단면 축적에 따른 레이놀즈 수 민감도 분석

Analysis of Reynolds Number According to Section Scale

이호엽* · 전낙현** · 김영민*** · 이학은****

Lee, Hyeop · Chun, Nak Hyun · Kim, Young Min · Lee, Hak Eun

Abstract

Reynolds number similarity is basic theory of aerodynamic test. Over specification Reynolds number, It isn't seem to have much regard for this effect. But it is important factor that should never be missed out on real aerodynamic test. We have to seriously consider this factor when planning aerodynamic test. Reynolds number is important non-dimensional factor that defined fluid viscosity, relative velocity and characteristic length. At two dimensional section model test, there is a special characteristic that air velocity and characteristic length is changed according to section scale. And from this characteristic, Reynolds number is changed. Using this special characteristics, we measure aerodynamic coefficient on aerodynamic test by varying the Reynolds number through two dimensional section model test and analysis sensitivity of Reynolds number. Finally, verify this aero dynamic coefficient by comparing with test data with CFD program analysis data.

Key words : reynolds number, drag coefficient, section scale, two dimensional section model test, CFD

요 지

레이놀즈 수 상사는 풍동실험의 기본 원리이지만 특정 레이놀즈 수 이상에서는 그 영향이 작다고 간주 된다. 그러나 실제 풍동실험에서는 간과해서는 안 될 중요한 변수로서 풍동실험을 계획할 단계에서부터 심각하게 고려해야한다. 레이놀즈 수는 유체의 점성, 유체의 상대 속도, 특성 길이로 정의되는 무차원 수로서 풍동 실험에서 무시할 수 없는 중요한 인자이다. 2차원 단면 모형 실험시, 단면의 스케일에 풍속 및 특성 길이가 변하고 이에 따라 레이놀즈 수가 변하는 특징이 있다. 이 특징을 이용, 2차원 단면 모형 실험을 통해 레이놀즈 수에 따른 항력계수를 측정해 풍동실험에 있어서 레이놀즈 수의 민감도를 분석하였다. 또한 CFD 프로그램 해석을 이용해 실험값과 비교해 검증하였다.

핵심용어 : 레이놀즈 수, 항력계수, 단면 축적, 2차원 단면모형 실험, CFD

1. 서 론

고 레이놀즈 수와 넓은 난류 스펙트럼 범위를 갖는 대기경계층 유동의 특징을 풍동에서 축소된 형태로 재현하는 것은 풍공학 실험의 중요한 부분이며 또한 여전히 어려운 문제이다. 레이놀즈 수 상사는 풍동실험의 기본 원리이지만 특정 레이놀즈 수 이상에서는 그 영향이 작다고 간주 된다. 그러나 실제 풍동실험에서는 간과해서는 안 될 중요한 변수로서 풍동실험을 계획할 단계에서부터 심각하게 고려해야한다(J. Struct. Mech., 1994). 레이놀즈 수의 영향이 가급적 작게 실험이 설계되어야 하나 기존의 일반적인 풍공학용 풍동시설에서는 레이놀즈 수 영향을 피할 수 없다.

풍공학 모형실험의 특징은 실험하고자 하는 대상이 주로

대기경계층 내에 대규모 구조물이므로 고 레이놀즈 수 영역의 문제라는 점이다(Seong, 2005). 풍동실험자는 대기경계층의 유체역학적 특성, 저 레이놀즈 수 문제와 구별되는 고 레이놀즈 수 유동특성, 레이놀즈 수 영향과 관련된 실험의 한계 등을 잘 이해하고 있어야한다(Cermak, 1975). 이에 풍동 실험 데이터의 정확성과 신뢰도를 높여 보다 우수하고 활용적인 결과를 얻기 위해 레이놀즈 수의 영향을 파악하고자한다.

레이놀즈 수는 유체의 점성, 유체의 상대 속도, 특성 길이로 정의되는 무차원 수로서 풍동 실험에서 무시할 수 없다. 레이놀즈 수에 변화를 주기위해, 단면의 Scale에 변화를 주어 풍속 및 특성 길이를 종속변수로 하는 실험을 수행한다. 이 실험을 통해 레이놀즈 수에 따른 항력계수를 측정해, 풍동 실험에 있어서 레이놀즈 수의 민감도를 분석한다. 또한 CFD 프

*정회원 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사과정 (E-mail : yopye@korea.ac.kr)

**고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정

***정회원 · (주)대우건설 기술연구원 방재연구팀 선임연구원

****정회원 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수 (교신저자)

로그를 이용해 해석값과 실험값을 비교해 검증하도록 한다.

2. 배경이론

2.1 레이놀즈 수와 풍동실험

유체역학에서 레이놀즈 수(Reynolds number)는 “관성에 의한 힘”과 “점성에 의한 힘(viscouse force)”의 비로써, 주어진 유동 조건에서 이 두 종류의 힘의 상대적인 중요도를 정량적으로 나타낸다.

레이놀즈 수는 유체 동역학에서 가장 중요한 무차원 수 중 하나이며, 다른 무차원 수들과 함께 사용되어 동적 상사성(dynamic similitude)을 판별하는 기준이 된다. 두 유동 패턴이 기하학적으로 상사일 때, 이 두 유동의 주요 무차원 수들이 동일한 값을 가지면, 이 두 유동이 동적 상사성을 가졌다고 말하며, 이 두 유동은 그 형태가 유사하게 된다(Tanaka, 1992).

$$R_e = \frac{\rho v_{\theta}^2 L}{\mu v_{\theta} L^2} = \frac{\rho v_{\theta} L}{\mu} = \frac{v_{\theta} L}{\nu} = \frac{\text{Inertial Forces}}{\text{Viscous Forces}} \quad (1)$$

여기에서, v_{θ} : 유동의 평균 속도, L : 특성 길이(characteristic length), μ : 유체의 점성 계수, ν : 유체의 동점성 계수, ρ : 유체의 밀도이다.

풍공학 모형실험의 특징은 실험하고자 하는 대상이 주로 대기경계층 내의 대규모 구조물이므로 고 레이놀즈 수 영역의 문제라는 점이다. 풍동실험자는 대기경계층의 유체역학적 특성, 저 레이놀즈 수 문제와 구별되는 고 레이놀즈 수 유동 특성, 레이놀즈 수 영향과 관련된 실험의 한계 등을 잘 이해하고 있어야 한다.

대부분의 대기유동관련 풍공학 실험이 실제로 낮은 레이놀즈 수에서 수행되고 있는데 그것은 풍동실험에서 레이놀즈 수 독립성이라는 실험적인 사실이 레이놀즈 수 상사 조건을 완화시켜 주고 있기 때문이다. 풍공학자들은 대부분의 풍공학 연구 대상물에 대하여 레이놀즈 수에 거의 독립적으로(혹은 레이놀즈 수의 영향이 작게) 실험 가능한 영역이 존재한다고 믿기 때문이다. 이것은 실험을 통한 난류유동 현상의 관찰로부터 얻은 결과로 풍공학 모형실험을 가능하게 하는 매우 중요한 사실이다. 난류 대기경계층 위에서 일어나는 대규모 구조물에 대한 풍공학적 문제에 대하여 레이놀즈 수에 독립적인 실험영역을 확보할 수 없다면 풍동실험을 통하여 설계에 유용한 실질적인 정보를 얻는 것은 불가능하다(Schlichting, 1979).

그러나 기존의 저속 풍공학용 풍동설비를 가지고 레이놀즈 수에 완전히 독립적인 실험은 실질적으로 불가능하며 그 영향은 항상 존재한다. 유동현상에 관한 레이놀즈 수의 영향은 끊임없이 논의되어 오고 있는 유체역학 연구자들의 공통 관심분야이다. 그 중에서도 실험 풍공학자들이 주된 관심은 대규모 구조물의 고 레이놀즈 수 유동현상에 대하여 어떻게 하면 레이놀즈 수의 영향을 최소화하는 실험을 구성하여 실제 구조물이 받는 풍하중이나 유동현상을 정확히 추정하는가에 있다.

2.2 항력과 항력계수

유체 동역학에서 항력은 물체가 유체 내를 움직일 때 이 움직임에 저항하는 힘이다. 유체 내에서 움직이는 고체 물체의 경우, 항력은 유체의 유동과 동일한 방향으로 작용하는 모든 유체역학적 힘의 합이다. 따라서 항력은 물체의 움직임을 방해하는 힘이다. 물체에 대한 항력은 무차원 수인 항력계수로 나타낼 수 있으며, 항력 방정식을 사용해 계산할 수 있다(Simiu and Scanlan, 1996; Scruton and Rogers, 1971).

항력 방정식은 물체가 유체 내에서 움직일 때 작용되는 항력을 계산하는 식으로서, 다음과 같다.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_d, F_l = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_l, F_m = \frac{1}{2} \rho v^2 B C_m \quad (2)$$

여기서, F_d , F_l , F_m : 항력, ρ : 유체의 밀도, v : 유체에 대한 물체의 상대 속도, A : 기준 면적, B : $A \times L$, C_d , C_l , C_m : 항력계수이다.

3. 2차원 단면모형 실험

3.1 2차원 단면모형 실험

풍동 실험의 지배적 인자인 레이놀즈 수는 공기의 동점성 계수와 풍속, 특성 길이에 영향을 받는 인자이다. 실 교량 대비 단면 모형의 scale이 변환에 따라 실 풍속 대비 실험 풍속과 특성 길이가 바뀌게 되고 이에 따라 필연적으로 레이놀즈 수가 바뀌게 된다. 이와 같은 특성을 이용해 같은 형상의 단면에 대해 Scale을 조절하여, 각각의 항력계수를 계산해 레이놀즈 수의 따른 영향을 분석한다.

단면은 실교량 대비 1:30, 1:60, 1:90 크기로, 형상은 같고 Scale은 다르다. 각각에 대해 다른 풍속과 다른 특성 길이(레이놀즈 수 변화)로 실험을 수행했다(Seong, 2005). 다양한 case의 실험을 위해 각 단면의 엣지 부분의 각도에 변화(20°, 30°, 40°)가 가능하도록 제작하였으며(Matsudak et al., 2001), 박스의 중간부분을 개폐식으로 제작하여 싱글 박스 형태와 투윈 박스 형태가 가능하도록 했다.

단면모형에 대한 제원은 표 1과 같다. 단면 Scale에 따라 B, L, H를 결정했고, 이 중에서 B(교축직각방향) 특성길이가 된다. 유체(공기) 흐름 안에서 각 단면의 동특성을 일정하게 유지하여, 같은 거동을 나타내기 위해 B/H 비를 5로 통일했다. H는 차폐율을 고려하여 충분히 작게 하였다.

그림 1은 실험단면의 실제 사진과 도면으로, (a)의 왼쪽이 1:30단면, 오른쪽이 1:60단면이다. (b)는 단면 중앙의 단판을 탈부착식으로 만들어, 싱글 박스와 투윈 박스 형태로 제작한 것을 보여주는 입체도면이다. (c)는 1:30단면의 종평면도이며

표 1. 단면모형 제원

Scale	B (교폭)	L (교축방향)	H (형고)	B/H
1:30	1.10m	2.2m	0.22m	5
1:60	0.55m	1.1m	0.11m	5
1:90	0.35m	0.7m	0.07m	5

(a) 실제 단면모형

(b) 단면 입체도

(c) 중평면도(1:30)

(d) 옛지 상세

그림 1. 실험단면

(d)는 옛지부분의 각도변화를 위해 탈부착식으로 제작한 것을 보여준다.

3.2 실험 세팅 및 절차

그림 2는 실험전경으로, (a)는 실험기기 및 실험단면이 설치된 전체 모습이다. 실험과정은, 풍속을 조절하여 임의의 풍속(Froude법칙을 적용한 상사법칙을 이용한 실험풍속, 실험풍속 $\times \sqrt{\text{스케일}}$)에서 실험단면에 가해지는 항력에 대한 전기신호를 추출한다(삼분력계 이용). 이 전기신호를 실제 항력으로 변환하여, 각 항력에 대한 항력계수를 계산한다. 싱글 박스와 투원 박스 형태, 옛지를 변화시켜가며 반복 수행한다. 이 과정을 각 Scale에 대해 동일하게 수행한다. (b)는 삼분력계, (c)는 실험단면 설치 상세이다.

4. 결과 및 분석

4.1 실험풍속 - 공기력계수

레이놀즈 수와 공기력계수와의 관계를 분석하기에 앞서, 실

험풍속과 공기력계수와의 관계를 그래프로 나타냈다.(공기력계수의 기준은 폭을 사용) 2차원 단면모형 실험의 경우, 3가지의 항력이 발생한다. 그러나 레이놀즈 수 민감도 분석을 위해, 3가지 경우를 모두 분석할 필요가 없다. 그러므로 대표 항력을 구하기 위해, 우선적으로 실험풍속-공기력계수 그래프를 나타냈다.

그림 3의 (a), (b), (c)는 모두 옛지 20°에서의 그래프이다. 모든 그래프에서 풍속이 증가함에 따라 공기력계수가 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 풍동실험시 고려하는 바람은 교축 직각방향만을 고려하므로 대표 항력은 F_d 값을 알 수 있고, 공기력계수의 특성을 파악하는데 C_d 값이 가장 중요한 요소로 작용하기 때문에 C_d 값에 집중하여 분석을 실시한다.

4.2 Scale별 레이놀즈 수 - C_d

다음 그래프는 Edge 20°에서 각 단면 Scale별 레이놀즈 수에 따른 C_d 값 변화를 나타낸 것이다. 경향성 평가가 목적이므로 나머지 단면에 대한 해석은 하지 않기로 한다.

위의 그림 4를 보면 알 수 있듯이 레이놀즈 수가 증가함에 따라 C_d 값이 비선형적으로 감소하는 것을 확인할 수

(a) 실험장비 및 단면모형 세팅

(b) 삼분력계

(c) 삼분력계 설치

그림 2. 실험전경

그림 3. 단면 Scale별 실험풍속 - 공기력계수 그래프

그림 4. 단면 Scale별 레이놀즈 수 - C_d 그래프

있다. 전체적인 추세가 비교적 일정하게 나타나는 것으로 보아 경향성에 대한 평가가 가능하다 할 수 있다. 그래프가 기하급수적으로 감소하다가 일정 레이놀즈 수 이상에서 감소세가 두드러지게 줄어드는 것을 알 수 있고, 이 사실로부터 공기력 계수는 레이놀즈 수가 작은 부분에서 상당히 민감하다는 것을 확인 할 수 있다.

4.3 Scale별 레이놀즈 수

단면 Scale에 따른 레이놀즈 수의 영향을 평가하기 위해,

세 가지 단면의 각각의 레이놀즈 수에 대한 값을 하나의 그래프로 만들었다. 레이놀즈 수에 영향을 받지 않는 일정 레이놀즈 수 이상에서의 C_d 값이 필요로 하므로, 레이놀즈 수가 작은 부분의 $C_d > 1.0$ 값은 의미가 없다. 그러므로 $C_d < 1.0$ 구간에서 확대해서 관찰/분석할 필요가 있다.(또한 C_d 값이 풍속의 제곱에 비례하기 때문에, 저 풍속에서 계산상의 오차가 크게 발생한다.) 그 결과 실험한 모든 case에서 그 추이가 일정하게 나오는 것을 확인 할 수 있었다.

그래프 분석 결과 모든 그래프가 레이놀즈 수가 증가함에

그림 5. 단면 Scale 변화에 따른 레이놀즈 수 - C_d 그래프

따라 일정한 추세를 보이며 감소하는 것을 확인할 수 있다. 레이놀즈 수가 일정 영역 범위에서 C_d 값이 구조물에 거의 영향을 미치지 않는 상태로 들어서게 된다. 약 4×10^5 변화폭이 눈에 띄게 감소하는 것을 확인할 수 있으나 지속적인 감소를 보인다. 단면 Scale 변화에 따른 차이는 찾아볼 수 없었으며, 단면 Scale 간의 오차는 실험상의 오차로 추정된다. 그러므로 C_d 값은 단면 Scale과는 독립적이며 단순히 레이놀즈 수에 의해 결정된다고 할 수 있다.

5. CFD 해석

5.1 해석 조건

정적 공기력계수 산출을 위하여 대표단면을 설정하고, CFD (Computational Fluid Dynamics)에 의한 수치해석을 수행하였다. CFD 해석은 Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 이용하여 수행한다. 해석은 2차원 모델을 적용하였으며, 유동장의 해석에 있어서는 Finite Volume Method(FVM)를 적용한 범용 CFD코드인 Fluent-6.3.2를 이용하였다. 본 해석에 이용된 해석 방법은 다음과 같다. Segregated Solver를 이용하여 2D에서 Implicit Formulation을 적용하였다. 시간에 대한 계산은 Unsteady 상태로 전개하였으며, Unsteady Formulation은 2nd-Order Implicit Method를 적용하였다. 수렴기준은 항력계수의 안정성을 확보하기 위하여 0.00001의 값이 적용되었다(Niemann, 1998).

$k-\varepsilon$ 난류모델은 보강형 단면의 경우 5개의 방정식으로 이루어진 Reynolds stress model(RSM) 모델을 사용하였다. 보강형 단면의 경우 초기 계산시 RNG 모델을 사용하였지만 후류에 생성되는 와류가 시간이 지남에 따라 소멸되는 현상이 나타나 레이놀즈응력 모델로 변경하였다. 레이놀즈응력 모델은 난류에 의해 발생하는 레이놀즈 응력을 레이놀즈응력에

대한 수송방정식으로부터 직접 구하기 때문에, 원리적으로 와점성 모델에서 명확하게 문제가 발생하는 복잡한 난류 유동장 예측에 적합한 것으로 알려져 있다. 해석에 사용된 난류 강도는 1%이며 대표 난류스케일은 0.1B를 적용하였다. 압력과 속도의 Coupling은 PISO Algorithm을 적용하였고 압력의 이산화는 PRESTO!를 사용하였고 모멘텀(Momentum), Turbulent Kinetic Energy 그리고 Reynolds stresses는 Quick이 적용되었다. RSM 및 RNG 모델에 사용된 상수는 다음과 같다.

- Reynolds Stress Model

$C_{mu}=0.09$, $C1\text{-Epsilon}=1.44$, $C2\text{-Epsilon}=1.92$, $C1\text{-PS}=1.8$
 $k-\varepsilon$ -RNGModel

$C_{mu}=0.0845$, $C1\text{-Epsilon}=1.42$, $C2\text{-Epsilon}=1.68$

5.2 해석 결과 비교

네 가지 단면에 대한 실험값과 CFD 해석 결과값을 정리한 결과는 아래 표와 같다. ($Re=1.8 \times 10^7$)

수렴도는, CFD 해석의 경우 0.00001의 값이 적용되었고 실험의 경우 0.0005의 값을 적용하였다. 두 값은 약 10% 내외의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 이로부터 해석결과에 타당성을 부여할 수 있으므로 위의 분석 내용이 검증되었다고 할 수 있다.

표 2. CFD 해석과 실험의 값 비교

Model	C_d (해석)	C_d (실험)	오차(%)
엣지 20°	0.069	0.073	5.48
엣지 20° Twin	0.133	0.127	4.72
엣지 30°	0.156	0.166	6.02
엣지 40°	0.166	0.190	12.6

그림 6. CFD 결과 (엣지 20°, 40 sec)

그림 7. CFD 결과 (엣지 20° twin, 60 sec)

(a) Static Pressure

(b) Velocity Magnitude

(c) Turbulence Kinetic Energy

그림 8. CFD 결과 (엡지 30°, 50 sec)

(a) Static Pressure

(b) Velocity Magnitude

(c) Turbulence Kinetic Energy

그림 9. CFD 결과 (엡지 60°, 60 sec)

다음은 CFD 해석 결과의 Static Pressure, Velocity Magnitude, Turbulence Kinetic Energy에 대한 각각의 case별 그림이다. mesh의 짜임과 압력구배, 속도구배, 난류의 발생을 확인 할 수 있다(Schewe and Larsen, 1998).

5. 결 론

실험 단면은 실교량 대비 1:30, 1:60, 1:90으로, 형상은 같고 Scale은 다른 단면이다. 각 단면에 대해 다른 풍속과 다른 특성 길이(레이놀즈 수 변화)로 실험을 진행했다. 그 결과 값은 풍속이 증가할수록 일정한 값에 수렴하는 양상을 보인다.

- 1) 실험 결과에서 선술 하였듯이 C_l , C_m 값은 그 수렴도가 C_d 값에 비해 빠르고 단면에 주는 영향이 작으므로 C_d 값에 집중하여 분석을 실시했다.
- 2) 레이놀즈 수가 증가함에 따라 C_d 값이 비선형적으로 감소해 전체적인 추세가 일정하게 나타났다. 그래프가 기하급수적으로 감소하다가 일정 레이놀즈 수 이상에서 감소세가 확연히 줄어드는 것로부터 공기력 계수는 레이놀즈 수가 작은 부분에서 상당히 민감하다는 것을 확인할 수 있다.
- 3) 세 가지 단면 Scale에 따라 각각의 레이놀즈 수에 대한 C_d 값을 하나의 그래프로 합치시켰다. 또한 보다 정확한 분석을 위해, 레이놀즈 수가 작은 부분에서 큰 값을 갖는 C_d 값은 사실상 의미가 없으므로 $C_d < 1.0$ 구간에서 확대해서 분석했다. 그 결과 레이놀즈 수에 따른 C_d 값은, 단면 Scale과의 상관성은 찾아볼 수 없었고 이로부터 Scale과는 서로 독립적이라는 것을 밝혀냈다. 또한 레이놀즈 수 변화에 직접적인 영향을 받으므로, C_d 값은 레이놀즈 수에 지배적인 것을 확인했다. 각 Scale에

따라 C_d 값의 작은 차이가 발생하나, 이 차이는 실험시의 오차로 판단된다.

- 4) 본 연구에서 사용한 단면은, 약 4×10^5 전후 범위에서 C_d 값이 약 0.0005 정도로 수렴하여 항력계수의 안정성을 확보했다고 판단할 수 있다.
- 5) 최종적으로 판단한 각 단면별 C_d 값은 CFD 프로그램 해석결과, 실험과 약 10% 내외의 오차를 보였다. 이로부터 해석결과에 타당성을 부여하였고, 결론적으로 풍동 실험시 레이놀즈 수에 따른 민감도가 상당히 높은 것으로 나타나, 레이놀즈 수에 따라 실험 결과의 양상이 크게 좌우되는 것을 알 수 있다.

감사의 글

초장대교량 사업단을 통하여 지원된 국토해양부 건설기술 혁신사업 (08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- J. Struct. Mech. (1994) Subcommittee on similarity of wind tunnel experiments, study on similarity of wind tunnel experiments, Earthquake Eng., JSCE No. 489/I-27, pp. 17-25 (in Japanese).
- Seong, S.H. (2005) Reynolds number effects in wind engineering model tests, 한국풍공학회, 제9권, 제2호, pp. 134-143.
- Cermak, J.E. (1975) Applications of fluid mechanics to wind engineering, A Freeman Scholar Lecture, ASME.
- Tanaka, H. (1992) Similitude and modelling in bridge aerodynamics, Proceedings of the First International Symposium on Aerodynamics of Large Bridges, Copenhagen, Denmark, pp. 83-94.
- Simiu, E. and Scanlan, R.H. (1996) Wind Effects on Structures, 3rd edition, John Wiley and Sons, Inc.

- Scruton, C and Rogers E.W.E. (1971) *Steady and unsteady wind loading of buildings and structures*, Phil. Trans. Roy. Soc., Vol. A269, pp. 353-383.
- Schlichting, H. (1979) *Boundary Layer Theory*, 7th edition, McGraw-Hill Book co.
- Matsudak, K. Cooper, K.R. Tanaka, H. Tokushige, M. Iwasaki T. (2001) An investigation of Reynolds number effects on the steady and unsteady aerodynamic forces on a 1:10 scale bbridge deck section model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, pp. 619-632.
- Niemann, H. (1998) The boundary layer wind tunnel: an experimental tool in building aerodynamics and environmental engineering, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76, pp. 826-838.
- Schewe, G and Larsen A. (1998) Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76.

◎ 논문접수일 : 10년 11월 23일

◎ 심사의뢰일 : 10년 11월 29일

◎ 심사완료일 : 11년 06월 27일