

CFD를 이용한 공동주택의 환기성능 및 실내공기질 예측

실내공기질 관리법의 제정과 더불어 실내환경에 대한 소비자들의 관심이 높아짐에 따라 친환경자재의 수요가 증가하고 있으며 환기설비 설치도 의무화되어 환기계획을 수립하는데 있어서도 보다 상세한 성능평가의 필요성이 제기되고 있다.

1 서론

웰빙(well-being)의식의 확대로 새집증후군(Sick House Syndrome) 등 실내공기환경과 환경문제에 관심이 고조되고 있다. 특히 90%이상을 실내에서 생활하는 현대인들의 건강과 관련해 실내공기질 문제는 매우 중요한 관심의 대상으로 부각되고 있다.

선진국에서는 실내공기질에 관하여 이미 과거 20여년간 연구를 활발히 진행하고 있다. 이를 통해 오염물질이 인체에 미치는 영향, 오염물질의 실태 및 기준치와 측정방법이 각 공간에 따라 다양하게 제시되는 등 여러 분야에서 체계적이고 지속적인 연구를 통하여 꾸준히 그 해결책을 모색해 나가고 있는 실정이다. 우리나라에서도 실내공기질에 대한 관심이 증가하여「지하생활 공간 공기질관리법」이 2004년 5월「다중이용시설 등의 실내공기질 관리법」으로 개정되면서 적용대상이 지하공간뿐만 아니라 일정규모 이상의 다중이용시설과 신축 공동주택으로 확대되었다. 즉, 국내 다중이용시설 중 17개 시설(지하역사, 지하상가, 도서관, 박물관, 미술관, 의료기관, 실내주차장, 터미널

및 대학실, 보육시설, 장례식장, 찜질방, 대형상가 등)을 비롯해 100세대이상의 신축공동주택에서는 포름알데히드(HCHO) 및 휘발성유기화합물(VOCs) 등의 오염물질을 측정해 그 결과를 입주자 등에게 의무적으로 알려야 한다. 이와 더불어 실내환경에 대한 거주자들의 요구가 다양화됨에 따라 친환경 및 건강자재의 수요가 증가하고 있으며, 환기계획의 설계에서도 보다 상세한 성능평가의 필요성이 제기되고 있다.

본 고에서는 수치해석 시뮬레이션을 통해 공동주택의 침기량 유입과 경로, 환기설비를 설치하였을 때 기류의 분포와 실내공기질의 개선효과, 그리고 화장실 배기와 주방 배기까지 고려하여 CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학)를 이용하여 평가한 후 실내기류 분포 및 환기의 효율을 정량적으로 평가하고, 친환경인증자재를 등급별로 사용하였을 경우 실내공기의 오염정도를 예측해 보았다.

2 기본이론

실내공기 오염의 저감방안, 실내공기질 잠정 권고기준 등에 대

하여 간단히 살펴본다.

2-1. 공기령 (Age of Air)

실내기류에 의한 오염물질 운송제어의 좋고 나쁨은 환기효율의 지표에 의해 평가된다. 환기효율을 평가하는 지표로는 공기령이 주로 이용된다. 공기령이란 취출구에서 유입된 공기가 어떤위치에 도달하는 시간을 나타내는 것으로, 공기가 유입되어 배출되는 시간이 길어지면 이에 비례하여 공기질도 나빠지게 됨을 의미한다. 공기령은 환기성상을 나타내는 중요한 지표로서 널리 이용되고 있는데 그 단위는 명목환기시간을 기준으로 한 값이 사용되고 있다.

명목환기시간이란 실내의 공기가 완전히 교체되는데 걸린시간을 의미한다. 실제 공기령 해석은 실험에 의한 방법과 시뮬레이션을 이용한 방법이 있다. 실험에 의한 방법은 추적가스(tracer gas)법에 의한 pulse, step-up, step-down이 있고, 컴퓨터 시뮬레이션의 대표적인 방법으로는 CFD를 이용하여 간단히 산출하는 방법이 있다.

다음 식 (1)~(3)은 환기회수, 명목환기시간, 공기령에 대한 상관관계이며 식 (3)은 평균환기효율(Ventilation Effectiveness)을 나타내고 있다. <그림 1>은 실내에서 급기구와 배기구가 있을 때 공기령, 여명, 공기수명을 나타내고 있다.

■ 그림 1. 공기령의 개념

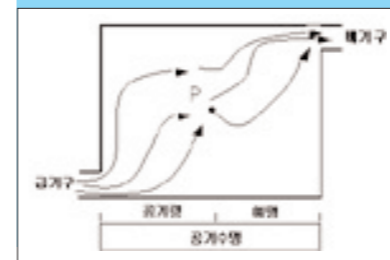


그림 1)은 실내에서 급기구와 배기구가 있을 때 공기령, 여명, 공기수명을 나타내고 있다.

$$l = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{l} = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

$$\epsilon_v = \frac{\tau}{\theta_{age}} \quad (3)$$

여기서, l : 환기회수 (1/h) Q : 환기량 (m³/h)
 V : 실의 체적 (m³) τ : 명목환기시간 (time)
 ϵ_v : 평균환기효율 (-) θ_{age} : 공기령 (time)

2-2. 실내공기 오염의 저감방안

실내공기질 오염 저감 방안으로는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 오염원을 제거하는 방법이고, 둘째는 환기설비를 설

치하여 실내의 오염된 공기를 제거하는 방법이다. 그 외에 베이아웃(Bake-Out)과 흡착·분해를 통한 개선제를 이용하는 방법들이 있으나 그 효과에 대해서는 아직 명확하지 않은 실정이며 연구들이 진행중에 있다. 본 고에서는 오염원 자체를 줄이는 방법과 환기에 대해서만 간략히 기술하며 이를 응용하여 CFD를 해석할 예정이다.

1) 자재의 오염방출 억제 (Source Control)

이 방법은 실내오염물 발생원 자체를 줄이는 방법으로 주요한 오염원으로 작용하고 있는 건축자재 및 내장재 등의 적절한 선택을 통해 오염물질 방출량이 비교적 적은 자재를 사용하는 것이다. 우리나라에는 환경부가 관련법령의 제정, 환경라벨링 대상제품의 선정 등 제도의 전반적인 사항을 관장하고, 민간단체인 환경마크협회에서 실질적인 진행업무를 수행하고 있다. 현재 한국공기청정협회가 건축자재를 대상으로 시험을 통해 포름알데히드와 휘발성유기화합물 방출 농도를 기준으로 건축자재 인증등급을 설정하여 친환경자재 인증마크를 부여하고 있으며 건물의 시공시 방출강도가 낮은 등급의 자재를 사용하도록 권장하고 있다. <표 1>은 한국공기청정협회의 건축자재의 인증등급을 나타낸다.

구분	일반자재	페인트	접착제
최우수	TVOC 0.10미만	0.10미만	0.25미만
우수	HCHO 0.03미만	0.03미만	0.06미만
양호	TVOC 0.10이상~0.20미만	0.10이상~0.20미만	0.25이상~0.50미만
일반1	HCHO 0.03이상~0.05미만	0.03이상~0.05미만	0.06이상~0.12미만
일반2	TVOC 0.20이상~0.40미만	0.20이상~0.40미만	0.50이상~1.50미만
■	HCHO 0.05이상~0.12미만	0.05이상~0.12미만	0.12이상~0.40미만
■	TVOC 0.40이상~2.00미만	0.40이상~2.00미만	1.50이상~5.00미만
■	HCHO 0.12이상~0.60미만	0.12이상~0.60미만	0.40이상~2.00미만
■	TVOC 2.00이상~4.00미만	2.00이상~4.00미만	5.00이상~10.00미만
■	HCHO 0.60이상~1.25미만	0.60이상~1.25미만	2.00이상~4.00미만

2) 환기 (Ventilation)

실내공기질 개선을 위해서는 이미 발생된 오염원이 실내에 확산되지 않도록 환기를 실시하여야 한다. 환기는 실내의 오염된 공기를 신선한 외부 공기와 교체, 희석 시켜주는 방법이다. 이때 도입되는 외부공기의 오염상태를 고려하여 공기정화장치의 설치도 고려해야 할 경우도 있다. 환기 방법으로는 외부와 통하는 개구부를 통풍이 원활하도록 개폐하여 재실자가 직접 제어하는 자연환기와 기계적 시스템인 환기장치를 사용하는 기계환기가 있다. 그러나 환기량의 증가는 에너지소비량을 증가시키기 때문에 에너지를 절약하는 방안으로 주로 열교환기 시스템이 설계에 반영되고 있다.

3) 신축공동주택의 실내공기질 잠정 권고기준

권고기준 설정을 위하여 환경부에서 발주하여 한국건설기술연구원에서 연구과제를 수행하고 있으며, 2004년 6월부터 2005년 3월까지 신축공동주택 266세대에 대한 1차 실내공기질 실태조사를 실시하여 <표 2>와 같이 잠정 권고기준을 발표하였다. 이 권고기준을 바탕으로 2005년 8월까지 800세대를 추가로 조사하여 관계부처 협의 및 전문가 자문 등을 거쳐 2005년 12월 권고기준을 마련할 예정이다.

■ 표 2. 신축 공동주택의 실내공기질 잠정 권고기준 단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

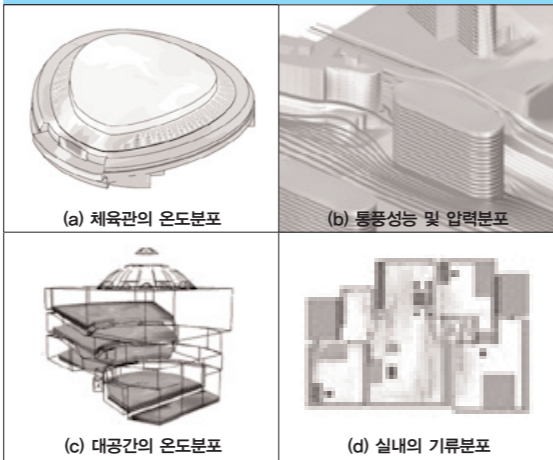
오염물질	기준값	주요국가 기준참고치	측정결과 참고치	위해성 평가	잠정권고 기준안
포름알데히드		30~120	150~450	350	100~350
벤젠		16110	5~10	45	5~45
톨루엔		260~1092	450~1000	1300	850~1300
에틸벤젠		1447~3800	50~150	1500	360~1500
자일렌		870~1447	45~120	700	240~700
스티렌		30~300	30~150	1500	300~1500
1,3,5-트리메틸벤젠		200	5~10	-	5~10
1,2,4-트리메틸벤젠		200	10~20	-	10~20
아세트 알데히드		48	25~50	-	25~50
TVOC		2000~3000	2000~4000	-	2000~3000

- ♣ 위해성 평가 결과를 우선적용, 측정결과 참고치를 차선적용
- ♣ 주요국가기준 참고치 중 WHO의 지침치를 우선검토
- ♣ 1,3,5-트리메틸벤젠, 1,2,4-트리메틸벤젠, 아세트 알데히드, TVOC는 기준설정용 우선검토하여야 할 것으로 판단됨.
- ♣ 파라디클로로벤젠은 실태조사시 검출되지 않아 오염물질 기준에서 제외검토

3 CFD 소개

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)이란 컴퓨터를 이용한 수치해석을 뜻한다. 건축분야의 CFD는 주로 국부적인 실내 기류해석에 이용되었으나 컴퓨터 성능의 비약적인 발전으로 아트리움, 쇼핑몰 및 전시공간 등 대공간의 온도 분포, 기류속도 및 방향분포, 압력분포, 오염물질의 확산 및 제거효과, 화재 및 연기의 확산, 건물주변의 대류해석 등에 많이 이용되고 있다. 수치해석을 이용하면 디테일한 차원에서의 시뮬레이션이 가능하며, 유사한 작업의 반복 수행 시 비교적 신속하고 저렴한 비용으로 예측을 할 수 있는 장점이 있다. 건축환경분야의 상용 CFD software로서는 Star-CD, Phoenics, Fluent등이 있으며 본 고에서는 Star-CD를 이용하였다. Star-CD는 영국 Imperial College의 A.D.Gosman 교수의 연구그룹에 의해 개발되어 1985년경부터 상용화된 유체해석 프로그램이다. Prostar와 Starlink라는 두 개의 큰 모듈로 나누어져 있으며 이들은 필요한 모든 제반 조건 및 격자 등을 설정하며 실제계산을 위한 실행화일을 만드는 부분이다. <그림 2>는 CFD를 이용하여 건축환경에 응용되는 사례들이다.

■ 그림 2. 건축환경분야의 CFD 응용사례

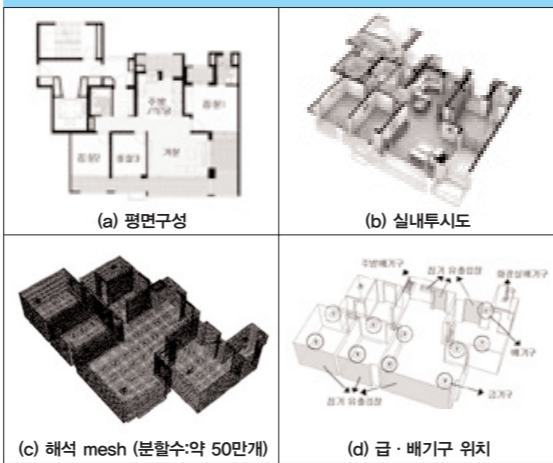


4 공동주택 실내공기환경 해석

4-1. 해석모델

본 고에서는 가장 많은 공급량을 보이고 있는 30평형대의 공간을 모델화하여 해석하였다. <그림 3>은 해석대상 모델이다. <그림 3>의 (d)를 살펴보면 전면과 후면의 베란다 창을 통해 침기가 유입되고 각 침실에 급기구와 배기구를 설치하였다. 거실은 두개의 급기구와 배기구를 설치하였으며, 화장실 배기구와 주방 후드를 통한 배기구를 고려하여 해석하였다. CFD를 이용한 3차원적 평가는 실내기류와 오염물질 확산의 구조적 이해와 실내오염의 분포를 배려한 설계를 가능하게 할 것으로 판단된다.

■ 그림 3. 해석 대상 모델



4-2. 해석조건

- 난류모델은 표준 k-epsilon 모델사용
- 온도와 습도의 변화는 없는 것으로 가정
- <표 3>과 같이 기류분포에 해석CASE를 다섯단계로 설정
- 오염발생량은 HB마크 최우수, 우수, 양호등급을 고려
- 정상상태의 농도 해석
- TVOC의 값은 톨루엔(toluene)을 의미

■ 표 3. 해석 CASE

해석 CASE	해석 내용	환기회수(1/h)
CASE-1	전면창을 통해 후면창으로 향하는 침기의 유입	0.3
CASE-2	환기시스템만 작동한 경우	0.7
CASE-3	침기와 환기가 작동한 경우	1.0
CASE-4	주방후드와 화장실배기만 가동한 경우	2.7
CASE-5	CASE 2+4	3.4

* 화장실 배기량은 각각 100CMH, 주방배기량은 350CMH
* CASE-4, 5의 경우 주방후드와 화장실배기를 통해 실내에 부압이 걸리는 데 이는 침기가 유입되는 위치에서 기류가 실내로 유입되게 해석.

4-3. 해석결과

1) 공기령 및 기류분포

높이 1.2m 지점에서 공기령의 분포 및 기류분포를 <그림 4>에 나타내었다. 색깔이 검을수록 공기령이 높은 것이며 이는 환기 성능이 좋지 않음을 나타내고 있다. <표 4>에는 CASE별 명목 환기시간과 공기령이 나타나 있다.

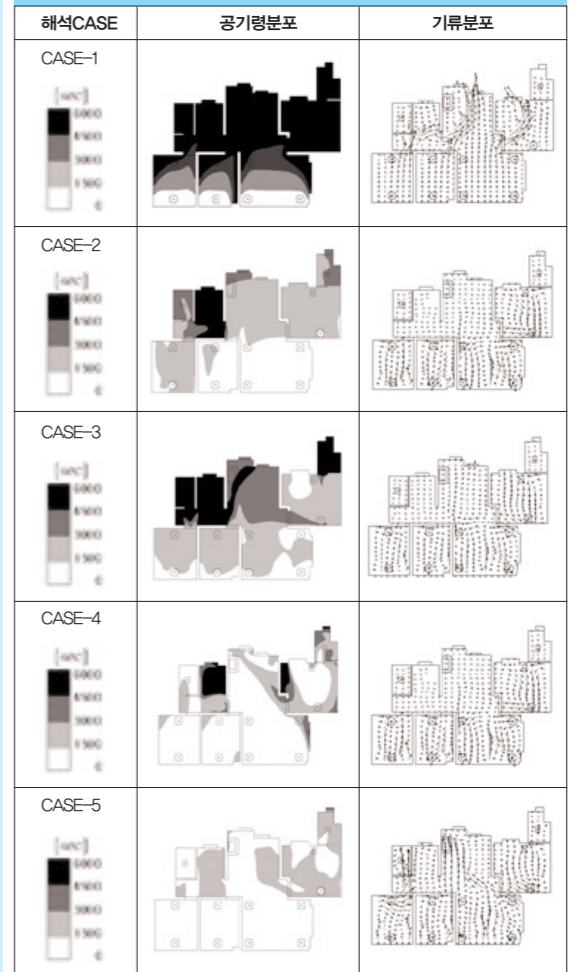
CASE-1의 경우 침기가 전면창에 유입되어 후면창으로 빠져 나가는 것을 표현하였으며, 침기량이 적고 기류속도가 낮아서 전면부만 공기령이 낮게 나타나고 있으며 점차 공기령이 높아 짐을 나타내고 있다.

CASE-2와 CASE-3과 같이 환기시스템을 고려한 해석에서는 CASE-1의 경우보다 환기성능에 효과가 있음을 알 수 있다. 천정면을 통한 급·배기 기류의 수직적 순환과 창을 통한 침기의 수평적 순환이 이루어지는 CASE-3의 경우는 기류의 간섭이 생겨서 환기시스템만 고려한 CASE-2보다 공기령이 다소 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

공기령이 가장 작게 나온 CASE-5에서 환기성능이 가장 좋다고 할 수 있으나 침실-1에서는 창을 통한 침기의 유입, 천정에 설치된 환기시스템의 신선공기 도입 그리고 화장실에서의 배기가 동시에 가동되었기 때문에 기류의 재순환도 나타나고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 공동주택에서 발생할 수 있는 기류의 분포와 환기효율을 살펴보고, 급·배기구의 적절한 위치를 통하여 효과적인 환기를 실시할 수 있을 것이며, 설계단계에서 정량적 분석을 통하여 적절한 시스템을 도입할 수 있을 것으로 판단된다.

■ 그림 4. 1.2m 높이에서 공기령분포와 기류분포



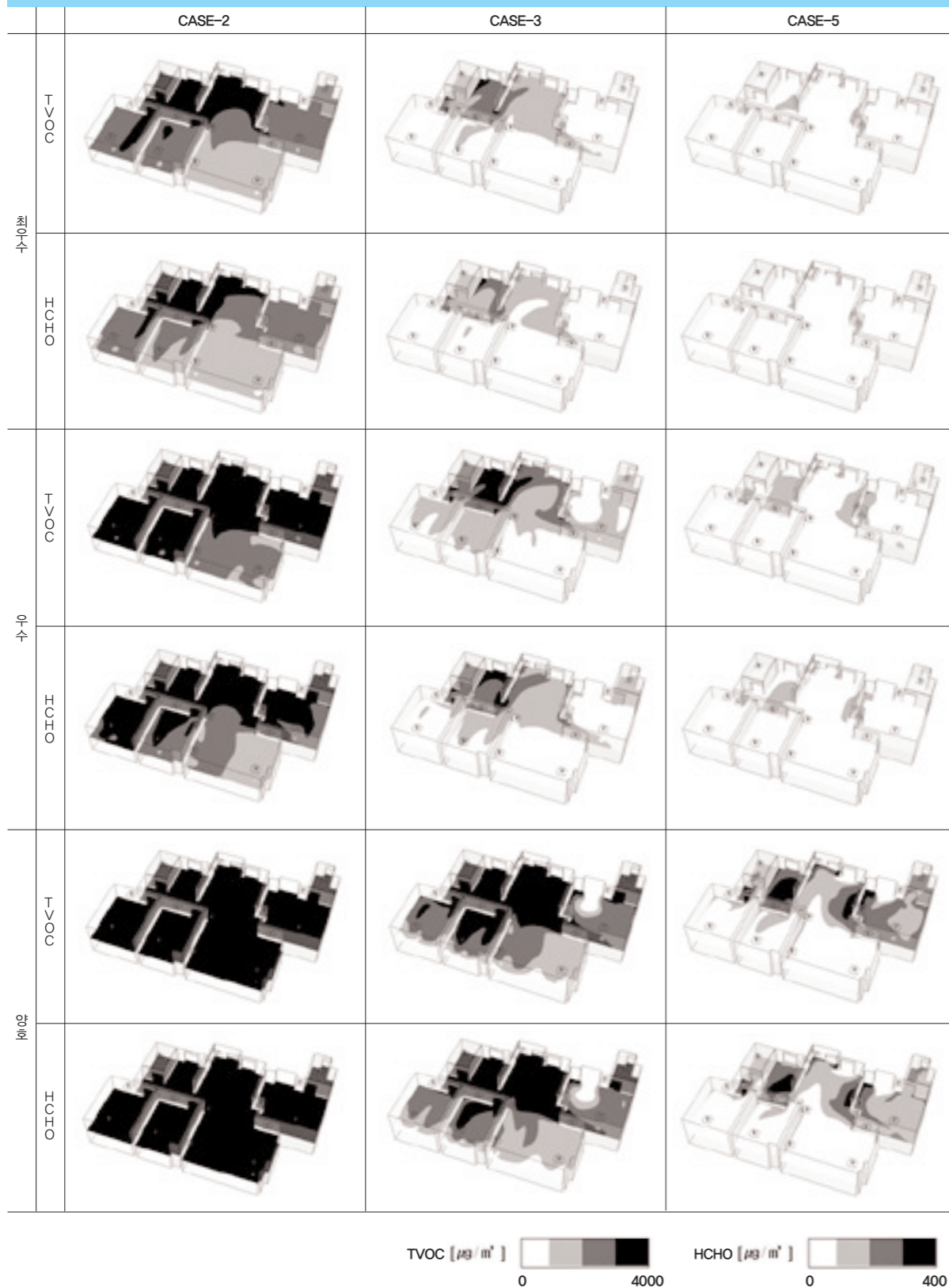
■ 표 4. 각 CASE별 명목환기시간과 공기령

해석 CASE	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5
명목환기시간 [h]	3.33	1.43	1.00	0.37	0.29
공기령 [sec]	12843	2789	4181	1546	1147

2) 인증등급 자재에 따른 농도분포

2장에서 언급한 실내오염저감 방안중에 오염자재의 방출량을 줄이면 실내공기는 더욱 쾌적해 질 것이다. 그와 관련하여 건축 자재 인증등급 중 최우수, 우수, 양호 등급의 자재를 해석모델에 사용하였을 경우 CASE-2(환기시스템만 가동), CASE-3(침기와 환기시스템), CASE-5(침기, 환기와 주방 및 화장실 배기가동)에 대해 거실중앙 1.2m높이에서 농도값을 <표 5>에 나타내었으며 <그림 5>와 같이 실내의 농도분포를 나타내고 있다. <표 2>에 나타난 실내공기질 권고기준의 최저값으로 비교하였을 때 만족하지 못한 것은 CASE-2와 CASE-3에서 양호 등급의 자재를 사용하였을 경우이며 나머지 해석에 있어서는

■ 그림 5. 인증등급 자재에 따른 오염농도 예측



■ 표 5. 자재등급에 따른 실내공기질 오염농도 단위 : µg/m³

자재등급 오염물질	최우수		우수		양호	
	TVOC	HCHO	TVOC	HCHO	TVOC	HCHO
CASE-2	1761	151	2641	218	6540	579
CASE-3	603	52	904	75	2238	198
CASE-5	90	8	135	11	333	29

TVOC와 HCHO의 오염량이 권고기준을 만족하는 것을 알 수 있다. 이로써 CASE-3인 침기와 환기를 작동하여 환기회수를 1회로 설정하였을 경우 우수등급 이상의 자재를 사용해야 됨을 알 수 있다.

특히, 전체 실 중에서 주방부분의 오염농도가 높게 예측되어 각 CASE별로 비교해보면 CASE-2와 CASE-3의 경우 주방후드 외에는 별도의 급·배기가 설치되지 않았기에 오염농도가 높은 것을 알 수 있다. 주방에 후드를 고려한 CASE-5의 경우에는 주방의 오염농도를 해결 할 수 있으나 상시환기를 할 수 없기에 설계자가 환기구를 배치하거나 재실자가 창을 열어 자연 환기를 도입하는 선택이 필요하다.

5 결론

공동주택의 실내공기오염 저감 방안으로 환기설비를 설치하였을 경우와 친환경자재를 사용하였을 경우를 고려하여 CFD를 이용하여 정량적인 평가를 실시한 결과는 다음과 같다.

- 1) 공동주택에서 발생할 수 있는 기류분포를 ①침기, ②환기시스템, ③침기+환기시스템, ④화장실 및 주방 배기, ⑤환기시스템+화장실 및 주방 배기 등 5가지 CASE로 설정하여 CFD를 이용하여 환기효율과 기류분포를 살펴보았다. 그 결과 환기효율을 나타내는 지표인 공기량은 환기량이 증가할 수록 낮게 나타나 환기시스템을 적용할 경우 전반적으로 실내공기환경이 개선되었으나, 급·배기구가 설치되지 않는 일부 공간(부엌, 화장실 등)에서는 기류분포가 원활하지 못하여 국부적으로 실내공기환경이 개선되지 못하는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 친환경 자재 중 최우수, 우수, 양호등급의 자재를 대상으로 실내오염농도분포를 살펴 본 결과 권고기준(안)을 만족하기 위해서는 환기설비를 설치하고, 우수등급 이상을 사용해야 하는 것으로 나타났다. 그러나 본 해석에서 고려하지 않았지만 실내공기오염의 가장 큰 원인으로 알려진 가구의 영향을 고려할 경우 더 많은 환기량과 더 높은 수준의 친환경 인증자재가 필요할 수도 있음을 주지해야 할 것이다.

3) 본 해석에서 특이한 사항은 전체 실 중에서 주방공간이 후드 외에는 별도의 급·배기구가 설치되어 있지 않기 때문에 CASE-3와 같이 환기시스템을 가동하더라도 주방공간의 오염농도가 상대적으로 높게 나타나고 있으며, CASE-5와 같이 후드를 가동할 경우 오염농도가 줄어드는 것을 알 수 있었다. 따라서 세대 전체 공간의 실내공기환경 개선을 위해서는 계획적으로 주방공간의 후드를 상시환기가 가능한 설비로 고려하거나 또는 별도의 급·배기구를 설치하여야 할 것이며, 재실자 측면에서는 주방공간의 창을 열어 자연 환기를 도입하는 선택이 필요하다. ■

끝으로, 본 연구를 위해 Star-CD 프로그램을 지원해 주신 씨디어덱코코리아(주) 관계자 분들께 감사드립니다.

◎ 참고자료

1. 김태연, "오염물질 발생원의 실내 공기질에 관한 기여율 해석", 대한건축학회논문집 2004년 2월, pp. 209~216
2. 이언구, "신축공동주택의 실내공기환경 개선방안", 대림기술정보 2004년 겨울호, pp. 4~28
3. 이정재, "Sick Building 대책방안으로서의 공기청정 환기시스템" 한국설비기술협회 2004년 1월호, pp. 101~109
4. 윤재욱외 1인, "CFD를 이용한 실내공기오염분포 예측 및 실측에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표논문 2002년 10월, pp. 685~688
5. 유복희외 2인, "가구배치 형태에 따른 실내기류분포 및 환기효율 분석", 대한건축학회 논문집 2002년 12월, pp. 191~198
6. 박진철외 3인, "공동주택 실내공기질 개선방안 효과에 관한 실험적 연구", 대한설비공학회 2005학계학술발표대회 논문집, pp. 795~800
7. 조원재외 3인, "공동주택의 실내공기질 개선방안(베이크아웃을 중심으로)", 대한설비공학회 2005학계학술발표대회 논문집, pp. 1001~1005
8. 이정재외 3인, "공기청정 겸용 전열교환 환기유닛 적용시 실내공기환경 CFD 시뮬레이션", 대한건축학회논문집 2005년 3월, pp. 157~164
9. 신지용, 공동주택의 실내외 공기질 향상을 위한 주동배치 계획연구, 2004년 연세대 박사학위 논문
10. ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 26, "Ventilation and Infiltration", 2001

