

장주(長柱)형 철강 소재 열전달 해석 Heat Transfer Analysis of Hot Billets

이연원* · 최윤환* · 박영규** · 전준호*** · 권현욱****†
Yeon-Won Lee*, Yoon-Hwan Choi*, Young-Kyu Park**,
Jun-Ho Jeon*** and Hyun-Wook Kwon****†

(Received 25 March 2020, Revision received 8 July 2020, Accepted 9 July 2020)

Abstract : In this paper, heat transfer analysis using Computational Fluid Dynamics technique was carried out to find the effective cooling way of hot temperature Billets. They should be cooled to move to other places. The core of the research is the heat transfer analysis to find reasonable forced cooling method if rapid cooling is required to increase production of Billets in current transfer structure that adopts natural cooling method. Research direction is to check the temperature reduction of the billet according to the presence and placement of the fan for cooling. In conclusion, the average volume temperature of the billet (Case 2, 3, 4 and 6) with the fan was found to be lower than Case 1 without the blower. The most effective arrangement for decreasing the temperature of the billet was Case 8 with four duct fans and two jet fans, causing 7.5% reduction in temperature. But the height of the duct fan and the angle of the jet fan were found to have no significant effect on the temperature change.

Key Words : Billet cooling, Heat transfer, Air jet cooling, Computational Fluid Dynamics

1. 서 론

기본적으로 빌렛 생산설비는 최초 자연냉각, 즉 자연대류를 근간으로 하여 설비를 가동하는 조건

으로 설계한다. 그러나 동일설비에서 생산량의 증대가 요구됨에 따라 냉각시간의 절약이 요구된다. 이에 냉각시간을 줄이기 위해 여러 방안들이 연구되어지고 있다.^{1,2)} 일반적으로 철강은 고온에서

****† 권현욱(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-6743-639X>) : 수석연구원, (재)포항산업과학연구원
E-mail : kwonhw@rist.re.kr, Tel : 054-279-6759
*이연원(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-3749-8119>) : 교수, 부경대학교 기계설계공학과
*최윤환(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3641-5534>) : 겸임교수, 부경대학교 기계설계공학과
**박영규(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-2938-6456>) : 과장, ㈜에콤
***전준호(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-9801-6251>) : 대학원생, 부경대학교 대학원 기계설계공학과

****† Hyun-Wook Kwon(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-6743-639X>) : Senior Researcher, Research Institute of Science and Technology
E-mail : kwonhw@rist.re.kr, Tel : 054-279-6759
* Yeon-Won Lee(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-3749-8119>) : Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.
*Yoon-Hwan Choi(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3641-5534>) : Adjunct Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University
**Young-Kyu Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-2938-6456>) : Session Head, ECOM Co., Ltd.
***Jun-Ho Jeon(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-9801-6251>) : Graduate Student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

저온으로 냉각될 때 상변태가 일어나기 때문에 적절한 주의가 필요하다. 본 연구는 복잡한 냉각 설비를 사용하는 대신 비교적 단순한 공기제트를 이용한 강제대류방식의 냉각을 채택하여 생산설비가 설치된 기존의 주어진 공장 환경하에서 가장 효율적인 냉각조건을 탐색하고자 한다.

국내외 연구동향은 각 빌렛의 배치(Contact 배열과 On-corner 배열)하에 일반적으로 3가지 방법으로 정리된다.^{3,7)} 즉 첫째 Natural cooling, 둘째 Air-jet cooling, 셋째 Mist-jet cooling. 철강생산과 관련한 직접적인 Know-how는 회사마다 기밀로 여겨져 구체적이고 정량적인 데이터는 공개적으로 잘 알려지지 않고 있다. 따라서 본 연구는 생산량 증대를 위해 기본적인 냉각메커니즘 연구, 상업적으로 실제 적용가능한 냉각방식 탐색을 하고자 한다. 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 기법을 활용하여 주어진 현 환경하에서 빌렛의 굽힘 혹은 균열을 초래하지 않는 합리적인 냉각조건 탐색, 즉 빌렛 냉각을 위한 냉각 송풍팬의 최적조합 및 위치를 탐색한다.

2. 연구내용 및 방법

연구에 사용된 빌렛의 형상은 Fig. 1과 같으며, 빌렛 냉각을 위한 열정산을 위해 재질을 탄소강(비열, $C=0.46 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$)이라 가정한다. 빌렛 이송 중 제거해야 할 열량을 근거로 송풍팬의 용량을 결정하기 위하여 아래의 계산식을 사용하였다. 실제 작업 환경을 고려하여 이송 직전 온도를 950°C , 냉각 목표온도를 500°C 로 가정하고, 이송시간은 이송시간에 따라 빌렛에서 제거되어야 할 시간당 열량이 변화하므로 30분과 40분 두 가지 경우를 목표로 정하여 이에 대한 계산을 수행하였다.

빌렛냉각을 위하여 제거하여야 할 열량을 먼저 계산하면 다음과 같다.

① 이송 시간이 30분(=1,800초)인 경우

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= c\dot{m}\Delta T \\ &= \frac{(0.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}})(2037 \text{ kg})(450 \text{ K})}{1800 \text{ s}} \\ &\approx 235 \text{ kW} \end{aligned} \quad (1)$$

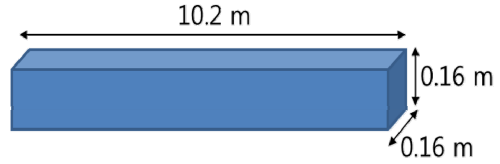


Fig. 1 Geometry of Billet

빌렛 32개인 경우는 $235 \times 32 = 7,503 \text{ kW}$ 이고, 빌렛 80개인 경우 $235 \times 80 = 18,766 \text{ kW}$ 이다.

② 이송 시간이 40분(=2,400초)인 경우

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= c\dot{m}\Delta T \\ &= \frac{(0.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}})(2037 \text{ kg})(450 \text{ K})}{2400 \text{ s}} \\ &\approx 176 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2)$$

빌렛 32개인 경우는 $176 \times 32 = 5,627 \text{ kW}$ 이고, 빌렛 80개인 경우는 $176 \times 80 = 14,068 \text{ kW}$ 가 된다.

빌렛 냉각에 소요되는 공기량을 계산하기 위하여 공기 비열이 $1007.07 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 일때(30°C 공기 기준, 빌렛의 열을 흡수하기 위해 분사되는 공기의 흡열 전, 후 온도가 각각 25°C , 35°C 라고 가정하여 그 중간 값을 사용)

① 이송 시간이 30분(=1,800초)인 경우, 구하고자 하는 공기 유량(kg/s)을 \dot{m} 로 놓으면,

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= c\dot{m}\Delta T \\ &= (1007.07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}})(\dot{m})(10 \text{ K}) \\ &\approx 235 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3)$$

빌렛 1개 냉각 시 필요한 공기량 μA 는

$$\therefore \dot{m} \cong 0.0233 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4)$$

② 이송 시간이 40분(=2,400초)인 경우

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= c\dot{m}\Delta T \\ &= (1007.07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}})(\dot{m})(10 \text{ K}) \\ &\approx 176 \text{ kW} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\therefore \dot{m} \cong 0.0175 \frac{kg}{s} \quad (6)$$

위와 같은 계산을 근거로 송풍팬의 용량을 설정하고 송풍팬의 유무 및 설치 위치의 영향에 관해 검토한다. 제1보의 기초연구에서는 Fig. 2와 같이 빌렛이 이동 시 자연대류에 의해 냉각되는 현재의 온도분포를 초기조건으로 가정하고 계산을 수행한다. Fig. 2, 3은 해석에 사용된 3D 모델 및 3D 모델의 중간단면을 각각 보여주고 있다.

Table 2에 구체적인 수치해석 조건들을 명시하였다. 공장의 바닥면과 입구 송풍팬을 제외한 나머지 경계면을 개방(opening) 경계조건을 적용해 해석영역 내, 외부의 공기가 자연스럽게 순환하도록 하였다. 빌렛, 덕트, 제트팬, 공장 바닥면은 벽면(wall) 경계조건으로 설정하였고 빌렛의 초기 온도 조건은 첫 번째 빌렛이 약 950°C, 마지막 빌렛이 약 600°C, 중간의 빌렛들은 950°C~600°C에서 위치에 따라 선형적으로 감소하는 온도 분포를 적용하였다. 덕트팬과 제트팬의 유량은 각각 65,000 m³/h, 15,000 m³/h이며(단, Case 8은 덕트팬 유량이 절반), 제트팬의 경우, 3,600 rpm의 회전성분을 주어 유동이 직진 방향 속도 외 반경 방향 속도 성분을 가질 수 있도록 하였다. 총 해석시간은 600초이다.

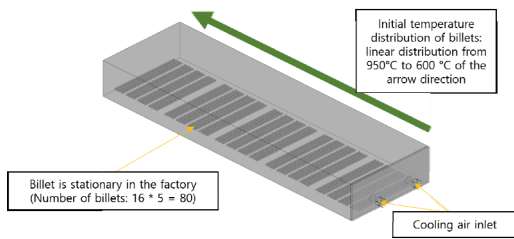


Fig. 2 3D model for analysis

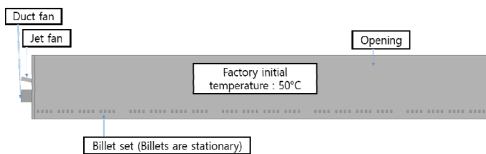


Fig. 3 Computational domain(section view)

Table 2 Numerical analysis conditions

Initial conditions	Inside of a factory: 50°C Billets: 600~950°C, distributed linearly according to location
Flow rate	Duct fan: 65,000 m ³ /h Jet fan: 15,000 m ³ /h, 3,600 rpm
Analysis time	600 seconds
Turbulence model	Standard k-ε turbulence model

빌렛 공장 내에 빌렛 셋트가 정지해 있는 상태에서 공장 입구의 송풍팬의 가동 상태에 따른 빌렛의 온도 변화를 알아보고자 송풍팬의 유무와 설치 위치에 따라 8가지 3D 해석 모델을 제작하여 수치해석을 수행하였다. 공장 내부 빌렛의 개수는 80개 (16개 X 5셋트)이다. 모든 빌렛이 공장 밖에서부터 채널 내로 완전히 장입된 직후로 가정하고, 그 시점에서의 빌렛의 온도를 추정하여 초기 온도 값을 설정하였다. 해석은 시간에 따른 빌렛의 온도 변화를 알기 위해 비정상상태로 해석을 진행하였다.

3. 송풍팬의 유무 및 위치 영향

수치해석 모델은 실제 빌렛 이송 라인을 고려하여 해석영역을 설정하였으며 공장 내 냉각공기를 공급하는 덕트팬(duct fan)과 제트팬(jet fan)에 따라 Case 1~8의 8개의 모델이 설정되었다.

Fig. 4와 Table 3은 해석모델의 종류와 각 모델의 덕트팬과 제트팬의 배치 형상 및 크기를 보여주고 있다. Case 1은 송풍팬 없이 자연대류에 의한 냉각만이 존재하며 Case 2~5는 덕트팬만을 사용한 강제대류 냉각을, Case 6~8은 덕트팬과 제트팬을 동시에 사용하여 냉각한다. 덕트팬은 최대 4개, 제트팬은 최대 2개가 설치되고 설치 높이 및 송풍팬과의 간격에 따라 다양한 조합이 존재한다. 제트팬의 경우 냉각 효율을 높이기 위해 입구가 아래쪽 방향으로 5° 혹은 10° 기울어져 설치되어 있다.

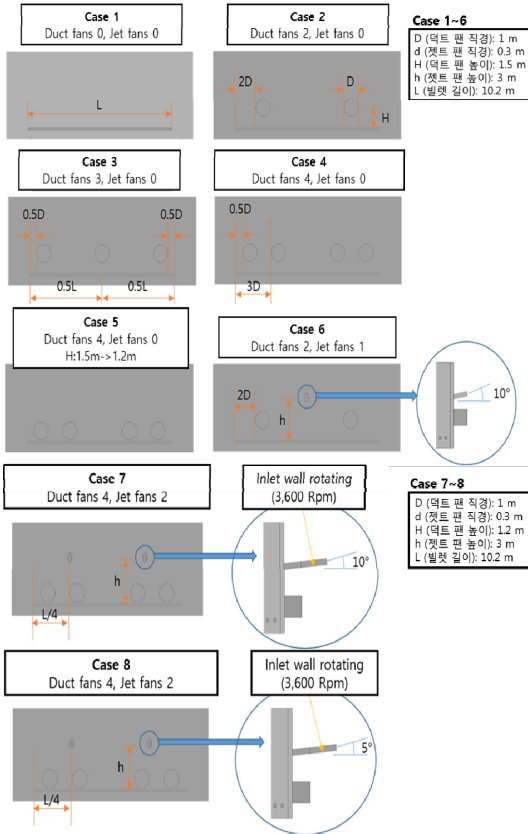


Fig. 4 Fan arrangement models

Table 3 Fan location and analysis conditions

Case	1	2	3	4	5	6	7	8
Duct fan No.	0	2	3	4	4	2	4	4
Jet fan No.	0	0	0	0	0	1	2	2
Jet fan angle(°)	-	-	-	-	-	10	10	5
Duct fan height(m)	-	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2	1.2	1.2
Jet fan height(m)	-	-	-	-	-	3	3	3

Fig. 5는 Case 1~8 덕트 및 제트팬 위치 단면에서의 온도장을 보여주고 있다. 송풍팬을 사용하지 않은 Case 1의 경우 빌렛 주변의 공기가 정체되어 있어 열의 배출이 원활하지 않는 반면 송풍팬을 사용한 Case 2~8은 송풍팬 바람에 의해 대기 중의 뜨거운 공기가 공장 뒤편으로 밀려나 공장 내부

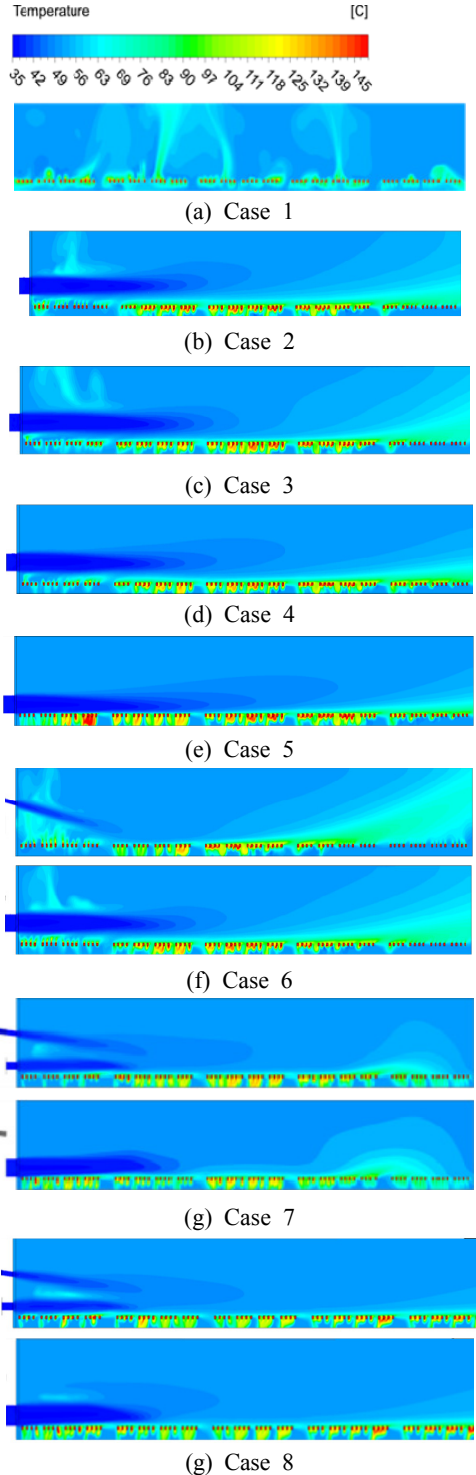


Fig. 5 Temperature fields of each cases inside the factory

온도가 설치 이전에 비해 확연히 낮아진 것을 확인할 수 있다. 특히 덕트팬을 4개 설치한 Case 4와 5의 경우, 다른 조건에 비해 빌렛 주변 온도가 더욱 낮게 나타나 덕트팬의 증가가 빌렛 냉각에 보다 유리하게 작용함을 알 수 있다. Case 6~8의 경우는 풍량이 상대적으로 작은 제트팬의 사용여부가 국부적인 냉각을 도울 수는 있어도 전체공장 내부의 환기에는 상대적으로 영향이 작다는 것을 보여 준다.

빌렛 냉각에 있어 송풍팬의 영향을 정량적으로 파악하기 위해 Fig. 6과 같이 유입구 측으로부터 51번째와 80번째 빌렛의 체적 평균 온도를 측정하여 송풍팬이 없는 Case 1과 냉각 효율을 비교해 보았다. 해석 결과, 송풍팬이 있는 모델(Case 2, 3, 4, 6)이 송풍팬이 없는 Case 1보다 빌렛 체적 평균 온도가 낮게 나타나 송풍팬이 빌렛 냉각에 도움이 되는 장치임을 알 수 있다. 또한 덕트팬의 개수가 많아질수록 빌렛의 냉각 속도가 보다 빨라지는 것을 확인할 수 있어 덕트팬의 개수 또한 빌렛 냉각에 큰 영향을 주는 요소로 확인되었다. 제트팬에 의한 영향을 확인하기 위해 덕트팬의 개수는 2개로 동일하나 제트팬이 설치되지 않은 Case 2와 설치된 Case 6을 비교해 보았을 때, 80번째 빌렛 온도가 거의 같음을 알 수 있다. Case 6에 설치된 제트팬이 1개임을 고려해 볼 때, 빌렛의 냉각에 있어 제트팬 하나의 설치 효과는 크지 않다고 보여진다.

Fig. 7은 덕트팬 높이 변화에 따른 빌렛 온도 변화를 알아보기 위해 4개의 덕트를 가지고 설치 높이만 서로 다른 Case 4와 Case 5의 체적 평균 온도를 비교한 것이다. 확인 결과 빌렛 온도는 16번째 빌렛 기준으로 덕트 팬 높이가 낮은 Case 5가 높이가 높은 Case 4에 비해 빌렛 온도가 더 낮게 나타났다. 이는 덕트팬의 높이가 높아질 경우 공기의 빌렛 표면 유속이 감소되어 강제대류에 의한 열전달 효과가 줄어들기 때문이다.

Fig. 8은 Case 8의 내부 온도장을 5초, 120초 600초 상황 및 여러 단면에서 나타낸 것으로 Case 8은 제트팬의 각도를 10°에서 5°로 변화시킨 모델로서 시간이 갈수록 빌렛에 의한 열이 송풍팬 및

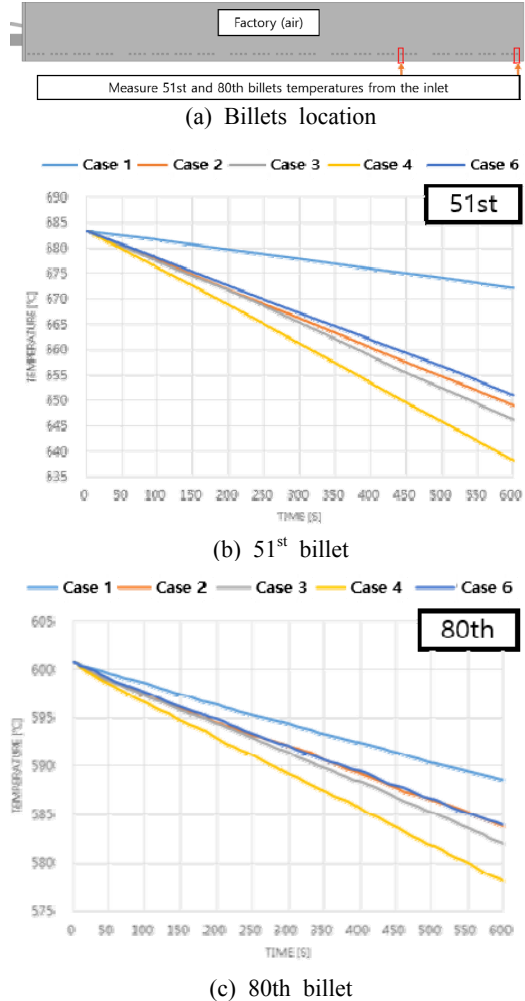


Fig. 6 Volume averaged temperature change of 51st and 80th billets with time

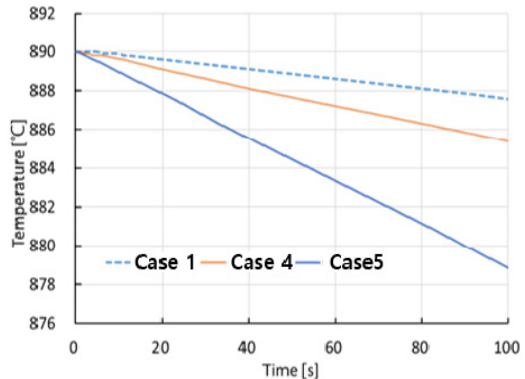
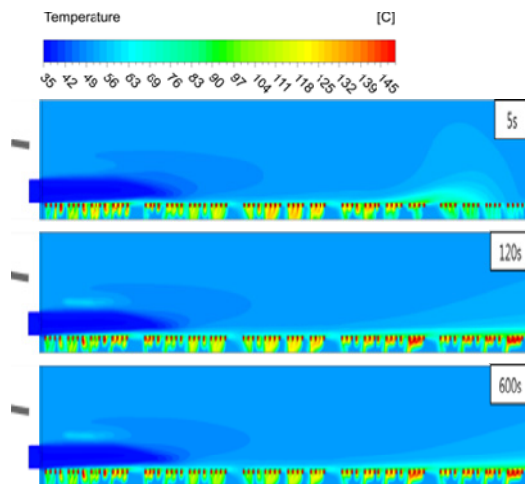


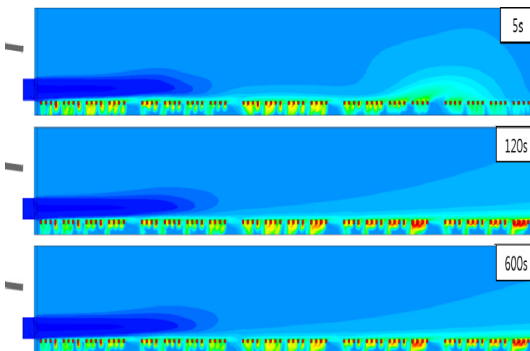
Fig. 7 Volume averaged temperatures of 80th billet

제트팬에 의하여 공장 뒷부분(오른쪽)으로 이동하여 뒤쪽 유동장의 온도가 높아지고 있음을 볼 수 있다.

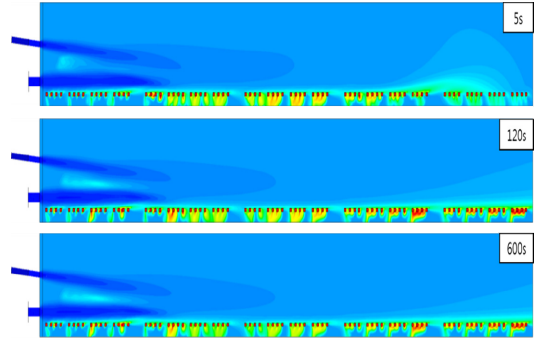
Fig. 9는 제트팬 2개 설치에 따른 빌렛의 온도 변화를 알아보기 위해 자연대류 모델인 Case 1과 덕트팬만 설치된 Case 4와 Case 5, 그리고 덕트팬과 함께 제트팬이 2개 추가 설치된 Case 8을 서로 비교한 것이다. 해석 결과, 제트팬이 설치된 Case 8은 16번째 빌렛에서는 다른 조건들에 비해 빌렛 온도가 높게 나타나는 반면, 공장 뒤쪽(32, 80번째 빌렛)으로 갈수록 빌렛 온도가 더 낮아짐을 알 수 있다. 이는 빌렛이 뒤로 이동될수록 제트팬의 분사로 인해 빌렛 주변 공기가 공장 뒤쪽으로 잘 배출되어 열전달이 원활하게 이루어지기 때문이다. 온도 감소는 80번째 빌렛 기준 Case 4, 5에 비해 약 7.5% 낮게 나타났다.



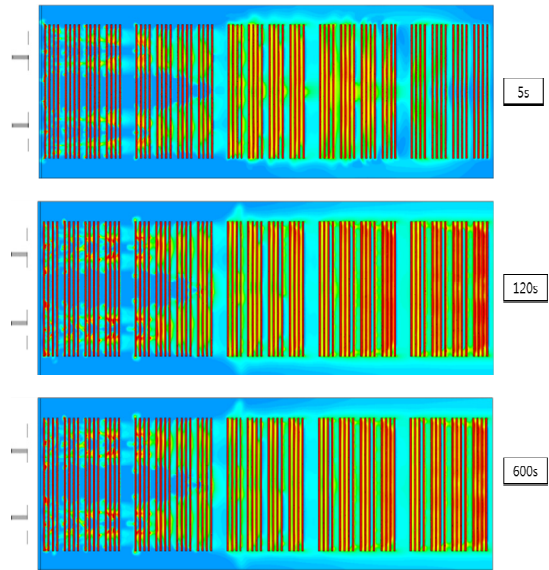
(a) Inner duct fan cross section



(b) Outer duct fan cross section



(c) Jet fan cross section



(d) Horizontal section of billets height

Fig. 8 Temperature fields

지금까지의 계산결과를 요약하면, 송풍팬 유무에 따른 빌렛의 온도 감소를 확인해 보았을 때, 송풍팬이 있는 모델(Case 2, 3, 4, 6)이 송풍팬이 없는 Case 1보다 빌렛 체적 평균 온도가 낮게 나타나 송풍팬이 빌렛 냉각에 도움이 되는 장치임을 알 수 있다. 또한 덕트팬의 개수가 많아질수록 빌렛의 냉각 속도가 보다 빨라지는 것을 확인할 수 있어 덕트팬의 개수 또한 빌렛 냉각에 큰 영향을 주는 요소로 확인되었다. 덕트팬 높이 변화에 따른 빌렛 온도 변화를 비교해 보면, 덕트팬 높이가 1.5 m와 1.2 m 두 모델의 빌렛 온도는

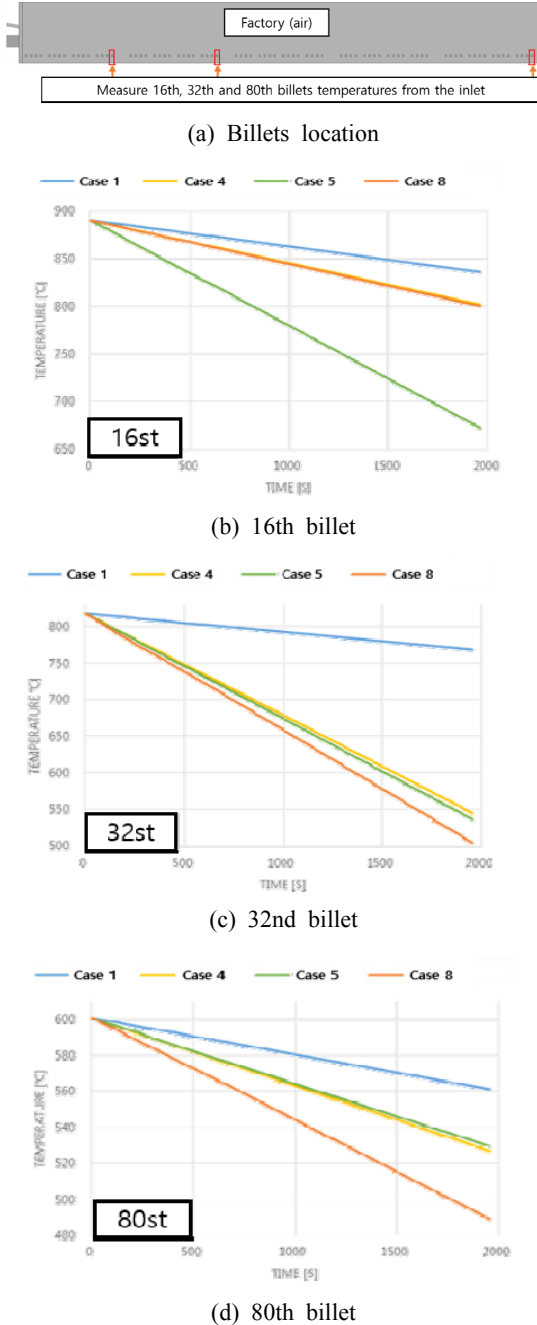


Fig. 9 Volume averaged temperature changes of 16th, 32nd and 80th billets with time

팬이 낮은 쪽의 빌렛 온도가 조금 더 낮은 수치를 보였다. 이는 덕트팬의 높이가 높아질 경우 공기

의 빌렛 표면 유속이 감소되어 강제대류에 의한 열전달 효과가 줄어들기 때문으로 보인다. 빌렛의 냉각에 있어 제트팬에 의한 영향을 확인하였을 때, 제트팬 하나의 설치 효과는 크지 않다고 보여진다. 그러나 그 수가 2개인 경우 열전달이 원활하게 이루어져 제트팬 미 설치 모델에 비해 약 7.5%의 온도감소 효과를 가지게 된다. 결과적으로 가장 빌렛 온도에 효과적인 배치는 덕트팬 4개, 제트팬 2개인 Case 7과 8이며, 제트팬의 각도는 온도 변화에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

빌렛 냉각시 송풍 조건 변화에 따른 빌렛의 온도분포를 수치해석을 통해 분석해 보았을 때 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

송풍팬 유무에 따른 빌렛의 온도감소를 확인해 보았을 때, 송풍팬이 있는 모델(Case 2, 3, 4, 6)이 송풍팬이 없는 Case 1보다 빌렛 체적 평균온도가 낮게 나타나 송풍팬이 빌렛냉각에 도움이 되는 장치임을 알 수 있다. 또한 덕트팬의 개수가 많아질수록 빌렛의 냉각속도가 보다 빨라지는 것을 확인할 수 있어 덕트팬의 개수 또한 빌렛 냉각에 큰 영향을 주는 요소로 확인되었다. 덕트팬 높이 변화에 따른 빌렛 온도변화를 비교해 보면, 덕트팬 높이가 1.5 m와 1.2 m 두 모델의 빌렛 온도는 팬이 낮은 쪽의 빌렛 온도가 조금 더 낮은 수치를 보였다. 이는 덕트팬의 높이가 높아질 경우 공기의 빌렛 표면 유속이 감소되어 강제대류에 의한 열전달 효과가 줄어들기 때문으로 보인다. 빌렛의 냉각에 있어 제트팬에 의한 영향을 확인하였을 때, 제트팬 하나의 설치 효과는 크지 않다고 보여진다. 그러나 그 수가 2개인 경우 열전달이 원활하게 이루어져 제트팬 미 설치 모델에 비해 약 7.5%의 온도감소 효과를 가지게 된다. 결과적으로 가장 빌렛 온도에 효과적인 배치는 덕트팬 4개, 제트팬 2개인 Case 7과 8이며, 제트팬의 각도는 온도 변화에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 확인되었다.

후 기

이 논문은 2017학년도 부경대학교 연구년[II] 교수 지원사업에 의하여 연구되었음. (C-D-2017-1056)

Author Contributions

Y. W. Lee; Conceptualization, writing-review & editing, funding acquisition, project administration and supervision. Y. H. Choi; Formal analysis, methodology and writing-original draft. Y. K. Park; Methodology and investigation. J. H. Jeon; Visualization and writing-review & editing. H. W. Kwon; Resources, writing-review & editing and supervision.

References

1. A. Jaklič, B. Glogovac, T. Kolenko, B. Zupančič and B. Težak, 2002, "A simulation of heat transfer during billet transport", Applied Thermal Engineering, Vol. 22, Issue 7, pp. 873-883, ([https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00022-4).)
2. O. Nakamura, M. Taura, M. Mitsutsuka, et al., 1983, "Development of the billet cooling facilities using fog-jet cooling and its operational performance", Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol 69, No. 16, pp. 2010-2015. (https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.69.16_2010)
3. A. Emadi, A. Saboonchi, M. Taheri and S. Hassanpour, 2014, "Heating characteristics of billet in a walking hearth type reheating furnace", Applied Thermal Engineering, Vol. 63, Issue 1, pp. 396-405. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.003>)
4. M. Mitsutsuka, H. Morise, T. Ogura, et al., 1983, "Air-atomized fog-jet cooling of hot billets", Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol 69, No. 16, pp. 2002-2009. (https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.69.16_2002)
5. M. Mitsutsuka, H. Morise, T. Ogura, et al., 1985, "Air-atomized mist-jet cooling of hot billets", Transactions of the Iron and Steel institute of Japan, Vol 25, No. 6, pp. 467-474. (<https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.25.467>)
6. C. Assuncao, R. Tavares and G. Oliveira, 2015, "Improvement in secondary cooling of continuous casting of round billets through analysis of heat flux distribution", Ironmaking & Steelmaking, Vol. 42, No. 1, pp. 1-8. (<https://doi.org/10.1179/1743281214Y.0000000190>)
7. S. Kumar, J. Meech, I. Samarasekera, J. Brimacombe and V. Rakocevic, 1999, "Development of intelligent mould for online detection of defects in steel billets", Ironmaking & steelmaking, Vol. 26, No. 4, pp. 269-284. (<https://doi.org/10.1179/030192399677130>)