

가스차단기의 소호노즐 내부에서 발생하는 압축성 유동에 관한 연구

정성재*·김희동**

Study of the Compressible Nozzle Flow in a Gas Circuit Breaker

Sung-Jae Jung*, Heuy-Dong Kim**

Keywords : Gas Circuit Breaker(가스차단기), Compressible Flow(압축성 유동), Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Shock Wave(충격파), Arc Extinction (아크소호)

Abstract

Very frequently the compressible flow in an extinction nozzle of gas circuit breaker is simulated under no arc assumption, which can be reasonable for both high and low current breakings. In the present study, computations are performed to investigate the major features of the compressible flows inside the arc extinction nozzle of gas circuit breaker. A fully implicit finite volume scheme is applied to solve the two-dimensional, steady, compressible, Navier-Stokes equations. The computed results are validated with the previous experimental data available. Several types of turbulence models are explored to reasonably predict the complicated flows inside the arc extinction nozzle. The obtained results show that the shock wave boundary layer interaction inside the nozzle significantly influences the whole performance of the gas breaker.

1. 서론

최근 변전소의 고전압, 대전류화의 경향에 따라, 절연성이 나 소호성능이 우수한 SF₆가스를 이용하여, 접지된 금속제 밀폐 용기 내에 차단기, 단로기, 접지개폐기, 변압기 등을 설치한 가스절연 개폐장치가 이용되고 있다. 이러한 가스 절연 개폐장치의 구성요소 중, 핵심부분인 차단기 소호노즐의 유체역학적 특성에 관한 데이터는 매우 부족한 실정에 있다. 따라서 발생할 수 있는 제반 상황에 대처하여 확실하게 소호 할 수 있는 노즐형상에 관한 설계자료는 현재까지 얻어지지 않고 있다. 더욱이 차단기 소호실 내부의 유동특성은 대전류 차단시와 소전류 차단 시 매우 다르게 되며, 차단성능이 우수한 소호노즐을 개발하기 위해서는 노즐 내에서 발생하는 압축성 유동특성이 충분히 알려져야 한다.

현재까지 가스 차단기에 관한 연구는 주로 차단 시 가동 아크전극과 고정 아크전극간에 발생하는 아크에 대하여 수행되었으며^{1,2)}, 노즐 목부분에서 발생하는 아크가열에 의한 Clogging(또는 Choke)현상에 관하여 많은 관심이 집중되었다. Noeske³⁾는 유동장에 아크를 가하는 경우 아크를 유동장내에 존재하는 물체로 가정하여 차단기의 유동특성을 조사하였다. Frost & Liebermann⁴⁾과 Ozakie등⁵⁾은 엔탈피유동모델을 이용하여 아크로부터 에너지 방출과 아크로의 주입에너지가 평형을 이룬다고 가정하여 아크 직경과 유동온도를 산출하였다. Ueda등⁶⁾은 일차원 압축성 유동모델을 적용하여, 아크와 주변 가스유동이 거의 동일한 온도로 된다고 가정하여 아크와 주변 가스에 관한 유동영역을 분할하여 이론해석을 수행하였으나,

반경방향으로 유동특성에 관한 정보를 제공할 수 없었다.

Puffer형 차단기는 실린더내부 피스톤에 의해 압축되는 SF₆ 가스를 이용하여 전류차단시에 발생하는 아크를 소호시키는 원리로 작동된다⁷⁾. Puffer형 차단기의 대전류 차단 시에는 가동 아크전극이 고정 아크전극으로부터 떨어지는 순간에 아크가 발생하게 되며, 이때 Puffer실 내 압축된 SF₆ 가스를 방출시켜 아크를 소호하게 되지만, 이 경우 고정 아크전극이 노즐을 빠져 나온 위치에 있게 된다. 한편 소전류 차단 시에는 가동 아크전극이 고정 아크전극으로부터 떨어지는 순간, 대전류 차단시와 동일한 고압의 SF₆가 방출되어 전류의 차단이 완료되게 된다. 그러나 그 후에도 Puffer실로부터 고압의 SF₆가 방출되어 노즐정압이 최초 탱크내의 압력이하로 낮아지게 되는 경우에 재점화가 발생할 수 있다.

이와 같이 대전류 차단시와 소전류 차단 시, 차단기의 동작은 동일한 과정으로 이루어지는데도 불구하고, 대전류 차단 시에는 아크소호를 위하여 SF₆가스의 고속유동이 필요하게 되지만, 소전류 차단 시에는 순간적으로 아크가 소멸되기 때문에 유동장의 단면적이 증가하여 대량의 가스가 유출하게 된다. 그 결과 유동장의 압력이 낮아져, 재점화의 위험성이 발생하기 때문에 소전류 차단 시에는 가능하면 압력이 낮아지지 않도록 유동속도를 낮게 유지할 필요가 있다. 따라서 차단기용 노즐은 이들의 상반된 요구를 충족시키는 유동장을 발생시켜야 한다. 이러한 노즐은 압축성 유동이론에서 비교적 잘 알려져 있는 일반적인 초음속 노즐과는 다른 형상이며, 소호노즐 본체내의 유체역학적 특성이 현재까지 잘 알려져 있지 않으므로, 노즐의 설계 및 제작은 주로 시행착오법을 거듭하고 있는 실정에 있다.

대전류 차단 시에는 유동장내에 아크가 존재하여 유동장은 매우 복잡하게 되지만, 소호 후에는 고정아크 전극이 노즐을

* 안동대학교 기계공학과 대학원

** 안동대학교 기계공학부, kimhd@andong.ac.kr

빠져 나온 위치에 있게 되므로, 유동장은 아크가 없는 모델로 취급할 수 있다. 또 소전류 차단 시에는 가동 아크전극이 고정 아크전극으로부터 떨어지는 순간에 아크가 소멸하게 되므로, 이 경우에도 노즐 내부유동은 아크가 없는 유동장으로 가정할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 사항들에 착안하여, 아크가 없는 경우 노즐 내부 유동장에 Navier-Stokes 방정식을 적용하여 유한체적법으로 유동장을 수치적으로 모사 하였다. 수치계산 결과는 참고문헌[8]의 실험결과와 비교하여, 수치계산의 타당성을 검증하고, 노즐 내부에서 발생하는 충격파 등의 유동특성을 조사하여, 차단성능이 뛰어난 노즐의 개발에 관한 정성적/정량적 자료를 제시하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 2차원 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용한 수치적 모사를 사용하여 가스 차단기 노즐의 유동특성을 파악하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(x + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3)$$

위의 식들에서 공간항의 차분에는 upwind scheme, 시간항의 차분에는 4단계 Runge-Kutta법을 적용하였다. 본 연구에서 적용된 노즐의 유동을 수치적으로 잘 예측하기 위해 적절한 난류모델의 선택이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 standard $\kappa-\epsilon$, RNG $\kappa-\epsilon$ 그리고 standard $k-\omega$ 의 3가지 난류모델과 표준벽함수(standard wall function)를 적용하였다

2.2 계산영역 및 경계조건

Fig.1에는 본 연구에 적용된 가스 차단기 노즐의 개략도를

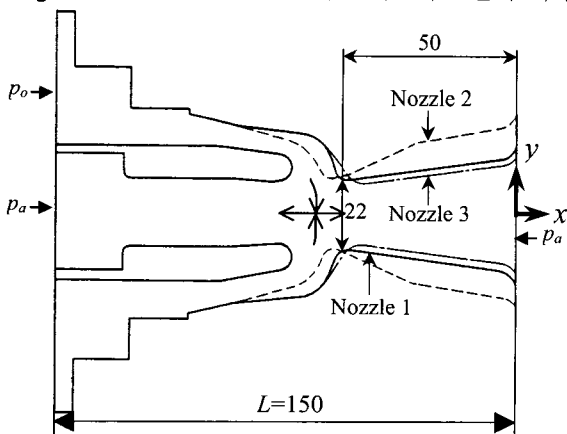


Fig.1 Schematic diagram of gas breaker nozzle

나타내었다. 형상이 다른 3종류의 노즐은 참고 문헌[8]의 실험적 연구에 사용된 노즐이다. 노즐은 실제 차단기 노즐의 1/2크기이며, Nozzle 2에서는 Nozzle 1의 목 하류의 확대각을 크게 하였고, Nozzle 3에서는 Nozzle 1의 목과 출구 단면적을 축소하였다. Puffer실에서 고압공기는 화살표로 표시한 바와 같이 모형노즐 환형부를 통하여, 중심부에서 좌우로 나누어져 노즐 출구로 유출한다.

Fig. 2에는 본 수치계산에 적용된 정렬 격자계를 나타내었다. 계산에서 사용된 격자점은 대략 5만개 정도이며, 유동이 좌우로 나누어지는 부분과 유동이 초크 하는 노즐목, 그리고 경계층이 발달하는 벽 근처에 격자점을 밀집시켰다. 경계조건으로는 유동이 유입되는 단면에 pressure inlet, 유동이 좌우로 갈라져 유출하는 단면에 pressure outlet 그리고 하부단면에는 축대칭조건을 적용하였다.

Fig.3에는 가스 차단기가 작동하는 동안 puffer실의 압력변화를 나타내었다. 차단기가 작동하여 puffer실의 압력은 급격히 증가하며, 1.6초 후에 대기압까지 감소한다. 전체 작동시간에 비하여 puffer실의 압력변화가 노즐내에 미치는 데 걸리는 시간은 매우 작고, 이로부터 puffer실의 압력변화가 거의 동시에 노즐내 유동에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 이에 본 수치계산에서는 정상상태로 가정하여 해석을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig.4a-c에는 3종류의 노즐에 대해서 puffer실 압력이 0.27MPa인 경우, 3가지 난류모델을 적용한 수치계산 결과를 참고문헌[8]의 실험 결과와 비교 하였다. 횡축은 노즐 출구를 원점으로 한 거리 x를 노즐 전체 길이 L로 무차원한 거리, 종축은 벽면 정압 p를 puffer실 압력 po로 무차원한 압력비이다. 또 그림 중의 파선은 대기압을 puffer실 압력으로 무차원한 값이며, 실험 값에서 첫 번째 값은 노즐목에서 벽압력을 나타낸다. Nozzle 1의 실험 값은 노즐 목에서 하류 방향으로 압력이 상승하고 일정한 값을 갖는다. 노즐에서 마하수가 1이 되는

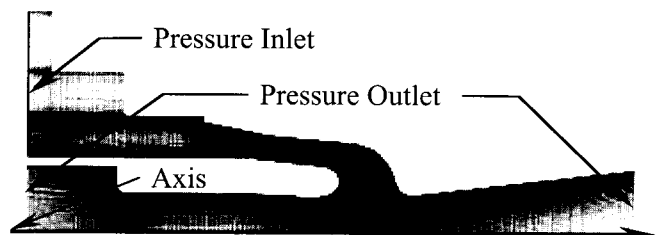


Fig.2 Computational grid system.

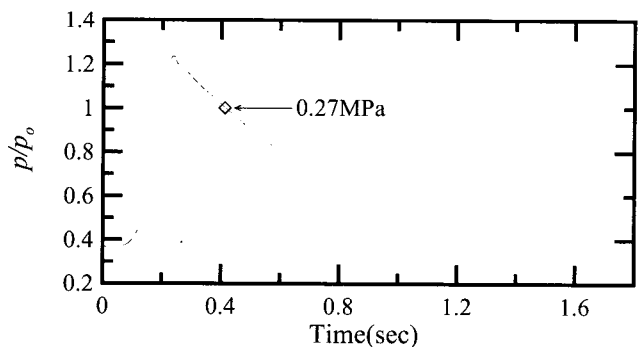
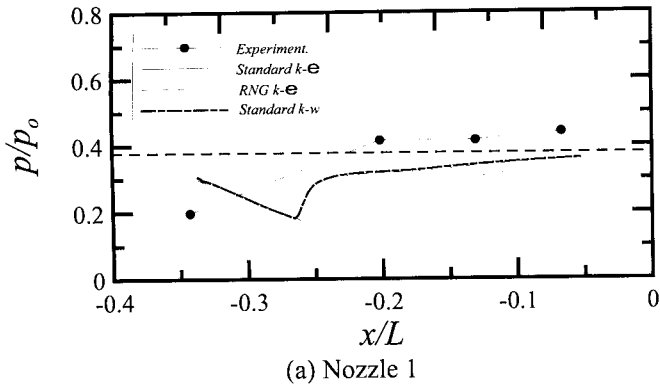
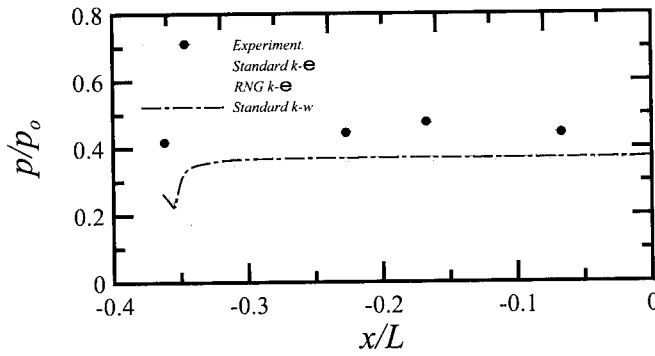


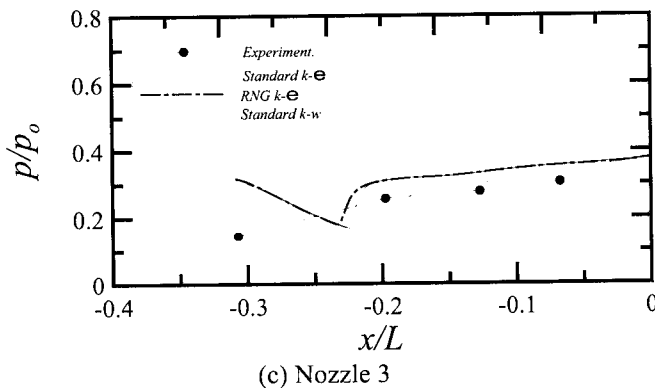
Fig.3 Pressure distribution in puffer cylinder



(a) Nozzle 1



(b) Nozzle 2



(c) Nozzle 3

Fig.4 Static pressure distributions along the nozzle wall

입계압력비가 0.528이지만, 노즐 목에서 측정된 압력비는 상당히 작게 나타난다. 이는 노즐 상류의 고압 공기가 좌우로 나누어지면서 상류 정체압의 손실이 발생하기 때문이다. 그리고 수치계산 결과로부터 노즐 확대부에 충격파가 발생하는 것 알 수 있다. 3가지의 난류 모델이 적용된 수치계산 결과는 유사한 경향을 나타내지만, 충격파 발생 위치를 다소 다르게 예측하고 있다. Nozzle 2의 수치계산 결과에서 충격파가 노즐 목 근처에서 발생 하는 것을 알 수 있다. 이 때 충격파 이후의 벽면 압력은 대기압에 가깝게 된다. Nozzle 3에서 실험의 압력값은 상당히 낮은 값을 나타내고 있으나, 수치계산 결과의 압력값은 큰 차이를 보이지 않고 있다. 단지 충격파의 위치가 하류로 이동한 것으로 나타났다. 하지만 수치계산 결과는 실험 결과를 정성적으로 잘 예측 하고 있다. standard κ - ϵ 모델이 다른 두 난류모델보다 충격파의 위치를 노즐 후방으로 예측하고 있다. 그러나 실험결과로부터 충격파의 위치를 알 수 없으므로, 유동장을 정확히 묘사하는 난류모델을 선정하기 위해서는 좀 더 자세한 실험결과가 필요하다. 아크 소호에 대해서 가동 아

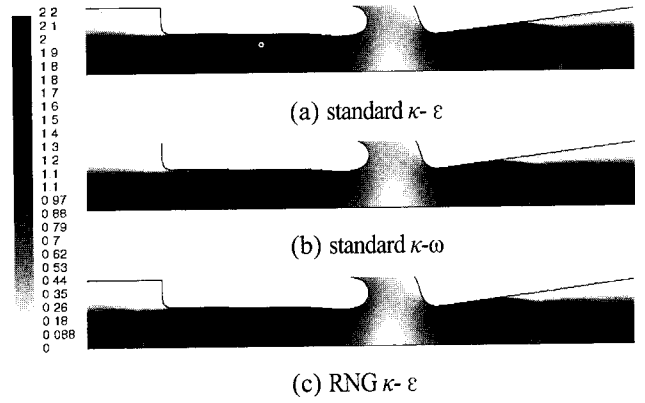


Fig.5 Mach number contours for nozzle 1

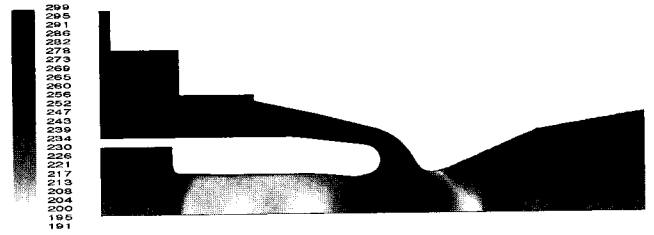


Fig.6 Static temperature contours for nozzle 2

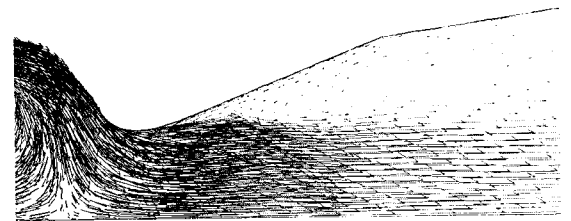


Fig.7 Velocity vectors for nozzle 2

크전극과 고정 아크전극에 흐르는 SF_6 가스의 유량비는 중요한 변수가 된다. 이때 유량비는 전체 유출유량에 대한 고정 아크전극쪽으로 유출되는 유량의 백분율로 정의한다. Nozzle 1의 유량비는 약54%, Nozzle 2는 58%, Nozzle 3은 48%로 예측되었 다.

Fig.5에는 Nozzle 1의 puffer실 압력이 0.27MPa일 때, 각 난류모델에 대한 등마하선도를 나타내었다. puffer실로부터 유입된 고압의 공기가 좌우로 나누어지면서 중심부에서 정체점이 발생한다. 유동은 노즐목에서 초크하고 초음속으로 가속한다. 이 때 초음속 유동과 경계층과 간섭으로 박리가 일어나게 되므로 경사충격파가 발생한다. 그리고 경사충격파와 벽면 경계층 사이의 간섭으로 노즐내에 마하디스크가 발생한다. 마하디스크 후방은 아음속이 된 후 다시 가속하며, 약한 충격파가 반복해서 나타난다. Fig.5c에서 이동 아크전극쪽 유동은 직관부를 통과 하면서 약한 경사충격파가 반복해서 발생하고, 급확대부에서 강한 충격파가 발생한다. 수치계산 결과 standard κ - ϵ 모델이 충격파의 위치를 가장 후방으로 예측 하였으며, RNG κ - ϵ 모델이 유동장을 가장 세밀하게 묘사하였다.

Fig.6에는 Nozzle 2의 puffer실 압력이 0.27MPa일 때, 등온도 선도를 나타내었다. 유동이 분지되는 지점에서 속도가 낮으므로 온도가 높은 상태이고, 유동이 가속되면서 온도가 점차 낮아 지며, 충격파를 통해 온도가 급격히 높아진다. 그리고 속도가 낮은 박리 영역이 유동의 중심보다 온도가 훨씬 높게 분포

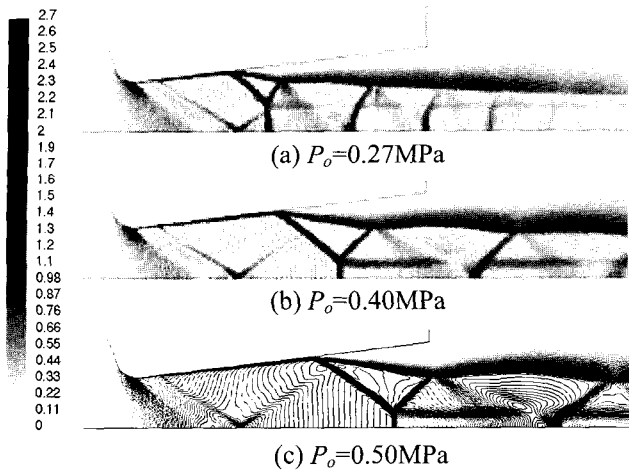


Fig.8 Mach number contours for nozzle 1 (RNG κ - ϵ)

한다.

Fig.7에는 Nozzle 2의 속도 벡터를 나타내었다. Nozzle 2는 Nozzle 1 보다 확대각이 크므로 노즐목 근처에서 박리하게 되고, 노즐 전체에서 박리영역이 Nozzle 1보다 크며, 재순환 영역이 나타난다.

Fig.8에는 Nozzle 1의 puffer실 압력이 0.27, 0.40, 0.50MPa 일 때, RNG κ - ϵ 모델을 적용하여 계산된 유동장의 등마하수선도이다. 노즐 벽면에서 박리가 일어나 경사 충격파가 발생 함을 알 수 있다. 이 때 puffer실 압력이 증가 함에 따라 마하디스크의 크기가 작아지면서 충격파의 위치가 노즐 하류로 이동하고, 노즐 외부에 강한 제트가 형성된다.

Fig.9에는 Fig.8a와 동일한 조건이며, 노즐출구로부터 제트유동에 수직인 단면에서 마하수 분포를 나타내었다. 횡축은 반경 방향 거리를 노즐 출구 직경으로 무차원한 거리이며, 종축은 마하수이다. 제트 중심부의 유동은 $x/L=3.45$ 인 지점까지 초음속 상태이며, 제트 중심부의 마하수가 주변의 마하수 보다 낮은 분포를 나타낸다. 또 제트 중심부의 마하수는 노즐 출구로부터 거리 증가와 더불어 감소하며, 제트폭이 넓어진다.

4. 결론

본 연구에서는 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용한 수치적 모사를 통하여 각 노즐에서 발생하는 충격파 등의 유동 특성을 조사 하였으며, 계산결과와 검증의 위하여 유효한 실험결과와 비교하였다.

본 연구의 수치계산 결과는 노즐 내의 충격파를 적절하게 묘사 하였으며, 실험결과와 정성적으로 잘 일치 하였다. 그러나 적절한 난류모델을 선정하기 위해 좀 더 자세한 실험 결과와 비교가 필요하다. Nozzle 1과 Nozzle 3에서는 노즐 확대부 중간에 충격파가 발생한다. 그리고 확대각을 크게한 Nozzle 2에서는 노즐목 근처에서 박리하고 충격파가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 또 puffer실 압력이 증가함에 따라 충격파의 위치가 하류로 이동하였다. 따라서 노즐 목으로부터 하류의 노즐 형상과 puffer실 압력이 충격파의 위치에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 가스 차단기로부터 유출되는 전체 유량에 대한 고정 아크전극

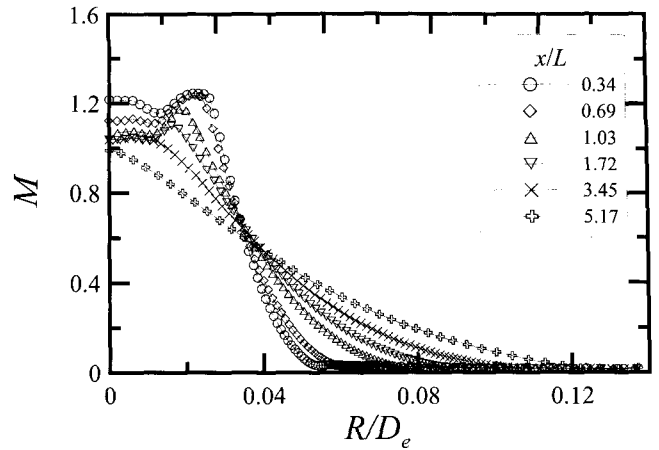


Fig.9 Mach number distributions with R/D_e ($p_o=0.27$ MPa)

쪽으로 흐르는 기체의 유량비는 가스차단기의 설계에서 매우 중요한 변수가 된다. 수치계산으로부터 얻어진 유량비는 Nozzle 1은 54%, Nozzle 2는 58%, Nozzle 3은 48%로 예측되었다. 노즐 출구의 제트유동에 수직인 단면에서는 중심부의 마하수가 주변의 마하수보다 낮은 분포를 나타내었다. 또 중심부의 마하수는 노즐 출구로부터의 거리 증가와 더불어 감소하였으며, 제트폭은 넓어진다.

후 기

이 논문은 2001년도 기초전력 공학공동연구소의 전력기술 기초연구과제 지원 연구비에 의해 수행된 연구의 일부이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] EPRI, "Fundamental Investigation of Arc Interruption in Gas Flows," EL-284 (1977).
- [2] 이종철, 안희섭, 최중용, 김윤제, "SF6 가스차단기 대전류 아크유동해석," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 (2002), pp. 1913-1918.
- [3] Noeske, H. O., "Investigation of Dynamic Nozzle Parameters for Various Nozzle Geometries and Test Condition of an Experimental Half-Size SF₆ Puffer Breaker," IEEE Trans. PAS, PAS-96.3 (1977).
- [4] Frost, L. S. and Liebermann., "Compressible and Properties of SF₆ and Their use in a Simplified Enthalpy Flow Arc Model", Proc. IEEE, 59 (1971).
- [5] Ozaki, Y., Mizoguchi, H., Yanabu, S. and Kobayashi, A., "Gas Pressure of Puffer Type Breaker During Current Interruption", Proc. Int. on Developments on Design and Performance of EHV Switching Equipment, IEE Pub., No.182 (1979).
- [6] Ueda, Y., Sasao, H., Murai, Y., Yoshinaga, K., Miyamoto, T. and Tominaga, S., "Self-flow Generation Phenomena in Gas Circuit Breaker without Puffer Action," IEEE PES, 81 WM 149-4 (1981).
- [7] Flurscheim, C. H., "Power Circuit Breaker Theory and Design," IEEE PES 1 (1982).
- [8] Iwamoto, K., "A study on Supersonic Nozzle used in High-Voltage Gas Circuit Breaker", Kyushu university, Master Thesis (in Japan).