

배출가스 중 수분량 - 계산법

2024

(Moisture content in Flue Gas - Calculation Method)

1.0 개요

1.1 목적

이 시험기준은 굴뚝 내 배출가스 중 수분량을 측정하기 위한 시험방법이다.

1.2 적용범위

배출가스 중에 함유되어 있는 수분량을 측정하는데 사용되며 0.1 % 이상의 수분량을 측정하는데 사용된다.

2.0 용어정의

2.1 배출가스

배출가스 (flue gas)란 연료, 기타의 것의 연소 합성 분해, 열원으로서의 전기의 사용 및 기계적 처리 등에 따라 발생하는 고체 입자를 함유하는 가스. 수분을 함유하지 않는 가스는 건조배출가스, 수분을 함유하는 가스는 습윤배출가스라 한다.

3.0 분석기기 및 기구 “내용 없음”

4.0 시약 및 표준용액 “내용 없음”

5.0 시료채취 및 관리 “내용 없음”

6.0 정도보증/정도관리 (QA/QC) “내용 없음”

7.0 분석 절차

7.1 측정방법

사용연료의 양과 조성 및 불어 넣은 공기량, 습도 등으로부터 다음 식에 의하여 계산된다.

$$X_w = \frac{W_g}{G} \times \frac{22.4}{18} \times 100 \quad (\text{식 1})$$

여기서, X_w = 습윤배출가스 중의 수증기의 부피 백분율 (%)

W_g = 연료 단위량당 발생가스 중의 수분량

(kg/kg: 고체 또는 액체연료, kg/Sm³ : 기체연료)

G = 연료 단위량당 습윤배출가스량

(Sm³/kg: 고체 또는 액체연료, Sm³/Sm³: 기체연료)

7.1.1 고체 또는 액체 연료일 때

$$W_g = \frac{29}{22.4} A_v K + \frac{W_r}{100} + \frac{9H}{100} \quad (\text{식 2})$$

7.1.2 기체 연료일 때

$$W_g = \frac{29}{22.4} A_v K + \frac{18}{22.4} \times \frac{1}{100} (H_2 + 2CH_4 + 2C_2H_4 + \dots) \quad (\text{식 3})$$

여기서, A_v = 연료 단위량당 사용한 건조공기량

(Sm³/kg: 고체 또는 액체 연료, Sm³/Sm³: 기체연료)

K = 연소용 공기의 절대습도

[습한 공기 중의 수증기량과 건조공기량과의 질량비(kg/kg 건조공기)]

$$K = \frac{0.622 \phi P_v}{100 P_a - \phi P_v} \quad (\text{식 4})$$

여기서, ϕ = 상대습도 (%)

P_v = 물의 포화증기압 (mmHg)

P_a = 측정공에서의 대기압 (mmHg)

W_r = 연료 중의 전 수분의 무게 백분율 (%)

H = 연료 중의 수소 (사용시 기준)의 무게 백분율 (%)

H_2 = 연료가스 중의 수소의 부피 백분율 (%)

CH_4 = 연료가스 중의 메테인의 부피 백분율 (%)

C_2H_4 = 연료가스 중의 에틸렌의 부피 백분율 (%)

※ 비고 : 증기가 스며들거나 제품 등에서 수분이 발생하여 배출가스 중에 포함될 때는 다음과 같이 이 수분량을 연료 단위량 당으로 환산하여 W_g 에 더한다.

7.1.3 고체 또는 액체 연료일 때

$$G = G' + \frac{22.4}{18} W_g \quad (\text{식 5})$$

$$\text{여기서, } G' = (m - 0.21)A_0 + 1.867 \frac{C'}{100} + 0.7 \frac{S}{100} + 0.8 \frac{N}{100}$$

$$m = \frac{(N_2)}{(N_2) - 3.76(O_2) - 0.5(CO)}$$

$$A_0 = \frac{1}{100} 8.89C' + 26.7(H - \frac{O}{8}) + 3.33S$$

$$\text{또는 } G' = \frac{1.867C'}{(CO_2) + (CO)}$$

여기서, G' = 연료 단위량당 건조 배출가스량

(Sm^3/kg : 고체 또는 액체연료, Sm^3/Sm^3 : 기체연료)

m = 공기비

W = 연료 중에 함유되어 있는 총 수분의 무게 백분율 (%)

H = 연료 중에 함유되어 있는 수소의 무게 백분율 (%)

C' = 연료 중에 함유되어 있는 탄소의 무게 백분율 (%)

S = 연료 중에 함유되어 있는 유황의 무게 백분율 (%)

N = 연료 중에 함유되어 있는 질소의 무게 백분율 (%)

O = 연료 중에 함유되어 있는 산소의 무게 백분율 (%)

A_0 = 연료 1 kg당의 이론 공기량 (Sm^3/kg 연료)

(N_2) = 건조 배출가스 중에 함유되어 있는 질소의 부피 백분율 (%)

(O_2) = 건조 배출가스 중에 함유되어 있는 산소의 부피 백분율 (%)

(CO) = 건조 배출가스 중에 함유되어 있는 일산화탄소의 부피 백분율 (%)

(CO_2) = 건조 배출가스 중에 함유되어 있는 이산화탄소의 부피 백분율 (%)

7.1.4 기체 연료일 때

$$G = G' + \frac{1}{100}(H_2 + 2CH_4 + 2C_2H_4 + \dots) \quad (\text{식 6})$$

이 때,

$$G' = \frac{(CO + CO_2 + CH_4 + 2C_2H_4 + \dots)}{(CO_2) + (CO)}$$

여기서, G' = 연료가스 1 Nm^3 당 건조 배출가스량 (Sm^3/Sm^3 : 기체연료)

H_2 = 건조 연료가스 중의 수소의 부피 백분율 (%)

CH_4 = 건조 연료가스 중의 메테인의 부피 백분율 (%)

C_2H_4 = 건조 연료가스 중의 에틸렌의 부피 백분율 (%)

CO = 건조 배출가스 중의 일산화탄소의 부피 백분율 (%)

CO_2 = 건조 배출가스 중의 이산화탄소의 부피 백분율 (%)

7.1.5 스크러버 출구 등 배출가스 중에 물방울이 공존할 때

배출가스 온도의 포화수증기압을 사용하며, 다음 식으로 수분량을 계산한다. (100 °C 이하일 때)

$$X_w = \frac{P_v}{P_a + P_s} \times 100 \quad (\text{식 7})$$

여기서, X_w = 배출가스 중의 수증기 부피 백분율 (%)

P_v = 배출가스 온도의 포화수증기압 (mmHg)

P_a = 측정공에서의 대기압 (mmHg)

P_s = 배출가스의 정압 (mmHg)

8.0 결과 보고

8.1 수분량 계산

배출가스 중의 수분량(X_w)은 습한 가스 중의 수증기의 부피백분율로 표시하고, 측정결과는 % 단위의 소수점 둘째 자리까지 계산하고 소수점 첫째 자리로 표기한다.

여기서, X_w = 배출가스 중의 수증기의 부피 백분율 (%)

9.0 참고자료

9.1 한국산업표준 (KS), KS I ISO 4225, “공기의 질 - 일반사항 - 용어”, 산업표준심의회, (2014)

9.2 한국산업표준 (KS), KS I ISO 14164, “고정 오염원 - 연도 내의 가스 유량 측정 (자동화법)”, 산업표준심의회, (1999)

9.3 한국산업표준 (KS), KS I 2200, “연도가스의 오염물질 측정방법”, 산업표준심의회, (2014)

9.4 한국산업표준 (KS), KS I ISO 9096, “고정 오염원 - 입자상 물질의 질량 농도 수동 측정법”, 산업표준심의회, (2009)

9.5 United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 1, “Sample and velocity traverses for stationary sources”, USEPA, (2020)

9.6 United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 2, "Determination of Stack Gas Velocity and Volumetric Flow Rate (Type S Pitot Tube)", USEPA, (2017)

9.7 United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 4, "Determination of Moisture Content in Stack Gas", USEPA, (2017)

9.8 United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 5, "Determination of particulate matter emissions from stationary sources", USEPA, (2019)

9.9 United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 5I, "Determination of Low Level Particulate Matter Emissions From Stationary Sources", USEPA, (2019)

9.10 United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 17, "Determination of particulate matter emissions from stationary sources", USEPA, (2017)

9.11 United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 201A, "Determination of PM₁₀ and PM_{2.5} emissions form stationary sources (Constant sampling rate procedure)", USEPA, (2019)

9.12 JIS Z 8808, "Methods of measuring dust concentration in flue gas", Japanese industrial standards committee, (2013)

10.0 부록

10.1 시험기준 요약표

표 1. 시험기준 요약표

배출가스 중 수분량 - 계산법 (Moisture content in Flue Gas - Calculation Method)	
분자식 및 특징: water vapor (H ₂ O)	
정량범위: 0.1 % 이상	
간섭물질: 해당 없음	
시료채취	
방법: 계산법	
흡수액: 해당 없음	
흡입속도: 해당 없음	
표준채취량: 해당 없음	
이동: 해당 없음	
보관: 해당 없음	
분석용 시료용액: 해당 없음	
Blank: 해당 없음	
측정	
방법: 계산법	
물질: 수분량	
표준물질: 해당 없음	
검정곡선: 해당 없음	
분석저울: 해당 없음	
정도관리	
주기: 해당 없음	
응답시간: 해당 없음	

10.2 물의 포화수증기압

표 2. 물의 포화수증기압 (단위: mmHg)

온도 (℃)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4.585	4.618	4.652	4.686	4.720	4.754	4.788	4.823	4.858	4.893
1	4.929	4.964	5.000	5.036	5.073	5.109	5.146	5.183	5.220	5.258
2	5.295	5.333	5.372	5.410	5.449	5.488	5.527	5.566	5.606	5.646
3	5.686	5.727	5.767	5.808	5.850	5.891	5.933	5.975	6.017	6.059
4	6.102	6.145	6.189	6.232	6.276	6.320	6.365	6.409	6.454	6.499
5	6.545	6.591	6.637	6.683	6.730	6.777	6.824	6.871	6.919	6.967
6	7.016	7.064	7.113	7.163	7.212	7.262	7.312	7.363	7.414	7.465
7	7.516	7.568	7.620	7.673	7.725	7.779	7.832	7.885	7.939	7.994
8	8.048	8.103	8.158	8.214	8.270	8.326	8.383	8.440	8.497	8.555
9	8.613	8.671	8.730	8.789	8.848	8.908	8.968	9.029	9.090	9.150
10	9.212	9.274	9.336	9.399	9.462	9.526	9.589	9.653	9.718	9.783
11	9.848	9.914	9.980	10.05	10.11	10.18	10.25	10.32	10.38	10.45
12	10.52	10.59	10.66	10.73	10.80	10.87	10.95	11.02	11.09	11.16
13	11.24	11.31	11.38	11.46	11.53	11.61	11.69	11.76	11.84	11.92
14	11.99	12.07	12.15	12.23	12.31	12.39	12.47	12.55	12.63	12.71
15	12.79	12.88	12.96	13.04	13.13	13.21	13.30	13.38	13.47	13.56
16	13.64	13.73	13.82	13.91	14.00	14.08	14.17	14.26	14.36	14.45
17	14.54	14.63	14.72	14.82	14.91	15.01	15.10	15.20	15.29	15.39
18	15.49	15.58	15.68	15.78	15.88	15.98	16.08	16.18	16.28	16.39
19	16.49	16.59	16.70	16.80	16.91	17.01	17.12	17.22	17.33	17.44
20	17.55	17.66	17.77	17.88	17.99	18.10	18.21	18.32	18.44	18.55
21	18.66	18.78	18.89	19.01	19.13	19.25	19.36	19.48	19.60	19.72
22	19.84	19.96	20.09	20.21	20.33	20.46	20.58	20.71	20.83	20.96
23	21.09	21.21	21.34	21.47	21.60	21.73	21.86	22.00	22.13	22.26
24	22.40	22.53	22.67	22.80	22.94	23.08	23.22	23.36	23.50	23.64
25	23.78	23.92	24.06	24.21	24.35	24.50	24.64	24.79	24.94	25.08
26	25.23	25.38	25.53	25.68	25.84	25.99	26.14	26.30	26.45	26.61
27	26.76	26.92	27.08	27.24	27.40	27.56	27.72	27.88	28.05	28.21
28	28.38	28.54	28.71	28.88	29.05	29.21	29.38	29.56	29.73	29.90
29	30.07	30.25	30.42	30.60	30.78	30.95	31.13	31.31	31.49	31.67
30	31.86	32.04	32.22	32.41	32.60	32.78	32.97	33.16	33.35	33.54
31	33.73	33.92	34.12	34.31	34.51	34.70	34.90	35.10	35.30	35.50
32	35.70	35.91	36.11	36.31	36.52	36.72	36.93	37.14	37.35	37.56
33	37.77	37.98	38.20	38.41	38.63	38.84	39.06	39.28	39.50	39.72
34	39.94	40.17	40.39	40.62	40.84	41.07	41.30	41.53	41.76	41.99
35	42.22	42.46	42.69	42.93	43.17	43.41	43.65	43.89	44.13	44.37
36	44.62	44.86	45.11	45.36	45.61	45.86	46.11	46.36	46.61	46.87
37	47.13	47.38	47.64	47.90	48.16	48.42	48.69	48.95	49.22	49.49
38	49.75	50.02	50.30	50.57	50.84	51.12	51.39	51.67	51.95	52.23
39	52.51	52.79	53.08	53.36	53.65	53.94	54.23	54.52	54.81	55.10

40	55.40	55.69	55.99	56.29	56.59	56.89	57.19	57.50	57.80	58.11
41	58.42	58.73	59.04	59.35	59.67	59.98	60.30	60.62	60.94	61.26
42	61.58	61.91	62.23	62.56	62.89	63.22	63.55	63.88	64.22	64.56
43	64.89	65.23	65.57	65.92	66.26	66.61	66.95	67.30	67.65	68.00
44	68.36	68.71	69.07	69.43	69.78	70.15	70.51	70.87	71.24	71.61
45	71.98	72.35	72.72	73.09	73.47	73.85	74.23	74.61	74.99	75.38
46	75.76	76.15	76.54	76.93	77.32	77.72	78.12	78.51	78.91	79.31
47	79.71	80.12	80.52	80.94	81.35	81.75	82.17	82.59	83.01	83.43
48	83.85	84.27	84.69	85.12	85.55	85.98	86.41	86.85	87.28	87.72
49	88.16	88.60	89.04	89.49	89.94	90.38	90.84	91.29	91.74	92.20
50	92.66	93.12	93.58	94.05	94.51	94.99	95.45	95.92	96.40	96.88
51	97.36	97.84	98.32	98.80	99.29	99.78	100.3	100.8	101.3	101.8
52	102.3	102.8	103.3	103.8	104.3	104.8	105.3	105.8	106.3	106.8
53	107.4	107.9	108.4	108.9	109.5	110.0	110.5	111.1	111.6	112.1
54	112.7	113.2	113.8	114.3	114.9	115.4	116.0	116.6	117.1	117.7
55	118.2	118.8	119.4	119.9	120.5	121.1	121.7	122.3	122.8	123.4
56	124.0	124.6	125.2	125.8	126.4	127.0	127.6	128.2	128.8	129.4
57	130.0	130.7	131.3	131.9	132.5	133.1	133.8	134.4	135.0	135.7
58	136.3	137.0	137.6	138.2	138.9	139.5	140.2	140.9	141.5	142.2
59	142.8	143.5	144.2	144.8	145.5	146.2	146.9	147.6	148.2	148.9
60	149.6	150.3	151.0	151.7	152.4	153.1	153.8	154.5	155.3	156.0
61	156.7	157.4	158.1	158.9	159.6	160.3	161.1	161.8	162.5	163.3
62	164.0	164.8	165.5	166.3	167.1	167.8	168.6	169.4	170.1	170.9
63	171.7	172.4	173.2	174.0	174.8	175.6	176.4	177.2	178.0	178.8
64	179.6	180.4	181.2	182.0	182.9	183.7	184.5	185.3	186.2	187.0
65	187.8	188.7	189.5	190.4	191.2	192.1	192.9	193.8	194.7	195.5
66	196.4	197.3	198.2	199.0	199.9	200.8	201.7	202.6	203.5	204.4
67	205.3	206.2	207.1	208.0	209.0	209.9	210.8	211.7	212.7	213.6
68	214.5	215.5	216.4	217.4	218.3	219.3	220.2	221.2	222.2	223.1
69	224.1	225.1	226.1	227.1	228.0	229.0	230.0	231.0	232.0	233.0
70	234.0	235.1	236.1	237.1	238.1	239.2	240.2	241.2	242.3	243.3
71	244.4	245.4	246.5	247.5	248.6	249.7	250.7	251.8	252.9	254.0
72	255.0	256.1	257.2	258.3	259.4	260.5	261.6	262.8	263.9	265.0
73	266.1	267.3	268.4	269.5	270.7	271.8	273.0	274.1	275.3	276.4
74	277.6	278.8	280.0	281.1	282.3	283.5	284.7	285.9	287.1	288.3
75	289.5	290.7	291.9	293.2	294.4	295.6	296.9	298.1	299.3	300.6
76	301.8	303.1	304.4	305.6	306.9	308.2	309.4	310.7	312.0	313.3
77	314.6	315.9	317.2	318.5	319.8	321.2	322.5	323.8	325.1	326.5
78	327.8	329.2	330.5	331.9	333.2	334.6	336.0	337.3	338.7	340.1
79	341.5	342.9	344.3	345.7	347.1	348.5	349.9	351.4	352.8	354.2
80	355.7	357.1	358.6	360.0	361.5	362.9	364.4	365.9	367.3	368.8
81	370.3	371.8	373.3	374.8	376.3	377.8	379.3	380.9	382.4	383.9
82	385.5	387.0	388.6	390.1	391.7	393.2	394.8	396.4	398.0	399.5
83	401.1	402.7	404.3	405.9	407.5	409.2	410.8	412.4	414.0	415.7
84	417.3	419.0	420.6	422.3	424.0	425.6	427.3	429.0	430.7	432.4
85	434.1	435.8	437.5	439.2	440.9	442.6	444.4	446.1	447.9	449.6
86	451.4	453.1	454.9	456.7	458.4	460.2	462.0	463.8	465.6	467.4

87	469.2	471.1	472.9	474.7	476.5	478.4	480.2	482.1	484.0	485.8
88	487.7	489.6	491.5	493.3	495.2	497.2	499.1	501.0	502.9	504.8
89	506.8	508.7	510.6	512.6	514.6	516.5	518.5	520.5	522.5	524.4
90	526.4	528.4	530.4	532.5	534.5	536.5	538.5	540.6	542.6	544.7
91	546.7	548.8	550.9	553.0	555.1	557.2	559.2	561.4	563.5	565.6
92	567.7	569.8	572.0	574.1	576.3	578.4	580.6	582.8	585.0	587.1
93	589.3	591.5	593.7	596.0	598.2	600.4	602.6	604.9	607.1	609.4
94	611.6	613.9	616.2	618.5	620.8	623.1	625.4	627.7	630.0	632.3
95	634.7	637.0	639.3	641.7	644.1	646.4	648.8	651.2	653.6	656.0
96	658.4	660.8	663.2	665.6	668.1	670.5	673.0	675.4	677.9	680.3
97	682.8	685.3	687.8	690.3	692.8	695.3	697.9	700.4	702.9	705.5
98	708.0	710.6	713.2	715.7	718.3	720.9	723.5	726.1	728.7	731.4
99	734.0	736.6	739.3	741.9	744.6	747.3	749.9	752.6	755.3	758.0
100	760.7	763.5	766.2	768.9	771.7	774.4	777.2	779.9	782.7	785.5

(참고: Sonntag (1990), ITS-90 기반의 물의 포화수증기압)