한국정밀공학회지 제 23 권 제 8 호 (2006 년 8 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 8, August 2006

PDMS 쿠션을 갖는 Si 몰드에 의한 핫엠보싱 공정에서의 4 인치 웨이퍼 스케일 전사성 향상

김흥규#, 고영배*, 강정진*, 허영무*

4 Inch Wafer-Scale Replicability Enhancement in Hot Embossing by using PDMS-Cushioned Si Mold

Heung-Kyu Kim#, Young Bae Ko*, Jeong Jin Kang* and Youngmoo Heo*

ABSTRACT

Hot embossing is to fabricate desired pattern on the polymer substrate by pressing the patterned mold against the substrate which is heated above the glass transition temperature, and it is a high throughput fabrication method for bio chip, optical microstructure, etc. due to the simultaneous large area patterning. However, the bad pattern fidelity in large area patterning is one of the obstacles to applying the hot embossing technology for mass production. In the present study, PDMS pad was used as a cushion on the backside of the micro-patterned 4 inch Si mold to improve the pattern fidelity over the 4 inch PMMA sheet by increasing the conformal contact between the Si mold and the PMMA sheet. The pattern replicability improvement over 4 inch wafer scale was evaluated by comparing the replicated pattern height and depth for PDMS-cushioned Si mold against the rigid Si mold without PDMS cushion.

Key Words : Hot embossing (핫엠보싱), Pattern fidelity (패턴 충실도), Large area (대면적), Mass production (대량 생산), PDMS (폴리디메틸실록산)

1. 서론

핫엠보싱(Hot embossing) 공정은 미세 패턴이 각인된 금형(Mold)을 유리전이온도(Tg) 이상으로 가열된 고분자 소재에 눌러서 금형의 미세패턴을 전사하는 성형 기술로서, 여러 개의 미세 패턴이나 구조물을 대면적의 소재 위에 한번의 가압 과정을 통해 전사할 수 있기 때문에 미세 광학 부품, 바이오 칩 등의 대량 생산 기술로서 활용 가능하다.[1-3]

그런데 많은 경우 실제 핫 엠보싱 공정에서는 원하는 수준의 패턴 전사성을 유지하면 공정 소요 시간이 길어지고, 공정 시간을 줄이면 패턴 전사성이 떨어지는 문제를 갖는다. 이는 곧 대량 생산 기술로의 활용이 어려워짐을 나타낸다. 이 때 패턴 전사성은 단일 패턴의 전사성과 대면적 전사성의 두 가지로 나눌 수 있다. 단일 패턴 전사성만을 고려하면 소재를 가열하는 온도와 가열/냉각 속도가 중요한 영향 인자가 될 것이고, 양산성과

☞ 접수일: 2006 년 4 월 28 일; 게재승인일: 2006 년 6 월 23 일
교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀
E-mail krystal@kitech.re.kr Tel. (032) 234-0606
* 한국생산기술연구원 정밀금형팀

성형 후 변형을 고려하면 가능한 한 낮은 온도에서의 성형이 바람직하다. 그런데, 대면적 전사성 측면에서는 단일 패턴에서 전사성을 확인한 성형 조건으로 충분한 전사성을 얻지 못할 수 있다. 이러한 경우 단일 패턴에 대해 적용 가능한 성형 온도를 올리거나 가열/냉각 속도를 낮추거나 하여야 하는데, 이는 곧 양산성 감소로 이어진다. 따라서 단일 패턴에 대한 성형성을 대면적 소재에 대한 성형 공정에서 유지할 수 있는 대면적 전사성 기술의 개발은 향후 핫엠보싱 공정의 양산화를 위해서 매우 중요한 핵심 기술이다.

일반적으로 PDMS 는 소프트 리소그라피(Soft Lithography) 공정에서 국부적인 표면 요철에 따른 패턴과 소재의 접촉성 향상을 위해 몰드 재료로 주로 사용되었다. 한편 최근에 UV 임프린팅 공정에서 PDMS 의 쿠션 작용을 활용한 적층형 구조의 몰드가 몇가지 제안되어 적용되었다.[4,5] 일반적으로 UV 임프린팅에 사용되는 고분자 소재는 액체 상태에서 성형되므로 대면적 전사성을 높이는데 PDMS 의 부드러운 쿠션 작용이 효과적이다. 본 연구에서는 이와 같이 UV 임프린팅 공정에 대해 제안된 몰드에 기반하여 핫엠보싱 공정에 적합한 적층형 몰드를 제안하고 이를 적용하고자 하였다.

UV 임프린팅에서는 성형물과 맞닿는 몰드 소재에 PDMS 또는 이보다 조금 더 높은 경도를 갖는 hard-PDMS 또는 PMMA 가 제안되어 적용되었는데, 핫엠보싱 공정의 경우 공정의 특성상 성형물의 강도가 높고 따라서 높은 가압력이 필요하다. 이러한 경우 몰드가 너무 연한 재료로 만들어지면 가압 공정에서 패턴 자체가 손상되거나 변형되어 원하는 전사성을 얻지 못하게 된다. 따라서 핫엠보싱 공정에서는 상대적으로 더 높은 강성을 갖는 몰드를 사용하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 이유로 Si 몰드를 그대로 사용하고 PDMS 쿠션 패드를 사용한 적층형 몰드를 제안하였다. 제안된 적층형 몰드를 제작하기 위해 1.3mm, 2.4mm 의 두 가지 PDMS 패드를 제작하였다. 먼저 무패턴 Si 웨이퍼, PDMS 패드, 유리 웨이퍼를 적층하고 4 inch PMMA 시트(sheet)에 대해 상온 가압 공정을 수행하여 전체 면적에 걸친 압력 분포를 확인하였다. 그 후 반복적인 패턴을 갖는 Si 몰드, PDMS 패드, 유리 웨이퍼를 적층하고 실제 핫엠보싱 공정을 수행하여 제안된 적층형 몰드가 실제 대면적 패턴 전사성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다..

2. PDMS 쿠션을 갖는 적층형 Si 몰드의 설계 및 제작

2.1 적층형 Si 몰드의 구조 설계

UV 임프린트 공정의 경우에 대면적 전사성 향상을 위해 PDMS 쿠션을 갖는 몇 가지의 몰드 구조물이 제안되었다. 이러한 몰드의 기본 구조는 패턴이 새겨진 몰드, 쿠션 역할을 할 수 있는 구조물, 기준 평탄면의 역할을 할 수 있는 강성 구조물을 차례로 적층한 Fig. 1 (a)와 같은 적층형 몰드로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 적층형 몰드를 핫엠보싱 공정에 처음 적용하기 위해 Fig. 1 (b)와 같이 패턴을 갖는 Si 몰드에 바로 PDMS 패드와 유리 웨이퍼를 적층한 구조를 제안하였다. UV 임프린팅을 위해 제안된 적층형 몰드의 경우에는 UV 투과성을 위해 몰드 재료로 hard-PDMS 또는 PMMA 등을 사용해야만 했다. 그러나 핫엠보싱 공정을 위해서는 투과성이 필요 없고 몰드 소재의 연성이 크면 핫엠보싱 공정의 높은 가압 환경에서 오히려 지나친 변형이 발생할 수도 있으므로 강성을 갖는 Si 몰드를 바로 사용할 수 있을 것으로 예상되었다.

핫엠보싱 성형 공정에서 대면적 상의 편평도 문제가 있는 PMMA 시트에 PDMS 쿠션을 갖는 적층형 몰드로 가압할 때 예상되는 몰드 변형과 패턴 전사 양상을 Fig. 2 에 나타내었다. PDMS 쿠션의 역할로 PMMA 시트소재의 면을 따라 고르게 패턴 전사가 이루어질 것으로 예상되었다.

2.2 적층형 Si 몰드의 제작

제안된 구조의 적층형 몰드를 제작하기 위해 먼저 2 가지 두께의 PDMS 패드를 제작하였다. 이를 위해 두께가 다른 아크릴 판에 5 inch 의 원형 구멍을 가공하고 이 부분에 액체 상태의 Dow Corning Sylgard 184 용액을 두께 수준까지 부어 주조하여 원하는 두께의 패드를 제작하였다. 용액 혼합 과정에서 발생하는 기포는 진공 환경에서 1 시간 동안 보존하여 충분히 제거하였으며, 아크릴 틀에 부은 후에는 70℃에서 2 시간 정도 가열하여 경화시켰다. 정해진 아크릴 틀 두께만큼 용액을 부어 주조했으나 경화 공정에 따른 체적 변화의 가능성이 있으므로 정확한 두께 측정을 위해 굳어진 후 PDMS 패드 두께를 측정하였는데 결과는 1.3mm 와 2.4mm 로 나타났다.

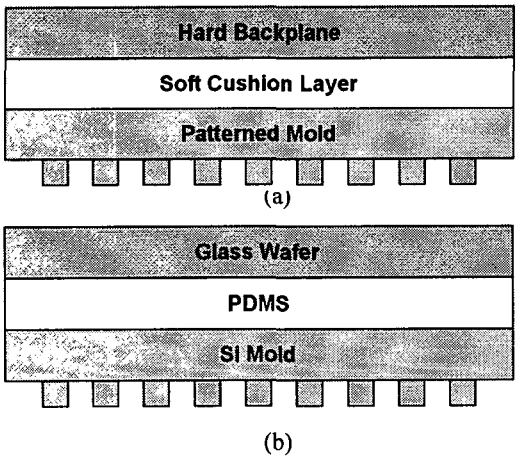


Fig. 1 (a) Concept of the PDMS-cushioned mold, and (b)the fabricated PDMS-cushioned mold

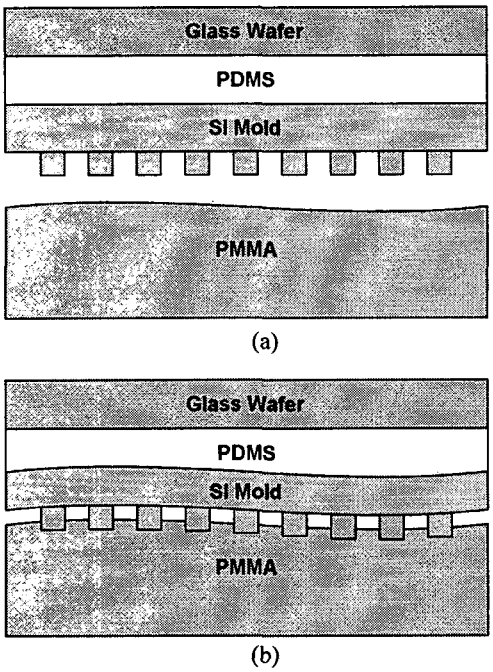


Fig. 2 Expected working mechanism of the PDMS-cushioned mold, (a) before embossing, and (b) after embossing

3. PDMS 쿠션을 갖는 적층형 Si 몰드에 의한 대면적 성형

3.1 적층형 Si 몰드에 의한 대면적 상온 가압 시험 및 결과

실제 핫엠보싱 공정을 통해 PDMS 쿠션 몰드의 영향을 평가하기 전에 상온에서의 가압 시험에서 면압지를 사용하여 Si 몰드와 성형물인 PMMA 시트 사이에 발생하는 가압력 분포를 측정하였다.

대면적 상의 가압력 분포를 관찰하는 것이 목적이므로 Si 몰드로는 패턴이 없는 Si 웨이퍼를 사용하였고, 가압 시험 및 핫엠보싱 공정을 위해서 EVG-520HE 를 사용하였다.

0.5mm 두께, 4 inch 지름의 PMMA 시트 위에 면압지, 다시 그 위에 적층형 몰드를 올려놓고 상온에서의 가압 시험을 수행하였는데 다음과 같은 구조의 3 가지 적층형 몰드를 대상으로 하였다.

(a) 6 inch 유리웨이퍼 + 4 inch Si 웨이퍼

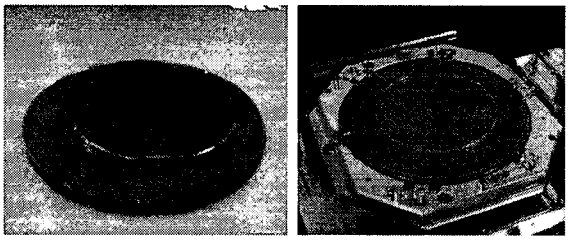
(b) 6 inch 유리웨이퍼 + 1.3mm 두께 PDMS 패드 + 4 inch Si 웨이퍼

(c) 6 inch 유리웨이퍼 + 2.4mm 두께 PDMS 패드 + 4 inch Si 웨이퍼

첫번째 적층형 몰드는 PDMS 패드가 없는 구조로서 PDMS 패드에 의한 쿠션 작용 효과와의 비교를 위해 제작되었다. EVG-520HE 의 몰드 고정구 위에 적층된 유리 웨이퍼, PDMS 패드, Si 웨이퍼의 모습과 성형물 고정구 위에 놓인 PMMA 시트의 모습을 Fig. 3 에 각각 나타내었다.

상온에서 가압력 분포만을 보기 위한 시험이므로 가열 및 냉각 공정은 생략하였다. 따라서 일반적인 핫엠보싱 공정에 비해 아주 짧은 공정 시간을 필요로 하는데, 공정시간 20 초(이중 실제 가압시간은 6 초), 가압력 10kN 으로 설정하고 시험을 하였다. 면압지는 작용하는 압력이 일정 수준에 도달하면 필름 내의 마이크로 캡슐이 파괴되고 그 속의 발색제가 유출되어 화학 반응을 함으로써 붉은 색을 나타내게 되는데, 적절한 규격의 것을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 몇 번의 시험을 통해 압력의 편차가 가장 잘 드러날 수 있도록 0.6~10MPa 압력 범위의 면압지를 사용하였다. 시험 후에 면압지에 나타난 압력 분포는 Fig. 4 와 같다. 육안으로 관찰할 수 있는 것처럼 PDMS 패드가 없는 몰드에서는 주로 테두리 부위에서만 가압 효과가 나타났다. 1.3mm 두께의 PDMS 패드를 사용하면 이러한 테두리 효과가 감소하였으나 압력이 아직 충분히 골고루 분포하지 못하고 영역별 차이를 나타내었다. 관찰 결과, 제작된 PDMS 평

탄도의 불량, 그리고 유리 웨이퍼와 PDMS 패드 또는 PDMS 패드와 Si 몰드 사이에 갇혀진 공기 방울의 영향도 이러한 불균일한 압력 분포의 한 원인으로 작용하였다. 그런데 더 두꺼운 2.4mm 두께의 PDMS 패드를 사용하면 이러한 영향까지도 상쇄되어 Fig. 4 (c)와 같이 상당히 균일한 압력 분포를 얻을 수 있었다. 이러한 면압지 시험을 통해 가압 시험 전에 균일한 압력 분포를 얻을 수 있는 최적의 PDMS 두께를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.



(a) (b)

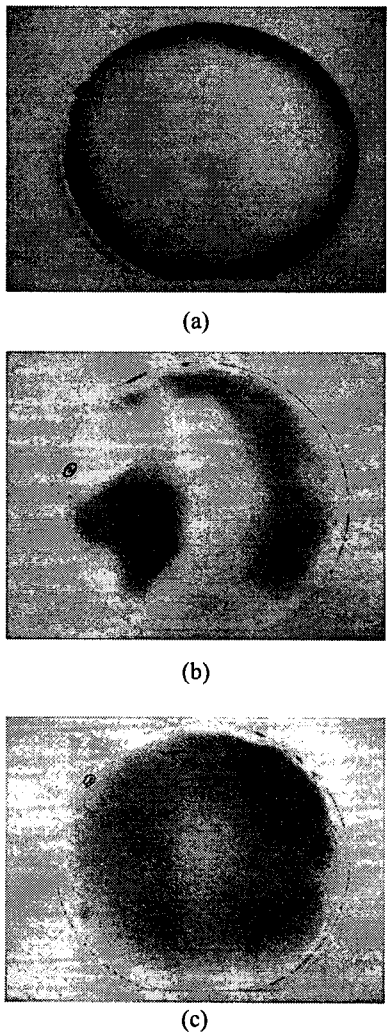
Fig. 3 (a) PDMS-cushioned mold on the mold fixture, and (b) PMMA sheet on the substrate fixture of EVG-520HE

3.2 적층형 Si 몰드에 의한 대면적 핫엠보싱 시험 및 결과

3.2.1 성형 시험 공정

이번에는 EVG-520HE 에서 앞의 가압력 분포 시험을 한 3 가지 몰드를 사용하여 실제 핫엠보싱 공정을 수행하였다. 면압지에 의한 가압력 분포 측정 결과로부터 PDMS 패드를 삽입한 적층형 몰드를 사용했을 때 더 좋은 대면적 전사성을 얻을 수 있을 것으로 예상되었다.

먼저 Si 웨이퍼 상에 반도체 공정을 사용하여 미세 패턴을 가공하였다. 대면적 전사성을 보기 위하여 같은 패턴을 웨이퍼 상의 여러 부분에 반복 가공하였다. Si 웨이퍼 상의 패턴 위치를 Fig. 5 에 나타내었는데, A 로 표시된 10mm×10mm 사각형 영역의 패턴이 각각의 위치에 동일하게 반복 가공되었다.



(a) (b) (c)

Fig. 4 Pressure sensing paper test results for (a) mold with no PDMS pad, (b) mold with 1.3mm-thickness PDMS pad, and (c) mold with 2.4mm-thickness PDMS pad

A 영역 안에는 폭 100μm, 깊이 10μm 의 채널들을 가공하였다. 이와 같이 제작된 Si 몰드를 사용하여 앞의 가압 시험과 마찬가지로 다음과 같은 3 가지 적층형 몰드를 시험하였다.

(a) 6 inch 유리웨이퍼 + 4 inch Si 몰드

(b) 6 inch 유리웨이퍼 + 1.3mm 두께 PDMS 패드 + 4 inch Si 몰드

(c) 6 inch 유리웨이퍼 + 2.4mm 두께 PDMS 패드 + 4 inch Si 몰드

핫 엠보싱 공정을 통해 몰드 상의 미세 패턴을 PMMA 시트에 전사하기 위해서는 PMMA 의 Tg 이상으로 가열하고 가압한 후 냉각하는 과정이 필요하다. 이때 충분한 전사성을 위해서는 충분히 높은 가열 온도, 가압력, 냉각 시간 등이 필요하다. 만약 전사성을 위해 필요한 가열 온도, 가압력을 낮추거나 냉각 시간을 줄일 수 있다면 공정 비용 및 시간의 감소를 통해 양산성을 증가시킬 수 있다. 실제 핫엠보싱 공정에서 성형 후 잔류변형 등을 방지하기 위해 냉각 시간이 많은 비중을 차지하는데 이는 가열 온도를 가능한 한 낮춤으로써 줄일 수 있다. 이 때 낮출 수 있는 온도의 이론적인 한계는 Tg 이다. 그러나 온도를 낮추면 대신 대면적 전사성이 나빠지기 때문에 실제로는 Tg 보다 어느 정도 높게 소재를 가열할 수 밖에 없다.

본 연구에서는 Tg 근방의 온도에서도 적층형 몰드를 사용하여 대면적에 걸친 패턴 전사를 할 수 있는지를 시험하였다. 따라서 PMMA 의 Tg 가 약 106℃로 알려져 있으므로 소재 가열 온도는 이보다 약간 높은 110℃로 설정하였다. 공정 순서는 우선 적층형 몰드와 PMMA 시트를 EVG-520 HE 의 몰드 및 substrate 고정 척에 각각 장착하고 110℃로 가열, 가압 후 냉각하고 분리하였다. 본 연구에서는 열변형의 영향은 배제하기 위해 모든 공정을 2 시간 정도의 충분히 긴 시간에 걸쳐 수행하였다. 이중 가열 시간은 15 분, 가압 시간은 10 분, 냉각 시간은 1 시간 25 분이었으며, 가압력은 12bar 를 사용하였다.

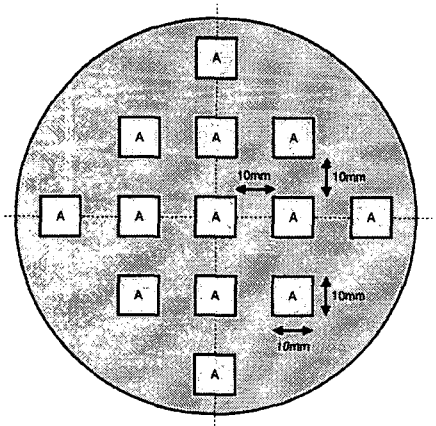


Fig. 5 Configuration of the repeated pattern region A's on 4 inch Si mold

3.2.2 성형 시험 결과 및 분석

핫엠보싱 성형 후 PMMA 시트에 대한 패턴 전사성 관찰 결과, 예상대로 PDMS 층의 두께가 증가할수록 전사성이 향상됨을 확인할 수 있었다. PMMA 시트 면상에서 관찰한 패턴의 모습을 Fig. 6 에 나타내었다. PDMS 층이 없는 몰드의 경우에는 일부 영역(주로 테두리 부분)에 패턴이 전사되었고, 두께 1.3mm 두께의 PDMS 를 갖는 몰드의 경우 이보다 많이 향상되었으나 여전히 중심부 등에 패턴이 전사되지 못했다. 반면, 2.4mm 두께의 PDMS 를 갖는 몰드의 경우에는 거의 모든 부분에 패턴이 전사되었음을 볼 수 있었다.

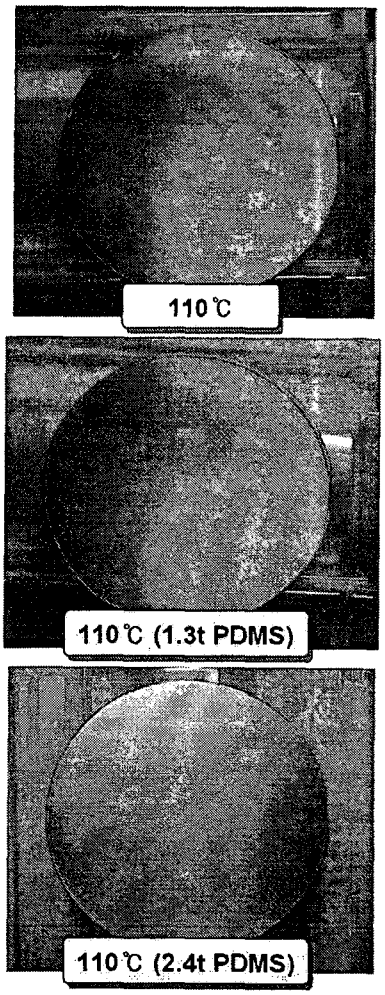


Fig. 6 Configuration of the replicated patterns on 4 inch PMMA sheet after the hot embossing by using the molds without and with the PDMS cushion

실제 전사된 패턴의 폭과 깊이가 어느 정도의 치수 정밀도를 갖는지 확인하기 위해 Nanofocus Surface 3D Profiler 인 μSurf 를 사용하여 측정하였다. A 로 표시된 동일한 패턴 영역의 일정한 위치에 있는 채널 폭과 깊이를 측정하였는데, 측정 위치를 표시하기 위해 Si 몰드 위에 Fig. 7 과 같은 좌표계를 도입하였다. 각 영역 사이의 거리는 실제 10mm 인데 편의상 이를 a 라 표시하여 몰드 위 좌표계의 기본 단위로 사용하였다.

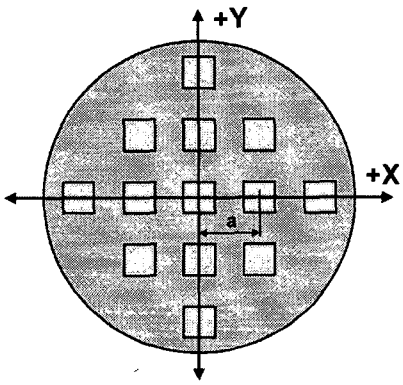


Fig. 7 Coordinate system defined on 4 inch Si mold (unit: a=10mm)

좌표계의 X 축과 Y 축 방향으로 각 영역 내의 채널 폭과 깊이를 측정하고 이를 Fig. 8 에 나타내었다. 결과에서 우선 알 수 있는 것은 육안으로 확인되는 것과 마찬가지로 두꺼운 PDMS 를 갖는 몰드일수록 더 좋은 성형 결과를 나타낸다는 점이다. PDMS 패드가 없는 몰드의 경우에는 거의 테두리에서만 성형이 되었고, 1.3mm 두께 PDMS 몰드의 경우에는 가운데를 제외하고 어느 정도 성형이 되었고, 2.4mm 두께 PDMS 몰드의 경우에는 모든 영역에서 채널이 성형되었음을 알 수 있었다. 또한 2.4mm 두께 PDMS 몰드의 경우에는 폭과 깊이의 위치별 분포가 비교적 균일함을 관찰할 수 있었다. 다만, 실측에 의한 원형 몰드 위의 채널 폭과 깊이가 각각 97.0~99.9μm, 10.3~10.4μm 의 범위인 점과 비교하면, 전사된 채널의 깊이는 상당히 유사하나 폭은 20 μm 정도 작음을 볼 수 있다. 이것은 채널 입구 저항으로 인한 충진 불량으로 보이는데, PMMA 의 가열 온도 또는 가압력을 조금 더 높이면 어느 정도 개선될 것으로 예상된다.

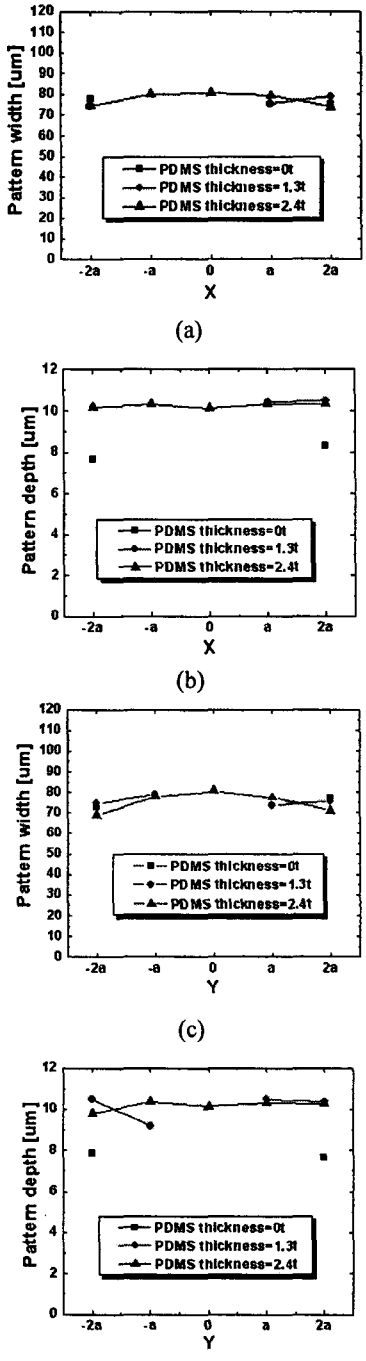


Fig. 8 Measurement of the replicated pattern width and depth on the 4 inch PMMA sheet (a) pattern width along X, (b) pattern depth along X, (c) pattern width along Y, and (d) pattern depth along Y

4. 결론

본 연구에서는 4 인치 Si 웨이퍼 몰드를 사용하는 핫엠보싱 공정에서의 대면적 전사성을 향상시킬 수 있는 PDMS 쿠션 몰드를 제안하였고, Si 몰드, PDMS 쿠션 패드, 유리 웨이퍼를 적층하여 PDMS 쿠션을 갖는 적층형 몰드를 제작하였다. 그리고 PMMA 시트에 대해 면압지 시험과 핫엠보싱 공정을 수행하여 그 효과를 고찰하였다. 시험 결과 PDMS 쿠션 패드가 없는 몰드보다 패드가 있는 몰드에서 Si 몰드와 PMMA 시트 사이의 압력 분포가 더 균일하였으며, 특히 2.4mm 두께의 가장 두꺼운 패드를 사용했을 때 면압지 시험과 핫엠보싱 시험에서 가장 좋은 대면적 전사성을 얻을 수 있었다. 따라서 이와 같은 PDMS 쿠션을 갖는 적층형 몰드를 적용함으로써 핫엠보싱 공정의 수율을 대폭 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

추후에는 최적의 PDMS 패드 및 몰드의 설계가 이루어져야 할 것이고, 이를 위해 가압 공정에서 적층형 몰드의 거동 예측을 위한 핫엠보싱 공정 해석도 수행되어야 하겠다.

후 기

본 연구는 2010 생산기반혁신기술개발사업의 기능성 고분자소재 성형용 마이크로 금형시스템 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 실험에 도움을 준 한양대학교 마이크로바이오칩센터와 관계자께도 감사드립니다.

참고문헌

1. Becker, H. and Heim, U., "Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures," Sensors and Actuator, Vol. 83, pp. 130-135, 2000.
2. Becker, H. and Gartner, C., "Polymer based micro-reactors," Reviews in Molecular Biotechnology, Vol. 82, pp. 89-99, 2001.
3. Lee, G. B., Chen, S. H., Huang, G. R., Sung, W. C. and Lin, Y. H., "Microfabricated plastic chips by hot embossing methods and their applications for DNA separation and detection," Sensors and Actuators B, Vol. 75, pp. 142-148, 2001.
4. Plachetka, U., Bender, M., Fuchs, A., Vratzov, B., Glinsner, T., Lindner, F. and Kurz, H., "Wafer Scale Patterning by Soft UV-Nanoimprint Lithography," Microelectronic Engineering, Vol. 73-74, pp. 167-171, 2004.
5. Roy, E., Kanamori, Y., Belotti, M. and Chen, Y., "Enhanced UV imprint ability with a tri-layer stamp configuration," Microelectronic Engineering, Vol. 78-79, pp. 689-694, 2005.