ₁	0.27391899	0.18759765	1.46	0.1443
EXP V ₂	1.01930887	0.17085338	5.97	0.0001
EXP V ₃	-0.19865763	0.16522806	-1.20	0.2292
EXP V ₄	0.42481060	0.19674112	2.16	0.0308
EXP V ₁ V ₂	-0.02933462	0.19653977	-0.15	0.8814
EXP V ₁ V ₃	0.49804538	0.21710186	2.29	0.0218
EXP V ₁ V ₄	0.02661345	0.21628115	0.12	0.9021
EXP V ₂ V ₃	0.32212455	0.21430323	1.50	0.1328
EXP V ₂ V ₄	-0.49993994	0.19560921	-2.56	0.0106
EXP V ₃ V ₄	0.09644961	0.23010012	0.42	0.6751
EXP V ₁ ²	-0.09141480	0.15941965	-0.57	0.5664
EXP V ₂ ²	0.17428710	0.13431290	1.30	0.1944
EXP V ₃ ²	-0.46451929	0.14322722	-3.24	0.0012
EXP V ₄ ²	0.13002438	0.17278155	0.75	0.4517

< 평균모형 - $\hat{\mu}_i$ >

Effect	Estimate	Std Error	DF	t	Pr > t
INTERCEPT	322.45000000	0.68372536	165	471.61	0.0001
V ₁	-0.81922284	0.48666728	165	-1.68	0.0942
V ₂	-5.97918662	0.60925970	165	-9.81	0.0001
V ₃	2.41415358	0.30524038	165	7.91	0.0001
V ₄	-2.62563974	0.56702953	165	-4.63	0.0001
V ₁ V ₂	2.31557708	0.62168536	165	3.72	0.0003
V ₁ V ₃	0.00617030	0.38836025	165	0.02	0.9873
V ₁ V ₄	-0.32166148	0.51106815	165	-0.63	0.5300
V ₂ V ₃	2.97075673	0.55394260	165	5.36	0.0001
V ₂ V ₄	-1.03878432	0.57133690	165	-1.82	0.0709
V ₃ V ₄	1.84875919	0.52167225	165	3.54	0.0005
V ₁ ²	-0.27553217	0.36329151	165	-0.76	0.4493
V ₂ ²	-2.76492571	0.45255061	165	-6.11	0.0001
V ₃ ²	1.46611720	0.23845228	165	6.15	0.0001
V ₄ ²	-0.32201749	0.45102047	165	-0.71	0.4763

4. 다기준 최적화를 이용한 강건설계

본 장에서는 각 품질 특성치에 대한 평균 및 분산 모형을 토대로 A제지의 백판지 제조공정 중 칼렌더 공정조건의 강건설계를 하는 데 그 목적이 있다. 강건설계를 통하여, 품질 특성치의 목표치로부터 제품의 품질변동을 작게 하는 공정조건을 찾고자 한다. 일반적으로 백판지는 광택과 두께는 어느 정도 크게 유지하고, 거칠음도는 낮게 할수록 좋은 품질을 얻을 수 있다. 이를 만족시키면서 각 특성치의 분산 정도를 줄이는 것이 바로 이 분석의 목적이다. 먼저 각 특성치의 분산 정도의 합이 최소가 되도록 해야 한다. 하지만 각 특성치의 측정단위가 다르므로, 그 크기를 정규화시킬 필요가 있다. 즉 각 분산치의 단순 비교 대신에, 각 분산정도에 각 평균의 제곱으로 나누어 준 값(Coefficient of variation)들의 합을 최소화하는 것이 더욱 타당하다고 할 수 있다. 이렇게 정량화된 식은 아래와 같다(Castillo, 1996; Engel and Huele, 1996; Lee and Yum, 1998).

목적함수

$$\text{Min } \sum_1^3 w_i (\sigma_i^2 / \mu_i^2) \quad (4)$$

(i: 1=광택, 2=두께, 3=거칠음도)

제약조건

$$\mu_1 \geq 48, \quad 310 \leq \mu_2 \leq 330, \quad \mu_3 \leq 2 \quad (5)$$

여기서 $\hat{\mu}_i$ 와 $\hat{\sigma}_i^2$ 은 <표 5>의 결과를 토대로 유의수준 10%에서 유의한 관계가 있는 변수들만으로 구성된 평균과 분산모형을 이용하였다.

즉 두께의 경우 사용된 반응표면은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_1 = & 322.45 - 0.819 V_1 - 5.979 V_2 + 2.414 V_3 - 2.626 V_4 \\ & + 2.316 V_1 V_2 + 2.971 V_2 V_3 - 1.039 V_2 V_4 \\ & + 1.849 V_3 V_4 - 2.765 V_2^2 + 1.466 V_3^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_1^2 = & \text{Exp}(1.019 V_2 + 0.425 V_4 - 0.50 V_1 V_3 \\ & - 0.50 V_2 V_4 - 0.465 V_3^2) \end{aligned} \quad (7)$$

w_i 는 각 품질특성의 중요도를 나타내며, 본 연구에서는 전문가의 경험에 따라 $w_1=0.4$, $w_2=0.5$, $w_3=0.1$ 의 가중치를 적

용하였다. 각 품질특성의 제약조건도 역시 전문가와 상의한 결과 식 (5)와 같이 형성되었다.

$V_1 \sim V_4$ 의 최적해를 찾기 위해 SAS Package의 PROC NLP를 이용하여 비선형 프로그램을 푼 결과 <표 6>과 같은 결과를 얻었다. <표 6>을 보면 목적함수를 최소로 하는 인자의 수준값(V_i^*)들이 주어져 있다. 현재 실제공정에서의 운전은 각 공정변수의 수준이 -1에서 1사이에서 이루어진다. 결과를 보면, 칼렌더 2의 압력, 칼렌더 3의 압력 및 온도의 최적 공정조건이 현재의 수준보다 더 낮은 수준으로 나타나 있다. 즉, 칼렌더 2의 압력, 칼렌더 3의 압력 및 온도를 현재 운영중인 조건보다 더 낮추는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

이상의 최적화분석은 반응표면 분석을 통해 얻어진 각 실험 인자와 관련된 모수의 점 추정치들을 이용하여 수행되었다. 다시 말해, 식 (6), (7)과 같이 각 품질 특성치의 평균모형과 분산모형을 기초로 하여 최적화를 수행한다. 이 때문에 한번의 반응표면 분석을 통해 나온 결과에 의해 강건설계 결과가 전적으로 결정되어 sampling 오차를 고려하지 못하는 단점이 있다. 이러한 점을 시정하기 위해 반응표면 분석 결과를 바탕으로 Bootstrap Resampling 방법을 통해 모의 실험된 모수 추정치들의 분포를 활용하여 공정조건의 최적화에 이용하고자 한다. Bootstrap Resampling 방법은 다음과 같은 측면에서 강건설계에 활용되었다(Efron, 1982).

반응표면분석에서 얻어진 $\hat{\alpha}$ 과 $\hat{\beta}$ 은 최우추정량이므로 다음과 같은 가정을 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} & \sim N(\alpha, \text{Cov}(\hat{\alpha})) \\ \hat{\beta} & \sim N(\beta, \text{Cov}(\hat{\beta})) \end{aligned} \quad (8)$$

실제 α , β 는 알려져 있지 않으므로 실험결과 구한 $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$ 을 실제 α 와 β 라고 가정하고 Bootstrap sample α^* , β^* 를 여러 번(예 200번)만들어 낸다. 이러한 Bootstrap sample을 다음과 같은 두 가지 방법을 이용하여 디자인 최적화에 이용하였다. 첫째로, 위의 식 (8)의 가정을 통해 α^* , β^* 를 200개를 만들어 내고, 동시에 Bootstrap sample 수만큼 배수가 된 제약조건들을 고려하고 각 200개의 목적함수 값들의 합을 최소화하는 방법이다.

목적함수

$$\text{Min } \sum_{j=1}^{200} \left[\sum_1^3 w_i (\sigma_i^2 / \mu_i^2) \right]_j \quad (9)$$

표 6. 강건설계 분석결과

최적 공정조건 \ 방법	One Sample	Bootstrap Resampling-I	Bootstrap Resampling-II	
			하한	상한
X_1 칼렌더 2압력	19.575	15	21.075	37.275
X_2 칼렌더 2온도	35.525	36.105	32.975	38.06
X_3 칼렌더 3압력	27	27	27	27
X_4 칼렌더 3온도	49.332	49.975	47.935	53

제약조건

$$\mu_1^* \geq 48, 310 \leq \mu_2^* \leq 330, \mu_3^* \leq 2.0 \quad (10)$$

($r = 1, \dots, 200$)

두 번째로, 제약식과 더불어 목적함수를 개개 Bootstrap sample 수만큼 고려하여 얻어지는 최적변수들 하나하나를 관찰지로 간주하고 각 공정변수의 95% 신뢰구간을 찾아내는 방법을 들 수 있다. 이들 분석결과는 표 4에 정리된 바와 같이 각 방법론의 차이로 각기 다른 강건설계 결과를 나타냄을 알 수 있다. 하나의 표본(One Sample)을 바탕으로 얻은 반응 표면식으로부터 유도된 최적설계보다 추정된 반응 표면식의 불확실성을 감안한 최적설계(Bootstrap Resampling-I)가 엄밀한 의미에서 강건설계라고 볼 수 있으며, 각 Bootstrap Resample 환경에서 생성된 수리계획식을 최적화하는 해를 바탕으로 얻어진 Bootstrap 신뢰구간(Bootstrap Resampling-II)은 강건설계에 flexibility를 허용하는 일종의 허용차 설계의 개념으로 받아들일 수 있겠다.

5. 결론

보통의 종이가 인쇄 후의 품질을 높이기 위해 제조 과정에서 표면 특성 특히 백색도나 평활도, 광택도 등을 중요하게 관리하는데 비해 백판지의 경우는 표면 특성은 물론 두께, 강도 등 튼튼한 용기(Box)로 만드는 데 필요한 물리적 특성도 중요하게 관리하게 된다. 이에 따라 전통적으로 원료의 조성, 제품의 수분, 코팅액의 조약, 코타의 운전 등에 대한 폭넓은 연구가 있어 왔으며 근래 관심분야는 칼렌더의 조성이 이러한 품질 특성에 미치는 영향이다. 본 연구는 국내 백판지 업계에 최초로 도입되어 운전 중인 2 Roll 칼렌더를 대상으로 Soft Nip과 Hard Nip의 최적조합과 압력, 온도 등 운전 파라미터의 최적범위를 찾기 위한 기초분석으로 우선 중심 합성 설계(Central Composite Design) 실험을 이용하였다. 가대했던 대로 광택과 거칠음도면에 있어서는 칼렌더의 재질이 Hard Nip일 때 Soft Nip보다 더 우수하게 나타났으나 전문가들이 가장 중요시하는 두께에 있어서는 Hard Nip칼렌더의 경우 만족해야 할 규격조건의 백판지를 만들어 내지 못함을 알 수 있었다. 이를 통해 품질 특성치 중 가장 우선시되는 두께의 규격을 만족시키는 Soft Nip으로 칼렌더의 재질을 고정시킨 후 두께, 광택, 거칠음도의 평균치는 목표값에 가깝게 하고 분산치를 최소화시키는 것을 동시에 어느 정도 만족시킬 수 있는 공경조건을 찾고자 품질 특성치들에 대한 평균과 분산의 반응표면 분석을 수행하여 다요소 강건설계의 기초로 이용하였다. 또한 연구 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 강건설계시 Bootstrap Resampling 방법을 이용하였다.

본 연구에서는 품질 요소로 두께, 광택, 거칠음도의 각 특성치마다 중요도를 전문가의 의견에 따라 미리 부과하여 어느 정도 만족시키기 위한 다요소 분석을 수행하였다. 중요도가 미리 정해지는 경직성을 보완하기 위한 방법으로 여러 가지 가능성이 있었다. 한 가지 대안으로 여러 가지 요소들을

하나로 묶어 주는 통합 연산자를 사용하여 접근하는 방법이다. 먼저 각 특성치의 만족도를 나타내는 호감도라는 척도를 정의하고, 각 호감도의 기하평균(Geometric Mean)같은 연산자를 호감도 함수로 이용하여 여러 가지 요소를 동시에 최적화하는 방법이다(Derringer, 1980; 변재현, 김광재, 1998). 다른 대안으로는 각 제약조건이나 변수의 모호성을 고려하여 퍼지계수를 도입하여 분석하는 방법을 들 수 있다(Khoo and Ho, 1996; 이상완, 남현우, 1997a; 이상완, 남현우, 1997b). 그리고 각기 상충되는 여러 가지 목표들을 동시에 고려하여 빠른 시간에 근사 최적해를 찾을 수 있는 여러 발견적 기법들의 이용도 들 수 있겠다. 먼저 생물의 진화과정, 즉 자연선택과 유전 법칙을 모방한 확률적 탐색기법인 유전자 알고리즘(김여근, 윤복식, 이상복, 1997), 국부 최적점을 개선하기 위한 범용의 최적화 기법으로 시뮬레이티드 어닐링, 타부서치 등의 메타휴리스틱 기법들이 바로 그것이다(Mitsuo, Takeaki and Changyun, 1998). 본 사례에서 각 품질 특성치들에 대한 목적함수를 설정 한 뒤 언급된 방법을 실제 적용하는 연구가 추후 연구과제로 남아 있다.

참고문헌

- 김여근, 윤복식, 이상복 (1997), *메타휴리스틱*, 영지문화사, 서울.
- 변재현, 김광재 (1998), A desirability function approach to the robust design for multiple quality characteristics, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 24, 287-296.
- 이상완, 남현우 (1997a), 퍼지환경에서 다목적 비선형계획문제의 절충 의사결정, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, 23(1), 163-175.
- 이상완, 남현우 (1997b), 퍼지모수를 가지는 다목적 비선형계획문제의 절충 의사결정, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, 23(2), 307-320.
- 한국제지공업연합회 판지분과위원회 간 (1986), *백판지의 기초지식*, 97~105(백판지의 품질).
- Castillo, E. D. (1996), Multiresponse process optimization via constrained confidence regions, *Journal of Quality Technology*, 28, 61-70.
- Derringer, G. (1980), Simultaneous optimization of several response variables, *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214-219.
- Efron, B. (1982), *The Jackknife, The Bootstrap and Other Resampling Plans*, SIAM, Philadelphia, PA.
- Engel, J. and Huele, A.F. (1996), A generalized linear modeling approach to robust design, *Technometrics*, 38, 365-373.
- Khattri, R., Robust parameter design - a response surface approach, *Journal of Quality Technology*, 28, 187-198.
- Khoo, L.P. and Ho, N.C. (1996), Framework of a fuzzy quality function development system, *International Journal of Production Research*, 34(2), 299-311.
- Lai, Y.J. and Chang, S.I. (1994), A fuzzy approach for multiresponse optimization : an off-line quality engineering problem, *Fuzzy sets and Systems*, 63, 117-129.
- Lee, P.H. and Yoon, B.J. (1998), Parameter design in the case of multiple performance characteristic, *Proc. of the 1st Korea-Japan Joint Conf. on Industrial Engineering and Management*, 30-31.
- Mitsuo, G., Takeaki T. and Changyun, L. (1998), Hybridized genetic algorithms for solving bicriteria reliability design problem, *Proc. of the 1st Korea-Japan Joint Conf. on Industrial Engineering and Management*, 125-130.
- Montgomery, D. C. (1991), *Design and Analysis of Experiments*, Wiley, New York Third edition.
- Schultz, B. J. (1995), The effect of calender and formulation variables: a

comparison of on-line soft nip & supercalendering, *TAPPI Proceedings*, 345-356.

Talbot, B. J. and Latimer, J. J. (1992). A comparative study of hot soft nip calendering and conventional supercalendering, *TAPPI Proceedings*, 77~90.



백계성

1974년 성균관대학교 전기공학 학사
1998년 연세대학교 산업대학원 공업경영전공 석사
1997년 ~ 1998년 한솔제지 이사
관심 분야: 공장자동화, 경제성공학, 조직구조 등

김세진

1998년 연세대학교 산업시스템공학과 학사
현재: 연세대학교 산업시스템공학과 석사과정
관심 분야: 의사결정론



손소영

1981년 연세대학교 수학과 학사
1983년 한국과학기술원 산업공학과 석사
1989년 Univ. of Pittsburgh 산업공학과 박사
현재: 연세대학교 산업시스템 공학과 교수로 재직중
관심 분야: 품질 및 신뢰도 공학모형 추정, 마케팅 분석 등