

플라즈마 풍동 시설용 분절형 아크 플라즈마 토치의 해석적 설계변수 해석

서준호* · 최수석** · 최성만*** · 홍봉근*

Analytical Analysis of Segmented Arc Plasma Torch for Plasma Wind Tunnel Facility

Jun-Ho Seo* · Sooseok Choi** · Seong-Man Choi*** · Bong-Gun Hong*

ABSTRACT

A parametric study is conducted for the segmented arc plasma torch with the input power and current of 0.4 MW and 300 A, respectively. For this purpose, we use the analytical relationship equations between plasma temperature, inner diameter (R) and length (L) of the torch constrictor at the given input power and current conditions based on the arc channel model. The results reveal that arc plasma temperatures show non-linear behavior or absence corresponding to the variations of L and R when their values become larger than 1.25 m and 7.5 mm, respectively. For $L < 1.25$ m and $R < 7.5$ mm, however, they can increase monotonically as L increase or R decrease when one of both parameters is fixed. From these parametric study results, optimum ranges of R and L are suggested as $5.5 \text{ mm} \leq R \leq 7.0 \text{ mm}$ and $0.5 \text{ m} \leq L \leq 1.0 \text{ m}$ for 0.4 MW class segmented arc plasma torch, under which stable arc plasma with the temperatures of $\sim 15,000 \text{ K}$ can be achieved at the input currents of $\sim 300 \text{ A}$.

초 록

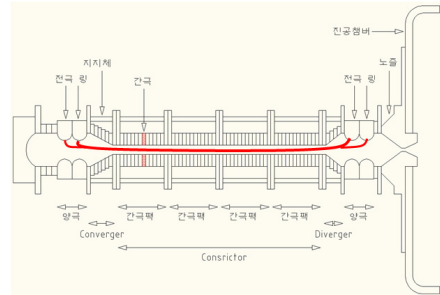
아크 채널 모델을 이용하여 플라즈마 온도를 매개로 플라즈마 입력전력과 전류 조건에 따른 간극 반지름(R) 및 간극팩 묶음 길이(L) 변수 계산이 가능한 해석해를 유도하고 이를 이용하여 300 A 전류조건에서 0.4 MW 급 분절형 아크 플라즈마 토치에 대한 해석적 설계 변수 해석을 수행하였다. 해석 결과, $L < 1.25 \text{ m}$, $R < 7.5 \text{ mm}$ 에 대해, 고정된 R 값에서 L 이 길어지거나 반대로 L 값이 일정할 때, R 이 작아질수록 플라즈마 온도는 비례하여 증가하는 경향을 가지고 있음을 알 수 있었으며, 그 이상의 범위에서는 만족하는 플라즈마 온도 해가 없거나 2개 이상 존재하여 주어진 전류 및 전력조건에서 아크 플라즈마의 형성이 불가능하거나 불안정할 것으로 예측되었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 입력전류가 300 A 일 때 약 15,000 K의 아크 플라즈마 온도를 안정적으로 구현할 수 있을 것이라 여겨지는 0.4 MW 급 분절형 아크 플라즈마 토치의 간극 반지름 R 및 간극팩 묶음 길이 L 의 설계범위를 각각 $5.5 \text{ mm} \leq R \leq 7.0 \text{ mm}$, $0.5 \text{ m} \leq L \leq 1.0 \text{ m}$ 범위로 제안하였다.

Key Words: Plasma Wind Tunnel(플라즈마 풍동), Segmented Plasma Torch(분절형 플라즈마 토치), Arc Channel Model(아크 채널 모델), Analytic Solution

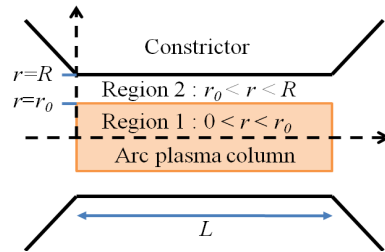
1. 서 론

전북대학교에서는 우리나라 최초로 0.4 및 2.4 MW 급 초음속 플라즈마 풍동 시설 구축사업을 수행하고 있다. 구축 시설의 핵심장치인 0.4 및 2.4 MW 급 대출력 초음속 플라즈마 발생기로는 Fig. 1(a)와 같이, 양 전극 사이에, 전기적으로 절연된 도넛 형태의 간극을 다수 삽입하여 아크 길이를 늘임으로써, 플라즈마 출력을 비례하여 높일 수 있는 분절형 (Segmented Type) 아크 플라즈마 토치를 사용할 계획이며, 제작을 위해 현재 설계 중인 0.4 MW 급 토치는 0.4 MW 입력 전력에 대해, 노즐 출구에서 13 MJ/kg 이상의 플라즈마 비엔탈피 구현과 전극에 의한 오염도를 0.05 wt % 이하로 제어하는 것을 목표로 하고 있다. 일반적으로 공기와 같은 산화성 기체를 사용하는 아크 플라즈마 토치에서 전극 물질의 부식은 전극 당 입력전류가 높을수록 급격히 진행되기 때문에[1], 상기 전극에 의한 오염도 제한 조건을 만족시키기 위해선, 가급적 낮은 전류로 출력 목표를 달성해야 하며, 이에 따라, 본 설계에서는 전극당 최대 허용전류를 300 A 로 제한하였다. 따라서, 0.4 MW 급 초음속 플라즈마 풍동 시설을 위한 분절형 아크 플라즈마 토치는 300 A의 허용전류만으로 0.4 MW의 출력을 내고, 이를 통해 13 MJ/kg 이상의 비엔탈피를 갖는 플라즈마 유동을 발생시킬 수 있도록 설계변수를 최적화하는 작업이 필수적이다. 그러나, 대개의 플라즈마 토치와 마찬가지로 분절형 아크 플라즈마 토치 역시, 요구되는 입력 전력과 전류 제한 조건으로부터, 토치 구성의 핵심인 간극 반지름과 전체 간극팩 묶음(Constrictor) 길이 등을 결정하는 어떤 표준화된 설계 방법은 없는 상태인데, 이는 분절형 아크 플라즈마 토치의 설계변수 및 운전변수 모두가 서로 간에 영향을 미치면서 아크 플라즈마 유동을 형성하므로, 한 변수의 변화만으로 다른 변수들과의 상호관계를 알아내는 것이 매우 곤란하기 때문이다. 반면, 분절형 아크 플라즈마 토치는 Fig. 1(a)와 같이 양 전극이 모두 제한된 표면적을 가진 링 형태로 되어 있어서[2,3,4], 막대 음극 - 원통형 노즐 양극이나 공동형 음극 및 원통형 노즐 양극을 갖는 다른 방식의 비이송식 아크 플라즈마 토치

와는 달리, 아크의 음극 점 및 양극 점이 축 방향으로 요동할 여지가 최소화 되어 있어 이로 인한 플라즈마 불꽃의 요동이 억제 되도록 설계된 것이다. 또한, 양 전극 사이에 발생된 아크 역시, 전극 링 내경보다 더 작은 내경을 가진 간극팩 묶음 통로를 지나가게 하고 회전방향 공기 주입을 통해 안정화시킴으로써, 반경방향 요동 역시, 강하게 제한할 수 있기 때문에, 고출력 운전에도 굉장히 안정적인 방전을 유지할 수 있는 구조를 가지고 있다. 또한, 간극팩 묶음의 길이가 상대적으로 다른 부위에 비해 길기 때문에, 인가된 대부분의 플라즈마 전력이 간극팩 묶음 내부 중심축을 따라 길게 형성되는 아크 플라즈마 기둥에 집중되는 형태가 된다.



(a)



(b)

Fig. 1. A schematic of the segmented arc plasma torch (a) and simplified cylindrical conductor model (b) for arc plasma column

이와 같은 구조적 특징을 가진 분절형 아크 플라즈마 토치 고유의 설계 개념 덕분에, 잘 알려진 아크 채널 모델[5,6]을 적용하여 플라즈마 입력 전력과 전류 제한 조건으로부터 간극 반지름 및 간극팩 묶음 전체 길이 사이의 관계식을 유도할 경우, 이를 이용한 해석적 설계변수 특성 해석이 가능할 것이라고 기대할 수 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 Fig. 1(b)와 같이 길다란 원통형 전도체로 단순화된 분절형 아크 플라즈마에 대해, Raizer [5,6] 등이 제안한 바 있는 아크

* 전북대학교 고온플라즈마응용연구센터구축사업단

** 서울대학교 핵융합로공학선형연구센터

*** 전북대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: jhseo@jbnu.ac.kr

채널 모델을 적용함으로써, 300 A 이하의 입력 전류에서 0.4 MW 출력을 안정적으로 발생시킬 수 있는 분절형 아크 플라즈마 토치의 설계변수 범위를 파악하고자 한다.

2. 본 론

2.1 아크 채널 모델을 이용한 해석해

Fig. 2에 나타낸, 공기 (Air) 플라즈마의 온도에 따른 전기전도도 특성을 살펴보면, 약 6,000 K 이하에선 거의 0에 가까운 값을 가지지만, 6,000 K를 넘어서면, 온도가 증가할수록 전기전도도가 서서히 좋아지다가 8,000 K 이상에서는 온도에 거의 비례하여 증가한다[7].

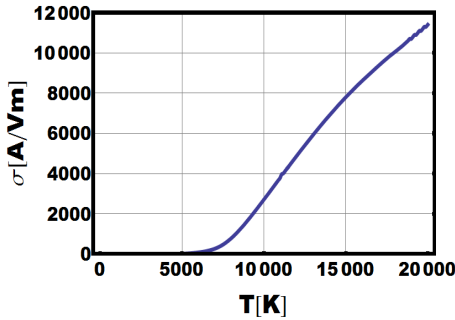


Fig 2. Electrical conductivity properties of air according to the temperatures

아크 채널 모델은 이와 같은 공기 플라즈마 전기전도도의 온도의존 특성을 근거로, 입력전류가 모두 6,000 K 이상의 고온 아크 채널만을 통해 흐를 수 있고, 이 부분에서만 주열 열 발생에 의한 고온 유지가 가능하므로, Fig. 1 (a)의 분절형 토치 내 아크 플라즈마를 Fig. 1 (b)의 반지름 R 및 길이 L 을 가진 간극팩 묶음 내부에서 길이 L 및 반지름 r_0 인 고온 원통형 아크 플라즈마 전도체 영역 (Region 1)과 그 사이에서 단순 온도 구배에 의한 열전도만 일어나는 언저리 영역 (Region 2)으로 단순화 할 수 있다고 가정한다. 특히, Fig. 1(b)의 Region 1과 같이 가정된 고온 원통형 아크 플라즈마 전도체 영역에서는 열전도율 역시 높기 때문에 축방향 온도분포는 없으며, 입력전력은 대류 및 복사에 의한 열 손실 없이 모두 간극 벽으로 열전도를 통해 빠져 나간다고 가정한다. 이와 같은 아크 채널 모델에 기반한 플라즈마 기둥의 반경방향 열전도 및 온도 분포에 대한 가정으로부터, Reizer 등은[5,6] Fig. 1 (b)의 각 영역에 대해 아래 식과 같은 열전달

방정식을 도출한 바 있다.

Region 1 : $0 < r < r_0$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \left(\lambda(T) \frac{dT}{dr} \right) + \frac{j^2}{\sigma(T)} = 0 \quad (1)$$

Region 2 : $r_0 < r < R$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \left(\lambda(T) \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2)$$

여기서, $\lambda(T)$ 및 $\sigma(T)$ 는 온도 T 에 따른 공기 기체의 열전도도와 전기전도도를 의미하며 j 는 전류 I 로부터 아래 식 (3)과 같이 계산하여 얻어지는 전류밀도이다.

$$j = \frac{I}{\pi r_0^2} \quad (3)$$

따라서, 식(3)과 같이 주어지는 전류밀도 j 를 식 (1)에 대입하고 $r=0$ 에서 온도분포가 대칭임을 감안하여 식 (1)을 영역 1에서 적분하면 아래 식 (4)와 같이 표현되는 해석해를 구할 수 있다.

Region 1 : $0 < r < r_0$

$$\int_0^T \sigma(t) \lambda(t) dt = \frac{I^2}{4\pi^2 r_0^2} \quad (4)$$

한편, Fig. 1(b)의 영역 2에서 간극 벽의 온도는 플라즈마 온도에 비해 무척 작기 때문에 0으로 가정할 수 있고, 또한, 대류와 복사에 의한 열전달을 무시하였으므로, $r=r_0$ 에서 길이 L 의 원통형 전도체 아크 기둥 표면을 빠져나가는 전체 열량이 플라즈마 입력 전력 P 가 된다는 것을 감안하여 식 (2)를 적분하면, 아래 식 (5)와 같은 또 하나의 해석해를 얻게 된다.

Region 2 : $r_0 < r < R$

$$\int_0^T \lambda(t) dt = \frac{P}{2\pi L} \ln \frac{R}{r_0} \quad (5)$$

여기서, T 는 아크 반경 r_0 에서의 플라즈마 온도이며, 온도가 균일한 원통형 아크 전도체 가정에 따라 아크 플라즈마의 온도가 된다. 또한, 식 (5)에서 구해지는 아크 반경 r_0 를 식 (4)에 삽입하여 정리하면 아래 식 (6)을 얻을 수 있는데, 이 식으로부터, 입력 전력 P 가 주어질 때, 토치 주요 설계변수인 간극팩 묶음 길이 L 과 간극 반지름 R 및 운전변수인 입력전류 I 사이의 상호 관계를 플라즈마 온도 T 를 매개로 하여 살펴볼 수 있게 된다.

$$L = \frac{P}{2\pi} \ln \left(\frac{2\pi R}{I} \sqrt{\int_0^T \sigma(t) \lambda(t) dt} \right) / \int_0^T \lambda(t) dt \quad (6)$$

2.2 설계변수 특성 해석 결과

Fig. 3은 플라즈마 입력 전력 P 와 입력전류 I 가 각각 0.4 MW 및 300 A일 때, 플라즈마 온도 T 및 간극 반지름 R 값에 따른 간극팩 묶음 길이 L 의 변화를 식 (6)을 써서 도시한 것이다. 이 Fig.으로부터, 먼저, 간극팩 묶음 길이 L 이 1.25 m 이상이거나 간극 반지름 R 이 7.5 mm를 초과하면, 온도에 따른 L 의 변화가 비선형 특성을 보이지만, 1.25 m 와 7.5 mm를 기준으로 L 및 R 값이 그 이하 영역에서는, 고정된 R 값에서 간극팩 묶음 길이 L 이 길어지거나 반대로 L 값이 일정할 때, 간극 반지름 R 이 작아질수록 플라즈마 온도는 비례하여 증가하는 경향을 가지고 있음을 알 수 있다. 예를 들어, $R = 5$ mm인 경우, L 값이 0.2 m에서 0.5 m 까지 늘어날 때, 플라즈마 온도는 약 15,000 K에서 16,000 K까지 단조 증가하며, 반대로, $L = 0.5$ m 일 때, R 값을 7.5 mm에서 5 mm로 감소시키면, 플라즈마 온도는 약 13,300 K에서 16,000 K까지 2,700 K 가량 증가한다. 이러한 현상은 입력전류 300 A 및 입력전력 0.4 MW 일 때, R 및 L 의 변화에 따른 플라즈마 반지름 r_0 의 변화가 플라즈마 온도 변화에 결정적인 영향을 미치기 때문에 일어난다.

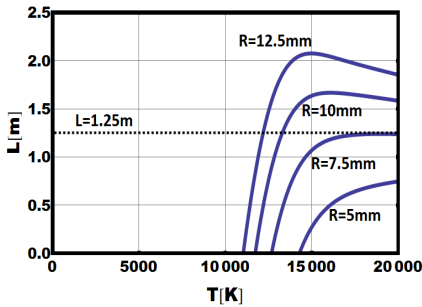


Fig 3. Constrictor length L according to the plasma temperatures and its radius R at $P=0.4$ MW and $I=300$ A

예를 들어, 간극팩 묶음 길이 L 이 증가함에 따라 플라즈마 반지름 r_0 가 감소하여 가늘고 길어지는 대신 플라즈마 온도가 증가하는 경향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 플라즈마 전력이나 기타 제한 조건 없이, $I = 300$ A를 흘리기 위해 필요한 플라즈마 반지름 r_0 를 식 (4)에 따라 플라즈마 온도의 함수로 표현한 것과 $P = 0.4$ MW, $R = 5.0$ mm 일 때, 0.2 ~ 0.5 m 사이의 간극팩 묶음 길이 내에서 가뉘지는 아크

플라즈마 기둥의 반지름 r_0 를 식(5)를 이용하여 플라즈마 온도에 따라 나타낸 것을 함께 도시한 것이다.

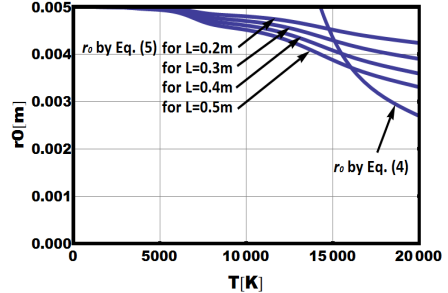


Fig 4. Plasma radius r_0 represented by Eq. (4) and (5) for plasma temperatures ($P = 0.4$ MW, $I = 300$ A and $R = 5$ mm)

아크 채널모델의 가정에 따라, 플라즈마 입력 전력, 전류, 간극팩 묶음 길이 및 그 반지름이 주어질 경우, 식 (4) 및 식 (5)에 의한 두 특성 곡선이 만나는 지점에서 플라즈마 반지름 r_0 는 일의적으로 결정된다. 이 Fig. 4로부터, 식 (4) 및 (5)에 의한 플라즈마 반지름은 일반적으로 온도가 증가함에 따라 전기전도도가 커지고 (Fig. 2 참조) 이에 따라 300 A의 전류를 흐르게 하기 위해 플라즈마 반지름이 작아지는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 특히, 간극 반지름 R 에 의해 그 성장이 제한된 아크 플라즈마 반지름 r_0 들은 식 (5)에 따라 간극팩 묶음 길이 L 이 커질수록 같은 온도에서 더 작은 값을 가지게 되는데, 이 경우 300 A의 전류를 흘리기 위해선 식 (4)에 의해 더 높은 온도를 가져야만 가능하기 때문에, 아크 플라즈마는 상대적으로 더 가늘어지고 뜨거워지게 된다. 그러나, Fig. 3으로부터 알 수 있듯이, 간극 반지름 R 이 일정할 때, 간극팩 묶음 길이 L 을 증가시켜 플라즈마 온도가 증가하는데에는 R 값에 따라 한계가 존재하게 된다. 곧, Fig. 3은 $R = 5$ mm인 경우, L 은 0.75 m 이하 이어야 20,000 K 이하의 아크 플라즈마 형성이 가능하며, $R = 7.5$ mm인 경우 L 이 1.25 m 이상이면, 식 (6)을 만족하는 플라즈마 온도가 아예 존재하지 않는다는 것을 보여주고 있다. 결국, 아크채널모델을 바탕으로 유도한 식(4), (5) 및 (6)의 해석해들은 해당 R 값이 주어졌을 때, 간극팩 묶음 길이 L 이 증가함에 따라 아크 플라즈마 기둥은 상대적으로 가늘고 길어지며 더 뜨거워짐으로서, 설계변수조건 (간극 반지름 R 및

L) 변화에 따른 열전도 에너지 균형을 맞추는 경향을 보이지만, 일정 L 값을 넘어서면, 주어진 입력전력에 대해 더 이상 단순 열전도에 의한 에너지 균형을 이룰 수 없는 조건에 다다르게 된다는 것을 보여준다. 이상과 같은 고찰로부터, 300 A의 입력전류 제한조건을 가진 0.4 MW 급 분절형 아크 플라즈마 토치의 간극 반지름 R 은 7.5 mm 이하로 설계될 필요가 있으며, 간극폭 묽음 길이 L 역시, 설계된 간극 반지름 R 값에 대해 Fig. 3과 같은 특성 곡선을 통하여 플라즈마 발생 및 유지가 가능한 범위에서 선정해야 함을 알 수 있다. 예를 들어, 표 1에 $R = 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5$ mm 일 때, 15,000 K 및 20,000 K의 플라즈마 온도값을 갖는 L 값을 나타내었다.

Table 1. Constrictor length L according to its radius R at $T = 15,000$ K and 20,000 K ($P = 0.4$ MW and $I = 300$ A)

R [mm]	L [m] ($T=15,000$ K)	L [m] ($T=20,000$ K)
5.0	0.27	0.75
5.5	0.46	0.87
6.0	0.63	0.97
6.5	0.79	1.06
7.0	0.93	1.15
7.5	1.07	1.25

이로부터, $R = 6.0$ mm 인 경우, 0.63 m 의 간극폭 묽음 길이에서 15,000 K의 온도를 가지는 공기 플라즈마의 발생 및 유지가 가능할 것으로 판단되는 반면, 0.97 m 이상에서는 앞에서 설명한 바와 같이, 400 kW의 입력전력을 가늘고 길어지고 더 뜨거워지는 것만으로는 간극벽으로 열전도를 통해 에너지 균형을 유지하는 것이 불가능할 것으로 여겨진다. 한편, Fig. 3에서 $R = 7.5$ mm를 초과할 경우에는 반대로 L 값에 따라 구현 가능한 플라즈마 온도가 2개가 되는 비선형성을 확인할 수 있다. 이는 해당 운전조건 (전류 및 입력전력)과 설계변수조건 (간극 반지름 R)에 대해 열전도에 의한 에너지 균형을 맞출 수 있는 플라즈마 온도가 2개가 존재할 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는, 공기 플라즈마의 온도가 증가함에 따라, 공기 플라즈마의 열전도도와 전기전도도의 곱으로 표현된 물성값($\lambda(T)\sigma(T)$)이 Fig. 5에 보인 바와 같이 10,000 K에서 15,000 K까지는 단조 증가하지만, 15,000 K ~ 20,000 K 영역에서는 오

히려 감소하다 증가하는 비선형 특성을 가지기 때문이다[7].

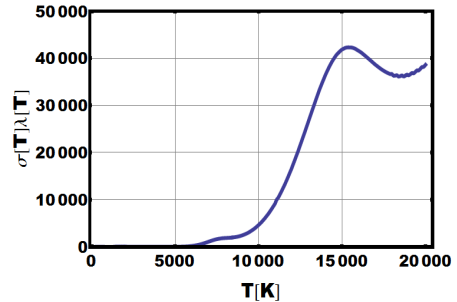


Fig. 5. Thermal conductivity (a) and its multiplication of electrical conductivity (b) of air plasma, which are used in Eqs. (4) and (5)

이들 물성값은 식(6)에서 플라즈마 온도를 결정하는데 사용되었다. 이러한 공기플라즈마의 온도 특성 때문에 $R = 7.5$ mm를 초과한 경우, 약 15,000 K 이상의 플라즈마 온도가 요구되기 시작하는 L 값에 대해서는 식 (6)으로부터 2개 이상의 온도값이 존재하게 된다. 공기 플라즈마의 온도에 따른 물성값의 변화가 이와 같이 비선형성을 띠는 이유는, 공기 기체 내 산소, 질소, 아르곤 등의 구성 원소들이 온도가 올라감에 따라, 단순 병진 운동 외에, 해리, 이온화, 재결합, 복사열전달 등과 같은 복잡하면서도 다수의 물리 화학작용을 일으키기 때문에 발생한다. 곧, 15,000 K 이상의 온도에서는 공기 입자들의 해리, 이온화, 재결합 등으로 인해 열전도도 등이 급격히 변화할 수 있고 이에 따라, 갑작스럽게 아크 기둥의 온도가 급격히 증가했다가 떨어졌다 다시 증가하는 등의 요동이 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 분절형 아크 플라즈마 토치의 설계 시, 아크 플라즈마의 온도를 15,000 K를 기준으로 Fig. 3의 비선형 영역이 나타나지 않도록 플라즈마 온도, 간극 반지름 R 값 및 간극폭 묽음 길이 L 을 설정하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 표 2는 입력전력 0.4 MW, 입력전류 300 A 일 때, 표 1에서 플라즈마 온도 15,000 K일 경우 제시한 간극폭 묽음 길이 L 과 간극 반지름 R 을 식 (7)에 대입하여 얻은, 벽면으로 전달되는 단위면적당 열속 q'' 을 나열한 것이다.

$$q'' = \frac{P}{2\pi RL} \quad (7)$$

표 2로부터, $R = 5.5$ mm 이하일 경우에는 상대적으로 짧은 길이 때문에, 벽면으로 전달되는 열

속이 급격히 증가하는데, 일반적으로 입력전력에 대해 토치로부터 빠져나오는 엔탈피의 비로 정의되는 토치 효율을 50%로 가정할 때[1], $R = 5.5 \text{ mm}$ 이하이면, 열속이 10 MW/m^2 이상이 될 수 있어 토치 길이를 늘이지 않으면 해당 토치의 냉각 장치 구현에 심각한 어려움이 따를 것으로 예상된다. 따라서, 간극 반지름을 5.5 mm 이하로 줄일 경우, 상대적으로 아크 플라즈마 온도는 $15,000 \text{ K}$ 보다 높게 구현하면서 토치 길이를 표 2에서 제시한 값보다 늘여서 설계하는 것이, 실제적인 냉각 장치 운영에 도움이 될 것으로 여겨진다.

Table 2. Heat fluxes q'' to the constrictor wall according to constrictor length L and radius R at the plasma temperature of $15,000 \text{ K}$ ($P = 0.4 \text{ MW}$ and $I = 300 \text{ A}$)

R [mm]	L [m] ($T=15,000\text{K}$)	q'' [MW/m^2] ($T=15,000\text{K}$)
5.0	0.27	46.72
5.5	0.46	25.15
6.0	0.63	16.80
6.5	0.79	12.41
7.0	0.93	9.73
7.5	1.07	7.93

한편, 간극 반지름 R 이 7.0 mm 이상일 경우, 표 2로부터 벽면으로 전달되는 열속은 10 MW/m^2 이하로 떨어질 것으로 예상되지만, 50% 이하의 토치 효율 등을 고려할 때, 간극 반지름의 증가는 아크 플라즈마의 출력밀도 저하로 이어져, 출구 엔탈피 및 플라즈마 입력 가스 유량 등에 제한이 따를 수 있다. 결론적으로, 0.4 MW 급 분절형 토치의 간극 반지름 R 과 이에 대응한 간극벽 묶음 길이 L 의 최적 설계값은, 전류 제한조건이 300 A 일 때, $5.5 \text{ mm} \leq R \leq 7.0 \text{ mm}$ 범위에서 플라즈마 온도에 따라 간극벽 묶음 길이 L 의 범위를 Fig. 3 및 표 1과 2에 따라 선정하고, 결정된 R 및 L 값에 대해 아크 전류 등을 통해 운전범위를 결정하는 것이 타당할 것으로 여겨진다. 예를 들어, 플라즈마 온도 $15,000 \text{ K}$ 를 기준으로 $5.5 \text{ mm} \leq R \leq 7.0 \text{ mm}$ 범위에 대해, 표 1 및 2로부터, 간극벽 묶음 길이의 범위를 $0.5 \text{ m} \leq L \leq 1.0 \text{ m}$ 에서 선택할 수 있다. 마지막으로, Fig. 6 (a)와 (b)는 $P = 0.4 \text{ MW}$ 조건에서, 플라즈마 온도 $15,000 \text{ K}$ 를 기준으로 각각 $R = 6.0 \text{ mm}$ 일 때 상기 설계변수 범위에 해당하는 L 및 전류 변화에 따른 플라즈마 온도 변화와 $L = 0.7 \text{ m}$ 일 때 R 및 전류 변화에 따

른 플라즈마 온도 변화를 도시한 것이다.

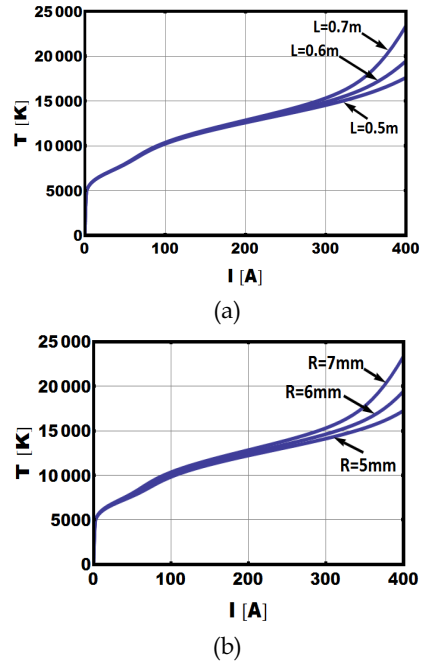


Fig. 6. Plasma temperatures according to the input currents I for (a) $R = 6.0 \text{ mm}$ and (b) $L = 0.7 \text{ m}$ at $P = 0.4 \text{ MW}$

Fig. 6으로부터, R 및 L 값의 크기가 플라즈마 온도 $15,000 \text{ K}$ 를 기준으로 이미 결정된 0.4 MW 급 분절형 토치의 아크 플라즈마 온도는 입력전류 변화에 의해 별도로 조절될 수 있음을 알 수 있다. 특히, R 및 L 값의 변화에 따른 플라즈마 온도 변화 경향은 300 A 이상에서 그 차이가 눈에 띄는 것, 그 이하에서는 전류 변화에 대한 온도 변화 경향이 거의 비슷하다. 이로부터, Fig. 6에서 사용된 설계변수 값들은 300 A 전류 제한조건에서 0.4 MW 분절형 아크 플라즈마를 $15,000 \text{ K}$ 이하의 온도로 구현하는데 적합한 범위에 있다고 여겨진다. 반면, 해당 설계조건에서 전류가 300 A 이상 인가되면 아크 플라즈마의 온도는 상대적으로 쉽게 $15,000 \text{ K}$ 이상 될 것으로 예상되는데, 이 경우엔 복사에 의한 에너지 손실이 급격해 질 뿐 아니라 전극에 의한 오염도 극심해 질 것으로 예상되므로, 주의할 필요가 있다.

3. 결 론

300 A 이하의 입력전류 제한 조건을 갖는 0.4 MW 급 분절형 아크 플라즈마 토치에 대해, 아

크 채널 모델을 이용하여 플라즈마 입력 전류 I 와 입력 전력 P 가 주어질 때, 간극 반지름 R 및 간극팩 묶음 길이 L 이 플라즈마 온도 T 와 맺는 관계를 유도하고, 이를 이용하여, 300 A, 0.4 MW 분절형 아크 플라즈마에 대해, R 및 L 의 변화에 따른 플라즈마 온도 T 와 단위면적당 열속 q'' 의 변화 등을 추적하였다. 그 결과, 간극팩 묶음 길이 L 이 1.25 m 이상이거나 간극 반지름 R 이 7.5 mm를 초과하면, 온도에 따른 L 의 변화가 비선형 특성을 보이지만, 1.25 m 와 7.5 mm를 기준으로 L 및 R 값이 그 이하 영역에서는, 고정된 R 값에서 간극팩 묶음 길이 L 이 길어지거나 반대로 L 값이 일정할 때, 간극 반지름 R 이 작아질수록 플라즈마 온도는 비례하여 증가하는 경향을 가지고 있음을 알 수 있다. 특히, $L > 1.25$ m, $R > 7.5$ mm 일 때 나타나는 설계변수 변화에 대한 플라즈마 온도의 비선형 특성은 이 영역에서 일어나는 공기 플라즈마의 해리, 이온화, 재결합 등과 같은 복잡하면서도 동시에 발생하는 다수의 물리 화학작용 때문에 일어나며, 결과적으로 이 영역에 해당하는 설계변수를 가진 분절형 아크 플라즈마 토치는 300 A, 0.4 MW 출력 구현에 있어서 불안정한 아크 플라즈마 기동을 형성할 것으로 예측되었다. 반면, 그 이하에서 R 및 L 값 변화에 선형적으로 변하는 아크 플라즈마 온도 거동은 이들 설계변수 변화에 대응하여 일어나는 아크 플라즈마 기동 반지름 r_0 의 증감에 따른 결과이며, 이로부터, 전류 제한조건이 300 A 일 때, 15,000 K의 아크 플라즈마 온도를 구현할 수 있을 것이라 여겨지는 0.4 MW 급 분절형 토치의 간극 반지름 R 및 간극팩 묶음 길이 L 의 최적 설계범위를 각각, $5.5 \text{ mm} \leq R \leq 7.0 \text{ mm}$, $0.5 \text{ m} \leq L \leq 1.0 \text{ m}$ 범위로 제안하였다. 특히, 이 범위에서는, 토치 효율 50%이하로 가정할 때, 간극벽으로 전달되는 열속 q'' 을 약 10 MW/m^2 이내로 구현 가능할 것으로 여겨지므로, 분절형 아크 플라즈마 토치의 냉각기구에 대한 부담을 크게 덜 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 제안된 설계변수 범위에서 분절형 아크 플라즈마 토치는 입력전류 300 A 이하에서 15,000 K 이하의 아크 플라즈마를 상대적으로 안정적으로 만들 수 있을 것으로 기대되었으며, 이 에 따라, 공기 플라즈마의 열복사 손실과 전극부식에 의한 오염도 최대한 피할 수 있을 것으로 예측된다. 이 외, 분절형 아크 플라즈마 토치의 구조적 특성은 Fig. 1 과 같이 간극팩 묶음의 길이가 상대적으로 다른 부위에 비해 길어서, 인가된 대부분의 플라즈마

전력이 간극팩 묶음 내부 중심축을 따라 길게 형성되는 아크 기동에 집중되는 형태에 있기 때문에, 아크 채널 모델이 적용될 수 있는 가장 이상적인 형태의 토치이며 따라서, 상대적으로 출력규모가 크고 복잡한 구조를 갖는 분절형 아크 플라즈마 토치의 특성을 간단하면서도 알기 쉽게 이해하는 데 유용할 뿐 아니라, 대류 및 복사에 의한 열전달을 무시하고, 원통형 전도체로 단순화된 아크 플라즈마의 반경방향 열전도만을 가정하는 아크 채널 모델의 한계에도 불구하고, 간극 반지름 및 간극팩 묶음 길이의 합리적 선택 범위를 제공해 줄 수 있어 향후, 2.4 MW 급 대출력 토치의 설계변수 해석에도 유용할 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

1. Fauchais, P., and Vardelle, A., "Thermal plasmas," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 25, Dec. 1997, pp.1258~1280.
2. Purpura, C., Filippisa, F., Grapsa, E., Trifonia, E., and Savinob, R., "The GHIBLI plasma wind tunnel: Description of the new CIRA-PWT facility," Acta Astronaut., Vol. 61, 2007, pp.331~340.
3. Marieu, V., Reynier, Ph., Marraffa, L., Filippisa, F., and Caristia, C., "Evaluation of SCIROCCO plasma wind-tunnel capabilities for entry simulations in CO2 atmospheres," Acta Astronaut., Vol. 61, 2007, pp.604~616.
4. Takahashi, Y., Kihara, h., and Abe, K., "Numerical Investigation of Nonequilibrium Plasma Flows in Constrictor- and Segmented- Type Arc Heaters," J. Thermophys. Heat Transfer, Vol. 24, No. 1, Jan.-Mar. 2010, pp.31~39.
5. Raizer. Y. P., Gas Discharge Physics, Springer-Verlag, 1991.
6. Zukov, M. F., Zasyupkin, I. M., Timosherskii, A. M., Mikhailov, B. I., and Desyatkov, G. A., Thermal Plasma Torches : Design, Characteristics, Application, Cambridge International Science Publishing Ltd., 2007.
7. Boulos, M. I., Fauchais, P., and Pfender, E., Thermal Plasmas : Fundamentals and Applications, Volume 1, Plenum Press, 1994