

상업용 도시재생 모듈러 건축물의 공간이용에 따른 실내공기질 평가

남 소 정, 김 세 련, 평 우 진, 강 유 진, 김 수 민[†]

숭실대학교 건축학부

Indoor Air Quality Evaluation of Commercial Urban Regeneration Modular Structure According to Space Usage

So-Jeong Nam, Sea-Ryon Kim, Woo-Jin Pyung, Yujin Kang, Sumin Kim[†]

School of Architecture, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

Abstract: From 2000s, modular construction has gained more attention due to many advantages such as reduction of duration, recycling. The modular structure is being used for urban regeneration recently. However, even though most facilities in the modular structures which are used as urban regeneration building are commercial spaces, exhibition spaces, eating and drinking spaces, there are lack of natural or mechanical ventilation systems. Also, there are relatively limited spaces on modular structure characteristic. Therefore, indoor environment performance of four buildings, which are performed as urban regeneration in Seoul, was evaluated by HCHO and CO₂ emissions. Consequently, the HCHO and CO₂ emissions of the commercial and exhibition spaces were confirmed that can influence on health of occupants. Therefore, the urban regeneration modular structure needs to add local ventilation systems for improvement of indoor air quality to more healthy and comfortable.

Keywords: Modular structure, Urban regeneration, Indoor environment performance, HCHO, CO₂

1. 서 론

모듈러 공법은 박스 형태의 모듈 유닛을 공장 제작한 후 시공현장으로 운반·조립하여 건축 공법으로 2,000년대 이후로 꾸준하게 성장하고 있다. 모듈러 건축은 최대 50%의 공기 단축, 최대 90%의 전자재 재활용, 설계비 및 원가 절감 등과 같은 장점으로 큰 주목을 받았고 이를 통하여 새로운 공간의 대안으로 제시되고 있다(김과 이 2014; 김 2015). 국외에서는 모듈러 공법을 복합화, 대형화,

초고층 건물로 활용하고 있으며, 모듈러 건축의 시장 전망이 밝은 것으로 보고 있다(해사이·아부도 극합 등 2012). 그리고 모듈러 건축은 공간의 대안 뿐만이 아니라 그 영역을 더욱 확장하여 도시재생 사업의 일환으로 활용되고 있다. 현재의 모듈러 건축은 도시의 물리적 환경 개선, 지역 상권의 재창출, 문화·복지 환경 개선 등을 통한 도시재생 정책을 충족시키며 도시재생의 역할로 발달해나가고 있다(이와 이 2011).

이때, 모듈러 건축에 주로 활용되고 있는 컨테이너의 재료는 목재, 철재, 알루미늄재, 섬유강화 플라스틱(Fibre-Reinforced Thermoplastic; FRT) 등으로 다양하나 건축에 활용되는 컨테이너는 철

2016년 6월 29일 접수; 2016년 7월 22일 수정; 2016년 7월 25일 게재확정

[†] 교신저자 : 김 수 민 (skim@ssu.ac.kr)

Table 1. The selected modular buildings of A, B and C

Modular	Area	Completion year	Number of Containers
A	5,300 m ²	2015	200
B	3,211 m ²	2016	116
C	2,790 m ²	2016	61

재 컨테이너이다. 철재 컨테이너인 ISO 규격의 선박용 컨테이너는 높은 내구성을 가지고 있고, 선박용으로서 수명을 다한 후에는 건축에 활용할 수 있다(강 2015). 이러한 재료적 측면에서의 철재는 단열효과, 방수, 내수성 등이 뛰어나며, 환경적 측면에서 품질의 저하가 발생하지 않아 재활용성이 뛰어나고 폐기물이 적다는 장점이 있다(양 2011). 그러나 철재 컨테이너의 바닥면이 지면에 닿아 있을 경우 지면에서 올라오는 습기로 인하여 철재가 부식할 수 있고, 가공 없이 건축에 사용할 경우 단열과 환기에 불리하다(양 2011). 이에 철재 컨테이너를 이용한 모듈러 건축물은 일반 건축물에 비하여 환기 설비 계획이 잘 이루어져야 하며, 환기량이 미비할 경우에는 실내 쾌적 수준을 유지하기 어려울 것이라고 판단된다.

그리고 국내의 도시재생 모듈러 건축물은 상업 시설, 전시 시설, 식음 시설 등으로 이루어져 있다. 그러나 모듈러 건축물은 도시재생의 다양한 공간 활용 목적을 수행하고 있는 것에 비하여 모듈화되고 한정된 공간으로 인해 실내 환경 오염요소에 쉽게 노출되어 있으며, 재실자의 밀집으로 인하여 이산화탄소 및 오염물질 등의 문제가 발생하기 쉽다. 그중에서 오염물질 발생량이 높은 내부 마감재와 가구 교체가 잦은 전시 시설과 상품 교체가 잦은 상업 시설에서는 높은 포름알데히드(Formaldehyde; HCHO) 수치를 보이는 것으로 알려져 있다. 포름알데히드는 유해 물질로 실내 유지 기준에 적합하다고 판단되는 수치에서도 민감한 아이의 경우 아토피성 피부염을 유발할 수 있으며, 적정 수치를 넘을 경우 눈의 자극, 호흡기 장애, 발암에까지 이어질 수 있는 매우 유해한 물질이다(강 외 2012). 그리고 실내 공기 오염물질 중 하나인 이산화탄소 농도는 재실자가 밀집한 상업 시설에서 높은 수치를 보일 수 있고, 실내 환기 수준의 지표가 될 수 있다.

이에 본 연구는 서울특별시 내에 위치한 도시재생의 의미를 지닌 모듈러 건축물 세 곳을 선정하여 포름알데히드와 이산화탄소 농도 평가를 실시하였다. 도출된 포름알데히드와 이산화탄소 측정값은 도시재생사업의 일환으로 활용되는 모듈러 건축물의 실내 환경을 보다 건강하고 쾌적하게 개선하기 위한 기초 자료로서 활용될 수 있을 것이라고 판단한다.

2. 연구 방법

2.1. 측정 장소 및 방법

측정 장소는 서울특별시에 내의 도시재생 모듈러 건축물 광진구의 A, 성동구의 B, 도봉구 C로 3 곳을 Table 1과 같이 선정하였다. 측정 지점은 Fig. 1에서 붉은 점과 같은 지점에서 측정을 진행하였다. 각 지점은 Fig. 2와 같이 모듈러 건축물 공간의 용도를 상업 공간(Commercial space; CS), 전시 공간(Exhibition space; ES), 식음 공간(Eating and drinking space; EDS)으로 분류하여 측정을 진행하였으며, 세 곳의 유동인구가 가장 많은 시간대인 18시부터 20시까지 측정을 실시하였다. 평면도 상 중심 위치의 1 m 높이에서 5분 간격으로 총 3회 측정하였다. 이때, 측정 결과 값은 3회 측정값의 평균값을 이용하였다. 실내 공기질의 오염 수준과 쾌적성 판단을 위하여 포름알데히드와 이산화탄소를 농도를 확인하였다. 포름알데히드 측정은 F300-L를 사용하였고, 이산화탄소 측정은 Falcon-II를 사용하였다.

2.2. 실내 공기질 유지 기준

건축물의 실내 공기질에 대한 쾌적 수준을 유지하기 위하여 환경부는 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법을 통하여 많은 사람들이 이용하는 다

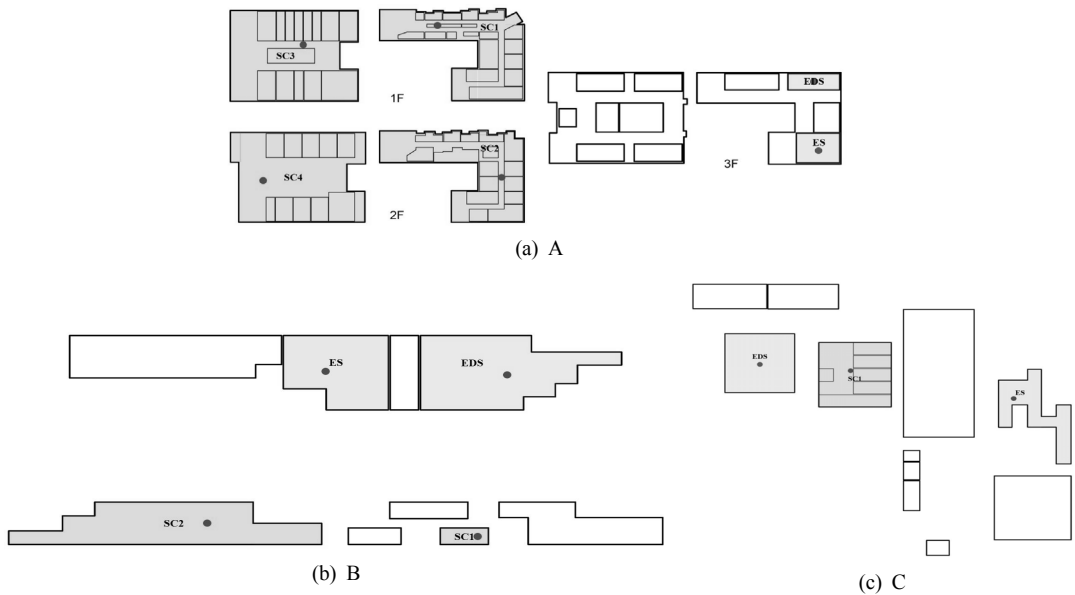


Fig. 1. Measurement spots of A, B and C.



Fig. 2. CS, ES, and EDS of the measurement spots.

Table 2. Measurement values for A, B and C

Modular	Facility	Volume (m ³)	Number of occupancy (per.)	Volume per person (m ³ /per.)	Window (o/x)	CO ₂ (ppm)	HCHO (ppm)
A	*CS1	529	57	9.28	x	1,071	0.080
	CS2	529	40	13.23	x	1,035	0.010
	CS3	1,058	10	105.80	x	760	0.180
	CS4	1,058	10	105.80	x	752	0.001
	**ES	795.8	-	-	o	594	0.030
	***EDS	264.5	16	16.53	o	1,000	0.001
B	CS1	66.7	4	16.68	x	1,100	0.035
	CS2	1,058	5	211.60	o	539	0.016
	ES	1,058	5	211.60	o	519	0.140
	EDS	529	20	26.45	o	504	0.001
C	CS	529	14	37.79	x	689	0.017
	ES	264.5	3	88.17	o	419	0.058
	EDS	529	9	25.56	o	527	0.024

*CS : Commercial Space
 **ES : Exhibition Space
 ***EDS : Eating and Drinking Space

Table 3. Effect on the body by CO₂ density

CO ₂ density (ppm)	Effect
~450	Level of healthy ventilation management
~700	Level of indoor, that are no health problems for a long time
~1,000	People feel discomfort but are not health problems
~2,000	Condition changes, such as feeling sleep
~3,000	Started health damage, such as shoulder discomfort and a headache
3,000~	Occur symptoms such as headache and dizziness, and damage health for a long times

중이용시설에 대한 실내 환경을 알맞게 유지하고 관리함으로써 국민의 건강을 보호하고자 한다(환경부 2014). 또한 이 법의 적용대상을 확대하여 현행 제도의 운영상 나타난 문제점을 개선·보완하여 법을 개정하였다. 개정된 법에 따라 용도가 2개 이상인 건축물의 경우, 이산화탄소 허용기준치는 1,000 ppm 이하, 포름알데히드 허용기준치는 100 µg/m² 이하로 유지해야 한다.

3. 결과 및 분석

선정된 모듈러 건축물에 따라 측정 장소의 체적, 재실 인원, 1인당 사용 체적, 창문 여부, 이산화탄

소 및 포름알데히드 농도 측정값은 Table 2와 같다.

3.1. 실내 이산화탄소 농도 측정

실내 이산화탄소는 농도에 따라 Table 3과 같이 인체에 미치는 영향이 다르게 나타난다. 이산화탄소 농도가 450 ppm 이하로 유지되는 경우에는 환기가 적절히 되고 있다고 판단할 수 있다. 그러나 700 ppm 이상이 되는 경우에는 민감한 재실자의 경우에는 불쾌감을 느낄 수 있고, 적정 수치를 초과하면 졸림, 두통, 어깨 결림 등의 건강상의 문제를 초래할 수 있다(www.phiko.or.kr).

Table 2에 따라 측정된 이산화탄소 농도는 A에서 가장 높은 값이 측정된 것을 확인할 수 있다.

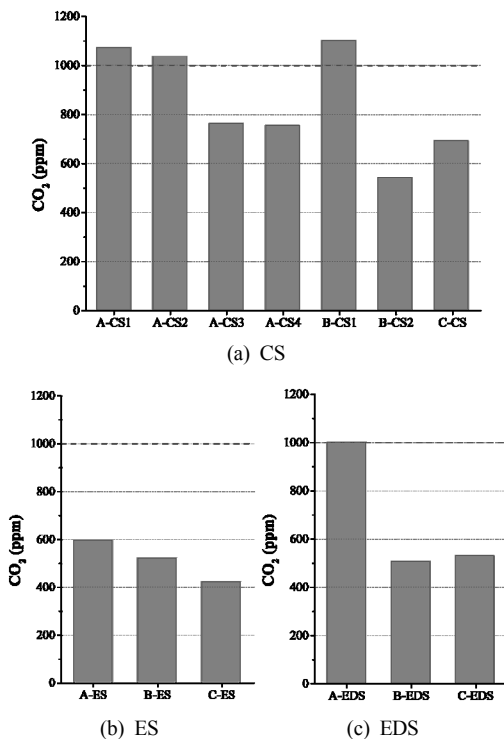


Fig. 3. The CO₂ density by (a) CS, (b) ES, and (c) EDS.

A-ES를 제외한 장소에서는 700 ppm 이상의 결과가 측정되었고, 1,000 ppm 이상인 경우가 있는 것을 확인할 수 있다. 그와 반대로 B-CS1에서 측정된 1,100 ppm 값을 제외한 B와 C에서는 700 ppm 이하로 측정되었다. 따라서 A가 다른 모듈러 건축물 B와 C보다 환기가 적절하게 이루어지지 못하고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 측정 장소의 용도별 이산화탄소 측정 결과를 보여준다. Fig. 3(a)은 상업 공간(CS)에서의 이산화탄소 농도로 A-CS1, A-CS2, B-CS1에서 각각 1,071, 1,035, 1,100 ppm으로 이산화탄소 허용기준치인 1,000 ppm을 초과하는 값이 측정되었다. 또한 CS에서는 대부분 700 ppm 이상으로 환기가 부족하며 이산화탄소로 인한 재실자의 건강에 영향을 미칠 수 있을 것이라고 평가하였다. Fig. 3(b)는 전시 공간(ES)에서의 이산화탄소 농도, Fig. 3(c)는 식음 공간(EDS)에서의 이산화탄소 농도를 나타낸다. 이때 A-EDS의 1,000 ppm을 제

외한 모든 공간에서는 700 ppm 이하로 측정되었다. 그러나 전체적으로 450 ppm 이상으로 적절한 환기가 일어나지 못하고 있으므로 컨테이너 박스로 이루어진 모듈러 건축은 환기에 취약하다고 판단되었다. 특히 CS의 경우에는 다른 공간과 달리 개폐가 가능한 창문이 없어 자연 환기가 불가능하며, 농도가 1,000 ppm 이상으로 측정된 A-CS1, A-CS2, B-CS1은 1인 사용 체적이 20 m³ 이하인 것을 확인하였다. 따라서 용도에 따라 국소적인 환기시스템 고려하여야 하며, 예상되는 재실자 수에 적합한 환기시스템을 고려할 필요가 있다고 판단하였다.

3.2. 공간 용도별 포름알데히드 측정

실내의 포름알데히드 발생 농도에 대한 허용기준치는 0.10 ppm이고 인체에 나타나는 증상들은 Table 4와 같이 0.04 ppm 이상일 경우에 민감한 재실자는 냄새를 맡으며 불쾌감을 느낄 수 있으며, 장기간 노출된 아이들에게서는 아토피 피부염과 같은 피부 질환 및 호흡기 질환이 발생할 수 있다(박 외 2013). 이때 모듈러 건축물의 포름알데히드 결과는 Table 2와 같다.

Fig. 4는 측정 장소의 용도별 포름알데히드 농도를 보여주며, Fig. 4(a)는 상업 공간(CS)에서의 측정 결과를 보여주며, A-CS3에서 허용기준치인 0.18 ppm인 것을 확인하였다. 그리고 A-CS1에서 허용기준치를 초과하지 않았으나 0.08 ppm에 가까운 값이 측정되었다. CS의 특성상 의류 등과 같은 상품이 판매·진열되고 있으므로 기존 연구 결과(백 외 2012)에 따라 실내 공기 오염물질 발생이 높은 것을 확인하였고, 매장이 밀집하게 위치한 경우에 더 높은 포름알데히드 수치를 보였다. Fig. 4(b)는 전시 공간(ES)에서 측정된 포름알데히드 농도로 각각 0.03, 0.14, 0.058 ppm로 확인되었다. B-ES에서의 포름알데히드 농도가 0.14 ppm으로 허용기준치를 초과하는 수치를 보였다. 이는 전시 교체가 잦은 공간으로 측정 당일 교체가 된 지 얼마 지나지 않았기 때문에 내장재 및 가구에서 오염물질이 발생하는 것으로 판단되었다. 이와 같이 ES의 경우에는 공간 내 내장재 및 가구의 교체가

Table 4. Symptoms by formaldehyde (HCHO) density (Park 2013)

HCHO density (ppm)	Symptoms
0.01	Maintenance level
0.04	Sensitization of atopic dermatitis
0.05	Indoor Environmental Standards in Canada and California
0.08	Indoor Environmental Standards in Japan and WHO
0.10	In Germany, the concentration of two or more products that ban the sale of emission
0.20	Started eye irritation
0.25	Respiratory failure
0.50	Stimulation of neck
1.0	Causing Cancer
2.0	Suffered stinging eyes
4.0	Comes the tears
10.0	Abnormal breathing
30.0	Causes of acute poisoning at 5-10
50.0	Upper limit of the meter measuring formaldehyde

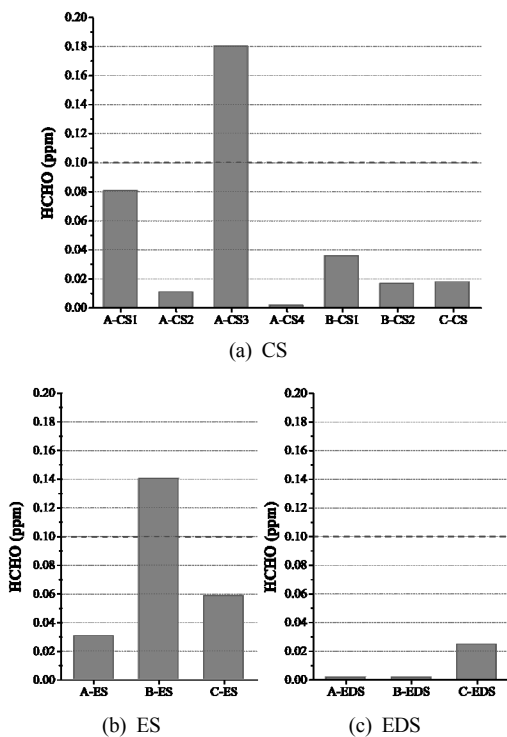


Fig. 4. The HCHO density by (a) CS, (b) ES, and (c) EDS.

찾기 때문에 다른 공간에 비하여 실내 오염물질의 발생에 취약할 것으로 판단되었다. 이때 A-ES의

경우에는 측정 당일의 전시가 Fig. 2(b)와 같이 다양한 성장식물을 이용한 전시가 이루어지고 있어 식물의 정화 작용으로 다른 ES보다 더 낮은 수치를 보였을 것으로 판단되었다. Fig. 4(c)의 경우에는 식음 공간(EDS)의 포름알데히드 농도를 보여주며, 가장 높은 값이 0.024 ppm으로 측정되었다. 이는 CS와 ES에 비하여 포름알데히드 발생이 낮은 것으로 확인하였다. 측정 결과, 선정된 세 모듈러 건축물의 포름알데히드는 국내 허용기준치를 대부분 만족하고 있으며 공간 활용에 따라 측정값이 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 선정된 모듈러 건축물은 재활용된 컨테이너로 컨테이너 자체에서의 포름알데히드 방출량이 적기 때문에 포름알데히드 방출량이 많은 가구와 상품이 있는 일부 CS와 ES에서 허용기준치를 초과하는 것을 확인하였다. 또한 성인에게는 영향이 적을 수 있으나 아이의 건강에 영향을 미칠 수 있는 포름알데히드 수치 0.04 ppm을 초과하는 것을 확인하였다.

4. 결론

모듈러 건축은 도시재생으로서의 역할을 하고 있으며 다양한 공간의 대안으로 제시되고 있다. 그러나 모듈화되고 한정된 공간으로써 실내공기질 오염에 대한 문제가 발생할 수 있다는 단점을 지

니고 있다. 이에 모듈러 건축물의 실내공기질 분석을 위하여 서울에 위치한 네 건축물을 선정하여 각 공간의 목적과 용도에 따라 CS, ES, EDS로 분류한 후 포름알데히드 방출량과 이산화탄소 배출량을 측정하였다.

이산화탄소 배출량 측정 결과를 보면 전체적으로 건강한 환기 레벨인 450 ppm 이상으로 재실자의 건강에 영향을 미칠 정도의 수치는 아니나 예민한 재실자에게는 불쾌감을 줄 수 있는 수치임을 확인하였다. 그러나 A-CS1, A-CS2, A-EDS, B-CS1에서는 이산화탄소 허용기준인 1,000 ppm 이상으로 측정되었다. 그리고 A의 경우에는 700 ppm을 초과하고 있는 것을 통하여 A 모듈러 건축물이 다른 건축물에 비하여 환기량이 부족하다는 것을 확인하였다. 이를 통하여 재실자 수, 1인당 체적, 자연환기 가능 여부에 밀접한 관계가 있으며, CS와 같이 재실자 수와 공간의 특성에 따라 국소적인 환기 시스템이 추가적으로 필요하다고 판단되었다. 포름알데히드 방출량은 측정 지점에서 대부분 국내 허용기준치인 0.10 ppm 이하로 측정되었다. 그러나 A-CS3과 B-ES에서 각각 0.18과 0.14 ppm으로 0.10 ppm을 초과하는 수치를 보였다. 이는 많은 상품의 진열과 전시를 위한 내장재 및 가구의 잦은 교체로 인한 결과 값이라고 판단되었다. 또한 대부분 CS와 ES가 EDS에서 비하여 더 높은 포름알데히드 수치를 보였으며, 포름알데히드 수치인 0.04 ppm을 초과하고 있으므로 민감한 아이들에게서 아토피 피부염이 발생할 수 있으며 민감한 재실자의 경우에는 불쾌감을 느낄 수 있음을 확인하였다.

측정 결과를 통하여 모듈러 건축물은 도시재생의 역할을 안정적으로 수행하고 있는 반면 컨테이너 박스로 이루어져 있는 공간으로써 실내공기질 개선을 위한 시스템 설계가 부족한 것을 확인하였다. 특히, 주로 상업 시설과 전시 시설로 이루어진 모듈러 건축물은 이산화탄소와 포름알데히드와 같은 실내 오염물질 발생이 높은 것으로 확인되었다. 따라서 모듈러 건축물의 실내공기질 개선을 위하

여 공간의 용도에 따라 자연 환기 및 국부 기계 환기 시스템을 도입하여야한다. 이를 통해 빠른 시공성과 환경 친화적 성능, 도시 재생을 비롯한 다양한 범위에서 모듈러 건축물이 보다 더 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 주거환경연구사업의 연구비지원(16RERP-B082204-03)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 강동희, 정찬권, 김석환, 이상진, 김수민. 2012. 대형 서점 내 서적 종류 및 가구배치에 따른 포름알데히드 발생 특성. *한국가구학회* 23(4): 381-387.
- 강승모. 2015. 선적용 컨테이너를 활용한 해외 건축물의 환경·친화적 특성에 관한 연구 -자원절약 영역을 중심으로-. *기초조형학연구* 16(1): 16-29.
- 김재영, 이종국. 2014. 모듈러 건축의 현황과 활용에 관한 기초연구 -사례조사 분석을 중심으로-. *한국주거학회* 25(4): 39-46.
- 김진엽. 컨테이너를 활용한 모듈러 건축의 유형분석 연구. *건축대학교 박사학위논문*. 1쪽.
- 박영훈, 김선용, 양희훈, 정옥영, 이상진. 2013. 키즈카페의 가구류 및 설치시설에 따른 실내공기질 비교 분석. *한국가구학회* 24(1): 70-78.
- 백송이, 박수영, 정옥영, 이상진, 김수민. 2012. 의류매장의 공간형태 및 전시형태 변화에 따른 실내공기질 분석. *한국생활환경학회* 19(6): 710-716.
- 양희정. 2011. 컨테이너 건축에서 나타난 공간구축 특성에 관한 연구. *건축대학교 석사학위논문*.
- 이일희, 이주형. 2011. 지속가능성을 위한 도시재생 계획요소에 관한 연구. *한국도시계획학회* 12(6): 101-114.
- 해사이·아부도극함, 배성인, 심운준, 안용선. 2012. 모듈러 건축 활성화 방안에 관한 연구. *대한건축학회 학술발표대회*.
- 환경부. 2014. 다중이용시설 등의 실내공기질관리법. www.phiko.or.kr (실내 이산화탄소 농도와 인체에 미치는 영향).