

자유수면에 세워진 원주 주위의 유동특성을 이용한 자유표면 유속계의 개발

김인철* · 조명종* · 김상준* · 이상준**

Development of surface-flow velocimetry based on flow characteristics around a cylinder piercing a water free surface

Incheol Kim, Myoungjong Cho, Sangjoon Kim and Sangjoon Lee

Key Words: Free Surface Velocimetry(자유표면 유속계), Piercing Cylinder(침적된 원주), Karman vortex street (카르만 보텍스 스트리트), Strouhl number(스트라올 수).

Abstract

Based on the flow characteristics around a piercing cylinder, a free surface-flow velocimetry which can be used in extremely harsh environment such as molten steel flow was developed. The velocimetry is consisted of finite length cylinder, load detecting elastic plate, electric signal transducer and data acquisition H/W and S/W. Using such a velocimetry, two velocity measurement schemes were established which one is flow resistance detecting scheme and the other is Karman Vortex frequency detecting scheme. For calibration of each scheme, realistic flow water model was used and in followings, detailed calibration processes were explained.

기호설명

| | |
|---------|--------------------------------------|
| D | cylinder diameter |
| H | test section width |
| β | blockage factor(=D/H) |
| L | submerged depth of cylinder |
| ρ | density of fluid |
| Cd | drag coefficient |
| V | fluid velocity |
| F | fluid force exerting on the cylinder |
| St | Strouhl number |
| Re | Reynolds number |
| Vin | bridge input voltage |
| Vout | bridge output voltage |

1. 서론

철강산업에서는 약 1525~1600℃ 사이의 고온의 용강(molten steel)을 처리하는 공정이 많은데 이

러한 공정에서 용강의 속도를 확인하는 것은 해당 공정의 운전 및 개선에 절대적으로 중요하다. 이러한 온도에서의 용강은 동점성계수가 상온 물의 약 90%정도로서 일반적인 유체역학 도구의 적용이 가능하며 주로 수치해석을 통한 연구가 많이 시도된다. 그러나 이러한 수치해석 모델의 검증을 위하여 수모델로부터 검증데이터를 얻기 어려운 경우(용고 존재 및 정자기장 사용시 등)가 많은데 이에 따라 실제 공장에서의 용강에 대한 직접적인 측정이 필요하게 된다. 한편 실제 용강의 측정에는 기존의 측정장치(Pitot, Hotwire, 혹은 LDV 등)의 사용이 불가능하므로 본 연구에서는 용강의 자유표면의 속도를 측정할 수 있는 새로운 장치를 개발하게 되었다. 이러한 측정장치는 용강의 자유표면에 실린더를 담그고 그에 걸리는 유동특성을 측정함으로써 자유표면 아래의 유동속도를 환산할 수 있도록 하는 것인데 이에 대해서는 장치의 개발 외에도 측정방법의 고안 및 보정과정이 필요하게 된다.

본 연구에서는 두 가지의 측정방법이 고안되

* 포항산업과학연구원 열유체연구팀

** 포항공과대학교 기계공학과

었는데 하나는 실린더에 걸리는 항력을 측정하는 방법이고, 다른 하나는 실린더 후류의 와생성 주파수를 측정하는 것이다. 그런데 이러한 실린더의 일부를 자유표면에 담그는 경우의 실린더 주변의 유동은, 그간 다른 연구자들에 의해서 연구가 행해진 실린더 주변의 유동특성과는 여러모로 달라서 유속계의 보정에 필요한 데이터를 직접적으로 인용하기는 어렵다. 즉 본 장치는 실린더의 일부가 자유표면에 잠기는 것으로 기존에 완전히 잠기는 2차원 유동에 관한 연구⁽¹⁾나 실린더가 일부가 잠기더라도 지지부가 유동속의 벽에 부착된 연구의 경우^(5,6)는 다르다. 또 이 장치가 사용될 용강 유동설비의 경우 그 유동공간을 형성하는 벽 사이의 간격(H)이 실린더의 직경(D)에 비해서 약 상대적으로 작아서 단면비 $\beta (=H/D)$ 가 약 3 ~ 20 정도이므로 실린더 설치에 따른 유동의 왜곡(Blockage effect)효과도 고려하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 유속계의 보정에 사용될 보정식들을 구할 때 기존문헌의 결과로부터 유추하기보다는 일단 그러한 유동조건과 유사한 당 팀 보유의 해당 철강공정 모사용 수모델 장치를 사용하기로 하였다. 그러한 수모델 실험을 통하여 구해진 보정 관계식 관련 계수들에 대해서 본 논문의 후반부에 다른 유사한 논문의 경우들과 비교하였다.

2. 자유표면 유속계 구성 및 측정방법

2.1 유속계의 주요 구성

Fig. 1에는 개발된 자유표면 유속계의 주요 구성부를 개략적으로 나타내었다. 주요 구성은 크게 유동에 담그어져 유동특성을 힘으로 전달해주는 고내식성 실린더와 이런 힘을 변형량으로 변환하는 탄성판, 변형량을 측정이 용이한 전기 신호로 변환시키기 위한 스트레인 게이지 및 브릿지회로, 그리고 이러한 전기적 신호를 원하는 가공이 용이하도록 컴퓨터로 받아들이기 위해 A/D 변환 및 증폭 등을 담당하는 보드(NI사, Daqpad-MIO-16XE-50) 및 소프트웨어(NI사, Labview)등으로 구성되어 있다. 이러한 구성을 통해서 Fig. 2처럼 자유표면에서의 유동특인 속도와 와 생성 주파수가 힘, 변위를 거쳐 최종적으로 브릿지 회로의 출력 전압으로 얻어지

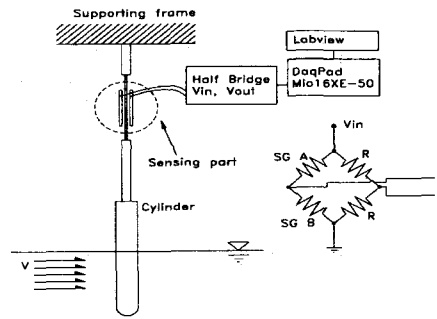


Fig. 1 Schematic drawing of velocimetry

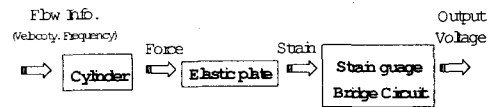


Fig. 2 Transfer of flow information

게 된다. 이러한 변환 과정 중에서 최종 출력전압으로부터 원하는 유동정보를 얻기 위해서는 주로 유동특성-힘 사이의 관계와 힘-출력전압 사이의 관계를 규정하는 것이 필요하다.

Fig. 3에는 상기 유동 정보 변환 과정에 사용되는 스트레인게이지가 탄성판에 부착된 형태를 자세히 나타내었다. 이때 Y방향의 단일 변형량을 측정하는 스트레인게이지 A 이외에 이와 수직인 방향으로 아무런 변형량도 측정하지 않는 별도의 더미 스트레인게이지 B가 부착되어 있는데 이는 측정 중 주변 고온의 용강에 의해서 스트레인게이지의 온도가 올라감에 따라 생기는 온도에 의한 오차를 서로 상쇄하기 위함이다. 즉 두 개의 스트레인게이지는 Fig. 1에 보이는 하프 브릿

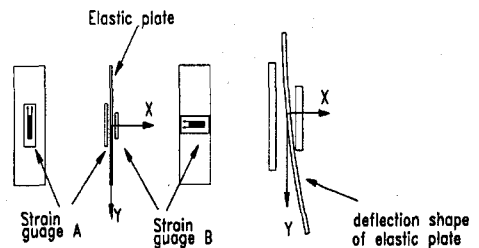


Fig. 3 Strain gages attached on elastic plate

지(Half bridge)를 구성하는 두 개의 저항으로 사용되는데 이 때 스트레인게이지 A에 생기는 탄성 변형에 의한 저항 증가분 외에 온도 증가에 의한 저항 증가분은 스트레인게이지 B에 생기는 순수한 온도만의 증가에 따른 저항 증가분에 의해서 서로 상쇄되게 된다. 이러한 방법으로 고온의 용강유동 측정시에 온도변화의 영향을 간단히 제거할 수 있게 된다. 한편 이러한 유동 힘의 측정에는 간단히 로드셀(load cell)의 사용을 생각할 수 있으나 로드셀 구조 자체가 온도에 의한 열변형을 피할 수 없어 그 출력값에서 온도에 의한 오차를 배제할 수가 없기 때문에 사용이 불가능하다.

2.2 두 개의 속도 측정 방법

먼저 기술의 편리상 Fig. 4처럼 좌표축의 X-방향을 유동과 평행한 방향으로, Y축을 유동 및 자유표면에 수직인 방향으로, 그리고 Z축은 우수계 좌표계 법칙을 따라 정하기로 한다. 좌표축의 원점은 편의상 탄성판 두께방향 중심선과 스트레인게이지 부착면의 중심선의 교차점으로 정하도록 한다.

본 유속계를 이용한 두 가지 측정 방법에 대해서 Fig. 4에 각각의 개념을 그림으로 나타내었다. 한편 이들을 향후 기술의 편리상 각각 유동 저항 측정법과 주파수 측정법으로 칭하도록 하겠다.

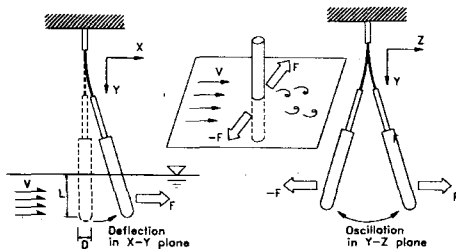


Fig. 4 Two measurement scheme

먼저 유동 저항력 측정법은 Fig. 4의 좌측에 보이는 것처럼 유동방향이 X축과 평행할 때, 탄성판의 넓은 면의 수직방향이 X축과 평행하도록 탄성판이 센서의 방향을 정하면 유동저항력에 의해서 탄성판이 쉽게 변형이 가능하며, 이러한 변형으로부터 유동에 의한 힘을 측정할 수 있게 된다.

다. 이러한 방식에서는 주로 유속-힘관계(즉 적절한 항력계수 Cd)와 힘-출력전압 관계를 구하는 보정 과정이 필요하게 된다.

한편 실린더 후류의 와생성에 의한 주파수 측정법은 와 생성 주기의 측정을 위해서 유동저항력 측정의 경우와는 달리 와에 의한 힘의 방향이 Fig. 4의 우측에 보이는 것처럼 주 유동방향에 수직이므로 탄성판의 방향을 유동 저항력 측정의 경우에 대하여 Y축을 중심으로 90도 돌려주어야 한다. 그런 상태에서 실린더에 걸리는 힘은 주로 와 생성에 의한 것이므로 쉽게 와 생성 주파수를 측정할 수 있게 된다. 이때 각 유속에서 스트라우홀수(Strouhl number)를 알고 있으면 (1)식과 같은 관계에서 유동 속도를 구할 수 있게 된다. 여기서 f 는 센서 출력으로부터 측정된 주파수이고, D 는 실린더 직경, 그리고 St 는 이미 보정실험에서 알려진 기지의 무차원수이다.

$$St = \frac{fD}{V} \quad \dots(1)$$

상기 두 가지 측정법은 각각의 장단점이 있는데 주파수 측정법은 주파수의 판별만 가능하면 되므로 출력 절대값의 크기가 중요하지 않아서 상대적으로 속도-힘 관계식이나 힘-출력전압 관계식에 대한 절대값의 오차가 영향을 미치지 않는다. 따라서 상대적으로 보정과정이 간단하지만 한편으로는 주파수 측정 시에 별도의 주파수 추출도구가 필요하고, 더불어 주파수 추출에 일정한 시간이 필요하므로 응답속도가 늦게 된다. 따라서 정상상태의 유동 측정에는 주파수법이, 빠른 응답이 필요한 경우에는 유동 저항 측정법이 상대적으로 유리하다.

3. 자유표면 유속계의 보정

3.1 유속계 보정에 사용되는 수모델의 개요

제작된 유속계의 보정을 위해서는 2장에서 설명한 것처럼 세 개의 적절한 보정관계식이 필요하다. 이의 보정관계식을 얻기 위해서 이 유속계가 실제로 사용될 연속주조 공정의 용강 유동 현상을 모사할 수 있는 수모델이 사용되었다. 이 수모델은 정자기장 및 응고의 효과를 제외한 유동에 대해서 실제 공정의 모사가 가능하며 그 자

세한 형상이 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5에 보이는 것처럼 이 수모델 장치는 크게 유체 공급

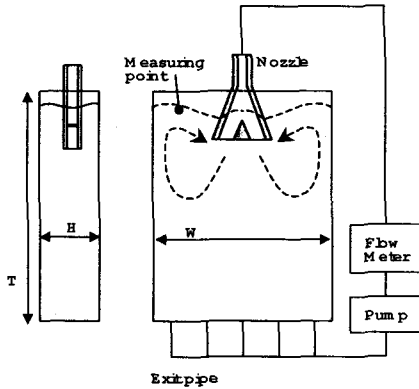


Fig. 5 Water model used for calibration

용 노즐과 측정될 유동이 형성될 얇은 육면체의 하부 공동(Cavity), 그리고 공동 하부에 배출용 파이프와 유량조절용 펌프 및 유량계로 구성되어 있다. 특히 보정실험 중 실 공정의 특성을 반영하기 위하여 유동저항 측정법 보정에 사용되는 하부 공동의 경우는 두께, H가 230mm인 것을, 주파수 측정법 보정의 경우는 두께, H가 37.5mm로 완전히 다른 하부 공동을 사용하였다.

유속계 보정을 위한 측정위치는 Fig. 5에서 측정점(measuring)라고 표시된 부근의 자유수면이며 실린더의 침적 깊이(L)는 전 실험을 통해서 50mm로 고정하였다. 보정 실험은 이 측정점에 개발된 자유표면 유속계를 놓고 출력값을 구하고, 또 거기에 별도의 일반 유속 측정장치인 LDV나 프로펠러터입 유속계를 이용하여 필요한 속도나 주파수를 구한 후 두 개의 결과를 비교하여 필요한 보정관계식을 구하게 된다. 이러한 보정과정을 거친 자유표면 유속계는 실제의 정자기장이 사용되고 응고가 존재하는 연주공정에 사용된다.

3.2 유동 저항 측정법의 보정

이 경우에 사용된 수모델 실험 조건을 정리하면 다음과 같은데 특히 H/D의 비율인 두께비, β 가 참고문헌⁽³⁾의 결과에 따라 충분히 커서 따라서 하부 공동벽의 영향은 무시할만하다.

- 하부 공동의 두께 H= 230mm,
- 실린더 직경, D = 12mm,

- 두께비, $\beta = 19.1$
- 속도 측정 범위, $V = 0.1 \sim 0.4m/s$
- 레이놀즈 수, $Re_d = 1142 \sim 4571$.

3.2.1 힘-전압의 보정

이 경우는 먼저 정밀하게 보정된 스프링 저울을 사용하여 실린더 끝단에서 접수길이 L의 1/2 지점에 기지의 힘을 가한 뒤 그때의 출력전압을 측정함으로써 힘-출력전압 관계식을 구할 수 있다. Fig. 6에는 이러한 방법을 통하여 얻어진 힘-출력전압 사이의 관계를 그래프로 나타내었다. 그 때 얻어진 관계식은 아래 식(2)과 같은데 이에 대한 오차는 최대 5% 이내였다.

$$F = (0.8467 \cdot (V \cdot 1500) - 0.591) \dots (2)$$

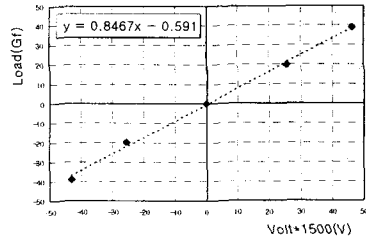


Fig. 6 Load-output volt relation

3.2.2 속도-힘의 보정

이 경우 우리가 이미 알고 있는 속도에서 실린더에 걸리는 힘을 구하면 아래의 (3)식을 이용하여 항력계수(Cd)를 구할 수다. 여기서 D는 실린더의 직경, L은 실린더의 침적 깊이, V는 유동 속도 그리고 F는 상기 (2)식에 의해서 출력 전압으로부터 구한 힘이 된다.

$$V = \sqrt{(F \cdot 0.0098 / (C_d \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot D, L))} \dots (3)$$

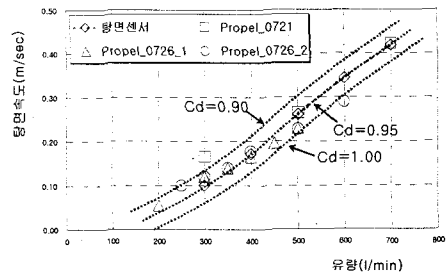


Fig. 7 Force-Velocity relation(Cd)

Fig. 7에는 프로펠러 유속계로부터 구해진 속도와 자유표면 유속계에 걸리는 하중으로부터 Cd를 결정하기 위한 그래프를 나타내었는데 구해진 Cd값은 대체로 0.9 ~ 1.0 사이였는데 이로부터 약 0.95로 결정하였다. 따라서 0.95로 결정할 때의 측정 오차는 약 5.2% 이내이다.

3.3 주파수 측정법의 보정

이 경우에 사용된 수모델 실험 조건은 다음과 같다. 이 실험에서는 아래에 보이는 것처럼 H/D의 비율인 두께비가 상당히 작아서 하부 공동벽의 영향이 지대하다고 판단된다.

- 하부 공동의 두께 $H = 37.5\text{mm}$,
- 실린더 직경, $D = 12\text{mm}$,
- 두께비, $\beta = 3.125$
- 속도 측정 범위, $V = 0.187 \sim 0.230\text{m/s}$
- 레이놀즈 수, $Re_d = 2137 \sim 2628$.

이 실험의 보정을 위해서는 주파수 측정을 위하여 비교적 정밀한 측정이 필요하므로 속도 측정 장치로 LDV를 이용하였다. 즉 LDV를 이용해서 실린더 0.5D 전방에서의 속도와, 실린더 1.5D 후방에서의 주 유동방향에 수직되는 속도성분을 측정하여 이로부터 와 주파수를 각각 추출하였다. 이들을 기준으로 자유표면 유속계의 출력전압과 으로부터 측정된 주파수와 비교, 필요한 스트라울수를 추출하였다.

3.3.1 자유표면 유속계의 와 주파수 추종성

19Hz로 측정된 자유표면 유속계 출력전압의 예를 Fig. 8에 나타내었는데, 구하려는 와 주파수가 대략 5Hz 정도이므로 요구되는 나이키스트 주파수를 충분히 만족시키고 있다.

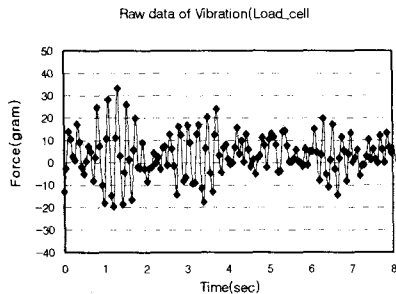


Fig. 8 Free surface velocimetry output data

Fig. 9에는 실린더 후방에서 LDV에 의해

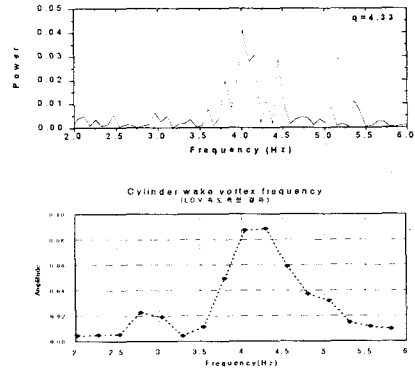


Fig. 9 Comparison of vortex freq. measurement

서 측정된 수직방향 속도로부터 추출된 와 주파수를 본 유속계 출력전압으로부터 추출된 주파수와 서로 비교한 것이다. 그 결과 LDV의 경우는 주파수가 약 4.0~4.2Hz 사이에 있고 본 유속계의 경우도 약 4.0Hz 정도이므로 약 5% 이내에서 본 자유표면 유속계가 실린더 후류의 와 주파수를 충실하게 추종하고 있음을 확인 할 수 있다.

3.3.2 유동속도-주파수 관계 보정

Fig. 10에는 유동의 평균속도가 0.187, 0.208, 0.230m/s로 변할 때 각각에 대해서 자유표면 유속계로 측정된 출력전압으로부터 추출한 와 생성 주파수를 나타내었는데, 속도가 증가함에 따라 각각 4.00, 4.25, 4.50Hz로 나타났다.

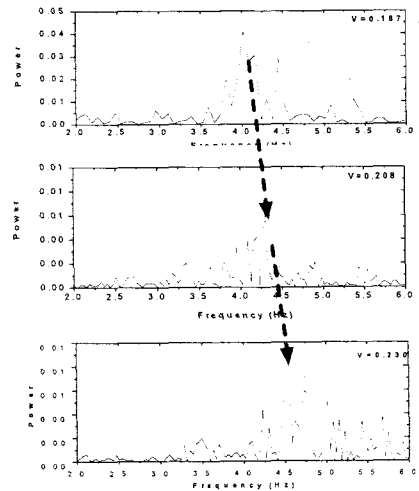


Fig. 10 Velocity v.s. vortex frequency

Table 1에는 LDV로 구한 속도, V와 이에 대한 스트라울수, St를 정리하여 나타내었다. 또 이 실험의 경우는 수모델 자체가 하부 공동의 벽간격이 좁으므로 실린더에 의한 유동단면적의 감소에 따라 가속되므로 이러한 효과를 고려하기 위하여 유량보전의 법칙에 따라 구한 속도, V' 및 V'에 대해서 구한 스트라울수, St'를 함께 나타내었다.

Table 1 Summary of result

| V(m/s) (LDV) | V'(m/s) | Re No. based V | Freq. Hz | St | St' |
|-----------------|---------|-------------------|-------------|-------|-------|
| 0.187 | 0.275 | 2424 | 4.00 | 0.257 | 0.174 |
| 0.208 | 0.305 | 2704 | 4.25 | 0.247 | 0.167 |
| 0.230 | 0.338 | 2990 | 4.50 | 0.234 | 0.159 |

그 결과 이러한 속도 구간에서 스트라울 수는 실린더 전방의 속도, V 대비 약 0.247 정도로 나타났고, 가속된 속도, V'에 대해서는 약 0.167 정도로 나타났다.

4. 고찰

본 실험에서 측정된 항력계수는 0.95로 White⁽¹⁾의 완전한 2D의 경우에 약 1.0인 것에 비하면 약 5.2 %이내의 오차로 잘 맞음을 알 수 있다. 따라서 향후 본 유속계로 유동 항력 측정방법을 사용할 경우 충분히 큰 단면비, β 에 대해서 항력계수를 0.95로 사용하여도 무방하다고 판단된다.

주파수 측정법의 경우 스트라울수가 참고문헌⁽¹⁾의 약 2.1이나 참고문헌⁽²⁾의 $250 < Re < 2 \times 10^5$ 의 경우에 사용되는 $St = 0.198(1 - 19.7/Re)$ 로부터 계산된 약 0.197에 비해서 현저히 높았다. 그러나 한편으로는 가속된 속도의 경우로 환산한 스트라울수 0.167은 참고문헌⁽⁴⁾의 경우에 약 0.15 정도로 본 측정의 결과와 비슷하게 나타나서 대조를 이루고 있다. 이러한 차이의 원인에 대해서는 좀 더 연구가 진행되어야 한다고 사료된다. 한편 대부분의 연구^(5,6)와 본 실험이 그 측정 조건이 달라서 직접적인 비교는 곤란하였지만 본 실험에서 LDV로 측정된 주파수를 자유표면 유속계가 5% 이내

로 잘 추종하고 있음이 증명되었으므로 향후 주파수 측정법의 사용 시는 그 유동조건만 같다면 스트라울수를 0.167로 하여 사용하는 것이 타당하다고 사료된다.

5. 결론

가속조건의 용강유동의 자유표면 속도를 측정할 수 있는 자유표면 유속계를 개발하였다. 또 하중 측정법 및 주파수법에 의한 속도 측정 방법을 개발하였고, 두 방법간의 장단점을 비교하였다. 두 가지 방법에 의한 유속측정시 필요한 보정관계를 실 공정을 모사한 수모델을 이용하여 구하였다. 그러나 그 유동 조건의 차이상 주파수 측정법에 대하여 측정된 스트라울수를 기존의 참고문헌의 결과와 바로 비교하기는 어려웠는데 이에 대해서는 향후 좀 더 연구가 필요하다

참고문헌

- (1) Frank. M white, 1995, "Fluid mechanics", 3rd Ed. McGraw hill, pp317
- (2) A.T.Sayers, 1990, "Vortex shedding from groups of three and four equispaced cylinders situated in a cross flow", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 34, pp213-221
- (3) Tetsushi Okamoto and Michio Takeuchi, 1975, "Effect of side walls of wind-tunnel on flow around two-dimensional circular cylinder and its wake", *Bulletin of the JSME*, Vol.18, No.123, September, pp1011-1017
- (4) Manabu IGUCHI, Hirotohi KAWABATA, et al, 1996, "A new probe for directly measuring flow velocity in a continuous casting mold", *ISIJ International*, Vol 36, Supplement, pp.S190-S193
- (5) F.Baban, R.M.C.So and M.V.Otugen, 1989, "Unsteady Forces on circular cylinders in a cross-flow", *Experiments of Fluids*, 7, pp293-302
- (6) Dj.Farivar, 1981, "Turbulent uniform flow around cylinders of finite length", *AIAA Journal*, Vol.19, No.3, March, pp275-281