

열진공성형 공정조건이 적층필름의 두께분포에 미치는 영향

유영길¹ · 이호상[#]

Effects of Processing Conditions on Thickness Distribution for a Laminated Film during Vacuum-Assisted Thermoforming

Y. G. Yoo, H. S. Lee

(Received March 21, 2011 / Revised April 28, 2011 / Accepted May 3, 2011)

Abstract

Vacuum-assisted thermoforming is one of the critical steps for the successful application of film insert molding(FIM) to parts of complex shapes. If the thickness distribution of the formed film is non-uniform, cracking, deformation, warping, and wrinkling can easily occur at the injection molding stage. In this study, the effects of processing parameters, which include the film heating time, plug depth, plug speed and vacuum delay time, on film thickness distribution were investigated. It was found that the film thickness at the part sidewall decreases with increasing the film heating time and plug depth, but the thickness at the bottom was found to exhibit the opposite behavior. The film thickness of the sidewall was observed to increase at higher plug speed and vacuum delay time of 0 ~ 0.3sec.

Key Words : Laminated Film, Vacuum, Thermoforming, Film Insert Molding, Thickness, Plug, Mold

1. 서 론

최근 종래의 인몰드(In-Mold Decoration) 방법을 더욱 발전시켜 인쇄된 필름을 미리 원하는 형상으로 성형하고, 금형에 삽입한 후 사출성형 공정을 적용하여 플라스틱 제품과 필름을 일체형으로 성형하는 필름인서트성형(Film Insert Molding) 기술이 새로운 플라스틱 표면 장식 기술로 각광을 받고 있다. 필름인서트성형 공정에서는 사전에 인쇄된 인서트 필름을 사용하기 때문에 패턴 형상 및 색상의 유지가 용이하고 유기화합물이 배출되지 않는 친환경 성형 공법이라는 장점을 갖고 있다.

필름인서트 사출성형을 위하여 인쇄된 필름을 진공성형기에 투입하고, 필름에 유리전이온도 이상으로 열을 가한 상태에서 진공을 가해 원하는 형상으로 열/진공성형하는 공정이 첫 번째 단계이

다.

열/진공성형 공정에서 플라스틱 필름은 연화온도 이상으로 가열되고 직하중 또는 압력차이에 의하여 금형 표면을 따라 늘어나게 된다. 이때 연신된 필름의 두께가 불균일해지고, 두께가 크게 얇아진 부위에서는 사출성형 공정에서 수지의 높은 압력 및 유동속도에 의한 전단력으로 필름이 찢어지거나 주름이 발생하는 현상이 발생할 수 있다. 특히, 사용하는 수지의 점도가 높고 유동성이 나쁘거나, 성형품의 두께가 얇고 대형 제품인 경우 사출성형 공정에서 발생하는 압력이 더욱 커지게 되어 필름의 두께 불균일은 더욱 큰 불량 원인이 된다. 뿐만 아니라 필름인서트 성형에 사용되는 필름은 표면에 패턴이 인쇄되고, 보호/접합 등에 필요한 화학층으로 코팅 처리되기 때문에 필름의 패턴 재현성, 두께 균일성 등은 열성

1. 충주대학교 대학원

교신저자: 충주대학교 항공기계설계학과,

E-mail: lhs@cjnu.ac.kr

형 공정조건에 더욱 민감하다.

열/진공성형 공정조건이 필름의 치수변화, 두께분포 등과 같은 성형된 제품의 품질특성에 미치는 영향은 매우 복잡하며, 그동안 관련된 많은 연구가 진행되어 왔다[1~8]. Pollar 등[5]은 플러그 적용 열성형에서 플러그와 필름온도가 두께분포에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다. Aroujalian 등[6]은 필름온도, 플러그속도, 플러그온도 등 공정조건이 플러그 적용 열성형 용기에서의 두께분포에 미치는 영향에 대하여 고찰하였으며, 플러그 속도와 플러그 온도가 필름두께 분포에 미치는 영향이 크고 필름 온도는 별 영향이 없음을 보고하였다. Chen 등[7]은 컵 형상의 제품에 대한 플러그 적용 열성형 실험을 통하여 금형 온도, 필름가열온도, 플러그 깊이, 플러그 속도, 다단 성형 등의 공정조건이 패턴변화와 두께분포에 미치는 영향을 연구하였다. 한편 단층필름을 사용한 기존 대부분의 연구와는 달리 Kim[8]은 적층필름을 사용하였으며, 단축인장실험을 통해 응력-변형을 관계를 도출하고, PAM-FORM을 사용하여 두께 및 패턴변화를 예측하였으며 실험결과와 비교하였다.

그동안 열/진공성형에 관한 연구는 플러그 또는 양각금형의 이동에 의한 열성형, 또는 진공만을 적용한 성형에 대하여 주로 이루어졌으며, 대부분 단층필름을 사용하였다. 그러나 필름인서트성형을 적용하기 위하여 적층필름을 사용하여야 하며, 연신 깊이가 큰 형상의 경우에는 플러그와 진공을 동시에 적용하는 공정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 깊이가 큰 컵 형상의 제품에 대하여 적층필름을 사용하였으며, 플러그와 진공을 동시에 적용한 열/진공성형 공정조건이 성형된 필름의 두께 변화에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

2. 금형설계 및 실험

플러그와 진공을 동시에 적용한 열/진공성형 실험을 위하여 Fig. 1과 같이 하부 직경 90mm, 상부 직경 106mm, 깊이가 60mm로서 깊이가 크면서 대칭구조를 갖는 컵 형상의 제품을 적용대상으로 선정하였다. Fig. 2는 열/진공성형을 위하여 제작된 상부 금형 플러그를 나타낸다.

실험에 사용된 필름은 Avery Dennison사에서 제조한 두께 0.5mm의 ABS 적층필름으로서 코팅층, 장식패턴, 그리고 기재층으로 구성되어 있다. 실

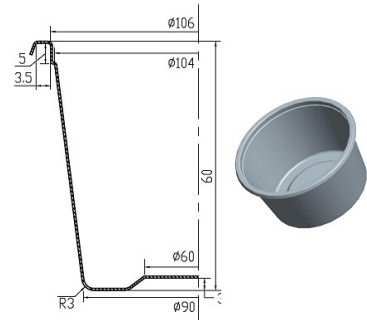


Fig. 1 Schematic diagram of the cup shaped part

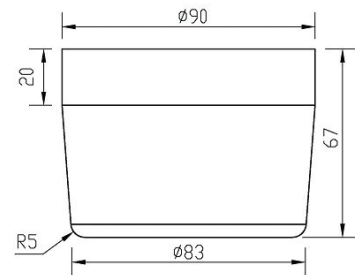


Fig. 2 Plug used in experiments

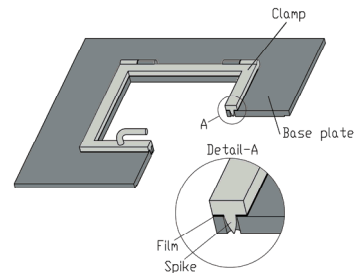


Fig. 3 Schematic of film clamping jig

험에 사용된 진공성형기는 신효산업(주)에서 제작한 깊이 150mm까지 성형가능한 장비이며, 필름을 클램핑하기 위한 위치는 400mm×400mm으로 고정되어 있다. Fig. 1에서 도시된 제품크기에 적합한 필름 클램핑 지그를 Fig. 3에서 도시된 바와 같이 설계/제작하여 베이스 플레이트위에 필름을 위치시키고 스파이크(spike)를 사용하여 필름을 고정시킬 수 있도록 하였다.

실험에 적용된 공정조건은 Table 1과 같으며, 필름가열시간, 플러그의 깊이, 플러그의 속도, 진공 지연시간 등 주요 공정조건을 변화시키며 성형하였으며, 필름의 두께를 측정하였다. 두께측정 위치는 Fig. 4에서 보여진 바와 같이 바닥면 중심위치에서부터 대칭선을 따라 성형품 가장자리까

Table 1 Processing conditions

| Parameters | Processing cond. |
|---------------------------|------------------|
| Film heating time | 23sec |
| Plug and mold temperature | 35℃ |
| Plug depth | 48mm |
| Plug speed | 240mm/sec |
| Press. diff. by vacuum | 10KPa |
| Delay time of vacuum | 0 sec |

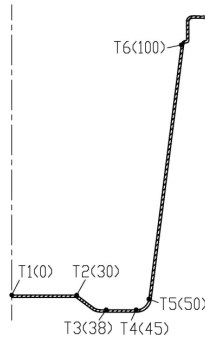


Fig. 4 Measuring points for thickness distribution

지 두께 값을 측정하였으며, 그림에서 괄호안의 수치는 바닥 중심점에서 시작된 누적거리를 나타낸다. T1에서 T2까지의 길이는 30mm이며 5mm간격으로 세분화하여 두께를 측정하였으며, 또한 측벽부위에 해당하는 T5에서 T6까지의 길이 50mm 영역에서는 2.5mm 간격으로 세분화하여 측정하였다.

각 지점 i 에서 측정된 두께 값(t_i)으로부터 평균 값(μ)과 표준편차(σ)를 구하고, 다음 식(1)으로 정의된 COV(Coefficient of Variation)를 계산하여 위치별 두께편차를 정량화하였다.

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (1)$$

여기서 $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$, $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2}$ 이다.

3. 실험결과 및 분석

필름을 가열한 상태에서 설정된 깊이까지 일정한 속도로 플러그를 하강시켜 1차 성형을 진행하

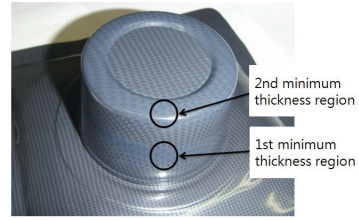


Fig. 5 Vacuum-assisted thermoformed part with two minimum thickness regions

고, 하부금형에 설치된 진공채널을 통하여 진공을 작동하여 2차 성형을 하였다. Fig. 5는 열/진공성형 실험에 의한 성형품으로서 2군데의 두께 최소위치가 존재하고 있음을 나타낸다. 첫 번째 위치는 1차 성형단계에서 플러그가 하강하면서 발생하는 필름의 이축연신에 의한 것이며, 두 번째 위치는 2차 성형 단계인 진공의 작용에 의하여 바닥면과 측벽이 접하는 모서리 부위에서 발생하는 연신에 의한 것이다.

주요 열/진공성형 조건이 필름의 두께분포에 미치는 영향을 파악하기 위하여 위에서 설명된 Table 1의 공정조건을 고정시킨 상태에서 필름가열시간, 플러그의 깊이, 플러그의 속도, 진공지연시간 등의 조건을 각각 독립적으로 변경시키면서 성형 실험을 수행하였다.

3.1 필름 가열시간

필름 가열시간을 각각 21초, 23초, 25초로 변경하면서 열/진공성형 실험을 수행하고, 두께분포를 측정하였다. 비접촉식 온도계를 사용하여 필름의 평균온도를 측정한 결과 가열시간 21초, 23초, 25초인 경우 필름 표면온도는 각각 164℃, 170℃, 그리고 174℃로 나타났다.

Fig. 6은 필름 가열시간에 따른 위치별 두께 분포를 측정한 결과이다. 성형품의 테두리 부분과 측벽부분에서는 필름 가열시간이 증가함에 따라 성형품의 두께가 감소하고 있으며, 성형품의 측벽과 바닥면이 접하는 모서리 부분과 바닥면에서는 필름 가열시간이 증가함에 따라 반대로 두께가 커지고 있음을 볼 수 있다. 1차 성형 단계에서는 가열된 필름의 가장자리가 클램핑된 상태에서 플러그가 필름의 중앙부위와 접촉하여 48mm 깊이까지 필름을 연신하게 된다. 이때 성형품 측벽 부분은 플러그의 작용력에 의한 이축연신(biaxial elongation) 거동을 겪게 된다.

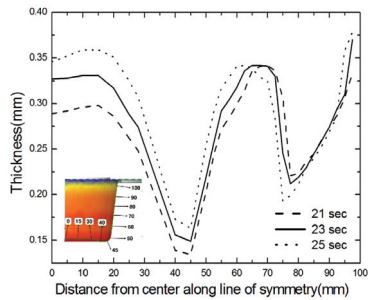


Fig. 6 Thickness variations along the line of symmetry under various film heating time

필름온도가 높을수록 이축연신점성(biaxial elongational viscosity)이 낮아지고 변형경화(strain hardening) 현상이 감소하기 때문에 플러그의 작용력에 의하여 측벽 부분의 두께는 더욱 얇아지게 된다. 반면에 바닥면은 플러그와 필름이 가장 먼저 접촉하게 되는 영역으로서 마찰계수의 정도에 따라 플러그와 필름 사이의 미끄러짐 현상이 연신거동에 영향을 크게 미치게 된다. 일반적으로 유리전이온도(glass transition temperature) 이상의 높은 온도에서 필름과 금형사이의 마찰계수는 온도가 높아짐에 따라 지수 함수로 증가하게 된다[3]. 따라서 필름 가열시간이 증가함에 따라 필름의 온도가 높아지고 플러그와 필름사이의 마찰계수가 더욱 증가하기 때문에 플러그가 하강하면서 중앙부 필름이 측벽쪽으로 유입되기 어려운 조건이 되기 때문에 두께가 더욱 두꺼운 것으로 판단된다.

Fig. 7은 필름 가열시간에 따른 필름 평균두께와 위 식(1)에서 정의한 두께 변동계수(COV)를 나타낸다. 필름 가열시간이 증가할수록 필름 평균두께가 커지고, 두께 변동계수도 크게 됨을 볼 수 있다. 열/진공성형의 첫 번째 공정으로서 필름을 설정된 시간동안 가열할 때 필름은 전체적으로 비교적 균일한 연신이 이루어지고 자중에 의하여 약간의 처짐이 발생하게 된다. 필름가열시간이 증가할수록 클램핑된 외주면으로부터의 필름 유입량이 많아지게 되어 전체적으로 필름의 평균두께는 커지게 된다. 그러나 필름 가열시간이 25초로 증가하게 되면 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 플러그의 하강에 따른 측벽부위의 두께가 크게 작아지게 되어 전체적으로 두께 변동계수는 증가하게 된다. 본 모델의 경우 일정두께 이상을 유지하면서 두께 변동계수를 줄일 수 있는 조건으로서 필

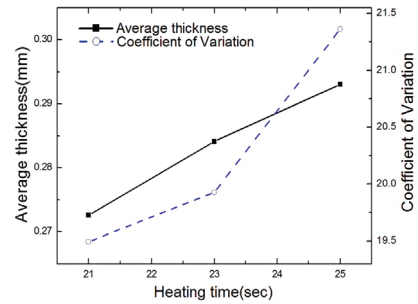


Fig. 7 Average thickness and coefficient of variation vs. film heating time

름 가열시간 23초가 바람직한 것으로 판단된다.

3.2 플러그 깊이

1 차 성형단계로서 플러그의 하강거리가 두께 분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 플러그의 깊이를 각각 37mm, 43mm, 48mm, 53mm로 변동시켜 열/진공성형 실험을 수행하였다. Fig. 8은 플러그의 깊이 변화에 따른 두께분포 측정결과를 나타낸다. 플러그의 깊이가 증가함에 따라 측벽 부분의 두께가 얇아지는 것은 플러그의 작용력 증가로 인한 측벽부 필름의 연신량이 크기 때문으로 쉽게 이해될 수 있다. 그러나 바닥부위 및 모서리 부위에서는 반대로 플러그의 깊이가 감소함에 따라 두께가 더욱 얇아짐을 볼 수 있다. 플러그의 깊이가 작을수록 1 차 성형 종료 후 필름 외주면에서 바닥면까지의 깊이는 작으며, 결국 필름 바닥면에서 하부금형의 내부 표면까지 간격이 커지게 된다. 2 차 성형단계에서는 진공펌프를 작동시키고 하부금형에 설치된 진공채널을 통해 필름과 하부금형 사이의 공기를 배출하게 된다. 따라서 플러그의 깊이가 작을수록 진공 작용력에 의한 필름 바닥면의 연신량은 더욱 커지고 되어 두께가 감소하게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 플러그의 깊이 변화에 따른 필름의 평균두께 및 두께 변동계수를 나타낸다. 플러그의 깊이가 증가함에 따라 필름의 평균두께는 커지며, 두께 변동계수는 전반적으로 감소하고 있음을 볼 수 있다. 플러그의 깊이를 증가시킴으로서 깊은 측벽 부위를 효과적으로 연신시킬 수 있으며 바닥면과 하부금형 사이의 간격을 줄여 진공에 의한 과도한 연신이 발생하지 않게 되기 때문이다. 이로인하여 평균 두께가 증가할 뿐만아니라 두께 편차도 감소하게 된다. 그러나 48mm이상에서는

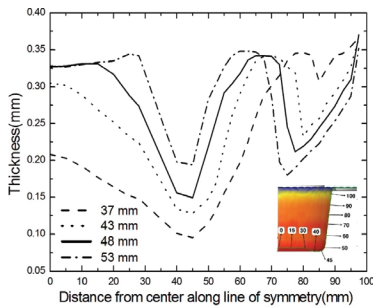


Fig. 8 Thickness variations along the line of symmetry under various plug depth

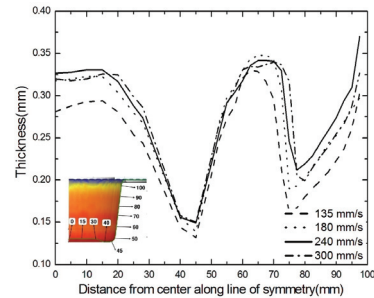


Fig.10 Thickness variations along the line of symmetry under various plug speed

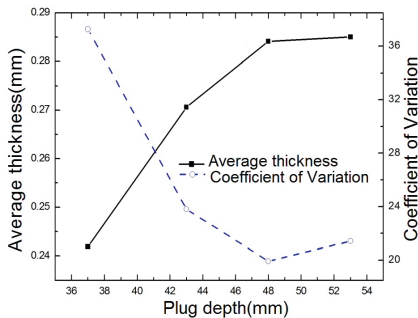


Fig. 9 Average thickness and coefficient of variation vs. plug depth

플러그 깊이의 증가에 따라 평균두께 변화가 매우 작으며, 두께 변동계수는 오히려 약간 증가하고 있음을 볼 수 있다. 위에서 설명한 바와 같이 플러그의 깊이가 증가함에 따라 측벽 부위의 두께는 더욱 얇아지고, 반대로 바닥면 및 모서리 부위의 두께는 더욱 두꺼워지므로 측벽부위와 모서리 부위의 두께 분포 균형을 이룰 수 있는 적절한 플러그 깊이 선정이 필요하다. 본 적용모델의 경우 플러그의 깊이 48mm가 적절하며, 적용 제품의 깊이가 60mm임을 고려할 때 플러그 깊이는 제품 깊이의 약 70% 정도로 설정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3.3 플러그 속도

플러그의 속도를 각각 135mm/s, 180mm/s, 240mm/s, 300mm/s 로 변동시켜 열/진공성형 실험을 수행하였다. Fig.10 은 플러그의 속도 변화에 따른 두께 분포 측정결과를 나타낸 것으로 플러그의 속도가 증가함에 따라 측벽 부분, 모서리 부분, 바닥 부분 등 모든 위치에서 두께가 증가하고 있음을

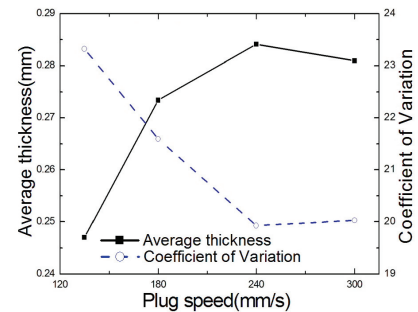


Fig.11 Average thickness and coefficient of variation vs. plug speed

볼 수 있다. 이것은 필름의 점탄성 특성에 의한 것으로서 변형률 속도(strain rate)가 증가할수록 필름은 솔리드 상태의 탄성변형 거동이 크게 나타나기 때문에, 플러그의 속도가 증가할 수록 필름의 변형률 속도가 커지게 되어 플러그 및 진공에 의한 연신이 작게 발생하게 된다. 그러나 약 240mm/s 이상의 빠른 플러그 속도를 작용한 경우 플러그 속도 변화에 따른 바닥부분과 모서리 부분의 두께분포 변화는 측벽부분의 변화에 비하여 매우 작음을 볼 수 있다. 그 이유는 바닥부분과 모서리 부분의 연신이 플러그의 작용에 의하여 이루어지는 것보다 2 차 성형단계에서 작용하는 진공에 의하여 영향을 더욱 크게 받기 때문으로 판단된다.

Fig. 11은 플러그의 속도 변화에 따른 필름의 평균두께 및 두께 변동계수를 나타낸다. 플러그의 속도가 증가할수록 필름 평균두께는 커지고 두께 변동계수는 작아짐을 볼 수 있다. 플러그의 속도 증가에 의한 필름의 변형률 속도 증가는 필름의 탄성을 높이고, 이로인하여 평균두께가 증가하고 두께는 보다 균일해 짐을 알 수 있다.

3.4 진공 지연시간

플러그에 의한 1 차 성형이 이루어진 이후 2 차 성형 단계로서, 진공을 작용하기까지의 진공지연 시간을 0 초~0.6 초 구간에서 0.1 초 간격으로 증가시키면서 실험을 수행하였다.

Fig. 12(a)와 (b)는 진공지연시간 변화에 따른 두께분포를 측정한 결과이다. 진공지연시간이 0 초에서 0.3 초까지 증가함에 따라 측벽 부분의 두께는 크게 증가하고 있으며, 바닥면과 모서리 부분의 두께도 다소 증가하고 있지만 바닥면 부위에 비하여 상대적으로 진공지연시간이 두께분포에 미치는 영향이 적은 것을 볼 수 있다. 진공지연시간이 증가할수록 하부 금형으로의 열전달량이 많아지고 필름의 온도가 낮아지게 되어 진공에 의한 연신이 줄어들게 된다. 바닥면과 모서리 부위의 경우 공정 초기부터 플러그와의 접촉이 이루어지므로 바닥부분 필름의 온도가 측벽 필름 온도에 비하여 더욱 낮아진 상태이므로 진공지연시간의 차이에 의한 연신율 차이가 측벽에 비하여 작은 것으로 판단된다.

한편 Fig. 12(b)에서 진공지연시간이 0.3 초 이상으로 지연시간이 증가하게 되면 측벽에서의 두께는 반대로 감소하고 있으며, 바닥면 부위에서는 두께 증가폭이 다소 크게 나타남을 볼 수 있다. 그 이유는 긴 진공지연시간으로 인하여 바닥면의 필름이 거의 솔리드상태가 되어 진공에 의하여 국부적인 연신은 거의 없는 상태에서 하부금형 표면으로 이동하게 되며, 이때 측벽부분의 필름은 바닥면 쪽으로 유입되는 연신거동이 발생하기 때문으로 판단된다. 따라서 0.3 초 이상에서는 진공지연시간이 증가할수록 바닥면의 필름은 더욱 솔리드 상태가 되어 두께가 증가하게 되고, 이로인하여 측벽부위의 필름은 바닥면쪽으로 더욱 많은 양이 유입되므로 측벽 두께는 감소하게 되는 것이다.

Fig. 13은 진공지연시간에 따른 필름의 평균두께 및 두께 변동계수를 나타낸다. 진공지연시간이 증가할수록 필름의 평균두께가 증가하고 두께 변동계수는 감소하고 있으나, 진공지연시간 0.4초이상에서는 반대로 평균두께가 감소하고 두께 변동계수는 증가하고 있음을 볼 수 있다. 위에서 설명한 바와 같이 0.3초까지는 진공지연시간이 증가할수록 측벽부위 필름 두께가 증가하고 바닥면 부위 필름 두께는 큰 변화가 없지만, 0.3초 이상에서는 진공지연시간이 증가할수록 바닥면 부위 필름

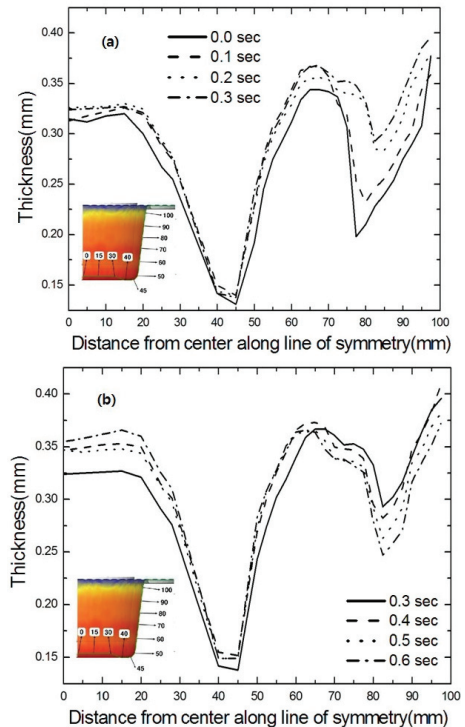


Fig.12 Thickness variations along the line of symmetry under various vacuum delay time: (a) vacuum delay time of 0.0sec~0.3sec; (b) vacuum delay time of 0.3sec~0.6sec

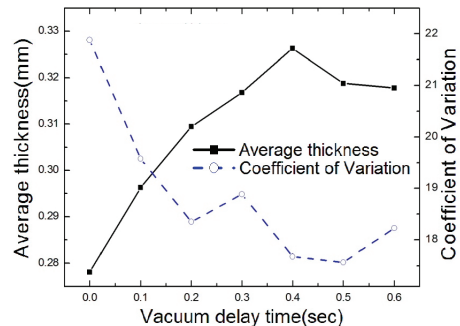


Fig.13 Average thickness and coefficient of variation vs. vacuum delay time

두께가 증가하는 대신 측벽부위 필름 두께가 반대로 감소하게 되는 현상으로 인하여 평균두께 및 두께 변동계수 변화의 경향이 변하게 된다. 본 적용모델의 경우에는 진공지연을 0.4초로 설정하여 성형하는 것이 평균두께를 증가시키고, 두께 변동계수를 최소화할 수 있는 조건으로 판단된다.

4. 결 론

깊이가 큰 컵 형상의 제품을 성형하기 위하여 적층필름을 사용하여 플러그와 진공을 동시에 적용한 열/진공성형 공정조건이 필름의 두께분포에 미치는 영향을 고찰하였으며, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 열/진공성형에 의한 성형품은 2 군데의 두께 최소위치가 존재하였으며, 각각 플러그에 의한 이축연신과 진공에 의한 연신위치로 파악되었다.

(2) 필름 가열시간이 증가함에 따라 성형품의 테두리 부분과 측벽부분에서는 두께가 감소하였으며, 성형품 모서리 부분 및 바닥면에서는 반대로 두께가 커지고 있음을 알 수 있었다.

(3) 플러그의 깊이가 증가함에 따라 측벽 부위의 두께는 더욱 얇아지고, 반대로 바닥면 및 모서리 부분의 두께는 두꺼워졌으며, 본 논문에서 적용한 모델의 경우 플러그 깊이는 제품 깊이의 약 70% 정도로 설정하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

(4) 플러그의 속도가 증가할수록 필름 평균두께가 커지고, 두께분포는 보다 균일해 짐을 알 수 있었다.

(5) 진공지연시간이 증가할수록 필름의 평균두께가 증가하고 두께 변동계수는 감소하지만, 일정 시간 이상의 진공지연시간에서는 반대의 경향이 나타남을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2010 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(한국연구재단-2010-0002938). 실험에 협조해 주신 첨단금형기술교육센터와 신효산업(주) 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] E. Gimenez, J. M. Lagaron, L. Cabedo, R. Gavara, J. J. Saura, 2004, Study of the thermoformability of ethylene-vinyl alcohol copolymer based barrier blends of interest in food packaging applications, J. of Appl. Poly. Sci., Vol. 96, pp. 3851~3855.
- [2] E. Gimenez, J. M. Lagaron, M. L. Maspoch, L. Cabedo, J. J. Saura, 2004, Uniaxial tensile behavior and thermoforming characteristics of high barrier EVOH-based blends of interest in food packaging, Poly. Eng. & Sci., Vol. 44, pp. 598~608.
- [3] J. K. Lee, T. L. Virkler, C. E. Scott, 2001, Effects of rheological properties and processing parameters on ABS thermoforming, Poly. Eng. & Sci., Vol. 41, pp. 240~261.
- [4] J. K. Lee, T. L. Virkler, C. E. Scott, 2001, Influence of initial sheet temperature on ABS thermoforming, Poly. Eng. & Sci., Vol. 41, pp. 1830~1844.
- [5] S. Poller, W. Michaeli, 1992, Film temperatures determine the wall thickness of thermoformed parts, SPE ANTEC, Vol. 38, pp. 104~108.
- [6] A. Aroujallan, M. O. Ngadi, J. P. Emond, 1997, Wall thickness distribution in plug-assist vacuum formed strawberry containers, Poly. Eng. & Sci., Vol. 37, pp. 178~182.
- [7] S.-C. Chen, S.-T. Huang, M.-C. Lin, R.-D. Chien, 2008, Study on the thermoforming of PC films used for in-mold decoration, Int. Comm. in Heat and Mass transfer, Vol. 35, pp. 967~973.
- [8] G. Kim, K. Lee, S. Kang, 2009, Prediction of the film thickness distribution and pattern change during film insert thermoforming, Poly. Eng. & Sci., Vol. 49, pp. 2195~2203.