

사출금형 냉각회로 자동최적화를 위한 설계변수 감소 방안

이병옥*, 최재혁⁺, 태준성⁺
(논문접수일 2009. 7. 6 심사완료일 2009. 8. 5)

Reduction of Design Variables for Automated Optimization of Injection Mold Cooling Circuit

B. O. Rhee*, J. H. Choi⁺, J. S. Tae⁺

Abstract

The injection mold cooling circuit optimization was studied with a response surface method in the previous research. It took so much time to find an optimum solution for a large product due to an extensive amount of calculation time for the CAE analysis. In order to use the optimization technique in the actual design process, the calculation time should be much reduced. In this study, we tried to reduce the number of design variables with the concept of the close relationship between the depth and the distance of cooling channel. The optimum ratio of the distance to the depth of cooling channels for a 2-dimensional problem was 2.0 so that the optimum ratio was again sought out for 4 large automotive parts. Therefore, the number of design variables for the cooling circuit optimization can be reduced in half, resulting in much faster running time for the optimization as a design tool.

Key Words : Injection mold cooling circuit(사출금형 냉각회로), Cooling channel(냉각관), Optimization(최적화)

1. 서론

사출성형에서 냉각단계는 사출성형을 충전/보압/냉각 3단계로 구분하였을 시에 가장 긴 공정 시간을 차지한다. 냉각 단계에서 소모되는 시간을 단축시킬 수 있다면 사출성형으로 생산되는 제품의 생산 시간을 단축시키는 효과를 볼 수 있으나 플라스틱 제품은 용융된 수지가 고화되는데 일정 시

간이 소모되어 무작정 단축시킬 수 없으므로 최소한의 값을 찾는 것이 중요하다.

냉각시간은 일반적으로 제품 두께를 기준으로 계산된다. Xanthos⁽¹⁾는 냉각단계를 3단계로 구분하여 냉각시간을 예측했고 Menges⁽²⁾는 금형벽면과 제품표면간의 온도구배를 이용하여 냉각시간을 예측했다. 이와 같이 계산되는 냉각시간은 고정된 값으로써 제어를 할 수 없는 인자이다. 계산에

* 아주대학교 기계공학과 (rhex@ajou.ac.kr)
주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산 5번지 아주대학교
⁺ 아주대 기계공학과

서 예측한 냉각시간을 실제 금형에서 구현하려면 제품 전체의 냉각시간이 동일할 수 있도록 균일한 냉각이 이루어질 수 있는 효율적인 냉각관 배치가 매우 중요하다.

Liang⁽³⁾은 효율적인 냉각관의 배치를 위해 9 개의 관계 방정식을 만든 후 계산을 수행함으로써 효율적인 냉각관 배치를 실시하였다. Tang⁽⁴⁾은 복수 캐비티 금형에서 냉각관을 자동적으로 최적화 시켜 균등한 온도 분포를 구하는 방법을 연구했다. Huang⁽⁵⁾도 Tang⁽⁴⁾과 유사한 방식을 사용해 효율적인 냉각관의 배치를 시도했으나 단일 캐비티에 대해 적용시켰다는 것이 다른 점이다.

이상의 연구⁽³⁻⁵⁾에서는 모두 배플관의 영향은 고려하지 않았으며 배플관에 의존한 냉각을 하는 대형사출제품의 냉각 해석에 위와 같은 방식들을 적용시키기에는 적합하지 않다. 장형건⁽⁶⁾은 이러한 단점을 보완하여 배플관을 고려한 상황에서 균등한 온도 분포를 자동적으로 얻는 방법을 연구했다. 정현우⁽⁷⁾는 장형건⁽⁶⁾의 연구에 추가로 제품의 평균온도를 목표하는 온도에 맞추는 방법에 대해 연구를 했다. 기존의 연구^(6,7)에 의해 자동 최적화된 금형 냉각회로는 이미 실제 제품에 적용한 후 실험을 통해 그 효과가 입증된 상태이지만 해당 업체의 보안상 이에 대한 구체적인 자료를 발표하지 못한 상태이다.

장형건과 정현우의 연구에서 균등한 온도 분포를 얻기 위해 4개의 설계변수를 가지고 반응표면법을 적용하여 총 26 회의 해석을 수행 후 최적화 된 값을 찾아냈다. 일반적으로 자동차 범퍼 혹은 인스트루먼트 패널과 같은 대형사출제품의 냉각해석은 1회 해석에 약 1시간이 소모되므로 장형건과 정현우의 방식을 이용하면 총 26시간이 걸린다. 균일한 금형냉각을 위한 최적 냉각회로 설계 프로그램은 제품설계 단계에서 주어진 제품설계에 따른 최적의 냉각회로를 신속하게 생성하기 위한 설계도로 사용되는데, 26시간은 설계도로 사용하기에는 비현실적인 시간이다. 따라서 유용한 설계도로 사용될 수 있기 위해서는 해석 시간의 단축이 필요한 상황이다.

본 연구에서는 장형건과 정현우의 방법을 이용하여 금형의 냉각회로를 자동으로 최적화 시키는 프로그램을 개발함에 있어 해석 시간을 단축시키기 위한 방법으로서 설계변수를 감소할 수 있는 방안을 모색하기 위한 방법을 연구하였다. 현재 사용되고 있는 4개의 설계변수인 냉각관의 깊이와 간격 그리고 배플관의 깊이와 간격의 관계를 살피고 냉각관과 배플관의 깊이와 간격 간의 관련성을 밝혀 설계변수를 감소할 수 있는 근거를 모색하였다.

2. 설계변수 감소의 방안

2.1 냉각관 간격과 깊이의 연관성

Liang⁽³⁾은 냉각회로의 최적화를 수행하기 위해 5개의 변수를 가지고 9개의 비선형 방정식을 구성하여 이것의 해를 구했는데, 냉각관의 깊이와 간격이 직경의 2배일 때 냉각 시간이 극대화 된다고 주장했다. 이것은 냉각관의 깊이와 간격의 비에는 1:1이라는 일정한 비율이 존재한다고 볼 수 있다.

Menges⁽²⁾도 이와 비슷한 개념을 제시했다. 금형 자체를 하나의 열교환기로 보고 용융된 수지에서 냉각관이 흡수하는 일정한 열량이 구해지면 냉각관의 깊이와 간격에는 추천되는 일정한 범위가 존재하여 그것을 바탕으로 냉각관을 설치하도록 했다.

Liang과 Menges의 내용을 바탕으로 설계변수의 감소를 위한 개선 방안을 생각할 수 있다. 선행연구^(6,7)에서 정의한 냉각관의 깊이와 간격, 배플관의 깊이와 간격 중 각각의 깊이와 간격이 일정한 비율을 가질 수 있다면 전체적으로 설계변수를 2개로 줄일 수 있을 것으로 예상하였다. 이를 위해 본 연구에서는 깊이와 간격간의 일정한 비율이 존재한다고 가정하고 냉각관이 깊이에 대한 간격의 비를 채널비, 배플관의 깊이에 대한 간격의 비를 배플비로 정의하여 2개의 설계변수로서 최적화를 실시하여 그 결과를 분석하였다.

이와 같은 방식의 검증을 위해 간단한 평판 모델을 대상으로 채널비의 개념을 적용시켰다.

냉각관의 깊이를 A, 냉각관의 간격을 B라고 정의했다. 해석에 사용된 프로그램은 Autodesk의 MPI 6.2이며 해석에 사용된 조건은 다음과 같다. 해석은 Table 1에 나타나 있듯이 총 27회가 수행되었다.

해석결과 냉각관 직경에 무관하게 깊이에 대한 간격의 비가 1:2일 때 온도 편차가 가장 낮고 평균 온도도 가장 낮은 것이 확인 되었다. 이것으로 냉각관의 깊이와 간격 사이에는 냉각효율이 극대화 되는 일정한 비율이 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.

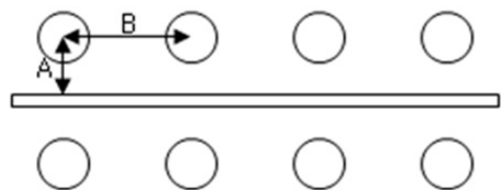


Fig. 1 Simple plane model

Table 1 Conditions of the analysis for the simple plane model

Diameter (mm)	Depth (mm)	Distance (mm)
20	20	40, 60, 80
	40	40, 60, 80
	60	40, 60, 80
25	25	50, 75, 100
	50	50, 75, 100
	75	50, 75, 100
30	30	60, 90, 120
	60	60, 90, 120
	90	60, 90, 120

배플관의 경우 평판 위에서의 영향도가 크지 않을 것이라고 판단하여 위와 같은 테스트를 수행할 수 없었으나 위의 개념이 배플관 설치에도 그대로 적용이 된다고 가정하였다. 제품면을 향하는 배플관 끝집이 냉각을 수행하는 하나의 요소로 본다면 냉각관에서 적용되는 개념이 배플관의 설치에도 그대로 적용된다고 판단하였다.

2.2 사출성형 CAE를 사용한 냉각해석

냉각해석에 앞서 사출성형제품의 최소 냉각시간을 예측하기 위해 Xanthos⁽¹⁾의 논문에서 제시한 냉각시간을 기준으로 하였다. 해석에 사용된 모델은 총 4가지였으며 각각의 모델에 대해 계산된 냉각시간은 다음과 같다. 실제 모델을 제공한 업체의 보안문제상 모델의 이름은 표시하지 않고 단순히 A, B, C, D라고 지칭하였다.

해석에 사용된 최적화 방식은 반응표면법⁽⁸⁾을 통한 최적화 방식을 택했으며 반응표면을 만들기 위한 측정점 추출을 위해서 면중심합성법⁽⁸⁾을 선택했다. 반응표면법을 이용한 최적화 방식이란, 최적화 대상 시스템에 대한 명확한 수학적 함수가 없이 수치해석적인 방법을 이용하여 최적화를 진행하는 경우 해당 시스템의 거동을 연속적인 함수 형태인 반응표면함수로 모델링을 한 후 모델링된 반응표면함수에 대해 최적해를 구하는 방법이다. 반응표면을 만들기 위해서 최적화 대상 시스템의 거동을 알아보기 위해 다양한 조건에서의 시스템 반응을 찾아내고 이를 근거로 회귀분석을 한 후 반응표면을 만든다. 회귀분석에 필요한 자료를 선정할 때 가능한 작은 자료수로서 보다 충실한 반응표면함수를 만들기 위해

Table 2 Cooling time calculation result for 4 products

Product	A	B	C	D
Maximum Thickness(mm)	3.5	3.7	2.7	3.2
Cooling Time(s)	48.2	53.5	29.7	40.7

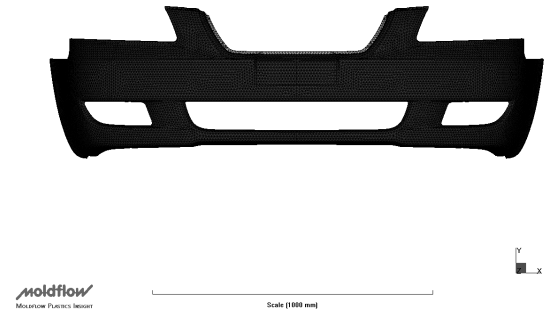


Fig. 2 A model among the parts tested for the optimization

서 실험계획법 중 몇 가지 방법이 사용된다. 그 중 본 연구에서는 면중심합성법을 선택하였다.

이것은 선행연구^(6,7)와 동일한 방식이며 기존 4개 설계변수 3수준일 때는 직교표(Orthogonal Array)의 끝점과 중심점을 이용하여 31회의 해석을 수행하게 되나 직교표의 중심점이 7회가 반복되어 나타므로 6개를 제거하면 25회의 해석이 수행된다. 이 해석을 통하여 최종적으로 최적화된 값이 계산되어 나오면 해석을 1회 더 수행하여 결과 값을 검증하므로 총 26회의 해석이 수행하였다.

설계변수를 2개로 감소시켜 실시한 해석에서도 설계변수 당 3수준을 선정하였으며 이를 위한 직교표(Orthogonal Array)를 사용하면 총 13회의 해석이 요구된다. 그러나 중심점 5개가 반복 되므로 4회를 제거하면 9회의 해석이 수행되고 최적화된 값이 계산되어 나오며 검증을 위한 1회의 해석을 더 수행하여 최종적으로 10회의 해석을 수행하였다. 최적화를 위한 목적함수는 선행연구^(6,7)와 동일하게 평균 온도편차의 최소화로 정의했다.

설계변수인 채널비와 배플비의 범위를 동일하게 2, 3, 4로 설정하였다. 해석에 사용된 냉각관과 배플관의 직경은 일반적인 대형사출금형에 사용되는 30mm를 기준으로 잡았다. 앞에서 언급한 채널비와 배플비는 정확한 치수가 아니라 비율이기 때문에 기준이 되는 깊이를 먼저 정의해야 한다. 적

Table 3 CAE analysis results for various depths of cooling channels and baffle tubes

깊이(mm)	A	B	C	D
30	4.1	3.8	5.3	3.2
40	4.3	4.1	5.5	4.0
50	5.2	4.4	5.8	5.2

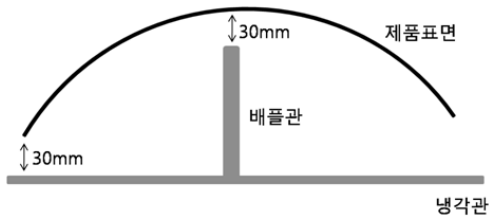


Fig. 3 Schematic of cooling channels and baffle tubes

절한 깊이를 찾기 위해서 4개의 모델에 대해 채널비와 배플비를 2로 고정시킨 채 깊이를 변화 시켜 평균온도편차값이 최소화될 때의 값을 구했다.

냉각관과 배플관의 깊이가 30mm이하에서는 일부 모델에서 냉각해석이 수렴하지 않는 현상이 발생했으나 깊이가 30mm 이상에서는 문제없이 해석이 수행되는 것으로 확인하였다. 따라서 이 문제는 냉각관과 배플관이 제품표면에 너무 근접하여 발생하는 현상이라 간주하고 30mm를 기준으로 40mm, 50mm 3개의 경우에 대해서 냉각해석을 진행하였다.

냉각해석 결과에 의하면 냉각관의 깊이가 30mm일 때 A, B, C, D모델 전부 평균온도편차값이 최소화 되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 최적의 채널비와 배플비를 위한 계산에서는 냉각관의 깊이와 배플관의 깊이 전부 30mm를 기준으로 냉각해석을 수행하였다.

2.3 냉각해석의 결과

4개의 설계변수로 26회의 냉각해석을 수행해서 나온 최적화 값과 2개의 설계변수로 10회의 냉각해석을 수행해서 나온 최적화 값을 각각 Table 4와 Table 5에 나타내었다. 또한 각각의 결과를 Fig. 4에 그래프로 나타내었다. CDS는 냉각관의 간격, CDP는 냉각관의 깊이, BDS는 배플관의 간격, BDP는 배플관의 깊이를 나타내며 Dev. 평균 온도편차를 나타낸다.

Table 5에 나타난 기존 4개의 설계변수로 최적화를 진행한 결과와 Table 4에 나타난 2개의 설계변수로 감소시켜 최

Table 4 CAE analysis results with 2 variables

	CDS (mm)	BDS (mm)	CDP (mm)	BDP (mm)	Dev. (°C)
A	66	60	30	30	4.1
B	120	60	30	30	3.7
C	60	60	30	30	5.3
D	60	60	30	30	3.2

Table 5 CAE analysis results with 4 variables

	CDS (mm)	BDS (mm)	CDP (mm)	BDP (mm)	Dev. (°C)
A	90	60	35	30	4.1
B	120	60	30	30	3.7
C	60	80	90	30	5.4
D	81	90	52	30	4.0

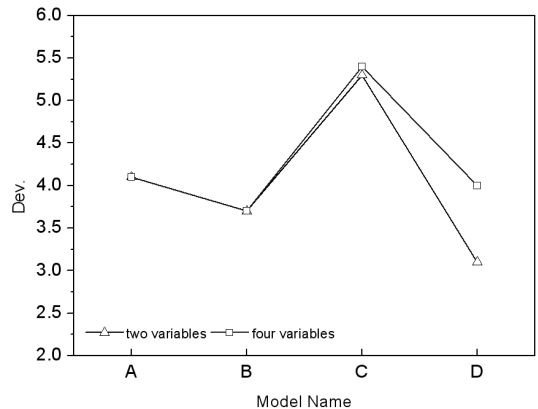


Fig. 4 Comparison of CAE analysis results with 2 and 4 variables

적화를 진행한 결과를 비교하면 평균적으로 차이가 크게 없는 것을 알 수 있다. 모델 A, B, C는 매우 유사한 값을 나타내고 있으나 모델 D에서 최적해의 차이가 나고 있음을 알 수 있다.

앞서 평판 모델의 냉각해석 결과에서 깊이에 대한 간격의 비가 1:2일 때 최적값이 나오는 것을 확인 하였다. 실제 3차원 모델을 이용한 해석 결과에서는 모델 A는 채널비 2.2, 배플비 2, 모델 B는 채널비 4, 배플비 2, 모델 C는 채널비 2, 배플비 2, 모델 D는 채널비 2, 배플비 2로 전반적으로 깊

이에 대한 간격의 비가 모델 B의 채널비를 제외하면 대부분 1:2로 유지되고 있는 것을 확인할 수 있다.

세부적으로 확인해 보면 채널비의 경우 모델 A, B에서는 2의 값보다 약간 큰 값이 나타났다. 이는 최적화에 사용된 대형사출제품의 형상 특징 때문에 냉각관보다는 배플관에 의존하고 있는 점 때문에 나타난 현상이라고 판단된다. 모델 A와 B의 경우 제품면의 굴곡이 커서 냉각관에 의한 냉각보다는 배플관에 의한 냉각효과가 큰 특징이 있었다. 최적해에 대한 채널비의 영향도가 낮고 민감도가 낮아지면 최적값이 다양하게 나타날 수 있다. 냉각관보다는 배플관이 보다 큰 영향도를 가지고 있다는 점은 4가지 모델에 대해 모두 최적 배플비가 2.0으로 나타난 사실에서도 알 수 있다.

채널비가 최적해에 미치는 영향도 확인을 위해서 P-검증이라는 유의성 검증을 시도하였다. P-검증은 설계변수의 결과에 대한 영향도를 수치적으로 확인할 수 있게 해주는데 0.05를 기준으로 이것을 초과한다면 검증에 사용된 설계변수가 결과에 미치는 영향도가 낮다고 판단할 수 있다. 각각의 모델에서 채널비에 대한 P-검증을 시도한 결과 모델 A의 경우 0.37, 모델 B의 경우 0.93으로 채널비는 결과에 미치는 영향도가 매우 낮은 것으로 확인되었다. 따라서 채널비의 경우 2.0의 값이 유지가 되지 않아도 결과에 큰 영향을 미치지 않고 있다는 것을 알 수 있었다.

배플비의 경우 4개 모델 모두에서 2.0이라는 값이 유지하고 있는 것을 확인하였다. 이것은 평판 모델의 냉각해석을 통해 확인하였듯이 깊이에 대한 간격의 비율이 1:2가 될 때 최적화된 값이 나온 것과 동일한 결과를 보여 주고 있었다. 또한 채널비의 경우와 비교하였을 때 깊이에 대한 간격의 비가 결과에 미치는 영향도가 큰 설계변수에서 더욱 확실하게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

Liang⁽³⁾의 연구 결과에서는 냉각관의 깊이에 대한 간격의 비가 1:1일 때 최적의 냉각회로를 얻을 수 있다고 하였다. 이러한 결과는 본 연구 결과와 비교하였을 때 차이가 나는 결과로서, 그 원인을 서로 다른 목적함수에서 비롯된 것으로 판단한다. Liang⁽³⁾의 연구에서 목적함수는 냉각수로의 열전달량이었으며 이를 최대화하도록 냉각회로를 최적화 하였던 점이 본 연구 결과와 다른 결과를 만든 것이라 판단한다.

3. 결론

선행 연구에서는 제품설계 단계에서 설계도구로 활용하기 위해 사출금형의 냉각회로를 자동으로 최적화하는 프로

그램을 개발하였다. 해당 연구의 결과 4개의 설계변수를 사용하고 반응표면법을 사용함으로써 총 26회의 냉각해석을 진행한 후 최적의 냉각회로를 얻었다. 그러나, 현실적인 설계도구로서 활용하기 위해서는 자동최적화를 위한 해석시간이 길다는 문제점이 있었다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 개선하기 위해서 설계변수를 감소하는 방안에 대해 검토하였다. 냉각관의 깊이와 간격은 일정한 관련을 가지고 변한다는 점을 활용하여 설계변수를 줄일 수 있다고 판단하였다. 냉각관의 깊이와 간격의 관련성을 간단한 2차원 설계에 대한 해석을 수행하여 확인하였다. 본 연구에서는 4개의 실제 3차원 모델에 대하여 냉각관의 깊이에 대한 간격의 비, 그리고 배플관의 깊이에 대한 간격의 비를 각각 새로운 설계변수로 정의하고 최적설계를 진행한 결과 대부분의 경우 채널비와 배플비가 2.0일 때 최적값을 가진다는 것을 확인하였다. 이로써 효과적으로 4개의 설계변수를 2개로 감소할 수 있는 가능성을 확인하였다. 2개의 설계변수를 사용한 최적설계에서는 총 10회의 냉각해석을 진행하여 선행연구에서 26회의 냉각해석을 진행한 결과에 비해 약 38%의 시간만을 사용함으로써 해석시간을 획기적으로 감소할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- (1) Zarkdas, D. M. and Xanthos, M., 2003, "Prediction of Cooling time in injection molding," *Advances in Polymer Technology*, Vol. 22, No. 3, pp. 188~208.
- (2) Menges, G., Michaeli, W., and Mohren, P., 2001, *How to make injection molds*, HANSER, Munich, German
- (3) Liang, Ji-Zhao, 2002, "An Optimal Design of Cooling System for Injection Mold," *Polymer-plastics Technology and Engineering*, Vol. 41, No. 2, pp. 261~271.
- (4) Tang, Li Q., Constantin Chassapis, Souran Manoocheri, 1997, "Optimal cooling system for multi-cavity injection molding," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 26, pp. 229~251.
- (5) Huang, Jinhua, Fadel, G. M., 2001, "Bi-Objective

Optimization Design of Heterogeneous Injection Mold Cooling Systems,” *Journal of Mechanical Design*, Vol. 123, pp. 226~239.

- (6) Chang, H. K., 2008, *A Study on automatic optimization of cooling circuit design in injection mold*, M.S. Thesis, Ajou University, Republic of Korea.
- (7) Chung, H. W., 2008, *A Study of automated optimi-*

zation of injection-mold cooling-line design with predefined product temperature, M.S. Thesis, Ajou University, Republic of Korea.

- (8) Montgomery, D. C., 2005, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, U.S.A.