

KINS/HR-259

최종 보고서

## 원전기기 및 계통성능 규제기술개발

Assessment of Operational Safety  
for the Equipments & System

## 전동밸브 주기적 안정성 확인 기술개발

A Study on Periodic Verification of MOV Performance

研究機關

忠南大學校 産業技術研究所

韓國 原子力 安全 技術院

# 제 출 문

한국원자력 안전기술원장 귀하

본 보고서를 “원전기기 및 계통성능 규제기술개발” (“전동밸브 주기적 안정성 확인 기술개발”)의 최종 보고서로 제출합니다.

1999. 4. .

주관연구기관명 : 한국원자력 안전기술원

주관연구책임자 : 조 두 연

협동연구기관명 : 충남대학교 산업기술연구소

협동연구책임자 : 박 중 호

연 구 원 : 임 영 준, (주) 삼신

” : 안 종 식, (주) 삼신

연 구 조 원 : 강 현 택, 충남대학교

” : 이 정 민, 충남대학교

” : 유 성 식, 충남대학교

” : 송 규 조, 충남대학교

” : 신 완 순, 충남대학교

” : 이 택 상, 충남대학교

# 요 약 문

## I. 제 목

### 전동밸브 주기적 안정성 확인 기술개발

## II. 연구의 목적 및 필요성

원자력 발전소는 안전성과 신뢰성이 다른 어떤 시스템보다도 강조되는 설비로 최근 설비의 다양한 신기술 개발에도 불구하고 안전계통에는 실증된 기술을 사용해야하는 특성으로 인하여 선진국에서 개발되고 그 성능이 보장된 기술에 의존할 수밖에 없었다. 원자력 발전소설비의 운전 가능성을 강하게 입증토록 요구하는 이유는 원자력 발전소에서 사고가 발생하면 설비손상은 물론이고, 사회적·경제적으로 미치는 영향이 클 뿐만 아니라 공중(公衆) 건강과 재산상 손실이 천문학적 수치에 도달할 수 있음을 미국 트리마일(Tree mile island) 원자력 발전소와 구 소련의 체르노빌(Chernobyl) 원자력 발전소의 방사능 누출사고를 통하여 잘 알려져 있다.

유체의 흐름을 제어하는 것은 원자력발전소 운전과 안전에 직결되어 있어, 전동밸브가 오작동의 경우 사고의 원인이 되기 때문에, 신뢰성 및 사고 예측에 많은 관심을 두고 있다. 더욱이 전동밸브는 사람이 접근하기 곤란한 위치에 설치되며, 열악한 환경에서 운전이 되기 때문에 쉽게 열화되거나 고장날 수 있다.

지난 13년동안 IAEA에 보고된 2100건의 원전 사건 사고 중 약 1/3이 액튜에이터를 포함한 밸브가 원인이었으며, 미국내의 원자력발전소에서 예상치 않은 운전정지 중 20%이상이 전동밸브에 의하여 일어나는 것으로 알려져 있으며, 발전소 운영과 안전에 전동밸브가 차지하고 있는 역할의 중요성이 계속 높아지고 있다.

원자력 발전소에서는 엄격한 전동밸브의 검증을 하며, 검증시 상당히 많은 계측 장비와 인원을 필요로 한다. 이러한 검증이 전동밸브의 작동에 관해 많은 정보를 주지만 그 정보는 어떠한 현상이 일어난 후이나 정보를 주고 미래에 있을

고장을 예측해 주지 못한다는 공통적인 약점을 가지고 있다.

전동밸브의 진단 필요성의 인식에 따라 외국의 경우 진단기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 전동밸브 사용자 그룹을 만들어 서로의 경험과 연구결과를 토대로 성과를 거두어 일부 진단장비를 상품화하였으나 그 성능이 미흡하여 관련업체에서는 진단기법의 향상을 위한 개발연구의 수행과 현재 상품화된 진단장비를 발전시키고 개선시키려는 노력을 끊임없이 하고 있다.

그러나 국내에서는 아직 진단기법에 대한 연구는 전무한 실정이고 정상운전시의 문제점을 해결하기 위한 수단으로 전동밸브 진단장비를 도입하여 활용하고 있으나 사고예방을 위한 진단에는 기능이 미흡하다.

따라서 원전의 안전을 보장하기 위해서는 전동밸브에 대한 성능평가 및 관련 조치를 취하여야 하고 이를 위해 현행 국내의 전동밸브 성능진단기법 및 기술동향을 파악하여 전동밸브 상태를 진단하고 전동밸브성능을 예측할 수 있는 성능변수들에 대한 적합한 평가와 분석기술이 개발되어 원자력 발전소의 설비 운전가능성을 확보하여 안전성 제고에 기여하여야 할 것이다.

### III. 연구개발의 내용 및 범위

전동밸브의 가동중 시험시 이상징후를 초기에 감시하고 진단하여 방사선 피폭을 최대한 줄이고, MCC에서 원격측정이 가능한 전동기 입력전류 및 전력을 측정하는 간단한 장치를 제작하여, 출력된 신호를 분석하여 최적의 진단 기법으로 전동밸브의 안전성을 확인할 수 있는 방법을 확립하기 위하여 국내외 기술현황 파악 및 관련 자료를 수집 검토하여 국내 원자력발전소에 적용 가능한 최적의 전동밸브의 진단기법을 개발하려고 한다.

기본적인 연구 방향은 전동기에 입력되는 전류 및 전력을 측정하여 모터의 출력변화를 상대적인 값으로 나타내고 구동부의 상태를 파악함으로써 전동밸브의 성능저하 등을 미리 진단하는 것이다. 단계별 추진 전략은 다음과 같다.

- 국내외 기술현황 파악 및 관련 자료수집
  - 고장유형, 사용 전동밸브의 종류, 전동밸브의 작동환경 등 자료조사

- 현행 기술 평가
- 전동밸브의 작동원리
- 실험장치 설계 및 제작
  - 밸브 관련 실험장치 설계 및 제작
- 진단기법개발
  - 이상징후의 모사를 통한 전류 및 전력신호 감시를 통한 밸브 이상징후 진단 기법 개발

#### IV. 연구 개발 결과

원자력 발전소에서 사용하고 있는 gate와 globe 전동밸브(MOVs)를 대상으로 밸브의 고장을 모사하여 전압, 전류 그리고 전력을 측정하는 간단한 장치를 제작하고 각각의 신호를 측정하여 분석 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고장모사에서 전동기의 전력 DC신호는 전류 DC신호보다 민감한 반응을 보이며, 두 신호의 거동이 유사하게 나타났다.
2. 밸브행정에서 나타나는 신호를 적절하게 처리하면 행정과 크기의 변화는 밸브손상 및 운전변수 변동을 나타내는 지표로 신호분석 및 진단에 이용할 수 있음을 알 수 있었다.
3. 전류의 AC 신호는 주파수 변화를 분석하는데 유용하게 이용할 수 있으며 주파수 분석도 밸브진단에 유용하게 활용할 수 있다.
4. 전류와 전력신호를 동시에 이용하여 밸브를 진단하는 방법은 전류만을 이용하는 방법보다 유용하며 정확한 진단결과를 기대할 수 있다.

## V. 연구개발 결과의 활용계획

본 연구는 전동밸브를 진단함에 있어 많은 계측기의 부착 없이 전동밸브의 이상징후를 찾아내고, 높은 진단의 정확도나 신뢰도를 확보함으로써 그 기술적 우위는 물론 전동밸브의 안전기능을 최적으로 유지하여 원자력 안전성을 확보할 수 있게 한다. 이런 기술의 축적은 앞으로 진단 장비 보완 및 개선을 독자적으로 할 수 있게 하여 문제 발생시 외국의 기술에 의존하지 않고 독자적인 해결을 모색할 수 있다.

독자적 진단방법기술 개발로 우리 나름대로의 지식과 방법을 축적하면 외국 기술 도입과 외국 장비 구입에 의한 외화 유출을 줄일 수 있으며 특히 진단장비의 개발은 원자력발전소의 안전성을 높여 지역 주민이나 관계자들의 관계 관리에도 도움을 줄 것이며, 또한 안전 점검을 위한 잦은 발전소 운휴나 사고로 인한 발전소 운영 마비를 통한 경제적 손실을 줄이는데 큰 역할을 할 것이다. 개발되는 진단기법은 원자력발전소외에도 전동밸브를 사용하는 일반 산업체에서도 전동밸브의 진단에 직접 운용이 가능할 것이다.

본 연구에서 개발되는 전동밸브의 이상징후 진단 기법은 원자력발전소에서 직접 활용이 가능하게 하여 안전성 도모는 물론이고 진단장비의 실용화와 연결이 가능할 것이다. 이상징후를 사전에 판별함으로써 원자력 발전소 안전성 향상 및 경제성 제고 등에 응용할 수 있을 것이다

# SUMMARY

## I. Project Title

A Study on Periodic Verification of MOV Performance

## II. Objective and Necessity of this Project

The nuclear power plants require high reliability and safety. Due to its characteristics, the safety systems of the nuclear power plants use only the proven technology although the various new technologies have been developed. In particular, the verification of operability of nuclear facilities has been required since the reactor accidents at Three Mile Island in 1979 and at Chernobyl in 1986.

The motor-operated valves (MOV's) are used extensively within nuclear power plants in safety-related and balance-of-plant systems and located in almost all plant fluid systems. Their failures have resulted in significant plant maintenance efforts. More important, the operational readiness of nuclear plant safety-related systems has often been affected by MOV degradation and failure. Approximately one of the third of 2100 events reported to IAEA during past 13 years and about 20% of the reactor shutdown not anticipated in the United States has been caused by the valve failures.

The surveillance on the MOV is restrictively performed in the nuclear power plants and requires massive amounts of manpower and instrument equipment. It provides large information on the MOV performance but cannot predict the future failure. The research on the valve diagnostic method has been actively in progress in recognition of the necessity of the motor-operated valve diagnostics in foreign countries and several

diagnostic systems have been developed. The systems known now to be commercially available have only the limited functions and are still being improved. However, there has been no research on the valve diagnostics in the domestic. The foreign diagnostic systems have been purchased and used to resolve the problems occurred during normal operation but those functions are not enough for the diagnostics for the prevention of the events.

Accordingly, the evaluation on performance of motor-operated valves should be evaluated to ensure the nuclear safety. It will be able to be accomplished by understanding the state of the art of the diagnostic method and developing the appropriate new methodology to evaluate the measuring parameters to predict the valve performance

### **III. Scope and Contents of this Project**

Developed in this study are the optimized valve diagnostic technique which detect early the abnormal symptom during the surveillance of the valve and consequently reduce the irradiation in a maximum. The major direction of the development is to detect in advance the valve degradation by monitoring changes in motor power due to the changes in motor current input.

The development strategies in phase are as follows:

- Understanding of the state of the art of the technique and collection of the related material
  - Survey of the material on the failure mode, types, and the

operating conditions of the MOVs

- Investigation of the state of the art of the technique
- Understanding of the operating principle of the valve
- Design and manufacture of the experiment facility
- Development of the diagnostic technique
  - Development of the method detecting the abnormal symptom by monitoring the changes of the motor current signature through simulating the abnormal conditions

#### **IV. Results and Proposal for Applications**

Measured and evaluated were the changes of the motor current signature taken by simulating the abnormal conditions on the gate and globe MOVs used extensively in the nuclear power plants. Based on the evaluation results, the following conclusion can be drawn:

1. The DC signature of motor power shows more sensitive than the DC signature of motor current. Both of them have similar behavior during the simulation.
2. The changes of the valve stroke and magnitude with appropriate management of the signature occurred during the stroke can be used as an index showing the valve failure and degradation.
3. The AC signature of the current is useful the analyses in the frequency domain. Also, the frequency analysis is valuable in the valve diagnostics.
4. The diagnosis of valve by simultaneous use of the valve current

and power is more useful than the method using the motor current only.

## **V. Plan for Applications**

The diagnostic method developed in this study detects the abnormal symptom of valve with minized use of the instruments. It is considered that this technology provides the high reliability and safety in the nuclear power plants by maintaining the optimized conditions of the MOVs. Consequently, the accumulation of the diagnostic technology through this study consequently will provide more opportunity and more reliability in resolving the valve related problem without foreign technology.

# Contents

Summary(in Korean) -----	3
Summary(in English) -----	7
Contents(in English) -----	11
Contents(in Korean) -----	13
List of Tables -----	15
List of Figures -----	16
1. Introduction -----	19
1.1 Necessity -----	19
1.2 Background -----	20
1.3 Objective -----	22
2. Theoretical Considerations of Motor Operated Valves -----	25
2.1 Characteristics of Valves -----	25
2.2 Motor Operated Valves -----	29
2.3 Requirements of NPT's Motor Operated Valves -----	32
2.4 Description of Commercially Available MOV Diagnostic Systems -----	35
3 Experimental Apparatus and Method -----	41
3.1 Experimental Apparatus -----	41
3.2 Experimental Method -----	45

4. Results and Discussion	49
4.1 Gate Valve	49
4.2 Globe Valve	56
5. Conclusion	101
6. Achievement of R&D Objective and Contributions	103
6.1 R&D Objective	103
6.2 degree of Achievement of R&D Objective	103
6.3 Contributions of R&D Results	104
7. Application Plan of R&D Results	107
8. References	109

# 목 차

제 출 문	1
요 약 문	3
Summary	7
Contents	11
목 차	13
표 목차	15
그림 목차	16
1. 서 론	19
1.1 연구 필요성	19
1.2 연구 배경	20
1.3 연구 목적	22
2. 전동밸브에 대한 이론적 고찰	25
2.1 밸브 종류에 따른 특성	25
2.2 전동밸브	29
2.3 원자력 발전소용 밸브의 구비요건	32
2.4 상업용 전동밸브 진단 시스템 개요	35
3. 실험장치 및 방법	41
3.1 실험장치	41
3.2 실험방법	45

4. 실험결과 및 고찰 -----	49
4.1 Gate 밸브 -----	49
4.2 Globe 밸브 -----	56
5. 결 론 -----	101
6. 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도 -----	103
6.1 연구개발 목표 -----	103
6.2 연구개발 목표 달성도 -----	103
6.3 연구개발 결과의 대외 기여도 -----	104
7. 연구개발 결과의 활용계획 -----	107
8. 참고문헌 -----	109

## 표 목 차

- 표 2.1 MOVATS에 의해 확인된 MOV의 비정상 유형 현황
- 표 3.1 실험에 이용한 전동밸브의 사양
- 표 3.2 토오크 스위치 설정치

## 그림 목 차

- 그림 2.1 Gate 밸브의 형상
- 그림 2.2 Gate 밸브 판의 종류
- 그림 2.3 Globe 밸브의 형상
- 그림 2.4 Limitorque SMB-0 through SMB-4 형상
- 그림 3.1 실험용 gate 밸브 전경
- 그림 3.2 실험용 globe 밸브 전경
- 그림 3.3 전동밸브 구동 제어반 전경
- 그림 3.4 실험 및 측정장치 구성 개략도
- 그림 3.5 전력 분석계 회로도
- 그림 3.6 Gate밸브 스템 taper가공 직경변화
- 그림 3.7 Globe밸브 스템 taper가공 직경변화
- 그림 4.1 Gate밸브 정상상태 전류, 전력신호
- 그림 4.2 Gate밸브 정상상태 열림 초기와 닫힘부의 전류, 전력신호 (open-to-close stroke)
- 그림 4.3 Gate밸브 정상상태 열림 초기와 닫힘부의 전류, 전력신호 (close-to-open stroke)
- 그림 4.4 Gate밸브 정상상태 닫힘부의 전류(교류)신호
- 그림 4.5 Gate밸브 정상상태 전류신호의 스펙트럼 분석
- 그림 4.6 Gate밸브 전압변화에 대한 전류신호(open-to-close stroke)
- 그림 4.7 Gate밸브 전압변화에 대한 닫힘부의 전류신호(open-to-close stroke)
- 그림 4.8 Gate밸브 전압변화에 대한 전력신호(open-to-close stroke)

- 그림 4.9 Gate밸브 전압변화에 대한 전류신호(close-to-open stroke)
- 그림 4.10 Gate밸브 전압변화에 대한 열림 초기의 전류신호  
(close-to-open stroke)
- 그림 4.11 Gate밸브 전압변화에 대한 전력신호(close-to-open stroke)
- 그림 4.12 Gate밸브 전압변화에 대한 행정시간 변화
- 그림 4.13 Gate밸브 전압변화에 대한 주파수 스펙트럼(open-to-close stroke)
- 그림 4.14 Gate밸브 전압변화에 대한 주파수 스펙트럼(close-to-open stroke)
- 그림 4.15 Gate밸브 스템 직경변화에 대한 전류, 전력신호
- 그림 4.16 Gate밸브좌에 위치한 용접봉에 의한 전류신호(open-to-close stroke)
- 그림 4.17 Gate밸브좌에 위치한 용접봉에 의한 전력신호(open-to-close stroke)
- 그림 4.18 Gate밸브판의 이물질에 의한 전류, 전력신호(open-to-close stroke)
- 그림 4.19 Gate밸브판 끼임에 대한 전류, 전력신호(open-to-close stroke)
- 그림 4.20 Gate밸브 스템 패킹의 조임정도에 따른 전류신호  
(open-to-close stroke)
- 그림 4.21 Gate밸브 스템 패킹의 조임정도에 따른 전류, 전력신호  
(close-to-open stroke)
- 그림 4.22 Gate밸브 토크 스위치 설정값 변화에 대한 전류신호  
(open-to-close stroke)
- 그림 4.23 Gate밸브 토크 스위치 설정값 변화에 대한 전류신호  
(close-to-open stroke)
- 그림 4.24 Gate밸브 토크 스위치 설정값 변화에 대한 전력신호  
(close-to-open stroke)
- 그림 4.25 Gate밸브 리미트 스위치 설정값 변화에 대한 전류, 전력신호  
(close-to-open stroke)
- 그림 4.26 Gate밸브 고착상태에 대한 전류, 전력신호(close-to-open stroke)

- 그림 4.27 Globe밸브 정상상태 전류신호
- 그림 4.28 Globe밸브 정상상태 열림 초기와 닫힘부의 전류, 전력신호  
(open-to-close stroke)
- 그림 4.29 Globe밸브 정상상태 열림 초기와 닫힘부의 전류, 전력신호  
(close-to-open stroke)
- 그림 4.30 Globe밸브 전압변화에 대한 전류신호(open-to-close stroke)
- 그림 4.31 Globe밸브 전압변화에 대한 닫힘부의 전류신호  
(open-to-close stroke)
- 그림 4.32 Globe밸브 전압변화에 대한 전력신호(open-to-close stroke)
- 그림 4.33 Globe밸브 전압변화에 대한 닫힘부의 전력신호  
(open-to-close stroke)
- 그림 4.34 Globe밸브 전압변화에 대한 전류신호(close-to-open stroke)
- 그림 4.35 Globe밸브 전압변화에 대한 전력신호(close-to-open stroke)
- 그림 4.36 Globe밸브 전압변화에 대한 행정시간 변화
- 그림 4.37 Globe밸브 스템 직경변화에 대한 전류, 전력신호
- 그림 4.38 Globe밸브 스템 패킹의 조임정도에 대한 전류, 전력신호  
(close-to-open stroke)
- 그림 4.39 Globe밸브 토크 스위치 설정값 변화에 대한 전력신호
- 그림 4.40 Globe밸브 리미트 스위치 설정값 변화에 대한 전력신호

# 1. 서론

## 1.1 연구 필요성

원자력 발전소는 안전성과 신뢰성이 다른 어떤 시스템보다도 강조되는 설비로 최근 설비의 다양한 신기술 개발에도 불구하고 안전계통에는 실증된 기술을 사용해야하는 특성으로 인하여 선진국에서 개발되고 그 성능이 보장된 기술에 의존할 수밖에 없었다. 원자력 발전소설비의 운전 가능성을 강하게 입증토록 요구하는 이유는 원자력 발전소에서 사고가 발생하면 설비손상은 물론이고, 사회적·경제적으로 미치는 영향이 클 뿐만 아니라 공중(公衆) 건강과 재산상 손실이 천문학적 수치에 도달할 수 있음을 미국 트리마일(Tree mile island) 원자력 발전소와 구 소련의 체르노빌(Chernobyl) 원자력 발전소의 방사능 누출사고를 통하여 잘 알려져 있다.

원자력 발전소의 안정성이란 원자로(Reactor)의 안전정지 도달, 원자로의 안전정지 유지 그리고 사고완화의 기능을 수행할 수 있는 능력으로[1], 안전기능을 갖는 펌프와 밸브에 대하여 발전소 가동 중에 시험이 불가능한 사유로 발전소 저온정지상태 또는 핵연료 재장전기간으로 시험이 연기된 경우를 제외하고 매 3개월 주기로 안전기능 수행능력을 확인과 시간 경과에 따른 성능의 취약화를 탐지하도록 원자력법 시행령 67조 2항에 기술되어 있으며, 국내 원자력발전소에 실행지침으로 적용되는 미국 기계학회기준에 구체적인 가동중 시험(IST: Inservice Test) 이행요건에 따라 현재 국내 원자력 발전소에서도 이를 준용하고 있다.

유체의 흐름을 제어하는 것은 원자력발전소 운전과 안전에 직결되어 있어, 전동밸브가 오작동의 경우 사고의 원인이 되기 때문에, 신뢰성 및 사고 예측에 많은 관심을 두고 있다. 더욱이 전동밸브는 사람이 접근하기 곤란한 위치에 설치되며, 열악한 환경에서 운전이 되기 때문에 쉽게 열화되거나 고장날 수 있다.

지난 13년동안 IAEA에 보고된 2100건의 원전 사건 사고 중 약 1/3이 액튜에

이터를 포함한 밸브가 원인이었으며, 미국내의 원자력발전소에서 예상치 않은 운전정지 중 20%이상이 전동밸브에 의하여 일어나는 것으로 알려져 있으며[2], 발전소 운영과 안전에 전동밸브가 차지하고 있는 역할의 중요성이 계속 높아지고 있다.

원자력 발전소에서는 엄격한 전동밸브의 검증을 하며, 검증시 상당히 많은 계측 장비와 인원을 필요로 한다. 이러한 검증이 전동밸브의 작동에 관해 많은 정보를 주지만 그 정보는 어떠한 현상이 일어난 후나 정보를 주고 미래에 있을 고장을 예측해 주지 못한다는 공통적인 약점을 가지고 있다.

전동밸브의 진단 필요성의 인식에 따라 외국의 경우 진단기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 전동밸브 사용자 그룹을 만들어 서로의 경험과 연구결과를 토대로 성과를 거두어 일부 진단장비를 상품화하였으나 그 성능이 미흡하여 관련업체에서는 진단기법의 향상을 위한 개발연구의 수행과 현재 상품화된 진단장비를 발전시키고 개선시키려는 노력을 끊임없이 하고 있다.

그러나 국내에서는 이제 전동밸브의 진단장비를 한국전력공사에서 개발중에 있으나 아직 진단기법에 대한 연구는 전무한 실정이고 정상운전시의 문제점을 해결하기 위한 수단으로 전동밸브 진단장비를 도입하여 활용하고 있으나 사고예방을 위한 진단에는 기능이 미흡하다.

따라서 원전의 안전을 보장하기 위해서는 전동밸브에 대한 성능평가 및 관련 조치를 취하여야 하고 이를 위해 현행 국내의 전동밸브 성능진단기법 및 기술동향을 파악하여 전동밸브 상태를 진단하고 전동밸브성능을 예측할 수 있는 성능변수들에 대한 적합한 평가와 분석기술이 개발되어 원자력 발전소의 설비 운전가능성을 확보하여 안전성 제고에 기여하여야 할 것이다.

## 1.2 연구 배경

전동밸브의 성능저하 및 파손은 원자력 발전소의 안전 시스템의 조작과 관련이 있다. 전동밸브에 관한 문제는 1985년 6월 9일 Davis-Besse 원전에서 급수의 손실사건이 발생한 후 관심을 갖게 되었다. 최근 Eklund 등[3]의 연구 보고서에

미국내 원자력발전소의 비상운전정지의 20%가 MOV의 성능저하 또는 파손에 의한 것으로 보고되고 있다.

1989년 펌프와 밸브의 가동중 시험에 관한 ASME/NRC 심포지움에서 ASME section X와 ASME/ANSI OMa -1988, part X 에서 요구하는 행정시간시험은 자주 일어나는 전동밸브 성능저하가 행정시간에 큰 영향을 주지 않기 때문에 불충분하다는 의견이 제시되었다.[4]

ORNL[5]에서는 원전의 전동밸브에 대한 노화 및 모니터링 평가를 수행하여 전동기 전류신호분석(Motor current signal analysis, MCSA)는 가장 쉽게 적용할 수 있으며 유용한 정보를 제공해 준다는 것을 밝혔다. 원전에서 접근하기 어려운 곳에 센서를 직접 설치할 필요가 없고 원격조작이 가능한 MCSA는 밸브나 밸브 액츄에이터와 관련되는 기계 및 전기적인 이상을 알려 주어 정비함으로써 더 큰 고장이나 파손을 막을 수 있을 것이라고 판단하였다.

Teledyne Brown Engineering은 밸브 스템에 직접 스트레인 게이지를 부착하여 토크와 추력을 PC를 이용하여 측정·분석하는 진단시스템을 개발하였다.[3] 그러나 모든 시스템은 MOV의 고장 또는 비정상상태의 매우 제한적인 부분만을 다룬다는 단점이 있다.

Tennessee대학과 Duke-Energy사에 의해 전동밸브의 진단에 전동기 동력신호분석(Motor Power Signal Analysis, MPSA) 시스템을 이용한 PowerMOV를 개발하였으며, 전동기 동력 또한 전동기 전류보다 전동밸브의 하중변화에 더 민감하다는 것을 밝히고 있다.[6] 또한 Siemens 사에서도 MPSA를 이용해서 전동밸브의 노화의 유효성과 작동성을 평가하여 NRC GL 89-10의 Appendix A와 일치함을 확인하였다.[7]

따라서 본 연구에서는 전동밸브의 가동중 시험시 이상징후를 초기에 감시하고 진단하여 방사선 피폭을 최대한 줄이고, MCC에서 원격측정이 가능한 전동기 입력전류 및 전력을 측정하는 간단한 장치를 제작하여, 출력된 신호를 분석하고 최적의 진단기법으로 전동밸브의 안전성을 확인할 수 있는 방법을 확립하기 위하여 국내의 기술현황 파악 및 관련자료를 수집 검토하여 국내 원자력발전소에

적용 가능한 최적의 전동밸브의 진단기법을 개발하려고 한다.

기본적인 연구 방향은 밸브본체에서 발생하기 쉬운 고장을 모사하여 전동기에 입력되는 전압, 전류 그리고 전력을 측정하여 전동기의 출력변화를 상대적인 값으로 나타내고 구동부의 상태를 파악함으로써 전동밸브의 성능저하 등을 미리 진단하는 것으로 단계별 추진 전략은 다음과 같다.

- 국내외 기술현황 파악 및 관련 자료수집
  - 고장유형, 사용 전동밸브의 종류, 전동밸브의 작동환경 등 자료조사
  - 현행 기술 평가
- 전동밸브의 작동원리
- 실험장치 설계 및 제작
  - 밸브 관련 실험장치 설계 및 제작
- 진단기법개발
  - 이상징후의 모사를 통한 전류 및 전력신호 감시를 통한 밸브 이상징후 진단 기법 개발

### 1.3 연구 목적

현재 국내 원자력발전소에서는 정상운전시의 문제점을 해결하기 위한 수단으로 상용 전동밸브 진단장비인 MOVATS, LIBERTY 등을 구입하여 활용하고 있으며 설계기준 또는 사고시 전동밸브의 안전기능을 확인하는 목적으로 사용할 수 있으나 실제 밸브에 직접 부착하여 사용해야 하므로 작업시 방사선 피폭을 무시할 수 없다.

국내외 기술개발 동향 파악 및 기존의 전동밸브 진단기법을 평가하고 이를 토대로 우리 국내 원자력발전소에 적용 가능한 최적의 전동밸브의 진단기법을 개발할 것이다. 기본적인 연구방향은 전동기에 입력되는 전압, 전류 그리고 전력을 측정하여 전동기의 출력변화를 상대적인 값으로 나타내고 구동부의 상태를 파악함으로써 전동밸브의 성능저하 등을 미리 진단하는 것이다. 이러한 진단 기

법이 국내실정에 맞게 개발되면 발전소 사고에 대비한 전동밸브의 안전기능을 향상시키고 궁극적으로는 발전소의 안전성을 증진시킬 수 있을 것이다.

본 연구는 전동밸브를 진단함에 있어 많은 계측기의 부착 없이 전동밸브의 이상징후를 찾아내고, 높은 진단의 정확도나 신뢰도를 확보함으로써 그 기술적 우위는 물론 전동밸브의 안전기능을 최적으로 유지하여 원자력 안전성을 확보하기 위함이다. 이런 기술의 축적은 앞으로 진단 장비 보완 및 개선을 독자적으로 할 수 있게 되어 문제 발생시 외국의 기술에 의존하지 않고 독자적인 해결을 할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다.

독자적 진단방법기술 개발로 우리 나름대로의 지식과 방법을 축적하면 외국 기술 도입과 외국 장비구입에 의한 외화 유출을 줄일 수 있으며 특히 진단장비의 개발은 원자력발전소의 안전성을 높여 지역 주민이나 관계자들의 관계 관리에도 도움을 줄 것이며, 또한 안전 점검을 위한 잦은 발전소 운휴나 사고로 인한 발전소 운영 마비를 통한 경제적 손실을 줄이는데 큰 역할을 할 것이다. 개발되는 진단기법은 원자력발전소외에도 전동밸브를 사용하는 일반 산업체에서도 전동밸브의 진단에 직접 운용이 가능할 것이다.

본 연구에서는 전동밸브의 이상징후를 모사하여 전동기에 입력되는 전류 및 전력을 측정하고 출력된 신호의 분석기술을 개발하여 전동밸브의 이상징후 진단 기법을 확립하고자 한다. 개발된 진단기법은 원자력발전소의 전동밸브에 대한 신뢰도를 확보하고 안전성 도모는 물론이고 진단장비의 개발 및 실용화에 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.



## 2. 전동밸브에 대한 이론적 고찰

밸브는 가정이나 산업현장에서 유체의 흐름을 차단하거나 일정한 유량을 흐르도록 조절하며, 유체의 역류를 차단하는 등 다양하게 이용되고 있다. 더욱이 산업이 발전할수록 석유화학공장이 많이 생기고, 전력수요 증가에 따라 수·화력, 원자력 및 복합화력발전소 등이 계속 건설되므로, 밸브는 공장의 운전, 정지를 위해 더없이 주요한 구성품이다.

전동밸브는 환경이 열악하여 사람이 접근하기 곤란한 위치에 주로 설치되며, 사고시 긴급하게 밸브의 개폐 조작이 요구되거나 여러 개의 밸브를 동시에 작동시킬 경우에 사용되고 밸브를 개폐할 수 있는 전동장치를 설치할 뿐만 아니라 관제실에서 원격조작이 가능할 뿐만 아니라 전기적인 이상이 발생했을 경우 수동 조작도 가능하도록 되어 있다.

### 2.1 밸브 종류에 따른 특성[8]

#### 2.1.1 Gate 밸브(그림 2.1 참조)

- 1) 유체의 방향 및 단면에 변화가 없으므로 압력 손실이 적다.
- 2) 밸브의 먼간 거리가 짧아 대구경의 밸브 제작이 가능하지만, lift가 크므로 완전 개폐에 시간이 많이 걸린다.
- 3) 개폐시 유체를 직각으로 차단하기 때문에 부분적으로 열 때 밸브판에 진동과 침식 등이 발생하여 완전히 열고 닫을 때 주로 사용하고 유량제어 용으로는 사용되지 않는다.
- 4) 밸브판 차단시 체부 토크(torque)가 globe밸브에 비해 적어 대형 밸브나 고압 밸브에 적합하다.
- 5) 밸브의 평행 판은 웨지판(wedge disc) 보다 고착(seizing)이 생기기 쉬우며, 웨지 판은 열팽창에 따라 galling 현상이 있다.
- 6) gate 밸브 판의 종류는 그림 2.2와 같다.

부품번호	부 품 명	부품번호	부 품 명
001	Body	023	Gland Bolt
002	Bonnet	024	Gland Bolt Nut
004	Stem	025	Gland Bolt Pin
005	Disc	027	Retaining Ring
007	Seat Ring	031	Sleeve
016	Bonnet Bolt	035	Handwheel
017	Gasket	039	Handwheel Nut
018	Packing Washer	056	Split pin
019	Gland	066	Sleeve Nut
020	Gland Packing	069	Disc Stopper
021	Gland Flange		

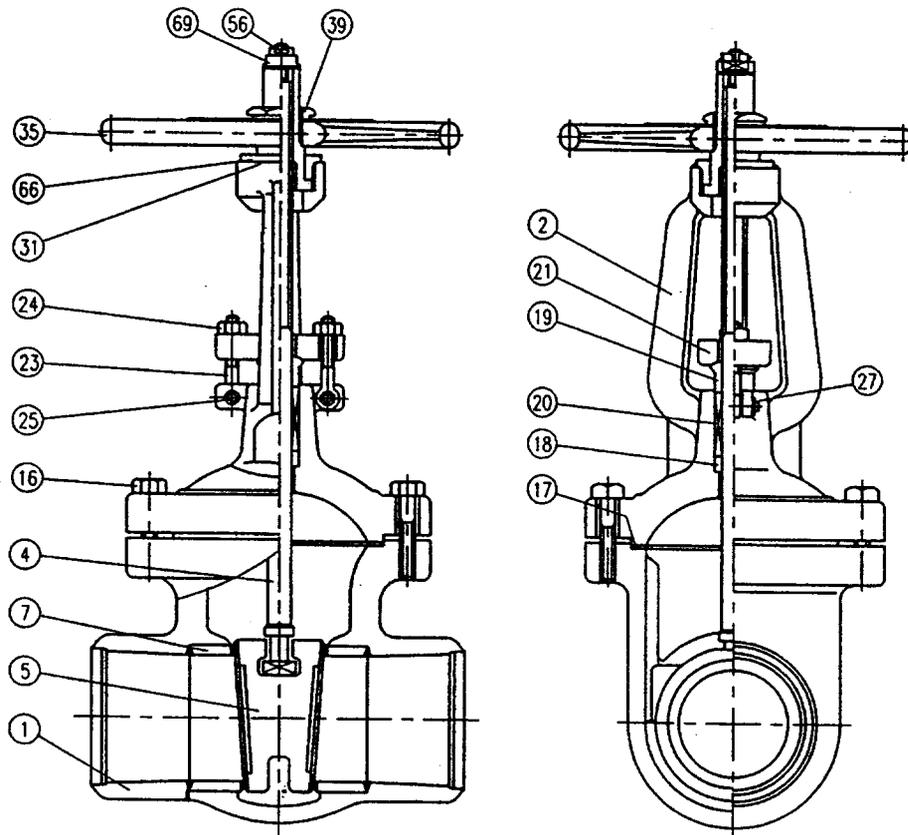


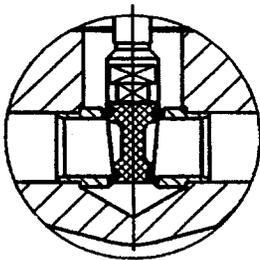
그림 2.1 Gate 밸브의 형상

### 2.1.2 Globe 밸브 (그림 2.3 참조)

- 1) 유량 조절용으로 사용한다.
- 2) 유체의 방향이 급격히 변화하여 저항이 크므로, 유체의 저항을 줄이기 위해 Y-형을 사용한다.
- 3) gate밸브보다 lift가 적어 신속하게 개폐가 되고, 밸브좌의 마모가 적으며 밸브의 압력 강하로 압력조절이 가능하다.
- 4) 밸브좌 구조를 보면 유체는 S자형으로 흐르므로 유체의 방향을 변경시켜 유체 압력손실이 크고, 와류 현상이 발생하여 압력 손실이 크므로 유체량이 적을 경우에는 적당하지 못하다.
- 5) 미소 유량을 조절하기 위해서는 needle밸브를 사용한다.
- 6) gate밸브에 비하여 무겁고 가격도 비싸다.

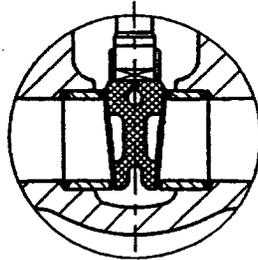
### 2.1.3 나비(butterfly) 밸브

- 1) 가볍고, 별도의 지지대 없이도 배관 중간에 간단히 설치할 수 있다.
- 2) 유량 제어가 쉽다.
- 3) 대구경에 사용할 때 면간 거리가 짧고 중량이 가벼우므로 많이 이용한다.



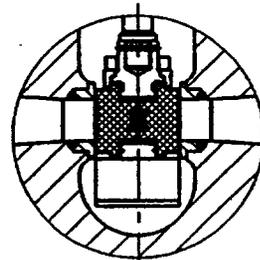
Solid Wedge

소형 저압밸브에 많이 사용



Flexible Wedge

대형 및 고압밸브에 많이 사용



Parallel Slide

고온·고압에 사용

그림 2.2 Gate 밸브판의 종류

부품 번호	부 품 명	부품 번호	부 품 명	부품 번호	부 품 명
001	Body	024	Gland Bolt Nut	088	Gland Bolt Clamp
002	Bonnet	025	Gland Bolt Pin	099	Body Plug
004	Stem	027	Retaining Ring	100	Lock Bolt
005	Disc	030	Yoke	111	Guide Bar
007	Seat Ring	031	Sleeve	112	Guide Plate
008	Disc Thrust Plate	035	Handwheel	113	Guide Plate Pin
009	Disc Nut	039	Handwheel Nut	114	Guide Plate Bolt
018	Packing Washer	067	Grease Nipple	115	Guide Plate Bolt Nut
019	Gland	068	Thrust Ball Bearing	201	Hammerblow Handwheel
020	Gland Packing	081	Seal Ring	203	Impactor Boss
021	Gland Flange	086	Clamp Washer		
023	Gland Bolt	087	Bonnet Clamp		

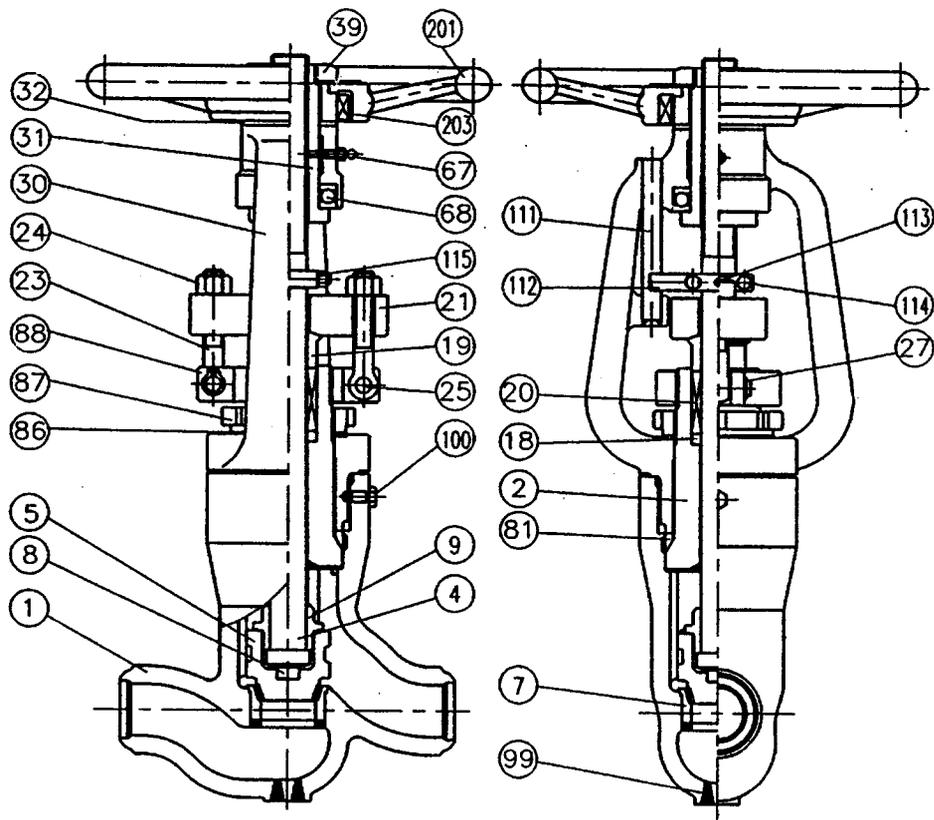


그림 2.3 Globe 밸브의 형상

## 2.2 전동밸브(Motor Operated Valve)

전동밸브는 원자력발전소 안전관련 및 평형시스템에 광범위하게 이용하며, gate, globe, 나비밸브 등이 많이 사용되고 있다. 전동밸브 본체는 일반 수동 밸브의 본체와 유사하다. gate밸브의 경우 전동부에서 전달되는 스템 추력(stem thrust)에 의한 체 부력(seating force)을 조정할 수 있도록 하였으며, 제작시 수동 밸브와 다른 밸브좌의 정밀한 가공, 조립면에서 밸브 내압에 의한 스템의 밀봉을 위하여 패킹을 충분히 압축하도록 grand볼트를 조여야하며, 작동기(actuator)의 stall에 의한 좌굴 등을 충분히 고려하여 스템 외경을 결정해야 한다.

### 2.2.1 전동 조작기(actuator)

전동 조작기는 전동기, 감속장치, 중심축, 밸브 구동 접속부 (drive sleeve), starter, 리미트 스위치(limit switch), 토크 스위치(torque switch) 및 handwheel 등을 주요 부품으로 하여 구성되어 있다. 최근에는 전동기, starter 및 스위치 등의 전동 부품류는 외부와 절연, 밀봉시켜 불꽃의 발생에 대한 방폭 구조화하는 것이 많이 사용되는 추세이다.

- ①Electric Motor
- ②Wormshaft Clutch Gear
- ③Worm Shaft Clutch
- ④Worm Shaft
- ⑤Worm
- ⑥Worm Gear
- ⑦Drive Sleeve
- ⑧Stem Nut
- ⑨Valve Stem
- ⑩ Spring Pack

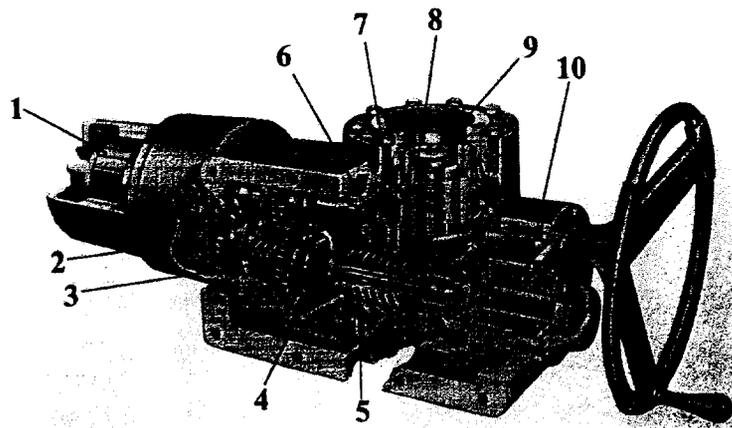


그림 2.4 Limitorque SMB-0 through SMB-4 형상

### 2.2.2 전동밸브의 개폐조작

일반적으로 전동밸브는 밸브 본체의 bonnet 또는 yoke 상부에 부착된 전동 조작기에 의해 발생하는 전동기의 회전력을 이용하여 스템 nut를 통하여 스템을 상하로 운동시키거나 (Gate, Globe밸브 등), 또는 90° 회전시키는 (Ball, Butterfly 밸브 등) 방법으로 밸브를 개폐시킨다. 전동기에서 발생한 회전력은 worm gear를 통하여 감속과 동시에 회전 토크가 증가되어 중심축에 직각으로 설치된 구동 sleeve를 회전시킨다. 이 때 구동 sleeve에 고정된 스템 nut가 회전하여 스템이 상하 운동을 함으로서 밸브를 개폐시킨다.

미국 원자력 발전소뿐만 아니라 국내 생산 전동밸브는 대부분 Limitorque 전동 조작기( SMB-0~SMB-4 )를 사용하고 있어 이 모델을 중심으로 조작방법을 설명하고자 한다.

Limitorque Corporation은 일반적으로 8가지 크기(SMB-000에서 SMB-5)의 SMB 모델과 7가지 크기의 SB모델의 밸브제어용 전동 조작기들을 제작하고 있다. SMB와 SB모델간의 차이점은 SB 조작기는 SMB처럼 적소에 위치되는 것보다 조작기의 스템 nut가 유동적인 보상 스프링 구조로 되어있다. SB설계는 고속 밸브 스템에 적합하며, 고온에 의한 스템의 인장과 수축에 의한 스템의 하중에 적절히 대처할 수 있다.

Limitorque에 의해 생산되는 또 다른 모델인 작은 밸브에 대해 특별히 설계된 SMC 조작기, 나비밸브와 같이 1/4회전 밸브에 사용하는 LY형 조작기, 나비 밸브에서도 쓰이고 수동 HBC조작기로 SMB와의 조합인 SMB/HBC 조작기 등이 있다.

그림2.4는 Limitorque SMB-0에서 SMB-4에 대한 구조를 보이고 있으며, Limitorque전동 조작기의 작동은 전동기가 작동 시에 축에 붙어있는 helical pinion을 사용해 전동기①가 worm축에서 자유롭게 돌아가는 worm shaft clutch gear②를 구동시킨다. worm shaft clutch gear는 차례대로 lug와 lug를 접촉하면서 worm shaft clutch④를 구동시킨다. worm축 clutch는 worm 축④에 나 있는 spline홈에 연결된다. 이렇게 worm shaft clutch가 회전하면 worm

축도 회전한다. worm 축에 spline 홈에 결합된 worm⑤은 worm 축과 함께 회전하여 worm gear⑥를 회전시킨다. worm gear는 두 개의 lug를 가지고 있는데 구동 sleeve⑦에 있는 두 개의 유사한 lug들을 접촉시킨다. lug들은 180°로 떨어져 있는데 전동기가 회전할 때는 역전된다. lug들이 재 가동되고 반대방향으로 초기 구동 sleeve 회전 전까지 worm gear의 자유회전은 약 120°에서 150°이다. 이 재 가동은 조작기내의 “hammerblow” 효과 때문으로 하중이 가해지기 전에 전동기가 전속력을 내기 위함이다..

스텝 nut⑧은 내 축에 맞게 하기 위해 그리고 구동 sleeve와 함께 회전하기 위해 키 홈이 있다. gate 밸브와 globe 밸브의 스텝 nuts는 상승밸브 스텝⑨의 나사산에 맞는 내부 나사산이 파여 있다거나 단순히 구멍만 파여 있다 그리고 나비밸브의 경우에는 비 상승 밸브 스텝과 맞게 하기 위한 key 홈이 파여 있다.

worm에서 worm gear로 전달되는 토크는 belleville washer들로 구성된 spring pack⑩을 압축하고 worm 축 키 홈을 따라서 축 방향으로 worm을 미는 반력이 발생한다. 축 방향으로 worm이 이동한 거리는 마주하고 있는 worm gear force와 spring pack의 스프링 상수와 비례한다. spring pack에 포함되어 있는 belleville washer는 spring pack의 말단에 있는 정지 nut에 의해 처음으로 눌러진다. worm의 축방향 운동은 축방향 worm이 spring pack preload를 과도하게 걸었을 때 일어난다.

worm의 축방향 운동은 rack과 pinion이나 종동 cam 배열에 의해 토크 스위치의 회전으로 전달된다. 토크 스위치의 예정된 각 위치에 도달하면 기계적 운동은 전기적 접촉을 시작하게되어 전동기의 동력이 제거된다.

일반적으로 토크 스위치는 밸브가 닫힐 때 전동기를 정지시키고, 리미트 스위치는 열릴 때 전동기를 정지시키는 역할을 하는 장치로 토크 스위치는 밸브의 체결 하중을 일정하게 하고 밸브의 개폐 도중에 이 물질이 치차 속에 들어가거나 과도한 토크가 발생할 경우 전원을 차단시켜 밸브 및 전동 조작기를 보호하는 역할을 한다.

리미트 스위치는 worm 축에 직접 맞물려있다. 이것은 worm 축의 회전을 셀

수 있어 위치를 지시하도록 고안되었고 valve 행정동안 회전자 4개까지 작동한다. 리미트 스위치의 접점 개폐작용은 제어실에 위치한 지시등을 켜고 끌 수 있으며, 개폐행정에서 토크 스위치의 bypass시키고 전동기의 작동을 정지시키는 기능을 수행한다.

## 2.3 원자력 발전소용 밸브의 구비요건

밸브를 포함한 원자력 발전소에서 사용되는 발전 기자재 중에서 안전성 관련 기기는 주어진 환경 조건하에서 그 기기의 안전성 관련 기능이 입증되어야 한다. 이로 인해 안전과 관련되는 주요 기기들을 선정하고, 기기 검증을 실시하여 기기의 설계 및 제작시 이를 반영함으로써 원자력 발전소에 대한 안전성을 확보하도록 해야 한다.

원자력 발전소에서 ASME Boiler and Pressure Vessel SEC. III Code를 적용하는 품목 중 Class 1기기는 일차 계통인 원자로 용기, 증기 발생기, 가압기 및 원자력 냉각재 펌프 등을 연결시켜 원자로 냉각재를 순환시켜 주는 계통 내에 존재하는 기기이며, Class 2와 3의 기기는 원자로 안전 관련 계통과 냉각수 계통이다.

ASME Sec. III를 적용하는 기기의 설계 및 응력해석을 수행하는데 필요한 ASME Code에서의 각종 요구 사항이 있으며, 특히 지진 해석과 Class 1 기기에 서만 상세한 해석을 요구하고 있는 피로 해석 등이 있다.

### 2.3.1 ASME Code의 구성

ASME Boiler and Pressure Vessel Code는 아래와 같이 각 산업별 기계 구조물의 건설 및 운전에 대한 8개 section과 3개의 service section 등 11개 section으로 나누어져 있으며 3개의 Service Section은 각 기계 구조물의 건설 및 운전에 대한 Section에서 인용 사용할 수 있다.

#### ① Section

- I Power Boilers
- II\* Material Specifications

- III Nuclear Power Plant Components
- IV Heating Boilers
- V\* Nondestructive Examination
- VI Recommended Rules for Care and Operation of Heating Boilers
- VII Recommended Rules for Care of Power Boilers
- VIII Pressure Vessels
- IX\* Welding and Brazing Qualifications
- X Fiberglass- Reinforced Plastic Pressure Vessels
- XI Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components

\* : Service sections

상기 11개 Section중에서 Section III는 기계 구조물 부품에 대한 Division 1  
과 Concrete 구조물에 대한 Division 2로 크게 나누어지고 이들은 다시 아래와  
같은 Subsection으로 구성되어 있다.

① NCA - General Requirements for Division 1 and Division 2

② Division 1

NB - Class 1 Components

NC - Class 2 Components

ND - Class 3 Components

NE - Class MC (Metal Containment Vessels) Components

NF - Component Supports

NG - Core Support Structures

Appendices

- Mandatory Appendices

- Nonmandatory Appendices

③ Division 2 - Code for Concrete Reactor Vessels and Containments

Subsection에 Class 1 Components (NB)의 구성을 보면 아래와 같다.

NB - 1000 Introduction

NB - 2000 Materials

NB - 3000 Design

NB - 4000 Fabrication and Installation

NB - 5000 Examination

NB - 6000 Testing

NB - 7000 Overpressure Protection

NB - 8000 Name Plate, Stamping, and Reports

### 2.3.2 적용 범위 및 등급 분류

#### a) 적용 범위

ASME Sec. III은 원자력 발전소의 압력용기, 저장조, 배관계, 펌프, 밸브 등의 품목을 설계, 설치, 표시 및 압력 초과 방지를 하는데 대한 제반 요구 사항을 총망라하여 규정하고 있다. 그러나 원자력 발전소의 모든 기자재를 Sec. III에 따라 설치하여야 하는 것은 아니며, 발전소 소유주에 의해서 원자력 발전소의 기능과 안전에 관련되는 필수적인 품목으로 분류되어 ASME Code에 따라 건설되어야 하는 품목에 한하여 Sec. III가 적용된다.

#### b) 기기의 적용 등급 분류

원자력 발전소에서의 적용 규격 및 등급분류는 소유주의 책임 사항으로서 설계 사양서에서 분류되어지며, 일반적인 등급 분류 기준은 다음과 같다.

- ① Class 1 기기(NB) : 원자로 냉각재 계통과 그 압력 경계내의 기기
- ② Class 2 기기(NC) : 원자로 냉각재 계통에 직접적인 영향을 미치거나 원자로 안전 관련 계통 (CVCS, SIS, RHRS, RMWS 등)과 그 압력 경계내의 기기 그리고 원자로 격납용기 관통 부분의 모든 배관계
- ③ Class 3 기기(ND) : 원자로 안전 관련 계통의 냉각수 계통 ( NSCWS, CCWS, ECWS 등) 기기
- ④ ANSI B31.1 기기 : 상기 ASME 기기를 제외한 모든 배관과 밸브

### 2.3.3 품질 요건

#### a) 밸브의 품질 및 재질

원자력 발전소에 사용되는 밸브는 그 기능의 안전성과 신뢰성이 엄격히 요구되므로 주어진 운전조건하에서 방사능을 밀봉하는 요건을 만족하여야 하므로 밸브의 내압부를 구성하는 몸체, Bonnet 등에 사용되는 재질은 고품질의 재질을 사용하여야 한다. 일반적으로 이들 밸브몸체 및 Bonnet 등에 사용되는 재질은 주로 Stainless강으로 그 재질의 건전성을 확보하기 위해 방사선 투과 시험, 자분 및 액체 탐상 시험 등의 각종 비파괴 검사에 의한 주물의 표면 또는 내부에

서의 결함을 탐지하고 결함이 발견될 경우 결함 보수 및 보수 후의 확인 검사가 필수적으로 행하여진다.

#### b) 품질 보증 체계

원전용 밸브의 제작에는 품질관리(QC) 및 품질보증(QA)이 중요한 요소 중의 하나이다. 품질보증이란 구조물, 계통 및 기기가 만족스럽게 작동하는지에 대한 확신을 얻는데 필요한 계획적이고 체계적인 행위를 말하며, 이러한 요건은 기기의 설계, 구매, 제작, 설치, 시험, 검사, 운전 및 보수까지의 전 단계에 걸쳐 수행되도록 요구된다. 품질보증의 방법으로써 회사내의 품질관리 체제, 조직의 정비로부터 시작하여 작업표준, QA Manual의 정비, 도면 사양서 등의 관리, 재료관리, 설비 계측 검사 기기의 보수 관리, 불합격품의 처리와 시정 조치 등 일련의 시스템의 정비가 요구된다. 즉, 구체적으로는 품질에 큰 영향을 주고 작업이 완료한 후에는 결과의 평가가 어려운 특수 작업 즉, 용접, 비파괴 검사 등에 대해서 작업자의 기능 및 기술 인정을 목적으로 하는 자격제도와 제작공정에 대한 충실한 기록 등이 필요하다.

현재 전세계적으로 적용되고 있는 원자력 품질 보증 요건은 미연방 법 10 CFR 50. App. B "원자력 발전소 및 핵연료 재처리 공장에 대한 품질보증 기준 (Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants)"를 근거로 하여 발전하여 왔으며 18개의 기준이 포함되어 있다.

## 2.4 상업용 전동밸브 진단 시스템 개요

최근 수년간 전동밸브 운전상태 감시를 위한 여러 시스템들이 개발되었다. 이들 시스템은 통상적으로 전동밸브운전과 관계되는 시간파형의 형태를 갖는 신호를 이용하기 위한 다양한 감지장치와 신호처리설비를 사용한다.

국내외적으로 많이 사용되고 있는 MOVAT시스템을 중심으로 몇 가지 진단 시스템에 대하여 검토하였다.

### 2.4.1 MOVATS (Motor Operated Valve Analysis and Test System)

MOVATS사의 상업용 시스템인 MOVATS는 다음의 인자들에 의한 전기적인 신호를 수집·저장·분석할 수 있는 휴대용 장비이다.

- 1) Spring pack 변위
- 2) 전동밸브의 스위치 작동
- 3) 전동기 전류

MOVAT 시스템은 motor operator의 spring pack 변위를 측정하는 추력 측정장치(TMD : Thrust Measuring Device)를 사용한다. 추력 측정장치는 밸브 구동기의 spring pack의 먼지 덮개를 제거하고 설치되는데 이 추력 측정장치는 자체의 플런저가 spring pack preload nut와 접촉하게 설치된다. Spring pack의 변위는 TMD의 풀리와 케이블로 배열된 선형 가변 차동 변압기(LVDT : Linear variable differential transformer)와 접촉되어 있는 플런저에 전달된다.

스프링 팩의 변위와 밸브 스템 추력의 관계는 스프링 팩의 스프링계수와 구동 sleeve와 관계되는 구조, 특히 워퍼와 워퍼기어, 밸브 스템과 스템너트, 구동 스리브의 추력베어링 상호간에 작용하는 효율에 의하여 일차적으로 결정된다.

밸브 스템에 작용하는 추력을 측정하기 위해서 스프링 팩의 변위를 교정하는 절차는 load cell을 장착 후 밸브가 개방되는 방향으로 작동할 때 밸브 스템 또는 스템 연결봉이 load cell에 감지되므로서 측정된다. load cell과 추력 측정장치 신호와의 관계는 밸브가 backseating 운전 또는 밸브가 닫힘에서 열림상태로의 운전기간 중에 측정되어 변환된다. 이것은 밸브가 열림에서 닫힘 행정에서도 측정된다. 이 추력 측정장치는 또한 스프링 팩의 예비부하를 초과하는 워퍼의 축하중과 같이 긴 밸브행정신호를 제공하여 준다.

TMD신호에 추가되는 한 개의 복합 제어 스위치신호는 리미트 스위치, 토크 우회 스위치, 토크 스위치의 개방, 접촉상태를 지시해 줄 수가 있다. 이 제어스위치의 신호가 추력 측정장치의 신호에 추가되어지면 밸브의 seating과 unseating을 나타내는 부하의 변동상태에 대한 스위치작동의 근사점이 쉽게 결정될 수 있다.

클램프형 전류계로서 수집한 전동기의 전류신호의 시간에 대한 파형은 일반

적으로 밸브의 행정시간, 작동전류의 변화와 전동기의 기동 및 밸브의 안착될 때의 최대값을 결정하는데 사용된다. 전동기의 전류신호를 추력 측정신호와 비교함으로써 MOV의 성능열화에 대한 정보를 얻을 수 있다.

MOVAT사에서는 최근 전동기 제어실(MCC : Motor Control Center)에서 전동밸브 전동기의 동력을 측정할 수 있는 장비를 개발하였다. 또한 MOVAT사에서는 MOV운전중 토크 스위치의 각 변위를 측정하는 토크 스위치 변환기를 개발한 것을 발표하였다.

1985년 6월 NPAR Program 초창기에 전동밸브의 성능열화와 비정상적인 유형들이 존재하는지를 확인하기 위하여 미국 NRC의 요구사항에 의한 현장시험으로 그 당시에 MOVAT은 유일하게 상용화된 전동밸브신호 해석시스템이었다.

4곳의 원전에서 36개의 전동밸브가 시험되었으며 그 결과는 NUREG /CR-4380[9]에 보고되었으며 다수의 전동밸브의 비정상 상태를 MOVATS로 시험·분석함으로써 감지되었다. 이들 비정상상태의 원인은 전동밸브 스위치의 부적합한 설정에 기인하며, 부적합한 스위치 설정의 원인은 대부분 그 자체가 열화를 유발할 수 있는 것으로 보고되었다. 또한 MOVATS의 기술은 ASME Code에서 요구한 조건보다 개선된 검사방법이나 현시점의 MOVATS 기술은 원자력발전소의 전동밸브 운전 중 노화정도를 결정하기에는 적절한 방법은 아니라고 결론지었다.[5]

표 2.1은 MOVATS로 확인된 전동밸브의 비 정상상태들을 나열한 것이며, 많은 수의 전동밸브가 하나이상의 비정상상태가 있음에 밝혀졌다. 이러한 문제점들은 NRC Bulletin. 85-03[10]에 상세하게 기술되어 있다.

표 2.1 MOVATS에 의해 확인된 MOV의 비정상 유형 현황

비 정 상 유 형	비율(%)	비 정 상 유 형	비율(%)
By-pass 스위치의 부적절한 설정	75	Torque switch의 교정 부적합	50
Torque switch의 불균형	33	과도한 Spring pack 간극	17
과도한 Spring pack 조임	8	과도한 관성력	8
Stem nut locknut의 헐거움	8	밸브의 back seating 불량	8
밸브 Stem 마모	8	Grease의 고화	8
Gear 마모	6	전동기의 열화	3
기타 비정상 유형들	35		

#### 2.4.2 VOTES(Valve Operation Test and Evaluation System)

VOTES는 미국 Liberty Technology Center Inc사에서 개발한 전동밸브진단 시스템으로 다음 인자들을 감시한다.

- 1) 밸브 스템의 추력
- 2) 전동밸브 스위치 작동
- 3) 전동기 전류 등

VOTES의 특징은 밸브 yoke에 응력 측정장치를 영구적으로 설치한다. 이 센서는 밸브작동으로 발생하는 밸브 스템의 부하방향을 갖는 크기가 같은 힘이 작용하는 요크의 응력을 측정한다. 응력 측정장치는 설치될 때 가해진 예비 응력변형이 주어진 상태에서 인장과 압축하중을 측정하는 기능을 갖는다.

VOTES 센서는 응력과 힘사이에 기하학적 관계를 갖는 밸브하중에 의한 밸브 스템의 응력측정을 위하여 밸브 스템에 ring형의 교정기를 부착하여 교정된다.

#### 2.4.3 전동밸브 작동기 진단시스템

전동밸브 작동기 진단시스템(Valve Motor Actuator Diagnostic system)는 미국 Wyle Laboratories사에서 상용화시킨 전동밸브 진단시스템으로 다음과 같은 운전 변수를 측정한다.

- 1) Spring pack 변위
- 2) 전동밸브의 스위치 작동
- 3) 전동기 입력 전류
- 4) 전동기 입력 전압
- 5) 밸브 스템의 위치
- 6) 밸브 스템의 추력

밸브 스템의 추력은 전동밸브에 설치된 load washers로서 측정되며, 다른 변수들은 clamp-on ammeter, 선형 변위 변환기(LDT : Linear Displacement Transducer)를 사용하여 수집된다. Wyle laboratories 사에서는 최근 전동기 전류 주파수 스펙트럼 분석기능을 이 진단시스템에 추가시켰다.

#### 2.4.4 MAC (Motor Actuator Characterizer)

MAC는 미 Limitorque사의 상용화된 전동밸브 진단 시스템으로 다음과 같은 운전변수를 감시한다.

- 1) 전동기 전류
- 2) 전동 작동기의 토오크 출력
- 3) Spring pack의 변위
- 4) 밸브 스템의 추력
- 5) 전동밸브 스위치들의 작동상태

clamp-on probe를 이용한 전동기 전류, 선형 변위 변환기(LVDT)를 이용한 스프링 팩의 변위, clamp-on 접속을 이용한 토크 스위치의 접점에 연결하는 MAC 시스템은 특이한 감시체계를 갖고 있다. 그 중에 하나가 리미트 스위치 로터의 위치를 결정하는데 사용된다.

MAC 시스템은 작동기에서 출력되는 양쪽 밸브행정 방향의 출력 토크를 측정할 수 있다. 임시로 설치되는 교정된 load cell은 작동기의 토크 출력에 직접 관계되는 스프링 팩의 측방향 힘을 측정하고, 힘을 토크로 환산은 컴퓨터에 의하여 수행된다. 출력되는 추력의 측정은 정상적인 작동기 하우징커버 볼트에 위치하는 응력 측정용 볼트에 의하여 우선적으로 측정이 된다. Limitorque사에서는 자사의 출력되는 추력

의 측정방법을 응력계가 부착된 작동기 하우징 덮개판을 사용하도록 개조하였다.

하우징 덮개판은 밸브가 닫힐 때 추력 하중을 전달하는 상향 레이퍼 롤러 베어링의 외륜과 같은 기능을 가지므로 오직 밸브가 개방된 상태에서 닫힘방향으로 작동될 때 밸브 스템의 추력 측정에 사용될 수 있다.

#### 2.4.5 Microprocessor control and Diagnostics system

EPRI의 지원으로 미국의 Foster miller사에서는 Limitorque사의 작동기를 진단하는 시스템을 개발하였으며, 다음과 같은 전동밸브 운전변수에 대한 자료를 수집한다.

- 1) Spring pack의 변위
- 2) 스템 위치
- 3) 전동기 전류 및 전압

spring pack의 변위는 밸브가 닫힘에서 열림방향으로 작동할 때 load cell에 밸브 스템이 back seating됨으로서 밸브 스템의 추력에 상응하는 출력신호를 제공도록 설계된 spring loaded linear potentiometer에 의하여 검출된다. 밸브 스템의 위치는 작동기의 위치 지시기와 맞물린 rotary position potentiometer에 의하여 결정되어 진다.

감시대상인 데이터는 스프링 팩 변위가 사전에 설정된 값에 도달하였을 때의 비율을 감지하는 마이크로 프로세서가 내장된 예측회로에 의하여 밸브가 작동 중에 연속으로 수집·평가된다. 이 시스템은 밸브의 안착과정에서 관성력에 의하여 유발되는 추가적인 추력을 보상키 위하여 최종 단계인 스템의 추력 설계치에 도달하기 전에 전동기를 정지시키는 용도로 사용되고 있어 이 시스템은 전동밸브가 닫혔을 때 토크 스위치의 기능을 대신할 수 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

전동밸브의 고장 모사를 위한 실험대상 밸브는 원자력 발전소에 많이 사용하고 있고 원자력발전소 3, 4호기에 (주)삼신에서 제작 납품한 제품과 같은 그림 3.1에 보인바와 같은 3 inch gate 밸브와 그림 3.2에 보인바와 같은 4 inch globe 밸브로 사양은 표 3.1과 같다. 2가지 전동밸브의 구동은 교류 3상 460V로 하였다.

실험장치 및 측정장치의 구성은 그림 3.3과 같이 실험용 밸브, 구동 전압 변화와 밸브의 행정에 걸리는 시간을 측정할 수 있는 (주) 삼신에 설치된 그림 3.4에서 보인바와 같은 전동밸브 구동 제어반, 전류 및 전압 그리고 전력신호를 AC와 DC신호로 변환하여 측정할 수 있는 전력 분석계, 전류 및 전압 그리고 전력신호를 감시할 수 있는 디지털 오실로스코프(Lecroy 9310AM), 그리고 실험실에서 신호를 분석하기 위하여 출력된 신호를 저장할 수 있는 데이터 기록계(RACAL Data Recorder)등으로 구성되어 있다. 전력 분석계(Power Analyzer)는 전류를 측정하기 위하여 전류계(Current Transformer, 100:1) 2개를 연결하고 전압을 측정하기 위하여 3상 전원에 직접 연결하도록 그림 3.5와 같은 회로로 구성 제작하였다. 전력 분석계에는 전기회로의 교류부하의 변동에 따라 전류 전압의 변화량을 DC 미소 전압과 전류로 변환하는 전류 전압형 변환기(AC Current & Voltage Transducer, 응답속도: 0.2sec이하) 5개와 전기회로의 교류부하의 변동에 따라 전력과 전력량을 DC 전력/전력량 변환기(응답속도: 0.2sec 이하) 1개로 구성하였다.

전동밸브에 가하는 차압은 밸브가 닫혀 있는 상태에서 공압 구동 고압펌프(Teledyne Fluid Systems, Max. Outlet pressure.: 33500 psig)를 이용하여 고압수를 주입하여 정압을 가했으며 밸브 전후에서의 압력은 브르돈 관 압력계를 부착하여 측정하였다.

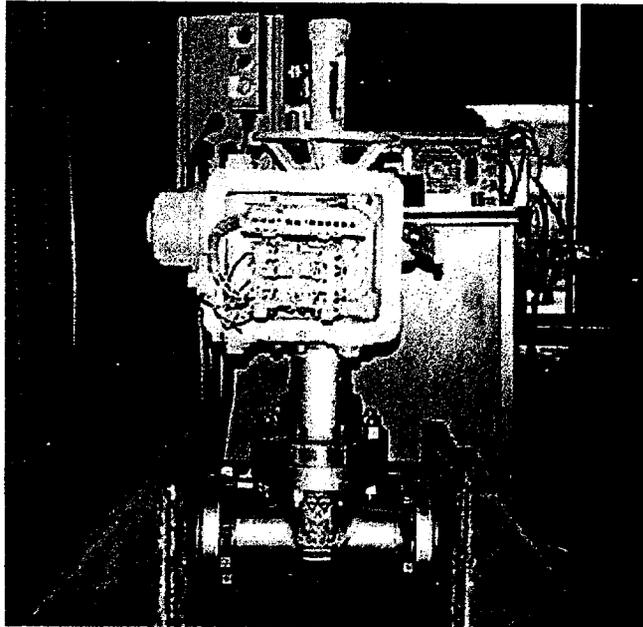


그림 3.1 실험용 gate 밸브 전경

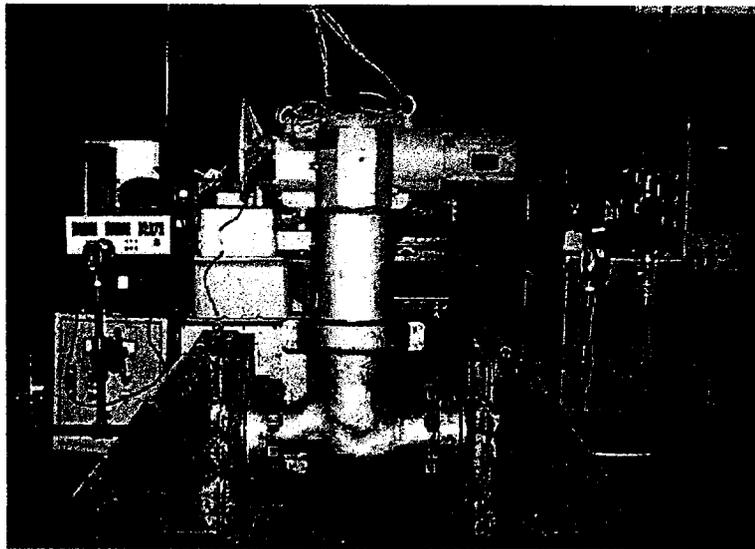


그림 3.2 실험용 globe 밸브 전경

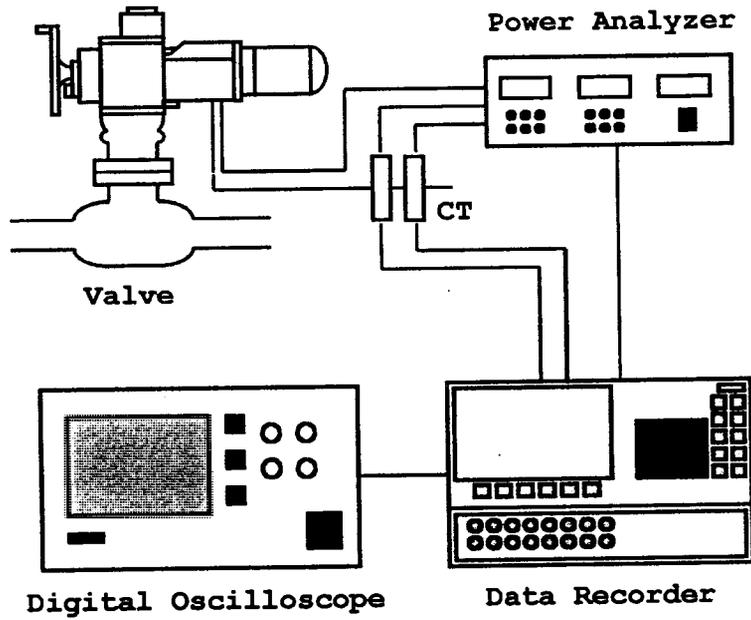


그림 3.3. 실험 및 측정장치 구성 개략도

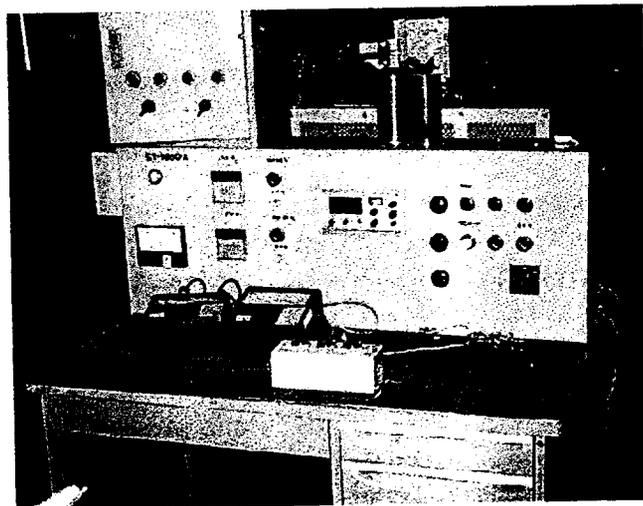


그림 3.4. 전동밸브 구동 제어반 전경

표 3.1. 실험에 이용한 전동 밸브의 사양

		Gate Valve	Globe Valve
Valve	Tag. No.	CH-534	SI-668
	Size	3"	4"
	Manufacturer	Samshin Limited	Samshin Limited
	ANSI rating	150 lb, 120 °F	1147 lb, 300°F
	Stem diameter	20 mm	39.5 mm
	Stem thread	0.165 pitch, 0.165 lead	0.286 pitch, 0.286 lead
	Stem travel	4.13 in	1.77 in
Actuator	Type	SMB-000-2	SMB-0-25
	Manufacturer	Limitorque/Nippon Gear	Limitorque/Nippon Gear
	Motor pinion Gear	27 teeth	34 teeth
	Worm shaft gear	18 teeth	38 teeth
	Worm gear	50 teeth	38 teeth
	Overall ratio	33.33 : 1	42.47 : 1
	Unit efficiency	0.3	0.3
	Stem factor	0.00684	0.013
	Limit switch	4 rotor(16 contacts)	4 rotor(16 contacts)
	Torque switch	open/close direction	open/close direction
Motor	Rated horsepower	0.33 Hp	3.12 Hp
	Rated voltage	460 V	460 V
	Rated Current	0.8 A	6.0 A
	Rated speed	1560 rpm	1530 rpm

### 3.2 실험 방법

본 실험은 3" 150lb의 gate 밸브와 4" 1147lb의 globe 밸브에 대하여 밸브 본체에서 발생 가능한 고장 유형과 액츄에이터의 토크와 리미트 스위치 조정 부적절 등을 모사하여 실험을 수행하였다.

- 정상상태
- 전압강하 (degraded voltage)
- 밸브 스템 윤활 기능저하 (degraded valve stem lubrication)
- 스템 패킹의 조임 부적절
- 토크 스위치의 설정값 부적절
- 리미트 스위치의 설정값 부적절
- 밸브 스템의 taper, 마모, bend
- 밸브시트 내의 이물질 (obstruction in valve seat area)

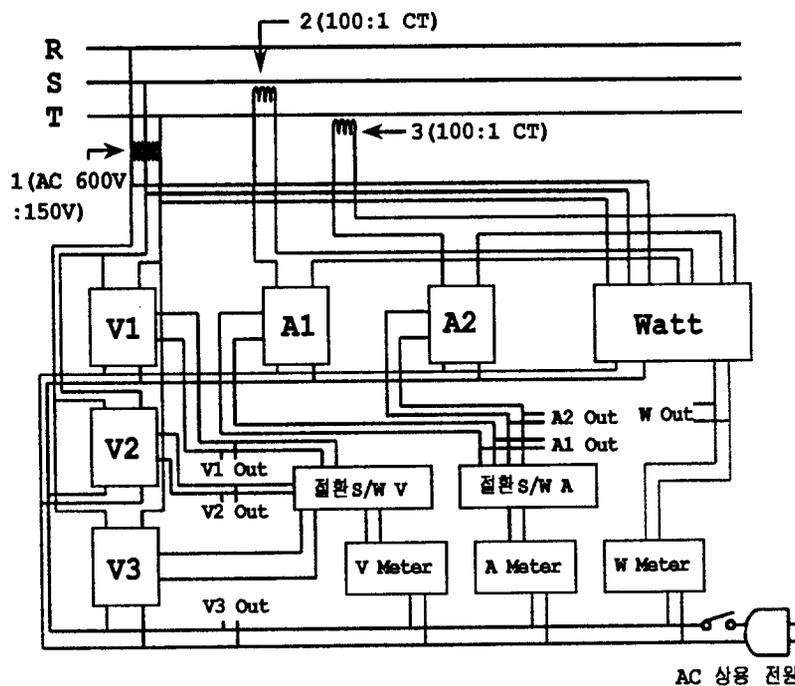


그림 3.5. 전력 분석계 회로도

실험은 각 조건에 대하여 3번의 실험을 수행하였으며, 전압과 전류신호는 주파수 분석을 위한 AC신호와 시간에 따른 신호변화를 분석하기 위한 DC신호 그리고 전력은 DC신호를 데이터 레코더에 저장하여 실험실에서 신호분석장치인 Digital Oscilloscope에 입력하여 ASCII코드로 데이터를 받아 프로그램으로 분석하였다. 각 조건에 대한 행정시간은 전동밸브 구동 제어반에 설치된 시간측정장치를 이용하였으며, 각 고장유형에 대한 실험방법은 다음과 같다.

#### 1) 정상상태의 차압변화

공기구동 고압펌프(Teledyne Fluid Systems, Max. Outlet pressure.: 33500 psig)를 이용하여 게이트 밸브와 글로브 밸브가 닫혀있는 상태에서 정압을 가하여 전류, 전압 및 전력의 변화를 관찰하였다.

gate밸브는 8, 10 그리고 13  $kg_f/cm^2$ 의 차압을 가하였으며 globe밸브는 40, 50, 60, 70 그리고 80  $kg_f/cm^2$ 로 변화하면서 전압, 전류 그리고 전력의 변화를 측정하였다.

#### 2) 전압강하 (degraded voltage)

gate밸브와 globe밸브의 정상상태의 전원은 460V이다. 본 실험에서는 전동기에 공급되는 전압을 전동밸브 구동 제어반에서 500V, 430V, 400V, 380V, 360V, 340V, 그리고 320V로 변화시키면서 측정하였다.

#### 3) 밸브 스템 윤활 기능저하 (degraded valve stem lubrication)

전동밸브에서 스템과 슬리브 사이의 윤활 기능이 저하된 상태를 모사한 것으로서 실제 실험에서는 스템과 슬리브에 묻어있는 윤활제를 모두 닦아낸 후에 차압에 따라 신호를 얻었다.

#### 4) 스템 패킹의 조임 부적절

스템 패킹의 조정은 토크 렌치를 이용하여 기준값을 정한 후, 과도하게 조이

거나 느슨하게 조임상태에 대하여 측정하였다.

5) 토크 스위치의 설정값 부적절

gate밸브와 globe밸브 각각에 대해 토크 스위치의 설정값을 표 3.2와 같이 변화하며 측정하였다.

표 3.2 토오크 스위치 설정치

	Open	Close	비고
Gate Valve	1.5	1.5	표준상태
	1.5	1.0	
	3.0	3.0	
	3.5	3.5	
Globe Valve	1.5	1.5	표준상태
	1.6	1.6	

6) 리미트 스위치의 설정치 부적절

리미트 스위치의 설정치를 바꿔 작동시간을 변화시킴으로써 정상상태의 행정 시간보다 짧게 하는 경우와 길게 조정하는 경우에 대하여 실험하였다.

7) 밸브시트 내의 이물질 (obstruction in valve seat area)

gate밸브의 경우 직경 3.2mm, 3.1mm, 2.23mm의 용접봉을 밸브 좌에 삽입한 경우, 밸브판에 구리스를 칠한 후 선삭 칩을 문힌 경우 그리고 두께 0.8mm의 U자형 황동띠를 밸브판이 유입되는 밸브몸체에 끼우는 경우들에 대하여 열림에서 닫힐 때에 대한 신호를 측정하였다.

8) 밸브 스템의 taper, 마모, bend

gate 밸브와 globe 밸브의 스템을 선반으로 그림 3.6, 3.7과 같이 선반으로 약 3°로 기계 가공하여 실험하였다.

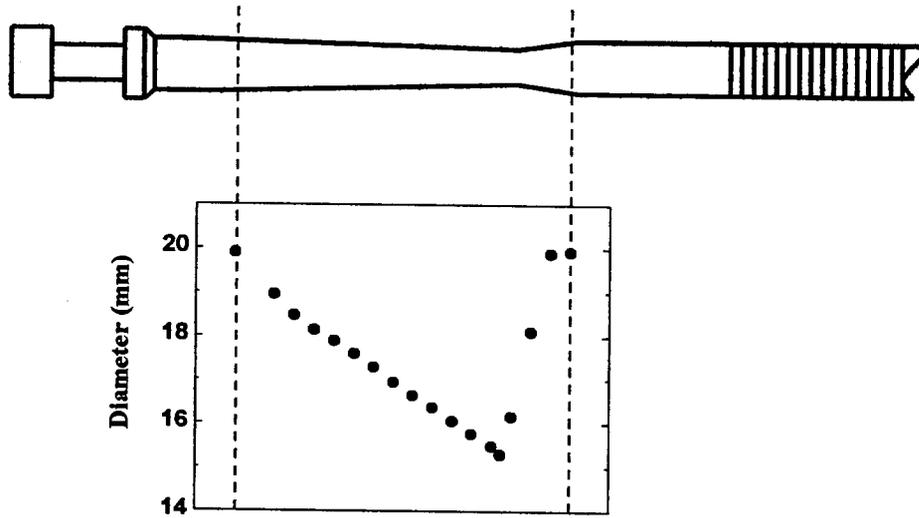


그림 3.6. Gate밸브 스템 taper가공 직경변화

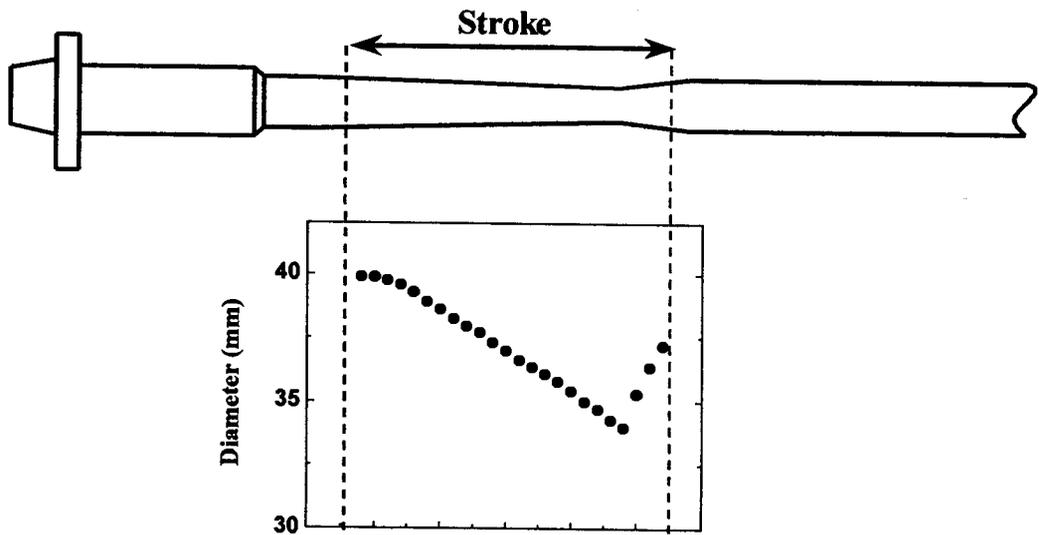


그림 3.7. Globe밸브 스템 taper가공 직경변화

## 4. 실험결과 및 고찰

전동밸브의 전동기는 기계적 부하에 대한 변환기 역할을 하는 센서로 ORNL[5]에서는 실험연구를 통하여 자료를 얻고, 개발한 전류신호 분석기법(MCSA)을 이용하여 분석·고찰하여 전동기의 전류신호가 전동밸브 진단기법으로 적절하다는 결론을 발표하였다. 전동기 입력전류·전압 및 전력신호에 의한 전동밸브 진단은 간단하게 전선을 전동기에 연결된 어느 위치에서든 측정이 가능하기 때문에 전동밸브에서 뿐만 아니라 전동기 제어실 등에서 원격으로 측정이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 원자력 발전소에서 유량 제어용으로 많이 사용되고 있는 gate밸브와 globe밸브를 대상으로 밸브 본체의 결함을 모사하여 전동기 부하에 따른 전압, 전류 그리고 전력을 측정하였는데 전류·전압은 시간 도메인 분석을 위한 DC신호와 주파수 도메인으로 분석하기 위한 AC신호를, 그리고 전력은 DC신호를 동시에 자기 기록계에 저장하여 신호 분석기를 이용하여 분석·고찰하였다.

### 4.1. gate 밸브

#### 4.1.1. gate 밸브의 정상상태

그림 4.1은 gate밸브의 열림에서 닫힘 행정과 닫힘에서 열림 행정에서 전동기 입력 전류와 전력의 시간에 따른 직류신호 파형을 전 행정에 대하여 보인 것으로 gate밸브 운전에서 나타나는 특성신호들을 보여주고 있으며, 전력신호는 전류신호가 변화되는 같은 시간에 대해 민감하게 변화하고 있다. 구동전류와 전력의 변화는 밸브 행정동안 스템과 패킹간의 마찰, 또는 비정상적인 밸브 부하가 발생될 때 또는 특정 위치영역을 지나갈 때 나타나는 것으로 보인다.

밸브 스템이 움직이기 시작할 때 구동전류의 변화는 일차적으로 스템 패킹 마찰 부하와 기어 train 비효율성을 극복하기 위해 요구되는 추가적인 전동기 토크를 반영한다. 구동전류는 패킹 마찰이 증가할 때 올라가고 패킹 마찰이 감소할 때 떨어진다. 밸브 행정동안의 전류의 주기적 특성은 전동기의 “slip frequency”에 있다. 토크 스위치 단락에서의 전동기 전류 peak의 크기는 패킹 마찰과 밸브 스템 seating에 필요한 추가적인 추력을 총 스템 부하에 대한 반작

용으로 나타나는 전동기 토크를 보여준다.

그림 4.2는 열림에서 닫힘 행정의 초기와 끝 부분에서 전류와 전력신호를 확대한 것으로 구동부하에 대한 특성을 잘 나타내고 있다. 초기의 전류신호는 Inrushed peak가 발생하고 약 0.5초 후에 밸브 스템의 작동이 시작되는 것을 보여준다. 이러한 시간지연은 웬기어의 lug가 구동 슬리브와 접촉하기 전까지의 회전과 스템 너트와 스템 기어와 맞물림 전에 발생하는 구동 슬리브 회전 등에 의한 것으로 워엄기어와 구동 축 lug, 스템 너트의 간극에 따라 밸브마다 달라진다. 이때 전력신호는 전류신호와 같이 Inrushed peak가 발생하고 전동기 부하에 의한 역률이 급격히 저하하여 밸브 스템 구동이 시작하면서 증가하는 경향을 나타나고 있다. 열림에서 닫힘 행정에서 밸브가 밸브좌에 접촉하여 끼워질 때, 전류는 증가하는 경향을 보여 토크 스위치가 단락되는 순간에 최대치를 나타내고 있으나 전력은 seating되는 순간 부하로 인하여 감소하는 경향을 보이다가 peak를 나타내고 있어 전류신호보다 seating 순간을 분명하게 알 수 있다.

그림 4.3은 닫힘에서 열림 행정에서 초기와 끝 부분에서의 전류와 전력신호를 나타낸 것으로 전류신호는 초기의 hammer blow와 밸브가 밸브좌를 빠져나오는 순간신호를 잘 보여주고 있으나 전력신호는 약간의 변화를 감지할 수 있지만 정확한 구별하기에는 어려움이 있다. 이는 전력측정 장치의 응답속도 특성에 원인이 있는 것으로 판단된다. 밸브의 열림 행정에서 작동하는 리미트 스위치가 단락되는 순간에는 전력신호가 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 여기에서 지배적으로 나타나는 특성은 gate밸브의 unseating에 관련된 전류의 과도현상이다. 이와 같은 과도시의 전류 상승은 밸브판을 밸브 몸체로부터 뽑기 위한 스템 추력 생성에 요구되는 전동기 토크발생을 나타내는 것이다. 또한 각 행정동안 전류와 전력신호는 Unseating peak뿐만 아니라 운전 중 전류, 전력의 크기 그리고 전동기 작동자 hammerblow 그리고 초기 밸브 스템 작동에 의한 여러 변곡 신호들을 관찰할 수 있는데, 이들 신호의 크기는 물론이고 발생빈도가 중요하다. 예를 들어 hammerblow와 초기 스템 작동간의 시간 차이는 스템 너트와 스템과의 간격을 나타내는 것으로 전동기 속도, 기어 비, 그리고 스템 추력 pitch들의 상태에 따라 달리 나타나게 된다. 또 다른 예로 초기 스템 작동과 gate unseating 시작 사이의 시간은 게이트와 스템의 연결 표면간의 간격을 나타내는 것으로 이 시간 차이는 이들 두 표면에서의 마모를 감지하는데 유용하다.

그림 4.4는 gate밸브가 닫힐 때 전류의 AC신호를 예로 나타낸 것으로 밸브가

밸브좌에 삽입될 때는 전류의 신호가 커지는 경향이 보이고 있어 진단의 한 방법으로 활용할 수 있을 것이다.

gate 밸브의 열림과 닫음 행정에서 전류의 AC신호에 의한 스펙트럼을 그림 4.5에 도시한 것으로 전동기 속도와 미끄럼 주파수가 뚜렷하게 나타나 있다.

전동기 전류신호 평가에서, 전동기 전류신호에 대한 주파수 분석은 전동밸브 진단에 효과적으로 이용될 수 있다는 것이 이미 확인되었으며, 미끄럼 주파수(SF)는 전동기 속도변화를 나타내는 인자로 그림 4.5에 두드러진 peak를 보이며 다음과 같이 정의된다.[5]

$$SF = (\text{동기 속도} - \text{실제 속도}) \times (\text{전동기 극 수})$$

또한 유도 전동기의 실제 전동기속도(actual motor speed : AMS)는 다음과 같이 SF로부터 결정된다.

$$AMS = 60 \times [30 - (SF/4)]$$

여기서 SF는 hertz 그리고 AMS는 RPM 단위를 나타낸다.

#### 4.1.2. gate 밸브의 전압 강하

전동밸브의 전동기 입력 전력신호특성을 바꾸게 하는 요소 중의 하나는 전압이다. 게이트 밸브의 정상적인 운전조건에 대한 전압은 460V이나 전압변화에 따른 전동밸브의 특성을 알아보하고자 320V~500V범위에서 20V~30V씩 전압을 변화하면서 전동기 전류와 전력신호를 측정하여 분석하였는데, 전압의 변화에 따른 운전전류의 변화, 행정시간 및 토크 스위치 단락시의 전동기 전류 최고치 등에 대한 변화가 진단의 척도가 될 것이다.

그림 4.6은 gate 전동밸브의 입력 전압변화에 대한 열림에서 닫힘 전 행정에서 나타내는 전류신호를 보인 것으로 전압이 정상운전전압보다 낮아질수록 운전전류는 부하에 대한 저항력의 증가로 인하여 그 크기가 낮아지는 경향을 보이며, 행정시간은 길어짐을 나타낸다.

그림 4.7은 gate 밸브의 열림에서 닫힘 행정에 대한 전류신호의 끝 부분을 확대한 것으로 토크 단락에 의한 peak의 크기는 전동기가 밸브를 구동하는데 필요한 토크를 발생시키기 위하여 정상전압에서 보다 낮아질수록 크게 나타나며, 행정시간도 정상전압보다 낮아질수록 길어지고 있음을 알 수 있다.

그림 4.8은 gate 밸브의 입력 전압변화에 대한 열림에서 닫힘 전 행정에서 나타내는 대한 전력신호를 보인 것으로 정상전압보다 낮은 전압에서 토크 스위치

의 단락 시 peak가 크게 나타남으로써 전류신호와 같은 경향을 보인다.

그림 4.9는 gate 밸브의 입력 전압변화에 대한 단힘에서 열림 전 행정에 대한 전류신호를 보인 것으로 열림에서 단힘 행정과 같이 전압이 증가할수록 운전전류는 증가하는 경향을 보이며 행정시간도 짧게 나타나고 있다. 또한 구동 후에 발생하는 hammerblow와 unseating 신호 크기가 정상 입력 전압보다 낮아질수록 크게 나타남을 보이고 있다.

그림 4.10은 gate 밸브의 입력 전압변화에 대한 단힘에서 열리기 시작할 때의 전류신호를 나타낸 것으로 hammerblow와 unseating의 발생위치가 정상전압보다 낮을수록 늦게 나타남을 보인다.

그림 4.11은 gate 밸브의 입력 전압변화에 대한 단힘에서 열림 전 행정에 대한 전류신호를 보인 것으로 전류신호와 같은 경향으로 hammerblow와 unseating이 발생하는 위치에서 peak를 나타내고 있으며, 리미트 스위치가 단락될 때 전류신호에서는 나타나지 않았으며 정상운전 전압에서는 나타나지 않는 peak가 그 외 전압에서 나타나는 것은 행정시간의 변화로 인한 리미트 스위치의 단락위치가 달라짐에 따라 작용되는 부하에 의해 나타나는 현상으로 보인다.

토크와 리미트 스위치의 조정이 일정한 상태에서 행정시간은 초기 손상과 성능저하를 예측하는데 유용한 자료가 된다. 따라서 그림 4.12는 gate 밸브가 열림에서 단힘, 단힘에서 열림의 전 행정시간을 전압변화에 대하여 도시한 것으로 열 때보다는 닫을 때의 시간이 초기 끼어있는 밸브가 밸브좌를 빠져 나오는데 필요한 시간으로 약간 더 걸리는 것으로 나타나며, 예상했던 대로 전압이 낮을수록 행정시간이 길어짐을 알 수 있다.

gate 전동밸브의 전동기 입력 전압변화에 대한 전류신호에 대한 스펙트럼을 그림 4.13과 그림 4.14에 나타낸 것으로 정상 전압보다 낮은 전압에서 슬립 주파수의 진폭은 감소하는 경향을 보여 전압의 감소는 전동기에 입력 전류는 증가하고, 기계부하 변화에 따른 민감도는 각각 감소하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.1.3. gate 밸브 스템 직경변화

밸브 스템 직경변화에 대한 모사시험은 스템의 마모, 부식으로 인한 불 균일한 스템 직경, 굽어진 스템, 그리고 가늘어진 스템 등의 상태를 진단할 수 있는 신호를 얻을 수 있는 것으로, 밸브가 작동하는 중에 스템과 패킹이 접촉하여 기계적 마찰부하가 작용하는 위치에서 구동부하가 커져 전류, 전류신호의 변화를

나타내게 될 것이다.

그림 3.6과 같이 가공한 스템을 설치한 gate 밸브의 전동기 전류와 전력신호 변화를 그림 4.15에 도시하였다. 스템을 가공하여 첫 시험하였을 때, 전류와 전력신호가 열림 위치에서 닫힐 때에는 시간에 따라 감소하고, 닫힘 위치에서 열릴 때에는 반대로 증가하는 경향이 약간 나타내었으나, 수 차례의 실험을 반복하면서 이러한 현상은 감쇄되어 경향이 나타나지 않았다. 또한 밸브가 작동하는 중에 스템과 패킹이 접촉하여 기계적 마찰부하에 의하여 신호의 변화가 나타나기 때문에 패킹의 조임정도에 따라서 이러한 현상은 감지할 수 없는 경우도 발생할 것이다.

#### 4.1.4 밸브의 이물질

gate 밸브에서 밸브 판과 밸브 좌에 끼인 이물질을 감지하였을 때 나타날 전류와 전력신호를 확인하기 위하여 직경이 다른 2.23, 3.1, 및 3.2mm의 스테인레스 강 용접봉을 gate 밸브 좌에 걸쳐놓은 경우와 밸브 판에 구리스를 바르고 선삭 칩을 붙인 경우 그리고 2.23mm 용접봉을 약 0.5mm 두께로 두들겨 납작하게 하여 밸브판이 유입되는 부분에 U자형으로 삽입한 경우 등에 대한 열림에서 닫힘의 행정에서 나타나는 신호를 확인하였다.

그림4.16과 그림4.17은 직경이 다른 용접봉을 gate 밸브 좌에 걸쳐놓은 상태에서 나타나는 전류와 전력신호를 전 행정에 대하여 도시한 것으로 실험 후 분해하여 확인한 결과 모든 용접봉이 밸브 판과 밸브 좌에 의하여 절단되어 있었다. 그림4.16의 전류신호에서 밸브 판이 용접봉에 닿으면서 2번의 peak를 보이고 있는데 일차 peak는 굽힘을 요하는데 필요한 전동기의 기동전류로 절단되면서 떨어지고, 2차 peak는 용접봉이 절단된 후 밸브 판과 밸브 좌에 끼임으로서 나타나는 것으로 용접봉의 강도가 크면 peak도 크게 나타난다. 또한 밸브 판에 끼인 용접봉의 영향으로 토크peak가 정상상태보다 크게 나타나고 이다. 그림 4.17에 보이는 전력신호는 전류와 달리 밸브 판이 용접봉에 닿는 위치에서 약간 감소하는 경향을 나타내고 있으나 전류신호에서와 같이 뚜렷한 변화는 나타나지 않았다.

그림 4.18은 gate 밸브 판에 구리스를 바르고 선삭 칩을 바른 후 닫는 경우로 칩이 밸브 판에 밀려 완전히 닫히기 전에 구동이 정지하였다. 그림에서 전류와 전력신호는 같은 경향을 보이며 칩의 마찰로 인하여 구동이 정지되면서 초기 벨

브구동 peak와 같은 크기로 유지하였다.

그림 4.19는 2.23mm 용접봉을 약 0.5mm 두께로 두들겨 납작하게 한 후 밸브 판이 유입되는 부분에 U자형으로 삽입하여 열림에서 닫힘 행정에서 나타나는 신호를 나타낸 것으로 실험 후 분해하여 확인한 결과 초기에는 밸브 판과 밸브 몸체 사이에 끼어 깎이다가 아래 부분에서 절단되어 끼이므로 구동이 되지 않았다. 따라서 나타나는 신호도 밸브 좌에 걸쳐놓은 용접봉의 경우와 유사한 2차페의 peak를 보이며 끼임 위치에서는 구동시의 peak와 같은 크기의 기동 전류와 전력이 비정상적으로 작용하는 경향을 보이고 있다.

#### 4.1.5 밸브 스템 패킹의 조임

gate 밸브의 스템 패킹 그랜드의 기능은 밸브 스템과 밸브몸체와의 밀봉역할을 한다. 패킹 그랜드는 밸브 요크 바닥 면에 위치하며, 스템 패킹의 조임에 의해 밸브 부하가 발생된다. 그림 4.20은 밸브를 닫을 때 전동기 전류신호에 대하여 패킹 조임의 영향에 대한 예를 도시하고 있다. 그림에서 도시하고 있는 바와 같이 스템 패킹의 조임 상태가 단단할수록 구동전류는 증가함을 보여주고 있으며 스템과 패킹사이의 마찰 부하로 인하여 일정하지 않는 신호를 보이고 있다. 또한 예상했던 바와 같이 패킹 조임이 단단하게 조일수록 전동기 전류가 증가하며 전동기 속도는 감소하여 행정시간이 길게 나타난다.

그림 4.21은 닫힘에서 열림 상태에서 패킹의 조임 정도에 따른 전류와 전력신호를 도시한 것으로 패킹을 느슨하게 조정하였을 때와 단단히 조였을 때 전류와 전력신호를 나타낸 것으로 단단히 조였을 때 전류와 전력은 증가하고 있으며 스템의 부하에 의하여 전동기 속도가 감소하므로 행정시간도 길게 나타난다. 또한 스템을 조임으로써 구동전류와 전력신호의 변화가 균일하지 못한 경향을 보이고 있다.

#### 4.1.6 토크 스위치의 설정

전동밸브에서 토크 스위치는 열림에서 닫힘의 행정에서 전동기 구동을 정지할 목적으로 주로 사용된다. 토크 스위치는 스위치 앞면에 있는 지시기에 맞추어 토크 스위치 축 회전에 한 쌍의 전기적 접촉을 열리게 하는 기능을 한다.

토크 스위치 축의 회전은 전동기의 출력 토크에 비례하며, 스템 너트에 의하여 밸브 스템 추력을 전달해 준다. 토크 스위치의 설정치가 증가할수록 전동기

를 정지시키는 회전력 역시 증가한다. 더 큰 전동기 구동 출력 토크로 맞추면 토크 스위치 작동 점에서 더 큰 스템 추력을 필요로 하게 된다. 일정한 밸브 패킹 그랜드 스템 부하에 대하여 토크 스위치 설정치가 높을수록 밸브가 닫히는 순간에 더 높은 밀봉하중을 가한다. gate 밸브의 경우에는 이러한 하중은 전동기가 정지한 다음에도 유지되어야 하고, 밸브가 열리고, 밸브 판이 밸브 좌로부터 느슨해질 때까지 제거되지 않는다.

그림 4.22는 gate 밸브의 열림에서 닫힘 행정에서 토크 스위치 설정치를 1.5, 3.0, 그리고 3.5로 조정하였을 때 전류신호를 나타낸 것으로 토크 설정치를 크게 하면 밀봉하중을 가하는 시간으로 행정이 길어지고 토크 peak가 크게 나타난다. 그림 4.23과 그림 4.24는 닫힘에서 열림 행정에서 토크 스위치 설정치를 1.0, 3.0, 그리고 3.5로 조정하였을 때 전류와 전력신호를 나타낸 것으로 열림에서 닫힘 행정과 같이 행정에 걸리는 시간이 길어지고 전동기 전류 최대치의 진폭이 밸브가 닫힘에서 열리는 순간에 역시 증가함을 나타내며, 열림에서 닫힘 행정과 다른 점은 끝 부분에서 짧은 시간에 peak가 발생한다. 전력신호도 전류신호와 같은 경향을 보이고 있다.

전동기 전류 입력파형은, 토크 스위치 설정치 증가에 따라서 전동기 전류 최대 진폭이 밸브가 닫히고 열리는 순간에는 역시 증가함을 보여주고 있다. 전동기 AC전류 파형에서도 밸브가 닫힘 위치에서 열리는 과정이 시작되는 시점에, 앞서 밸브가 닫히는 동안에 발전된 부하가 증가할수록 밸브가 열릴 때 전동기 전류의 순간변화 진폭이 증가할 뿐만 아니라 밸브가 열린 후에도 나타났다. 이것은, 밸브가 닫히는 과정에서 스템 압축부하가 증가할수록 이러한 부하를 제거하는 시간이 필요함을 나타낸다. 이러한 스템 압축제거 시간은 전동기 구동방향을 변경하여 밸브 판을 위로 움직이기 시작하는데 필요한 전체 시간에 영향을 미친다.

밸브 판을 여는데 필요한 전동기 전류 최대 진폭은 밸브 좌로부터 밸브 판을 빼내는 데에 필요한 스템 추력에 영향을 미치고 그리고 밸브가 열리기 시작할 때의 시간은 전동기가 구동하기 시작하는 시점에 존재하는 스템의 압축부하에 의하여 결정되기 때문에 밸브 판과 밸브 좌의 형상에 상관관계가 있다. 한편, 밸브가 열릴 때 전동기 전류 최대 진폭이 너무 적으면 밸브 판이 밸브 좌에 밀착되지 않을 가능성이 커서 부적절하게 밸브가 닫혀있게 될 것이다.

#### 4.1.7. 리미트 스위치 부적절

전동밸브에서 리미트 스위치는 닫힘에서 열림의 행정에서 전동기 구동을 적절한 위치에서 정지할 목적으로 주로 사용된다. 따라서 리미트 스위치의 부적절한 조정은 전동기가 정지되어 밸브가 완전히 열리지 않는 경우가 발생하게 된다.

그림 4.25는 gate 밸브의 리미트 스위치가 열림에서 닫힘 행정에 대해 너무 빠른 위치에 조정하였을 때와 정상보다 늦게 조정되었을 때의 전류와 전력신호를 도시한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 리미트 스위치가 너무 빠른 위치로 조정되었을 때는 밸브가 완전히 닫히지 않고 정상보다 늦게 조정되었을 때는 밸브가 과도하게 닫힘을 전류신호로부터 알 수 있으며 행정에 걸리는 시간에 차이가 나타남을 알 수 있다.

#### 4.1.8. 밸브 판 고착현상

원자력발전소에서 gate 밸브 판의 고착은 열적인 원인이나 오랜동안 운전하지 않아 생긴 부식 또는 이물질의 끼임으로 고착이 일어나기 쉽다. 본 실험에서는 열적 고착은 모사가 쉽지 않아 스템을 강제로 상승하지 못하도록 장치를 설치하여 밸브 판 고착현상을 모사하여 밸브를 열 때 전류와 전력신호를 측정하여 그림 4.26에 도시하였다. 전류와 전력신호 초기에는 정상상태와 같이 초기 구동 전류 및 전력peak를 나타내고 스템을 상승하지 못하도록 만든 장치에 닿으면서 전류와 전력은 구동 peak와 거의 같은 크기로 계속되는 경향을 보이고 있어 이때 오랜 시간 방치하는 경우 전동밸브의 전동기 소손과 스템의 굽힘, 스템 너트의 마모 등 밸브의 파손우려가 있으며 화재의 위험까지 따르게 될 것이다.

### 4.2 globe 밸브

#### 4.2.1. globe 밸브의 정상상태

그림 4.27은 globe 밸브의 정상상태에서 열림에서 닫힘, 닫힘에서 열림의 행정에서 전동기 입력전류와 전력의 시간에 따른 DC신호 파형을 전 행정에 대하여 보인 것으로 밸브행정과 관련된 시간에 밸브 운전에서 나타나는 특성들을 보여주고 있으며, 전력신호는 전류신호가 변화되는 같은 시간에 민감하게 변화하고 있다. gate 밸브에서와 마찬가지로 밸브 행정동안 스템과 패킹간의 마찰, 또

는 비정상적인 밸브 부하가 발생될 때 또는 특정 위치영역을 지나갈 때 구동 전류와 전력의 변화가 나타나는 것으로 보인다.

그림 4.28은 globe 밸브의 열림에서 닫힘 행정에서 초기와 끝 부분에서 전류와 전력신호를 확대한 것으로 초기에 Inrushed peak이 발생하고 밸브 스템의 작동이 시작되면서 나타나는 부하에 대한 신호는 전류보다 전력신호가 더욱 민감하게 나타나고 있으며, 끝 부분은 gate 밸브와는 달리 토크 스위치가 단락되기 전까지 밸브 좌에 밀착시키기 위한 시간으로 전류와 전류가 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 행정의 끝 부분에서 gate 밸브와 같이 전류신호는 증가하나 그림 4.2와 비교해보면 전력은 밸브 구조특성이 달라 gate 밸브와 같은 마찰에 의한 부하가 작용하지 않아 전류신호와 같이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

그림 4.29는 globe 밸브의 닫힘에서 열림 행정에서 초기와 끝 부분에서 전류와 전력신호를 나타낸 것으로 전력신호는 초기에 hammer blow와 밸브 판이 밸브 좌와 떨어지는 순간신호를 잘 보여주고 있으나 전류신호는 약간의 변화를 감지할 수 있다. globe 밸브는 gate 밸브와 달리 밸브 좌에서 밸브 판이 부하 없이 이동되기 때문에 이에 대한 민감성은 전력신호가 분명하게 나타나는 것으로 예측된다. 밸브행정에서 거의 다 열려 리미트 스위치가 단락되는 순간에는 전류와 전력신호가 같은 경향을 보이고 있다.

#### 4.2.2. globe 밸브의 전압 강하

전동밸브의 전동기 입력전력신호특성을 바꾸게 하는 요소 중의 하나는 전압이다. globe 밸브의 정상적인 운전조건에 대한 전압은 460V이나 전압변화에 따른 전동밸브의 특성을 알아보려고 320V~500V범위에서 20V~30V씩 전압을 변화하면서 전동기 전류와 전력신호를 측정하여 분석하였는데, gate 밸브와 같이 전압의 변화에 따른 운전전류의 변화, 행정시간 및 토크 스위치 단락시의 전동기 전류 최고치 등에 대한 변화가 진단의 척도가 될 것이다.

그림 4.30은 globe 밸브의 입력 전압변화에 대한 열림에서 닫힘 전 행정에 대한 전류신호를 보인 것으로 전압이 정상 운전전압보다 낮아질수록 운전전류는 부하에 대한 저항력의 증가로 감소하는 경향을 보이며, 행정시간도 길게 나타나며, 정상전압보다 클 경우는 운전전류는 크게 나타나며 행정시간도 짧게 나타난다.

그림 4.31은 globe 밸브의 열림에서 닫힘 행정에 대한 전류신호의 끝 부분을

확대한 것으로 전동기는 밸브를 구동하는데 필요한 토크를 발생시키기 위하여 정상전압보다 낮아질수록 토크 단락에 의한 peak의 크기가 커진다.

그림 4.32는 globe 밸브의 입력 전압변화에 대한 열림에서 닫힘 전 행정에 대한 전력신호를 보인 것으로 전압이 변화하여도 운전 동력은 변화가 없으며 행정 시간이 길게 나타나는데 그림 4.33에서 분명하게 알 수 있다.

그림 4.34는 입력 전압의 변화에 대한 닫힘에서 열림 전 행정에 대한 전류신호를 보인 것으로 열림에서 닫힘 행정과 같이 전압이 증가할수록 운전전류는 증가하는 경향을 보이며 행정시간도 짧게 나타나고 있다. 또한 gate 밸브에서와 같이 구동 후에 발생하는 hammerblow와 unseating 신호의 크기가 정상 전압보다 낮아질수록 크게 나타남을 보이고 있다.

그림 4.35는 globe 밸브의 입력 전압변화에 대한 닫힘에서 열림 전 행정에 대한 전력신호를 보인 것으로 정상 전압보다 낮아지면 운전 전력이 감소하는 경향을 보인다.

그림 4.36은 globe 밸브의 열고 닫을 때 전 행정의 시간을 전압변화에 대하여 도시한 것으로 열 때보다는 닫을 때 밸브가 밸브 좌에 작용하는 밀봉압에 필요한 시간으로 약간 더 걸리는 것으로 나타나며 전압이 낮을수록 행정시간은 많이 걸린다.

#### 4.2.3. globe 밸브의 스템 직경변화

그림 3.7과 같이 가공한 스템을 설치한 globe 밸브의 전동기 전류와 전력신호 변화를 그림 4.37에 도시하였다. 스템을 가공하여 첫 시험하였을 때, 전류와 전력신호가 열림 위치에서 닫힐 때에는 시간에 따라 감소하고, 닫힘 위치에서 열릴 때에는 반대로 증가하는 경향이 약간 나타나 있다. 이는 스템형상에 의하여 열릴 때 스템과 패킹사이의 마찰에 의한 영향과 gate 밸브와는 달리 globe 밸브는 스템의 중량이 커서 이에 대한 영향으로 gate 밸브에서보다 현상을 분명하게 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 gate 밸브에서와 같이 수 차례의 실험을 반복하거나 패킹의 조임정도에 따라서는 이러한 경향이 나타나지 않을 수도 있다.

#### 4.2.4 밸브 스템 패킹의 조임

밸브의 스템 패킹 그랜드의 기능은 밸브 스템과 밸브몸체사이의 밀봉역할을 하기 때문에 밸브 스템 부하는 패킹의 조임에 의해 발생된다. 그림 4.38은 globe

밸브의 닫음에서 열 때 패킹을 느슨하게 조인 경우와 패킹을 단단히 조였을 때 전동기 전류와 전력신호에 미치는 영향에 대하여 도시하였다. 그림에서 스템 패킹의 조임 상태가 단단할수록 구동전류는 증가함을 보여주고 있으며 스템과 패킹사이의 마찰 부하로 인하여 일정하지 않는 신호를 보이고 있다. 또한 예상했던 바와 같이 패킹 조임이 단단하게 조일수록 전동기 전류가 증가하며 전동기 속도는 감소하여 행정시간이 길게 나타난다.

#### 4.2.5 토크 스위치의 설정

전동밸브에서 토크 스위치는 열림에서 닫힘의 행정에서 전동기 구동을 정지할 목적으로 주로 사용된다. 토크 스위치는 스위치 앞면에 있는 지시기에 맞추어 토크 스위치 축 회전에 한 쌍의 전기적 접촉을 열리게 하는 기능을 하는 것으로 정상상태에서 열고 닫을 때 1.5로 조정한다.

그림 4.39는 globe 밸브의 열림에서 닫힘과 닫힘에서 열림 행정에서 토크 스위치 설정치를 1.6으로 조정하였을 때 전류와 전력신호를 나타낸 것으로 토크 설정치를 크게 하면 밀봉하중을 가하는 시간으로 행정이 약간 길어지고 토크 peak가 크게 나타난다. 또한 닫힘에서 열림의 행정에서 토크 스위치 설정치를 1.6으로 조정하였을 때도 열림에서 닫힘 행정과 같이 행정에 걸리는 시간이 길어지고 전동기 전류 최대치의 진폭이 밸브가 닫히고 열리는 순간에 역시 증가함을 나타내며, 열림에서 닫힘 행정과 다른 점은 끝 부분에서 짧은 시간에 peak가 발생한다. 전력신호도 전류신호와 같은 경향을 보이고 있다.

#### 4.2.6. 리미트 스위치 부적절

전동밸브에서 리미트 스위치는 닫힘에서 열림의 행정에서 전동기 구동을 적절한 위치에서 정지할 목적으로 주로 사용된다. 따라서 리미트 스위치의 부적절한 조정은 전동기가 정지되어 밸브가 완전히 열리지 않는 경우와 패킹부가 밸브 몸체에 걸려 큰 부하가 작용하는 경우가 발생하게 된다.

그림 4.40은 globe 밸브의 닫힘에서 열림 행정에서 리미트 스위치가 정상보다 늦게 조정되었을 때 전류와 전력신호를 도시한 것으로 운전 전류와 전력신호는 정상상태와 경향은 같으나 행정에 걸리는 시간이 길어지고 열림부 끝 위치에서 부하가 작용하여 전류와 전력이 큰 폭으로 증가함을 보여주고 있다.

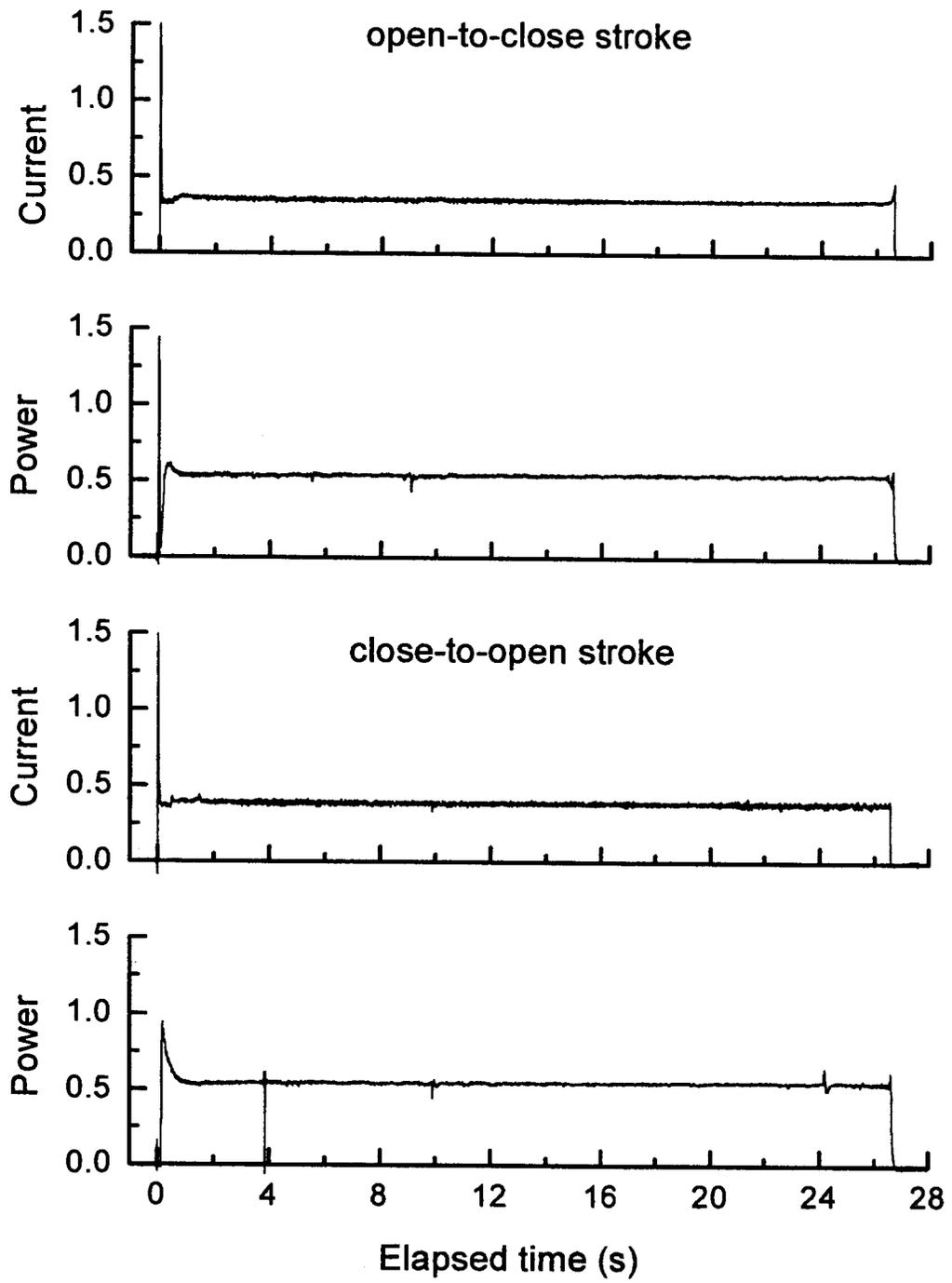


그림 4.1. Gate밸브 정상상태 전류, 전력신호

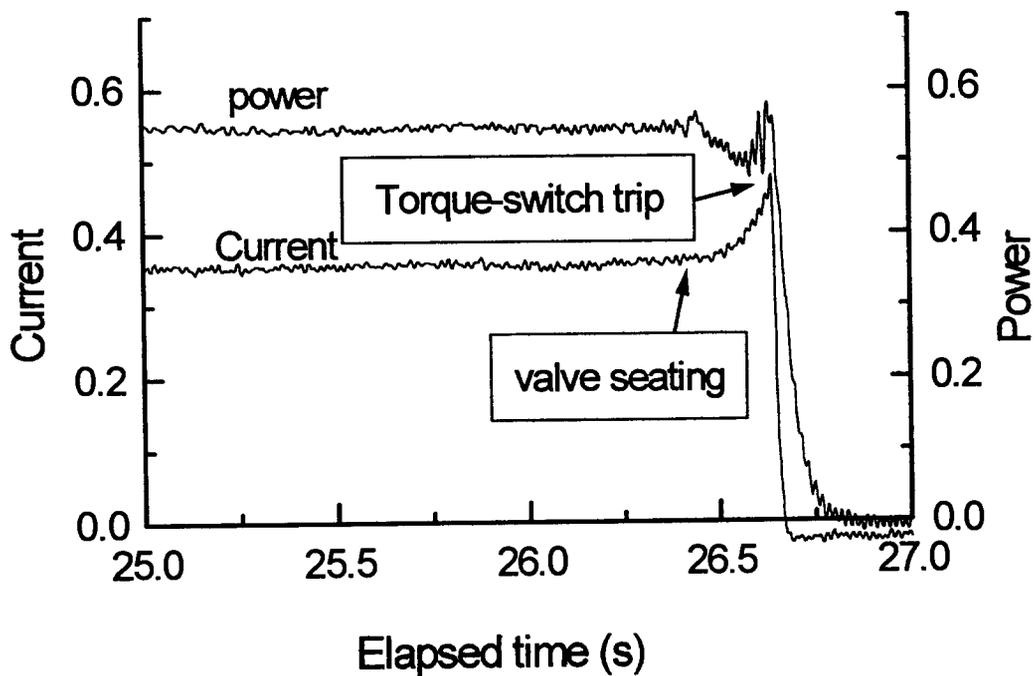
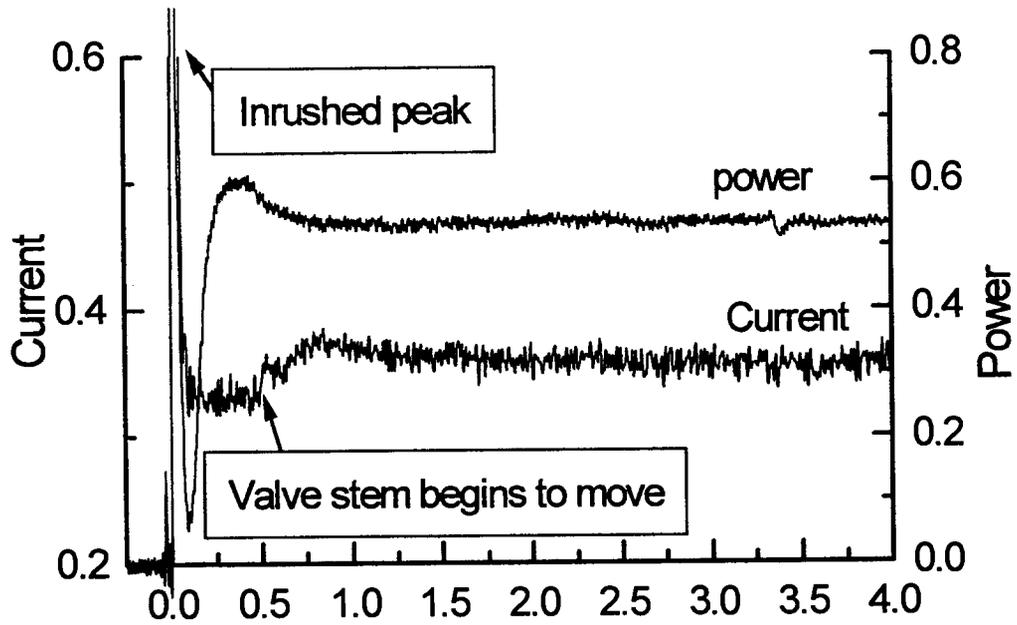


그림 4.2. Gate밸브 정상상태 열림 초기와 닫힘부의 전류, 전력신호  
(open-to-close stroke)

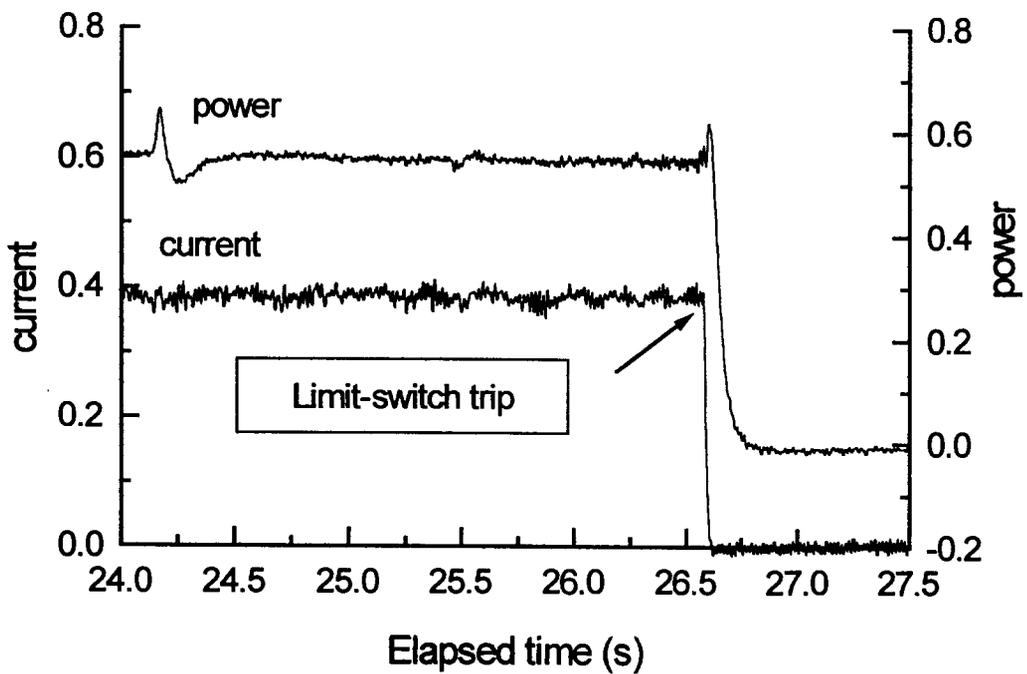
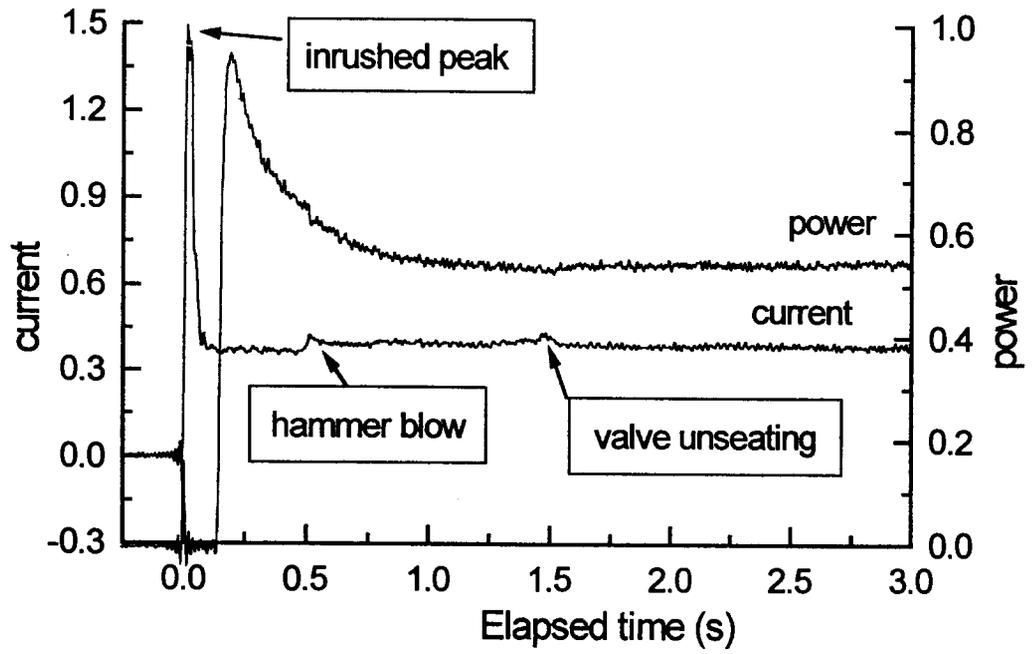


그림 4.3. Gate밸브 정상상태 열림 초기와 닫힘부의 전류, 전력신호 (close-to-open stroke)

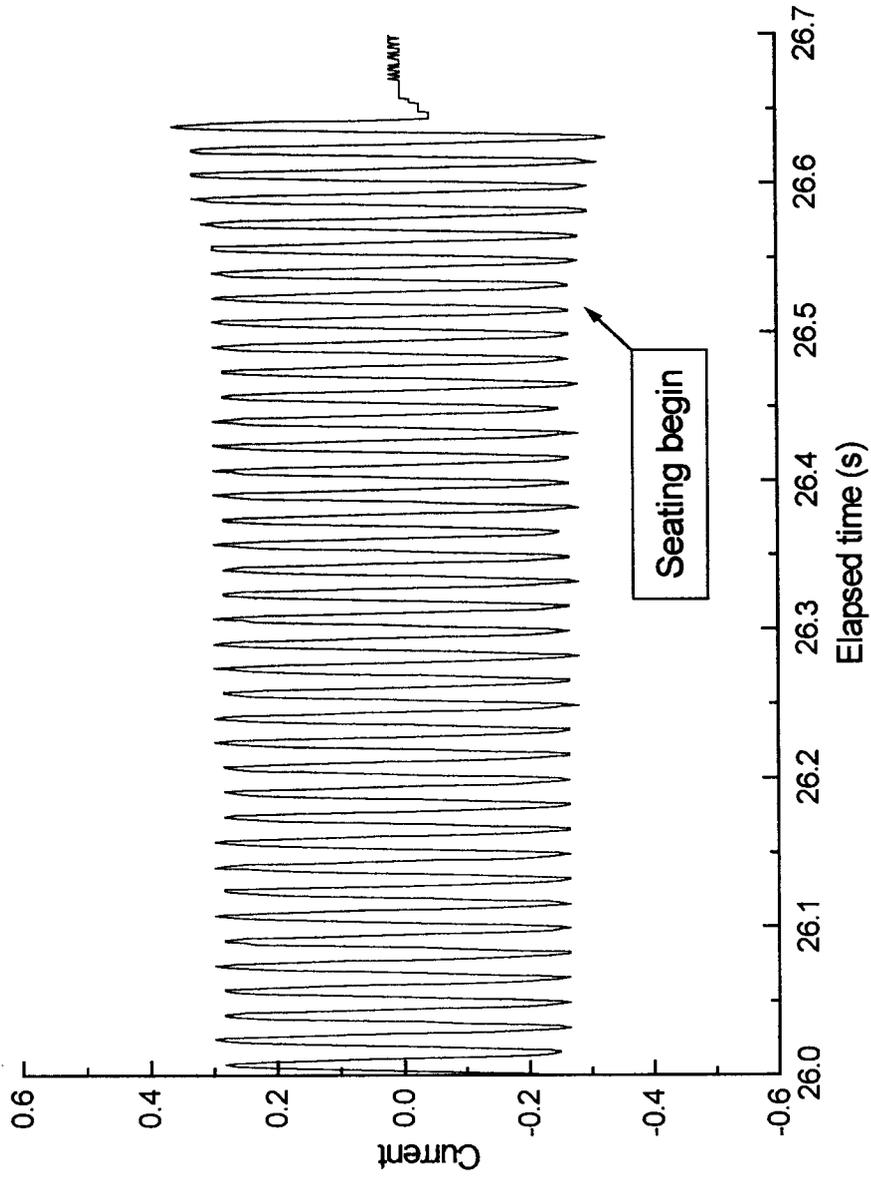


그림 4.4. Gate밸브 정상상태 단침부의 전류(교류)신호

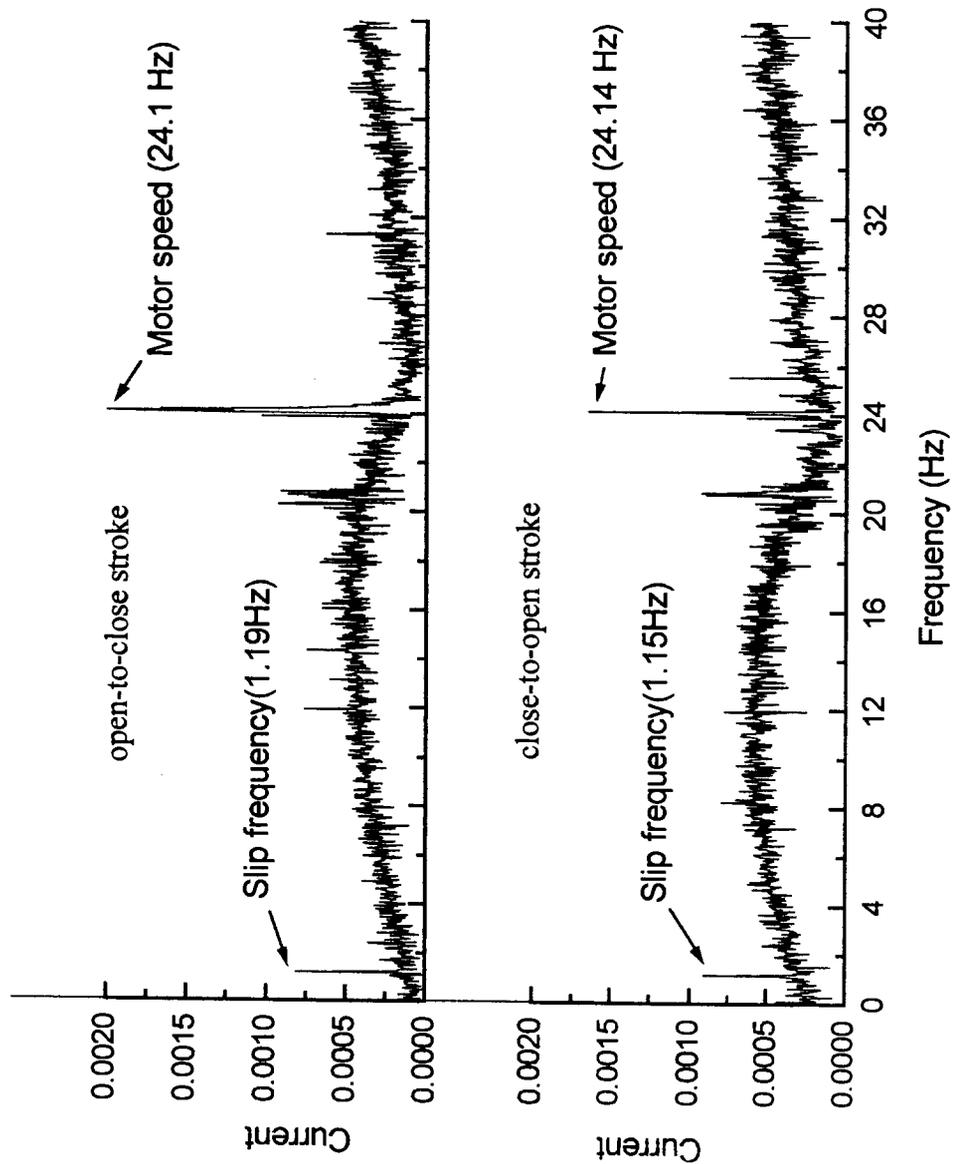


그림 4.5. Gate 벨브 정상상태 전류신호의 스펙트럼 분석

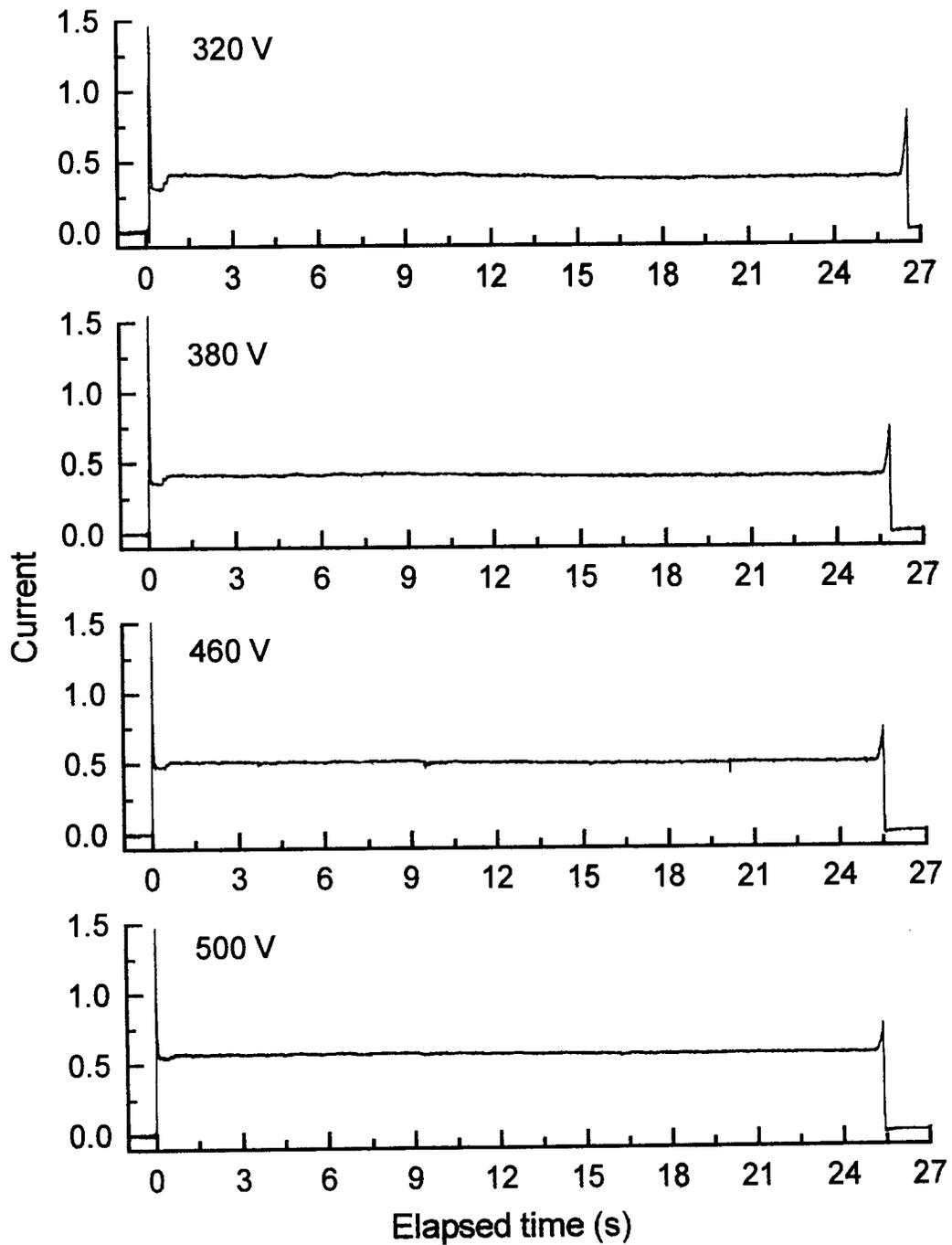


그림 4.6. Gate밸브 전압변화에 대한 전류신호  
(open-to-close stroke)

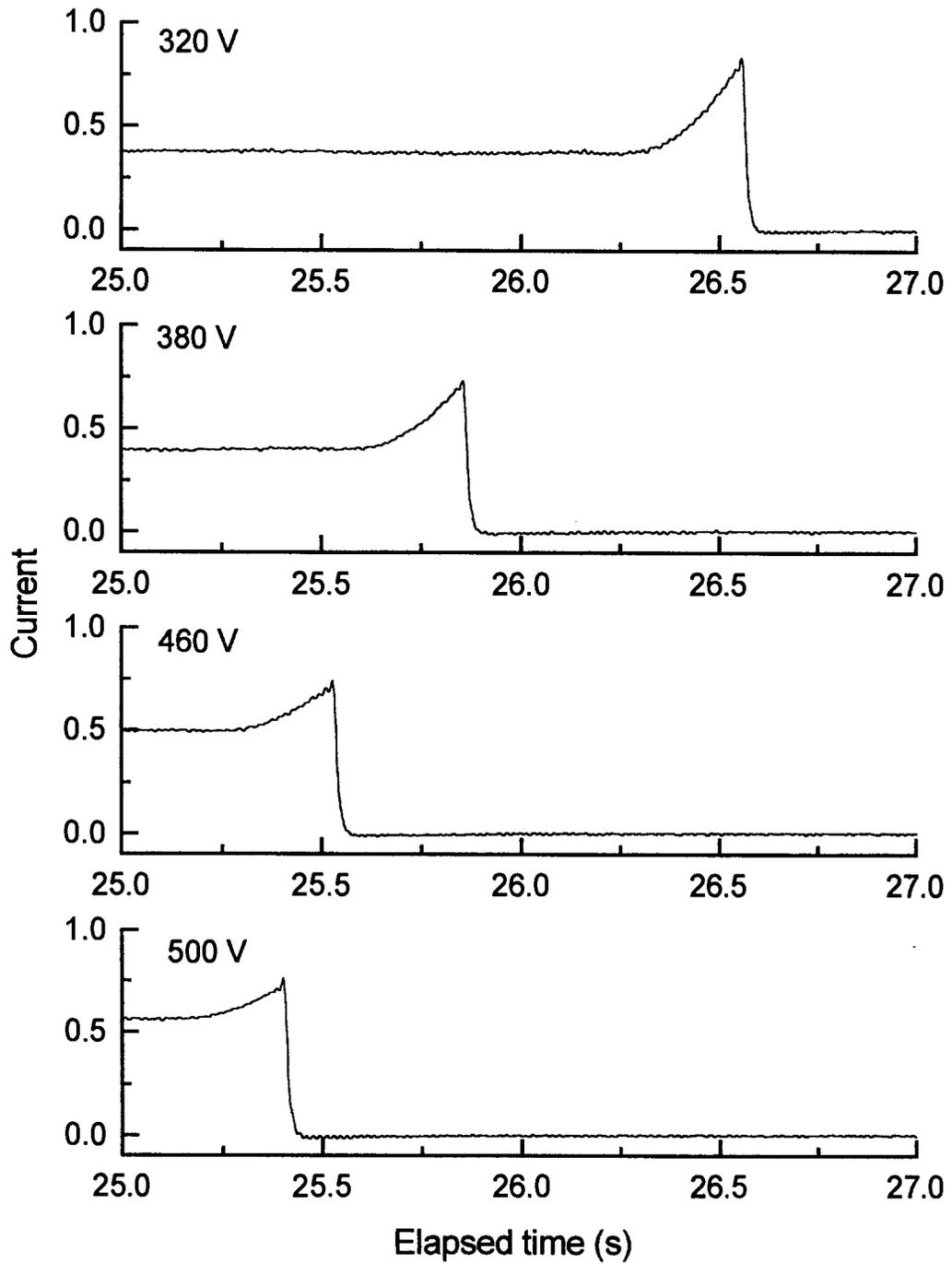


그림 4.7. Gate밸브 전압변화에 대한 닫힘부의 전류신호  
(open-to-close stroke)

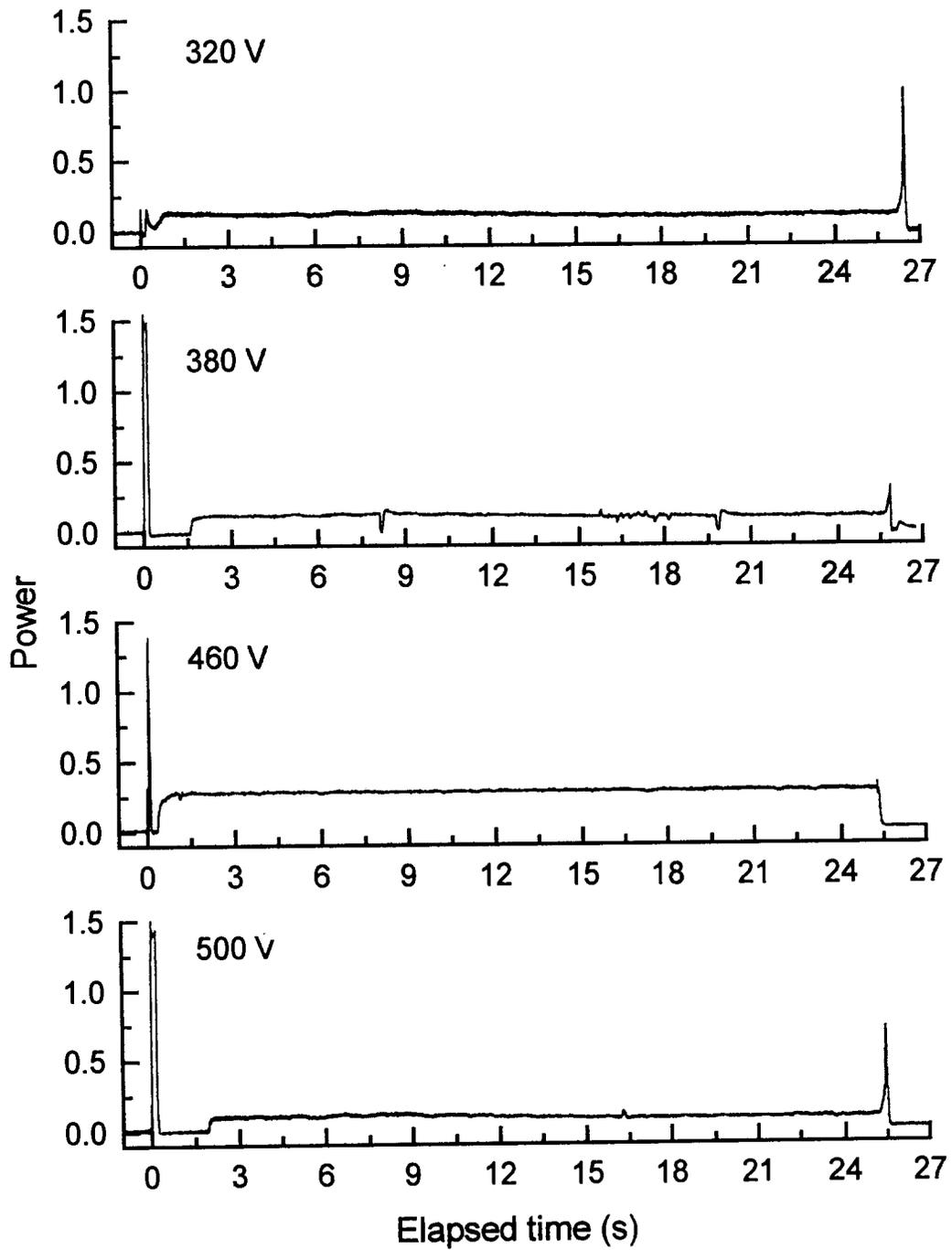


그림 4.8. Gate밸브 전압변화에 대한 전력신호  
(open-to-close stroke)

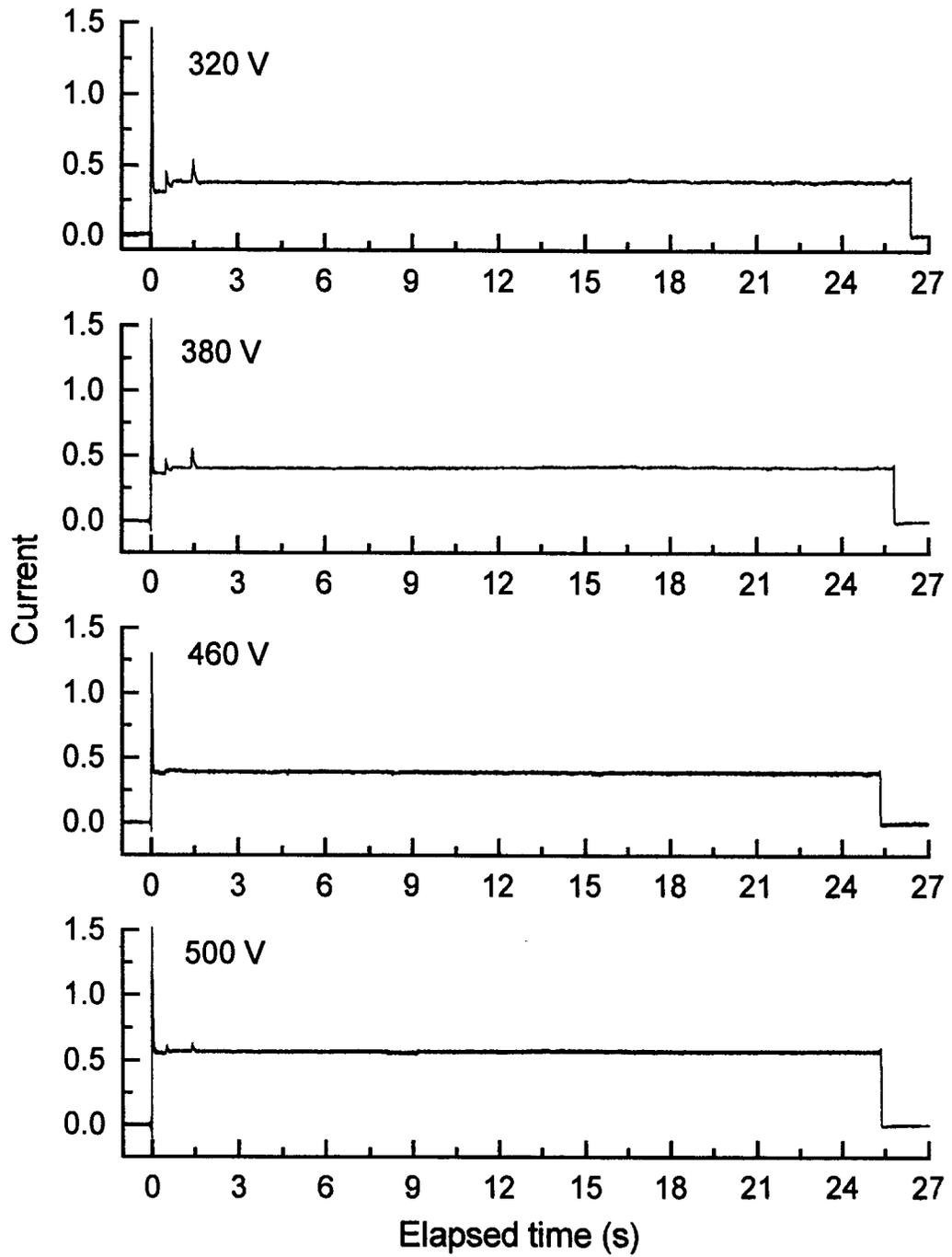


그림 4.9. Gate밸브 전압변화에 대한 전류신호  
(close-to-open stroke)

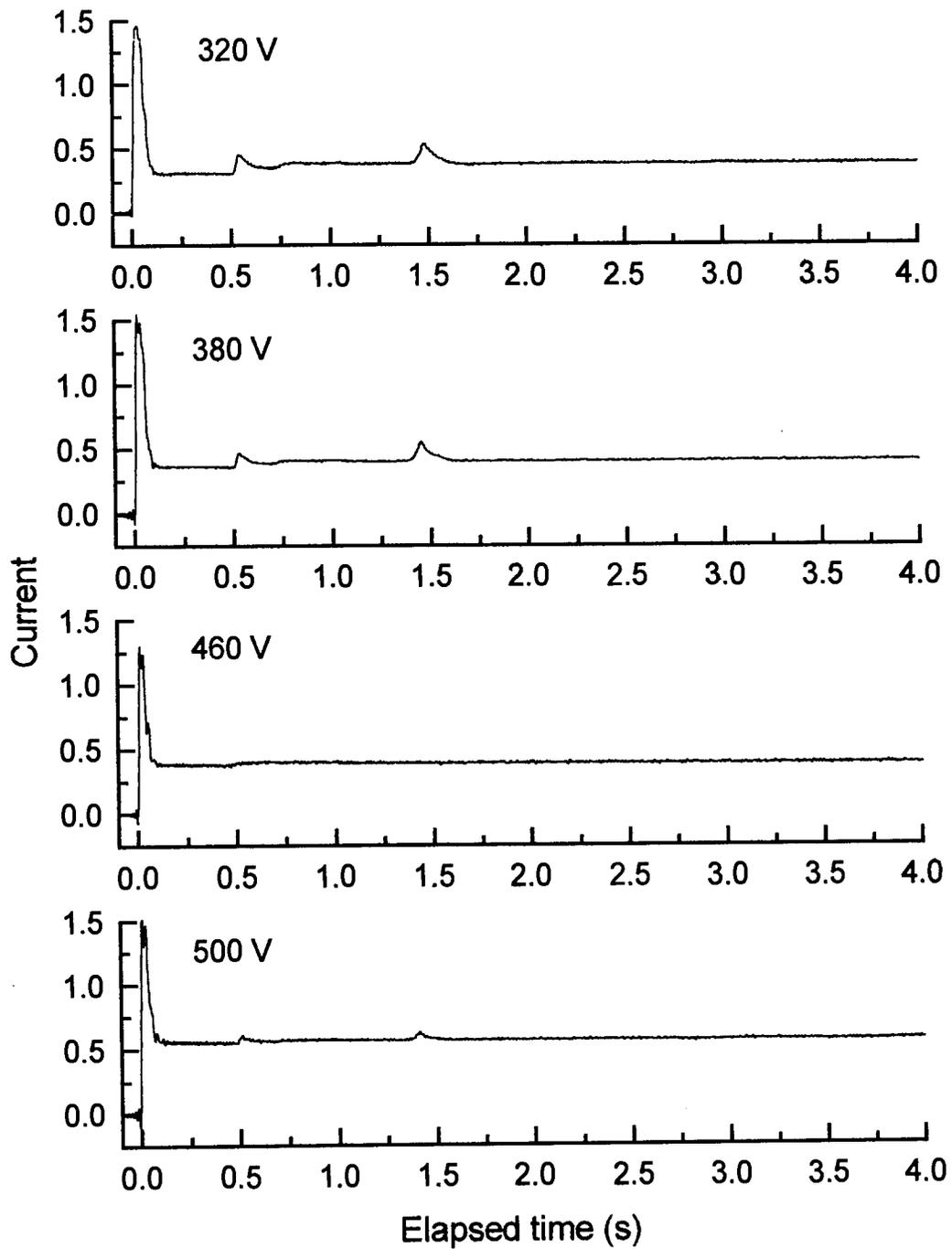


그림 4.10. Gate밸브 전압변화에 대한 열림 초기의 전류신호  
(close-to-open stroke)

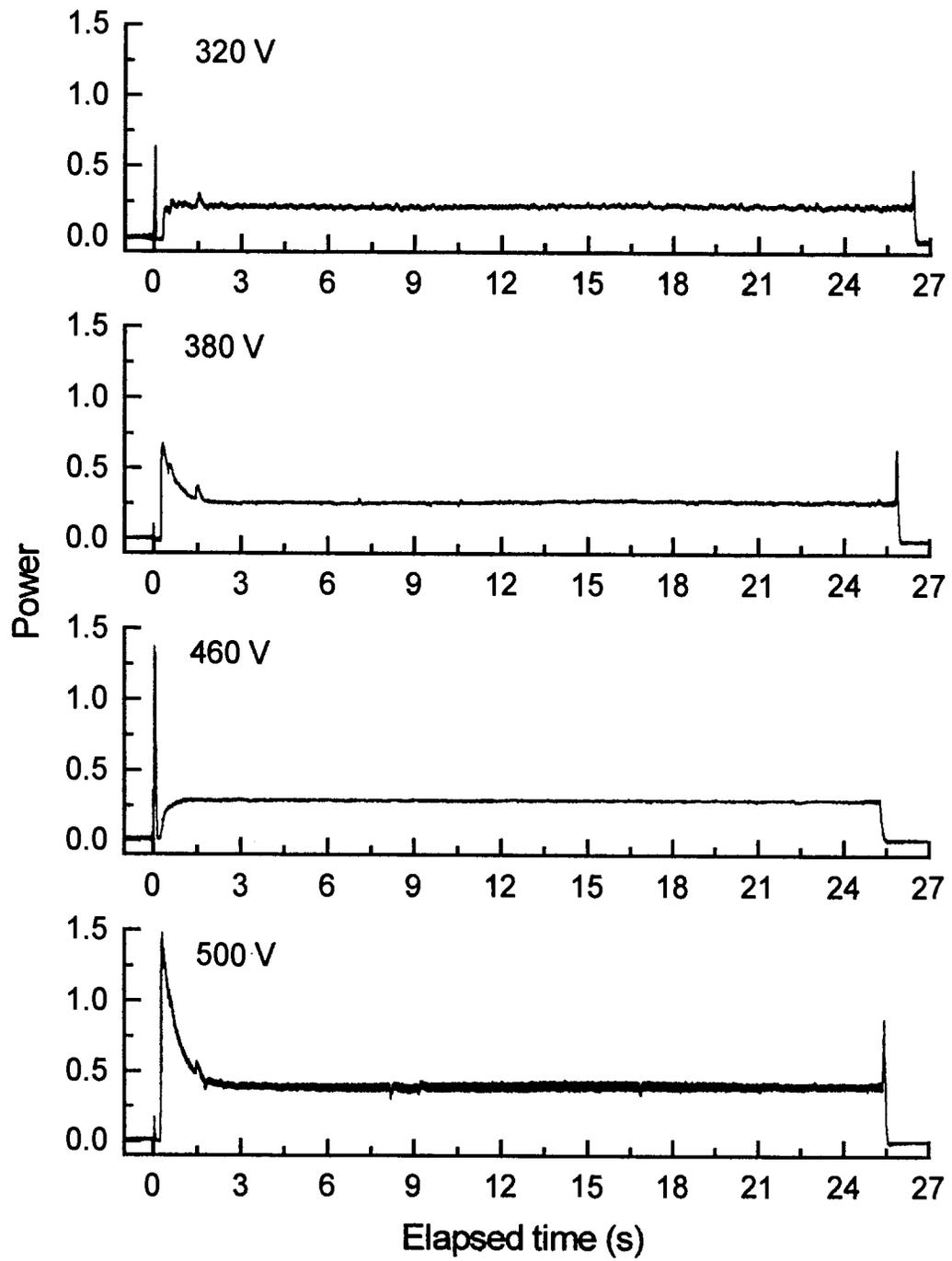


그림 4.11. Gate밸브 전압변화에 대한 전력신호  
(close-to-open stroke)

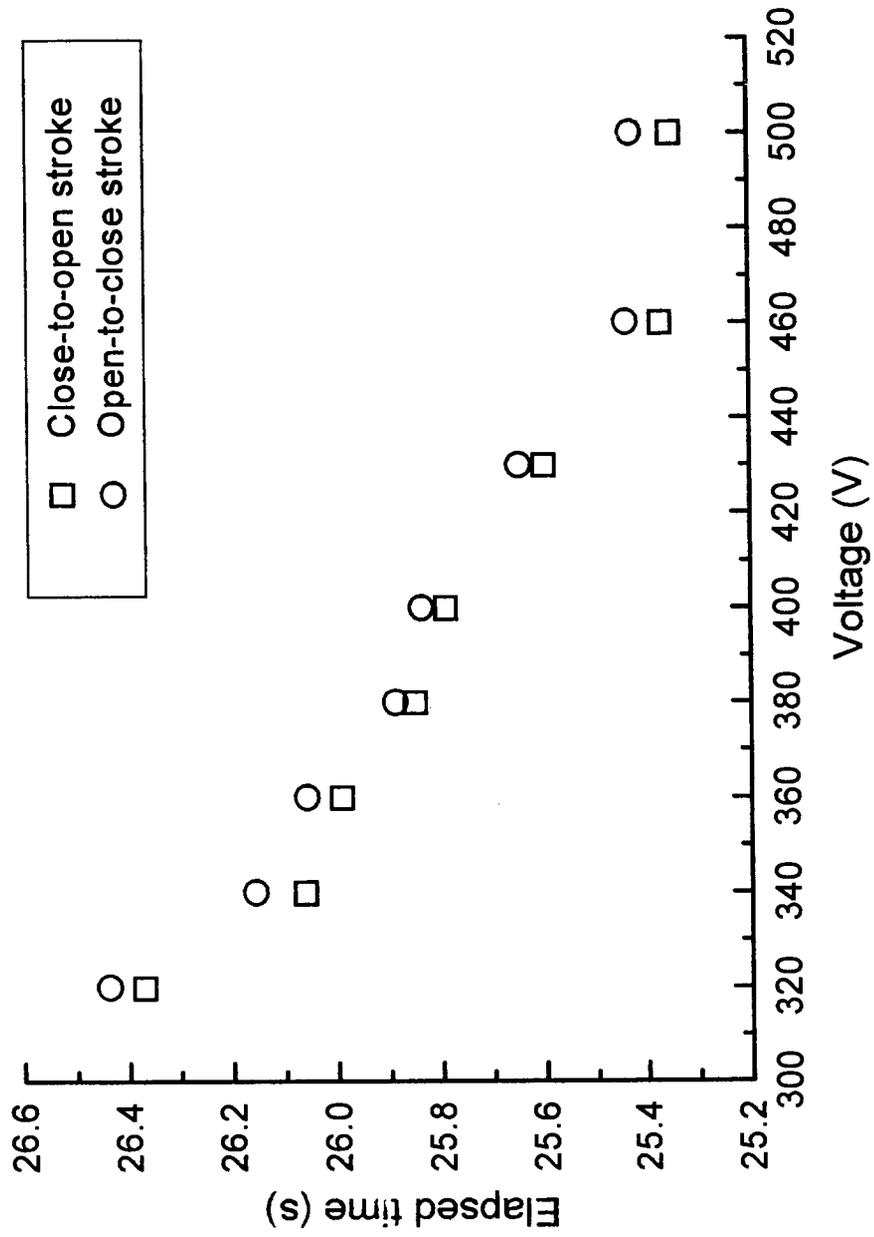


그림 4.12. Gate 밸브 전압변화에 대한 행정시간 변화

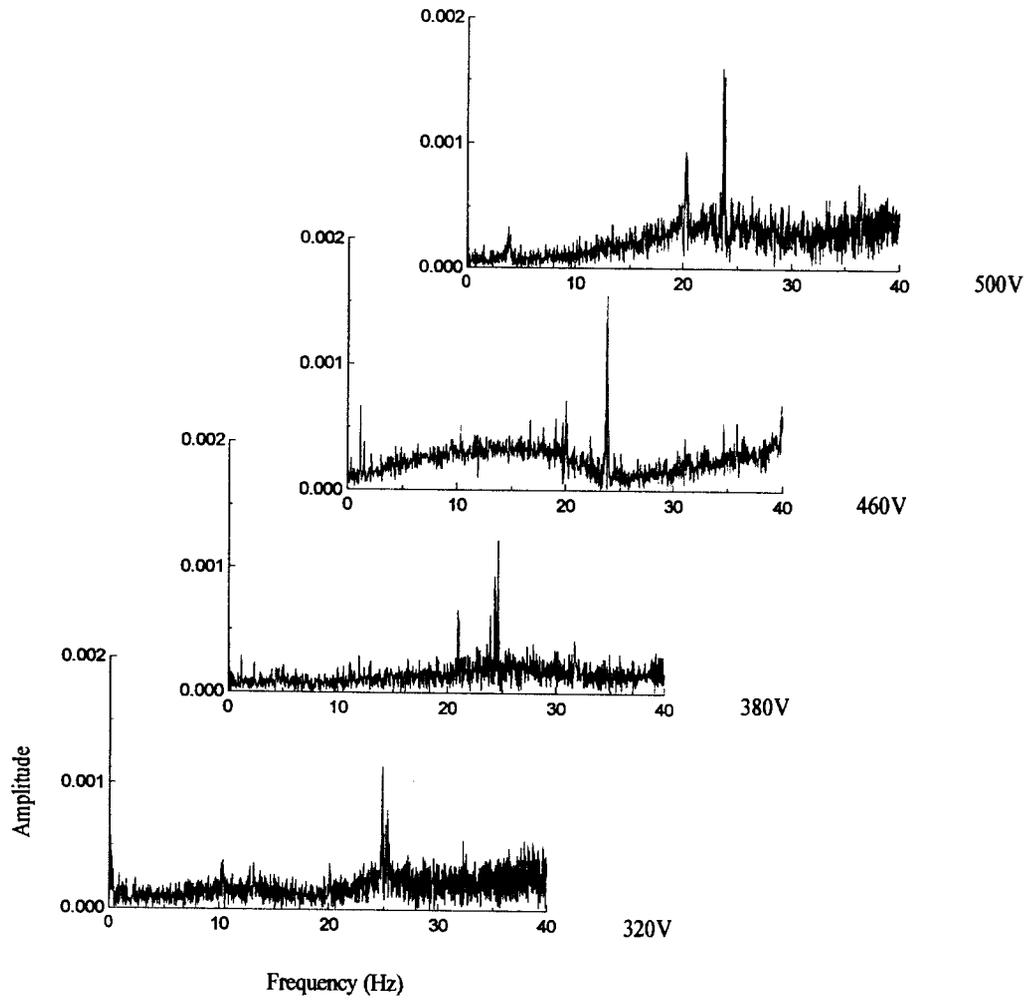


그림 4.13. Gate밸브 전압변화에 대한 주파수 스펙트럼  
(open-to-close stroke)

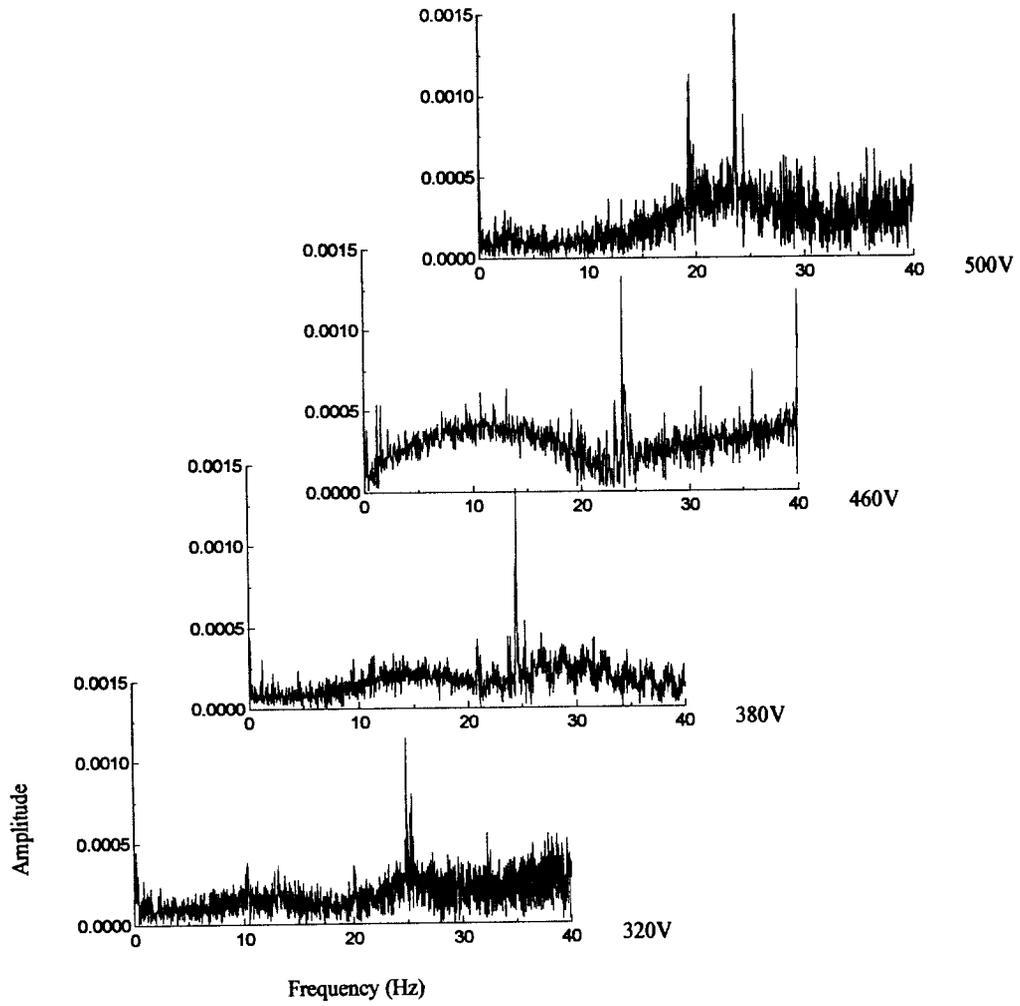


그림 4.14. Gate밸브 전압변화에 대한 주파수 스펙트럼  
(close-to-open stroke)

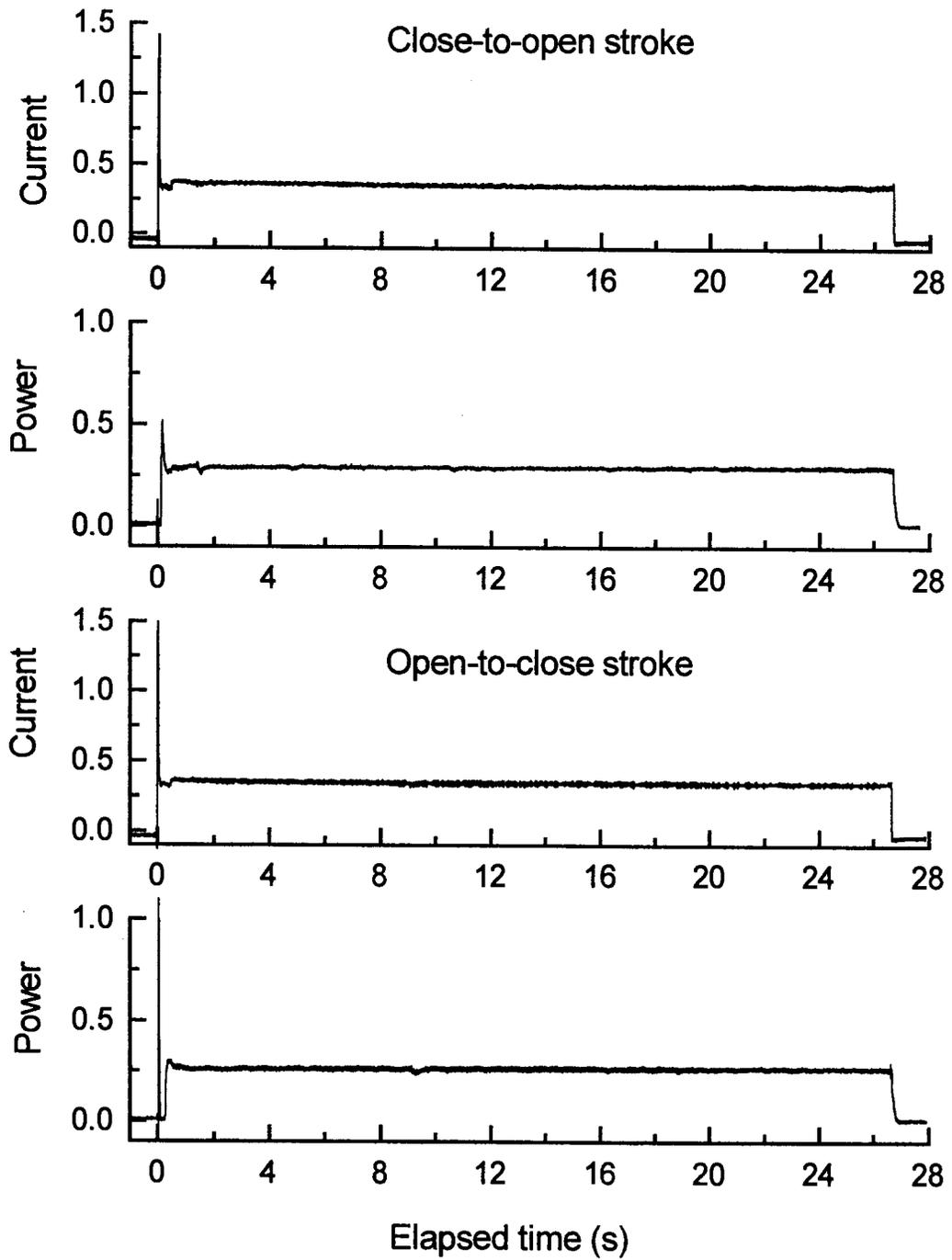


그림 4.15. Gate밸브 스템 직경변화에 대한 전류, 전력신호

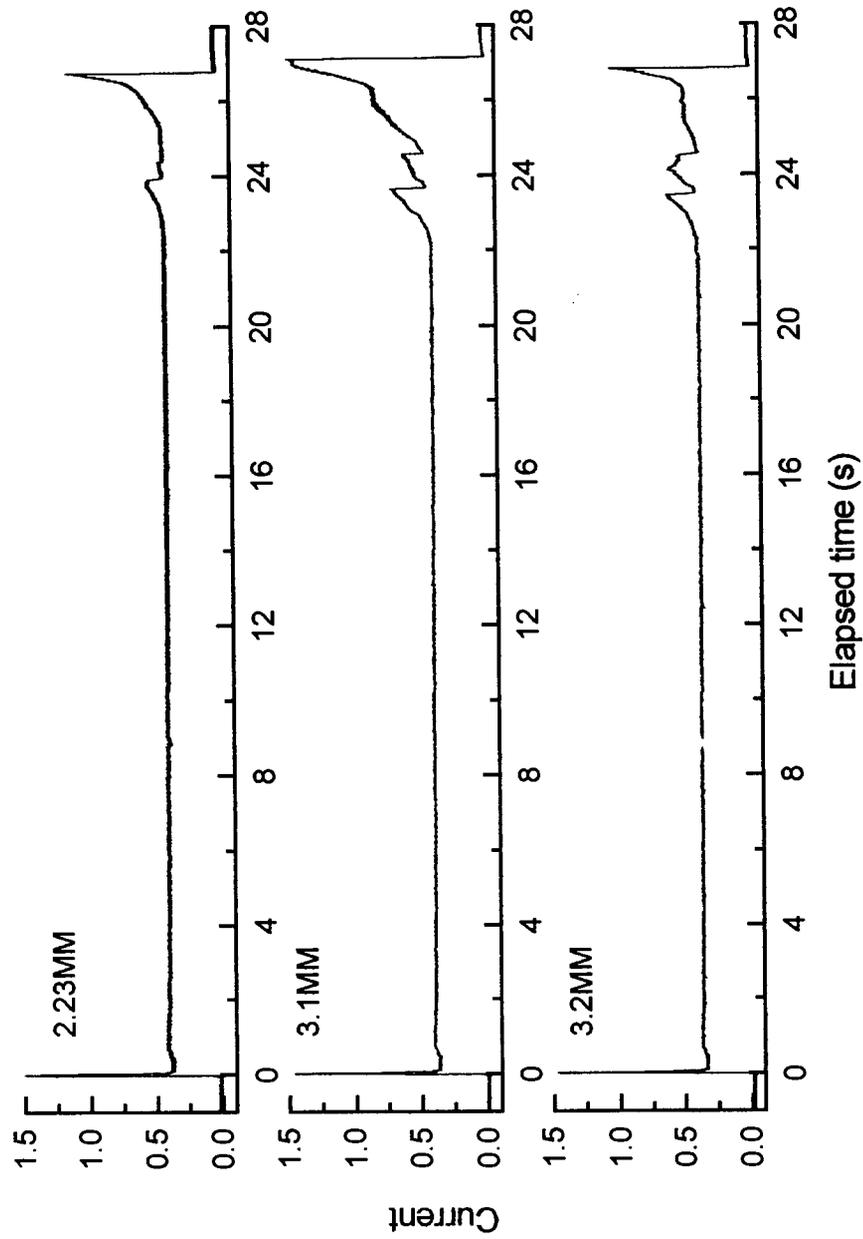


그림 4.16. Gate 밸브브좌에 위치한 용접봉에 의한 전류신호  
(open-to-close stroke)

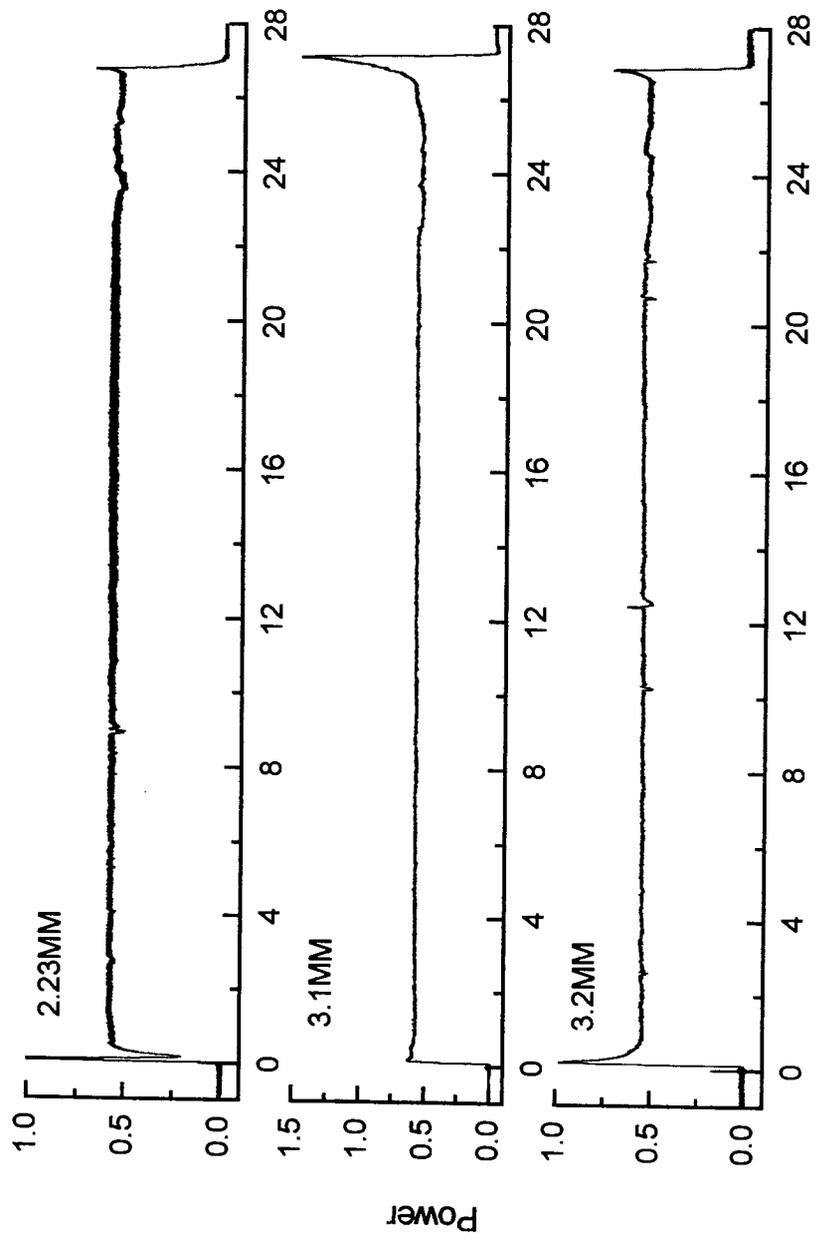
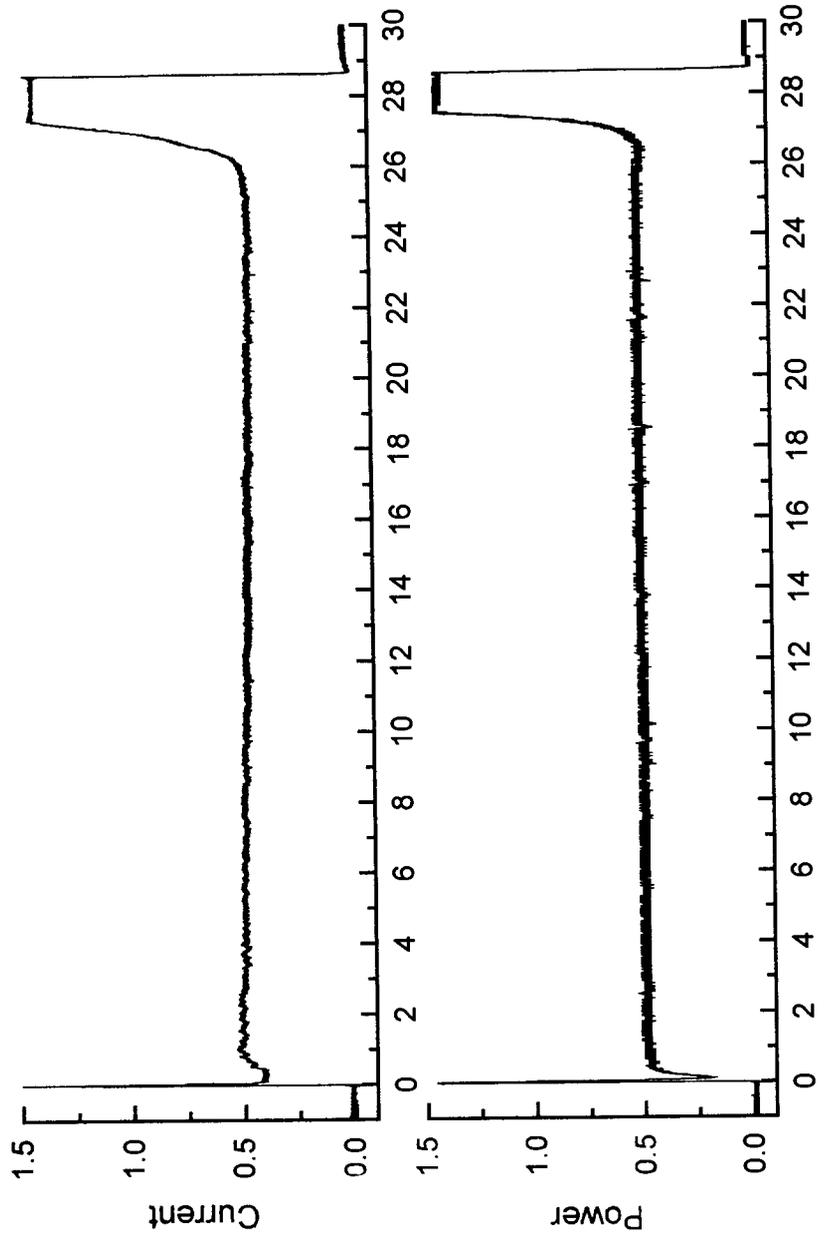


그림 4.17. Gate 밸브 좌에 위치한 용접봉에 의한 전력 신호  
(open-to-close stroke)



Elapsed time (s)

그림 4.18. Gate벨보판의 이물질에 의한 전류, 전력신호  
(open-to-close stroke)

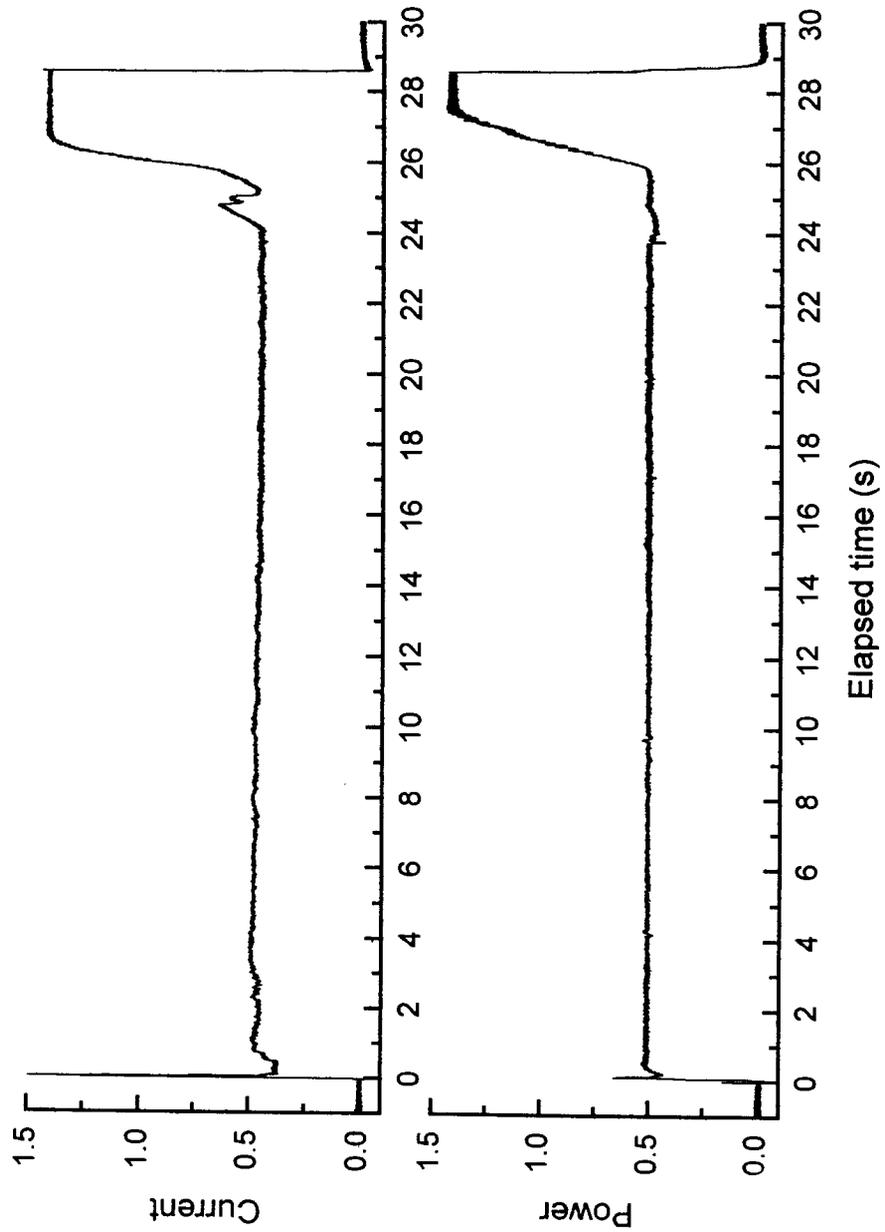


그림 4.19. Gate벨브판 끼임에 대한 전류, 전력신호  
(open to close stroke)

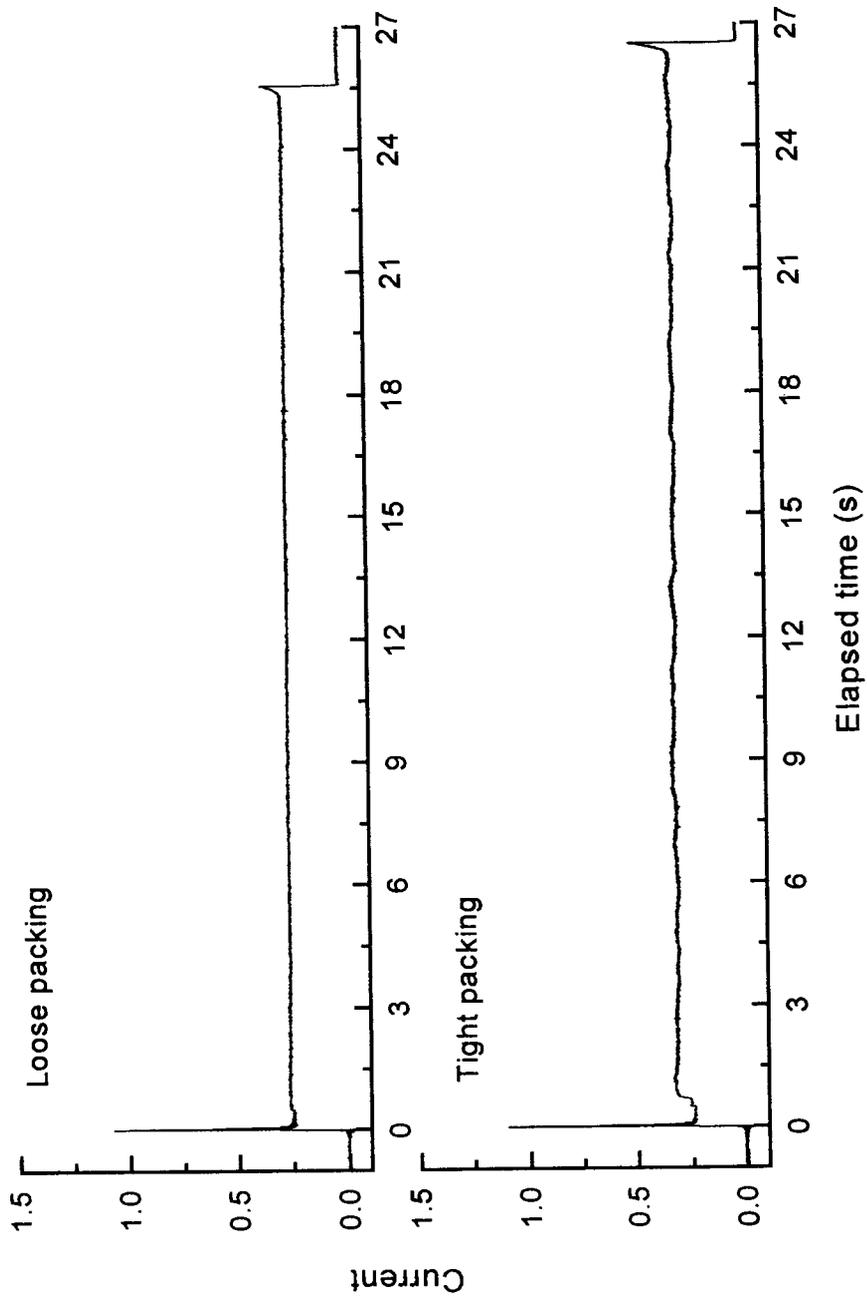


그림 4.20. Gate 밸브 시스템 패킹의 조임 정도에 따른 전류 신호  
(open-to-close stroke)

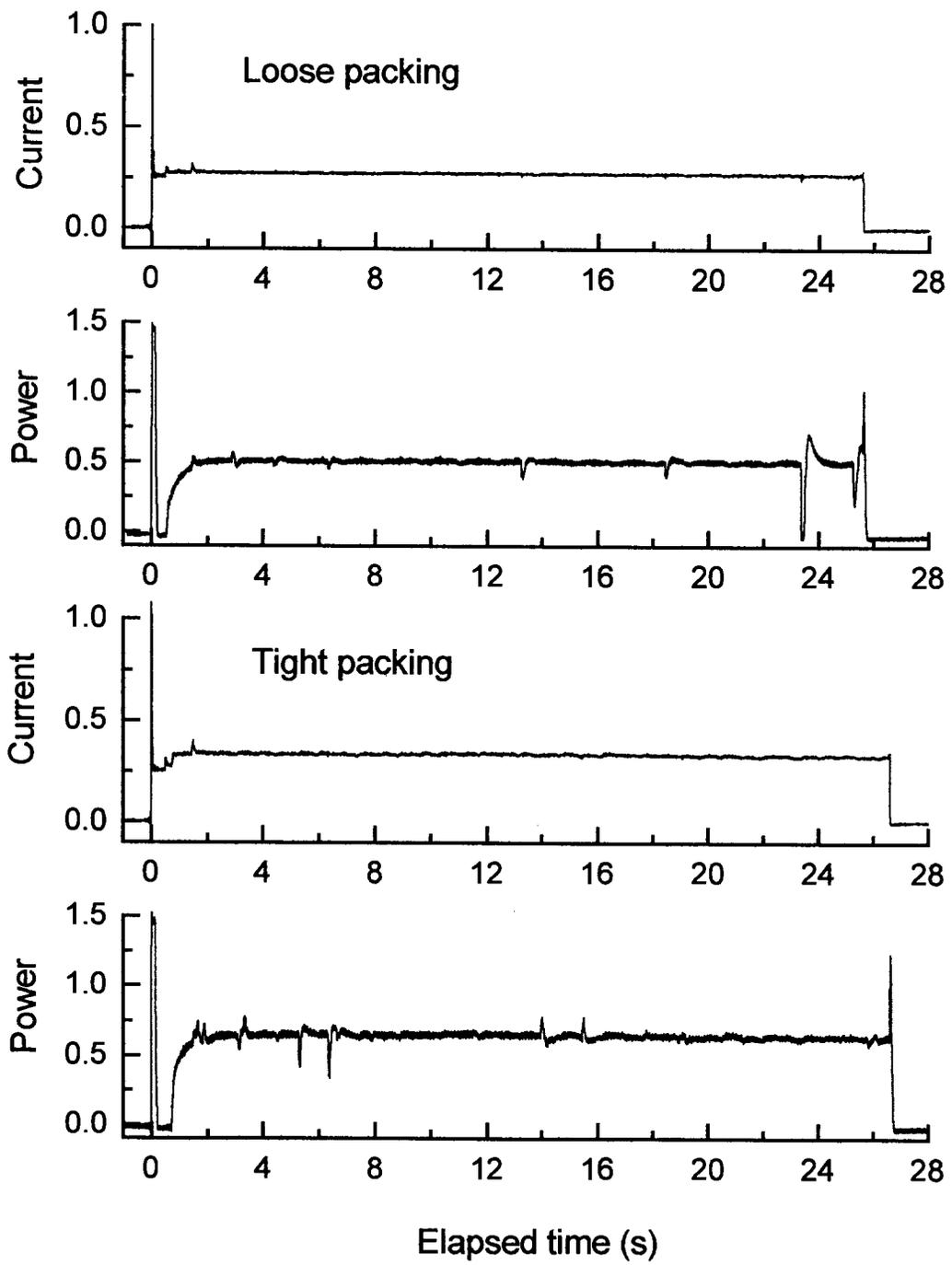


그림 4.21. Gate밸브 스템패킹의 조임정도에 따른 전류, 전력신호 (close-to-open stroke)

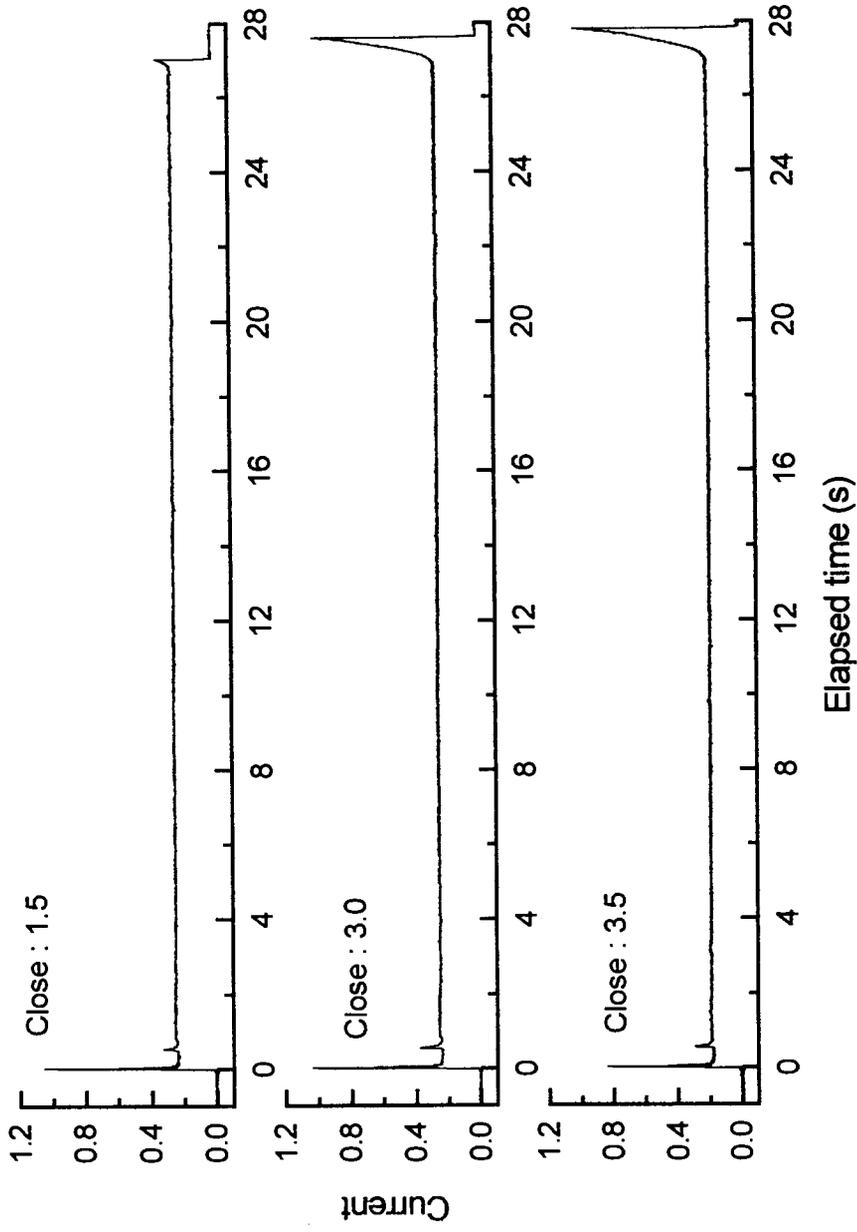
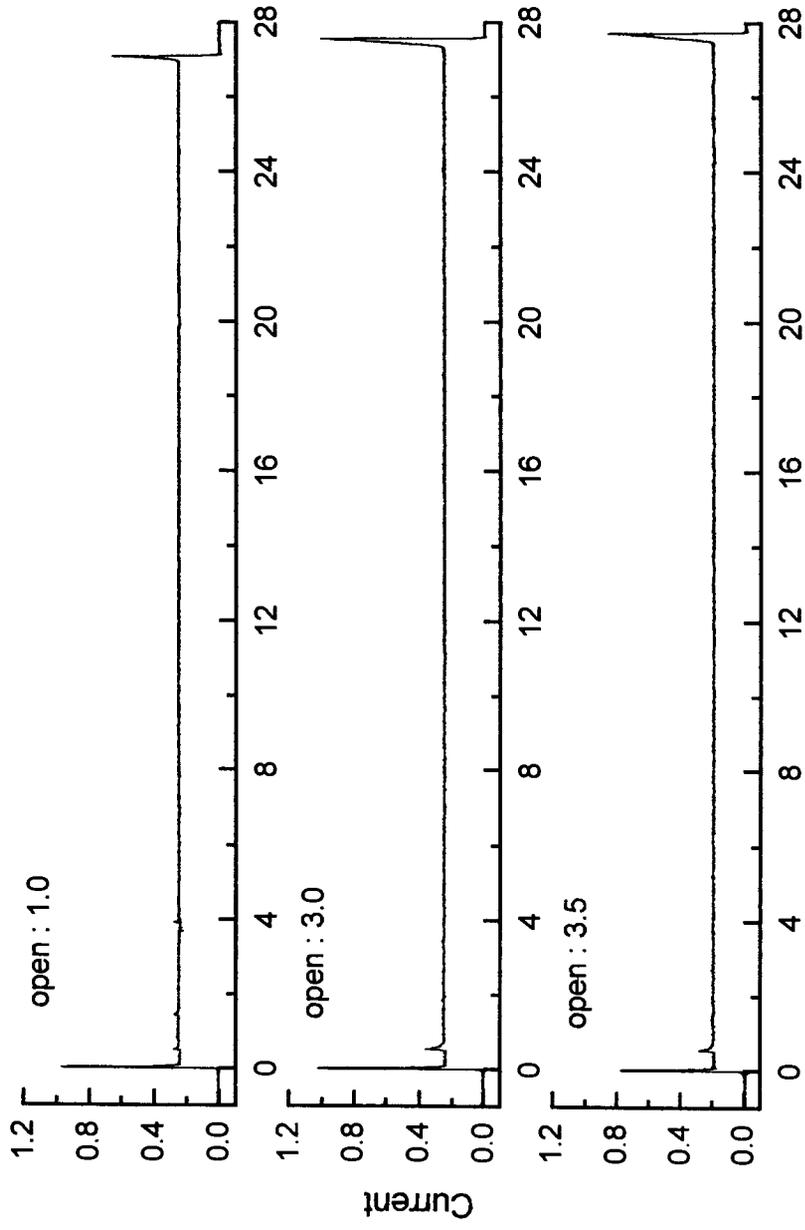


그림 4.22. Gate밸브 토크 스위치 설정값 변화에 대한 전류신호  
(open-to-close stroke)



Elapsed time (s)

그림 4.23. Gate밸브 토크 스위치 설정값 변화에 대한 전류신호  
(close-to-open stroke)

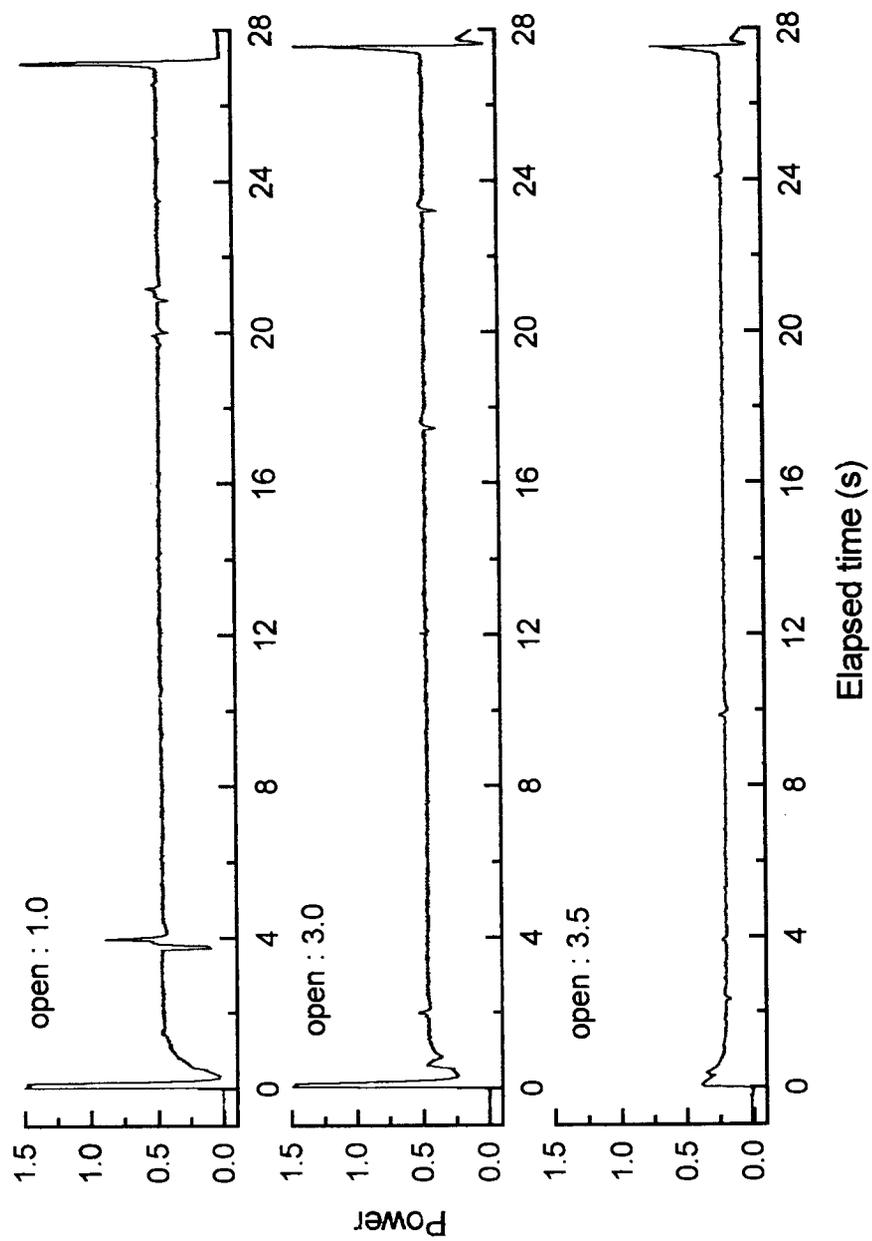


그림 4.24. Gate밸브 토크 스위치 설정값 변화에 대한 전력신호(close-to-open stroke)

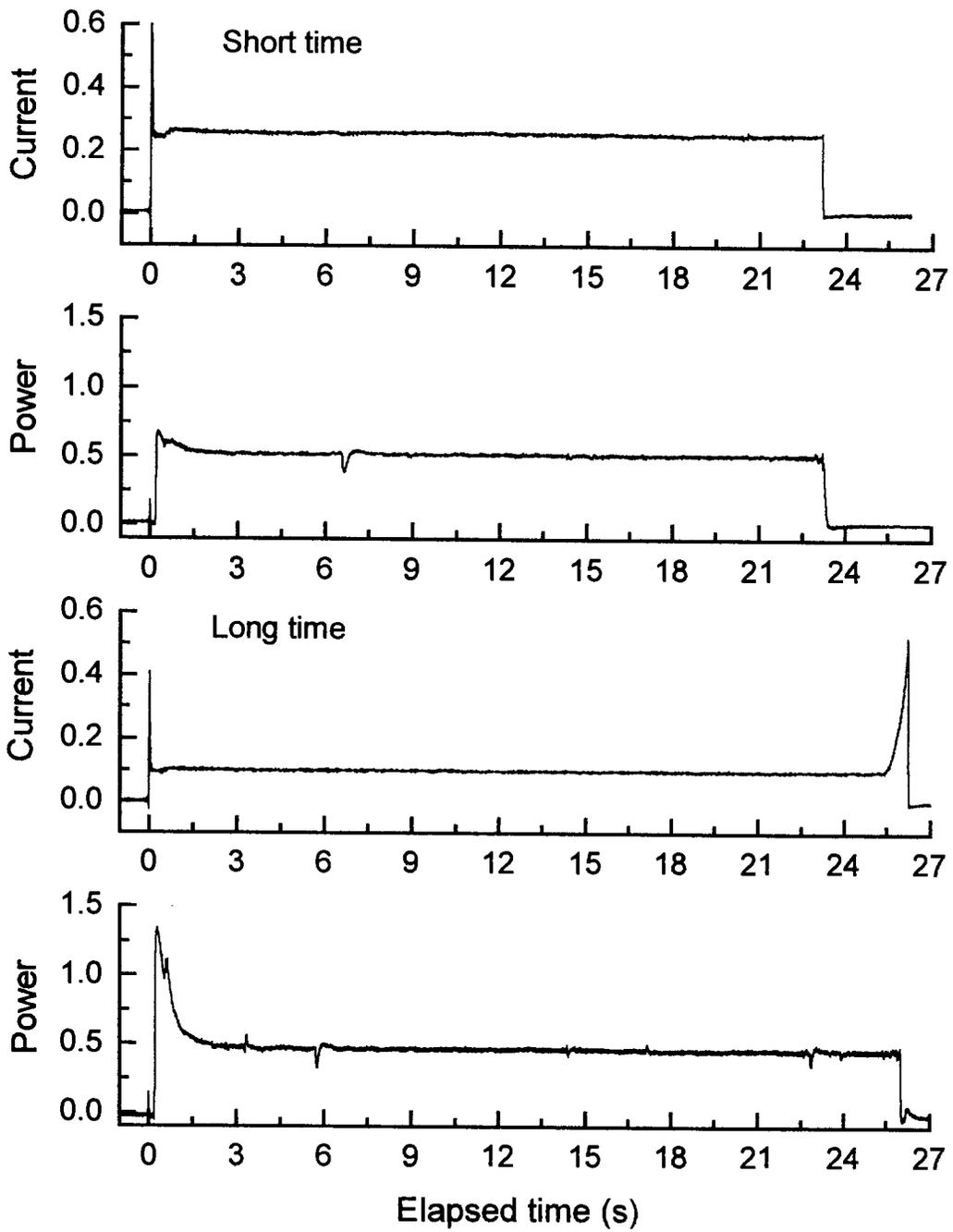


그림 4.25. Gate밸브 리미트 스위치 설정값 변화에 대한 전류, 전력신호 (close-to-open stroke)

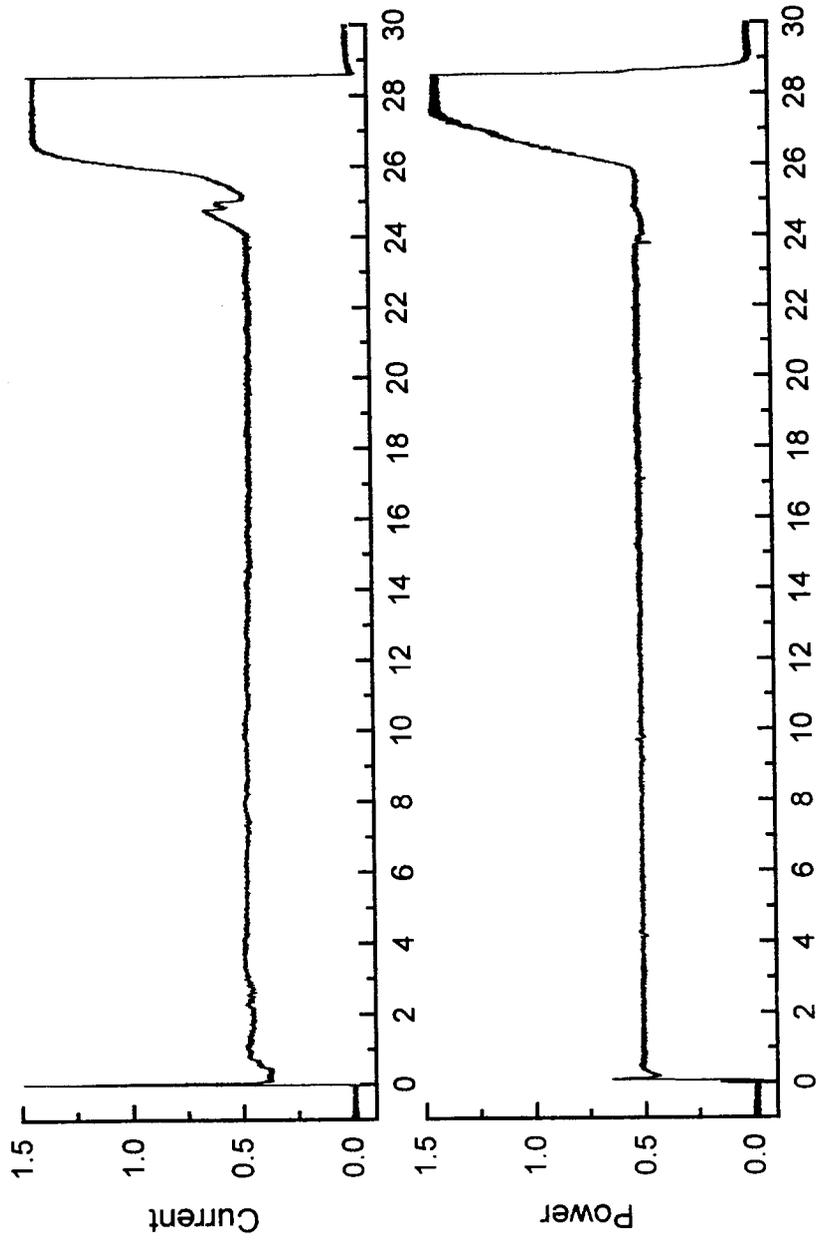


그림 4.26. Gate밸브 고착상태에 대한 전류, 전력신호  
(close-to-open stroke)

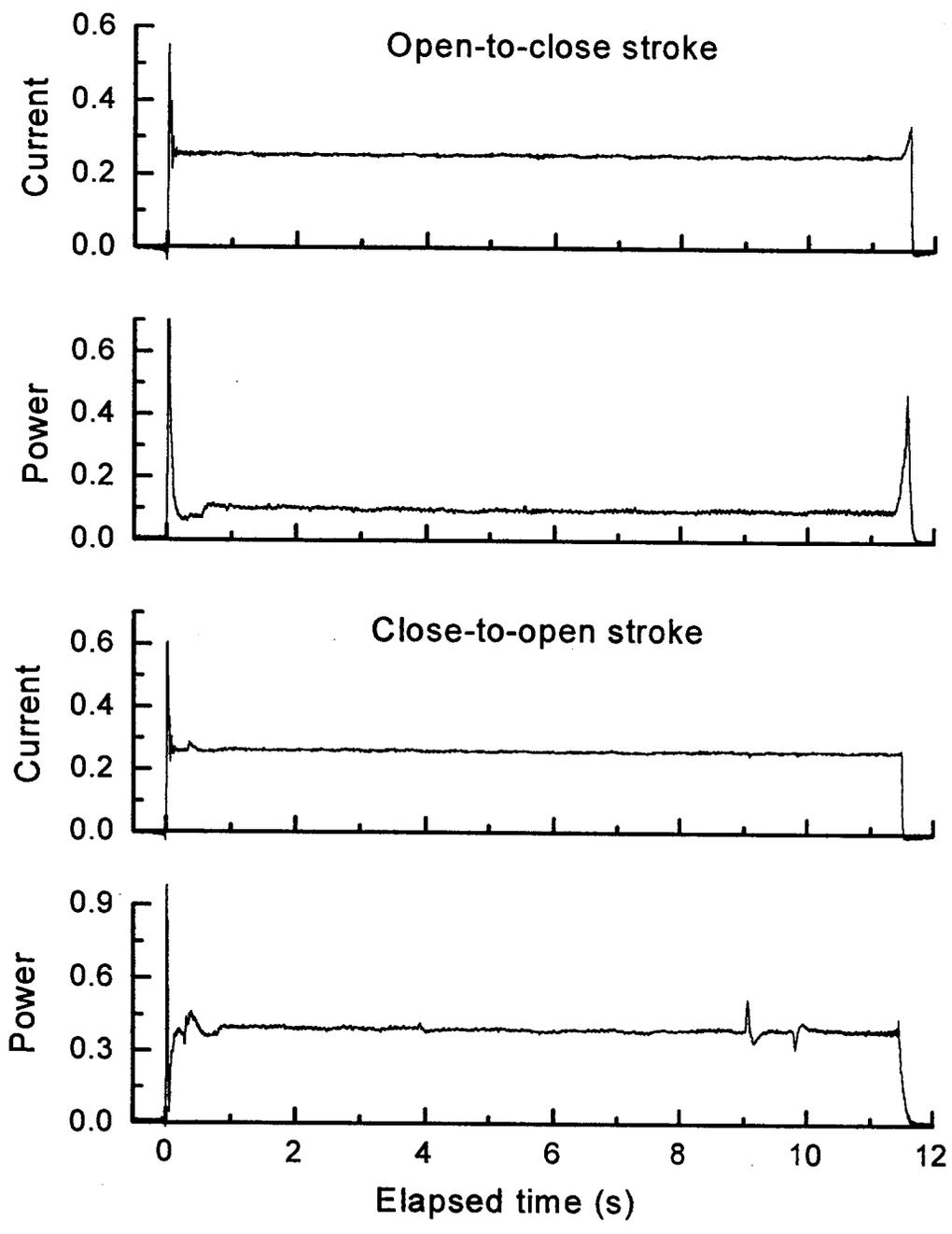


그림 4.27. Globe밸브 정상상태 전류신호

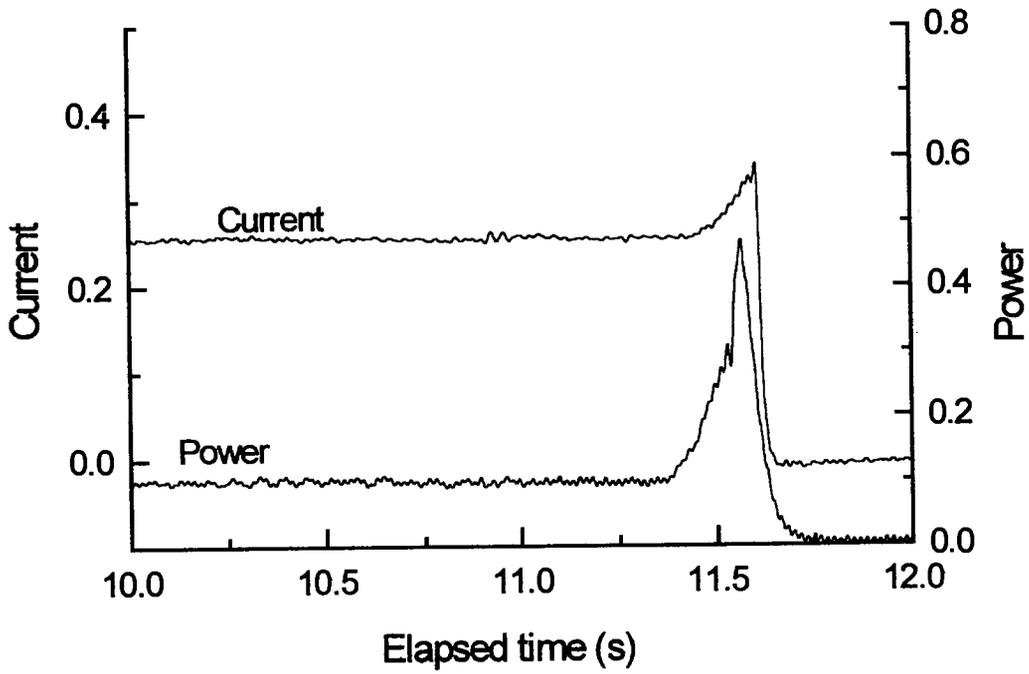
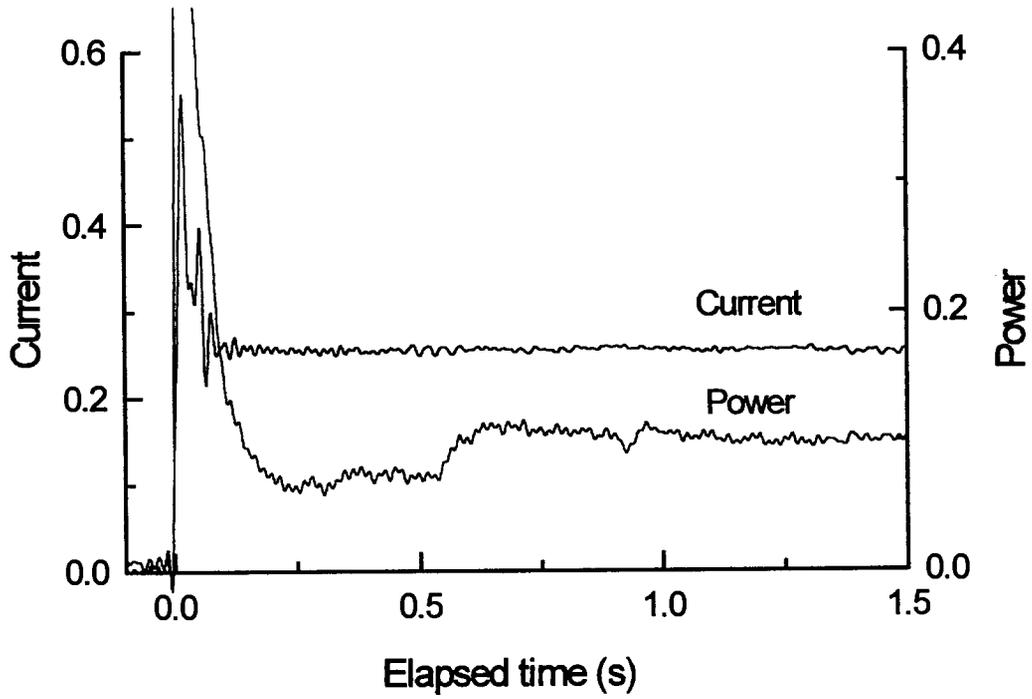


그림 4.28. Globe밸브 정상상태 열림 초기와 닫힘부의 전류, 전력신호 (open-to-close stroke)

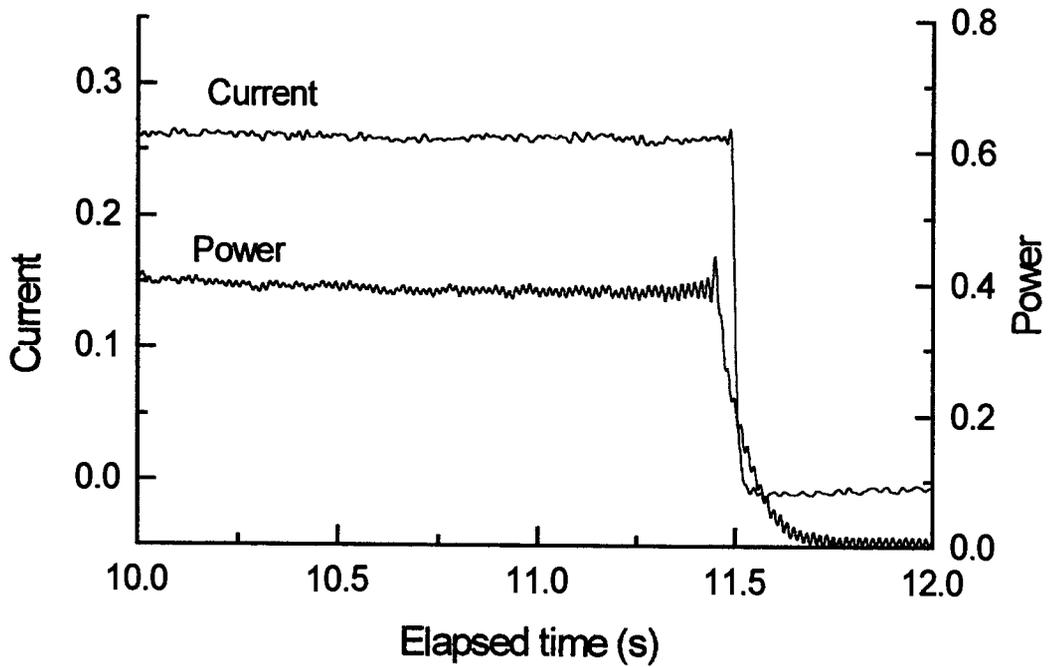
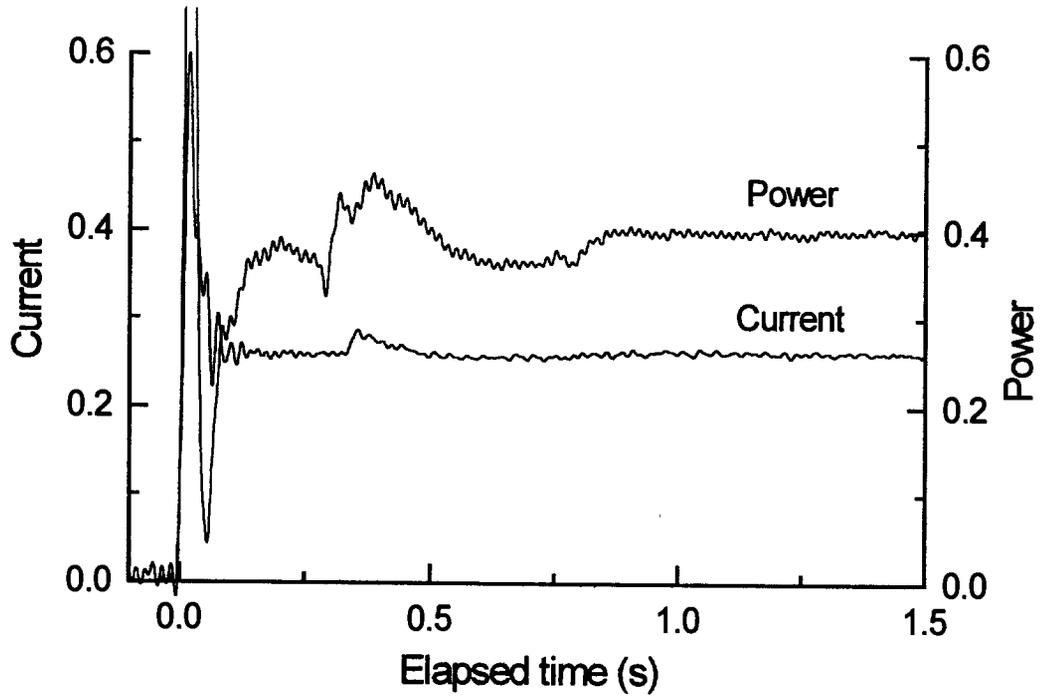


그림 4.29. Globe밸브 정상상태 열림 초기와 닫힘부의 전류, 전력신호 (close-to-open stroke)

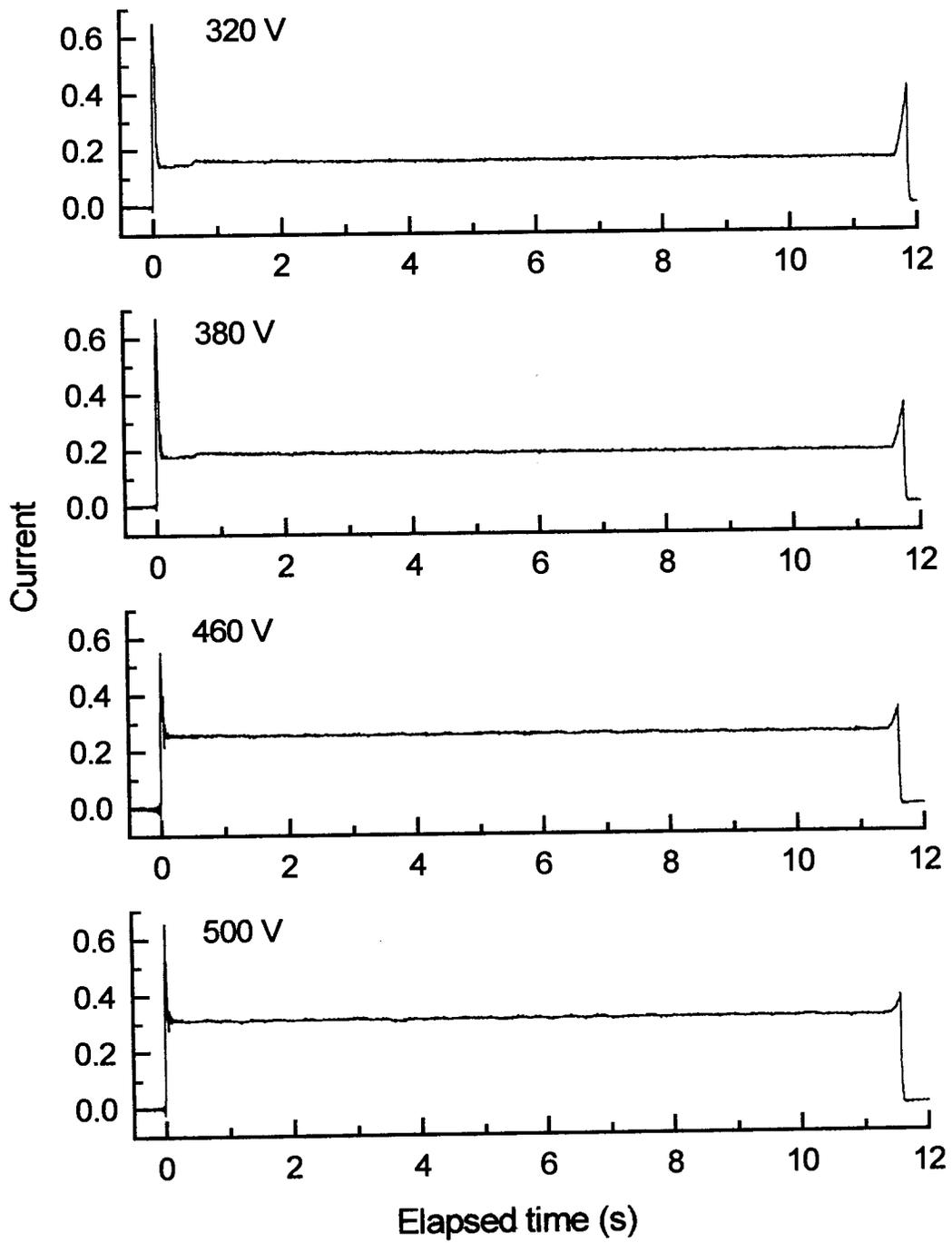


그림 4.30. Globe밸브 전압변화에 대한 전류신호  
(open-to-close stroke)

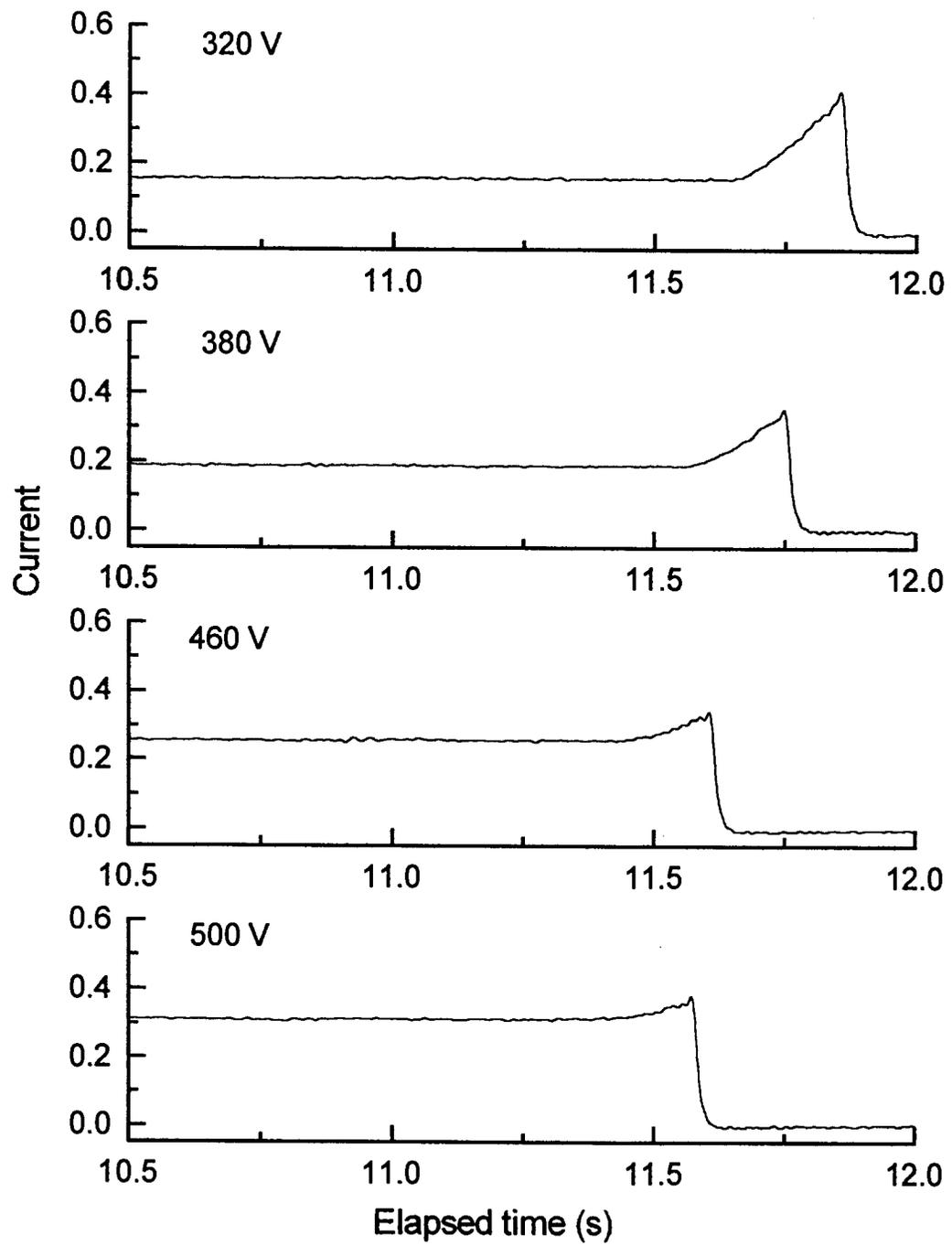


그림 4.31. Globe밸브 전압변화에 대한 닫힘부의 전류신호  
(open-to-close stroke)

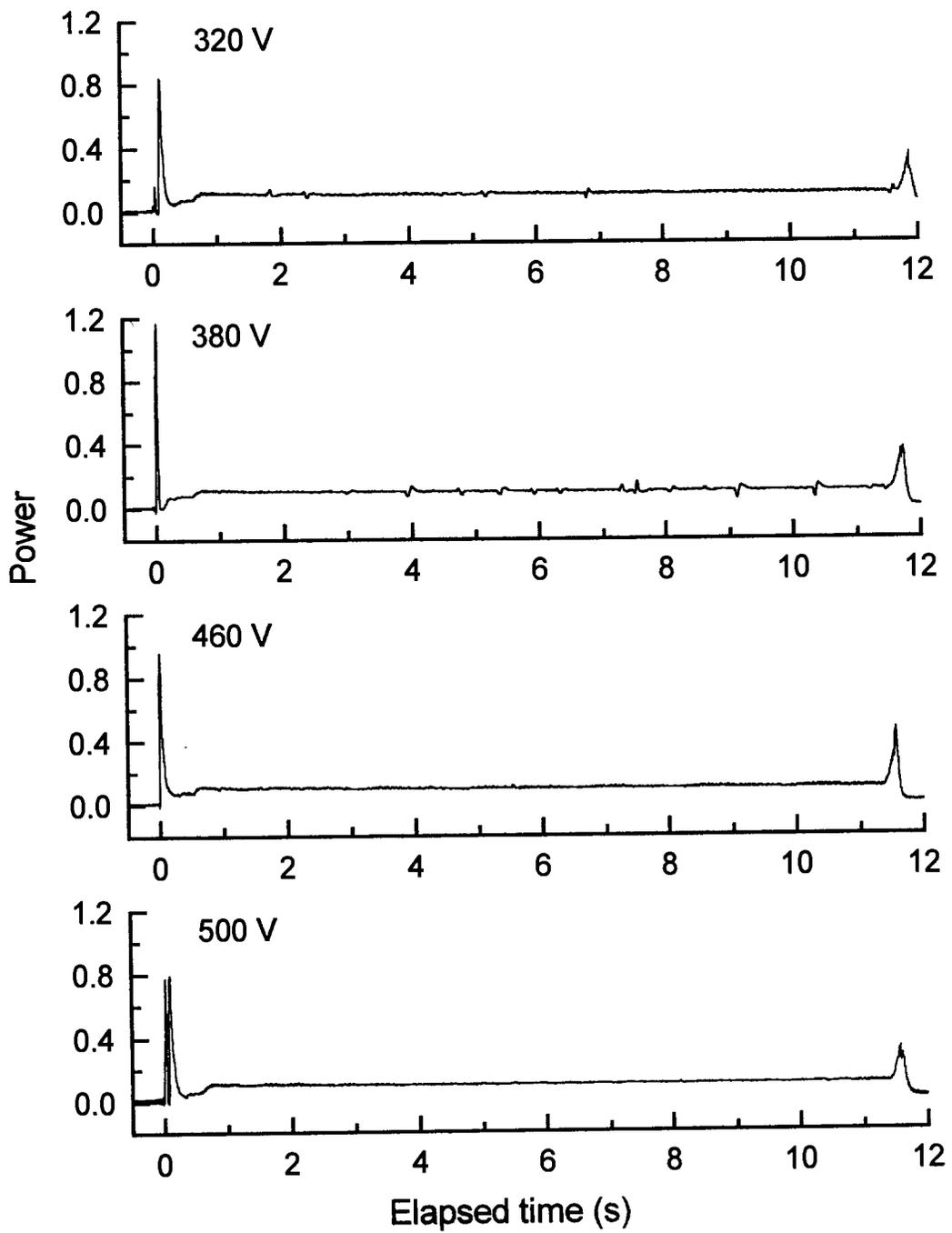


그림 4.32. Globe밸브 전압변화에 대한 전력신호  
(open-to-close stroke)

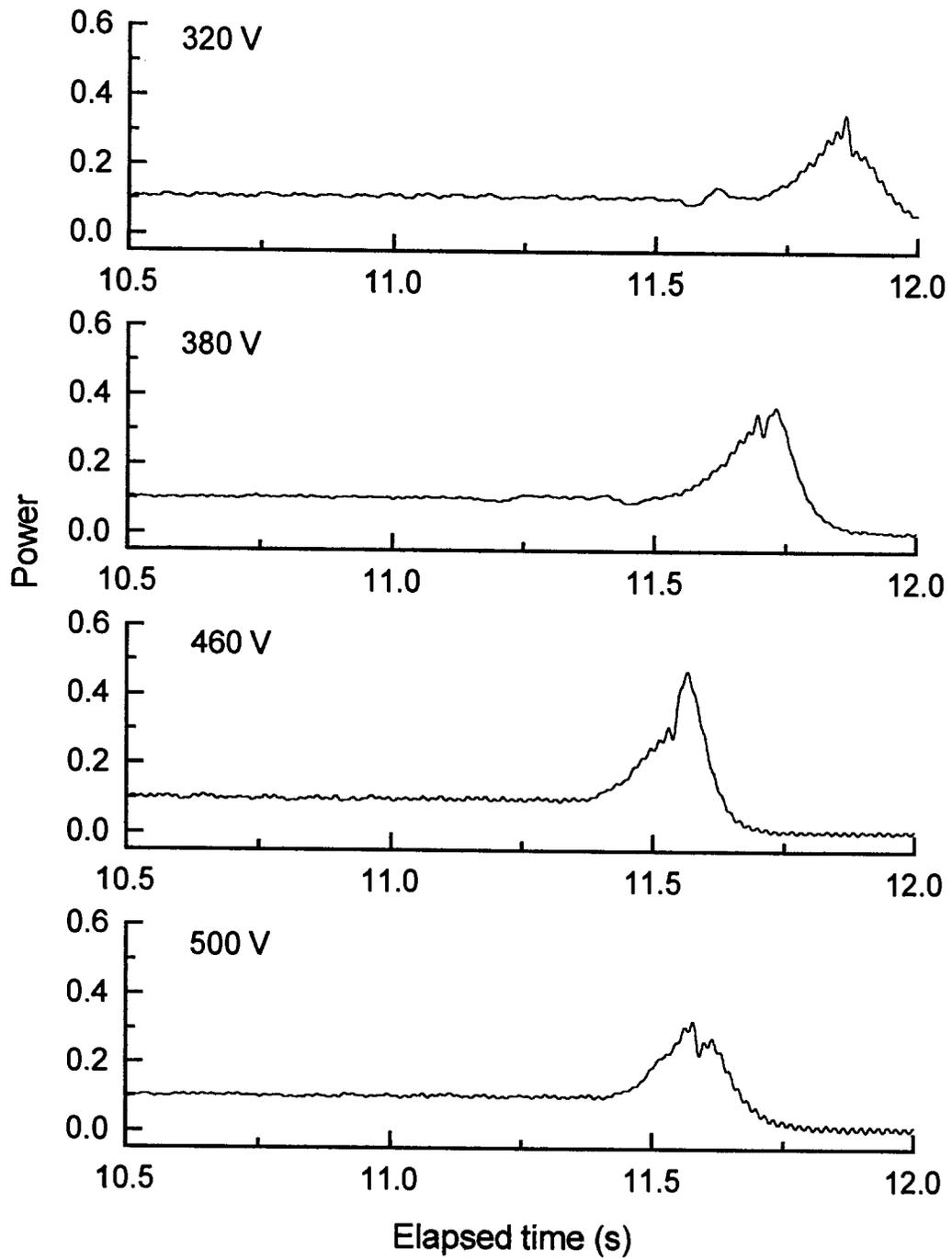


그림 4.33. Globe밸브 전압변화에 대한 닫힘부의 전력신호  
(open-to-close stroke)

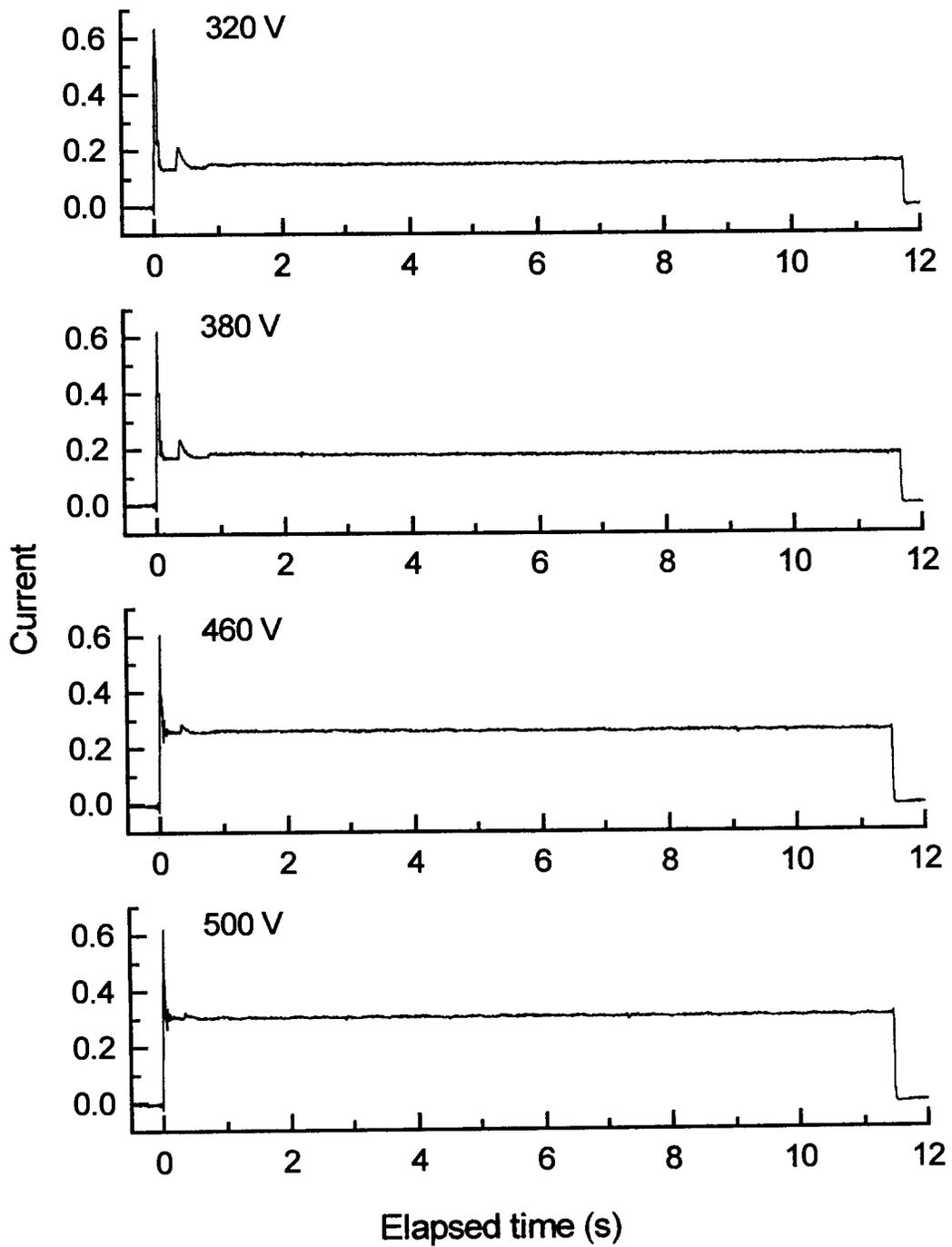


그림 4.34. Globe밸브 전압변화에 대한 전류신호  
(close-to-open stroke)

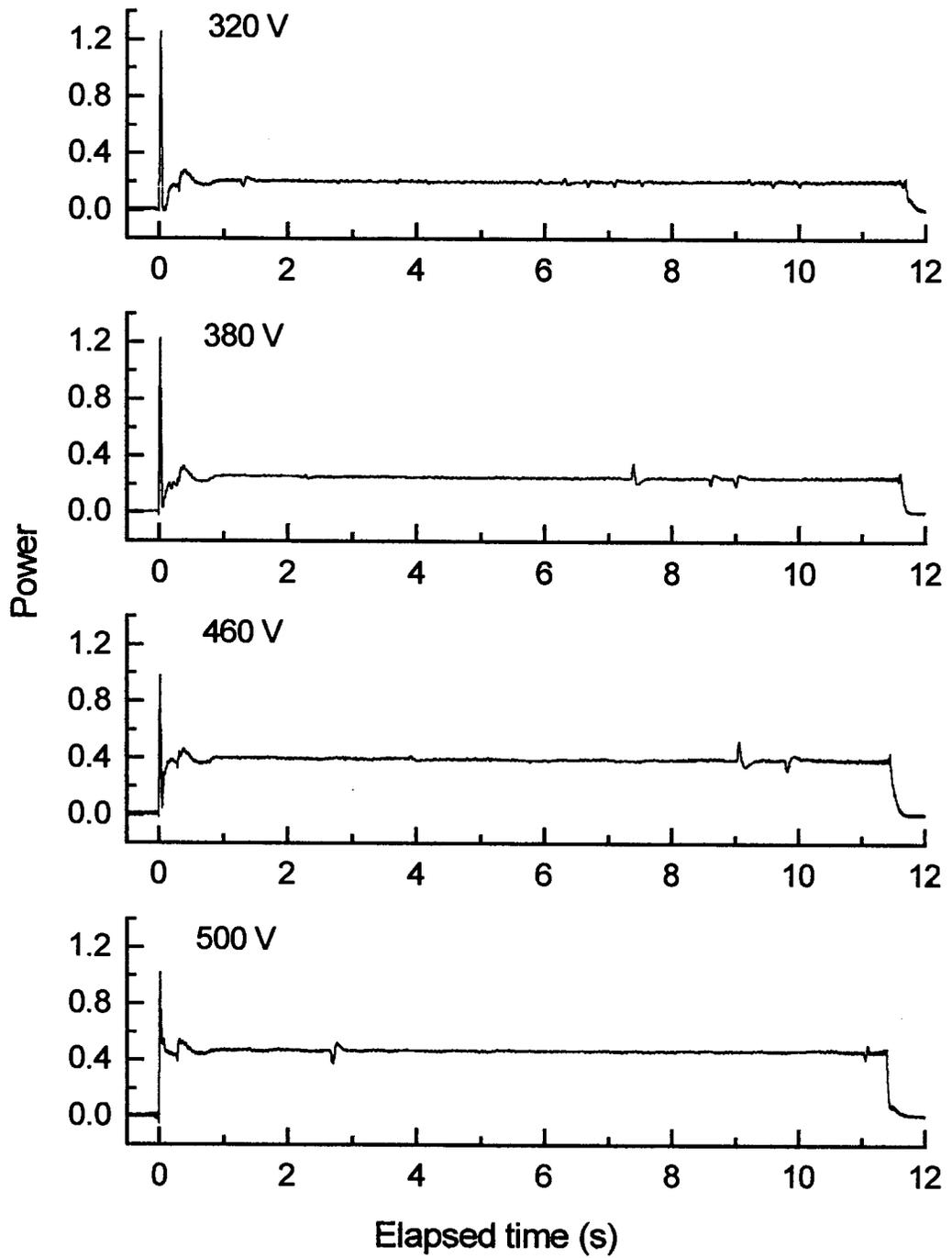


그림 4.35. Globe밸브 전압변화에 대한 전력신호  
(close-to-open stroke)

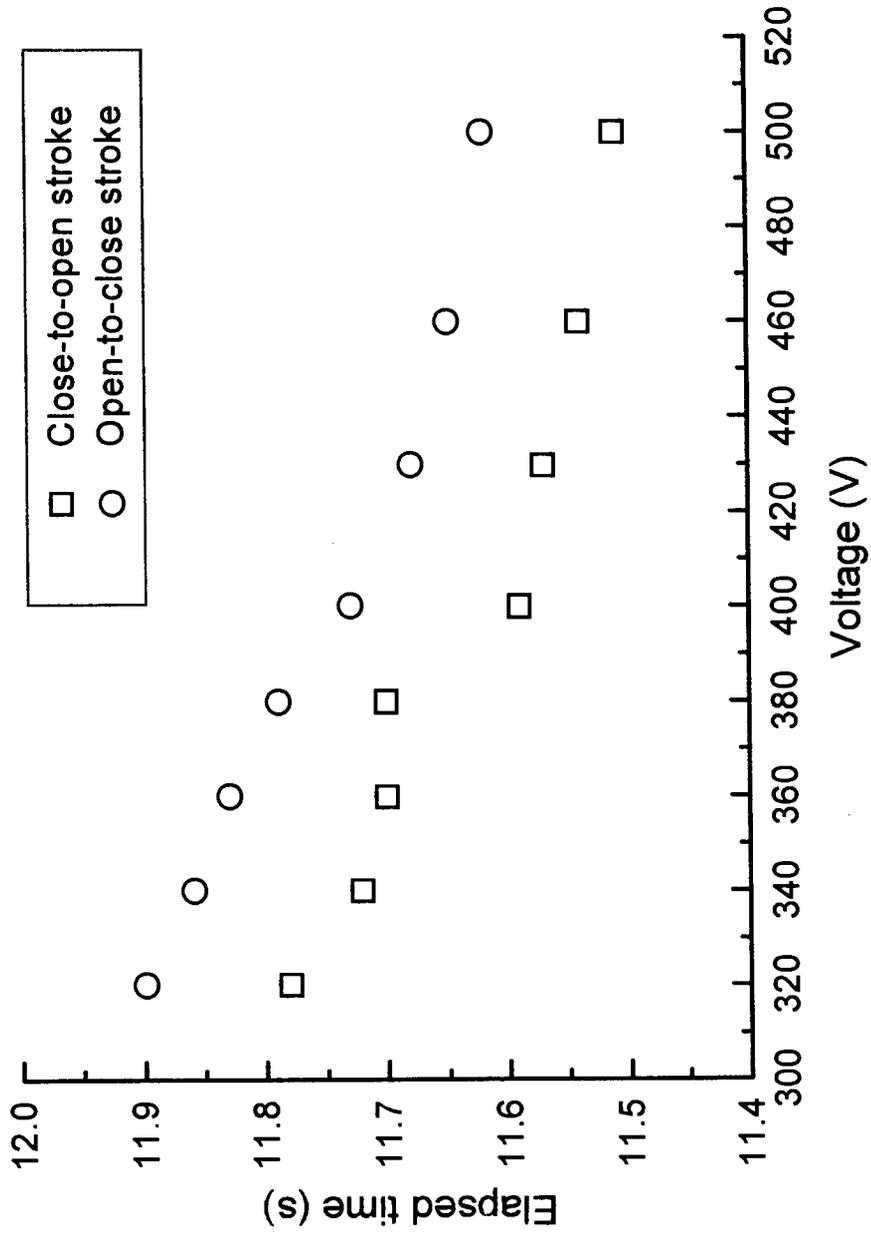


그림 4.36. Globe밸브 전압변화에 대한 행정시간 변화

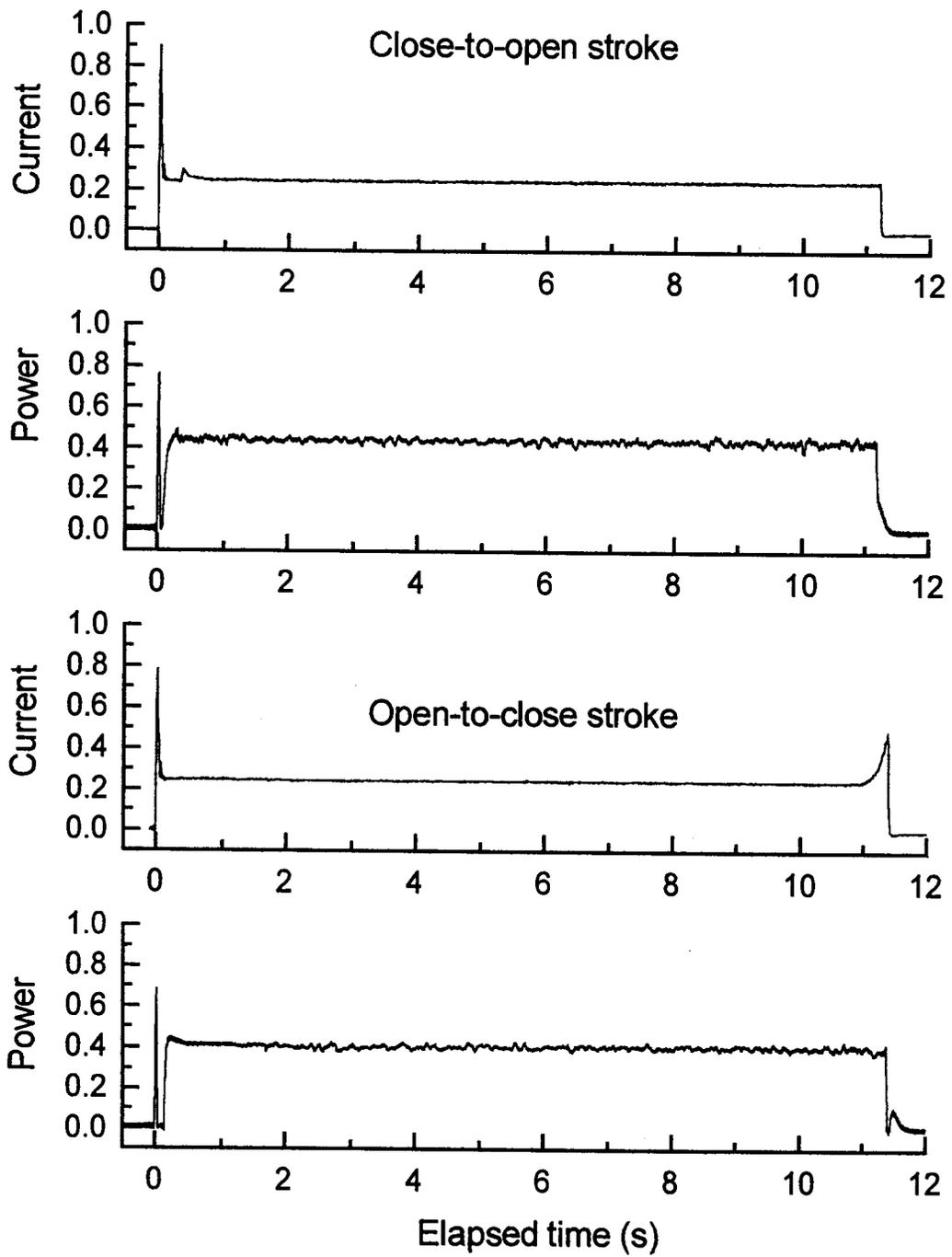


그림 4.37. Globe밸브 스템 직경변화에 대한 전류, 전력신호

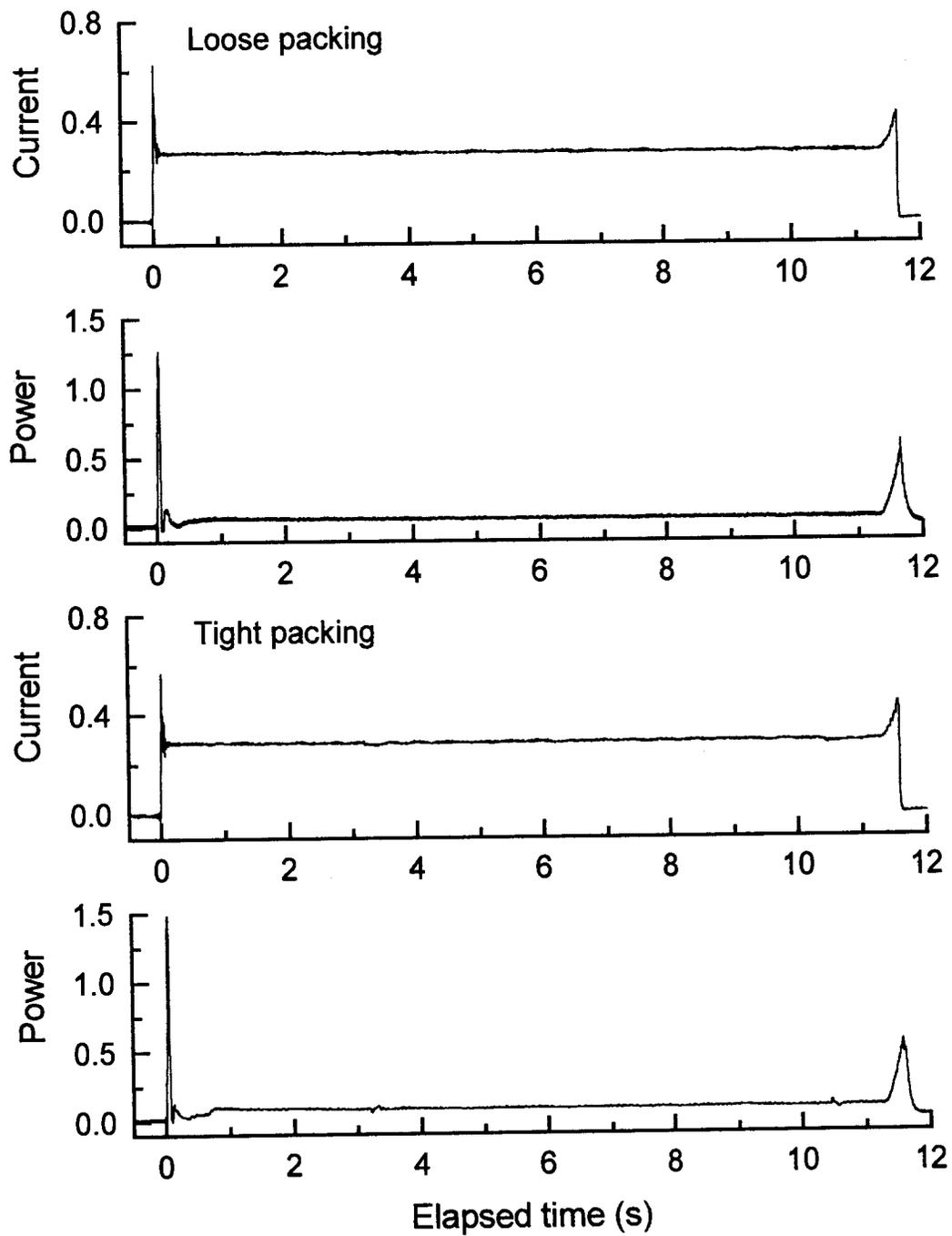


그림 4.38. Globe밸브 스템 패킹의 조임정도에 따른 전류, 전력신호 (close-to-open stroke)

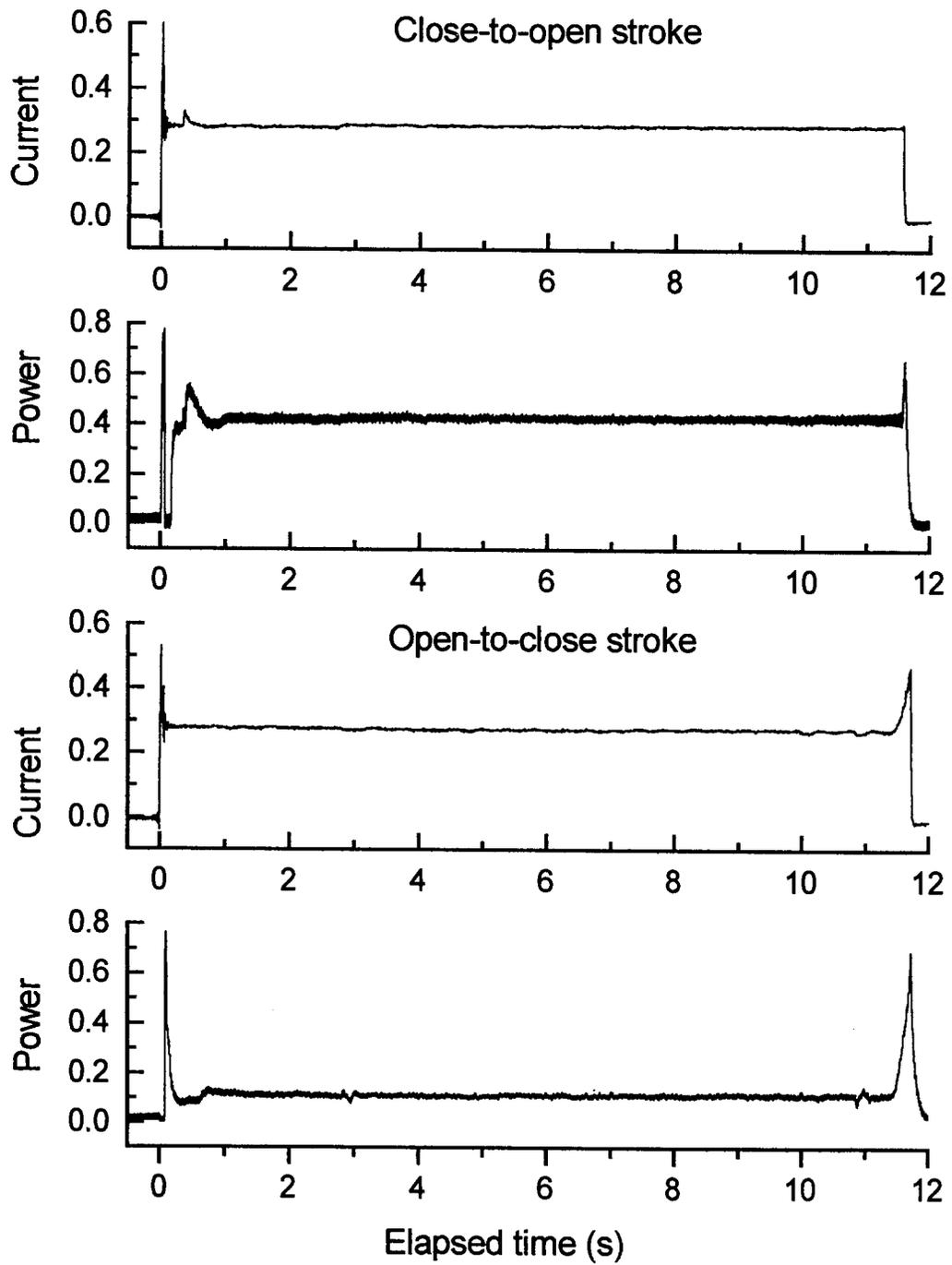


그림 4.39. Globe밸브 토크 스위치 설정값 변화에 대한 전력신호

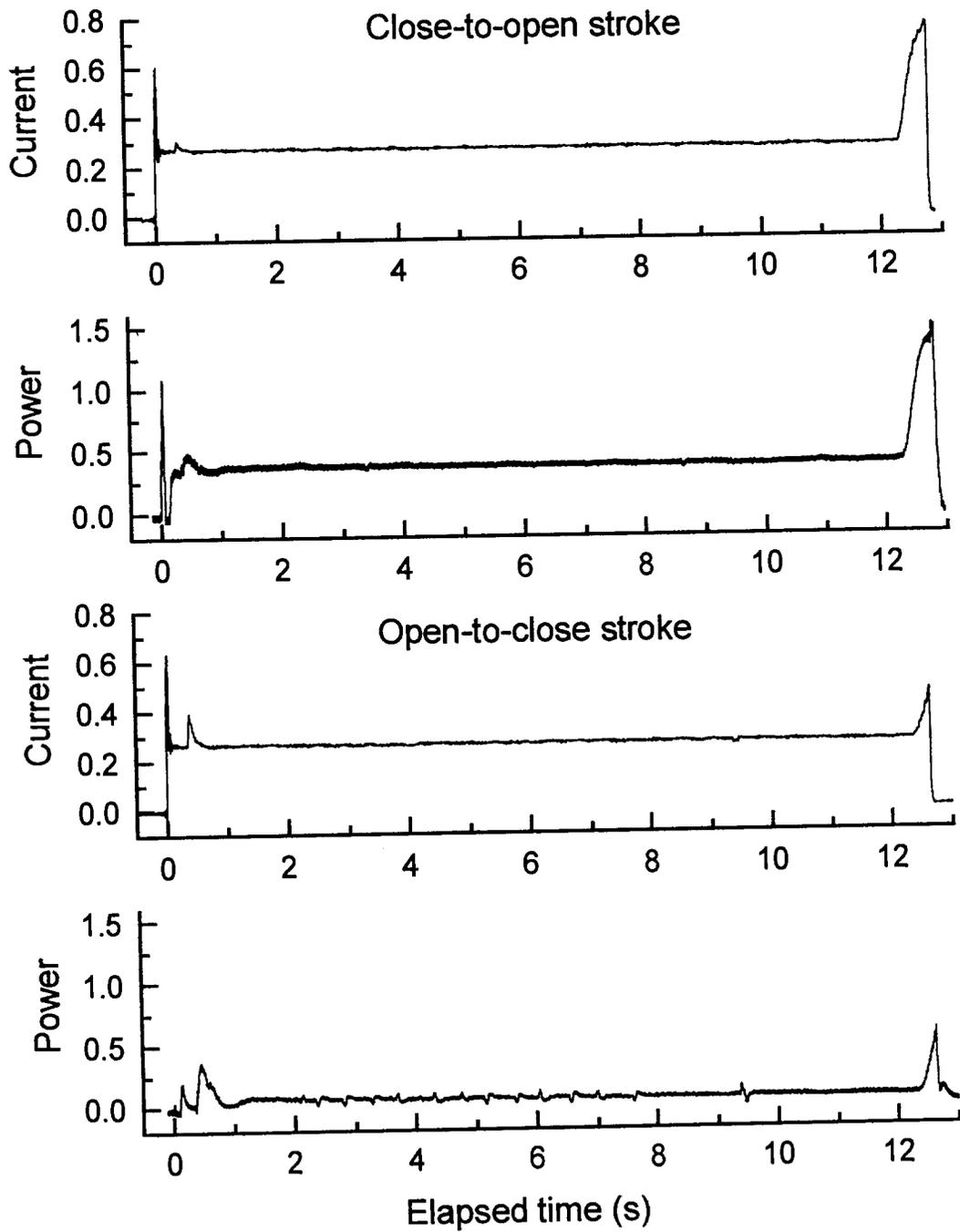


그림 4.40. Globe밸브 리미트 스위치 설정값 변화에 대한 전력신호



## 5. 결 론

원자력 발전소에서 사용하고 있는 gate와 globe 전동밸브(MOVs)를 대상으로 밸브몸체에서 발생 가능한 고장 및 노화를 모사하여 전압, 전류 그리고 전력을 측정하는 간단한 장치를 제작·사용하여 각각의 신호를 측정하여 분석 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고장모사에서 전동기의 전력 DC신호는 전류 DC신호보다 민감한 반응을 보이며, 두 신호의 거동이 유사하게 나타났다.
2. 밸브행정에서 나타나는 신호를 적절하게 처리하면 행정과 크기의 변화는 밸브손상 및 운전변수 변동을 나타내는 지표로 신호분석 및 진단에 이용할 수 있음을 알 수 있었다.
3. 전류의 AC 신호는 주파수 변화를 분석하는데 유용하게 이용할 수 있으며 주파수 분석도 밸브진단에 유용하게 활용할 수 있다.
4. 현장에서 정확한 밸브진단에는 정상상태의 신호를 저장하여 항상 비교할 수 있는 시스템 개발이 필요하다.
5. 전류와 전력신호를 동시에 이용하여 밸브를 진단하는 방법은 전류만을 이용하는 방법보다 유용하며 정확한 진단결과를 기대할 수 있다.

앞으로 본 연구에서 활용한 측정 및 분석기법을 현장에 적용하여 문제점을 파악하고, 보다 면밀한 신호분석 기법을 통하여 연구의 결과를 얻는다면, 전류와 전력신호를 이용한 전동밸브의 진단기술 개발은 유용하며 정확한 정보를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.



## 6. 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

### 6.1 연구개발 목표

유체의 흐름을 제어하는 것은 원자력발전소 운전과 안전에 직결되어 있어, 전동밸브가 오작동의 경우 사고의 원인이 되기 때문에, 신뢰성 및 사고 예측에 많은 관심을 두고 있다. 더욱이 전동밸브는 사람이 접근하기 곤란한 위치에 설치되며, 열악한 환경에서 운전이 되기 때문에 쉽게 열화되거나 고장날 수 있다.

국내외 기술개발 동향 파악 및 기존의 전동밸브 진단기법을 평가하고 이를 토대로 우리 국내 원자력발전소에 적용 가능한 최적의 전동밸브의 진단기법을 개발할 것이다. 기본적인 연구방향은 전동기에 입력되는 전압, 전류 그리고 전력을 측정하여 전동기의 출력변화를 상대적인 값으로 나타내고 구동부의 상태를 파악함으로써 전동밸브의 성능저하 등을 미리 진단하는 것이다. 이러한 진단 기법이 국내실정에 맞게 개발되면 발전소사고에 대비한 전동밸브의 안전기능을 향상시키고 궁극적으로는 발전소의 안전성을 증진시킬 수 있을 것이다.

본 연구는 전동밸브를 진단함에 있어 복잡한 계측기의 부착없이 전동밸브의 가동중 시험시 이상징후를 초기에 감시하고 진단하여 방사선 피폭을 최대한 줄이고, MCC에서 전류를 측정하는 간단하면서 최적의 진단 기법을 개발하여 전동밸브의 안전성을 확인할 수 있는 방법을 확립하여 진단의 정확도나 신뢰도를 확보함으로써 그 기술적 우위는 물론 전동밸브의 안전기능을 최적으로 유지하여 원자력 안전성을 확보하기 위함이다.

### 6.2 연구 개발 목표 달성도

본 연구는 전동밸브를 진단함에 있어 복잡한 계측기의 부착없이 전동밸브의 가동중 시험시 이상징후를 초기에 감시하고 진단하여 방사선 피폭을 최대한 줄

이고, MCC에서 전동기 입력전압, 전류 그리고 전력을 측정하는 간단하면서 최적의 진단 기법을 개발하여 전동밸브의 안전성을 확인하고 최적으로 유지하여 원자력 안전성을 확보하기 위함이었다.

연구의 목표 달성을 위하여 국내외 관련 자료를 수집 검토하고 전동밸브의 구동 및 전동기 입력 전압, 전류 그리고 전력을 측정할 수 있는 실험장치의 설계 및 제작 그리고 각 신호에 대한 진단기법의 개발 등의 과정으로 연구를 수행하였다. 그러나 전동밸브에서 발생 가능한 고장 또는 노화현상을 모사하기에는 경제적, 시간적으로 많은 부족함이 있었다. 따라서 이번 연구에서는 (주) 삼신의 도움으로 2대의 전동밸브를 이용하여 밸브 본체에서 발생 가능한 고장 또는 노화현상에 대해서만 모사시험을 수행하고 전동밸브 작동기에 대한 자료는 얻을 수 없었다.

앞으로 2천년도 연구를 통하여 개발된 진단기법을 원자력 발전소 현장에 적용하여 상업용 진단장비를 이용하여 얻은 자료와 비교 검토하면서 진단기법에 대한 보완이 필요할 것으로 생각된다.

### 6.3 연구 개발 결과의 대외 기여도

#### 6.3.1 기술적 측면

간단한 계측장비를 이용하여 전동밸브의 이상징후를 찾아내고, 높은 진단의 정확도나 신뢰도를 확보함으로써 전동밸브의 안전기능을 최적으로 유지하여 원자력 안전성을 확보할 수 있게 한다. 이런 기술의 축적은 앞으로 진단 장비 보완 및 개선을 독자적으로 할 수 있게 하여 문제 발생시 외국의 기술에 의존하지 않고 독자적인 해결을 모색할 수 있다.

또한 전동밸브의 성능저하를 감시·평가할 수 있는 진단장비를 개발하는데 기초자료로 활용될 것이며, 나아가 안전성을 저해하는 발전소의 사고나 고장을 미연에 방지함으로써 발전설비의 과도상태로 인한 운전 교란현상(transient status), 예기치 못한 운전정지 및 사고확산을 방지하고, 원자력 발전소의 사고

로 인한 사회적 불안감을 줄이는데 큰 역할을 할 것으로 판단된다.

또한 다양한 종류의 전동밸브를 사용하는 산업체 공장 등에서 정확한 성능을 진단하고 평가할 뿐만 아니라 사전에 성능저하를 예방할 수 있는 대책을 수립하고 실행할 수 있는 유효한 도구로서 활용될 수 있을 것이다.

### 6.3.2 경제적·산업적 측면

독자적 진단방법기술 개발로 우리 나름대로의 지식과 방법을 축적하면 외국 기술 도입과 외국 장비 구입에 의한 외화 유출을 줄일 수 있으며 특히 진단장비의 개발은 원자력발전소의 안전성을 높여 지역 주민이나 관계자들의 관계 관리에도 도움을 줄 것이며, 또한 안전 점검을 위한 잦은 발전소 운휴나 사고로 인한 발전소 운영 마비를 통한 경제적 손실을 줄이는데 큰 역할을 할 것이다. 개발되는 진단기법은 원자력발전소외에도 전동밸브를 사용하는 일반 산업체에서도 전동밸브의 진단에 직접 운용이 가능할 것이다.

### 6.3.3. 향후 활용방안

전동밸브를 간단한 계측기로 전동밸브의 이상징후를 찾아내고, 높은 진단의 정확도나 신뢰도를 확보하기 위해서는 앞으로 많은 연구가 계속되어야 할 것이다. 본 연구에서 접근하지 못한 작동기 부분의 이상징후에 대한 모사시험, 신호분석의 다양화 기법 개발 등에 대한 지속적인 연구에 측정방법, 신호분석 등의 기법을 활용하고, 본 연구결과를 원자력 발전소에서 활용할 수 있기 위해서는 현장자료를 직접 받아 분석하고, 수정 보완하여 전동밸브의 안전기능을 최적으로 유지하고 원자력 안전성을 확보할 수 있는 최적 진단기술을 개발하는데 기반 자료가 될 것이다. 또한 이런 기술의 축적은 앞으로 진단 기술개발 및 개선을 독자적으로 할 수 있게 하여 문제 발생시 외국의 기술에 의존하지 않고 독자적인 해결을 모색할 수 있는 능력을 배양하고, 진단장비를 개발하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.



## 7. 연구개발 결과의 활용계획

본 연구는 전동밸브를 진단함에 있어 간단한 계측기로 전동밸브의 이상징후를 찾아내고, 높은 진단의 정확도나 신뢰도를 확보함으로써 그 기술적 우위는 물론 전동밸브의 안전기능을 최적으로 유지하여 원자력 안전성을 확보할 수 있게 한다. 이런 기술의 축적은 앞으로 진단 장비 보완 및 개선을 독자적으로 할 수 있게 하여 문제 발생시 외국의 기술에 의존하지 않고 독자적인 해결을 모색할 수 있다.

독자적 진단방법기술 개발로 우리 나름대로의 지식과 방법을 축적하면 외국 기술도입과 외국 장비구입에 의한 외화 유출을 줄일 수 있으며 특히 진단장비의 개발은 원자력발전소의 안전성을 높여 지역 주민이나 관계자들의 관계 관리에도 도움을 줄 것이며, 또한 안전 점검을 위한 잦은 발전소 운휴나 사고로 인한 발전소 운영 마비를 통한 경제적 손실을 줄이는데 큰 역할을 할 것이다. 개발되는 진단기법은 원자력발전소외에도 전동밸브를 사용하는 일반 산업체에서도 전동밸브의 진단에 직접 운용이 가능할 것이다.

본 연구에서 개발되는 전동밸브의 이상징후 진단 기법은 원자력발전소에서 직접 활용이 가능하게 하여 안전성 도모는 물론이고 진단장비의 실용화와 연결이 가능할 것이다. 또한 이상징후를 사전에 판별함으로써 원자력 발전소 안전성 향상 및 경제성 제고 등에 응용할 수 있을 것이다.



## 8. 참고문헌

- [1] ASME, 1990, "Code of operation and maintenance of nuclear power plants" pp.9-10
- [2] S. Mukhopadhyay & Chaudhyri, 1995., "A feature-based approach to monitor motor-operated valves used in nuclear power plants" IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.42, No.6, pp.2209~2220
- [3] J. Eklund, V. O.Imtran, & B. R. Upadhyay, 1991., "An automated system for motor-operated valve diagnostics," Power Eng., Vol.95 No.12, pp.38-41
- [4] R .C .Rittenhouse, 1990, "The dynamic world of valve testing," Power Eng., Vol.94, No.1, pp.18-23
- [5] H. D. Haynes, 1989, "Aging and service wear of electric motor-operated valves used in engineered safety-feature systems of nuclear power plants," NUREG/CR-4234
- [6] B. W. Roberts, 1993, "Power signal analysis for motor driven device monitoring and diagnosis," Duke-Energy Cooperation
- [7] Siemens Power Corporation, 1995, "Trending MOV performance using motor power monitoring." SPC Document No. 5221/94/029
- [8] 이철희, 1996, "밸브개론", 주식회사 삼신
- [9] J. L. Crowley & D. M. Eissenberg, 1986, "Evaluation of the motor operated valve analysis and test system(MOVATS) to detect degradation, incorrect adjustments, and other abnormalities in motor operated valves", USNRC Report NUREG /CR-4380
- [10] U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1985, "Motor operated valve common mode failures during plant transient due to improper switch settings", USNRC Bulletin. 85-03
- [11] P. A. Lapoint, Atwood and J. K. Clayton, 1992, "Recent experience with testing of parallel disc gate valves under accident flow conditions", NUREG/CP-0123, EGG-2676, pp.9-23

- [12] R. Steele, M. J. Russel, K. G. Dewall, and J. C. Watkins, 1992, "Load sensitive behavior in motor-operated valves", NUREG/CP-0123, EGG-2676, pp.25-37
- [13] Thomas A. Rak, Lewis F. Sweeney, 1992, "Operability testing of electrical moter-operatied valves", pp.57-68
- [14] U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1986, "Case study report-Review of motor-operated valve performance," USNRC report AEOD/C603
- [15] Wyle Laboratories, 1988, "Test procedure, gate valve flow interruption blowdown test for EC&G Idaho," test procedure No. 49064
- [16] 박종호 외, 1998, "원전기기 및 계통성능 규제기술개발," KINS/HR-214
- [17] H. D. Haynes, "Electrical signature analysis(ESA) developments at the Oak Ridge Diagnostics Applied Research Center,"
- [18] R. C. Rittenhouse, 1990, "The dynamic world of valve testing," Power Eng., Vol.94, No.1 pp.18~23
- [19] J. D. Kueck, 1988, "An investigation of magnesium rotors in motor operated valve actuators," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. EC-3, pp.40~43
- [20] Kelvin G. DeWall, Robert Steele, Jr., and John C. Watkins, "Lesson Learned from Validation Testing of Diagonostic Systems for Motor-Operated Valves", NUREG/CP-0123, EGG-2676, pp.297-305
- [21] Robert L.Leon, "Diagonosing MOV Problems Using Comparative Trace analysis", NUREG/CP-0123, EGG-2676, pp.307-319
- [22] Bill R.Black, "Using Torque Switch Settings and Spring Rack Characteristics to Determine Actuator Output Torque", NUREG/CP-0123, EGG-2676, pp.321-336
- [23] Ken Green, Frances Rosch, Jr., Ted Neckowicz, "Motor Operated Valve Stroke Timing; Is There Value?", NUREG/CP-0111, T191 002343, pp.389-396
- [24] Anthony Moffa, "Special Considerations for Testing Rising Rotating Stem MOV's", NUREG/CP-0123, EGG-2676 , pp.337-347
- [25] Nabill Schauki, Chad Smith, "Similarity Analysis-A Basis for MOV Verification", NUREG/CP-0123, EGG-2676 , pp.509-517

## 감사의 글

본 과제를 수행할 수 있도록 기회를 주신 한국 원자력 안전기술원 원장님을 비롯한 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

본 과제는 천안시 두정동에 있는 (주) 삼신에서 시험용 전동밸브와 시설을 이용할 수 있도록 배려해 주시어 원만히 실험을 수행할 수 있었습니다. (주) 삼신의 회장님을 비롯한 임 영준 상무님, 안 종식 부장님께 감사드리며, 바쁘신 중에도 전동밸브의 작동과 기계가공을 도와주신 보수사업부 여러분과 그 외 여러분께도 감사를 드립니다. (주) 삼신에서 실험을 수행하는 동안 전동밸브 시험장비 구비에 투자를 아끼지 않는 것을 볼 때 국내뿐 아니라 세계적인 전동밸브 생산 업체가 될 것으로 믿으며 날로 번창하길 기원드립니다.

모쪼록 미진한 과제 수행이나 이 결과가 한국 원자력발전소의 안전에 조금이나마 도움이 되었으면 더 없는 다행으로 생각하겠습니다.

끝으로 본 과제의 실험을 위해 천안시에 수없이 다니느라 수고한 충남대학교 유체공학실험실의 강 현택과 이 정민군 그리고 본 과제 수행에 참여한 유체공학 실험실원 여러분께 노고를 치하드리며, 앞으로 여러분의 장래에 밝은 희망이 모두 이루어지길 기원합니다.

1999년 4월

연구책임자 박 종 호