

곡관의 곡률에 따른 전자기유량계 설치효과의 수치모사에 의한 특성 예측(층류)

임기원* · 최상규** · 정명균***
(1999년 4월 27일 접수)

Prediction of Curvature Effects on the Electromagnetic Flowmeter Characteristics with Numerical Simulation (Laminar flow)

Ki Won Lim, Sang Kyu Choi and Myung Kyoon Chung

Key Words: Electromagnetic Flowmeter(전자기유량계), Voltage Equation(볼테지방정식), Finite Volume Method(유한체적법), Weight Function Method(가중함수법), Installation Effect (설치효과), Magnetohydrodynamics(전자유체역학)

Abstract

An electromagnetic flowmeter, based on a magnetic induction principle, provides an obstructionless flowmeter that essentially averages the velocity distribution over the pipe cross-sectional area. To predict the installation effects, the flowmeter installed near 90° elbow is simulated by using a commercial code FLUENT(ver. 4.48) for the laminar flow field and a code developed through this study for magnetic field. The installation effects of the flowmeter are estimated by varying a number of the dependent parameters such as the radius of the elbow($R_c=1D, 1.5D, 2D, 3D$), the location, Reynolds number and the direction of electrodes plane(φ). It was found that all these factors affect the performance of the electromagnetic flowmeter significantly. The longer installation distance from the elbow is not always optimal to minimize the error, and also there exists an optimal location to install the EMF for a minimum error. Especially the flow signal with the electrodes plane direction of $\varphi = 45^\circ$ is shown to yield smallest measurement error regardless of the Reynolds number and the curvature of elbow.

기호설명

a :파이프 반경 [m]
 B, \vec{B} :자속밀도(스칼라, 벡터) [wb/m^2]
 B_0 :균일한 자속밀도 [wb/m^2]
 D :파이프 직경 [m]
 \vec{D} :전속밀도 [C/m^2]
 \vec{E} :전계의 강도 [V/m]
 \vec{F} :로렌츠힘 [N/m^3]

\vec{H} :자계의 강도 [$A \cdot T/m$]
 \vec{J} :전류밀도 [A/m^2]
 P :압력 [N/m^2]
 Pr_m :마그네틱 프란틀 수
 Re_m :마그네틱 레이놀즈 수
 S_f :스위치 팩타 (0 또는 1)
 S_φ :이산화방정식의 원천항
 \vec{u} :속도벡터 [m/s]
 w_0 :평균속도 [m/s]

u, v, w :카테시안 속도 요소

x, y, z :카테시안 좌표계

* 회원, 한국표준과학연구원 유체유동그룹

** 한국과학기술원 대학원 기계공학과

*** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

그리스문자

- μ : 유체 점성 [$N \cdot s / m^2$]
 μ_0 : 유체의 투자율 [H/m]
 ν : 동점도 [m^2/s]
 ρ : 유체의 밀도 [kg/m^3]
 σ_s : 유체의 도전율 [S/m]
 ϕ : 종속 변수
 Γ_s : 확산 계수
 φ : 곡판의 평면과 전극면의 방향이 이루는 각
 ψ : 전위
 $\Delta\psi_s$: 전극간의 전압차
 ξ, η, ζ : 일반 좌표계

1. 서론

자기장(magnetic field)이 작용하는 전자기유량계(electromagnetic flowmeter)의 내부를 전도성 유체(electrically conducting fluid)가 유동하면 파라데이의 유도법칙(Faraday induction law)에 의해 전극(electrode)에 전압(voltage)이 유도된다. 즉 전극에 유도되는 전압이 유체의 유동율(flowrate)에 비례하기 때문 유량신호(flow signal)로 사용할 수 있다. 전자기유량계는 비교적 응답속도가 빠르고, 내부의 회전체(rotor)나 유체의 흐름을 방해하는 요소가 없어 압력손실이 적다. 또 상하수도, 슬러지 등을 측정할 수 있고 펄프, 맥주 및 우유 등 다양한 전도성 유체를 측정할 수 있어서 산업 현장에서 유량측정에 광범위하게 사용되고 있다.

전자기유량계의 해석은 자기장과 유동장이 중첩한 경우로 광의의 MHD(magnetohydrodynamics)의 범주에 속한다. 그러나 자속밀도가 상대적으로 작기 때문에 자기장에 의해 유동장이 거의 영향을 받지 않는다. 전자기유량계 연구는 해석방법과 내부의 속도 분포에 영향을 받지 않는 유량계의 설계에 관한 연구이고 또 하나는 유량계가 설치된 상류쪽 배관에 의한 유량계의 특성 변화 즉 설치효과(installation effect)에 관한 예측이다.

해석 방법에 관한 연구는 1954년 Shercliff⁽¹⁾가 가중함수(weight function)방법으로 해석한 이래 많은 연구자들이 이 방법으로 전자기유량계를 해석하고 연구결과를 성능 개선을 위한 설계에 반

영하였다. Bevir⁽²⁾는 2차원 가중함수를 가중벡터(weight vector)의 개념을 도입하여 3차원으로 확장하였고, 내부의 속도분포에 영향을 받지 않는 이상적인 유량계가 되기 위한 조건을 제시하였다. 그러나 Engl⁽³⁾이 2차원에서 이러한 조건을 만족할 수 없음을 확인하였다. 또 O'sullivan⁽⁴⁾은 점전극으로 제한되는 Bevir의 가중함수를 여러 가지 모양의 전극에 대해 일반적인 가중함수를 소개하였다.

한편 설치효과에 대한 연구는 Luntta⁽⁵⁾가 상업용 PHOENICS 코드로 해석한 유동장의 속도와 가중함수법으로 곡판의 하류에서 전자기 유량계의 신호변화를 예측하였다. 또 Kuromori⁽⁶⁾는 곡판, 밸브 등 배관부품의 하류에서 측정한 속도 값과 가중함수법으로 유량신호의 변화에 관해 실험적 연구를 수행하였다. 이와 같이 대부분의 연구는 해석 및 특성의 예측은 가중함수법이 사용되었고 난류 유동에 관한 것이었다.

전극간의 전압차는 유동이 축대칭(axisymmetry)이고 자속밀도가 균일한 경우에 해석적인 엄밀해를 구할 수 있다. 속도의 분포가 축대칭이 아니거나 자속밀도가 균일하지 않으면 수치 해석의 방법으로 유량신호를 구하여야 한다. 또 산업 현장에서 속도가 낮은 층류유동으로 사용범위가 확장되고 있으며 측정오차를 줄이고 사용범위를 확장하기 위해 층류유동에서 설치효과를 포함한 특성예측의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 이러한 필요성을 고려하여 수치모사의 방법으로 층류유동에서 전자기유량계의 설치효과를 예측하였다. 상업용 코드인 FLUENT(ver4.48)로 층류 유동장을 해석하고, 자기장의 지배방정식인 볼테지(voltage)방정식을 유한체적법(finite volume method)으로 개발한 코드를 이용하여 해석하였다. FLUENT와 개발된 코드로 90° 곡판의 하류에 설치된 전자기유량계의 유량신호의 변화를 예측하였다. 90° 곡판은 배관 부품으로 자주 사용되는 곡판이 1D인 짧은 곡판(short elbow)과 1.5D인 긴곡판(long elbow)(KS B 1522, ISO 3419)을 포함하여 2D와 3D인 곡판에서 유량신호의 변화를 레이놀즈수에 따라 예측하였다. 또 전극면(electrode plane)의 방향에 따른 유량신호의 변화를 각각의 곡판과 레이놀즈수에서 고찰하였으며 유량신호와 속도분포의 관계에 대해 논의하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 지배방정식

자기장이 작용하는 공간의 내부에 전도성 유체가 유동하면 유체에 로렌츠 힘(Lorentz force)이 외력으로 작용한다. 즉 유동장은 연속방정식과 로렌츠 힘이 외력으로 부가된 운동량방정식의 지배를 받는다. 자기장은 전하가 보존(conservation of charge)되며 맥스웰(Maxwell) 방정식의 지배를 받는다.

전자기유량계와 같이 전류의 흐름이 공간적으로 분포되어 있을 때 자계의 강도(magnetic field intensity) \vec{H} 와 전류밀도 \vec{J} 와 관계를 암페어의 법칙(Ampere's law)으로부터 얻을 수 있다. 변위전류(displacement current)의 개념을 포함하여 적용하면 식 (1)과 같은 맥스웰방정식을 얻는다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

변위전류는 빛과 같은 높은 주파수인 경우에 고려해야 하나 자기장의 발생방법이 주기적인 DC형인 전자기유량계의 해석에서는 $\partial \vec{D} / \partial t = 0$ 로 표현된다.

한편 전도성 유체인 물이 자기장 내부에서 유동할 때 전기적으로 중성상태이므로 유체입자가 가지고 있는 전하가 무시할 정도로 작다. 이 때 발생하는 로렌츠 힘 \vec{F} 와 전류밀도 \vec{J} 는 전계의 강도(electric field intensity) \vec{E} , 자속밀도(magnetic flux density) \vec{B} , 유체의 속도 \vec{u} 와의 관계를 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.^(7,8)

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

$$\vec{J} = \sigma_e (\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (3)$$

그리고 전자기유량계와 같이 자기장이 작용한 상태에서 전도성 유체가 유동하면 전류가 발생하게 되고, 또 발생한 전류에 의해 자기장이 변하게 된다. 그러나 자기레이놀즈(magnetic Reynolds)

$Re_m = w_0 D \sigma_e \mu_0 = Re \sigma_e \mu_0 \nu \sim O(10^{-18})$ 로서 상

대적으로 작고, 자기프란틀(magnetic Prandtl) 수도

$Pr_m = Re_m / Re \sim O(10^{-20})$ 이므로 자속밀도 \vec{B}

는 유도되는 전류에 의해 영향을 받는 자기장의 크기가 상대적으로 작고, 원래 가해진 자기장이

지배적이다.⁽⁹⁾

한편 전계의 강도 \vec{E} 는 스칼라 포텐셜(Scalar potential)과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (4)$$

식 (3), 식 (4) 및 식 (1)의 맥스웰방정식으로 부터 식 (5)과 같은 볼테지방정식(전자기유량계방정식)을 얻는다.⁽¹⁰⁾

$$\nabla^2 \phi = \nabla \cdot (\vec{u} \times \vec{B}) \quad (5)$$

따라서 전자기유량계 내부의 자기장과 유동장의 지배방정식은 식 (5)의 볼테지방정식과 연속방정식, 로렌츠 힘이 외력으로 작용하는 모멘텀방정식으로 정리된다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \vec{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (7)$$

$$\vec{F} = -\sigma_e \nabla \phi \times \vec{B} + \sigma_e (\vec{u} \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (8)$$

한편 식 (8)의 로렌츠 힘은 도전율이나 자기장이 커서 유동에 영향을 미치는 경우 고려해야 하고, 특정 유체가 물인 경우에는 유동에 미치는 영향이 무시할 정도로 작다.

2.2 수치해석

수치모사에서 지배방정식 식 (6), (7)은 FLUENT 물 이용하여 해석하였고, 자기장의 지배방정식인 식 (5)를 수치해석하기 위해 식 (9)과 같이 일반적인 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Sf \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \phi) \right) \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_x \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_y \frac{\partial \phi}{\partial y}) \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_z \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_s \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서 스위치 팩터(switch factor) Sf , 확산계수(diffusion coefficient) Γ_s , 원천항(source term) S_s 을 선택하여 볼테지방정식을 표현할 수 있다.

수치해석에서 종속변수는 물리공간(physical domain)에 두고 독립변수는 계산공간(computational domain) 좌표계 (ξ, η, ζ) 로 일반변환

(general transformation)시킨다. 계산공간의 좌표는 $\xi = \xi(x, y, z)$, $\eta = \eta(x, y, z)$, $\zeta = \zeta(x, y, z)$ 관계를 이용하여 식 (10)과 같이 변환한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial x} &= \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \cdot \xi_x + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot \eta_x + \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \cdot \zeta_x \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} &= \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \cdot \xi_y + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot \eta_y + \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \cdot \zeta_y \quad (10) \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} &= \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \cdot \xi_z + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot \eta_z + \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \cdot \zeta_z \end{aligned}$$

그리고 각 항은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} J \cdot \xi_y &= x_\zeta z_\eta - x_\eta z_\zeta \\ J \cdot \xi_x &= y_\eta z_\zeta - y_\zeta z_\eta \\ J \cdot \xi_z &= x_\eta y_\zeta - x_\zeta y_\eta \\ J \cdot \eta_x &= y_\zeta z_\xi - y_\xi z_\zeta \\ J \cdot \eta_y &= x_\xi z_\zeta - x_\zeta z_\xi \\ J \cdot \eta_z &= x_\zeta y_\xi - x_\xi y_\zeta \quad (11) \\ J \cdot \zeta_x &= y_\xi z_\eta - y_\eta z_\xi \\ J \cdot \zeta_y &= x_\eta z_\xi - x_\xi z_\eta \\ J \cdot \zeta_z &= x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J &= x_\xi(x_\eta z_\zeta - y_\zeta z_\eta) - x_\eta(y_\xi z_\zeta - y_\zeta z_\xi) \\ &\quad + x_\zeta(y_\xi z_\eta - y_\eta z_\xi) \end{aligned}$$

식 (10)과 (11)의 관계를 이용하여 변환하면 식 (9)는 식 (12)와 같이 보존형태(conservative form)의 지배방정식이 되고 이를 차분하여 이산화 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} Sf \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \xi^k} (\rho u_k \beta_k^i \phi) \right) \\ = \frac{\partial}{\partial \xi^k} \left(\frac{\Gamma_\phi}{J} \frac{\partial \phi}{\partial \xi^m} \beta_k^m \beta_k^i \right) + S_\phi \quad (12) \end{aligned}$$

$$\text{단, } \beta_k^i = J \cdot \frac{\partial \xi^i}{\partial x^k}$$

여기에서 $Sf=0$, $\Gamma_\phi=1$ 이고, 원천항은 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_\phi &= -\nabla \cdot (\vec{u} \times \vec{B}) \\ &= -\left[\frac{\partial}{\partial x} (vB_x - wB_y) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial y} (wB_x - uB_z) + \frac{\partial}{\partial z} (uB_y - vB_x) \right] \quad (13) \end{aligned}$$

개발한 코드는 유한체적법으로 볼테지방정식을 이산화(discretization)하였고, 비엇갈림(non-staggered) 비균일(non-uniform) 격자제가 사용되었다. 계산 과정에서 리디주얼(residual)의 합이 10^{-6} 보다 작을 때 수렴되었다고 판단하였다.

3. 수치해석에서 경계 조건

90° 곡판에서 유동하는 층류 유동장을 FLUENT를 이용하여 해석하기 위해 적용한 경계 조건은 다음과 같다. 입구에서는 충분히 발달한(fully-developed) 속도분포를 축방향의 속도성분으로 하였고 각각의 레이놀즈 수에서 미리 계산한 속도성분을 사용하였다. 그리고 반지름 방향과 원주방향의 속도성분은 "0"으로 하였다.

유동장의 출구에서는 곡판으로부터 충분한 거리를 유지한다고 가정하여 노이만 조건(Neumann condition) $\partial u / \partial x = 0$, $\partial v / \partial x = 0$, $\partial w / \partial x = 0$ 을 적용하여 축방향으로 속도 성분의 변화가 없는 것으로 하였다. 곡판의 벽면에서 미끄러짐이 없는 조건(non-slip condition)을 적용하여 모든 속도 성분이 "0"이 되도록 하였다. 그리고 전극단면의 중심인 작은 구멍(very small hole)에는 노이만 조건을 적용하였다.

한편 볼테지방정식의 해석을 위한 자기장의 경계조건은 벽면과 출구에서 노이만 조건과 파이프 중심에서 "0"을 적용하였다. 즉 주어진 자기장에서 벽면에서 반지름 방향으로 유동장에 의한 전압의 변화가 없으므로 노이만 조건을 적용할 수 있다. 그리고 출구에서도 유동장과 같이 축방향으로 변화가 없는 것으로 가정할 수 있다. 또 유량신호는 전극간의 상대적인 전압의 차이를 나타내므로 파이프의 중심에서 "0"으로 하고 전극의 위치에서 상대적인 전압의 차이를 구하였다.

4. 곡률에 따른 전자기유량계의 설치효과 예측 결과

4.1 수치해석 결과의 검증

FLUENT에 의한 유동장의 계산 결과와 개발된 코드에 의한 자기장의 계산 결과를 검증하기 위해 측정값과 엄밀해와 각각 비교하였다. 유동장의 계산은 90° 곡판에서 층류유동을 해석하여

Bovendeerd⁽¹¹⁾의 실험값과 비교하였다.

Fig. 1의 (a)는 곡관의 대칭면(symmetry plane)에서의 격자계이고, (b)는 파이프 단면에서 O형 격자계이며 유동장과 자기장의 해석에 사용되었다. (c)는 자기장의 해석에 사용된 경계조건을 나타낸 것이다. Fig. 2는 곡관의 대칭면에서 FLUENT로 계산한 축방향의 속도값과 실험값과 비교한 것이다. 무차원 변수 $S = Rc \cdot \theta_s (a \cdot Rc)^{1/2}$ 는 입구로부터 축방향의 거리를 나타낸 것이다. 무차원 변수값 $S=0.2, 0.5, 1.0, 1.7, 2.5, 3.5$ 는 곡관의 입구로부터 임의의 곡관 단면까지 각각 $\theta_s = 0^\circ, 4.6^\circ, 11.7^\circ, 23.4^\circ, 39.8^\circ, 58.5^\circ, 81.9^\circ$ 을 각각 나타낸다.

그리고 Fig. 3은 파이프 단면에서 계산된 축방향의 동속도 콘투어(iso-velocity contour)와 측정값과 비교한 것이다. Fig. 2, 3에서 알 수 있듯이 FLUENT에 의한 수치계산의 결과와 실험값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 유동장의 계산 결과인 각각의 속도 성분을 근거로 하여 불테지방정식을 해석하여 유량신호를 구할 수 있음을 뜻한다.

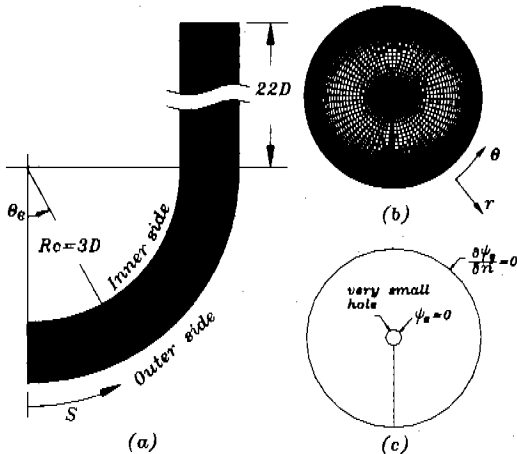


Fig. 1 The grid system and the boundary conditions used in numerical calculation ;
 (a) grid in symmetry plane of a 90° elbow,
 (b) grid in pipe section,
 (c) boundary conditions used in magnetic field calculation.

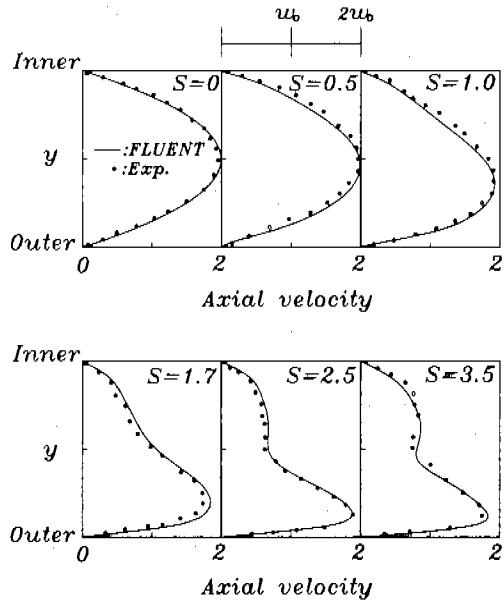


Fig. 2 Comparison of the axial velocity in a 90° elbow between the computation results with FLUENT and the experimental data at various pipe sections.

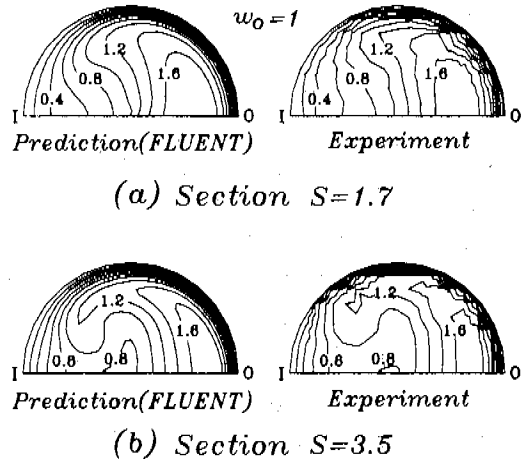


Fig. 3 Comparison of the axial velocity contours in a 90° elbow between the computation results with FLUENT and the experimental data at pipe sections.

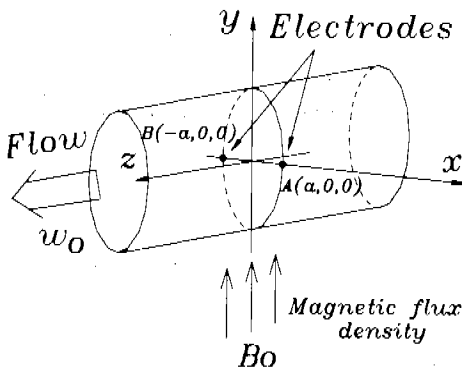


Fig. 4 The schematic diagram of an electromagnetic flowmeter.

한편 자기장 해석을 위해 개발한 코드의 계산 결과를 검증하기 위해 엄밀해결 구할 수 있는 조건에서 수치해석 결과를 비교하였다. Fig. 4는 전자기 유량계의 유량측정원리를 나타낸 것으로 전극은 $(-a, 0, 0)$ 과 $(a, 0, 0)$ 의 위치에 있다. 자기장 B_0 가 균일하게 y 방향으로 작용하고 축방향의 평균 속도(axial bulk mean velocity)는 w_0 이다. 따라서 전극간 전압의 차이인 유량신호는 충분히 발달한 속도분포와 균일한 자기장을 가질 때 해석적 엄밀해 $\Delta\phi_e = B_0 w_0 D$ 를 구할 수 있다. 따라서 자기장의 수치해석은 직관(straight pipe)에서 충분히 발달한 속도분포 일 때 균일한 자기장인 경우를 해석하여 비교하였다. 수치해석에서는 Fig. 1의 (b), (c) 같은 격자계와 벽면에서는 노이만 조건과 파이프의 중앙에서는 전압을 "0"으로 하고 유량신호는 전극의 위치에서 전압의 상대적인 차이로 표시하였다. 수치해석에서 계산의 편리성을 위해 자기장이 세기 $B_0=1$, 유량계의 지름 $D=1$, 평균유속 $w_0=1$ 로 하여 엄밀해와 비교하였다. 그리고 반지름 방향과 원주 방향으로 격자 수를 변화시키면서 격자 의존성을 고찰하였다. Fig. 5에서와 같이 반지름 방향의 격자수 40, 원주방향의 격자수 60이상이면 엄밀해와 0.05% 이내로 일치함을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구에서 유동장 계산에 사용된 FLUENT와 볼테지방정식 해석을 위해 개발한 코드의 해석 방법 및 경계조건의 설정이 적절히 이루어 졌다고 할 수 있다.

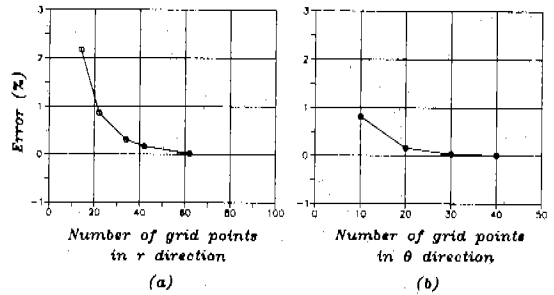


Fig. 5 The grid dependence test with the variation of grid numbers in r and θ directions for a fixed grid number in other direction.

(a) Number of grids in θ direction = 40

(b) Number of grids in r direction = 60

4.2 곡률에 따른 설치 효과의 예측

Fig. 6은 수치모사에 사용된 곡판의 곡률 $Rc=1D, 1.5D, 2D, 3D$ 일 때의 격자계를 각각 나타낸 것이며 D 는 $5.08 \times 10^{-3} m$ (공칭직경 2")이다. 격자계는 비균일 격자계로서 원주방향(circumference), 반지름방향(radial), 축방향(axial)의 격자수가 각각 $(60 \times 40 \times 80)$ 이 되도록 하였다. 가속밀도의 크기는 $B_0=100$ Gauss 로서 상업용 전자기유량계에서 사용되는 자기장의 세기를 고려하였고 유량계의 길이 2D 만큼 축방향 길이로 작용하도록 하였다. 그리고 자기장의 방향에 따른 유량계의 특성을 고찰하기 위해 Fig. 7과 같이 곡판의 대칭면과 전극면이 이루는 각이 $\varphi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 가 되도록 하였다.

Fig. 8은 $Re=400$ 일 때 곡판의 곡률 Rc 가 1D, 1.5D, 2D, 3D 일 때 자기장의 방향을 변화시키면서 각각 계산한 결과이다. 즉 직판에서 충분히 발달한 속도 분포일 때의 유량신호를 기준으로 곡판에 의해 변화된 속도분포에 의한 유량신호의 편차를 나타낸 것이다. 우선 Fig. 8의 (b)에서 $\varphi=45^\circ$ 일 때 곡판의 곡률에 관계없이 편차가 가장 적었고, $\varphi=0^\circ, \varphi=90^\circ$ 일 때 서로 대칭의 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

$\varphi=0^\circ$ 일 때 $Rc=1D$ 는 "+" 방향으로 최고 2%의 편차를 보이고 곡률이 증가함에 따라 "-" 방향으로 편차가 이동하고 있음을 알 수 있다. 이는 곡률이 작을 때($Rc=1D$) 원심력에 의한 유동의 찌그러짐(distortion)이 가장 크고 곡률이 증가

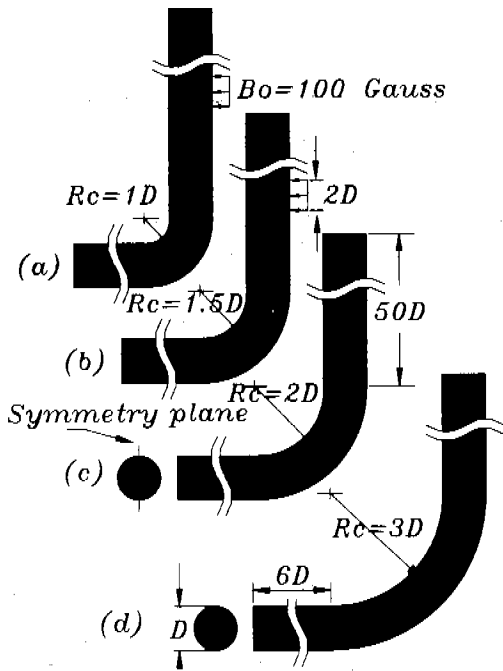


Fig. 6 The grid configurations for a 90° elbow with four different radii of curvature ($R_c=1D$, $1.5D$, $2D$ and $3.0D$) and the applied magnetic field.

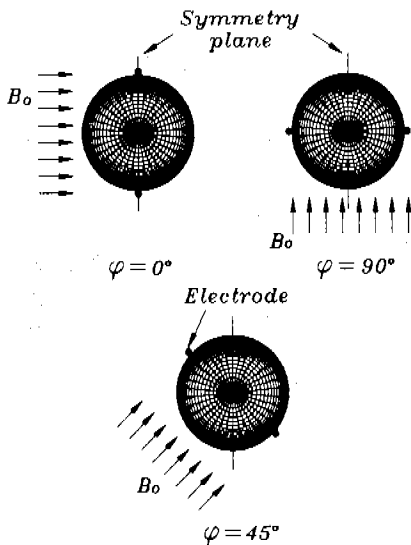


Fig. 7 The schematic diagram showing the magnetic field, symmetry plane and the electrode setting for $\phi=0^\circ$, 45° and 90° .

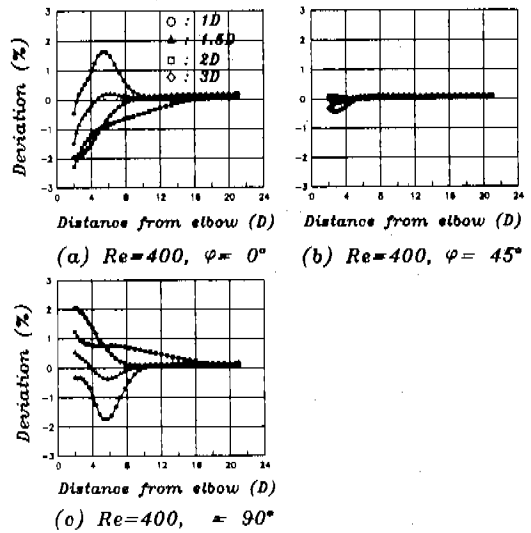


Fig. 8 The percentage deviation of the predicted flowrate from a reference value. The radii of curvature are $R_c=1D$, $1.5D$, $2D$, $3.0D$ and the angle of electrode plane are $\phi=0^\circ$, 45° , 90° with Reynolds number 400.

함에 따라 찌그러짐이 줄어드는 현상과 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 $Re=400$, $R_c=1D$ 일 때는 측정의 오차를 줄이기 위해서 전자기유량계를 2D 또는 10D 이상의 곡관 하류에 설치되어야 한다는 것을 의미한다.

Fig. 9는 곡관으로 부터 6D와 20D 하류에서 곡률이 다른 곡관에서 측방향의 등속도 콘투어를 나타낸 것이다. 전자기유량계의 유량신호는 전극의 단면에서 속도분포와 직접 관련되어 있다. 가중함수법(weight function method)에서는 이러한 관계를 전극의 단면에서 가중함수로 표현하고 있다.⁽¹⁰⁾ 가중함수는 전극면 임의의 위치에서 속도 성분이 즉 유량신호에 기여하는 정도를 함수로 표현한 것이다. 가중함수는 전극의 부근에서 최대값을 가지고 전극에서 멀어질수록 값이 적어진다. 따라서 전극면에서 속도가 큰 부분이 가중함수의 값이 큰 부분과 중복되면 유량신호는 커지고 서로 엇갈리면 유량신호가 상대적으로 작아진다.

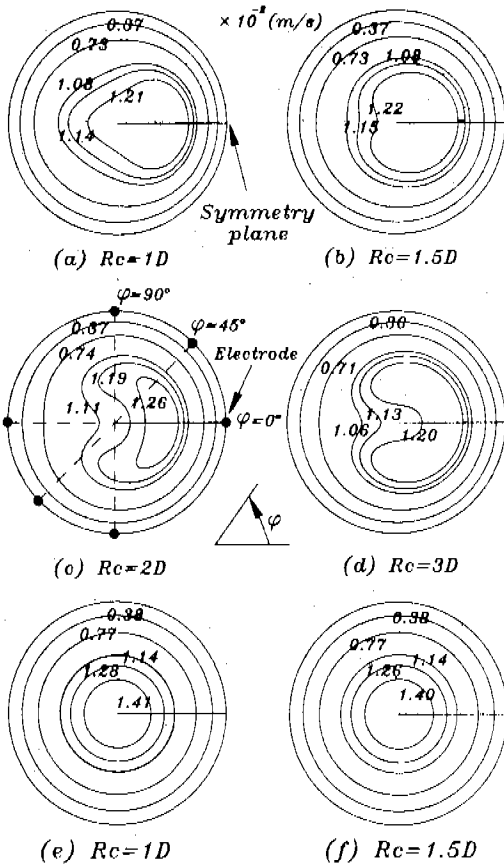


Fig. 9 The axial velocity contours at 6D((a), (b), (c), (d)) and 20D((e), (f)) from elbow for $Re=400$ and $Rc=1D, 1.5D, 2D, 3.0D$.

Fig. 9의 (a)에서는 곡관의 평면과 전극면이 이루는 각이 $\phi=0^\circ$ 일 때 전극 부근에서 상대적으로 큰 속도를 보이므로 "+" 방향의 편차를 보이고, $\phi=90^\circ$ 일 때는 전극 부근에서 작은 속도가 분포하므로 "-" 방향의 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 9의 (d)에서 $\phi=0^\circ$ 일 때 오른쪽 면에서 큰 속도분포를 지나 왼쪽의 전극 가까이에서는 상대적으로 작기 때문 유량신호는 "-" 방향으로 편차를 가진다. 또 $\phi=45^\circ$ 일 때는 속도 분포가 곡관의 크기에 관계없이 유량신호에 기여할 수 있는 형태를 가지기 때문 편차가 적음을 알 수 있다. Fig. 9의 (e)와 (f)는 곡관 $Rc=1D$ 와 $1.5D$ 일 때 곡관을 지나 20D에서 속도의 분포를 각각 나타낸 것이다. 그리고 이러한 속도 분포는 유량신호를 나타내는 Fig. 8에서 전극면의

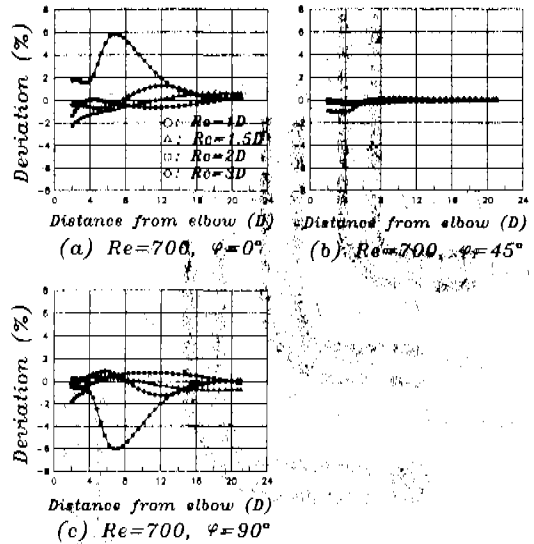


Fig. 10 The percentage deviation of the predicted flowrate from a reference value. The radii of curvature are $Rc=1D, 1.5D, 2D, 3.0D$ and the angle of electrode plane are $\phi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ with Reynolds number 700.

방향과 관계없이 발달한 속도분포일 때 외 유량 신호와 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 $Re=700$ 일 때 곡관이 다른 곡관에서 유량신호의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 $Rc=1D$ 일 때 곡관의 하류 6D에서 $\phi=0^\circ$ 인 경우 6%, $\phi=90^\circ$ 인 경우 -6%의 편차를 보이고 있다. 그리고 $Rc=1.5D, 2D, 3D$ 에서는 곡관에서 거리가 멀어 질수록 편차가 상대적으로 작아 "0" 가까이 접근하고 있음을 알 수 있다.

이는 Fig. 11의 곡관 하류의 6D의 위치에서 전극 단면의 속도 분포로부터 설명될 수 있다. 즉 $Rc=1$ 일 때 Fig. 11의 (a)에서($\phi=0^\circ$) 전극에 가까운 위치에 속도가 큰 부분이 분포하고 있어 Fig. 10의 (a)에서 "+" 방향으로 편차를 보이고 있고, $\phi=90^\circ$ 일 때는 전극에서 먼 위치에서 속도가 큰 부분이 분포되어 있어서 Fig. 10의 (c)에서와 같이 "-" 방향의 편차를 보이고 있다. 그리고 Fig. 11와 (b), (c), (d)에서 속도분포는 곡관을 유동할 때 원심력에 의해 속도분포는 편심되어 있으나 Fig. 10에서 알 수 있듯이 유량신호는 충분

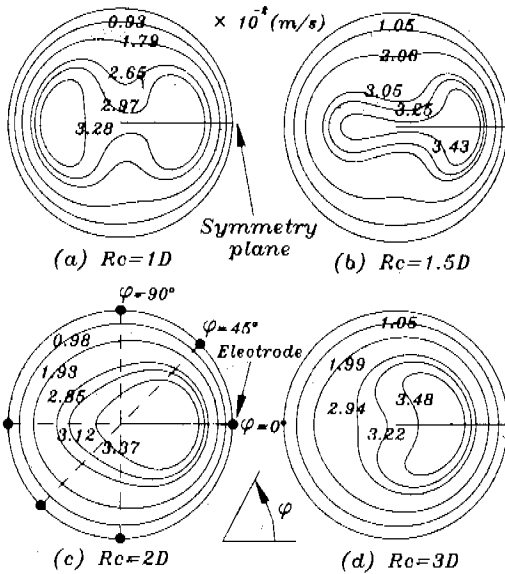


Fig. 11 The axial velocity contours at 6D from elbow for $Re=700$ and $Rc=1D, 1.5D, 2D, 3.0D$

히 발달한 속도 분포일 때의 유량 신호값과 일치하고 있음을 알 수 있다. 이것은 높은 속도가 분포된 전극 쪽에서는 유량신호의 크기를 증가시키고 상대적으로 낮은 속도가 분포하는 쪽의 전극에서는 유량신호의 크기를 감소시키므로 나타나는 현상이다.

따라서 측정오차를 최소화하기 위해 $Rc=1D$ 에서는 곡관을 지난 다음 16D 이상의 거리와 곡관 직후 4D의 위치에 설치하는 것이 최적임을 알 수 있다. 곡률 $Rc=1.5D, 2D, 3D$ 인 경우에는 6D와 8D 사이 또는 비교적 속도가 발달한 20D 이후의 위치에서 측정오차를 최소화할 수 있음을 뜻한다. 또 짧은 곡관($Rc=1D$)인 경우는 편차가 크므로 설치공간이 제약을 받을 때 긴곡관($Rc=1.5D$)을 사용하여 곡관 가까운 곳에서도 측정 오차를 줄일 수 있다.

Fig. 12는 $Re=1100$ 일 때 곡률에 따른 유량신호의 변화를 나타낸 것이다. $Re=400, 700$ 과 같이 $\phi=45^\circ$ 일 때 편차가 가장 적고, $\phi=0^\circ$ 와 $\phi=90^\circ$ 일 때 서로 대칭적인 신호의 변화가 보이고 있음을 알 수 있다. 또 곡률에 관계없이 4D에서 비교적 측정오차를 줄일 수 있고 이러한 현상은 $Rc=1D, 1.5D$ 에서 뚜렷하게 나타나고 있다.

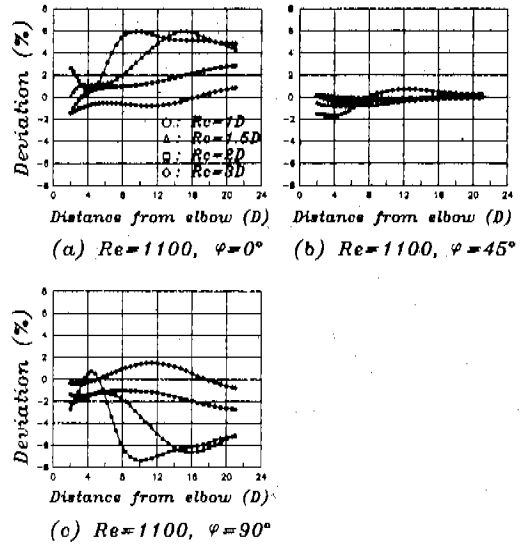


Fig. 12 The percentage deviation of the predicted flowrate from a reference value. The radii of curvature are $Rc=1D, 1.5D, 2D, 3.0D$ and the angle of electrode plane are $\phi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ with Reynolds number 1100.

$Rc=3D$ 에서는 곡관으로 부터 거리에 따른 유량신호의 변화가 상대적으로 적음을 알 수 있다.

Fig. 13, 14, 15는 $Re=1100$ 일 때 거리 4D, 10D, 20D에서 각각의 단면에서 축방향의 속도 분포가 나타낸 것이다. Fig. 13에서는 속도 분포는 편심되어 있으나 Fig. 11의 (d)와 비슷한 형태로 유량신호의 편차가 적다. 그러나 10D의 위치인 Fig. 14의 (a)의 경우 양쪽 전극 근처에서 높은 속도분포를 보이고 있으며 유량신호도 최대 6%의 편차를 보이고 있다. 그리고 Fig.14의 (c)와 (d)는 Fig. 13의 (c), (d)와 비슷한 형태를 유지하고 있고 유량신호의 편차(Fig. 12)도 변화가 적다.

$Rc=1.5D$ 인 경우는 곡관으로 부터 거리가 증가함에 따라 유량신호의 편차(Fig. 12)가 커지고 있으며 속도의 분포도 Fig. 14의 (b)의 모양은 편차가 적은 Fig. 14 (c)의 모양으로부터 편차가 큰 Fig. 14의 (a)의 형태로 변화하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 15 (b)에서도 확인할 수 있다. Fig. 15 (a), (b)에서는 양쪽 전극의 가까운 위치($\phi=0^\circ$ 인 경우)에 높은 속도가 분포하

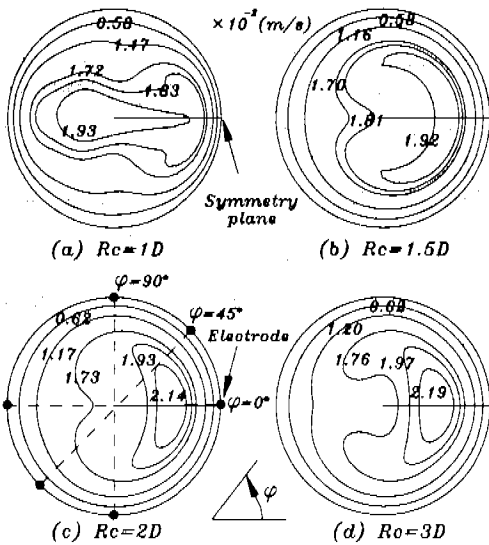


Fig. 13 The axial velocity contours at 4D from elbow for $Re=1100$ and $Rc=1D, 1.5D, 2D, 3.0D$.

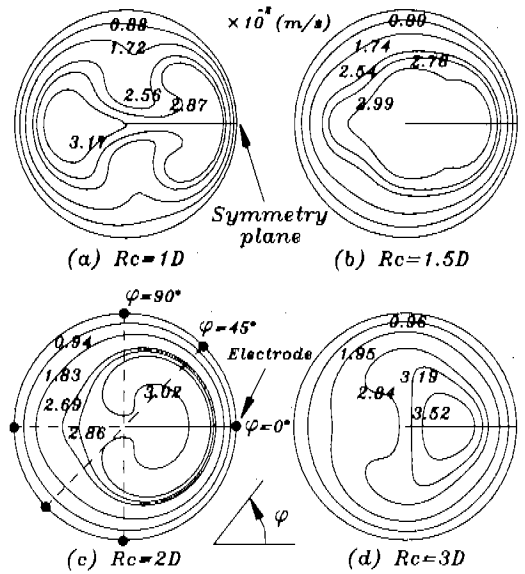


Fig. 15 The axial velocity contours at 20D from elbow for $Re=1100$ and $Rc=1D, 1.5D, 2D, 3.0D$.

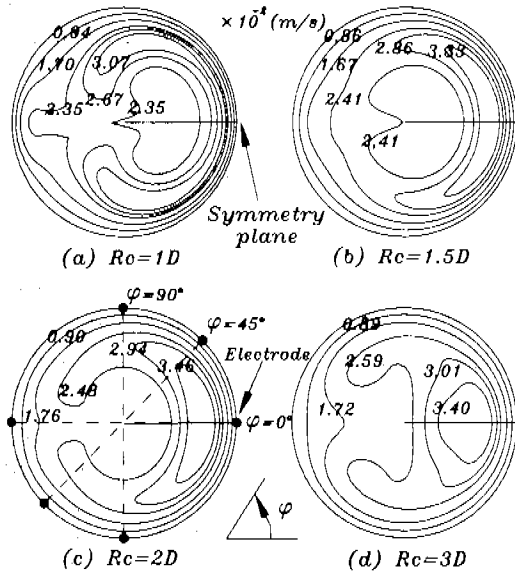


Fig. 14 The axial velocity contours at 10D from elbow for $Re=1100$ and $Rc=1D, 1.5D, 2D, 3.0D$.

므로 Fig. 12에서 유량신호의 편차가 크나 $Rc=3D$ 인 (d)의 속도분포는 Fig. 13 (d)와 Fig. 14 (d)의 속도분포와 비슷한 형태가 유지되고 있으며 유량신호의 편차도 변화(Fig. 12)가 비교적 작음을 알

수 있다. 결과적으로 Fig. 12의 곡선에 따른 유량신호의 변화는 Fig. 13, 14, 15로 부터 거리에 따라 속도 콘투어의 형태의 변화로부터 설명될 수 있음을 알 수 있다.

지금 까지 $Re=400, 700, 1100$ 에서 곡관의 곡률에 따른 전자기 유량계의 유량신호의 변화를 고찰하였다. 곡률에 따른 유량신호는 곡률이 작을 때 즉 $Rc=1D$ 일 때 편차가 상대적으로 크고, 자기장의 방향은 $\phi=0^\circ$ 일 때 "+" 방향, $\phi=90^\circ$ 일 때 "-" 방향으로 편차를 보이고 곡률에 관계없이 서로 대칭적인 경향을 나타냈다. 또 $\phi=45^\circ$ 일 때 편차의 크기가 현저히 작았다. 그리고 측정 오차를 최소화 할 수 있는 최적의 설치위치는 일반적으로 알려진 곡관으로부터 먼 위치(속도가 충분히 발달한 위치) 뿐만 아니라 대체로 곡관 직후에도 최적의 설치위치가 존재하고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 설치공간이 제약되는 곳에서 유량계를 설치하는 경우 최적의 설치위치를 설정할 때 필요한 데이터가 되며 또 배관에서 흔히 사용하는 짧은 곡관($Rc=1D$) 보다 긴 곡관($Rc=1.5D$)이 측정오차를 줄일 수 있다. 이러한 곡률에 의한

유량신호의 변화는 전극면과 축방향 속도분포로부터 합리적으로 설명될 수 있다.

5. 결 론

총류유동장에서 전자기 유량계가 곡관의 곡률에 따른 설치효과를 예측하기 위해 유동장과 자기장을 수치 해석하였다. 유동장의 해석에는 상업용 코드인 FLUENT(ver. 4.48)를 사용하였고, 자기장의 지배방정식인 볼테지방정식(전자기유량계 방정식)을 해석하기 위해 유한체적법(finite volume method)으로 개발한 코드를 사용하였다. 각각의 해석 결과는 실험값과 해석적인 엄밀해와 비교하여 정확도를 검증하였다.

곡관의 곡률 $Rc=1D, 1.5D, 2D, 3D$, 레이놀즈수 $Re=400, 700, 1100$ 및 자기장의 방향 $\phi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 으로 변화시키면서 곡관의 하류에서 전자기유량계의 설치효과(installation effect)를 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 짧은 곡관($Rc=1D$)에서 다른 곡률에 비해 신호의 편차가 크고 곡률이 클수록($Rc=3D$) 편차가 작았다. 그러나 유량신호의 편차가 곡률의 크기에 따라 일관된 특성으로 나타나지는 않았다.

(2) 유량신호의 편차는 곡관으로부터 먼 거리뿐만 아니라 곡관의 곡률(Rc)과 레이놀즈(Re)수에 따라 최소가 되는 최적의 설치위치가 곡관 가까이에도 존재한다. 또 이것은 가중합수법(weight function method)의 관점에서 유동의 축방향(axial direction) 속도 분포로부터 합리적으로 설명될 수 있다.

(3) 자기장의 방향에 따른 유량신호의 변화는 $\phi=45^\circ$ 일 때 곡관의 곡률, 레이놀즈수에 관계없이 가장 편차가 적었다. 또 $\phi=0^\circ$ 와 $\phi=90^\circ$ 일 때의 유량신호의 편차는 서로 대칭적인 현상을 나타냈다.

(4) 본 연구에서 전자기유량계를 해석하기 위해 유한체적법(finite volume method)으로 개발한 3차원 자기장 해석 프로그램이 전자기유량계 특성해석과 설치효과에 예측에 적용할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Shercliff, J.A., 1954, "Relation Between the Velocity Profile and the Sensitivity of Electromagnetic Flowmeters," *J. Appl. Phys.*, Vol. 25, pp. 817~818.
- (2) Bevir, M. K., 1970, "The Theory of Induced Voltage Electromagnetic Flowmeters," *J. Fluid Mech.*, Vol. 43, pp. 577~590.
- (3) Engl, W. L., 1970, "Der Induktive Durchflussmesser mit Inhomogenem Magnetfeld," *Arch. für Electrotechn.*, Vol. 5, No. 6, pp. 126~134.
- (4) O'Sullivan, V. T. and Wyatt, D. G., 1983, "Computation of Electromagnetic Flowmeter Characteristics from Magnetic Field Data:III. Rectilinear Weight Functions," *J. Phys. D:Appl. Phys.*, Vol. 16, pp. 1461~1476.
- (5) Luntta, E. and Halttunen, J., 1989, "The Effect of Velocity Profile on Magnetic Flow Measurement," *Sensors and Actuators*, Vol. 16, pp. 335~344.
- (6) Kuromori, K., 1993, "An Electromagnetic Flowmeter with Plural Pairs of Electrodes (in Japanese)," *J. of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 29, pp.1413~1420.
- (7) Ozoe, H. and Okada, K., 1989, "The Effect of the Direction of the External Magnetic Field on the Three-Dimensional Natural Convection in a Cubical Enclosure," *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 32, No. 10, pp. 1939~1954.
- (8) Langston L. S. and Kasper R. G., 1993, "Analysis of an Electromagnetic Boundary Layer Probe for Low Magnetic Reynolds Number Flows," *Transaction of ASME*, Vol. 115, pp. 726~731.
- (9) Hughes W. F. and Young F. J. 1966, *Electromagnetodynamics of Fluid*, John Wiley, New York.
- (10) JIS B 7554, 1993, "Electromagnetic Flowmeters(in Japanese)."
- (11) Bovendeerd P.H.M, A.A. van Steenhoven, F.N. van de Vosse and G.Vossers, 1987, "Steady Entry Flow in a Curved Pipe," *J. Fluid Mech.*, Vol. 177, pp. 233~246.