

## 중자조형기의 토치위치 최적화를 위한 열계해석

한근조\*, 안성찬\*\*, 심재준\*\*, 한동섭\*\*

### Thermal System Analysis to Optimize Torch Position in The Core Making Machine.

Geun Jo Han\*, Sung Chan Ahn\*\*, Jae Joon Shim\*\*, and Dong Seop Han\*\*

#### ABSTRACT

The new core making method economizing the amount of core sand has been requested. The new method is that a core box is heated until it reaches reasonable temperature and then core sand with core binder is sprayed into the core box. Since inner temperature distribution have to be uniform in order to form uniform thickness of core, we studied inner temperature distribution of core box.

First, we determined proper number of torches and optimized torch positions to minimize the average of absolute deviation(AVEDEV) of inner temperature. The results are as followed :

1. The number of torches that enables uniform inner temperature distribution about 300°C is 25.
2. When  $S_H$  and  $S_V$  is 0.7, the torch positions are optimized and AVEDEV is 5.85.

**Key Words :** Thermal system analysis (열계해석), FEM (유한요소법), Heat flux (열유속), Conduction (전도), Core (중자), Core box (조형틀), Core sand (주물사), Optimization (최적화)

#### 기호설명

AVEDEV = average of absolute deviation

$l$  = gap between two torches

$S$  = tolerance of the torch position

#### 1. 서론

주물공정에 있어서 중공제품은 주물사로 만든 외형인 몰드(mold)와 내형인 중자(core)를 결합시켜

주물을 부어 제품을 생산해 내게 되는데, 외형인 몰드에 비해 내형인 중자는 강도적인 측면에서 월등해야 하므로 외형에 쓰이는 주물사보다도 훨씬 고온 재료를 사용하여 만들게 되며, 또한 질소 및 점착제 등을 사용하여 제작하는 외형과 달리 내형은 열을 가해 구워내는 중자조형기를 통해 제작하게 된다.

중자로써 사용한 주물사는 외형에 쓰이는 주물사에 비해 고가이며, 재활용이 불가능하다. 따라서 주물사의 양을 줄이면서 강도는 그대로 유지할 수 있는 새로운 중자조형법 개발의 필요성이 대두된다. 본 연구에서는 조형틀 내부의 온도분포를 살펴

2001년 2월 15일 접수

\* 동아대학교 기계산업시스템공학부

\*\* 동아대학교 대학원 기계공학과

두께가 일정한 중자를 제작하는데 중점을 두고자 한다.

두께가 일정한 중자를 제작하기 위해서는 조형틀 내부 표면의 온도분포가 균일해야 하므로 조형틀의 형태에 따라 토치(torch)의 개수 및 위치를 적절하게 결정하여야 한다. 그러기 위해서 우선 토치(torch)의 개수의 증가에 따른 조형틀 내부표면의 온도분포를 살펴 적정 토치 개수를 결정하고, 다음으로 조형틀 내부표면 온도분포의 절대편차평균(AVEDEV)이 가장 작아지는 적정 토치 위치를 유한요소법을 이용한 열해석을 수행하여 결정하고자 한다.<sup>2),5)</sup>

## 2. 유한요소해석

유한요소해석을 위해 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS5.6을 사용하였으며, 열해석을 수행하여 온도분포를 구하고, 열해석에서 얻어진 온도분포를 이용하여 열응력해석을 수행한다.<sup>4),5),6)</sup>

### 2.1 해석모델

조형틀은 중자의 형태에 따라 각각 제작되며, 본 연구에서 사용한 조형틀은 주철(GC 25)을 사용하여 제작하였고, 해석에 필요한 재료특성은 Table 1에 나타내었다.<sup>2)</sup>

조형틀의 크기는 가로 500mm, 세로 390mm, 폭 100mm이며, 내부의 최대 공간은 가로, 세로 모두 300mm, 폭 70mm이다. 조형틀은 한 쌍을 이루며, 그 중 한쪽편의 경우 중앙을 기준으로 좌우 대칭형이므로 전체의 1/4만 해석을 수행한다. 해석에 사용된 요소의 종류는 3자유도를 가진 8절점 brick 요소를 사용하였다. 해석은 열해석을 수행하였으며, modeling에 사용된 총 요소 수는 1602~1904개, 총 절점 수는 2255~2640개이며, 내부 온도분포를 결정하기 위한 조형틀 내부의 절점수는 321~349개이다. 조형틀 전체의 1/4 메쉬된 형상을 Fig. 1에 나타내었다.



Fig. 1 Meshed shape of model.

### 2.2 경계조건 및 하중조건

해석은 열해석과 열해석을 이용한 구조해석의 두가지 단계를 거쳐 수행하게 되며, 조형틀의 경계조건 및 하중조건은 Fig. 2에 나타내었다.

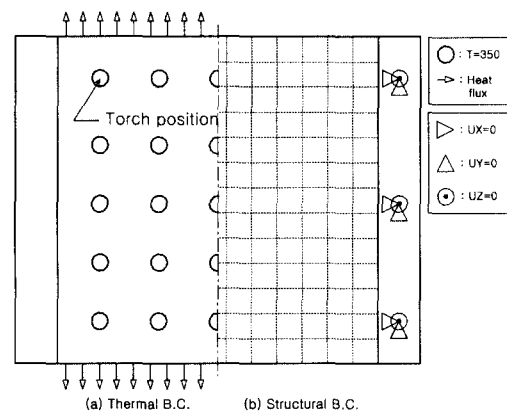


Fig. 2 The boundary condition of model.

각각에 대한 구속조건을 살펴보면, 먼저 열해석

Table 1 Material properties of GC 25.

Specific heat (kJ/kgK)	Density (kg/mm <sup>3</sup> )	Thermal conductivity (W/mmK)	Linear thermal expansion (10 <sup>-6</sup> /K)	Heat convection coefficient (W/mm <sup>2</sup> K)	Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Young' modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	Poisson' ration
0.503	7.32 × 10 <sup>0</sup>	4.28 × 10 <sup>-2</sup>	11.9	5.0 × 10 <sup>-6</sup>	25	1.2 × 10 <sup>4</sup>	0.3

시 토치의 온도는 350℃이고, 조형틀 주위는 대류에 의한 열전달(손실)이 발생하게 된다.<sup>1),3)</sup> 다음으로, 구조해석 시 좌우 edge 부분이 구속되고, 하중은 열해석에 의한 온도분포를 적용한다.

### 3 설계 파라메타 정의

새로운 중자조형법에 있어서 가장 중요한 것은 중앙부(thin)와 외곽부(thick)의 두께가 다른 조형틀의 내부온도가 300℃로 균일해야 한다는 것이다. 열전달에 있어서 온도분포는 전달거리에 따라 달라지게 된다. 만약 토치 위치를 등 분포시킬 경우 중앙부는 두께가 얇으므로 비교적 높은 온도, 외곽부는 두꺼우므로 비교적 낮은 온도의 분포를 나타내게 된다.

따라서 중앙부의 토치 간격보다 외곽부의 토치 간격이 더 조밀하게 구성되어야 한다는 결론에 따라 토치 분포에 관한 일정한 규칙을 갖는 식을 이용하여 300℃를 기준으로 조형틀 내부표면의 온도 절대편차평균이 최소가 되는 적정 토치 위치를 결정한다.

이때, 해석에 필요한 적정 토치 개수를 정하는 과정이 선행되어야 한다. 토치 개수의 증가에 따른 조형틀 내부표면의 온도분포를 살펴보고, 300℃를 기준으로 내부온도 절대편차평균(AVEDEV)이 최소가 되는 토치 개수를 정한다. 여기서, 절대편차평균은 다음 식에 의해 결정된다.

$$AVEDEV = \frac{1}{n} \sum |T - \bar{T}| \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 조형틀 내부의 절점수,  $T$ 는 각 절점에서의 온도,  $\bar{T}$ 는 기준 온도로써 중자를 제작하기 위한 적정온도인 300℃이다.

#### 3.1 토치 개수의 변화

토치가 분포되는 면은 중자조형기 본체에 부착시켜 고정하는 좌우 edge부분을  $\text{한 } 400 \text{ mm} \times 390 \text{ mm}$  으로 정방형에 가깝기 때문에 토치를 가로 세로 같은 수로 분포시켰으며, 토치 간격은 공차  $S$ 가 0인 등분포로서 같게 하고, 토치 개수를 1, 4, 9, 16, 25, 36의 여섯 가지 경우에 대하여 각각 열해석을 수행한다.

#### 3.2 토치 위치의 변화

등 분포 상태에서 최적위치 해석에 필요한 토치 개수가 결정되면, 중앙부에 비해 외곽부의 간격이 조밀하도록 각 토치 사이의 간격을 일정한 규칙을 이용하여 변화시켜 가면서 해석을 수행한다.

##### 3.2.1 토치 위치 결정을 위한 식

각 토치 사이의 간격( $l_n$ )은 등차수열을 이용하여 다음과 같이 얻어진다.

$$l_n = l_0[1 + Sn] , \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

여기서,  $l_0$ 는 초기간격,  $l_n$ 은  $n$ 번째 간격, 공차  $S$ 는 수평( $S_H$ )과 수직( $S_V$ ) 두 가지이며, 0~1까지 0.2 간격으로 각각 여섯 가지 경우에 대하여 해석을 수행한다.

##### 3.2.2 토치 위치 최적화

먼저,  $S_V$ 를 0으로 놓고  $S_H$ 를 0에서 1까지 0.2 간격으로 변화시키고, 같은 방법으로  $S_H$ 를 0으로 놓고  $S_V$ 를 0에서 1까지 0.2간격으로 변화시켜 총 11가지 경우에 대하여 해석을 수행한 후 조형틀 내부온도 절대편차평균이 최소가 되는  $S_H$ 와  $S_V$ 를 결정한다.

다음으로, 위 단계에서 구한  $S_H$ 와  $S_V$ 에 대해 각각  $\pm 0.2$ 의 유효범위 내에서 0.1간격으로 변화시켜 4가지씩 총 16가지 경우에 대하여 재해석을 수행하여 조형틀 내부온도의 절대편차평균이 최소가 되는 토치의 최적위치를 찾는다.<sup>7),8)</sup>

### 4. 해석결과 및 고찰

#### 4.1 토치 개수에 따른 온도분포

토치 개수는 1, 4, 9, 16, 25, 36개의 6가지 경우에 대하여 300℃에 대한 조형틀 내부온도의 절대편차평균(AVEDEV)을 구한 해석결과를 Table 2에 나타내었다.

이 결과를 통해볼 때 토치 개수가 25개 일 때 조형틀 내부온도의 절대편차평균(AVEDEV)이 8.76으로써 가장 작은 값이므로, 최적의 토치 개수는 25개이다.

Table 2 The list result of AVEDEV to torch number.

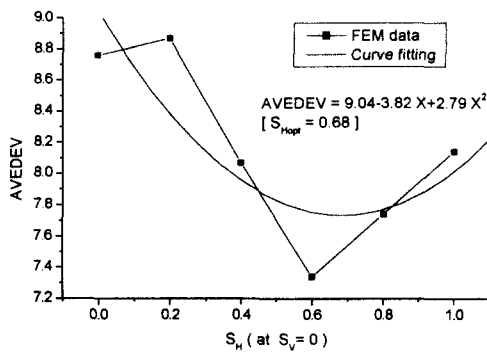
Torch number	AVEDEV
1 × 1	13.28
2 × 2	11.43
3 × 3	10.88
4 × 4	9.70
5 × 5	8.76
6 × 6	9.39

4.2 토치 위치에 따른 온도분포

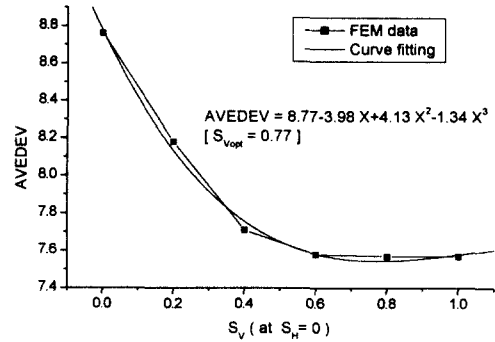
먼저, 25개의 토치를  $S_H$ 와  $S_V$ 의 값의 변화에 따라 각각 배열하여, 총 11가지 경우에 대해 열해석을 수행하여 각각의 토치의 위치변화에 따른 조형틀 내부온도 절대편차평균(AVEDEV)에 대한 결과 값을 Table 3와 Fig. 3에 나타내었다.

Table 3 The list result of AVEDEV to torch position (5 × 5).

at $S_V = 0$		at $S_H = 0$	
$S_H$	AVEDEV	$S_V$	AVEDEV
0	8.76	0	8.76
0.2	8.87	0.2	8.18
0.4	8.07	0.4	7.71
0.6	7.34	0.6	7.58
0.8	7.74	0.8	7.57
1	8.14	1	7.57



(a) The change of  $S_H$  at  $S_V = 0$ .



(b) The change of  $S_V$  at  $S_H = 0$ .

Fig. 3 The plot result of AVEDEV to torch position.

그림을 통해 볼 때 FEM data를 좀더 정확하게 fitting을 하기 위하여  $S_H$ 의 추세선은 2차식으로,  $S_V$ 의 추세선은 3차식으로 curve fitting을 수행한 결과 각각  $S_{Hopt}$ 는 0.68,  $S_{Vopt}$ 는 0.77에서 최소 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

다음으로, 위에서 얻어진  $S_{Hopt}$ 와  $S_{Vopt}$ 의 값에 대한 유효범위는 각각  $S_H$ 는 0.5~0.8,  $S_V$ 는 0.6~0.9이며, 각각 0.1간격으로 나뉘 총 16가지 경우에 대하여 재해석을 수행하였고, 그 때의 해석결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 The result of AVEDEV at effective range.

$S_V \backslash S_H$	0.5	0.6	0.7	0.8
0.6	6.92	6.11	6.09	6.66
0.7	6.71	5.88	5.85	6.43
0.8	6.82	6.15	6.12	6.57
0.9	7.62	6.55	6.52	7.23

위 결과를 살펴보면,  $S_H$ 와  $S_V$  모두 0.7일 때 조형틀의 내부온도 절대편차평균(AVEDEV)이 5.85로써 가장 적은 값을 나타내었으며, 이때 조형틀 내부표면의 온도분포도를 Fig. 4에 나타내었다. 또한 구조해석의 결과, 변위는 0.2 mm로써 core 형상에 미치는 조형틀 내부의 변형이 매우 적었으며, 이때 응력 분포도를 Fig. 5에 나타내었다.

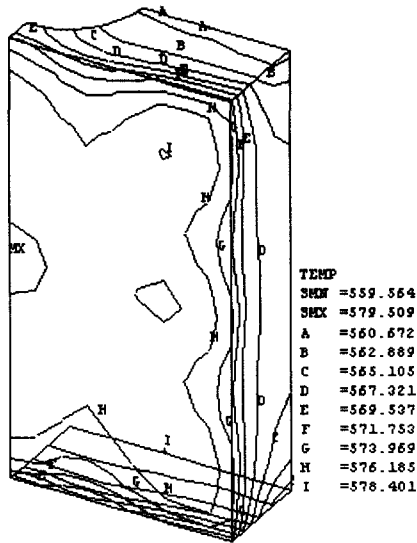


Fig. 4 Inner temperature contour at optimal model.

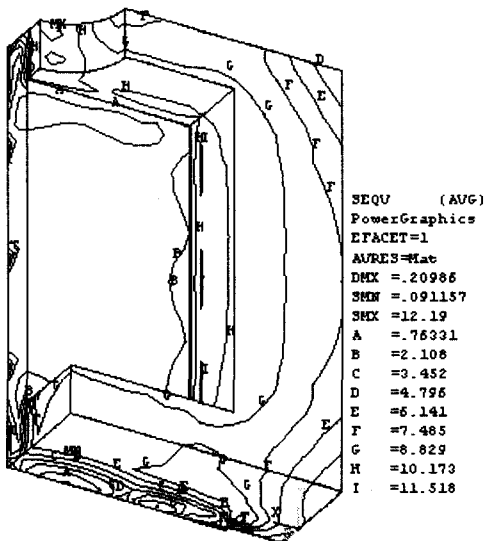


Fig. 5 Von-mises stress contour at optimal model.

### 5. 결론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 주물사를 절약할 수 있는 새로운 증자조형법을 적용한 증자조형기의 설계를 위해 최적화를 수행하였다. 파

라메타로는 토치개수 및 토치위치의 변화를 고려하였으며, 토치의 온도는 350℃, 조형틀 내부의 온도는 300℃가 되는 조건에서 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 내부온도가 300℃로 고르게 분포되는 토치의 개수는 25이며, 이때 절대편차평균(AVEDEV)이 8.76으로써 가장 작은 값을 보였고, 이를 초과할 경우 조형틀 내부온도의 절대편차평균이 다시 증가함을 알 수 있었다.

2. 25개의 토치 개수에서 토치의 최적위치는  $S_H$ 와  $S_V$  둘 다 0.7일 때, 조형틀 내부온도의 절대편차평균(AVEDEV)이 5.85으로써 가장 효율적인 온도분포를 나타내었다.

### 참고문헌

1. Incropera, F, Dewitt, D, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, 1985.
2. Yildiz Bayazitoglu, M. Necati Ozisik "Elements of Heat Transfer," McGraw-Hill, 1988.
3. J. P. Holman, "Heat Transfer," 7th ed., McGraw-Hill, 1990.
4. Segrind, L, "Applied Finite Element Analysis," 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, 1984.
5. O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, "The Finite Element Method," 4th. ed., McGraw-Hill, Vol. 1, pp. 260-287, 1989.
6. Robert P. Taylor, B. K. Hodge and Carl A. James, "Estimating Uncertainty in Thermal Systems Analysis and Design," Applied Thermal Engineering, Volume 19, Issue 1, Pages 51-73, 1999.
7. Singiresu S. Rao, "Engineering Optimization," 3rd ed., New York, John Wiley & Sons, 1996.
8. Kuang J. Ku, S. S. Rao and Li Chen, "Taguchi-Aided Search method for Design Optimization of Engineering System," Engineering Optimization, 30, 23, 1998.