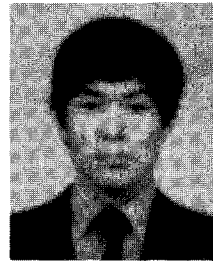


# 자동제어와 PLANT의 특성

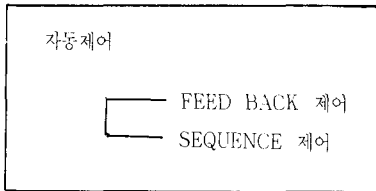


글/이상호 <현대엔지니어링(주) 화공사업본부 계장부부장>

## 1. PROCESS 제어의 개요

### 1) 제어의 종류

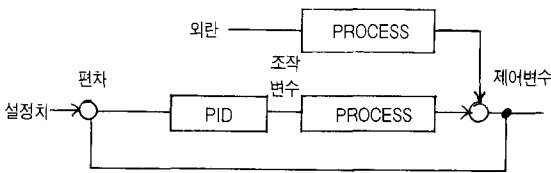
자동제어는 보통 <표 1>과 같이 두개로 나뉘어진 다.



<표 1>

### (1) FEED BACK 제어

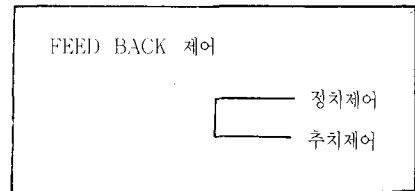
프로세스 제어에는 PID 제어가 많이 사용되고 있다



<그림 1>

<그림 1>. 제어변수는 온도, 유량과 같은 ANALOG 양이다. 따라서 제어변수의 값이 주어진 설정치와 같 게 되도록 조작변수에 의해 제어된다.

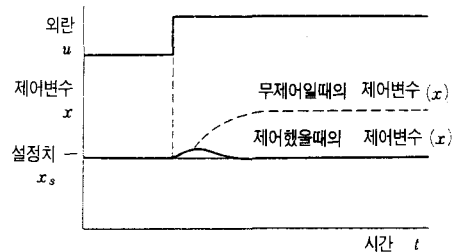
제어의 목적은 <표 2>와 같이 두개로 나눌 수가 있 다.



<표 2>

### ① 정치제어(定値制御)

설정치가 일정한 제어이다. 이 경우 제어변수의 값 을 변화시켜 버리는 요인 즉, 외란이 없으면 제어변수 의 값은 당연히 일정하게 된다. 그러나 실제에는 외란 이 있기 때문에 무제어(無制御)에서는 제어변수의 값 이 변화해 버린다. 이것을 FEED BACK 제어에 의해 일정하게 유지하는 것을 목적으로 한다<그림 2>.

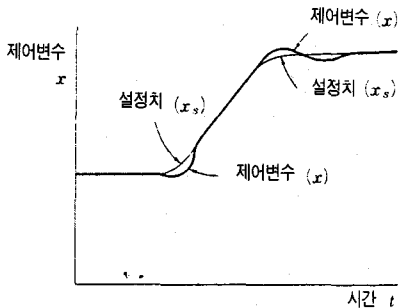


외란에 의한 제어변수의 값이 변화하는 것을 제어에 의해 일정하게 한다.

<그림 2> 정치제어

② 추치제어 (追値制御)

설정치의 값을 시간과 함께 변화시킨다. 이 변화와 같이 제어변수의 값을 추수(追隨) 시키는 제어이다(그림 3). 추치제어의 경우에는 외란에 따라 외란의 영향도 동시에 보상하는 경우가 많다. 프로세스 제어에서는 정치제어가 많고 기계제어에서는 추치제어가 많이 사용되고 있다. 기계제어에 관한 추치제어를 SERVO라고 흔히 부른다.



설정치가 시간과 함께 변화하여 제어변수를 이에 맞도록 제어한다.

<그림 3> 추치제어

③ 제어의 고도화와 DIGITAL 제어

FEED BACK 제어의 제어 연산식에는 PID가 많이 사용되고 있다(그림 4). PID 제어로는 제어성적이 충분하지 못하여 보다좋은 제어가 요구될 때에는 제어 연산식을 PID 제어 보다도 고도의 제어 연산식으로 치환된 것을 사용한다.

$$y = K \left( e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{d}{dt} e \right)$$

↑            ↑            ↑  
 P            I            D

y : 조작변수  
 e : 편차  
 K, T<sub>i</sub>, T<sub>d</sub> : 정수

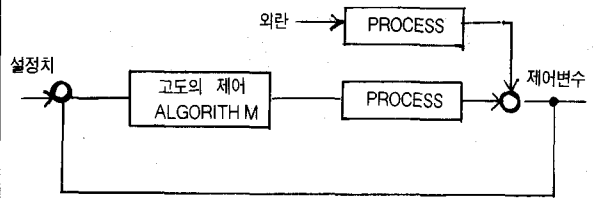
<그림 4> PID 제어연산식

또 보다 좋은 제어의 요구에 대해서는 복합제어가 많이 사용된다(그림 5). 이 복합제어 중에는 FEED BACK 제어 이외의 제어가 포함되는 경우가 있다.

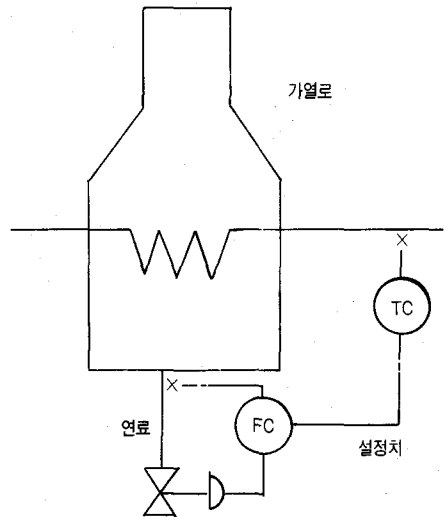
그러나 일반적으로는 이것들을 포함해서 FEED BACK 제어의 이름으로 불리워진다. 또 최근에는 새

로운 이론을 응용한 새로운 제어도 사용되고 있다. FEED BACK 제어는 제어 대상이 ANALOG 이므로 종래에는 ANALOG 조절계가 사용되어 왔었다. 그러나 최근에는 DIGITAL 제어가 많아졌다(DDC라고 부름).

기계제어에서는 DIGITAL 제어를 SOFTWARE · SERVO라고 부른다.



(a) 고도의 제어 ALGORITHM을 사용



(b) 복합제어를 사용

<그림 5> 고도의 제어 방식을 활용

(2) SEQUENCE 제어

시퀀스 제어는 「미리 정해진 순서에 따라 제어의 각 단계를 순차 진행하는 제어」라고 정의한다.

시퀀스 제어는 다음의 2가지로 분류할 수 있다.

- 프로그램제어 : 미리 설정된 프로그램에 따라 제어를 진행해 나간다.
- 조건제어 : 내부, 외부상태를 감시하고 그 조건에 따라 제어를 한다.

## 2) 제어의 요소

(1) 검출단 온도의 검출단으로서 프로세스에 많이 이용되고 있는 것은 측온저항체, 열전대 등이 있다. 프로세스의 분야에서는 온도, 압력, 유량, LEVEL의 4종류가 대부분이다. 이것을 프로세스의 4대 변수라 한다.

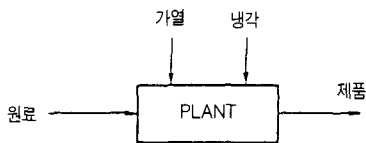
(2) 전송기 : 검출단에서 측정된 제어량을 멀리 떨어져있는 조절기나 기록계 등에 보내기 위해서는 검출된 변량을 그대로 보내지 않고 전송에 적합한 신호로 바꾸어서 보내는 방법이 필요하다.

(3) 조절기 : 조절기는 제어량과 목표치를 비교하여 그 편차에 대응하는 조작신호를 내는데 필요한 수정동작을 하는 것으로 ON-OFF CONTROLLER 및 연속 출력신호의 PID CONTROLLER 등이 있다.

(4) 조작부 : 조절부로부터 신호를 받고서 예를 들면 열교환기에 들어오는 스팀의 양을 변화시키는 역할등을 하게되는데 이때 보조동력으로서 공기압, 유압, 전기 등이 사용된다.

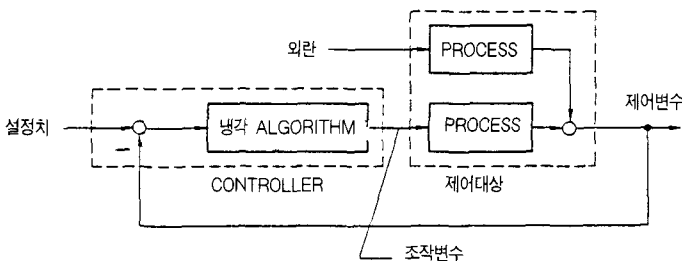
## (5) MAN-MACHINE INTERFACE

MAN-MACHINE INTERFACE는 중요한 요소로서 자동화의 극한은 완전무인화이다. 완전무인화하면 MAN-MACHINE INTERFACE도 필요없게된다. 그러나 완전무인화는 불가능하다. 자동제어에서도 MAN-MACHINE INTERFACE는 DIGITAL 제어와 극히 밀접한 관계에 있다. 즉 DIGITAL 계장은 ANALOG 계장에 관한 MAN-MACHINE INTERFACE를 크게 변모시켰다.



원료-제품은 물질의 흐름이다.  
가열·냉각 등 열교환이 있다.  
따라서, ENERGY의 흐름으로 받아들일 수 있다.

<그림 6> PLANT는 물질과 ENERGY의 흐름으로 되어 있다.



<그림 7> FEED BACK 제어

## 2. 제어계의 취급-신호의 흐름

### 1) 제어대상의 특성과 제어

자동제어 특히, FEED BACK 제어는 제어대상 (PROCESS 제어에 있어서는 PLANT)의 특성에 크게 의존한다. 제어성적은 CONTROLLER의 특성에도 의존하지만 크게는 제어대상의 특성에 따라서 지배된다. 즉, 제어대상의 특성이 제어하기 쉬운 특성을 가지고 있는 경우는 간단한 CONTROLLER라도 충분히 좋은 제어를 할 수 있다.

이와반대로 제어하기 어려운 특성의 제어대상은 고도의 제어방식을 사용하고도 상당히 좋은 제어성적을 얻을 수 없다. 따라서 FEED BACK 제어계를 설계하고 개선하기 위하여는 제어대상의 특성을 포함시킨 SYSTEM으로서 취급하는 것이 필요하다.

또, 자동화된 PLANT의 운전을 보다 좋게하기 위하여 PLANT의 특성과 CONTROLLER의 특성을 종합적으로 검토하는 것을 필요로 한다.

### 2) 신호의 흐름

자동제어의 문제는 신호의 계통으로서 해석할 수 있다. 제어대상 그 자체는 물질과 ENERGY의 흐름이며 정보의 흐름은 아니다(그림 6). 그리고 이것은 계측에 의하여 정보의 형태로 변화하고 받아들일 수 있다. 그리고 그 정보를 구체적으로 표현한 것이 신호이다. FEED BACK 제어에 있어서는 신호의 계통은 Loop를 만들고 있지만 그중에는 제어대상이 포함되어 있다(그림 7). 즉, CONTROLLER의 특성 뿐만이 아니고 CONTROLLER의 특성과 제어대상의 특성을 종합한 특성이 제어결과로 나타나게 된다.

CONTROLLER 뿐만이 아니고 제어대상의 특성도 신호의 흐름으로 표현된다.

### 3) 신호의 흐름표현 -BLOCK DIAGRAM

#### (1) BLOCK DIAGRAM

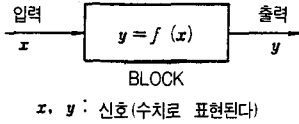
제어계의 신호의 흐름은 BLOCK DIAGRAM의 형태로 표현되는 것이 많다. 앞의 <그림 7>은 BLOCK DIAGRAM으로 사용하고 있다. 각각의 BLOCK은 1개의 입력과 1개의 출력을 가진다(그림 8).

입·출력 함께 신호로 된다. 신호는 수치로 표현된다. 예를 들면  $x, y$  같은 변수로서 표시할 수

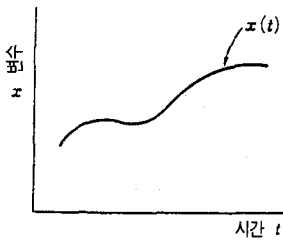
있다.

제어에 있어서는 변수는 시간과 함께 변화한 양으로 받아들일 수 있다(그림 9).

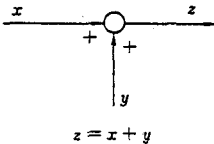
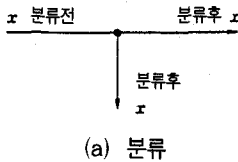
또 입력치에 따라 출력치가 변화한다. 즉 출력은 입력의 함수가 된다. BLOCK은 입력을 출력으로 변환하는 요소이다.



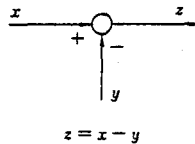
<그림 8> BLOCK의 표현



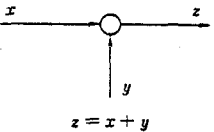
<그림 9> 변수는 시간관수로 된다



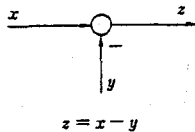
(b) 가산(1)



(d) 감산(2)



(c) 가산(2)



(e) 감산(2)

(b)에 비교하여 +를 생각하고 있다. 보통 2 생략형이 많다.

(d)에 비교하여 +를 생각하고 있다. 보통 2 생략형이 많다.

<그림 10> 분류·합류의 표현

(2) 분류

일반으로 신호의 흐름은 복잡하다. 이 경우 어떤 BLOCK의 출력이 다른 BLOCK의 입력이 되어 이어져 간다(〈그림 7〉 참조). 또 분류나 합류도 존재한다. 물질이나 ENERGY의 계통에는 분류한다면 각각의 양은 변화하여 각 분류의 값을 합한 것이 분류전의 값과 같게 된다.

그러나 정보의 경우는 분류하여도 각각의 값을 분류전과 같은 값을 갖는다. 같은 것을 분류하는 경우에는 〈그림 10〉 (a)와 같이 표현한다.

(3) 합류

합류의 경우에는 일반적으로는 가감승제 같은 연산이 된다. 그러나 제어의 경우에는 통상 SYSTEM을 선형으로 취급하므로 (+) 또는 (-)가 된다. 이것은 〈그림 10〉 (b)와 같이 표현한다.

(4) BLOCK DIAGRAM의 변형

제어대상의 특성이 복잡한 경우에는 제어대상 자체가 복잡한 BLOCK DIAGRAM으로 표현된다. 이것을 변형하여 〈그림 7〉에 표현한 제어대상의 형태로 정리할 수 있다.

3. PROCESS의 비선형성과 선형성

1) 곡선형 비선형과 선형화

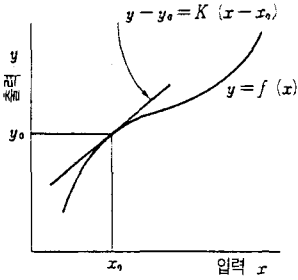
BLOCK은 〈그림 8〉에 표시한 것처럼 1개의 입력과 1개의 출력을 가진다. 입력의 값이 결정되면 출력의 값이 결정된다(〈그림 11〉). 입출력의 관계는 보통 곡선으로 표현된다. 즉, 비선형으로 된다. 예를들면 VALVE를 통과하는 유량은 VALVE 전후 차압의 평방근이 된다(〈그림 12〉).

그러나 비선형인 상태로는 제어의 문제가 대단히 복잡하게 된다. 따라서 취급을 쉽게하기 위하여 직선으로 한다. 즉 어떤 주목점(注目点) (〈그림 11〉의  $x_n, y_n$ )에서 곡선에 접선을 긋고 그 접선으로 곡선을 근사(近似)한다. 이것을 선형화라 부른다. 선형화한다면 입출력의 단계는 직선으로 표현된다. 직선으로 표현된 계를 선형계라 부르고 있다.

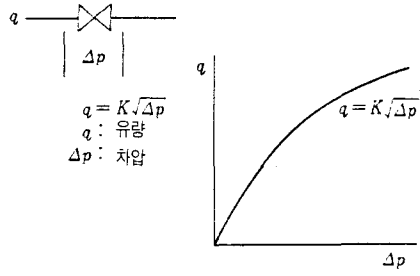
제어의 경우는 일반적으로 설정치를 주목점으로 선형화를 이른다.

2) 프로세스의 비선형성

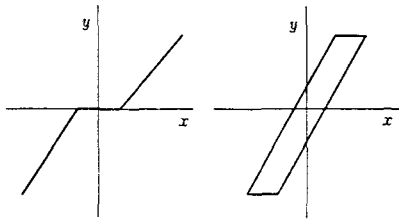
프로세스 제어에서 제어대상은 거의 비선형이다. 따라서 이것을 선형화하는 것은 어디까지나 근사(近似)를 하는 것이다. 주목점의 가까이에서는 근사도가 높으나 멀리 떨어진 곳에서는 크게 다르게 된다. 따라서 이 점을 주의하여야 한다.



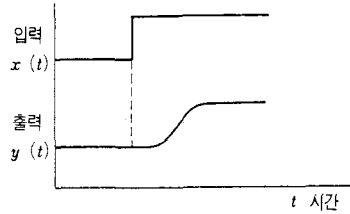
〈그림 11〉 입출력의 관계



〈그림 12〉 VALVE의 유량



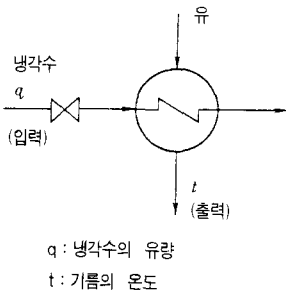
(a) 불감대 (b) 히스테리시스



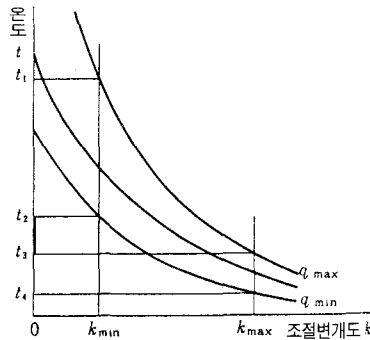
입력치에 대한 출력치는 일정한 값이 된다. 그러나 일정한 값이 되는 것은 즉시 되지 않고 어느 정도 시간지연이 존재한다.

〈그림 13〉 곡선에서는 나타나지 않는 비선형의 예

〈그림 14〉 입력에서 출력으로는 시간지연이 있음



(a) 열교환기에 의한 냉각의 예



(b) 정특성

많기 때문이다. 그러나 정밀한 제어를 필요로 하는 경우에는 무시할 수 없는 경우가 있다.

#### 4. 정특성(靜特性)과 동특성(動特性)

##### 1) 정특성

###### (1) 정특성의 정의

자동제어에서 신호(변수)의 값은 순간순간의 값보다 시간적인 변화가 중요하다. 따라서 프로세스 변수는 시간을 독립변수로 하는 종속변수로서 표현된다. 일반적으로 입력의 값을 변화시켰을 때 출력은 즉시

따라지지 않고 지연이 생긴다(그림 14).

그러나 지연이 존재해도 변화가 있고나서 충분히 시간이 경과된 후에는 정상상태에 달한다. 정상상태에 관한 출력의 값은 정상상태에 관한 입력의 값에 의해 임의적으로 결정한다.

정상상태에 관한 입력과 출력과의 관계를 정특성이

### 3) 비곡선형의 비선형

비선형중에는 곡선형에는 없는 형이 있다(그림 13). VALVE의 형은 이와같은 비선형이다. 이것은 직선근사는 불가능하다. 통상은 이 특성을 무시한채 선형화한다. 프로세스 제어에서 이와같은 선형화는 많이 존재한다. 다행히 무시해도 지장이 없는 경우가

〈그림 15〉 정특성을 만족하는 것이 제일조건

라 한다.

(2) 정특성과 제어가능조건

제어를 하는 경우 제어대상은 먼저 정특성을 만족하여야 한다(그림 15). 입력값에는 변화가능한 최소치와 최대치가 존재한다. 그 최소/최대치에 의해 출력의 변화범위가 결정된다. 이 변화범위는 제어를 하기 위하여 충분히 클 필요가 있다.

조작변수(조절밸브개도)를 입력치, 제어변수(온도)를 출력치로 한다. 외란의 값에 의해 입력/출력의 관계는 달라진다. 외란의 최대범위에 의해 조절밸브개도와 온도와의 관계는 그림의  $q_{max}$ 에서  $q_{min}$  범위까지 변화한다.

지금 온도는  $t_2$ 에서  $t_3$ 까지의 범위에서 변화시킬 필요가 있을 경우, 조절밸브 개도를  $k_{min}$ 에서  $k_{max}$ 까지의 범위에서 변화시킬 필요가 있다. 좋은 제어가 되기 위하여는 약간의 여유가 필요하다. 이 그림은 여유를 두어도 제어가능한 것을 나타내고 있다. 그러나 온도는  $t_1$ 로 제어할 필요가 있다고 하니 외란조건이  $q_{max}$ 일 때는 제어불능이다.

2) 동특성

(1) 동특성의 정의

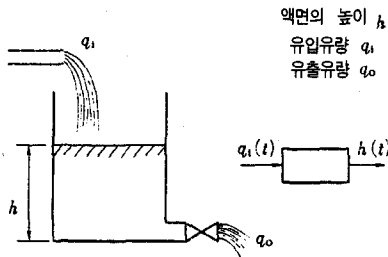
제어에 있어서 먼저 정특성을 만족하는 것이 필요조건이다. 그러나 충분조건은 아니다. 자동제어에서 출력이 입력에 즉시 뒤따르지 않고 지연이 존재하는 것이 제어성적에 큰 영향을 준다.

자동제어의 문제를 생각할 때에는 지연 즉, 시간적인 변화특성을 확실히 파악하는 것이 중요하다. 정상상태에 도달하기까지의 과도적인 특성을 동특성이라 부른다.

(2) 지연과 제어성적

제어대상에 지연이 있는 것은 제어를 위한 조작을 하여도 그 영향이 제어변수의 변화로 나타나기까지 시간이 걸리는 것을 의미한다. 정치제어(定値制御)의 경우에는 외란에 의한 제어변수의 값이 변화하는데 이것을 수정하여 편차를 0으로 하기 위하여 조작을 한다. 그 조작의 영향이 바로 나타나지 않는 것은 편차가 0으로 되기 위하여는 시간이 걸리기 때문이다.

즉, 지연은 제어성적을 나쁘게 하는 작용을 가지고



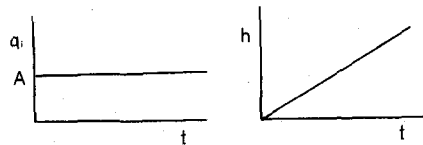
(a) PROCESS

$$h(t) = \int |q_1(t) - q_0(t)| dt$$

유입유량  $q_1$ 와 유출유량  $q_0$ 의 차가 TANK 내에 축적(적분)되어 LEVEL의 높이가 변화한다.

(b) 기본식

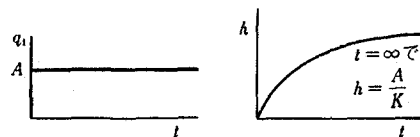
$$q_1 = A(\text{정수}) \quad q_0 = 0 \quad h(t) = \int A dt = At$$



(c) 유입량 일정, 유출유량이 0의 경우

$$q_1 = A(\text{정수}) \quad q_0 = Kh$$

$$h(t) = \int (A - Kh) dt = \frac{A}{K} (1 - e^{-Kt})$$



NOTE : VALVE를 통하는 유량은 h의 평방근에 비례하지만, 선형화하여 h에 비례하였음

(d) 유입유량 일정, 유출유량이 h에 비례하는 경우

<그림 16> LEVEL PROCESS에 관한 지연

$$y(t) = \int x(t) dt \dots\dots\dots (a)$$

$$\frac{d}{dt} y(t) = x(t) \dots\dots\dots (b)$$

NOTE : 제어의 문제에서는 모든 초기치를 0으로 하여도 일반성을 잃지 않는다.  
따라서 위의 관계가 성립한다.

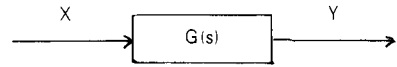
**<그림 17> 적분방정식의 미분방정식으로의 변환**

있다.

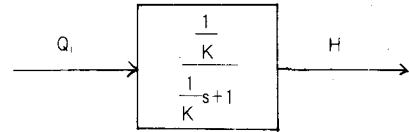
**(3) 지연의 원인**

지연은 수학적으로는 적분의 존재로 귀착된다. 즉, 입력과 출력의 관계가 대수방정식으로 표현되면 입력의 변화는 즉시 출력의 변화로 되어 지연은 존재하지 않는다.

그러나 적분은 과거의 값의 축적이므로 과거의 영향이 남게 된다. 이것이 지연의 원인이 된다. LEVEL의 PROCESS는 전형적인 적분 프로세스이다(그림 16). 유입유량을 시각 t=0에서 A까지 STEP 상(狀)



(a) 일반적인 표현



(b) LEVEL PROCESS의 예

**<그림 18> BLOCK DIAGRAM에 의한 전달함수의 표현**

으로 변화시켰을 때의 LEVEL의 변화를 그림의 (c) 및 (d)에 표시하였다.

지연이 있다고 하는 것은 입력과 출력과의 사이가 적분방정식으로 나타낸 것을 의미한다. 그런데 적분과 미분은 역연산의 관계가 된다. 따라서 적분방정식과 미분방정식은 등가이고 서로 환산 가능하다(그림 17).

따라서 지연이 있는 것은 입출력의 관계가 미분방정식으로 표현되는 것으로 귀착된다.