

원심펌프 최적설계를 위한 통합설계 시스템의 Agent 모듈 개발

최범석* · 김명배* · 이공훈*

Development of Agent Module of Integrated Design System for Centrifugal Pump Design Optimization

Bum Seog Choi*, Myung Bae KIM*, Kong Hoon Lee*

Key Words: Pump Design(펌프설계), Performance Analysis(성능해석), 최적화(optimization), Agent(에이전트), System Integration(시스템 통합)

ABSTRACT

A pump design system was constructed by several integrating in-house programs and commercial softwares to design and evaluate centrifugal pumps. An agent-based prototype framework has been developed for collaborative design and optimization of a centrifugal pump. This paper introduces the feasible technology needed to construct a pump design system based on software agents. The integrated design system, developed in the present study, was used in designing a centrifugal pump and modifying its impeller shape by using optimization processes to increase the pump performance.

1. 서 론

국내에서도 원심펌프의 설계 및 해석에 관한 많은 연구가 진행되어 국내 펌프 산업의 발전에 기여하여 왔다. 그러나 아직까지 중소기업의 펌프 생산업체에서는 체계적인 설계기술을 확보하지 못하고, 경험을 바탕으로 단순한 설계방식에 의해 설계된 펌프를 생산하고 있는 경우가 많다. 국내 전 산업현장에서 사용되고 있는 펌프의 수량과 사용시간을 생각하면, 이렇게 낮은 효율의 펌프 사용을 인해 낭비되는 에너지량은 쉽게 생각할 수 없는 규모일 것이다. 전산유동해석, 최적화 설계 등 최근의 첨단기술들을 융합하여 사용하여 효율이 높고 신뢰성이 좋은 펌프를 설계 할 수도 있으나, 국내의 중소기업 여건상, 고효율펌프 설계를 위한 소프트웨어, 설계DB 및 운용인력을 확보하기가 어렵다. 따라서 펌프 설계에 대한 기본적인 지식만 갖추고도 고효율 펌프를 설계할 수 있도록 하는 원심펌프 최적설계 시스템의 구축이 요구된다. 원심펌프 최적설계 시스템은 기본설계, 유동해석, 회전체해석, 최적화 등을 포함하고 각종 소프트웨어들을 단순 배열하는 것이 아니라 이들이 유기적으로 연결되어 펌프 최적설계의 임무를 수행할 수 있어야 한다.

최근 들어 IT기술과 설계/엔지니어링 기술의 접목을 통한 제품의 품질 향상, 생산성 증가, 설계 및 제조 공정의 최적화를 위한 새로운 패러다임으로 e-엔지니어링 기술이 주목받고 있다. e-엔지니어링 기술은 네트워크로 연결된 컴퓨터 hardware 및 software들로 구현되는 가상공간에서 모델링이나

시뮬레이션, 설계 등을 수행하고 여러 가지 프로세스를 통합하고 최적화하여 특정한 목표를 실현시킬 수 있는 엔지니어링 기술을 지칭한다.

미국의 "Integrated Manufacturing Technology Roadmapping Project : Modeling and Simulation"에서는 21세기 제조산업의 핵심기술로서 e-엔지니어링 기반의 모델링 및 시뮬레이션 기술의 중요성을 강조하고 있다. GM은 "Virtual Vehicle 개발" 프로젝트를 통하여 자동차의 설계, 제작, 시험 평가 및 판매에 이르는 전 과정을 가상공간에서 수행할 수 있는 기술을 개발하고 있다. 독일에서도 가상 시제 기술 및 시스템 개발 사업(Integrated Virtual Product Creation)을 수행하여 웹기반의 가상시제 도구를 제공하는 ASP(Application Service Providers) 시스템 개발을 완료하였다.

국내에서도 KIST 및 KAIST에서 가상 제조 기술을 중심으로 연구가 진행되고 있다. 한국전자통신연구원에서는 산업지원 가상실험 소프트웨어 개발, CALS 요소기술 개발 및 동시공학 기술 개발 과제를 통해 협업적 제품거래 기술에 대한 연구가 수행되었다. 또한 한국기계연구원에서는 캐나다의 NRC-IMTI(National Research Council of Canada - Integrated Manufacturing Technology Institute)와의 공동연구를 통하여 운송 시스템의 설계 및 최적화를 위한 software agent 기반의 e-engineering prototype framework에 관한 연구가 수행된 바가 있다.^[1]

본 연구에서는 원심펌프의 최적설계를 위해 자체개발된 소프트웨어와 상용 소프트웨어들의 통합환경을 구축하고, 원심펌프 설계, 성능평가 및 최적화에 적용하기 위한 요소기술 및 에이전트 모듈을 개발하고 있다.

* 한국기계연구원 에너지기계연구센터
E-mail : bschoi@kimm.re.kr

2. Agent 관련 기술 분석

2.1. Agent의 개념

오래 전부터 인공지능 분야에서 에이전트(agent)에 관한 연구가 진행되어 오기는 했지만, 에이전트가 많은 사람들의 관심을 집중시키면서 독립된 분야로 연구되기 시작한 것은 네트워크와 분산환경이 구축되기 시작한 1990년대 초반부터이다. 에이전트란 스스로 센서(sensor)를 통해 주위 환경을 인지(percept)하여 작용기(effectors)를 통해 환경에 대해 반응하는 시스템을 지칭한다. 에이전트를 명확하게 정의할 수는 없으나 에이전트는 다음과 같은 중요한 특징들을 가진다.

- 자율 : 특정 목적을 위해 적절한 작업을 수행하는 자율적 프로세스이다.
- 목표지향 : 어떤 목표가 달성되거나 실현 불가능할 때까지 그 목표에 대한 의무를 유지한다.
- 위임 : 한 에이전트가 다른 에이전트에게 권한이나 작업을 위임하거나 부과할 수 있다.
- 환경성 : 주어진 환경(computational and/or physical)에 속해있고, 환경을 인식하거나 상황에 반응할 수 있다.
- 협업 : 주어진 임무를 수행하기 위해 다른 에이전트와 협업한다.
- 통신 : 다른 에이전트와 통신을 한다.
- 적응 : 경험을 바탕으로 믿음이나 행위를 수정한다.

2.2. Agent Framework

현재 에이전트 개발 도구로는 FIPA(Foundation for Intelligent Physical Agent) 규격을 만족하고 있어 호환성과 확장성이 좋은 FIPA-OS와 JADE가 광범위하게 사용된다.

1996년에 설립된 에이전트 시스템에 대한 국제 표준화 단체인 FIPA에서는 멀티 에이전트 시스템간의 통신규약이나 시스템 구조를 정의하고 있으며 구현단계의 지침이나 제약조건은 없다. Agent Platform이 시스템의 기본 단위이며, Fig.1에는 FIPA의 Agent reference model을 표현하였다. 한 에이전트가 같은 platform 내의 다른 에이전트나 다른 platform에 있는 다른 에이전트와 협업을 하기 위해서는 최소한 하나의 platform에는 등록되어 있어야 한다. Agent platform은 Fig.1에 표시한 것처럼 agent간의 메시지(message) 전송과 통신을 지원하는 ACC(Agent Communication Channel)과 에이전트들이 제공하는 능력이나 서비스에 대한 정보를 다른 에이전트들에게 제공하는 DF(Directory Facilitator), 에이전트의 등록 및 제거 등의 전반적인 에이전트 관리를 담당하는 AMS(Agent Management System)을 구성요소로 가지고 있다.

JADE는 이탈리아 TILAB에서 개발되었다. JADE의 Agent platform은 main container에서 DF와 AMS를 가지며 main container에 등록된 독립적인 에이전트인 다른 platform을 관리할 수 있다. Fig. 2에는 multi agent 형태의 JADE agent platform 예를 보여준다. 에이전트들 사이에서는 ACL(Agent

Communication Language)를 사용해서 통신을 한다. FIPA-OS는 2002년 이후 지속적인 개발이 이루어지지 않은 반면, JADE는 지속적인 개발이 이루어지고 있으며 FIPA 표준과의 호환성도 뛰어나다.

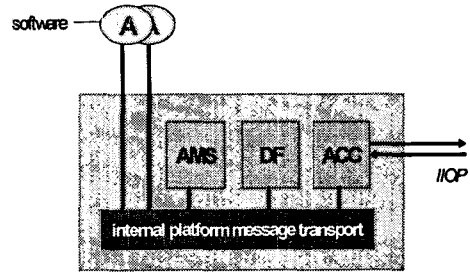


Fig. 1 FIPA Agent Platform

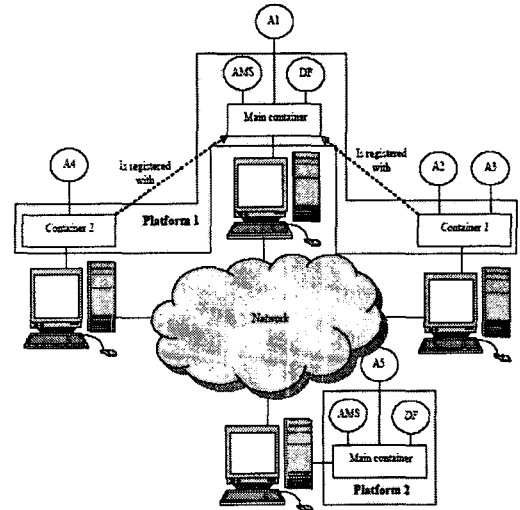


Fig. 2 JADE Multi-agent system

3. 펌프의 설계 및 성능평가 시스템의 모델링

3.1. 펌프 설계/해석 절차의 분석 및 구성

펌프의 설계 및 성능평가를 위한 에이전트 모듈 개발을 위해서는 펌프 설계/평가의 절차에 대한 분석이 필요하다. Fig. 3에는 서로 다른 종류의 소프트웨어들로 구성된 펌프 설계/해석 절차를 도식화하였다. 펌프의 설계/평가 절차는 다음과 같이 구성하였다.

1. 펌프 요구사항 결정
2. 1차원 성능해석 및 기본 형상 설계
3. 임펠러 블레이드 3차원 형상 설계
4. 펌프 내부 3차원 유동해석 및 수력성능 평가
5. 펌프형상 상세설계
6. 펌프형상 최적화

정확성이 보장되어야 한다. 본 연구에서 임펠러 유동의 3차원 해석을 위해서는 CFX-BladeGenPlus를 사용하였다.

3.1.4. 임펠러 형상 최적화

최적화의 알고리즘은 크게 수리적기법(numerical method)과 전역적 탐험기법(global exploratory method), 그리고 학습적기법(heuristic method) 등 세 가지로 분류할 수 있다. 수리적기법은 gradient-based hill climbing 기법으로 국부적 탐색에서 빠르고 효율적이다. 전역적 탐험기법은 국부적 최적점에서 벗어나지 못하는 것을 피하기 위한 전역적 탐색기법으로 genetic algorithm이나 simulated annealing 등이 이에 해당한다. 학습적기법은 지식기반의 전문가시스템을 이용한다.

원심펌프의 설계최적화를 위해, 본 연구에서는 두 가지 형태의 최적화 기법을 혼합 사용하였다. 즉, 최적화 초기계산에서는 먼저 전역적 탐험기법을 적용한 후 국부적인 탐색에 수리적기법을 사용해서 최적의 설계변수를 찾는데 있어서 안정성과 효율성을 도모하였다. 설계변수들을 변화시켜가면서 반복되는 계산과정을 거쳐서 제한조건을 만족하는 목적함수에 대한 향상된 값들을 허용된 수렴범위 내에서 결정한다.

본 연구에서 최적화 문제의 목적함수는 펌프효율을 최대화하는 방향으로 최적화 과정을 수행한다. 임펠러 날개각 최적화를 위해서 상용 소프트웨어인 iSIGHT를 사용하였다.

3.2. 원심펌프의 설계 시스템의 구현

3.2.1. PSWrapper의 개요

공학계산에 이용되는 공학 소프트웨어를 에이전트 시스템과 연결하기 위해서는 소프트웨어 래핑(software wrapping) 기법이 필요로 한다. 소프트웨어 래핑은 다음과 같이 정의될 수 있다. 소프트웨어 래핑은 프로세서 인터그레이션의 한 방법이며, 프로세서 인터그레이션을 위한 블록재(building block)와 같이 사용된다.

Wrapping을 제공하는 소프트웨어 모듈을 Wrapper라 부르며 다음과 같이 정의될 수 있다. Wrapper는 어떤 응용 소프트웨어가 다른 응용 소프트웨어에 연결될 수 있도록 입/출력 데이터를 표준화된 형태로 바꾸어주는 소프트웨어 인터페이스이다.

3.2.2. FIPA 표준안에서의 Software Integration

FIPA 표준 Spec. 79 FIPA Agent Software Integration Specification 내용으로 멀티에이전트 시스템에서 에이전트가 아닌 소프트웨어와의 통합방법을 다루고 있다. 에이전트 시스템이 아닌 소프트웨어를 FIPA 호환 에이전트 시스템에서 사용하고자 할 때에는, 해당 소프트웨어에 대한 정보, 서비스 정보를 ARB(Agent Resource Broker) 에이전트에 등록하고 소프트웨어를 사용할 Client Agent는 ARB를 통하여 해당 소프트웨어와의 연동을 제공하는 Wrapper Agent를 찾아서 해당 소프트웨어를 이용할 수 있다.

3.2.3. PSWrapper의 설계

본 연구에서는 자바 기반의 래핑 프로그램(PSWrapper)를 개발하였다. Fig. 4는 PSWrapper의 개념도이며, PSWrapper는 공학 소프트웨어를 실행하고 실행상태를 모니터링하여 PS(Problem Solver) 에이전트가 공학 소프트웨어를 연동시키는 방법을 제공한다. PSWrapper는 PSAgent와 공학 소프트웨어 사이의 일종의 게이트웨이라 할 수 있다.

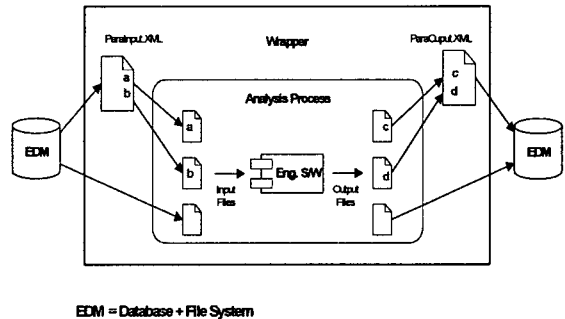


Fig. 4 Concept of PSWrapper

3.2.4. 각 해석 Agent의 기능

Engineering Server Agent 와 각종 해석 Agent (기본설계, 블레이드 3차원 형상설계, 전산유동해석, 구조해석, 회전체해석)로 구성된다.

- (1) 다양한 resource를 효과적으로 활용하는 제어 기능을 가진다.
- (2) 필요한 경우 각각의 업무를 구분하여 sub 개념의 task 수행 module을 가진다. 이 경우 sub task 수행 모듈의 기능은 단순 process로 국한한다.
- (3) 각종 parametric study 결과를 저장하는 DB 기능
- (4) DB에 저장된 결과를 주어진 rule 혹은 process에 따라 결과를 판단하는 기능을 가진다.
- (5) 현재 작업 중인 Engineering Server Agent로부터 특정의 명령이 주어지면 이를 고려할 수 있어야 한다.

3.2.5. Engineering Server Agent의 기능

- (1) 각 해석 agent에서 필요로 하는 data (이 data는 User로부터 혹은 다른 해석 agent로부터 생성)를 증계하는 기능을 가진다.
- (2) 특정 해석 agent로부터 전체 설계과정에 반드시 고려되어야 하는 제약조건이 발생하는 경우, 이를 관련 agent에 통보하는 기능을 갖는다.
- (3) 전체 과정에서 업무 조절이 필요로 하면 이와 관련한 해석 agent의 작업을 통제하고 새로이 지시한다.
- (4) 해석 agent의 작업지시는 여러 가지 상황에 따라 달리 수행되어 질 수 있다.(유연 시스템) 즉, User 혹은 DB 상의 정보 확보 수준에 맞추어 업무진행이 가능하여야 한다.

- (5) ES Agent는 기본적으로 User Interface와 DB 그리고 각 해석 Agent 간을 중계한다.

4. 펌프의 설계 결과

4.1. 초기 설계안에 대한 분석

본 연구에서 구축된 원심펌프의 통합설계 시스템을 이용하여 펌프사양을 정하고, 성능조건을 만족시키는 펌프의 일차적인 형상을 도출하였다.

먼저, 펌프에 사용되는 작동유체의 물성치를 정하고, 요구되는 유량, 회전수, 전양정 등을 결정하면, 수력학적 관점에서 최고효율을 갖는 펌프의 기본형상을 결정하게 된다.

Table 1에는 본 연구에서 선택한 설계사양과 평균유선해석법을 이용한 기본공력설계 과정을 통해 도출된 설계자료들을 정리하였다. 기본설계단계에서 설계된 형상치수를 사용해서 3차원 블레이드를 상세설계하였고, 이것을 초기 설계안으로 하여, 3차원 유동해석을 통하여 성능을 평가하고, 다음 절의 최적화 과정을 거친 후의 결과와 비교하였다. Fig. 5는 설계된 원심임펠러의 3차원 형상을 보여준다.

Fig. 6과 7은 B-B면(blade-to-blade plane)과 자오면에서의 압력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 펌프 내의 정압 분포가 반경에 따라 거의 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 평균화된 압력을 입구에서 출구까지 유선방향으로 표시한 것으로, 임펠러 영역에서는 압력이 선형적으로 증가되고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 임펠러 블레이드에서 나타나는 블레이드 하중을 나타낸 것이다. 블레이드의 압력면과 흡입면 사이의 정압차이인 블레이드 하중이 클수록 임펠러가 유체에 가한 에너지는 커지게 되지만, 펌프에서의 같이 심한 역압력 구배가 존재하는 경우에는 블레이드 하중이 지나치게 크면 경계층 박리 및 흐름 역류 현상으로 인해 심각한 성능 저하를 초래할 수도 있다. 따라서 적절한 블레이드 하중을 가지도록 임펠러를 설계해야 한다. Fig. 9에서 설계된 펌프의 블레이드 압력면과 흡입면에서의 정압분포는 정성적으로 만족스러운 결과를 보여주고 있다.

Table 1 Required design specifications and designed data for centrifugal pump

항목	사양
유량	12.5 m ³ /min
전양정	52.84 m
회전수	1250 rpm
임펠러 입구 허브 직경	45.0 mm
임펠러 입구 팁 직경	114.0 mm
임펠러 출구 직경	252.8 mm
임펠러 출구 폭	45.8 mm
임펠러 팁 간극	0.35 mm
벌류트 기초원 직경	606.8 mm
임펠러 날개수	5

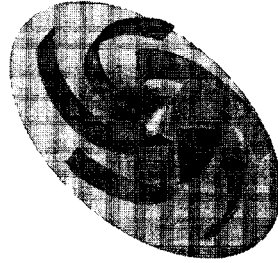


Fig. 5 Three dimensional impeller shape

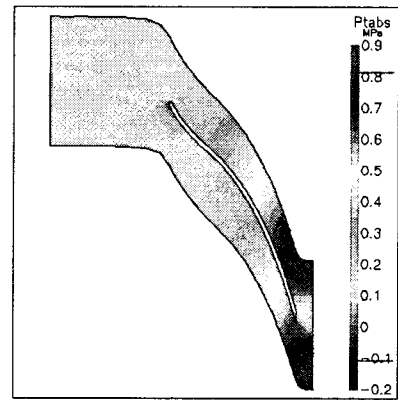


Fig. 6 Total pressure distribution on B-B plane at 50% span

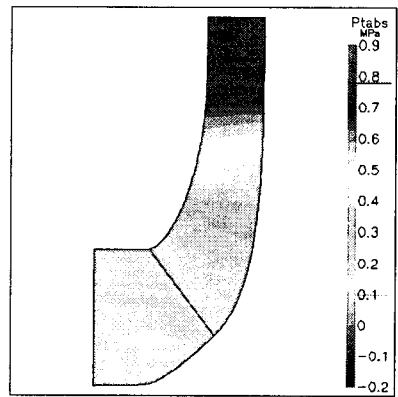


Fig. 7 Total pressure distribution on meridional plan

4.2. 임펠러 블레이드각 최적화

4.1절의 펌프 초기 설계안을 바탕으로 펌프 임펠러의 입출구 날개각에 대한 최적화를 수행하였다. 최적화 과정은 블레이드각을 변화시켜 새로운 임펠러의 3차원 형상을 생성시키고 변경된 임펠러 형상에 대한 3차원 유동해석을 수행하여 임펠러의 효율을 최대화 하는 최적화 과정을 수행하였다. 본 연구에서는 최적 설계점을 효율적으로 찾기 위해서 전역적 탐색기

법과 국부적 수치기법을 동시에 사용하였다. 사용된 최적화 기법으로는, 초기 계산에서는 국부적인 최적점에 갇히는 것을 방지하기 위해 전역적 탐색기법인 Adaptive simulated Annealing 기법을 사용하였고, 두 번째 단계에서는 국부적인 탐색에 빠르고 효율적인 직접수치기법인 Modified method of feasible directions 기법을 사용하였다. Table 2에는 초기 설계안과 최적화 후의 입출구 블레이드각과 펌프성능을 비교하였다. 임펠러 날개각의 최적화로 임펠러효율은 1.5% 증가하였고, 펌프효율은 1.1% 증가하는 것으로 나타났다.

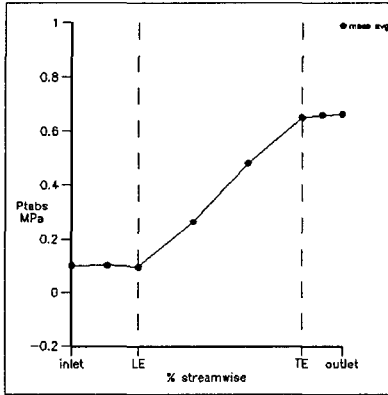


Fig. 8 Total pressure variation in streamwise direction

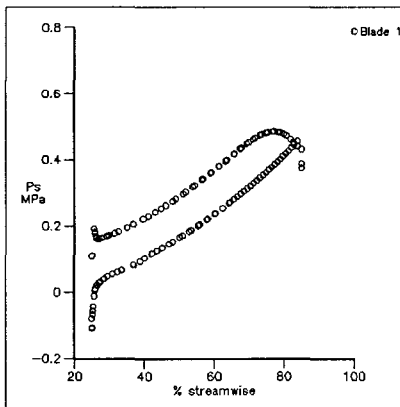


Fig. 9 Surface pressure distribution at 50% span

4. 요약

본 연구에서는 펌프설계에 사용되는 각종 in-house 프로그램과 상용 소프트웨어들을 유기적으로 연결하여 원심펌프 통합설계 시스템을 구축하였다. 설계 시스템은 e-engineering 기술을 기반으로 네트워크로 연결된 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어들을 통합하여 모델링이나 시뮬레이션, 설계 등을 협업하고, 여러 프로세스들을 통합하여 최적화함으로써 특정한 목표를 구현한다. 원심펌프

설계, 해석 및 최적화를 위한 에이전트 기반의 prototype framework을 개발하였다. 또한 본 연구에서는 구현된 펌프 통합설계 시스템을 이용해서, 선택된 사양의 원심펌프를 설계하였고, 임펠러 날개각의 최적화를 통해 펌프의 성능을 향상시킬 수 있었다.

Table 2 임펠러 날개각 최적화 전후의 성능비교

Item	Initial design	Final design
Inlet hub blade angle [deg]	36.38	20.82
Inlet shroud blade angle [deg]	22.21	11.14
Exit blade angle [deg]	17.00	13.41
Headrise [m]	57.37	55.87
Impeller efficiency [%]	94.58	96.04
Pump efficiency [%]	87.10	88.19

참고문헌

- (1) 박성환 외 3인, "Agent 기반 협업 e-Engineering 환경 개발: 윤축 시스템의 설계 및 최적화," KIMM 자체사업보고서, 2004.
- (2) O. E. Balje, "A contribution to the problem of designing radial turbomachines," *Trans ASME*, Vol. 74, pp. 451-471, 1952.
- (3) J. E. Coppage, F. Dallenbach, H. P. Eichenberger, G. E. Hlavaka, E. M. Knoernschild, and N. Van Lee, "Study of supersonic radial compressors for refrigeration and pressurization systems," *WADC report 55-257*, 1956.
- (4) W. Jansen, "A method for calculating the flow in a centrifugal compressor impeller when entropy gradients are present," *Royal Society Conference on Internal Aerodynamics (Turbomachinery)*, IME, pp. 133-146, 1967.
- (5) J. D. Denton and N. A. Cumpsty, "Loss mechanisms in turbomachines," *Proceedings IME Conference on Turbomachinery Efficiency Prediction and Improvement, Paper C260/87*, 1987.