

풍력발전기 하중 측정을 위한 해석 프로그램의 개발

길 계환¹⁾, 전 형원²⁾, 윤 영덕³⁾, 김 희섭⁴⁾, 정 진화⁵⁾, 한 경섭⁶⁾

Development of the Analysis Program for the Load Measurement of Wind Turbines

Kyehwan Gil, Hyungwon Jun, Youngduck Yun, Heeseob Kim, Chinwha Chung, Kyungseop Han

Key words : Demonstration research(실증연구), Load measurement(하중 측정), Equivalent load(등가 하중), Analysis program(해석 프로그램)

Abstract : 포항공과대학교의 포항풍력에너지연구센터(PoWER Center)가 개발에 참여했던 750 kW급 직접구동형 국산화 풍력발전 시스템(KBP-750D)은 그 개발이 완료 단계에 이르러 설치를 준비하고 있으며 현재는 KBP-750D의 상용화를 추진하기 위한 출력성능 및 하중 측정을 통한 실증연구가 진행되고 있다. IEC 61400-13의 규격을 기준으로 수행되는 하중 측정은 수개월간 지속되는 측정을 통한 방대한 하중 데이터 수집 과정과 데이터 검증, 데이터 분류, 시계열 해석, 하중 통계 해석, 주파수 분석, 하중 스펙트럼 해석과 등가하중 해석의 측정 데이터 처리 과정으로 구성된다. 본 연구에서는 하중 측정 데이터를 처리·해석함에 있어서 성력화를 도모하고 정확하면서도 객관적인 성능평가 자료를 확보하기 위하여, 하중 측정에 대한 전용 해석 프로그램의 개발을 추진하였다. 본 논문에서는 하중 측정 데이터에 대한 처리 및 해석 과정을 소개하고 해석 프로그램의 개발 과정 및 수행 결과를 보고한다.

Nomenclature

R : load in the fatigue load spectrum
 n : number of cycles in the fatigue load spectrum
 m : S-N-curve slope for the relevant material

subscript

eq : equivalent
 i : i -th class

1. 서론

풍력발전기의 인증 절차에 있어서 하중 측정은 출력성능 측정과 함께 반드시 수행되어야 하는 시험 항목이다. 하중 측정은 IEC 61400-13의 규격을 기준으로 수행되는데 수개월 간 지속되는 측정을 통하여 수백 GB의 측정 데이터를 수집하게 되며, 그 데이터 처리 및 해석 과정도 측정 데이터의 양과 함께 방대한 작업을 요구한다.

본 연구에서는 하중 측정 데이터의 처리 및 해석 작업에 대한 준비의 일환으로 하중 측정 전용 해석 프로그램을 개발하였다. 본 논문에서는 개발된 해석 프로그램을 중심으로 하중 측정 데이터에 대한 처리

및 해석 과정을 소개하고 해석 프로그램의 수행 과정 및 결과를 보고한다.

2. 프로그래밍 일반

2.1 측정 물리량

하중 측정에서 측정할 물리량은 하중 관련 물리량(블레이드 하중, 로터 하중, 타워 하중 등), 기상 관련 물리량(풍속 및 풍향, 기온, 기압 등) 그리고 작동 관련 물리량(전력, 회전 속도, 피치 각도, 편각 위치, 방위각 등)으로 구성되는데 본 연구에서는 IEC 61400-13의 규격에서 의무 사항과 선택 사항으로 규정하는 모든 측정 대상 물리량을 포괄하는 총 40 채널의 물리량을 측정하고 해당 데이터 파일에 기록하는 것으로 가정한다.

★

2.2 데이터 수집

- 1) 포항공과대학교 / PoWER Center
E-mail : khgil@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1366 Fax : (054)279-1799
- 2) E-mail : jhw1222@postech.ac.kr
- 3) E-mail : yyd@postech.ac.kr
- 4) E-mail : jaeoh@postech.ac.kr
- 5) E-mail : cwchung@postech.ac.kr
- 6) E-mail : kshan@postech.ac.kr

본 연구에서는 40 채널의 정해진 단위로 보정된 신호를 100 Hz의 표본 추출률로 10 분 데이터로서 수집하고 txt 형식으로 데이터 파일을 저장하는 것으로 계획한다.

데이터 파일의 이름은 측정일자와 측정일자에 측정된 10 분 데이터의 일련번호로 구성함으로써 해석 프로그램에서 인식 및 분류가 용이하도록 하였다. 예를 들면, 2005년 10월 31일에 일곱 번째로 측정된 데이터 파일의 이름은 P20051031 #007.txt가 되도록 하였다. 한편, 데이터 파일과 독립적으로, 데이터 파일에 저장된 데이터의 이력 등을 기술하는 헤더 파일을 생성하게 되며 그 이름은 해당 데이터 파일의 이름 선두에 "H"를 첨자하여 구성하였다.

디지털 신호는 데이터의 검증과 분류 단계에서 유용하게 사용될 수 있다. 본 연구에서 사용되는 디지털 신호의 정의는 표 1과 같다.

Table 1 디지털 신호의 정의

신호 명	값이 1인 상태	값이 0인 상태
Rain	강수가 없을 경우	강수가 있는 경우
Status "error"	DAQ 정상 상태	DAQ 비정상 상태
Status "wind turbine"	풍력발전기 정상 상태	풍력발전기 비정상 상태
Status "grid connection"	계통 연결 상태	계통 단락 상태
Status "brake"	브레이크 비작동 상태	작동 상태

2.3 캡처 매트릭스

캡처 매트릭스는 측정된 시계열 데이터를 정리하기 위해 사용되는데 측정 데이터베이스의 수집조건 충족 여부를 판단할 수 있게 해준다.

하중 측정에서 측정하여야 할 측정 하중유형 (Measurement Load Cases)은 정상상태 작동시의 세 개의 하중유형과 과도 사건 작동시의 여섯 개의 하중유형으로 분류된다. 각 하중유형에 대해 캡처 매트릭스가 정의되는데 "정상적인 전력 생산"에 대한 캡처 매트릭스만이 풍속 및 난류 강도에 대하여 측정 데이터를 분류하게 하고, 피로 해석을 수행하기 위한 최소 데이터 수집조건이 부가되므로 본 연구에서는 "정상적인 전력 생산"의 하중유형에 대한 캡처 매트릭스만을 취급하기로 한다.

2.4 해석 프로그램의 구성

측정된 하중 측정의 데이터에 대해서는 데이터 검증을 거친 후에 측정 하중유형에 따라 분류하고 시계열 해석, 통계 해석, rainflow counting에 기초한 피로하중 스펙트럼의 산출과 등가하중의 추정을 수행하여야 한다. 이를 위하여 Matlab을 이용하여 개발된 해석 프로그램은 다음의 부 프로그램으로 구성되어 있다.

- 데이터 파일 생성 프로그램 (LM_sampledata.m)
- 데이터 파일 검증 프로그램 (LM_validation.m)
- 데이터 파일 검사 프로그램 (LM_inspection.m)
- 데이터 파일 분류 프로그램 (LM_grouping.m)
- 과도 사건 분류 프로그램 (LM_classification.m)
- 시계열 해석 프로그램 (TS_analysis.m)
- 통계 해석 및 피로 해석 프로그램 (SF_analysis.m)

본 연구에서 나타나는, 해석 프로그램의 모든 수행 결과는 데이터 파일 생성 프로그램에 의해서 생

성된 데이터 파일을 입력 데이터로서 사용한 것이다.

3. 측정 데이터 처리

3.1 데이터 검증

측정 오류에 기인한 측정 데이터를 해석 대상으로부터 배제시키기 위하여 측정된 물리량의 유효성을 확인하여야 한다. 유효성이 확인된 측정 데이터에 대해서만 해석을 진행시켜야 한다.

측정된 데이터 파일과 해당 헤더 파일은 데이터 검증 초기에는 <measurement> 디렉토리에 보관하게 된다. 이 데이터 파일과 해당 헤더 파일은 데이터 검증과 데이터 분류 단계를 거치면서 <measurement> 디렉토리의 각 부 디렉토리로 분류되게 된다. 그림 1에 <measurement> 디렉토리의 하부 구조가 나타나 있다.

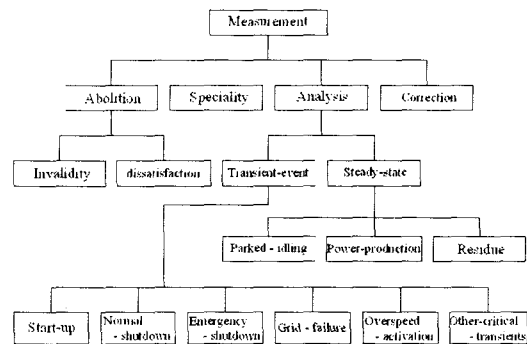


Fig. 1 <측정> 디렉토리의 하부 구조

표 2의 점검 사항 중 1.1, 1.2, 1.3과 3.1은 프로그램에 의해서 데이터 파일의 데이터를 점검하여 관련 디렉토리로 데이터 파일과 헤더 파일을 분류하도록 프로그래밍 하였으나, (LM_validation.m) 표 2의 나머지 사항에 대한 점검은 그 분류 기준을 수학적으로 구현하기가 난해하므로, 데이터 파일의 각 채널 데이터를 시계열 그래프로 출력한 후 해석자의 육안 판단에 근거하여 그 데이터 파일을 관련 디렉토리로 이동시키도록 프로그래밍 하였다. (LM_inspection.m) 그림 2는 각 채널 데이터의 시계열을 보여주고 있다. 이동시켜야 할 원인에 따라 데이터 파일을 <abolition#invalidity>, <abolition#dissatisfaction>, <correction> 그리고 <speciality> 디렉토리로 이동시키며 육안 판단의 순서는 <invalidity>, <dissatisfaction>, <correction> 그리고 <speciality>의 순으로 진행시킨다.

3.2 데이터 분류

검증 과정을 거친 후 <measurement> 디렉토리에 남아 있는 데이터 파일에 대하여 데이터 분류를 수행한다. (LM_grouping.m)

status "error", status "wind turbine", status "grid connection" 그리고 status "brake"의 각 신호가 데이터 파일의 측정 시간 내에서 항상 일정하면 <analysis> 디렉토리의 하부 디렉토리인 <steady-state> 디렉토리로 이동시킨다. 만일 상기의 신호

Table 2 데이터 검증 시의 점검 사항

No.	점검 사항	이동 디렉토리	헤더 파일 기록 문구	점검 형식
데이터 유효성 점검				
1.1	DAQ 상태	<abolition#invalidity>	"DAQ error"	P
1.2	풍력발전기 작동 상태	<abolition#invalidity>	"unavailable wind turbine"	P
1.3	장애물로 인한 무효한 측정 결과 파악	<abolition#invalidity>	"impossible region to measure"	P
1.4	비교 가능한 물리량 간의 비현실적인 격차	<abolition#invalidity>	"unrealistic differences between comparable quantities"	M
센서보정, 센서 작동범위 및 잡음과 관련된 기준				
2.1	보정 결과 점검	<abolition#dissatisfaction>	"absence of calibration process"	M
2.2	센서 보정 상수 적용 오류	<correction>	"erroneous application of sensor calibration constants"	M
2.3	작동 한계를 벗어나는 측정 결과	<abolition#dissatisfaction>	"excess of operational limits"	M
2.4	잡음 유무 파악	<correction>	"presence of noise"	M
2.5	편차	<correction>	"presence of drift"	M
특수한 대기 조건에서의 측정				
3.1	강수 시의 측정 자료	<speciality>	"data in precipitation"	P

status "error", status "wind turbine", status "grid connection" 그리고 status "brake"의 각 신호 값이 (1,x,0,x)이면 해당 헤더 파일과 함께 <analysis# steady-state#parked-idling> 디렉토리로 이동시킨다.

<analysis#steady-state> 디렉토리의 파일 중에서 <analysis#steady-state#power-production> 디렉토리와 <analysis#steady-state#parked-idling> 디렉토리에 포함 되지 않는 데이터 파일들은 해당 헤더 파일과 함께 <analysis# steady-state#residue> 디렉토리로 이동시킨다.

<analysis#transient-event> 디렉토리의 파일에 대해서는 각 채널 데이터를 시계열을 그래프로 출력한 후 육안 검사를 실시하여 다음 여섯 개의 디렉토리로 분류한다. (LM_classification.m)

- <analysis#transient-event#start-up>
- <analysis#transient-event#normal-shutdown>
- <analysis#transient-event#emergency-shutdown>
- <analysis#transient-event#grid-failure>
- <analysis#transient-event#overspeed-activation>
- <analysis#transient-event#other-critical-transients>

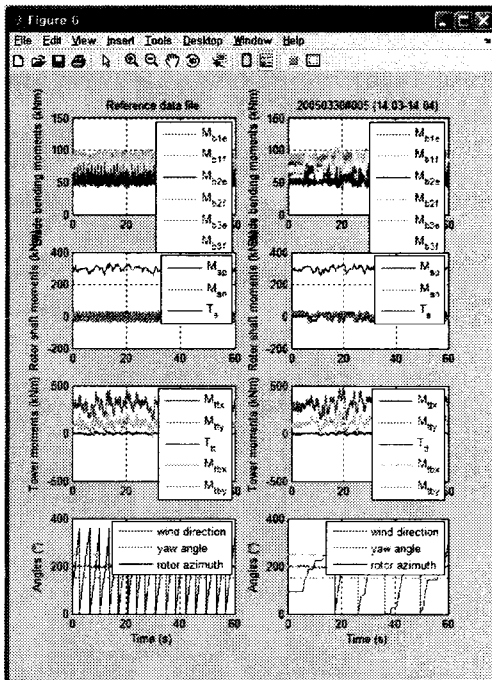


Fig. 2 데이터 파일 각 채널의 시계열

중 하나라도 일정 하지 않은 신호가 존재하는 데이터 파일은 해당 헤더 파일과 함께 <analysis#transient-event>로 이동시킨다.

<analysis#steady-state> 디렉토리의 데이터 파일 중에서 status "error", status "wind turbine", status "grid connection" 그리고 status "brake"의 각 신호 값이 (1,1,1,1)이면 해당 헤더 파일과 함께 <analysis# steady-state

#power-production> 디렉토리로 이동시킨다. 또한, <analysis# steady-state> 디렉토리의 파일 중에서

3.3 데이터 교정

데이터 분류가 끝난 <analysis#steady-state#power-production> 디렉토리에 있는 시계열 데이터에 대해서 데이터 교정을 수행한다.

풍속의 교정은 부지보정 작업에서 조사된 유동 왜곡 교정계수를 풍향에 따라 해당 풍속에 곱함으로써 수행한다. 기압 센서가 허브 높이로부터 10 m 이상 아래에 설치되어 있으면 측정된 기압은 ISO 2533에 따라 허브 높이로 교정되어야 하고, 10분 평균 공기 밀도는 10 분 평균 기압과 10 분 평균 기온을 이용하여 계산한다.

4. 측정 데이터 해석

데이터 교정이 끝난 <analysis\steady-state\power-production> 디렉토리에 있는 시계열 데이터에 대해서 캡처 매트릭스 프로그램을 수행하여 최소 데이터 수집 조건을 만족하는지 점검하고 그 결과를 그림 3과 같이 출력한다.

풍속이 느리게 변화할 경우에는 실제보다 높은 난류 강도가 피상적으로 계산되므로, 풍속 데이터에 대해서는 고역 필터링(High-Pass Filtering)을 수행한 후 표준편차를 계산하고 이를 평균풍속으로 나눠 난류 강도를 계산한다.³⁾

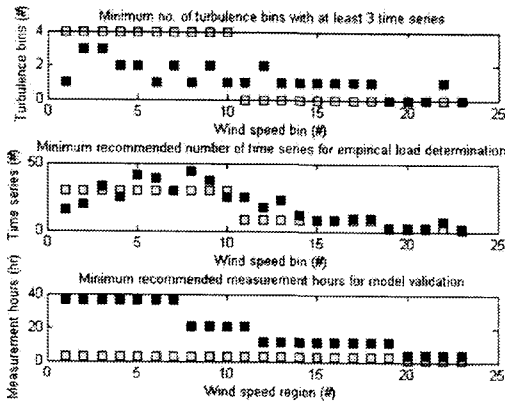


Fig. 3 최소 데이터 수집조건

4.1 시계열 해석

측정 및 계산된 하중 시계열은 우선 그래프로 출력하여 보고하여야 한다. 그래프로 출력된 하중 시계열은 신호 검증의 점검, 보정 그리고 정상 조건 및 과도 사건 하에서 풍력발전기가 갖는 동적 하중의 특성 파악 등을 위해서 사용될 수 있다.¹⁾

시계열 해석에서는 선택된 특정한 데이터 파일의 시계열에 대해서 출력을 수행하는데 크게 시계열 제시 출력, 블레이드와 샤프트 하중의 방위각에 따른 변화의 출력 그리고 측정 하중 데이터의 파워 밀도 스펙트럼의 산출을 수행한다. (TS_analysis.m)

그림 4 - 6에 해석 프로그램에 의해서 계산·작성된 대표적인 시계열 제시출력, 방위각에 따른 블레이드 하중의 변화 출력 그리고 하중의 파워 밀도 스펙트럼이 나타나 있다.

4.2 통계 해석

평균값, 최대값, 최소값 및 표준편차 등을 포함하는 통계 결과는 바람 유입 특성 파악, 정상 조건 하에서 풍력발전기의 정적 하중 및 동적 하중 특성 파악, 신호 검증의 점검 그리고 측정 업무 보고를 위해서 사용될 수 있다.³⁾

대표적인 통계 해석은 기상 관련 물리량 통계, 풍력발전기 작동 관련 물리량 통계 그리고 기계 하중 통계에 대한 출력으로 구성된다. 그림 7은 작성된 해석 프로그램에 의해서 계산된, 평균 풍속에 대한 로터 하중의 평균, 최소, 최대 및 표준편차를 보여주고 있다. (SF_analysis.m)

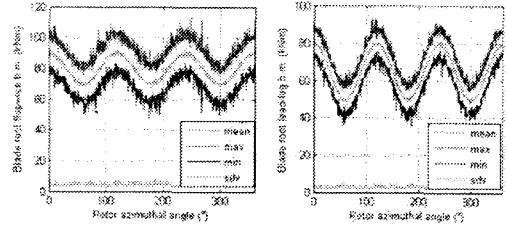


Fig. 5 방위각에 따른 블레이드 하중의 변화

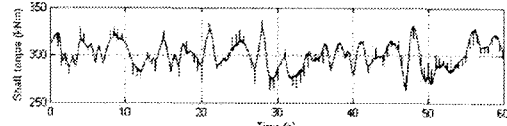


Fig. 4 로터 샤프트의 하중 시계열

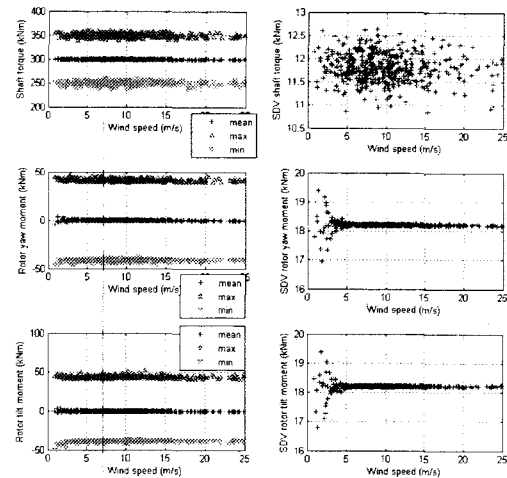


Fig. 7 로터 샤프트 하중의 통계 해석

4.3 피로 해석

4.3.1 하중 스펙트럼

측정한 각 하중 시계열로부터 피로 하중 스펙트럼을 계산하기 위하여 rainflow counting 과정을 전처리, 사이클 계수 그리고 후처리 과정으로 나누어 프로그래밍 하였다.

1) 전처리

전처리 과정에서는 각 국부적 극치를 둘러싸는 세 데이터 점들을 포물선으로 근사하여 실제의 극치를 추출함으로써 하중 시계열 데이터를 국부적인 정점과 골의 단순한 배열로 변환시킨다.

극치 배열에 있는 수치적인 떨림으로부터 도출되는 많은 작은 사이클의 계수를 피하고 중요하게 풍력발전기의 손상을 야기하지 않는 많은 작은 사이클을 제거하기 위하여, 범위 필터를 사용한다. 이 필터는 연속하는 국부 극치들이 정해진 최소치 이상 차이 나지 않으면 현재의 극치 배열로부터 제거한다. 본 연구에서는 하중 범위 분할 간격의 반을 최소치로 잡았다.

2) 사이클 계수

본 연구에서는 ASTM 표준의 rainflow counting 알고리즘을 사용하였다.¹⁾ rainflow counting 과정이 시계열 데이터 기록의 끝에 이를 때, 대응되지 않은 일련의 정점과 골이 “절반 사이클”로서 잔류할 수 있다. 본 연구에서는 IEC 표준의 추천에 따라 모든 폐쇄되지 않은 사이클을 절반 사이클로 취급하여 계수

한다. 1)

3) 후처리

범위 스펙트럼과 범위 및 평균 스펙트럼으로 피로 사이클의 계수를 양식화하기 위해 각 피로 사이클의 수를 적절한 범위 분할에서 계수한다. 충분한 해상도를 확보하기 위해 본 연구에서의 하중 범위 분할 개수는 각 피로 스펙트럼의 최대 범위를 50 개로 분할하여 사용하였다. (TS_analysis.m) 그림 8은 해석 프로그램에 의해서 산출된, 1차원 피로 하중 스펙트럼을 나타낸 것이다.

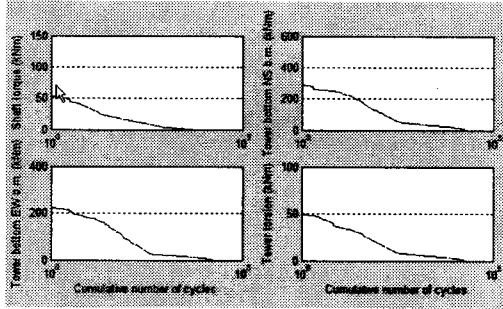


Fig. 8 1차원 피로 하중 스펙트럼

4.3.2 등가하중

소재의 피로 특성이 로그-로그 공식으로 설명된다고 가정하면 등가하중은 다음 공식을 통해 정의된다. 3)

$$R_{eq} = (\sum R_i^m n_i / n_{eq})^{1/m} \quad (1)$$

각 풍력발전기 요소의 대표적인 두 개의 S-N 곡선 기율기에 대하여, 식 (1)에 따라 1 Hz 등가하중을 계산하도록 프로그래밍 하였다. (SF_analysis) 그림 9는 해석 프로그램에 의해서 산출된 등가하중을 평균 풍속에 대해서 보여주고 있다.

5. 결론

IEC 61400-13의 규격에 따라서 하중 측정 데이터를 검증, 분류, 해석 및 보고하는 하중 측정 전용 해석 프로그램을 개발하였다. 본 해석 프로그램은 동 프로그램의 데이터 파일 생성 프로그램으로부터 만들어진 데이터 파일을 이용하여 시험 중이며 2005년 겨울에 측정이 시작될 KBP-750D에 대한 출력성능 및 하중 측정의 측정 데이터를 해석하기 위해 사용될 예정이다.

References

[1] Sutherland, H. J., "On the Fatigue Analysis of Wind Turbines." SAND99-0089, Sandia National Laboratories, pp. 9-14, 1999.
 [2] IEC 61400-12:1998(E), Wind Turbine Generator Systems - Part 12: Wind Turbine Power Performance Testing, IEC, 1st ed., 1998.

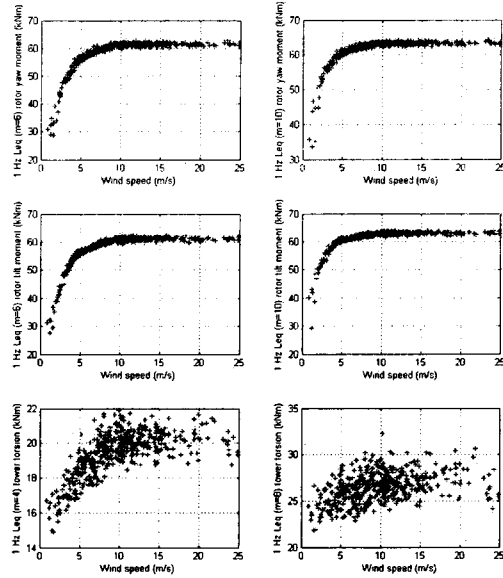


Fig. 9 산출된 등가하중

[3] IEC/TS 61400-13:2001(E), Wind Turbine Generator Systems - Part 13: Measurement of Mechanical Loads, IEC, 1st ed., 2001.

[4] Bannantine, J. A. et al., Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, pp. 184-196, 1990.