

# 유량측정 정확도 향상을 위한 연구동향

박 경 암  
한국표준연구소 유량연구실



● 1953년생  
● 전자부품 냉각 및 비동열전달을 전공하였으며, 유량계측분야 및 전자장비내의 열전달에 관심을 가지고 있다.

백 중 승  
한국표준연구소 유량연구실장



● 1948년생  
● 유량계측 및 비뉴턴 유체의 유동특성 연구에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리 말

국민소득의 증가와 중화학공업의 비약적 발전으로 도시가스, 석유류, 각종 용수의 소비가 급격하게 증가하고 있다. 원유, 액화 천연가스 등 에너지원의 수입 증가는 국제수지를 악화시키고 있으며 산업발전의 부산물로 수질이 오염되어 수자원이 고갈되고 있다. 수자원을 보호하고 에너지를 절약함은 물론 생산성 제고와 원가절감으로 국내 제조업체의 경쟁력을 강화하기 위해서는 생산공정에 연속 투입되는 각종 원료와 용수, 그리고 에너지량을 정밀, 정확하게 측정하고 제어해야 한다. 특히 투입되는 유체가 고가이거나 그 양이 방대하면 측정 정확도를 0.5%만 향상해도 경제적 파급 효과가 막대하기 때문에 한국 가스공사, 수자원공사, 정유회사, 석유화학 관련 산업체에서는 유량측정 정확도 향상을 통하여 에너지 절약과 공정한 상거래로 인한 부당한 이익이나 손실을 막으려고 하고 있다.

파이프내의 유량측정을 위해서 고안된 유량

계 중에서 오래된 것은 19세기 말부터 천연가스 유량측정에서 사용된 오리피스 유량계(orifice meter)이다. 오리피스 유량계와 같이 유량계 전후에서 측정된 압력차의 제곱근에 유량이 비례하는 차압식 유량계가 산업체에 가장 많이 사용되고 있다. 차압식 유량계로는 오리피스, 벤튜리, 노즐 등 유량계가 있다. 유량계의 출력(pulse 신호 또는 전압 등)이 유량과 비례하는 선형 유량계(linear flowmeter)로는 터빈 유량계(turbine meter), 와류유량계(vortex meter), 전자기 유량계 등이 있다. 최근에 개발된 유량계 중에는 유동장 내부의 잡음신호를 두 지점에서 초음파로 감지하여 상관관계식을 구함으로써 평균유속을 결정하는 것도 있고 유동방향에 따른 초음파의 통과시간 차이나 도플러(doppler) 효과 정도를 측정하여 평균유속을 결정하기도 한다.

유량계 선정을 위한 기준이 표 1에 유량 측정범위(4:1 혹은 10:1)와 사용 가능한 유체의 종류, 개략적인 사용 최대온도 및 압력, 최소 레이놀즈 등의 변수로 주어져 있다<sup>(1)</sup>. 또한 표 1에는 유량계 입구의 유속분포가 완전히 발달

달되어 있는 경우 (fully developed flow) 유량 계를 교정하지 않고 사용할 때 발생 가능한 최대 오차가 오리피스 유량계는 약 1~2%이고, 초음파 유량계는 약 5% 정도라고 표시되어 있

으나 이는 유량계 선정에 필요한 가이드일 뿐 측정오차는 유량계를 표준시스템으로 교정하지 않는 한 알 수 없는 경우가 대부분이다. 더구나 실제 현장에서는 밸브(valve), 엘보

표 1 유량계 선정가이드<sup>(1)</sup>

유량계	관직경 (mm)	기체						사용온도 (°C)	사용 압력 (kPa)	예측 정확도 (미교정)	레이놀스 수
		청정	불순물포함	점성	불순물포함	부식성	슬러지				
사용영역 4 : 1											
오리피스								-30~120	41,000		
직각날 (Square edge)	>40	G		G		N	N			±1~2%	>2000
사분원형 (Quadrant)	>40			G	G	N	N			±2%	>200
편심 (Eccentric)	>50	N	G	N		G	N			±2%	>10,000
반원형 (Segmental)	>100	N	G	N		G	N			±2%	>10,000
환형 (Annular)	>100	N	G	N		G	N			±2%	>10,000
타겟 (Target)	>12-100	G	G	G	G	G	N			±1.5~5%	>100
벤투리	>50	G	N	G	N	N	N			±1~2%	>75,000
노즐	>50	G	N	G	N	N	N			±1~2%	>10,000
로-로스 (Lo-Loss)	>75	G		G			G			±1.25%	>12,500
피토판	>75	G		G	G		N			±5%	-
애뉴바 (Annubar)	>25	G		G			N	±1.25%	>10,000		
엘보	>50	G	N	G		N	N	±4.25%	>10,000		
선형영역 10 : 1											
전자기	25-1800			G	G	G	G	180	10,500	±0.5~1%	-
적산식	>300	G		G			N	120	10,000	±0.5~1%	≤8000cS
터어빈	6-600	G		G			N	-268~260	21,000	±0.5~1%	≤2~15cS
초음파											
시간차법	>12			G	N		G	-180~260	-	±1~5%	-
도플러	>12					N	G	-180~120	-	±5%	-
면적식	<75	G		G	G		N	200	2,400	±0.5~1%	-
와 (vortex)	40-400	G	N	G			N	200	10,500	±0.75~1.5%	>10,000

(비고) G : 사용에 적합, N : 사용 가능 cS : Centi Stoke

(elbow), 티(tee) 등 파이프 연결부등에서 스월(swirl), 2차유동(secondary flow), 비대칭 유속분포, 확관이나 축소관 후방의 중심축에서 유속이 커지는 것들이 혼합되어 유량계 설치 위치에서 완전하게 발달된 유속분포를 얻을 수 없는 경우가 많다.

본 글에서는 유량계 설치 위치에서 완전하게 발달된 유속분포를 얻기 위해 flow conditioner에 관한 연구와 현장조건에서 유량계를 교정하는 방안 등 유량측정 정확도를 향상시키기 위해 최근의 연구동향에 관하여 논하고자 한다.

## 2. 유량측정관련 연구와 규격의 문제점

유량제로 유입되는 유체의 유동특성은 유량 측정 정확도에 크게 영향을 주는데 그 정도는 유량계와 종류에 따라 다르다. 유량측정표준 시스템(그림 1)에서는 유량제로 유입되는 유체가 완전하게 발달된 이상적 유동상태를 발생하기에 충분한 길이의 직관부를 갖도록 설계되어 있다. 그러나 표준 시스템에 의해 교정된 유량계가 사용되는 현장에서는 유체의 물성 또는 유동특성이 표준 시스템과 다른 경우가 대부분으로서 이것은 측정오차가 커지는 주요 원인이 된다. 현재로서는 이에 대한 정량적인 예측은 매우 어렵기 때문에 최선의 대책은 현장에 설치한 유량계 상류측에 충분한 길이의 직관부를

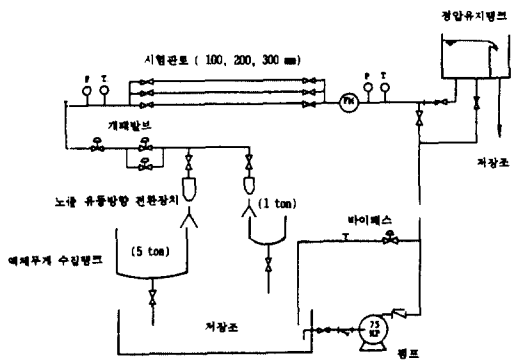


그림 1 한국표준연구소의 액체 표준시스템

확보하거나 flow conditioner를 설치하여 상류측에서 발생하는 유동교란이나 유속분포 변형을 교정하여 이상적인 유동조건에서 유량계를 사용하고, 또 유량계 교정시에 현장 유체와 비슷한 물성의 유체를 사용하는 것이다.

차압식 유량계의 경우와 같이 오랜 기간에 걸쳐 상당 양의 데이터가 축적된 경우에는 ISO, ASME, API, AGA 등 기구에서 발행하는 규격서에 유량계 제작사양은 물론 이상적인 유동을 발생하는데 필요한 직관부의 최소길이, flow conditioner 제작사양 및 최적설치 위치, 측정방법에 대한 제반 권고 사항들이 있다<sup>(2,3)</sup>. 그리고 규격서에서 제시하는 권고사항에 충실하게 따르는 경우 규격서의 허용오차 범위에서 유량측정 정확도를 보장 받을 수 있다고 생각

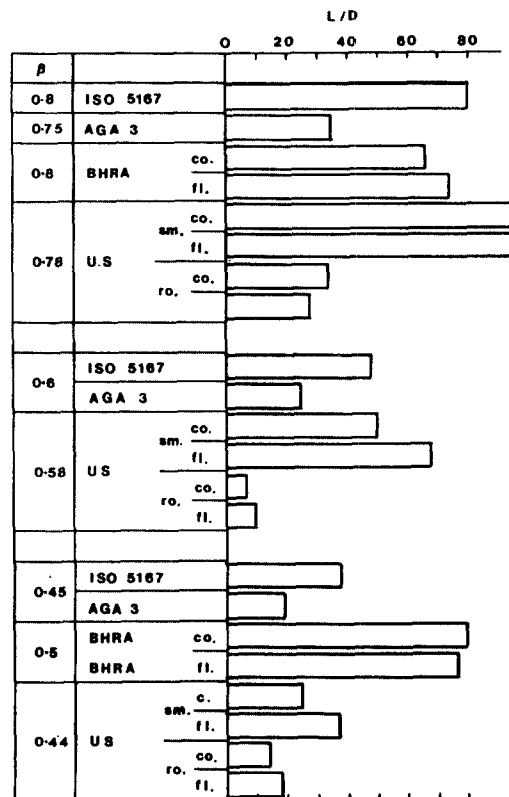


그림 2 오리피스 유량계 상류측에 2개의 엘보가 90°로 접하는 두 평면상에 설치된 경우 최소 직관부 길이<sup>(4)</sup>

되어 왔다. 같은 맥락에서 터빈미터, 전자기 유량계 등 차압식이 아닌 유량계들에 대한 규격제정 노력도 계속되고 있다.

그러나 차압식 유량계중 가장 보편적인 오리피스 유량계의 상류측에 유량측정에 큰 오차를 발생할 수 있는 배관형태로서 90°로 접하는 두 개의 엘보가 두 평면상에 설치되어 있는 경우 그림 2와 같이 이상적인 유동조건 확보에 필요

한 최소 직관부 길이에 대한 ISO와 AGA에서 권고가 2배정도 다르며 영국의 BHRA나 US (University of Surry)의 연구결과들이 또 다르다<sup>(4)</sup>. 그리고 직관부의 관내 표면거칠기에 따라서 필요한 최소직관부 길이가 달라져 표면거칠기의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 파이프 배관 형상에 따라 이상적인 유동조건 확보에 필요한 최소 직관부 길이에 관한

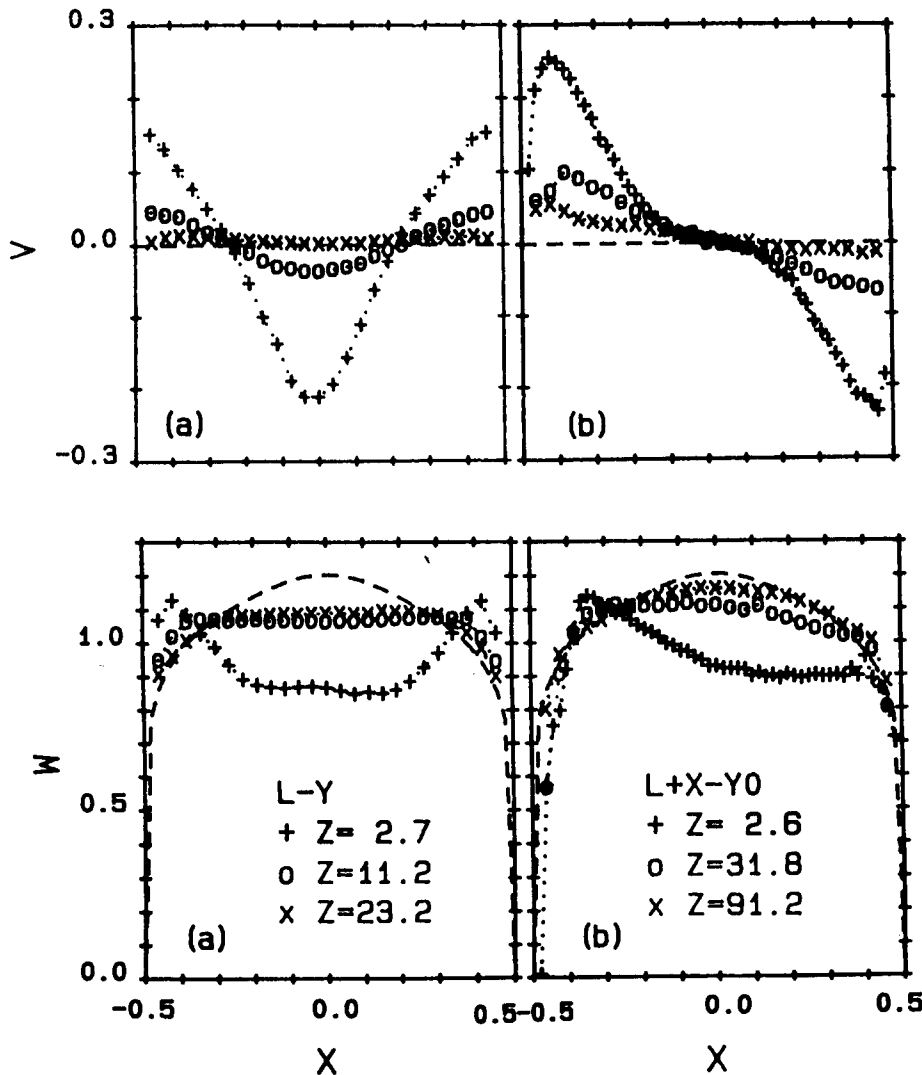


그림 3 엘보 1개 설치된 경우 (a)와 2개의 엘보가 90°로 접하는 두 평면상에 설치된 경우(b)의 접선방향속도( $V$ )와 축방향속도( $W$ ), 점선은 완전히 발달된 유속분포<sup>(5)</sup>

연구는 물론 관내의 상대표면 조도와 최소 직관부 길이의 관계에 관하여 발표된 자료를 정리하고 데이터를 보충하는 연구가 필요하다.

미국 NIST(national institute of standards and technology)에서는 유량계 상류측에 1개의 엘보가 존재하는 경우와 2개의 엘보가 서로 다른 평면상에 존재할 때 LDV를 사용하여 엘보에 의해 발생하는 스웰(swirl)의 거동을 엘보로부터의 거리의 함수로 관찰하였다<sup>(5)</sup>.

엘보 상류측에는 80D의 직관부를 확보하여 엘보로 유입되는 유체가 완전하게 발달한 이상적인 유속분포를 갖도록 하였으며 레이놀즈 수  $10^4 \sim 10^5$  범위에서 벽면 거칠기가  $3\mu\text{m}$  이하(상대 거칠기  $6.25 \times 10^{-3}\%$ )인 시험 관로에서 실험하였다. 유속분포 측정결과는 측정지점 상류측에 1개의 엘보만이 존재할 때의 유속 분포상태를 엘보로부터의 거리함수로 나타내면 그림 3(a)와 같고, 다른 평면상에 설치된 2개의 엘보가 존재하는 경우는 그림 3(b)와 같다. 그림 4는 스웰 각 변화를 엘보로부터의 거리의 함수로 나타낸 것인데 1개 엘보에 의한 스웰 각은 엘보로부터 20D후방에서 90%이상 감쇄되나 2개의 엘보에 의해 발생하는 스웰의 감쇄 속도가 훨씬 늦다. ISO규격에서는 유량계 설치지점에서 스웰 각이 2도 이하이어야 한다고 규정하고 있는데 이를 만족시키는 거리는 엘보로부터 각각 약 11D와 88D이다. 반면 ISO와 AGA-ANSI/API에서 이상적인 유동상태를 확보하는데 필요하다고 권고하는 직관부 길이는 각각 36D와 13.5D이다. 그림 5는 두 가지 경우에서 발생하는 스웰이 오리피스 유량계에 미치는 영향을 각각 거리의 함수로 나타낸 결과들이다.

최근 EC, API, AGA는 지금까지 규격 제정에 사용되어 온 실험데이터가 보다 객관적이고 신뢰성이있는 오리피스 유출계수(Cd)의 예측에 필요한 실험식을 유도하기에 충분하지 않았다는 결론에 도달하여 공동으로 새로운 데이터베이스(data base) 구축을 위한 공동연구를 수행하고 있다. 그 결과 AGA-ANSI/API 2530

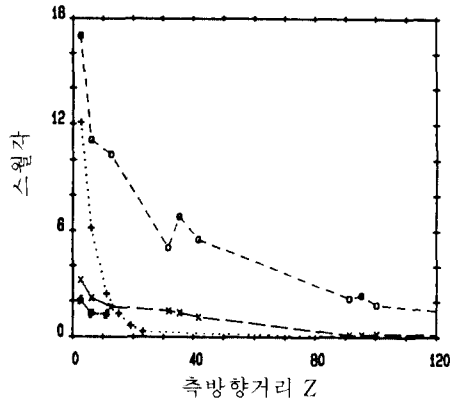


그림 4 엘보 1개 설치된 경우 최대스웰 각(+), 엘보 2개가 90°로 접하는 두 평면상에 설치될 때 엘보 사이가 0인 경우(0), 2.4D인 경우(X), 5.3D인 경우(#)의 최대 스웰각<sup>(5)</sup>

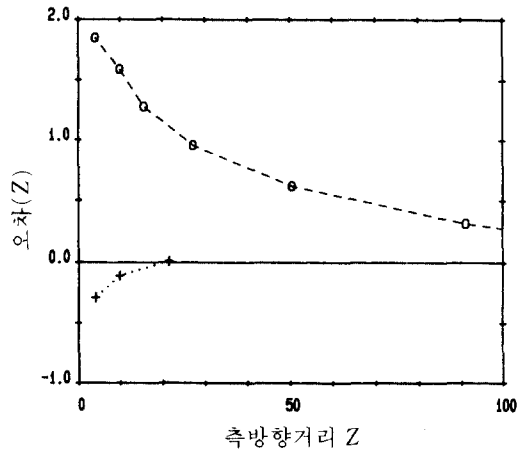


그림 5 엘보 1개가 설치된 경우(+), 엘보 2개가 90°로 접하는 두 평면상에 설치된 경우(0)에 엘보로부터 거리가 터빈 유량계 특성에 미치는 영향<sup>(5)</sup>

과 ISO 5167에서 권장하고 있는 Stoltz방정식 대신 RG방정식을 제안하여 1988년 11월 New Orleans에서 개최된 북미와 EC의 유량측정 전문가 공동회의에서 만장일치로 받아들여져 규격중 이 부분의 개정을 위한 작업이 진행중이다.

AGA-ANSI/API 규격이나 ISO 규격에서 권

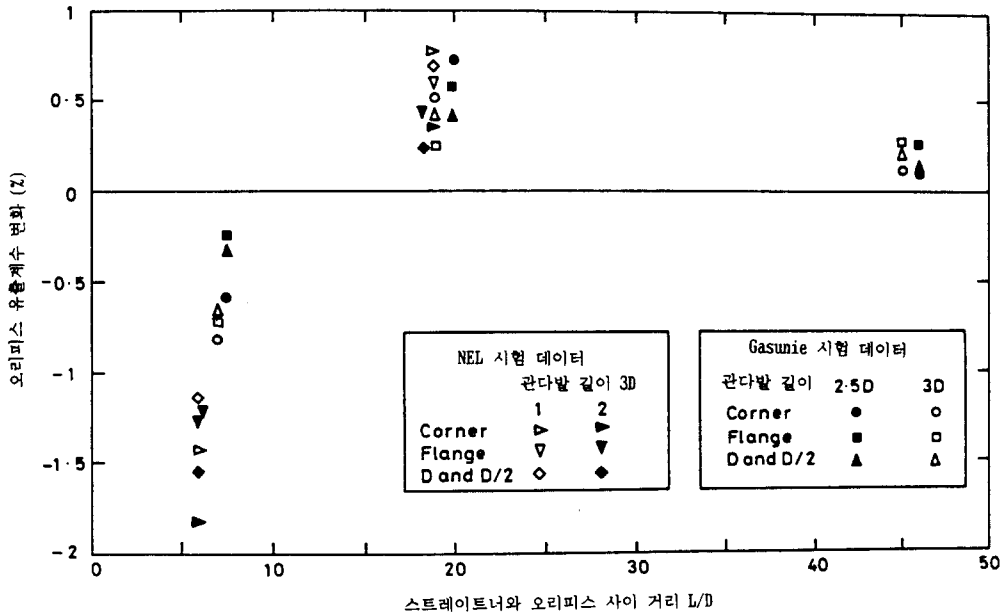


그림 6 관다발형 flow straightener의 하류거리가 관직경 100mm, 조임비 0.75 오리피스 유량계의 특성에 미치는 영향<sup>(6)</sup>

고하고 있는 flow conditioner의 최적 설치 위치가 서로 다를 뿐만이 아니고, 어느 규격을 따르더라도 때에 따라서는 측정 오차를 오히려 증가시킨다는 연구결과들이 발표됨에 따라 이 부분에 대한 규격개정의 필요성도 깊이 인식되고 있다. 영국의 NEL에서는 이상적인 유속분포를 갖는 유동장에서 관 다발형태(tube bundle)의 flow conditioner설치 위치를 오리피스 상류 6D, 22D, 45D지점으로 바꾸어 가면서 오리피스 유출계수, Cd값 변화를 관찰하였는데 그림 6에서 보는 바와 같이 AGA-ANSI/API에서 권하는 6D지점이나 ISO에서 권하는 22D 지점 모두에서 오리피스 유출계수에 상당한 영향을 미친다는 결과를 얻었다<sup>(6)</sup>. 이는 두 지점 모두 flow conditioner설치에 적합하지 않아 flow conditioner 때문에 야기되는 유동장 교란에 의한 영향이 유량측정 결과에 미치고 있음을 의미한다. 미국의 Southwest Research Institute에서도 비슷한 실험 결과를 얻었다.

### 3. 오차감소 방안과 연구동향

유량측정 정확도를 향상시킬 수 있는 방안으로는 현장 사용 상태에서 유량계를 교정하는 것과 유속 분포가 완전히 발달된 상태에서 유량을 측정하는 것이다. 정유회사들은 현장에서 유량계를 교정하기 위하여 파이프 푸루버(pipe prover)를 사용하고 있다. 푸루버의 기본원리는 그림 7과 같이 유체가 불이나 피스톤을 밀어서 지나간 기본부피(basic volume)와 시간을 측정하여 유량계의 지시치와 비교하는 것이다. 푸루버 종류는 그림 7과 같이 체적이 작은 소형 푸루버(small volume prover)와 기본부피가 큰 볼 푸루버(ball prover)로 구분할 수 있다<sup>(7)</sup>. 산업체 현장 중 많은 경우 푸루버를 설치할 수 있는 공간이 없거나 수자원공사의 경우와 같이 검증대상이 대용량 유동일 때에는 푸루버 사용에 제한을 받는다. 또한 검증대상 유체가 기체인 경우에는 상용화된 파이프 푸루

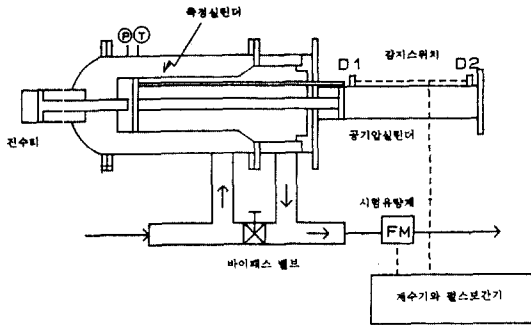


그림 7 소형 푸루버 (small volume prover)<sup>(7)</sup>

버가 없기 때문에 EC에서는 1988년 경에 6개의 소닉노즐(sonic nozzle)을 병렬로 연결하여 6개의 노즐을 조합할 수 있는 소닉노즐 बैं크(sonic nozzle bank)로 현장에서 천연가스 유량계를 교정할 수 있는 이동식 검증시스템을 제작하였다. 고도의 정확도를 유지하고자 하는 경우에 푸루버나 소닉노즐 बैं크로 현장에서 유량계를 교정할 수 있으나, 유량계의 용량이나 현장 상황에 따라 현장에서 유량계를 교정할 수 없는 경우가 많다.

유속분포가 완전히 발달된 상태에서 유량을 측정할 수 있는 방안으로는 ISO, AGA, 최근의 연구결과를 참조하여 유량계 상류에 최소 직관부를 설치하는 것과 flow strainer를 설치하여 유속분포를 완전히 발달시키는 것이다. 이러한 목적에 이상적인 유동조건이나 몇몇 특정 설치 조건에서의 허용오차 크기만을 제시하고 있는 기존의 규격서는 유량계 교체에 따른 유량측정 정확도 향상 정도를 추정하는데 큰 도움이 못 된다. 더구나 현대와 같이 산업기술이 급격하게 발전하고 있는 상황에서 모든 유량계를 대상으로 가능한 모든 설치 및 유동조건에서 유량계를 실험한 후 새로운 규격을 계속 생산해 내는 것은 비현실적이다.

따라서 최근에는 LDV, CTA, 유동 가시화 기법에 의한 유체역학적 실험과 전산 유체역학적 연구를 수행하여 비이상 파이프 유동발생 기구를 규명하고 제어하기 위한 노력이 시작되

고 있다. 이러한 노력이 성공하여 배관형상이나 기타 여러 가지 이유로 발생하는 스웰과 같은 유동교란, 그리고 유동속도 분포 변형정도를 정량적으로 예측할 수 있을 것으로 기대한다. 이 경우 제한된 범위에서 실시한 유량계 실험데이터만으로도 비이상적인 유동특성이 유량측정 결과에 미치는 영향을 예측할 수 있게 될 뿐 아니라 현재 논란의 대상이 되고 있는 flow conditioner의 설계개선과 최적 설치위치에 관한 문제도 효과적으로 해결할 수 있게 될 것이다.

#### 4. 맺음 말

유량측정 정확도를 1~2% 정도 원하는 경우 ISO, AGA 등 규격서에 제시한 직관부 길이나 flow strainer를 설치하면 얻을 수 있으나 측정 정확도를 더욱 향상시키기 위해서 최소 직관부길이, straightener의 설계 개선과 최적 설치 위치에 관한 연구와 규격보완을 위한 연구가 진행중이다. 현장에서 유량계를 교정할 수 있는 검증시스템으로 석유특유의 경우에 푸루버가 사용되고 있으나 현장 검증시스템의 용량과 측정 정확도의 향상을 위한 연구가 진행중이고, 천연가스의 경우에는 EC에서 소닉노즐 बैं크를 제작하여 시험중에 있다.

#### 참고 문헌

- (1) Miller, R.M., 1983, "Flow Measurement Engineering Handbook," McGraw-Hill, New York.
- (2) AGA Report 3 1990, "Orifice Plate Discharge Coefficient".
- (3) ISO 5167, 1980, "Measurement of Fluid Flow by means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-section Conduites Running Full".
- (4) Mottram, R.C. and Rawat, M.S., 1986, "The Swirl Damping Properties of Pipe

- Roughness and the Implications for Orifice Meter Installation," Proceeding of International Conference on Flow Measurement in the Mid 80's, paper 6.1.
- (5) Mattingly, G.E. and Yeh, T.T., 1990, "Flowmeter Installation Effects due to Several Elbow Configurations," Proceedings of 2nd International Symposium on Fluid Flow Measurement, pp. 271~283.
- (6) Smith, D.J.M., "The Effects of Flow Straighteners on Orifice Plates in good flow conditions," Proceedings of International conference on flow measurement in the Mid 80s, Vol.1, pp. 5~3.
- (7) 백종승, 임기원, 1987, "이동식 유량검증 시스템 개발", 한국표준연구소, KSRI-87-42-IR.



■ 국제학술대회 참가 안내 ■

The Fourth International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-4)

장소 : Hlonolulu, Hawaii, USA

일시 : 1992년 4월 5일~4월 8일

초록 및 논문 제출처 :

Dr. J. H. Kim

Electric Power Research Institute 3412 Hillview Ave

P. O. Box 10412

Palo Alto, California 94303, USA

주제 : 回轉機械의 熱·流體傳達現象과 動力學, 진동, 制御에 관한 工學的 문제

\* 초록은 500단어 이내로 작성하여 3부를 1991년 8월 말까지 제출할 것

연락처 : 한국과학기술원 기계공학과 현재민 (02) 966-1931, 교환 3625