

충격파관을 이용한 DISK형 MHD발전기에 관한 연구

배 철 오¹⁾, 金潤植²⁾

A Study on the Disk Type MHD Generator Using a Shock Tube

Cherl-O Bae , Yoon-Sik Kim

Abstract

In MHD power generation system, enthalpy of the working gas is converted to electric power directly through expansion in generator channel. It means that electric power can be generated without a moving mechanical linkage such as turbine blades.

The principle of MHD generation is based on Faraday's law of induction that electromotive force($u \times B$) is generated when the working gas of velocity u flows a channel in which magnetic field of strength(B) exists.

There are two types of generator in MHD generation; linear type faraday and disk type hall generator.

Disk type hall generator's generation performance using helium gas seeded with cesium as a working gas is the main target of this paper, which superiors to linear type Faraday generator in many points. Isentropic efficiency and enthalpy extraction rate of disk type shock tube driven hall generator is discussed here.

It is studied the characteristics and efficiency of Disk type hall generator driven a shock tube especially by measurement using a many kinds of instruments.

Rogowski coils having the bandwidth of the 100[Hz] ~ 20[kHz] were used

1) 한국해양대학교 기관공학과 석사 전기제어전공

2) 한국해양대학교 전기공학과 교수

for measuring current flowing MHD disk channel.

Optimum load resistance of the MHD generator studied was 2.5[Ω].

In this experiment, obtained maximum isentropic efficiency was 54.5[%] at a 1[MW] thermal input and the maximum enthalpy extraction of 27.7[%] was achieved. When the applied magnetic flux density increased, the extraction of enthalpy and output electrical power increased remarkably. So it is considered that the application of higher magnetic flux density is essential to get higher isentropic efficiency.

1. 서 론

MHD는 Magneto-Hydro-Dynamics라는 원어의 머릿글자로 된 용어로 전자기학과 유체역학의 결합이라 할 수 있다. 이 MHD발전방식은 자장이 강한 유로중에 전기전도성을 가진 작동유체를 흘림으로써, 유체가 가지는 열(엔탈피)을 전력으로 변환하는 것이다.⁽¹⁾

또한 MHD발전이라는 것은 작동유체가 자장안으로 흐르면 자장과 작동유체의 운동방향에 수직한 방향으로 기전력이 발생한다는 파라데이의 전자유도법칙에 기본을 두고 이때 발생한 기전력을 외부부하로 빼내는 것이다.

MHD발전기에는 그림 1, 2에서 나타낸 것처럼 크게 리니어(faraday)형⁽²⁾과 디스크(Hall)형⁽³⁾의 2종류가 있다.

이들 중, 디스크형 발전기는 리니어형 발전기와는 달리 전극이 링형으로 Anode와 Cathode의 2개뿐이므로 전극 및 부하회로가 간단하고 전극의 손상이 적은 잇점이 있어 본 실험에서는 디스크형을 채택하였다.

특히, 여기서는 디스크형 발전기중 작동유체의 온도를 1800 ~ 2500[K]정도의 높은 온도를 얻기 위해 충격파에 의한 일시적인 단열압축방식인 충격파관을 이용하고 있다.

2. 실험장치

그림 3은 본 연구에서 구성한 실험장치의 개략도를 나타내었다.

이 실험장치는 크게 충격파관, Seed 주입장치, 디스크형 MHD발전기, 수냉철심 상전도자석으로 이루어져 있다.

충격파관은 길이가 약 10[m]의 스테인레스제이고, 고압부와 저압부는 알루미늄제의 위판으로 차단되어 있다. 저압부는 작동기체로써 세슘(Cs)을 Seed로 한 헬륨(He)을 사용하고, 고압부에는 이동도가 헬륨보다 빠른 수소를 이용했다. 수냉철심 상전도자석은 최대로 약 2.6[T]정도의 자속밀도를 발생 할 수 있다.

그림 4, 5에 발전기 입구에서 초음속의 선회류를 만들기 위해 원주 방향에 같은 간격으로 24개의 Swirl Vane⁽⁴⁾을 설치한 디스크와 그의 단면도를 나타내었다.

디스크내벽은 전기적 절연을 위해 FRP로 만들어져 있으며 디스크에는 3개의 전극이 동심원상으로 설치되어 있고, 중심으로부터 Anode(A), 제1 Cathode(C), 제2 Cathode(C) 순으로 되어 있다. 본 연구에서는 Anode와 제1 Cathode(C) 사이의 외부회로를 접속하여 발전을 행하였다. 발전기의 원주방향으로 흐르는 파라데이 전류는 대전류에서도 포화되지 않도록 설계된 주파수대역 100[Hz] ~ 20[kHz]의 공심형 Rogowski coil⁽⁵⁾에 의해 측정되었다.

그 밖에 디스크 내벽에는 전위분포를 계측하기 위한 전압 probe, 압력계측을 위한 pito관, 분광계측을 위한 수정창 등이 설치되어 발전기내에서 일어나는 여러 현상들을 계측할 수 있다.

3. 실험조건

본 실험의 전반적인 실험조건을 표 1에 표시한다.

표 1 실험조건

Working gas	He + Cs
Stagnation temperature	2100 [K]
Stagnation pressure	1.7 [atm]
Seed fraction	3×10^{-4}
Thermal input	1.08 [MW]
Load resistance	1.0 ~ 7.0 [Ω]
Magnetic flux density	0.91 ~ 2.55 [T]

4. 단열효율에 관한 실험적 평가

4.1 엔탈피 추출율과 단열효율과의 관계

엔탈피 추출율은 아래와 같이, MHD 발전기로부터의 전기출력을 열입력으로 나누어 산출할 수 있다.

$$E.E. \text{ (엔탈피추출율)} = \frac{\frac{V^2}{R_L}}{\text{Thermal Input}} \quad (4-1)$$

여기서 V : 출력전압, R_L : 부하저항이다.

열입력(thermal input)은 throat부분의 값들을 기준으로 계산하였으며, throat부에서의 마하수는 1이고, 정체점으로부터 throat까지의 변화는 단열적이다.

$$\text{Thermal Input} = \rho \sqrt{\gamma R T_g} A_{th} C_p T_{st} \quad (4-2)$$

ρ : 작동기체의 질량밀도 (kg/m^3)

A_{th} : throat 단면적 (m^2)

C_p : 정압비열

T_g : 정체점 온도

$$T_g = T_{st} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}\right)^{-1}$$

또 발전기의 단열효율(η_i)은 다음과 같이 나타낸다.⁽¹⁾

$$\eta_i = \frac{h_{Oin} - h_{Oout} \text{ (actual)}}{h_{Oin} - h_{Oout} \text{ (isentropic)}} \quad (4-3)$$

여기서 h_o 는 작동기체가 가지는 전 엔탈피, 첨자의 in, out은 발전기입구, 출구를 표시하고, actual은 실제의 값을, isentropic은 단열변화를 가정한때의 값을 표시한다.

윗식의 분모를 단열변화의 관계식

$$T_o^\gamma p_o^{1-\gamma} = \text{const.} \quad (4-4)$$

을 이용하여 변형하면, 다음과 같은 식이 된다.

$$\eta_i = \frac{E \cdot E}{1 - \left(\frac{P_{Oout}}{P_{Oin}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (4-5)$$

P_{Oout} : 발전기 출구에서의 total 압력

P_{Oin} : 발전기 입구에서의 total 압력

γ : 작동기체의 비열비

위 식에서 보는 바와 같이 발전기의 단열효율은 엔탈피 추출율과 출구/입구의 압력비의 함수로서 표현된다. 따라서 단열효율을 높이기 위해서는 높은 엔탈피 추출율을 유지하고, P_{Oout} / P_{Oin} 의 값을 크게 즉, 출구에서의 소압력의 저하를 억제할 필요가 있다. 그림 6에서는 엔탈피 추출율과 단열효율에 관한 그래프를 보여준다. 엔탈피 추출율이 증가할수록 단열효율 또한 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 이 실험에서 얻어진 최대 단열효율은 54.6[%]이었다.

4.2 부하저항의 영향

실험조건은 앞서 언급한 조건들을 유지하고, 자속밀도를 2.55[T]로 하였다. 그리고 부하저항을 1.0 ~ 7.0[Ω]으로 변화시키면서 실험을 행하였다. 부하저항과 홀 전위분포와의 관계를 그림 7에 나타내었다. 그래프에서 보는 것처럼 부하저항이 클수록 발생하는 홀 전압이 점점 증가함을 알 수 있다. 그러나 모든 부하저항값에 있어서 발전기 상류부분보다도 중류부분 이후에서, 홀 전계강도가 작게 나타나 있다. 이것은, 중류영역 이후에서의 유속 및 자속밀도 감소에 의해 홀 기전력이 저하함으로써 일어난다고 생각된다.

한편, 그림 8을 보면 부하저항이 높게 되면, 발전기 중류부분영역의 파라데이 전류밀도가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 어떠한 부하저항값에서도 발전기 하류부분에서는 파라데이 전류밀도가 작게 되고, 7.0[Ω]의 경우 상류부분에서의 파라데이 전류밀도가 2.5[Ω]의 경우보다 작게 되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 발전기입구부분에서 큰 파라데이 전류가 흘러 유속의 감속이 심해지고, 바로 파라데이 전류가 감소하기 때문이라고 생각된다. 그리고 그림 9에서 부하저항이 높아질수록 정압상승이 크게 된다는 것을 알 수 있다. 이것은 그림 8에서 알 수 있듯이 부하저항이 높게 되면 파라데이 전류밀도가 증가하고, 작동기체의 흐름방향과 반

대로 작용하는 로렌츠의 힘($-j_{\theta} \times B$)이 크게 되어 브레이크작용을 하기 때문이다.

그림 10에 부하저항의 변화에 따른 엔탈피 추출율과 단열효율을 나타내었다. 본 실험조건에서는 부하저항이 $2.5[\Omega]$ 일 때에 엔탈피 추출율 및 단열효율이 최대로 된다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로 엔탈피 추출율 및 단열효율이 최대로 되는 최적의 저항값이 존재함을 알 수 있다.

4.3 자속밀도의 영향

현재의 실험조건을 유지하고 부하저항을 $2.5[\Omega]$ 으로 고정한 후, 자속밀도를 0.91, 1.46, 2.0, 2.55[T]로 각각 변화시키면서 자속밀도가 발전성능에 주는 영향을 비교했다.

그림 11에 자속밀도와 홀 전위분포와의 관계를 나타내었다. 자속밀도가 커짐에 따라 발전기 입구부분에서 홀 전위분포가 높게 나타남을 알 수 있었다. 그런데 자속밀도가 0.91[T]시에는 발전기 입구부분에서 부의 전압부분이 나타나고 있다. 이는 정체점 온도 및 자속밀도가 낮을 때 나타나게 되는데, 초음속 노즐 안에서 불충분한 이온화에 의해 발생된다고 생각된다.

그림 12에서는 자속밀도와 파라데이 전류와의 관계를 나타내었다. 자속밀도가 저하하면 상류부분에서 전기전도도가 저하하여 파라데이 전류가 적게 되는 것을 알 수 있다. 한편 자속밀도가 낮을 때 발전기 하류부분에서의 파라데이 전류밀도가 크게 되고, 발전기내에 흐르는 파라데이 전류의 합은 자속밀도를 변화시켜도 그에 대응하여 변하지 않고 있다. 그림 13에는 자속밀도와 정압과의 관계를 나타내고 있다. 자속밀도가 크게 됨에 따라 정압이 상승하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 그림12에서 알 수 있듯이 자속밀도가 클 때에 발전기 상류부분에서의 파라데이 전류밀도가 크게 되어 로렌츠의 힘이 강하게 나타나기 때문이다. 또, 자속밀도가 낮을때에는 발전기 하류부분에서 정압이 상승하고 있는데, 이는 하류부분에서의 파라데이 전류밀도가 커지기 때문이다.

그림 14에 자속밀도에 대한 엔탈피 추출율과 단열효율을 나타낸다. 자속밀도를 높게 함에 따라 엔탈피 추출율 및 단열효율 모두가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 자속밀도를 크게 할수록 발전기의 성능은 향상될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

세슘을 seed로 한 헬륨을 작동기체로 하고, swirl vane을 가진 디스크형 발전기 ISTE C 1을 이용해 운전조건을 변화시키면서 단열효율과 발전특성에 주는 영향을 알아보기 위해 발전실험을 행하였다. 본 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻게 되었다.

- 1) 열입력 1[MW]정도에서 최대 54.6[%]의 단열효율이 얻어졌고, 최대의 엔탈피 추출율로서는 27.7[%]가 얻어졌다.
- 2) 단열효율이 최대로 되는 최적의 외부부하저항(2.5[Ω])이 존재하였다. 부하저항이 커지면 홀 전계분포는 높아지지만, 파라데이 전류의 증가와 함께 로렌츠의 힘이 커지므로 작동기체는 감속되어 전기출력이 저하하고 단열효율이 감소하게 된다.
- 3) 자속밀도를 증가시키면 실효적인 전기변환효율이 크게 되고 그 결과 단열효율 및 전기출력이 증가하게 됨을 실험적으로 알게 되었다. 결국 더 강한 자속밀도는 더 높은 단열효율의 향상에 필수적이므로 자속밀도의 향상을 위한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) R.J Rosa "Magnetohydrodynamic Energy Conversion" McGraw·Hill, 1968
- 2) A. Veeffkind, et al., "High Power Density Experiments in a Shock-Tunnel MHD Generator," AIAA Journal, Vol. 14, No.8, pp.1118-1122, 1976.
- 3) A.F.C. Sens, et al., "First Experimental Results with the Eindhoven Shock Tube Driven Closed Cycle MHD Disk Generator", late paper 20th SEAM, 1982.
- 4) Hruby, V.J., "Experimental Investigation of the MHD Disk Generator with Inlet Swirl M.S. / Engineer Thesis, M.I.T. press, February, 1976.
- 4) I. Hayash and Y. Nakano, J.IEE Japan, Vol. 81, pp. 1084-1092, 1961
- 5) T. Okamura, et al, "measurement of Faraday Current in Disk Generator," Proc. of 16th Symp. of Efficient Use of Energy and Direct Electrical Power Generation, 1994

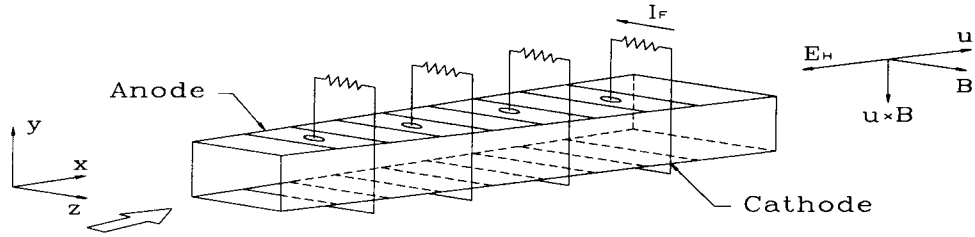


그림 1 리니어형 파라데이 발전기

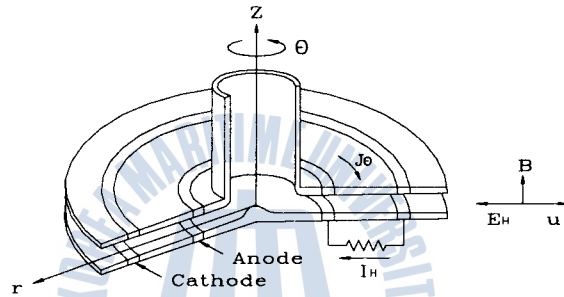


그림 2 디스크형 홀 발전기

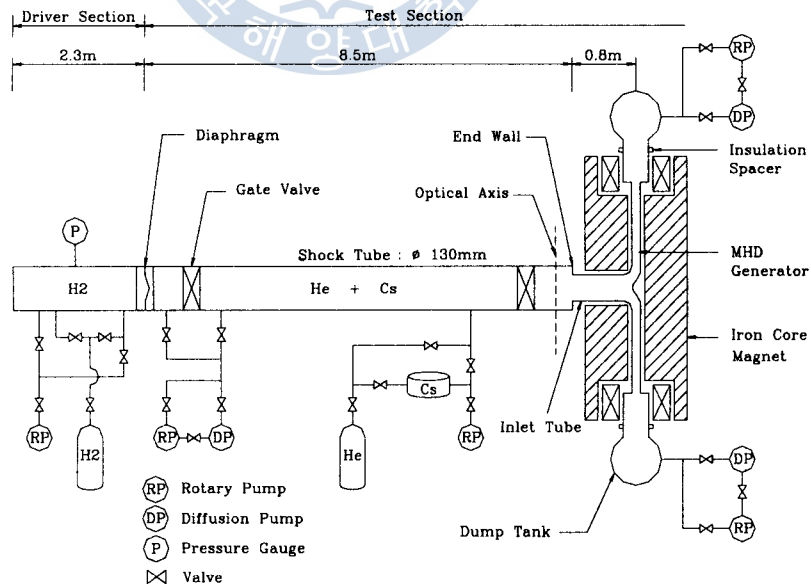


그림 3 충격파관 구동실험장치의 개략도

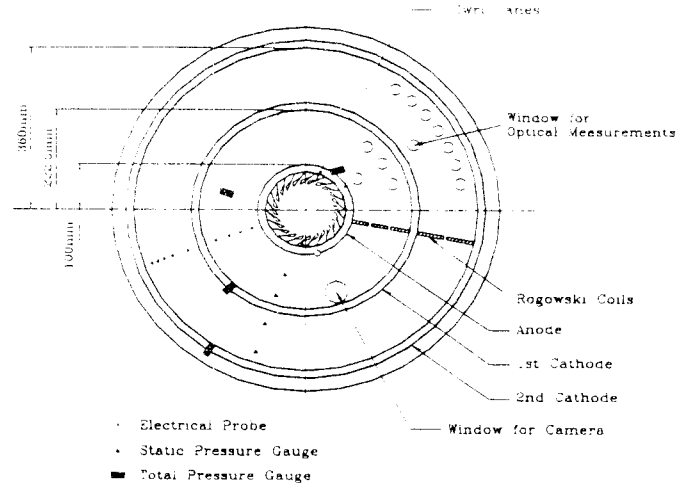


그림 4 디스크 발전기의 개략도

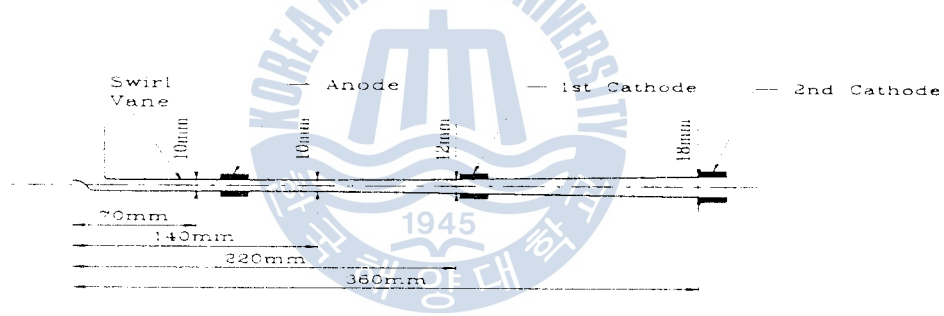


그림 5 디스크 발전기의 단면도

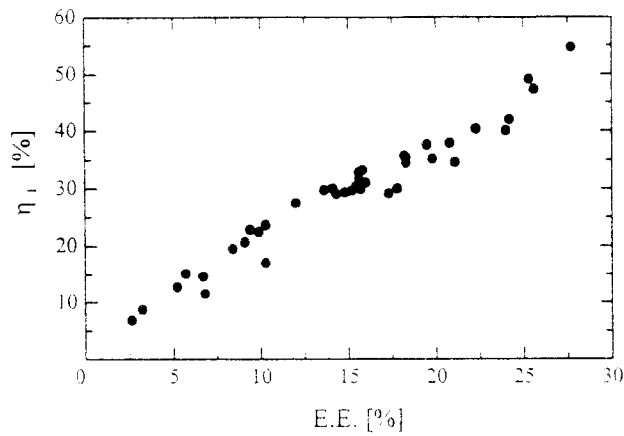


그림 6 엔탈피 추출율과 단열효율과의 관계

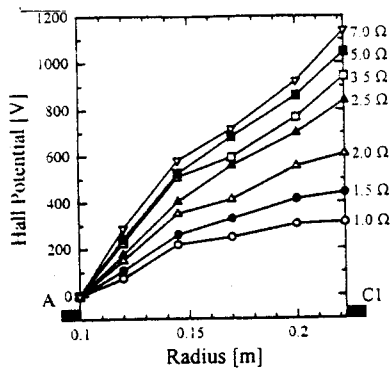


그림7 부하저항에 따른 홀 전위분포

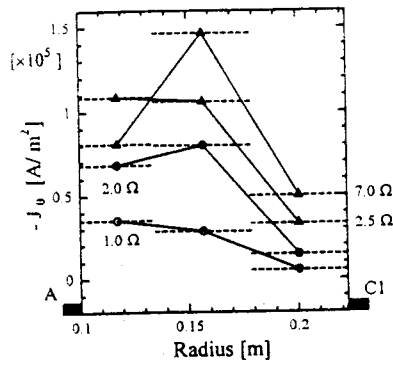


그림8 부하저항에 따른 파라데이 전류분포

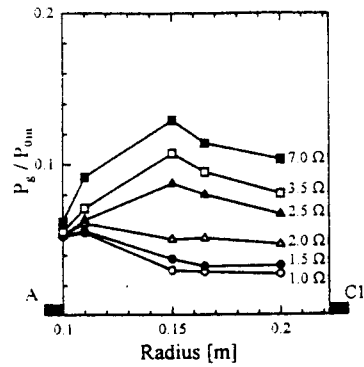


그림9 부하저항에 따른 정압분포

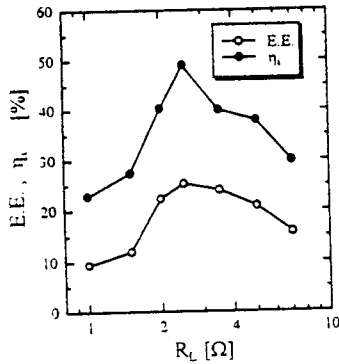


그림10 부하저항에 따른 엔탈피추출율과 단열효율과의 관계

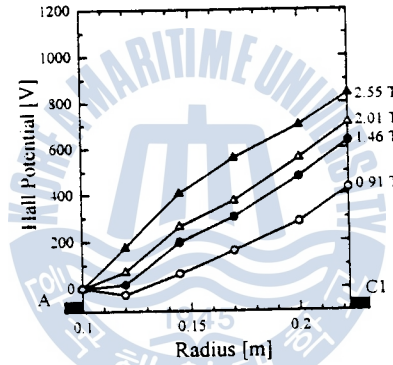


그림11 자속밀도에 따른 홀 전위분포

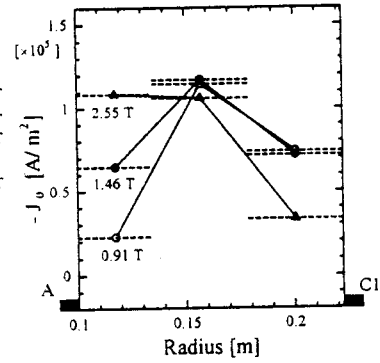


그림12 자속밀도에 따른 파라데이 전류분포

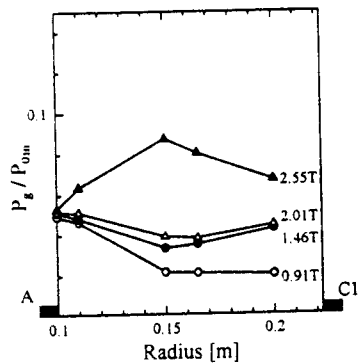


그림13 자속밀도에 따른 정압분포

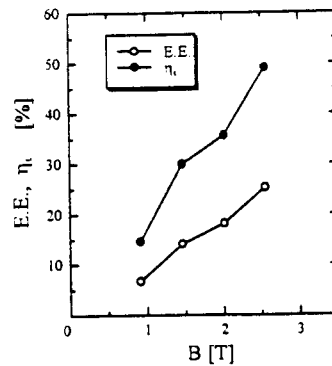


그림14 자속밀도에 따른 엔탈피 추출율과 단열효율과의 관계