유체공학 부문

이 글에서는 2003년도 유체공학 분야의 주요 연구 동향을 유동제어 및 계측, 난류, 유체기계, 전산 유체공학, 유동소음, 생체유체, 액체미립화 및 분무 그리고 마이크로 유체역학 등으로 나누어 소개한다.

글 • 최 영 돈 부문위원장(고려대학교, 교수)
e-mail • ydchoi@korea.ac.kr

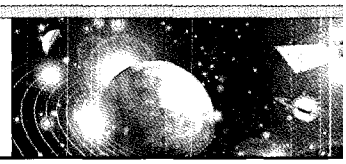
유동제어 및 계측

유동제어 분야 연구에 있어서 항력감소와 유동소음 저감에 관한 연구가 예년에 비해 다소 증가하였다. 능동적 유동제어기법으로는 회전 및 진동, 음향여기, 초음파 가진, blowing 및 suction 등이 활용되었다. 예를 들어 유동 공진에 의한 원주 후류의 유동특성 변화와 진동하는 평판과 타원형 에어포일에서 발생하는 비정상 후류에 관한 연구 등이 수행되었다. 또한 후향계단 주위 층류박리 유동의 이중 주파수 가진(excitation)과 난류박리에 대한 비정상 후류 영향에 대한 연구 결과가 보고되었다. 그리고 회전하는 원통 내부 3차원 주기적 유동과 회전하는 90도 덕트 내부 유동에 관한 연구가 수행되었다. 이 밖에 능동 가진과 마이크로 제트를 이용한 제트유동의 소음제어, 흡입분사에 의한 난류경계층 벽면의 압력변동, 초음파 가진에 의한 난류생성과 초음파 유량계 내부유동, helical vane을 이용한 pulse파 제어에 관한 연구도 보고 되었다.

수동적 유동제어로 O-ring이나 톱니형 fin이 부착된 원주와 wavy 단면을 가진 원주의 저항감소와 후류 제어에 관한 연구가 수행되었으며, 원주의 자유단 형상 변화가 후류 유동에 미치는 영향과 후류 교란자를 이용한 운송체 모형의 저항감소에 관한 연구가 보고되었다. 그리고 컴플라이언트 코팅과 점탄성 벽면이 난류경계층 유동과 유동소음에 미치는 영향에 대한 연구와 파형 벽면이 있는 채널 내부 난류유동에 관한 연구가 수행되었다. 이 밖에 표면조도가 있는 회전디스크와 구 주위 유동, 원주 후류를 이용한 디퓨저 유동의 제어, 하드디스크 드라이브 내부 유동 제어를 통한 액츄에이터의 진동 저감에 관한 연구 등이 보고되었다. 최근 들어 미세유동의 제어와 유동소음 저감에 관한 관심의 증가로 2003년도 유체공학부문 추계 학술강연회에서 이 분야를 집중적으로 다루었다.

유동계측과 관련하여 3-D stereoscopic PIV, recursive-PIV, multi-frame MQD-PIV, miniature stereo-PIV, 3-D volume PIV 등의 속도장 측정기법의 개발이 보고되었는데, 전반적으로 3차원 속도장 측정기법의 개발이 주를 이루고 있다. 그리고 생체 내부 유동을 계측할 수 있는 X-ray PIV 기법이 새롭게 개발되었으며, 이상 유체에 대한 토모그래픽 방식의 재구성(reconstruction) 기법과 POD기법을 이용한 PIV 유동 해석기법이 발표되었다. 이 밖에 개발된 속도장 측정기법의 성능을 표준화상을 이용하여 검증하는 연구와 난류경계층의 헤어핀 다발구조에 대한 3차원 토플로지를 규명하는 연구도 수행되었다.

PIV/PTV 속도장 측정기법을 이용한 응용 연구도 예년에 비해 크게 늘었는데, 다양한 형상의 원주 후류, 경계층 유동, 평면제트, 충돌제트, 델타형 날개, 파형관 및 교반기 내부 유동, 후향단 유동, 천정형 실내기 내부 유동, 비강 내부 유동, 곡관 및 분기관 내부 유동, 엔진 내부 유동 등에 대한 응용 연구가 수행되었다. 그리고 stereoscopic PIV기법을 임펠러와 프로펠러에 적용하여 이들 유체기계 주위의 복잡한 3차원 유동을 해석하였다. 또한 LIF 온도장 측정기법을 PIV 속도장 측정기법과 결합하여 교반기 내부 유동의 속도장과 농도장을 동시에 측정하였으며, 홀로그래픽 간섭계와 PIV를 결합하여 열유동의 온도장과 속도장을 측정하기도 하였다. 압력계측과 관련하여 저속 유동용 PSP 압력장 측정기술과 무선계측기법을 이용한 송출공의 압력계수 측정기법이 개발되었다. 이 밖에 무인 비행물체에 관한 풍동 실



험연구와 Ludwig tube를 이용한 유동계측 실험이 발표되었다.

또한 BT/NT 기술에 대한 국가 차원의 지원과 이 분야에 대한 관심 증대로 인해 미세 채널 내부 흐름의 유동 특성과 유동제어에 관한 연구가 예년에 비해 많이 발표되었다. 예를 들어 micro-PIV 속도장 측정기법을 이용하여 미세채널의 입구형상 변화가 유동저항의 감소에 미치는 영향, 채널 내부에 설치한 블록이나 전기삼투(electro-osmosis)를 이용한 미세유동의 혼합 증진, 미세 분지관 내부 유동의 제어 등이 있다. 이 밖에 Langmuir 미끄럼 모형을 이용한 수치해석 연구가 수행되었으며, 혈류 맥동 유동이나 혈구 거동을 연구한 내용도 발표되었다.

최근의 세계적 연구 경향에서 볼 수 있듯이 우리나라에서도 미세유동과 바이오 유동에 대한 연구가 지속적으로 증가하고 있으며, 광기술의 급속한 발전과 컴퓨터 성능의 향상 등에 기인하여 향후 유체문제의 규명 및 진단에 있어서 고성능 컴퓨터와 디지털 화상처리를 이용한 광계측 기술의 활용이 크게 늘어날 것으로 예상되어 진다. **[이상준, 포항공과대학교]**

난 류

2003년에도 난류유동에 관한 연구들은 수치해석적, 실험적 및 이론적 방법을 통해 다양하게 수행되었다. 난류연구는 그 특성 상, 여러 학제간 연구들과 긴밀하게 관련되는 부분이 많기 때문에 그 중요성이 지속적으로 증대되고 있으며, 난류의 물리적 특성에 대한 지식을 바탕으로 하여 좀더 복잡한 시스템에 대한 해석 및 이를 제어하기 위한 시도가 진행되고 있다. 특히, 난류제어 및 환경 난류 등의 지속적 연구는 난류연구의 영역을 현실적 공학 문제로 확장하여 실생활에 직접적으로 응용될 수 있도록 함으로써 학계의 많은 관심을 받고 있다. 최근에 많이 사용되고 있는 PIV/PTV를 이용한 유동계측 기법이나, 난류 연소 및 난류 유동장에서 발생되는 유동소음에 관한 연구 등은 별도의 분야로 다루어지므로 이를 제외한 각 분야에서 진행되고 있는 연구들의 동향을 간단히 요약하면 다음과 같다. 난류연구의 성격상 유체공학 전 분야에 걸쳐 긴밀한 상호관계를 갖기 때문에 타 분야와 중복되는 영역이 많으나, 다음과 같이 세분화해볼 수 있다.

1) 난류현상의 물리적 이해를 위한 기초 연구
2) 난류제어
3) 대와류모사
4) 난류모델링
5) 환경난류

난류현상의 물리적 이해를 위한 기초 연구

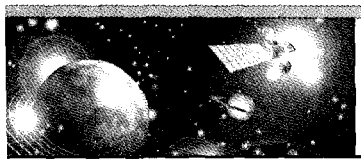
직접수치모사의 방법을 이용하여 유동장에 존재하는 모든 스케일의 유동을 해상함으로써 유동장의 자세한 정보를 얻거나, PIV/PTV를 이용한 실험적 방법을 통해 얻은 데이터를 분석하여 난류의 물리적 특성을 파악한다. 난류경계층의 헤어핀 다발구조에 대한 3차원 토폴로지 규명, 가열 봉다발의 난류 열전달 문제의 전산유체역학적 해석, 후향계단 주위의 박리 유동에 대한 비정상 후류의 영향, Taylor vortex의 구조에 대한 연구, 파형벽면이 있는 채널 내의 난류 유동에 대한 수치해석, 벽분사가 있는 채널의 열/유동 해석 등에 대한 결과들이 발표되었는데, 난류의 물리적 특성을 다양한 측면에서 살펴본 연구들이라고 할 수 있다.

난류제어

난류 유동장을 효과적으로 제어함으로써 이득을 얻기 위한 연구는 그 중요성으로 인해 많은 관심을 받고 있는데, 난류의 물리적 현상에 대한 이해가 높아지면서 더 활발히 진행되고 있다. 그러나 실용적으로 적용이 가능한 결과의 도출까지는 지속적인 연구가 필요하다고 하겠다. 진동 유동장에서 유동공진에 의한 실린더 후류의 와류 특성변화, 층류박리 후향계단 유동의 이중주파수 가진, 난류열전달 향상을 위한 엇갈린 리브가 부착된 열전달면의 최적 형상설계에 관한 연구 등에 대한 연구가 보고되었다.

대와류모사

현실적인 공학 문제를 다루기 위해서는 높은 레이놀즈수를 가지는 유동의 해석이 필수불가결한데, 물체의 형상이나 경계조건의 영향을 받는 큰 와류들은 직접 모사하고 보편적인 성질을 가지는 작은 와류를



모델링하는 이 방법은 그 적용 범위가 계속 확대되고 있다. 대형와 모사를 사용한 혼합 탱크 내의 농도장과 유동장 동시 해석, 대형와 모사를 통한 레이놀즈수 증가에 따른 혼합 탱크 내의 유동 구조에 대한 연구, test filter 너비의 추정을 통한 난류채널 유동의 Large Eddy Simulation(LES)에서 중심 및 상류 컴팩트 차분기법의 적합성에 관한 연구 등이 보고되었는데, 기존의 RANS모델에 비해 유동장의 정보를 상세하게 얻을 수 있는 장점을 갖고 있으므로 앞으로도 다양한 유동장의 해석에 좋은 해석도구로 활용될 것으로 기대된다.

난류모델링

공학 문제의 해결에 필수불가결한 난류모델링의 개발은 기존 모델의 성능을 확장하여, 여러가지 다양한 종류의 유동에 적용되고 있는데, 난류에 의해 야기되는 이차유동 예측성능에 대한 비선형 κ-ε 난류모델의 평가, 비선형 저레이놀즈수 κ-ε 난류모델에 따른 정사각형 덕트 내 완전 발달된 난류유동 예측 등의 접근 방법들이 보고되었다.

환경난류

난류채널 유동의 라그란지안 해석, 고밀도 가스확산을 예측을 위한 라그란지안 입자 모델의 개발, 고전압 분사시스템의 액적 하전 특성에 관한 연구, 샤워형 초음파 장치를 이용한 입자 제거 효율 등에 관한 연구, 입자가 포함된 유체의 유동특성에 대한 직접수치해석 등이 진행되고 있는데, 그 응용 대상의 중요성으로 볼 때, 앞으로 더 활발히 연구가 진행될 것으로 기대된다. [**나 양, 건국대학교**]

유체기계

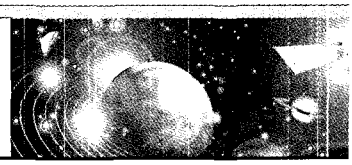
유체기계에 관한 국내 연구논문의 수는 해가 바뀔수록 지속적으로 증가하고 있으며, 연구방법도 다양해지고 연구의 수준도 높아지고 있음을 2003년도에 발표된 연구논문들을 통해 알 수 있다. 이 분야의 연구가 활성화되고 있다는 것은 유체공학이 보다 실용적인 학문으로서 발전하고 있다는 것을 의미하므로 매우 바람직한 현상으로 볼 수 있다. 각 분야에 대한 2003년도 국내 연구 동향은 이미 유체기계저널 제7권 제1호에 특집으로 발표된 바 있어 여기서는 이 특집의 내용을 정리함으로써 각 분야의 연구동향을 소개하고자 한다.

펌 프

2003년에 주요 국내 학술지와 학술대회에 발표된 펌프와 관련된 연구 논문은 총 21편으로 이중 유체기계공업학회에서 14편, 대한기계학회(학술대회 제외)에서 2편, 대한설비공학회에서 5편이 발표된 것으로 파악되고 있다. 펌프 분야의 논문들을 세분하면 터보펌프, 원심 및 사류 펌프, 용적형 및 특수펌프, 마이크로펌프 등 각종 펌프 종류에 관한 연구와 펌핑시스템 및 수격현상 등에 대한 연구들이 있다. 터보펌프에 관해서는 인듀서의 성능 및 유동 특성과 인듀서와 임펠러의 상호작용에 관한 실험과 수치해석적 연구들이 7건 수행되어 펌프분야의 연구 중에서는 터보펌프에 관한 연구가 가장 활발하게 진행되었음을 알 수 있다. 각종 원심펌프에 관한 논문이 3편, 워터제트 추진용 사류펌프에 관한 논문이 1편 발표되었으며, 자동차용 용적식 오일펌프에 관한 논문이 1편 발표되었다. 그리고, 작은 유량에서 큰 양정을 낼 수 있는 특수펌프인 재생펌프에 관한 연구논문이 3편 발표된 것이 주목할 만하다. 최근 차세대 성장동력원으로서 마이크로 펌프가 각광을 받고 있는데, 이에 관한 논문이 4편이 발표된 것은 최근 이 분야에 대한 높은 관심도를 반영하고 있다. 이외에도 펌핑시스템과 수격현상에 관해 각각 1편의 논문이 발표되었다.

송풍기

송풍기의 해석과 설계에 관해 지난해 국내 주요 학술지에 발표된 논문은 총 15편으로 파악되고 있으며, 이들은 대한기계학회논문집에 3편, 유체기계학회 논문집인 유체기계저널에 5편, 설비공학논문집 3편, 전산유체공학회 및 학술대회 논문집에 3편, 그리고 소음진동학회 논문집에 1편이 발표되었다. 이와 아울러 유체기계공업학회 연구개발 발표회에 6편의 논문이 발표되었고, 파악되지 않은 학술대회 논문집에 더 많은 논문이 발표되었을 것으로 생각된다. 송



풍기에 관한 논문들은 다양한 형태의 형상설계, 수치최적화, 기초실험, 성능시험 및 유동소음 해석 등에 대해 수행되었다. 특히 송풍기의 성능과 소음의 해석에 전산유체역학(CFD)적 해석기법이 보다 폭넓게 응용되고 있음을 알 수 있으며, CFD를 수치최적화 기법과 결합하여 송풍기의 최적설계에 사용한 연구 등은 주목할 만하다. 대부분의 연구들이 산학협동과제를 통해 수행된 것으로서 이 분야의 국내 산학협동이 성숙된 단계에 진입하였음을 알 수 있다.

압축기

압축기는 크게 용적형과 터보형으로 나뉘어지고, 용적형에는 로터리 압축기, 사판식 압축기, 스크롤 압축기 및 왕복동 압축기 등이 있으며, 터보형에는 원심형과 축류형이 있다. 압축기와 관련된 연구는 2003년 한 해 동안 국내 주요 학술지에 총 16편(기계학회 8편, 유체기계저널 2편, 설비학회 6편)과 학술대회에 29편(기계학회 4편, 유체기계공업학회 11편, 설비학회 11편, 전산유체공학회 2편, 항공우주학회 1편)이 발표된 것으로 파악되고 있다. 저자들은 대학에 32명, 산업체 10명, 연구소 6명 등으로 분포하였다. 압축기 종류별로는 로터리 압축기에 관해 6편, 사판식 압축기 2편, 스크롤 압축기 11편, 왕복동 압축기 8편, 그리고 원심형과 축류형 압축기에 관해 각각 14편과 7편의 연구논문이 발표되었다. 저자의 2/3 정도가 대학에 속해 있다는 것은 아직 국내의 연구가 대학에 편중되어 있음을 나타내고 있다. 그러나 원심형과 스크롤 압축기의 경우 다른 분야들과는 달리 저자들이 산학연에 골고루 분포된 것이 주목할 만하다. 이는 이 분야의 연구에서 산학연의 협동이 실질적으로 이루어지고 있음을 나타낸다.

가스 · 스팀터빈

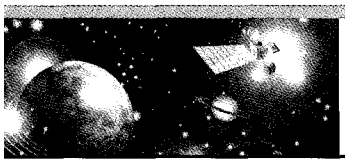
이 분야에서는 최근 분산발전에 대한 관심이 고조되면서 이에 적합한 동력원으로 고려되고 있는 마이크로 터빈 및 이의 응용시스템에 대한 연구개발이 활발하게 수행되고 있다는 점이 주목할 만하다. 2003년도에 발표된 논문들을 유체기계공업학회, 대한기계학회, 대한설비학회 논문집과 학술대회에 발표된 논문들을 중심으로 분류하면 유동장 해석에 관해 7편, 열전달 해석 2편, 터빈 블레이드 냉각 12편, 가스터빈 개발 및 성능평가 10편, 그리고 스팀터빈 및 복합발전에 관해 6편의 연구논문 등 총 37편의 논문이 발표되었다. 이는 2002년에 비해 15편 정도 감소한 양으로서 학술지 게재 논문이 10편으로 전년도에 비해 반 이상 감소한 것이 그 원인으로 파악된다. 유동장 및 열전달 해석 연구는 예년과 비슷한데 터빈 블레이드 관련 연구 중 막 냉각에 관한 연구가 예년에 비해 많이 감소하였다. 그러나 향후 한국형 다목적 헬기 사업 등이 착수됨에 따라 이 분야의 연구는 다시 활성화 될 수 있을 것으로 생각된다. 스팀터빈에 관한 연구는 수적으로는 열세지만 지속적인 연구가 수행되고 있음을 알 수 있다.

유량계 및 밸브

유량계 및 밸브에 관해 2003년도 국내 주요 학술지와 학술대회에 발표된 논문은 약 36편으로 파악되며, 이는 그 전 해와 비슷한 숫자이다. 유량측정 표준 시스템의 불확도 평가와 향상에 관한 논문이 발표되었으며, 기체 유량측정에 기준기로 사용되는 소닉노즐에 관한 논문이 많이 발표되었다. 천연가스 소비량의 증가에 따라 가스량을 측정하는 분야의 유량측정 정확도에 관한 연구가 다수 수행되었다. 초음파 유량계와 전자기 유량계의 개발과 관련되는 논문들도 발표되었다. 밸브에 관해서는 냉난방 설비에 사용되는 콘트롤밸브에 관한 연구가 많이 수행되었다. 발전소에 사용되는 고온 고압 밸브에 관한 연구도 진행되었으며, 다양한 종류의 밸브에 대한 개발 및 성능평가 결과가 발표되었다. [**김광용, 인하대학교**]

전산유체공학

전산유체역학은 대략 과거 50년 동안 압축성/비압축성, 3차원, 난류유동 등의 영역에서 많은 발전을 해왔다. 유동의 물리적 특성에 대한 이해를 바탕으로 전산해석기법들이 개발되어 왔고, 그 다양한 유동해석기법들은 현재 많이 사용되고 있는 상용코드에서 잘 반영되어 있다. 예를 들면, 다양한 수치해석기법들과 물리적 모델링 등이 메뉴에서 선택될 수 있



고, 복잡한 형상에 대한 처리도 용이하게 되어 있다.

전산유체역학은 현재에도 계속 발전되고 있다. 특히 최근 들어 고차정확도 기법을 이용한 비정상 유동에 대한 엄밀 해석이나, 또는 다상유동에 대한 해석기법 및 물리적 모델링의 개발 등 다양한 연구가 현재 진행되고 있다. 일예로, 고차정확도 기법은 비정상 상태의 요동(fluctuations)이 중요한 유동현상의 대상이 될 수 있는 유동소음(flow noise)에 대한 해석이나, 다양한 길이-시간 스케일을 갖고 있는 난류 유동 해석을 위한 직접모사법(direct numerical simulation) 혹은 대와류모사법(large eddy simulation) 등에서도 해의 정확도를 높일 수 있는 중요한 수치해석기법으로 이 기법의 응용성은 매우 중요하게 인식되고 있다.

한편, 또 하나의 중요한 전산유체역학 연구 분야로는 복잡한 형상 주변에서 발생하는 비정상 상태의 난류 유동 및 소음장 예측을 위한 연구를 들 수 있다. 이 분야에서 현재 많이 연구되고 있는 전산해석기법을 크게 분류하면 (i) 삼각형 격자를 이용한 비정렬 격자기법에 고차정확도를 갖는 Discontinuous Galerikin Method 계열의 기법을 적용하는 방법과 (ii) 벽면 부근에서 forcing 개념과 고차정확도 보간 처리법을 이용하는 Immersed Boundary Method, 그리고 (iii) 격자계간에 고차정확도 보간법을 이용하는 Overset Grid Method로 구분할 수 있다. 최근 들어 전산유체역학에서는 이와 관련된 연구가 활발해지고 있고 FLUENT나 STAR-CD와 같은 상용코드회사들도 많은 관심을 갖고 있는 것으로 알고 있다.

전산유체역학은 앞으로도 그 역할이 매우 중요하다. 특히 난류 유동조건에 있는 3차원 유체기계의 요소설계 수단으로서의 정확한 활용이 더욱 강조되고 있고, 또한 유동의 정량적 데이터 획득과 더불어 유동가시화(flow visualization) 기법은 물리적 현상에 대한 이해를 증진시키는 데 큰 역할을 할 것으로 기대된다. **[문영준, 고려대학교]**

유동소음

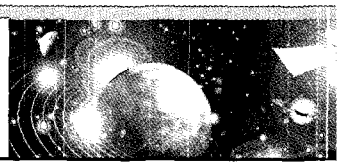
유동소음은 국외는 주로 항공에 관련된 연구가 많았고 국내에서는 자동차, 전자제품을 포함한 다양한 분야에 대한 연구가 활발하였다. 2003년 Aeroacoustic 연구 활동에 대해 미국 Aerospace America에 언급되었고 제트소음, 일반 항공기 소음, 초음속 항공기 소음 그리고 공항소음에 대한 연구 내용은 다음과 같다.

비행기 장착시의 제트 소음 예측에 대해 NASA/산업체/대학에서 다년간 공동연구로 수행한 결과 많은 발전을 가져왔다. 제트노즐의 셰브론과 파일론 영향을 포함하여 물리적인 현상을 고려한 JET3D는 제트 소음 예측 코드로 NASA-Langley의 실험치와 비교하여 매우 정확함을 보였다. 차세대 전투기인 F-35 JSF(Joint Strike Fighter)에서 발생한 소음이 지상과 항공모함 근무자에게 하루 종일 노출되는 양을 계산하는 예측방법도 계속 개발되고 있다. 성능과 효율을 고려한 제트소음 저감 기술로 F/A 18 Super Hornet 의 1/10스케일 모델 실험결과, 1% 추력 손실 대비 4db의 소음저감을 엔진노즐의 가변하는 외부 플랩 또는 물액정분사를 사용하여 얻을 수 있었다.

NASA Glenn에서는 Quiet Aircraft Technology 프로그램으로 1/5 스케일 팬의 공력과 소음치 측정을 풍동에서 완료하였다. Boeing과 Rolls-Royce는 Trent 800 엔진을 장착한 777-200ER 항공기의 지난 비행 시험 때 사용된 소음저감장치를 정지 엔진에서 테스트하였다. Georgia Tech에서는 CCW(Circulation Control Wing)가 기존의 날개보다 airfram 소음 측면에서 적은 것을 확인하였다.

Northrop Grumman과 NASA/DARPA/Lockheed Martin/Boeing/Wyle에서는 F-5E 전투기의 동체를 변화시켜 소닉붐이 적은 것을 보여주었다. DARPA의 Queit Supersonic Platform 프로그램으로 개발된 이 기술은 궁극적으로 대륙에서 비행 제한이 없는 초음속비행을 실현케 할 희망을 보여 주고 있다.

Loisville 국제공항에서는 착륙시 비행소음을 줄일 수 있는 비행 접근 방법인 CDA(Continouous Descent Approach)를 테스트하였다. Boeing, FAA, MIT, NASA, UPS와 지역 공항 당국에서 실



시한 이 테스트로 활주로 끝에서 10~30m에 사는 주민들의 소음피해를 줄일 수 있는 희망을 보여주고 있다. 전에는 컴퓨터로 보여 주었는데 이 번 측정결과로 실제로 3~6dB의 소음이 저감됨을 보여 주었다.

국내에서 개최된 제32회 internoise 2003에서는 '인간과 환경을 위한 소음 진동제어' 라는 주제 하에 일반 소음 진동은 물론 Fan Noise(7), Fan,Pump & Compressor Noise(14), Aeroacoustcs/ Aerodynamic Noise(11), Flow & Jet Noise(9)와 같이 유동소음에 관한 세션(논문수)이 있었고 Automobile Noise & Vibration, Heavy Machinery Noise, Shipboard Vibration and Noise, High Speed Train Noise and Vibration, Military Weapon and Aircraft Noise, Launch Vehicle Acoustics 등에서 유동소음에 대한 논문이 다수 발표되었다. Keynote speech로서 Penn State 의 Philip J. Morris 교수가 Aeroacoustics: Classical and Modern Approaches에 대해 발표 하였다. 춘계 한국소음진동공학회 학술대회에서는 유체유발소음진동(14), 공조기기 및 공력소음(5)에서 스크리치 제트, 자동차 팬, 플라스마 TV 팬 등 논문이 발표되었고 추계 한국소음진동공학회 학술대회에서도 다수의 유동소음에 관련된 논문이 발표되었다.

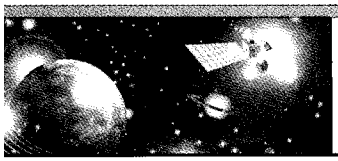
제9차 미국항공우주학회(AIAA)와 유럽 항공우주학회(CEAS) 공동으로 AIAA/ CEAS Aeroacoustic 학술대회에서는 200편의 제트소음, 팬 소음 그리고 캐비티 소음 등의 논문이 발표되었고, 제59차 AHS(America Helicopter Society)에서는 10여 편의 로터, 헬리콥터에 대한 Aeroacoustic 논문이 발표되었다. 제4차 Computaional Aero-Acoustics Bench Mark Workshop이 미국 NASA의 후원으로 열렸고 약 30편의 논문이 발표되었다. 프랑스에서는 제2회 Fan Noise Symposium이 열렸고 약 60여 편의 논문이 발표되었다.

국내 논문집으로는 유체기계저널, 한국소음진동공학회논문집, 대한기계학회논문집, 한국항공우주학회 논문집에서는 청소기, 에어콘 등에 대해 논문이 수록되어 있으나, 활발하지는 않았다. AIAA Journal 에서는 고바이패스 노즐 소음, 난류에 의한 뒷전 소음, 제트, 제트 테스트, 고양력 항공기 소음, 헬름홀즈 공명기, CAA(Computational Aero-Acoustics)의 interface 조건, N wave 등에 대한 논문 등이 수록되었다. JSV(Journal of Sound Vibration)에서는 원심 팬 소음 예측 등이 수록되었다.

과기부 공학용 소프트웨어 제2단계에 팬 유동 및 소음 예측 프로그램이 선정되었다. 또한 과기부에서는 발사체 제트 소음, 과학재단에서는 유동과 소음의 되먹임 능동제어, 항공우주연구원에서는 헬리콥터 로터 및 팬 테일 소음저감, 국방과학 연구원에서는 전차포 소음에 대한 초음속 유동 소음 등에 대한 연구과제를 도출하였다. 자동차 회사에서는 음향풍동을 이용하여 발생되는 자동차 Wind Noise의 소음원들을 근거리 음향 홀로그래피를 이용하여 손쉽게 파악할 수 있었고, 자동차 공조 팬에 대한 공조업체에서의 팬과 팬케이스 개발이 활발히 진행되었다. 가전회사에서는 고효율 저소음 선형 압축기를 지난 10여 년 간의 획기적인 연구 개발 끝에 상품화에 성공하였다. [**이덕주, KAIST**]

생체유체

생체유체는 생체 내부에 순환되는 유체, 즉 혈액과 공기의 거동이 생체에 미치는 영향에 대한 연구 및 이에 관련된 생체유체 기기 등의 연구가 이 범주에 속한다. 이러한 생체유체의 연구는 생물학 및 유체역학의 특성을 동시에 고려하여야 하는 융합기술 분야로서, 최근 생물산업 기술의 비약적인 발전과 함께 생체유체 분야도 매우 각광을 받고 있다. 실제로, 보건산업기술 분류에 있어서도 생체역학계측(biomechanical instrumentation) 분류에는 혈류, 호흡기능, 심음도, 혈압, 등의 계측이 포함되어 있으며, 의료영상 분류에는 X선, 초음파, MRI 및 광학영상기기 등을 이용한 의료영상시스템 분야가 있으며, 인공장기 분류에는 심폐순환계, 내분비대사계 등의 전자기형 인공장기 등이 생체유체와 직접적으로 연관되어 분류되어 있으며 국내외에서 활발히 연구·개발이 진행되고 있다.



그러나 생체에 대한 연구인 만큼 그 영향력이 높은 반면 관련되는 많은 제한 조건 때문에 학문적으로 많은 어려움을 겪고 있다. 외국에서도 실제 생체에 대한 연구는 임상의를 중심으로 수행되고 있으며, 기계공학에서는 전임상 단계인 모사(phantom)실험, 전산유동해석(CFD), in-vitro 실험 등의 연구 형태가 주류를 이루고 있다. 최근 들어서는 임상의와 유체 공학전문가들이 직접 공동 연구 및 학회를 추진하며, 상호 의사전달의 채널을 확보하고 융합적인 연구의 기틀을 마련해 나아가고 있어 고무적이라 할 수 있다. 그 대표적인 예가 '순환기질환의공학회'와 '의용생체공학회'라고 할 수 있다. 현재, 이들 학회에는 임상의들이 활발히 참여하면서 의학과 공학이 서로의 필요성을 인식하면서 새로운 형태의 융합적 연구들이 시도되고 있다.

생체유체와 관련된 국내의 연구는 대략 54편 정도의 논문이 발표되어 전년도에 비해 비슷한 수준이다. 분야별로는 혈류역학 분야가 가장 많은 31편이고, 인공장기 분야에는 14편, 유동가시화 분야에는 4편, 생체유변학 분야에는 7편이 발표되었다. 발표학회별로는 대한기계학회에서 15편, 대한의용생체공학회에서 15편, 순환기질환의공학회 18편, 한국유변학회 2편, 한국화학공학회 3편, 한국전산유체공학회 1편 등이 논문집 및 학술대회를 통해 발표되었다. 물론, 간접적으로 연관된 논문을 포함하면 이보다 상당히 많은 수의 논문들이 포함될 것이다.

혈류역학

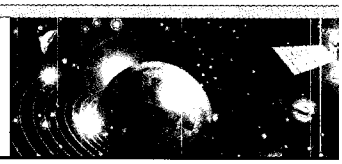
혈류역학은 주로 전산유동해석을 이용하여 혈관내의 혈류유동의 특성을 연구한 논문이 주를 이루었다. 특히, 협착(stenosis) 및 분지(bifurcation) 혈관 형상이 혈류의 맥동 유동특성에 미치는 영향을 고찰한 논문이 많이 발표되었는데, 이는 맥동유동에 의해 발생되는 전단응력을 해석하여 장기적으로 혈관의 탄성을 감퇴시켜 혈관을 경화시킬 것이라는 기존의 학설을 정량적으로 연구하고자 한 것이라 할 수 있다. 이러한 동맥경화 발생 메커니즘의 기존 가설들에 대하여 혈류역학적인 관점으로 해석하여 비교 · 연구한 논문도 우리 학회에서 발표되어 다시 한번 관련 연구를 정리하는 계기가 되기도 하였다. 또한, 7편의 논문이 심장의 관상동맥(coronary artery)에 관련하여 연구 발표되었는데, 이는 국내 심혈관 질환의 주요 부분이 심근경색 등의 관상동맥 질환이기 때문일 것으로 보인다. 이러한 관상동맥 질환에 대하여 혈관조영술(angiography)을 바탕으로 한 혈관의 3차원 모델링과 관련된 전산유동해석을 실시하고 이를 다시 임상 결과와 비교하는 등의 연구가 이루어져 의학계와 공학계가 유기적인 공동연구들이 진행되고 있음을 보여주고 있다. 특히, 심혈관 질환 및 암 발생의 열쇠를 가지고 있는 것으로 여겨지는 혈관내피세포에 대한 연구가 의학 및 생명과학분야에서 활발히 연구 중이어서 이 분야에 대한 혈류역학분야의 연구가 더욱 필요할 것으로 전망된다.

인공장기

인공장기 분야는 인공심장 및 관련 밸브장치와 폐 보조장치에 대한 연구가 주를 이루었다. 특히, 인공심장 밸브에 대한 연구는 혈구의 용혈(hemolysis) 현상을 방지하기 위하여 각종의 설계안에 대하여 밸브의 개폐운동이 전산유체역학적 모사 및 해석이 수행되었다. 또한, 폐 보조장치에 대한 설계 및 해석 · 실험 등의 일련의 논문이 생체유체분야에서 주목을 끌었는데 이는 폐 내부에서의 기체전달을 촉진시키며, 압력손실 및 용혈현상을 최소화하는 기기 개발 관련 연구논문이 발표되었다.

유동가시화 및 혈액유변특성 계측

생체유동가시화 분야에서는 2차원 및 3차원 Dynamic PIV 기법의 생체유체 적용 기술이 발표되었고, 이러한 PIV 기법을 이용하여 혈류의 3차원 맥동유동 현상을 계측하는데 성공하는 기술논문이 발표되었다. 또한 주목할 점은 방사광 X선을 이용한 PIV 기법을 개발하여 식물의 목질부 내부 수액 유동을 *in-vivo* 상태에서 가시화하는 논문이 발표되었다. 이는 기존의 PIV기법이 *in-vitro*(체외) 측정방식의 한계를 생체 내의 유체를 직접 관찰할 수 있는 기술적 진보성을 보여 줌으로써 관련 분야에 커다란 반향을 일으켰다. 한편, 혈액유변학 분야에는 혈구의 변형성 계측 논문이 새로이 소개되었다. 즉, 적혈



구가 마이크로 채널 내부 유동에 놓일 때, 유동에 의한 전단력에 의하여 적혈구가 변형되는 정도를 레이저 회절(laser-diffraction) 기법을 이용하여 계측하는 영상분석기법으로서 실시간에 혈구의 변형성을 측정하여 이를 심혈관질환의 진단에 사용하고자 하는 목적으로 개발되었다. 또한, 다양한 유동 특성에서의 혈구의 변형성을 고찰하기 위하여 T형 및 +형 채널, 그리고 급작 축소 채널에서의 혈구 변형 거동 특성 등이 연구 및 발표되었다. 그 밖에, 생체유변학 분야에는 혈액점도를 측정할 수 있는 일회용 슬릿 점도계 개발에 대한 연구가 발표되었으며, 혈구의 응집률 측정 및 점도와의 관련 특성 연구 등이 발표되었다. **[신세현, 경북대학교]**

액체미립화 및 분무

2003년도 액체 미립화 및 분무 분야의 연구 논문은 대한기계학회논문집과 KSME International Journal에 18여 편이 게재되었다. 발표된 논문의 양으로 볼 때 예년과 거의 같은 수준이다. 주제별로 보면 가솔린 직접 분사의 분무에 대한 연구가 가장 많고, 포트 연료분사 분무, 디젤분무, 벽면충돌 분무, 분무 측정기법, 분무 모델링, 램제트분무, 정전분무 도장 등 다양하게 발표되었다.

보통 분무특성(spray characteristics)이라고 하면 거시적, 미시적 그리고 미립화 특성을 통틀어 말한다. 거시적(macroscopic) 특성에는 분무각, 분무관통거리, 분무폭 등이 속하게 되고, 미시적(microscopic) 특성에는 평균입경, 액적속도, 액적밀도, 액적크기분포 등이 포함된다. 그리고 미립화(atomization) 특성에는 분열길이와 분열시간이 해당된다. 이와 같은 전제하에 아래에서 거시적 및 미시적 특성이란 단어를 사용하기로 한다.

가솔린 직접분사는 GDI(Gasoline Direct Injection)또는 DISI(Direct Injection Spark Ignition)으로 표현되는데 가솔린 직접 분사 엔진용 인젝터의 거시적 분무특성을 Mie산란 방법과 엔트로피 해석방법을 이용한 연구가 이루어졌다. 이 연구는 GDI용 인젝터의 균일 예혼합 압측착화(HCCI : Homogeneous Charge Compression Ignition)엔진에의 적용가능성을 검토하기 위하여 가솔린과 디젤연료의 혼합비율에 따라 분무특성을 연구한 것이 특징이라 하겠다. 또 현재 가솔린 직접분사식 엔진에 장착되어 시판중인 고압 선회 분사기의 거시적 및 미시적 분무 특성을 고찰한 연구도 있다. 앞의 연구에서는 분무 영역을 leading edge, cone region, trailing edge, vortex cloud region으로 네 영역으로 나누어 고찰한 반면, 이 연구에서는 분무선단(leading), 주분무(main spray) 그리고 와운영역(vortex)의 세 영역으로 나누어 고찰한 것이 차이가 있다.

가솔린 직접 분사의 분무를 예측하는 모델을 개발하기 위한 연구가 두 연구 그룹에 의해 3편의 논문으로 발표되었다. GDI의 경우 고압 선회 또는 핀틀 분사기에서 분사되는 속빈(중공)원추형 분무이므로 디젤분무의 예측모델과는 달리 액막의 분열에 대한 모델을 도입해야 한다. 한 연구는 1차 분열모델로 WB 모델, LISA모델, 그리고 2차 분열모델로는 DDB모델과 APTAB모델을 선정하여 각각 조합한 혼합모델의 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 그 결과 액막의 분열길이 개념을 도입한 LISA모델과 APTAB모델을 혼합한 모델을 사용할 경우 분무관통거리와 SMD의 예측값이 실험값과 가장 잘 일치하였다고 보고하고 있다. 다른 연구 그룹의 한 연구에서는 1차 분열모델로 CSD모델과 LISA모델, 2차 분열 모델로는 DDB모델과 RT모델을 조합하여 실험결과와 비교 검토하였다. 이 논문에서는 분무관통거리, SMD를 예측하는데 CSD DDB혼합모델이 가장 추천할 만하다고 결론지었다. 한편 같은 연구 그룹에 의한 연구로 1차 분열모델은 LISA모델, 2차 분열모델은 DDB 모델을 쓴 혼합 모델의 경우 액적크기, 평균속도 등 분무거동을 잘 예측할 수 있다고 보고하였다. 위의 두 연구는 분사압력, SMD측정 위치 등 실험 조건이 약간씩 다르므로 직접 비교될 수 없지만 같은 실험실이므로 같은 실험 조건에서 실행한 결과와 혼합모델을 비교하는 것이 바람직하다고 생각된다. 따라서 GDI분무의 경우 같은 실험조건 및 결과와 여러가지 제한된 혼합모델의 종합적인 비교 검토에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

4밸브 시스템을 채택한 포트 연료 분사(port fuel

injection) 가솔린 엔진의 흡기 포트 내부의 분리 벽에 벽류생성을 억제하기 위한 한 가지 방법으로 이중 분무가 형성되는 이류체 분사기 중 Y 제트 노즐과 유사한 형태의 공기덮개 분사기(air shrouded injector)의 설계변수와 미립화 메커니즘을 연구한 논문이 발표되었다. 분무의 미립화에 영향을 주는 주된 설계변수로 공기구멍의 개수, 지름, 공기공급 각도를 달리 하였고 미립화 메커니즘을 설명하기 위하여 웨버수의 분포로 나타내었다. 이중 분무의 중심이 이루는 각인 분리각(separation angle)을 19로 고정시킨 것이 특징이다. 또 한편으로 위의 연구에서와 같은 형태의 노즐은 아니지만 이중분무 사이에서의 분무 유동 특성을 세 가지 분사기에 대해 미시적 분무 특성을 측정한 연구도 발표되었다. 이 경우는 세 가지 분사기의 분리각이 각각 달랐다.

디젤 분무에 대한 연구들을 살펴보기로 하자. 유해물질 배출 감소를 위해 직접 분사 디젤 노즐에서 많이 사용되고 있는 다공 노즐에서 지금까지의 대부분의 연구와는 달리 시간의 변화에 따른 분무의 거시적 및 미시적 특성을 측정한 경우가 있다. 이 연구에서는 분무의 반경방향으로 SMD 크기에 따라 내부영역, 혼합유동영역, 외부영역 세 가지로 나눌 수 있다고 하였다. 또 노즐형상과 작동압력 즉 개변압력, 주변압력, 그리고 분사압력 등이 연료 분무의 거시적 및 미시적 특성에 미치는 영향을 실험한 연구가 보고되었다. 둥근 입구형상 노즐의 경우가 모난 입구 형상 노즐의 경우보다 더 큰 액적이 생성되었고, 분무각은 둥근 입구 형상 노즐이 더 작았다. 개방압력을 증가시키면 분무관통거리와 분무각은 주변압력에 관계없이 증가한다. 분사압력이 상당한 수준까지 변해도 속도나 크기 분포는 그다지 변하지 않았고, 분사압력이 증가하면 더 많은 액적이 생성되었다. 디젤엔진에서 NOx와 PM을 동시에 저감시키기 위한 방법으로 고압분사를 채택하고 있으며 점점 더 고압화 되는 경향이 있다. 따라서 고온, 고압 분위기 하에서 분사압력을 변화 시켰을 때 분무구조 및 특성의 변화가 중요하게 된다. 이러한 배경에서 분사압력을 22MPa에서 112MPa로 증가시키고 수정된 KIVA II코드를 사용하여 계산한 결과와 실험치를 비교한 연구가 있다.

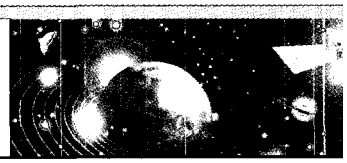
여러가지 분무에서 미시적 특성을 측정하는 데 과연 얼마나 조밀한(dense)분무까지 측정 가능할 것인가가 분무측정기법에 관한 연구에서 관건이다. 즉 노즐 출구에서 먼 위치의 경우 문제가 되지 않지만 가까운 위치에서는 액적의 수밀도가 크기 때문에 광학 측정장치에 한계가 있다. 따라서 위상 도플러 유속계 기술을 조밀 분무의 미시적 특성을 측정하는 데 이용할 경우 최적 광증배관 전압을 선정하게 되면 체적 플럭스나 액적 직경에 관한 데이터가 빠르게 변화하지 않는다는 연구 결과가 있다. 더 나아가 3차원 속도 측정에 있어서 PIV를 2차원에서 3차원으로 확장시키는 방법 대신에 홀로그래피 방법이 주목을 받고 있다. 이러한 추세에 발맞추어 분무 액적의 홀로그래피 속도 측정 시스템을 개발하는 도중에 중간 단계의 결과를 보고한 연구도 발견된다.

액적과 벽면 사이의 충돌현상을 수치적으로 해석하려는 연구 중의 하나로 최근에 제안된 CLSVOF 방법을 도입하여 액적의 복잡한 거동을 해석하기 위한 연구가 발표되었다. 고압 분위기에 분사된 액체 연료 분무의 증발에 관한 수치적 연구가 이루어졌다. 비정상 다차원모델을 사용하며 특히 고압 증발 모델을 도입하였다. 가스터빈 엔진에서 선회를 이용해 안정화를 도모하는 분사기에서 액체 분무 모델링에 관한 총설이 있다(KIJ 726 739). 우선 액체 제트의 분열, 액적의 분열, 분무와 벽면 충돌모델, 충돌하는 액판, 액판의 분열 등에 관한 기존 모델들을 검토하였다. 좀처럼 총설 형태의 논문 발표가 흔치 않은 국내 실정에 비추어 볼 때 의외라 할 수 있다. 그 외에 가장 간단한 로켓 시스템 중의 하나인 보염기가 있는 램제트 엔진의 연소실에서 분무 및 연소 특성에 관한 실험 연구가 발표되었고, 자동차 도장에 주로 사용되는 정전분무 도장의 표면질의 향상을 위한 연구도 있었다. **[노수영, 충북대학교]**

마이크로 유체역학*(Microfluidics)

(*Microfluidic의 번역으로 다양한 용어를 사용하고 있지만, 이 글에서는 마이크로 유체역학이라 칭한다).

MEMS(Micro-Electro-Mechanical-



System) 산업의 발달로 인해 복잡한 미소형상 내부의 유동현상을 규명할 수 있는 마이크로 유체역학(microfluidics)이 중요한 분야로 떠오르고 있다. 마이크로 유체역학은 유체를 사용하여 추력이나 에너지를 만들어내기 위한 연구 분야와 극미량 유체흐름의 반응, 혼합, 펌핑, 모니터링 또는 센싱을 제어하는 마이크로 유체기기(microfluidic device)나 마이크로 유체 시스템(microfluidic system)을 연구 개발하는 분야를 통칭한다. 마이크로 유체역학은 다양한 분야와 관련되어 연구가 진행되고 있다. 특히 LOC(Lab-On-a-Chip), SOP(System-on-Package), μ-TAS(Micro Total Analysis System) 등 Bio-MEMS 관련 분야는 완전히 새로운 거대한 산업 및 시장을 창출해 낼 것으로 예상되고 있어, 최근 들어 국내외에서 많은 연구가 진행되고 있다.

2003년도 대한기계학회논문집에 게재된 마이크로 유체역학과 직접적으로 관련된 논문은 모두 11편이 발표되었다. 논문들을 살펴보면, 마이크로 채널을 통해 흐르는 작동유체의 추적 기술에 관한 것이 5편 발표되었고, 마이크로 채널 내부에서 이온성 물질을 분리, 농축하는 기술에 관한 것이 3편, 마이크로 펌프와 같은 새로운 마이크로 유체 기기 관련 논문이 2편 발표되었다. 그러나 마이크로 유체역학은 그 응용분야가 광범위하기 때문에 간접적으로 연관된 논문을 포함하면 이보다 상당히 많은 수의 논문들이 포함될 것이다.

마이크로 유체유동 해석에서는 불연속체효과, 표면장력효과, 저 레이놀즈 수 효과, 그리고 다양한 스케일과 그에 따른 물리적 효과 등을 무시할 수 없다. 대한기계학회논문집에 발표된 논문을 분석해보면, 이런 효과들을 고려하여 마이크로 채널을 통해 흐르는 열유동 특성에 대해 수치적 방법을 통한 연구가 주로 수행되었다. 주된 연구로, 마이크로 채널 내 박막영역에서 증발에 의한 열유동 특성에 대한 수치적 연구가 있었고, 직사각형 단면을 갖는 마이크로 채널에서 완전 발달된 다층 유동특성과 Langmuir 미끄럼 경계조건을 이용한 미소 박리유동에 관한 연구가 수행되었다. 또한, 마이크로 채널 내 기하학적 교반 특성에 관한 연구 논문이 발표된 바 있다. 실험적 방법으로 가시화 기법 개발을 위한 X-ray 미세영상 기법이 제시되었다. 이러한 각종 연구에서는 향후 마이크로 유체기기나 마이크로 유체 시스템을 개발하는데 필요한 표면장력 효과, 채널의 다양한 스케일과 각종 물리적 현상에 대해 집중적으로 연구되었다.

마이크로 채널 내 이온성 물질의 농축과 분리와 관련한 실험 연구가 수행되었다. MOUDI(Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor)를 사용하여 미세 오리피스 노즐에서 입자 막힘이 미세 오리피스형 다단 임팩터의 입자포집 성능에 미치는 영향과 튜브로(tube reactor)를 이용해 얻어진 입자 크기 분포 특성이 실험적으로 연구된 바 있다. 또한 마이크로 채널 충전과정의 유동 가시화 실험에 대한 수치적 연구가 수행되어 마이크로 채널 충전 유동의 특성을 예상할 수 있는 수치적 기법이 제시되었다.

기기의 크기가 마이크로 수준으로 작아지면 그동안 고려하지 않았던 각종 효과가 무시할 수 없을 정도로 증가한다. 따라서 전술한 각종 효과 및 영향을 고려한 기기의 성능 해석과 설계 기법은 매우 중요하다. 이와 관련하여 지난 2003년도 대한기계학회논문집에 발표된 논문으로 2편의 점성구동 마이크로 펌프 관련 논문을 들 수 있다. 점성구동 마이크로 펌프의 성능 특성을 향상시키기 위해 듀얼 로터 타입의 펌프를 제시하였고 그 성능 연구가 수행되었다. 또한 비정렬 격자법과 수학적 최적화 모델을 조합하여 최적설계 해석 도구를 제시하였으며, 단일 실린더를 가진 점성구동 마이크로 펌프에 적용하여 그 적합성을 확인하였다.

이와 같이, 마이크로 유체역학의 연구는 미소입자의 물리적 이론 및 특성들을 정립하기 위한 것과 마이크로 수준의 밸프, 펌프 등의 설계 및 제작 기법 확립과 성능 향상에 중점을 두고 수행되고 있다. 향후에는 방열성능 향상을 위한 열유동과 표면력간 그리고 분자간의 상호작용을 이해하고 특성화하기 위한 심도 있는 연구가 수행될 것으로 기대되고 있다.

[김윤제, 성균관대학교]