

MELCOR와 MAAP 전산코드에서의 불완전 연소 조건 비교

Comparison of Incomplete Burn Condition between MELCOR and MAAP

김시달, 김동하, 박종화, 박수용, 최 영
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

대표적인 중대사고 해석코드인 MELCOR와 MAAP에서 사용하고 있는 수소 연소 가능 조건과 연소시 완전, 불완전 연소 조건을 점화원의 유무에 따라 비교하였다. MELCOR에서는 격납건물 대기의 가스 온도와 무관하게 가연성 및 비가연성 기체의 몰 비를 이용한 간단한 조건식으로부터 연소 발생 여부를 판단하는 반면, MAAP에서는 가스 온도와 다양한 구성 기체의 몰 비에 따른 가연 곡선을 이용하여 연소 기준을 결정한다. 점화원이 없는 경우의 두드러진 특징은 두 코드 모두 연소 조건이 만족되는 경우에는 항상 완전 연소가 일어난다는 것이다. 점화원이 가능한 경우는 두 코드 모두 불완전 연소를 고려하였고, MAAP의 불완전 연소 구역은 MELCOR의 불완전 연소 구역보다 구역이 넓음을 알 수 있다. MAAP의 경우 연소 기체의 온도가 증가할수록 낮은 가연성 몰 비에서도 연소를 예측하였고, MELCOR의 내장된 값으로부터 계산된 연소 조건은 500K의 연소 기체에 대한 MAAP 결과와 유사하였다.

Abstract

The ignition criteria and the completeness of combustion with and without ignition source are compared between MELCOR and MAAP, which are two representative severe accident analysis codes. While MELCOR uses a simple correlation to determine the ignition criteria, MAAP constructs a flammability limit diagram based on gas temperature and various gas mole fraction. If there is no ignition source, then both codes estimate only the complete combustion as long as the ignition criteria are satisfied. If the ignition source is available, the incomplete burn as well as the complete burn is allowed in the two codes. As the gas temperature increases, MAAP predicts combustion initiation at the lower fuel concentration and MAAP calculates a wider range of fuel concentration for the incomplete burn. Also, the default values set in MELCOR generates similar ignition criteria to MAAP for the gas temperature of 500K.

1. 서론

중대사고시 고온의 증기와 피복재가 산화 반응하여 생성되는 수소는 연소가 일어날 경우 격납건물 내부 압력을 상승시키는 등 격납건물 건전성에 위협을 준다. 이러한 수소 연소에 대한 영향을 정확히 평가하기 위해선 기존 코드의 사용 모델에 대한 분석이 필요하며 이를 위하여 대표적인 중대사고 해석코드인 MELCOR[1] 와 MAAP[2]의 연소 모델을 비교, 평가하였다. 수소 연소 발생 조건과 특히 연소로 인한 압력 상승이 관심인 경우에는 완전 연소인지 불완전 연소인지를 예측하는 것은 중요한 일로 판단되어, 이 두 코드에서 다루고 있는 연소 가능 조건과 연소 후의 최대 압력에 영향을 미치는 완전, 불완전 연소 구분을 비교, 검토하였다.

2. MELCOR 연소 조건 특성

MELCOR의 수소 연소 모델은 화염 전파 관계식을 풀기보다는 전체적인 관점에서의 연소 영향을 평가한다. 주로 HECTR 1.5 코드의 모델을 그대로 사용하며 각종 관계식의 계수에 대한 민감도분석을 수월하게 하고, 특히 DCH 현상으로 인한 조건 변화를 고려할 수 있도록 필요 변수를 지정하여 사용하고 있다. 가연성 기체로는 수소와 일산화탄소가 있으며, 산소와 수증기, 그리고 이산화탄소 량을 고려하여 연소 조건을 판단한다. 연소가 발생하면 연소 전파 조건을 만족하는 경우 연소 발생 노드와 인접한 노드로 화염이 전파되며 이때 전파되는 시간은 사용자가 지정하거나 코드가 계산하는 화염 속도를 가지고 예측한다.

2.1 연소 발생 기준

MELCOR에서는 임의의 제어 체적에서 물 비 구성에 근거한 다음의 LeChatelier 기준이 만족되면 연소가 가능하다고 판단한다:

$$X_{H_2} + X_{CO} \frac{L_{H_2, ign}}{L_{CO, ign}} \geq L_{H_2, ign} \quad (1)$$

여기서, X_{H_2} 와 X_{CO} 는 수소와 일산화탄소의 물 비이고, $L_{H_2, ign}$ 와 $L_{CO, ign}$ 은 LeChatelier가 제시한 수소 및 일산화탄소의 연소 가능 물 비를 각각 나타낸다. MELCOR에서 제시하는 LeChatelier 상수 L 은 점화원이 없고 격납건물 직접 가열 (DCH) 현상이 없는 경우에는 수소의 경우 0.1, 일산화탄소의 경우에는 0.167이고, 점화원이 있는 경우에는 수소의 경우 0.07, 일산화탄소의 경우 0.129이며, 사용자가 모두 입력할 수 있는 변수이다. DCH가 연소에 미치는 영향을 고려하기 위해 사용자가 이 값들을 수정할 수 있으나 기본 값은 점화원이 있는 경우와 동일하다.

또 다른 가연 조건은 연소에 필요한 충분한 산소와 연소를 방해하는 수증기와 이산화탄소의 물 비로, 연소기준은 다음과 같다:

$$X_{O_2} \geq X_{O_2IG} \quad (2)$$

$$X_{H_2O} + X_{CO_2} < X_{MSCIG} \quad (3)$$

여기서, X_{O_2} 와 X_{H_2O} , 그리고 X_{CO_2} 는 각각 산소와 수증기, 그리고 이산화탄소의 몰 비이고, X_{O_2IG} 와 X_{MSCIG} 는 연소에 필요한 최소 산소 몰 비와 연소가 가능한 최대 비가 연성 기체의 몰 비를 각각 의미하며, 코드에 내장되어 있는 기본 값은 각각 0.05와 0.55로 역시 사용자가 입력으로 수정할 수 있다.

2.2 불완전 연소 기준

MELCOR에서는 연소가 발생하여도 언제나 완전 연소되지는 않는다. 완전 연소 여부를 판단하기 위해 코드에서는 완전연소도 (combustion completeness, CC)를 다음과 같이 정의하고 있다:

$$CC = 1 - \frac{Y_{min}}{Y_{max}} \quad (4)$$

$$Y = X_{H_2} + X_{CO} \frac{Y_{H_2}CC}{Y_{CO}CC} \quad (5)$$

여기서, Y 는 가연성 기체의 몰 비와 LeChatelier 상수로 정의되는 변수로 Y_{max} 와 Y_{min} 는 각각 연소 시작과 종결 시점에서의 값을 의미한다. LeChatelier 상수인 $Y_{H_2}CC$ 와 $Y_{CO}CC$ 는 DCH가 일어나지 않는 경우 각각 0.08과 0.148이 내장되어 있고, DCH의 경우에도 동일한 값을 기본 값으로 사용하고 있다. 완전연소도인 CC는 일정한 값이나 가변적인 값을 사용자가 지정할 수 있고, 또한 관계식으로부터 계산할 수도 있다. 코드에 내장되어 있는 관계식은 초기 가연성 기체의 몰 비 (Y_{max})의 함수로, HECTR 1.5 코드와 실험 결과로부터 다음과 같이 얻어진다:

$$CC = 0 \quad \text{for } Y_{max} \leq 0.03746 \quad (6)$$

$$CC = 23.4116(Y_{max} - 0.03746) \quad \text{for } Y_{max} > 0.03746 \quad (7)$$

이상과 같이, MELCOR에서는 먼저 연소 시작 시점에서의 수소와 일산화탄소의 몰 비로부터 식 (5)를 이용하여 Y_{max} 를 구하고, 식 (6)과 (7)로부터 완전연소도 CC를 계산한다. 완전연소도가 결정되면 식 (4)로부터 연소 후의 가연성 기체 조건인 Y_{min} 을 얻는다.

2.2.1 점화원이 없는 경우

먼저 MELCOR에 내장되어 있는 계수를 이용하여 식 (1)로부터 연소 가능 조건을 만들어보면 다음과 같다:

$$X_{H_2} + 0.5988 X_{CO} \geq 0.1 \quad (8)$$

완전, 불완전 연소의 판단 기준은 식 (6)과 (7)로부터 얻을 수 있다. 즉, Y_{max} 가 0.03746보다 작으면 CC 는 0이 되어 Y_{min} 과 Y_{max} 이 같게 된다. 즉, 연소가 일어나지 않는다. 만일, Y_{max} 가 0.08 부근이면 CC 는 1에 접근하고 Y_{min} 은 0이 되고 연소 후 남아 있는 가연성 기체는 없게 된다. 즉, 완전 연소 조건이 된다. Y_{max} 가 0.08보다 크게 되면 CC 와 Y_{min} 이 음수가 되어 완전 연소가 됨을 확인 할 수 있다. 따라서 MELCOR에서의 불완전 연소는 Y_{max} 가 0.03746과 0.08 사이의 경우에 발생하고 그 이상의 농도 비에서는 항상 완전 연소됨을 알 수 있다. 이로부터 얻어지는 불완전 연소 조건은 다음과 같다:

$$0.03746 \leq X_{H_2} + 0.5405 X_{CO} \leq 0.08 \quad (9)$$

부등식 (8)과 (9)를 수소와 일산화탄소 좌표에 그려보면 그림 1에서처럼 두 부등식의 영역이 서로 교차하지 않음을 알 수 있다. 즉, 연소가 발생하지 않는 조건에서 불완전 연소 구간이 설정되므로, 점화원이 없는 경우에는 연소가 일어나면 항상 완전 연소가 일어남을 알 수 있다.

2.2.2 점화원이 있는 경우

점화원이 있으면 연소 가능 영역이 넓어지며, 코드에 내장된 기본 값에 의한 식(1)의 가연 조건은 다음과 같다:

$$X_{H_2} + 0.5426 X_{CO} \geq 0.07 \quad (10)$$

이 부등식의 영역과 불완전 연소 구간인 부등식 (9)의 연소 영역을 비교해보면 그림 2에서처럼 연소 가능 지역 안에 불완전 연소 영역이 일부 포함되어 있음을 알 수 있다. 즉, 점화원이 있는 경우에는 불완전 연소가 발생할 수 있는 연소 조건이 형성됨을 알 수 있다.

3. MAAP 연소 조건 특성

3.1 연소 발생 기준

MAAP에서는 MELCOR의 경우에 비해 여러 가지 요소를 고려하여 연소 조건을 판단한다. 첫째, MELCOR에서는 식 (1), (2), 그리고 (3)의 조건만을 이용하여 가연 조건을 판단하는데 비하여 MAAP에서는 실험으로 얻어진 두가지 혹은 세가지 기체가 혼합된 경우의 가연 곡선을 기준으로 가연성 기체와 비가연성 기체의 몰 비율과 가연 곡선의 연소 범위를 비교하여 가연 조건을 결정한다. 둘째는 MELCOR에서는 연소 기체의 온도 효과가 가연 조건에서 일정한 반면, MAAP에서는 온도의 상승 효과를 체계적으로 예측하여 대부분의 실험이 149C 이하의

기체의 온도에서 수행되어 실제의 사고 조건인 고온에서의 자료가 충분하지 못한 점을 고려하고 있다. 셋째는, MAAP의 경우 단일 가연성 기체와 단일 비가연성 기체로 구성된 혼합 기체의 경우를 기본으로 하여 비가연성 기체나 가연성 기체가 추가되면 LeChatelier의 법칙에 따라 가연 곡선을 수정하여 가연 범위를 정의하고 있다.

3.2 불완전 연소 기준

MAAP에서의 불완전 연소는 화염이 위 방향이나 옆 방향으로 전파되는 대기 조건에서 발생하며, 화염 전파 방향이 아래로 진행되는 경우에는 완전 연소로 정의된다. 표준 상태의 수소와 공기의 혼합 기체의 경우 완전 연소의 부피 비는 9%이고 4.1%부터 불완전 연소가 시작되며, 일산화탄소와 공기의 혼합기체의 경우에는 15% 이상에서 완전 연소가 12.5% 이상이면 불완전 연소가 가능하다.[2].

MAAP에서의 연소 구분은 다음의 절차에 따른다. 먼저 혼합 기체의 구성에 맞는 상향 및 하향 화염 전파 가연 곡선을 구성한다. 상향 가연 곡선의 가연 범위에 혼합 기체가 포함되면 일차적으로 연소가 가능하다고 판단한다. 그리고 나서 하향 가연 곡선의 가연 범위와 비교한 뒤 가연 범위에 포함되면 완전 연소가 가능하다고 분석하고 점화원의 존재 여부를 확인한다. 이 때 점화원이 있으면 완전 연소가 일어나고, 그렇지 않으면 점화원 없이도 연소가 가능한 범위에 혼합 기체가 포함되는지 확인하고 만족되면 역시 완전 연소가 일어나지만 범위에서 벗어나면 어떠한 연소도 일어나지 않는다. 만일 상향 가연 곡선에는 포함되지만 하향 가연 곡선의 가연 범위에 들지 않으면 불완전 연소의 가능성을 타진한다. 이때는 점화원이 있으면 불완전 연소를 예측하며, 점화원이 없으면 불완전 연소를 고려하지 않는다.

4. MELCOR와 MAAP의 불완전 연소 특성 비교

4.1 점화원이 없는 경우

MELCOR에서는 격납건물 대기의 가스 온도와 무관하게 연소 발생 여부를 판단하는 반면 MAAP에서는 가스 온도에 따라 연소 기준이 변함을 알 수 있다. MELCOR에 내장된 기본 값을 사용한 연소 기준과 온도에 따른 MAAP의 연소 기준을 그림 3에 비교하였다. 여기서 MAAP의 경우 혼합 가스는 산소와 수증기의 몰 비가 각각 0.2와 0.3, 나머지는 수소와 일산화탄소, 그리고 질소로 구성되어 있다고 가정하였다. 그림에서 보듯이 MAAP에서는 가스 온도가 높아짐에 따라 필요한 가연 기체의 몰 비가 감소하는 추세를 보이며 MELCOR의 기본 값에 의한 연소 기준은 MAAP에서의 300K-500K의 대기 온도의 결과와 유사함을 알 수 있다.

점화원이 없는 경우의 두드러진 특징은 연소 조건이 만족되는 경우에는 항상 완전 연소가 일어난다는 것이다. MELCOR의 경우 2.2.1절에서 언급되었듯이 가연 가스의 몰 비를 양축으로 하는 좌표에서 불완전 연소 구간이 가연 구간보다 항상 아래 존재하게 되어 불완전 연소는 일어나지 않도록 모델되어 있다. MAAP의 경우에는 상향 화염 전파 기준으로 연소 가능성을 판단하며 하향 전파 기준보다 가연 가스 구성비가 낮게되면 불완전 연소를 예측한다. 그러나 점화원이 없는 경우에는 불완전 연소의 가능성을 고려하지 않는다.

4.2 점화원이 있는 경우

MELCOR에 내장된 기본 값을 사용한 불완전 연소 구역과 온도에 따른 MAAP의 불완전 연소 구역을 그림 4에서 그림 6까지 비교하였다. 그림 4에서 보듯이 MELCOR의 기본 값에 의한 연소 구역과 MAAP에서의 300K 대기 온도에서의 결과를 비교해 볼 때 MELCOR에서의 완전 연소 구역의 일부가 MAAP에서의 불완전 연소 구역에 포함됨을 알 수 있다. MELCOR의 기본 값에 의한 불완전 연소 구역과 500K의 대기 온도의 MAAP 결과와 비교해 보면 그림 5에서처럼 대부분의 MELCOR 불완전 연소 구역이 MAAP의 불완전 연소 구역 내에 포함됨을 알 수 있으며, 800K의 대기 온도의 MAAP 결과와 비교해 볼 때는 그림 6에서처럼 MELCOR 불완전 연소구역이 MAAP의 완전 연소 구역에 위치함을 알 수 있다.

그림들에서 보듯이 점화원이 있는 경우에도 점화원이 없는 경우와 마찬가지로, MELCOR에서는 연소 기체의 온도와 무관하게 연소 여부를 판단하여 불완전 연소 구간은 변하지 않는다. 반면에 MAAP에서는 온도가 상승할수록 연소 가연 영역이 넓어지고, 마찬가지로 불완전 연소 구역도 좀 더 낮은 가연성 기체 구성 조건으로 이동함을 알 수 있다. 특히, 일산화탄소의 물 비가 낮아질수록 불완전 연소 구간도 증가함을 알 수 있다.

MELCOR에 내장되어 있는 기본 값으로부터 계산되는 연소 조건은 MAAP의 500K의 온도에서의 연소 조건과 유사함을 알 수 있고, 그보다 낮은 온도에서는 수소 연소를 먼저 예측하고 그보다 높은 온도에서는 수소 연소를 늦게 예측한다. 그런데 실제 연소 조건에 도달했을 경우의 대기 온도를 알 수 없으므로 MELCOR에서처럼 고정된 연소 기준 값을 사용하는 것은 정확한 연소 시점을 얻는데 한계가 있다. 또한 이로 인한 완전, 불완전 연소에 대한 불확실성은 격납건물 압력 예측에도 영향을 미친다.

5. 결론

대표적인 중대사고 해석코드인 MELCOR와 MAAP에서 사용하고 있는 수소 연소 모델의 완전, 불완전 연소 조건을 점화원의 유무에 따라 비교하였다. 비교한 결과, MELCOR의 연소 모델은 가연 기체의 온도효과가 일정하고 가연 기체의 물 비에만 관련되는 반면, MAAP에서는 가연 기체와 비가연 기체의 물 비로 구성되는 가연 곡선을 이용하여 기체 온도 및 추가되는 기체의 영향도 고려하는 등 MELCOR에 비하여 유연한 모델을 보유하고 있음이 확인되었다. 또한 MELCOR에 내장된 연소 관련 변수들은 점화원이 없는 경우에는 MAAP에서의 300K-500K의 대기 온도의 결과와, 점화원이 있는 경우에는 대기 가스 500K의 MAAP 결과와 유사한 연소 한계를 보여주고 있어, 그보다 낮은 온도의 경우 MAAP보다 먼저 수소 연소를 예측하며, 그보다 높은 온도에서는 수소 연소를 늦게 예측하는 동시에 MAAP에서의 완전 연소와는 달리 불완전 연소를 보여준다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. R.M. Summers, et al., "MELCOR Computer Code Manuals," SML, NUREG/CR-6119, SAND97-2185, 1997.7
2. "MAAP4 (Modular Accident Analysis Program for LWR Plants Code Manual," EPRI, 1994.5

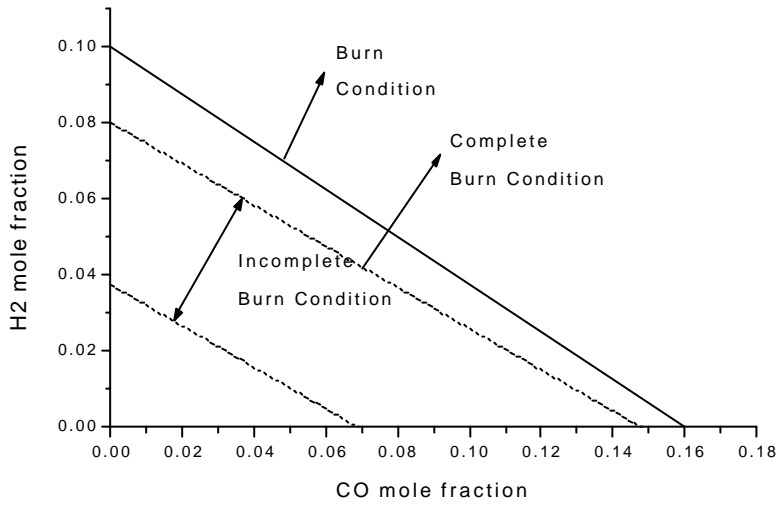


그림1 점화원이 없는 경우 MELCOR 불완전 연소 범위

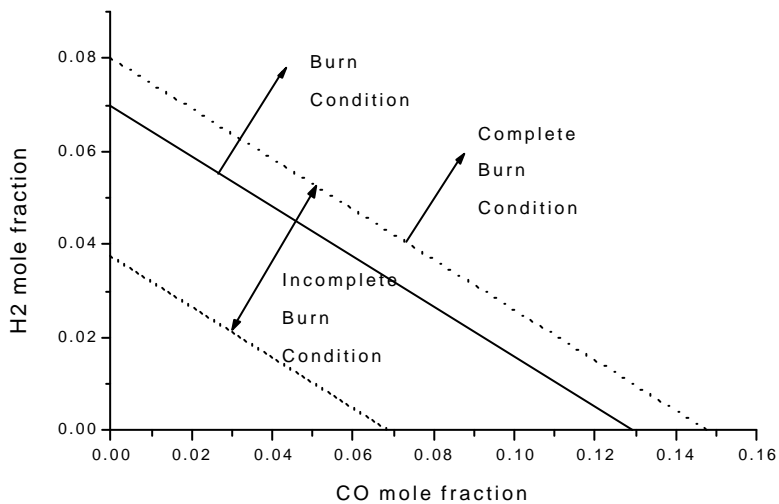


그림2 점화원이 있는 경우 MELCOR 불완전 연소 범위

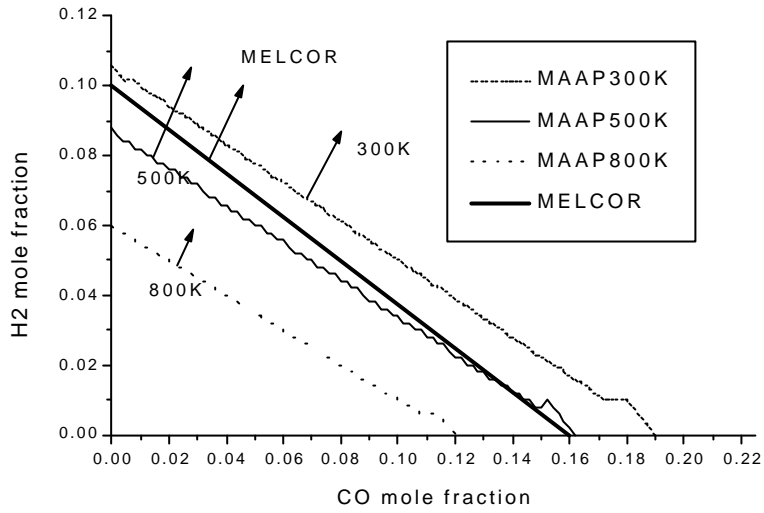


그림3 점화원이 없는 경우 MELCOR와 MAAP에서의 완전 연소 한계

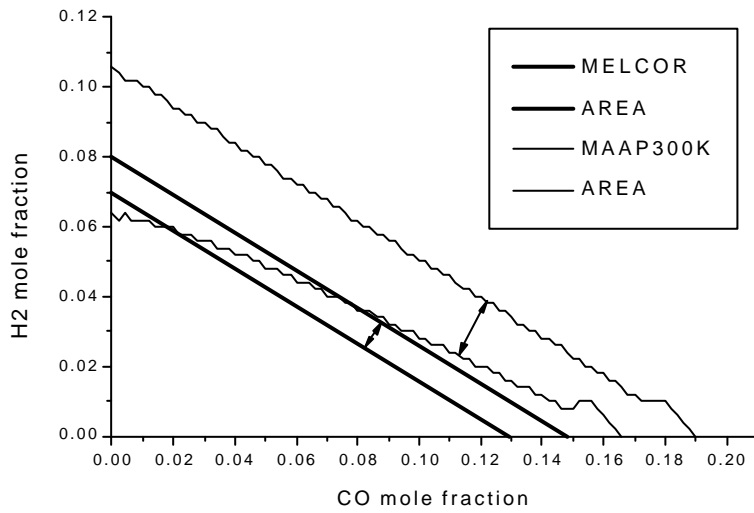


그림4 점화원이 있는 경우 MELCOR와 MAAP(300K)에서의 불완전 연소 구역 비교

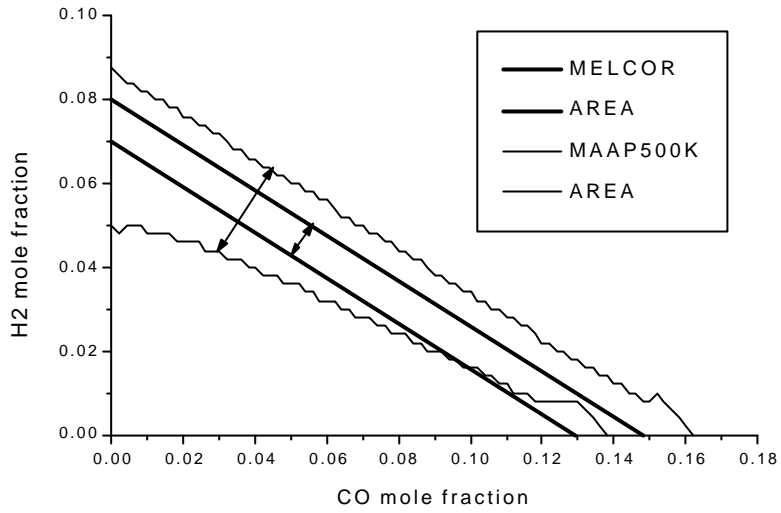


그림5 점화원이 있는 경우 MELCOR와 MAAP(500K)에서의 불완전 연소 구역 비교

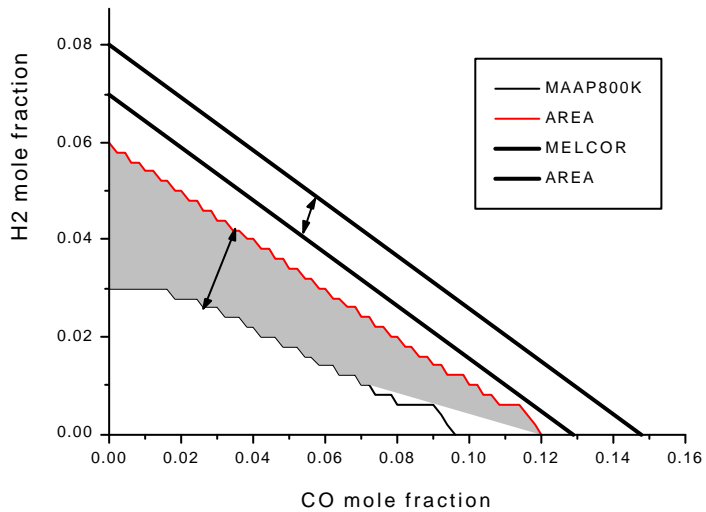


그림6 점화원이 있는 경우 MELCOR와 MAAP(800K)에서의 불완전 연소 구역 비교