한국마린엔지니어링학회지 제32권 제8호, pp. 1157~1163, 2008. 11 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

선박 냉각시스템에서의 전기 에너지 절감 시스템에 관한 연구

김연형* · 배수영* · 정성영* · 오진석†

(원고접수일 : 2008년 11월 3일, 원고수정일 : 2008년 11월 20일, 심사완료일 : 2008년 11월 27일)

Study on the Electric Energy Saving System in Marine Cooling System

Yun-Hyung Kim* · Soo-Young Bae* · Sung-Young Jung* · Jin-Seok Oh†

Abstract : Fuel represents a significant portion of the operating costs of voyages of the vessel. Under this situation, dramatic increase in fuel price caused a problem that earnings of ship becomes decreased seriously. Pumps in a cooling system of the vessel are often operated inefficiently. The reasons will vary from process to process and application to application. Inefficiency of pumps is one of the reason for making the cost of operating the vessel increased. This paper suggests energy-effective cooling system that controls sea water pumps with inverters to reduce energy consumption in vessel by conducting simulation with LabVIEW. Results shows that electric energy consumption of pumps are significantly deceased. If this energy-effective cooling system is applied to other systems which need cooling, it could be useful in reducing electric energy wastage.

Key words : Fuel(연료), Sea water pump(해수펌프), Energy wastage(에너지 낭비)

기호설명

A : 열교환기 열교환 면적 (m^2)
L : 축동력 (kW)
N : 회전속도 (RPM)
NTU : 열전달 단위 수
Q : 유량 (m^3/h)
q : 열유동율 (kcal)
T_{mean} : 대수평균 온도차(℃)
T_h : 열교환기 고온유체의 온도
T_c : 열교환기 저온유체의 온도
U : 총합 열전달 계수 (kcal/h· m^2·℃)
ε : 열교환기 유용도

1. 서 론

최근 국내외의 전반적인 산업분야에 있어서 에너지 절감의 중요성이 강조되고 있다. 조선업계에서도 에너지 절감을 위한 탑재 시스템들의 고효율화가 진행되고 있다. 특히 최근의 국제 유가 급등에 따른 선박의 운항비가 증가함에 따라 선박에서의 운항효율 향상 및 에너지 절감의 필요성이 더욱 대

† 교신저자(한국해양대학교 선박전자기계 교수), E-mail: ojs@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4283
* 한국해양대학교 메카트로닉스 공학부

두되고 있다. 현재 주기관 시스템의 효율 향상은 한계에 도달한 상태이지만, 보기 시스템의 에너지 효율 향상을 통하여 선박에서의 에너지 절감효과를 노려볼 수 있다.

선박의 각종 설비에 사용되고 있는 펌프는 요구 사양에 맞도록 설비하여야 한다. 하지만 실제로는 배관 설비의 관로 손실 또는 장래의 송수량 증대 등의 이유로 인하여 필요로 하는 양정 유량보다 큰 성능을 가지는 펌프를 설치하여 사용하는 경우가 대부분이다. 각종 설비에 사용되는 펌프의 소비전력은 상당히 크므로 전력 절감을 위하여 이들 펌프 및 시스템운전의 효율 향상이 무엇보다도 중요하다.

선박의 냉각 시스템은 해수를 이용하여 청수를 냉각하고 이 냉각된 청수로 전체의 기관 시스템을 냉각하는 2차 냉각 방식을 주로 채택하고 있다. 이러한 방식에서, 해수 펌프는 전체 냉각시스템에서 소모하는 전력량의 상당한 부분을 차지하게 된다. 만약 기관에서 발생하는 열량이 감소하여 냉각에 필요한 해수 유량이 감소하게 되더라도 냉각용 해수펌프는 정격 회전수로 운전되므로 소모되는 전력량은 변화하지 않는다. 따라서 이 등[1]은 선박 냉각시스템의 구성요소인 냉각용 해수 펌프의 회전수를 기관에서 발생하는 열량에 따라 조절하여 선박의 전기 에너지를 절감하는 시스템에 관하여 연구하였다. 하지만 냉각용 해수펌프의 회전수 조절을 위한 제어 기법이 도입되지 않았으며 이에 따라 청수 온도 제어가 원활하지 못했던 문제점을 가지고 있었다. 따라서 본 논문에서는 냉각용 해수펌프의 제어를 위해 일반 산업현장에서 흔히 사용되는 PID 제어기법을 도입하였으며, 실제 냉각 시스템에 적용하기에 앞서 컴퓨터 기반의 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 선박의 냉각 시스템을 수학적으로 모델링하고 제어의 안정성 및 에너지 절감을 확인하였다.

2. 에너지 절감형 냉각시스템의 특징

2.1 기존의 선박 냉각 시스템

일반적으로 선박은 Fig.1과 같은 냉각 시스템을 사용하고 있다. 좌측에는 냉각용 해수펌프를 보여주며 중앙에는 열교환기 우측에는 냉각 부하를 보여주고 있다. 2차 냉각수인 청수는 선내 각종 기기의 안전, 효율을 위해 일정 온도를 유지하여 한다. 이를 위해 냉각기에 우회관을 설치하고, 냉각기에서 냉각된 청수와 냉각되지 않은 청수를 적절하게 혼합하여 사용하며, 청수 온도용 제어기로는 산업현장에서 흔히 사용하는 PID제어기가 사용되고 있다[1].

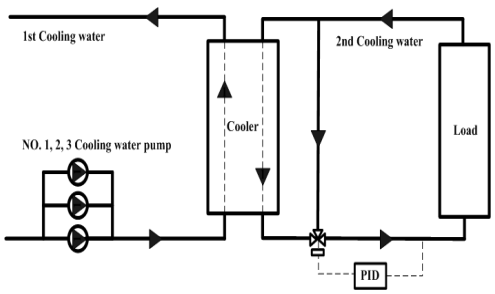


Fig. 1 Water cooling system in vessels

2.2 에너지 절감형 냉각 시스템

에너지 절감형 냉각 시스템은 선박에 설치된 냉각용 해수 펌프의 회전수를 조절함으로서 선내의 전력소비를 절감하게 된다. Fig.2는 에너지 절감형 냉각 시스템의 구성도이고, 각종 온도 및 압력 데이터를 계측하기 위한 센서, 냉각용 해수 펌프를 제어하기 위한 인버터, 수집된 데이터를 바탕으로 냉각용 해수펌프를 제어하기 위한 중앙 제어기로 이루어져 있다.

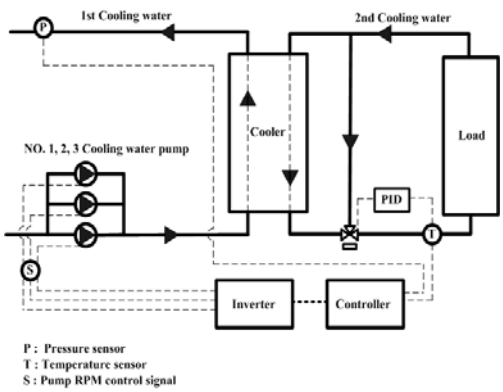


Fig. 2 Energy-effective water cooling system

기존의 냉각 시스템은 선내의 청수 온도 제어를 위하여 Fig.2의 우측의 3-way 밸브만을 PID제어기로 제어하지만 본 논문에서 제안하는 에너지 절감형 시스템은 3-way 밸브뿐만 아니라 Fig.2의 좌측에 위치한 냉각용 해수펌프의 회전수도 함께 제어함으로써 선내의 청수 온도를 일정하게 유지하며, 동시에 펌프 동력감소에 따른 에너지 절감을 이루어 내게 된다.

3. 시뮬레이션 냉각시스템 구현

3.1 펌프소모 동력에 관한 이론적 배경

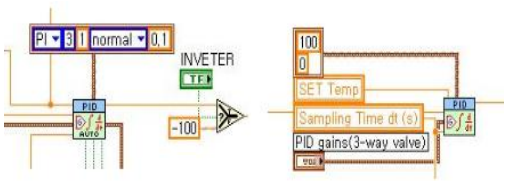
펌프의 회전속도를 N_0에서 N_1으로 변화시킨 경우의 유량(Q), 동력(L)은 다음의 상사법칙을 통하여 알 수 있다.[2]

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{N_1}{N_0} \tag{1}$$

$$\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{N_1}{N_0}\right)^3 \tag{2}$$

수식 (1), (2)를 통하여 냉각용 해수펌프의 회전수 조절에 따른 소모 동력 변화를 예측할 수 있다.

3.2 인버터 & 3-way 밸브



(a) Block diagram of PID control

PID gains(Inverter)		PID gains(3-way valve)	
proportional gain (Kc)	59.313	proportional gain (Kc)	20.000
integral time (Ti, min)	0.026	integral time (Ti, min)	0.008
derivative time (Td, min)	0.000	derivative time (Td, min)	0.000

(b) PID control gain setting

Fig. 3 Block diagram of PID control and settings

인버터와 3-way 밸브에는 모두 산업현장에서 주로 쓰이는 PID 제어 기법을 적용하였다. 적용된 수식은 수식(3)과 같다. Fig. 3(a)의 왼쪽에는 인버터, 오른쪽에는 3-way 밸브에 PID제어기법을 LabVIEW 로 구현하였으며, Fig. 3(b)에서 PID 제어기의 이득값을 설정할 수 있도록 하였다[3].

$$G_c(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i(s)} + T_d(s)\right) \tag{3}$$

3.3 열교환기

열교환기 해석에는 식 (4)이 주로 사용된다. 수식 (4)은 적절한 평균온도를 계산하는 데 필요한 모든 출입구 온도를 파악할 때 편리하며, 주어진 사양에 따라 열교환기를 설계할 때 널리 사용된다. 그렇지만 열교환기를 실제 운전할 경우에 열교환기에 흘려보내는 유체의 유량은 시험을 실시할 때와 크게 다르게 된다. 따라서 출구온도와 열유동율은 대수 평균 온도차의 기법을 적용한 시행착오를 통하여 찾을 수 있다[4].

$$q = UA\triangle T_{mean} \tag{4}$$

열교환기의 총합열전달계수(U)를 알고 있는 경우 또는 총합 열전달계수를 산정할 수 있는 경우에도 열교환기를 통해 유출되는 유체의 온도를 정확히 모르는 경우가 많이 있다. 열교환기를 나가는 유체의 온도는, 열교환기를 선정하고 열교환기에 일정한 유량을 흘려보낼 때 열교환기의 성능 시험을 통해 알 수 있다. 따라서 열교환기의 성능을 시뮬레이션 하기 위해서 ε-NTU (Effectiveness-Number of Transfer Unit)방법을 사용하였다. ε-NTU 기법을 사용하면 열교환기에 흐르는 유체의 유량과 열교환기의 입구온도를 알고 있을 때 출구 온도를 계산할 수 있다.

Fig.4는 대향류 열교환기에 관한 ε-NTU 곡선으로서 NTU값과 열용량비($C_{\min}/C_{\max}$)를 알면 유용도(ε)를 알 수 있다. 유용도는 실제 열전달율을 단지 열역학 제 2법칙에 의해서만 제한 받는 최대 열전달율과 비교한 값을 말한다. 유용도를 알게

되면 식 (5)를 통해 열교환기 출구 온도를 알 수 있다[5],[6].

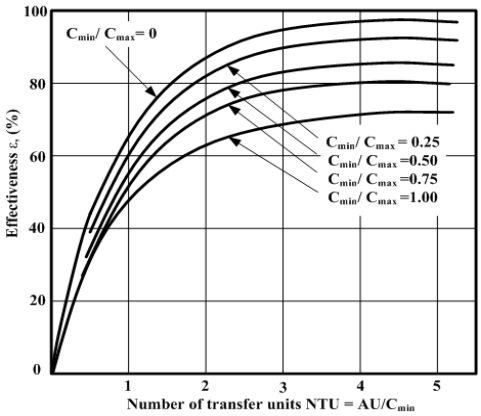


Fig. 4 ε-NTU curve

$$\varepsilon C_{\min}(T_{hin} - T_{cin}) = C_h(T_{hin} - T_{hout}) = C_c(T_{cout} - T_{cin}) \quad (5)$$

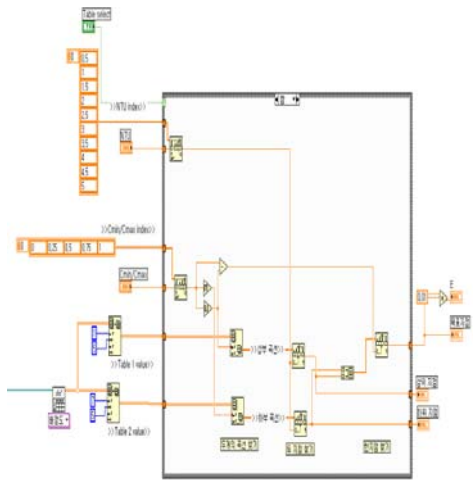


Fig. 5 Block diagram of ε-NTU curve

Fig.5는 언급된 수식과 표를 바탕으로 하여 LabVIEW로 작성된 프로그램 블록선도이다. Table 1은 시뮬레이션 프로그램에 적용된 냉각기의 구체적인 사양으로서 대향류 열교환기를 채택하였다.

Table 1 Specification of heat exchanger

Description		Hot side	Cold side
Flowrate	m^3/h	300.00	360.00
Specific gravity		1.000	1.025
Specific heat	kcal/kg·h·℃	1.000	0.940
Design of frame/plates			
Overall K-value(U)	kcal/h·m^2·℃	5,631	
Effective heat surface(A)	m^2	134.00	183

3.4 운영 알고리즘

선박의 냉각용 해수펌프의 회전수를 조절하는 것을 기초로 하는 에너지 절감형 냉각 시스템은 해상이라는 특수한 환경에 때문에 시스템을 구현하는데 많은 주의가 필요하다. 따라서 에너지 절감형 냉각 시스템의 제어기는 선내의 안전을 우선으로 하여 알고리즘이 내장되어야할 것이다.

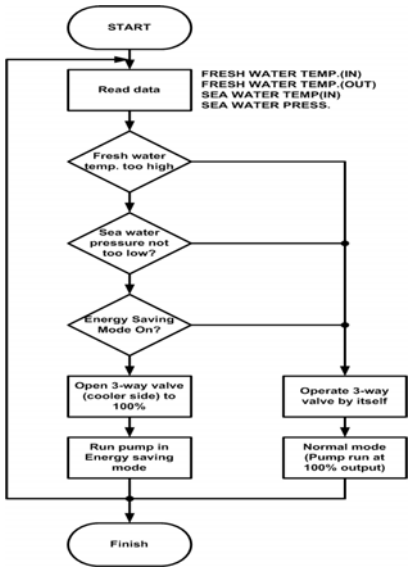


Fig. 6 Flow chart of operation algorithm

Fig. 6은 운영 알고리즘에 관한 순서도이다. 에너지 절감형 냉각 시스템은 우선 수집된 데이터를 바탕으로 하여 제어대상인 청수 온도가 상위 제한치 이상 여부를 판단하고, 그 후 제어를 하고 있는

펌프의 압력이 하한치 이하 여부를 판단한다. 청수 온도가 상한치 이상이거나 혹은 펌프의 압력이 하한치 이하인 경우, 에너지 절감형 냉각 시스템이 정상적으로 청수 온도를 제어하지 못한다고 판단한다. 그 후 펌프의 회전수를 최대로 조절하여 청수 온도를 낮추고 해수펌프의 압력을 높이게 된다. 앞에서 제시한 두 가지의 선행 조건을 만족한다면 에너지 절감형 냉각시스템은 정상 작동을 하게 된다.

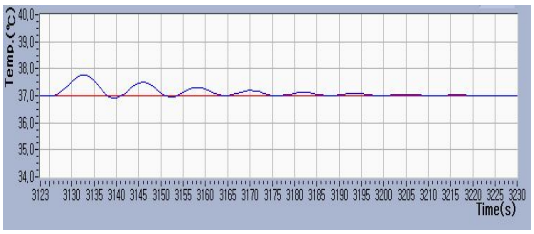


Fig. 7 Fresh water temperature with load variation

Fig. 7은 알고리즘을 적용하여 냉각 부하를 800 kcal/h에서 200 kcal/h로 변화시켰을 때 청수 온도가 37℃로 추종하는 것을 보여 주고 있다.

3.5 시뮬레이션 화면 구성

에너지 절감형 냉각 시스템을 시뮬레이션 하기 위하여 기존의 냉각 시스템을 모델링 하였고 여기에 에너지 절감형 냉각 시스템을 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 프로그램의 화면은 Fig.2 을 바탕으로 하여 구현하였다. 좌측부터 인버터, 냉각용 해수 펌프, 냉각기, 3-way 밸브를 시각적으로 확인 할 수 있다.

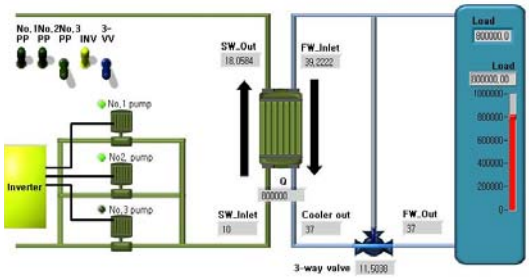


Fig. 8 Front panel of simulation program

선박의 냉각 시스템에서 요구하는 청수 온도 약 37℃를 설정온도로 입력하게 되면 이에 따른 온도 변화를 즉각적으로 확인할 수 있으며, 선박의 냉각 부하 역시 임의로 변화시킴으로서 시스템 상태를 실시간으로 확인할 수 있다.

4. 시뮬레이션 실험 및 고찰

기존 선박의 냉각 시스템과 비교하기 위해 해수 온도는 29℃, 냉각 부하는 500 kcal/h로 유지하였다. Fig. 9의 좌측은 기존의 냉각 시스템으로서 펌프는 정격 회전수를 유지한 채 운전되고 있으며 이에 따라 200 m^3/h 의 유량이 일정하게 냉각기에 공급되고 있다. 3-way 밸브는 2차 냉각수인 청수 온도를 설정치 37℃로 유지하게 위하여 냉각기 방향으로 41.1%가 열려있는 상태를 유지하였다. 반면에 Fig. 9의 우측의 에너지 절감형 냉각시스템의 경우 설정치의 청수 온도를 유지하기 위하여 144 m^3/h의 유량만이 필요한 것을 확인하였다. 이를 상사법칙에 관한 수식 (1),(2)에 대입하면 동력(L)은 기존의 선박 냉각시스템의 해수펌프 전력 소모량 대비 37%만의 동력으로 운전할 수 있다.

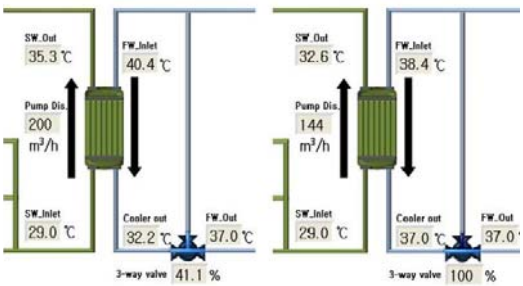


Fig. 9 Difference of sea water discharge quantity

냉각 시스템의 1차 냉각수인 해수는 계절, 운항 해역에 따라 변화한다. 해수온도가 감소하게 되면 냉각에 필요한 해수 유량이 감소하게 된다. 따라서 해수 온도의 변화에 따른 에너지 절감형 냉각 시스템의 특성 변화를 시뮬레이션 하여 Fig. 10으로 나타내었다.

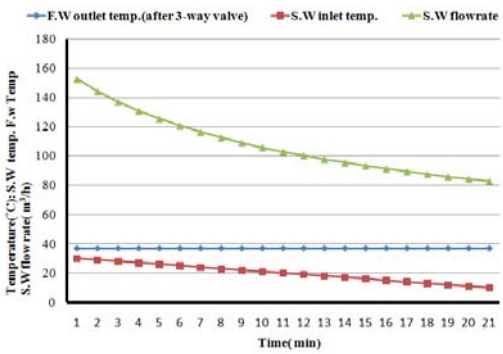


Fig. 10 Decreasing of sea water quantity

해수 온도를 30℃에서 10℃까지 변화 시키면서 해수유량, 3-way 밸브 이후의 청수온도를 관찰 하였다. 해수 유량이 152m^3/h에서 82m^3/h까지 변화하는 것을 확인할 수 있었으며 더불어 해수 온도가 변화하여도 3-way 밸브 이후의 청수 온도가 일정하게 유지 되는 것을 확인 할 수 있었다. 수식 (1),(2)를 위의 결과에 적용 시켜보면, 냉각용 해수펌프가 정격으로 운전되어 200 m^3/h로 해수가 공급 되고 있을 때의 동력에 비하여 6.8%의 동력으로 도 2차 냉각수인 청수를 설정 온도로 유지 할 수 있다. 하지만 에너지 절감을 위하여 펌프의 회전수를 무리하게 낮춘다면 펌프의 효율, 기계적 마찰 또는 발열 등의 이유로 오히려 펌프의 손상을 가져 올 것이다. 또한 냉각용 해수펌프의 토출압력 저하로 인하여 냉각수가 원활하게 흐르지 못하는 경우가 있다. 따라서 선박 운항의 안전을 위하여 냉각용 해수 펌프의 토출압력 하한치는 선박의 특성에 따라 조절 하여 무리하게 펌프의 회전수를 감소시키지 말아야 할 것이다.

5. 결 론

선박의 에너지 절감 방안으로서 냉각시스템의 효율을 높일 수 있는 방안에 관하여 시뮬레이션 해보았다. 에너지 절감형 냉각 시스템은 선박의 냉각용 해수 펌프의 회전수를 조절하는 것을 기본으로 하여 펌프의 동력 소모를 최소화 할 수 있도록 하였다. 기존 선박의 냉각 시스템과 본 논문에서 제안한 에너지 절감형 냉각 시스템을 비교하여 시뮬레이션 결과를 제시하였으며, 또한 해수온도 감소에 따른 동력 절감을 예측할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 냉각 시스템이 비단 선박의 에너지 절감뿐만 아니라 기타 냉각 시스템을 필요로 하는 산업시설물에 적용된다면 동일한 효과를 가져 올 것이라 생각 된다. 또한 에너지 절감형 냉각 시스템에 관한 연구를 더욱 진행시켜 육상실험, 해상실험을 실시한다면 더욱 효과적인 실험과 검증이 이루어 질 것이라 생각된다.

후 기

수중운동체기술 특화연구센터의 지원으로 수행됨

참고문헌

[1] 이지영, 유희한, 김연형, 오진석,“선박용 중앙냉각시스템의 해수 펌프 용량조절에 따른 에너지 절감 기법에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 제5호, 2007.

[2] 효성펌프편람, 효성EBARA주식회사, 정문출판사, pp.47-64, 1996.

[3] Rongfu Luo, S. Joe Qin and Dapang Chen, "A New Approach to Closed Loop Autotuning for PID Controllers", Proceedings of the American Control Conference, pp.348-351, 1998.

[4] Browman, R.A.C. Mueller, and W.M. Nagle, "Mean Temperature Difference in Design", Trans. ASME62, pp.234-294, 1940.

[5] Gardner, K.A. "Variable Heat Transfer Rate Correction in Multipass Exchangers, Shell-Side Film Controlling", ASME67, pp.31-38, 1945.

[6] H. A. Navarro, “Effectivness-NTU Computation with a Mathematical Model for Cross-flow Heat Exchangers", Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 24, No. 04, pp.509-521, 2007.

저 자 소 개

오진석(吳珍錫)

1960년 3월생. 한국해양대 졸업.공학박사 영국ZODIAC 선박회사 엔지니어. 1989년~1992년 국방과학연구소 연구원. 1992년~1996년 양산대 전임강사, 조교수, 학과장. 1996년~현재 한국해양대 전임강사, 조교수, 부교수, 교수

김연형(金淵亨)

1979년생, 2003년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 2003년~2004년 KSS해운 근무, 2004년~2006년 범진해운 근무, 2006년~현재 한국해양대학교 메카트로닉스 공학부 석사과정

배수영(裵修英)

1984년 4월생. 2008년 한국해양대학교 선박전자기계공학부 전기전자 전공(공학사), 현재 동 대학원 석사과정

정성영(鄭星泳)

1985년 4월생. 2008년 한국해양대학교 선박전자기계공학부 제어시스템 전공(공학사), 현재 동 대학원 석사과정