

변풍량 유닛 시스템의 최소풍량 제어

변풍량 유닛 시스템의 적절한 최소 풍량 설정을 통한 건축물의 에너지 사용량 절감 및 실내 쾌적을 위해 고려되어야 할 요소들은 소개하고, 이를 바탕으로 변풍량 유닛 시스템의 효율성 및 쾌적성을 높이는 데 도움이 되고자 구성되었다.

서론

1973년 제1차 석유 파동과 함께 에너지에 대한 경각심, 대체 연료에 대한 관심이 증가하였고, 에너지 절약을 위한 각종 정책이 시행되었다.¹⁾ 이와 맞물려 고안된 햄박스(HAM Box)는 실내부하변동에 따라 급기 풍량을 직관적으로 감소시킬 수 있다는 개념에서 적용되기 시작된 후 변풍량 유닛 시스템(Variable Air Volume Unit System, VAV Unit System)으로 꾸준히 보완 발전되었다.²⁾

변풍량 유닛 시스템은 급기 온도를 변화시키고 송풍량을 일정하게 유지하는 정풍량 유닛 시스템(Constant Air Volume Unit System, CAV Unit System)과는 달리 급기 온도를 고정하고 송풍량을 변화시켜 실내의 부하를 제거하는 방식으로 순간부하에 대처하여 쾌적한 환경을 만들 수 있으며, 동시 부하율을 고려하여 설계함으로써 공조시스템의 설비용량을 줄여 설비와 운전면에서 많은 비용을 절감할 수 있다.³⁾

하지만 현재 전 세계적으로 가장 많이 통용되고 있는 ASHRAE(미국 냉동공조학회, American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers) 90.1 기준에서는 변풍량 유닛 시스템의 최소 풍

유병호

국립한밭대학교
건축공학과 석사과정
hoya0824@naver.com

이광호

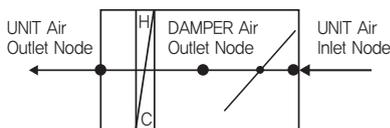
국립한밭대학교
건축공학과 부교수
kwhlee@hanbat.ac.kr

량을 일반적으로 최대 풍량의 30%로 채택하여 적용하고 있다.⁴⁾ 하지만 별도의 고려 없이 일괄적으로 적용된 최소 풍량과 변풍량 유닛 시스템에 대한 이해의 부족으로 인한 잘못된 설계 및 운전은 에너지의 낭비뿐만 아니라 실내 환경에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다.⁵⁾

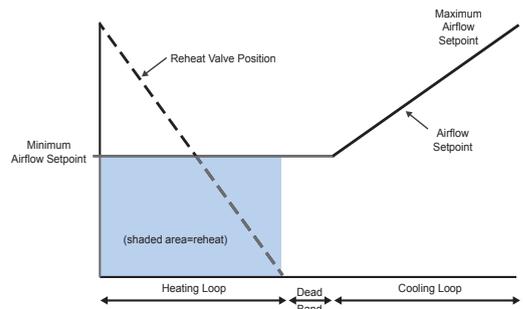
변풍량 터미널 박스의 구성 및 제어 로직

그림 1은 변풍량 터미널 박스의 개략적인 구성을 나타낸다. 변풍량 터미널 박스는 각 실의 공급 풍량을 제어하기 위한 풍량 조절 댐퍼와 중앙 공기 조화기에서 1차적으로 가열된 취출 공기를 각 실의 부하에 맞추어 2차적으로 가열하는 재열 코일로 구성된다.

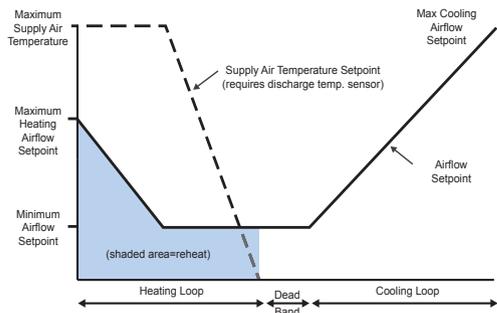
이때 각 실의 부하에 맞추어 운용되는 변풍량 터미널 박스의 제어 로직에는 난방시에 취출 온도를 제어하는 일변수 제어 로직(The Single Maximum Control Logic)과 취출 온도와 공급 풍량 모두를 제어하는 이변수 제어 로직(The Dual Maximum Control Logic)이 있다. 그림 2는 변풍량 터미널 박스에 일반적으로 적용되는 일변수 제어 로직을 나타내고 있다. 일변수 제어 로직의 경우 난방 시에 공급 풍량을 최소 풍량으로 고정된 상태로, 변풍량 터미널 박스의 재열 코일에서 조절되는 온수 유량을 통해 취출공기 온도를 조절하여 실내 부하에 대응한다. 그림 3의 이변수 제어 로직의 경우, 일변수 제어 로직과 비슷한 제어 형태를 보인다. 하지만 난방 시에 최대 공급온도로 공급하여도 실내 부하를 충족시키지 못하는 경우에는 댐퍼를 개방하



[그림 1] 변풍량 터미널 박스의 구성⁶⁾



[그림 2] Single-maximum 제어 로직⁶⁾

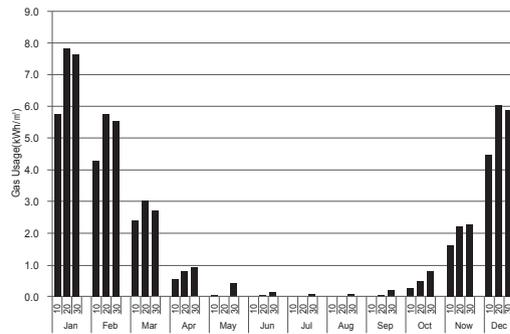
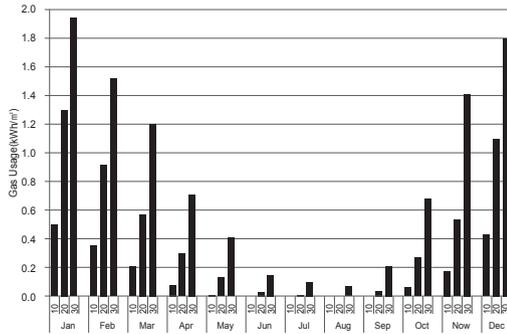


[그림 3] Dual-maximum 제어 로직⁶⁾

여 실내 공급 풍량을 난방의 최대 풍량까지 증가시킬 수 있다. 또한, 일반적으로 난방 시의 최대 풍량은 냉방 시의 최대 풍량보다 작다. 냉방 시에는 일변수 제어 로직과 이변수 제어 로직간의 차이가 없으며, 중앙 공기조화기의 고정된 취출 온도를 실내 부하에 맞추어 최소에서 최대 풍량으로 각 실에 공급한다.

변풍량 유닛 시스템의 최소 풍량 제어의 중요성

환기를 목적으로 설정되는 최소풍량은 다양한 기준이 존재하며, ASHRAE 기준 90.1에 따르면 변풍량 터미널 박스의 최소 풍량은 냉방시 최대 공급 풍량의 30% 이상으로 명시되어 있다.⁴⁾ 하지만 이는 변풍량 터미널 박스의 재열코일에서 소비되는



(a) 변풍량 터미널 박스의 재열 코일의 에너지 소비량

(b) 보일러의 에너지 소비량(총 난방 에너지 소비량)

[그림 4] 변풍량 유닛 시스템의 최소 풍량에 따른 월별 에너지 소비량⁷⁾

에너지 사용량에 상당한 영향을 미칠 수 있다.⁷⁾ 그림 4는 변풍량 유닛 시스템에 대한 최소 풍량의 영향을 분석한 선행연구⁷⁾의 결과로, 변풍량 터미널 박스의 최소 풍량을 변수로 하여 최대 풍량의 10%, 20%, 30%의 경우를 분석하였다. 그 결과 그림 4(a)와 같이 최소 풍량을 적게 설정할수록 변풍량 터미널 박스의 재열 코일에서 소비되는 월별 에너지가 현저히 감소되는 패턴을 보이며, 그림 4(b)와 같이 변풍량 유닛 시스템의 에너지 사용량은 최소 풍량이 가장 낮게 설정된 10%의 경우에서 가장 많은 절감량을 보였다.⁷⁾ 이는 변풍량 유닛 시스템에 의하여 각 실이 냉·난방 설정온도를 만족했다고 하여도 설정된 최소 풍량에 의하여 환기를 위한 공급 풍량이 지속적으로 공급되기 때문이며, 이 과정에서 불필요한 재열 에너지가 낭비될 수 있다. 따라서 기존 건축물에서 과다 설정된 최소 풍량을 각 실의 부하에 상응하도록 재설정하는 것만으로도 연간 상당량의 난방 에너지를 절감할 수 있다.⁸⁾ 즉, 30%의 최소 풍량을 10%로 감소시키는 경우 변풍량 터미널 박스의 재열코일에서 소비되는 난방 에너지의 상당한 절감이 가능하다.⁷⁾ 또한, 이변수 제어 로직을 사용할 때 난방의 최대 풍량 설정이 가능하며, 일변수 제어 로직보다 최소 풍량을 더 적게 설정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 일변수 제어

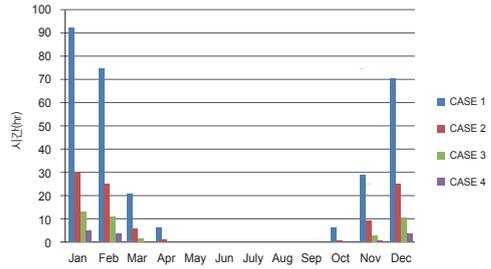
로직보다 낮은 최소 풍량을 적용한 이변수 제어 로직을 사용한 경우 상당한 에너지의 절감이 가능하다.⁹⁾ 이처럼 적절한 최소 풍량의 설정은 에너지 절감에 기여할 수 있으며, 반대로 부적정한 설정 시 불필요한 에너지의 낭비를 야기할 수 있다.

최소 풍량 설정의 고려 요소

변풍량 유닛 시스템의 적용을 통한 에너지 절감을 위해서 적절한 최소 풍량의 제어는 필수불가결한 사항이다. 앞서 언급한 내용과 같이 부적정한 최소 풍량의 설정 시 불필요한 에너지의 낭비를 야기할 수 있으며 실내 온도의 성층화 및 이로 인한 불쾌적 또한 야기할 수 있다. 따라서 적절한 최소 풍량 산정을 위한 고려 요소는 다음과 같다.

- (1) 실내 열환경 : 실내 열환경은 공기조화의 첫 번째 목적이며, 변풍량 유닛 시스템의 최소 풍량 감소는 건축물의 에너지 사용량은 줄일 수 있으나 급변하는 실내 부하에 적절히 대응하지 못하는 현상에 대한 우려가 크다. 그림 5는 변풍량 유닛 시스템에 대한 최소 풍량의 영향을 분석한 선행연구⁵⁾의 결과를 나타낸다. Case1부터 차례로 최소 풍량 10~40%의 값을 설정

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
Chiller	1,629.9	1,599.9	1,615.0	1,644.2
Boiler	2,005.8	2,878.5	3,246.0	3,902.3
Pump	316.4	324.7	349.7	373.0
Fan	354.4	358.4	365.3	375.1
Reheat coil	1,559.2	2,266.8	2,668.4	3,255.2
Heating coil	120.7	140.0	60.1	9.1
Cooling coil	3,915.7	3,886.4	3,970.7	4,116.7



(a) 시스템 각 구성 요소의 연간 에너지 소비량

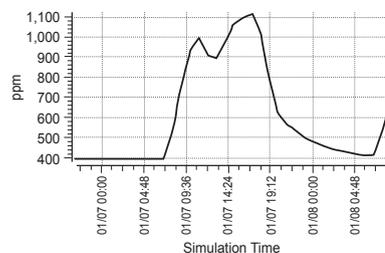
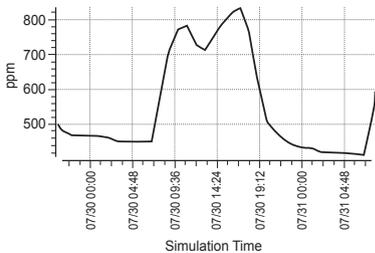
(b) 월별 설정온도 불만족 발생 시간

[그림 5] 최소 풍량에 따른 에너지 소비량 및 설정온도 불만족 발생 시간⁵⁾

하여 진행하였으며, 그 결과 그림 5 (a)와 같이 Case1 즉, 최소 풍량이 가장 적은 경우가 보일러의 에너지 소비량에 있어 가장 적은 값을 나타냈다. 하지만 Case1은 그림 5 (b)의 월별 설정온도 불만족 발생 시간에서 가장 많은 불만족 시간이 발생하였으며, 주로 난방기간 동안 설정온도에 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 난방 시 공급되는 최소 풍량이 적어질수록 실의 난방부하에 대응하는데 많은 시간이 필요하기 때문이며,⁵⁾ 공급 풍량을 최소 풍량으로 고정된 채로 취출 온도만 제어하는 일변수 제어 로직의 한계로 생각한다. 이 같은 경우 공기조화의 본래의 목적을 상실하게 될 수 있으며, 따라서 이를 고려한 최소 풍량 설정이 요구된다.

되였다. 이로 인하여 쾌적한 실내공기질을 위한 환기가 요구되며, 신선한 외기의 도입 또한 요구된다. 실내 열환경과 같이 에너지 절감을 위한 맹목적인 최소 풍량의 감소는 최소 외기 도입량을 충족하지 못하였을 경우 실내공기질을 악화시킬 가능성이 있다. 그림 6은 변풍량 유닛 시스템에 대한 최소 풍량의 영향을 분석한 선행연구⁵⁾의 결과를 나타낸다. 그림 6 (a)와 같이 하절기의 경우 CO₂ 농도가 기준치인 1,000 ppm을 만족한다. 하지만 그림 6 (b)의 동절기의 경우 CO₂ 농도가 최대 1,110 ppm의 값을 보이며 기준치를 상회한다. 이는 최소 풍량이 최소 외기 도입량을 만족하지 못하는 것에 기인하며,⁵⁾ 일변수 제어 로직을 적용함으로써 공급 풍량의 추가적인 증가가 없는 것에 의한 영향도 있는 것으로 생각한다. 따라서 에너지 절감을 위한 변풍량 유닛 시스템의 최소 풍량 고려 시

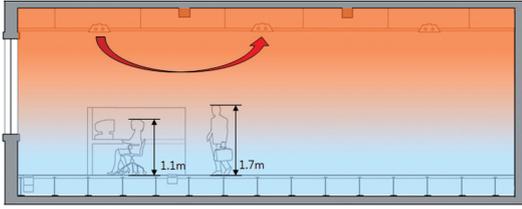
- (2) 실내공기질 : 현대의 건축물은 에너지 절감 및 열쾌적성을 목적으로 건축물의 기밀성이 증대



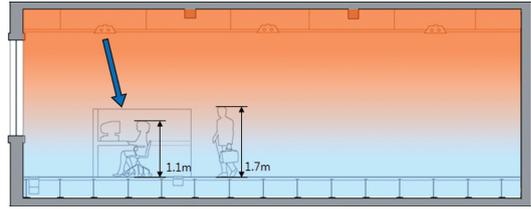
(a) 하절기 대표일 CO₂ 농도(Case1)

(b) 동절기 대표일 CO₂ 농도(Case1)

[그림 6] 최소 풍량에 따른 하절기 및 동절기 대표일의 CO₂ 농도⁵⁾



[그림 7] 낮은 풍량, 높은 온도 취출 시의 성층화



[그림 8] 낮은 풍량, 낮은 온도 취출 시 성층화

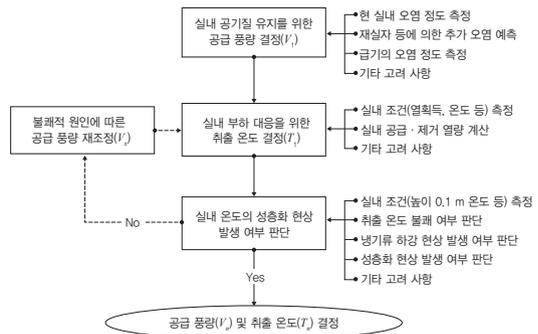
실내공기질 또한 고려될 필요가 있다.

- (3) 실내 온도의 성층화 : 실내의 열쾌적 달성은 온열지표만으로 만족되는 것이 아니며, 실내 온도의 성층화 여부 및 정도 또한 포함된다. ASHRAE Standard 55에 따르면 발목 높이(0.1 m)에서 앉은 상태의 머리 높이(1.1 m)까지의 온도차는 3℃로 지정되어 있다.¹⁰⁾ 선행연구¹¹⁾에 의하면 현열부하만을 고려한 최소 풍량 설정 시 실내 부하 상황에 따라 그림 7과 같이 0.1 m~1.1 m 높이에서 3℃ 이상의 온도차가 발생하는 현상이 나타났다.¹¹⁾ 이 경우 난방 시의 실내 공급 풍량에 비해 높은 취출 온도는 부력에 의하여 공급된 풍량이 실내 공기와 적절히 혼합되지 못한 채로 실내의 상층부에 머물게 된다. 이후 상층부의 환기구를 통하여 고스란히 배출됨으로써 난방 에너지가 무의미하게 낭비될 여지가 있다. 이와 반대로 그림 8과 같이 냉방 시 실내 공급 풍량에 비해 낮은 취출 온도는 밀도에 의하여 공급 풍량을 수직적으로 흐르게 할 여지가 있다. 따라서 변풍량 터미널 박스의 직하 공간에 냉기류 하강 현상을 발생시킴으로써 고르지 못한 온도 분포를 형성하게 된다. 또한, 직하 공간의 재실자에게 국부적인 불쾌적을 제공할 여지가 있으며, 결과적으로 공급 혹은 제거 열량이 효과적으로 또는 효율적으로 운용되지 못할 여지가 있다.^{10, 11)} 따라서 이를 고려하여 성층화 현상을 방지를 위해 공급 풍량과 취출 온도의 균형을 맞추어야 할 필요가 있다.

변풍량 유닛 시스템의 제어

그림 9는 변풍량 유닛 시스템의 풍량 및 취출 온도 제어를 위한 간단한 알고리즘의 예시이다. 이를 위한 변풍량 유닛 시스템의 제어 로직으로는 공급 풍량과 취출 온도 모두 제어가 가능한 이변수 제어 로직이 적합할 것으로 보인다. 해당 예시에서는 실시간 제어를 기반으로 하며 최소 풍량은 0 m³/s이 된다. 제어된 실은 냉·난방 설정온도, 설정 이산화탄소의 농도를 만족하는 등 모든 조건에서의 쾌적을 목표로 한다. 총 4단계의 과정으로 제어가 진행되며, 각 단계에 대한 설명은 다음과 같다.

- (1) 실내공기질 유지를 위한 공급 풍량 결정 : 각실에서 요구되는 최소 풍량을 산정하는 단계이며, 이 단계에서의 최소 풍량이란 실내공기질을 쾌적하게 유지하기 위한 최소 외기 도입량으로 정의된다. 이를 산정하기 위해서는 현 실내 오염



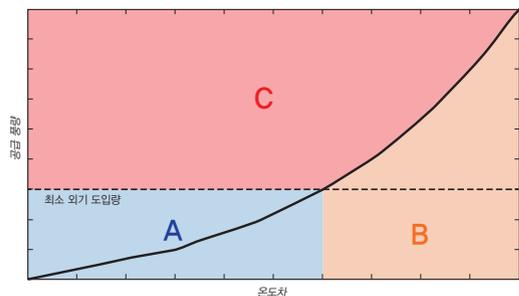
[그림 9] 변풍량 유닛 시스템 제어를 위한 알고리즘 예시

정도를 측정해야 하며, 이에 재실자의 수 등 추가 오염 정도를 예측하여 적용하여야 한다. 또한, 도입 외기의 오염 정도를 측정하여 1차 계산 결과인 변풍량 터미널 박스의 공급 풍량(최소 외기 도입량)을 결정한다.

- (2) 실내 부하대응을 위한 취출 온도 결정 : 앞선 단계에서 계산된 공급 풍량을 바탕으로 변풍량 터미널 박스에서 실내로 취출되는 공기의 취출 온도를 도출하는 단계이다. 이를 위해서는 실내 발열 요소, 외피로부터의 열획득 혹은 손실량, 실내 온도 등의 측정이 요구되며, 이를 통하여 실내에 요구되는 냉·난방 부하를 산출한다. 앞서 계산된 부하량과 공급 풍량을 바탕으로 실내 부하에 대응하기 위한 변풍량 터미널 박스의 취출 온도를 산출해낼 수 있다.
- (3) 실내 온도의 성층화 현상 발생 여부 판단 : (1), (2) 단계를 통하여 결정된 공급 풍량과 취출 온도가 재실자에게 불쾌감을 형성하는가에 대한 여부를 판단하는 단계이다. 실내 온도의 성층화가 형성된 경우 또는 실내 공기와 혼합된 후 간접적으로 전달되는 경우가 아닌 취출 공기가 재실자에게 직접적으로 영향을 미치는 경우에는 실내의 재실자에게 쾌적하지 못한 환경을 제공할 여지가 있으며, 직접적인 영향 하에도 불쾌하지 않도록 취출 온도를 조정해야 한다. 부하를 충족하기 위한 공조를 실시했음에도 불구하고 재실자에게 열쾌적성을 제공하지 못한다면 이는 공조에 실패한 것이며, 앞선 실패를 만회하기 위하여 추가적으로 진행되는 공조는 추가적인 에너지 낭비를 발생시킬 것이다.
- (4) 성층화 유형에 따른 공급 풍량 재조정 : **그림 10**은 성층화 방지를 위한 공급 풍량에 대하여 설명하기 위한 그래프이다. 점선은 (1) 단계에 의하여 산출된 최소 외기 도입량으로 현 실내 상태에서 공급되어야 할 최소 풍량을 나타낸

다. 실선은 온도차와 공급 풍량에 따른 영향을 고려한 성층화 발생 방지를 위한 풍량을 나타낸다. 변풍량 터미널 박스의 취출 온도와 실내 온도차이가 증가할수록 성층화 발생 가능성 역시 증가하며, 따라서 이에 따른 공급 풍량의 증가가 요구된다. A영역은 공급 풍량을 최소 외기 도입량으로 결정하여도 성층화가 발생하지 않는 영역이다. 반면 B영역은 공급 풍량을 최소 외기 도입량으로 결정하였을 때 성층화가 예상되는 영역으로 풍량의 재조정이 요구된다. 또한, 공조된 공기가 재실자에게 직접적인 영향을 미쳐 불쾌감을 형성할 경우 온도차를 감소가 요구된다. 하지만 이때 실의 부하를 해결하기 위한 풍량 증가가 동반되어야 하며 C영역에 접어든다.

결국 (1), (2) 단계에서 결정된 공급 풍량과 취출 온도가 (3) 단계를 만족하지 못하였을 경우 풍량의 재조정이 요구된다. 취출 온도의 불쾌적이 예측될 때 풍량 증가와 취출 온도 감소가 필요하며, 반면 이와 같은 경우에 풍량을 감소시킬 때 실내 부하에 부응하여 취출 온도 증가가 동반된다. 이 과정에서 성층화가 형성될 여지가 크다. 또한 이로 인하여 공급 풍량이 실내에 고르게 섞이지 않고 고스란히 상층부의 환기구로 유입될 수 있으며, 이는 에너지 낭비를 초래할 수 있음을 유의하여야 한



[그림 10] 풍량 제어를 위한 그래프 예시

다. B영역에 해당하는 냉기류 하강 현상 발생 시 공급 풍량을 증가시키는 것이 타당하며, 취출 온도가 증가하게 된다. 앞선 과정에 의해 온도차가 감소함으로써 이러한 현상의 방지가 가능하다. 또한, 성층화 현상의 발생 시 공급 풍량을 증가시키는 것이 타당하며, 이 과정에서 취출 온도는 감소하게 된다. 따라서 이러한 과정을 통한 제어는 실내의 쾌적성 유지가 가능하며, 쾌적성 유지를 위한 최소 풍량만을 사용함으로써 변풍량 유닛 시스템에서 사용되는 에너지 사용량의 절감이 가능할 것으로 예상된다.

상기 예시와 같이 에너지 절감 및 재실자의 쾌적을 위한 변풍량 유닛 시스템의 적절한 제어는 단편적인 면을 고려하는 것만으로는 달성될 수 없으며, 다양한 측면에서 각 요소 간의 상호작용을 고려하여 진행되어야 달성될 수 있을 것이다.

맺음말

변풍량 유닛 시스템은 시스템이 적용된 각각의 실을 일괄제어가 아닌 개별제어를 통하여 과잉 공조를 피하고 적정 수준만을 공조함으로써 건축물에서 사용되는 공조에너지를 절감할 수 있는 공조 시스템이다. 하지만 변풍량 유닛 시스템의 장점을 살릴 수 있는 최소 풍량의 적절한 제어가 동반되지 못하면 변풍량 터미널 유닛에서 재열 에너지가 낭비될 수 있으며, 실내공기질 및 실내 온도 성층화의 문제를 일으킬 수 있다.¹¹⁾

따라서 본 고는 변풍량 유닛 시스템의 기본원리에 대한 이해 그리고 이를 바탕으로한 에너지 절감, 쾌적한 실내 열환경 및 실내공기질 유지에 대한 올바른 설계 및 운용의 이해를 도모함으로써 변풍량 유닛 시스템의 효율성을 높이는데 도움이 되고자 구성되었다. 또한 이를 위해 적정 최소 풍량 제어의 중요성, 풍량 설정의 고려 요소, 간단한 예

시를 통한 변풍량 유닛 시스템의 제어 방법 등에 대하여 논하였다.

시스템의 효율을 극대화할 수 있도록 하는 건물 에너지 관리 및 최적 제어 기술의 도입은 건물에서 사용되는 에너지를 상당부분 절감할 수 있다.¹²⁾ 따라서 변풍량 유닛 시스템의 에너지 절감 및 실내 환경의 쾌적성 유지를 위해서는 최적의 제어가 필요하다. 변풍량 유닛 시스템을 위한 최적의 제어는 각 요소들의 상관관계를 고려한 통합화된 제어가 요구되며, 특히 다양한 인자가 상호작용하여 영향을 미치는 에너지 및 실내 환경 등의 경우에는 인공 신경망, 뉴로퍼지 등을 이용한 학습 및 예측을 통한 제어의 적용이 유리할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 유종선, 2012, 석유의 역습, 미국사 다이제스트 100.
2. 권용일, 권순석, 1999, 변풍량시스템이 적용된 사무소건물의 환기 및 에너지성능평가, 설비공학 논문집, Vol. 11, No. 1, pp. 100-108.
3. 문정우, 김서영, 김원년, 조형희, 2000, 성층화 열용량 모델을 이용한 VAV 시스템 급기 제어 시뮬레이션, 설비공학논문집, Vol. 12, No. 7, pp. 632-641.
4. ASHRAE, ASHRAE Standard 90.1-2004, Energy standard for buildings except low rise residential buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2004.
5. 강수현, 조영흠, 2011, VAV 터미널 박스의 최소 풍량 설정에 따른 실내 열환경 및 에너지 성능 분석, 한국건축친환경설비학회 논문집, Vol. 5, No. 3, pp. 130-136.
6. The U.S. D.O.E., 2011, EnergyPlus Input

- Output Reference, The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output.
7. Lee, K.H., Chin, K.I., and Yoon, J.H., 2012, Effect of Minimum Airflow Setting of VAV Unit on Building Energy Consumption under Korean Climatic Condition, *Advanced Materials Research*, Vols. 450-451, pp. 1435-1439.
 8. 유시완, 조영흠, 2011, 사무소건물의 에너지 효율 향상을 위한 VAV 터미널 박스의 최소풍량 재 설정에 관한 연구, *한국건축친환경설비학회 논문집*, Vol. 5, No. 4, pp. 273-279.
 9. 조영흠, 강수현, 성윤복, 2012, VAV 터미널 박스의 최소풍량 제어방식 비교 연구, *한국태양에너지학회 논문집*, Vol. 32, No. 4, pp. 96-98.
 10. ASHRAE, 2010, ASHRAE Standard 55, Atlanta : American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
 11. 김효준, 조영흠, 2014, 단일덕트 변풍량 터미널 유닛의 최소풍량 산정에 관한 연구, *대한건축학회 추계학술발표대회 논문집*, Vol. 34, No. 2, pp. 273-274.
 12. Baek, S.J. and Kim, J., 2011, Verification of Building Energy Saving by using Optimal Control System, *Magazine of The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol. 40, No. 3, pp. 9-12. 