

## 변형을 고려한 유연 프로펠러 날개의 설계

장현길, 이창섭, 노인식 (충남대학교)

### 1. 서론

고력청동주물(Ni-Al-Br, 일명 알브론즈)과 같은 금속 재질을 사용하는 기존의 프로펠러는 자체의 과도한 중량 때문 어떤 특정한 수중 운반체의 추진을 위한 프로펠러로서의 응용에 제한을 받을 수 있다. 이러한 중량 문제를 해결하기 위한 방법의 하나로 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)와 같은 복합재를 사용하여 프로펠러를 제작하는 방법이 제시되고 있으며, 복합재가 가진 흡음성, 고감쇄, 저중량 고강도, 내부식성 등은 프로펠러의 재료로서 적합한 특성이라고 할 수 있다.

그러나 복합재는 기존의 금속 재료에 비해 강성이 낮은 유연한 재료이기 때문에 복합재로 제작된 프로펠러는 기존의 금속 재료에 비하여 작동 시 하중에 의한 변형이 커지므로 프로펠러 작동점이 변화하게 되고 설계조건 상태에서 작동하지 않을 가능성이 높아지는 문제점이 있다. 따라서 유연 재료로 제작되는 프로펠러는 변형을 고려한 설계가 되어야 한다. 이를 이론적으로 수행하기 위해서 우선 프로펠러에 작용하는 유체역학적 성능을 추정하고, 이 유체역학적 하중에 따라 날개형상이 변형되는 것을 추정할 수 있는 구조해석법을 확보하고 있어야 한다. 최근에는 컴퓨터를 이용한 계산 능력이 향상되어 유탄성 이론을 적용한 유연 프로펠러의 성능 추정방법이 제시되고 있으며(Motley and Young, 2010, Miller et. al, 2012), 국내에서도 Lee, et. al.(2009)에 의한 연구결과가 발표되고 있다.

본 연구에서는 유체역학적 성능해석/프로펠러 설계를 위해서는, 이미 확보하고 있으며 계산 정도가 높은 것으로 확인되고 있는 Kerwin and Lee(1978)의 양력면 이론(lifting-surface theory, Vortex Lattice Method, VLM)에 의한 프로펠러 유체역학적 성능해석 코드(KPA4), Kim et. al.(1995)의 프로펠러 설계 코드(KPD4)를 사용하고, 이미 고정밀 구조해석 능력이 입증된 Nho et. al.(2004)의 유한요소법을 적용한 프로펠러 날개 전용 구조해석 프로그램(ProSTEC)을 이용하기로 한다. 그러나 양력면 이론에 기반한 KPA4 프로그램에서 프로펠러 날개를 기하학적으로 처리하는 방법과 유한요소이론에 기반한 ProSTEC 프로그램에서 20-절점 육면체 등 매개변수 요소를 기하학적으로 처리하는 방법이 상이하여, 두 프로그램 사이의 인터페이스에서 오차가 발생할 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 우선적으로 두 프로그램 사이의 인터페이

스를 원활하게 하는 처리장치를 개발하였으며 유연 프로펠러의 변형을 고려한 설계기법에 이를 적용하여 변형 후 목표하중을 갖도록 설계 형상을 찾아가는 절차를 완성하였다.

### 2. 설계 알고리즘

유연 프로펠러가 작동 중 하중에 의해 변형된 후의 형상은 설계 조건에 부합하는 추진 성능을 가지고 있어야 하며 이때의 추력 및 형상을 목표하중(Target Loading, TL), 목표하중 형상이라고 한다. 설계의 최종 목표는 정지상태의 형상으로 제작 형상이다. 제작형상은 변형된 후에 목표하중을 발생시킬 수 있어야 한다.

목표하중 형상은 설계 조건에 따라 프로펠러의 요구 추력(하중)이 결정되면 양력면 이론에 의한 설계 프로그램을 통해 형상 설계가 가능하다. 이때 목표하중 형상은 강제로 간주하고 수행되는 일반 프로펠러 설계 절차를 그대로 따르지만 유연 프로펠러의 제작형상을 도출하기 위해서는 프로펠러의 변형을 고려하는 절차가 요구된다. 다음에는 목표하중 형상으로부터 제작형상을 도출하는 설계 알고리즘을 서술하기로 한다.

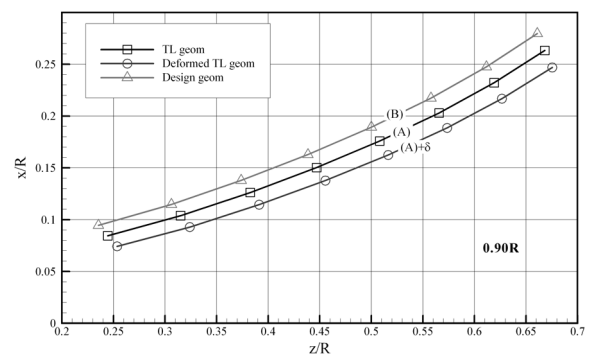


그림 1 특정 반경에서의 프로펠러 흡입면 (목표하중형상의 변형 전과 후 그리고 설계형상)

어떤 특정 반경에서의 날개의 한 면(여기서는 설명의 단순화를 위해 흡입면 한쪽만 보인다)이 유체역학적 하중에 의해 변형된 형상을 관찰함으로써 설계 알고리즘이 유도될 수 있다. 그림 1은 목표하중을 보이는 날개의 한 단면 (A)가 유체역학적 하중에 의해 변형(상징적으로 날개위에 있는 점에서의

변형량을 FEM 프로그램을 적용하여 구하며  $\vec{\delta}$ 로 표기한다) 되어, 날개 (A) +  $\vec{\delta}$ 로 변형됨을 보인다. 그림 1이 날개 특정 부위의 (x/R, z/R) 좌표만 보여주며 있지만, 코드방향의 형상의 변화를 충분히 보여주며, 날개의 변형이 거의 평행하게 나타나고 있음을 관찰할 수 있다. 이 관찰을 근거로 변형을 반대로 주어, 날개 (A) -  $\vec{\delta}$ 를 계산하여, 단면 (B)라고 부른다. 우리의 기대는 프로펠러가 실제 추진력을 낼 때 단면 (B)가 하중을 받아 단면 (A)로, 또는 단면 (A)와 유사하게 변형하여, 처음의 목표하중 상태와 비슷한 상태에서 유연 프로펠러가 작동할 것을 예상하는 것이다. 그림 1에서 3개의 곡선이 거의 평행하게 나타나므로, 날개의 변형을 피치, 레이크, 스큐의 변화로 표현할 수 있으리라고 예상할 수 있으며, 실제로도 기하학적인 형상의 변화가 상당히 빠르고, 안정적인 수렴성을 보인다. 또한 변형된 형상은 피치와 레이크가 감소하는 방향, 스큐가 증가하는 방향으로 변형됨을 그림들에서 확인할 수 있다.

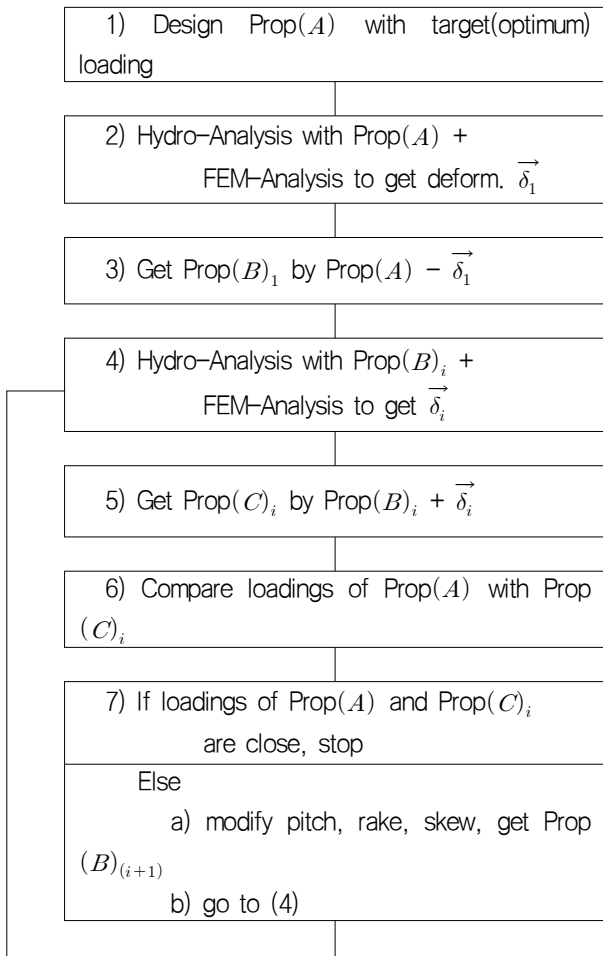


그림 2 유연 프로펠러 설계 알고리즘

그림 2는 상기 서술한 관찰을 근거로 도출한 유연 프로펠러의 설계 알고리즘을 나타내고 있다. 그림 2의 알고리즘을 적용하여 예제 설계를 수행한 일부 과정이 그림 3에 정리되어 있다. 3개의 선택된 반경에서 (x/R, z/R)의 관계만을 보이고 있으나, 설계 알고리즘의 개념에 대해서 잘 보여주고 있다. 그림 3에서 설계 추진력을 내는 운전 상태에서 목표하중을 보일 Prop(A) 날개의 단면을 목표하중형상(TL geom)으로 표기하고, 그림 1에서 설명하였던 - $\vec{\delta}$ 를 적용하여 구한 Prop(B)의 단면을 설계형상(undeformed design geom)으로 표기

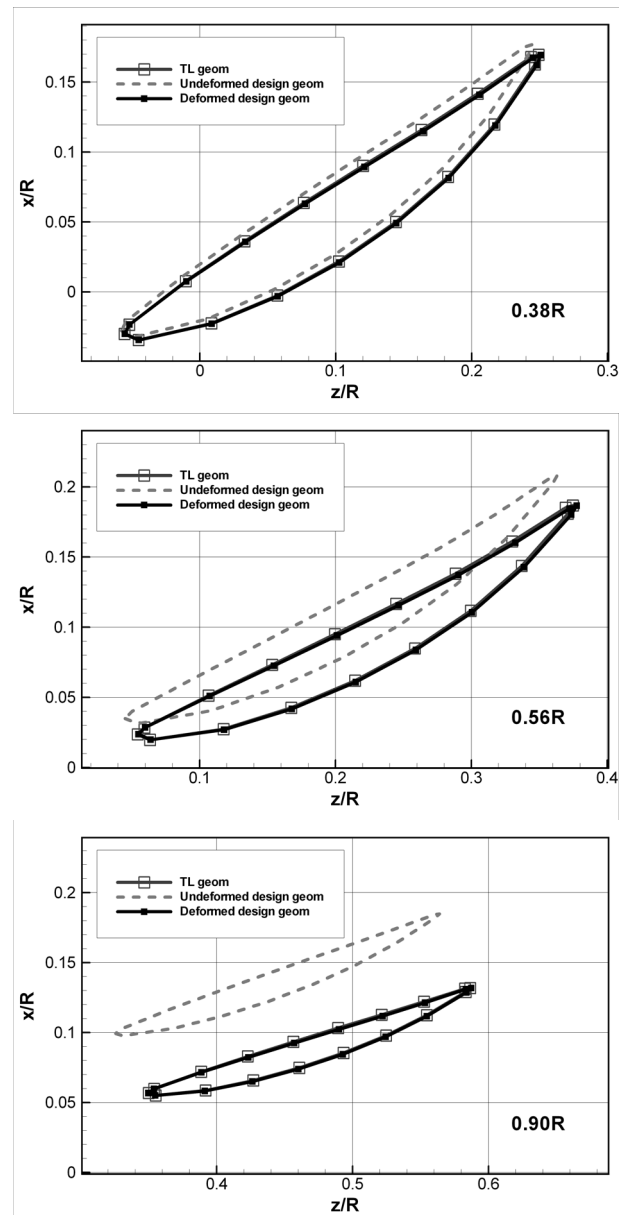


그림 3 목표하중 형상, 설계 형상, 설계형상의 변형 후 형상 비교

하였으며, Prop(B)가 정상추진 운전 중에 변형된 형상을 갖는 Prop(C)를 변형 후 형상(deformed design geom)으로 표기하여 보인다. 그림 3에서 설계 프로펠러 형상은 변형 후 목표하중 형상과 거의 일치하는 모습을 확인할 수 있다.

### 3. 설계 예제

본 연구의 검증을 위하여 목표하중을 갖는 프로펠러로 스쿠가 비교적 큰 KP069 프로펠러를 재고프로펠러로 선정하여 예제 계산을 수행하였다. 구조해석 수행에 사용된 재료의 Young's modulus는 10GPa로 설정하였다. 설계점은  $J=0.9$ , RPM=2000으로 단독상태에서 계산을 수행하였다. 해석 조건은 표 1과 같다.

표 1 설계 조건 및 재료 특성

TL Prop.	KP069
Diameter(mm)	250.0
$J$	0.90
$K_T$	0.20
RPM	2000
Young's Modulus(GPa)	10.0
Poisson ratio	0.17
Density(kg/m <sup>3</sup> )	2200.0

유연 프로펠러의 변형을 계산하기 위해 KPA4를 사용해 추정된 TL geom의 날개 표면에 작용하는 압력분포를 그림 4에 보인다. 여기서 추정된 압력분포와 함께 날개 형상 정보를 ProSTEC에 전달하면 FEM 해석에 의해 프로펠러 날개의 변형을 구하고 그림 5의 결과를 얻을 수 있다. 그림 5는 프로펠러 날개가 운전 중에 유체역학적 하중을 받아 변형된 모습을 3-차원 그림으로 축방향 변형량과 함께 보인 것이다. 허브에서 날개 끝까지의 여러 반경위치에서 날개 단면이 변화하는 전체적인 모습을 관찰할 수 있다.

다음으로 프로펠러의 기하학적 형상으로부터 날개의 가장 중요한 기하학적 매개변수인 피치, 레이크, 스쿠가 도출되고, 반복계산과정을 통해 수렴되어 가는 모습을 보이고자 한다. 그림 6~8에서 보는 바와 같이 피치, 레이크, 스쿠값의 반경 방향 분포가 목표하중(TL geom) 형상에 아주 빠르게 수렴하는 것을 볼 수 있다. 여기서 실선은 변형 전 형상, 파선은 변형 후 형상으로 최종 형상은 4회의 반복 계산으로 결정되었으며 허용치는 변형량의 0.1%로 하였다.

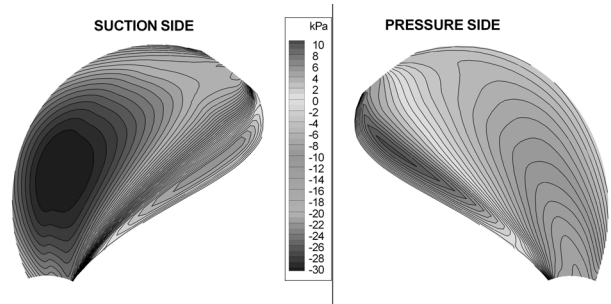


그림 4 프로펠러 표면 압력 분포의 추정 결과

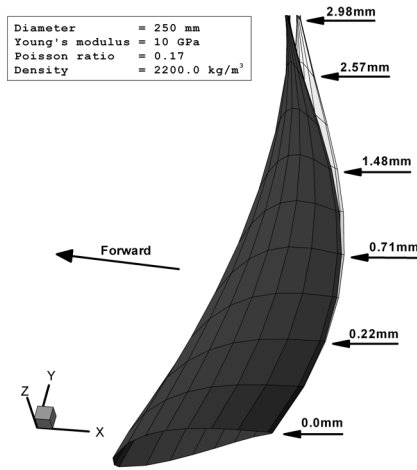


그림 5 설계된 제작 형상의 변형 전 후 변형 모습 및 축방향 변형량 비교(회색: 변형 전, 검정: 변형 후)

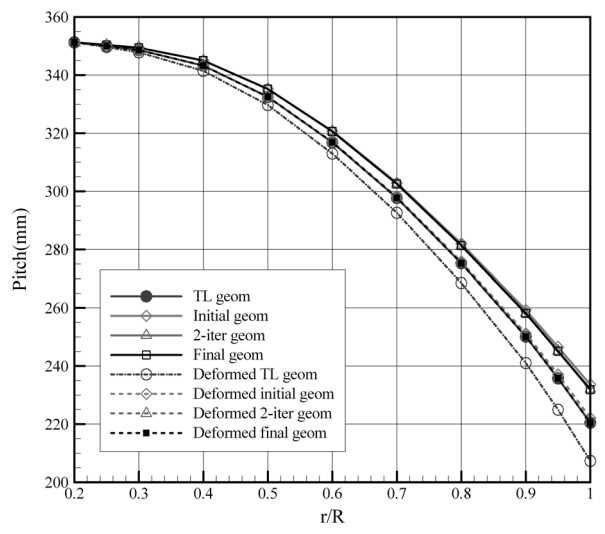


그림 6 각 반복 단계별 변형 전, 후 그리고 목표하중 형상의 반경별 피치 분포 비교

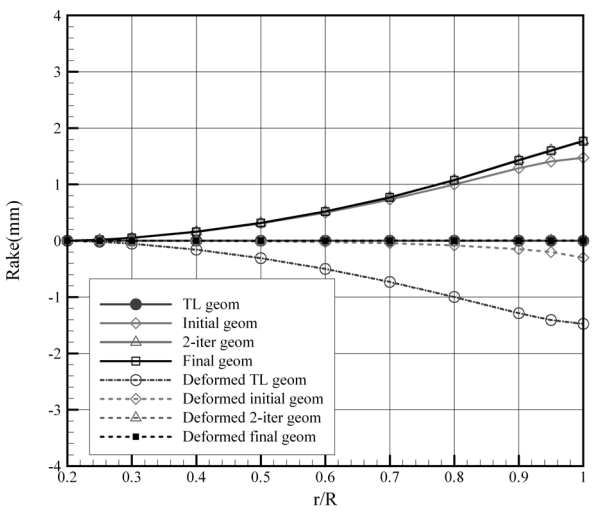


그림 7 각 반복 단계별 변형 전, 후 그리고 목표하중 형상의 반경별 레이크 분포 비교

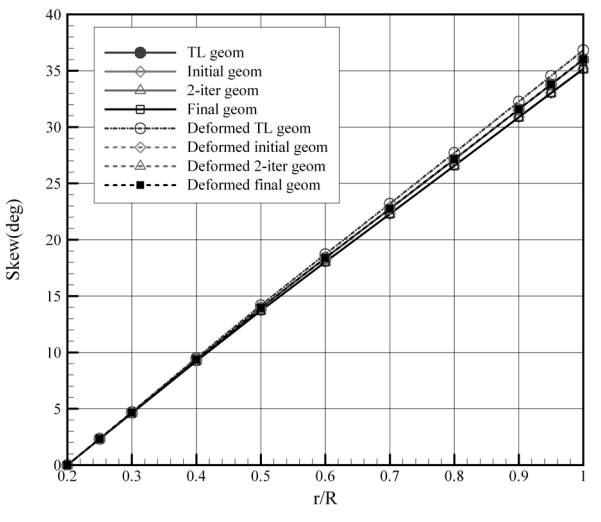


그림 8 각 반복 단계별 변형 전, 후 그리고 목표하중 형상의 반경별 스큐 분포 비교

그림 9는 최종 설계형상의 변형 전과 후 이에 대응되는 반경방향 순환의 분포를 보여준다. 여기에는 목표하중형상이 변형하였을 때와 변형하지 않았을 때의 순환의 값이 감소/증가하는 것을 함께 보였다. 그림으로부터 형상 변화에서 관찰했던 선형 거동(linear behavior)이 순환분포의 변화에도 그대로 나타남을 알 수 있다. 또한 기하학적 형상의 수렴에 따라 순환분포도 수렴한 것을 관찰할 수 있다. 즉 목표하중 형상과 설계형상의 변형 후 형상이 가지는 추진 성능이 일치함을 나타낸다. 본 예제 계산이 사용된 프로펠러의 스큐가 36도로 비

교적 큰 값임에도 불구하고 순환분포가 변화하는 거동이 선형적이라는 것은 유연 설계 이론이 기본적으로 선형성에 기반할 수 있음을 보이는 것이고, 따라서 선형 설계이론이 유용할 것이라는 것을 의미한다.

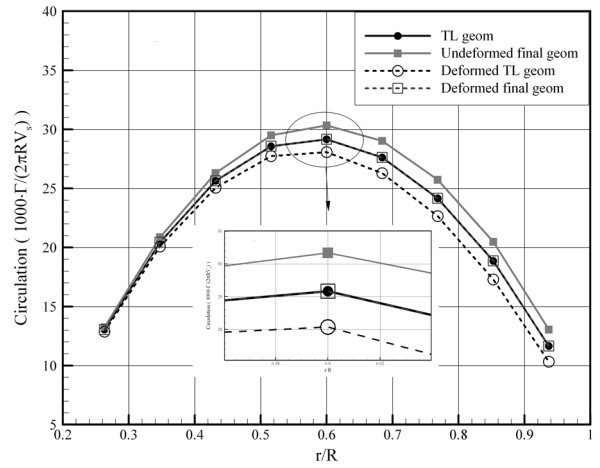


그림 9 목표하중 형상과 최종 설계(제작)형상의 변형 전, 후 반경별 순환 분포 비교

## 4. 결론

유연 프로펠러의 변형을 고려한 설계기법을 고안하고 이를 유체역학적 해석과 구조해석 프로그램을 활용하여 적용하였다. 전통적인 강체 프로펠러 설계이론을 사용해 프로펠러가 설치될 수중 운반체의 운항조건에 맞는 목표하중을 갖도록 프로펠러를 설계하고, 유연 프로펠러가 변형 후 목표하중을 갖도록 설계 형상을 찾아가는 절차를 완성하였다. 프로펠러의 설계 및 성능해석을 위해서는 양력면-이론에 기반하는 프로그램(KPA4)을 사용하였고, 날개의 변형을 추정하기 위해서는 유한요소-이론에 기반하는 프로그램(ProSTEC)을 사용하였다. 변형량이 비교적 커도 선형성에 기반한 현재의 설계 절차가 빠른 수렴성을 보이는 것을 확인하였고, 설계 절차가 안정적임을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국해양대학교 수중운동체특화센터 ‘탄성변형을 고려한 복합재 추진기 설계기법 연구’ 과제(SM-42)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- Kerwin, J.E. and Lee, C.S., 1978, Prediction of steady and unsteady marine propeller performance by numerical lifting surface theory, Transactions of The society of naval architects and marine engineers, Vol. 86, pp 218–258, 1978.
- Kim, J.H., Kim, S.K. and Lee, C.S., "Design of propeller blade shape by vortex distribution method," *Proc. of 6-th International symposium on practical design of ships and mobile units*, 17–22, Vol. 1, pp 207–218, 1995.
- Lee, C.S. Suh, J.C. Hyun, B.S. Kim, M.C. Suh, S.B. Moon, I.S., 2007, *Propeller Design*, Munundang.
- Lee, S.G. Byun, J.H. Paik, B.G. Hyun, B.S., 2009, Production & Performance Assessment of Composite Material Flexible Propeller, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), pp.667–674.
- Motley, M.R. and Young, Y.L., 2010, Performance-based design of adaptive composite marine propellers, 28-th Symp. on Naval Hydrodynamics, Pasadena, California, 12–17 Sept, 2010.
- Miller R. Kim, S.E. Rhee, B., Young, Y.L., 2012, Unsteady Fluid Structure Interaction Response of Marine Propellers in Crashback, 29<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics Gothenburg, Sweden, 26–31, August 2012.

- Nho, I.S. Lee, J.Y. Lee, H.Y. & Lee, C.S., 2004. A Dynamic Structural Analysis System for Propeller Blades. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(2), pp.114–120.



장 현 길

- 1980년생
- 2012년 충남대학교 공학박사
- 현 재 : 충남대학교 박사후연구원
- 관심분야 : 선박저항추진
- 연 락 처 : 042-821-7762
- E - mail : crasher@cnu.ac.kr



이 창 섭

- 1947년생
- 1977년 M.I.T. 공학박사
- 현 재 : 충남대학교 명예교수
- 관심분야 : 프로펠러/캐비테이션
- 연 락 처 : 042-821-7762
- E - mail : csleepro@cnu.ac.kr



노 인 식

- 1956년생
- 1992년 서울대학교 공학박사
- 현 재 : 충남대학교 교수
- 관심분야 : 대형구조물의 안전성평가, 비선형 구조해석
- 연 락 처 : 042-821-6622
- E - mail : isno@cnu.ac.kr

## 대한조선학회 추계학술대회

일 시 : 2012년 11월 15일(목) ~ 16일(금)

장 소 : 창원컨벤션센터

사전등록 : 2012년 10월 25일(목)까지