

실내공기와 온열환경

Indoor Air and Thermal Environment

배 귀 남
G. N. Bae
한국과학기술연구원
기전연구부
선임연구원



- 1960년생
- 실내환경의 쾌적성, 반도체 제조공정중의 오염제어 등에 관심이 있다.

1. 쾌적하고 건강한 실내환경의 추구

현대인들은 하루 시간의 80% 이상을 주택, 사무실, 지하공간(지하상가, 지하철 구내 등) 등의 실내공간에서 생활하며 지내고 있다. 이처럼 실내에서 대부분의 시간을 보내는 현대인들에게 있어 쾌적한 실내환경은 일의 효율성을 증대시키고 나아가 인간의 건강을 유지하는데 매우 중요하다. 최근 정보화 시대로의 급속한 변화에 따른 사무자동화(Office Automation) 및 가사자동화(Home Automation)와 지가 상승에 따라 건물 실내의 내부부하의 증가 및 편재가 가속되고 있다. 또한, 근래에

건설되고 있는 주택은 전통적인 주거공간의 개념과 달리 고단열화, 고기밀화가 진행되어 열적 성능이 크게 향상되고 있으며, 에어컨이나 난로 등의 설비기에서도 고성능화, 고기능화, 에너지 절약화가 진전되어 그 보급률이 상승하고 있다. 이처럼 인간의 생활수준이 향상되고 풍요로워짐에 따라 실내환경의 쾌적성에 대한 의식, 욕구도 높아지고 있다.

그림 1에 나타낸 바와 같이 쾌적하고 건강한 실내환경의 구성요소로는 공조, 음, 조명, 편리, 실내장식 등이 있다. 공조에 관련된 것으로는 온열(온도, 습도, 기류 등)과 공기(분진, 가스, 생물 등)가 있다.

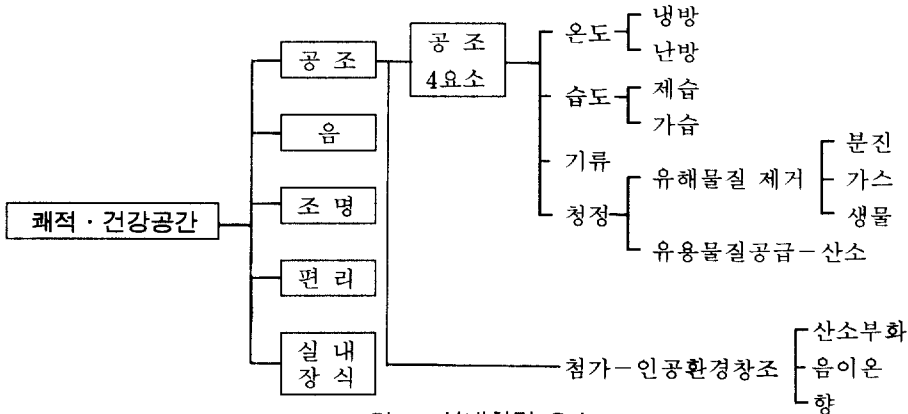


그림 1 실내환경 요소

인간의 쾌적감과 온열환경간의 관계를 파악하기 위한 연구는 일찌기 19세기 말부터 미국, 유럽 등지에서 시작되었다. 즉, 인간이 가장 직접적으로 느끼는 실내의 기온, 습도, 기류, 복사와 같은 물리적 환경과 인간의 쾌적감간의 상관성을 밝혀내려는 다양한 연구가 지속적으로 수행되었다. 온열환경의 복합적인 요소가 인체에 미치는 영향을 정량적으로 표현하고, 이를 통해 간단하고 정확하게 쾌적한 온열조건의 범위를 제시하기 위하여 많은 온열환경 평가지표들이 개발되어 왔다. 이러한 온열환경 평가지표를 이용하여 선진 각국에서는 실내 온열환경에 대한 기준을 제정하여 사용하고 있는데, 이들 기준에는 쾌적조건 및 평가방법 등이 기술되어 있다. 공조기기의 제어에 있어서도 단순히 온도, 습도와 같은 개별 요소의 제어에서 평가지표에 의한 쾌적제어로 바뀌어가고 있다. 또한, 이러한 연구를 통하여 밝혀진 사실들은 공조기기 등의 제품에 반영되어 현재 복사냉난방, 저속환기, 개별 공조, 향 공조 시스템 등이 실용화되고 있다.

한편, 1970년대 초 석유파동으로 인하여 구미 각국에서 에너지 절약을 위해 기존 건물에서 환기량을 감소시키고, 에너지 절약형 건축자재를 많이 사용하게 되었다. 이로 인해 실내 공기 중의 오염물질 농도가 상승되어 결과적으로 사무실내 직장인들에게서 건물병 증후군(Sick Building Syndrome)이 발생되었다. 이때부터 실내 공기오염에 관한 연구가 활발히 수행되기 시작하였다. 최근에는 에너지 비용의 상승에 따라 일반 주택 뿐만 아니라 공공건물에 이르기까지 에너지 절약을 위한 다양한 기술이 개발되고, 실내 공기오염 방지를 위한 각종 대책이 제안되고 있다. 특히, 작업장에서의 실내환경 뿐만 아니라 일반인이 생활하는 실내에서의 환경오염의 발생원과 그것이 건강에 미치는 영향을 파악하여 보다 나은 실내 생활환경을 유지함으로써 인간의 건강증진과 복지향상을 도모하고 있다.

열적으로 쾌적한 실내환경은 온열환경의 제

어를 통하여, 건강한 실내환경은 공기질 제어를 통하여 이루어지는데, 실제로 쾌적하고 건강한 실내환경은 공조기기를 통하여 복합적으로 구현된다. 그러므로, 온열환경과 공기환경은 서로 불가분의 관계를 갖고 있으며, 에너지 절약 측면에서 최적 시스템을 구성하기 위해서는 온열환경과 실내 공기질을 함께 고려하여야 한다.

본 고에서는 온열환경의 경우 온열환경 평가지표, 온열환경 기준, 드래프트 등에 대하여, 공기환경의 경우 실내 공기질의 쾌적성 평가 및 실내환기에 대하여 알아보하고자 한다. 이러한 개념을 바탕으로 에너지 절약적이면서 쾌적하고 건강한 실내환경을 구현할 수 있는 공조·환기·공기청정 통합 시스템에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 온열환경

2.1 온열환경 평가지표

인간은 주위 환경과 끊임없는 열교환을 하면서 살아가는데, 인체가 생성하는 열과 체표면이나 호흡을 통해 손실되는 열이 같게 되면 열평형 상태를 유지하게 되어 인간은 출거나 덥게 느끼지 않는 열적인 중립 상태가 된다. 그러나, 인체가 생성하는 열과 손실되는 열이 같지 않는 열환경에 존재하게 되면 인간은 더위나 추위를 느끼면서 인체의 열조절 기구를 통하여 열평형 상태에 도달하려고 한다. 이와 같은 인체와 주위 환경간의 열교환 관계를 열전달 이론과 생리학적 모델을 이용하여 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S = [M - W] - [(C + R + E_{diff} + E_{rsw}) + (C_{res} + E_{res})] \\ = [M - W] - [H_{sk} + H_{res}] \quad (1)$$

여기서, S는 인체내 열축적률, M은 대사에 의한 열생성률, W는 수행된 기계적 일률, C와 R은 각각 체표면으로부터의 대류 및 복사 열손실률, E_{diff} 와 E_{rsw} 는 각각 체표면에서 수분의 확산 및 땀 조절에 의한 증발 열손실률, C_{res} 와 E_{res} 는 각각 호흡을 통한 현열 및 증발 열손

실률, H_{sk} 와 H_{res} 는 각각 체표면에서의 열손실률 및 호흡에 의한 열손실률이다.

이러한 열교환 모델을 기초로 하여 온열환경에 대한 인간의 반응을 올바르게 평가하기 위해서 다음과 같은 점들을 고려하여 온열환경 평가지표가 개발되고 있다.

① 인체의 체표면과 주위 환경간의 열교환에 대한 합리적인 모델. 여기서, 주위 환경은 작용온도, 노점온도 및 이와 관련된 열 및 물질 전달계수로 표현된다.

② 인간이 땀, 혈관 운동 및 몸의 떨림에 의해 인체의 내부 온도를 어떻게 일정한 수준으로 조절하는가

③ 인체 표면에 관련된 두가지 중요한 물리적 요소인 평균 체표면 온도와 발한작용에 의한 피부 젖음률이 어떻게 '더위와 추위' 및 '쾌

적과 불쾌적' 감각에 영향을 미치는가

실내 온열환경을 단일 요소로 평가하기는 어려우므로 쾌적감각을 지배하는 기온, 습도, 기류, 복사, 착의량, 대사량 등의 온열환경 요소를 2가지 이상 결합하여 단일한 지표로 나타내려는 연구들이 많이 수행되었다. 지금까지 개발된 20여 가지의 온열환경 평가지표는 표 1에 나타난 바와 같이 크게 물리적 지표, 생리적 지표, 열평형 지표 및 주관적 지표로 분류된다. 본 고에서는 온열환경의 평가에 널리 쓰이고 있는 지표 중에서 열평형 지표인 작용온도(t_o), 주관적 지표로서 등온감각을 나타내는 신유효온도(ET^*) 및 주관적 지표로서 쾌적감각을 나타내는 예상온열감-예상불만족률(PMV-PPD)에 대해서 간략히 소개하고자 한다.

표 1 온열환경 평가지표의 분류

종 류		평 가 지 표
물 리 적 지 표		건구온도, 상대습도, 기류속도, 복사, 습구온도, 흑구온도
생 리 적 지 표		4시간 후 발한예측지수(P_4SR), 피부 젖음률, 열 스트레스지수(HSI)
열 평 형 지 표		작용온도, 습작용온도, 표준작용온도, 평균복사온도, 표준신유효온도
주관적지표	등 온 감 각	유효온도, 신유효온도, 수정유효온도, 등온지표
	쾌 적 감 각	불쾌지수, 예상온열감(PMV) - 예상불만족률(PPD)

(1) 작용온도(Operative Temperature, t_o)

작용온도는 Gagge 등이 1940년에 개발한 지표로 인체와 환경간의 열교환에 기초를 두어 기온, 기류, 복사의 영향을 이론적으로 종합한 것이다. 작용온도는 대류와 복사에 의한 열전달률에 의해 기온(t_a)과 평균복사온도(t_r)를 가중 평균한 값으로서 식 (2)와 같이 표현된다.

$$t_o = \frac{h_c t_a + h_r t_r}{h_c + h_r} \quad (2)$$

여기서, h_c 는 대류 열전달 계수, h_r 은 복사 열전달 계수이다.

작용온도는 미국 기준인 ANSI /ASHRAE Standard 55-1992에서 쾌적범위를 나타내는데 사용되고, 국제 기준인 ISO 7730에서도 쾌적범위를 알기 쉽게 표현하는데 사용된다.

(2) 신유효온도(New Effective Temperature, ET^*)

1923년 Houghten과 Yaglou가 제안한 유효온도(Effective Temperature, ET)는 습도의 영향이 적은 영역에서 과대 평가되고, 반대로 고온 영역에서 과소 평가되는 것으로 지적되어 왔다. 이러한 유효온도의 단점을 보완하여 1971년 Gagge 등이 개발한 신유효온도는 미국 ASHRAE(American Society of Heat-

ing, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)를 중심으로 온열환경을 평가하는데 많이 사용되고 있다. 신유효온도는 온도(기온, 평균복사온도)와 습도의 영향을 결합하여 열환경을 단일한 온도지표로 나타낸 것이다. 동일한 신유효온도는 일정한 생리적 스트레인과 온열감을 나타내므로 신유효온도가 같은 두 환경은 동일한 열적 반응을 일으킨다고 볼 수 있다. 그러므로, 신유효온도를 이용하여 온열환경이 다른 곳에서 수행된 연구결과들을 쉽게 비교할 수 있다. 신유효온도는 수학적으로 식 (3)과 같이 정의되며, 50% 상대습도에서 재실자가 실제 환경에서와 동일한 쾌적감, 생리적 스트레인 및 피부로부터의 열교환을 느끼는 흑체복사공간의 균일한 온도를 의미한다.

$$ET^* = t_o + w i_m LR (p_a - 0.5 p_{ET^*,s}) \quad (3)$$

여기서, w 는 피부 젖음률, i_m 은 투습지수, LR 은 Lewis 상수, p_a 는 대기압, $p_{ET^*,s}$ 는 신유효온도에서의 포화증기압이다.

신유효온도를 구하기 위해서는 실제 환경과 동일한 기류속도를 사용하고, 피부 젖음률과

투습지수를 알아야 한다. 피부 젖음률과 투습지수는 주어진 환경조건에서 동일한 신유효온도에 대해 일정하다. 신유효온도는 ANSI / ASHRAE Standard 55-1992에서 쾌적범위의 경계조건으로 사용된다.

(3) 예상온열감-예상불만족률(PMV-PPD)

1970년 Fanger는 인체와 주위 환경간의 열평형 방정식으로부터 인체에 대한 정상 상태 열평형 모델을 이론적으로 개발하고, 인체의 열부하($L = \text{열생성률} - \text{열손실률}$)를 약 1,300명의 서구인에 대한 환경 실험실에서의 실험결과와 결합하여 인간이 느끼는 온열감을 예측할 수 있는 평가지표인 예상온열감(Predicted Mean Vote, PMV)을 개발하였다. PMV는 인간과 주위환경의 6가지 온열환경 요소들(기온, 습도, 기류속도, 평균복사온도, 대사량, 착의량)을 측정하여 인체의 열평형에 기초한 쾌적 방정식에 대입하여 구하며, 주어진 대사량(M)에서 중립 온열감을 갖게 하는 체표면 온도와 땀 증발률에 의해 계산된 인체 열부하(L)의 함수로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036 M) + 0.028] L \quad (4)$$

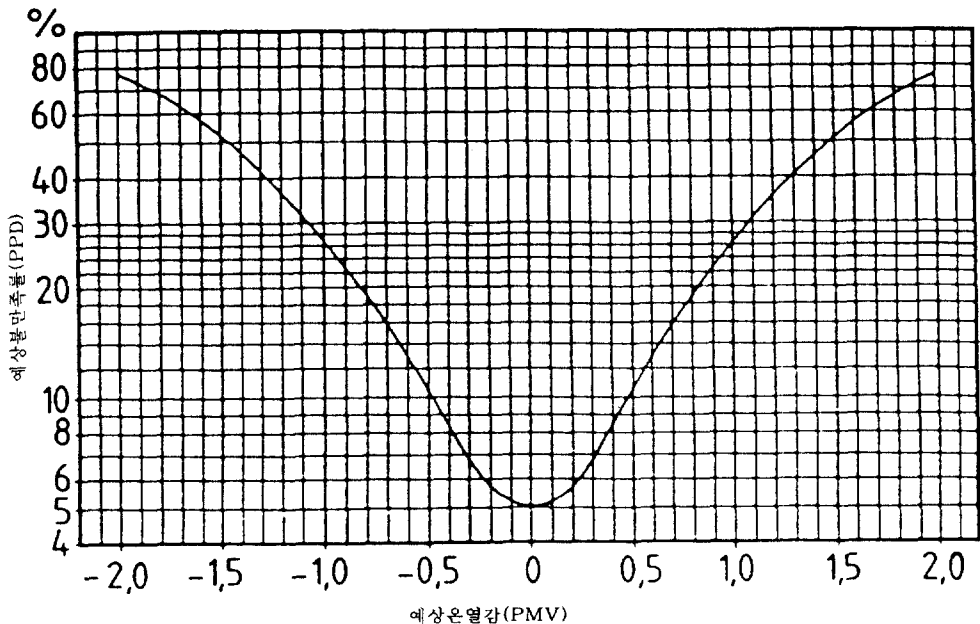


그림 2 PMV와 PPD의 관계

PMV 값은 ASHRAE의 온열감 7단계 척도를 기준으로 설정되었다. 일반적으로 PMV의 적용범위는 중립점을 중심으로 쾌적 환경의 근방에 한정되어 있으므로 ($-2 < PMV < 2$), 땀을 많이 흘리는 환경이나 극한 환경에는 적용할 수 없고, 일반적인 사무 환경 및 주거 환경의 온열감 평가에 많이 사용되고 있다.

한편, 예상불만족률(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)는 온열감 척도에서 따뜻하다 및 덥다($PMV=2, 3$)와 서늘하다 및 춥다($PMV=-2, -3$)라고 반응하는 것이 불만족을 의미한다는 가정하에 주어진 환경에 대해 만족하지 않는 사람의 예상 비율을 나타낸 것이다. PMV와 PPD의 상관관계는 식 (5)와 같이 표현되고, 이것을 그림 2에 나타냈다. 따라서, 6가지 온열환경 요소들이 주어지면 PMV를 계산할 수 있고, PMV로부터 PPD를 구할 수 있다.

$$PPD=100-95 \exp[-(0.03353 PMV^4+0.2179PMV^2)] \quad (5)$$

PMV-PPD는 1984년 ISO 7730에 채택되어 유럽을 중심으로 사용되어 왔는데, 최근에는 세계적으로 공조 분야에서 널리 사용되고 있는 대표적인 온열환경 평가지표이다.

2.2 온열환경 기준

선진 각국에서는 앞에서 소개한 평가지표를 이용하여 실내 온열환경의 쾌적범위 및 평가방법에 대한 기준을 제정하여 사용하고 있다. 쾌적한 실내환경의 유지 및 새로운 건물의 공조 시스템 설계시 이러한 기준을 활용하여 에너지 절약적이면서 쾌적한 실내환경을 구현하고 있다. 미국의 경우 ANSI /ASHRAE Standard를 사용하고 있고, 유럽의 경우 주로 ISO Standard를 사용하며, 일본의 경우 아직 기준은 제정되어 있지 않지만 최근 정부와 민간이 공동으로 연구한 보고서에 온열환경 평가방법 및 쾌적범위에 대해 상세하게 기술되어 있다. 영국은 CIBS(The Chartered Institution of Building Services)에서 작성한 CIBS Guide A1에서 합성온도를 사용하여 장소별로 기준값을 제시하는 등 유럽대륙과 다른 독자적인 기준을 사용하고 있다. 우리나라의 경우 온열환경에 대한 규정이 현실과 동떨어져 있으므로, 국내 실정에 맞는 합리적 기준 설정을 위한 연구가 시급히 요구된다. 각국에서 사용되고 있는 온열환경 기준을 비교하여 표 2에 나타냈다. 본 고에서는 대표적인 온열환경 기준인 국제 기준과 미국 기준을 소개하고자 한다.

표 2 온열환경 기준의 비교

평가항목		미국 1)	유럽 2)	일본 3)	비고
온도 (°C)	여름	23.0~26.0 (0.5clo)	23~26 (0.5clo)	20~26 (허용: 17~28)	미국, 유럽: 작용온도 일본: 기온
	겨울	20.0~23.5 (0.9clo)	20~24 (1.0clo)		
습도		노점온도 상대습도 1.7°C~60%		상대습도 40~70%	
기류속도 (m/s)	여름	0.15 이하	0.15 이하	0.15 이하 (허용: 0.5 이하)	미국: 고온부기류 증가
	겨울	0.25 이하	0.25 이하		
복사온도차 (°C)	수평	10 이하	10 이하	10 이하	
	수직	5 이하	5 이하	5 이하	
상하온도차 (°C)		3 이하		3 이하	
바닥온도 (°C)		18~29		19~26(겨울)	
PMV(PPD)				-0.5~+0.5(10% 이하)	

1) ANSI /ASHRAE Standard 55-1992(1992)
 2) ISO 7730(1984)
 3) 日本 建設省建築研究所 官民連帶共同研究報告書(1990)

(1) 국제 기준

ISO(International Organization for Standardization)에서는 ISO 7730의 부칙에 기준이 아닌 권장치라는 형식으로 온열환경의 쾌적조건에 대해서 다루고 있다. ISO에서는 온열환경 평가지표로서 Fanger가 제안한 PMV-PPD를 채택하고 있으며, 쾌적조건으로 $PPD < 10\%$, $-0.5 < PMV < 0.5$ 를 추천하고 있다. 쾌적조건을 이해하기 쉽게 온도로

표현한 것이 그림 3이다. 그림 3은 착의량과 대사량을 변화시키면서 $PMV=0$ 인 중성점으로부터 구한 최적 작용온도를 나타낸 것이다. 착의량은 계절과 사람에 따라 변화나, 여름철 0.5clo, 겨울철 1.0clo를 표준적인 착의량으로 간주하고 있다. 허용 작용온도는 겨울철 난방시에 20~24℃, 여름철 냉방시에 23~26℃이다. 또한, 겨울철 및 여름철 평균풍속은 각각 0.15, 0.25m/s 이하로 권장하고 있다.

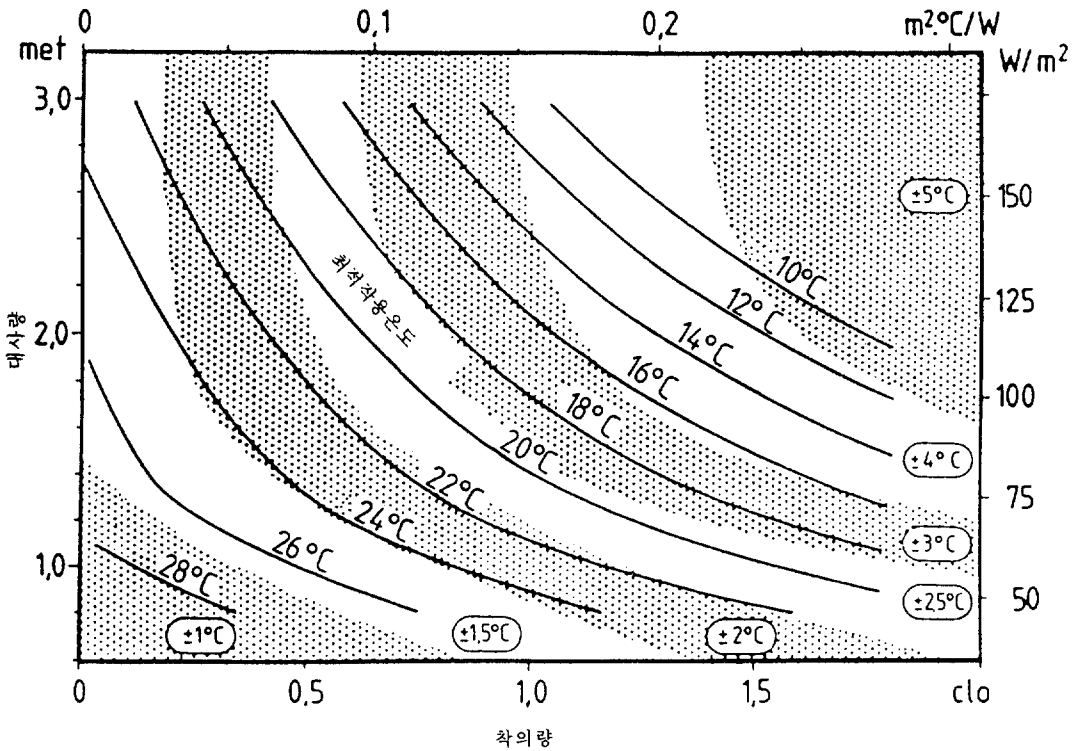


그림 3 착의량과 대사량의 함수로 나타낸 최적 작용온도

(그림에서 \pm 온도는 $-0.5 < PMV < 0.5$ 로부터 구한 최적 작용온도에서의 허용 쾌적범위를 나타낸 것이다.)

(2) 미국 기준

미국에서는 온열환경 기준으로 ASHRAE에서 만든 ANSI/ASHRAE Standard 55-1992를 사용하고 있으며, 이 기준은 1966년에 제정된 후 3차례 개정(1974년, 1981년, 1992년)되어 현재에 이르고 있다. 현재 사용되고 있는

ANSI/ASHRAE Standard 55-1992의 쾌적조건은 국제 기준인 ISO 7730의 경우와 매우 유사하다.

표준적 착의, 경작업시 10% 불만족률을 기준으로 여름철과 겨울철의 쾌적범위는 그림 4와 같이 규정되어 있다. 이때 표준적인 착의량

은 여름철 0.5clo, 겨울철 0.9clo로 간주하고 있다. 쾌적범위를 작용온도와 습도로 나타내고 있는데, 쾌적온도 범위의 상하한은 신유효 온도로 경계지워지고, 습도의 상한은 상대습도 60%, 하한은 노점온도 1.7℃이다. 불만족률을 10%로 가정할 때 작용온도 범위는 겨울철 난방시에 20~23.5℃, 여름철 냉방시에 23~26℃이다.

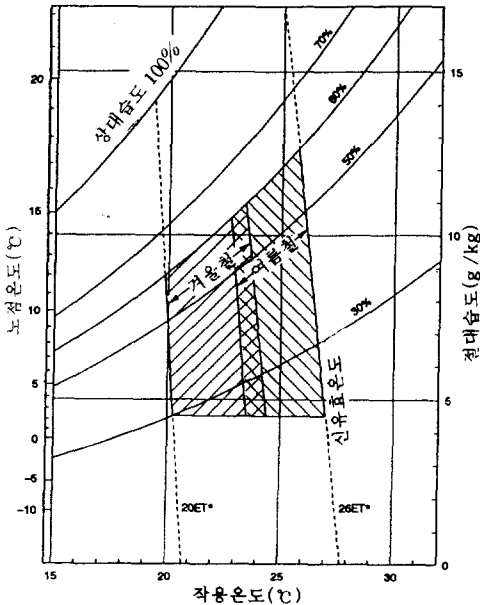


그림 4 표준적 착의, 경작업시 10% 불만족률을 기준으로 나타낸 쾌적범위

2.3 드래프트(Draft)

지금까지는 주로 실내공간 전체의 평균적인 물리적 환경과 인간의 온열감에 대한 연구가 주류를 이루어 다양한 온열환경 평가지표들이 개발되었다. 실제 거주자에게 보다 쾌적한 환경을 제공하기 위하여 이러한 평가지표를 이용하여 실내 열환경을 제어하는 공조 시스템이 실용화되고 있다. 대표적 온열환경 평가지표인 PMV값이 -0.5에서 0.5 사이의 쾌적범위에 있어도 국부 온냉감에 의해 불쾌감이 생기면 쾌적한 온열환경은 아니다. 즉, PMV는 전신의 덩고 추운 감각을 표현하는 것으로 열

적 쾌적감의 필요조건이지 충분조건은 아니다. 최근들어 인간의 온열감에 대한 연구가 상당한 성과를 거두고, 실내 열부하의 불균등 분포가 심화됨에 따라 평균적인 온열감 뿐만 아니라 국부적인 열환경이 인간의 온열감에 미치는 영향도 중요하게 취급되기 시작하였다. 현재 국부 불쾌감의 주된 원인으로 거론되고 있는 것은 드래프트, 불균일 복사, 상하 온도차, 바닥 온도 등이다. 표 2에서 나타낸 바와 같이 ISO 7730이나 ANSI/ASHRAE Standard 55-1992에서는 국부 불쾌감을 느끼지 않도록 이들 값의 범위를 제한하고 있다.

여름철에는 기류속도를 증가시킴으로써 시원함을 느낄 수 있으나, 공조공간 및 난방공간에서는 기류속도를 너무 증가시키면 드래프트라고 하는 바람직하지 못한 국부 대류 냉각이 생긴다. 이 드래프트는 현재의 난방, 공조에서 가장 해결하기 어려운 문제이며, 종래부터 실내 드래프트 평가를 위하여 ADPI(Air Distribution Performance Index)가 자주 사용되고 있다. 또한, 인간이 더운 상태에 있는 경우에는 그다지 드래프트를 느끼지 않는다. ANSI/ASHRAE Standard 55-1981에서는 기온이 26℃ 이상인 경우 28℃까지는 기류속도를 0.8m/s까지 증가시켜도 좋다고 추천하고 있다.

최근에는 기온, 평균풍속 뿐만 아니라 기류속도의 변동량(난류강도)도 드래프트에 의한 불쾌감에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 상관성을 덴마크의 Fanger는 아래와 같은 Draft Risk 모델로 표현하고 있다.

$$PD = (34 - t_a)(v - 0.05)^{0.62}(0.37v T_v + 3.14) \quad (6)$$

$$v = 0.05 \text{ m/s for } v < 0.05 \text{ m/s}$$

$$PD = 100\% \text{ for } PD > 100\%$$

여기서, PD(Percentage Dissatisfied)는 불만족률(%), t_a 는 기온(℃), v 는 평균풍속(m/s), T_v 는 난류강도(%)이다.

이러한 연구결과는 최근에 개정된 ANSI/ASHRAE Standard 55-1992에 반영되었다.

그림 5는 불만족률이 15%일 때 이들 변수에 따른 드래프트의 허용한계를 나타낸 것이다.

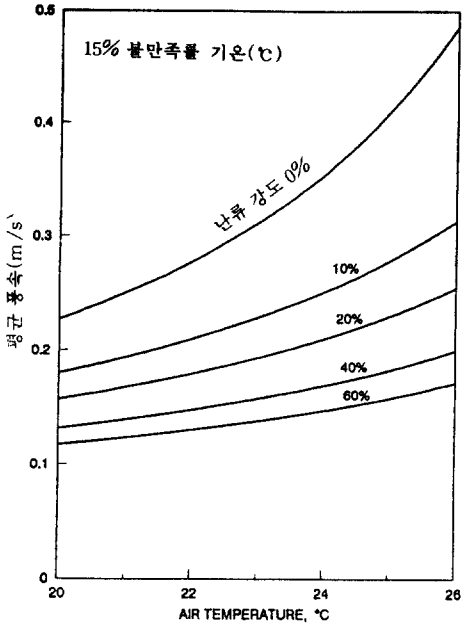


그림 5 드래프트의 허용한계 (불만족률이 15%일 때)

3. 공기환경

3.1 실내 공기질의 쾌적성 평가

각국에서는 실내에 거주하는 인간의 건강을 해치지 않는 실내 공기질과 환기량을 설정한 기준을 만들어 행정적으로 규제를 가하고 있다. 실내 공기질에 관한 대표적인 기준으로 미국의 ANSI / ASHRAE Standard 62-1989가 있고, 우리나라의 경우 공중위생법에 총부유분진(Total Suspended Particulates, TSP), 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO)에 대한 규제치가 명시되어 있다. 실내 공기질(Indoor Air Quality, IAQ)을 유지하기 위한 규제 경향을 보면, 대체로 실내 환기량은 증가시키고 유해물질의 허용량은 줄이며, 새로운 유해물질을 추가로 규제하고 있다. 현재 주로 연구되고 있는 분야는 실내 환기량 계산, 신 유해물질의 측정 및 이것이 건강에 미치는 영향에

관한 것이다. 지금까지 많이 연구되고 있는 유해물질로는 라돈, 포름알데히드, 석면, 일산화탄소, 이산화질소, 아황산가스, 오존, 납 등이 있다.

이와 같은 개별 화학 성분에 의해 공기질을 평가하는 방법은 100년 이상 사용되어 왔다. 산업환경의 경우 위생학자들은 개개의 화합물에 대한 허용값을 설정하여 오고 있는데, 문제가 되고 있는 화합물은 보통 생산공정에서 발생된다. 허용값은 화합물의 양과 작업자의 반응간의 상관도에 따라 결정되고, 이러한 허용값은 건강에 해를 미칠만한 값 이하로 설정된다. 보통 이러한 허용값은 상대적으로 매우 높은 수준이므로, 표준적인 계측기로 화합물을 측정하기가 용이하다.

그러나, 산업용 건물이 아닌 경우(예: 사무실, 학교, 주택) 산업환경에 적용되는 건강과 화합물간의 원리는 부적절한 것으로 여겨져 왔다. 이러한 건물에서 실내 공기질에 대한 불평이 자주 있는데, 이것은 때때로 건물병 증후군으로 표현된다. 건물병 증후군은 많은 건물에서 발생하는데 그 정도는 매우 다양하다. 어떤 건물에서는 매우 민감한 몇 사람만이 불평을 하지만, 다른 건물에서는 20%, 40% 또는 60%의 사람이 괴로움을 당하는 수도 있다. 사람들의 불평을 유발하는 화합물은 실내 공기중에 하나가 아니라 수천 종류가 있을 것이고, 이들의 농도는 산업환경의 경우보다 몇 차수(several orders of magnitude)가 낮다. 농도가 매우 낮으므로 보통의 화학분석법으로 측정하기가 어렵다. 비록 완전한 화학분석을 할 수 있을지라도 이러한 매우 낮은 농도에서 하나의 화합물이 인간에게 미치는 영향에 관한 최소의 자료만을 얻을 수 있을 뿐이다. 더욱이 개개 화합물에 관한 정보를 활용할 수 있다고 가정하여도 수천 종류의 화합물이 함께 작용하는 경우 이것을 다루는 방법을 아직 모르고 있다. 이것들이 복합적으로 인간이 공기질을 감지하는데 어떤 영향을 미치는 지가 규명되어야 한다.

지금 단계에서 위생학과 화학을 결합시킨

전통적인 방법으로 인간이 감지하는 공기질을 정의하거나 평가하는 것은 불충분하다고 여겨진다. 최근에 덴마크의 Fanger는 “olf”와 “decipol”이라는 단위를 사용하여 실내 공기질을 종합적으로 평가하는 방법을 개발하여 실험실 및 현장에서 적용 가능성을 검토하고 있다. 본 고에서는 이러한 새로운 공기질 평가방법에 대하여 소개하고자 한다.

(1) olf 단위

보통 인간의 감각이 공기의 화학분석보다 우수하다고 전제한다. 여기서 말하는 인간의 감각은 공기 중에 있는 독성 화합물에 민감한 후각과 자극성 화합물에 민감한 화학감각이다. 이들 감각은 코의 점막에 위치하며, 공기의 신선도, 자극성, 양호도, 용인성 등을 판단한다. 그러므로, 화학분석에 대한 자연적 대안은 공기오염을 정량화시키는 척도로 인간을 사용하는 것이다.

아이디어는 비교할 만한 알려진 기준 오염원에 의해 모든 오염원을 표현하는 것이다. 비록 후각과 화학감각이 새로운 단위의 정의에 포함되지만, 라틴어의 “olfactus(취각)”로부터 따온 olf가 새로운 단위로 제안되었다. 1 olf는 표준적인 한 사람의 공기 오염물질(생체 발산물질) 발생률이다. 모든 오염원은 실제 오염원과 동일한 불만족을 야기시키는데 요구되는 표준적인 사람수(olf)로 정의되는 등가 오염원 강도로 표현된다. 그러므로, olf는 대사량을 나타내는 met나 의복의 단열성을 나타내는 clo와 유사한 상대적인 단위이다.

열적으로 쾌적한 정상 상태에서 olf당 환기량에 따른 불만족률의 변화를 그림 6에 나타냈다. 그림에서 곡선은 청정한 공기로 환기되는 실내에 존재하는 표준적인 한 사람(1 olf)이 공기질을 불만족하다고 판단하는 비율을 환기량에 따라 나타낸 것으로, 관계식은 다음과 같다.

$$PD = 395 \exp(-1.83 q^{0.25}) \text{ for } q \geq 0.32 \text{ } \ell / (\text{s} \cdot \text{olf})$$

$$PD = 100\% \text{ for } q < 0.32 \text{ } \ell / (\text{s} \cdot \text{olf}) \quad (7)$$

여기서, PD는 불만족률(%)이고, q는 olf당

정상 상태의 환기량[$\ell / (\text{s} \cdot \text{olf})$]이다.

환기량이 증가함에 따라 불만족률은 처음에 급격히 감소한 후 완만히 감소한다. 어떤 사람들은 매우 민감하여 환기량이 많아야 공기질을 만족스럽게 여기는 반면에, 참을성이 많은 사람들은 매우 적은 환기량에서도 공기질을 만족스럽다고 판단한다.

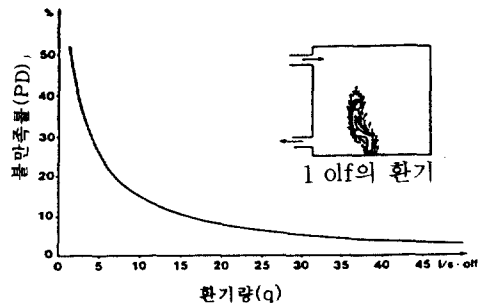


그림 6 환기량에 따른 불만족률의 변화

(2) decipol 단위

공기오염 농도는 오염원과 환기나 바람에 의한 희석에 좌우된다. 지각성 공기오염(Perceived Air Pollution)은 실제 공기오염 농도와 동일한 불만을 야기시키는 생체 발산물질의 농도로 정의된다. 라틴어의 “pollutio(오염)”로부터 따온 pol이라는 단위를 사용하여 지각성 공기오염을 측정한다. 1 pol은 청정한 공기로 1 ℓ /s씩 환기되는 공간에서 표준적인 한 사람(1 olf)에 의한 공기오염을 나타낸다. 즉, 1 pol=1 olf/(ℓ /s)이다. 보통 사용되는 범위를 감안하여 지각성 공기오염을 1/10 pol 단위로 표현한다. 즉, 1 decipol=0.1 olf/(ℓ /s)이다. 그러므로, 1 decipol은 청정한 공기로 10 ℓ /s씩 환기되는 공간에서 표준적인 한 사람(1 olf)에 의한 공기오염이다.

그림 6에 나타낸 불만족률을 지각성 공기오염의 함수로 그림 7에 다시 나타냈다. 그림 7에서 곡선의 관계식은 다음과 같다.

$$PD = 395 \exp(-3.25 C^{-0.25}) \text{ for } C \leq 31.3 \text{ decipol}$$

$$PD = 100\% \text{ for } C > 31.3 \text{ decipol} \quad (8)$$

여기서, PD는 불만족률(%)이고, C는 시각성 공기오염(decipol)이다.

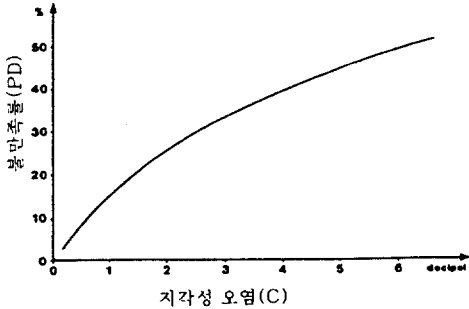


그림 7 시각성 공기오염과 불만족률의 관계

오염원이 적고 환기가 잘 되는 건물의 경우 시각성 공기오염은 1 decipol 이하 또는 불만족률의 15% 이하이다. 오염원이 많고 환기가 잘 안되는 공간의 경우 시각성 공기오염이 10 decipol 이상 또는 불만족률이 60% 이상일 수 있다. 실내환경에서 공기질을 0.1 decipol 또는 1% 불만족률 수준으로 만드는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 시각성 공기오염을 측정할 수 있는 decipolmeter가 최근에 개발되어 사용되고 있다.

3.2 실내 환기

실내 오염물질을 제거하는 방법은 오염물질의 실내 침입을 허용하지 않는 것과 침입은 허용하되 제거하는 것으로 크게 나뉜다. 전자는 다시 오염 발생원을 제거, 격리하는 방법과 발생원의 성질을 변화시켜 무공해화시키는 방법이 있다. 후자는 공기청정기에 의해 오염물질을 제거하는 방법과 환기에 의해 실외로 배출하는 방법이 있다. 이 4가지 방법은 오염물질에 대한 대처가 열거한 순서대로 적극성이 줄어드는 특징이 있다.

환기에 의한 실내공기 중의 오염물질 제거는 가장 소극적인 방법이지만, 실내공기 중의 오염물질이 가스상 물질인 것과 에어로졸인 것, 또한 이들 오염물질의 거동을 잘 알지 못하고 더욱이 제거하지 않으면 안될 오염물질이 어떤 종류이든지 모든 오염물질을 확실히

실외로 배제시키는 장점이 있다. 특히, 휘발성 유기화합물, 담배 연기, 연소 배출가스, 냄새와 같은 복잡한 특성을 갖는 오염물질의 제거법으로는 가장 실용성이 높은 방법이다. 단, 환기되는 외기의 오염물질 농도가 실내 공기 중의 오염물질 농도보다 낮은 것이 전체되어야 한다.

(1) 환기(Ventilation)

환기는 실내 공기정화 또는 온열환경 조건의 개선 등과 같은 명확한 환경개선을 목적으로 거주자가 의도적으로 실내의 공기를 교체하는 것을 의미한다. 환기를 시키기 위해서는 실내외를 연결하는 개구를 설치하고, 두 공간간의 압력차를 높일 필요가 있는데, 이것을 기계적인 힘으로 하는 경우를 기계환기 또는 강제환기라 부른다. 특히, 공기조화 설비를 갖춘 건물의 경우 실내 공기질 개선을 목적으로 행하는 환기를 외기도입이라 부르고, 이때 도입되는 외기를 도입외기라 부른다.

일반적으로 실내의 공기조화를 공조설비로 하는 경우 에너지 절감을 위해 공조대상실에 도입외기를 100% 급기하지 않고, 실의 배기(재순환 공기)를 도입공기에 일정 비율로 혼합하여 급기하게 된다. 이때 급기량에서 재순환 공기량을 뺀 순수한 외기도입량 또는 도입외기량을 환기량이라 부른다.

한편, 기계적인 힘에 의하지 않고 바람, 실내외의 온도차 등과 같은 자연적인 힘을 이용하는 경우를 자연환기라 부른다.

(2) 필요 환기량

쾌적하고 건강한 실내환경을 유지시키는데 필요한 환기량을 산출하는 방법은 2가지가 있다.

첫째, 건강 측면에서 필요한 환기량은 화학성분의 농도를 이용하여 식 (9)와 같이 구한다.

$$Q_n = \frac{G}{C_i - C_o} \cdot \frac{1}{\epsilon_v} \quad (9)$$

여기서, Q_n 는 건강에 필요한 환기량(1/s), G 는 화학오염 강도($\mu\text{g/s}$), C_i 는 허용화학오염 농도($\mu\text{g/l}$), C_o 는 외기의 화학오염 농도($\mu\text{g/l}$), ϵ_v 는 환기효율이다.

둘째, 쾌적성 측면에서 필요한 환기량은 최근에 제안된 olf와 decipol 단위를 사용하여 식 (10)과 같이 구한다.

$$Q_c = \frac{10G}{C_i - C_o} \cdot \frac{1}{\epsilon_v} \quad (10)$$

여기서, Q_c 는 쾌적성에 필요한 환기량 (l/s), G 는 시각성 오염 강도(olf), C_i 는 시각성 실내 공기오염(decipol), C_o 는 시각성 외부 공기오염(decipol), ϵ_v 는 환기효율이다.

그림 7로부터 C_i 와 불만족률(PD)의 관계는 식 (11)과 같으므로, 불만족률이 설정되면 C_i 를 구할 수 있다.

$$C_i = 112[\ln(PD) - 5.98]^{-4} \quad (11)$$

건강과 쾌적성을 위해 필요한 환기량은 건강에 필요한 환기량(Q_h)과 쾌적성에 필요한 환기량(Q_c) 중에서 높은 값이고, 이것을 공조기기 설계에 사용하여야 한다.

4. 공조·환기·공기청정 통합시스템 (ACV System)

쾌적하고 건강한 실내환경은 온열환경과 공기환경의 조화에 의해 생긴다. 에어컨은 온열환경에, 공기청정기, 탈취기 등은 공기환경에, 그리고 환기기기는 온열환경과 공기환경에 모두 관여하고 있다. 그림 8에 나타난 바와 같이 공조·환기·공기청정 통합 시스템(Airconditioning, Cleaning, Ventilation, ACV System)은 이 3가지 기능을 효과적으로 연계시켜 시스템화 함으로써 쾌적하면서 에너지 절약적인 실내환경의 실현을 도모하는 기술로 최근 많은 진전이 이루어지고 있다.

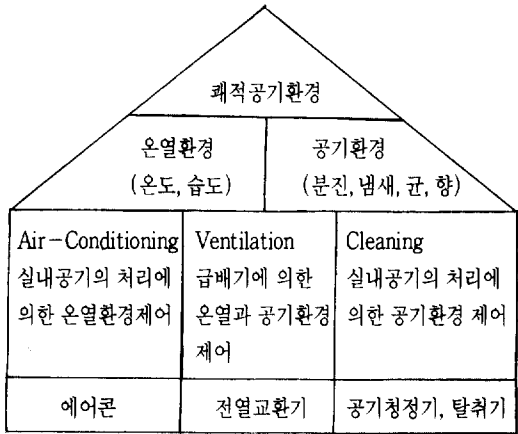


그림 8 ACV 시스템의 개념

환기는 실내 공기질 향상의 유효한 수단이다. 그러나, 공기오염과 함께 많은 에너지가 유출되어 온열환경적으로 손실이 크다. 그러므로, 급기와 배기의 현열 및 잠열의 전열교환기 유니트가 사용된다. 전열교환기는 주로 특수 가공지로 만든 정지형 직교류 열교환기로 개발의 역사는 오래되었지만, 성능이나 내구성 면에서 계속 개선되고 있다.

환기량은 이산화탄소(CO₂) 농도로 보면 사람의 호흡으로부터 구하는 필요량보다도 체취나 흡연에 대한 필요량이 많고, 대략 2~3배가 된다. 따라서, 공기청정기로는 처리가 불가능한 CO₂ 배출, 산소(O₂) 흡입을 전열교환기에서 행하고, 제진, 탈취는 공기청정기로 행하는 역할 분담에 의해 환기량이 최소화 될 수 있다. ACV 시스템의 기능 분담을 그림 9에 나타냈고, 경제성 비교의 예를 표 3에 나타냈다.

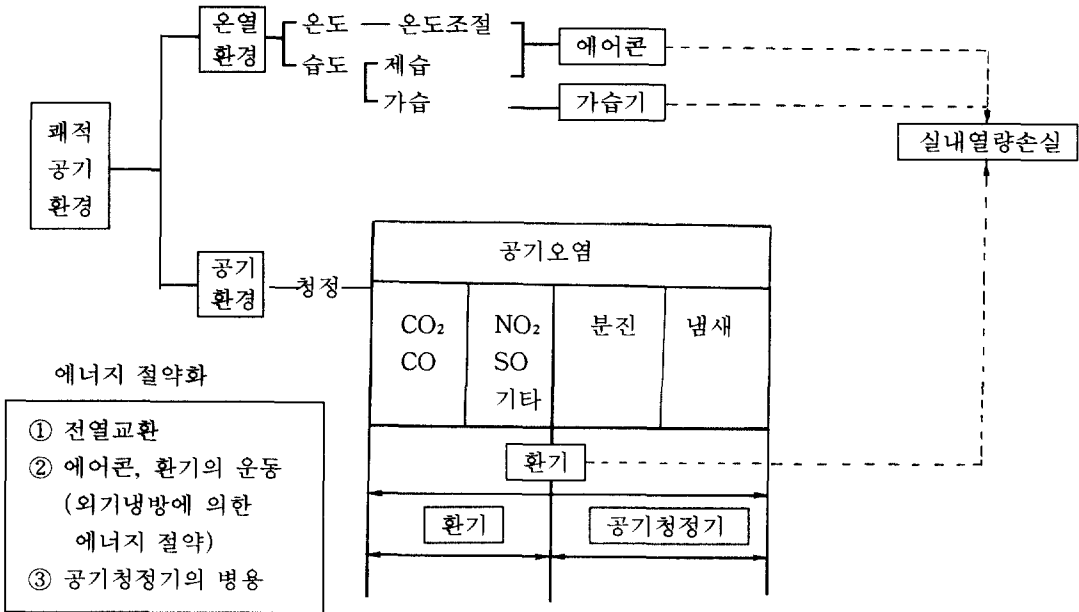


그림 9 ACV 시스템의 기능 분담

표 3 ACV 시스템의 경제성 비교 예

실내 분진농도를 0.15mg/m ³ 으로 유지하기 위한		필요환기량 (m ³ /인·hr)	초기 공조부하 (HP)	운전 전력량 (%)
공조+환기 팬		53	8	100
공조+전열교환기			6	75.8
ACV 방식	공조+전열교환기+공기청정기	20	4	57
	공조+전열교환기 시스템제어+공기청정기		4	51.4

- 조건 : 바닥면적 100m², 재실인원 20명, 실내허용 CO₂ 농도 0.15%, 실내 발생분진 6mg/인·hr, 외기분진농도 0.05mg/m³
- 운전시간 : 10hr /일, 25일 /월
- 운전기간 : 냉방 6개월, 난방 3개월

쾌적하고 건강한 실내환경을 구현하기 위한 과제에 개요를 그림 10에 나타냈다. IAQ 기술은 최근 진전이 현저하지만, 더욱 기본적인 기술의 정비와 실용화를 위한 각종 기술의 융합을 도모할 필요가 있다. 향후 기술개발 내용으로 생각되는 것을 요약하면 다음과 같다.

첫째, IAQ 기기와 공조기, 건축 등과 관계되는 종합적 시스템화 기술의 고도화

둘째, 실내 공기환경 평가기술의 향상
셋째, 쾌적제어 기술의 확립(센서, 인공지능 제어 등)

넷째, 각종 기기의 성능, 유지관리의 향상 및 신개발

다섯째, 오염물질의 제거기술에서 유용물질의 첨가기술로의 능동적 대응

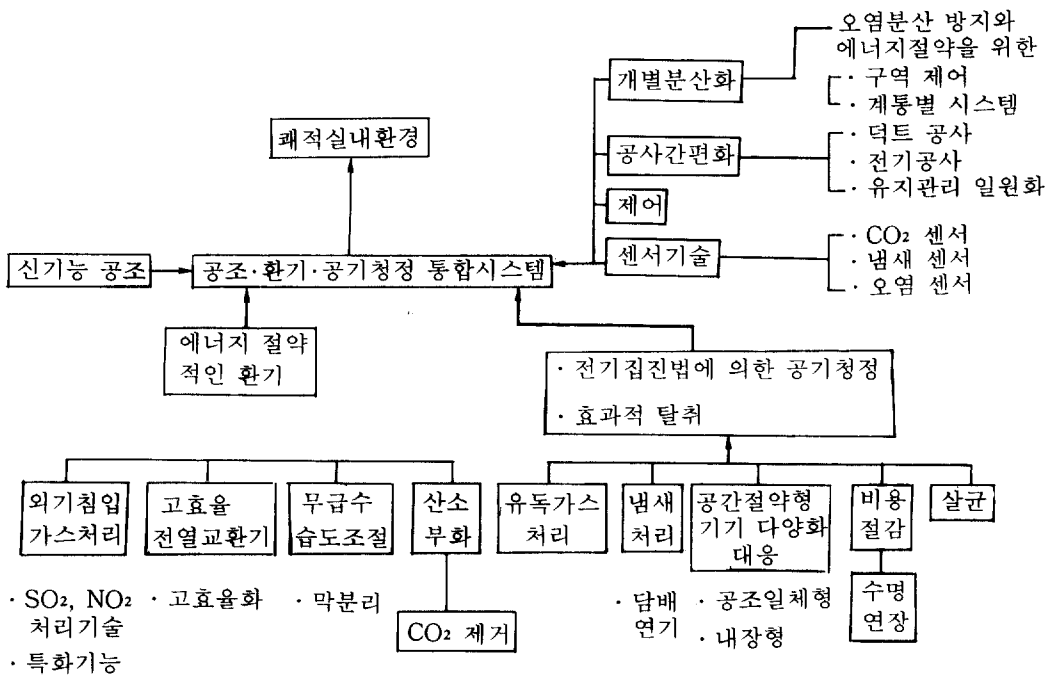


그림 10 쾌적 실내환경 기술의 과제

5. 맺음말

경제발전에 의해 사람들의 생활수준이 향상되고 환경오염이 심각한 사회문제로 대두되면서 실내환경에 대한 관심이 점차 고조되고 있다. 본 고에서는 실내환경 중에서도 가장 기본이 되는 온열환경과 공기환경에 대하여 살펴보았다. 온열환경의 경우 일찌기 19세기 말부터 연구가 시작되어 많은 평가지표들이 개발되었고, 이러한 지표를 이용하여 온열환경의 쾌적성을 평가하고 있으며, 이러한 쾌적 개념이 공조기기를 통하여 실현되고 있다. 실내 공기질의 경우 1970년대 초부터 본격적인 관심을 끌기 시작하여 현재 활발한 연구를 수행하고 있는데, 지금까지 수행된 연구는 주로 인간의 건강 측면에서 개별 오염물질의 농도 평가에 치중되었다. 최근에 이르러 공기환경의 쾌적성 평가지표로 decipol 등이 제안되어 사용되고 있으므로, 쾌적성 측면에서는 초보적인 연구 단계에 있다고 할 수 있다.

기술수준의 차이, 인식 부족 등으로 인하여 지금까지는 주로 온열환경과 공기환경이 별도로 다루어져 왔다. 그러나, 쾌적하고 건강한 실내환경을 적은 에너지로 실현하지 않으면 안되는 시대가 되었다. 선진국에서는 이러한 개념에 입각하여 공조, 공기청정 및 환기를 통합한 ACV 시스템이 실용화되고 있다. 향후 온열 뿐만 아니라 실내 공기질을 복합적으로 고려한 다양한 공조 시스템이 출현할 것으로 예상되므로, 국내에서도 이에 대한 연구를 시작하여야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 명현국, 1992, "실내환경 기준의 국내 현황 및 국제적 동향", 공기청정기술, 제5권, 제1호, pp.14~40.
2. 명현국, 1992, "실내 온열환경 평가지표", 공기조화·냉동공학, 제21권, 제4호, pp. 257~270.
3. 이춘식, 배귀남 등, 1993, 실내환경 쾌적성 평가방법에 관한 연구(I)-온열 및 공기 질에 대해서-, 과학기술처, KIST UCN998-4939-2.
4. 이춘식, 배귀남 등, 1994, 실내환경 쾌적성 평가방법에 관한 연구(II)-온열 및 공기 질에 대해서-, 과학기술처, KIST UCN1183-5282-2.
5. 배귀남, 1994, "주거환경의 열적 쾌적성", 월간 주택설비 7월호, pp.35~43.
6. CIBS, 1978 Environmental Criteria for Design, CIBS Guide A1.
7. ASHRAE, 1981, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI /ASHRAE Standard 55-1981.
8. ASHRAE, 1992, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI /ASHRAE Standard 55-1992.
9. ISO, 1984, Moderate Thermal Environments-Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort -, ISO Standard 7730.
10. ASHRAE, 1989, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, ANSI /ASHRAE Standard 62-1989.
11. ASHRAE, 1993, ASHRAE Handbook-1993 Fundamentals, ASHRAE, Atlanta.
12. Gagge, A. P., Fobelets, A. P., Berglund, L. G., 1986, "A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment", ASHRAE Transactions, Vol. 92, Part 2, pp.709~731.
13. Fanger, P. O., 1988, "Introduction of the olf and the decipol Units to Quantify Air Pollution Perceived by Humans Indoors and Outdoors", Energy and Buildings, Vol. 12, pp.1~6.
14. 建設省建築研究所, 1990, 室内環境の最適化 システムの開発, 官民連帶共同研究報

告書, 日本.

15. 上村茂弘, 1992, “IAQの 現状とえの 清浄
化への 取組み”, 冷凍, 第67巻, 第773號,

pp.47~56.

16. 池田耕一, 1992, 室内空気汚染の メカニズ
ム, 鹿島出版會.