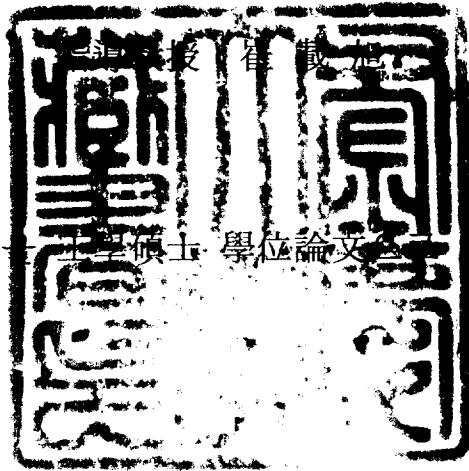


工学碩士 學位論文

표면열처리용 변성가스의 폭발특성에
관한 연구



이 論文은 工学碩士 學位論文으로 提出함

2005年 8月

釜慶大學校 産業大學院

安全工學科

李 柄 喆

李柄喆의 工學碩士 學位論文을 認准함

2005年 6月

主 審 工學博士 權 五 憲



委 員 工學博士 張 聖 祿



委 員 工學博士 崔 載 旭



목 차

1. 서 론	1
2. 이론적 배경	3
2-1. 변성가스의 침탄반응과 공정기본원리	3
2-1-1. 변성가스의 침탄반응	3
2-1-2. 변성가스의 이론변성 반응식	6
2-1-3. 변성로의 구조	7
2-2. 기체 혼합물의 상태방정식	12
2-3. 폭발한계산소농도의 추산	15
2-3-1. 질소첨가시의 폭발한계산소농도	15
2-3-2. 계산값에 의한 폭발한계산소농도	20
3. 실험장치 및 방법	21
3-1. 실험시료	21
3-2. 실험장치	22
3-3. 실험방법	26
3-4. 폭발압력 및 폭발압력상승속도의 측정방법	28
3-5. 최소착화에너지의 측정방법	31
4. 결과 및 고찰	33

4-1. 폭발범위와 산소농도변화에 따른 폭발한계	33
4-2. 변성가스농도변화에 따른 최소착화에너지	35
4-3. 변성가스의 농도변화에 따른 최대폭발압력	37
4-4. 변성가스의 농도변화에 따른 최대폭발압력상승속도	39
4-5. 하한계에서의 산소농도변화에 따른 압력기동	41
4-6. 하한계에서의 산소농도변화에 따른 압력상승속도	46
 5. 결 론	 51
 기 호 설 명	 52
참 고 문 헌	53
Abstract	55

1. 서 론

최근에 화학공업분야 및 금속·철강 분야 등에서는 다양한 금속표면처리방법이 사용되고 있으며, 그 중 하나인 표면경화(Surface hardening)공법은 일산화탄소 등으로 표면의 물리적 성질을 향상시키는 방법으로 사용되고 있다. 그러나 일산화탄소만으로는 침탄성이 약하기 때문에, 메탄, 프로판, 부탄 등에 적당한 비율의 공기를 첨가시킨 변성가스로 열처리를 하게된다. 이러한 이유로 탄화수소계 가스 등의 사용이 매년 증가하는 추세를 나타내고 있다.^{1),2)} 특히 액화석유가스(LPG)는 1970년경 도입된 이래로 사용량이 116.6배나 증가하였고, LP가스 등이 도시가스의 설비사업과는 달리 가스용기 등으로 취급하기 때문에 관리 및 취급불량에 따른 폭발·화재사고가 계속 증가하고 있다.^{3),4)}

변성가스는 약 900~1150℃에 상태에서 탄화수소계의 열분해를 행하고 있으면, 제조설비 등에서 발생할 수 있는 여러 가지 점화원에 쉽게 착화할 수 있으므로 이에 대한 위험성 연구가 절실하지만 지금까지는 관련분야에 대한 연구가 거의 없는 상태이다. 가스사고가 발생시에는 엄청난 인명피해와 함께 많은 재산의 손실을 초래한다.^{5),6)}

가스폭발의 연구사례로는 Kakutkina 등⁷⁾의 밀폐용기의 가스폭발에 관한 평가방법과 Haneda 등⁸⁾의 고전압 영역에 대한 메탄의 점화한계에 관한 연구, 최 등⁹⁾의 도시가스 폭발특성에 관한 연구가 있다. 지금까지의 연구는 금속의 표면열처리 작업으로 변성가스를 사용하고 있지만 프로판 등의 탄화수소계 가스등에 대한 기본적인 연구결과만 있을 뿐 변성가스 자체에 대한 연구가 거의 없는 실정이다. 따라서

본 연구에서는 주요 표면처리 기술중에 한가지인 표면경화공법에 사용된 원료인 변성가스에 대한 폭발특성치를 구하고 폭발시 압력에 대한 위험성인 폭발압력 및 폭발압력상승속도, 최소착화에너지 등을 평가하여 화재·폭발사고의 예방을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. 변성가스의 침탄반응과 공정기본원리

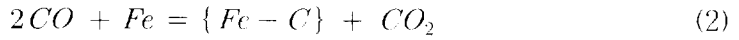
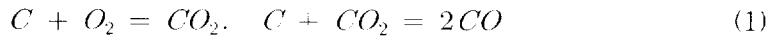
2-1-1. 변성가스의 침탄반응

금속의 후처리에 있어서 주로 CO, N₂, H₂ 등을 포함하는 원료가스가 일반적으로 사용된다. LPG와 일정량의 Air를 촉매층에서 연소시켜, 이때 반응온도에 따른 효과 및 값이 싸고 활성도가 큰 Nickel 촉매를¹⁰⁾ 통해 약 1080℃의 온도에서 실시한다.

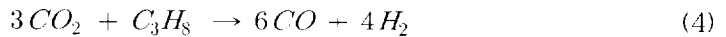
원료가스를 적당한 비율의 공기를 첨가시켜 열분해 또는 산화분해시키는데, 이는 반응가스가 열분해시 그을음이 생겨 철강의 가공재료에 부착되어서 침탄성을 해친다. 침탄은 표면부의 높은 정도와 내부의 인성이 요구되는 경우에 행하는 열처리방법으로써 탄소함량이 낮은 재질(0.15%~0.22%)를 탄소농도 0.9%~1.0%로 만들기 위해 변성가스의 열처리를 통해 금속 이외의 탄소, 질소를 강재료의 표면에 깊이 0.4~1.0mm로 탄소를 침투시킨 후 급냉시켜서 강의 재질을 개선하는 방법이다.¹¹⁾

이러한 침탄과정에서 그을음등으로 인해 침탄성을 해치는 것을 방지하기 위해 가스에 적당한 비율의 공기를 첨가하여 열분해 또는 산화분해된 가스를 표면처리에 사용하는데, 이를 변성가스라고 한다. 변성가스를 사용하는 이유는 가스침탄을 할 때 일산화탄소만으로는 침탄성이 약하기 때문이며¹²⁾, 변성가스의 존재하에 1000℃이상의 조건에서 열분해를 하게되면 LPG 가스에 의해 발생하는 CO₂의 발생을 억제하여 침탄반응을 순조롭게 유도할 수 있다.

원료가스인 LPG 등에 공기를 섞어 Photo 1 열처리로에서 강재를 고온에서 가열하며 그 침탄반응을 반응식은 다음과 같다.



위 반응에서 CO가스가 분해되어 그중{C}는 강속으로 침투하게 되고 CO₂가스가 남게된다. 따라서 분위기 가스중의 CO₂량이 증가한다는 것은 그 만큼의 {C}가 감소하여 침탄능력이 없어지는 것을 의미한다. 이때에 부족분의 {C}를 보충하기 위해 탄화수소계 가스를 첨가시켜서 침탄능력을 유지하게 된다. 즉



그러나 위의 경우는 가장 기본적인 반응이며, 실제의 침탄현상을 보면 이외 C₃H₈ 등의 탄화수소가 열분해 반응에 의해 잔류메탄으로 분해된다. 즉, C₃H₈ 중 일부는 CO₂ 및 H₂O와 반응하여 CO와 H₂로 변하고 일부는 CH₄로 되어 다시 열분해되면서 CH₄ → {C} + 2H₂로 되어 침탄에 참여하게 된다. 이렇게 생성된 {C}가 강속으로 침투되어야 하나 이들이 과다하게 생성된 경우에는 침투되고 남은 {C}가 노벽이나 천정, 바닥 등에 달라 붙게되는 문제점을 안고 있다. 그렇기 때문에 현장에서는 각 제품별, 수량별로 분위기 가스에 첨가하는 LPG가스량을 규제하고 있으며, 현장에서는 이러한 문제에 가장 관심을 가지고 공정을 운영하고 있다.

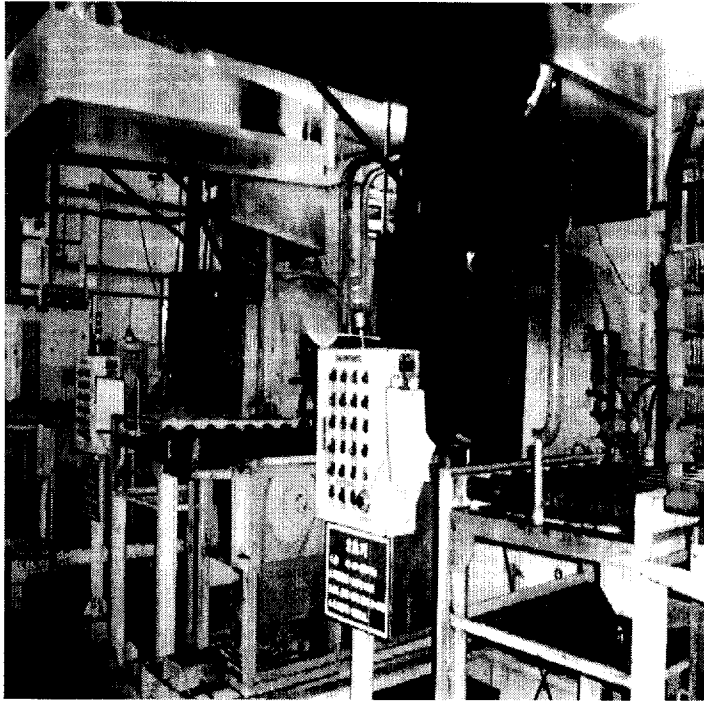
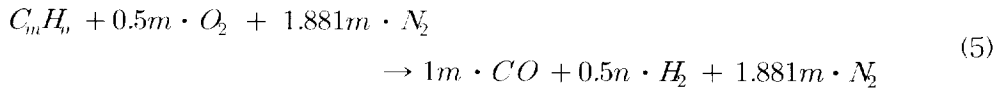


Photo 1. The picture of heat treatment furnace.

2-1-2. 변성가스의 이론변성 반응식

탄화수소가스는 부분 연소에 필요한 량의 공기가 혼합되어, 고온(1080~1100℃)의 니켈 촉매중에서 복잡한 중간반응을 거쳐, 얻어지는 흡연형 변성가스가 된다.

이 반응의 시작과 끝을 총괄하여 나타내면 다음과 같다.



위 식에 의해 탄화수소의 단위 체적에 대하여 공기는 이론상 2.381×m 배가 필요하게 되는데, 위 변성반응은 이 공기혼합비(2.381×m)를 경계로 하여 다음과 같이 변화한다.

1) 공기혼합비 > 2.381×m 일 때

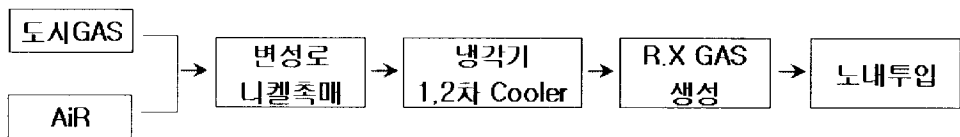
위 식의 우변에 주 조성외에 CO₂와 H₂O가 증가한다. 실제의 변성가스에 대한 공기 혼합비는 이 조건아래에서 이론 공기 혼합비(2.381×m)에 가까운 값을 정한다.

2) 공기혼합비 < 2.381×m 일 때

위 식의 우변 주성분외에 잔류 메탄이 증가하고 니켈 촉매에는 그을음이 부착되어 변성가스 조성은 급속히 불안정하게 되어 변성로 조업을 계속할 수 없다.

2-1-3. 변성로의 구조

변성로의 구조는 하기의 흐름도와 같이 원료가스와 일정량의 공기를 첨가한 후, 변성로에서 고온에서 불리·화학적 성질을 유지하도록 NiO촉매반응시킨다. 반응한 고온의 가스를 냉각기를 통하게 되면 표면열처리용 원재료인 변성가스가 생성하게 되며, 이를 강의 표면처리를 위한 노의 내부에 투입하게 된다.



변성로를 구성하는 주요부품 기능은 다음과 같다.

1) 1,2차 냉각기(Cooler)

1차 Cooler에서 약 1080℃의 변성가스를 320℃ 이하로 급냉시켜 CO가스의 분해작용에 의해 Soot가 생기는 것을 방지하는 역할을 하며, 2차 Cooler는 70℃ 이하까지 내려서 안전하게 작업을 행하게 된다.

2) 역화방지밸브

Retort에서 혼합가스가 불이 붙어 역화되는 경우에, 혼합가스를 차단하는 역할을 한다.

3) 1차 조절기(Primary regulator)

Retort로부터 들어온 가스의 양을 조절하는 압력조절기로써 변성가스의 압력에 의해 조절이 되는 구조를 가지고 있다.

4) 2차 조절기(Secondary regulator)

침탄로에서 변성가스의 사용이 줄어들면 변성로의 2차 압력이 올라간다. 이때 과잉가스가 Excess pipe로부터 자동적으로 나가도록 압력이 조정되어 있는 조절기로서 Retort내의 반응이 압력변화에 의해 변하는 것을 방지하는 역할을 한다.

5) 밸런싱 압력조절기(Balancing regulator)

가스 및 공기의 압력을 일정하게 하여 압력차이에 의해 혼합비가 바뀌는 것을 방지하는 역할을 한다.

6) 언로더(Unloader)

Blower로부터 나온 가스의 압력을 일정한 값이 되도록 하는 역할을 한다.

7) 가스혼합기(Gas mixer)

Blower의 흡입쪽 진공도를 신호로 하여 혼합가스를 Blower에 보내는 역할을 하여 내부의 구조에 의해서 가스 및 공기의 혼합비가 유량에 의해 변하지 않도록 한다.

8) 블로아(Blower)

가스 및 공기를 일정 비율로 Retort로 이송하는 역할을 한다.

9) 가스압력스위치

임계압력치를 설정하여 기준 이상, 이하 일 때 Blower를 자동적으로 정지시키는 역할을 한다.

10) 테스트 파이프(Excess pipe for test operation)

촉매의 건조, 시험작동 등의 경우 가스조성이 안정되어 있지 않을 때 가스를 흘려 보내는 파이프이다.

11) 혼합가스밸브 및 변성가스밸브

각 각 혼합가스 및 변성가스의 양을 조절하는 밸브이다.

12) Retort

노벽에 충전된 열원장치에 의해 가열되며, 내부에 촉매를 충전하여 원료가스가 통과하면서 변성가스로 변화되는 주반응기(主反應器)이다.

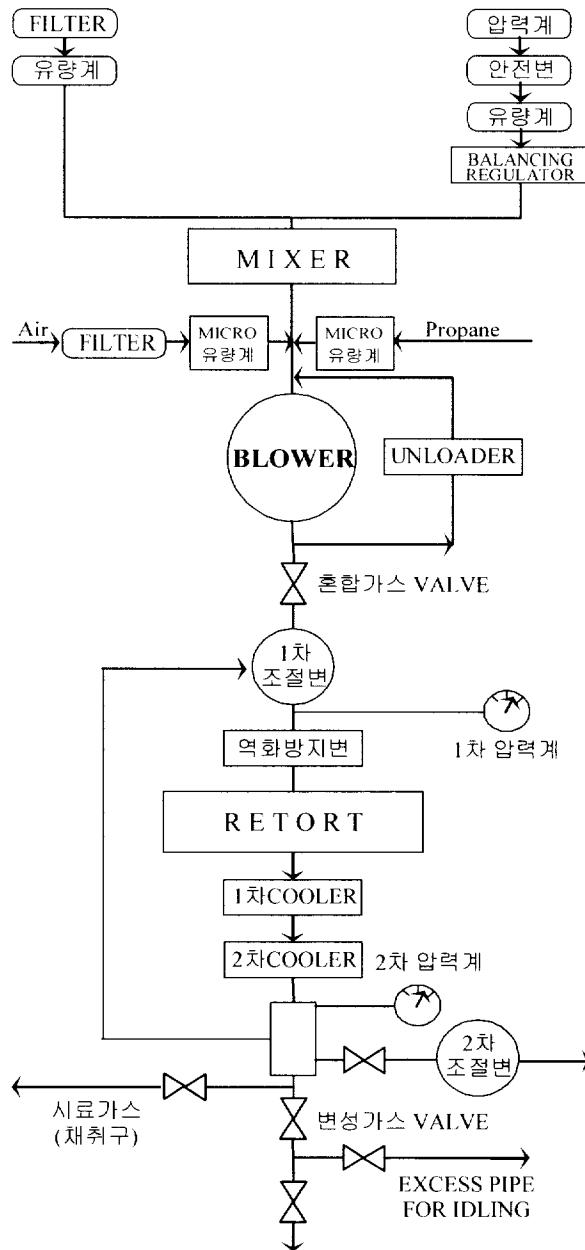
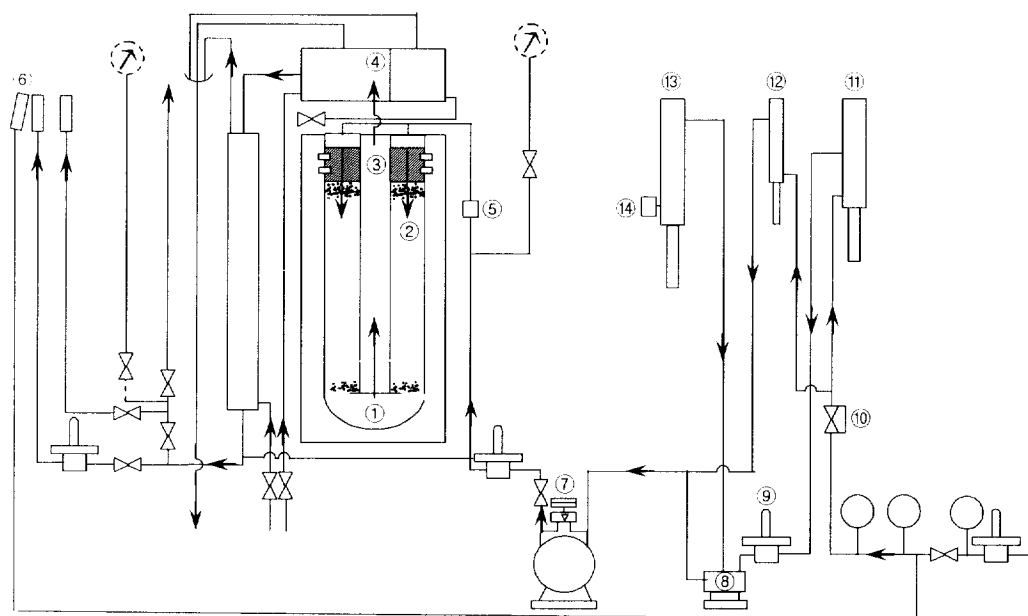


Fig. 1. Flow of converted gas generator.



- | | |
|------------------------|-----------------------|
| ① Converted gas vessel | ⑧ Blower |
| ② Retort | ⑨ Balancing regulator |
| ③ Retort plug | ⑩ Gas safety valve |
| ④ Primary cooler | ⑪ Gas flowmeter |
| ⑤ Fire arrester | ⑫ Micro gas flowmeter |
| ⑥ Pilot burner | ⑬ Air flowmeter |
| ⑦ Unloader | ⑭ Air cleaner |

Fig. 2. Process of converted gas generator.

2 2. 기체 혼합물의 상태 방정식

두 가지 이상으로 혼합되어 있는 기체 혼합물의 경우에 각 물질의 혼합조성비는 압력이나 부피에 의존하게 되며, 혼합 기체속에 들어있는 각 물질의 몰수의 합은 전체 혼합기체의 몰수가 되고, 각각의 몰수는 각 성분 기체의 농도, 즉 양을 나타낸다. 그러나 전체 혼합기체의 경우 일정압력에서 부피의 변화나 일정부피에서 각각의 압력이 변화하게 되면, 각 성분의 농도가 변화하게 되므로 물리화학적 조성을 나타내는 것은 몰분율의 형태로 표시하는 것이 더 편리하게 사용된다.

몰 분율 x_i 는 존재하는 모든 물질의 몰수의 합, $n_t = n_1 + n_2 + n_3 + \dots$ 에 각 몰수를 나눈 것으로 식 (7)과 같으며, 혼합물 속에 존재한 모든 물질의 몰분율의 합은 1로서 식 (8)과 같다.

$$x_i = \frac{n_i}{n_t} \quad (7)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_i = 1 \quad (8)$$

식 (8)에 의해 한 물질의 몰분율을 모르더라도, 나머지 물질들의 몰분율만 알면 그 혼합물질의 조성을 알 수 있고, 몰 분율 자체가 혼합기체의 부피, 압력 및 온도에 무관한 함수이기 때문에 보통 몰분율로 표시한다.

기체 혼합물에 대하여 각 성분을 이상기체로 가정하면, 이상기체의 법칙이 적용되며, 혼합기체의 상태방정식은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$PV = n_i RT \quad (9)$$

여기서 절대온도 T 에서 부피가 V 인 용기 속에 몰수가 n_1, n_2, n_3 인 세 기체가 혼합되어 있다고 가정하면, $n_i = n_1 + n_2 + n_3$ 가 되고, 이 혼합기체의 압력은 식 (10)과 같이 구할 수 있으며,

$$P = \frac{n_i RT}{V} \quad (10)$$

각 성분에 대한 부분 압력을 구한다면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1 = \frac{n_1 RT}{V}, P_2 = \frac{n_2 RT}{V}, P_3 = \frac{n_3 RT}{V} \quad (11)$$

여기서 식 (11)을 식 (10)에 적용시키면,

$$P_1 + P_2 + P_3 = (n_1 + n_2 + n_3) \frac{RT}{V} = n_i \frac{RT}{V} = P \quad (12)$$

이것은 일정온도에서 혼합기체가 나타내는 전체 압력은 그 성분 기체들의 부분 압력의 합과 같다는 것을 나타내고, Dalton의 분압법칙이라 한다.

분압 법칙은 혼합물 속에 들어있는 그 기체의 몰분율과 간단한 관계를 가지므로 식 (11)의 첫째항을 식 (10)로 나누어서 식 (7)에 적용시키면 식 (13)과 같이 된다.

$$\frac{P_1}{P} = \frac{n_1}{n_t} = x_1 \quad (13)$$

식 (13)은 일부의 기체 혼합물에만 국한되지 않고 모든 기체 혼합물에 대해서도 성립되며, 전체 압력과 몰분율만 알면 분압을 계산할 수 있으므로, 필요로 하는 화학조성의 농도를 만들 수가 있다.

2 3. 폭발한계산소농도의 추산

2-3-1. 질소첨가시의 폭발한계산소농도^{13),14)}

가연성가스 및 인화성액체를 취급하는 설비에서 화재·폭발을 예방하기 위하여 불활성가스를 첨가하여 혼합가스중의 산소농도를 어느 한계치 이하로 유지하면 화재·폭발의 발생을 예방할 수 있다. 이 한계의 산소농도를 폭발한계산소농도라 하며, 불활성가스로는 헬륨, 질소, 수증기, 이산화탄소 및 사염화탄소 등이 사용되나 실제적으로 산업현장에서는 질소를 많이 사용하고 있다.

질소첨가시의 한계산소농도를 추산하기 위하여 다음의 경험적 사실을 활용한다.

(가) 폭발범위도에 있어서 폭발범위의 형상은 거의 삼각형이다.

(나) 하한계 선은 공기-질소농도 선에 평행한 직선이다.

(다) 임계점은 거의 화학양론선상에 존재한다.

(라) 임계점은 하한계선과 화학양론선의 두 선상에 존재하므로, 이 두직선의 교점에서 구해진다.

(마) 임계점에 있어서 산소농도가 한계산소농도로 된다.

따라서 한계산소농도를 구하기 위하여 임계점의 위치를 결정하면 되고, 임계점은 하한계선과 양론선의 교점으로부터 구하면 된다. 이를 위해 삼각도를 사용하는 작도법도 가능하나 실용상에서는 직교좌표에 의한 계산법이 편리하다. 더욱이, 이 직교 좌표는 원점을 공기성분으로 하는 직각 삼각도를 사용하여 나타낸다.

Fig. 3의 XY좌표에서 하한계선은 $L_1(0, b)$ 을 통과하는 X축에 평행한 직선이며, 양론선은 $C_{st}(0, a)$ 와 $C(100, 0)$ 의 두 점을 통과하는 직선이므로 이들 방정식은 각각 다음과 같이 된다.

$$y = b \quad (14)$$

$$y = -\frac{a}{100}x + a \quad (15)$$

이 두 직선의 교점의 좌표는 연립방정식을 풀면 얻어지며 식 (14), (15)로부터

$$x = (1 - b/a) \times 100$$

즉, 임계점 L_3 의 좌표는 $[x = (1 - b/a) \times 100, b]$ 로 된다.

이와 같이 L_3 의 X좌표는 b/a 의 값으로 결정되는 것을 알 수 있다. 또한 L_3 에 있어서 3성분중의 산소농도는

$$\text{공기}(\%) = 100\% - [\text{가연성성분}(\%) + \text{질소}(\%)]$$

가 되고, 이로부터 식(16)에 의해 산소농도를 구할 수 있다.

$$\text{성분중의 산소}(\%) = [100 - [b + (1 - b/a) \times 100]] \times 0.209 \quad (16)$$

한계산소농도를 공기-질소 2성분중의 농도로서 표시하는 것은 Fig. 3에 있어서 $A(0, 100)$ 와 $L_3[(1 - b/a) \times 100, b]$ 의 두 점을 통과하는 직선과 X축의 교점인 E점의 좌표를 구하면 된다.

$$y = \frac{-(100 - b)}{(1 - \frac{b}{a}) \times 100} x + 100 \quad (17)$$

$$y = 0 \quad (18)$$

식 (17), (18)로부터

$$x = \frac{(1 - \frac{b}{a}) \times 10^4}{100 - b}$$

따라서 E점의 산소농도는 식 (19)로부터 구해진다.

$$[100 - \frac{(1 - \frac{b}{a}) \times 10^4}{100 - b}] \times 0.209 = 2 \text{ 성분중의 산소}(\%) \quad (19)$$

Fig. 4는 식 (16)과 (19)의 한계산소농도의 관계를 나타내며, 계산치를 비교하면 하한계 L_1 의 값이 높을수록 양자의 차이가 크나 하한계치가 비교적 작은 유기화합물에서는 일반적으로 무시할 수 있는 정도의 차이이다.

또한 불활성가스가 탄산가스 또는 수증기의 경우에는 대부분 한계산소농도의 값이 질소의 경우보다 약간 높으므로 질소로서 구한 값을 이용하면 충분히 안전하다.

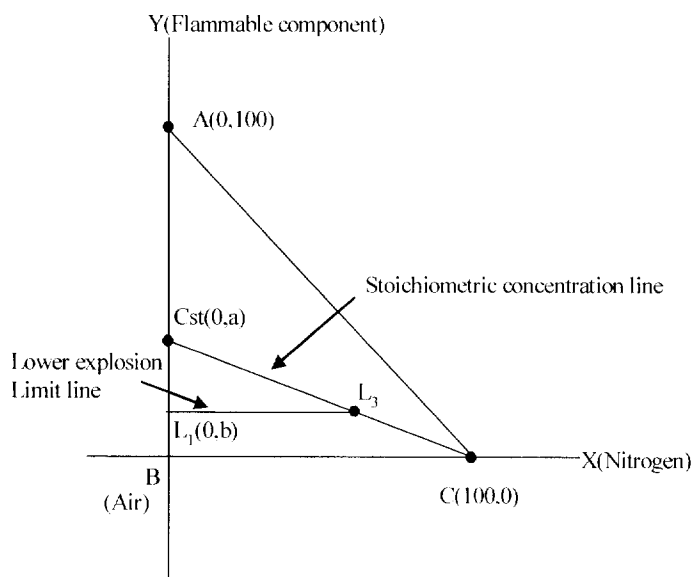


Fig. 3 Explosion range diagram of three-component system.

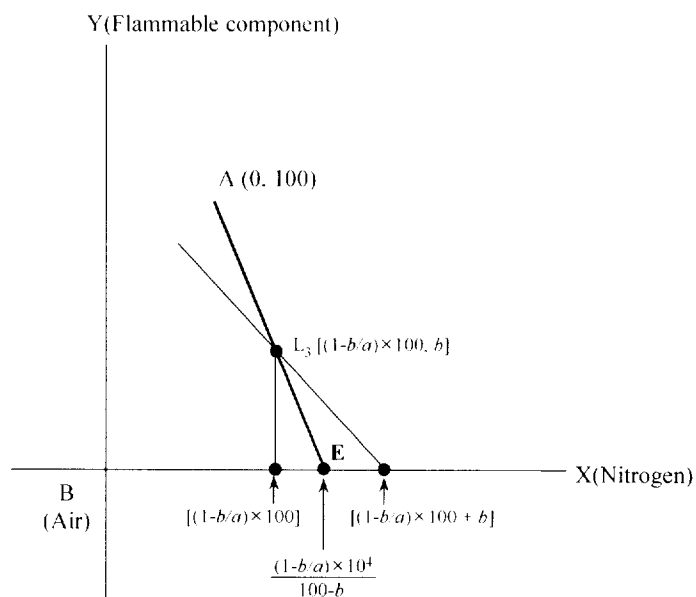


Fig. 4 Relationship between two kinds of critical oxygen concentration.

2-3-2. 계산값에 의한 폭발한계산소농도

폭발한계산소농도의 추산은 2-3-1에서와 같이 삼각도표를 이용하여 구하는 방법을 사용하기도 하고, 일반적으로 계산에 의해 편리하게 구하기 위해서는 가연성 가스 또는 인화성 액체의 폭발하한계와 그 물질의 완전연소 방정식을 이용하기도 한다. 이 방법은 폭발하한계에 있어서의 가스 및 증기를 완전연소 시키기 위해서는 산소농도가 얼마나 될 것인가를 계산하여 이를 연소에 필요한 최소산소농도(MOC, Minimum Oxygen for Combustion) 즉, 폭발한계산소농도라 하며 식 (20)과 같이 계산할 수 있다.¹⁵⁾

$$MOC = L_1 \times \text{화학양론적 산소 } mol\text{수} \quad (20)$$

3. 실험장치 및 방법

3 1. 실험시료

본 실험에서 사용된 변성가스는 (주)○○열처리에서 표면처리용으로 (주)○○자동차의 부품을 열처리하는데 사용되는 가스를 채취하였으며, 주요 표면열처리용 변성가스 조성은 Table 1. 과 같다.

Table 1. The composition of converted gas

원 료 가 스	반 응 가 스	변 성 가 스
Methane(CH_4)	$\text{CH}_4 + \frac{1}{2}(\text{O}_2 + 4\text{N}_2)$	$\text{CO} + 2\text{H}_2 + 2\text{N}_2$
Propane(C_3H_8)	$\text{C}_3\text{H}_8 + \frac{3}{2}(\text{O}_2 + 4\text{N}_2)$	$3\text{CO} + 4\text{H}_2 + 6\text{N}_2$
Butane(C_4H_{10})	$\text{C}_4\text{H}_{10} + 2(\text{O}_2 + 4\text{N}_2)$	$4\text{CO} + 5\text{H}_2 + 8\text{N}_2$

3-2. 실험장치

가스폭발한계를 측정하는 장치로서는 전파법과 버너법이 있으며, 이중에서 전파법은 원통형 또는 구형의 용기내에 혼합가스를 넣고 한쪽에서 점화하여 화염이 전체에 확산되는 한계조성을 결정하는 방법이고, 버너법은 버너위에 안정된 화염이 가능한 혼합가스 조성의 한계치를 결정하는 방법이다.¹⁶⁾

본 연구에 사용한 실험장치는 전파법을 개량한 장치로써 Fig. 5와 같다. 주요 구성부로는 폭발통부, 진공부, 에너지 공급부, 폭발압력 측정·저장부로 구성되어 있으며, Photo 2에 나타내었다.

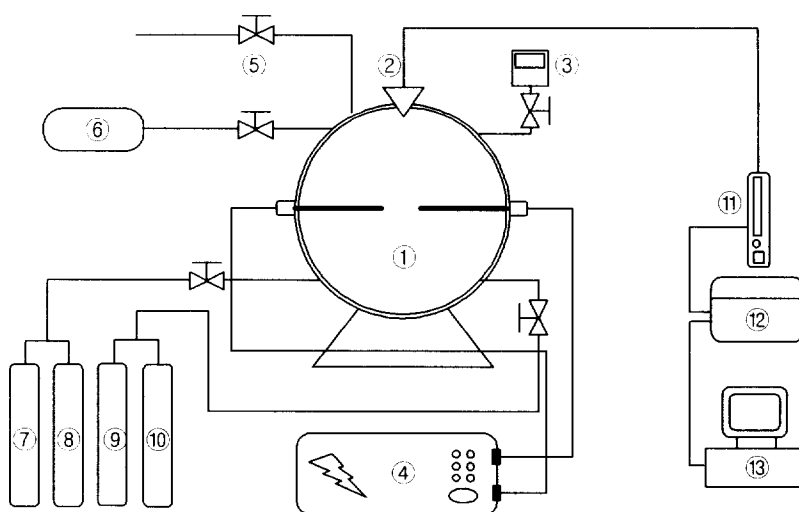
폭발통부에는 폭발통과 압력측정센서로 구성되어 있으며, 폭발통은 원통형으로 외경이 148mm, 지름이 105.4mm로서 용기의 체적이 1.1ℓ이며, 용기의 앞면은 직경 32mm의 강화유리를 부착하여 용기내부의 폭발 거동을 육안으로 확인할 수 있고, 불완전연소 시 발생하는 타르 등의 이물질들을 제거할 수 있도록 개폐가 가능한 구조로 하였다. 그 외의 부분은 두께 21.3mm의 Stainless steel로 제작하였다. 용기에는 가스주입시 농도를 확인할수 있도록 디지털 압력계(PG-200-102G, Copal Electronics CO., LTD)를 부착하였으며, 폭발시에 압력 측정을 위해 용기 상부에 0 ~ 30 kgf/cm²까지 측정할 수 있는 압력센서(PE-30KF, Kyowa Electronics Co., LTD)를 부착하였다.

폭발통 양측부에는 전기에너지를 공급할 수 있도록 점화전극을 용기의 중앙부에 설치하였다. 또한, 용기의 양측부에 3개의 가스주입밸브를 설치하여, 이들을 진공흡입구, 변성가스주입구, 산소·질소주입구로 이용하였다.

진공부는 진공펌프와 배기밸브로 구성되어 있고 에너지공급부는 점화원의

역할을 하는 부분으로서 용량방전형 콘덴서, 가스봉입형 고전압스위치, 방전 제한저항, 무유도저항 등으로 구성되어 있다. 용량방전형 콘덴서는 설정된 전압을 충전하는 역할을 하며, 가스봉입형 고전압스witch는 고전압으로 충전된 콘덴서를 방전회로측에 순간적으로 접속시키는 역할을 한다. 방전제한 저항은 작화지연시간의 역할을 하는 것으로, 저항의 크기에 따라 방전전극을 통해 방전되는 작화지연시간이 달라진다. 방전전극 2차측에는 무유도저항 2개가 장치되어 있는데 고주파 진동을 제어하기 위한 500Ω의 무유도저항과 전류 검출용의 무유도저항(50Ω)을 사용하였으며, 접지선에 연결되어 있다.

폭발에너지 측정·저장부는 오실로스코프(TDS 220, Tektronix), 앰플리파이(DA 16A, Tokyo Sokki Kenkyujo) 및 컴퓨터로 구성되어 있다. 폭발발생시 발생하는 폭발압력은 주문제작된 프로그램 TPMeas((주)엘텍인스트루먼트))를 통해 실시간으로 모니터링하고 수치화시킬 수 있으며, 폭발통에 부착된 압력센서의 신호는 증폭기를 통해 증폭시킨 후 A/D Converter를 통해 신호를 변환시키고, 변환된 수치는 압력변화 및 그 값을 데이터화되어 컴퓨터에 저장된다. 이 데이터를 가지고 최대폭발압력과 폭발압력상승속도를 계산하였고, 최소작화에너지 측정시에는 오실로스코프상에 파형이 나타나도록 하여 이것을 컴퓨터로 처리하여 수치화한 다음에 프로그램을 통하여 최소작화에너지 값을 계산할 수 있도록 구성하였다.



- | | |
|----------------------------|-----------------|
| ① Explosion vessel | ⑧ Hydrogen bomb |
| ② Pressure sensor | ⑨ Oxygen bomb |
| ③ Pressure gage | ⑩ Nitrogen bomb |
| ④ High voltage transformer | ⑪ Amplifier |
| ⑤ Vent valve | ⑫ Converter |
| ⑥ Vacuum pump | ⑬ Computer |
| ⑦ Sample gas bomb | |

Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus.

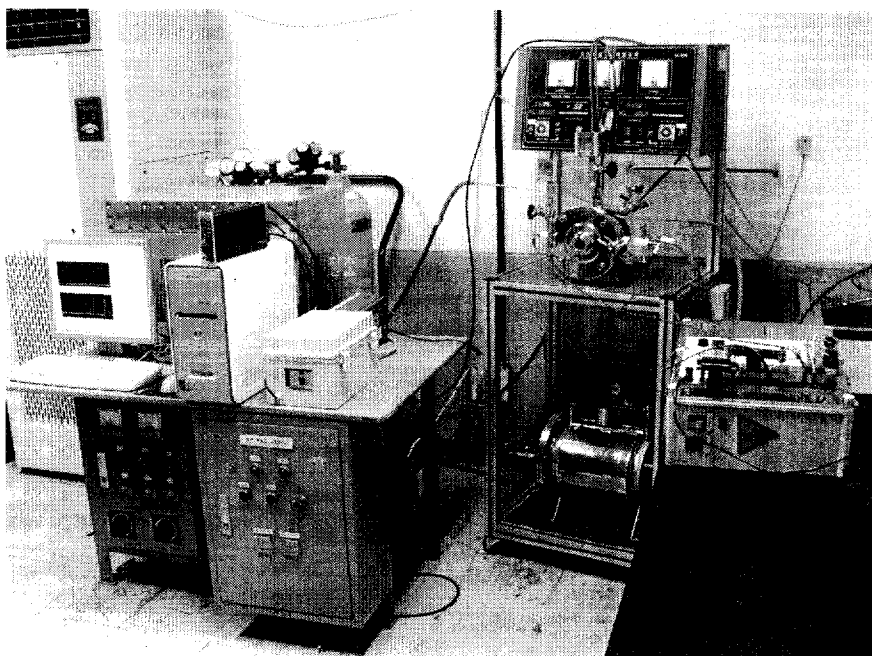


Photo 2. The picture of experimental apparatus.

3 3. 실험방법

가스 폭발의 경우에는 온도와 습도에 따라서 폭발거동이 다르므로 실험의 재현성을 좋게 하기 위하여 온도 $25 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 5\%$ 의 항온항습실에서 실험을 행하였다. 가스의 농도변화에 대한 실험을 수행하기 위하여 폭발통에 주입하는 산소, 질소는 순도 99%의 것을 사용하였으며, 실험은 다음의 순서에 의해 진행하였다.

- (1) 폭발통 내부를 진공펌프를 사용하여 상부에 설치된 압력계의 수치가 1.000 kgf/cm.G (이하 모든 압력은 gage pressure임)까지 진공을 만든다.
- (2) 기체 혼합물의 상태방정식으로 계산된 압력의 수치만큼 변성가스의량을 가스 주입구를 통해서 주입한다.
- (3) 산소를 산소 주입구를 통해 해당 압력만큼 폭발통에 주입한다.
- (4) 질소를 질소 주입구를 통해 해당 압력만큼 폭발통에 주입한다. 이때 질소 주입부의 밸브를 급격히 열어 폭발통 내부로 질소가 빠르게 유입되면서 내부에 난류를 형성시켜 시료가 잘 혼합될 수 있도록 한다.
- (5) 점화플러그에 전원을 연결한다.
- (6) 점화스위치를 작동시켜 폭발유무를 관찰한다.
- (7) 폭발시 TPMeas 와 오실로스코프상에 나타난 파형을 컴퓨터로 읽어 들여 저장한 다음 계산한다.

가스의 폭발한계를 결정하기 위하여 변성가스농도를 10%씩 변화시켜 실험하였으며, 폭발하한와 상한의 부근에서는 1%범위의 농도에서 3회이상 실험하여 1회라도 폭발했을 때의 최소농도를 폭발하한계로 최대농도를 폭발상한계로 하였다.

폭발한계산소농도를 측정하기 위하여 순도가 높은 산소와 질소를 미리 혼합한

21%~100% 사이에서 각각 10% 간격으로 혼합가스(제조회사 : (주)유니온가스, 순도 : 99.8%)를 사용하여 폭발범위를 측정하였으며, 폭발이 발생하는 최저농도를 폭발한계산소농도로 하였다.

3 4. 폭발압력 및 폭발압력상승속도의 측정방법

각 가스의 농도별로 폭발압력 및 폭발압력상승속도($\frac{dP}{dt}$)가 다르기 때문에 이를 측정하여 위험성평가를 하는 것이 대단히 중요하다. 폭발시에 압력센서로부터 측정된 압력은 증폭기에 의해서 증폭되어 TPMeas에 기록된다. 여기서 시간의 변화에 따라서 폭발압력의 값을 확인할 수 있으며, 프로그램(엑셀)상의 데이터를 가지고 시간에 대한 압력의 변화값을 통해 각 각 의 시간에 대한 폭발압력상승속도를 구하였고, 이들 중에 가장 큰 값이 최대폭발압력상승속도이다.

Fig. 6은 폭발시에 TPMeas를 통해 실시간으로 시간에 대한 압력변화를 파형으로 형상화되어 보여주는 것이며, 여기서 측정된 수치를 가지고 폭발압력과 폭발압력상승속도를 구하기 위해 프로그램(엑셀)으로 데이터화하여 Fig 7과 같이 그래프로 나타내었다.

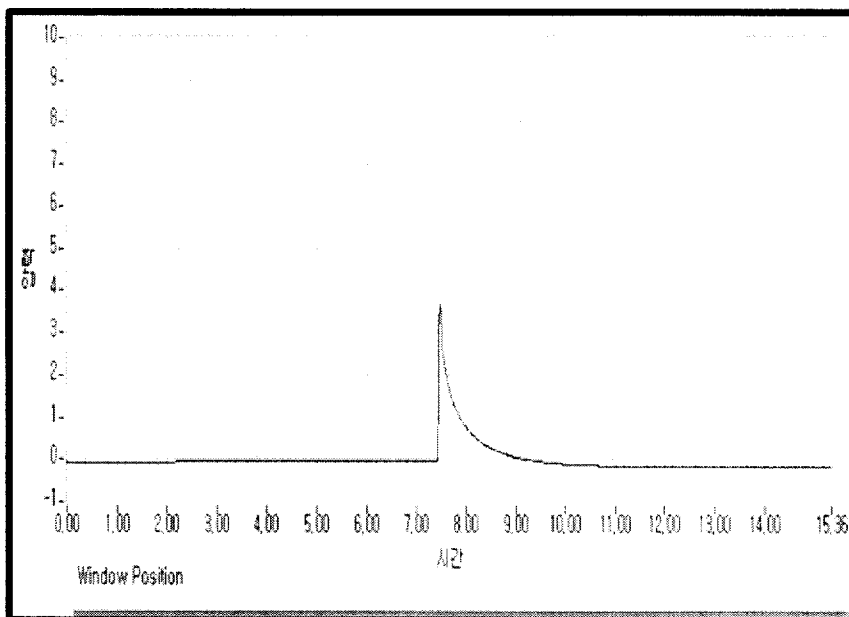


Fig. 6 The wave plotted from the TPMeas program.

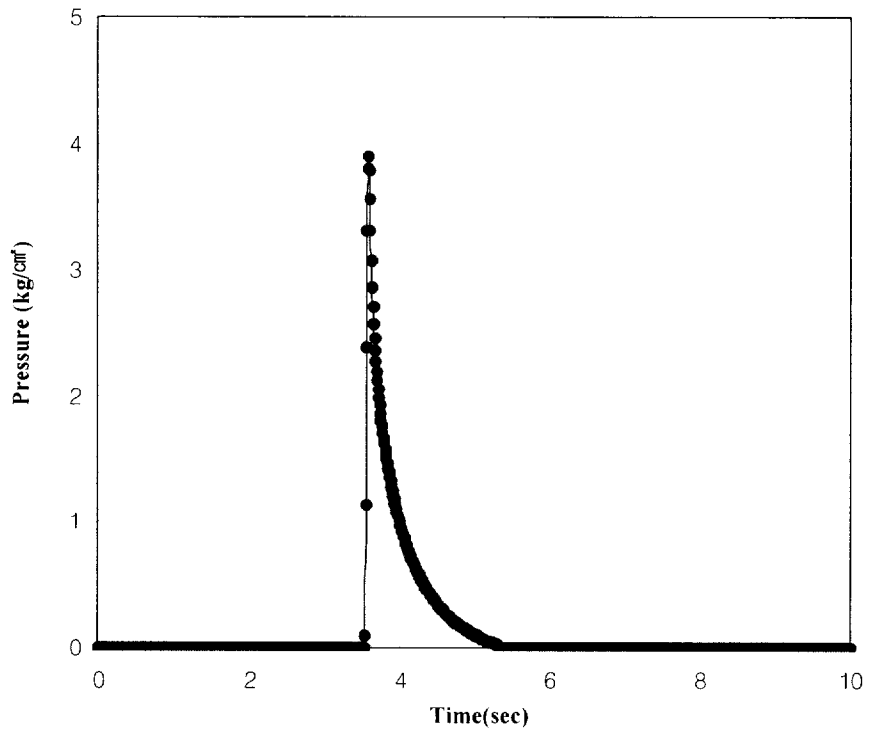


Fig 7. The wave plotted from the program(excel).

3 5. 최소착화에너지의 측정방법

가스폭발에 있어서 최소착화에너지(minimum ignition energy)란 폭발성가스와 공기혼합물 중에 에너지가 주어졌을 때 착화가 일어나는 최소한의 한계에너지로서, 이 한계에너지 미만에서는 어떠한 가스농도에서도 폭발이 발생할 수 없는 에너지를 최소착화에너지라고 한다.

이 최소착화에너지는 가스폭발을 미연에 방지하는 대책의 중요한 값이다. 그러나 가스의 농도와 주변의 온도, 습도 등에 많은 영향을 받으므로, 일정한 값을 가지는 것에는 많은 어려움 있지만 비교적 분진폭발에 경우보다는 신뢰성이 높은 편이다.^{17),18)}

최소착화에너지의 측정원리는 전원으로부터 고전압콘덴서를 충전시킨 후 폭발통 내에 있는 혼합가스에 콘덴서로부터 축적된 정전 에너지를 방전시켜 전극에서 기체의 전연과괴 에너지에 도달하면 방전전극 사이에서 불꽃방전이 일어난다. 이 때 방전전극에서 소비된 방전에너지를 구하고, 에너지의 값을 증감시켜 가며 착화가 발생하는 최소의 한계치 즉, 최소착화에너지를 구할 수 있는데, 이는 방전전극과 집지전극간의 방전시간에 대한 방전전압과 방전전류의 곱으로서 산출한다.¹⁹⁾

실험을 통해 폭발로 인정된 값들에 대한 오실로스코프의 파형은 컴퓨터로 읽어 들여 수치화 하였으며, 얻어진 데이터는 다음의 계산식에 따라 착화에너지를 구한다.²⁰⁾

$$W = \int IV dt \quad (21)$$

여기서, W(J):착화에너지, I(A):방전전류, V(V):방전전극간의 전압

Fig. 8은 오실로스코프에 나타난 파형을 나타내고 있는데, 파형 1>은 방전전극간의 전압을 표시하고, 파형 2>는 방전전류를 나타낸다.

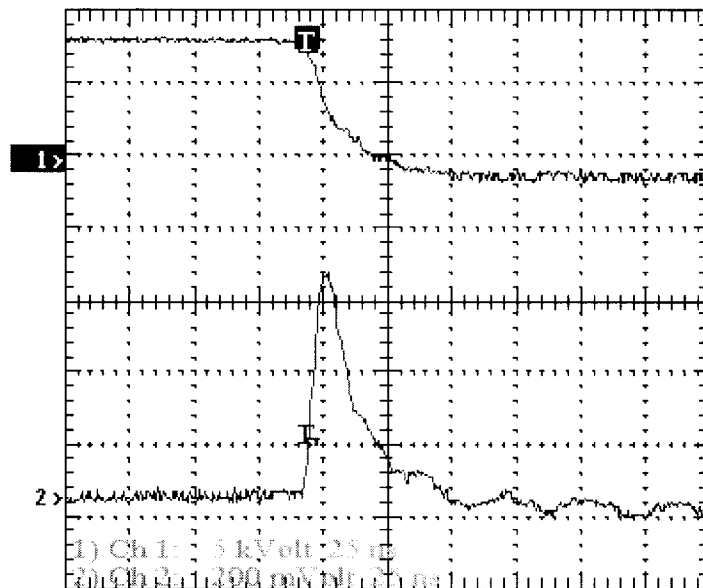


Fig. 8. The plotted waves from the oscilloscope.

4. 결과 및 고찰

4. 1. 폭발범위와 산소농도변화에 따른 폭발한계

가스폭발의 경우에는 가연성 gas와 지연성 gas와의 혼합상태에서 점화원이 가해진다고해서 항상 폭발이 일어나지는 않으나, 가연성 gas와 지연성 gas가 폭발 가능한 농도범위 내에 있을 경우에는 폭발이 일어난다. 일반적으로 이 때의 범위를 폭발범위라 하며, 폭발범위의 정확한 측정은 가스폭발사고 방지대책의 가장 기본적인이며 중요한 사항이다.²¹⁾

Fig. 9는 변성gas와 변성gas에 수소를 10%, 20% 첨가함에 있어서 산소농도에 변화에 따른 폭발 특성치를 나타낸 것으로 동일한 산소농도에서 수소의 농도가 증가할수록 하한계는 낮아지고 상한계는 거의 변화가 없었다.

또한 각각의 가스조성에 따라 실험한 결과 산소농도 21%에서 변성gas, 변성gas에 수소를 10%, 20%첨가하였을 때 폭발하한계는 각각 17%, 15%, 13%를 나타내었고, 폭발하한계의 변화는 수소농도가 증가함에 따라 낮아지는 것을 알 수 있다. 폭발상한계에 있어서는 수소농도 변화에 따른 변화는 거의 없었으며, 산소농도 50%이하에서는 급격하게 감소하였다. 따라서 상한계와 하한계 피이크 값인 6%에서 한계 산소농도(MOC)를 구하였다.

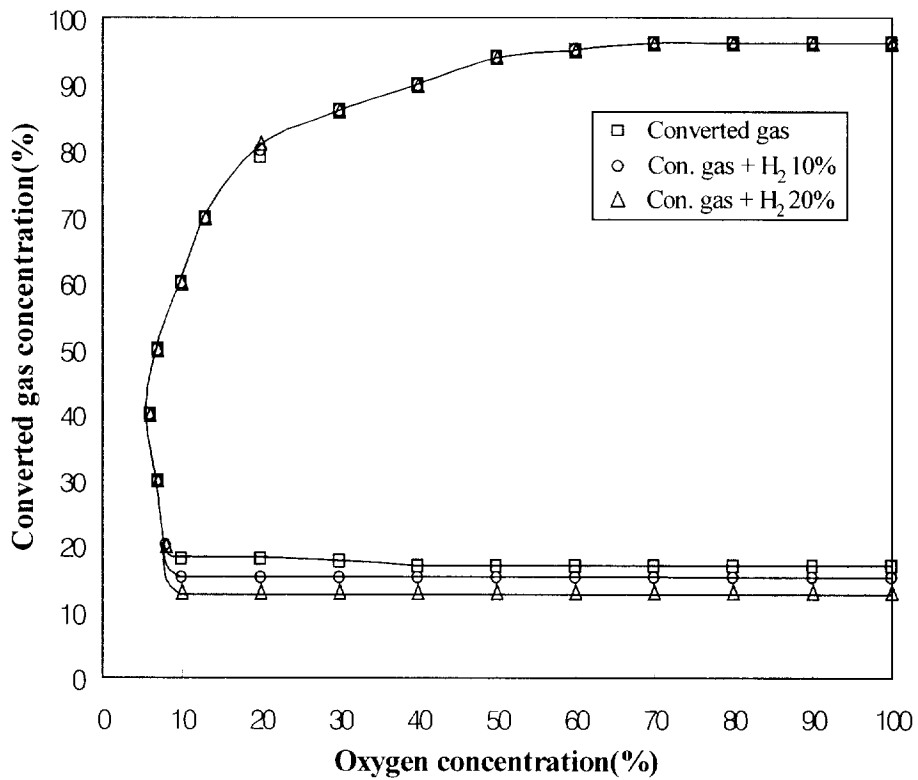


Fig. 9 Explosion behavior between converted gas and oxygen concentration variation.

4 2. 변성가스농도변화에 따른 최소착화에너지

Fig 10은 산소농도 21%에서 변성가스의 최소착화에너지를 구하기 위하여 변성가스의 농도를 변화시키면서 에너지를 측정한 결과, 가스농도 20%에서 최대값 1.36mJ를 나타내었고 시료농도가 증가함에 따라서 낮아지다가 산소농도 50% 부근에서 0.13mJ의 에너지를 구하였다. 또한 변성가스의 농도가 50%이상에서는 다시 착화에너지가 증가되어 70%에서 1.33mJ를 구하였다.

따라서 본 연구에서 사용된 변성가스는 착화 가능한 0.13mJ이상의 에너지 발생에 주의를 하여야 할 것으로 사료된다.

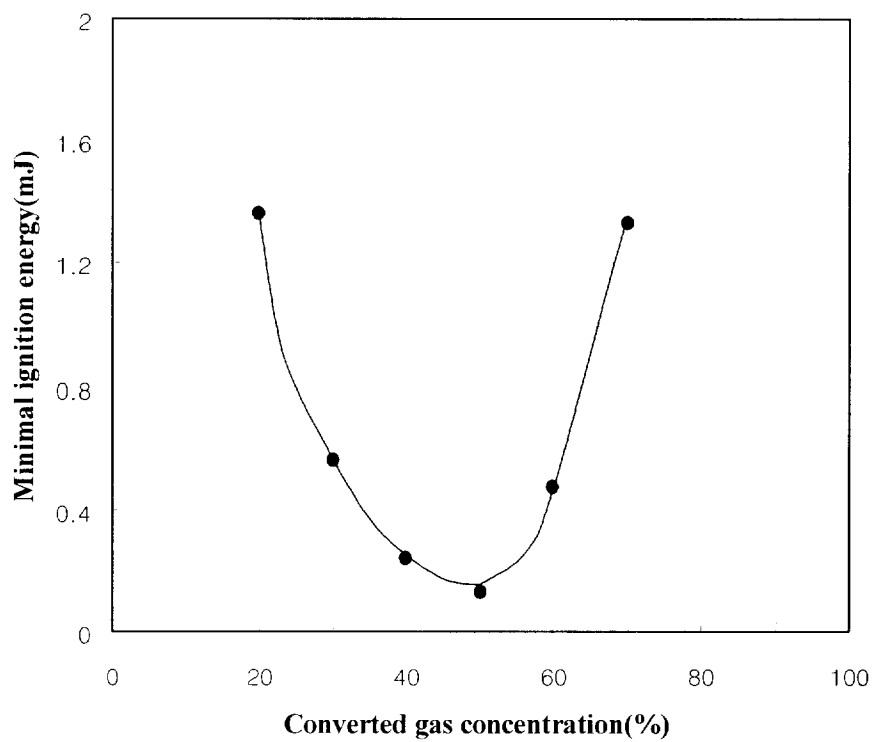


Fig. 10 Minimal ignition energy of converted gas at oxygen concentration 21%.

4 3. 변성가스의 농도변화에 따른 최대폭발압력

가스폭발연구에 있어서 폭발압력은 가스의 저장·취급시설 설비시에 내압능력과 방폭설비의 선정기준으로써 매우 중요한 인자이기 때문에 이에 대한 안전대책을 강구하는데 반드시 고려해야할 사항이다. 본 실험에서는 폭발통내의 전극간극을 5mm로 하고, 방전전압을 15kV로 설정하여 실험을 행하였다.

Fig. 11은 산소농도 21%에서의 변성가스의 최대폭발압력을 나타낸 것으로서 하한계에서부터 변성가스의 농도가 증가할 수록 폭발압력이 가파르게 상승하다가 변성가스농도 40%부근에서 최대폭발압력을 나타내었고, 변성가스 및 수소 10%, 20%를 첨가하였을 때, 각각 최대폭발압력의 값은 $4.61\text{kg}/\text{cm}^2$, $4.53\text{kg}/\text{cm}^2$ 및 $4.31\text{kg}/\text{cm}^2$ 를 얻었다.

본 연구에서 변성가스 및 수소 첨가에 따른 최대폭발압력은 일반적인 탄화수소불질의 최대폭발압력보다 낮게 나타났다. 따라서 동일한 재질일 경우 변성가스의 저장, 취급설비는 폭발에 대한 내압능력이 우수할 것으로 사료된다.

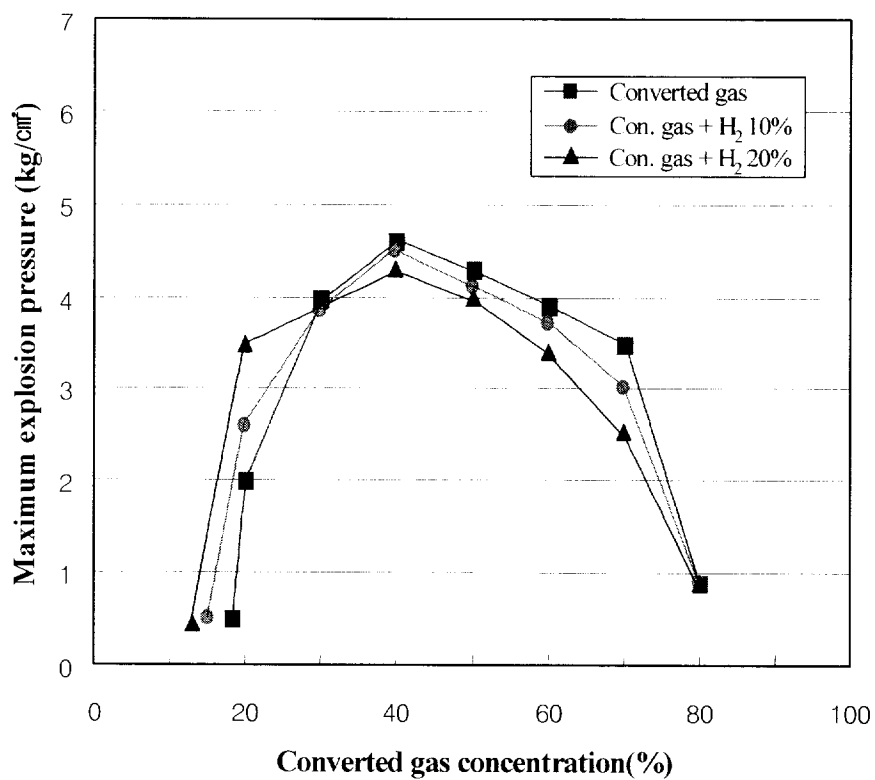


Fig. 11 The Maximum explosion pressure of converted gas at oxygen concentration 21%.

4 4. 변성가스의 농도변화에 따른 최대폭발압력상승속도

Fig. 12는 변성가스의 농도별 폭발압력변화에 따른 폭발압력상승속도를 나타낸 것으로서 산소농도 21%에서 변성가스의 각 농도별로 최대폭발압력을 구한 후, 각각의 농도에서 시간에 대한 폭발압력변화인 최대폭발압력상승속도를 나타내고 있다. 변성가스의 하한계 18%에서 최저값을 나타내다가 가스농도가 증가할 수록 최대 폭발압력상승속도가 증가하여, 변성가스농도 40%에서는 최대값 130.75kg/cm/s를 얻었다.

이는 변성가스의 하한계와 상한계 범위에서는 산소의 농도가 증가할 수록 연소 및 폭발이 용이한 상태가 조성되는 것으로 사료된다.

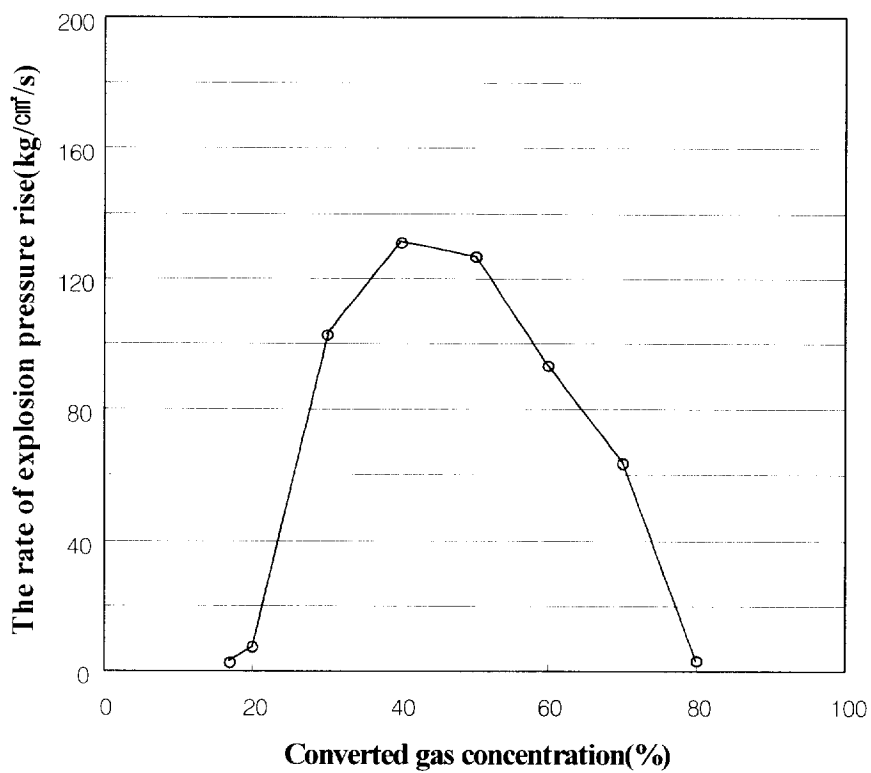


Fig. 12 Relation between explosion pressure rising velocity and converted gas concentration at oxygen concentration 21%.

4 5. 하한계에서의 산소농도변화에 따른 압력거동

폭발한계는 가연성물질을 다루는 공정에서 매우 중요한 안전의 특성치이다. 폭발범위에 있어 가연성가스와 공기가 혼합하여 착화에 의해 폭발을 일으키는 최저농도인 폭발하한계(LEL:Lower Explosion Limit)는 가스폭발의 연구에 있어서 매우 중요한 인자이다. 그러므로 변성가스 및 수소를 10%, 20% 첨가되었을 때 폭발에 따른 압력거동의 변화를 실험하였다.

Fig. 13, 14, 15 및 16은 산소농도의 변화와 수소첨가에 따른 폭발압력거동을 나타낸 것으로서 산소농도 21%, 40%, 60% 및 80%의 분위기에서 변성가스 와 변성가스에 수소를 10%, 20% 첨가하였을 때 하한계 지점에서 폭발압력거동을 나타내었다. 산소농도 21%일 때 0.53kgf/cm^2 의 최대폭발압력을 구하였으며, 수소를 10%, 20% 첨가함에 따라 0.62kgf/cm^2 , 0.94kgf/cm^2 로 증가하였으며, 산소농도 40%와 수소첨가에 따라 각 각 0.56kgf/cm^2 , 0.96kgf/cm^2 , 1.16kgf/cm^2 , 산소농도 60%와 수소첨가에 따라 0.76kgf/cm^2 , 1.24kgf/cm^2 , 1.67kgf/cm^2 를 구하였다. 또한 산소농도 80%와 수소의 첨가에 따라 최대폭발압력 1.63kgf/cm^2 , 1.8kgf/cm^2 , 2.1kgf/cm^2 를 구하였다.

Fig. 13, 14, 15 및 16에서 산소의 농도가 증가 할수록 최대폭발압력이 증가하였고, 동일한 산소분위기에서는 수소농도가 증가할 수록 최대폭발압력이 증가하였다. 이는 하한계에서 산소의 농도가 증가할 수록 연소 및 폭발이 용이한 상태의 조성으로 되기 쉽기 때문에 폭발압력이 증가하는 것으로 사료된다.

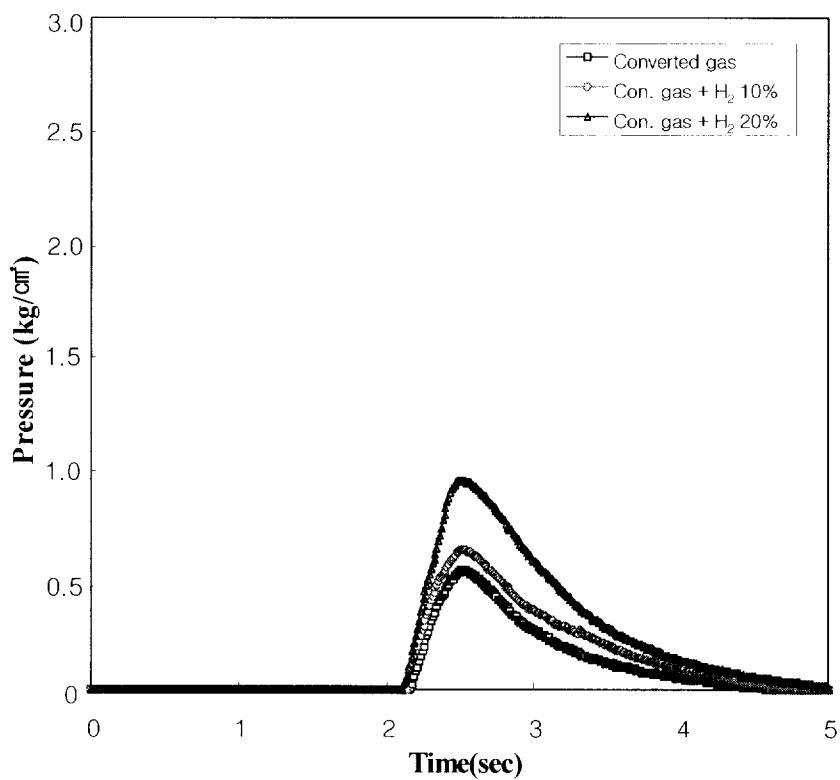


Fig. 13 Curve an behavior of pressure increasing for time at oxygen concentration 21%.

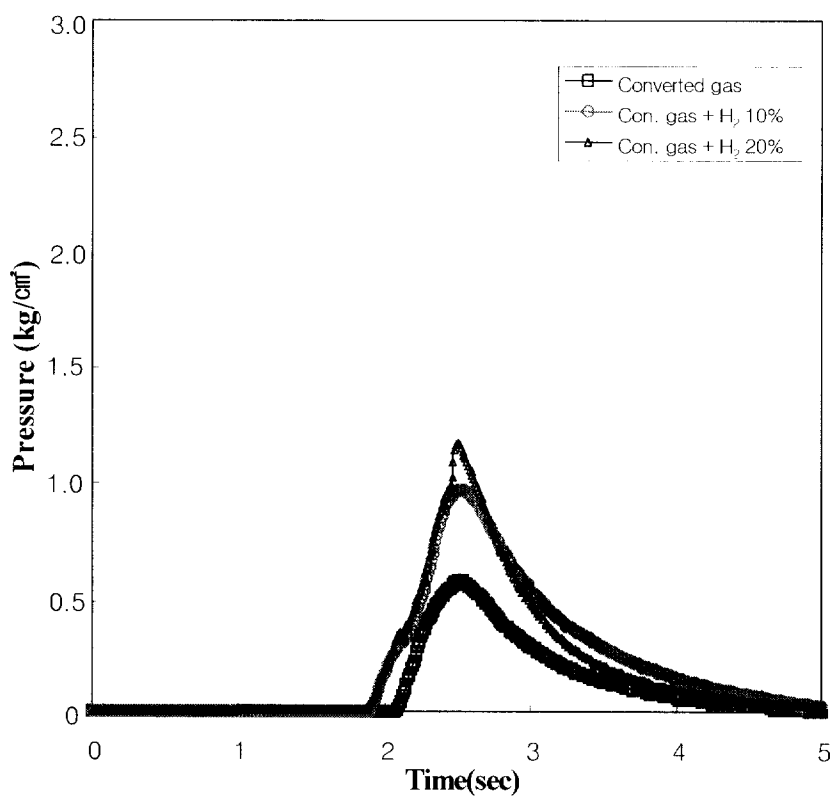


Fig. 14 Curve an behavior of pressure increasing for time at oxygen concentration 40%.

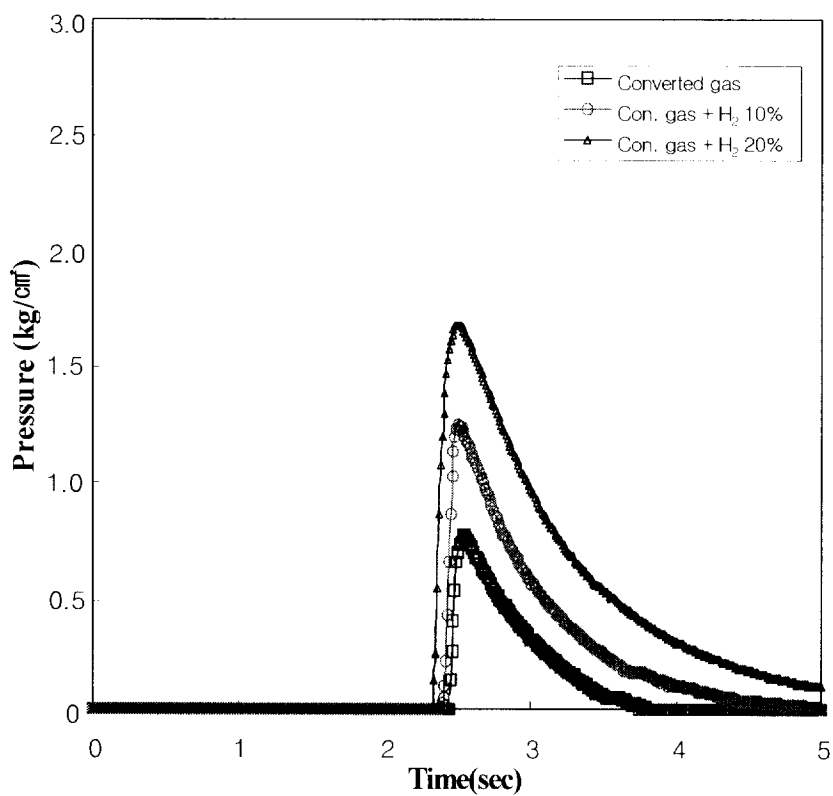


Fig. 15 Curve an behavior of pressure increasing for time at oxygen concentration 60%.

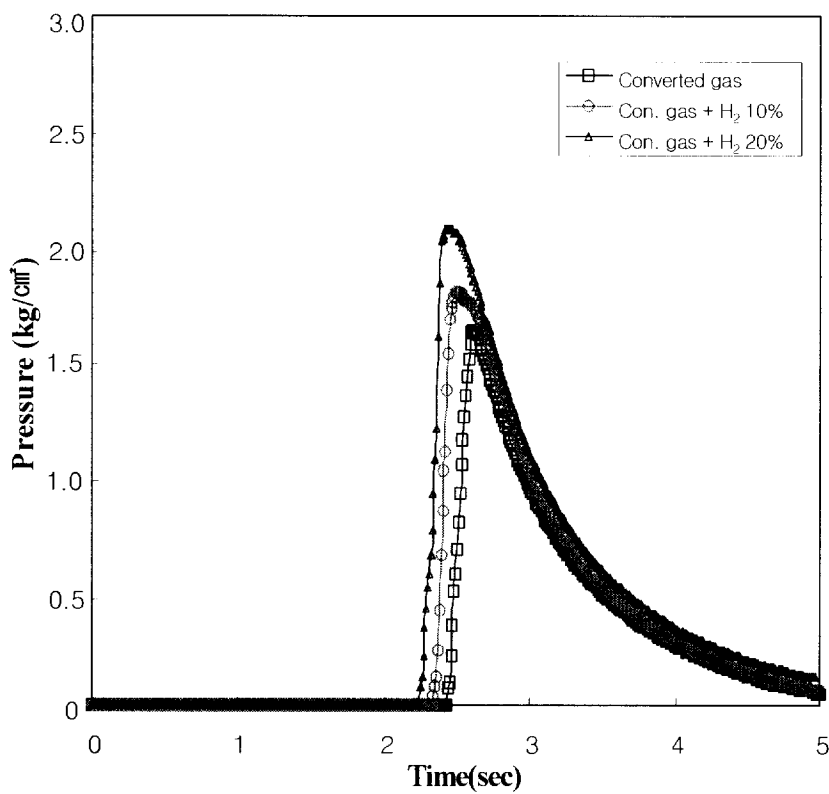


Fig. 16 Curve an behavior of pressure increasing for time at oxygen concentration 80%.

4 6. 하한계에서의 산소농도변화에 따른 압력상승속도

Fig. 17, 18, 19 및 20은 산소농도의 변화와 수소첨가에 따른 압력상승속도를 나타낸것으로서 산소농도 21%, 40%, 60% 및 80%의 분위기에서 변성가스 및 변성가스에 수소를 10%, 20% 첨가하였을 경우 하한계 지점에서 폭발시에 최대폭발압력상승속도는 산소농도 21%에서 각각 $2.54\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$, $2.64\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$, $3.56\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$ 를 구하였으며, 산소농도 40%일 때 각각 $2.62\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$, $3.05\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$ 및 $7.12\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$ 였다. 또한 산소농도 60%에서 최대폭발압력상승속도는 $13.8\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$, $23.4\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$, $32.5\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$ 를 구하였으며, 산소농도 80%일 때 $14.58\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$, $26.61\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$, $40\text{kg}_t/\text{cm}^2/\text{s}$ 를 구하였다.

따라서 산소농도가 증가할수록 최대폭발압력상승속도는 증가하였으며, 산소농도가 80%에서는 산소농도 21%일 경우보다 약 5.5~9배의 높은 상승속도를 나타내었다.

이는 산소농도가 낮을 경우에는 폭발에 있어서 필요한 산소의 농도가 충분하지 못하기 때문이고, 산소농도가 60%이상에서는 폭발이 발생 후 연소될 수 있는 가연물의 농도에 대하여 산소의 농도가 충분하게 반응하기 때문인 것으로 사료된다.

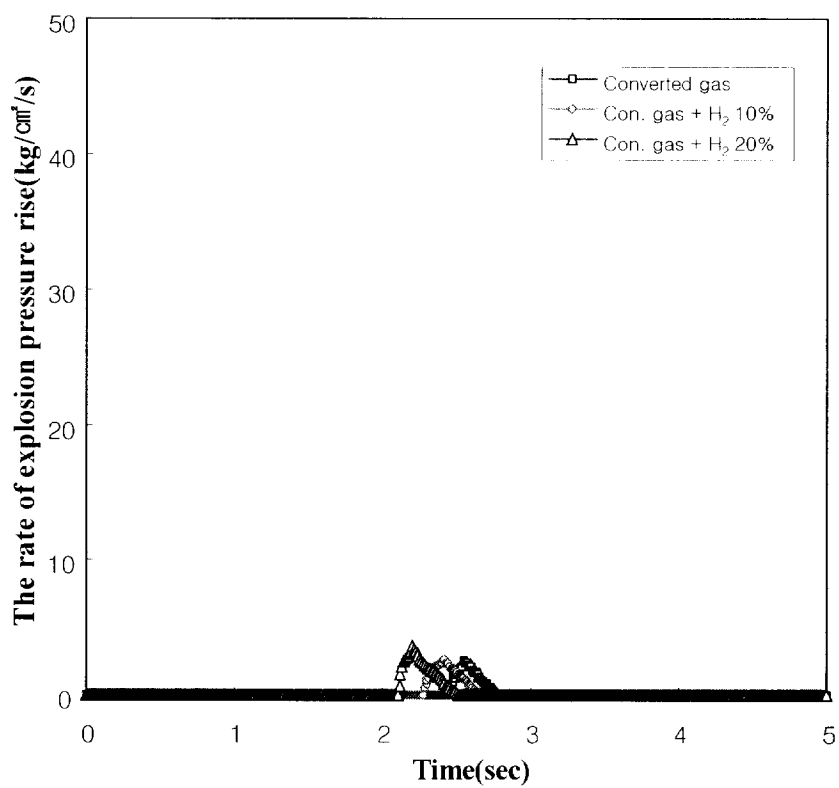


Fig. 17 The rate of explosion pressure rise for time at oxygen concentration 21%.

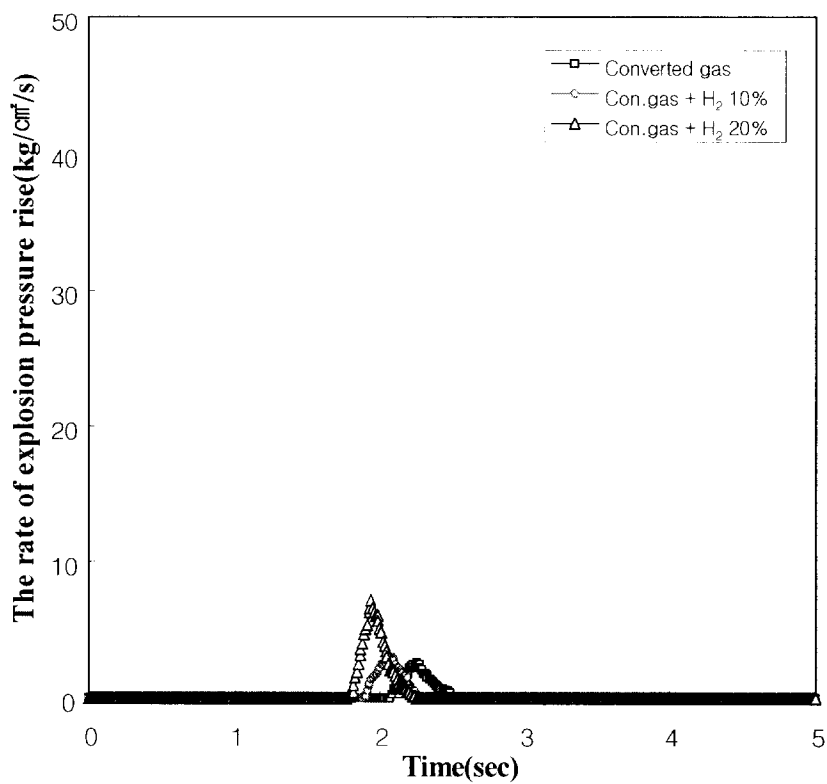


Fig. 18 The rate of explosion pressure rise for time at oxygen concentration 40%.

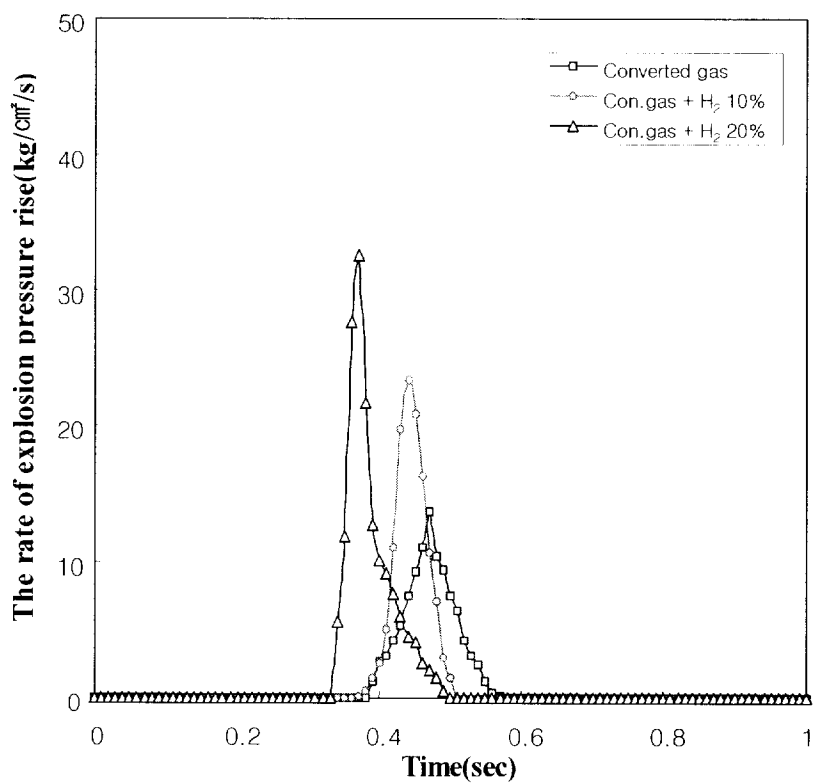


Fig. 19 The rate of explosion pressure rise for time at oxygen concentration 60%.

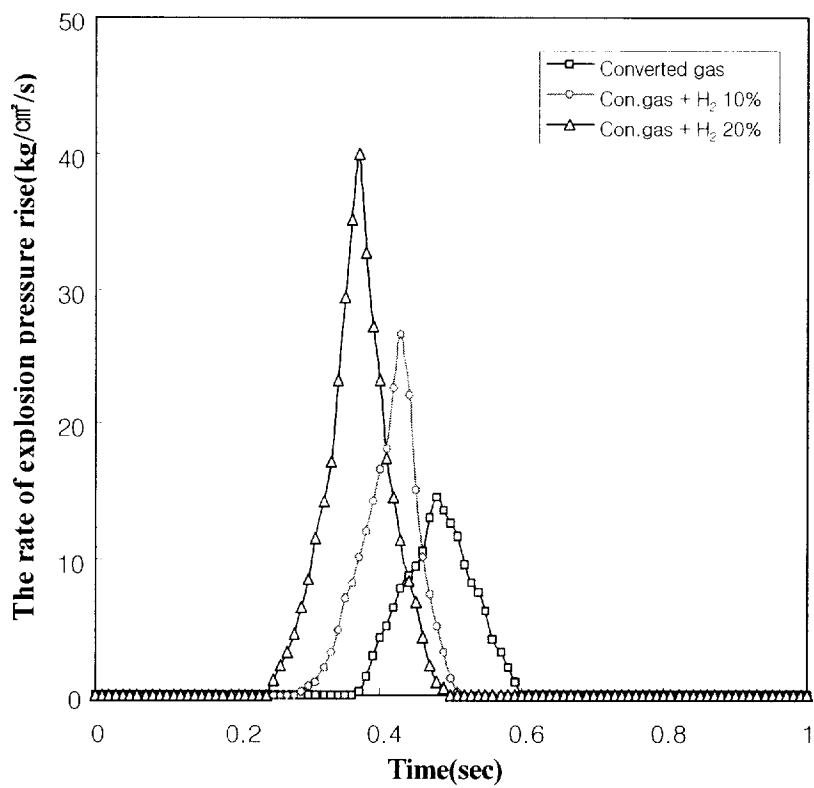


Fig. 20 The rate of explosion pressure rise for time at oxygen concentration 80%.

5. 결론

변성가스의 폭발특성을 고찰하기 위하여 산소농도변화와 수소의 첨가에 따른 변성가스 조성을 변화시키면서 폭발거동에 대한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 산소농도 21%에서의 변성가스, 변성가스에 수소 10% 및 20%를 첨가했을 경우 각 각 폭발한계는 17%, 15% 및 13%를 구하였다.
- 2) 산소농도와 변성가스의 농도변화에 따른 폭발한계를 측정한 결과, 산소농도 6%에서 한계산소농도를 구하였다.
- 3) 산소농도 21%에서 변성가스 및 수소첨가에 따른 최대폭발압력은 각 각 $4.61\text{kg}_f/\text{cm}^2$, $4.53\text{kg}_f/\text{cm}^2$, 및 $4.31\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 를 구하였다.
- 4) 변성가스의 농도변화에 따른 최대폭발압력상승속도를 구한 결과 시료농도 40%에서 $130.75\text{kg}_f/\text{cm}^2/\text{s}$ 를 구하였다.
- 5) 변성가스의 최소착화에너지는 시료농도 50%에서 0.13mJ를 구하였다.

기호설명

a, a', b : constant	[-]
C_{st} : stoichiometric concentration	[vol%]
L_1 : lower explosive limit	[%]
MOC : minimum oxygen for combustion	[vol%]
n_i : mole	[-]
P : pressure	[mmHg]
T : absolute temperature	[K]
U_1 : upper explosive limit	[%]
x_i : mole ratio	[%]

참고문헌

- 1) 小林清志, 荒木信幸, 牧野敦, 燃焼工学, 理工學社, pp.1-24, 1988.
- 2) 에너지 경제 연구원, <http://www.keei.re.kr>, 21세기 에너지부문의 여건변화 및 중
장기정책 연구, 2001.
- 3) 김봉진, 강경식, 가스산업실태 및 안전사고사례 비교분석을 통한 안전성 향상
방안, 안전경영과학회 춘계학술대회, 2000.
- 4) 한국가스안전공사, 해외 가스사고 사례집(Ⅲ), 2000.
- 5) M.P. Houben, H.C. de Lange and A. A. Van Steenhoven, Tar reduction
through partial combustion of fuel gas, Fuel, Vol 84, Issues 7-8, pp.817~824, 2005.
- 6) 한국가스안전공사, <http://www.kgs.or.kr>, 가스통계.
- 7) N. A. Kakutkina, A. A. Korzhavin, V. S. Babkin, V. V. Zamashchikov, and A.
A. Pleslov, Scale Modeling of Gas Explosions in Closed Vessels, Combustion,
Explosion and Shock Waves, Vol.32, No.6, 1996.
- 8) 羽田博憲, 高橋保盛, 木山保, 皿田滋, 鍋谷弘, 高電壓領域におけるメタンの點火
限界, 安全工学, Vol.28, No.3, 1989.
- 9) 최재욱, 복연수, 박승호, 도시가스의 폭발 특성에 관한 연구, 한국산업안전
학회지, Vol. 16, No 4, pp.109~114, 2001.
- 10) 김종래, 이종부, 일산화탄소(CO)의 산화축매에 대한 고찰, 부산공업대학교
논문집, Vol 20, pp.447~450, 1979.
- 11) 염희택, 여운관, 최신 금속표면처리, 동명사, pp.337~338, 1981.

- 12) K. Matsui, Energy conservation in the controlled atmosphere heat treatment, 表面技術, 表面技術協會, Vol. 46, No 2, p.5, 1995.
- 13) K. Koide and K. Ohtaguchi, A Method for Estimating Flash Points of Organic Compounds from Molecular Structures, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.24, No.2, 258-261, 1991.
- 14) G. Gündüz, J. Stickling and R. Rennhack, Experimental Determination and Simulation of Explosion Limits of Benzene Inert Gas-Air Mixtures, Chem. Eng. Technol., 18, pp.403-408, 1995.
- 15) 목연수, 조태제, 전성균, 유용호, 화학안전공학, 동화기술, pp.200-201, pp.205-210, pp.219-221, 1994.
- 16) 安全工學協會, 防爆工學, 海文堂, pp.39-40, 1983.
- 17) F. T. Bodurha, Industrial Explosion Prevention and Protection, McGraw-Hill, pp. 19-22, 1980.
- 18) 石浜渉, 東猛, 榎本兵治, 梅律實, 荷福正治, 粉じん雲の着火エネルギーに関する研究, 安全工學, Vol.21, No.5, pp.273-79, 1982.
- 19) 秋田一雄, 最小發火エネルギー-消炎距離, 安全工學, Vol. 7, pp.296~309, 1968.
- 20) D.Oancea, D.Razus, V.Munteau and I.Cojocea. High voltage and break spark ignition of propylene/air mixtures at various initial pressures, Jurnal of Loss Prevention, pp. 353~361, 2003.
- 21) 近藤重雄, 浦野洋吉, 岩阪雅二, 堀口貞茲, 徳僑和明, AH_n 水素化物ガスの爆発下限界温度と結合解離エネルギー, 安全工學, Vol.25, No.5, pp.258-264, 1986.

A Study on the Explosion Characteristics of Converted Gas for Surface Heating Treatment.

Byoung Chul Lee

Dept. of Safety Engineering, Graduate School of Industry,

Pukyong National University

Abstract

To examine the characteristics of the explosion of converted gas, the concentration of oxygen was changed with the change of hydrogen concentration and as the result of the experiment, the following conclusions were made;

- 1) In case converted gas and 10%, 20% hydrogen gas was added to converted gas at the concentration of 21% of oxygen, the explosion lower limit was 17%, 15% and 13%.
- 2) In result of experiment by altering concentration of oxygen gas and converted gas, minimum oxygen for combustion was searched at oxygen concentration 6%.

- 3) The maximum explosion pressure by converted gas and hydrogen gas had was added to converted gas a oxygen concentration 21% was 4.61kg/cm³, 4.53kg/cm³ and 4.31 kg/cm³.
- 4) The maximum explosion pressure rising ratio of converted gas was 130.75kg/cm³/s at the concentration of 40% of converted gas.
- 5) The minimum ignition energy of converted gas was 0.13mJ at the concentration of 50% converted gas.

감사의 글

를 새로운 것을 배운다는 즐거움을 뒤늦게 깨달았습니다. 새로운 기쁨에 희열 가득했던 때도 있었지만 어떤 때는 업무의 무게에 눌려 한동안 슬럼프도 겪었습니다.

본인 스스로 믿어지지 않는 결실에 행복 합니다. 중도에 주위 분들에게 학업을 미룬다고 선언했던 때를 생각하면, 지금의 결실은 고맙기만 합니다. 그 동안 주변에서 도와주신 고마운 분들 덕분에 이렇게 결실을 맺게 되어 무한한 감회와 북받쳐 오르는 감정을 억누를 수가 없습니다.

이 논문이 있기까지 그야말로 각별한 관심과 지도를 아끼지 않고 끝까지 이끌어 주신 최재욱 지도교수님께 진심으로 머리 숙여 감사 드립니다. 아울러 그 동안 학문적 조언과 지도 편달을 하여 주신 이내우 교수님, 이동훈 교수님, 장성복 교수님, 권오현 교수님께도 무한한 감사의 말씀을 올립니다. 그리고 화공안전실험실의 임우섭 박사의 조언과 지도에 감사 드리며, 민철웅 군과 김태근 군의 열과 성을 다한 협조에 대해서는 진심 어린 감사를 드립니다. 아울러 인간공학실험실의 배동철 선생님의 지도에도 감사말씀 드립니다. 학업을 수행하는 기간 동안 깊은 애정으로 염려해주신 어머니와 학업을 핑계로 가정사에 소홀함을 참아 주고 이해를 아끼지 않고 성원을 다해 준 사랑하는 아내 김미라와 딸 유진, 하연에게도 영광스런 마음으로 감사함을 전하고 싶습니다. 끝으로 도움을 주신 많은 분들께 진심 어린 마음으로 다시 한번 머리 숙여 감사 드립니다.

2005년 6월

이 병 천