

방수 커넥터용 LSR Seal의 균일 경화를 위한 사출 금형 히터의 최적 설계

송민재¹, 차백순², 홍석관², 고영배^{*}
¹맥소프트(주) 기술연구소, ²한국생산기술연구원 금형기술그룹

Optimum design of injection mold heater for uniform curing of LSR seal for waterproof connector

Min-Jae Song¹, Baeg-Soon Cha², Seok-Kwan Hong², Young-Bae Ko^{*}

¹Technical R&D Center, MAXOFT Inc.

²Molds & Dies Technology R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology

요약 자동차용 방수커넥터는 외부로부터 방수가 필요한 전장부품인 와이어 하네스(Wire Harness)에 연결되어 있는 핵심 기능부품이며 특히 와이어셀(Wire Seal) 부품은 고온, 다습, 저온, 먼지, 약품 등의 복합적 환경에서도 체결부 기밀성이 확보되어야 한다. 이러한 와이어셀은 최근 기존의 고상실리콘고무(Heat Cure Rubber)대신 친환경 소재이며 기계적 특성이 우수한 액상실리콘고무(LSR)를 적용하고 있다. 그리고 LSR용 와이어셀을 액상사출성형(Liquid Injection Molding)공정으로 제조할 경우 고상실리콘고무를 제조 하긴 위한 압축성형방식에 비해 사이클타임이 10배이상 빠르고 스크랩이 발생하지 않아 재료의 손실이 없으며 가류 및 생산을 위한 전후처리 과정이 필요 없기 때문에 원가 절감효과가 큰 이점이 있다. 하지만, 방수커넥터를 제조하기 위한 LSR 다캐비티 사출성형공정에서는 일정한 품질의 제품을 확보하기 위하여 캐비티간 균일한 경화온도를 유지하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 캐비티간 온도 편차를 최소화 하기 위하여 카트리지 히터의 용량을 위치마다 다르게 설계한 후 열전달 해석과 최적화 모듈을 연계하여 최적의 카트리지 히터 용량을 빠르고 효율적으로 도출하였다. 최적화 해석 결과 일정한 히터 용량을 적용한 경우에 비하여 캐비티간 온도 편차는 13.1℃에서 8.1℃로 감소 시켜 균일 경화를 위한 온도 편차 10℃ 이내인 설계 기준을 만족시킬 수 있었다.

Abstract Automotive waterproof connectors are highly functional parts that must be air-tight in a complex environment. In the LSR multi-cavity injection molding process for manufacturing waterproof connectors, it is important to maintain a uniform curing temperature between the cavities in order to obtain a quality product. For this purpose, we designed the capacity of the cartridge heater differently for each position, and then linked the heat transfer analysis and optimization module to obtain the optimal cartridge heater capacity. As a result of the optimization analysis, the temperature deviation between cavities was decreased from 13.1℃ to 8.1℃ compared with the case in which constant heater capacity was applied, so that the design criterion could be satisfied within a temperature deviation of 10℃ for uniform curing. This study suggests that this method can be applied efficiently to the design of a large area multi-cavity LSR mold heater.

Keywords : Cartridge heater, Heat transfer analysis, Injection molding, LSR(liquid silicone rubber), Optimization, Waterproof connector

*Corresponding Author : Young-Bae Ko(KITECH)

Tel: +82-32-850-0321 email: kaiser74@kitech.re.kr

Received May 11, 2017

Revised July 6, 2017

Accepted July 7, 2017

Published July 31, 2017

1. 서론

자동차용 방수커넥터는 외부로부터 방수가 필요한 전장부품인 와이어 하네스(Wire Harness)에 연결되어 있는 핵심 기능부품이며 특히, Fig.1의 와이어씰(Wire Seal) 부품은 고온, 다습, 저온, 먼지, 약품 등의 복합적 환경에서도 체결부 기밀성이 확보되어야 한다. 이러한 와이어씰은 최근 기존의 고상실리콘고무(Heat Cure Rubber)대신 친환경 소재이며 기계적 특성이 우수한 액상실리콘고무(LSR)를 적용하고 있다. 그리고 LSR용 와이어씰을 액상사출성형(Liquid Injection Molding)공정으로 제조할 경우 고상실리콘고무를 제조하기 위한 압축성형방식에 비해 사이클타임이 10배 이상 빠르고 스크랩이 발생하지 않아 재료의 손실이 없으며 가류 및 생산을 위한 전후처리 과정이 필요 없기 때문에 원가 절감효과가 큰 이점이 있다[1]. 이러한 LSR은 열경화성 수지로서 금형에 약 200℃ 이상의 고열을 가하는 경화공정을 거쳐야만 제품을 성형할 수 있다. 그런데 생산성 향상을 위해 다수의 캐비티로 성형할 경우 위치에 따른 금형의 온도 편차가 심하여 캐비티간 균일한 경화가 되지 않을 가능성이 크며 제품간의 불균일한 기계적 성질로 품질이 일정하지 않는 가능성이 크다. 이러한 열경화를 위한 가열장치로 환봉 형태인 카트리지 히터를 금형에 삽입하여 많이 사용하는데 카트리지 히터는 좁은 공간에 많은 열량을 넣을 수 있고 장착이 편리하여 산업 현장에 많이 사용되지만 히터 위치 및 형상에 따라서 금형 온도 편차가 크게 발생하는 단점이 있다. 이러한 금형의 불균일한 온도 분포를 저감하기 위한 연구가 수행되어왔는데, Song 등은[2] CFRP 프리프레그용 열성형 금형에 대하여 삽입된 카트리지 히터의 위치를 변경하면서 온도 편차를 낮추기 위한 방법을 열전달해석으로 분석하였고, Lee [3] 등은 복잡형상 프리프레그 압축성형 금형에 대하여 히터의 길이와 출력을 변경하면서 열전달해석을 수행하여 온도 편차를 줄일 수 있는 요인에 대하여 분석하였다. Seo[4] 등은 미세 패턴을 성형하기 위한 사출 금형에서 상형과 하형의 금형을 온도를 따로 제어하기 위한 온도조절기를 추가하여 온도편차를 낮추었다. Song[5] 등은 LED 렌즈 성형용 대면적 LSR에 압축 성형 금형에 대하여 카트리지 히터와 금형간의 열접촉저항을 실험적으로 구하고 히터의 위치를 변경하면서 온도 편차를 최소화 하는 히터의 위치를 열전달해석으로 분석하였다. 하지만 이러한 방법은 시행착오에 의존하거나 온도 조절을 위한 장

비가 추가되어 시간과 비용이 증가되는 단점이 있다.

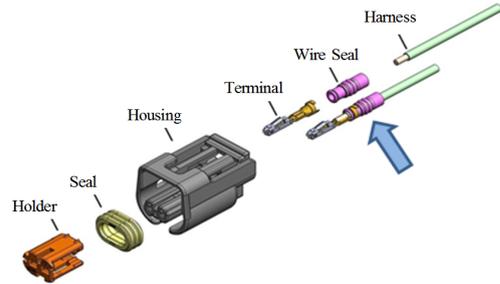


Fig. 1. Waterproof connector for automobile.

본 연구에서는 와이어씰 제조용 LSR 사출 금형의 온도 균일화를 위하여 각 위치마다 카트리지 히터의 용량을 다르게 설계한 후 이를 실험계회법으로 분석하여 최적의 카트리지 히터 용량을 빠르고 효율적으로 찾는 방법을 열전달 해석으로 분석하여 제시하였다.

2. 본론

2.1 와이어씰 제조용 LSR 사출 금형

Fig.2는 해석에 사용된 와이어씰 제조용 128 캐비티 LSR 사출 금형을 나타내었다. 해석 시간 절감을 위하여 1/4 대칭 모델을 사용하였다. LSR 사출 금형은 제품을 경화시키기 위한 히터시스템과 사출 게이트까지 재료의 경화를 방지하기 위한 콜드러너(Cold Runner)시스템이 금형 내부에 있기 때문에 코어가 많고 복잡한 구조를 가지게 된다. 카트리지 히터는 지름10mm 2개와 8mm 4개가 히팅 플레이트에 삽입되며 그 길이는 198mm이다.

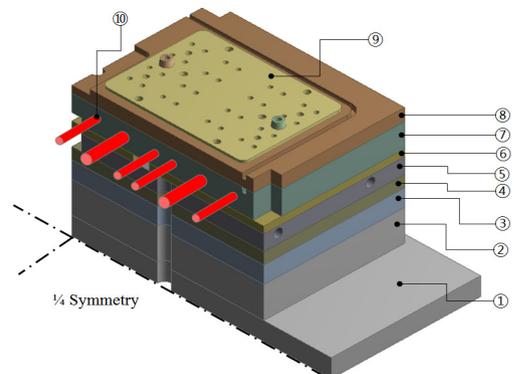


Fig. 2. Symmetry (1/4) model of LSR injection mold for heat transfer analysis.

Table 1은 각 부의 명칭과 사용된 금형강의 종류를 나타내었다.

Table 1. Mold description and materials.

No.	Description	Mold steel
1	Fixed plate 1	NAK80
2	Fixed plate 2	NAK80
3	Fixed plate 3	NAK80
4	Fixed plate 4	NAK80
5	Cooling plate	NAK80
6	Insulation plate	Insulation material
7	Heating plate	NAK80
8	Core pocket plate	NAK80
9	Cavity core plate	SLD MAGIC
10	Catridge heater	Catridge heater

일반적으로 금형의 카트리지 히터는 균일한 간격과 같은 용량으로 설계하는 것이 일반적이다. 먼저 최적화 수행 이전에 균일하게 히터 용량을 적용한 초기 해석을 수행하여 온도 분포를 고찰하였다.

2.2 균일히터 적용 열전달 해석

본 연구에 사용되는 LSR은 215℃가 최적의 경화온도이며 카트리지 히터봉 하나당 94W의 용량을 입력하여 초기 해석을 수행하였다. 요소는 형상에 따라 사면체요소와 육면체요소를 적절히 사용하였으며 총 요소수는 168,944개 절점수는 269,860개이며 정상상태 열전달해석을 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS로 수행하였다. Table 2에 해석에 입력한 금형강 및 단열판의 물성을 정리하였다.

Table 2. Thermal properties of mold steel and insulation plate.

Thermal properties	NAK80	SLD MAGIC	Insulation plate
Specific Heat (J/kg·℃)	481	460	840
Thermal Conductivity (W/m·℃)	40	16.5	0.20
Density (kg/m ³)	7800	7770	1400

분석하고자하는 온도분포 결과는 Fig.2의 core plate의 32개의 캐비티 형상에 대하여 최고온도와 최소온도 분포를 비교하였다. Fig.3은 6개 히터에 대하여 같은 값의 히터용량을 적용한 32개 캐비티의 온도 분포를 나타낸 것이다. 최고온도는 222.9℃로서 좌측 하단 중심부에

서 나타났으며 최저온도는 209.8℃ 우측 외곽부에서 발생하였다. 이는 외곽부가 자연대류에 의한 열손실이 중심보다 크기 때문에 발생하는 결과이다. 이때 온도차이는 13.1℃로 온도 편차는 10℃이상 발생하였다.

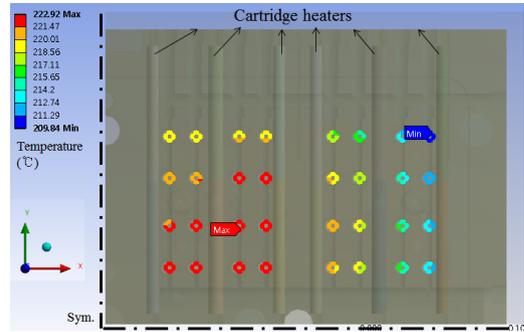


Fig. 3. Temperature distribution of cavities.

Fig.4는 캐비티를 포함한 캐비티 코어 플레이트의 전체 온도분포이다. 온도 분포는 코어 플레이트 좌측 하단을 중심으로 낮아지는 경향이 뚜렷이 나타난다. 이때 최고온도는 223.4℃, 최소온도는 207.5℃로 온도 편차는 15.9℃로 크게 발생하였다. 이러한 좌측 하단부와 우측 외곽부의 온도 편차를 최소화하기 위한 방법으로 히터 위치에 따라 히터의 용량을 변화시켜 최적의 히터를 설계하고자 하는 방법으로 열전달해석을 진행하였다.

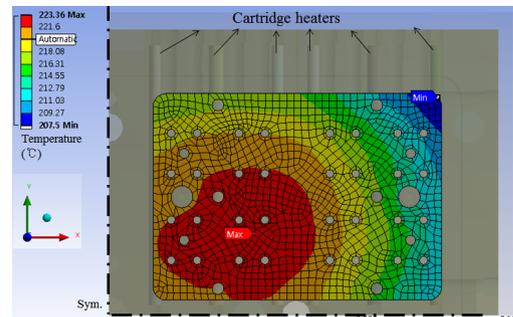


Fig. 4. Temperature distribution of cavity core.

2.3 최적화 열전달 해석

카트리지 히터는 내부의 니크롬선을 감는 횟수에 따라서 히터 용량이 결정된다. 따라서 하나의 히터봉에서 권선비율을 다르게 적용하여 히터 용량을 다르게 할 수 있다. 따라서 fig.5와 같이 히터봉 하나당 2개의 영역으로 나누어 총 12개의 히터 용량을 다르게 적용하였다.

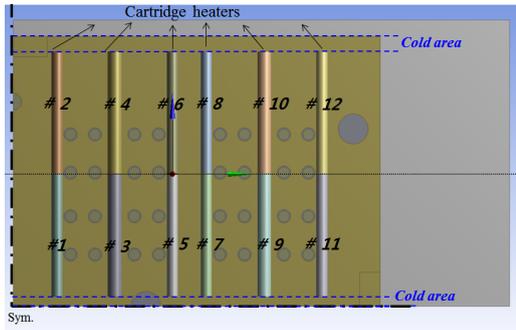


Fig. 5. Cartridge heaters with different watt density.

이러한 12개의 히터로 온도 편차를 최소로 하기위한 최적의 히터 용량을 구하기 위해 실험 계획법을 수행하였다. 우선 초기해석결과와 Table 3에 정리한 카트리지 설계 가이드를 참조로 하여 1개의 히터 용량은 30~60W의 4수준으로 설정하였다. 최적화 방법은 ANSYS DesignXplorer의 Shifted- Hammersley Sampling 방법을 사용하여 300개의 샘플에 대한 정상상태 열전달 해석을 순차적으로 수행하여 최적의 3후보를 도출하도록 하였다. 이때 구속 조건은 식 (1)과 같다.

Table 3. Design guide for cartridge heater.

Heater diameter (per 1mm)	Heater length (per 1mm)	Watt (per 10W)	Wiring ratio (per 0.1)	Watt density (W/cm ²)
8	100~400	100~1100	1.0~2.0	2~15
10		100~1600		

$$f_{\text{optimization}} = \text{minimum}(\Delta T) \quad \text{subject to } 210^{\circ}\text{C} \leq T \leq 220^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

여기서, T는 경화온도이다.

위와 같이 최적 해석을 수행하여 Table 4와 같이 최적화 된 히터 용량을 구할 수 있었다. fig. 6은 최적 히터 용량을 적용하였을 때 나타난 온도 분포이다. 최고 온도는 220℃, 최저온도는 211.9℃로 온도 편차는 8.1℃로 초기해석결과인 13.1℃보다 5℃정도 감소한 것을 확인할 수 있었다.

Table 4. Optimal design of cartridge heaters for uniform temperature

Heater No.	Watt
1	40
2	30
3	40
4	50
5	30
6	40
7	50
8	50
9	60
10	60
11	60
12	50

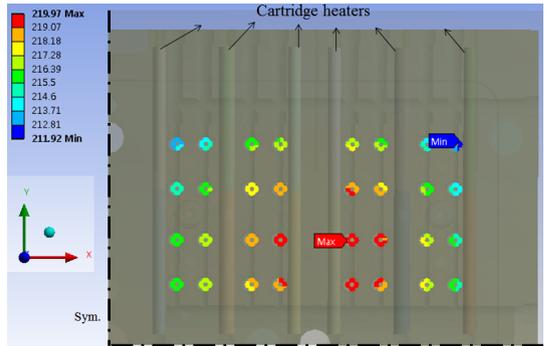


Fig. 6. Temperature distribution of cavities.

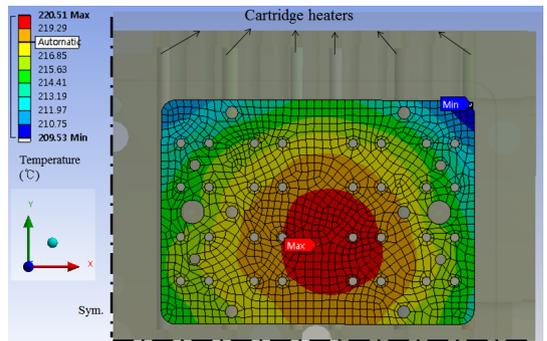


Fig. 7. Temperature distribution of cavity core.

Fig.7은 캐비티를 포함한 캐비티 코어 플레이트의 전체 온도분포이다. 온도 분포는 코어 플레이트 가운데를 중심으로 낮아지는 경향이 나타났다. 이때 최고온도는 220.5℃, 최소온도는 209.5℃로 온도 편차는 11℃로 크게 발생하였다. 초기해석결과인 15.9℃보다 4.9℃정도 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 히터 용량이 일정한 초기 해석보다 최적화 해석에서는 Table 4에서 알 수

있는 바와 같이 히터 외곽부의 용량을 중심보다 20~30%정도 증가시켰기 때문에 외곽부의 열손실을 보완하였다고 판단된다. 이같이 열전달 해석과 최적화 모듈을 연계하면 본 연구와 같이 많은 인자와 수준에 대한 모델에 대한 분석을 효율적으로 적용할 수 있다고 판단된다.

2.4 과도 열전달 해석

최적화 해석은 정상상태 열전달해석을 수행하였기 때문에 이 히터 용량을 그대로 현장에 적용하면 상온에서 경화온도로 급형을 가열시키는데 많은 시간이 소요되게 된다. 따라서 Table 3의 최대 watt 설계값을 참조하여 Table 4의 최적값을 최대 5배로 적용하고 경화온도에 도달하면 다시 원래의 값으로 적용하는 방식으로 과도상태 열전달해석을 수행하였다. 즉, Fig. 8과 같이 12분까지 5배의 히터 용량을 적용하고 그 후 정상상태 히터 용량을 적용하였다.

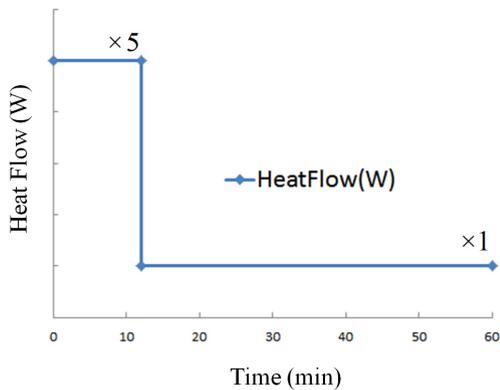


Fig. 8. Input value of heat flow for transient analysis.

Fig. 9는 과도해석을 수행하여 32개 캐비티중 최고온도의 캐비티와 최저온도의 캐비티를 시간에 따라서 나타낸 것이다. 초기 5배의 히터용량을 주었을때 약 15분 정도까지 온도가 급격히 상승하지만 22분후부터는 목표하고자 하는 경화온도에 도달하며 60분까지 정상상태를 유지하는 것을 알 수 있다. 따라서 실제에서도 히터의 제어장치를 Fig. 8과 같이 시간에 따른 입력값을 주면 급형 온도제어를 빠르고 효율적으로 적용 가능할 수 있다고 판단된다.

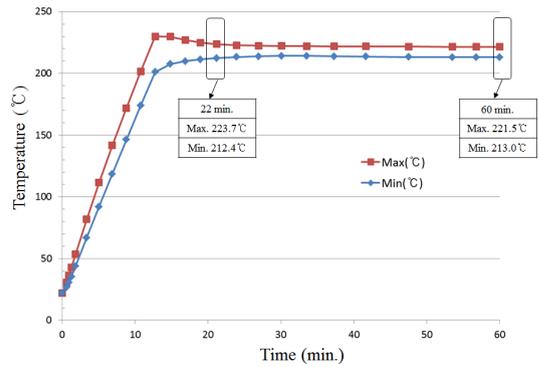


Fig. 9. Temperature plot for transient analysis.

3. 결론

자동차용 방수 커넥터 제조용 LSR 사출성형공정에서 캐비티간 균일한 경화온도를 얻기 위하여 급형 카트리지지 히터의 최적 설계를 수행하였다.

- (1) 카트리지지 히터의 용량을 위치마다 다르게 설계한 후 열전달 해석과 최적화 모듈을 연계하여 최적의 카트리지지 히터 용량을 빠르고 효율적으로 도출하였다.
- (2) 최적화 해석결과 일정한 히터 용량을 적용한 경우에 비하여 캐비티간 온도 편차는 13.1°C에서 8.1°C로 감소 시켜 균일 경화를 위한 온도 편차 10°C 이내인 설계 기준을 만족시킬 수 있었다.
- (3) 본 연구에 나온 결과를 바탕으로 실제 카트리지지 히터를 제작하여 LSR 사출 급형에 삽입하여 실험을 수행하고 이를 비교할 예정이다.
- (4) 본 연구는 대면적 다캐비티 LSR 급형 히터 설계에 효과적인 방법을 제시할 수 있다고 판단된다.

References

[1] Haberstroh, E., Michaeli, W., Henze, E., "Simulation of the Filling and Curing Phase in Injection Molding of Liquid Silicone Rubber (LSR)" J. Reinf. Plast. Comp. 21, pp. 461-470, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1177/073168440201005476>

[2] M. J. Song, S. K. Hong, Y. B. Ko, J. Y. Choi, E. A. Kim, "A Study on the Design of Mold Heaters for CFRP Thermoforming" Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference Mold Symposium, pp. 20-25, Aug. 2015.

- [3] S. G. Lee, S. T. Won, Y. B. Ko, G. S. Yoon, J. D. Kim, Y. M. Heo, D. E. kim, "Analysis of Key Parameters for Temperature Uniformity Control of the Prepreg Compression Molding Dies" Korean Society Of Precision Engineering 2016 Spring Conference, pp. 521-522, 2016.
- [4] J. W. Seo, D. S. Park, S. H. Park, Y. E. Yook, S. K. Kim, T. J. Je, D. S. Choi, "Study on the Micro Pattern Replication and the mold Temperature in Injection Molding" Korean Society Of Precision Engineering 2009 Spring Conference, pp. 901-902, 2009.
- [5] M. J. Song, K. H. Kim, S. K. Hong, J. W. Lee, J. Y. Park, G. S. Yoon, H. K. Kim, "Simulation-Based Optimization of Cure Cycle of Large Area Compression Molding for LED Silicone Lens" Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2015, 1-11, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/573076>

홍 석 관(Seok-Kwan Hong)

[정회원]



- 2004년 2월 : 강원대학교 기계공학과(공학석사)
- 2015년 8월 : 단국대학교 기계공학과(공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 연구원

<관심분야>

연성해석(CAE), 프레스/사출 금형/공정 해석(CAE), 마이크로/나노 금형/성형

송 민 재(Min-Jae Song)

[정회원]



- 2005년 8월 : 한양대학교 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 고려대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 9월 ~ 2017년 2월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2006년 3월 ~ 현재 : 맥소프트(주) 책임연구원

<관심분야>

CAE 해석, 열/유동/구조 해석

고 영 배(Young-Bae Ko)

[정회원]



- 2001년 8월 : 홍익대학교 기계공학과(공학석사)
- 2003년 5월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 수석연구원

<관심분야>

사출성형, 열/구조 해석, 실리콘 성형

차 백 순(Baeg-Soon Cha)

[정회원]



- 1991년 12월 : 독일 브라운슈바이크 공대 기계공학과 (한국학석사)
- 1996년 11월 : 독일 브라운슈바이크 공대 기계공학과 (한국학박사)
- 1999년 10월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 수석연구원

<관심분야>

생산기술, 금형/성형