

열경화성 소재를 사용한 웨이퍼 레벨 렌즈 성형 중 이형 특성에 관한 연구

박시환^{1*}, 황연², 김대근²
¹울산과학기술대학교 기계공학부, ²한국광기술원

A Study on the Release Characteristics During Wafer-Level Lens Molding Using Thermosetting Materials

Si-Hwan Park^{1*}, Yeon Hwang², Dai-Geun Kim²
¹Faculty of Mechanical Engineering, Ulsan College
²Korea Photonics Technology Institute

요약 열경화성 소재를 이용하여 열경화방식의 웨이퍼 레벨 렌즈를 성형할 때 발생할 수 있는 불량요인 중 이형 과정에서 성형 렌즈의 금형 고착문제는 웨이퍼 레벨에서 성형된 기판의 파손 및 기판의 변형으로 성형된 웨이퍼 기판의 적층시 웨이퍼 양면의 렌즈 형상 및 센터 정렬 오차에 영향을 미친다. 본 연구에서는 웨이퍼 레벨 렌즈 성형 공정에서 이형력에 영향을 미치는 인자를 검토하기 위한 실험을 수행하였다. 먼저 상·하 금형의 코팅 재질에 따른 이형력을 검토하기 위하여 금형 표면을 ITO 및 Ti로 표면처리 후 O₂분위기에서 플라즈마 처리하였고, 또한 DLC 코팅도 진행하였으며 경화 및 이형성을 검토하였다. 그 결과를 바탕으로 pull-off 실험을 위한 코팅방법을 선정하였다. 또한 경화공정조건에 따른 이형력을 측정하기 위하여 압력을 유지하면서 경화시키는 방법과 일정한 간격을 유지하면서 경화시키는 방법을 실험적으로 적용하였다. 그 결과 Ti 코팅 후 O₂ 플라즈마 표면처리 방법이 이형력을 감소시키고 위치를 제어하면서 경화시킬 경우 경화수축에 의해 경화 중 계면의 접착에너지를 감소시켜 보다 나은 이형이 될 수 있음을 확인하였다.

Abstract Among the defect factors that can occur when a wafer-level lens is molded using a thermosetting material, the mold sticking problem of a molded lens during the release process can damage the molded substrate and deform the substrate at the wafer level. An experiment was conducted to examine the factors affecting the demolding force in the lens forming process. The demolding force was examined according to the coating material of the molds. The mold was surface-treated with ITO and Ti, followed by plasma treatment in an O₂ atmosphere. A DLC coating was then performed, and the curing and releasability were examined. A coating method for the pull-off experiment was selected based on the results. To measure the demolding force according to the curing process conditions, a method of curing at a constant pressure and a method of curing at a constant position were applied. As a result, the TiO₂ surface treatment reduced the release force. When cured by controlling the location, curing shrinkage can reduce the adhesion energy of the interface during curing, resulting in better demolding.

Keywords : Wafer-Level Lens, Curing, Demolding Force, Thermosetting, Coating

이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 전자시스템산업핵심기술개발사업 연구비지원에 의한 연구임. (10084979, 차량 내장용 내열성 열경화 플라스틱 렌즈 및 광학모듈 기술개발)

*Corresponding Author : Si-Hwan Park(Ulsan College.)

email: shpark3@uc.ac.kr

Received October 7, 2020

Revised December 9, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

1. 서론

모바일 디지털 제품, 특히 휴대폰의 대중화로 소형, 경량, 고성능 카메라 모듈에 대한 수요가 증가하고 있다. 또한 자동차 산업에서 자율주행차의 발전으로 자동차용 렌즈의 영상 품질 향상의 필요로 이미지 센서의 고화소화가 요구되고 있다. 일반적으로 휴대폰용 카메라와 같이 소비자 용도를 위해 제작된 카메라 모듈은 대부분 열가소성 수지를 이용하여 사출성형공법으로 제작된 렌즈를 사용하여 만들어진다. 하지만 자동차용 렌즈는 높은 온도의 환경에서 성능을 유지해야하므로 주로 유리 렌즈가 사용된다. 하지만 이러한 유리 광학렌즈의 제작비용은 플라스틱 기반 렌즈와 비교하여 훨씬 높다. 따라서 최근에는 열가소성 수지를 이용한 렌즈의 내열성 부족 문제 및 유리 광학렌즈의 경제성 문제를 해결하기 위하여 UV경화성 수지 및 열경화성 수지를 이용한 렌즈의 개발에 대한 연구가 진행되고 있다[1,2].

기존 사출 성형을 이용한 렌즈의 성형공법은 여러 연구자에[3-5] 의하여 연구되어 왔으며 안정된 양산이 이루어지고 있다. 또한 금형기술의 발전으로 1 cycle에 수십 개의 렌즈 생산할 수 있고 비교적 짧은 성형시간으로 인하여 생산 공정비용이 적은 이점이 있다. 하지만 열경화성 소재의 경우는 상대적으로 긴 경화시간으로 인하여 1 cycle당 성형공정시간이 비교적 긴 문제점이 있다. 특히 열경화성 소재를 이용하여 렌즈를 제작할 때 비교적 cycle time 긴 문제를 해결하여 제작비용을 줄이기 위해 웨이퍼 레벨 렌즈(wafer level lens) 제작 기술이 개발되고 연구되어져 왔다[6-9]. 웨이퍼 레벨 렌즈 제작 공정은 한 번에 수백 개의 웨이퍼 레벨에서 렌즈를 생산할 수 있고 사출성형 기능을 능가하는 다양한 모양, 두께 및 크기의 렌즈를 만들 수 있다는 중요한 이점이 있다. 이러한 공정상의 장점 외에도 내열성 수지의 이용으로 리플로 공정에 사용할 수 있는 추가적 장점을 가지고 있다.

웨이퍼 레벨 성형공정은 비교적 넓은 영역에서 얇은 단면을 갖는 부품을 성형하는데 적합한 압축성형기법을 사용한다. 이러한 압축 성형기법은 얇은 단면의 표면에 형상을 가지는 면적이 넓은 부품을 제작하는데 가장 적합하다. 그 제작 공정은 Fig. 1의 ①에서 보는 바와 같이 mm 크기의 수십 개의 렌즈를 상·하 금형에 직접 가공 또는 전주 금형을 활용하여 렌즈의 패턴을 형성하고, 하 금형에 열경화성 소재를 일정한 양으로 도포한 후 상측 금형을 내리면서 압축공정을 통하여 금형 표면에 형성된 렌즈 형상에 소재를 충전하여 렌즈를 성형한다. 이때 렌즈

를 성형하기 위한 금형구조는 개방형의 금형구조로 고압이 작용하지 않는다. 이후 Fig. 1의 ②에서 보는 바와 같이 금형의 온도를 조건에 따라 높이거나 낮추어 경화공정을 거친 후 Fig. 1의 ③에서 보는 바와 같이 같이 렌즈가 성형된 기판을 금형에서 분리하여 웨이퍼 레벨 렌즈를 제작하고 이후 다이싱 공정 등을 통하여 개별 렌즈를 완성한다. 이러한 성형 기술은 렌즈 어레이의 저비용 대량 생산을 달성하기 위해 널리 사용되는 복제 기술이다[10].

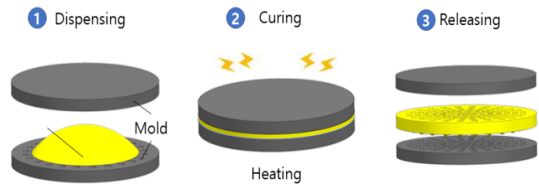


Fig. 1. Wafer-level camera fabrication process which creates extremely thin camera modules

이와 같이 열경화성 소재를 이용한 웨이퍼 레벨 성형 공정에서 렌즈 형상을 성형시킬 때 소재가 경화되지 않는 상태인 저점도 상태에서 렌즈 형상을 성형함으로써 도포 후 압축성형방식으로 성형할 때 발생하는 불량 현상으로는 기포가 발생되나 렌즈 형상의 미성형 등 렌즈 형상의 성형단계에서는 공정상의 큰 불량 요인은 없다. 하지만 렌즈 형상이 성형되고 이후 경화공정 중에 열경화성 소재의 경화 중 발생하는 물질 변화와 경화과정 중 화학적 요인으로 인한 경화 수축 때문에 개별 렌즈의 형상 정밀도와 기판 위 배열된 렌즈들의 형상정밀도 편차 그리고 및 기판의 변형은 전체 웨이퍼 레벨 성형공정에서 매우 중요하게 검토되어야 하는 부분이다[2,11]. 또한 비교적 넓은 면적의 웨이퍼를 사용하여 성형을 하고 형성 후 성형품과 금형과의 접촉특성으로 인하여 이형공정에서 성형된 기판의 변형 및 부분 파손이 발생한다. 따라서 이형공정에 대한 검토도 매우 중요하다.

이와 같은 공정 중 발생할 수 있는 불량 요인들 중 본 연구에서는 열경화수지를 이용한 웨이퍼 레벨 렌즈 성형공정 중에 이형성에 영향을 주는 인자에 대하여 실험적으로 검토를 진행하고 실제 공정에 적용하는 기반을 마련하고자 한다.

2. 이형공정 특성 검토

2.1 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 웨이퍼 레벨 렌즈 성형공정에서 이형력에 영향을 미치는 인자를 검토하기 위하여 상·하 금형의 코팅 재질에 따른 이형력과 경화공정조건에 따른 이형력을 측정하기 위하여 실제 공정을 모사하는 실험적 방법을 수행하였다.

2.1.1 웨이퍼 레벨 렌즈 성형공정

웨이퍼 레벨 렌즈의 성형은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 압축성형기(NETZSCH사의 DEA 288)를 사용하여 성형하였다. 렌즈의 제작방법은 히터와 냉각라인이 있는 상·하형 부착 원판에 단렌즈 형상을 새긴 상·하 금형을 고정하여 금형의 온도 조절이 가능하도록 하였다. 또한 성형방식은 하형 금형은 고정하고 상형 금형을 내리면서 렌즈를 성형하는 압축성형을 적용하였다. 성형 조건은 수지를 하형 금형에 도포하고 상형 금형을 원하는 위치까지 내린 후 수지의 가스를 빼기 위하여 60 °C 승온 후 약 10분정도 유지한다. 이후 열경화성 소재를 경화시키기 위해서 금형의 온도를 110 °C~150 °C까지 승온시킨다. 이때 상형 금형의 제어 방식은 압력제어 또는 위치제어 방식을 택한다. 경화가 모두 진행되어 소재가 완전 경화된 후 상온으로 냉각하여 이형하여 렌즈를 성형을 완성한다.

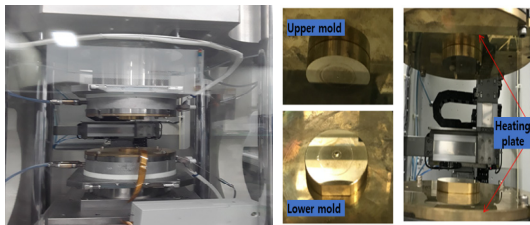


Fig. 2. Lens molding equipment(NETZSCH DEA 288) and mold installation for 1 cavity lens molding

이 때 온도 조절이 가능한 상·하형 부착 원판에 렌즈 형상이 가공된 금형을 부착하여 성형하는 방식을 적용하였기 때문에 열전달 특성과 가공성을 고려하여 금형재질을 황동으로 선정하였고 초정밀 직접 가공으로 렌즈 형상을 가진 황동 금형을 제작하였다. 이렇게 제작된 금형을 사용하여 성형된 렌즈는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 황색으로 이염되는 현상과 표면이 파손되는 현상이 발생하였다.

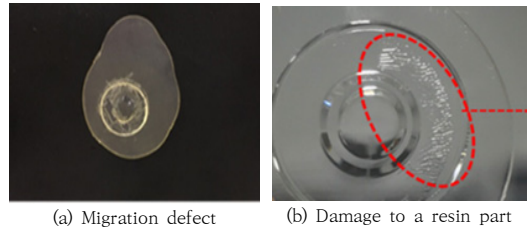


Fig. 3. Defects in the surface of a molded part that occurs when there is no coating in the use of brass molds.

황색 이염의 원인은 화학적 변화로 예측되어 본 연구에 원인 분석은 진행하지 않았다. 하지만 표면의 파손은 열경화성 소재와 금형표면의 접촉특성 및 경화과정에서 열경화에 의한 소재의 수축 특성 등으로 발생하는 이형 불량으로 판단된다.

2.1.2 이형력 분석 방법

압축성형 방식으로 렌즈를 성형할 때 두 가지 방법이 사용된다. 첫 번째 방식은 경화 과정 중에 상측에 일정한 압력을 유지시키는 제어 방식과 상측 금형의 위치를 제어하는 방식이 사용된다. 이는 실제 공정에서는 고가의 성형기를 사용하여 매우 정밀한 방식으로 제어되나 본 연구에서는 이러한 현상을 모사하기 위하여 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 상측 금형의 자중을 받으며 경화공정 진행되는 경우와 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 일정한 간격을 유지시킬 수 있는 방법으로 압력제어 방식과 위치제어 방식을 모사하였다.

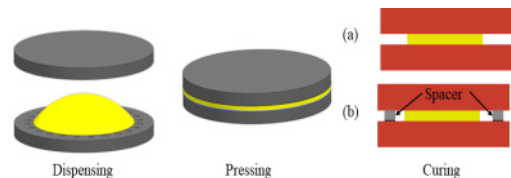


Fig. 4. Conceptual diagram of experimental equipment for pressure control and position control

Persson 등의 연구[12]에 의하면 접착력을 가지는 두 표면의 포텐셜에너지를 이용하여 변형량이 Eq. (2)와 같을 때 이형력은 Eq. (1)과 같음을 이야기하고 있다. 이를 이용하면 본 시스템에서 변형량은 Eq. (3)와 같이 열팽창에 의한 변형량과 경화수축에 의한 변형량의 합이 나타나어 질수 있다. 또한 이때 경화에 의한 변형량은 Eq. (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{DF} = \frac{AE(t)\delta}{L} \quad (1)$$

$$\delta = \left(\frac{2\Delta\gamma L}{E(t)} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\delta = \delta_{th} + \delta_{ch} \quad (3)$$

$$\delta_{ch}/L = \sqrt[3]{1 + (\alpha V_{shr})} - 1 \quad (4)$$

Here, F_{DF} is the deforming force, δ_{th} is the amount of deformation due to thermal expansion, δ_{ch} is the chemical curing shrinkage due to curing, V_{sh} is the volume shrinkage rate of the thermosetting material, α is the degree of curing of the thermosetting material, and $E(t)$ is the elastic modulus.

$E(t)$ 는 열경화소재의 탄성계수로 경화반응 중 경화도에 따라 변하게 되는데 경화도는 온도와 시간에 따라 변하게 되어[11] 이에 대한 추가적인 고찰이 필요하다. 또한 두 가지 공성방식에 따라 수축량이 달라질 것이다. Fig. 5(a)의 경우는 자중에 의하여 소재가 지속적으로 압력을 받고 있기 때문에 수축이 보상되고 따라서 수축량은 거의 없으며 단지 열적 변화에 따른 열팽창만이 고려 대상이 되어 이형력은 Eq. (5)과 접착력만으로 표현된다. 하지만 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 간격을 유지하는 위치제어의 경우는 열적 변화에 의한 영향 및 경화과정 중 발생하는 경화수축에 의한 영향을 고려하여 Eq. (6)과 같이 이형력이 결정된다.

$$F_{DF} = F_{AF} \quad (5)$$

$$F_{DF} = F_{AF} - F_{SF} \quad (6)$$

Where, F_{AF} denotes adhesion force, F_{SF} denotes force by shrinkage.

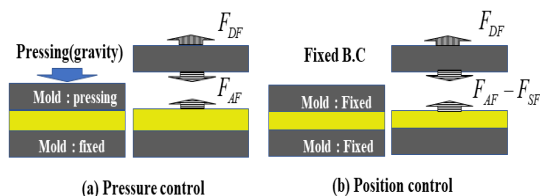


Fig. 5. Release force according to process conditions

2.1.2 이형막에 따른 이형특성 실험 및 결과

금형 표면의 특성을 변화시키는 이형막에 따른 이형 특성을 검토하기 위하여 표면 개질을 하지 않은 실리콘 기판과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 RF스퍼터(Nanofilm

사의 M23971)를 이용하여 Ti 및 ITO코팅을 한 후 Reactive ion Etcher(Nanofilm사의 RIE-2621B)를 이용하여 100 sec와 200 sec 동안 표면산화방식으로 플라즈마 처리한 실리콘 기판을 마련하였다. 또한 일반적으로 사출금형에서 이형성 개선 및 고경도, 내마모성을 향상시키기 위하여 사용하는 DLC(Diamond-like- carbon)코팅을 Fig. 7에서 보는 바와 같이 적외선 광학 금형 DLC 코팅기(Nanofilm사의 LFSI-6X)를 이용하여 실리콘 표면을 코팅하였다.



Fig. 6. Plasma treatment of a silicon substrate by surface oxidation method.



Fig. 7. DLC(Diamond-like-carbon) Coating Machine

Fig. 8에서 보는 바와 같이 세 가지 다른 물질과 플라즈마 처리방식으로 표면 처리된 9개의 서로 다른 이형막을 가진 기판에 소재를 도포하고 가열판을 이용하여 소재를 경화시킨 후 경화 특성과 이형 특성을 검토하였다.

그 결과는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 Ti를 코팅하고 200 sec 동안 플라즈마 처리한 기판에서 이형이 가장 쉽게 되는 것을 볼 수 있었다. 접촉각을 정밀 측정하지 않았으나 ITO를 코팅한 기판에서 접촉각이 가장 크고 DLC코팅의 경우 접촉각이 매우 작은 것을 알 수 있었다. 또한 ITO를 코팅한 기판은 Ti를 코팅한 기판에 비하여 경화특성이 좋지 않았다. 이와 같은 실험 결과 경화성과 이형성에서는 Ti를 코팅한 기판에서 가장 우수한 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 실험 결과 황동 금형에는 Ti코팅 후 200 sec 플라즈마 처리방식을 채택하였고 DLC코

팅 또한 비교를 위하여 황동 금형에 코팅하여 실험을 진행하였다.

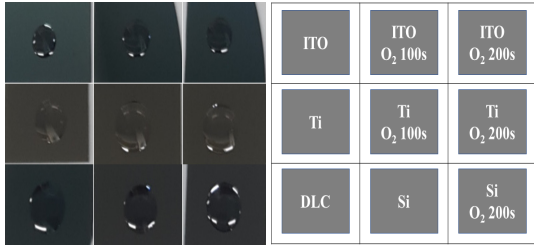


Fig. 8. Silicon wafer treated with three different materials and different plasma treatment methods

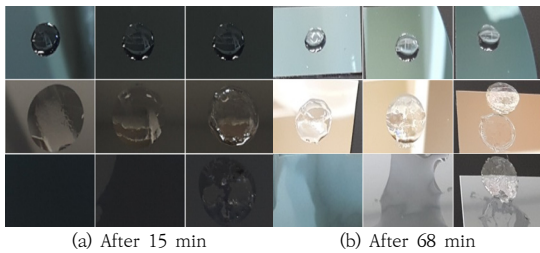


Fig. 9. The appearance of thermosetting materials after curing process according to surface treatment of silicon wafers

2.1.4 이형막 및 공정조건에 따른 이형력 측정 실험 및 결과

50 mm의 원형 황동 금형을 정밀가공을 통하여 표면 거칠기($Ra \leq 3 \text{ nm}$)를 최소화하여 제작하였다. 그리고 열경화성 소재(Mitsubishi chemical의 DIABEAM MP-2005)를 경화제와 혼합 후 탈포과정을 거쳐 금형면에 도포 후 소형 열풍건조기에서 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 경화시킨 후 상하 금형에 인장용 지그를 부착하여 Fig. 10에서 보는 바와 같이 인장시험기(UTA™ Universal Texture Analyzer)을 이용하여 pull-off test를 실험하였다. 이때 하측 금형은 표면거칠기($Ra \geq 20 \text{ nm}$) 이상으로 주어진 기계적 방식으로 경화소재와 최대한 점착력을 키웠고 상측에서 이형이 일어나도록 하여 이형력을 측정하였다.

시험 조건은 이형막의 종류와 공정조건은 반영하여 Table 1에서 보는 바와 같다. 실험 결과 Fig. 11(a)의 경우는 위치제어 경화 이후 이형된 하형 금형에서 경화된 소재의 모습이며, Fig. 11(b)는 상형 금형의 자중을 이용한 압력제어 경화 이후 이형된 소재의 모습이다. 그 결과 위치제어의 결과는 두께를 유지하며 경화가 일어나고 자

중을 이용한 압력제어 결과는 상측 금형의 무게로 인하여 경화반응 이전에 소재가 비교적 넓게 퍼진 후 경화가 일어난 것을 알 수 있다. 따라서 이형력을 비교하기 위해서는 측정된 이형력 값을 단순 비교하지 않고 단위 면적당 이형력을 비교할 필요가 있다. 이를 위하여 이미지 프로세싱을 통하여 면적을 계산하였고 그 결과 값을 비교하였다. 결과 값은 Table 2에서 보는 바와 같다.

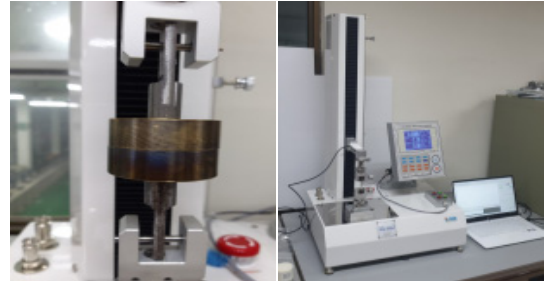


Fig. 10. Test device for measuring release force of pull-off test method



Fig. 11. Appearance of material after release

Table 1. The fabrication condition of pressing mold

	Mold coating	Curing process conditions
Case 1	No treatment	Pressure control
Case 2		Position control
Case 3		Pressure control
Case 4	DLC Coating	Position control
Case 5		Pressure control
Case 6	Ti Coating + O ₂ Plasma treatment	Position control

Table 2. Summary of results for various experimental methods

	Applied Area(mm ²)	Demolding force(kg _f)	Force per Area(N/mm ²)
Case 1	431.020	84.240	1.917
Case 2	323.670	46.130	1.398
Case 3	316.016	33.020	1.025
Case 4	395.065	26.930	0.668
Case 5	306.744	20.220	0.646
Case 6	237.438	10.970	0.453

Fig. 12에서 보는 바와 같이 이형막에 종류에 따른 이형력을 검토하였다. 측정 결과 이형막으로 TiO₂ 코팅한 경우 가장 낮은 이형력을 나타내고 있고 이때 이형력은 아무런 이형막 처리를 하지 않는 황동의 24 %수준의 이형력을 나타내었다. 즉 아크릴계열의 열경화성 소재는 TiO₂ 코팅의 경우가 DLC 코팅과 황동표면보다 이형 공정에서 유리함을 알 수 있다.

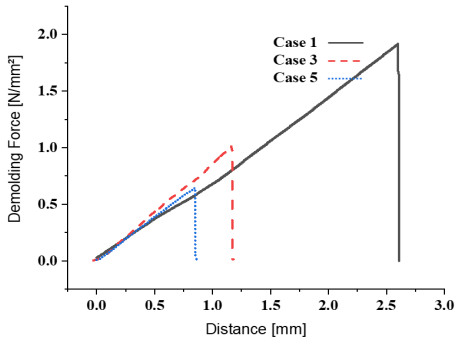


Fig. 12. Results of demolding force according to tensile length for each surface treatment method

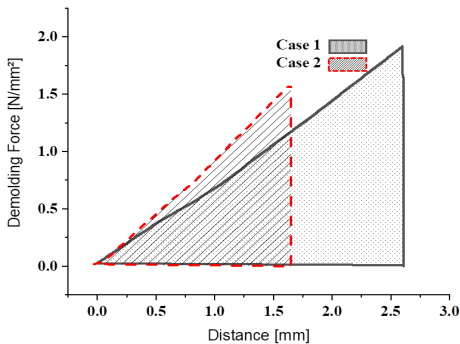


Fig. 13. Graph of demolding force measurement result according to process control conditions when using untreated brass molds.

Fig. 13의 경우는 표면 처리를 하지 않는 황동 금형에서의 공정조건 즉 압력제어 방식과 위치제어 방식에 따른 이형력의 결과는 나타내고 있다. 측정결과 위치제어 방식이 압력제어 방식에 비하여 37%정도 작은 이형력을 나타내고 있으며 동일한 조건을 비교하면 DLC코팅의 경우는 위치제어 방식이 압력제어 방식에 비하여 53 %, TiO₂의 경우 위치제어 방식이 압력제어 방식에 비하여 43 %정도의 이형력 감소의 효과를 있음을 알 수 있다. 또한 이형력 뿐 아니라 빗금과 접 형태로 표시되어 있는 면적이 위치제어 방식에서 크게 줄어들음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 경화공정 중 열경화성 소재의 경화 수축에

의한 영향으로 위치 제어를 할 경우 경화 수축에 의하여 계면에서의 접착에너지가 줄어 든 결과로 이해 할 수 있다. 즉 경화공정 중 수축에 의한 변형량이 계면의 cohesive energy의 감소를 가져오고 이후 이형시 감소된 에너지를 제외한 만큼의 이형력이 발생시키는 것으로 이해 할 수 있다. 이러한 결과는 많은 연구자의 접착(Cohesive)에서 설명하고 있다[13].

3. 결론

웨이퍼 레벨 렌즈성형시 여러 공정 중 이형공정에서의 이형성 특성에 영향을 미치는 원인을 알아보기 위하여 TiO₂ 코팅과 DLC 코팅 후 pull-off 실험을 진행하였으며, 경화 수축이 이형에 영향을 주는 효과를 알아보기 위하여 압력제어와 위치제어 방식의 실험을 진행하였다. 그 결과 금형표처리는 TiO₂ 코팅이 가장 효과가 좋음을 확인하였고 위치제어를 할 경우 경화수축이 이형력을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 실험적 연구를 통하여 이형막의 종류에 따른 이형력과 공정조건에 따른 이형력의 결과를 검토하였으나 향후 Cohesive energy에 대한 추가적 검토를 통하여 열경화성 소재를 이용한 웨이퍼 레벨 렌즈 성형시 기판의 변형 및 각 개별렌즈의 변형등을 해석적으로 검토할 필요가 있다.

References

- [1] S. H. Lee, J. D. Jo, K. Y. Kim, Y. M. Choi, "Recent Research Trend of Micro Hot-Embossing", J. Korean Soc. Precis. Eng. Vol.35, No.11, pp.1027-1034, 2018. DOI: <http://doi.org/10.7736/KSPE.2018.35.11.1027>
- [2] S. H. Park, J. S. Moon, "Analysis of the shrinkage and warpage of Wafer lens during UV curing" Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.15, No.11 pp.6464-6471, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.11.6464>
- [3] D. S. Baek, J. S. Nam, S. W. Lee, "A Development of Feature Extraction and Condition Diagnosis Algorithm for Lens Injection Molding Process", J. Korean Soc. Precis. Eng. Vol.31, No.11, pp.1031-1040, 2014. DOI: <http://doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.11.1031>
- [4] H. S. Lee, W. T. Jeon, S. W. Kim, "Development of Plastic Lenses for High-Resolution Phone Camera by Injection-Compression Molding", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.37, No.1, pp.39~46, 2013.

DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.1.039>

- [5] H. J. Kim, J. H. Kim, Y. G. Kim, J. Y. Song, D. H. Moon, "A Simulation Study on the Development of Injection Mold for the Parts of Phone Camera Lens Module", Journal of the Korea Society for Simulation, Vol.22, No.4, pp.83-92, Dec. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.9709/KSS.2013.22.4.083>
- [6] H. Han, K. Main, "Low Cost Camera Modules Using Integration of Wafer-Scale Optics and Wafer-Level Packaging of Image Sensors" Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, Shanghai, Vol.7631, pp.1-7, Nov, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1364/ACP.2009.FH6>
- [7] G. Humpston, B. Kidron, M. Kriman, "Low Cost Through Silicon Via Solution Compatible with Existing Assembly Infrastructure and Suitable for Single Die and Die Stacked Packages," IEEE International Microsystems, Packaging, Assembly & Circuits Technology Conference, Taipei, pp.61-64, October, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1109/EMAP.2008.4784229>
- [8] G. Humpston, "Novel and Low Cost Through Silicon Via Solution for Wafer Scale Packaging of Image Sensors," IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium, Seoul, pp.179-182, Dec. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1109/EDAPS.2008.4736029>
- [9] Y. Dagan, "Wafer-level optics enables low cost camera phones" Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XIII, Proceedings of SPIE, Vol.7218, 72180P, Feb. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.811609>
- [10] S. Xie, X. Wan, X. Wei, "Fabrication of Multiscale-Structure Wafer-Level Microlens Array Mold", Appl. Vol.9, No.3: 487. Jan. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app9030487>
- [11] H. Nagaoka, M. Furuyama, T. Akahoshi, D. Mizutani, S. Sakuyama, M. Nagatake, N. Itoh, "Thermal Stress Simulation Method in Substrate with Cure Shrinkage Reaction of Thermosetting Resin," 13th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), Taipei, Taiwan, pp.135-138, Oct. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IMPACT.2018.8625779>
- [12] B. Persson. E. Tosatti, "The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids" The Journal of Chemical Physics, Vol.115, No.12, pp.5597-5610, Jul. 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1398300>
- [13] Roger. A. Sauer, "Survey of Computational Models for Adhesion", The Journal of Adhesion, Vol.92, No.2, pp.81-120, Oct. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00218464.2014.1003210>

박 시 환(Si-Hwan Park)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 (공학석사)
- 2011년 2월 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 (공학박사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 교수

<관심분야>

사출금형, Polymer Processing, 렌즈 성형

황 연(Yeon Hwang)

[정회원]



- 2005년 8월 : 광주과학기술원 기전공학과 (기전공학석사)
- 2016년 2월 : 광주과학기술원 기전공학과 (기전공학박사)
- 2008 10월 ~ 현재 : 한국과학기술원 책임연구원, 팀장

<관심분야>

초정밀가공, 광학계측정, 광학부품제조

김 대 근(Dai-Geun Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 충남대학교 유기소재.섬유시스템공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 충남대학교 나노기술학과 (공학석사)
- 2016년 2월: 충남대학교 유기소재.섬유시스템공학과(공학박사)

• 2016년 1월 ~ 2017년 1월 : University of Sheffield 생명화학공학과 박사후 연구원

• 2017년 2월 ~ 현재 : 한국과학기술원 선임연구원

<관심분야>

고분자, 나노소재, 광응용