

소형 복사방식 순차제조 비구면 렌즈 제조시스템 개발

Development of a Small Radiant Sequential Production System for Aspheric Lens

국금환^{1,✉}, 정준호¹
Kum Hoan Kuk^{1,✉} and Jun Hyo Jeong¹

1 경상대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Gyeong-sang National Univ.)
✉ Corresponding author: kkh5367@naver.com, Tel: 010-5720-5367

Manuscript received: 2010.4.16 / Revised: 2010.7.9 / Accepted: 2010.10.1

The fabrication method of aspheric lens is changed from machining to press molding so as to improve the productivity. In the case of the press molding method, the temperature control of the molding die is most impotent, because the temperature of each molding die determines the quality of lens. But any practical method for direct measuring of the lens temperature and the die internal temperature is yet unknown. Besides, in the case of the press molding system in which the heating and pressing and cooing of a die is done at one work station, the cycle time for the system is yet too long. The paper shows an improved structure of radiant sequential system in which the heating and pressing and cooing of dies is done at individual work station so as to cut down the cycle time. To know the die internal temperature, numerical results are given using ANSYS. An experimental radiant sequential system is developed and tested. Finally, the Taguchi method is applied in order to optimize the setting conditions of individual work station.

Key Words: Aspheric Lens (비구면 렌즈), Press Molding (프레스 성형), Sequential Production (순차제조), Radiant Method (복사 방식), Convective Method (전도 방식)

1. 서론

렌즈 구성매수 감소에 인한 광학계의 소형화, 중량감소, 비용절감으로 인하여 기존 구면렌즈는 비구면 렌즈로 점차 대체되고 있으며, 카메라 폰의 경우 비구면 렌즈 적용은 필수적이다.¹ 또한 광학렌즈 제조 방식은 생산성 향상을 위한 성형기술 개발에 의해 종래의 기계가공·연마 방식에서 정밀 프레스 성형방식²과 사출 성형방식³으로 옮겨가고 있다. 다양한 형상의 광학 렌즈를 프레스 성형방식에 의해 효율적으로 제조하기 위해서는 반복 성형에 충분한 강도를 갖는 금형재료기술, 고정밀 금형가공기술,⁴ 금형형상을 정확히 전사하는 정밀 프레스 성형기술, 고정도 렌즈 형상·결합 측

정기술⁵ 등이 요구된다. 그러나 종래 방식보다 개선된 프레스 성형방식의 경우도 하나의 작업단(Work Station)에서 초재의 예열·압축·냉각이 모두 이루어지는 집중제조 방식은 사이클 타임이 너무 길다는 단점이 있다.

프레스 성형 작업에서 성형직전 렌즈 초재(구형 Glass 소재)를 일정한온도까지 서서히 올려야(예열) 하고, 성형(금형 압축)시 일정 온도를 유지하고, 성형 후 일정한온도까지 서서히 내려야(냉각) 한다. 이 온도설정 값들이 렌즈 성형 성패(렌즈 품질)를 좌우하기에⁶ 렌즈 초재에 인접한 금형 영역이 설정된 균일한 온도 분포를 가져야 한다. 렌즈 생산성 향상을 위해 금형 예열과 압축(성형) 및 냉각 작업을 복수 개의 개별 작업단에서 분할하여

수행하는 경우, 상하 금형과 금형 가이드 링으로 둘러싸인 렌즈 초재의 온도를 직접 측정하는 것은 불가능하고 금형 자체 내부영역의 온도분포 측정 역시 어렵다.⁷

성형직전 금형(내부 렌즈 초재)을 일정한온도까지 올리는 열전달 방법은 크게 전도방식(Convective Method)과 복사방식(Radiant Method)으로 나눌 수 있다. 전도방식의 경우 주로 원통형 카트리지 히터(전열선)를 심은 열생성블록의 열에너지가 열균 일화용 열전달블록을 매개로 렌즈 금형 상하부 표면에 직접 접촉된 상태에서 전달되며,⁸ 복사방식의 경우 주로 금형 주위에 원형으로 배치한 적외선 램프로부터 열에너지가 복사방식으로 금형 표면에 전달된다.⁹

본 논문에서는 먼저 소형 비구면 렌즈 생산성 향상을 위해 기존 집중제조 복사방식 제조시스템을 순차제조 복사방식 제조시스템으로 개선한 하나의 실용적 구조설계 결과를 제시한다. 또한 구체적으로 금형 온도분포의 수치해석을 통해 복사방식과 전도방식을 상호 비교하고, 제한한 복사방식 시스템의 열해석 결과를 보인다. 나아가 제작한 실험용 복사방식 제조시스템의 챔버 내 금형 온도측정 실험결과를 보이고, 실제 현장 적용 복사방식 제조시스템의 불량률 최소화를 위한 최적 제조조건을 구하기 위해 다구찌(Taguchi) 방법을 적용한다.

2. 렌즈 제조시스템의 개념설계 및 구조

2.1 렌즈 제조시스템 개념설계

사이클 타임을 줄이고 장비 가격을 낮추기 위해 저비용 전기로 가열방식을 적용하여 기존 집중제조 복사방식 시스템을 순차제조 복사방식으로 바꾸는 경우, 제조시스템 전체 구조가 대형화되는 것을 피할 수 없기에 시스템 소형화와 구조 단순화 방안을 필히 강구해야 한다. 경상대에서 1 차 개발한 기존 집중제조 복사방식 시스템을 순차제조방식으로 구조변경하기 위해 개념설계한 시스템 소형화 및 구조 단순화 방안은 Table 1 과 같다. 이러한 소형화 및 구조 단순화 방안에 의해 장비 제조비용이 낮아질 뿐만 아니라, 나아가 렌즈 제조시스템 운전비용(전기료, 질소가스비용, 냉각시스템(필요시) 유지비용 등)을 최소화 할 수 있다.

Table 1 Strategy for system minimization and simplification

Chamber Minimization	• Minimization of chamber internal space according to maximum die size
	• Elimination of the pneumatic arm for handling lens dies in chambers
	• Elimination of upper and lower heating blocks in heating station 1, 2, 3, pressing station and cooling station 1, 2, 3 of convective production system
	• Elimination of all cooling blocks on the heating blocks of heating station 1, 2, 3, pressing station and cooling station 1, 2, 3
	• Application of high efficiency insulation board to minimize chamber wall thickness
Structure Simplification	• Inserting electrical heating wires in upper and lower walls of all chambers
	• Elimination of all cooling pipes in all chamber walls
	• Application of steel wires to transport lens dies in chambers at the same time

2.2 렌즈 제조시스템 구조

상기 Table 1 내용을 반영하여 설계한 전체 시스템의 3 차원 구조(시스템 제어를 제외한 기구 부분체)는 Fig. 1 과 같으며, 좌 우 그림은 각기 3 차원 시스템 구성과 우측면도이다. 챔버 내 금형 운반 유닛은 챔버 외부 좌우에 설치된 두 원통의 홈에 감겨 상하·왕복 운동하는 강선과 강선 구동용 배력 구조 메커니즘 및 전 메커니즘 구동용 공압 실린더로 이루어진다.

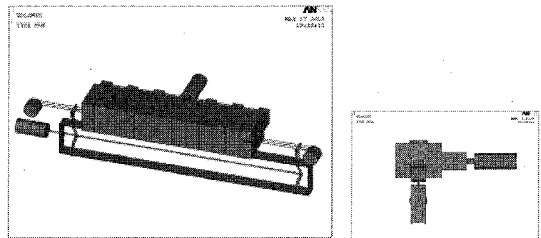


Fig. 1 Structure of lens production system

챔버 소형화는 챔버 벽두께에 직접 의존한다. 복사방식 시스템의 소형화를 위해 챔버 벽두께는 얇을수록 바람직하나, 내부 열원(Chrome Steel)의

Table 2 Thermal conductivity

Element	Thermal Conductivity(K) joul/(sec*Mm*°C)
Glass Lens	1.22E-3
N ₂ in Chamber	0.739E-3
Die (Upper,Lower,Block,Case,Base)	3.6E-3
Interface between Die Base and Lower Die	0.739E-3
Interface between Upper·Lower Die and Die Block	1.812E-3
Interface between Die Block and Die Case	1.097E-3

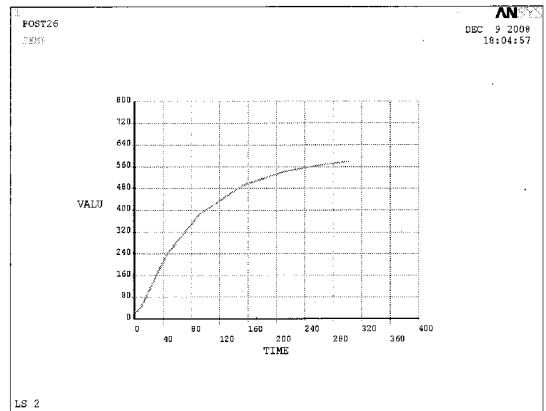


Fig. 5 Temperature variation at the lens center

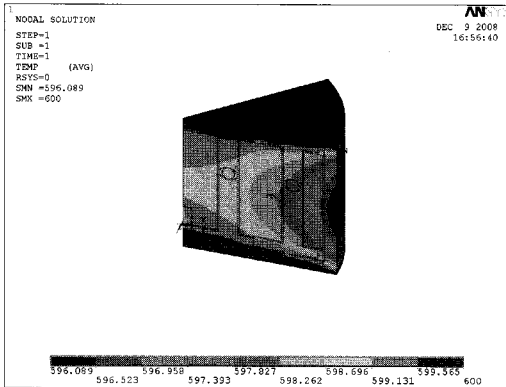


Fig. 4 Temperature distribution of die in radiant system

물론 이러한 결과 역시 챔버 내부 온도 설정값에 직접 의존한다. Fig. 4 에서 금형 외곽 8 개 초재들(Fig. 3 참조)의 온도는 약 598° C 이고, 금형 내부 4 개 초재들의 온도는 약 599° C 이다. 따라서, 초재 온도를 정확히 600° C 로 제어하기 위해 챔버 내부 상하부 벽 표면(온도 센서 실제위치) 온도를 초재 보다 1~2° C 더 높게 제어해야 함을 알 수 있다. 그리고 초재 온도가 민감한 초재 재료의 경우, Fig. 3 금형 타입에서 내부 초재와 외부 초재의 온도 차가 1° C 이기에, 상기 금형 구조를 바꾸어 내부 12 개 원통형 금형을 동일한 반경으로 원주를 따라 배치시켜야 한다. 물론 이 경우 전체 금형이 더 커지는 단점이 있다

Fig. 5 는 상하부 열에너지 저장용 접촉열판을 포함시켜 해석한 경우에 대한 금형 외곽부 렌즈 초재들의 시간에 대한 온도변화로서, 렌즈 초재 중심부 온도는 100 초(목표 Cycle Time 이내)에 400° C 에 도달하며 비선형으로 상승한다.

3.1.2 전도방식 시스템의 금형 온도분포

챔버 내 각 금형의 온도해석을 위해 고려해 주어야 하는 경계조건으로, 먼저 각 작업단에서 금형 상하 표면에 직접 접촉하는 열판(열전달 블록)과의 전도 열전달을 모델링하기 위해 열판과 직접 접촉하는 금형 상하 표면에 일정온도(열전달블록인 열판 온도가 제어기를 통해 일정 온도로 제어됨을 가정) 구속조건을 부여하였다. 또한 챔버 내 기체를 통한 대류 열전달 현상을 고려해 주었다. 수치해석을 위해 적용한 요소 타입은 역시 SOLID70 이다.

Fig. 6 은 챔버 내부 온도 400° C 에 대한 금형 내부의 정상상태 온도분포이고, Fig. 7 은 렌즈초재 중심부의 과도상태 온도변화이다. 렌즈 초재 압축 전 금형 상하면의 경계조건이 다르기에 금형 내부 온도 분포가 비대칭 형태임을 알 수 있다. 온도분포 해석 결과, 이 경우 역시 렌즈 초재 온도를 정확히 600° C 로 제어하기 위해서는 열판 온도를 600° C 보다 2~3° C 높여야 한다. 그리고 초재 압축 직전 렌즈 초재를 중심으로 상하부 금형에 대칭에 가까운 온도 분포를 얻는 것이 렌즈 품질 향상에 중요한 경우에는 금형 하부열판 온도를 상부 열판 온도보다 약간 높게 제어해야 한다. 그러나 렌즈 초재의 금형 내 위치에 따라 1° C 정도의 온도 차는 피할 수 없다.

Fig. 4-Fig. 5 와 Fig. 6-Fig. 7 을 비교해보면 금형 내부 온도분포(변화)가 거의 같음을 알 수 있다. 따라서 금형과 렌즈 초재를 원하는 설정온도로 제어하기 위해 기존 순차제조 전도방식 대신 순차제조 복사방식을 문제없이 적용할 수 있다.

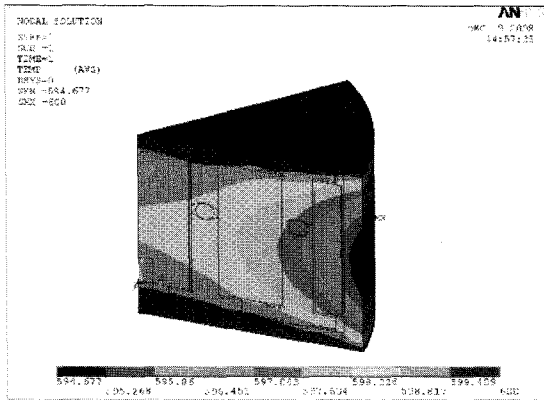


Fig. 6 Temperature distribution of die in convective system

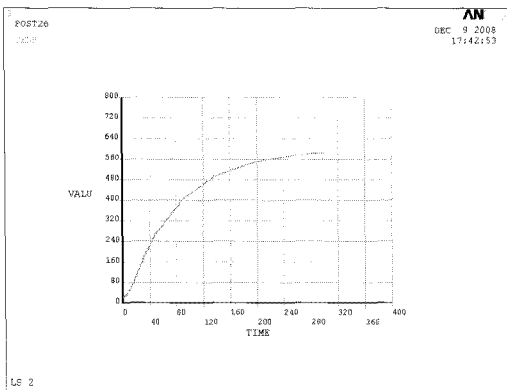


Fig. 7 Temperature variation at the lens center

3.2 렌즈 제조시스템의 온도분포 해석

3.2.1 복사방식 챔버의 온도분포 해석

수치해석 목적은 시스템 구조변경을 통한 챔버 소형화의 실현가능성을 열전달측면에서 확인하는 것이기에, 상대적으로 매크로 관점의 온도분포 해석이 요구되어 지금까지의 마이크로 관점 금형 열해석을 단순화하여 금형(Fig. 3) 전체를 하나의 원통형 블록으로 단순화하였다.

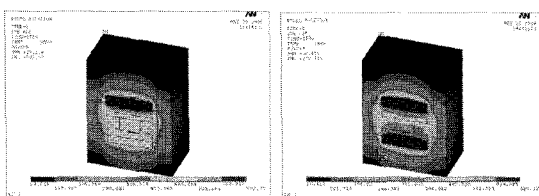


Fig. 8 Temperature distribution of a radiant chamber

반면 다양한 챔버 벽 구조 및 챔버 개폐판의 재질에 대한 온도분포해석이 중요하기에 두 종류 챔버(금형 상부 압축판이 있는 챔버와 없는 챔버)에 대한 Solid Model 을 몇 개의 기본 Brick 형태요소를 조합하여 얻었다. 수치해석할 일반적인 비선형 과도상태 열전달 방정식은 다음과 같이 정상상태 식에 과도상태를 반영하는 첫 항이 추가된다.

$$[C(T)] \{T'\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T,t)\}$$

Fig. 8 은 챔버(금형 상하부 열 에너지 저장 접촉판이 있는 경우) 열원능력을 각기 상부 100W, 하부 100W 로 설계한 경우(좌)와 상부 80W, 하부 120W 로 설계한 경우(우)에 대한, 챔버 가열 시작 후 40 분이 경과한 챔버의 온도분포 해석결과이다. 렌즈 금형을 중심으로 챔버 내부구조의 열적 불균형으로 인하여 챔버 상하부 열원능력을 다르게 주는 것이 오히려 챔버 내부의 온도분포 대칭성을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

3.2.2 실험용 렌즈 제조시스템의 온도분포 해석

실제 실험장치의 각 챔버(Chamber)는 온도 제어 PID 제어에 의해 일정 온도로 제어되지만, 이곳에서는 단지 개념 설계한 소형 챔버 내부열원의 발열 능력 변화에 의한 챔버 내 금형표면 온도상승 소요시간의 변화를 예측하기 위해 재료의 열적 물성치가 온도에 의존하지 않은 선형 과도해석과 온도에 의존하는 비선형 과도해석을 모두 수행하였다.

Fig. 9는 챔버 열원(챔버 가열용 Molding Heater) 능력이 맨 우측 챔버 부터 차례로 상부 80W, 하부 120W 인 경우(전체 챔버 경우 두 배 용량에 해당됨)에 대한 챔버 온도해석 결과이다. Fig. 10 은 Fig. 9 에 보인 챔버 내 금형 표면에서의 온도상승 과정을 시간에 대해 나타낸 것으로, 첫 번째 챔버 내 금형 표면 온도가 최고 600℃ 까지 상승하는데 2125 초 소요됨을 알 수 있다. 실제 현장에 적용된 시스템 내 각 챔버 온도를 챔버 고유의 일정 온도까지 상승시키는 작업은 렌즈 제조 시스템을 처음 가동시킬 때 1 회만 요구된다. 따라서 전체 시스템 가동 에너지 비용을 줄이기 위해 금형 운반을 위한 챔버 개폐시 개별 챔버 온도 안정성에 문제가 되지 않는 범위 내에서 각 챔버 열원 능력을 가능한 작게 설계해야 한다.

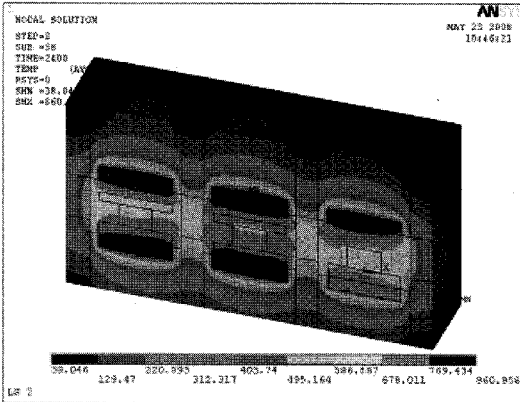


Fig. 9 Temperature distribution of an experimental lens production system

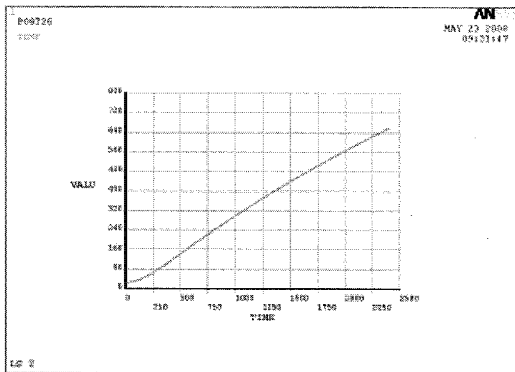


Fig. 10 Temperature distribution at the die top surface

4. 실험용 렌즈 제조시스템의 온도제어 실험

실험용으로 상세설계(Fig. 2)하여 제작한 순차제조 복사방식 비구면 렌즈 제조시스템은 예열단, 압축단, 냉각단 3 개 챔버만으로 구성되며, 주요 요소는 Table 3 과 같다.

Table 3 Elements of an experimental system

System Element	Specifications
Control System	<ul style="list-style-type: none"> •PID control of temperature (3 zone) •Thermocouple: "K" type •Digital V/A meter
Heating Element	•Kanthal A-1 molding heater
Insulation	•Ceramic board: ISOLITE 1260 ; Board between chambers: LBK-28
Die Transport	•Motor(220V/3P), wire and roller Driving
Max. Temp.	•950°C

제작한 시스템(Fig. 11)의 금형 운반용 강선 컨베이어 시스템의 제어는 챔버 온도제어와 독립적으로 이루어지며, 컨베이어 시스템은 개별동작의 분리제어와 연속제어가 가능하다.



Fig. 11 Experimental lens production system

제작한 렌즈 제조시스템은 순차제조방식이기에 동일 주기의 개별 공정들이 순차적으로 동시에 진행된다. 각 공정이 이루어지는 개별 챔버들 간 챔버 분리용 게이트의 전진과 후진 과정이 필히 수반되고, 이러한 게이트 개폐 과정 중 챔버 온도저하가 발생한다. 게이트 개폐에 의한 챔버 온도저하를 보상할 수 없다면 고 품질 렌즈 생산을 기대할 수 없다. 그러므로 챔버 온도제어기는 개별 챔버의 온도 상승 기능 못지않게 이러한 열적 외란에 대한 챔버 설정온도 유지 기능을 수행해 주어야 한다. 각 챔버의 설정온도는 독립적으로 조절 가능하며 다음과 같이 실험을 통해 온도제어 특성을 확인하였다.

챔버 온도 실험시 설정 가능한 두 조건은 분리용 게이트 상태(전, 후진)와 게이트 상태유지 소요 시간이다. 소요시간에 따른 조건은 세 개의 챔버(가열, 압축, 냉각)를 각기 400-600-300°C(Fig. 12)로 가열한 후 일정시간(1 분, 1 분 30 초) 동안 챔버 내 온도저하 과정을 측정하는 것이다.

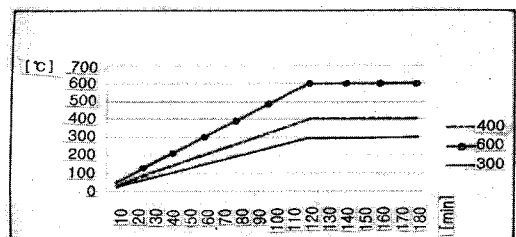


Fig. 12 Temperature of three chambers

이때 게이트 개폐에 기인한 챔버 온도저하에 대한 온도제어기 보상 영향을 제거하였다. 즉 개별 챔버의 가열은 하지 않았다.

각 실험에서 온도저하는 게이트 상태와 측정 시간에 의존하는데, 게이트 전진(닫힌 상태)일 때 1 분 간격으로 측정시 온도저하(°C)는 -1(가열단), -4(압축단), -1(냉각단)을 보였다. 1 분 30 초 간격으로 측정시에는 -2(가열단), -7 ~ -10(압축단), -2(냉각단)를 보였다. 게이트 후진(열린 상태)일 때 1 분 간격으로 측정시 온도저하(°C)는 -2(가열단), -4 ~ -5(압축단), -2(냉각단)를 보였다. 1 분 30 초 간격으로 측정시에는 -3(가열단), -7 ~ -8(압축단), -3(냉각단)를 보였다. 게이트 전진과 후진 각 상태에서의 온도차는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 순수하게 온도 저하에 대한 외란 영향의 파악을 위해 제어기 온도보상(가열)을 하지 않았지만, 실제 시스템은 온도의 PID 제어가 이루어지기에 게이트 전·후진시 온도 저하는 결코 이 보다 클 수 없다.

5. 최적 렌즈 제조조건 결정

5.1 렌즈 불량과 제조조건

본 연구를 통해 개발한 시스템의 제조방법은 상하 두 금형 중간에 놓인 구형 렌즈 초재에 상하 양측에서 동시에 전사하는(찍는) 열간 성형 방법으로 생산성도 높고 품질도 보다 안정화 된다. 그러나 렌즈 초재 자체의 불량(중량, 형상, 재질)이 없는 경우에도, 제조된 렌즈 치수 및 형상 정밀도는 제조 원리상 렌즈 금형 자체 정도에 직접 의존한다. 고정도 양품 렌즈를 높은 생산성으로 제조하기 위해서는 금형 자체의 높은 가공정도 뿐만 아니라, 렌즈 초재의 예열·압축·냉각 각 개별 공정에 요구되는 소요시간과 금형 온도·압축력 제어의 상관관계 정보가 요구된다.

구체적으로 렌즈 압축 시, 렌즈 초재 내부에 온도분포가 균일하지 않으면 성형품 표면에 주름이 생기기도 하고 낮은 온도에서 큰 압축력이 가해지면 초재가 파괴되기도 한다. 또한 렌즈 냉각 공정의 온도제어 실패로 성형된 렌즈 표면에는 압축응력이 렌즈 내부에는 인장응력이 남아 렌즈 파괴의 원인이 될 수 있다. 렌즈 불량 원인은 상기 원인 이외에 금형 내 초재 삽입 위치 편차, 금형 산화 및 초재 표면 부착 이물질등 다양하다. 이러한 불량들 중 렌즈 제조 공정에 직접 의존하는 불량을 파악한 후, 성형 사이클 타임을 줄여 생산성

을 높이면서도 동시에 성형 불량을 피할 수 있는 최적 성형 조건을 합리적으로 찾는 것이 렌즈 성형의 중요한 기술적 과제 중 하나이다.

현재 렌즈 불량 현상과 제조(성형)조건과의 명확한 상관관계를 파악할 수 없고 신뢰할 수 있는 충분한 렌즈 제조관련 축적 정보도 없다. 그래서 렌즈 생산성을 높이면서도 렌즈 성형 조건에 의존하는 불량률을 낮추기 위해 오직 많은 실험(시행착오)을 통해 렌즈 성형 최적조건을 구해야 한다. 최소 횟수 실험으로 렌즈 성형 최적조건을 구하기 위해 새로운 실험계획법인 다구찌(Taguchi) 방법을 적용할 수 있다.

5.2 다구찌 방법에 의한 최적 렌즈 제조조건 결정

불량률 증가가 예상되는 차세대 12 개 동시생산 금형에 의한 렌즈 제조 불량률을 최소화 할 수 있는 조건을 찾기 위해 예상 실험 결과(불량률)에 다구찌 방법을 적용하였다. Table 4 는 다구찌 방법의 주요 단계별 구체적 작업수행 내용이다. 결과치 중 하나인 신호 대 잡음 비(SN 비)는 클수록 좋다.

Table 4 Work step of Taguchi method

Step	Work
Parameter Selection	<ul style="list-style-type: none"> Control parameter(10 elements, 2 levels): A: temp. of heating station 1(250°C, 300°C); B: temp. of heating station 2(400°C, 450°C); C: temp. of heating station 3(500°C, 550°C); D: temp. of pressing station (590°C, 610°C); E: temp. of cooling station 1(450°C, 500°C); F: temp. of cooling station 2(300°C, 350°C); G: temp. of cooling station 3(200°C, 250°C); H:press. force of pressing station(100Kgf, 120Kgf); I: press. force of cooling station 1(50Kgf, 60Kgf); J: press. force of cooling station 2(30Kgf, 40Kgf) Noise parameter(1 element, 2 levels): N1, N2(die state: good, bad) Present conditions: A₁B₂C₁D₁E₂F₁G₂H₁I₁ A(250°C), B(450°C), C(500°C), D(590°C), E(500°C), F(300°C), G(250°C), H(120Kgf), I(50Kgf), J(30Kgf)
Experiment Design	<ul style="list-style-type: none"> L₁₂(2¹¹) type of orthogonal matrix Internal side: experiment for two levels of control parameter External side: experiment for two levels of noise parameter
Experiment Execution	<ul style="list-style-type: none"> Defect: number of defective elem. per 1000 lens Recording all experi. results in orthogonal matrix
Optimum Conditions	<ul style="list-style-type: none"> SN ratio and average Optimum condi.: A₁B₂C₂D₁E₁F₁G₂H₂I₁J₁ (Fig. 13)

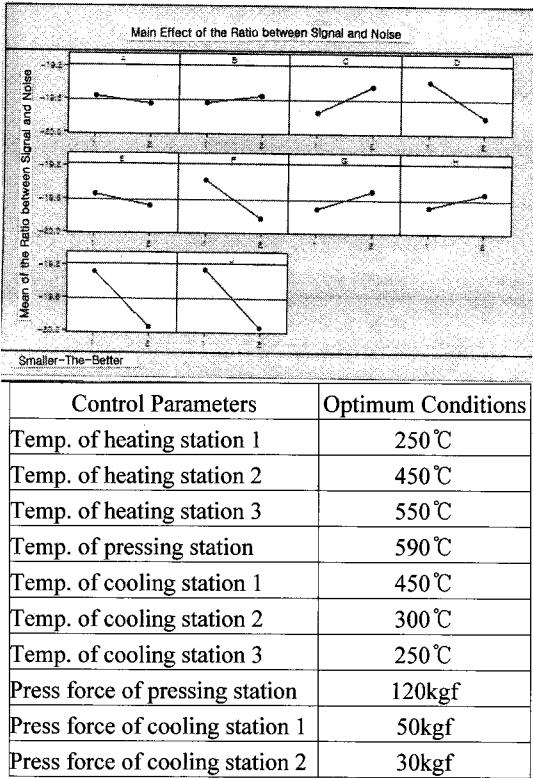


Fig. 13 Optimum lens production conditions

6. 결론

본 논문에서 하나의 저가 고생산성 복사방식 순차제조 비구면 렌즈 제조시스템 개발을 위한 챔버 소형화 방법을 제시하였다. 이를 위해 기존 챔버 내 금형 운반용 로봇을 강선 컨베이어 시스템으로 대체하였다. 또한 제안한 시스템의 실제 구현가능성을 검증하기 위해 금형 및 챔버의 온도분포 해석 후 실험용 제조시스템을 제작 시운전하였다. 나아가 복사방식 순차제조 시스템의 불량률 최소화를 위해 다구찌 방법을 적용하여 개별 작업단의 최적 온도·압축력을 결정하였다. 향후 7 개의 챔버로 구성된 현장 제조용 소형 복사방식 순차제조 비구면 렌즈 제조시스템을 제작할 계획이다.

후 기

본 논문은 지식경제부지원으로 지역산업기술개발사업으로 추진한 ‘글래스 렌즈 제조용 초정밀 힘.열 제어 로봇 시스템 개발’ 과제(2 단계)로부터 지원받아 수행한 연구결과이다.

참고문헌

1. Chong, D. Y. and Kuk, K. H., “Development of Robot System for Production of Glass Lens by Ultra-precise Control of Force and Temperature,” Ministry of Knowledge Economy, pp. 6-9, 2009.
2. Makoto, U., “Manufacturing of Optical Glass Lens by Press-Molding Method,” New Glass, Vol. 13, No. 2, pp. 32-37, 1998.
3. Park, K. and Han, C. Y., “Numerical Analysis for the Injection Molding of an Aspheric Lens for a Photo Pick-up Device,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 163-170, 2004.
4. Kim, S. S., Lee, Y. C., Lee, D. G., Kim, H. J. and Kim, J. H., “Ultra-precision Grinding Optimization of Mold Core for Aspheric Glass Lenses using DOE and Compensation Machining,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 6, pp. 45-50, 2007.
5. Kim, S. H., Beak, K. Y., Kim, Y. N. and Yang, I. Y., “Defect Evaluation of Optical Lens by Resonant Ultrasound Spectroscopy,” Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 1491-1495, 2004.
6. Yoshizo, K., “The Present Condition of Glass-Molding Press Machine,” New Glass, Vol. 13, No. 2, pp. 38-42, 1998.
7. Kuk, K. H., Kim, K. S. and Chong, D. Y., “Development of a Small Radiant Production System for Aspheric Lens,” Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 293-294, 2009.
8. Takaki, K., Yonemoto, T., Inoue, T. and Nakamura, S., “A Method for Forming an Optical Element and an Apparatus for Manufacturing the Same,” Panasonic Co., Ltd., No. 10-0207170
9. Tanioka, T., Masaki, H., Urusibata, K., Komiyama, Y., Kanamo, T. and Maszki, I., “Method and Apparatus for Press Forming Glass Products,” Toshiba Machine Co., Ltd., No. 10-0193374