

# 발사체 탱크 추진제 수위 측정시스템 감지부 선행연구

신동순\* · 이웅신\*\* · 고현석\*\*\* · 조인현\*\*\*

## Preceding Study on the Sensing Part of Level Measurement System of Launch Vehicle Propellant Tanks

Dongsun Shin\* · Eungshin Lee\*\* · HyunSeok Ko\*\*\* · Inhyun Cho\*\*\*\*

### ABSTRACT

The propellant level measurement system of the next Koreanized launch vehicle shall adapt a capacitive type sensor, which can generate capacitive values continuously considering cryogenic environment and the characteristics of flowrate control. At present there are a twin-arc and a triple-arc methods as a capacitive type signal sensing method. In this study a highly accurate triple-arc method, which can apply to almost all fluids, is chosen. In this paper the review results on the principle of triple-arc sensing, the analysis results on the influence on capacitive values due to shape change of sensing part, and the simulation results to monitor the influence on signal sensing according to the location of sensing part in the upper part of propellant tank are included. Information obtained from this study can be used in the designing and manufacturing of on-board propellant level measurement system in tanks.

### 초 록

차기 한국형 발사체의 추진제 수위 측정시스템은 적용하는 추진제의 극저온 환경 및 유량제어 특성을 고려하여 연속적인 정전용량 값 출력이 가능한 정전용량형이 채택될 예정이다. 현재 정전용량형 신호 감지방식은 2전극과 3전극 방식이 있으나 본 연구에서는 측정 정확도를 고려하여 모든 유체에 적용 가능한 3전극 방식을 채택하였다. 본 논문에는 3전극 방식의 감지원리에 대한 고찰 결과 및 감지부의 형상 변화가 정전용량값에 미치는 영향에 대한 분석 결과, 추진제 탱크 상단의 감지부 설치 위치에 따른 신호감지 영향을 확인하기 위하여 시뮬레이션 프로그램을 활용한 결과가 정리되어 있다. 본 연구에서 얻어진 자료는 실제 탱크 내의 추진제 수위 측정시스템 감지부 설계 및 제작에 활용 가능하다.

Key Words: Capacitive type sensor(정전용량형), Sensing part(감지부), Dielectric material(유전체)

\* 한국항공우주연구원 추진제어팀

\*\* (주)레시너코리아

\*\*\* 한국항공우주연구원 추진제어팀

\*\*\*\* 한국항공우주연구원 추진제어팀

연락처, E-mail: msepl@kari.re.kr

### 1. 서 론

우주발사체에서 추진제 충전량은 추진기관의 연소에 필요한 실사용 추진제량과 엔진 종료 후

남은 잔류 추진제량으로 구분할 수 있다. 발사체의 무게를 최적화하기 위해서는 추진기관 연소 종료 후 추진제 탱크에 남아 있는 잔류 추진제가 최소가 되도록 하고 추진제를 최적의 공연비로 연소시키기 위해서는 비행 중에 추진제 탱크 안에 있는 추진제의 양을 정확하게 측정하여 제어하는 시스템이 필요하다[1].

본 연구에서 액체의 수위를 연속적으로 측정하기 위해 정전용량형(capacitive type)타입을 사용한다.

정전용량형 센서가 상용화되어 산업계에 사용되기 시작한지 약 40 여년이 되었다. 이전까지 사용된 정전용량형 센서는 2전극 시스템이며 콘덴서의 전극을 펼쳐 놓아 감지부(sensing part) 주위에 오는 유전체(dielectric material)가 왔을 때 형성되는 전기장의 변화로 인한 정전용량값의 변화를 회로에서 계산하는 방식이었다. 종래의 정전용량형 센서를 개량하여 3전극 시스템을 구성하여 수위를 정확하게 감지하는 방식은 1995년 무렵 독일의 POK[2]에 의하여 제시되었고, KOHLER와 POK[3]에 의해 회로까지 고안하였다. KSR-III 발사체 개발 당시에는 2전극 정전용량형 센서를 이용하여 추진제의 높이를 측정하는 연구를 수행하였다[4]. 그러나 우주 발사체의 추진제와 관련된 감지센서 방식과 제어는 각 나라의 기술 비공개 방침에 따라 자세하게 알 수 없다.

본 연구에서는 3전극 시스템의 구성 및 작동 원리를 설명하고 2전극 시스템과 비교하여 추진제 탱크에 설치했을 때를 가정한 시뮬레이션을 통해 센서 감지부의 최적 설치 장소와 감지부 형상을 고찰 한다. 또한 실제로 센서를 제작하여 설치했을 때 사전 연구 결과가 얼마나 정확했는지를 고찰 한다.

## 2. 수위측정시스템의 감지 원리

### 2.1 2전극 센서의 감지 원리

유전체가 감지부 전극에 근접했을 때 1극과 2극사이의 전기장의 왜곡으로 인하여 정전용량

값이 변화하게 되고 감지된 정전용량값을 R-C 회로를 이용하여 전압이나 전류로 변화시켜 추진제의 높이를 측정하는 방식이다.

### 2.2 3전극 센서의 감지 원리

그림 1에서 보는바와 같이 센서의 감지부가 액체의 탱크 중심에 있을 때 금속 탱크의 내벽 자체가 하나의 거대한 전극으로 만들고 센서의 감지부의 측정 부위는 반대 극성의 전극으로, 측정범위를 벗어나는 부분은 차폐 전극으로 한다. 내벽과 감지부 사이에 전기장이 형성되고 일정한 전압이 걸린다고 하면 액체면이 올라올 때 액체가 부도체(유전체)라고 하면 유전분극에 의해 생기는 전하가 내벽의 전극판과 감지부의 전극판에 모인 전하를 유전상수에 해당하는 정도로 상쇄시키므로 회로부에서 전극판에 공급하는 전압은 액체면이 올라오는 것과 비례해서 감소한다.

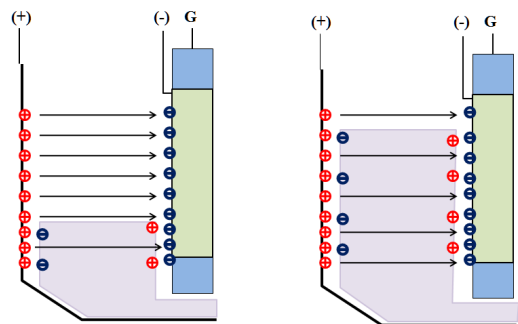


Fig. 1. schematic interpretation of 3-electrode system capacitive sensor

## 3. 수위측정시스템의 감지부 설계

### 3.1 시뮬레이션 프로그램

본 연구에서는 불규칙한 기하학적 모양에도 쉽게 적용 가능한 유한요소법(FEM)을 이용하였다. COMSOL사의 MULTIPHYSICS 3.5는 3차원으로 해석을 할 수 있으나 본 연구에서는 약간 오차가 따르더라도 쉽게 입력하고 시각적으로 살펴 보기에 쉬운 평면도형으로 해석하였다[5].

### 3.2 감지부 형상 설계

발사체의 추진제탱크의 지름이 대략 1 m 정도 이고 감지부 지름이 대략 20 mm 되므로 거의 50:1~100:1 정도의 비례 관계를 가진다. 이런 비례 관계에서 감지부의 형상에 따른 차이가 별로 크지 않다.

감지부의 단면이 원형일 때와 정사각형일 때는 비교하였다. 정사각형의 한 변의 길이는 2 이고 외접하는 원의 반지름( $R_2$ )은 1.414, 정사각형의 둘레와 같은 원주를 갖는 원의 반지름( $R_1$ )은 1.273으로 한다(그림 2).

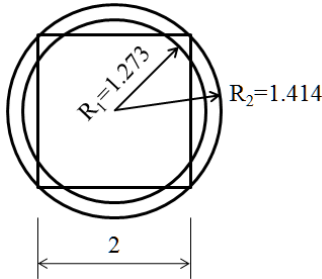


Fig. 2. cross section of various detecting electrodes

공기의 유전상수는  $\epsilon_r = 1$ , LOX는  $\epsilon_r = 1.47$ 이다. 각 전극에는  $V_0 = 5$  (V)로 한다. 각 값은 10-10 (F/m<sup>2</sup>)의 단위를 갖지만 상대적인 비교값을 알아내기 때문에 큰 의미를 가지지 않는다.

	공기	LOX	차이	비고
정사각형	1.0542	1.5497	0.4955	1
원 1	1.0904	1.6029	0.5125	1.0343
원 2	1.1495	1.6897	0.5402	1.0902

원 1은 정사각형과 둘레는 같지만 정전용량값은 탱크의 내벽과 가까운 부분이 높다. 감지부 단면적을 27%, 57% 증가시켜봐야 정전용량값의 증가는 3%, 9%에 불과하다. 따라서 감지부 전극의 모양은 어떤 모양인가이냐가 중요한 것이 아니라 제작할 때 편리한 모양이면 된다.

### 3.3 감지부 위치와 정전용량값

감지전극의 단면적이 증가하고 탱크의 내벽이 가까울수록 정전용량값이 크게 되어 최소유량과 최대유량일 때 정전용량값의 차이가 커지고 측정 조건이 좋아진다. 이번에는 센서의 감지부 단면적을 고정하고 감지부 전극을 내벽에 가까운 곳으로부터 가운데까지 12 지점을 선택하여 정전용량값의 차이를 계산한다. 액체는 LOX로 하여 그림 3과 같이 위치 1인 지점에서 최저유량과 최대유량일 때 등전위면의 모양을 색을 이용해서 나타내었다. 붉은색은 양의 높은 전압을 푸른색은 음의 낮은 전압을 표시한다.

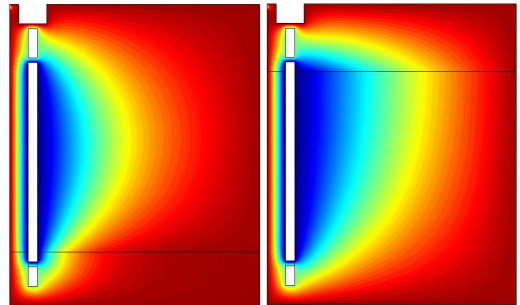


Fig. 3. position 1 of detecting electrode near the internal tank wall at low and high level

액체는 LOX로 하여 그림 4와 같이 정전용량값의 차이는 저장 탱크의 내벽에 가까울수록 크고 가운데로 오면서 점차 낮아져서 거의 1/3 정도로 되었다. 센서의 감지전극 위치는 벽에 가까울수록 더 좋다고 할 수 있다.

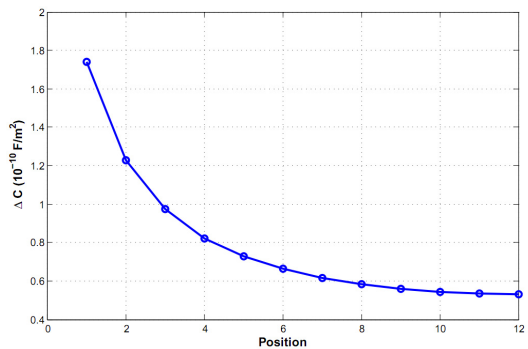


Fig. 4. capacitance difference from position 1 to position 12 (center) by LOX

## 4. 결 론

### 4.1 발사체 추진제 탱크 수위 감지 가능성

3전극 시스템 정전용량형 센서는 수위감지를 하기 위해 기존의 센서를 개량한 형태로 액체의 유전상수에 따른 성질을 이용하여 수위를 측정하는 센서다. 액체의 유전상수 크기가 감지 성능을 좌우하는데 기존의 2전극 시스템 센서에서 유전상수가 1.2 이상에서 최대 90까지 감지가 가능하므로 유전상수 1.47인 LOX를 감지하는데 아무런 문제가 없다.

다만 LOX의 끓는점 온도가 영하 183도가 되기 때문에 센서의 외곽을 구성하는 재료가 극저온을 견디어야 한다. 기존의 2전극 시스템 센서에서는 감지전극과 전자회로 사이가 가까워야 하므로 전자부품들이 극저온 액체의 영향으로 기능이 나오지 않을 수 있다. 이에 반해 3전극 시스템에서는 감지전극 자체가 액체 저장탱크가 되기 때문에 내부에 잠기는 감지전극이 극저온에 견디도록 설계하면 된다. 감지전극과 센서의 전자회로 사이의 거리가 길어져도 감지신호를 처리하는데 문제가 되지 않으므로 극저온 액체의 감지를 위해 최적의 센서라고 할 수 있다.

### 4.2 센서의 감지전극 형태

앞에서 계산한 값을 보면 액체에 잠기는 감지전극의 형태에 따른 정전용량값의 변이는 3전극 시스템에서 탱크와 감지전극 극판 사이의 거리 때문에 큰 차이가 없었다. 즉 감지전극의 모양은 제작에 편리성을 고려하여 선택하면 된다. 현재 판매되고 있는 극저온에 견디는 고분자화합물로 PTFE나 PEEK를 이용하여 센서 감지부를 제작한다. 감지전극은 전도성이 뛰어난 구리를 선택하면 극저온에서 문제없이 견딜 수 있다. 경우에 따라 센서의 감지전극을 탱크에 견고하게 고정시킬 필요성이 있을 때 사각형 막대로 만들 수 있으나 피복으로 사용할 고분자화합물의 모양을 사각형으로 만들려면 제작비가 많이 소요되는 단점이 있다.

### 4.3 센서의 감지전극 위치

시뮬레이션으로 구한 최적의 위치는 센서의 감지전극이 탱크의 내벽에 가깝게 있다. 이렇게 할 경우 감지신호를 처리해야 하는 센서의 회로를 어떻게 구성해야 할지 연구할 필요성이 있다. 예를 들어 너무 강한 신호가 들어올 때 센서의 전자회로가 감당을 하지 못하는 경우가 있어 적당히 신호 값을 감소시키든지 혹은 증폭을 덜 해야 하는 문제가 있을 수 있다.

시뮬레이션 결과대로 센서의 감지전극이 너무 벽 쪽으로 치우치면 액체면의 수위를 충분히 반영하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 내벽 쪽의 수위는 올라갔는데 중심 부분은 아직 올라가지 않거나 액체의 수면이 출렁거릴 때 벽 쪽의 수위가 액체면의 평균 수위를 나타내기에는 문제가 있다.

## 참 고 문 헌

1. 신동순, 한상엽, 조인현, 이웅신, "발사체 추진제 탱크 수위측정 및 제어시스템 기초연구", 한국유체공학회학술대회, 2008, pp. 393~396
2. U. Pok, "Kapazitive Messeinrichtung zur kontinuierlichen Standregelung fuer Medien unterschiedlicher Dielektrizitaetskonstanten", Deutsches Patentamt, DE 195 28 384 A1, 1997.
3. A. Kohler, U. Pok, "Schaltungsanordnung zur Erfassung von Kapazitaetsaenderungen", Deutsches Patentamt, DE 100 27 507 C1, 2002.
4. 이중엽, "액체로켓에서의 추진제 충전량 계측에 관한 연구", 항공우주학회 2002년 추계 학술대회, pp. 1053~1056.
5. COMSOL, "COMSOL Multiphysics MATLAB Interface Guide", COMSOL Reaction Engineering Lab, 2008