

열선에 의한 파이프라인내의 수소/공기 혼합기의 착화온도

김동준

경일대학교 소방방재학과

Ignition Temperature of Hydrogen/Air Mixture by Hot Wire in Pipeline

Dong-Joon Kim

Dept. of Fire Safety, Kyungil University

(Received February 17, 2014; Revised June 29, 2014; Accepted August 14, 2014)

요 약

본 연구에서는 수소 네트워크 설비의 안전성 확보를 위한 기초연구로 파이프라인 내부에서의 수소/공기혼합기의 착화 온도를 조사하였다. 착화원으로는 순간적으로 고온이 된 후 일정한 온도를 유지하는 열선을 사용하였다. 수소농도와 열선의 온도를 변화시키며 실험한 결과, 수소농도의 감소에 따라 최저착화온도도 감소하는 경향이 확인되었다. 착화를 위한 열선의 최저온도는 수소 농도 10 vol.%에서 가장 낮음이 확인되었다. 이러한 경향은 열선주변의 부력에 의한 영향이라 생각된다. 또한, 혼합기의 습도는 착화온도, 화염온도에 큰 영향을 미치는 않는 것이 확인되었다.

ABSTRACT

In order to improve safety for hydrogen network infrastructure, the ignition temperature by hot wire was investigated for different hydrogen compositions in pipelines. The result shows that minimum temperature for ignition decreased with decreasing hydrogen composition. The minimum temperature was confirmed at a hydrogen composition of approximately 10 vol.%. The one of the reasons is supposed that buoyancy force should generate the convection of gas mixture. It was also found that humidity had a little effect on ignition temperature, flame temperature.

Keywords : Hydrogen, Safety, Ignition Temperature, Pipeline, Humidity

1. 서 론

수소는 연소 후 생성물이 수증기이므로 환경오염이 없어, 석유에너지를 대체할 친환경 에너지로 기대되어, 현재 수소를 에너지원으로 하는 각종 기반시설(인프라)이 검토되고 있다. 국내에서는 기업의 경쟁력 강화를 위해 수소 네트워크를 수립하는 것을 검토 중이며⁽¹⁾, 국외에서는 수소의 생산에서 사용장소까지 유통을 위한 인프라를 구축하고 있다⁽²⁻⁷⁾. 특히, 일본은 최근 수소타운을 설립하여, 제철소에서 발생한 부산물인 수소를 공공도로에 수소파이프라인을 설치하여 일반 주택과 업무용 시설 등에 공급하는 인프라를 건설 중이다⁽⁸⁾.

하지만, 이렇게 실용화를 위해 여러 프로젝트가 진행되고 있으나, 아직 그 안전성이 충분히 확보되었다고 보기는 어렵다. 수소는 누출되기 쉽고, 폭발범위가 넓고, 착화가 용이하기 때문에 사용시 높은 안전성 확보가 요구된다⁽⁹⁾. 또한, 위험성평가 시 필요한 최악의 사고시나리오를 위한 수

소농도도 일정하지 않다. 종래 연구에서 전기스파크^(10,11), 고압⁽¹²⁾, 정전기⁽¹³⁾, 레이저⁽¹⁴⁾, 고온열면⁽¹⁵⁾ 등에 의한 수소의 착화특성을 조사한 결과, 최소착화에너지와 최저착화온도는 이론혼합비($\phi = 1$, 수소농도 약 30 vol.%)보다 약간 낮은 농도인 약 22 vol.%^(8,12), 최고화염온도는 약 30 vol.%, 연소속도는 이론혼합비보다 높은 약 40 vol.%^(10,16)에서 나타남이 확인되는 등, 이상적인 조건에서의 착화/연소특성은 많이 알려져 있다. 하지만, 산업현장에서는 그 조건과 일치하지 않은 경우가 많다. 온도, 압력에 따라 폭발범위는 변화하며, 용기의 형태, 크기, 재질과 같은 물리적 환경에 따라 열손실의 영향 등으로 착화조건이 변화하는 것은 잘 알려진 사실이다.

한편, 다가올 수소 네트워크 사회는 경제성과 효율적인 유통을 위해, 파이프라인의 직경을 넓히고, 압력을 높이는 것 등이 요구되고 있다. 그에 따라, 실제 사용 환경에서 수소의 착화, 연소특성에 관한 연구에 관심이 모이고 있다.

본 연구는 최근 수소 네트워크 구축에 필요한 안전성확

보를 위한 기초연구로, 수소 네트워크 구축 시에 사용할 가능성이 있는 파이프의 직경과 같은 직경을 가진 파이프를 대상으로, 만일의 사고로 수소/공기혼합기가 파이프 내부에 형성되었다고 가정하여, 농도 변화에 따른 최저착화온도의 변화를 실험적으로 조사하였다. 또한 대기중의 공기는 습도를 포함하기 때문에 습도의 영향도 조사하였다.

2. 실험

Figure 1은 가스제어의 개략도와 스테인레스 반응기(SUS 316, 내경: 40 mm, 길이: 1000 mm)를 나타내고 있다. 수소와 건조공기는 각 저장탱크에서 진공상태의 혼합용기에 주입하였다. 혼합용기에서의 각각의 분압은 압력측정기기(MKS Baratron, 222BA)를 사용하여 분압조절을 통해 혼합기의 농도를 제어하였다. 혼합용기의 내부의 압력은 1기압 보다 높게 충전한 후, 진공상태의 반응기로 유입하는 혼합기의 유량을 조절하여 반응기 내부가 1기압이 되도록 제어하였다. 반응기내부의 농도는 수소농도측정기(Riken keiki, FI-21)를 사용하여, 혼합용기에서의 농도와 동일함을 확인하였다. 습도의 영향을 파악하기 위한 실험에서는 혼합용기에서 일정한 농도로 혼합한 후, 물속에서 버블링하여 상대습도를 높인 후, 반응기에 유입하였다.

반응기 내부의 상대습도는 습도온도측정기(Vaisala, HMT337)를 이용하여 측정하여 건조한 혼합기는 상대습도가 0%이고, 상대습도가 높은 혼합기는 90% 이상이 되는 것을 확인하였다.

착화원으로 사용한 열선(니켈, 직경 0.05 mm, 길이 6 mm)은 반응기 우측내부중심에 수평하게 설치하였다. 열선은 순간적으로 설정온도까지 가열되고 가열완료 후에는 일정온도를 유지하는 것이 이상적이므로 본 실험에서는

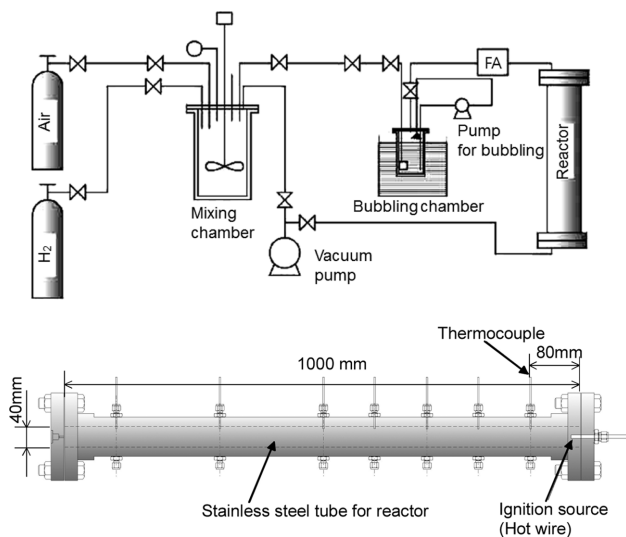


Figure 1. Schematic of gas flow and experimental setup at reactor.

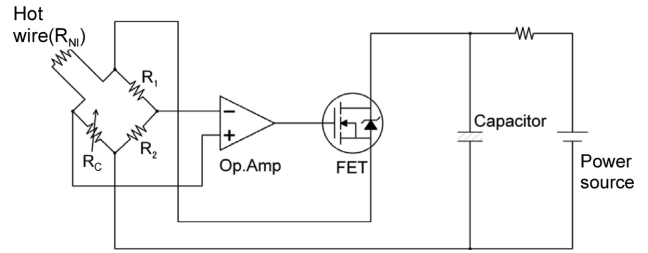


Figure 2. Electrical circuit of the ignition equipment.

이와 같은 목적으로 이전 연구⁽¹⁷⁾에 사용한 적이 있는 Figure 2와 같은 온도제어회로를 이용하였다. 그 원리는 다음과 같다. 먼저 콘덴서에 전하를 충전하여, 방전전류를 전류제어용 전계효과 트랜지스터(FET)를 통해 0.3초 동안 방전한다. 이때 생성된 방전전류는 FET를 통과하여 브리지회로를 흐른다. 브리지회로의 R_1 - R_2 사이와 R_C - R_{NI} 사이의 전압을 연산증폭기(Op. Amp)에 입력하여, 브리지의 전압을 증폭시킨다. FET는 그 전압에 비례하는 전력을 브리지에 공급한다. 이 피드백의 효과에 의해 열선의 저항치(R_{NI})를 일정하게 유지하는 것이 가능하게 된다. 열선의 체적저항율과 온도와는 일정한 관계가 있기 때문에 R_{NI} 는 저항온도계수가 큰 니켈을 열선으로 사용하였으며, R_C 의 재료는 온도변화시 저항변화가 거의 없는 콘스탄탄선을 사용하였다. 따라서, 저항 R_1 , R_2 , R_C 의 저항을 제어하여 R_{NI} 의 저항치, 다시말해 열선의 온도를 제어하였다.

화염 검출을 위한 극세선열전대(K-type, 소선 직경 0.025 mm)를 열선으로부터 80 mm의 거리에, 반응기 내부 면에서부터 3 mm가 돌출되도록 설치하였다. 열전대에서 출력되는 기전력은 보상도선을 통하여 디지털 오실로스코프(GR-7000, Kyence)에 입력하였다. 실험은 재현성의 확인을 위해 각 농도에서 여러차례 반복하여 실험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열선의 온도

3.1.1 저항측정결과

Figure 3(A)에 착화와 불착화시, 열선에 방전된 전류의 시간프로필을 나타낸다. Figure 3의 내부의 그래프는 초기 전류의 변화를 자세히 확인하기 위해 시간을 1.5 ms까지 확대하여 나타내었다. 방전 초기에 약 1 ms 동안 최대 약 13 A의 전류를 방전한 후, 1 ms 이후에는 약 1 A의 일정한 전류를 유지하고 있다. 이렇게, 방전 초기에 높은 전류치를 흐르게 하여, 짧은 시간내에 열선의 온도를 높이는 것이 가능하게 된다. 착화하지 않은 경우는 1 ms의 시간내 일정한 전류를 방전한 후, 설정 방전 시간인 0.3초까지 일정한 전류치를 유지하며, 착화한 경우는 t_d 의 시간 후에 전류치가 작아진다. 이것은 가연성가스의 착화로 인해, 열선 주변의 고온인 기연가스로 부터 열선으로 열이 이동하여 열선의 온도가 상승하여, 다시말해, 열선의 저항(R_{NI})이 증

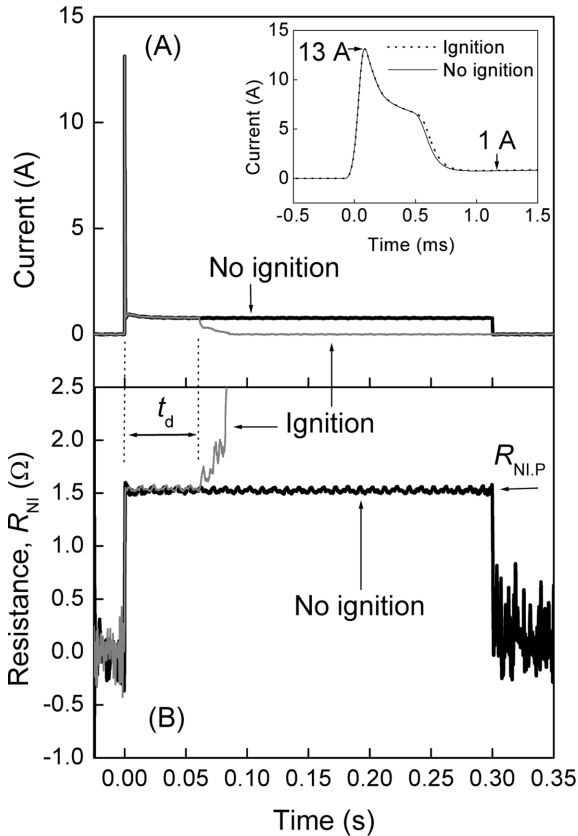


Figure 3. Time histories of current (A) and resistance (B) at hot wire.

가하였기에 R_C , R_1 , R_2 에 의해 결정된 설정 저항치로 저항을 낮추기 위해 FET가 방전전류를 낮추었기 때문이다.

또한, Figure 3(B)에, 열선의 전압과 전류를 측정하여 구한 저항값을 나타내었다. 착화하지 않은 경우, 설정시간(0.3초)까지 일정한 값을 유지하고 있으나, 착화한 경우는 t_d 의 시간 후에 급격히 저항이 증가하고 있다. 이것은 위에서 설명한 것처럼 고온인 기연가스로 부터 열선으로 열이 이동하여 저항치(R_{NI})가 증가하였기 때문이다. 본 그래프에서는 착화 이후(약 0.08초)에 전류치가 0에 가까워짐에 따라 저항 프로필에 큰 노이즈가 발생하였기에 착화시의 저항치는 0.08초까지 기재하였다. 본 연구에서는 일정한 저항치를 나타내는 구간의 평균값을 고온시의 저항값($R_{NI,P}$)으로 정하였다. 또한 착화의 유무는 방전전류치의 변화와 나중에 설명하는 착화전극으로부터 80 mm 떨어진 위치에 있는 열전대에서 측정된 온도변화에 의해 판단하였다.

3.1.2 저항과 온도의 관계

본 연구에서는 열선의 온도를 정확히 파악하기 위해 열선 중앙부분의 온도변화를 극세선 열전대(K-type, 소선직경 0.013 mm)를 이용하여 직접 측정하였다. R_C , R_1 , R_2 에 의해 결정된 설정 저항치를 변화시키며, 열선의 온도를 측정된 결과의 예를 Figure 4(A)에 나타낸다. 0.1초 이하의

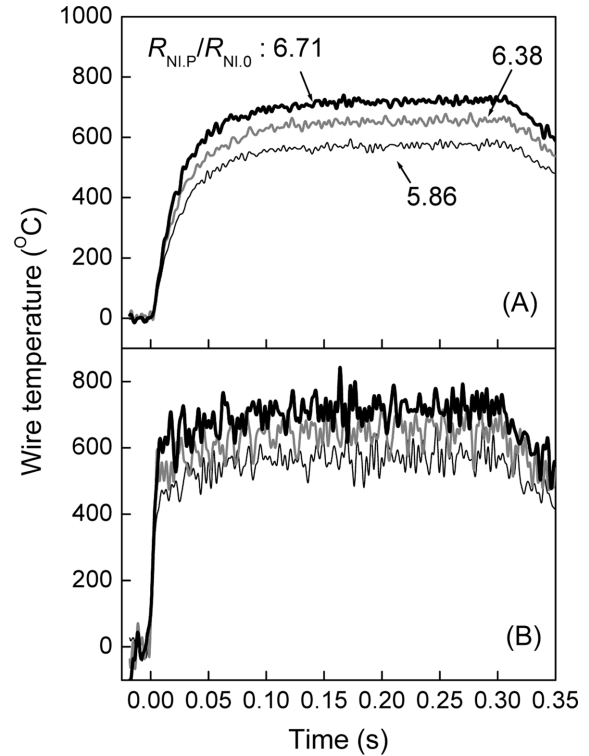


Figure 4. Time histories of wire temperature for different resistance ratio ($R_{NI,P}/R_{NI,0}$): before (A) and after (B) temperature compensation.

시간에 일정 온도에 도달한 후 그 온도를 유지하고 있다. 그래프내의 숫자는 열선의 초기저항치($R_{NI,0}$)와 콘덴서에서 방전 후 전압과 전류의 측정에서 구한 열선의 저항치($R_{NI,P}$)와의 비($R_{NI,P}/R_{NI,0}$)를 의미한다. 이 실험결과에는 온도측정에 사용한 열전대의 시정수로 인한 영향을 포함하고 있기 때문에 정확한 열선의 온도를 평가하기 위해서는 시정수를 고려한 온도보상을 하여야 한다.

열선의 저항치는 순간적으로 설정 저항치에 도달한 후 유지되고 있기 때문에(Figure 3 참조), 본 연구에서는 열선의 온도(T_{NI})가 불연속적으로 설정온도까지 도달한 한 후 일정온도를 유지한다고 가정하여, 온도보상을 계산하였다⁽¹⁸⁾. 열선의 온도(T_{NI})와 열전대의 온도(T)와의 관계는 다음 식(1)과 같다⁽¹⁹⁾.

$$T_{NI} = T + \tau \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

여기서, t 는 시간, τ 는 열전대의 시정수가 되며, 식(2)으로 부여된다.

$$\tau = \frac{\rho C d}{4h} \quad (2)$$

여기서, ρ , C , d , h 는 각각 열전대의 밀도, 비열, 직경, 열전달율을 나타낸다.

본 연구에서는 초기(0~10 ms)의 온도상승을 최소자승으로

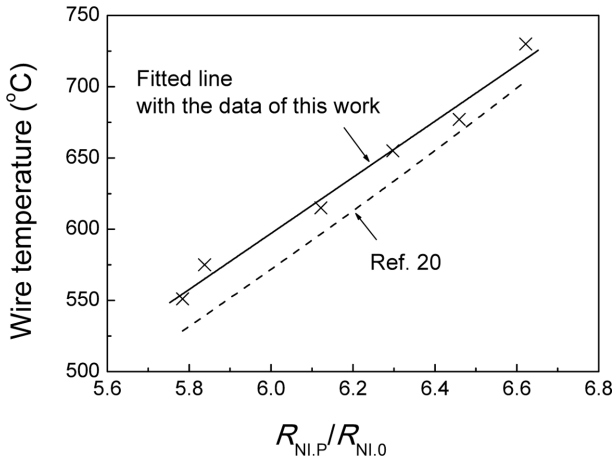


Figure 5. Relationship between $R_{NI,P}/R_{NI,0}$ and temperature of hot wire.

차법으로 선형근사하여 시정수를 구한 결과, 약 15 ms가 되었다. Figure 4(B)에 시정수를 고려하여 온도보상을 한 결과를 나타낸다. 약 수 ms 이내에 일정온도에 도달하는 것을 알 수 있다. 착화지연시간에 관한 자세한 설명은 생략하지만, Figure 3에서 확인 가능하듯이 모든 실험결과에서 착화지연시간(t_d)은 수십 ms 이상이였다. 이것과 비교하면, 순간적으로 열선이 고온이 되어, 착화는 설정 온도를 유지하고 있을 때 일어났음을 알 수 있다.

본 연구에서는 열선 온도의 신뢰성을 높이기 위해 다른 방법으로도 열선 온도를 추정하여 데블체크 하였다. 전압과 전류에 의해 측정된 열선의 저항치를 가지고, 열선의 재료인 니켈의 온도변화에 따른 저항변화를 조사한 문헌치와의 비교를 통해 온도를 추정하였다. Figure 5에 $R_{NI,P}/R_{NI,0}$ 에 따른 열선온도를 열전대로 직접 측정된 결과와 문헌치⁽¹⁹⁾를 점선으로 나타내었다.

열전대의 측정결과가 문헌치보다 약 20°C 높게 나타났다. 이것은 본 실험에서의 열선은 6 mm의 길이를 가지며, 양끝에 전류를 흐르게 하기 위해, 그리고 위치를 고정하기 위해, 구리로 된 금속과 접촉하고 있다. 따라서 금속으로의 열손실로 인해 열선에 온도분포가 존재하게 되고, 열선의 중심부의 온도는 열선의 평균온도보다 높아지게 된다. 때문에 열선의 중심 온도를 직접 측정할 값이 열선 전체의 평균 저항치로부터 구한 온도보다 높게 나타난다고 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 직접 온도를 측정된 결과를 이용하여 Figure 5에서 나타낸 선형근사한 결과(Fitted line)를 가지고 저항치의 변화에 따른 열선의 온도를 계산하였다.

3.2 착화온도

3.2.1 건조 혼합기의 실험결과와 문헌치와의 비교

고온 열선을 이용하여 건조한 수소/공기 혼합기의 착화 농도를 조사한 결과 본 실험조건에서는 10 vol.%에서 65

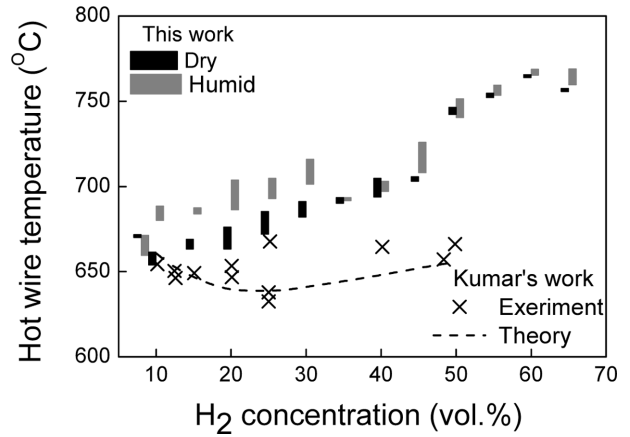


Figure 6. Hot wire temperature for ignition at different H_2 concentration.

vol.%에서 착화가 확인되었다. Figure 6에 각 농도에서 착화시의 최저온도와 불착화시의 최고온도를 막대그래프로 나타내었다. 따라서, 각 농도의 착화온도는 막대그래프의 범위 내에 존재한다. 검정색 막대그래프(■)가 건조한 혼합기를 대상으로 한 실험결과이다. 실험결과, 착화온도는 650°C에서 770°C까지 분포하며, 수소농도의 증가에 따라 착화온도가 높아지는 경향을 나타낸다. 최저착화온도를 가지는 특성의 농도를 결정하는 것은 어렵지만, 수소의 최저 착화온도는 이론혼합비보다 훨씬 낮은 농도인 10 vol.% 부근에서 나타나고 있다.

한편, Kumar⁽¹⁵⁾은 최저착화온도를 나타내는 수소농도는 최소착화에너지와 같은 약 22 vol.%라고 제시하고 있기에 Figure 7에 Kumar의 실험(×)과 수치계산(점선) 결과도 함께 나타내었다. 수소농도가 낮은 농도에서는 본 실험결과와 가까운 착화온도를 나타내고 있지만, 농도의 증가에 따라 차이가 커짐을 알 수 있다.

Kumar의 연구에서는 부력의 영향을 최소화하기 위해 고온 표면적을 크게 하여 상승기류의 영향을 억제하면서

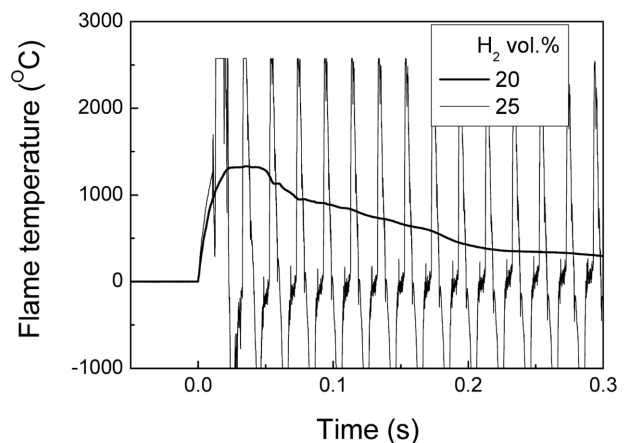


Figure 7. Examples of time profiles of flame temperature by thermocouple.

실험을 수행하였으며, 수치계산에서도 부력을 고려하지 않았다. 그에 비해, 본 실험은 직경 40 mm의 파이프 내부에 직경 0.05 mm인 열선을 수평하게 설치하여 착화하였다. 이로 인해, 공간이 차지하는 면적에 비해 열선이 차지하는 면적은 매우 작다. 따라서 열선 주변에 부력에 의한 상승 기류의 영향을 받았기 때문에, 전반적으로 Kumar의 연구 결과보다 높은 착화온도를 나타내고 있으며, 농도변화에 따른 착화온도의 변화도 다른 경향이 나타나, Kumar의 수소농도 22 vol.% 보다 낮은 10 vol.% 부근에서 최저착화온도가 나타났다고 생각된다. 한편, 수소농도가 8 vol.%의 경우가 10 vol.%보다 착화온도가 높아지는 것은 수소농도가 연소하한계에 가깝기 때문이라 생각된다.

3.2.2 부력영향의 검토

열선이 일정한 고온체가 된 후 혼합기의 착화, 다시 말해 일정 발화온도가 되기까지는 일정 시간이 필요하다. 따라서 열선의 온도상승과 함께, 주변 혼합기도 열전달에 의해 온도가 상승한다. 열선 주변의 혼합기에 온도분포가 생기게 되어 혼합기가 착화하는 순간에는 부력에 의해 열선 주변 혼합기는 일정한 속도로 상승하고 있음이 생각된다. 열선 주변 혼합기의 상승속도를 직접 측정하는 것이 바람직하나 현실적으로 여러 어려움이 있어 아래와 같이 몇가지 방법으로 착화온도에 미치는 부력의 영향을 검토하였다.

물성치: 수소의 열전도율은 공기보다 약 8배로 크며, 수소의 점성도는 공기보다 약 0.5배가 된다. 따라서, 수소농도가 높아짐에 따라 보다 많은 체적의 혼합기가 고온이 되어 부력이 커지며, 점성이 낮아 이동이 쉬워, 결론적으로 상승 부로의 이동속도가 빠르게 증가할 것이다. 역으로, 수소농도가 낮아지면 상승속도가 작아질 것이다. Figure 6에 의하면 수소농도가 높아질수록 본 실험결과와 Kumar의 연구결과와의 차이가 커지며, 낮은 수소농도에서 본 실험결과와 Kumar의 연구결과와 가깝다. 이것은 혼합기의 물성치의 변화가 부력에 미치는 경향과 동일한 경향을 나타내고 있다.

수치계산: 간단한 수치계산을 통해, 부력에 의한 상승속도를 예측한 결과, 정지상태의 공기는 600 °C의 고온표면에 의해 0.3초 내에, 60 cm/s까지 도달하는 것이 확인되었다. 수소는 공기보다 점성이 작기 때문에 수소농도의 증가에 따라 속도는 이보다 커질 것이다.

실험결과: 실험적으로 일정 상승속도가 존재함을 확인하기 위해, 직경이 0.05 mm보다 두 배 큰 0.1 mm인 열선을 사용하여 고온표면의 면적을 4배 크게 하여 실험을 한 결과, 30 vol.%의 착화온도가 약 20 °C 낮아지는 것이 확인되었다. 이것은 일정속도를 가진 흐름에서, 열선 직경이 증가함에 따라 착화온도가 낮아진다는 종래의 연구와 일치한다⁽²⁰⁾. 고온 열면적의 증가는 부력 영향의 감소로 이어지고 Kumar의 결과에 가까워질 것이라 생각된다.

이상의 검토결과, 착화시에 열선 주변에 상당한 속도의 상승기류가 존재하여 그로 인해 Kumar보다 수소농도의 증

가에 따라 차이가 증가한다는 생각은 타당하다고 생각된다.

3.2.3 상대습도의 영향

상대습도 90% 이상의 수소/공기혼합기를 사용한 경우의 착화온도를 측정한 실험결과를 Figure 6에 회색 막대 그래프(■)로 나타내었다. 단, 습도가 높은 경우 수소농도에 최대 3 vol.%의 차이가 있으나, 본 연구에서는 그 차이를 무시하여 표시하였다. 착화온도가 약간 높아지는 영향이 있으나, 그 차이는 크지 않아, 상대습도의 변화는 착화온도에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 종래의 연구⁽¹¹⁾에서 상대습도가 수소/공기혼합기의 착화에너지에 미치는 영향이 크지 않다고 보고되고 있다. 상대습도의 변화는 착화에너지 뿐만이 아니라, 착화온도에도 크게 영향을 미치지 않음이 확인되었다.

3.3 화염온도

화염의 온도를 측정한 결과의 예로, Figure 7에 수소농도 20, 25 vol.%인 혼합기가 착화시, 착화원에서 80 mm 거리에 위치한 열전대에서 측정된 온도변화를 나타낸다. 비교의 편리함을 위해 시간의 기준은 화염도착에 의해 온도가 상승하는 순간을 기준으로 하였다. 수소농도 20 vol.%인 경우 화염면의 도착으로 온도가 상승한 후 반응용기로의 열손실로 인해 천천히 낮아지는 연속적인 온도변화를 나타내고 있다. 반면, 수소농도 25 vol.%인 경우에는 화염이 도착 후 약 10 ms에서 불연속적인 변화를 나타내고 있다. 이것은 본 실험에서 사용한 열전대는 노출형이기 때문에, 반응열로 인해 기연가스의 온도가 K형열전대의 용점(약 1400 °C)을 넘어 열전대가 용융되어 파손되었다고 판단된다. 본 실험에서 수소가 25~60 vol.%에서 열전대가 파손되었다.

상대습도가 화염온도에 미치는 영향을 파악하기 위해 각 농도에 따른 실험결과와 계산결과를 Figure 8에 나타낸다. 심벌은 실험결과이며 실선은 화학평형계산프로그램인

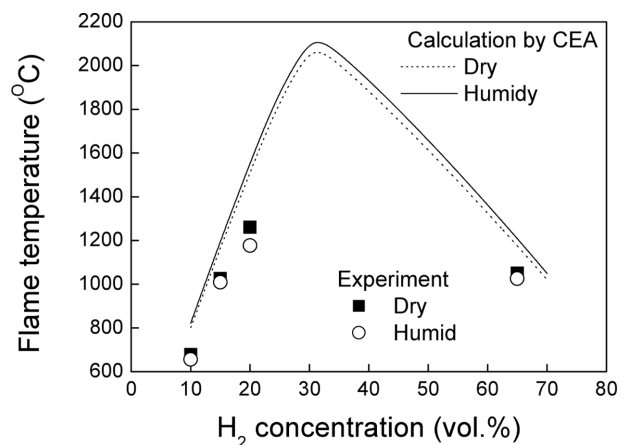


Figure 8. Flame temperature for different H₂ concentration and humidity.

Chemical Equilibrium with Applications (CEA)⁽²¹⁾에 의해 단열화염온도를 계산한 결과를 표시하였다. 계산결과에 의하면, 화염온도가 당량비에 의존하는 경향이 있으며, 이론 혼합비보다 높은 경우에는 수증기에 의해 수습도 정도 낮아지는 경향이 있다. 실험결과는 열전대 고유의 시정수에 의한 영향 등으로 계산결과보다 낮은 온도를 나타내고 있지만, CEA 결과와 크게 모순되지 않음을 알 수 있으며, 상대 습도가 화염온도에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

수소 네트워크를 구성함에 있어, 필수불가결한 안전성 확보를 위한 연구의 첫걸음으로 파이프내의 수소/공기 혼합기를 극세선 열선으로 착화하여 착화온도를 농도변화에 따라 조사하였다.

1. 수소/공기 혼합기가 착화하는 경우의 열선의 온도는 650 °C에서 770 °C의 분포를 나타내며, 연소범위내의 수소/공기 혼합기의 착화온도는 650 °C에서 770 °C의 분포를 나타내며, 수소농도의 증가에 따라 착화온도가 높아지는 경향을 가졌다. 최저착화온도를 가지는 특정의 농도를 결정하는 것은 어렵지만, 이론혼합비보다 낮은 수소농도 10 vol.% 부근에서 나타났다. 종래 연구에서 최저착화온도는 이론혼합비보다 조금 낮은 22 vol.%이었으나, 이것은 부력의 영향이 적은 조건에서의 연구결과이며 본 실험에서는 착화시에 열선의 주변에 상당한 속도의 상승기류가 존재하였기 때문이라 생각된다

2. 혼합기의 상대습도의 변화는 착화온도, 화염온도에 미치는 영향이 크지 않음이 확인되었다.

References

1. D. H. Kim, C. H. Jeong and C. H. Han, "Economic Efficiency of Using Existing Pipe Line in Hydrogen Network", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 46. No. 3, pp. 598-603 (2008).
2. K. O'Hashi, M. Hirata and W. C. Leighty, "Proposal for a Northeast Asian Hydrogen Highway: From a Natural-gas-based to a Hydrogen-based Society", 16th world hydrogen energy conference, Lyon (2006).
3. Wietschel, "The Future of Hydrogen - Opportunities and Challenges", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 615-627 (2009).
4. M. Konda, N. Shah and N. P. Brandon, "Optimal Transition Towards a Large-scale Hydrogen Infrastructure for the Transport Sector: The Case for the Netherlands", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 36, pp. 4619-4635 (2011).
5. G. A. Papadakis, "Major Hazard Pipelines: A Comparative Study of Onshore Transmission Accidents", J. Loss Prevention in the Process Industries, Vol.12, pp. 91-107 (1999).
6. M. H. Alencar and A. T. Almeida, "Assigning Priorities to Actions in a Pipeline Transporting Hydrogen Based on a Multicriteria Decision Model", Vol. 35, pp. 3610-3619 (2010).
7. P. H. C. Lins and A. T. de Almeida, "Multidimensional Risk Analysis of Hydrogen Pipelines", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, pp. 13545-13554 (2012).
8. <http://hysut.or.jp/business/2011/02/index.html>.
9. A. Daniel and Y. Jo, "The Hazard and Risks of Hydrogen", J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 20, No.1, pp. 58-164 (2007).
10. O. Kwon and G. Faeth, "Flame/Stretch Interactions of Premixed Hydrogen-fueled Flames", Combustion and Flame, Vol. 124, pp. 590-5610 (2001).
11. R. Ono, M. Nifuku, S. Fujiwara, S. Horiguchi and T. Oda, "Minimum Ignition Energy of Hydrogen-air Mixture: Effects of Humidity and Spark Duration", J. of Electrostatics, Vol. 65, pp. 87-93 (2007).
12. T. Mogi, D. J. Kim, H. Shiina and S. Horiguchi, "Self-ignition and Explosion During Discharge of High-pressure Hydrogen", J. of Loss Prevention, Vol. 21, pp. 199-204 (2008).
13. T. Imamura, T. Mogi and Y. Wada, "Control of the Ignition Possibility of Hydrogen by Electrostatic Discharge at a Ventilation Duct Outlet", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 2815-2823 (2009).
14. D. Srivastava, M. Weinrotter, K. Iskra, A. Ayarwal and E. Wintner, "Characterisation of Laser Ignition in Hydrogen-air Mixtures in a Combustion Bomb", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 2475-2482 (2009).
15. R. K. Kumar, "Ignition of Hydrogen-Oxygen-Diluent Mixtures Adjacent to a Hot, Nonreactive Surface", Combustion and Flame, Vol. 75, pp. 197-215 (1989).
16. D. Kiu and R. MacFarlane, "Laminar Burning Velocities of Hydrogen-air and Hydrogen-air-steam Flames", Combustion and Flame, Vol. 49, pp. 59-71 (1983).
17. H. Kim, H. Enomoto, H. Kato, M. Tsue and M. Kono, "The Effect of Catalytic Reaction on Hot Surface Ignition", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 63, pp. 2539-2544 (1997) (in Japanese).
18. D. J. Kim, "Measurements on the Propagation Characteristics of the Hydrogen Flame by Ultra Fine Thermocouple", Journal of Korean Institute of Gas, Vol. 14, No. 3, pp. 8-13 (2010).
19. H. H. Potter and H. H. Wills, "The Electrical Resistance of Ferromagnetics", Proc. Phys. Soc., Vol. 49, pp. 671-678 (1937).
20. A. Gaydon and H. Wolfhard, "Flames - Their Structure, Radiation and Temperature", 4th Edition, Chapman and Hall, p. 320 (1979).
21. <http://cearun.grc.nasa.gov>, (accessed : 31 - September - 2012) (online).