



## 부틸고무의 압출을 위한 압출해석 및 다이설계

최태균 · 이희주\* · 류민영\*<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과

\*서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

접수일(2014년 9월 15일), 수정일(2014년 9월 30일), 게재확정일(2014년 10월 11일)

### Computer Simulation of Extrusion and Die Design for the Extrusion of Butyl Rubber

T. G. Choi, H. J. Lee\* and M.-Y. Lyu\*<sup>†</sup>

Department of Product Design Manufacturing Engineering, Graduate school, Seoul National University of Science and Technology, 172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul, 139-743, S. Korea

\*Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul, 139-743, S. Korea

(Received September 15, 2014, Revised September 30, 2014, Accepted October 11, 2014)

**요약** : 건축용 접착제로 활용되고 있는 부틸고무는 주로 시트의 형태로 사용된다. 본 연구에서는 컴퓨터 해석을 통해 부틸고무 시트 압출용 다이를 설계하였다. 압출용 다이의 내부는 크게 매니폴드와 랜드로 나뉜다. 매니폴드는 다이 중앙에서 유입되는 재료가 폭 방향으로 흐름이 이루어 지도록 하는 역할을 한다. 랜드는 재료가 흐름 방향으로 균일하게 흐르게 하여 균일한 두께의 시트가 성형되도록 한다. 다이는 매니폴드와 랜드 외에도 아일랜드를 설치하여 흐름의 안정을 주도하도록 하는 경우가 많다. 본 연구에서는 컴퓨터 해석을 통하여 다이에서 매니폴드의 각도와 길이, 랜드 길이 그리고 아일랜드를 설계 변수로 하여 다이 출구에서 다이 폭 방향으로 균일한 흐름이 형성되도록 하는 최적의 다이 형상을 연구하였다.

**ABSTRACT** : Butyl rubber is used as an adhesive and it is mainly used in the form of sheets. The goal of this study is to design an extrusion die for the butyl rubber sheets using computer simulation. The extrusion die for the butyl rubber sheets consists of manifold area and land area. In the manifold area, flows are spread from the entrance of the extrusion die to the land area. In the land area, flows become stable to the flow direction and uniform sheet can be obtained. Island area is being installed in the land area to get uniform flow. Four parameters, angle of manifold, length of manifold, length of land and island, were examined in the computer simulation. The optimum geometry of the extrusion die is derived which has a uniform flow in the width direction of the die.

**Keywords** : butyl rubber, rubber sheets, rubber extrusion, extrusion die, die design

## I. 서론

부틸고무는 내후성, 내화학약품성, 내열노화성, 전기적 성질 등의 우수한 특성을 바탕으로 전선피복, 산업용품 등에 사용되고 있다. 부틸고무는 이소부틸렌과 이소프렌을 -100℃에서 공중합시켜 얻어진다. 정식명칭은 IIR (Isobutylene-Isoprene Rubber)이며, 통상적으로 부틸고무라 한다.<sup>1</sup> 이러한 부틸 고무를 사용한 제품들은 주로 압출을 통해서 제조된다. 압출은 연속 공정으로 단면의 형상이 균일한 형태의 제품을 얻기 위해 열적·기계적 방법으로 원재료를 가열, 가압하여 제품을 생산하는 방식으로 고분자 가공법 중 널리 사용되고 있는 공정이

다.<sup>2</sup> 고분자 압출은 사용되는 재료에 따라 크게 플라스틱압출과 고무압출로 나누어진다. 플라스틱 압출품에 대한 연구는 활발히 보고되고 있지만 고무 압출품에 대한 연구의 보고는 많지 않다. 그 이유는 플라스틱 압출품은 정밀한 최종품으로 쓰이나 고무 압출품은 주로 중간품으로 활용되어 추가 공정을 거친 후 최종 제품이 되는 경우가 많아서 고무압출물의 치수 정밀도의 요구가 높지 않기 때문이다.<sup>3</sup>

시트 압출다이 내부는 매니폴드와 랜드로 구분되어 있다. 매니폴드의 형상에 따라 T형다이, fish tail형 다이 그리고 coat hanger형 다이로 분류된다.<sup>4</sup> Coat hanger형 다이가 고무시트 압출에 좀 더 적합하지만, 형상설계와 가공이 어렵고 높은 제작비가 요구된다. 압출다이 내부의 유동 흐름에 따라 제품 형

<sup>†</sup> Corresponding Author. E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

상의 변화가 결정되기 때문에 압출다이 디자인은 매우 중요한데 현재까지 컴퓨터 해석을 통한 압출 다이 설계에 관한 연구는 압출다이 내부 형상을 변수로 설정하고 해석을 통해 적절한 다이를 설계하는 연구가 진행되고 있다.<sup>5-6</sup> 이러한 연구는 다이 내부의 형상 변경을 통해 다이 내부 흐름을 최적화시키는 연구이다.<sup>7-15</sup> 다이 내부 형상 뿐 아니라 재료의 온도 조건, 압출 이후의 변화인 die swell 까지 고려하여 압출다이를 설계하는 연구도 보고되고 있다.<sup>16-19</sup> 또한 다이 내부의 흐름을 분할 시키는 부분을 추가하여 압출다이를 설계하는 연구도 있다.<sup>20-21</sup> 슬롯코팅에서도 다이내부의 매니폴드와 랜드 설계에 따라 흐름의 균형을 연구한 논문도 있다.<sup>22-23</sup> 그러나 부틸고무에 적합한 다이설계에 관한 연구가 부진하여 이의 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 건축용 접착제로 사용되는 부틸 고무 시트의 압출을 위한 다이 설계를 시도하였다. 다이형상은 fish tail형 다이를 기본으로 연구를 진행하였다. 본 연구에서 사용한 다이 설계변수는 매니폴드의 길이와 각도, 랜드길이, 그리고 아일랜드 형상이다. 다이 내부의 설계를 통하여 다이 출구부에서 균등한 속도를 얻을 수 있는 최적의 다이 설계를 제시하고자 한다.

## II. 컴퓨터 해석

### 1. 해석모델

Figure 1은 해석을 위한 압출다이의 단면형상 및 치수를 나타내고 있다. 다이내부의 고무의 흐름은 입구부터 출구까지 이어지며 흐름방향은 X축 이다. 흐름의 폭 방향은 Y축이며, 흐름의 갭, 즉, 두께는 Z축 이다. 압출다이의 입구는  $\phi 146.6$

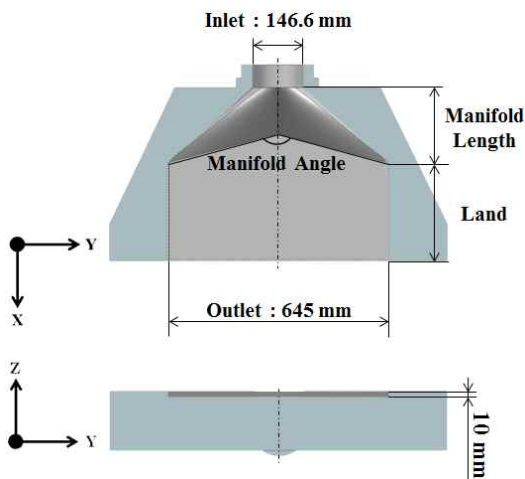
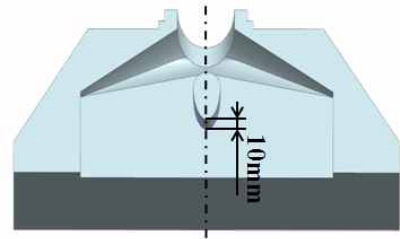


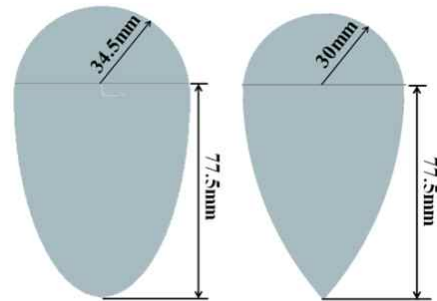
Figure 1. Geometry of extrusion die (bottom half) for butyl rubber sheet.

Table 1. Variables for die design

Variable	Value			
Manifold Length (mm)	75	150	410	
Manifold Angle (°)	180	170	160	150
Land Length (mm)	64	128	192	320



(a) Location of island



-Island 1- -Island 2-  
(b) geometry of island

Figure 2. Location and geometry of island.

mm이며 압출 시트의 폭은 645mm, 그리고 두께는 20mm이다.

### 2. 다이설계 변수

다이는 크게 manifold부와 land부로 나누어진다. Manifold부는 스크류 압출기로부터 재료를 받아 land부로 분배하는 영역이며, land부는 재료의 흐름을 안정되게 하여 다이의 출구부까지 연결시켜주는 영역이다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 manifold 길이, manifold 각도, land 길이를 변수로 설정하여 해석을 진행하였다. Manifold 길이는 75mm를 기준으로 2배와 약 5배 확장시킨 값을 변수로 설정하였다. Manifold 각도는 180°에서 150°까지 10°씩 감소시킨 값을 변수로 설정하였다. Land의 길이는 64mm를 기준으로 각각 2배, 3배, 그리고 5배 확장시킨 값을 변수로 설정하였다.

Island는 land 맨 윗부분 중앙에 설치하여 고무의 흐름을 분리시켜 다이 양 측면에서의 속도를 증가시키는 역할을 한다. Figure 2는 land 영역의 island 위치와 그 형상을 나타낸 것이

다. Island의 전체 길이와 island 끝 부분의 형상을 변화시켜 각각 island 1과 island 2 모델로 설계하였다.

### 3. 해석방법

압출 해석을 위해 다이 내부에 흐르는 고무의 형상을 3차원으로 모델링 하였다. 좌우대칭이므로 반쪽만 모델링 하였으며 Figure 3에 모델 및 경계조건이 나타나있다. BS1은 다이 입구 경계 조건이며 일정한 volume flow rate 값을 부여하였다. Volume flow rate는 요구 생산량인 20kg/min의 mass flow rate를 재료의 밀도로 나누어 계산하였다. BS2는 symmetry 조건을 부여하였다. BS3은 wall로 no-slip 조건을 부여하였다. BS4는 압출 다이 출구 조건을 부여하였다.

해석을 위한 메쉬는 입구부터 land 영역 전까지 rounding과 부피변화가 나타나는 부분 등을 고려하여 사면체 격자를 사용하였으며, land영역을 지나 다이 출구까지는 변화가 없는 일정한 형상이기 때문에 육면체 격자로 구성하였다. Figure 4에 메쉬가 나타나있다.

압출 해석은 상용화된 CFD코드인 Polyflow를 사용하였다. 해석조건은 steady-state, generalized-Newtonian iso-thermal 조건을 사용하였으며, 점도모델은 낮은 shear rate 영역에서의

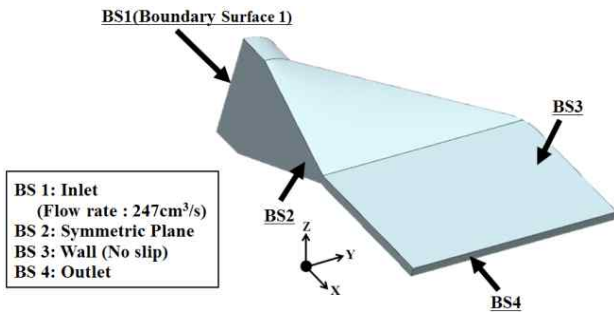


Figure 3. Modeling of material in the die for simulation and boundary conditions.

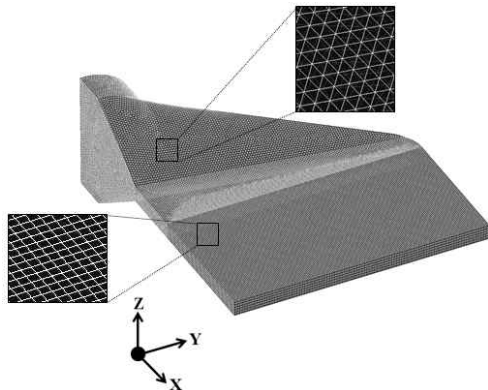


Figure 4. Mesh for simulation.

거동을 잘 나타내는 Bird-Carreau model을사용하였다. 해석에 사용된 부틸고무의 점도와 해석을 위한 curve fitting 그래프가 Figure 5에 나타나있다.

### 4. 해석결과 평가방법

Figure 6은 해석결과를 분석하기 위한 고무모델의 출구면에서 속도의 측정위치를 나타내었다. 속도의 균일성을 나타내는 지표로 출구부의 각 측정 위치에서 두께 방향으로 평균속도를 구하고 평균 속도의 표준편차를 사용하였다.<sup>24</sup> 평균속도와 평균 속도들의 표준편차를 측정하기 위해서 Y축(다이 폭 방향)으로 10개의 구간을 나눈 다음 각각의 측정위치에서 두께방향으로 평균속도를 측정하였다.

그리고 각 위치별 평균속도의 표준편차를 계산하였다. 이 표준 편차로 다이 폭 방향으로 흐름의 균일성을 평가하는데 사용하였다. 또한 다이내에서 고무의 흐름방향으로 일정 위치의 단면에서 압력분포, 속도분포, streamline 등의 결과를 분석하였다.

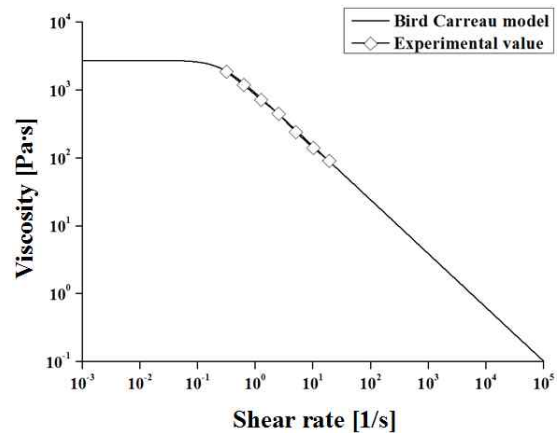


Figure 5. Measured viscosity and curve fitting curve for butyl rubber used in this study.

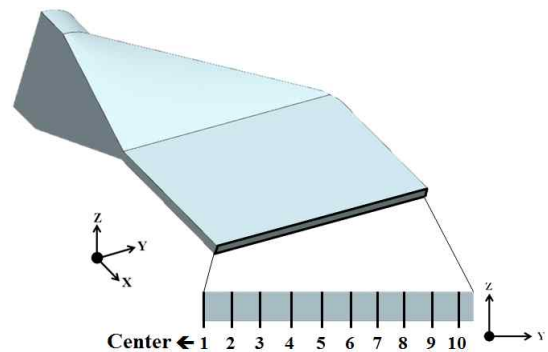


Figure 6. Measurement points of velocity at the outlet of extrusion die for the evaluation of flow balance.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. Manifold 길이에 따른 결과

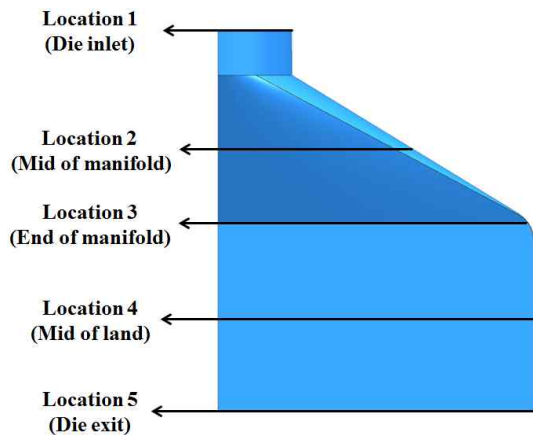
Manifold 길이에 따른 다이내부의 압력과 평균속도를 분석하였다. 먼저 다이 내부의 흐름 방향으로의 압력분포를 확인하였다. 다이 입구부터 출구까지 X축 방향으로 5개의 압력측정 구간으로 나누어 Table 2와 같이 압력을 측정하였다. Figure 7에 측정위치를 나타내었다. Location 1은 다이의 입구이며 location 2는 manifold영역의 중간위치이다. Location 3은 land의 시작위치이다. Location 4는 land영역의 중간위치이며 location 5는 다이의 출구 위치이다.

Manifold 길이 150mm의 압력분포가 Figure 8에 나타나있고, manifold 길이에 따른 위치별 압력을 Figure 9에 나타냈다. manifold 길이가 길어짐에 따라 입구에서의 요구압력은 미소하게 증가하는 것으로 나타났다. 다이 입구에서의 요구압력은 고무가 다이 출구까지 흘러가는데 필요한 압력이다. Manifold 영역 내에서는 고무가 흘러가는 면적이 넓기 때문에 길이가 증가해도 다이 입구의 압력에는 큰 변화가 없다.

Figure 10은 manifold 길이에 따른 다이 출구에서의 속도가

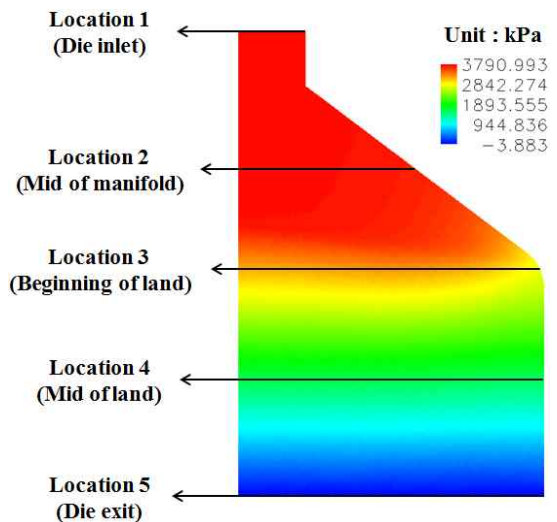
**Table 2.** Location of pressure prediction for manifold length

Model Location	Manifold 1 (75mm)	Manifold 2 (150mm)	Manifold 3 (410mm)
1	0 mm	0 mm	0 mm
2	101.25 mm	147.5 mm	350 mm
3	120 mm	195 mm	455 mm
4	220 mm	295 mm	548.5 mm
5	312 mm	387 mm	647 mm

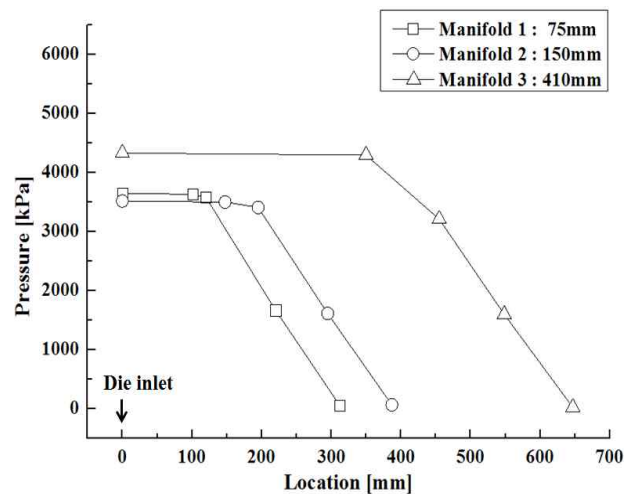


**Figure 7.** Location of pressure prediction along the flow direction for manifold length.

다. Manifold 길이가 길수록 다이의 폭 방향의 속도 분포가 균일해지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 manifold가 길어지면 manifold부의 단면적 변화가 천천히 일어나기 때문에 속도의 변화 또한 서서히 일어나 균일한 속도를 유지하여 land까지 전달되기 때문이다. Figure 11은 Figure 10의 속도에서 속도의 표준편차를 계산한 것이다. Manifold 길이가 길어질수록 속도 표준편차가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Manifold 3 (410mm)의 속도 표준편차가 가장 낮아 속도가 균일하지만, manifold 2 (150mm) 보다 manifold 길이가 63.4% 증가 한 것에 비해 속도 표준편차는 4.8% 감소한 것으로 길이 증가 대비 큰 효과가 없다. Manifold 2 (150mm)의 경우 표준편차가 0.004cm/s 이하이고 길이도 적절히 짧아 이상적인 manifold 길이로 판단된다.



**Figure 8.** Pressure distribution along the flow direction for manifold length 150mm.



**Figure 9.** Pressure profile along the flow direction for manifold length.

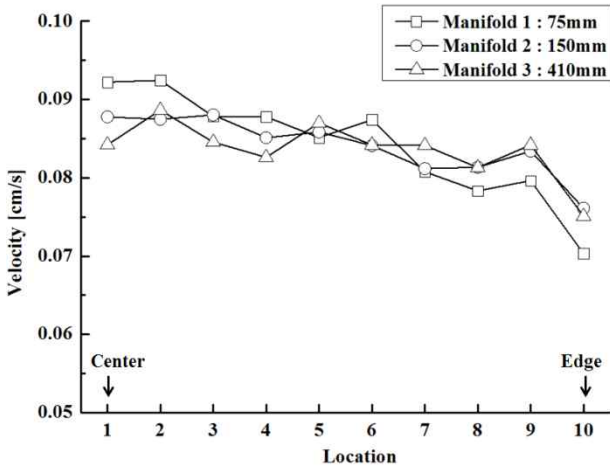


Figure 10. Average velocity along the die width for manifold length.

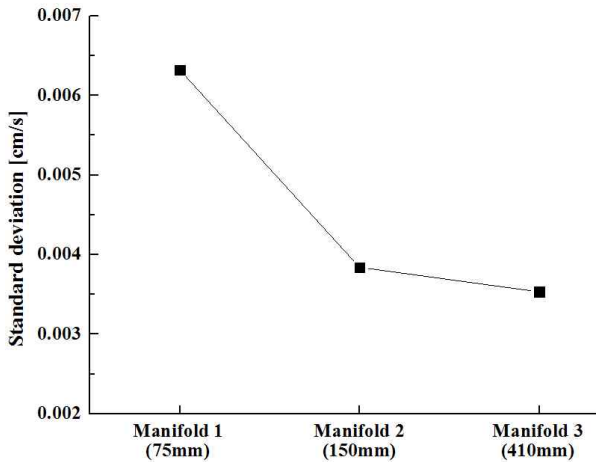


Figure 11. Standard deviation of average velocities at the outlet for manifold length.

## 2. Manifold 각도에 따른 결과

Manifold 각도에 따른 다이내부의 압력과 평균속도를 관찰하였다. 먼저 다이내부의 흐름 방향으로의 압력분포를 확인하였다.

Table 3과 같이 7개의 구간으로 나누어 압력을 측정하였다. Location 1은 다이의 입구위치이며 location 2-4는 manifold 영역이다. Manifold 각도가 생성됨에 따라 land로 이어지는 영역에 부피 변화가 생기고 이를 자세히 관찰하기 위해 manifold 영역을 3구간으로 나누었다. Location 5는 land의 시작위치이고 location 6은 land 영역의 중간위치이며 location 7은 다이의 출구위치이다. Manifold 각도에 따른 Table 3에 나타난 위치별 압력분포가 Figure 12와 같이 나타났다. Manifold 각도가 작아짐에 따라 다이 입구의 요구압력이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 변화는 manifold 각도가 작아질수록 manifold 영역의 부피변화가 많이 발생하기 때문이다. Manifold 영역을

Table 3. Locations of pressure measurement for manifold angle design

Model	Angle 1 (180°)	Angle 2 (170°)	Angle 3 (160°)	Angle 4 (150°)
Locations				
1	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
2	158 mm	106 mm	91.5 mm	77 mm
3	.	167 mm	138 mm	109 mm
4	.	181 mm	166.5 mm	152 mm
5	195 mm	195 mm	195 mm	195 mm
6	291 mm	291 mm	291 mm	291 mm
7	387 mm	387 mm	387 mm	387 mm

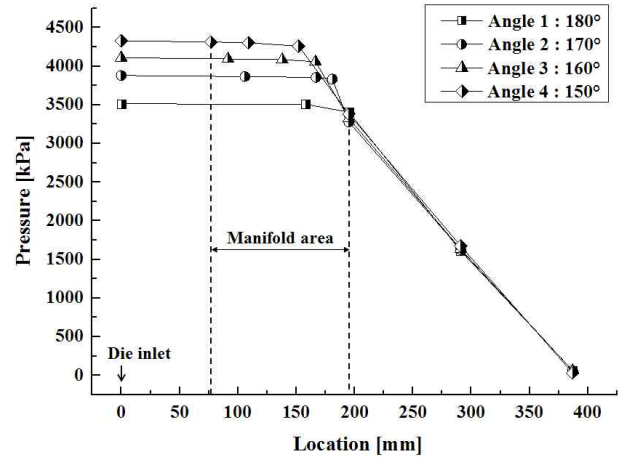


Figure 12. Pressure profile along the flow direction for manifold angle.

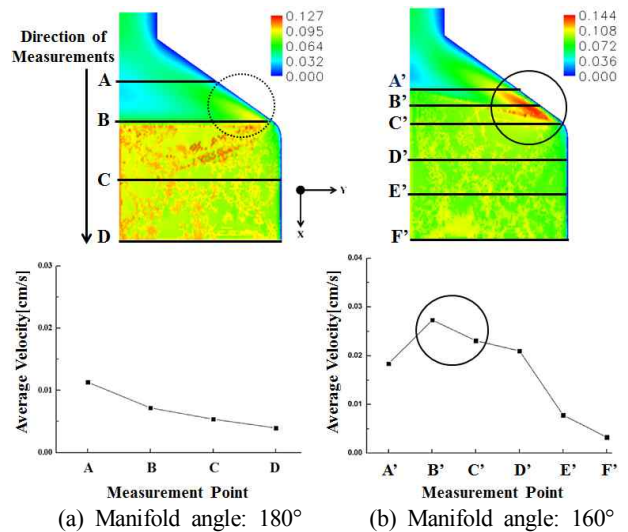


Figure 13. Velocity distribution of flow in the die for manifold angle.

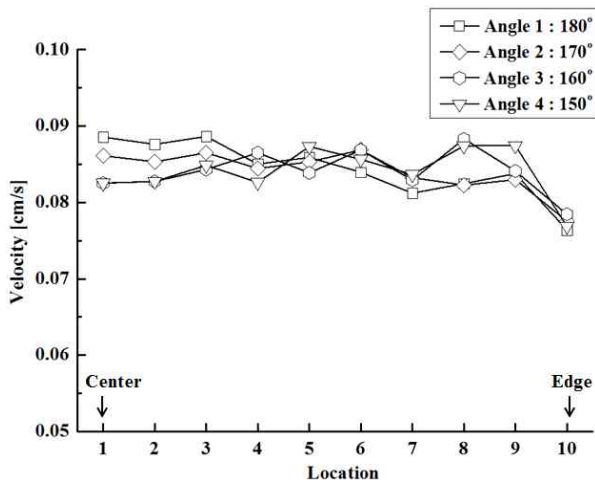


Figure 14. Average velocity along the die width for manifold angle.

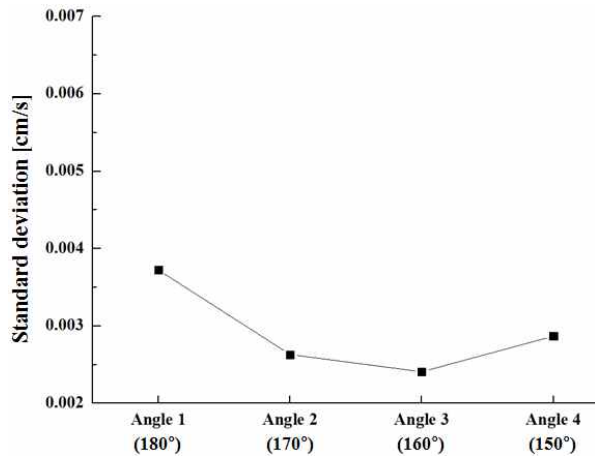


Figure 15. Standard deviation of average velocities at the outlet for manifold angle.

지나고 land 영역이 시작되는 위치에서 압력이 일정해지는 것으로 나타난다. 따라서 manifold 각도는 다이입구 압력과 밀접한 연관이 있는 것으로 나타난다.

Figure 13은 manifold 각도 180°와 160°에서 속도분포와 흐름 방향으로 평균속도의 추이를 보여주고 있다. Angle 1(180°)에선 manifold의 부피변화가 적기 때문에 속도 집중이 생기지 않지만, angle 3(160°)에선 manifold의 부피변화가 크고 영역이 길기 때문에 그 부분으로 속도 집중이 발생 하는 것을 볼 수 있다. 흐름방향으로의 표준편차를 비교해봤을 때, angle 3(160°)은 manifold 영역에서 크게 증가했다가 land 영역을 지나면서 angle 1(180°)보다 감소 하는 것을 알 수 있다.

Figure 14는 manifold 각도 별 다이출구에서의 속도 이다. 시각적으로는 속도 분포의 큰 차이가 없음을 알 수 있다. Figure 15는 Figure 14의 평균속도를 토대로 평균속도의 표준편차를 계산한 것이다. Manifold 각도가 angle 1(180°)

Table 4. Locations of pressure measurement for land

Model	Land 1 (64mm)	Land 2 (128mm)	Land 3 (192mm)	Land 4 (320mm)
Locations				
1	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
2	250 mm	250 mm	250 mm	250 mm
3	455 mm	455 mm	455 mm	455 mm
4	487 mm	519 mm	551 mm	615 mm
5	519 mm	583 mm	647 mm	775 mm

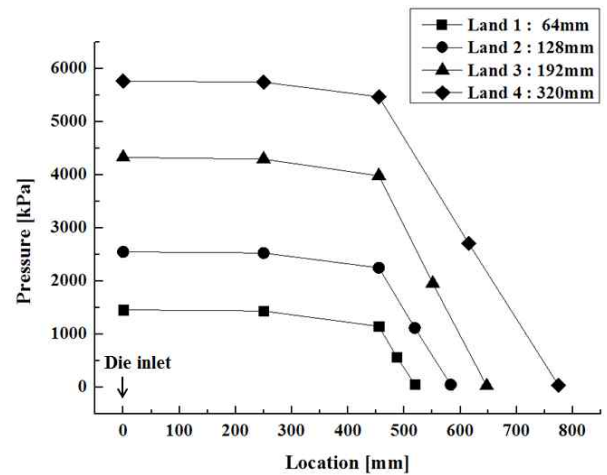


Figure 16. Pressure profile along the flow direction for land.

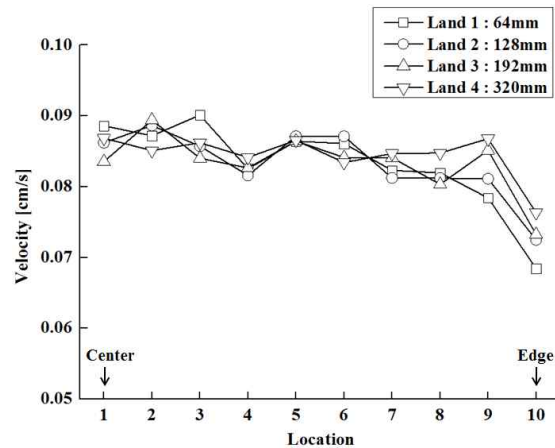


Figure 17. Average velocity along the die width for die land.

에서 angle 3(160°)으로 감소 할수록 표준편차가 감소 하다가 angle 4(150°)에서 다시 증가하는 경향을 보였다.

### 3. Land 길이 설계에 따른 결과

Table 4에 다이 입구부터 출구까지 흐름 방향으로 5개의 압

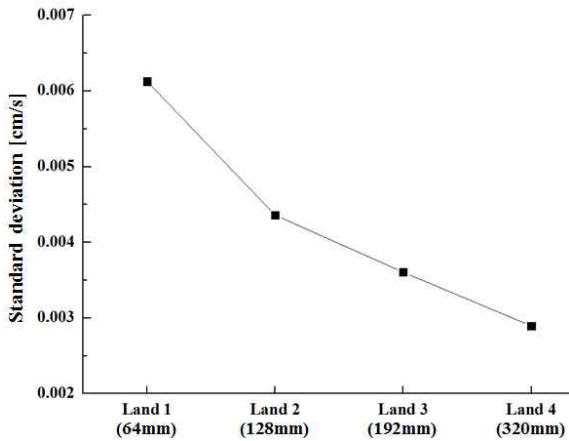


Figure 18. Standard deviation of average velocities at the outlet for die land length.

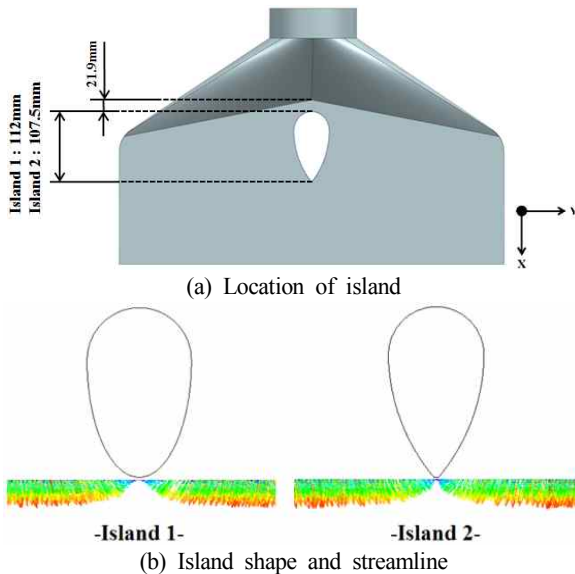


Figure 19. Island design and stream line adjacent to the island.

력측정 구간으로 나누어 압력을 나타내었다. Location 1은 다이의 입구이며, Location 2는 manifold 영역의 중간위치이고, location 3은 land의 시작위치이다. Location 4는 land 영역의 중간위치이며 location 5는 다이의 출구 위치이다. Land 길이에 따른 다이내부의 위치별 압력분포는 Figure 16과 같이 나타났다. Land의 길이가 길어질수록 다이 입구에서의 압력이 높아지는 것을 알 수 있다. 3.1절의 manifold 길이의 증가 보다는 land 길이의 증가가 입구에서의 요구 압력과 더 관련이 있는 것으로 나타났다. 이는 land의 길이가 증가함에 따라 다이의 전체 길이가 길어지게 되고, 그만큼 다이 내부에서 고무는 다이를 빠져나가기 위해서 더 큰 전단력을 필요로 하기 때문에 다이 입구에서 압력이 높아지게 된다.

Figure 17은 land 길이에 따른 다이출구에서의 평균속도 분

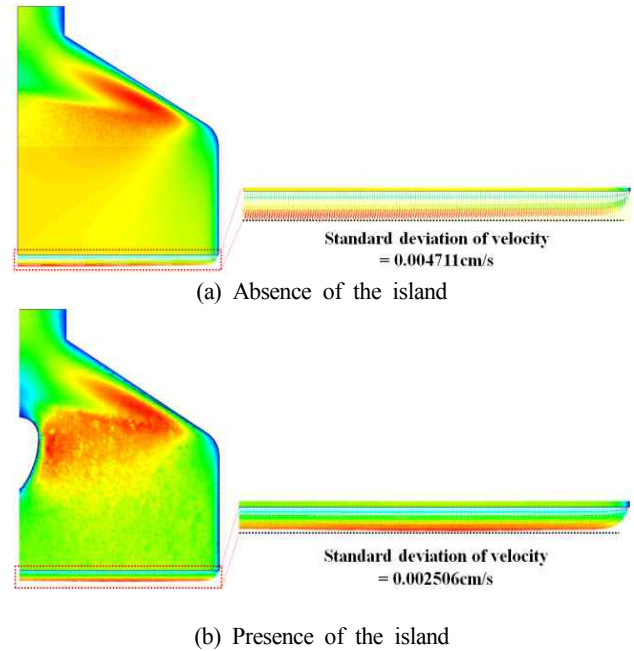


Figure 20. Comparison with the standard deviation of velocity at outlet due to the absence or presence of the island.

포이다. 앞 절에서 설명한 것과 같이 다이출구 영역을 10개의 구간으로 나누어 평균속도를 측정하였다. Land 길이가 길어질수록 다이 폭 방향으로 속도 분포가 균일해지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 manifold 영역에서 형상의 급격한 변화가 발생하고 land 영역에서 그 형상을 유지하게 되는데, land 길이가 길어짐에 따라 형상을 유지할 수 있는 거리가 충분해지기 때문이다. Figure 18은 다이출구에서의 평균속도의 표준편차를 나타낸 것이다. Land 길이가 길어질수록 속도 표준편차가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 land가 길어짐에 따라 다이 내부에 고무가 머무르는 시간이 길어져 다이출구에서 균일한 속도가 측정되는 것이라 판단된다. Land 4 (320mm)의 속도 표준편차가 가장 낮아 속도가 균일하지만, land 3 (192mm)보다 길이가 66.6% 증가한 것에 비해 평균속도의 표준편차는 19.3% 감소한 것으로 길이 증가 대비 표준편차는 크게 줄어들지 않았다. Land 3(192mm)인 경우 평균속도의 표준편차가 0.004cm/s 이하로 균일한 Sheet를 압출하는데 충분하다고 판단된다.

#### 4. Island의 영향

다이 내부의 land 부에 island를 설치하여 중앙부의 흐름을 제어하고 edge 부로 흐름을 크게 유도한다. Island 유무에 따라 출구에서의 속도를 관찰하였다. Island를 지나면서 다이 내부의 흐름이 두 방향으로 나누어지고 다시 합쳐지면서 내부 흐름의 변화가 발생되었다. 이를 확인하기 위해 흐름 방향으로

의 streamline 을 관찰하였다. 두 경우의 island 디자인에 따른 흐름이 Figure 19 에 나타나있다. Island 1 에서는 흐름이 만나면서 air trap 의 가능성이 있다고 판단되며 island 2 에서 흐름의 만남이 완만하여 적절한 형상이라고 판단 된다.

Figure 20 은 island가 없는 다이와 island가 존재하는 다이의 출구에서의 속도 표준편차를 비교한 것이다. Island 없는 모델의 다이 출구에서의 평균속도 표준편차는 0.004711 cm/s로 나타났다. 반면에 island가 존재하는 모델의 다이출구에서의 평균속도 표준편차는 0.002506 cm/s로 나타났다. Island의 설치를 통해 다이출구에서의 평균속도 표준편차가 약 47% 감소하는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 압출 다이 설계를 위해 manifold 길이와 각도, land 길이 그리고 island의 설계에 따라 나타나는 흐름의 변화를 컴퓨터 해석을 통해 관찰하였다.

Manifold 길이가 길어질수록 다이 입구에서의 압력은 다소 증가하였고 다이 출구에서의 속도 표준 편차가 작아 속도 균일성이 향상되었다.

Manifold 각도는 180°부터 줄어들어 따라 manifold의 부피변화가 급격하게 일어나는 영역이 발생하기 때문에 국부적인 속도 집중 현상이 관찰되었다. 하지만 이런 현상은 land를 지나면서 해소되었으며, 다이 출구에서의 속도 표준편차는 더 작아지는 것을 보였다. 본 연구에서 가장 이상적인 흐름을 보인 manifold 각도는 160°였다.

Land 길이가 길어질수록 다이 입구에서의 압력은 높아지고 다이출구에서의 속도 표준편차가 작아져 속도 균일성이 향상되는 경향을 나타내었다.

Manifold와 land 영역 사이에 island를 설치 함으로써 다이 edge부의 속도 증가를 유도할 수 있었고, 이로 인해 속도 균일성이 향상되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### References

1. C. W. Na, S. E. Shim, and etc., *고무재료와 가공기술*, The Rubber Society of Korea, Seoul , 2008.
2. H.Y . Kim, M. -Y. Lyu, "Introduction to Poylmer Shaping Processes and Their Principles", *Polym. Sci. Technol.*, **20**, 157-169 (2011).
3. J. H. Kim, J. S. Hong, S. H. Choi, H. J. Kim, and M.-Y. Lyu, "Computer Simulation of Die Extrusion for Rubber Compound Using Simplified Viscoelastic Model", *Elast. Compos.*, **46**, 54-59 (2011).
4. Chris. R, *Polymer Extrusion 4<sup>th</sup> revised edition*, Hanser, New York, 14-15, 2001.
5. Chris. R, *Polymer Extrusion 4<sup>th</sup> revised edition*, Hanser, New York, 539-547, 2001.
6. E. S Douglas, "Design Sensitivity Analysis and Optimization for Polymer Sheet Extrusion and Mold Filling Processes", *J. Num. Meth. Eng.*, **57**, 1381 -1411, (2003).
7. Y. Ying, W. Jia, G. Yuguag and L. Baiyuan, "The Finite Analysis and Optimization of Head Runner of Rubber Sheeting Extruder", *Key Eng. Mater.*, **561**, 25-29 (2013).
8. E. S Douglas, Q. Wang, "Optimization-based Design of Polymer Sheeting Dies Using Generalized Newtonian Fluid Models", *Polym. Eng. Sci.*, **45**, 953-965 (2005).
9. L. Nadhir, S. Fabrice, P. Stephan, "Design and optimization of three-dimensional extrusion dies, using constraint optimization algorithm", *Finite Elements in Analysis and Design*, **45**, 333-340 (2009).
10. G. D. Oliver, "A Survey of Manifold Designs for Flat Die Extrusion", *Conference proceedings : ANTEC*, **61**, 27-33 (2003).
11. Y. Sun, M. Gupta, "An Analysis of The Effect of Elongational Viscosity on The Flow in a Flat Die", *Conference proceedings : ANTEC*, **62**, 3307-3311 (2004).
12. J. M. Nobrega, O. S. Carneiro, P. J. Oliveira, F. T. Pinho, "Sensitivity of Flowdistribution and Flow Patterns in Profile Extrusion Dies", *Conference proceedings : ANTEC*, **61**, 310-314 (2003).
13. E. C. Brown, A. L. Kelly, P. D. Coates, "Effect of Extrusion Die Geometry on Molecular Orientation of Unfilled Polyethylene", *Conference proceedings : ANTEC*, **61**, 1464-1468 (2003).
14. M. K. Alam, C. Tzoganakis, J. Perdikoulis, "Effect of Rheology and Die Design on Flow Balancing of Profile Extrusion Dies", *Conference proceedings : ANTEC*, **1**, 76-80 (2005).
15. S. R. Lee, D. Y. Yang, "Shape optimization of flow guides in three-dimensional extrusion processes by an approximation scheme based on state variable linearization", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **66**, 1691-1716 (2006).
16. N. Sombatsompop, N. O. Charoen, "Extrudate Swell Behavior of PS and LLDPE Melts in a DualDie with Mixed Circular/ Slit Flow Channels in an Extrusion Rheometer", *Polym. Adv. Technol.*, **14**, 699-710 (2003).
17. W. A. Gifford, "Compensating for Die Swell in The Design of Profile Dies", *Conference proceedings : ANTEC*, **61**, 11-16 (2003).
18. E. S Douglas, Q. Wang, "Incorporating Adjustable Features in the Optimal Design of Polymer Sheet Extrusion Dies",



- J. Manuf. Sci. Eng.*, **128**, 11-19 (2006).
19. W. S. Lee, H.-Y. Ho, "Experimental Study on Extrudate Swell and Die Geometry of Profile Extrusion", *Polym. Eng. Sci.*, **40**, 1085-1094 (2000).
  20. S. R. Vaddiraju, M. Kostic, and etc., "Extrusion Simulation and Experimental Validation to Optimize Precision Die Design", *Conference proceedings : ANTEC*, **62**, 76-80 (2004).
  21. G. -J. Yang, X. -C. Huang, and etc., "An Improvement on Design of Sheet Extrusion Dies", *Int. Polym. Proc.*, **20**, 336-344 (2005).
  22. H. Kim, Y. H. Park, J. S. Hong, M. -Y. Lyu, S. K. Shin, J. K. Seo, "Computer Simulation of Flow Balance in the Die of Slot Coater: Part 1: Land Geometry", *ANTEC, Conference Proceedings*, **2**, 1399-1403 (2012).
  23. G. G. Yoon, H. Kim, M. -Y. Lyu, J. J. Jeong, "Computer Simulation of Transient Flow Behavior of Photo Resist in the Coater Die", *PPS-28, Pattaya, Thailand*, 2012.12.12
  24. N. Sombatsompop, A. K. Wood, "Flow Analysis of Natural Rubber in A Capillary Rheometer. 2: Flow Patterns and Entrance Velocity Profiles in the Die", *Polym. Eng. Sci.*, **37**, 281-290 (1997).