가스 인젝션을 적용한 전기자동차용 히트펌프의 난방성능 특성에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Heating Performance Characteristics of a Vapor Injection Heat Pump for Electric Vehicles

김동우(Dongwoo Kim)¹, 정종호(Jongho Jung)¹, 김용찬(Yongchan Kim)^{2*}

¹고려대학교 기계공학과 대학원, ²고려대학교 기계공학과

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

(Received January 16, 2014; revision received May 1, 2014; Accepted: May 8, 2014)

Abstract A heat pump has been considered as a thermal management unit for electric vehicles, including the heating and cooling of the cabin. However, the heat pump shows performance degradation at low outdoor temperatures or high compressor speeds. In this study, a R-134a heat pump for an electric vehicle was designed to improve system efficiency, by applying vapor injection with an internal heat exchanger. The heating performance characteristics of the vapor injection heat pump were analyzed at various compressor speeds and outdoor temperatures. The vapor injection heat pump showed 13.3% COP improvement over the non-injection heat pump, when the heating capacity was fixed at 5.2 kW. In addition, the heating capacity of the vapor injection system increased by 9.6%, as compared to the non-injection system.

Key words Heat pump(히트펌프), Vapor injection(가스 인젝션), Electric vehicle(전기자동차), Heating(난방)

† Corresponding author, E-mail: yongckim@korea.ac.kr

기호설명

COP : 성능계수
 P : 압력 [kPa]
 Q : 난방용량 [W]
 R : 압력비
 W : 압축기 일 [W]

하첨자

$comp$: 압축기
 $cond$: 응축기
 eva : 증발기
 inj : 인젝션

1. 서 론

국제 유가의 상승과 대기 오염에 대한 경각심으로 기존의 내연기관 자동차를 대체할 전기자동차의 연구가 매우 활발히 진행 중이다. 전기자동차는 대부분 난방은 증기압축사이클을 이용하고, 난방은 기존 내연기관 자동차에서 사용하던 엔진배열 대신 PTC(positive temper-

ature coefficient) 히터를 사용하고 있다. 하지만 전기자동차는 기존의 PTC 히터 방식 난방에 의한 과도한 배터리 소모로 주행 가능 거리가 현격히 감소하는 문제점을 지니고 있다. Choi et al.⁽¹⁾의 연구에 따르면 일반적인 전기자동차의 1회 충전 주행거리는 난방 운전 시 약 25%, 난방 운전 시 약 45% 감소한다. 즉, 전기자동차의 난방 시스템은 배터리 용량의 절반에 가까운 전기를 소비한다. 이에 대한 해결 방법으로 고효율 난방장치인 자동차용 히트펌프가 대안으로 떠오르고 있다.

히트펌프란 냉매의 증발열과 응축열을 이용하여 저온의 열원을 고온의 열원으로 이동시키는 장치로, 높은 효율 때문에 이를 전기자동차에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. Kim et al.⁽²⁾은 전기자동차용 히트펌프와 PTC 히터의 난방 특성을 비교하였고, Lee et al.⁽³⁾은 대형 차량용 히트펌프의 성능 특성, Choi et al.⁽¹⁾은 중·소형 차량용 히트펌프의 성능특성에 대한 연구를 수행하였다. Woo et al.⁽⁴⁾은 전기자동차 내부 부품에서 발생하는 폐열을 활용한 전기자동차용 히트펌프의 성능특성을 연구하였다.

히트펌프는 에너지 효율 측면에서 큰 강점을 보이

나 외기온도가 낮아질 경우 난방성능이 현저하게 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 자동차에는 진동에 인한 냉매 누설을 방지하기 위해 작동압력이 낮은 R-134a를 사용하기 때문에 이러한 문제가 특히 두드러진다. 따라서 R-134a 히트펌프가 잘 작동되려면 저온조건에서의 단점을 보완할 수 있는 기술의 개발이 요구된다.

히트펌프의 단점을 보완하기 위해 냉매를 압축기 혹은 기액분리기 등으로 분사(Injection, 이하 인젝션)하는 기술이 사용된다. 이를 통해 냉매유량을 증가시키고, 증발기 입/출구의 엔탈피 차이를 증가시킬 수 있다. 가스 인젝션 기술은 냉방 모드보다 난방 모드에서 더 큰 효과를 보인다.⁽⁵⁾ 인젝션 기술은 구성 요소의 관점에서 볼 때, 크게 기액분리기를 사용하는 인젝션과 중간열교환기를 사용하는 인젝션 기술로 나눌 수 있다.^(6,7) Heo et al.⁽⁸⁾은 기액분리기를 사용한 가스 인젝션 기술을 가정/산업용 히트펌프에 적용하는 연구를 수행하였고, Feng et al.⁽⁹⁾은 열교환기를 이용한 액 인젝션 기술을 적용하여 히트펌프의 성능을 향상시키는 연구를 수행하였다.

Roh et al.⁽¹⁰⁾과 Aikins et al.⁽¹¹⁾의 연구에 따르면 중간열교환기를 사용한 가스 인젝션 방식이 기액분리기 방식보다 인젝션측 압력 조절 가능 범위가 더 넓어, 외기온도가 매우 낮을 때 성능이 더 우수하다. 하지만

이러한 인젝션 기술들을 전기자동차용 R-134a 히트펌프에 적용하는 연구는 아직 미흡한 상태이다.

전기자동차에는 기존 내연기관 자동차에 사용되던 기계식 압축기가 사용될 수 없고, 엔진에서 발생하는 배기폐열도 활용할 수 없다. 따라서 구동 시스템과는 분리된 전동식 압축기를 사용해야 한다. 전동식 압축기의 사용은 시스템의 신뢰성을 높이고 온도조건에 대한 빠른 시스템 제어를 가능하게 한다.

본 연구에서는 중간열교환기를 사용한 가스 인젝션 시스템을 전기자동차용 R-134a 히트펌프에 적용하여 일반 히트펌프 대비 난방성능 향상 정도를 평가하였다. 또한 압축기 회전수 변화에 따른 성능 특성과 저온 외기조건에서의 시스템 성능 변화를 비교, 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 전기자동차용 가스 인젝션 히트펌프의 개략도를 나타내고 있다. 실험장치는 크게 증발기와 응축기, 전자팽창밸브, 가변속 스크롤(scroll) 압축기, 그리고 중간 열교환기로 구성하여 히트펌프의 난방성능을 평가할 수 있도록 하였다.

Fig. 1 Schematic of the vapor injection heat pump system with internal heat exchanger.

Table 1 System specification

Component	Specification
Compressor	Electric driven scroll compressor
	34 cc/rev
	Operating range : 30~150 Hz
Outdoor evaporator	Aluminum/copper fin/tube HX (670×400 mm)
	Number of tube : 42
	Number of port : 18
	Tube thickness : 2 mm
	Tube depth : 14 mm
	Tube length : 707 mm
	Tube pitch : 9 mm
Indoor condenser	Aluminum/copper fin/tube HX (230 × 220 mm) × 3 each
	Number of tube : 24
	Number of port : 8
	Tube thickness : 2 mm
	Tube depth : 14 mm
	Tube length : 270 mm
	Tube pitch : 9 mm
Expansion valve (Electric expansion valve)	Port size 1st : 1.4 mm 2nd : 1.6 mm
Internal heat exchanger	Double pipe heat exchanger (1 m)

Table 2 Uncertainties analysis

Variable	Uncertainties
Mass flow meter (Total mass flow)	0.20%
Mass flow meter (Injection mass flow)	0.20%
Thermocouple	0.15%
Pressure gage	0.13%
Heating capacity	2.83%
COP	3.01%

Table 1은 본 연구에서 사용한 시스템의 사양을 나타내고 있다. 가정/산업용 히트펌프와는 달리 전기자동차용 히트펌프는 탑승자와의 거리가 가까워 작은 실

내 토출온도의 변화가 쾌적함을 저해할 수 있으므로 시스템 안정성이 무엇보다 우선되어야 한다. 게다가 설치 공간이 제한되어 있기 때문에 효율적인 배치와 부품의 중량도 중요하게 고려되어야 한다. 실험장치에 사용된 스크롤 압축기는 왕복동식 압축기나 로타리식 압축기에 비해 토크 변동이 작고, 인접하는 압축공간의 차압이 작다. 또한 냉매의 압축이 연속적으로 이루어지는 안정성, 저진동, 저중량의 장점 때문에 차량용 공조시스템에 적합하다. 압축기는 전동식으로 운전하여 엔진의 운전과 상관없이 안정적인 난방이 가능하도록 하였다. 실외기 팬은 정격 220 V 60 Hz로 고정하여 운전하였다. 응축기와 증발기는 가벼우면서 열교환 효율이 높은 루버핀 형태의 알루미늄 핀튜브 열교환기를 사용하였다. 응축기는 좁은 차량 엔진룸 내부에서의 배치가 용이하도록 3개의 작은 열교환기를 적층하는 방식으로 설계하였다. 중간 압력 및 저압측 압력과 유량을 결정하는 전자팽창밸브는 각각 직경 1.4 mm, 1.6 mm를 사용하였으며, 수동버튼 조작으로 0~500 step 사이에서 개도의 조절이 가능하도록 설계 하였다.

가스 인젝션 히트펌프의 열역학적 성능 및 제어 특성을 측정하기 위해 데이터 수집 시스템, 전력계, RTD 온도센서, 압력계, 질량유량계를 사용하였다. 압력 측정은 3000 kPa급 압력계를 사용하였다. 시스템의 전체 냉매유량은 Oval 사의 0~300 kg/h 범위의 질량유량계(D012S-SS-200)를 사용하였고, 중간열교환기를 통과하는 인젝션 유량은 Micro Motion사의 0~110 kg/h급 질량유량계(CMF 025)를 사용하여 측정하였다. 두 유량계의 정밀도는 측정값의 $\pm 0.2\%$ 이고, 압력계는 $\pm 0.13\%$, 온도센서는 $\pm 0.15\%$ 이다. Table 2에 실험에 사용된 장치와 실험결과의 불확실도를 나타내었다.

2.2 실험방법

차량공조용 히트펌프의 최적 냉매충전량을 결정하기 위해 냉매충전량을 1300 g부터 1800 g까지 100 g씩 늘려 가면서 성능특성을 비교하였다. 냉매충전량 1500 g일 때 난방용량 및 성능계수(COP)가 가장 높은 값을 나타내어, 이를 최적 충전량으로 결정하여 실험을 수행하였다.

Table 3은 본 연구의 실험조건을 나타내고 있다. 가스 인젝션 시스템의 효율향상 정도를 규명하기 위해

Table 3 Operating conditions

Case	Operating temperature (°C)		Compressor speed (rpm)	1st EEV	2nd EEV
	Outdoor	Indoor			
1	7	20	3600, 4200, 4800, 5400	Adjust for injection superheat 3°C	Adjust for superheat 5°C
2	0, -5, -10, -15, -20	20	8000	Adjust for injection superheat 3°C	Adjust for superheat 5°C

인젝션 냉매유량 및 압축기 회전수, 외기온도를 각각 변화시키며, 이에 따른 시스템 특성 변화를 고찰하였다.

모든 실험에서 2nd EEV(증발기 유량제어)의 개도 조절을 통해 압축기 입구 과열도를 5℃로 고정하여 압축기 액냉매 유입을 방지하였고, 1st EEV(인젝션 유량제어)의 개도 조절을 통해 인젝션 냉매유량을 조절하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축기 회전수 변화에 따른 성능특성

인젝션 및 비인젝션 시스템에 대하여 2nd EEV 개도 조절을 통해 과열도를 5℃로 유지하고 1st EEV로 인젝션 과열도를 3℃로 유지하면서, 시스템의 성능특성을 측정하였다. 압축기 내부로 액냉매 유입을 방지하면서

Fig. 2 Variation of mass flow rate with compressor speed.

Fig. 3 Variations of compressor inlet/outlet and injection pressures with compressor speed.

인젝션에 의한 압축기 출구온도 감소 효과의 극대화를 위해 인젝션 과열도를 3℃로 설정하였다. 압축기 주파수를 3600 rpm부터 5400 rpm까지 600 rpm 씩 증가시키며 시스템 성능을 측정하였다. 각 주파수에서 EEV 개도는 1st EEV가 13.4~13.8%, 2nd EEV가 19.4~19.8%로 압축기 회전수 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 2는 압축기 회전수 변화에 따른 냉매유량의 변화를 나타낸 것이다. 압축기 회전수가 증가하면서 단위시간당 압축체적이 늘어나기 때문에 인젝션 시스템과 비인젝션 시스템 모두 냉매유량이 증가하였다. 또한, 인젝션 시스템의 냉매유량은 인젝션 효과로 인해 비인젝션 시스템에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 인젝션 시스템이 비인젝션 시스템에 비해 3600 rpm에서는 11.4%, 5400 rpm에서는 12.9% 더 높은 질량유량을 나타냈다.

Fig. 3은 압축기 회전수 변화에 따른 압축기 입/출구 및 인젝션 압력의 변화를 나타내고 있다. 압축기 회전수가 증가하면 시스템 냉매유량이 증가하므로 두 시스템 모두 증발기 압력은 감소하고 응축기 압력은 증가하는 경향을 보인다. 인젝션 시스템에서 인젝션 압력의 변화는 뚜렷하지 않았으며, 식(1)에서 정의한 인젝션 압력비 역시 큰 변화를 보이지 않았다. 식(1)의 압력비는 응축기 압력과 증발기 압력 차에 대한 인젝션 압력과 증발기 압력 차의 비율로 정의되며, 인젝션 압력의 정도를 나타내는 무차원 수이다.

$$R_{inj} = \frac{P_{inj} - P_{eva}}{P_{cond} - P_{eva}} \quad (1)$$

Heo⁽¹²⁾의 연구에 따르면 인젝션 시스템에서의 압력비는 압축기 회전수보다 인젝션 EEV 개도 혹은 외기온도에 영향을 많이 받는다. 본 실험에서 압축기 회전수의 변화에 따라 인젝션 EEV의 개도는 큰 차이가 없었고, 외기온도 또한 고정되어 있으므로 이러한 결과를 뒷받침 한다. 인젝션 시스템의 압축기 출구 압력은 인젝션에 의한 유량의 증가 때문에 비인젝션 시스템에 비해 2.6~5.5% 높게 나타났다. 인젝션 시스템의 압축기 입구 압력은 비인젝션 시스템에 비해 0.9~1.2% 낮게 나타났다. 두 시스템간의 압축기 입구 압력차이는 상대적으로 매우 적었는데, 이는 증발기를 통과하는 두 시스템의 냉매유량이 큰 차이가 없기 때문이다.

Fig. 4는 압축기 회전수 변화에 따른 난방용량, 압축기 소요동력, COP의 변화를 나타낸다. COP는 난방용량을 압축기 소요 동력으로 나눈 값으로, 식(2)와 같이 정의한다.

$$COP = \frac{Q_{cond}}{W_{comp}} \quad (2)$$

압축기 회전수가 증가하면 두 시스템의 냉매 유량이 모두 증가하기 때문에 난방용량과 압축기 소요 동력이 모두 증가하는 경향을 보인다. 하지만 난방용량의 증가량에 비해 압축기 소요 동력의 증가량이 상대

Fig. 4 Variations of heating capacity, compressor work, and COP with compressor speed.

Fig. 5 Comparison of the injection cycle with the non-injection cycle at the heating capacity of 5.2 kW.

Fig. 6 Variation of mass flow rate with outdoor temperature.

적으로 더 크기 때문에 COP는 감소한다. 압축기 소요 동력은 인젝션 시스템이 비인젝션 시스템에 비해 3600 rpm에서 7.4%, 5400 rpm에서 12.6% 더 높다. 또한, 압축기 회전수가 3600 rpm에서 5400 rpm으로 증가할 경우, 인젝션에 의한 난방용량 상승효과는 7.2%에서 9.6%로 증가하였다. 압축기 회전수가 증가하면 인젝션 유량이 증가하므로 난방용량의 향상효과는 높은 회전수 조건에서 더 크게 나타난다.

인젝션 시스템과 비인젝션 시스템이 동일 난방용량 (5.2 kW)을 가질 때의 두 시스템의 성능특성 차이를 Fig. 5에 나타내었다. 인젝션 시스템을 비인젝션과 비교할 때, 압축기 회전수는 19.4% 감소하고, COP는 13.3% 증가하였다. 이는 인젝션으로 인한 냉매유량의 증가에 기인한다. 또한 압축기 출구의 온도는 인젝션 시스템에서 85.4°C, 비인젝션 시스템에서 93.5°C를 나타냈다. 인젝션 시스템이 약 8.1°C 낮은 압축기 출구온도를 나타내어 시스템 신뢰도가 향상되었음을 확인할 수 있다.

3.2 외기온도 변화에 따른 성능특성

최대의 난방용량을 확보하기위해 인젝션 EEV 개도를 조절하여 인젝션 과열도를 최소화 하였다. 외기온도를 0°C에서 -20°C까지 5°C씩 감소시킬 때, 압축기 주파수는 최대 8000 rpm까지 운전하여 최대의 난방용량을 측정하였다.

Fig. 6은 외기온도에 따른 냉매유량의 변화를 나타낸 것이다. 외기온도가 낮아지면 압축기 흡입부 냉매의 밀도가 감소하기 때문에 총 냉매유량이 감소하게 된다. 하지만 인젝션 시스템은 가스 인젝션 효과로 비인젝션 시스템보다 응축기를 통과하는 유량이 높다. 따라서 더 큰 난방용량을 기대할 수 있다.

Fig. 7은 외기온도 변화에 따른 압축기 입/출구 및 인젝션 압력의 변화를 나타내고 있다. 외기온도가 감소하면 두 시스템의 압축기 입구와 출구, 인젝션 압력이 모두 감소하는 경향을 보인다. 외기온도가 감소하면 시스템 내의 전체 질량유량이 감소하고 증발기/응축기 압력이 모두 감소하기 때문이다. 또한 인젝션으로 인한 냉매유량 증가 효과로 인젝션 시스템이 비인젝션 시스템에 비해 응축기 압력 및 압축기 출구 압력이 더 높게 나타났다. 인젝션 압력은 압축기 입/출구 압력이 모두 감소하기 때문에 외기온도 감소에 따라 점차 감소하는 경향을 보인다. 인젝션 시스템의 압축기 출구 압력은 인젝션에 의한 유량의 증가 때문에 비인젝션 시스템에 비해 0°C에서 3.2%, -20°C에서 2.8% 높다. 인젝션 시스템의 압축기 입구 압력은 비인젝션 시스템에 비해 0°C에서 0.2%, -20°C에서 0.5% 낮은, 서로 근사한 압력을 보였는데 두 시스템의 증발기를 통

Fig. 7 Variations of compressor inlet/outlet and injection pressures with outdoor temperature.

Fig. 8 Variations of heating capacity, compressor work, and COP with outdoor temperature.

과하는 냉매유량의 차이가 적기 때문이다.

Fig. 8은 외기온도 변화에 따른 압축기 소요동력, 난방용량 및 COP의 변화를 나타낸 것이다. 외기온도가 감소하면 압축기 흡입부 압력이 낮아져 냉매의 밀도가 감소하게 된다. 냉매 밀도의 감소로 압축기 입구 냉매유량이 감소하여 난방 용량이 현저히 줄어들게 된다. R-134a는 다른 냉매에 비해 저압에서 밀도가 낮은 경향을 보이는데, 인젝션 시스템은 감소된 냉매유량을 보완하여 난방 용량을 증가시키는 역할을 한다. 인젝션 시스템의 난방 용량은 비인젝션 시스템에 비해 외기온도 0℃에서 6.8%, -20℃에서 8.1% 향상되었다. 즉 인젝션 시스템은 보다 저온의 외기조건에서 강점을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 압축기 소요동력은 외기온도 0℃와 -20℃에서 각각 6.9%, 6.7% 증가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 R-134a를 사용하는 전기자동차용 히트펌프를 제작하고, 중간열교환기를 적용한 인젝션과 비인젝션 시스템의 성능특성 변화를 비교 및 고찰하였다.

(1) 중간열교환기를 통한 가스 인젝션으로 인해 압축기 출구 냉매 온도가 감소하여 시스템 안정성이 확보되었으며, 냉매유량의 증가로 전체적인 성능이 향상되었다. 표준 외기조건인 건구온도 7℃에서 5.2 kW 난방용량을 목표로 할 때 COP는 인젝션 시스템이 비인젝션 시스템에 비하여 13.3% 향상되었다.

(2) 외기온도가 감소하면 압축기 입구 냉매밀도의 감소로 전체 냉매유량이 줄어들어 난방용량 및 성능이 저하된다. 하지만 가스 인젝션으로 인해 각 외기온도에서 난방용량은 0℃에서 6.8%, -20℃에서 8.1% 상승하였다.

(3) 중간열교환기에 의한 가스 인젝션은 높은 압축기 회전수, 저온 외기조건에서 더욱 큰 난방용량 증가 효과를 보이므로 전기자동차 난방에서의 성능 저하 문제를 해소하는 데에 기여할 수 있다.

후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20124010203250).

References

1. Choi, Y. C., Lee, W. S., Park, M. H., and Choi, Y. H., 2011, Heating performance evaluations for development of heat pump system on battery electric vehicle, Proceedings of the KSAE 2011 Autumn Annual Conference, Vol. 11, pp. 559-563.
2. Kim, K. Y., Kim, S. C., and Kim, M. S., 2012, Experimental studies on the heating performance of the PTC heater and heat pump combined system in fuel cells and electric vehicles, International Journal of Automotive Technology, Vol. 13, No. 6, pp. 971-977.
3. Lee, D. Y., Cho, C. W., Won, J. P., Park, Y. C., and Lee, M. Y., 2013, Performance characteristics of mobile heat pump for a large passenger electric vehicle, Applied Thermal Engineering, Vol. 50, No. 1, pp. 660-669.
4. Woo, H. S., Ahn, J. H., Oh, M. S., Kang, H., and Kim, Y. C., 2013, Study on the heating performance characteristics of a heat pump system utilizing air and

- waste heat source for electric vehicles, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 180-186.
5. Xu, X., Hwang, Y. H., and Radermacher, R., 2011, Refrigerant injection for heat pumping/air conditioning systems: Literature review and challenges discussions, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, No. 2, pp. 402-415.
 6. Heo, J. H., Jeong, M. W., Baek, C. H., and Kim, Y. C., 2011, Comparison of the heating performance of air-source heat pumps using various types of refrigerant injection, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, No. 2, pp. 444-453.
 7. Kim, M. S. and Kim, M. S., 2013, A study of the comparison between vapor injection heat pump systems using a sub-cooler and a flash tank in the performance improvement potential for electric vehicle heating, *Proceedings of the KSAE 2013 Spring Annual Conference*, Vol. 2013, No. 5, pp. 682-682.
 8. Heo, J. H., Kang, H., and Kim, Y. C., 2012, Optimum cycle control of a two-stage injection heat pump with a double expansion sub-cooler, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, No. 1, pp. 58-67.
 9. Feng, C., Jiyou, F., Ziwen, X., and Liansheng, L., 2009, Study on performance of a heat pump water heater using suction stream liquid injection, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 14-15, pp. 2942-2948.
 10. Roh, C. W., Yoo, J. W., and Kim, M. S., 2014, Vapor refrigerant injection techniques for heat pump systems: the latest literature review and discussion, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 22, No. 1, pp. 1430002-1-1430002-9.
 11. Aikins, K. A., Lee, S. H., and Choi, J. M., 2013, Technology review of two-stage vapor compression heat pump system, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 21, No. 3, pp. 1330002-1-1330002-14.
 12. Heo, J. H., 2010, The heating performance improvement of two-stage heat pumps with the vapor injection technique, Ph.D. thesis, Korea University, Seoul, Korea.