

## 수냉식 화격자 유로 형상에 따른 냉각수의 정체 영역 및 체류 시간 변화

송 동근<sup>\*1,2</sup> 김 상 복<sup>1</sup> 박 도 원<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국기계연구원 환경에너지기계연구본부

<sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 환경에너지기계공학

<sup>3</sup>지이큐솔루션

### CHANGES IN STAGNATION REGION AND RESIDENCE TIME OF COOLING WATER FOR VARIOUS FLOW CHANNEL GEOMETRY OF WATER COOLING GRATE

D.K. Song,<sup>\*1,2</sup> S.B. Kim<sup>1</sup> and D.W. Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Environmental and Energy Systems Research Div., Korea Institute of Machinery and Materials

<sup>2</sup>Environment & Energy Mechanical Engineering, Univ. of Science and Technology

<sup>3</sup>GEQ Solution

*Waste-to-energy facilities including incinerators are known as an efficient method to reduce wastes. In waste-to-energy facilities, more efficient cooling system is still needed for grates as the energy density of waste increased. For better cooling performance with the water-cooled grates, optimal design of cooling water pathways is highly beneficial. We performed numerical investigation on fluid flow and residence time of cooling water with change of the geometry of the cooling water pathway. With addition of round shaped guide vanes in the water pathway, the maximum residence time of flow is reduced(from 4.3 sec. to 2.4 sec.), but there is no significant difference in pressure drop between inlet and outlet, and average residence time at the outlet. Furthermore the flow stagnation region moves to the outlet, as the position of the round shaped guide vanes is located to the neck point of pathways.*

**Key Words :** 수냉식 화격자(Water-Cooled Grate), 정체 영역(Stagnation Region), 체류시간(Residence Time)

### 1. 서 론

폐기물 소각은 가연성 폐기물을 공기 중의 산소와 반응시켜 연소시키는 기술로, 폐기물의 감량화 및 폐기물 에너지의 경제적인 이용에 매우 효과적인 기술로 알려져 있다. 소각로 기술은 크게 스토커, 유동층, 로타리 킬른 방식으로 구분되며, 도시 폐기물 소각로에는 적용 사례가 많고 기술 신뢰성이 높은 스토커 기술이 주로 이용되고 있다. 스토커 방식은 소각로 하단부에 고정 화격자와 이동 화격자를 번갈아 설치하여 소각하고자 하는 폐기물을 연소로 내부로 투입하여 연소하는 방식으로, 하나의 소각로에서 건조, 연소, 후연소의 3단계 과

정을 거치게 된다. 화격자는 폐기물을 지지하면서 실제로 연소공기가 공급되어 소각이 진행되는 부분으로, 효율적으로 폐기물을 연소하기 위한 폐기물 소각시스템에서 화격자 설계가 소각시스템의 성능을 결정하는 중요한 요소이다[1,2].

폐기물의 이송 및 연소가 진행되는 동안 화격자 표면온도가 매우 높아지기 때문에 화격자 파손을 방지하기 위해 지속적인 냉각이 필요하다. 화격자 냉각 방식은 크게 공기를 이용한 공냉식과 냉각수를 이용한 수냉식이 있으며, 수냉식 화격자는 기존의 공냉식에 비해, 연소공기 과잉율이 적고 냉각수 폐열회수가 가능하여 열효율이 좋으며, 환경오염물질 배출 감소, 효율적인 화격자 냉각에 따른 화격자 수명 연장 등의 장점이 있다. 또한 화격자 표면 온도가 낮아 비교적 가격이 저렴한 다양한 소재의 사용이 가능하다.

소각시스템의 설계를 위해 전산유체 해석 결과를 이용하고 있으며[3], 새로운 시스템의 성능 예측을 위해 전산유체 해석을 수행하기도 한다[4]. 소각시스템에 대한 연구는 연소실 모

Received: May 25, 2016, Revised: June 16, 2016,

Accepted: June 16, 2016.

\* Corresponding author, E-mail: dksong@kimm.re.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2016.21.2.106

© KSCFE 2016

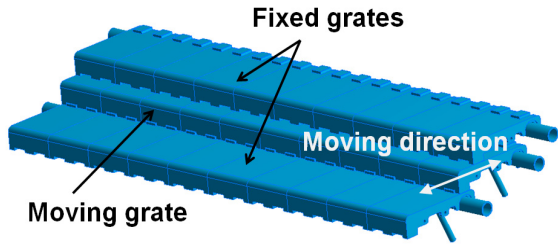


Fig. 1 Three stage grates consisted of one moving grate(center) and two fixed grates

형을 이용한 냉간 유동 실험 연구[5]와 연소실 내부의 유동, 온도 분포 및 연소 특성[6,7]에 대한 연구가 수행되었으며, 수냉식 화격자의 유로 형상의 영향에 대한 해석 연구는 이루어지지 않았다.

수냉식 폐기물 소각시스템의 화격자 내부 냉각수 유로 형상에 따라 냉각 성능이 달라지며, 냉각 효율 증대를 위해서는 냉각수 유로 형상에 따른 민감도 분석이 요구된다. 본 연구에서는 화격자 내부 냉각수 유동 해석을 통해 수냉식 화격자 유로 형상 변화에 따른 냉각수 정체 영역과 체류시간 분포의 변화를 살펴보고, 수냉식 화격자 설계에 반영하고자 한다.

### 2. 수냉식 화격자 해석대상

폐기물 소각로의 폐기물 이동을 위한 지지대는 층을 이루어 다단으로 구성되며, 폐기물의 이동을 위해 고정 화격자와 이동 화격자로 구성된다(Fig. 1). 수냉식 화격자에서 하나의 화격자 단은 여러 개의 단위 화격자의 연결로 구성되며, 공급된 냉각수는 하나의 단을 이루는 단위 화격자를 순차적으로 통과하며 화격자를 냉각시킨다.

단위 화격자를 단순화한 냉각수 유로를 대상으로 해석을 수행하였으며, 단위 화격자의 유로 형상은 Fig. 2와 같다. 냉각수 유로를 구성하는 화격자 내부 형상은 모두 동일하며, 화격자 내부 유로의 안내판 형상 변화에 따라 해석 대상의 유로가 변경된다. 화격자 내부 유로의 입구를 통해 공급된 냉각수는 입구 영역을 통과해 연소 영역에 접한 공간을 통과해 출구 영역으로 이동하여 단위 화격자 유로의 출구로 이동한다. 화격자 유로는 입구 영역과 출구 영역이 대칭 형태를 가

Table 1 Dimensions of water-cooled grates, case 1 ~ 4

Case	1	2	3	4
$d_1$ (mm)	46.0	46.0	36.0	26.0
$d_2$ (mm)	62.0	28.5	38.5	48.5
$h_1$ (mm)	15.0	$D$ (mm)		30.0
$h_2$ (mm)	65.0	$w$ (mm)		50.0

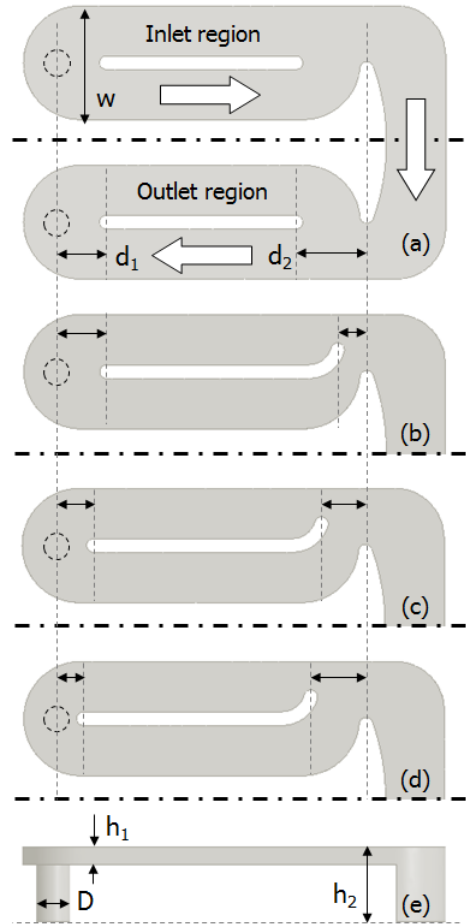


Fig. 2 Top view of computation domain of water-cooled grates; case 1 (a), case 2 (b), case 3 (c), case 4 (d), and side view of grates (e)

지며, case 2 ~ 4는 대칭면을 기준으로 입구 영역만 표시하였다. 각 경우의 안내판과 입/출구 사이의 거리( $d_1$ ), 병목지점과 안내판 사이의 거리( $d_2$ ), 냉각수 입/출구 영역의 높이( $h_1$ ), 화격자 냉각부의 높이( $h_2$ )는 Table 1에 나타내었다.

### 3. 수치해석 방법

#### 3.1 지배방정식

수냉식 화격자의 내부 유동 해석을 위해 질량 보존 방정식 (1)과 운동량 보존 방정식 (2)을 적용하였으며, 비압축성, 정상 상태 유동에 대한 해석을 수행하였다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \cdot \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) \quad (2)$$

단위 화격자 내부의 유동 해석 모델로 경계층과 선회유동에 대한 정확한 결과를 제공하는 Realizable k-ε 난류 모델을 사용하였다[8,9]. 유입 유량은 질량 유량 0.74 kg/s로 설정하였으며, 출구 조건으로 정압(0 Pa) 출구 조건을 적용하였다. 이때 입구 직경을 기준으로 한 Re 수는 31,313이며, 벽면 경계 조건으로 미끄러짐이 없는 유속 경계 조건(no-slip)을 적용하였으며, ‘Enhanced Wall Function’을 사용하였다.

### 3.2 냉각수 체류 시간

체류 시간 분포 해석을 위해 식 (3)과 같이 정상상태의 대류-확산 방정식을 정의하여 해를 구하였다[10,11].

$$\nabla \cdot (\rho u \tau - \Gamma \nabla \tau) = S_\tau \quad (3)$$

여기서 τ는 체류시간, Γ는 체류시간의 확산계수, Sτ는 체류시간의 생성항을 의미한다. 체류시간 이송방정식의 확산계수는 식 (4)와 같이 층류 점도(μ<sub>laminar</sub>)와 유효 점도(μ<sub>eff</sub>)를 이용하여 계산하여 방정식의 해를 구하는 과정에 적용된다.

$$\Gamma = \mu_{laminar} \rho + \frac{\mu_{eff}}{0.7} \quad (4)$$

체류시간 이송방정식의 생성항은 1로 주어지며, 경계조건으로 입구에서의 체류시간은 0, 출구에서는 ∂τ/∂xi = 0 조건을 적용하였다.

## 4. 해석 결과 및 고찰

수냉식 화격자 내부 유동 해석을 위한 계산 격자로 사면체 격자를 이용하였으며, 내부 유로의 곡면 부분에 조밀한 격자를 생성하고 벽면에 경계층 격자를 생성하였다. 냉각수 유동 및 체류 시간의 해석은 ANSYS Fluent v13을 이용하여 3차원 비압축성 유동으로 가정하고 수행하였다. 격자 민감도 분석을 위해 Table 2와 같이 격자수와 벽면의 y+ 값을 달리하는 격자에 대해 해석 결과를 비교하였다. 격자 민감도 영향을 살펴보기 위해 각 격자를 적용하여 얻은 해석 결과의 출구영역 병목 지점과 안내판 중간 지점(Fig. 6, line 0)에서의 속도를 기

Table 2 Number of elements and y+ for grid dependence test

Grid	1	2	3
No. of Elements	92,005	418,965	705,882
y+	< 30	< 15	< 5

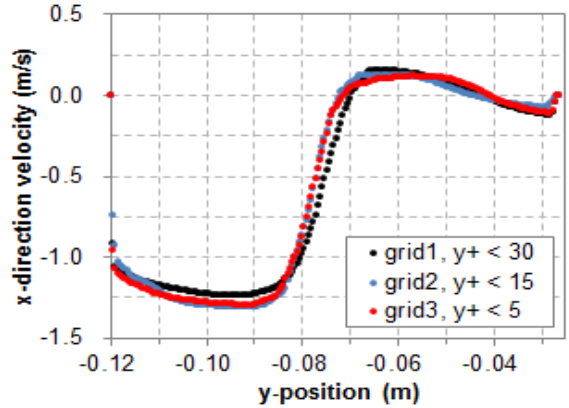


Fig. 3 Comparison of x-velocity profile for case 1 at the inspection line with different grids

준으로 비교하였다(Fig. 3). 격자수 증가 및 벽면 y+ 변화에 따른 속도 분포의 차이가 크지 않다고 판단하여, 이후 해석에는 grid1을 적용하였다.

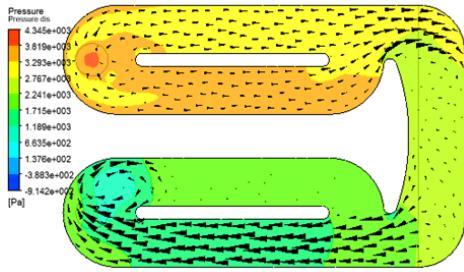
### 4.1 정체 영역의 변화

단위 화격자 내부 유동 해석을 통해 얻은 유로 중앙단면에서의 압력 및 속도 분포는 Fig. 4와 같다. 냉각수 유로의 안내판 형상이 직선 형태에서 곡면 형상이 추가되는 경우에 입구 영역의 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 추가된 곡면 형상이 유동 흐름을 방해하는 저항이 증가하기 때문이다. 곡면 형상이 추가된 안내판의 경우에는 안내판 위치 변화에 따른 압력 분포의 차이는 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

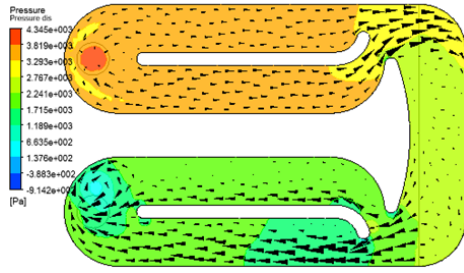
단위 화격자 내부로 유입된 냉각수는 입구 영역에서 내부 안내판에 의해 분리되며, 입구 영역의 유속 분포에는 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 화격자 우측의 공간을 통과한 후, 출구 영역인 하부로 이동하는 단계에서 하부 안내판에 의해 한쪽 영역으로 치우치는 현상이 나타난다. 안내판이 직선 형태인 경우(case 1), 정체 영역은 출구 영역의 상부 전체 영역에서 형성되고, 안내판에 곡면 형상이 추가되면 출구 영역의 상부에 형성된 정체 영역이 벽면 근처로 축소되는 것을 확인할 수 있다.

### 4.2 냉각수 체류 시간

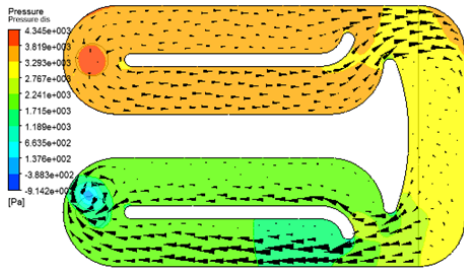
전체 영역에 대한 유속 비교에서는, 곡면 형상이 추가된 안내판의 위치 변화에 따른 속도 분포의 차이는 크지 않은 것으로 나타났으나, 낮은 유속에서 작은 차이로 인해 정체 영역의 변화가 발생할 가능성이 있으며, 비교하는 속도 크기 범위에서는 이를 확인하기가 쉽지 않다. 따라서 유동 영역에서 체류 시간의 비교를 수행하였다(Fig. 5).



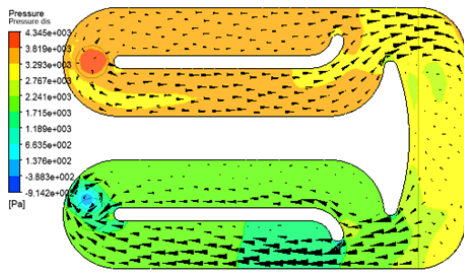
(a) case 1



(b) case 2



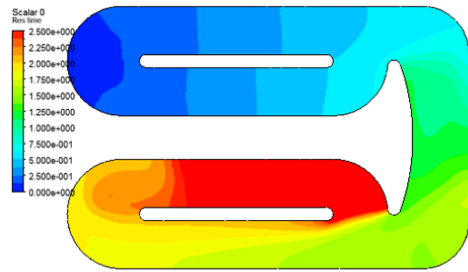
(c) case 3



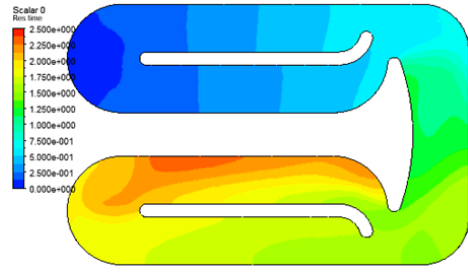
(d) case 4

Fig. 4 Pressure and velocity distributions at the center surface of the grate

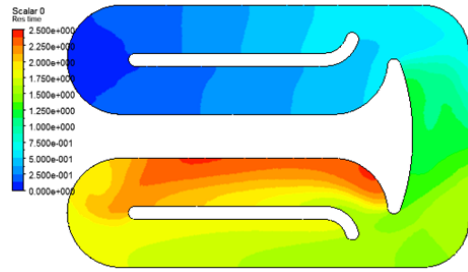
냉각수 유로의 안내판이 직선 형태인 경우(case 1), 출구 영역의 상부의 체류시간이 과도하게 높게 형성되었다. 출구 영역으로 유입되는 냉각수가 출구 영역과 연결된 병목 지점에서 안내판 하부로 주로 이동함에 따라, 안내판 상부 영역에서 유속이 감소하고 이에 따라 안내판 상부 영역의 체류 시간이 증가한다.



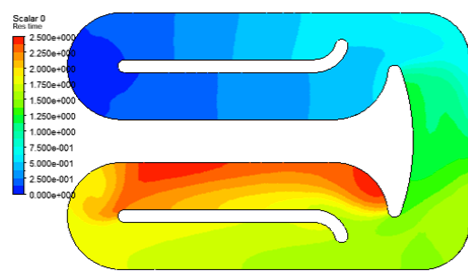
(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3



(d) case 4

Fig. 5 Residence time distributions at the center surface of the grate

냉각수에 유로 내부 안내판에 곡면 형상이 추가된 경우(case 2 ~ 4), 출구 영역의 안내판의 시작점이 하부 영역으로 이동하고, 출구 영역으로 유입되는 냉각수의 유동이 안내판에 의해 분리되어, 안내판 상부로 유입되는 냉각수 유량이 증가한다. 출구 영역 안내판 상부 영역으로 유입되는 냉각수 유량 증가에 의해 상부 영역의 유속이 증가하고, 체류시간은 감소

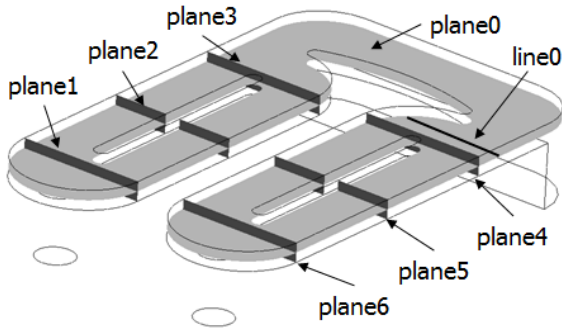


Fig. 6 Inspection planes for distributions of pressure, velocity, and residence time and inspection line for comparison of velocity profile

한다. 출구 영역의 안내판 위치가 병목 지점과 멀어질수록 (case 2 → case 4) 안내판 상부로 이동하는 냉각수 유량이 감소하여, 출구 영역 안내판 상부의 체류 시간은 증가하는 것을 확인할 수 있다.

냉각수 유로 형상 변화에 따른 단위 화격자 입구와 출구 사이의 압력 손실( $\Delta P$ ), 출구에서의 평균 체류시간( $\tau_{avg}$ ), 냉각수 유동 영역에서의 최대 체류시간( $\tau_{MAX}$ )은 Table 3에 제시한 바와 같다. 유로 안내판이 직선 형태인 경우, 출구 영역에서의 최대 체류 시간은 출구의 평균 체류시간 보다 1초 이상 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 안내판에 곡면 형태가 추가되는 경우, 최대 체류 시간과 출구 평균 체류 시간의 차이는 0.4초 이내로 감소하였다. 안내판의 위치가 출구 방향으로 이동함에 따라 최대 체류 시간은 증가하는 경향을 보였으며, 출구의 평균 체류 시간은 큰 차이를 갖지 않았다. 또한 안내판 위치가 병목 지점에 가까울수록 최대 체류 시간이 형성되는 영역이 출구 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 소각 시스템의 연소실과 접해 주로 냉각이 이루어지는 영역이 계산 영역의 오른쪽 부분에 해당한다는 점에서, 정체 영역의 출구 방향으로의 이동은 냉각 성능 향상에 기여할 것으로 판단된다.

냉각수 유동 진행 방향의 단면(Fig. 6, planes 1 ~ 6)에서 체류시간의 평균과 표준편차를 구하여 Table 4에 나타내었고, 이를 비교하면 Fig. 7에 나타낸 바와 같다. 입구 영역(planes 1 ~ 3)에서는 유로 형상 변화에 따른 평균 체류 시간 및 표준

Table 3 Comparison of pressure difference, and the maximum and average residence time

Case	1	2	3	4
$\Delta P(\text{Pa})$	3,530.4	3,718.1	3,798.0	3,692.9
$\tau_{avg}(\text{sec})$	2.0914	2.0656	2.0668	2.0658
$\tau_{MAX}(\text{sec})$	4.3401	2.3244	2.3922	2.4666

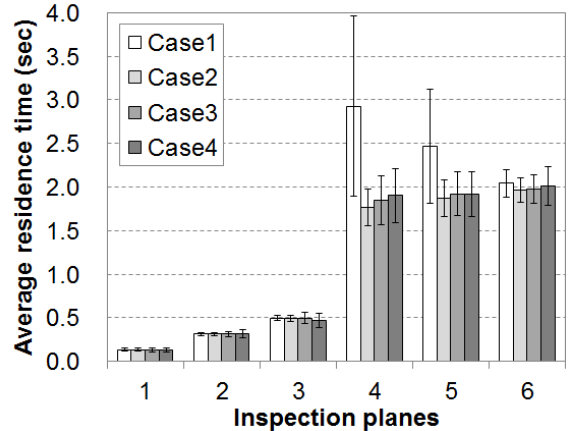


Fig. 7 Comparison of average residence time and standard deviation at inspection planes 1 ~ 6

편차에 큰 차이가 나타나지 않았으며, 출구 영역(planes 4 ~ 6)에서는 안내판 형상에 곡면 형태가 추가된 경우에 평균 체류 시간이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히 출구 영역의 병목 지점에 가까운 영역에서 큰 차이를 보이며, 표준 편차도 큰 차이를 나타낸다.

안내판에 곡면 형태가 적용된 경우, 출구에 가까운 영역에서는 평균 체류 시간 및 표준 편차에 큰 차이가 없지만, 병목 지점에 가까운 영역에서는 안내판의 위치가 병목 지점에 가까울수록 평균 체류 시간이 감소하고, 표준 편차도 감소하는 것을 확인할 수 있다.

안내판에 곡면 형상을 추가함에 따라 냉각수의 최대 체류

Table 4 Average residence time, standard deviation and its ratio computed at inspection planes 1 ~ 6

plane	1	2	3	4	5	6
Case	1					
$\tau_{avg}(\text{sec})$	0.1327	0.3139	0.4990	2.9271	2.4663	2.0454
$\sigma_{\tau}(\text{sec})$	0.0173	0.0150	0.0278	1.0356	0.6558	0.1577
$\sigma_{\tau}/\tau_{avg}$	0.1307	0.0479	0.0556	0.3538	0.2659	0.0771
Case	2					
$\tau_{avg}(\text{sec})$	0.1320	0.3127	0.4940	1.7664	1.8725	1.9635
$\sigma_{\tau}(\text{sec})$	0.0168	0.0146	0.0308	0.2114	0.2129	0.1374
$\sigma_{\tau}/\tau_{avg}$	0.1276	0.0465	0.0624	0.1197	0.1137	0.0700
Case	3					
$\tau_{avg}(\text{sec})$	0.1337	0.3147	0.4960	1.8494	1.9214	1.9788
$\sigma_{\tau}(\text{sec})$	0.0234	0.0315	0.0657	0.2840	0.2532	0.1617
$\sigma_{\tau}/\tau_{avg}$	0.1750	0.1001	0.1324	0.1536	0.1318	0.0817
Case	4					
$\tau_{avg}(\text{sec})$	0.1335	0.3166	0.4707	1.9023	1.9211	2.0121
$\sigma_{\tau}(\text{sec})$	0.0267	0.0483	0.0806	0.3125	0.2596	0.2259
$\sigma_{\tau}/\tau_{avg}$	0.2000	0.1525	0.1713	0.1643	0.1352	0.1123

시간은 감소하였으나, 단위 화격자의 압력 손실은 증가하였다. 화격자 유로의 압력 손실 증가는 냉각수 공급에 필요한 동력의 상승을 의미하며, 소각로 운전비용 상승 요인이 된다. 반면 형상 변화에 의해 냉각 효율이 증가하면, 냉각에 필요한 냉각수 공급 유량을 줄일 수 있어 운전비용을 낮출 수 있다. 따라서 안내판 곡면 형상 추가에 따른 압력 증가에 따른 운전비용 상승과 냉각수 최대 체류시간 감소에 의한 냉각 성능 향상을 고려하여 냉각수 유로 형상을 결정할 필요가 있다.

## 5. 결 론

수냉식 화격자 내부의 냉각수 유동 해석을 통해 냉각수 출구 영역에서 냉각수의 통과가 지연되어 정체되는 영역이 형성됨을 확인할 수 있다. 이는 화격자 냉각 성능 저하의 원인으로 작용할 가능성이 있으며, 냉각수 유로의 격벽 형상 변화에 의해 개선이 가능함을 확인할 수 있다. 냉각수 유로 형상 변화에 따른 냉각수 유동 및 체류 시간 해석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 냉각수 유로 내부 안내판의 형상이 직선 형태인 경우보다 곡면 형태가 추가된 경우, 유로 내부 최대 체류 시간이 감소하였으며, 압력 손실 및 출구에서의 평균 체류 시간은 큰 차이를 보이지 않았다.
- (2) 곡면 형태가 적용된 안내판의 위치가 출구 영역의 병목 지점에 가까울수록 정체 영역이 형성되는 위치가 출구 쪽으로 이동하였으며, 최대 체류 시간은 감소하였다.
- (3) 냉각수 유동 방향 단면에서의 평균 체류 시간과 편차는 안내판에 곡면 형상 추가에 의해 크게 감소하였으며, 안내판의 위치가 병목 지점에 가까울수록 평균 체류 시간과 편차가 감소하였다.
- (4) 냉각수 유로 내 안내판 형상 변화에 따른 정체 영역 및 체류 시간의 변화는 출구 영역에서 크게 나타났으며, 입구 영역에서는 큰 차이를 보이지 않는다.

## 후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20152020106580)

## References

- [1] 2003, Adams, B., Eeraerts, D. and Christiaens, I., "Design,

- Construction, Start-up and Commissioning of a State-of-the-Art Water-Cooled Grate WtE-Plant for Orebro, Sweden," *Proc. of NAWTECH11*, Florida, USA..
- [2] 2010, Owens, E.M. and Szczepkowski, J., "Advancements in Grate Cooling Technology," *Proc. of the 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference*, Florida, USA..
- [3] 1996, Kim, S., Shin, D. and Choi, S., "Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Design by Flow Simulation," *Combust. Flame*, Vol.106, pp.241-251.
- [4] 2003, Shin, D., Hwang, J., Baek, I. and Jung, S., "An Evaluation Study on Combustion and Thermal Flow Characteristics of G+R Type Incinerator," (in Korean) *Proc. The Korean Society of Combustion(KOSCO) Symposium*, pp.111-117.
- [5] 1994, Ryu, C.K., Kim, S.K. and Choi, S., "A cold Flow Experimental for the Incinerator Shape Design," (in Korean) *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.18, No.8, pp.2184-2193.
- [6] 2013, Jang, J.H., Ahn, J. and Kim, J.J., "Combustion & Heat Transfer Characteristics inside a Combustion Chamber of 13-Step-Grate Wood Pellet Firing Boiler," (in Korean) *Proc. KSCFE Spring Annual meeting*, pp.73-77.
- [7] 2014, Ahn, J. and Jang, J.H., "CFD (Computational Fluid Dynamics) Study on Partial-Load Combustion Characteristics of a 4-Step-Grate Wood Pellet Boiler," (in Korean) *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.38, No.4, pp.365-371.
- [8] 2012, Davis, P., Rinehimer, A. and Uddin, M., "A Comparison of RANSBased Turbulence Modeling for Flow Over a Wall-Mounted Square Cylinder," *20th Annual Conference of the CFD Society of Canada*, Canmore, AL, Canada, May 9-12.
- [9] 2016, Halawa, T., Gadala, M.S., Alqaradawi, M. and Badr, O., "Influence of Changing Casing Groove Parameters on the Performance of Centrifugal Compressors Near Stall Condition," *Trans. ASME J. Fluid Eng.*, Vol.138, No.2, 021104.
- [10] 2009, Chanteloup, V. and Mirade, P., "Computational fluid dynamics (CFD) modelling of local mean age of air distribution in forced-ventilation food plants," *J. Food Eng.*, Vol.90, pp.90-103.
- [11] 2010, Liu, M. and Tilton, J.N., "Spatial Distributions of Mean Age and Higher Moments in Steady Continuous Flows," *AIChE Journal*, Vol.56, No.10, pp.2561-2572.