ETV 프로그램과 Filter media의 올바른 선택

정 연 홍
<고어코리아>

1. 서 론

Cement Kiln에 있어서 분진 배출농도(Particle Emission 이하 PM이라고 함)를 최저의 수준으로 유지하면서 운전의 조건을 경제적으로 유지하는 것이 경쟁력 확보에 있어서 매우 중요한 요소이다. 이러한 요구조건을 충족시키기 위해서는 Cement Kiln에서 널리 사용되는 Pulse-Jet Bag filter 비롯한 Air Pollution Control System을 최적의 조건으로 운전을 해야할 필요가 있다. Filter Media는 Bag Filter에 있어서 매우 중요한 요소이기 때문에 이를 선정함에 있어서도 각별한 주의가 요구되며 많은 다양한 제품이 소개되고 있는 실정이다. 이러한 점은 시장의 상황은 사용자로 하여금 선택의 폭을 넓힐 수 있게 하였다 하지만 공장특성에 맞는 최적의 제품을 선정하는데 있어서 혼란을 야기하는 것도 주지의 사실이 되었다. 무엇보다도 Bag filter media는 낮은 압력손실을 유지하면서 가장 좋은 효율과 우수한 Air Flow를 제공함은 물론 장시간에 걸쳐 우수한 성능을 유지하는 것이 매우 중요하다. 어떠한 Filter media가 이러한 요구조건에 부합하는지에 대한 정보를 사용자에게 제공하고 사용자는 이를 활용하여 올바른 판단을 할 수 있게끔 하기 위하여 미국 환경청(the United States Environmental Protection Agency)는 환경기술의 평가 프로그램(Environmental Technology Verification Programme : US EPA ETV programme)의 절차를 수립하고 수행하고 있다.

2. Background

지난 십여년간, Cement산업에 있어서 Cement Kiln으로 부터의 분진 배출 문제를 관리하기위하여 전기 집진기(ESP)를 대신하여 Pulse Jet Bag Filter를 설치하고자 하는 중요한 경향이 있어 왔다. 또한 분진 배출농도에 대한 엄격한 법규정으로 인하여 이러한 경향은 심화되었다. 이러한 경향은 발전된 Pulse Jet Bag Filter의 제작기술과 Filter Media의 성능향상이 결합되어 공정시스템의 전반적인 성능향상에 크게 기여 하게 되었다. 이러한 개선의 한 부분에 Expanded Polytetra fluoroethylene (ePTFE)에 의한 표면여과 기술이 자리잡고 있으며 Membrane filter bag을 사용하려는 경향도 점차 증가하고 있다. 이러한 경향에 부합, 배출분진의 총량뿐만 아니라 2.5㎛(PM2.5) 이하의 미세분진 배출량도 중요한 관리항목의 하나가 되었다. US EPA ETV programme를 본격적으로 거론하기 이전에 Filtration에 잇어서 큰 두가지 흐름인 Conventional Filter에 의한 심층여과방식(Depth Filtration)과 Membrane filter에 의한 표면여과방식(Surface filtration)에 대해서 알아 보도록 한다.

3. 심층여과방식(Depth Filtration)

심층여과 방식의 원리는 2단계 Dust Cake를 이용하는 것이다. 즉, 1단계로 [Figure1]에서 보는 바와 같이 직포나 부직포의 틈새나 단층에 형성되는 1차 Dust Cake가 있는데 이는 Filter Media가 최초상태에 비해 보다 효율적인 Filtration기능을 도와 준다. 2단계는 1차 Dust Cake위에 형성되는 2차 Dust Cake이다. 1차 Dust Cake는 분진(PM)을 포집하는데 기여하며 분진의 배출을 일정수준으로 유지하는데 기여한다. 2차Dust Cake는 Filter media전단과 후단의 압력손실의 증가(차압증가)를 야기한다. 압력손실을 최소한도로 유지시키기 위하여 2차 Dust Cake는 주기적으로 제거되어야 한다. 그렇지만 지나친 2차 Dust Cake의 탈진은 1차 Dust Cake층을 방해해서 분진 배출농도가 증가시키는 현상과 더불어 부직포나 직포의 Fiber나 Yarn의 약화를 초래한다. 이는 1차적으로 Fiber간의 마모와 Dust에 의한 Fiber의 마모를 심화시킨다.

Fig 1. Cross-section of conventional non-membrane fibreglass fabric

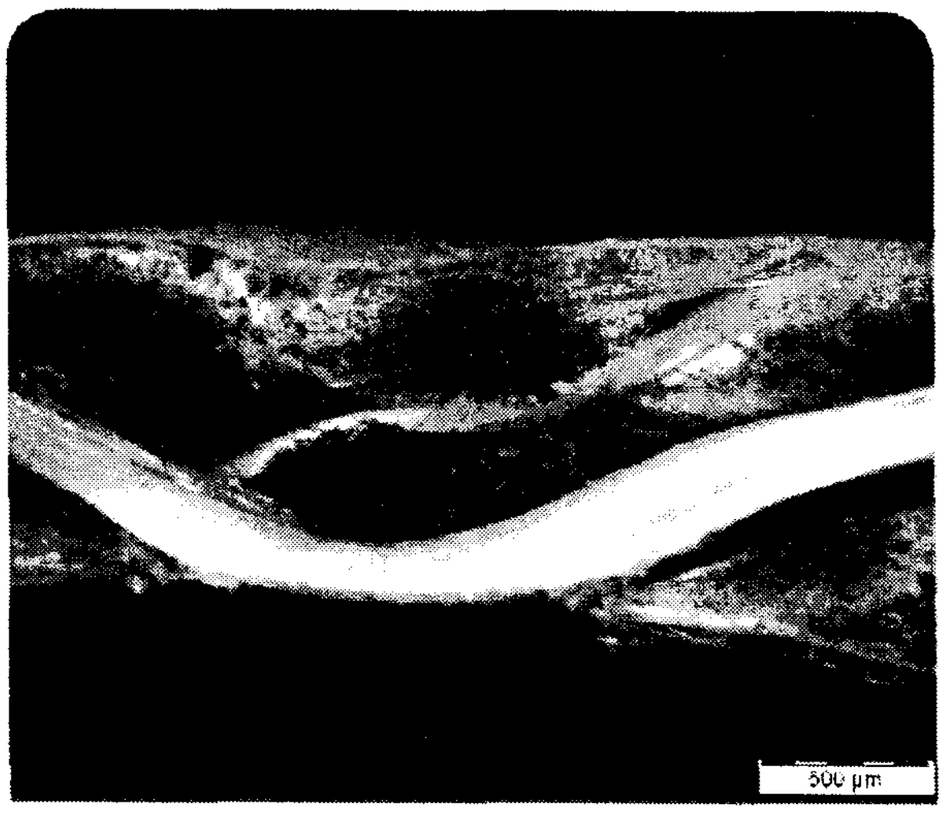


Fig 2. Cross-section of GORE™ membrane laminated to woven fibreglass fabric

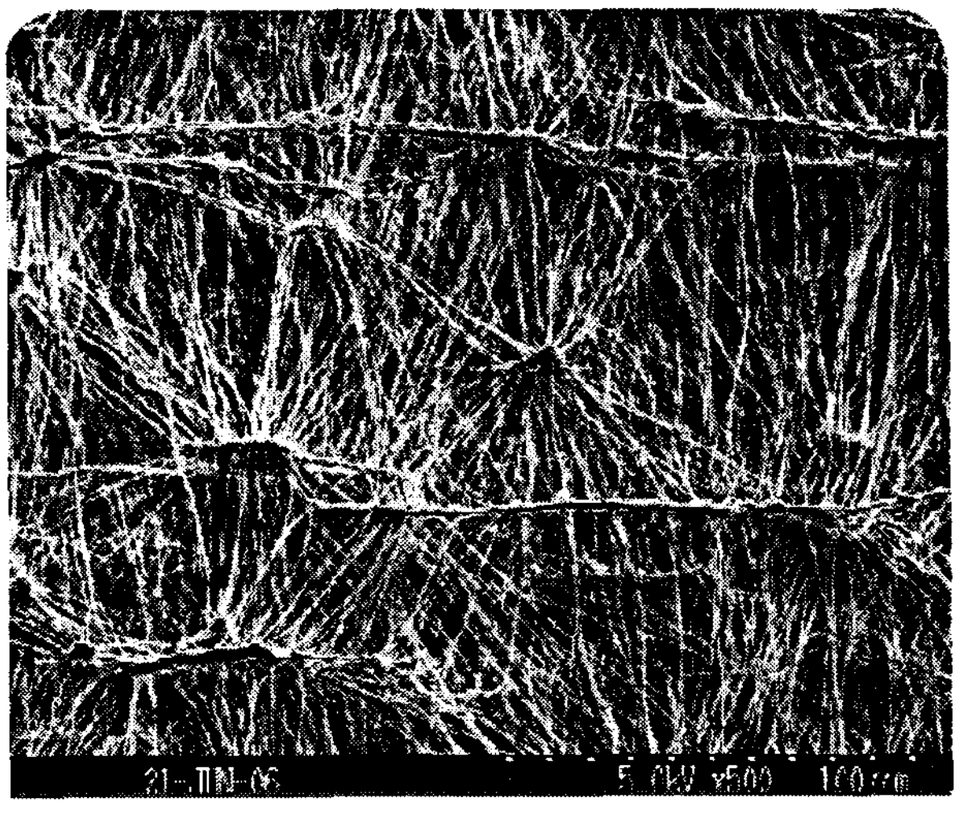


Fig 3. 500×SEM of new generation GORE™ ePTFE membrane

4. 표면여과방식(Surface Filtration)

1975년W.L Gore & Associates,Inc는 GORE-TEX 멤브레인을 Filter bag에 적용하여 세계최초로 표면여과방식을 소개하였다. Membrane Filtration은 Bag filter 시스템에서 요구되는 기계적,열적,화학적인 필요조건에 부합하도록 선정된 Filter media의 표면에 ePTFE Membrane 이라고 하는 얇은 막을 [Figure2]와 같이 부착(Laminating)하는 기술을 활용한 것이다. 이 Membrane은 미세섬유(Fibril)의 얽힘에 의한 미세기공구조로 이루어져 있으며 [Figure3]과 같이 1차 Dust Cake층의 도움없이도 고효율의 집진성능을 구현할 수 있는 구조를 이루고 있다.

ePTFE Membrane지체는 화학적으로 불활성이며 260-285℃의 온도범위에서 사용이 가능하고 또한 매우 미끄러운 성질을 가지고 있다. Membrane표면에 포집된 Dust는 Filter 표면근처에서 형성되어 탈진시 거의 모든 Dust는 제거된다. 이 Surface filtration과 고효율 Membrane은 이들 Filter가 보다 더 낮은 Filter 저항과 최상의 Filtration효율로 보다 높은 여과효율(air to cloths ratio)에서 운전되게끔 허용한다. Surface filtration의 이런 뛰어난 성능, 주의깊은 Filter bag 디자인,Filter media의 구조, 생산품질, Bag filter cleaning시스템의 최적화이외에 Membrane filter는 Conventional filter media보다도 더 긴 수명을 자랑한다.

5. Filter Media의 선택과 ETV 프로그램

비록, Cement Kiln에서 Acryl felt나 P-84재질의 Conventional filter를 사용한 Pulse jet bag filter를 사용하는 경우도 있지만 대다수의 Cement Kiln Pulse jet bag filter는Fiberglass에 Membrane이 적용된 재질을 사용하는 것이 일반적 추세이다. Cement Kiln bag filter에서 Filter media자체 이외에 또다른 중요한 요소가 있다. 그것은Filter bag의 디자인과 제조기준, Filter media 공급자의 전문지식과 경험, 운영능력 등이다. Media 선정시의 오류를 최소화하기 위하여 US EPA는 중요한 성능특성을 판단하기 위한 Test 프로그램을 개발하여 왔다. 이 프로그램은 Bag filter의 Filtration제품에 대한 Environmental Technology Verification Programme(ETV)이다.

6. ETV 프로그램

ETV프로그램은 환경 관련 종사자들에게 환경과 관련한 새로운 제품이나 기술에 관한 신뢰할 만한 검증 Data를 제공하는데 그목적이 있다. 이프로그램은 실험적인 방법을 통하여 Filter media의 주요한 성능 Data를 제공하고 있다. 이 Test 프로토콜은 Filter media공급자와 제조자, 최종 사용자, Test를 시행하는 연구소 관계자 및 ETV프로그램 실무진이 포함된 Bag filter product technical panel에 의해 개발되었고 승인되었다. 1995년 부터 2000년도까지 5년간의 Pilot period기간동안 12개의 Pilot area에서 ETV 프로그램의 유효성 확인 실험이 시행되었다. 이후 6개의 Verification partner에의해 ETV center가 운영되면서 검증에 관한 시험과 보고 업무를 수행하면서 인간과 환경을 위협하는 문제를 위한 창의적이고 개선된 기술적 제시방안을 검증하고 있다.

1) ETC의 조직

- ETV center내에Air Pollution Control Technology Verification Center(APCTVC) 설치
- APCTVC의 검증 Partner로 RTI(North Carolina에 본부를 두고 있는 비영리 연구기관)가 지정되어 있슴.

ETS, INC.

- APCTVC에서는 PM, VOC, NOx 및 유해 대기오염물질에 관한 control 기술에 관한 시험수행

2) ETV의 목적

상업적으로 출시가 완료된 기술의 성능에 대한 신뢰성을 확인 하여 사용자로 하여금 그 기술을 빨리 수용할수 있도록 지원

3) ETV 프로그램의 Benefit

- 객관적이고 신뢰성있는 성능 데이타를 구매자에게 공급
- 관련환경기술이 수용될 수 있도록 촉진
- 경제적 투자의 위험성을 감소
- 객관적이고 표준화된 시험방법을 통하여 시장에서 경쟁제품간의 마찰을 최소화
- 환경제품의 상업화를 지원

4) ETV 성취결과는?

- 1995년 이후로 ETV는 300개가 넘는 환경기술과 80개가 이상의 시험방법을 수립
- 2001년 기준 73개 업체가 자사의 제품홍보에 이용.

7. Bag Filter Filtration material의 시험방법에 관한 일반사항들

1) 목 적

VDI Method 3926, Part2의 "Testing for filter media for cleanable filters under operational conditions (작동조건하에서의 cleanable filter용 필터원단의 성능시험)"에 따른 $PM_{2.5}$ 미세분진 제거능력에 대한 공신력있는 시험결과를 만든다.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure) : 미국의 ASTM과 동등한 독일의 규격단체.

2) 시료준비

- 생산제품중 무작위로 선정된 9장의 시료(46 x 91 cm)를 제출

Table 1. Technologies tested to data using programme

Supplier	Type	Product description	Verification date
Air Purator Corporation	Membrane	PTFE film applied to a 22 opsy glass felt	September 2000
Albany International Corporation	Conventional	16 opsy polyethylene terephthalate	September 2000
BASF Corporation	Conventional	14 opsy Basofil	September 2000
BHA Group Inc.	Membrane	Woven-glass-base fabric with an expanded microporous PTFE membrane, thermally laminated to the filtration/dust cake surface	September 2000
BHA Group Inc.	Membrane	Polyester needlefelt substrate with an expanded, microporous PTFE membrane, thermally laminated to the filtration/ dust-cake surface	September 2001
BWF America Inc.	Conventional	18 – 20 opsy (0.61 – 0.68 kg/m²) micro-pore size, high efficiency, scrim-supported felt, singed cake side	September 2000
BWF America Inc.	Conventional	18 – 20 opsy (0.61 – 0.68 kg/m²) micro-pore size, high efficiency, scrim-supported felt, singed cake side	July 2002
Inspec Fibres	Conventional	16 opsy 100% scrim supported P84 needlefelt	September 2000
Menardi-Criswell	Conventional	16 opsy singed microdenier polyester felt	September 2000
Polymer Group Inc.	Conventional	Non-scim-supported, 10 opsy, 100% polyester, non-woven fabric	September 2001
Standard Filter Corp.	Conventional	Stratified microdenier polyester non-woven filter media for use in fine particulate capture	September 2000
Tertratec PTFE Technologies	Membrane	16 opsy polyester needlefelt with Tetratex® expanded polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane	September 2001
Tetratec PTFE Technologies	Membrane	16 opsy polyester scrim-supported needlefelt with a Tetratex® expanded PTFE membrane	September 2000
W.L. Gore & Associates Inc.	Membrane	GORE-TEX® ePTFE membrane/polyester felt laminate	September 2000
W.L. Gore & Associates Inc.	Membrane	GORE-TEX® ePTFE membrane/polyester felt laminate	September 2001
W.L. Gore & Associates Inc.	Membrane	GORE-TEX® membrane/fibregalss fabric laminate with a weight of 22 opsy (746 gpsm) - Pristyne® expanded PTFE membrane on woven PTFE coated fibreglass (746 g/m² 22 oz/yd²) - product code 6250	August 2006

- 시험기관이 임의 3장의 시료를 선택
- 직경 150mm시험용 시료를 준비(실제의 opening 면적은 직경 140mm)

3) 기준시험용 분진 준비

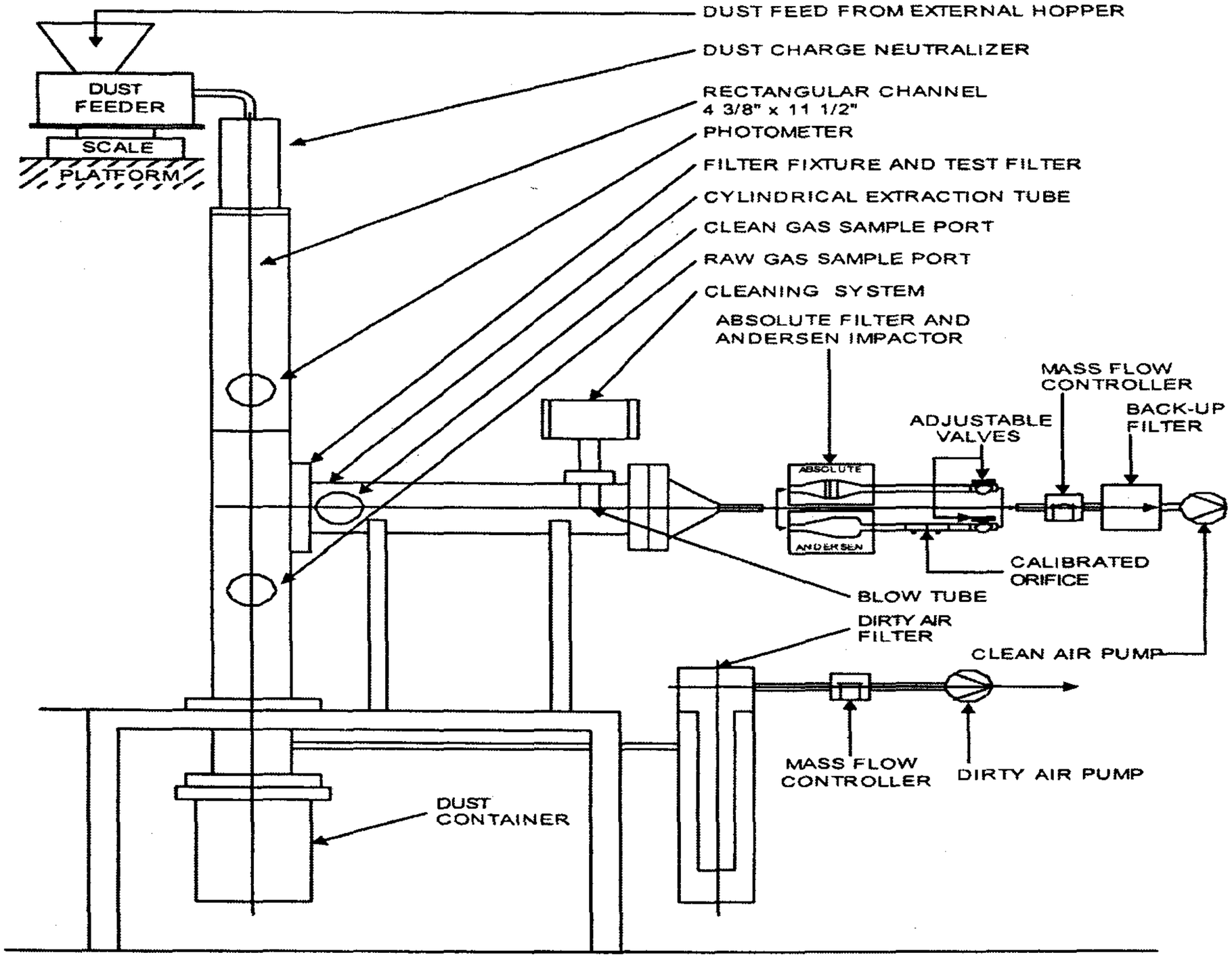
- Pural NF 산화알루미늄분진
- 최대 평균질량직경은 1.5μm
- 2.5 μm의 질량분포가 40~90%.

[Table 2]

Parameters	Unit
Outlet particle concentration, $PM_{2.5}$	g/dscm
Outlet particle concentration, total mass	g/dscm
Average residual pressure drop during Performance test period	cm w.g.
Initial residual pressure drop during Performance test period	cm w.g.
Residual pressure drop increase during Performance test period	cm w.g.
Average filtration cycle time during Performance test period	Seconds
Number of filtration cycles during Performance test period	
Mass gain of sample filter after test completion	new fabric filter, after 10 pulse cake removal, as stated in VDI 3926

4) 시험설비의 구성

FEMA (Filtration Efficiency Media Analyzer)를 사용한다.



5) Test Conditions

Test Parameter	Value
Dust concentration	18.4 ± 3.6 g/dscm
Filtration velocity (G/C)	120 ± 6 m/h
Pressure loss before cleaning	1,000 ± 12 Pa
Tank pressure	0.5 ± 0.03 MPa
Valve opening time	50 ± 5 ms
Air temperature	25 ± 2 C
Relative humidity	50 ± 10%
Total raw gas stream flow rate	5.8 ± 0.3 m^3/h
Sample gas steam flow rate	1.13 ± 0.06 m^3/h
Number of filtration cycles	
> During conditioning period	10,000 cycles
> During recovery period	30 cycles
Performance test duration	6 h ± 1 s

6) 시험 절차

- VDI3926의 여과재성능시험방법과 ETV의 PM2.5효율측정 방법 적용.
  (VDI3926 (ASTM과 동등)은 1985년에 독일의 Karlsruhe대학에서 시작되어 1994년에 최종 승인된 규격이다.)
- Table 3의 3단계 시험을 연속으로 실행.
- Table 4의항목들에 대한 수치를 측정
- 한번 test마다 3개의 시료에 대해 시행

[Table 3]

Test	Condition	Remarks
Conditioning period	10,000 rapid-pulse cleaning cycles	- Simulation for long-term use under continuous dust loading - pulsing at every 3 sec.
Recovery period	30 normal-pulse cleaning cycles	- 일정한 분진농도 유지. - ΔP 가 100 mmH_2O에 도달할 때까지 dust cake를 형성시킨후 pulsing
Performance test period	6 hr filter fabric test period with impactor	- 일정한 분진농도 유지 - ΔP 가 100 mmH_2O에 도달할 때까지 dust cake를 형성시킨후 pulsing

여과속도 (여재비) = 2 ± 0.1 m/min
Inlet dust 농도 = 18.4 ± 3.6 g/dscm

7) 시험결과의 비교

- 입증된 시험결과는 3년간 유효
- EPA승인을 유지하기 위해서는 재시험을 해야만 한다.

8. 각 Filter media의 시험 결과 비교

1) 고온 Bag

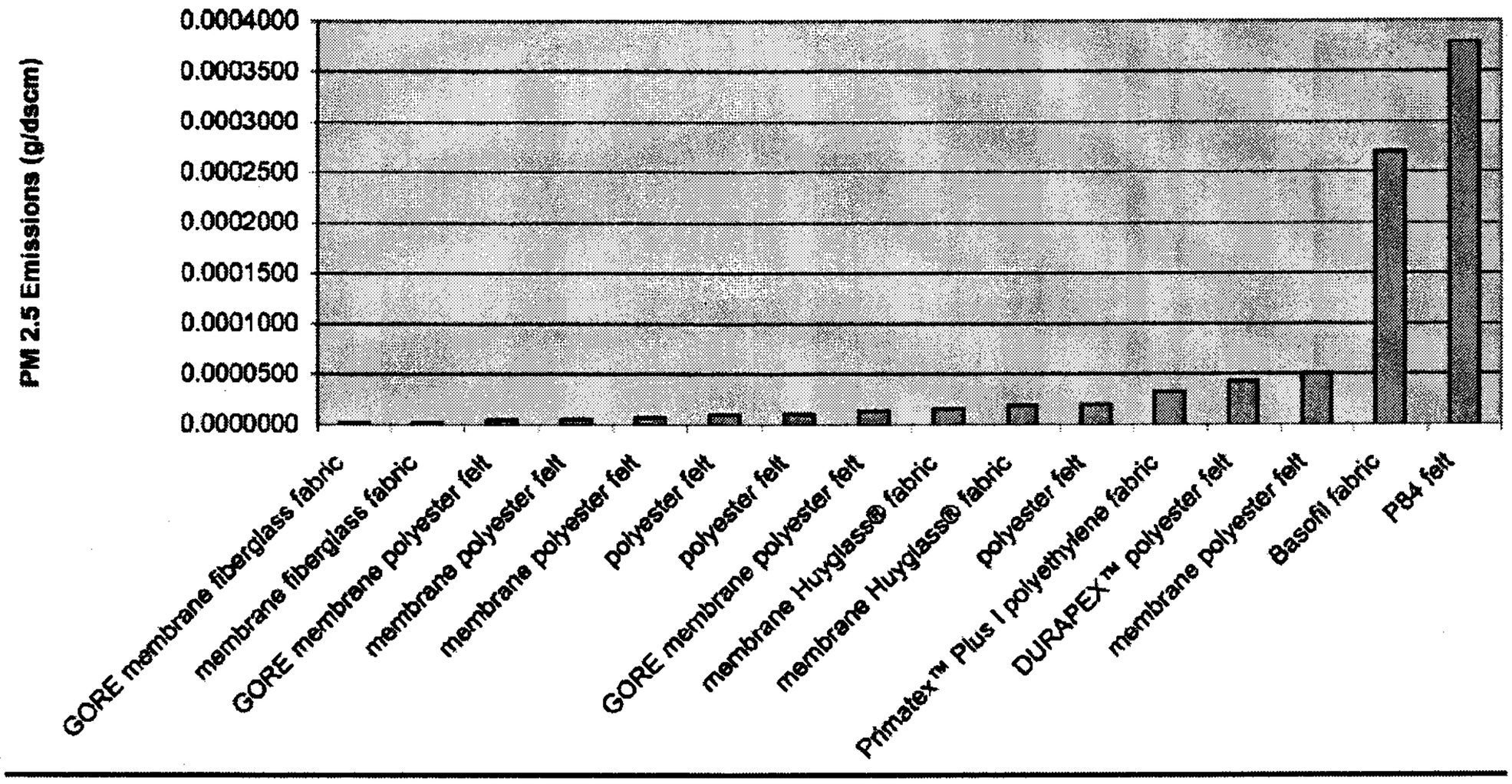
[Table 4]

Verification parameter	Unit	At verification test conditions		
		Gore	A	B(P84)
Outlet particle concentration at standard conditions PM2.5 Total mass	g/dscm	 <0.000002 <0.000002	 0.000002 0.000002	 0.00038 0.00042
Average residual pressure drop	cm W.G	2.45	6.2	11.76
Initial residual pressure drop	cm W.G	2.36		
Residual pressure drop increase	cm W.G	0.18	0.56	5.1
Filtration cycle time	Sec	251	57	6
Mass gain of test sample filter	g	0.09	0.1	1.47
Number of cleaning cycles	횟수	87	377	3571

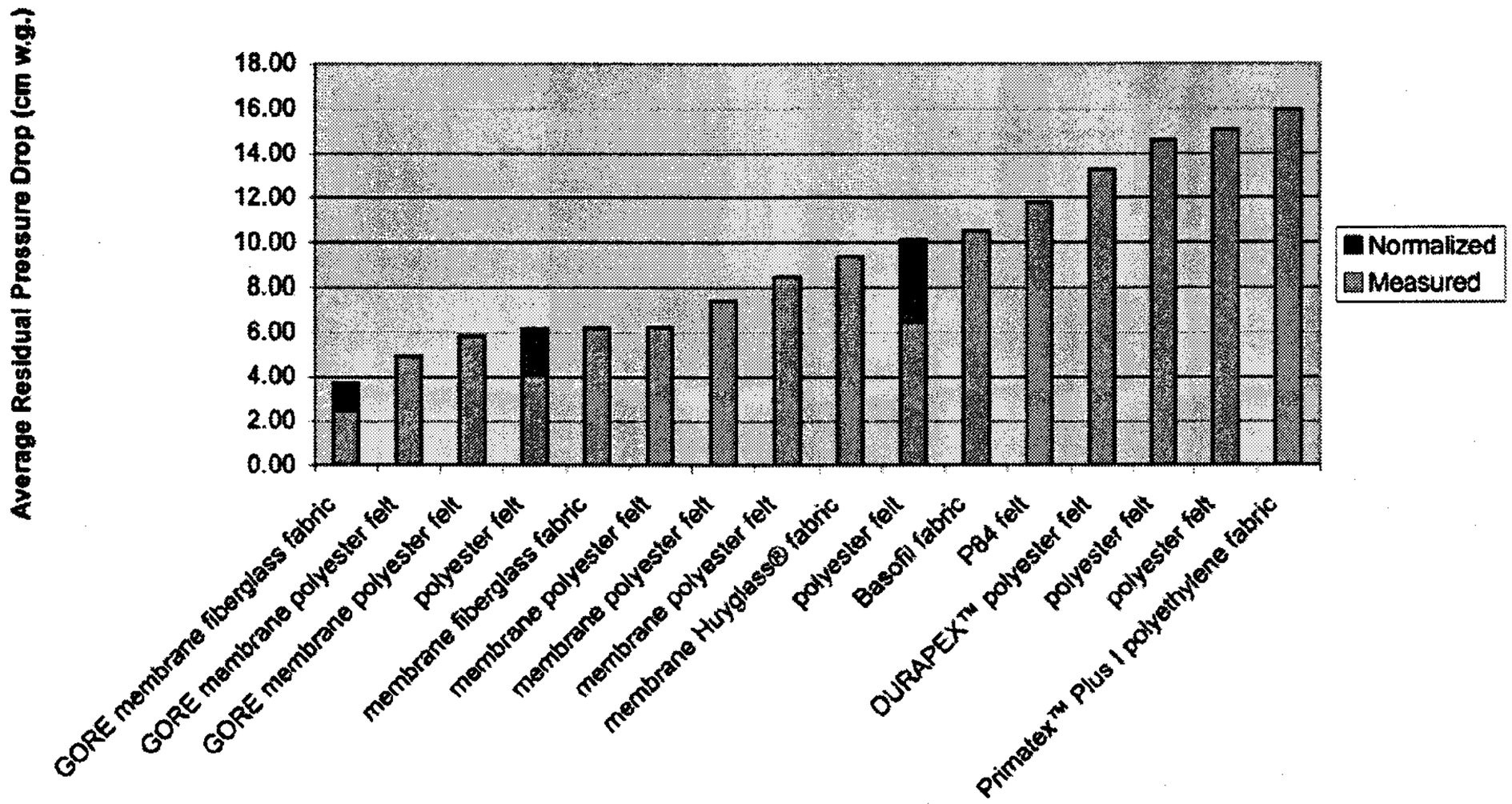
2) 저온 Bag

Verification parameter	unit	At verification test conditions		
		Gore	A	B
Outlet particle concentration at standard conditions PM2.5 Total mass	g/dscm	 0.0000047 0.0000115	 0.0000051 0.0000232	 0.00005 0.00012
Average residual pressure drop	cm W.G	5.83	7.38	8.46
Initial residual pressure drop	cm W.G	5.60	6.93	
Residual pressure drop increase	cm W.G	0.41	0.79	1.16
Filtration cycle time	Sec	79	35	15
Mass gain of test sample filter	g	0.41	0.06	0.16
Number of cleaning cycles	횟수	279	616	1493

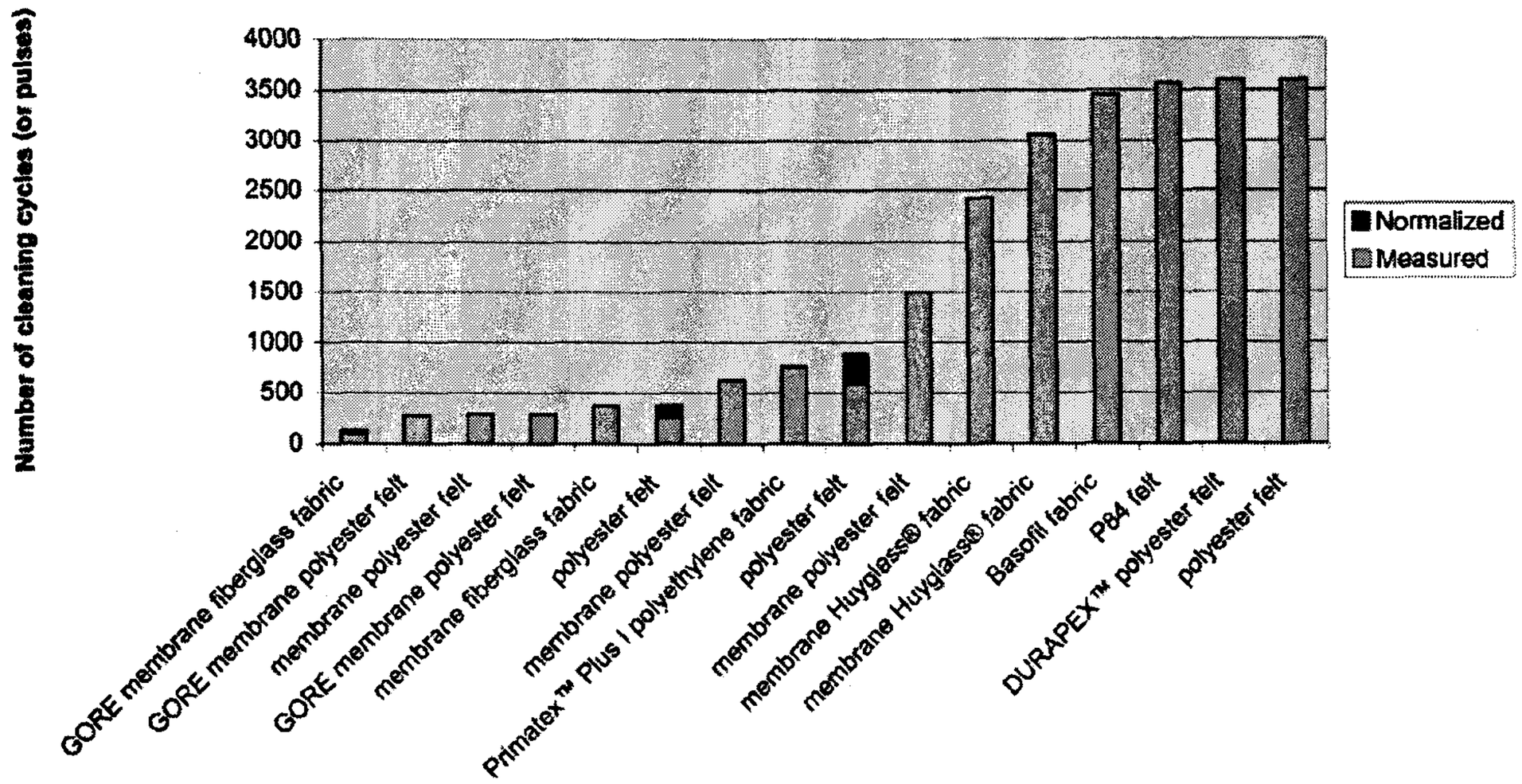
3) Filter media의 PM2.5 Emission비교



4) 각 Filter media의 Residual pressure drop 비교



5) 각 Media의 Cleaning cycle의 회수 비교



9. 결 론

- PM 2.5 Emission량은 2.5㎛이하의 분진 배출량을 측정하여 Filter media의 Filtration효율에 관한 정보를 제공한다.

- Average Residual Pressure Drop비교는 Media의 압력손실 정도 및 높은 Air flow를 Handling 할 수 있느냐의 여부를 판단하는 지표이다

- Cleaning Cycle회수의 비교는 Filter media의 탈진능력(Cleanability)과 Bag life를 가늠하는 척도이다

- 이상에서 우리는 Filter 제공업체의 Bag 성능을 어떻게 판단하여야 할 것인지에 대하여 알아보았다. 모쪼록 공신력 있는 ETV 프로그램에서 제공하는 성능 시험 Data가 공정운영에 가장 효율적이면서도 경제적인Filter media를 선택할 수 있는 지표로 활용될수 있기를 바랍니다.