

펄스 플라즈마 반응기의 모델링

최영욱* 이흥식* 임근희* 김태희** 정종한** 김중화** 장길홍**
 *한국전기연구소 **한국중공업

Modelling of Pulsed Plasma Reactor

Y W Choi* H S Lee* G H Rim* T H Kim** J H Joung** J W Kim** G H Jang**
 * KERI **HANJUNG

Abstract - The pulsed plasma wire-plate reactor was modelled on the basis of experiment and EMTP simulation. The electrical phenomena in reactor is consistent with the model we suggested. Using this model, the influence of the reactor capacitance on the impedance matching between pulse generator and reactor can be analyzed. From this, we found that the energy of 95 % was delivered from pulse generator to reactor at the ratio of $C_p/C_r \approx 30 \%$, where C_p is pulse generator capacitance, C_r is reactor capacitance.

mm의 wire frame 8 조로 제작하여 총 108 m의 wire 길이로 되어있다. 리액터 내에는 연소로부터 $1100 \text{ Nm}^3/\text{hr}$, 125°C , SO_2 420 ppm, C_2H_4 6.2 l/min, NH_3 12 l/min의 상태의 유체를 유입시켰다. 실험시 부하는 세가지 경우로서 1)반응기, 2)무유도 탄소저항 (dummy load; 23~170 Ω), 3)반응기의 모델링을 위한 실험부하로서 커패시턴스 (1.5, 2.6, 5.6, 10.8 nF)와 무유도 탄소저항 (35, 70 100 Ω)을 각각 병렬로 연결하여 하였다.

1. 서 론

펄스 플라즈마를 이용한 탈황·탈질 기술은 전자빔 법이나 기존의 습식 탈황설비보다 경제적이고 안전성이 있는 기술로 알려져 현재 세계 각국에서 많은 연구자들의 관심을 모으고 있다. 이 연구를 위해서는 고전압 펄스 전원과 유해가스를 흘리는 반응기가 기본적인 시스템으로 필요하며 특히 반응기의 구조는 고효율의 유해가스 제거효과를 가질 수 있도록 기계적·전기적인 설계가 이루어져야 한다. 전기적 측면의 설계라 함은 전원과 반응기간의 임피던스 정합 관계를 가시도록하는 것을 의미하며 이는 구체적으로 반응기의 저항성분, 누설 인덕턴스 및 커패시턴스의 값을 전원과 연계하여 적절히 설계하여 전원과 반응기간의 최상의 임피던스 정합관계를 유도하는 것을 의미한다. 현재까지 임피던스 정합에 대해서 이론적·실험적 연구가 진행되어 왔으나[1,2] 실제 응용 규모에 대해서는 실험적 연구가 진행되어 오지 않고 있고 더구나 반응기의 임피던스는 비선형 특성을 가지는 것으로 알려져있어[3] 해석에 어려움이 있으므로 연구의 진전이 많이 이루어지지 않고 있다고도 볼 수 있다. 그렇지만 발전소 등의 대규모 탈황·탈질반응기의 제작을 위해서는 반응기의 임피던스 해석 문제가 선결되어야만 산업계에 실적용할 수 있는 반응기의 설계기술이 확립되므로 이를 해석하는 연구는 경제적이고 고효율의 반응기의 제작을 위해 기초연구로서 매우 의미가 있다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 실험연구와 병행하여 반응기의 비선형적 전기적 등가회로를 EMTP 시뮬레이션으로 해석하였고 나아가서 전원과 반응기 간의 임피던스 정합의 현실적인 최상의 설계기법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치

그림 1에 실험에 사용한 펄스 발생기의 회로를 나타내었다. 2단의 자기 압축회로에 의해 500 ns의 펄스폭이 출력되고 펄스 반복률은 최대 300 Hz이다. 출력전압은 130 kV(peak), 전류는 6 kA(peak)이다.[4] 그림 2에 반응기의 내부구조를 보였다. 1340 x 1500

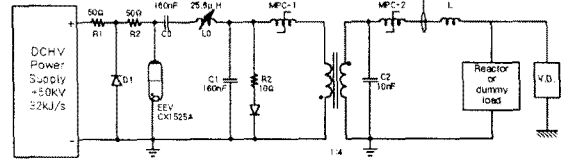


그림 1 실험에 사용한 磁氣압축형 펄스 발생전원 (CT : Current Transformer, VD : Voltage Divider)

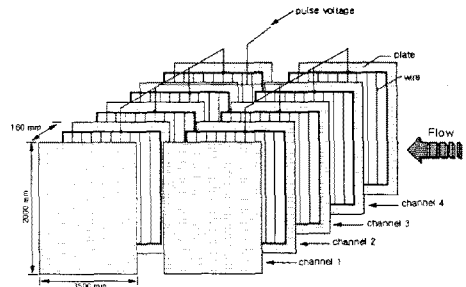


그림 2 0.5 MW wire-plate 반응기

2.2 실험결과 및 고찰

그림 3, 4에 반응기에서 측정된 전압, 전류 파형을 나타내었다. 펄스 발생기에서 발생한 원래의 파형은 펄스 폭이 약 600 ns 이나[5] 반응기와의 임피던스 부정합이 일어나 전압 전류 파형의 변형이 일어난 것을 알 수 있다. 전압과 전류폭의 차이가 상당히 크고 인가전압이 높을수록 전압파형의 폭이 좁아지고 전류파형의 폭은 넓어지는 것을 알 수 있다. 이 관계는 그림 5에 나타내었다. 그림 6에는 그림 3, 4로부터 얻은 반응기 임피던스의 시변특성을 나타내었다. 인가전압이 높을수록 임피던스 값이 작아지고 일정한 임피던스 값을 갖는 시간적 영역이 넓어지는 것을 알 수 있다. 현재의 반응기의 상태는 인가전압을 더 이상 높여 실험 할 수 없으나 이상의 결과로부터 인가전압을 높이면 스파크가 발생하지 않는 방전조건내에서 어느정도 펄스 발생기의 출력 임피던스 값인 35 Ω 가까이 조정할 수 있고 반응기에 인입되는 에너지 효율을 높일 수 있음을 알 수 있다.[5]

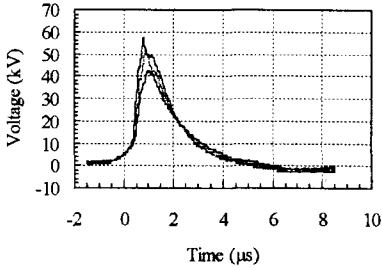


그림 3 반응기의 측정전압 파형 (Co : 23.4, 19, 14.7 kV의 경우)

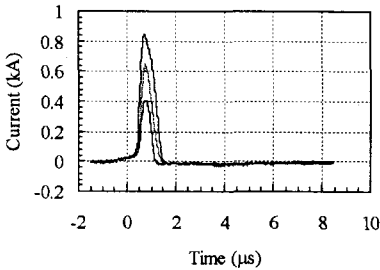


그림 4 반응기의 측정전류 파형 (Co : 23.4, 19, 14.7 kV의 경우)

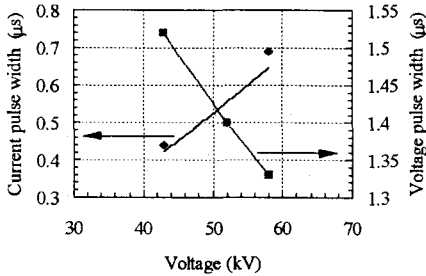


그림 5 인가전압에 따른 전압, 전류 펄스폭의 변화

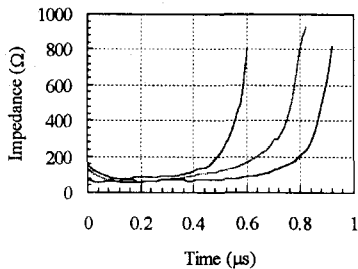


그림 6 인가전압에 따른 반응기의 임피던스의 시변특성

2.3 반응기의 모델링

반응기에 존재하는 전기적 성분은 누설 인덕턴스(인가선의 인덕턴스 포함), 반응기 자체의 커패시턴스 및 반응기의 저항으로 볼 수 있다. 여기서 누설인덕턴스는 직렬성분으로 커패시턴스와 저항 성분은 시변 병렬성분으로 생각하여 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 이와 같이 가정된 전기적인 등가회로의 타당성을 확인하기 위하여 EMTP 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 1의 펄스 발생회로는 EMTP를 이용하여 해석할 수 있고[5] 등가회로에서의 커패시턴스는 직접 측정한 값인 2.7 nF로 하였고 시변 저항성분은 그림 6의 실험 결과를 이용하였다. 인가전압은 실험과 동일하게 하였다. 누설인덕턴스 성분은 3~5 μH로 하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 8, 9에 전압, 전류 파형을 각각 나타내었다. 그림 3, 4의 실험결과와 비교하여보면 결과적으로 거의 같은 결과가 얻어진 것을 알 수 있다. 또한 커패시턴스 값도 시변 특성을 가지나 그 변화량이 무시할 수 있을 정도로 작은 것을 알 수 있었다. 그러므로 등가회로에서 커패시턴스 값은 초기 커패시턴스 값으로 하여도 무방하다고 볼 수 있다. 이상의 결과로 반응기의 모델링 회로에 2.7 nF의 초기 커패시턴스 값과 저항성분을 펄스발생기의 출력임피던스 값(35 Ω)과 같이 하여 시뮬레이션을 하였을 때 전압, 전류의 파형이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이 현상은 실험으로도 확인하였다. 즉, 그림 7의 모델링 등가회로는 반응기의 실제의 경우를 예측할 수 있다고 사료된다.

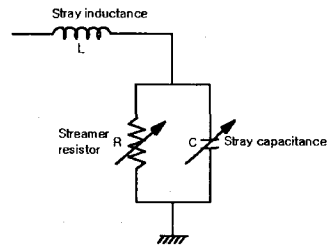


그림 7 반응기의 등가회로

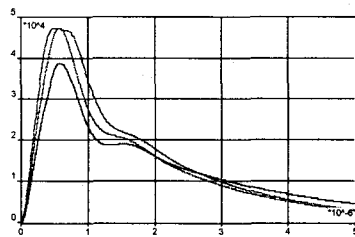


그림 8 EMTP 시뮬레이션 결과 얻어진 전압파형(X축:시간, Y축:전압)

2.4 반응기의 커패시턴스에 관하여

지금까지의 고찰을 기초로 모델링 회로를 실험 및 시뮬레이션에 이용하면 임피던스 정합에 영향을 미치는 반응기의 커패시턴스 값에 대한 자세한 해석이 가능해진다. 현실적으로 불가피하게 존재하는 반응기의 커패시턴스 값은 반응기의 에너지 효율을 저하시키지만 그 손실의 정도가 크지 않은 현실적인 설계범위를 파악하는 것이 중요하다. 그림 1의 펄스발생회로에서 출력단의 커패시턴스 값은 10 nF이고 이 커패시터에 저장된 에너지가 모두 반응기에 유입되는 조건은 반응기의 저항 성분

과 펄스 발생기의 출력 임피던스가 일치할 때이다. 그러나 누설 인덕턴스와 반응기의 커패시턴스 값이 불가피하게 존재하여 이와같은 이상적인 경우는 존재하지 않는다. 그러므로 펄스 발생기의 출력단의 커패시턴스 값이 10 nF이므로 반응기의 커패시턴스 값이 1.5, 2.6, 5.6, 10.8 nF과 각각에 대하여 저항성분을 35, 70, 100 Ω으로 하였을 경우에 대하여 그림 1의 회로에 대하여 실험 및 시뮬레이션을 하였으며 실험 결과를 그림 10에 나타내었다. C_0 의 초기 충전전압은 32.4 kV이다.

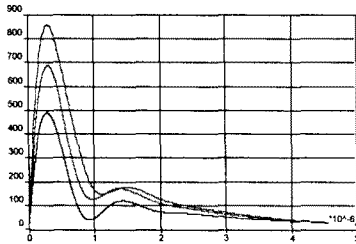


그림 9 EMTP 시뮬레이션 결과 얻어진 전류파형 (X축:시간, Y축:전류)

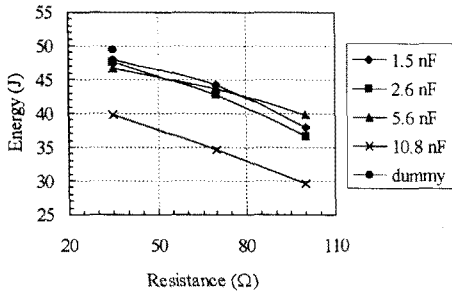


그림 10 반응기의 커패시턴스 및 저항 성분에 따른 에너지 유입특성

그림 10의 결과로부터 반응기의 커패시턴스가 커질수록, 저항성분이 펄스 발생기의 출력 임피던스 보다 커질수록 에너지 전달효율이 감소하는 것을 알 수 있다. dummy load (무유도 탄소 저항 35 Ω)인 경우에는 전달에너지가 1 μs에서 49.16 J이다. 이 에너지의 95%의 에너지가 반응기로 전달되기 위한 조건은 반응기의 저항성분이 35 Ω이고 커패시턴스 값이 2.6 nF 이하로 될 때 가능함을 알 수 있다. 그러므로 임피던스 정합을 위한 반응기의 조건은 커패시턴스가 펄스 발생기의 최종 단 출력 커패시턴스 값의 약 30 %이내이고 저항성분은 펄스 발생기의 출력임피던스와 일치해야한다는 것을 알 수 있다. 그림 11에 모의부하에 대한 실험 결과를 나타냈다. 각각의 파형은 위로부터 반응기 전압, 유입전체전류, 저항전류, 커패시턴스전류를 나타낸다. 그림 12에는 그림 11에 해당하는 에너지를 계산한 결과를 나타냈으며 각각의 파형은 위로부터 전체 유입에너지, 저항에 유입되는 에너지, 커패시턴스에 유입되는 에너지를 나타낸다.

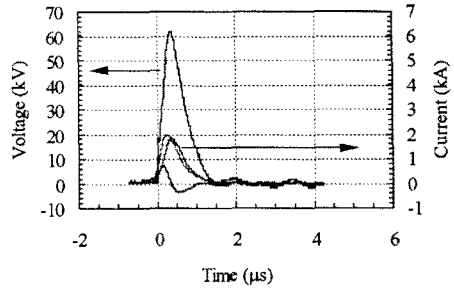


그림 11 반응기 모의 실험 결과 (커패시턴스 2.6 nF, 저항 35 Ω)

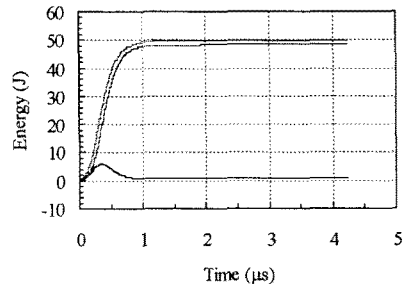


그림 12 반응기 모의 실험결과 (그림 11로부터 계산된 각각의 에너지)

3. 결 론

본 연구에서는 펄스 플라즈마 반응기에 대한 실험 및 EMTP 시뮬레이션을 통하여 반응기의 모델링 등가회로를 제안하였으며 제안한 등가회로가 타당함을 알 수 있었다. 그리고 제안한 등가회로를 이용하여 반응기에 존재하는 커패시턴스 값이 임피던스 정합에 미치는 영향에 대하여 실험 및 EMTP 시뮬레이션을 통하여 정량적으로 분석하였고 이는 펄스 플라즈마 반응기의 설계에 중요한 기초자료로서 활용될 수 있다고 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Han S. Uhm and Woong M. Lee "An analytical theory of corona discharge plasmas." Phys. Plasmas vol. 4, no. 9, pp. 3117-3128, Sept. 1997.
- [2] T. Fujii, R. Gobbo, and M. Rea "Pulse corona characteristics," IEEE Trans. Industry Applications vol. 29, no. 1, pp. 98-101, Jan/Feb 1993.
- [3] Bernie M. Penetrante, Shirley E. Schultheis, "Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Part A, B", NATO ASI Series, 1993.
- [4] J.S. Oh, M.H. Cho, I. S. Ko, W. Nqamkung, G.H. Jang, "Operational characteristics of 30-KW average MPC modulator for plasma De-NO_x/De-SO_x system," 11th International pulse power conference, Baltimore, Maryland, June 29 - July 2, 1996.
- [5] 최영욱, 이홍식, 임근희, 김태희, 김종화, 장길홍, 신완호, 송영훈, "펄스 플라즈마 반응기에 대한 임피던스 및 누설 인덕턴스 분석" 대한전기학회 논문지 48C권 4호 pp. 253-260, 1999.