

선박용 센서 기술 (5)

이 일 영/부경대학교 공과대학 교수

9. 액위 및 체적의 측정

탱크(tank)내에 들어있는 유체의 총 부피 또는 총 중량을 구하려면 먼저 탱크내의 액위(液位)를 측정하지 않으면 안된다. 측정된 액위를 탱크 체적 계산표(tank table) 또는 계산식에 적용함으로써 탱크내 액체의 총 부피가 산출되며, 여기에 액체의 비중을 곱해주면 총 중량이 구해진다. 액체의 비중은 온도에 따라 다소 변하므로 정확한 액체 중량 산정을 위해서는 온도 변화에 따른 환산 비중치를 사용하게 된다. 이와 같은 환산 및 산정 과정이 컴퓨터를 이용한 프로그램(program)에 의해 자동적으로 처리되는 방법이 최근의 선박에 널리 쓰이고 있다.

공업용의 액위 측정 센서는 측정 대상 또는 탱크(tank)의 구조에 따라 다양하며, 선박에서 많이 사용되는 것으로는 아래와 같은 것들이 있다.

9. 1 직독식(direct reading type)액위 센서

(1) 게이지 글래스(gauge glass)식 : 대기에 개방되어 있거나 또는 밀폐된 액체용 탱크의 액위 지시에 널리 사용되는 것으로, 정밀 측정을 필요로 하는 경우에는 게이지 글래스에 직접 눈금을 표시하거나 게이지 글래스의 측판에 눈금을 표시하여 액면의 높이와 탱크내 액면과의 관계를 직접 읽는다.

이 방식의 문제점은 게이지 글래스의 모세관 현상에 의하여 탱크내 액면과 게이지 글래스의

위치 사이에 차가 생길수 있다는 점이다. 아래 그림 9.1에서 보여주는 Δh 는 게이지 글래스의 내경에 반비례하는 관계가 있으므로, 검출 정밀도(accuracy)를 높이기 위하여 일반적으로 게이지 글래스의 내경을 일정 크기 이상의 것을 사용하게 된다.

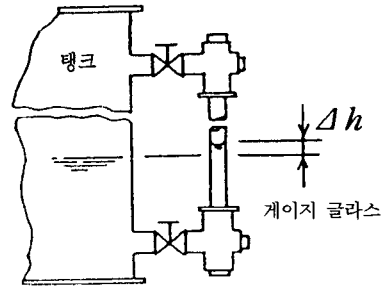


그림 9.1 게이지 글래스의 예

게이지 글래스 방식은 사용상 아래와 같은 점을 고려해야 한다.

- 글래스를 부식시키는 액체에는 사용하지 못한다.
- 파손에 대비한 보호장치가 필요하다.
- 불투명한 점착성 액체(중유 등)에는 부적당하다.

(2) 탱크 척(尺) : 탱크 척은 대형 탱크 등의 액위 측정 방법으로 오래전부터 사용되어 왔으며, 액위 측정용 줄의 끝에 달아맨 분동은 탱크 밑바닥(gauging plate)에 닿아서 기준 점을 표시하고, 액(liquid)에 의해 젖은 곳까지의 거리에 의하여 액위를 검출하는 방법이다. 이에 따른 액위의 표현은 액심(depth)과 상부 공간 거리(ullage)의 두가지가 있다.

9.2 부자(float)식 액위 센서

(1) 플로트 스위치(float switch)식: 부자(float)식 액면계 중에서 구조가 가장 간단한 것으로 여러 가지 형태의 것이 사용되고 있다. 아래 그림 9.2는 선박에서 많이 쓰이는 것으로, 부자의 반대편에 영구 자석을 부착하여 액면의 위치에 따라 영구 자석이 상하로 이동하게 하는 방법이다.

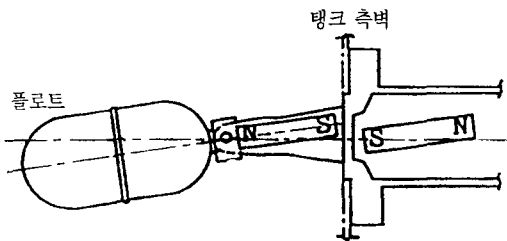


그림 9.2 플로트 스위치식 액위계의 예

액면의 위치에 따른 영구 자석의 이동은 비자성 격벽을 통하여 스위치(switch)내에 있는 또 다른 자석을 움직임으로써 점점 등을 작동시켜 신호 전달이 가능하다. 화재나 폭발의 위험이 있는 장소에서는 액위 측정시 영구 자석의 이동이 전기 스위치 대신에 사용된 공기압 파일럿 밸브(air pilot valve)에 전달되고 이는 안전한 장소에 설치된 압력 스위치로 파일럿 공기(pilot air)의 압력이 전달됨으로써 액면을 측정하는 방법도 쓰인다. 이와 같은 액면계는 구조가 간단하므로 사용이 용이한 편이지만 측정액이 응고성의 물질을 함유하였을 경우 부자(float)에 고착물이 부착되어 부자의 체적, 중량을 변화시켜 오차를 유발할 수도 있다.

(2) 디스플레이서(displacer)식 [= 부력-힘 변환식]: "액체 속에 잠긴 물체는 그것이 배제한 액체의 무게만큼 가벼워진다."는 아르키메데스의 원리를 액위 검출에 이용한 것으로서, 이 때 사용되는 물체를 디스플레이서(displacer)라 부른다.

그림 9.3과 같이 액체속에 그 일부가 잠긴 물체에 수직 방향으로 작용하는 힘의 평형식은 아래와 같다.

$$F + W - \frac{\gamma V(L_i - L_0)}{d} = 0, \quad (9.1)$$

$$L_i = (W+F) \times \frac{d}{\gamma V} + L_0$$

여기서, F:디스플레이서 지지력, W:디스플레이서의 중량, γ :액체의 비중량, V:디스플레이서의 체적, d:디스플레이서의 길이, L_0 :탱크 밑바닥에서 디스플레이서 하부까지의 거리, L_i :액위이다. 식 (9.1)에서 디스플레이서 지지력 F를 측정함으로써 액위 L_i 를 측정할 수 있다.

이 방식의 액위 센서의 구조를 그림 9.4에 나타내었다. 그림 9.4(a)는 힘 변환기(예: 로드 셀, 힘-공기압 변환기)를 사용하여 디스플레이서 지지력을 측정하는 경우이며, 그림 9.4(b)는 토크 튜브(torque tube)를 사용하여 디스플레이서의 부력이 토크 튜브에 비틀림을 일으킬 때의 비틀림 각을 회전각도 센서(예:전기식 또는 공기압식 센서)로 측정하는 경우이다.

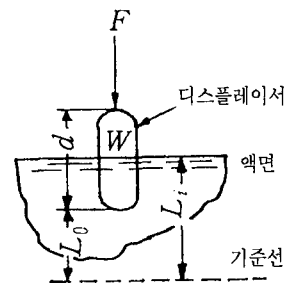


그림 9.3 디스플레이서 액위 센서의 원리

디스플레이서식 액위 센서를 사용할 때는 탱크와 계기 또는 스위치와의 사이를 완전히 차단시킬 수 있으므로 누설의 염려가 없고 압력 탱크의 액위 측정에도 적합하다. 또한 디스플레이서의 재료를 적절히 선택함으로써 부식성

이 있는 액체에도 적용이 가능하다.

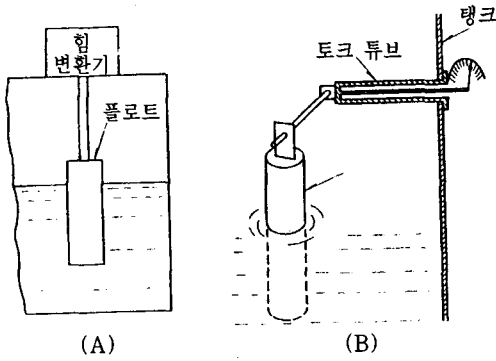


그림 9.4 디스플레이서 액위 센서의 구조 예

(3) 차동변압기(LVDT)식: 플로트의 위치 검출에 차동변압기를 이용할 수 있다. 액위의 변화 범위가 큰 경우에는 그림 9.5와 같은 자동 추종식 액위계가 사용된다. 이 방식은 전기 서보 기구를 사용하여 철심 내장형 플로트와 차동변압기 코일 사이의 상대 위치를 항상 영으로 유지하도록 벨트 풀리로 구동시키는 것으로, 정밀한 측정 및 원격지시가 가능하다.

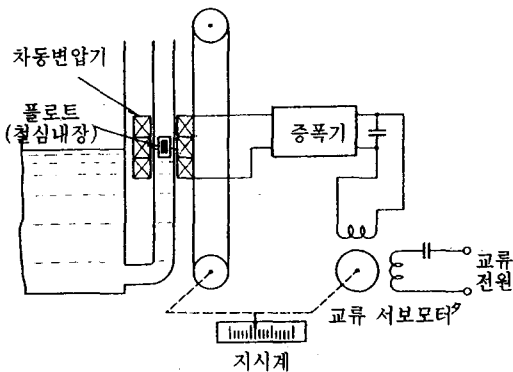


그림 9.5 자동 추종식 액위계

9.3 압력식 액위 센서

(1) 탱크내 압력 측정식: 대기에 개방된 탱

크내의 어느 위치(예를 들면 탱크 밑바닥)의 압력은 액표면으로부터 측정점까지의 수직 거리를 H , 액체의 비중량을 γ 라 하면 $P = \gamma \times H$ 로부터 구해진다. 밀폐형 탱크의 경우는 차압을 측정함으로써 액위를 측정할 수 있다(그림 9.6). 압력변환기 및 차압변환기로는 직독식, 전기식, 공기압식이 있다.

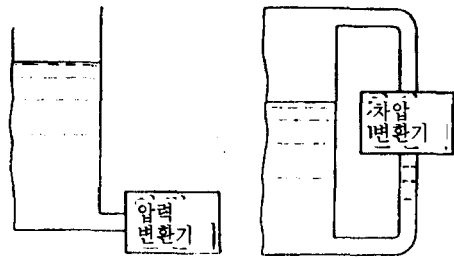


그림 9.6 탱크내 압력 측정식 액위 센서

탱크 밑바닥에 압력변환기를 설치하는 방법의 하나로 센서를 탱크 상부에서 아래로 늘어뜨려서 직접 투입하는 방법이 있으며, 간단히 설치할 수 있는 이점이 있다.

(2) 기포식(air purge type) : 그림 9.7과 같이 탱크내 액체 속의 밑바닥까지 관로를 설치하고 상부에서 일정량의 기체를 연속적으로 공급하면 공기 공급관내의 압력은 관로 선단(purge mouth)의 액체 압력과 같아지기 때문에 기체 공급 관로내의 압력을 측정함으로써 액위를 구할 수 있다. 즉, 측정된 공기압 P 를 액체의 비중량 γ 로 나누면 액위 H 가 구해진다.

이 방식은 부식성의 액체, 부유물이 포함된 액체, 탱크의 깊이가 매우 깊은 경우와 같이 압력계를 탱크에 직접 설치하기 곤란한 경우에 많이 사용되며, 선박에서는 기관실의 연료 탱크, 화물창의 탱크, 밸러스트 탱크(ballast tank) 등의 액위 측정 또는 선박의 흘수, 트림(trim) 등의 측정에도 널리 쓰인다.

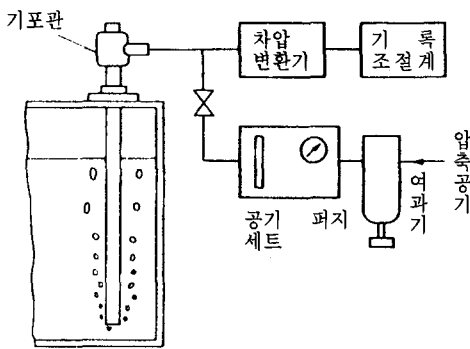


그림 9.7 기포식 액위 측정 장치

압력식 액위 센서로 액위 측정시에는 온도 변화에 따른 액체 비중의 보정에 유의할 필요가 있다. 최근에는 컴퓨터를 사용한 액위 측정 시스템에서 키보드(key board)에 의한 수동 보정 조작 또는 온도 센서를 응용한 자동 보정 조작이 이루어지고 있다.

9.4. 정전용량식(靜電容量式) 액위 센서

두 개의 절연된 도체가 있을 경우 이 사이에 형성되는 정전용량은 두 도체의 크기, 상대적 위치 및 도체 사이에 존재하는 매질의 유전율(誘電率)에 의하여 결정된다. 다음 그림 9.8 과 같이 동심 원축상에 있는 두 개의 도체 사이에 유전율 ξ_1 의 물질이 충만해 있을 경우와 유전율 $\xi_2 (> \xi_1)$ 의 물질이 1만큼 유입된 경우의 정전용량의 변화 ΔC 를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta C = \frac{(\xi_2 - \xi_1)l}{\log_{10} D/d} \text{ [pF]} \quad (9.2)$$

여기서 $\frac{(\xi_2 - \xi_1)}{\log_{10} D/d}$ 은 일정하므로 ΔC 는 1에 의해서만 결정됨을 알 수 있으며, ΔC 를 측정함으로써 액위 l 을 구할 수 있다.

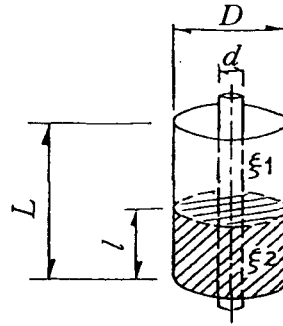


그림 9.8 정전용량식 액위 측정 원리도

정전용량식 액위 측정 센서는 전극(electrode 또는 probe)과 정전용량의 변화를 전류신호 또는 전압신호로 변환하는 전자회로로 구성되며, 그 기능에 따라서 액위 스위치와 연속적인 액위 센서로 구분된다.

측정 대상의 액체로는 물, 수용액 등과 같은 도전성 액체, 가솔린, 증유, 등유, 식물유 등과 같은 비도전성 액체, LPG, 액화탄산가스, 액체산소, 액체질소 등 비교적 도전율이 약한 것 등이 있다. 가장 일반적인 측정에는 기체와 액체의 경계면 측정이며, 두가지 종류의 액체의 경계면 측정에도 이용된다. 액체가 부도체인 경우는 전극을 비복합 상태로 사용해도 무방하나, 어느 정도 도전성을 갖는 경우에는 전극에 테프론(Teflon)을 피복하여 절연시킨 상태로 사용해야 한다. 정전용량식 액위 센서는 선박의 화물 탱크 고액위 경보(high level alarm)용 등으로 사용되고 있다.

9.5 초음파식 액위 센서

초음파식 액위 센서에는 단순히 온-오프 신호를 발생시키는 초음파식 액위 스위치와 아래에서 설명하는 연속적 액위 신호 검출용 초음파식 액위 센서가 있다. 초음파 액위 센서에는 크게 다음 두가지 방식의 것이 있다. 그 하나는 발신기(transmitter)에서 발사된 음파가 어떤 경계면에서 반사되어 수신기

(receiver)에 도달할 때까지의 소요 시간을 측정하는 방식이고, 다른 하나는 발신기에서 발사된 음파가 어떤 매질을 통과하여 수신기에 도달하는 과정에서 소실된 음파 에너지의 양을 측정하는 방식이다.

그림 9.9는 음파의 도달 시간을 측정하는 방식의 초음파 액위 센서의 원리를 나타낸 것이다. 탱크 상부의 발신기로부터 주기적으로 초음파 펄스(pulse)를 보내고, 이것이 액면에서 반사하여 재차 탱크 상부의 수신기에 반사파로서 귀환해올 때까지의 왕복시간을 측정한다.

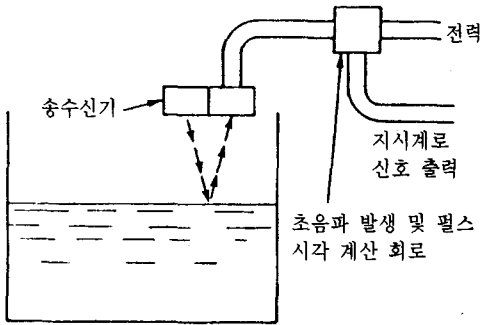


그림 9.9 초음파 액위 센서의 측정 원리

탱크 상부에서 액면까지의 거리와 초음파를 발사해서 반사파 수신까지의 시간과의 관계는 아래 식으로 주어진다.

$$h = \frac{tu}{2} \quad (\text{m}) \quad (9.3)$$

- u: 기체중의 음속 (m/s)
- t: 초음파 발사후 반사파 수신까지의 시간 (s)
- h: 센서에서 액면까지의 거리 (m)

초음파식 액위 센서는 직접 액체에 접촉함이 없이 탱크 상부에 설치된 센서만으로 액위 측정이 가능하므로 선박에서 화물유 탱크의 액위 측정이나 홀수의 측정 및 수심의 측정 등에 더욱 널리 사용될 것으로 예상된다.

초음파 액위 센서의 오차(error)는 일반적으로 1 ~ 2% 이나 반사율의 문제, 온도변화, 매체의 상태, 잡음 등에 대하여 아래와 같은 사항을 고려하여야 한다.

- 액체와 기체와의 경계에 있어서 반사율은 크지만 그 사이에 거품 등이 있으면 반사율이 현저히 적어지며 오동작의 원인이 된다.
- 초음파의 전파속도 즉, 음속(331.4 m/s in air at 20°C)은 기체의 온도가 변하면 크게 변화하므로, 필요시 온도센서를 탱크 내에 설치하여 지시치를 보정해야 한다.
- 초음파의 음속은 매체의 종류에 따라서 변화한다.
- 초음파식 액위 센서는 액면에 대하여 수직으로 부착해야 하며, 액면에서의 반사파가 탱크 상부(roof)에서 반사해서 초음파 센서에 되돌아오는 위치에 부착해서는 안된다.
- 초음파 센서는 탱크 상부에 부착하므로 탱크내의 부식성 가스에 의하여 부식되는 경우가 있는데, 그 때는 센서 내부를 연속적으로 에어 퍼지(air purge)해야 한다.

그림 9.10은 에코 사운딩(echo sounding) 기술을 이용한 새로운 방식의 센서로서 선박의 화물유 탱크 바닥으로 설치된 파이프를 통하여 탱크 속의 바닥까지 파동을 전달함으로써 액위를 측정하는 방법의 예이다.

그림 9.10의 파이프 속에는 정확한 간격의 기준점(reference points, 탱크 높이에 따라 10 points까지 사용)을 나누었으며 기준(reference)과 액면으로부터 받은 각 에코(echo)를 컴퓨터에 의해 분석하여 탱크의 액위를 측정하는 방법이다.

이는 센서 파이프를 탱크 벽의 구조에 따라 최대 45°까지 구부릴 수 있으므로 탱크 내부에 장애물(bottom beam 등)이 있는 구조의 경우에 사용하기에 유리하다.

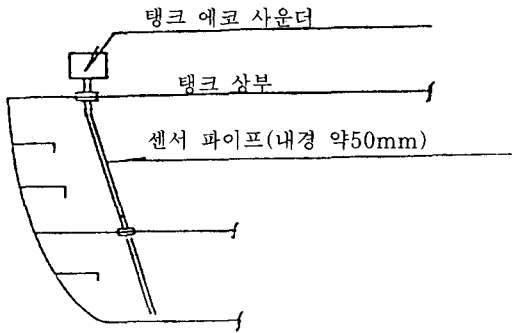
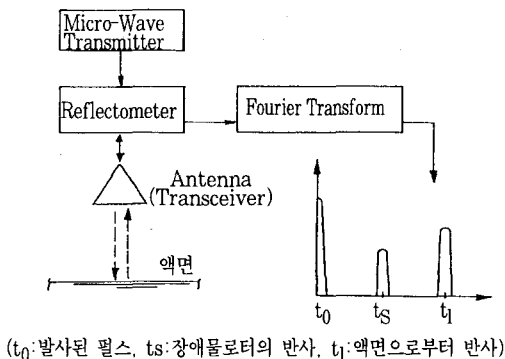


그림 9.10 도파관을 이용한 액위 측정의 예

9.6. 마이크로 파(micro wave)식 액위 센서

마이크로 파 빔(micro wave beam)은 물질에 따라서 흡수 또는 반사되어 그 통과가 저지된다. 이것은 광선이 물질에 의해서 저지되는 것과 유사하다. 마이크로 파식 액위 센서의 작동 원리는 초음파식 액위 센서의 그것과 마찬가지로, 다른 점은 마이크로 파(약 1 GHz ~ 40 GHz)의 경우가 훨씬 더 고주파 신호를 사용하는데에 있다.

마이크로 파 빔의 강도는 거리의 2승에 따라서 감쇠하며, 송·수신기 사이의 매질에 따라서도 감쇠의 정도가 달라진다. 금속 물질은 비투과성을 갖고 마이크로 파를 반사하지만 저도전성 물질과 감쇠량과의 사이에는 물질의 유전율과 직접적으로 상호관계가 존재한다.



(t_0 : 발사된 펄스, t_s : 장애물로부터의 반사, t_1 : 액면으로부터 반사)

그림 9.11 송·수신기가 조합된 마이크로 웨이브식 액위 센서

그림 9.11은 송·수신기가 조합된 마이크로 파식 액위 센서를 이용한 액위 측정의 한 예이다. 그림에서 나타낸 바와같이 9.5 ~ 10.5 GHz 범위의 주파수에 걸친 마이크로 파 신호가 센서로부터 액체 표면으로 발사되고 그의 일부가 액면으로부터 안테나(antenna)까지 반사되며, 원칙적으로 액면까지의 거리는 반사 신호의 지연 시간(time delay)으로부터 얻어진다.

또 다른 한 예로서, 삼각 주파수파로 변조된 연속적인 파동을 액면에 발사하여, 발사된 마이크로 파 신호와 반사된 신호와의 주파수 차이를 레이다 안테나에서 액면까지의 거리로 환산하는 방식이 그림 9.12와 같이 쓰이고 있다.

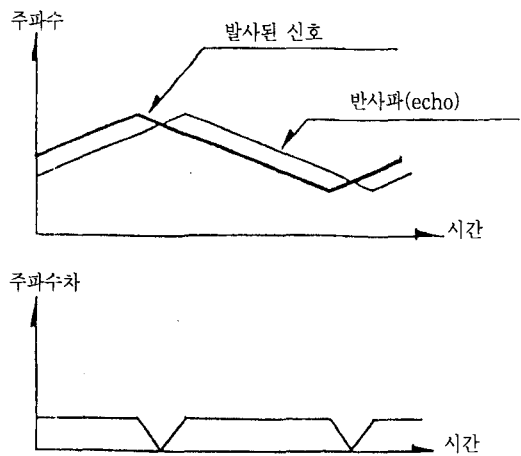


그림 9.12 마이크로파 신호의 주파수 차에 의한 액위 측정 예

위에서 설명한 마이크로 파식 액위 센서는 다른 액위 측정 방식에 비해 정밀도가 높으며 센서가 탱크 상부에 위치하므로 설치 방법이 간단한 반면, 센서의 설치 위치 선정시에는 탱크 내부의 장애물, 필요시 배의 기울기 및 요동에 의한 액면의 위치 보정 등을 필요로 하므로, 탱크의 구조와 관련하여 센서 공급 업체와 사전에 협의하여 센서의 위치를 결정하는 것이 좋다.

탱크내 매체의 체적, 중량은 센서와 조합된 컴퓨터(computer)에 의해 탱크 계산표 등에 근거하여 계산될 수 있다.

9.7 액위 측정 센서의 선정 및 설치

액위 측정 센서의 선정 및 설치시에는 설치 장소 또는 시스템과의 연결 등에 따라 제조업체의 표준 및 권고 사항을 충분히 숙지하여야 한다.

다른 센서와 마찬가지로 액위 측정 센서의 선정시에는 계측, 경보 및 감시조절 시스템과의 적절한 신호접속(interface)이 필요하며, 탱크의 특별한 구조, 탱크 상부의 오버플로관로 높이 및 벤트 관로 높이 등에 따른 센서의 보호가 요구된다.

특히 정확한 계측을 위해서는 액위 측정 센서에 적절한 신호접속이 이루어지도록 센서 및 계측정보기 제조업체에 아래 사항을 통보하는 것이 필요하다.

- 센서의 제조업체명 및 형식
- 탱크 체적에 관련된 데이터
- 탱크 하부(bottom)로부터의 센서 위치 (기포식 센서의 경우 purge mouth까지 높이)
- 전체 탱크 높이, 탱크 상부의 벤트(vent) 관로 또는 오버 플로(overflow) 관로 높이
- 지시(scale) 범위
- 탱크내 유체 또는 매체의 비중
- 센서의 4mA 및 28mA DC 출력에 상응하는 액위값, 고/저 액위 경보치에 상응하는 액위값. 탱크내 액위 경보 및 유체 이송 펌프의 자동조작을 위해 선박에서 널리 쓰이고 있는 부자식(float type) 액위 측정 센서의 선정 및 설치시에는 아래 사항에 유의해야 한다.
- 탱크 구조에 따라 형식 선정을 해야한다. 즉, 탱크 상부에만 설치 장소가 있거나 기관실 최저부의 이중저 탱크(double bottom

tank) 등에는 디스플레이식 센서 등을 선정해야 하며, 탱크 측면에 설치 공간이 있으면 보다 저렴한 측면 설치 방식(side mounting type)으로 선정하는 것이 경제적이다.

- 고/저 액위 경보 및 펌프 시동/정지에 적합한 액위를 선정하여 부자(float)의 설치 위치를 결정한다. 또한 선박의 운동(rolling, pitching, trim 등)에 따른 탱크의 경사를 고려하여 정확한 액위 측정이 될 수 있도록 가능한 한 탱크 중심부에 부자가 위치하는 것이 좋다. (선박의 pitching 운동 방향으로 부자를 설치하는 방법이 좋다.)

- 유지 및 보수가 용이한 장소, 특히 디스플레이식(top mounting type) 부자 센서는 보수시에 전체 센서를 길이 방향으로 뽑아내야 하므로 상부에 설치된 다른 장비와의 적절한 공간 확보가 필요하며, 부자 테스트 장치(test lever 등)가 설치된 경우에는 이의 적절한 조작 공간을 확보해야 한다.

- 각 조선소의 표준에 따라 부자식 센서의 설치용 시트의 플랜지 표준이 있으므로 이를 참조한다.

- 탱크의 높이가 비교적 높은 경우에는 하부에 설치된 센서는 중력에 의한 유체 압력에 견딜 수 있도록 플랜지 및 부자(float)의 재질, 강도가 적절히 고려되어야 하며, 연료유 주입시에 탱크내 액위가 증가하면 이송 펌프의 송출압력이 부자에 전달될 수도 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

또한 부자의 재질 선정시에는 탱크 내의 유체 압력, 온도 및 비중을 고려하여 적절한 것으로 선택되어야 한다.

부자식 액면 측정 센서 이외에도 화물유 탱크의 액위 및 체적 센서로서 많이 쓰이고 있는 마이크로 웨이브식 및 기포식 액위 측정 센서 등의 설치시에는 각 제조업체의 특별 요구 사항이 적용되어지도록 초기 자재 구입시부터 제조업자와 충분한 협의를 해야 한다.

(다음호에 계속)