

유도가열방식 세정장치용 전력변환장치 용량 산정 및 부하 분석

장은수, 박상민, 오창열, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Load Analysis and Calculation of Power Conversion System Capacity for Induction Heating Cleaning Device

Eun Su Jang, Sang Min Park, Chang Yeol Oh, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 유도가열방식 세정장치의 티타늄 용기 특성을 분석하고 전력변환장치를 설계한다. 코일에 흐를 전류를 계산하기 위한 용량 산정은 기체의 온도 변화량 및 용기 가열 시간을 고려하여 증기 가열에 필요한 열량을 수학적으로 분석하고 설계한 전력변환장치를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

디스플레이 세정에 필요한 증기를 가열하는 방식은 열선을 이용하여 직접 가열하는 Pre heating 방식이 주로 사용된다. Pre Heating 가열방식은 소모되는 전력이 크고, 목표 온도에 도달하는 시간이 오래 걸리는 단점을 갖는다. 반면 본 논문에서 제안하는 유도가열 방식은 Pre Heating 가열방식에 비해 증기의 가열 시간이 짧고, 가열체를 균일하게 가열할 수 있는 장점을 갖는다.

세정공정의 특성상 가열체로 사용하는 금속은 증기가 지나가는 부분에 파티클이 형성되지 않도록 티타늄으로 선정해야 한다^[1]. 하지만 비자성체 금속인 티타늄은 열전도도와 저항률이 낮아 유도가열이 어려운 단점이 있다. 따라서 전력변환장치의 스위칭 주파수를 높게 선정하여 티타늄의 전기 저항을 증가시켜야 하며 높은 스위칭 주파수로 인한 전력변환장치의 스위칭 손실을 최소화 할 수 있도록 공진형 토폴로지를 선정해야 한다. 본 논문에서는 티타늄 용기에 유입되는 증기의 온도 변화량 및 용기 가열 시간을 고려하여 과열 증기 생성에 필요한 열량을 수학적으로 분석하고, 이를 토대로 세정장치용 전력변환장치를 설계한다. 그리고 시뮬레이션을 통해 설계한 내용을 검증한다.

2. 부하 분석 및 전력변환장치 용량 산정

2.1 티타늄 부하 해석

티타늄 용기는 투자율($\mu_r = 1.00018$)이 낮고, 전기 저항률($\rho = 55 \sim 60 \mu\Omega \cdot cm$)이 다른 금속에 비하여 상대적으로 낮은 특성을 갖기 때문에 피가열체 부하로서 저항 성분이 작은 단점이 있다. 따라서 유도가열에 의한 티타늄의 발열량을 높이기 위해 전력변환장치의 스위칭 주파수를 높게 선정하여 티타늄 용기의 저항을 증가시켜야 한다. 그림 1은 주파수 증가에 따른 저항과 인덕턴스의 변화 양상을 나타내는 그래프이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 주파수가 증가할수록 저항은 증가하는

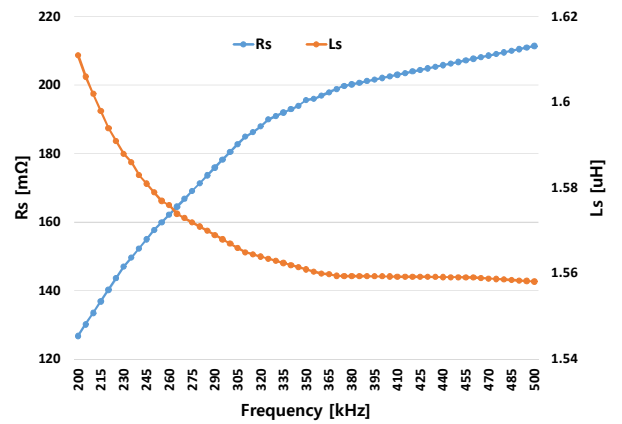


그림 1 주파수 변화에 따른 티타늄 부하 파라미터 양상
 Fig. 1 parameters pattern of Titanium Load according to frequency variation

반면 인덕턴스는 감소하는 양상을 보이며 이를 수학적으로 분석한 식은 아래와 같다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} = 503.3 \times \sqrt{\frac{\rho}{\omega \cdot \mu_r}} \quad (1)$$

$$R_L = \frac{\rho}{\sigma} = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu \cdot \rho}{2}} \quad (2)$$

$$R_{eq} = R_w + \frac{R_L}{N} = R_1 + \frac{(\omega M)^2 \cdot R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (3)$$

$$L_{eq} = L_1 - \frac{(\omega M)^2 \cdot L_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (4)$$

$$M = \frac{N \cdot \Phi}{I_L} \quad (5)$$

식 (1)을 통해 침투깊이를 고려하여 계산한 저항은 식 (2)와 같으며 이를 토대로 등가 저항을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 이를 통해 주파수가 증가 할수록 ω 가 증가함에 따라 등가 저항의 크기는 증가함을 알 수 있다. 반면, 등가 인덕턴스는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (4)를 통해 주파수가 증가 할수록 등가 인덕턴스는 ω 의 증가에 의해 감소함을 알 수 있다. 또한 식 (5)를 바탕으로 식 (3), 식 (4)을 분석하면 턴 수에 따른 저항 및 인덕턴스의 변화 양상을 볼 수 있다. 저항과 달리 인덕턴스는 턴 수에 반비례하며, 이는 상호 인덕턴스 M 이 턴 수에 비례하여 증가하기 때문이다.

표 1 가열열량 및 전력 에너지 계산

Table 1 calculation of heating calorie and power

Parameters	Value [Unit]
CMH, Q	6 [L/min]
Specific Gravity, S	1.5116
Specific Heat, C_p	0.523 [kcal/kg°C]
Temperature Variation, ΔT	66.44 [°C]
Power, W	2.64 [kW]
Coil Resistance, R	0.28 [Ω]
Coil Current, I	97.01 [A]

2.2 증기 가열열량 및 출력 전류 계산

유도가열방식 세정장치용 전력변환장치의 출력 전류를 계산하기 위해 티타늄 용기에 유입되는 포화증기를 과열증기로 가열시키는데 필요한 열량을 계산하여야 한다. 포화증기를 과열증기로 가열 시 필요한 열량의 계산은 CMH (Cubic Meter per Hour)와 비중, 증기의 온도에 따른 비열과 온도 변화량을 고려하여 계산하며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다²⁾.

$$Q = CMH \times \rho \times C_p \times \Delta T \quad (6)$$

CMH는 시간당 체적을 나타내고 유량과 동일하게 볼 수 있으며, 압력에 따른 증기의 비열은 스팀 테이블을 통해 구할 수 있다. 1기압에서 기체 1mole의 부피 통해 기체의 부피는 절대 온도 K 와 현재 증기의 온도를 통해 식 (7)과 같이 계산하고 식 (7)에서 구한 기체의 부피와 기체의 분자량 및 증기에 가해지는 압력을 통해 기체의 밀도를 식 (8)과 같이 계산할 수 있으며, 이를 통해 기체의 비중을 계산한다.

$$V = 22.414 \times \frac{x^\circ C + K}{K} \quad (7)$$

$$\rho = P \times \frac{M}{V} \quad (8)$$

위의 식 (6)을 통해 계산한 열량은 가열에 필요한 절대열량이며, 이를 임의의 가열시간 동안 목표 온도까지 증기를 가열시키기 위해 필요한 전력 에너지로 환산할 수 있다. 또한 환산한 전력 에너지와 식 (1)을 통해 침투깊이를 고려한 단면적을 이용하여 식 (9)와 같이 코일의 저항을 구할 수 있으며 이를 통해 부하 전류를 계산한다.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (9)$$

표 1은 위의 식들을 바탕으로 3기압 조건에서 직경 635mm, 배관길이 1250mm의 배관을 통해 6L/min의 유량으로 티타늄 용기에 유입되는 133.56°C의 포화증기를 10초의 가열 시간동안 200°C의 과열증기로 가열하는데 필요한 열량과 전력변환장치의 용량 및 코일에 흐르는 전류를 계산하는데 필요한 파라미터들을 나타낸 것이다.

2.3 전력변환장치 설계 및 검증

유도가열방식 세정장치용 전력변환장치는 고주파에서 동작하기

표 2 LCL 토폴로지 파라미터

Table 2 LCL topology Parameter

Parameters	Value [Unit]
Primary Coil, L_1	7.5 [μ H]
Secondary Coil, L_2	1.556 [μ H]
Capacitor, C	100 [nF]
Switching frequency, f_{sw}	481 [kHz]

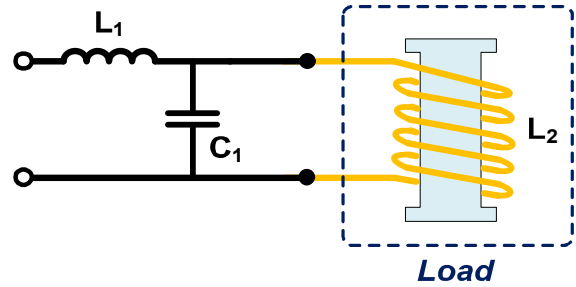


그림 2 티타늄 부하 모델링

Fig. 2 Titanium load modeling

때문에 스위칭 손실을 최소화하기 위해 Zero Voltage Switching (ZVS)가 가능하게 설계해야 하며, 코일에 흐르는 전류가 크므로 전력변환장치의 부담을 줄이기 위해 1차 측 인버터 전류는 작게 가져갈 수 있도록 그림 2와 같은 LCL 토폴로지로 선정한다. 표 2는 선정된 각 파라미터를 나타내며 시뮬레이션을 통해 계산한 전류이득 곡선은 아래의 그림 3과 같다. 이를 통해 수식적으로 계산한 유효 전력과 거의 동일함을 확인할 수 있다.

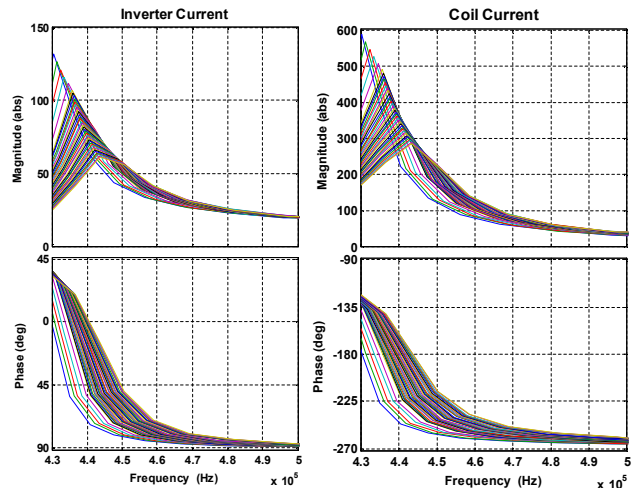


그림 3 인버터 전류와 출력 전류 시뮬레이션 비교

Fig. 3 Comparison of inverter and output current

3. 결론

본 논문은 수학적 분석을 통하여 비자성체 티타늄 부하조건에서 포화증기를 과열증기로 가열하는데 필요한 가열 열량을 계산하였으며, 이를 토대로 유도가열방식 세정장치용 전력변환장치의 용량 산정 및 부하 전류를 계산하였다. 또한 계산한 결과를 시뮬레이션을 통하여 검증하였으며 하드웨어 제작 및 증기 가열 시험을 통한 검증을 추후 진행할 계획이다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

참고 문헌

- [1] DISCO. 블레이드 다이싱, 파티클 제거 [Online]. Available: <https://www.disco.co.jp/kr/solution/library/partrm.html>
- [2] Samhung machinery co. (2005). 피가열체 열량 계산식 [Online]. Available: <http://www.samhungm.co.kr>