

모바일 폰 카메라 패키지의 다이 본딩 에폭시가 Warpage와 광학성능에 미치는 영향 분석

손석우* · 김학용[†] · 양호순**

*과학기술연합대학원대학교 측정과학과,

[†]한국표준과학연구원 우주광학센터,

**한국표준과학연구원 우주광학센터

Effect of Die Bonding Epoxy on the Warpage and Optical Performance of Mobile Phone Camera Packages

Sukwoo Son^{*}, Hagyong Kihm[†] and Ho Soon Yang^{**}

^{*}Science of Measurement, University of Science and Technology,

[†]Center for Space Optics, Korea Research Institute of Standards and Science,

^{**}Center for Space Optics, Korea Research Institute of Standards and Science

ABSTRACT

The warpage on mobile phone camera packages occurs due to the CTE(Coefficient of Thermal Expansion) mismatch between a thin silicon die and a substrate. The warpage in the optical instruments such as camera module has an effect on the field curvature, which is one of the factors degrading the optical performance and the product yield. In this paper, we studied the effect of die bonding epoxy on the package and optical performance of mobile phone camera packages. We calculated the warpages of camera module packages by using a finite element analysis, and their shapes were in good agreement showing parabolic curvature. We also measured the warpages and through-focus MTF of camera module specimens with experiments. The warpage was improved on an epoxy with low elastic modulus at both finite element analysis and experiment results, and the MTF performance increased accordingly. The results show that die bonding epoxy affects the warpage generated on the image sensor during the packaging process, and this warpage eventually affects the optical performance associated with the field curvature.

Key Words : die bonding epoxy, warpage, package, mobile phone camera, field curvature, MTF

1. 서 론

전자제품 시장의 중심이 스마트폰, 태블릿 등과 같은 모바일 기기로 옮겨짐에 따라, 이들 모바일 부품의 패키지 방식도 점차 초박형, 고직접화 되어가고 있다. 그림 1

에서와 같이 초박형의 실리콘 다이(silicon die)와 FR4 기판(substrate)의 적층 결합으로 이루어진 모바일 패키지들은 각 부품간의 열팽창계수(CTE, Coefficient of Thermal Expansion)의 차이로 인해 warpage가 발생한다. 이러한 모바일 전자부품의 패키지 과정에서 발생하는 warpage는 제품 수율은 물론, 신뢰성에 영향을 미치는 주요한 요인 중 하나로서 그 동안 이를 해결하기 위한 연구가 많이 진행되어왔다[1-4].

[†] E-mail: hkihm@kriss.re.kr

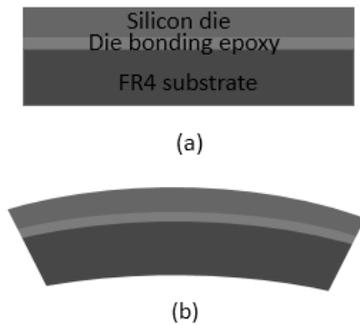


Fig. 1. Schematic of the packaging structure of common mobile packages. (a) pre-package, (b) post-package.

모바일 폰 카메라 업계에서 범용적으로 가장 많이 사용하는 패키지 방식은 그림 2에 표현된 와이어 본딩(wire-bonding) 방식으로 FR4 기판 위에 이미지 센서 다이올리고 그 사이를 에폭시로 접합하는 구조로 되어 있다. 이는 대부분의 모바일 부품들의 패키지 구조와 동일한 것으로 카메라 모듈 패키지에서도 warpage가 발생할 수 있음을 예측할 수 있다.

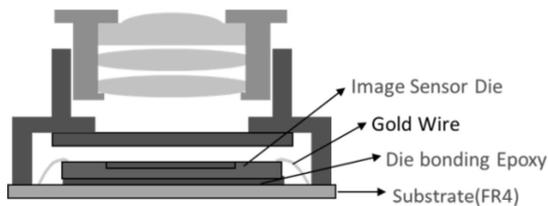


Fig. 2. Packaging structure of wire bonding method for phone camera modules.

그림 3에서 알 수 있듯이 카메라 모듈과 같은 광학 기기의 패키지에서 발생하는 warpage는 상면 만곡(field curvature)에 영향을 준다. 이는 MTF(Modulation Transfer Function) 성능을 저해하고 제품 수율을 떨어뜨리는 요인으로 작용할 수 있다. MTF는 카메라 모듈과 같은 결상 시스템(image forming system)에서 광학 성능을 평가하는 주요한 척도로서, 카메라 모듈은 패키징 이후에 그 성능을 평가하기 위해 MTF를 측정하고 있다[5-6]. MTF 성능을 좌우하는 주요 인자는 크게 렌즈 수차(eg. 구면 수차, 비점 수차, 코마, 렌즈 상면 만곡), 패키지 불량(eg. 광축 틀어짐, warpage로 인한 상면 만곡, 공정 틸트) 그리고 테스트 환경(eg. 광원 세기, 색온도, 차트 품질, 정렬)이 있다. 이 중 패키지 과정에서 발생하는 MTF 불량의 주요 인자는 공정 틸트(tilt)와 상면 만곡이다. 최근 대부분의 고화소급 카

메라 모듈을 생산하는 업체들이 Active Alignment(이미지 센서와 렌즈의 광축이 수직이 되도록 정렬 하는 방법) 장비를 도입함으로써 공정 틸트는 대부분 개선이 되었다. 하지만 패키징 과정에서 발생하는 warpage로부터 야기되는 상면 만곡의 경우 아직까지 뚜렷한 해결책이 없는 상태이다.

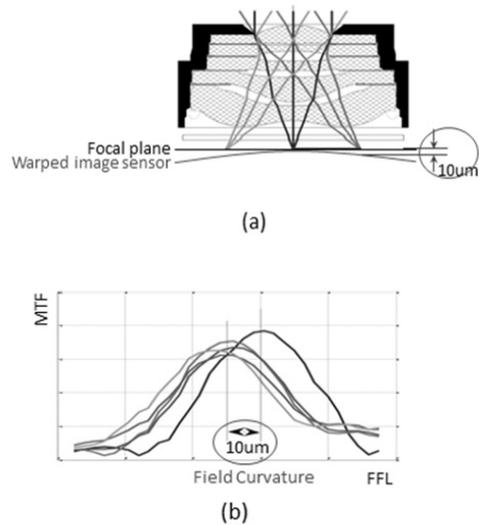


Fig. 3. The relationship between package warpage and optical performance on phone camera modules. (a) schematic of phone camera module with package warpage, (b) MTF through focus data.

최근까지 카메라 모듈 생산 업계에서는 공정 틸트 개선을 위한 연구에 비해 패키지 warpage로 인한 상면 만곡 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 이는 그 동안 생산해 오던 8백만화소 이하의 카메라 모듈에서는 초점 심도 마진(margin)이 커서, 패키지 warpage로 인한 상면 만곡의 영향을 상쇄할 수 있었고, 그로 인해 수율에 미치는 영향이 공정 틸트에 비해 상대적으로 미미했기 때문이다. 하지만 최근 카메라 모듈이 초 고화소화(10~15백만화소) 되어 가면서 픽셀(pixel) 크기가 줄어들고 점점 더 낮은 조리개 값의 밝은 렌즈를 채용하게 되었고, 이로 인해 초점 심도 마진도 많이 줄어들었다. 그 결과 상면 만곡으로 인한 MTF 불량이 공정 틸트 못지 않게 많이 발생되고 있으며, 이 같은 이유로 카메라 모듈 업계에서도 패키지 warpage를 해결하기 위한 연구의 필요성이 점차 대두 되고 있다.

카메라 모듈 패키지에서 다이 본딩 에폭시는 이미지 센서와 기판 사이의 열팽창 계수 차이로 인해 발생하는

응력을 잘 흡수하고 sensor를 기판에 물리적으로 단단히 고정하는 역할을 한다. 따라서 적절한 다이 본딩 에폭시의 사용은 패키지 warpage 개선에 있어서 매우 중요하다. 패키지 warpage와 관련한 그 동안의 연구 결과에서도 다이 본딩 에폭시가 warpage 발생 정도에 지배적 인자 중 하나이며, 특히 에폭시의 물성치 중 탄성계수(elastic modulus) 값이 낮을수록 warpage 개선에 매우 효과적인 것으로 알려져 있다[7-9].

본 연구에서는 다이 본딩 에폭시가 카메라 모듈 패키지 과정에서 warpage와 광학성능에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자 하였다. 먼저 이론적 수식을 검증하였고 유한요소법 수치해석을 통해 실험 결과를 미리 예측해 보았다. 또한 카메라 모듈 시료를 제작하여 에폭시의 물성치에 따른 패키지 warpage의 발생량을 실험적으로 측정하였고, 이를 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 최종적으로 카메라 모듈 시료의 through-focus MTF를 측정함으로써 패키지 warpage가 광학성능에 어떠한 영향을 미치는지 분석했다.

2. 본 론

2.1 이론 및 유한요소 해석

다이와 기판의 에폭시 결합으로 이루어진 구조물은 에폭시가 특정 온도에서 경화가 진행되면서 다이와 기판 사이에서 물리적 결합이 시작된다. 이때 경화된 에폭시가 다이와 기판의 열팽창계수의 차이에 따른 상대적 움직임을 방해함으로써 변형이 발생된다. 에폭시 경화 온도까지의 승온 과정에서는 다이와 기판이 자유 응력 상태로 서로

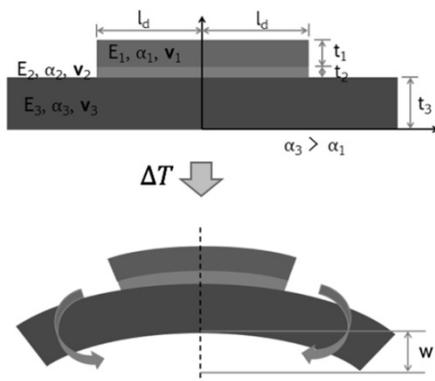


Fig. 4. Deformation during epoxy curing on die-substrate assembly.

구속 받지 않고 자유롭게 열팽창 하다가 에폭시가 경화된 후 상온까지 다시 냉각되는 과정에서 열팽창계수가 큰 기판이 센서보다 더 많이 수축하면서 경화된 에폭시로 인해 기판에 구속되어 있는 센서가 기판을 수축량을 이기지 못하고 그림 4에서와 포물선 형상으로 변형이 일어나 warpage가 발생하게 된다.[10]

이 때 발생하는 warpage는 다음의 식으로 정의할 수 있는데 이 계산식은 E. Shuir가 정리한 수식으로 다이와 기판의 적층 구조물에서의 변형을 표현하는 가장 잘 알려진 수식 중 하나이다[11].

$$w(x) = \frac{t\Delta\alpha\Delta T}{2\lambda D} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{\cosh kx - 1}{\cosh kl_d} \right)$$

위 수식에서

$$t \text{ (thickness)} = t_1 + t_2 + t_3,$$

$$\Delta\alpha \text{ (CTE difference)} = \alpha_3 - \alpha_1,$$

$$\Delta T \text{ (temperature difference)} = T_{final} - T_{initial},$$

$$D \text{ (flexural rigidity)} = \frac{E_1 t_1^3}{12(1-\nu_1)} + \frac{E_2 t_2^3}{12(1-\nu_2)} + \frac{E_3 t_3^3}{12(1-\nu_3)},$$

$$\lambda \text{ (axial compliance)} = \frac{1-\nu_1}{E_1 t_1} + \frac{1-\nu_3}{E_3 t_3} - \frac{t^2}{4D}, \text{ and}$$

$$k \text{ (longitudinal compliance)} = \sqrt{\frac{\lambda}{\frac{t_1}{3G_1} + \frac{2t_2}{3G_2} + \frac{t_3}{3G_3}}}$$

을 나타낸다. 여기서 E는 elastic modulus를 ν 는 Poisson's ratio를 나타낸다.

위 수식에 따르면 다이와 기판의 적층 구조물에서 발생하는 warpage는 2차원 포물선과 초월함수의 조합으로 나타낸다. 이는 카메라 모듈에서는 발생하는 warpage는 광

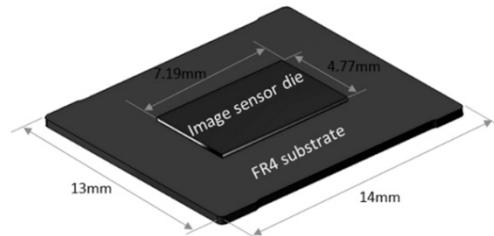


Fig. 5. Geometric details of the packages for experiment.

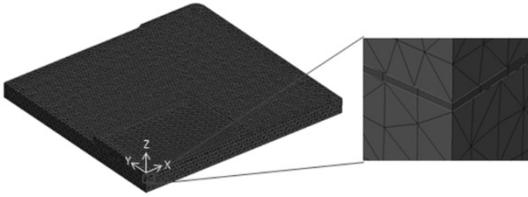


Fig. 6. Finite element mesh of a quarter model for camera module package.

학적으로는 상면만곡의 형태로 나타날 수 있음을 의미한다.

시편 제작을 통한 실험에 앞서 유한요소해석을 통하여 warpage 값을 예측해 보았다. 해석에 사용된 프로그램은 상용 해석프로그램인 CATIA를 사용하였다. 그림 5에 시료 제작에 사용될 카메라 모듈패키지의 디자인을 나타내었다. 패키지의 디자인이 대칭 구조로 되어 있어 본 해석에서는 패키지의 1/4만을 고려하여 모델링 하였으며 해석에 소요되는 시간과 해석의 용이성을 고려하여 결과에 영향이 크지 않은 범위에서 모델을 단순화 하였다. 본 해석을 위해 parabolic tetrahedral 요소를 사용하였으며 총 절점의 수는 202,409개, 요소의 수는 130,552개로 구성되었다. 에폭시는 높은 종횡비(aspect ratio)를 고려하여 그림 6에 서와 같이 요소를 두께방향으로 4층으로 생성하였다[12].

표 1과 표 2는 시료 제작에 사용된 카메라 모듈의 패키지 디자인과 주요 재료의 물성치 및 실험에 사용될 두 종류의 에폭시에 대한 물성치를 나타낸 것이다.

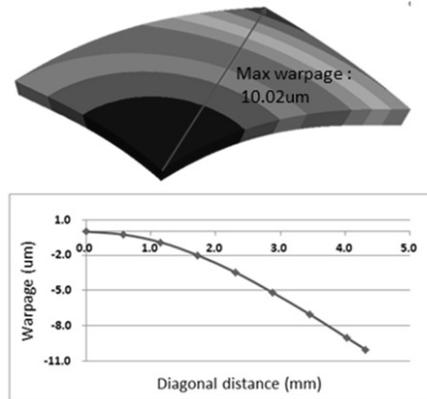
Table 1. Material properties of main parts used in this study.

Material	Elastic Modulus E (Gpa)	Poisson Ratio	Coefficient of Thermal Expansion α (ppm/°C)
Image sensor	131	0.3	2.8
FR4 substrate	22	0.28	18

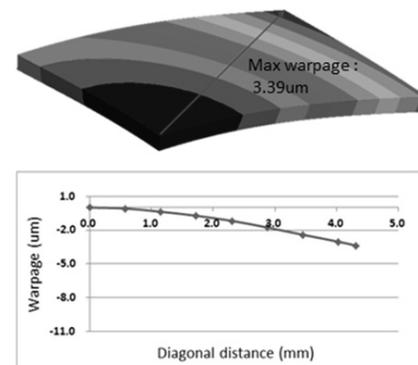
Table 2. Material properties of die bonding epoxies used in this study.

Material	Elastic Modulus E (Mpa)	Glass Transition Temperature T_g (°C)	Coefficient of Thermal Expansion α (ppm/°C)	
			α_1	α_2
Epoxy A	43	109	60	154
Epoxy B	15	112	59	151

그림 7은 유한요소 해석 결과를 나타낸 것으로 이미지 센서 상면의 대각성분의 warpage값을 그래프로 표현하였다. 두 에폭시 모두 이론 식에서의와 같이 포물선 형태로 변형이 발생함을 알 수 있다. 하지만 Epoxy B가 Epoxy A에 비해 더욱 완만한 포물선 형태로 warpage가 발생하였고 최대 변위 또한 Epoxy B(3.39 μ m)가 Epoxy A(10.02 μ m)에 비해 작은 값을 가짐을 확인할 수 있다. 그림 8은 에폭시 두께에 따른 warpage량을 해석한 결과로 에폭시의 두께가 증가할수록 warpage는 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 에폭시의 두께를 증가시키는 것은 제조 관점에서 봤을 때 균일한 높이로 관리하기 어려우며, 에폭시 두께가 증가하면 카메라 모듈 전체 높이가 증가하게 되는 등의 단점이 있어 실제로 적용하는데 어려움 있다. 본 연구에서는



(a)



(b)

Fig. 7. Displacement contour and profile graph of a diagonal direction on the image sensor. (a) Epoxy A, (b) Epoxy B.

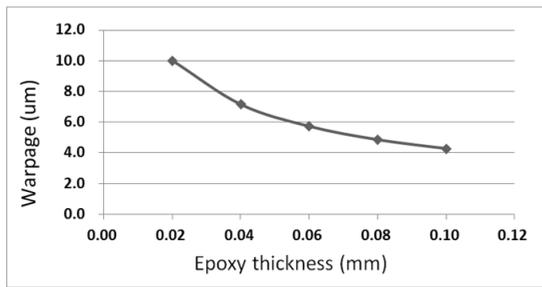


Fig. 8. Effects of epoxy thickness on warpage.

에폭시 두께에 대한 실험은 제외하고 탄성계수 차이에 대한 실험만 진행하였다.

2.2 시편 제작 및 실험

시료 제작에 앞서 이미지 센서 자체의 warpage를 측정하였다. 패키지 전과 후에 이미지 센서 상면의 평탄도를 측정하여 그 변화량을 관찰함으로써 패키지 과정에서 warpage가 얼마나 발생하는지 확인하고자 했다.

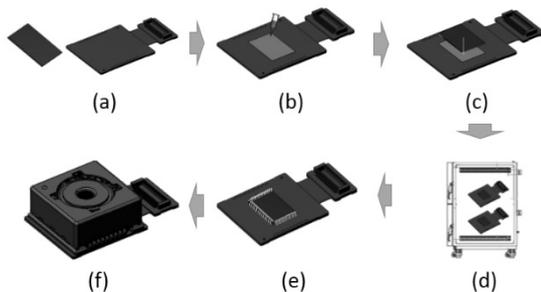


Fig. 9. Process flow of phone camera module packaging. (a)Raw material, (b)Epoxy dispensing, (c)Sensor attachment, (d)Oven Cure, (e)Wire bonding, (f)VCM A'ssy mount

본 시료 제작에 사용된 패키지 방식은 와이어 본딩 방식으로 FR4 기판 위에 에폭시를 도포한 후 이미지 센서 다이를 올렸다. 이 때 최종 경화 후 에폭시의 두께가 0.02 mm로 일정하게 유지되도록 장비에서 에폭시 도포량 및 다이 마운트(mount) 압력을 최적화했다. 이 후 온도 80℃의 챔버(chamber)에서 40분간 에폭시를 경화하고 와이어 본딩으로 센서와 기판을 전기적으로 연결하는 공정을 진행했다. 공정 별 에폭시 warpage를 확인하기 위해 에폭시 경화 후, 그리고 와이어 본딩이 완료된 후에 시료들의 이미지 센서 상면의 평탄도를 측정하였다. 광학성능 평가를 위해서 MTF 측정이 필요하므로 이를 위해 이후 공정을

진행하여 MTF 측정이 가능한 최종 카메라 모듈을 제작했다. 그림 9에 카메라 모듈 패키지의 주요 공정도를 나타냈다.

이미지 센서 상면의 평탄도를 측정하기 위해 본 연구에서는 비접촉식 3차원 광학 측정기술인 광절단법(light sectioning method)을 이용한 시스템을 사용했다. 이 시스템은 광원에서 구조화 조명광(줄무늬 투영광)을 텔레센트릭(telecentric) 투광 렌즈를 통해서 비스듬하게 대상 물체에 조사한다. 그림 10에서와 같이 대상 물체에 고저차가 없을 때 줄무늬 투영광은 점 O의 위치에 닿는다. 하지만 대상 물체의 표면 형상에 높이가 있는 경우 줄무늬 투영광은 점 A의 위치에 닿고 줄무늬는 OA간의 거리 d만큼 왜곡이 발생한다. 카메라 광축에 대해 줄무늬 투영광원의 조사 각도가 θ라고 대상 물체의 고저차 h는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$h = \frac{d}{\tan \theta}$$

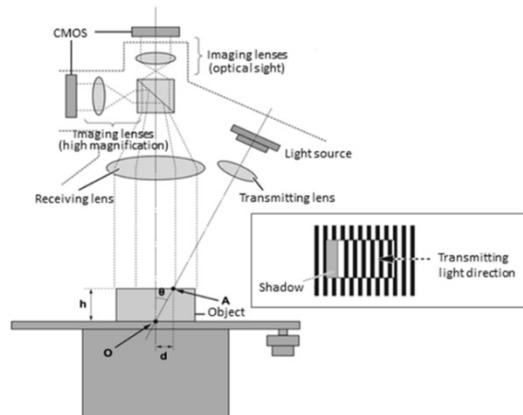


Fig. 10. Schematic of measurement system for package warpage.

Warpage 값의 부호는 JEDEC 표준에 따라 그림 11에서와 같이 볼록(convex)한 warpage를 (+)로, 오목(concave)한 warpage를 (-)로 정의했다[13].

광학 성능 평가는 through-focus MTF 측정을 통해 상면 만곡을 계산하는 방법을 사용했다. 이는 카메라 모듈의 VCM(Voice Coil Motor)을 구동시켜 렌즈의 초점 거리를 변화시켜 가면서 각 필드(field)별로 MTF값을 측정하는 방법으로 각 필드의 MTF 최대(peak)값의 위치가 중심 필드의 MTF 최대 값으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 계산하면 상면 만곡을 구할 수 있다[14]. 이 때 초점 거리는



Fig. 11. Illustration for (a) positive convex warpage and (b) negative concave warpage.

DAC(Digital to Analog Conversion)값으로 표현 되는데 이는 VCM을 구동시킬 때 사용하는 드라이버 IC가 DAC값에 의해 제어 되기 때문이다. 따라서 DAC값을 거리 값으로 환산해 주기 위해 초점 거리에 따른 렌즈의 높이 변화를 레이저 거리 측정기로 같이 측정했다. DAC 값에 따른 초점 거리 변화량의 비를 민감도(sensitivity)라고 정의하며 VCM의 주요 구동 특성 중 하나이다.[15]. 본 연구에서는 민감도가 $3(\mu\text{m}/\text{DAC})$ 인 VCM을 사용했다.

MTF 측정은 ISO-12233 방법에 의거하여 측정했다.[16] 본 연구에 사용된 테스트 차트는 그림 12에서와 같이 ISO-12233 차트로부터 센서의 이미지 포맷에 맞게 수정하여 사용했다. 그림 13은 이미지 센서의 각 필드 정보를 나타낸 것으로, 본 연구에서는 그림에서 붉게 표시된 중심 필드와 4곳의 0.8 필드의 through-focus MTF를 측정하여 중심 대비 0.8 필드의 MTF 최대값의 차이로 상면 만곡량을 계산했다.

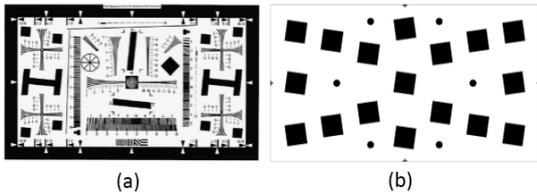


Fig. 12. Resolution chart. (a)ISO-12233 resolution chart, (b)modified chart for experiment.

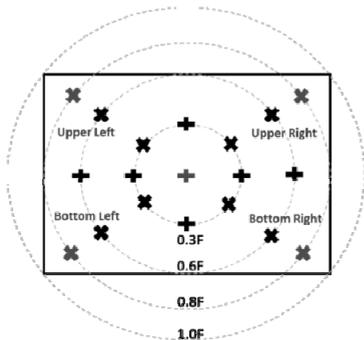


Fig. 13. Field information of CMOS sensor area.

2.3 실험 결과 및 고찰

그림 14과 표 3에 다이 본딩 에폭시 종류에 따른 패키지 warpage 측정 결과를 나타냈다. Epoxy A의 경우 warpage가 평균 $9.62\mu\text{m}$ 인 반면 Epoxy B는 $2.66\mu\text{m}$ 으로 현저히 값이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

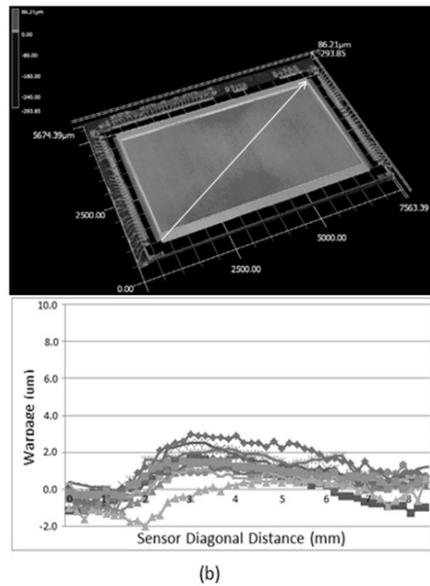
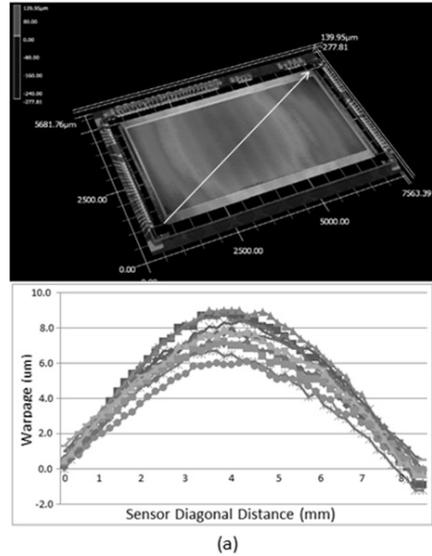


Fig. 14. Measured 3D images of the package warpage and profile graph measured in diagonal direction on image sensor. (a)Epoxy A, (b)Epoxy B.

Table 3. Measured warpage results of specimens.

	Epoxy A	Epoxy B
No. 01	9.16	2.56
No. 02	9.92	2.20
No. 03	9.04	3.16
No. 04	12.11	3.5
No. 05	12.12	2.56
No. 06	7.20	3.02
No. 07	9.05	2.18
No. 08	9.11	2.39
No. 09	9.96	2.15
No. 10	11.47	2.54
No. 11	8.34	2.37
No. 12	7.97	3.73
Average	9.62	2.66
St.dev	1.58	0.48

Epoxy A의 경우 측정된 warpage가 해석결과에서와 같이 완만한 포물선의 형태로 잘 나타나는데 비해 Epoxy B는 포물선의 형상이 잘 나타나지 않고 있다. 이는 시료 제작 과정에서 에폭시가 고르게 잘 도포되지 않았거나 그 외 다른 공정 요인으로 인해 발생하였을 수 있으며, 자세한 원인 분석을 위해 추후에 좀더 연구해 볼 필요가 있겠다. 그림 15는 유한요소 해석을 통한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교한 것으로 두 결과가 근사한 값을 보였다.

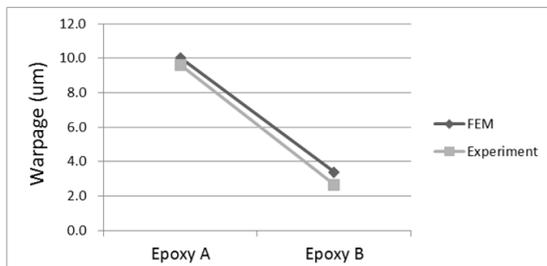


Fig. 15. Warpage results obtained by simulation and experiment.

그림 16에 Epoxy A와 Epoxy B에 대한 패키지 공정별 warpage 변화를 나타냈다. 두 종류의 에폭시를 사용한 시료들 모두 이미지 센서의 warpage가 원자재 상태에서는 (-) 값을 가지다가 공정이 진행될수록 (+) 값으로 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 패키지 과정에서 warpage가 발생되는 방향성을 아는 것은 매우 중요하다. 렌즈의 구면 수차

로 인해라도 상면 만곡이 발생하게 되는데, 만일 패키지 warpage의 방향성과 그 크기를 미리 예측할 수 있다면 렌즈의 구면 수차를 상쇄시키는데 이용할 수 있으므로 광학 설계 시 도움이 될 수 있다. 또한 이미지 센서 원자재 자체에도 warpage가 있으므로 패키지 과정에서 warpage의 발생량과 방향성을 적절히 조절할 수 있다면 이미지 센서의 warpage를 상쇄시킴으로써 카메라 모듈의 광학성능을 높일 수도 있다.

그림 17에 두 종류의 에폭시를 사용한 카메라 모듈의 through-focus MTF 측정 결과를 나타내었다. Epoxy B를 적용한 카메라 모듈의 상면 만곡은 3 μm 수준으로 12 μm 수준인 Epoxy A에 비해 많이 개선된 것을 확인 할 수 있다. 이를 앞서 보았던 warpage 측정결과와 비교해 보면 warpage가 많이 발생한 Epoxy A에서는 상면 만곡량 또한 크게 나타나고, warpage가 작은 Epoxy B에서는 상면 만곡량이 작게 나타남을 알 수 있다. 즉 카메라 모듈에서의 다이 본딩 에폭시는 패키지 warpage에 영향을 미치며, 이는 결국 카메라 모듈의 광학성능에 영향을 미치는 관계가 있음을 말해준다.

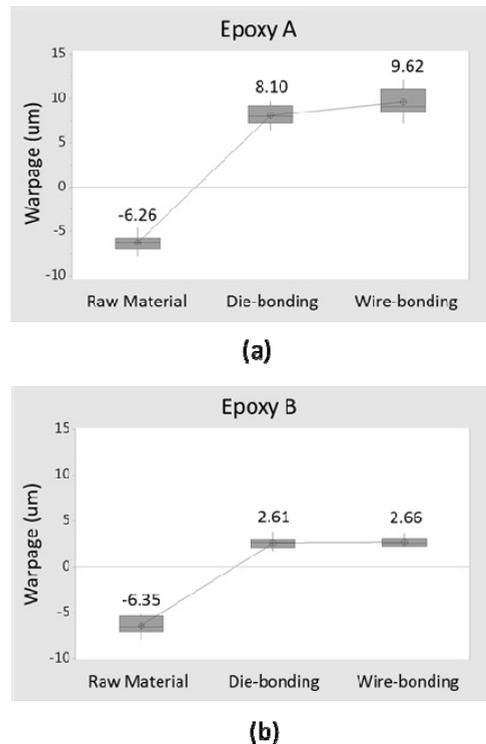
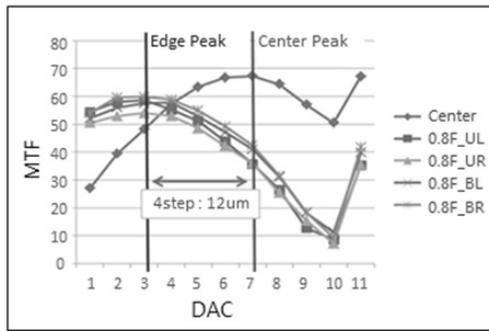
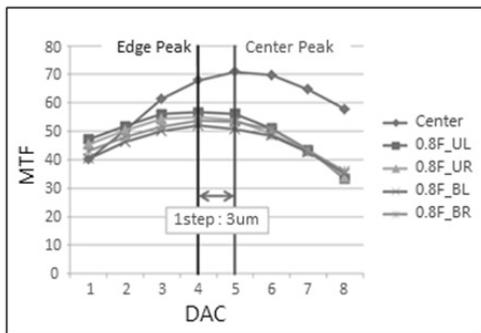


Fig. 16. Package warpage in assembly process. (a)Epoxy A, (b)Epoxy B.



(a)



(b)

Fig. 17. The results of through-focus MTF. (a)Epoxy A, (b)Epoxy B. (UL : Upper Left, UR : Upper Right, BL : Bottom Left, BR : Bottom Right).

3. 결 론

본 논문에서는 카메라 모듈 패키지에서 다이 본딩 에폭시가 warpage와 광학성능에 어떠한 영향을 미치는지 알아 보았다. 수식 및 유한 요소 해석을 통해 warpage의 형태 및 발생 정도를 미리 예측하였고, 카메라 모듈 시료 제작을 통한 실험으로 실제 warpage 발생량과 그에 따른 through-focus MTF를 측정했다. 유한 요소 해석과 실제 측정 결과, 모두 낮은 탄성계수 값의 에폭시에서 warpage가 개선되는 것을 확인했고, 형태 및 수치 등의 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 그리고 warpage가 개선된 시료는 through-focus MTF 또한 개선되는 것을 확인했다. 종합해보면 카메라 모듈에서의 다이 본딩 에폭시는 패키지 과정에서 발생하는 이미지 센서의 warpage에 밀접한 영향을 미치며, 이는 결국 상면 만곡과 관련된 광학성능에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 초점심도 마진이 부족한 초고해상도 카메라 모듈 개발에 있어서 패키지 warpage로 인한 광학성능의 저하가 제품 수율에 미치는

영향은 점차 증대되는 추세인데, 본 연구를 통해 패키지 warpage 개선 및 광학 성능 향상에 기여할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 LG이노텍과 국가과학기술연구회(KRCF-2015-CAP-1345194477)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. T. S. Yeung and M. M. F. Yuen, "Warpage of plastic IC packages as a function of processing condition," J. Electron. Packag., Vol. 123, pp. 268-272, 1999.
2. C. G. Song and S. H. Choa, "Numerical study of warpage and stress for the ultra thin package," J. Opt. Soc. Kor., Vol. 17, pp. 49-60, 2010.
3. J. H. Park, Y. M. Koo, E. K. Kim and G. S. Kim, "A reliability and warpage of wafer level bonding for CIS device using polymer," J. Microelectron. Packag. Soc., Vol. 16, pp. 27-31, 2009.
4. W. G. Kim, "Moisture absorption properties of liquid type epoxy encapsulant with nano-size silica for semiconductor packaging materials," J. Semiconductor & Display Technology, Vol. 9, pp. 33-39, 2010.
5. M. Marchywka and D. G. Socker, "Modulation transfer function measurement technique for small-pixel detectors," Appl. Opt., Vol. 31, pp. 7198-7213, 1992.
6. M. Yamamoto and S. Horiuchi, "Simulation of modulation transfer function using a rendering method," Opt. Express, Vol. 21, pp. 7373-7383, 2013.
7. Y. Sawada, K. Harada and H. Fujioka, "Study of package warp behavior for high-performance flip-chip BGA," Microelectron. Reliab., Vol. 43, pp. 465-471, 2003.
8. W. Y. Kong, J. K. Kim, and M. F. Yuen, "Warpage in plastic package: effects of process conditions, geometry and materials," IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf., Vol. 26, pp. 245-252, 2003.
9. H. Y. Kihm, H.-S. Yang, I.-K. Moon, and Y.-W. Lee, "Athermal elastomeric Lens mount for space optics," J. Opt. Soc. Kor., Vol. 13, pp. 201-205, 2009.
10. W. Zhang, D. Wu, B. Su, S. A. Hareb, Y.C. Lee and B.P. Masterson, "The effect of underfill epoxy on warpage in flip-chip assemblies," IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf., Vol. 21, pp. 323-329, 1998.
11. M. Y. Tsai, C. H. Hsu and C. N. Han, "A note of Suhir's solution of thermal stresses for a die-substrate assembly," J. Electron. Packag., Vol. 126, pp. 115-119, 2004.
12. A. E. Hatheway, "Analysis of adhesive bonds in optics," Proc. SPIE, 1998, 2 (1993).
13. JEDEC Standard JESD22-B112A, "Package warpage

- measurement of surface-mount integrated circuits at elevated temperature,” JEDEC Solid State Technology Association, Arlington, 2009.
14. J.-H. Kwon, H.-G. Rhee, Y.-S. Ghim and Y.-W. Lee, “Field-curvature correction according to the curvature of a CMOS image-sensor using air-gap optimization,” J. Opt. Soc. Kor., Vol. 19, pp. 658-664, 2016.
15. G. B. Kim, S. H. Moon, “An automatic focusing method using establishment of step size from optical axis interval,” J. Semiconductor & Display Technology, Vol. 14, pp. 7-11, 2015.
16. ISO 12233:2000, “Photography-electronic still-picture cameras resolution measurements,” 7-16, International Standard, Geneva, 2000.
-
- 접수일: 2016년 9월 27일, 심사일: 2016년 11월 28일,
 게재확정일: 2016년 11월 28일