

## 전차 포탑 승무원실의 내부 열/유동장에 관한 수치적 연구

### Heat and Flow Analysis on Cabin Room of Battle Tank

남궁혁준\*      이 경 훈\*      박 병 훈\*\*      노 근 래\*\*  
H. J. Namkoung      K. H. Lee      B. H. Park      K. L. Roh

#### ABSTRACT

The heavy thermal load to battle tanks can cause electronic components' malfunction and crew to be put out of action. The thermal load is generated from internal heat sources such as electronic devices installed in the room as well as extremely hot weather. In this study, heat and flow analysis for the cabin room of a battle tank was performed to deal with this thermal problem. This study presented the validation of simulation results in comparison with those of test, the investigation of optimal flow design for effective cooling in cabin room and finally the evaluation of thermal comforts to crew.

주요기술용어(주제어) : PMV Index(쾌적성 지수), Turret cabin room(포탑 승무원실), Thermal comfort(열적 쾌적성), Air-conditioning design(공조 설계), Electronic units(전장품)

#### 1. 서 론

다양한 전장 환경에서 전차(battle tank)의 운용 신뢰성을 확보하기 위해서는 개발단계에서 극한(extreme) 환경요구조건을 만족시켜야 하며 이 중에는 40℃ 이상의 고온의 환경조건도 포함된다. 이러한 고온 외기 조건에서 발생하는 전차 승무원실의 온도 상승은 열에 민감한 장비들의 오동작과 전투원의 전투력 저하를 유발하게 된다. 특히 미래의 각종 전자전에 대응하기 위해 미래형 전차의 승무원실에는 과거보다 많은 전자 장비들이 탑재되는데 이들로부터 발생하는 열 또한 전차 승무원실의 온도 상승을 유발하게 된

다. 또한 시스템 운용 측면에서 사용 가능한 냉방 용량(cooling capacity)은 제한적이어서 전투원이 전투의욕을 상실하지 않도록 적정 쾌적성을 유지함과 아울러 전차 승무원실의 전장품들의 온도 상승을 줄이기 위한 효율적인 공조(air conditioning) 시스템의 구현이 필요하다.

본 연구에서는 미래형 전차 승무원실의 열유동 해석을 수행하였으며 이를 통해 온도 상승에 따른 열적 취약부위를 규명하고자 하였다. 이를 통해 발열 전장품에 대한 적절한 배치 구조의 검토와 승무원실의 국소적 과다 온도 상승을 규제하는 냉기 흐름의 개선 방안을 찾고자 하였다. 또한 인체 발열 해석을 수행하여 도출되는 PMV(Predicted Mean Vote, 쾌적성 지수) 지수의 평가를 통해 전투원의 체감하는 쾌적성 정도를 예측하고자 하였다. 이를 위해 해석 방법 및 결과에 대한 검증 차원에서 K1A1 전차의 내부 온도장 계산을 수행한 뒤 시험 결과와의 비교를 통해 해

† 2006년 1월 20일 접수~2006년 4월 4일 게재승인

\* 로템 기술연구소(Rotem)

\*\* 국방과학연구소(ADD)

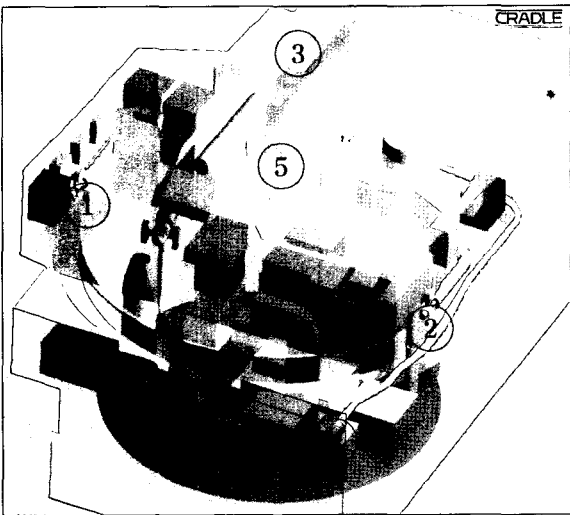
주저자 이메일 : 247842@mail.rotem.to

석 과정 및 방법에 대한 신뢰도를 확인하였으며 이를 토대로 미래형 전차에 대한 해석을 수행하여 승무원실 온도 상승을 저감시킬 수 있는 개선안 및 설계 옵션 (Option)을 도출하였다.

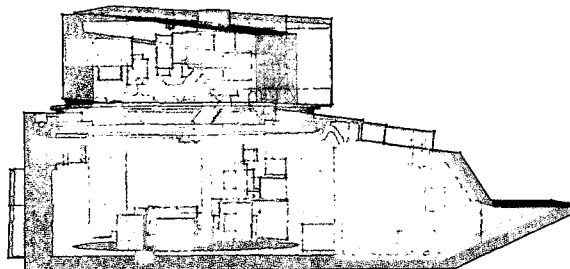
## 2. 본론

### 가. 해석 모델 및 방법

그림 1에서는 해석 모델에 대한 3차원 형상을 도시하고 있다. 1번, 2번 덕트는 포수 및 전차장으로 분사되는 냉기 덕트이며 3번은 조종수로 분사되는 덕트 입구이다. 4번 덕트에서 환기를 위한 냉기가 분사되고 있으며 5번에는 주포 주변의 틈새로서 냉기가 유출되는 출구 형상이 모델링 되어 있다.



[그림 1] 해석 모델에 대한 3차원 형상



[그림 2] 해석 모델에 대한 격자계

그림 2에서는 해석 격자계 분포를 보여주고 있다. Octree 방식의 Tetra 격자를 생성시켰으며, 고체 영역 주변의 경계층 및 열전달을 해석하기 위해 Prism Mesh를 적용시킴으로써 전체적으로 해의 정확성을 향상시키기 위한 Hybrid Mesh<sup>[1]</sup>를 생성하였다. 이때 벽면에서의 첫번째 격자 위치를 결정하는  $y^+$  값은 약 30 정도로 조정하였다.

표 1에서는 해석 방법을 보여주고 있다. 지배 방정식은 3차원 비압축성 N-S 방정식을 사용하였으며 온도 변화만이 부력항에 영향을 준다고 가정하는 Boussinesq 근사를 채택하여 비압축성 방정식으로 부력항을 모사하였다. 임의의 제어 체적(Control Volume)에 대하여 적분형 보존방정식을 적용함으로써 물리적 변수들이 격자의 형태에 크게 구애 받지 않는 유한 체적법(Finite Volume Method)를 사용하였으며, 복사 모델은 발열체가 다수 존재하며 상호 복사에 의한 열전달 관계에 있을 때 일반적으로 사용하는 입자 궤적 추적 방법의 View Factor 모델<sup>[2]</sup>을 사용하였다.

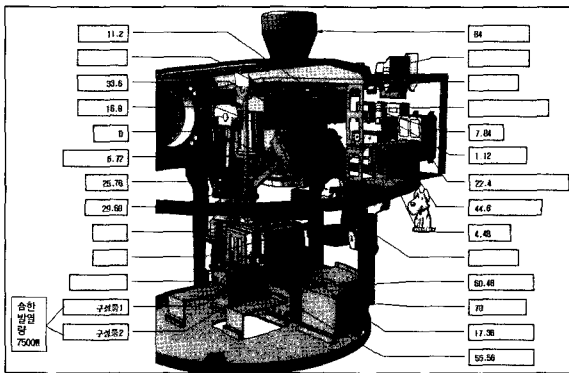
기본적인 해석 조건은 표 2와 같다. 포탑 승무원실 전체를 해석 제어 체적(Control Volume)으로 하여 583만개의 격자를 분포시켰으며, 난류 모델은 발열 전장품에 의해서 발생하는 자연대류 현상 및 냉기 덕트에서 분사되는 흐름에 의한 강제대류 현상을 적절히 해석하기 위해서 GPC  $k-\epsilon$  난류 모델<sup>[3]</sup>을 사용하였다. 외기 및 외벽면 조건은 전차 외부 온도를 43℃로 적용하였고 수평 평판에서 대기로의 자연대류를 가정할 때 일반적으로 적용되는 값인  $5W/mK$ <sup>[2]</sup>을 벽면 대류 열전달 계수로 가정하였다. 냉기 덕트의 설계 유량은  $180m^3/h$ 이며 엔진룸 격벽은 온도 시험 결

[표 1] 해석 방법

격자수	583만 셀
지배 방정식	비압축성 Navier-Stokes Equation
난류 모델	GPC $k-\epsilon$ 모델
공간 차분	FVM
복사 열전달 모델	VF Method

[표 2] 해석 조건

구분	경계 조건	값
입구	승무원실 입구 유량, 온도	60m <sup>3</sup> /h, 23℃
	조정석 입구 유량, 온도	30m <sup>3</sup> /h, 23℃
	승무원실 덕트 유량, 온도	90m <sup>3</sup> /h, 23℃
출구 (외기)	출구압	0Pa(대기압 조건)
벽면	no-slip Condition Duct : 단열조건	V=0, dV/dX = 0
외기	온도	43℃
	열전달 계수(자연대류)	5W/mK
발열	발열전장품의 전체 발열량	2,430W



[그림 3] 각 전장품에 대한 발열 조건, W

과로부터 획득한 발열량 조건으로 계산하였다. 내부 전장품의 발열 조건(W)은 각 전장품의 온도 시험 결과를 통해 열유속량(Heat flux)을 계산하고 표면적을 통해 Total 발열량을 예측하여 계산 조건으로 설정할 수 있지만 본 연구에서는 그림 3과 같이 각 전장품에 대해 제작사가 제시하는 부하용량에 대해서 효율을 80%로 가정하고 발열량 조건을 설정하였으며 전장품 전체 발열량은 총 2,430W이다.

순간 구동 전장품의 경우는 전체 운용 시간에 대한 비율의 조건으로 계산을 수행하였다. 표 2에서 입구 위치에서의 유입 공기부 유량은 총 180m<sup>3</sup>/h, 온도는 23℃이며 알루미늄 덕트 튜브는 실제 단열재가 감싸고 있음을 감안하여 단열 조건으로 가정하였다.

나. 인체 쾌적 지수 모델링

내부 공조 시스템에 대해 전투원의 쾌적 지수를 평가하고 효율적 공조 시스템 설계를 위해 인체모델링을 수행하였다 해석 모델에서도 인체 모형을 형상화하여 해석을 수행하였다. 열적으로 쾌적한 상태에서의 피부온도 33±1.5℃를 기준으로 인체 내부에서 신진대사에 의해 발생하는 열을 피부와 호흡을 통해 주위로 방출하는 현상(Heat Flux)을 물리적으로 다음과 같이 모사할 수 있다. 대류와 복사 모드를 통해 현열과 잠열의 형태로 정의<sup>[4,5]</sup>한다.

$$M = \dot{Q}_{skin} + \dot{Q}_{lung} \tag{1}$$

$$= (\dot{Q}_C + \dot{Q}_R + \dot{Q}_E)_{skin} + (\dot{Q}_C + \dot{Q}_E)_{lungs} \tag{2}$$

여기서 하첨자 C : 대류, R : 복사, E : 잠열

인체 발열 면적 계산을 위해 DuBois Area<sup>[4]</sup>의 나체 평균 표면적을 다음과 같이 계산한다.

$$A=0.202 \times m^{0.425} \times H^{0.725} \quad (m : \text{체중}, H : \text{키}) \tag{3}$$

인체 쾌적성을 평가하는 PMV 방정식<sup>[5]</sup>은 식 (4)와 같다.

$$PMV=(0.303e^{-0.036M}+0.028) \times [(M-W)-H-E_c-C_{res}-E_{res}] \tag{4}$$

여기서

- M : Metabolic rate(W/m<sup>2</sup>)
- W : Effective Mechanical Power(W/m<sup>2</sup>)
- H : Dry Heat Loss(W/m<sup>2</sup>)
- E<sub>c</sub> : Evaporative Heat Exchange on Skin (W/m<sup>2</sup>)
- C<sub>res</sub> : Respiratory Convective Heat Exchange

$$(W/m^2)$$

$E_{res}$  : Respiratory Evaporative Heat Exchange  
( $W/m^2$ )

PMV 지수 계산을 위한 변수로서 의복지수<sup>[5]</sup>는 전투복에 대한 상세 정보가 없어 긴 소매를 입었을 때의 값인 0.5로 설정하였으며, 승무원실의 습도는 다소 건조하다고 가정하여 50%로 설정하였다. 활동 지수<sup>[6]</sup>의 경우 전투시 의자에서 착석한 상태로 가정하여 1.0값으로 설정하여 계산을 수행하였다. 표 3에서 쾌적 모델링을 통해 예상 온열감과 예상 불만족율을 무차원 지수로 -3~+3으로 표시하였다.

[표 3] PMV 지수<sup>[4]</sup>

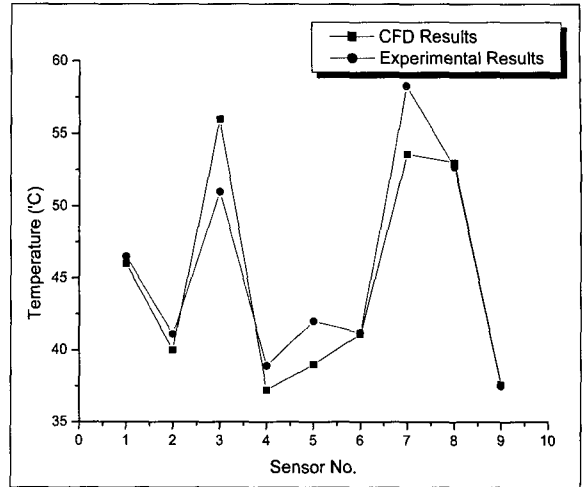
지수	상태	비고
+3	hot	
+2	warm	
+1	slightly warm	
0	neutral	
-1	slightly cool	
-2	cool	
-3	cold	

다. 예비 검증 해석 결과(K1A1 전차 모델)

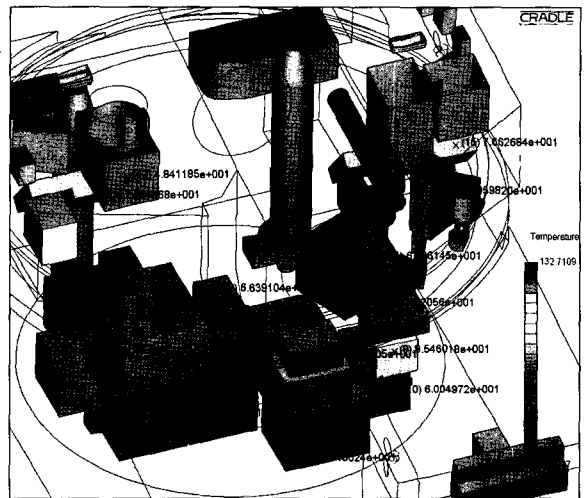
예비 검증 해석으로써 K1A1 전차 승무원실에 미래형 전차의 내실 발열량과 유사한 조건을 모사하기 위해 전열기 3개(각 800W, 총 2,400W)를 가동했을 때 상온(29℃)의 외기 조건에 대해 벽면 온도 및 내부 온도를 계산하여 시험 결과와 비교하였다. 시험 측정 위치인 각 센서 위치에서의 온도값을 그림 4에서와 같이 해석 결과와 비교를 수행하였다. 최대 오차 7%이내에서 비교적 잘 일치하고 있다. 또한 각 측정 위치에서의 온도 분포 경향도 일치하고 있으므로 해석 방법에 대한 타당성을 확인할 수 있었다.

라. 발열 해석 결과

그림 5는 발열 전장품의 표면 온도 분포를 나타내

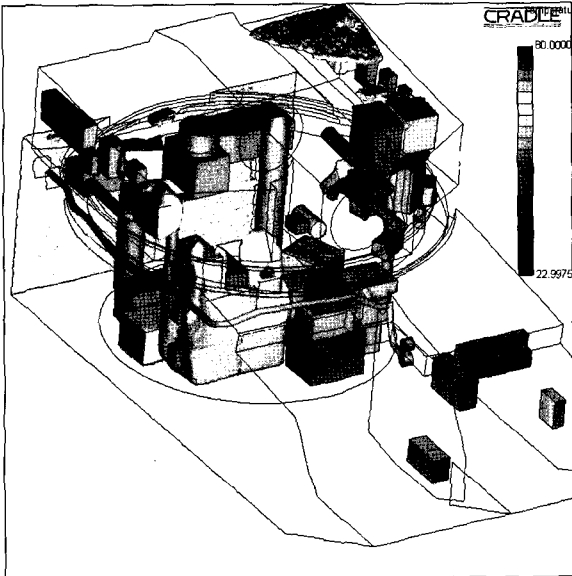


[그림 4] 각 센서 위치에서의 표면 온도 결과 비교 (#1~#3 : 전열기 상단 공간, #4 : 포탑 승무원실 중앙 천정, #5 : 포탑 승무원실 좌측벽, #6 : 포탑 승무원실 포수 가슴, #7 : 플랫폼 바닥, #8 : 포탑 승무원실 우측벽, #9 : 플랫폼 바닥 좌측면)

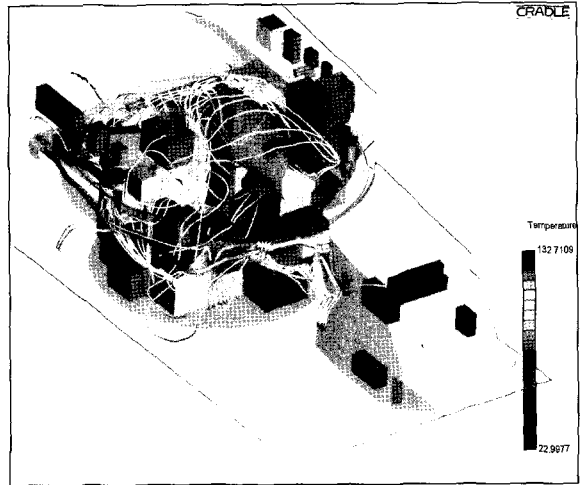


[그림 5] 발열 전장품 표면 온도 분포

고 있다. 최대 132℃까지 상승한 전장품이 있으며 그림 6에서 볼 수 있듯이 포탑내부의 전장품에 대한 발열 조건을 기준으로 할 때 내부 온도 분포가 우측 승무원 아래쪽의 부근과 좌측 상단부에서 60℃이상의 고온 영역이 나타나고 있다.



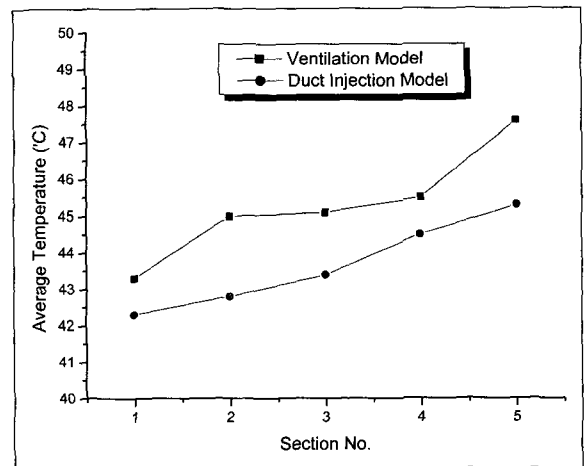
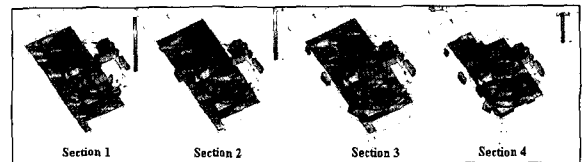
[그림 6] 포탑 승무원실 온도 분포(Iso-Temperature 60°C)



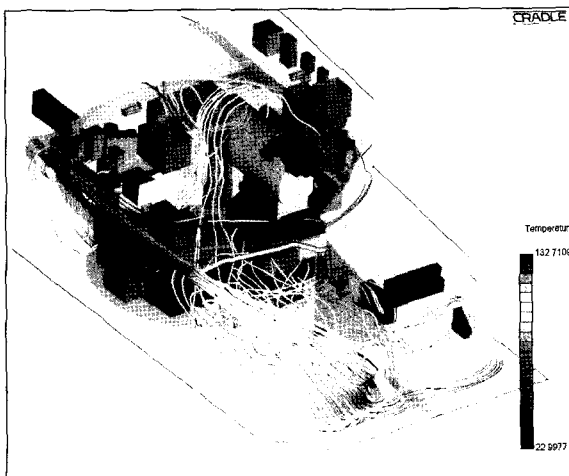
b) 덕트 분사 모델(개선안)

[그림 7] 포탑 승무원실의 유동 궤적

그림 7에서는 유동 궤적을 통해 내부 유동 패턴을 도시하였다. 그림 8의 a)는 환기 공기를 후방에서 분사하는 기본안 모델이며 b)의 경우는 에어컨 덕트 중간에서 분기하여 고온 영역에 직접 분사하는 모델의 경우 유동 궤적을 비교해서 보여주고 있다. b)의 개선안의 경우 고온의 전장품 주변을 강제 대류에 의해 적절히 냉각할 수 있도록 흐름이 개선되고 있음을 확



[그림 8] 포탑 승무원실 단면 평균 온도 (기본안 vs 개선안)



a) 환기구 분사 모델(기본안)

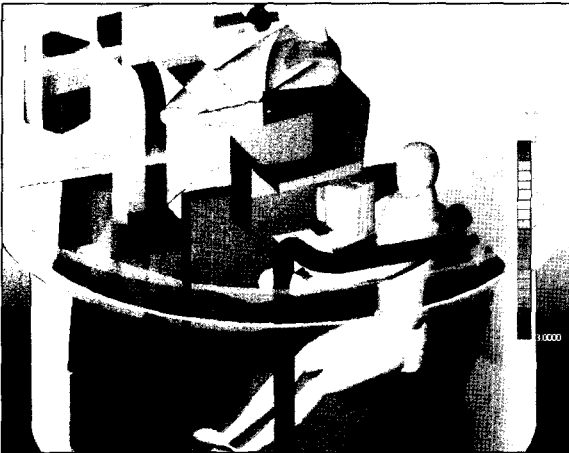
인할 수 있다.

그림 8은 포탑 하단에서 상단까지 5등분한 횡단면에 따른 포탑 승무원실의 평균 온도에 대해 기본안과 개선안에 대한 결과값이다. 전장품의 운용 규제 조건

인 발열전장품에 대한 승무원실 주변 온도 조건(50℃ 이하)을 만족시킴을 확인할 수 있었으며, 개선안의 경우 주요 단면에서의 승무원실 평균온도를 기본안에 비해 약 4%정도 감소시킬 수 있었다. 결국, 흐름 개선을 통해 국부적으로 상승한 고온 영역을 해소할 수 있다고 판단되었다.

#### 마. PMV 지수 결과

그림 9는 전투원의 쾌적 체감지수 관련해서, PMV 지수를 도시하고 있다. 전체적으로 2로 다소 덥게 느껴지는 상태이며, 왼쪽 전투원의 머리 부분과 오른쪽 전투원의 왼쪽 어깨 부위에서 최대 불쾌지수가 나타나고 있다. 하지만 전장품의 운용 조건이 최대일 경우에 해당 되므로 평시 조건에서는 적정 쾌적 지수를 유지할 것으로 판단된다.



[그림 9] 전투원 인체 PMV 지수

### 3. 결론

전차내부의 효율적 공조(Air Conditioning) 환경 설계를 위해 열/유동 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 포탑 승무원실 내부의 전장품에 대한 발열 해석을 수행한 결과 전장품의 운용 규제 온도 조건을 대체로 만족함을 확인하였으며 국부적으로 50℃ 이상 상승하는 영역에 대해 흐름 개선을 통해 내부 상승 온도를 규제 할 수 있었다.
- (2) 전투원의 쾌적 체감지수 관련해서, PMV 지수를 도입하여 평가하였으며 전장품의 최대 발열량 조건에서 지수 2로 다소 덥게 느껴지는 상태이며, 왼쪽 전투원의 머리 부분과 오른쪽 전투원의 왼쪽 어깨 부위에서 최대 불쾌지수가 나타나고 있음을 확인하였다. 하지만 평시 조건에서는 적정 쾌적 지수를 유지할 것으로 판단된다.
- (3) 향후 승무원실의 온도/유동 측정 시험을 통해 계산 결과의 검증과 열적 안정성에 대한 최종 평가를 수행 예정이다.

### 참 고 문 헌

- [1] SC/Tetra version 5, User's guide Preprocessor Reference, 2004.
- [2] SC/Tetra version 5, User's guide Solver Reference, 2004.
- [3] Goldberg. U., O. Perroomian and S. Chakravarthy, "GPC  $k-\epsilon$  Turbulent Model for Natural Convection" in Journal of Fluid Engineering, Vol. 120, 1998, pp.457~462.
- [4] Fundamentals of engineering discipline specific reference hand book, p.51, National council of examiners for engineering and surveying, 1996.
- [5] A. Nagaghima, Transport Phenomena, pp.103~104, Corona, 1978.
- [6] J. P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill, 2001.