

금속 용해공장에서의 증기폭발 발생과 방지대책



김 홍

(호서대학교
산업안전공학과 교수)

- '80.2 충남대학교 공과대학 화학공학과(공학사)
- '87.2 충남대학교 대학원 화학공학과(공학박사)
- '82.-'88 한국기계연구소 연구원
- '88-현재 호서대학교 이공대학 산업안전공학과 학과장, 조교수



권 영 배

(시험평가부장)

- '65. 2 충남대학교 공과대학 화학공학과(공학사)
- '85. 9 충남대학교 대학원 화학공학과(공학석사)
- '79-현재 한국기계연구소 책임연구원

산업 안전 보건법이 제정되고 시행령이 발효 단계에 있어 산업안전의 관심도가 높아지고 있으며 종종 일어나는 금속공장의 폭발과 방지대책에 대하여 논하고자 한다.

옛날부터 야금, 주조, 단조, 전기로등의 고열 작업장에서 종종 용융금속이 물과 접촉해서 다량의 수증기가 급격히 발생하고 그 팽창작용으로 인한 폭발사고가 발생하는 경우도 있다.

또한 운행중인 보일러의 관체가 파손되어 파편이 멀리 비산하는 경우가 있다. 이것은 보일러의 파손에 의한 관내의 과열수가 급격히 비등하기 때문이라고 생각되며 이것을 흔히 보일러 폭발이라고 한다.

이와같은 폭발현상은 일반적으로 폭발은 급격한 화학반응에 의하여 발생하고 화염을 수반하고 있는데 반하여, 물은 급격한 비등 현상에서 알 수 있듯이 액체의 급격한 비등현상에 의해 폭발적으로 발생된다. 이경우 화염을 동반하지 않으며 일반적인 폭발현상과 구분하여“증기폭발”이라고 부르고 있다. 최근에“증기운폭발”이라는 용어가 자주 사용되고 있는데 이것은 대량의 가연성 가스나 증기가 장치의 파손이나 오조작에 의해 유출되어서 운상(cloud phase)으로 퍼져 있을때 발화원에 의해 발화해서 폭발하는 현상으로 증기폭발과는 근본적으로 다르다.

증기폭발의 발생기구나 그 파괴력등에 대해서 최근에 연구가 진행되어 각종 학설이 발표되고 있으나 아직 불명확한 점도 많고 앞으로도 연구가 필요한 분야이다.

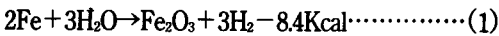
1. 고온 용융물과 물과의 증기폭발

고온의 용융물과 물의 접촉에 의한 수증기폭발은 철강업과 비철금속공업등에서 발생율의 30%이상 차지하고 있으며 화학공업에서는 전기로에서 많이 발생된다.

수증기폭발의 대표적인 재해사례는 캐나다의 퀘백시에 있는 주조공장의 폭발사고이다. 전기로를 비운상태에서 부품교환 작업중에 4톤의 용융강(약 1500°C)을 다른 용기에 보관하였다가 수리후 로에 옮겨 담을 때 대부분 안전하게 되유했지만 약 45kg이 수중에 낙하해서 폭발을 일으켜 사망 1명과 다수의 부상자가 발생하였다. 이때 폭발의 충격에 의해 두께 20인치의 콘크리트 바닥에 균열이 생기고, 건물은 진동으로 벽돌벽이 손상을 입었고 약 6000장의 유리가 파손되었다. 이 사고의 규모는 화약의 충격력으로 유추했을 때, 온도 1560°C의 용융강 45kg이 1000°C까지 냉각되는 동안에 방출되는 열에너지의 약 13%가 충격과 에너지로 변화되었다고 추정되고 있다.

이와같은 수증기폭발의 발생기구로서 최초로 고려되었던 것은, 물이 분해하여 수소가 발생하고 이것이 또 산소와 반응해서 폭발을 일으킨다는 것이다.

그러나 철과 물의 반응은 다음식과 같은 흡열 반응이기 때문에 상온에서는 일어나지 않고 대단히 높은 고온상태가 아니면 반응이 진행되지 않는다.



게다가 고온상태라고 해도 약 1600°C 이상이 되지 않으면 물은 수소와 산소로 분해되지 않고, 약 2400°C 일 때라도 5.9%밖에 해리되지 않는다고 알려져 있다. 나트륨이나 칼륨등과 같이 반응성이 강한 금속은 물과 격렬히 반응해서 수소를 발생시키지만 용해상태의 염화나트륨, 염화칼륨, 탄산나트륨, 개미산염등은 물과 접촉해서 수소를 발생하는 것과 비슷한 화학반응은 일어나지 않으나, 이들 염에서도 용융상태에서는 물과의 접촉으로 폭발을 일으킨 경우도 있다.

또한, 철의 경우, 1600°C 이상에서는 물과 반응하여 수소를 발생하지만 1200°C 이하에서는 수소를 발생시키지 않는다. 그러나 760°C의 용융알루미늄은 물과 접촉되었을 때 조건에 따라서 폭발을 하는 것도 있다.

그 때문에 현재로서는 이들 현상이 물의 분해가 아니라 물이 고온 용융물과 접촉해서 비점 이상으로 과열되거나 혹은 열이 급속히 전달되어 격심한 폭발적인 비등이 일어나는 "물리적인 폭발"이라고 설명되고 있다.

현재 고려되고 있는 증기폭발의 기구를 설명하기 전에 물과 액체의 열전달에 의한 비등현상의 기본적인 성질이나 용어에 대하여 설명을 한다.

2. 물과 액체의 비등현상

2.1. 물의 열 역학적 성질

물은 일반적으로 1기압하에서 100°C에 끓는다고 하지만 압력을 감소시키면 비점도 강하게 된다. 이와같이 압력이 일정한 상태에서 끓기 시작하는 온도를 포화온도라 한다. 이 액체를 포화액체라 하고 이때의 압력을 포화압력이라 한다. 포화용액과 공존하고 평형상태의 증기를 포화증기라 한다. 또한 포화증기중에 습기를 함유하고 있지 않는 것을 건조포화증기라고 한다.

액체가 기화되서 증기로 변화하는 것을 증발이라 하는데, 가열이 강하면 증발은 액체내부로부터 기포가 발생되면서 일어나는데 이 현상을 비등이라 한다.

수증기는 공업적으로 널리 이용되기 때문에 그 열역학적 성질은 잘 계산되어 있으며 표1과 같이 증기표로 작성되어 있다.

이 표로 부터 증기폭발기구의 검토에 필요한 사항들을 구할 수 있다. 예를들면,

- ① 대기압(1.03323kg/cm²)하에서 물은 100°C에서 비등하고, 0'값으로부터 1kg의 물로부터 100°C, 1 atm의 증기를 1.673m³ 얻을 수 있다.
- ② 100°C의 물이 전부 증기로 변화했을 때의 체적팽창은 0'6의 비로 구할 수 있다. 즉 1630배가 된다.

表 1) 飽和蒸氣表(溫度基準)

溫度 (°C) t	飽和壓力 (kg/cm ²) Ps	比容積 (m ³ /kg)		엔탈피 (kcal/kg)			엔트로피 (kcal/kg·°K)	
		飽和水 ú	乾 飽和蒸氣 ú'	飽和水 h	乾 飽和蒸氣 h'	蒸發熱 r	飽和水 s	乾 飽和蒸氣 s'
0	0.006228	0.00100022	206.305	-0.010	597.49	597.50	-0.00004	2.18729
10	0.012512	0.00100025	106.430	10.030	601.87	591.84	0.03606	2.12620
20	0.023826	0.00100172	57.8383	20.030	606.23	586.20	0.07077	2.07041
30	0.043251	0.00100431	32.9289	30.014	610.57	580.56	0.10426	2.01934
40	0.075204	0.00100781	19.5461	39.995	614.88	574.88	0.13665	1.97245
50	0.12578	0.00101211	12.0457	49.980	619.13	569.15	0.16803	1.92930
60	0.20313	0.00101714	7.67854	59.972	623.32	563.35	0.19848	1.88946
70	0.31776	0.00102285	5.04627	69.975	627.43	557.45	0.22805	1.85260
80	0.48291	0.00102919	3.40909	79.993	631.45	551.46	0.25682	1.81839
90	0.71491	0.00103614	2.36130	90.031	635.36	545.33	0.28483	1.78654
100	1.03323	0.00104371	1.67300	100.092	639.15	539.06	0.31214	1.75680
110	1.4609	0.00105187	1.20994	110.183	642.81	532.62	0.33880	1.72896
120	2.0246	0.00106063	0.891524	120.311	646.31	526.00	0.36486	1.70280
130	2.7546	0.00107002	0.668136	130.483	649.64	519.16	0.39036	1.67815
140	3.6850	0.00108006	0.508494	140.705	652.78	512.08	0.41535	1.65483
150	4.8538	0.00109078	0.392447	150.986	655.72	504.73	0.43987	1.63270
160	6.3025	0.00110222	0.306756	161.334	658.43	497.10	0.46395	1.61161
170	8.0764	0.00111445	0.242553	171.758	660.90	489.14	0.48764	1.59141
180	10.224	0.00112752	0.193800	182.267	663.10	480.83	0.51096	1.57206
190	12.799	0.00114150	0.156316	192.872	665.01	472.14	0.53396	1.55336
200	15.855	0.00115649	0.127160	203.585	666.60	463.02	0.55667	1.53525
210	19.454	0.00117260	0.104230	214.420	667.86	453.44	0.57912	1.51761
220	23.656	0.00118995	0.0860378	225.393	668.75	443.36	0.60136	1.50036
230	28.528	0.00120872	0.0714498	236.521	669.24	432.72	0.62343	1.48341
240	34.138	0.00122908	0.0596544	247.827	669.30	421.47	0.64536	1.46665
250	40.560	0.00125129	0.0500374	259.335	668.87	409.54	0.66721	1.44999
260	47.869	0.00127563	0.0421338	271.076	667.91	396.84	0.68903	1.43331
270	56.141	0.00130250	0.0355880	283.088	666.35	383.26	0.71089	1.41646
280	65.468	0.00133239	0.0301260	295.414	664.09	368.68	0.73285	1.39931
290	75.929	0.00136591	0.0255351	308.113	661.04	352.93	0.75501	1.38167
300	87.621	0.00140406	0.0216487	321.261	657.07	335.81	0.77748	1.36336
310	100.65	0.00144797	0.0183339	334.956	652.05	317.10	0.80042	1.34417
320	115.12	0.00149950	0.0154798	349.337	645.76	296.42	0.82402	1.32376
330	131.16	0.00156147	0.0129894	364.603	637.76	273.15	0.84858	1.30147
340	148.93	0.00163871	0.0107801	381.072	627.25	246.18	0.87456	1.27609
350	168.61	0.00174112	0.0087991	399.337	613.27	213.94	0.90285	1.24622
360	190.43	0.0018959	0.0069308	421.37	593.64	172.27	0.93652	1.20857
370	214.69	0.0022136	0.0049727	451.47	559.56	108.09	0.98185	1.14990
371.15	225.56	0.0031700	0.0031700	503.34	503.34	0.00	1.06116	1.06116

- ③ 각 온도에서 증발열 r 은 엔탈피의 차($h'-h$)이다. 100°C 에서 539.06kcal/kg 이 된다.
- ④ 증발열 r 은 내부에너지 u (u 는 포화증기, u 는 포화수)로부터 구할수 있다.

$$r = h' - h = u' - u + APs(u' - u) \dots \dots \dots (2)$$

$u' - u$ 는 증발에 필요한 내부에너지의 증가이며, $APs(u' - u)$ 는 증발에 의해 외부에 하는 일의 열당량이다. 여기서 A 는 일의 열당량이고 $1/427$ [$\text{kcal/kg} \cdot \text{m}$]이다. Ps 는 포화압력이고, 100°C 의 수증기에서 1.03323kg/cm^2 이다.

100°C 의 물 1kg 을 전부 수증기로 변화시키는데는 539.06kcal 의 열이 필요하며, 그중 수증기의 체적팽창으로 외부에 하는 일은 열에너지로 겨우 40.5kcal 인 것을 계산할 수 있다.

2.2. 액체의 과열

액체를 비점이상으로 가열해도 액체로서 존재하는 과열현상은 실험과 이론으로 알려져 왔다. 실험의 예는, 비이커내에 실리콘유와 유동파리핀의 2층을 만들어 그 중간에 물을 주입해서 물방울을 만든다. 그리고 온도를 상승시켰을 때 액-액의 접촉으로 비등핵이 없기 때문에 쉽게 200°C 이상 과열된 뒤에 물방울이 소멸된다. 그 현상을 분류하면 [1], 물방울 표면의 어느 지점으로 부터 기포가 연속적으로 나온다. [2], 물방울이 작아지고 이윽고 소멸한다. [3], 물방울이 파열음과 함께 순간적으로 소멸한다,로 구분되며 이중 [3]이 대부분 이었다.

또한 액체의 과열과정은 이론적으로 유체의 상태방정식으로 유도된다. 실제유체에 적용할 수 있는 상태방정식은 van der Waals식이 있다. 유체 1몰에 대해서 압력을 P , 부피를 v , 온도를 T , R 을 기체상수라고 하면,

$$(P + \frac{a}{v^2})(v - b) = RT \dots \dots \dots (3)$$

로 표시된다. a, b 는 van der Waals상수이고, a 는 분자력에 관한 것이고, b 는 분자의 부피에 관한 상수이다.

또한, 물질의 상태변화, 즉, 기화·액화등의 현상은 물질의 가열이나 냉각에 의해 일어나는데 일정온도에서는 압력을 변화시킬때 일어난다. 물을 대표적으로 그림1에 나타내었는데 압력 P 와 부피 V 의 변화를 실험적으로 구한 것이다. 그림1에서 ABCD는 일정온도 일때의 압력변화를 나타낸 것이며 D 는 수증기 상태이다. 만일 압력을 증가시키면 수증기의 부피는 감소하고 C 방향울 향하여 DC선상을 이동한다. C 는 포화상태를 나타내는 것이며 계속 압력을 증가시키면 포화상태에 있는 수증기의 일부는 액화되어 물로 변하므로 부피는 감소하지만 압력은 그 온도의 증기압으로 일정하다.(CB 사이) B 점에서는 증기전체가 액화해 버렸기 때문에 더욱 압력을 가하면, 액체의 압축율은 기체에 비해서 아주 작기 때문에 압력상승을 이 커진다(BA 선). 일반적으로 이와같은 경로는 온도를 상승시킨 만큼 윗쪽으로 이동되고 이때 평형부분의 기액공존상태의 길이 CB 가 짧아진다. 각 곡선의 CB 점을 이으면 점선과 같이 되며 이때의 정점 K 가 임계점이다. K 를 지나는 $Ac k Dc$ 곡선 이상의 온도에서는 아무리 압력을 증가해도 기체는 액화되지 않는다. 이때의 압력 및 부피를 임계압력, 임계부피라 하고 $Ac k Dc$ 곡선의 온도를 임계온도라 한다.

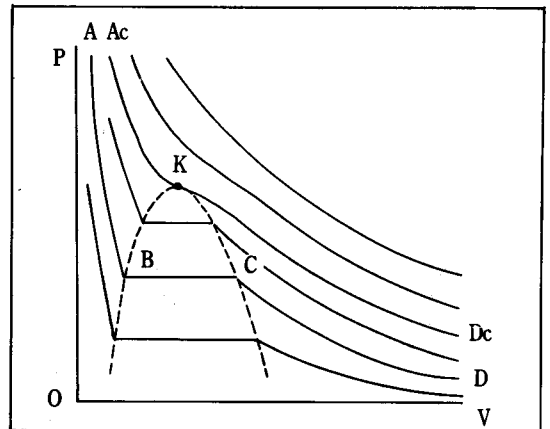


그림 1) 기액2상의 경우에 있어서 상태변화

그런데, van der Waals식에 따라 $P-V$ 곡선을 그리면 그림2에서와 같이 기액공존의 평형부분이 없고 그림1의 BC 부분이 $B \rightarrow G \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow C$ 의 곡선으로 된다. 실제의 변화는 BC 인 수평부분에

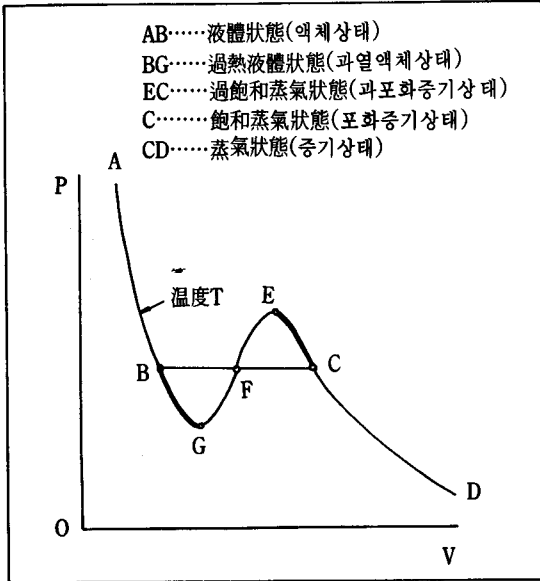


그림 2) Van der Waals의 상태변화와 실제의 상태변화의 관계

부합되어 진행되며 FCE와 BFG의 면적의 크기는 같다.

기체를 일정온도에서 정적인 상태에서 서서히 압축하면 포화증기 상태의 C점에서 C→B의 방향으로 가지 않고 DC를 연장한 C→E를 향한다. 같은 결과로 A의 액체를 정지된 상태에서 서서히 감압해가면 AB의 연장인 B→G를 향한다. 그러나 이와같은 경로는 실제언을 수 없으며 C→E→F→G→B→F→C인 사이클을 형성했다고 하면 이 사이클은 가역사이클이다.

그림2에서 G점이 대기압이 되는 온도를 Van der Waals식으로 부터 구하면 물의 물의 이론과열한계온도 T_c 가 얻어진다. 또 물의 임계온도를 T_c 라 하면 같은 식으로 부터 $T_c/T_c=0.84$ 가 된다.

또한 과열액체가 생성되서 폭발적인 비등을 하여 안정한 상태가 되는 과정을 그림3의 온도-증기압 곡선으로 설명할수 있다. 이 액체의 대기압하의 비점은 J이다. 이것이 가열되면 J→H→K와 같이 상승하지만 증기압은 변화하지 않는다. K점의 온도, 즉 한계과열온도가 되면 폭발적으로 비등해서 기화한다. 이비등은 균일핵비등(homogeneous nucleation)이라는 형식으로 액체내부에 균

일하게 기포가 발생해서 기화하는 것으로 알려져 있다. 최초로 발생하는 증기의 온도는 T_1 이고 압력은 D이다. 계속해서 발생하는 증기의 온도와 압력은 서서히 감소되어 마침내 온도J, 대기압에서 기포의 발생이 종료된다. 이 폭발적 비등은 과열한계폭발(superheat-limit explosion)이라 한다. 물은 대기압하에서 269°C까지 과열하는 것이 가능하다. 만일 269°C까지 과열된 물이 돌비하면 이때 발생하는 압력은 최고 56kg/cm²이나 된다.

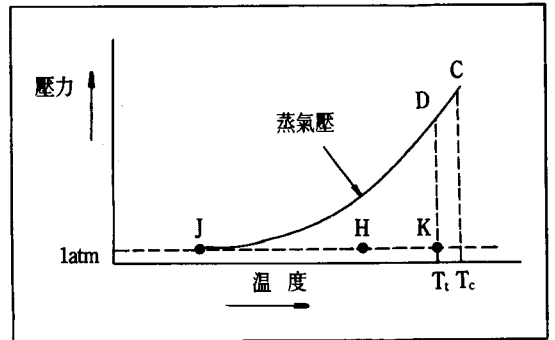


그림 3) 임계과열온도의 액체가 기화할때의 온도-압력관계

2.3. 액체의 비등에 의한 열전달

비등 또는 응축을 수반하는 열전달은 화학변화를 수반하는 일반적인 열전달에 비하면 열전달율이 아주 높으며, 일상생활에서 부터 증기플랜트, 원자력 산업에 이르기 까지 널리 실용화되고 있다. 한편 이 각종 열전달은 그 기구가 복잡하고 영향을 주는 인자도 많기 때문에 그 해석은 매우 복잡하고 연구도 진행되고 있지 않다.

2.3.1. 각종 비등영역

물을 넣은 비이커에 백금선을 넣고 적당한 세기의 전류로 선을 가열하면 처음에는 백금선의 주위에 가열수가 자연대류에 의해 운동하고 있는 것이 보인다. 더욱 전류를 증가시키면 수온이 상승되어 백금선의 표면으로 부터 작은 기포가 발생되기 시작한다. 그러나 전열면에서 멀어지면 갑자기 소멸된다. 물이 포화온도에 도달되지 않는 범위에서는 이와같은 상태가 계속된다. 이 영역의 비등을 sub cool 비등 또는 표면비등이라 한다.

비이커속의 물이 포화온도 혹은 포화온도에 근접하면 발생된 기포는 전열면에서 멀어져도 소멸하지 않고 수면에 도달한다. 이때 비이커내부는 심한 교란이 생긴다. 이와같이 포화온도에서의 비등을 포화비등이라 한다. 이때 기포는 몇 군데의 특정장소에서 연속적으로 발생되며 이와같이 특정한 기포발생점을 갖는 비등현상을 핵비등이라 부른다.

보통의 보일러, 원자력, 또는 일상생활에 사용되는 비등은 이 핵비등 영역에 속한다.

한편 더욱 가열전류를 증가시키면 기포발생점의 수가 증가됨과 동시에 발생된 기포가 전열면 전체를 덮고 거대한 합체 기포가 발생된다.

더욱 전류를 증가하면 백금선의 일부가 백색으로 발열됨과 동시에 기포발생점이 전체를 덮는다. 이것은 핵비등이 상한에 도달했기 때문에 가열선의 온도가 상승해도 증기막이 전열을 나쁘게 하여 백금선이 고온이 되었기 때문이다. 만약 가열선이 철선이나 동선을 사용했을 경우 가열선은 달구어져 절단된다. 이와같은 현상을 burn out점이라고 한다.

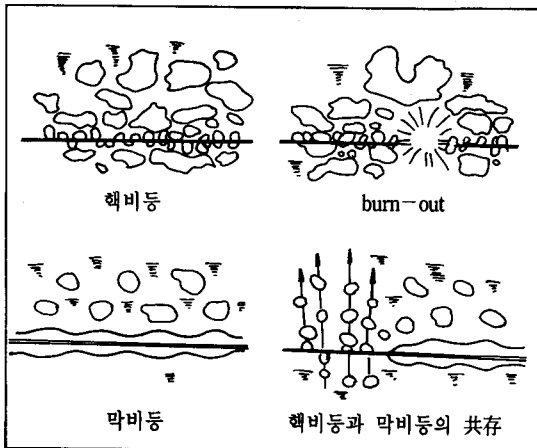


그림 4) 전열선상의 비등상황의 변화모습

그런데 가열선이 백금선이나 카본일때는 burn out점을 통과해도 절단되지 않으며, 다시 가열을 계속하면 선전체가 적열된채로 주위를 증기막이 쌓이고, 막의 일부로부터 규칙적으로 기포가 발생하는 형태로 된다. 이와같이 가열면이 증기막으로 덮여진 비등의 상태를 막비등이라고 부르고

있다.

발광계 달구어진 스토브의 철판면에 소량의 물을 흘리면 작은 물방울로 되어 표면에 구르는 것이 보이는데 물방울과 철판 사이에 증기막이 생기고 물이 막비등을 하고 있기 때문이다. 이 상태는 빨간계 달군 금속을 물속에 담금질 할때에도 볼 수 있다. 이와같은 현상을 Leidenfrost 현상이라 한다.

막비등 상태에서 백금선의 전류를 강하시켜 보면 어느 열유속에 도달하면 일부분이 핵비등 상태로 변하다가 결국 전체가 핵비등 상태가 된다. 이점을 라이덴프로스트점이라 하며 이때의 열유속을 막비등의 극소열유속이라 부른다.

2.3.2. 비등곡선

이상의 실험에 있어서 전열면의 표면온도와 표면열유속과의 관계는 그림5와 같이 N자형 곡선으로 나타난다. 이와같이 온도차 ΔT 와 비등열유속 q_m 의 관계를 표시하는 곡선을 비등곡선이라 한다. 비등곡선중의 OP는 자연대류영역이며 P에 도달하면 기포발생이 시작되기 때문에 비등개시점이라 한다.

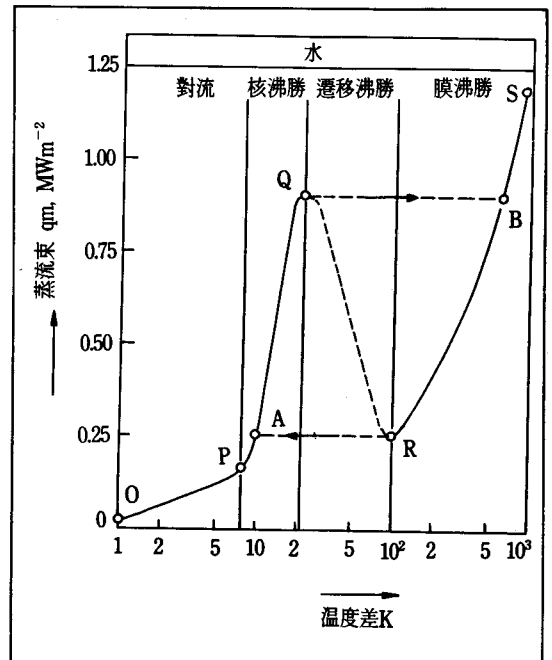


그림 5) 대기압에 있어서 물의비등 곡선

P점에서 부터 burn out점 Q까지가 핵비등 영역이며 이때 q가 ΔT 의 2.5~4승으로 나타나는 급경사를 이룬다. 비등곡선의 RS는 막비등 영역이며 R점은 극소열유속점이며, QR사이는 ΔT 의 증가에 따라 역으로 q가 감소하는 특성을 가진 영역이다. 이 영역을 전이영역이라 한다. 이 영역에서는 전기 가열과 같이 전열량을 제어만으로는 로벽온도가 불안정하게 되어 임의의 1점에 머무르는 것이 어렵게 된다. 이 때문에 비등현상이 일단 Q점을 넘으면 전이비등영역이 되지 않고 막비등 영역으로 급히 이동되고 burn out하게 된다. 즉 q가 일정한 Q점에서 B점으로 쾰다. 또한 역으로 온도차가 감소하는 경우, 막비등에서 q가 작아져 라이덴프로스트점을 넘으면 핵비등의 A점으로 이동된다. QR구간은 최근에 표면온도를 제어할 수 있는 특수한 가열원으로 전이영역의 비등현상을 고속촬영 하는것을 성공하였다. 이 영역에서는 핵비등과 막비등이 혼합해서 존재하고 기포의 생성과 파열이 짧은 무기로 반복되며 다른 영역보다도 격심한 비등현상이 보이고 있어 증기폭발의 기구에 큰 역할을 하는 것으로 알려졌다.

3. 증기 폭발과 예방대책

3.1. 고온 용융물에 의한 증기폭발의 기구

용융금속과 물과 접촉에 의한 증기폭발의 현상은 앞에서 언급한 사고를 계기로 활발히 연구되었다. 이들 증기폭발의 발생압력은 수ms이내이고 경우에 따라서는 0.1ms의 시간스케일이 된다는 것을 알았다. 이와같이 빠른속도의 증기폭발이 발생하기 위해서는 증기의 급속한 생성이 필요하다. 그러기 위해서는 고온물질에서 저온물질로 급속하게 열이 이동되지 않으면 안된다. 간단하게 하기 위해서 양 액간의 전열속도를 $Q(J/S)$, 양 액간의 온도차를 $\Delta T(^{\circ}K)$, 접촉면적을 $A(m^2)$, 열전도율 $h(W/(m^2 \cdot k))$ 로 하면 다음 식으로 나타내어 진다.

$$Q=hA\Delta T \dots \dots \dots (4)$$

Q를 증대시키기 위해서는 h, A, ΔT 가 크지 않으면 안된다. 그러나 ΔT 가 너무 크면 막비등으로 되어 h가 극도로 작게 된다. 또한 h를 비등곡선의 q의 극대치로 하여도 수 ms내의 폭발을 발생시키는 데는 너무 작다. 즉 접촉면적의 확대가 필요하며 그렇게 되기 위해서는 양액이 미세화되어 혼합될 필요가 있다고 생각되어 용융금속의 미세화의 기구가 연구의 중심이 되었다.

이 미세화 기구는 여러가지의 설이 있으나 어느 것이나 용융금속은 용융상태에 있는 크기 이상의 용적으로서 물속에 들어가고 거기서 잘게 분산하여 표면적이 크게되어 갖고있던 열을 물에 전달한다. 이 때문에 물은 단시간에 100 $^{\circ}C$ 이상의 고온으로 되고 과열상태를 거쳐 급속하게 기화하여 대량의 고온·고압의 수증기로 된다. 그로 인해 물을 격렬하게 비산시키고 공기중에 폭발을 발생하여 건물파괴등의 재해로 된다.

3.2. 용융염의 수증기 폭발

보일러에 있어서 Smelt의 주성분은 Na_2CO_3 로서 여기에 소량의 Na_2S , Na_2SO_4 , $NaOH$, $NaCl$ 등이 함유되어 있다. 이 용융염을 약 900 $^{\circ}C$ 로 가열한 후 수조중에 낙하시켜 실험했을때의 결과는 다음과 같다.

- ①용기의 바닥에 가라앉아 폭발하지 않는것.
- ②물속에서 폭발을 반복하여, 경우에 따라서는 큰 폭발을 일으키는 것
- ③용기의 바닥에 가라 앉은후에 작은 폭발을 반복하며, 경우에 따라서는 큰 폭발을 유발시키는 것
- ④접촉직후에 폭발하는 것

용융염이 물과 접촉했을때 이 중에서 어떤 형을 취할 것인가 하는 것을 그조성에 크게 영향을 받는다. 예를들면 탄산나트륨의 단순 용융염은 제1의 형이되고, 탄산나트륨에 10~20%의 염화나트륨이 가해진 용융염은 제2 또는 제3형이 되며, 탄산나트륨에 20%이상의 염화나트륨을 가한 용융염에는 제4의 형이 된다. 이 결과 탄산나트륨에 염화나트륨을 가하면 그 용융염의 표면장력은 급격하게 감소하는 것이 명확히 되었다. 따라서

표면장력이 큰것은 제1형이 되고, 작은 것은 제4의 형으로 되며 중간의 것은 제2 또는 제3의 형이다.

표면장력이 큰 용융염은 낙하하여 물과 접촉했을 때의 충격에서는 미세화되지 않는다. 접촉후는 용융염과 물과의 온도차로 인해 막비등에 의해 열이 이동한다. 따라서 증기폭발은 발생하지 않는다. 이것이 제1의 형이다.

표면장력이 중간의 용융염은 낙하하여 물과 접촉했을 때의 충격에서는 미세화되지 않는다. 접촉후에도 물속을 강하하여 용융염의 앞의 끝부분이 용기의 바닥과 사이에 물을 에워싸서 여기서 국부적인 작은 폭발이 발생하고 용융염이 물속으로 불러 올라가게 된다. 이 용융염은 물속에 부유하는 상태에서 열전달이 행하여 진다. 한편, 용융염이 그다지 크지 않으므로써 표면이 불안정하고 물을 품기 쉽게 된다. 거기서 용융염이 물을 품게되면 국부적으로 작은 미세화가 일어나서 작은 폭발로 된다. 이 작은 폭발에 의해 다른 용융염도 미세화가 진행되고 결국 큰 증기폭발로 진행된다. 이것이 제2의 형이다.

용융염의 앞부분의 끝이 용기의 바닥에 도달했을 때 물을 에워싸지 않으면 뒤따르는 용융염도 바닥에 가라 앉는다. 이 상태에서는 막비등이 일어나나 온도차가 감소하면 전이비등영역이 되고 물이 과열된다. 이 과열수의 비등에 의해 용융염이 미세화되어서 증기폭발을 일으킨다. 이것이 제3의 형이다.

표면장력이 작은 용융염은 낙하하여 물과 접촉했을 때의 충격에 의해 용이하게 미세화되고 증기폭발을 일으킨다. 이것이 제4의 형이다. 이 형의 폭발은 물의 표면가까이에서 일어나므로 폭발이 물속이나 또는 용기의 바닥에서 일어나는 제2, 제3의 형에 비하면 배출수량이 적다.

3.3. 수증기폭발의 예방대책

일반적으로 증기폭발은 착화원도 가열물도 필요하지 않는 상변화에 기인하는 폭발사고이므로 그의 예방대책은 가스폭발의 예방대책과는 완전히 다르다. 일반적으로 위험성이 적다고 생각되고 있는 물이 어떤 조건에 의해서 폭발수라고 하는 위험물로 변하는 것이 이 재해의 특징이다.

증기폭발이 일어나는 설비로서 용광로, 용융로, 평로, 전기로, 회수로등이 가장 많고 Crucible, 주형, 가마등이 그 다음이다. 또 폐기물 수집장소나 배수구, 수조등에서도 발생하고 있다.

수증기폭발의 예방대책의 기본은 물과 고열물체와의 직접적인 접촉의 기회를 주지 않는 것이다. 그러기 위해서는 종래, 어떤 기회에 고열물이 물과 접촉하게 되었던가 하는 경과를 구체적으로 알아서 이것을 참고로 하여 고려할 필요가 있다. 주요 예방대책을 들면 다음과 같다.

3.3.1. 로내로 물의 침입방지

고온의 로내에 물이 들어갈 기회를 주지 않는 것이 가장 중요하다. 로내에 투입하는 재료가 수분을 함유하고 있는 경우도 있고, 전극의 냉각수가 로내에 들어가는 경우도 있다. 또한 로벽의 보수작업을 마치고 벽이 마르지 않아 물을 함유하고 있는 사이에 용융작업을 시작한다든지 화재의 소화작업중에 주수가 로내에 들어가는 경우에 증기폭발사고가 일어나기 쉽다.

3.3.2. 작업바닥의 건조

고온작업을 행하는 작업바닥은 건조하여 있지 않으면 안된다. 공장이 저습지에 있어서 지하수가 솟아 오른다든지 빗물이 들어간단든지 하는 경우가 많으므로써 기초를 잘하여 빗물이 새어들어움을 방지하지 않으면 안된다. 특히 고온작업의 장소는 물로서 젖어있는 편이 안전하다는 잘못된 생각을 갖고 있는 사람이 있으나 이 생각은 고치지 않으면 안된다.

3.3.3. 고온 폐기물의 처리

고온의 폐기물은 건조한 장소에 버리지 않으면 안된다. 고온의 slug등을 폐기하는 경우에 젖어있는 장소에 버린단든지, 또 고온물을 하수구나 수조의 속으로 투입하는 것은 아주 위험하다. 역으로 건조한 장소에 버린후에 냉각시키기 위해 산수하는 것은 불안전하다.

3.3.4. 주수 분쇄설비의 안전설계

고온물에 주수하여 급냉시켜 분쇄하는 경우는 .

특별한 배려가 필요하다. 고온의 slug나 smelt등에 물을 뿌려 급냉하여 분쇄하는 경우에는 물을 사용하므로써 수증기 폭발을 일으킬 우려가 있다. 이러한 경우는 물속에 고온물을 투입하는 것은 안되며, 고온물이 밖으로 흘러나오지 않도록 물을 뿌려주는 설비가 필요하고 또한 주수에 대한 배수를 잘 되도록 하고 물이 정체하여 있도록 해서는 안된다.

참고문헌

- [1] katz, Chem. Eng. Prog. 68[5], 68 (1972)
- [2] Van stralen, and Cole, "Boiling Phenomena" vol.1, McGrow-Hill (1979)
- [3] 安全工學協會編, "爆發" 安全工學講座 2, 161-196, 海文堂 (1983)
- [4] L.C. Witte, J.E. Cox, J.E. Bouvier, J. Materials, Feb 39 (1970)
- [5] 목연수, "화학안전공학" 부산공업대학출판사, 171-189, (1989)