

비구면 렌즈 제조시스템의 온도분포해석과 제조조건 최적화

Temperature Analysis of the Production System for Aspherical Lens and Optimization of Production Conditions

**국금환¹, 김갑순², 정동연³

*# K. H. Kuk(kkh@gnu.ac.kr)¹, K. S. Kim², D.Y.Chong³

¹경상대학 제어계측공학과, ²경상대학 제어계측공학과, ³(주)대호테크

Key words : Aspherical Lens, Temperature Distribution, Optimum Production Conditions

1. 서론

다양한 형상의 광학 렌즈를 효율적으로 제조하기 위한 정밀 프레스 성형기술이 적용되고 있다⁽¹⁾. 렌즈 초재(glass)의 정밀 프레스 성형을 위해서는 반복 성형에 충분한 강도를 갖는 금형재료기술, 고정밀 금형가공기술, 금형형상을 정확히 전사하는 정밀 프레스 성형기술, 고정도로 형상을 측정하는 계측평가기술과 광학 디바이스 성능향상을 위한 광학설계기술 등이 요구된다.

이 중 프레스 성형작업은 다시 상하 금형 사이에 렌즈 초재를 장입하는 공정, 금형의 예열 공정, 금형에 압력을 주어 상하 금형의 형상을 glass 에 전사시키는 성형공정, 금형을 냉각하는 공정으로 이루어진다. 이때 성형은 금형과 성형기의 산화 방지를 위한 N₂ 와 같은 불활성 기체 분위기 속(챔버 내부)에서 이루어진다. 프레스 성형 작업에서 성형직전 금형을 일정온도까지 올리고, 성형 후 금형을 일정온도까지 냉각해야 하는데 이러한 금형 온도설정 값은 매우 중요하며, 이 때 금형 전체는 균일한 온도 분포를 가져야한다. 또한 금형 예열과 냉각 작업을 복수 개의 단으로 분할하여 수행하는 경우, 각 단간에 온도 상승 기울기와 온도 하강 기울기가 최적이 되도록 각 단 설정온도를 결정해야한다. 각 단의 설정 온도는 렌즈 초재 자체의 가열 및 냉각 목표값이 되는데, 상하 금형과 금형 가이드 링으로 둘러싸인 렌즈 초재 온도를 직접 측정하는 것은 불가능하고 금형 자체의 온도분포 측정 역시 어렵다.

본 논문에서는 각 단 금형 내부 렌즈 초재와 금형 자체의 온도분포 수치해석결과와 이 결과를 이용한 챔버 소형화 설계 결과를 제시한다. 또한 렌즈 제조 시스템의 불량률 최소화를 위해 적용한 다구찌 방법에 의한 각 단의 최적 온도 및 압축력 결정결과를 보인다.

2. 금형 온도분포 수치해석

아래 그림 1 은 실제 금형 사진과 1/12 솔리드 모델로, 이 렌즈 금형은 동시에 6개 렌즈를 성형할 수 있다. 유한요소 해석을 효율적으로 수행하기 위해 열전달에 크게 영향을 주지 않는 금형 최 외곽 케이스 상부 내측에서 블록 쪽으로 돌출한 링형상 돌기를 제거하였다.



Fig 1. Lens die and solid model

2.1 전도 열전달 방식 시스템 내 금형 온도분포

1단계에 시제품으로 개발한 전도방식 렌즈 제조 시스템은 6개 렌즈의 동시 제조를 위해 시스템으로, 챔버 내에서 금형이 예열(3 단)·압축(1 단)·냉각(3 단)에 차례로 운반되며 제조되는 순차 제조 방식 시스템이다⁽²⁾.

챔버 내 각 금형의 온도해석을 위해 고려해주어야 하는 경계조건으로, 먼저 각 단에서 금형 상하 표면에 직접 접촉하는 열판(열전달 블록)과의 전도 열전달을 모델링하기 위해 열판과 직접 접촉하는 금형 상하 표면에 일정온도(열전달 블록 온도가 제어를 통해 일정 온도로 제어됨을 가정) 구속조건을 부여하였다. 또한 챔버 내 기체를 통한 대류 열전달 현상을 고려해 주었다. 렌즈 금형 내부에서는 모든 구성요소(금형 자체의 구성 요소인 상하 형, 블록, 케이스, 베이스, 렌즈 초재, 이들 요소들 간의 접촉부)간의 전도 열전달 현상을 모델링 하였다. 수치해석을 위해 적용한 요소 타입은 블럭 형태 8개 노드를 가진 3차원 SOLID70 이고, 각 재료의 열전도계수는 표 1 과 같다.

Table 1 Thermal conductivity

	렌즈 초재	금형 Upper-Lower Die	챔버 내 질소	금형 Base	금형 Block	금형 Case	Base와 Lower Die 접촉부	상·하부 Die와 Block 접촉부	Block 과 Case 접촉부
열전도 계수(K) joul/(sec*mm*C)	1.22 E-3	3.6E-3	0.06 1E-3	3.6 E-3	3.6 E-3	3.6 E-3	1.123 E-3	1.831E-3	0.769 E-3

아래 그림 2 는 챔버 내부 온도 500°C 에 대한 금형 내부 온도분포이다. 렌즈 초재 압축 전 금형 상하면의 경계조건이 다르기에 금형 내부 온도 분포가 비대칭 형태임을 알 수 있다. 현재는 렌즈 압축(성형) 단에서 일정 온도(597°C) 이상 600°C 로 제한하고 있다. 온도분포 해석 결과, 렌즈 초재 온도를 정확히 600°C 제어하기 위해서는 챔버 내부 온도에 따라 다르지만 열판 온도를 600°C 보다 5~7°C 높여야한다. 그리고 초재 압축 직전 렌즈 초재를 중심으로 상하 대칭에 가까운 온도 분포를 얻는 것이 렌즈 품질 향상에 중요한 경우에는 상부 열판의 온도를 하부열판 온도보다 약간 높게 제어해야 한다. 또한 챔버 각 단의 렌즈 온도를 일정하게 제어하기 위해서는 현재 적용된 각 단의 온도 제어 뿐 만아니라 챔버 내부 온도 역시 일정 범위로 제어해야 함을 알 수 있다.

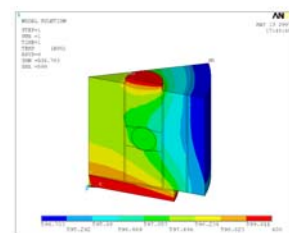


Fig 2. Temperature distribution of die

2.2 복사 열전달 방식 시스템 내 금형 온도분포

비교 실험용으로 제작한 또 하나의 시스템은 복사 열전달 방식으로, 구조상 금형 예열을 위해 금형 상하부 히터 블록에 부착된 열판으로부터의 전도 열전달에 의존하지 않고, 챔버 벽 속의 히터에 의해 가열된 챔버 내벽 표면으로부터의 복사

열전달과 챔버 내부 기체의 대류 열전달 및 금형 상하부 접촉관으로 부터의 전도 열전달에 의존한다. 챔버 내 금형의 온도해석을 위해 고려해준 열전달현상과 경계조건은, 앞의 전도 열전달 방식 시스템에 고려한 모든 내용뿐 만아니라 추가로 챔버 내벽과 금형 사이의 복사 열전달 현상을 고려해 주었다. 전도 열전달 해석을 위해 적용한 요소 타입은 동일한 SOLID70 이고, 복사 열전달 해석을 위한 추가 요소 타입은 Extra Node를 갖는 SURF152 이다.

해석을 위해 접촉관과 직접 접촉하는 금형 상하 표면을 600°C로 지정하였는데, 이것은 챔버 상하부 표면을 600°C로 제어함을 반영한 것이다. 또한 챔버 내부 공기 온도를 620°C로 주었다. 그림 3 은 주어진 조건에 대한 온도분포 해석결과이다. 금형 내부 온도분포 중 최고 온도는 챔버 내 공기와의 접촉부에서 620°C 이고, 최저온도는 금형 상하부 온도인 600°C 이다. 이러한 온도분포는 챔버 벽 속의 히터가 챔버 내부에 열에너지를 계속 공급하고, 금형이 챔버 내부 복사 및 대류를 통해 얻은 열에너지를 상하부 접촉관에 계속 빼앗김을 보인다. 이 시스템의 경우 렌즈 초재의 온도는 606 ~ 608°C 정도임을 알 수 있다. 즉, 앞에 기술한 전도 열전달 방식 시스템과는 반대로 렌즈 초재의 온도가 상하 접촉관의 온도 보다 높음을 알 수 있다.

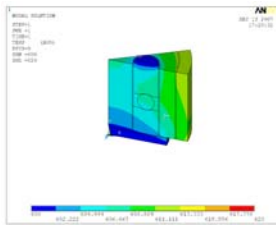


Fig. 3 Temperature distribution of die

3. 챔버 소형화 설계

챔버의 소형화는 챔버 벽두께에 직접 의존한다. 복사방식 시스템의 소형화를 위해 챔버 벽두께는 얇을수록 바람직한다. 내부 열원(chrome steel)의 정해진 능력에 허용되는 최소 챔버 벽두께는 현 상용 단열 재료의 열전달계수 값에 의하여 제한된다. 또한 챔버 들 사이의 벽두께는 챔버 좌우, 전후, 상하 벽 두께에 비해 작아도 되는데, 그 이유는 연속 제조 방식의 경우 각 챔버 고유 온도와 좌우 인접 챔버 고유 온도의 차가 200°C 를 넘지 않기 때문이다. 또한 각 챔버가 열적 외란에 강인한 열용량(열용량 증대용 접촉관 적용)을 가지고 있거나 신속한 온도제어 능력을 가지고 있으면, 한 챔버 벽에 내장된 챔버 열원의 열 발생 능력이 작을수록 챔버 벽 두께를 더 줄일 수 있다. 따라서 챔버 외부 허용 온도에 대한 개별 챔버의 최적 열원 능력과 최적 벽두께(최적 단열 재료)는 이들의 다양한 조합들에 대한 챔버 내 온도분포 수치해석을 통해 결정할 수 있다.

시스템 좌우 양단 챔버 모델(200°C 고유온도)을 이용한 온도 분포 해석 결과는 그림 4 좌편과 같고, 시스템 중간 챔버 모델(400°C 고유온도)을 이용한 수치 해석한 결과는 그림 4 우편과 같다.

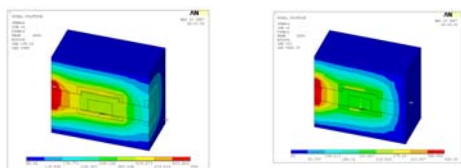


Fig. 4 Temperature distribution of chamber

4. 제조조건 최적화

현재 렌즈 표면 주름과 터짐 외에 육안으로 판별하는 렌즈 불량은 얼룩, 굽힘, 찌힌, 찡구, 파손, 빠리, 두께 불균일

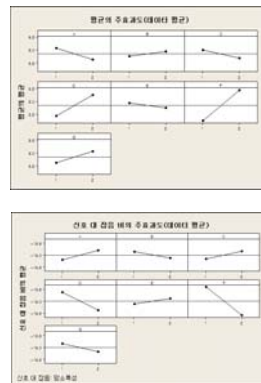
등으로, 렌즈 불량 원인은 성형시 초재 온도 불균일, 냉각시 잔유응력, 금형 내 초재 삽입 위치 편차, 금형 산화, 초재 표면 부착 이물질(초재와 성형된 렌즈 핸들링 작업시 유입) 및 먼지 등 다양하다.

현재 렌즈 불량 현상과 성형 조건의 명확한 상관관계를 파악할 수 없고 신뢰할 수 있는 충분한 축적된 관련 정보도 없기에, 렌즈 생산성을 높이며 동시에 렌즈 성형 조건에 의존하는 불량률을 낮추기 위해서는 오직 많은 실험을 통해 얻은 실험 결과를 토대로 렌즈 성형 최적 조건을 구해야 한다. 시제품으로 제작한 렌즈 제조 시스템(그림 5)의 렌즈 성형 최적조건을 구하기 위해 실험계획법인 다구찌 방법(Taguchi Method)⁽³⁾을 적용한 결과는 표 2 와 같다.



Fig. 5 Production system for lens

Table 2 Optimum production conditions



제어 인자	최적 조건
예열 2단 온도	450°C
예열 3단 온도	500°C
압축 단 온도	610°C
냉각 1단 온도	400°C
냉각 2단 온도	250°C
압축 단 압축력	100Kgf
냉각 단(1, 2단 공통) 압축력	50Kgf

5. 결론

본 논문에서는 비구면 광학 렌즈를 효율적으로 제조하기 위한 정밀 프레스 성형기용 금형내부 렌즈 초재 온도분포와 금형 자체의 온도분포 수치해석결과를 제시하였다. 그리고 온도분포 해석 결과를 이용한 하나의 복사방식 시스템용 챔버 소형화 설계 방법을 제시하였다. 또한 시제품으로 제작한 렌즈 제조 시스템의 불량률 최소화를 위해 다구찌 방법을 적용하여 각 단 최적 온도 및 압축력을 결정하였다. 향후 챔버 소형화 설계 결과를 직접 검증할 수 있는 소형 복사방식 렌즈 제조 실험 장치를 제작할 계획이다.

후기

본 논문은 산업자원부지원으로 지역산업기술개발사업으로 추진 중인 ‘글래스 렌즈 제조용 초정밀 함열 제어 로봇 시스템 개발’ 과제로부터 지원받아 수행한 연구결과이다.

참고문헌

1. M. Umetani, "Manufacturing of Optical Glass Lens by Press-Molding Method," 32-37, NEW GLASS Vol. 13, No. 2, 1998.
2. 산업자원부, "고화소(메다픽셀) 다초점 유리렌즈 제조용 로봇 시스템," 1단계보고서, 2007.
3. 백운봉, "품질을 좋게 하는 방법-다구찌 방법의 해설," 자유아카 데미, 1997.