

# 선박용 센서 기술(I)

부산수산대학교 기관공학과  
교수 이 일 영

## 1. 서언

1970년대 이후 제1차 및 제2차 유류 파동을 겪으면서 선박 운항비 절감을 목적으로 기관실 무인화선이 건조되었다. 초기의 기관실 무인화선에서는 주로 카세트형 PCB 전자 회로에 의한 경보 및 제어장치를 사용하였다. 1980년대 말부터는 선내 주요 기기를 컴퓨터 제어화하고, 이를 주 컴퓨터에 의하여 집중관리하는 종합 자동화 시스템이 개발되었으며, 신조선에서의 종합 자동화 시스템 채용률이 높아져가고 있다. 또한 통신위성을 거쳐서 육상의 관리용 컴퓨터와 정보를 교환함으로써 육상지원 시스템까지를 포함하는 종합적인 운항 관리 시스템으로 발전하고 있다.

이러한 자동화 선박에서는 항해의 자동화, 주기관의 원격 및 자동운전, 발전기의 자동운전, 밸러스트 제어, 각종 기계설비(보일러, 공기 압축기, 냉동기, 공조기, 펌프류, 폐기 터빈 발전기 등)의 자동 운전과 중앙 집중 관리가 가능해졌다.

이상은 주로 상선에서의 선박 자동화 추세를 설명한 것이나, 이러한 선박 자동화 기술은 어선에도 거의 그대로 적용이 가능한 기술이며, 새로 건조되는 어선에서 자동화(또는 반자동화) 시스템 채용의 경향은 상선에서와 마찬가지로이다.

선박에서는 오래전부터 감시, 경보 및 제어의 역할 수행을 위하여 여러 가지 센서들이 사용되어 왔지만, 특히 근래의 자동화 선박에서는 센서의 역할이 더욱 막중해졌다 하겠다.

본 해설에서는 선박용 센서 기술에 대하여 수회에 걸쳐서 해설함으로써 각종 선박용 기계장치의 설계, 시공 및 운전에 종사하는 기술자들의 센서에 관한 지식함양에 다소나마 보탬이 되고자 한다.

## 2. 센서의 개요

자동 제어계에서 센서의 역할을 이해하기 위하여 그림 2.1에 자동 제어계의 블록 선도를 나타낸다. 그림에서 센서(검출부)는 자동

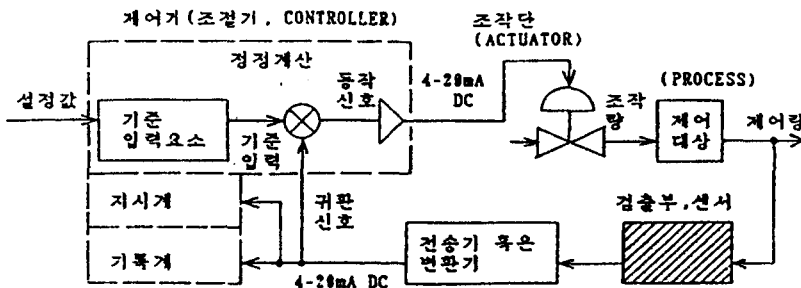


그림 2.1 자동 제어계의 블록선도

제어계의 제어량을 측정하는 장치이며, 이 센서의 특성(예:선형성, 해상도 등)에 따라서 자동 제어계의 성능이 직접적으로 영향을 받게 되는 것이다.

센서의 측정 대상에는 온도, 압력, 액위, 유량, 변위, 속도, 가속도, 전기 전도도 등의 물리량과 pH, 농도 등의 화학량이 있다.

자동화 선박에서는 센서의 결함으로 유발되는 문제가 종래의 선박에비하여 매우 심각해 지므로, 각국의 선급에서도 센서와 예상되는 설치 구역의 주요 환경과의 적합성을 고려한 검사(온도, 습도, 진동, 전자 유도 장애, 전원의 안전성 등을 고려한 검사)를 공인된 시험소에서 수행하여 합격된 제품을 사용하도록 규정하고 있다. 예를 들면, 센서가 오일 탱커의 화물 구역과 같이 위험 구역에 설비될 경우에는 고도의 안정성을 만족시키는 방폭 구조로서 저 전류의 신호가 사용되는 본질 안전 회로(intrinsically safe circuit)의 요구 조건들을 만족시켜야 한다. 그러나 이러한 위험 구역을 제외한 일반 구역에서의 계측 신호는 4~20mA DC로 표준화 되고 있다.

### 3. 센서의 특성

측정 대상에 따라서 어떤 센서를 선택할까? 센서에 관련된 신호 조절기, 기록기로는 어떤 것을 선택하면 좋을까? 이와 같은 문제를 검토할 때는 센서의 특성에 대한 지식이 중요한 역할을 한다. 센서의 특성은 정특성(靜特性: steady state characteristics)과 동특성(動特性: dynamic characteristics)으로 나누어진다. 계측량이 일정치이거나 또는 비교적 천천히 변화하는 양인 경우에는 정특성만을 고려하면 되지만, 계측량이 비교적 빠른 속도로 변화하는 경우에는 동특성까지를 고려하지 않으면 안된다.

센서 제작사가 제공하는 기술 자료에는 아래에 열거한 용어들을 사용하여 센서 및 관련 기기들의 정특성 및 동특성을 나타내게 된다.

### 3.1 정특성

#### (1) 感度(sensitivity)

감도의 정의는 아래와 같다.

$$\text{감도}(s) = \frac{\text{출력 신호의 변화량}}{\text{입력 신호의 변화량}}$$

예를 들면 길이 측정에 사용하는 차동변압기에서 1mm의 변위(입력 신호)에 따라 2mV의 전압(출력 신호)이 얻어진다면 감도  $s = \text{mV/mm}$ 이다.

#### (2) 解像度(分解能, resolution)

센서의 입력 신호를 어떤 값으로부터 서서히 증가시킬 때 어떤 입력 구간 동안에 출력 신호가 불변인 상태로 존재하며, 정해진 일정 구간을 초과할 때마다 출력이 증가하는 경우, 그러한 입력 신호의 구간을 해상도(또는 분해능)이라 한다.

즉, 해상도란 센서에서 계측 가능한 입력 신호의 최소 변화량이며, 길이 측정용 다이얼 게이지의 최소 눈금이 0.01mm이면 이 다이얼 게이지의 해상도는 0.01mm이다.

디지털식 센서에서는 계측에 사용하는 2진 자리수(bit수)에 따라서 해상도가 정해진다.

#### (3) 直線性(linearity)

입력 신호와 출력 신호 사이의 정특성 선도가 그림 3.1과 같이 표시될 때, 양자의 관계가 직선으로 표시되면(즉, 감도가 일정하면) 일반적으로 이상적이다. 보통 그림에서와 같이 다소 곡선으로 될 수가 있으며, 이러한 경우 감도는 근사적으로 직선으로 간주할 수 있는 부분을 사용 범위로 하여 정하거나 또는 직선으로 되도록 보정하여 표시한다. 직선성의 정도를 나타내는 것이 비직선도이며, 그림의 경우에는

$$\text{비직선도} = \frac{B}{A} \times 100\%$$

로 나타낸다. 여기서 B는 출력 신호를 나타내는 곡선과 직선 사이의 최대 편차이다.

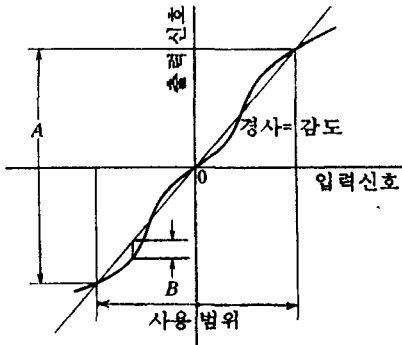


그림 3.1 입력-출력사이의 정특성

(4) 히스테리시스 오차(hysteresis error)

입력 신호를 서서히 증가시켜 갈 때와 서서히 감소시켜 갈 때에는 동일한 입력 신호 값에 대하여 다른 출력 신호가 얻어질 수가 있다. 이와 같이 측정의 이력에 따라서 생기는 동일 입력 신호에 대한 출력 신호의 차이를 히스테리시스 오차라 한다(그림 3.2).

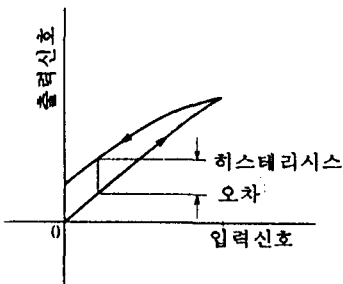


그림 3.2 히스테리시스 오차

3.2 동특성

그림 3.3에는 어떤 계측 장치에서 입력 신호  $x_i$ 와 출력 신호  $x_o$ 가 시간 경과에 따라 변화하는 모양을 나타내었다. 이 계측 장치에서 감도가 1이고, 입력과 출력사이에 시간 지연이 전혀 없다면  $x_i$ 와  $x_o$ 는 크기와 모양이 완전히 일치해야 할 것이다. 그런데, 그림에서  $x_i$ 와  $x_o$ 의 절대치는 거의 같은데 비하여  $x_i$ 에 존재하는 고주파 성분(요철 부분)이  $x_o$ 에는 나타나 있지 않으며, 그 이유는  $x_o$ 가  $x_i$ 의 빠른

변화에 추종하지 못하기 때문이다.

계측장치의 동특성을 나타냄에 있어 입력 신호가 임의의 형태인 것으로는 객관적인 표시가 어려우므로, 정해진 입력 신호에 대한 출력 신호의 응답으로서 동특성을 나타내는 것이 일반적이다. 동특성 표시법에는 입력 신호의 형태에 따라 과도응답법(過渡應答法)과 주파수응답법(周波數應答法)이 있다.

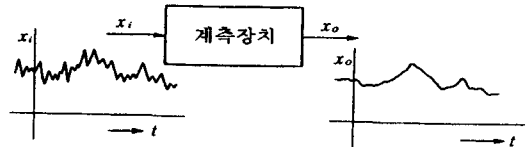


그림 3.3 센서의 동특성 설명

(1) 과도응답법(transient response method)

입력 신호가 하나의 정상상태에서 다른 정상상태로 변화할 때의 응답으로부터 계측장치의 동특성을 나타내는 방법이며, 여기에는 스텝(step)응답법, 임펄스(impulse)응답법, 램프(ramp)응답법이 있다. 이 중에서 가장 널리 사용되는 스텝응답법을 아래에서 설명한다.

① 1차 자연계의 스텝 응답

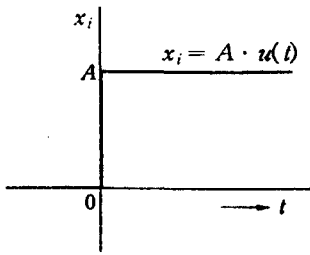
전달 함수  $G(s)$ 가 다음 식의 형태로 표시되는 경우의 계를 1차 자연계라 한다.

$$G(s) = \frac{K}{1+Ts} \quad (3.1)$$

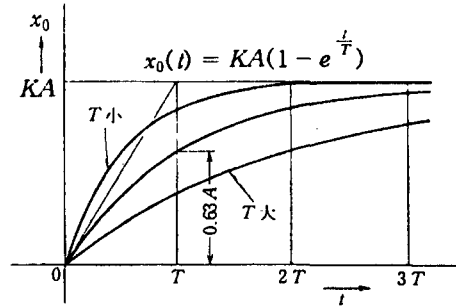
여기서  $s$ 는 라플라스 연산자,  $K$ ,  $T$ 는 정수이다.

전달함수가 식(3.1)로 표시되는 계측장치에 그림 3.4(a)와 같은 계단상의 입력 신호를 가했을 때의 출력 신호는 그림 3.4(b)와 같이 표시된다.

그림 (b)에서와 같이 시간이 경과함에 따라  $x_o$ 는  $KA$ 에 접근하며,  $t=T$ 일 때  $x_o=0.632 \times KA$ 에 도달한다. 1차 자연계에서  $T$ 의 값



(a) 입력 신호



(b) 출력 신호

그림 3.4 1차 지연계의 스텝 응답

은 계측장치의 응답 속도를 결정하는 중요한 역할을 하며  $T$ 를 時定數(time constant)라 한다.

② 2차계의 스텝 응답

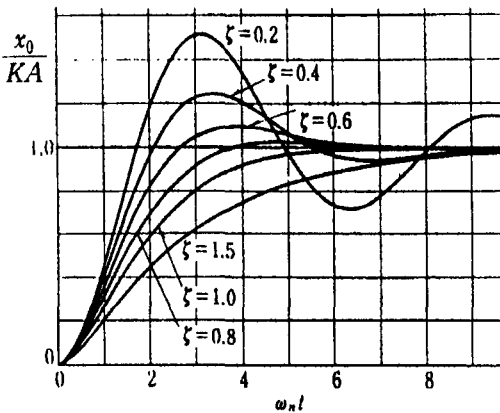
전달 함수  $G(s)$ 가 다음 식의 형태로 표시되는 계를 2차계라 한다.

$$G(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.2)$$

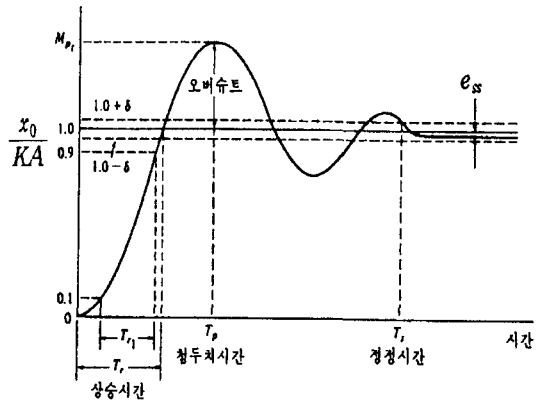
여기서  $\zeta$ ,  $\omega_n$ ,  $K$ 는 상수이다. 전달함수가 식(3.2)로 표시되는 계측장치

에 그림 3.4(a)와 같은 계단상의 입력 신호를 가했을 때의 출력 신호는 그림 3.5(a)와 같이 표시된다.

그림 3.5(a)에서 횡축은  $\omega_n t$ , 종축은  $x_0/KA$ 로 하여 표시하였다. 그림 3.5(b)에는 2차계 스텝 응답 파형의 특성을 설명하는 데에 사용되는 '상승시간' (최종치의 10%로부터 90%에 도달하는데 걸리는 시간), 오버슈트 (over-shoot), 정정시간(settling time), 침두치 시간의 정의를 표시하였다. 이 그림에서 시간이 경과함에 따라 출력 신호  $x_0$ 는  $KA$ 에



(a)



(b)

그림 3.5 1차계의 스텝 응답

접근하며, 출력 신호의 형태는 감쇠비  $\zeta$ 의 값에 따라서 유일하게 결정됨을 알 수 있다. 즉  $\zeta$ 가 1보다 크면 출력 응답이 최종치(KA)에 도달하는 시간이 너무 길어지고,  $\zeta$ 가 작은 경우에는 출력 응답이 진동적으로 되어 역시 최종치에 도달하는 시간이 과대해진다. 대체로  $\zeta=0.6\sim 0.8$ 정도가 적정치이다.

한편,  $\omega_n$  변화에 따른 출력 신호 응답 파형의 변화를 조사해 보자. 그림의 횡축  $\omega_n t$ 의 눈금을  $t$ 의 눈금으로 고쳐본다.  $\omega_n=1\text{rad/s}$  라면 이대로의 눈금이 되며,  $\omega_n=0.5\text{rad/s}$ 이면  $\omega_n t=1$ 이  $t=2s$ 에 상당한다. 또  $\omega_n=2\text{rad/s}$ 이면  $t=0.5s$ 에 상당한다. 즉,  $\zeta$ 가 일정하고  $\omega_n$ 이 커지면 상승 시간이 짧아져서 빠른 응답이 얻어진다. 또한,  $\omega_n$ 은  $\zeta=0$ 인 경우의 각주파수로서, 고유 각주파수(undamped natural frequency)라 불린다.

### (2) 주파수 응답법

어떤 계의 전달 함수가  $G(s)$ 일 때  $s$ 대신에  $j\omega$ 를 대입한 함수  $G(j\omega)$ 를 주파수 전달함수라 한다. 주파수 전달함수는 계의 주파수 특성, 즉 계에 정현파 함수의 입력  $a \sin \omega t$ 가 가해졌을 때 출력  $b \sin(\omega t - \phi)$ 가 얻어졌다면 이러한 입력과 출력사이의 진폭비(게인, gain) 및 위상각의 특성을 제공한다.

그림 3.6에서 진폭비  $b/a$ 와 위상각  $\phi$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{b}{a} = |G(j\omega)|, \quad \phi = -\angle G(j\omega) \quad (3.3)$$

여기서  $|G(j\omega)|$ 는 복소수  $G(j\omega)$ 의 절대치,  $\angle G(j\omega)$ 는 편각이다.

$\omega$ 값의 변화에 따른  $G(j\omega)$ 의 변화를 나타내는 방법으로는 벡터 궤적, Bode선도가 있으며, 계측장치의 전달 함수가 2차계 [식 (3.2)]로 표시되는 경우의 주파수 응답특성을

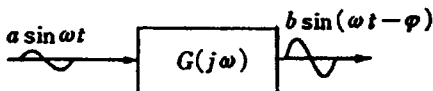


그림 3.6 주파수 응답

Bode선도로 표시한 것을 그림 3.7에 나타내었다.

그림 3.7로부터  $\omega=\omega_n$ 에서  $-90^\circ$ 의 위상차가 있으며, 공진이 발생함을 알 수 있다. 이때의 게인 곡선 및 위상 곡선의 모양은 감쇠비  $\zeta$ 에 의하여 유일하게 결정된다. 이 그림에서  $\omega < \omega_n$ 의 영역에서는 게인에 1 이상이며, 위상 지연도  $90^\circ$  이하이지만  $\omega > \omega_n$ 인 경우에는 게인이 1이하로 감소하며 위상각도 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 2차계의 특성은 주파수  $\omega$ 가  $\omega_n$ 을 기준으로 하여 그 특성이 현저하게 달라지게 된다.

주파수 응답 특성을 기술하는 편리한 수단으로 대역폭(bandwidth)이란 용어가 사용되

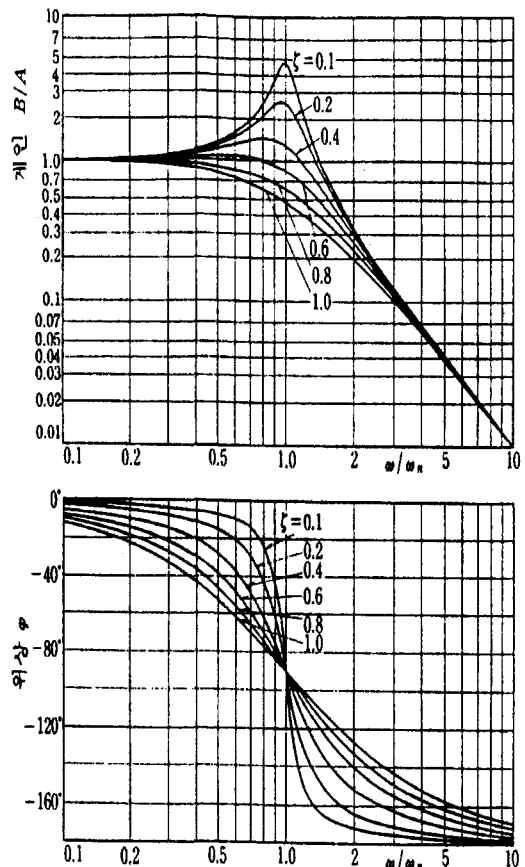


그림 3.7 2차계의 주파수 응답 특성

며, 대역폭의 정의를 그림 3.8에 나타낸다. 여기서 단절 주파수(cutoff frequency)  $\omega_c$ 란  $20 \log|G(j\omega)|$ 가 -3 dB로 되는 주파수로 정의되고, 이 때의  $|G(j\omega)|$ 는 0.707이다.

2차계에서  $\omega_c$ 는  $\omega_n$ 보다 약간 큰 값이 되며,  $\omega_n$  변화에 따라  $\omega_c$ 도 달라짐은 물론이다. 대역폭이란  $0 \sim \omega_c$ (단절 주파수)까지의 주파수 범위를 의미한다. 어떤 계측장치의 대역폭이 넓으면 이 계측장치의 응답 시간이 짧아서 응답이 빠를 것이고, 반대로 대역폭이 좁으면 응답이 느려질 것이다. 따라서 대역폭은 계측장치의 응답성을 나타내는 척도가 되며, 일반적으로 계측장치의 이상적인 사용 주파수 범위는 대역폭의 1/3정도이다.

그림 3.8에서 보는 바와 같이 단절 주파수  $\omega_c$  이상의 주파수 영역에서는 신호의 감쇠가 매우 커지며, 따라서 이 계는  $\omega_c$  이상의 고주파 영역에서 필터 기능을 가지게 된다. 이 경우 계측장치에 가해지는 전기적 잡음, 기계적 진동, 유체계 내의 압력 맥동과 같은 고주파 잡음을 감쇠시켜서, 출력 신호에 미치는 잡음

의 영향을 줄여준다. 최적의 대역폭이란 계측 신호는 감쇠됨이 없이 전송시키되 원하지 않는 잡음은 모두 제거하는 대역폭을 말한다.

〈예제〉 어떤 계측 장치의 전달함수가 다음 식으로 표시될 때, 이 장치의 대역폭을 구하라.

$$G(s) = \frac{0.95}{(1/a)s + 1} \quad (3.4)$$

이 계는 1차 지연계로서 시정수  $T=1/a$ 이며, 게인(dB)은 다음과 같이 구해진다.

$$20 \log|G(j\omega)| = -0.45 - \frac{20}{2} \log(\omega^2/a^2 + 1) \quad (3.5)$$

이 계는 그림 3.9에 나타낸 바와 같이 공진 점을 갖지 않고  $|G(j\omega)|$ 의 최대치는 0.95이며, 이 값은 -0.45 dB에 상당한다. 이 때 대역폭은  $a$  rad/s에 가까운 값이 되며,  $a$  가 클수록 대역폭은 증가한다.

〈다음호에 계속〉

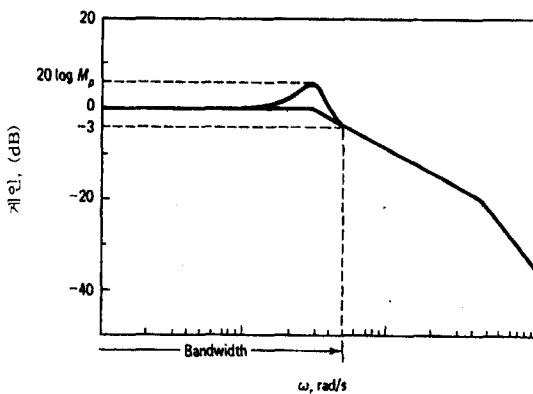


그림 3.8 대역폭의 정의

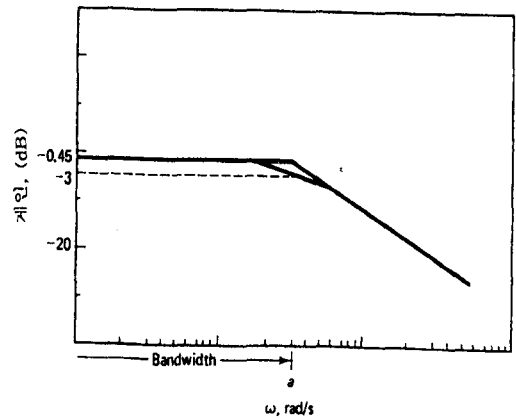


그림 3.9 1차계의 대역폭