

技術論文

플라즈마 풍동 시설용 분절형 아크 플라즈마 토치의 이론적 설계변수 해석

서준호* · 최수석** · 최성만*** · 홍봉근*

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

Jun-Ho Seo* · Sooseok Choi** · Seongman Choi*** · Bong-Guen Hong*

ABSTRACT

A parametric study is conducted for the design of 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 between input power, current condition, plasma temperature, inner diameter (R) and length (L) of the torch constrictor based on arc channel model. The results reveal that arc plasma temperatures increase monotonically as L increases or R decreases for the ranges of $R \leq 7.5$ mm and $L \leq 1.25$ m. For larger value of R and L than 7.5 mm and 1.25 m, respectively, however, they show non-linear behavior corresponding to the variations of L , which stands for the generation of unstable arc plasma. From this parametric study, optimum ranges of R and L are suggested as 5.5 mm $\leq R \leq 7.5$ mm and 0.25 m $\leq L \leq 0.5$ m for 0.4 MW class segmented arc plasma torch, under which stable arc plasma can be achieved at the input currents of ~ 300 A.

초 록

아크 채널 모델을 이용하여 플라즈마 온도를 매개로 플라즈마 입력전력과 전류 조건에 따른 간극 반지름(R) 및 간극폭 묽음 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, $R \leq 7.5$ mm, $L \leq 1.25$ m 인 범위에 대해, L 이 길어지거나 R 이 작아질 때, 플라즈마 온도는 비례하여 증가하는 경향을 가지고 있음을 알 수 있었으며, 그 이상의 범위에서는 증가하다 감소하는 비선형 현상이 존재하여 주어진 전류 및 전력조건에서 아크 플라즈마의 형성이 불가능하거나 불안정할 것으로 예측되었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 입력전류가 300 A 일 때, 아크 플라즈마 온도를 안정적으로 구현할 수 있을 것이라 여겨지는 0.4 MW 급 분절형 아크 플라즈마 토치의 간극 반지름 R 및 간극폭 묽음 길이 L 의 설계범위를 각각 5.5 mm $\leq R \leq 7.5$ mm, 0.25 m $\leq L \leq 0.5$ m 범위로 제한하였다.

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

접수일 2010. 12. 3, 수정완료일 2011. 6. 20, 게재확정일 2011. 6. 24

* 정희원, 전북대학교 고온플라즈마응용연구센터구축사업단

** 정희원, 서울대학교 핵융합로공학 선행연구소

*** 종신회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부

† 교신저자, E-mail: jhseo@jbnu.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 25-26, 제주 샤인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

최근, 우리나라 우주개발로드맵이 구체화되면서 [1, 2] 달 탐사선 및 인공위성과 같은 우주선

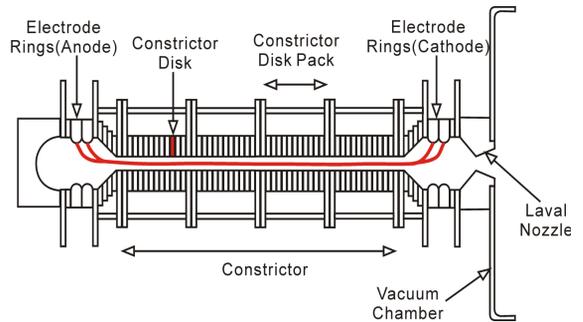
개발에 필요한 거대과학시설에 대한 관심이 커지고 있다. 이 중, 우주선의 지구 재진입 시 겪는 공력가열 [3-5] 현상뿐만 아니라, 인공위성 아크젯 추력기 등과 같은 우주 추진 기관 내부에서 일어나는 열유동 현상 [6, 7] 모사에 필수적인 MW 급 초음속 플라즈마 풍동 시설이 전북 대학교에서 우리나라 최초로 구축되고 있다. 구축 시설의 핵심장치인 0.4 및 2.4 MW 급 대출력 초음속 플라즈마 발생기로는 Fig. 1(a)에 묘사된 것과 같은 분절형(Segmented Type) 아크 플라즈마 토치를 사용할 계획이며, 제작을 위해 현재 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.

분절형 아크 플라즈마 토치는 전극 간 길이가 제한되어 출력 증가를 위한 전압 증가에 한계가 있는 막대-노즐형 또는 공동형 토치와는 달리 [8], 양 전극 사이에, 전기적으로 절연된 도넛 형태의 간극(Constrictor Disk)을 다수 삽입하여 아크 길이를 늘임으로써, 플라즈마 출력을 전압에 비례하여 높일 수 있다는 장점이 있다. 특히, 공기와 같은 산화성 기체를 사용하는 직류 아크 플라즈마 토치들은 전극 당 입력전류가 높을수록 전극 물질의 부식이 급격히 진행되기 때문에 [8], 전극에 의한 오염도 제한 조건이 특별히 요구되는 초음속 플라즈마 풍동 시설의 경우, 가급적 낮은 전류로 상대적으로 높은 출력 목표를 달성할 수 있는 분절형 아크 플라즈마 토치의 사용이 바람직할 수 있다. 예를 들어, 0.05 wt % 이하의 전극 오염도 달성이 중요 목표 중 하나인 본 설계의 경우, 전극 당 최대 허용전류를 300 A 로 제한할 필요가 있으며, 이에 따라, 300 A의 허용전류만으로 0.4 MW의 출력을 내고, 이를 통해 13 MJ/kg 이상의 비엔탈피를 갖는 플라즈마 유동을 발생시킬 수 있도록 분절형 아크 플라즈마 토치의 각 설계변수를 최적화하는 작업이 필수적이다.

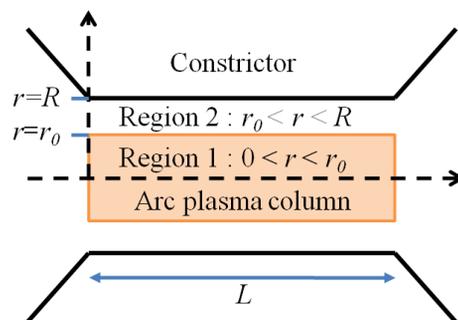
그러나, 대개의 플라즈마 토치와 마찬가지로 분절형 아크 플라즈마 토치 역시, 요구되는 입력

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)에 나타난 바와 같이 양 전극이 모두 제한된 표면적을 가진 링 형태로 되어 있어서[3-5], 막대음극 - 원통형 노즐 양극이나 공동형 음극 및 원통형 노즐 양극을 갖는 다른 방식의 비이송식 아크 플라즈마 토치와는 달리, 아크의 음극 점 및 양극 점이 축 방향으로 요동할 여지가 최소화 되어 있어 이로 인한 플라즈마 불꽃의 요동



(a)



(b)

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

이 억제 되도록 설계된다는 특징이 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.

이와 같은 구조적 특징을 가진 분절형 아크 플라즈마 토치 고유의 설계 개념 덕분에, 잘 알려진 아크 채널 모델[9, 10]을 적용하여 플라즈마 입력 전력과 전류 제한 조건으로부터 간극 반지름 및 간극팩 묶음 전체 길이 사이의 관계식을 유도할 경우, 이를 이용한 이론적 설계변수 특성 해석이 가능할 것이라고 기대할 수 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 Fig. 1(b)와 같이 길쭉한 원통형 전도체로 단순화된 분절형 아크 플라즈마 기둥에 대해, Raizer[9, 10] 등이 제안한 바 있는 아크 채널 모델을 적용함으로써, 300 A 이하의 입력전류에서 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

Figure 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[11]. 아크 채널 모델은 이와 같은 공기 플라즈마 전기전도도의 온도 의존 특성을 근거로, 입력전류는 모두 6,000 K 이상의 고온 아크 채널만을 통해 흐를 수 있고, 따라서, 이 부분에서만 주열 발생에 의한 고온 유지가 가능할 것이라는 생각에서 출발한다. 이러한 생각을 바탕으로 Fig. 1 (a)의 분절형 토치 내 아크 플라즈마 기둥을, 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

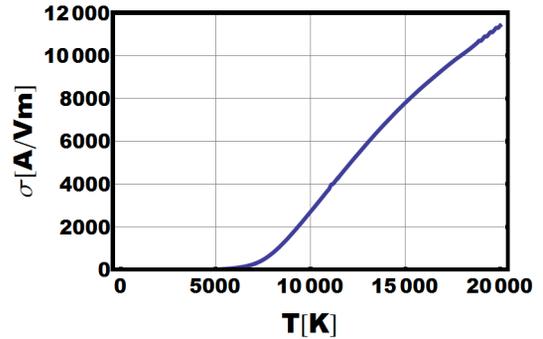


Fig. 2 Electrical conductivity properties of air according to the temperatures [11]

단순 온도 구배에 의한 열전도만 일어나는 언저리 영역 (Region 2)으로 단순화 할 수 있다고 가정한다. 특히, 고온 원통형 아크 플라즈마 전도체 영역 (Region 1)에서는 열전도를 역시 매우 높기 때문에 축방향 온도분포는 없다고 생각할 수 있으며, 입력전력은 대류 및 복사에 의한 열손실 없이 모두 간극 벽으로 열전도를 통해 빠져 나간다고 가정한다.

이와 같은 아크 채널 모델에 기반한 플라즈마 기둥의 반경방향 열전도 및 온도분포에 대한 가정으로부터, Raizer 등은[9, 10] Fig. 1 (b)의 각 영역에 대해 아래 식과 같은 열전달방정식을 도출한 바 있다.

영역 1 (Region 1) : $0 < r < r_0$

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

영역 2 (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 Eq. 3과 같이 계산하여 얻어지는 전류밀도이다.

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

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

영역 1 (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 Eq. 2를 적분하면, 아래 Eq. 5와 같은 또 하나의 해석해를 얻게 된다.

영역 2 (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, Eq. 5에서 구해지는 아크 반경 r_0 를 Eq. 4에 삽입하여 정리하면 아래 Eq. 6을 얻을 수 있는데, 이 식으로부터, 입력 전력 P 가 주어질 때, 토치 주요 설계변수인 간극폭 묶음 길이 L 과 간극 반지름 R 및 운전변수인 입력전류 I 사이의 상호관계를 플라즈마 온도 T 를 매개로 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

Figure 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 간극폭 묶음

길이 L 의 변화를 Eq. 6을 써서 도시한 것이다. 이 그림으로부터, 먼저, 간극폭 묶음 길이 L 이 1.25 m 이상이면, 온도에 따른 L 의 변화가 비선형 특성을 보이지만, 1.25 m를 기준으로 그 이하 범위에서는, 도시된 모든 R 값에 대해 간극폭 묶음 길이 L 이 길어질수록 플라즈마 온도는 비례하여 증가하는 경향을 가지고 있음을 알 수 있다. 반면, 고정된 L 값에 대해서는 간극 반지름 R 이 작아질수록 온도가 증가한다. 예를 들어, $R = 10$ mm 인 경우, L 값이 0.2 m에서 1.0 m 까지 늘어날 때, 플라즈마 온도는 약 11,900 K에서 12,800 K 까지 단조 증가하며, 반대로, $L = 0.5$ m 일 때, R 값을 12.5 mm에서 7.5 mm 로 감소시키면, 플라즈마 온도는 약 11,400 K에서 13,300 K까지 1,900 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. 곧, 간극 반지름이 일정할 때, 간극폭 묶음 길이 L 이 증가하면, 플라즈마는 반지름 r_0 를 감소시켜 가늘고 길어지는 대신 플라즈마 온도를 증가시켜 늘어난 길이 대비 간극 벽으로의 열전도 균형을 맞추려고 하기 때문이다. R 값이 주어질 때, L 증가에 따른 플라즈마 반지름 r_0 의 감소와 온도 증가 경향은 Eq. 4와 Eq. 5를 온도에 대해 서로 도시하여 만

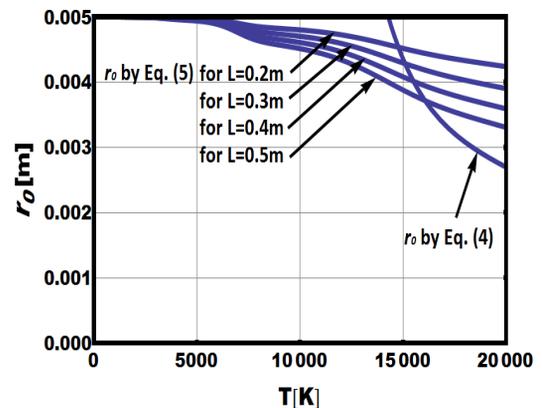


Fig. 3 Constricter length L according to the plasma temperatures and its radius R at $P=0.4$ MW and $I=300$ A

나는 지점들의 변화 경향을 나타내고 있는 Fig. 4를 통해 더 확실하게 확인할 수 있다.

Figure 4는, $I = 300$ A를 흘리기 위해 필요한 플라즈마 반지름 r_0 를 Eq. 4에 따라 플라즈마 온도의 함수로 표현한 것과 $P = 0.4$ MW, $R = 5.0$ mm 일 때, 0.2 ~ 0.5 m 사이의 간극폭 묶음 길이 내에서 가뉘지는 아크 플라즈마 반지름 r_0 를 Eq. 5를 이용하여 플라즈마 온도에 따라 나타낸 것을 함께 도시한 것이다. 먼저 이 그림에 나타난 Eq. 4에 따른 특성곡선으로부터, 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 Eq. 5에 따라 간극폭 묶음 길이 L 이 커질수록 같은 온도에서 더 작은 값을 가지게 된다. 이 경우 300 A의 전류를 흘리기 위해선 Eq. 4에 의해 더 높은 온도를 가져야만 가능하기 때문에, 아크 플라즈마는 상대적으로 가늘어지는 대신 더 뜨거워진다. 그러나, Fig. 3으로부터 알 수 있듯이, 간극 반지름 R 이 일정할 때, 간극폭 묶음 길이 L 을 증가시켜 플라즈마 온도를 더 증가시키는 데에는 R 값에 따라 일정한 한계가 존재하게 된다. 곧, Fig. 3은 $R = 5$ mm 인 경우, L 은 0.75 m 이하이어야 20,000 K 이하의 아크 플라즈마 형성이 가능하며, $R = 7.5$ mm 및 10 mm 인 경우 L 이 1.25 m 및 1.7 m 이상이면, Eq. 6을 만족하는 플라즈마 온도가 아예 존재하지 않는다는 것을 보여주고 있다. 결국, 아크채널 모델을 바탕으로 유도한 Eq. 4, 5 및 6의 해석해들은 해당 R 값이 주어졌을 때, 간극폭 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 맞추려는 경향을 보이지만, 일정 L 값을 넘어서면, 주어진 입력전력에 대해 더 이상 단순 열전도에 의한 에너지 균형조차 이룰 수 없는 조건에 다다르게 된다는 것을 보여준다.

한편, Fig. 3에서 $R = 7.5$ mm를 초과할 경우

에는 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 오히려 감소하다 증가

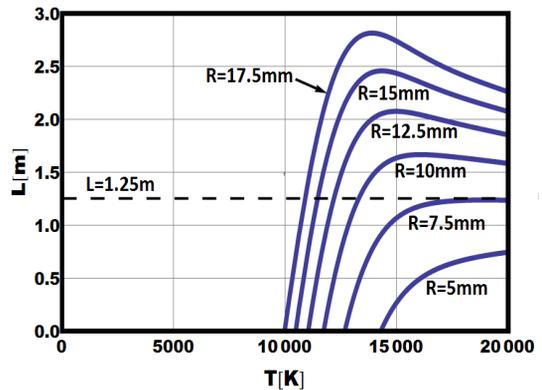


Fig. 4 Plasma radius r_0 represented by Eq. 4 and 5 for plasma temperatures ($P = 0.4$ MW, $I = 300$ A and $R = 5$ mm)

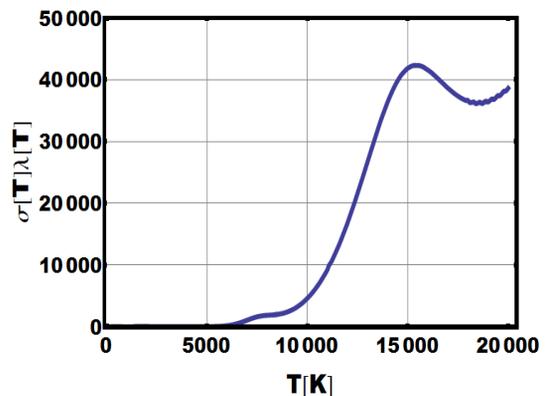


Fig. 5 Air plasma characteristics of thermal conductivity multiplied by electrical conductivity used in Eq. 4 and 5

하는 비선형 특성을 가지기 때문이다[11]. 이들 물성값은 Eq. 6에서 플라즈마 온도를 결정하는데 사용되었다. 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. 이러한 공기플라즈마의 온도 특성 때문에 $R = 7.5$ mm를 초과한 경우, Eq. 6으로부터 2개 이상의 온도값이 존재하게 된다. 따라서, 분절형 아크 플라즈마 토치의 설계 시, Fig. 3의 비선형 영역이 나타나지 않도록 플라즈마 온도, 간극 반지름 R 값 및 간극폭 묶음 길이 L 을 설정하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

이상과 같은 고찰로부터, $P=0.4$ MW, $I=300$ A의 입력전류 제한조건을 가진 분절형 아크 플라즈마 토치의 간극 반지름 R 은 7.5 mm 이하로 설계될 필요가 있으며, 간극폭 묶음 길이 L 역시, 1.25m 이하 영역에서, 실제 구현 가능한 플라즈마 온도를 고려하여 결정해야 함을 알 수 있다. 곧, 공기 플라즈마의 경우, 10,000 K 이하에서 열복사에 의한 손실은 미미하지만, 10,000 K 이상에서는 열복사율이 급격히 증가하는 특성을 가지고 있으므로, 복사에 의한 열전달을 무시한 아크채널 모델의 특성 상, 주어진 입력 대비 열복사 손실 등을 고려하여 실제 구현가능한 플라즈마 온도 범위를 선정하고 이를 기준으로 L 및 R 의 설계값을 결정할 필요가 있다. 예를 들어, 입력전력 대비 열복사에 의한 손실을 α 와 벽으로 전달되는 열 유속 q'' 을 아래 Eq. 7 및 8과 같이 표현할 경우, $R = 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5$ mm 일 때, $\alpha=20\%$ 가 되는 L 값 및 그때의 플라즈마 온도 T 와 q'' 를 Table 1에 나타내었다.

$$\alpha = \frac{\pi r_0^2 L \varepsilon}{P_0} \quad (7)$$

$$q'' = \frac{P}{2\pi RL} \quad (8)$$

Equation 7에서 ε 은 온도 T 에서 공기 플라즈마의 단위체적당 방사율(net emissivity)을 의미하며 온도에 따른 해당 값은 참고문헌 [11] 등에 나와 있는 데이터를 정리한 서울대 FUSMA 연구팀의 데이터베이스를 사용하였다.

Table 1로부터, $R = 6.0$ mm 인 경우, 0.31 m의 간극폭 묶음 길이에서 14,050 K의 온도를 가지는 공기 플라즈마의 발생 및 유지가 가능할 것으로 계산 되었는데, 이 때의 공기 플라즈마 단위체적당 방사율은 약 2,983 MJ/m³에 해당되어 주어진 R 및 L 값에서는 입력전력의 약 20%인 80 kW 가량의 에너지를 열복사로 방출할 수 있다. 따라서, 전도 뿐아니라, 대류 및 복사가 동시에 일어나는 실제 분절형 아크 플라즈마의 경우, 플라즈마 온도는 Table 1에서 예측한 값에 비해 상대적으로 낮을 것으로 예상된다. 예를 들어, $R=12.52$ mm, $L=0.4699$ m의 분절형 토치에 대해 이정일 등이 수행한 수치해석 연구결과 [12, 13]에 의하면, 중심축에서 반경방향으로 2.5 mm 영역에서 플라즈마 온도는 12,500 K ~13,500 K 사이에서 분포하며 벽쪽으로 다가갈수록 온도는 떨어지지만, 반경방향으로 약 5 mm 영역까지 주울 열 발생이 가능한 7,500 K 이상의 고온 영역을 유지한다고 보고된 바 있다.

반면, 5 mm 이상에서는 주울 열 발생이 급격히 줄어드는데, 이 영역에서의 온도분포는 주울 열 발생 보다는 열전도 등에 의해서 5,000 K 이상의 온도를 유지하는 것으로 보이며, 벽 근처인 12 mm 이상에서 급격히 감소하는 경향을 보였다. 곧, Fig. 1의 아크 채널 모델처럼, 주울 열 발생이 가능한 고온 영역을 원통형 전도체처럼 가지고 있지만, 주울 열 발생이 집중적으로 일어나는 원통형 전도체의 중심축 온도는 13,000 K 가량으로 상대적으로 낮고, 대류 및 복사 등의 영향으로 2.5 mm에서 5 mm까지의 온도 분포

가 7,500 K 까지 떨어지는 형태의 아크 기동을 가지고 있다는 것을 의미한다. 따라서, Table 1에서 제시된 R 및 L 값으로 설계된 토치의 경우, 실제 운전에 있어, 플라즈마 온도는 상대적으로 낮아질 것으로 예상할 수 있다.

또한, Table 1에 계산되어 나타낸 열유속 값으로부터, R 이 작아질 경우, 함께 짧아지는 길이 L 때문에, 벽면으로 전달되는 열유속이 매우 커짐을 알 수 있다. 예를 들어, 입력전력에 대해 토치로부터 빠져나오는 엔탈피의 비로 정의되는 토치 효율을 50%로 가정할 때, Table 1의 계산값에 의하면 $R = 5.5$ mm 이하일 경우, 열유속이 20 MW/m^2 이상이 될 수 있으므로, 토치 길이를 늘이지 않으면 해당 토치의 냉각 장치 구현에 심각한 어려움이 따를 것으로 예상된다. 따라서, 간극 반지름을 5.5 mm 이하로 줄일 경우, 토치 길이를 Table 1에서 제시한 값보다 늘여서 설계하는 것이, 실제적인 냉각 장치 운영에 도움이 될 것으로 여겨진다. 한편, 간극 반지름 R 이 7.5 mm 이상일 경우, Table 1로부터 벽면으로 전달되는 열유속은 약 10 MW/m^2 이하로 떨어질 것으로 예상되지만, 이 경우, 간극 반지름의 증가가 아크 플라즈마의 출력밀도 저하로 이어져 출구 엔탈피 및 플라즈마 입력 가스 유량 등에 제한이 따를 수 있다.

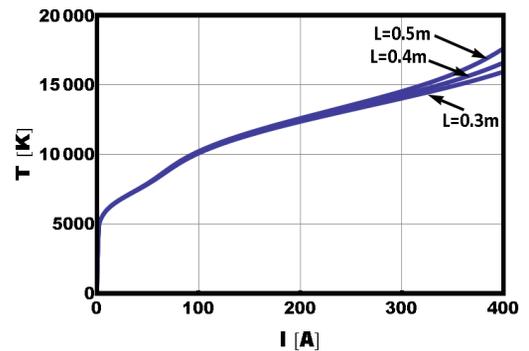
결론적으로, 0.4 MW 급 분절형 토치의 간극 반지름 R 과 이에 대응한 간극폭 묶음 길이 L 의 최적 설계과정은, 전류 제한조건이 300 A 일 때, $5.5 \text{ mm} \leq R \leq 7.5 \text{ mm}$ 범위에서 플라즈

Table 1. Constrictor length L according to its radius R and plasma temperature T corresponding to $\alpha = 20\%$ ($P = 0.4 \text{ MW}$, $I = 300 \text{ A}$)

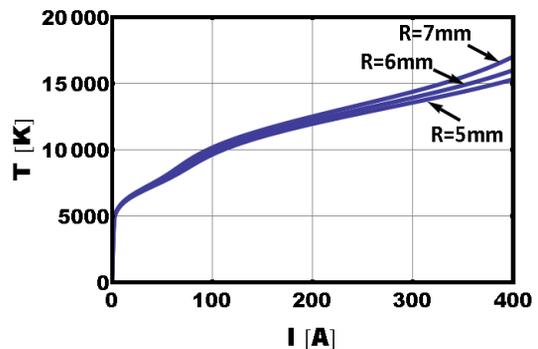
R [mm]	L [m]	T [K]	q'' [MW/m^2]
5.0	0.20	14,780	63.0
5.5	0.24	14,355	47.4
6.0	0.31	14,050	34.3
6.5	0.38	13,790	26.1
7.0	0.43	13,540	21.2
7.5	0.47	13,300	18.0

마 온도 및 이에 따른 간극폭 묶음 길이 L 의 범위를 Fig. 3 및 Table 1과 같이 계산하여 선정하고, 결정된 R 및 L 값에 대해 아크 전류 등을 통해 운전범위를 추정하는 것이 타당할 것으로 여겨진다. 예를 들어, 0.4 MW 분절형 아크 플라즈마 토치의 간극 반지름 설계범위를, $5.5 \text{ mm} \leq R \leq 7.5 \text{ mm}$ 로 할 경우, 복사 열손실이 20% 인 플라즈마 온도를 기준으로 계산한 Table 1로부터, 간극폭 묶음 길이의 범위를 $0.25 \text{ m} \leq L \leq 0.5 \text{ m}$ 에서 선택할 수 있다.

마지막으로, Fig. 6(a)와 (b)는 0.4 MW 조건에서, $R = 6.0$ mm 일 때, 상기 설계변수 범위에 해당하는 L 및 전류 변화에 따른 플라즈마 온도 변화와 $L = 0.45$ m 일 때 R 및 전류 변화에 따른 플라즈마 온도 변화를 도시한 것이다.



(a)



(b)

Fig. 6 Plasma temperatures according to the input currents I for (a) $R = 6.0$ mm and (b) $L = 0.45$ m at $P = 0.4 \text{ MW}$

Figure 6으로부터, 복사에너지 손실이 20%가 되는 플라즈마 온도를 기준으로 R 및 L 값의 크기를 결정한 0.4 MW 급 분절형 토치는 입력전류 변화를 통해 별도로 플라즈마 온도를 조절할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 이러한 플라즈마 온도 변화 경향은 300 A 이상에서 그 차이가 눈에 띄는 것만, 그 이하에서는 전류 변화에 대한 온도 변화경향이 거의 비슷하게 나타난다. 따라서, Fig. 6에서 사용된 설계변수 값들은 300 A 전류 제한조건에서 0.4 MW 분절형 아크 플라즈마를 복사에너지 손실이 전체 출력의 20%가 넘지 않는 온도로 구현하는데 적합한 범위에 있다고 여겨진다. 반면, 해당 설계조건에서 전류가 300 A 이상 인가되면 아크 플라즈마의 온도는 상대적으로 쉽게 증가할 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

아크 채널 모델을 이용하여 플라즈마 입력 전류 I 와 입력 전력 P 가 주어질 때, 분절형 플라즈마 토치의 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 열유속 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 m와 7.5 mm를 기준으로 그 이하 영역에서는, 간극팩 묶음 길이 L 이 길어지거나 간극 반지름 R 이 작아질수록 플라즈마 온도는 비례하여 증가하는 경향을 가지고 있음을 알 수 있었다. 이로부터, 복사열손실이 전체 출력 대비 20% 이하가 될 것으로 예측되는 플라즈마 온도를 기준으로, 0.4 MW 급 분절형 토치의 간극 반지름 R 및 간극팩 묶음 길이 L 의 최적 설계범위를 각각, $5.5 \text{ mm} \leq R$

$\leq 7.5 \text{ mm}$, $0.25 \text{ m} \leq L \leq 0.5 \text{ m}$ 범위로 제안하였다. 이 범위에서는, 입력전류 300 A 이하에서 아크 플라즈마를 상대적으로 안정성 있게 운전할 수 있을 것으로 기대되었으며, 이에 따라, 공기 플라즈마의 열복사 손실과 전극부식에 의한 오염도를 최소화 할 수 있을 것으로 예측된다.

대류 및 복사에 의한 열전달을 무시하고, 반경 방향 열전도만을 가정하는 아크 채널 모델의 한계에도 불구하고, Fig. 1과 같은 분절형 아크 플라즈마 토치의 구조적 특성을 바탕으로 시도한 설계변수 해석은 복잡한 분절형 토치의 간극 반지름 및 간극팩 묶음 길이와 같은 설계변수에 대해 기초적인 선택 범위를 제공해 줄 수 있어, 향후, 2.4 MW 급 대출력 토치의 설계변수 해석에도 유용할 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

1. 이상목, "우주개발 정책 방향," KSAS 매거진, 제3권, 제1호, 2009, pp.4-7
2. 공현철, 임창호, 최홍택, "주요 국가의 우주개발 장비 비전 비교 연구," 한국항공우주학회 2006년도 추계학술발표회 논문집, 2006, pp.514-517
3. Purpuraa, C., Filippisa, F., Grapsa, E., Trifonia, E., and Savinob, R., "The GIBLI plasma wind tunnel: Description of the new CIRA-PWT facility," Acta Astronaut., Vol. 61, 2007, pp.331-340
4. Marieu, V., Reynier, Ph., Marraffa, L., Filippisa, F., and Caristia, C., "Evaluation of SCIROCCOplasma wind-tunnel capabilities for entry simulations inCO2 atmospheres," Acta Astronaut., Vol. 61, 2007, pp.604-616
5. 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
6. Funaki, I., Kubota, K., Okuno, Y., Sato, H., Fujino, T., "Numerical study of low-power MPD arcjet," AJCP, Mar. 2008, pp.570-573
 7. 신재렬, 이대성, 오세종, 최정열, "하이드라진 아크젯 추력기의 수치적 모델링," 한국항공우주학회지, 제36권, 제9호, 2008, pp.907-915
 8. Fauchais, P., and Vardelle, A., "Thermal plasmas," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 25, Dec. 1997, pp.1258-1280
 9. Raizer. Y. P., Gas Discharge Physics, Springer-Verlag, 1991
 10. Zukov, M. F., Zasytkin, I. M., Timoshervskii, A. M., Mikhailov, B. I., and Desyatkov, G. A., Thermal Plasma Torches : Design, Characteristics, Application, Cambridge International Science Publishing Ltd., 2007
 11. Boulos, M. I., Fauchais, P., and Pfender, E., Thermal Plasmas : Fundamentals and Applications, Volume 1, Plenum Press, 1994
 12. 이정일, 김규홍, 김종암, 노오현, "아크히터 내부의 유동장 계산," 한국항공우주학회 2003년도 추계학술발표회 논문집 (I), Nov., 2003, pp.601-604
 13. 이정일, 김규홍, 김종암, "아크히터 내부의 난류 효과에 대한 고찰," 한국항공우주학회지, 제33권, 제5호, 2005, pp.1-8