

2.2 실험결과 및 고찰

2.2.1 반응기 임피던스와 유입 에너지

반응기의 임피던스 특성은 인가전압, wire-plate 간극거리, wire의 길이에 따라 변화하였으며 그 경향은 소형이나 100 m wire의 0.5 MW급이나 같은 경향을 가지는 것을 알 수 있었다. 그림 4에 소형 반응기의 실험결과를 보였다. 실험조건을 간극 1.5, 2.5 cm, 인가전압 30, 40 kV, wire 길이를 24 - 120 cm로 변화시키며 측정한 결과이다. 이 결과로 임피던스는 wire의 길이가 길수록, 간극이 짧을수록, 인가전압이 클수록 작아진다는 것을 알 수 있다. 임피던스가 작아질수록 펄스 발생기로부터 반응기에 유입되는 에너지가 증가하므로 반응기의 전기적 효율은 증대된다고 볼 수 있다. 이 관계는 그림 5로부터 알 수 있다. 그러나 단위 길이당 유입되는 에너지는 임피던스가 작아 질수록 감소하므로 유해가스 제거 효율면에서는 바람직하지 않다. 그러면 이러한 점을 유의하여 wire의 단위 길이당 유입에너지 양이 많을수록 유해가스 제거 효율이 향상된다고 가정하면 그 최대한의 한계는 반응기의 방전현상이 streamer corona에서 spark로 변화하는 임계에너지를 파악함으로써 알 수 있다. 그 임계 에너지는 그림 5에서 알 수 있다. 즉, 30 kV, 40 kV의 실험결과중 wire의 길이가 48 cm의 경우에는 spark가 발생하였고 72, 96, 120 cm의 경우에는 streamer corona 가 발생하였다. 그러므로 이 결과로부터 임계에너지를 알 수 있고 산출한 결과를 표 1에 나타내었다. 이 임계에너지는 일정한 wire의 길이에서 인가전압이 높고 간극이 작을수록 높게 나타난 것을 알 수 있다. 펄스 코로나법은 반응기내에 형성된 전계가 자유전자를 가속하여 가속된 전자의 충돌로 분자, 래디컬을 해리시켜 유해물질을 제거하는데 그 원리를 두고있으나 외부에서 유입되는 에너지의 양이 아무리 많아도 자유전자는 3 - 6 eV이상 가속되지 않으므로 [3] 반응기에 유입되는 에너지 밀도가 높을수록 유해물질 제거 능률이 향상된다고는 볼 수 없다. 그러므로 wire의 단위길이당 입력에너지를 조절하며 유해물질 제거율을 실험적으로 조사하는 것도 펄스발생기와 반응기의 경제적인 설계에 매우 중요한 것임을 본 실험결과로부터 알 수 있다.

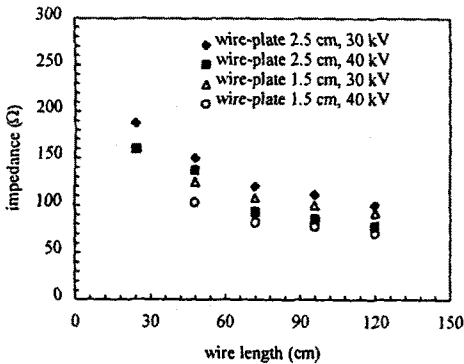


그림 4 소형 반응기의 임피던스 특성

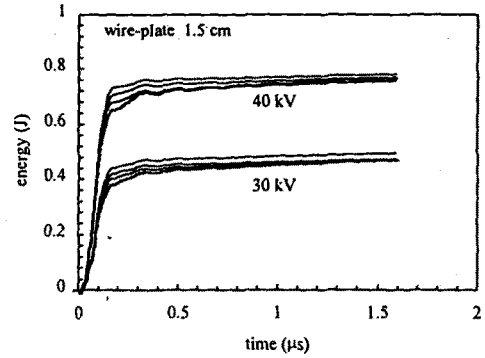


그림 5 일정 간극하에서 인가전압과 wire의 길이가 변화 할 때 펄스 발생기에서 반응기에 유입되는 에너지의 양의 관계. (30, 40 kV의 각각의 4 개씩의 곡선은 위로부터 wire의 길이가 120, 96, 72, 48 cm의 경우에 해당함.)

표 1. 반응기에서 방전조건에 따라 산출된 spark와 streamer corona 발생에너지

인가전압 (kV)	30 kV		40 kV	
간극(wire-plate, cm)	1.5	2.5	1.5	2.5
spark 발생 에너지 (J/m)	0.89 -	0.54-0.91	1.45 -	0.69-1.5
streamer 발생 에너지 (J/m)	0.39-0.61	0.33-0.5	0.63-1.0	0.52-0.6

2.2.2 반응기의 에너지 효율

그림 1과 같은 소형 반응기에서의 에너지 효율은 그림 5로부터 90% 이상 되는 것을 알 수 있다. 이렇게 효율이 높지 나타나는 이유는 반응기가 작아 누설 커패시턴스와 인덕턴스 성분은 거의 무시할 수 있기 때문이다. 그러나 0.5 MW급 실제 유해물질 제거에 적용할 수 있는 반응기의 경우는 누설 커패시턴스와 인덕턴스 때문에 반응기의 임피던스가 그림 6과 같이 시변 비선형 특성을 가지게 되어 효율이 저감된다. 그림 7에는 그림 6의 68 kV 곡선에 해당하는 전압, 전류 파형을 나타냈다. 그림 8의 0.5 MW급 반응기의 임피던스 특성 실험결과로부터 분석하여 보면 반응기에 인가전압을 높일수록 임피던스가 작아지면서 에너지 효율이 향상되나 80 kV에서의 에너지 효율은 50%로 산출되었다. 이렇게 효율이 떨어지는 이유는 펄스발생기 자체의 손실과 펄스발생기와 반응기와의 임피던스 부정합으로 인한 것으로 볼 수 있다. 최대한의 에너지가 반응기에 전달되기 위해서는 펄스발생기와 반응기와의 임피던스가 일치해야 한다. 그림 9에 그림 8과 같은 실험 조건에서 반응기 대신 17 - 195 Ω의 무유도 탄소저항(dummy load)을 사용하여 각 저항값에 대한 유입에너지의 실험 결과를 나타내었다. 최대의 에너지가 전달된 값은 35 Ω 이고 이 때의 에너지 효율은 68%이다. 그러므로 실제 반응기에서 누설 성분과 임피던스 부정합으로 인한 손실은 18%로 산출되어진다. 이 손실을 개선하기 위해서는 더 높은 전압을 인가 할 수 있도록 반응기의 구조를 설계하는 것과 아울러 누설 성분도 최소한으로 줄이는 노력이 필요하다.

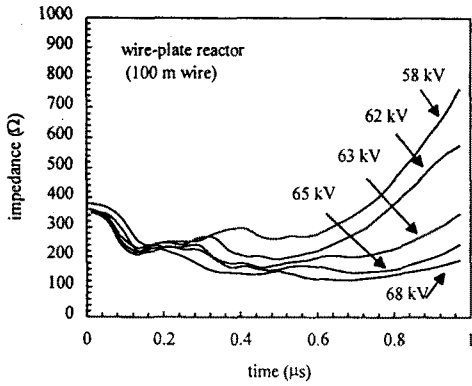


그림 6 0.5 MW 반응기의 비선형 임피던스 특성

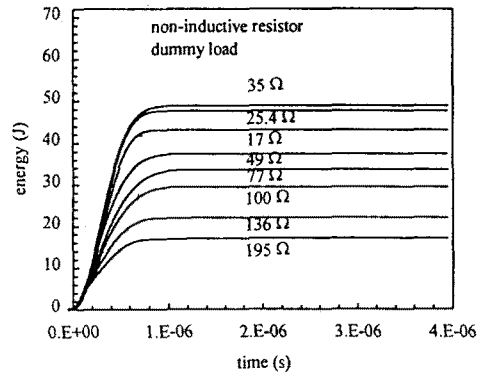


그림 9 dummy load를 이용한 펄스발생기의 임피던스 특성 실험결과

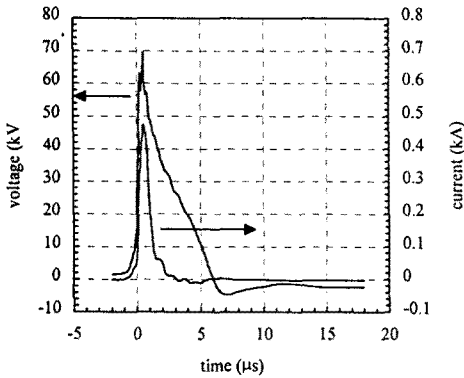


그림 7 0.5 MW 반응기의 전압, 전류 파형 (충전전압 24 kV)

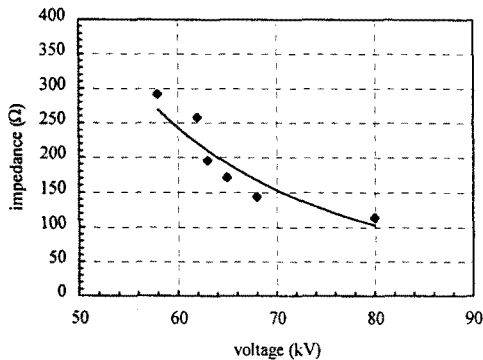


그림 8 0.5 MW 반응기의 임피던스 특성 (전압, 전류의 peak값으로 산정)

2.3 누설 인덕턴스의 EMTP 해석

펄스발생기로부터 반응기까지의 인가선 및 반응기 자체에 존재하는 누설 인덕턴스 성분은 임피던스 정합에 방해적인 요소이다. 그러므로 누설 인덕턴스를 최소화하여 설계하는 것이 펄스회로 설계의 기본이자 필수적인 과제이다. 이러한 누설 인덕턴스의 정량적 해석을 위해 EMTP 프로그램을 이용하였다. 이를 위해 먼저 본 연구 실험에 사용한 그림 2의 펄스발생기 회로를 EMTP 프로그램으로 해석하였고 그 후 부하의 저항과 누설 인덕턴스 값을 변화시켜가며 누설 인덕턴스가 임피던스 정합에 영향을 미치는 것을 분석할 수 있었다. 그림 10의 (a), (b), (c)에 부하가 32 Ω 이고 누설 인덕턴스가 1에서 7 μH 까지 변화할때의 해석 결과를 보였다. 충전전압은 40 kV로 하였고 그림 10의 파형은 그림 2에서 콘덴서 C_0 의 방전전류(1), MPC-1의 1차 압축전류(2), 2차압축후 부하에 인가되는 전류(3)를 차례로 나타내고 있다. 누설 인덕턴스가 비교적 큰 7 μH 의 경우에는 펄스회로에 의해 500 ns까지 압축된 펄스폭이 다시 늘어난 것을 알 수 있다. 그러나 누설 인덕턴스 값이 4에서 1 μH 로 줄어 갈수록 펄스폭이 다시 좁아지고 부하전류 파형 뒤에 나타나는 반사파가 사라지는 것을 볼 수 있다. 즉, 누설 인덕턴스 성분이 감소할수록 임피던스 정합이 잘 일어나는 것을 확인할 수 있고 1 μH 의 경우에는 완벽한 임피던스 정합이 이루어진 것을 알 수 있다. 이 해석결과는 그림 11의 35 Ω 의 무유도 탄소저항 부하의 실험결과와도 잘 일치하고 있다. 이 실험 결과에서 전류, 전압 파형은 거의 일제진동을 하고있는 것을 볼 수 있다. 즉, 거의 누설 인덕턴스가 존재하지 않는 무유도성 부하로 실험한 결과는 누설 인덕턴스를 1 μH 로하여 해석한 결과와 거의 일치하므로 펄스 시스템에서 누설 인덕턴스가 1 μH 이하로 되면 거의 무시할 수 있다고 볼 수 있다.

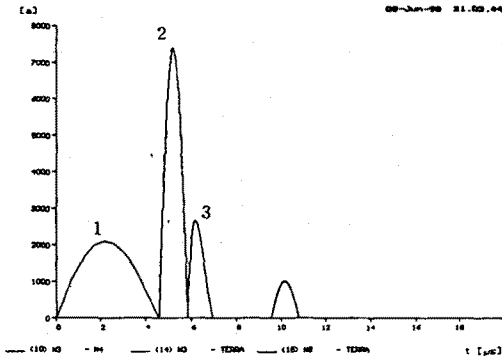


그림 10 (a) $R = 32 \Omega$, $L = 7 \mu H$ 일 때의 전류파형

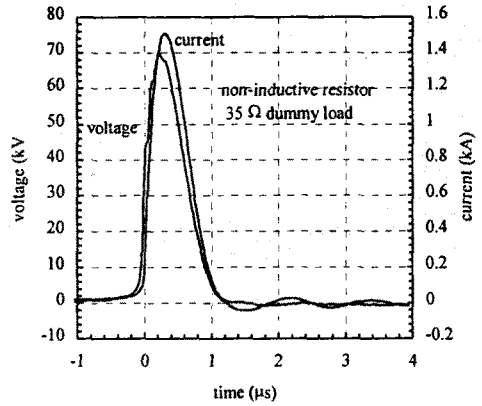


그림 11. 무유도 탄소저항 부하에 대한 실험결과 (35Ω , 충전전압 30 kV)

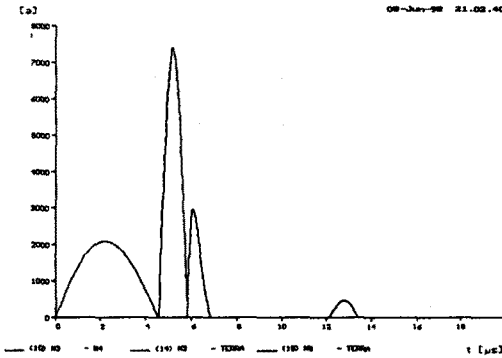


그림 10 (b) $R = 32 \Omega$, $L = 4 \mu H$ 일 때의 전류파형

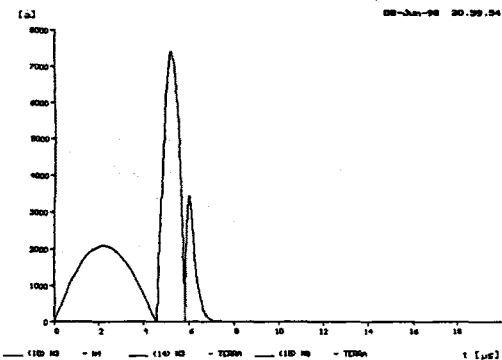


그림 10 (c) $R = 32 \Omega$, $L = 1 \mu H$ 일 때의 전류파형

3. 결 론

반응기의 임피던스 값은 인가전압, wire-plate 간극 거리, wire의 길이로 결정되며 이 요소들을 이용하여 펄스발생기의 출력 임피던스와 반응기와의 임피던스 정합을 유도할 수 있다. 그렇지만 선로와 반응기에 존재하는 누설 커패시턴스와 인덕턴스 성분 때문에 현실적으로 완전한 임피던스 정합이 이루어지기는 어렵다. 임피던스 정합은 회로해석만을 고려할 때에는 의미가 있으나 실제로 유해가스 제거율이 임피던스 정합이 이루어졌을 때 최대로 된다고는 단정할 수는 없다. 왜냐하면 반응기에 유입되는 에너지밀도(J/m)가 유해가스 제거율과 관계가 있다고 볼 수 있기 때문이다. 그러므로 임피던스는 어느 정도 근사적으로 이루어진 상태에서 반응기에 유입되는 에너지 밀도에 따른 유해가스 제거율을 분석하는 차후의 기초연구도 필요하다고 사료된다. 아무튼 본 연구는 펄스발생기와 반응기의 임피던스 정합을 유도하는 방법론에 주력하였으며 이것을 바탕으로 10 MW, 500 MW 급의 반응기 및 이에 대응하는 펄스발생기의 경제적용량의 설계능력 확보에도 목적을 두었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Bernie M. Penetrante, Shirley E. Schultheis, "Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Part A, B", NATO ASI Series, 1993.
- [2] 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.
- [3] Bernie M. Penetrante, J Norman Bardsley and Mark C. Hsiao, "Kinetic Analysis of Non-Thermal Plasmas Used for Pollution Control," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36 Part 1, No. 7B July, pp. 5007-5017, 1997.