



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공조시스템을 활용한  
실내 공기질 개선에 관한 연구

연세대학교 보건대학원  
산업환경보건학과 산업보건전공  
김 석 현

# 공조시스템을 활용한 실내 공기질 개선에 관한 연구

지도 노 재 훈 교수

이 논문을 보건학 석사학위 논문으로 제출함

2017년 12월 일

연세대학교 보건대학원

산업환경보건학과 산업보건전공

김 석 현

김석현의 보건학 석사학위 논문을 인준함

심사위원 노재호   
심사위원 원종욱   
심사위원 김치년 

연세대학교 보건대학원

2017년 12월 일

## 감사의 글

산업보건 관련 업무를 하면서 업무에 대한 전문성을 높이기 위해 시작했던 2년 6개월간의 보건대학원 생활을 통해 학문에 대한 깊은 지식뿐만 아니라 교수님과 보건대학원 선후배, 동기를 만날 수 있는 기회는 인생에 있어 무엇과도 바꿀 수 없는 소중한 기회였습니다.

제일 먼저 바쁘신 가운데 시간을 내주시어 논문지도를 해주신 노재훈 교수님께 감사드립니다. 논문을 작성하면서 어려움을 겪고 의지가 약해졌을 때 교수님께서 해주신 조언과 격려가 있었기에 무사히 논문을 마칠 수 있었습니다. 교수님의 가르침을 기억하여 산업보건 분야에서 반드시 필요한 인재가 되도록 노력하겠습니다.

다음으로 부교수이신 원종욱 교수님, 김치년 교수님께 감사드립니다. 원종욱 교수님의 논문 수업을 들으면서 논문을 작성하는 방법을 배울 수 있었고, 논문이 완성되기까지 세심하게 가르쳐주신 덕분에 조금 더 완성도 높은 논문을 작성할 수 있었습니다. 또한 논문을 작성하면서 포기하고 싶어질 때마다 따뜻한 미소와 잘하고 있다는 응원을 아끼지 않으셨던 김치년 교수님, 감사드립니다.

그리고 대학원 생활을 함께한 동기들 고맙습니다. 간호사로써 보건 분야에 경험이 많아 많은 조언을 해준 채경 누나, 퇴근 후 저녁을 못 먹고 수업에 오면 간식을 나눠주던 진혁이, 노무사로써 산재분야에 궁금한 게 있을 때마다 도움을 준 혜림이와 건강이, 모두 고맙고 앞으로 각자의 분야에서 최고가 되길 바랍니다. 특히 직장생활과 대학원 생활을 함께하는 게 쉬운 일이 아니었지만 동기들끼리 어려움을 나누고 서로 도와주면서 큰 힘이 되었습니다.

항상 대학원을 다니면서 건강을 해치진 않을지 걱정해주시고 뒤에서 기도 해주신 아버지, 어머니, 효진이 항상 감사하고 사랑합니다.

대학원 입학할 때부터 졸업할 때까지 누구보다 고생하고 힘든 시간을 이겨낸 아내 수진이에게 정말 고맙고 사랑한다는 말을 전합니다. 대학원 생활을

하는 2년 6개월 동안 성율이와 성준이가 태어나 육아로 고생이 정말 많았습니다. 마찬가지로 수진이 옆에서 전폭적으로 지원을 아끼지 않은 장인어른, 장모님 그리고 처제에게 정말 감사합니다. 또한 논문 영문번역에 큰 도움을 준 처남에게도 고맙다는 말을 전합니다.

연세대학교 보건대학원에서 만난 소중한 인연들과 가르침을 가슴에 새기고 연세인으로써 자랑스러운 산업보건 전문가가 되도록 하겠습니다.

다시 한번 지도해주신 교수님들께 감사드리며, 연세대학교 보건대학원의 무궁한 발전을 기원합니다.

2018년 1월  
김 석 헌 올림

## 차 례

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 국문요약 .....                       | iii |
| I. 서론 .....                      | 1   |
| II. 연구대상 및 방법                    |     |
| 1. 연구대상 .....                    | 4   |
| 2. 연구방법 .....                    | 6   |
| III. 연구결과                        |     |
| 1. 사무실 공기질 평가 .....              | 11  |
| 2. 사무실 환기상태 평가 .....             | 16  |
| 3. 공조시스템을 활용한 사무실 공기 개선 평가 ..... | 17  |
| IV. 고찰 .....                     | 21  |
| V. 결론 .....                      | 24  |
| 참고문헌 .....                       | 25  |
| Abstract .....                   | 29  |

## 표 차 례

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 표 1. 국내 주요정부 부처의 실내 공기질 관리기준           | 2  |
| 표 2. 고용노동부 사무실 공기관리 지침 제2조             | 2  |
| 표 3. 연구대상 건물의 개요                       | 4  |
| 표 4. 본 연구의 공기질 측정 항목 및 관리기준            | 7  |
| 표 5. 본 연구의 사무실 공기질 측정 장비               | 7  |
| 표 6. 시간에 따른 사무실 공기질 평가결과(휴일)           | 12 |
| 표 7. 시간 및 채실자수에 따른 사무실 공기질 평가결과(평일)    | 13 |
| 표 8. 대상사무실의 환기상태 평가                    | 16 |
| 표 9. Damper 개방율 조절에 따른 사무실 공기질 개선결과    | 17 |
| 표 10. 급기량 조절에 따른 사무실 공기질 개선결과          | 18 |
| 표 11. Damper 및 급기량 조절에 따른 사무실 공기질 개선결과 | 20 |

## 그 림 차 례

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 그림 1. 연구대상 건물의 공조시스템 개요도                    | 5  |
| 그림 2. 연구대상 사무실 평면도                          | 5  |
| 그림 3. 시간 및 채실자수에 따른 사무실 CO <sub>2</sub> 농도  | 14 |
| 그림 4. 시간 및 채실자수에 따른 사무실 PM <sub>10</sub> 농도 | 14 |
| 그림 5. 시간 및 채실자수에 따른 사무실 온도                  | 15 |
| 그림 6. 시간 및 채실자수에 따른 사무실 상대습도                | 15 |

## 국 문 요 약

### 공조시스템을 활용한 실내 공기질 개선에 관한 연구

본 연구는 사무실 공기질의 시간변화에 따른 오염물질의 변이양상을 살피고 공조시스템을 활용하여 실내 공기질 개선방안을 마련하고자 수행하였다.

2017년 11월부터 12월까지 경기도 소재 일개 사무실에서 온도, 습도, 이산화탄소, 포름알데히드 등 실내 공기질을 측정하였고 공조시스템 조절하여 사무실 공기질의 개선을 모색하였다.

사무실 공기질 측정 결과, 재실자 수 증가에 따라 이산화탄소 농도가 1,054.3ppm까지 증가하였으며, 15~17시에는 고용노동부 기준인 1,000ppm을 초과하였다. 재실자수에 의한 사무실 공기질 영향성을 확인하기 위해 휴일과 평일을 비교한 결과 이산화탄소, PM<sub>10</sub>, 온도와 습도는 휴일에 비해 평일에 높았다.

공기질 개선을 위해 Damper 개방율을 기존 20%에서 70%까지 증가시킨 결과 이산화탄소 농도는 1,054.3ppm에서 795.7ppm으로 감소하였고, 실내로 공급되는 급기량을 기존 612.2m<sup>3</sup>/hr에서 784.3m<sup>3</sup>/hr으로 변화시킨 결과 이산화탄소 농도가 1,054.3ppm에서 933.4ppm으로 감소되었다. 또한 Damper 개방율과 급기량을 동시에 증가시키면서 이산화탄소 농도 감소량을 확인한 결과, Damper 개방율을 70%, 급기량 722.5m<sup>3</sup>/hr인 조건에서 이산화탄소 농도는 752.3ppm으로 감소하였고, 온·습도 및 미세먼지 등 측정한 모든 항목이 관리기준을 만족하였다.

본 연구 결과 사무실 공기질 평가 시 재실자수를 고려한 측정이 이루어질 필요성이 있으며, 공조시스템의 조절을 통해 쾌적한 사무환경 조성하여 근로자 건강영향을 최소화하도록 노력해야 할 것이다.

## I. 서 론

The National Human Pattern Survey(NHAPS)의 보고에 따르면 현대인들이 실내에서 보내는 시간은 하루의 86.9%로, 실외에서 보내는 시간은 하루의 7.6%에 불과한 것으로 보고하고 있어(NHAPS, 2016), 실내공기오염에 의한 질병발생이 사회적으로 주목받고 있다. 실내공기 오염물질로는 포름알데히드(Formaldehyde; HCHO)와 휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds; VOCs), 분진, 이산화탄소(Carbon Dioxide; CO<sub>2</sub>) 등이 알려져 있으며(Jones, 1999), 이러한 오염물질은 빌딩증후군(SBS : Sick Building Syndrome), 새 집 증후군 등의 질병을 야기하는 것으로 알려져 있다.

최근 우리나라에서는 미세먼지로 인한 각종 질병, 새집증후군 등 공기질 오염에 따른 질병 발생이 증가함에 따라 공기질 관리에 대한 국민의 관심과 요구가 높아지고 있다. 이러한 이유로 국내에서는 각 부처별로 표1와 같이 실내 공기질 관리지침을 제시하고 있다.

특히 우리나라의 경우 연평균 노동시간이 2,069시간으로 OECD 가입국 32개국 중 2위로 근로자의 사무공간에서의 장시간 오염물질 노출에 주목할 필요가 있다(OECD, 2016). 또한 실내공기 오염은 근로 생산성 저하의 원인이 될 수 있는 바(Wargocki등, 1999), 사무실 공기질 관리의 중요성이 대두되고 있다. 이러한 사무실 공기질 관리에 관련하여 고용노동부에서는 “사무실 공기 관리 지침(고용노동부 고시 2015-43)”을 통해 사무실 공기의 오염물질별 관리기준, 공기질 측정 및 분석방법 등 사무실 공기를 쾌적하게 유지·관리하기 위하여 사업주에게 지도·권고할 기술상의 지침 또는 작업환경의 표준을 정함을 목적으로 하고 있다.

고용노동부에서 지정한 사무실 공기 오염물질 관리대상은 미세먼지(PM<sub>10</sub>), 일산화탄소, 이산화탄소, 포름알데히드 등 총 9개 항목이며 오염물질 및 관리기준은 표2과 같다.

<표 1> 국내 주요정부 부처의 실내 공기질 관리기준

| 담당부처<br>기준물질    | 환경부                               | 보건복지부                          | 노동부                                         | 교육인적자원부                      |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|
| 적용대상            | 다중이용시설<br>(지하역사 등<br>17개 시설군)     | 공중이용시설<br>(학원, 공연장,<br>업무시설 등) | 사무실                                         | 학교                           |
| 근거법             | 다중이용시설<br>등의 실내공기질<br>관리법         | 공중위생관리법                        | 사무실<br>공기관리 지침                              | 학교보건법                        |
| 미세먼지            | 100~200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  | 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$   | 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$                | 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| CO              | 10~25ppm                          | 25ppm                          | 10ppm                                       | 10ppm                        |
| CO <sub>2</sub> | 1000ppm                           | 1000ppm                        | 1000ppm                                     | 1000ppm                      |
| NO <sub>2</sub> | 0.05~0.3ppm                       | -                              | 0.05ppm                                     | 0.05ppm                      |
| 포름알데히드          | 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$      | 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$   | 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$<br>(또는 0.1ppm) | 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| 총부유세균           | 800CFU/ $\text{m}^3$              | -                              | 800CFU/ $\text{m}^3$                        | 800CFU/ $\text{m}^3$         |
| 라돈              | 4 pCi/L                           | -                              | -                                           | 4.0 pCi/L                    |
| 휘발성<br>유기화합물    | 400~1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | -                              | 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$                | 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| 석면              | 0.01개/cc                          | -                              | 0.01개/cc                                    | 0.01개/cc                     |

<표 2> 고용노동부 사무실 공기관리 지침 제2조(오염물질 관리기준)

| 오염물질                    | 관리 기준                                        |
|-------------------------|----------------------------------------------|
| 미세먼지(PM <sub>10</sub> ) | 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하              |
| 일산화탄소(CO)               | 10ppm 이하                                     |
| 이산화탄소(CO <sub>2</sub> ) | 1000ppm                                      |
| 포름알데히드(HCHO)            | 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (또는 0.1 ppm) 이하 |
| 총휘발성유기화합물(TVOC)         | 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$                 |
| 총부유세균                   | 800 CFU/ $\text{m}^3$                        |
| 이산화질소(NO <sub>2</sub> ) | 0.05 ppm 이하                                  |
| 오존(O <sub>3</sub> )     | 0.06 ppm 이하                                  |
| 석면                      | 0.01개/cc 이하                                  |

주1) 관리기준 : 8시간 시간가중평균농도 기준

주2) PM<sub>10</sub> : Particle Matters. 입경이 10 $\mu\text{m}$  이하인 먼지

주3) CFU/ $\text{m}^3$  : Colony Forming Unit. 1 $\text{m}^3$  중에 존재하고 있는 집락형성 세균 개체 수

또한 공기정화시설을 갖춘 사무실에서 근로자 1인당 필요한 최소 외기량은  $0.57\text{m}^3/\text{min}$  이상, 환기횟수는 시간당 4회 이상으로 규정하고 있다(고용노동부 사무실 공기관리 지침 제3조(사무실의 환기기준)).

실내에서 이산화탄소의 농도가 증가하면 재실자들의 호흡에 필요한 산소의 양이 감소하기 때문에 이산화탄소는 중요한 실내 공기질 지표 중 하나이다. 또한 실내에서 이산화탄소는 주로 사람의 호흡에 의해 발생하고 환기가 부족하면 농도가 증가하기 때문에 이산화탄소 농도는 환기정도를 판단하는 지표물질로 사용된다. 특히 사계절이 뚜렷한 계절적 특성을 갖는 한국의 경우, 여름철 냉방과 겨울철 난방 등 실내 밀폐로 인한 기밀화로 환기량이 더욱 부족하게 된다.

따라서 본 연구에서는 연구대상 사무실의 공기질 측정 결과 일정시간에 관리기준을 초과한 이산화탄소에 주목하여, 사무공간의 시간변화에 따른 오염물질의 변이양상을 살펴보고, 공조시스템을 이용한 공기질 개선 정도를 평가하고자 하였다.

본 연구의 구체적 목적은 다음과 같다.

첫째, 시간과 사무실 내 재실자수에 따른 사무실 공기질을 파악한다.

둘째, 사무실의 면적당 재실인원, 환기량 및 환기횟수를 파악하여, 대상 사무실의 환기상태를 평가한다.

셋째, 이산화탄소 농도 감소를 위해 공조시스템의 조건을 변경하여 이산화탄소 농도 감소 효과를 확인한다.

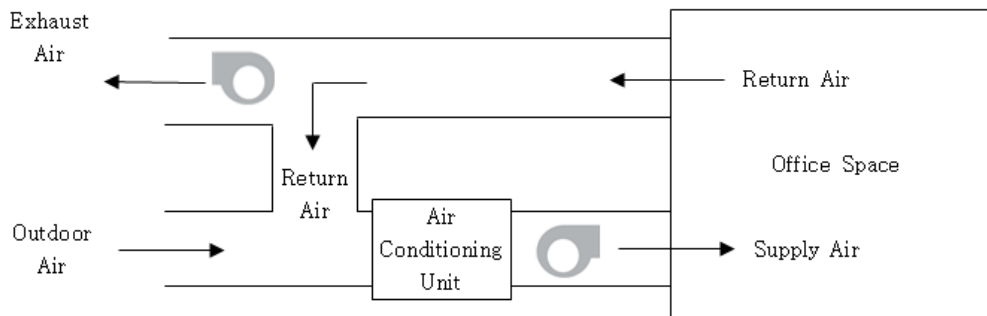
## II. 연구대상 및 방법

### 1. 연구대상

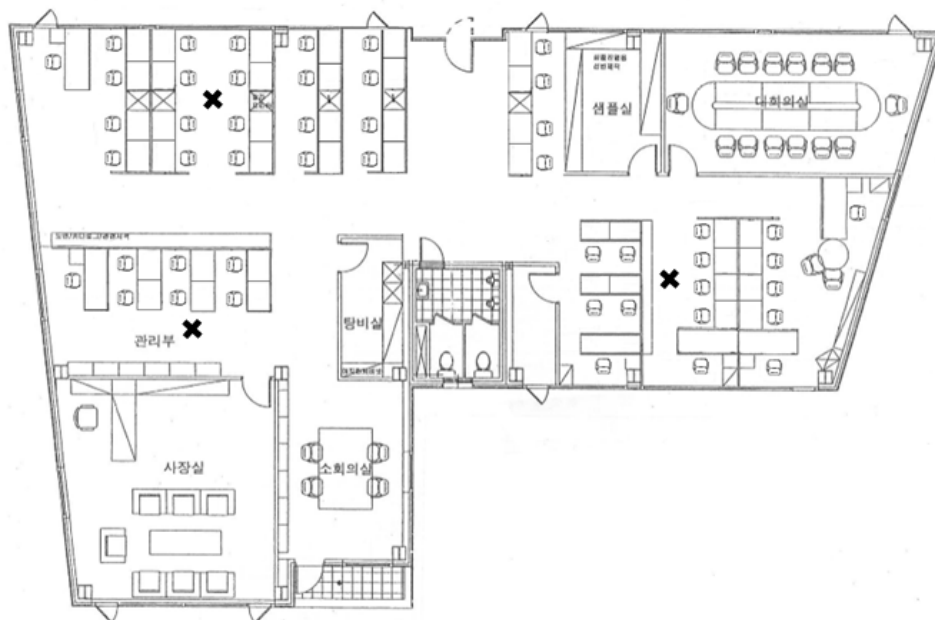
본 연구 대상은 경기도 용인시 마북동 소재 사무실 건물의 1개 층 사무실이며, 대상 건물의 개요는 표3과 같다.

<표 3> 연구대상 건물의 개요

| 구분     | 개요      |                                        |
|--------|---------|----------------------------------------|
| 건물     | 대지 위치   | 경기도 용인시 마북동                            |
|        | 규모      | 지하3층 지상 10층                            |
|        | 신축년도    | 2005년 2월                               |
|        | 용도      | 일반 사무실                                 |
| 공조 시스템 | 공조방식    | 중앙식(central system)                    |
|        | 풍량 조절방식 | 변풍량방식(Variable Air Volume System; VAV) |
|        | 온도 제어방식 | 자동제어 방식                                |
|        | 온도셋팅    | 24(℃)                                  |
|        | 필터      | Pre-filter, Medium filter              |
|        | 가습 방식   | 증기 분무식                                 |
| 대상 사무실 | 연면적     | 331.53 m <sup>2</sup>                  |
|        | 높이      | 2.6m                                   |
|        | 층수      | 지상 3층                                  |
|        | 근로자수    | 51명                                    |
|        | 흡연 여부   | 금연                                     |



<그림 1> 연구대상 건물의 공조시스템 개요도



<그림 2> 연구대상 사무실 평면도

## 2. 연구방법

### 가. 사무실 공기질 평가

사무실 공기질에 대한 평가와 동시에 사무실 내 재실자에 의한 공기질 영향성을 확인하기 위해 휴일과 평일에 각각 측정을 하였고, 휴일과 평일의 공조 설비는 동일하게 가동되었다. 또한 사무실 내 공기와 옥외 공기질을 비교하기 위하여 옥외 공기 측정을 병행하였다.

먼저, 재실자 영향성을 배제하기 위해 사무실 내 측정자 외 재실자가 없는 휴일(2017년 11월 26일)에 8시부터 19시까지 매시간 마다 사무실 내 각기 다른 3곳에서 10분씩 측정을 실시하였다.

또한 사무실 내 재실자수에 따른 사무실 공기오염 영향성을 확인하기 위하여 평일(2017년 11월 27일)에 휴일과 동일한 방법으로 재실자수를 확인하며 측정하였다.

측정항목은 총 10개로 온도와 습도, 총휘발성유기화합물(TVOC), 포름알데히드(HCHO), 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ), 일산화탄소(CO), 이산화질소( $\text{NO}_2$ ), 오존( $\text{O}_3$ ), 미세먼지( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ )를 측정하였고, 측정결과에 대한 공기질 수준을 평가하기 위한 기준은 국내 고용노동부 기준과 미국 공조냉동학회(American Society of heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers; ASHRAE)의 기준을 본 연구에서 표4와 같이 적용하였다.

<표 4> 본 연구의 공기질 측정 항목 및 관리기준

| 측정 항목             | 관리 기준                    | 관련 기관  |
|-------------------|--------------------------|--------|
| 온도                | 21~23℃(겨울)<br>23~26℃(여름) | ASHRAE |
| 상대습도              | 20~30%(겨울)<br>50~60%(여름) | ASHRAE |
| PM <sub>10</sub>  | 150µg/m <sup>3</sup>     | 노동부    |
| PM <sub>2.5</sub> | 15µg/m <sup>3</sup>      | ASHRAE |
| TVOC              | 500µg/m <sup>3</sup>     | 노동부    |
| HCHO              | 120µg/m <sup>3</sup>     | 노동부    |
| CO <sub>2</sub>   | 1000ppm                  | 노동부    |
| CO                | 10ppm                    | 노동부    |
| NO <sub>2</sub>   | 0.05ppm                  | 노동부    |
| O <sub>3</sub>    | 0.06ppm                  | 노동부    |

그리고 위 10개 항목을 측정하기 위한 측정 장비의 세부내용은 표5와 같다.

<표 5> 본 연구의 사무실 공기질 측정 장비

| Model | IQ-610                                                                              | DUSTMATE                                                                            | FORMALDEHYDE METER                                                                    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 제조사   | Gray Wolf(USA)                                                                      | Turnkey Instruments (UK)                                                            | ENMET                                                                                 |
| 측정 항목 | 온도, 습도, TVOC, O <sub>3</sub> ,<br>CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub>             | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>                                                | 포름알데히드 (HCHO)                                                                         |
| 사진    |  |  |  |

## 나. 사무실 환기상태 평가

사무실 면적, 근무인원 및 환기량 등에 대한 기초 조사를 통해 대상 사무실의 환기상태를 평가하였다.

먼저 사무실 면적당 적정인원이 채실하고 있는지  $100\text{m}^2$  당 최대점유인원을 산출하고, 근로자 1인당 외기 공급량을 확인하여 ASHRAE의 기준과 비교하여 보았다.

또한 시간당 환기횟수(Air Change per Hour; ACH)를 확인하여 대상 사무실의 환기횟수가 충분한지를 따져보았다.

## 다. 공조시스템을 활용한 사무실 공기 개선 및 평가

대상 사무실의 공기질과 환기상태에 대한 평가 후 공기질을 개선하기 위해 공조시스템을 조절하는 방법을 사용하였고, 공조시스템 중 옥외 공기가 실내로 들어오는 양을 조절하는 Damper의 개방율을 증가시키고, 실내로 공기를 공급해주는 급기량을 증가시켰다. Damper의 개방율과 급기량을 조절하는 것은 옥외 공기의 공급량을 증가시키기 때문에 옥외 공기의 측정을 병행하였다.

### 1) Damper 개방율 조절에 따른 사무실 공기 평가

사무실 실내 공기질 개선을 위한 첫 번째 방법으로 옥외 공기가 실내로 유입될 수 있는 Damper의 개방율을 기존 20%에서 30%, 50%, 70%로 증가시키면서 실내 공기질의 변이양상을 측정하였다. 측정은 2017년 11월 28일부터 30일까지 평일에 이산화탄소 농도가 가장 높았던 16시부터 17시에 실시하였으며, 측정일 3일간 평균 재실자수는 45.3명이었고, 지면으로부터 1.5m 높이에서 사무실 내 각기 다른 3곳에서 측정하였다.

### 2) 급기량 조절에 따른 사무실 공기 평가

사무실 실내 공기질 개선을 위한 두 번째 방법으로 해당 건물에서 대상 사무실의 층에 공급되는 급기량을 증가시키면서 실내 공기질의 변이양상을 측정하였다. 측정은 2017년 12월 4일부터 6일까지 16시부터 17시까지 실시하였으며, 측정일 3일간 평균 재실자수는 42.3명이었고, 측정 높이와 장소는 Damper 개방율 조절 시 측정방법과 동일하였다.

### 3) Damper 개방율 및 급기량 조절에 따른 사무실 공기 평가

사무실 실내 공기질 개선을 위한 세 번째 방법으로, Damper 개방율과 급기량을 동시에 조절하여 실내 공기질을 평가하였다. 측정은 2017년 12월 19일부터 21일까지 16시부터 17시까지 실시하였으며, 측정일 5일간 평균 재실자수는 45.4명이었고, 그 외 측정방법은 Damper 개방율 또는 급기량 조절 시 측정방법과 동일하였다.

### Ⅲ. 연구결과

#### 1. 사무실 공기질 평가

대상 사무실 공기질 평가를 위해 사무실 내 측정자를 제외한 채실자가 없는 휴일에 시간에 따른 실내 공기질을 측정한 결과 온도는 23.9~26.9℃로 겨울철 기준인 21~23℃에 비해 높았고, 그 외 9개 항목들은 관리 기준을 만족하였다(표6). 개별 항목별로 살펴보면, 습도는 20.3~22.9% 수준으로 아침과 오후시간에 높았고, 이산화탄소는 623~749.3ppm, PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 9.1~11.0μg/m<sup>3</sup>, 2.6~4.5μg/m<sup>3</sup>, TVOC는 309.7~427.7μg/m<sup>3</sup>, 포름알데히드는 19.6~36.6μg/m<sup>3</sup>, 이산화질소와 오존은 0.01ppm 미만으로 모두 관리 기준 미만이었다. 실내 공기와 옥외 공기를 비교해보면, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 이산화질소는 실내에서 농도가 더 낮았고, TVOC와 포름알데히드는 실내에서 농도가 더 높았다.

다음으로 평일에 시간대별 채실자수와 오염물질의 농도, 온·습도를 측정한 결과 온도와 이산화탄소를 제외한 항목은 기준치를 만족하였으나, 온도는 24.1~27.5℃ 수준으로 관리 기준인 21~23℃ 보다 높았고, 이산화탄소는 15~17시에 관리 기준인 1,000ppm을 초과하였다(표7). 개별 항목을 살펴보면, 습도는 24.4~33.1% 수준으로 아침시간에 높았고, PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 각각 9.4~24.8μg/m<sup>3</sup>, 2.6~4.9μg/m<sup>3</sup>, TVOC는 253.7~319.7μg/m<sup>3</sup>, 포름알데히드는 22.8~52.2μg/m<sup>3</sup>, 이산화질소와 오존은 0.01ppm 미만으로 모두 관리 기준 미만이었다. 실내와 옥외 공기를 비교해보면, 미세먼진과 이산화질소는 실내에서 농도가 더 낮았고, TVOC와 포름알데히드는 실내에서 농도가 더 높았다.

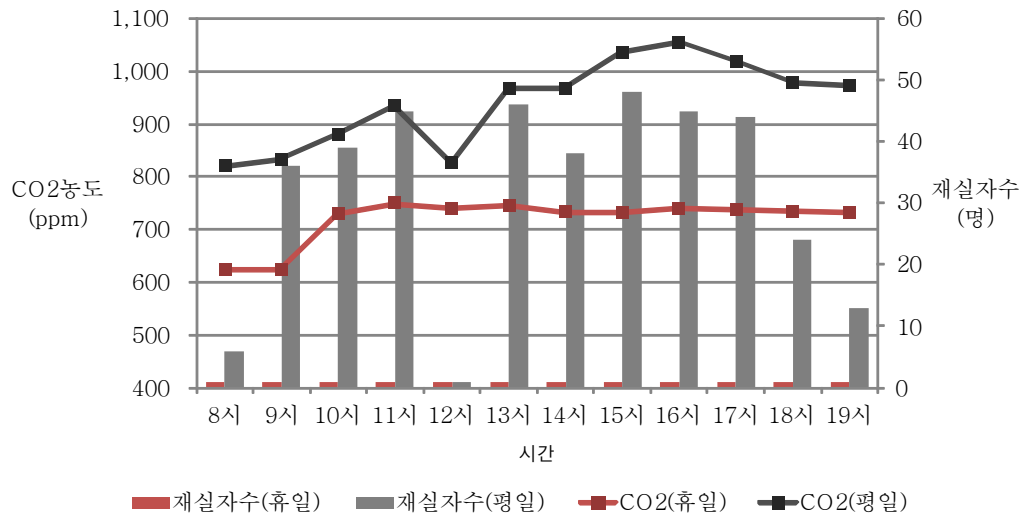
평일과 휴일의 측정결과를 비교했을 때 채실자의 증가로 인해 실내 공기질에 영향을 미치는 항목은 이산화탄소, PM<sub>10</sub>, 온도 및 습도로 판단된다(그림 3~6).

<표 6> 시간에 따른 사무실 공기질 평가 결과(휴일)

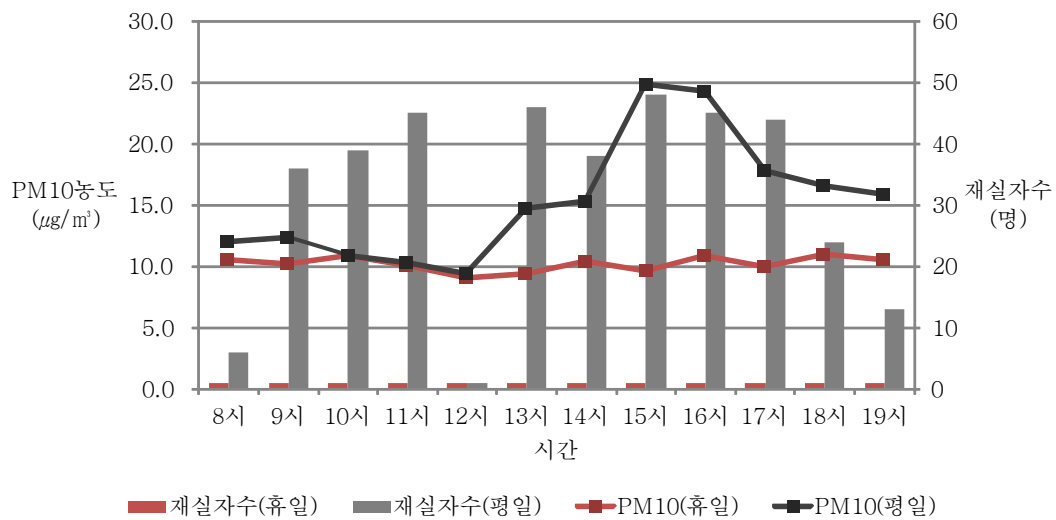
| 시간                                     | 08시            | 09시            | 10시            | 11시            | 12시           | 13시           | 14시           | 15시            | 16시           | 17시            | 18시           | 19시            | 옥외<br>공기       |
|----------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| 온도(℃)                                  | 23.9<br>±0.2   | 24.4<br>±0.4   | 25.8<br>±0.2   | 26.0<br>±0.1   | 26.2<br>±0.2  | 26.4<br>±0.1  | 26.6<br>±0.1  | 26.8<br>±0.1   | 26.9<br>±0.1  | 26.8<br>±0.1   | 26.5<br>±0.2  | 26.2<br>±0.2   | 5.1<br>±3.3    |
| 습도(%)                                  | 22.9<br>±0.2   | 22.1<br>±0.7   | 20.3<br>±0.2   | 20.7<br>±0.4   | 21.4<br>±0.1  | 21.7<br>±0.2  | 21.9<br>±0.4  | 20.5<br>±0.2   | 20.4<br>±0.1  | 20.4<br>±0.1   | 20.8<br>±0.3  | 21.0<br>±0.3   | 22.5<br>±13.2  |
| PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )  | 10.5<br>±0.5   | 10.9<br>±0.4   | 10.2<br>±0.4   | 10.1<br>±0.4   | 9.1<br>±0.4   | 9.4<br>±0.5   | 10.4<br>±0.6  | 9.7<br>±0.4    | 10.9<br>±0.4  | 10.0<br>±0.7   | 11.0<br>±1.3  | 10.6<br>±0.6   | 43.7<br>±12.6  |
| PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) | 3.1<br>±0.7    | 2.6<br>±0.5    | 3.4<br>±0.4    | 3.4<br>±0.4    | 2.9<br>±0.6   | 3.3<br>±0.4   | 3.1<br>±0.5   | 4.4<br>±0.6    | 4.5<br>±0.7   | 3.9<br>±0.4    | 3.4<br>±1.1   | 3.2<br>±0.3    | 24.6<br>±10.2  |
| TVOC(μg/m <sup>3</sup> )               | 425.3<br>±14.5 | 427.7<br>±9.3  | 415.0<br>±19.1 | 362.0<br>±25.1 | 319.3<br>±5.5 | 315.7<br>±2.9 | 326.3<br>±6.4 | 315.0<br>±14.1 | 309.7<br>±8.6 | 311.7<br>±8.1  | 317.3<br>±6.0 | 321.7<br>±9.1  | 176.6<br>±14.2 |
| HCHO(μg/m <sup>3</sup> )               | 19.6<br>±10.9  | 25.9<br>±7.4   | 25.0<br>±4.7   | 32.1<br>±7.5   | 22.8<br>±11.9 | 36.6<br>±6.3  | 33.9<br>±8.1  | 35.7<br>±10.4  | 29.0<br>±5.4  | 27.7<br>±4.7   | 25.0<br>±6.7  | 34.4<br>±11.7  | 11.5<br>±3.2   |
| CO <sub>2</sub> (ppm)                  | 623.0<br>±26.3 | 620.3<br>±21.6 | 728.7<br>±16.6 | 749.3<br>±4.9  | 740.3<br>±3.8 | 744.3<br>±4.5 | 733.3<br>±2.5 | 731.7<br>±4.7  | 740.3<br>±3.5 | 736.7<br>±10.7 | 735.7<br>±5.1 | 732.7<br>±11.1 | 357.5<br>±43.1 |
| CO(ppm)                                | 1.6<br>±0.1    | 1.5<br>±0.2    | 1.7<br>±0.1    | 1.6<br>±0.1    | 1.7<br>±0.1   | 1.6<br>±0.1   | 1.7<br>±0.1   | 1.6<br>±0.1    | 1.7<br>±0.1   | 1.7<br>±0.1    | 1.7<br>±0.1   | 1.6<br>±0.1    | 0.9<br>±0.1    |
| NO <sub>2</sub> (ppm)                  | 0.01<br>±0.01  | 0.01<br>±0.01  | 0.00<br>±0.01  | 0.01<br>±0.01  | 0.00<br>±0.01 | 0.01<br>±0.01 | 0.00<br>±0.01 | 0.00<br>±0.01  | 0.01<br>±0.01 | 0.01<br>±0.00  | 0.00<br>±0.01 | 0.01<br>±0.01  | 0.04<br>±0.01  |
| O <sub>3</sub> (ppm)                   | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.01  | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00  |

<표 7> 시간 및 재실자수에 따른 사무실 공기질 평가 결과(평일)

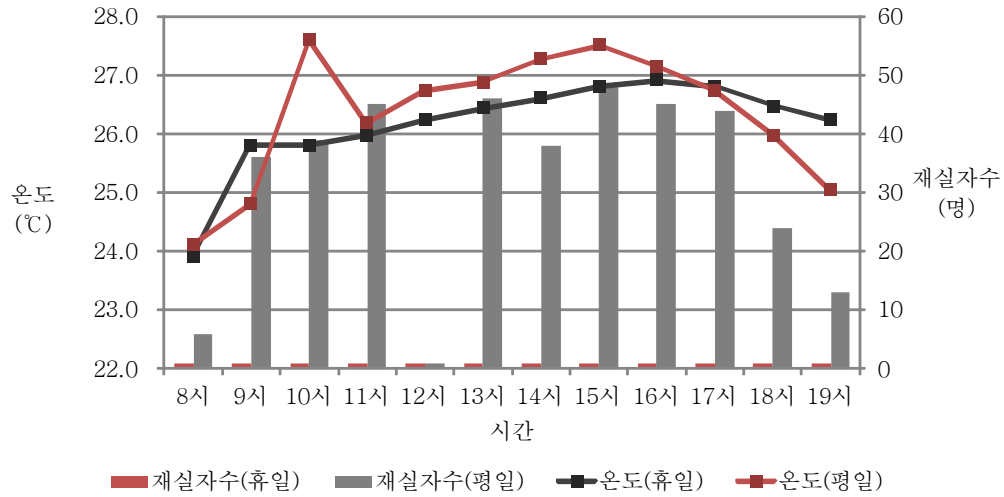
| 시간                                     | 08시           | 09시           | 10시            | 11시            | 12시           | 13시           | 14시            | 15시             | 16시            | 17시            | 18시           | 19시           | 옥외<br>공기       |
|----------------------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| 재실자수(명)                                | 6             | 36            | 39             | 45             | 1             | 46            | 38             | 48              | 45             | 44             | 24            | 13            |                |
| 온도(℃)                                  | 24.1<br>±0.7  | 24.8<br>±0.7  | 27.6<br>±0.8   | 26.2<br>±0.5   | 26.7<br>±0.6  | 26.9<br>±0.4  | 27.3<br>±0.5   | 27.5<br>±1.1    | 27.1<br>±0.9   | 26.7<br>±0.9   | 26.0<br>±0.7  | 25.0<br>±0.3  | 2.7<br>±4.3    |
| 상대습도(%)                                | 33.1<br>±0.4  | 26.7<br>±1.2  | 25.1<br>±0.5   | 25.1<br>±0.4   | 24.7<br>±0.6  | 25.9<br>±0.5  | 26.2<br>±0.5   | 26.3<br>±0.6    | 24.4<br>±0.8   | 24.5<br>±0.7   | 24.8<br>±0.7  | 24.6<br>±0.8  | 23.9<br>±11.5  |
| TVOC(μg/m <sup>3</sup> )               | 319.7<br>±6.4 | 292.0<br>±4.6 | 266.3<br>±11.6 | 272.3<br>±10.1 | 255.3<br>±7.4 | 261.7<br>±6.1 | 253.7<br>±7.5  | 294.3<br>±7.1   | 290.7<br>±5.1  | 295.0<br>±6.6  | 292.7<br>±5.7 | 294.7<br>±7.8 | 157.3<br>±19.2 |
| HCHO(μg/m <sup>3</sup> )               | 42.0<br>±12.7 | 28.1<br>±11.0 | 22.8<br>±8.0   | 35.7<br>±6.0   | 23.7<br>±8.1  | 43.3<br>±6.9  | 52.2<br>±18.9  | 48.2<br>±7.5    | 33.9<br>±14.2  | 35.7<br>±8.9   | 34.3<br>±10.2 | 25.4<br>±3.5  | 8.2<br>±4.1    |
| CO <sub>2</sub> (ppm)                  | 820.7<br>±7.1 | 833.3<br>±7.8 | 880.7<br>±5.5  | 934.3<br>±8.1  | 825.7<br>±7.1 | 968.0<br>±9.6 | 966.3<br>±11.0 | 1035.3<br>±11.9 | 1054.3<br>±7.8 | 1017.0<br>±7.5 | 978.7<br>±6.7 | 973.7<br>±7.6 | 339.7<br>±38.2 |
| CO(ppm)                                | 1.7<br>±0.1   | 1.7<br>±0.1   | 1.8<br>±0.1    | 1.7<br>±0.1    | 1.8<br>±0.1   | 1.7<br>±0.1   | 1.7<br>±0.1    | 1.7<br>±0.1     | 1.8<br>±0.1    | 1.7<br>±0.1    | 1.8<br>±0.1   | 1.7<br>±0.1   | 3.2<br>±1.9    |
| NO <sub>2</sub> (ppm)                  | 0.01<br>±0.01 | 0.00<br>±0.00 | 0.00<br>±0.01  | 0.00<br>±0.01  | 0.00<br>±0.01 | 0.00<br>±0.00 | 0.00<br>±0.01  | 0.01<br>±0.00   | 0.01<br>±0.01  | 0.00<br>±0.01  | 0.01<br>±0.01 | 0.01<br>±0.01 | 0.03<br>±0.01  |
| O <sub>3</sub> (ppm)                   | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00   | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00  | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.00 | 0.01<br>±0.01  |
| PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )  | 12.0<br>±0.5  | 12.4<br>±0.3  | 10.8<br>±0.4   | 10.3<br>±0.3   | 9.4<br>±0.4   | 14.7<br>±1.1  | 15.3<br>±0.5   | 24.8<br>±0.7    | 24.3<br>±0.6   | 17.8<br>±0.6   | 16.6<br>±0.8  | 15.9<br>±1.4  | 47.1<br>±15.6  |
| PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) | 2.6<br>±0.4   | 2.9<br>±0.1   | 3.6<br>±0.5    | 3.5<br>±0.7    | 3.3<br>±0.7   | 3.1<br>±0.7   | 3.1<br>±0.1    | 4.7<br>±0.7     | 4.9<br>±0.5    | 4.5<br>±0.6    | 4.1<br>±0.3   | 4.3<br>±0.5   | 28.5<br>±9.7   |



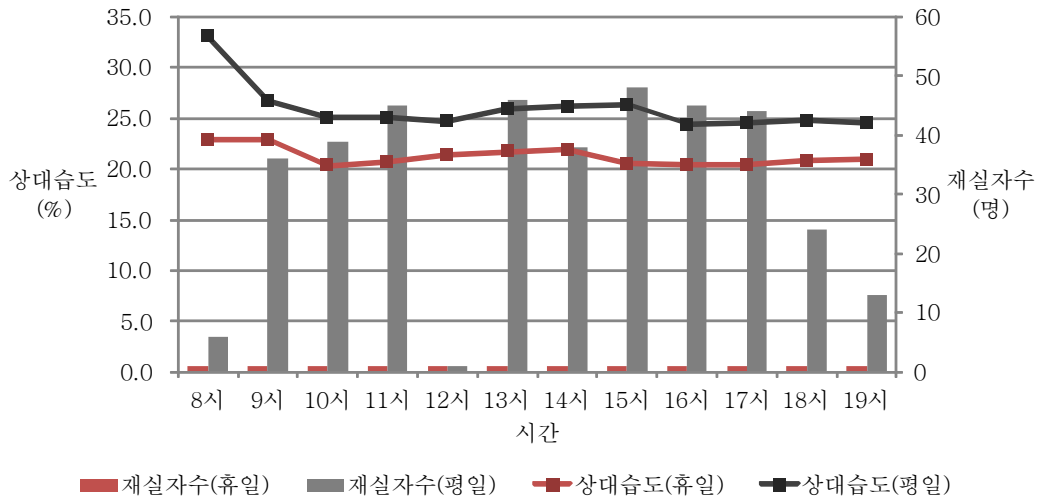
<그림 3> 시간 및 재실자수에 따른 사무실 CO<sub>2</sub> 농도



<그림 4> 시간 및 재실자수에 따른 사무실 PM<sub>10</sub> 농도



<그림 5> 시간 및 재실자수에 따른 사무실 온도



<그림 6> 시간 및 재실자수에 따른 사무실 상대습도

## 2. 사무실 환기상태 평가

대상 사무실의 환기상태를 평가하기 위해 ASHRAE의 기준(62-2001)과 비교한 결과 100m<sup>2</sup>당 점유인원은 15.38명으로 기준인 7명에 비해 약 2.2배 높았고, 사무실 1인당 외기 공급량은 0.20m<sup>3</sup>/min으로 기준인 0.57m<sup>3</sup>/min 대비 약 0.5배였으며, 시간당 실내공기 교환횟수는 1.16회로 기준인 4~10회에 비해 부족하여, 전체적으로 환기상태가 불량하였다(표8).

<표 8> 대상사무실의 환기상태 평가

|                                    | 대상 사무실 | 기준(ASHRAE, 62-2001) |
|------------------------------------|--------|---------------------|
| 100m <sup>2</sup> 당 점유인원(명)        | 15.38  | 7                   |
| 1인당 적정 외기 공급량(m <sup>3</sup> /min) | 0.20   | 0.57                |
| 시간당 실내공기 교환횟수(회)                   | 1.16   | 6~10(Office)        |

$$- 100m^2 \text{당 점유인원} = \frac{\text{점유인원(명)}}{\text{사무실 면적}(100m^2)} = \frac{51\text{명} \times 100}{331.53m^2} = 15.38\text{명}/100m^2$$

$$- 1\text{인당 외기 공급량}(m^3/\text{min}) = \frac{612.2m^3/hr}{60\text{min}/hr \times 51\text{명}} = 0.20m^3/\text{min}$$

$$- \text{필요 환기량}(m^3/hr) = \frac{\text{이산화탄소 발생량}(m^3/hr)}{\text{이산화탄소 허용 농도}(\%) - \text{실외 이산화탄소 농도}(\%)}$$

$$= \frac{0.0128m^3/hr \times 51\text{명}}{0.1\% - 0.03397\%} \times 100 = 988.64m^3/hr$$

※ 1인당 이산화탄소 배출량(ASHRAE기준) = 0.0128m<sup>3</sup>/hr

$$- \text{시간당 실내공기 교환횟수} = \frac{\text{필요 환기량}(m^3/hr)}{\text{기적}(m^3)} = \frac{988.64m^3/hr}{331.53m^2 \times 2.6m} = 1.16$$

### 3. 공조시스템을 활용한 사무실 공기 개선 평가

#### 가. Damper 개방율 조절에 따른 사무실 공기 평가

공조시스템을 활용한 사무실 내 이산화탄소 농도 감소를 위한 첫 번째 방법으로 Damper 개방율을 기존 20%에서 30%, 50%, 70%로 증가시킨 결과, 이산화탄소 농도는 988.5, 845.4, 795.7ppm으로 감소하였다(표9).

온도는 27.1℃에서 26.4, 24.1, 23.4℃로 낮아졌고, 상대습도는 24.4%에서 25.1, 25.7, 26.3%로 증가하였다. PM<sub>10</sub>은 24.3μg/m<sup>3</sup>에서 12.4, 11.8, 12.4μg/m<sup>3</sup>으로 감소하였고, PM<sub>2.5</sub>는 4.9μg/m<sup>3</sup>에서 2.2, 2.1, 2.7μg/m<sup>3</sup>으로 감소하였다. TVOC는 290.7μg/m<sup>3</sup>에서 284.5, 281.6, 276.6μg/m<sup>3</sup>으로 감소하였고, 포름알데히드는 33.5μg/m<sup>3</sup>에서 36.2, 42.9, 28.1μg/m<sup>3</sup>으로 확인되었다. 일산화탄소는 0.70ppm에서 0.60, 0.63, 0.57ppm으로 감소하였고, 이산화질소와 오존은 Damper 개방율 조절과 상관없이 모두 0.01ppm 이하였다.

<표 9> Damper 개방율 조절에 따른 사무실 공기질 개선결과

| Damper 개방율                             | 20%         | 30%       | 50%       | 70%       | 옥외 공기      |
|----------------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 온도(℃)                                  | 27.1±0.9    | 26.4±1.2  | 24.1±0.9  | 23.4±1.7  | 2.3±1.1    |
| 상대 습도(%)                               | 24.4±0.8    | 25.1±1.3  | 25.7±0.9  | 26.3±1.8  | 36.7±15.3  |
| PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )  | 24.3±0.6    | 12.4±0.5  | 11.8±0.5  | 12.4±0.8  | 19.3±6.1   |
| PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) | 4.9±0.5     | 2.2±0.4   | 2.1±0.7   | 2.7±0.6   | 12.5±3.5   |
| TVOC(μg/m <sup>3</sup> )               | 290.7±5.1   | 284.5±6.5 | 281.6±4.9 | 276.6±7.5 | 145±19.1   |
| HCHO(μg/m <sup>3</sup> )               | 33.5±8.4    | 36.2±7.1  | 42.9±8.4  | 28.1±6.5  | 61.6±11.7  |
| CO <sub>2</sub> (ppm)                  | 1,054.3±7.8 | 988.5±8.2 | 845.4±9.5 | 795.7±9.1 | 377.3±48.1 |
| CO(ppm)                                | 0.70±0.10   | 0.60±0.10 | 0.63±0.06 | 0.57±0.12 | 0.53±0.12  |
| NO <sub>2</sub> (ppm)                  | 0.01±0.01   | 0.00±0.01 | 0.00±0.00 | 0.00±0.00 | 0.02±0.01  |
| O <sub>3</sub> (ppm)                   | 0.01±0.00   | 0.01±0.00 | 0.01±0.00 | 0.01±0.00 | 0.03±0.02  |

## 나. 급기량 조절에 따른 사무실 공기질 평가

공조시스템을 활용한 사무실 내 이산화탄소 농도 감소를 위한 두 번째 방법으로 대상 사무실에 공급되는 급기량을 기존 612.2m<sup>3</sup>/hr에서 695.7, 721.2, 784.3m<sup>3</sup>/hr로 증가시킨 결과, 이산화탄소 농도는 1,011.6, 974.7, 933.4ppm으로 감소하였다(표10).

온도는 27.1℃에서 26.5, 25.3, 26.1℃로 낮아졌고, 상대습도는 24.4%에서 25.1, 24.9, 27.2%로 증가하였다. PM<sub>10</sub>은 24.3μg/m<sup>3</sup>에서 18.2, 16.2, 15.5μg/m<sup>3</sup>으로 감소하였고, PM<sub>2.5</sub>는 4.9μg/m<sup>3</sup>에서 2.2, 2.8, 2.4μg/m<sup>3</sup>으로 감소하였다. TVOC는 290.7μg/m<sup>3</sup>에서 293.6, 277.2, 281.4μg/m<sup>3</sup>으로 확인되었고, 포름알데히드는 33.5μg/m<sup>3</sup>에서 34.3, 37.2, 35.6μg/m<sup>3</sup>으로 증가하였다. 일산화탄소는 0.70ppm에서 0.68, 0.64, 0.74ppm으로 확인되었고, 이산화질소와 오존은 급기량 조절과 상관없이 모두 0.01ppm 이하였다.

<표 10> 급기량 조절에 따른 사무실 공기질 개선결과

|                                        |             |             |            |            |            |
|----------------------------------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
| 급기량(m <sup>3</sup> /hr)                | 612.2±13.7  | 695.7±18.2  | 721.2±19.6 | 784.3±23.5 | 옥외 공기      |
| 온도(℃)                                  | 27.1±0.9    | 26.5±0.8    | 25.3±1.2   | 26.1±0.7   | -2.6±1.4   |
| 상대 습도(%)                               | 24.4±0.8    | 25.1±1.3    | 24.9±1.3   | 27.2±1.6   | 47.4±19.8  |
| PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )  | 24.3±0.6    | 18.2±0.7    | 16.2±0.6   | 15.5±0.9   | 27.2±14.5  |
| PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) | 4.9±0.5     | 2.2±0.3     | 2.8±0.6    | 2.4±0.4    | 14.3±8.2   |
| TVOC(μg/m <sup>3</sup> )               | 290.7±5.1   | 293.6±15.6  | 277.2±14.5 | 281.4±9.5  | 166.8±17.6 |
| HCHO(μg/m <sup>3</sup> )               | 33.5±8.4    | 34.3±6.2    | 37.2±10.3  | 35.6±8.6   | 46.3±9.6   |
| CO <sub>2</sub> (ppm)                  | 1,054.3±7.8 | 1,011.6±6.9 | 974.7±11.7 | 933.4±8.5  | 355.9±37.2 |
| CO(ppm)                                | 0.70±0.10   | 0.68±0.10   | 0.64±0.06  | 0.74±0.08  | 0.72±0.26  |
| NO <sub>2</sub> (ppm)                  | 0.01±0.01   | 0.00±0.00   | 0.01±0.00  | 0.01±0.01  | 0.01±0.00  |
| O <sub>3</sub> (ppm)                   | 0.01±0.00   | 0.01±0.00   | 0.01±0.01  | 0.01±0.00  | 0.02±0.01  |

다. Damper 및 급기량 조절에 따른 사무실 공기질 평가

공조시스템을 활용한 사무실 내 이산화탄소 농도 감소를 위한 세 번째 방법으로, Damper 개방율을 30%, 50%, 70%로 증가시키면서 각 조건에서 급기량을 단계적으로 3번씩 증가시켜 총 9가지 조건으로 평가한 결과, Damper를 70%개방한 상태에서 급기량을  $787.2\text{m}^3/\text{hr}$ 까지 증가시켰을 때 이산화탄소 농도는  $717.8\text{ppm}$ 으로 가장 크게 감소하였다.

Damper를 30% 개방한 상태에서 급기량을  $699.5$ ,  $718.2$ ,  $785.9\text{m}^3/\text{hr}$ 로 증가시키고, Damper를 50% 개방한 상태에서 급기량을  $695.4$ ,  $729.2$ ,  $693.7\text{m}^3/\text{hr}$ 으로 증가시키고, Damper를 70% 개방한 상태에서 급기량을  $693.7$ ,  $722.5$ ,  $787.2\text{m}^3/\text{hr}$ 로 증가시킨 결과를 각 항목별로 살펴보면, 온도는  $25.9^\circ\text{C}$ 에서  $21.2^\circ\text{C}$ 까지 낮아졌고, 상대습도는 25.7%에서 30.7%까지 증가하였다.  $\text{PM}_{10}$ 은  $11.4\sim 12.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 는  $3.4\sim 4.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, TVOC는  $258.3\sim 286.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 포름알데히드는  $38.5\sim 42.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가 또는 감소 추세를 보이지 않았다. 일산화탄소는  $0.57\sim 0.72\text{ppm}$ 이었고, 이산화질소와 오존은 모두  $0.01\text{ppm}$  이하였다.

<표 11> Damper 및 급기량 조절에 따른 사무실 공기질 개선결과

| Damper개방율<br>(%)                       | 30         |            |            | 50         |            |            | 70         |            |            | 옥외<br>공기질  |
|----------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 급기량(m <sup>3</sup> /hr)                | 699.5±15.3 | 718.2±14.5 | 785.9±17.2 | 695.4±21.4 | 729.2±19.7 | 783.5±24.5 | 693.7±19.9 | 722.5±22.6 | 787.2±24.2 |            |
| 온도(℃)                                  | 25.9±1.4   | 25.5±1.4   | 25.2±1.7   | 24.8±2.1   | 24.5±1.6   | 23.9±1.5   | 22.5±1.8   | 22.4±1.7   | 21.2±2.3   | -3.1±5.6   |
| 습도(%)                                  | 25.7±1.6   | 25.9±1.8   | 26.2±1.3   | 26.8±2.5   | 26.9±2.5   | 27.1±2.8   | 28.7±2.7   | 29.3±2.4   | 30.7±3.1   | 43.7±17.7  |
| PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )  | 12.1±1.0   | 11.7±1.2   | 11.8±0.9   | 11.7±0.9   | 12.3±1.0   | 11.4±0.8   | 12.1±1.3   | 11.9±0.7   | 12.2±0.8   | 45.7±7.3   |
| PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) | 3.8±0.5    | 3.5±0.4    | 3.7±0.3    | 3.8±0.6    | 3.4±0.6    | 4.2±0.5    | 3.8±0.3    | 3.5±0.6    | 3.7±0.4    | 29.5±6.6   |
| TVOC(μg/m <sup>3</sup> )               | 282.4±5.9  | 274.6±7.2  | 285.1±5.4  | 277.5±6.3  | 286.3±6.7  | 275.2±5.9  | 263.4±5.8  | 258.3±7.1  | 267.4±6.8  | 127.3±24.2 |
| HCHO(μg/m <sup>3</sup> )               | 40.6±5.3   | 42.8±4.8   | 38.5±5.7   | 41.6±4.8   | 42.6±4.7   | 39.7±5.2   | 38.6±4.7   | 41.7±3.8   | 42.2±4.5   | 72.3±15.5  |
| CO <sub>2</sub> (ppm)                  | 989.3±14.7 | 972.9±13.4 | 955.8±10.6 | 855.4±12.5 | 845.7±15.2 | 833.1±14.7 | 763.5±17.6 | 752.3±12.6 | 717.8±15.3 | 382.5±51.2 |
| CO(ppm)                                | 0.62±0.04  | 0.68±0.06  | 0.57±0.05  | 0.58±0.05  | 0.65±0.07  | 0.61±0.04  | 0.72±0.06  | 0.59±0.05  | 0.67±0.06  | 0.76±0.27  |
| NO <sub>2</sub> (ppm)                  | 0.01±0.00  | 0.01±0.00  | 0.01±0.01  | 0.01±0.00  | 0.01±0.00  | 0.01±0.00  | 0.01±0.00  | 0.01±0.01  | 0.01±0.01  | 0.05±0.02  |
| O <sub>3</sub> (ppm)                   | 0.01±0.00  | 0.01±0.01  | 0.01±0.00  | 0.01±0.01  | 0.01±0.00  | 0.01±0.01  | 0.01±0.00  | 0.01±0.00  | 0.01±0.00  | 0.01±0.01  |

## IV. 고찰

실내 이산화탄소 농도 증가에 따른 건강영향성에 대해 살펴보면, 국내 김혜정(2005)의 연구에서 사무공간의 낮은 이산화탄소 농도와 자각증상 호소 간의 양의 상관성( $B=0.141, p<0.01$ )을 보고한 바 있고, 대만의 한 연구에서는 여름철과 겨울철의 이산화탄소 농도를 반복 측정하여(평균 농도 각각  $431\pm19$ ;  $876\pm48$ ) 오즈비를 산출한 결과, 500ppm미만의 이산화탄소에 노출된 저 노출군에 비해 800ppm이상의 고노출군에서 눈 간지러움과 상기도질환 증상의 오즈비가 1.7배 높다고 보고하였다(Dai-Hua Tsai 등, 2012).

다음으로 사무 공간 내 이산화탄소 농도 증가에 따른 업무영향성에 대해 살펴보면, 미국의 한 연구에서 사무공간의 이산화탄소 농도 증가와 인지기능 점수 저하와의 관련성을 보고하였으며(Allen JG 등, 2016), Wargocki 등(1999)의 연구에서는 환기율을 두 배 증가시키는 것이 사무직의 전반적인 생산성을 1.9%까지 증가시킨다고 보고하였다. 국내에서 수행된 오근숙 등(2010)의 연구에서도 이산화탄소 농도 증가는 작업생산성의 질적인 면에 부정적인 영향을 미치며, 여성이 남성에 비해 높은 영향을 받는다고 보고하였다.

따라서 사무실 공기질은 인체영향성 뿐만 아니라 업무 생산성에도 영향을 미쳐 근로자의 건강과 업무효율에 있어 매우 중요하다.

본 연구의 결과 중 재실자수 변동에 따른 이산화탄소 농도 변화에 대해 살펴보면, 사무실 내 재실자수의 증가 또는 감소에 따라 이산화탄소 농도는 함께 증감하는 추세를 보였고, 오후 16시에 가장 높은 농도를 보였다. 이러한 추세는 사무실의 환기상태가 불량하여 재실자의 호흡으로 발생한 이산화탄소가 사무실 내 축적된 것이 원인으로 판단된다.

정지연 등(2007)이 국내 4개 빌딩 소재 사무실의 공기질에 대해 평가한 연구에서 겨울철(2007년 2월 18일~3월 15일)에 측정한 결과와 본 연구 대상 사무실의 공기질을 비교해보면, 이산화탄소 농도는 평균 786ppm으로 본 연구

941ppm에 비해 낮았으며, 시간에 따른 이산화탄소 농도는 오전 11시와 17시 전후로 높은 농도를 보여 본 연구와 유사한 패턴을 보고하였다. 또한 온도는 평균  $23.9 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 로 본 연구  $26.3 \pm 1.1^\circ\text{C}$ 보다 더 낮았고, 상대습도는  $20.7 \pm 4.3\%$ 로 본 연구  $26.0 \pm 4.3\%$ 보다 더 낮았다. 일산화탄소는 2.1ppm으로 본 연구 1.7ppm보다 더 높았고, 미세먼지(PM<sub>10</sub>)는  $62.3 \pm 1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구  $15.4 \pm 5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 더 높았다. 포름알데히드는 0.027ppm으로 본 연구 0.026ppm와 거의 비슷한 수준이었다.

다음으로 공조시스템의 변경을 통한 사무실 내 이산화탄소 농도 개선 효과에 대해 살펴보면, 이산화탄소 농도가 가장 많이 감소한 조건은 Damper를 70% 개방하고 급기량을  $787.2 \text{m}^3/\text{hr}$ 으로 한 조건이었다. Damper 개방율을 증가시키고 급기량을 늘리는 것은 옥외 공기의 실내 공급량을 늘려 이산화탄소 농도를 감소시키는 방법인데, 이는 동시에 사무실 공기의 온·습도 등에도 영향을 미친다. 대상 사무실의 공조시스템의 조절 전과 공조시스템의 단계적 조절에 따른 결과를 살펴보면, 온도는 Damper의 개방율과 급기량을 증가시킬수록 감소하였고(최대  $-5.9^\circ\text{C}$ ), 상대습도는 증가추세를 보였고(최대 6.3%), 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)는 각각 24.3,  $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 12.2,  $3.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하였다. 그 외 TVOC, 포름알데히드, 일산화탄소, 이산화질소 및 오존은 공조시스템의 단계적 조절에 따른 변이양상을 보이지 않았다.

본 연구에서 대상 사무실의 공기질을 평가하기 위하여, 평일에 시간 및 재실자수에 따른 실내 공기질을 측정하였고, 재실자수가 제한된 주말 측정을 통해 재실자수가 사무실에 미치는 영향에 대한 비교가 가능하였다. 또한 공조시스템의 단계적 조절이 사무실 내 공기질에 미치는 영향에 대해 확인하였다. 다만 이 연구를 활용하기에 앞서, 각 사무실의 공조시스템의 조건이 다양하기 때문에 공조시스템 조절에 의한 소음 발생, 에너지효율 및 재실자의 만족도 등을 고려하여 각 사무실에 최적의 공조시스템 조건을 적용해야 한다.

본 연구의 제한점은 사무실 내 개인적 가습기, 히터 사용 등에 대해서는 조

절하지 못하였고, 측정이 계절적으로는 겨울철(11~12월)에 이뤄졌지만 측정 일에 따라 옥외 공기의 온·습도 및 오염물질 농도가 조금씩 상이하였고, 이에 따른 실내 공기 영향성은 고려되지 못하였다.

겨울철 환기가 부족한 사무실의 이산화탄소 저감을 위한 적절한 방법에 대한 제언으로 실내 관상식물을 이용한 공기정화는 사무실 내 미학적 분위기 환기 뿐 아니라, 식물 광합성을 통한 이산화탄소 소모를 기대할 수 있다. 국내 연구에서 *Fatsia japonica* 등의 화훼류가 높은 광합성과 이산화탄소 소모량으로 실내 정화에 유용한 것으로 보고되었다(박재숙, 2008).

## V. 결론

본 연구는 대상 사무실의 공기질과 환기상태를 평가하고, 일부 시간대 관리 기준을 초과한 이산화탄소 농도 감소를 위해 공조시스템을 조절하였다. 이에 따른 이산화탄소 농도, 온·습도 및 포름알데히드 등을 고려한 최적의 개선 조건을 도출하고자 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

대상 사무실의 공기질을 평일과 휴일에 비교하여 재실자의 영향을 확인한 결과, 평일은 휴일에 비해 이산화탄소 농도가 평균 222.6ppm 높았고, 온도는 0.3℃, 상대습도는 4.8% 높았으며, PM<sub>10</sub>은 5.1μg/m<sup>3</sup>, PM<sub>2.5</sub>는 0.3μg/m<sup>3</sup> 높았다.

공조시스템을 통해 실내 공기질을 개선하기 위해 Damper 개방율을 증가한 결과 Damper개방율이 증가할수록 이산화탄소 농도는 감소하였고, 급기량을 증가시킨 결과 급기량이 많을수록 이산화탄소 농도는 감소하여 두 조건 모두 이산화탄소 감소효과를 확인하였다. 또한 Damper개방율과 급기량을 동시에 단계적으로 증가시킨 결과 Damper개방율과 급기량이 많을수록 이산화탄소 농도와 온도는 감소하였고, 상대습도는 증가하였다. 또한 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 감소하였고, 그 외 TVOC, 포름알데히드, 일산화질소, 이산화질소 및 오존에서는 뚜렷한 증감을 확인할 수 없었다.

본 연구의 결과를 종합하였을 때, 겨울철 환기가 부족한 대상 사무실은 Damper개방율을 증가시키고 급기량을 늘릴수록 공기질이 개선되었으며, 본 연구에서의 최적 조건은 공기질 측정항목의 기준을 모두 만족시키는 Damper 개방율 70%, 급기량 722.5m<sup>3</sup>/hr 로 판단하였다.

## 참 고 문 헌

김상철, 강병창, 이상욱, 김기두, 서원호, 김종현. 어린이집 실내공기 중 주요 오염물질의 특성 및 환기에 관한 연구. 한국대기환경학회지 2014; 30(3): 245-250

김혜정. 석유화학 공장 사무실 공기질과 근로자 자각증상과의 관계 [석사학위 논문]. 서울: 연세대학교 2005

노영만, 이철민, 김석원, 김치년, 김현욱, 조기홍, 최호춘, 강성호, 김정만. 사무실 내 실내공기질 특성 및 근무자의 자각증상에 관한 연구. 한국산업위생학회지 2004; 14(3): 270-282

박재숙, 이진희, 서정근. 관상화훼식물의 실내공기정화에 관한 연구 -이산화탄소를 중심으로-. 인간식물환경학회 2008; 11(1): 59-72

오근숙, 정근주, 임영빈. 실내 이산화탄소 농도가 작업능률에 미치는 영향. 대한건축학회 학술발표대회 논문집 2010; 30(1): 385-6

정지연, 이병규, 피영규. 업무용 빌딩 내 사무실의 실내공기질 평가. 한국산업위생학회지 2007; 17(1): 31-42

이산화탄소. 식품의약품안전평가원 독성정보시스템 [cited 2017 Dec 10] ; Available from: URL:<http://www.nifds.go.kr/toxinfo>

Allen JG, MacNaughton P, Satish U. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environ Health Perspect* 2016; 124(6): 805-812

American Society of Heating, Refrigeration and Air -conditioning. Engineers (ASHRAE): ASHRAE Standard 62. I-2007: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: ASHRAE, 2007

Apte MG, Fisk WJ, Daisey JM. Associations between indoor CO<sub>2</sub> concentrations and sick building syndrome symptoms in U.S. office buildings: An analysis of the 1994-1996 BASE study data. *Indoor Air* 2000; 10(4): 246-257

Dai-Hua Tsai , Jia-Shiang Lin & Chang-Chuan Chan. Office Workers' Sick Building Syndrome and Indoor Carbon Dioxide Concentrations, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2012, 9:5, 345-351

Roberts J, Nelson WC, National Human Activity Pattern Survey Data Base, United States Environmental Protection Agency (USEPA), Research Triangle Park, NC, 1995

Erdmann CA, Apte MG. Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset. *Indoor Air* 2004; 14(s8): 127-134

Jones, A.P. Indoor air quality and Health. Atmospheric Environment 1999; 33: 4535-4564

Rich Prill. Why Measure Carbon Dioxide Inside Building? Washington State University Extension Energy Program [cited 2017 Dec 10]; Available from: URL: <http://www.energy.wsu.edu/Documents/CO2inbuildings.pdf>

Satish U, Mendell MJ, Shekha K. Is CO<sub>2</sub> an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO<sub>2</sub> Concentrations on Human Decision-Making Performance. Environ Health Perspect 2012 120: 1671-7

Tsai DH, Lin JS, Chan CC. Office workers' Sick Building Syndrome and Indoor Carbon Dioxide Concentrations. JOEH 2012; 9(5): 345-351

Wargocki P, Wyon DP, Baik YK, Clausen G, Fange PO. Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity in an Office with Two Different Pollution Loads. Indoor Air 1999;9(3): 165-179

Wargocki P, Wyon DP, Fange PO. Productivity is affected by the air quality in offices. Proc. of Healthy Buildings 2000, Espoo, Finland, 2000(1): 635-640

Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, Behar JV, Hern SC, Engelmann WH. A resource for assessing exposure to environmental pollutants [cited 2017 Dec 10]; Available from: URL: <https://www.buildinggreen.com/blog/we-spend-90-our-time-indoors-says-who>

<ABSTRACT>

## A Study on improving indoor air quality by controlling HVAC system

Suk-Hun Kim  
Graduate School of Public Health  
Yonsei University

(Directed by Professor Jaehoon Roh, M.D., Ph.D.)

**Objective:** Focusing especially on CO<sub>2</sub> among various air quality in office, this study aims to investigate the changes in the mutation aspect of the environmental pollutants over time and propose an improvement plan on the indoor air quality through controlling HVAC system.

**Subjects and Methods:** From November to December 2017, we measured

the ventilation status and the Indoor Air Quality(IAQ) of the office located in Gyeonggi-do, South Korea, including the temperature, humidity, CO<sub>2</sub>, HCHO, and etc. By controlling the HVAC system, we were able to improve the indoor air quality in the office.

**Result:** The evaluation of the indoor air quality in the office suggested that the indoor CO<sub>2</sub> concentration increased up to 1,054.3ppm as the number of the office occupants increased, and from 3pm to 5pm, it exceeded 1,000ppm, which is the national standard of the Ministry of Employment and Labor. We compared the CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, temperature and humidity of the office during the weekdays and weekends in order to find out the influence of the number of the occupants on the air quality; they turned out to be higher during the weekdays than the weekends.

After increasing the damper open rate from the original 20% to 70% to improve the air quality, the CO<sub>2</sub> concentration decreased from 1054.3ppm to 795.7ppm. We also reduced the amount of supply air from 612.2m<sup>3</sup>/hr to 784.3m<sup>3</sup>/hr, decreasing the CO<sub>2</sub> concentration from 1,054.3ppm to 933.4ppm as a result. Moreover, we increased both the damper open rate and the amount of supply air at the same time to check the decrement in the CO<sub>2</sub> concentration; the CO<sub>2</sub> concentration reduced to 752.3ppm under the condition of the damper open rate being 70% and the amount of supply air 722.5m<sup>3</sup>/hr, and the temperature, humidity and fine dust all satisfied the criteria of the control standards.

**Conclusion:** This research demonstrates the need to consider the number of the occupants in the office when evaluating, and the way to establish a pleasant work environment to minimize the health impact of the workers by controlling HVAC system.