



## 공동주택의 준공연도에 따른 단열성능 평가 및 에너지소비 특성에 관한 연구

### *Energy Consumption Characteristics and Evaluation of Thermal Insulation Performance in Accordance with Built Year of Apartment Complex*

최두성\* · 이명은\*\* · 전흥찬\*\*\*

Choi, Doo Sung\* · Lee, Myung Eun\*\* · Chun, Hung Chan\*\*\*

\* Dept. of Architecture, Chungwoon University, South Korea (trebelle@chungwoon.ac.kr)

\*\* Corresponding author, Dept. of Architecture, Suwon University, South Korea (pigbab@naver.com)

\*\*\* Dept. of Architecture, Suwon University, South Korea (chun4575@nate.com)

#### ABSTRACT

This study aimed at developing and evaluating performance of the two logics for respectively operating two-position and variable-heating systems. Both logics control the heating system and openings of the double skin facade buildings in an integrated manner. Artificial neural network models were applied for the predictive and adaptive controls in order to optimally condition the indoor thermal environment. Numerical computer simulation methods using the MATLAB (Matrix Laboratory) and TRNSYS (Transient Systems Simulation) were employed for the performance tests of the logics in the test module. Analysis on the test results revealed that the variable control logic provided more comfortable and stable temperature conditions with the increased comfortable period and the decreased standard deviation from the center of the comfortable range. In addition, the amount of heat supply to the indoor space was significantly reduced by the variable control logic. Thus, it can be concluded that the optimal control method using the artificial neural network model can work more effectively when it is applied to the variable heating systems.

#### KEYWORD

최적제어,  
인공신경망,  
발정제어,  
가변제어,  
이중외피

Optimal controls,  
Artificial neural networks,  
Two-position controls,  
Variable controls,  
Double skin facades

#### ACCEPTANCE INFO

Received April 18, 2014

Final revision received June 19, 2014

Accepted June 23, 2014

© 2014 KIEAE Journal

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

한해 건축물에서 소비되는 에너지는 국내 에너지 사용량의 25%를 차지할 정도로 엄청나지만, 건축물 상당수가 단열기준이 법적으로 강화되기 이전에 지어져 에너지 절감이 쉽지 않은 상태다. 특히, 공동주택의 경우 통계조사에서 주거용 건축물 중 47%를 차지하고 있으며, 단열기준<sup>1)</sup>이 법적으로 강화된 1991년 이전에 시공된 공동주택은 전체의 약 27%를 차지하는 것으로 나타났다.<sup>2)</sup> 또한 10년 후에는 준공 후 25년을 넘기는 공동주택이 전국에 185만 가구 이상으로 공동주택이 밀집된 수도권 신도시와 대도시에서는 동시적 집단 노후화로 주택시장의 불안정 등 사회문제와 공동화라는 도시문제가 대두될 수 있으므로 노후주택에 대한 관리 및 정비의 필요성이 크게 부각되고 있다.

건축물의 단열성능은 현장시공의 견실도, 단열재의 경년변화에 따른 열화, 벽체내부의 흡습상태 변화, 구조적 결함에 의한 크랙의

발생 등에 의하여 초기 설계 시에 의도된 단열성능과는 다른 열적 특성을 지니게 되는 경우가 많으며, 이러한 단열성능의 변화는 곧 에너지 사용량의 증대라는 의미를 가지게 된다. 따라서 단열성능에 대한 정량적인 평가가 필요하나 현재 국내에서는 이를 위한 평가 방안 및 기준 등에 관한 대책 마련이 미비한 것으로 나타났다. 이러한 상황에서 국토교통부에서는 사전에 단열성능을 예측·평가하여 상호 및 벽체접합부 등에서 예상되는 결로 현상을 방지할 수 있는 가이드라인<sup>3)</sup>을 제시하였으나, 기존 건축물에 이를 적용하는 방안에 대한 기준은 제시되어 있지 않다. 또한 기존 건축물을 대상으로 단열성능에 대한 연구 사례를 살펴보면 노후건물을 대상으로 하는 정량적 평가가 주를 이루고 있으며, 단열성능의 상태변화와 더불어 에너지소비 특성에 관한 연구는 미미한 것으로 나타났다.

이에 본 연구에서는 다수의 공동주택을 대상으로 준공연도에 따른 단열성능의 변화를 평가하고, 건물의 준공연도에 따른 단열성능의 저하로 나타나는 에너지소비 특성에 대한 분석을 목적으로 하였다. 단

1) 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙(국토교통부령 제52호), 국토교통부, 2013

2) 2013년도 국토교통 통계연보, 국토교통부, 2013

3) 공동주택 결로 방지를 위한 설계기준(국토교통부고시 제2013-845호), 국토교통부, 2013

열성능의 경우 주택건설기준 등에 관한 규정에서 제시하고 있는 온도차 비율(TDR, Temperature Difference Ratio) 평가 방법을 이용하였으며, 또한 온도변화에 따라 발생하는 현열량(Sensible heat flux)을 산출·분석하였다. 에너지소비 특성의 경우 측정대상의 단열성능 평가 결과와 함께 겨울철 발생하는 난방비용을 비교·분석하였다.

### 1.2. 연구의 범위 및 방법

단열성능의 정량적인 분석을 위해 실내 온도조건을 일정하게 유지하기 위한 시스템과 열류계측이 필요하나, 다수의 공동주택을 대상으로 이를 측정·분석하기에는 여건상 적용이 불가능함에 따라 실내온도는 주택의 적정설계 온도로 설정하고, 외부 벽체의 표면온도 측정 결과를 이용하여 외표면 온도차 비율(TDRo, Temperature Difference Ratio outside)을 산출하였다. 또한 현장에서 일정 높이의 풍속을 측정하고, 열화상카메라를 통해 촬영된 측정부위에서의 풍속을 예측하여 현열량을 산출·분석하였다.

위의 산출방법을 활용하여 준공연도에 따른 단열성능을 평가하기 위한 연구범위로는 동일한 외벽 단열조건(설계기준)을 만족할 수 있는 중부지방 내 위치한 공동주택을 평가대상으로 하였다. 또한 준공연도별 온도차 비율 및 현열량, 난방비용의 변화를 분석하기 위해 최근 5년 이내에 준공된 공동주택에서부터 25년 이상의 노후공동주택을 평가대상 범위로 선정하고, 현장에서 열화상카메라를 통해 벽체의 외부 표면온도를 측정하고 계측기를 이용하여 현장의 기상상태를 기록하였다. 단, 외부에서는 세대별로 발코니 확장 및 비확장 여부를 판단할 수 없으므로 정면부와 후면부를 제외한 외기와 직접 면하는 세대벽의 표면온도를 측정하였으며, 연구의 방법으로는 다음과 같다.

① 단열성능을 평가하기 위한 방안으로 벽체 외표면 온도차 비율 및 현열량 산출방법과 건물 외표면의 온도분포 특성을 분석할 수 있는 열화상카메라 촬영방법 및 측정 기본 조건 등에 대한 이론적 고찰과 관련연구 동향에 대한 분석을 수행하였다.

② 동일한 벽체 열관류율 설계기준<sup>4)</sup>을 고려하여 중부지방(서울 및 경기) 내 위치한 공동주택을 선정 후 최근 5년 이내에 준공된 공동주택에서부터 25년 이상 된 공동주택을 준공연도별로 구분하고, 이론적 고찰을 통해 정립된 촬영기법 및 조건 등을 토대로 건물의 외표면 온도를 측정하였으며, 동시에 디지털 계측기를 이용하여 현장의 외기온도 및 풍속 등의 기상상태를 측정·기록하였다.

③ 현장에서 측정·기록된 결과 값을 이용하여 외표면 온도차 비율 및 현열량을 산출하였으며, 준공연도에 따른 단열성능의 변화를 분석하였다.

④ 측정대상의 난방비용을 조사하고 단열성능 평가결과와 비교·분석을 통해 준공연도와 단열성능의 변화가 에너지소비 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 이론적 고찰 및 관련연구 동향

### 2.1. 온도차 비율(TDR) 및 현열량(Sensible heat flux)

건축물 외피의 온도분포를 일시에 포착할 수 있는 적외선(IR :

4) 건축물 에너지절약 설계기준(국토교통부 고시 제2013-587호), 국토교통부, 2013

Infrared) 열화상카메라를 활용하여 측정대상 외벽의 온도분포를 측정하였으며, 이의 평가수단으로서 온도차 비율 및 측정부위(세대 벽)의 단위면적당 현열량 산출을 통해 정량적인 단열성능을 평가·분석하였다.

#### 1) 외표면 온도차 비율(TDRo)

건축물 외부에서 촬영된 벽체 외부 부위의 단열성능 판정 지표로서 식 1에서와 같은 방법으로 산출된다.

$$TDRo = \frac{T_o - T_{os}}{T_i - T_o} \quad (식 1)$$

여기서,  $T_i$  : 실내온도(°C)  
 $T_o$  : 외기온도(°C)로서 일출 직전 측정된 온도 (일몰 후 최소 8시간 이후)  
 $T_{os}$  : 외피의 표면온도(°C)

TDRo가 의미하는 바는 단열상태가 우수할수록 실외표면온도는 외기온도와 가까워지므로 0에 수렴하게 되며, 단열상태가 불량할수록 실내온도에 접근하게 되어 -1에 수렴한다는 가정에 근거하고 있으며, 다음의 Table 1에서는 외표면 온도차 비율의 산출을 위한 측정 기본 조건을 나타낸다.

Table 1. Basic Measurement Conditions for Calculating TDRo

Measuring element	TDRo
Indoor temperature	Indoor temperature within 2m away from the internal wall surface (°C)
Outdoor temperature	Applying the outdoor temperature upon measurement
Interior surface temperature	-
Exterior surface temperature	Distribution of outer surface temperature of measured area
Wind velocity	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ambient wind speed : Calculated TDRo upon 2 m/s</li> <li>Maximum wind speed for TDRo measurement : Stopped the measurement when it was below 3m/s or above 3m/s</li> <li>Measurement of the wind speed around the building is necessary(TDRo calibration is necessary in line with wind speed)</li> </ul>
Measurement Time	Measurement can be done right before sunrise when the impact of insolation is minimized, but the shooting was done at least 8 hours after sunset.
Weather conditions	TDR was calculated only when the difference between the indoor temperature and average temperature during the past 3 ambient days was at least 10°C.

#### 2) 현열량(Sensible heat flux)

현열은 물질의 온도 변화 과정에서 상태의 변화 없이 흡수되거나 방출된 열에너지를 의미하는 것으로 TDRo와 함께 단열성능의 정량적인 평가 방안으로 식 2에서와 같은 방법으로 산출된다.

$$H = \int_{all\ surfaces} \alpha_{\epsilon_i} (T_{s_i} - T_{air_i}) dS \quad (식 2)$$

여기서,  $H$  : 현열량(kW)  
 $\alpha_c$  : 대류열전달계수( $kW/^\circ C \cdot m^2$ )<sup>5)</sup>  
 $T_s$  : 외피의 표면온도( $^\circ C$ )  
 $T_{air}$  : 외기온도( $^\circ C$ )  
 $S$  : 면적( $m^2$ )

대류열전달계수의 경우 풍속에 따라 변화하게 되므로, 현장에서 높이 1m의 풍속을 측정하고 데콘공식<sup>6)</sup>을 활용하여 측정부위 높이에서의 풍속을 예측하여 산출한다.

## 2.2. 적외선 촬영법(KS F 2829)

본 연구에서는 건축물의 단열성능을 평가하기 위하여, 국제 규격인 ISO 6781을 기초로 한 한국표준협회에서 제시한 KS F 2829 (2005) 규격으로 적외선 촬영법에 의한 건축물의 단열성능을 측정·평가하였다.

열화상 측정방법에 대한 일반적인 요구 조건은 우선 측정대상 건축물 외피에 대한 이해와 표면 마감 재료의 방사율<sup>7)</sup> 값을 적용하여 측정하며, 측정 시 외기온도, 운량, 강우량, 그리고 풍속과 함께 건축물 외 표면의 결합상태 등을 기록한다. 또한 적외선 열화상 계측 장비는 장비의 사용법에 따라 조정·운용하며 민감도 및 촬영 거리, 각도 등은 측정 대상 외피의 온도 범위에 맞도록 적절하게 조정하여 사용한다.

열화상 계측 장비를 이용하여, 온도차 비율에 의한 정량적인 단열성능 평가를 목적으로 할 경우에는 다음의 제시하는 사항을 준수하여 촬영한다.

- ① 실내온도와 과거 3일간 외기온도와와의 일평균 온도차가  $10^\circ C$  이상인 날에 측정한다.
  - ② TDRo를 평가를 위한 측정 시간은 일출 직전으로 하되, 최소한 일몰 후 8시간 이후에 측정되어야 한다.
  - ③ 측정 당시의 외기 풍속이  $3m/s$  이하일 경우에 측정되어야 하며, 현장 외기 풍속을 측정하여 TDRo의 보정에 사용되어야 한다.
- 위와 같은 사항을 만족하는 열화상 계측 장치로 본 연구에서 실측을 위해 사용한 계측 장치의 개요는 다음의 Table 2에 나타낸다.

Table 2. Overview of Thermo-graphic Camera

Thermo-graphic Camera (FLIR T620)	
Temperature range	$-20^\circ C$ to $+150^\circ C$
Accuracy	$\pm 2^\circ C$ or $\pm 2\%$ (reading)
Wavelength range	$7.8\mu m \sim 14\mu m$
Viewing angle	수평 $25^\circ \times$ 수직 $19^\circ$
Emissivity rang	0.01 ~ 1.0
IR Resolution	$640 \times 480$ 픽셀



## 2.3. 국내·외 단열성능 평가 연구동향

### 1) 국내 연구동향

적외선 열화상 계측 장치는 단순 현장 촬영을 통해 열적성능의 결

함부위를 검지하는 목적으로 사용되는 경우가 대다수였으며, 이를 이용한 건축물에서의 단열성능평가에 관한 국내연구는 거의 전무한 상황으로 나타난다.

그중 (煎)대한주택공사 부설 주택연구소에서는 공동주택 단열성능 진단 및 개선방안 연구에서 적외선 열화상카메라를 이용하여 공동주택의 단열시공 상태 및 열적 취약부위에 대한 진단 및 평가를 실시하였고, 그에 따라 공동주택 외피의 단열설계 및 시공기술의 개선사례를 제시한 바 있으며, 최경석 외 1인은 적외선 열화상을 이용한 공동주택 단열성능 평가 연구에서 최적 단열설계 방안 도출을 목적으로 경로 발생 위험도를 평가할 수 있는 온도차 비율을 이용한 단열성능 평가 연구를 수행하였다. 또한 박정훈 외 1인은 동계 아파트 외표면 온도에 의한 단열성능 평가 연구에서 열교현상으로 인하여 경로가 우려되는 부위를 찾고 보수보강을 위한 기초자료 제공을 목적으로 겨울철 외기온도와 외표면 온도 분포 및 변화를 측정·분석하였다.

### 2) 국외 연구동향

국외의 경우 1980년대를 거치면서 건물 외피의 현장 열성능 평가와 관련된 연구가 활발히 진행되었으며, 측정기기 및 분석기법 등에 관한 기본 원리가 제시되었다.

스웨덴에 Petterson 외 1인은 난방기간 동안 적외선 열화상 계측 장치를 통해 기존 건물 벽체에서 열 누출 부위를 탐지하고 표면의 온도 분포 특성을 분석하여 현장 평가방법으로 적외선 열화상 측정법에 대한 유효성을 제시하였다. 또한 일본의 Akira Hoyano 외 2인은 일반 주택을 대상으로 여름과 겨울철 열화상카메라를 이용하여 건물 외피 요소별 외표면 온도를 측정하였으며, 벽체 및 창호 등에서 발생하는 현열량 산출을 통해 건물이 사용되는 기간 동안의 정량적인 단열성능 평가에 관한 연구를 수행하였다.

이상 국내·외 연구동향을 살펴본 바 참고자료로 활용하기 위한 용도로써 적외선 열화상 카메라를 이용하여 단열성능의 결합 여부 및 시공기술, 설계기준에 대한 제시를 목적으로 하는 연구가 주를 이루고 있으며, 건물의 노후화에 따른 정량적인 단열성능 평가에 관한 연구는 미미한 것으로 나타났다.

## 3. 공동주택의 단열성능 평가 및 검증

### 3.1. 평가범위 및 방법

#### 1) 측정대상

동일한 외벽 단열조건(설계기준)을 만족하는 공동주택의 준공연도별 단열성능을 평가하기 위하여, 1978년에서부터 2012년까지 준공된 서울 및 경기지역 내 위치한 총 86개의 공동주택을 선정하였으며, 측정대상의 개요는 다음의 Table 3에 나타낸다.

#### 2) 측정부위

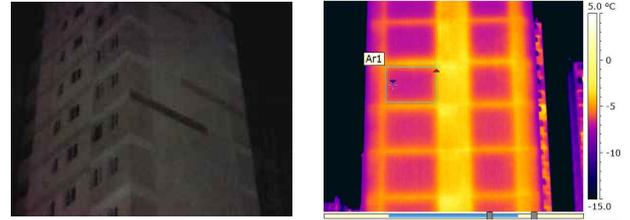
공동주택의 단열성능 평가를 위하여 선정된 대상 건물의 측정부위는 세대별로 발코니 확장공사 등에 따라 열화상 패턴이 상이하게 나타나므로 세대 정면부와 후면부 측정은 제외하였으며, 난방공간(침실)과 외기가 직접 면하는 외표면(세대측벽)의 온도를 측정하였다. 단, 측정 시 최대한 인접건물의 영향을 받지 않으며, 하부층의 경

5) JuK rges' equation, e.g. Cole and Sturrock, 1997

6) Deacon' equation, eg.

7) 같은 온도의 물체와 흑체(black body)면과의 방사도(放射度)의 비율

우 주변 수목 또는 가로등 등의 영향으로 측벽 전체의 열화상 패턴을 분석하기 어렵고 상부층의 경우 열화상 카메라의 특성 상 측정물체와의 거리 및 풍속의 영향이 나타나므로 측정거리 10m 이내에 위치한 중간층(5~8층 중 1개층) 측벽을 대상으로 측정하였다. 또한 일몰 후 8시간 이후에 촬영을 실시했으나 낮 동안 일사의 영향으로 벽체의 축열상태를 고려하여 동(E) 또는 남동(SE) 사이에 위치한 세대를 선정하였으며, 다음의 Fig 1에서는 측정부위(a) 및 열화상카메라를 통해 촬영되는 열화상 패턴(b)을 나타낸다.



a. Site-Photo b. Thermography Patterns  
Fig 1. Measured area & Thermography Patterns

Table 3. Overview of Measurement Target

Measurement target	Bult Year	Total floor area (m <sup>2</sup> )	Household area (m <sup>2</sup> )	Floor type	Heating method	Measurement target	Bult Year	Total floor area (m <sup>2</sup> )	Household area (m <sup>2</sup> )	Floor type	Heating method
CASE_1	1978	128,992	162 ~ 226	Walk up	Central	CASE_44	2000	106,787	59	Walk up	District
CASE_2	1984	41,989	83 ~ 109	Walk up	Central	CASE_45	2000	172,823	49 ~ 84	Walk up	District
CASE_3	1984	52,505	84	Walk up	Individual	CASE_46	2000	78,757	49 ~ 59	Walk up	District
CASE_4	1985	110,354	46 ~ 47	Walk up	Individual	CASE_47	2001	99,640	75 ~ 84	Walk up	District
CASE_5	1986	81,133	74 ~ 86	Walk up	District	CASE_48	2001	28,201	59 ~ 84	Walk up	District
CASE_6	1986	109,365	63 ~ 126	Walk up	Central	CASE_49	2001	99,837	84	Walk up	District
CASE_7	1986	29,415	39 ~ 46	Walk up	Individual	CASE_50	2001	18,994	39 ~ 49	Hallway	District
CASE_8	1986	21,687	38 ~ 47	Walk up	Individual	CASE_51	2001	109,194	49 ~ 59	Walk up	District
CASE_9	1987	19,035	59 ~ 79	Hallway	Individual	CASE_52	2001	,???	99 ~ 118	Walk up	District
CASE_10	1987	93,282	54 ~ 75	Hallway	District	CASE_53	2002	90,565	40 ~ 59	Walk up	District
CASE_11	1987	123,671	61 ~ 75	Walk up	District	CASE_54	2002	78,205	84	Walk up	District
CASE_12	1987	114,785	54 ~ 75	Walk up	District	CASE_55	2002	53,700	66	Walk up	District
CASE_13	1988	18,421	25 ~ 46	Walk up	Individual	CASE_56	2003	105,708	75 ~ 84	Walk up	District
CASE_14	1988	55,720	51 ~ 79	Walk up	Individual	CASE_57	2004	121,539	75 ~ 84	Walk up	District
CASE_15	1989	23,355	51 ~ 59	Walk up	Individual	CASE_58	2004	79,033	49 ~ 62	Hallway	District
CASE_16	1989	14,864	39 ~ 46	Walk up	Individual	CASE_59	2004	119,018	75 ~ 84	Walk up	District
CASE_17	1989	52,474	39 ~ 47	Walk up	Individual	CASE_60	2005	24,740	51	Walk up	District
CASE_18	1990	65,720	39 ~ 46	Walk up	Individual	CASE_61	2006	48,409	52 ~ 66	Hallway	District
CASE_19	1990	30,236	39 ~ 46	Walk up	Individual	CASE_62	2006	73,557	46 ~ 59	Walk up	District
CASE_20	1990	61,290	75 ~ 84	Walk up	Individual	CASE_63	2006	82,624	36 ~ 51	Walk up	District
CASE_21	1990	26,496	39 ~ 46	Walk up	Individual	CASE_64	2006	57,518	51 ~ 59	Walk up	District
CASE_22	1991	44,862	39 ~ 47	Walk up	Individual	CASE_65	2006	17,645	39 ~ 46	Hallway	District
CASE_23	1991	87,995	38 ~ 44	Hallway	Central	CASE_66	2008	59,403	36 ~ 52	Walk up	District
CASE_24	1992	41,545	39 ~ 47	Walk up	Individual	CASE_67	2008	49,693	46 ~ 51	Hallway	District
CASE_25	1992	25,828	31	Hallway	District	CASE_68	2008	81,190	36 ~ 56	Walk up	District
CASE_26	1992	39,019	52 ~ 84	Walk up	Individual	CASE_69	2008	131,993	75 ~ 84	Walk up	District
CASE_27	1992	70,470	33 ~ 49	Hallway	District	CASE_70	2008	31,913	66	Hallway	District
CASE_28	1992	73,223	36 ~ 49	Hallway	Central	CASE_71	2008	72,937	36 ~ 51	Walk up	District
CASE_29	1992	59,333	54 ~ 106	Walk up	Individual	CASE_72	2009	49,632	74 ~ 84	Walk up	District
CASE_30	1992	28,198	37 ~ 84	Walk up	District	CASE_73	2009	45,233	74 ~ 84	Walk up	District
CASE_31	1993	121,520	84	Walk up	District	CASE_74	2009	66,333	75 ~ 84	Walk up	District
CASE_32	1994	76,184	80	Hallway	District	CASE_75	2009	53,607	74 ~ 84	Walk up	District
CASE_33	1997	53,784	49 ~ 59	Hallway	District	CASE_76	2009	71,437	36 ~ 51	Hallway	District
CASE_34	1997	295,717	49 ~ 59	Walk up	District	CASE_77	2010	42,000	85	Walk up	District
CASE_35	1997	141,199	49 ~ 59	Walk up	District	CASE_78	2010	92,404	36 ~ 59	Walk up	District
CASE_36	1997	88,704	49 ~ 59	Walk up	District	CASE_79	2010	108,955	36 ~ 59	Walk up	District
CASE_37	1998	48,269	59	Walk up	Individual	CASE_80	2010	93,230	59	Walk up	District
CASE_38	1998	60,283	59 ~ 84	Walk up	Individual	CASE_81	2011	86,833	26 ~ 51	Hallway	District
CASE_39	1998	40,803	38 ~ 49	Hallway	Individual	CASE_82	2011	54,240	46 ~ 51	Walk up	District
CASE_40	1999	113,728	49 ~ 59	Walk up	District	CASE_83	2011	76,876	36 ~ 51	Walk up	District
CASE_41	1999	115,784	49 ~ 59	Walk up	District	CASE_84	2012	56,207	74 ~ 84	Walk up	District
CASE_42	1999	85,470	49 ~ 59	Walk up	District	CASE_85	2012	81,850	74 ~ 84	Walk up	District
CASE_43	1999	125,099	49 ~ 59	Walk up	District	CASE_86	2012	115,998	74 ~ 84	Walk up	District

3) 측정일시 및 기상조건

건물의 단열성능을 정량적으로 평가하기 위해 앞서 2.2절에서 제시한 준수사항을 만족하는 범위에서 촬영하였으며, 다음의 Table 4에서는 측정일시에 대한 개요를 나타낸다.

Table 4. Overview of Measurement Date

Date	2014.01.01 ~ 2014.01.31
Time	AM 02 ~ 06
Weather conditions	Day when the difference between indoor and outdoor temperature was at least 10°C
	Day when the wind speed was below 3m/s
	Day when the amount of clouds was below 7 (clear)
	Excluding rainy or snowy days and the next day

공동주택 외표면의 온도측정은 적외선에 의한 열화상카메라를 통해 촬영·측정하였으며, 측정온도 및 방사율 오차를 줄이기 위하여 측정 전 표면 접촉식 온도계를 통해 외표면의 온도를 측정하였다. 또한 현장의 외기온도 및 풍속의 경우 다기능 디지털 계측기(온도, 풍속, 습도, 압력 등)를 통해 측정하였다.

3.2. 단열성능 평가 및 난방비용 분석결과

앞서 제시한 평가범위 및 방법에 따라 외기온도 및 외표면 온도를 측정하였으며, 온도 계측결과 및 TDRo, 현열량, 대류열전달계수, 난방비용 분석결과를 다음의 Table 5에 나타낸다.

Table 5. Analysis of TDRo & Heating Cost of Measurement Target

Measurement target	Outdoor temperature (°C)	Exterior surface temperature (°C)	TDRo	Convective heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> K)	Sensible heat flux (kW/m <sup>2</sup> )	Heating cost (W/m <sup>2</sup> )	Measurement target	Outdoor temperature (°C)	Exterior surface temperature (°C)	TDRo	Convective heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> K)	Sensible heat flux (kW/m <sup>2</sup> )	Heating cost (W/m <sup>2</sup> )
CASE_1	-7.50	-4.40	-0.105	6.02	22.60	2,285	CASE_44	-4.00	-1.20	-0.108	5.34	16.14	981
CASE_2	-10.10	-5.00	-0.159	6.36	41.07	1,623	CASE_45	-5.20	-3.60	-0.069	5.51	9.83	1,065
CASE_3	-7.20	-5.60	-0.055	6.36	12.89	-	CASE_46	-3.00	-1.40	-0.064	5.34	9.22	946
CASE_4	3.30	5.20	-0.102	6.02	13.85	-	CASE_47	2.90	4.30	-0.073	-	8.07	707
CASE_5	2.80	4.70	-0.099	6.36	15.30	858	CASE_48	-9.00	-7.40	-0.052	5.34	9.22	946
CASE_6	-5.70	-4.30	-0.051	5.68	9.14	1,748	CASE_49	-9.50	-8.50	-0.032	5.68	6.53	808
CASE_7	-4.50	-3.60	-0.034	5.34	1.15	-	CASE_50	-10.10	-9.10	-0.031	5.68	6.53	697
CASE_8	-3.80	-3.20	-0.023	5.34	3.46	-	CASE_51	-9.50	-8.90	-0.019	5.34	3.46	898
CASE_9	-6.80	-1.80	-0.174	5.34	28.82	-	CASE_52	-9.10	-8.70	-0.016	6.36	3.22	687
CASE_10	-4.90	-1.40	-0.130	5.34	20.17	950	CASE_53	1.20	3.20	-0.096	5.17	11.53	1,087
CASE_11	-5.00	-4.30	-0.026	5.34	5.76	940	CASE_54	-3.00	-0.70	-0.092	5.34	13.26	758
CASE_12	-4.60	-4.30	-0.011	5.34	1.73	987	CASE_55	-3.40	-1.60	-0.071	5.34	10.37	734
CASE_13	-7.50	-2.70	-0.163	5.68	31.33	-	CASE_56	2.80	4.90	-0.109	5.17	12.10	913
CASE_14	-6.00	-3.80	-0.079	6.02	16.04	-	CASE_57	-10.50	-7.10	-0.105	6.02	24.79	861
CASE_15	-7.70	-4.30	-0.114	5.34	19.60	-	CASE_58	-9.50	-7.50	-0.063	5.34	11.53	685
CASE_16	-4.30	-3.00	-0.049	6.36	10.47	-	CASE_59	-9.30	-8.00	-0.042	5.34	7.49	704
CASE_17	-7.20	-6.10	-0.038	5.34	6.34	-	CASE_60	-9.50	-7.40	-0.067	7.21	20.92	754
CASE_18	2.80	5.50	-0.141	5.17	15.56	-	CASE_61	-10.90	-7.70	-0.097	6.02	23.33	622
CASE_19	-4.30	-2.30	-0.076	5.34	11.53	-	CASE_62	-4.40	-3.00	-0.053	5.68	9.14	708
CASE_20	-7.60	-5.60	-0.068	5.68	13.05	-	CASE_63	-3.90	-2.70	-0.046	5.34	6.92	677
CASE_21	-7.00	-5.80	-0.041	5.34	6.92	-	CASE_64	-9.70	-8.70	-0.032	5.68	6.53	980
CASE_22	-8.00	-3.80	-0.140	6.70	37.03	-	CASE_65	-9.50	-9.40	-0.003	5.34	0.58	539
CASE_23	2.50	5.20	-0.138	5.17	15.56	1,985	CASE_66	-10.90	-7.20	-0.112	7.04	35.45	534
CASE_24	2.80	5.40	-0.135	5.17	14.98	-	CASE_67	-11.30	-8.80	-0.075	5.34	14.41	501
CASE_25	3.40	4.90	-0.081	5.85	10.36	641	CASE_68	-10.90	-8.60	-0.070	8.40	29.04	565
CASE_26	-7.80	-5.60	-0.074	7.72	24.44	-	CASE_69	-10.90	-9.00	-0.058	5.34	10.95	861
CASE_27	-6.90	-5.20	-0.059	5.34	9.80	1,230	CASE_70	-11.00	-9.30	-0.052	7.38	17.58	514
CASE_28	-9.30	-8.10	-0.038	5.34	6.92	1,783	CASE_71	-10.50	-9.80	-0.022	7.72	7.78	688
CASE_29	-6.80	-6.10	-0.024	6.02	5.10	-	CASE_72	-10.50	-7.10	-0.105	5.68	22.19	657
CASE_30	-6.80	-6.40	-0.014	5.68	2.61	1,060	CASE_73	2.40	4.40	-0.102	5.85	13.82	670
CASE_31	-6.10	-4.80	-0.046	5.68	8.48	1,030	CASE_74	2.40	4.40	-0.102	5.17	11.53	568
CASE_32	-6.50	-6.20	-0.011	5.68	1.96	786	CASE_75	-10.00	-7.80	-0.069	6.70	19.40	659
CASE_33	-7.70	-5.30	-0.081	5.34	13.83	976	CASE_76	3.80	4.30	-0.027	5.34	2.88	511
CASE_34	-3.70	-1.80	-0.074	7.04	18.20	884	CASE_77	-4.00	-0.30	-0.165	5.34	21.32	942
CASE_35	-7.00	-6.10	-0.031	6.36	7.25	980	CASE_78	-4.70	-1.80	-0.109	7.38	30.00	560
CASE_36	-3.20	-2.60	-0.024	5.34	3.46	973	CASE_79	-4.80	-2.10	-0.101	5.17	15.56	537
CASE_37	-3.50	-0.60	-0.114	7.04	27.83	-	CASE_80	-5.10	-3.60	-0.055	5.34	8.65	676
CASE_38	-4.60	-3.60	-0.038	6.36	8.05	-	CASE_81	-4.20	-3.00	-0.046	6.02	6.92	537
CASE_39	-3.90	-3.40	-0.019	5.34	2.83	-	CASE_82	-8.30	-7.70	-0.020	5.68	3.92	520
CASE_40	-5.00	-1.20	-0.156	6.70	33.50	1,041	CASE_83	-8.00	-8.00	0.000	6.02	0.00	488
CASE_41	-4.60	-1.90	-0.102	5.68	17.62	895	CASE_84	2.40	3.60	-0.061	5.51	7.37	717
CASE_42	-3.20	-0.80	-0.095	6.02	17.50	904	CASE_85	-9.40	-8.20	-0.038	5.34	6.92	743
CASE_43	-7.00	-6.60	-0.014	5.34	2.31	999	CASE_86	-8.10	-7.20	-0.030	6.36	7.25	513

1) 외표면 온도의 분포 특성

현장에서 계측기 및 열화상카메라를 통해 외기온도와 외표면 온도를 측정하였으며, 측정결과는 다음의 Fig 2에 나타낸다.

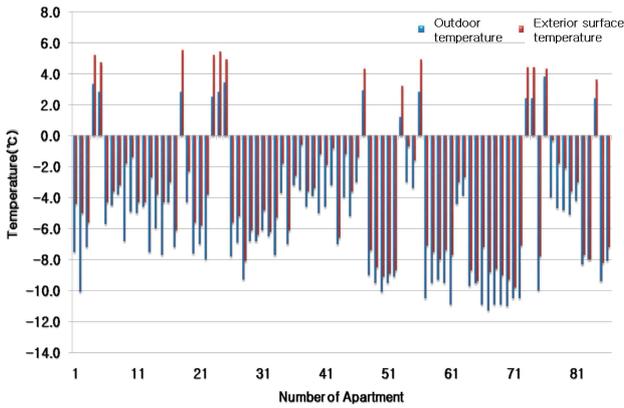


Fig 2. Outdoor temperature & Exterior surface temperature

측정결과 외표면의 온도가 외기온도보다 높게 측정되는 것으로 나타났으며, 준공연도가 1990년도 이전의 공동주택의 경우 외기온도와 외표면 온도의 차가 최대 3.5°C로 평균 2.4°C의 차이를 보이고 있으며, 1990년 이후의 공동주택의 경우 최소 0.0°C로 평균 1.7°C의 차이를 나타내는 것으로 분석되었다.

2) TDRo 및 현열량 분석결과

식 1에서 제시한 산출식을 통해 총 86개의 공동주택에 대한 TDRo를 산출하였으며, 또한 현장에서 풍속 및 표면온도 측정결과를 활용하여 식 2를 이용해 현열량을 산출하였다. 단, 모든 측정대상의 외표면 온도 및 외기온도는 현장에서 계측이 가능한 반면에 실내 온도의 경우 밤사이(새벽) 촬영되는 측정시기와 실 거주자의 프라이버시 등으로 정확한 측정이 불가하여 동계 시 주택의 실내 적정 설계 온도인 22°C로 설정하고 TDRo를 산출하였다.

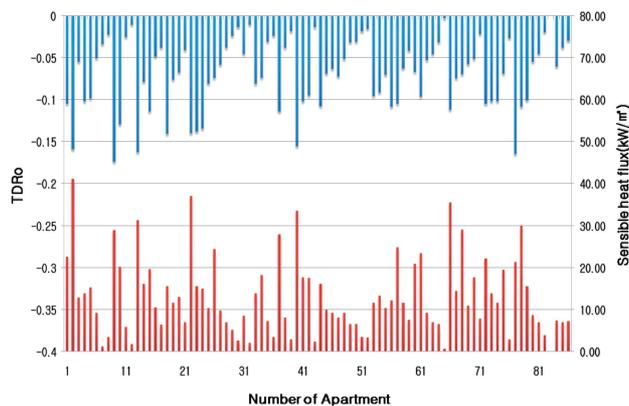


Fig 3. Analysis of TDRo & Sensible heat flux

분석결과 온도차 비율이 높은 경우 현열량 또한 전반적으로 크게 나타나는 것으로 분석되었으며, 평균 TDRo는 -0.069로 현열량은 13.02W/m<sup>2</sup>·°C로 산출되었다. 최대 TDRo는 -0.174(현열량, 28.82W/

m<sup>2</sup>·°C)로 1987년 준공되어 현재 재건축이 허용된 공동주택인 것으로 나타났다. 반면에 최소 TDRo는 0.00(현열량, 0.00W/m<sup>2</sup>·°C)으로 외기온도와 외표면의 온도차가 없는 것으로 분석되었으며, 준공연도는 2011년인 것으로 나타났다.

다음의 Table 6에서는 측정대상의 준공연도를 5년 주기로 구분하고 최근 5년 이내에 준공된 공동주택에서부터 30년 이상된 공동주택의 평균 TDRo를 제시하였다. 또한 Fig 4에서는 TDRo의 변화에 따른 현열량을 나타낸다.

Table 6. Analysis of TDRo & Sensible heat flux of Built Year

Built Year	TDRo			Sensible heat flux (W/m <sup>2</sup> ·°C)		
	Min	Average	Max	Min	Average	Max
Under 1985	-0.055	-0.106	-0.159	12.89	25.52	41.07
1985 ~ 1989	-0.011	-0.078	-0.174	1.15	13.08	31.33
1990 ~ 1994	-0.011	-0.072	-0.141	1.96	12.29	37.03
1995 ~ 1999	-0.014	-0.068	-0.156	2.31	13.85	33.50
2000 ~ 2004	-0.016	-0.065	-0.109	3.22	10.21	24.79
2005 ~ 2009	-0.003	-0.064	-0.112	0.58	14.85	35.45
More than 2010	0.000	-0.063	-0.165	0.00	10.79	30.00

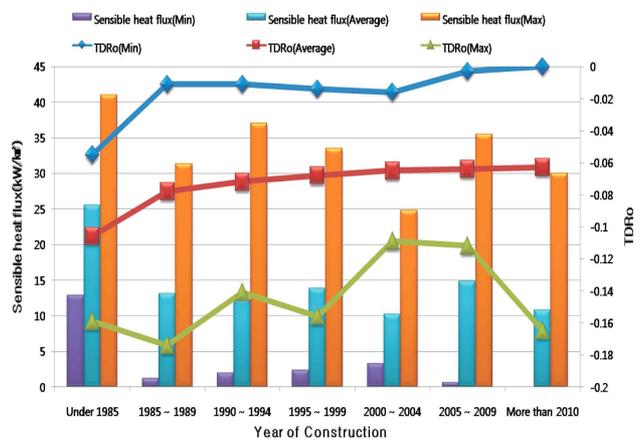


Fig 4. TDRo & Sensible heat flux of Built Year

분석결과 1985년 이전에 준공된 공동주택의 경우 평균 TDRo가 -0.106으로 현열량은 25.52W/m<sup>2</sup>·°C로 나타났으며, 최근 5년 이내에 준공된 공동주택의 경우 평균 TDRo는 -0.063으로 현열량은 10.79W/m<sup>2</sup>·°C로 나타나 30년 이상된 공동주택이 5년 이하의 공동주택 대비 70% 정도의 단열성능이 저하되는 것으로 분석되었다.

TDRo의 변화를 살펴보면 전반적으로 준공연도가 오래될수록 단열성능이 저하되는 경향으로 나타나고 있으나, 현열량의 경우 풍속에 의해 대류열전달계수가 산출되기 때문에 준공연도와 상관없이 풍속이 강한 날 측정된 공동주택의 경우 단열성능이 다소 떨어지는 경향으로 평균 현열량의 변화는 일정하지 않는 것으로 나타났다.

3) 난방비용 분석결과

본 연구에서 산출된 TDRo 및 현열량 분석결과를 통해 준공연도별 단열성능에 대한 정량적 평가를 수행하였으며, 단열성능 평가결

과로 국토교통부에서 운영하는 공동주택 관리 정보시스템<sup>8)</sup>을 통해 난방비용을 조사하였으며, 동계 시 기준으로 2011년에서부터 2013년까지 1월, 2월, 11월, 12월의 단위면적당 평균 난방비용(원/㎡)을 분석하였다.

단, 현재 운영 중인 공동주택 관리 정보시스템의 경우 개별난방 방식의 공동주택(21개)에 대해서는 난방비용을 제시되고 있지 않으며, 중앙난방(5개)과 서울지역의 지역난방(11개)의 경우 경기지역 지역난방과의 단가차이로 인해 난방비용의 차이가 발생하는 것으로 나타나, 이에 본 연구에서는 경기지역 내 지역난방 방식의 공동주택(49개)에 한해서만 조사·분석을 실시하였으며, 다음의 Fig 5에 분석결과를 나타낸다.

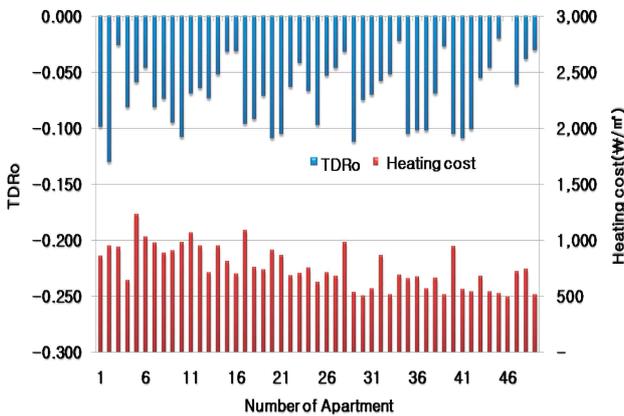


Fig 5. Analysis of TDRo & Heating cost

분석결과 Fig 5에서와 같이 TDRo의 변화에 따라 단위면적당 난방비용이 전반적으로 비례하여 발생하는 것으로 나타났으며, 총 49개 공동주택의 평균 난방비용은 단위면적당 781원/㎡로 분석되었다. 최대 난방비용은 단위면적당 1,230원/㎡으로 1992년 준공되었으며, 최소 난방비용을 나타낸 공동주택의 경우 단위면적당 488원/㎡으로 최대 난방비용은 최소 난방비용에 약 2.5배 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 최대, 최소 난방비용을 나타낸 공동주택의 단열성능 즉, TDRo를 비교·분석한 결과에서도 각각 -0.056, 0.000으로 둘의 단열성능 차이 또한 2배가 넘는 것으로 분석되었다.

다음의 Table 7에서는 준공연도별로 구분하여 단위면적당 평균 난방비용을 제시하며, Fig 6에서는 TDRo의 변화에 따른 난방비용(원/㎡)변화를 분석한 결과를 나타낸다.

Table 7. Analysis of TDRo & Heating cost of Built Year

Built Year	Heating cost(W/m <sup>2</sup> )		
	Min	Average	MAx
Under 1990	982	1,043	1,078
1990~1994	765	952	1,101
1995~19999	1,013	1,044	1,086
2000~2004	778	950	1,239
2005~2009	570	733	1,094
More than 2010	579	716	1,070

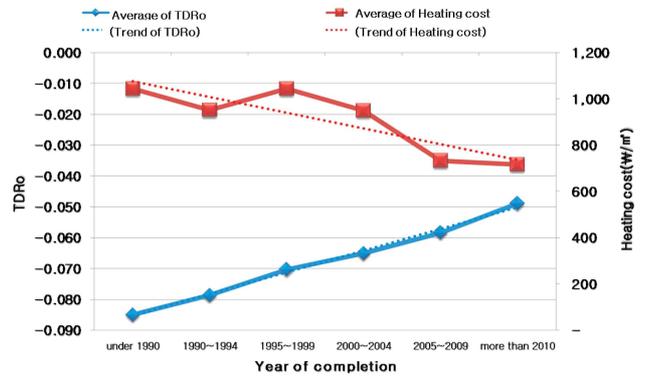


Fig 6. Average of TDRo & Heating cost

분석결과 Fig 6에서와 같이 TDRo 즉, 단열성능이 저하될수록 단위면적당 난방비용이 증가하는 것으로 나타났으며, 준공연도 1990년 이전의 공동주택의 경우 단위면적당 평균 난방비용은 1,043원/㎡으로 최근(5년 이내) 공동주택 대비 1.5배 정도의 요금이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 TDRo 및 난방비용의 추세를 분석한 결과 TDRo의 등급이 1단계씩 감소할수록(준공연도 변화 5년) 전 단계 대비 14.0% 정도의 단열성능이 저하되는 것으로 나타났으며, 난방비용의 경우 9.3%씩 증가하는 것으로 분석되었다.

#### 4) 난방비용 예측 분석결과

준공연도에 따른 단열성능 평가결과 및 난방비용에 대한 분석결과를 이용하여, 향후 건물의 노후변화와 단열성능의 저하를 통해 발생하는 난방비용을 다음의 식 3에 제시한 회귀방정식을 통해 도출하였다. 예측·산출된 난방비용의 결과 값은 실제 난방비용과의 평균 오차율이 7.0%로 분석되었으며, 준공 후 1년에서부터 공동주택의 재건축 허용연한의 최장 기간인 40년까지의 난방비용 예측결과를 다음의 Fig 7에 나타낸다.

$$Y = 1490.5948 + 40.5701 \times X_1 + 19110.5968 \times X_2 \quad (\text{식 } 3)$$

여기서,  $Y$  : 난방비용 예측 값(원/㎡)  
 $X_1$  : 건물의 노후도(준공 후)  
 $X_2$  : 외표면 온도차 비율(TDRo)

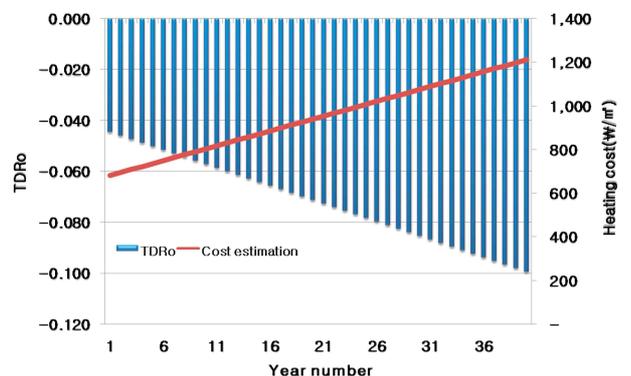


Fig 7. Analysis of Heating cost Estimation

8) 공동주택 관리 정보시스템(<http://www.k-apt.go.kr/>), 국토교통부

분석결과 Fig 7에서와 같이 건물의 노후변화를 통해 단열성능은 매년 2.3% 수준으로 저하되는 것으로 나타났으며, 난방비용의 경우 매년 2.0% 수준으로 증가하는 것으로 분석되었다. 건물이 준공 후 초기 1년인 경우 단위면적당 난방비용은 682원/㎡으로 예측되었으며, 최장 40년의 경우 초기 비용 대비 1.8배가 증가하는 것으로 분석되었다. 이처럼 정량적으로 건물의 단열성능을 평가할 수 있는 방안으로 제시되고 있는 온도차 비율 평가 방안은 산출결과에서도 나타난바와 같이 단열성능이 저하됨에 따라 난방비용 또한 증가하는 것으로 분석되면서 건물의 준공연도 변화와 더불어 단열성능이 저하되면서 에너지소비량의 증대라는 문제를 야기 시키는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 온도차 비율 및 현열량 산출을 통해 공동주택의 정량적인 단열성능을 평가·분석하였으며, 또한 건물의 준공연도 변화와 단열성능의 저하를 통해 발생하는 에너지소비량 증대라는 사회적 문제에 대한 해석으로 단열성능 평가결과와 함께 측정대상의 난방비용을 비교·분석하였다.

이에 대한 본 연구결과의 내용은 다음과 같다.

##### 4.1. 단열성능 평가결과

총 86개의 공동주택의 준공연도별 외기온도 및 외표면 온도분포를 현장에서 디지털 온도계 및 열화상카메라를 통해 측정하고, 측정결과를 이용하여 온도차 비율 및 현열량 산출을 통해 단열성능의 정량적인 분석을 수행하였다.

분석결과 평균 TDRo는 -0.069로 나타났으며, 현열량은 13.02W/㎡·℃로 분석되었으며, 최대 TDRo는 -0.174, 현열량은 28.82W/㎡·℃로 최소 TDRo는 0.00으로 현열량 역시 0.00W/㎡·℃로 분석되었다. TDRo가 최소를 보이는 공동주택의 경우 외기온도와 외표면의 온도차가 없는 것으로 분석되었으며, 현열량의 산출결과는 전반적으로 TDRo에 비례하여 나타나는 것으로 분석되었다. 다만, TDRo와 현열량이 비례하는 경우는 측정 당시의 풍속이 측정대상별 로 유사한 경우에 전반적인 결과값이 비례적으로 나타났으나, 측정대상별 풍속이 상이한 경우 즉, 준공연도가 같은 공동주택이라도 측정 당시의 풍속이 크게 상이한 경우 TDRo와 현열량은 반비례적인 결과값을 나타내는 것으로 분석되었다.

준공연도를 5년 주기로 구분하여 TDRo 및 현열량에 대한 분석결과에서는 1985년도 미만의 공동주택의 경우 평균 TDRo가 -0.106으로 현열량은 25.52W/㎡·℃로 분석되었으며, 2010년도 이상의 공동주택의 경우 TDRo가 -0.063, 현열량은 10.79W/㎡·℃로 1985년도 미만의 공동주택이 2010년도 이상의 공동주택 대비 70% 정도의 단열성능이 저하되는 것으로 분석되어, 준공연도가 오래될수록 건물의 단열성능은 저하되는 것으로 나타났다.

##### 4.2. 에너지소비 특성 분석결과

86개의 공동주택에 대한 난방비용을 분석한 결과에서는 난방방식 및 사용에너지, 지역에 따른 단가차이로 측정대상 중 경기지역 내 지

역난방 방식을 사용하고 있는 공동주택(49개)에 한해서 준공연도별 난방비용을 분석하였다.

분석결과 2010년 이후 준공된 공동주택의 경우 난방비용이 평균 단위면적당 716원/㎡으로 가장 적게 나타났으며, 1990년 이전에 준공된 공동주택의 경우 1,043원/㎡으로 2010년 이후 준공된 공동주택 대비 1.5배 정도의 비용 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 회귀분석을 통해 준공연도 변화에 따른 단열성능 저하 및 난방비용 증가에 대한 예측·산출한 결과 준공 후 1년씩 변화할수록 단열성능은 전년도 대비 2.3% 수준으로 저하되는 것으로 나타났으며, 난방비용의 경우 물가상승을 고려하지 않는 조건에서 매년 2.0%의 비용이 증가하는 것으로 분석되었다.

이처럼 본 연구결과에 따라 온도차 비율(TDR)의 변화 즉, 단열성능이 우수할수록 난방비용이 적게 발생하는 것으로 분석되었으며, 단열성능의 저하는 곧 건물에서의 에너지소비의 증대와 사용자에게 경제적 부담을 증가시키는 요인으로 해석되었다.

끝으로 본 연구에서 건물의 노후변화에 따른 단열성능 평가 및 에너지소비량(난방비용) 분석을 공동주택에 한하여 제시하였으나, 향후 사무소 및 학교, 병원 등 용도별 건축물에 대한 단열성능 평가 연구가 진행될 것으로 사료된다.

#### References

- [1] Akira Hoyano, Kohichi Asano, Takehisa Kanamaru, Analysis of the sensible heat flux from the exterior surface of buildings using time sequential thermography, Atmospheric Environment 33; 1999, p. 3941-3951
- [2] Lee, Tae-Cheol, Yoon, Seong-Hwan, Review on Radiation Temperature Distribution of a Multipurpose High-rise Building by Infrared Rays Camera, Journal of the Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems; 2012, p. 77-80
- [3] Park, Jung-Hun, Kim, Bong-Joo, Comparative Performance Evaluation by Winter Apartment Temperature on the Outer Surface of the Insulation, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection; Vol. 17, No. 4, 2013, p. 91-100
- [4] Choi, Gyoung-Seok, Jeong, Young-Sun, Kang, Jae-Sik, Lee, Seung-Eon, Development of In-site Evaluation Method for Building Insulation Performance Using Infra-red Camera, Journal of Architectural Institute of Korea; Vol. 24, No. 1, 2004, p. 762-765
- [5] Kim, Kyeong-A, Kim, Bong-Joo, Heat Loss the Case Study of Office Building, Academic Journal of the Korea Institute of Building Construction; Vol. 11, No. 1, 2011, p. 51-54
- [6] Hong, In-Pyo, Lee, Su-Mi, Jung, Eun-Young, Song, Doo-Sam, A Study on the Propriety of Wind Profile in CFD Simulation for predicting Wind Environment of Urban Area, Journal of the Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 2011, No. 3, 2011, p. 97-100