

# 모터구동밸브의 원격 진단 시스템 개발에 대한 연구

## Development of Remote Diagnostic Monitoring System for Motor-Operated Valves

임찬우\*, 채장범\*\*, 강성기\*\*\*, 박성근\*\*\*\*, 강신철\*\*\*\*

Chanwoo Lim, Jangbom Chai, Seongki Kang, Sungkeun Park, Shinchul Kang

**Key Words** : motor torque(모터 토크), stem thrust(스텝 힘), stem thrust estimator(스텝 힘 검출기)

### ABSTRACT

A diagnostic methodology, which utilizes only the remotely-measurable signals, has been requested to be developed in order to evaluate and monitor conditions of MOVs. It is proven that the stem thrust are the most important variables which provide the operability of MOVs. Therefore the stem thrust estimator was developed and validated, which estimates stem thrust by use of the motor torque. The motor torque is calculated using electrical signals which can be measured in Motor Control Center(MCC). The procedures to evaluate the accuracy of the diagnostic variables were set up and the accuracy of each variable was obtained through the experiments under various conditions. In addition, the applicability of the stem thrust estimator was tested in the plants.

### 1. 서 론

모터구동밸브는 발전소, 화학 공장, 그리고 대형 배관 시스템에서 유체의 흐름을 제어하는데 사용되는 부품으로 안전에 관련된 계통에서 사용되는 모터구동밸브의 작동 실패는 대형 사고의 원인이 될 수 있다. 따라서 안전에 관련된 모터구동밸브의 작동 실패를 미연에 방지하기 위해서 모터구동밸브를 감시하고 상태를 진단하는 것이 요구되고 있다.

지금까지는 모터구동밸브의 진단을 위해서 현장에서 직접 진단 신호를 취득하여 분석하는 방법을 주로 사용하였다. 그러나 원자력 발전소나 화학 공장에서는 방사능이나 독성 물질의 오염 등으로 현장에서 작업하는데 많은 어려움이 있고 대형 배관 시스템에서는 모터구동밸브가 지역적으로 상당한 먼 곳에 설치되어 있어서 측정을 위하여 현장에 가는 것이 현실적으로 불가능 하였다. 이러한 현장 측정 방법의 한계와 단점들을 극복하고 보다 효율적인 진단을 위해서는 원격에서 진단하는 방법이 필요하다. 그런데 모터구동밸브를 원격에서 진단하고자 할 경우에는 현장에서 진단을 수행한 경우와 달리 측정할 수 있는 신호가 모터에 공급되는 전류와 전

압 신호로 한정된다. 이에 이러한 제약 상황 하에서 진단을 수행할 수 있는 방법에 대하여 몇 기관에서 연구·개발이 이루어졌다. 미국의 Oak Ridge National Laboratory에서는 모터의 입력 전력을 기준으로 모터구동밸브 진단에 중요한 진단 변수인 스텝 힘을 구하는 방법이 연구되었다. 그리고 이 방법은 미국의 Liberty사에서 MPM(Motor Power Monitor)이란 방법으로 상용화되기도 하였다.(1) 또한 미국의 Crane사에서는 모터의 사양과 모터 실험 정보를 이용하여 모터의 출력 토크를 예측하여 진단에 이용하였다. 이 방법은 MC<sup>2</sup> 방법으로 상용화되어 미국의 일부 원자력 발전소에서 사용되고 있다.(1)

그러나 모터의 효율이 모터 부하의 변화에 따라 변동하기 때문에 모터의 입력 전력은 모터의 부하에 비례하지 않는다. 따라서 모터의 입력 전력으로 스텝 힘을 예측하는 MPM 방법은 오차가 크게 발생하여 실제 적용하는데 어려움이 있다. 그리고 모터의 토크를 예측하는 MC<sup>2</sup> 방법은 많은 정보를 요구하고 정보가 없으면 모터 토크를 예측하지 못하는 한계를 보이고 있다.

따라서 본 논문에서는 MC<sup>2</sup> 방법에서와 같이 많은 정보가 필요 없는 모터 토크 계산 방법인 NEET(Noninvasive Evaluation of Electric Torque) 방법을 검증하였고 부하에 비례하여 변하는 모터 토크를 이용하여 스텝 힘을 예측하는 방법인 NEST(Noninvasive Evaluation of Stem Thrust) 방법을 개발하였다.(2)

\* (주)엠앤디

E-mail : kamangi@korea.com  
Tel : (031)216-3944, Fax : (031)216-3334

\*\* 아주대학교

\*\*\* (주)엠앤디

\*\*\*\* 한국전력공사 전력연구원

개발된 진단 방법을 현장에 적용하기 위해서는 반드시 검증이 필요하므로 이를 위해서 모터구동밸브를 다양한 환경에서 반복적으로 실험하였다. 검증 방법으로는 모터에 걸리는 토크나 스템에 가해지는 힘을 센서를 이용해서 직접 측정하고 이 측정된 결과와 진단 방법으로 계산한 결과를 비교하여 검증을 수행하였고 정확도를 산출하였다. 그리고 NEST 방법은 현장에 설치된 모터구동밸브에 비침투적인 센서를 부착하여 현장 검증도 수행하였다.

## 2. 모터구동밸브의 구성과 작동 원리

### 2.1 구성

모터구동밸브는 크게 모터와 구동부, 그리고 밸브로 구성된다. 본 논문에서 사용한 모터구동밸브는 3상 유도 전동기, 발전소 등의 현장에 가장 많이 설치되어 있는 모델인 Limatorque사 SMB-00 구동기, 그리고 게이트 밸브로 구성하였으며 그림 1과 같다. 그림 1에서 보는 바와 같이 피니언, 헬리컬, 워프 워프 기어, 스템과 스템 너트, 드라이브 슬리브(drive sleeve) 그리고 스프링 팩(Spring pack)으로 구성되어 있다. 일반적으로 모터구동밸브는 닫힘과 열림시의 거동을 제어하기 위해서 두개의 스위치 즉, 리미트 스위치(limit switch)와 토크 스위치(torque switch)를 사용하는데 SMB-00 역시 이와 같은 스위치들을 용도에 맞게 선택하여 사용한다. 일반적으로 안전 관련 밸브는 닫힘시 적절한 스템 힘을 보장하기 위하여 토크 스위치로 조절되고 열림시는 정해진 위치에서 밸브 작동이 멈추도록 리미트 스위치를 사용하여 조절하도록 되어 있다. 또한 스템의 수동 조작을 위한 디클러치 레버(declutch lever)와 핸드휠(handwheel)이 있다.

### 2.2 작동 원리

모터구동밸브 동력 전달계의 작동 원리는 다음과 같다. 최초의 동력원인 모터의 회전으로부터 피니언과 헬리컬을 통하여 워프로 동력이 전달된다. 워프 워프 기어를 회전시키고 워프 기어에 있는 블럭(block)이 드라이브 슬리브의 블럭과 마주치게 되면(이것을 hammer blow effect라 한다.) 드라이브 슬리브가 스템 너트를 회전시켜 스템을 움직이게 한다. 이때 스템과 스템 너트는 마찰을 하게 되며 마찰 상태에 따라 스템 토크에서 스템 힘으로 전환되는 양이 크게 변하게 된다. 밸브가 완전히 닫히면 워프 기어는 더 이상 회전을 하지 못하게 되지만 모터는 계속적으로 회전하므로 워프 워프 축(shaft)을 따라 움직이게 되고 스프링 팩을 압축시키게 된다. 스프링 팩이 압축되면 압축 거리에 따라 작동하는 토크 스위치가 모터의 전원을 차단시켜 구동을 멈추게 한다.

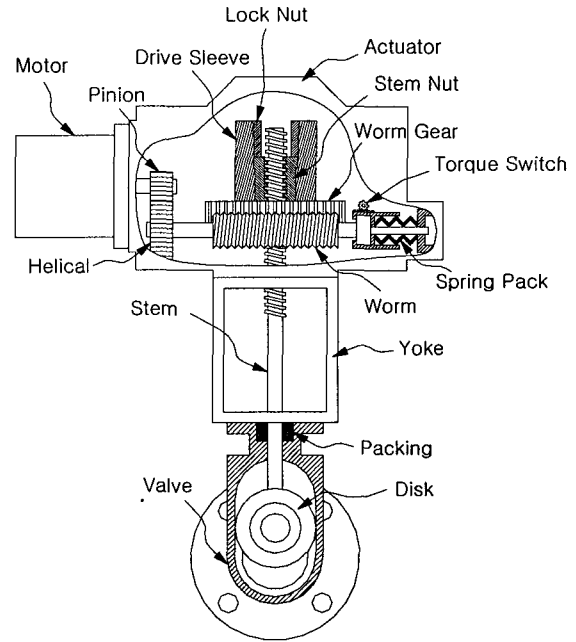


그림 1. 모터구동밸브 구성도

이러한 작동 구조에 때문에 토크 스위치는 스템 힘이 아닌 스템 토크를 기준으로 작동하게 된다. 따라서 토크 스위치가 정확한 기준 스템 토크에서 작동하여도 스템과 스템 너트 사이의 마찰 상태에 따라 스템 힘은 크게 변할 수 있으므로 모터구동밸브 작동에 실패를 가져올 수 있다. 따라서 스템 힘을 구하는 것이 모터구동밸브 진단에 가장 중요하다.

## 3. 정확도 계산 방법

정확도란 '측정값과 참값이 서로 일치하는 정도'로 본 논문에서는 진단 방법을 이용하여 예측한 결과와 센서를 이용하여 측정된 결과가 일치하는 정도가 된다. 이러한 정확도를 구하기 위해서 아래와 같은 계산식을 사용하였다.

$$E_{est} = \frac{V_{est} - V_{mes}}{V_{mes}} \quad [1]$$

여기서,  $E_{est}$  : 진단 방법을 이용하여 계산한 값의 상대 오차  
 $V_{est}$  : 진단 방법을 이용하여 계산한 값  
 $V_{mes}$  : 센서를 이용하여 측정된 값

$$U(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad [2]$$

여기서,  $U(x)$  : x의 표준 불확도  
 $n$  : 데이터 수  
 $\bar{x}$  : x의 평균

$$U_c = \sqrt{U(E_{est})^2 + U(E_{sensor})^2} \quad [3]$$

여기서,  $U_c$  : 합성 표준 불확도

$E_{sensor}$  : 센서의 상대 오차

따라서 정확도 계산식은 다음과 같으며 계산 결과의 최대값으로 정확도를 표시하였다.

$$Accuracy = bias \pm \frac{U(E_{est})}{\sqrt{n}} \pm 2U_c \quad [4]$$

식 [4]의 두 번째 항은 bias의 불확도를 나타내며 세 번째 항은 95.46 %의 신뢰도로 불확도가 확장된 것이다.

#### 4. 모터 토크의 정확도

NEET 방법은 3상 유도 전동기를 모델링 하여 모터 토크를 구한다.(2) 이는 고정자의 전압과 전류를 이용하여 토크를 계산할 수 있는 방법으로 CRANE사 MC<sup>2</sup> 방법의 모터 토크 계산 방법과는 달리 모터 성능 곡선 등 많은 정보를 이용하지 않아 적용범위가 넓다.

NEET 방법으로 계산된 결과를 검증하기 위하여 그림 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 모터 축에 걸리는 토크를 직접 측정하기 위하여 모터와 구동기 사이에 토크 센서를 삽입하였으며, 다양한 실험 환경을 제공할 수 있도록 모터구동벨브의 밸브 대신에 유압으로 부하를 조절할 수 있는 부하 시뮬레이터를 장치하였다. 모터는 3상, 60 Hz, 460 V, 0.75 HP, 구동기는 Limitorque SMB-00를 사용하였다.

공급 전압의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여 공급 전압을 380 V, 435 V, 460 V, 그리고 475 V로 변경시키면서 각 전압별로 100회의 실험을 수행하였다. 실험 수행시 부하 시뮬레이터로 부하를 변경시켜서 모터 축에 다양한 토크를 공급하고 토크 센서를 이용하여 모터 토크를 측정하였다. 이때 함께 측정된 전류와 전압으로부터 모터 토크를 계산하여 측정된 결과와 서로 비교·검증하였다. 그림 3은 비교 결과를 나타낸 것으로 계산한 모터 토크와 측정된 모터 토크가 거의 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

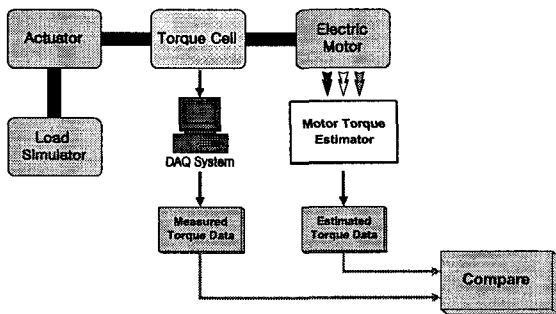
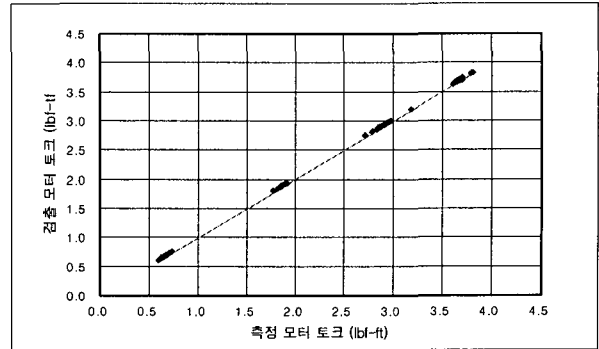
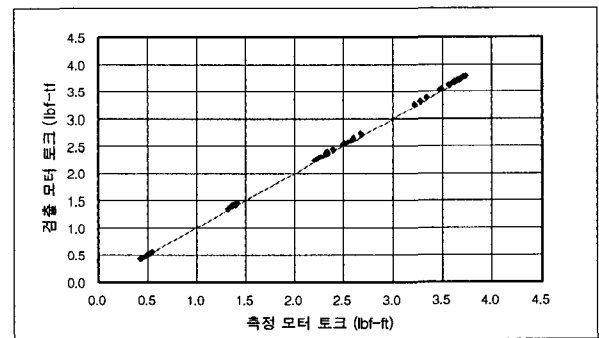


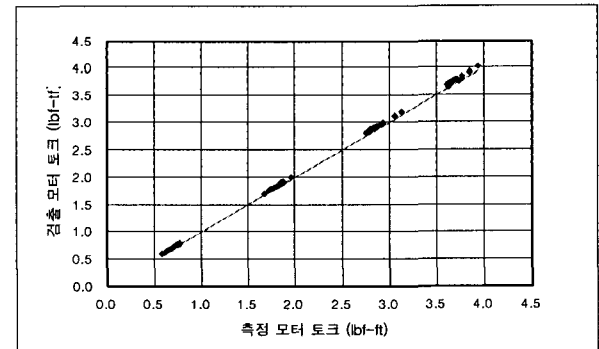
그림 2. 계산된 모터 토크 검증 실험 장치



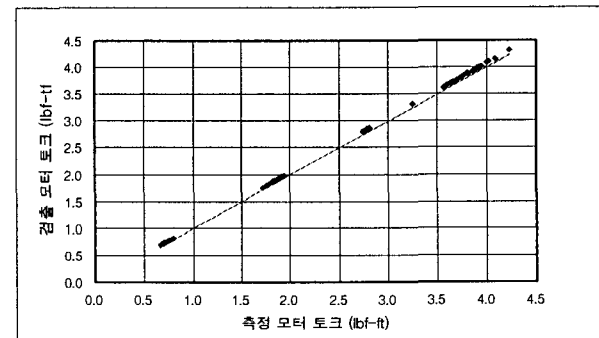
(a) 380 V 공급 전압일 때



(b) 435 V 공급 전압일 때



(c) 460 V 공급 전압일 때



(d) 475 V 공급 전압일 때  
그림 3. 모터 토크 실험 결과 데이터

표 1. 계산된 모터 토크의 정확도

공급 전압	정확도 (Accuracy)	검증 구간 (lbf=ft)
380 V	4.32 %	0.6857 ~ 3.7124
435 V	3.91 %	0.4806 ~ 3.6557
460 V	4.31 %	0.7257 ~ 3.7608
475 V	4.07 %	0.7390 ~ 3.8612

표 2. 모터 토크 계산 방법의 정확도 비교

구간	방법	MC <sup>2</sup>	NEET
460/480 V Motors	< 20% Start Torque	± 10.1% FS	4.31 % Reading
	20% ~ 100% Start Torque	± 9.3% Reading + 2.5% FS	4.31 % Reading
550/575 V Motors	< 20% Start Torque	± 10% FS	-
	20% ~ 100% Start Torque	± 10% Reading + 4% FS	-

앞에서 설명한 정확도 계산 방법을 이용하여 실험을 통하여 얻은 데이터로부터 정확도를 구하였으며 표 1과 같다. 최대 4.32 %의 정확도를 갖는다. 이를 외국의 진단 방법인 MC<sup>2</sup> 방법의 정확도와 비교해보면 표 2와 같다. MC<sup>2</sup> 방법보다 매우 정확하다는 것을 알 수 있다.

### 5. 스템 힘의 정확도

NEST 방법은 모터 토크와 구동부의 효율을 통하여 스템 힘을 구한다. 모터 토크는 NEET 방법을 이용하여 구해진 값을 사용한다. 구동부 효율은 모터 토크로부터 스템 힘까지 동력이 전달되는 과정의 전체 효율을 의미한다. 동력 전달시 효율은 동력 전달 구조가 받는 부하 상태에 따라서 변하게 되므로 모터구동밸브의 작동 중 부하 변화 상태를 알 수 있는 모터 토크를 분석하여 구동부 효율을 구한다.

NEST 방법으로 계산된 결과를 검증하기 위하여 그림 4와 같은 실험 장치를 구성하였다. 스템에 걸리는 힘을 직접 측정하기 위하여 스템 사이에 힘 센서를 삽입하였으며, 실제 작동시 시팅 현상과 언웨징 현상을 고려하기 위해서 게이트 밸브를 사용하였다. 모터와 구동기는 NEET 방법을 검증할 때와 동일하다.

토크 스위치의 변화에 대한 영향을 고려하기 위하여 3가지의 스위치 설정치에 따라서 45회의 실험을 수행하여 각 실험에 대한 5개의 검증 구간 총 225개의 실험 데이터를 얻었다. 실험 수행시 패킹 부하를 변경시켜서 스템에 다양한 부하를 공급하고 힘 센서를 이용하여 스템 힘을 측정하였다. 이때 함께 측정된 전류와 전압으로부터 모터 토크를 구하고 구동부 효율을 예측하여 스템 힘을 계산하고 계산 결과를 측정된 결과와 서로 비교·검증하였다.

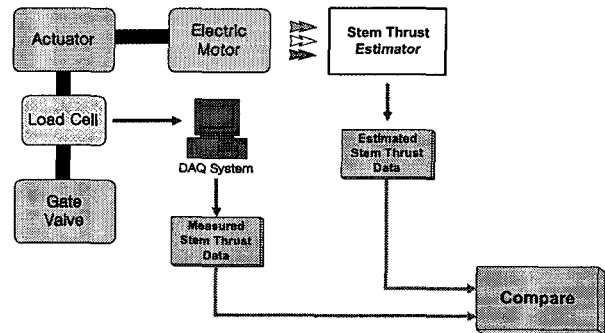


그림 4. 계산된 스템 힘 검증 실험 장치

그림 5는 실험실에서 계산된 스템 힘과 측정된 스템 힘을 함께 나타낸 것이다. 초록색은 계산된 스템 힘이고 붉은색은 측정된 스템 힘이며 검증을 위하여 비교한 구간이 표시되어 있다. 그림 6은 비교 결과를 나타낸 것으로 계산한 스템 힘과 측정된 스템 힘이 거의 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

실험을 통하여 얻은 데이터로부터 앞에서 설명한 정확도 계산 방법을 이용하여 정확도를 구하였으며 표 3과 같다. 최대 8.47 %의 정확도를 갖는다. 이를 외국의 진단 방법인 MPM 방법과 MC<sup>2</sup> 방법의 정확도와 비교해보면 표 4와 같다. MPM 방법과 MC<sup>2</sup> 방법 방법보다 매우 정확하다는 것을 알 수 있다. MPM 방법은 단합 행정의 제어 스위치 트립시에만 정확도가 적용된다.

NEST 방법의 현장 적용성을 검증하기 위해서 실제 현장인 원자력 발전소에서 실험을 수행하였다. 모터구동밸브의 스템에 비침투적인 힘 센서를 장착하여 스템에 가해지는 부하를 실제 작동 상태에서 직접 측정하였으며 이때 동시에 측정된 전류와 전압으로부터 스템 힘 신호를 계산하여 서로 비교·검증하였다.

그림 7은 현장 시험 데이터의 한 예로 계산된 스템 힘과 측정된 스템 힘을 함께 나타낸 것이다. 초록색은 계산된 스템 힘이며 붉은색은 측정된 스템 힘이다. 그림의 왼쪽 아래에 삽입되어 있는 작은 그림은 스템 힘이 크게 변하는 구간(시팅 구간)을 확대하여 나타낸 것이다.

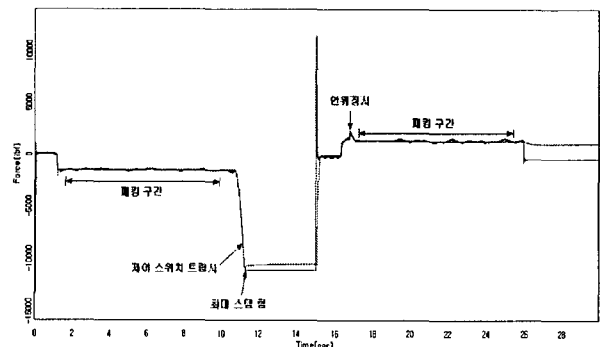
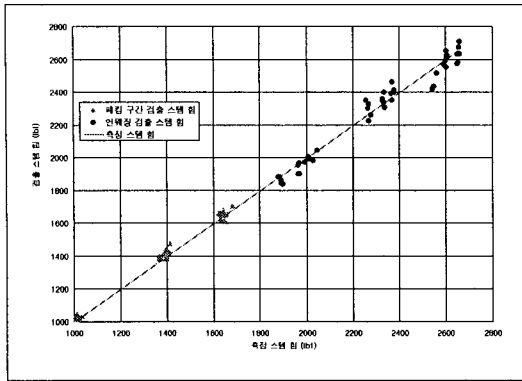
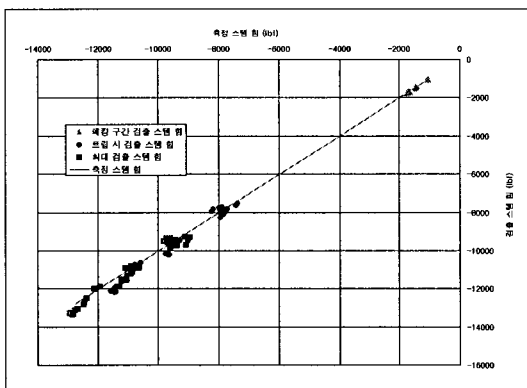


그림 5. 계산된 스템 힘(초록색)과 측정된 스템 힘(붉은색)



(a) 열림시



(b) 닫힘시

그림 6. 스템 힘 실험 결과 데이터

표 3. 계산된 스템 힘의 정확도

정확도 (Accuracy)	검증구간 (lbf)
열림 행정시	
5.05 %	언웨징시 (1,889 ~ 2,654)
4.27 %	패킹 구간 (1,005 ~ 1,656)
닫힘 행정시	
6.01 %	패킹 구간 (1,059 ~ 1,718)
8.47 %	제어스위치 트립시 (7,745 ~ 11,383)
6.42 %	최대 스템 힘 (9,307 ~ 12,754)

\* 센서 오차는 포함하지 않음

표 4. 스템 힘 계산 방법의 정확도 비교

구간	방법	MPM	MC <sup>2</sup>	NEST
열림 행정	언웨징시	적용 불가	12% Reading + 2.6% FS	5.05 % Reading
	패킹 구간	적용 불가		4.27 % Reading
닫힘 행정	패킹 구간	적용 불가		6.01 % Reading
	제어스위치 트립시	12 % Reading		8.47 % Reading
	최대 스템 힘	적용 불가		6.42 % Reading

\* 센서 오차는 포함하지 않음

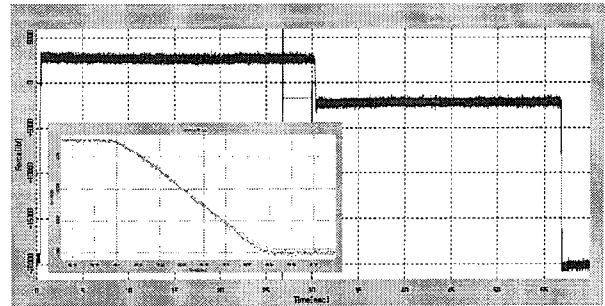


그림 7. 현장에서 계산된 스템 힘(초록색)과 측정된 스템 힘(파란색)의 예

표 5. 현장에서 계산된 스템 힘 정확도의 예

정확도 (Accuracy)	검증구간
열림 행정시	
해당 없음	언웨징시
4.43 %	패킹 구간
닫힘 행정시	
4.04 %	패킹 구간
-3.97 %	제어스위치 트립시
-4.75 %	최대 스템 힘

계산된 스템 힘의 정확도는 표 5와 같다. 그림 7과 표 5를 통하여 알 수 있듯이 현장에서도 NEST 방법이 검증된 정확도 범위 내에서 적용된다는 것을 알 수 있다. 이는 대표적인 현장 검증의 예를 보여준 것으로 다른 현장 검증 데이터도 이와 같이 실험실에서 구한 정확도 검증 범위를 만족시켰다.

## 6. 결론

원자력 발전소나 화학 공장 등의 운영과 안전에 직결되는 모터구동밸브의 상태를 원격에서 진단하기 위한 NEET 방법과 NEST 방법의 정확도를 구하였으며 현장 검증을 수행하였다.

정확도는 3상 유도 전동기와 Limitorque SMB-00 구동기에 NEET 방법 검증시는 부하 시뮬레이터를 NEST 방법 검증시에는 게이트 밸브를 함께 구성하여 구하였다. NEET 방법은 4.32 % 이내, NEST 방법은 8.47 % 이내의 정확도를 가지며 외국의 방법인 MPM 방법이나 MC<sup>2</sup> 방법과 비교하였을 때 매우 정확하다.

NEST 방법의 현장 검증을 위하여 실제 현장에 설치된 모터구동밸브에 비침투적인 센서를 부착하여 시험을 수행하였으며 시험 결과가 실험실에서 구한 정확도 검증 범위를 만족시켜 현장에 적용이 가능하다는 것을 입증하였다.

NEET 방법과 NEST 방법은 3상 유도 전동기와 라이징(rising) 스템 구동기로 구성된 모터구동밸브에 적용이 가능

하여 적용 대상이 한정되어 있는 외국의 진단 방법인 MPM 방법이나 MC<sup>2</sup> 방법보다 넓은 범위에 적용이 가능하다.

이와 같이 개발한 원격 진단 방법을 이용하면 원격에서 비침투적으로 측정 가능한 전압과 전류를 이용하여 모터구동밸브의 분해·조립 없이 모터구동밸브의 상태 진단에 필요한 신호를 추출해내고 이를 바탕으로 모터구동밸브에 발생한 결함 등의 상태를 정확히 진단할 수 있다. 따라서 이러한 진단 방법을 사용하여 원자력 발전소나 화학 공장 등에 설치되어 있는 모터구동밸브의 안정적인 운영을 효과적으로 수행할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) MOV Users Group, 2000, Guidance on the Use of MCC-Based Technologies for Static MOV Performance Testing and Condition Monitoring
- (2) 채장범 등, 1998. 12, “모터구동밸브의 진단장비 개발 연구”, 제1회 신뢰성기술심포지움
- (3) 채장범 등, 1999, “밸브 진단 장비 개발”, 대한기계학회 '99 추계학술대회
- (4) H.H. Woodson and J.R. Melcher, Electromechanical Dynamics, Part I, Kreuger Press
- (5) W.H. Press, Saul A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.R. Flannery, Numerical Recipes in C, Chapter 12·13, Cambridge
- (6) Department of Electrical Engineering Ohio Northern University, Analog and Digital Filter Design Using C, Prentice Hall PTR