

철강공정에서의 충돌제트냉각 기술현황

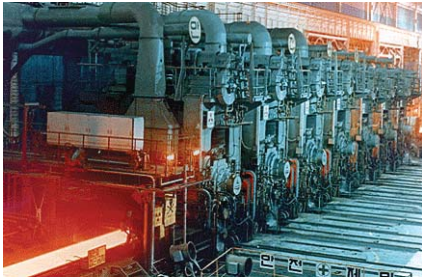
이정호, 박상진 | 한국기계연구원

1. 서론

충돌제트 (impinging jet)는 충돌면에서의 높은 열전달 효과로 인해 그 공업적 응용분야가 매우 넓다. 예를 들면 철강공정에서의 고온강판의 냉각, 원자로내의 냉각, 가스 터빈 냉각 등에서 널리 이용되고 있다. 철강공정의 냉각에 적용되는 냉각방식은 크게 충돌제트방식과 스프레이방식으로 나눌 수 있다. 특히 열연강판, 후판, 선재와 같은 철강제품과 직결되어 있는 냉각공정에서는 제어냉각을 목적으로 주로 충돌제트가 많이 사용된다. 열연 ROT 냉각, 후판 가속냉각에 충돌제트(impinging water jet)에 의한 고온강판의 냉각문제를 고려해보면 고온강판 표면에서의 냉각은 비등현상을 동반한다. 이 때 비등 열전달은 표면에 접하여 비등을 일으키는 액체의 소모와 액체층 위에 있는 증기의 거동에 의하여 영향을 받게 된다. 표면온도가 상승하게 되면 비등현상이 활발해지며 표면에 형성된 증기층이 냉각수의 공급을 막아버려 열전달 효과는 오히려 떨어지게 된다. 충돌제트는 이와 같은 원리를 이용한 냉각방식으로 노즐로부터 분출된 수분류가 충돌된 냉각수는 액막을 형성하고 증발 비등하면서 고온면상을 유동하므로 냉각능력이 매우 높다.

일반적으로 rolling과 strip을 포함하는 철강제품의 후 공정에 적용되는 냉각방식의 국소 열전달특성을 표 1에서 비교하였다¹⁾. 충돌제트는 제트유동을 수반하는 강제대류에 의한 열전달 방식으로 부력이나 밀도 차에 의한 자연대류에 비해 월등하게 높은 열전달계수를 갖는다. 여기서 특히 열연제품에서의 국소 열전달계수를 비교해 보면 충돌제트는 $10^3 \sim 10^5$ 의 값을 갖고 스프레이는 $10^2 \sim 2 \times 10^4$ 정도의 값을 갖기 때문에 충돌제트 냉각방식이 스프레이 냉각방식에 비해 냉각능이 뛰어난을 알 수 있다. 특히 막 비등영역에서는 충돌제트가 증기막을 연속적으로 제거할 수 있는 높은 모멘텀을 갖기 때문에 스프레이방식에 비교하여 우수한 냉각능을 갖는다고 할 수 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 충돌제트방식이 적용되는 대표적인 공정은 열연 냉각공정과 후판 가속냉각공정이다. 하지만 철강공정에서의 충돌제트에 의한 냉각특성은 일본과 유럽을 비롯한 대부분의 철강회사의 고유 노하우로 보관하고 있기 때문에 기존 문헌을 통해 구하기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 철강제품에서 요구되는 기계적 성질과 재질 특성을 만족하기 위해 채택된 철강공정에서의 충돌제트방식에 의한 유동특성 및 냉각에 미치는 열전달특성에 대해 알아보고자 한다. 또한 충돌제트를 이용한 냉각방식의 기술현황을 정리하고 비등기구별 열전달특성을 조사하고 비교 정리하였다.



(a) 열연 냉각 공정



(b) 후판 냉각 공정

그림 1. 충돌제트냉각이 적용된 철강공정의 예

2. 충돌제트 유동기구

제트가 유동방향으로 벽에 닿게 되면 그 벽은 벽면 주변에서 제트를 감속시키게 되고 유동 방향도 바꾸게 된다. 충돌제트는 그림 2에서 Z/L 이 0.86보다 큰 경우에 제트가 충돌면의 효과를 된다^[2]. 충돌제트는 크게 노즐 출구로부터 주변으로 분출될 때 자유표면의 존재에 따라 크게 동일한 상으로 분출되는 submerged jet, 서로 다른 상으로 분출되는 free surface jet으로 구분한다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 충돌수분류의 경우는 액체가 주위 공기인 기체로 분출되고 자유표면을 갖기 때문에 free surface jet에 해당하고, 일반적으로 자유표면이 없는 submerged jet 보다는 이론적, 수치적, 그리고 실험적으로 해석하기에 보다 까다롭다. 충돌제트를 적용하는 목적에 따라 plunging jet, confined jet, 그리고 wall jet으로 구분 할 수 있다.

충돌제트는 Reynolds number를 기준으로 층류제트와 난류제트를 다음과 같이 구분한다.

1. dissipated laminar jet, $Re < 300$

표 1. 철강공정에서 공정별 냉각특성 비교

	Cooling Mode	Surface Temperature (°C)	Heat Flux (W/m ²)	Heat Transfer Coefficient (W/m ² K)
Roll/strip Interface	(1) Deformation	900 ~ 1,100	—	—
	(2) Friction	500 ~ 1,000	$10^7 \sim 10^8$	$10^5 \sim 10^6$
Rolls	(3) Spray cooling	80 ~ 200	$10^6 \sim 2 \times 10^7$	$5 \times 10^3 \sim 10^5$
	(3a) Film cooling	80 ~ 150	$10^5 \sim 10^6$	$10^2 \sim 10^4$
	(4) Air-vapor cooling	150 ~ 550	$10^3 \sim 10^4$	$10^1 \sim 10^2$
	(5) Conduction to the back roll	100 ~ 300	$10^3 \sim 10^4$	$10^2 \sim 10^3$
Strips	(6) Phase transformation	900 ~ 1,100	—	—
	(7) Jet cooling	100 ~ 800	$10^6 \sim 2 \times 10^7$	$10^3 \sim 10^5$
	(7a) Film cooling	400 ~ 1,000	$10^5 \sim 10^6$	$10^3 \sim 5 \times 10^3$
	(8) Spray cooling	400 ~ 1,000	$10^6 \sim 2 \times 10^7$	$10^3 \sim 2 \times 10^4$
	(9) Conduction to the rollers	400 ~ 1,000	$10^3 \sim 10^4$	$10^2 \sim 10^3$
	(10) Air-vapor cooling	400 ~ 1,000	$10^4 \sim 10^5$	$10^1 \sim 10^2$

- 2. fully laminar jet, $300 < Re < 1,000$
- 3. transition or semi-turbulent jet, $1,000 < Re < 3,000$
- 4. fully turbulent jet, $Re > 3,000$

충돌제트의 유동구조는 그림 2에 나타나 있는 것과 같이 크게 3가지 영역으로 나눌 수 있다: (1) free jet region, (2) impingement (stagnation) flow region, and (3) wall jet region.

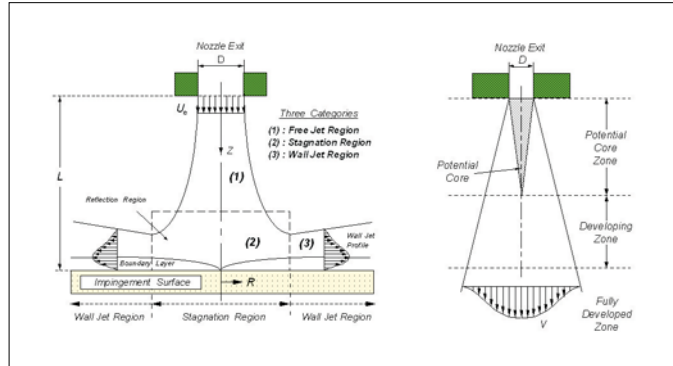


그림 2. 충돌제트와 자유제트의 유동구조

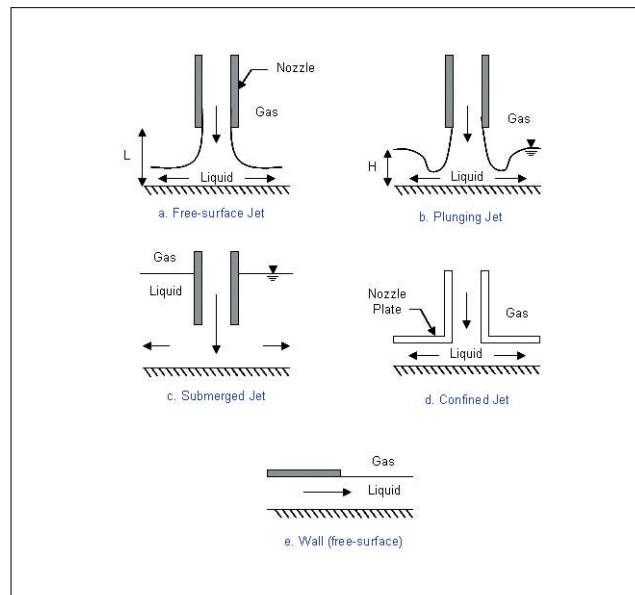


그림 3. 충돌제트의 분출 특성에 따른 구분

2.1 Free Jet Region

노즐 출구로부터 분출된 제트는 제트와 주변 유체와의 전단력에 기인한 상호작용으로 질량, 모멘텀, 그리고 에

너지를 유입하게 된다. 다시 free jet 영역은 그림 2에서 볼 수 있듯이 3가지로 구분될 수 있다: (1) potential core zone, (2) developing zone, and (3) fully developed zone. 첫째, potential core zone에서는 속도는 거의 변하지 않고 일정하고, potential core 길이는 중심속도가 출구속도의 95%를 유지하는 경우의 길이를 의미하고 원형제트의 경우에는 출구직경의 6배 되는 길이를 갖는다^[2,3,4]. 둘째, developing zone에서는 제트의 경계에서 큰 전단응력에 의해 축 방향 속도감쇠가 발생하고, 주변유체와의 혼합과 유입을 증가시킨다. 속도분포는 대개 Gaussian 분포를 갖는 것으로 알려져 있다. 셋째, fully developed zone에서는 노즐 출구로부터 거리가 멀어짐에 따라 축 방향의 속도는 감쇠율이 일정하게 되고, 제트 폭은 선형적으로 감소한다^[2].

2.2 Impingement Flow Region

제트가 충돌면에 닿으면서 일부는 반사되기도 하고 일부는 반경방향으로 벽면을 따라 흘러가게 된다. 충돌 유동 영역은 정체점으로부터 반경방향으로 유동이 바뀌는 특징을 갖고 있다. 충돌 유동영역에서의 유동은 매우 복잡하기 때문에 수치적으로도 해석하기에 까다롭다. 일반적으로 충돌영역은 정체점으로부터 반경방향으로 노즐 출구 직경의 2배 정도의 거리까지 고려한다.

2.3 Wall Jet Region

벽면 제트영역은 제트가 벽면에 충돌한 후 반경방향을 따라 흐르게 되면서 벽면 위에서 발달하게 되는 벽 제트(wall jet) 유동을 갖는다. 정체점으로부터 벽면을 따라 경계층이 형성되면서 층류에서 난류로 천이되는 과정을 거치게 되는데, 천이되는 구간에서 난류강도가 매우 높기 때문에 열전달을 크게 향상시킬 수 있다.

3. 충돌제트 열전달기구

충돌제트 냉각에서 사용되는 주요 인자는 크게 수력학적 인자와 기하학적 인자로 구분할 수 있고 각각의 인자에 의해 표면에서의 열전달은 이와 같은 인자들의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Nu = Nu(Re, Pr, L/D, R/D, \text{geometric effects, etc.}) \quad (1)$$

D	: 노즐 직경
L/D	: 노즐과 충돌면 사이의 거리비
R/D	: 반경방향으로의 거리비
Re	: 레이놀즈 수
Pr	: 프란틀 수

철강공정에서 발생하는 충돌제트에 의한 고온 강판의 냉각은 그림 4와 같이 몇 개의 주요 영역으로 구분할 수 있다. 1번 영역은 단상 유동의 강제대류가 일어나는 곳으로 냉각능이 매우 우수하고, 강판의 표면 온도는 비등점에 비해 상대적으로 매우 낮다. 충돌제트가 충돌 정체점으로부터 점차 멀어짐에 따라 점차 가열되어 지고 이에 따른 냉각능은 점점 떨어져 강판의 온도는 높아지게 된다. 이 과정이 계속 진행되어 가다 결국 냉각수는 비등점에 도

달하게 된다. 2번 영역은 좁은 영역에서 핵 비등과 천이 비등이 서서히 진행되는 핵 비등/천이 비등 영역을 나타내며, 3번 영역에서는 강제 대류 막 비등이 일어나게 된다. 4번 영역에서는 강판과 냉각수 사이에 증기막이 형성되어 냉각수는 표면장력에 의해 물방울 형태로 불규칙하게 운동하면서 강판의 표면을 따라 흐르게 된다. 5번 영역은 냉각수가 도달하지 않는 영역으로 주위로 복사와 대류가 일어난다^[6].

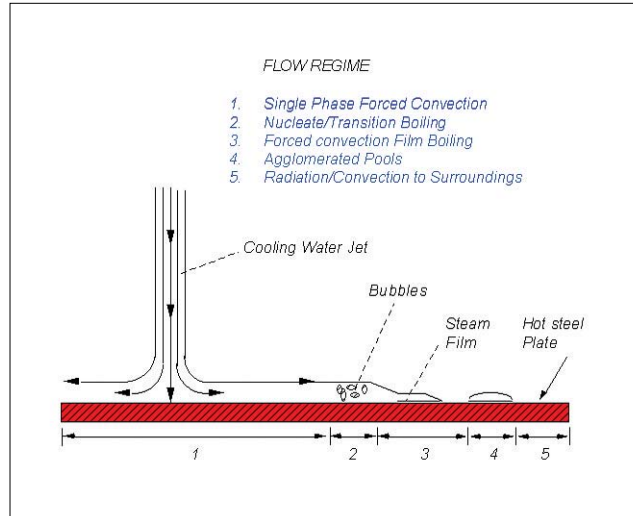


그림 4. 고온강판의 총돌제트 냉각 기구

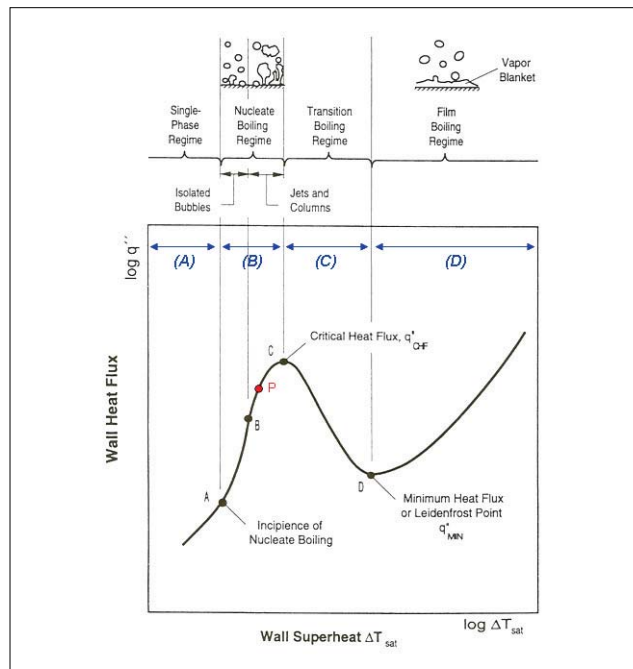


그림 5. 비등열전달 기구에 따른 비등 곡선 (boiling curve)

그림 5는 충돌제트냉각의 비등열전달 기구에 따른 비등곡선을 보여 주고 있다. 일반적인 물의 풀 비등에서의 비등 곡선과 겹으로 보기에 는 비슷하지만, 임계열유속이 존재하는 위치와 천이 비등과 막 비등을 구분하는 Leidenfrost점의 위치가 다르다. 철강공정에서의 충돌제트냉각은 이와 같이 막 비등, 천이 비등, 핵 비등을 모두 포함한 복잡한 형태의 비등현상을 동반하기 때문에 냉각공정에서의 비등 특성을 고려한 주의가 필요하다. 최근 열연 ROT 냉각이나 후판 가속냉각과 같이 강 냉각이 요구되어지는 공정에서는 열유속이 낮은 막 비등에 비해서 열유속이 상대적으로 높은 핵비등 영역에서 냉각이 발생할 수 있는 공정 설비가 주목받고 있다. 철강공정에서 충돌제트냉각을 모사하기 위해 실험실에서 냉각실험이 수행될 수 있고 그 예를 그림 6에서 잘 볼 수 있다. 그림 6은 노즐의 이송에 따른 충돌제트냉각의 열전달 가시화를 보여주고 있다. 열연 ROT 또는 후판 가속냉각공정에서의 냉각 현상은 이와 같이 실험실 규모에서 선행 해석을 할 수 있다.

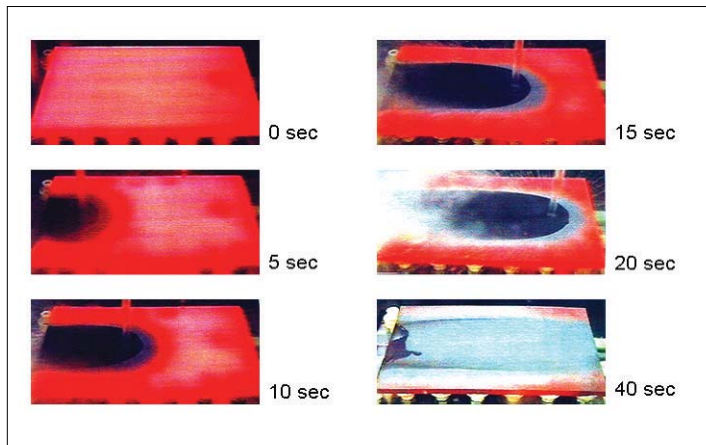


그림 6. 실험실에서의 노즐 이송에 따른 충돌제트 냉각 예

철강공정에서의 충돌제트의 열전달 기구는 그림 7과 같이 냉각공정에서의 발생하는 열전달 현상으로 설명할 수 있다. 그림 7은 철강공정에서 충돌제트냉각이 대표적으로 적용되는 후판 가속냉각의 예를 보여 준다. 가속냉각장치는 이송롤 사이에 설치된 하부 제트노즐과 상부에 설치된 상부 제트노즐로 구성되고, 제트노즐은 일련의 군집으로 배열되고 고온 강판은 냉각종료 후 판의 시작과 끝 부분의 온도 차이를 줄이기 위해 가속냉각의 시작부터 끝까지 서서히 가속하게 된다. 제트노즐로부터 분출된 냉각수는 표면에 연속적으로 충돌하게 되어 고온 강판을 냉각시킨다. 이 때 발생하는 냉각현상에 대해서는 서로 다른 4가지 형태의 열전달 기구(heat transfer mechanism)를 포함하는 것을 알 수 있다.

- (1) 이송롤 접촉에 의한 냉각 (roll contact cooling)
- (2) 복사와 공기의 자연대류 (radiation/air convection)
- (3) 충돌제트 냉각 (impinging jet cooling)
- (4) 냉각수 막을 통한 대류 (water film convection)

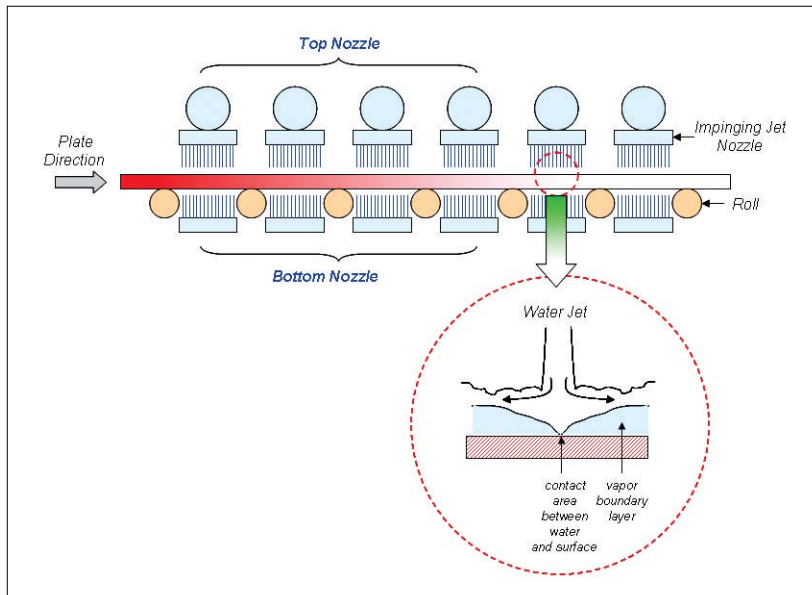


그림 7. 철강공정에서의 충돌제트 냉각 (후판 가속냉각 예)

여기서, 첫째 이송롤 접촉에 의한 냉각은 고온의 날판이 차가운 이송롤 표면에 닿게 되면서 발생하는 전도열전달에 의한 냉각을 의미하고, 둘째 복사과 공기의 자연대류는 수분류 냉각의 영향을 받지 않는 이송롤과 제트노즐 부근의 외기에 노출된 부분에서 발생하고 자연대류의 영향보다 고온의 열원을 갖는 복사열전달에 의해 냉각되는 형태이고, 셋째 충돌제트 냉각은 제트 노즐로부터 분출되어 고온의 날판 표면에 충돌되는 강제 대류 열전달의 형태를 갖고, 마지막으로 냉각수 막을 통한 대류는 날판의 표면에 쌓이게 되는 체류수의 액막을 통한 열전달 형태를 갖는다.

여기서 언급한 4가지 형태의 열전달 기구 가운데 특히 충돌제트냉각에서의 복잡한 열전달 현상은 다음과 같이 설명이 가능하다. 충돌제트냉각에서는 충돌제트가 고온의 강판 표면에 직접 닿게 되고 동시에 대부분이 증발되면서 강판 표면을 완전하게 적시지 못하도록 방해하는 증기막 층을 형성하게 된다. 이 때 충돌제트 유동에 의한 열전달은 일반적으로 알려진 바와 같이 유동의 가운데 부분의 압력이 상대적으로 높고 유동의 난류강도가 크기 때문에 열전달이 가장 활발하게 일어나게 되는데, 특히 고온 강판 표면에 부딪히는 충돌제트 유동이 증기막을 관통하기에 충분한 운동량을 갖는 경우 가운데 부분에서 발생하는 열전달은 더욱 활발하게 일어날 수 있다. 극단적으로 불규칙한 유동조건은 증기막 경계층을 형성하게 되고, 경계층은 결국에는 파형을 갖고 반경방향으로 서서히 운동량을 잃게 되며 얇아지게 된다. 충돌제트가 고온 강판 표면에 닿게 되는 시간은 냉각유량이 많아지거나 노즐 출구압력이 높아질수록 늘어나게 된다. 따라서 충돌제트 유동의 냉각성능은 냉각유량이 증가할수록 향상하게 된다.

액막을 통한 막 냉각에서는 냉각수가 거의 균일한 속도로 표면을 따라 흐르게 되고, 그 결과 냉각수 막과 강판 표면 사이의 증기막은 점점 더 두꺼워지게 된다. 하지만 강판 표면이 점점 더 냉각됨에 따라 증기막은 일부 사라지게 되어 냉각수 막은 직접 강판 표면과 접촉하기 시작한다. 이 때의 접촉면적은 강판의 표면 온도가 감소하면서 늘어나게 되고 따라서 열전달이 급격하게 증가하게 된다. 하지만 열연 ROT 및 후판 가속냉각공정에서의 이러한 냉

각현상은 매우 비정상 상태가 되며 제어하기에도 매우 힘들어지게 된다. 이미 언급한 바와 같이 철강공정에서의 충돌제트에 의한 냉각은 비등 현상을 비롯하여 불규칙한 거동의 액막, 체류수의 유동으로 인해 매우 복잡하다.

4. 충돌제트 냉각특성 현황

충돌제트는 지난 수 십 년간 많은 연구자들에 의해 연구 되어져 왔으며, 자유표면을 동반하지 않는 submerged jet의 연구가 free surface jet에 비해 해석이 용이하기 때문에 대부분을 차지하고 있다^[3,6,7]. 본 연구에서는 주로 충돌제트에 의한 강제대류냉각을 다루고 있기 때문에 자유표면이 존재하는 free surface jet에 관한 기존 문헌을 조사하였다. 앞에서 언급했듯이 충돌제트냉각은 비등을 수반하기 때문에 매우 복잡한 열전달 현상으로 나타나고, 앞의 비등 곡선에서 언급한 대로 핵 비등, 천이 비등, 막 비등의 3가지 열전달 형태로 나눌 수 있고, 충돌제트냉각에 적합한 상관관계 가운데 유용한 몇 가지를 본 연구에서 제시하고자 한다.

표 2. 문헌에서의 충돌제트냉각의 열전달 특성

Authors	Problem studied	Results	Comments
Laminar boundary layer			
Levy [1952]	P, W, A	$h=0.569k_f(C/v)^{1/2}Pr^{0.376}$	• similarity solution
Miyasaka and Inada [1980]	P, S, E, H	$h=1.03k_f(C/v)^{1/2}Pr^{1/3}$	• $\omega_j = 1\text{cm}$
Levy [1952], Inada et al. [1981]	P, L, A	$Nu_x=C(\gamma, \beta)Re_x^{1/2}Pr^{m(\beta)}$	• $C(\gamma, \beta)$ and $m(\beta)$ are unique to H/ω_j • valid for $T_w=Ax$ or $q=Dx$ where $\gamma = \gamma - [(1-\beta)/(2-\beta)]$ • when $\chi/\omega_j \geq 5$ and $\gamma = 0, 1 \geq \beta \geq 0$ [$C(1)=0.57 \geq C(\beta) \geq [C(0)=0.46]$ [$m(1)=0.38 \geq m(\beta) \geq [m(0)=0.34]$
Miyasaka and Silberman [1972]	P, L, A, T	$Nu_j=f(\chi/\omega_j)Re_j^{1/2}$	• boundary layer analysis • $f(\chi/\omega_j)$ is unique to H/ω_j and Pr
McMurray et al. [1966]	P, L, E, H	$Nu_x=0.73Re_x^{1/2}Pr^{1/3}$	• $\omega_j = 0.64\text{cm}$ • $0.7 \leq Pr \leq 10$
Zumbrunnen et al. [1988, 1989]	P, L, E, Q	$Nu_j=f(\chi/\omega_j)Re_j^n Pr^{1/3}$	• when $\omega_j = 1\text{cm}$, $n = 0.608$ and $[f(0)=0.33] \geq f(\chi/\omega_j) \geq [f(10)=0.109]$ • when $\omega_j = 2.03\text{cm}$, $n = 0.666$ and $[f(0)=0.149] \geq f(\chi/\omega_j) \geq [f(5)=0.060]$
Merzger et al. [1974]	C, Av, E, T	$Nu_d=2.74Re_d^{0.348}Pr^{0.487}(d/D)^{0.774}$	• $3 < d/D < 25$ • partial boundary layer turbulence is likely for large d/D
Turbulent boundary layer			
Hatta et al. [1984]	C, L, E, Q	$Nu_r=0.063Re_r^{0.8}Pr^{1/3}$	• $d = 1\text{cm}$
Miyasaka and Inada [1980]	P, L, E, H	$Nu_r=0.033Re_x^{0.8}Pr^{1/3}$	• based only on data for $\chi/\omega_j = 2.5$ • unheated upstream flow
McMurray et al. [1966]	P, L, E, H	$Nu_r=0.037Re_x^{0.8}Pr^{1/3}$	

충돌제트의 열전달특성은 표 2에 나타나 있는 것과 같이 충돌제트의 종류를 2차원 평면 제트와 축 대칭 원형제트에 관한 열전달특성을 다룬 기존의 연구 가운데 대표적인 문헌을 나열하였다^[8]. 여기서 언급된 결과들은 충돌제트가 충돌면에 부딪힌 후 벽면을 따라 경계층을 형성하게 되는데, 그 때의 경계층이 층류 또는 난류에 따라 구분되어 질 수 있다. 표면에서의 열전달계수는 층류와 난류를 구분하여 모두 다음과 같은 대표적인 함수 형태로 표현하고 있음을 알 수 있다.

표 3. 문헌에서의 충돌제트냉각의 주요 변수

Author	Jet type	Fluid	ΔT_{sub} (°C)	V_n (m/s)	dor w_n (mm)	L (mm)	T_i (°C)	Comments
Akimenko(1966)	Circ-free	Water	80	3-20	-	150	1050	
Hanasaki et al.(1981)	Circ-free	Water	-	0.042	10	100	900	
Hatta et al.(1982)	Circ-free	Water	-	0.21-1.49	10	100-500	900	
Hatta et al.(1983)	Circ-free	Water	80	0.025-1.43	10	123-470	900	
Hatta et al.(1984)	Circ-free	Water	50-80	0.21-1.49	10	200	900	
Hatta et al.(1989)	Planar-free	Water	85	-	-	100	900	
Hatta and Osakave(1989)	Planar-free	Water	82-92	0.83	1	100	900	Moving Jet
Ishigai et al.(1971)	Circ-free	Water	10-80	1.5-12	3-12	-	400-800	
Ishigai et al.(1978)	Planar-free	Water	5-55	0.65-35	62	15	1000	
Ishimaru et al.(1991)	Circ-free	Nitrogen	0	0.22-134	0.6	0.6	300	
Kamata et al. ^{1,2} (1988)	Circ-free	Water	0	10-20	22	0.3-0.6	900	
Kokado et al.(1984)	Circ-free	Water	8-29	0.32	10	200	500	
Lamvik and Iden(1982)	Circ-free	Water	88	11-35	0.7-2.0	100	640	
Nevins(1953)	Circ-free	Water	70-80	0.8-1.0	12.7	12.7-63.5	1100	
Ochi et al.(1984)	Circ-free	Water	5-80	2-7	5-20	25	700	
Owen and Pulling(1979)	Circ-free	Water	<10	29-65	1.0-15	50	500-800	
Piggot et al.(1976)	Circ-free	Water	<80	1-15	15-30	-	-	
Rush and Holman(1975)	Circ-free	R-113	27	1.23-6.87	0.21-0.433	4.7-9.8	-	
Sakhuja et al.(1980)	Circ-free	Water	18-77	-	1.59-3.18	635-12.7	352	
Sano et al.(1991)	Planar-free	Water	0	35	-	-	300	

$$Nu_j = f(x/w_j) Re_j^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{층류}) \quad (2)$$

$$Nu_j = f(x/w_j) Re_j^{0.8} Pr^{1/3} \quad (\text{난류}) \quad (3)$$

일반적으로 층류인 경우 누셀 수는 레이놀즈 수의 0.5승에 비례하고 난류에서는 0.8승에 비례한다. 즉 난류에서 레이놀즈 수에 더욱 의존함을 알 수 있다.

충돌제트냉각은 앞에서 언급한 바와 같이 복잡한 비등현상을 수반하기 때문에 비등조건에 맞는 열전달 상관관계가 규명되어야 하고 많은 문헌에서 조사한 내용 가운데 다음과 같은 각 비등기구별 상관관계를 제시할 수 있다. 그림 8은 앞에서 언급한 비등특성에 따라 추천되는 충돌제트냉각의 상관관계를 한 눈에 볼 수 있도록 정리한 것으

표 4. 문헌에서의 총돌제트냉각의 가열방법 및 노즐배치

Author	Nozzle Coverage Area(%)	Angle (deg)	Heater Information				Surface finish
			Orientation	Material	Heating scheme	Size(mm)	
Akimenko(1966)	-	90	-	SS or cooper	Transient	-	-
Hanasaki et al.(1981)	0.20	90	Up	Stainless steel	Transient	200×200; ×10	-
Hatta et al.(1982)	0.20	90	Up	Stainless steel	Transient	200×200; ×10	-
Hatta et al.(1983)	0.20	90	Up	Stainless steel	Transient	200×200; ×10	-
Hatta et al.(1984)	0.20	90	Up	Stainless steel	Transient	200×200; ×10	-
Hatta et al.(1989)	-	90	Up	Stainless steel	Transient	100×300; ×10	-
Hatta and Osakave(1989)	0.42	90	Up	Stainless steel	Transient	100×240; ×10	-
Ishigai et al.(1971)	0.014-0.23	90	Up	Copper	Transient	D=250; ×40	Chrome plated
Ishigai et al.(1978)	7.8	90	Up	Stainless steel	Transient	12×80; ×2	No.100 emery;acetone
Ishigai et al.(1978)	7.8	90	Up	Stainless steel	Direct-ac	12×80	No.100 emery;acetone
Ishimaru et al.(1991)	16	90	Vertical		Induct	D=15	No.3000 emery;acetone
Kamata et al. ^{1,2} (1988)	12	90	Up	Copper	Transient	D=20	No.1500 emery;acetone
Kokado et al.(1984)	0.20	90	Up	Stainless steel	Transient	200×200; ×10	-
Lamvik and Iden(1982)	>0.0022	90	Up, down, vertical	Aluminum	Transient	D=150; ×10	-
Nevins(1953)	25	90	Down	Stainless steel	Transient	D=25.4; ×76.2	-
Nevins(1953)	25	90	Down	Stainless steel	Induct	D=25.4	-
Ochi et al.(1984)	0.22-35	90	Up	Stainless steel	Transient	50×180; ×2	No.100 emery
Owen and Pulling(1979)	0.0030-0.0068	45-90	Down	SS/Nimonic	Transient	102×254; ×0.5-0.91	-
Piggot et al.(1976)	-	15-90	Vertical	Gold, inconel, silica	Transient	63≤D≤25.4; ×200	Several types
Rush and Holman(1975)	0.026-0.11	45-90	Down	Copper	Induct	D=12.9	25-μm nickel plating
Sakhuja et al.(1980)	-	90	Vertical	Copper	Transient	51×152; ×102	-
Sano et al.(1991)	-	90	Up	Copper	Transient	20×150; ×120	-

로 충돌제트 열전달의 로드맵으로 사용될 수 있다.

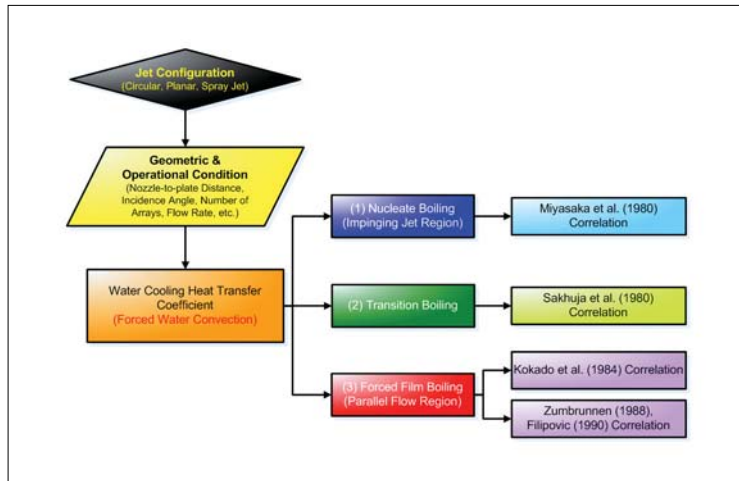


그림 8. 비등 특성에 따른 충돌제트냉각의 상관관계식 정리

(1) 핵 비등 : Miyasaka 등^[9]의 상관 관계식을 추천하고, 평면 충돌제트의 경우에 다음의 식을 제시한다.

$$q'' = 9.968 \times 10^6 (1 + 0.4V^{0.4}) \Delta T_{\text{sat}}^{0.12} \quad (4)$$

여기서 V 는 충돌제트의 증력기속도를 고려한 속도를 사용한다^[9].

(2) 천이 비등 : Sakhusa 등^[10]의 상관 관계식이 적합하고, 원형 충돌제트의 결과를 다음과 같이 제시한다.

$$h = 6.71 \times 10^4 V_n \text{Pr}^{0.6} (1.8 \Delta T_{\text{sat}})^n f(S/D) \quad (5)$$

여기서 n 와 $f(S/D)$ 는 다음의 함수를 갖는다.

$$n = -1.89 + 0.328(S/D) - 0.025(S/D)^2 \quad (6)$$

$$f(S/D) = 27 - 0.35(S/D) - 1.51(S/D)^2 + 0.15(S/D)^3 \quad (7)$$

여기서 V_n = 노즐 출구속도, S/D = 노즐 사이의 간격과 직경 사이의 비로 표현한다. 이 경험식은 $\Delta T_{\text{sat}} > 42^\circ\text{C}$ 와 $4 \leq S/D \leq 12$ 인 경우 대략 20% 오차 범위를 갖는다. 다만, 노즐 출구속도의 범위는 구체화되지 않았고, Prandtl 수의 영향도 물의 결과에 한정된다.

(3) 막 비등 : 강제 막 비등의 경우에는 Kokado 등^[11]의 상관관계가 적합하고, 이 상관관계는 주로 원형 충돌제트에서 잘 일치하는 결과를 보여준다.

$$h = 200 \frac{2420 - 21.7 T_{\text{water}}}{\Delta T_{\text{sat}}^{0.8}} \quad (8)$$

표 3은 충돌제트냉각의 주요 변수를 문헌으로부터 정리한 결과가 나타나 있다^[12]. 충돌제트의 형상을 원형과 평면으로 구분하였고, 작동유체로는 대부분이 물이 사용되었고, 다양한 범위에서의 출구속도가 검토되었으며, 초기 온도는 900°C 정도를 기준으로 막 비등, 천이 비등, 핵 비등의 영역을 포함하고 있다. 표 4는 충돌제트냉각 실험의 가열 방법 및 노즐 배치에 대한 문헌을 정리한 것으로, 노즐의 방향은 대부분이 상부노즐이고 가열시편은 대부분이 스테인리스강을 이용하였다^[12]. 스테인리스강은 고온 냉각실험시 상변태가 발생하기 않기 때문에 탄소강에서 발생하는 변태발열을 고려하지 않아도 되는 장점 때문에 충돌제트를 이용한 고온 냉각실험에서는 스테인리스강을 사용한다. 가열방법은 대부분이 900°C 정도의 고온으로 가열 후 시간 변화에 따른 냉각 특성을 측정하는 transient법을 사용하였다.

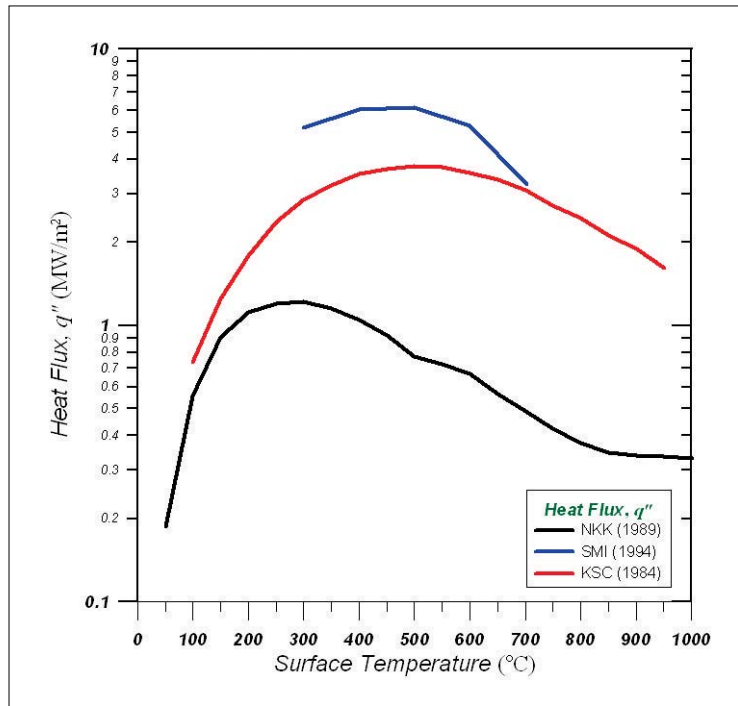


그림 9. 철강공정에서의 충돌제트냉각의 열유속 비교

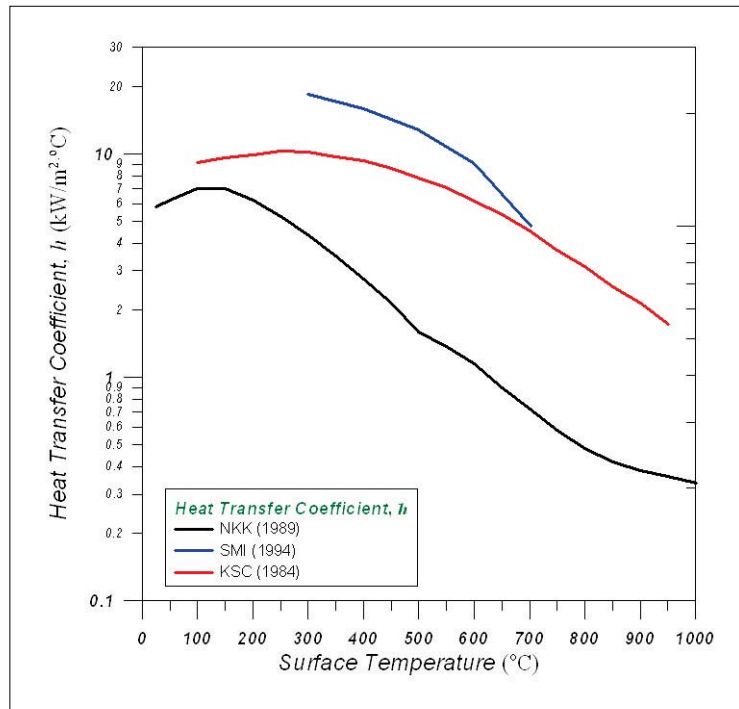


그림 10. 철강공정에서의 총돌제트냉각의 열전달계수 비교

그림 9와 그림 10은 일본 철강사(NKK, Sumitomo, Kawasaki)의 원형 총돌제트를 이용한 후판 가속냉각설비의 열유속 및 열전달계수를 비교하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 철강공정에서의 냉각특성은 철강사에서 대부분을 노하우로 보유하고 있기 때문에 냉각설비의 열전달특성은 극히 제한적이다. 지난 1980년대 중반에는 대부분의 일본 철강사들이 경쟁적으로 냉각설비를 개발하였으며, 그 가운데 일부만이 발표되었다. NKK의 결과를 제외하고는 임계열유속이 500°C부근에서 존재하여 총돌제트를 이용한 강제 대류열전달의 경향과 거의 일치하였고, 열전달계수는 핵 비등 영역이 존재하는 250~300°C영역에서 최대값을 갖는다.

일본 철강사의 가속냉각설비는 대부분이 철강사 독자적으로 개발되어 현재에까지 이르고 있고, 특히 주목할 냉각설비는 JFE사의 SuperOLAC과 신일본제철(NSC)사의 CLC- μ 이다. 첫째, JFE의 SuperOLAC은 NKK에서 OLAC, OLAC II 이후에 독자 개발하여 Kawasaki 제철소와 2000년에 합병하여 JFE를 설립한 이후 기존의 Kawasaki 후판공장에도 SuperOLAC로 교체되고 있다. 둘째, NSC사는 JFE사의 SuperOLAC에 필적할 만한 냉각능과 제어성능을 갖는 CLC- μ 를 2005년에 개발하였다. JFE의 SuperOLAC이 강력한 냉각속도를 자랑하는데 반해 신일철의 CLC- μ 는 저속냉각으로부터 고속의 강력냉각에 이르는 냉각 제어의 범위가 매우 크고 정확하다는 장점을 갖고 있다. 한편 유럽 철강사의 가속냉각설비는 주로 Mulpic이 대표적이다. 가속냉각설비에서 기존의 냉각방식으로 사용된 spray 냉각시스템의 flexibility, controllability, 제한된 냉각능, inhomogeneity와 같은 단점을 극복하기 위하여 1980년대에 벨기에 CRM(Centre for Research in Metallurgy)에 의해 초기 개발되었다. 1984년 벨기에 Forges de Clabecq에 처음으로 설치되었고, 그 후 1988년 독일 Dillinger와 같은 해 스웨덴 SSAB에 설치되었고, 2003년 POSCO 3후판공장에 네 번째 Mulpic 시스템이 설치되어 현재 가동되고 있다. 국내 철강사의

경우에는 대부분의 냉각설비를 일본과 유럽에서 기술 도입하여 사용하고 있는 현실이고, 향후 철강공정의 국제 경쟁력을 갖추기 위해 독자적인 기술개발이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 철강공정에서 적용되는 고온 냉각방식 가운데 대표적인 충돌제트냉각에 대한 기술 현황을 살펴 보았다. 충돌제트의 유동기구와 열전달기구를 이해함으로써 철강공정에서 적용된 충돌제트냉각의 특성을 파악할 수 있다. 충돌제트유동의 변화는 대부분이 원형노즐, 평면노즐, 슬릿노즐과 같은 노즐 형상의 기하학적인 변화에 의해 제트유동의 구조가 바뀌게 되고 이러한 변화는 충돌면에서의 열전달 특성에 영향을 미치게 된다. 기존의 문헌을 통해 조사된 충돌제트냉각의 열전달계수는 비등기구(핵 비등, 천이 비등, 막 비등)에 따라 구분되고, 충돌제트냉각에서는 반드시 비등특성을 고려하여야 한다.

기존의 고장력강(high-tensile steel)보다 향상된 인성과 낮은 탄소당량(C_{eq})을 갖는 고장력강의 요구에 따라 제어압연, 제어냉각, 각종 열처리 등과 같은 공정을 거치게 되는데, 특히 제어냉각에서는 기존의 스프레이 냉각설비를 대체하여 보다 큰 냉각능을 갖는 충돌제트 냉각방식이 선호되고 있는 실정이다. 충돌제트를 적절하게 이용하면 고온 냉각범위에서 막 비등의 발생을 지연할 수 있으며, 강판의 냉각은 주로 핵 비등/천이 비등 영역에서만 발생하도록 제어한다면 보다 효과적인 제어냉각이 가능하게 될 것이다.

✻ 참고 문헌

- [1] Chen, S-J., and Tseng, A.A., 1992, "Spray and jet cooling in steel rolling", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 13, No. 4, pp. 358-369.
- [2] Rajaratnam, N., 1986, Turbulent Jets, Elsevier, New York.
- [3] Viskanta, R., 1993, "Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 6, pp. 111-134.
- [4] Lee, J., 1999, Enhancement in Turbulent Heat Transfer Characteristics for Jet Impingement Based on Nozzle Geometry, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea.
- [5] Zumbrennen, D. A., 1988, A Study of Heat Transfer from Stationary and Moving Plates Cooled by Planar Jets of Water, Ph.D. Theses, School of Mechanical Engineering, Purdue University.
- [6] Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces", Advances in Heat Transfer, Vol. 13, pp. 1-60.
- [7] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M. A. and Button, B. L. 1992, "A review of heat transfer data for single circular jet impingement", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 13, pp. 106-115.
- [8] Vader, D.T., Incropera, F.P., and Viskanta, R., 1991, "Local convective heat transfer from a heated surface to an impinging, planar jet of water", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 34 No. 3 pp. 611-623.

- [9] Miyasaka, Y., Inada, S., and Owase, Y., 1980, "Critical heat flux and subcooled nucleate boiling in transient region between a two-dimensional water jet and a heated surface", Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 13, No. 1, pp. 29-34.
- [10] Sakhuja, R.K., Lazgin, F.S., and Oven, M.J., 1981, "Boiling heat transfer with arrays of impinging jets", ASME Paper No. 80-HT-47.
- [11] Kokado, J., Hatta, N., Takuda, H., Harada, J., and Yasuhira, N., 1984, "An Analysis of film boiling phenomena of subcooled water spreading radially on a hot steel plate", Arch. Eisenhüttenwes., Vol. 55, pp. 113-118.
- [12] Wolf, D. H., Incropera, F. P., and Viskanta, R., 1993, "Jet impingement boiling", Advances in Heat Transfer, Vol. 23, pp. 1-132.



이 정 호

- 한국기계연구원 에너지기계연구본부
에너지플랜트팀 선임연구원
- 관심분야 : jet/spray cooling, micro thermal
system, energy plant
- E-mail : jungho@kimm.re.kr



박 상 진

- 한국기계연구원 에너지기계연구본부
에너지플랜트팀 선임연구원
- 관심분야 : thermal system optimum design,
energy plant, desalination plant
- E-mail : giant@kimm.re.kr