`2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MELCOR 전산코드에서의 수소 제어 모델 개선 제안

Suggestion of Hydrogen Control Model Improvement in MELCOR

김시달, 김동하, 홍성완, 박종화, 김희동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

MELCOR를 근간으로 한 국산화된 중대사고 해석 코드인 MIDAS를 개발하기 위하여 MELCOR의 수소연소 및 폭발에 대한 모델을 평가하였다. MELCOR 수소 제어 모델에서는 가스 온도에 대한 보정과 가연성 기체 및 비가연성 기체의 혼합 비율에 대한 보정의 필요성이 확인되었고, 수소 연소시 폭발로의 전이 판단 기준추가가 개선사항으로 나타났다. 가스온도 영향 평가 결과 가스 온도가 증가함에 따라 가연 구간이 증가함을 알 수 있다. 가연성 기체와 비가연성 기체 영향 평가 결과 H_2 값과 H_2O 값이 증가함에 따라 가연 구간이 증가했으며 반면에 CO 값과 CO_2 값이 증가함에 따라 가연 구간은 감소했다. 수소 연소시 폭발로의 전이 판단 기준평가결과 detonation cell width 값은 수소 몰 비가 증가함에 따라 값이 작아졌으며 같은 수소 몰 비인 경우 이산화탄소 몰 비가 증가할수록 따라서 증가함을 알 수 있다. 이러한 개선사항에 대한 독립모듈을 개발하여 MIDAS에 접목할 예정이다.

Abstract

A study on hydrogen control model of MELCOR identifies that MELCOR has a very simple model on the following items : gas temperature effect, multiple fuels and inertants effect, and deflagration to detonation transition (DDT) criteria. As the gas temperature increases, combustion initiates at the lower fuel concentration and the range of fuel concentration for combustion grows. As the mole fractions of H_2 and H_2O increase, the range of combustible fuel concentration increases too. On the contrary, it decreases as the mole fractions of CO and CO_2 increase. The deflagration to detonation transition (DDT) criteria are modified to consider temperature and multiple gas components such that as the CO_2 mole fraction increases, the detonation cell width increases. MIDAS will include these items for improvement.

1. 서론

MELCOR[1]를 근간으로 한 국산화된 중대사고 해석 코드인 MIDAS를 개발함에 있어 MELCOR의 기존 모델을 검토하여 취약 부분을 확인하던 중 MELCOR 코드에서 격납건물 안에서의 주요 현상에 대한 정량화 모델이 취약하다고 판단되어 그 중 수소연소 및 폭발에 대한 모델 개선/추가를 수행할 예정이다. MELCOR의 수소 모델을 검토한 결과 MELCOR의 수소 제어 모델 중 개선/추가가 필요한 부분으로 수소연소 모델과 수소 연소-폭발 천이 (DDT) 기준 추가로 나타났으며 본 논문은 수소 제어 모델의 개선사항을 평가하여 그 효과를 분석하였으며 얻어진 결과를 이용하여 수소연소 및 폭발에 대한 모델 개선/추가에 대한 독립 모듈을 개발하여 초기 조건 및 경계 조건으로부터 최종 결과물을 예측할 수 있도록 한 후 MIDAS에 접목할 예정이다.

2. MELCOR 수소 제어 모델 개선

MELCOR에서의 수소 연소 기준 (가연 기체의 몰 비가 0.1 이상, 산소 몰 비가 0.05 이상, 그리고 비가연성 기체의 몰 비가 0.55 이하)은 사용자 입력 상수를 이용한 간단한 관계식을 기준으로 가연 조건을 판단하며, 연소기체의 온도 변화에는 무관하다. 한편, MAAP[2]에서는 단일 가연성 기체와 단일 비가연성 기체로 구성된 혼합 기체의 경우를 기본으로 하여 다른 기체가 추가되면 LeChatelier의 법칙을 응용하여 가연 곡선을 구성하고, 가연성 기체와 비가연성 기체의 몰 비율에 근거하여 가연 범위를 정의하며 또한, 가스 온도의 상승 효과를 구체적으로 고려하여 가연 조건을 판단한다. 또한 MELCOR에서는 폭발 모델은 고려되어 있지 않으며, 각 제어 체적 안에서의 기체의 혼합 비율이 사용자 입력으로 주어지는 폭발 조건(수소 몰 비가 0.14 이상, 산소 몰 비가 0.09이상, 수증기 몰 비가 0.3 이하)을 만족하면 폭발가능성을 제시한다. 따라서, MELCOR 수소 제어 모델에서는 가스온도 보정과 가연성 기체와 비가연성 기체 보정 그리고 수소 연소시 폭발로의 전이 (DDT) 판단 기준 추가가 필요하다.

2.1 가스온도 보정

일반 화염 한계 범위 내에서 2가지 혼합물의 예열은 Lean Flammability Limit (LFL) 안에선 농도 감소를 Rich Flammability Limit (RFL) 에선 농도 증가를 야기한다.(즉 온도가 증가 하면 LFL에선 낮은 H2% 에서도 전파가 일어나고 RFL에선 높은 H2% 에서도 전파가 일어난다.) 상승된 온도에서, Zero inertant intercept는 확장된다. 그러나, RFL 기울기와 LFL 기울기는 일정하게 나타나며, inerting point는 100% inertant point로 이동함을 알 수 있다. 그러므로 가스온도에 대한 보정이 필요하면 다음과 같은 식에 의해 보정 된다.

$$XLu = XLLu + Mlu\ (T - 298)$$
$$XRu = XRLu + MRu\ (T - 298)$$

여기서 XLu : 주어진 온도 (T) 일때 LFL
XRu : 주어진 온도 (T) 일때 RFL
XLLu : 표준온도와 압력 일때 LFL
XRLu : 표준온도와 압력 일때 RFL
Mlu ,MRu : 자료[2]로부터 얻어지는 기울기 값, 이 값은 온도에 상관없이 일정하다.

Inert point는 100% inert point로 이동하지만 자동점화가 일어나는 최대 inertant 농도보다는 작게 된다.

온도 효과를 고려한 inert point (yi)는 다음과 같이 구할 수 있다.

yi = yiSTP + (ystia - yiSTP) (T - 298) / (Tauto - 298)

여기서
yiSTP : 표준온도와 압력 일때 증기 inerting 농도
Tauto : 자동점화 온도
ystia : 자동점화 온도시 증기 inerting 농도

온도 효과를 고려한 단일 가연성 기체와 단일 비가연성 기체로 구성된 혼합 기체의 경우의 화염한계 그림은 다음과 같은 방법으로 그린다. 화염한계 그림 구성을 위해선 LFL Intercept 점과 RFL Intercept 점, LFL 기울기, RFL 기울기 그리고 Inert 점이 필요하며 예로서 온도가 500 K이고 수소와 수증기만 있는 경우의 수소의 하향전파 화염한계 그림을 그리는 절차는 다음과 같다.

a. 표준온도에 대한 Inertant 가 없는 lean 과 rich limits LFL Intercept 점과 RFL Intercept 점을 구한다.(해당 자료로부터) [2].

(예 H_2 Rich Limit : 0.78, H_2 Lean Limit : 0.045, XHRLD : 0.715 XHLLD : 0.085)

온도가 보정된 값을 구한다.

XHLD= XHLLD + MHLLD (T - 298)= 0.085 + (-0.000084) (500 - 298) = 0.06803

XHRD= XHRLD + MHRLD (T - 298)= 0.715 + (0.0002667) (500 - 298) = 0.76887

여기서
XHLD : 주어진 온도 (T) 때 하향전파 H_2 LFL
XHRD : 주어진 온도 (T) 때 하향전파 H_2 RFL
XHLLD : 표준온도 (298K) 때 하향전파 H_2 LFL
XHRLD : 표준온도 (298K) 때 하향전파 H_2 RFL
MHLLD : 하향전파 H_2 Lean Limit 기울기
MHRLD : 하향전파 H_2 Rich Limit 기울기

b. LFL 기울기와 RFL 기울기

기울기 값은 온도에 관계없이 일정하므로 298K 때 RFL 기울기 값과 LFL 기울기 값을 이용한다 [2].

MHLD = 22.5

MHRD = -0.8452

inertant 농도값 예로서 H20 값이 0.1일때 LFL 값 LFL1 과 RFL 값 RFL1 은 다음과 같이 구해진다.

MHLD = (0 - 0.1) / (0.06803 - LFL1) = 22.5

LFL1 = 0.07247
MHRD = (0 - 0.1) / (0.76887 - RFL1) = -0.8452
RFL1 = 0.65055

c. Inert point 결정
하향전파용 Inert point coordinates는 다음과 같다.
예 H2O in H2-Air-H2O : 0.52
온도 효과를 고려한 inert point (yi)는 다음과 같이 구할 수 있다.
yi = yiSTP + (ystia - yiSTP) (T - 298) / (Tauto - 298)

여기서
yiSTP : 표준온도와 압력일때 증기 inerting 농도 : 0.52
Tauto : 자동점화 온도 : 983 K
ystia : 자동점화 온도시 증기 inerting 농도 : 0.74
yi = 0.52 + (0.74 - 0.52) (500 - 298) / (983 - 298) = 0.585

2.2 가연성 기체와 비가연성 기체 보정

단일 가연성 기체와 단일 비가연성 기체로 구성된 혼합 기체의 경우를 기본으로 하여 비가연성 기체나 가연성 기체가 추가되면 LeChatelier 의 법칙에 따라 가연 곡선을 수정하여 가연 범위를 보정한다. 아래 예는 연료로 수소와 일산화탄소가 비가연성 기체로 수증기와 이산화 탄소가 혼합된 경우에 대해 연료/비가연성 기체의 영향을 보정하여 화염한계 그림 작성법을 설명하였다.

화염한계 그림 구성을 위해선 LFL Intercept 점과 RFL Intercept 점, LFL 기울기, RFL 기울기 그리고 Inert 점이 필요하며 예로서 온도가 298K 이고 수소 (H_2) 몰 비가 0.1 , 일산화탄소(CO) 몰 비가 0.05, 수증기(H_2O) 몰 비가 0.3, 이산화탄소(CO_2) 몰 비가 0.1 이고 공기 (Air) 몰 비가 0.45인 경우의 혼합가스의 하향전파 화염한계 그림을 그리는 절차는 다음과 같다.

a. 표준온도에 대한 Inertant 가 없는 lean 과 rich limit인 LFL Intercept 점과 RFL Intercept 점을 구한다.(LeChatelier 의 법칙) [2].

$$L = [\sum_i Ci / Li]^{-1}$$

여기서 Li = 개별 연료 LFL
L = 전체 혼합물 LFL
Ci = 전체 연료내 각 연료의 몰 비

$$R = \sum_i Ci\ Ri$$

여기서 Ri = 개별 연료 RFL

R = 전체 혼합물 RFL
Ci = 전체 연료내 각 연료의 몰 비

H_2 하향 Rich Limit: 0.715, H_2 하향 Lean Limit : 0.085
CO 하향 Rich Limit : 0.68, CO 하향 Lean Limit : 0.159
L1 = 0.085, C1 = 0.1 / (0.1+0.05) = 0.667, L2 = 0.159, C2 = 0.05 / (0.1+0.05) = 0.333
R1 = 0.715, R2 = 0.68

$L = [C1 / L1 + C2 / L2]^{-1} = [0.667/ 0.085 + 0.333 / 0.159]^{-1} = 0.1$
R = C1 R1 + C2 R2 = 0.667 x 0.715 + 0.333 x 0.68 = 0.703

b. LFL 기울기와 RFL 기울기
불활성 물질이 하나 이상인 경우 , 평균 화염 한계 curve는 점근선의 평균 기울기에 의해 구해진다.
$Ml = (f1 /Ml1 + f2 /Ml2)^{-1}$
Mr = f1 Mr1 + f2 Mr2

여기서 f1과 f2는 상대적인 불활성 fraction이다 (f1 + f2 =1)
(예 f1= 0.3/ (0.3+0.1) = 0.75, f2= 0.25, Ml1 = 22.5 , Ml2 = 8.0, MR1 = -0.8452 , MR2 = -0.811
$Ml = (0.75 /22.5 + 0.25 /8)^{-1} = 15.48$
Mr = 0.75 x (-0.8452) + 0.25 x (-0.811) = -0.837

yl = Mlx + bl ……… (1)
yr = Mrx + br ……… (2)

여기서 x : fuel mole fraction
y : inertant mole fraction
예로든 값을 이용하여 식을 계산해보면
bl = yl - Mlx = 0 - 15.48 x (0.1) = -1.548
br = yr - Mrx = 0 - (-0.837) x (0.703) = 0.588

그러므로 (1)식은 yl = 15.48 x + (-1.548) 이고 (2)식은 yr = (-0.837)x + 0.588 이다.

c. Inert point 결정
xi = 1 / (f1 /xi1 + f2 /xi2)
= 1 / (0.75 /0.52 + 0.25 /0.20)
= 0.371
여기서 x11 : H2O inert point in H2-Air-H2O : 0.52
x12 : CO2 inert point in CO-Air-CO2 : 0.20
이 방법으로부터 그린 그림이 그림1에 나타나 있다.

2.3 수소 연소시 폭발로의 전이 (DDT) 판단 기준

수소 연소시 고려되어야 할 내용은 수소 폭발로의 진행 가능성 (DDT) 을 판단하는 것으로 MELCOR 에서는 수소 몰 비가 0.14 보다 크고, 산소 몰 비가 0.09 이상이며, 수증기 몰 비가 0.3 보다 낮으면 폭발 경고가 기록되며 위의 관계식의 상수는 사용자가 수정할 수 있도록 되어 있다. 보다 정확하게 수소 폭발 가능성을 예측하기 위하여 온도 효과와 수소와 일산화탄소 두 종류의 가연 기체를 고려하였으며, 수증기와 이산화탄소의 두 종류의 비가연 기체에 대한 각각의 detonation cell width (λ) 를 활용하여 혼합 기체에서의 λ를 계산하였으며, 7*λ와 수소 폭발 제어 체적에서의 특성 길이와 비교하여 폭발 가능성을 제시하도록 하였다. DDT를 평가하는 방법은 크게 두 가지로 하나는 NUREG/CR-4803[3] 에서 사용한 가연기체 농도와 기하학적 구조에 따라 초음속 연소 발생 가능성 등급을 평가하는 방법으로 SYSTEM 80+[4] 에서 사용한 방법이기도 함. 다른 하나는 미국 EPRI에서 ALWR에 사용하는 방법[5]으로 가스 혼합물의 detonation cell width를 계산하여 제어 체적의 특성 길이 (characteristic length) 와 비교하여 폭발 가능성을 결정하는 방법으로 차세대 원전에서의 DDT 평가에 활용된다. 가스 혼합물의 detonation cell width 를 계산하는 방법은 다음과 같다.

a. 1단계 : 연료 농도계산

하나의 연소가스 이상을 포함하는 혼합물 점화에 필요한 몰 농도는 Lechatelier 식을 통한 하나의 연소 가스의 혼합물에 요구되는 농도와 관련된다. 그 식은 수소 몰 fraction 과 일산화탄소 몰 fraction 으로 정의된 효율적인 가스 몰 fraction 을 제공한다.

$$X_f = X_{H2} + FX_{CO}$$

여기서 F : 수소와 일산화탄소의 실험 변수로서 점화기가 없는 경우는 0.6 점화기가 있는 경우는 0.54를 쓴다.

b. 2단계 : 373K 때 λ_{H2O} 값을 계산한다. (표1을 이용하여 보간법으로 계산) [6]

c. 3단계 : H_2O에 대한 온도 보정 (표2 참조) [7]

$\lambda'_{H2O} = \lambda_{H2O} \times (\lambda_T / \lambda_{373})_{H2O}$

여기서 λ_{TH2O} : 온도 T때 λ_{H2O}

d. 4단계 : 373K 때 H_2O 몰농도에 따른 CO_2 보정

$\lambda'_{CO2} = \lambda_{H2O} \times S$

여기서 S 는 373K 때 몰농도에 따른 $(\lambda_{CO2} / \lambda_{H2O})$ (표3 참조) 비 [7]

e. 5단계 : CO_2 온도보정 (표4 참조) [7]

$\lambda''_{CO2} = \lambda'_{CO2} \quad (\lambda_T / \lambda_{373})_{CO2}$

f. 6단계 : 전체 λ 값을 계산한다

$\lambda = \lambda'_{H2O} + \lambda''_{CO2}$

3. 수소 제어 모델 개선 영향 평가

3.1 가스온도 영향 평가

연소 기체의 온도에 따른 효과를 고려하여 온도에 따른 연소한계를 구분하였다. 온도 효과를 보기 위해 표준 온도인 298K , 500K 그리고 800K 세 온도에 대해 단일 가연성 기체(H_2) 와 단일 비가연성 기체(H_2O)로 구성된 혼합 기체의 경우 화염한계 그림을 통해 영향 평가를 하였다. 2.1의 방법대로 그림을 그린결과 그림2에 보듯이 가스 온도가 증가함에 따라 가연 구간이 증가함을 알 수 있다.

3.2 가연성 기체와 비가연성 기체 영향 평가

가연성 기체와 비가연성 기체의 영향을 평가하기 위해 연료로 수소와 일산화탄소가 비가연성 기체로 수증기와 이산화 탄소가 혼합된 경우에 대해 연료/비가연성 기체의 영향을 보정하여 평가 하였다. 예로서 mole fraction이 H_2 = 0.1, CO = 0.05, H_2O = 0.3, CO_2 = 0.1, Air= 0.45인 혼합 기체를 기본으로 연료인 H_2 값이 0.2, 0.3인 경우 , CO 값이 0.15,0.25인 경우와 비가연성 기체인 H_2O 값이 0.4, 0.5인 경우와 , CO_2 값이 0.2, 0.3 인 경우에 대해 평가 하였다. H_2 값이 0.2, 0.3인 경우의 평가결과가 그림3에 나타나있다. 그림3에서 보듯이 H_2값이 증가 함에 따라 가연 구간이 늘어남을 알 수 있고 H_2값이 0.1에서 0.2로 증가된 경우가 H_2값이 0.2에서 0.3 으로 증가된 경우에 비해 가연구간이 증가되는 비가 큼을 알 수 있다. CO 값이 0.15,0.25인 경우의 평가결과가 그림4에 나타나있다. 그림4 에서 보듯이 CO 값이 증가 함에 따라 가연 구간이 줄어듬을 알 수 있고 CO 값이 0.05에서 0.15로 증가된 경우가 CO 값이 0.15에서 0.25로 증가된 경우에 비해 가연구간이 감소되는 비가 큼을 알 수 있다. H_2O 값이 0.4, 0.5 인 경우의 평가결과가 그림5에 나타나있다. 그림5에서 보듯이 H_2O 값이 증가 함에 따라 가연 구간이 늘어남을 알 수 있고 H_2O 값이 0.3에서 0.4로 증가된 경우가 H_2O 값이 0.4에서 0.5로 증가된 경우에 비해 가연구간이 증가되는 비가 큼을 알 수 있다. CO_2 값이 0.2, 0.3인 경우의 평가결과가 그림6에 나타나있다. 그림6에서 보듯이 CO_2값이 증가 함에 따라 가연 구간이 줄어듬을 알 수 있고 CO_2값이 0.1에서 0.2로 증가된 경우가 CO_2값이 0.2에서 0.3으로 증가된 경우에 비해 가연구간이 감소되는 비가 큼을 알 수 있다.

3.3 수소 연소시 폭발로의 전이 (DDT) 판단 기준 평가

기존의 간단한 DDT 기준을 detonation cell width (λ) 를 계산하는 EPRI 방법으로 대체하여 평가하였고 혼합 기체의 온도가 λ에 미치는 영향을 고려하였다. 수소와 일산화탄소의 두 가지 가연 기체와 수증기 및 이산화탄소의 두 가지 비가연성 기체에 대해 를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하여 활용하였다. 예로서 수소 몰 비가 15% 와 25%에서의 이산화탄소 몰 비에 따른 변화를 평가 하였으며 평가결과가 그림7,8에 나타나있다. 그림7,8에서 보듯이 수소 몰 비가 15%인 경우가 수소 몰 비가 25%인 경우에 비해 값이 큼을 알 수 있고 같은 수소 몰 비인 경우 이산화탄소 몰 비가 증가할수록 값

이 큼을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구계획

MELCOR의 수소 제어 모델 중 개선사항으로 나타난 것은 가스온도 보정과 가연성 기체와 비가연성 기체 보정 그리고 수소 연소시 폭발로의 전이 판단 기준추가 이며 이 개선사항은 평가결과 중요하게 나타났다. 그러므로 이러한 개선사항에 대한 독립 모듈을 개발하여 현재 개발중인 국산화된 중대사고 해석 코드인 MIDAS에 접목이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. R.M. Summers,et al., “MELCOR Computer Code Manuals,” SNL, NUREG/CR-6119, SAND97-2185, 1997.7
2. “MAAP4(Modular Accident Analysis Program for LWR Plants Code Manual,”EPRI,1994.5
3. “The possibility of local detonations during degraded core accidents in the Bellefonte Nuclear Power Plant,” NUREG/CR-4803, SAND-86-1180, 1986.
4. System 80+, Standard Design CESSAR Design Certification, Combustion Engineering.
5. FAI, “Technical Support for the Hydrogen Control Requirement for EPRI Advanced Light Water Reactor Requirements Document,” Task 8.3.5.4, 1988.6
6. Seong-Wan Hong, et al., “A Study on the Evaluation Methodology of DDT Potential in a PWR Containment during Severe Accidents,” SMiRT-15, 1999.8
7. D.W.Stamps, et al., “Hydrogen-Air-Diluent Detonation Study for Nuclear Reactor Safety Analyses,” NUREG/CR-5525, 1991.1

표1 373K 때 수소와 증기에 대한 혼합물의 detonation cell width

HYDROGEN CONC. (%)	Name	Steam Concentration (%) 0	5	10	15	20	25	30	35
10	Detonation Cell Width(m)/ Min. DDT Characte-ristic Length (m)	5/35	N	N	N	N	N	N	N
13		0.3/2.1	1/7	4/28	N	N	N	N	N
15		0.15/1.05	0.4/2.8	1/7	5/35	N	N	N	N
18		0.05/0.35	0.1/0.7	0.3/2.1	1/7	5/35	N	N	N
20		0.03 (D)	0.05/0.35	0.15/1.05	0.4/2.8	1.3/9.1	5/35	N	N
25		0.01 (D)	D	0.05/0.35	0.1/0.7	0.2/1.4	0.7/4.9	2/14	N
30		0.005 (D)	D	D	0.03/0.35	0.1/0.7	0.3/2.1	0.8/5.6	3/21
35		0.002 (D)	D	D	D	0.09/0.63	0.3/2.1	0.7/4.9	2/14
40		0.007 (D)	D	D	0.07/0.49	0.15/1.05	0.4/2.8	1.2/9.6	4/28
45		0.01 (D)	D	0.05/0.35	0.1/0.7	0.3/2.1	1/7	4/28	N
50		0.03 (D)	0.05/0.35	0.1/0.7	0.3/2.1	0.9/6.3	3/21	N	N
55		0.05/0.35	0.09/0.63	0.2/1.4	0.7/4.9	3/21	N	N	N
60		0.1/0.7	0.2/1.4	0.5/3.5	3/21	N	N	N	N
65		0.2/1.4	0.5/3.5	2/14	N	N	N	N	N
70		0.5/3.5	1.5/10.5	5/35	N	N	N	N	N
75		1/7	5/35	N	N	N	N	N	N
80		3/21	N	N	N	N	N	N	N

N : Not Detonable (Code에선 100 사용)
D : DETONABLE IN ANY COMPARTMENT BECAUSE THE LIMITING SCALE IS ABOUT 0.35M

표2 수증기 농도에 따른 가스 온도에서의 detonation cell width(mm)

	Steam Concentration(%) 0	10	20	30	40
373K	21	31	150	700	3600
400K	22	30	110	550	3000
600K	40	43	55	100	380
800K	60	60	70	90	140
1000K	80	80	90	110	150

표3 373K때 수증기 몰농도에 따른 이산화탄소 대 수증기의 detonation cell width 비

H_2O (%)	0	5	10	15	20	25	30
$\lambda_{CO2} / \lambda_{H2O}$	1	27/24 =1.125	42/30 =1.4	80/58 =1.38	280/140 =2	900/300 =3	2700/670 =4.03

표4 이산화탄소의 농도에 따른 가스 온도에서의 detonation cell width(mm)

	CO2 Concentration(%)				
	0	5	10	15	20
373K	20(mm)	27	42	90	260
400K	22	30	43	78	210
600K	40	50	70	100	150
800K	60	70	100	140	200
1000K	80	95	130	180	230

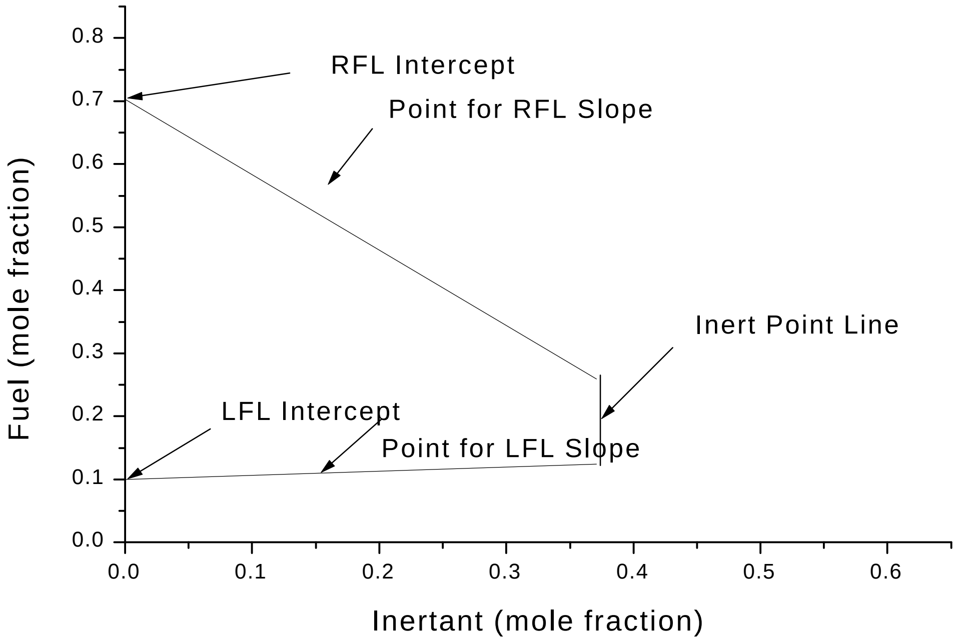

그림 1 가연성 기체와 비가연성 기체의 혼합 농도에서의 화염한계

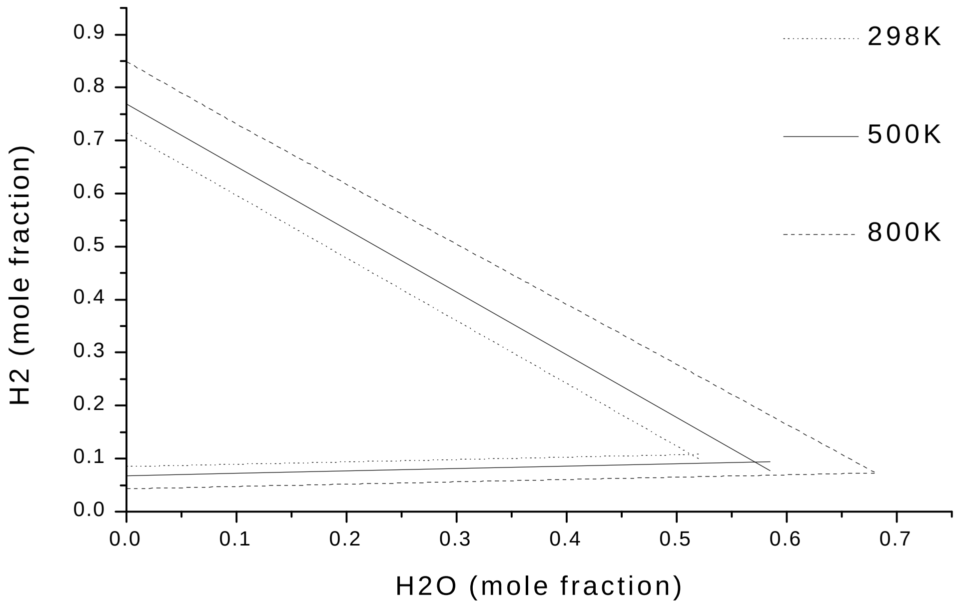

그림 2 화염 한계에 대한 온도영향

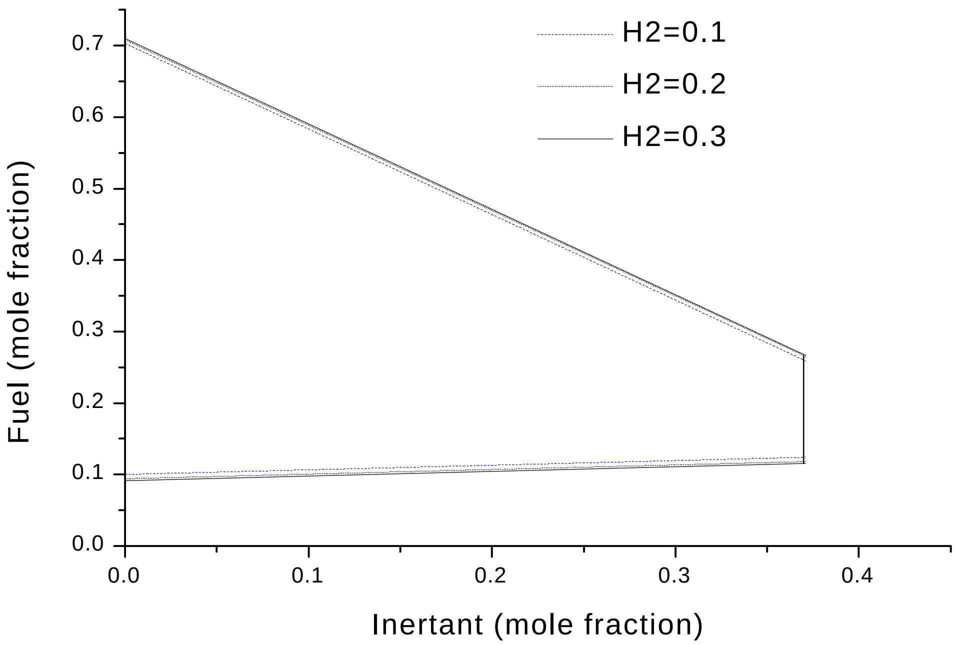

그림 3 수소 몰 비가 10%, 20%,30% 에서의 가연 구간 변화

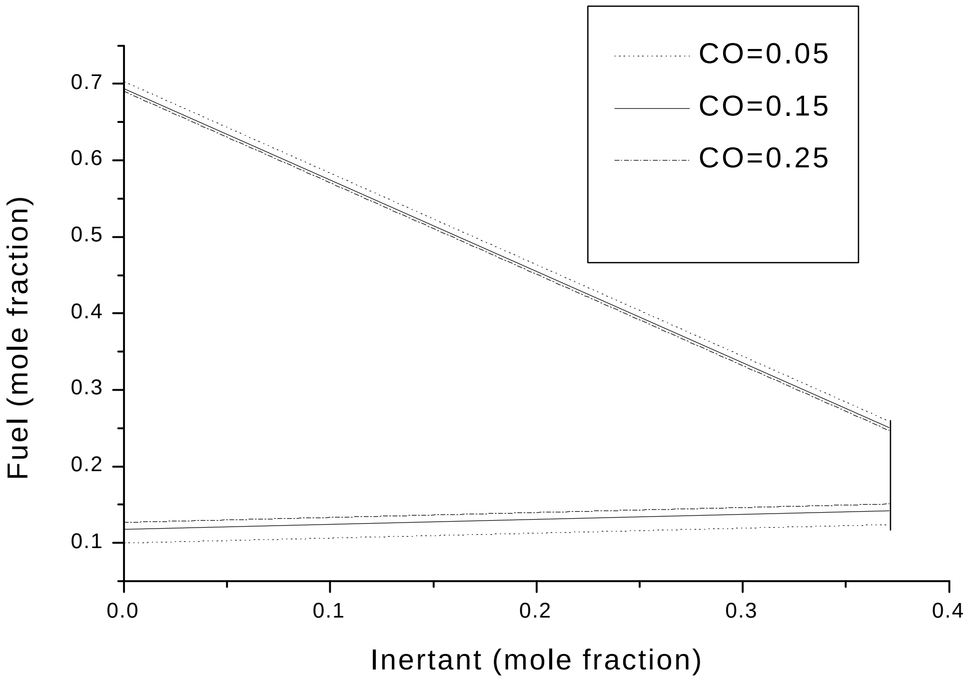

그림 4 일산화탄소 몰 비가 5%, 15%,25% **에서의 가연 구간 변화**

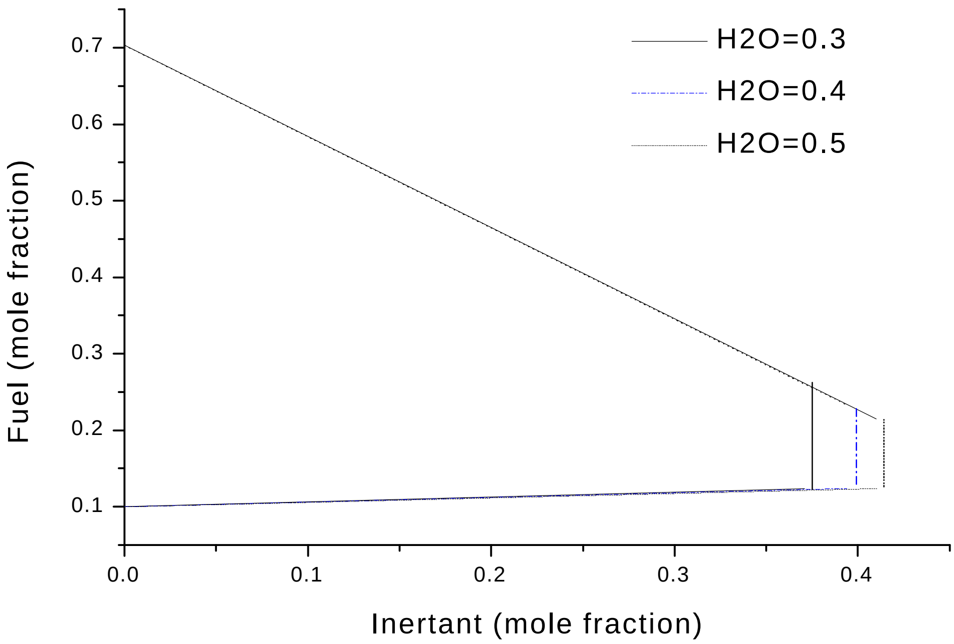

그림 5 수증기 몰 비가 30%, 40%,50% **에서의 가연 구간 변화**

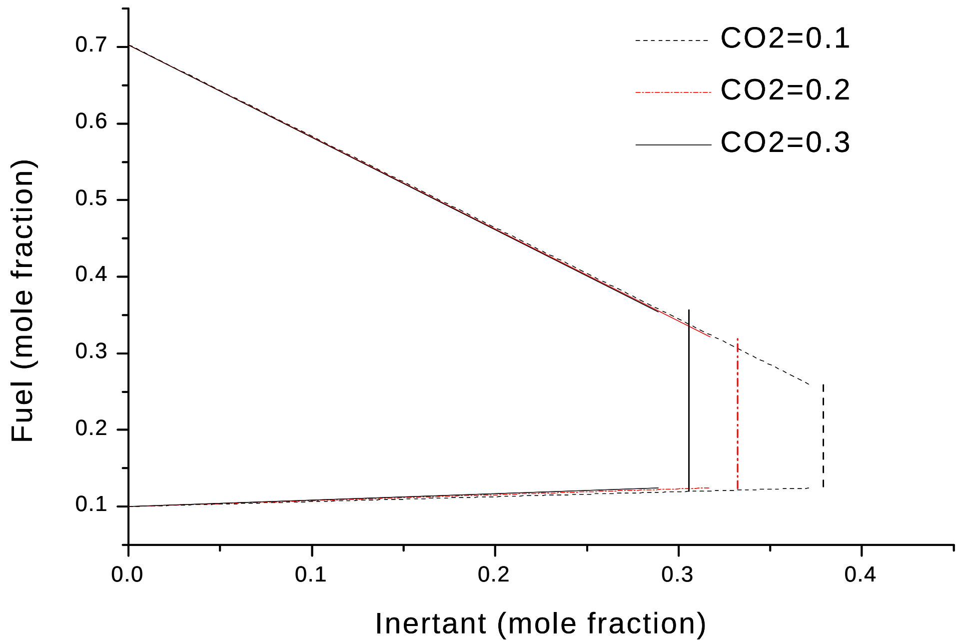

그림 6 이산화탄소 몰 비가 10%, 20%,30% **에서의 가연 구간 변화**

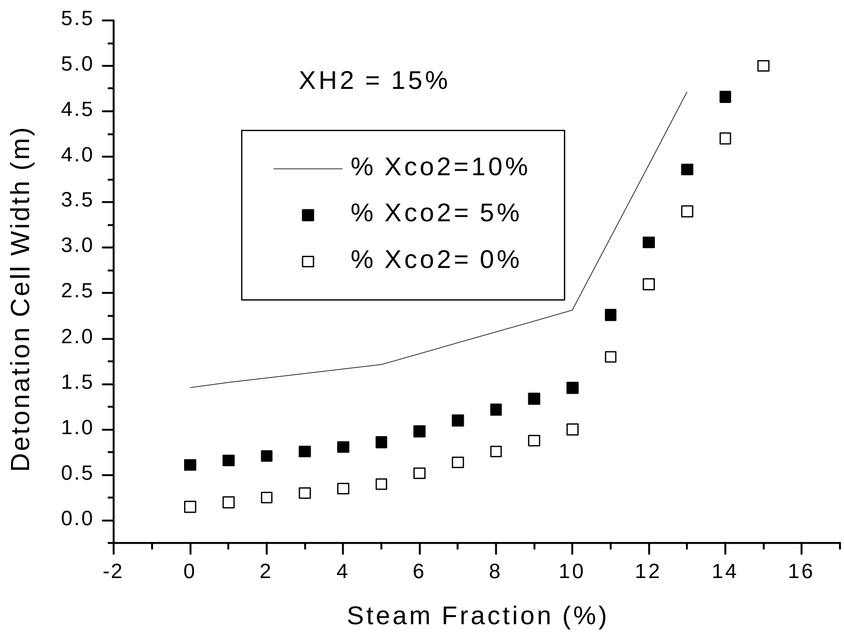

그림 7 **수소 몰 비가** 15% **에서의** CO2 **몰 비에 따른 λ변화**

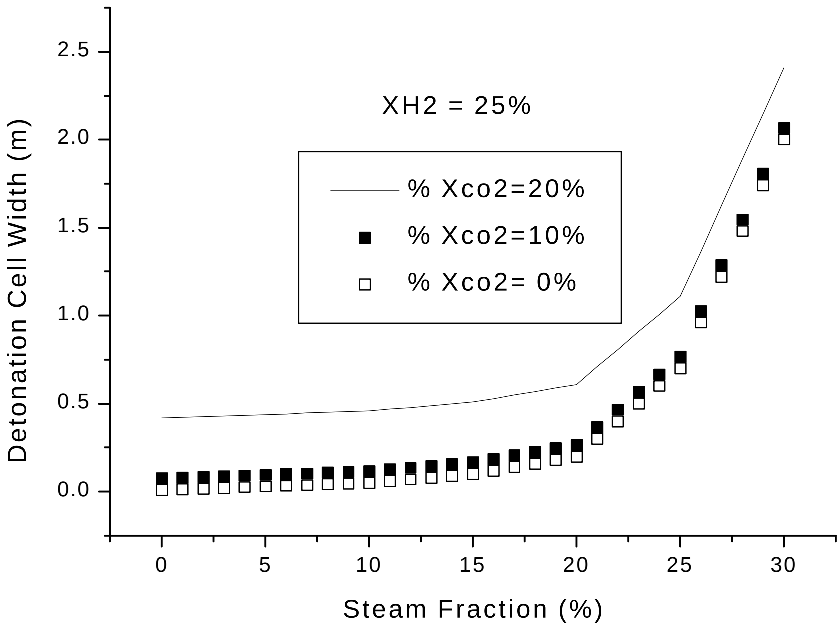

그림 8 **수소 몰 비가** 25% **에서의** CO2 **몰비에 따른 λ 변화**