

## 고속 분립체 이송용 곡관의 내마모성 향상에 관한 연구

권동구 · 김윤제\*

성균관대 대학원, \*성균관대 기계공학부

### A Study on the Improvement of Anti-abrasion Nature of Curved Ducts for High-velocity Particle-laden Gas Flow

D.-G. Kwon and Youn J. Kim\*

Graduate School, Sungkyunkwan University

\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

#### 요 약

석탄화력발전소에 장착되는 고속분립체 이송용 곡관의 내마모성 향상에 관한 수치해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 22.5°와 90° 곡관을 모델로 하여, 분립체에 의한 곡관의 마모를 감소시키기 위해 유동방향이 전환되는 부분에 와류장이 형성되도록 곡관의 단면형상을 변화시켰다. 삼차원, 난류유동장의 지배방정식을 유한체적법으로 이산화시키고, SIMPLE 알고리즘을 이용하여 해를 구하였다. 수치해석을 통해 마모감소를 위한 새로운 형상의 곡관을 설계하였다. 새로운 형상의 곡관을 제작, 운전중인 국내 화력발전소에 장착하여 마모실험을 수행하였으며 내마모성이 매우 향상되었음을 알 수 있었다.

**Abstract** — Numerical and experimental studies are made for improving the anti-abrasion nature of curved ducts for high-velocity gas-solid flow which are typically equipped in a coal-firing steam power plant. To reduce the abrasion of pipe by particles, the shape of cross sections of curved ducts have been changed to form the vortex flow field in the corner region of duct with two different models of 22.5° and 90° elbows. The governing equations for three-dimensional and turbulent flow fields in the ducts are discretized by FVM and solved by SIMPLE algorithm. From the numerical analysis, the newly designed elbows for reducing abrasion have been developed. Numerical results are compared with the experimental abrasion data which are obtained from one of the coal-firing steam power plants in Korea. Comparison of these results shows that the developed elbows have much more durability than the original one.

#### 1. 서 론

현재 석탄화력발전소에서 연소 후 배출되는 연소 회분을 공기를 이용하여 이송할 경우 작동유체의 유속은 정상운전시 배관내부에서 16~40 m/s의 고속으로 이송되어 배관내벽과 회분입자와의 마찰로 인하여 마모가 발생하게 된다. 또한 곡관부에서 유동방향 전환에 따른 압력구배 변화 및 고속의 경질 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 30~50°의 각도로 충돌하면서 급격한 국부적인 마멸현상을 일으킨다. 이러한 분립체 이송배관에 적용되는 fittings류는 이송매체에 의한 심한 마모현상으로 인하여 여러 가지 내마모성 재료(ceramic, basalt, 초경합금 등)로 특수 라

이닝 처리하여 설비운전의 신뢰도를 확보해 오고 있다. 그러나, 이러한 내마모성 라이닝 재료들은 회귀성과 제작의 특수성으로 인하여 제작비용과 유지보수의 비용이 많이 소요되고 있으며 일정한 한계를 벗어나지 못하고 있는 실정이다.

따라서 배관의 전전성 확보를 위해 내부 유동특성을 분석하여 속도 구배가 큰 부분을 찾아낸 후, 형상에 변화를 줌으로써 내마모성을 갖는 제품 개발이 요구된다.

이러한 고속 분립체 이송용 배관의 마모를 최소화하기 위해 설계시 고려해야 할 사항은 3가지 정도가 있다. 첫째는 곡관내 작동 유체의 유속 및 분립체의 충돌 입사각을 줄여 배관 벽과 평행하게 이송하도록 하는데 있고, 두

번제는 원활한 이송을 위해 곡관부 끝에서의 유속이 입구 속도를 유지해야만 한다. 마지막으로 별도의 배관 작업없이 기존 배관과 교체가 가능하도록 하여야 한다.

최근의 최적형상설계와 고상-기상 유동에 관한 연구를 살펴보면, 임석현과 최해천<sup>[1]</sup>은 수학적으로 유도된 최적조건에 따라 층류 곡면덕트의 최적형상설계를 수행하였다. Cabuk 과 Modi<sup>[2]</sup>는 최적제어이론(optimal control theory)을 이용하여 층류 평판 디퓨저의 최적형상을 설계하였다. Levy 등<sup>[3]</sup>은 일정한 고체와 기체의 혼합비율을 가진 경사진 관의 정상상태 이상유동에 관한 삼차원 보존방정식을 수치적으로 연구하였다. Masson과 Baliga<sup>[4]</sup>는 FEM(Finite Element Method)을 이용하여 이차원 고상-기상유동을 수치적으로 연구하였다.

본 연구에서는 유동해석 프로그램인 상용코드 STAR-CD를 이용하여 22.5°, 90° 배관 내부의 유통특성을 파악함으로써 기존의 세라믹 라이닝을 갖는 연결부 보다 수명이 오래가고, 분립체 이송에 악영향을 끼치지 않으며 최대 이송속도가 35 m/s 범위 내에서 사용할 수 있는 배관을 설계하고자 한다. 또한 이를 가동중인 발전소에 장착하여 내마모성을 평가함으로써 설계결과와 신뢰성을 확보하는데 연구 목적이 있다.

## 2. 이론적 배경

### 2-1. 지배방정식

관내 유동장을 지배하는 연속방정식 및 운동량 방정식(Navier-Sokes 방정식)을 텐서(tensor) 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial x_i} \tag{2}$$

여기서  $\tau_{ij}$ 는 점성항이며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \tag{3}$$

관내 높은 레이놀즈수에 대한 난류유동의 기초방정식으로는 표준 k-ε 모델을 적용하였다.

이송되는 분립체의 운동량 방정식을 Lagrangian 관점에서 나타내면 다음과 같다.

$$m_d \frac{d\vec{u}_d}{dt} = \vec{F}_{dr} + \vec{F}_p + \vec{F}_{am} + \vec{F}_b \tag{4}$$

여기서,  $m_d$ 는 분립체의 질량,  $\vec{u}_d$ 는 분립체의 속도벡터

이다.  $\vec{F}_{dr}$ 은 항력(drag force),  $\vec{F}_p$ 는 압력힘(pressure force),  $\vec{F}_{am}$ 은 분립체에 의해 유입되는 유체를 가속시키는데 필요한 가상질량힘(virtual mass force), 그리고  $\vec{F}_b$ 는 일반적인 체적력(body force)이며 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho A_d |\vec{u} - \vec{u}_d| (\vec{u} - \vec{u}_d) \tag{5}$$

$$\vec{F}_p = -V_d \nabla p \tag{6}$$

$$\vec{F}_{am} = -C_{am} \rho V_d \frac{d\vec{u}_d}{dt} \tag{7}$$

$$\vec{F}_b = m_d [g + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + 2(\vec{\omega} \times \vec{u}_d)] \tag{8}$$

여기서,  $A_d$ 는 분립체의 단면적,  $V_d$ 는 분립체의 체적,  $\nabla p$ 는 유체의 압력구배값,  $C_{am}$ 는 일반적으로 0.5의 값을 갖는 가상질량 계수(virtual mass coefficient)이다. 가상질량 힘  $\vec{F}_{am}$ 에 대해서는 참고문헌<sup>[5]</sup>를 참고하기 바란다.

항력계수(drag coefficient)  $C_d$ 는 다음과 같이 분립체 레이놀즈수(particle's Reynolds number)  $Re_d$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$C_d = \begin{cases} 24(1 + 0.15 Re_d^{0.687}) / (Re_d), & Re_d \leq 10^3 \\ 0.44, & Re_d > 10^3 \end{cases} \tag{9}$$

여기서,  $Re_d$ 는 다음과 같다.

$$Re_d = \frac{\rho |\vec{u} - \vec{u}_d| D_d}{\mu} \tag{10}$$

윗 식에서,  $\vec{u}$ 는 유체의 속도벡터이고,  $\vec{u}_d$ 는 분립체의 속도벡터이다.

### 2-2. 경계조건

관 벽면에서의 경계조건은 벽에 인접한 경계층내의 속도분포를 나타내는 벽함수(wall function)를 적용하였고, 이에 대한 속도분포는 다음과 같다.

$$u^+ = \begin{cases} y^+, & \text{for } y^+ \leq y_m^+ \\ \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+), & \text{for } y^+ > y_m^+ \end{cases} \tag{11}$$

여기서

$$u^+ = (u - u_w) / u_\tau \tag{12}$$

$$u_\tau = (\tau_w / \rho)^{1/2} \tag{13}$$

$$y^* = \rho C_{\mu}^{1/4} k^{1/2} y / \mu \quad (14)$$

위 식에서  $x$ 는 von Karman 상수이고,  $E$ 는 관벽의 조도에 의해 결정되는 적분상수이다. 또한,  $y_m^*$ 은 다음을 만족시키는 값이다.

$$y_m^* - \frac{1}{x} \ln(Ey_m^*) = 0 \quad (15)$$

본 연구에서는 관내 온도의 영향은 고려하지 않았다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 수치해석 결과

수치해석모델은 직경 254 mm(10")를 갖는 90°, 22.5° 원형관을 이용하였고, 해석모델에 일반좌표계의 Navier-Stokes 방정식을 적용하여, 유한체적법(Finite Volume Method)으로 이산화 하였다. 차분법으로는 중앙차분법(central differencing scheme)을 적용하였으며, SIMPLE 알고리즘을 이용하여 해를 구하였다. 입구속도는 90°, 22.5° 관 모두 35 m/s로 설정하였으며, 완전 발달 유동(fully developed flow)을 갖기 위해 입구길이를 충분히 길게 하였다.

Fig. 1에 직경 254 mm(10")를 갖는 일반적인 90° 곡관의 수치해석에 의한 속도분포 결과를 도시하였다. 입구속도가 35 m/s일 때 곡관 시작부에서 속도가 41 m/s까지 증가하였다. 곡관의 끝부분으로 분립체가 30° 정도의 각도로 배관 벽면과 충돌하게되며, Fig. 1과 같은 90° 곡관 형상으로 운전을 계속할 경우 최대 마모는 90° 곡관의 끝부분에서 일어날 것으로 예상되었다. 이러한 이론적인 수치해석 결과와 가동중인 국내 화력발전소의 운전자료와

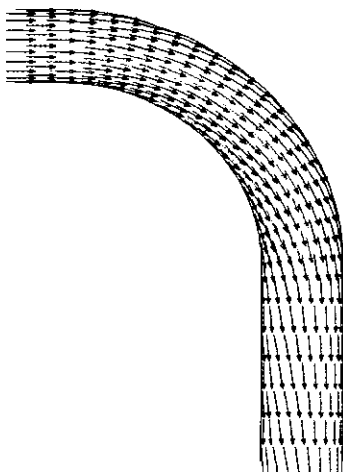


Fig. 1. Velocity vectors of the conventional 90° elbow.

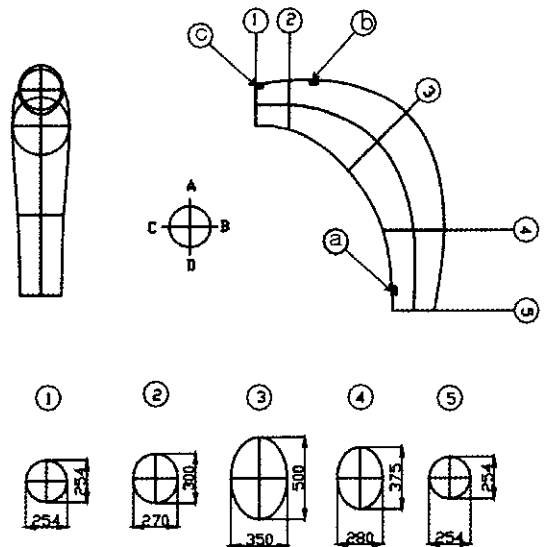


Fig. 2. Configuration of the newly developed 90° elbow.

비교한 결과 거의 유사한 부위에서 마모손상이 확인되었다.

수치해석 결과를 토대로, 곡관 내부에 와류실(vortex flow field)을 두어 유속을 줄이고 입사각을 변화시키기 위해 최대 마모가 예상되는 부분에 유동막을 생성할 수 있는 기하학적 단면 형상을 설계하였다. 이를 토대로, 시행착오법(trial and error method)을 사용하여 수정된 형상에 대한 수치해석을 단면형상을 변화시켜가며 수행하는 과정을 반복, 작동유체의 유속을 최대한 줄이면서 동시에 압력손실이 분체이송에 악영향을 미치지 않도록 Fig. 2와 같은 형상을 구현하였다. Fig. 2에서 @~(c)는 마모 시험시 시편장착지점을 나타낸다.

Fig. 3에는 수정된 형상의 수치해석을 위한 계산격자를 도시하였고, Fig. 4는 그 결과인 곡관 내부의 속도벡

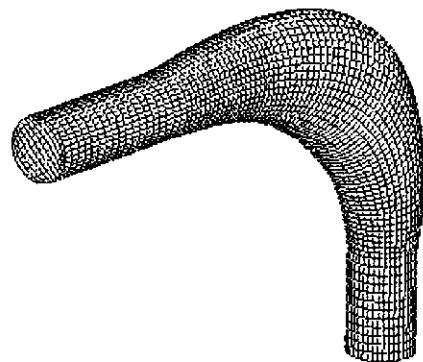


Fig. 3. Computational grids for the curved portion of the developed 90° elbow.

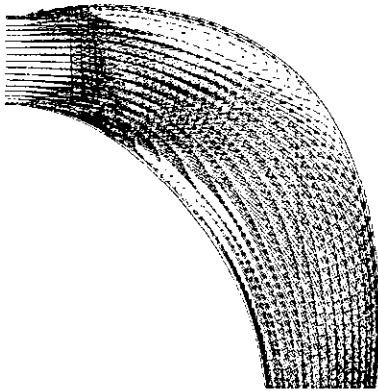


Fig. 4. Velocity vectors of the developed 90° elbow.

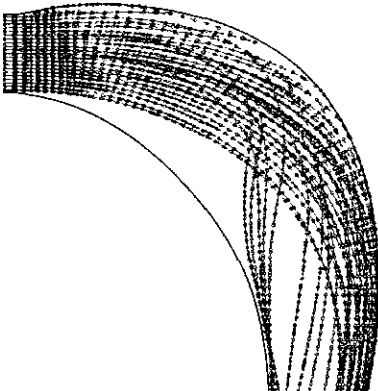


Fig. 5. Solid flow vectors of the developed 90° elbow.

터이다. 곡관의 시작부분에서 상부면으로 와류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 와류의 영향으로 유속이 단면 3 부근에서 41 m/s에서 21 m/s로 감소함을 볼 수 있었다. 또한, 유동 방향도 벽면과 거의 평형을 이루고 있으며 곡관 끝 부분에서의 유속도 35 m/s 정도 유지되는 것을 볼 수 있으므로 마모는 상당히 감소할 것으로 예상되었다.

Fig. 5는 수정된 형상에 분립체를 포함시킨 고상-기상 유동 조건하에서의 수치해석 결과를 나타내었다. 분립체는 배관벽에 충돌하지 않거나 충돌하더라도 속도가 상당히 감소한 상태로 충돌함으로써 배관의 내마모성 증가가 예상됨을 유추할 수 있다.

22.5° 곡관의 설계도 이와 유사한 과정으로 수행되었으며, Figs. 6~8에 최적형상, 속도벡터, 그리고 고상-기상 유동 조건하에서의 수치해석 결과를 도시하였다.

Figs. 9~14에 일반적인 90° 곡관과 수정된 90°, 22.5° 곡관의 입구압력( $P_{inlet}$ )과 입구속도( $V_{inlet}$ )로 무차원화 한 압력 및 속도 값을 도시하였는데, 유동방향에 따른 배관 길이(1)는 배관전체길이(L)로 무차원화 하였다. Fig. 10

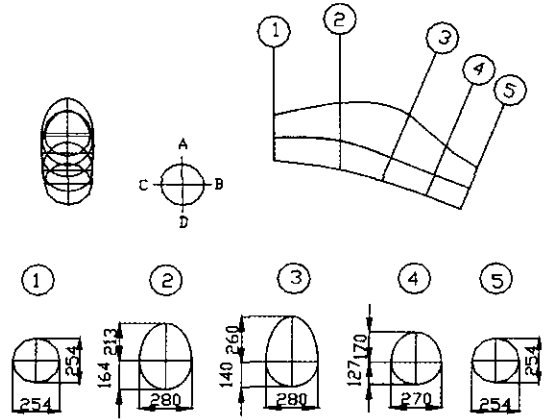


Fig. 6. Configuration of the newly developed 22.5° elbow.

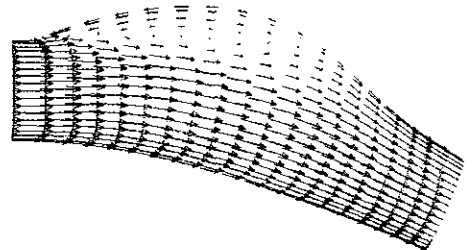


Fig. 7. Velocity vectors of the developed 22.5° elbow.

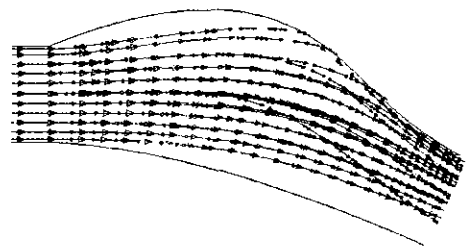


Fig. 8. Solid flow vectors of the developed 22.5° elbow.

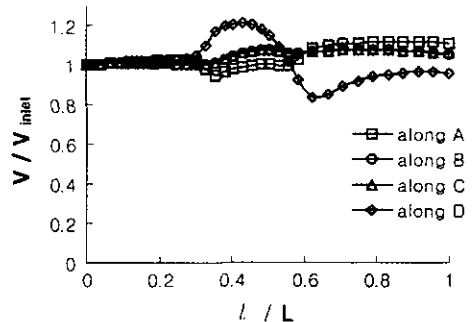


Fig. 9. Velocity profiles of the conventional 90° elbow along the flow direction of A~D.

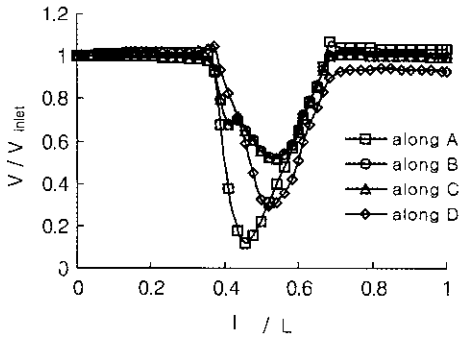


Fig. 10. Velocity profiles of the developed 90° elbow along the flow direction of A~D.

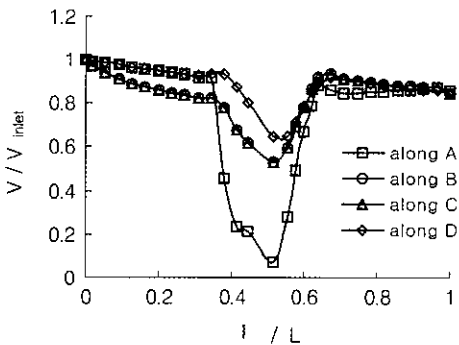


Fig. 11. Velocity profiles of the developed 22.5° elbow along the flow direction of A~D.

는 수정된 90° 곡관의 A~D를 따르는 속도 형상이다. 예상한 바와 같이 타원형단면 부근에서는 유속이 Fig. 9에 나타난 일반적인 90° 곡관의 경우에 비해 상당히 감소하였으며, 특히 와류가 생성되는 상부면 A를 따르는 속도 형상을 보면 다른 지점에 비해 속도감소의 폭이 큼을 알 수 있다.

Fig. 11은 수정된 22.5° 곡관의 A~D를 따르는 속도

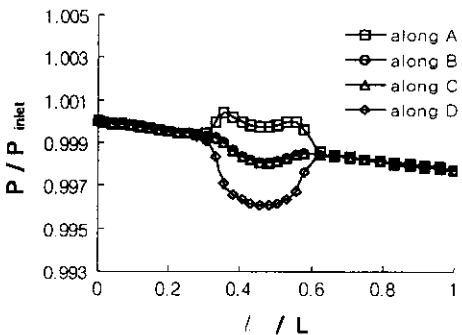


Fig. 12. Pressure profiles of the conventional 90° elbow along the flow direction of A~D.

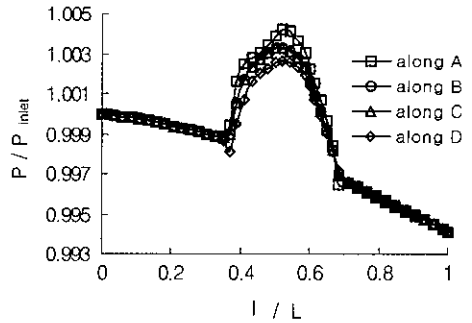


Fig. 13. Pressure profiles of the developed 90° elbow along the flow direction of A~D.

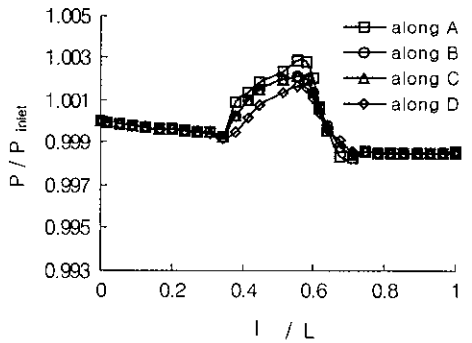


Fig. 14. Pressure profiles of the developed 22.5° elbow along the flow direction of A~D.

형상이다. 90° 곡관의 경우에는 입구부분에서의 속도 감소가 거의 없었으나, 22.5° 곡관의 경우에는 속도가 감소하는 경향이 나타나고 있으며, 특히 B, C부분의 속도가 D부분에 비해 많이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는, D부분의 유속이 90° 곡관에 비해 감소 폭이 작기 때문이다. 또한, 22.5° 곡관의 경우에는 출구에서 입구속도가 완전히 회복되지 못함을 알 수 있다.

Figs. 13과 14에는 수정된 90°, 22.5° 곡관의 A~D를 따르는 압력 분포를 각각 나타내었다. 경향은 비슷하지만, 22.5° 곡관의 경우 90° 곡관에 비해 압력변화의 폭이 작음을 알 수 있고, Fig. 12에 나타난 일반적인 90° 곡관의 경우와 비교해 볼 때 와류장으로 인한 속도 감소로 인해 발생하는 압력강하는 분체이송에 그다지 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

### 3-2. 마모시험 결과

마모시험은 개발된 90° 곡관에 대해서 수행하였다. 설계된 형상은 주철강으로 주물제조 후 가동중인 국내의 D화력발전소에 장착하였다. 총 운전시간 452시간, 분립체의 총 이송량 7,400톤 이송 후 배관의 마모량 측정치

**Table 1. Experimental data of the developed 90° elbow at each section (unit : mm).**

구분		A	B	CD	
단면 1	최 초	30.45	23.13	20.30	19.33
	사용 후	30.40	23.10	20.30	19.30
	마모 량	0.050	0.030	-	0.030
단면 2	최 초	30.10	24.03	19.22	20.91
	사용 후	30.00	23.90	19.10	20.90
	마모 량	0.100	0.130	0.120	0.010
단면 3	최 초	28.36	24.72	23.07	18.00
	사용 후	28.10	24.70	23.00	18.00
	마모 량	0.260	0.020	0.070	-
단면 4	최 초	23.52	22.52	24.07	17.50
	사용 후	23.50	22.50	24.00	17.50
	마모 량	0.020	0.020	0.070	-
단면 5	최 초	21.11	19.34	27.82	19.99
	사용 후	21.10	19.30	27.70	19.90
	마모 량	0.010	0.040	0.120	0.090

**Table 2. Experimental data of test piece at each location (unit : mm).**

장착지점	사용 전	사용 후	마모 량
Ⓐ	23.5	23.5	-
Ⓑ	26.1	25.4	0.7
ⓒ	30.2	30.1	0.1

를 Table 1과 Table 2에 기술하였다. 이 측정치는 Fig. 2에 기술한 측정 부위를 따라 측정한 값이며, 단면 ①~⑤는 초음파 측정기를 이용하여 각각 A~D부위를 따라 모재의 마모량을 측정하였으며 Table 1에 나타내었다. 관의 단면 ①~⑤는 수치해석시의 각 단면과 일치한다. Ⓐ~ⓒ 지점은 측정시편을 장착하여 마모량을 측정하였고, 이는 Table 2에 나타내었다.

수치해석의 결과와 같이 최대 마모가 예상되었던 곡관부의 유속이 현저하게 줄어들었으며, 이는 Table 1과 Table 2에 기술한 바와 같이 실제 현장에서 측정된 마모량의 현저한 감소로 확인할 수 있었다.

Fig. 9의 속도 형상을 보면 단면 B와 C의 속도 분포가 거의 일치하고 있으나, Table 1의 마모시험 결과를 보면 단면 B와 C의 마모량이 많이 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 Fig. 9가 단상(single-phase)의 수치해석 결과이며, 이에 반해 Table 1은 실제 이상유동(two-phase)에서의 마모시험 결과이기 때문이라 판단된다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 유동해석을 통하여 화력발전소등에서

사용되고 있는 고속 분립체 이송용 배관의 전전성 확보를 위해 단면형상을 변화시켜가며 속도구배가 큰 부분에 유동막을 형성함으로써 배관의 마모를 감소시킬 수 있는 새로운 형상의 90°, 22.5° 곡관을 개발하였다. 수치해석 결과를 통해 예측한 배관의 마모 감소는 실제 발전소에서 실시한 마모시험을 통하여 검증할 수 있었으며, 수치해석을 통해서 얻은 설계치가 옳다는 것을 입증하였다. 하지만, Fig. 10에서 알 수 있듯이 수정된 22.5° 곡관의 경우 출구에서 입구속도를 완전히 회복하지 못하는 것은 90° 곡관과 같은 실증시험을 통해 검증되어야만 할 것이다. 그리고, 90°, 22.5° 곡관 모두  $Re = 5.9 \times 10^4$ 의 일정한 레이놀즈수를 갖는 경우만을 살펴보았으나, 향후 연구에서는 작동유체의 광범위한 레이놀즈 수 영역과 다양한 형상, 즉 분지관(Y, T자형 배관)에 대한 연구가 요구된다고 할 수 있다.

### 기호설명

- $A_d$  : 분립체의 단면적
- $C_{am}$  : 분립체의 가상질량계수
- $C_d$  : 분립체의 항력계수
- $C_u$  : 경험상수
- $D_d$  : 분립체의 직경
- $E$  : 벽면조도 매개변수
- $\vec{F}_{am}$  : 분립체의 가상질량 힘
- $F_b$  : 분립체의 체적력
- $\vec{F}_d$  : 분립체의 항력
- $\vec{F}_p$  : 분립체의 입력힘
- $g$  : 중력가속도
- $k$  : 단위 질량당 난류운동에너지
- $l$  : 곡관의 길이
- $L$  : 곡관의 전체길이
- $m_d$  : 분립체의 질량
- $p$  : 압력
- $\vec{r}$  : 분립체의 위치벡터
- $Re$  : 레이놀즈 수
- $Re_d$  : 분립체의 레이놀즈 수
- $u_i$  : 속도 텐서
- $u^*$  : 무차원 속도
- $\vec{u}_d$  : 분립체의 속도
- $u_w$  : 벽면에서의 속도
- $u'_i$  : 요동속도
- $u_c$  : 마찰속도
- $V_d$  : 분립체의 체적
- $x_i$  : 직교좌표 텐서
- $y^*$  : 무차원 벽면거리

## 그리스 문자

- $\delta_{ij}$  : Kronecker delta 함수  
 $x$  : von Karman 상수  
 $\mu$  : 점도  
 $\rho$  : 밀도  
 $\tau_{ij}$  : 응력텐서  
 $\tau_w$  : 벽면 전단응력  
 $\vec{\omega}$  : 분립체의 각속도

## 참고문헌

1. 임석현, 최해천: "수학적 이론을 이용한 이차원 곡면 덕트의 최적형상 설계", 대한기계학회논문집 B권, 제 22권 제9호, 1325 (1998).
2. Cabuk, H. and Modi, V.: "Optimum Plane Diffusers in Laminar Flow", J. Fluid Mech., 237, 373 (1992).
3. Levy, A., Mooney, T., Marjanovic, P. and Mason, D.J.: "A Comparison of Analytical and Numerical Models With Experimental Data for Gas-Solid Flow Through a Straight Pipe at Different Inclinations", Powder Technology, 93, 253 (1997).
4. Masson, C. and Baliga, B.R.: "Simulation of Gas-Solid Particle Flows Over a Wide Range of Concentration", Int. J. Numer. Meth. Fluids, 28, 1441 (1998).
5. Milne-Thompson, L.M.: "Theoretical Hydrodynamics", 5th edition, McMillan & Co., New York (1968).
6. Patankar, S.V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, New York (1980).