

# 다양한 레이놀즈수에서 원형실린더 주변 유동 특성 연구

이 지 현<sup>1\*</sup>, 안 창 환<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 항공우주시스템공학과

<sup>2</sup>경상대학교대학원 기계항공공학부

본 연구에서는 EDISON CFD의 2D Incomp P 해석자를 이용하여 0.16부터 1,000,000까지 다양한 레이놀즈수에서 실린더의 유동 특성을 연구하였다. 임계 레이놀즈수 이하에서 실험값과 유사한 압력분포도를 제작하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 레이놀즈수에 따른 항력계수의 그래프를 제작하여 항력계수의 값이 레이놀즈수의 변화에 대해 선형적으로 변화하는 것을 연구하였다. 같은 속도장일 때 특성길이에 따른 유동장의 차이 점도 연구하기 위하여 특성길이에 변화를 주어 해석을 진행하였고, 특성길이가 길수록 박리가 빠르게 발생하는 것을 알게 되었다.

**Key Words :** 전산유체역학(CFD), 비정상유동(Unsteady Flow), 정상유동(Steady Flow), 실린더(Cylinder)

## 1. 서 론

공기역학 수업을 들으면서 양력은 물체의 윗면과 아랫면의 압력차에 생기는 것을 배웠다. 원형실린더의 경우도 마찬가지로 아랫면과 윗면의 압력이 이론적으로 같기 때문에 항력이 0이라는 것을 배웠다. 하지만 실제 유동에서는 원형실린더의 항력의 값이 0이 아니라는 사실이 이해가 힘들었다. 이번 기회를 통하여 실린더 주위의 유동의 형태를 이해하고 이론과 전산 해석의 결과를 통해 정확히 알아보고자 연구하였다. 이러한 실린더 주위의 유동에 대한 초기의 연구는 3.8부터 208까지의 낮은 레이놀즈수에서 연구되었다[1]. 1979년에는 Critical Reynolds Number Range에 대한 연구[2]가 있었으며, 1996년에는 150에서 4000까지의 범위에서 Karman Vortex Steert와 Karman Vortex Steert의 난류화에 대한 연구가 진행되었다[3]. 2014년에는  $2.5 \times 10^5$ 부터  $6.5 \times 10^5$ 까지의 높은 레이놀즈수에 대한 연구가 있었다[4]. 또한 아주 낮은 레이놀즈수부터 높은 레이놀즈수 까지 통합적으로 고려한 연구도 있었다 [5]. 이론적으로 비점성, 비압축성 유동에서 실린더의 항력과 양력은 0이다. 하지만 실제 유동에서는 점성으로 인하여 실린더의 항력은 유한하고 레이놀즈수에 대한 함수로 표현된다. 본 연구에서는 EDISON CFD를 이용하여 다양한 레이놀즈수에서 실린더를 지나는 유동을 전산해석하고 압력계수의 이론값과 해석 값을 비교를 한다. 또 레이놀즈수에 대한 항력계수의 값을 구하여 그래프를 작성하고 레이놀즈수와 항력계수간의 관계를 확인하였다. 추가적으로 같은 속도장일 때 실린더의 특성길이에 따른 실린더 주변 유동의 차이점도 연구하기 위하여 특성길이에 변화를 주어 해석을 진행하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 계산격자 및 경계조건

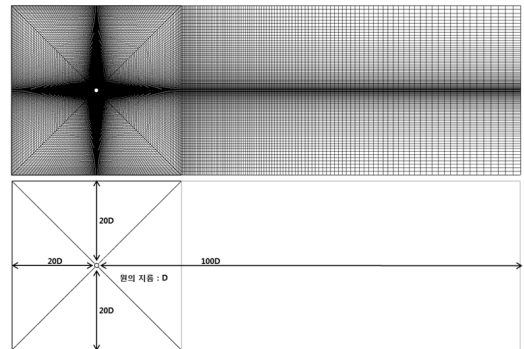


Fig. 1 Domain

Table 1 Input condition

Solver	정렬격자 기반 2차원 비압축성 유동 범용 해석		
비점성/층류/난류	Turbulent Flow		
Steady	Unsteady		
최대반복계산 횟수	30000	최대 반복 계산 횟수	10000
		시간 전진 간격	0.1
		파일 쓰기 간격	10
CFL 수	0.1	CFL 수	0.1

Fig. 1은 eMEGA를 이용하여 제작한 격자이다. 실린더의 지름이 1D이고, 실린더의 전면부와 상하로 20D, 후류방향으로 100D의 도메인을 제작했으며, 격자는 정렬격자를 이용하였다. Table 1에는 본 연구에서 사용한 입력조건이 명시되어 있다. 경계조건으로는 우선 실린더의 벽면조건을 Viscous

Adiabatic Wall의 조건을 주었고 외부유동의 조건은 Far-field를 사용하였다.

## 2.2 유동장 해석 결과의 타당성

실린더 주위의 박리 및 난류의 정확한 해석을 위해서 RANS (Reynolds Average Navier-Stokes)를 기반으로 하고, EDISON에서 지원하는 ‘정렬격자 기반 2차원 비압축성 유동 범용 해석 SW(2D\_Incomp\_P)’을 이용한다. 또한 난류 해석을 위하여 난류 모델을 설정 하였다. 각 난류별 레이놀즈수  $10^5$  일 때 실린더의 항력계수를 비교해보았다[6]. Fig. 2의 결과를 보면 Spalart-Allmaras 모델의 경우 0.073에 수렴하고 나머지  $k-\omega$ ,  $k-\epsilon$ 는 1.147에 수렴하는 것을 확인하였다. Fig. 3을 보면  $10^5$ 의 레이놀즈수에서 항력계수 1.1의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. Spalart-Allmaras 모델은 난류를 정확히 예측하지 못하여 큰 오차가 있는 것으로 보인다.  $k-\omega$ ,  $k-\epsilon$ 중 외부 유동장에 조금 더 적합한  $k-\epsilon$ 을 선택하였다. 선택한 난류모델로 EDISON CFD의 해석 결과의 타당성을 검증해 보았다. Fig. 4은 [6]에 삽입된 실험값을 그래프로 나타낸 것이며, Fig. 5은 EDISON CFD를 이용하여 도출해낸 그래프이다. 임계 레이놀즈수 이하의 범위에서 압력계수가 정성적으로 일치하는 것을 확인하였으며, EDISON CFD를 통한 실린더 주변의 유동 해석이 타당하다고 판단하였다.

## 2.3 해석자 소개

2D\_Incomp\_P을 사용하였다. 유한 체적법(Finite Volume Method, FVM)을 기반으로 하며 격자계는 정렬격자를 사용한다. 압축성 효과가 무시되는 저 마하수 영역(마하수 0.3 이하)에 주로 사용되며, 점성 유동과 비점성 유동 모두 사용가능하다. 또한 유동장이 시간에 따라 변하지 않는 정상 유동과, 시간에 따라 변하는 비정상 유동 모두 해석 가능하며 비정상 유동 해석에서는 Dual-time Stepping 기법을 이용한다. 차별화된 RANS 방정식의 수치 플럭스를 계산하는데 Osher의 Upwind 방법을 사용하고 시간 전진 기법(Time Integration)으로는 내재적 (Implicit) 기법인 LU-SGS Method를 사용하였다.

Table 2 Input Reynold's number value

특성길이	1D( $d_1$ )	2D( $d_2$ )
레이놀즈수	0.16	0.32
	9.6	19.2
	13.1	26.2
	26	52
	112	
	10000	20000
	100000	200000
	1000000	2000000

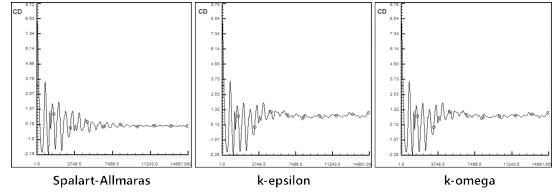


Fig. 2 EDISON CFD를 이용한 난류 모델별 항력계수 비교

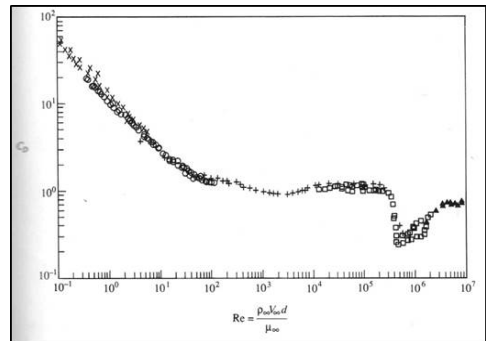


Fig. 3 레이놀즈수에 따른 실린더 항력 계수의 변화[6]

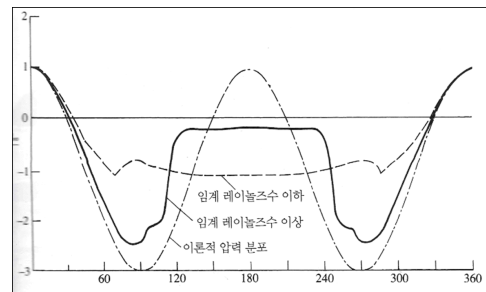


Fig. 4 이론적인 압력 분포와 임계 레이놀즈수 이하와 임계 레이놀즈수 이상인 2개의 압력 분포 비교[6]

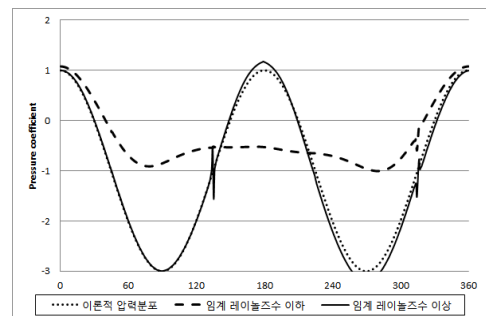
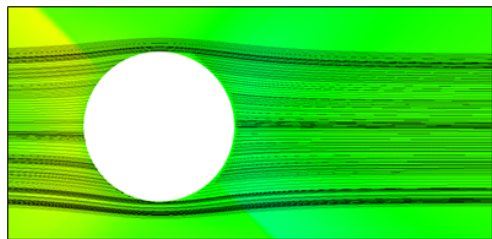
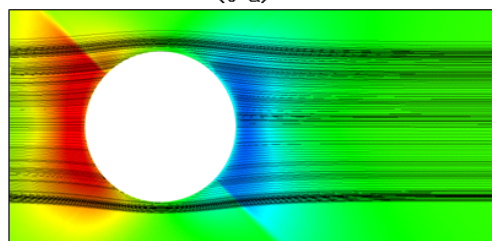


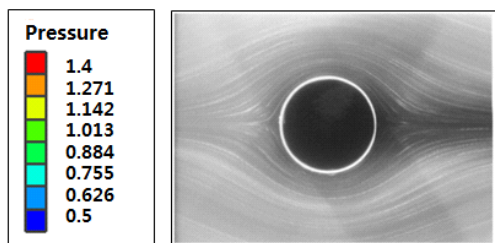
Fig. 5 EDISON CFD를 이용한 압력 분포 비교



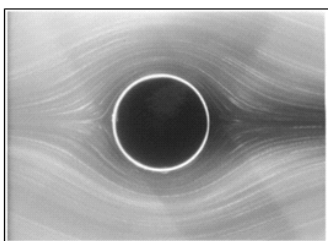
(6-a)



(6-b)



(6-c)



(6-d)

Fig. 6 Result on Re = 0.16 (a), 0.32 (b)

(a) Streamline and Pressure Contour of  $d_1$

(b) Streamline and Pressure Contour of  $d_2$

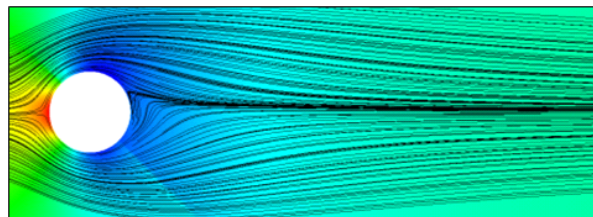
(c) Legend (d) Experiment data(Re = 0.16)[7]

## 2.4 해석 진행

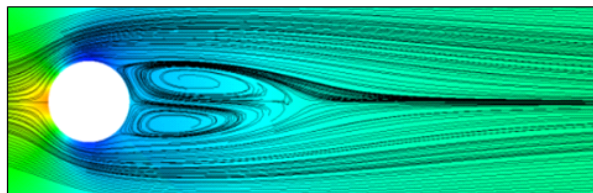
본 연구에서  $d_1$ 은 지름을 1로 하는 실린더로 설정하고  $d_2$ 는 지름을 2로 하는 실린더로 설정한다. 해석 진행에 사용한 SW인 ‘정렬격자 기반 2차원 비압축성 유동 범용 해석 SW(2D\_Incomp\_P-3.0.0)’는 입력 가능한 Input Value가 레이놀즈수로 제한되어있다. 이를 이용하여 다양한 레이놀즈수에 대해 해석을 진행하고, 같은 속도장일 때 특성길이에 따른 유동의 차이점도 연구하기 위하여 특성길이에 변화를 주어 해석을 진행한다. Table 2는 실험 결과에 이용된 특성길이에 따른 레이놀즈수 입력값을 명시한다.

## 2.5 실험 결과

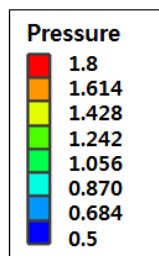
Fig. 6의 그림 (6-a)와 (6-b)는 각각 특성길이  $d_1$ 에서 레이놀즈수 0.16과  $d_2$ 에서 레이놀즈수 0.32에 대한 해석 결과를 후처리 eDAVA를 이용해 실린더 주변의 Pressure Contour 와



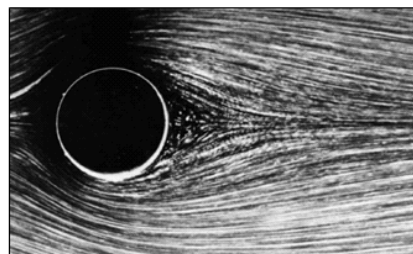
(7-a)



(7-b)



(7-c)



(7-d)

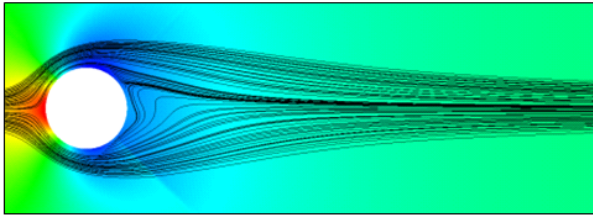
Fig. 7 Result on Re = 9.6 (a), 19.2 (b)

(a) Streamline and Pressure Contour of  $d_1$

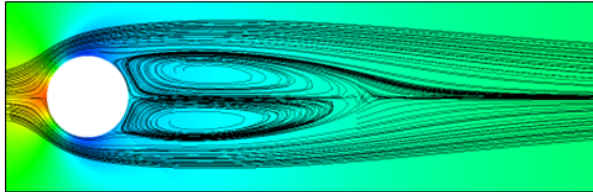
(b) Streamline and Pressure Contour of  $d_2$

(c) Legend (d) Experiment data(Re = 9.6)[7]

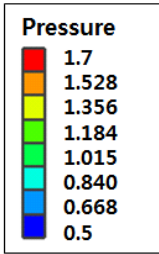
Streamline을 나타낸 그림이다. 그림 (6-c)는 Pressure Contour의 Legend이고 그림 (6-d)는 실험 결과이다. 그림 (6-a)에서 항력 계수는 85.209이다. 실험 결과[6]에서는 이 범위에서 50에 가까운 항력계수가 나온다. (6-a)와 실험 결과[6]의 오차는 70.418%이다. 이는 레이놀즈수가 아주 낮은 구간이고, 이 구간에서는 Creeping Flow등이 잘 관측되지 않는 예측이 불안정한 구간이기 때문에 큰 오차가 나는 것으로 보인다. (6-a)의 Streamline을 실험 결과 (6-d)와 비교해 보면, 실험 결과 (6-d)에서는 실린더를 따라 부드럽게 흘러가는 Creeping Flow가 잘 관측 된다. 해석 결과는 (6-a)의 Streamline이 상하 대칭을 이룬다. 하지만 해석 결과 (6-a)에서는 실린더의 위, 아래에서 약간의 부분을 제외하고는 Creeping Flow가 발생하지 않는다. 저 레이놀즈수에서는 정확한 해석이 어려운 것으로 볼 수 있다. 추가적으로 (6-b)일 때는 같은 속도장일 때 (6-a)에서와 달리 (6-a)에 비해 실린더 전면부와 후반부에 압력차가 더 도드라지는 것으로 보인다. 이는 같은 속도장이지만 실린더의 형상이 더 크기 때문에 형상항력에 많이 영향을 받아 압력장



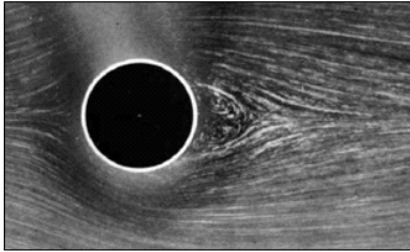
(8-a)



(8-b)

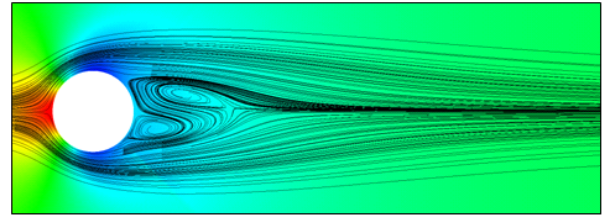


(8-c)

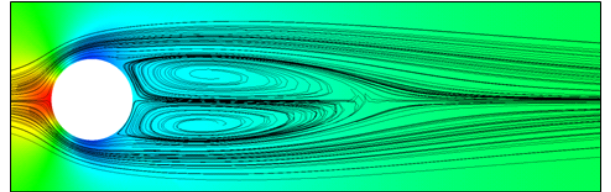


(8-d)

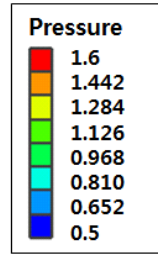
Fig. 8 Result on  $Re = 13.1$  (a),  $26.2$  (b)  
 (a) Streamline and Pressure Contour of  $d_1$   
 (b) Streamline and Pressure Contour of  $d_2$   
 (c) Legend (d) Experiment data( $Re = 13.1$ )[7]



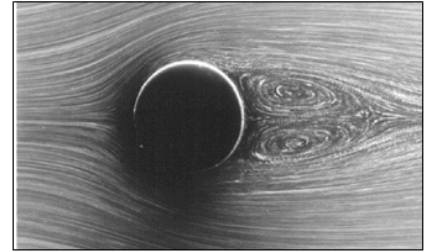
(9-a)



(9-b)



(9-c)



(9-d)

Fig. 9 Result on  $Re = 26$  (a),  $52$  (b)  
 (a) Streamline and Pressure Contour of  $d_1$   
 (b) Streamline and Pressure Contour of  $d_2$   
 (c) Legend (d) Experiment data( $Re = 26$ )[7]

이 차이가 나는 것으로 보인다.

Fig. 7은 레이놀즈수 9.6일 때  $d_1$ 인 (7-a)와 레이놀즈수 19.2일 때  $d_2$ 인 (7-b)의 결과를 나타내었다. (7-a)에서 항력계수는 2.8173으로 실험 결과[6]를 참조하면 이 범위에서는 2.5에 가까운 항력계수가 나와야 한다. (7-a)와 실험 결과[6]의 오차는 12.692%이며, 본래 항력계수는 정확한 예측이 어려움으로 15% 이내의 오차는 신뢰성 있는 결과라고 판단된다. 추가적으로 (7-b)와 Streamline을 비교해 보았을 때 (7-b)에서는 같은 속도장일 때 (7-a)와 달리 실린더 후면에 와류가 생성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 같은 속도장이라도 지름이 더 길 때 실린더 후면에서 와류가 발생하는 것을 알 수 있다. 와류는 물체의 표면 위에서 박리가 발생한 다음에 일어나는 현상이다. 즉, (7-b)실린더에서 박리가 더 빨리 일어난다는 뜻으로 박리점이 (7-a)보다 (7-b)에서 실린더 후면의 정체점으로 부터 더 전면부 쪽에서 일어난다는 것을 알 수 있다. 이 것은 (7-a)보다 (7-b)의 특성길이가 더 길기 때문에, 실린더의 위, 아래를 지나는 유동들은 (7-b)의 실린더 위에서 더 긴 거리를 지

나가게 된다. 이 때 (7-a)와 (7-b)의 위를 지나가던 유동들이 일정 거리를 지나서 마찰력이 강해져 박리가 발생할 때, 두 실린더에서 유동들이 같은 거리를 지나가더라도 상대적으로 둘레가 더 긴 (7-b)에서 (7-a)보다 일찍 박리가 발생하는 것으로 보인다.  $4 < Re < 40$ 의 범위에서는 실린더 후면에 박리가 발생하고 안정된 두 개의 와류가 생성되는 것이 특징이다. 이 두 와류는 실린더 뒷면에 붙어서 x축을 대칭으로 서로 반대 방향으로 회전을 한다. (7-b)의 해석 결과의 Streamline을 관찰하면 두 개의 와류가 발생한 것을 볼 수 있다.

Fig. 8에서는 레이놀즈수 13.1일 때  $d_1$ 인 (8-a)와 레이놀즈수 26.2일 때  $d_2$ 인 (8-b)의 결과를 나타내었다. (8-a)에서 항력계수는 2.4707로 실험 결과[6]를 참조하면 이 범위에서는 약 2.5의 항력계수가 나와야 한다. (8-a)와 실험 결과[6]의 오차는 1.1703%이며 매우 작은 오차가 발생했음을 알 수 있다. (8-a)와 (8-d)를 비교해 보았을 때 (8-a)에서는 와류가 생성되지 않았고, (8-d)에서는 와류가 생성되어 있다. 추가적으로 같은 속도장인 (8-a)와 (8-b)를 비교해보면 (8-b)일 때와는 달리 (8-a)

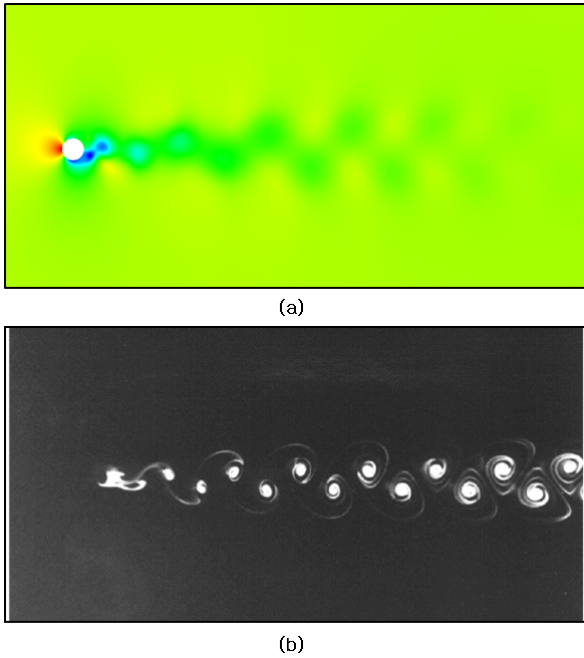


Fig. 10 Result on  $Re = 112$  about  $d_1$   
 (a) Streamline and Pressure Contour of  $d_1$ ,  $t=100s$   
 (b) Experiment data( $Re = 112$ )[7]

에서는 여전히 와류가 발생하지 않았다.

Fig. 9는 레이놀즈수 26일 때  $d_1$ 인 (9-a)와 레이놀즈수 52일 때  $d_2$ 인 (9-b)의 결과를 나타내었다. (9-a)에서 항력계수는 1.8793로 실험 결과[6]에서 이 범위는 약 2의 항력계수가 나와야 한다. (9-a)와 실험 결과[6]의 오차는 6.0325%로 크지 않은 오차가 생기는 것을 알 수 있다. 이 레이놀즈수에서 그림 (9-a)에 와류가 발생한 것을 알 수 있다. 추가적으로 (9-b)일 때는 같은 속도장인 (9-a)일 때와 달리 (9-a)에서는 박리점이 실린더후면의 정체점으로 부터 전면부 방향으로  $40^\circ$ 에서 발생하고 (9-b)에서는  $60^\circ$ 에서 발생 한다. 앞서 Fig. 7에서 언급한 이유와 마찬가지로 같은 속도장이더라도 특성길이에 따라 박리가 더 빠르게 일어나는 것을 알 수 있다. 그에 따라 Streamline에서 관측 가능한 와류도 특성길이가 더 길 때 규모가 더 크게 생성되는 차이가 발생한다.

Fig. 10의 (a)는 레이놀즈수 112의 해석에서 최종적인 결과인 100s때의 Pressure Contour이다. Fig. 10의 후류부분을 유심히 살펴보면 상하에 규칙적으로 압력이 낮은 구간들이 반복되는 것을 볼 수 있다. 이것이 Karman Vortex Street로 레이놀즈수 40이상, 400이하에서 발생하며[8] 40이하의 레이놀즈수에서 한 위치에 정지해 있던 와류들이 물체로부터 규칙적으로 교대로 떨어져 나와 후류로 흘러들어가는 현상이다. 그림

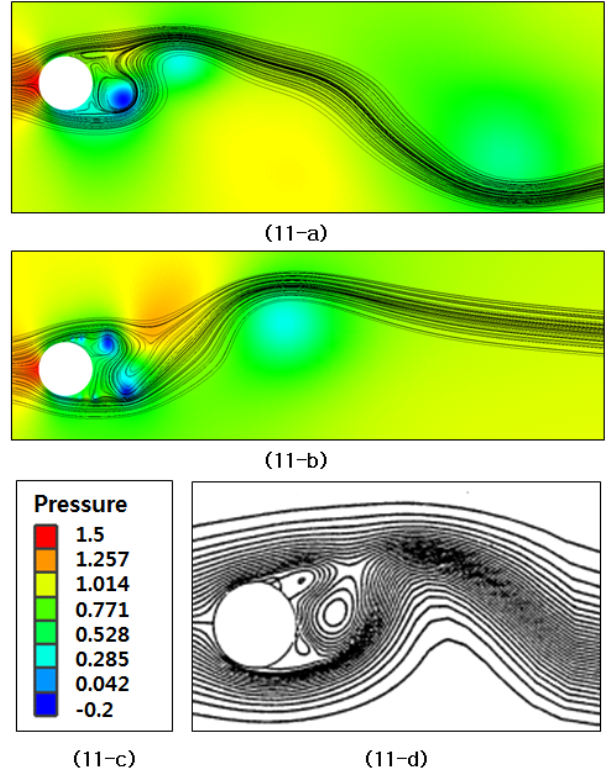
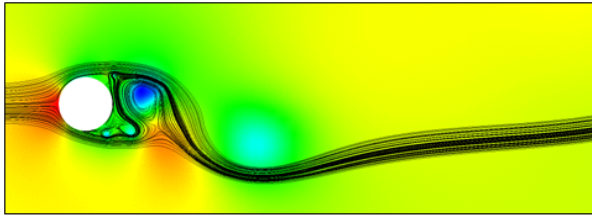


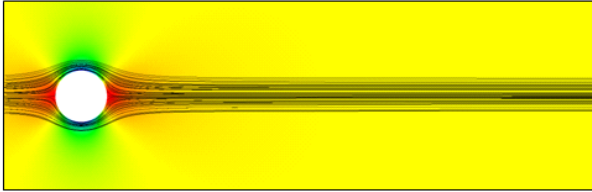
Fig. 11 Result on  $Re = 10,000$  (a), 20,000 (b)  
 (a) Streamline and Pressure Contour of  $d_1$   
 (b) Streamline and Pressure Contour of  $d_2$   
 (c) Legend (d) Experiment data( $Re = 10,000$ )[7]

(a)에서 그림 (b)와 유사한 유동이 생성되었다는 것을 알 수 있다. 후류에서 실린더로부터 가장 먼 구간에서는 와류로 추정되는 구간이 잘 보이지 않는다. 이것은 실험 결과(b)에서 실린더와 가장 먼 구간의 와류가 유동을 흐르며 외부공기와 혼합되기 때문에 주변과 압력차가 크지 않은 것으로 보인다. 항력 계수는 1.3474이다. 실험 결과[6]을 참조하면 이 부근에서는 1.2에 가까운 항력계수가 나와야 한다. 실험 결과와는 12.284%의 오차가 난다.

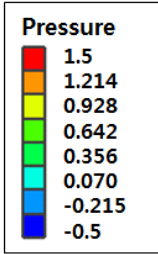
Fig. 11은 레이놀즈수 10,000일 때  $d_1$ 인 (11-a)와 레이놀즈수 20,000일 때  $d_2$ 인 (11-b)의 결과를 나타내었다.  $d_1$ 에서 항력계수는 1.0911로 실험 결과[6]에서 이 범위는 1.1에 가까운 항력계수가 나와야 한다. (11-a)와 실험 결과[6]의 오차는 0.00809%이며 오차가 매우 작은 것을 알 수 있다. 그림 (11-a)와 논문에 삽입된 그림 (11-d)를 비교해 보면 실린더 후면에 생긴 와류와 실린더 후류의 곡선 형태가 매우 유사하다. 실린더 뒷면에 작은 와류들이 여러 덩이들로 구성되어있다. 앞서 Fig. 10에서



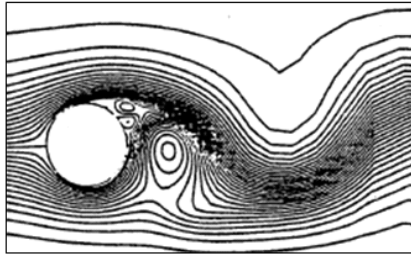
(12-a)



(12-b)



(12-c)

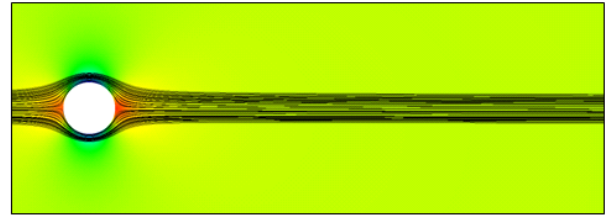


(12-d)

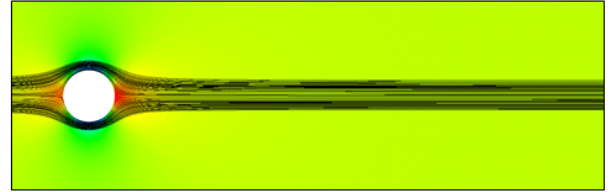
Fig. 12 Result on Re = 100,000 (a), 200,000 (b)  
 (a) Streamline and Pressure Contour of  $d_1$   
 (b) Streamline and Pressure Contour of  $d_2$   
 (c) Legend (d) Experiment data(Re = 100,000)[7]

볼 수 있었던 Karman Vortex Street는 레이놀즈수가 증가하면서 난류화 되었고 뚜렷하게 후류의 형태로 변형 하였다. Fig. 9의 (9-a)에서는 실린더 후면의 정체점에서 위아래로 40°에서 박리가 일어나 와류가 생성된다. Fig. 11의 (11-a)에서는 후면 정체점의 82°에서 박리가 발생한다. 레이놀즈수가 높아질수록 박리가 빠르게 발생하는 것을 알 수 있다. 레이놀즈수는 점성계수와 반비례 관계에 있다. 밀도와 속도를 고정 값으로 가정할 때 레이놀즈수가 높아지게 되면 점성계수가 낮아지게 된다. 점성계수가 낮기 때문에 점성의 영향이 약해지고 박리점이 실린더의 전면부로 앞당겨지게 된다. (11-b)일 때에는 같은 속도장인 (11-a)에서와 달리 후면 정체점에서 전면부로 100°앞에 박리가 발생한다. 그림 (11-c)의 Legend에서 음수의 값이 나온다. 이것은 식(1)-(2)에 나오는 압력의 무차원화 과정에서 차원화된 압력의 값보다 자유류의 압력값이 높으면 음수의 값이 나오는 현상이다. 속도가 높을수록 압력이 낮아져 무차원화 된 압력값이 음수값이 나온다.

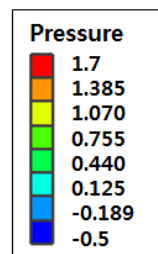
Fig. 12는 레이놀즈수 100,000일 때  $d_1$ 인 (12-a)와 레이놀즈



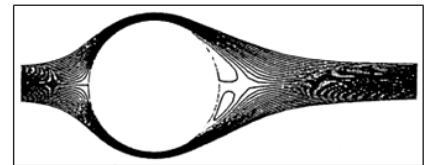
(13-a)



(13-b)



(13-c)



(13-d)

Fig. 13 Result on Re = 1,000,000 (a), 2,000,000 (b)  
 (a) Streamline and Pressure Contour of  $d_1$   
 (b) Streamline and Pressure Contour of  $d_2$   
 (c) Legend (d) Experiment data(Re = 1,000,000)[7]

$$P = \rho_{\infty} v_{\infty}^2 P^* + P_{\infty} \quad (1)$$

$$P^* = \frac{P - P_{\infty}}{\rho_{\infty} v_{\infty}^2} \quad (2)$$

$P$  : Pa 단위로 표현되는 차원화 값 압력

$\rho_{\infty}$  : 자유류 밀도

$v_{\infty}$  : 자유류 속도

$P_{\infty}$  : 자유류 압력

$P^*$  : 무차원화 값 압력

수 200,000일 때  $d_2$ 인 (12-b)의 결과를 나타내었다. (12-a)에서 항력계수는 1.1688으로 실험 결과[6]에서 이 범위는 1.2에 가까운 항력계수가 나와야 한다. (12-a)와 실험 결과[6]의 오차는 2.5991%이며 오차율이 작은 것을 알 수 있다. 그림 (12-a)에서는 논문에 삽입된 그림 (12-d)와 유사하게 나타난다. 실린더 후면에 발생한 와류무리들과 후류의 유선이 휘어지는 경향이

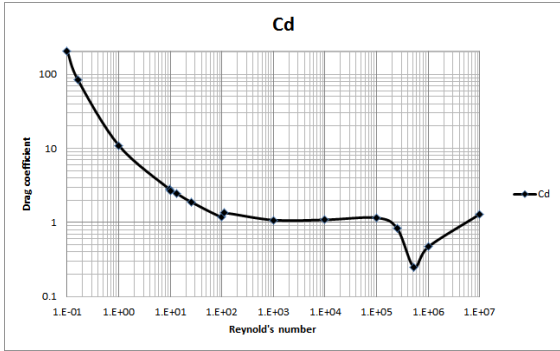


Fig. 14 Drag coefficient vs Reynold's number graph

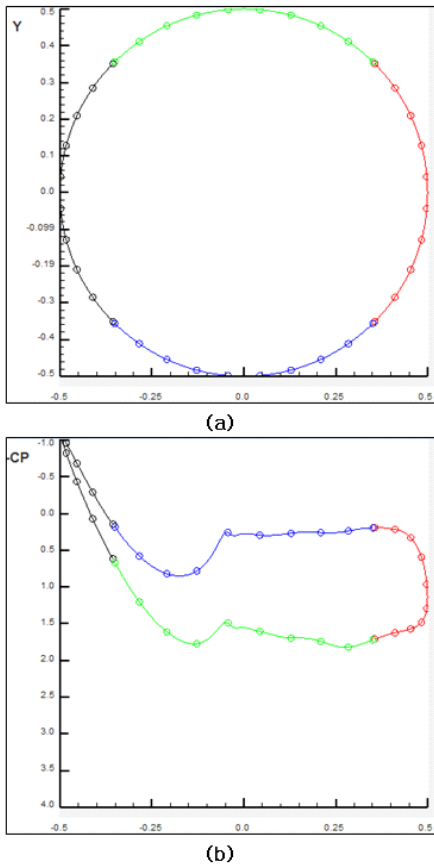


Fig. 15 (a) Geometry of  $d_1$   
(b) Pressure Coefficient Distribution Chart of  $d_1$

그림 (12-d)와 유사하다. 추가적으로 (12-b)일 때는 같은 속도장이지만 (12-a)일 때와는 달리 Fig. 15의 그림 (15-b)와 같이 레이놀즈수가 더 높을 때 발생하는 현상이 나타난다. 이는 같

은 속도장이지만 (12-b)의 특성길이 값이 더 크기 때문에 (12-b)의 레이놀즈수가 더 높음으로 나타나는 현상이다.

Fig. 13은 레이놀즈수 1,000,000일 때  $d_1$ 인 (13-a)와 레이놀즈수 2,000,000일 때  $d_1$ 인 (13-b)의 결과를 나타내었다. (13-a)에서 항력계수는 0.47070으로 실험 결과[6]에서 이 범위는 0.4에 가까운 항력계수가 나와야 한다. (13-a)와 실험 결과[6]의 오차가 17.675% 발생했다. 이는 임계 레이놀즈 이상의 범위에 는 정확한 예측이 어려워 오차가 발생한 것으로 보인다. (13-a)의 Streamline을 실험 결과 (13-d)와 비교해 보면 (13-a)실린더의 후류가 요동치지 않고 일직선으로 뻗어나간다는 점에서 논문에서 삽입

된 그림 (13-d)와 유사하다. 또, 실린더 윗면과 아랫면으로 실린더를 따라 부드럽게 흐르는 Creeping Flow가 관찰된다. 하지만 그림 (13-d)에 나와 있는 실린더 뒷면부근에 좁은 와류부분은 해석 결과 (13-a)에서 명확히 나타내지 못한다. 이 또한 임계 레이놀즈수 이상의 범위에서는 예측이 정확하지 못한 것으로 보인다. 추가적으로 속도장이 같은 (13-b)와 (13-a)일 때 Streamline을 비교 해 보면 (13-a)와 (13-b) 모두 실린더 위, 아래에 Creeping Flow가 발생하고, 후류의 형태를 보았을 때 비슷한 결과를 낸 것으로 보인다.

Fig. 14은 레이놀즈수에 따라 항력계수를 구하여 그래프를 나타낸 것이다. 특성길이  $d_1$ 에서 레이놀즈수 0.1, 0.16, 1, 9.6, 10, 13.1, 26, 100, 112, 1000, 10,000, 100,000, 250,000, 530,000, 1,000,000, 10,000,000을 이용했다. 그 결과 레이놀즈수 0.16에서는 레이놀즈수 0.1과 1 사이의 단조롭게 감소하는 항력계수 경향과 부드럽게 이어지는 것을 볼 수 있다. 레이놀즈수 9.6과 13.1, 26에서도 레이놀즈수 10과 100 사이에서 값들이 부드럽게 연결되는 것을 볼 수 있다. Fig. 3의 레이놀즈수 100 직후에서 항력계수가 조금 증가하는 것을 볼 수 있다. 이처럼 레이놀즈수 112에서는 레이놀즈수 100에서 보다 조금 증가하는 값을 보여주며 Fig. 3에서와 유사한 경향을 보인다. 레이놀즈수 10,000와 100,000에서는 1에 근사하는 값을 보인다. 레이놀즈수가 530,000에서 항력계수가 급격히 감소하는 구간이 있음을 확인 할 수 있다. 급격한 항력계수의 감소가 일어난 후 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 2.2에서 나온 Fig. 3의 그래프와 일치하는 경향성을 보인다.

Fig. 15은 특성길이가  $d_1$ 일 때, 형상과 레이놀즈수 100,000에서의 압력분포도 해석 결과를 나타낸 것이다. (a)와 (b) 그림 모두 x축은 실린더의 x좌표 값이다. 그림 (a)를 살펴보면 실린더의 윗면부는 초록색, 아랫면은 파란색, 전면부는 검정색, 후면부는 빨간색으로 나타내진다. 그림 (b)를 확인하면 윗면과 아랫면의 압력계수가 차이가 나고, 실린더의 전면부와 후면부에서도 압력계수 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이론상으로는 압력분포가 완전히 대칭하고 항력이 0이지만 이처럼 실

제 점성유동 에서는 압력분포가 완전히 대칭하지 않고, 항력이 0이 아님을 알 수 있다.

### 3. 결 론 및 고 찰

원형실린더  $d_1$ 에서 레이놀즈수에 따른 항력계수의 값을 구하였다. 실험 결과[6]에서 인용한 Fig. 3을 해석 결과를 이용하여 제작한 그래프 Fig. 14과 비교했다. Fig. 3과 Fig. 14을 비교해 보았을 때  $Re < 100$ 의 구간에서는 항력계수가 선형적으로 감소하고  $100 < Re < 100,000$  구간에서는 항력계수가 1에 근사한다.  $100,000 < Re < 1,000,000$  구간에서는 항력계수가 급격히 감소한다. 이러한 경향성을 비교해 보았을 때, 실험 결과인 Fig. 3과 해석 결과인 Fig. 14이 정성적으로 일치한다는 것을 알 수 있다.

레이놀즈수의 증가에 따라 항력계수가 감소하는 이유는 점성에 의한 마찰의 영향으로 보인다. 레이놀즈수가 증가할수록 점성계수가 감소하고 이로 인해 박리점이 실린더 전면부로 이동하여 박리가 빠르게 발생하게 된다. 박리가 빠르게 일어날수록 실린더를 타고 흐르던 유체들과의 마찰이 줄어들기 때문에 항력계수 또한 감소하는 것으로 보인다.

원형실린더  $d_1$ 에서 위상에 따른 압력계수의 분포를 구해보았다. 이론값의 그래프도 작성하여 해석 값과의 차이를 보았다. 이론상으로는 실린더 위상에 따른 압력분포가 대칭이기 때문에 항력이 0이지만, 실제 유동에서는 Fig. 15의 (b) 그림 처럼 상하 좌우의 압력이 대칭이 아니게 되고 항력이 발생한다. 임계 레이놀즈수 이하의 범위에서는 실험값과 유사하게 예측 되었다. 하지만 임계 레이놀즈수 이상의 범위에서는 잘 예측되지 않았다.

본 연구에서는 레이놀즈수에 따른 원형실린더의 항력계수 변화와 유동특성을 살펴보았다. 레이놀즈수가 바뀔 때 얻어지는 항력계수를 이용하여서 Drag coefficient vs Reynold's number 그래프를 제작할 수 있었고 Pressure Contour와 Streamline을 이용하여 각 레이놀즈수별 유동을 관찰할 수 있었다. 같은 속도장에서 원형 실린더 특성길이의 차이에 따른 실린더의 유동장 차이를 연구하였다. 특성길이가 1인  $d_1$ 과 2인  $d_2$ 를 이용하여 비교하였다. 특성길이가 2인  $d_2$ 에서 실린더에 박리가 더 빨리 발생하고 와류도 더 크게 생성되었다. 실린더의 위, 아래를 지나는 유동들은 일정거리이상 진행하였을 때 마찰력이 강해져서 박리가 일어나게 된다. 두 실린더에서 유동들이 같은 거리를 지나가더라도 상대적으로 둘레가 더 긴  $d_2$ 에서  $d_1$ 보다 일찍 박리가 시작하는 것으로 보인다. 또 박리점이  $d_1$ 보다 더 앞으로 당겨져 박리가 빨리 시작하는 만큼 와류가 생성되는 크기도 더 커지게 되었다.

## 후 기

본 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2016M3C1A6937383)

## References

- [1] 1933, Thom, A., "The Flow Past Circular Cylinders at Low Speeds," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, Vol. 141, No. 845 (Sep. 1, 1933), pp. 651-669
- [2] 1951, William J. Bursnall, Lawrence K. Loftin, Jr., "Experimental investigation of the pressure distribution about a yawed circular cylinder in the critical Reynolds number range," *National Advisory Committee for Aeronautics Collection*
- [3] 1996, G. H. K. Williamson, "Vortex dynamics in the cylinder wake," *Annual review of fluid mechanics*, Vol. 28: 477-539
- [4] 2014, O. Lehmkuhl, I. Rodríguez, R. Borrell, J. Chiva and A. Oliva, "Unsteady forces on a circular cylinder at critical Reynolds numbers," *Physics of Fluids*, 28-31p
- [5] 1996, M Hashiguchi, "Two-Dimensional Study of Flow past a Circular Cylinder," *數理解析研究所講究錄*, 164-169p
- [6] 2011, John D. Anderson, "Fundamentals of aerodynamics," TEXTBOOKS
- [7] 1982, Milton Van Dyke, "An Album of Fluid Motion," THE PARABOLIC PRESS
- [8] 2010, Prud'homme, Roger, "Flows of Reactive Fluids," Springer, 179p