

직렬 제습방식 열펌프 시스템의 성능특성에 관한 연구

고원빈¹ · 고지운² · 박윤철[†]

(원고접수일 : 2014년 2월 25일, 원고수정일 : 2014년 5월 19일, 심사완료일 : 2014년 6월 18일)

Study on the performance of a heat pump system with serial dehumidification function

Wonbin Ko¹ · Ji-Woon Ko² · Youn Cheol Park[†]

요약: 화산지형인 제주도의 지열에너지를 사용하기 위하여 지하공기를 측정하였을 때 지중 온도는 15~18°C이며, 상대습도는 70~80%로 타 지역에 비하여 매우 높은 경향을 나타내고 있다. 본 연구는 제습기능 및 난방기능을 구비한 다단 제습·가열 열펌프 시스템의 개발에 관한 연구로써, 개발된 열펌프의 성능 실험을 수행한 결과 흡입공기의 상태가 최저 15°C, 60%인 경우 총제습량이 1.797(kg/h)로 나타났으며, 최고 20°C, 80%인 경우 총제습량이 45% 증가한 3.269(kg/h)로 증가하여 충분한 제습이 이루어짐을 알 수 있다. 또한, 난방능력은 흡입온도 17°C 상대습도 70% 일 때 1.91로 가장 높은 효율을 얻을 수 있다.

주제어: 지열, 열펌프, 제습, 열교환기, 응축기, 증발기

Abstract: In this research, results of measuring temperature and relative humidity of underground-air-heat in Jeju showed 15~18°C and 70~80% each which are somewhat high compare to other regions. So the Multi-effect dehumidifying and heating Heat Pump system which has merged functions of dehumidification and heating is made to solve this problem mentioned previously. When the suction air was 15°C with 60% humidity, the outcome was 1.70 on COP_h and 1.797(kg/h) on total amount of dehumidification, and also showed 1.87 COP_h with 1.87 total amount of dehumidification under the condition of 20°C and 80% humidity of suction air. Furthermore, COP_h showed increased number which is 1.87 and also total amount of dehumidification increased which was 3.269(kg/h). The highest COP can be achieved at 17°C and 70% relative humidity condition.

Keywords: Geothermal, Heat pump, Dehumidification, Heat exchanger, Condenser, Evaporator

기 호 설 명

COP_h : 난방성능계수 [-]

Q_{in} : 방출열량 [kcal/kg]

Q_{out} : 흡입열량 [kcal/kg]

W : 공급일량 [W]

\dot{D} : 제습량 [kg/h]

δ : 건조공기 비중 [kg/m³]

Q : 건조공기 풍량 [m³/h]

X_{in} : 냉각코일 입구 공기의 절대 습도 [kg/kg[']]

X_{out} : 냉각코일 출구 공기의 절대 습도 [kg/kg[']]

[†]Corresponding author: Mechanical Engineering, Jeju National University, Ara-dong, Jeju-si, Jeju 690-756, Korea, E-mail: yapark@jejunu.ac.kr, Tel: 064-754-3626

1 Department of Mechanical Engineering, Jeju National University, E-mail: kwb3750@naver.com, Tel: 064-754-3606

2 Green Energy System Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, Chungnam, 331-025, Korea, E-mail: wasabeclub@paran.com, Tel: 064-754-3606

1. 서론

지속적인 화석연료의 사용에 따른 지구온난화와 자원고갈의 문제로 인해 전 세계적으로 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 우리 정부는 이러한 에너지 수급 상황을 개선하기 위하여 관공서 및 지방자치단체 등의 신축건축물에 신재생에너지 설비를 의무적으로 사용하도록 하고 있다[1].

연중 15~18°C도의 일정한 온도를 유지하는 특성을 가진 지열을 냉난방시스템의 열원으로 사용할 경우, 에너지 이용 효율이 높고 친환경적인 요소로 인해 큰 주목을 받고 있다[2]. 특히 제주도 지하공기열의 특성을 측정된 결과 깊이에 따라 차이를 나타내지만 지하층을 거친 공기의 온도는 연중 15~18°C를 일정하게 유지하며 70~80%의 높은 상대습도를 가진다[3].

Shin et al. [4]에 의해 지열 에너지의 이용가능성이 확인된 후, 지열원 히트펌프의 성능분석 및 요소기술 개발에 대한 관심도가 증가하고 국내외에서 일반적으로 많이 사용되고 있다.

해외의 연구를 살펴보면 Zeng et al. [5]은 수직형 지중 열교환기에 있어 단일 U자관과 2중 U자관을 사용했을 때의 보어홀의 열전달을 해석하였고, Hepbasli et al. [6]은 밀폐수직형 지열원 히트펌프의 실험적 연구를 수행하였다. Bi et al. [7]은 지중 열교환기 주위의 온도분포를 이론과 실험을 통하여 해석하였으며, Inall and Esen [8]은 수평형 지열원 열펌프 시스템의 지중열교환기 매립 깊이를 다르게 했을 때의 열적 성능을 조사하였다.

국내의 경우 Lee [9]는 지하의 열해석 방법과 열교환기 매립형태에 따른 지중열교환기의 설계방법 등을 소개하였고, Shin et al. [10]은 지열에너지를 효과적으로 이용할 수 있는 방안을 소개하였으며 Kim et al. [11]은 국내에 설치되어있는 지열원 히트펌프시스템의 난방성능을 조사하였다.

지금까지의 국내의 지열원 히트펌프시스템의 연구는 주로 지하열원과 열교환을 통한 실험을 주로 하였으나 제주도의 전역은 화산지역으로 토양의 공극과 현무암등이 기공을 포함하고 있어 직접적으로 지열을 이용하기에는 열전도 계수가 떨어진다[12].

제주도에서 지하공기를 직접적으로 이용 할 경

우, 지표의 공기가 지중의 용암쇄설층을 통과하며 열을 흡수하게 되고 이 과정에서 지하수로 유입되는 물과 접촉하게 된다. 따라서 포화과정과 유사한 과정을 거치게 되며 흡입되는 지하공기열원의 습도는 100%의 상대습도를 가지게 된다[13].

이 때 지하공기의 습도가 너무 높아 시설원예나 건물공조에 적합하지 않으므로 지하공기의 제습과정이 반드시 필요한 실정에 있다. 이러한 공기의 제습과정을 위해 현재 국내에서 개발되어 보급되고 있는 제습기의 경우에는 냉각사이클을 이용하여 이슬점 온도에 해당하는 증발기의 온도를 구현한 후, 상기 증발기 표면에서 과포화된 공기를 응축시켜 제습하는 방법과 제습로터를 이용하여 흡습과 제습을 반복적으로 이용하는 방식 등이 일반적인 방법이다.

본 연구는 위와 같이 상대습도가 높은 특성을 가진 제주도의 지하공기를 이용하기 위하여 Ko et al. [14]에 의해 개발된 병렬사이클 히트펌프제습기의 사이클을 직렬구조로 변경하고, 위 시스템에 대한 성능실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

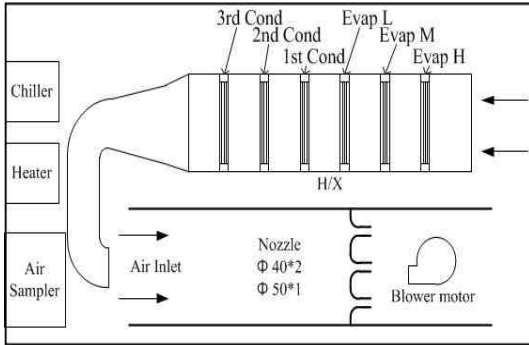
2.1 실험장치

본 연구에서 지하공기의 특성을 모사하기 위한 환경챔버의 외부는 열손실을 줄이기 위하여 150mm의 특수 단열재로 시공되었고, 내부에는 6kW급 PTC(Positive Temperature Coefficient)전기히터와 3kW급 칠러(Chiller), 가습기 및 제습기를 설치하여 습도 및 온도를 조절할 수 있도록 하였다.

시스템의 열량을 계산하기 위하여 열교환기에 공급되는 공기의 상태량을 에어샘플러(Air sampler)를 이용하여 측정된 후 히트펌프의 제습효율과 COP(Coefficient of Performance)를 산출하였다.

Cord tester를 이용하여 열펌프 시스템을 통과하는 공기의 상태량 및 풍량을 측정하였으며, 취출되는 지하공기의 풍속을 일정하게 제어하기 위하여 인버터(Inverter)와 5kW급 모터를 사용하였다.

Figure 1은 향온 및 향습을 위해 설치된 환경챔버에 설치된 히트펌프의 계략도 이다.



H : High pressure M : Mid pressure L : Low pressure

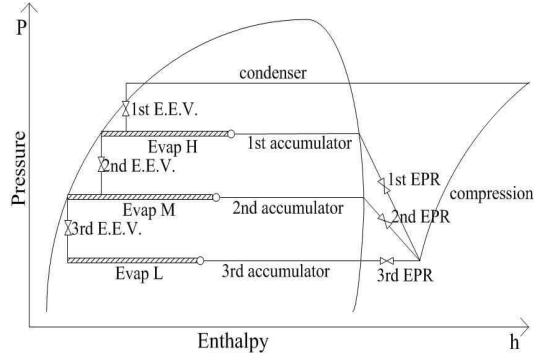
Figure 1: Schematic diagram of climatic Chamber.

Table 1 Experimental Test Condition

Inlet air temp (°C)	Relative humidity (%)	Air Flow rate (m ³ /min)
15	60/70/80	8.5
17	60/70/80	
20	60/70/80	

히트펌프 제습기는 1RT급 증발기 3개와 각각에 1HP급 어큐뮬레이터(Accumulator) 3개를 직렬로 설치하였고, 응축기 3개와 3HP급 수액기 1개를 병렬로 설치하여 압축기, 응축기, 증발기 및 팽창밸브로 구성된 시스템이며, 증발기로 유입되는 지하공기의 상태에 따른 이슬점으로 냉매의 압력을 조절하여 최대의 제습과정을 거친 공기를 실내로 유입시키는 방식이다. Figure 2는 P-h사이클 선도이다.

실제 지하공기의 상태로 모사된 공기의 상태량을 파악하기 위하여 오차범위가 ±0.5°C인 T-type의 열전대를 사용하여 온도를 측정하고, 각 증발기의 입구와 출구에 온-습도센서를 설치하여 습도를 측정하였으며, 측정범위는 -20°C~+80, 0~100%이고 오차범위 ±0.2°C, ±2%이다. 또한 히트펌프 시스템의 사이클 압력을 측정하기 위하여 압력범위 0~1000psig 오차범위 ±0.13%로 측정할 수 있는 압력변환기를 압축기 입·출구, 증발기, 응축기, 및 팽창장치 등 각각의 요소에 설치하였다. 성능평가를 위하여 열펌프에 사용된 전력량을 측정하여 위의 모든 값들을 자료수집기(Data logger)를 이용하여



H : High pressure M : Mid pressure L : Low pressure

Figure 2: Pressure-Enthalpy diagram of serial evaporator system.

컴퓨터와 네트워크 연결을 통해 실시간으로 데이터를 모니터링 및 저장을 하였다.

본 연구에서 개발한 제습히트펌프의 성능을 평가하기 위하여 실제 지하공기의 온도범위인 15~18°C에서 날씨에 따른 습도의 변화를 고려하여 Table 1 과 같은 실험조건으로 실험을 진행하였다. 시스템을 1~2시간동안 가동하여 환경챔버 내의 정상상태를 유지한 후 10분간 데이터를 취득하였다.

3. 이론 해석

3.1 성능계수

제습 히트펌프 시스템의 성능을 알기 위하여 시스템 운전에 소요된 동력과 저온열원으로부터 흡수한 열을 고열원으로 방출 할 때 다음의 관계식이 성립된다.

$$COP = \frac{Q_{in}}{W} = \frac{Q_{in}}{Q_{in} - Q_{out}} \quad (1)$$

식 (1)에 따라 복수개의 응축기를 지나며 가열되는 동안의 성능계수를 알 수 있다. 이 과정을 지나며 제습과정에서 저하된 온도가 일반적으로 사용될 수 있는 온도까지 상승하게 된다.

3.2 제습능력

공기가 복수개의 증발기를 지나면서 처음에는 공기의 온도만 강하게 되어 현열감소가 일어나게

되고, 현열 감소를 마친 공기는 포화선을 따라 공기중의 수분이 응축하게 되어 현열과 잠열이 동시에 감소하는 과정을 거치는 과정이 진행된다. 이 과정에서 실내 공기 중의 수분이 응축되는 제습량 D 는 식 (2)와 같다.

$$\dot{D} = \delta \times \dot{Q} \times (\chi_{in} - \chi_{out}) \quad (2)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 흡입공기온도별 토출 공기온도 변화 및 난방능력

본 연구에서 개발한 시스템의 궁극적인 목적은 지하열원을 일반 시설원에 등에서 사용이 가능한 온도와 습도로 토출되는 것이다. 지하열원의 온도와 비슷한 실험조건으로 연구를 진행한 결과 각각의 흡입되는 지하열원의 상태가 15°C, 17°C, 20°C 이고 습도가 60%에서 10%씩 증가함에 따라 토출 온도 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 각단 응축기와 증발기에서도 비슷한 패턴의 온도변화를 보이고 있으며, 각각의 흡입공기온도별 상대습도에 따른 토출공기의 온도그래프를 Figure 3, Figure 4 및 Figure 5에 나타내었다.

흡입온도가 15°C이고, 상대습도가 60%, 70% 및 80% 일 때 토출온도가 27.0°C, 28.7°C, 및 29.4°C를 보이고 있고, 난방능력은 1.75, 1.70 및 1.70 으로 나타났다.

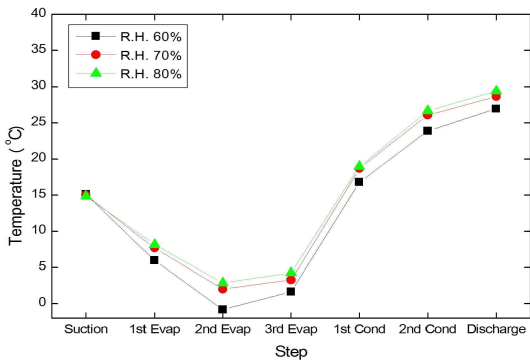


Figure 3: Air temperature variation that is passing through each heat exchanger($T_{ain}=15^{\circ}\text{C}$).

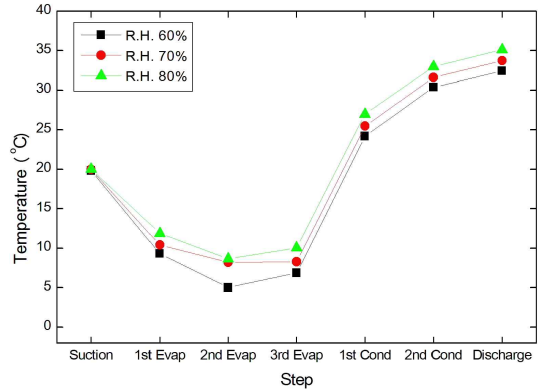


Figure 4: Air temperature variation that is passing through each heat exchanger($T_{ain}=17^{\circ}\text{C}$).

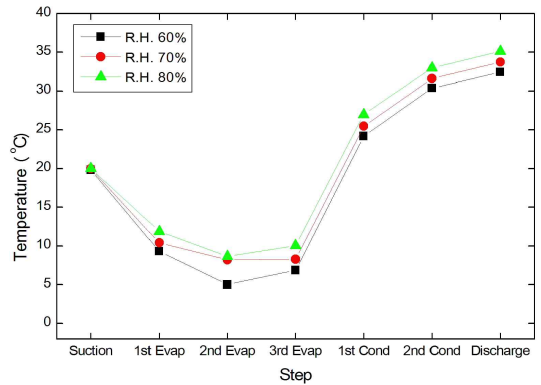


Figure 5: Air temperature variation that is passing through each heat exchanger($T_{ain}=20^{\circ}\text{C}$).

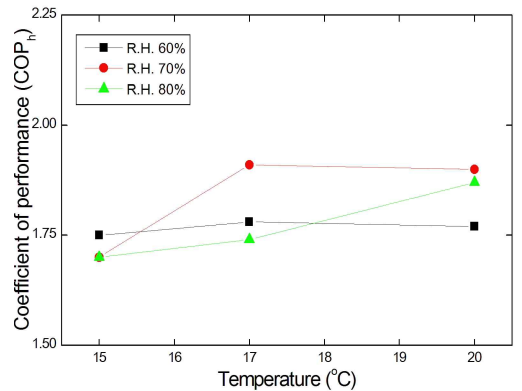


Figure 6: Heating COP variation with suction air temperature.

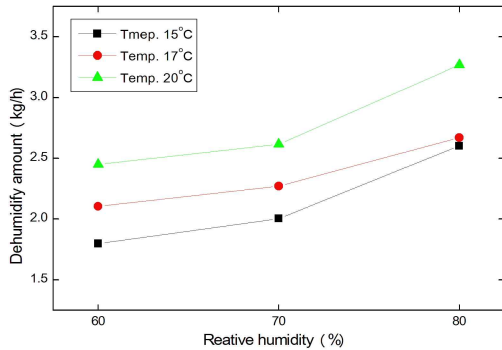


Figure 7: Total dehumidification rate with suction air humidity.

위와 마찬가지로 흡입공기온도가 17°C이고, 상대 습도가 60%, 70% 및 80% 일 때 토출온도가 29.0°C, 33.8°C, 및 32.9°C를 보이고, 난방능력은 1.78, 1.91 및 1.74 이다. 흡입공기온도가 20°C이고 상대 습도가 60%, 70%, 및 80% 일 때는 토출온도가 35.8°C, 37.8°C 및 38.8°C이고, 난방능력은 1.77, 1.90 및 1.87 로 나타나며 흡입공기 온도가 높을수록 난방능력이 좋아짐을 알 수 있다. 전단에 제습 시스템의 효율까지 더한다면 일반적인 난방장치의 능력보다 높을 것으로 사료되며 각각의 상대습도 별 흡입공기의 온도에 따른 난방 COP를 Figure 6에 나타내었다.

4.2 흡입공기온도 및 습도별 제습량

시스템이 흡입공기의 상태에 따른 총제습량을 알기 위하여 실험한 결과, 흡입공기 온도가 15°C이고, 상대습도가 약60% 일 때 총제습량은 1.797(kg/h)이고, 상대습도가 약 70% 일 때의 총제습량은 약 6.94% 증가한 2.003(kg/h)을 보이고 있으며, 상대습도가 80% 일 때 약 60%의 총제습량 대비 약 39.37% 증가한 2.602(kg/h) 이다. 흡입공기 온도가 17°C이고, 상대습도가 약60%, 70%, 80% 일 때 총제습량은 2.105(kg/h), 2.270(kg/h) 및 2.67(kg/h) 이다. 흡입공기 온도가 20°C이고, 상대습도가 60%, 70% 및 80% 일 때 2.45(kg/h), 2.616(kg/h) 및 3.269(kg/h)의 총제습량을 보이고 있다.

흡입온도가 15°C, 상대습도 60% 인 경우와 흡입 온도가 17°C, 20°C 이고 상대습도가 60% 일 때 총

제습량은 각각 17.1% 및 36.3% 증가함을 알 수 있다. 온도에 따라 제습량은 다르지만 습도와 온도가 높아질수록 제습량이 증가하는 것을 알 수 있으며 흡입공기온도별 상대습도에 따른 총제습량 실험결과 그래프를 Figure 7에 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 대표적인 신재생에너지 중 하나인 지열에너지를 사용하기 위하여 제주도의 지하공기를 측정해본 결과 지형적 특성으로 인해 다른 지역보다 높은 습도를 가지고 있다는 것을 알 수 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제습과 동시에 난방이 가능한 히트펌프를 개발하고, 성능실험을 수행하였다. 각각의 흡입공기 온도별 상대습도에 따른 총 제습량 및 난방능력의 연구결과는 다음과 같다.

(1) 다만 제습·가열기능을 구비한 열펌프 시스템의 경우, 중압 증발기 까지만 제습이 이루어 졌으며, 그 이유는 과도한 어큐뮬레이터의 사용과 관로의 마찰손실로 인하여 사이클의 부하가 크기 때문이다. 각각의 흡입온도에서 상대습도가 60%일 때 총제습량은 각각 1.797(kg/h), 2.105(kg/h) 및 2.45(kg/h)로 나타났으며 흡입공기가 20°C 상대습도 80%인 경우 제습량이 가장 적은 흡입온도15°C 상대습도60% 일 때의 제습량 보다 45% 증가한 3.269(kg/h)로 흡입온도와 상대습도가 높을수록 총제습량이 늘어나 충분한 제습이 이루어짐을 알 수 있다.

(2) 흡입공기가 중압 증발기를 지나면서 제습을 마친 후 저압 증발기와 3개의 응축기를 거치면서 온도가 일괄적으로 상승하여 난방이 이루어지게 된다. 일반적인 난방기의 효율에 따라 흡입공기의 온도와 습도가 높을수록 상대적으로 더 높은 난방 COP가 나와야 하지만 흡입공기의 절대습도가 높아짐에 따라 중압 증발기에서 적상현상이 나타나 난방 COP가 흡입온도 17°C 상대습도 70% 일 때 1.91로 가장 효율이 좋게 나타났다.

후 기

이 논문은 2014학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음

참고문헌

- [1] Ministry of Commerce Industry and Energy, “Alternative energy development and promotion of dissemination”, Article 11, paragraph 2, 2004.
- [2] H. B. Chae and Y. J. Nam, “Study on the method to predict the heat exchange rate of horizontal ground heat pump system using underground heat transfer analysis model”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 2012, no. 11, pp. 339-402, 2012.
- [3] J. W. Ko, Y. C. Park, and G. S. Ko, “The performance evaluation of a ground air source heat for an air conditioning system”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 2012, no. 6, pp. 781-784, 2012.
- [4] H. J. Shin, C. H. Ahn, and C. S. Cho, “Overview for the effective use of geo-thermal energy”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 24, no. 4, pp. 409-419, 1995.
- [5] H. Zeng, N. Diao, and Z. Fang, “Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers”, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 46, no. 23, pp. 4467-4481, 2003.
- [6] A. Hepbasli, O. Akdemir, and E. Hancioglu, “Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump systems”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2003.
- [7] Y. Bi, L. Chen, and C. Wu, “Ground heat exchanger temperature distribution analysis and experimental verification”, Applied Thermal Engineering, vol. 22, no. 2, pp. 183-189, 2002.
- [8] M. Inalli and H. Esen, “Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system”, Applied Thermal Engineering, vol. 24, no. 14-15, pp. 2219-2232, 2004.
- [9] K. W. Lee, “Earth-coupled heat pump technology”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 21, no. 4, pp. 306-315, 1992.
- [10] H. J. Shin, C. H. Ahn, and C. S. Cho, “Overview for the effective use of geothermal energy”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 24, no. 4, pp. 409-419, 1995.
- [11] B. C. Kim, H. j. Shin, and C. S. Cho, “The measurement and analysis of performance of ground source heat pump system in winter”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 2003, pp. 190, 2003.
- [12] Y. C. Park and S. K. Park, “In-situ performance evaluation of a ground source heat pump for an air conditioning system”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 1, pp. 66-72, 2008.
- [13] D. G. Ko, “A study on heating system applied ground source heat pump(GSHP) for the agriculture”, Graduate Degree Research paper, Department of Mechanical Engineering, Jeju National University, Korea, 2010.
- [14] J. W. Ko, Y. C. Park, and G. S. Ko, “An experimental study on a heat pump with dehumidification function to utilizing underground air heat”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 26, no. 2, pp. 55-60, 2014.