

반구형 소형 간극 내에서의 냉각과정에 관한 실험적 연구

하광순* · 박래준* · 김상백* · 조영로* · 김희동*

An Experimental Study on the Quenching Phenomena of Hemispherical Downward Facing Convex Surfaces with Narrow Gaps

Kwang-Soon Ha, Rae-Joon Park, Sang-Baik Kim, Young-Ro Cho and Hee-Dong Kim

Key Words : Quenching Process(급냉과정), Hemispherical Downward Facing Convex Surface(하향반구표면), Narrow Gap(소형간극), Counter Current Flow Limit(역류유동제한), Two Phase Flow(이상유동)

Abstract

Quenching phenomena of hemispherical downward facing convex surfaces with narrow gaps have been investigated experimentally. Experiments employed test sections having 1 and 2 mm in gap thickness and 1atm in system pressure. From interpretations of the temperature and the heat flux history, it was found that the flooding inside the gap was restricted by CCFL phenomena and quenching process was propagated from lower to upper region of the internal copper shell. The ratio of the maximum heat fluxes at 1mm to 2mm in gap thickness was the almost same that obtained by steady state experiments. The quenching scenario of the hemispherical downward facing surface with narrow gap has been suggested.

1. 서 론

원전에서 원자로 노심이 용융되는 중대사고(severe accident)가 발생하였을 경우 원자로용기의 파손(reactor vessel failure)을 방지하여 노심용융물을 원자로용기 내에 가두어두면서 냉각능력을 확보하는 방안(IVR: In-Vessel Corium Retention)은 원자로용기의 건전성유지와 관련하여 가장 효과적인 대처방안으로 최근 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다[1-3]. 실제로 TMI-2 원전의 노심용융 사고시 노심용융물이 원자로용기 하부로 재배치된 후 원자로용기가 파손되지 않고 단시간 내에 냉각률 10~100°C/min 로 냉각되었다. 이러한 노심용융물의 노내 냉각 기본원리 중 하나로 대두되는 것이 간극형성에 의한 냉각이다. 즉, 고온의 핵연료가 원자로용기 하부로 용융되어 내려오면 핵연료(산화물질)와 원자로물질(금속물) 간의 물성차이로 노심용융물은 수축하고 원자로는 고온상태에서 팽창하게 된다. 이러한 과정에서 노심용융물과 원자

로 사이에 좁은 간극(gap)이 형성되며, 이 간극으로 냉각수가 스며들어 노심용융물이 냉각된다는 것이다. 한국원자력연구소에서는 이러한 간극냉각의 형성과 냉각과정을 규명하기 위해 SONATA-IV(Simulation Of Naturally Arrested Thermal Attack In-Vessel) 프로그램을 수행하고 있다[4-6]. 이 연구를 통해서 하부로 녹아 내린 노심용융물과 원자로용기 사이에 1~3mm 정도의 간극이 존재할 수 있음을 확인하였으며, 이러한 간극을 통해 제거될 수 있는 최대 열제거량을 제시하였다.

본 연구에서는 노심용융물을 모사하는 내부히터반구와 원자로용기를 모사하는 외부반구 사이에 1, 2mm 의 균일 간극이 존재하는 상황을 가정하고, 이러한 상황 하에서 냉각수가 주입될 경우 노심용융물의 냉각거동을 규명하고자 한다. 지난 수십 년 동안 급냉(quenching) 과정에 관한 연구는 많이 있어 왔지만[7-9], 이러한 미소 간극을 가진 하향반구 표면에서의 냉각현상에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 대부분의 연구는 수조(pool) 내에서 이루어지는 냉각현상을 다루고 있는데, 이러한 조건에서는 냉각수의 접근이 오직 열원의 표면 온도

* 한국원자력연구소 열수력안전연구팀

유지하며, 압력을 일정하게 유지하도록 실험용기에서 생성된 기포가 열교환기에서 응축되어 다시 실험용기로 돌아오는 유로이다. 열교환기는 1 차축의 비등된 증류수를 응축시킬 수 있도록 2 차축에 외부냉각수인 물을 공급하고 이 냉각수량을 조절하여 1 차축 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 즉, 계통압력은 열교환기 2 차축의 외부 냉각수 유량을 조절하여 일정하게 유지되게 하였다. 냉각수 유량은 압력신호를 입력값으로 하고 밸브 개폐 정도를 제어값으로 하는 자동제어기에 의해서 제어된다.

실험수행 중 가열면의 온도를 측정하기 위해 내부 구리반구에 Fig.2 와 같이 K 형 열전대를 설치하였다. 열전대는 각 위치에 두 개씩 설치하였으므로 이들로부터 열속(heat flux)을 계산할 수 있도록 하였다.

모든 계측기의 신호는 휴렛 팩커드(HP)사의 VXI 데이터 획득 장치로 입력되고 HP 9000 735 컴퓨터에 기록된다.

2.2 실험방법

우선 간극내부에 증류수를 채우지 않은 상태에서 반구표면을 히터의 한계 온도를 고려해 약 450°C 정도까지 가열한다. 히터 전원을 차단한 후 증류수 공급장치를 통해 증류수를 반구상부에서 약 160mm 높이까지 채워넣는다. 이후의 냉각 과정은 히터반구표면에 설치한 66 개의 열전대와 외부반구에 설치한 4 개의 열전대로 관측된다. 실험장치내의 압력은 1 기압으로 유지하였다.

3. 실험결과

3.1 온도측정결과

실험은 대기압상태에서 간극 1mm 와 2mm 를 대상으로 수행하였다.

Fig.3 은 간극 1, 2mm 냉각실험 결과 나타난 반구 표면의 온도를 2 차원 평면으로 투영하여 등온선으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 중심은 반구의 하부를 원주바깥은 반구의 상부를 각각 나타낸다. 전체적으로 등온선 모양은 반구하부를 중심으로 하는 동심원 형태를 나타내고 있다. 따라서 전체적인 냉각과정이 원주방향으로 동일한 축대칭 형태를 나타냄을 알 수 있다. 또한 온도분포는 초기에는 하부가 가장 높게 나타났으며, 시간이 지남에 따라 하부에서부터 균일하게 냉각되는 것을 보여준다.

Fig.4 는 간극 1mm 에 대한 시간에 따른 히터반구표면의 온도변화를 반구의 같은 경도에서 위도

방향에 따라 도시한 것이다. 물의 공급은 약 210 초 부근에서 종료되었으며, 따라서 이후의 시간에서 외부의 영향은 없다. Fig.4 를 보면 반구의 표면 온도가 약 3600 초까지는 약 2.5°C/min 정도로 아주 천천히 냉각되다가 3600 초 부근에서 반구하부의 온도가 15°C/min 의 큰 냉각률로 갑자기 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 갑작스런 온도하강은 하부부터 순차적으로 상부로 진행되어 나가고 있다. 참고로 1mm 외부반구에는 하부 중심과, 45° 위치에 각각 외부반구 내부표면으로부터 5mm, 15mm 깊이에 열전대가 쌍으로 설치되어 외부반구표면의 온도 변화를 측정할 수 있게 제작되어 있다. Fig.4 에 함께 표시한 외부반구의 온도는 내부표면으로부터 5mm 위치에 설치된 열전대의 측정 결과이다. 이 온도변화를 보면 외부반구의 중심의 온도가 계속 증가하여 265°C 도달한 후 3140 초 부근에서 갑자기 감소하고 있다. 그리고 100°C 에 도달한 그 시각이 히터반구의 하부온도가 떨어지기 시작한 시점과 일치한다. 즉, 3140 초에서 간극 내로 냉각수가 하부까지 유입되기 시작하였고, 3600 초에서 내부반구의 하부 표면이 부분적으로 증류수 유체에 의해 잠기기 시작하는 것으로 해석할 수 있다. 외부반구의 온도가 냉각과정 중 감소하지 않고 오히려 상승하는 것은, 내부히터반구의 열이 간극 내 존재하는 수증기를 통해 외부반구로 전달되고 있기 때문이다. 히터반구를 가열한 후 정상상태에 도달할 때까지 충분히 기다려 외부반구의 온도를 높였다면 이러한 온도의 증가현상은

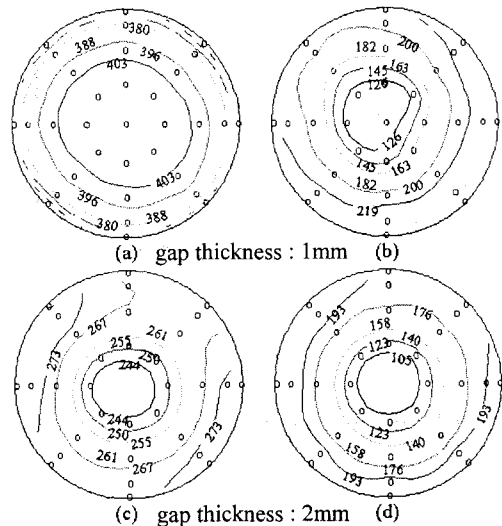


Fig. 3 Contour plots of temperatures on the heater shell : elapsed time (a)1500s (b)4300s (c)1500s (d) 2000, gap thickness (a)&(b) 1mm, (c)&(d) 2mm

일어나지 않았을 것이다. 하지만 여기에서 외부반구의 측정 결과는 냉각과정 중 냉각제인 증류수의 유입시점을 판단하는 보조자료로 활용하기 위함이다. 따라서 굳이 정상상태를 만들 필요는 없는 것으로 판단했다.

Fig. 4 (b) 의 확대 그림을 살펴보면 4290 초가 경과한 후 반구하부의 온도는 급격히 감소한다. 이는 내부반구표면과 냉각수가 서로 접촉하여 핵비등(nucleate boiling) 이 일어나고 있음을 의미한다. 수조냉각(pool quenching)의 경우와 비교하면 막비등(film boiling) 영역에서 핵비등 영역으로의 천이가 이루어지는 현상과 비슷하다. 핵비등은 하부에서 먼저 일어나 상부로 전파되며, 그 온도는 하부의 경우 155°C 정도에서, 상부는 210°C 에서 시작하며, 하부에서 상부로 전파되는 데는 수 십초의 짧은 시간이 소요된다.

이와 같은 냉각 현상은 기존의 간극에서의 임계열유속 연구[6]에서 제시한 CCFL(counter current

flow limit) 현상과 관련을 맺을 수 있다. 즉 냉각 초기에는 간극 내로 유입되는 증류수의 흐름이 간극 내에서 생성되어 빠져나오는 수증기의 흐름에 의해 제한을 받아 처음에는 간극 내로 증류수가 원활하게 유입되지 못한다. 즉 CCFL 에 의해 증류수의 유입이 제한되는 것이다. 표면 온도가 떨어지면서 이러한 CCFL 의 한계균형이 무너졌을 경우 순식간에 냉각수가 유입되는 것으로 해석할 수 있다.

Fig.5 는 간극 2mm 에 대한 히터반구표면의 온도 분포변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. 물의 공급은 약 450 초 부근에서 종료되었으며, 따라서 이후의 시간에서 외부의 영향은 없다. 약 2000 초까지의 냉각률이 9.0°C/min 정도로 간극 1mm 경우보다 3.6 배 정도 크게 나타났다. 위도 45°, 깊이 4mm 에 위치한 외부반구의 온도 측정 결과도 1mm 간극에서와는 달리 증류수를 채워넣자마자 바로 100°C 로 떨어진다. 이는 외부반구의 벽면을 따라 냉각수가 침투해 들어가고 있음을 나타낸다. 그러나 이때 간극 내에 냉각수가 채워져 있기는 하지만 내부히터반구 표면과 냉각수의 접촉이 일어나지 않아 반구표면의 냉각률은 매우 낮게 나타난다. 2000 초가 경과한 후 반구 내 온도는 급격히 감소하며, 이는 내부반구표면과 냉각수가 서로 접촉하여 핵비등(nucleate boiling) 이 일어나고 있음을 의미한다. 그 온도대와 경향은 1mm 의 경우와 비슷하게 나타났다.

3.2 열유속분포

Fig.6 과 7 은 각각 간극 1, 2mm 상태하에서 측정된 온도값을 바탕으로 반경방향 평균 열유속 분포를 계산하여 도시한 것이다. Fig.2 와 같이 히터 내부반구에는 열전대가 동일한 위치에 깊이방향으로 14mm 의 깊이차이를 갖도록 열전대쌍을 설치

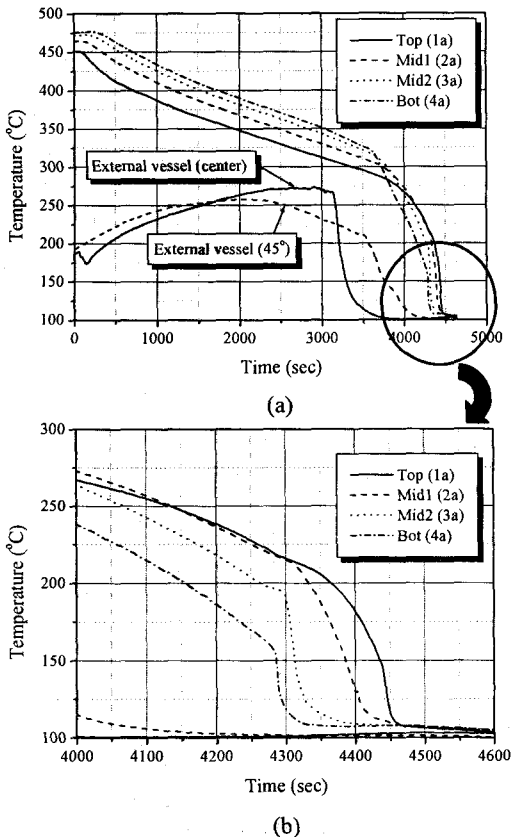


Fig. 4 Typical temperature history of heater shell and external vessel wall along with same longitude (gap thickness : 1mm, (b) is a detail drawing of (a).)

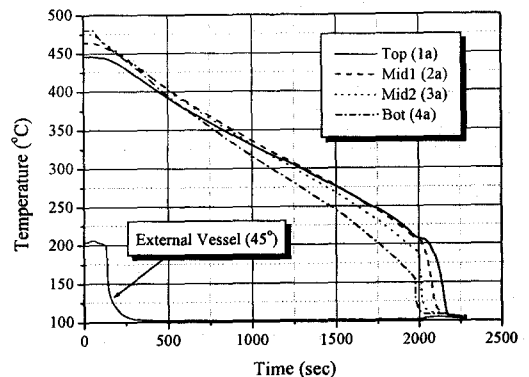


Fig. 5 Typical temperature history of heater shell and external vessel wall along with same longitude (gap thickness : 2mm)

되어있으며, 이를 바탕으로 반경방향 열유속을 계산하였다. Fig.3의 등온도 선포에서 살펴보았듯이 각 위도에서 온도는 거의 균일하므로 같은 위도에서 깊이 별로 평균하여 열유속을 산출하였다. Fig.6과 7에서 열유속은, 내부반구의 경우에는 간극으로 열전달이 일어날 경우를 (+)로, 외부반구의 경우에는 간극에서 외부반구로 열전달이 일어날 경우를 (-)로 각각 정의하였다.

Fig.6의 1mm인 경우 평균 열유속을 보면, 반구가 고온인 초기상태에서는 히터내부반구 상부의 열유속이 (-)값을 가진다. 이는 Fig.4의 내부반구 온도분포에서 나타나듯, 상부의 온도가 하부보다 더 낮은 값을 가져, 하부에서 상부로 반구표면을 따라 전도되는 열유속이 간극으로 빠져나가는 열유속보다 상대적으로 크기 때문이다. 반구의 상부는 냉각과정동안 냉각수로 채워져 있으며, 따라서 반구상부로의 전도에 의한 열전달이 간극을 통한 열전달 보다 상대적으로 큰 것으로 보인다. 이는 간극 내로 냉각재가 하부까지 유입되지 못해 간극에서 제거할 수 있는 열량이 매우 작다는 3.1절의 온도분포 해석 결과와 일치한다. 3140초에서 외부반구의 중심의 열유속이 갑자기 (-)값을 가지는 것은 뜨거운 외부반구에서 냉각수의 유입으로 간극쪽으로 열이 전달됨을 의미한다. 또한 3600초에서 내부반구 하부의 열유속이 급격히 상승하는 것은 냉각수가 하부로 침투하여 내부반구와 접촉이 일어나기 시작한다는 3.1절의 온도분포 해석 결과와 일치한다.

Fig.7의 간극 2mm의 경우에는 내부반구 표면 온도가 높은 초기상태에서 평균 열유속값이 1mm의 경우보다 더 크게 나타났다. 그리고 열유속이 (-)가 되는 영역도 없다. 이는 간극을 통해 열전달이 꾸준히 이루어지고 있음을 나타내며, 이와 같은 경향은 간극으로의 냉각수의 유입이 1mm의

경우보다 원활하기 때문이다.

최대열유속은 1, 2mm의 경우 모두 하부에서 발생하며 각각 325kW/m^2 , 346kW/m^2 이었다. 한편 박래준등[6]은 동일한 간극조건에서 가열을 통해 임계열유속을 구하였으며, 그 결과는 1mm의 경우 60.3kW/m^2 , 2mm의 경우 87.3kW/m^2 로 나타났다. 냉각실험의 경우 이 값에 비해 매우 큰 값을 보이나, 간극 1mm와 2mm의 최대열유속의 비율은 가열실험의 경우 1.2, 냉각실험의 경우 1.4로서 비슷한 경향을 나타냈다.

4. 간극에서의 냉각 과정

3장의 온도 및 열유속 측정결과를 바탕으로 미소간극을 가진 하향 반구 표면의 냉각과정을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 반구외벽의 온도가 먼저 감소한다.
- (2) 반구표면은 하부부터 냉각되기 시작한다.
- (3) 반구하부가 핵비등 영역으로 천이하여 급냉되기 시작하면 이와 같은 현상이 상부까지 수 십초 내에 급격히 전파된다.
- (4) 간극이 작은 경우의 냉각과정이 간극이 큰 경우보다 더 느리다.

이상과 같은 관찰결과를 바탕으로 간극 내 냉각과정을 유추할 수 있다. Fig.8은 미소간극을 가진 하향 반구 표면의 냉각과정을 설명한 것이다. 즉 벽면을 따라 흘러 들어간 냉각수가 반구의 아래에서 증발하여 증기의 흐름을 만들고 이 증기의 흐름이 상부에서의 냉각유체의 진입을 막는 CCFL에 의해 지배되는 모델이다. 반구의 온도가 점점 감소하여 Leidenfrost 온도이하로 떨어지면 하부표면이 냉각수에 의해 침수되게 된다. 이때 열전달 계수가 급격히 상승하여 반구의 표면온도를 급격

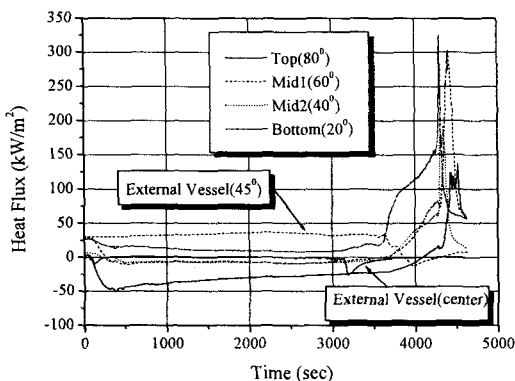


Fig. 6 Average radial heat flux distributions (gap thickness : 1mm)

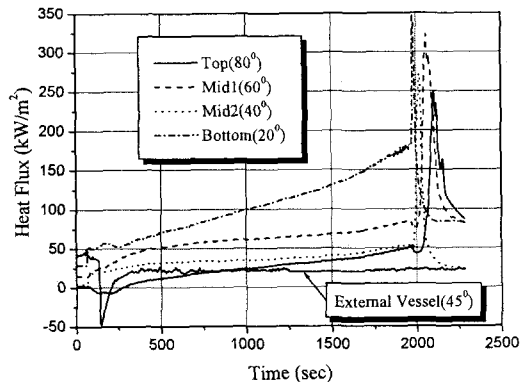


Fig. 7 Average radial heat flux distributions (gap thickness : 2mm)

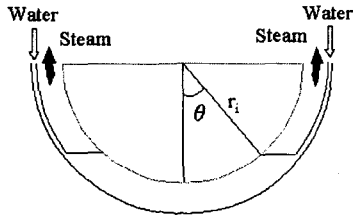


Fig. 8 Scenario of quenching process

히 감소시키게 된다. 이와 같은 급격한 온도감소는 냉각수 유입량 증가의 원인이 되며, 따라서 상부까지 냉각수가 빠른 시간 내에 차오르게 되는 것이다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 노심용융물을 모사하는 내부히터반구와 원자로용기를 모사하는 외부반구 사이에 1, 2mm의 균일 간극이 존재하는 상황을 가정하고, 이러한 상황에서 냉각수가 주입될 경우 노심용융물의 냉각거동을 규명하고자 하였다. 내부반구히터를 가열한 후 냉각수를 주입하여 급냉과정을 관찰하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 간극 내 온도변화 추이는 반구외벽의 온도가 감소한 후 반구하부표면부터 냉각이 시작되었다.
- (2) 간극이 작은 경우의 냉각과정이 간극이 큰 경우보다 더 느리게 나타났다
- (3) 핵비등으로 천이되는 온도대역은 1, 2mm 간극에서 비슷하게 나타났다
- (4) 간극이 1mm에 비해 간극이 2mm인 경우가 전체적으로 내부반구에서 간극쪽으로 전달되는 열량이 더 크게 나타났다.
- (5) 간극 1mm와 2mm의 최대 열유속 값의 비는 정상상태의 결과와 일치하였다.

본 연구에서 제시된 냉각과정 중 몇가지 사항에 대한 의문들은 보다 세심하게 검증되어야 한다. 첫번째로 평균 열유속의 크기가 Top(80°) < Mid1(60°) < Mid2(40°) < Bot(20°)의 순차적인 경향을 보이지 않고 Top(80°) < Mid2(40°) < Mid1(60°) < Bot(20°)로 역전되고 있다. 두번째로 히터반구표면의 온도의 감소에 따른 열전달 계수의 증가를 정량적으로 평가해야 한다. 이는 단순히 수조 내에서의 막비등 하에서 열전달 계수를 도입할 수 없기 때문이다. 세번째로 액막의 두께 및 액체 및

기체상의 속도를 예측할 수 있는 모델을 세워 제시한 냉각과정에 관한 해석적인 접근이 필요하다. 마지막으로 가시화 실험을 통해 quenching 과정의 전반적인 검증과 간극 및 압력의 변화에 따라 일관성이 있는가에 관한 검증이 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 과제 의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) Theofanous, T.G., Liu, C., Addition, S., Angelini, S., Kymalainen, O., and Salmassi, T., 1995, "In-Vessel Coolability and Retention of a Core Melt", DOE/ID-10460, Vol.1.
- (2) Kymalainen, O., Tuomisto, H., and Theofanous, T.G., 1997, "In-Vessel Retention of Corium at the Loviisa Plant", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.169, pp.109~130.
- (3) Rempe, J.L., Wolf, J.R., Chavez, S.A., Condie, K.G., Hargman, D.L., and Carmack, W.J., 1994, "Investigation of the Coolability of a Continuous Mass of Relocated Debris to a Water-Filled Lower Plenum", EGG-RAAM-11145.
- (4) Kim, S.B. et al., 1997, "Recent Progress in SONATA-IV Project", OECE/NEA CSNI PWG-2, The Third Mtg. of TG-DCC, Rockville, MD, USA, May 9-10.
- (5) Kang, K.H. et al., 1998, "Experimental Investigations on In-Vessel Debris Coolability through Inherent Cooling Mechanisms", OECD/CDNI Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability", Garching, Germany, March 3-6.
- (6) 박래준 외, 2001, "간극에서의 임계출력에 대한 연구", KAERI/TR-1800/2001.
- (7) Bergles, A.E. and Thompson, Jr, W.G., 1970, "The Relationship of Quench Data to Steady-State Pool Boiling Data", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.13, pp.55-68.
- (8) Bui, T.D. and Dhir, V.K., 1985, "Transition Boiling Heat Transfer on a Vertical Surface", *Trans. of the ASME*, Vol.107, pp.756-763.
- (9) El-Genk, M.S. and Gao, C., 1996, "Transient Heat Conduction During Quenching of Downward Facing Copper and Stainless Steel Convex Surface", *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol.29, pp543-573.