초고층 커튼월 외피 열성능해석 프로그램 개발에 관한 연구

노 상 태, 김 강 수†, 정 진 세*
고려대학교 건축공학과, *CNC 커튼월 시험연구소

A Study on the Development of High-rise Curtain Wall Thermal Analysis Program

Sang-Tae No, Kang-Soo Kim†, Jin-Se Chung*
Department of Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea
**Curtain Wall Design & Consulting Testing Laboratory, Seoul 135-539, Korea*

(Received February 20, 2006; revision received November 18, 2006)

ABSTRACT: The purpose of this study is to develop an user-friendly computer program which can analyze the thermal performance of high-rise curtain wall. In this study, the sub-routines for FVM SOLVER, HIGH-RISE CONDITION CALCULATION, AUTOMATIC SPECIFICATION BOUNDARY/MESH, MATERIAL DATABASE, and GRAPHICAL CONDENSATION/U-FACTOR OUTPUT were developed by using Visual Basic. The curtain wall heat conduction simulation results of program showed good agreement with those of FLUENT and THERM. The minimum and maximum relative error rates were 3.17 and 9.68% compared to other software.

Key words: High-rise building(초고층건물), Curtain wall(커튼월), Heat conduction(열전도), Finite volume method(유한체적법), U-factor(열관류율)

기 호 설 명

a : 지형조건계수(a=0.143~0.333)
d : 제어체적의 크기 [m]
H : 건물 높이 [m]
h : 열전달계수 [W/m^{2}K]
H_{10m} : 지상 10 m 높이 [m]
H_{mesh} : 각 격자점에서의 열유속 [W/m^2]
k : 열전도도 [W/mK]
l_i : 커튼월 실내표면 길이 [m]
T_i : 실내온도 [℃]
T_o : 실외온도 [℃]
V : 건물 높이(H)에서의 풍속 [m/s]
V_{10m} : 지상 10 m 높이에서의 풍속 [m/s]

그리스 문자

Δ : 격자점 사이의 거리 [m]

하첨자

E, e : 동측 격자점
N, n : 북측 격자점
P : 중앙 격자점
S, s : 남측 격자점
W, w : 서측 격자점

† Corresponding author
Tel.: +82-2-3290-3335; fax: +82-2-921-7947
E-mail address: kskim@korea.ac.kr

1. 서 론

1.1 연구의 필요성

현재 전국 주요 도시에서 외피시스템으로 커튼월이 적용된 초고층 주상복합 주거시설의 건설이 증가하고 있는 추세이다. 초고층 건물 외피로서의 커튼월은 여러 장점이 있으나 유리가 차지하는 면적이 크고, 열전도율이 매우 높은 금속 프레임을 이용하기 때문에 우리나라와 같이 사계절의 구분이 명확한 기후에서는 단열성능, 결로발생 면에서 매우 불리한 단점이 있다. 이에 최근 초고층과 커튼월을 대상으로 한 연구들이 증가 추세에 있다. Park et al.[1]은 여러 종류의 커튼월 타입에 대해 Mock-up 시험과 열쾌적 시뮬레이션을 실시하여 열성능을 평가하였으며, Chung et al.[2]은 커튼월의 구성요소와 단열바가 전열 및 결로성능에 미치는 영향을 Therm과 Window5를 이용하여 평가하였다. 현재 대부분의 연구는 기존 커튼월을 대상으로 하고 있으며, 외국에서 개발된 프로그램을 사용하고 있다. 초고층 커튼월은 설계단계에서부터 시험체 실험 등을 통한 적절한 보완이 필요하나, 커튼월 설계업체의 여건상 실험에 소요되는 노력과 비용을 감당하기 힘든 실정이다. 그러나 컴퓨터 시뮬레이션은 실험에 드는 많은 시간과 비용을 절약할 수 있는 대안이 될 수 있으므로, 커튼월 설계 단계에서부터 적용 가능한 평가기법의 연구가 필요하다.

1.2 연구의 목표

본 연구는 초고층 주거용 건물 외피에 일반적으로 적용되고 있는 커튼월 부재를 대상으로 2차원 정상상태 열전도 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 이용하여 커튼월의 열성능을 평가할 수 있는 소프트웨어를 개발하는 것을 목표로 한다.

2. 연구의 내용

2.1 프로그램의 요구성능

기존 프로그램의 특성을 살펴보면, 범용 열해석 프로그램의 경우 상당한 열역학적, 수치해석 지식을 요구하므로 사용하기에는 어렵지만 그 결과물의 질이나 활용성은 높고, 열전도 해석전용 프로그램의 경우 여러 가지 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 외국에서 개발되었기 때문에 사용언어가 다르고 결로부위를 파악하기 힘들며, 소스 코드 업그레이드를 통한 지속적인 추가개발이 불가능한 단점이 있다. 이와 같은 관점에서 본 연구에서 개발될 소프트웨어에 요구되는 필요성능을 다음과 같이 설정하였다.

① 열역학적 요구지식을 최소화
② 모델링의 편이성(CAD 데이터와 호환)
③ 건축재료 물성치의 데이터 베이스화
④ 자동화된 격자/경계면 생성
⑤ 열관류율(U-factor) 계산
⑥ 초고층 외기조건을 고려한 입력
⑦ 온습도조건에 의한 결로 발생부위 평가

2.2 프로그램의 구조와 개발 프로세스

Fig. 1과 Fig. 2에 프로그램의 구조와 개발 프로세스를 나타내었다. 프로그램은 크게 해석대상 모델을 불러오는 입력부분과 2차원 열전도 계산을 수행하는 솔버(SOLVER), 그리고 결과를 그래픽과 텍스트 형식으로 출력하는 출력부분 3가지로 나뉜다. 또한 입력부분에는 건축재료의 물성을 데이터베이스화하여 입력할 수 있도록 하였으며, 초고층 실외조건을 고려할 수 있도록 하였다.

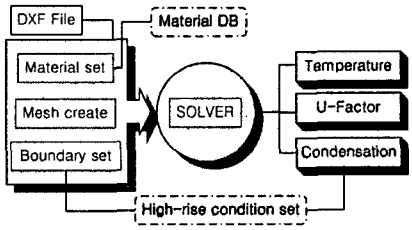


Fig. 1 Structure of program.

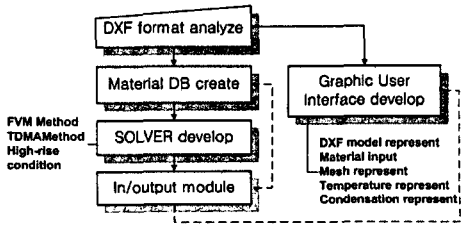


Fig. 2 Development process of program.

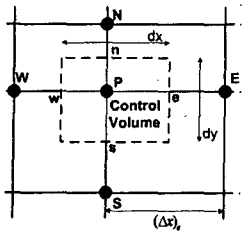
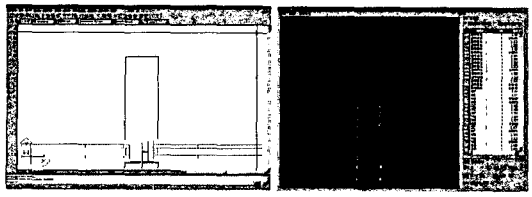
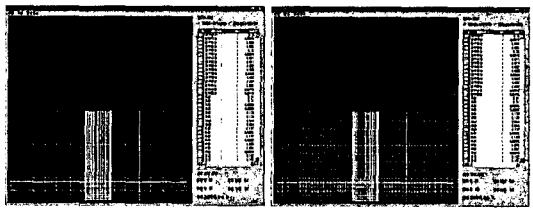


Fig. 3 Control volume.



(a) CAD DXF file (b) DXF import

Fig. 4 CAD modeling and importing.



(a) 1 stage mesh (b) 5 stage mesh

Fig. 5 Automatic mesh generation with step.

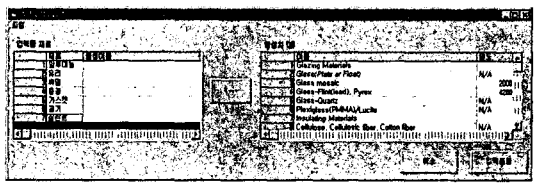


Fig. 6 Material conductivity input with DB.

2.3 유한체적법에 의한 계산

본 연구에서 채택하고 있는 유한체적법은 운동량 및 질량보존법칙을 만족시키기에 용이하도록 적분으로 기초방정식을 이산화하는 방법이다. 구체적으로는 Fig. 3과 같이 대상이 되는 격자점을 중심으로 미소영역(제어체적) 내에서 방정식을 적분하고, 그 경계의 값을 인근 격자점을 이용하여 요구되는 정확도로 주어 적분식을 Table 1과 같은 형태로 이산화하는 방식이다.

2.4 프로그램의 구성

2.4.1 해석대상 모델링과 입력

프로그램은 마이크로소프트사의 Visual Basic으로 작성되었으며, DXF(Drawing exchange file format)[4] 파일을 해석대상으로 인식한다. Fig. 4 (a)와 같이 캐드 상에서 커튼월 멀리온(수직부재)을 모델링하고 이를 프로그램으로 불러들인 결과를 Fig. 4(b)에 예시하였다. 좌측의 픽쳐 박스(Picture box)를 통해서 모델을 가시화하며, 우측의 데이터 패널에 부재의 이름과 열전도율, 형태, 격자의 개수, 경계조건을 표시하고 이에 대한 편집이 가능하다.

2.4.2 자동 격자망(Mesh) 생성

본 연구에서 개발된 프로그램은 사용자 지정에 의해 자동으로 직사각형 격자를 생성하는 서브루틴을 포함하고 있다. 1단계부터 5단계까지의 단계별로 격자간격을 조밀하게 지정할 수 있다.

Fig. 5의 (a)와 (b)에 기본단계인 1단계 격자망과 가장 세밀한 5단계 격자망을 나타내었다.

2.4.3 건축재료 DB에 의한 물성치의 입력

본 연구에서는 열전도 해석에 필요한 열전도도를 결정하기 위해 Fig. 6과 같이 일반적으로 건축재료로 사용되는 재료들의 물성 DB를 작성하

Table 1 Governing and discretization equation[3]

2D steady state governing equation	$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)=0$
Discretization equation	$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S$ $a_E=\frac{k_e dy}{(\Delta x)_e},\ a_W=\frac{k_w dy}{(\Delta x)_w},\ a_N=\frac{k_n dx}{(\Delta y)_n},\ a_S=\frac{k_s dx}{(\Delta y)_s}$ $a_P = a_E + a_W + a_S + a_N$

였다. NFRC(National fenestration rating council, Inc.)[5]와 ASHRAE[6] 데이터를 기준으로 작성되었으며, 크게 유리재료, 금속재료, PVC 재료, 단열재료, 목재 등으로 구성되어 있다.

2.4.4 초고층 외기조건 설정

본 연구에서는 지형조건과 건물 높이에 따른 풍속을 산정하고, 그 풍속에 따른 실외 대류 열전달계수를 산정하여 외피 열성능 해석에 초고층 실외조건을 고려하였으며 그 식은 다음과 같다.[7]

$$V = V_{10\,\mathrm{m}} \times \left(\frac{H}{H_{10\,\mathrm{m}}}\right)^{a} \qquad (1)$$

Table 2와 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 건물의 지형조건을 고려하여 해당 건물 높이에서의 평균 풍속을 산정한다.

그리고 이 풍속을 풍속에 따른 열전달계수 산정식(식(2))에 대입하여 초고층 조건을 고려한 실외 대류 열전달계수를 산정한다.[8]

$$h = 4.1\,V + 5.8 \qquad (2)$$

Table 2 a value by several terrain

Terrain	Plain	Town, forest	Suburbs	Downtown
a	0.143	0.2	0.25	0.333

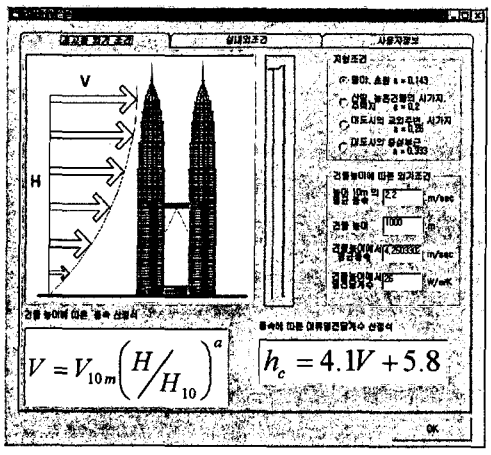


Fig. 7 High-rise condition calculation with building height.

또한 실내외 온도와 열전달계수를 직접 입력하고, 실내 표면 결로발생 유무를 판정하기 위해 실내 상대습도를 설정할 수 있다.

2.4.5 실내외 경계조건의 자동 생성

실내외 경계조건(Boundary)이 적용되는 부위를 설정하기 위해 기존 프로그램에서는 격자점의 번호를 입력하거나 모델 화면 상에서 사용자가 직접 지정해 주어야 하는 번거로움이 있었으나, 본 연구에서 개발된 프로그램에서는 멀리온과 트랜섬 각각에 대해 실내외 경계부위를 프로그램이 Fig. 8과 같이 자동 인식하여 설정한다.

Fig. 8의 좌측 픽쳐박스에 모델 경계부위(Indoor/Exterior Boundary)로 표시된 부분이 실내외 경계조건을 나타낸다. 또한 우측 패널에서와 같이 모델의 전체 크기와 격자 개수 등을 확인할 수 있다.

2.4.6 유한체적 SOLVER에 의한 계산

Fig. 9의 계산 화면상에서 최대 계산횟수, 허용오차(Residual) 등을 사용자가 지정할 수 있다.

허용오차는 각 계산 단계(Step)에서의 최대 오차를 뜻하며, 계산오차가 허용오차 이하에 도달하거나 계산횟수가 최대 계산횟수보다 커지게 되면 계산이 강제 종료된다. 솔버의 반복계산법은

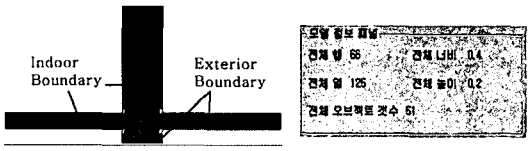


Fig. 8 Automatic specification of boundary.

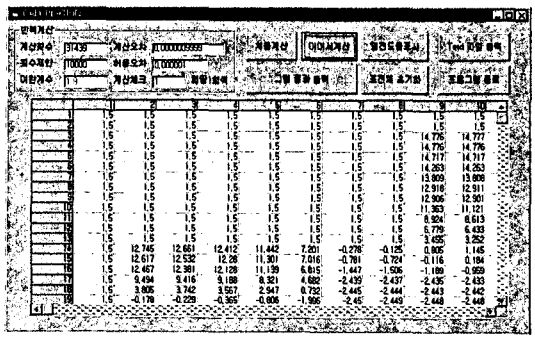


Fig. 9 Calculation panel.

선순법(Line-By-Line Method)[3]을 적용하였다.

2.4.7 계산결과 출력

그래픽 결과 출력 폼(Visualization)에서 Fig. 10과 Fig. 11에 예시한 바와 같이 여러 가지 형태의 결과물을 출력할 수 있다. 그래픽 결과의 형태는 각 격자점에서의 X, Y축 좌표값과 좌표에 대응하는 온도값을 이용하여 보간법(Interpolation)으로 계산되어 나타내어진다.

그래픽 결과의 종류는 꽉 채워진 형태(Fill), 등온선 형태(Contour), 벡터 형태(Vector) 세 가지로 나타낼 수 있다. 우측의 온도값 레전드(Legend)를 이용하여 그림과 온도값을 확인할 수 있다.

커튼월뿐 아니라 모든 건물 실내 표면에서의 결로발생을 예측하는 것은 매우 중요하다. 본 프로그램에서는 결로발생의 유무, 부위, 그리고 정도를 해석하기 위해서 각 격자점에서의 온도값을 노점온도와 비교하여 실내 표면 결로부위를 그림상에 출력하고 결로 길이를 산정할 수 있도록 하였다.

실내 표면에서의 결로부위는 Fig. 12(a)와 같이

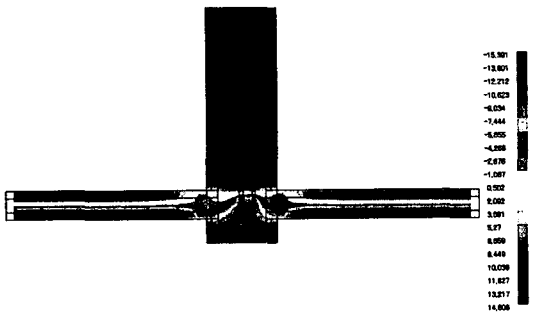


Fig. 10 Temperature result (fill option).

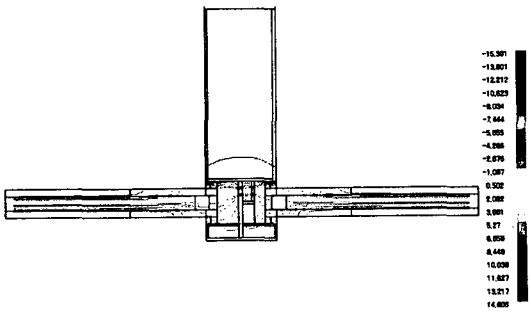
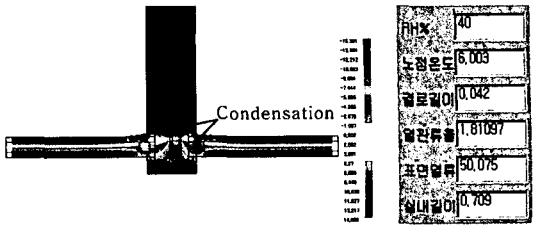


Fig. 11 Temperature result (contour option).



(a) Indoor condensation result (b) U-factor

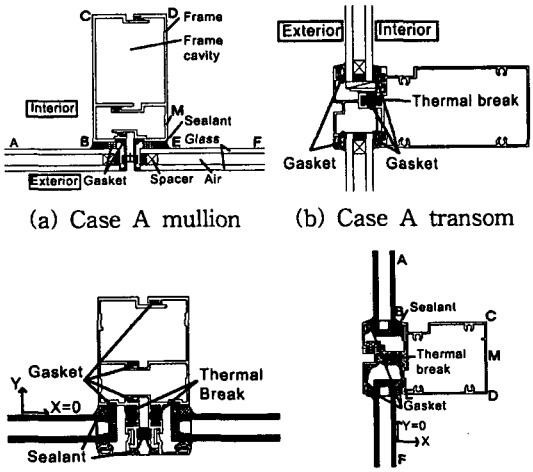
Fig. 12 Condensation and U-factor result.

원모양(Condensation)으로 표시되며, Fig. 12(b)에서와 같이 노점온도와 실내 상대습도, 결로 길이, 열관류율, 실내 표면 열류량값이 텍스트 박스에 출력된다. 또한 이 결과값들을 각 그리드 좌표에서의 온도값과 함께 텍스트 파일 형식으로 출력할 수 있다. 열관류율은 아래 식(3)에 의해 산출하였다.[9]

$$U_{factor} = \frac{\sum H_{mesh}}{l_i \times \Delta(T_i - T_o)} \tag{3}$$

2.5 프로그램 결과 검증

개발된 프로그램의 결과를 검증하기 위해 기존 소프트웨어인 FLUENT와 THERM을 이용, Fig. 13과 같은 동일한 커튼월 모델을 대상으로 시뮬레이션을 실시하여 각 결과를 비교하였다. 재료



(a) Case A mullion (b) Case A transom

(c) Case B mullion (d) Case B transom

Fig. 13 Structure of simulation model.

Table 3 Heat conductivity/conductance of materials

Material	Heat conductivity/conductance
Aluminum frame	227 W/mK
Spacer	227 W/mK
Gasket	0.25 W/mK
Sealant	0.25 W/mK
Thermal break (Poly urethane)	0.12 W/mK
Glass	0.8 W/mK
Frame cavity	0.21 W/m^{2}K
Air	0.03 W/m^{2}K

Table 4 Boundary condition for simulation

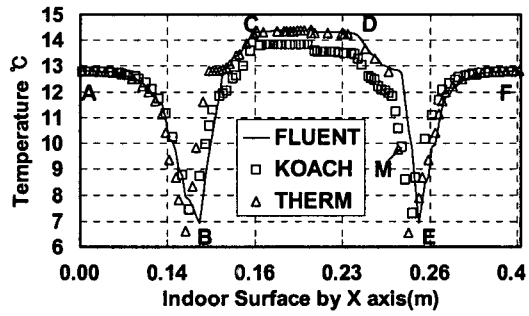
	Heat transfer coeff.	Temperature
Interior	8.29 W/m^{2}K	21℃
Exterior	26 W/m^{2}K	−18℃

의 열전도도와 실내외 경계조건을 Table 3[5]과 Table 4[6]에 각각 표시하였다. 경계조건은 대류에 의한 열전달만을 고려하였으며, 세 프로그램 모두 해석시 유동과 복사는 고려하지 않았다. 계산 허용오차를 10^{-6}으로 설정하여 계산된 커튼월 실내 표면온도를 비교하여 Fig. 14에 나타내었다.

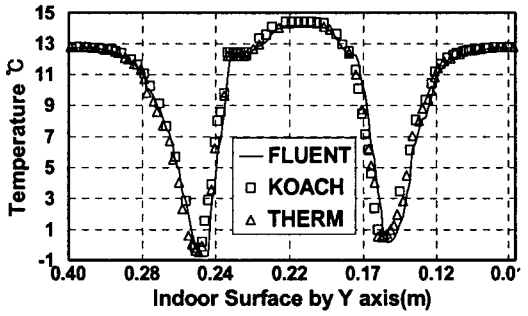
Fig. 14에 나타난 바와 같이 세 프로그램 모두 유사한 형태의 결과를 보였고, Fig. 14의 (a)와 (d)에서는 커튼월의 알루미늄 프레임(Fig. 13, Fig. 14 (a), (d)(C-D부위)) 부분에서 개발된 프로그램이 다른 두 프로그램과 차이를 보였다.

부재의 폭이 작은 유리부분에서는 세 프로그램의 온도값 차이가 거의 없었으나, 부재의 폭이 큰 알루미늄 프레임 부분에서는 세 프로그램 간의 오차가 발생하였다. Table 5에 구체적인 오차값을 표시하였는데, 각 프로그램 간 온도값 절대차는 최소 0.029℃(Fig. 13의 Glass 부위)에서 최대 3.011℃(Fig. 13, Fig. 14(a)의 M부위)의 차이를 보였으나, 90% 이상의 격자점에서 온도값 차이는 0.4℃보다 작았다. 전 격자점에서의 평균 상대오차는 최소 3.17%에서 최대 9.68%로 나타났다.

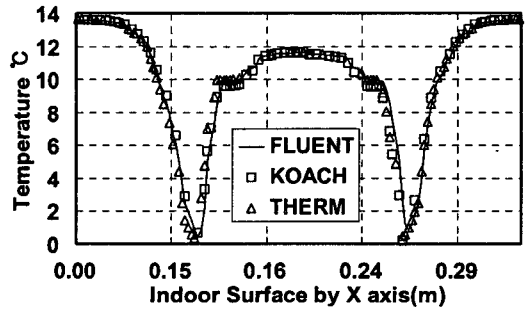
Fluent와 Therm 간의 오차를 비교해 보면, 실내 표면 격자점에서 평균 7.98%의 상대오차가 있



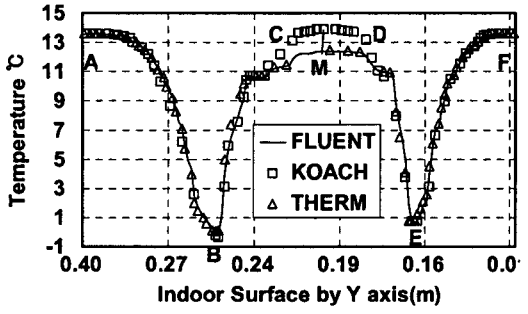
(a) Case A mullion



(b) Case A transom



(c) Case B mullion

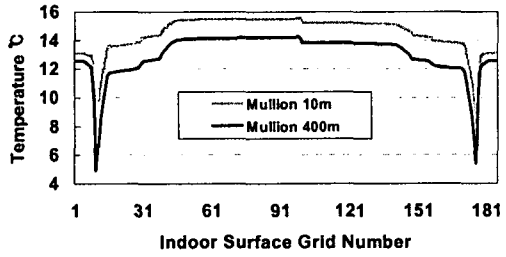


(d) Case B transom

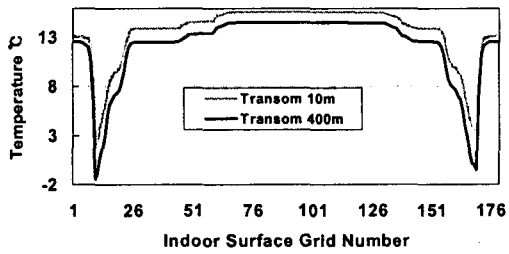
Fig. 14 Simulation result comparison of indoor surface temperature between other software.

Table 5 Error rates with other software

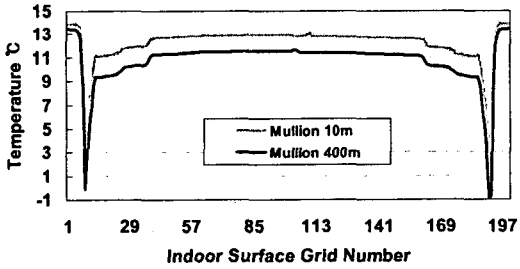
Temperature	Min. absolute err. (℃)	Max. absolute err. (℃)	Mean relative err. (%)
Case A mullion	0.029	3.011	9.68
Case A transom	0.056	1.642	5.26
Case B mullion	0.04	2.318	3.17
Case B transom	0.041	2.310	8.47
U-factor	THERM (W/m^2K)	Program (W/m^2K)	Relative err. (%)
Case A mullion	1.72	1.77	2.91
Case A transom	1.90	1.84	3.16
Case B mullion	2.05	2.02	1.46
Case B transom	1.97	1.89	4.06



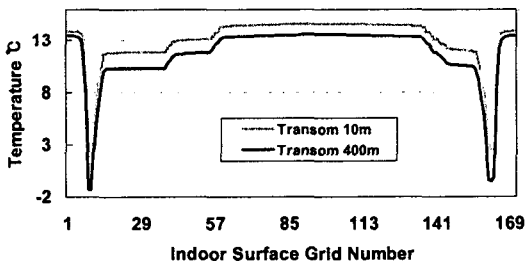
(a) Case A mullion



(b) Case A transom



(c) Case B mullion



(d) Case B transom

Fig. 15 Simulation result comparison of indoor surface temperature between 10 m and 400 m height.

었으며 온도값은 최대 4℃의 오차가 발생하였는데, 각 프로그램 간 격자생성법, 지배방정식의 수치해석법의 상이함에 의해 어느 정도 오차가 발생되는 것으로 생각된다. 본 연구에서 개발된 프로그램과 THERM의 U-factor 값을 비교해 본 결과, 상대오차가 최소 1.46%에서 최대 4.06%로 낮은 오차를 보였다. Fig. 16의 Case B 멀리온(400 m)의 실내 결로발생 길이를 실내상대습도 60%를 기준으로 계산해 본 결과, 비록 각 프로그램 간의 온도값 상대오차가 10% 범위 내에서 발생하지만, 격자 길이가 매우 미소하기 때문에 노점온

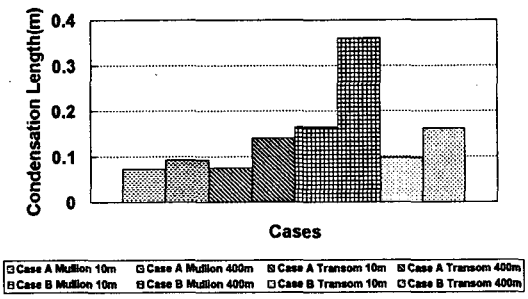


Fig. 16 Comparison of condensation length between 10 m and 400 m height.

도보다 낮은 실내 표면 격자점의 각 길이를 총합한 결로 길이는 세 프로그램 모두 1 cm 이내의 오차를 보였다. 그러므로 본 연구에서 개발된 프로그램은 기존 프로그램과 비슷한 수준의 결과를 제시하는 것을 알 수 있었다.

2.6 초고층 커튼월 외피 시뮬레이션

본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 Fig. 13의 모델(멀리온, 트랜섬)에 대해 2.4.4절의 초고층 외기조건 산정식을 적용하여 10 m와 400 m 높이에서의 커튼월 외피 단열 결로 성능 시뮬레이션을 실시하였다.

10 m 높이에서 측정된 서울 지역 겨울철 평균 풍속 2.2 m/s를 적용하고,[10] 지형조건은 대도시 중심지역을 적용하여 외기의 대류 열전달계수를 10 m 높이에서는 14.8 W/m^2K로, 400 m 높이에서는 36.6 W/m^2K로 산출하였다. 실내외 온도조건은 Table 4의 조건을 적용하였다.

Fig. 15에 10 m 높이와 400 m 높이에서의 실내 표면온도 결과를 모델별로 각각 나타내었다. 10 m 높이보다 400 m 높이에서 열전달계수가 증가하므로 외기의 영향이 커서 실내 표면온도는 저하하는 것을 볼 수 있다.

모델 A의 멀리온과 트랜섬의 실내 표면온도는 높이가 10 m에서 400 m로 높아질 때 전 격자점 평균 각각 1.48℃, 1.39℃ 감소하였고, 모델 B의 멀리온과 트랜섬의 실내 표면온도는 평균 1.5℃, 1.28℃ 감소하는 것으로 나타났다.

또한 실내 상대습도 60%인 경우의 결로 길이를 산정하여 Fig. 16에 표시하였다. 모델 A 멀리온의 실내 표면 결로 길이는 높이가 10 m에서 400 m로 높아질 때 7.2 cm에서 9.2 cm로 27.8% 증가하였으며 트랜섬은 7.5 cm에서 14.1 cm로 88% 증가하였다. 모델 B의 경우 멀리온은 16.5 cm에서 36.1 cm로 118.8% 매우 크게 증가하였으며, 트랜섬 또한 9.7 cm에서 16.2 cm로 67% 증가하는 것으로 나타났다. 모델 B 멀리온의 경우에는 실내외 프레임을 분리하는 단열간봉이 2개 설치되어 있으나, 개스킷으로 실내외 프레임을 분리한 모델 A 멀리온에 비해 효과적이지 못하다는 것을 알 수 있다.

모델 A에 비해 모델 B에서 결로발생 증가량이 큰 것은 실내 쪽으로 돌출된 실내 프레임 길이의 차이로, 모델 A가 모델 B에 비해 실내 프레임 길이가 더 길기 때문에 실내 온도에 의한 영향을 모델 B보다 더 많이 받게 되어 결로발생 증가량이 적은 것으로 판단된다. 이러한 결과로, 초고층화에 의해 발생되는 실내 표면의 온도 저하나 실내 표면 결로 길이는 각 모델 타입의 단면구성에 따라 그 증가폭이 각기 상이한 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 초고층 주거용 건물 외피의 커튼월을 대상으로 2차원 정상상태 열전도 시뮬레이션을 수행하여 커튼월의 열성능을 평가할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다.

(2) 개발된 프로그램은 자동 직사각형 격자생성 루틴을 포함하고 있으며, 실내외 경계조건이 적용되는 부위 설정 또한 멀리온(수직부재)과 트랜섬(수평부재) 각각에 대해 프로그램이 자동 인식하여 설정할 수 있도록 하였다.

(3) 지형조건과 건물 높이에 따른 풍속을 산정하고, 그 풍속에 따른 실외 대류 열전달계수를 산정하여 외피 열성능 해석에 초고층 실외조건을 고려하였다.

(4) 커튼월의 열성능을 평가하기 위하여 결로 길이, 열관류율, 실내 표면 열류량, 실내 표면에서의 결로발생 부위를 계산하여 그림 상에 출력할 수 있도록 하였다.

(5) 동일한 커튼월 모델과 조건으로 열전도 시뮬레이션을 실시하여 기존 프로그램과 그 결과를 비교해 본 결과, 각 프로그램 간 온도값 절대차는 최소 0.029℃(유리부위)에서 최대 3.011℃(프레임부위)의 차이를 보였으나, 90% 이상의 격자점에서 온도값 차이는 0.4℃보다 작았다. 전 격자점에서의 평균 상대오차는 최소 3.17%에서 최대 9.68%로 나타났다.

(6) 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 두 가지 모델(멀리온, 트랜섬)에 대해 초고층 외기조건 산정식을 적용하여 10 m와 400 m 높이에서의 커튼월 외피 단열 결로 성능 시뮬레이션을 실시한 결과, 초고층화에 의해 발생되는 실내 표면의 온도 저하나 실내 표면 결로 길이는 각 모델 타입의 단면구성에 따라 그 증가폭이 각기 상이한 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 개발된 프로그램은 열전도만을 대상으로 하였기 때문에 Glazing cavity와 Frame cavity 내부에서의 대류, 복사현상을 해석하지 못하는 단점이 있다. 또한 시뮬레이션의 결과는 커튼월 외피의 실내외를 100% 기밀한 상태로 가정하고 있기 때문에 실제 Mock-up 시험 결과와는 차이가 있다. 더 정확한 커튼월 외피 열성능 해석을 위해서는 대류, 복사현상을 해석하는 동시에 개스킷 불량에 의한 침기 등을 해석할 수 있도록 프로그램에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04-1)에 의한 것임.

참고문헌

1. Park, S. H., Bae, S. H. and Hong, C. H., 2002, Curtain wall design criteria for condensation-proof and thermal comfort, Proceedings of the SAREK 2002 Winter Annual Conference, pp. 538-542.
2. Chung, M. S., Jeong, C. S. and Seok, H. T., 2005, A study on the heat transmission and condensation performance of curtain-Wall window in high-rise residential buildings, Proceedings of the SAREK 2005 Summer Annual Conference, pp. 783-788.
3. Patankar, S. V., 1988, Numerical heat transfer and fluid flow.
4. Autodesk, Inc., 2004, AutoCAD DXF reference.
5. NFRC, Inc., 2004, NFRC 101-2004 procedure for determining thermo-physical properties of materials for use in NFRC-approved software programs.
6. ASHRAE, 1993, Fundamentals handbook, 22.1.
7. Wind Engineering Research Center, 1984, Knowledge of building wind, p. 22.
8. Chartered Institute of Building Services (CIBS), 1979, Guide Book A.
9. LBNL, 1998, A PC program THREM 2.0, A-12.
10. No, S. T., Cheong, J. S. and Kim, K. S., 2005, Analysis of the thermal performance of curtain walls in high-rise residential buildings, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, pp. 525-532.