



## Simulation Study on the Effect of Pre-blow Timing on the Injection Stretch Blow Molding

Dong-Hae Choi, Kyoung Woo Nam\*, and Min-Young Lyu†

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,  
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, Republic of Korea

\*Samyang Packaing Co., 31 Jongro 33-gil, Jongro-gu, Seoul, Republic of Korea

(Received September 13, 2022, Revised September 23, 2022, Accepted September 30, 2022)

**Abstract:** Research on the reduction of plastic use to prevent environmental pollution is urgently needed. Accordingly, studies on reducing the weight of polyethylene terephthalate (PET) bottles are currently being conducted. PET bottles are fabricated by injection stretch blow molding. In this study, stretch blow molding for fabricating PET bottles using preform studied through a computer simulation. Blowing characteristics are analyzed by varying the start time of the pre-blow, which is one of the process conditions of stretch blow molding. Simulation results and the preform inflation process are presented, and the parameters of stretch ratio, stretching path, thickness distribution, and weight distribution of blown PET bottles are investigated.

**Keywords:** PET bottle, injection stretch blow molding, Pre-blow timing, thickness distribution, stretch ratio

### Introduction

PET (Polyethylene terephthalate)병은 음료 포장 용기 중 가장 흔히 볼 수 있는 제품으로, 사출 연신 블로우 성형(ISBM, Injection Stretch Blow Molding)이라는 공정으로 생산된다. PET병을 만들기 전에 먼저 프리폼(Preform)이라는 투명한 1차 형태의 제품을 사출 공정(Injection Molding)으로 제작한다.<sup>1</sup> PET는 원래 결정성이 높은 수지로 상온에서는 불투명하다. 그래서 투명한 프리폼을 제작하기 위해 사출공정에서 급냉시켜 결정화도를 낮추어 투명하게 만든다.<sup>1-3</sup> 이후 병의 몸통부만 다시 가열하여 연신 블로우 성형으로 PET병의 최종 형상을 제작한다. 병의 형상은 대부분 지름보다 길이가 더 길어 프리폼을 단순히 블로우하여 병을 제작할 수 없으므로, 스트레치 로드(Stretch rod)를 이용해 프리폼을 길이 방향으로 연신시킨다.<sup>4-8</sup> 블로우는 스트레치 로드와 프리폼을 연신시키는 동안에 시작되는 낮은 압력의 프리블로우(Pre-blow)와 이후 높은 압력의 메인 블로우(Main Blow)로 구성되어 있다.<sup>9</sup>

PET병의 성형공정은 더 면밀히 연구하기 위해서 연신 블로우 공정의 공정변수인 프리폼의 가열온도, 금형과 스트레치로드의 온도, 블로우 압력의 크기에 대한 실험 및 해석 연구 결과가 있다.<sup>4,20</sup> 대부분의 연구가 프리폼의 초기 가열 온도, 블로우 압력 등에 집중하고 있다.<sup>8,9,17,18</sup> 성형공정 변수 중에 하

나인 프리블로우의 시작 시간에 따른 PET병의 블로우 연구는 아직 미비한 실정이다. PET병의 연신 블로우 공정의 결과를 예측 혹은 분석하기 위해서는 다양한 결과의 비교, 분석이 필수이며, 대표적으로 두께 분포, 연신율, 성형경로 등을 분석한다.<sup>16,21,22</sup>

본 연구에서는 프리블로우 위치에 시작 시간에 따른 연신 블로우 해석을 진행하였다. 프리블로우의 역할은 축 방향 연신 중에 스트레치 로드와 프리폼의 안쪽 면이 맞닿는 것을 방지하고, 연신율 및 두께 분포를 결정하며 급격히 큰 압력으로 프리폼이 찢어지는 것을 방지하는 것으로, 그 시작 시간에 따라 성형에 큰 영향을 미치므로 중요한 공정조건 중 하나이다. 본 연구에서는 컴퓨터 해석을 통해 성형 과정, 두께 분포, 성형경로, 축 방향과 원주 방향 연신비, 중량분포를 분석하여 프리블로우 시작 시간에 따른 블로우 특성을 관찰하였다.

### Simulation

#### 1. 성형 조건

성형공정은 스트레치로드의 하강에 따른 연신성형과 블로우의 압력에 의한 블로우 성형으로 이루어진다. 스트레치로드는 0초부터 900 mm/s의 속도로 0.1185초 동안 하강하여 106.74 mm를 이동한다. 스트레치로드가 이동하는 동안 블로우 과정은 Figure 1과 같이 프리블로우와 메인 블로우로 압력

†Corresponding author E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

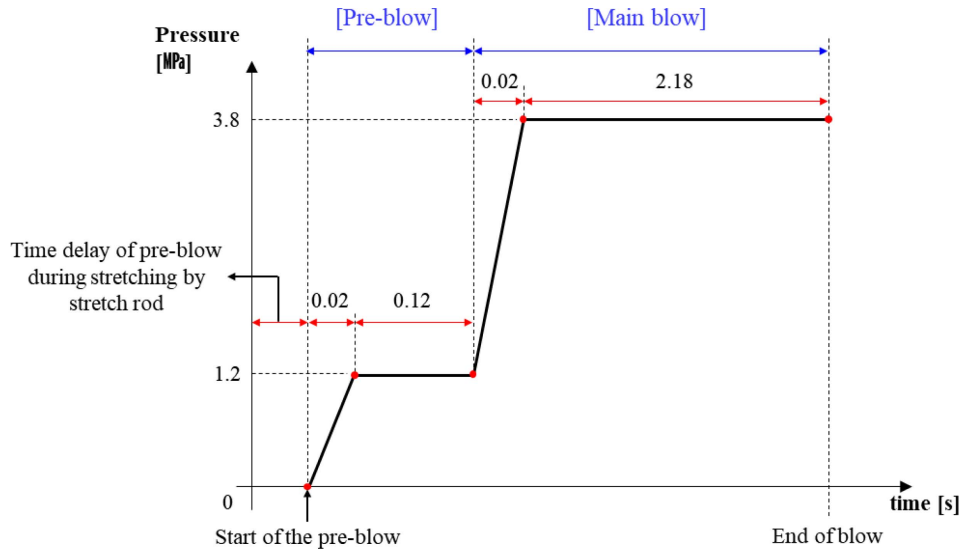


Figure 1. Pre-blow and main blow profile according to the process time in the stretch blow molding.

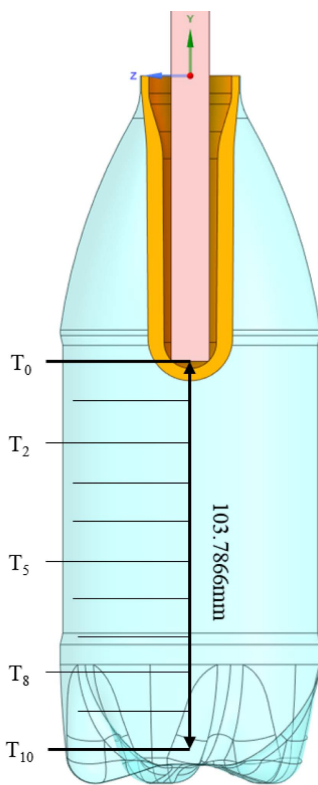


Figure 2. Designation of stretch rod tip location according to the pre-blow start time.

이 가해진다. 프리블로우 시작시간에 따라 블로우 과정이 전체적으로 지연되는 것이다.

프리블로우가 시작되는 위치는 Figure 2와 같이 나타낼 수 있다. 스트레치 로드 하강하는 동안 지정된 프리블로우 시작 시간에 도달하게 되면 블로우 압력이 가해진다.  $T_0$ 는 스트레치 로드의 모서리가 프리폼에 닿는 위치이며,  $T_{10}$ 은 병의 바

Table 1. Designation of Stretch Rod Tip Location Corresponding to Pre-blow Start Time

Pre-blow start time [s]	Location of stretch rod tip [mm]	Designation
0.0033	2.9534	$T_0$
0.0148	13.3281	$T_1$
0.0263	23.7027	$T_2$
0.0378	34.0774	$T_3$
0.0493	44.4520	$T_4$
0.0609	54.8267	$T_5$
0.0723	65.2014	$T_6$
0.0838	75.5760	$T_7$
0.0955	85.9507	$T_8$
0.1068	96.3253	$T_9$
0.1185	106.74	$T_{10}$

닥에서 프리폼의 게이트 길이(1.3 mm)와 스트레치 로드와 금형과의 충돌을 방지하기 위한 길이(1.5 mm)를 제외한 위치이다. 그 외의 위치는  $T_0$ 와  $T_{10}$  사이에 위치한다. Figure 2에 표시된 위치에서 프리블로우가 시작되기 위한 프리블로우 시작 시간이 Table 1에 나타나 있다. 본 연구의 공정 변수는 프리블로우 시작 시간이다.

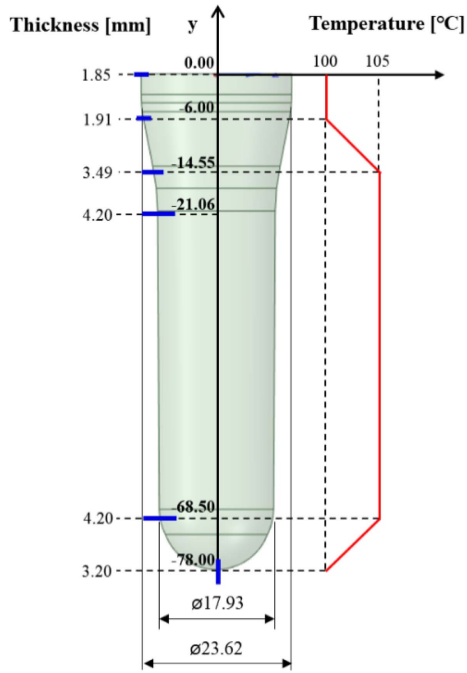
## 2. 재료 및 해석 조건

해석에 사용한 PET는 Lotte Chemical(South Korea)의 내압 병용 수지인 PET Cool이다. PET Cool의 밀도는  $1.4 \text{ g/cm}^3$ , 유리전이온도는  $80.66^\circ\text{C}$ , 용융온도는  $246.0^\circ\text{C}$ 이다.

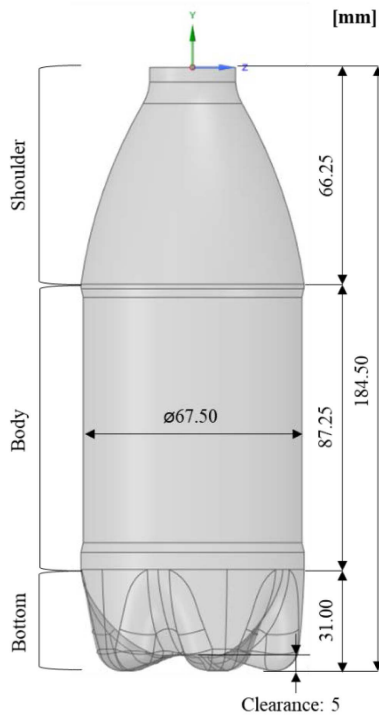
해석에서 PET의 온도에 따른 점도를 반영하기 위해 WLF 수식을 사용하였다. 식 (1)과 (2)를 이용하여 온도에 따른 점도를 추정하였다.<sup>23</sup>

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_r)}{C_2+(T-T_r)}$$

$$a_T = \frac{\eta_T}{\eta_{T_r}}$$



(a) Preform



(b) Mold for PET bottle

- (1)  $a$ 는 이동 인자(shift factor)로  $\eta_T$ 와  $\eta_{T_r}$ 의 비를 의미한다.  $\eta_T$ 는 알고 싶은 온도( $T$ )에서의 점도이다.  $T_r$ 는 기준 온도 (Reference Temperature)이고  $\eta_{T_r}$ 는  $T_r$ 에서의 점도이다.
- (2) Williams, Landel, Ferry는  $C_1$ 과  $C_2$ 를 재료와 기준온도에 대한 상수로 정의하였으며,  $T_r$ 가 유리전이온도  $T_g$ 와 같을 때 17.44와 51.6으로 정의하였다. 기준온도가  $T_g$ 에서 다른 온도로 변경된다면,  $C_1$ 과  $C_2$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$C_1' = \frac{C_1 C_2}{C_2 + (T_r - T_g)} \quad (3)$$

$$C_2' = C_2 + (T_r - T_g) \quad (4)$$

여기에  $T_g$ 는 80.66°C 그리고  $T_r$ 은 94.15°C을 적용하면  $C_1'$ 는 13.83,  $C_2'$ 는 65.09로 계산되며 이를 이용하여 해석하였다.

금형의 온도는 16°C, 스트레치 로드의 온도는 20°C로 설정하여 해석하였다. PET 프리폼 두께방향의 양쪽에 접촉하는 금형과 스트레치 로드의 열전달계수는 참고문헌을 참고하여 50 W/m<sup>2</sup>·°C를 적용하여 해석하였다.<sup>20</sup>

해석에 사용된 프리폼 모델은 스트레치 블로우 공정에서 성

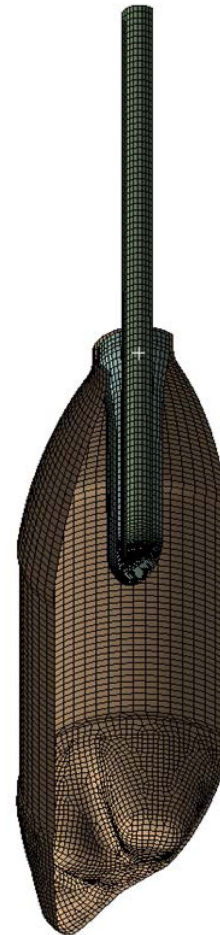
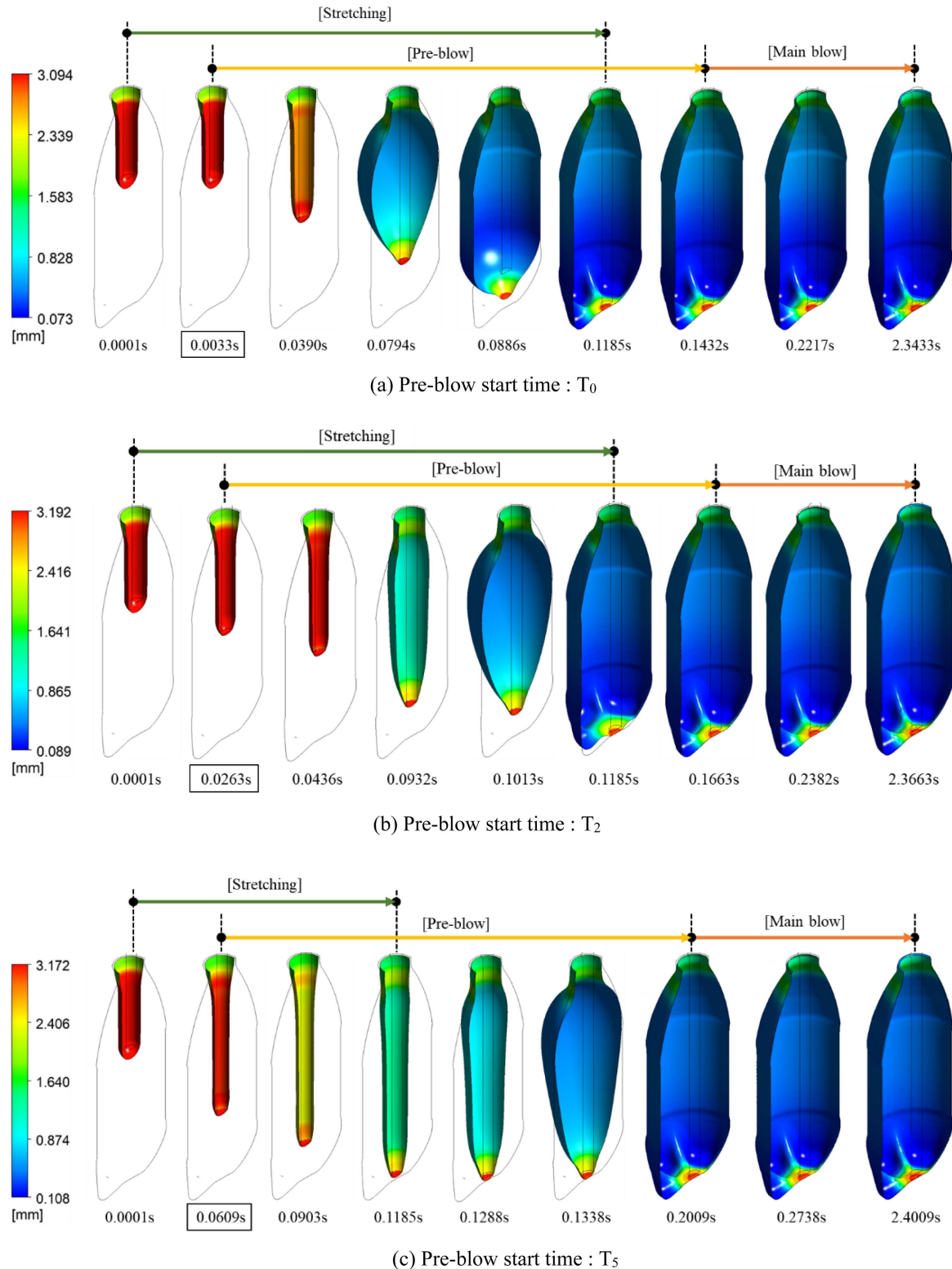


Figure 4. Mesh shape for computer simulation.

Figure 3. Study model for preform and mold for PET bottle.

형이 진행되지 않는 병의 목(Neck)부분 즉 병뚜껑과 결합되는 부분을 제외하고 진행하였다. 스트레치 로드는 지름 10 mm, 길이 184.5 mm, 모서리 끝에 0.1 mm의 라운드가 있는 형

상이다. 프리폼과 금형의 형상과 수치가 Figure 3에 나타나 있다. 프리폼과 금형, 스트레치 로드와 형상은 해석을 위해 3D Shell model로 변환하였다. Figure 3(a)의 프리폼에서 좌측에



**Figure 5.** Blowing phenomena and thickness distributions during stretch blow molding according to the pre-blow start time.

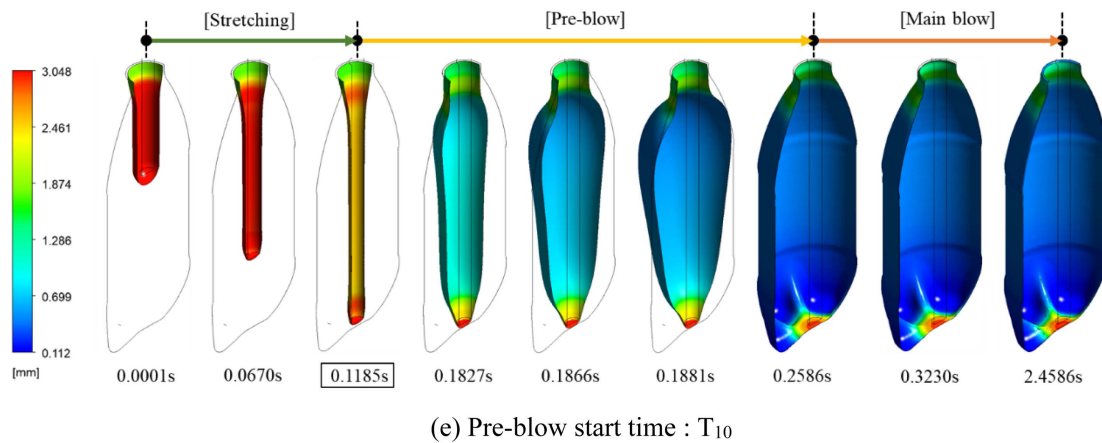
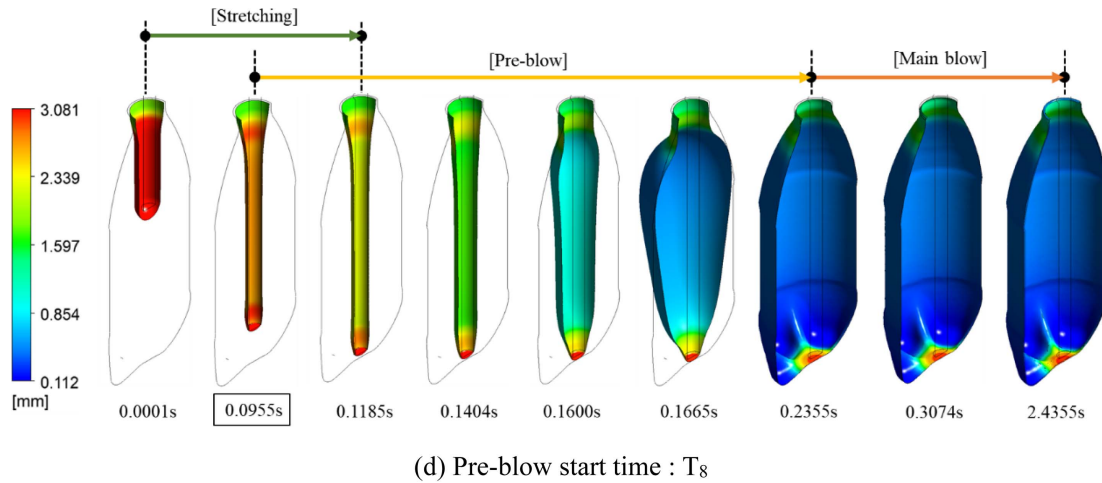


Figure 5. Continued.

있는 치수는 y축에 따른 두께를 해석에 입력한 값이다. 그리고 프리폼 우측의 그래프는 프리폼의 초기온도를 나타낸다. Figure 3(b)에서 병의 형상은 세 부분으로 어깨부(Shoulder), 몸통부(Body) 그리고 바닥부(Bottom)로 구성되어 있다.

스트레치 로드는 해석을 위해 프리폼과 접촉 직전인 xz평면에서 70 mm 내려간 곳에 있다. Figure 4는 연신 블로우 성형 해석을 위한 초기 메쉬(Mesh) 상태이다. 성형이 진행됨에 따라 프리폼이 변형되면서 메쉬가 크게 변한다. 리메싱(Remeshing)을 위해 Lagrangian Remeshing과 접촉에 따른 Adaptive Remeshing의 Contact Remeshing을 적용하여 해석하였다.

## Results and Discussion

### 1. 성형 과정과 두께 분포

프리블로우 시작 시간에 따른 연신 블로우 성형 과정에서의 차이를 보기 위해 해석을 통해 시간마다 두께 분포를 분석하였다. Figure 5는 프리블로우 시작 시간에 따른 스트레치

로드의 위치 별( $T_0$ ,  $T_2$ ,  $T_5$ ,  $T_8$ ,  $T_{10}$ ) 성형 과정을 보여준다. Figure 5에 스트레칭, 프리블로우 그리고 메인 블로우가 진행되는 구간이 표시되어 있다. Figure 5(a)는 프리블로우 위치  $T_0$ 에서의 성형 과정이다.  $T_0$  성형조건의 0.0886초에서 프리폼의 안쪽 하단이 스트레치 로드면에서 떨어진 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 프리폼 끝단 중앙의 게이트 자리가 금형 바닥의 중앙으로 향하지 않고 한쪽으로 치우친 상태로 성형이 진행되어 병의 바닥 두께가 불균일해질 수 있다.  $T_0$ 는 프리블로우가 가장 빨리 시작되어 블로우 성형 시간이 가장 짧다.

Figure 5(b)는 프리블로우 위치  $T_2$ 의 결과로 프리블로우가  $T_0$ 에 비해 더 늦게 시작되기 때문에 프리폼의 팽창이 더 늦게 이루어지는 것을 볼 수 있다. 또한 스트레치 동안에 프리폼 안쪽 면이 스트레치 로드 밑 면에서 분리되지 않고 연신되는 것을 볼 수 있다.

Figure 5(c)는 프리블로우 위치  $T_2$ 의 결과이다. 시간 0.1185초에서 확인할 수 있듯이 축 방향으로 완전히 연신이 될 때까지 프리폼의 팽창이 이루어지지 않고 있다. 이러한 성형 과정은 병의 몸통부에서 더욱 균일한 두께와 길이 방향으로 큰 연신비가 나타날 것이라 예상할 수 있다.



Figure 5(d)는 프리블로우 위치  $T_8$ 의 결과이다. 프리블로우는 0.0955초에서 시작되는데 0.1185초에서 성형 상태를 보면 스트레치 로드와 프리폼이 접촉하고 있음을 볼 수 있다. 스트레치 로드와 프리폼의 접촉은 프리폼 안쪽 표면의 손상을 야기할 뿐만 아니라 병 입구에서 발생하는 공압의 흐름을 제한하여 블로우가 가해지는 과정에서 프리폼의 모든 부분에 압력이 고루 분포되지 않을 것으로 판단된다.

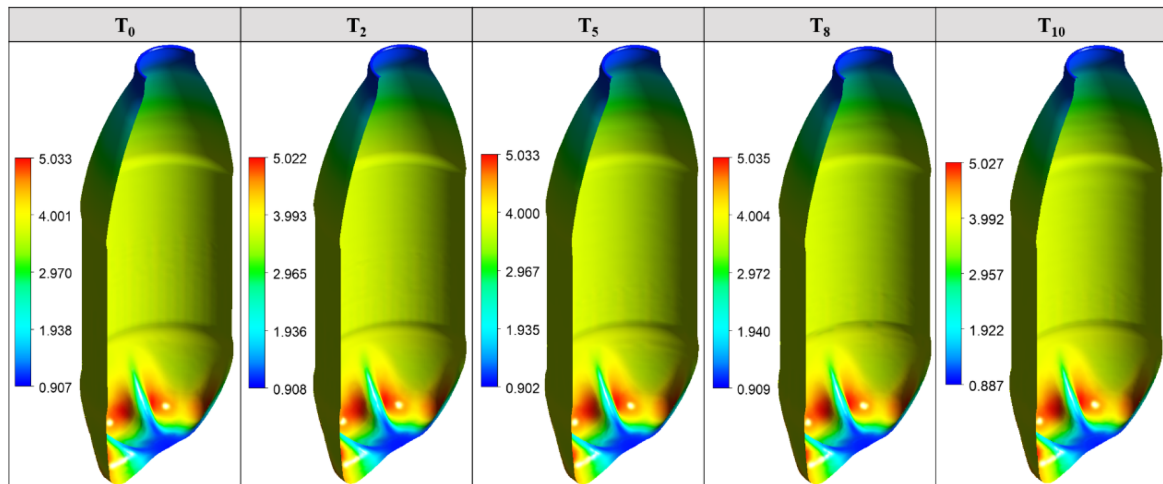
Figure 5(e)는 프리블로우 시작 시간이 0.1185초로 프리블로우 위치  $T_{10}$ 의 결과이다. 늦은 프리블로우 시작으로 프리폼의 많은 부분이 스트레치 로드와 접촉해 있다. 이는 프리블로우 위치  $T_8$ 과 같이 프리블로우 시작 시간이 지나치게 늦어 적합하지 않은 성형조건으로 판단된다. 프리블로우 시작 시간이 늦을수록 메인 블로우가 지연되어 병 성형이 완료되는 시간도 늦어짐을 알 수 있다.

## 2. 연신비

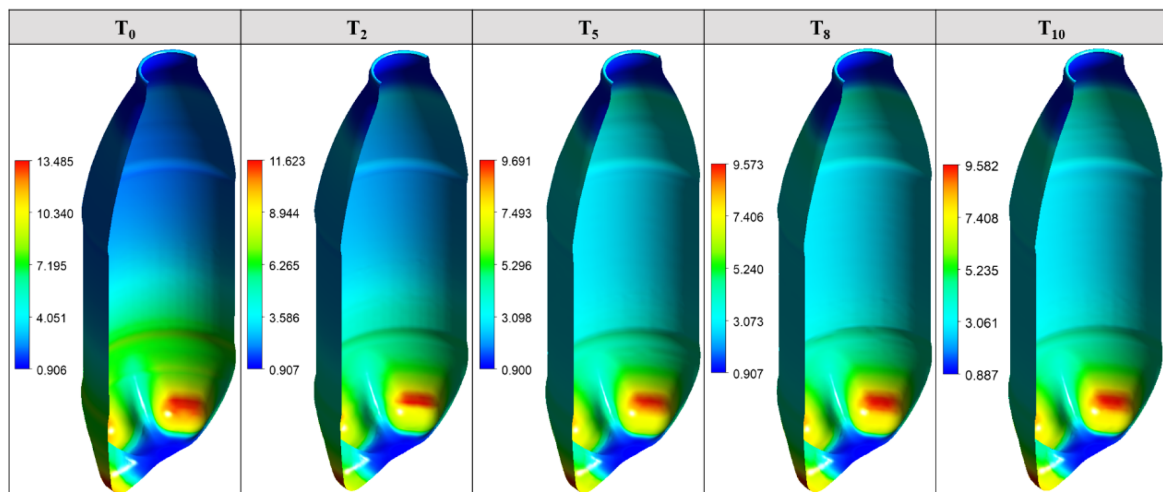
연신비는 연신에 의한 강도 증가로 두께가 얇은 부분의 강도를 보상하는 역할을 한다.<sup>19</sup> 일정 양 연신이 된 부분은 두께가 얇아져도 소재의 강도가 증가하였기 때문에 PET는 충분한 강도를 가진다. 따라서 PET병 성형에 있어 적절한 두께 분포 또는 충분한 연신비를 적절히 조절하는 것이 중요하다.

Figure 6(a)는 프리블로우 시작 시간에 따른 원주 방향의 연신비를 보여준다. 원주 방향의 연신비는 PET병의 직경 측, 금형의 형상에 따라 결정되기 때문에 프리블로우 시작 시간이 변하여도 그 연신비가 거의 유사한 것을 볼 수 있다. 프리블로우 시작 시간에 따라 원주 방향 최대 연신비는 5.022~5.035 수준으로 분포한다.

Figure 6(b)는 프리블로우 시작 시간에 따른 축 방향의 연신비를 나타내며,  $T_0$ 와  $T_2$  조건의 경우 병의 어깨부에서 몸통



(a) Stretch ratio in hoop direction



(b) Stretch ratio in axial direction

**Figure 6.** Stretch ratio of blown PET bottle according to the pre-blow start time.

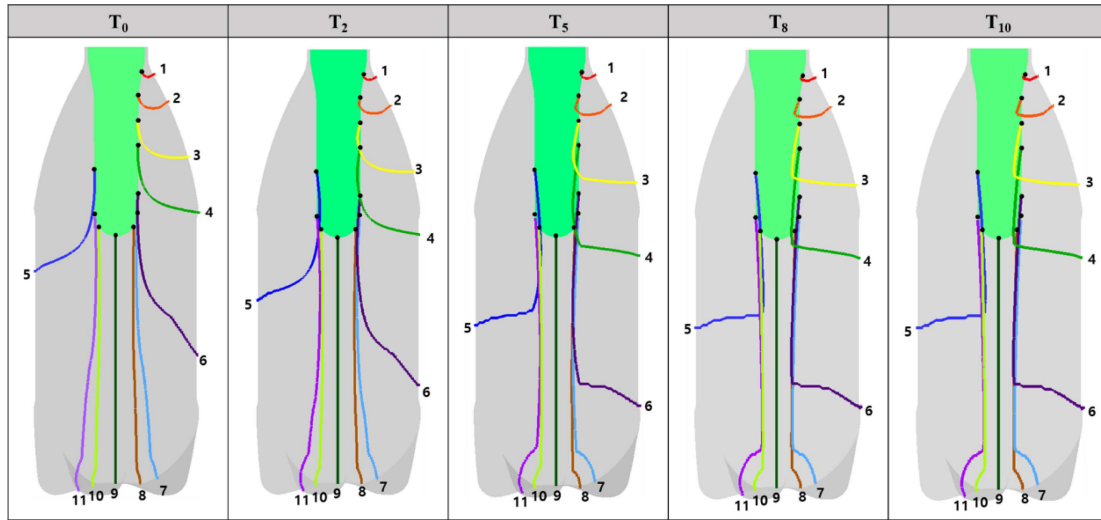
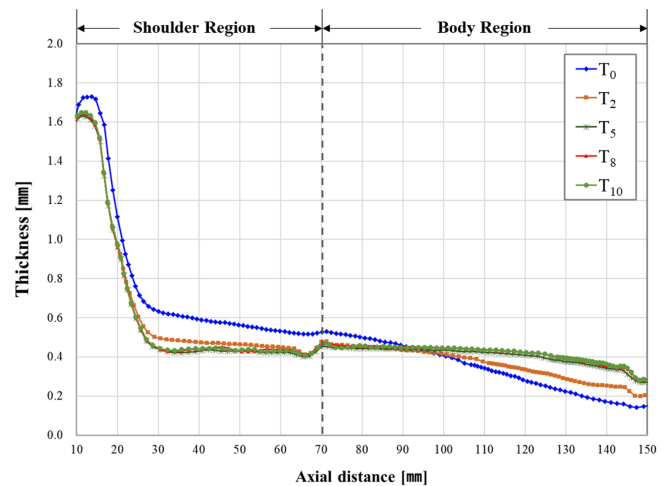


Figure 7. Stretching path from preform to blown bottle according to the pre-blow start time.

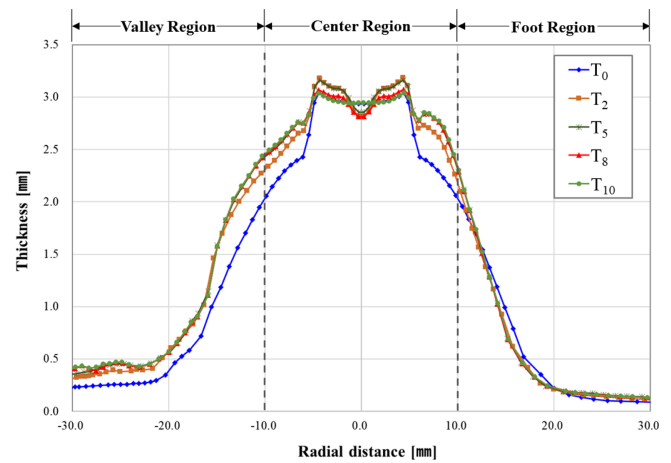
부까지 연신비가 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면  $T_5$ ,  $T_8$ ,  $T_{10}$  조건의 경우에는 어깨부에서 몸통부에 이르기까지 균일한 연신비를 보인다. 이는 프리블로우 시작 시간이 늦은 조건으로 스트레치 로드에서 균일한 축 방향 연신이 이루어졌다고 판단된다.  $T_0$ 와  $T_2$  조건에서 병의 발부분이 각각 13.485, 11.623의 큰 연신비를 보이고 있다. 이는 과도한 연신으로 터짐 현상이 생기거나 얇은 두께로 인해 발의 강성이 낮아 문제를 일으킬 수 있을 것으로 예상된다. 축 방향 최대 연신비는 프리블로우 시작시간에 따라 9.573~13.485로 나타나 원주 방향보다 큰 것을 알 수 있다.

### 3. 성형경로

Figure 7의 성형경로는 초기 프리폼의 상태에서 최종 병의 형태까지 어느 경로로 성형이 진행되었는지 보여준다. Figure 7에서 보듯이 프리블로우 위치의 차이에 따른 성형 경로의 차이를 볼 수 있다. Figure 7에서의 프리폼의 점은 위에서부터 높이 별로 10 mm 간격으로 6개의 점(1~6번)과 4 mm 간격으로 5개의 점(7~11번)을 선정하여 성형경로를 추적하였다. 프리폼의 7, 8번 점은 병 바닥부 골부분(Valley)으로 향하는 성형이고 10, 11번 점은 발(Foot)부분으로 향하는 점이다.  $T_0$ 와  $T_2$  조건은 스트레치 로드에서 연신의 초기부터 프리블로우가 시작되기 때문에 축 방향 성형과 반경 방향 성형이 동시에 이루어져 성형경로가 곡선의 형태를 보여준다. 반면  $T_5$ ,  $T_8$ ,  $T_{10}$ 의 조건에서 성형경로는 축 방향과 반경 방향의 연신이 분리되어 있는 것으로 보인다. 또한  $T_5$ ,  $T_8$ ,  $T_{10}$  조건의 성형경로는 거의 유사하며, 최종적으로 도달하는 위치 또한 유사한 것으로 보인다. 차이점으로는 성형 초기의 성형경로가 얼마나 더 스트레치 로드에서 접촉하고 있는지에 따라 다르다.



(a) Shoulder and body region



(a) Bottom region

Figure 8. Thickness profile of blown bottle for different pre-blow start time.

#### 4. 두께 분포

병의 두께 분포는 최종적인 병의 품질을 판단하는데 중요한 요소이다. Figure 8(a)는 성형된 병의 어깨부분부터 몸통부까지의 두께를 나타내고 있다. Figure 8(a)에서  $T_0$ 조건은 연신비에서 확인한 것과 같이 어깨부에서 몸통부에 이르기까지 점점 두께가 얇아지는 것을 볼 수 있다.  $T_2$ 조건에서는 어깨부에서 두께가  $T_0$ 에 비해 더 줄었으나 몸통의 하단부에서는 오히려 두께가 두꺼워진다. 그리고  $T_5$ ,  $T_8$ ,  $T_{10}$ 조건으로 갈수록 어깨부 두께는 더 감소하고 몸통 하단부의 두께는 더 두꺼워지고 있다.  $T_5$ ,  $T_8$ ,  $T_{10}$ 의 조건은 Figure 7의 성형경로에서 보듯 유사한 결과를 보였는데 두께 분포에서도 유사한 결과를 보인다.

Figure 8(b)는 바닥부 두께 분포이다. x축의 음의 값은 병에서 바닥과 접촉하지 않는 골 부분이고 양의 값은 병의 바닥에서 바닥과 접촉하는 발 부분이다. 그림에서 보면 발부분의 두께가 더 얇은 것으로 보아 스트레치가 더 많이 이루어진 것으로 판단된다.  $T_0$  조건은 두께가 가장 얇게 분포하는데 이는 어깨부와 몸통부의 상단에서 다른 조건보다 두꺼운 두께로 인해 바닥부에서는 두께가 얇은 것을 볼 수 있다. 어깨부와 몸통부와 마찬가지로 바닥부에서도  $T_5$ ,  $T_8$ ,  $T_{10}$  조건들이 매우 유사한 두께 분포를 보여주고 있다.

#### 5. 중량분포

중량분포는 실제 공정에서 양품을 판단하는 결과값으로 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서도 프리블로우의 위치에 따른 위치 별 중량분포를 분석하였다. Figure 9에 나타난 중량분포의 분석은 실제 현장에서 수행하는 분석과 동일한 방법으로 하였다. Figure 3에 PET병의 어깨부, 몸통부, 바닥부로 나누는 방법을 보여주고 있다. Figure 9의 결과값에서 프리블로우 시작되는 스트레치 로드 위치가 더 낮을수록 어깨부의 중량이 몸통부로 이동하는 경향을 보인다. 그러나  $T_5$ ,  $T_8$ ,  $T_{10}$

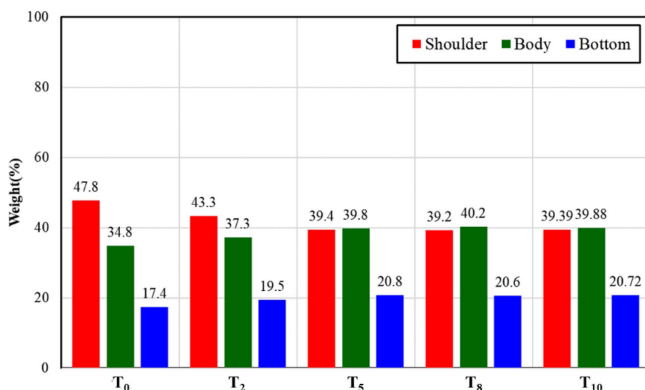


Figure 9. Weight distribution of blown PET bottle according to the pre-blow start time.

조건은 유사한 중량분포를 보인다. Figure 8의 두께 분포에서  $T_5$ ,  $T_8$ ,  $T_{10}$  조건에서 유사한 값을 나타낸 것과 일치한다. 이는 실제 공정에서 각 조건을 구분하는데 어려움을 줄 수 있다.

#### Conclusions

본 연구에서는 기존의 연구에서 집중적으로 다루지 않았던 프리블로우 위치에 따른 연구를 해석적으로 수행하였다. 다양한 프리블로우의 시작 시간에 따라 즉 프리블로우가 시작하는 스트레치 로드 위치의 위치에 따라 연신 블로우 성형해석을 진행하였다. 해석값으로 성형과정, 두께 분포, 연신비, 성형경로, 중량분포를 분석하였다. 너무 이른 프리 블로우 시작의 경우 스트레치 공정 중 프리폼이 팽창하여 스트레치 로드에서 벗어났다. 늦은 프리블로우 시작의 경우 스트레치 과정 중 프리폼 팽창이 늦어 프리폼과 스트레치 로드 위치가 서로 늦게까지 접촉하였다. 이는 컴퓨터 해석으로 프리블로우 시작 시간의 최적값을 제공할 수 있음을 보여주었다. 해석으로 예측한 프리블로우 시작 시간에 따른 성형과정, 연신율, 연신경로, 두께 분포 그리고 병의 중량분포는 매우 일관성 있는 결과를 보여주고 있었다. 이러한 해석적 결과는 현장에서 필요한 공정 설정에 응용이 가능하다. 본 연구에서 수행한 공정변수 이외의 공정변수에서도 해석적 연구가 더 필요하다.

#### Acknowledgements

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 재활용 저해제품 순환이용성 개선 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(202003080006).

**이해상충:** 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

#### References

1. N. H. Kim, I. Y. Woo, K. W. Nam, B. R. Yeon, M. R. Kim, and M.-Y. Lyu, "Comparison of Injection Molding Characteristics according to Thickness Variations of Preform for PET bottle", *Elast. Compos.*, **56**, 164 (2021).
2. Z. Bashir, I. Al-Aloush, I. Al-Raqibah, and M. Ibrahim, "Evaluation of three methods for the measurement of crystallinity of PET resins, preforms, and bottles", *Polym. Eng. Sci.*, **40**, 2442 (2000).
3. J. S. Schaul, "Drying and Injection Molding Pet for Beverage Bottle Preforms", *Polym. Plast Technol. Eng.*, **16**, 209, (1981).
4. Z. J. Yang, E. Harkin-Jones, G. H. Menary, and C. G. Armstrong, "A non-isothermal finite element model for injection stretch-blow molding of PET bottles with parametric stud-



- ies”, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 1379 (2004).
5. H. Haddad, S. Masood, and D. U. Erbulut, “A study of blow moulding simulation and structural analysis for PET bottles”, *Aust. J. Mech. Eng.*, **7**, 69 (2009).
  6. J. Nixon, G. H. Menary, and S. Yan, “Finite element simulations of stretch-blow moulding with experimental validation over a broad process window”, *Int. J. Mater. Form.*, **10**, 793 (2017).
  7. A. Lontos and A. Gregoriou, “The effect of the deformation rate on the wall thickness of 1.5LT PET bottle during ISBM (Injection Stretch Blow Molding) process”, *Procedia CIRP*, **81**, 1307 (2019).
  8. F. Daver and B. Demirel, “A simulation study of the effect of preform cooling time in injection stretch blow molding”, *J. Mater. Proces. Technol.*, **212**, 2400 (2012).
  9. P. Wawrzyniak, “The Influence of Stretch Rod Speed on the Relationship between Preblown Bottle Aesthetic Quality and Final Blown Bottle Thickness Profile in Stretch Blow Molding from Preform Process”, *Appl. Mech. Mater.*, **797**, 383 (2015).
  10. S. Bagherzadeh, F. R. Biglari, and K. Nikbin, “Parameter study of stretch-blow moulding process of polyethylene terephthalate bottles using finite element simulation”, *Proc. Inst. Mech. Eng. B. J. Eng. Manuf.*, **224**, 1217 (2010).
  11. F. M. Schmidt, J. F. Agassant, and M. Bellet, “Experimental study and numerical simulation of the injection stretch/blow molding process”, *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 1399 (1998).
  12. J. Biglione, Y. Béreaux, and J.-Y. Charneau, “Numerical Simulation of the Injection Blow Molding Single Stage Process: Shaping of Two Different Geometries and Comparison with Experimental Thickness Measurements”, *Int. Polym. Process*, **31**, 442 (2016).
  13. G. H. Menary et al., “Validating injection stretch-blow molding simulation through free blow trials”, *Polym. Eng. Sci.*, **50**, 1047 (2010).
  14. X.-T. Pham, F. Thibault, and L.-T. Lim, “Modeling and simulation of stretch blow molding of polyethylene terephthalate”, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 1460 (2004).
  15. H.-X. Huang, Z.-S. Yin, and J.-H. Liu, “Visualization study and analysis on preform growth in polyethylene terephthalate stretch blow molding”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **103**, 564 (2007).
  16. J. P. McEvoy, C. G. Armstrong, and R. J. Crawford, “Simulation of the stretch blow molding process of PET bottles”, *Adv. Polym. Technol.*, **17**, 339 (1998).
  17. B. Cosson, L. Chevalier, and J. Yvonnet, “Optimization of the Thickness of PET Bottles during Stretch Blow Molding by Using a Mesh-free (Numerical) Method”, *Int. Polym. Process*, **24**, 223 (2009).
  18. M. Bordival, F. M. Schmidt, Y. le Maout, and V. Velay, “Optimization of preform temperature distribution for the stretch-blow molding of PET bottles: Infrared heating and blowing modeling”, *Polym. Eng. Sci.*, **49**, 783 (2009).
  19. M.-Y. Lyu and Y. Pae, “Bottom design of carbonated soft drink poly(ethylene terephthalate) bottle to prevent solvent cracking”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **88**, 1145 (2003).
  20. M. Bordival, F. M. Schmidt, Y. le Maout, and V. Velay, “Simulation of the two stages stretch-blow molding process: Infrared heating and blowing modeling”, *AIP Conf. Proc.*, **908**, 519 (2007).
  21. M.-Y. Lyu, H. C. Kim, J. S. Lee, H. C. Shin, and Y. Pae, “Causes of Cracks in Petaloid Bottom of Carbonated PET Bottle”, *Int. Polym. Process*, **16**, 72 (2001).
  22. S. Hwan Cho, J. S. Hong, and M. Young Lyu, “Investigation of the Molding Conditions to Minimize Residual Stress and Shrinkage in Injection Molded Preform of PET Bottle”, *Macromol. Res.*, **35**, 467 (2011).
  23. M. L. Williams, R. F. Landel, and J. D. Ferry, “The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids”, *J. Am. Chem. Soc.*, **77**, 3701 (1955).

**출판자 공지사항:** 한국고무학회는 게재된 논문 및 기관 소속의  
관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.