

강제배기를 이용한 굴삭기 공기조화 시스템에 관한 연구

A Study on Air-Conditioning System for Excavator using Forced Exhaust

황지현¹ · 정찬세¹ · 고주현² · 양순용^{3*}

J. H. Hwang, C. S. Jeong, J. H. Ko and S. Y. Yang

Received: 06 May 2013, Revised: 27 May 2013, Accepted: 27 May 2013

Key Words : Excavator cabin(굴삭기 캐빈), Forced exhaust(강제배기), Air condition(공기조화), Forced convection(강제대류), 1-D simulation(1차원 시뮬레이션)

Abstract: The excavator is used in a variety of construction environments. There are many kinds of risk like falling rocks or harmful dust. The excavator cabin protects the operator not only from these harmful environments but also provides a comfortable working environment. By the way, the excavator cabin consumes a lot of energy for cabin air conditioner. For this reason, the research is required to reduce energy consumption. This study suggests the air conditioning system for excavator using forced exhaust. First, the forced exhaust system simulated by AMESim tool and surveyed the applicability. Using AMESim simulation, it was investigated the effect of cabin inside temperature by intake flow rate and intake air temperature. The experiment executed using the 1.5 ton excavator and field tested according to the intake flow rate. Finally, verified the applicability on the air conditioning system for excavator using forced exhaust.

1. 서 론

굴삭기는 다양한 건설 및 토목분야에서 폭넓게 사용되고 있는 장비로써 화석연료 에너지를 유압으로 변경하고 이를 다시 기계적 에너지로 변경하여 사용되는 장비이다.

굴삭기의 작동에는 많은 에너지가 소모되며 이러한 에너지는 환경오염을 일으키는 한 요소가 된다. 따라서 전 세계적으로 화석연료를 사용하는 장비에

대하여 환경규제를 적용하고 있으며 이와 더불어 에너지 절감에 대한 연구가 많은 분야에서 진행되고 있다.

최근 굴삭기에 대한 연구는 주로 굴삭기의 환경규제 대응과 에너지 절감을 위한 유압시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. 유봉수의 2명이 하이브리드 굴삭기의 에너지 관리에 대한 연구를 수행하였으며 김학구 외 3명은 복합형 하이브리드 굴삭기의 동력전달계에 대한 제어기법에 관하여 연구를 수행하였다.^{1,2)} 또한 안경관 외 2명은 에너지 회생 하이브리드 유압시스템에 대한 연구를 수행하였다.^{3,4)}

굴삭기의 경우 전체 공급 에너지 중 유압시스템에서 가장 많은 소모가 일어나지만 보조시스템에서도 일부 사용되며 특히, 굴삭기의 에어컨 시스템이 많은 에너지를 사용하게 된다.

굴삭기의 에어컨 시스템은 쾌적한 작업환경을 구축하기 위하여 장착되었다. 즉, 굴삭기 캐빈은 유해먼지가 많고 낙하 사고가 발생할 수 있는 위험한 작업 환경으로부터 운전자를 보호하고 쾌적한 공간을 제공

* Corresponding author: soonyy@ulsan.ac.kr

1 Department Mechanical Automotive Engineering Graduate school of University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

2 Institute of e-vehicle Technology, Graduate school of University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

3 Department of Mechanical Engineering, The University of Ulsan, KOREA1

Copyright © 2013, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하기 때문에 굴삭기에서 필수적으로 요구되는 구성품이다. 하지만 연료소모량이 높은 이유로 운전자들은 굴삭기 캐빈의 에어컨을 잘 사용하지 않고 캐빈 창문을 열거나 하여 자연통풍을 이용하여 온도를 조절하고 있는 실정이다.

특히, 굴삭작업은 봄, 가을에 대부분 집중되므로 자연대류를 이용하여 캐빈 내부 온도는 조절할 수 있지만 운전자는 유해먼지와 같은 건강에 유해한 환경에 직접 노출된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 굴삭기의 에어컨 시스템이 장착된다.

현재 굴삭기의 에어컨 시스템은 자동차의 에어컨 시스템과 동일하게 적용되고 있으며 이 시스템이 약 2.5~3kw의 에너지를 소모한다. 따라서 운전자를 보호하면서 캐빈의 온도를 적절히 조절하되 연료소모량이 적은 시스템이 요구된다.⁵⁾

본 논문에서는 굴삭기에 강제배기를 이용하여 캐빈 내부의 공기를 배출시키고 이로 인하여 외기가 자연 유입되어 실내온도 조절이 가능한 시스템을 제안하였다.

또한 강제배기를 이용한 굴삭기 캐빈의 공기조화 시스템에 대한 1-D 시뮬레이션으로 배기 유량에 따른 시스템의 거동을 예측하고 실차 실험을 통하여 이를 검증하였다.

2. 모델링

2.1 시스템 모델링

굴삭기 캐빈의 온도 상승은 태양복사열에 의한 영향이 가장 크다. 따라서 외기 온도가 높지 않은 상태에서도 굴삭기 캐빈의 온도는 상승하게 된다. 굴삭기 캐빈의 온도 상승을 감소시키기 위하여 창문을 통한 공기유동 즉, 대류현상을 이용하게 된다. 이때 온도 감소 정도는 대류열전달계수에 의하여 그 성능이 결정된다. 대류열전달 계수는 자연대류성분과 강제대류성분의 합으로 표현되며 온도 차이에 의한 자연대류 성분보다 유속에 의한 강제대류 성분이 대류열전달 계수에 많은 영향을 미치게 된다.⁶⁾

이러한 점에 착안하여 강제 배기와 자연 흡기를 이용한 제 3종 하이브리드 환기 시스템은 이미 건물의 공기조화에 적용 가능성이 검토되었고 상용화도 진행 중인 것으로 판단된다.^{7,8)}

따라서 본 연구에서는 굴삭기 캐빈의 상부 공기를 강제배기 시키고 상대적으로 태양복사에너지지를 적게 받는 굴삭기 캐빈의 하부 공기를 자연흡기하는 방식

의 시스템을 제안하였다.

시스템은 굴삭기 캐빈의 상부에 블로어를 장착하여 내부 공기를 강제배기 시키는 배기구와 비교적 온도가 낮은 굴삭기 캐빈 하부의 공기가 이동할 수 있는 흡입구로 구성된다. 강제 배기를 이용한 굴삭기 캐빈의 공기조화 시스템의 구성은 Fig 1 과 같다.

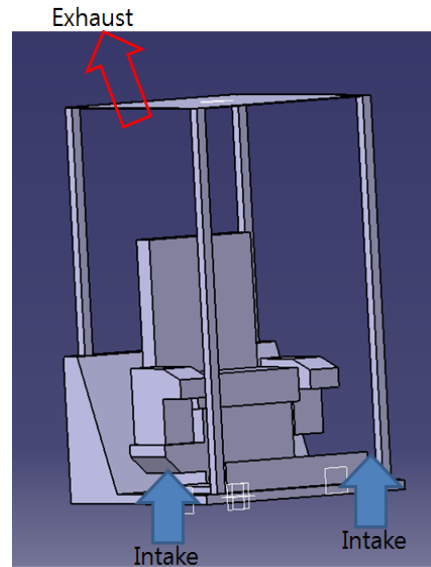


Fig. 1 System configuration

2.2 지배방정식

굴삭기 캐빈의 공기는 비압축성유체이며 물성치는 일정한 것으로 가정한다. 이러한 가정 하에 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식을 나타내면 다음과 같다.⁹⁾

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = k \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

또한 대류열전달계수는 강제대류 열전달계수와 자연대류 열전달 계수의 합으로 식(4)와 같다.

$$h_{conv} = \sqrt[3]{(h_{forced}^3 + h_{free}^3)} \quad (4)$$

강제대류에 의한 열전달 계수는 식 (5)와 같고 자연대류에 의한 열전달 계수는 식 (6)과 같다.

$$h_{forced} = \frac{N_{forced} \cdot \lambda}{c \cdot \text{dim}} \quad (5)$$

$$h_{free} = \frac{N_{free} \cdot \lambda}{c \cdot \text{dim}} \quad (6)$$

그리고 강제대류의 Nusselt number는 식 (7)과 같고 자연대류의 Nusselt number는 식 (8)과 같다.

$$N_{forced} = [0.037 \cdot Re^{0.8} - 871] \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$N_{free} = 0.68 + \frac{(0.67 \cdot Re^{\frac{1}{4}})}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}} \quad (8)$$

식 (8)에서 Prandtl number는 식 (9)과 같이 나타내며

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (9)$$

Rayleigh number는 식 (10)과 같다.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (10)$$

또한 식 (10)의 Grashof number는 식 (11)과 같다.

$$Gr = \frac{g \cdot \alpha (T_w - T_f) \cdot \text{vol}}{v^2} \quad (11)$$

3. 시뮬레이션

강제배기를 이용한 굴삭기 공기조화 시스템의 적용가능성과 흡기 온도 및 배기 유량에 따른 시스템의 성능을 예측하고 그 경향을 파악하기 위하여 LMS imagine사의 공학 상용 시뮬레이션 툴인 AMESim을 기반으로 1-D 시뮬레이션을 실시하였다.

AMESim은 Sketch mode 에서 시뮬레이션 모델을 구성하여 빠르고 정확하게 해석할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 설계 및 개발기간을 줄일 수 있고 실제시스템의 검토단계에서도 설계 최적화와 성능향상을 위한 유용한 도구로 이용되고 있다. AMESim의 적용 분야는 Hydraulic, Pneumatic, Thermal, Mechanical, Electric 등 산업 전반에 걸쳐 적용할 수 있는 시뮬레이션 툴이다.¹⁰⁾

3.1 시뮬레이션 모델

강제배기를 이용한 굴삭기 공기조화 시스템의 시뮬레이션 모델은 AMESim에서 제공하는 자동차 캐빈 라이브러리를 사용하였다. 캐빈 라이브러리는 입구공기와 출구공기의 온도, 압력, 습도, 유량을 결정할 수 있으며 모델 자체적으로 태양열에 의한 열전달을 제공한다. AMESim을 이용한 강제배기를 이용한 굴삭기 공기조화 시스템의 시뮬레이션 모델은 Fig. 2와 같다.

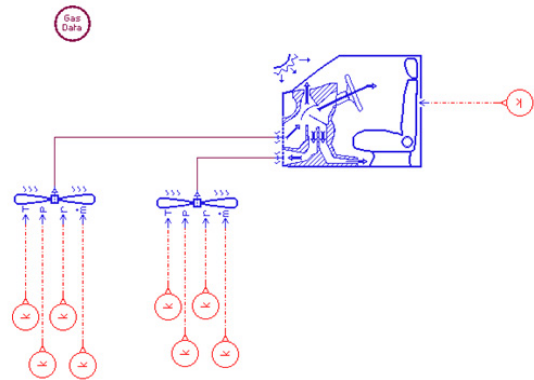


Fig. 2 AMESim simulation model

본 연구에서는 시스템에 가장 영향을 미치는 인자 중 흡기온도와 배기유량에 따른 캐빈 내부온도에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

3.2 배기유량에 따른 캐빈 내부 온도

배기유량에 따른 캐빈 내부 온도는 캐빈 내부 초기 온도를 52°C로 설정하고 배기 유량을 각각 0.01kg/s, 0.02kg/s, 0.03kg/s, 0.04kg/s, 0.05kg/s로 설정하여 캐빈 내부의 온도변화를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 시간은 1000s 이며 배기 유량에 따른 캐빈 온도변화는 Fig. 3과 같다.

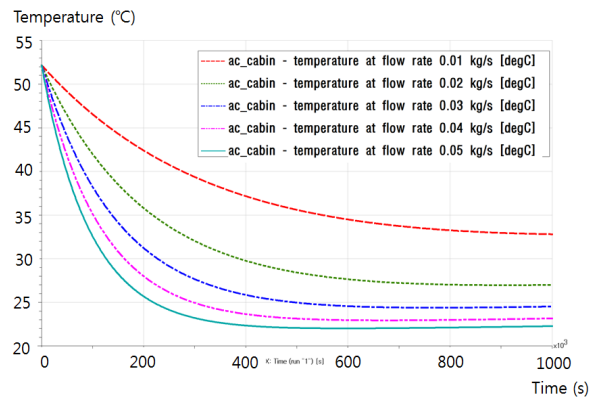


Fig. 3 The cabin temperature by exhaust flow rate

배기 유량에 따른 캐빈 내부 온도는 유량이 많을수록 온도가 급격히 떨어지는 것으로 나타났다. 배기 유량이 많을수록 음압에 의하여 흡입되는 유량이 많기 때문에 열교환이 원활해져 온도변화가 빨리 일어난 것으로 판단된다.

3.3 흡기온도에 따른 캐빈 온도

흡기온도에 따른 캐빈의 온도 변화는 캐빈 내부의 초기 온도를 52°C로 설정하고 흡기 온도를 각각 15°C, 18°C, 20°C, 22°C, 25°C로 설정하여 캐빈 내부의 온도변화를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 시간은 1000s, 유량은 0.02kg/s 이며 흡기온도에 따른 캐빈의 온도 변화는 Fig. 4와 같다.

흡기온도에 따른 캐빈의 내부온도 변화는 온도가 낮을수록 캐빈 내부의 온도가 더 많이 떨어지는 것으로 나타났다.

또한 실제 한 여름이 아닌 경우 실외 온도는 18°C~20°C 정도가 되며 시뮬레이션 결과 캐빈 내부의 온도가 52°C에서 25°C 까지 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 실제 시스템에 적용가능성이 타당한 것으로 판단된다.

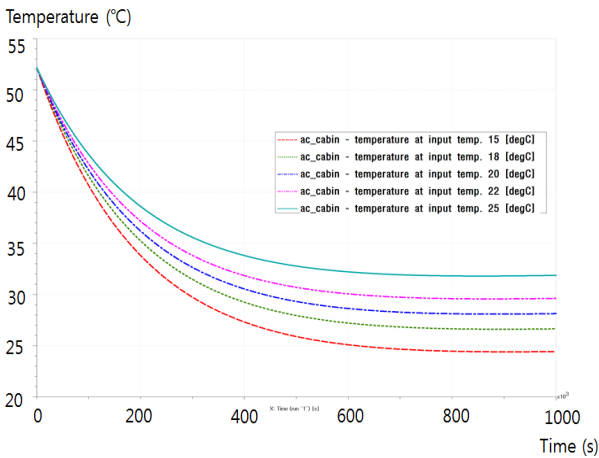


Fig. 4 The cabin temperature by intake air temperature

4. 실험 장치

강제배기를 이용한 굴삭기 공기조화 시스템의 실험 장치는 1.5톤 굴삭기를 이용하였고 본 연구에 사용된 1.5톤 굴삭기는 D 사의 굴삭기로 밀폐되지 않은 개방형 캐빈이 장착되어 있다. 따라서 투명비닐을 이용하여 굴삭기 캐빈을 밀폐시켰다. 밀폐된 캐빈의 모습은 Fig. 5와 같다.



Fig. 5 The closed cabin

캐빈의 강제배기는 상용차량에 사용되는 블로워 모터에 알루미늄 덕트를 설치하여 캐빈 내부 공기를 배기시켰다. 설치된 블로워 모터와 배기관은 Fig. 6과 같다.



Fig. 6 The blow motor and exhaust pipe

캐빈에서 배출되는 배기유량은 Air Flow Sensor를 블로워 모터 출구에 설치하여 측정하였으며 설치된 Air Flow Sensor는 Fig. 7과 같다.



Fig. 7 The air flow sensor

자연흡기를 위한 흡입구는 굴삭기 캐빈의 하단부에 설치하였으며 외부에서 이물질이 침입 하지 못하도록 공기 필터를 설치하였다. 설치된 흡입구와 공기 필터는 Fig. 8과 같다.



Fig. 8 The intake pipe and air filter

캐빈 내부의 온도측정은 온도가 증가함에 따라 저항이 낮아지는 부특성 서미스터를 이용하여 온도를 측정하였다. 온도 측정 지점은 캐빈의 상부 9 지점, 중간부 9지점, 하단부 6 지점으로 총 24 지점을 측정할 수 있도록 하였고 외기가 흡입되는 흡입구 2 지점의 온도도 측정할 수 있도록 하였다.

측정 장비는 National instrument 사의 NI USB DAQ 6212 1개와 NI USB DAQ 6008 2개를 사용하였다. 사용된 NI USB DAQ 6008과 서미스터는 Fig. 9와 같다.

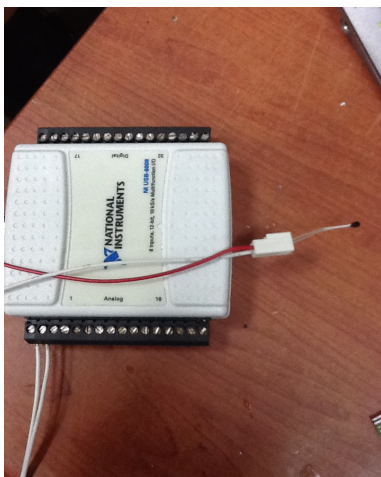


Fig. 9 The Thermistor and NI USB DAQ 6008

서미스터는 온도에 따른 가변저항과 같으므로 고정저항을 연결하여 측정하여야 한다. 본 연구에서는 1KΩ 의 저항을 연결하여 단자대 회로를 구성하였다. 구성된 단자대 회로는 Fig. 10과 같다.

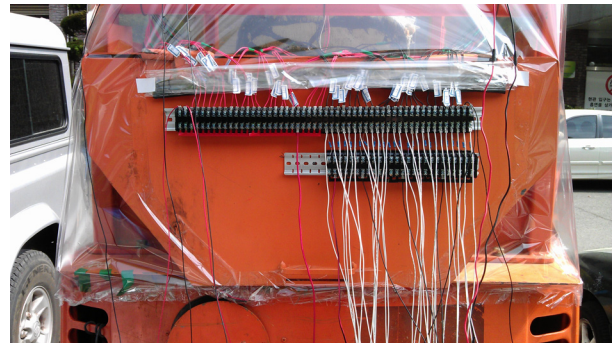


Fig. 10 The circuit for measurement

5. 실험 결과

강제배기를 이용한 굴삭기 공기조화 시스템의 실험은 실내실험과 실외실험으로 실내실험은 일정한 온도조건을 유지한 공간에서 캐빈 내부를 가열하여 강제배기를 적용했을 때와 적용하지 않았을 때의 온도변화를 측정하였다. 실외실험은 실제 태양복사에너지를 이용하여 캐빈을 가열하고 강제배기를 통하여 내부 온도를 감소시키는 시스템의 적용가능성을 검증하도록 하였다.

5.1 실내실험 결과

실내실험은 일정한 온도 조건에서 강제배기 시스템의 효율성을 검토하기 위하여 실험하였다. 실험은 20℃로 일정한 온도 환경에서 캐빈 내부를 가열한 후 강제배기를 적용한 경우와 강제배기를 적용하지 않은 경우를 비교 실험하였다. 캐빈 내부 초기 온도는 52℃로 설정하여 시간에 따른 온도 변화를 1회/1s 주기로 데이터를 측정하였다. 강제 배기유량은 0.021kg/s 로 설정하였고 실내실험의 결과는 Fig. 11과 같다.

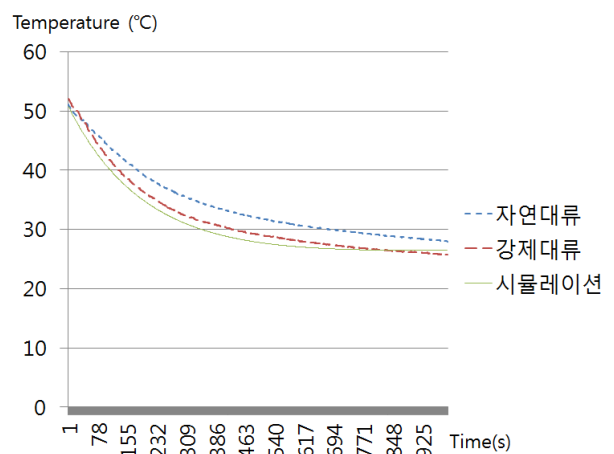


Fig. 11 Experimental result of inside test

실내실험은 자연대류 상태의 시스템보다 강제대류를 적용한 시스템이 온도가 더 급격히 떨어지는 것을 확인하였다. 초기 설정 온도(52℃)에서 30℃까지 감소하는 시간은 자연대류 상태는 690s 강제대류 상태는 390s로 강제대류를 적용 했을 경우 약 300s 정도 빠른 것을 확인하였다.

5.2 실외 실험 결과

실외 실험은 실제 실험장치인 1.5톤 굴삭기를 태양열을 직접 받게 하고 강제배기를 시켜 실험을 하였다. 또한 강제배기 유량을 변경하고 태양열을 받는 면적을 변경하여 실험을 하였다. 실외 온도는 19℃ 였으며 실험 결과는 Fig. 12와 같다.

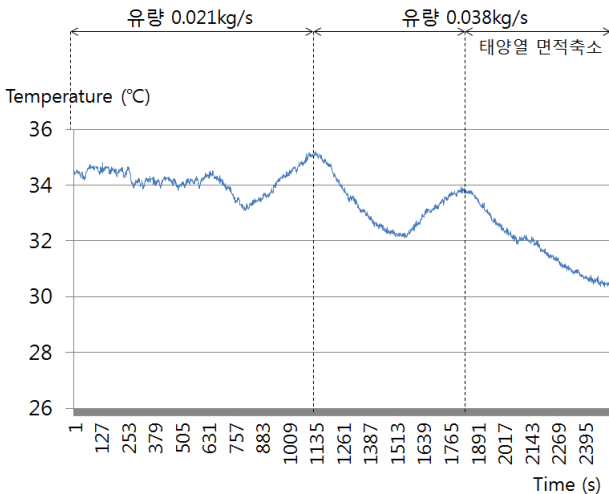


Fig. 12 Experimental result of outside test

실외 실험은 환경적인 제약으로 내부 초기온도를 실내실험과 동일한 52℃로 설정하지 못하였다. 초기 온도는 약 34℃로 설정되었으며 초기 강제배기 유량은 0.021kg/s 로 설정하였다. 시간에 따라 굴삭기 캐빈의 온도 변화는 크지 않았으며 일사량에 따라 오히려 온도가 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 강제배기 유량을 0.038kg/s 로 증가시켜 실험을 수행하였다. 유량의 증가로 인하여 캐빈의 내부 온도는 낮아지는 경향을 보였으나 대류에 의한 열교환 효과 보다 태양 복사에 의한 유입 열량이 증가한 이유로 다시 약간의 온도상승이 발생한 것으로 생각된다.

본 실험장치는 밀폐 공간을 비닐을 이용하여 구성하였기 때문에 실제 굴삭기의 캐빈이 받게 되는 태양열 보다 많은 양의 태양열을 받게 된다. 따라서 태양열을 직접적으로 받지 않도록 일부 면적을 축소하여 실험을 실시하였다. 태양열을 받는 면적을 축소하여

강제배기를 시킨 결과 캐빈 내부의 온도가 약 14.3% 감소되는 것을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 강제배기를 이용한 굴삭기 캐빈의 공기조화 시스템에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 강제배기를 이용한 굴삭기 캐빈 공기조화 시스템의 원리와 기초이론을 정립하였다.
- 2) AMESim을 이용하여 강제배기를 이용한 공기조화 시스템의 모델을 개발하였으며 흡입공기온도와 배기유량에 따른 캐빈 내부 온도변화를 확인하였다.
- 3) AMESim 시뮬레이션을 통하여 흡입공기온도가 낮고 배기유량이 많을수록 캐빈 내부 온도가 급격히 낮아지는 것을 확인하였다.
- 4) 실내실험을 통하여 자연대류를 이용한 캐빈 온도변화와 강제대류를 이용한 캐빈 온도변화를 비교하였으며 52℃에서 30℃까지 낮아지는 시간은 강제대류가 약 250s 빨리 낮아지는 것을 확인하였다.
- 5) 실외실험을 통하여 실제 일사량이 적용된 동안 캐빈의 내부온도를 측정하였으며 배기유량을 변경하고 태양열을 받는 면적을 변경하여 강제배기 시스템의 적용 가능성을 검증하였다.

본 연구에서는 강제배기 시스템의 적용 가능성을 검증하기 위하여 개방형 캐빈을 자체적으로 밀폐형으로 변경하여 시스템을 구성, 실험하였다. 따라서 실제 밀폐형 캐빈 보다 열악한 환경에서 시험을 수행하여 실제 사용 환경에서의 성능은 실험에서 얻어진 결과보다 향상되리라 예상 된다. 향후 각 굴삭기 캐빈의 형태나 부피에 따른 시스템의 최적화를 위한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1) B. S. Yoo, C. M. Hwang, and J. S. Joh, "A Study on the Energy Management Control of Hybrid Excavator", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 12, pp. 1304-1312, 2012
- 2) H. G. Kim, J. W. Choi, S. J. Yoo and K. S. Yi, "Development of Power Management Strategies for a Compound Hybrid Excavator," KSME-A, Vol. 35, No. 12, pp. 1537-1542, 2011

- 3) K. K. Ahn, J. I. Yoon, H. T. Do, "Introduction of Energy Regenerative Hybrid Hydraulic System Technologies", KSFC, Vol. 9, No. 3, pp.67-76, 2012
- 4) K. K. Ahn and J. I. Yoon, "Development of Hybrid Excavator for Regeneration of Boom Potential Energy", KSFC, Vol. 7, No. 2, pp.25-32, 2010
- 5) S.Y Hong, M. S. Han, S. J. Park, "Research of 2.5KW Electric Scroll Compressor Using PMSM", KIPE conference, pp.600-603, 2012
- 6) J. M. Choi, S. W. Cho, "The Characteristic of Convective Heat Transfer Coefficient by Natural Heat Transfer Coefficient and Forced Heat Transfer Coefficient", AIK, Vol. 27, No. 6, pp.205-212, 2011
- 7) M. H. Kim, J. H. Hwang, " A Study on the Thermal/Airflow Characteristics of an Apartment House with a Natural Supply and Mechanical Exhaust System", AIK, Vol. 28, No. 4, pp.223-232, 2012
- 8) J. H. Hwang, C. Y. Oh, M. H. Kim, "A Prediction of Hybrid Ventilation System Performance in Apartment House", SAREK, Vol. 18, No. 7, pp.541-548, 2006
- 9) J. H. Moh, S. H. Lee, "Flow and Heat Transfer Analysis for the Ventilating System in Automobile Interior with a Forced Exhaust", KSME-B, Vol. 29, No. 4, pp.469-476, 2005
- 10) Y. H. Yoon, "Introduction to AMESim Software", KSFC, Vol. 2, No. 1, pp.3-9, 2005