

# 발전설비 계측기기의 건전성 및 성능 실시간 감시 방법론



이 재 용  
한국수력원자력(주) 중앙연구원 NRC-DC팀 책임연구원

## 1. 개 황

발전소, 우주선, 항공기, 생체조직 등과 같은 막대한 수의 부품으로 이루어지고 복잡하게 연결된 복잡계

(Complex Systems)는 매우 많은 수의 운전변수와 비선형성, Feedback 등으로 모델링이 매우 어려운 시스템이다 (예 : 생명체: 1000 ~ 100,000genes, Boeing 777: > 100,000 subsystems, 엔진: >10,000subsystems,

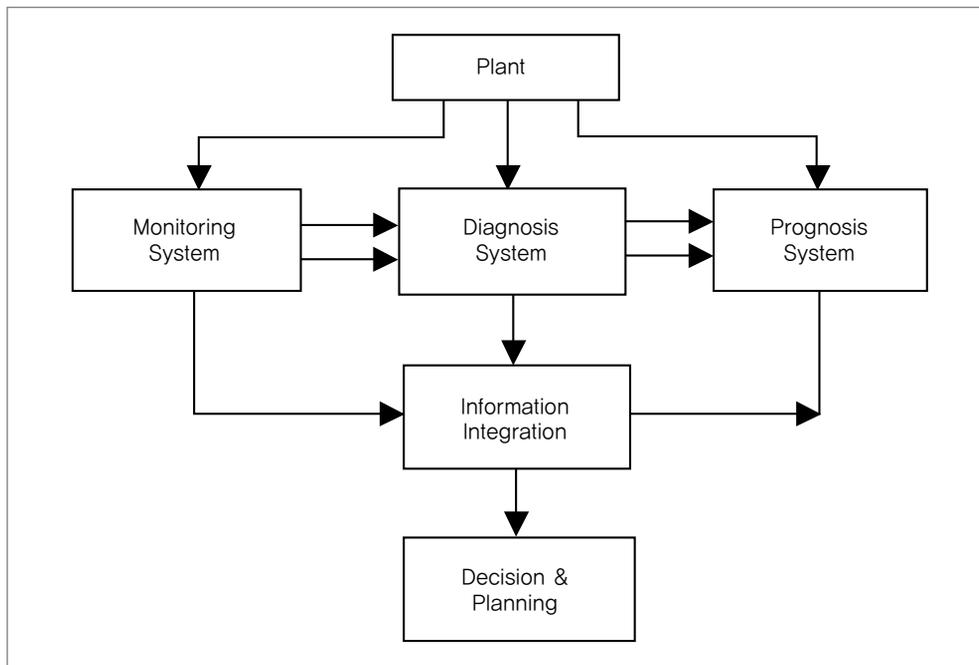
PC: >1,000,000,000transistors, 발전소: >1,000,000 부품, 인터넷, 전력계통망: ~∞). 특히, 지금까지 활용되어 오던 편미분방정식 기반의 시뮬레이션 및 설계 도구로는 경년열화, 환경변화 등을 고려하여 실제 상황을 정확하게 모사하는 것이 불가능한 시스템이다. 따라서 과학계에서 비교적 최근에 그 개념이 정립된 카오스 이론(chaos theory), 인공생명(artificial life), 진화 계산(evolutionary computation)과 유전 알고리즘(genetic algorithm) 등의 아이디어와 기술을 포함하는 연구 방식을 적용하는 것이 새로운 대안으로 부각되고 있다. 또한 공학 분야뿐만 아니라 대규모의 입력자료/변수가 상호 연관성을 맺고 있으나 수학적 모델링이 어려운 금융공학, 대기업의 경영전략 수립, 수요예측 등도 유관 분야라 할 수 있다.

지금까지 발전설비 성능 감시는 운전자료 취득을 통해 운전상황을 알려주는 감시(Monitoring) 기능이 강조되어 왔으며, 최근 다양한 수학적 방법론을 이용한 진단

(Diagnosis) 기술을 개발하고 있다. 그러나 방대한 양의 정보 분석이 필요하고 안전성 관련 운전변수의 감시와 신속한 대응이 중요한 원자력발전 분야에 이러한 기술들이 활용되기 위해서는 실시간 분석을 통한 신속한 의사결정, 장애 대처에 유연한 조직, 빠른 대응시간, 대규모로 긴밀하게 연결된 차원의 모니터링과 의사결정을 지원할 수 있는 고신뢰도의 소프트웨어 확보가 매우 중요하므로 과거의 진단/감시에서 한 차원 발전한 예후진단(Prognosis) 기능이 추가되고 있다.

그림 1은 Prognosis 기능이 추가된 원전 운전용 의사결정 시스템의 개략도이다.

또한, 전산기술의 급격한 발전에 따라 과거에 적용하기 힘들었던 모델을 이용한 진단 기술 개발이 주류를 이루고 있다. 본고에서는 최근 발전설비의 안전성 및 성능 실시간 감시 방법론 중 비선형 모델 기반을 이용하여 Reference Signal을 생성하고 진단 및 예측을 수행하는 기술의 최근 동향 및 발전방향을 기술하고 있다.



[그림 1] 운전지원 의사결정 시스템

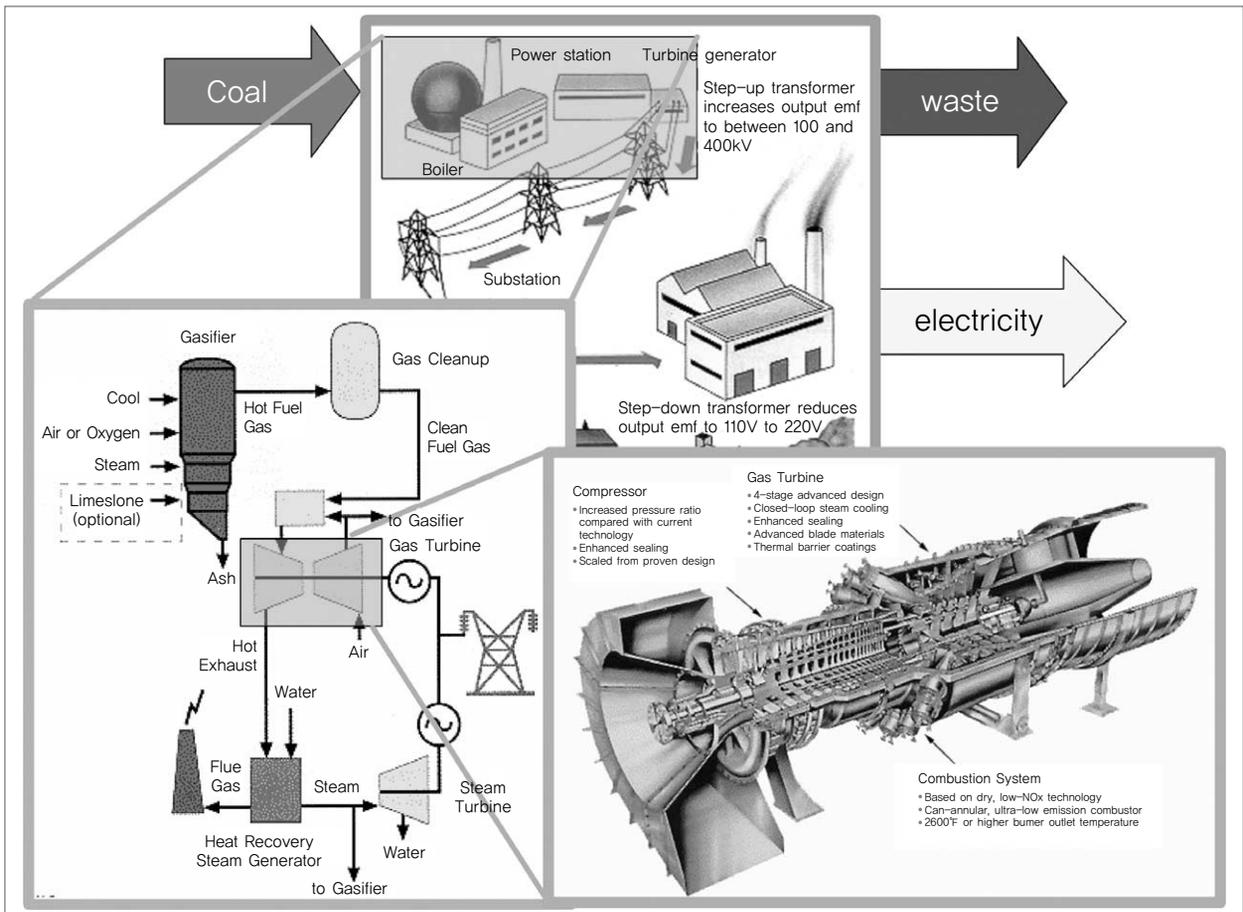
## 2. 동적 시스템 모델링 방법론

그림 2와 같이 발전소는 극단적으로 단순화할 경우 연료를 입력으로 전기와 폐기물이란 출력을 생산하는 Single Input - 2 Outputs 시스템으로 볼 수도 있다. 하지만 세부계통 전체를 들여다 볼 경우 너무나 복잡하고 방대한 수의 부품들로 구성되어 단위부품 전체를 포함하는 모델은 구성이 매우 어렵다.

발전소와 같이 복잡하게 연계된 시스템은 경년열화, 운전조건 및 환경에 따른 변화가 어떤 조건에서 발생하는지를 이해하는데 중요하며, 동적변화에 영향을 미치는 주요 인자로는 다음과 같은 것들이 있다.

■ 비선형성(Non-Linearity) : 발전설비의 측정 자료는 모델링이 어려운 경년열화의 영향이나 잡음 등이 많이 포함되어 있어 모델계수가 비선형적으로 끊임 없이 변화하므로 지금까지의 미분방정식을 이용한 수치계산으로는 한계가 있으며, 실측자료를 이용한 학습이나 진단을 통해 동적(Dynamic) 특성을 모사하는 것이 운전 측면에서는 바람직하다.

■ Feedback Loop의 영향 : Feedback 현상은 일반적으로 비선형이며 특히, 운전조건 및 환경에 따른 변화와 제어입력이 상존하는 발전소 운전 측면에서는 최적운전 조건이 항상 변화하므로 이의 추적과 정확한 진단을 위해서는 환경변화 추적이



[그림 2] 발전소의 모델링 범위

어려운 설계공급자가 제공하는 설계자료/수치 모델로는 원천적 한계가 있다.

주로 운전원 훈련용으로 사용되고 있는 시뮬레이터에 사용되는 미분방정식 기반의 기존 모델링 방법과 신경 회로망 등 측정자료 기반의 학습을 이용한 동적모델의 차이는 표 1과 같다. 특히, Off-Line, 미분방정식 기반의 기존 모델링 방법은 발전소와 같이 복잡하게 연계된

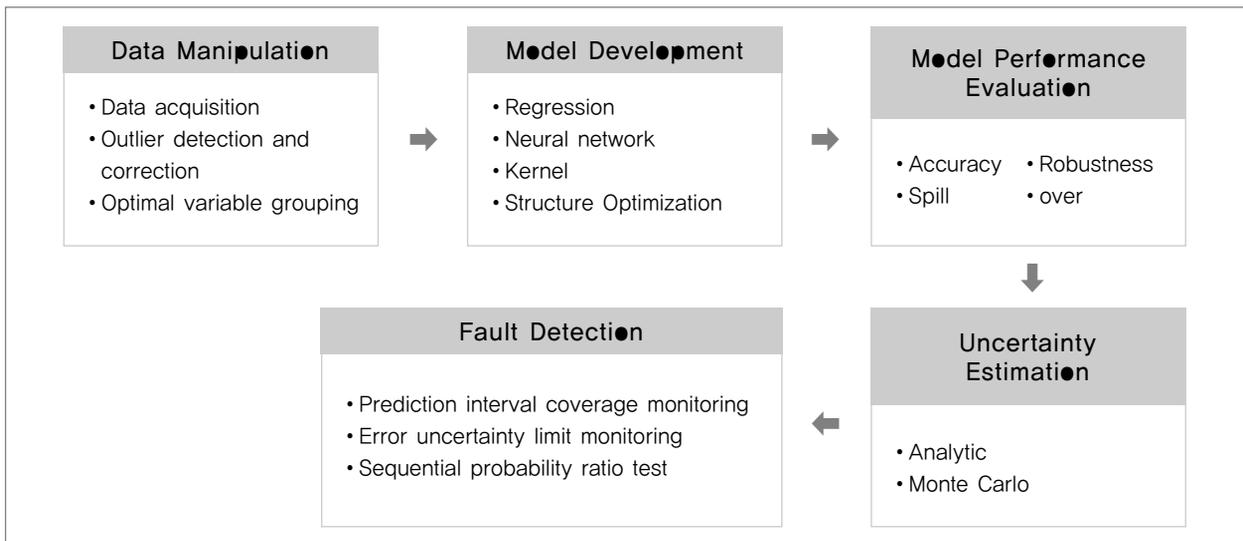
시스템의 경년열화, 운전조건 및 환경에 따른 변화를 동적모델에 반영하기 어려워 실측자료를 이용한 학습 알고리즘 기반의 적응(Adaptation) 가능한 모사방법이 필요하다.

**가. 동적 시스템 모델링 절차**

학습을 이용한 동적모델링 절차는 다음과 같은 사항을 고려하여 진행된다.

[표 1] 미분방정식 기반 모델과 측정자료 기반의 학습을 이용한 동적모델의 차이

기존 모델링 방법	학습기반 모델링 방법
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 미분방정식의 수치해석을 통한 모사 예) Navier-Stokes equation : <math display="block">\rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{v}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 실측자료를 이용한 학습이나 진단을 통해 동적(dynamic) 특성을 모사 예) <math>\dot{x} = f(x, t, \dots)</math>, <math>f(x, t, \dots)</math>: 신경회로망 혹은 비선형함수를 이용한 fitting</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 수치계산 필요 ⇒ 실시간 계산 어려움</li> <li>● 많은 메모리 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 학습/최적화를 통한 모델링 시간 소요</li> <li>● 학습이 완료되면 실시간 계산이 가능하며 메모리 요구가 크지 않음.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 운전조건 변화 adaptation 어려움</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 운전조건 변화 adaptation 가능</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 제어/운전조건 최적화 모델로 이용 어려움</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 제어/운전조건 최적화 모델로 적당</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 비선형성 모델링이 어려움</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 비선형성 모델링에 적당</li> </ul>



[그림 3] 모델링 절차

모델의 종류에는 해석적 모델을 사용하는 First Principle 모델과 운전 자료를 Fitting한 Data-Based 모델을 병행하는 추세이며 특히, 신경회로망 등 인공지능이 중요한 역할을 하고 있다.

#### 나. 동적 시스템 모델링 방법론

동적 시스템 모델로는 최근 그 응용분야가 확대되고 있는 신경회로망(Neural Network), Fuzzy 집합, 비선형 시계열(Time Series) 모델 등 학습(Training) 알고리즘을 통해 구현 가능한 동적 모델링 특히, 현 운전상태가 적절히 반영되고 Adaptation 및 예측(Prediction)이 가능한 수학적 모델이 가장 바람직하다. 정확한 모델과 학습 데이터 생산을 위해서는 모델링 작업 이전에 측정 잡음의 제거와 적절한 샘플링 기법의 적용이 필수적이다.

그림 4는 측정 잡음의 제거와 샘플링 기법 적용을 통한 학습 데이터 생산과정의 개략도이다.

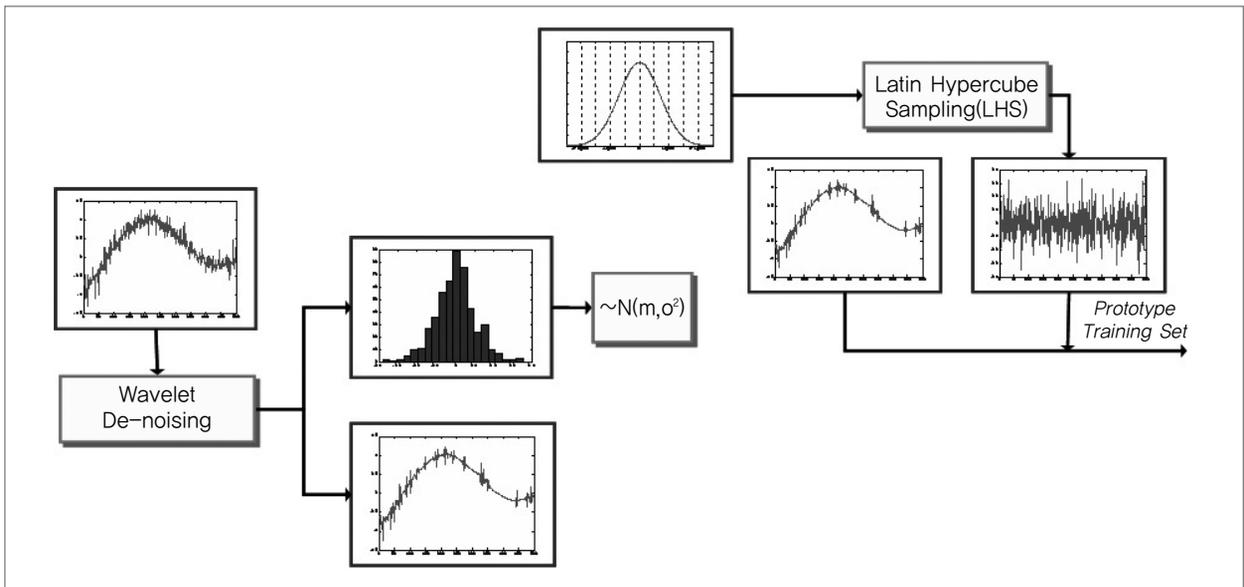
또한 일반적으로 충분히 다양한 Frequency의 입력으로 Persistency Of Excitation을 확보하기 어려운

플랜트의 특성상 모델의 정확도와 실험비용을 고려한 실험계획법(Experimental Deign) 기법의 결합이 매우 중요하다.

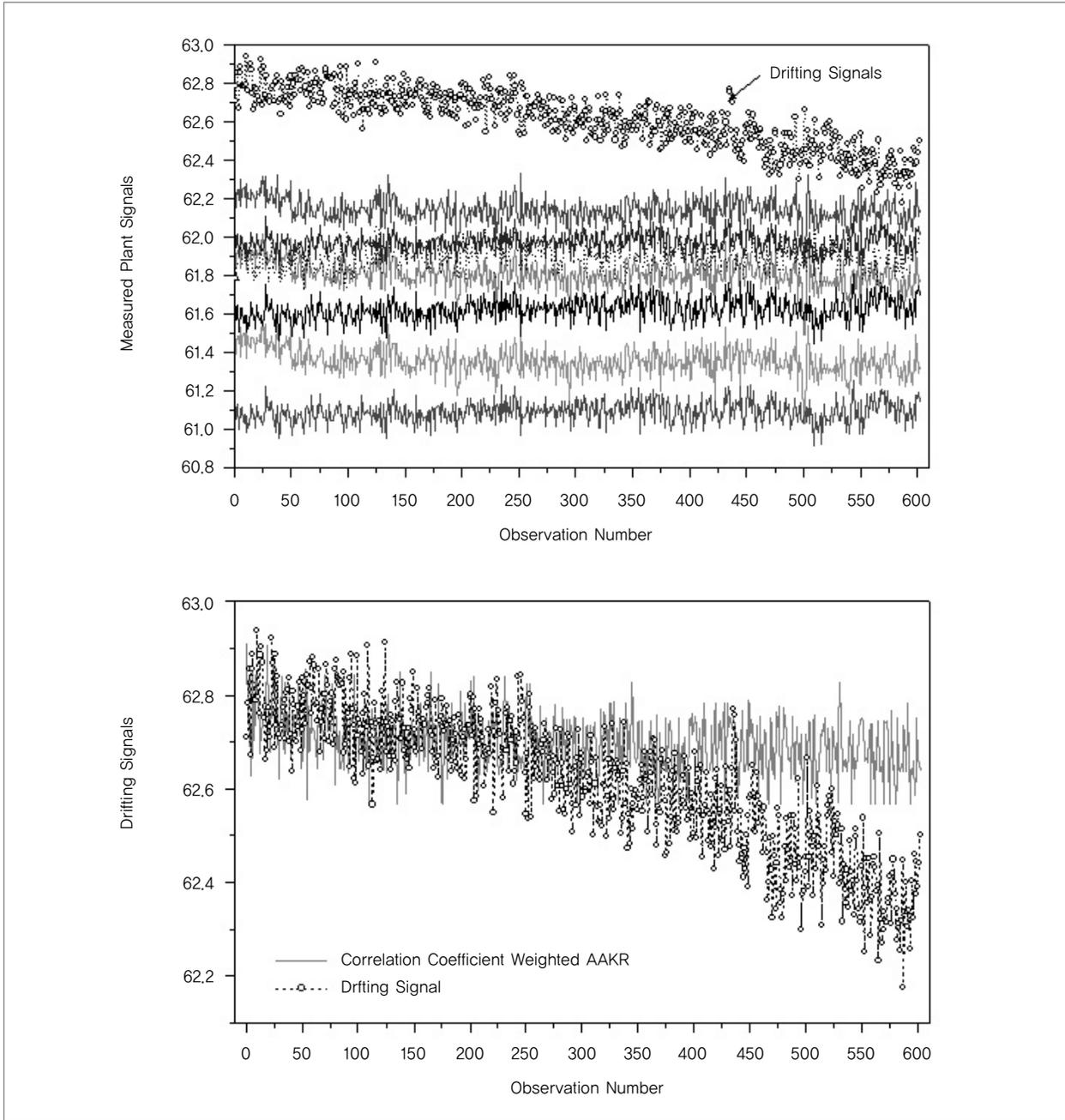
### 3. 발전설비 계측 시스템 성능 감시 적용

원자력발전소의 안전계통 계측 채널들은 운영기술 지침서 상에서 매 핵주기마다 점검과 교정을 하여야 하나 조사에 따르면 90% 이상의 대상 계측기들이 교정이 불필요한 것으로 조사되고 있다. 계측채널의 상시 감시를 통해 성능이 저하된 계측채널만을 교정하는 것이 경제적 이므로 측정자료 기반의 계측기 동적모델 개발과 이를 기반으로 한 고장 진단/성능 감시가 필요하다. 특히, 이에 사용되는 모델은 발전소의 운전환경변화에 강인하게 대처할 수 있어야 한다.

그림 5는 원자력발전소의 정상상태 운전 중 발생한 계기 Drift 신호와 비선형함수 기반의 Auto-Associative



[그림 4] 측정 잡음의 제거와 샘플링 기법 적용을 통한 학습 데이터 생산 과정

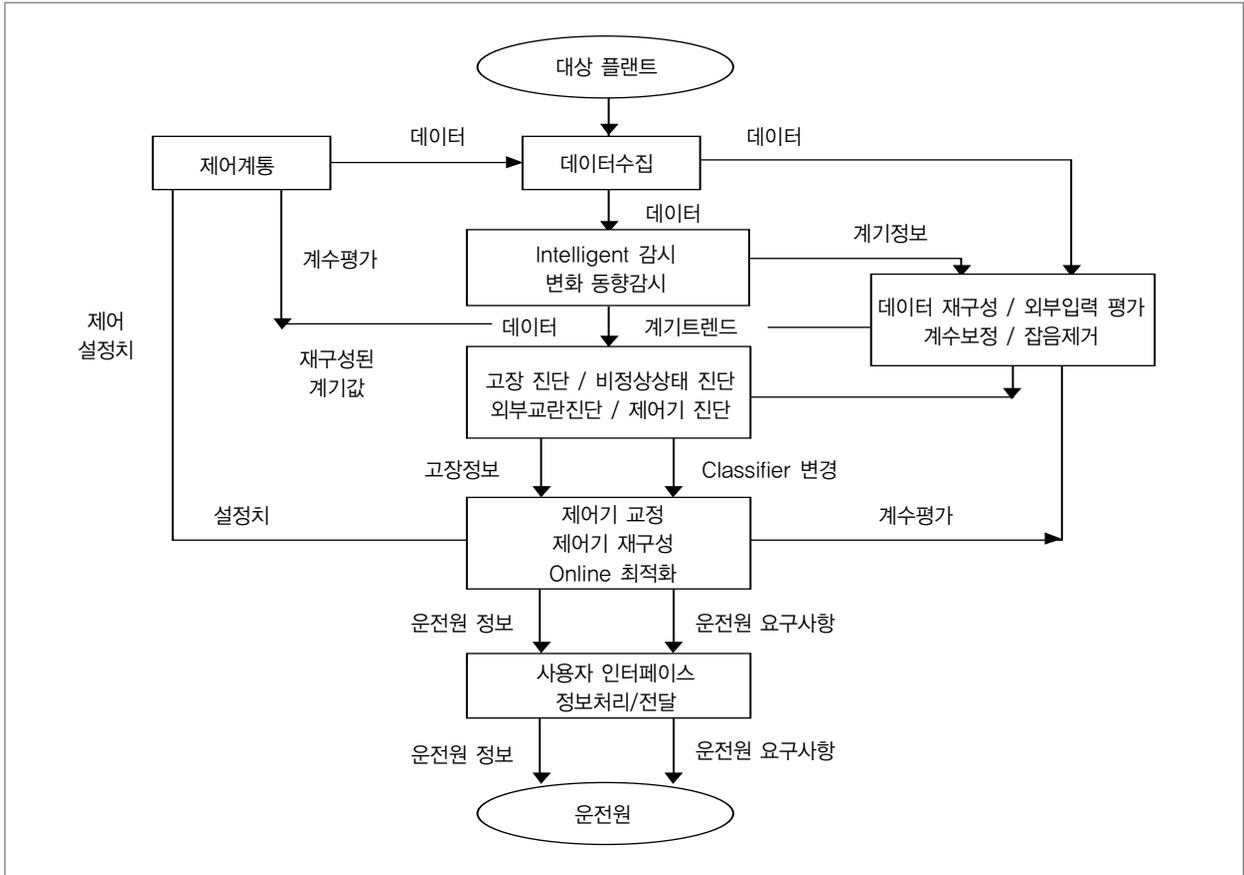


[그림 5] Drifting 신호 검증 결과

Kernel Regression(AAKR) 모델의 커널 가중함수를 모델 변수간의 상관계수를 가중한 거리함수를 적용하여 학습시켜 정확도를 향상시킨 방법론의 Drifting 신호 검증 결과이다. AAKR 모델로 계산한 Reference 신호는 발전소가 정상적으로 운전되고 있음을 지시하고 있다.

#### 4. 전망

발전설비와 같이 운전변수의 수가 매우 많고 운전 환경 변화가 심한 플랜트의 안전성과 성능진단은 적절한 Reference 신호를 제공할 수 있는 모델링이 어려워



[그림 6] 안전성 및 성능 실시간 감시/제어 방법 구성도

동적특성이 잘 알려져 있는 컴포넌트 단위로 이루어져 왔다. 최근 복잡계를 다룰 수 있는 동적모델링 기술과 전산설비 성능향상으로 플랜트 전체의 성능과 계측설비를 동시에 모델링할 수 있게 됨에 따라 성능감시분야의 외연이 매우 넓어지고 있는 추세이다. 그림 6은 안전성 및 성능 실시간 감시/제어 방법의 전체적인 구성을 보여 주고 있다.

동 분야의 기술개발은 급격한 발전하고 있는 디지털 기술을 기반으로 다양하고 즉시 수정·보완이 가능한 Framework들이 제시되고 있으며, 디지털 및 IT 기술에 강점을 가지고 있는 우리나라가 경쟁력을 가질 수 있는 Emerging Technology 분야로 판단된다. KEA

[참고문헌]

- 1, 'Integration techniques in intelligent operational management: a review,' Yvonne Power, Parisa A. Bahri, Knowledge-Based Systems 18 (2005) 89-97
- 2, 'A review of process fault detection and diagnosis Part I,II, III,' Venkatasubramanian et al., Computers and Chemical Engineering 27 (2003)
- 3, 'International Cooperative Research in Nuclear Reactor Monitoring and Diagnosis between The University Of Tennessee and Ipen, Brazil,' Upadhyaya and Hines, University of Tennessee (2005)