

실내공기질의 건강성능 평가모델 연구

A Health Performance Evaluation Model of Building
Indoor Air Quality

정기* 이동훈** 최재휘*** 김선국****
ZHENG, QI Lee, Dong-Hoon Choi, Jae Hwi Kim, Sun-Kuk

Abstract

As indoor air quality directly affects health and comforts of the residents, researchers from different countries have continued to explore criteria by which indoor air quality can be indicated in a scientific and quantitative manner over the past several decades. However, there are many possibilities that can deteriorate indoor air quality. Due to the uncertainty of influence factors, it is quite difficult to develop a correct evaluation model and quantitative method. Furthermore, the effects from the indoor air pollutants have different levels, leading to the difficulties to apply the regular standard. This study aims to propose evaluation criteria by using the FD-AHP analysis. Obtained findings will be beneficial to construct apartment buildings, commercial buildings and others health performance evaluation framework.

키워드 : 실내공기질, 건강성능, 평가모델, FD-AHP기법

Keywords: Indoor Air Quality (IAQ), Health Performance, Evaluation Model, FD-AHP

1. 서론

최근 자료에 의하면 한국인들은 95.4%를 실내에서 지내고 있는 것으로 조사되었으며(KEI, 2001), 이에 따라 실내공기질(Indoor Air Quality, IAQ)의 건강성능에 대한 관심이 점차 증대되고 있다. 또한, 개인소득 및 과학기술의 발전에 따라 일반인들이 주거건강 및 개인건강에 대한 관심이 증대되고 있으며, WHO가 제안하고 있는 건강주택(healthy housing)¹⁾에 대한 관심도 높아지고 있다. 따라서 실내공기질의 건강성능에 관한 연구의 중요성도 높아지고 있다.

실내공기질은 거주자의 건강에 영향을 미치는 원인이 주로 공기 중에서 존재한 오염물질이며, 이는 거주자의 삶의 방식과 직접적인 연관이 있다(공성용 외, 2004). 예를 들어, 실내 장식을 위해 많은 가구, 방향제 등의 생활용품의 사용이 증가하면서 휘발성 유기화합물(VOCs), 부유분진(TSP) 등의 오염물질이 발생된다. 거주자의 취사활

동으로 의해서 CO, NO₂ 등의 오염물질을 발생한다. 또한, 에너지 절약을 위해 건물이 밀폐되고 자연환기 횟수가 감소하면서 오염물질의 농도가 증가된다(공성용 외, 2004, 김봉애, 2008). 그 결과 아토피와 같은 피부질환, 호흡기 질환, 알레르기 등의 질병이 증가되며(Sundell, 2009), 특히, 매년 실내공기 오염으로 인해 약 160만명 조산아가 사망한다(WHO, 2002). 따라서 건강한 실내 환경을 조성하기 위하여 공기질을 평가하는 연구가 선행되어야 한다.

실내공기 악화 요인은 다양하게 존재하며, 영향인자들이 불명확하기 때문에 정량적으로 정확한 평가모형 및 방법을 개발하기 어렵다(Zhu, 2007). 기존 연구를 살펴보면, 휘발성유기물질(VOCs), 포름알데히드(formaldehyde), 일산화탄소(CO) 등 실내오염물질을 중심으로 진행된 연구(Uhde, 2007, 김선숙 외, 2008), 담배, 건축자재, 인체의 활동 등 오염물질 발생원을 중심으로 진행된 연구(WHO, 2000, Jamrozik, 2005), 온열환경 및 환기조건을 중심으로 진행된 연구(Sekhar, 2002) 등이 있으나 아직까지 실내공기질의 건강성능을 종합적으로 평가한 연구는 없다.

또한, 실내공기 오염물질들은 거주자의 건강에 영향을 미치는 정도가 다르기 때문에 일정한 기준으로 평가하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 건축물의 실내공기질의 건강성능을 종합적 평가하는 모델을 제시하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 공동주택, 상업건물 등의 다양한 건축물의 건강성능평가 기준 마련 및 제도 구축에 활용될 수 있다.

* 경희대학교 건축공학과 석사과정
(jianchao@khu.ac.kr)

** 교신저자, 경희대학교 건축공학과 박사과정
(dr.lee.kor@gmail.com)

*** 경희대학교 건축공학과 석사과정
(chjheda@naver.com)

**** 경희대학교 공과대학 교수, 공학박사
(kimsuk@khu.ac.kr)

1) WHO Regional Office for Europe, <Housing and Health: Identifying priorities>, 2003

본 연구에서는 실내공기질의 건강성능 평가모델을 제시하기 위하여 FD-AHP(Fuzzy Delphi-Analytic Hierarchy Process)기법에 대해 고찰하고, 건강건축 측면에서 실내공기질의 건강성능 평가요소를 도출한다. 도출된 평가요소를 대상으로 오염물질, 오염원 제어 수준, 환기성능 수준, 거주자의 주관적 판단 등 4가지 측면에서 전문가 인터뷰를 통하여 최종 평가요소를 확정한다. 이 요소들과 함께 FD-AHP기법을 활용하여 각 평가요소의 가중치를 산정한 후 기존 평가방법 및 배점방식을 고려하여 실내공기질 건강성능의 평가모델을 제시한다.

2. 퍼지 델파이 AHP 기법 (FD-AHP)

2.1 FD-AHP 기법의 개요

FD-AHP 기법은 AHP를 기반으로 퍼지 델파이 기법을 접목시킨 새로운 의사결정모델이다. 이의 목적은 AHP와 마찬가지로 복수 대안들 중에서 최선의 대안을 선택하는 의사결정문제에 대하여 쌍대비교(pairwise comparison)를 통해 평가결과를 정량적, 체계적으로 정리함으로써 그 결과를 의사결정에 반영하는 기법이다. 기존 AHP의 경우 평가요소들 간의 상관관계를 고려하지 않고 각 대안의 우선순위를 결정하는 것은 많은 불확실성과 오차를 내포하고 있으며 의사결정자의 순위역전 현상 등의 문제점을 발생시킬 수도 있다(Liu, 2002).

Hsu(1998)는 FD-AHP에 대하여 “여러 의사결정의 공식적인 문제를 해결할 뿐만 아니라 퍼지 다속성 의사결정의 계산방법을 간단하게 할 수 있으며, 상황이 변했을 때 나타나는 의사결정문제 및 평가요소의 순위역전 등의 문제를 해결할 수 있다”는 것을 제시하였다. 참고로 FD-AHP의 구조형식은 그림 1과 같다.

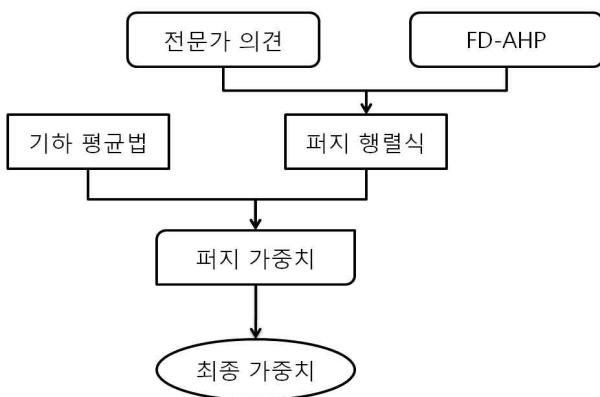


그림 1. FD-AHP의 구조형식(Hsu, 1998)

2.2 FD-AHP 기법의 절차

FD-AHP 기법의 절차를 구체적으로 살펴보면 다음과 같이 5단계 과정을 거쳐 수행된다.

1) 계층구조화

의사결정 목표단계에서 해당 목표를 최상위에 설정하

고, 이 목표를 달성하기 위한 세부목표 및 이와 관련 평가요소들을 설정한다. 그림 2와 같이 세부목표 및 평가요소들의 관계를 연계적으로 분석하여 계층구조화를 한다.

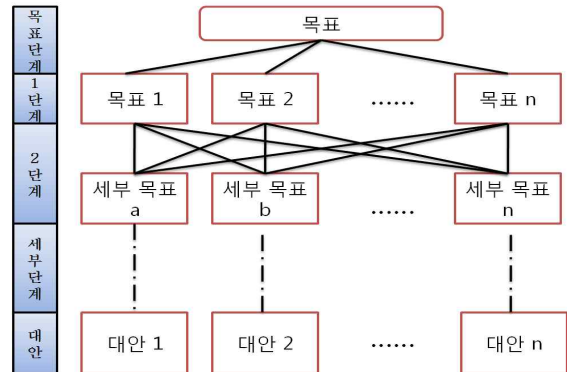


그림 2. 평가요소 계층도

2) 쌍대비교

평가요소들의 중요도를 비교하기 위하여 전문가 설문조사를 수행한 후 쌍대비교법을 이용하여 요소들 간의 중요도를 평가한다. 즉, 쌍대비교를 위하여 한 번에 두 개의 요소들을 상호 비교하는 방법을 사용한다. 쌍대비교에서 사용되는 척도의 범위는 일반적으로 중요도에 따라 1에서 9까지 숫자를 사용한다. 동일계층 요소들을 대상으로 쌍대비교를 실시하여 식(1)과 같은 쌍대비교 매트릭스 $A = [a_{ij}]$ 를 산정한다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \hat{a}_{12} & \dots & \hat{a}_{1n} \\ 1/\hat{a}_{21} & 1 & \dots & \hat{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\hat{a}_{n1} & 1/\hat{a}_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$\hat{a}_{ij} = \begin{cases} 1, 3, 5, 7, 9 & i < j \\ 1 & i = j \\ 1^{-1}, 3^{-1}, 5^{-1}, 7^{-1}, 9^{-1} & i > j \end{cases} \dots \dots (1)$$

$$\hat{a}_{ij} \times \hat{a}_{ji} = 1$$

3) 논리적 일관성

논리적 일관성의 검토는 AHP와 같이 의사결정 참여자들의 설문내용이 얼마나 논리적 일관성을 유지하는가를 평가하는 것이다. 일관성 비율이 10% 이내인 경우에만 설문참여자가 답변한 서수적 순위에 무리가 없는 신뢰할 수 있는 결과라고 인정할 수 있다. 일관성 비율은 일관성지수(Consistency Index: CI)와 행렬의 크기 n에 해당하는 무작위 확률지수(Random Index: RI)를 이용하여 다음 식 (2)와 같이 산정할 수 있다.

$$\text{일관성 지수(CI)} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \dots \dots (2)$$

$$\text{일관성 비율(CR)} = (CI/RI) * 100\%$$

λ_{\max} : 최대고유치, n:행렬의 크기

4) 삼각퍼지함수의 적용

설문에 참여한 전문가의 평가결과는 삼각퍼지함수(triangular fuzzy number)에 의하여 객관화된다(Hsu, 1998). 그림 2의 평가요소 계층도에 열거된 모든 요소들을 대상으로 각기 두개의 평가요소를 쌍대비교 할 때, 전문가의 의사결정 형식은 3 가지(최소치, 최대치와 최적치)로 나타낼 수 있다. 여기서 최소치와 최대치는 전문가의 극단적인 의사결정 표현형식으로 볼 수 있으며, 이 사이에 가장 확신을 가지고 나타낼 수 있는 결과는 최적치로 표현할 수 있다. 그 중 최적치는 모든 전문가가 선택한 의사결정 결과의 기하 평균치로 표현할 수 있다(Saaty, 1980).

따라서 이 3가지 대표값을 가지고 전체 전문가의 의사결정결과를 반영할 수 있으며 퍼지삼각함수로 표시하면 그림 3과 같다. 여기서 U(x)는 의사결정 결과의 가능성(확률값)을 의미하며, x는 의사결정 값을 의미한다. a는 최소치, b는 기하평균치, c는 최대치를 의미한다. 이를 함수형식으로 표시하면 식 (3)과 같다. 이때 $a < b < c$ 를 만족해야 하며, k는 평가요소에 대한 각 전문가들의 평가치를 의미한다.

$$T.F.N=(a, b, c)$$

$$a = \text{Min}[a_{ij}]_k, b = \left(\prod_{k=1}^n [a_{ij}]_k \right)^{\frac{1}{n}}, c = \text{Max}[a_{ij}]_k \dots (3)$$

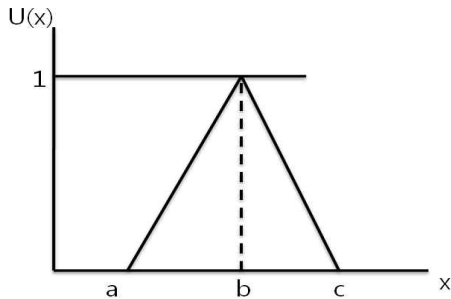


그림 3. 퍼지삼각함수의 개념도

참고로 삼각퍼지함수를 도입한 후 쌍대비교 매트릭스는 다음 표 1과 같이 작성한다.

표 1. 삼각퍼지함수 도입한 쌍대비교 매트릭스

	평가요소1	평가요소2
평가요소1	(1, 1, 1)	(a, b, c)
평가요소2	(1/c, 1/b, 1/a)	(1, 1, 1)

5) 가중치의 도출

퍼지행렬식에 대한 계산 방법은 식(4)와 같이 벡터기하평균법(column vector geometric mean method)을 이용하여 퍼지 벡터(\widehat{W}_i)로 계산되며 그 내용은 식 (4)와 같다.

$$\widehat{A}_i = [a_{ij} \times \dots \times a_{ei}]^{\frac{1}{n}}$$

$$\widehat{W}_i = \widehat{A}_i \times [\widehat{A}_i + \dots + \widehat{A}_n]^{-1} \dots (4)$$

식(4)에 의하면 퍼지 벡터(\widehat{W}_i)의 계산 결과는 각기 최소($\text{Min} \widehat{W}_i$), 기하평균($\prod_{k=1}^n \widehat{W}_i$), 최대로($\text{Max} \widehat{W}_i$)로 나타나고, 식 (5)에 의한 기하 평균법을 사용하여 최종 가중치 벡터(W_i)가 산정된다. 이때 각 단계별 평가요소에서 산정된 가중치 합이 1이 되도록 계산한다.

$$W_i = \sqrt[n]{\text{Min} \widehat{W}_i \times \prod_{k=1}^n \widehat{W}_i \times \text{Max} \widehat{W}_i \dots} (5)$$

3. 실내공기질 건강성능 평가모델의 개발

본 연구는 FD-AHP 기법을 이용하여 실내공기질의 건강성능 평가모델을 개발하는 것으로 모델 구축 프로세스는 그림 4와 같다. 먼저 문헌조사 및 전문가 면담 등의 과정을 거쳐 건강성능 평가요소를 선정 한 후 이 요소들의 계층구조를 설정한다. 이후 전문가 설문을 통해 평가요소별 중요도 척도값을 얻는다. 설문결과에 대하여 FD-AHP 기법에 의해 계층구조별 가중치를 산정한다.

실내공기질의 건강성능 평가요소들은 각기 다른 평가기준을 가지고 있기 때문에 이들을 대상으로 일관된 배점을 부여하는 기준을 설정하여야 한다. 또한 실내공기질에 영향을 미치는 정도를 결정하기 위하여 각 요소별 건강성능 등급을 설정하여야 한다.

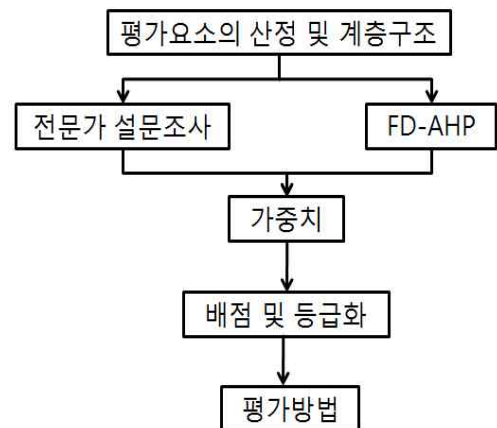


그림 4. 평가모델 개발 절차

3.1 평가요소의 도출

실내공기질에 관한 평가기준을 살펴보면 일반적으로 실내공기환경 유지를 위한 환기규정, 건축자재와 인테리어 재료들이 공기질에 미치는 영향의 평가기준, 실내오염물질에 대한 평가기준으로 나눌 수 있다(표 2 참조). 참고로 주요 국가별 실내공기질 평가요소는 각 국가별로 평가요소가 다소 상이하다. 대표적인 오염물질별로 살펴보면 CO₂의 경우 ASHRAE와 일본건축기준법이 1,000ppm으로 동일하게 설정하고 있으나, 포름알데히드의 경우 0.1ppm(ASHRAE), 0.08ppm(WHO Europe), NO₂의 경우 0.21ppm(WHO Europe: 1시간 평균), 0.075ppm(WHO Europe: 24

표 2. 현행 각국의 실내공기질 평가기준

평가기준	운영기관(국가)	내용	비고
ASHRAE	ASHRAE (미국)	환기 및 공기질과 관련 기준	실내공기질이 고려된 실내공기환경 유지를 위한 환기규정의 제시
EPA	U.S.EPA (미국)	실내공기질의 평가제도	실내공기의 질이 고려된 실내공기환경 유지를 위한 환기규정을 제시
NMRC	보건부 (호주)	실내공기오염에 대한 측정	-
DEFRA	환경국 (영국)	실내오염에 대한 측정	실내공기질을 관리하여 생산성이 향상될 수 있도록 목표와 평가지표를 단계적으로 설정
실내환경인증 제도(ICL)	환경보호청 (덴마크)	건축자재와 설비의 기준	건물자재와 인테리어 재료들이 실내환경에 미치는 영향의 증시하며, VOCs, Radon, HCHO등을 통제
PRTR법	환경성 (일본)	실내 화학물질에 대한 기준	실내 화학물질에 의한 환경오염에 의해 생기는 사람의 건강이나 생태계에 대한 영향을 측정
AQG	WHO	건강을 위한 평가기준법	Formaldehyde, Benzene, NO ₂ , CO, Radon, Particulate matter, Toluene, Styrene, O ₃ 등 오염물질 중심으로 평가

시간 평균), 0.053ppm(WHO Europe: 24시간 평균) 등과 같이 다소 상이하게 기준을 설정하고 있다. 또한, 최근의 연구에 의하면 실내공기 오염의 주된 배출원은 크게 거주자의 활동에 기인한 것, 건축자재에 기인한 것, 각종 설비에 의한 것, 외부환경에 의한 것 등으로 나뉜다.

한편 WHO(2006)의 보고서에 의하면 건강하고 쾌적한 실내공기질을 확보하기 위하여 실내오염물질을 측정할 뿐만 아니라 건축물의 설계, 운영, 자재, 통풍, 거주자의 만족도 등 다양한 평가영역을 추가적으로 고려해야 한다고 제시하였다. 특히, 천장의 높이 및 창문의 개수, 크기 등을 확보하고 라돈 가스, 진드기의 제어, 흡연구역의 제어, 친환경 건축자재의 사용 등을 실내공기질의 영향요인으로 명시하였다.

실내공기질에 의한 건강성능 평가를 위해 WHO(2006)에서 제시한 모든 오염원을 대상으로 연구를 진행하는 것은 많은 노력과 시간을 필요로 하며, 다양한 기법이 개발

되어야 한다. 또한, 현재 각국의 실내공기질의 평가내용 및 WHO(2006)를 참고하며, 단순히 오염물질에 대한 평가 뿐 아니라 환기성능, 건축자재, 오염원의 제어, 거주자의 정신적 평가도 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실내공기질에 의한 건강성능은 크게 오염물질의 양, 오염원 제거 수준, 환기성능, 주관적 판단에 의해 결정되는 것으로 설정하고 연구를 진행하였다. 이를 위해 기존 연구 및 WHO에서 제시된 건강한 실내공기질의 영향 요인을 참조하여 '후각만족도(PDA)', '흡연환경(ETS)의 제어', '온·습도의 유지', '실내오염물질 저방출 자재의 사용', '환기 효율성', 'CO₂ 농도', 'CO 농도', 'SO₂ 농도', 'NO₂ 농도', 'TSP농도', 'Radon 농도', 'VOCs 농도', '포름알데히드 농도' 등 총 13가지 평가요소를 도출하였다.

이 평가요소들을 대상으로 평가목적의 부합성 및 객관성, 평가요소의 중요도, 평가의 용이성, 정량적 평가 가능성, 거주자 요구사항의 충실도 등을 고려하여 관련 전문

표 3. 실내공기질 건강성능의 평가영역 및 평가요소의 설명

평가영역	평가요소	평가요소의 설명
오염물질량	Radon 농도	라돈은 무색, 무미, 무취의 방사성 가스이다. 실내에서는 건물 지반이나 주변 토양, 광석, 상수도 및 건축자재, 또한, 요리나 난방 목적으로 사용되는 천연가스 등에서 발생된다. 라돈 및 라돈의 부산 물질은 호흡기계 질환, 특히 폐암을 유발한다.
	CO 농도	CO는 화석연료의 불완전 연소에 의해 발생되는데 실내에서 사용하는 난방기기 및 조리용 버너 등이 주요 배출원이다. CO의 급성 중독은 뇌조직과 신경계통에 가장 많은 피해를 가져오며 증상은 시야 감소, 정신적 영향, 생리적 영향, 중독 피해 등이며, 만성적인 영향으로는 성장장애, 만성 호흡기질환 발생 등의 영향을 미치게 된다.
	NO ₂ 농도	NO ₂ 은 고온 연소시에 공기 중의 산소와 질소가 반응하여 발생하므로 실내에서는 취사용 시설이나 난방, 흡연 등이 주 원인이다. 혈중 헤모글로빈의 산소 운반능력을 저하시키고, 수 시간 내에 호흡곤란을 수반한 폐수종 염증을 일으키는 독성이 강한 물질이다.
	부유분진(TSP) 농도	부유분진은 외부공기의 유입이 주된 원인이라면, 실내의 거주자의 활동이나 연소 등도 원인이 된다. 이는 인체에 만성 호흡기 질환으로 기침, 호흡곤란 등의 증상을 초래한다. 이와 더불어 중금속 등이 흡착되어 있어 다양한 질병들의 발생과도 많은 관련이 있다.
오염원 제어	실내오염물질 저방출자재사용	실내공기오염물질 중 VOCs, 포름알데히드 등의 유기 오염물질은 주로 건축자재에서 방출된다. 따라서 이 두 가지 오염물질을 통하여 평가될 수 있다.
	흡연환경(ETS)의 제어수준	담배연기는 수 천 가지의 발암성 물질이 포함되어 있고, 인체에 영향을 미치고 있는 연구결과 밝혀졌다. 방출원인에 의하여 CO, NO ₂ , SO ₂ 방출량을 통해 평가할 수 있다.
환기성능	온·습도의 유지	온·습도의 변화에 따라 곰팡이나 진드기 등의 미생물질이 생기는 양이 다르다. 따라서 곰팡이나 진드기 등의 미생물질은 전염성 질환, 호흡기 질환 등을 유발시킨다
	환기효율성	환기는 주요 오염물질의 농도를 적절한 수준으로 유지하기 위하여 실내공기를 하는 것을 의미한다. 그 중에 가장 많이 존재하는 물질인CO ₂ 농도로 반영할 수 있다.
주관적 판단	후각만족도(PDA)	실내공기질의 쾌적여부는 사람의 감각을 통해서 직접 판단할 수 있다.

가에게 설문조사 및 인터뷰를 실시하였다. 그 결과 CO₂는 지구온난화가 발생하는 주요 오염물질이며, 건축공사 시 다량으로 배출되므로 매우 중요한 요소로 볼 수 있지만, 실내에서는 주로 인체로부터 나오기 때문에 주요한 실내 공기 오염물질이라 보기 어렵다고 판정하였다.

어울러 환기 효율성을 평가할 때 CO₂ 농도가 참조되므로 평가요소에서 제외하였다. 또한, SO₂는 자동차 폐기가스 중에서 다량 방출되는데 실내에서 많이 발생하지 않고 주로 흡연행위를 통하여 발생하기 때문에 흡연환경의 제어수준을 평가할 때 포함된다. 'VOCs 농도'와 '포름알데히드 농도'의 경우에는 주로 건축자재에서 오염을 발생하기 때문에 실내오염물질 저방출 자재사용 평가 시 포함된다. 이러한 내용을 전제로 오염물질을 정리하면 표 3과 같이 4개의 평가영역과 9개의 세부 평가요소로 정리된다.

3.2 평가요소의 계층구조

FD-AHP 기법을 적용하기 위하여 앞에서 도출된 평가영역과 요소를 계층화 한다. 계층을 구성하는 원리는 하위 수준에 있는 모든 항목과 요소가 상위 수준에 있는 분류 체계의 평가요소가 되는 것이다. 계층적 구조로 구성된 평가모델은 합산결과와 상세결과를 모두 제공할 수 있다는 장점이 있다. 합산결과는 사용자가 실내공기질에 의한 건강성능 수준을 종합 판단하는 데 유용하며, 상세결과는 항목별 성능수준을 파악하는데 이용될 수 있다.

본 연구에서는 실내공기질 건강성능 평가를 최종 목표로 설정하며, 하위로 오염물질, 오염원 제어, 환기성능, 주관적 판단 4개 항목을 설정하고 이와 관련 하위 평가요소는 오염물질 관련 요소 4개, 실내오염물질 저방출 자재사용을 포함한 오염원 제어 관련 요소 2개, 환기성능 관련 2개, 주관적 판단 관련 요소 1개의 총 9개 평가요소를 설정한다. 이들 평가요소에 대한 계층도는 그림 5와 같다.

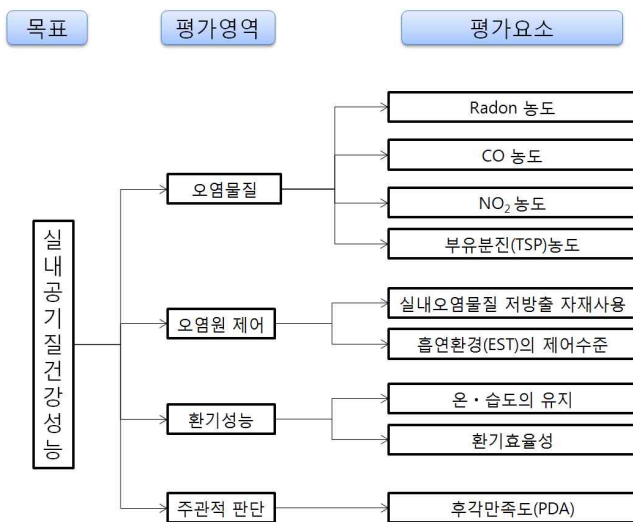


그림 5. 평가요소의 계층도

3.3 평가요소의 가중치 산정

3.3.1 설문조사

본 연구에서는 실내공기질 건강성능을 목적으로 하위 4가지 평가영역, 소분류 9가지 평가요소의 중요도(가중치)를 판단하기 위하여 설문조사를 실시하였다. 설문조사는 평가목적에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 건설분야의 실내공기질 관련 전문가를 대상으로 실시하였다. 설문조사 기간은 10월9일부터 10월18일까지 진행하였으며, 총 20부를 메일로 보내어 20부 100%를 회수하였다.

전문가 설문조사에서 얻어진 데이터는 식 (2)에 의한 논리적 일관성을 검토하며, CI<0.1를 만족해야 한다. 얻어진 설문조사 결과를 검토한 결과 17부(85%)가 통과하여 이들을 대상으로 가중치를 산정하였다.

3.3.2 가중치의 산정

3.2절에서 도출된 평가요소 간의 중요도(가중치)는 전문가 설문결과를 이용하여 FD-AHP 기법에 의해 계산한다. 예를 들면, 4가지 평가영역에 대한 중요도를 계산하자면 우선 얻어진 전문가 답변 자료를 식 (3)에 의해 최솟치, 기하평균치, 최대치로 계산한 후 표 4와 같이 평가영역 관련 퍼지 매트릭스를 산정한다(표 1 참조).

표 4. 평가영역의 퍼지 매트릭스

평가영역	오염물질	오염원 제어	환기성능	주관적 판단
오염물질	(1, 1, 1)	(1/9, 0.786, 9)	(1/7, 1.311, 9)	(1/7, 3.460, 9)
오염원 제어	(1/9, 1.274, 9)	(1, 1, 1)	(1/7, 3.325, 9)	(1/7, 4.430, 9)
환기성능	(1/9, 0.763, 7)	(1/9, 0.301, 7)	(1, 1, 1)	(1/7, 3.639, 7)
주관적 판단	(1/9, 0.289, 7)	(1/9, 0.226, 7)	(1/7, 0.275, 7)	(1, 1, 1)

이후 식 (4)에 의해 각 평가영역의 퍼지 가중치(\hat{W})를 다음 표 5와 같이 산정한다.

표 5. 퍼지 가중치 산정

오염물질	\hat{W}	(0.012, 0.288, 6.139)
오염원 제어	\hat{W}	(0.012, 0.436, 6.139)
환기성능	\hat{W}	(0.011, 0.200, 5.084)
주관적 판단	\hat{W}	(0.011, 0.076, 5.084)

표 5와 같이 산정한 다음 식 (5)를 이용하여 표 6과 같이 최종 가중치(W)를 산정한다. 이때 반드시 평가영역별로 산정된 가중치의 합이 1이 되어야 한다.

표 6. 최종 가중치 산정

오염물질	W	0.28
오염원 제어	W	0.32
환기성능	W	0.23
주관적 판단	W	0.17
합계		1

표 7. 실내공기질 건강성능의 평가영역 및 평가요소의 가중치

평가영역	퍼지 가중치			최종 가중치	평가요소	퍼지 가중치			최종 가중치
	최소치	기하 평균치	최대치			최소치	기하 평균치	최대치	
오염물질	0.012	0.288	6.139	0.28	Radon 농도	0.010	0.101	3.819	0.16
					CO농도	0.013	0.510	5.934	0.34
					NO ₂ 농도	0.012	0.204	5.573	0.25
					부유분진TSP농도	0.012	0.185	5.934	0.25
오염원 제어 수준	0.012	0.436	6.139	0.32	실내오염물질 저방출 자재사용	0.067	0.751	4.218	0.61
					흡연환경ETS 제어수준	0.059	0.249	3.720	0.39
환기성능	0.011	0.200	5.084	0.23	온·습도의 유지	0.071	0.311	3.5	0.43
					환기효율성	0.07	0.689	3.5	0.57
주관적판단	0.011	0.076	5.084	0.17	후각만족도(PDA)	-	-	-	1

표 6의 평가영역별로 산정된 결과를 살펴 보면, 오염물질, 오염원 제어, 환기성능, 주관적 판단의 가중치는 각기 0.28, 0.32, 0.23, 0.17이며, 이들의 합은 1이다. 따라서 평가영역별 중요도는 오염원 제어>오염물질>환기 성능>후각만족도의 순서이며, 이 내용은 실내공기질 영향요인 중 오염원 제어를 가장 중요하게 인식하고 있다는 것을 시사한다. 지금까지 설명한 과정에 따라 평가영역 및 평가요소에 대한 가중치를 산정하여 정리하면 표 7과 같다.

3.4 평가요소의 등급 및 배점

표 7에서 제시된 것과 같이 평가요소들은 인체의 건강에 영향을 미치며, 각 평가요소별 부여된 가중치를 통해 건강에 영향 정도도 다르다고 알 수 있다. 또한, 이러한 평가요소들은 각기 다른 측정값을 가지고 있기 때문에 이들을 대상으로 정량적 객관적으로 판단하기 쉽지 않다. 따라서 본 연구는 실내공기질이 거주자의 건강에 어느 정도 영향을 미치는지 정량적 객관적 판정하기 위해서는 표 7에서 제시된 평가요소에 대한 동일한 평가척도를 설정한다. 즉, 평가요소별 측정치에 상응하는 척도(점수)가 부여된 후 각 요소별 가중치를 곱하여 합산하면, 상위 영역의 점수가 산정되고 최종 실내공기질의 건강성능은 정량적 객관적으로 나타날 수 있도록 한다.

현재 실내공기질의 평가기준은 여러 가지 있는데 WHO (2006)의 보고서에서 건강한 실내공기의 정의를 근거로 설계 및 시공단계를 고려하여 건축물성능 및 거주성능 측면에서 평가기준을 설정한다. 따라서 본 연구에서는 등급 및 배점하는 기준은 김선숙 외(2004)에서 주거성능 평가모델을 참고하여 각 항목의 평가요소의 특징을 고려하여 3~5단계의 등급 및 1~5점으로 설정한다. 참고로 평가요소의 등급기준은 법적기준 또는 성능기준을 참고로 중간 등급으로 두고 그 이상 및 이하의 성능 수준에 대하여 각각 성능등급을 부여한다. 단, 예외적으로 온·습도의 유지에 대한 평가요소는 법적 기준은 최상위 등급으로 한다. 즉, 1등급은 최상위 등급으로 이 평가요소에 대한 평가는 매우만족하거나 건강성능이 매우 높다는 것을 의미

한다. 2등급은 1등급보다 약간 미달하는 수준이고, 3등급은 현행 법적기준이며, 4등급은 법적기준에 약간 미달하는 수준이고, 5등급은 법적기준에 상당히 미달하는 수준으로 판단한다. 따라서 각 등급 별 점수는 총 배점 및 평가결과 판단의 용이성을 고려하여 1~5등급으로 나누며, 표 8과 같이 표시한다. 여기에서 1등급은 5점으로 설정하고, 2, 3, 4, 5등급은 4, 3, 2, 1로 배점한다.

표 8. 평가등급 분류 및 배점(김선숙 외, 2004)

평가등급		평가등급 수준
등급	점수	
1등급	5	최상위 등급
2등급	4	현행 법적기준보다 약간 상회하는 수준
3등급	3	현행 법적기준
4등급	2	현행 법적기준보다 약간 미달하는 수준
5등급	1	최하위 등급

앞에서 분석한 바와 같이 각 평가요소 별의 중간 등급은 WHO기준 및 현행의 평가기준의 지표를 설정하여 세 부적으로 5등급을 나눈다. 예를 들어, 평가요소인 라돈의 경우에는 일반적으로 실내에서 라돈의 농도가 4.0pCi/L를 초과하면, 호흡기계 질환, 폐암 등의 유발을 쉽게 발생할 수 있다(EPA). 또한, ASHRAE에서는 2.0pCi/L 이하의 기준으로 한정하였으며, 미국 EPA 및 한국 지하생활공간 공기질관리법에 따라 4.0pCi/L 이하의 기준으로 한정하였다.

본 연구에서는 라돈의 중간등급은 2.0pCi/L~4.0pCi/L로 설정하고, 2.0pCi/L미만이나 4.0pCi/L초과하는 경우는 1등급과 5등급으로 설정한다. 배점은 1등급 5점, 3등급 3점, 5등급 1점으로 한다. 저방출 자재 사용의 경우에는 SCANVAC²⁾에서 제시된 오염물질의 배출강도에 따라 3단계 기준을 참고하여 평가기준을 설정할 수 있다. 지금까지 설명한 내용에 따라 실내공기질 건강성능에 대한 평

2) SCANVAC: 스웨덴, 노르웨이, 피란드, 덴마크의 연합체

가요소의 기준의 일부를 예시하면 표 9와 같다.

표 9. 평가기준의 예시(오염물질)

평가 항목	가중치	평가 요소	가중치	평가 기준(점수)	
				등급 기준	배점
오염 물질	0.28	Radon 농도	0.16	1등급: 0-2.0pCi/L	5
				3등급: 2.0-4.0pCi/L	3
				5등급: 4.0pCi/L 이상	1
		CO 농도	0.34	1등급: 0-5ppm(8h)	5
				2등급: 5-8.6ppm(8h)	4
				3등급: 8.6-25ppm(8h)	3
				4등급: 25-200ppm(8h)	2
				5등급: 200ppm(8h) 이상	1
		NO ₂ 농도	0.25	1등급: 0-0.04ppm(24h)	5
				2등급: 0.04-0.075ppm(24h)	4
				3등급: 0.075ppm(24h)	3
				4등급: 0.075-0.3ppm(24h)	2
				5등급: 0.3ppm(24h) 이상	1
		부유 분진 (TSP) 농도	0.25	1등급: 0.025-0.05mg/m ² (8h)	5
				2등급: 0.05-0.1mg/m ² (8h)	4
				3등급: 0.1-0.12mg/m ² (8h)	3
				4등급: 0.12-0.20mg/m ² (8h)	2
5등급: 0.20mg/m ² (8h) 이상	1				

상기 평가등급 및 배점은 예시적으로 제시하였다. 향후 실험을 통하여 측정 빈도를 정구분포가 이루어지는 수준으로 충분히 얻는다면 본 연구에서 제시된 평가모델로 등급 및 배점을 결정할 수 있으며, 그 결과를 이용하여 정확한 평가모델을 실현할 수 있다.

3.5 평가방법

3.4절에서 배점 및 등급을 설계한 후 표 7에서 제시된 각 평가요소 및 평가영역의 가중치를 통하여 최종적인 실내공기질의 건강성능의 점수 및 등급을 산출할 수 있다. 즉, 최하위 평가요소에 대하여 평가하고 점수를 부여한 후 해당된 가중치를 곱하며, 이 항목에 위의 전체 평가요소의 환산된 점수를 곱한다.

이러한 과정을 계속해서 최종적인 실내공기질의 건강성능의 점수가 계산된다(식(6) 참조). 여기에서 Q 는 실내공기질의 건강성능 점수를 의미하고, M 은 점수를 의미하며, W 는 해당된 가중치를 의미한다. EC (Evaluation Category)는 평가영역이며, EF (Evaluation Factors)는 평가요소를 의미한다.

$$Q = \sum_{i=1}^n M_{ECi} W_{ECi} \quad \dots \dots \dots (6)$$

여기에서, $M_{ECi} = \sum_{i=1}^n M_{EFi} W_{EFi}$

위 식에 따라 먼저 각 평가요소의 값을 측정하고 본 연구에서 제시된 기준의 점수를 환산한다. 예를 들어, 'Radon 농도', 'CO 농도', 'NO₂ 농도', 'TSP농도', '실내오염물질 저방출 자재의 사용', '흡연환경(ETS)의 제어', '온·습도의 유지', '환기 효율성', '후각만족도(PDA)'의 환산 점수는 5, 4, 5, 4, 4, 3, 4, 4, 4점이면, 식(6)에 의하여 실내공기질 건강성능 최종값 Q 는 다음과 같이 산출된다.

$$M_{EC_1} = 0.28 \times (5 \times 0.16 + 4 \times 0.34 + 5 \times 0.25 + 4 \times 0.25) = 1.235$$

$$M_{EC_2} = 0.32 \times (4 \times 0.61 + 3 \times 0.39) = 1.155$$

$$M_{EC_3} = 0.23 \times (4 \times 0.43 + 4 \times 0.57) = 0.92$$

$$M_{EC_4} = 0.17 \times (4 \times 1) = 0.68$$

$$Q = \sum_{i=1}^n M_{EFi} W_{EFi} = M_{EC_1} + M_{EC_2} + M_{EC_3} + M_{EC_4} = 3.99$$

따라서 이 건축물의 실내공기질의 건강성능 점수는 3.99이며, 3등급이다.

4. 결론

국내외적으로 실내공기질에 대한 평가모델은 많은 연구자의 관심을 불러일으키고 있으며, 현재 다양한 측면에서 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 그 중 하나의 연구로서 실내공기질이 악화된 원인을 분류하고 각 원인별 세부 요인을 도출하였다. 이 요인들을 대상으로 실내공기질의 건강성능에 미치는 영향 수준과 각 요인별 가중치를 판단하기 위하여 FD-AHP기법을 이용하였다. 아울러 각 영향요인들의 측정결과를 일관된 기준에 의해 용이하게 평가하기 위하여 각 평가영역 및 요소에 가중치와 등급을 부여하는 방법을 제시하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

첫째, 현재 실내공기질에 대한 오염물질의 건강평가기준을 각 국가/지역별로 다소 상이하지만 비교적 구체적으로 제시되어 있으므로 본 연구에서는 건축물의 성능 및 거주자의 감각적인 건강을 고려하여 크게 평가영역 4개 및 세부적인 평가요소 9개를 나누었다.

둘째, 전문가 인터뷰 및 설문조사를 통하여 실내공기질에 있어서 거주자에 영향을 미치는 요인들 및 각 요인별의 중요도를 파악하였다.

셋째, 서로 상이한 법적 및 측정기준을 가진 공기오염요인들을 FD-AHP를 이용하여 종합평가하는 방법을 체계적으로 제시하였다. 이를 위해 서로 다른 기준을 일관된 점수로 배분하기 위한 등급화 방법을 객관적으로 제시하였다.

끝으로 본 연구에서 제시한 평가모델에 의해 거주자의 건강에 영향을 미치는 수준을 영역별로 정략적인 판단을

하도록 지원할 뿐 아니라 각 영역별 오염요소에 대한 수준도 판단할 수 있도록 지원할 수 있다. 또한 본 연구에서 제시한 모델은 실내공기질을 개선하기 위한 설계기법 개발, 재료 및 공법의 개발 및 선택 등에 활용될 수 있다. 한편, 본 연구에서 적용된 기법은 향후 건강에 영향을 미치는 음, 열, 빛 등의 성능평가에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.
(NO. R11-2010-0001860)

참고문헌

1. 공성용, 이희성, “실내공기질 관리제도 발전방안에 관한 연구”, KEI, 2004
2. 김강석 외, “실내공기오염에 대한 국민의식조사와 정책방안연구”, KEI, 2001
3. 김선숙, 김광우, 양인호, “공동주택의 거주성능 평가모델 개발에 관한연구”, 대한건축학회논문집, 계획계 20권 9호(통권191호), 2004. 09, p.265-272
4. 김선숙, 여명식, 김광우, “온도 변화에 따른 건축자재의 VOC 방출 및 실내공기질 해석”, 대한건축학회논문집, 계획계, 제24권, 제3호, 2008.03, p.233-240
5. 김봉애, “생활과 건강측면에서 본 주거 공간”, 건축 특집, 2008.01, p.39-42
6. Hsu, Tsuen-ho, “Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process”, Journal of the Chinese Fuzzy Systems Association, Vol.4, No.1, 1998, p.59~72
7. Jamrozik, Konrad, “Estimate of deaths attributable to passive smoking among UK adults: database analysis”, BMJ, 2005
8. Liu, Ya-Ching, “Application of the fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process on Rock Mass Classification”, National Cheng Kung University, 2002.06
9. Saaty, T.L., “The Analytic Hierarchy Process”, McGraw-Hill International Book Company, New York, 1980.
10. Sekhar, S. C., Tham, K. W., Cheong, K. W., “Ventilation, indoor environment quality and climate- comparison of European and Singapore office buildings”, International Journal of Ambient Energy, vol. 23, 2002, p. 108-112
11. Sundell, Jan, “Indoor Environments and Health”, SHB2009-1st International Conference, 2009.02
12. Uhde, E., Salthamme, T., “Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality-A review of recent advances in indoor chemistry”, Atmospheric Environment, Volume 41, Issue 15, P3111-3128, 2007.05
13. WHO, “Air Quality Guidelines for Europe” 2nd edition, 2000
14. WHO, “Development of WHO Guidelines for Indoor Air Quality”, 2006.10
15. WHO, “Development of Environment and Health Indicators for European Union Countries ECOEHIS”, 2004
16. WHO, “Housing and health regulations in Europe Final report” 2006.07
17. Zhu, Chihui, Li, Nianping, Guan, Di Re, Jun, “Uncertainty in indoor air quality and grey system method”, Building and Environment, 42, p1711-1717, 2007

투고(접수)일자: 2010년 3월 10일

심사일자: 2010년 3월 11일

게재 확정일자: 2010년 5월 7일