

자중을 이용한 곡면유리의 열 성형 공정에서 금형의 형상이 미치는 영향에 관한 연구

이광호^{1,2} · 이동원^{1,3} · 김순욱⁴ · 김종수[†]

한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소^{1,†}

고려대학교 기계공학과²

인하대학교 기계공학과³

국민대학교 기계공학부⁴

A Study on the effect of mold shape in thermal molding process of curved glass using self-weight

Kwang-Ho Lee^{1,2} · Dong-Won Lee^{1,3} · Soon Wook Kim⁴ · Jong-Su Kim[†]

Korea Institute of Industrial Technology, Research Institute of Intelligent Manufacturing & Materials Technology^{1,†},

Dept. of Mechanical Eng., Korea Univ.², Dept. of Mechanical Eng., Inha Univ.³,

School of Mechanical Eng., Kookmin Univ.⁴

(Received March 15, 2024 / Revised March 24, 2024 / Accepted March 31, 2024)

Abstract: In-car monitors in automobiles are increasingly being applied in the form of curved displays that combine the traditional instrument panel and center display. When molding the curved glass for these curved displays, it is necessary to achieve the desired curvature to improve the quality and aesthetics, while forming a clean surface. However, when applying a bending method that applies direct pressure to such glass, indentations are generated due to compressive stress, and a curved glass molding method that generates curvature by deflection due to self-gravity without direct pressure is being researched. In this thermoforming process of curved glass using self-weight, the heat source that heats the glass is an important factor. In this process, the heat source can be considered as a lamp that provides direct heat and the temperature of the mold that supports the glass. In this study, finite element analysis was performed using finite element analysis software (Ansys) to determine the effect of mold geometry during the forming process to obtain the desired curvature of glass by thermal and gravitational deflection without direct pressure. Experiments were also performed to compare the results with the actual glass gravitational deflection behavior using the mold geometry optimized through finite element analysis (FEA). This showed the effect of the mold shape on the shape of the heated curved glass when the thermoforming process is performed using self-weight without applying direct pressure.

Key Words: CAE, Finite element analysis, Glass molding process, Heat deflection, Heat transfer analysis, Thermal image analysis

1. 서론

최근 출시되는 자동차의 운전석 모니터는 기존의 계기판과 센터 디스플레이가 합쳐진 커브드 디스플레이 형태로 많이 적용되고 있다. 이러한 커브드 디

스플레이의 곡면유리를 성형할 때, 품질과 심미성을 향상시키며 원하는 곡률을 얻어내기 위한 성형이 요구된다^{1,2)}. 현재 보편적인 곡면유리의 성형 방법은 평면 유리 판재를 금형에 위치시키고 금형의 온도를 올려 유리를 연화시킨 후 상부 금형을 아래로 눌러 유리에 원하는 곡률을 부여하는 방법이다³⁾. 이러한 직접적인 압력을 이용한 굽힘 방법은 정밀한 형태의 원하는 곡률을 얻을 수 있는 방법이지만 몇 가지 단점을 가지고 있다. 금형에 곡면이 직접적으

† 교신저자: jskimgloria@kitech.re.kr

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

로 접촉하여 곡면의 표면 거칠기에 영향을 줄 수 있다. 또한 균일하지 않은 압력에 의한 유리 내부에 불균형한 응력을 생성하여, 추후 품질에 영향을 미칠 수 있다⁵⁾. 이를 예방하기 위해 유리에 직접적인 압력을 가하지 않고 원하는 곡률을 얻어내는 공정이 요구되고 있다.

압력을 가하지 않는 방법으로 유리를 금형 위에 올려 가열을 통해 유리를 연화시킨 후 자중에 의한 처짐을 이용할 수 있다. 이러한 곡면 유리를 자중에 의한 처짐으로 성형하기 위해서는 적합한 열 성형 공정 시스템이 요구된다.

유리의 특징으로는 저온에서는 탄성을 띠지만 유리전이 온도에 가까워지면서 점성의 성질이 생기는 점탄성을 띄게 된다. 이 과정에서 유리의 변화하는 점성은 온도에 의존적이게 된다. 때문에 유리의 열 성형에서 유리의 가열 온도와 그에 따른 유리의 온도분포가 결과에 큰 영향을 미치게 된다⁶⁻⁸⁾. 유리의 가열된 온도의 분포가 균일 하지 않으면 온도차로 인한 점성 차이로 뒤틀림과 들뜸이 발생할 수 있다.

균일한 유리의 온도분포를 얻기 위해서는 직접적인 열원 외에도 가열부 주변에 형성되는 온도 또한 중요한 인자로 고려되어야 한다. 본 연구에서 설계한 열 성형 공정 시스템에서는 직접적인 열원인 근적외선(Near-Infrared Ray, NIR)램프와 유리를 지지하고 있는 NIR 램프에 의하여 가열된 금형의 온도를 대표적인 주요 인자로 볼 수 있다⁹⁾.

본 연구에서는 유한요소해석 소프트웨어(Ansys, Ansys Inc.)를 사용하여 유리를 지지하고 있는 금형의 가열부의 형상을 변경하며, 금형의 형상이 유리의 온도분포에 미치는 영향을 해석하였다. 이를 통해 유리의 균일한 온도 분포를 띄게 하는 금형 형상을 찾고자 하였으며, 해석을 통해 얻어낸 최적의 금형 형상을 실제 실험에 사용하여 가열된 유리의 온도분포를 확인하였다.

2. 유한요소해석

가열부의 금형의 형상에 따른 유리의 온도분포를 보기 위해 상용 유한요소해석 소프트웨어(Ansys)를 사용하여 3차원 1/2 대칭 모델로 열전달 해석을 진

행하였다. 유리는 soda-lime glass, 금형은 304stainless steel을 사용하였다. 유리의 크기는 1360×160 mm 두께 1.1 mm이며, 열원인 NIR 램프와 가열된 금형에서의 열전달은 모두 복사열전달을 사용하였다^{10,11)}. 유리와 외부 사이의 대류계수는 정지 대류계수 5e-6 W/mm²°C를 사용하였다.

2.1. 재료물성

자중을 이용한 곡면유리 열 성형 시스템에 사용된 금형의 소재인 304stainless steel의 물성은 Table 1과 같으며 성형재인 유리(Soda-lime glass)의 물성은 Table 2와 같다. 본 연구에서는 금형과 유리의 열전달과 열분포를 확인하기 위해 물성으로 밀도(Density), 열전도도(Thermal conductivity), 비열(Specific heat)을 사용하였다. 기계적 물성은 향후 연구에서 변형을 고려하기 위하여 적용 하였다.

Table 1 Material properties of 304 stainless steel

Category	Properties	Unit	Value
Thermal	Thermal conductivity	W/m°C	16.2
	Thermal expansion	10-6/°C	17.2
	Specific heat	J/kg°C	500
Mechanical	Young's Modulus	Mpa	193,000
	Poisson's Ratio	-	0.29
other	Density	kg/m3	7930

Table 2 Material properties of soda-lime glass

Category	Properties	Unit	Value
Thermal	Thermal conductivity	W/m°C	0.98
	Thermal expansion	10-6/°C	8.36
	Specific heat	J/kg°C	1140
Mechanical	Young's Modulus	Mpa	68,500
	Poisson's Ratio	-	0.22
other	Density	kg/m3	2483

2.2. 곡면 유리 열 성형 시스템 모델 설계

자중을 이용한 곡면유리 성형에서 원하는 곡률을 얻어내기 위해서는 적절한 성형 공정 시스템이 필

† 교신저자: jskimgloria@kitech.re.kr

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

요하다. 본 연구에서 목표로 하는 휨 각은 3°로 그에 맞는 적절한 금형의 각도를 가정하여 설계하였다. 금형의 형상은 Fig.1과 같이 평면 유리를 얹어 놓을 수 있는 형상으로 설계되었다. 좌측 금형의 크기는 500×200 mm으로 150 mm의 두께를 가지며, 우측 금형의 크기는 1100×200 mm이며 110 mm의 두께를 가진다. 목표한 휨 각을 대략적으로 얻기 위한 좌측 금형의 각도는 2° 우측 금형의 각도는 2.4°로 설계하였다. NIR 램프를 이용한 유리의 가열시간은 총 35분이며, NIR 램프의 시간대 별 출력은 Table 3과 같다. 급격한 유리의 온도변화로 인한 유리의 파손을 예방하고, 실험의 재현성을 위해 금형은 100°C로 예열 하였다. 열원에 위치한 가열부의 금형은 유리의 균일한 온도분포를 얻기 위하여 형상을 다양화하여 해석을 진행하였다.

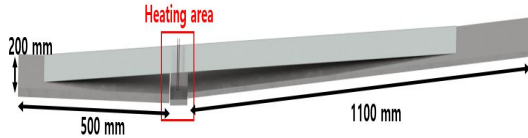


Fig. 1 3-D Model of thermoforming system

Table 3 Output of NIR lamp over time

Time(min)	Volt(V)
0-5	80
5-10	100
10-15	120
15-20	140
20-25	160
25-35	240

설계된 열 성형 시스템 내 가열부 금형의 기본 형상은 Fig. 2와 같다. 이런 형태의 가열은 대기에 노출된 유리 측면에서의 대류 열전달로 인한 열 손실이 발생하여 유리 중심의 온도가 높고 폭 방향 바깥 부분의 온도가 낮게 형성될 것으로 예상할 수 있다. 따라서 이러한 온도차를 줄여 유리의 온도 분포를 균일하게 하기 위하여 Fig. 3과 같이 가열부에 위치한 금형의 형상을 달리하였다. Fig. 3 (a)는 기본 모델로 가열부 금형은 직육면체의 형상이다.

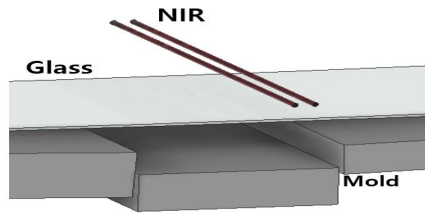
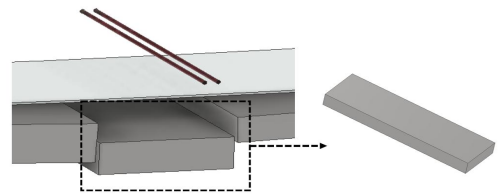
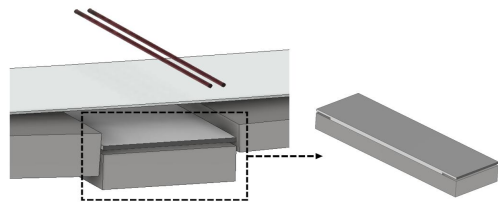


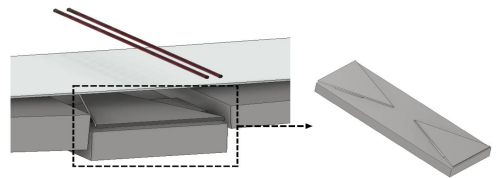
Fig. 2 Default shape of the heating section mold



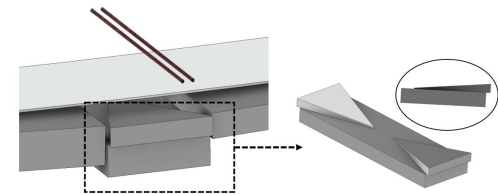
(a) Default



(b) Rectangle



(c) Triangle



(d) Triangle + Tilt angle 6°

Fig. 3 Shape of heating section mold type

Fig. 3 (b)는 기본 모델 위에 직사각형 단면의 4mm 두께의 금형을 올린 형상으로 기본 모델인 (a)보다 유리 하단부와의 거리가 가까워 더욱더 큰 열

전달을 할 것으로 예상할 수 있다. Fig. 3 (c)는 기본 모델 위에 4mm두께의 마주 보고 있는 두 개의 삼각형 금형을 올린 형상으로 유리의 폭 방향 바깥 부분에서의 열전달을 키울 수 있다. Fig. 3의 (d)는 (c)와 같은 마주 보고 있는 삼각형 금형을 지면에서 6°기울인 형상으로 (c) 금형보다 유리의 폭 방향 바깥 부분에서 가열된 금형으로 인한 열전달을 극대화할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

2.3. 가열부 금형의 형상에 따른 온도분포

Fig. 4는 Fig. 3의 금형들을 사용해 얻은 유리의 온도분포이다. 기본 모델을 이용하여 해석을 진행한 온도분포는 Fig. 4의 (a)와 같다. 예상 한 바와 같이 기본 모델에서는 중심의 최고온도 대비 폭 방향 가장 바깥 온도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 직사각형 단면의 금형을 덧댄 형상의 Fig. 3 (b) 금형은 전체적인 유리의 온도는 상승시켰지만 최고온도와 폭 방향 가장 바깥 온도의 차이는 Fig. 3 (a)금형을 사용한 기본 모델과 유사하였다. 두 개의 삼각형 형상의 금형이 마주 보고 있는 Fig. 3 (c)금형은 Fig. 3 (a), (b)금형에 비해 최대 온도와 폭 방향 가장 바깥 온도의 온도차가 적게 나타났다. Fig. 3 (c)금형에서 지면으로부터 6°기울인 Fig. 3 (d)형상은 최고온도와 폭 방향 가장 바깥 온도의 차이가 21.66°C로 Fig. 3 (a), (b), (c)형상에 비해 최대 약 13.6°C 만큼 온도차가 작게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 Fig. 3 (a), (b)금형을 사용하여 가열된 유리의 최대 온도를 유리 중심에 위치하였지만 Fig. 3 (c), (d)금형을 사용하여 가열된 유리에서는 폭 방향 바깥으로 최대 온도가 점차 이동하는 것을 볼 수 있었다.

Table 4는 각각 다른 4종류의 금형의 형상에서의 가열된 유리의 최고온도와 폭 방향 가장 바깥 온도를 비교한 결과이다. 4가지 금형 형상에 따른 가열된 유리의 폭 방향 온도분포를 비교하면 Fig. 5와 같으며 지면과 6° 각을 갖는 삼각형 금형의 온도분포가 일정한 구간이 가장 긴 것을 알 수 있다.

Table 4 Max. temperature and Max.-Min. temperature difference due to mold shape

Mold	Max Temperature(°C)	Temperature difference(°C)
(a) Default	391.34	34.47
(b) Rectangle	412.68	35.23
(c) Triangle	389.78	27.44
(d) 6° tilted Triangle	391.99	21.66

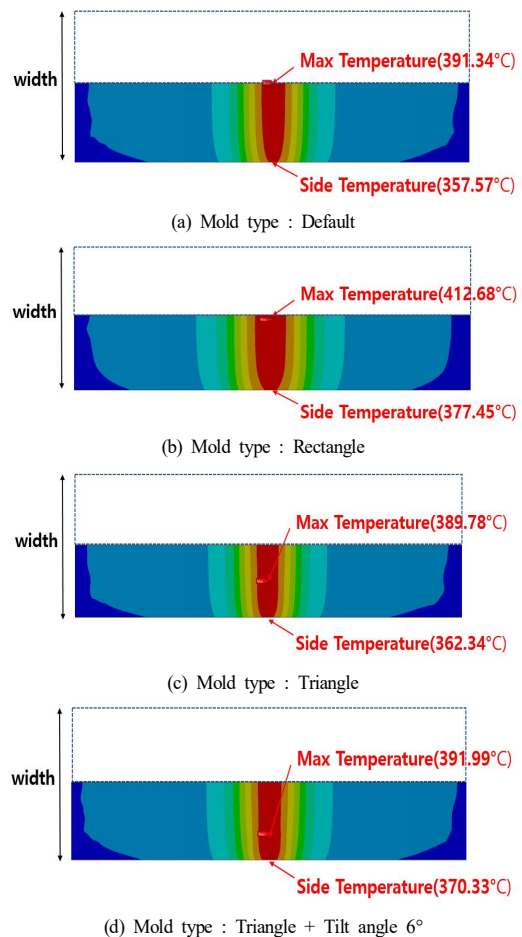


Fig. 4 Temperature distribution of glass by heating section mold type

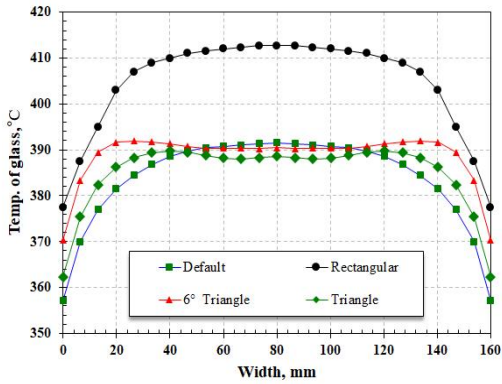


Fig. 5 Temperature distribution of width direction of glass by heating section mold type

3. 자중을 이용한 곡면유리 성형 실험

3.1 실험조건

유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)결과를 검증하기 위해 FEA에서의 열 성형 공정 시스템을 실제 실험에서 구현하여 실험을 진행하였다. 구현된 시스템은 Fig. 6과 같으며, FEA를 통해 알아낸 유리의 온도분포를 고르게 할 수 있는 지면으로부터 6° 각을 갖는 삼각형 금형 Fig. 7을 사용하여 진행하였다. Fig. 7의 L1은 삼각형 단면의 중심선이고 L2는 지면의 역할을 하는 기본 금형과 평행한 선이다. 실험에서의 온도 측정은 비접촉식 열화상 카메라(T450sc, FLIR)와 접촉식 온도계를 함께 사용하여 진행하였다. 비접촉식 열화상 카메라는 금형의 온도를, 접촉식 온도계는 Fig. 8과 같이 유리의 중심부와 폭 방향의 가장 바깥 부분에서 중심으로부터 25 mm 부근의 위치를 측정하였다.



Fig. 6 Curved glass thermal molding system using self-weight

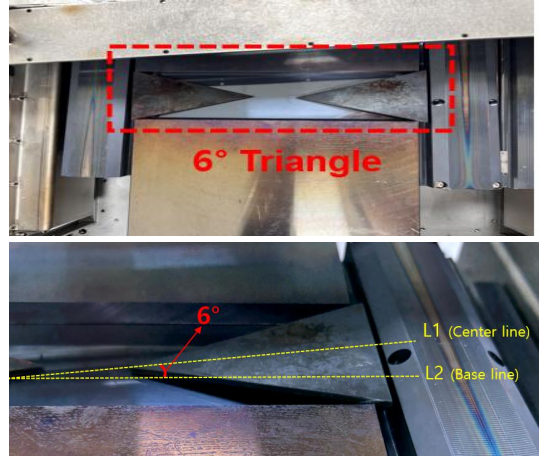


Fig. 7 6° tilted triangle mold

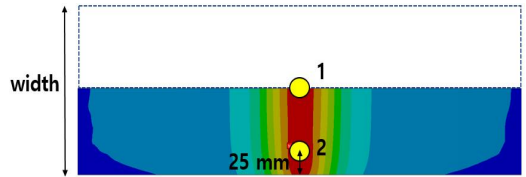


Fig. 8 Measurement point with a contact thermometer

3.2 실험 결과

접촉식 온도계를 사용하여 측정한 유리의 중심부와 폭 방향의 바깥 면의 온도는 Table 5와 같다. 측정 결과를 보면 유리의 폭 방향의 가장 바깥 부분에서 중심으로 25 mm 부근인 Fig. 8 2번에서 중심인 1번 부분보다 온도가 더 높은 것을 볼 수 있다. 이는 지면으로부터 6° 각을 갖는 삼각형 금형이 유리의 폭 방향 바깥 부분에 열전달을 수행했다고 볼 수 있다. 접촉식 온도계를 사용하여 측정한 Fig. 8 2번 위치와 FEA를 이용하여 알아낸 같은 위치에서의 온도를 비교하면 Fig. 9와 같다.

Table 5 Temperature in center and side of glass in experiment

Voltage (time)	Center Temperature(°C)	Side Temperature(°C)
80(5min)	122	136
100(5min)	134	150
120(5min)	167	192
140(5min)	187	214
160(5min)	194.5	213
240(5min)	235	261
240(5min)	290	312

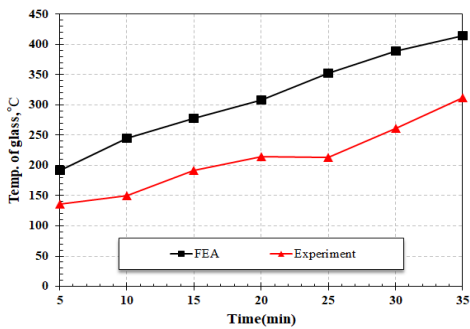


Fig. 9 Comparison of temperature of glass at measurement point No. 2 obtained from experiment with FEA

비접촉식 열화상 카메라로 측정된 지면에서 6° 기울어진 삼각형 금형의 온도 측정 지점은 Fig. 10의 두 위치와 같고, Fig. 11은 FEA에서 얻은 같은 지점에서의 금형 온도와 비교한 결과이다. Fig. 11에 사용된 실험을 통해 얻은 금형 온도는 Fig. 10의 두 위치 중 높은 온도를 사용하였다.

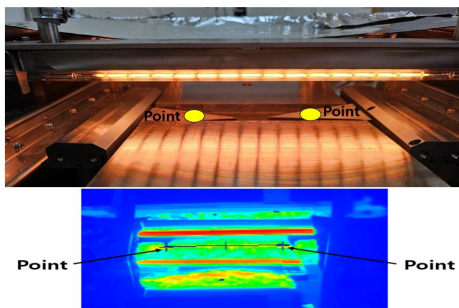


Fig. 10 Mold temperature measurement point using thermal imaging camera

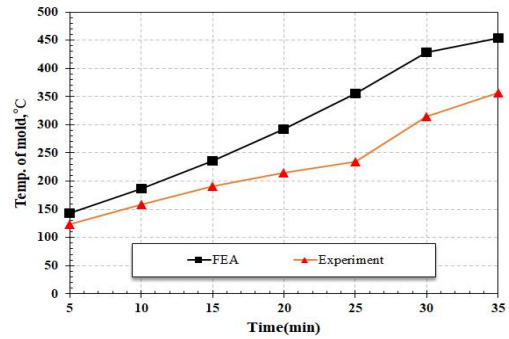


Fig. 11 Comparison of 6° tilted triangle mold temperature obtained from experiment with FEA

Fig. 9와 Fig. 11의 결과를 보면 FEA에서의 온도와 실험에서 측정된 온도는 유사한 경향성을 보이지만 전체적으로 FEA에서 얻은 온도가 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 해석에서의 정지 대류 환경보다 실제 실험 환경에서의 대류로 인한 외부로의 열 손실이 더 많았음을 알 수 있다. Fig. 9에 비해 Fig. 11의 초기 성형 시간에서의 온도차가 적은 것은 금형이 실험의 재현성과 유리의 파손을 예방하기 위해 100°C로 예열되어 성형이 진행되어 유리에 비해 상대적으로 초기에 온도차가 적은 것을 알 수 있다.

최종적으로 열 성형 공정이 끝난 곡면유리는 Fig. 12와 같다. NIR 램프로 가열된 유리의 바깥 부분의 열 손실을 방지하여 뒤틀림이나 들뜸 없이 휨 각을 2.5° 얻어낸 것을 볼 수 있었다.

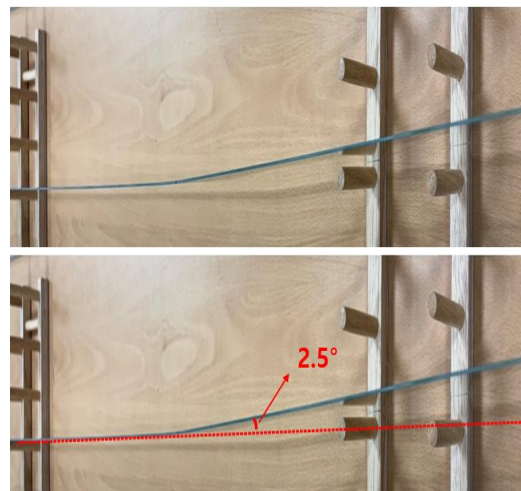


Fig. 12 Curved glass obtained through the thermal molding process using self-weight

5. 결론

본 연구에서는 커브드 디스플레이이용 곡면 유리를 직접적인 압력을 가하지 않고 자중에 의한 처짐 방식을 이용하여 열 성형 공정을 설계하였고, 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 이용하여 열원과 가까운 가열부의 금형의 형상이 유리의 온도분포에 미치는 영향을 알아내어 유리의 온도분포를 균일하게 하는 금형의 형상을 찾아내었다. 그 후 FEA와 같은 조건으로 실제 실험을 진행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 가열 부분 금형에 추가적으로 금형을 부착하지 않은 기본 열 성형 시스템을 이용하여 NIR 램프로 유리를 가열했을 때 유리의 바깥 부분에 열이 손실되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 예방하기 위해 기본 금형에 추가적으로 직사각형, 삼각형 단면의 금형을 부착하여 FEA를 진행하였다. 그 결과 지면으로부터 6° 각을 갖는 삼각형 단면의 금형을 사용하였을 때, 유리의 최고온도와 가장 바깥 부분의 온도의 차이가 21.66°C로 다른 금형 형상들 보다 온도차가 작은 것을 알 수 있었다. 또한 폭 방향으로 온도분포가 일정한 구간을 가장 길게 갖는 것을 알 수 있었다.
- 2) FEA 결과를 토대로 실제 실험 시스템을 구성하여 진행 한 결과 지면으로부터 6° 각을 갖는 삼각형 금형을 사용하였을 때, 실제 유리 바깥 부분의 열 손실이 최소화 되는 것을 확인하였으며 본 열 성형 공정 시스템을 통해 얻어낸 곡면유리의 형상이 뒤틀림이나 들뜸이 없는 것을 확인하였다.
- 3) 결론적으로 자중을 이용한 곡면유리 열 성형 공정에서 최종 형상의 품질에 주요한 인자인 유리의 폭 방향 온도 분포를 균일하게 하기 위한 금형의 형상을 찾을 수 있었고, 이를 통해 자중을 이용한 커브드 디스플레이이용 곡면유리 열 성형 공정 기술을 확립할 수 있었다

추후 연구를 통해 우리가 가진 비선형 점탄성 특성을 고려하여, 열 구조 해석을 통한 목표로 하는

곡면유리의 최종 휨 각, 변형을 예측하고자 한다. 이를 통해 목표로 하는 최종 형상을 위한 공정 조건을 예측하고, 실제 공정에 적용시킨다면 곡면유리 열 성형 공정 기술을 발전시킬 수 있을 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 기계·장비산업기술개발사업 중 ‘곡면 멀티 디스플레이 상압 본딩 능동화 장비 개발 및 실증(KM230303, 20023669)’과제의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌

- 1) Tamada, M., Mishiro, H., and Kobune, S., “Technology trend of cover glass for automotive displays” In 2019 26th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices, Vol. 26, pp. 1-4, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.23919/AM-FPD.2019.8830559>
- 2) Yoon, H. W., Lee, C. K., “A study on the springback analysis of a curve monitor using a 3D scanner” Design & Manufacturing, Vol. 12, pp. 13-18, 2018.
- 3) He, W., Chen, Z., Ming, W. et al. Multi-objective optimization of glass multi-station bending machining for smartphone curved screen. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 41, 476, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1985-3>
- 4) Park, J., Chang, S., Lee, D., Lee, H., Kang, B. and Kim, J., “Two-Step Glass Molding Process for Forming Glass Edges with Obtuse Angles for Mobile Displays”, Micromachines, Vol. 13, 1032, 2022,
DOI: <https://doi.org/10.3390/mi13071032>
- 5) Feldmann, M., Kasper, R., Bucak, Ö., Illguth, M., and Bues, M. "Curved Glass - Quality and Application." Challenging Glass Conference Proceedings. Vol. 2. pp. 543-552, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.7480/cgc.2.2353>
- 6) Su, L., He, P., and Allen, Y. Y., “Investigation of glass thickness effect on thermal slumping by

- experimental and numerical methods”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, Issue 12, pp. 1995-2003, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.06.020>.
- 7) Koide, M., and Matusita, K., "Delayed elasticity in relaxation process of glasses far below the glass transition temperature", Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol. 106, No. 1231, pp. 260-264, 1998.
DOI: <https://doi.org/10.2109/jcersj.106.260>
- 8) Yan, J., Zhou, T., Masuda, J., and Kuriyagawa, T., "Modeling high-temperature glass molding process by coupling heat transfer and viscous deformation analysis”, Precision Engineering, Vol. 33, Issue 2, pp. 150-159, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.05.005>
- 9) Kwak, Y. S., Han, S. R., "A study on a transcription of pattern of glass fiber reinforced laptom computer cover surface”, Design & Manufacturing, Vol. 10, pp. 39-45, 2016.
- 10) Le Corre, B., Collin, A., Soudre-Bau, L., Meshaka, Y., and Jeandel, G. "Glass sagging simulation with improved calculation of radiative heat transfer by the optimized reciprocity Monte Carlo method”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 70, pp. 215-223, 2014.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.068>.
- 11) Buonanno, G., Dell’Isola, M., Frattolillo, A., and Giovinco, G., "Thermal analysis of a glass bending process”, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, Issues 14 - 15, pp. 2108-2121, 2005.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.01.008>

저자 소개

이 광 호 (Kwang-Ho Lee)



- 2024년 2월: 한국교통대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2024년 3월~현재: 고려대학교 기계공학과 석사과정
- 2024년 3월~현재: 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소 디지털 생산부문, 근로연수생

< 관심분야 >

정밀가공, 최적설계, CAE

이 동 원 (Dong-Won Lee)

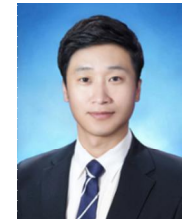


- 2017년 8월: 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 9월~현재: 인하대학교 기계공학과 박사과정
- 2015년 3월~현재: 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소 디지털 생산부문, 학연협동과정생

< 관심분야 >

정밀가공, 금형, CAE

김 순 욱 (Soon-Wook Kim)



- 2016년 2월: 울산대학교 물리학과 (이학박사)
- 2019년 3월~2022년 2월: 에드파인 테크놀로지 책임연구원
- 2022년 4월~현재: 국민대학교 연구교수

< 관심분야 >

레이저 공학, 기능성 표면가공, 나노·마이크로 구조제어

김 종 수 (Jong-Su Kim)



- 2012년 2월: KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2012년 3월~2019년 1월: 삼성전자 MASK 개발팀, 책임연구원
- 2019년 1월~현재: 한국생산기술연구원, 지능화뿌리기술연구소, 디지털 생산부문, 수석연구원

< 관심분야 >

정밀가공, 금형, 자동화