



## LNG 터미널 유량 보정 방법 개발

이상호 · 이철진 · 임영섭 · 박찬샘\* · \*한중훈

\*서울대학교 화학생물공학부

(2010년 1월 4일 접수, 2010년 11월 9일 수정 2010년 12월 22일 채택)

## Development of LNG Terminal Flow Rate Data Reconciliation Method

Sang Ho Lee · Chul Jin Lee · Young Sub Lim · Chan Saem Park\* · \*Chong Hun Han

\*Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received 4. January. 2010, Revised 9. November. 2010, Accepted 22. December. 2010)

### 요 약

국내의 LNG 터미널은 일반적으로 대형화 되어있다. 그런데 이런 대형화된 터미널의 안전한 관리를 위해서는 전 시설에 대한 온도 관측이 필요하며 따라서 터미널 내 모든 시설에는 온도센서가 다수 존재한다. 하지만 터미널의 운영, 관리 및 안전사고 예방을 위해서 또 파악해야 하는 정보 중 하나가 유량인데 보통 부족한 경우가 많다. 그런데 배관의 온도 정보는 유량과 밀접한 관련을 맺고 있고 이를 통해 유량은 몇 가지 가정을 통해서 쉽게 추산할 수 있다. 이렇게 발생된 유량 데이터는 오차를 갖고 있을 수 있기 때문에 이를 정상상태 데이터 보정(steady state data reconciliation)을 활용하면 보다 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 이러한 LNG 터미널 데이터 보정 방법에 대해 설명하고 사례연구를 통해 얼마나 신뢰성 있는 데이터를 제공하는지에 대해서 기술하고자 한다.

**Abstract** - Especially in Korea, LNG terminals commonly have huge scale because of the high demand of natural gas, and for the safe operation of terminal wide observation on temperature is necessary. That is the reason why the terminal has thermometer all over the facility but another information, flow rate, is insufficient. By the way, in pipeline, temperature difference is highly related with flow rate and with some simple assumptions, we can estimate flow rate. And through the steady state data reconciliation, the flow rate data become more reliable. In this research, we will study about flow rate data reconciliation method for LNG terminal and case study.

**Key words** : flow rate data reconciliation, temperature-flow rate correlation, steady state simulation, LNG pipeline, LNG terminal,

### 1. 서 론

LNG 터미널은 생산, 수송, 저장, 분배의 단계로 이뤄지는 LNG 산업에서 선박이나 배관을 통해 수송된 LNG를 저장하고 수요에 따라 기화하여 소비자에 공급하는 기능을 담당하고 있다. 특히 우리나라에서는 지역적 특성으로 말미암아 LNG의 수

송이 대부분 선박을 통해 이뤄지고 있으며 수요의 변화가 계절에 따라 두드러지게 나타나기 때문에 저장시설의 규모가 크며 그 예로 수도권의 도시가스 공급을 담당하고 있는 인천 LNG 인수기지의 경우 저장용량만 2,680,000m<sup>3</sup>에 이르며 그 면적이 44.5만평에 달한다[1].

이런 거대한 규모로 인해 LNG 터미널에는 필연적으로 다량의 배관을 설치하는데 이때 배관의 안전성을 확보하기 위해서는 배관 내 유체의 유동상황이나 물성에 대한 정확한 파악에 필요한 온도나

\*주저자:chhan@snu.ac.kr

압력, 유량 센서 등을 직접 설치해야 한다. 하지만 이 센서 설치에 있어서 두 가지 문제가 존재하게 되는데 첫째는 여러 종류의 센서를 원하는 곳에 모두 설치하기에는 비용의 부담이 너무 커진다는 점이며 둘째는 제한된 수준의 센서만 설치하더라도 그 수가 워낙 많기 때문에 운전원 들에게는 오류가 발생한 센서를 찾는 것조차 쉽지 않은 일이라는 점이다. 이 문제점들은 특히 LNG 하역 배관에서 도드라지게 나타나는데, 하역 배관 내부의 LNG는 항상 약 -160℃ 가량의 초저온 상태를 유지해야 하기 때문에 하역 배관에는 온도 센서가 반드시 설치되어야 하고 또한 배관을 충분히 냉각할만한 양이 흘러가는 지나 각 저장탱크로 잘 분배되고 있는지를 파악하기 위한 유량센서도 필요하지만 실제 터미널에서는 대부분 유량 센서는 거의 없이 수 백개의 온도센서 만을 설치하고 있는 상황이다. 따라서 센서의 오류를 정확하게 찾아내며 센서를 통해서 만으로는 측정할 수 없는 변수에 대해 예측하는 방법이 제안된다면 터미널의 안전성 향상에 큰 도움을 줄 것이다.

이를 위해 본 연구에서는 LNG 터미널에서 쉽게 얻을 수 있는 배관 내 온도센서의 값들과 배관의 정보를 이용해서 배관을 따라 흐르는 유량을 열전달 해석을 통해 유추하고 그 결과를 정상상태에 기반한 질량균형에 도입하여 보정하여 신뢰성 있는 유량을 예측하며 온도 센서의 오류를 판단하는 방법을 제안하고자 한다.

## II. 배경 이론

본격적인 연구의 방법론 전개에 앞서 먼저 본 방법론을 구성하는 이론에 대해 언급하고자 한다. 본 방법론은 크게 두 가지 과정을 토대로 이루어졌다고 할 수 있는데 그 첫째는 온도 데이터를 통해 유량데이터를 예측하는 과정이며 둘째는 예측된 유량 데이터를 질량균형식을 통해 보정하는 과정이다. 이 각각의 과정들에 대한 이론적 배경은 아래와 같다.

### 2.1. 온도를 이용한 유량 예측

먼저 온도를 이용하여 유량을 예측하는 과정은 배관 내의 LNG는 외부와의 열교환을 통해 가열되는 현상을 해석하는 것에서 출발할 수 있다. 배관을 흐르는 유체와 배관 외부와의 열 교환은 이미 많은 연구가 되어 있는데[2] Fig. 1과 같은 배관 내의 유체 흐름 상황에서의 열교환 현상은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Q_H = wC_p(T_o - T_i) \tag{1}$$

$$h = \left( \frac{1}{r_o h_o} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{k^i} \ln \left( \frac{r_i}{r_{i-1}} \right) + \frac{1}{r_n h_n} \right)^{-1} \tag{2}$$

$$Q_o = 2\pi L(T_a - T_b) \cdot h \tag{3}$$

$$W = \frac{2\pi L(T_a - T_b) \cdot h}{C_p(T_o - T_i)} \tag{4}$$

(1)식은 열량 유입으로 인해 일어나는 유체 내 온도 변화에 대해 정의한 것이며 (2)식은 복합재 배관의 열전달계수, (3)식은 복합재로 둘러싸인 배관 안에서 내부와 외부의 열교환을 표현한 식이다. (1)식과 (3)식에서의 열량은 내부 상변이나 화학 반응 등의 추가적 열량 변화 요인이 없을 때 같다 할 수 있으므로 (4)식과 같이 정리할 수 있다. 결과적으로 배관의 크기와 재질, 길이, 외부 온도 요인이 고정되었다고 가정했을 때, 배관에 흐르는 유량은 온도변화와 직접적 관계를 지닌다는 것이다. 그런데 일반적인 터미널에서는 배관 길이, 크기, 외부 온도, 재질 등의 고정 정보들이 이미 확보된 상태이기 때문에 온도 센서간의 온도차 정보만 알고 있어도 그 센서 사이를 흐르는 유량에 대해서 알 수 있게 된다. 따라서 배관 정보가 확보된 부분에 대해서 온도를 얻게 되면 각 온도 센서 사이로 흐르는 유량을 계산할 수 있는 것이다. 또한 이 역도 성립하기 때문에 유량으로 온도도 역추산할 수 있으며 유량이 보정되고 난 후에 이를 통해 온도를 역추산, 원래의 온도 데이터와 비교하면 센서의 오류도 확인할 수 있을 것이다.

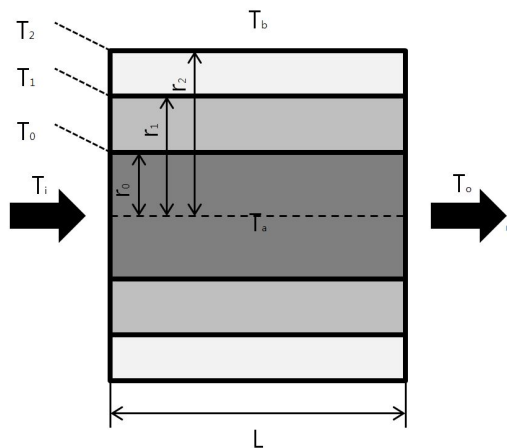


Fig. 1. Heat transfer through composite pipe.

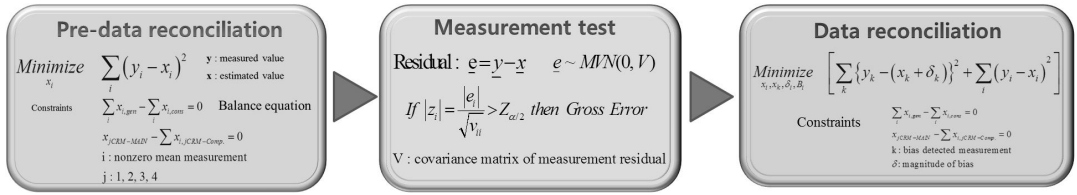


Fig. 2. General data reconciliation process.

2.2. 유량을 이용한 데이터 보정

화학공정에서 발생하는 데이터를 보정하는 방법은 매우 다양하다. 통계적인 방법을 응용하여 데이터만으로 오류를 찾아내어 보정하거나 이론 모델을 세워서 보정하는 방법 모두 이용되고 있는데 본 연구에서는 질량균형 관계를 이용하여 유량을 보정하고자 한다. 이 방법은 앞의 방법들과 비교하면 상대적으로 단순하며 정상상태를 가정한 상태에서 높은 정확도를 보인다고 할 수 있다[3-4]. Fig. 2에서는 데이터 보정의 개요에 대하여 나타나 있는데 간략히 설명하자면, 그림에서처럼 앞에서 얻은 유량 값과 각 유량 사이의 관계를 통해 질량균형식을 세우고 그 식을 항상 만족하는 것을 조건으로 하여 추정된 값과 보정된 값의 차이가 최소가 되도록 최적화를 진행하는 것이다. 이렇게 보정을 하고 난 값이 추정값과 큰 차이를 보여서 센서 자체에 이상이 있다고 판단되는 경우에는 별도의 제거과정을 통해 추정된 값을 아예 무시한채로 다시 같은 과정으로 보정을 한 후 주변의 값을 통해 역추산할 수 있으며 결과적으로 질량균형을 만족하는 유량을 확보할 수 있다. 이 최적화는 센서를 통해 검출된 데이터의 측정오차를 보정함과 동시에 mass balance를 충족시켜 합리적인 데이터를 얻을 수 있으며 데이터가 존재하지 않는 영역에서도 신뢰성 있는 데이터를 제공한다.

III. 유량 예측 및 보정 알고리즘

앞의 이론을 바탕으로 하여 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 유량 예측 및 보정 알고리즘을 설계, 사례 연구를 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 먼저 터미널 배관에서 발생하는 온도데이터를 수집하면 앞의 (4)식을 전개하여 온도 센서 사이의 배관 특성을 대입하고 센서 사이로 흐르는 유량을 예측한다. 이렇게 얻은 유량 정보와 사전에 입력된 Mass balance table을 이용하여 질량균형식을 제약 조건으로 두고 예측값과 측정값의 차이를 최소화 하는 최적화를 수행하여 보정된 유량을 얻고 보정

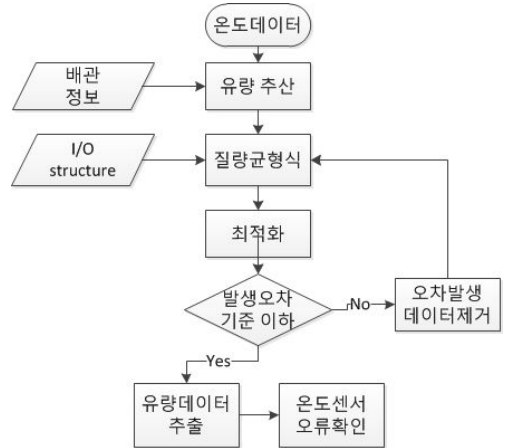


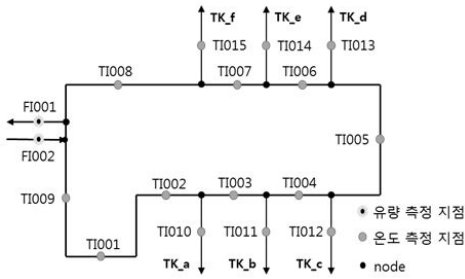
Fig. 3. Algorithm for flow rate estimation and reconciliation.

된 유량의 특정 부분이 원 데이터와 큰 차이를 보일 경우 이 데이터를 제외한 나머지 데이터로 다시 최적화를 수행한다. 제외된 데이터는 최적화가 완료된 후 주변의 유량을 이용하여 역추산하며 이 부분의 온도 데이터를 총괄오차를 보이는 오류로 보고한 후 최종적으로 모든 부분에 대한 유량을 얻게 된다.

IV. 사례연구

3.1. 실험 조건 및 원본 데이터

앞에서 제안한 방법론을 검증하기 위해 본 연구에서는 LNG 터미널 배관에서 발생한 데이터를 이용하여 온도에서 정확한 유량을 얻을 수 있는지, 그리고 온도에 오류가 있을 경우 보정이 잘 이루어지며 온도가 존재하지 않는 부분에서도 유량을 잘 예측하는지를 실험하였다. 사례연구의 대상은 Fig. 4와 같은 6개의 저장탱크로 분배되는 가상의 하역 라인인데 실제 터미널에서와 같이 인입부에서 측정하는 유량센서를 제외하고 각 탱크로 분배되는



**Fig. 4.** Hypothetical LNG unloading pipeline for the case study.

유량도 전혀 측정하지 못하는 상황을 반영하였다. 다만 배관 내 여러 부분에서 온도를 측정하고 그 측정 간격은 일정하며 배관의 물성치는 국내 모 LNG 저장 시설의 자료를 기반으로 하였다.

실험의 대상 온도 데이터는 위의 사례 연구 대상에 실제 터미널 운전 조건을 반영한 가상의 운전 시나리오를 ASPEN 사의 공정모사 소프트웨어인 HYSYS로 모사한 결과물 데이터에서 실제 터미널 운영 시에 얻는 데이터와 같은 포인트의 온도 데이터를 이용하였다. 그런데 이 발생한 온도 데이터로 얻는 유량은 정상상태의 질량균형이 완벽하게 성립하기 때문에 생성된 온도 데이터 셋에 측정오차를 반영하여 섭씨  $\pm 0.5$ 도 안의 임의의 오차를 첨가하였다.

또한 실제로 센서를 통해 얻을 수 있는 인입부의 유량은 본 사례연구에서는 이용하지 않고 오직 온도 센서에서만 데이터를 얻을 수 있는 상황으로 가정하였다.

**3.2. 결과 및 해석**

Table 1은 본 방법론의 Input 데이터와 중간 처리 데이터, 최종적으로 발생하는 데이터를 나타내고 있다. Table 1의 2열에는 각 태그 별 온도 데이터가 나타나 있는데 실제 터미널 운영시 데이터 시스템을 통해 얻는 원본데이터가 이와 같은 형태가 될 것이다. 이 온도값쌍을 앞의 배경에서 언급한 (4)식의  $T_a, T_b$ 에 각각 대입하면 3열의 보정 전 유량 값을 얻는데 이 값과의 차이가 최소이면서 동시에 각 node에 대한 질량균형식들을 만족할 수 있는 값이 4열이다. 이 값은 질량균형식을 제약조건으로 하여 3열의 유량과의 차이의 제곱 값들의 합이 최소인 최적화를 excel solver로 풀어서 얻을 수 있다. 5열의 유량은 시뮬레이션을 통해 얻은 ideal한 상황의 데이터로, 2열의 태그 온도 데이터는 이 ideal case의

**Table 1.** Temperature and Flow rate data of normal state case study.

Tag #	Temperature	Flow rate	Flow rate	Flow rate	Error	Error	
		(estimated)	(reconciled)	(ideal)	(est-i de)	(rec-i de)	
TI001	TI001_1	-156.7	18868	19106	19434	2.91	1.69
	TI001_2	-156.5					
TI002	TI002_1	-156.5	18877	19106	19434	2.87	1.69
	TI002_2	-156.3					
TI003	TI003_1	-156.3	15118	15311	15547	2.76	1.52
	TI003_2	-156					
TI004	TI004_1	-156	13619	13768	13993	2.67	1.61
	TI004_2	-155.7					
TI005	TI005_1	-155.7	12270	12375	12593	2.57	1.74
	TI005_2	-155.4					
TI006	TI006_1	-155.4	9832	9908	10075	2.41	1.65
	TI006_2	-155					
TI007	TI007_1	-155	9058	9054	9269	2.28	2.32
	TI007_2	-154.6					
TI008	TI008_1	-154.6	7262	7224	7415	2.06	2.58
	TI008_2	-154.1					
TI009	TI009_1	-156.9	18860	19106	19434	2.96	1.69
	TI009_2	-156.7					
TI010	TI010_1	-156.3	3812	3795	3887	1.93	2.35
	TI010_2	-155.3					
TI011	TI011_1	-156	1548	1543	1555	0.47	0.77
	TI011_2	-153.5					
TI012	TI012_1	-155.7	1399	1393	1399	0.05	0.44
	TI012_2	-146					
TI013	TI013_1	-155.4	2488	2467	2519	1.20	2.06
	TI013_2	-153.9					
TI014	TI014_1	-155	858	854	806	6.40	6.01
	TI014_2	-150.6					
TI015	TI015_1	-154.6	1844	1830	1854	0.50	1.28
	TI015_2	-152.5					

**Table 2.** Temperature and Flow rate data of abnormal state case study.

Tag #	Temperature	Flow rate	Flow rate	Flow rate	Error	Error	
		(estimated)	(reconciled)	(ideal)	(est-i de)	(rec-i de)	
TI001	TI001_1	-156.7	18868	18994	19434	2.91	2.27
	TI001_2	-156.5					
TI002	TI002_1	-156.5	18877	18994	19434	2.87	2.27
	TI002_2	-156.3					
TI003	TI003_1	-156.3	15118	15180	15547	2.76	2.36
	TI003_2	-156					
TI004	TI004_1	-156	13619	13633	13993	2.67	2.57
	TI004_2	-155.7					
TI005	TI005_1	-155.7	12270	12235	12593	2.57	2.85
	TI005_2	-155.4					
TI006	TI006_1	-155.4	9832	9972	10075	2.41	1.02
	TI006_2	-155					
TI007	TI007_1	-155	9058	9116	9269	2.28	1.65
	TI007_2	-154.6					
TI008	TI008_1	-154.6	7262	7279	7415	2.06	1.84
	TI008_2	-154.1					
TI009	TI009_1	-156.9	18860	18994	19434	2.96	2.27
	TI009_2	-156.7					
TI010	TI010_1	-156.3	3812	3814	3887	1.93	1.89
	TI010_2	-155.3					
TI011	TI011_1	-156	1548	1547	1555	0.47	0.49
	TI011_2	-153.5					
TI012	TI012_1	-155.7	1399	1398	1399	0.05	0.09
	TI012_2	-146					
TI013	TI013_1	-155.4	700	2262	2519	72.2	10.1
	TI013_2	-150					
TI014	TI014_1	-155	858	856	806	6.40	6.27
	TI014_2	-150.6					
TI015	TI015_1	-154.6	1844	1837	1854	0.50	0.90
	TI015_2	-152.5					

온도에  $\pm 0.5$ 도 안의 가상 측정오차를 더하여 만들어졌으며 이 방법론의 성능을 평가하기 위하여 6, 7월에는 각 단계를 거친 유량이 실제의 유량과 얼마의 차이를 나타내는지 표기하였다.

Table 2는 Table 1의 사례에서 온도 센서에 오류가 발생, 잘못된 데이터를 얻었을 때도 유량을 올바르게 예측할 수 있는지를 평가하기 위한 사례의 데이터를 담고 있다. Table 2에서 TI013 부분은 output 부분의 온도에 오류가 발생한 부분인데 Table 1에서의 값보다 약 3도 가량 높은 값을 보이고 있으며 이는 유량을 계산할 때도 오차를 발생시킨다. 그러나 이후의 보정과정에서 이 오차는 걸러져서 최종적으로 실제 값에 10%정도의 차이만을 보이게 된다.

최종적으로 먼저 언급한 정상 사례에서는 보정 후 유량과 실제 유량이 평균적으로 약 1.96%의 차이를 보이는 것으로 나타났으며 센서 고장 사례에서도 평균오차는 약 2.59%로 유량의 추측이 매우 잘 이루어지는 것을 볼 수 있었다. 특히 고장 사례에서 유량을 잘못되게 추측하였음에도 이를 고장으로 인식, 데이터를 무시하고 다른 부분을 통해 역산하였기 때문에 보정 전처럼 오차가 다른 센서로 퍼져나가는 현상도 거의 없음을 볼 수 있었다.

## V. 결 론

앞의 두 사례에 대한 연구를 통해 LNG 터미널에서 발생하는 온도 데이터 만으로도 유량을 추측하거나 온도 센서에서의 오류를 검증하는 것이 잘 이루어짐을 관찰할 수 있었다. 특히 앞의 사례에서는 온도에 약 0.5도 가량의 측정오차를 감안하고 모사하였는데 실제 터미널의 온도 센서의 측정관계는 그보다 훨씬 작기 때문에 본 방법론을 터미널 배관의 온도 데이터를 이용해 적용했을 때 보다 높은 정확성을 가진 유량을 얻게 될 것이다. 또한 본 사례연구에서 사용하지 않았던 확보된 유량정보를 이용할 경우에 유량정보의 신뢰도에 따라서 유량의 추가적인 보정이 가능하기 때문에 정확도는 더욱 향상이 가능하다. 다만 본 방법론에서 가지는 근본적인 약점으로 배관 내 상황에 대한 정상상태를 가정했기 때문에 실제 대형 터미널에서 발생하는 데이터를 적용할 시에 다소 부정확한 결과가 발생할 수 있는데 이런 점은 추후 dynamic data reconciliation 이나 각 센서의 time delay 를 개별적으로 반영하는 등의 방법을 통해 개선이 가능할 것이다. 또한 이렇게 보완된 방법론을 프로그램화 시켜서 실제 터미널에서 발생하는 데이터 베이스에 연결한다면 추후 터미널을 운영하는 작업자에게도 새

로운 도움을 줄 수 있는 데이터를 제공하게 되어 안전성 향상과 기타 여러 부분에 도움을 줄 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 ETI (2007-M-CC23 -P-05-1-000), 건설교통부 플랜트기술 개발 (08 Gas Plant B03) 과제의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] 국토해양부, 한국건설교통기술평가원, *가스플랜트 사업단 상세기획*, 국토해양부 한국건설교통기술평가원, (2008)
- [2] Stanley Middleman, *An Introduction to Mass and Heat Transfer: Principles of Analysis and Design*, John Wiley & Sons, (1997)
- [3] Heui-Seok Yi, Jeong Hwan Kim and Chonghun Han, "Industrial application of gross error estimation and data reconciliation to byproduction gases in iron and steel making plants", International Conference on Control, Automation and Systems, October 16-19, 2002, Muju, Korea.
- [4] Lee, Moo-Ho, Kim, Jeong-Hwan, Chonghun Han, Chang, Kun-Soo, Kim, Seong-Hwan, You, Sang-Hyun, "Data reconciliation and optimization of utility plants for energy saving", 한국에너지공학회 1997년도 추계학술발표회 논문집, pp.17-23, (1997)