온열 쾌적성과 쾌적 환경 구현기술

실내 온열환경의 쾌적성에 관한 개념을 파악하고 온열 쾌적감의 정량화, 그리고 쾌적성 향상을 위한 공조기술의 사례 등을 소개하고자 한다.

금 종 수
부경대학교 기계공학부(jskum@pknu.ac.kr)

서 론

현대인들은 인공적으로 외계기후와 단절된 실내환경 중에서 외계의 더위나 추위를 특별하게 의식하는 일 없이 생활하는 경우가 많아지고 있다. 이처럼 사람들의 생활이 풍요로워 지고 쾌적하게 됨에 따라서 실내온열환경의 쾌적성에 대한 의식이나 욕구도 점차적으로 높아지고 있다.

여기서 인간에게 쾌적한 실내환경이란 도대체 어떤 환경일까? 쾌적한 실내환경이란 건물이나 설비기기와 같은 하드웨어적인 요인과 인체 생리 및 심리량과 같은 소프트웨어적인 요인이 복잡하게 뒤얽혀 있어서 일률적으로 정의하는 것은 어렵지만 쾌적성, 안전성, 기능성과 같은 기본적인 요인이 확보되어 있는 환경을 말하는 것으로 생각된다. 이와 같은 환경을 공기조화의 시점에서만 취급하면 가장 기본적인 단계는 단순히 환경의 더위와 추위를 제거하는 온도조절의 수준이며 제2단계는 인간의 오감에서 느끼는 생리적 욕구를 만족시켜서 인체에 스트레스를 생기지 않도록 환경의 온도, 습도, 기류, 복사를 제어하는 수준이다. 그리고 더 나아가서 이상적 단계를 생각한다면 생활에 최적인 상태가 되도록 환경을 조정하여서 자라고 생활하는 사람들에게 생리적인 면은 물론이고 심리적인 면에서도 만족을 줄 수 있는 환경수준을 얻을 수 있어야 할 것이다. 이에 본고에서는 실내온열환경의 열적 쾌적성의 기본개념을 살펴보고, 쾌적성에 관련된 정량적 평가기술과, 쾌적성을 향상시키기 위한 여러 가지 공조기술들에 대해 소개하고자 한다.

온열쾌적성의 개념

일기예보에서 예측되는 기온이나 온도계에 나타나는 기온에 의해서 더위나 추위를 판단하는 것은 꽤 오랜 된 경험이다. 마치 "인체온도계"라고도 할 수 있는 「온도레벨」을 감지하는 감각기가 사람에게 갖춰져 있는 듯한 착각조차 갖고 있다. 또 이외에도 쾌적감을 감지하는 감각기도 존재하는 것일까?

여기서 온냉감과 쾌적감에 대한 특이성을 살피고 온열쾌적성과 관련된 개념을 살펴 보고자 한다.

인체 온냉감

온열생리학의 참고서를 보면 사람의 피부 밑에는 "냉각"과 "온각"이란 온도수용기가 존재한다고 한다. 옛날 참고서에는 차가움은 클라우제의 소체, 따뜻함은 루히니의 소체라고 하는 감각기에 의해 감지된다고 기술되어 있기도 하지만 이러한 것은 상상에 의해 추상되었던 것 같다.

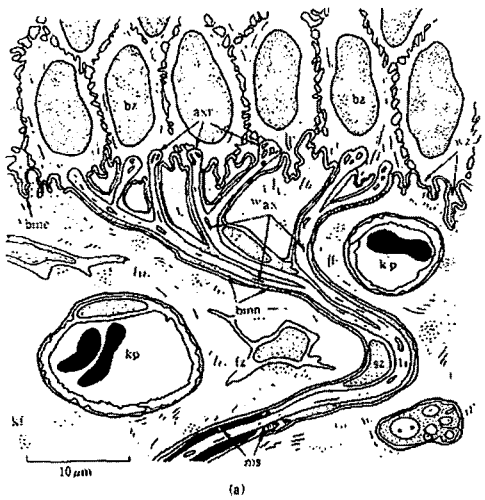
현재에는 전기생리학적 연구에 의해 냉(冷)감각은 **그림 1**에 나타낸 것과 같이 전자현미경사진에 근거하여 그려진 신경의 종말부에 의해 감지된다는 것이 명확해졌다고 한다. 그러나 온(溫)감각에 대해서는

아직 불명확한 점이 많다고 한다.

온도감각의 생리학적 특징은 감각이 환경에 순응하는 것이며 온도수용체의 온도조건이 일정하게 되면 감각은 점차 약해져 최후에는 소실한다는 점에 있다. 즉 온도변화만이 감각으로서 감지되는 것이다. 일정온도의 우물물이라도 여름에는 차갑고 겨울에는 따뜻하게 느끼는 것은 누구나 경험하는 점일 것이다. 그러나 현저히 고온이나 저온에서는 감각은 계속되며 순응은 보이지 않는다.

기온 23℃의 실내와 수온 23℃의 풀(pool) 속에서는 온도감각이 전혀 다른 것은 전자에서는 순응에 의해서 감각이 소실하여 있는 데 비해서 후자는 비부온의 급격한 강하와 체열의 발산에 원인이 되어 냉감을 느끼는 것이기 때문에 사람의 온냉감은 온도계에 나타나는 온도만으로는 나타낼 수 없다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 온냉감은 절대습도(t), 순응한 온도에서의 온도변화(Δt), 온도변화의 속도(dT/dt), 자극되는 부위의 면적, 자극이 지속하는 시간 등에 의해서 복잡하게 변화하는 것이지만 온도 그 자체 보다는 몸에 주어지는(혹은 빼앗는) 열에너지량을 감지하는 것으로 해석할 수 도 있을 것이다.



[그림1] 고양이 비부 냉수용기(鼻部 冷受容器) 전자현미경 이미지 모식도
(Hensel(1973), Physiol, Rev. 53m O.948에서 인용)

쾌적감

그리스 철학자 아리스토텔레스는 기원전350년에 "사람에게는 오감, 즉 「시」, 「청」, 「취」, 「미」, 「촉」이란 감각이 「고유감각」으로서 갖춰져 있고 예를 들면 색을 볼 때는 눈이라고 말하는 것처럼 감각에는 그것에 대응하는 정해진 대상이 존재한다. 그리고 온·냉감각과 같이 다른 「제6감」은 존재하지 않는다고 주창하였다고 한다.

그럼 우리들이 흥미대상으로 삼고 있는 「온도감각」이나 「쾌적감각」등은 어떻게 설명되어질 것인가?

온열생리학자 하디는 「쾌적감 comfot, 만족감 pleasure, 고통감 pain은 감각이라고 하기 보다는 오히려 정신적인 데에 기인하는 성질 즉 시각이나 청각과는 별도 종류의 인식능력이며, 정신적 행동의 주요 지침으로 생각할 수 있다.」라고 하며 아리스토텔레스의 논문으로부터 인용하여 「만족감은 정신의 상태」라 쓰고 있다.

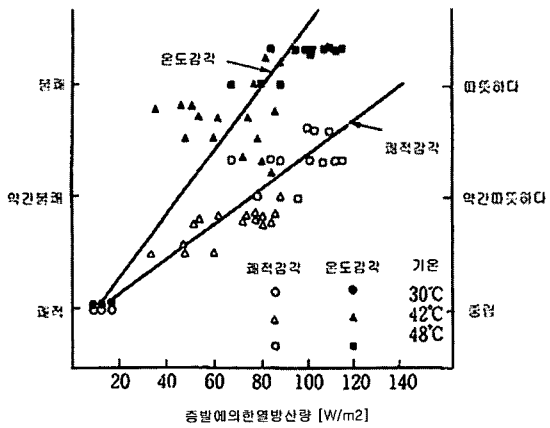
ASHRAE의 「온열환경의 쾌적성(thermal comfort)」의 정의는 「열환경에 대해 만족을 표명할 수 있는 마음의 상태」라 하고 있지만 이것은 아리스토텔레스의 철학에 연결 지어 하디의 생각을 반영한 것으로 볼 수 있다.

온냉감과 쾌적감의 평가척도

인체가 누드로 기온이 28℃정도의 정온 실내에 있을 때, 「덥지도 않고」,「춥지도 않다」는 중립(neutral)의 온도감각을 얻을 수 있지만 이 환경에서는 사람은 일정체온을 유지하는 데에 생리적인 체온조절 노력을 필요로 하지 않는다. 그러나 실온이 서서히 내려가면 냉감을 느끼게 됨과 동시에 추위의 불쾌감이 늘어나게 된다.

한편 열자극을 제거하는 방향으로 「추위」에서 「중립」으로, 「더위」에서 「중립」으로 복귀하는 경우에는 사람은 무의식중에 「선행 할 예감」에 의해서 쾌감을 느끼게 된다.

추위의 불쾌감은 피부온도의 저하와 밀접한 관계가 있다고 한다. 프랑스의 온열생리학자 샤토네(J.Chatonnet)와 갸바나(M.Cabanac)는 국부적 피부의 온냉감각이어도 그때의 평균피부온도나 평균체온의 레벨에 따라서 전신 불쾌감에 큰 영향을 준다는 점을 보고하였다.



[그림 2] 온열성 발한의 증발에 의한 열방산량과 불쾌감, 온도감각의 관계
(Gagge, Stolwijk & Hardy, 1967)

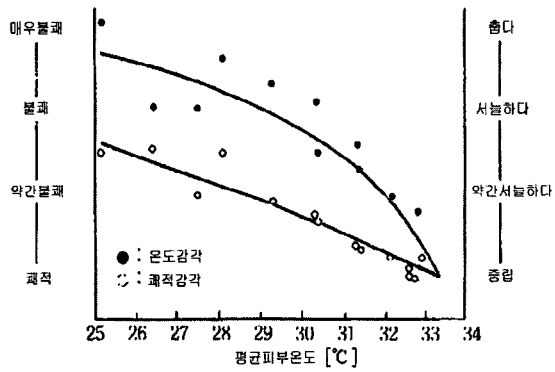
또 더위의 불쾌감은 체온조절을 위한 온열성 발한의 발현 정도와 관련성을 가지고 있다는 점이 알려져 있다. **그림 2**는 땀의 증발에 의한 열방산량과 불쾌감, 온도감각의 관계를 나타낸 것으로 열방산량과 불쾌감 사이에는 직선적인 비례관계가 인정되고 있다.

온도감각과 쾌적감각의 정도를 나타내는 카텍리 스케일로서 **표 1**에 나타낸 A~C가 흔히 이용되고 있다.

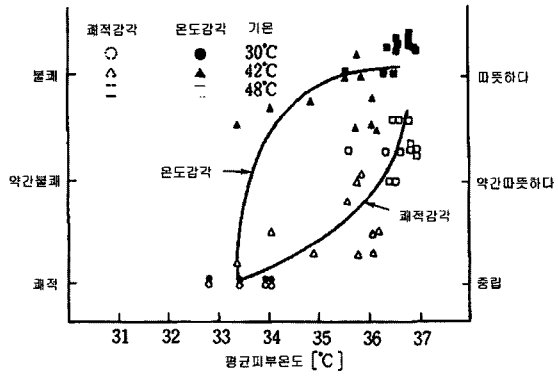
스케일A는 1920년에 시작한 ASHRAE에 의한 온열환경 평가의 일련 연구에 이용된 것이며 「중립(neutral)의 온도감각」의 위치에 쾌적이 위치해 있다.

스케일B와 C는 Gauge 등에 의한 온도감각과 쾌적감각을 명확히 구별한 스케일이다.

그림 3과 **그림 4**는 Gauge 등에 의한 한냉환경 및 고온역에서 평균피부온도와 추운 불쾌감, 온도감각



[그림 3] 한냉에 노출된 때의 평균 피부온도와 쾌불쾌감/온도감각의 관계
(Gagge, Stolwijk & Hardy, 1967)



[그림 4] 고온역에서 평균피부온도와 쾌불쾌감/온도감각의 관계
(Gagge, Stolwijk & Hardy, 1967)

<표 1> 온냉감과 쾌적감의 카테고리 스케일(Gagge, Stolwijk & Hardy,1967)

Scale	-3	-2	-1	0	1	2	3
A	cold 춥다	cool 서늘하다	slightly cool 약간 서늘하다	comfortable 쾌적	slightly warm 약간 따뜻하다	warm 따뜻하다	hot 덥다
B	cold 춥다	cool 서늘하다	slightly cool 약간 서늘하다	neutral 중립	slightly warm 약간 따뜻하다	warm 따뜻하다	hot 덥다
C	very uncom-fortable 매우 불쾌	uncom- fortable 불쾌	slightly uncom-fortable 약간 불쾌	comfortable 쾌적	slightly uncom-fortable 약간 불쾌	uncom- fortable 불쾌	very uncom-fortable 매우 불쾌

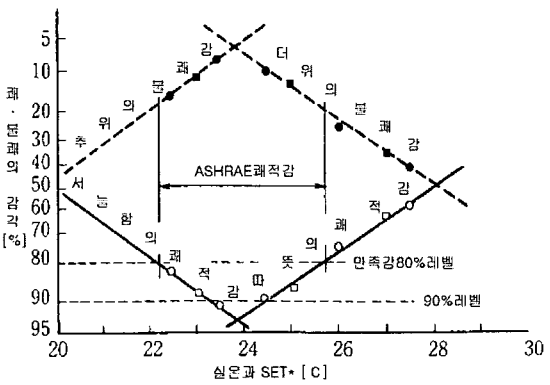
의 관계를 나타낸 것이다. 피부온도의 저하는 불쾌감을 가져다주기 전에 민감하게 추위의 감각으로 연관되는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 더위에 대해서도 피부온도는 민감하게 온도감각에 연관 지어지는 것을 나타내고 있다. 다시 말하자면 온냉수용체에서 감지되는 것으로 생각되는 온도감각과 특별한 감각기에 의하지 않고 「어떤 종류의 인식능력」으로 생각되어지는 쾌적감 및 불쾌감이 기본적으로 다르다는 것은 충분히 이해할 수 있을 것이다.

온열 쾌적성이란 불쾌하지 않다는 것

그림 5는 ASHRAE의 연구 프로젝트의 일환으로서 1975년 뉴욕시 맨하탄의 정부 빌딩 온열환경조사에서 실측한 온열쾌적지표 SET* 와 그곳에서 일하는 492명의 정부직원이 열환경에 대해 만족하는 정도(acceptability)를 나타낸 것이다.

여기에 나타낸 것처럼 어떤 주어진 환경에 대해서 「시원하여서 쾌적」이라 느끼는 사람과 「추워서 불쾌」를 느끼는 사람, 또「따뜻해서 쾌적」에 대해 「더워서 불쾌」를 느끼는 사람이 존재하며 집단의 전체 사람들을 만족시킬 수 있는 온열환경은 존재하지 않는다는 점을 알 수 있다.

이러한 결과를 근거로 하여 ASHRAE는 집단 구성원의 80%이상인 자가 그 환경에 「만족 acceptable」이라 표명할 수 있다면 그 환경을 「쾌적 comfortable」이라 판정하는 것으로 여기고 있으며, ASHRAE의 원문에 따르면 "그 온열환경에 만족을 하는 마음의 상태"라고 정의되어있다. 따라서 온열 쾌적성(thermal comfort)은 재실자의 심리상태, 감각으로 나타내진다. 또 허용 가능한 온열환경이란 재실자 중에서 적어도 80%이상이 그 환경을 허용 할 수 있는 환경이라 정의되어있다.



[그림 5] 실온과 재실 중 집단구성원의 열환경에 대한 만족도 비교

온열환경연구분야에서 이용되고 있는 좁은 의미의 열적쾌적성이란 일반적으로 네가티브(negative)한 상태로 열적으로 불쾌를 느끼지 않는 상태를 말한다. 이것에 대해서 적극적인 쾌적감(pleasantness)도 존재한다. 자연계의 시변동에 동반되는 쾌적성을 인공환경 중에 도입하는 것은 오랜 꿈이다. 그러나 변동을 동반하는 자극은 반드시 재실자 전부에게 쾌적감을 가져다주는 것은 아니다. 건물 내에서는 연령, 활동, 의복, 그 외의 조건이 서로 다른 여러 가지 거주자가 있기 때문이다.

주어진 환경과 스스로 구하는 환경

아주 쾌적이나 마음속 깊이까지 만족이라 느끼는 것은 어떤 경우일까? 쾌적감이나 만족감이 정신이나 마음의 상태이면 온도계로 나타나는 물리적 척도로는 당연히 잴 수 없을 것이다.

아침 일찍 반짝이는 하얀 눈을 밟으며 하얀 숨을 내쉬며 하는 산보는 기온은 낮고 코나 손끝이 차다. 그러나 겨울 공원의 눈에 덮인 수목과 대화를 즐기면서 산보하고 있는 당사자에게는 추위의 감각은 의식 밖에 있다. 그러나 마주 스치며 회사로 급히 가야하는 샐러리맨에게는 추운 눈길은 불쾌한 것 이외에는 아무 것도 아니다.

쌀쌀한 가을의 조깅, 무더위 속에서의 테니스, 얼음 비속의 럭비등도 스스로 추구한 것이면 당사자들은 마음속 바닥에서부터 만족하여 아주 쾌적하다고 느끼는 것이다.

그러면 사무실에서 일하는 사람들은 주어진 온열환경을 아주 쾌적하다고 의식하는 일이 있을 것인가?

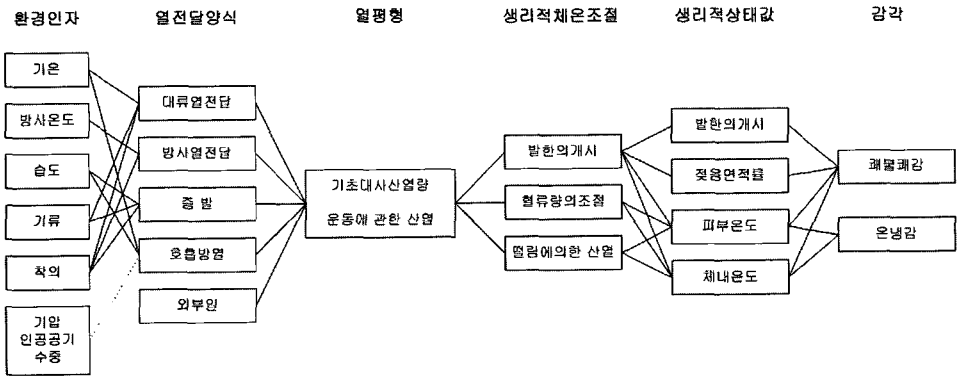
실온이 쾌적하게 조정되어 있는 것이 공기의 존재처럼 당연한 것이며 보통은 그것을 의식하는 일도 없다. 그러나 추워서 그것을 불쾌라 느끼면 사람은 비로소 그것을 의식하여 불만을 호소하는 것이다. 즉 대다수의 사람들을 만족시키는 쾌적을 달성하는 것은 당연히 불쾌를 배제하는 일이다.

스케일 B에 나타낸 중립의 온도감각은 최대공약수적인 의미이며 쾌적으로 연관되는 것이다. 최대공약수적 쾌적과 하디가 주장한 정신상태로 연결되는 만족감, 쾌적감과는 질적으로 서로 다른 것은 명백한 것이다.

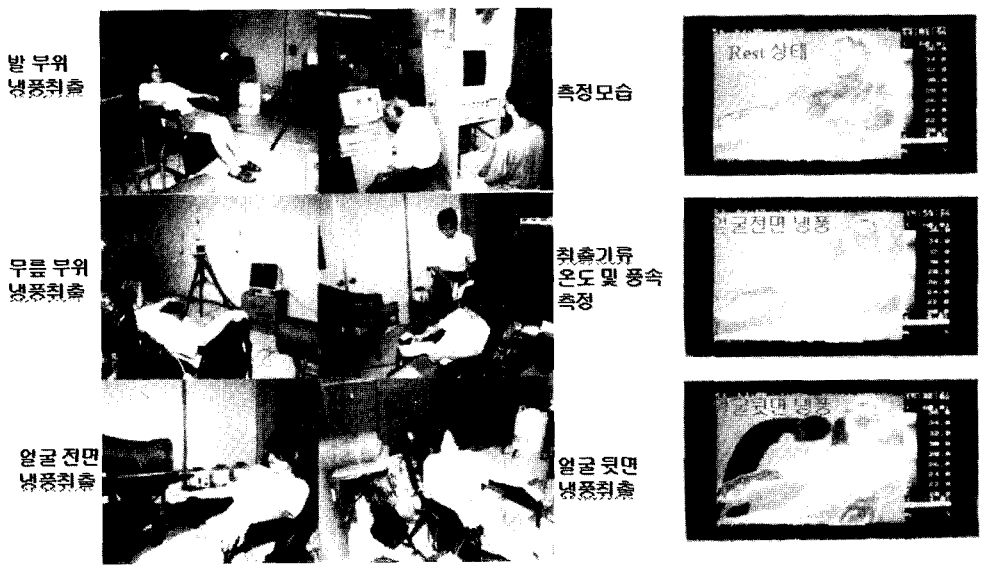
온열 쾌적감의 정량화

온냉감 및 쾌적감은 인체와 환경사이의 열평형 상태와 아주 밀접한 관계가 있다. **그림 6**은 환경의 온열성 물리인자, 인간과 환경사이의 열전달, 열평형, 생리적조기능, 그리고 그 결과에 의해 정해진 생리적 상태치 그리고 그것을 사람이 감각으로 인식하는 것을 관련지어 나타냈다.

생리적 반응으로 나타나는 체온, 피부온, 혈압, 혈류량, 발한량, 맥박 등은 특히 온냉감을 파악하는 상태치로 알려져 쾌적성 관련 연구에서 조사되어 정량화되어 지고 있다. 물론 심리적 반응으로도 온냉감, 쾌적감, 기류감, 방사감, 습도감 등이 체감실험을 통한 신고치를 통해서 정량화되어지고 있다. 이와 같은 연구들은 온열환경의 쾌적 범위를 정하거나 PMV 또는 SET* 와 같은 대표적인 온열환경의 쾌적성 평



[그림 6] 환경인자와 온열쾌적감과의 관계



[그림 7] 온열환경 변화시 심리생리량 및 열화상 이미지 계측 장면

가 지표를 만드는 데에 활용되기도 한다. 그러나 심리적 반응을 조사하는 것은 피체험자의 개개인이 직접 신고하여 얻어지는 것이나 상당히 주관적인 신고가 될 가능성을 배제하지 않을 수 없다. 따라서 이와 같은 심리적인 변화를 나타는 생리량을 조사하여 과학적으로 증명 시키려는 연구들이 수행되고 있는 데 주로 EEG, ECG 등을 계측하여 온열쾌적감과의 관계를 탐구하여 심리적 변화를 구별할 수 있는 생리량으로 사용하고 있다.

그림 7은 온열환경 변화에 따른 EEG(electroencephalogram), ECG(electrocardiogram) 열화상이미지 등을 계측하고 있는 모습이다.

온열쾌적성을 향상시키는 기술 사례

1/f 흔들림 제어

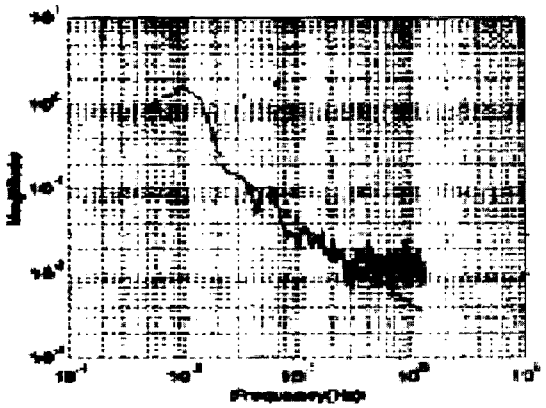
조용한 해변에서의 파도소리, 졸졸 흐르는 시냇물 소리, 고원의 산들바람 등 자연속의 대부분 현상은 기준점이 없고 미묘한 흔들림 현상이 있어서 인간이 기분이 좋다고 느끼는 현상의 흔들림을 주파수와 강도로 해석해보면 **그림 8**과 같이 일정한 규칙성이 있다. 이런 경향은 인간의 릴렉스 상태의 심장고동이나 뇌파도 같은 규칙성을 가진다. 또한 비발디의 「사계」를 모눈 눈금의 그래프에 기입하면 같은 규칙성에 강도가 주파수에 역비례하는 역 45° 의 각도가 된다. 이와 같이 인문과학과 자연과학의 가운데에서 생겨난 쾌적이론이 1/f흔들림이다. 이 쾌적이론을 바탕으로 마치 자연속의 미풍(산들바람)과 같은 미묘한 콘트롤로 바람을 보내는 것이 개발되기도 하였다.

그림 9는 측정된 자연바람의 특성치를 에어컨의 팬-모터의 제어신호로 입력하여 자연바람의 특성을 재현할 수 있는 것을 보여준 것이다.

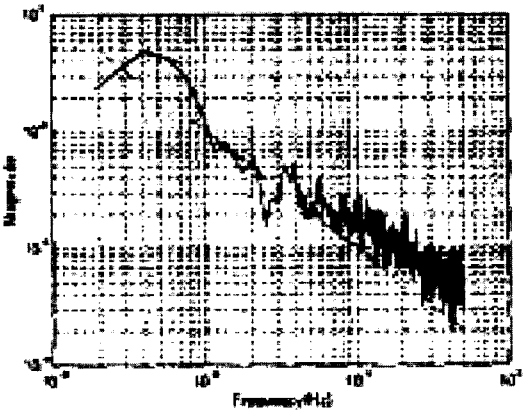
온열쾌적센서에 의한 제어

사람이 있는 장소에서 온도나 습도 뿐 만이 아니라 인간의 쾌적성에 영향을 미치는 다른 환경 요소인 기류와 복사를 검지하며 인간의 대사량이나 착의량도 미리 고려하여 인간이 느끼는 온열감각을 판단할 수 있는 센서를 이용한 쾌적제어이다.

인체는 생명활동을 유지하기 위해서 체내에서 대사를 하여 발열을 함과 동시에 대류, 복사, 증발 등에 의해서 환경과 열교환을 하여 체온을 일정하게 유지하도록 체온조절을 한다. 인체의 온열적인 감각은 혈류량을 제어하거나 발한이 몸떨림 등을 일어나도록 하여 그 체온조절의 부하가 클수록 인체 온열감각이 나쁘게 되고 이 감각은 주위환경과 인체의 접점인 인체피부온도와 상관을 갖고 있다. 따라서 인체와 같이 발열시켜서 그 표면온도를 측정하는 센서가 있다면 인체의 온열감각을 추정할 수 있지만 인체와 똑같은 대류나 증발에 의한 열교환을 일으키게 하려면 너무 크게 되므로 에어컨에 탑재하는 센서로는 부적합하다. 그래서 구성이나 형상을 궁리하여 검지부를 소형화하더라도 대류나 방사에 대한 감도가 인체와 등가가 되도록 한 센서의 구조를 **그림**



[그림 8] 자연바람의 주파수 특성



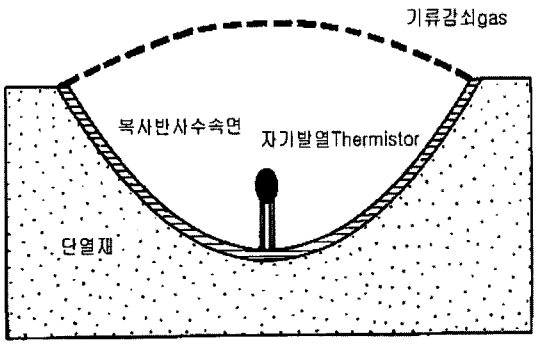
[그림 9] 자연바람의 주파수 특성

10에 나타냈다.

이 센서는 광택이 있는 포물선형상면의 초점위치에 설치한 자기발열 thermistor와 개구부를 덮고 있는 기류감쇠 커버로 구성되어 있다. 이 자기발열 thermistor의 표면온도를 인체 피부상당온도로 유지하도록 전류를 흘리어 제어하며 이때의 부하를 전압으로 검출하는 것이다.

바이오리듬 제어

인간의 생체는 지구환경의 주기적 변화에 대응하여 그 기능을 동조시키는 적응성을 보여준다. 이 자율성 생체리듬(biological rhythm)을 해명하여 공조콘트롤에 응용한다. 생체의 리듬의 주기는 초에서 년까지 광범위한데 특히 주목하고 싶은 것은 지구의 자전과 거의 같은 약 24시간의 주기현상(일주리듬 : 사카디안 리듬)이다. 이 리듬은 체온, 대사, 혈압, 호르몬, 교감신경 등 대부분이 생리기능에서 보여주는 것으로서 환경의 변화에 대해서 유연하게 준비하는 적응적인 활동을 가지고 있다고 생각된다. 즉 생체리듬에 따라서 인간은 자연환경과 더불어 건강하게 존재한다고 여겨진다. 바이오리듬 콘트롤은 개인의 생체리듬에 공기환경제어를 동조시켜 개인의 생리에 최적의 공조를 실현시킬 수 있는 것이다. 이러한 것은 최근 비약적인 발전을 한 의료기기 기술과의 접목에 의해 **그림 11**에서 보는 바와 같이 손목시계나 팔찌의 센서(개인 신체에 부착)로 맥박이나 발한 및 체온 등 개인의 신체상태를 검지하여 공조를 제어하는 것이다.



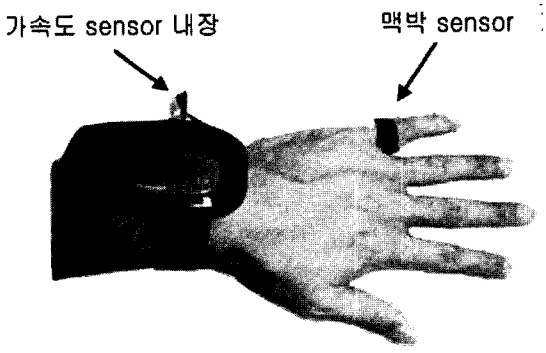
[그림 10] 온열쾌적센서의 구조

결 론

온열환경의 쾌적성에 대해서는 현재 온도조절의 수준에서 점차적으로 인간의 오감에서 느끼는 생리적 욕구를 충족시켜 인간에게 스트레스를 주지 않도록 제어하는 수준으로는 되어 오고 있지만 인간의 감성까지 만족시켜주는 이상적인 수준까지는 이르지 않았다고 볼 수 있다. 금후는 인간의 온열감각을 정량화시키는 데에 있어서도 정상상태를 주체로 하기 보다는 비정상 환경, 불균일 환경 등에서 인간의 전신 및 국부적인 온열쾌적감을 해명하여 이를 근거로 쾌적한 온열환경을 실현하는 공조기기의 개발이 이루어 져야 할 것이다. 또한 앞으로의 유비커터스 시대에서는 집 밖에서 손에 찬 시계를 이용해 인터넷에 접속해 날씨를 알아보고 본인의 신체리듬을 최적으로 조절할 수 있도록 집안에 있는 공조장치로 실내환경의 물리적요소를 원격으로 조절할 수 있게 될 것으로 본다. 이 같은 일들은 더 이상 공상과학 영화에서나 접할 수 있는 환상이 아니라 미래에는 이러한 것들이 필수적으로 개발되어 인간에게 건강과 쾌적성을 가져다 줄 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 入來正躬 : 第4章 溫調節機構, 中山昭雄編, 溫熱生理學, p. 217, 理工學社, 1981
2. 西 安信 : 熱環境の快適性の考え方とその評熱と環境, Vol. 28, p. 1, ダウ化工, 1990



[그림 11] 착용 가능한 수면센서의 개관 (일본 다이킨사 제품)

3. Hardy, J. D. : Chapter 57. Physiological and Behavioral Temperature Regulation, p. 856, C. Thomas Pub., 1970
4. ASHRAE Standard : Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE, 1992
5. Chatonnet, J. & M. Cabance : The perception of thermal comfort, Inter. J. of Biometeorology, Vol.2, p. 183, 1965
6. Gagge, A. P., J. A. J. Stolwijk & J. D. Hardy : Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambit temperature, Environmental Research. Vol. 1, p. 1, 1967
7. 西 安信 : 第2章 人体との熱交換, 中山昭雄編, 溫熱生理學, p. 33, 理工學社, 1981
8. 大野秀夫 : 快適環境の科學, p. 11, 朝倉書店
9. Fanger, P. O. : Calculation of thermal comfort, introduction of a basic comfort equation, ASHRAE Transactions, 1967
10. 佐 方産 : 生活科學のすすめ, 井上書院 1998
11. 井口征士 : 感性情報處理, オーム社, 1994
12. 長町三生 : 快適科學, 人間側からみた商品づくりへ, 海文堂, 1992
13. 금종수, 온열쾌적감 측정기술 및 DB개발, 부경대학교, 1998
14. 西 安信 :快適な溫熱環境のメカニズム, 豊かな生活空間をめざして, 空氣調和・衛生工學會
15. 심민섭, 금종수, 박종한, 성시풍, 변일수, 자연바람의 특성분석 및 구현, 한국생활환경학회 추계학술발표대회(1994) p.27
16. ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-92 : Thermal environmental conditions for human occupancy, 1992