'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

ABB-CE Evaluation Model을 이용한 COBRA-TF의 재관수 열전달 모델 평가

Assessment of Reflood Heat Transfer Model of COBRA-TF Against ABB-CE Evaluation Model

이 상 일, 이 상 용, 박 찬 억, 최 한 림, 최 철 진

한국전력기술㈜ 원자로 설계 개발단
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

본 논문에서는 ABB-CE의 MOD-2C 상관식을 이용하여 COBRA-TF가 10 CFR 50, Appendix K 에서 요구하는 보수성을 만족하는지 평가하였다. Appendix K 요건에 의하면 비상노심냉각계통의 성능평가를 위한 해석모델(Evaluation Model)은 재관수 단계시 열전달계수는 FLECHT 실험데이타에 근거해야 하며 이보다 보수적이어야 한다. ABB-CE는 이 요건을 만족하기 위해서 열수력 계산은 COMPERC-II에서 열전달 계수 계산은 FLELAPC와 HTCOF에서 수행하고 최종적으로 피복재 온도 계산은 STRIKIN-II에서 수행하는 복잡한 코드 체계를 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 복잡한 코드 체계를 하나의 코드로 계산할 수 있는 방안으로 COBRA-TF를 이용해서 FLECHT 실험을 모사하고, 실험데이타와 NRC가 승인한 ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 열전달 계수와 비교를 하였다. 비교 결과, COBRA-TF의 계산결과가 실험데이타를 적절히 예측하고, ABB-CE의 MOD-2C의 열전달 계수보다 보수적임을 발견하였다. 결론적으로 COBRA-TF의 재관수시의 열전달 계수는 Appendix K 요건을 만족하는 것으로 판단된다.

Abstract

According to 10 CFR 50 Appendix K, ECCS performance evaluation model should be based on the experimental data of FLECHT and have the conservatism compared with experimental data. To meet this requirement ABB-CE has the complicate code structure as follows : COMPERC-II calculates three reflood rates, and FLELAPC and HTCOF calculate the reflood heat transfer coefficients, and finally STRIKIN-II calculates the cladding temperature using the reflood heat transfer calculated in previous stage. In this paper, to investigate whether or not COBRA-TF satisfies the requirement of Appendix K, the reflood heat transfer coefficient of COBRA-TF was assessed against ABB-CE MOD-2C model. It was found out that COBRA-TF predicts properly the experimental data and has more conservatism than the results of ABB-CE MOD-2C model. Based on these results, it can be concluded that the reflood heat transfer coefficients calculated by COBRA-TF meet the requirement of Appendix K.

1. 서 론

10 CFR 50의 Appendix K는 비상노심냉각계통의 성능 평가를 위한 해석모델 및 평가방법에 대한 요건을 기술하고 있다. Appendix K에서 기술하고 있는 가압경수로의 재충수 및 재관수 단계시의 열전달에 대한 사항을 요약하면 다음과 같다:

- 재관수율이 초당 1인치 혹은 그 이상인 경우, 재관수단계시의 열전달 계수는 FLECHT 결과[1]를 비롯한 유동로가 봉쇄되지않은 노심에 대한 해당 실험자료에 근거해야한다.
- FLECHT 자료로부터 유도된 상관식을 사용하기 위해서는 상관식이 적용될 과도상태에 대해서 보수성이 입증되어야 한다. WCAP-7544 [3]와 7931 [4]에서 제시하고 있는 열전달 상관식의 사용은 허용하지 않는다.
- 새로운 상관식 및 FLECHT 열전달 상관식의 수정은 상관식이 적용되는 과도영역에 해당되는 매개변수의 범위에서 FLECHT 자료와 비교하여 보수성이 입증된 후에 사용될 수 있다.
- 재충수 및 재관수단계 동안 재관수율이 초당 1인치 미만인 경우의 열전달 계산은 냉각이 증기에 의해서만 이루어진다는 가정에 근거해야 하며, 또한 폐쇄에 의해 국부적인 증기유동과 열전달에 영향을 미치는, 피복관의 팽창 또는 파열의 결과로서 발생하는 것으로 예측되는, 어떤 유동폐쇄도 고려하여야 한다.

ABB-CE는 WCAP-7931 [4]에서 제시한 상관식("new" FLECHT heat transfer correlation)을 일부 보수적으로 수정한 MOD-1C 상관식을 개발하고, 이것을 기본으로 하여 재관수율이 시간에 따라 달라지는 과도현상에 적용할 수 있도록 구성한 MOD-2C 상관식을 개발하여 NRC로 부터 CE 발전소에 이를 적용하는 것을 승인받았다[5]. FLECHT 실험에 따르면 재관수 열전달 현상은 서로 다른 열전달 및 유동현상을 보이는 세 개의 시간단계로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째 기간은 증기/분무액적 유동영역이고, 두 번째 유동은 천이 영역이며, 그리고 세 번째 영역은 막비등 영역에 해당한다. 각 기간의 열전달 상관식은 참고문헌 5에 잘 나타나 있다.

ABB-CE의 대형냉각재 상실사고 평가모델에 의하면[5], ABB-CE의 MOD-2C는 재관수율을 크게 세가지 영역으로 나누어서 열전달 계수를 계산하기 때문에 재관수율을 계산하기 위해서는 COMPERC-II[6]를, 재관수 열전달 계수는 FRELAPC [7]와 HTCOF[6]을 이용하며 최종적으로 첨두 피복재 온도는 STRIKIN-II[8]가 계산하는 복잡한 과정을 거치게 된다.

COBRA-TF[9]는 가압경수로의 냉각재 상실사고를 해석하기 위해서 개발된 최적해석 코드이다. COBRA-TF는 원자로 용기를 3차원적으로 해석할 수 있고, 지배방정식을 물, 증기, 물방울로 나누어서 계산할 수 있는 능력을 가진 코드이다. 특히 COBRA-TF는 FLECHT-SEASET [10]의 실험데이타를 이용해서 대형냉각재 상실사고시 재관수기간동안의 열수력학적인 거동을 최적해석할 수 있도록 개선되었다. 만약 재관수기간동안 COBRA-TF가 계산한

열전달 계수가 FLECHT 실험데이타와 ABB-CE의 MOD-2C의 열전달 계수보다 보수적인 결과를 보이면 10 CFR 50의 Appendix K 요건을 만족할 수 있다. 그러면 COBRA-TF를 이용해서 계산한 피복재 온도가 인허가 계산에 사용할 수 있는 가능성이 있다.

본 논문에서는 COBRA-TF의 모델이 10 CFR 50 Appendix K의 요건에 적합한지를 평가하기 위해서, FLECHT 실험을 모사하고, 그 결과를 ABB-CE의 MOD-2C의 상관식의 결과와 비교하여 평가하였다.

2. COBRA-TF를 이용한 FLECHT 실험 모사

COBRA-TF를 이용해서 FLECHT 실험에 대한 계산을 수행하였다. 본 실험에 사용된 FLECHT 실험장치는 7x7과 10x10 두 가지 타입의 heater를 사용하였다. 계산의 편의를 위해서 COBRA-TF의 계산에서는 하나의 채널과 수직방향으로 21개의 노드로 모델링하여 실험과 동일한 초기 조건과 경계조건을 적용하여 계산을 수행하였다. 본 계산에서는 COBRA-TF의 Grid 모델은 사용하지 않았다. 왜냐하면 10 CFR 50 Appendix K 요건에서는 핵연료의 Grid로 인한 열전달 계수의 향상 효과에 대한 고려에 대한 언급이 되어 있지 않다. 또한 FLECHT 실험장치에는 Grid의 효과를 측정할 수 있는 계측장비가 구비되어 있지 않았다. 평가에 사용된 실험데이타에 대한 조건은 표 1에 나와 있다. 계산은 FLECHT 전반적인 실험조건에 대해서 다음과 같은 항목에 대해서 수행하였다:

- Effect of Height Effect
- Effect of Flooding Rate
- Effect of Clad Material (Zr-4 vs Stainless Steel)
- Effect of Initial Clad Temperature
- Effect of Peak Power
- Effect of Coolant Subcooling
- Effect of Pressure

2.1 Effect of Height

FLECHT run 6948에 대해서 높이에 따른 COBRA-TF의 계산결과와 ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 결과를 비교하였다. 그림 1은 FLECHT run 6948의 실험데이타와 비교한 결과이며, 그림 2는 ABB-CE의 MOD-2C의 결과와 비교한 것이다. 그림 1에서는 COBRA-TF가 2 ft에서는 실험데이타보다 Quenching이 빨리 일어나서 열전달 계수가 높고, 6 ft에서는 실험데이타와 일치하면서 낮은 경향을 보인다. 10 ft에서는 초기 100 초까지 실험데이타와 COBRA-TF의 결과가 음의 열전달 계수를 갖는 것을 알 수 있는데, 이 이유는 실험초기에 과열 증기에 의해서 열이 증기에서 피복재로 전달되기 때문이다. COBRA-TF의 결과도 같은 경향을 보인다. 그러나 10 ft에서의 실험은 375 초에서 Quenching이 일어나는 반면에 COBRA-TF의 결과에서는 400 초까지 Quenching이 일어나지 않는다.

그림 2에서는 COBRA-TF의 6 ft와 10 ft의 결과가 ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 결과보다 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 COBRA-TF의 결과가 NRC가 허용한 ABB-CE의 MOD2C의 결과보다 보수적인 것을 알 수 있다.

2.2 Effect of Flooding Rate

그림 3은 Flooding rate에 따른 FLECHT실험 데이타와 COBRA-TF의 계산결과를 비교한 것이다. 실험데이타와 계산결과가 모두 Flooding rate가 증가하면 열전달 계수가 증가하는 경향을 보인다. 이 이유는 Flooding rate가 증가하면 증기의 발생이 증가하고 entrainment의 양도 증가하기 때문이다. Flooding rate가 클 때에는 냉각수에 노출이 되는 단위시간당 열전달 면적이 커지므로 열전달이 크다. COBRA-TF의 계산결과는 전반적으로 실험데이타를 잘 예측하고 있다. 그러나, 5.9 in/s인 경우에는 20 초까지는 실험데이타와 일치하나, 이후에는 낮게 예측하는 것을 알 수 있다. 20 초까지의 주요 열전달 영역은 증기/분무 액적유동이며, 이후 증가속도가 둔화되어서 천천히 증가하는 영역은 천이영역이며, 이후에 Quenching될 때까지 급격히 증가하는 영역은 막비등영역에 해당된다. 5.9 in/s와 3.9 in/s에서는 transition regime과 film boiling regime에서 COBRA-TF의 계산 결과가 보수적인 경향을 보이고 있다.

그림 4는 Flooding rate의 변화에 따른 ABB-CE의 MOD-2C 상관식와 COBRA-TF의 계산결과를 비교한 것이다. 실험데이타와의 비교에서처럼 비슷한 경향을 보이고 있다. 세 가지 Flooding rate에 대해서 모두 COBRA-TF의 계산 결과가 ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 계산결과에 비해서 낮게 예측하고 있다.

2.3 Effect of Clad Material

그림 5는 Zircaloy(Zr)와 Stainless Steel(SS) Clad의 열전달 계수에 대해서 실험 데이터와 COBRA-TF의 계산 결과를 비교한 것이다. 실험데이타에서는 Zr의 열전달 계수가 SS의 열전달 계수보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 Zr의 Heat capacity가 SS보다 15% 정도 작아서, Zr 피복재가 냉각재와 접촉하면 빨리 냉각되기 때문이다. FLECHT 실험의 관찰에 의하면[1], Zr의 Quench front 의 상승속도가 SS보다 크다. Quench front 위에는 증기의 두께와 속도가 증가되므로 물과 증기의 접촉면이 불안정하게 되어 유동패턴은 천이영역이 된다. 좀더 지나면 안정된 막비등영역이 된다. 그러므로 Zr 피복재가 안정된 막비등영역에 있을 때에 SS의 피복재는 천이영역에 있게 된다. 막비등의 열전달 계수가 천이비등의 열전달 계수보다 크므로 Zr 피복재의 열전달 계수가 SS 피복재보다 크다. COBRA-TF의 결과는 실험데이타보다 낮게 예측을 하고 있다. 그러나 Zr 피복재의 열전달 계수가 SS 피복재의 열전달 계수보다 큰 경향은 일치하고 있다.

2.4 Effect of Initial Clad Temperature

그림 6는 초기 피복재 온도의 변화에 따른 열전달 계수에의 영향에 대해서 실험데이타와 COBRA-TF의 계산 결과를 비교한 것이다. 실험 데이터를 보면 초기의 피복재 온도가 높

으면 열전달이 크므로 열전달 계수가 크다. 그러나 그후에는 열전달 계수는 피복재 온도차이가 초기 만큼 크지 않으므로 초기 피복재 온도에 무관해 진다. COBRA-TF의 계산 결과는 실험데이타를 잘 예측하고 있으며, 초기 피복재 온도에 덜 민감한 경향을 보인다.

그림 7은 ABB-CE의 MOD-2C 상관식과 COBRA-TF의 계산결과를 비교한 것이다. ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 결과는 초기 피복재 온도에 민감하지 않은 것을 보여주고 있다. COBRA-TF의 결과가 ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 결과를 잘 예측하고 실험초기에는 보수적인 결과를 보이고 있다.

2.5 Effect of Peak Power

그림 8은 Peak Power의 변화에 따른 열전달 계수에의 영향에 대해서 실험데이타와 COBRA-TF의 계산 결과를 비교한 것이다. 실험에서는 초기 70초동안은 Peak power의 영향이 거의 없는 것으로 보인다. 이 이유는 초기에는 heater에 저장된 에너지중 열전달에 참여하는 양이 적기 때문이다. 냉각수의 수위가 증가함에 따라서 높은 Peak power에서는 제거되는 열이 많고, 이로 인해서 기포가 증가하게 된다. 열전달은 냉각할 수 있는 물의 양에 의존하는데, 기포가 증가하여 물의 양이 감소하면 열전달 계수가 감소하게 된다. 70초 이후 실험데이타에서 Peak power가 클수록 열전달이 감소하는 것은 이 때문이다. COBRA-TF의 계산 결과는 이러한 경향은 보이나, 실험데이타보다 큰 열전달 계수를 보여 주고 있다.

그림 9는 Peak Power의 변화에 따른 열전달 계수에의 영향에 대해서 ABB-CE의 MOD-2C 상관식과 COBRA-TF의 계산 결과를 비교한 것이다. 실험에서 예측한 것과 같은 경향을 보이고 있다. COBRA-TF의 결과가 증기/분무액적 유동영역과 천이영역에서는 ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 결과보다 낮게 예측하고 있다. 이후 막비등 영역에서는 높게 예측하고 있다. ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 모델에서는 Quenching 이후의 핵비등에 대한 모델이 없기 때문에 실험이나 COBRA-TF의 결과처럼 Quenching 이후의 급격한 열전달 계수가 상승하는 것을 볼 수가 없다. 이로 인하여 COBRA-TF의 결과는 열전달 계수가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으나, ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 결과는 완만하게 증가하는 것이다. 실제 COBRA-TF가 높게 예측하는 영역은 짧은 시간이며 Quenching 이후에는 ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 결과는 신뢰할 수 없다. 그러므로 전 실험기간 동안에는 COBRA-TF의 결과는 보수적이라고 볼 수 있다.

2.6 Effect of Coolant Subcooling

그림 10은 냉각재 온도의 변화에 따른 열전달 계수에의 영향에 대해서 실험데이타와 COBRA-TF의 계산 결과를 비교한 것이다. 실험 데이터에서는 초기에는 Subcooling이 감소하면 열전달 계수가 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 나중에는 역전이 된다. 초기에 보이는 현상은 낮은 subcooling에서는 증기가 많이 생성이 되고 아울러서 액적이 생기게 되다. 이로 인해서 냉각할 수 있는 물이 많아지게 되어서 열전달 계수가 증가하게 된다. 그러나, 시간이 지나면, 낮은 Subcooling인 경우에는 증기의 발생이 많아서 Quenching front가 보다 천

천히 상승하게 되어 열전달 계수가 낮아지고 Quenching time도 늦어진다. COBRA-TF의 결과도 실험과 유사한 경향을 보이고 있다. 전반적인 결과는 실험 데이터보다 낮게 예측하고 있다. ΔT_{sub}인 16 °F인 경우의 COBRA-TF의 결과가 많은 진동을 보이고 있는데, COBRA-TF에서는 발생한 액적으로 인해서 피복재의 표면온도의 변화가 심하기 때문에 나타나는 현상인 것으로 판단된다.

그림 11은 Coolant subcooling의 변화에 따른 열전달 계수에의 영향에 대해서 ABB-CE의 MOD-2C 상관식과 COBRA-TF의 계산 결과를 비교한 것이다. COBRA-TF의 결과가 ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 결과보다 낮게 예측하는 것을 알 수 있다.

2.7 Effect of Pressure

그림 12는 압력의 변화에 따른 열전달 계수에의 영향에 대해서 실험데이타와 COBRA-TF의 계산 결과를 비교한 것이다. 실험에 의하면 압력이 증가하면 열전달 계수도 증가한다. 열전달 계수는 다음과 같은 식으로 결정된다:

$$h = q''/(T_{clad} - T_{sat})$$

압력이 증가하면 T_{sat}가 증가하게 되어 열유속이 같다면 열전달 계수가 증가하게 된다. COBRA-TF의 결과도 같은 경향을 보인다. 실험데이터에서는 56 psia와 90 psia가 비슷한 경향을 보이나, COBRA-TF의 결과는 90 psia가 큰 열전달 계수를 갖는다.

그림 13은 압력의 변화에 따른 열전달 계수에의 영향에 대해서 ABB-CE의 MOD-2C 상관식과 COBRA-TF의 계산 결과를 비교한 것이다. 압력이 90 psia인 경우에 COBRA-TF의 결과가 ABB-CE의 MOD-2C 상관식의 결과에 비해서 높게 예측하고 있다. 이에 대한 이유는 명확하지는 않으나, 대형 냉각재 상실사고시 Reflood 기간중의 압력은 50 psia 이하이므로 원자로 안전해석의 적용 범위에서는 COBRA-TF의 결과가 여전히 보수적이다.

3. 결론

본 연구에서는 대형 냉각재 상실사고를 해석하기 위해 최적 코드로서 개발된 COBRA-TF를 이용해서 FLECHT 실험데이타를 평가하였다. 아울러 ABB-CE가 NRC로 부터 승인받은 재관수 열전달 계수 모델인 MOD-2C 상관식과 비교하여 COBRA-TF의 계산결과를 평가하였다.

평가 결과는 COBRA-TF는 FLECHT 실험데이타를 보수적으로 낮게 예측하고, 물리적으로 주요 변수의 민감도에 대해서도 물리적으로 타당한 예측 결과를 보여 주고 있다. ABB-CE의 MOD-2C 상관식과 비교하여 COBRA-TF의 결과가 대형 냉각재 상실 사고의 적용 범위에서 보수적임을 보여주고 있다.

이와같은 평가를 토대로, COBRA-TF의 재관수 열전달 모델은 10 CFR 50 Appnedix K에서 요구하는 보수성을 지닌 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. WCAP-7665, “Full Length Emergency Cooling Heat Transfer(FLECHT) Final Report,” April 1971
2. WCAP-7435, “PWR Full Length Emergency Cooling Heat Transfer(FLECHT) Group I Test Report,” January 1970
3. WCAP-7544, “PWR Full Length Emergency Cooling Heat Transfer(FLECHT) Group II Test Report,” September1970
4. WCAP-7931, “PWR FLECHT Final Report Supplement,” October 1972
5. CENPD-132P , “Calculative Methods for C-E Large Break LOCA Evauation Model, Vol.1, “ August, 1974, pp III-D. 6-3.
6. CENPD-134P, “COMPERC-II, A Program for Emergency Refill-Reflood of the Core,” February, 1975.
7. LOCA-76-349, “FRELAPC: An Analytical FLECHT ROD Elevation and Power Correction Program,” T. C. Kessler
8. CENPD-135P, “STRIKIN-II, A Cylindrical Geometry Fuel Rod Heat Transfer Program,” August 1974
9. NUREG/CR-3046, “COBRA/TRAC Manual,” Volumes 1-5, Thurgood, M. J. et al, March 1983
10. NUREG/CR-4166, “Analysis of FLECHT SEASET 163-Rod Blocked Bundle Data Using COBRA-TF,” Hochreiter, L. E. et al, January 1986.

표 1 COBRA-TF의 평가에 사용된 FLECHT 실험에 대한 조건

FLECHT Run No.	Clad Material	Initial Clad Temperature(F)	Flooding Rate(in/s)	Peak power (kw/ft)	Initial Coolant Temperature(F)	Pressure (psia)
6948	SS	1615	1.0	1.24	146	58
6155	SS	2212	5.9	1.24	150	60
6256	SS	2199	3.9	1.24	159	60
7158	SS	2156	2.0	1.24	144	54
2443	Zr-4	2004	10.0	1.24	150	56
0509	SS	1990	9.9	1.24	154	58
6948	SS	1602	1.0	1.24	146	58
6351	SS	1795	1.0	1.24	150	60
6553	SS	2012	1.0	1.24	140	61
4129	SS	1603	1.9	1.40	159	60
4225	SS	1605	1.9	1.24	153	59
4027	SS	1603	1.9	0.69	148	57
3920	SS	1608	5.8	1.24	271	55
4718	SS	1610	5.9	1.24	210	55
3541	SS	1598	5.9	1.24	148	57
0711	SS	1600	5.9	1.24	75	15
1002	SS	1605	6.0	1.24	151	56
1417	SS	1611	5.8	1.24	170	90

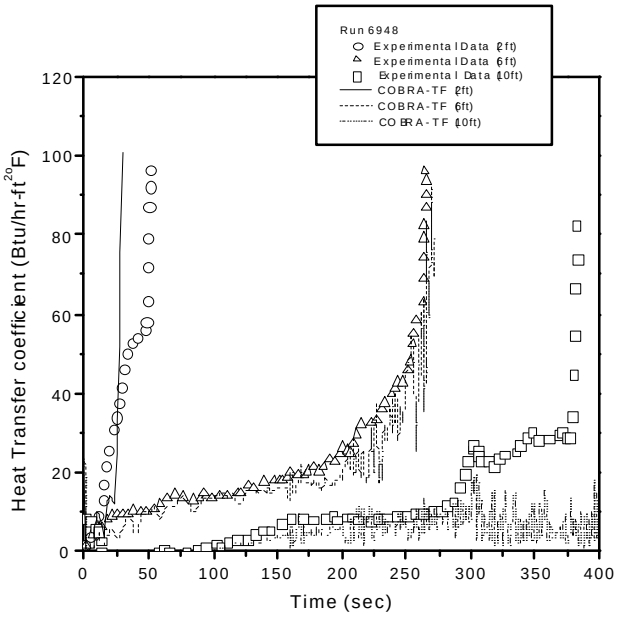

그림 1 FLECHT run 6948 **의 높이에 따른** (2ft, 6 ft, 10ft) **실험데이타에 대한** COBRA-TF **의 계산 결과 비교**

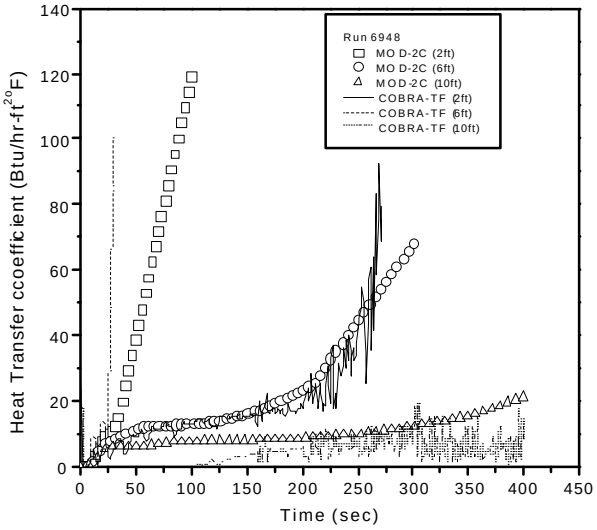

그림 2 FLECHT run 6948 **의 높이**(2ft, 6 ft, 10ft)**에 대한** ABB-CE **의** MOD-2C **상관식와** COBRA-TF **의 계산 결과 비교**

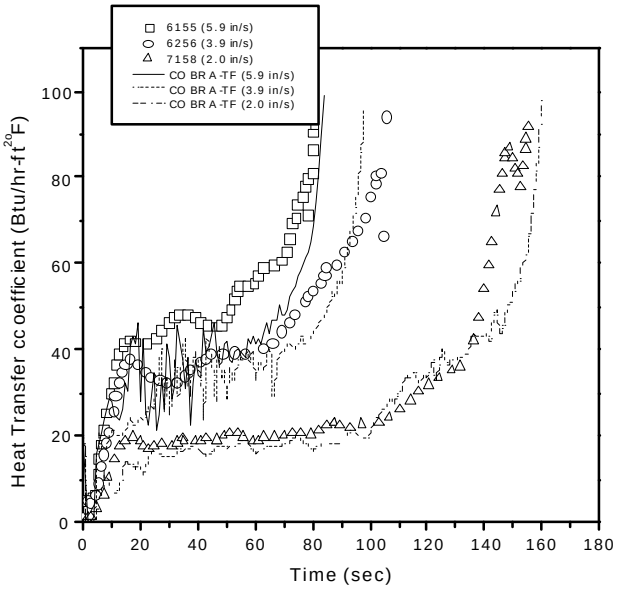

그림 3 Flooding rate **의 변화에 따른** FLECHT **실험데이타와** COBRA-TF **의 계산 결과 비교**

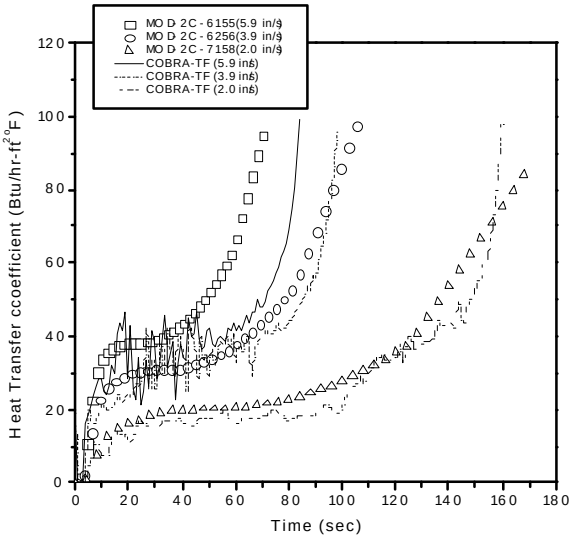

그림 4 Flooding rate **의 변화에 따른** ABB-CE **의** MOD-2C **상관식와** COBRA-TF **의 계산 결과 비교**

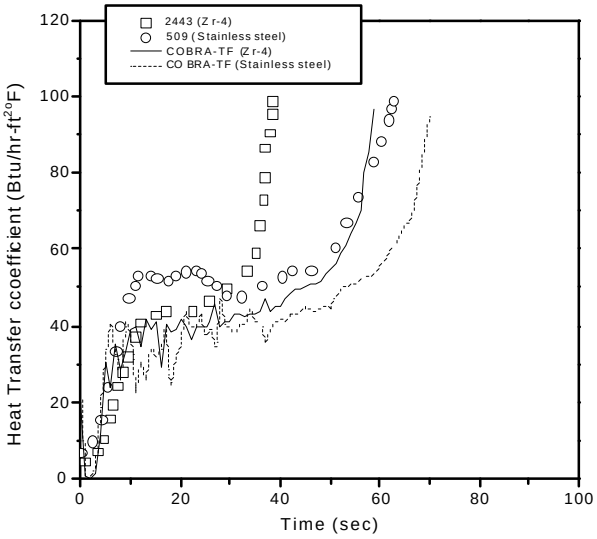

그림 5 Cladding **재질**(Zr-4 vs. Stainless Steel)**에 따른** FLECHT **실험데이타와** COBRA-TF **의 계산결과 비교**

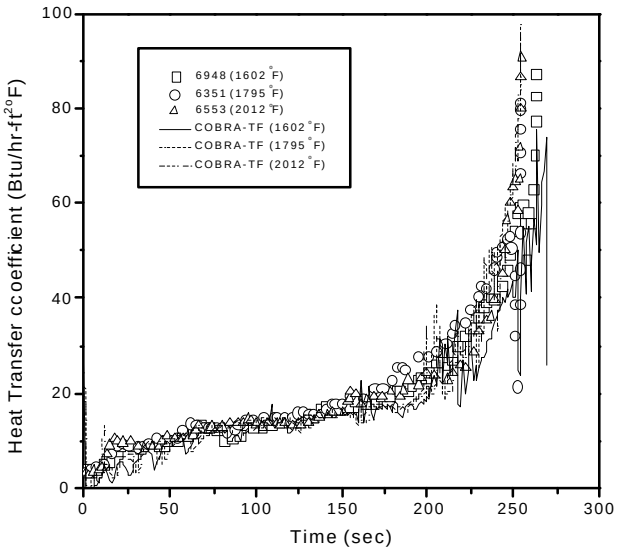

그림 6 **초기 피복재 온도의 변화에 따른** FLECHT **실험데이타와** COBRA-TF **의 계산결과 비교**

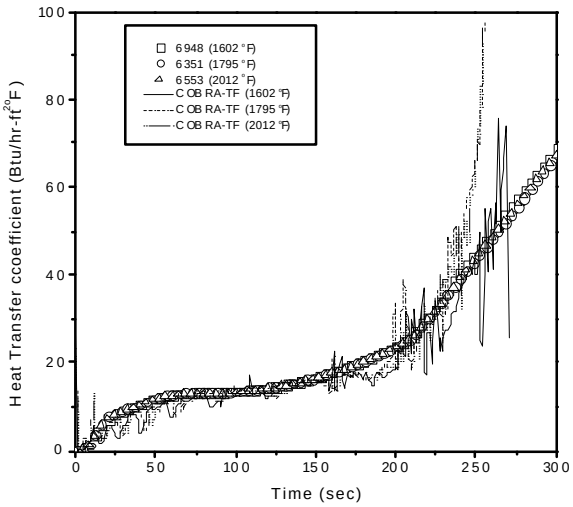

그림 7 **초기 피복재 온도의 변화에 따른** ABB-CE **의** MOD-2C **상관식와** COBRA-TF **의 계산결과 비교**

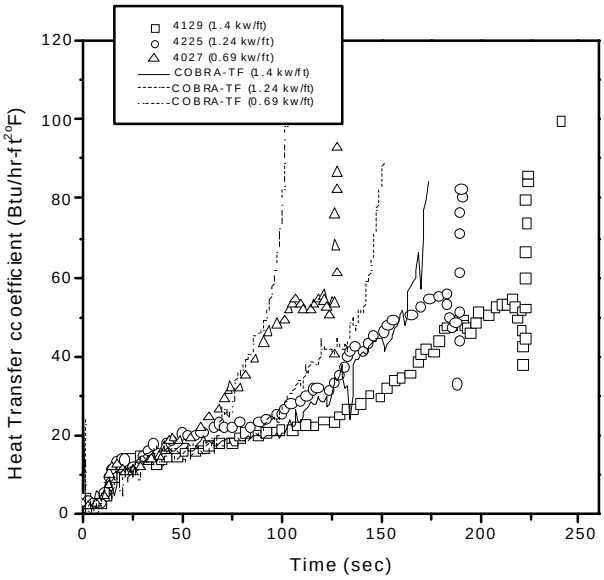

그림 8 Peak Power **의 변화에 따른 실험데이타와** COBRA-TF **의 계산결과 비교**

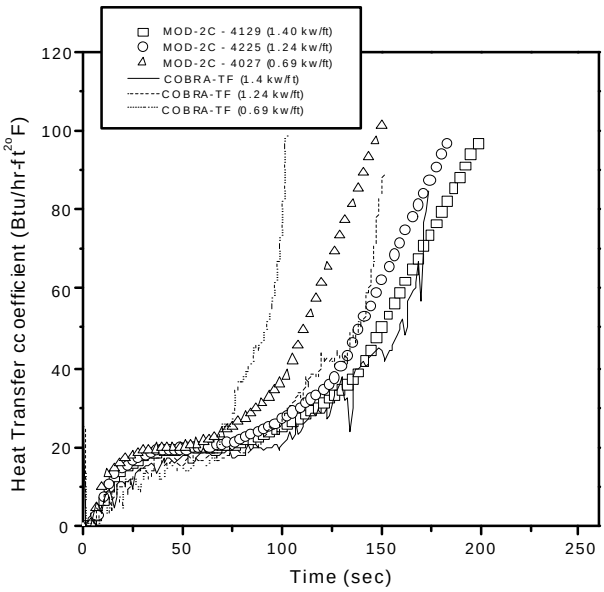

그림 9 Peak Power **의 변화에 따른** ABB-CE **의** MOD-2C **상관식와** COBRA-TF **의 계산결과 비교**

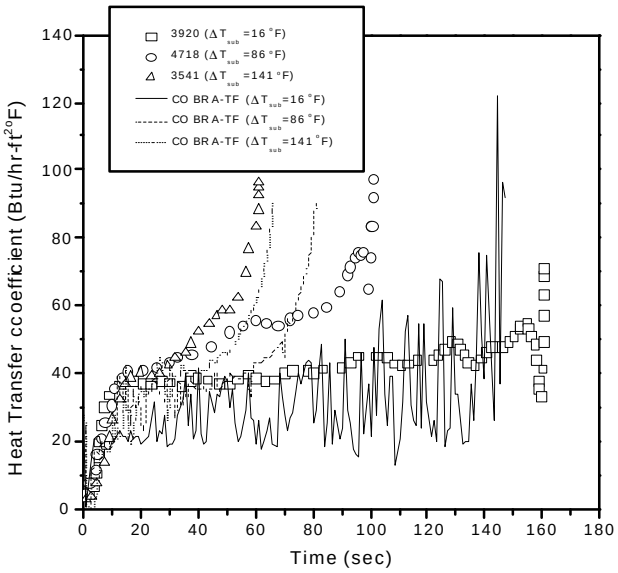

그림 10 Coolant subcooling **의 변화에 따른 실험데이타와** COBRA-TF **의 계산결과 비교**

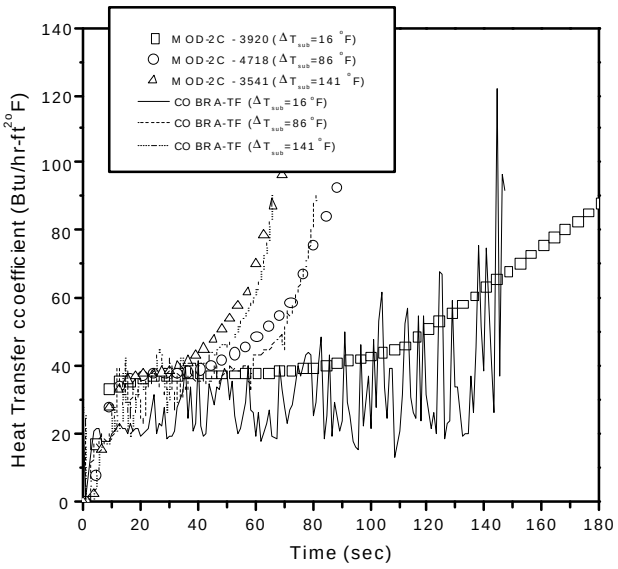

그림 11 Coolant subcooling **의 변화에 따른** ABB-CE **의** MOD-2C **상관식와** COBRA-TF **의 계산결과 비교**

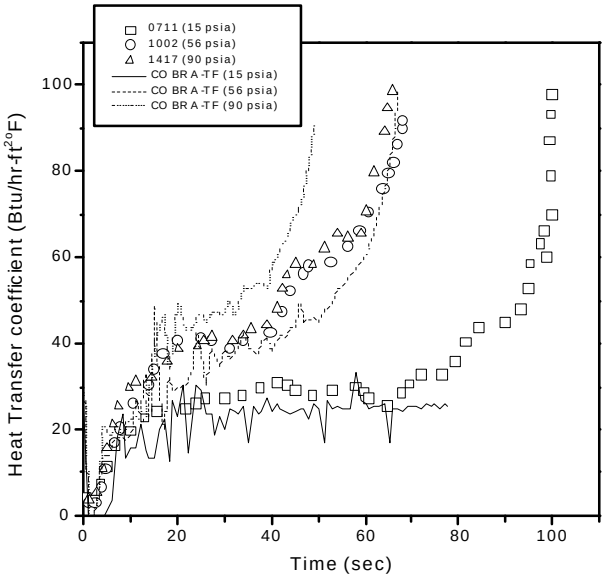

그림 12 Pressure **의 변화에 따른 실험데이타와** COBRA-TF **의 계산결과 비교**

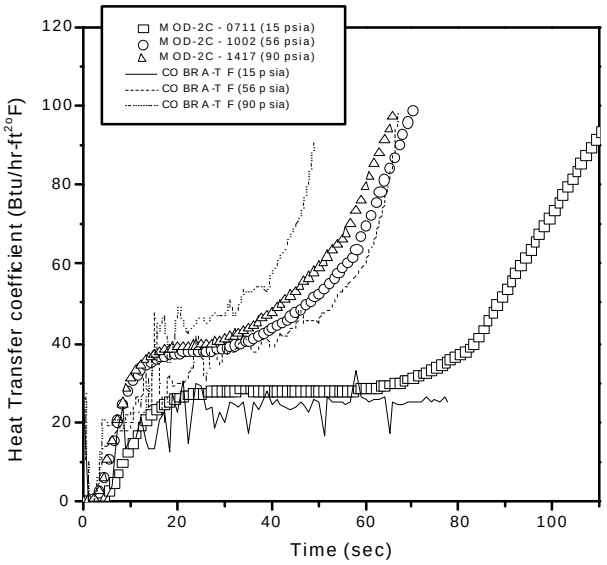

그림 13 Pressure **의 변화에 따른** ABB-CE **의** MOD-2C **상관식와** COBRA-TF **의 계산결과 비교**