

팬터그래프 팬헤드 강건최적형상에 대한  
공기역학적 특성에 관한 실험적 연구

**An Experimental Study on the Aerodynamic Characteristics  
of the Robust Optimized Shape of Pantograph Panhead**

노주현\*,      광민호\*,      박훈일\*,      이영빈\*,      이동호\*\*,      조환기\*\*\*  
Rho, Joo-Hyun   Kwak, Min-Ho   Park, Hoon-Il   Lee, Young-Bin   Lee, Dong-Ho   Cho, Hwan-Kee

-----  
**ABSTRACT**

High-Speed train has been developed and it becomes faster and environmental friendly. As trains run faster, Noise of trains is generated mainly by aerodynamic disturbance. Pantograph, both ends of trains, and gaps of coaches which are thought to be aerodynamic noise's factors are primarily studied. Pantograph is a similarly shaped metal framework on the roof of an electric high speed train, transmitting current from an overhead electric catenary wire. Panhead which contacts electric wires directly looks like a bluff strut, goes through flows, is sensitive to external disturbances and is one of the most important factors which decide whole vehicles' driving ability. In this study, aerodynamically robust optimized pantograph panhead shape is designed and then evaluated through subsonic wind tunnel test. To compare these with existing panhead rectangular shapes or circular cylinder shapes, By visualizing strong vortex flow patterns which are main noise sources, characteristics are compared and analyzed

-----

**1. 서 론**

최근 수십 년간 고속열차의 주행속도는 눈부시게 향상되었다. 일본의 신칸센이 1964년 200 km/h를 돌파한 이후, 2007년에는 프랑스의 TGV가 574.8 km/h 시대를 열었다. 이것은 헬리콥터보다 빠르며 항공기와 비슷한 속도이다. 이와 같은 고속열차는 세계 각국에서 꾸준히 개발되고 있다. 현재 우리나라에서 개발 중인 차세대 한국형 고속열차도 운행속도 350 km/h, 최고 속도 400 km/h를 목표로 하고 있다. 또한 현대의 고속열차는 고속화뿐만 아니라 고효율, 친환경적으로 연구개발 되고 있으며, 이러한 원천기술개발로 진입 장벽을 높이고 더욱 고부가치화 하고 있다. 특히 열차가 300 km/h 이상으로 주행 시 발생하는 소음의 70 %이상은 공기역학적 교란에 의한 소음이 대부분을 차지한다. 따라서 친환경적인 열차를 개발하기 위하여 공기역학적인 소음원인 팬터그래프나 차량 양끝 단, 객차 사이의 간극 등에 대해 주로 연구되고 있다. 그중에서도 팬터그래프 시스템은 열차의 지붕에 위치하여 전기를 공급하는 시스템으로, 그 중 가선과 직접 닿는 팬헤드는 유동을 가로지르는 뭉툭한 막대 형태로 외부 교란에 대해 민감하며 전체차량의 운전성능을 결정짓는 중요한 요소 중 하나이다. 따라서 선진 고속열차에 있어서는 그림 1과 같이 다양한 형태의 고성능 친환경 판토히드 및 팬헤드가 개발되어 사용되고 있다.

-----

\* 서울대학교, 기계항공공학부, 정회원

E-mail : boondo0@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7399 FAX : (02)882-7927

\*\* 서울대학교, 기계항공공학부, 항공우주신기술연구소

\*\*\* 공군사관학교, 항공우주공학과

본 연구에서는 공기역학적으로 강건 최적화된 팬터그래프 팬헤드의 기본 형상에 대하여 아음속 풍동실험을 통하여 그 성능을 평가하였으며 기존 팬헤드의 사각주나 원통형 형상의 특성과 비교하기 위하여, 주요 소음발생 원인인 강한 와류유동 형태에 대한 가시화 결과의 검토를 통하여 그 특징을 비교 분석하였다.

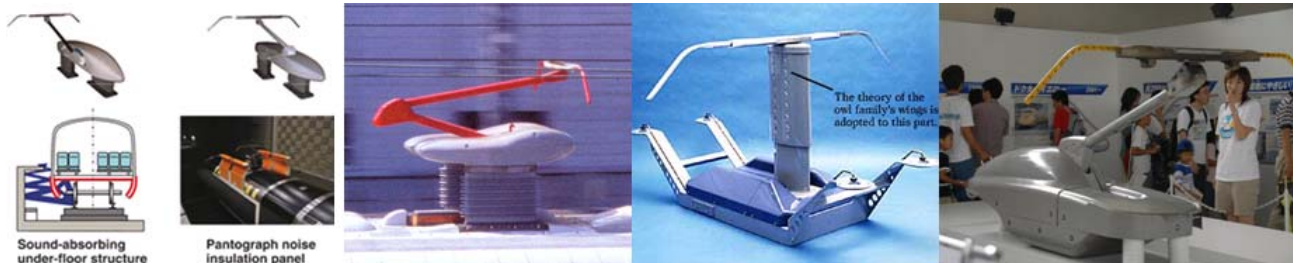


그림 1. 최신 고성능 친환경 판토그래프 예 (일본 신간선)

## 2. 판토그래프 시스템 및 팬헤드

대부분의 고속열차는 전기모터를 이용하는 전동차 구동형이며 이것은 일반적으로 커티너리선 이라고 불리는 전력선으로부터 모터에 전기를 공급하는 집전계(팬터그래프) 시스템이 필요하다. 팬터그래프는 전동차의 지붕 위에 위치하며 그림 1과 같이 높이가 조절되는 금속프레임 모양의 구조물로써 크게 열차 위쪽의 전선에 직접 닿아 전류를 전달하는 팬헤드와 링크 지지대 및 전기 절연체로 구성되어 있다.

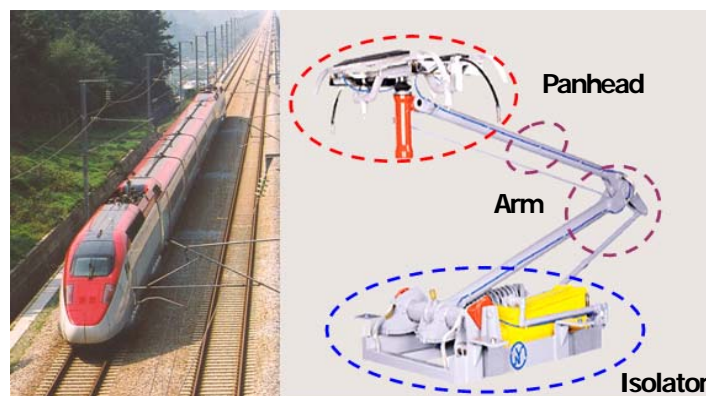


그림 2. G7 고속열차 판토그래프 시스템

최근 들어 열차가 더욱 고속화 고성능화됨에 따라 이러한 팬터그래프 시스템이 고속열차의 성능을 제한하는 매우 중요한 요소의 하나로 부각되고 있다. 열차가 고속으로 주행하게 되면 그림3의 모식도와 같이 팬헤드 압상력 증가로 인한 전선의 과도한 마모, 단락에 의한 아크, 외부 풍환경에 대한 민감성 증가, 공력소음 발생 등과 같은 여러 가지 문제가 팬터그래프 시스템에서 발생하게 된다.[1],[2]

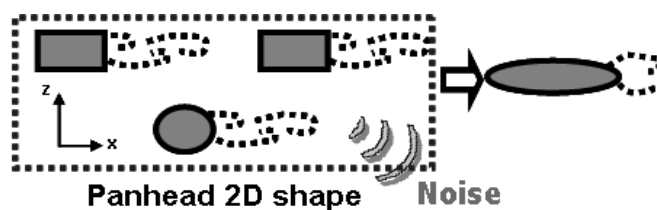
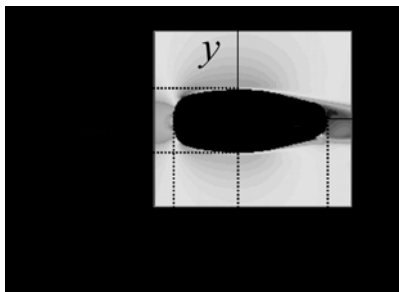


그림 3. 팬헤드에 의한 와류 및 공력소음

속도가 증가하면 할수록 동력전달성능은 더욱 더 공기역학적 특성에 민감하게 영향을 받게 되며 특히 팬헤드와 그것에 연결된 혼이 전체 시스템의 공력소음 및 공기역학적 특성을 결정짓는 매우 중요한 부분이 된다.[3]

### 3. 팬헤드 2D 형상 강건 최적 설계

본 연구에서는 전산유체역학 해석과 최적화 기법을 이용하여 팬터그래프의 팬헤드 단면 형상을 강건 설계하였다. 모든 공력특성 해석을 위한 수치계산은 본 연구실에서 개발한 압축성 N-S 방정식 수치해석 프로그램을 이용하여 일본 동북대학교 유체과학 연구소의 Integrated Super-Computation System(ISS)을 이용하여 수행하였다. 먼저 팬헤드의 형상은 그림 4와 식 (1)와 식 (2)에 정의된 바와 같이 앞쪽/뒤쪽 곡률 그리고 축 길이와 같은 설계 변수  $n, m, a_1, a_2$ 에 의해 전두부형상과 마찬가지로 함수형태로 정의한다.



$$\left(\frac{x}{a_1}\right)^n + \left(\frac{y}{b}\right)^n = 1; (x \leq 0) \tag{1}$$

$$\left(\frac{x}{a_2}\right)^m + \left(\frac{y}{b}\right)^m = 1; (x > 0) \tag{2}$$

그림 4. 팬헤드 2D 형상 함수정의

이와 같이 자유자제로 정의 할 수 있는 형태에 대해 Latin Hypercube 샘플링 및 크리깅 모델을 이용하여 속도 350 km/h 및 받음각  $-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 에서의 반응면을 구성한 후, GA와 EI값들을 이용하여 강건 최적화과정을 수행한다[4][5]. 팬헤드의 안정성과 강건성을 위해  $C_d$ 와  $C_l$  진폭, 그리고 외란에 대한 민감도  $\frac{dC_l}{d\alpha}$ 을 최소화 하여 외부교란에 강건한 팬헤드 2D 기본형상을 강건 최적설계 하였다. 그림 5의 결과와 같이 외란에 강건한 형태는 A에서 처럼 앞전이 뭉툭한 형태가 되면 저항을 줄이기위한 형태는 B와 같이 에어포일처럼 생긴 날씬한 형태가 된다. 따라서 환경 및 목적에 따라 파레토 셋에서와 같이 설계자가 선택을 하게 되면 된다[6].

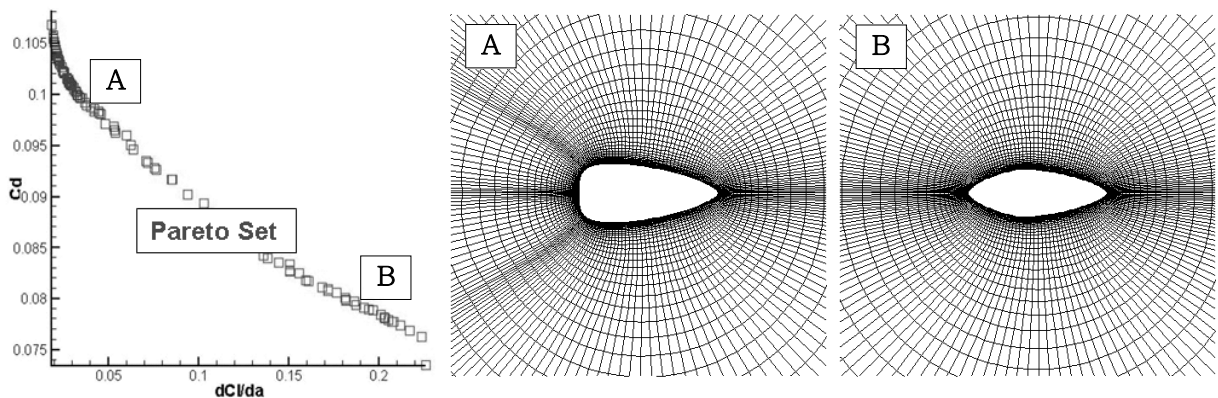


그림 5. 팬터그래프 팬헤드 강건최적설계

#### 4. 팬헤드 최적형상 풍동실험

앞 절의 연구결과와 같이 1차년도 연구를 통하여 고성능 친환경 판토타그래프 설계를 위한 강건 최적설계된 팬헤드 기본 형상에 대하여, 각각 그 공기역학적 특성을 더욱 정확히 파악하고 측풍과 같은 외부 외란에 대한 원천 기술을 개발하기 위하여 몽툰한 실린더 주변의 유동현상을 풍동실험을 통하여 검토하였다. 먼저 가속되는 유동 하에서의 유동특성을 검토하기 위하여 서울대 아음속 교육용 풍동에서 기본실린더 형상을 가지고 연구하였으며 이를 통하여 자유류의 속도가 가속되는 유동 하에서는 박리점의 이동 및 모멘텀 공급으로 저항이 일반적인 경우보다 낮은 레이놀즈 수에서는 더 작게 큰 레이놀즈 영역에서는 더 크게 나타남을 분석하였다[7][8]. 이 결과를 통하여 가속유동에서의 공력특성 변화가 더 급격함을 알아내었다. 또한 강건 최적설계된 팬헤드 기본 형상에 대하여 공군사관학교 교육용 풍동에 그림 6과 같이 각 형상에 대한 실제 크기(두께 25 mm 길이 35 mm ~ 150 mm)의 풍동실험 모델을 설치하여 공력특성 실험과 스모그 와이어 및 PIV 가시화를 통하여 현재 사용되고 있는 팬헤드의 형상과 성능특성을 비교 분석하였으며 풍동실험 가시화 결과를 통하여 후류의 교란과 공력소음 발생이 밀접한 관련이 있음을 검토하였다.



그림 6. 팬헤드 풍동실험 모델 및 경계층판

#### 5. 팬헤드 형상 연기 가시화 결과

풍동실험 연기 가시화는 낮은 유동속도 20 m/s에서 실험하였으며 액체 파라핀을 태워 후류의 특성을 파악하였다. 그 결과를 보면 현재 운용중인 팬헤드 기본 형상인 사각주 형태, 그림 7과 원형 실린더 형태 그림 8는 물체의 후류에서 강력한 전형적인 형태의 칼만 볼텍스가 형성됨을 볼 수 있다. 이는 다이폴 형태의 소음을 발생 시킬 수 있으며 진동하는 공력특성을 나타낸다. 이러한 진동하는 특성은 구조물의 진동수와 간섭을 일으킬 수도 있으며 전체 판토타그래프의 성능을 제한하기도 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 일본의 RTRI에서는 홀이나 슬롯의 형태의 구멍을 뚫어 후류진동을 제어하는 연구를 하였으면 그 결과 적용하여 현재 상용 서비스하고 있다. 이러한 형태, 그림 9의 효과를 검토하며 본 연구를 통해 개발된 최적설계 형상, 그림 10과 비교하여 그 효과를 예상하였다. 후류 와동의 크기의 감소는 공력소음을 저감시킨다. 더욱이 강건설계된 형상, 그림 10은 홀에서 유도되는 고주파 소음을 발생시키지 않으면서도 구조적으로도 더욱 유리한 형상을 보임을 알 수 있다.

#### 6. 팬헤드 형상 PIV 가시화 결과

연기 가시화의 단점인 낮은 속도제한을 Particle Image Velocity-meter 장치를 이용하여 그림 11~14에서와 같이 후류 와동을 30 m/s 조건에서 정량적으로 검토하였다. 결과에서 보이는 바와 같이 강건 최적설계된 형상이 매우 효과적임을 알 수 있다.

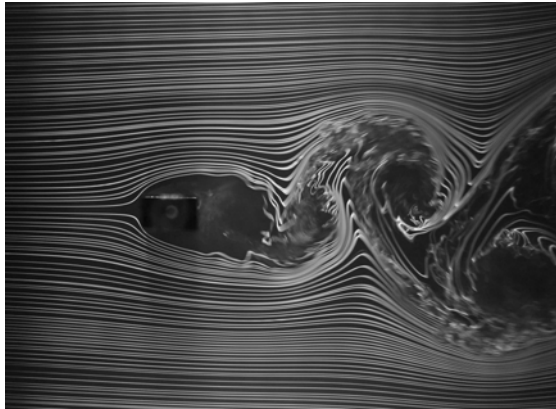


그림 7. 사각주형상 연기가시화

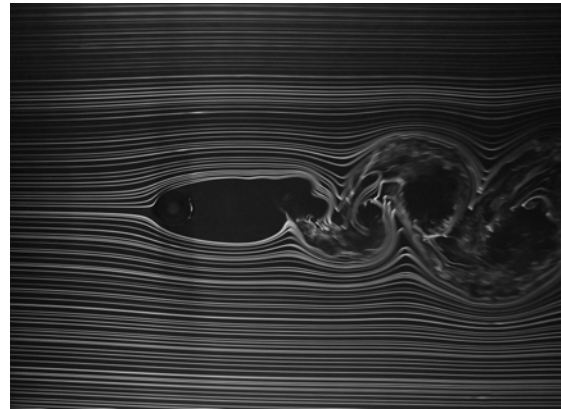


그림 8. 원형 실린더 연기가시화

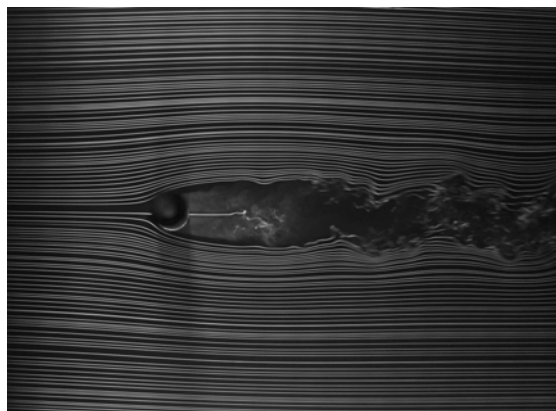


그림 9. 슬롯 실린더 연기가시화

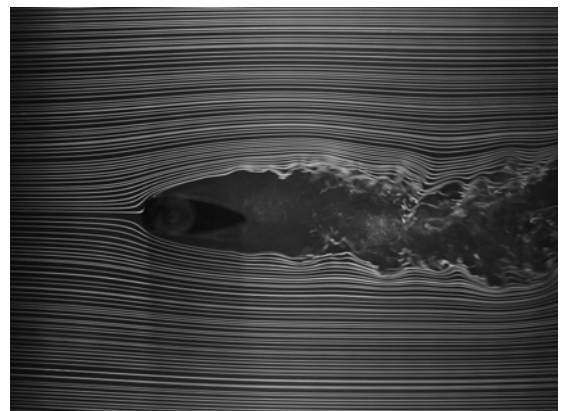


그림 10. 최적형상 연기가시화

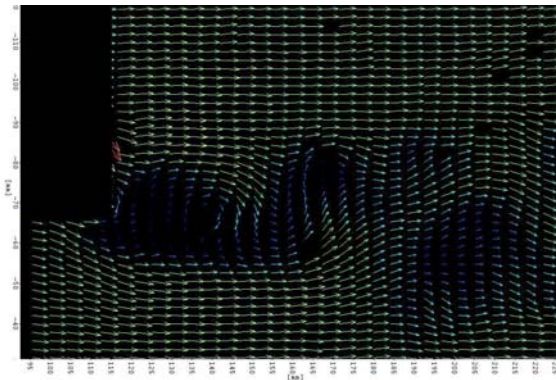


그림 11. 사각주형상 주변의 PIV 유속분포

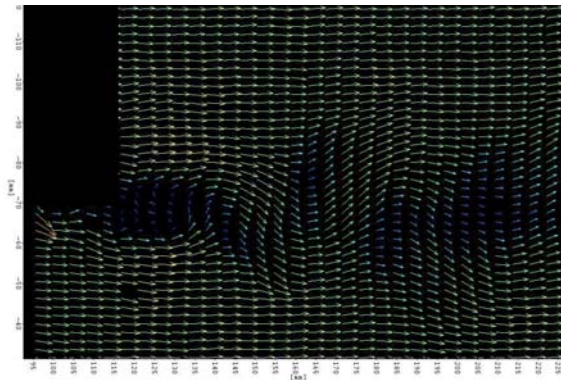


그림 12. 원형 실린더 주변의 PIV 유속분포

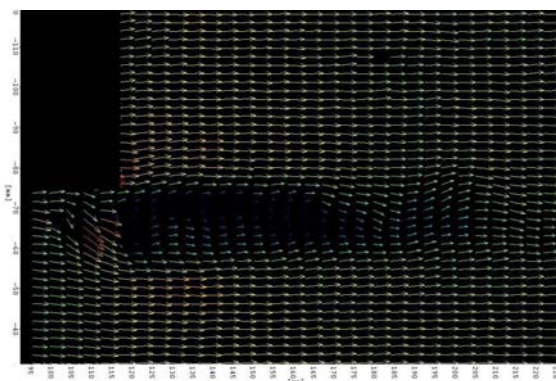


그림 13. 슬롯 실린더 주변의 PIV 유속분포

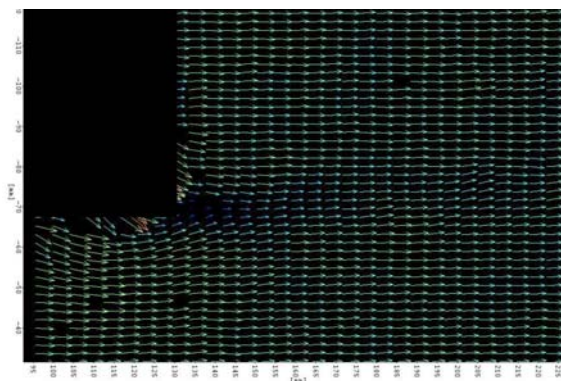


그림 14. 최적형상 주변의 PIV 유속분포

## 5. 결론

본 연구를 통하여 강건 최적설계된 팬헤드 2D 기본형상은 외부 유동조건의 변화에 대하여 강건하며 설계조건에서 압상력이 매우 작으며, 사각 실린더와 같은 일반적인 팬헤드 형상에 비해 월등한 항력 감소와 효율적인 공력 성능을 나타낸다. 공력특성에서 보이는 바와 같이 압상력 크기 및 진동하는 양력계수 폭의 감소는 전력선과 팬헤드의 마모와 아크발생을 줄일 수 있다.

또한 항력 계수 감소 및 가시화 실험을 통해 검증된, 작아진 후류 와동의 크기는 강건 최적설계된 팬헤드 형상이 공력소음 억제에 효과적임을 예상할 수 있다. 이와 같은 최적화 형상에 대한 기본 유동특성의 이해 및 분석 결과는 향후 고성능, 친환경 팬터그래프 3차원 형상 설계 및 기타 부착물에도 응용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 서울대학교 “차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단” 및 건설교통부 “미래철도기술개발사업”의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Hisung Lee, Dae-seop Moon, 2005, "Next Generation of Korea Train Express (KTX): Prospect and Strategies", Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, 255-262.
2. Joseph A. Schetz, 2001, "Aerodynamics of High-Speed Trains", Annual meeting. Rev. Fluid Mech., Vol.33, 371 414.
3. Mitsuru IKEDA, Takehisa TAKAISHI, 2004, "Perforated Pantograph Horn Aeolian Tone Suppression Mechanism", QR of RTRI, Vol. 45, No. 3, 169-174.
4. Shinkyu JEONG, Youichi MINEMURA and Shigeru OBAYASHI, 2006, "Optimization of Combustion Camber for Diesel Engine Using Kriging Model", Journal of Fluid Science and Technology., Vol. 1, 138-146.
5. R. H. Meyers, D. C. Montgomery(1995), Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons
6. 노주현, 곽민호, 강형민, 정지훈, 정신규, 이동호, 고속열차 팬터그래프 팬헤드 형상의 강건 최적설계, 대한기계학회 2007 추계학술대회 논문집, 2007
7. Y.B.Lee, J.H.Rho, K.H.Kim, D.H.Lee, "Experimental studies on aerodynamic characteristics on circular cylinder in steady and unsteady flow", 5th int. conference of Fluid mechanics, Mexico, Jan.25-27, 2008
8. 노주현, 이영빈, 김규홍, 이동호, 조환기, 비정상 가속유동의 공기역학적 특성 파악을 위한 실험적 연구, 한국항공우주 학술대회 논문집, 2008