

# 모델에 근거한 기계 감지시스템의 정성적 설계 절차

허 권 수\*

## A Qualitative Design Methodology for Model-based Monitoring Systems

Kunsoo Huh\*



### 요 약

모델에 근거한 감지시스템(Model-based Monitoring System, MBM)은 생산성과 생산량을 증대 시켜줄 수 있는 방법으로 생각되어 왔다. 그러나 이러한 MBM시스템의 성능이 기대에 못 미치는 상황이 종종 발생하기도 했는데 실패의 한가지 원인은 MBM 시스템이 적절히 설계되지 못한 점에 있었다. 상태변수, 입력 및 파라미터의 추정에 관한 많은 이론적인 연구가 이루어졌지만 MBM 방식을 실제 생산공정에 적용하기 위한 설계과정에 대한 연구는 거의 없는 상황이다.

본 글에서는 MBM 시스템의 성능에 영향을 미치는 요소를 조사하고 이를 토대로 MBM 시스템의 정성적인 설계과정을 전개해 보았다. 특히 그 중에서도 MBM 시스템을 위한 감지모델의 선택에 대한 집중적으로 기술하였다. 한가지 중요한 문제점으로서 감지방식의 설계가 기계시스템의 수학적모델을 토대로 이루어져 왔는데 이 모델은 종종 감지의 관점에서 보았을 때 주요 요소를 생략하거나 또는 불필요한 요소가 포함되어질 수 있다는 것이다.

### 1. 서 론

감지시스템은 기계나 공정의 성능을 일정하게 유지시켜 줄 수 있는 효과적인 방법으로 믿어져 왔으나 불행히도 그 성능이 기대에 못 미치고 있다. 감지시스템의 적용사례<sup>(1)</sup>에 의하면 이 시스템은 종종 꺼져 있거나 관리자들이 이를

무시하고 작업을 수행한다고 보고된 바 있다. 이러한 감지시스템의 비실용성에 대한 이유들이 많지만 그 중에 성능 대비 가격이 매우 높은 것을 우선 들 수 있다. 감지시스템의 가격은 센서, 유지비용 및 기술자의 고용비용 등에 의해 높아질 수 있고, 감지시스템의 성능은 기계시스템의 특성과 발생할 수 있는 고장에 대한 지식 결여와 감지방식의

\* 한양대학교 정밀기계공학과

이해 부족에 의해 감소할 수 있다. 본 글에서는 모델에 근거한 감지시스템의 설계와 적용에 관점을 두고 있으며 이러한 시스템은 적절하게 설계되어 상대적으로 낮은 가격을 갖고 우수한 성능을 나타낼 수 있어야 한다.

### 1.2 모델에 근거한 감지시스템 (MBM System)

감지시스템은 기계장치의 성능을 실시간으로 평가하는데 사용된다. 이론적으로는 센서가 플랜트의 파라미터(마찰계수, 댐핑계수, 관성 등) 및 상태변수(전류, 속도, 힘, 토크 등) 등을 측정하는데 사용될 수 있으나 센서기술의 한계나 비용, 공학적 구속조건 및 기계장치와의 간섭문제 등으로 장착하기 불가능한 경우가 많다.

이러한 문제를 해결하는 다른 방법으로는 모델에 근거한 감지(MBM)방법을 들 수 있다. 이 방법은 원하는 신호로부터 멀리 떨어진 측정하기 쉬운 신호들을 활용하는 대신, 이 측정된 신호들과 원하는 신호사이의 모델을 토대로 원하는 변수를 추정하게 된다. MBM시스템은 기계 고장 진단 분야에서 많이 연구되어 왔으며 여기서는 모델의 상태변수나 파라미터의 변화로 기계고장을 판단한다. 적용된 사례는 많지만 몇가지 예로서 힘 센서<sup>(2)</sup> 및 열펌프 진단기<sup>(3)</sup> 등을 들 수 있고 그 밖의 여러 경우가 Willsky[4], Isermann<sup>(5-6)</sup>, Gertler<sup>(7)</sup>, Rault<sup>(8)</sup> 및 Isermann과 Freyemuth<sup>(9)</sup>에 의해 발표되었다. 이러한 방식은 감지시스템에 필요한 신호의 개수나 형태를 선택하는데 있어서 직접 센서를 사용할 때보다 훨씬 많은 편리함을 제공한다.

그러나 실험실에서 좋은 전망을 보여주었던 이 MBM 시스템들이 산업현장에서는 잘 받아들여지지 않고 있는 것이 사실이다. 예를 들어 감지된 신호가 모델의 부적절한 선정, 모델링의 오차, 부적절한 추정알고리즘 및 측정잡음 등에 의해 그 정확성이 불충분할 수 있다. 특정한 MBM시스템<sup>(6, 10-11)</sup>에 대해서 위의 문제점들을 검증하기 위한 노력이 있었지만, 감지모델과 추정알고리즘을 어떻게 선정할 것인지, MBM시스템의 성능을 어떻게 평가할 것인지 등과 같은 설계과정에 대한 접근은 부족하였다. 한 예로 기존의 접근방식은 감지모델 또는 최소한 모델구조는 주어졌다는 가정하에서 MBM 시스템이 설계되어 왔다.

위에서 언급한 문제점을 해결하기 위해서 본 글에서는 MBM시스템을 위한 설계절차를 기술하였다. 첫째, MBM시스템의 성능에 영향을 미치는 요소를 찾기 위해 MBM시스템의 일반적인 구조를 조사한다. 둘째, 그 요소를 근거로 하여 MBM시스템의 설계과정을 전개한다. 그리고 특히 MBM시스템의 성능 개선을 위한 감지모델의 선택에

대해 중점적으로 기술하였다. 본 글에서는 MBM시스템의 성능을 판단하기 위한 정량적인 평가는 고려하지 않고 정성적인 평가만 언급하고 있으며 실제 절삭력 감지에 대한 응용을 통해 정성적인 평가의 예를 들어보고자 한다.

### 2. MBM시스템의 성능에 영향을 미치는 요소

MBM시스템의 성능에 영향을 미치는 주요 변수를 결정하기 위하여는 이 시스템을 구성하는 하위 시스템들이 나뉘어지고 분석되어야 한다. MBM시스템의 주요 구성요소로서 Fig. 1과 같이 3개의 하위 시스템이 있으며 그것은 1) 감지모델, 2) 추정알고리즘 그리고 3) 측정치이다.

이러한 하위 시스템들 각각이 모두 중요하며 독립적으로 설계되지만 이 중에서 감지모델은 종종 간과되는 요소임을 지적하고자 한다. 즉 MBM시스템 설계에 있어서 활용 가능한 추정알고리즘과 측정치에 따라 타당한 감지모델이 선택되어야 한다. 또한 감지모델의 선택은 모니터할 시스템에 대한 설계자의 이해 정도를 나타내며 설계자는 기계요소, 플랜트 특성, 잡음 및 제어기 설계 등에 관한 시스템의 특성을 잘 이해해야 한다. 여기서 타당한 모델이라 함은 필수요소를 포함한 최소차수의 모델, 측정 또는 추정할 수 있는 입력을 갖는 모델, 파라미터값을 미리 알거나 추정할 수 있는 모델 그리고 추정 알고리즘에 적합한 모델 등을 들 수 있겠다.

MBM시스템의 성능에 영향을 미치는 다른 요소는 센서와 추정알고리즘의 성능인데, 센서의 성능은 가격, 크기, 유지성, 정밀도, 신뢰도, 대역폭 등에 따라 구별되고 추정알고리즘의 성능은 주어진 문제에 있어서 수학적인 타당성으로 표현되기는 하지만 존재성(existence)과 성능조건

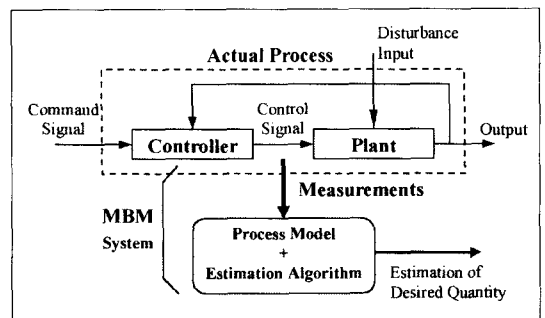


Fig. 1 MBM시스템의 구조

(quality condition)의 견지에서 구별된다. 또한 추정알고리즘의 수렴성, 신호대 잡음비, 정밀도 및 민감도와 같은 문제들도 고려되어야 한다. 위에서 언급한 문제에 대한 정량적인 연구는 상태 관측기에 대해서 본 글의 저자가 발표한바 있다.<sup>1,2)</sup>

결과적으로 MBM시스템 구성요소들의 설계는 제어기와 플랜트를 포함하고 있는 실제 생산공정에 대한 철저한 이해가 요구되는 논리적인 작업이라고 요약할 수 있다. 이러한 절차가 부족할 경우 잘못된 모델, 불필요한 측정치 및 잘못된 추정알고리즘을 설계하게 되고 결과적으로 성능은 매우 나빠질 수 있다.

### 3. MBM시스템의 설계절차

2장에서 논의한 주요 요소에 근거하여 MBM시스템의 설계방식을 기술하고자 한다. 설계방식은 모니터링 문제 설정 단계와 MBM 시스템 설계 단계의 2단계로 나눌 수 있고, 각각의 단계는 효과적인 MBM시스템 설계를 위해 필요하다고 생각되는 몇 개의 과정으로 구성되어 있다. 아래에 각 과정을 순서대로 배열하였고 이 순서는 주어진 문제에 따라 변화할 수 있으며 전체과정은 반복되어진다.

#### 단계1 : 모니터링 문제 설정

- 과정1 : 추정할 주요변수를 결정한다.
- 과정2 : 요구되는 사양을 결정한다.
- 과정3 : 감지될 공정의 각 요소들을 분석하고 그 기능을 특성화 한다.
- 과정4 : 주요변수의 측정이 가능한지 결정한다.
- 과정5 : 주요 파라미터들의 특성을 분석한다.

#### 단계2 : MBM 시스템 설계

- 과정6 : 감지모델을 선택한다.
- 과정7 : 추정알고리즘을 설정한다.
- 과정8 : 파라미터들이 off-line으로 결정될 것인지 on-line으로 계속 바뀔 것인지 결정한다.
- 과정9 : 감지방식을 설계하고 시뮬레이션을 통해 검증한다.
- 과정10 : MBM시스템을 실제 적용하고 검증한다.

#### 3.1 단계1 : 문제 설정

과정1부터 과정5는 설계자가 단계2의 설계과정을 용이하게 하기 위해 중요한 정보들을 모으고 조사하는 과정이다. 과정1은 모니터링할 특정한 현상에 대한 철저한 조사를 요구하며 이러한 조사를 통해 측정되어야 할 주요 변

수가 무엇인지 결정해야 한다. 과정2는 대역폭, 정밀도 및 신호대 잡음비와 같은 전형적인 감지방식의 주요 사양을 나타내며 이 과정에서 데이터 획득을 위한 샘플링 속도, 실시간 계산을 위한 적분시간 및 필터를 위한 cut-off 주파수 등을 결정한다. 과정3은 모니터링 될 생산공정에 대한 정확한 이해를 요구한다. Schematic diagram, word bond graph 등의 형태로 표현되는 정성적인 모델이 우선 사용되며 이 모델은 어떤 부분이 잘 정의되어있고 어떤 부분이 잘 이해되지 않는지 나타낼 수 있다. 과정4는 어떤 변수들이 측정될 수 있는지 또는 적절히 디지털화 될 수 있는지 모든 물리량에 대한 정보를 요구한다. 여기에는 제어나 자동화 목적으로 이미 설치된 센서에 의해 측정되는 변수와 새로 설치 가능한 센서에 의해 측정될 변수들을 포함한다. 과정5는 과정3의 정성적인 모델에 의해 묘사된 모든 요소의 파라미터적인 특성을 결정한다. 비록 감지모델의 정확한 특성이 아직 결정되지 않았더라도 파라미터의 특성에 따라 구별할 수 있으면 추후 최상의 감지모델을 선택하는데 도움을 줄 것이다. 파라미터들은 다음과 같이 구별할 수 있고 특정한 파라미터 값을 이 단계에서 구할 필요는 없다.

- 1) 값의 획득 여부 (아는 값, 모르지만 얻을 수 있는 값, 미지의 얻기 힘든 값)
- 2) 상수 인지 시간에 따라 변하는지 여부
- 3) off-line 또는 on-line으로 결정할 수 있는지 여부

#### 3.2 단계2 : MBM 시스템 설계

단계 1에서 결정된 주요사항을 토대로 하여 감지모델과 추정알고리즘이 결정되어야 하고 감지모델과 추정알고리즘의 선택은 상호 의존적이다. 그러므로 일반적인 공학 설계과정과 마찬가지로 감지시스템의 설계는 다음 과정들의 반복적인 절차가 될 것이다. 과정6에서는 감지모델을 결정하게 되는 가장 중요한 과정이며 다음 4장에서 자세하게 설명하고 있다. 과정7에서는 성능 사양(과정2), 사용 가능한 측정치(과정4), 파라미터의 특성(과정5) 및 감지모델(과정6)에 근거하여 추정알고리즘을 선택한다. 과정8은 과정5의 파라미터 정보와 과정6에서 얻어진 모델을 토대로 off-line으로 결정할 파라미터와 on-line으로 얻어질 파라미터를 결정한다. 과정 9는 추정알고리즘의 존재성과 성능조건에 관계되며 측정치에 대한 정보(과정4), 모델구조(과정6) 및 파라미터(과정8)를 이용하여 검토한다. 일단 감지시스템이 설계되면 성능사양(과정2)에 대한 성능을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션이 필수적이다. 마치

막으로 과정10은 감지시스템을 실제 플랜트에 적용하고 성능을 검증하는 것이며 이는 과정2에서 결정된 추정된 변수의 사양(대역폭, 정밀도, 민감도 및 신호대 잡음비)을 비교함으로써 이루어진다.

#### 4. MBD 시스템의 감지모델 선택

효과적인 감지모델을 결정하는 단계는 다음의 2단계로 나타낼 수 있다.

- 1) 시스템 경계의 설정
- 2) 시스템 경계에 의해 한정된 시스템의 최소 차수의 적절한 수학적 모델의 유도

##### 4.1 시스템 경계의 설정

대부분의 공학 문제에서와 같이 MBM(모델에 근거한 감지) 시스템을 위한 최상의 모델은 필요한 요소를 포함하는 가장 단순한 모델이다. 즉, 원하는 변수와 센서의 위치가 가까울수록 둘 사이의 모델은 간단해지고 센서 신호로부터 원하는 변수의 값을 쉽게 그리고 정확히 대응시킬 수 있다. 이때는 MBM 시스템의 구성요소들을 검증하거나 특성을 분석하는 것도 매우 간단해진다. 이 논리의 극단적 예는 원하는 변수를 직접 측정할 수 있는 경우 모델은 전혀 필요가 없는 것이다.

분명한 것은 측정 가능한 신호들의 유무에 따라 Fig. 2와 같이 원하는 변수로부터 장착되는 센서까지의 거리 그리고 시스템 경계의 크기 등이 결정된다. 그리고 Fig. 2에서 보인 것과는 다르게 측정센서가 멀어지더라도 가까운 센서에 의한 시스템 경계를 포함하지 않은 모니터링 문제도 많이 있다. 즉, 경계1이 경계2에 포함되지 않는 공정의 서로 분리되어 있는 하위 시스템일 수 있다. 이런 경우, 각각의 경계에 대한 모델의 차수는 조금 다르더라도 경계의 선택은 이들에 둘러싸인 시스템에 대한 모델의 불확실성을 근거로 이루어져야 한다. 모델이 불확실하면 할수록, 더 자주 모델의 조정이 요구되기 때문이다. 주목할 것은 MBM시스템을 위해 선택된 시스템 경계는 제어모델을 위해 선택된 경계와 같을 필요가 없다는 것이다. 일반적으로 제어기 설계를 위해 선택된 시스템 경계와 모델을 감지시스템 설계를 위해 그대로 적용할 경우 좋은 성능을 얻지 못하게 된다.

시스템 경계를 선택하는 또 다른 어려움은 모델의 복잡성과 입력의 숫자가 상호 독립적이지 않다는 점이다. 시스템 경계는 플랜트의 요소가 최소가 되도록 선택되어야

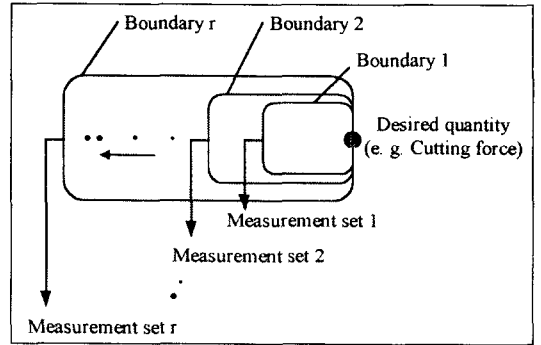


Fig. 2 측정치를 포함한 시스템 경계의 선택

하지만 동시에 경계를 가로지르는 입출력 변수를 염두에 두어야 한다. 따라서 시스템 경계의 선택에 따라 같은 물리변수가 모델의 입력이 되기도 하고 출력이 되기도 하고 또 파라미터로 표현될 수도 있다. 이것은 그 물리변수가 모르는 값이고 변하는 값을 가질 때 어떤 추정방법으로 감지할 것이냐에 따라서도 다르게 된다.

##### 4.2 수학적 모델의 유도

수학적 모델을 유도하는 두 번째 단계는 모델의 사용목적에 정확히 부합되도록 수행되어야 한다. 이러한 목적은 대역폭이나 신호대 잡음비와 같은 성능 사양과 활용 가능한 추정알고리즘에 의해 정의된다. 예를 들어 선형 추정 알고리즘은 모델이 선형인 구간에서만 사용되며, 작동범위가 변하면 다수의 선형화된 모델이 필요하게 된다. 신호대 잡음비를 높이기 위해서는 잡음에 관계된 요소가 고려된 정확한 모델이 이용되어야만 원치 않는 신호를 제거할 수 있다.

대역폭 사양은 요구된 동역학적 모델의 차수를 결정하며 모델의 대역폭이 클수록 모델의 차수는 높아지게 된다. Wilson등<sup>13)</sup>은 주파수영역에서의 모델의 정확도와 차수와의 관계를 연구하고, 원하는 주파수영역에서 시스템의 요소를 표현하는 최소의 차수를 결정하기 위해 모델차수 유추알고리즘(Model order deduction algorithm)을 개발한바 있다. 따라서 감지모델을 결정하는 주요방법은 사용가능한 측정치를 갖는 최소의 시스템 경계를 선택하고 요구된 대역폭을 갖는 최소차수의 동적모델을 유도하는 것이다. 본 글에서는 위와 같이 결정된 모델을 '타당한(proper)' 감지모델이라 언급하겠다.

시스템 경계의 선택이 바뀔 때 따라 감지모델은 제어기

설계에 사용되는 모델과 다르게 된다. 입력과 출력도 바뀌고 따라서 모델의 구조도 변하게 된다. 사용되는 추정알고리즘에 따라 제어기 설계에서는 거의 사용되지 않는 비선형 모델도 이용될 수 있다. 그리고 시스템 경계의 선택에 따라 감지모델의 전체적인 구조가 완전히 바뀔 수 있다. 예를 들어 미지의 시변 파라미터들의 경우 시스템 경계의 선택에 따라 미지의 입력으로 변환될 수 있다. 수학적 변환을 적용함으로써 미지의 파라미터는 모델 차수의 증가와 함께 미지의 상태변수로 변환될 수 있고 확장된 칼만 필터(Extender Kalman Filter)<sup>(14)</sup>를 사용하여 추정될 수 있다. 또한, 미지의 입력에 대한 구조나 특성이 off-line으로 결정될 수 있으면 그 입력은 파라미터의 함수로 다루어질 수 있고 파라미터 추정방식을 이용하여 추정할 수 있다.<sup>(15)</sup> 따라서 감지시스템 설계자는 이러한 방법과 실제 적용에 대해 잘 이해해야 한다. 마지막으로 감지모델은 모니터링 될 기계장치에서 검출되어야 하며, 부가적인 센서들이 임시적으로 장착되어 감지대상 프로세서의 작동범위와 조건에서 모델의 정확도와 신뢰성이 검토되어야 한다.

### 5. 절삭력 감지에의 적용

본 장에서는 앞에서 언급된 MBM 시스템 설계 방법을 실제로 선반 절삭력을 감지하는데 적용하는 예를 들고자 하며 특히 감지모델 선정에 관하여 고려하였다. 모니터링 할 시스템은 Fig. 3과 같이 CNC선반의 주축 드라이브이며 PWM이나 SCR 앰프를 갖는 DC스핀들 모터와 속도제어기를 포함하고 있다. 공구와 공작물과의 상호작용으로부터 발생한 절삭력은 절삭조건(절삭속도, 절삭깊이, 이송속도 등)과 공작물/공구 재료의 성질에 따라 변하고 이에 따라 주축 구동상태(속도, 토크, 전류 등)에 밀접한 영향을 끼치게 된다. 그런데 절삭조건과 절삭력과의 상관관계에 비해 절삭력과 주축 구동상태와의 상관관계가 더 쉽게 표현될 수 있다는 점이 감지모델 선정시 고려되어야 한다. 자세한 설계과정은 지면 관계상 생략하고 감지모델 선정에 관련된 과정 4부터 과정 6까지만 언급하기로 한다.

#### (과정4) 측정할 주요변수의 결정

절삭력은 공구동력계, 스핀들 베어링 스트레인 게이지와 turret disk inserts와 같은 센서에 의해 측정될 수 있지만, 이러한 센서의 설치에 고비용, 구속조건(공간, 하중 등)과 절삭 성능과의 간섭에 의해 사용할 수 없다고 가정한다.<sup>(18)</sup> 따라서 모델에 근거한 절삭력 감지방식이 사용되며 여기서 요구되는 사항은 다음과 같다.

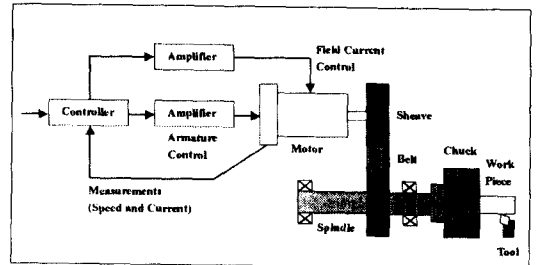


Fig. 3 선반 절삭작업의 구성도

- 1) 간접적인 신호들을 측정하기 위한 센서
- 2) 간접 신호와 절삭력 신호간의 모델
- 3) 간접센서 출력으로부터 절삭력을 추정하는 추정알고리즘

주축 드라이브에서 측정 가능한 신호는 주축속도와 스핀들 모터 전류(이들은 제어기에서 이미 사용되고 있는 신호들임)이고 모터 전압도 측정 가능하다. 그런데 모터 전압은 대개 PWM 앰프나 SCR앰프에 의해 구동 되므로 잡음이 많이 포함되어 있고 측정하여 이산화 하기가 그리 쉽지는 않다.

#### (순서5) 주요 파라미터들의 특성 분석

주축 드라이브를 구성하는 요소들의 정성적인 특징과 이를 표현하는 파라미터들의 특성에 대해 고려한다. 정성적으로 DC주축 모터, 주축기구 그리고 벨트 구동장치 등은 쉽게 특성이 묘사될 수 있으며 모터의 열적인 특성은 모터에 감긴 코일의 전기적인 특성을 변화 시킬 수 있다. 스핀들 베어링의 마찰은 대부분 기계장치에서 그렇듯이 정확한 특성을 파악하기 어렵고 따라서 계속적인 실시간 추정이나 적어도 주기적인 튜닝이 요구된다고 할 수 있다. 다른 예로 이송축의 볼 베어링의 경우 오일의 이동과 가해진 토크에 따른 비선형적인 마찰토크가 발생하기 때문에 계속적인 관찰과 튜닝이 필요하게 된다.

#### (순서6) 감지모델 선택

4장에서 언급한 사항들을 고려하여 절삭력 감지를 위한 시스템 경계의 선택은 다음과 같이 고려될 수 있다. 선삭 공정은 Fig. 4와 같이 2개의 하부 시스템으로 나뉘질 수 있으며 그것이 서보 드라이브와 절삭 메커니즘이다. 예를 들어 Takata와 Sata<sup>(16)</sup>, 그리고 Nair et al.<sup>(17)</sup>은 시스템 경계로써 절삭 메커니즘을 설정하고 절삭력을 절삭 메커니즘의 출력으로 고려하여 절삭 메커니즘 모델을 근거로 한 절삭력 추정시스템을 개발하였다. 그런데 이 모델의 파라

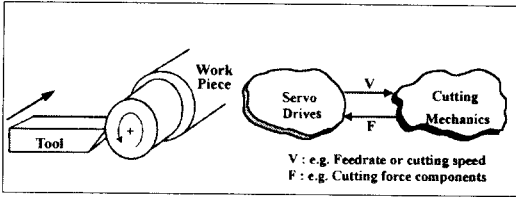


Fig. 4 절삭공정의 구조

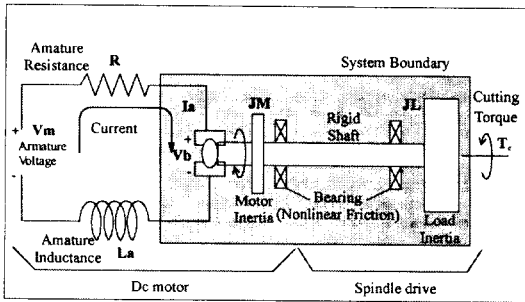


Fig. 5 MBM 설계를 위한 선택된 시스템 경계

미터는 공작물, 공구 및 절삭조건에 따라 변화하므로 이들 각각의 조합에 따라 파라미터의 튜닝이 필요하게 되며 이런 번거러움은 아직 완전히 이해되지 않는 절삭 메커니즘 현상의 복잡성에 기인한다. 위와 같은 문제점은 시스템 경계를 서보드라이브로 설정하고 절삭력을 서보드라이브의 외란으로 고려함으로써 해결할 수 있다. 그리고 이때 절삭력은 서보드라이브에 입력으로 작용하며 서보드라이브 모델에 근거하여 절삭력을 추정하게 된다.

본 글에서 제안하는 절삭력 감지를 위해 설정한 시스템 경계는 Fig. 5에서 보인 바와 같이 서보드라이브의 일부인 DC모터의 기계적 부분과 주축기구를 포함하고 있으며, 이러한 선택에는 다음과 같은 몇 가지 이유가 있다.

a) 앰프에서 발생하는 고주파수 전압 신호의 측정을 피할 수 있다. 대신에 반드시 측정해야 하는 모터 전류는 고주파 전압이 모터 저항과 인덕턴스에 의해 필터링된 신호이기 때문에 전압보다 측정하기 쉽다.

b) 전기자 회로의 파라미터들은 시스템에서 제외시켜 온도에 따라 변하는 모터의 저항값등을 고려하지 않아도 된다.

c) 이러한 시스템 경계에서 주축 모터 속도는 시스템의 유일한 상태변수이고 시스템 경계를 가로지르는 변수들은 전기자 전류와 절삭력이다. 이중에 전기자 전류는 쉽게

측정될 수 있고 절삭력 또한 미지의 입력 성분으로써 추정될 수 있다.

## 참고 문헌

- (1) Handscombe, J., 1990, "Diagnostics Through the 80s and into the 90s," Control Engineering, Nov., pp. 124~132.
- (2) Stein, J.L. and Shin K.C., 1986, "Current Monitoring on Field Controlled DC Spindle Drivers," Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol. 108, No. 4, pp. 289~295, Dec.
- (3) Shoureshi, R. and McLaughlin, K., 1984, "Observer Design for Dynamics, Control and Failure Detection of Heat Pumps," ASME special Publication, Dynamics and Control of Thermofluid Processes and Systems, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, pp. 13~18.
- (4) Willsky, A.S., 1976, "A Survey of Design Methods for Failure Detection Systems," Automatica, Vol. 12, pp. 601~611.
- (5) Isermann, R., 1984, "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods-A Survey," Automatica, Vol. 20, No. 4, pp. 387~404.
- (6) Isermann, R., 1989, "Process Fault Diagnosis Based on Process Model Knowledge," IFAC, Advanced Information Processing in Automatic Control, Nancy, France, Vol. 5, pp. 21~34.
- (7) Gertler J.J., 1988, "Survey of Model-Based Failure Detection and Isolation In Complex Plants," IEEE Control Systems Magazine, Dec. pp. 3~11.
- (8) Rault, A., 1989, "Detection and Diagnosis System and Model-based Approach," IFAC, Advanced Information Processing in Automatic Control, Nancy, France, Vol. 5, pp. 35~44.

- (9) Isermann, R. and Freyermuth, B., 1991, "Process Fault Diagnosis Based on Process Model Knowledge-Part II: Case Study Experiments," *Trans. of ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 113, Dec., pp. 627~633.
- (10) Tonshoff, H.K., Wulfsberg, J.P., Kals, H.J.J, Konig, W. and van Luttervelt, C.A., 1988, "Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes," *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 2, pp. 611~622.
- (11) Monostori, L., 1987, "Toward More Complex and Intelligent Machine Tool Monitoring and Diagnostic Systems," *IFAC 10th Triennial World Congress*, Munich, FRG. Published in 1988, Vol. 4, pp. 181~186.
- (12) Huh, K and Stein, J.L., 1994, "A Quantitative Performance index for Observer-based Monitoring Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 116, No. 3, pp. 487~496.
- (13) Wilson, B.H. and Stein J. L., 1992 "An Algorithm for Obtaining Minimum-order Lumped-Parameter Models of Distributed and Discrete Systems", 1992 ASME WAM Symposium on Automated Modeling, 92, November, Anaheim, CA. also *Journal of Dynamic Systems Measurements and Control* (in re-review).
- (14) Ljung, L., 1979, "Asymptotic Behavior of the Extended Kalman Filter As a Parameter Estimator for Linear Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-24, pp. 36~50.
- (15) Johnson, C.D., 1976, "Theory of Disturbance Accommodating Controllers," *Control and Dynamic System*, Vol. 12, pp. 387~489.
- (16) Takata, S. and Sata, T., 1986, "Model Referenced Monitoring and Diagnosis - Application to the Manufacturing System," *Computers in Industry*, Vol. 7, pp. 31~43.
- (17) Nair, R., Danai, K., and Malkin, S., 1990, "Turning Process Identification Through Force Transients," *Automation of Manufacturing Processes*, The Winter Annual Meeting of the ASME, Dallas, Texas, pp. 59~66.
- (18) Kim, T-Y, Woo, J., Shin, D. and Kim, J., 1999, "Indirect Cutting Force Measurement in Multi-axis Simultaneous NC Milling Processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, pp. 1717~1731.