

## A Study on Accuracy Improvement in Measuring Liquid Level inside Pressurized Vessels

김 호 열<sup>†</sup> · 변 승 현<sup>\*</sup>  
(Hoyol Kim · Byun Seung-hyun)

**Abstract** - Differential pressure type level measuring systems have been using widely for industrial applications like drum level measurements in power plants. Because of difficulties in specific gravity compensation for vapor and liquid inside the vessel and the sensing lines, this type of measuring systems reveal significant measuring error. In this paper, the major reason causing errors on the differential pressure type level measurement is analyzed and a method of more accurate calculation for specific gravity compensation is introduced.

**Key Words** : Level measurement, Specific gravity, Gravity compensation, Drum level

### 1. 서 론

증기 드럼과 같은 압력 용기의 수위를 검출하는 데 있어서는 고온 고압으로 인해 전극식이나 변위 검출형 수위전송기를 사용하지 못하고 차압식 수위 전송기를 널리 사용하고 있다. 이러한 시스템에서는 내부 증기 및 액체의 비중이 운전 조건에 따라 크게 변하기 때문에 내부 수위를 정확히 산출하기 곤란하며 많은 공장에서는 상당한 오차를 발생하는 가운데 운용이 되고 있다. 또한, 신규 프로젝트에서는 엔지니어들이 수위 검출을 위한 비중 보정커브를 산출하는 것이 매우 곤란하기 때문에 현장 기술자들이 다루기 어려우며, 일반적으로 열역학을 이해하는 고급 계측제어 엔지니어가 증기표를 참조하면서 복잡한 수작업 계산을 반복적으로 수행하여 보정커브를 산출한 뒤 현장에 적용하고 있는데, 현장의 설치 상태가 설계와 다른 경우에 큰 측정 오차를 초래하게 된다.

본고에서는 발전소 보일러의 증기 드럼, 기수분리장치, 급수가열기 및 각종 열교환기 수위를 측정하기 위해서 사용하는 비중량 보정 방법과 보정함수를 보다 정확하게 산출하는 계산방법 및 시스템에 대하여 논하고자 한다. 또한 컴퓨터나 계산용 소프트웨어를 사용한 보정함수 계산방법과 직접 측정법에 대해서도 언급한다.

### 2. 차압식 수위 측정

증기드럼과 같은 포화 용기 내부의 액체 수위(또는 액위) 측정은 압력과 온도가 높아지면 일반적인 수위 측정 장치를

사용하지 못하고 차압식을 사용하고 있는데, 용기의 상부와 하부에 검출 배관을 연결하여 차압을 측정하고 이를 수위로 환산하는 방법이 전통적으로 사용되어 왔다. 이 차압은 운전 조건이나 주위 환경에 따라 다르게 나타나므로 이를 정확하게 보정하여 수위를 환산하는 것이 측정의 관건이다. 이 방식에서는 용기 및 검출 배관 내부에 들어 있는 매체의 종류와 운전 환경에 따라 비중량이 변하는 것을 반드시 보정해야 하는데, 드럼 압력이 증가하면 물의 비중량이 적어지고 증기의 비중량이 커지기 때문으로 예컨대 150kg/cm<sup>2</sup>에서 차압은 대기압 때에 비해 약 1/2 정도로 감소한다. 측정에 영향을 주는 요소는 실제 드럼 수위, 내부 운전 압력과 온도에 따르는 포화수 비중량, 포화 증기 비중량, 외부 기준 칼럼(배관)의 높이 및 주위 온도 등이다.

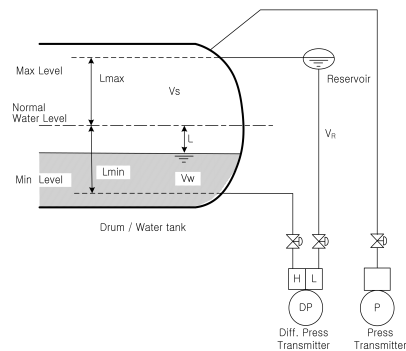


그림 1 차압식 수위 측정시스템  
Fig. 1 Level measurement system

포화 용기의 차압식 수위 측정은 통칭 Wet Leg를 사용하기 때문에 기준 용기(Reference Reservoir) 하부측 배관은 물로 충만 되어 있으며 이 상부 배관과 하부측 배관에서의 차압을 검출하여 수위로 환산한다. 내부 수위가 변동하면

† 교신저자, 정회원 : 한국전력공사 전력연구원 수석전문원  
E-mail : hoyolkim@kepco.co.kr

\* 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원  
접수일자 : 2010년 5월 13일  
최종완료 : 2010년 9월 13일

차압이 변하므로 수위를 환산할 수 있으나, 내 외부 물과 증기의 비중량(비체적의 역수)을 정확히 보정하는 것이 관건이며 차압식 측정시스템 검출배관은 그림 1과 같이 설치된다. [1] [2] [3] [4]

비중량을 고려하면 수위에 따른 차압은 다음과 같다.

$$H = \frac{1}{V_R}(L_{max} - L_{min}) - \frac{1}{V_S}(L_{max} - L) - \frac{1}{V_W}(-L_{min} + L) \quad (1)$$

여기서,  $H$  : 차압(수두),  $V_R$  : 기준 칼럼 압축수의 비체적,  $V_W$  : 내부 포화수의 비체적,  $V_S$  : 내부 포화증기의 비체적,  $L_{max}$  : 최고 측정 수위,  $L_{min}$  : 최저 측정 수위,  $L$  : 수위(정상 기준 수위로 부터의 상대적 거리)이다.

상기 (1)식을 수위에 대해 정리하면

$$L = \frac{-H + \frac{L_{max} - L_{min}}{V_R} - \frac{L_{max}}{V_S} + \frac{L_{min}}{V_W}}{\frac{1}{V_W} - \frac{1}{V_S}} \quad (2)$$

여기서  $V_W, V_S, V_R$ 은 내부 상태(압력, 온도)에 따라 변하기 때문에 포화 상태에서 온도와 일정한 관계를 가지는 압력을 측정하여, 그 압력에서의 용기 내부 포화수와 포화증기의 비중량 및 기준 배관의 압축수 비중량을 구해서 계산하고 그림 2와 같이 보정을 실시한다. DCS[1]에서는 수위를 산출하기 위하여 식(2)와 같은 비중량 보정을 제어로직으로 수행하게 되는데 차압은 대기압일 때 차압 측정 범위를 기준으로 입력되며, 보정되지 않은 수위에 압력에 따라 계산된 바이어스(가산)를 가하고 게인(이득)을 곱하여 보정된 수위를 산출한다.

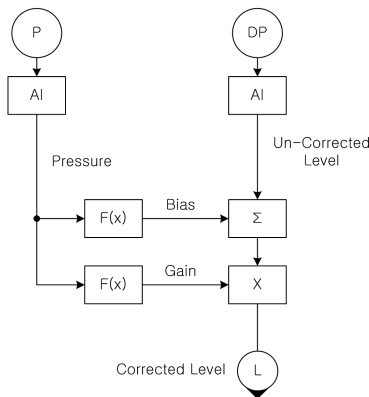


그림 2 비중량 보정  
Fig. 2 Specific gravity compensation

최저 측정 수위를 0으로 하는 시스템에서 비중량을 기준으로 하면 게인과 바이어스는 다음과 같다. [1]

1) DCS : Distributed Control System, Digital Control System

$$Gain = \frac{1}{G_w - G_s} \quad (3)$$

$$Bias = H(G_r - G_s) \quad (4)$$

여기서,  $G_w$  = 물의 비중량,  $G_s$ : 증기의 비중량,  $G_r$ : 기준 배관 압축수 비중량이다.

보정 동작은 가산기와 적산기에 의해 수행되는 데, 이 때 더하는 바이어스 값과 곱하는 게인 값이 압력에 따라 다르기 때문에 비직선 함수발생기(Function generator)에 바이어스와 게인 커브를 프로그램 하여 압력에 따른 연산 값이 나오도록 프로그램 한다.

비중량 보정을 위한 바이어스와 게인 값을 알아내기 위해서는 각 압력에서 물과 증기 비중량(비체적의 역수)을 증기 표에서 일일이 찾아내고 전체 측정 범위에 대한 수두차를 계산하여야 한다. 식(1)에서 세 가지 수위  $L_{min}, L_0, L_{max}$ 에 대해 차압을 구하면

$$H_{min} = \frac{1}{V_R}(L_{max} - L_{min}) - \frac{1}{V_S}(L_{max} - L_{min}) - \frac{1}{V_W}(-L_{min} + L_{min}) = \frac{1}{V_R}(L_{max} - L_{min}) - \frac{1}{V_S}(L_{max} - L_{min}) \quad (1-1)$$

$$H_0 = \frac{1}{V_R}(L_{max} - L_{min}) - \frac{1}{V_S}(L_{max} - L_0) - \frac{1}{V_W}(-L_{min} + L_0) = \frac{1}{V_R}(L_{max} - L_{min}) - \frac{1}{V_S}L_{max} + \frac{1}{V_W}L_{min} \quad (1-2)$$

$$H_{max} = \frac{1}{V_R}(L_{max} - L_{min}) - \frac{1}{V_S}(L_{max} - L_{max}) - \frac{1}{V_W}(-L_{min} + L_{max}) = \frac{1}{V_R}(L_{max} - L_{min}) - \frac{1}{V_W}(L_{max} - L_{min}) \quad (1-3)$$

예를 들어 0~220kg/cm<sup>2</sup>까지 10kg/cm<sup>2</sup> 단계로 23개 압력에서 상, 중, 하 수위에 대해서 69번의 계산을 수행하여 차압을 구하고 구한 차압에 따라 각 압력에서의 게인과 바이어스를 계산할 수 있다.

각 압력에서의 게인은

$$G_{(n)} = \frac{L_{max} - L_{min}}{H_{max(n)} - H_{min(n)}} \quad (5)$$

여기서  $G_{(n)}$  : 압력  $n$ 에서의 게인,  $H_{max}$  : 압력  $n$ 에서  $L=L_{max}$ 일 때의 차압,  $H_{min}$  : 압력  $n$ 에서  $L=L_{min}$ 일 때의 차압이다.

각 압력에서의 바이어스는

$$B_{(n)} = L_{max} - H_{0(n)} \quad (6)$$

여기서  $B_{(n)}$  : 압력  $n$ 에서의 바이어스,  $L_{max}$  : 최고 측정 수위,  $H_{0(n)}$  : 압력  $n$ 에서  $L=L_0$ 일 때의 차압이다.

여기서 측정 수위는 중간지점을 기준으로 상하로 (+) 또는 (-) 수치로 표시하고 있는 것이며, 만약 최소 측정수위인  $L_{min}$ 을 영(0)으로 하는 측정의 경우에 바이어스는 다음과 같이 계산된다.

$$B_{(n)} = -H_{(n)\min} \quad (6-1)$$

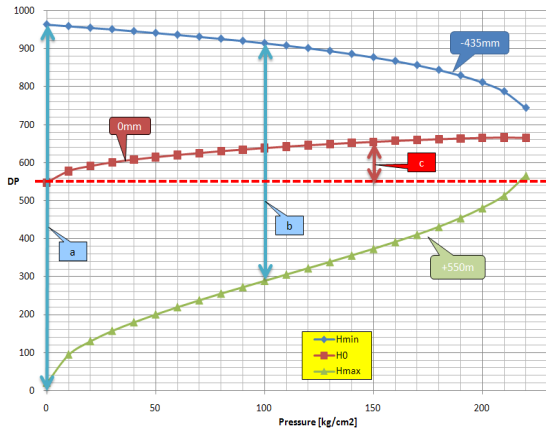


그림 3 압력별 수위 측정 차압의 변화  
Fig. 3 Differential pressures change on each pressure

압력 변화에 따라 물과 증기의 비중량이 변하므로 측정차압은 그림 3과 같이 변화한다.  $L_{max} = 550\text{mm}$ ,  $L_{min} = -435\text{mm}$ 인 경우 기준 상태인 대기압일 때 전체 측정범위(최저 → 최고)간 차압의 변화량 a와 특정 압력에서의 차압 변화량 b 및 중간 수위 0mm에서 차압의 크기는 c로 나타난다. 압력이 증가할수록 전체 수위 측정범위에 대한 차압의 변화가 적게 나타나기 때문에 큰 게인(Gain = a/b)으로 보정해야 하며 수위가 0mm일 때 압력별로 나타나는 차압의 차이에 해당하는 바이어스(Bias = c) 값을 가산해 주어야 정확한 수위가 산출된다.

표 1 압력별 수위에 따른 차압 및 보정 수치  
Table 1 Gain and bias for each pressure

Pressure	$H_{\min}$	$H_0$	$H_{\max}$	Gain	Bias
0	963.954	547.432	20.794	1.044	-2.57
10	959.570	577.664	94.794	1.139	27.66
20	955.218	590.802	130.047	1.194	40.80
30	951.279	600.703	157.446	1.241	50.70
40	946.357	607.917	180.004	1.285	57.92
50	941.655	614.396	200.620	1.329	64.40
60	936.760	620.104	219.734	1.374	70.10
70	931.641	625.239	237.835	1.420	75.24
80	926.361	630.129	255.583	1.468	80.13
90	920.696	634.348	272.299	1.519	84.35
100	914.707	638.368	288.973	1.574	88.37
110	908.425	642.208	305.612	1.634	92.21
120	901.593	645.700	322.158	1.700	95.70
130	894.214	648.943	338.831	1.774	98.94
140	886.173	651.940	355.784	1.857	101.94
150	877.337	654.686	373.172	1.954	104.69
160	867.665	657.304	391.329	2.068	107.30
170	856.774	659.613	410.329	2.206	109.61
180	844.188	661.739	431.056	2.384	111.74
190	829.463	663.728	454.176	2.625	113.73
200	811.467	665.362	480.631	2.977	115.36
210	787.220	666.190	513.164	3.594	116.19
220	743.959	665.342	565.941	5.533	115.34

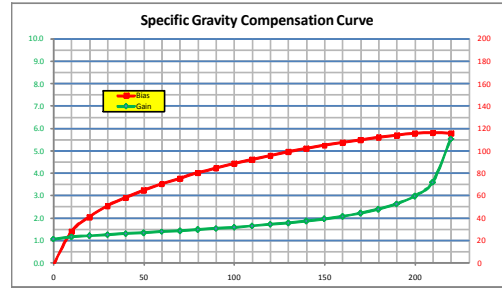


그림 4 게인 및 바이어스 보정 수치 예  
Fig. 4 Gain and bias example

표 1에서는 위와 동일한 조건에서 드럼의 압력변화에 따라 각 수위(최저, 중간, 최고)에 대한 차압을 계산한 결과를 H mmH<sub>2</sub>O로 나타내며 올바른 측정값을 위해 보정해야 할 게인 및 바이어스 값을 나타내고 있다. 그림 4에서는 이 게인과 바이어스를 디지털 제어시스템에서 보정할 때 함수 발생기(Function Generator)에 입력하는 커브로 보여주고 있다.

### 3. 수위보정 오차 발생

상기 수위보정은 검출배관 상하부 설치 높이가 측정범위와 일치하는 것을 전제로 한다. [1] [2] [3] [4] 예를 들어 측정범위가 +300mm, -350mm일 때 상부검출 배관은 +300mm 위치에 그리고 하부 배관은 -350mm 위치에 설치되어야 오차가 생기지 않는다. 그러나 실제 현장에서는 검출 배관의 높이가 측정 범위와 일치하지 않아 큰 오차를 유발한다. 예를 들어, 발전소 증기드럼의 경우 상부 측 검출배관이 설계보다 높게 설치되어 측정오차가 -100mm 이상 발생한 경우가 있는데 ±500mm 정도의 측정범위에 비하면 상당히 큰 오차이다. 이처럼 검출배관의 높이를 맞추는 것이 중요하지만, 용접 작업이나 현장 여건에 따라 어렵기 때문에 수위 측정오차가 발생하는 중요한 요인이 된다.

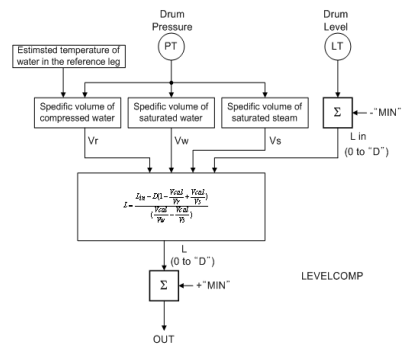


그림 5 에머슨 수위 보정 알고리즘  
Fig. 5 Level compensation from Emerson

복잡한 보정커브를 어렵게 산출하여 비직선함수로 프로그램 하는 수고를 덜기 위하여 현대의 디지털 제어 시스템에서는 그림 5와 같이 단일 기능 블록(Function block)으로 수위 측정을 위한 모든 보정이 이루어지게 하는 경우가 있다.

에머슨사의 수위 자동보정 블록에서는 차압과 압력(정압) 신호를 받으면 자동 비중보정이 되어 수위가 산출된다. 이 기능블록을 사용하면 복잡한 수동 작업에 의존했던 게인 및 바이어스의 계산이 필요 없다. 내부 액체의 종류에 따라  $V_{cal}$ 을 설정하고 측정범위 Max와 Min을 입력하면 수위가 계산되어 나온다. [2] 그러나 이것도 측정범위와 검출장치의 설치 높이가 같은 것을 전제로 연산하기 때문에 항상 바른 측정 결과를 내어 주지는 못한다.

#### 4. 비중량 보정의 개선

이런 수위 측정 한계를 극복하기 위하여, 새로운 보정 계산 방법을 제시한다. 이것은 그림 6에서와 같이 수위 측정 범위와 검출 배관의 높이를 다르게 ( $D1 \approx L_{max}$ ,  $D2 \approx -L_{min}$ ) 즉, 검출 배관의 설치 높이를 자유롭게 정하여 비중량 보정을 정확하게 계산하는 새로운 방법이다.

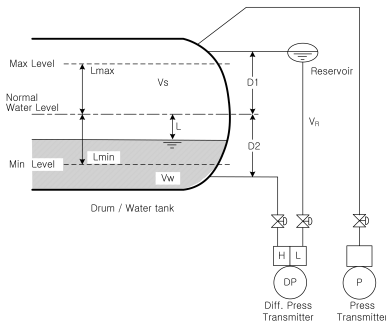


그림 6 측정시스템 개선  
Fig. 6 Improvement on level measurement

그림 6의 환경에서 차압은 다음과 같다.

$$H = \frac{1}{V_R}(D_1 + D_2) - \frac{1}{V_S}(D_1 - L) - \frac{1}{V_w}(D_2 + L) \quad (7)$$

여기서,  $D1$  : 정상 기준 수위로부터 상부배관까지의 높이,  $D2$  : 정상 기준 수위로부터 하부배관까지의 높이다.

세 가지 수위  $L_{min}$ ,  $L_0$ ,  $L_{max}$ 에 대해 차압을 구하면

$$H_{min} = \frac{1}{V_R}(D_1 + D_2) - \frac{1}{V_S}(D_1 - L_{min}) - \frac{1}{V_w}(D_2 + L_{min}) \quad (7-1)$$

$$H_0 = \frac{1}{V_R}(D_1 + D_2) - \frac{1}{V_S} D_1 - \frac{1}{V_w} D_2 \quad (7-2)$$

$$H_{max} = \frac{1}{V_R}(D_1 + D_2) - \frac{1}{V_S}(D_1 - L_{max}) - \frac{1}{V_w}(D_2 + L_{max}) \quad (7-3)$$

이것을 식 (1-1), (1-2), (1-3)과 비교하면 모든 항에서 차이가 남을 알 수 있다. 즉, 비중량 보정을 위하여 게인과 바이어스 수치를 계산할 때 압력 별로 최저 측정치, 최고 측정치 및 기준 수위에서의 차압을 (7)식으로 구하면  $D1 \approx L_{max}$ ,  $D2 \approx -L_{min}$ 이기 때문에 계산된 차압이 식 (1)에서 부정확하게 계산된 값과 달라진다.

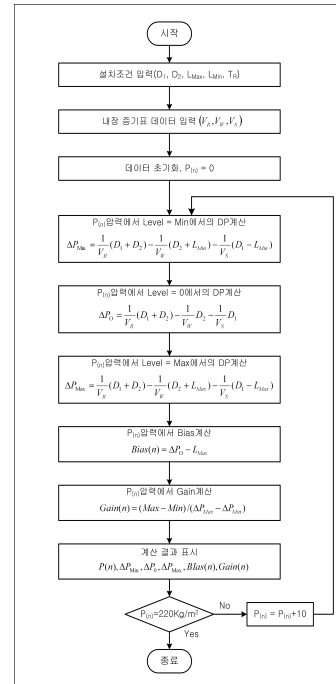


그림 7 비중량 보정 계산  
Fig. 7 Calculation flow

아직까지 제어 시스템 제작사에서 표준 라이브러리로서 모든 현장 설치조건을 만족하는 정확한 보정기능을 제공하지 않기 때문에 바이어스와 게인을 정확히 산출하는 연산 프로그램을 작성하였다. 수작업으로 증기표상에서 액체와 기체의 압력별 비중량을 일일이 찾아내어 수십 번의 반복 계산을 통하여 바이어스와 게인을 복잡하게 구하던 것을, 쉽고 정확하게 처리하는 것이 가능하다. 플랜트를 설계할 때 측정범위가 정해지지만 실제 건설 과정에서 수위 검출배관의 높이가 달라지는 일이 많기 때문에 수위 측정오차가 생기는 것에 효과적으로 대처할 수 있다.

프로그램은 Excel과 독립 실행프로그램으로 작성이 가능하였으며, 압력별 포화수, 포화증기 및 압축수에 대한 비체적은 표준 증기표의 데이터를 그대로 이용하여 프로그램에 내장하였다. 설치조건으로 측정범위와 검출배관 설치위치 및 기준배관 주위온도를 입력하면, 게인 및 바이어스 계산을 반복한다. 게인과 바이어스 값을 시스템에 입력하면 측정시스템이 완성된다.

제어시스템과 독립적인 수위 측정 장치를 제작하기 위해서는 식(2)가 사용되어 왔지만, 역시 측정범위와 검출배관 높이가 다른 경우는 다음과 같은 계산식으로 수위를 정확히 계산해 낼 수 있다.

$$L = \frac{-H + \frac{D_1 + D_2}{V_R} - \frac{D_1}{V_S} - \frac{D_2}{V_w}}{\frac{1}{V_w} - \frac{1}{V_S}} \quad (8)$$

여기서,  $D1$  : 정상 기준 수위로부터 상부배관까지의 높이,  $D2$  : 정상 기준 수위로부터 하부배관까지의 높이다.

새로운 계산 방법을 적용한 경우의 오차 개선에 대한 사례를 살펴보면 운전압력에 따라 그림 8처럼 변한다. 배관 높이가 30mm 차이가 날 때 운전압력에 따라 최소 31mm에서 최대 173mm까지의 오차를 개선한다. 실제로 신규 건설된 국내 발전소에서 검출배관 설치 높이에 따른 오차가 100~150mm 이상 발생된 것이 확인되었다. 이렇게 측정 오차가 커지는 것은 높은 압력에서는 내부 액체의 비중이 낮으므로 높은 계인이 적용되기 때문이다.

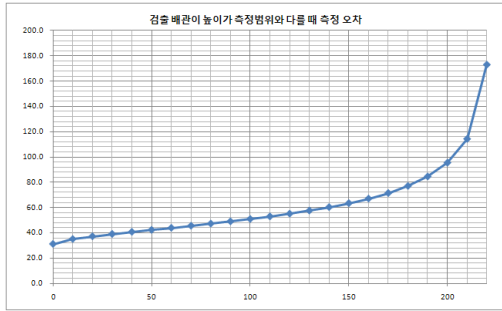


그림 8 배관 오차 30mm일 때 압력별 측정오차  
Fig. 8 Error resulted from 30mm deviation

### 5. 결 론

고온 고압용기에 사용되는 차압식 수위 검출장치는 용기 내부 및 검출배관의 액체와 기체의 비중이 운전 조건에 따라 변하기 때문에 비중 보정 문제로 상당한 오차를 발생하는 경우가 많으며, 엔지니어나 기술자들이 정확한 보정커브를 산출하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 계산 및 비중량 보정 방식의 문제점은 측정 범위와 검출배관의 설치 위치 차이와 기준 배관의 주위 온도 등에 따라 보정해야 하는 수치가 변하기 때문이다.

본고에서는 고급 엔지니어가 복잡한 수작업 계산을 반복적으로 수행하여 산출하였던 비중량 보정 데이터 산출을 간단하고 신속히 수행하는 방법을 보여주고 있으며, 현장 설치 조건이 변한 경우에도 새로운 계산법에 의해 측정의 정확성을 높여주기 때문에 수위 전송기의 현장 설치 방법에도 많은 유연성을 제공하여 준다. 새로운 계산 및 보정 방법을 실제로 사용하여 내부를 들여다 볼 수 없는 증기드럼에서 수위 측정 오차를 100 mm 이상 시정된 사례들이 있다.

이 방법을 이용하면 발전소 보일러의 증기 드럼, 기수분리장치, 급수가열기 및 각종 열교환기 등과 같은 저장 용기의 내부 수위를 보다 정확히 측정하고 제어함으로써 공정을 효율적으로 운전할 수 있으며, 수위 불안정에 따른 기기의 손상이나 폭발 등의 재해로부터 인명과 재산을 안전하게 보호할 수 있을 것으로 기대한다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김응석, 이주현, 이광훈, “보일러 드럼 수위 보정에 대한 고찰”, 자동화 제어시스템 공학회, Proceedings of 13th KACC, 1998
- [2] Emerson Process Management, “Ovation Algorithms Reference Manual REF\_1100”, pp. 247-248, May, 2009
- [3] John E. Hewson, “Process Instrumentation Manifolds”, Instrument Society of America, pp. 174-178, 1981
- [4] Sam G. Dukelow, “The Control of Boilers” 2nd Edition, Instrument Society of America, pp. 190-191, 1991

### 저 자 소 개



#### 김 호 열 (金 好 烈)

1990년 인하대학교 대학원졸업(공학석사)  
1995년 한국전력공사 본사 선임전문원  
2008년~ 전력연구원 수석전문원  
제어시스템 진단과 튜닝기술 개발 종사



#### 변 승 현 (邊 昇 炫)

1992년 연세대학교 전기공학과 졸업  
1994년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(석사)  
1994년~현재 한전전력연구원 선임연구원  
관심분야는 제어 시뮬레이션, 제어기 튜닝