

LNG 플랜트 냉매압축기 개발기술 현황

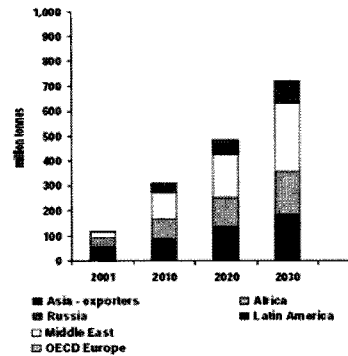
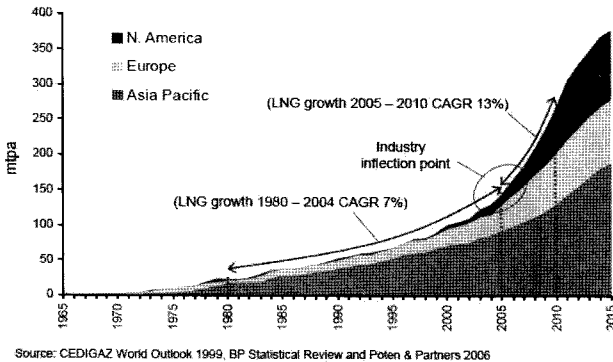
■ 이 현 석 / 한국터보기계(주), hslee@kturbo.com

천연가스 수요동향

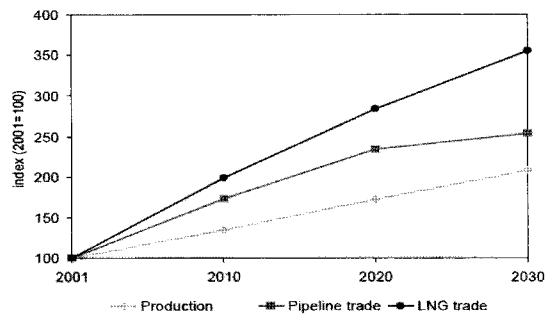
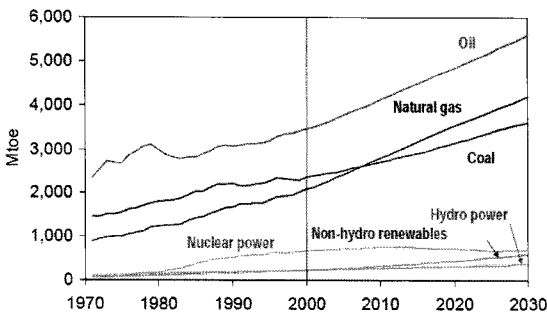
천연가스(Natural gas) 중 메탄(Methane)만을 분리하여 약 -160°C 이하로 냉각하여 액화시킨 액화천연가스(Liquefied Natural Gas : LNG)는 무색, 무취, 무독성이며, 이산화탄소 배출량이 적기 때문에 청정연료에 대한 요구와 맞물려 전세계적으로 수요가 증가하고 있는 상황이다. 그림 1은 에너지원의 소비량 증가와 LNG 액화플랜트의 수요증가에 대한 예측을 나타낸 것이다. 러시아, 중동, 아프

리카를 중심으로 LNG의 생산량 크게 증가하고 있으며, 이와 비례하여 전세계적으로 소비량이 증가하고 있는 추세이다.

전통적인 LNG 주요 수입국인 한국, 일본 뿐 아니라 미국과 중국 등의 기존 석유 산유국의 LNG 소비 증가가 뚜렷한 상황이다. 국내의 LNG 수입량은 1986년 처음 도입한 이래, 2007년 약 2,500 만톤에 이르며, 미국의 경우에도 2002년에 228 BCF (Billion Cubic Feet)였던 것이 2010년에는 2.2TCF (Trillion Cubic Feet)까지 약 10배 가량 증가될 것



a) 연도별 LNG 소비량 및 생산량 추이



b) 에너지원의 연도별 에너지소비량과 생산량 증가 예측

[그림 1] LNG 생산량과 액화플랜트 수요 증가 예측

으로 예측된다. 중국에서도 LNG는 값싼 석탄, 파이프 라인 가스와의 가격 경쟁을 하고 있으며, 2006년 9월부터 광동성 LNG 기지가 완공되었으며 이어 복건성, 상하이 등에 기지가 완공될 예정이며 2010년까지 약 7,500만톤의 수요가 있을 것으로 예상된다. 이러한 LNG의 수요 증가에 따라 LNG 플랜트 사업이 고부가가치의 유망 산업으로 각광 받고 있으나 미국, 유럽, 일본 등의 일부 국가군에서 관련 산업 분야를 독점하고 있는 상황이다.

LNG 액화공정

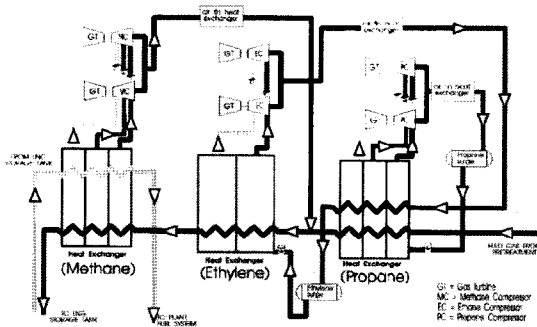
천연가스는 임계온도가 약 -82℃로 낮기 때문에 일반적인 산업용 냉매 냉동기나 흡수식 냉동기는 액화가 힘들고 LNG 플랜트의 액화기술은 1970년대 전반까지 확립되어 왔다. 표 1에서 요약한 바와 같이 5개의 기술이 개발 되었으나, APCI사의 기술이 주로 적용되고 있다. 주요 액화공정의 특징

은 다음과 같다. C3MR 기술을 보유하고 있는 기업은 APCI사이고, 현재 세계 시장의 60% 이상을 점유하고 있다. 공칭생산량은 4.7 MTPA(Million Tonnes Per Annum)이나 최근에 질소(N₂) 팽창기를 추가한 AP-X 개량공정이 개발되어 6 MTPA 이상도 가능해졌다. Conoco Philips사는 Cascade 방식을 이용한 액화공정을 개발하여 초기 LNG 플랜트에 적용되었으나, CoP LNGSM 개량공정이 개발되어 에너지 소모가 적은 것으로 평가되어 트리니다드 및 이집트 LNG 플랜트 등 시장점유율을 증가시키고 있다. MFCP 액화기술은 statoil linde가 보유한 기술로 mixed refrigerant와 Cascade 공정이 결합된 기술이다. 공칭생산량은 4 MTPA 이상이며 최근 노르웨이 Snohvit LNG 플랜트에 처음 적용되었다.

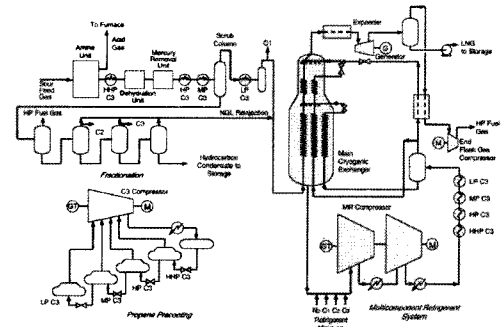
일반적으로 천연가스 액화공정은 그림 2에서와 같이 다단냉동법(cascade cycle)이나 혼합냉매법(mixed refrigerant cycle)을 통해 액화한다. 1960

<표 1> LNG 플랜트 액화기술 보유현황

기술보유사	기술명	현황
APCI	Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant Process(C3MR)	세계시장 최대점유
Conoco Philips	Pure Refrigerant Cascade Process	Bechtel 독점계약 트리니다드, 이집트에 적용
Shell	Dual Mixed Refrigerant Technology(DMR)	사할린, 오만에 적용
Statoil Linde	Mixed Fluid Cascade Process(MFCP)	노르웨이에 적용
IFP Axens	Liquefin Process	이란에 적용 예정



a) Cascade cycle



b) Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant Cycle(C3MR)

[그림 2] 대표적인 LNG 액화 공정



년대 초, 최초의 플랜트가 건설된 이래로 LNG 플랜트 산업은 지속적인 가격 경쟁력 확보를 위해 생산 플랜트의 규모 확대를 목표로 발전해 왔다. 초기 LNG 플랜트의 트레인 당 0.5 MTPA 이하 수준이었던 것이 현재는 7~8 MTPA 수준의 플랜트가 계획 및 건설 중이다.

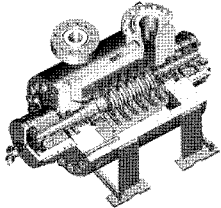
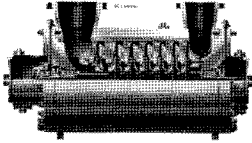
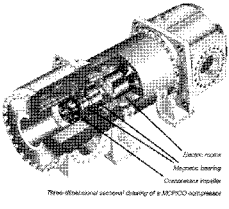
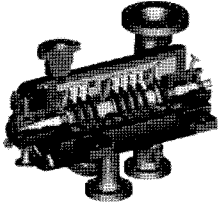
LNG 냉매압축기

LNG 플랜트 내에서 에너지 소비가 가장 큰 부분은 냉동압축기로 전체 플랜트의 열효율을 높인다는 것은 (1) 압축기 동력의 감축, (2) 압축기 구동기

(drive)의 효율 향상을 의미한다. 또한 플랜트 가동률 면에서도 압축기의 비중이 높다. 구성 기기의 신뢰성과 보수 유지 기간은 일반적으로 전기기기가 회전기기에 비해 매우 높기 때문에 전체 LNG 플랜트의 가동률은 구동기를 포함한 냉동 압축기의 신뢰성과 보수 유지 기간에 의해 정해진다고 할 수 있다. 이러한 주요 설비인 냉매 압축기는 몇 개 대형 업체만이 관련 기술을 가지고 있다. 1980년대 초기까지 압축기의 구동력으로 증기 터빈이 주를 이루었으나 1990년 대 중반부터는 GE사의 Frame 6, 7 등의 발전용 대형 1축, 정속회전 가스터빈이 주를 이루고 있다. 현재는 동력을 가변속도조절이 가능한 모터 형식으로의 전환을 꾀하고 있다.

현재까지 이 분야에 대한 국내의 연구 실적은 없는 상황으로 고효율 LNG 플랜트 공정기술 개발과 관련된 구성품을 위해서는 신규 개발이나 선진 업체로부터의 도입을 통해 해결하여야 한다. 선진업체의 압축기는 후발업체의 시장진입을 철저히 제한하고 있는 상황이며, 선진 업체로부터의 도입의 경우, 전체 플랜트의 핵심 기기인 냉매 압축기의 설계 및 제작 기술을 확보할 수 없어서 전체 공정 구성상의 자유도가 없어지므로 최종적인 목표인 LNG 플랜트 관련 FEED(front-end engineering design) 능력의 확보 및 기술 경쟁력 확보가 어려울 것으로 예상된다. 따라서 냉매 압축기 개발은 전체 사업의 측면에서 필수적인 요소라 할 수 있다.

<표 2> 액화 공정용 냉매 압축기 제조사 및 대표 기종

제조사	대표기종	압축기 형상
SIEMENS	STC-SH STC-SV	
GE	BCL Series MCL Series AN Series	
MAN Turbo	AG, AKF HOFIM MOPICO	
Dresser-Rand	Datum Series	

구동기술

현재 LNG 액화 공정에 사용되는 일반적인 압축기의 구성은 그림 3과 같이 가스 터빈 구동 형식이다. 이러한 형식의 압축기를 사용하는 경우 평균적으로 25% 내외의 train 효율을 얻을 수 있는데 반해, 전기구동방식(all electric drive)의 압축기의 경우, 평균적으로 36%의 효율을 얻을 수 있다.

그러나 높은 효율에도 불구하고 외부 전력이 별도로 존재해야 함에 따른 초기 투자비의 증가, 플랜트 부지의 대형화, 관련 기술 분야의 미발전 등에 따라 그동안 그 실효성이 의심되어 왔으나, 최근 LNG 플랜트의 대형화 및 모터 관련 기술의 진전 등에 힘입어 모터 구동 방식으로 냉매 압축기

기술 발전이 가속되고 있다.

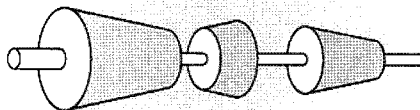
전기 구동 방식을 채택하게 되면, 기어 결속이 아닌 구동기와 압축기가 직결형태로 결속할 수 있으므로 작고 경제적인 설계와 설치 공간의 간소화, 누설 방지, 소음 저감 등에 있어서도 장점을 가진다. 앞으로의 가스 플랜트 관련 압축기의 미래 기술은 직결형 전동 구동 형태로 진행할 것으로 예상되며 이러한 흐름을 보여주는 두 가지 모델이 GE의 ICL과 MAN Turbo의 MOPICO이다.

두 모델은 직결형 전동 구동 형태로 시스템이 간소하다는 점 외에 한 가지 특징적인 부분을 공유한다. 두 모델 모두 자기부상 베어링(active magnetic bearing: AMB)를 적용하여 윤활오일 시스템과 dry end seal이 존재하지 않는다. 기존의 볼 베어링, 틸팅 패드 베어링과 같은 윤활 접촉 방식 베어링에 비해 AMB 방식은 윤활유를 사용하지 않으므로 시스템이 간소화되고 관련 유지 보수가 불필요하며, 접촉으로 인한 마찰 손실이 없어 보다 높은 효율을

얻을 수 있다. 앞서 말한 바와 같이 LNG 플랜트의 가동률은 구동기를 포함한 냉매 압축기의 신뢰성과 보수 유지 기간에 의해 정해지므로, 이러한 시스템은 기기의 신뢰성 측면에서 매우 큰 장점을 지니게 된다. 그러나 AMB는 그림 5와 같이 위치 센서가 부상체의 위치를 측정하여 이를 제어기에 제공하고 제어기는 부상에 필요한 명령값을 증폭기에 전달, 이에 따른 전류를 발생하여 베어링을 부상시키는 일련의 고도 제어가 필요하며 기술 개발의 어려움이 예상된다. 이러한 AMB 관련 기술은 LNG 냉매 압축기 뿐 아니라 회전기기 전반에 응용이 가능한 기술로 파급효과가 크며 관련 분야의 미래 핵심 기술로 기술 개발의 필요성이 매우 크다.

냉매 압축기의 임펠러 등 공력학적 설계의 경우, 모터 구동기 개발에 비해 보다 많은 연구 개발이 예상된다. 현재까지 개발된 국내의 터보형 냉매 압축기는 LS전선 등에서 제작한 증속 기어 타입의 프레온 계열 냉매 압축기가 전부이며, 공기 압축기의

a) Total efficiency per unit compressor driven by gas turbine (approx. 25%)



Efficiency approx.:
Gas turbine 30% Compressor 82%

a) 가스터빈 구동 방식 압축기

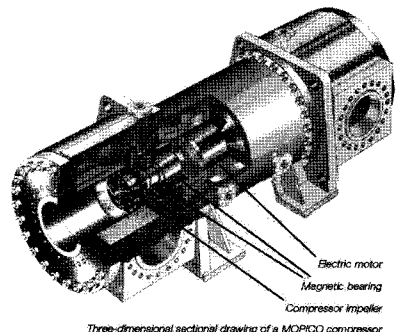
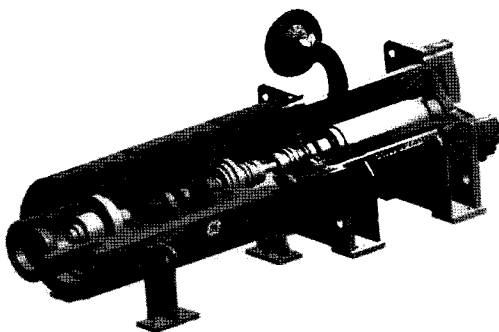
b) Total efficiency per unit compressor driven by motor (approx. 36%)



Efficiency approx.:
Compressor 82% Motor 96.5% Inverter 98.5% Transformer 98% Power generation 47%

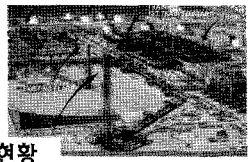
b) 모터 구동 방식 압축기

[그림 3] 압축기 구동 방식



Three-dimensional sectional drawing of a MOPICO compressor

[그림 4] 상용 직결식 모터구동 압축기



경우에도 최대 200 HP의 소규모 압축기 설계 및 생산 기술 밖에 갖추지 못하고 있는 실정이기 때문이다. 혼합 냉매 공정을 통해 LNG를 생산한다고 할 때, 필수적인 혼합 냉매 압축기는 전세계적으로도 5개 기업 내외가 그 기술을 보유하고 있으므로 이에 대한 신중한 접근이 필수적이다. 사이클 해석을 통한 혼합 냉매의 선정과 냉매 물성특성 연구를 통해 압축기 공력설계를 진행한 후 실험리그에서 실험을 실시한다. 천연가스를 압축하는 출구헤드는 매우 높은 압력이며, 높은 압력비를 가지고 있다. 이에 실험리그에서 고압상태로 압축기 실험을 실시하기 매우 어려운 실정이다. 이러한 압축기의 실험방법으로 동일한 외형상태의 압축기의 고압상태를 감압하여 레이놀즈 상사를 통해 소비동력을 줄인 상태로 감압실험을 실시하여 압축기 성능을 확인할 수 있다.

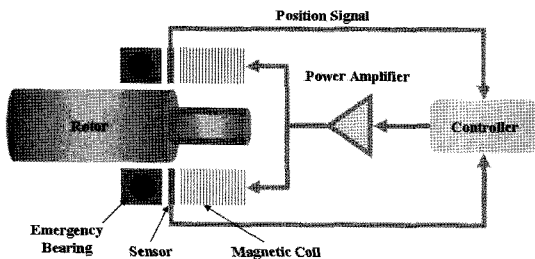
그림 6은 무급유 시스템과 증속기어의 동력전달 손실을 제거하기 위해 직결구동방식의 채택, 정격 및 부분부하에서의 전동기효율을 극대화하기 위한 영구자석을 이용한 전동기를 채용하여 기존의 유도전동기에 비해 월등한 효율을 보이고 있다. 특히 부분부하에서 그 특징은 뚜렷하게 나타난다.

현재까지 직결형 전동 구동 압축기에 쓰이는 고효율 유도전동기의 정격에서의 효율은 95 ~ 96% 이나 전체 출력의 70% 이하 부하에서는 정격 효율보다 10% 이상 떨어진다. 그러나 고속 영구자석 전동기의 경우, 기존의 유도전동기에 비해 보다 소형 경량화 및 고효율 성능을 얻을 수 있어 미래의 냉매 압축기의 구동기로 적합하다. 이러한 영구자석 전동기(permanent magnetic motor: PM motor) 시스템을 설계하기 위해서는 고속 전동기

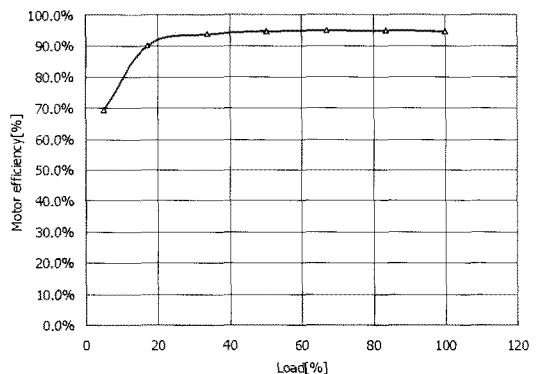
의 전자계 시스템 설계, 착자 기술 및 착자요크 제작 기술, 열해석 및 냉각 해석, 로터의 소음 및 진동 설계, 전력변환장치 및 제어 기술 등이 복합적으로 요구된다. 회전자의 영구 자석 부착과 전자력이 회전력에 미치는 영향을 구조 설계에 반영하는 것이 전동기 설계의 필수 요소 기술이다. 더불어 이러한 구조 기술 외에 LNG 플랜트 산업에서 요구하는 전동기의 소형화, 대용량화에 따른 내부 손실의 증대에 따른 발열량도 점점 증가할 것으로 예상되는데, 전동기의 코일 온도를 한계치 이하로 낮추거나 높은 과부하율을 가지는 신뢰성 있는 전동기를 제작하기 위해서는 냉각 성능을 향상 시키는 일이 매우 중요하다. 이를 위해 설계 및 개발 단계에서 열해석을 통한 정확한 온도 분포를 예측하고 최적의 냉각 시스템을 개발하여 전동기의 신뢰성을 높여야 한다.

LNG 플랜트용 고효율 압축기를 구동하기 위해서는 플랜트의 특성상 고전압, 고출력, 고속회전의 인버터가 필요하다. 특히 개발되는 인버터는 MW급의 고속 인버터로 고전압 전력소자를 사용하기 때문에 전력소자의 병렬적용으로 고속구동에 대해 안정적인 전력소자를 채용이 필요하다. 더불어 인버터는 원가를 고려한 최적화와 구동 알고리즘에 대한 정밀 제어설계가 동반되어야 하는 중요한 기술이라 할 수 있다. 그림 7은 고전압용 상용인버터에 대한 사진을 보여 준 것으로서 고효율 냉매 압축기를 개발하는데 많은 비중을 차지하고 있다.

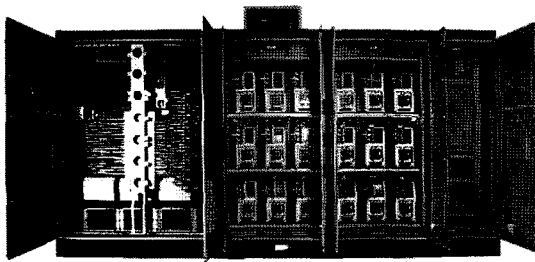
향후 개발되는 LNG 플랜트 냉매 압축기의 주요



[그림 5] 자기부상 베어링(AMB)의 제어 개념도



[그림 6] 영구자석 모터의 부하별 효율특성, 전기연구원

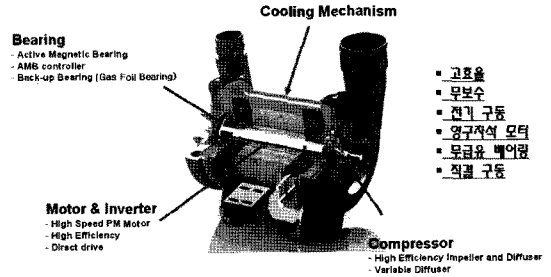


[그림 7] 고전압용 상용 인버터

기술 개발은 그림 8과 같으며, 미래의 냉매 압축기 핵심 기술들이라 할 수 있다. 미래형 압축기는 고효율 무보수로 발전하고 있다. 현재까지 국내에서 한국터보기계(주)는 수냉식 400 HP PM Motor 블로워와 7.0 bar 공기압축기에 무급유 공기베어링을 장착하여 상용화 하였다. 이러한 기술을 바탕으로 고전압용 모터를 개발할 경우 2 MW까지 문제 없이 확대가 가능하고, 개략적인 모터 사이즈는 외경 500 mm, 길이 800 mm, 회전수 15000 rpm 정도로 설계가 가능하며, 100 TPD의 LNG액화용량을 처리할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 자기베어링과 가스베어링을 하이브리드 형태로 개발하여 기동 및 구동 시 최적효율달성과 비상 시 catch up 베어링의 역할을 동시에 겸할 수 있는 로터시스템에 대한 개발이 진행 중으로 앞으로 수 년 내에 사업화가 가능할 것으로 판단된다.

결론

LNG 플랜트는 규모 확대에 따라 비용이 감소되고 열효율 향상을 위해 대형화하는 경향이 있다. 그 중에서도 플랜트의 심장부인 냉매 압축기 및 구



[그림 8] 개발 압축기의 핵심 기술

동기기에 관해서는 큰 변천이 있었다. 현재는 GE사의 가스 터빈 프레임 7을 구동기로 사용한 것이 일반적이거나 앞으로는 플랜트의 대형화는 계속될 것으로 예상되며, 새로 개발된 액화 공정과 함께 프레임 7을 3대, 또는 프레임 9를 사용하는 플랜트도 계획되고 있으나, 이는 과도기적인 경향으로 중국에는 전기구동 방식으로 구동기를 모터로 하고 발전 설비에 열병합발전, 복합 사이클을 조합함으로써 플랜트 효율 개선과 이에 따른 이산화탄소의 대기 방출 저감을 도모하여 플랜트의 가동률을 높이는 방향이 각광을 받고 있다. 또한 유도전동기 대신 영구자석 모터를 사용하여 부분부하 및 전부하에서 고효율을 달성할 수 있으며 불필요한 오일의 압축을 피하기 위하여 무급유 시스템과 동력손실 및 유지보수비의 최소화를 위한 직결형 터보압축기를 개발하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 가스플랜트사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. ●●