

# 공동주택 덕트 부위 구조체의 열성능에 관한 수치적 연구

신우철 / 대전대 건축공학과, 공학박사  
박효순·서항석 / 한국에너지기술 연구소, 공학박사

※ 「건축물의 내단열시공결함에 따른 단열성능 평가에 관한 실험적 연구」, 대한건축학회 논문집

## 1. 서론

건물의 구조체를 통한 관류열손실을 극소화하기 위하여 단열재의 개발과 더불어 시공방법에 따른 열성능평가에 대한 많은 이론과 실험적 연구들이 진행되어 왔다. 벽과 천정의 단열재 시공으로 인한 건물의 총 에너지절감률은 약 55% 정도에 이르는 것으로 보고되어 있는데, 현재 우리나라에서도 부위별 단열재 두께 또는 열관류율의 상한치로서 건물단열을 의무화하는 법적인 규정이 시행됨으로서 많은 개선이 이루어지고 있다. 단열시공은 단열재의 설치위치 및 시공精度에 따라서 결로, 실온변동률, 냉 난방부하 등에도 많은 영향을 미치게 되며, 특히 건축부재의 접합부위에 따라 발생 가능한 열교는 건물전체의 열성능을 크게 저하시킬 우려가 있다. 이와 관련된 연구로서 한국동력자원연구소팀은 건물에 사용되는 발포폴리스티렌 단열재의 단열시공시 발생 가능한 단열결함의 사례 및 이로 인한 결로나 열교현상 등의 문제점을 분석하고 부위별 단열시공방법에 대한 개

선책을 제시하였으며, 김태용 등은 내단열시공에 있어서 단열재 파손이나 시공불량 등과 같은 단열 성능저하요인의 유형을 분류하고 열성능 실험을 통하여 그 정도를 파악하였다.

그러나 최근 들어 단열성능이 크게 강화되고 있는 대부분의 신축 공동주택에서도 비난방공간으로 간주할 수 있는 외기에 면한 duct부위에 대해서는 단열시공이 이루어지지 않는 상태로서, 이부위를 통한 과도한 열손실 발생뿐만 아니라 주변벽체의 열성능까지도 저하시키고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 신축아파트의 도면분석에 의해 추출된 duct부위의 모델을 대상으로, 수치열전달해석을 통하여 열성능을 평가하고 이에 따른 단열개선방안을 제시하였다.

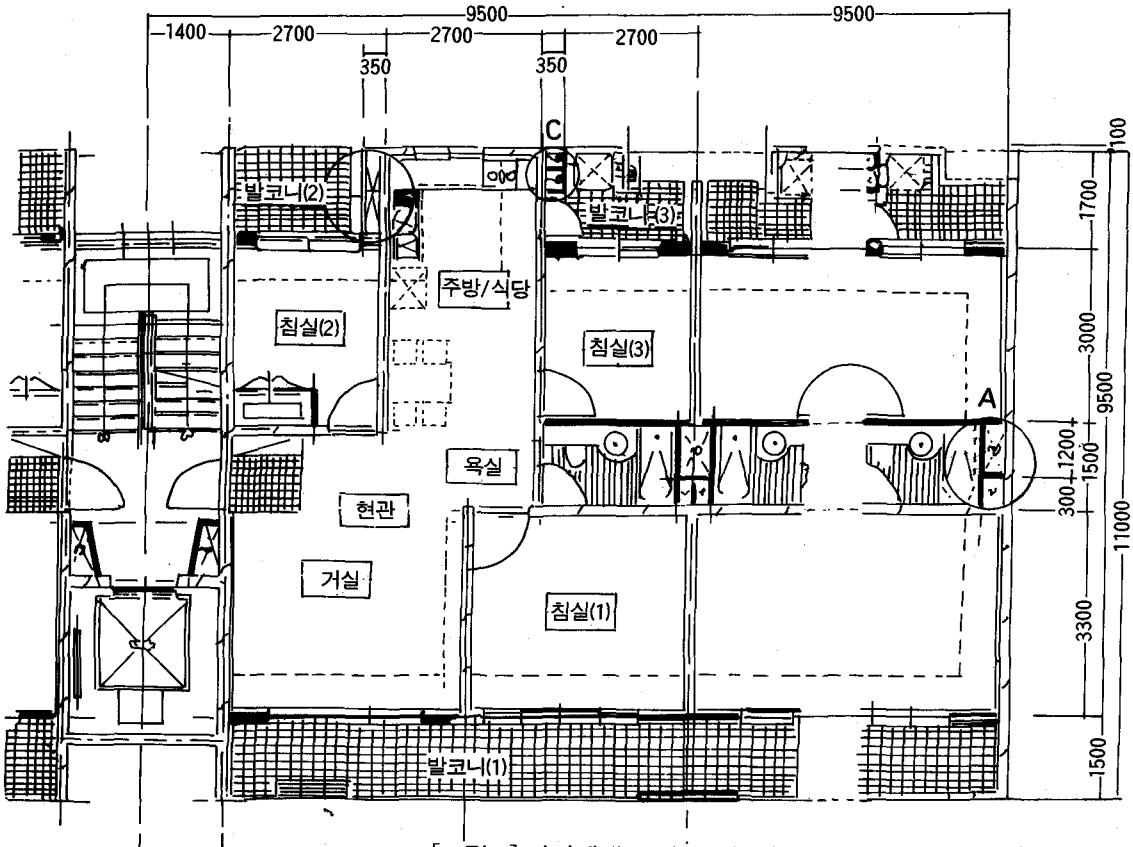
## 2. 기본모델

일반적으로 공동주택의 duct는 급배수관을 위한 pipe duct와 화장실이나 주방의 배기를 위한 air duct로 분류되며 실내공기가 유입되어 배출

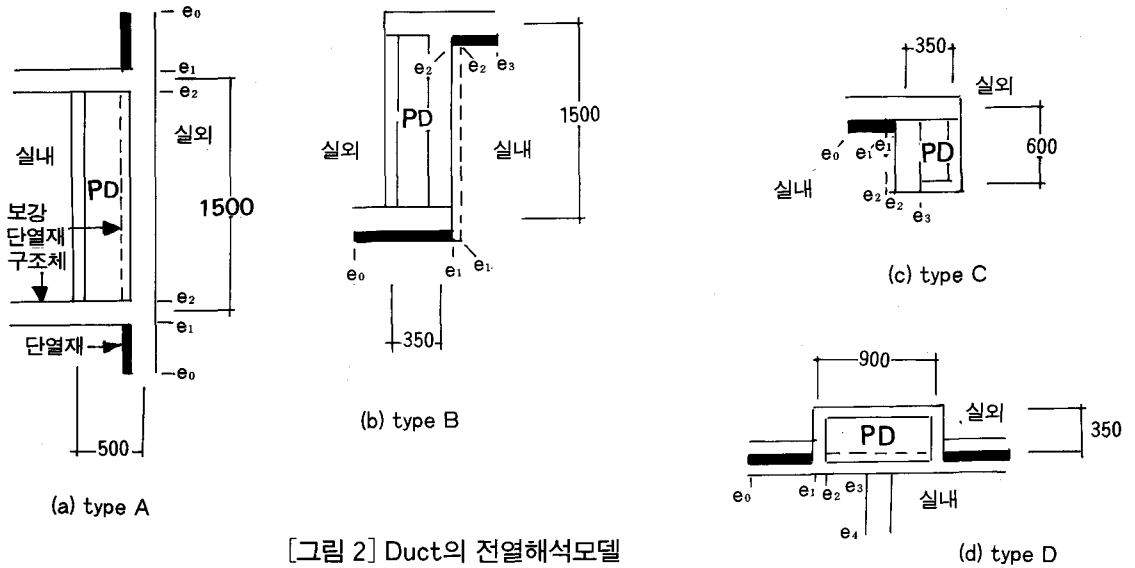
되는 완전개방된 air duct에 비하여, pipe duct의 경우에는 건축법 시행령 46조에 의한 층별방화구획에 따라서 각층마다 급배수관 사이가 차단되어 밀폐공간이 형성된다. (그림 1)은 duct의 단열상태를 분석 검토하기 위해 본 연구에서 선정된 도면으로서 서울방화지구에 신축된 A아파트의 27평형 단위세대 평면도를 나타낸 것이다. 철근 콘크리트 구조로서 외벽체에 대해서는 중단열로, 엘리베이터홀과 같은 비난방공간에 면한 실에는 내단열로서 각각 시공되고 있으나, 외기에 면한 Air 나 pipe duct에는 단열재가 설치되지 않고 있다(이하 모든 duct는 외기에 면한 경우에 한함). 자연배기 시스템의 일종인 air duct의 경우, 외기에 면한 벽체가 단열되지 않을

때 이 면은 냉각면으로서 배기성능을 악화시키고 결로를 발생시키며, pipe duct 경우에는 단열된 주변벽체 사이에서 과도한 열손실을 발생시키는 열적취약부위가 된다. 따라서 본 연구에서는 건물 구조체의 부위별 열성능을 분석하기 위하여 연구 대상 범위를 밀폐된 pipe duct로 한정하고 이에 대한 열전단 현상을 해석하였다.

(그림 2)는 (그림 1)에서 추출한 pipe duct 부위를 전열해석모델로 간단히 나타낸 것으로서 duct는 설치위치에 따라서 외벽중심선에서 실내 쪽으로 설치된 매입형(그림 2(a))과 실외쪽으로 도출되어 설치된 도출형(그림 2(b)~(d))으로 각각 분류할 수 있다. 마감재를 제외하고, 주요 부재를 단열재 및 조적조나 concrete 벽체와 같은 구



[그림 1] 단위세대 평면도



[그림 2] Duct의 전열해석모델

조체만으로 구성하였으며, pipe duct에 연결된 air duct를 무시하고 하나의 공간으로 간주하였다.

이러한 계산모델에 대한 열전달해석을 복사 및 대류경계조건을 갖는 전도문제로 한정하고 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 설정하였다.

1. duct 내부에서의 열원은 없다.
  2. duct는 완전 밀폐상태로서 실내 외로부터의 침기(infiltration)가 없으며 내부공기의 온도는 균일하다.
  3. 실내 외부 공기의 온도는 일정하며 균일하다.
- 위의 가정을 기초로 duct부위의 구조체를 통한 열전달을 아래와 같은 정상상태 2차원 열전도 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_1 \frac{\partial T^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_1 \frac{\partial T^*}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서  $i$ 는 구조체의 각 부재를 나타내며  $T^*$ 는 무차원화된 온도로서 아래와 같다.

$$T^* = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (2)$$

위의 지배방정식을 풀기 위한 경계조건은 다음과 같다.

duct부위와 연결된 주변벽체의 절단면에 대한 단열경계조건,

$$\frac{\partial T^*}{\partial x} = \frac{\partial T^*}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

실내 및 실외측 벽면에 대한 복사 및 대류경계조건,

$$k \frac{\partial T^*}{\partial y} \Big| = q \quad (4)$$

벽체의 표면온도가  $T_s^*$  공기온도를  $T_a^*$ 라고 하면 식(4)의 방열량  $q$ 는 대류열전달량( $q_c$ ) 및 복사열전달량( $q_r$ )의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} q &= q_c + q_r \\ &= (h_c + h_r) (T_s^* - T_a^*) \\ &= h (T_s^* - T_a^*) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $h$ 는 표면열전달률로서 대류열전달률,  $h_c$ 와 복사열전달률,  $h_r$ 의 합으로 표시된다.

대류와 복사열전달률은 벽체표면의 형상, 크기,

유체의 특성과 상태 등의 조건에 따라 각각 계산되는 계수들이나, 통상적으로 열관류율 문제에서는 실용치로서 표면열전달률을 사용할 수 있다. 본 연구에서 사용한 표면열전달률은 ASHRAE에서 제안한 다음값으로서, 이때 벽체의 방사율은 0.9이며 실외측 표면열전달률은 겨울철 외기풍속 6.7m/s를 기준으로 하였다.

[표 1] 표면열전달률

부 위	표면열전달률 (kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C)
실 내 측(h <sub>i</sub> )	7.13
Duct 중공측(h <sub>d</sub> )	5.37
실 외 측(h <sub>e</sub> )	29.24

### 3. 수치해석

경계조건 (3)~(4)를 갖고 있는 지배방정식 (1)을 차분화하기 위하여 유한체적법(finite volume method)을 이용하였으며, 이것을 일반화된 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$a_p T_p = \sum a_{nb} T_{nb} + b \quad (6)$$

식 (6)의 반복계산시마다 duct내부 공기층에 대하여 다음과 같은 에너지평형식을 나타낼 수 있으며, 이 식을 통해 공기온도  $T_{air}^{n+1}$ 를 구할 수 있다.

$$Q = \rho \cdot c_p \cdot V (T_{air}^{n+1} - T_{air}^n) \quad (7)$$

여기서 Q는 duct의 내부 각 벽체에서 내부공기로 전달되는 총방열량으로서 다음과 같다.

$$Q = \sum_i h_s \cdot A_i (T_s - T_{air}) \quad (8)$$

식 (7)에서 계산되는 duct 내부의 새로운 공기온도,  $T_{air}^{n+1}$ 에 대하여 발산을 방지하고 수렴을 촉진하기 위하여 하양이완계수,  $\alpha$ 를 도입하였다.<sup>9)</sup>

$$T_{air}^{n+1} = \alpha T_{air}^{n+1} + (1 - \alpha) T_{air}^n \quad (9)$$

식 (5)으로 이산화된 지배방정식은 심대각 행렬

알고리즘(tridiagonal-matrix algorithm, TDMA)에 의한 ADI(Alternating-Direction Implicit)법으로 반복 계산하였으며, 반복해의 수렴성은 이산화 방정식의 잔차에 대한 이산화방정식의 최대항의 비가  $10^{-6}$ 이하이고 총열손실량에 대한 상대오차가  $10^{-5}$ 이하가 될 때로 판정하였다.

### 4. 계산결과 및 분석

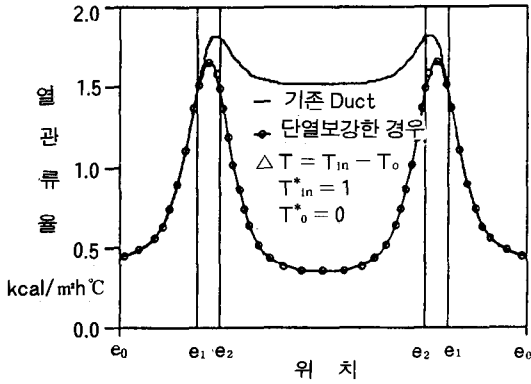
본 연구에서는 그림 2의 4가지 duct 모델을 대상으로 단열상태에 따른 열성능을 정상상태의 2차원 열전달로 해석하고, 구조체 내부의 온도분포 및 관류열손실률로서 비교 분석하였다. 표 2는 이때 사용된 부재의 두께 및 열적물성치를 나타낸 것으로서 콘크리트옹벽과 조적조의 열전도율을 동일한 값으로 가정하였다. 식(2)에 따른 무차원 온도의 도입으로 실내온도( $T_{in}^*$ ) 및 외기온( $T_{out}^*$ )은 1과 0으로 각각 표시된다. balcony의 온도는 외기온으로 간주하였으며 실외측 표면열전달률의 시뮬레이션 조건에 따라 본 결과는 동절기에만 한정된다.

[표 2] 부재의 열적물성치 및 두께

	열전도율(K) (kcal/m·h·°C)	두께 (m)	비 고
단열재	0.035	0.07	
구조체	1.4	0.18	콘크리트옹벽
		0.09	

(그림 3~6)은 각 duct의 열관류율을 실내나 실외의 수직벽면을 따라 도시한 것이다. x축 상의 기호 e는 전열해석모델(그림 2)에 표기된 duct의 각지점을 나타내며, duct와 연결된 주변벽체의 길이는 duct 부위에서 발생하는 2차원 열류가 실내 외의 벽체면을 따라 영향을 미치는 곳까지로 한정하였다.

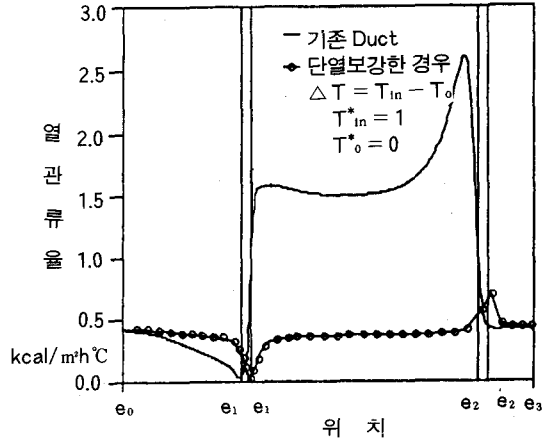
(그림 3)은 type A인 duct의 열관류율을 나타낸 것이다. 실외측 벽면을 따라 나타낸 열손실 부위는 duct 부위( $e_1 - e_2$ )에 주변 외벽체( $e_0 - e_0$ )의



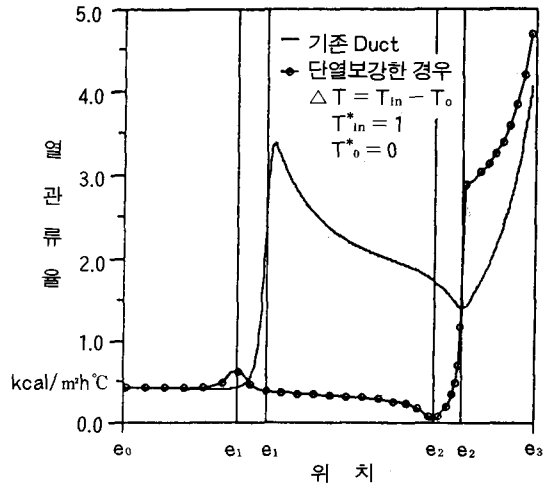
[그림 3] Duct(type A)부위의 열관류율분포

평균 열관류율은 1.41kcal/m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C로서 단열재가 설치되어 있는 기준 외벽체(구조체 180mm+단열재 70mm)의 0.43kcal/m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C와 비교할 때 227.9% 높은 열손실률을 갖게된다. duct 내부에 단열재를 보강한 경우 duct에 면한 부위(e<sub>2</sub>-e<sub>2</sub>)의 평균 열관류율은 감소하게 되나, 단열재가 단절된 외벽체와 내벽체 접속부위 및 주변 외벽체(e<sub>0</sub>-e<sub>1</sub>)에서는 기존 duct와 거의 동일한 열관류율을 나타낸다. 이와같이 단열재가 연속되지 않는 지점에서 발생하는 열교부위(e<sub>1</sub>-e<sub>2</sub>)는 그 두께의 1.5~2배에 이르는 좌우 외벽체의 열성능을 크게 저하시키며, 평균 열관류율은 1.05kcal/m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C에 이른다.

그림 4는 type B에 대한 열관류율을 실내측 벽면을 따라 나타낸 것으로서, 열관류율을 실외벽면을 따라 나타낸 매입형 duct(그림 3)와는 대조적인 분포도를 보인다. 단열재가 설치된 실내 벽면(e<sub>0</sub>-e<sub>2</sub>)에서는 거의 일정한 열관류율을 나타내는 반면 중공층에 면한 부위(e<sub>1</sub>-e<sub>2</sub>)에서 집중적인 열손실이 발생하므로 열손실 부위의 길이를 duct부위(e<sub>1</sub>-e<sub>2</sub>)만으로 한정할 수 있다. 이 부위의 평균 열관류율은 1.63kcal/m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C로서 기준 외벽체에 비해 279.0% 높은 손실률을 나타내며 단열 보강시의 열관류율은 0.36kcal/m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C가 된다. 인입된 모서리 부위(e<sub>2</sub>)의 열손실률은 평균치에



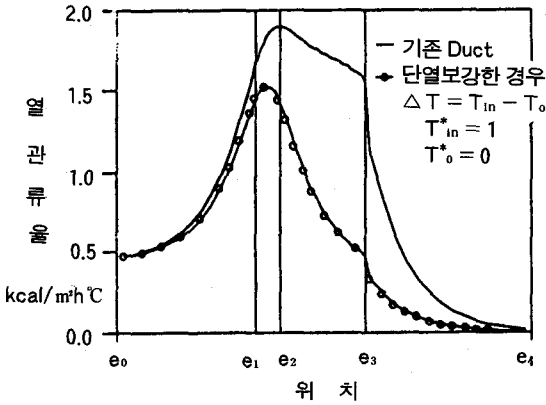
[그림 4] Duct(type B)부위의 열관류율분포



[그림 5] Duct(type C)부위의 열관류율분포

비하여 높은 값을 가지나 도출된 모서리부위(e<sub>1</sub>)에서는 오히려 낮은 값을 나타내며 이러한 경향은 단열재가 설치되어 있지 않는 기존 duct의 경우 더욱 뚜렷해 진다.

실내측 벽면을 따라 나타낸 type C의 duct 부위(e<sub>1</sub>-e<sub>2</sub>) 평균 열관류율(그림 5)은 2.24kcal/m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C로서 실내측에 단열재를 보강할 경우 0.32kcal/m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C로 감소하게 된다. (e<sub>2</sub>-e<sub>3</sub>)의 높은 열관류율은 시뮬레이션상에서 인접한 두지점의

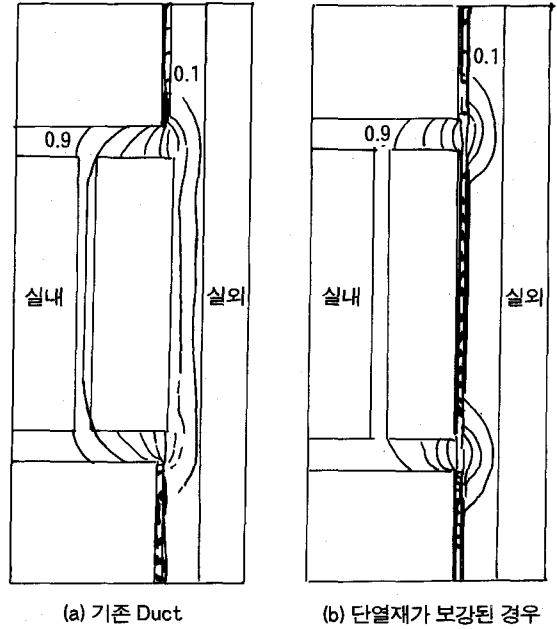


[그림 6] Duct(type D)부위의 열관류율분포

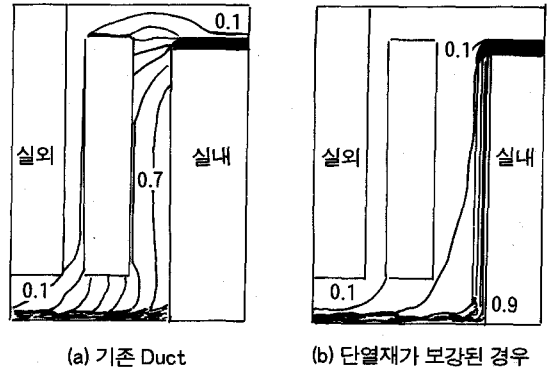
경계 조건 ( $e_3$ 지점을 중심으로 실내외가 구분됨)이 실제조건과 일치하지 않기 때문에 발생하는 수치해석상의 문제로서 실제로는 이보다 낮을 것으로 예상된다.

(그림 6)은 type D의 열관류율을 실내측 벽면을 따라서 도시한 것이다. 열손실 부위는 duct 부위 ( $e_1-e_3$ )에 한정되지 않으며 주변벽체의 주변벽체 및 실내 벽체부위( $e_3-e_4$ )에서도 높은 열관류율을 보이고 있다. 단열재가 단절된 부위( $e_1-e_2$ )에서의 열손실은 기존 duct에 비해 다소 낮으나, 이부위 두께의 4~5배에 이르는 주변벽체 ( $e_0-e_1$ )에서는 거의 동일한 열관류율을 나타낸다. 실내 벽체부위( $e_3-e_4$ )의 열손실량을 포함시켜 계산한 열손실 부위( $e_0-e_3$ )의 평균 열관류율은 기존 duct의 경우  $0.98\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 가 되며 단열보강 시에는  $0.58\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 로 감소한다.

(그림 7~10)은 각 duct 형태별, 벽체 내부에서의 온도분포로서 실내와 실외의 무차원화된 온도를 각각 1과 0로 할 때 0.1 간격의 등온선으로 나타낸 것이며 이 때 열류방향은 등온선의 수직방향이 된다. 단열재가 설치된 부위에서는 조밀한 등온선 분포로서 단열층 내부에 급격한 온도구배가 형성되며 벽면에 수직인 1차원 열류만이 존재하는 것을 알 수 있다. 이와는 대조적으로 단열재가 보강되지 않는 duct 구조체에서는 완만한 온도구



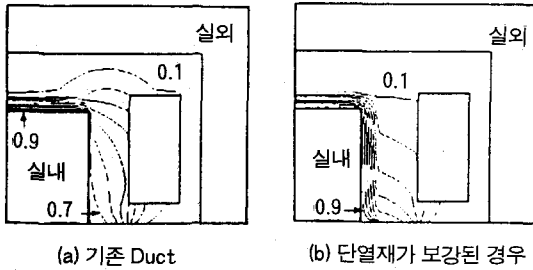
[그림 7] Duct(type A) 내부의 등온선 분포



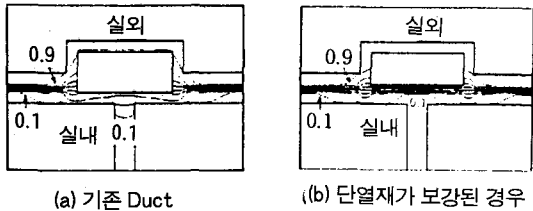
[그림 8] Duct(type B) 내부의 등온선 분포

배의 등온선 분포로서 2차원 열류가 형성되며, 단열된 주변벽체까지 등온선이 확산되고 있다.

따라서 동일 벽체단면에 대한 평균 열관류율 분포가 실내나 실외의 측정벽면에 따라 상이하게 나타난다. 단열재가 단절된 좁은 열교부위에서의 등온선 분포(그림 7(b)와 그림 10(b))는 실내 외



(a) 기존 Duct (b) 단열재가 보강된 경우  
[그림 9] Duct(type C) 내부의 등온선 분포



(a) 기존 Duct (b) 단열재가 보강된 경우  
[그림 10] Duct(type D) 내부의 등온선 분포

쪽으로 확산되는 파장형태로서, 벤츨리관 내부에서의 유체유동이 그리는 유선과 유사한 형태의 열류가 발생하는 것을 알 수 있으며 이에 따라 실내의 양쪽 벽면의 넓은 열손실 부위를 추정할 수 있다. 단열재가 설치되지 않은 duct 부위의 실내측 벽체표면온도 ( $T^*$ )는  $T^* \approx 0.7 \sim 0.8$ 로서 단열보강시,  $T^* > 0.9$ 에 비해 낮은 분포를 나타낸다.

(표 3)은 duct내부의 평균온도( $T^*$ )를 나타낸 것이다. 매입형 duct의 내부온도는 0.53로서 거의 실내 외 온도의 평균값을 갖는데 비해 노출형 duct의 내부온도는 실내측 표면적에 대한 실외측 표면적비의 상대적인 증가에 따라서 0.21~0.34로 감소한다. 노출형 duct의 내단열 보강시 내부온도는 평균 0.1로서의 외기온에 접근한다.

### 5. 결론

본 연구에서는 단열상태에 따른 pipe duct 부위의 열성능을 정상상태의 2차원 열전달로 수치 해석하고, 구조체 내부의 온도분포 및 열관류율로서 비교 분석하였다. 신축아파트의 도면분석에 의해 추출된 duct 부위의 모델을 대상으로 시뮬레

[표 3] duct 내부 공기층의 평균온도

Duct의 형태	내부온도 $T^*$	
	기존 Duct	단열보강시
type A	0.53	0.82
type B	0.33	0.09
type C	0.21	0.10
type D	0.34	0.11

이션한 결과, 단열재가 설치되지 않는 pipe duct의 열손실 부위별 평균 열관류율은 0.98~2.24kcal/m<sup>2</sup>h<sup>2</sup>°C로서 단열된 기준외벽의 0.43kcal/m<sup>2</sup>h<sup>2</sup>°C에 비해 높은 손실률을 나타내었다. 실내측 벽체의 무차원화된 표면온도는 0.7~0.8로서 낮게 유지되며 duct내부의 평균온도는 매입형인 경우에는 0.53을 노출형일 때는 0.2~0.3을 각각 나타내고 있다. 단열보강시 duct 부위의 열성능은 크게 향상되며 벽면에 수직한 1차원 열류만이 존재하게 되나, 구조체 내부의 단열재가 단절된 부위에서는 과도한 열손실과 불균일한 실내 표면 온도를 형성시킬 우려가 있으므로 이 부위의 열교방지를 위하여 단열시공법의 개발과 주의가 요망된다.

### [기호설명]

- a, b : 식 (5)에서 정의된 계수
- $A_i$  : Duct 내부벽체의 면적(m<sup>2</sup>)
- $C_p$  : 공기의 비열(kcal/kg<sup>2</sup>°C)
- h : 표면열전달률 (kcal/m<sup>2</sup>·h·K)
- $h_c$  : 대류열전달률 (kcal/m<sup>2</sup>·h·K)
- $h_r$  : 복사열전달률 (kcal/m<sup>2</sup>·h·K)
- k : 열전도율 (kcal/m<sup>2</sup>·h·°C)
- q : 총방열량 (kcal/m<sup>2</sup>·h)
- $q_r$  : 복사열전달량 (kcal/m<sup>2</sup>·h)
- $q_c$  : 대류열전달량 (kcal/m<sup>2</sup>·h)
- Q : Duct 내부벽체의 총표면방열량
- $T_s$  : 벽체의 표면온도(K)
- $T_a$  : 공기온도 (K)
- V : duct 내부 공기층의 체적
- x, y : 직교좌표계(m)

### [참자]

- \* : 무차원수
- i : 실내측
- o : 실외측
- s : Duct내부
- n : 반복계산횟수

### [그리스문자]

- $\alpha$  : 하양이완계수
- $\rho$  : 공기의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)