

소형 셸앤튜브형 열교환기의 운전 조건에 따른 열유동 거동 특성 해석

Analysis on Characteristics of Behavior of Thermal Flow
According to Operation Conditions of Small-sized Shell and
Tube-type Heat Exchanger

양영준*

Young-Joon Yang*

〈Abstract〉

The shell and tube-type heat exchanger was the most utilized in industrial field because of its simple structure and wide operation conditions and so on. This study was performed to investigate the characteristics of behavior of thermal flow according to operation condition of small-sized shell and tube-type heat exchanger. The operation conditions, here, were set up to flow rate of hot air with temperature of 100°C, number of baffle and cut rate of baffle(BCR) using numerical analysis. As the results, both mean relative pressure and relative pressure drop was increased with quadratic curve in case of less than BCR 25%, however, decreased linearly in case of more than BCR 25%. The collision with first baffle by flow velocity and temperature, of hot air, respectively, was depended on BCR. Further it showed that the behaviors between flow velocity and temperature were almost similar.

Keywords : Small-sized Shell and Tube-type Heat Exchanger, Operation Condition, Behavior of Thermal Flow, Flow Rate of Hot Air, Baffle, Cut Rate

* 정회원, 교신저자, 경상국립대학교 미래자동차공학과, 교수
E-mail: yangyj@gnu.ac.kr

* Dept. of Future Automotive Engineering, Gyeongsang National University

1. 서론

셸앤튜브형 열교환기(shell and tube-type heat exchanger)는 구조가 간단하고 제작이 용이하며 또한 넓은 온도와 압력 범위에서 운전 가능한 장점이 있어 전체 산업용 열교환기 중 약 60% 이상을 차지한다. 이에 관한 선행 연구로서, Jang 등[1]은 냉각장치로 사용되는 셸앤튜브형 열교환기의 수치 해석을 통해 배플(baffle)의 유무가 압력강하와 온도차에 미치는 영향을 조사하고 실험을 통해 열적 성능에 영향을 주는 인자를 연구하였다. Lee 등[2]은 가스히트펌프 제품에 적용된 이중 셸앤튜브형 배기가스 열교환기에 대해 해석을 통한 설계를 수행하였다. Jang 등[3]은 기존의 셸앤튜브형 막가습기의 유로에 발포금속을 충전한 경우의 셸앤튜브형 막가습기에 대한 열전달과 물질전달 특성 비교 및 차압 특성에 대한 연구를 수행하였다. 열교환기 시뮬레이터를 이용한 연구로서, Kim 등[4],[5]은 바이오수소 생산 시뮬레이터의 설계·제작을 통한 열수지 분석 및 바이오수소 생산시스템에 열교환기를 판형 열교환기로 모형화한 동적 시뮬레이션을 수행하였다. Shin[6]은 온수 가열용 판형 열교환기를 구비한 하이브리드 열펌프 시운전 결과와 유사한 동적 성능을 나타내는 동적 시뮬레이터를 개발하여 고장을 진단할 수 있는 방안을 제시하였다.

본 해석 연구 이전의 실험 연구에서 실험용 셸앤튜브형 열교환기 및 열교환기 시뮬레이터를 이용하여 특정 사양의 셸앤튜브형 열교환기에 관한 기초 데이터는 이미 취득하였다[7]. 그러나 셸앤튜브형 열교환기의 사양 변경에 따른 실험 데이터는 아직까지 축적이 미비한 상태이다. 따라서 본 연구는 수치 해석적 방법을 통해 열교환기 시뮬레이터의 사양 내에서 소형 셸앤튜브형 열교환기의 운전조건에 따른 열유동 거동 특성을 파악하고자 한다. 즉 운전조건으로서 고온공기 유량, 배플 수 및 배플 커트율을 설

정하여 소형 셸앤튜브형 열교환기의 열유동 거동 특성을 조사하여 해당 열교환기에 관한 기초 데이터를 취득하고자 하였다. 또한 본 연구에서는 셸앤튜브형 열교환기에서 셸만 있는 경우를 조사하고 향후 연구에서 동일 조건에서 셸내 튜브가 장착된 경우를 조사하여 상호 특성 차이를 비교하고자 하였다.

2. 모델링 및 수치해석 방법

열교환기는 증기발생 및 온수용 등으로 많은 산업분야와 가정에서 사용되고 있다. 열교환기의 여러 제품을 Fig. 1에 나타내었다. 응축기(condenser),

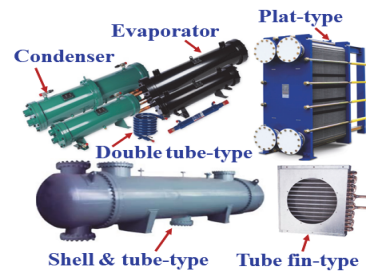
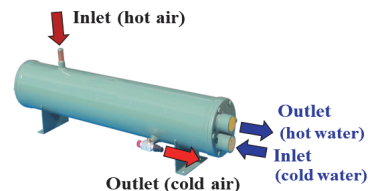


Fig. 1 Examples of many heat exchangers



(a) Heat exchanger simulator



(b) Small-sized shell & tube-type heat exchanger

Fig. 2 Simulator and heat exchanger

증발기(evaporator) 외에 이중관형(double tube-type), 판형(plat-type), 셸앤튜브형(shell & tube-type) 등은 잘 알려진 형태이다.

Fig. 2는 열교환기용 시뮬레이터(H&C SYSTEM Co. Ltd)와 소형 셸앤튜브형 열교환기(DHC-100 Model)를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)의 시뮬레이터에 열교환기가 장착되어 시험을 거치게 된다. Fig. 2(b)에 소형 셸앤튜브형 열교환기를 나타내었다. Fig. 2(a)의 시뮬레이터의 사양으로서 사용 유체는 공기와 냉각수이다. 시뮬레이터로부터의 공기 온도 범위(이하 '고온공기'라 칭함)는 40~150°C (±2%), 공기 유량 범위는 최대 80m³/h이다. 냉각수의 온도 범위는 10~40°C(±2%), 냉각수 유량 범위는 최대 3m³/h이다.

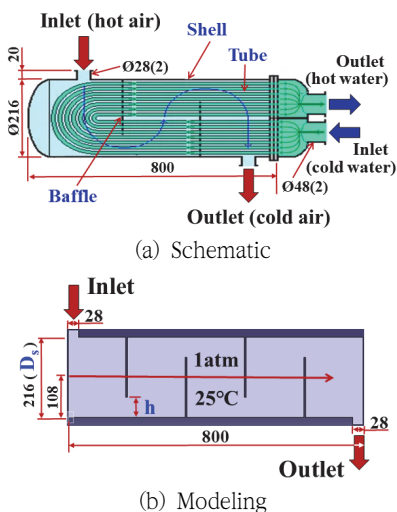


Fig. 3 Schematic and modeling

소형 셸앤튜브형 열교환기의 개략도를 Fig. 3(a), 수치해석을 위한 모델링을 Fig. 3(b)에 나타내었다. Fig. 3(a)에서와 같이 시뮬레이터로부터 셸의 Inlet에 고온공기가 유입되어 Outlet에서 유출되어지며 배플이 2개인 경우를 예로 나타내었다. 수치해석을 위해 Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)에서 고온공기가 통과하는 셸과 배플만을 모델링한 것이다. Fig. 3(b)의 모델링은 배플의 수 4개, 배플의 커트율(cut rate of baffle, 이하 'BCR'이라 칭함)인 $BCR = h / D_s \times 100$ (%)이 적용된 경우를 예로서 나타낸 것이다. 여기서 h는 배플의 커트된 높이, D_s 는 셸의 안지름(Ø216mm)을 나타낸다. 수치해석 초기조건으로 셸 내부는 1기압, 25°C로 설정하였다.

Fig. 4에 격자(mesh)의 예를 나타내었다. 해석 격자 수는 배플 수에 따라 일부 차이가 있지만 큰 차이는 없다. 격자는 사면체(tetrahedron), 노드 수는 약 23만개, 엘리먼트 수는 약 110만개이다. 고온 공기이므로 부력을 고려하였으며 열전달로 Total Energy, 난류모델로서 역압력 구배로 인한 유동박리 현상 예측에 많이 사용되는 SST(shear stress transport) 모델을 적용하였다. 해석 프로그램

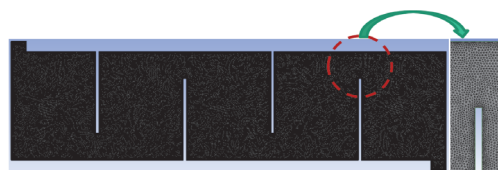


Fig. 4 Mesh

Table 1. Analysis conditions

Conditions	1	2	3	4	5	6	7
Inlet flow rate of hot air (m³/h) (Inlet velocity, m/s)	1 (0.45)	5 (2.3)	10 (4.5)	20 (9.0)	40 (18.0)	60 (27.1)	
Inlet temperature of hot air (°C)	100						
Baffle number	2	4	6				
BCR (%)	10	15	20	25	30	35	40

램으로서 ANSYS Workbench를 사용하였다.

해석조건을 Table 1에 나타내었다. 전술한 바와 같이 운전조건으로서, 시뮬레이터의 고온공기 최대유량이 80m³/h이므로 그보다 작은 20, 40, 60m³/h로 20m³/h 간격으로 설정하였다. 또한 미세 유량의 경우를 알아보기 위해 1, 5, 10m³/h를 추가하였다. 이를 유입속도로 환산하면 각각 0.45, 2.3, 4.5, 9.0, 18.0, 27.1m/s가 된다. 고온공기의 유입온도는 100°C로 일정하게 하였으며, 배플 수는 2, 4, 6개인 경우로 설정하였다. 배플 컷트율(BCR)은 10~40%의 범위에 대해 5% 간격으로 설정하였다. 즉 운전조건으로 고온공기 유량 6조건, 배플 수 3조건, 배플 컷트율 7조건을 설정하여 해석을 통해 소형 셀엔튜브형 열교환기의 열유동 거동 특성을 조사하였다.

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 5는 고온공기 유입유량 40m³/h, BCR 25% 경우의 배플 수에 따른 상대압력을 셀 중앙 지점의 길이에 따른 변화를 나타낸 것이다. 배플 수가 2개인 경우의 압력강하는 크지 않다. 그러나 배플 수가 증가함에 따라 상대압력도 높아지고 압력강하도 증가하는 것을 알 수 있다. 셀 내 길이에 따라 압력은 측정 지점에 기인하여 다소 변동이 있지만 전체적으로 감소하고 있는 것을 관측할 수 있다.

Fig. 6에 배플 수 4개, BCR 25% 경우의 고온공기 유입유량에 따른 상대압력 변화를 나타내었다. Fig. 6(a)는 셀 내 중앙 지점 전 길이에 따른 변화를, Fig. 6(b)는 셀 출구 부분에서의 변화를 확대한 것이다. Fig. 6(a)에서 전반적으로 유량이 증가할수록 압력강하는 증가하는 경향을 보이거나 압력강하가 매우 작은 유량 조건도 관측된다. 특

히 유량 20m³/h 보다 큰 경우는 출구 근처에서도 압력 증가가 관측된다. 압력강하는 흐름이 있는 유동에서 존재한다. 그러나 열교환기에서 너무 큰 압력강하는 많은 비용을 필요로 하므로 적절한 수준의 압력강하가 요구된다. Fig. 6(a)에서 알 수

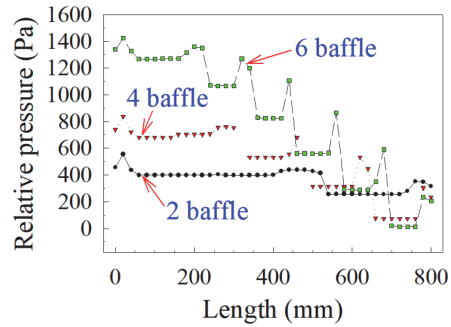
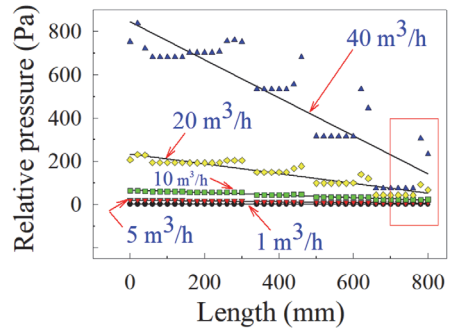
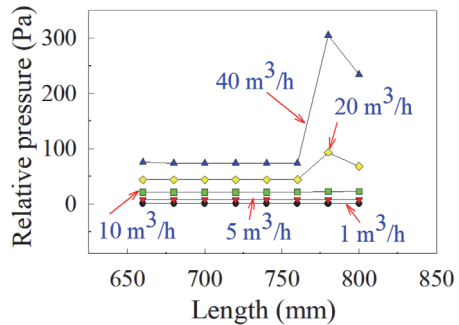


Fig. 5 Relative pressure according to baffle number in case of 40m³/h of inlet flow rate and BCR 25%



(a) All distributions



(b) Local distributions

Fig. 6 Relative pressure according to inlet flow rate in case of 4 baffles and BCR 25%

있는 바와 같이, 유량 40m³/h와 20m³/h는 압력 강하 측면에서 서로 큰 차이를 보인다. 여기서 고온공기 유량 20m³/h의 경우에 대해 더 조사하고자 한다.

Fig. 7에 배플 수 4개, 고온공기 유량 20m³/h의 경우 BCR에 따른 상대압력을 나타내었다. 그림에서 관측되는 바와 같이, BCR 10%인 경우 가장 큰 압력강하가 발생한다. 이 경우 출구 근처에서 기준압력 1기압보다 낮은 압력도 발생한다. BCR 20% 이상에서는 다른 조건과 비교하여 압력강하가 작음을 확인할 수 있다. 따라서 본 해석조건에서는 BCR이 최소 15% 이하가 되어야 두드러진 압력강하 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 예측값은 소형 쉘앤튜브형 열교환기 설계 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

배플 수 4개, 고온공기 유량 20m³/h 경우의 BCR에 따른 평균상대압력 및 상대압력강하를 Fig. 8(a)에 나타내었다. 본 그래프는 Fig. 7에서 상대압력을 평균하여 BCR에 따라 나타내었으며 상대압력강하는 최초압력에서 최종압력을 뺀 값이다. 또한 Fig. 8(b) 및 Fig. 8(c)에 BCR 30% 및 BCR 35% 경우의 고온공기 유동 속도분포를 나타내었다. Fig. 8(a)에 따르면 본 해석 조건에서는 쉘 내 평균상대압력과 상대압력강하는 BCR 약 25%를 기준으로 이보다 작으면 2차 곡선적으로 증가하고 이보다 크면 거의 선형적으로 감소한다. 또한 고온공기 유동의 속도분포 형상에 따르면, BCR 30~35% 사이를 기준으로 유동 속도의 주류(main stream)가 첫 배플과의 충돌 경계점이 되는 즉 30% 이하는 주류가 첫 배플의 끝 부분과 충돌하지만 35% 이상에서는 충돌이 발생하지 않음이 관측되었다. 유동의 원활한 흐름 관점에서 주류는 배플과 충돌하지 않는 것이 바람직할 것이다. 그러나 충돌을 피하기 위해 BCR를 너무 크게 하면 열교환 성능이 감소하게 된다. 따라서 최적 성능

을 내기 위한 운전조건에 따른 특성을 파악하는 것이 필요할 것으로 예상된다.

열교환기에서 중요한 요소 중 하나는 온도이다.

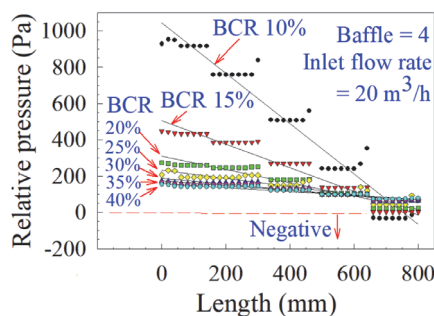


Fig. 7 Variations of relative pressure according to BCR in case of 4 baffles and 20m³/h of inlet flow rate

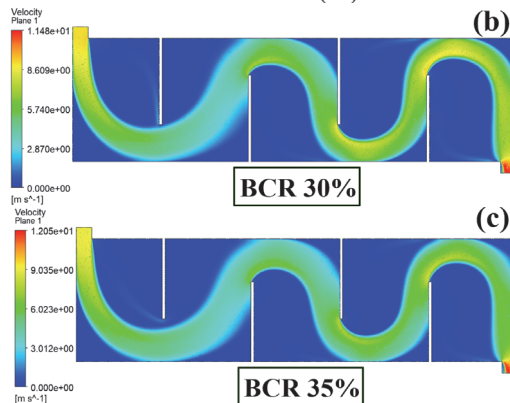
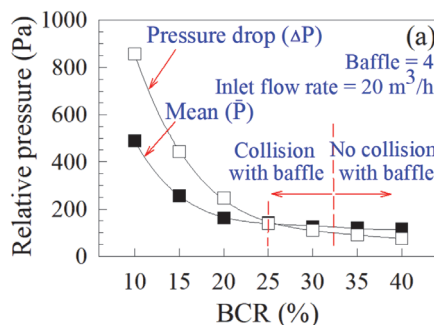


Fig. 8 Mean relative pressure, relative pressure drop and velocity distributions according to BCR in case of 4 baffles and 20m³/h of inlet flow rate

Fig. 9에 배플 수 4개, 고온공기 유량 20m³/h 경우의 BCR에 따른 온도 형상을 나타내었다. BCR 조건에 따라 첫 배플 근방의 주요 온도형상 및 각 배플 하단의 재순환영역에서의 온도분포 등 일부 다른 온도 형상이 관측된다.

Fig. 10는 배플 수 4개, 고온공기 유량 20m³/h

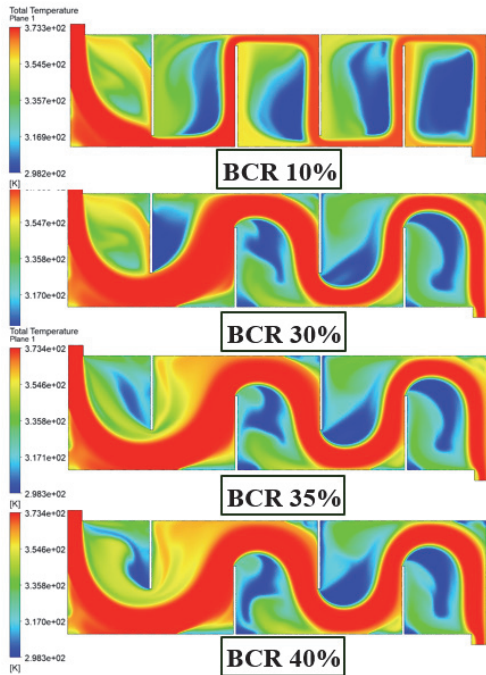


Fig. 9 Temperature distribution according to BCR in case of 4 baffles and 20m³/h of inlet flow rate

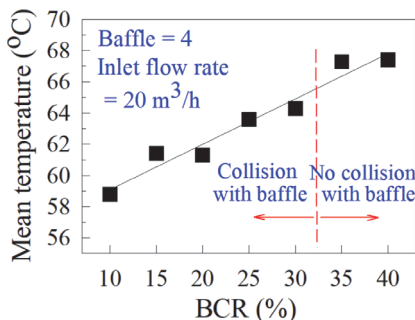


Fig. 10 Mean temperature according to BCR in case of 4 baffles and 20m³/h of inlet flow rate

경우의 BCR에 따른 평균온도를 나타낸 것이다. 이 그래프는 Fig. 9의 셀 중앙지점에서 길이방향(20mm 간격으로 약 40지점)으로 온도를 측정하여 평균한 값이다. 그래프를 고찰하면, BCR의 증가에 따라 평균온도가 증가한다. 이와 같은 이유는 BCR이 증가하면 최초 유입온도(100°C)가 BCR이 감소한 경우보다 유동이 배플에 의한 제한을 적게 받으므로 유동이 셀 내 공간 전체에 상대적으로 고르게 분포할 가능성이 높기 때문인 것으로 예측된다. 즉 BCR이 너무 작으면 유동의 원활한 흐름이 저하될 뿐만 아니라 온도도 감소할 수 있다는 것을 의미하는 것으로서 최적의 BCR을 선택해야 할 필요성을 나타낸다. 또한 100°C 고온공기의 주류는 BCR 30% 이하에서는 첫 배플과 충돌이 발생하고 BCR 35% 이상에서는 충돌이 발생하지 않는다. 이것을 Fig. 8(b) 및 Fig. 8(c)의 결과와 비교하면, 예상과 달리 고온공기의 유동 흐름은 주류에서 크게 분산되지 않는 형태로 유동하며 고온공기의 유동속도와 고온공기의 온도는 거의 동일하게 거동하고 있음을 본 해석을 통해 확인할 수 있다. 본 해석에서는 열교환기 시뮬레이터의 사양 내에서 소형 셀엔튜브 열교환기의 열적 거동을 파악하기 위해 넓은 범위의 고온공기 유량 및 배플의 수를 조사한 후 특정 조건(고온공기 유량 20m³/h 및 배플 수 4개)의 경우에 대해 상세하게 조사하였다. 향후 다른 특정 조건에 대한 조사도 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

수치해석을 통해 운전조건으로서 100°C의 고온공기 유량, 배플 수 및 배플 커트율을 설정하여 소형 셀엔튜브형 열교환기의 열유동 거동 특성을 조사하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

배플 수 4개, 고온공기 유량 20m³/h 경우 BCR이 최소 15% 이하가 되어야 두드러진 압력강하가 발생하였으며, 셸 내 평균상대압력과 상대압력강하는 BCR 약 25%를 기준으로 이보다 작으면 2차 곡선적으로 증가하고 이보다 크면 거의 선형적으로 감소하였다. 또한 고온공기 유동 속도의 주류는 BCR 30~35% 사이를 기준으로 30% 이하의 주류가 첫 배플의 끝 부분과 충돌하며 35% 이상에서는 충돌이 발생되지 않았다. 열교환기 내 유동의 원활한 흐름과 최적 성능 유지 사이의 적절한 운전조건의 필요성을 나타내었다. 온도 관점에서 BCR이 너무 작으면 유동의 원활한 흐름 저하뿐만 아니라 온도 감소가 동반될 수 있다. 또한 고온공기의 유동속도와 고온공기의 온도가 BCR 30% 이하에서는 첫 배플과 충돌이 발생하고 BCR 35% 이상에서는 충돌이 발생하지 않는 것으로부터, 크게 분산되지 않는 유동 흐름을 갖는 유동속도 주류와 온도는 거의 동일하게 거동하고 있음을 나타내었다.

참고문헌

- [1] B. H. Jang, S. P. Kim and K. H. Lee, "A Numerical Analysis for the Performance Improvement of a Channel Heat Exchanger," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, vol. 11, no. 2, pp. 159-164, (2012).
- [2] J. W. Lee, K. H. Shin, S. Choi, B. Y. Chung and B. S. Kim, "Design Optimization of Dual-Shell and Tube Heat Exchanger for Exhaust Waste Heat Recovery of Gas Heat Pump," *Transaction of Korean Society of Mechanical Engineers C*, vol. 3, no. 1, pp. 23-28, (2015).
- [3] H. S. Jang, M. H. Kim and S. K. Park, "Study on the Characteristics of Membrane Humidifier with Porous Metal Foam," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 41, no. 7, pp. 632-637, (2017).
- [4] H. J. Kim, S. Y. Kim and J. Ahn, "Dynamic Thermal Design of a 1-ton Class Bio-Hydrogen Production System Simulator using Industrial Waste Heat and By-Products," *Korean Journal of Air -Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 259-268, (2017).
- [5] H. J. Kim and J. Ahn, "Dynamic Simulation of a Bio-Hydrogen Production System using Waste Heat and By-Products from Steel-Manufacturing Process," *Transaction of Korean Society of Mechanical Engineers B*, vol. 43, no. 5, pp. 371-378, (2019).
- [6] Y. G. Shin, "A Study on Diagnosing Fouling of Heat Exchangers of a Hybrid Heat Pump," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 26, no. 5, pp. 240-246, (2014).
- [7] Y. G. Lee, "A Study on Improvement of Cooling Performance in Heat Exchanger of Shell & Tube Type," *Graduate School of Gyeongsang National University*, (2009).