

고분자압출의 공정변수가 통기성필름강도에 미치는 영향

최만성*

(Manuscript received: Apr, 23, 2012 / Revised: May, 18, 2012 / Accepted: May, 22, 2012)

Influence of Process Parameters on the Breathable Film Strength of Polymer Extrusion

Man-Sung Choi*

Abstract

Optimization of process parameters in polymer extrusion is an important task to reduce manufacturing cost. To determine the optimum values of the process parameters, it is essential to find their influence on the strength of polymer breathable thin film. The significance of six important process parameters namely, extruder cylinder temperature, extruder speed, extruder dies temperature, cooling roll temperature, stretching ratio, stretching roll temperature on breathable film strength of polymer extrusion was determined. Moreover, this paper presents the application of Taguchi method and analysis of variance (ANOVA) for maximization of the breathable film strength influenced by extrusion parameters. The optimum parameter combination of extrusion process was obtained by using the analysis of signal-to-noise ratio. The conclusion revealed that extruder speed and stretching ratio were the most influential factor on the film strength, respectively. The best results of film strength were obtained at higher extruder speed and stretching ratio.

Key Words : Polymer extrusion(고분자압출), Breathable film(통기성필름), Tensile strength(인장강도), Taguchi method(다구찌법), Process parameter(공정변수), Optimization(최적화)

1. 서론

통기성 필름(breathable film)은 기저귀나 생리대의 가장 외측에 들어가는 필수적인 제품으로서 공기 통풍성과 강성, 내열성, 특히 필름의 두께 균일성 등이 요구된다^(1,2). 특히 최근에는 세계적인 글로벌 제조업체들이 고품질의 제품으로 원가절감을 통한 생산성 향상을 위해서 기본적인 요구물성을 유지하되, 향상된 20 μm 이하의 초박막의 얇은 필름을 요구하고 있는 실정이다. 현재 통기성 필름은 공기통풍성을 유지하기 위해 폴리에틸렌에 다량의 무기물(탄산칼슘)을 혼합하여 T-다이(die)형 압출기를 통해 20~30 μm 의 필름을 제조하고 있으며, 이때 균일한 두께 유지와 강성이 필수적이다. 따라서 고속에서의 고분자

의 용융 유동이 일정하게 유지되어야 하는 어려움이 있다. 종래의 고분자압출을 할 경우 일반적으로 필름의 두께가 25 μm 이상인 제품을 생산속도가 100m/min 이하에서 생산하여 왔으나, 13 μm 의 초박막 필름으로 기계적강도, 내열성, 두께균일성 및 가공성이 향상된 최고 300m/min의 고속생산이 가능한 초박막 통기성 필름의 양산 기술을 개발하는 추세이다. 고분자압출에 있어서 필름강도의 요구특성은 고강성의 초기 및 파단강도가 제품을 사용하는 업체에서 요구하는 규격하한(lower specification limit, LSL) 이상이어야 하며, 고분자필름강도에 영향을 미치는 주요인자는 수지의 분자량^(3,4), 결정화도(crystallinity)⁽⁵⁻⁶⁾, 수지의 분자량분포, 용융지수(MI)⁽⁷⁾, 밀도⁽⁸⁾ 등으로 알려져 있다. 이러한 방법은 고분자 용융체(melt)의 특

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 (mschoi@kut.ac.kr)
주소: 330-708 충남 천안시 동남구 병천면 충절로 1800

성을 규명해야 하므로 그 분석이 매우 까다롭고 번잡하다. 따라서 압출공정변수의 간단한 실험으로 특성치인 필름강도의 품질 요구조건을 찾아내는 것이 합리적인방법으로 여겨지나, 이에 관련된 연구는 국내외적으로 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실험용 압출기를 개발하고, 고분자 압출 실험을 통하여 통기성 필름강도의 요구물성을 만족할 수 있는 압출기의 최적공정조건을 구하였다.

2. 고분자 필름의 압출

고분자압출(polymer extrusion) 성형은 Fig. 1과 같이가열에 의해 용융된 플라스틱을 연속적으로 성형하는 방법이며, 일반적인 설비로서는 압출기, 다이 및 연신장치의 세 부분이 주요 요소이다.

압출기는 성형재료를 가열하여 균일한 용융체 상태로 만들면서 이것을 가압하여 연속적으로 송출하는 펌프의 역할을 하며, 다이는 소정의 형태를 만들고, 연신장치는 다이로부터 압출된 성형품의 형상이나 치수를 규제하면서 냉각하여 연신하는 작용을 한다. 고분자 가공에서의 압출 공정은, 호퍼(hopper)를 통하여 펠렛(pellet) 또는 분말상의 고형 수지가 가열된 배럴(barrel)과 그 내부의 회전 스크루(screw)와의 상대 속도 차에 의해 연속적으로 이송, 압축, 용융되면서 일정 형태의 다이를 통과한 후 냉각되어 필름, 시트(sheet), 파이프(pipe), 이형 압출물(profile) 등으로 제조되는 공정으로 구성된다. 압출기에는 단축스크루(single screw) 식과 다축스크루(multi screw) 식이 있다. 단축스크루 식은 스크루가 하나뿐인 것으로서⁽⁹⁾ 현재 가장 널리 사용되고 있다. 압출기 내의 스크루는 고체이송을 위한 공급부(feed zone), 용융을 위한 용융부(melting zone), 그리고 용융체의 이송을 위한 용융수지 이송부(melt pumping zone)로 나누어진다. 다축 스크루 식은 2개 이상의 스크루를 조합한 것이다. 현재, 고분자필름은 다이의 구조에 따라 취입 필름(blown film)과 압출 주조필름(casting film)으로 구분되며, 필름의 층(layer)수에 따라 단층필름(mono layer)과 다층필름(multi layer)으로 구분된다.

통기성 필름제조 장비는 일반적으로 압출 성형 주조방식으로 이루어져있다. 압출주조필름의 경우, 광학성과 압출 생산성이 우수하다. 그러나 분자배양 조절이 매우 어려워 Fig. 2에 나타난 MD(machine direction)와 CD(cross direction)의 물성 편차가 심하다⁽¹⁰⁾.

특히 통기성 필름의 경우에는 Fig. 3의 SEM 이미지와 같이 폴리에틸렌 수지에 무기물인 탄산칼슘이 다량 함유(약 50%)되어 필름의 두께가 얇아지거나, 생산속도가 빨라지면 이러한 현상이 더욱 심해지는 단점이 있다. 고분자압출필름의 주요 가공 변수로는 압출 실린더 가공 온도, 다이온도, 다이 갭, 에어 갭,

연신비, 가공 속도, 냉각온도, 필름두께, 필름 폭 등이 있다. 압출성형주조방식에 주로 사용되는 다이는 옷걸이형태(coat hanger type)이다. 옷걸이형태의 다이의 경우 고분자수지의 유동흐름이 중심부와 양쪽사이드 부분의 차이가 심하게 되어 있어 두께가 얇은 필름을 고속 생산할 경우에는 심한 두께편차로 인한 후두 불량 발생되며 다이 내에 탄화물 증가 및 적체로 인한 홀 발생이 심화되어 생산이 어려워진다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 원재료의 개발도 중요하지만, 더욱 중요한 것은 압출기 내에서 용융된 고분자 수지가 다이를 통과할 때 보다 효과적으로 유동흐름을 제어하여 균일하게 배출함과 동시에 다이 내에 탄화물의 적체할 수 있는 요인들을 제거할 수 있는 압출공정변수의 제어에 있다.

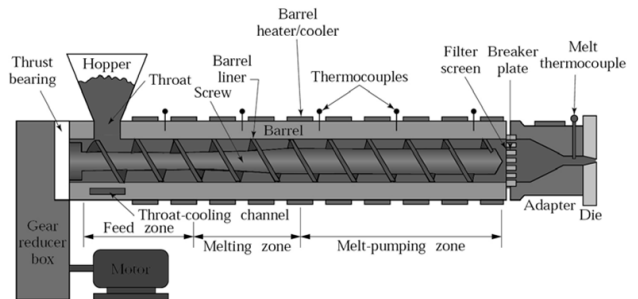


Fig. 1 Basic components of a single screw extruder

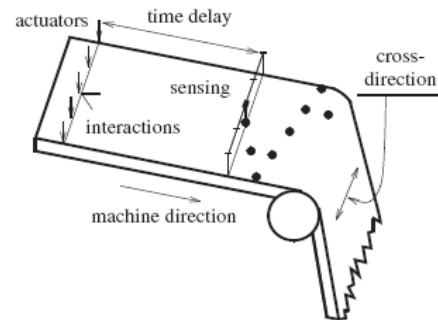


Fig. 2 Schematic of film process

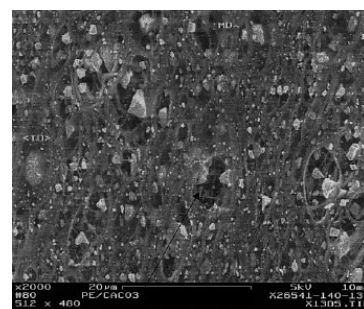


Fig. 3 SEM photomicrograph (×2,000) of microporous calcium carbonate filled PE film

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장비 및 실험재료

실험에 사용된 고분자압출기의 모델명은 BNP PE-50로 고속·통기성필름개발을 위해 Fig. 4와 같이 별도로 제작된 장비이다. 이 장비의 압출기 형식은 단축 스크루식이며, 주요 규격으로는 스크루길이가 1,280mm, 스크루직경이 50mm로 L/D=26이다.

현재 일반적으로 사용되고 있는 통기성 필름은 앞서 기술한 바와 같이 20 ~30 μ m 두께의 필름을 100m/min 수준의 속도로 생산되어지고 있는데, 이러한 가장 큰 이유는 통기성을 부여하기 위하여 50%이상의 많은 탄산칼슘 무기필러를 충전시켜 컴파운드해야 하기 때문이다. 따라서 이러한 무기 필러를 효과적으로 분산 시킬 수 있는 가공성과 물성 균형을 가진 원료의 선택과 또한 폴리에틸렌 베이스 원료와 탄산칼슘 무기필러의 분산효과를 향상시키기 위한 폴리머 상용화제와 고속 생산 가공시 용융 압력 및 열에 의한 산화를 최소화하기 위한 산화 방지 첨가제의 선택도 매우 중요한 부분으로 검토 되어야 한다. 본 실험에 사용된 고속·통기성필름의 기저재료는 LLDPE(linear low density polyethylene)로서 여기에 상용화제, 첨가제, 충전제 등을 혼련하여 MI(melting index), 밀도, 수분 등의 물성측정을 실시한 후 통기성필름에 적절한 컴파운드 원료를 개발하였다. LLDPE는 기계적 성질이 우수하여 산업체에서 많이 사

용되나, 유동성질이나 가공성은 분자질량분포에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다^(11,12). Table 1에 LLDPE의 주요 재료 물성 값을 나타내었다.

3.2 통기성필름의 인장강도 측정

압출된 필름의 인장강도를 측정하기 위해 사용된 계측장비는 Fig. 5와 같으며, 제조사는 SINTECH이고, 주요규격은 500kg/max.이다. 측정방법으로서는 인장시험기의 주 화면으로 이동한 후 시험하고자 하는 내용을 입력한 후 인장시험을 한다.

시험방법으로는 그림의 간격이 정확하게 2인치인지를 확인한다. 다음에 로드 셀(load cell)의 영점을 조정하고, 그림을 연 후 샘플을 수직으로 물리고, 그림을 닫는다. 그리고 주 화면에서 시험을 시작한 후 데이터가 나오면 저장한다. 시편채취방법으로는 Fig. 6과 같이 점보 롤 쪽의 샘플(sample)을 MD 방향으로 반을 접고(그림에서 ①), 점보 롤 쪽을 3등분하여 다시 접는다(그림에서 ②③). 다음에 시편 채취 도구를 사용하여 MD와 CD방향으로 시편을 절단한다. 시편규격 및 수량은 MD 방향으로 1인치x4인치x9장이고 CD방향으로는 4인치x1인치x9장이다.

3.3 Taguchi법에 의한 실험계획

Taguchi 방법은 직교배열표 상에 제어인자와 잡음인자를 동시에 고려하여 S/N비(signal to noise ratio)를 최대화하는 제어

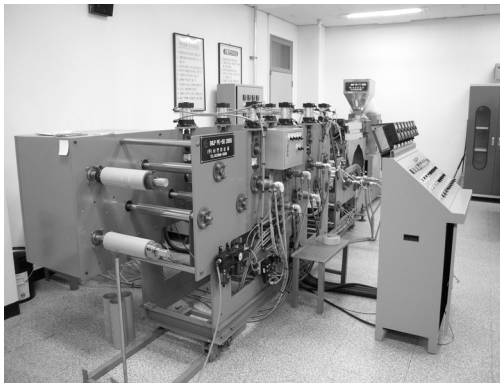


Fig. 4 Breathable film develop equipment

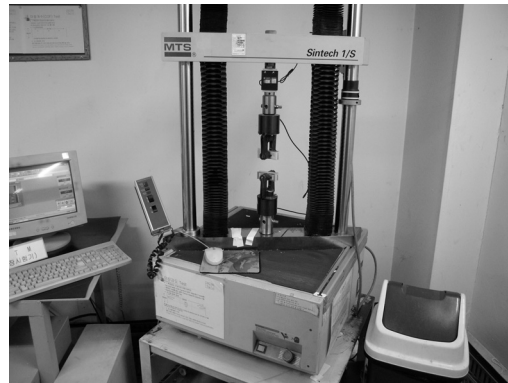


Fig. 5 Tensile strength test M/C

Table 1 Material properties of LLDPE

Properties	Value
Thermal conductivity	0.24J/ms $^{\circ}$ C
Specific heat at constant pressure	2.30J/g $^{\circ}$ C
Density	0.92g/cm ³
Transition temperature	-120/-9 $^{\circ}$ C
Crystalline melting point	125 $^{\circ}$ C
Power law index	0.6

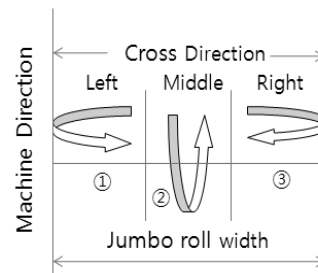


Fig. 6 Sampling of specimen

인자의 조건 즉, 잡음 하에서도 성능특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 근접하는 제어인자의 조건을 찾는 것이다. 평가특성치는 신호와 잡음비로 나타내는데 통기성필름의 인장강도는 업체에서 주로 규격하한을 적용하므로 특성치가 크면 클수록 좋은 망대특성(higher is the best)을 적용하였다. 망대특성의 S/N비는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (1)$$

여기서 y_i 는 실험에서 얻어진 데이터이고 n 은 실험회수를 의미한다. 직교배열표를 활용하는 주목적은 재현성이 높은 요인 효과에 중점을 둔다. 직교배열표는 인자배치에 있어서 작고성과 데이터 해석에 있어서 중요한 성질로서 분산분석(ANOVA, analysis of variation)을 통해 데이터의 전 분산을 인자별 분산함으로 분해하는 것이다. 여기서 압출공정변수인 제어인자(control factors)는 Table 2와 같다. Table 2에서 압출공정변수들을 살펴보면 A는 압출기의 실린더 온도(extruder cylinder temperature), B는 압출속도(extruder speed), C는 압출기의 다이온도(extruder dies temperature), D는 냉각롤 온도(cooling roll temperature), E는 연신비(stretching ratio), 그리고 F는 연신롤 온도(stretching roll temperature)를 나타낸다. 통기성필름의 MD 인장강도와 CD 인장강도는 압출기의 실린더 온도, 압출속도, 압출기 다이온도, 냉각 롤 온도, 연신비, 연신 롤 온도에 의존적이다.

압출공정변수가 특성치인 인장강도에 미치는 영향을 알기 위해서는 분산분석을 해야 하는데 다음과 같은 식들이 이용된다.

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^j \sum_{j=1}^n \eta_{ij}^2 - nr\eta_m^2 \quad (2)$$

$$SS_{factor} = \frac{nr}{L} \sum_{k=1}^L (n_k - \eta_m)^2 \quad (3)$$

$$DF = L - 1 \quad (4)$$

Table 2 Process parameters with levels

Process parameters	Unit	L1	L2	L3
A : Ex. cylinder temper.	°C	220	240	260
B : Ex. speed	rpm	200	250	300
C : Ex. dies temp.	°C	220	230	240
D : Cooling roll temp.	°C	16	18	20
E : Stretching ratio	-	2.0	3.0	4.0
F : Stretching roll temp.	°C	80	90	100

EX. : Extruder, Temp. : Temperature

$$V_{factor} = \frac{SS_{factor}}{DF} \quad (5)$$

$$F_{factor} = \frac{V_{factor}}{V_{error}} \quad (6)$$

여기서 SS_{total} 은 전체제공합, SS_{factor} 은 인자의 제공합, DF 는 자유도, V_{factor} 는 인자의 분산, F_{factor} 는 인자의 F비, 그리고 η_k 는 수준 k 에서 인자의 평균S/N비이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 MD 인장강도의 정규성 검정

많은 통계적 절차는 데이터가 정규분포를 따른다고 가정한다. 이러한 가정을 확인하기 위하여 데이터에 대한 정규성 검정을 수행할 필요가 있다. 정규성을 확인하는 절차로 정규확률도(normal probability plot)를 작성하여 판정하는 방법이 있다.

정규확률도에서 점들이 대부분 직선에 떨어지면 정규성 가정이 만족한다고 판정한다. Fig. 7은 MD 인장강도의 실험자료를 근거로 확률플롯을 나타낸 것이다. 여기에서 사용된 검도 식은 Anderson-Darling식으로 이것은 누적분포함수를 이용하여 검정하는데 검출력이 높은 것이 장점이다. 이 검정에서는 p-값이 0.946으로서 실험데이터가 정규분포라는 가설을 강력하게 입증한다.

4.2 S/N비의 결과

Table 3은 실험에 사용된 직교배열표 L27(33)에 따른 MD 인장강도와 CD 인장강도의 S/N비를 보여준다. 여기서 L27(36)은 27번의 공정조건별 시행, 3수준 및 6개의 제어인자를 나타낸다. 제어인자가 6개인 경우 완전요인법에 의한 실험은 26=64번의 실험횟수가 요구되나, Taguchi 법에서는 실험횟수가 27번으로 줄어든다. 이 직교배열은 각 열의 결과가 다른 열에 영향을 주지 않고 각 인자의 주 효과를 가장 잘 나타낸다.

Fig. 8과 Fig. 9는 Table 3의 실험데이터에 따라 S/N비에 대

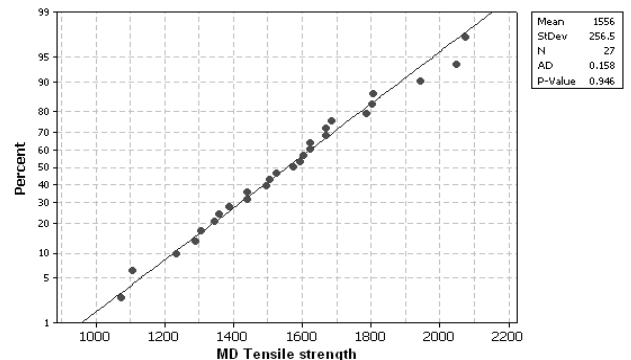


Fig. 7 Probability Plot of MD Tensile strength

Table 3 Orthogonal array L27 (36)

Run	A	B	C	D	E	F	S/N (MD)	S/N (CD)
1	1	1	1	1	1	1	60.62	48.76
2	1	1	1	1	2	2	61.83	43.75
3	1	1	1	1	3	3	63.16	42.14
4	1	2	2	2	1	1	62.66	50.98
5	1	2	2	2	2	2	63.50	49.48
6	1	2	2	2	3	3	64.21	47.85
7	1	3	3	3	1	1	63.95	53.50
8	1	3	3	3	2	2	64.44	52.71
9	1	3	3	3	3	3	65.12	51.80
10	2	1	2	3	1	2	60.89	49.69
11	2	1	2	3	2	3	62.21	44.86
12	2	1	2	3	3	1	64.06	41.51
13	2	2	3	1	1	2	63.17	51.36
14	2	2	3	1	2	3	64.21	50.93
15	2	2	3	1	3	1	65.04	50.60
16	2	3	1	2	1	2	65.13	54.78
17	2	3	1	2	2	3	65.78	54.10
18	2	3	1	2	3	1	66.23	53.52
19	3	1	3	2	1	3	62.33	50.29
20	3	1	3	2	2	1	62.57	49.66
21	3	1	3	2	3	2	62.85	44.45
22	3	2	1	3	1	3	63.56	53.03
23	3	2	1	3	2	1	64.10	51.80
24	3	2	1	3	3	2	64.53	51.17
25	3	3	2	1	1	3	63.66	55.10
26	3	3	2	1	2	1	64.45	54.34
27	3	3	2	1	3	2	66.34	53.73

한 주효과도를 그림으로 나타낸 것으로, 압출공정변수의 각 수준에 따라 S/N비의 평균값이 도시되어있다. 그림에서 S/N비의 경사가 급한 요인이 수준 간에 차이가 있는 즉, 유의한 요인임을 나타낸다. 여기에서 MD 와 CD 인장강도 모두 압출속도, 연신비, 압출기 실린더 온도 순으로 유의한 공정변수임을 알 수 있다. 또한 Taguchi 법에서는 S/N비가 크면 품질특성이 우수하므로 이에 대한 최적의 압출공정조건을 구할 수 있다. S/N비를 바탕으로 MD 인장강도를 최대화하는 공정조건은 실린더의 온도가 240℃, 연신속도 300rpm, 연신 비 4.0 : 1인 A₂B₃E₃이다. 그리고 CD 인장강도를 최대화하는 공정조건은 실린더의 온도가 260℃, 연신속도 300rpm, 연신 비 2.0 : 1인 A₃B₃E₁이다.

4.3 S/N비의 분산분석

압출공정변수의 유의성 검정을 위해 식 (2)에서 식 (6)까지를

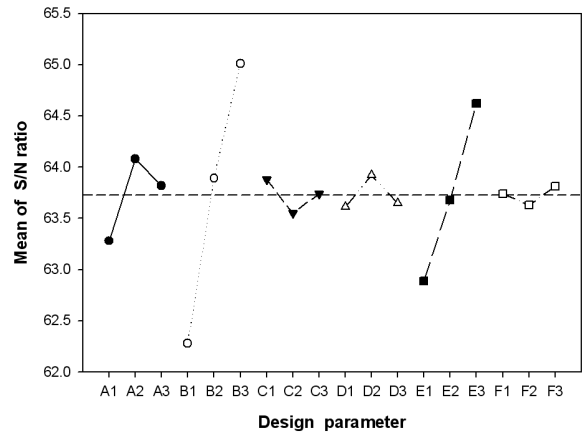


Fig. 8 Main effects plot (data means) for S/N ratios of MD tensile strength

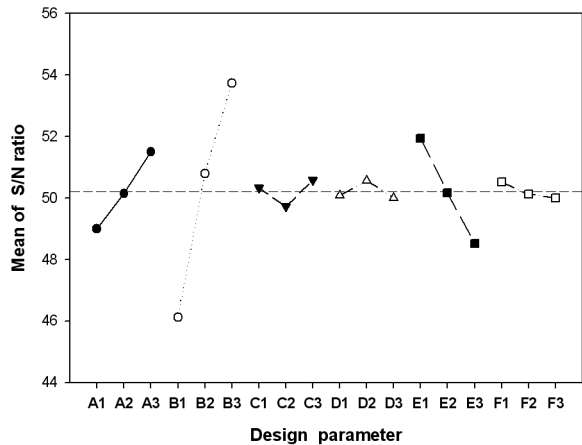


Fig. 9 Main effects plot (data means) for S/N ratios of CD tensile strength

이용하여 S/N비에 대한 분산분석을 하였다. Table 4와 Table 5는 반응변수로 S/N비를 지정하고, 모형에 포함될 인자를 지정한 다음 관련 데이터를 작성한 것이다. Table 4(MD 인장강도)와 Table 5(CD 인장강도)의 분산분석표에서는 모형의 각 항에 대한 자유도(DF), 순차제곱합(Seq. SS), 수정평균제곱(Adj. MS)을 사용하여 얻은 F-통계량, p-값이 나타나있다. 순차제곱합은 이전에 포함된 항에 하나의 새로운 항이 추가된 모형에서의 제곱합이며, 이 값은 모형 차수에 따라 달라진다. 순차 제곱합을 선택한 경우에는 평균 제곱 및 F-검정에 이 값이 사용된다. Table 4와 Table 5의 결과를 사용하여 요인과 반응 데이터의 상관관계가 높은지 여부와 모형에서 각 요인의 상대적 중요도를 확인할 수 있다. Table 4와 Table 5에서 유의수준 α = 10%에서 판단하여 압출기의 실린더 온도, 압출속도, 연신비가 압출기 다이온도, 냉각 롤 온도, 연신 롤 온도에 비해 매우 유의한 요인으로 나타났다. 여기서 압출기 다이온도, 냉각 롤

Table 4 ANOVA table for S/N ratio of MD tensile strength

Source	DF	Seq. SS	Adj. MS	F	P
A	2	3.02	1.51	6.38	0.011
B	2	33.93	17.0	71.8	0.000
C	2	0.50	0.25	1.05	0.377
D	2	0.52	0.26	1.09	0.363
E	2	13.50	6.75	28.6	0.000
F	2	0.14	0.07	0.29	0.751
Error	14	3.31	0.24		
Total	26	54.91			

DF, : Degree of freedom

Seq. SS., : Sequential sum of squares

Adj. MS, ; Adjusted mean of squares

Table 5 ANOVA table for S/N ratio of CD tensile strength

Source	DF	Seq. SS	Adj. MS	F	P
A	2	28.44	14.22	5.75	0.015
B	2	264.96	132.48	53.6	0.000
C	2	3.54	1.77	0.72	0.506
D	2	1.68	0.84	0.34	0.718
E	2	52.34	26.17	10.59	0.002
F	2	1.27	0.63	0.26	0.778
Error	14	34.60	2.47		
Total	26	386.82			

Table 6 ANOVA table for S/N ratio of MD tensile strength after pooling

Source	DF	Seq. SS	Adj. MS	F	P
A	2	3.02	1.51	6.76	0.006
B	2	33.93	16.97	76.12	0.000
E	2	13.50	6.75	30.29	0.000
Error	20	4.46	0.22		
Total	26	54.91			

Table 7 ANOVA table for S/N ratio of CD tensile strength after pooling

Source	DF	Seq. SS	Adj. MS	F	P
A	2	28.44	14.22	6.92	0.005
B	2	264.96	132.48	64.50	0.000
E	2	52.34	26.17	12.74	0.000
Error	20	41.08	2.05		
Total	26	386.82			

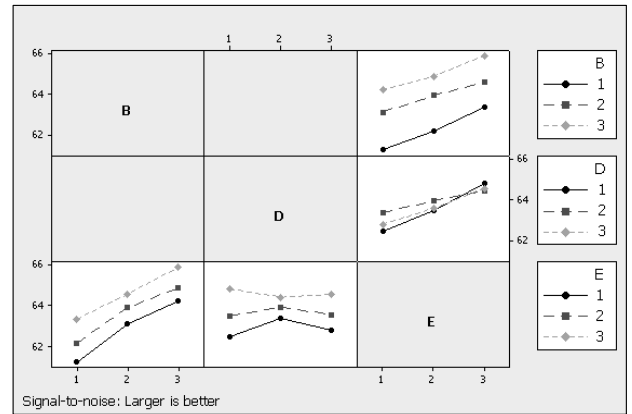


Fig. 10 Interaction plot for S/N ratio of MD tensile strength

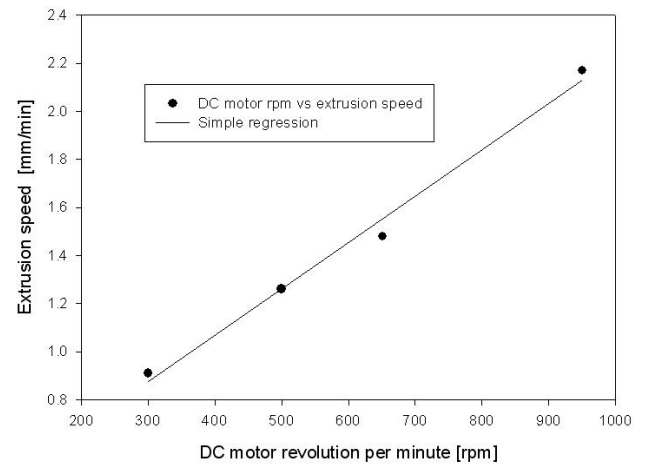


Fig. 11 Interaction plot for S/N ratio of MD tensile strength

온도, 연신 률 온도는 유의하지 않으므로 이들의 순차제공함을 오차 항에 합하면(pooling) Table 6과 Table 7이 된다. 이 표에서 알 수 있듯이 압출속도, 연신비, 압출기의 실린더 온도로 매우 유의하다. 따라서 이 변수들은 압출공정 설계변수로서 매우 중요하다는 것을 의미한다.

Fig. 10은 압출기 실린더 온도, 압출속도, 연신비의 교호작용을 나타낸 것으로 압출기 실린더 온도와 연신 비 간에 미미한 교호작용이 작용하나 무시할 만 하다는 것을 보여준다.

지금까지 살펴본 바에 의하면 통기성필름강도에 가장 큰 영향을 미치는 압출공정변수는 압출속도이다. Fig. 11은 압출실험을 통하여 DC 모터의 회전수와 다이로 통하여 흘러나오는 압출필름의 압출속도와의 관계를 도시한 것이다. 압출속도는 고속카메라를 이용하여 속도를 측정하였다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 신뢰구간 95%에서 DC 모터의 회전수와 압출속도는 거의 선형적인 함수관계이다. 단순회귀분석 결과에 따른 결정계수 R^2 은 0.99이다. 따라서 압출기 DC 모터의 회전수를 제어하면 압출속도를 가변화시킬 수 있다.

4.4 인장강도의 다중회귀분석

다중회귀분석(multiple regression analysis)이란 2개 이상의 예측변수와 1개의 반응변수와의 관계를 선형, 즉 직선으로 가정하는 회귀분석을 말한다. 회귀함수가 얼마나 유효한가는 분산분석표를 작성하여 t-검정을 실시하거나, 실험에서 얻어지는 총 편차의 제곱 합과 회귀제곱 합으로부터 구해지는 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 이용하여 평가한다. 각 인자들로부터 MD 인장강도를 예측하기 위한 방법으로 Table 4와 Table 5의 자료 중 유의하지 않은 압출기 다이 온도, 냉각 롤 온도, 연신 롤의 온도를 오차 항에 합하여 아래의 식 (7)과 식 (8)의 다중회귀식(multiple regression equation)을 얻었다.

$$\hat{y}_{MD} = 58.7 + 0.27A + 1.37B + 0.87E \quad (7)$$

$$\hat{y}_{CD} = 43.5 + 1.26A + 3.80B - 1.70E \quad (8)$$

여기서 \hat{y}_{MD} 는 MD 인장강도의 추정식이고, \hat{y}_{CD} 는 CD 인장강도의 추정식이다. 식 (7)과 식 (8)에서 알 수 있듯이 각 인장강도를 최대화하기 위해서는 압출속도 B를 높이면 된다. 그러나 연신비 E는 MD 인장강도와 양의 상관관계가 있고, CD 인

장강도는 음의 상관관계가 있다. 아울러 회귀분석결과 MD 인장강도의 결정계수 R^2 (수정)의 값은 84.7%, CD 인장강도의 결정계수 R^2 (수정)의 값은 95.4%로 나타났는데 전체변동 중 회귀식에 의해 설명되는 변동이 높은 편이다. Table 8은 모든 압출공정변수에 대한 회귀식의 t-검정 값을 나타낸 것으로 회귀식의 t-검정 값이 높은 변수일수록 추정식 \hat{y} 를 설명하는데 공헌도가 크다. 다중회귀분석을 한 결과 압출기속도 B와 연신비 E의 p-값은 모두 0.000으로 나타나 유의수준 $\alpha=5\%$ 에서 이 공정변수들은 매우 유의함을 알 수 있다. 다음에 주어진 압출공정변수 사이에 선형결합관계를 알아보기 위해 다중공선성(multi-collinearity)을 살펴보았다.

이에 대한 방법으로 분산팽창인수(variance inflation factor, VIF)가 있다. 다중공선성이란 여러 개의 독립변수 사이에 선형결합관계가 존재한다는 것을 의미한다. 다중공선성이 존재하면 회귀계수 추정량의 분산이 매우 커지게 되므로 추정된 결과를 신뢰할 수 없게 된다. 분산팽창인수는 추정회귀계수들의 분산의 독립변수들이 선형으로 관련되어 있지 않을 때와 비교하여 얼마나 팽창되었는지를 측정하는 것이다. 분산팽창인수의 정의는 다음과 같다.

$$VIF = \frac{1}{1 - R_k^2} \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (9)$$

여기서 R_k^2 은 x_i 를 종속변수로 하고 나머지 $p-1$ 개의 다른 x 변수들을 독립변수로 하여 회귀분석할 때의 결정계수이다. 식 (9)에서 독립변수 x_i 가 나머지 독립변수들과 상관이 없다면, R_k^2 이 0이 되고 VIF_k는 1이 된다. Table 8에서 상수와 모든 독립변수들의 VIF가 1이므로 독립변수 상호간의 상관관계가 없음을 알 수 있다.

Fig. 12는 95% 신뢰구간에서 MD 인장강도와 CD 인장강도의 상관관계를 나타낸 것으로 MD 인장강도와 CD 인장강도는 양의 선형관계가 있음을 보여준다. 즉 MD 인장강도가 증가하면 CD 인장강도도 증가됨을 의미한다. 여기서 MD 인장강도와 CD 인장강도의 상관계수 R^2 은 0.326, 수정 결정계수 R^2 (수정)은 0.299, P-값은 0.002로 나타났다. 따라서 두 변수의 관계는 상관관계가 매우 미약한 것으로 보인다. Fig. 12에서 많은 실험점이 점선으로 연결된 95% 신뢰구간을 벗어나 있는데 MD 인장강도와 CD 인장강도 회귀식을 이용하는데 있어서는 어려움이 있음을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 고분자압출가공에 있어서 압출공정변수가 통기성 필름의 강도에 미치는 영향을 Taguchi 방법에 의한 실험을 통하여 조사한 것으로 아래와 같은 결론을 얻었다.

Table 8 t-Test of MD tensile strength

Predictor	Coef.	T	p	VIF
Constant.	724.9	6.18	0.000	1.0
A	46.17	1.95	0.065	1.0
B	240.72	10.18	0.000	1.0
C	-22.39	-0.95	0.355	1.0
D	-1.67	-0.07	0.944	1.0
E	152.50	6.45	0.000	1.0
F	0.39	0.02	0.987	1.0

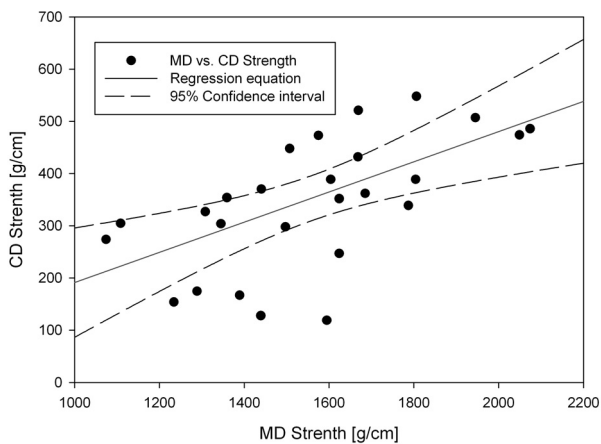


Fig. 12 Scatter plot of MD Tensile strength vs. CD Tensile strength

- (1) 실험에서 얻어진 각각의 인장강도는 정규성 검정을 통해 정규분포를 따랐으며, 압출기의 공정변수는 교호작용이 거의 나타나지 않았다.
- (2) 압출공정변수 사이에 선형결합관계가 존재하는가를 알아보기 위해 분산팽창인수를 계산한 결과 다중공선성이 존재하였다.
- (3) 압출기의 실험에서 얻은 시편을 인장강도 시험을 통하여 MD 인장강도와 CD 인장강도에 큰 영향을 미치는 압출공정변수는 압출속도, 연신비, 압출기의 실린더온도 순으로 나타났다. 이외의 압출공정변수인 다이온도, 냉각 롤 온도, 연신 롤 온도 등은 각 인장강도에 미치는 영향이 적었다.
- (4) MD 인장강도와 CD 인장강도는 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

References

- (1) Suh, C. S., Lee, J. H., Ahn, J. W., Lee, G. J., and Choi, K. S., 2006, "Life Cycle Assessment on Porosity Film in YK's Supply Chain Green Partnership," *Korean Journal of LCA*, Vol. 7, No. 1, pp. 25~32.
- (2) Kundu, P. P., Biswas, J., Kim, H., and Choe, S., 2003, "Influence of Film Preparation Procedures on the Crystallinity, Morphology and Mechanical Properties of LLDPE Films," *European Polymer Journal*, Vol. 39, No. 8, pp. 1585~1593.
- (3) Doi, M., and Ohta, T., 1991, "Dynamics and Rheology of Complex Interfaces," *Int. Journal. Chem. Phys.*, Vol. 95, pp. 1242~1247.
- (4) Takahashi, Y., Kitade, S., Kurashima, N., and Noda, I., 1994. "Viscoelastic Properties of Immiscible Polymer Blends under Steady and Transient Shear Flows," *Polymer. Journal*, Vol. 26, No. 11, pp. 1206~1212.
- (5) Rao, I. J., and Rajagopal, K. R., 2001, "A Study of Strain-induced Crystallization of Polymers," *Int. Journal Solids Structures*, Vol. 38, No. 6-7, pp. 1149~1167.
- (6) Rao, I. J., and Rajagopal, K. R., 2004, "On the Modeling of Quiescent Crystallization of Polymer Melts," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 44, No. 1, pp. 123~130.
- (7) Alaie, S. M., and Papanastasiou, T. C., 1991, "Film Casting of Viscoelastic Liquid," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 3, No. 2, pp. 67~75.
- (8) Muller, A. J., Balsamo, V., Silva, F. D., Rosales, C. M., and Saez, A. E., 1994, "Shear and Elongational Behaviour of Linear Low-density and Low-density Polyethylene Blends from Capillary Rheometry," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 34 pp. 1455~1463.
- (9) Kim, J. -Y., and Chung, H. -H., 2009, "Performance Evaluation and Analysis of the Screw and Die of the Single Screw Extruder Using the CFD," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 18, No. 2, pp. 194~200.
- (10) VanAntwerp, J., G., Featherstone, A. P., Braatz, R. D., and Ogunnaike, B. A., 2007, "Cross-directional Control of Sheet and Film Process," *Automatica*, Vol. 43, No. 2, pp. 191~211.
- (11) Liang, S., Yang, H., Wang, K., Zhang, Q., Du, R., and Fu, Q., 2008, "Unique Crystal Morphology and Tensile Properties of Injection- Molded Bar of LLDPE by Adding HDPE with Different Molecular Weights," *Acta Materialia*, Vol. 56, No. 1, pp. 50~59.
- (12) Lamberti, G., Titomanlio, G., and Brucato, V., 2002, "Measurement and Modeling of the Film Casting Process: 2. Temperature Distribution along Draw Direction," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 57, pp. 1993~1996.