발간등록번호
11-1613000-000802-01

ISBN 979-11-955588-1-0 93550

14PRTD
C061723-03

국토교통기술촉진연구사업

14PRTD-C061723-03

고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 풀스케일 팬터그래프 형상 개발 최종보고서

20 15. 4.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 서울대학교 산학협력단
공동연구기관 / 한국항공우주연구원
공동연구기관 / 한국철도기술연구원

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

최종보고서
고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 풀스케일 팬터그래프 형상 개발

2015. 4.
국토교통부
국토교통과학기술진흥원

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술 연구개발사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

제출문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

이 보고서를 "고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 풀스케일 팬터그래프 형상 개발에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2015. 4.

주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 김규홍
연 구 원 : 정성민
" : 노성준
" : 변재윤
" : 유진선
" : 이재상
" : 김형진
" : 허진영
" : 이준우
" : 한다빈
공동연구기관명 : 한국항공우주연구원
공동연구책임자 : 김철완
연 구 원 : 조태환
" : 김양원
" : 황승재
" : 황은수
" : 김상곤
" : 안영선
공동연구기관명 : 한국철도기술연구원
공동연구책임자 : 오혁근
연 구 원 : 노희민
" : 이태형
" : 곽민호
" : 홍지영
" : 유근준

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>14PRTD-C061723-03</td><td>해당단계 연구기간</td><td>2012.4.30.~2015.4.29</td><td>단계구분</td><td>(1)/(1)</td></tr>
<tr><td>연구사업명</td><td colspan="5">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="4">연구과제명</td><td>최상위 과제명</td><td colspan="4">고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 풀스케일 팬터그래프 형상 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="3">단위과제명</td><td colspan="4">(주관)고속열차 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 개발</td></tr>
<tr><td colspan="4">(공동)풍동시험을 통한 고속전철 팬터그래프의 공력성능 및 소음특성 실험 연구</td></tr>
<tr><td colspan="4">(공동)고속열차 팬터그래프 공력설계 평가검증 기술 개발</td></tr>
<tr><td>연구책임자</td><td>김규홍</td><td>총연구기간 참여 연구원수</td><td>총 : 48명
내부 : 16명
외부 : 32명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 1,182,000천원
기업 : 천원
계 : 1,182,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속부서명</td><td colspan="2">(주관)서울대학교 기계항공공학부
(공동)한국항공우주연구원 공력성능연구팀
(공동)한국철도기술연구원 고속열차연구팀</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>631</td></tr>
</table>

- 전산해석 결과와 항공우주연구원의 개방형 시험부의 실험결과를 통해서 주요 소음원 및 공력저항의 원인을 파악함
- 전산해석을 통해서 기존 싱글암 팬터그래프의 팬헤드 형상 및 암 형상 최적화 설계
- 최적설계를 수행한 팬터그래프 설계안을 바탕으로 풀스케일 팬터그래프 시험모델을 제작함
- 팬터그래프의 소음시험을 위해서 400km/h급 폐쇄형 시험부를 구축함
- 항공우주연구원의 폐쇄형시험부에서 최적설계된 팬터그래프 모델의 실험을 수행하고 동일한 조건에서 전산해석을 수행하여 전산해석의 정확성을 파악함
- 폐쇄형시험부 실험조건과 동일한 조건에서 기존 싱글암 팬터그래프의 전산해석을 수행하여 최적설계된 팬터그래프의 공력성능 및 공력소음 저감을 확인함
- 1/20 스케일 HEMU-430X 모델을 이용한 풍동시험 결과와 전산해석 결과로부터 팬터그래프 전방경계조건은 열차운행속도의 80%에 해당하는 속도로 제시하고 팬터그래프 관련 국제기준에 대한 분석을 수행하여 운용조건을 제시함
- HEMU-430X 속도별 환경 소음 Array 측정결과를 분석하여 팬터그래프에서 발생하는 소음 주파수 대역을 확인하고, 팬터그래프 상승/하강 시 환경소음을 비교 측정하여 300 km/h 주행 시 팬터그래프에 의한 소음 기여율을 확인
- 소음 Array 측정 및 환경소음을 측정하여, 실차에서 350km/h 주행 중 300~ 500Hz 대역이 팬터그래프의 주 소음 주파수임을 확인하였고, 이에 따른 최적설계 팬터그래프 적용 시 환경소음은 최대 1.6dB(A) 저감 가능할 것으로 평가
- 공력최적설계 팬터그래프 (Arm 질량 및 팬헤드 질량 변화)의 동특성 및 집전성능을 해석을 통하여 분석하였고 그 결과 최적설계에 따른 질량의 변화가 집전성능 및 동특성에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인하였음.

<table>
<tr><td rowspan="2">색인어 (각 5개 이상)</td><td>한글</td><td>팬터그래프, 공력소음, 공력저항, 최적설계, 고속철도, 풍동 시험, 마이크로폰 어레이, 실차시험</td></tr>
<tr><td>영어</td><td>pantograph, aerodynamic noise, aerodynamic drag, design optimization, High speed train, Wind tunnel test, Microphone array, Real train test</td></tr>
</table>

요약문

Ⅰ. 제 목

고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 풀스케일 팬터그래프 형상 개발

Ⅱ. 연구개발과제 개요

차세대 고속열차의 속도 향상으로 인해 고속열차 팬터그래프의 공기역학적 문제가 심화될 것으로 예측됨. 따라서 고속열차용 저소음 저저항 팬터그래프의 형상을 설계하는 것이 요구됨

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과

◎ 기존 싱글암 팬터그래프 공력소음 및 공력성능 특성 정립
◎ 기존 열차 상부경계층 수집 및 분석
◎ 팬터그래프 전방 경계조건 도출
◎ 전산해석을 통한 저소음 저저항 팬헤드 형상 최적설계
◎ 전산해석을 통한 팬터그래프 암 최적화 설계
◎ 전산해석을 통한 팬터그래프 암 연결부 설계
◎ 팬터그래프 공력소음 비중 제시
◎ 공력성능 및 공력소음 실험을 위한 폐쇄형 시험부 개발
◎ 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상의 공력소음 및 공력성능 특성 정립
◎ 최적 설계 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 성능 평가
◎ 최적 설계 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 해석
◎ 실차소음측정과 풍동소음측정 결과간의 비교 분석

Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

◎ 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 풍동시험모델 제작
◎ 팬터그래프 공력소음 풍동시험 기법 및 공력/소음특성 DB
◎ 실차소음측정과 풍동소음측정 결과간의 비교 분석

Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

◎ 기존 팬터그래프 시스템의 요소별 공력특성 파악 및 분석
◎ 기존 팬터그래프 형상 저소음 저저항 최적설계 수행
◎ 폐쇄형 시험부 소음시험장치 및 기법개발
◎ 최적설계 팬터그래프 공력소음 및 공력성능 특성정립
◎ 최적설계 팬터그래프의 환경소음저감 기여도 평가
◎ 최적설계 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 예측

Ⅵ. 연구성과 활용계획

◎ 팬터그래프 설계에 팬터그래프 공력 및 공력소음 분석결과 활용
◎ 팬터그래프 설계 시 최적설계 팬터그래프 설계안 적용

◎ 팬터그래프 개발 시 풍동소음결과와 실차소음 측정결과간의 비교 데이터베이스 활용하여 실차소음 예측

SUMMARY

Ⅰ. Title

Aerodynamic design technology of high speed train pantograph for aerodynamic noise and drag reduction and development of full-scale pantograph shape

Ⅱ. Outline

The speed-up of train causes numerous aerodynamic problem of high speed trian pantograph, such as aerodynamic drag and noise. Therefore, development of full-scale pantograph shape for aerodynamic noise and drag reduction is required.

Ⅲ. Research Items and results

◎ Build aerodynamic noise and aerodynamic performance characteristics of existing single arm pantograph

◎ Analysis upper boundary layer of existing train

◎ Draw inlet condition of pantograph

◎ Panhead design optimization for aerodynamic noise and drag reduction by computational analysis

◎ Pantograph arm design optimization for aerodynamic noise and drag reduction by computational analysis

◎ Pantograph arm knee design for aerodynamic noise and drag reduction by computational analysis

◎ Draw aerodynamic noise proportion of pantograph

◎ Development of closed test section for aerodynamic performance and aerodynamic noise test

◎ Build aerodynamic noise and aerodynamic performance characteristics of optimized pantograph

◎ Performance evaluation of full-scale optimized pantograph model

◎ Simulation quality of current collection and dynamic characteristic of optimized pantograph

◎ Comparison vehicle noise measurement with noise measurement by wind tunnel test

Ⅳ. Final results of research and applied results

◎ Design and production of full-scale optimized pantograph model for wind tunnel test

◎ Wind tunnel testing techniques of pantograph and aerodynamic performance and aerodynamic noise DB of pantograph

◎ Comparison and analysis of vehicle noise measurement and noise measurement by wind tunnel test

Ⅴ. Achievement of research objectives and effects

◎ Aerodynamic characterization and analysis of each part of existing pantograph system

◎ Design optimization of existing pantograph system for aerodynamic noise and drag reduction

◎ Development of closed test section and wind tunnel testing techniques for aerodynamic performance and aerodynamic noise test

◎ Analysis aerodynamic noise and aerodynamic performance characteristics of optimized pantograph

◎ Evaluation environment Noise Reduction Contribution of optimized pantograph

◎ Prediction dynamic characteristic and quality of current collection of optimized pantograph

Ⅵ. Application

◎ Application of aerodynamic noise and aerodynamic performance characteristics to design of pantograph

◎ Design guideline of next generation high speed train pantograph

◎ Application of comparison and analysis of vehicle noise measurement and noise measurement by wind tunnel test to development of pantograph

CONTENTS

Chapter 1 Introduction ····· 9
1 Introduction ····· 9
2 Necessity of research ····· 10
3 Research objective and contents ····· 12
4 Domestic and foreign research results ····· 18
Chapter 2 Research Items and results ····· 27
1 Annual Research Results Summary ····· 27
2 1st year research results ····· 30
3 2nd year research results ····· 211
4 3rd year research results ····· 301
Chapter 3 Final results of research and applied results ····· 504
1 Key results of research ····· 504
2 Detailed description of each results ····· 504
3 Main research results ····· 519
4 Technology implementation and application examples ····· 523
5 Domestic and international market prospects of research ····· 524
Chapter 4 Achievement of research objectives and effects ····· 530
1 Achievement of research final objectives ····· 530
2 Technical effects of research and developments ····· 533
3 Economic effects of research and developments ····· 534
4 Policy effects of research and developments ····· 535
Chapter 5 Application plan of research results and additional research needs ····· 536
1 Application plan of research results ····· 536
2 Additional research needs ····· 536
Chapter 6 Reference ····· 538
Chapter 7 Supplement ····· 542
1 Quantitative and qualitative results ····· 542
2 Information of international science and technology collected in research ····· 547
3 3rd year wind tunnel experimental results ····· 552

목차

제1장 연구개발과제 개요 ····· 9
1절 연구개발 개요 ····· 9
2절 연구개발 필요성 ····· 10
3절 연구개발의 목표 및 내용 ····· 12
4절 국내외 연구개발 실적 및 기술·산업현황 ····· 18
제2장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 27
1절 연차별 연구개발결과 요약 ····· 27
2절 1차년도 연구 수행 내용 및 결과 ····· 30
3절 2차년도 연구 수행 내용 및 결과 ····· 211
4절 3차년도 연구 수행 내용 및 결과 ····· 301
제3장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 504
1절 연구개발 핵심성과 ····· 504
2절 핵심성과별 세부설명 ····· 504
3절 주요 연구성과 ····· 519
4절 기술실시 및 적용사례 ····· 523
5절 기술개발성과의 국내외 시장전망 ····· 524
제4장 연구목표 달성 및 효과 ····· 530
1절 연구개발 최종목표 달성도 ····· 530
2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 533
3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석 ····· 534
4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 535
제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 536
1절 연구성과 향후 활용방안 ····· 536
2절 추가연구 필요성 등 ····· 536
제6장 참고문헌 ····· 538
제7장 부 록 ····· 542
1절 정량적 성과와 정성적 성과 ····· 542
2절 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 547
3절 3차년도 최적설계 팬터그래프 풍동시험 결과 ····· 552

제1장 연구개발과제 개요

1절 연구개발 개요

우리나라는 눈부신 경제발전으로 사회적, 경제적인 활동이 활발해지면서 대량의 인적 및 물적 자원의 수송을 필요로 하고 있으며 온실가스 문제 및 자원고갈에 따라 정부에서 도로 기반의 물류수송이 아닌 차세대 친환경 에너지 기반의 철도차량교통물류시대 전환을 요구하고 있다 (그림 1-1-1.).

화물물동량의 수단별 수송현황 (단위 : 천톤/년, %)

연도	철도		도로		해운		항공		합계
	수송량	분담율	수송량	분담율	수송량	분담율	수송량	분담율	
2000	45,240	6.69	496,174	73.36	134,467	19.88	434	0.06	676,315
2001	45,122	6.25	535,725	74.22	140,544	19.47	431	0.06	721,823
2002	45,733	5.92	584,573	75.68	141,706	18.35	433	0.06	772,444
2003	47,110	6.21	565,456	74.57	145,327	19.16	423	0.06	758,316
2004	44,512	6.55	518,856	76.37	115,636	17.02	409	0.06	679,413
2005	41,669	6.06	526,000	76.51	119,410	17.37	372	0.05	687,451
2006	43,341	6.27	529,278	76.62	117,805	17.05	355	0.05	690,778
2007	44,562	6.23	550,264	76.94	120,079	16.79	316	0.04	715,222
2008	46,779	6.47	555,801	76.88	120,079	16.61	254	0.04	722,913
2009	38,898	5.07	607,480	79.24	120,032	15.66	269	0.04	766,679
2010	39,217	5.04	619,530	79.63	119,022	15.30	262	0.03	778,031

※자료 : 국토해양부, 국토해양통계연보 각연도

그림 1-1-1. 화물물동량의 수단별 수송현황

이 수요를 충족하기 위해 우리나라에서는 고속전철에 대한 고속화와 효율성을 고려하여 최고속도가 430km/h인 HEMU-430X의 개발완료 단계에 있으며, 앞으로 2020년까지 국내 고속전철의 운행속도를 350km/h까지 증속시킬 예정이다. 고속화 과정에서 기존의 열차에 비하여 공력소음과 공기저항 증가 문제가 대두되어, 향후 안정적이고 친환경적인 고속열차 운행을 위해서는 이러한 공기역학적 문제의 해결이 요구되고 있다. 특히, 앞으로 운용속도가 될 350km/h의 속도는 음속의 약 30% 이상에 해당되는 속도로 이 경우 공기저항이 총 주행저항의 80% 이상을 차지하게 되며(표 1-1-1.), 공력소음과 열차간의 교행, 터널 주행시의 미기압파 발생과 같은 심각한 공기역학적 문제가 야기된다. 특히, 그림 1-1-2와 같이 열차의 동력원으로서 지붕에 위치하여 가선에서 전력을 받아들이는 팬터그래프는 열차의 공력소음과 항력 증가를 심각하게 야기하기 때문에 열차의 증속에 방해요인으로 보고되고 있다.

표 1-1-1. KTX-산천의 저항에서 공기역학적 저항이 차지하는 비율

	100km/h	300km/h	400km/h
열차전체항력	1052.8[N]	5159.6[N]	8479[N]
공기역학적 항력	422[N]	3798[N]	6572[N]
차지비율	40.08%	73.61%	79.63%

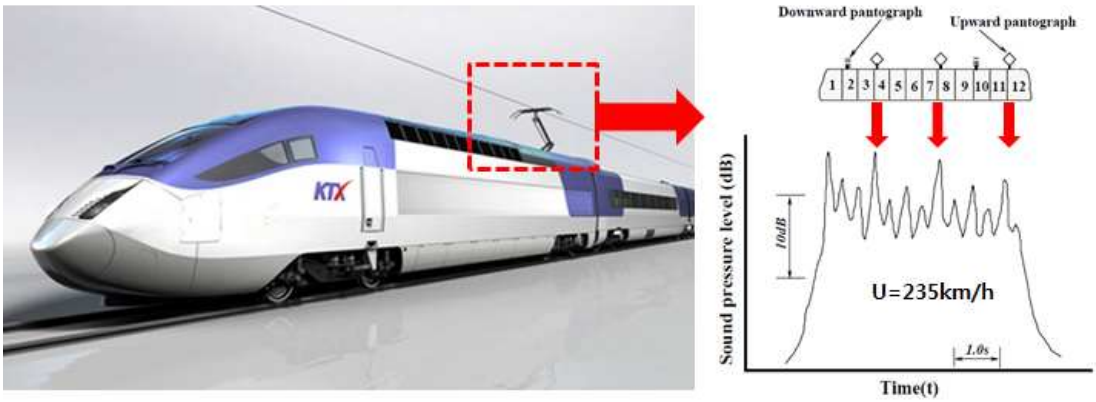


그림 1-1-2. KTX-산천의 팬터그래프와 팬터그래프에서 발생하는 소음 예시

우리나라는 1990년대 중반부터 G7과 HEMU-430X 고속전철 개발을 해오면서 현재 열차의 많은 부품들을 국산화하여 왔지만, 팬터그래프에 대한 공기역학적 연구와 개발은 현재까지도 미흡하여 전량 외국에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 따라서 팬터그래프의 수입대체 및 나아가 고속전철의 수출경쟁력 향상을 위해 고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 형상 설계기술을 개발하고자 한다.

2절 연구개발 필요성

1. 기술적 측면

대부분의 열차개발 선진국에서는 각국의 가선환경과 고속전철의 특성에 맞는 팬터그래프를 개발하여 상용화하였으며, 팬터그래프는 개발기술에 관한 기술이전을 꺼리는 핵심장치 중 하나이다.

현재 우리나라는 최고속도 430km/h를 목표로 고효율 동력분산형 고속전철(HEMU-430X)을 개발 중에 있으며, 앞으로 2020년까지 열차의 운행속도를 350km/h까지 운행속도를 증속할 예정이다. 따라서 기설치된 가선 조건에서 공력소음이 작고, 안정한 집전성능을 갖는 저소음, 친환경의 팬터그래프를 필요로 하고 있으며, 기존 팬터그래프의 성능개선이 요구되고 있다.

항력측면에서는 팬터그래프는 외부유동에 직접 노출되고 복잡한 형상으로 인하여 고속전철의 공기역학적 항력 중 약 8%정도 차지하고 있는데 팬터그래프의 개선으로 그림 3과 같이 열차의 전체저항의 2%까지 감소시킬 수 있다.

안정성측면에서는 팬터그래프의 복잡한 형상으로 인하여 주위 유동이 불안정해져 고속주행에 의한 이선율 증가 및 안정성을 저하시키는데 형상설계를 통해서 이를 극복할 수 있다.

마지막으로, 외국의 가선조건과 우리나라의 가선조건은 차이가 있기 때문에 수입된 팬터그래프를 그대로 적용할 경우 적용성의 한계를 가질 수 있고 우리나라 가선 실정에 맞지 않는 부가장치(가선높이의 변환장치 등)들을 포함하는 문제를 가지고 있어 효율성 측면에서 한국 가선조건에 알맞은 한국형 고속 팬터그래프의 개발이 요구되고 있다.

위에서 언급한 운행속도 향상 시 발생할 수 있는 소음 및 공기저항 문제 등을 해결하기 위해 고속 주행 시 저소음/저저항 특성을 갖는 팬터그래프의 공기역학적 최적 형상 개발이 필수적이다.

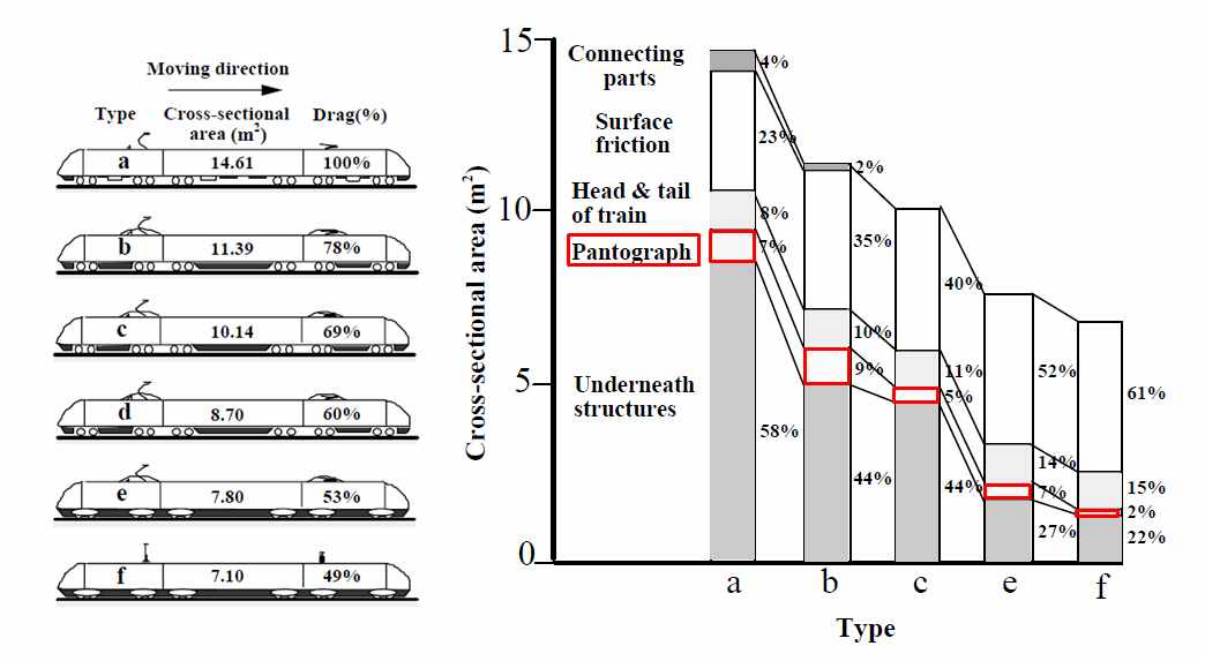


그림 1-2-1. ICE의 공기역학적 항력 분포와 팬터그래프에 의한 항력변화

2. 경제 산업적 측면

프랑스와 독일, 일본은 세계 고속철도 시장에서 경쟁력 우위를 유지하기 위해 신기술의 고속열차 개발과 속도 향상을 위한 연구개발이 꾸준히 이루어져 왔다. 특히 그림 4와 같이 고속전철 증속의 원천기술인 팬터그래프에 대하여 지속적으로 자국철도환경에 적합한 팬터그래프를 개발하여 왔다. 유럽 팬터그래프의 경우, 유럽 여러 나라를 거쳐 운행해야하기 때문에 소음감소 관련 연구보다는 주로 집전 성능 및 호환성 향상을 목표로 연구개발이 되어온 반면, 일본의 경우 복잡한 도심지를 통과하며 운행하기 때문에 소음감소를 주목표로 연구가 진행되어 왔다. 우리나라는 KTX-산천과 HEMU-430X의 독자적인 개발을 토대로 해외 고속전철 수출시장에서 유럽과 일본의 고속전철과 경쟁하고 있다. 하지만 고속전철용 팬터그래프의 경우 프랑스, 독일의 팬터그래프 일본 등이 기술을 독점하고 있으며 기술유출을 극도로 제한하기 때문에 독자적인 기술개발만이 관련 기술의 자립 및 세계 경쟁력 확보를 위한 유일한 방안이다. 저소음/저저항 공력설계 기술 확보를 통해 향후 팬터그래프 국산화가 이루어질 경우 국산화를 통한 수입대체 효과가 기대되며, 세계 고속전철시장의 높은 진

입장벽을 극복할 수 있는 핵심 원천기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

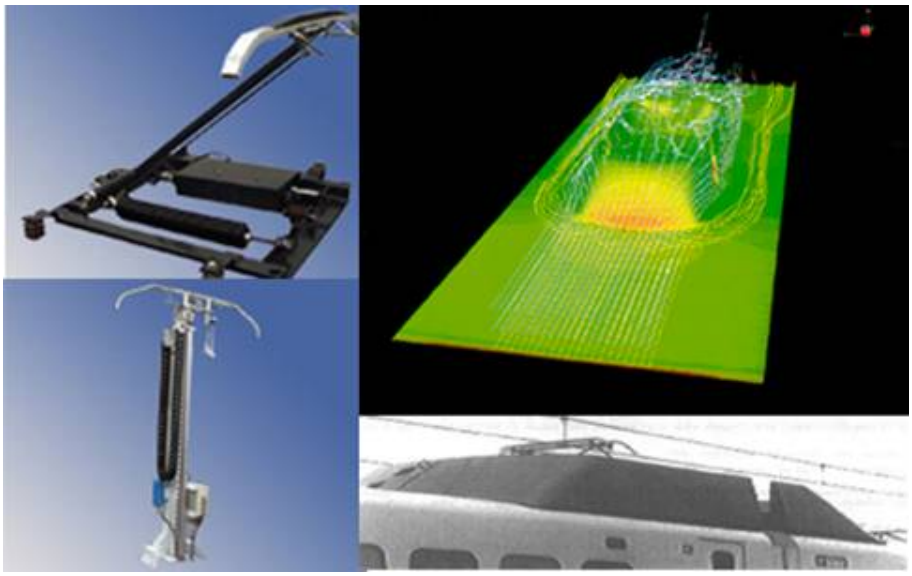


그림 1-2-2. 유럽의 다양한 팬터그래프와 팬터그래프 커버 예

3. 사회문화적 측면

고속전철이 고속에서 발생할 수 있는 심각한 문제들 중 고속에서 가장 주요한 것이 집전계 즉, 팬터그래프에서 발생하는 고주파 소음이다. 본 연구를 통해 고속용 친환경 저소음/저저항 팬터그래프 형상 설계 기술을 개발하게 되면 열차 주행 중 발생하는 공력소음을 감소시킬 수 있을 것으로 예상되며 이를 통해 열차선로 주변에 거주하는 국민들의 소음관련 민원제기를 효과적으로 대처할 수 있을 것이다.

한국형 저소음/저저항 팬터그래프 개발을 통하여 팬터그래프에 대한 기술발전과 팬터그래프 연구경험을 가진 인력배출을 통하여 국가 경쟁력 향상에 기여할 것이다.

3절 연구개발의 목표 및 내용

1. 연구개발 최종목표

가. 최종목표

본 연구의 최종 목표는 고속열차용 저소음, 저저항 팬터그래프 형상 공력설계 기술 확보 및 풀스케일 팬터그래프 형상 모델의 시험 검증이며, 이를 위해 1) 기존 팬터그래프의 공력소음 및 공력성능 특성 정립, 2) 운행속도 350km/h에서 공력소음 및 공기저항 저감을 목표로 팬터그래프 공력 형상설계 기술 확보, 3) 형상 설계된 팬터그래프 모델의 소음평가 검증기준 마련, 4) 풀스케일 팬터그래프 형상 모델의 공력소음 및 공력성능을 검증하여 기존 팬터그래프 대비 공력소음과 공기저항을 10% 감소시키는 것 5) 형상 최적 설계 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 수치 시뮬레이션 등을 목표로 한다. 연구개발의 체계는 그림 1-3-1과

같다.

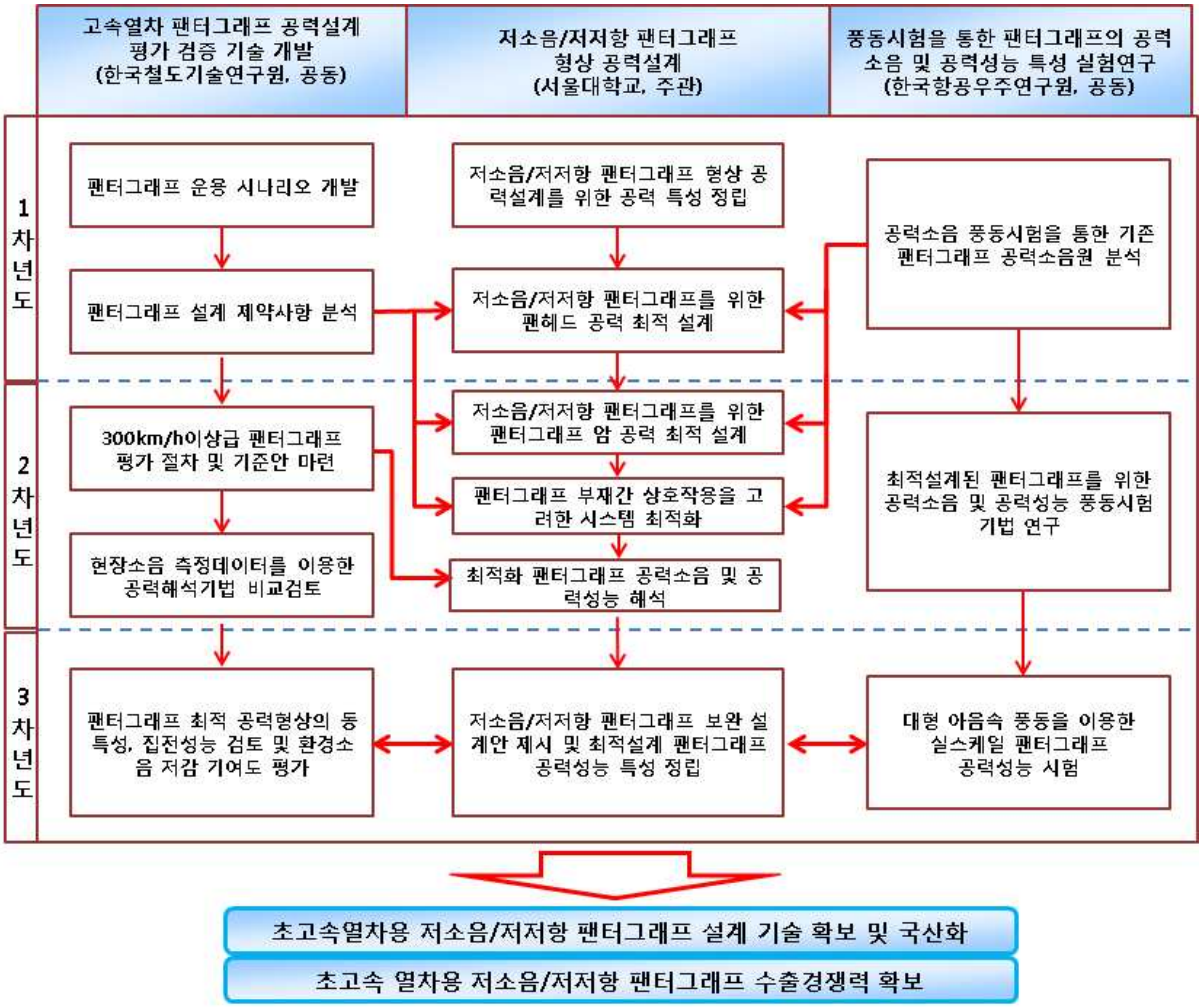


그림 1-3-1 고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 풀스케일 팬터그래프 형상개발 연구흐름도

나. 최종목표의 성격 및 설정근거

현재 우리나라에서 개발 중인 고속열차(HEMU-430X)는 최고속도가 430km/h이고 향후 2020년까지 운행속도가 기존 300km/h에서 350km/h이상으로 상향조정 예정이다. 이처럼 고속열차의 고속화가 진행됨에 따라 저속에서 무시되었던 공력소음 문제가 350km/h에서는 다음 표와 같이 심각하게 발생될 것으로 예상된다. 특히 고주파소음을 발생하는 팬터그래프가 크게 문제가 될 것으로 예상된다.

Level at 5m dB(A)	100 kph	200 kph	300 kph	350 kph
Wheels, coach	82.4	89.7	97.2	98.1
Wheels, forward power car	82.9	89.4	102.5	100.4
Wheels, rear power car	81.7	89.6	102.7	98
Pantograph	82.1	91.3	103.5	104.3
Cooling fan, front	78.9	87.9	101.3	104
Cooling fan, rear	78.3	79.6	102.1	100.5
Front window / Roof	77.9	88.5	102.2	104.9
Intercar gap	81.7	87.1	92	98.1
Bogie (aero)	76.8	78.6	90.1	93.3

그림 1-3-2 TGV 소음분포 예상도

공력소음은 열차의 소음원 중 열차속도 증속에 따라 가장 급격히 증가되는 소음원으로, 최근의 열차증속경쟁과 친환경적인 이슈를 고려할 때 공력소음 저감연구는 필수적이다. 또한 공력소음의 정확한 평가를 위해서 관련 시험절차서 및 검증안이 마련되어 있어야 하나, 현재 즉시 활용할 수 있는 해외 규정이 전무하기 때문에 소음 관련 평가 절차를 포함한 검증 기준에 관한 연구가 필요하다. 이러한 연구는 향후 소음 관련 인증안 개발에 있어 소중한 참고 자료로 활용될 수 있다.

2. 연차별 연구목표 및 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ 기존 싱글암 팬터그래프 시스템의 공력소음 및 공력성능 특성 정립	▪ 전산해석을 통한 기존 싱글암 타입 팬터그래프 주위의 유동해석 ▪ 풍동시험을 통한 기존 싱글암 타입 팬터그래프 시스템의 소음특성 분석 ▪ 전산해석과 풍동시험을 통한 고속용 저소음/저저항 팬터그래프형상 공력 설계를 위한 공력 특성 정립
	▪ 열차 상부경계층 분석을 통한 팬터그래프 전방경계조건 연구	▪ 기존 열차 상부경계층 수집 및 분석 ▪ 풍동시험을 위한 팬터그래프 전방경계조건 도출
	▪ 팬터그래프 운용시나리오 및 형상 설계요구조건 도출	▪ 팬터그래프 운용시나리오 구축 - 일반운행환경 조건 - 비상운행환경 조건 ▪ 팬터그래프 형상설계 요구조건 도출 - EN, TSI, 한국 기준을 고려한 팬터그래프 공력설계 평가 기준 도출 - 팬터그래프 운용시나리오 분석을 통한 설계 요구조건 도출 - 접촉력 및 전차선 압상력 변위 기준 검토 ▪ 팬터그래프 설계제약사항 분석
	▪ 기존팬터그래프의 동특성 및 집전성능 분석	▪ 기존 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 시뮬레이션 및 검증
	▪ 공력성능 향상을 위한 성능결정인자 파악	▪ 팬터그래프 요소별 소음, 공력특성 분석 및 성능 결정 인자 파악 ▪ 팬터그래프 공력성능 향상을 위한 파라미터 선정
	▪ 팬헤드 형상 최적 설계	▪ 전산해석을 통한 저소음/저저항 팬헤드 형상 최적화 설계

2차년도	▪ 팬터그래프 암 형상 최적 설계	▪ 전산해석을 통한 저소음/저저항 팬터그래프 암 최적화 설계 - 양산화를 고려한 실용화 측면 설계안(싱글암 타입) ▪ 부재간 상호작용을 고려한 팬터그래프 최적화연구 - 팬헤드와 팬터그래프 암과의 공력영향 최소화 방안연구
	▪ 전산해석을 통한 최적화된 팬터그래프 형상 소음 평가 및 검증	▪ 전산해석을 통한 최적화된 형상의 설계요구조건에서의 팬터그래프 소음 평가 및 검증
	▪ 350km/h 급 팬터그래프 소음 평가 절차 및 검증기술 개발	▪ HEMU-430X 환경소음 측정데이터 분석을 통한 팬터그래프의 적절한 공력소음 비중 제시 - 측정 환경소음 데이터의 도플러 보정을 통한 소음 데이터의 정규화 - 주파수 분석과 위치 분석을 통한 팬터그래프의 공력소음 비중 도출 및 적절한 소음 비중 제시 - 속도 증가에 따른 각 소음원별 공력소음 증가량 도출 ▪ 350km/h 급 팬터그래프의 평가절차를 포함한 공력소음 검증안 마련
	▪ 풀스케일 팬터그래프 형상 공력 소음 및 공력성능 검증을 위한 시험기법 연구	▪ 풀스케일 팬터그래프 형상의 공력소음 시험기법 개발 ▪ 풀스케일 팬터그래프 형상의 공력성능 시험기법 개발

3차년도	▪ 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 제작	▪ 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 제작 ▪ 운용시나리오 별 최적설계 팬터그래프 형상 주위 유동 전산해석
	▪ 최적 설계 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 시뮬레이션	▪ 최적설계 팬터그래프의 동특성 해석 및 검토 ▪ 최적설계 팬터그래프의 압상력 에 의한 전차선 변위 검토
	▪ 최적 설계 팬터그래프의 환경소음 저감 기여도 평가	▪ 팬터그래프 형상 최적화 결과에 따른 환경소음 저감도 예측 및 평가
	▪ 최적 설계 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 성능 평가	▪ 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 공력 성능시험 ▪ 2차 년도에 도출된 평가 절차에 따른 최적 설계된 팬터그래프 형상 공력 성능평가
	▪ 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상의 공력소음 및 공력성능 특성 정립	▪ 전산해석과 풍동시험을 통한 최적 설계된 팬터그래프 형상의 공력소음 및 공력성능 특성 정립

4절 국내외 연구개발 실적 및 기술·산업현황

1. 연구진의 기존 연구

국내에서는 고속전철 개발에 있어 KTX-산천을 성공적으로 개발하였으며, HEMU-430X의 시운전 시험을 목전에 두고 있는 상황이다. 300km/h 미만에서는 팬터그래프에서 발생하는 공력소음이 주요적이지 않아 공력소음을 고려한 팬터그래프 연구개발이 미진하였지만 고속화에 따라 저소음 팬터그래프에 대한 요구가 커지고 있다. 그러나 아직 초기 단계에 머물러 있으며, 특히 공력소음이 주요적이 되는 300km/h 이상에 대해서는 팬터그래프의 공력소음에 대한 평가 절차안 등은 현재 마련되어 있지 않다.

국내의 고속전철용 팬터그래프 개발에 대한 일례로, 2000년대 350km/h급 G7 팬터그래프 개발하였으며, G7 HSR-350X 고속전철이 최고속도 352km/h의 기록을 달성하는데 일조하였다.

현재까지의 연구개발 현황을 정리하여 보면, 우리나라의 팬터그래프 연구는 팬터그래프의 구조와 동특성을 고려한 연구가 수행된 바 있지만 고속에서 중요시 되는 공기역학적 고려 연구는 미흡한 실정이다.

팬터그래프 시스템에 대한 기초연구로서는 서울대학교에서 더블암타입 팬터그래프의 공기저항을 파악하였으며(그림 1-4-1과 그림 1-4-2), 그림 1-4-3과 같이 팬터그래프의 공기역학적 성능을 향상시키고자 팬헤드 형상을 저항이 작고 외란에 강건하도록 최적화하여 실험적으로 이를 평가하여 양산화방안을 모색한 바 있다. 그리고 그림 1-4-4과 같이 더블암타입 팬터그래프, 싱글암타입 팬터그래프, 잠망경타입 팬터그래프에 대한 공력특성을 파악하였으며, 그림 9와 같이 팬터그래프 시스템의 공력성능을 향상시키고자 팬터그래프 커버 형상을 개념 설계하여 HEMU-430X 팬터그래프 커버 설계에 가이드라인을 제시하였다. 동일 사업에서 철도연과 항우연은 팬터그래프 소음의 환경영향을 절감하기 위한 커버 및 방음판에 대한 연구를 수행하였다.

그 밖에 홍익대학교에서는 팬터그래프의 진동 소음에 대하여 기초연구가 수행되었고, 아주대학교에서는 팬터그래프의 동특성에 대한 연구를 수행하였다.

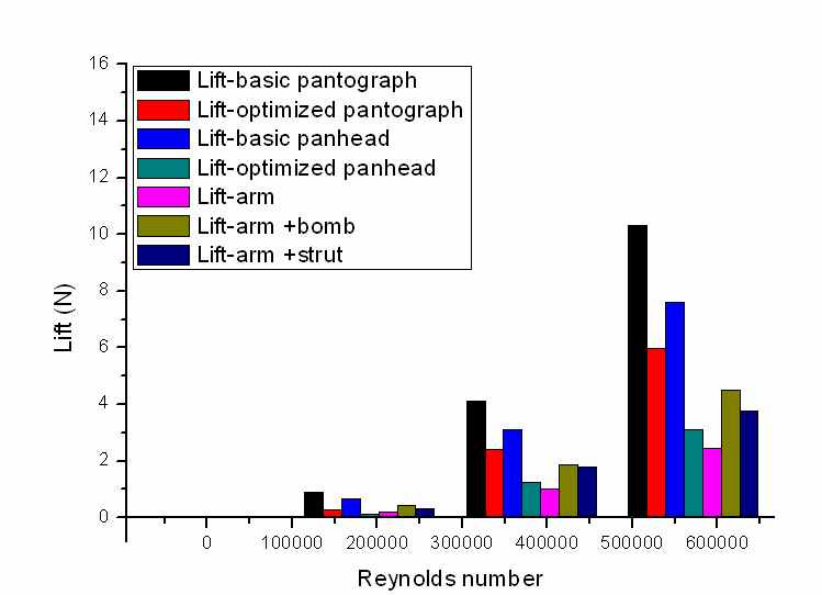


그림 1-4-1. 더블암타입 팬터그래프 양력분포(풍동실험결과, 서울대학교)

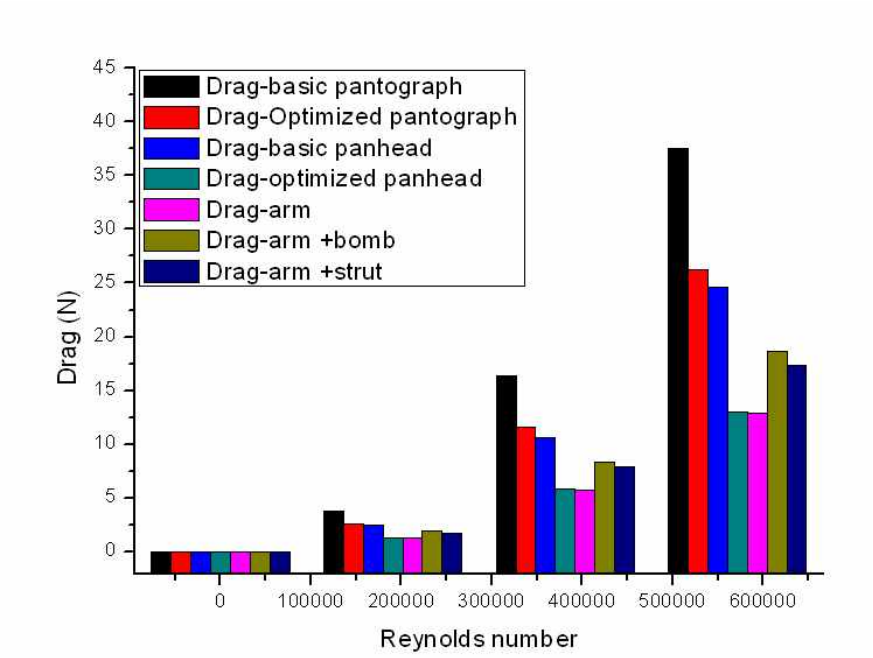


그림 1-4-2. 더블암타입 팬터그래프 항력분포(풍동실험결과, 서울대학교)

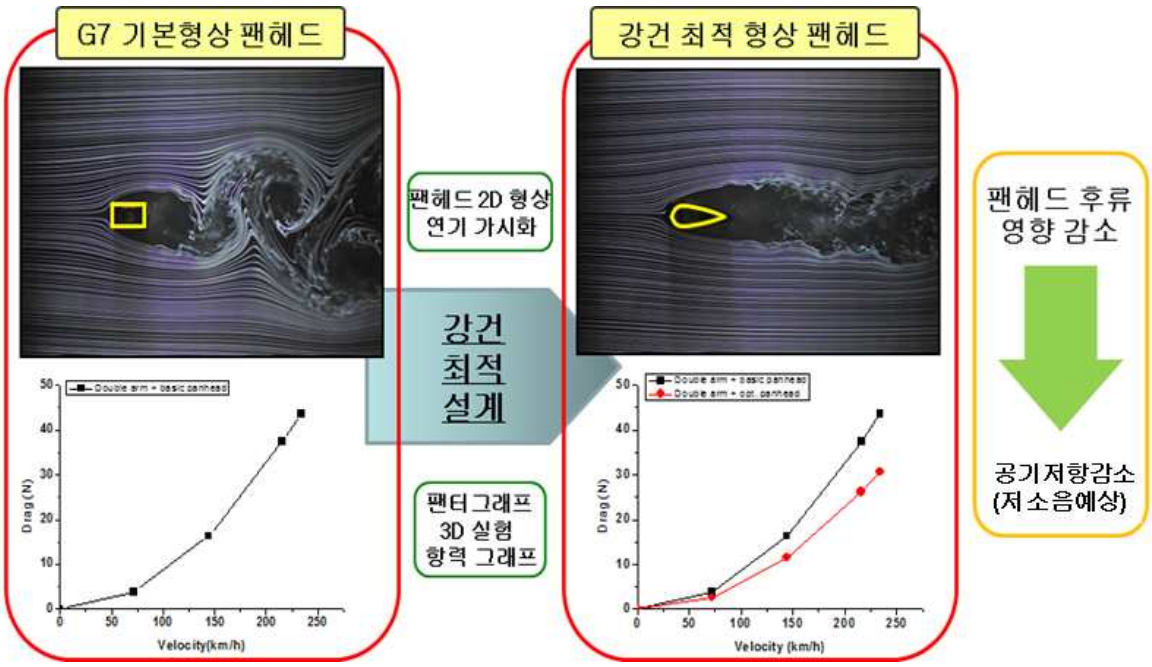


그림 1-4-3. 팬터그래프 팬헤드 형상에 따른 항력변화(서울대학교)



그림 1-4-4. 팬터그래프 암타입 별 공력비교를 위한 실험모델(서울대학교)

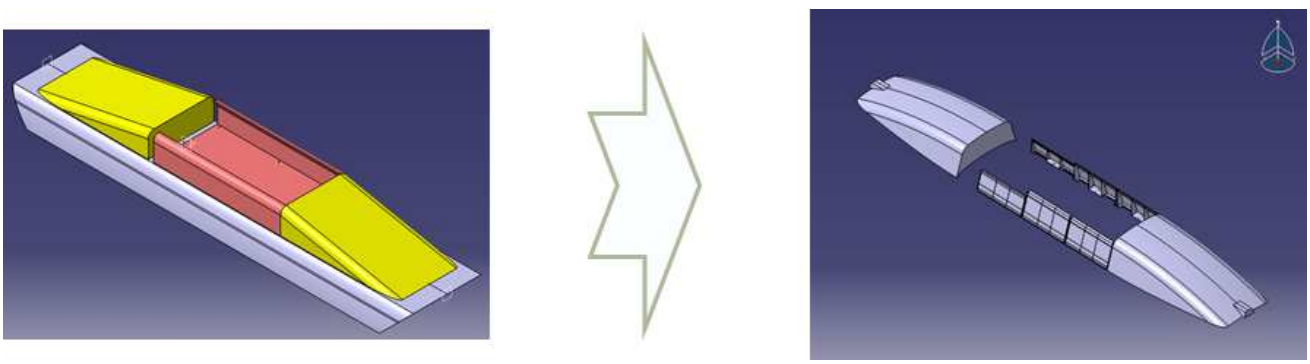


그림 1-4-5. 팬터그래프 커버 설계를 통한 HEMU-430X 팬터그래프 커버 설계 적용(서울대학교)

2. 연구진 외 국내 연구 및 산업동향

팬터그래프의 공력특성에 대해서 연구진 외에는 홍익대학교에서는 팬터그래프의 진동 소음에 대하여 기초연구가 수행되었고, 아주대학교에서는 팬터그래프의 동특성에 대한 연구를 수행하였다.

한편 산업적으로는 경부고속철도 개통 이후 KTX 열차에는 프랑스 페블리사의 GPU 팬터그래프가 사용되고 있다. 그러나 프랑스 패블리사의 가격 정책에 따라 GPU 팬터그래프의 집전판 가격이 결정되는 등 운용사인 철도공사는 유지보수의 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 국내 중소기업인 유진기공에서는 독일 슝크사와 제휴하여 시속 300km/h 급 팬터그래프를 개발하여 철도공사에 납품하였고 현재 단일 편성에 대해서는 성공적으로 잘 운영이 되고 있다. 그러나 국내 완성차업체인 현대로템이 개발한 KTX-산천에 유진기공 팬터그래프 탑재 시 단일편성에서는 문제가 없으나 중련운행 시 집전성능을 확보하지 못하여 결국 프랑스 패블리사의 CX 팬터그래프가 KTX-산천에 탑재되는 실정이다. 이러한 문제로 인하여 결국 국내개발 팬터그래프가 양산 및 실차적용은 아직 미흡한 상태이며, 소음특성 확보보다는 집전성능 확보에 국내 산업계는 집중하고 있다.

3. 기존 국외기술개발 현황

국외의 고속전철용 팬터그래프 제작기술을 보유하고 있는 나라는 프랑스, 독일, 일본 등 몇 나라에 국한되어 있으며, 팬터그래프의 신뢰성 확보를 위해 긴 시간을 투자하여 자국의 가선과 선로에 알맞은 팬터그래프를 개발하여 왔으며, 속도증속을 위하여 현재까지도 여전히 고속용 팬터그래프 개발을 위하여 지속적으로 투자하고 있다.

프랑스의 경우, TGV-A에 Faiveley사의 팬터그래프(그림 1-4-6)를 적용하여 차륜 형으로서 고속전철의 최고속도인 574km/h의 신기록을 달성하는데 일조하였으며, 공기저항 최소화 등을 통해 집전성능을 향상시켰다.



그림 1-4-6. TGV-A(최고속도 574km/h)와 Faiveley사의 팬터그래프

독일의 경우, 여러 나라를 운행해야 하는 유럽의 특성으로 인해 다양한 가선조건을 만족하는 팬터그래프를 개발하는데 중점을 두고 있으며, 팬터그래프의 공력저항을 감소시키고자 하는 연구가 수행되고 있으며, 380km/h급 팬터그래프를 개발하여 상용화하였다.

일본은 유럽과 가선환경이 다르기 때문에 독자적으로 팬터그래프를 개발하여 왔으며, 가

선 추종성을 높이고 고속주행 시 안정된 집전을 할 수 있도록 소형화와 경량화를 목표로 개발하였다. 그림 1-4-7과 같이 고속에서 저소음 구조를 갖는 싱글암형 팬터그래프와 잠망경 타입 팬터그래프(공력소음수준 90dB, 350km/h)를 꾸준히 개발, 실용화하였으며, 그림 1-4-8와 같이 공력소음 저감을 위한 팬터그래프 커버 또한 개발하였다.



그림 1-4-7. 공력소음 저감을 위한 일본의 팬터그래프 예

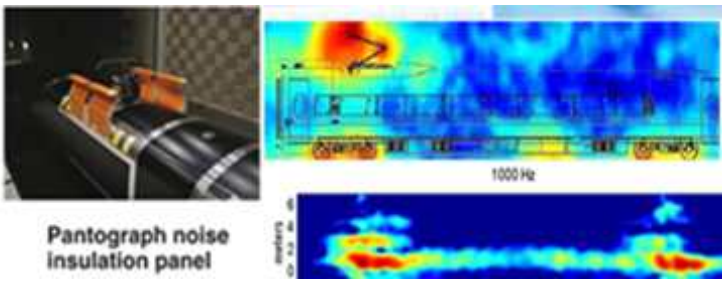


그림 1-4-8. 공력소음 저감을 위한 일본의
팬터그래프 커버 예

팬터그래프에 대한 연구는 유럽과 일본을 중심으로 활발히 진행되어 왔으며 이에 대한 특허를 꾸준히 등록해 오고 있다. 따라서 새로운 기술의 개발이나 적용에 있어서 기존에 등록된 특허의 동향을 파악하고 대처하는 것이 신기술 개발에 있어서 우선되어야 할 과제이다.

분석 범위는 1975년~2010년까지 출원된 특허이며 미국공개특허는 일부만 공개되는 미국 특허법에 따라 분석대상으로 적절치 않으므로 제외하였음.

	한 국	일 본	미 국	유 럽	합계
출원량	41	431	34	47	553
점유율	7.41%	77.9%	6.15%	8.5%	100%

한·미·일·유럽 출원 년도 별 특허동향

- 한국에서는 1990년대 초에 최초출원이 나타났으며, 일본을 제외한 한국, 미국, 유럽은 매우 저조한 출원 추이를 보임.
- 일본의 경우 1970년대 중반에 출원을 시작했으며, 미국, 유럽에 비해 월등한 출원 추이를 보이고 90~95년에 그 출원 량이 정점을 기록하다가 96년 이후로 감소하다가 근래에 들어 다시 회복되는 출원 추이를 보임.
- 유럽의 경우 기업비밀 누출을 대비해 특허출원 등록을 자제하고 있는 상황임.

고찰

- 전체 출원(등록)수 중 일본이 약 80%를 차지하며 선도적인 역할을 하고 있음.
- 1990년에 들어서면서 일본에서 급진적인 증가를 보이고 있음.
- 1996년을 넘어서면서 일본과 미국의 출원(등록)수는 줄어드는 추세를 보이며 한국은 2000년대 이후로 증가하는 추세를 보이고 있음.
- 한국의 경우 점진적으로 출원량이 증가하는 추세이나 일본에 비해 절대적인 출원량이 적음.
- 특히 일본출원인에 의해서 다수의 특허권리가 선점된 상황이며, 일본 출원인들의 국내 특허활동이 활발하지 않은 지금, 국내 특허의 권리 확보가 시급한 것으로 보임.

한·미·일·유럽 출원 점유율

- 전체 출원량 중 일본에서의 출원량이 전체의 80%로 대부분을 차지함
- 팬터그래프 기술에 관련된 한국, 미국, 유럽에서의 전체출원 건은 553건으로 이중 일본에서 출원된 건수가 431건으로 전체의 77.9%를 점유하고, 이어서 유럽은 47건으로 8.5%를 점유하고, 미국은 34건으로 6.15%, 한국은 41건으로 7.41%를 점유하고 있음
- 미국은 등록건을, 한국·일본·유럽은 공개 건을 기준으로 조사된 자료임을 감안해도 팬터그래프의 출원은 일본이 가장 많은 것으로 판단됨.

4. 신규 입수된 국외 기술개발 현황

가. Toyodenki 저소음 싱글암 팬터그래프

일본 Toyodenki社는 그림 15의 저소음 싱글암 팬터그래프를 개발하여 공개하였다. 이 판토그래프는 350km/h 주행에 대응할 수 있도록 싱글암의 적용 및 하부쉴드 적용으로 공기저항 및 공력소음을 최소화하였다.

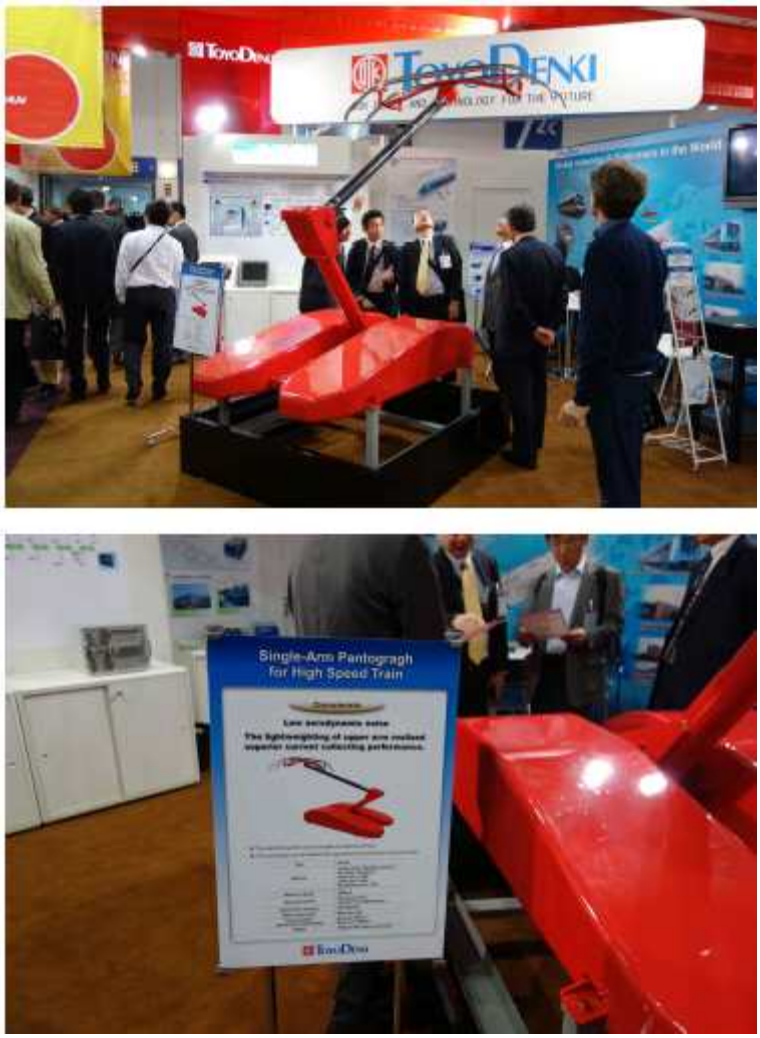


그림 1-4-9 Toyodenki 저소음 싱글암 팬터그래프

나. Melecs SSS 400+

독일 Melecs社의 고속철도용 팬터그래프 SSS 400+는 독일 ICE 시험열차에 탑재되어 404km/h 최고속도 달성 시 사용된 팬터그래프이다. 그림 16에서와 같이 로어암은 싱글암이며, 어퍼암은 더블암으로 구성되어 있고, 공기역학적으로 형상설계된 요소들도 인하여 낮은 소음 방사 수준을 갖는다고 알려져 있고 운영속도는 350km/h 이다. 이 팬터그래프는 유진기공이 기술제휴한 슝크사와 기본적으로 같은 설계를 가지고 있다.



Technische Daten
Technical Data

Bauhöhe in Senklage (Standard/optional):	600/549 mm
Overall height in lowered state (Standard/optional)	
Min. Arbeitshöhe über Senklage:	300 mm
Min. working height above lowered state	
Max. Arbeitshöhe über Senklage:	2400 mm
Max. working height above lowered state	
Max. Steghöhe über Senklage:	>2500 mm
Lifting height above lowered state	
Nennisolation:	25 kV
Nominal insulation	
Nennstrom mit Kohle:	1000 A
Max. nominal current with carbon	
Nennstrom mit metallimprägnierter Kohle:	2200 A
Max. nominal current with metal impregnated carbon	
Kontaktkraft Einstellbereich:	60 - 150 N
Contact force adjustment range	
Betriebsgeschwindigkeit bei entsprechender Fahrleitung:	350 km/h
Operating speed with respective contact line	
Wippenbreite / Fahrbahnbreite anpassbar Standard:	1950 / 1600 / 1450 mm
Collector head width / carbon specifically adaptable	
Gesamtgewicht inkl. Isolatoren:	ca./approx. 140 kg
Total weight including support insulators	

그림 1-4-10 Melecs社의 고속철도용 팬터그래프

다. Stemmann-Technik DSA380.09

Stemmann-Technik 社의 고속철도용 팬터그래프 DSA380.09는 최고속도 380km/h 대응이 가능한 팬터그래프이며, 그림 17에서 보이는 바와 같이 슑크 및 멜렉스와 마찬가지로 로어암은 싱글, 어퍼함은 더블로 구성이 되어있다.



그림 1-4-11 Stemmann-Technik 社의 고속철도용
팬터그래프

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

1절 연차별 연구개발결과 요약

연차	연구 내용	연구 결과
1차년도	▪ 전산해석을 통한 기존 싱글암 타입 팬터그래프 주위의 유동해석	전산해석을 통한 기존 싱글암 타입 팬터그래프 주위의 유동을 해석하여 실제 주행 조건인 350km/h에서 팬터그래프의 양력(100N), 항력(830N), 공력소음(100.6dB)결과를 취득하였다.
	▪ 풍동 시험을 통한 기존 싱글암 타입 팬터그래프 시스템의 소음특성 분석	풍동시험을 통하여 하부덮개가 설치된 상태에서 팬터그래프 시스템의 소음특성을 분석하여 팬헤드 소음원은 600Hz 부근에서 비상운행조건이 정상 운행조건에 비해 10dB 큰 값을 보이며, 1.2kHz ~ 2.2kHz 영역에서는 2dB 큰 값을 보인다. 관절부위 소음원은 600Hz 부근에서 정상주행조건이 4dB 큰 값을 보이고 있으며, 1.8kHz에서는 비상 주행조건이 2dB 큰값을 보이는 결과를 보인다.
	▪ 전산해석과 풍동시험을 통한 고속용 저소음/저저항 팬터그래프 형상 공력 설계를 위한 공력 특성 정립	350km/h 저소음/저저항 팬터그래프 형상 공력 설계를 위한 속도에 따른 양력, 항력, 공력소음을 테이블로 제시하였다.
	▪ 전산해석을 통한 저소음/저저항 팬헤드 형상 최적화 설계	전산해석을 통한 저소음/저저항 팬헤드 형상 최적화 설계를 통하여 기존 팬터그래프와 비교하여 항력은 21%, 공력소음은 4dB 감소하였다.
	▪ 열차 상부경계층 분석을 통한 팬터그래프 전방경계조건 연구	- 1/20 스케일 HEMU-430X 모델을 이용한 풍동시험 결과와 전산해석 결과로부터 팬터그래프 전방경계조건은 열차운행속도의 80%에 해당하는 속도로 제시
	▪ 팬터그래프 운용시나리오 및 형상 설계 요구조건 도출 연구	- EN, TSI, UIC 등 팬터그래프 관련 국제기준에 대한 분석을 수행하였으며, 이를 통하여 팬터그래프 작용높이, 접촉력 기준, 전차선 압상량 변위 기준 등을 검토 - 정상팬터그래프, 비상 팬터그래프 등 팬터그래프 운영 시나리오 검토
	▪ 기존 팬터그래프 동특성 및 집전성능 분석	- 전차선-팬터그래프 간 상호작용 해석을 통하여 기존 CX 팬터그래프의 동특성 및 집전성능을 분석함

2차년도	▪ 부재간 상호작용을 고려한 팬터그래프 최적화연구	- 주요 소음원 중 하나인 암 연결부에 유선형 캡을 설치하여 Full-scale 싱글 암 타입 팬터그래프 모델을 설계한 후 전산해석을 수행한 결과 각 속도대역별로 평균 1.54dB만큼 소음이 저감함을 확인하였고 항력의 경우에도 평균 6.2% 저감함을 확인함.
	▪ 전산해석을 통한 저소음/저저항 팬터그래프 암 최적화 설계	- 유선형 캡을 설치한 Full-scale 싱글 암 타입 팬터그래프 모델에 1차년도에 최적화를 수행한 단면형상을 암 단면에 적용하여 설계한 후 전산해석을 수행한 결과 각 속도대역별로 평균 1.63dB가 저감함을 확인하였고 항력의 경우 평균 4% 저감함을 확인함. - 최초 형상인 기존 싱글 암 타입 모델과 비교하였을 때에는 소음은 3.17dB, 항력은 10.0% 저감함을 확인함.
	▪ 팬헤드 형상에 대한 추가연구	- 기존 팬헤드 소음 및 항력 저감 연구들 중 Air jet 타입의 팬헤드 형상을 전산해석을 수행한 결과 기존 팬헤드 형상과 비교할 때 소음은 1.23dB, 항력은 2.53% 저감하여 최적화 단면 팬헤드에 비해서 성능이 낮음을 확인함
	▪ 전산해석을 통한 최적화된 형상의 설계요구조건에서의 팬터그래프 소음 평가 및 검증	- 유선형 캡과 암의 최적단면의 적용한 모델에 팬헤드 단면형상을 최적화한 최종 Full-scale 싱글 암 타입 팬터그래프 형상의 전산해석을 수행한 결과 소음은 평균 3.33dB 저감함을 확인하였고 항력의 경우 평균 17.4% 감소함을 확인함. - 최초 형상인 기존 싱글 암타입 모델과 비교하였을 때에는 소음은 6.5dB, 항력은 25.61% 저감함을 확인함.
	▪ 팬터그래프 공력소음 비중 제시	- HEMU-430X 속도별 환경 소음 Array 측정결과를 분석하여 팬터그래프에서 발생하는 소음의 주파수 대역을 확인함 - 팬터그래프 상승/하강 시 환경소음을 측정하여 300 km/h 주행 시 팬터그래프에 의한 소음 기여율이 전체소음 중 약 4dB 수준임을 확인하였음
	▪ 350㎞/h급 팬터그래프 소음평가방안 수립	- 환경소음 측정결과를 바탕으로 팬터그래프 소음평가방안을 수립하였음 - 팬터그래프에의한 소음은 크게 2단계의 절차로 평가함 - 1단계에서는 환경소음측정 Array를 이용하여 350㎞/h 주행 시 팬터그래프에서 발생하는 소음원의 주파수를 평가함 - 2단계에서는 1단계에서 평가된 주파수 영역을 중심으로 팬터그래프 상승/하강 시 소음을 마이크로폰을 이용하여 측정하여, 그 차이를 분석하고 팬터그래프의 소음을 평가함
	▪ 풀스케일 팬터그래프 소음풍동시험 기법 개발	- 폐쇄형시험부 소음시험 장치 개발 및 기법 연구 완료

3차년도	▪ 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 제작	- 2차년도에 설계한 최적 설계 팬터그래프 형상을 실제 제작을 위해서 형상 개선 후 풍동실험을 위한 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 제작완료함
	▪ 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상의 공력소음 및 공력성능 특성 정립	- 2차년도에 항공우주연구원에서 구축한 폐쇄형 풍동에서 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 모델의 풍동시험을 수행함 - 1차년도 연구결과를 통해 도출한 실험조건에서 실험을 수행하여 공력소음 및 공력성능 특성에 대한 데이터베이스를 구축함. (2장 4절 1과 부록3 참고)
	▪ 최적 설계 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 성능 평가	- 1차년도의 개방형 풍동 시험결과와 3차년도에 수행한 해무 팬터그래프의 실험결과를 통해서 최적설계된 팬터그래프의 공력성능을 비교함 - 3차년도에 수행한 풍동해석결과와 동일한 조건에서 전산해석을 수행하고 비교하여 전산해석의 타당함을 확인함 - 전산해석을 통해서 최적설계 되기 전의 기존 팬터그래프를 풍동시험 동일한 조건에서 해석을 수행하여 최적 설계된 팬터그래프의 성능을 평가하여 **공력저항은 최적설계를 수행한 후 평균 23.63% 저감**된 것으로 확인되었고 **공력소음은 최적설계를 수행한 후 평균 11.2dB 저감**된 것으로 확인됨.
	▪ 실차소음측정과 풍동소음측정 결과간의 비교 분석	- HEMU-430x 의 속도별 소음 Array 측정 및 환경소음을 측정하여, 실차에서 300~350 km/h 주행 중 300~500 Hz 대역이 주 팬터그래프 소음원인을 확인하였으며, 이는 Closed 풍동소음 결과(항우연)와 비슷한 주파수 대역을 보임을 확인함
	▪ 최적 설계 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 해석	- 공력최적설계 팬터그래프 (Arm 질량 및 팬헤드 질량 변화)의 동특성 및 집전성능을 해석을 통하여 분석하였고, 그 결과 질량의 변화가 집전성능 및 동특성에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인하였음.
	▪ 최적 설계 팬터그래프의 환경소음 저감 기여도 평가	- HEMU-430X 팬터그래프 소음기여율 평가 및 문헌조사등을 통하여 최적설계 팬터그래프 적용 시 350km/h에서 환경소음을 약 1.6dB(A) 저감 가능함을 제시

2절 1차년도 연구 수행 내용 및 결과

1. 고속열차 팬터그래프 공력설계 평가 검증 기술 개발

가. 기존 열차 상부경계층 수집 및 분석

(1) 개요

일반적인 고속열차는 열차의 지붕위에 위치한 팬터그래프를 통해 운용에 필요한 동력을 전달받는다. 팬터그래프는 열차의 지붕에 위치하고 돌출되어 있기 때문에 외부유동에 직접 노출되어 심각한 공력소음을 발생하며 공기저항을 증가시킨다. 이러한 공력/공력소음 문제를 분석하기 위해서 풍동시험이나 전산해석을 수행하는데 보다 정확하고 자세한 연구를 위해서는 고속열차의 상부 경계층에 대한 자세한 정보가 필요하다. 열차의 상부 경계층은 평판에서 생성되는 경계층과 비슷하다고 볼 수 있다. 열차의 길이적 특성상 열차의 상부경계층은 매우 클 것으로 예상되며, 이것으로 인하여 외부유동과 다른 공력특성을 가진 상부유동이 팬터그래프와 같은 외부 장착물에 영향을 미치게 될 것으로 이에 대한 자세한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기존 열차 상부경계층을 수집 및 분석하기 위해 1/20 스케일 HEMU-430X 모델을 제작하여 포항공과대학교 아음속풍동에서 풍동시험을 수행하였다.

(2) 실험 모델 및 방법

기존 열차 상부경계층 수집 및 분석을 위해 다음 그림 18과 같이 포항공과대학교 아음속 풍동에서 풍동실험을 수행하였다. 포항공과대학교 아음속 풍동은 시험부의 크기가 1.5m(높이)×1.8m(너비)×4.6m(길이)이며 75m/s일 때 0.2% 난류도를 갖는다.

기존 열차 상부경계층을 측정하기 위해 현재 실차시험 중에 있는 HEMU-430X(High speed Electrical Multiple Unit)을 1/20 스케일로 축소하여 모델을 제작하였다. 실험모델은 다음 그림 19와 같이 3량으로 제작되었으며, 전두부(1번 차량), 객차(2번 차량), 후미부(3번 차량)로 구성된다. 제작공차는 1/100으로 제작되었으며, 열차 모델의 공기역학적 힘을 측정할 수 있도록 설계되었다.

다음 그림 2-1-3과 2-1-4은 풍동시험부 내의 경계층 성장과 풍동의 가동에 의한 진동에 따른 에러율을 감소시키고자 풍동시험부 내에 지상판을 장착한 모습이다. 포항공과대학교 아음속 풍동의 시험부는 70m/s에서 약 15cm의 경계층을 가지고 있기 때문에 시험부에 실험모델을 직접 설치하여 압력이나 공기역학적인 힘을 측정 시 실험모델에 영향을 주게 된다.

다음 그림 2-1-5와 2-1-6은 열차 상부 경계층 측정을 위한 Micro-rake 장비의 장착사진과 사양을 나타내고 있다. Micro-rake 장비는 25채널이며, total pressure를 측정할 수 있게끔 설계되어 경계층을 자세하게 측정할 수 있도록 제작되었다. 경계층 측정을 위한 total pressure는 그림 2-1-7과 같이 PSI-9016과 Multi-purpose DAQ(Data Acquisition) System을 이용하여 측정하였다. PSI-9016은 pressure system사의 제품으로 16채널의 압력데이터

를 동시에 100Hz로 측정할 수 있으며 측정정확도는 0.05%이다. Multi-purpose DAQ system은 National Instrument사의 NI-9110 DAQ Board와 LABView 소프트웨어로 구성되어 있으며, 센서에서 측정된 데이터를 디지털신호로 변환하여 LABView 소프트웨어를 통해 후처리 후 저장된다. 그림 2-1-8는 열차모델의 상부경계층을 측정하는 장면으로 측정위치는 팬터그래프 장착위치와 동일하다.



그림 2-1-1 포항공과대학교 아음속 풍동 시험부

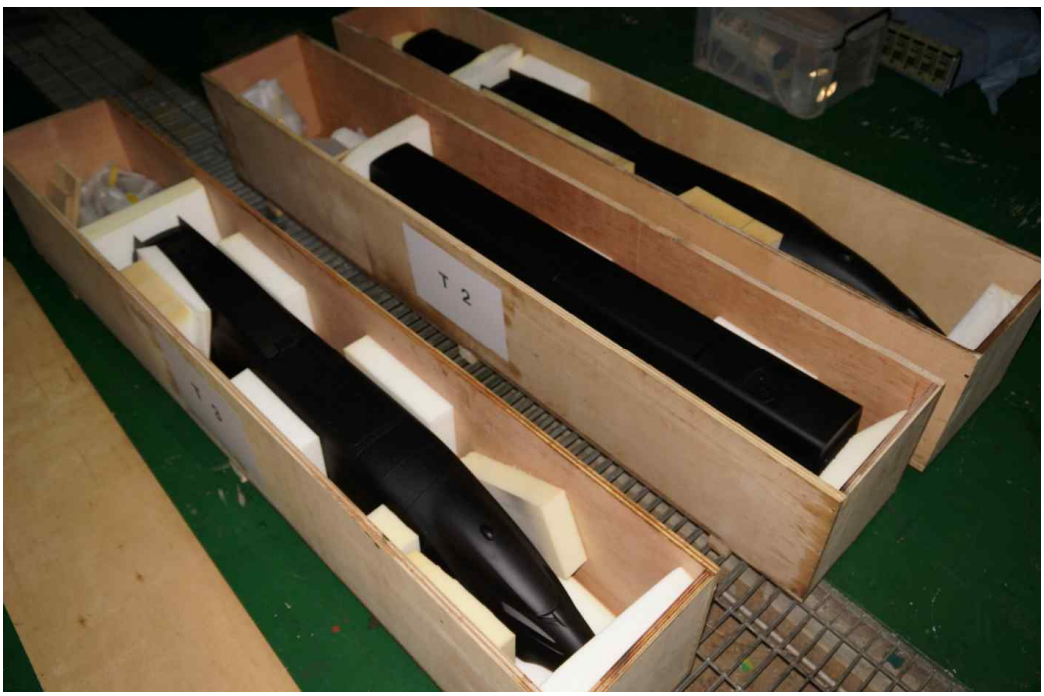


그림 2-1-2 1/20 스케일 HEMU-430X 실험모델

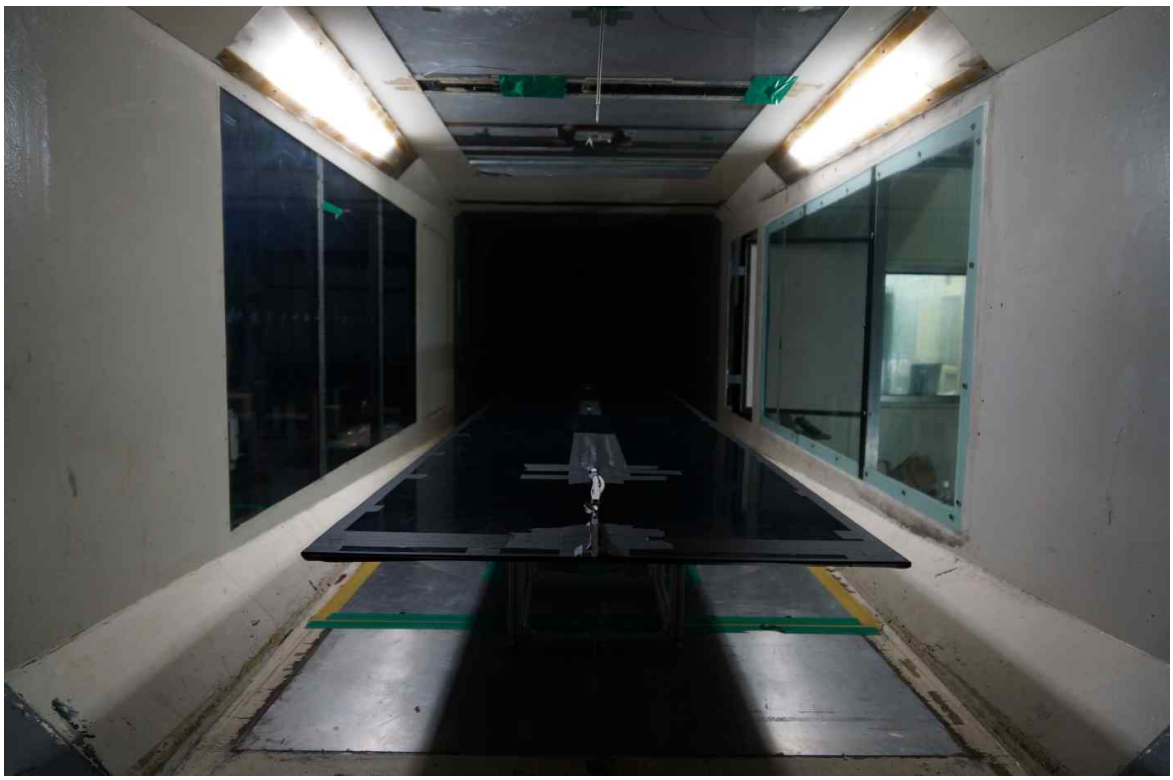


그림 2-1-3 풍동시험부의 경계층 성장 방지를 위한 지면경계층 설치 모습
(포항공대, 아음속풍동)

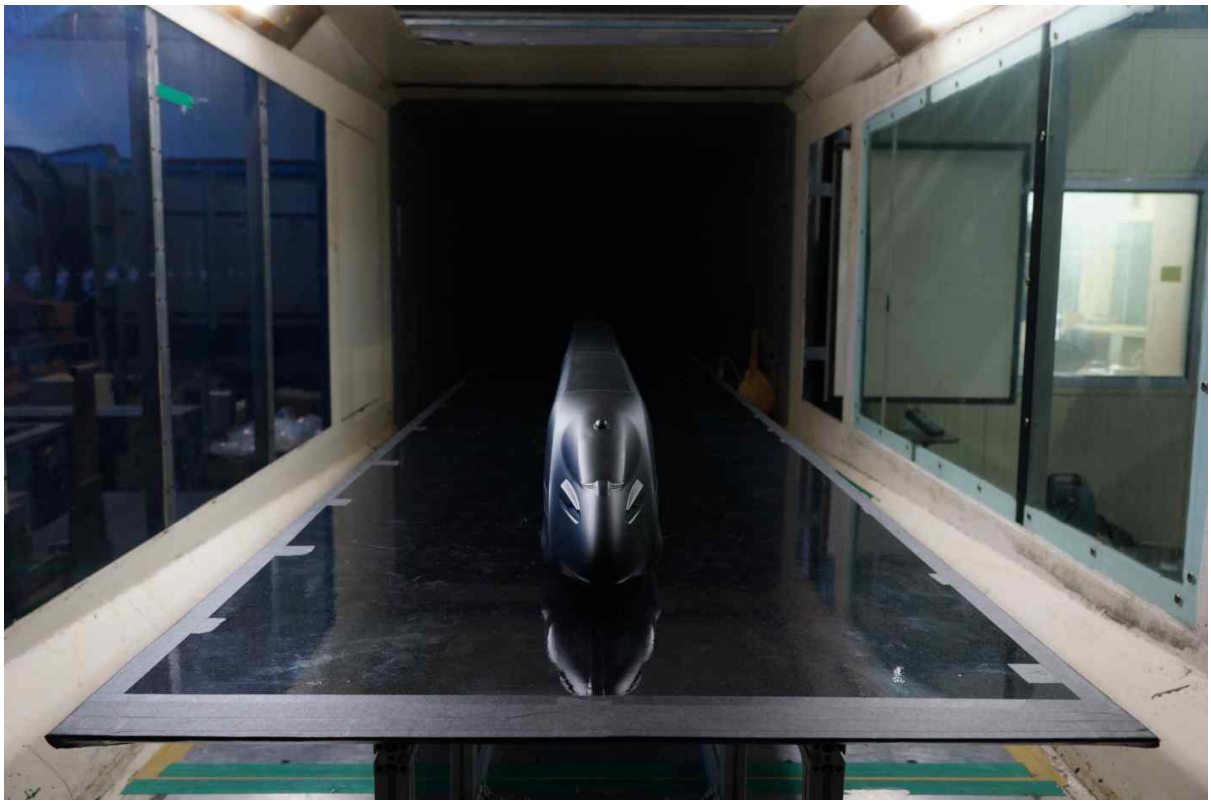


그림 2-1-4 판에 1/20 스케일 HEMU-430X 설치 모습

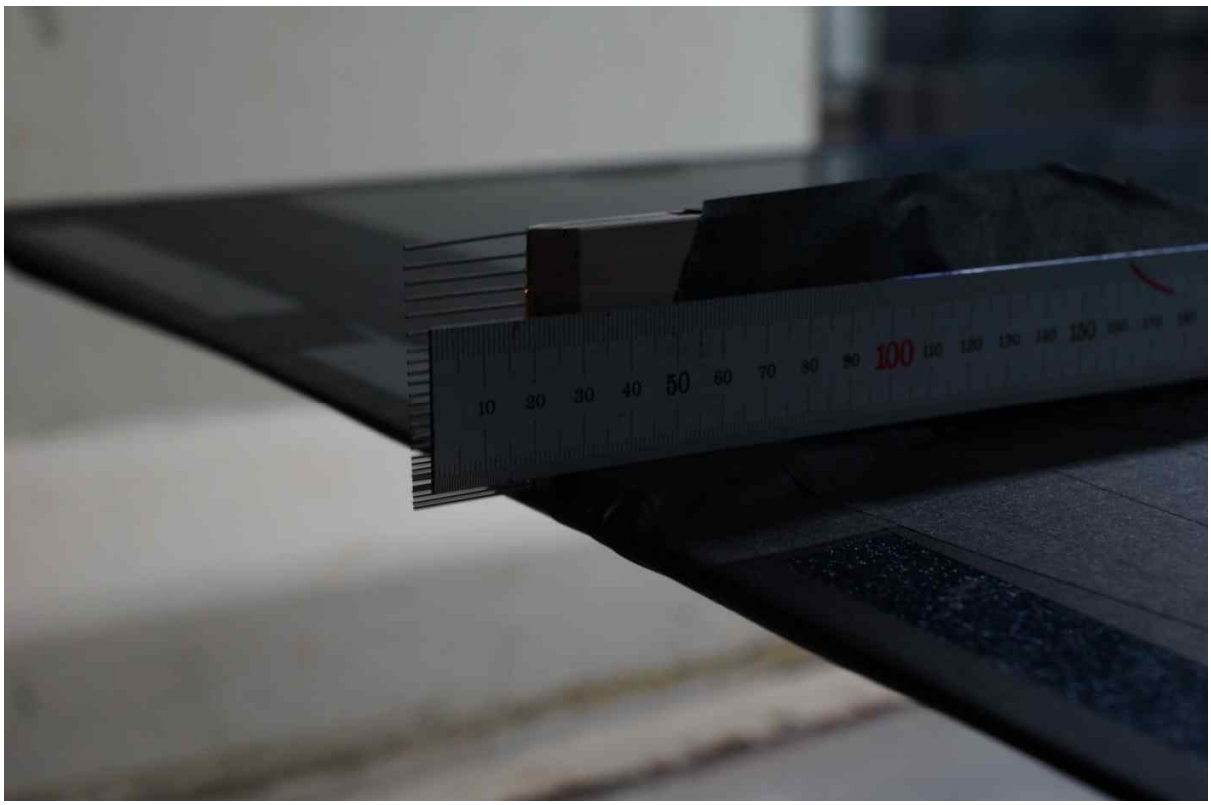


그림 2-1-5 경계층 측정을 위한 Micro-rake 설치 모습

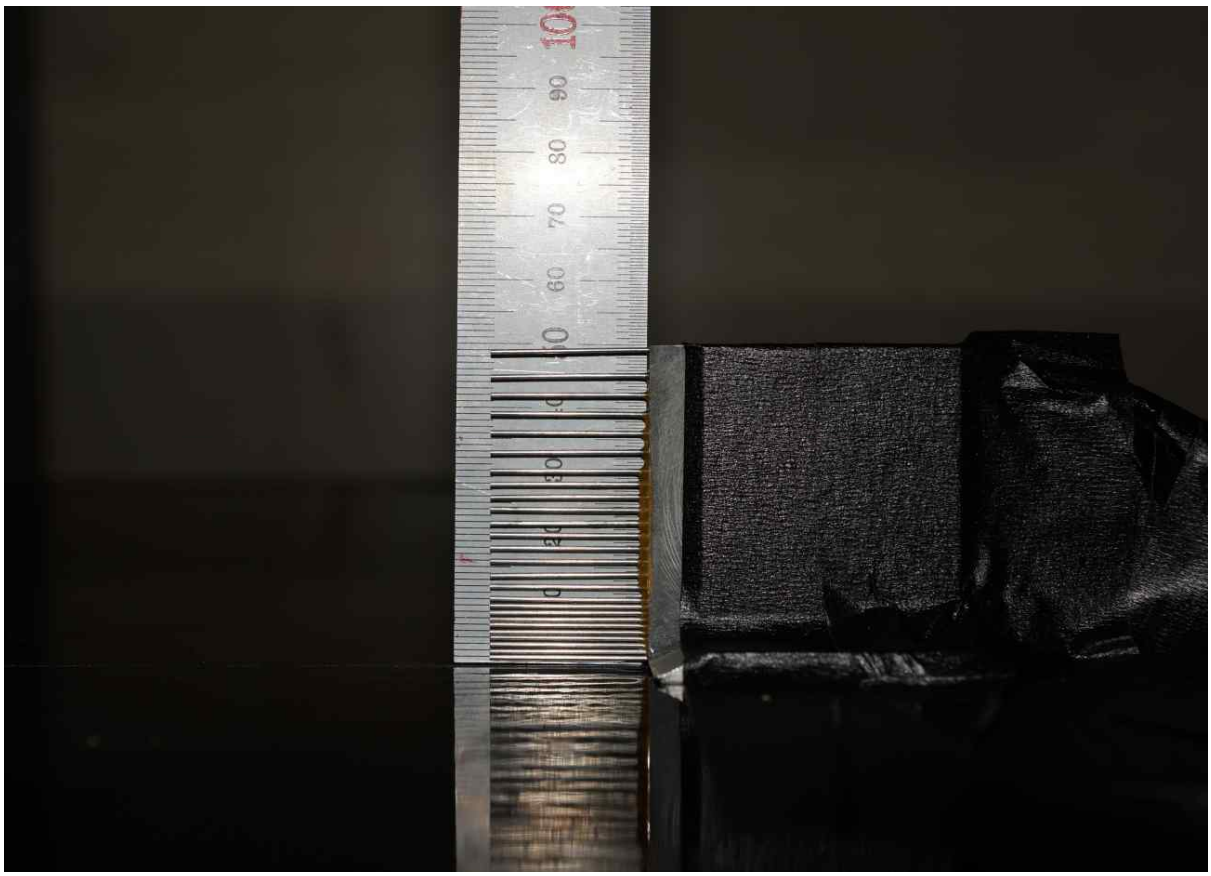


그림 2-1-6 Micro-rake의 기하학적 수치

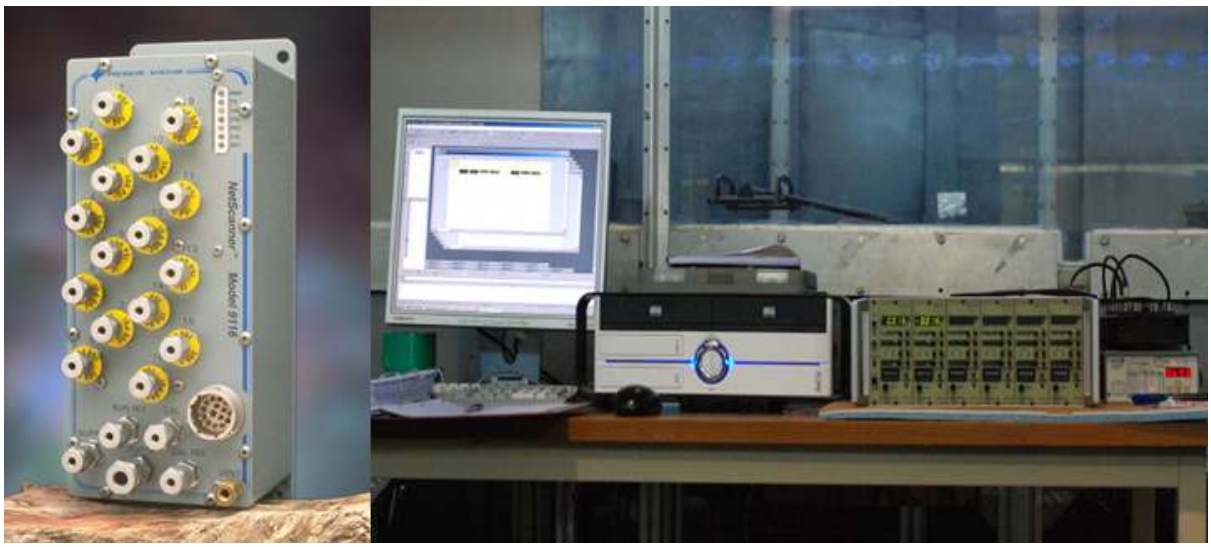


그림 2-1-7 PSI-9016 (좌), Multi-purpose DAQ system (우)

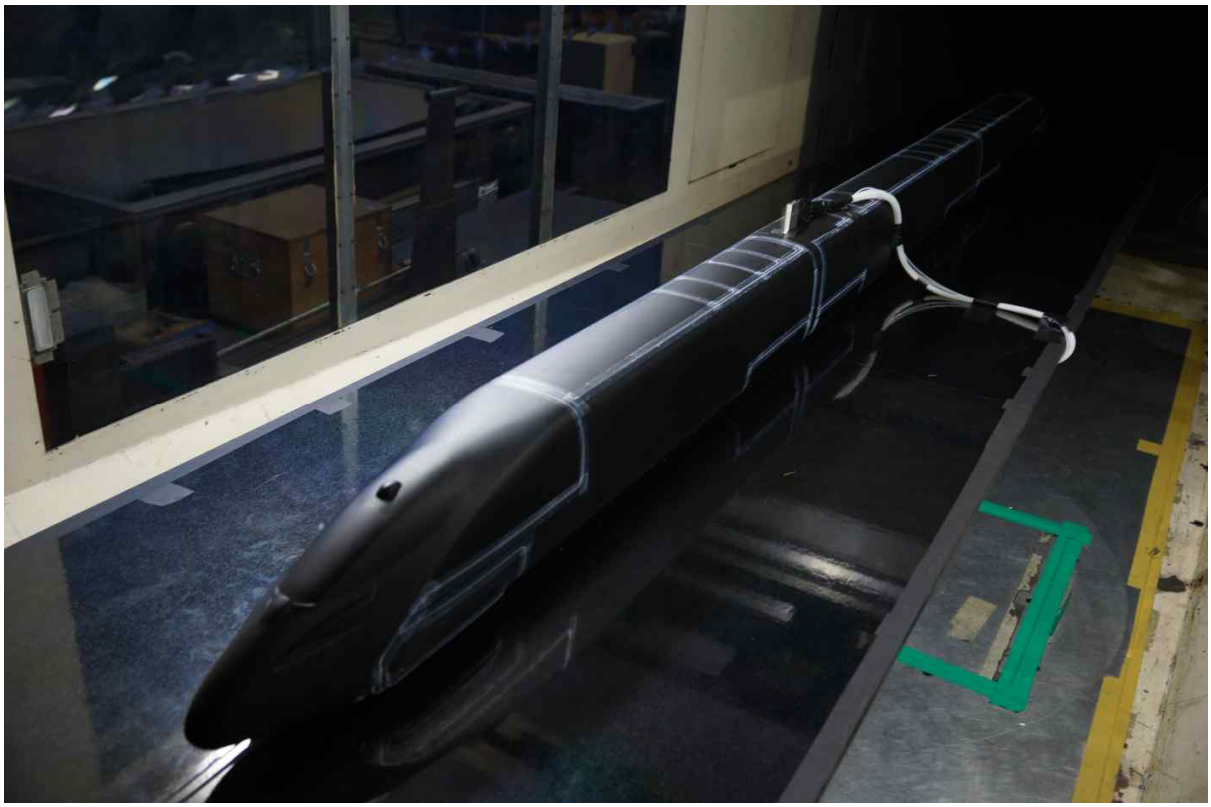


그림 2-1-8 열차 상부 경계층 측정 장면 (2번 차량 상부)

(3) 연구내용 및 결과

기존 열차 상부 경계층을 측정하기 위하여 앞 절에서 언급한바와 같이 1/20 스케일 HEMU-430X 열차 모델을 이용하여 상부 경계층을 측정하였다. 열차 상부 경계층은 1번 차량(전두부)과 2번 차량(객차)의 뒷 부분에서 유동 속도는 10~60m/s (36~216km/h)으로 설정하여 유동속도에 따른 기존 열차의 상부경계층을 파악하였다.

상부경계층 측정에 앞서 풍동실험 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 다음 그림 2-1-9와 같이 레이놀즈수에 따른 항력특성을 분석하였다. 그래프에서 보시다시피 레이놀즈수가 증가함에 따라 열차의 항력계수가 일정히 유지됨을 알 수 있으며, 이를 통해 풍동실험 조건에서 일정한 유동특성이 모사됨을 확인하였다.

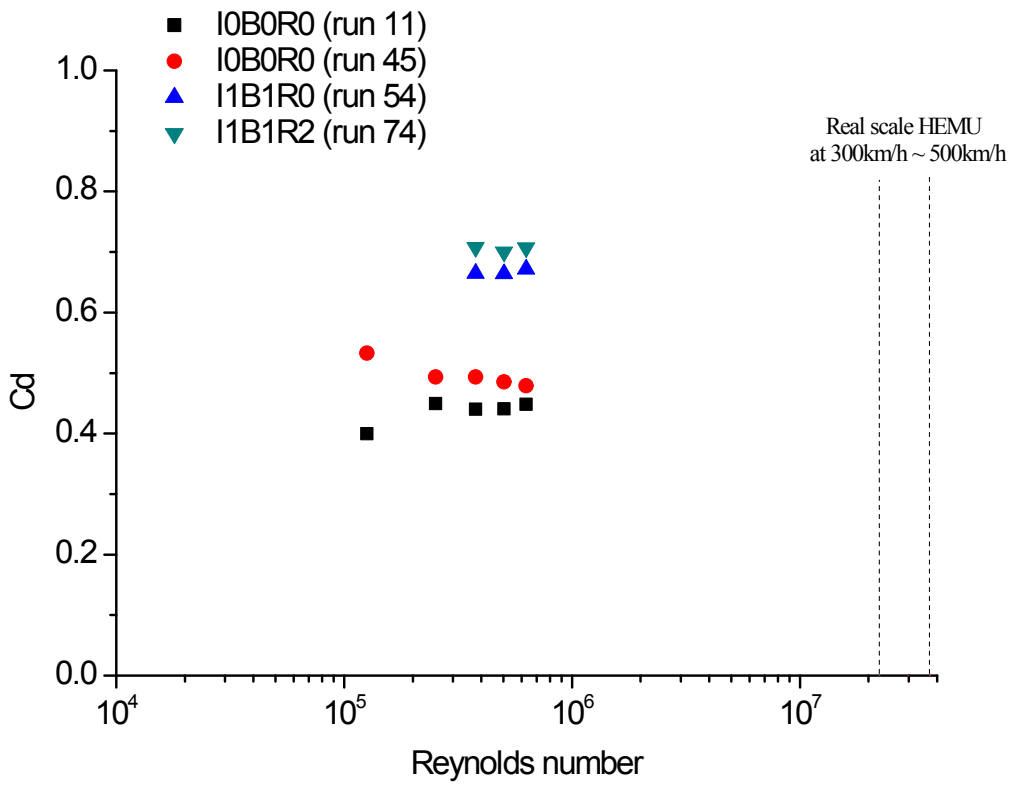


그림 2-1-9 열차모델의 레이놀즈수에 따른 항력특성 분석

다음 그림 2-1-10은 차량별 항력계수의 특성과 반복실험을 통한 재현성 결과를 나타내고 있으며 이를 통해 풍동실험 데이터 재현성을 확인하였다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 동일한 실험조건에서 동일한 데이터가 나타남을 알 수 있으며, 이를 통해 풍동시험의 신뢰성이 확보되어 있음을 확인할 수 있다.

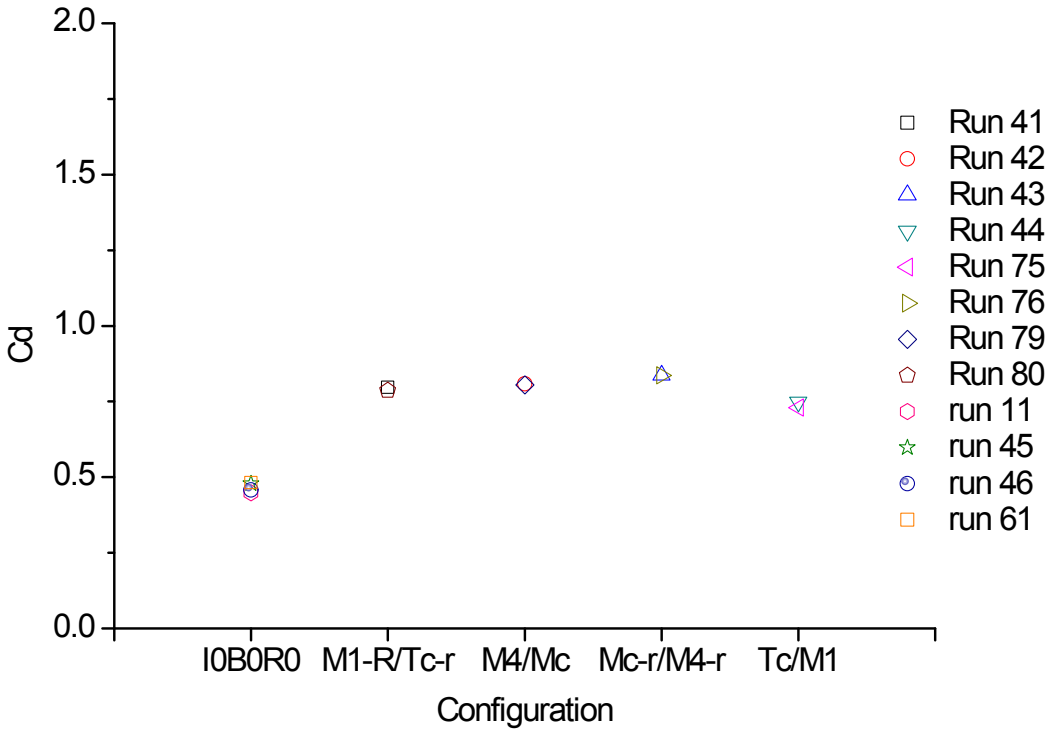


그림 2-1-10 차량 별 항력계수의 재현성

다음 그림 2-1-11와 2-1-12은 풍동시험모델을 설치하기 이전 지상판에서의 경계층을 측정한 결과이다. 지상판 역시 평판으로 구성되어 있기 때문에 유동의 점성영향으로 경계층을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 경계층의 측정 지점은 지상판 시작지점에서 300mm, 1575mm 떨어진 지점에서 측정하였다. 지상판 시작지점에서 300mm 떨어진 지점에서는 경계층의 두께가 약 2.5cm이며, 1575mm 떨어진 지점에서의 경계층은 4.5cm이다. 지상판 경계층 측정 결과 본 실험에 있어서 열차모델의 상부경계층을 측정하는 것이 주목적이고, 지상판 경계층이 열차모델의 상부까지 영향을 미치지 않았기 때문에 열차상부경계층을 측정하는데 있어서 지상판에서의 경계층 효과는 무시하였다.

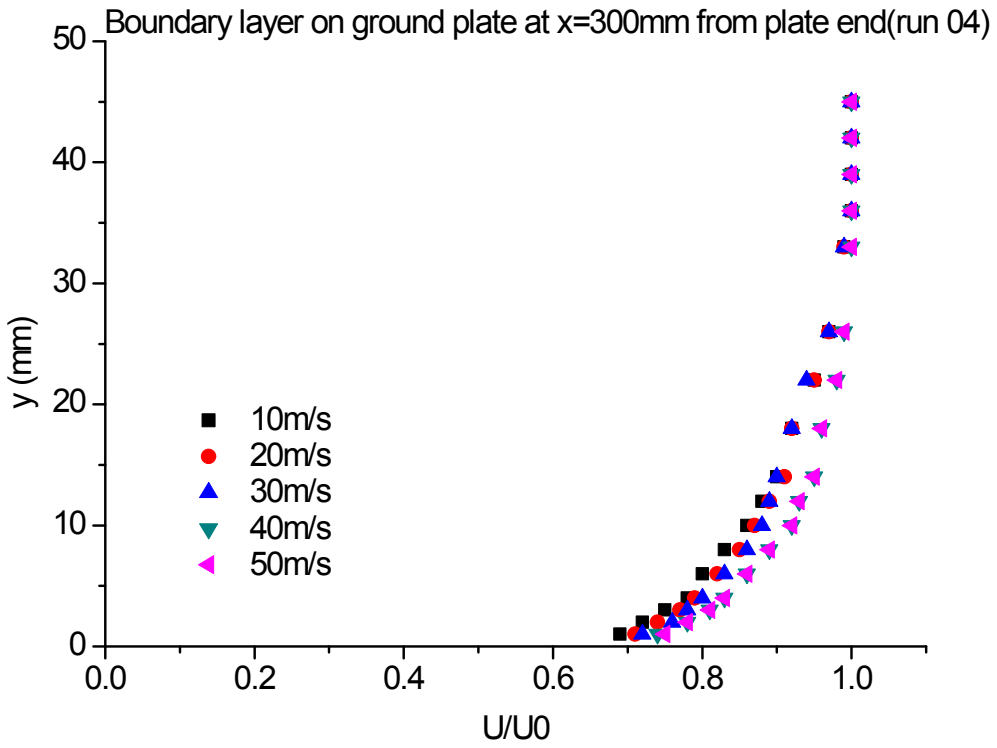


그림 2-1-11 풍동 시험부 내의 지상판 경계층 (지상판 시작지점에서 300mm)

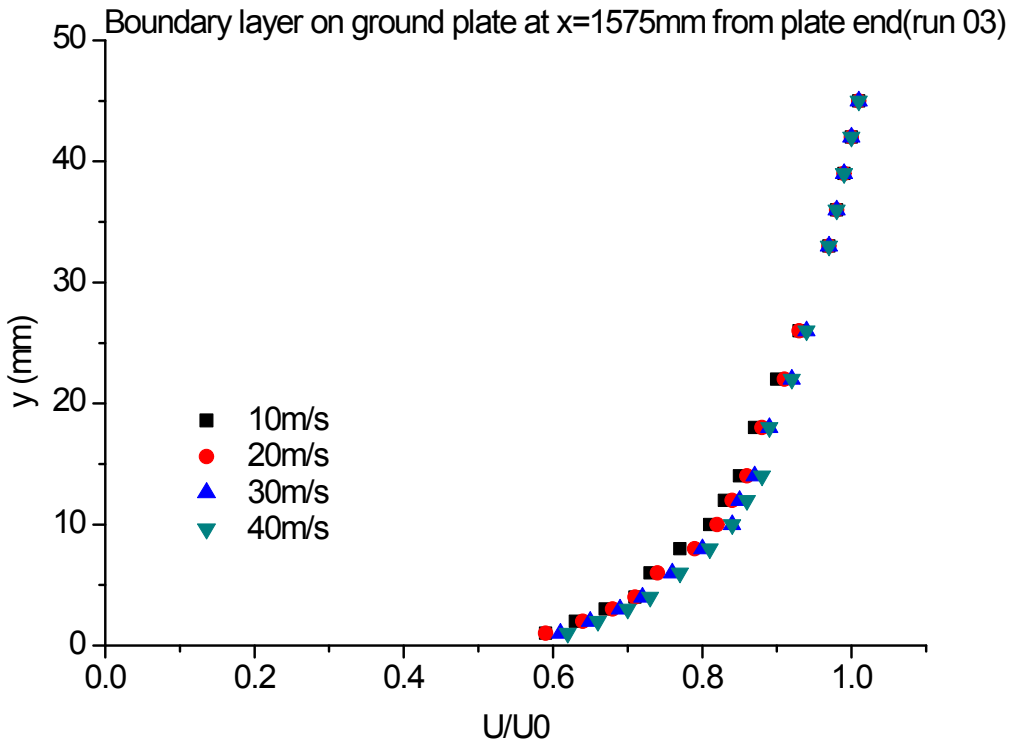


그림 2-1-12 풍동시험부 내의 지상판의 경계층 (지상판 시작지점에서 1575mm)

다음은 열차의 상부경계층을 모사하기 위하여 열차 상부에 트립와이어(trip wire; vortex generator)를 장착하여 실험한 결과이다. 유동 속도에 따른1번 차량에서 trip wire 높이에 따른 상부경계층 결과는 그림 2-1-13 ~ 17 이다. trip wire에 따른 상부경계층 변화를 살펴보면 1번 차량에서 유동속도에 따라 상부경계층의 전체 두께는 유속이 증가할수록 감소한다. 하지만 trip wire의 높이가 커질수록 상부경계층의 전체 두께가 증가한다. 이것은 trip wire로 인하여 vortex가 생성되어 상부경계층이 성장하는데 모멘텀을 공급하여 난류화가 진행되며 이로 인해 상부경계층이 증가하게 된다. 실험결과 역시 trip wire의 높이가 커지면 표면과 가장 가까운 지점의 속도가 증가하고 경계층 두께가 커지기 때문에 상부경계층의 난류효과를 어느 정도 반영시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 2번 차량에서 trip wire에 따른 상부경계층 변화는 다음 그림 2-1-17과 같다. 2번 차량의 상부경계층에서는 1번 차량의 상부경계층 결과와는 달리 trip wire의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이것은 1번 차량에 장착한 trip wire에서 발생된 vortex가 1번 차량의 상부경계층에 영향을 이미 미쳤고, 이로 인해 상부경계층이 점차 성장하여 2번 차량으로 진행되기 때문이다.

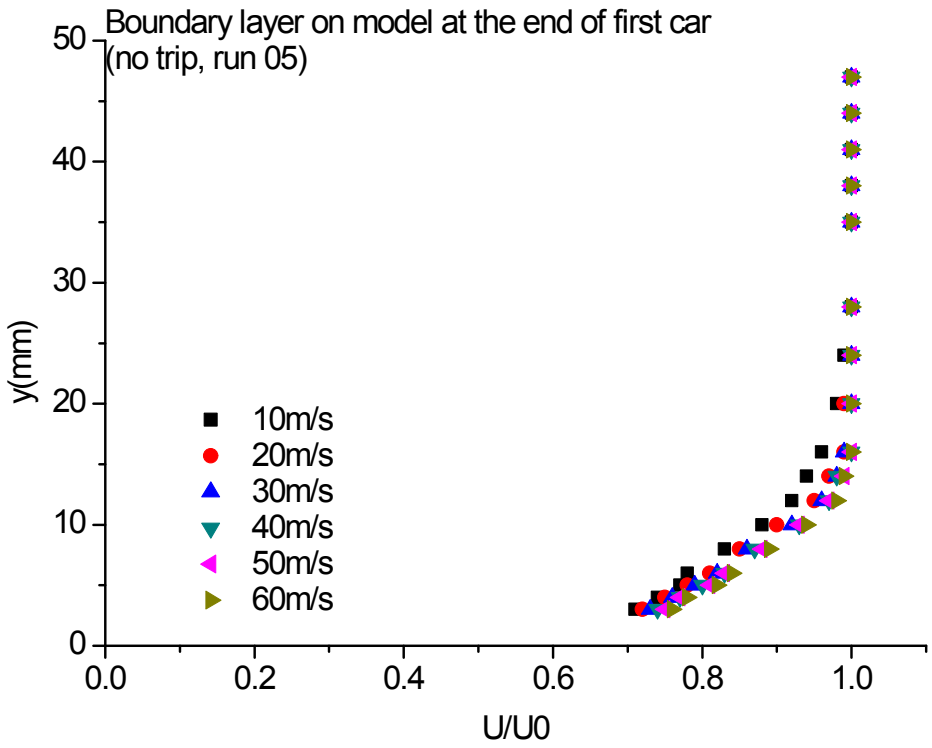


그림 2-1-13 상부경계층 1번 차량 (1번 차량, trip wire 없음)

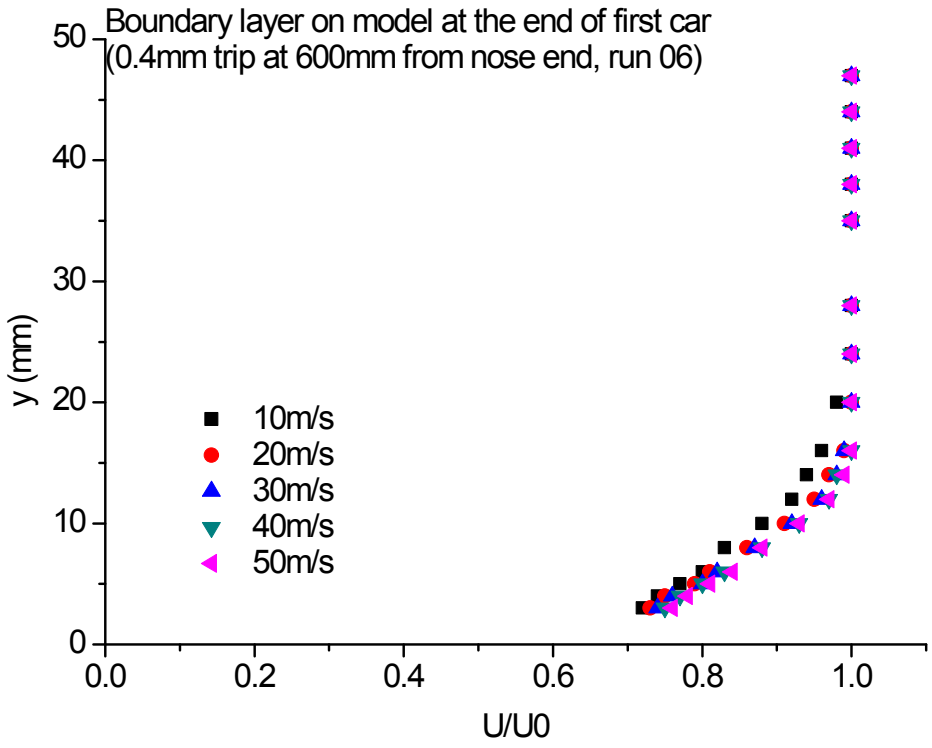


그림 2-1-14 상부경계층 (1번 차량, trip wire= 0.4mm)

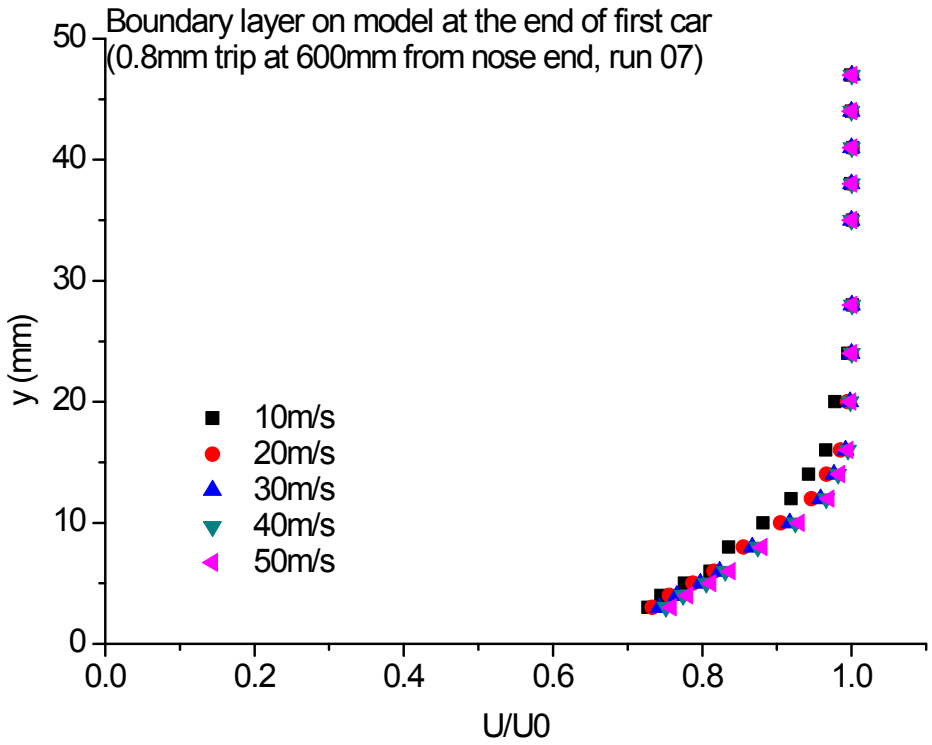


그림 2-1-15 상부경계층 (1번 차량, trip wire= 0.8mm)

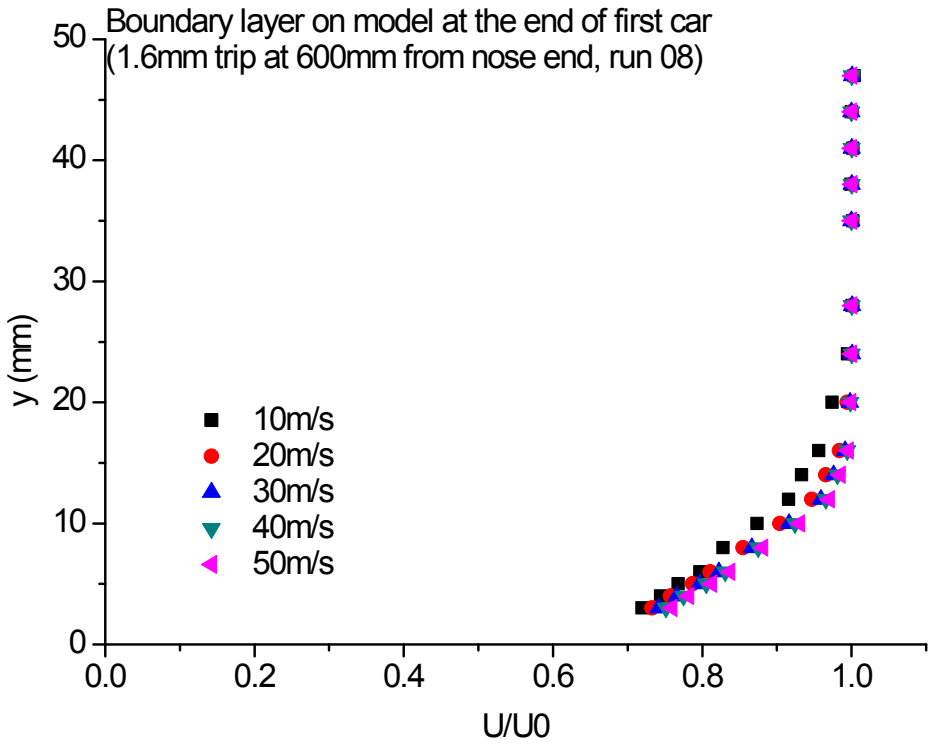


그림 2-1-16 상부경계층 (1번 차량, trip wire= 1.6mm)

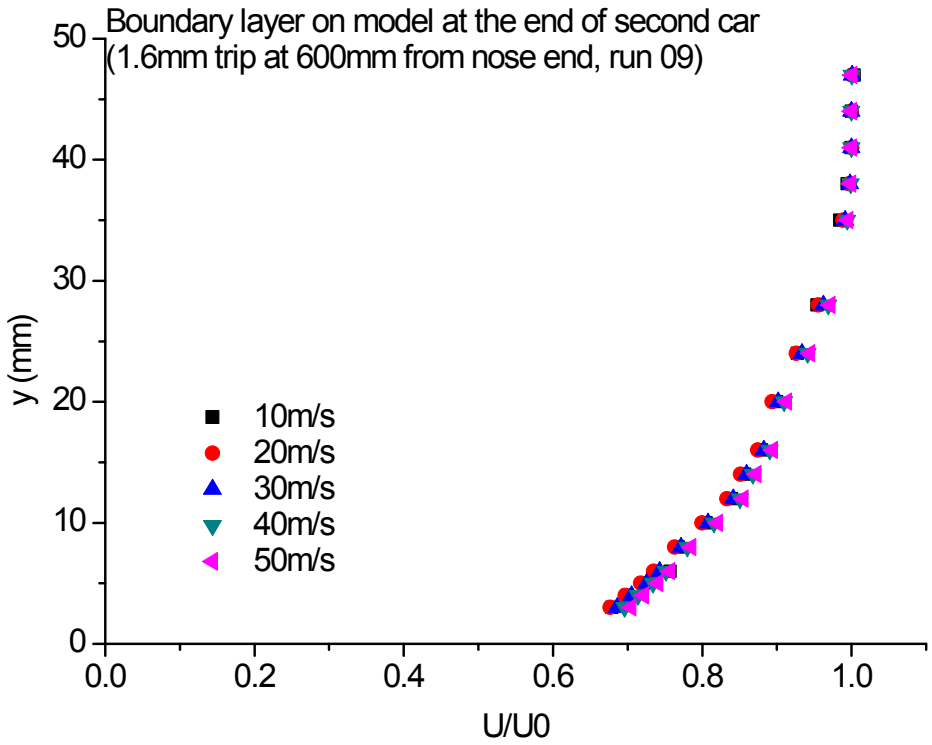


그림 2-1-17 상부경계층 (2번 차량, trip wire=1.6mm)

열차속도에 따른 상부경계층 결과를 살펴보면 그림 2-1-18와 같다. 그림과 같이 열차의 지붕에서 경계층이 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 열차 차량의 길이가 길어길수록 경계층이 성장하는 것을 알 수 있다. 실제 열차의 상부경계층 두께를 예상하여 보면, 1번 차량의 경우 유동이 전두부형상으로 인해 열차의 형상을 따라 흐르다가 평평해지는 부분에서부터 상부경계층이 형성이 되며 점차 경계층이 성장된다. 1번 차량의 상부경계층은 실험결과 약 17mm이며, 실제 차량에서는 약 34cm가 될 것으로 예상된다. 2번 차량은 1번 차량의 뒷부분 형상과 같이 평평한 형상을 가지고 있으므로 1번 차량부터 성장한 상부경계층이 계속 성장하여 1번 차량의 경계층보다 경계층이 더 두꺼워짐을 알 수 있으며 2번 차량 상부경계층은 실험결과 약 34mm로 측정되었으며 실제 차량에서는 68cm으로 예상된다. 본 풍동실험에서는 실험장비의 한계로 3량만을 이용하여 상부경계층을 측정하였지만, 1번 차량과 2번 차량의 상부경계층 결과를 토대로 뒷 차량의 상부경계층을 예상하여 본다면 팬터그래프가 설치되는 부근에서 약 2~3m 이상의 상부경계층이 발생할 것으로 예상된다.

기존 열차(HEMU-430X)의 상부 경계층에 대해 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 유동 속도에 따른 상부경계층 결과는 그림 2-1-19 ~ 20과 같다. 그림 2-1-19의 경우 1번 차량(전두부)의 뒷부분에서 생성된 경계층 결과이며 유동속도가 증가할수록 상부경계층의 두께는 점성영향이 감소하게 되므로 경계층의 두께가 약간 감소함을 알 수 있다. 하지만 유동속도에 따른 상부경계층의 대략적인 두께는 속도의 1/2승에 반비례하기 때문에 크게 변하지 않을 것으로 예상되나 다른 운송체에 비해 긴 길이적 특성을 가진 열차는 길이의 1/2승에 비례하므로 열차의 길이가 길어질수록 상부경계층이 매우 두꺼워 진다. 특히 열차의 전력공급장치인 팬터그래프가 위치하는 곳이 1번 차량과 2번 차량 연결부 부근이기 때문에 팬터그래프 주위 유동을 연구할 시 상부경계층에 의한 조건을 반드시 고려하여야 할 것이다.

2번 차량의 상부경계층의 경우 역시 앞에서 언급하였듯이 속도가 증가할수록 경계층의 두께가 매우 조금 감소함을 확인할 수 있지만, 전체 상부경계층의 두께가 매우 두꺼우므로 상부경계층의 변화량은 무시할 수 있으며, 1번 차량에서 성장된 경계층이 계속 성장되기 때문에 전체적으로 상부경계층 두께가 증가함을 확인하였다.

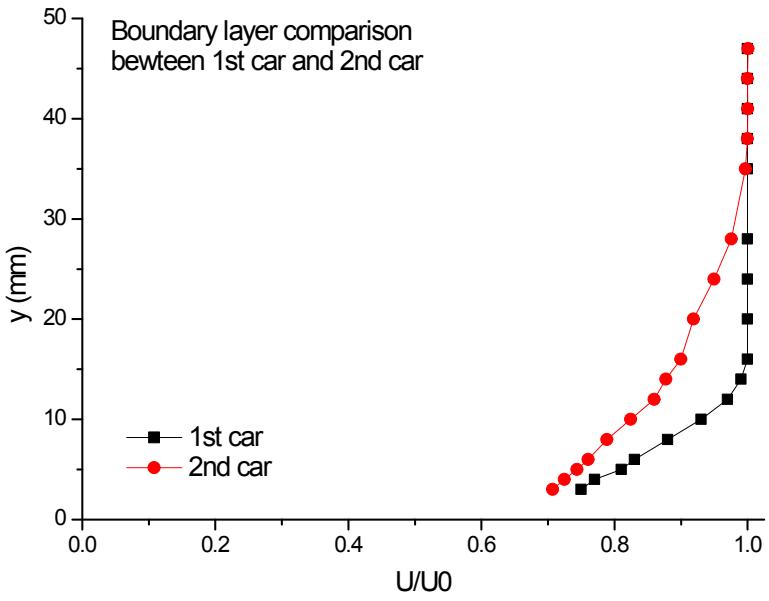


그림 2-1-18 열차 길이에 따른 상부경계층 특성 (U∞=60m/s)

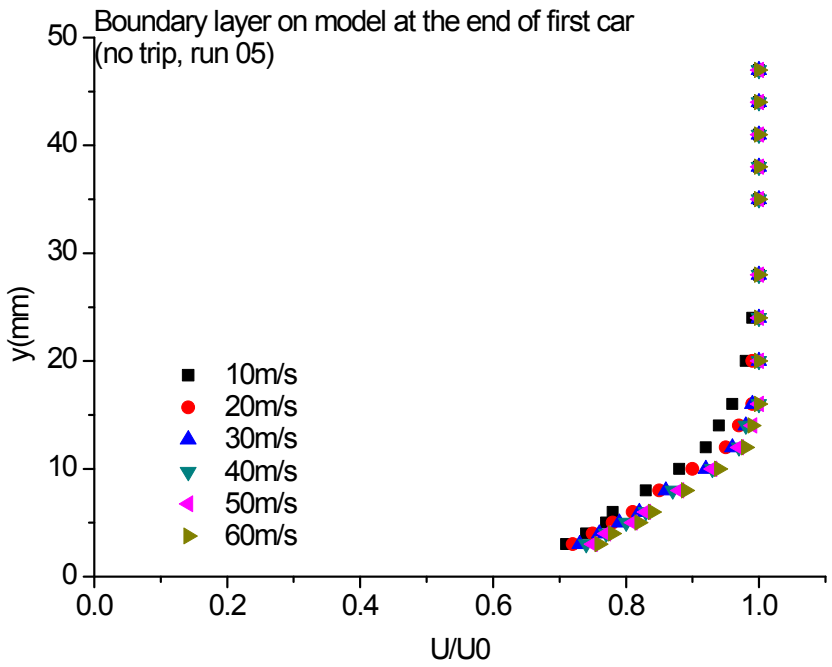


그림 2-1-19 Boundary layer on model at the end of first car

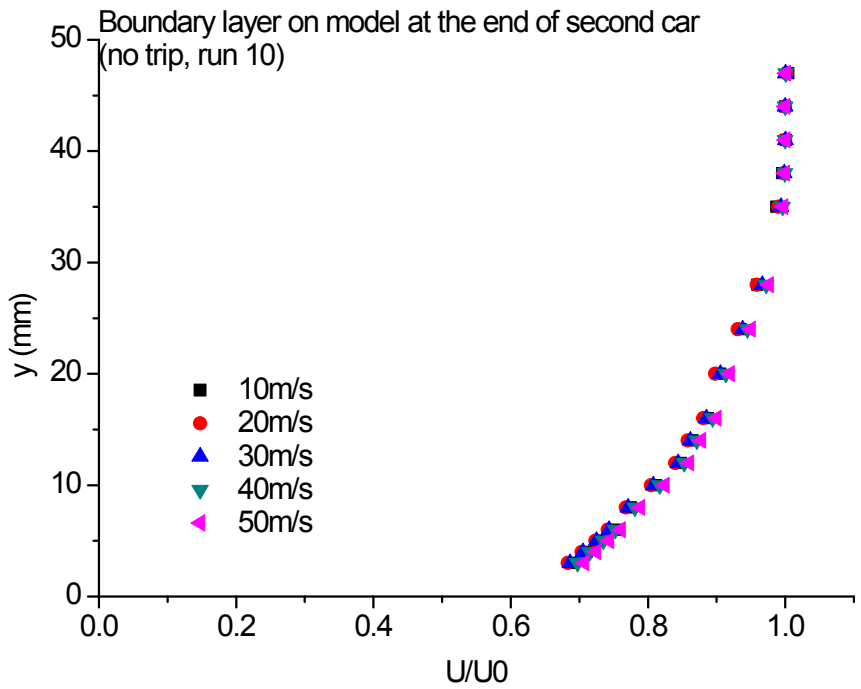


그림 2-1-20 Boundary layer on model at the end of second car

나. 풍동시험을 위한 팬터그래프 전방경계조건 도출

(1) 개요

앞 절에서는 기존 열차(HEMU-430X)의 상부경계층에 대해서 알아보았다. 좀 더 정확하고 상세한 팬터그래프 주위의 유동을 모사하기 위해 앞 절에서 수행한 기존 열차 상부경계층 결과와 전산해석 결과를 이용하여, 풍동실험을 수행하기 위해 팬터그래프를 시험부에 설치하는 방안에 대하여 연구를 수행하였다.

전산해석은 HEMU-430X의 3차원 형상을 정확히 모사하여 수치해석을 수행하였다. 이를 위해서 복잡한 외부형상에 맞는 정밀한 격자를 생성하고 지배방정식을 푸는 작업이 필요하다. 수치해석을 효과적으로 수행하기 위하여 상용 유체해석 프로그램인 Ansys Fluent를 사용하였다. 수치해석을 위하여 정확한 공기저항 예측을 위해 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 난류모델은 k-omega SST model을 사용하였다. 고속 주행 시 상부 유동특성을 분석하기 위하여 열차 주행속도는 차세대 고속열차의 최고 시험 속도인 430km/h로 해석을 수행하였다. 실제 열차가 지면에 근접하여 주행하는 상황을 모사하기 위하여 이동지면 조건을 선택하였다.

(가) 해석방법 K-W SST(Shear Stress Transport) 모델

k-w sst 모델은 경계층 내부에서는 k-w 모델이 정확하고 자유류에서는 k-e 모델이 정확하다는 점에 착안하여, blending function F_1을 이용하여 k-w 모델과 k-e 모델을 조합한 형태이다. k-w 난류모델에 F_1을 곱하고 k-e 난류모델에는 $(1-F_1)$을 곱하여, k-w 난류모델 형태로 다시 쓰면 아래의 식과 같게 된다. 따라서 벽면 근처에서는 blending function 값이 0이 되어 k-w 난류모델이 되고, 자유류에서는 blending function이 1이 되어 k-e 난류모델이 된다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho k u_j\right) = \tau_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \beta^* \rho w k + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \sigma_{k1}\mu_t\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \qquad (2\text{-}1)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho w u_j\right) = \frac{\alpha w}{k}\tau_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \beta \rho w^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \sigma_w \mu_t\right)\frac{\partial w}{\partial x_j}\right] + 2(1 - F_1)\rho\sigma_{w2}\frac{1}{w}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial w}{\partial x_j} \qquad (2\text{-}2)$$

$$\nu_t = k/w$$

각 난류 상수들은 blending function F_1에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi = F_1\Phi + (1 - F_1)\Phi_2$$

Φ_1 : $k-w$ 난류모델 상수

$$\beta^* = 0.09, \quad \sigma_{k1} = 0.5, \quad \sigma_{w1} = 0.5, \quad \beta_1 = 0.075, \quad \alpha_1 = \frac{5}{9}$$

Φ_2 : $k-\epsilon$ 난류모델 상수

$$\beta^* = 0.09, \quad \sigma_{k2} = 1, \quad \sigma_{w2} = 0.856, \quad \beta_2 = 0.0828, \quad \alpha_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w2}k^2}{\sqrt{\beta^*}}, \quad \kappa = 0.41$$

또한 blending function(F_1)은 다음과 같이 표현된다.

$$F_1 = \tanh\left[\min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* wy}; \frac{500\nu}{y^2 w}\right); \frac{4\rho\sigma_{w_2}k}{CD_{kw}y^2}\right)\right]^4 \qquad (2\text{-}3)$$

y는 벽면까지의 최단거리를 나타내고, CD_{kw}는 교차확산 항을 나타내며 다음과 같이 표현 된다.

$$CD_{kw} = \max\left[2\rho\sigma_{w2}\frac{1}{w}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial w}{\partial x_j}\ ;\ 10^{-20}\right]$$

경계층내부의 전단응력은 난류 운동에너지에 비례한다는 Bradshaw 가정을 만족시키기 위해서 eddy viscosity를 다음과 같이 제한하여 전단응력이 역압력구배에서 과도하게 예측되는 것을 방지한다. Bradshaw 가정은 다음과 같다.

$$\tau = \rho a_1 k$$

전단응력의 정의를 이용하여 위 식을 변형하면 다음과 같이 표현된다.

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\Omega}$$

위 식을 이용하여 난류방정식의 난류 점성계수를 제한하도록 식을 구성하면 다음과 같다.

$$\mu_t = \frac{0.31\rho k}{\max\left[0.31w;\ \Omega F_2\right]}$$

위 식에서 Ω는 vorticity의 절대 값을 나타내며 blending function(F_2)는 다음과 같이 구성된다.

$$F_2 = \tanh\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* wy}; \frac{500\nu}{y^2 w}\right)\right]^2$$

(나) 해석모델

HEMU-430X는 다음 그림 2-1-21과 같이 총 6량으로 구성되어 있으며, 상부의 구조물을 보호하기 위하여 다수의 커버가 설치되어 있는데 팬터그래프 커버 2개에 추가로 열차 중간에 애자를 보호하기 위한 커버가 존재한다. 수치해석 모델은 커버와 팬터그래프 보기를 모두 포함시켰고, 복잡한 열차형상을 잘 표현하기 위해 비정렬 격자(Unstructured Grid)를 사용하여 격자를 생성하였다. 곡면에 격자를 집중적으로 배열하여 형상이 변하는 곡면에서의 유동변화를 효과적으로 모사할 수 있도록 하였다. 열차 표면과 지면에서의 경계층의 영향을 고려하기 위하여 10층으로 구성된 26mm 두께의 Boundary prism mesh를 생성하였으며, 열차의 실제 주행상황을 모사하기 위해 너비, 높이, 길이가 각각 300m, 80m, 750m 인 해석공간을 설정하였으며, 이 때의 Blockage ratios는 6.17E-4으로 경계조건이 열차주위 유동에 미치는 영향을 최소화 하였다. 해석에 이용된 격자수는 총 1370만개를 사용하였고 다음 그림과 같이 구성하였다. 전산해석에 사용된 상세격자를 다음 그림 2-1-22~29으로 나타내었다.



그림 2-1-21 HEMU-430x 의 구성

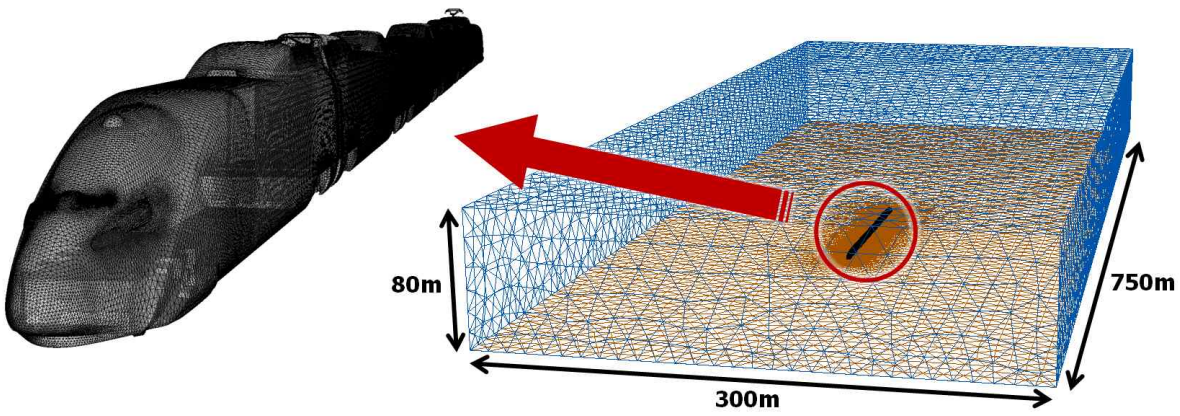


그림 2-1-22 HEMU-430x 격자 및 경계조건

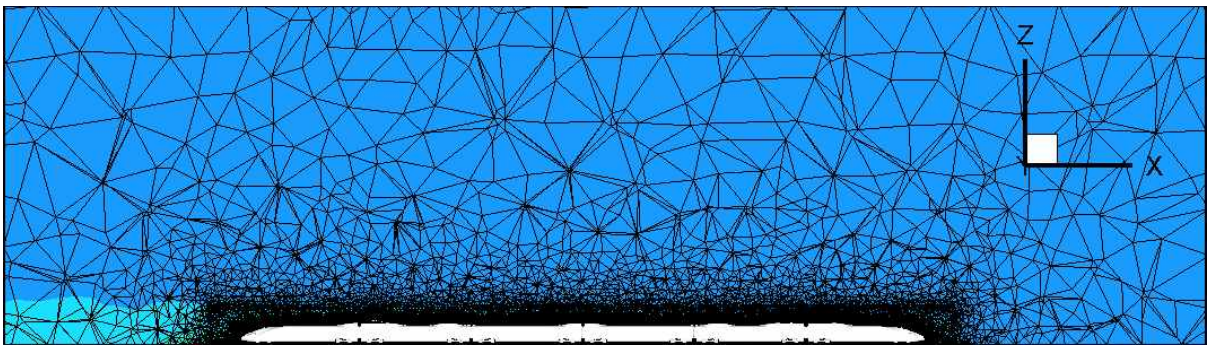


그림 2-1-23 상세격자 전체도

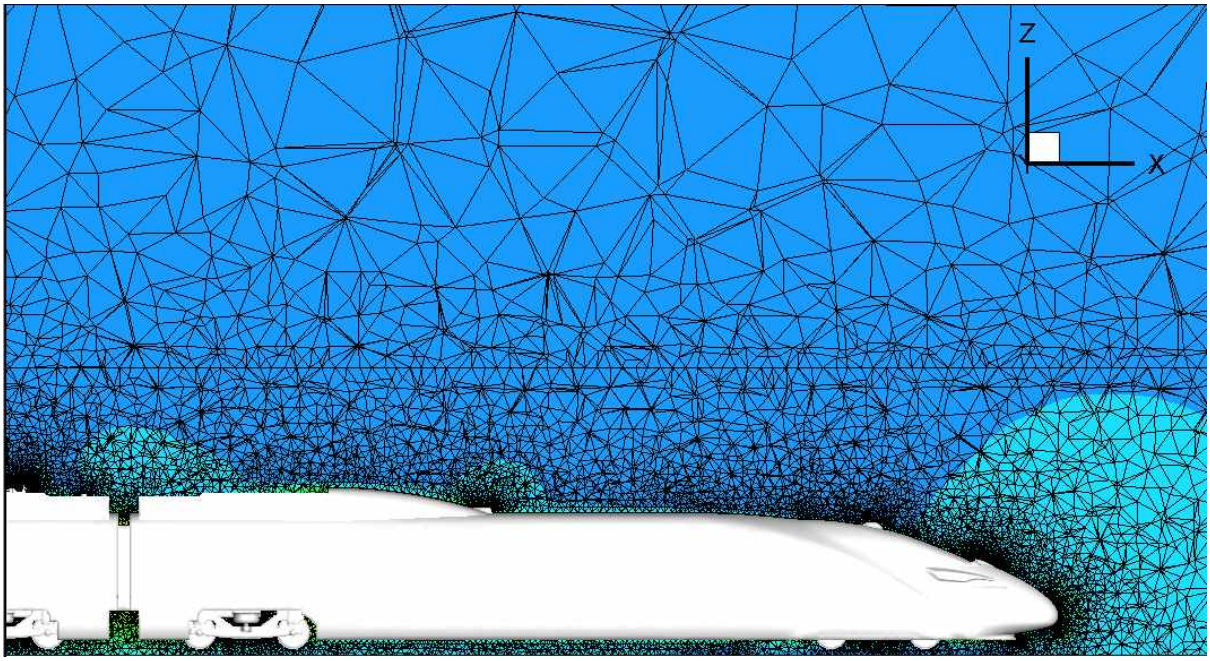


그림 2-1-24 1번차량 상세격자

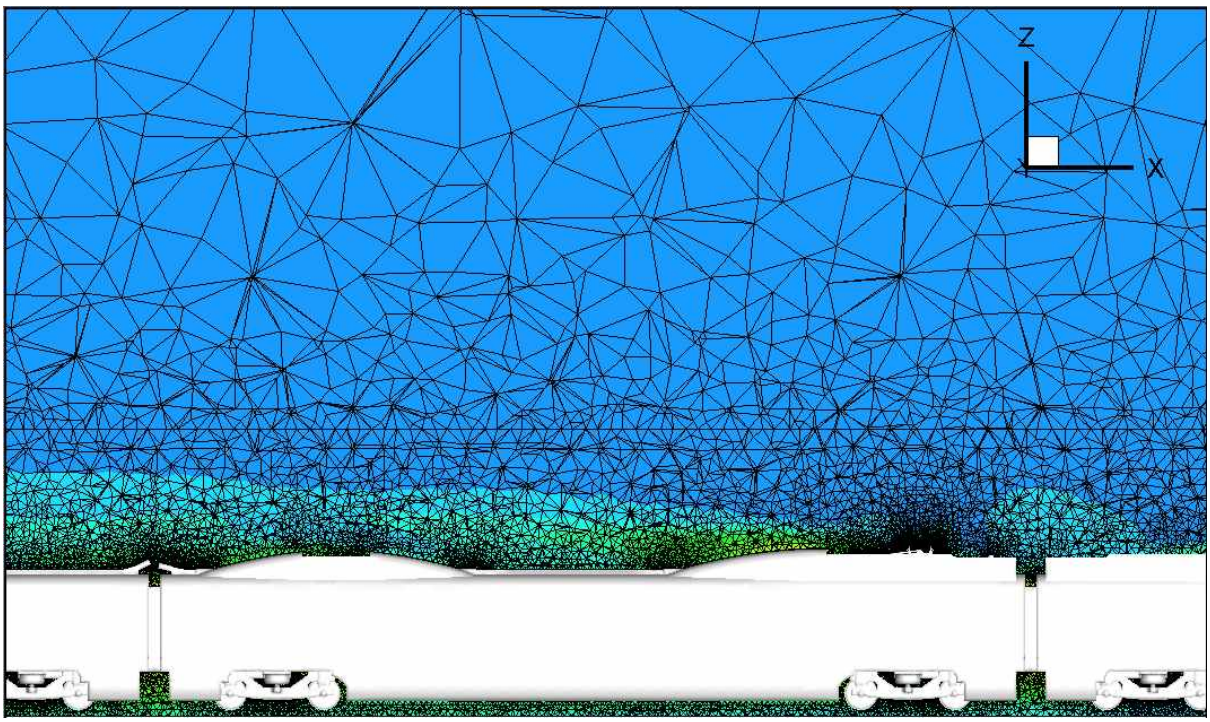


그림 2-1-25 2번 차량 상세격자

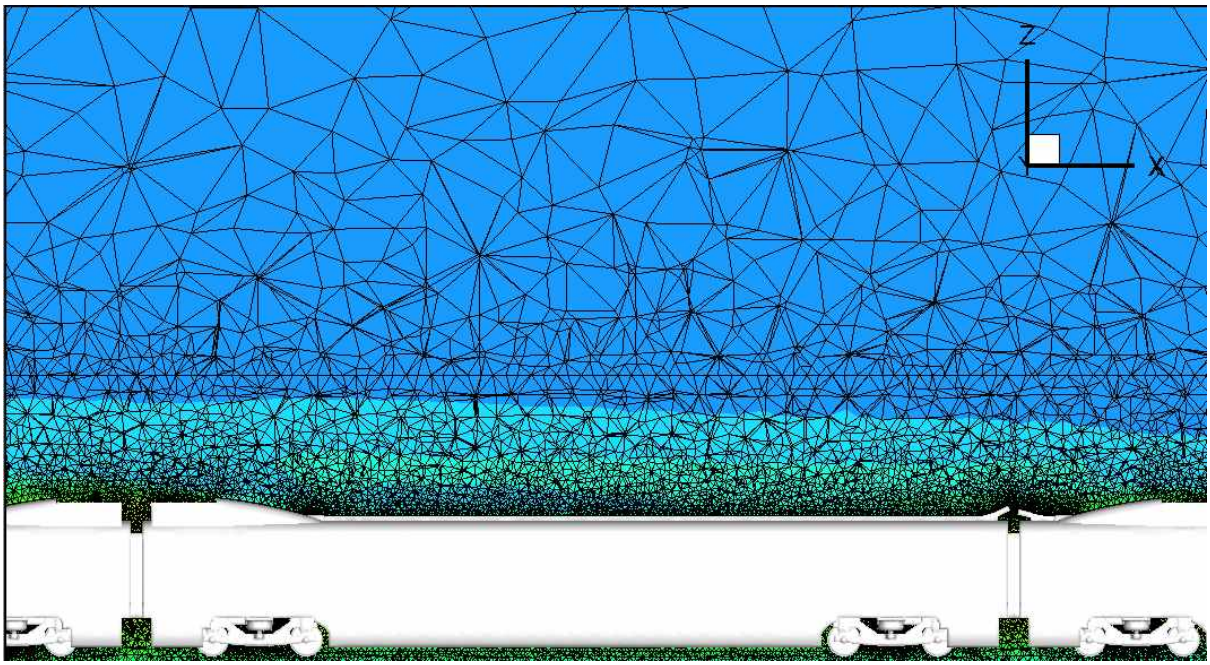


그림 2-1-26 3번 차량 상세격자

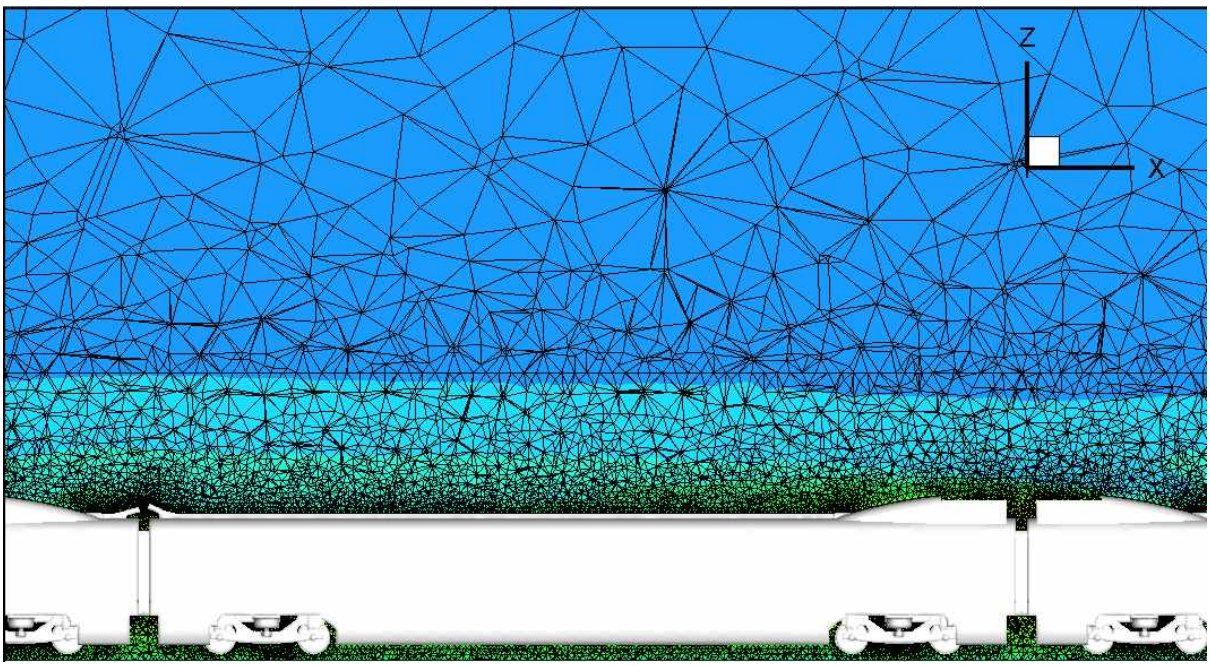


그림 2-1-27 4번 차량 상세격자

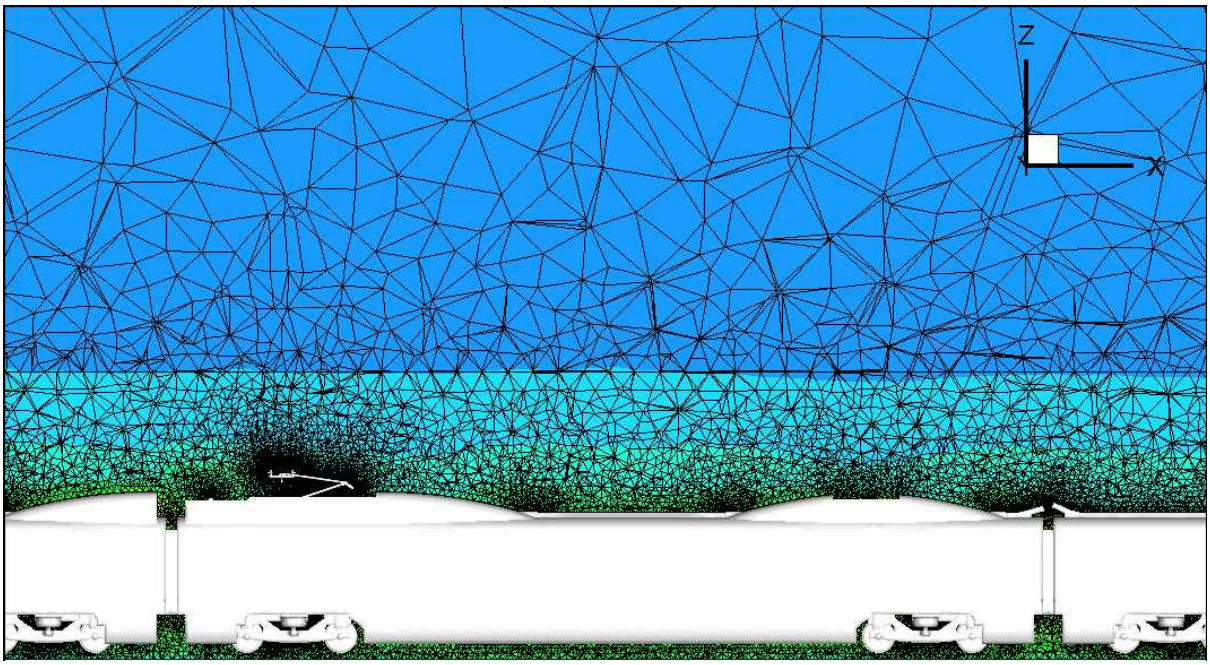


그림 2-1-28 5번 차량 상세격자

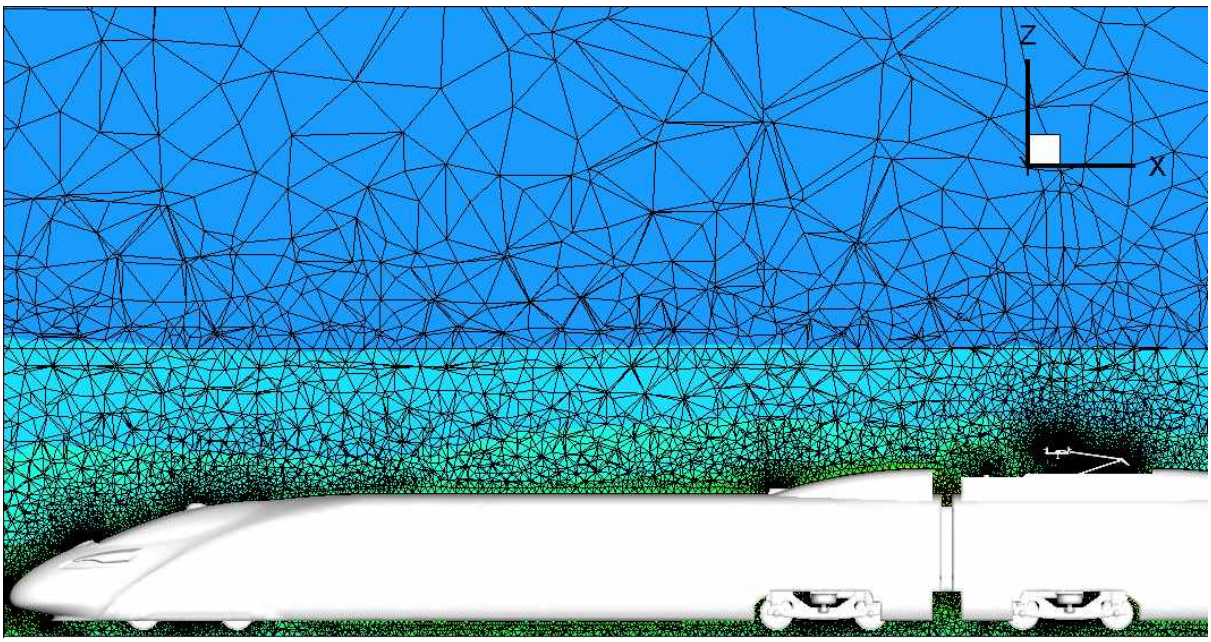


그림 2-1-29 6번 차량 상세격자

(2) 연구내용 및 결과

열차의 상부유동의 전산해석결과는 다음 그림 2-1-30~36 과 같다. 그림 2-1-30는 HEMU- 430X 주위의 압력장 결과이며, 그림 2-1-31은 X방향 속도분포 결과이다.

HEMU-430X 주위의 압력장을 살펴보면, 전두부와 후미부, 연결부에서 압력변화가 심하게 나타나며, 상부에서도 팬터그래프 커버 및 추가 커버에 의해 압력변화가 나타나는 것을 알 수 있다. 상부의 경우 팬터그래프 커버 및 추가 커버에 의해 상부 유동이 매우 복잡해지고 급격한 압력변화로 인하여 항력증가가 커진다.

그림 2-1-32의 결과를 살펴보면 열차 상부의 경계층이 상당히 두꺼움을 알 수 있으며, 상부 경계층 역시 1번 차량(전두부)에서 매우 작게 나타나나 뒷 차량으로 갈수록 경계층이 성장하고 유동이 복잡해 짐을 알 수 있다. 다음 그림 2-1-32~36에서 차량별 상부경계층을 좀 더 자세하게 나타냈다.

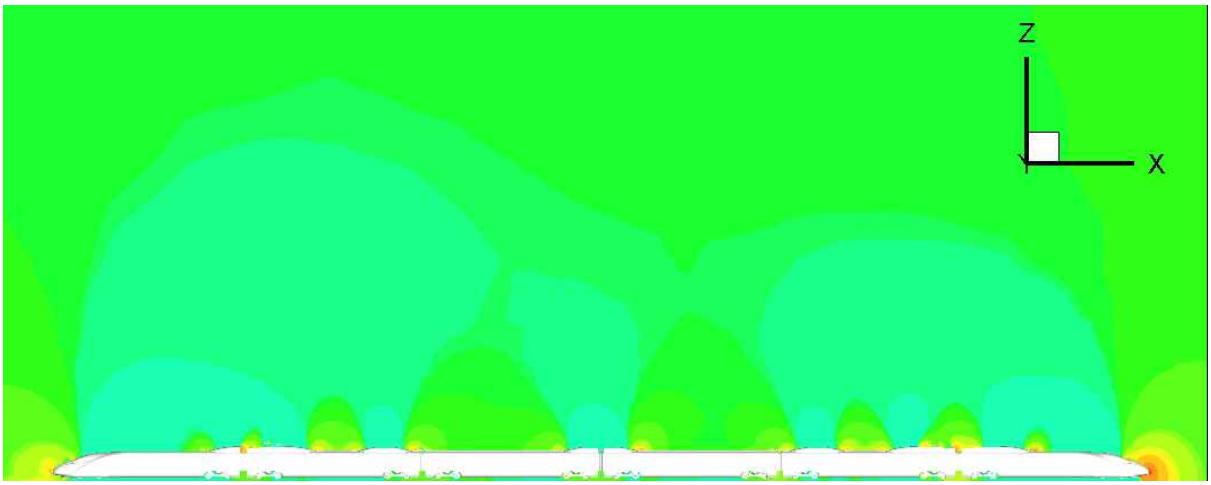


그림 2-1-30 HEMU-430X의 상부유동 압력장 (V=430km/h)

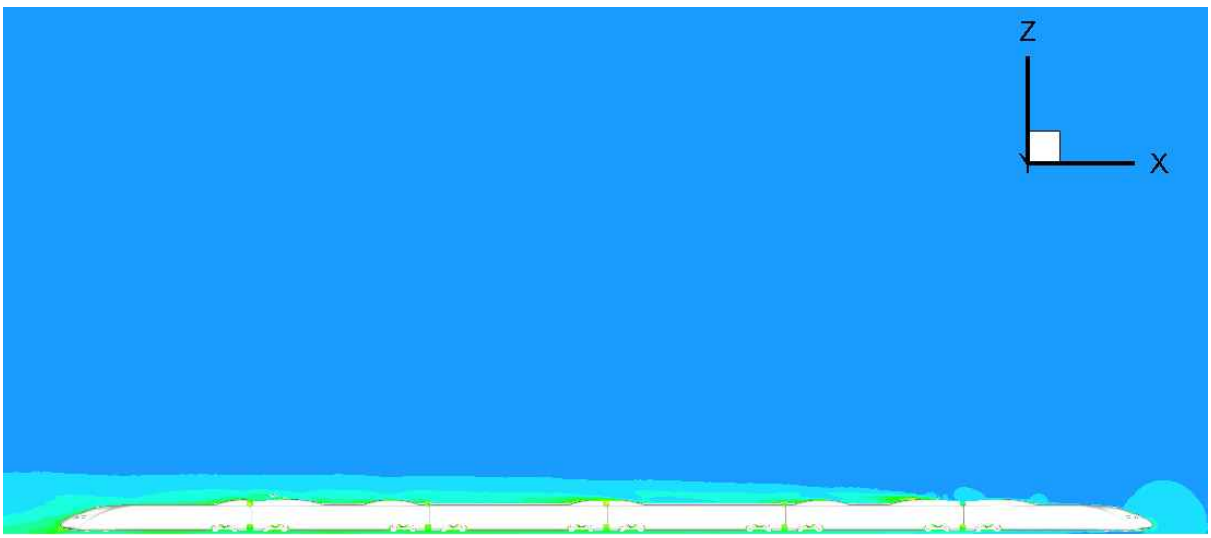


그림 2-1-31 HEMU-430X의 상부유동 해석결과 (상부경계층, V=430km/h))

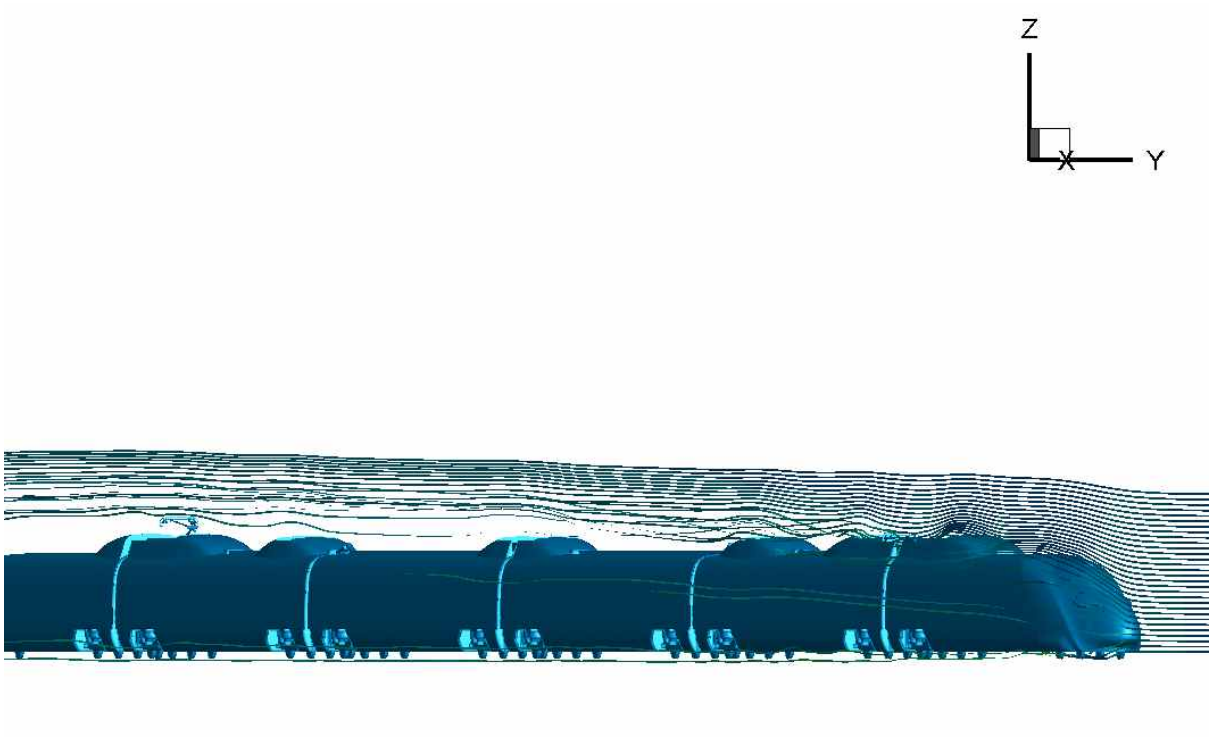


그림 2-1-32 HEMU-430X의 상부유동 특성 (V=430km/h)

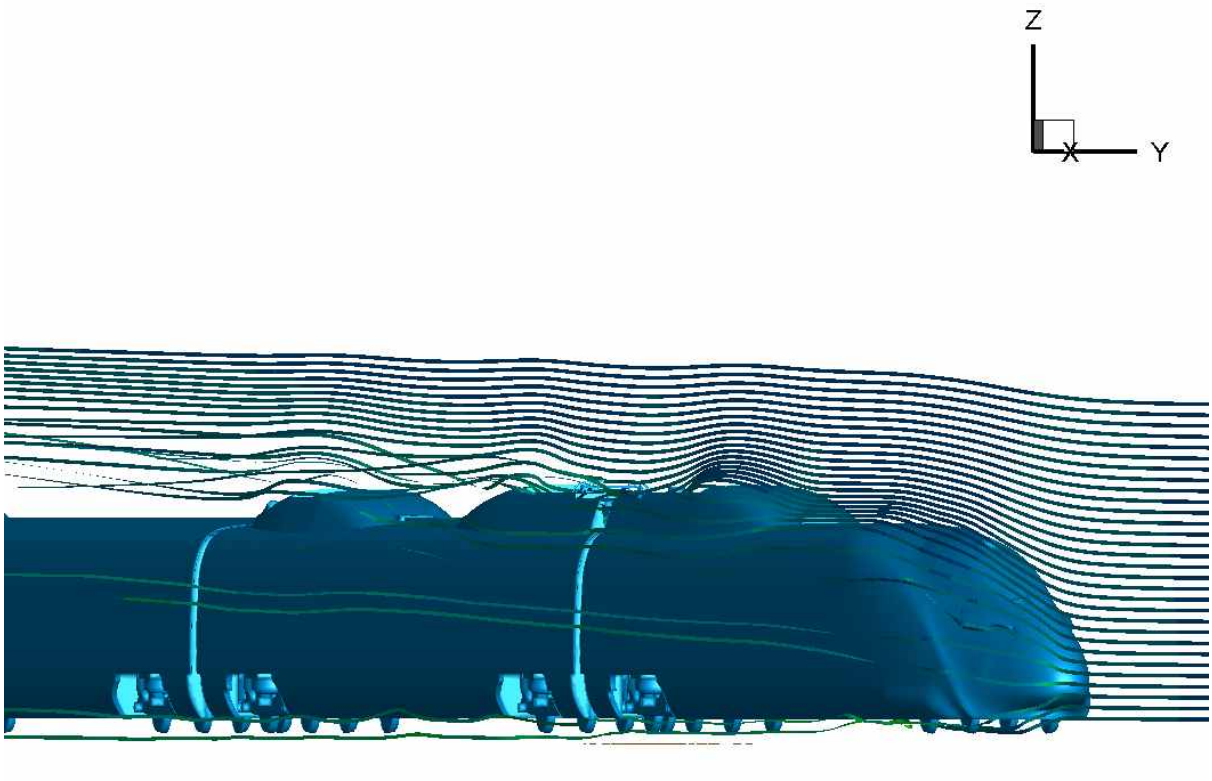


그림 2-1-33 HEMU-430X의 상부유동 특성 (1번 차량과 2번 차량, V=430km/h))

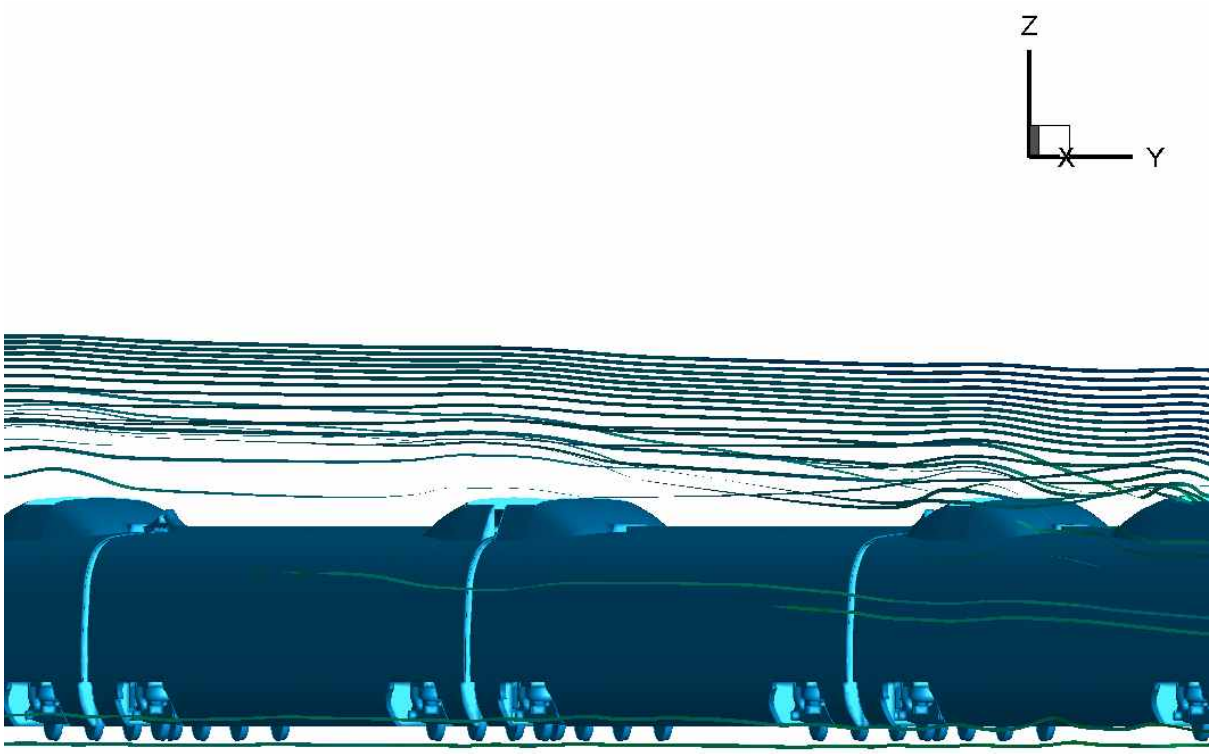


그림 2-1-34 HEMU-430X의 상부유동 특성 (3번 차량과 4번 차량, V=430km/h))

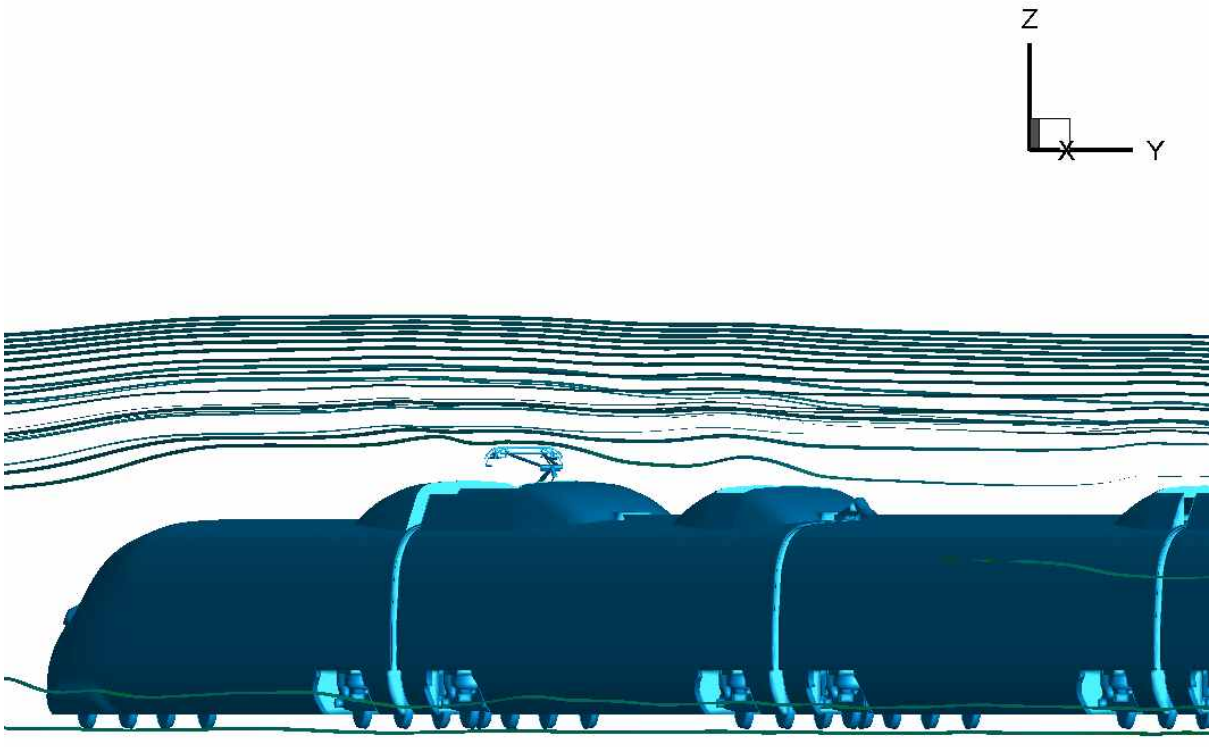


그림 2-1-35 HEMU-430X의 상부유동 특성 (5번 차량과 6번 차량, V=430km/h))

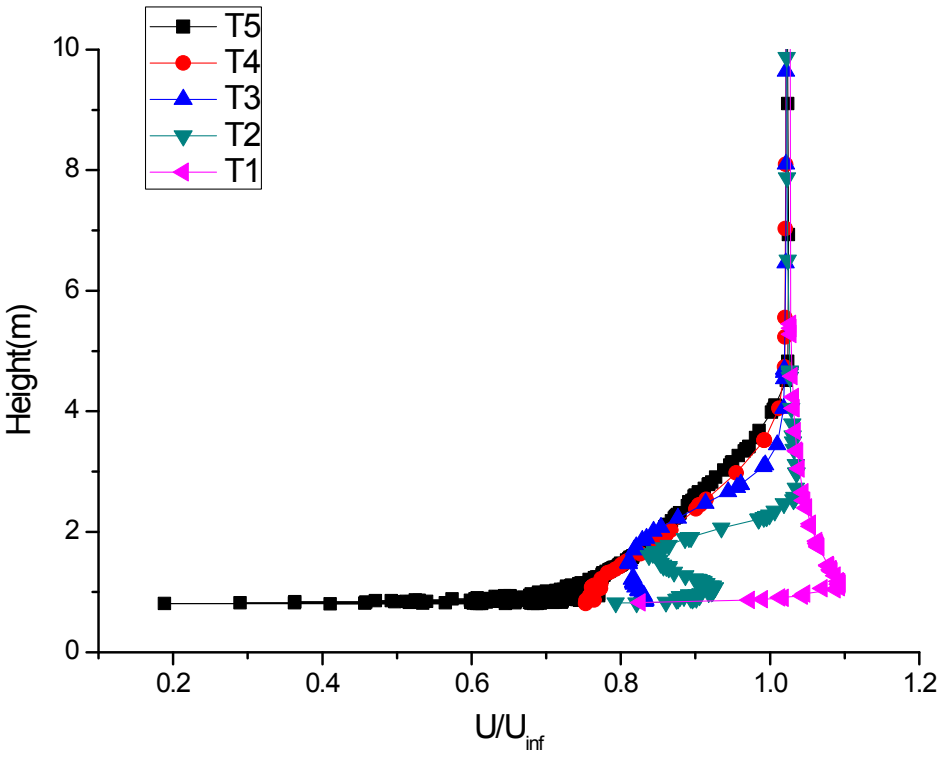


그림 2-1-36 HEMU-430X의 차량별 상부경계층 두께 (V=430km/h)

상부경계층 측정 위치는 팬터그래프 암의 Knee 부분의 바로 앞을 기준으로 모든 차량에서와 같은 위치이며 차량별 상부경계층 두께는 그림 2-1-36과 같다. 우선, 전산해석결과와 1/20 스케일 풍동실험결과를 비교하여 보면 풍동실험조건과 전산해석의 동일한 조건인 1번 차량의 상부경계층 두께를 살펴보면 풍동실험에서 예상된 상부경계층 두께는 34cm이고, 전산해석으로 얻은 1번 차량의 상부경계층은 약37cm로 비교적 잘 일치한다.

전산해석 결과의 차량별 상부경계층 두께에 따라 유동속도가 어떻게 바뀌는지 알아 보았다. 차량별 상부경계층 증가량은 다음 표2-1-1와 그림 2-1-37와 같다. 열차의 길이가 길어질수록 경계층은 점차 두꺼워짐을 알 수 있으며, 차량이 길어질수록 초기 경계층에 비하여 9.5배까지 증가함을 알 수 있다. 하지만 열차의 길이가 길어진다고 무조건 지며, 이로 인해 동일한 위치(팬터그래프 암의 Knee 지점)에서 속도 감소량은 시속 430km/h일 때 상부경계층으로 인하여 운행속도의 80%에 해당하는 유속을 갖는 것을 알 수 있다. 그러므로 6량의 경우 풍동시험을 위한 팬터그래프 전방경계조건은 열차의 운행속도에 80%에 해당한다.

표 2-1-1 상부경계층 두께와 차량에 따른 경계층 증가량

	상부경계층(m)	상부경계층 증가량
T1	0.05	0
T2	0.37	1
T3	1.9	5.1
T4	2.89	7.8
T5	3.46	9.3
T6	3.53	9.5

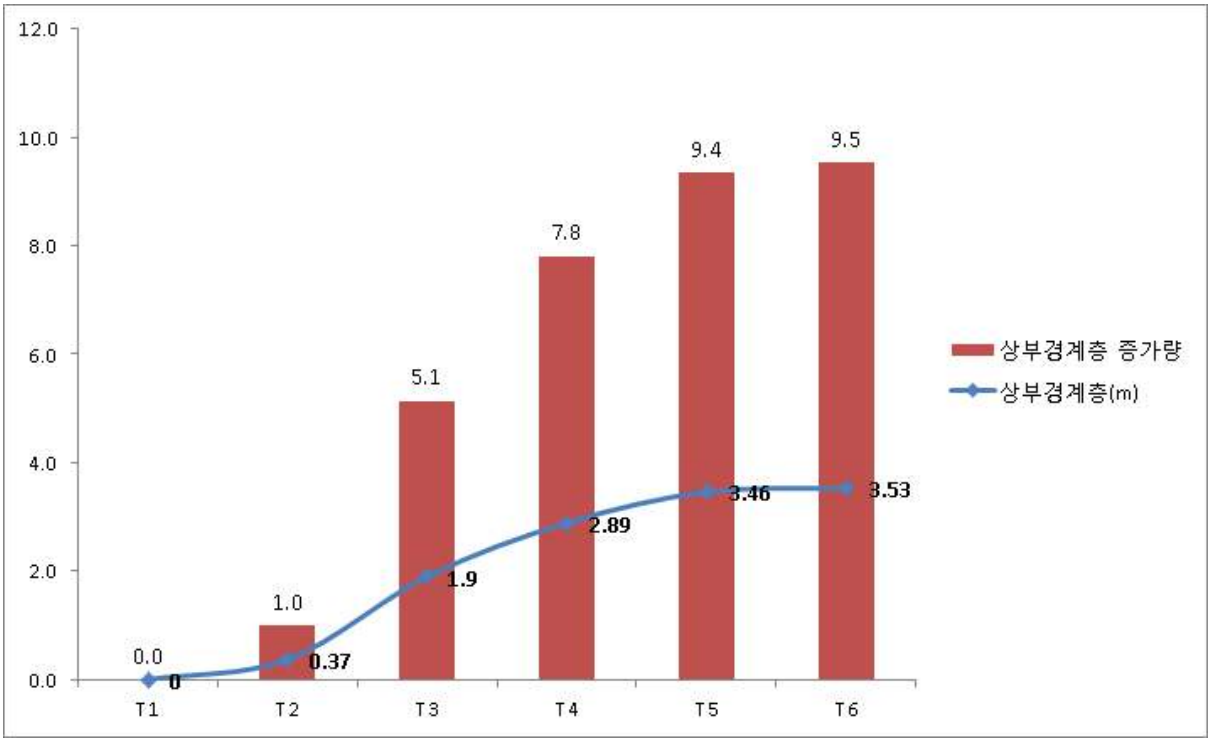


그림 2-1-37 상부경계층 두께와 차량에 따른 경계층 증가량

다. 팬터그래프 운용시나리오 구축

(1) 가선 설명

팬터그래프 운용시나리오는 운용되는 가선(전차선) 시스템과 밀접한 관계가 있다. 가선 시스템은 다음 그림과 같이 simple catenary, stich wire catenary, compound catenary 등 3 가지 형식으로 크게 구분되며, 국내에서는 Simple catenary 형식의 가선계를 채택하고 있다. 가선계는 접촉선(Contact wire), 조가선(Messenger wire), 드롭퍼(Dropper), 가동 부라켓(Moving bracket)등으로 구성되어 있다. 접촉선은 팬터그래프의 팬헤드와 직접 접촉하는 부분이며 조가선은 접촉선을 위해서 지지해 주는 부분으로서 접촉선이 일정한 높이를 갖게 하고 전체적으로 강성을 균일하게 하기 위해 설치된다. 드로퍼는 접촉선과 조가선을 연결하는 선으로 경간 내의 위치에 따라 다른 길이로 설치됨으로써 조가선의 처짐에도 접촉선은 일정한 높이를 갖게 된다. 가동 브라켓은 전주로부터 뻗어나와 조가선을 지지하는 부분으로 한 경간의 시작과 끝을 이룬다. 곡선당김금구는 접촉선과 팬헤드의 일부분 접촉에 의한 편마모 방지를 위해 경간단위로 설치된다.

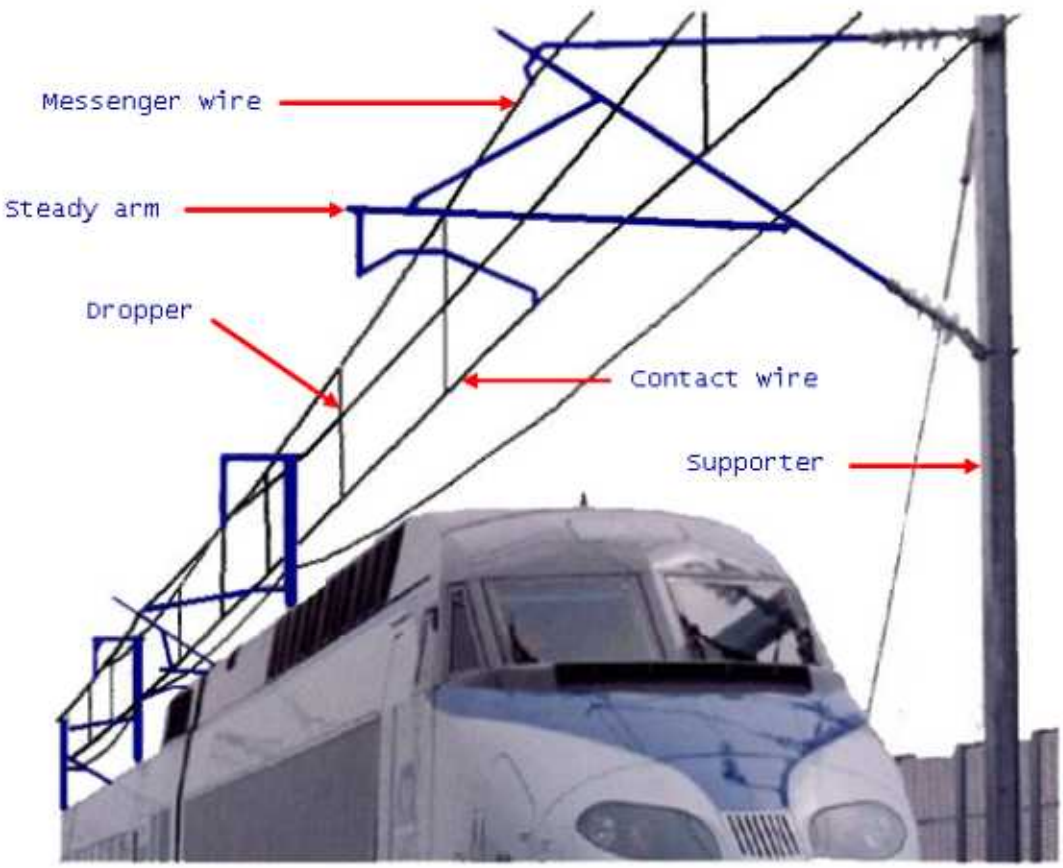


그림 2-1-38 한국 고속철도 전차선 시스템

(2) 팬터그래프 높이 설정

현재 우리나라의 고속선의 규정은 고속선의 높이는 레일 면으로 부터 5080mm이며, 팬터그래프의 최소 집전높이와 최대 집전높이는 다음 그림과 같다. 팬터그래프 운용시나리오 구축을 위한 팬터그래프의 높이는 다음과 같이 결정하였다.



그림 2-1-39 우리나라 가선 높이 기준

다음 그림 2-1-39과 같이 고속선의 전차선 공칭 높이에서 팬터그래프 설치 바닥 높이를 빼면 1600mm이며, 이 높이에서 팬터그래프를 열차의 지붕에 설치하기 위한 애자 높이와 프레임 높이를 빼면 1280mm이다. 따라서 본 연구에서는 팬터그래프 운용시나리오에서 그림 2-1-40 ~ 41과 같이 기본적으로 팬터그래프 높이를 1280mm로 선정하였으며, 전산해석과 풍동실험에서 본 높이를 이용하여 공력소음과 양력, 항력 등을 측정하도록 각 기관에 제공하였다.

고속선 전차선 공칭 높이 – 팬터그래프 설치 바닥높이 = 5080-3480 = 1600

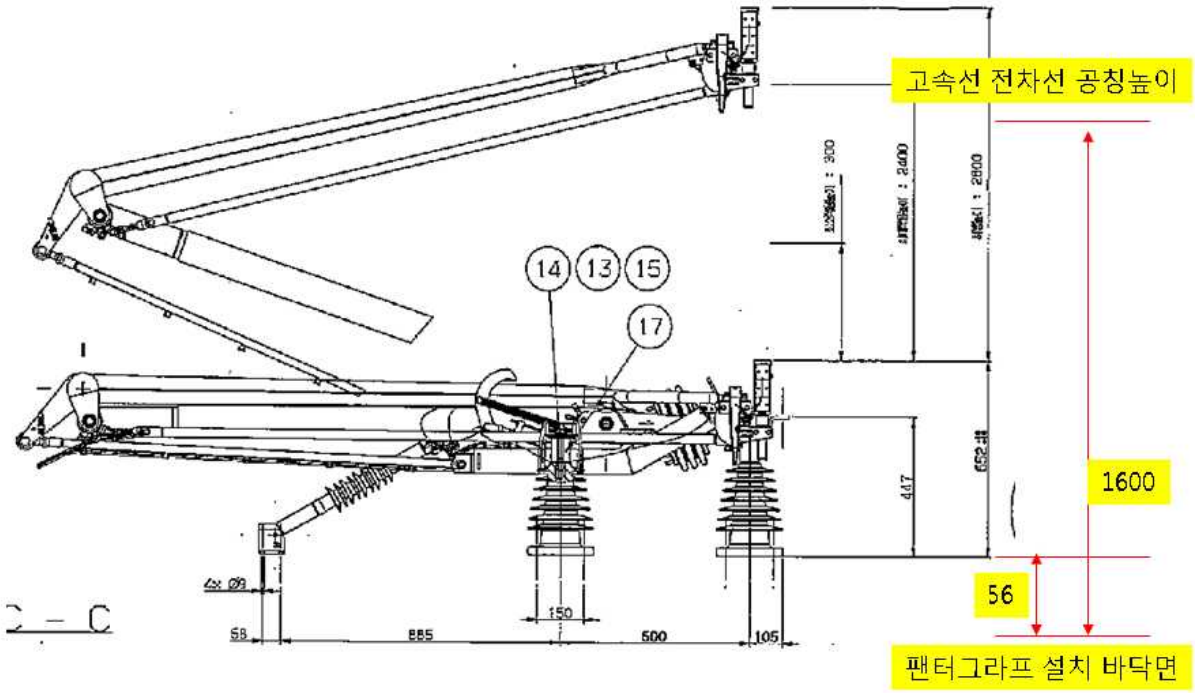


그림 2-1-40 팬터그래프 높이 선정 방법 1-1

고속선 전차선 공칭 높이 - 팬터그래프 프레임 = 1600-56-(447-183)=1280

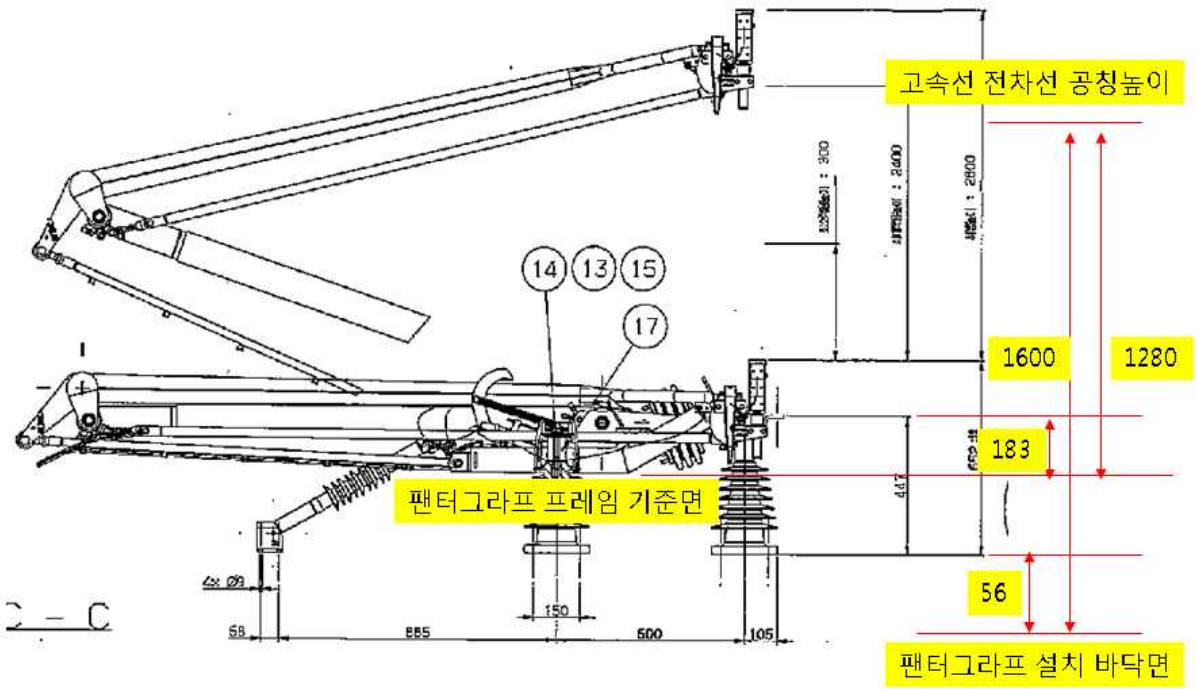


그림 2-1-41 팬터그래프 높이 선정 방법 1-2

(3) 고속전철 팬터그래프 운행시나리오

팬터그래프의 운용시나리오는 각 운행환경 특성에 따라 주행속도, 주행방법, 측풍영향, 터널주행, 가선높이 변화 등에 대한 고려를 통하여 결정하였다. EN 14067-4:2005A1의 Railway applications - Aerodynamics- Part 4: requirements and test procedures for aerodynamics on open track을 참조하였다.

(가) 정상모드 (close knee)

다음 그림은 임의의 지점에서 최고속도 300km/h로 운행하는 시나리오의 예를 보여주고 있다. 정상모드 시나리오의 경우 역에서 출발하여 서서히 가속하다가 300km/h를 유지하며 운행하다 역에 정차하기 위하여 다시 감소하여 정차하고 다시 가속하여 300km/h로 운행하다가 다시 감속을 되풀이하는 내용이다. 이 때는 정상모드로서 팬터그래프는 close knee 조건이며, 현재 우리나라 고속선의 높이에 맞는 높이로 설정되어 진다.

정상모드 시나리오를 풍동실험이나 전산해석을 수행할 시 주행속도에 상응하는 유속을 제공하여야 하며, 지면조건 역시 유속과 동일한 속도로 움직여 주어야 한다. 하지만 팬터그래프의 경우 열차의 지붕에 위치하여 외부유동에 노출되기 때문에 지면 조건은 고정지면으로 설정하여야 하고 상부경계층의 효과로 운행속도의 80% 해당하는 유속을 제공하여야 실제 운행조건과 가장 유사하다.

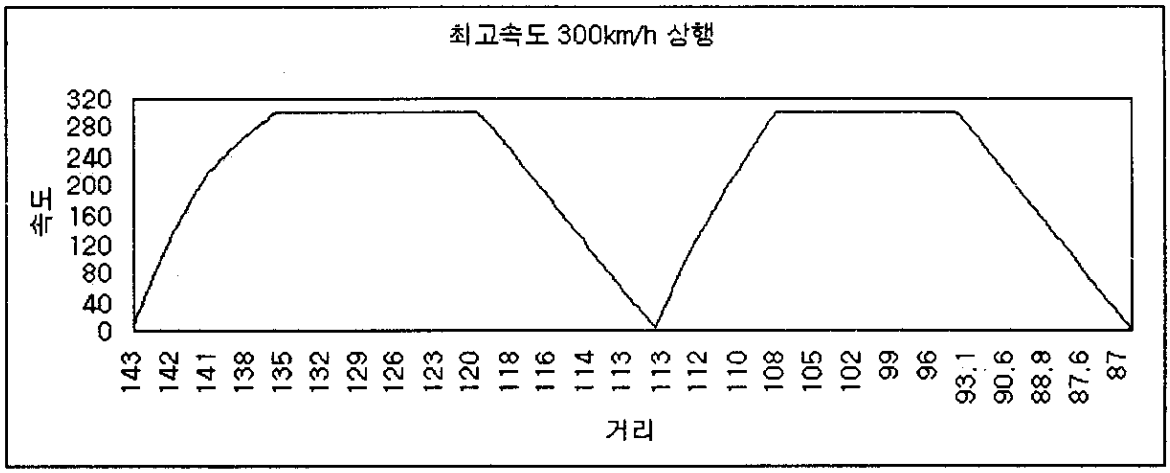


그림 2-1-42 팬터그래프 운용시나리오 중 정상모드 조건 예시(KRRI 실차 시험보고서)

(나) 비정상모드(open knee)

비정상 모드 시나리오는 열차의 정상모드가 아닌 비정상 모드에 대한 내용으로서 유동조건은 정상모드 시나리오와 동일하지만 팬터그래프의 방향이 정상모드의 경우의 정반대(Open Knee)로 운행되는 것을 말한다. 비정상모드 시나리오를 풍동실험이나 전산해석을 수행할 시 정상모드 시나리오와 동일하게 주행속도에 상응하는 유속을 제공하여야 하며, 지면조건 역시 유속과 동일한 속도로 움직여 주어야 한다. 하지만 팬터그래프의 경우 열차의 지붕에 위치하여 외부유동에 노출되기 때문에 지면 조건은 고정지면으로 설정하여야 하고 상

부경계층의 효과로 운행속도의 80% 해당하는 유속을 제공하여야 실제 운행조건과 가장 유사하다.

(다) 측풍

고속전철은 운행 중 간헐적으로 측풍의 영향을 받게 된다. 측풍은 열차에 주행안정성에 많은 영향을 미치며, 특히 팬터그래프의 경우 열차보다 더 높은 지점에 위치하기 때문에 영향을 더 많이 받게 되어 팬터그래프의 집전 성능에 영향을 미치게 된다. 유동은 벡터성분으로 다음 그림과 같이 Yaw angle을 결정할 수 있다.

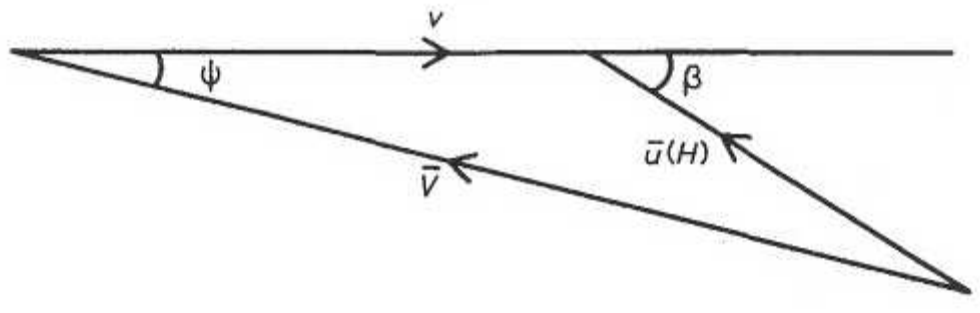


그림 2-1-43 측풍에 따른 Yaw angle 산출 방법

본 연구에서 측풍에 대한 팬터그래프의 운용시나리오로 선정한 것은 350km/h(97.22m/s)시 유동방향의 90도에서 불어오는 6.8m/s, 3.4m/s의 바람이 불어오는 경우이다. 이를 통해 풍동실험과 전산해석에서는 유동의 Yaw angle을 2도, 4도로 결정하여 유동해석 및 실험을 수행하였다.

(라) 가선 높이

우리나라의 경우 고속선의 가선 높이는 한 개로 고정되어 있다. 하지만 고속선이 아닌 기존선을 운행하는 경우도 종종 발생하고 있다. 본 연구에서는 가선높이 변화에 따른 팬터그래프 운용시나리오를 결정하여 높은 높이, 낮은 높이 두 가지 경우에 대해서 풍동실험과 전산해석 연구를 수행하도록 하였다.

(4) 팬터그래프 형상설계 요구조건 및 제약조건 도출

(가) 팬터그래프 설계 제약사항 조사

공력학적 설계에서 이루어지는 주 내용은 공력에 의한 소음과 양력, 항력이다. 공력소음은 속도의 6~8승으로 증가되며, 팬터그래프에서는 특히 고주파수 소음을 발생하게 되므로 이를 최소화하도록 하여야 한다. 양력은 요구되는 값이 발생되어야 하며 압력 변동이 최소화되도록 하고 열차의 전체 저항에서 최대 10% 정도 차지하므로 저저항 설계가 필요하다. 여기서 양력은 너무 크면 접촉력을 증가시키므로써 마모 및 이선의 증대를 야기한다. 반면에 양력이 너무 작으면 판토그래프를 하강시킴으로 이선이 커지게 된다. 또한 양력변동이 크게 나타나면 아킹이 발생되기 때문에 이로인해 팬헤드에서 마모와 충격소음이 발생하게 된다. 특히 터널 통과 시 좁은 면적을 빠른속도로 통과하다 보니 압축성 효과와 차폐율에 의해 운행속도보다 더 빠른 유동이 발생하게 되어 이에 따른 양력 변화를 설계에 고려해야 한다.

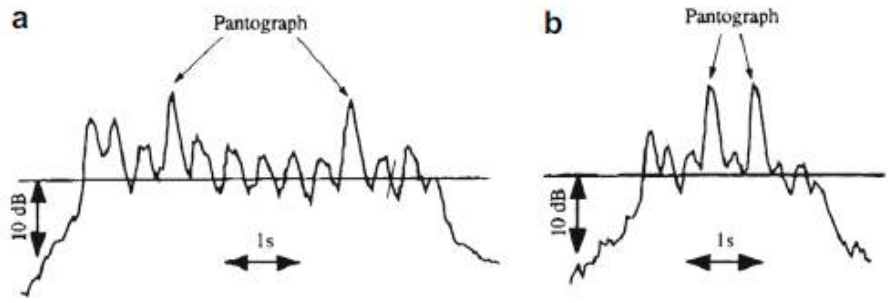


FIGURE 8-17 Time history of A-weighted sound pressure level from Shinkansen measured with a microphone array at 25 m from the track: (a) S-1 train, 235 km/h, (b) S-2 train, 312 km/h [8.33]

그림 2-1-44 팬터그래프 공력소음

(나) EN, TSI, UIC, 한국기준을 고려한 팬터그래프 공력설계 평가 기준 분석

팬터그래프의 형상설계 요구조건을 도출하기 위해 본 연구에서는 EN, TSI, UIC, 한국 기준을 검토하였다. 팬터그래프 시험과 관련된 각종 관련 시험규격은 다음과 같다.

① UIC Code 794-O ; "Pantograph-Overhead Line interaction on the European high- speed network"

UIC 794 O는 European Union에 의해 규정된 유러피언 고속선에 대한 다양한 종류의 팬터그래프와 가선사이에 대한 규정이다. 유럽 고속선에서 적용되는 규정은 300km/h 이상의 팬터그래프 접촉력과 관련한 내용에서는 아래와 같이 최고속도에서 공력을 포함한 **접촉력(Fmean)이 120N 또는 200N 이하로 규제하고 있으며, Fmean - 3σ(표준편차) 가 0 N 이상 또는 스페인이나 프랑스의 경우는 40N이상을 제한 값으로 제시**하고 있다.

Series No.	Description	Line speed (km/h)				
		V ≤ 100	100 < V ≤ 200	200 < V ≤ 230	230 < V ≤ 300	V > 300
Table 1 : Overhead line requirements						
1.	Height of contact wire (mm) Current situation (mm) Current BR variation (mm) Current SNCF variation(mm) (all standard height)	CENELEC specifications ⇓	5 500 4 800 - 6 000 4 550 - 6 000 4 640 - 6 200	5 500 4 800 - 6 000 4 550 - 6 000 4 640 - 6 200	5 300(1) or 5 080(1)	5 300(1) or 5 080(1)
2.	Height tolerance from one support to another when erected (mm)		± 30	± 30	± 10	± 10
3.	Maximum contact wire slope in relation to the track (‰)		1(2)	1(2)	0	0
4.	Lateral deflection of the contact wire in maximum cross wind (mm) Current DB situation Current RENFE situation		≤ 400 ≤ 550	≤ 400 ≤ 550	≤ 400 ≤ 500 ≤ 500	≤ 400
5.	Permissible maximum contact wire uplift (when pantograph passes the support) (mm) Current SNCF situation Current DB situation Current RENFE situation (see Table 2.4)		120 100 100	120 100 100	120 120 100 100	120

Footnote :
(1) Standard heights for the GC gauge are dependent on certain criteria (e.g. electric insulation, ice load, building and maintenance tolerances, etc.)
(2) Proposal in the CENELEC standard EN 50 119

그림 2-1-45 UIC 794 팬터그래프 해당부분

Series No.	Description	Line speed (km/h)				
		V ≤ 100	100 < V ≤ 200	200 < V ≤ 230	230 < V ≤ 300	V > 300
Table 2 : Pantograph requirements						
1.	Width of pantograph bow (mm) Current situation - SNCF - DB, RENFE - MÁV, ÖBB - BV/SJ, NSB - CFF	CENELEC Specifications ⇓	1 600 1 450 1 950 1 950 1 800 1 450	1 600 1 450 1 950	1 600 1 450 1 950	1 600
2.	Working range of the pantograph bow (mm)		1 200	1 200	1 200	1 200
3.	Profile of pantograph bow		Appendix 1	Appendix 1	Appendix 1	Appendix 1
4.	Permissible maximum aerodynamic contact force (N) at maximum speed		120(1) (2) or 150(2)	120(1) (2) or 150(2)	120(1) (2) or 200(2)	120(1) (2) or 200(2)
5.	Current collection criterion (s) Fm - 3σ en N(3) Current DB situation Current RENFE situation Current SNCF situation		> 0(4) > 40(5) Demonstration using checks on arcs. criteria to be agreed.	> 0(4) > 40(5)	> 0(4) > 40(5) > 40(5)	> 0(4)

Footnote :
(1) With two pantographs per train, 140 N for the trailing pantograph
(2) Values dependent on type of overhead line
(3) Fm is the average value for the contact force after statistical analysis of the results obtained with the contact force measurement
(4) Provisional value
(5) See also ERRI A 186 Document dated 12.1.1994

그림 2-1-46 UIC 794 팬터그래프 해당부분

Series No.	Description	Line speed (km/h)				
		V ≤ 100	100 < V ≤ 200	200 < V ≤ 230	230 < V ≤ 300	V > 300
6.	Safety device to protect against crosswinds (limitation of height of pantograph)		not necessary	desirable	necessary	necessary
7.	Contact strip material		Plain carbon - if necessary, impregnated with added material	Plain carbon- if necessary, impregnated with added material	Plain carbon - if necessary, impregnated with added material	Plain carbon - if necessary, impregnated with added material
8.	Device to detect defects in pantograph bow		desirable	necessary	necessary	necessary
Table 3 : Overhead-line recommendations						
1.	Maximum longitudinal span (m)		65	65	65	65
2.	Minimum wave propagation speed (m/s)(1)		100	110	120	V_{max} + 40 m/s
3.	Degree of variability (2)(en %) with stitch wire without stitch wire		 < 15 < 38	 < 10 < 38	 < 10 < 39	 < 10 < 25
4.	Sag in longitudinal span (‰)		≤ 1	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5

Footnote :

(1) See UIC 57H3 "Characteristics of overhead line for high-speed lines"
(2) Values depend on the type of overhead line

그림 2-1-47 UIC 794 팬터그래프 해당부분

Serial No.	Description	Line speed (km/h)				
		V ≤ 100	100 < V ≤ 200	200 < V ≤ 230	230 < V ≤ 300	V > 300
Table 4 : Pantograph recommendations						
1	Maximum number of active pantographs per trainset			2	2	2
2	Minimum spacing between 2 active pantographs (m)			> 200	> 200	> 200
3	Secondary damping		desirable	necessary	necessary	necessary

그림 2-1-48 UIC 794 팬터그래프 해당부분

② BS EN 50119 (2009) ; “Railway applications - Fixed installations - Electric traction overhead contact lines”

EN 50119에서는 200km/h 이상의 속도에서 이선과 관련하여 **Fmean - 3σ > positive 로 규정하고 있고, 최대 접촉력은 350N 으로 제한**하고 있다. 다만 최대접촉력의 경우 본 규격에 정확한 정의가 되어 있지 않아 적용하는데 어려움이 있다. 또한 본 규격에서는 기계적인 접촉력 계측이 불가능 한 경우 이선율로 판단토록 하고 있으며, 이는 아크의 지속시간으로 결정되고 있다.

4.4 Vehicle characteristics

The overhead contact line system design shall consider clearances for all vehicle types to be used on the line. In particular the following shall be determined:

a) the static and kinematic load gauge, kinematic envelope and the swept envelope as well as any national or international requirements for structural clearances;

b) the number of pantographs in service, their spacing, and whether they are electrically linked or independent.

4.5 Current collectors

The characteristics of the current collectors to be used on the line shall be determined. These characteristics include

a) current collector head width, length and profile, as defined in EN 50206-1:1998 and EN 50206-2:1999, 3.2.6 and 3.2.7,

b) number of contact strips, the type of material and the spacing,

c) mean static contact force of current collector, depending on its working height,

d) details of the lateral movement of the current collector head,

e) mean contact force at maximum line speed,

f) working width of the current collector head,

g) working range and housed height,

h) controlled height positions,

i) mathematical model of dynamic characteristics,

j) skew of current collector head,

k) number, position on the train and separation of current collectors that may be used simultaneously.

NOTE Specific requirements for pantographs for interoperable lines are given in EN 50367.

4.6 Environmental conditions

For environmental conditions refer to EN 50125-2.

4.7 Design life

The purchaser may state the required design life of the system. Consumable components such as contact wire are not included in the design life of the system. Specific requirements for the design life of these components may also be specified by the purchaser.

5 System requirements

5.1 Design of electrical system

5.1.1 General

The overhead contact line system shall be designed to allow for the electrical characteristics defined in 4.2 and 4.3. The design shall include the return circuit and feeder connections and shall consider short-circuit faults.

그림 2-1-49 EN 50119:2009 해당부분

5.2.5.2 Contact forces

Overhead contact line equipment shall be designed to accept maximum permissible contact forces between the pantograph and the contact wire. The aerodynamic effects which occur at the maximum permissible speed of the vehicle shall be taken into account.

The minimum contact force shall be positive to ensure that there is no loss of contact between the pantograph and the overhead contact line.

Force values vary with different combinations of pantographs and overhead contact systems. The simulated or measured values of contact forces between the contact wire and contact strip shall not exceed the range given in Table 4.

Where contact forces are used to define the current collection, the mean value and standard deviation of contact force shall be the criteria for current collection quality.

The mean contact force plus three standard deviations shall be equal to or smaller than the maximum value in Table 4. The mean contact force minus three standard deviations shall be positive.

Table 4 — Contact force

System	Speed	Contact force	
		Maximum	Minimum
	km/h	N	N
a.c.	≤ 200	300	> 0
a.c.	> 200	350	> 0
d.c.	≤ 200	300	> 0
d.c.	> 200	400	> 0

For rigid components such as section insulators in overhead contact line systems up to 200 km/h the contact force can increase up to a maximum of 350 N.

For urban mass transportation systems the dynamic behaviour need not be considered. In this case the static contact force shall be at least 60 N. For trolleybus systems the values are specified in 5.13.5.

NOTE Requirements for contact forces for interoperable lines are given in EN 50367.

그림 2-1-50 EN 50119:2009 해당부분

③ BS EN 50367 (2012) ; “Railway applications-Current collection systems-Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access)”

β angle of the main horn on the fixed part of the pantograph head

5 Geometry

5.1 General

The geometric characteristics of the overhead contact line shall be designed and built in accordance with 5.2. The geometric characteristics of the pantograph(s) shall be designed and built in accordance with 5.3, according to the type of infrastructure on which it will operate.

5.2 Overhead contact line characteristics

5.2.1 General

The following geometric parameters of the overhead contact line are defined in order to achieve free access:

- gauge;
- contact wire height;
- contact wire gradient;
- lateral deviation of the contact wire from the track centre line under action of a crosswind;
- free and unrestricted contact wire uplift at the support;
- neutral section arrangements.

The overhead contact line shall conform to EN 50119.

5.2.2 Gauges

The design of the overhead contact line shall allow the operation of vehicles compliant to the appropriate vehicle gauge for the route. This gauge shall be calculated according to EN 15273.

5.2.3 Contact wire height

The range of nominal contact wire height shall be in accordance with Table 1.

The contact wire may be higher in certain cases such as level crossings, loading areas, etc. In these cases the maximum design contact wire height shall not be greater than 6,20 m.

The maximum contact wire height is 6,5 m.

The contact wire height may be lower in certain cases related to gauge such as bridges and tunnels. Minimum contact wire height shall be calculated in accordance with EN 50119:2009, 5.10.4.

Table 1 – Range of nominal contact wire height for AC and DC systems

Line speed v (km/h)	$v \leq 200$	$200 < v < 250$	$v \geq 250$
Range of nominal contact wire height [m]	5,0 up to 5,75	5,0 up to 5,5	5,08 up to 5,3

그림 2-1-51 EN 50367:2012 해당부분

5.2.4 Contact wire gradient

The permissible contact wire gradient is defined in EN 50119:2009, 5.10.3.

The variation in contact wire height shall fulfil the requirements imposed by EN 50119:2009, 5.10.3.

The contact wire gradient specified in EN 50119:2009, 5.10.3 may be exceeded on an exceptional basis, where a series of restrictions on the contact wire height such as level crossings, bridges, tunnels, etc., prevents compliance. In this case the requirements of 7.3 are not applicable, and the contact force shall not exceed the maximum value defined in EN 50119:2009, 5.2.5.2.

5.2.5 Lateral deviation

The maximum lateral deviation of the contact wire shall be calculated by taking into consideration the total movement of the pantograph with respect to the nominal track position and the conducting range (or working length, for pantographs with horns made from a conducting material) as follows:

$$d_{\mathrm{i}} = b_{\mathrm{w,c}} + b_{\mathrm{w}} - b'_{\mathrm{h}}$$

The values shall be adjusted taking into account the pantograph movement, track gauge and track tolerances according to EN 15273 and the following reference parameters:

s'_0 = 0,225

h'_{c0} = 0,5 m

l'_0 = 0,066 m and D'_0 = 0,066 m

h'_o = 6,500 m and h'_u = 5,000 m

$b_{w,c}$ = 600 mm for pantographs in accordance with Figure A.6

b_w = 800 mm for pantographs in accordance with Figure A.6

$b_{w,c}$ = 775 mm for pantographs in accordance with Figure A.7

b_w = 975 mm for pantographs in accordance with Figure A.7

For interoperable pantographs defined in A.2 the limit for the maximum permissible lateral deviation of the contact wire normal to the design track centre line under the action of cross wind is given in Table 2.

Table 2 – Maximum lateral deviation

Dimensions in millimetres

Pantograph length	Maximum lateral deviation
1 600	400
1 950	550

In the case of a multi-rail track, the requirement shall be fulfilled for each pair of rails (designed to be operated as separated track) that is intended to be interoperability.

그림 2-1-52 EN 50367:2012 해당부분

The wind speed and the pantograph length to be considered will be defined by the infrastructure manager.

5.2.6 Contact wire uplift

The requirements for the allowance for contact wire uplift at the support are defined in EN 50119:2009, 5.10.2.

5.2.7 Neutral sections

For operation through neutral sections see EN 50388. The requirements for the design of neutral sections are defined as follows:

- trains shall be able to move from one section to an adjacent one (which is fed from a different phase or system) without bridging the neutral section;
- the neutral section shall be designed in such a way that trains with multiple pantographs arranged according to A.1.5 at an overall separation up to a maximum of 400 m can pass through with their pantographs raised;
- adequate means shall be provided to allow a train that is stopped within the phase separation section to be restarted.

In the case of trains with multiple pantographs, the pantographs shall be lowered for the entire length of the neutral section if any of the above requirements cannot be met. Technical or operational measures shall be taken to meet safety and availability requirements.

For compatibility between neutral sections and certain arrangements of pantographs, see Clause 8.

5.2.8 Change over area between pantograph profiles

At connections between lines which are designed for different pantograph profiles, a change over area shall be provided. In the change over area one pantograph type shall be lowered and the other type shall be raised. In the area which is common to the different pantograph profiles, the overhead contact line shall be designed as follows:

- the lateral deviation of the contact wire according to 5.2.5 shall be calculated for a pantograph with the shortest length of head;
- the pantograph gauge according to 5.2.2 shall be calculated for a pantograph with the largest length of head.

The new pantograph shall not be raised before the other is lowered.

NOTE Lowering of a pantograph before raising another one is necessary to avoid a critical uplift of the contact wire and unexpected high contact forces.

5.3 Pantograph characteristics

5.3.1 General

The following geometric parameters of the pantograph are important to interaction performance:

- geometric profile of pantograph head;
- working range of the height of pantograph;
- length of contact strips;
- maximum width of pantograph head;
- encroachment of the pantograph head above the contact line.

The maximum encroachment of pantograph head shall not exceed 60 mm under all conditions according to EN 15273-1:2009, 8.1.1.2.

NOTE 1 Typically the critical case is with the contact point at the limit of the contact strips with maximum contact forces applied.

The maximum lateral deviation of the contact wire using interoperable pantograph heads is specified in 5.2.5.

그림 2-1-53 EN 50367:2012 해당부분

The design of the pantograph shall ensure performance in accordance with Clause 7 for the speed range and a contact wire height according to 5.2.2 and Table 3. The maximum value of working height shall be 6,5 m.

Table 3 – Pantograph characteristics for AC and DC systems

Profile of pantograph heads [a]	See Figure A.6 and Figure A.7
Maximum width of pantograph head (m) [b]	0,65
Mechanical kinematic pantograph gauge	See 5.2.2

[a] See Figures B.1 to B.7 for the national profiles for existing lines.

[b] Maximum width of pantograph head, see A.1.

NOTE 2The reference point for the pantograph profiles refers to the contact point (of contact strip and contact wire) at the centre of the pantograph head

The pantograph shall conform to EN 50206-1. Additional tests are defined in 5.3.2.

5.3.2 Assessment of the pantograph profile

An assessment of the pantograph profile shall be undertaken on a new pantograph.

5.3.2.1 Continuous pantograph head profile

Pantograph heads shall remain compliant with the overall profile according Figures A.6 and A.7.

Maximum vertical deviation from the nominal pantograph profile is allowed only downwards and shall be less than 30 mm.

Deviations below the pantograph profile inside the minimum collector strip length shall not exceed 5° against a line horizontal to the pantograph when in a horizontal orientation.

5.3.2.2 Non-continuous pantograph head profile (independent suspended collector strips)

Additional assessments to 5.3.2.1 shall be undertaken as follows:

The transition between independently parts of the pantograph head shall be checked.

For pantograph heads fitted with contact strips having independent suspensions, the test value of nominal static contact force given in Table 4 is applied to the centre of the head.

For pantographs capable of operating with different static forces (multi voltage pantographs), the lowest value shall be used.

The location of the transition point between independently suspended parts of the collector head shall be less than 300 mm from the end of the pantograph.

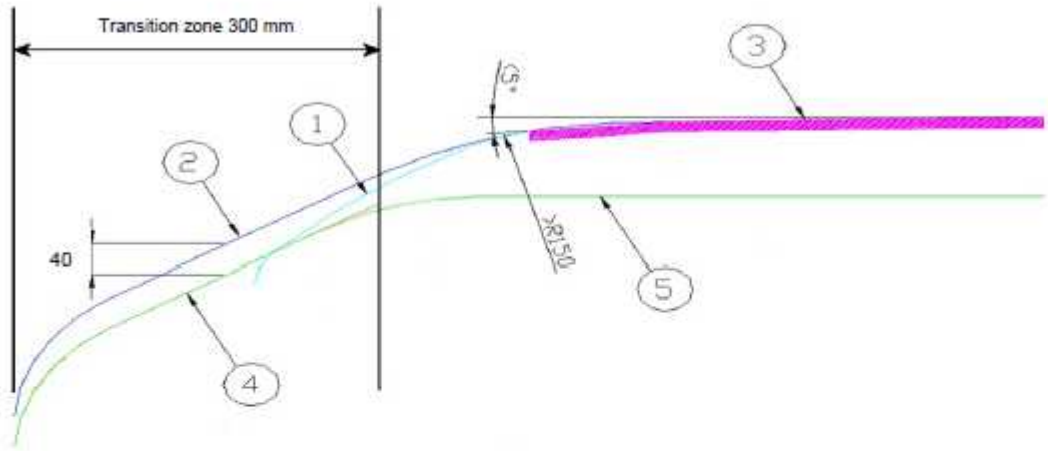
Deviations downwards from the pantograph profile shall not exceed following maximum gradients against a line horizontal to the pantograph when in a horizontal orientation

- outside the transition zone of pantograph head 30°
- at the transition point of pantograph head 40°.

In the transition zone the maximum vertical deviation from the nominal pantograph profile is allowed only downwards and shall be less than 40 mm.

그림 2-1-54 EN 50367:2012 해당부분

Dimensions in millimetres



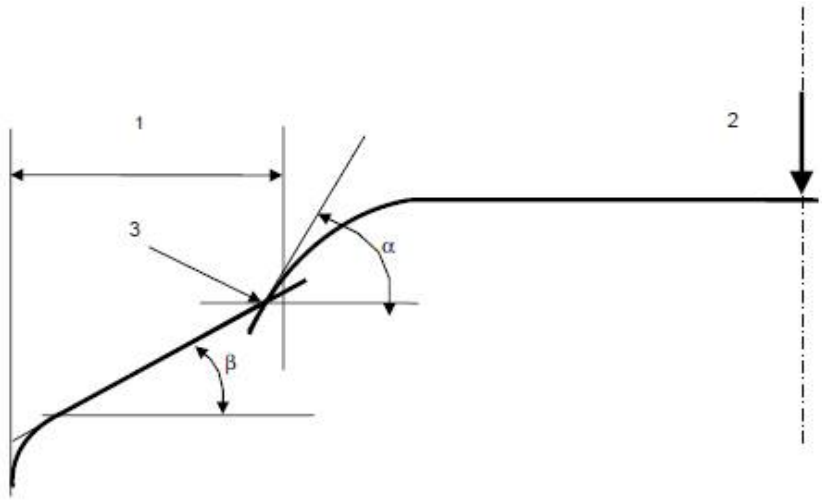
Key

1 independently suspended parts of the pantograph head
2 nominal profile of pantograph head (see Figures A.6 and A.7)
3 contact strip
4 maximum vertical deviation 40 mm below nominal profile within the transition zone only
5 non independently suspended parts of the pantograph head

Figure 1 – General detail of pantograph with independently suspended collector head

The position of transition point and the angle between the fixed and independent parts at the transition point shall be as defined in Figure 2.

그림 2-1-55 EN 50367:2012 해당부분



Key

1 transition zone 300 mm
2 static force
3 transition point

Figure 2 – Transition point – 1 600 mm and 1 950 mm pantograph head

Condition: The maximum value for α shall not exceed 40°. Maximum value for β is given by Figures A.6 and A.7.

5.3.3 Conducting range

The conducting range and the minimum length of contact strip are defined in Figures A.6 and A.7.

그림 2-1-56 EN 50367:2012 해당부분

7 Interaction performance

7.1 General

The performance of the overhead contact line and pantograph interface shall be subject to conformity assessment.

For current collection without interruption, functional requirements are described here. These requirements are related to the geometric profile of the pantograph head and to the dynamic behaviour of the vehicle (for example kinematic envelope) and ensure that at least one contact wire is always within the conducting range of pantograph head (including all tolerances).

7.2 Current capacity

The current in the overhead contact line depends on different parameters such as speed, train weight, number of and distance between trains, line gradient and power supply system.

The properties of pantograph and contact wire shall be such that overheating does not occur.

The maximum allowed current collected by the pantograph depends on the following parameters:

- number and material of contact wires;
- number and material of contact strips;
- actual contact forces at the contact point;
- train speed;
- environmental conditions.

The current demand of the train shall comply with the working limits of the overhead contact line according to EN 50388:2012, Table 2. Temperature limits of the conductors shall be in accordance with EN 50119:2009, 5.1.2.

Static contact force is defined in EN 50206-1:2010, 3.3.5, and is exerted by the pantograph on the contact wire. The overhead contact line shall be designed for a static contact force as specified in Table 4.

그림 2-1-57 EN 50367:2012 해당부분

Table 4 – Static contact forces

	Range for application [N]	Test value [N]
AC	60 to 90	70
DC 3 kV	90 to 120	90
DC 1,5 kV	70 to 140	90

Conformity assessment for static contact force shall be carried out by design review and measurements in accordance with EN 50206-1.

Compatibility with current at standstill performance shall be assessed according to A.3.1. The maximum current at standstill is given in Table 5.

Table 5 – Maximum current at standstill

Category	AC	DC 1,5 kV	DC 3 kV
Maximum current at standstill per pantograph (A)	80	300	200

7.3 Dynamic behaviour and quality of current collection

Safety and performance of train operation and wear of the contact strips and contact wire are influenced by the dynamic interaction between the pantograph and the overhead contact line.

The dynamic behaviour depends upon the characteristics of the pantograph and overhead contact line and the operating conditions. The principal operating conditions to be considered are the train speed and the number, distance and position of the pantographs.

The acceptable number of pantographs and their minimum spacing (see Table 8) are limited by the dynamic performance of pantograph and overhead contact line. The overhead contact line shall be designed in accordance with the requirements for dynamic behaviour. Contact wire uplift at the design speed shall comply with the requirements in Table 6.

The quality of current collection has a fundamental impact on the life of a contact wire and shall therefore comply with agreed and measurable parameters.

Compliance with the requirements for dynamic behaviour shall be verified by assessment of:

- contact wire uplift

and for quality of current collection, either

- mean contact force F_m and standard deviation σ_{max}

or

- percentage of arcing NQ

The Infrastructure Manager shall decide which measurement system is to be used. The values to be achieved by the chosen method are set out in Tables 6 and 7. The values shall be measured in accordance with EN 50317.

그림 2-1-58 EN 50367:2012 해당부분

For qualification of performance with more than one pantograph, the pantograph which shows the most critical values shall be considered. The worst performing pantograph should be determined by simulation in accordance with EN 50318 or testing in accordance with EN 50317.

Table 6 shows limits for interaction performance. These values shall apply for the range of nominal contact wire heights given in Table 1 to any operating pantograph.

F_m for any pantograph shall be between the design limit and the approval limit for pantographs given in Table 6. For each pantograph, the criteria for current collection quality shall be fulfilled.

For speeds higher than 320 km/h national rules for the value of F_m shall apply.

그림 2-1-59 EN 50367:2012 해당부분

Table 6 – Limits for interaction performance (contact force)

Line speed Category	$v \leq 200$ km/h AC	$v > 200$ km/h AC	$v \leq 200$ km/h DC 1,5 kV	$v > 200$ km/h DC 1,5 kV	$v \leq 200$ km/h DC 3 kV	$v > 200$ km/h DC 3 kV
$F_{m,max}$ (N) * Design limit [b]	$F_{m,max} < 0{,}000\,47\ v^2 + 90$	$F_{m,max} < 0{,}000\,97\ v^2 + 70$	$F_{m,max} < 0{,}000\,97\ v^2 + 140$	$F_{m,max} < 0{,}002\,28\ v^2 + 90$	$F_{m,max} < 0{,}000\,97\ v^2 + 110$	$F_{m,max} < 0{,}000\,97\ v^2 + 110$
$F_{m,min}$ (N) Minimum for pantograph approval *	$0{,}000\,47\ v^2 + 60$	$0{,}000\,47\ v^2 + 60$	$0{,}001\,12\ v^2 + 70$	$0{,}001\,12\ v^2 + 70$	$0{,}000\,72\ v^2 + 90$	$0{,}000\,72\ v^2 + 90$
σ_{max} (N) at maximum speed [c]	$0{,}3\ F_m$					
Space for free and unrestricted uplift of the contact wire	See EN 50119:2009, 5.10.2					
If simulations are used, they shall be validated in accordance with EN 50318.						

* For visualisation of the formulas see Figures A.8 to A.10.

[b] The overhead contact line shall be designed to accept as a minimum the value of mean force (F_m) stated here. The pantograph design shall apply as a maximum the mean force (F_m) stated here.

[c] The limit of $\sigma = 0{,}3\ F_m$ gives a probability of less than 0,27 % that contact forces lower than $0{,}1\ F_m$ occur for a gaussian distribution of forces.

그림 2-1-60 EN 50367:2012 해당부분

Table 7 – Values for interaction performance (arcs)

Requirement	*v ≤ 160 km/h*	*160 km/h < v ≤ 250 km/h*	*v > 250 km/h*
Percentage of arcing at maximum line speed, *NQ* (%) (minimum duration of arc 5 ms)	≤ 0,1	≤ 0,1 for AC ≤ 0,2 for DC	≤ 0,2 for AC
If, in the event of a failure of the normal operating pantograph, continued operation at normal speed using the backup pantograph is required, the value of *NQ* shall be not more than 0,5. If operation at normal speed is not required, the train shall operate at such a speed that maintains the normal value of *NQ*. The operation conditions shall be subject to agreement by the Infrastructure Manager.			

8 Operational requirements

8.1 Additional characteristics for automatic dropping device

An automatic dropping device shall be employed for lines with speed of 160 km/h or more.

From the moment of initiation, the pantograph shall lower to the minimum dynamic electrical clearance in less than 3 s. The pantograph shall lower to the housed position in less than 10 s. The circuit breaker shall be opened before lowering the pantograph.

8.2 Minimum and maximum spacing between two operating pantographs

The overhead contact line shall be designed for a minimum of two pantographs operating adjacently, having a distance designation as type A, B or C as set out in Table 8. The distance is measured between pantograph head centre lines. The Infrastructure Manager shall define the line type (see Table 8).

NOTE The limits for maximum width are important for the correct operation of sectioning devices. The limits for distances between operating pantographs are important for the correct operation of neutral sections, see A.1.

In AC systems operating pantographs shall not be electrically connected by the train. For DC systems, when an electrical connection between operating pantographs exists, a device to interrupt this connection shall be provided.

그림 2-1-61 EN 50367:2012 해당부분

EN50367의 경우 역시 **접촉력과 아크에 의해 가선과 팬터그래프 사이의 상호작용에 대해 그 특성을 제한하고 있으며, 위와 같이 평균 접촉력에 대하여 속도에 따른 목표치를 제시**하고 있다.

④ 경부고속철도 도입당시 적용되었던 문서인 WBS N : K651-1-E5330-RB+T-017

11.5 Dynamic tests of quality of current collection

Counting the losses of contact

The collection is defined by the loss of contact times (losses of contact) :

$$NQ = \sum \frac{\text{losses of contact (>101 ms)}}{\text{(Total time of actual collection)}} \leq 1\ \%$$

A loss of contact is taken into consideration if it lasts for more than 101 ms and if the intensity collected by the catenary is higher than 235 A (30 % of the rated value of the current in the pantograph).

The actual collection time is the time where the intensity collected by the catenary is higher than 235 A.

A loss of contact is considered uninterrupted for each break in light emission of less than 100 µs ; above this value, the losses of contact are considered as consecutive losses of contact.

그림 2-1-62 경부고속철도 도입 시 적용된 시험규정 발췌

경부고속철도 도입당시 적용되었던 문서인 WBS N : K651-1-E5330-RB+T-017은 **아크를 측정하여 1% 이내가 되도록 제시**되고 있다.

(다) 팬터그래프 운용시나리오 분석을 통한 설계 요구조건 도출

팬터그래프 Contact Strip과 가선과의 접촉에 의해 발생되는 전체 힘(Fc)은 정적 압상력(Po)과 판토그라프 전체에 작용하는 공력(Faero) 및 가속도에 의한 관성력(Fint)으로 크게 구분된다.

즉 Fc = Po + Faero + Fint이다. 여기서 Faero는 팬터그래프 전체에 작용하는 힘으로 Collector Head에 걸리는 공력(Fsp)과 그 이외의 공력(Fnsp)으로 나눌 수 있다.

따라서, Fc = Po + Faero + Fint = Po + Fsp + Fnsp + Fint이며, 여기서, Suspension의 Spring Force(Fsus)는 Po와 Fnsp의 합과 같다.

즉, Fsus = Po + Fnsp.이며 따라서 최종 전체 접촉력은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Fc = Fsus + Fint + Fsp \quad (1)$$

$$Fsp = Fc - Fint - Fsus$$

Fsp는 공력 특성으로 속도의 자승에 비례하는 이론식으로 적용 가능하며 다음과 같이 회귀곡선식으로 단순화 시킬 수 있다.

$$Fsp = A + Bv2 \quad (2)$$

여기서, A는 offset으로 계측시스템간의 계측오차 및 계측 환경에 따라 발생되는 상수이고, B는 공력 계수, v는 속도이다.

정적 접촉력(Static contact force)은 EN 50206-1:1998 clause 3.3.5에 의해 명시되어 있으며 정적 접촉력은 다음 표와 같다.

	Nominal Value (N)	Range for application (N)
AC	70	60 to 90
DC 3kV	110	90 to 120
DC 1.5kV	90	70 to 110

다음 그림과 같이 TSI 규정의 4.2.15. Mean contact force부분을 참조하여 350km/h의 속도에 대한 권장량을 살펴보면 다음과 같다. 이 부분에서는 320km/h 이상의 접촉력에 대해서는 명확하게 언급하고 있지 않지만, 이 내용이 국제기준으로 채택 예정 중이라 언급되어 있다.

Table 3.4

Clause number	Clause Title	Safety				R&A	Health		Environmental Protection				Technical Compatibility		Operations			Maintenance	
		1.1.1	1.1.3	1.1.4	2.2.1	1.2	1.3.1	1.3.2	1.4.1	1.4.2	1.4.3	2.2.2	1.5	2.2.3	2.7.1	2.7.2	2.7.3	2.5.1	2.5.2
4.2.1	General provisions	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.2	Voltage and frequency	—	—	—	X	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.3	System performance and installed power	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.4	Regenerative braking	—	X	—	X	—	—	—	X	—	—	—	X	X	X	—	—	—	—
4.2.5	Harmonic emissions towards the power utility	—	—	—	X	—	—	—	—	—	X	—	—	—	—	—	—	—	—
4.2.6	External electromagnetic compatibility	—	—	—	X	—	—	—	X	—	X	X	X	—	—	—	—	—	—
4.2.7	Continuity of power supply in case of disturbances	X	X	—	X	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X	—	—
4.2.8	Protection of the environment	—	—	—	—	—	—	—	X	X	X	X	—	—	—	—	—	—	X
4.2.9.1	Overall design	X	X	X	—	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.9.2	Geometry of Overhead Contact Line	X	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.10	Compliance of the Overhead Contact Line with Infrastructure Gauge	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X	—	—	—	—	—	—
4.2.11	Contact wire material	X	X	X	—	—	—	X	—	—	—	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.12	Contact Wire Wave Propagation Speed	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X	X	X	X	—	—	—	—	—
4.2.14	Static contact force	X	X	X	X	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.15	Mean contact force	X	X	X	X	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.16	Requirements for dynamic behaviour and quality of current collection	X	X	—	X	—	—	—	—	—	X	X	X	X	—	—	—	—	—
4.2.17	Vertical movement of the contact point	—	—	—	X	—	—	—	—	—	X	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.18	Current capacity of the overhead contact line system	X	X	X	X	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.19	Pantograph spacing used for the design of the overhead contact line	—	X	—	—	—	—	—	—	—	X	—	X	X	—	—	—	—	—
4.2.20	Current at standstill (DC Systems)	X	X	X	X	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	—	—	—

그림 2-1-63 EN TSI 규정 해당부분 발췌

4.2.15. Mean contact force

The mean contact force F_m is formed by the static and aerodynamic components of the pantograph contact force with dynamic correction. F_m represents a target value to be achieved in order to ensure current collection quality without undue arcing and to limit wear and hazards to contact strips.

The mean contact force F_m applied by a pantograph on the contact wire is shown as a function of running speed in Figure 4.2.15.1 for AC lines, and figure 4.2.15.2 for DC lines. Overhead contact line shall be designed to be capable of sustaining this force curve for all pantographs on a train.

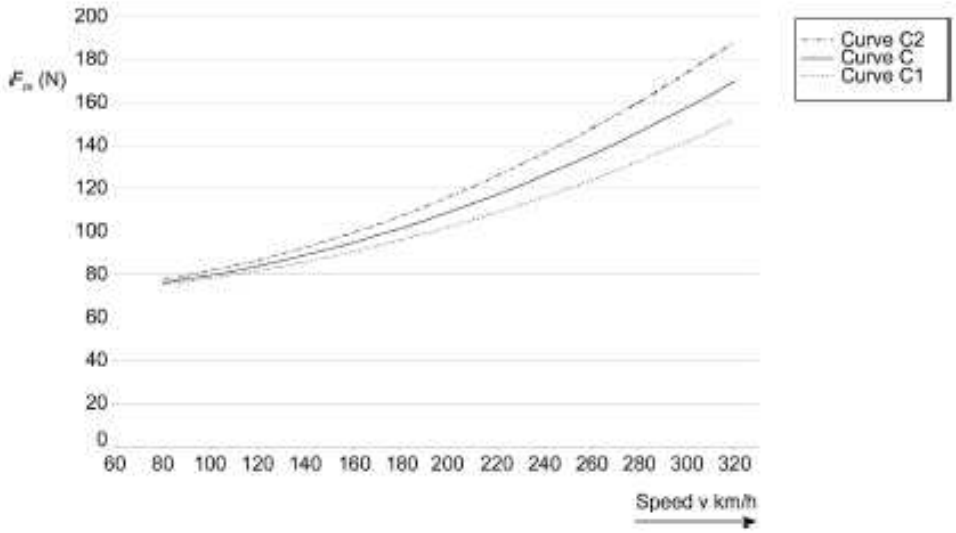
Maximum force (F_{max}) on an open route is usually within the range of F_m plus three standard deviations σ; higher values may occur elsewhere.

For speeds higher than 320 km/h, values for the mean contact force are not detailed in the TSI; additional specifications are needed, these specifications are an Open Point. In this case, National Rules shall apply.

Conformity assessment shall be carried out in accordance with EN 50317:2002, clause 6 for AC and DC systems at speeds above 80km/h.

Figure 4.2.15.1

Mean contact force F_m for AC systems as a function of speed



AC	Curve C2	$F_m = 0{,}001145 \times v^2 + 70$	(N)
AC	Curve C	$F_m = 0{,}00097 \times v^2 + 70$	(N)
AC	Curve C1	$F_m = 0{,}000795 \times v^2 + 70$	(N)

그림 2-1-64 EN TSI 규정 해당부분 발췌

권장 최저치: Fm=0.001145*V2+70 (N)

권장 평균치: Fm=0.00097*V2+70 (N)

권장 최고치: Fm=0.000795*V2+70 (N)

속도에 따른 권장 접촉력을 그래프로 그려보면 다음과 같다.

Speed(km/h)	권장최고치(N)	권장평균치(N)	권장최저치(N)
80	77.328	76.208	75.088
100	81.45	79.7	77.95
120	86.488	83.968	81.448
140	92.442	89.012	85.582
160	99.312	94.832	90.352
180	107.098	101.428	95.758
200	115.8	108.8	101.8
220	125.418	116.948	108.478
240	135.952	125.872	115.792
260	147.402	135.572	123.742
280	159.768	146.048	132.328
300	173.05	157.3	141.55
320	187.248	169.328	151.408
340	202.362	182.132	161.902
350	210.2625	188.825	167.3875

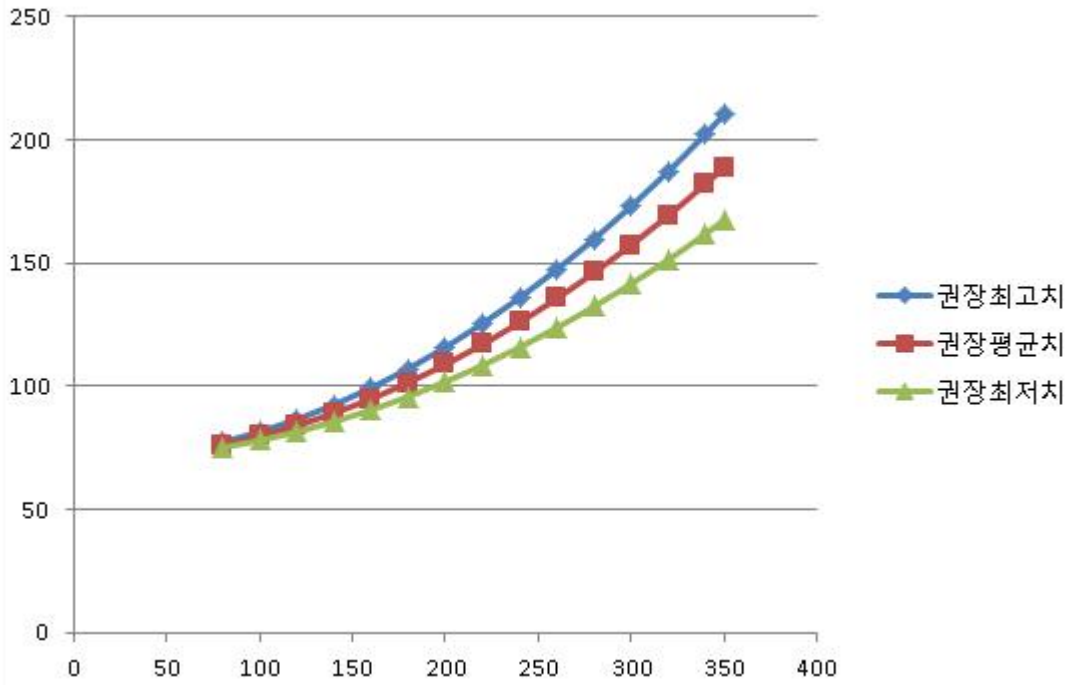


그림 2-1-65 속도에 따른 팬터그래프 접촉력 권장 치

동특성과 관련하여서는 다음 그림과 같다.

4.2.16. Dynamic behaviour and quality of current collection

4.2.16.1. Requirements

The overhead contact line shall be designed in accordance with the requirements for dynamic behaviour. Contact wire uplift at the design line speed shall comply with the stipulations in Table 4.2.16.

The quality of current collection has a fundamental impact on the life of a contact wire and shall, therefore, comply with agreed and measurable parameters.

Compliance with the requirements on dynamic behaviour shall be verified in accordance with EN 50367:2006, clause 7.2 by assessment of:

— Contact wire uplift

and either

— Mean contact force F_m and standard deviation σ_{max}

or

— Percentage of arcing

The Contracting Entity shall declare the method to be used for verification. The values to be achieved by the chosen method are set out in Table 4.2.16.

그림 2-1-66 EN TSI 규정 해당부분 발췌

Table 4.2.16

Requirements for dynamic behaviour and current collection quality

Requirement	Category I	Category II	Category III
Space for steady arm uplift	$2 S_0$		
Mean contact force F_m	See 4.2.15		
Standard deviation at maximum line speed σ_{max} (N)	$0,3 F_m$		
Percentage of arcing at maximum line speed, NQ (%) (minimum duration of arc 5ms)	≤ 0,2	≤ 0,1 for AC systems ≤ 0,2 for DC systems	≤ 0,1

For definitions, values and test methods refer to EN 50317:2002 and EN 50318:2002.

S_0 is the calculated, simulated or measured uplift of the contact wire at a steady arm, generated in normal operating conditions with one or more pantographs with a mean contact force F_m at the maximum line speed. When the uplift of the steady arm is physically limited due to the overhead contact line design, it is permissible for the necessary space to be reduced to 1,5 S_0 (refer to EN 50119:2001 clause 5.2.1.3).

F_m is the dynamically corrected statistical mean value of the contact force.

그림 2-1-67 EN TSI 규정 해당부분 발췌

이를 통해 350km/h에서 운용하기 위한 팬터그래프의 형상설계 요구조건으로서 접촉력과 동특성에 대한 형상설계 요구조건을 다음과 같이 도출할 수 있다.

● **접촉력**

평균 접촉력: 평균접촉력 ≦ 200 N

● **이선율**

이선율 $F_{mean} - 3\sigma \geqq 0$

라. 기존 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 시뮬레이션 검증

(1) 집전 성능 예측에 사용된 프로그램 및 정확성 검증

(가) 개요

본 시뮬레이션에는 전차선로와 팬터그래프 사이 기계적 상호작용을 FEM으로 모의하는 시뮬레이션 프로그램인 CaPoPDyS Ver.3.0을 사용한다. 이 프로그램은 한국철도기술연구원에서 자체 개발한 프로그램이며, 전차선로 전선을 현(string) 요소로 모델링하고, 접촉력과 압상량, 이동 궤적 및 이선율 등을 출력 데이터로 내어 집전 성능을 예측하는데 적합하도록 구성되어있는 동역학 해석 프로그램이다. 지난 2008년 차세대 고속철도 사업 1-1-4 과제 보고서에 수록된 CaPoPDyS Ver.2.0에 비하여 업그레이드된 제품이다.

가공 전차선로와 팬터그래프 사이 동역학 시뮬레이션 프로그램의 정확성을 검증하는 방법과 기준을 기술하고 있는 국제규격이 있다. 유럽 표준 규격인 EN50318 인데, “Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line″라는 제목으로 2002년 7월에 최초 발행된 것으로서, 유럽 각국 사이에서 열차가 자유로이 통행할 수 있는 상호통행성이 보장되도록 하기 위하여, 각 나라마다 독자적으로 개발하여 사용하고 있는 집전 동역학 시뮬레이션의 결과를 상호 인정하기 위한 목적으로 시뮬레이션 수단의 정확성을 어느 정도 규정할 필요성에 따라 제정된 규격이다. 이 규격에는 검증용 예시 모델을 제시하고 있으며 그 결과가 가져야 할 범위에 대해서도 언급하고 있다. 따라서 여기서 EN50318에 제시된 절차와 예시 모델에 따라 CaPoDyS Ver.3.0의 정확성을 검증해 보기로 한다.



EUROPEAN STANDARD **EN 50318**

NORME EUROPÉENNE

EUROPÄISCHE NORM July 2002

ICS 29.280

English version

Railway applications -
Current collection systems -
Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line

Applications ferroviaires - Systèmes de captage de courant - Validation des simulations de l'interaction dynamique entre le pantographe et la caténaire

Bahnanwendungen - Stromabnahmesysteme - Validierung von Simulationssystemen für das dynamische Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung

그림 2-1-68 EN50318 규격서 표지(cover sheet)

(나) EN30518의 예시 모델링에 대한 시뮬레이션

EN50318에서 비교 검증용으로 제시하는 전차선로 모델은 다음과 같은 Simple Catenary 타입이다.

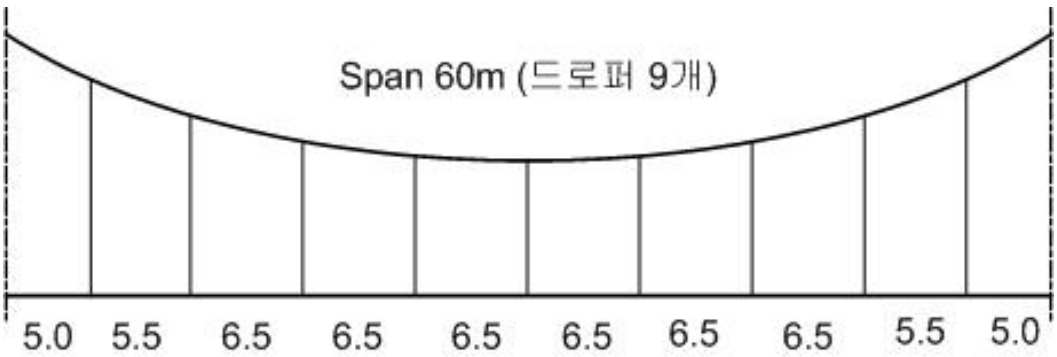


그림 2-1-69 reference 커티너리 경간 및 드로퍼 configuration

표 2-1-2 reference 커티너리 사양 데이터

항목	데이터
전차선 장력, 단위질량	20,000 N, 1.35 kg/m
조가선 장력, 단위질량	16,000 N, 1.07 kg/m
드로퍼 단위질량, 드로퍼 클램프 질량	0.0 kg/m, 0 kg/개
곡선당김금구 길이, 단위질량	1.0 m, 1.0 kg/m
가고	1.2 m
편위	±0.2 m

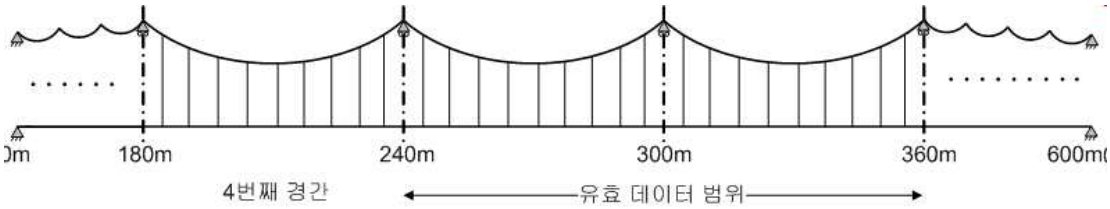


그림2-1-70 시뮬레이션 전체 구간 configuration 및 유효 데이터 추출 구간

팬터그래프는 다음과 같은 모델을 제시하고 있다. 이것은 2단 질량 모델로서 각 단에는 각각 스프링과 댐퍼가 있고, 팬터그래프에 작용하는 외부 힘은 두 번째 단에 정적 압상력만 있고 공기역학적 양력은 없는 것으로 가정하고 있다.

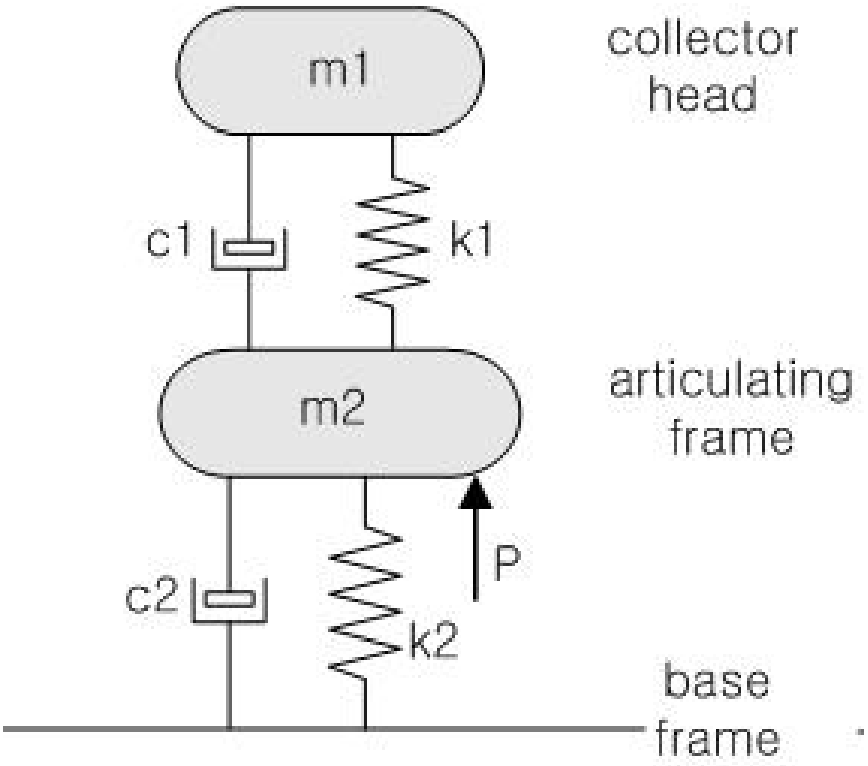


그림 2-1-71 팬터그래프 수학적 모델

표 2 -1-3 수학적 모델링 데이터

변수	값	설 명
m1	7.2 kg	집전판
m2	15.0 kg	관절 구조
kc	50000 N/m	접촉 가상 스프링
k1	4200 N/m	
k2	50 N/m	
c1	10	
c2	90	
P	120 N	정적압상력

속도는 250km/h와 300km/h 두 가지로 하도록 하고 있으며, 시뮬레이션 결과에서 양 끝단의 고정점의 영향을 배제하기 위하여 유효한 데이터는 가운데 2경간(5번째와 6번째)만으로 하도록 하고 있으며, 출력 데이터는 0Hz에서 20Hz까지만 관심 영역으로 하여 저역통과 필터링하도록 하도록 하고 있다.

EN50318에는 시뮬레이션에서 추출해야 하는 결과 값의 종류와 결과 값이 가져야 할 범위를 명시해 놓고 있다. 이에 따라 프로그램(CaPoDyS)으로 시행한 시뮬레이션에서 얻은 데이터를 추출하여 비교하였다.

표2-1-4 reference 모델에 대한 EN50318 결과와 비교 (V=300km/h)

항목	EN50318에서 제시한 값	프로그램(CaPoDyS) 으로 수행한 결과
평균 접촉력 Fm [N]	110 ~ 120	119.1
접촉력 표준편차 σ [N]	32 ~ 40	34.2
통계적 최대접촉력(Fm+3σ) [N]	210 ~ 230	221.6
통계적 최소접촉력(Fm-3σ) [N]	-5 ~ 20	16.7
실제 최대 접촉력 [N]	190 ~ 225	206.7
실제 최소 접촉력 [N]	30 ~ 55	52.3
전주에서 최대 압상량 [㎜]	55 ~ 65	61
이선율 [%]	0	0.0

표 2-1-5 reference 모델에 대한 EN50318 결과와 비교 (V=250km/h)

항목	EN50318에서 제시한 값	프로그램(CaPoDyS) 으로 수행한 결과
평균 접촉력 Fm [N]	110 ~ 120	119.2
접촉력 표준편차 σ [N]	26 ~ 31	30.9
통계적 최대접촉력(Fm+3σ) [N]	190 ~ 210	211.9
통계적 최소접촉력(Fm-3σ) [N]	20 ~ 40	26.5
실제 최대 접촉력 [N]	175 ~ 210	174.8
실제 최소 접촉력 [N]	50 ~ 75	45.3
전주에서 최대 압상량 [㎜]	48 ~ 55	48
이선율 [%]	0	0.0

위의 두 테이블에서 보는 바와 같이 개발 프로그램으로 시뮬레이션한 결과는 접촉력 부문과 통계치 부문, 압상량 부문에서 대부분 EN50318에서 제시하는 결과의 범위 이내에 들어감을 볼 수 있다. 다만, 250km/h에서 통계적 최대 접촉력과 실제 최대 접촉력, 실제 최소 접촉력 부분에서 EN50318에서 제시하는 카테고리를 미소하게 벗어나고 있으나 이것은 데이터를 필터링 처리하는 과정에서 필터의 종류 차이로 인한 미소한 차이로 보이며, 그 정도의 차이는 이해할 수 있는 범위인 것으로 판단되어 그대로 수용하여도 무방하다고 사료된다. 따라서 이에 본 개발 프로그램의 신뢰성은 EN50318의 인정 절차에 따라 정확성이 검증된 것으로 판단한다.

(다) 경부고속철도에서 KTX-1 및 KTX-산천 집전 상황 시뮬레이션

EN50318에서는 신뢰성을 높일 수 있는 프로그램 검증 단계로서 시뮬레이션 데이터를 실제 현장 실험 데이터와의 비교 검토를 통한 검증을 권고하고 있다. 따라서 이제까지 시운전 단계와 유지보수 단계를 통하여 다수의 측정 데이터가 축척되어 있고, 집전 성능을 판단할 수 있는 기회가 많았던 경부고속철도(KHSL)에서 KTX 주행을 대상으로 집전 성능 시뮬레이션을 해보기로 한다. 팬터그래프는 KTX-1의 GPU 팬터그래프와 함께 최근에 도입된 KTX-산천에 장착되어 있는 CX 팬터그래프를 대상으로 한다. 속도는 300km/h와 330km/h 두 가지로 한다.

시뮬레이션 대상 전차선로(KHSL)는 다음과 같은 2 가지의 경간과 아래 표의 데이터를 사용한다.

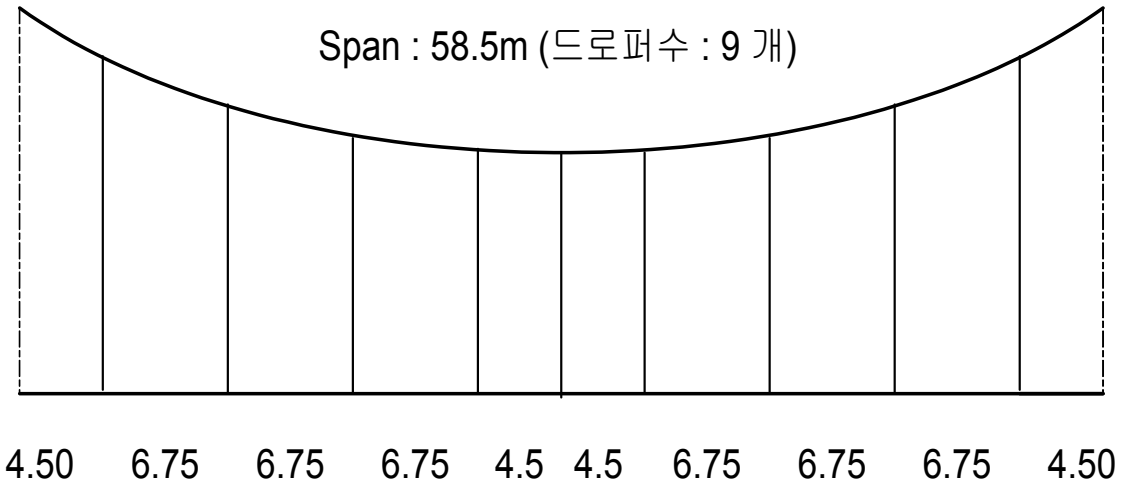


그림 2-1-72 경부 고속선 58.5m 경간 Configuration

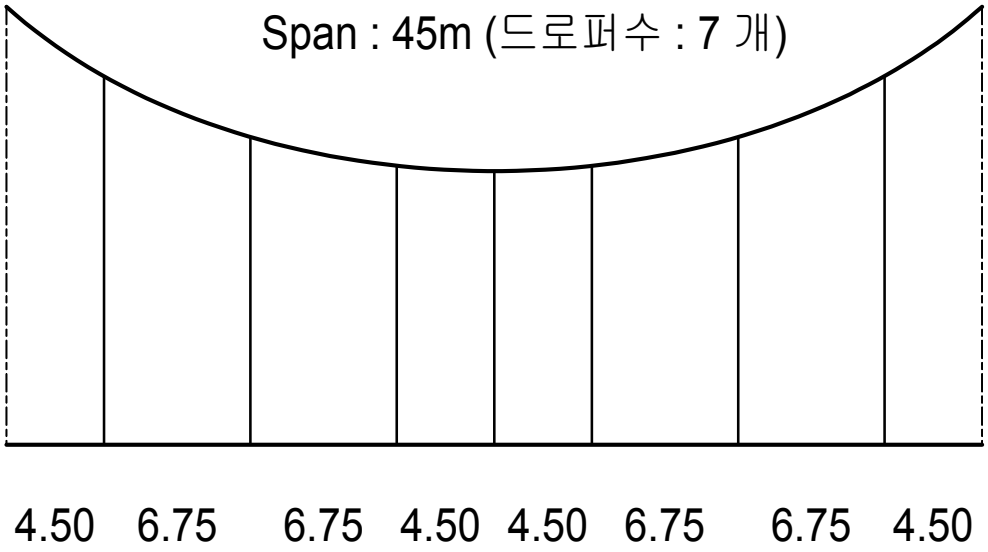


그림 2-1-73 경부 고속선 45.0m 경간 Configuration

표 2-1-6 경부 고속선 전차선로 파라미터

항목	데이터
전차선 장력, 단위질량	19,600N, 1.334 kg/m (Cu 150㎟)
조가선 장력, 단위질량	13,720N, 0.605 kg/m (Bz 65㎟)
드로퍼 단위질량, 클램프 질량	0.108 kg/m, 0.125 kg/개
곡선당김금구 길이, 질량	1.2 m, 1.6 kg/개
가고	1.4 m
사전 이도(Pre-sag)	Span/2000

KTX-1에 장착된 GPU 25kV 팬터그래프에 대한 수학적 모델링 자료는 2001년 SYSTRA가 수행한 호남선 시뮬레이션 자료로부터 인용하여 아래 데이터를 사용한다.

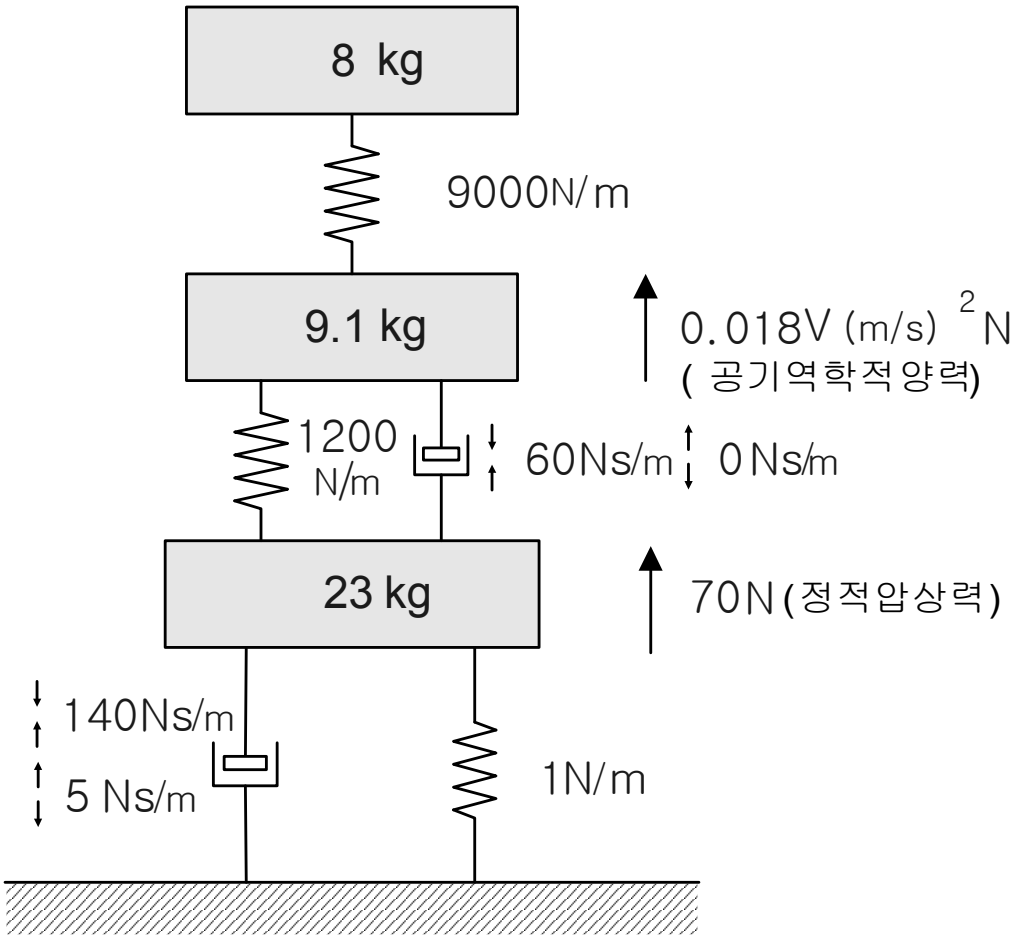
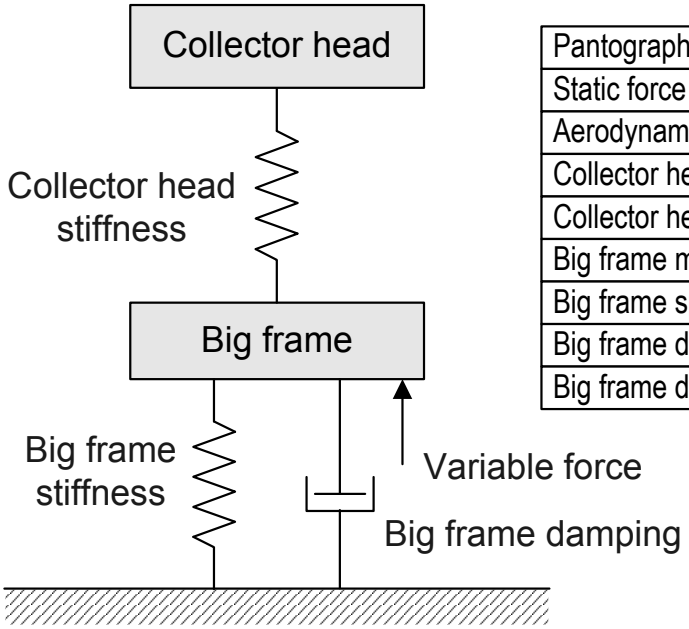


그림 2-1-74 GPU 팬터그래프 모델링 데이터

KTX-산천에 장착된 CX 팬터그래프에 대한 수학적 모델링 자료는 건설교통기술평가원이 주관하는 400km/h 인프라 개발 과제의 4세부인 증속을 위한 전차선로 시스템 개발의 2011년 보고서에서 인용하여 아래 데이터를 사용한다.



Pantograph frame number	2
Static force	70 N
Aerodynamic force	116 10-4 N(m/s)^2
Collector head mass	8 kg
Collector head spring stiffness	6000 N/m
Big frame mass	17.5 kg
Big frame spring stiffness	1 N/m
Big frame damping when descent	200 Ns/m
Big frame damping when ascent	5 Ns/m

Pangtograph CX

그림 2-1-75 CX 팬터그래프 수학적 모델링 데이터

시뮬레이션 결과는 다음과 같이 나타났다.

표 2-1-7 KHSL-KTX GPU 팬터그래프 조합 300km/h 시뮬레이션 결과

변수	기호	단위	결과 값 (V=300km/h)	
			58.5m 경간	45m 경간
평균 접촉력	Fm	N	205.0	201.0
접촉력 표준편차	σ	N	53.7	52.8
통계적 최대 접촉력	Fm+3*σ	N	366.1	359.4
통계적 최소 접촉력	Fm-3*σ	N	43.9	42.6
전주에서 압상량	Uplift	mm	91	78
이선율(20Hz 필터링)		%	0.0	0.0

표2-1-8 KHSL-KTX-산천 CX 팬터그래프 조합 300km/h 시뮬레이션 결과

변수	기호	단위	결과 값 (V=300km/h)	
			58.5m 경간	45m 경간
평균 접촉력	Fm	N	165.8	162.3
접촉력 표준편차	σ	N	48.3	54.1
통계적 최대 접촉력	Fm+3*σ	N	310.7	324.6
통계적 최소 접촉력	Fm-3*σ	N	20.9	0
전주에서 압상량	Uplift	mm	80	63
이선율(20Hz 필터링)		%	0.0	0.0

표2-1-9 KHSL-KTX GPU 팬터그래프 조합 330km/h 시뮬레이션 결과

변수	기호	단위	결과 값 (V=330km/h)	
			58.5m 경간	45m 경간
평균 접촉력	Fm	N	233.8	230.6
접촉력 표준편차	σ	N	70.2	57.6
통계적 최대 접촉력	Fm+3*σ	N	444.4	403.4
통계적 최소 접촉력	Fm-3*σ	N	23.2	57.8
전주에서 압상량	Uplift	mm	109	95
이선율(20Hz 필터링)		%	0.0	0.0

표 2-1-10 KHSL-KTX-산천 CX 팬터그래프 조합 330km/h 시뮬레이션 결과

변수	기호	단위	결과 값 (V=330km/h)	
			58.5m 경간	45m 경간
평균 접촉력	Fm	N	186.5	185.2
접촉력 표준편차	σ	N	65.3	59.9
통계적 최대 접촉력	Fm+3*σ	N	382.4	364.9
통계적 최소 접촉력	Fm-3*σ	N	-9.4	5.5
전주에서 압상량	Uplift	mm	89	73
이선율(20Hz 필터링)		%	0.0	0.0

시뮬레이션 결과를 살펴보면 지금의 KTX의 집전 상황과 잘 맞아 들어가고 있는 것으로 보인다. 집전 성능이 여러 차례의 KTX 시험에서 10㎳ 이상의 긴 아크는 나타나지 않고(이선율 0%) 양호한 점, 실제 측정한 압상량이 8~10㎝정도로 나오는 점 등과 비교해 볼 때 시뮬레이션과 거의 일치한다고 판단된다. 한편 KTX 지붕에 설치한 비디오 모니터링을 통해 볼 때 300km/h에서 육안으로 아크가 조금씩 나타나고 있는 것은 본 시뮬레이션에서 판단하는 정상적인 경간에서의 아크가 아니라 오버랩의 균압선이 있는 곳이라든지, 시설 초기 길들여지기 전의 설비 상태에 따른 아크, 거친 접촉면 등에 따른 불규칙적인 아크로 판단되어 본 시뮬레이션으로 판단하는 집전 성능의 판단 영역과는 다른 측면의 것으로 이해하여야 한다. 결론적으로 프로그램의 신뢰성을 한번 더 검증하였다고 평가할 수 있겠다.

(2) 350km/h 주행 시 집전성능 예측, 검토

(가) 개요

팬터그래프가 350km/h로 주행 시 전차선로와의 동특성을 분석하고 집전 성능을 예측해 보기 위한 시뮬레이션을 실시하여, 팬터그래프에서 소음을 저감하기 위한 여러 방안을 모색하는데 체크 포인트로 활용해 보고자 한다. 350km/h로 운행할 수 있는 선로는 우리나라에서는 지금 한창 건설 중인 호남선밖에 없다. 경부선은 이미 여러 시험을 통하여 350km/h 운행은 어려운 것으로 판명 나 있기 때문이다. 따라서 전차선로 모델링은 호남선 고속 전차선로 제원을 넣기로 하고, 경간 길이는 최대 경간에 가까우면서 실제 경간 배치(pegging) 설계에서 빈도수가 많은 것 중의 하나인 60m를 검토 대상 경간으로 선정하고, 아울러 경간배치 설계에서 빈도수가 많은 것 중의 하단을 차지하는 45m를 추가로 선정하기로 한다.

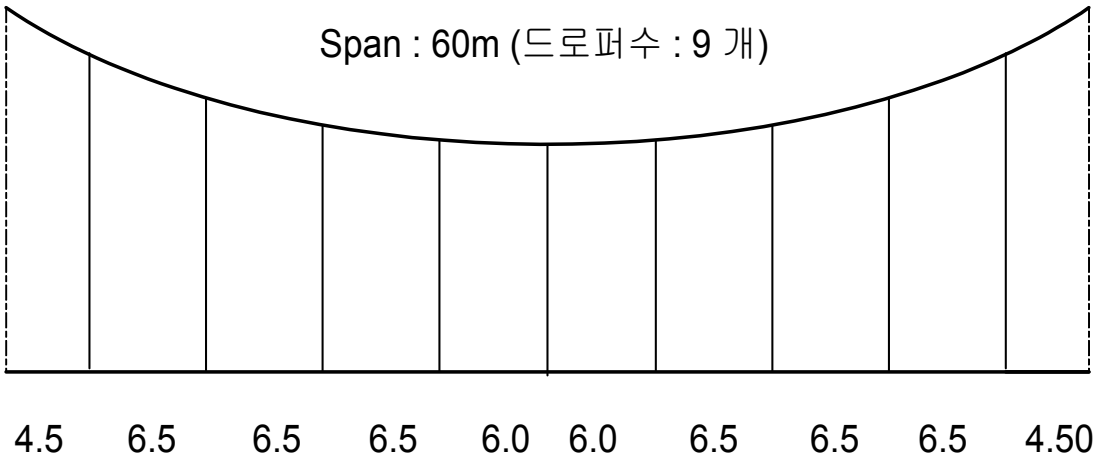


그림 2-1-76 시뮬레이션 대상 경간 호남선 60m Configuration

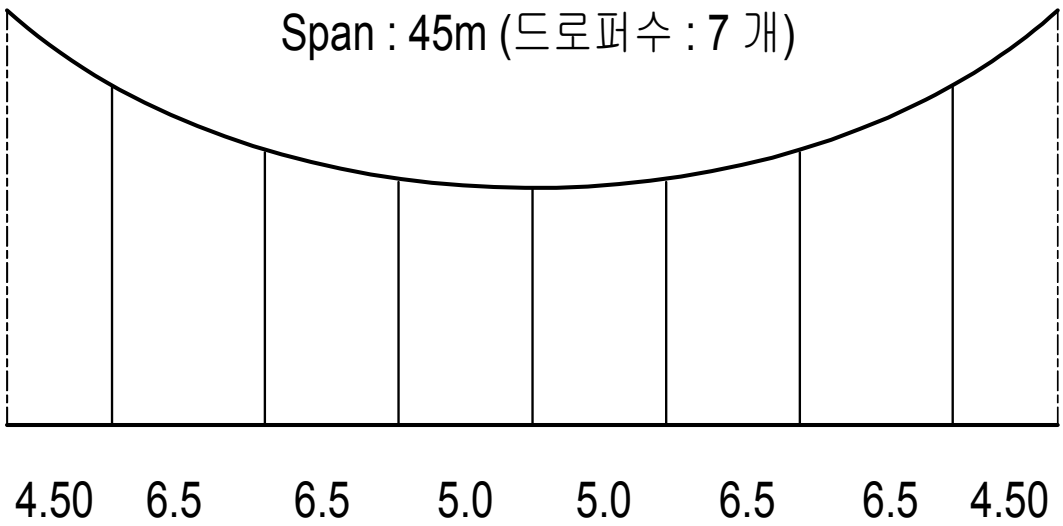


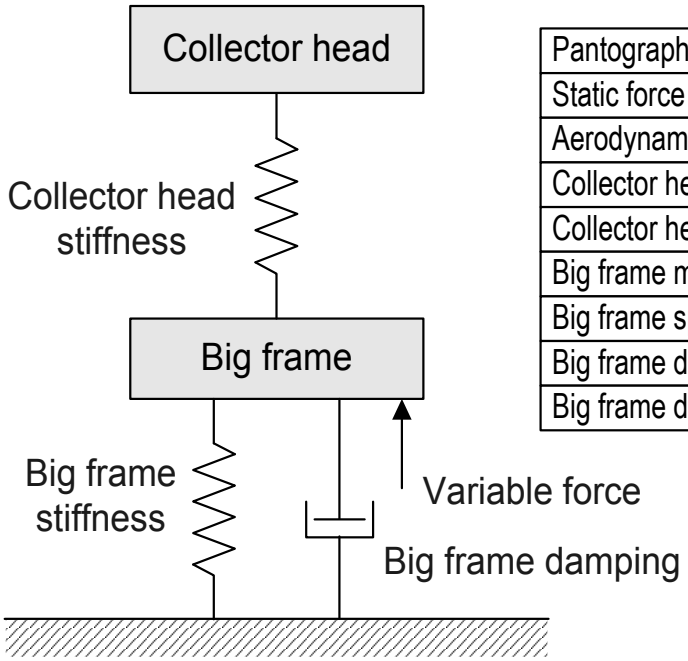
그림 2-1-77 시뮬레이션 대상 경간 호남선 45m Configuration

표 2-1-11 시뮬레이션 대상 호남선 전차선로 파라미터

항목	데이터
전차선 장력, 단위질량	25,480N, 1.334 kg/m (CuSn 150㎟)
조가선 장력, 단위질량	19,600N, 1.080 kg/m (CuMg 116㎟)
드로퍼 단위질량, 클램프 질량	0.120 kg/m, 0.135 kg/개
곡선당김금구 길이, 질량	1.2 m, 1.6 kg/개
가고	1.4 m
사전 이도(Pre-sag)	Span/2000

전체 시뮬레이션 구간은 동일 경간이 11경간 반복되는 것으로 하고 양 끝단은 고정점으로 경계 조건 처리하며 유효 데이터 구간은 가운데 3경간(5th~7th)으로 한다.

팬터그래프 모델링은 350km/h를 주행할 수 있는 팬터그래프는 KTX-산천의 CX 팬터그래프가 적합한 것으로 판단되어 이를 선택하기로 한다. 모델링은 다음과 같다.



Pantograph frame number	2
Static force	70 N
Aerodynamic force	116 10-4 N(m/s)^2
Collector head mass	8 kg
Collector head spring stiffness	6000 N/m
Big frame mass	17.5 kg
Big frame spring stiffness	1 N/m
Big frame damping when descent	200 Ns/m
Big frame damping when ascent	5 Ns/m

Pangtograph CX

그림 2-1-78 CX 팬터그래프 수학적 모델링 데이터

시뮬레이션 속도는 350km/h는 기본으로 하고, 추가적으로 385km/h도 하기로 한다. 385km/h를 선정한 이유는 우리나라에서는 설계속도=운영 속도로 보는 경향이 있지만,

프랑스 등에서는 설계 속도는 운영 속도의 110% 조건에서 만족하여야 한다는 규정이 있고, 유럽에서는 10% 정도 높은 속도에서 evaluation하는 경향을 가진 나라가 다수 있는 점을 반영한 것이기도 하며, 아울러 요즈음 팬터그래프 운전 모드에서 중련 운전 모드가 필요한 운전 조건으로 등장하고 있고, 또한 팬터그래프는 정방향 이외에도 역방향(비상 모드) 주행 조건에서도 집전 성능을 만족하여야 하는 등 정상적인 운영 조건보다 약 10% 정도 악조건인 경우에도(자체적으로 판단하였을 때) 집전 성능을 만족하여야 하는 상황인 점을 고려하여 이 속도를 선정한 것이다.

시뮬레이션 결과는 다음페이지부터와 같다.

(나) CX 팬터그래프 기본 형상(팬헤드 부가장치 미 장착) 조건

① 350km/h일 때

표2-1-12 호남선, CX 팬터그래프 기본형상, 350km/h 시뮬레이션 결과

변수	기호	단위	결과 값	
			60.0m 경간	45.0m 경간
평균 접촉력	Fm	N	198.8	194.3
접촉력 표준편차	σ	N	55.9	55.0
통계적 최대 접촉력	Fm+3*σ	N	366.5	359.3
통계적 최소 접촉력	Fm-3*σ	N	31.1	29.3
전주에서 압상량	Uplift	mm	76.4	64.2

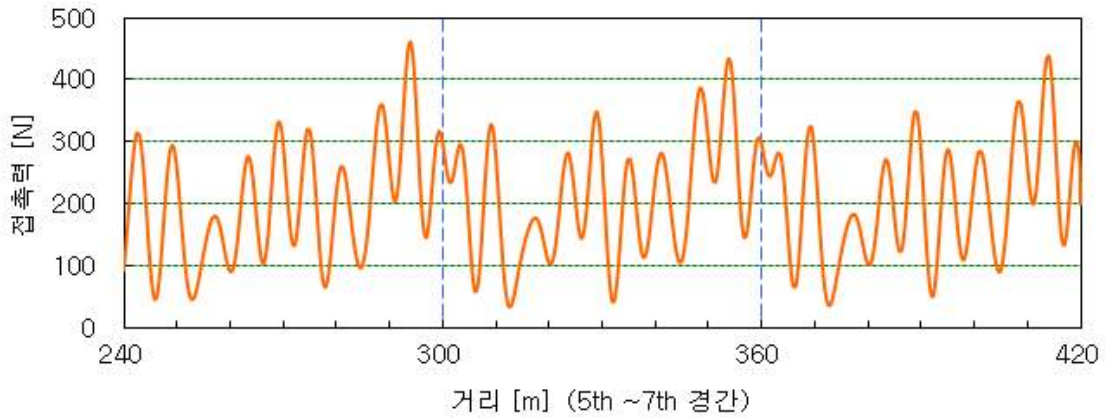


그림 2-1-79 호남선 60m, CX 팬터그래프 기본형상, 350km/h에서 접촉력 그래프

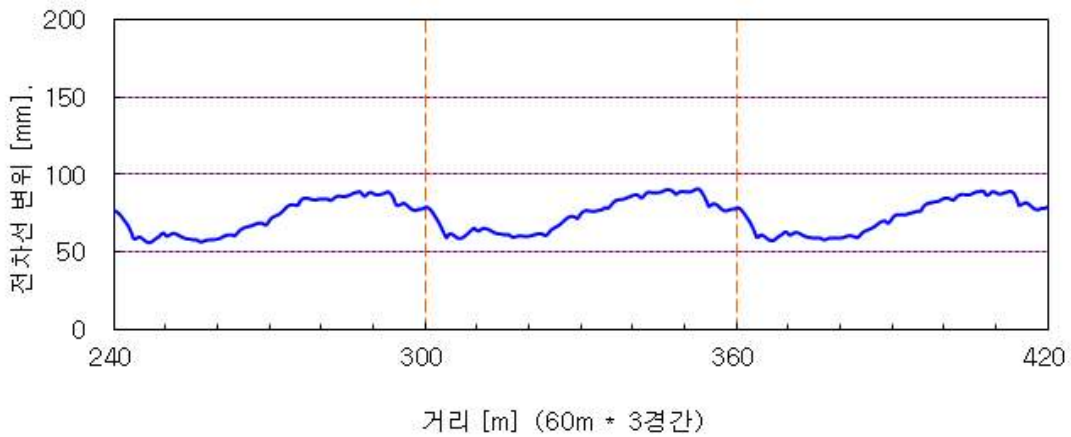


그림 2-1-80 호남선 60m, CX 팬터그래프 기본형상, 350km/h에서 변위궤적 그래프

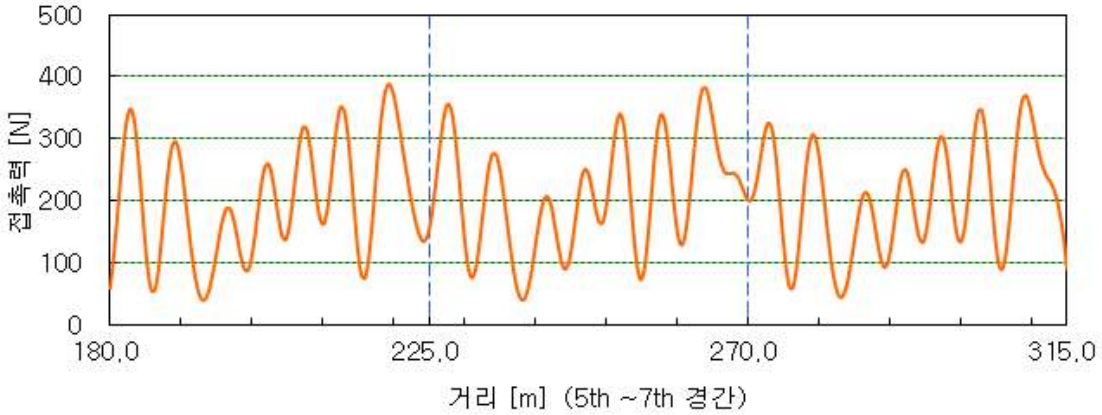


그림 2-1-81 호남선 45m, CX 팬터그래프 기본형상, 350km/h에서 접촉력 그래프

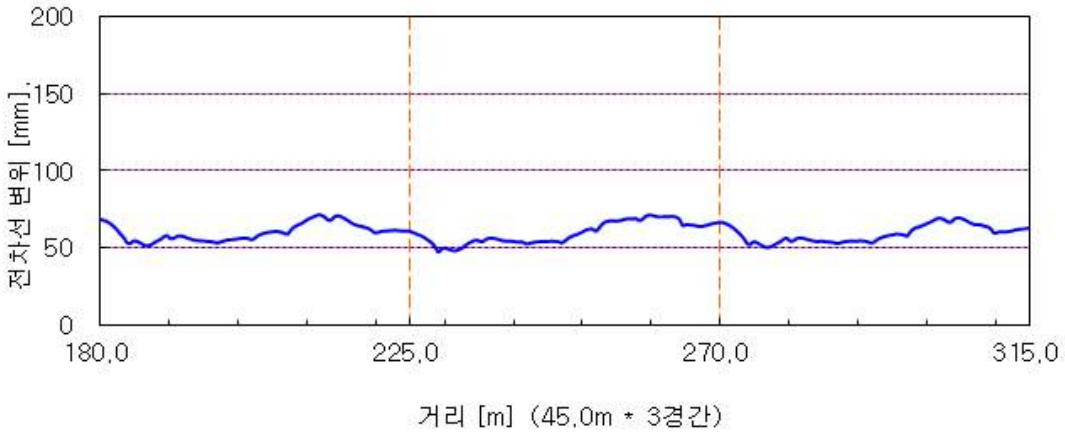


그림 2-1-82 호남선 45m, CX 팬터그래프 기본형상, 350km/h에서 변위궤적 그래프

② 385km/h일 때

표 2-1-13 호남선, CX 팬터그래프 기본형상, 385km/h 시뮬레이션 결과

변수	기호	단위	결과 값	
			60.0m 경간	45.0m 경간
평균 접촉력	Fm	N	227.2	227.1
접촉력 표준편차	σ	N	81.4	80.3
통계적 최대 접촉력	Fm+3*σ	N	471.4	468.0
통계적 최소 접촉력	Fm-3*σ	N	-17.0	-13.8
전주에서 압상량	Uplift	mm	95.1	75.7

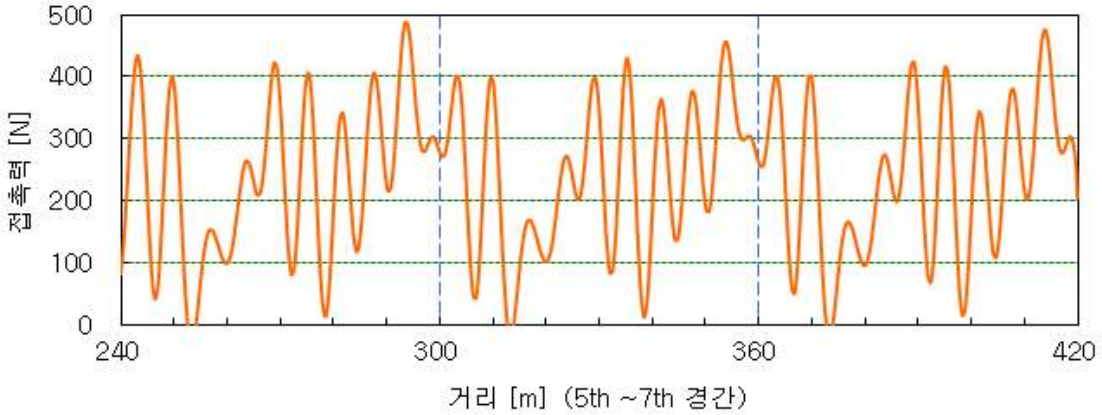


그림 2-1-83 호남선 60m, CX 팬터그래프 기본형상, 385km/h에서 접촉력 그래프

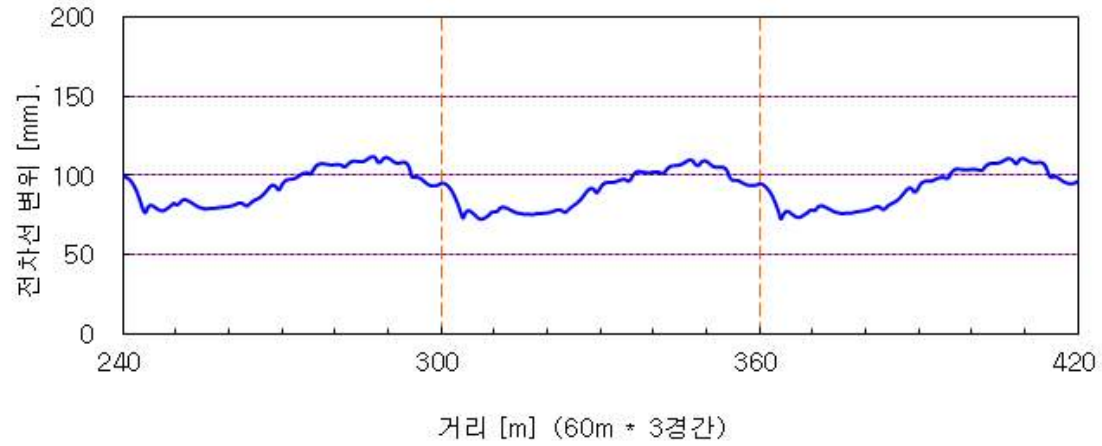


그림 2-1-84 호남선 60m, CX 팬터그래프 기본형상, 385km/h에서 변위궤적 그래프

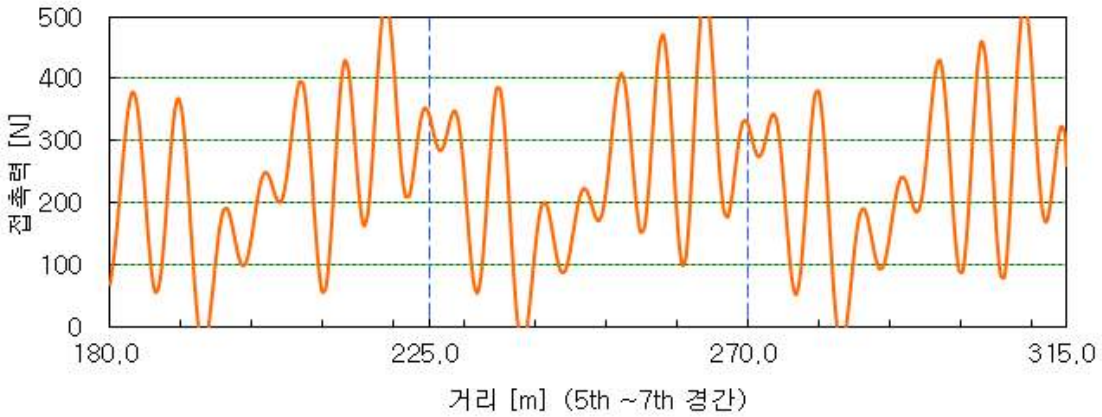


그림 2-1-85 호남선 45m, CX 팬터그래프 기본형상, 385km/h에서 접촉력 그래프

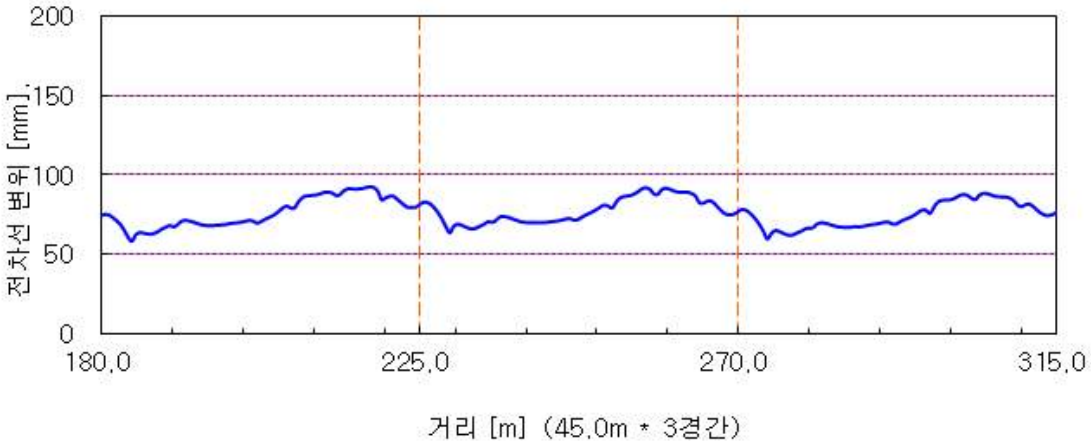


그림 2-1-86 호남선 45m, CX 팬터그래프 기본형상, 385km/h에서 변위궤적 그래프

(다) CX 팬터그래프에 팬헤드 부가장치 장착 조건

아래 그림과 같은 팬헤드 부가 장치를 부착한 경우에 대한 시뮬레이션이다. 이 부가장치의 무게는 3kg으로 입력 하였다.

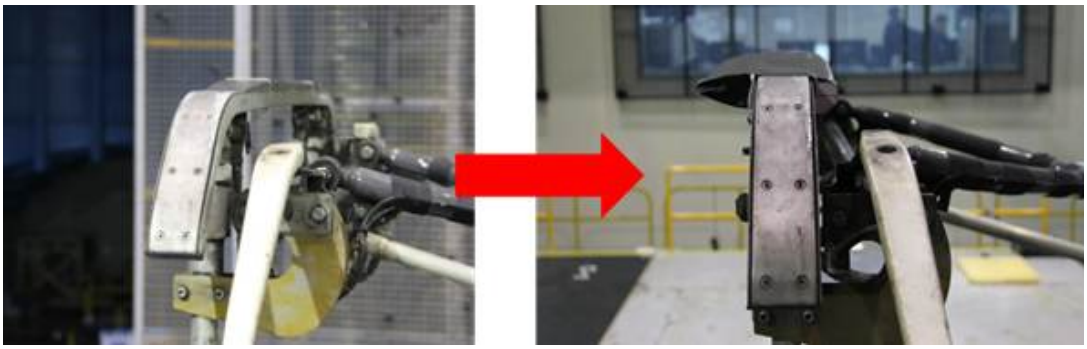


그림 2-1-87 팬터그래프 집전판 부가장치 부착

① 350km/h일 때

표 2-1-14호남선, CX 팬터그래프 부가장치, 350km/h 시뮬레이션 결과

변수	기호	단위	결과 값	
			60.0m 경간	45.0m 경간
평균 접촉력	Fm	N	198.0	195.1
접촉력 표준편차	σ	N	58.6	58.1
통계적 최대 접촉력	Fm+3*σ	N	373.8	369.4
통계적 최소 접촉력	Fm-3*σ	N	22.2	20.8
전주에서 압상량	Uplift	mm	77.6	64.0

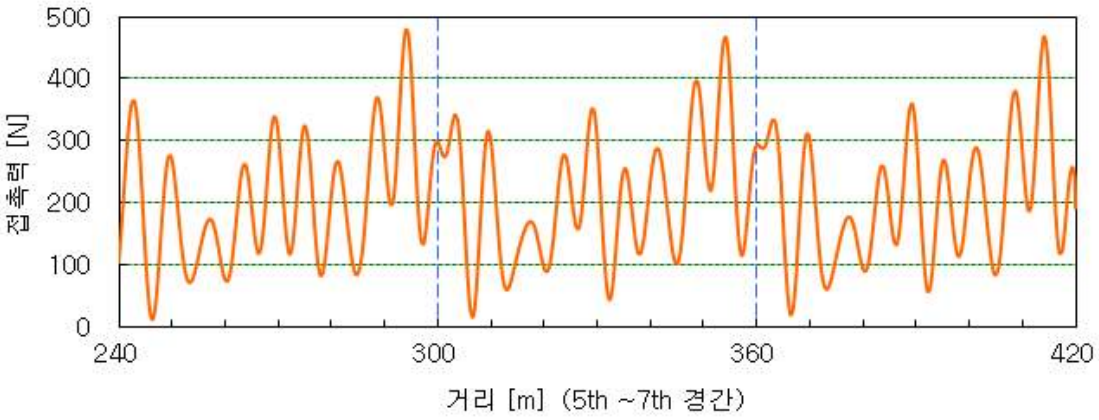


그림 2-1-88 호남선 60m, CX 팬터그래프 기본형상, 350km/h에서 접촉력 그래프

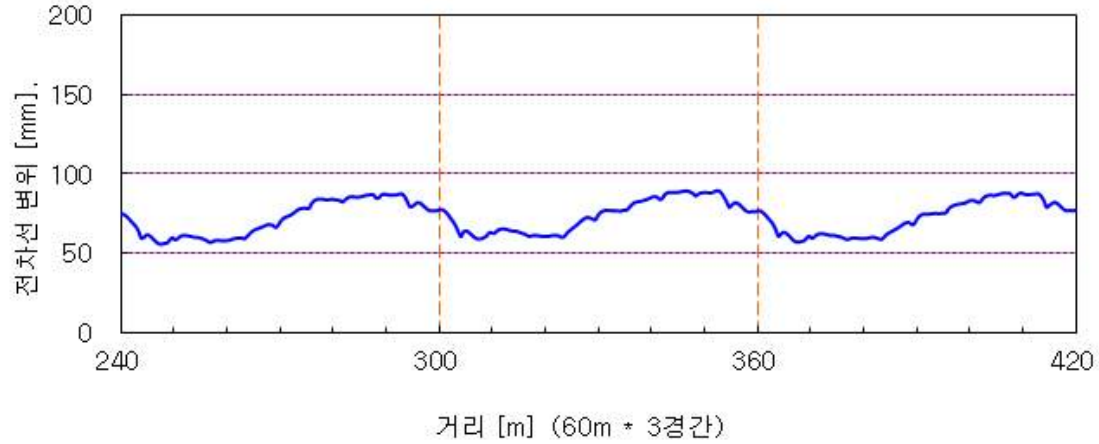


그림 2-1-89 호남선 60m, CX 팬터그래프 기본형상, 350km/h에서 변위궤적 그래프

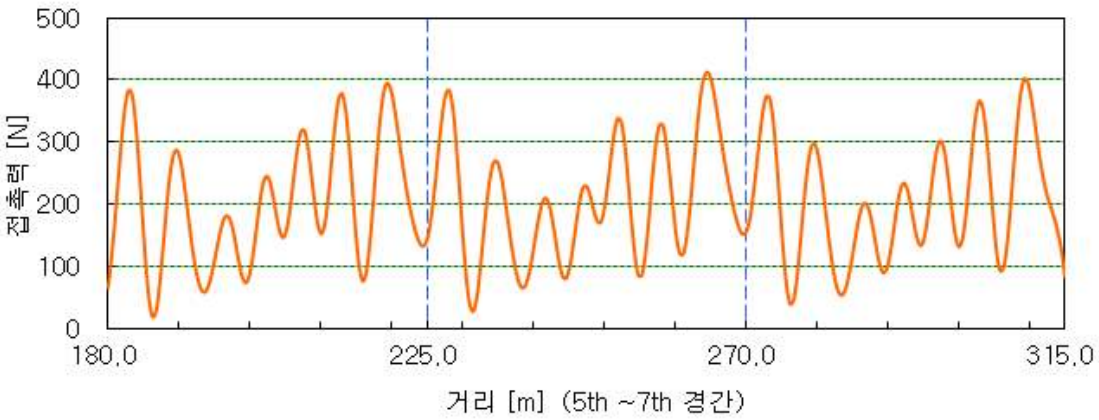


그림 2-1-90 호남선 45m, CX 팬터그래프 기본형상, 350km/h에서 접촉력 그래프

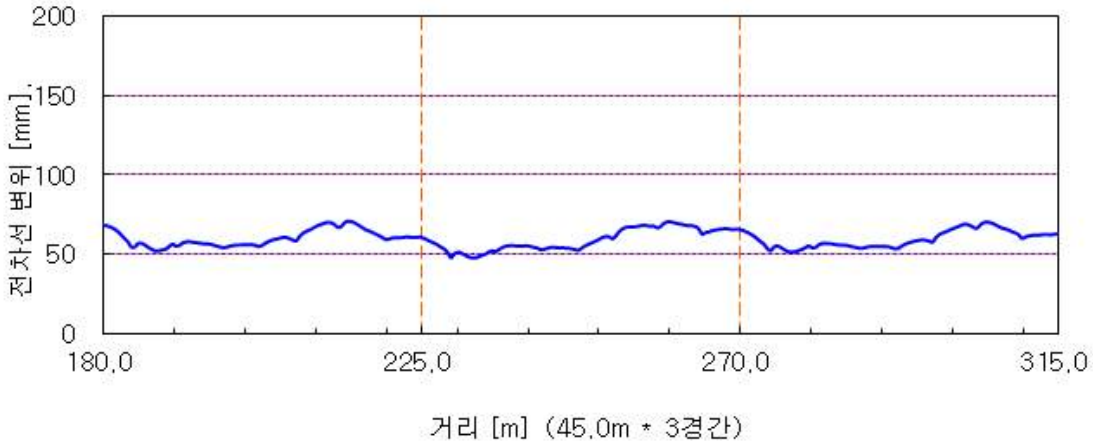


그림 2-1-91 호남선 45m, CX 팬터그래프 기본형상, 350km/h에서 변위궤적 그래프

② 385km/h일 때

표 2-1-15 호남선, CX 팬터그래프 기본형상, 385km/h 시뮬레이션 결과

변수	기호	단위	결과 값	
			60.0m 경간	45.0m 경간
평균 접촉력	Fm	N	228.1	228.7
접촉력 표준편차	σ	N	85.2	86.7
통계적 최대 접촉력	Fm+3*σ	N	483.7	488.8
통계적 최소 접촉력	Fm-3*σ	N	-27.5	-31.4
전주에서 압상량	Uplift	mm	94.7	75.6

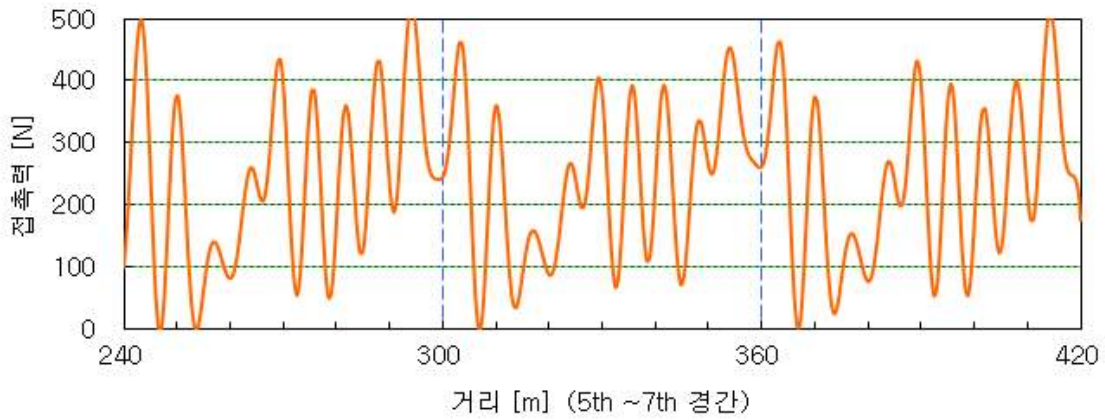


그림 2-1-92 호남선 60m, CX 팬터그래프 부가장치, 385km/h에서 접촉력 그래프

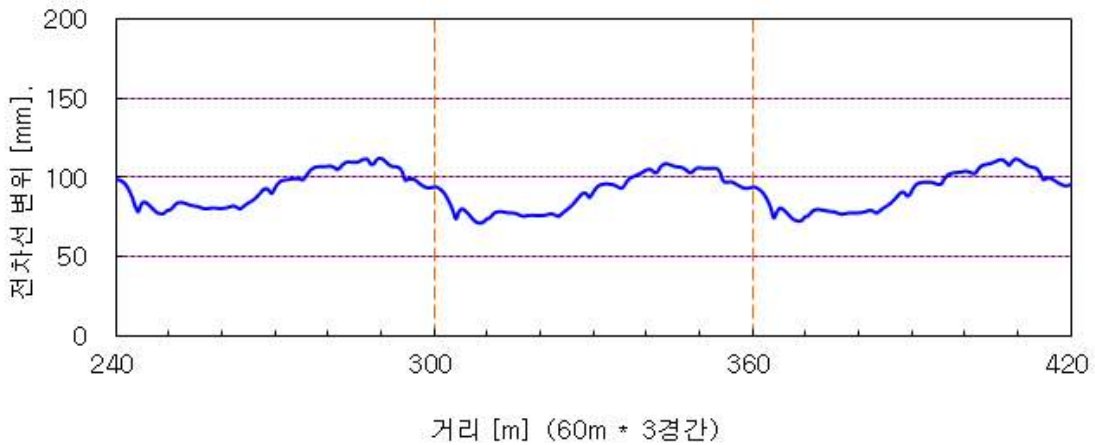


그림 2-1-93 호남선 60m, CX 팬터그래프 부가장치, 385km/h에서 변위궤적 그래프

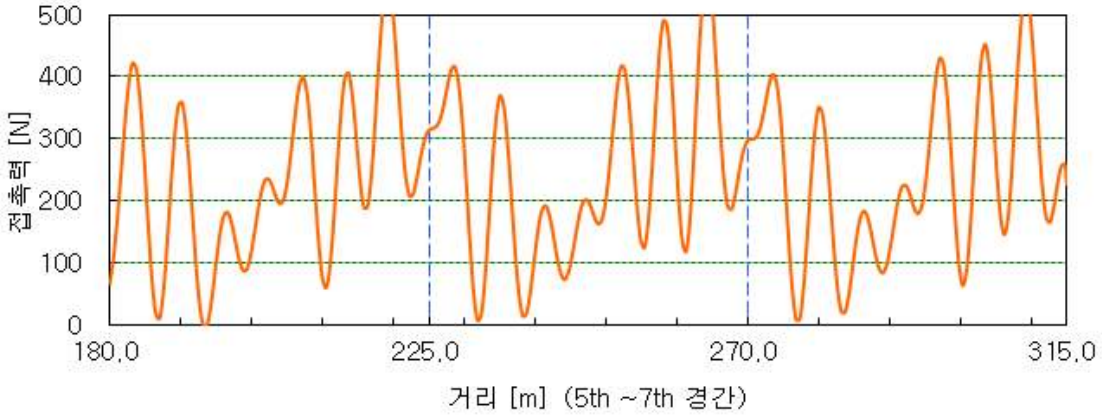


그림 2-1-94 호남선 45m, CX 팬터그래프 부가장치, 385km/h에서 접촉력 그래프

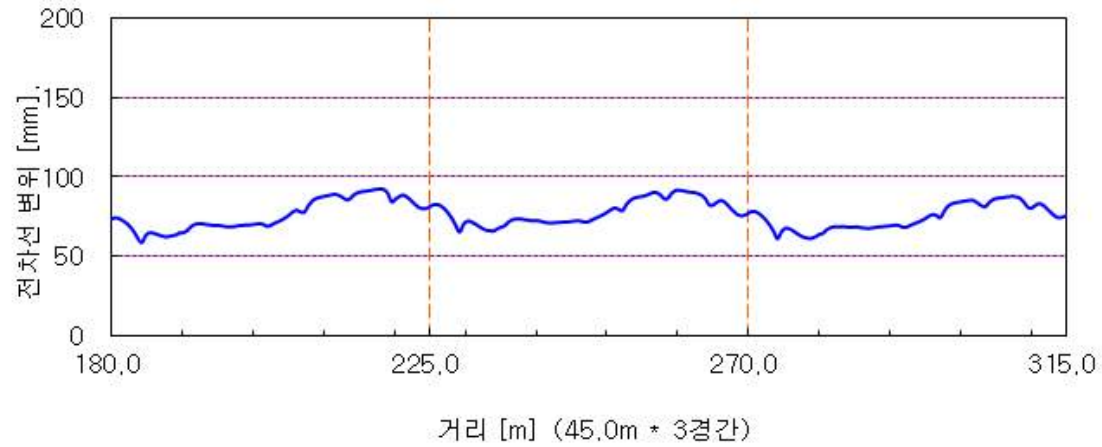


그림 2-1-95 호남선 45m, CX 팬터그래프 부가장치, 385km/h에서 변위궤적 그래프

(라) 시뮬레이션 결과 검토

시뮬레이션 결과를 검토해 보기로 한다. UIC 794-1에서 집전 성능의 판단 기준으로 통계적 최소접촉력이 0 이상일 것(Fm-3σ > 0N)을 요구함과 통계적 최대 접촉력이 350N일 것(Fm-3σ < 350N)을 요구하고 있다. 이러한 기준을 염두에 두되, 본 시뮬레이션은 해당 선로의 집전 성능의 합부 판정을 목적으로 하지 않고 또 CX 팬터그래프는 속도가 높아짐에 따라 압상력을 조정하는 Semi-active 팬터그래프임인 점을 고려하여 최대 접촉력 부분에 대해서는 평가하지 않기로 한다.

앞의 시뮬레이션 결과를 검토해 보면 다음과 같은 결론을 도출할 수 있겠다.

1) 약 3kg 정도 되는 팬 헤드 부가장치를 장착하는 경우 장착 하지 않은 기본 형상 모델에 비하여 집전 성능의 조금 떨어지나 그 저하되는 양은 크지 않다. 그러나 속도가 높아짐에 따라서는 집전 성능의 저하량이 확대되는 경향을 갖는다.

2) 팬 헤드 부가 장치를 장착하는 경우 약 100% 속도 조건(350km/h)에서는 집전 성능의 요구 조건(통계적 최소 접촉력 > 0)을 만족한다. 그러나 약 110% 속도 조건(385km/h)에서는 집전 성능의 요구 조건을 만족하지 못한다.

3) 상기 2)에 대하여, 이것은 팬 헤드 부가 장치를 장착하지 않은 기본 형상 조건에서도 마찬가지이다. 따라서 CX 팬터그래프에 대해서는 385km/h 속도 대역을 운행하고자 한다면 기본적으로 설비의 변경이나 튜닝, 조정 등이 필요해 보인다.

따라서 부가 장치를 장착함으로서 생기는 집전 성능의 저하량은 크지 않음을 알 수 있으며, 따라서 결론적으로 본 시뮬레이션을 통하여 부가 장치를 장착하는 개념에 대하여 집전 성능 측면에서도 그 실현 가능성(feasibility)을 확인할 수 있었다고 판단된다.

마. 결론

본 연구에서는 팬터그래프 개발에 관한 세계동향 조사를 통하여 고속용 팬터그래프에 대한 설계에 대한 가이드라인으로 삼았다. 고속용 저소음/저저항 팬터그래프 설계기술 확보를 위하여 풍동실험과 전산해석을 통하여 기존 열차 상부경계층을 수집하고 분석하여 풍동실험을 위한 팬터그래프 전방경계조건을 도출하였다. 그리고 팬터그래프 운용시나리오를 구축하여 다양한 시험조건에 대한 항목을 마련하였으며, 350km/h에서 팬터그래프 운용시 요구되는 형상설계 요구조건과 운용시나리오 분석을 통해 공력설계 요구조건을 도출하였다. 또한 팬터그래프 공력형상 설계 시 설계 제약사항을 분석하여 팬터그래프에서 팬헤드와 팬터그래프암에 대해 상세히 설계할 수 있는 기준을 제시하였다. 최종적으로 기존 팬터그래프의 동특성 및 집전성능을 시뮬레이션을 수행하였으며, 본 1차년도에서 수행된 팬터그래프의 팬헤드 최적화 결과를 적용한 팬터그래프에서 동특성 및 집전성능을 시뮬레이션하여 350km/에서 사용가능함을 검증하였다.

2. 기존 싱글암 타입 팬터그라프 공력 소음 및 공력 성능 풍동 시험

가. 한국항공우주연구원 풍동 시험 장치 및 모델 설치

(1) KARI LSWT

한국항공우주연구원 중형아음속풍동(KARI LSWT)은 폐회로형으로 시험부 교환형으로 설계되었다. 현재 보유한 시험부는 폭 4m, 높이 3m의 표준형시험부(Closed wall)와 폭 5m, 높이 3.75m인 개방형시험부(Open jet)를 보유하고 있다.

소음풍동시험은 한국항공우주연구원(KARI) 중형아음속풍동(LSWT) 개방형시험부에서 수행되었다. 시험이 수행된 개방형시험부의 폭은 5m, 높이는 3.75m이며 시험부 유질은 표 2-1-16과 같다. 개방형시험부의 최대 풍속은 68m/s(245km/h)이다.

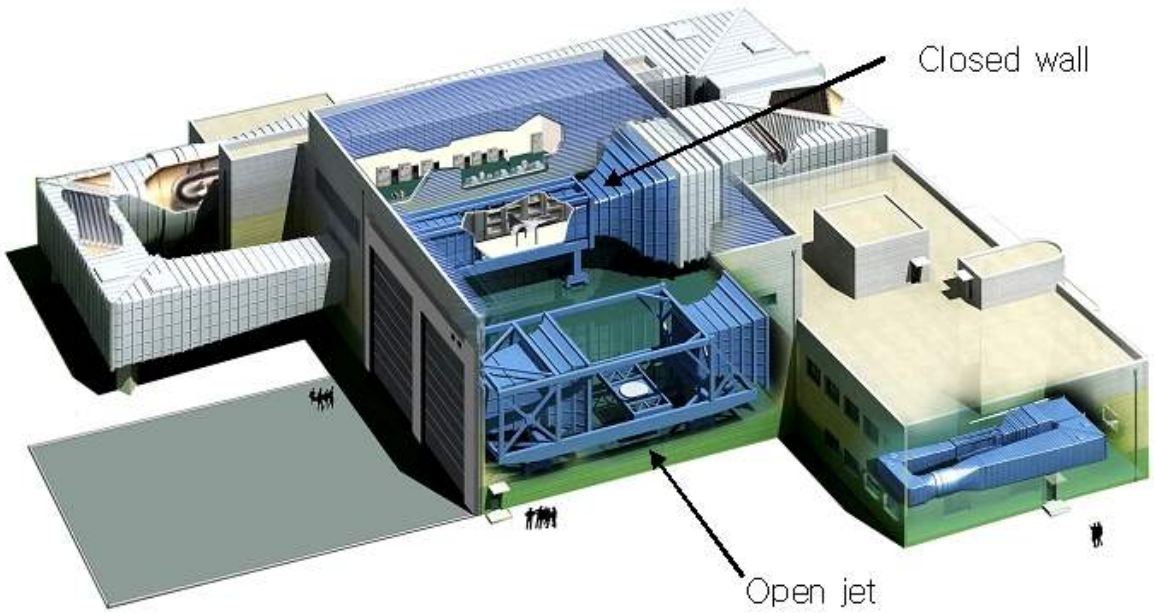


그림 2-1-96 KARI 중형아음속풍동

표 2-1-16 KARI LSWT 개방형시험부 Flow quality

Δq/q (%)	Angularity (°)	ΔT (℃)	Turbulence level (v/V) (%)
< 0.5	< 0.2	< 0.5	< 0.4

(2) Data Acquisition

시험에 사용된 주요 측정변수 및 계측장비는 다음과 같다. 표 2-1-17에 나타난 정밀도는 제품의 사양에 나타난 정밀도이다. KARI LSWT에서 사용하는 기본적인 계측장비는 NEFF471과 MGCPlus를 사용하였다. 풍동운영조건에 관련된 센서(시험부 기준압력 및 온도)는 NEFF471로 측정하였으며, 공력하중과 관련된 센서(풍동정울)는 HBM 장비를 사용하여 측정하였다.

표 2-1-17 측정변수 및 DAQ

측정변수	센서	센서정밀도	DAQ	DAQ 정밀도
시험부 정압(절대압)	MKS 1000 torr	0.01%	NEFF471	0.05%
시험부-정체실 차압	MKS 100 torr	0.01%	NEFF471	0.05%
정체실 온도	RTD	0.2도	PLC	
모델 공력하중	Internal Balance	0.2% f.s.	MGCPlus ML38B	0.0025%

(3) 내장형 저울

시험모델에 부가되는 전체적인 공력하중을 측정하기 위해 시험모델 하부에 내장형 풍동저울을 설치하였다. 시험에 사용된 풍동저울은 IAI에서 제작한 6축 Load cell로 최대하중 범위는 표 2-1-18과 같다.

표 2-1-18 내장형 풍동저울 KARI-IB6-009

	Normal	Axial
단위	Lbs	Lbs
하중범위	3000	350

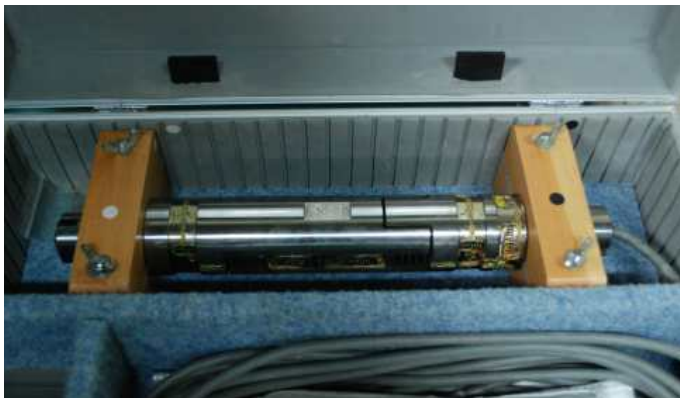


그림 2-1-97 내장형 풍동저울

(4) Pan head lift용 load cell

Pan head에 작용하는 Lift를 측정하기 위해 추가로 로드셀 2기를 장착하였다. 로드셀은 그림 2-1-98과 같은 다셀 제품으로, 최대하중 50Kgf 정밀도 0.03%인 제품을 사용하였다. 로드셀은 중심을 기준으로 양쪽으로 설치하고 Wire를 이용하여 상부 Pan head에 고정하였다. 하중의 일정한 분포 및 미세 높이 조정을 위해 로드셀 상부에 턴버클을 설치 하였다.



그림 2-1-98 Pan head Lift 측정용 load cell

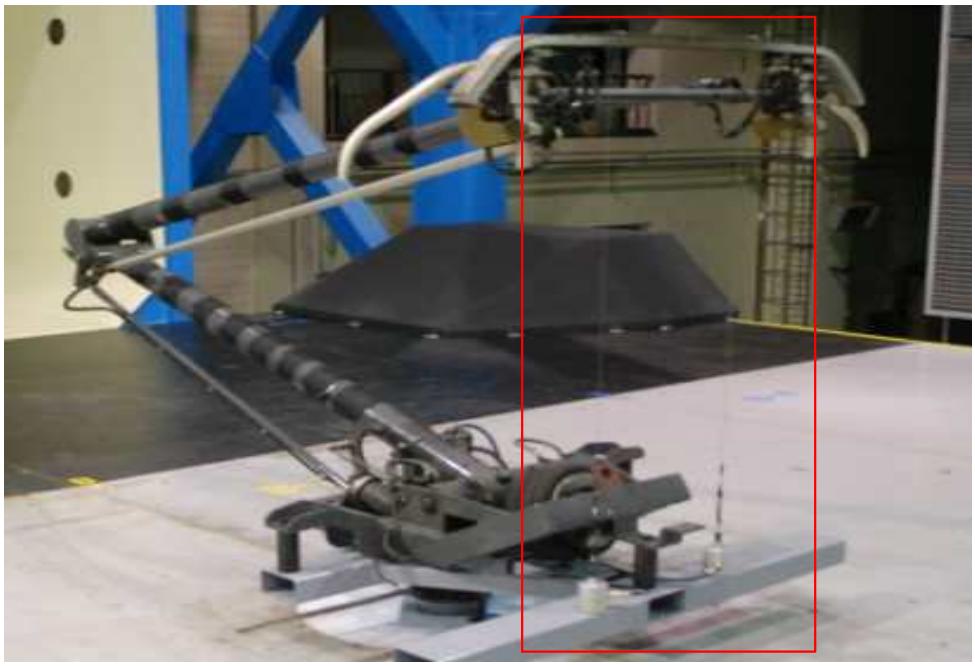


그림 2-1-99 Pan head용 lift 연결 모습

(5) 팬터그래프 모델설치

팬터그래프는 개방형 시험부 회전판에 설치된 지지대 상부에 내장형 저울을 설치한 후 팬터그래프를 설치하였다. 그림 2-1-100는 팬터그래프 설치 측면개략도이다.

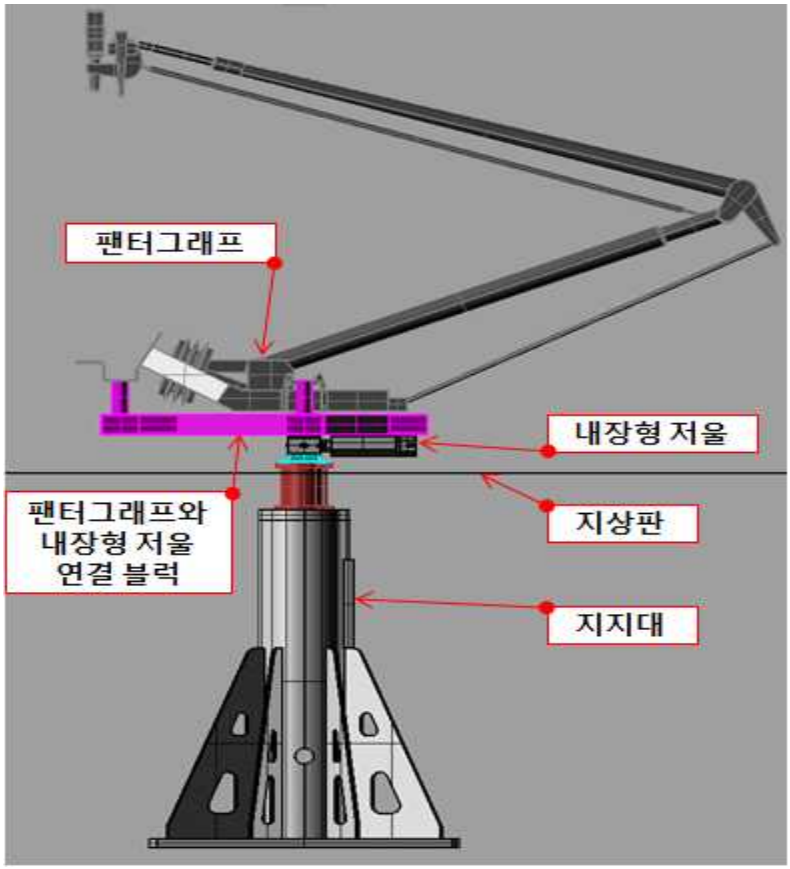


그림 2-1-100 팬터그래프 설치 측면도

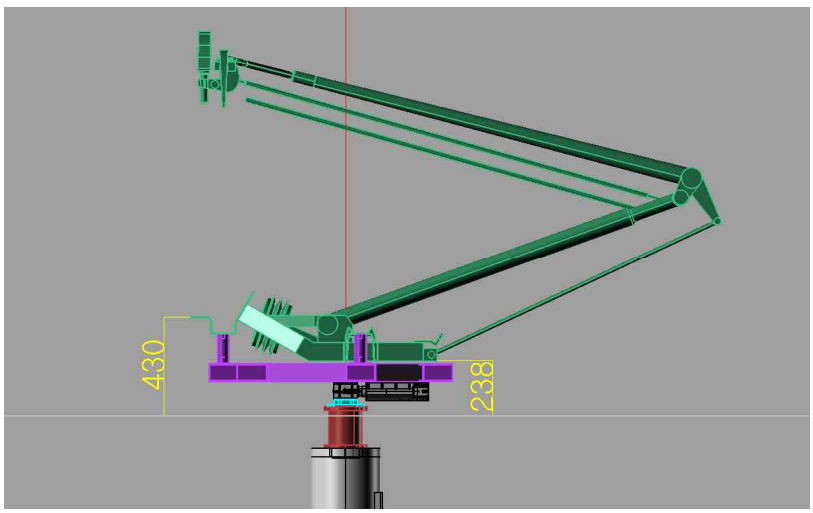


그림 2-1-101 시험모델 설치

시험모델의 요각방향을 제어하기 위해 하부 회전판(각도 범위 -180도 ~ +180도)에 모델지지부를 설치하였으며, 팬터그래프 모델이 지상판 경계층 외부에 위치하도록 지지대를 지상판 상부 위까지 확장하였다. 팬터그래프 모델의 공력하중을 측정하기 위해 내장형 풍동저울은 지지대 상부에 설치하였으며, 내장형 풍동저울과 시험모델을 연결하기 위한 팬터그래프 연결 블록을 풍동저울과 팬터그래프 하부 프레임 사이에 설치하였다. 지상판과 팬터그래프 하부 프레임의 간격은 238mm이며, 지상판과 팬터그래프 높이 기준점 사이의 간격은 430mm이다(그림 2-1-101). 그림 2-1-102과 같이 팬터그래프에 3.5bar의 압축공기를 공급하여 팬터그래프가 위로 펴지도록 하였으며, 그림 2-1-99에 나타난 팬헤드 lift 로드셀과 연결된 wire의 길이를 수동으로 조절하여 팬헤드의 높이를 조정하였다. 팬헤드의 높이을 조정할 때 그림 2-1-103 및 그림 2-1-104와 같이 팬터그라프 프레임과 팬헤드 부위에 수평계를 설치하여 시험모델의 수평을 조절하였으며, 2개의 팬헤드 로드셀에 부가되는 하중이 각각 3.5kg 부근이 되도록 wire의 장력을 조절하였다.



그림 2-1-102 공압 조절장치

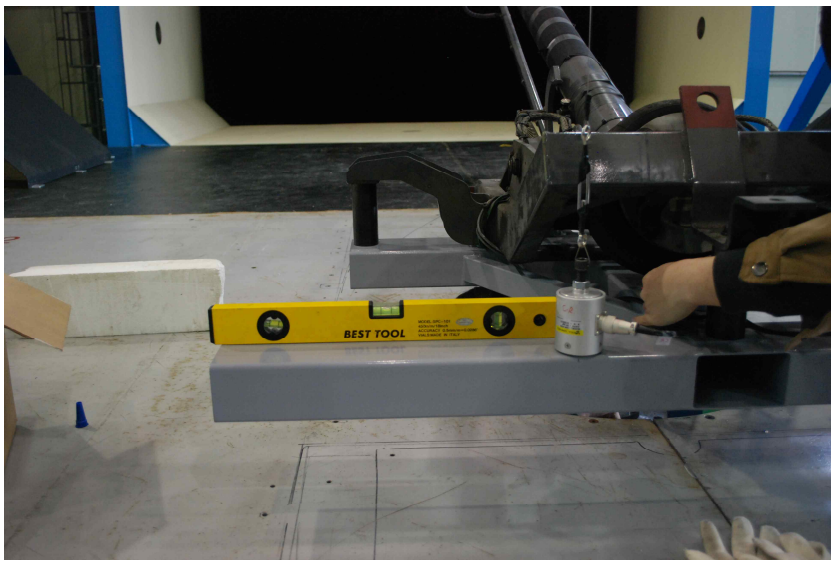


그림 2-1-103 하부 프레임 수평조절



그림 2-1-104 팬헤드 수평조절

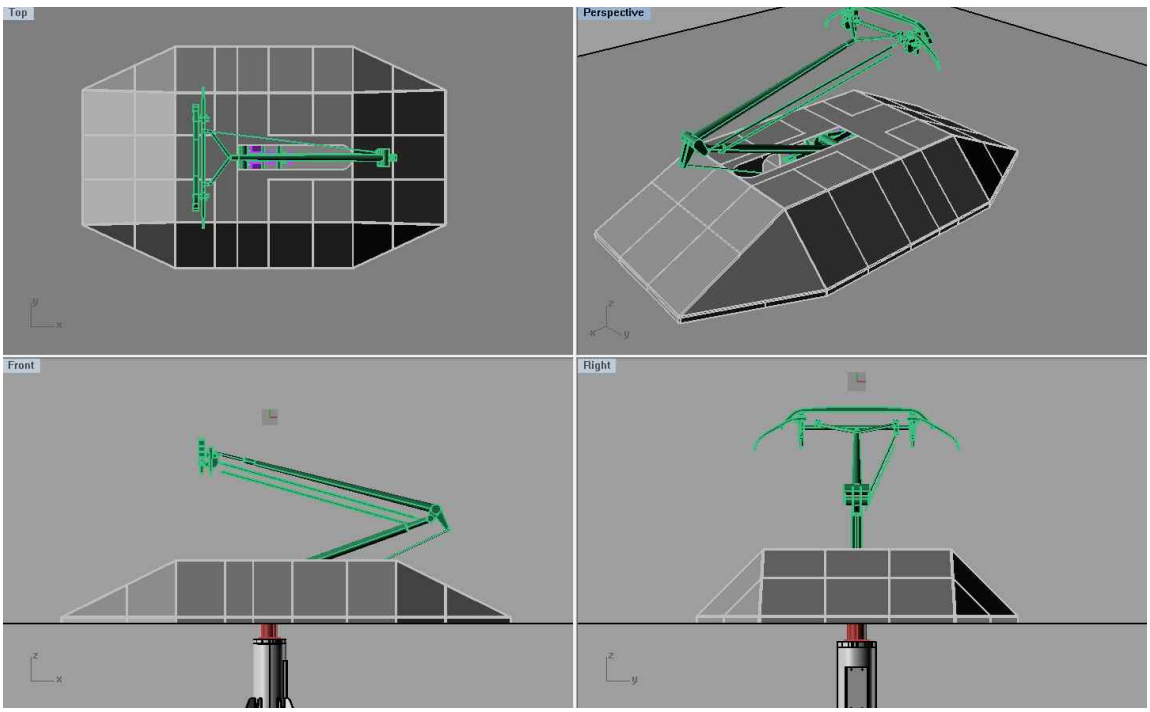


그림 2-1-105 하부 fairing 설계

고속철도 차량에 팬터그래프가 설치될 경우 팬터그래프의 하부는 대부분 지붕 또는 보호덮개로 덮여있어 흐름에 노출되지 않는 형태이므로 본 연구의 주목적인 팬터그래프 소음저감 형상설계 방안은 팬헤드와 암 부위에 집중되어 있다. 그러나, 시험모델은 그림 2-1-99와 같이 팬터그래프 하부 프레임과 풍동저울 관련 연결부가 흐름에 노출되는 형태이므로 하부에서 발생되는 소음이 전체 측정에 영향을 미치게 된다. 이러한 하부구조물의 소음영향을 차단하기 위해 팬터그래프 하부를 별도의 fairing으로 덮은 상태에서 시험을 수행하였다. Fairing은 그림 2-1-105과 같이 하부구조물 전체를 덮을 수 있는 형상이며, 지상판으로부터 높이는 580mm, 폭 2500mm, 길이

4100mm이다. 모델설치 편의성을 고려하여 fairing 부위는 복합재로 제작하였다.

풍동시험부에 설치된 팬터그래프 모델의 최종형상은 그림 2-1-106과 같다. 팬터그래프에 사용되는 공압 및 모든 Data Cable은 지상판 하부에서 풍동 주조종실까지 연결되도록 구성을 하였다.

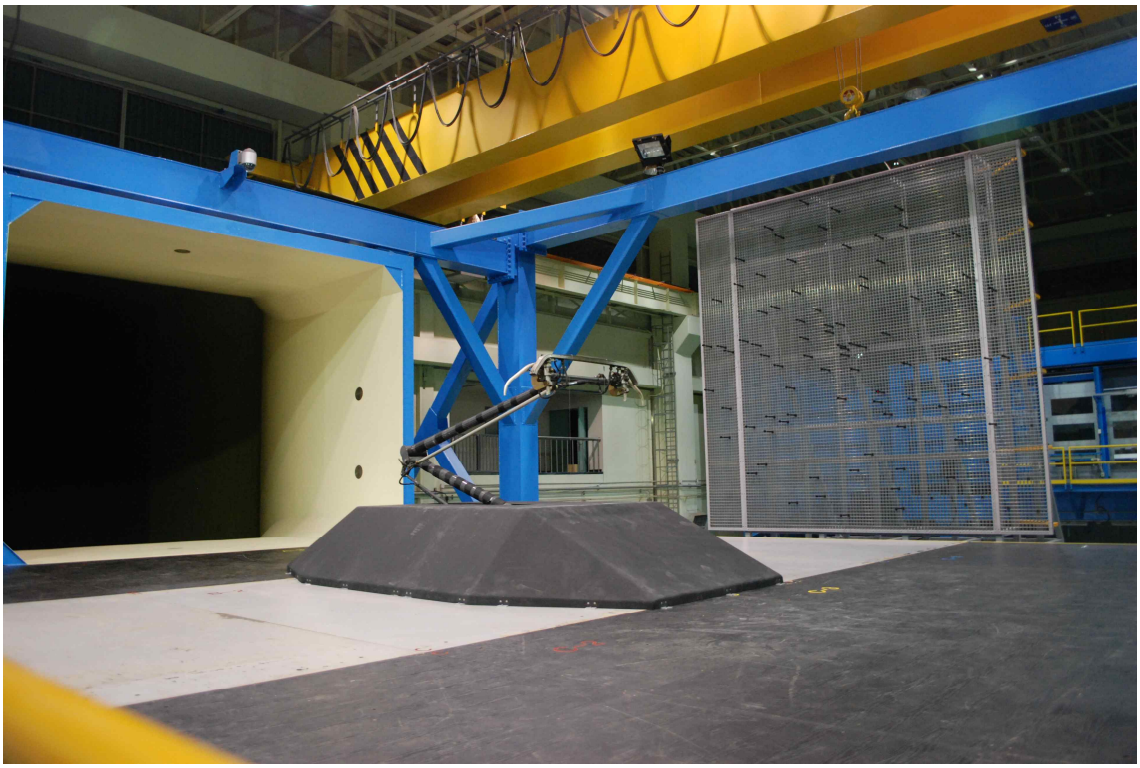


그림 2-1-106 풍동 시험부에 설치된 모델 최종형상

(6) 공력/소음 측정장치

팬터그래프 소음원 측정시험은 마이크로폰 어레이를 활용한 빔포밍 기법을 사용하였다. 마이크로폰 어레이는 그림 2-1-107와 같이 4.5m x 4.5m 격자판에 마이크로폰을 설치하는 형태로 설계되었다. 어레이는 80개의 LinearX M51 마이크로폰을 spiral 구조를 기준으로 그림 2-1-108과 같이 구성하였으며 상세한 배열 위치는 표 2-1-19에 나타나 있다. 마이크로폰 어레이의 중심점은 높이방향으로는 팬헤드 상단을 기준으로 615mm 지점, 흐름방향으로는 팬터그래프 중심축을 기준으로 후류방향 5mm 지점 그리고 측면방향으로는 팬터그래프 중심축을 기준으로 5600mm 지점에 위치하고 있다.



그림 2-1-107 마이크로폰 어레이 형상

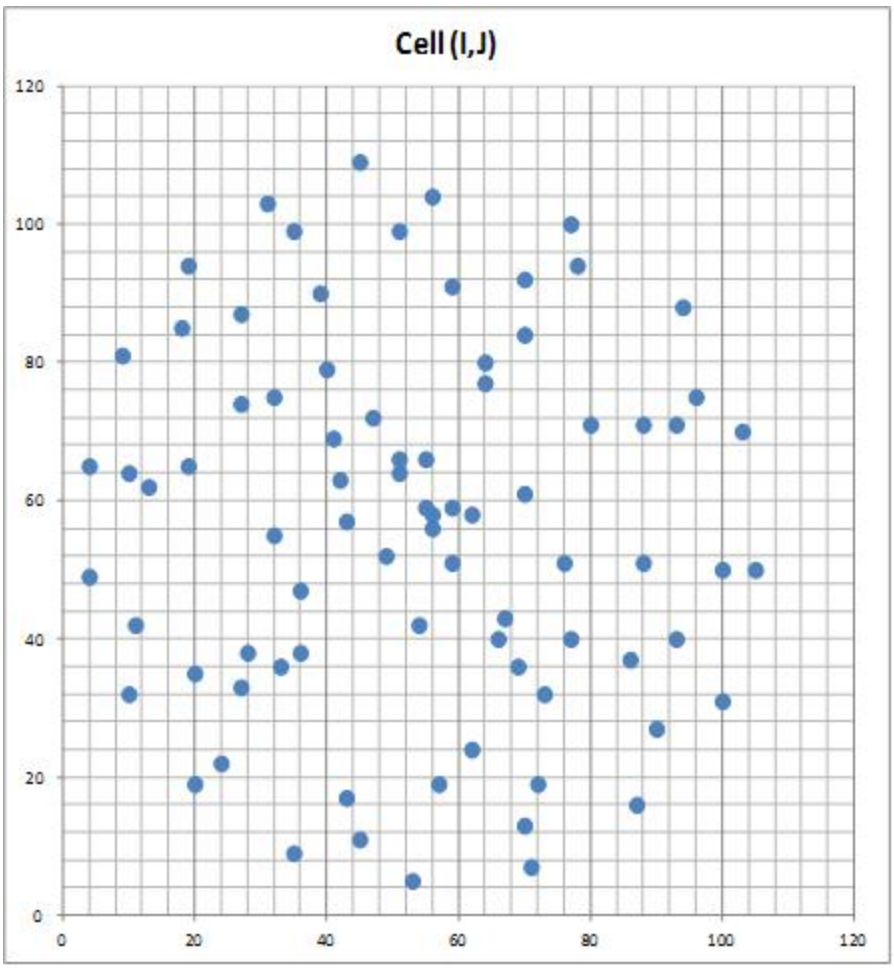


그림 2-1-108 마이크로폰 어레이 배열

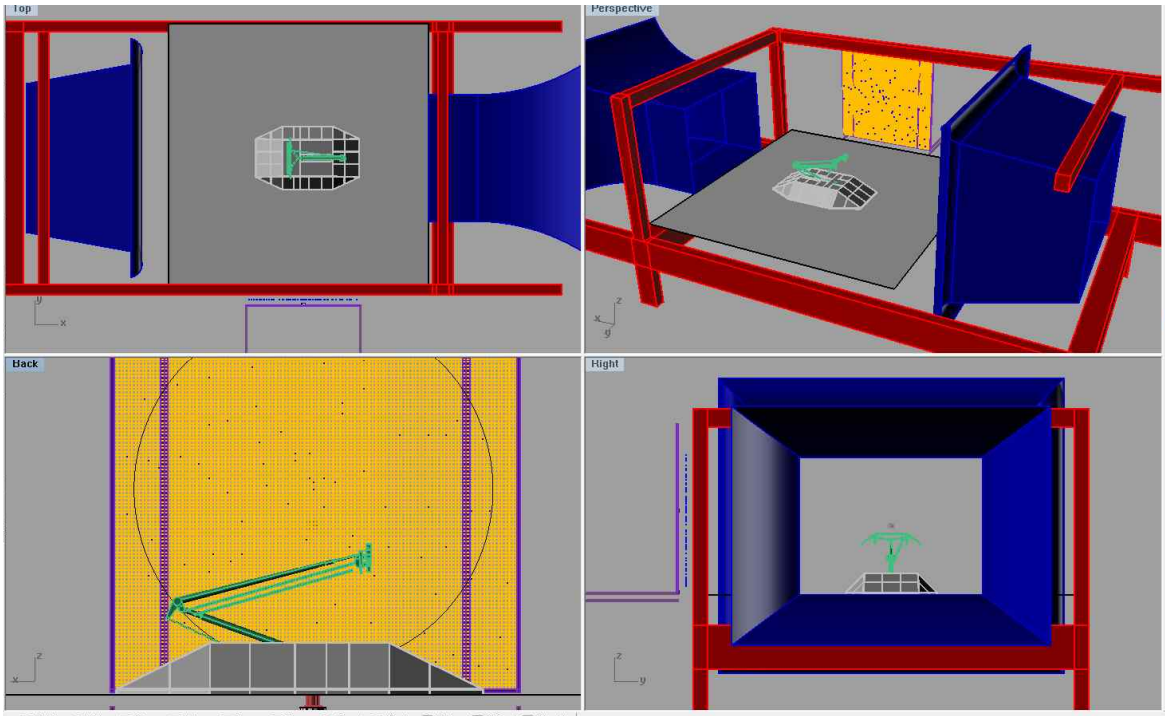


그림 2-1-109 마이크로폰 어레이 설치 위치

표 2-1-19 마이크로폰 어레이 배열 위치

Index	Pos [X]	Pos [Y]	Pos [Z]	Index	Pos [X]	Pos [Y]	Pos [Z]
1	1.235	5.600	-1.193	43	-0.645	5.600	1.327
2	0.595	5.600	-1.553	44	-0.605	5.600	0.927
3	0.555	5.600	-1.313	45	-0.365	5.600	1.047
4	0.795	5.600	0.207	46	-0.565	5.600	0.687
5	1.757	5.600	-0.593	47	-0.525	5.600	0.447
6	1.475	5.600	-0.233	48	-0.285	5.600	0.247
7	1.195	5.600	-0.353	49	-1.485	5.600	1.927
8	0.835	5.600	-0.233	50	-1.285	5.600	0.687
9	1.355	5.600	-0.753	51	-1.165	5.600	0.527
10	0.515	5.600	-0.393	52	-2.087	5.600	0.127
11	0.395	5.600	-0.233	53	-0.045	5.600	0.527
12	0.435	5.600	-0.113	54	-0.205	5.600	0.727
13	0.675	5.600	-0.553	55	-0.005	5.600	0.487
14	0.635	5.600	-1.073	56	-0.005	5.600	0.407
15	0.235	5.600	-0.873	57	0.115	5.600	0.207
16	0.035	5.600	-1.073	58	0.115	5.600	0.527
17	-0.085	5.600	-0.153	59	0.235	5.600	0.487
18	-0.965	5.600	0.367	60	0.555	5.600	0.607
19	-0.805	5.600	0.047	61	0.955	5.600	1.007

Index	Pos [X]	Pos [Y]	Pos [Z]	Index	Pos [X]	Pos [Y]	Pos [Z]
20	-1.807	5.600	-0.153	62	1.275	5.600	1.007
21	-0.805	5.600	-0.313	63	1.475	5.600	1.007
22	-0.925	5.600	-0.393	64	1.595	5.600	1.167
23	-1.125	5.600	-0.313	65	1.877	5.600	0.967
24	-1.165	5.600	-0.513	66	1.275	5.600	0.207
25	-1.445	5.600	-0.433	67	1.757	5.600	0.167
26	-1.847	5.600	-0.553	68	1.957	5.600	0.167
27	-1.445	5.600	-1.073	69	-1.003	5.600	2.287
28	-1.285	5.600	-0.953	70	-0.443	5.600	2.527
29	-0.525	5.600	-1.153	71	-0.003	5.600	2.327
30	-0.845	5.600	-1.473	72	0.837	5.600	2.167
31	-0.445	5.600	-1.393	73	-0.843	5.600	2.127
32	-0.125	5.600	-1.633	74	-0.203	5.600	2.127
33	-0.685	5.600	1.767	75	0.877	5.600	1.927
34	-1.165	5.600	1.647	76	1.517	5.600	1.687
35	-1.525	5.600	1.567	77	0.555	5.600	1.847
36	-1.887	5.600	1.407	78	0.555	5.600	1.527
37	-2.087	5.600	0.767	79	0.115	5.600	1.807
38	-1.847	5.600	0.727	80	0.315	5.600	1.367
39	-1.727	5.600	0.647	81	-0.205	5.600	0.807
40	-1.485	5.600	0.767	82	-0.045	5.600	0.807
41	-1.165	5.600	1.127	83	0.315	5.600	1.247
42	-0.965	5.600	1.167				

시험에 사용된 M51 마이크로폰의 비교정(Uncorrected) 특성은 주파수 50Hz ~ 10kHz 범위에서 1dB 정도의 감도특성을 보이고 있으며, 측정범위는 150dB로 본 소음 시험에 적합한 특성을 가지고 있다. 시험에 사용된 마이크로폰은 그림 1-1-15와 같이 교정음원(B&K 4226)을 사용하여 감도보정을 수행하였다.

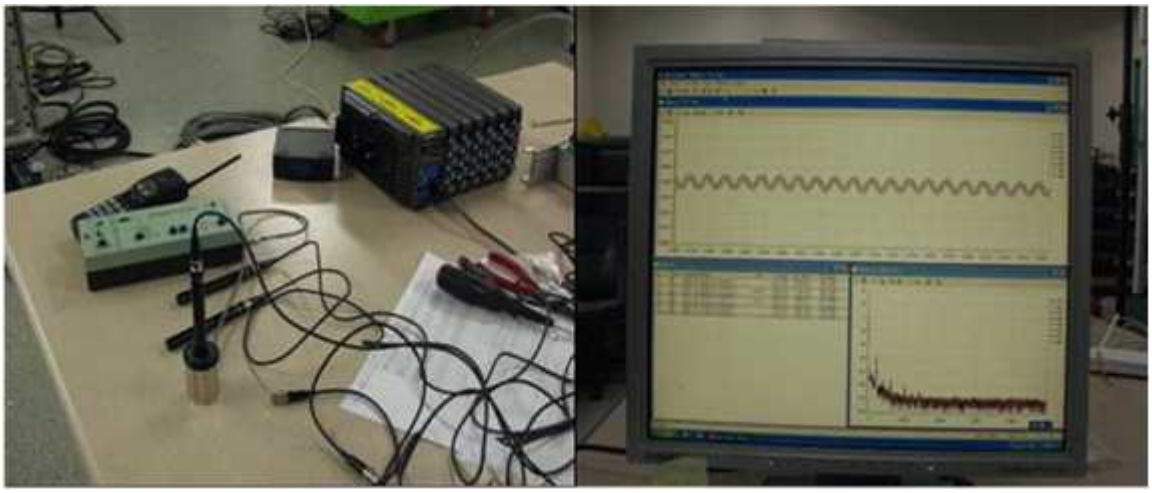
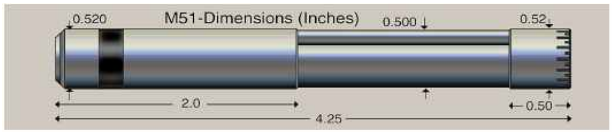


그림 2-1-110 마이크로폰 calibration



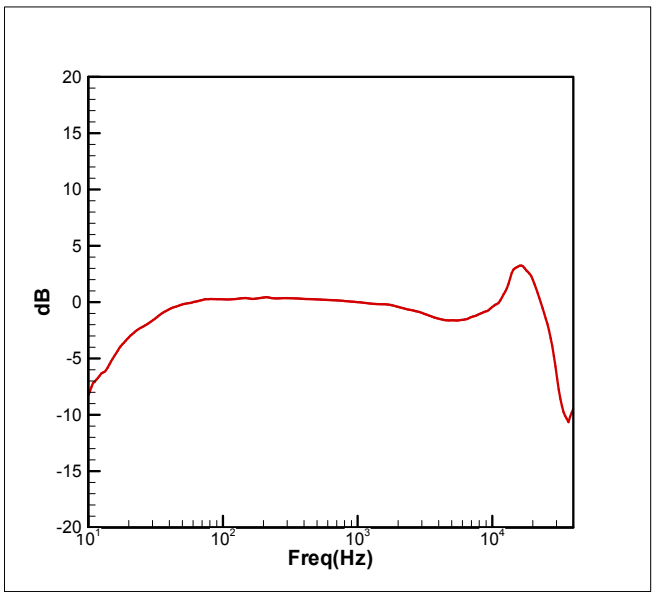


그림 2-1-111 M51 마이크로폰 특성

각 마이크로폰은 그림 2-1-107(우)에 나타난 것과 같이 어레이 후면에 설치된 junction box를 통해 데이터 획득시스템인 VIPER(그림 2-1-112)에 연결하였다. 데이터 획득은 각 채널별 32kHz로 10초동안 수행하였으며, AC 1.5Hz high pass filter를 적용하여 DC 성분을 제거하였다. 신호감도 조절은 PreGain/MidGain/PostGain을 각각 10/1/1로 설정하여 측정을 수행하였다.



그림 2-1-112 소음 데이터 획득시스템 : VIPER

나. 공력/소음 풍동시험

(1) 풍동시험 RUNLOG 및 측정조건

풍동시험은 2012.12 ~ 2013.1에 수행되었으며, 총 314 측정점에 대해 공력 및 소음 측정 시험이 수행되었다. 중형아음속풍동의 최대 풍속은 65m/s이나, 동계전력사용제한으로 인해 45m/s 이하의 풍동조건에 대해 시험이 수행되었다.

팬터그라프 소음풍동시험은 기준높이 H1조건(1253mm)에 대해 총 293회 시험이 수행되었으며, 높이조건 H2(903mm)에 대해서는 총 21 조건에 대해 시험이 수행되었다. 팬터그래프의 방향조건은 정상 주행조건(‘Closed knee′)과 비상 주행조건(‘Open knee′)에 대해 시험이 수행되었으며, 측풍조건을 반영하기 위해 Yaw각 (-2, 0, 2, 4도) 조건에 대해 시험이 수행되었다.

앞서 기술한 바와 같이 팬터그래프 하부 구조물의 소음영향을 배재하기 위해 fairing이 설치된 상태에서 대부분의 시험(총 261회)이 수행되었으며, fairing이 미치는 영향을 파악하기 위해 fairing이 제거된 상태에서 총 53회 시험이 수행되었다.

팬터그래프 각 부재(팬헤드 및 헤드암, 주암 등)의 소음영향을 파악하기 위해 팬헤드에 총 10종(정상 조건 : 6종, 비상조건 4종)의 부착물을 부착하여 시험을 수행하였으며, 주암에 2종의 부착물, 헤드암에 1종의 부착물을 부착하여 시험을 수행하였다.

풍동시험이 수행된 조건이 표 2-1-20에 기술되어 있다.

표 2-1-20 풍동시험 Run log

	높이	방향	Yaw	덮개	부착물	RUN	Velocity(m/s)								
							1	2	3	4	5	6	7	8	9
Set0	H1	C	0	X	X	1	20.3	25.5	30	35.3	38				
	H1	C	0	X	X	2	20.3	25.6	30	35.3	37.1				
Set1	H1	C	0	O	X	3	20.4	25.6	30	35.4	38	40.7	43.4		
	H1	C	-2	O	X	4	20.3	25.6	30	35.4	38	40.7	43.4		
	H1	C	2	O	X	5	20.3	25.6	30	35.3	38	40.7	43.3		
	H1	C	4	O	X	6	20.3	25.6	30	35.3	38	40.7	43.3		
Set2	H1	C	0	O	X	14	20.3	25.6	30	35.4	38	40.7	43.4	45.1	
	H1	C	-2	O	X	15	20.3	25.6	29.9	35.3	38	40.7	43.3	45.1	
	H1	C	2	O	X	16	20.3	25.6	30	35.3	38	40.7	43.3	45.1	
	H1	C	2	O	X	18	20.3	25.6	30	35.3	38	40.7	43.3	45.1	
	H1	C	4	O	X	17	20.3	25.6	30	35.3	38	40.7	43.3	45.1	
Set3	H1	C	0	OC	X	22	20.3	25.6	29.9	35.3	38	40.7	43.3	45.1	
	H1	C	0	OC	A1,P1	19	20.3	25.5	30	35.3	38	40.7	43.3	45.1	
	H1	C	0	OC	A3,P1	21	20.3	25.6	30	35.3	38	40.6	43.3	45	
	H1	C	0	OC	P1	20	20.3	25.5	30	35.3	38	40.7	43.3	45	
	H1	C	0	OC	P2	23	20.3	25.5	30	35.3	38	40.7	43.3	45.1	
	H1	C	0	OC	P3	24	20.3	25.5	29.9	35.3	38	40.7	43.3		
	H1	C	0	OC	P4	25	20.3	25.6	30	35.3	38	40.6	43.3	45	
	H1	C	0	OC	P5	26	20.3	25.5	30	35.2	38	40.7	43.3	45	
Set4	H1	C	0	X	X	34	20.3	25.5	29.9	35.2	38	40.6	43.3	45	
	H1	C	0	OC	X	37	20.3	25.5	30	35.3	37.9	40.6	43.3	45.1	
	H1	C	0	OC	B1	35	20.3	25.5	30	35.3	38	40.6	43.3		
	H1	C	0	OC	B1	36	20.3	25.5	30	35.3	37.9	40.6	43.3	45	
	H1	C	0	OC	P2	38	20.3	25.5	30	35.3	38	40.6	43.3	45.1	
	H1	C	0	OC	P3	39	20.3	25.5	29.9	35.3	38	40.6	43.3	45.1	
	H1	C	0	OC	P8	40	20.3	25.5	29.9	35.3	38	40.6	43.3	45.1	
	H1	C	0	OC	P8,B1	41	20.3	25.5	29.9	35.3	38	40.6	43.3	45	

	높이	방향	Yaw	덮개	부착물	RUN	Velocity(m/s)								
							1	2	3	4	5	6	7	8	9
Set5	H1	O	0	O	X	7	20.3	25.5	29.9	35.3	38	40.6	43.3	46.8	48.5
	H1	O	2	O	X	8	20.3	25.6	29.9	35.3	38	40.6	43.3	46.8	48.5
	H1	O	4	O	X	9	20.3	25.6	30	35.3	38	40.6	43.3	46.8	48.5
	H1	O	0	X	X	10	20.3	25.5	29.9	35.3	37.9	40.6	43.2		
Set6	H1	O	0	X	X	33	20.3	25.5	29.9	35.2	37.9	40.6	43.3		
	H1	O	0	OC	X	27	20.2	25.5	29.9	35.3	38	40.7	43.3	45	
	H1	O	0	OC	X	28	20.2	25.5	29.9	35.3	38	40.7	43.3	45	
	H1	O	0	OC	P3′	29	20.3	25.5	29.9	35.2	37.9	40.7	43.3	45.1	
	H1	O	0	OC	P4′	30	20.3	25.5	30	35.3	38	40.6	43.3	45	
	H1	O	0	OC	P6′	31	20.3	25.5	30	35.2	38	40.6	43.3	45.1	
	H1	O	0	OC	P7′	32	20.2	25.5	30	35.3	38	40.6	43.3	45.1	
Set7	H2	O	0	X	X	11	20.3	25.5	29.9	35.2	37.9	40.6	43.3		
	H2	C	0	X	X	12	20.3	25.5	30	35.3	38	40.6	43.3		
	H2	C	0	X	X	13	20.3	25.6	29.9	35.3	37.9	40.6	43.4		

다. 공력특성 시험결과

팬터그래프 공력특성은 팬터그래프 축력과 수직력이며, 하부구조물을 포함한 전체 모델의 축력과 수직력은 풍동저울로 측정하였으며, 각각 'Axial force'와 'Bal_Normal'로 표기하였다. 팬헤드 양력을 측정하기 위해 설치한 wire를 통해 측정한 힘은 'Pan head lift'로 표기하였다. 각 측정량은 아래 식과 같이 동압 및 단위면적(1)을 사용하여 무차원화 하였다.

$$C_X = \frac{Axial\,\mathrm{force}}{q};\ C_N = \frac{Normal\,\mathrm{force}}{q}$$

(1) 반복성 점검

측정결과의 반복성을 점검하기 위해 동일한 시험조건에서 연속적으로 시험을 수행한 두 결과의 공력측정결과를 그림 2-1-114 ~ 그림 2-1-116와 같이 비교하였다. Case a는 비상 주행조건, Case b는 정상 주행조건 시험결과이며, 각각 (R)은 반복시험결과를 나타내며 y축의 단위는 [kg]이다. 풍속 40m/s 조건에서 축력은 0.25kg, 풍동저울 수직력은 0.34kg, 팬헤드 수직력은 0.14kg 이내의 차이를 보이고 있다.

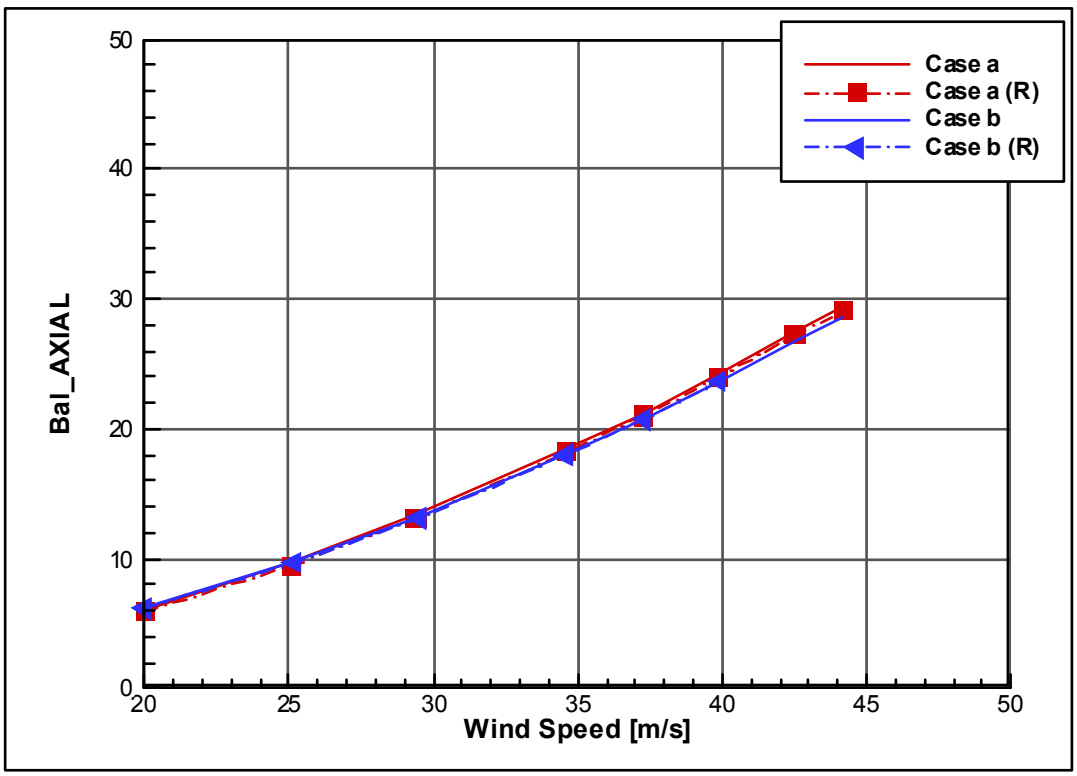


그림 2-1-113 반복성 시험 : 축력

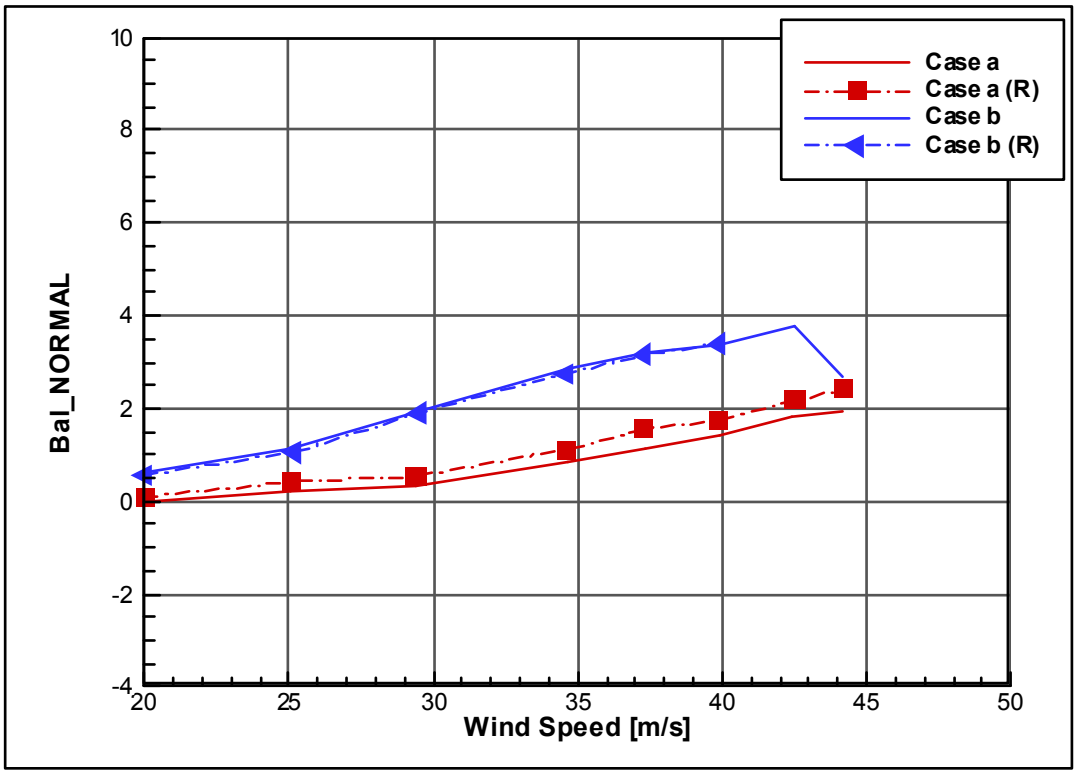


그림 2-1-114 반복성 시험 : 풍동저울 수직력

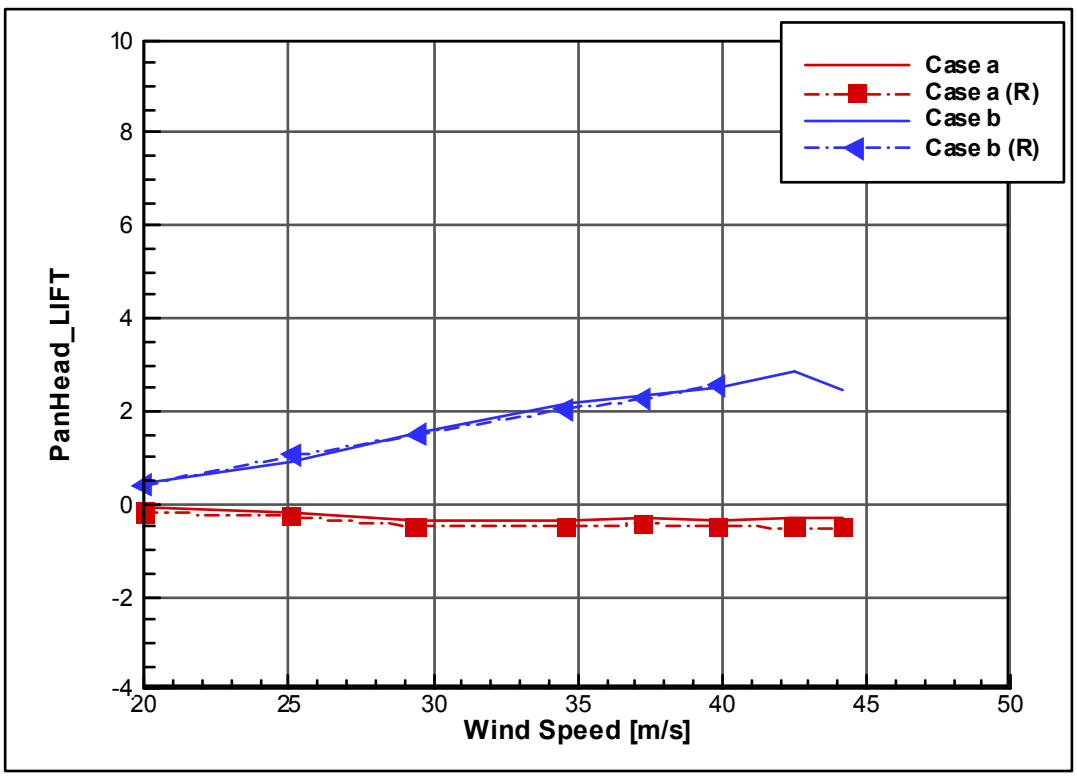


그림 2-1-115 반복성 시험 : 팬헤드 수직력

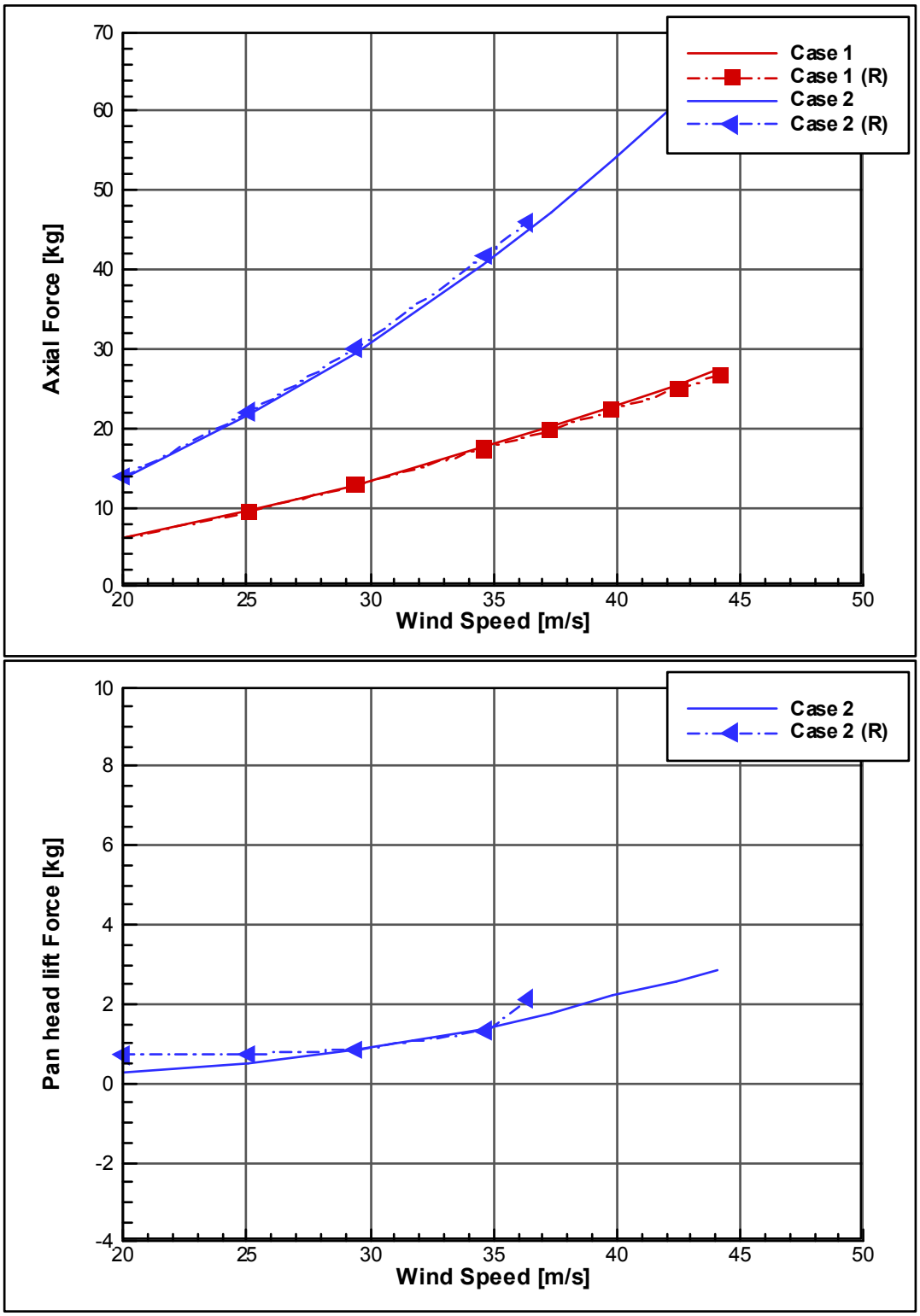
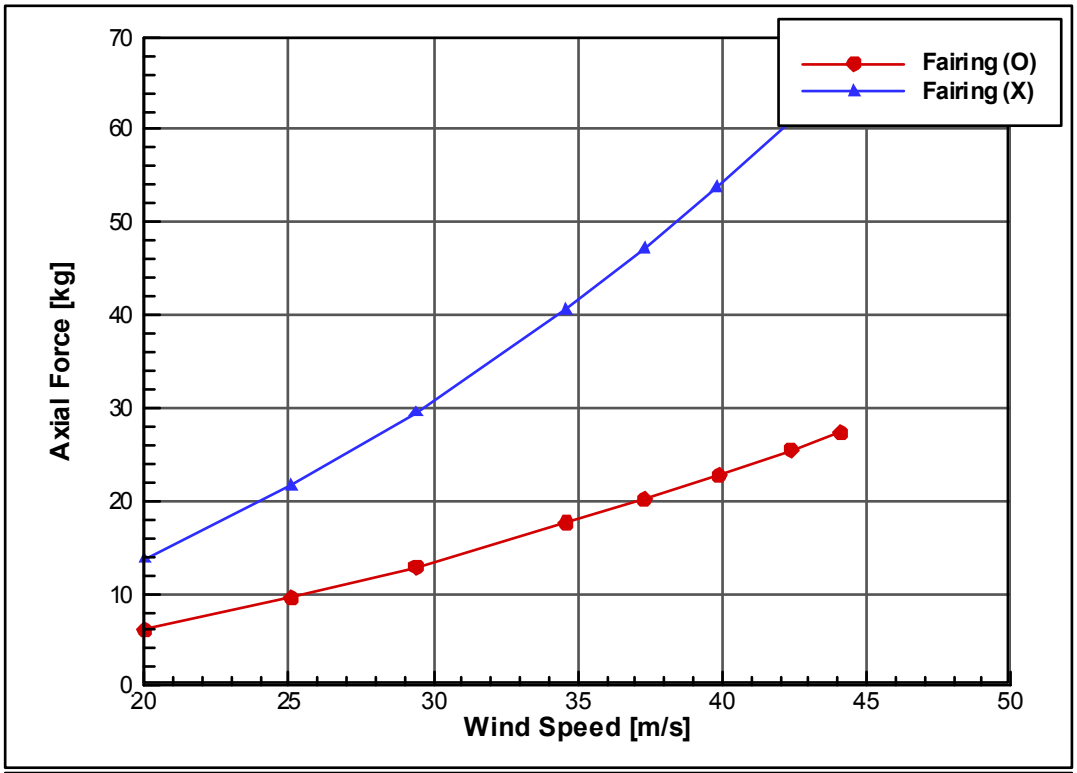


그림 2-1-116 반복성 시험2 : 축력 및 팬헤드 수직력

(2) 하부 덮개 부착에 따른 공력특성 : 기준높이 H1 조건

팬터그래프 모델의 하부구조물의 소음간섭을 방지하지 위해 앞서 기술한 바와 같

이 하부덮개를 장착하여 시험을 수행하였다. 하부덮개가 공력에 미치는 영향을 파악하기 위해 덮개가 설치된 상태와 (Fairing(O)) 덮개를 제거한 상태의 (Fairing(X)) 공력을 그림 2-1-117 ~ 그림 2-1-118에 비교하였다. 하부덮개는 축력에는 큰 영향을 미치고 있으나, 수직력에 미치는 영향은 0.3kg 이내로 미미한 것으로 나타났다.



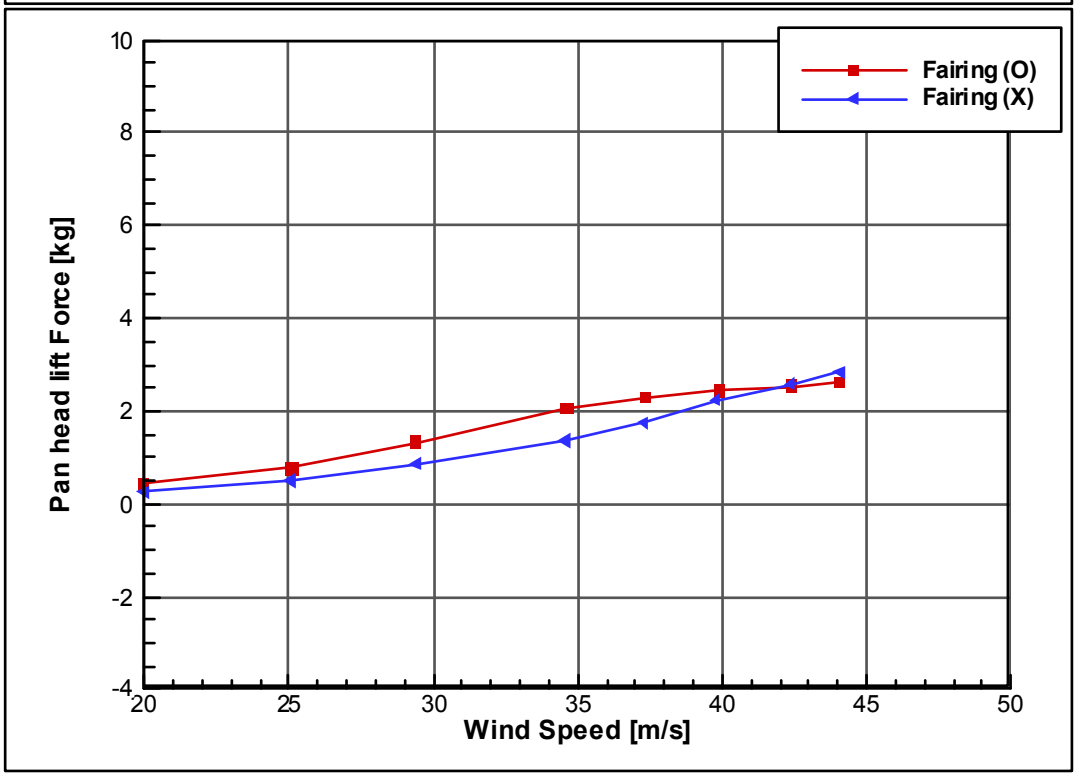
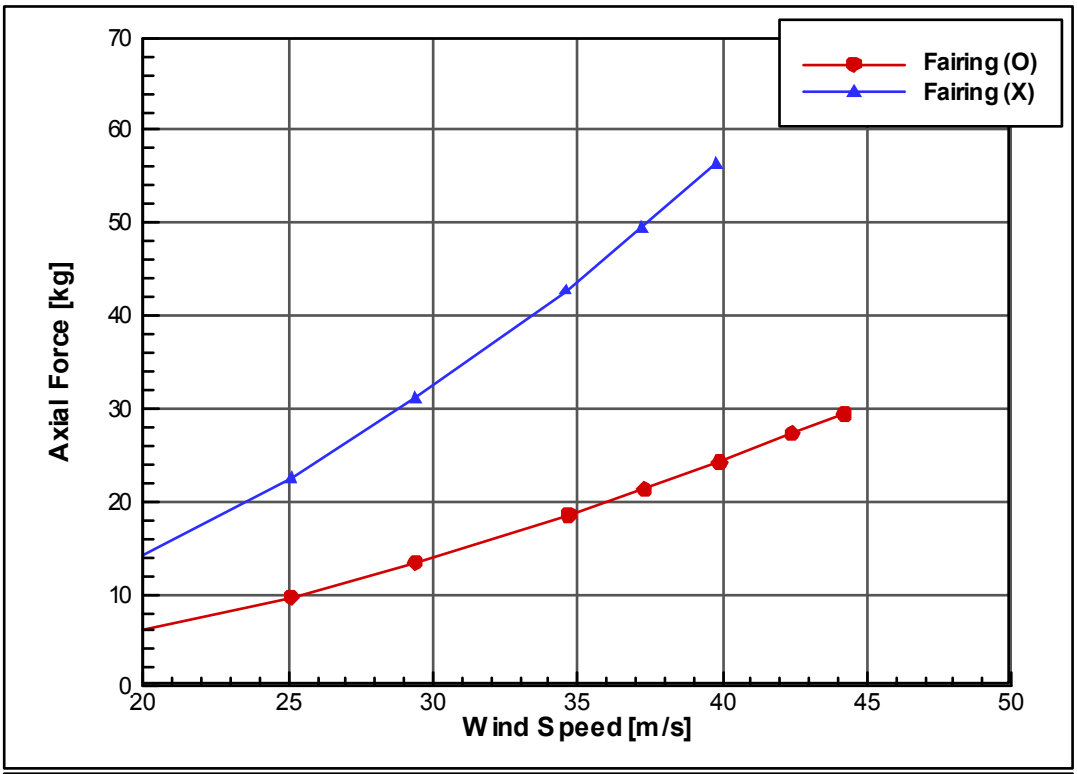


그림 2-1-117 하부덮개의 영향 : 정상 주행조건



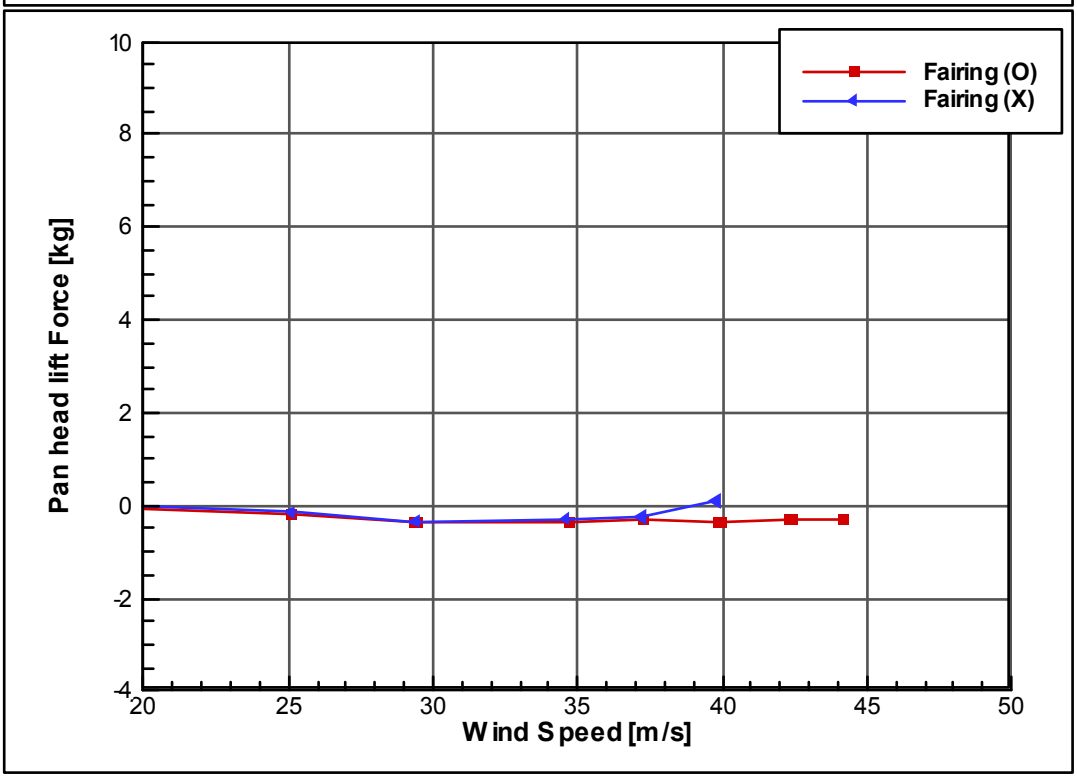
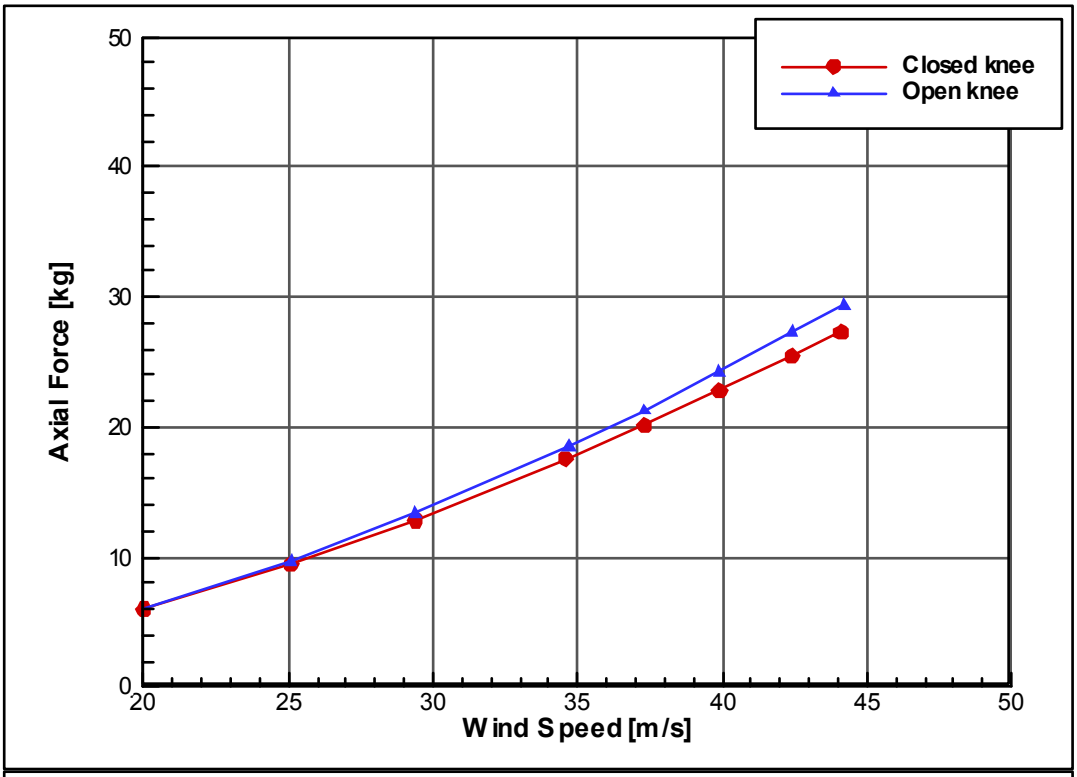


그림 2-1-118 하부덮개의 영향 : 비상 주행조건

(3) 주행 방향에 따른 공력특성 : 기준높이 H1 조건

정상 주행조건 및 비상 주행조건의 공력이 그림 2-1-119 에 나타나 있다. 비상

주행조건의 축방향 항력이 더 크게 나타나고 있다. 축력 계수 C_X로 비교할 경우 비상조건/정상조건 = 0.228/0.210 ~ 1.09로 비상조건이 정상조건에 비해 약 9%의 항력이 추가로 발생하고 있다. 수직력의 경우 정상조건의 경우 40m/s 이상 조건에서 약 2.5kg의 수직력이 발생하고 있으나, 비상조건에서는 수직력이 발생하지 않는 것으로 나타났다.



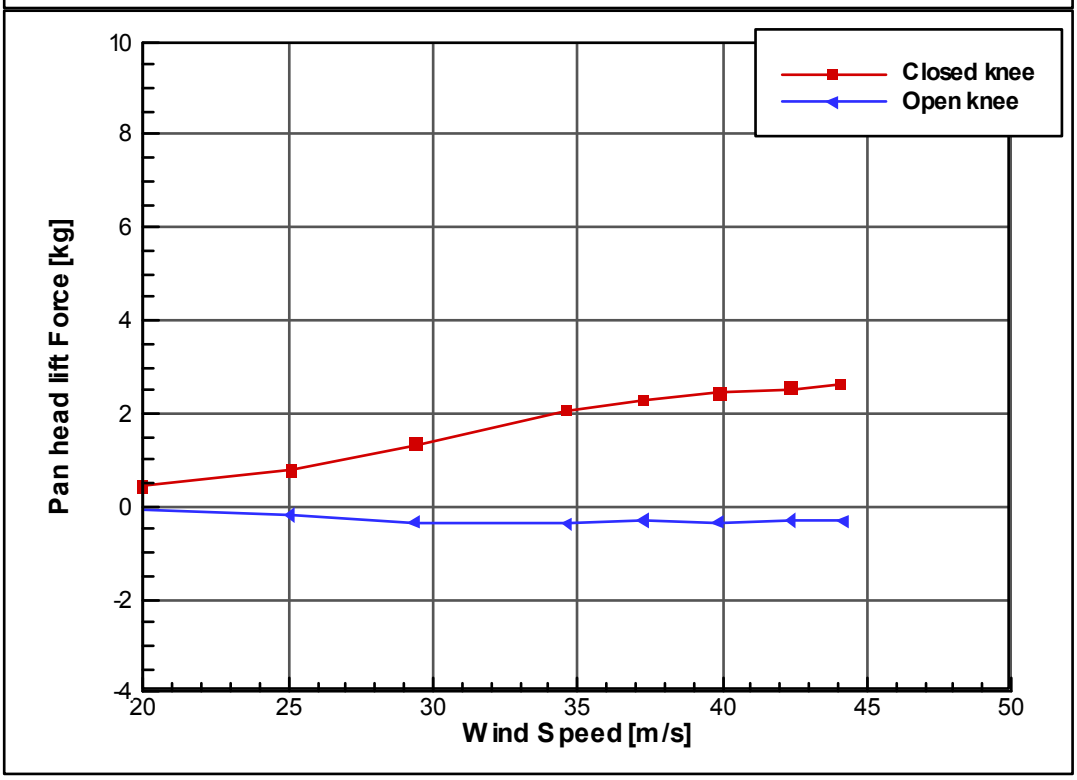


그림 2-1-119 주행방향에 따른 공력특성

(4) 팬헤드 높이에 의한 영향

팬헤드 작동 높이에 따른 공력특성이 그림 1-3-8에 나타나 있다. H1은 기준점으로부터 1253mm에 팬헤드가 위치하며, H2는 903mm에 팬헤드가 위치한다. 팬헤드의 높이가 높을수록 축방향 항력이 증가하고 있으며, H1 형상조건이 H2 형상조건에 비해 항력계수 C_X가 0.02 크게 나타나고 있다. 팬헤드 수직력은 비상조건에서는 H1, H2조건 모두 수직력이 발생하지 않고 있으며, 정상조건에서는 H1 형상조건이 H2 형상조건에 비해 수직력계수 C_N이 0.005 크게 나타나고 있다.

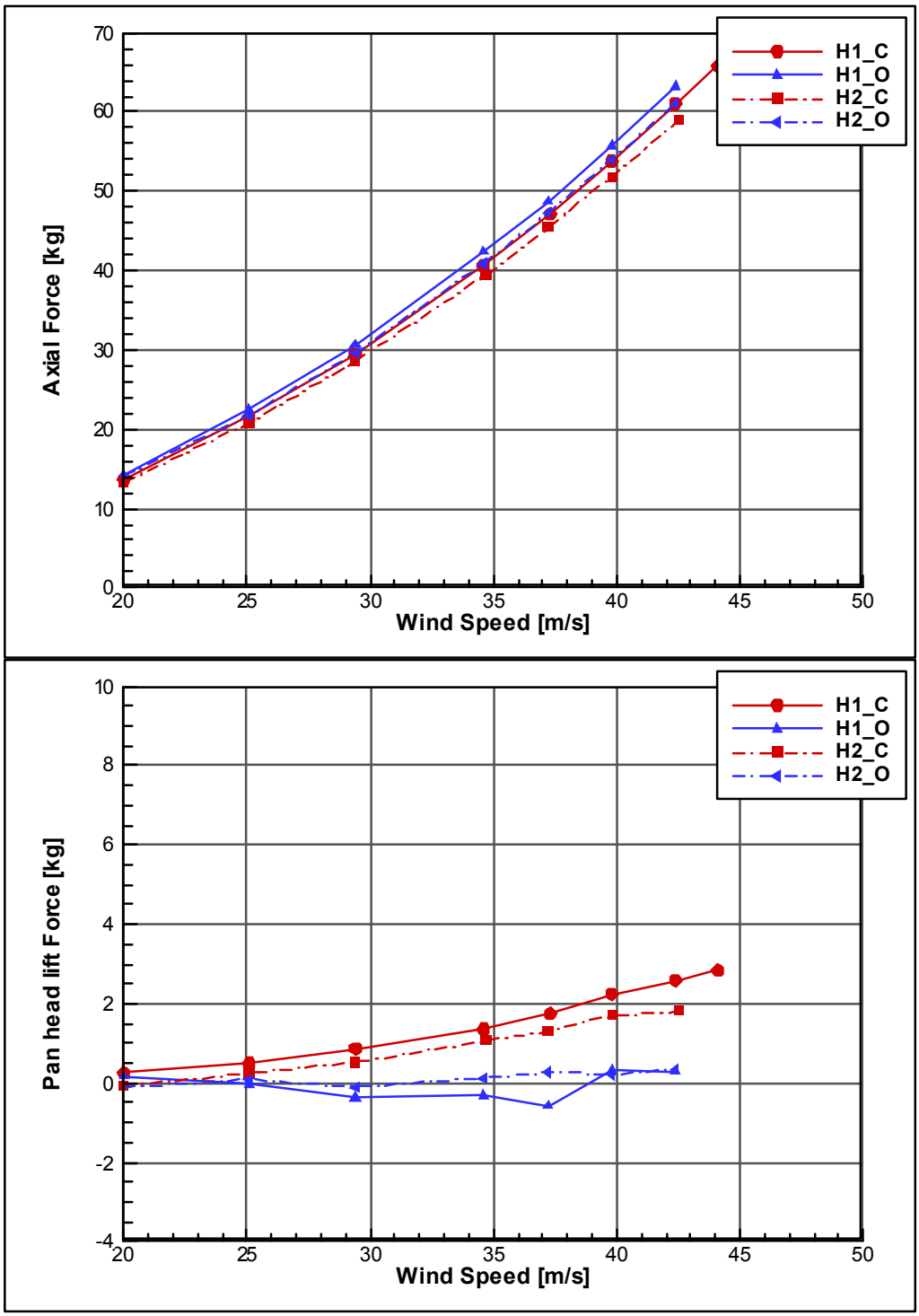


그림 2-1-120 팬헤드 높이에 따른 공력특성

(5) 측풍에 의한 영향

측풍에 의한 영향을 파악하기 위해 팬터그래프와 흐름의 각도를 -2, 0 , 2, 4도로 변화하며 시험을 수행하였다. 측풍에 의한 공력특성의 변화는 그림 2-1-121과 같이 축방향 항력과 수직력 모두 미세하게 감소하는 형태로 나타나고 있다.

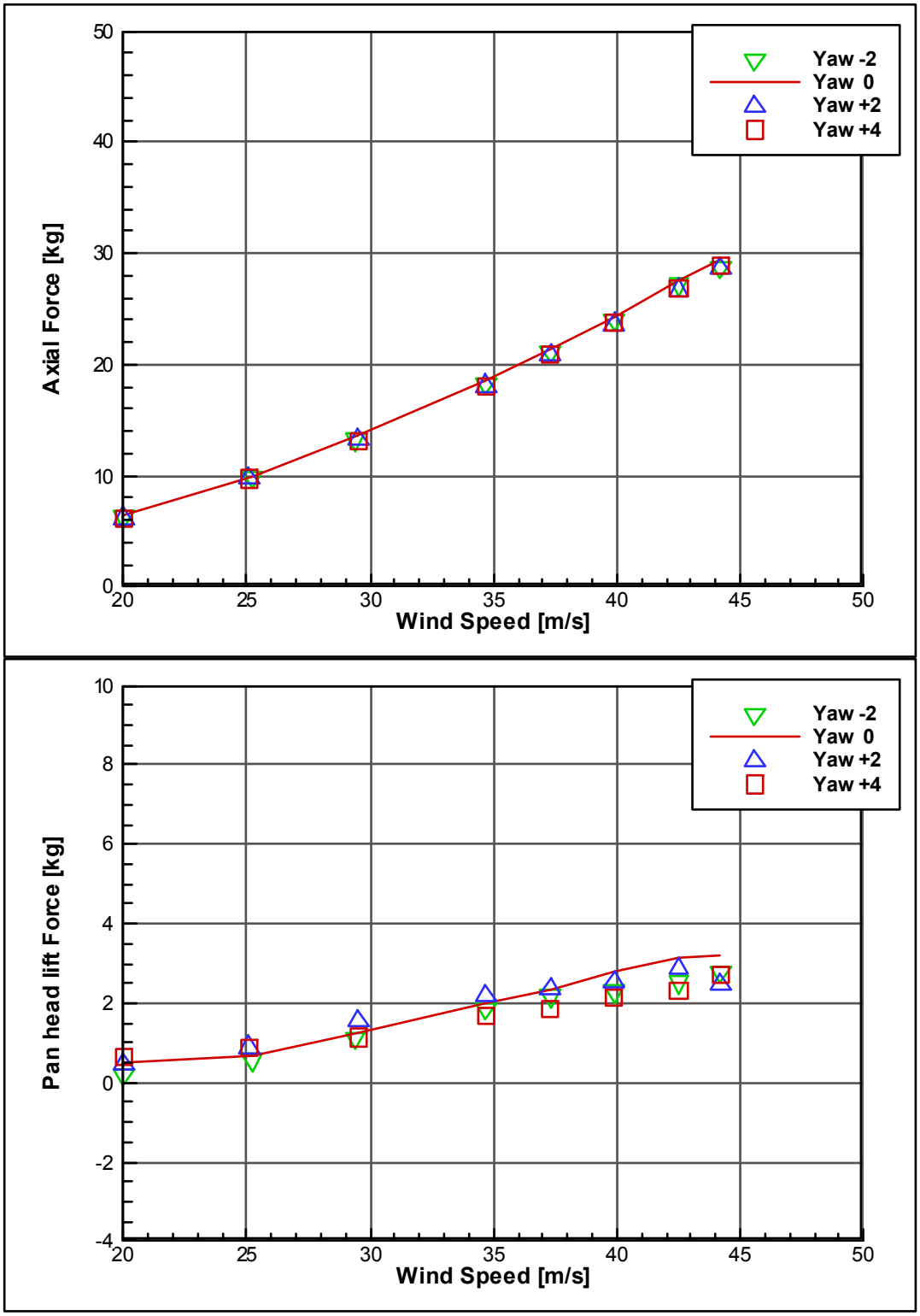


그림 2-1-121 측풍에 의한 영향

(6) 팬헤드 부착물에 의한 영향

팬헤드 형상에 따른 소음특성을 파악하기 위해 그림 2-1-122과 같은 부착물을 임시로 제작하여 사각단면을 갖는 팬헤드에 부착하였다.

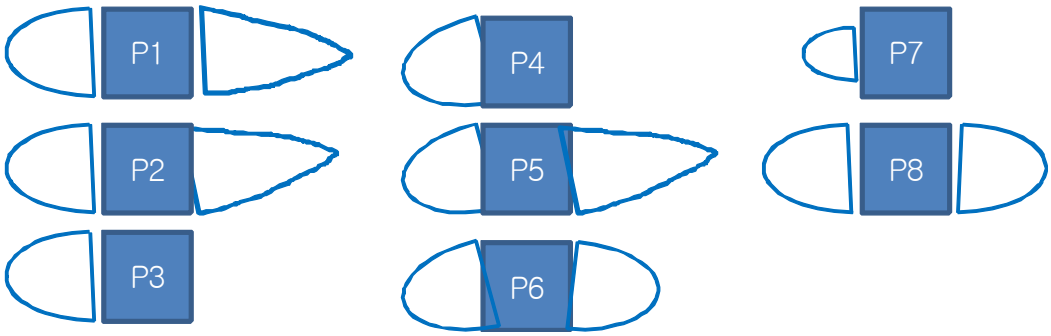


그림 2-1-122 팬헤드 부착물 형상



그림 2-1-123 팬헤드 부착물

그림 2-1-124 에 팬헤드 부착물에 따른 공력변화를 기준형상('Base')과 비교하였다. 팬헤드에 부착물을 부착하여 사각단면에 의한 흐름박리를 줄였을 경우 축방향 항력은 감소하며, 수직력은 증가하는 경향이 나타나고 있다. 축방향 항력은 항력계수 C_X로 0.21에서 0.18로 감소하였으며, P1과 P5, P8이 가장 큰 감소효과를 나타내었다. 팬헤드 수직력은 모든 부착물 조건에서 증가하고 있으며, P1, P4, P5가 가장 작은 증가폭을 보여주고 있다. P8 형상시험의 경우 팬헤드의 진동특성을 파악하기 위해 팬헤드 풍동저울을 동특성 DAQ 장비에 연결하였으므로 직접적인 평균 수직력 비교는 수행하지 않았다.

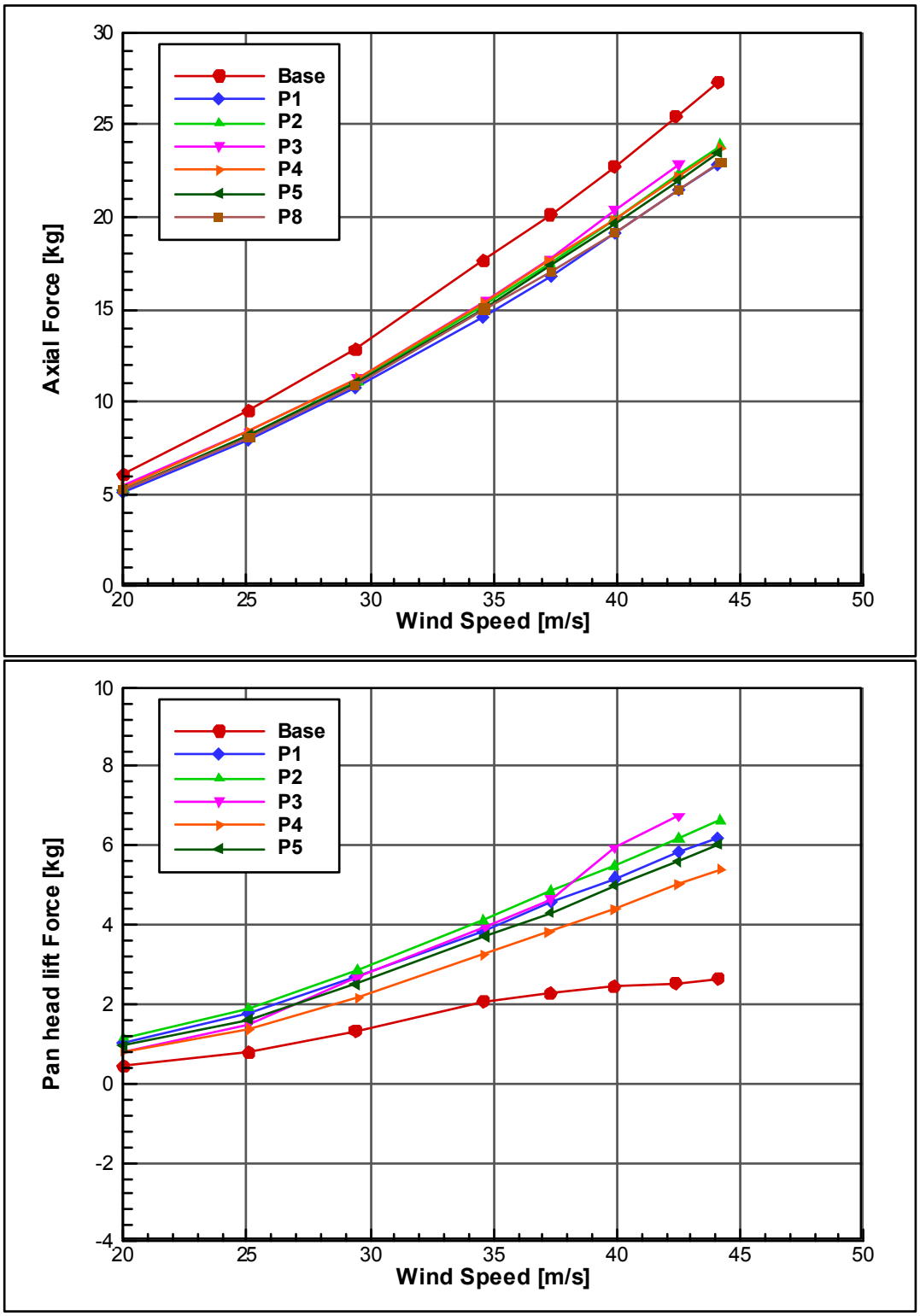


그림 2-1-124 팬헤드 부착물에 의한 공력변화

(7) 암 부착물에 의한 영향

팬터그래프 암에 발생하는 흐름을 변화하여 소음을 저감하는 방안에 대해 검토하기 위해 그림 2-1-125 및 그림 2-1-126과 같이 주암과 헤드암에 부착물을 부착하여 시험을 수행하였다. 주암에는 후방부에 주암 직경의 1배(A1) 또는 3배(A3)의 평판을 수직으로 부착하여 시험을 수행하였으며, 헤드암에는 그림 1-3-14(우)와 같은 형상을 전/후에 부착하여 전반적으로 타원형상(B1)이 되도록 하였다.

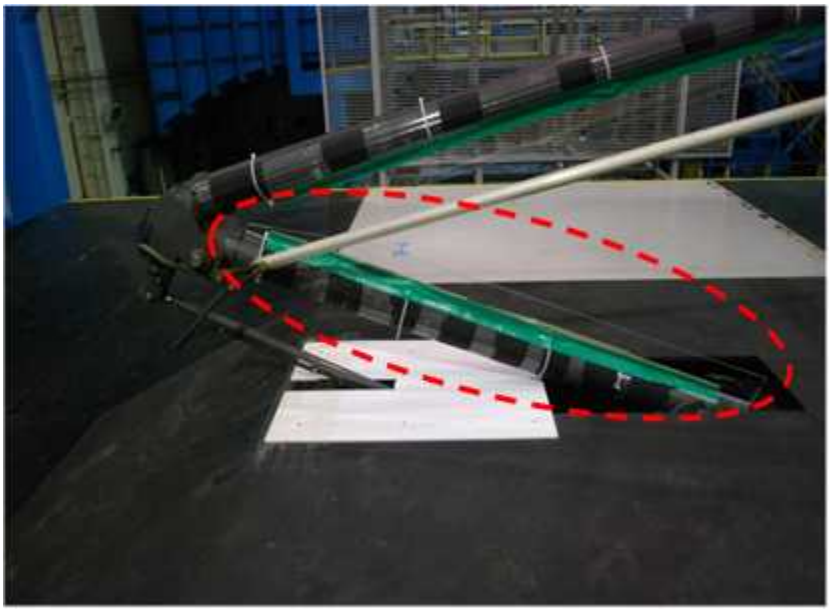


그림 2-1-125 주 암 부착물

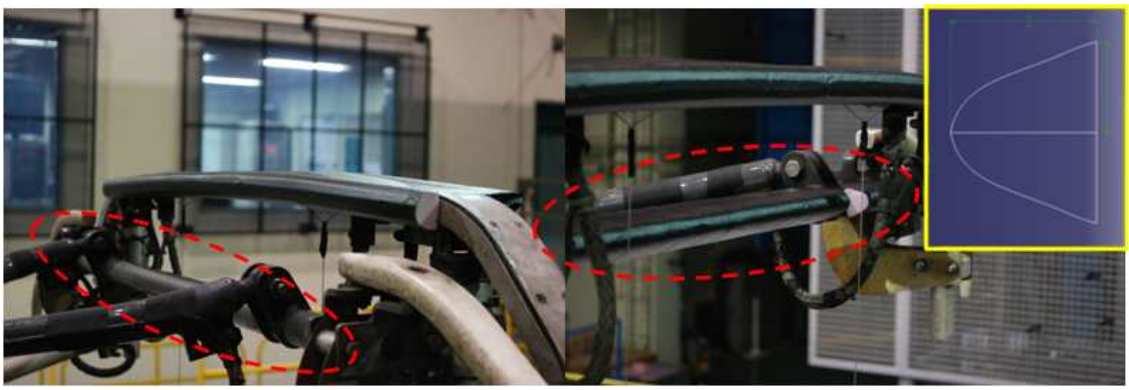


그림 2-1-126 팬헤드 암 부착물

그림 2-1-127에 주암 부착물에 따른 공력변화를 기준형상('P1')과 비교하였다. 주암 부착물은 항력 및 수직력에 변화를 주지 않는 것으로 나타났다. 헤드암 부착물은 그림 2-1-128과 같이 축방향 항력을 감소시키고 있으며, 항력계수 C_X로는 약 0.005정도의 감소효과를 보이고 있다. 수직력의 경우 진동특성 시험을 위해 센서를 동특성 장비에 연결하였으므로, 팬헤드 수직력이 아닌 풍동저울 수직력을 비교하였다. 헤드암 부착물은 수직력을 약 1kg 정도 감소시키는 형태로 나타났다.

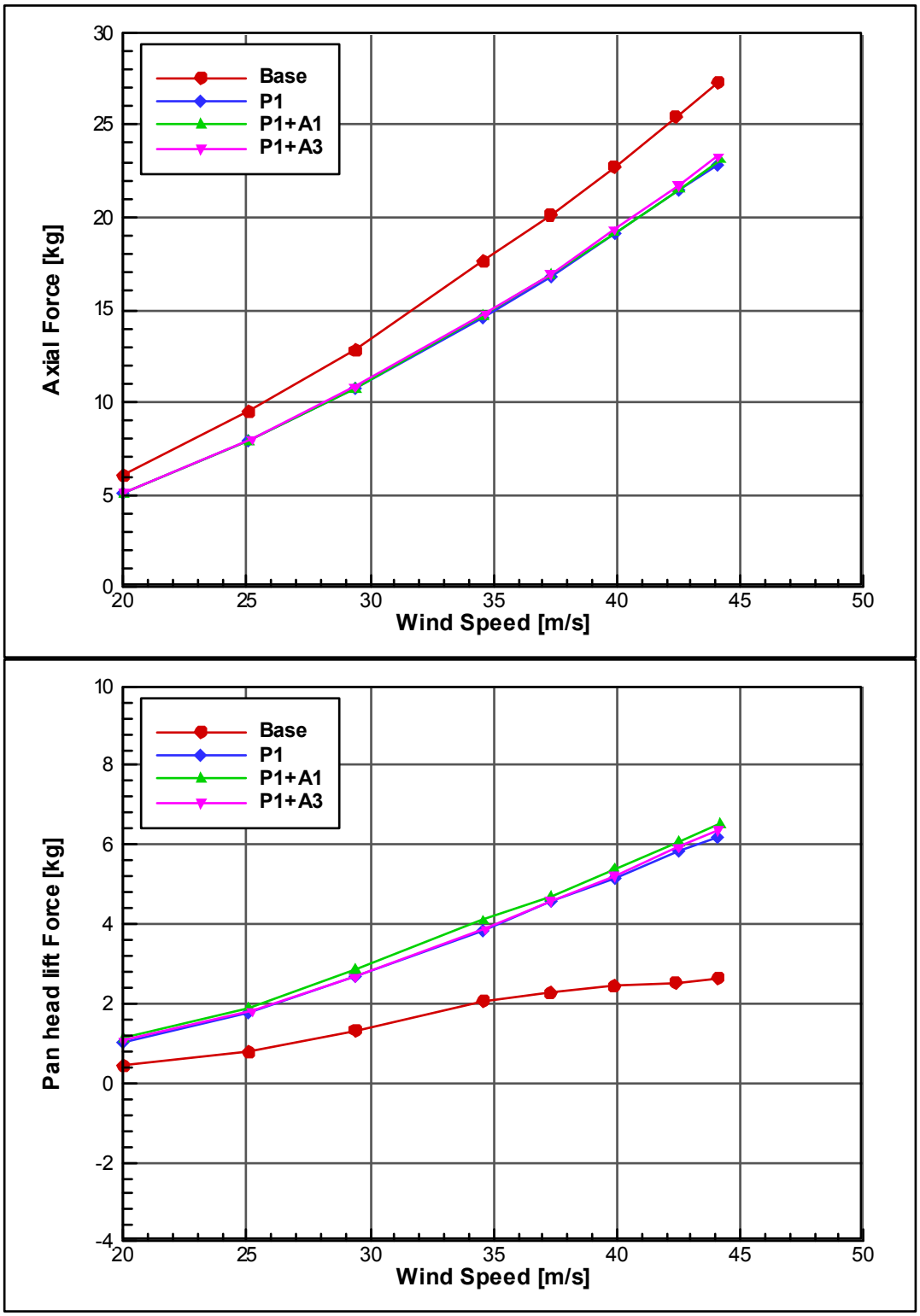


그림 2-1-127 주암 부착물에 의한 공력특성 변화

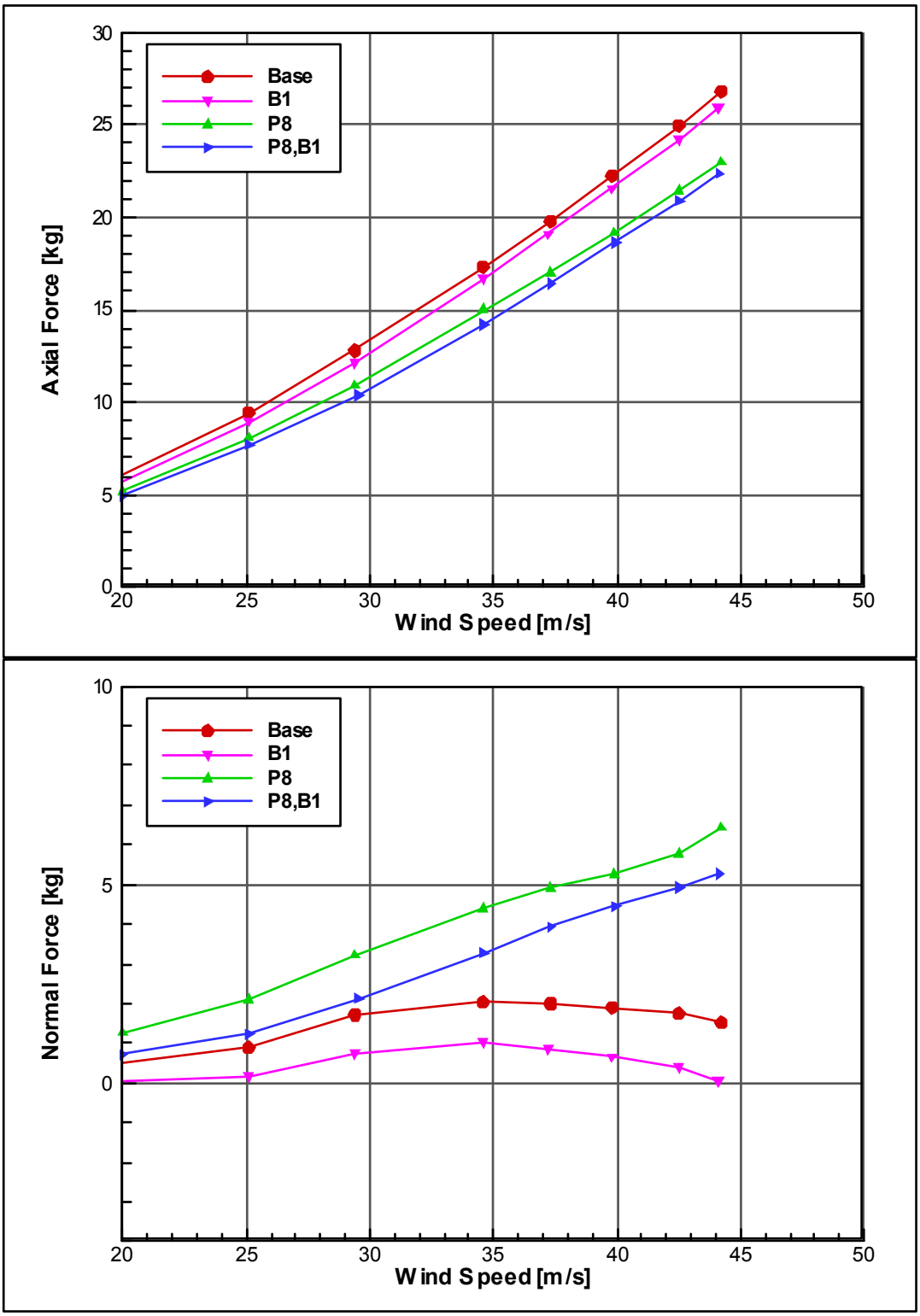


그림 2-1-128 헤드암 부착물에 따른 공력특성 변화

(8) 팬헤드 수직력 진동특성

고속철도 차량이 고속으로 주행중에 팬터그래프 수직력이 큰 폭으로 진동하는 현상을 파악하기 위해 팬헤드 수직력을 동특성 DAQ 장비에 연결하여 그림 2-1-129 와 같이 32kHz로 10초동안 수직력 데이터를 측정하였다. 아울러 팬헤드 부착물이 수직력 진동특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 팬헤드에 부착물을 부착한 후 시험을 수행하였다.

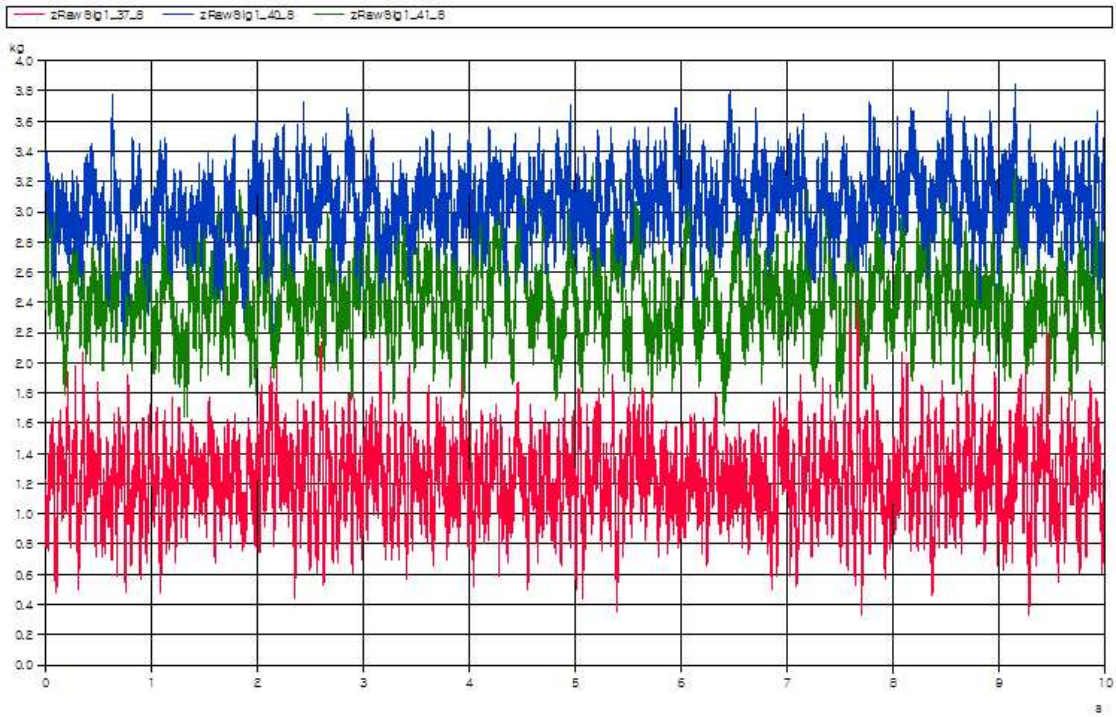


그림 2-1-129 팬헤드 수직력의 동적특성

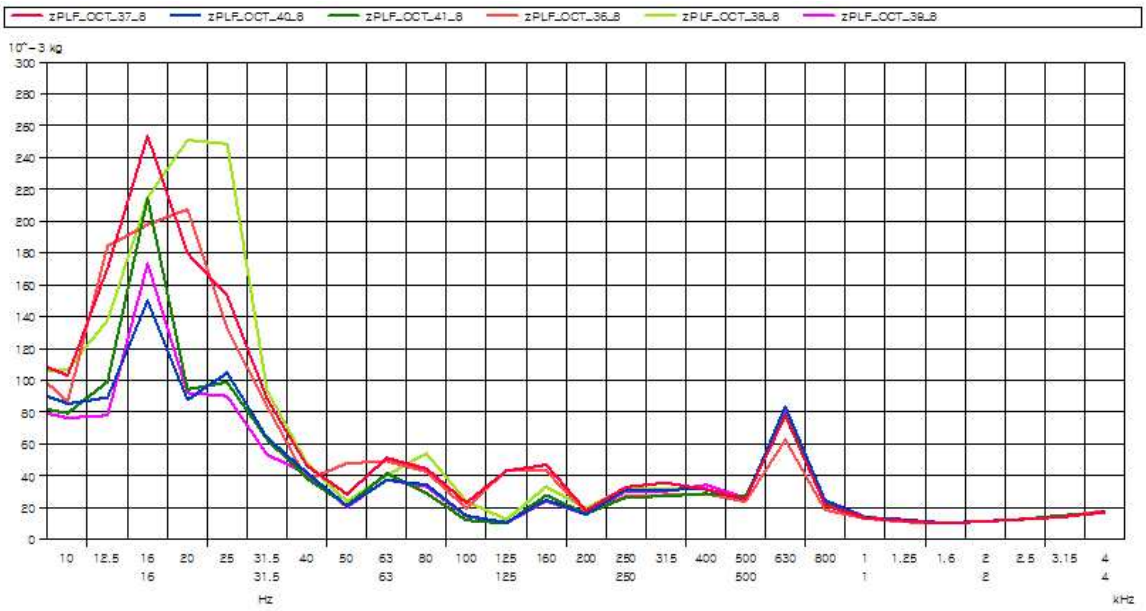


그림 2-1-130 수직력 1/3 옥타브밴드 스펙트럼(speed : 45m/s)

수직력의 동적특성을 평가하기 위해 각 센서(2개)에서 측정된 수직력 데이터를 1/3 옥타브밴드 스펙트럼 분석을 수행하였다. 그림 2-1-130에서 16~25Hz 밴드영역에서 팬헤드 수직력의 주 진동특성이 나타나고 있다. 또한, 팬헤드에 부착물을 부착하지 않은 시험조건(R37, R35)의 경우 팬헤드 사각단면의 shedding 주파수 영역인 125Hz 밴드에서 또 다른 진동특성이 나타나고 있다. 630Hz 밴드영역에서는 모든 시험결과가 유사한 진동특성을 나타내고 있는 것으로 비추어 시험모델 및 설비에서 전파된 진동특성으로 추정된다. 팬헤드 수직력 주 진동특성은 P8 형상조건에서 가장 작은 값을 나타내고 있으며 기준형상대비 약 40% 진동특성값이 감소되었다. 125Hz 밴드 영역 진동특성은 헤드암 부착물에는 영향을 받지 않으나, 팬헤드에 부착물을 부착한 모든 시험조건에서 피크형태가 감소된 것을 알 수 있다.

부착물 형상에 따른 진동특성을 파악하기 위해 형상별 평균수직력 및 overall spectrum을 비교하였다. 그림 2-1-132에서 헤드암 부착물은 평균수직력을 크게 감소시키고 진동특성은 약간 감소시키는 역할을 하고 있으며, 팬헤드 부착물은 평균수직력은 증가시키나 진동특성은 크게 감소시키는 역할을 하고 있다. 팬헤드 및 팬헤드 암에 부착물을 부착한 경우(P8+B1) 기준형상에 비해 overall spectrum이 약 30% 감소되는 것으로 나타났다. 그림 2-1-132에 기준형상 및 P8+B1형상의 풍속에 따른 overall spectrum을 비교하였다. 모든 풍속조건에서 overall spectrum이 약 30% 감소한 특성을 보이고 있다.

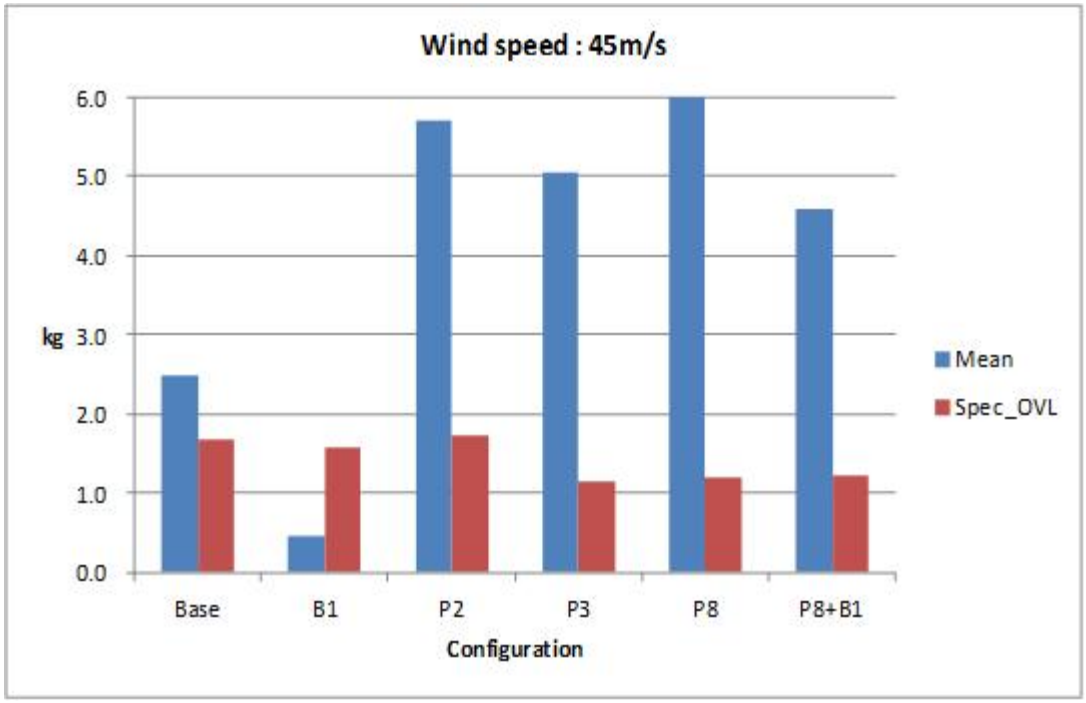


그림 2-1-131 형상에 따른 팬헤드 동적특성 시험결과

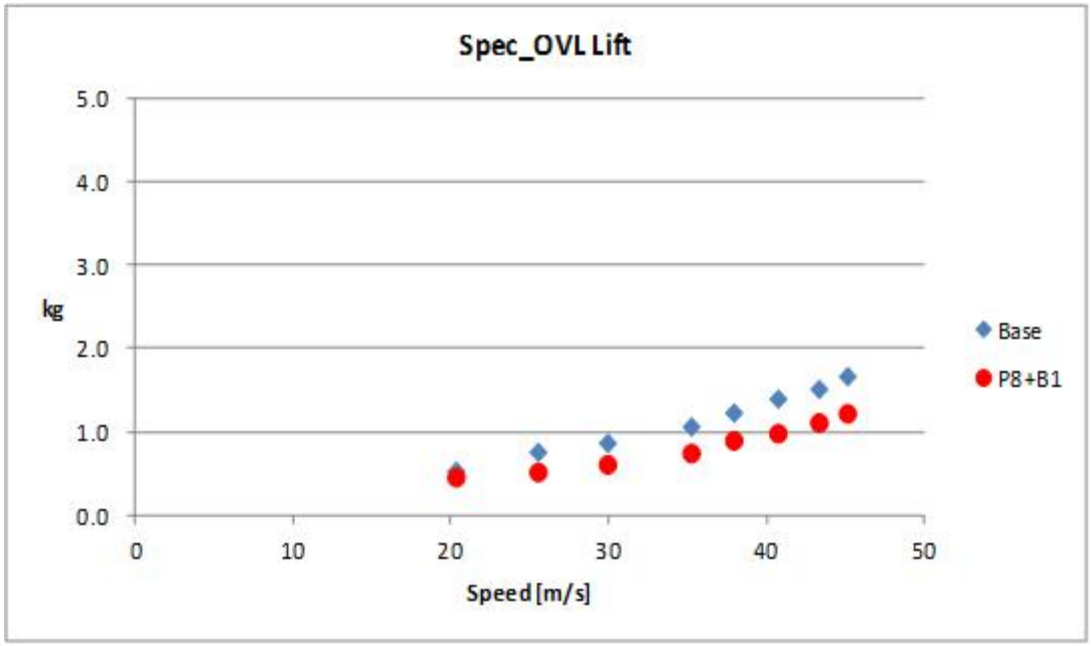


그림 2-1-132 풍속에 따른 수직력 동특성 변화

라. 소음특성 시험결과

(1) 소음측정결과 분석 방법 : 분석 주파수 영역설정

팬터그래프 소음은 총 83개의 마이크로폰을 이용하여 측정하였다. 풍속 45m/s에

서 측정된 마이크로폰 신호의 주파수 특성은 4kHz까지는 주파수에 따라 소음감소하는 일반적인 광역소음의 형태를 나타내고 있으며, 9kHz 영역에서 강한 피크가 발생하고 있다. 9kHz 소음피크는 팬터그래프 수직력을 측정하기 위해 설치한 wire에서 발생하는 소음이므로 팬터그래프 소음특성과는 무관한 음원이다. 이러한 wire 소음이 7kHz 이상에서는 전체 측정에 큰 영향을 주고 있으며, 팬터그래프에서 발생되는 소음은 4kHz 이하의 영역에서 주로 발생되고 있으므로 마이크로폰 신호는 32kHz의 획득률로 데이터를 획득하였으며, 스펙트럼 분석은 4kHz 영역까지만 수행하였다.

소음측정 결과분석은 팬터그래프 소음원 특성을 파악하기 위해 빔포밍분석기법을 활용하여 주 소음원의 위치 및 크기 특성을 분석하였으며, 100Hz의 낮은 주파수에서 발생되는 소음 특성을 파악하기 위해 팬헤드 높이에 설치된 마이크로폰 신호의 1/3 옥타브밴드 스펙트럼을 분석하였다.

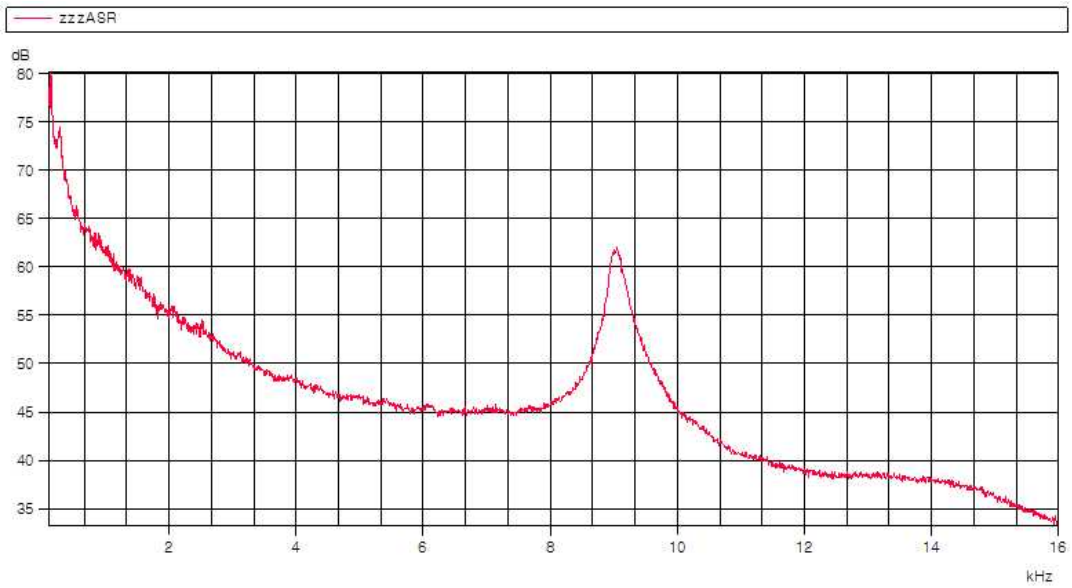


그림 2-1-133 마이크로폰 신호 특성

(2) 마이크로폰 어레이 점검

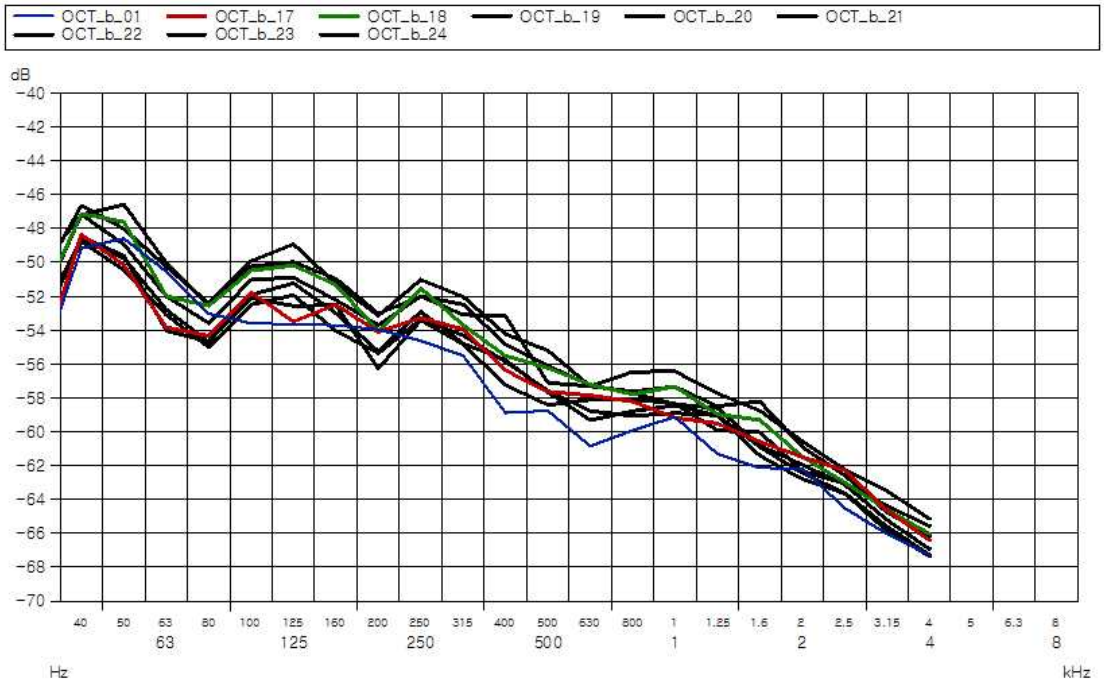


그림 2-1-134 마이크로폰 어레이 출력특성 점검 : 주파수 특성

시험에 사용된 마이크로폰 어레이의 상태를 점검하기 위해 각 마이크로폰의 출력 특성을 비교하였다. 출력특성은 그림 2-1-134와 같이 1/3 옥타브밴드 스펙트럼 비교를 통해 마이크로폰의 주파수 응답특성을 점검하였으며, 그림 2-1-135과 같이 동일 주파수 밴드에서 각 마이크포론의 SPL을 공간상에서 비교하여 공간적으로 특이사항이 있는지를 점검하였다. 또한, 그림 2-1-136 과 같이 동일한 시험조건에 대한 마이크로폰 신호의 반복성을 점검하였다.

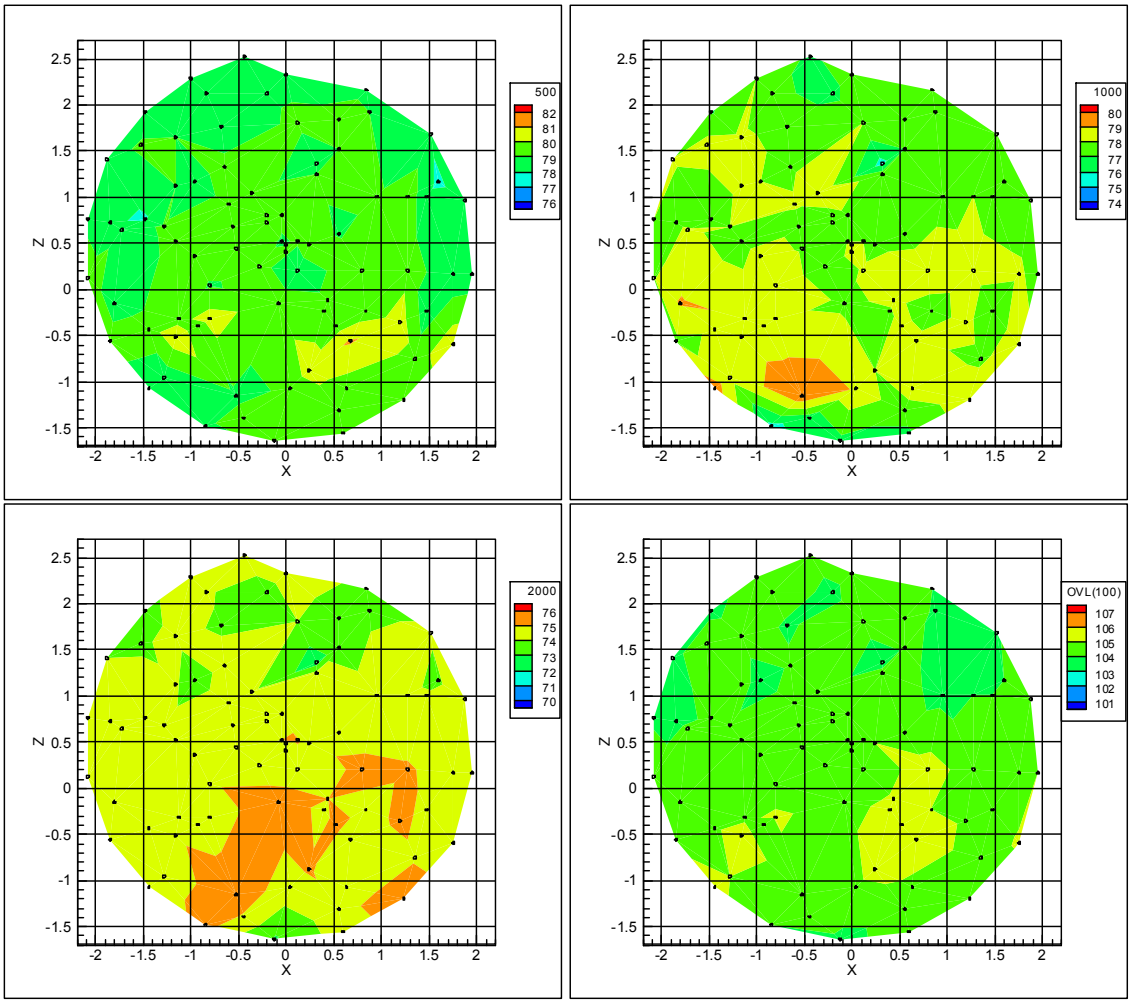


그림 2-1-135 마이크로폰 출력특성 점검 : 공간분포

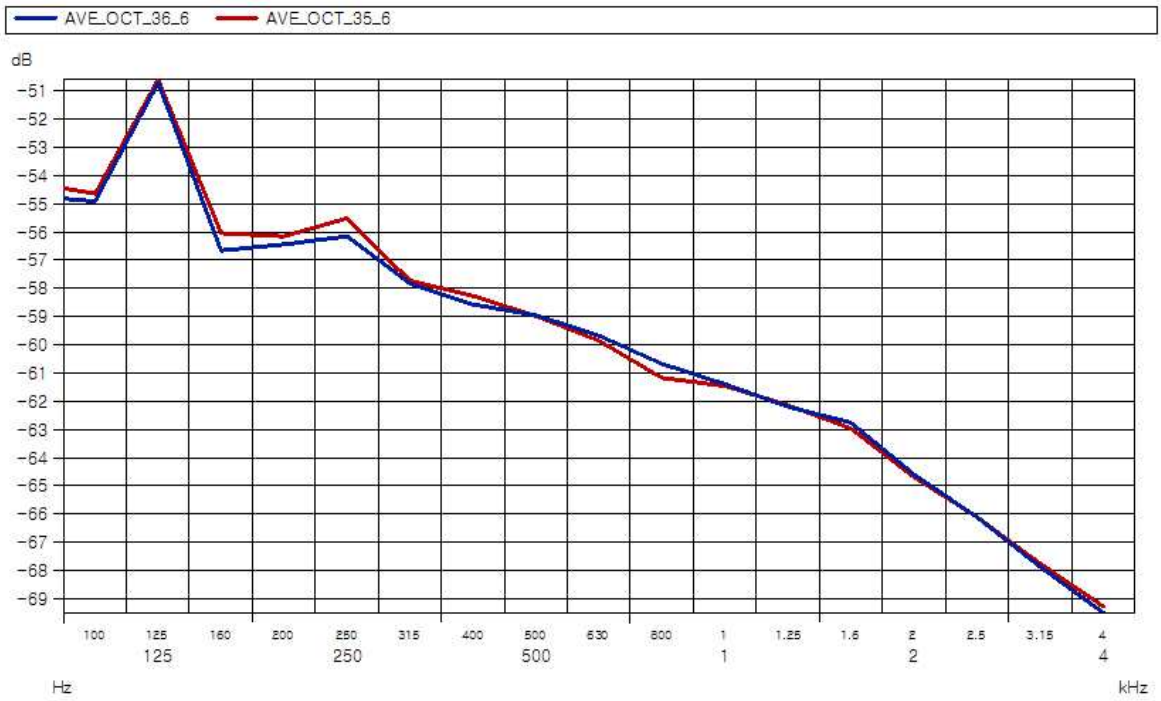


그림 2-1-136 소음신호 반복성 점검

시험조건과 동일한 풍속에서 시험모델이 장착되지 않은 상태에서 측정한 배경소음(background noise)과 시험모델이 장착된 상태에서 측정한 소음을 비교한 결과는 그림 2-1-137와 같이 400Hz 이상에서는 6dB 이상의 차이를 보이고 있으며, 100Hz ~ 200Hz 구간에서는 2dB 정도의 차이를 보이고 있다. 100Hz 미만에서는 배경소음과 시험측정소음의 차이기 크지 않으므로 시험해석은 100Hz 이상의 영역에 대해서만 수행하였다.

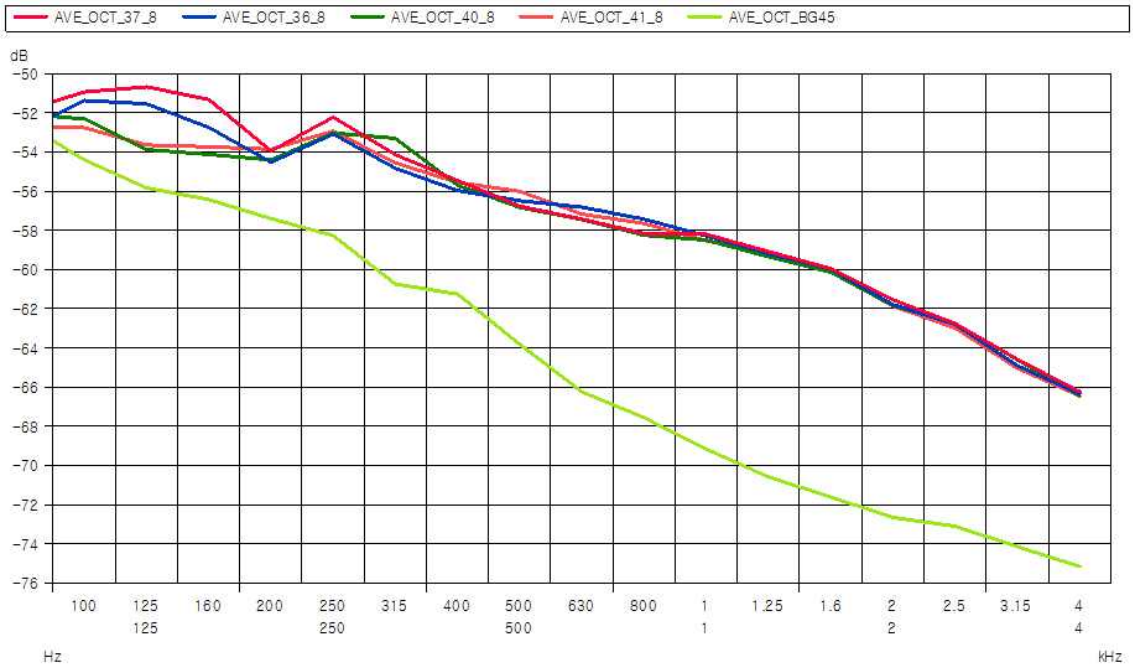


그림 2-1-137 배경소음 비교

(3) 빔포밍 분석 기법

시험에 적용된 빔포밍 분석은 주소음원의 위치를 파악하는 기법으로 분석원리는 다음과 같다.

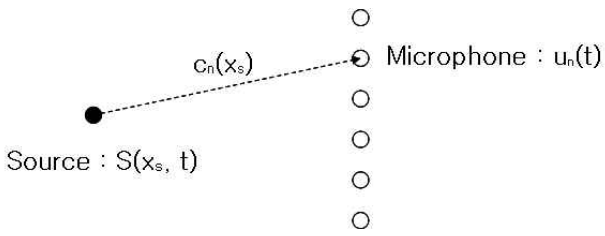


그림 2-1-138 빔포밍 측정 기법

마이크로폰 어레이를 이용한 빔포밍 시험기법은 각 마이크로폰에서 측정된 신호가 갖는 위상정보를 활용하여 소음이 발생하는 위치를 파악하는 시험기법으로 그림 2-1-138과 같이 마이크로폰에서 측정된 신호(u)의 상호간섭영향(Cross Correlation) 함수를 사용하여 시험모델의 각 위치에서 발생되는 소음의 크기를 파악한다. 빔포밍 함수 $b(x_b)$를 주파수영역에서 표현하면 아래와 같이 나타나며, 음원의 위치를 파악하기 위해 사용되는 방향성벡터($w(x_b)$)는 단순음원(Monopole) 특성함수가 일반적으로 사용되고 있다.

$$b(x_b;t) = < \left| \overrightarrow{w^*}(x_b)\overrightarrow{u}(t) \right|^2 \geqq \overrightarrow{w^*} A \overrightarrow{w}(x_b)$$

$$b(x_b;\omega) = \vec{w}^{*}(x_b) < \vec{F}^{*}(\omega)\vec{F}^{*}(\omega) > \vec{w}(x_b) = \vec{w}^{*}(x_b)R\vec{w}(x_b) \qquad \text{(식 2-1)}$$

$$\vec{w}(x_b) = \frac{\vec{C}(x_b)}{\| \vec{C}(x_b) \|}, \quad C_n(x_s) = \frac{e^{-iw\sigma(x_n,x_s)}}{D(x_n,x_s)}$$

빔포밍 기법을 사용하여 분석한 결과는 그림 2-1-139와 같이 각 위치에서 상대적인 음원강도에 따른 contour로 나타내었다. 빔포밍 해석은 흐름방향으로 팬터그라프 전영역을 포함하는 영역에 대해 수행하였으며, 높이방향으로 팬헤드 상부 0.2m 영역까지 해석을 수행하였다. 해석영역 내에서 가장 큰 음원강도(빔함수 값)를 기준으로 -6dB 까지 표현하여 주음원의 위치를 명확히 구분할 수 있도록 하였다. 빔포밍 해석 결과는 1/3 옥타브 밴드를 기준으로 각 주파수별 주음원을 나타내는 방식으로 표현하였다.

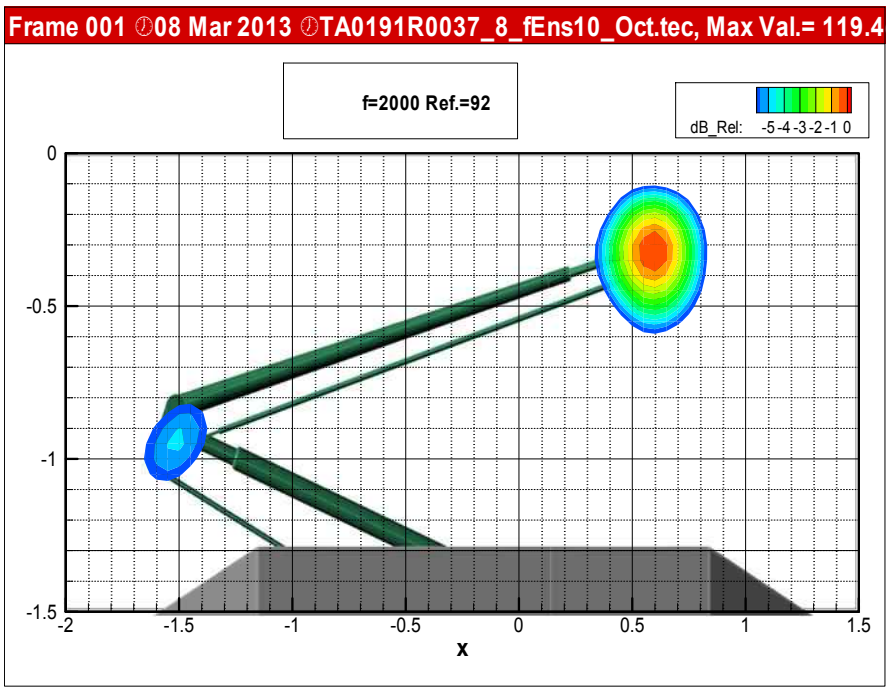


그림 2-1-139 빔포밍 분석 결과 예

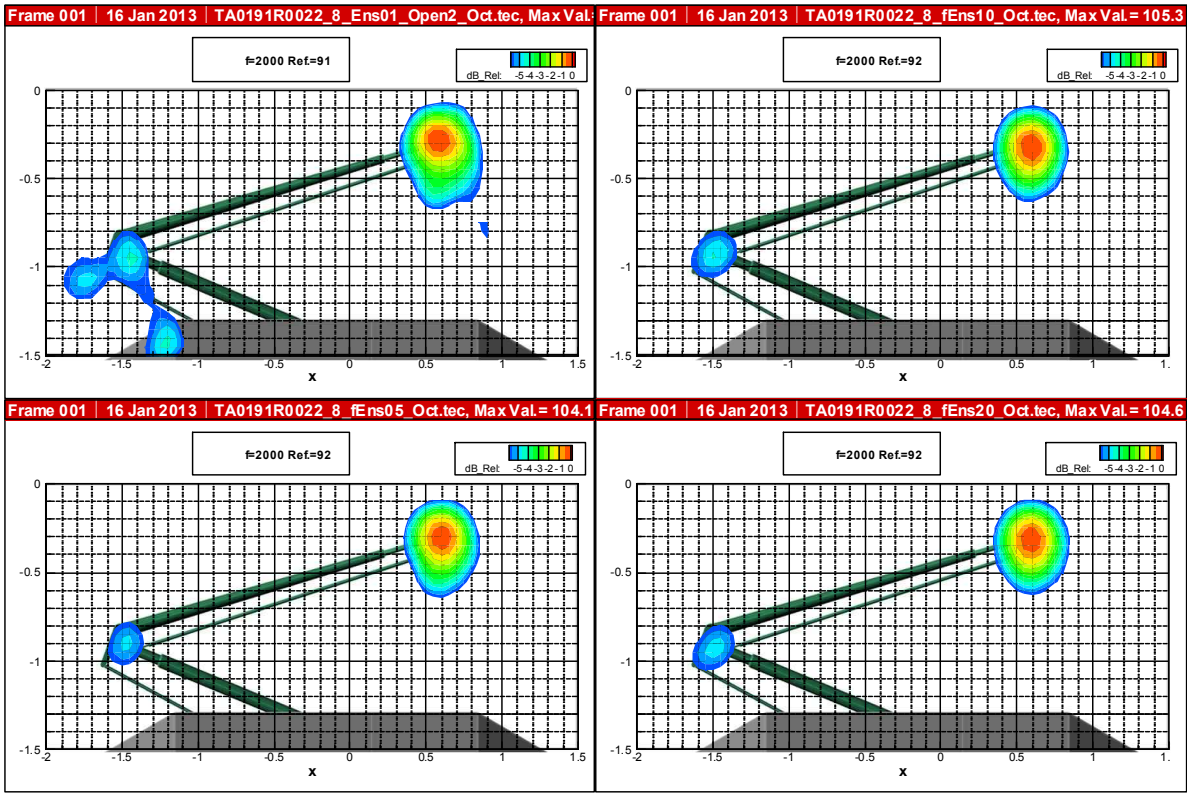


그림 2-1-140 Ensemble 평균 개수에 따른 빔포밍 해석결과 비교 : contour

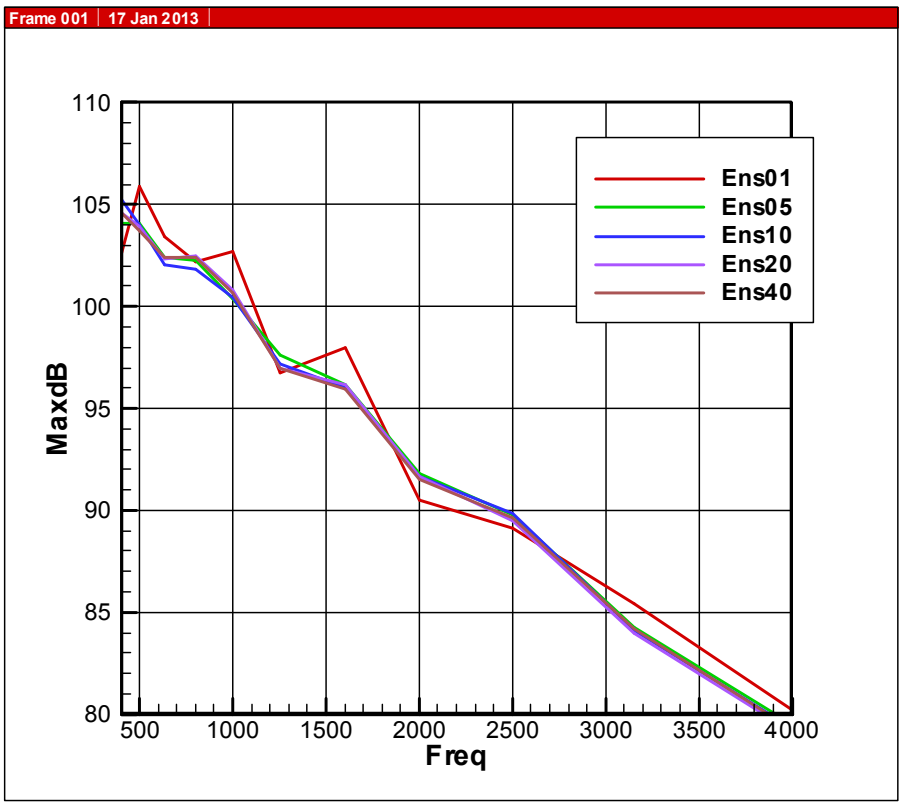


그림 2-1-141 Ensemble 평균 개수에 따른 빔포밍 해석결과 비교 : 최대빔함수 스펙트럼

빔포밍 해석을 수행하기 위해서는 narrow band로 각 마이크로폰 신호의 주파수 분석을 수행하여야 한다. 주파수 분석은 해석 효율을 위해 20Hz band로 수행하였으며, 이 경우 사용되는 측정신호영역은 0.05sec이다. 해석결과의 수렴성을 파악하기 위해 0.05sec 신호 해석결과의 ensemble 평균을 구하였다. Ensemble 평균에 사용되는 개수를 1~40개로 변화시키며 빔포밍 결과를 비교하였다. 그림 2-1-140와 그림 2-1-141과 같이 ensemble 평균 개수가 증가함에 따라 주음원의 위치가 보다 명확히 나타나고 있으며, 주파수에 따른 주음원의 최대 크기는 ensemble 개수가 5개 이상일 경우 동일하게 나타나고 있다. 이상의 결과에서 최종해석은 ensemble 평균개수를 10개로 지정하여 수행하였다.

(식 2-1)을 사용하여 빔포밍 해석을 수행할 경우 각 마이크로폰 자체의 auto-correlation 값이 빔함수에 포함된다. 어레이에 설치된 각 마이크로폰이 흐름의 영향을 직접적으로 받을 경우 마이크로폰 자체에서 발생된 소음이 해석결과에 포함되어 주음원 해석결과를 왜곡할 수 있으므로, auto-correlation 항을 제외하고 cross-correlation 항만을 사용하여 빔포밍 해석을 수행하는 'Diagonal Removale(DR)' 기법을 적용하여 빔포밍 분석을 수행하였다.

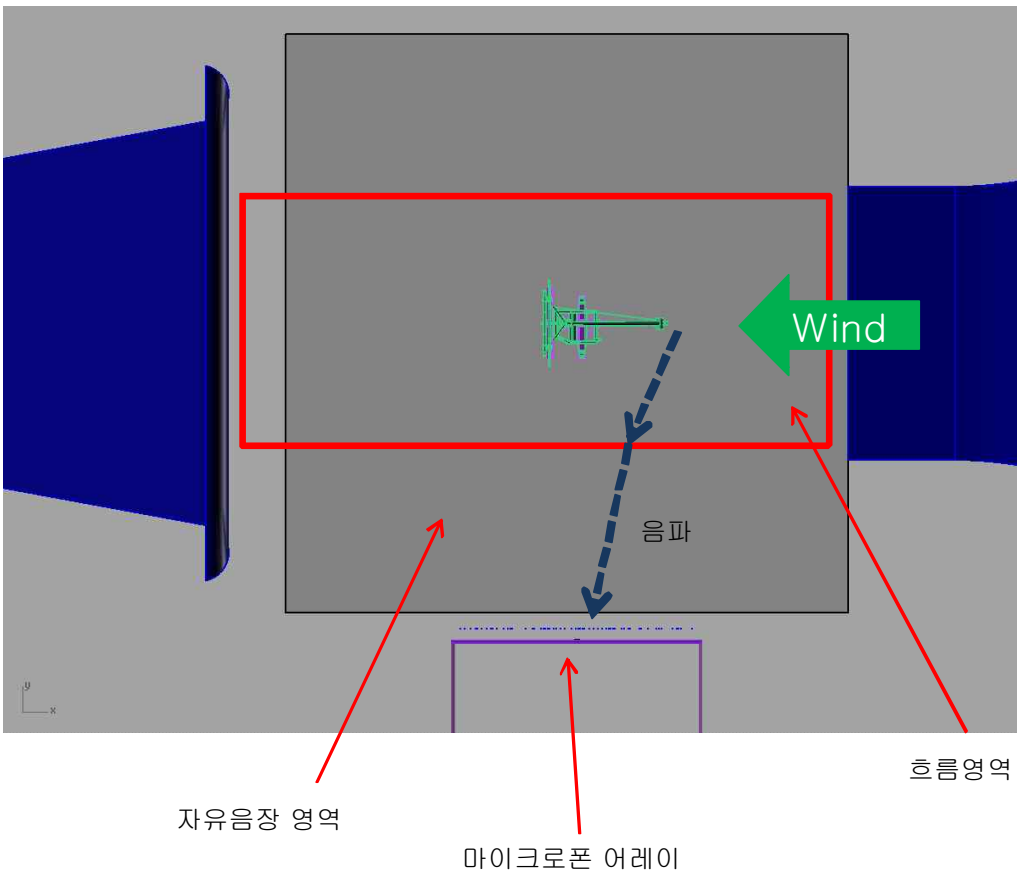


그림 2-1-142 Open jet 시험부에서 음파의 굴절

시험에 수행된 open jet 시험부의 경우 그림 2-1-142과 같이 jet 경계 내부에서는 바람이 V의 속도도 존재하고 경계 외부에서는 흐름이 없으므로 V=0이 된다. 이러한

자유류 흐름에 의해 팬터그래프 시스템 시험모델에서 발생한 음파는 jet 경계에서는 굴절현상(jet refraction)을 겪게 된다. (식 2-1)에서 방향성벡터($w(x_b)$)는 음원에서 마이크로폰까지 음파의 전달시간에 대한 함수이므로 그림 2-1-142과 같이 굴절현상이 포함된 시험에서는 자유음장 전파시간을 굴절된 음파 전파시간으로 대체하여 신호를 분석하여야 한다. 본 시험결과 분석에는 시험부 중심선에서 jet 경계까지의 수직거리는 2.5m, jet 경계에서 마이크로폰 어레이까지의 수직거리는 3.1m를 적용하였다.

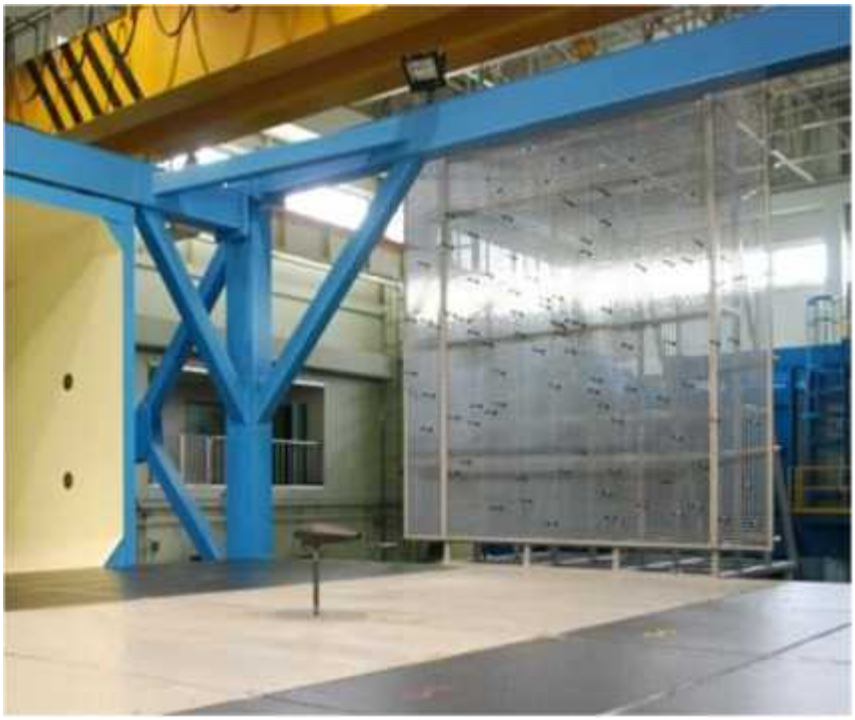


그림 2-1-143 스피커를 사용한 시험시스템 검증시험

소음시험시스템을 검증하기 위해 그림 2-1-143 과 같이 팬터그래프 시험모델이 설치되는 위치에 스피커를 설치한 후, 마이크로폰 어레이 빔포임 측정결과가 음원(스피커)의 위치를 정확히 파악하는지를 검토하였다. 스피커는 B&K Bp 1689를 사용하였으며, 1kHz ~ 8kHz의 순음을 발생시켜 검증시험을 수행하였다. 실 시험과 동일한 환경에서 검증시험을 수행하기 위해 풍속 30m/s 조건에서 검증시험을 수행하였다. 그림 2-1-144는 jet 경계 굴절영향을 반형하지 않은 빔포밍 측정결과이다. 음원인 스피커의 위치는 검정색 점으로 표기되어 있다. 그림에서 빔포밍 측정결과는 음원의 위치를 실제 위치보다 후류방향에서 나타내고 있다. Jet 경계 굴절영향을 반영한 빔포밍 결과인 그림 2-1-145은 음원의 위치를 정확히 측정하고 있음을 보여주고 있다.

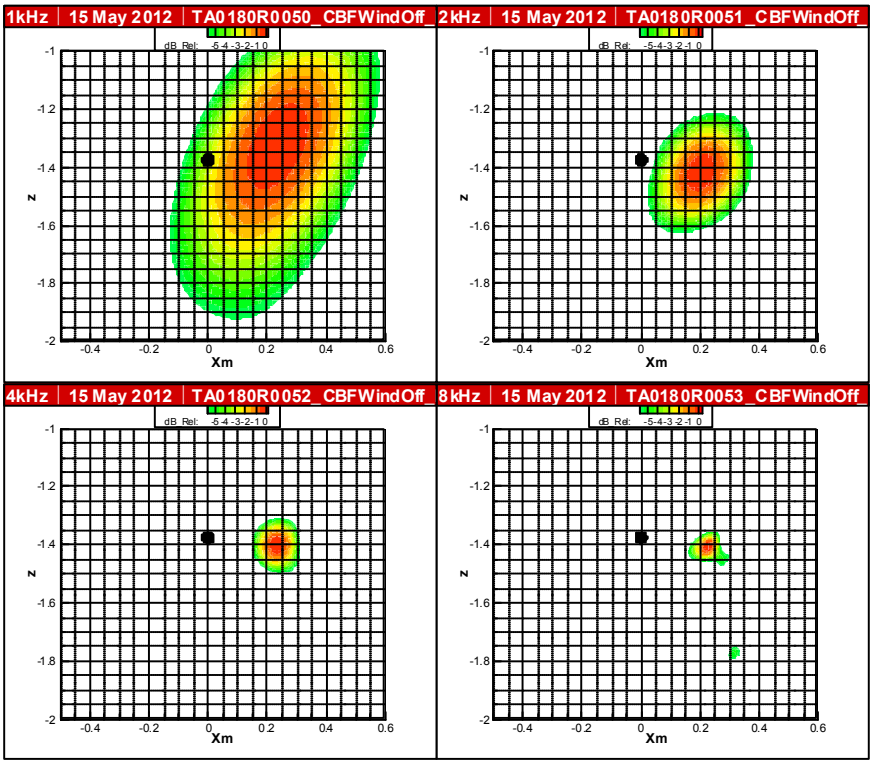


그림 2-1-144 스피커 검증시험 결과 : Jet refraction 반영전
(상좌:1kHz, 상우: 2kHz, 하좌:4kHz, 하우:8kHz)

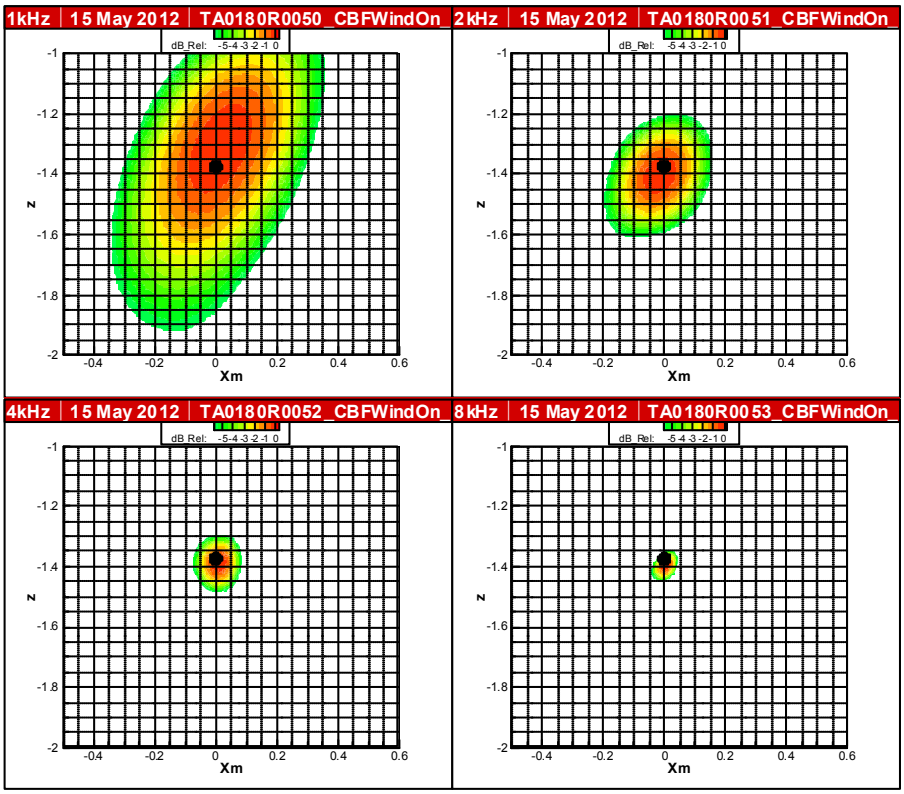


그림 2-1-145 스피커 검증시험 결과 : Jet refraction 반영후
(상좌:1kHz, 상우: 2kHz, 하좌:4kHz, 하우:8kHz)

빔포밍 측정결과는 상대적인 음원강도 contour를 통해 주음원의 위치를 나타낸다. 각 시험조건에서 주음원의 크기를 비교하기 위해 그림 2-1-146와 같이 팬헤드 영역(A0), 관절영역(A1)으로 빔함수 영역을 설정한 후, 각 영역내의 최대 빔함수 값의 구하여 최대빔함수 스펙트럼을 구하였다.

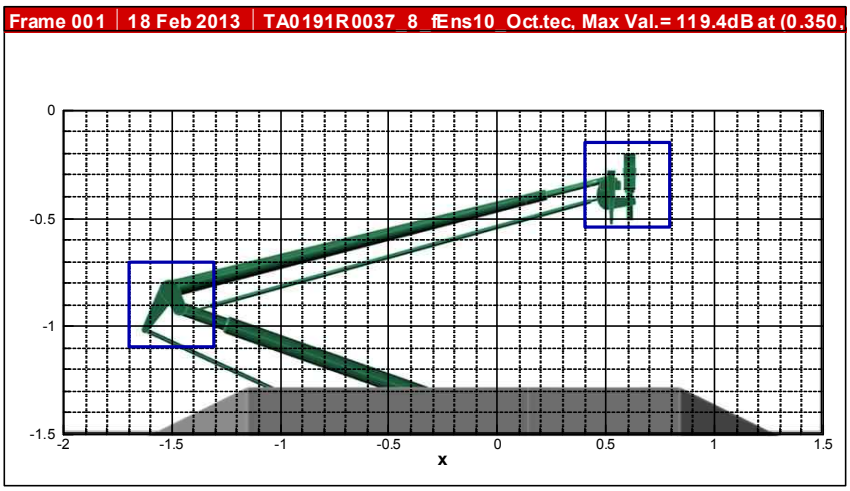


그림 2-1-146 빔함수 비교영역

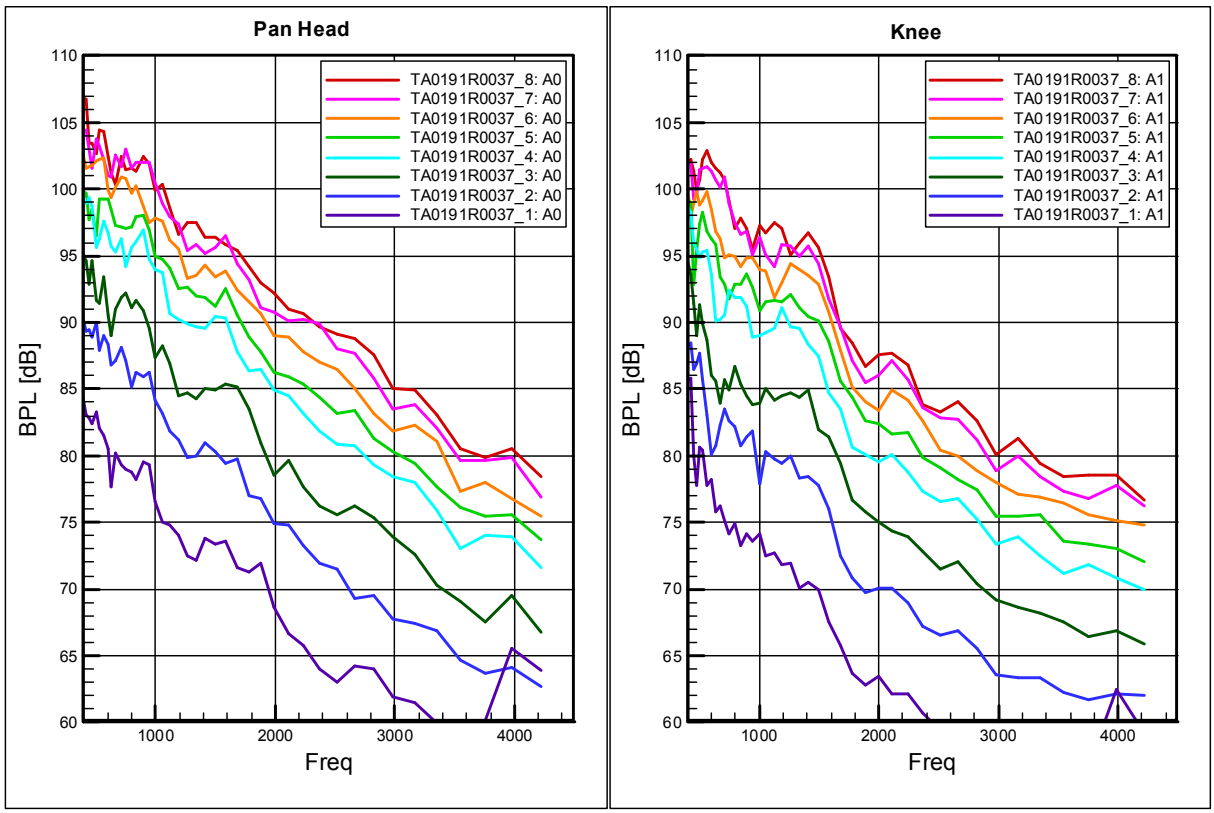


그림 2-1-147 최대 빔함수 수펙트럼 비교

(4) 기준 마이크로폰 측정

빔포밍 분석기법의 분해능은 주파수에 비례하므로 낮은 100Hz 부근의 낮은 주파수 영역에서는 그림 2-1-148과 주음원에 대한 정보를 파악할 수 없게 된다. 팬헤드 단면에서 발생되는 shedding 주파수는 스트라울수를 0.11 ~ 0.2로 추정할 경우 80 ~ 140Hz 영역이므로, 이 주파수 영역에 대한 연구를 위해 빔포밍 분석이 아닌 단일 마이크로폰의 SPL 스펙트럼 분석을 적용하였다.

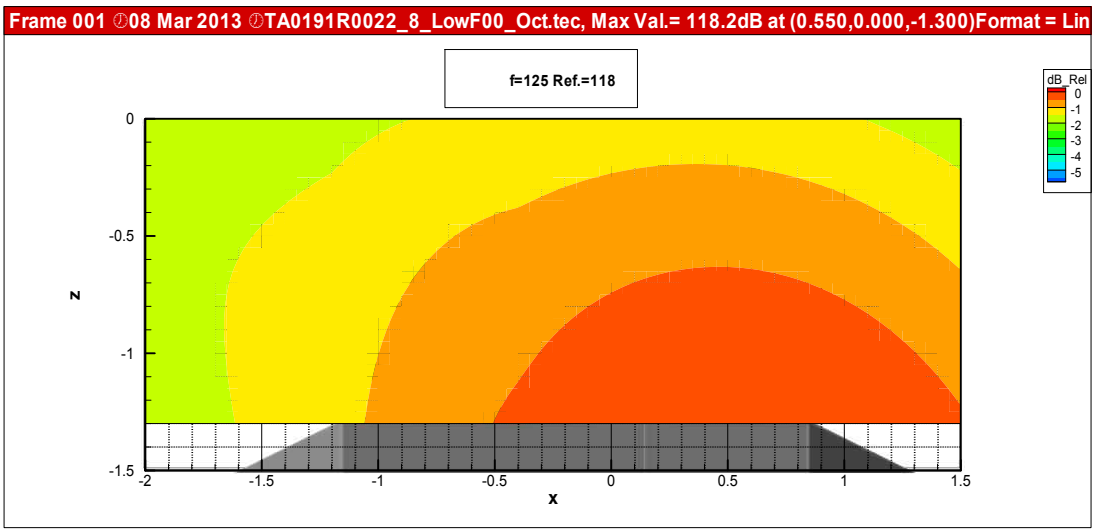


그림 2-1-148 저주파수(125Hz) 빔포임 분석 결과

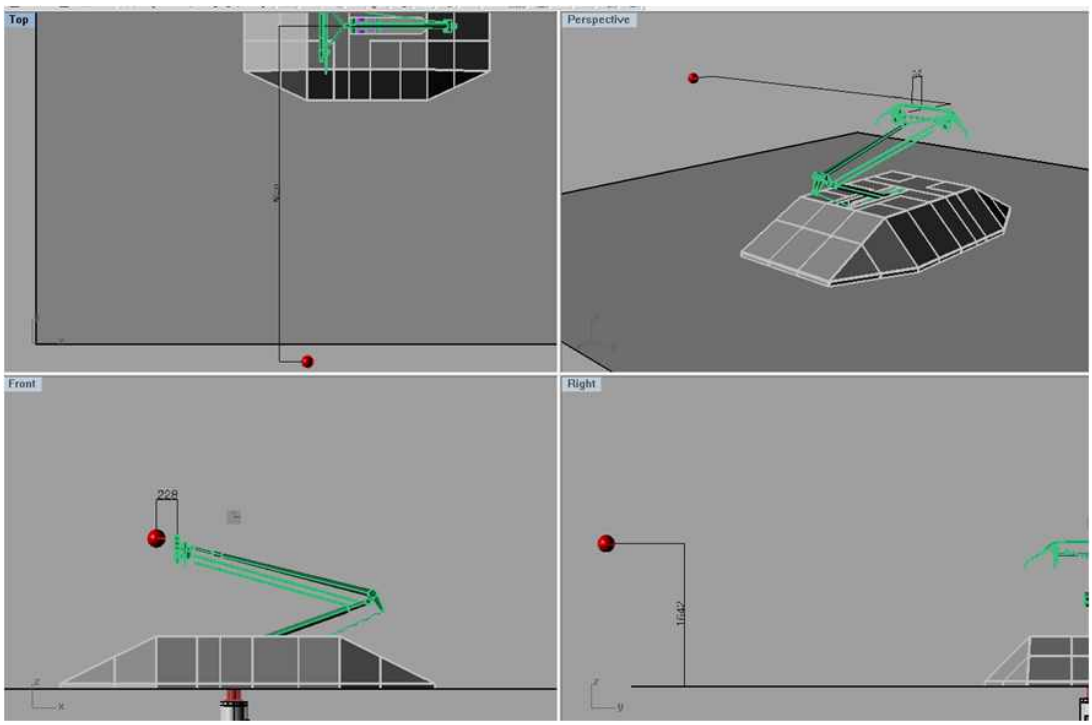


그림 2-1-149 기준 마이크로폰 위치

분석에 사용된 기준 마이크로폰은 마이크로폰 어레이 중 팬헤드 부근 위치에 설치된 'b_08'(X:0.835, Y:-0.233)을 선택하였다. 기준 마이크로폰 측정결과는 그림 2-1-150와 같이 SPL의 1/3 옥타브밴드 스펙트럼 및 overall 스펙트럼으로 나타내었다.

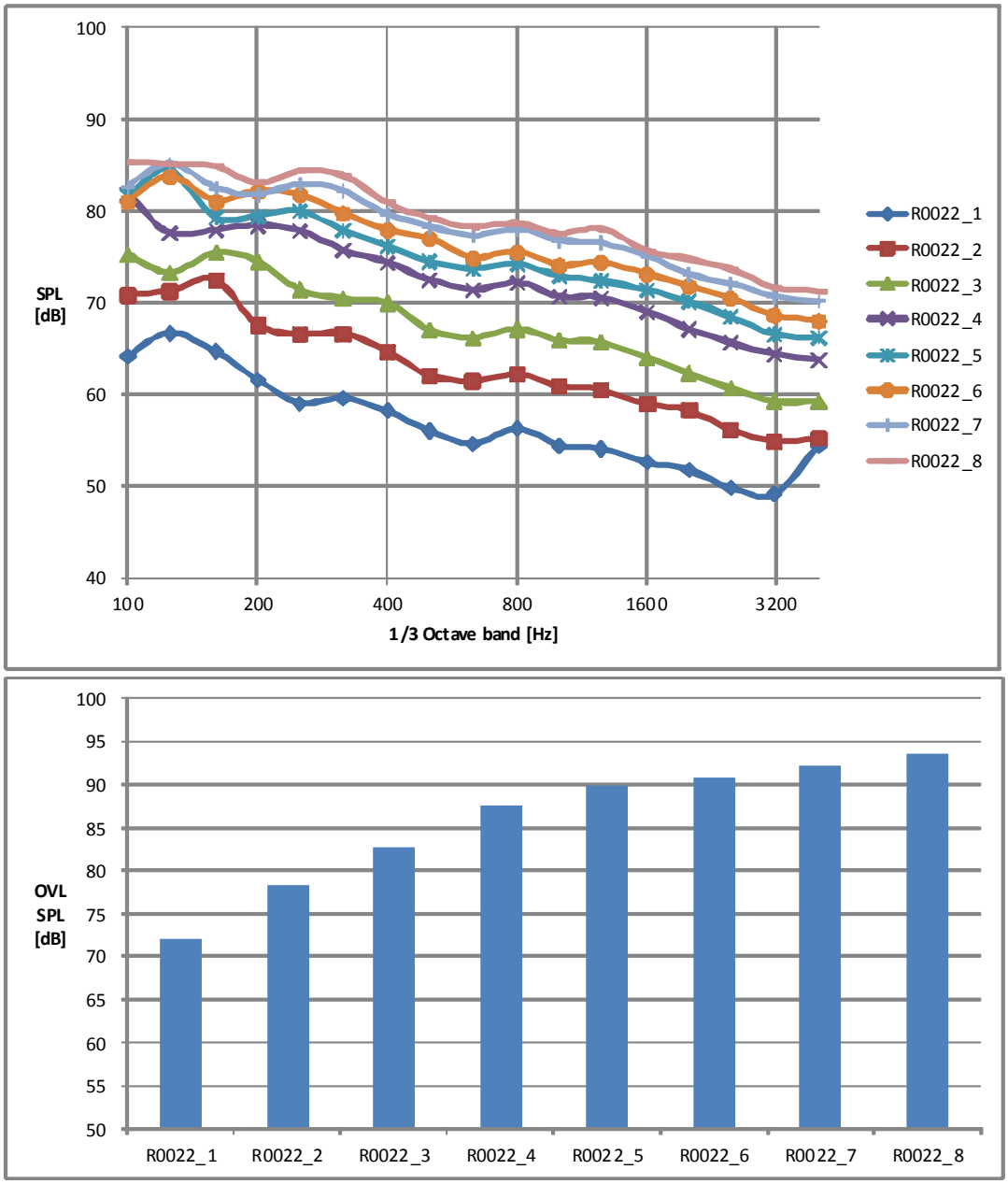


그림 2-1-150 기준 마이크로폰 측정결과 분석

(5) 공력소음 시험결과 : 주행방향 및 하부덮개 영향

정상 주행조건에서 기준형상 조건(높이조건 H1, Yaw = 0, 하부 덮개(O))에 대한 시험결과(R37_8, 속도 45m/s)를 빔포밍 분석한 결과가 그림 2-1-151 ~ 그림 2-1-156에 빔함수 contour로 나타나 있다. 팬터그래프의 주소음원은 팬헤드와 관절부위에서

나타나고 있다. 팬헤드 소음은 전체 주파수 영역에서 주요한 소음으로 작용하고 있으며, 관절부위 소음은 630Hz ~ 1.6kHz 영역에서 주요한 소음으로 작용하고 있다.

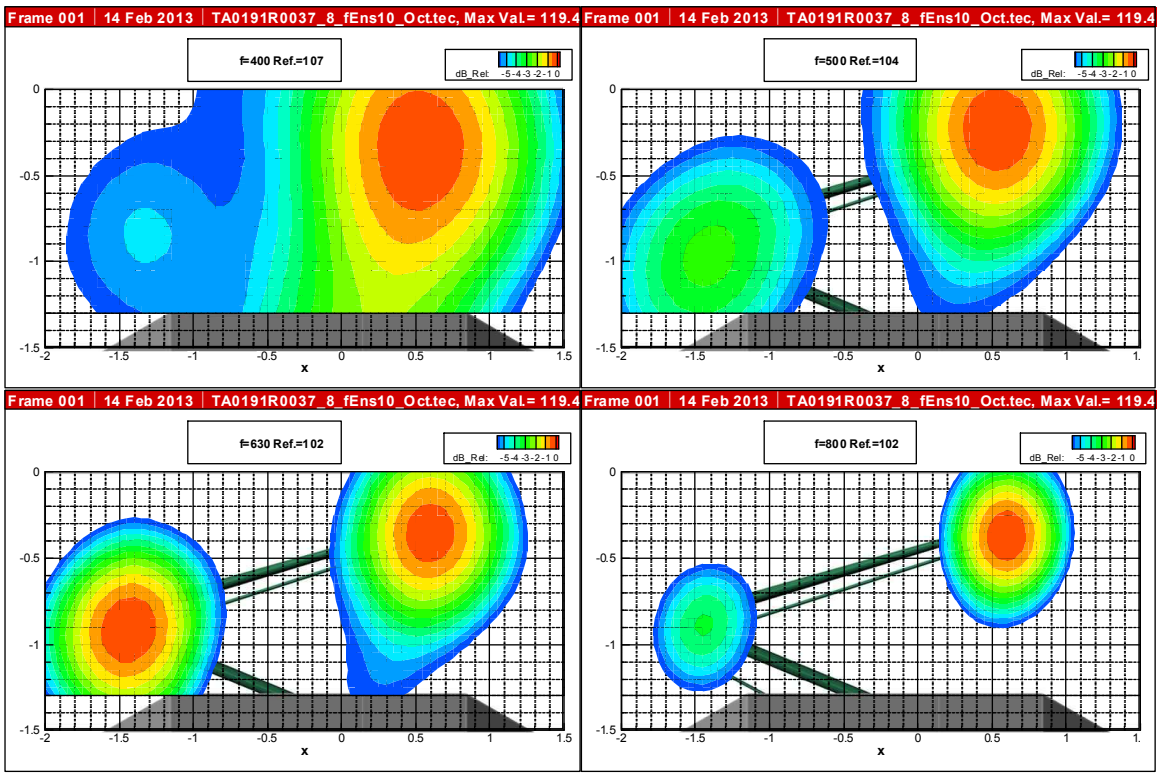


그림 2-1-151 빔포밍 분석결과 : R37_8, f:400Hz ~ 800Hz

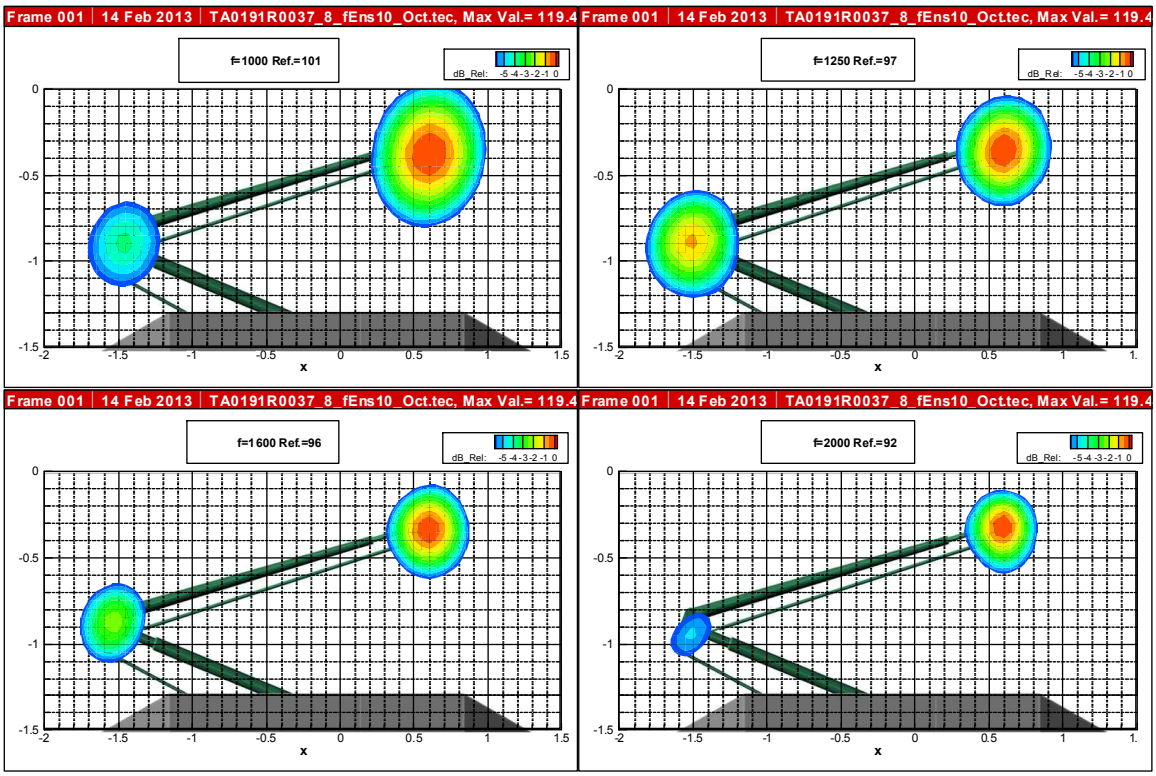


그림 2-1-152 빔포밍 분석결과 : R37_8, f:1kHz ~ 2kHz

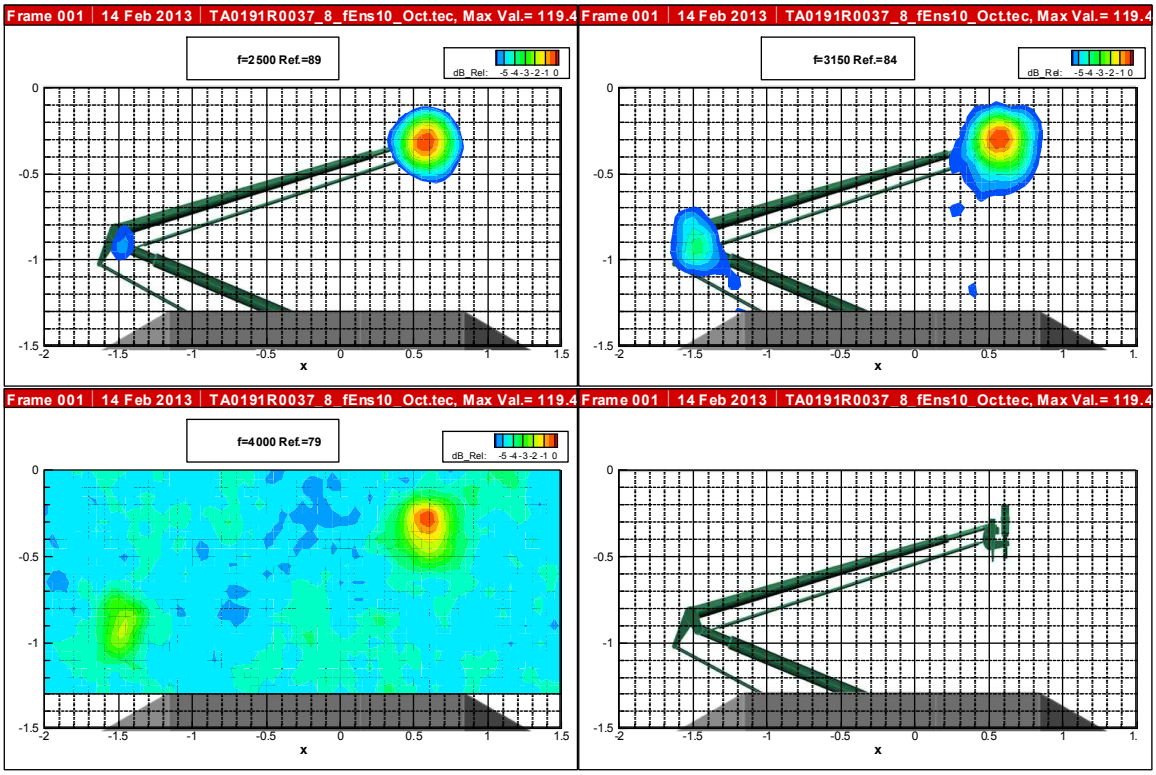


그림 2-1-153 빔포밍 분석결과 : R37_8, f:2.5kHz ~ 4kHz

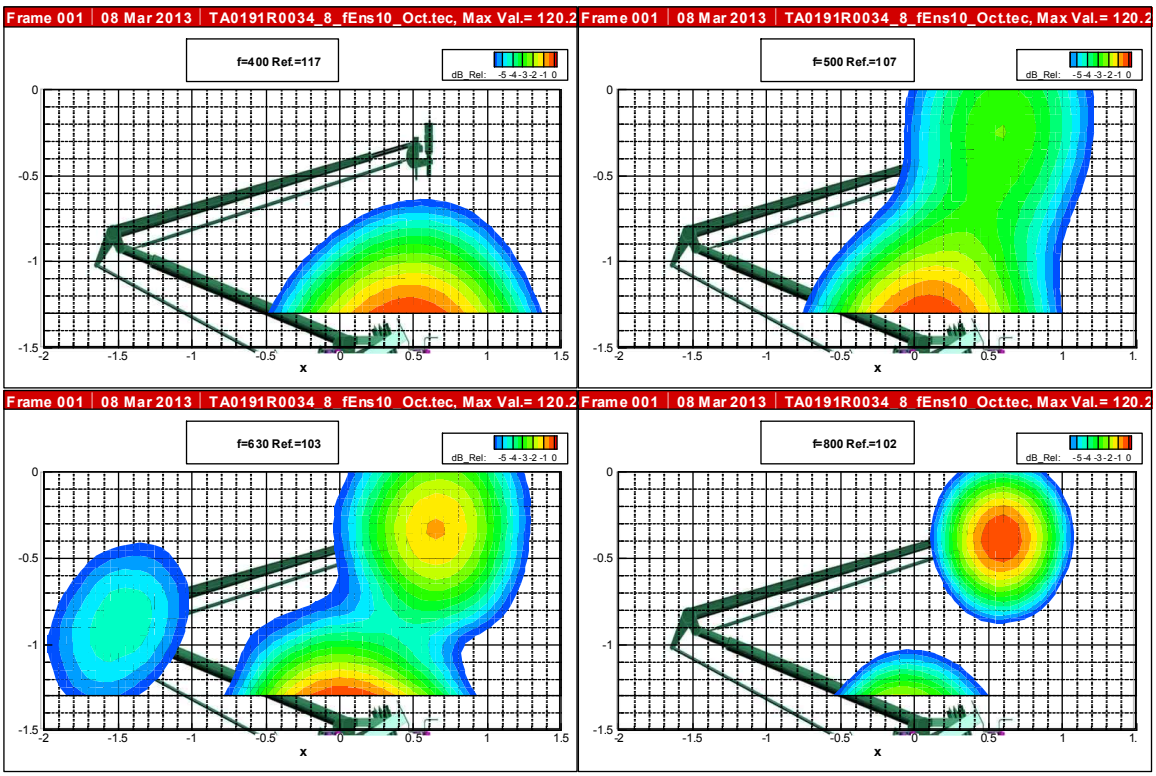


그림 2-1-154 빔포밍 분석결과 : R34_8, f:400Hz ~ 800Hz

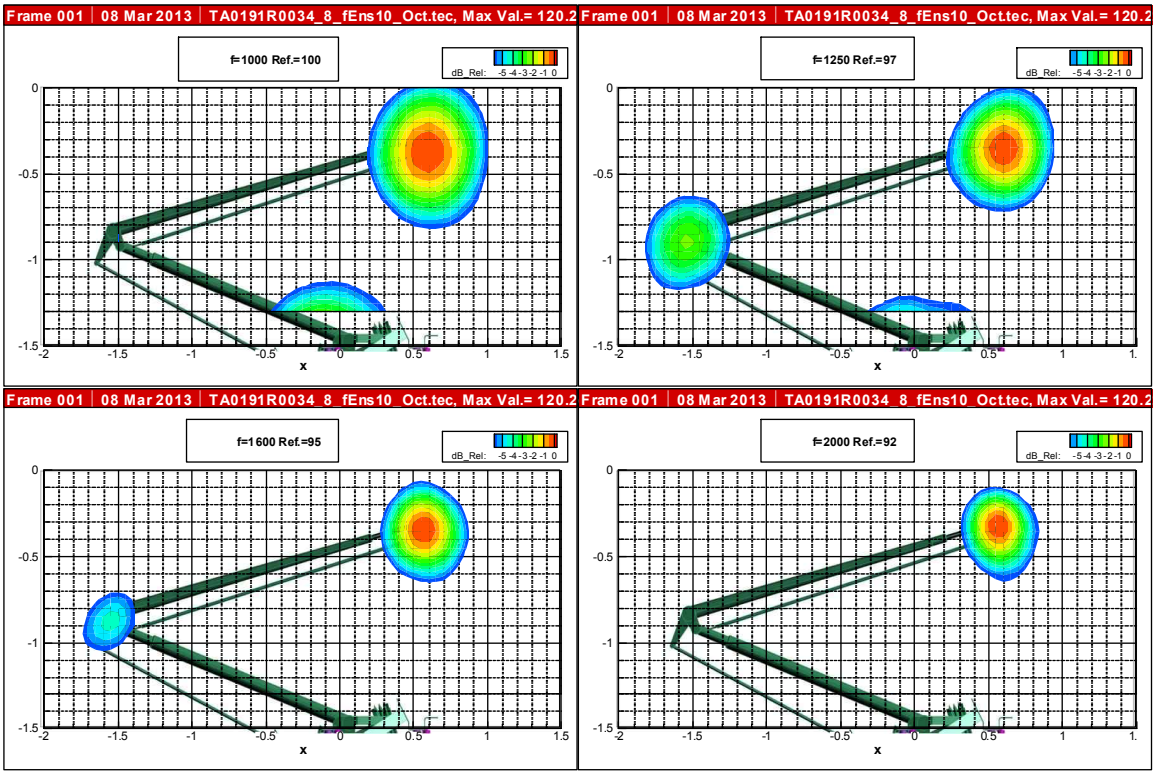


그림 2-1-155 빔포밍 분석결과 : R34_8, f:1kHz ~ 2kHz

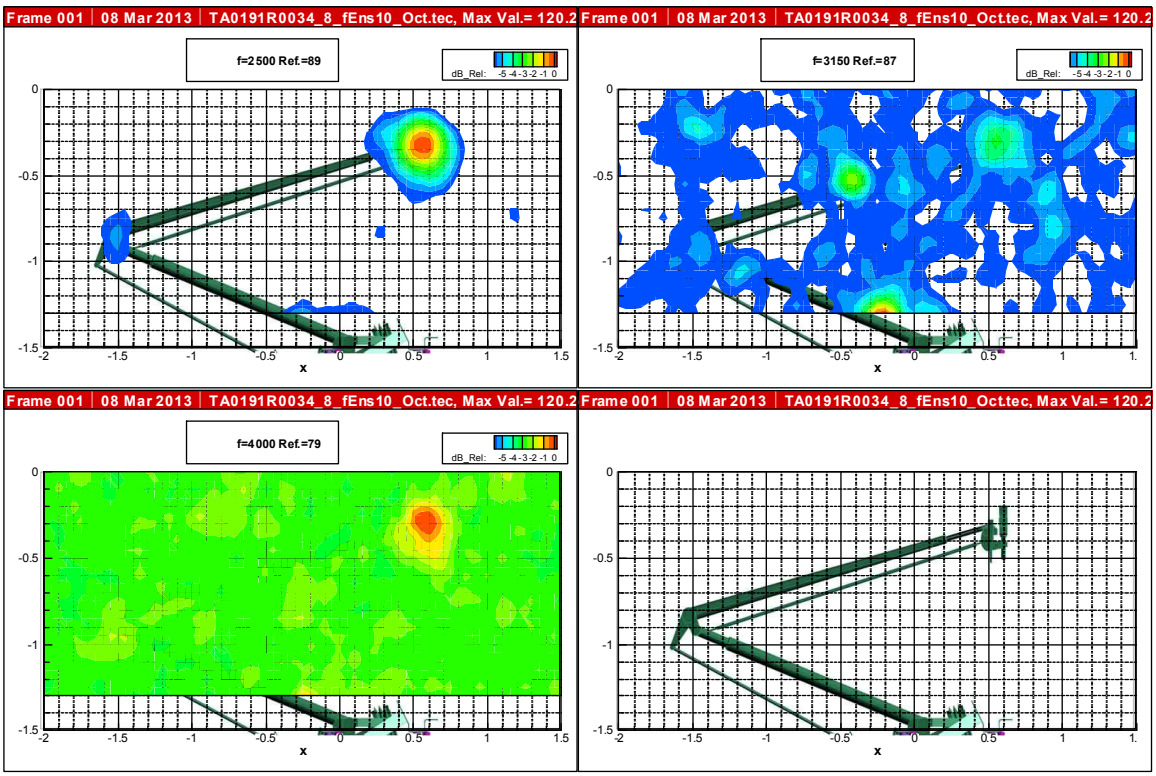


그림 2-1-156 빔포밍 분석결과 : R34_8, f:2.5kHz ~ 4kHz

정상 주행조건에서 하부덮개를 제거한 시험조건(높이조건 H1, Yaw = 0, 하부 덮개(X))에 대한 시험결과(R34_8, 속도 45m/s)를 빔포밍 분석한 결과가 그림 2-1-157~

그림 2-1-158 에 빔함수 contour로 나타나 있다. 하부덮개가 설치된 시험결과와 비교해 보면, 팬터그래프 하부에서 발생된 소음영향으로 인해 관절부위 소음이 명확하기 나타나지 않고 있으며, 특히 630Hz 이하에서는 하부소음으로 인해 팬헤드 소음도 나타나지 않고 있다. 또한, 3.15kHz 영역에서도 하부덮개가 설치된 시험결과에 비해 하부소음의 영향 및 sidelobe가 증가하여 주소음원을 명확히 파악할 수 없다.

비상 주행조건에서 기준형상 조건(높이조건 H1, Yaw = 0, 하부 덮개(O))에 대한 시험결과(R27_8, 속도 45m/s)를 빔포밍 분석한 결과가 아래와 같이 빔함수 contour로 나타나 있다. 정상 주행조건 시험결과와 비교해 보면, 비상 주행조건에서 팬터그래프 공력소음은 주로 팬헤드에서만 발생하고 있으며, 관절부위의 역할은 정상 주행조건에 비해 작음을 알 수 있다.

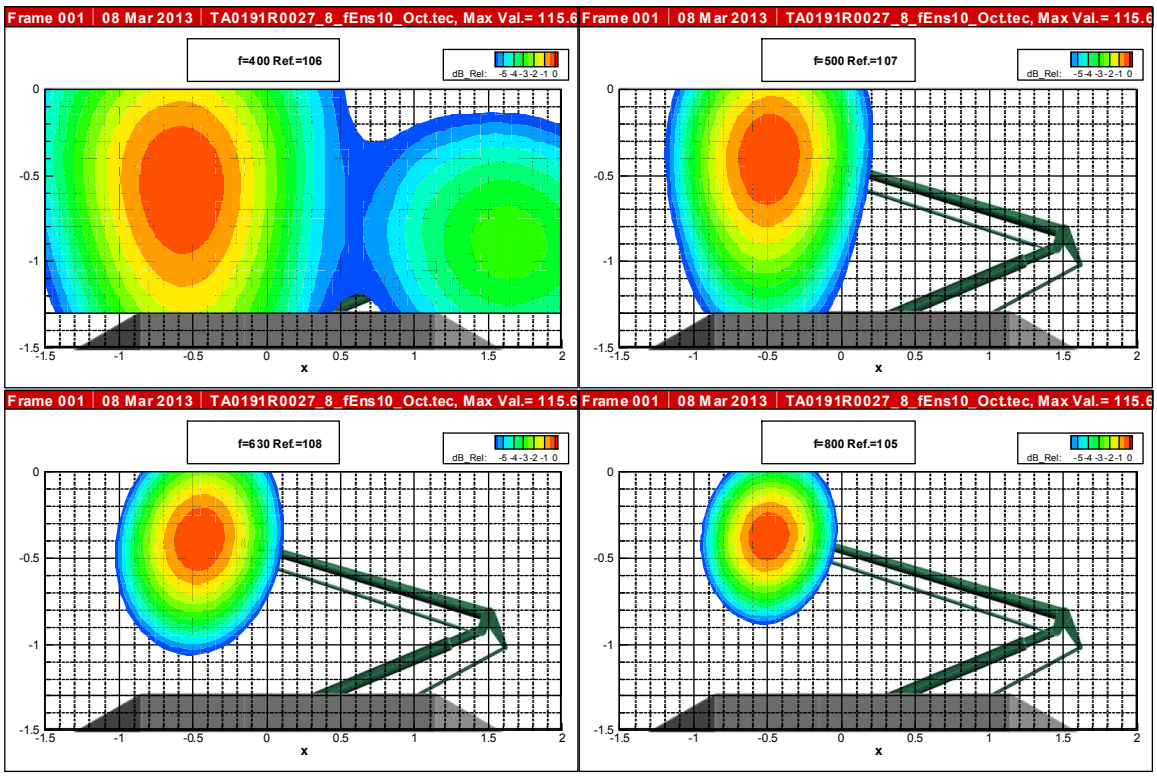


그림 2-1-157 빔포밍 분석결과 : R27_8, f:400Hz ~ 800Hz

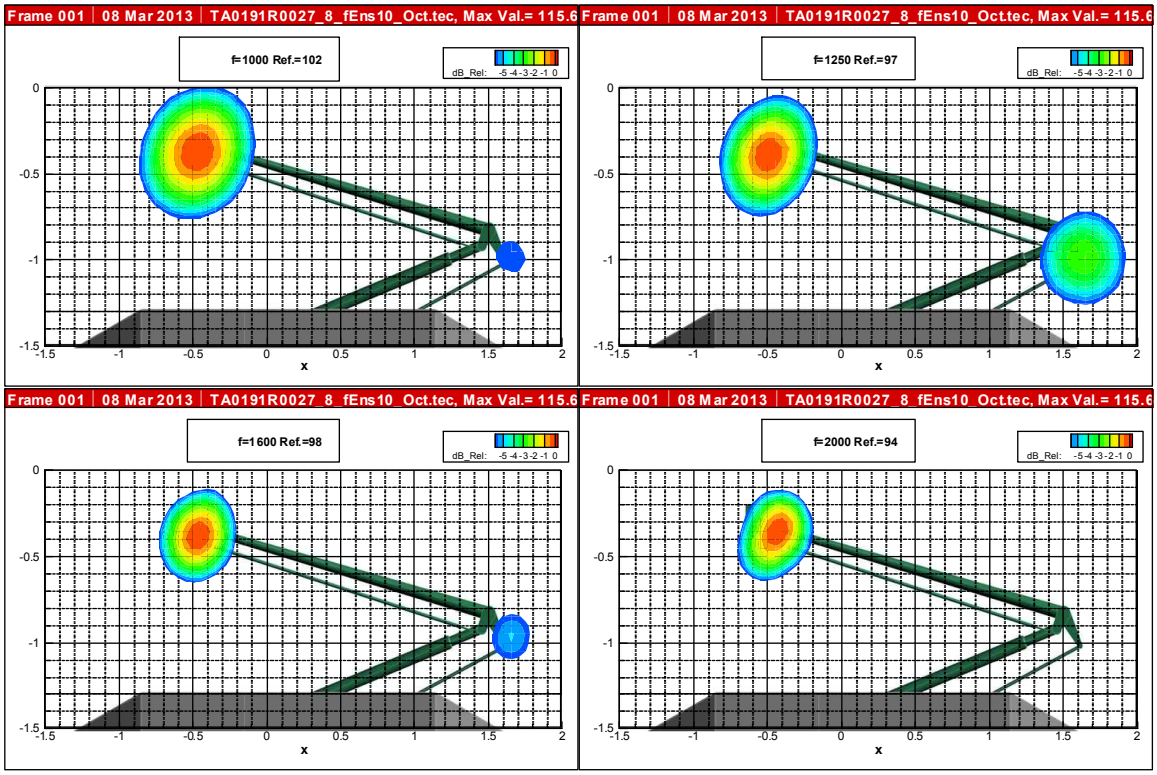


그림 2-1-158 빔포밍 분석결과 : R27_8, f:1kHz ~ 2kHz

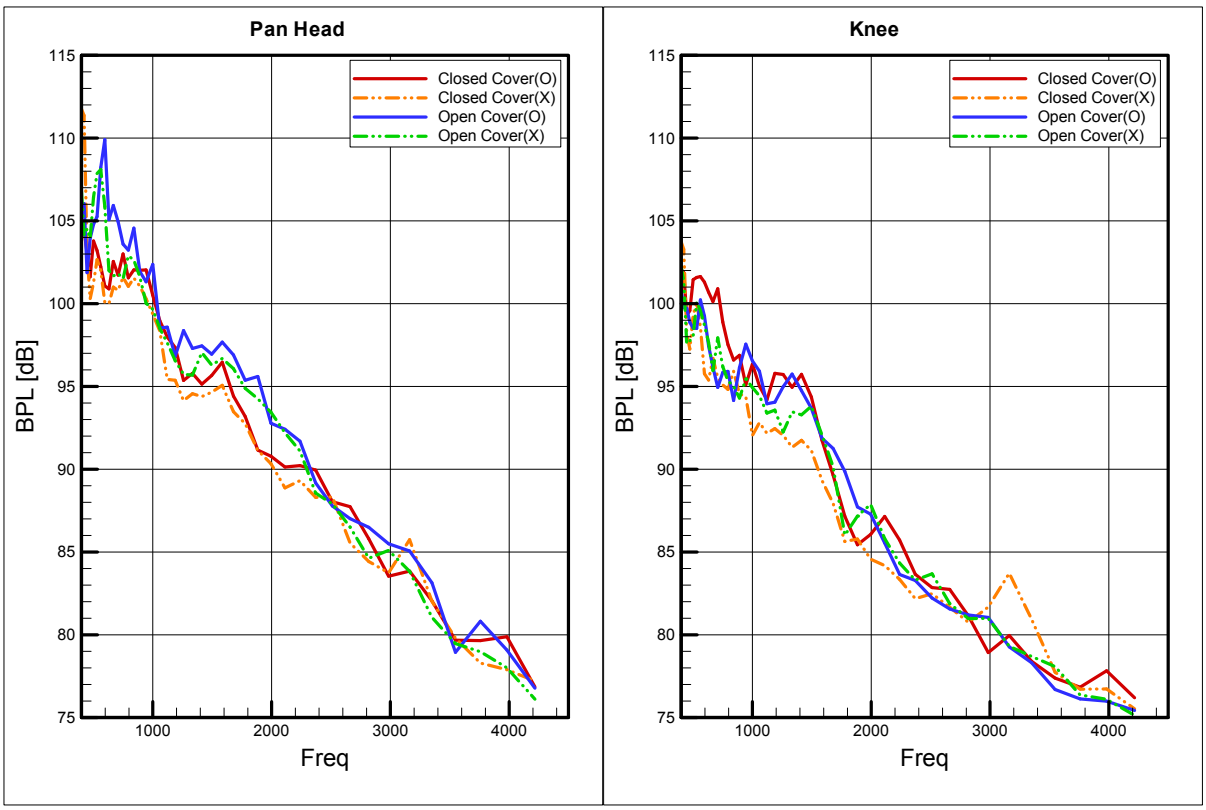


그림 2-1-159 최대빔함수스펙트럼 : 주행방향

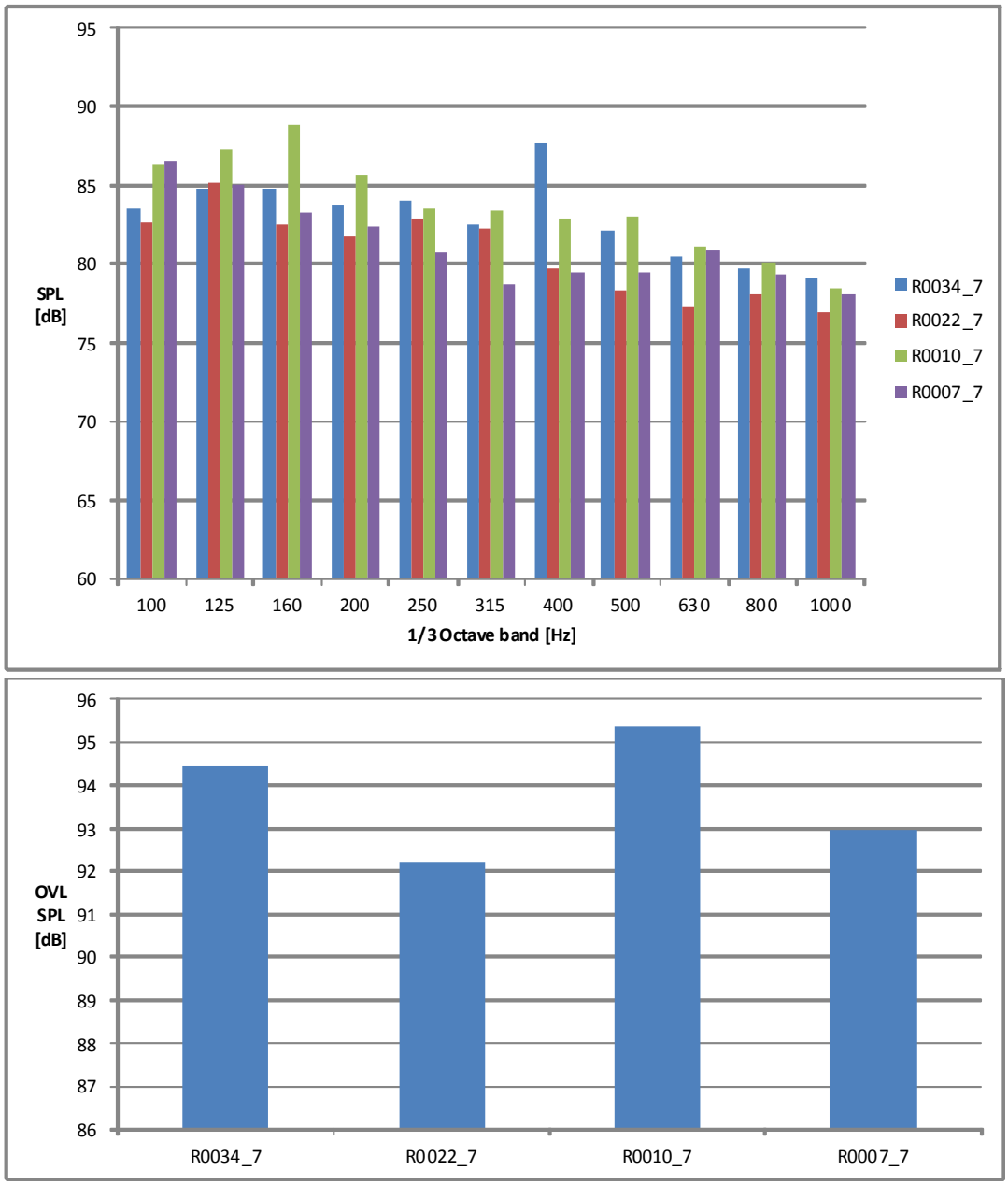


그림 2-1-160 기준 마이크로폰 측정결과 : 주행방향

그림 2-1-159와 그림 2-1-160에 주행방향에 따른 팬헤드 및 관절부위의 최대빔함수 스펙트럼 및 기준 마이크로폰 SPL이 나타나 있다. 정상 주행조건의 경우, 하부덮개가 팬헤드 소음원 스펙트럼에 미치는 영향은 없으며, 관절부위의 경우 하부덮개에 의해 1.6kHz 이하영역의 빔함수값이 3~5dB 증가하는 것으로 나타났다. 기준 마이크로폰 측정결과에서 315Hz 이하 주파수에서는 하부덮개가 설치된 경우 1~2dB 낮은 소음값을 보이고 있으며, 400Hz에서는 7dB 낮은 값을 나타내고 있다. 전체 주파수 영역을 합산한 OVL SPL의 경우 하부덮개가 설치된 경우 2dB 작게 나타났다. 이상의 결과로 보아 팬터그래프 하부에서 발생하는 소음이 1kHz 이하 영역에서 가장 큰 소음원의 역할을 하며, 하부덮개가 팬헤드 소음에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 비상 주행조건의 경우 하부덮개가 팬헤드 및 관절부위 빔함수에 미치는 영향은

없으며, 기준마이크로폰 측정결과에서는 500Hz 이하 주파수에서 하부덮개의 영향이 크게 나타나고 있다. 하부덮개가 OVL SPL에 미치는 영향은 정상 주행조건과 동일하게 2dB로 나타났다.

하부덮개가 설치된 상태에서 주행방향에 따른 영향을 살펴보면, 팬헤드 소음원은 600Hz 부근에서 비상 운행조건이 정상 운행조건에 비해 10dB 큰 값을 보이고 있으며, 1.2kHz ~ 2.2kHz 영역에서는 2dB 큰 값을 보이고 있다. 관절부위 소음원은 600Hz 부근에서 정상 주행조건이 4dB 큰 값을 보이고 있으며, 1.8kHz에서는 비상 주행조건이 2dB 큰 값을 보이고 있다. 기준 마이크로폰 측정결과를 살펴보면, 정상 주행조건에서는 125Hz와 250Hz에서 주요 피크가 나타나고 있으나, 비상 주행조건에서는 100Hz와 630Hz에서 주요 피크가 나타나고 있다. 100~160Hz 주파수에서는 비상 주행조건이 2dB 큰 값을 보이고 있으며, OVL SPL은 비상 주행조건이 1dB 큰 값을 보이고 있다.

(6) 공력소음 시험결과 : 주행속도

주행속도에 대한 영향을 살펴보기 위해 정상 주행조건에서 기준형상 조건(높이조건 H1, Yaw = 0, 하부 덮개(O)) 시험결과(R37)를 빔포밍 분석한 결과가 그림 2-1-161 ~ 그림 2-1-162에 빔함수 contour로 나타나 있다. 주파수 630Hz 영역에서는 관절부위의 소음원의 상대적인 크기가 속도가 증가함에 따라 증가하여 45m/s 조건에서는 팬헤드 소음원과 유사한 크기를 보여주고 있으며, 주파수 1250Hz 영역에서는 모든 시험속도에서 관절부위 소음원이 팬헤드 소음원가 유사한 크기를 보여주고 있다. 그림 2-1-163의 최대빔함수 스펙트럼에서 주파수 및 속도가 증가함에 따라 빔함수의 최대값은 감소하고 있으며, 팬헤드 소음은 700Hz 및 1500Hz 영역에서 피크값을 보이고 있다. 관절부위 소음은 2kHz 이하 주파수에서 주요한 역할을 하고 있으며, 700Hz 및 1400Hz 영역에서 주파수가 고정된 피크값이 나타나고 있으며, 800Hz 부근에서는 속도에 따라 주파수가 증가하는 피크값이 나타나고 있다. 그림 2-1-164에서 최대빔함수값의 풍속의 6.5승에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

그림 2-1-165의 기준 마이크로폰 측정결과에서 400Hz 이하에서 가장 큰 소음 피크가 발생하고 있으며, 40m/s 이상 속도조건에서는 125Hz와 250Hz 피크가 뚜렷이 나타나고 있다. 그림 2-1-166 에서 OVL SPL은 속도의 6승에 비례하는 형태로 나타나고 있다.

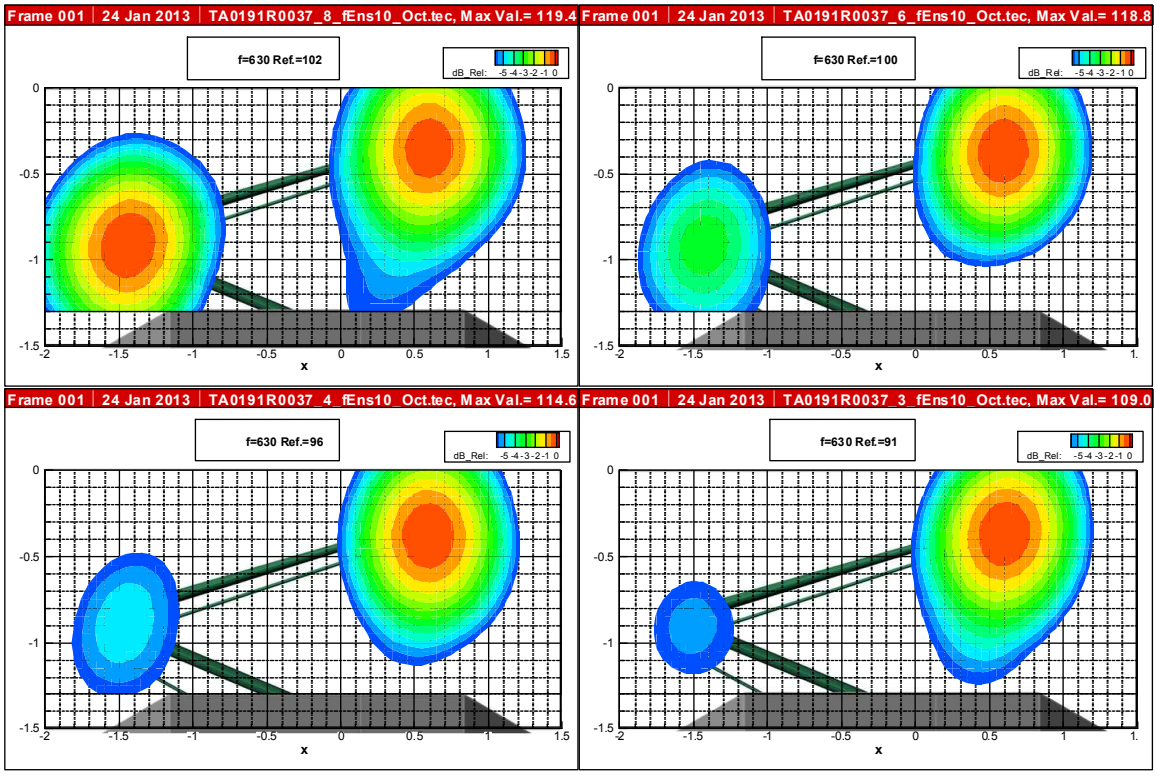


그림 2-1-161 빔포밍 분석결과 : R37(속도: 45, 40, 35, 30m/s), f = 630Hz

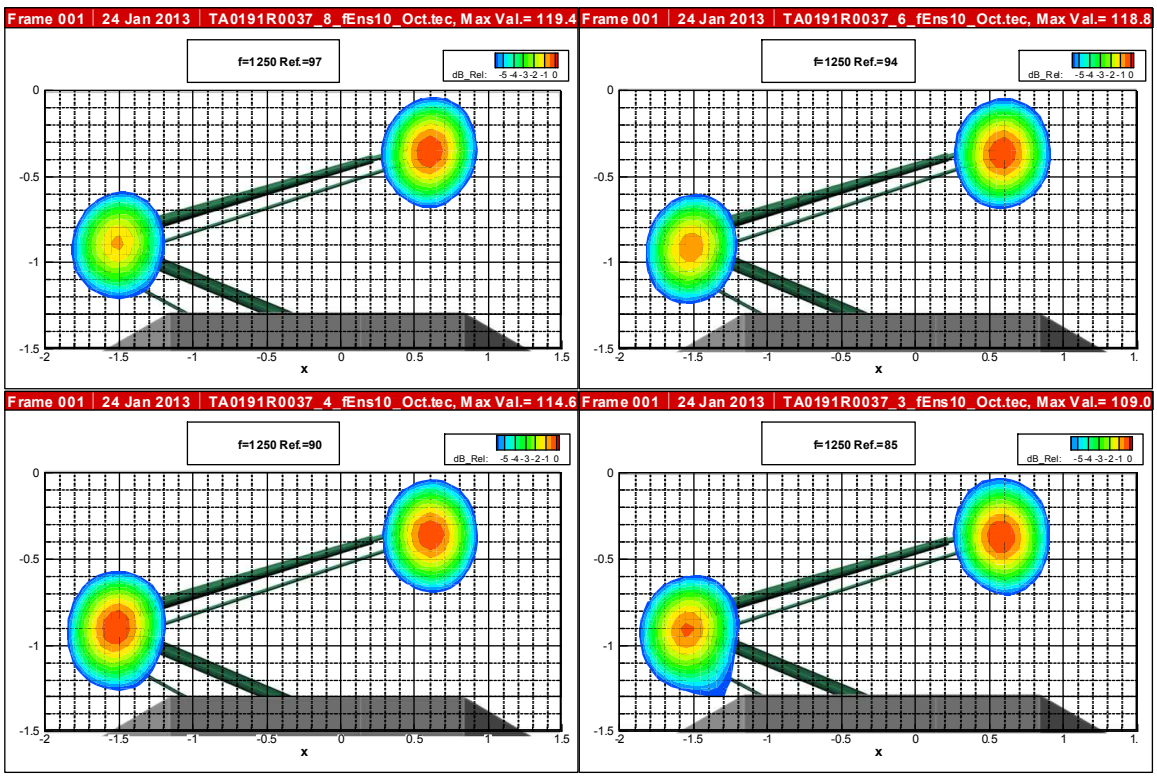


그림 2-1-162 빔포밍 분석결과 : R37(속도: 45, 40, 35, 30m/s), f = 1250Hz

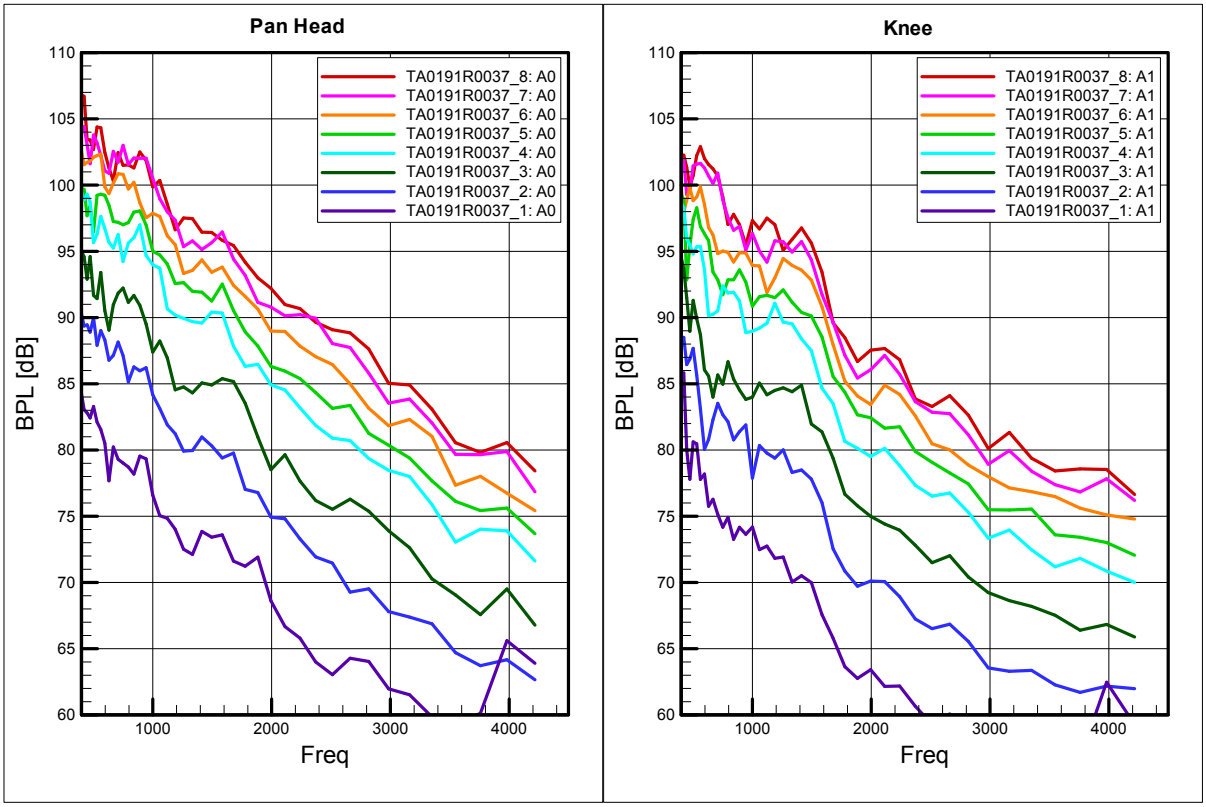


그림 2-1-163 최대빔함수 스펙트럼 : 주행속도

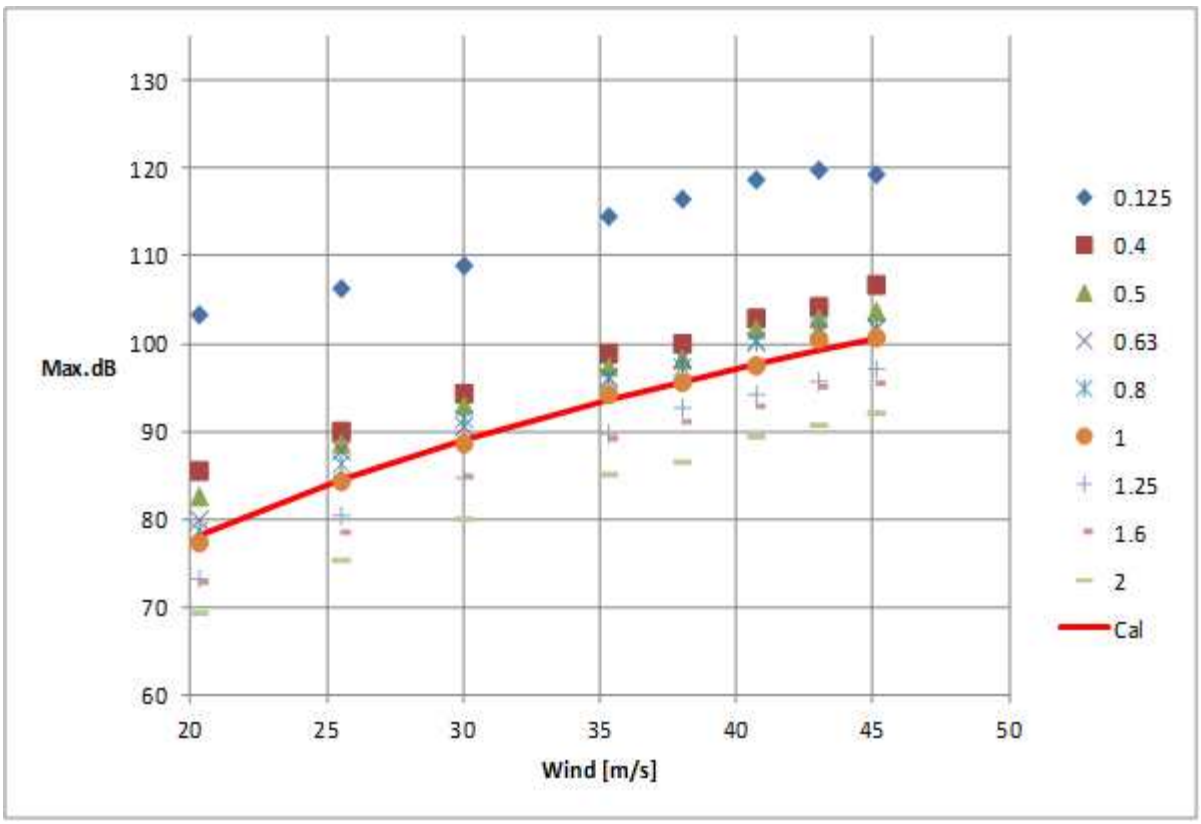


그림 2-1-164 속도에 따른 최대 빔함수값의 변화

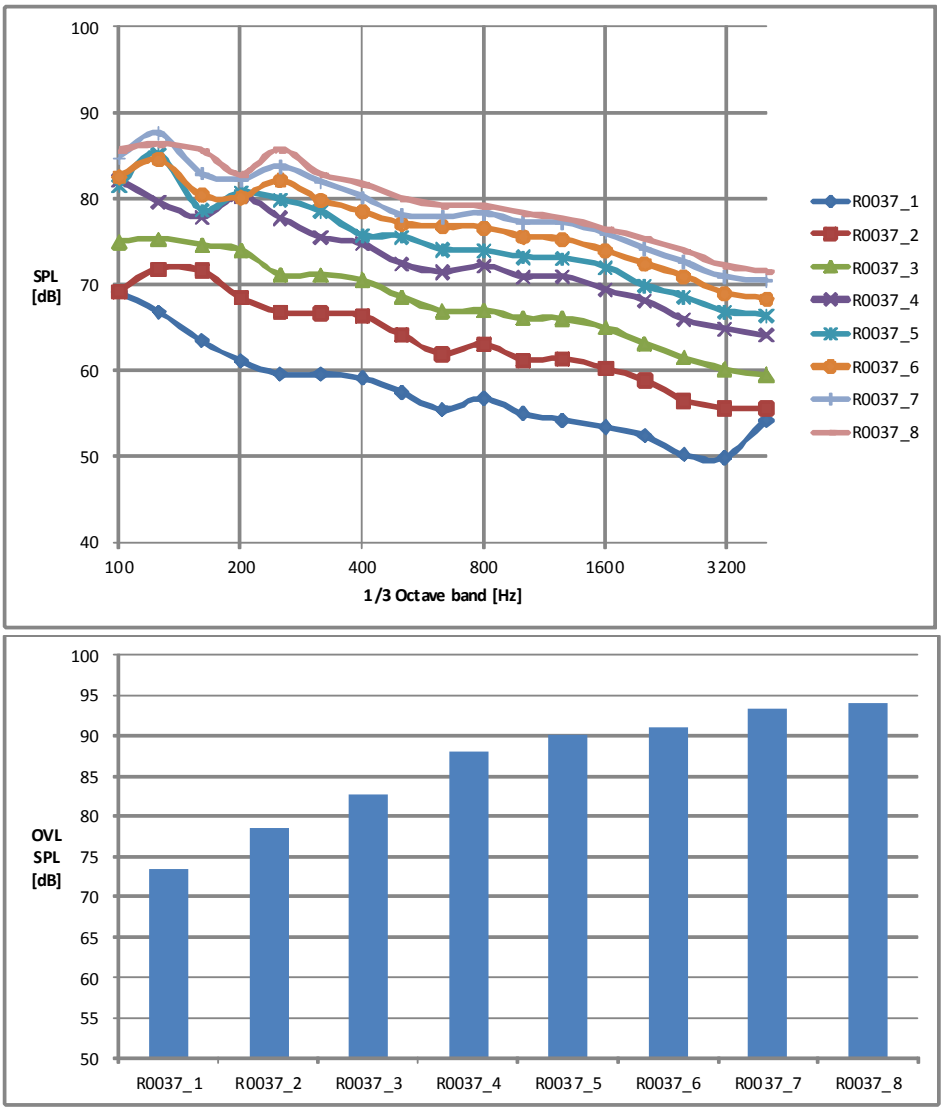


그림 2-1-165 기준 마이크로폰 측정결과 : 주행방향

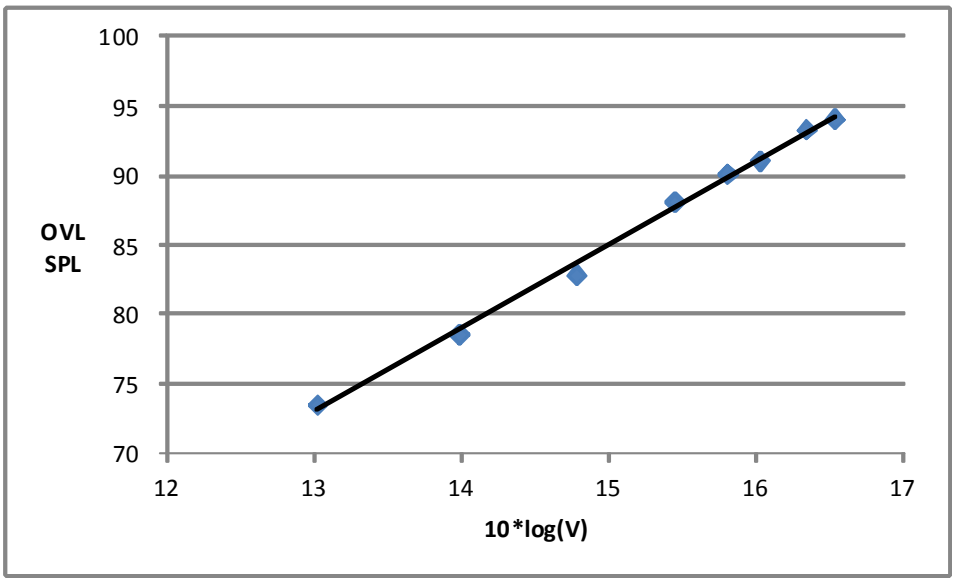


그림 2-1-166 속도에 따른 OVL SPL 변화

(7) 공력소음 시험결과 : 요각변화

측풍에 대한 영향을 살펴보기 위해 정상 주행조건에서 기준형상 조건(높이조건 H1, 하부 덮개(O), 속도 45m/s), 요각 0,-2,2,4도 시험결과(R14, R15, R16, R17)를 비교하였다. 그림 2-1-167 최대빔함수 스펙트럼 및 그림 2-1-168 기준 마이크로폰 소음측정결과에서 시험범위 요각에서 팬헤드 및 관절부위의 소음 및 OVL SPL은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

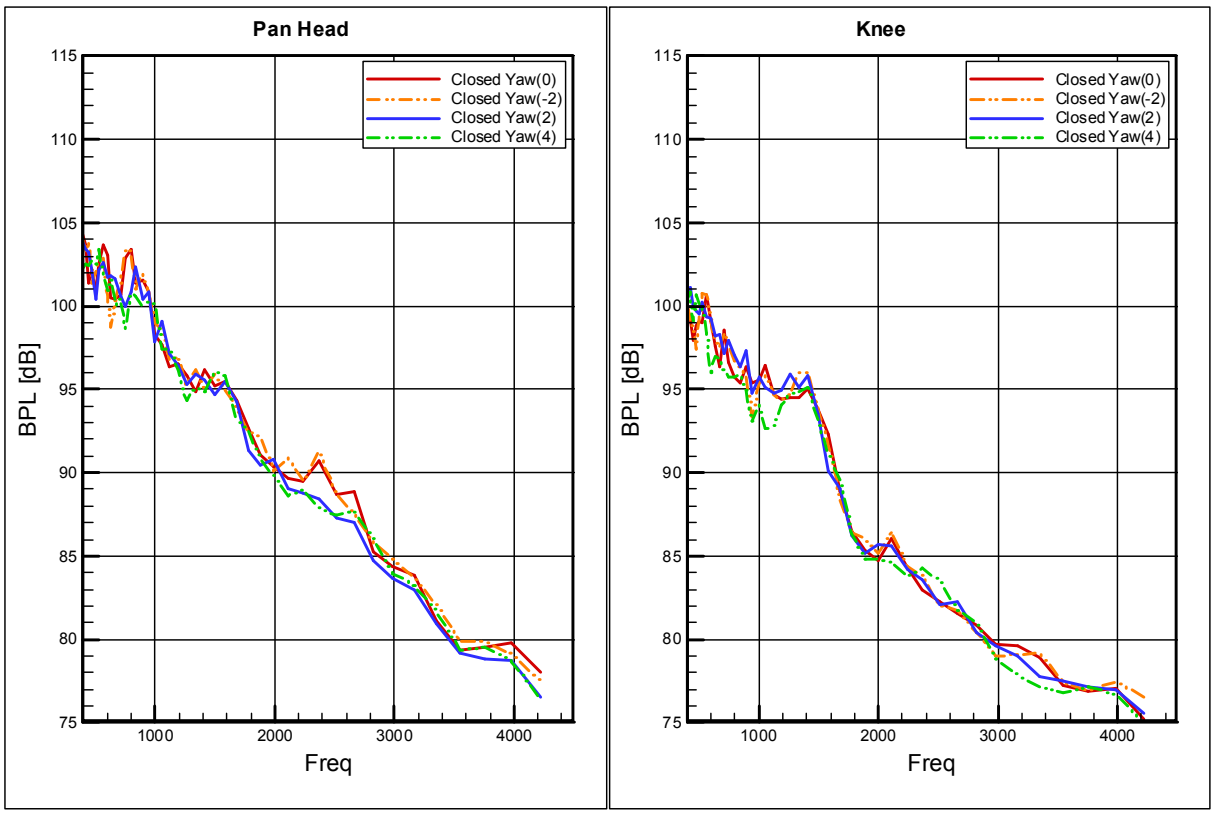


그림 2-1-167 요각에 따른 최대빔함수 스펙트럼

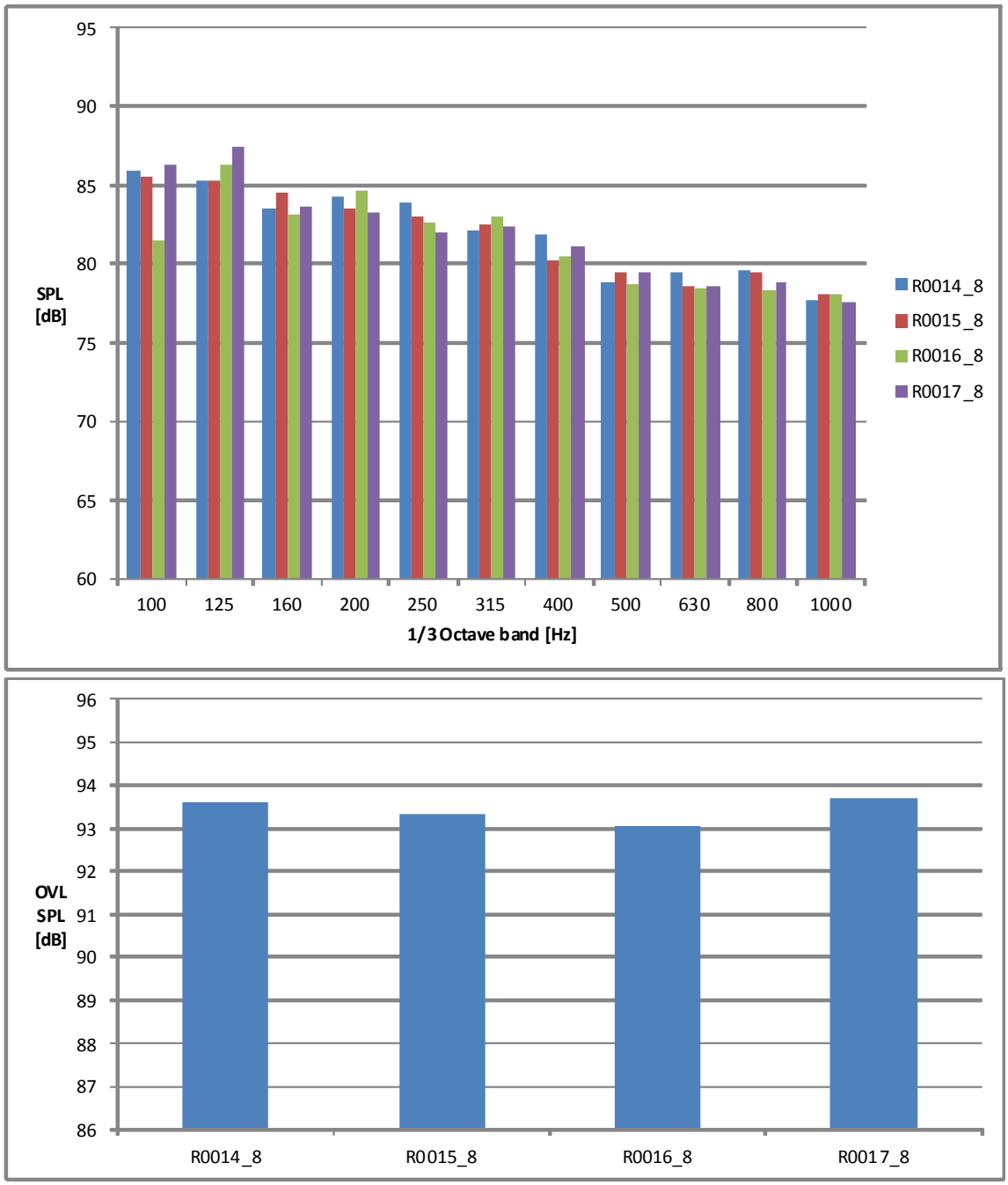


그림 2-1-168 기준 마이크로폰 측정 결과 : 요각변화

(8) 공력소음 시험결과 : 팬터그래프 높이

팬터그래프 높이에 대한 영향을 살펴보면, 그림 2-1-169 최대빔함수 스펙트럼 및 그림 2-1-170 기준 마이크로폰 소음측정결과에서 시험범위 높이조건에서 팬헤드 및 관절부위의 소음 및 OVL SPL은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

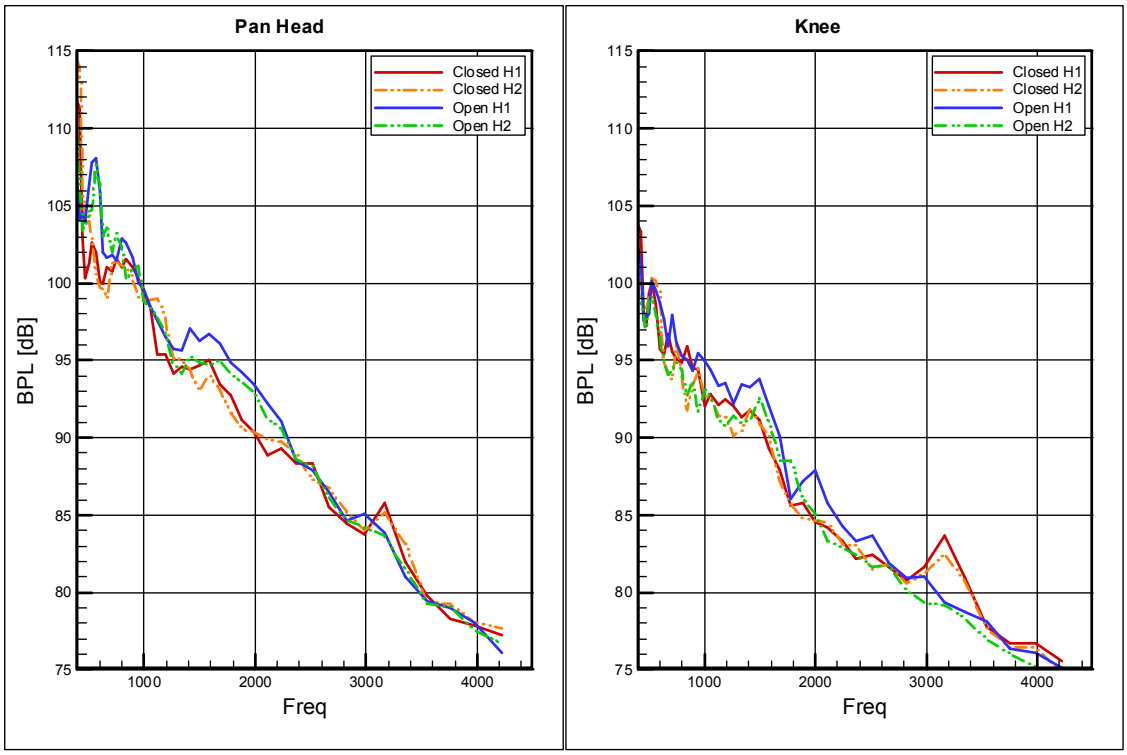


그림 2-1-169 높이에 따른 최대빔함수 스펙트럼

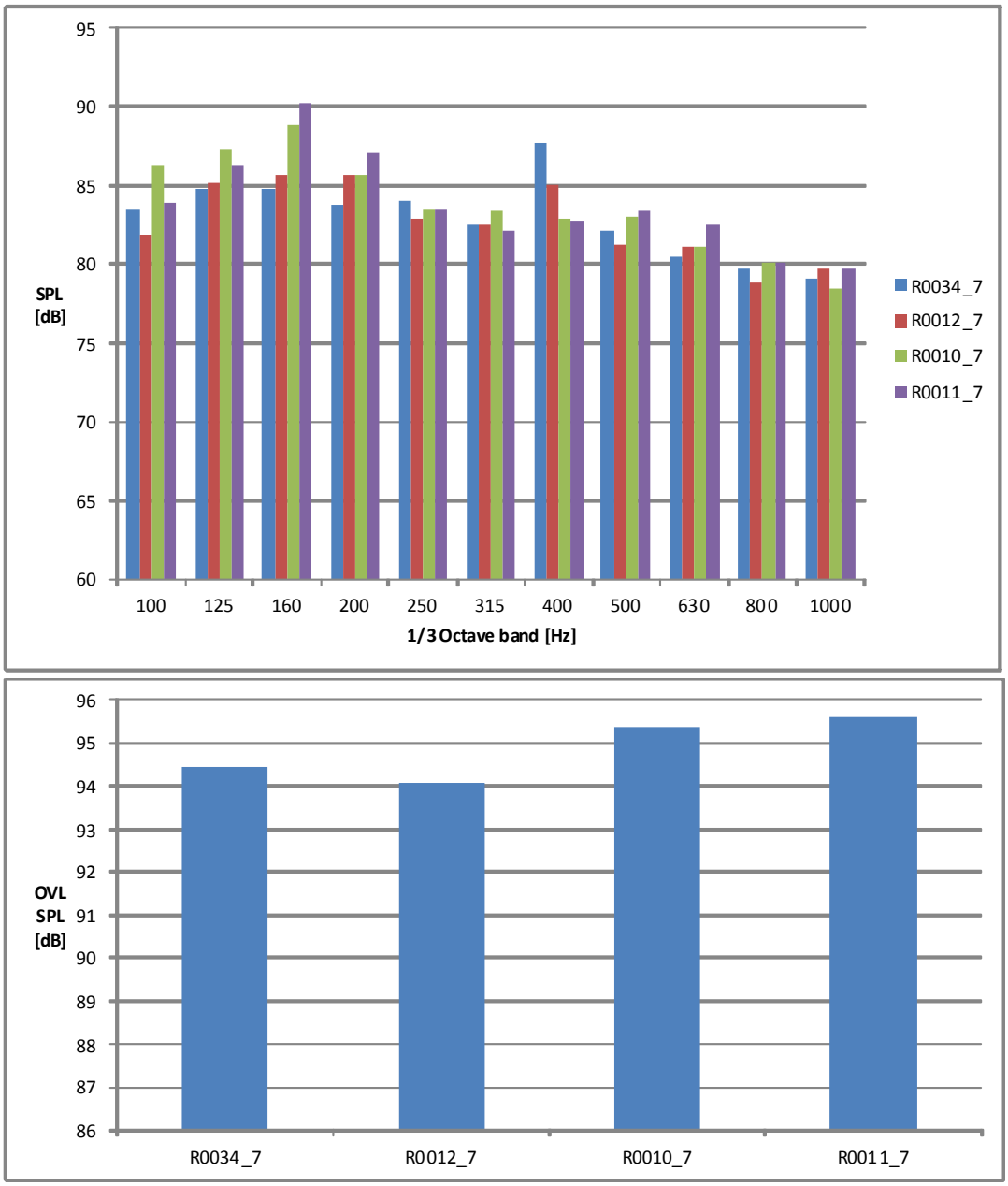


그림 2-1-170 기준 마이크로폰 측정 결과 : 높이변화

(9) 공력소음 시험결과 : 팬헤드

팬헤드 부위의 소음저감 방법을 연구하기 위해 사각단면 형상을 가진 팬헤드에 부착물에 따른 각 형상별 소음저감 효과를 시험하였다. 팬헤드 부착물 시험은 표 2-1-10 의 Set3'과 'Set4'에서 수행되었으며, 각각의 기준형상은 R22와 R37이다. 기준 마이크로폰으로 측정한 'Set3' 시험결과는 팬헤드에 유선형 커버를 부착하여 전체적인 소음레벨(OVL SPL)을 1dB 정도 저감할 수 있음을 보여주고 있다. 1/3 옥타브밴드 스펙트럼에서 팬헤드의 shedding 주파수인 125Hz 대역 소음이 3dB 감소되었음을 알 수 있다. 'Set4' 시험결과인 그림 2-1-172 에서 정상 및 비상 주행조건을 고려하

였을 때 가장 현실적인 방안인 좌우 대칭형 팬헤드 부착물 시험결과(R40)는 기준형상에 비해 OVL SPL이 1dB 저감되었으며, 125Hz~250Hz 대역 소음은 4dB 감소하였음을 알 수 있다. 500Hz 이상 주파수에서는 팬헤드 부착물에 의한 소음저감이 나타나지 않고 있다. 또한, P3와 같은 형상부착물의 경우 400Hz에서 소음을 오히려 증가시키는 현상을 보이고 있으므로, 팬헤드 소음저감을 위해서는 적절한 형상을 갖는 부착물이 설계되어야 한다.

그림 1-4-41 ~ 그림 1-4-47 빔포밍 분석결과에서도 500Hz 이상 주파수 대역에서는 팬헤드 부착물에 의한 소음저감 효과가 거의 없음을 알 수 있다.

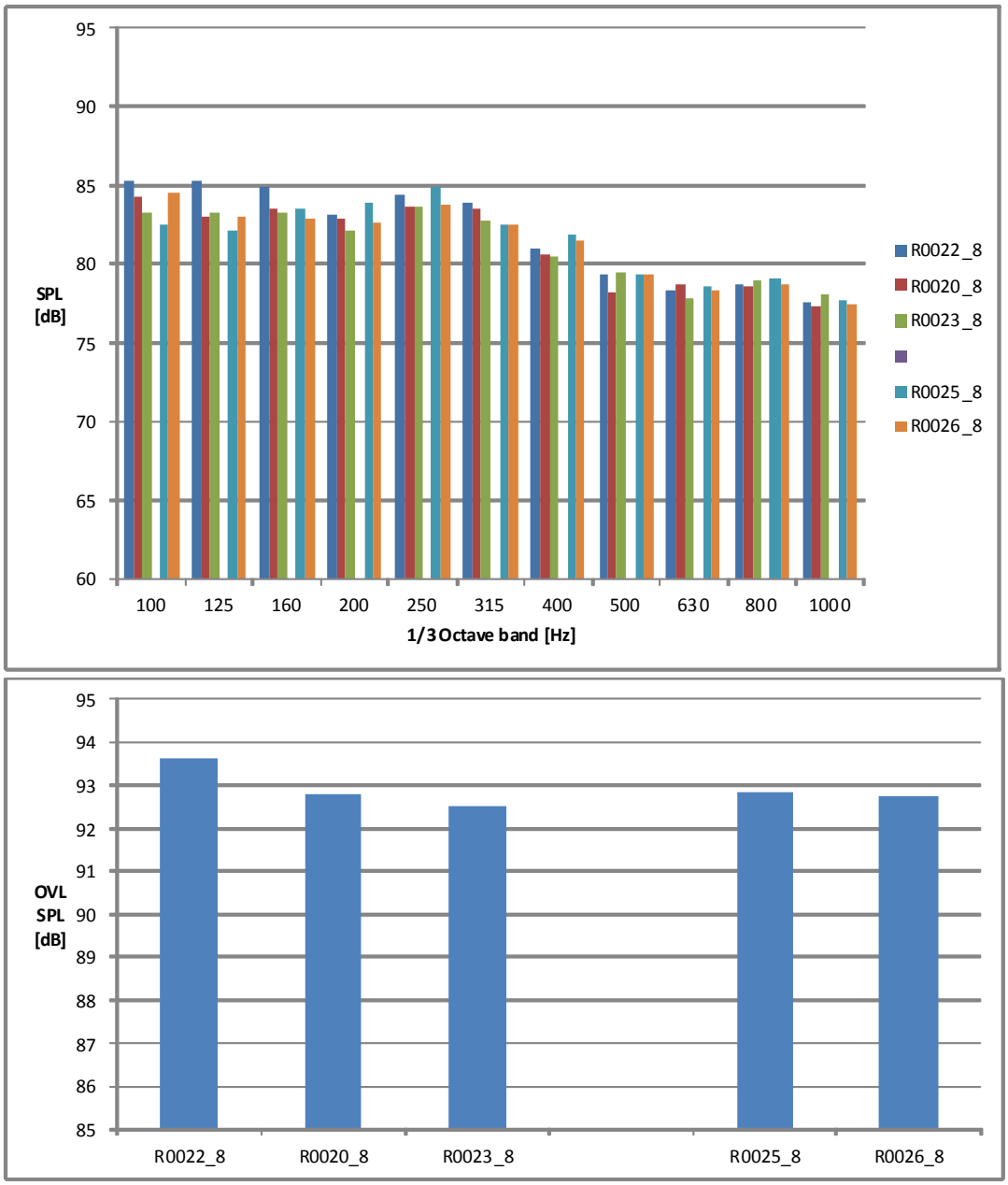


그림 2-1-171 팬헤드 부착물 영향 : Set3

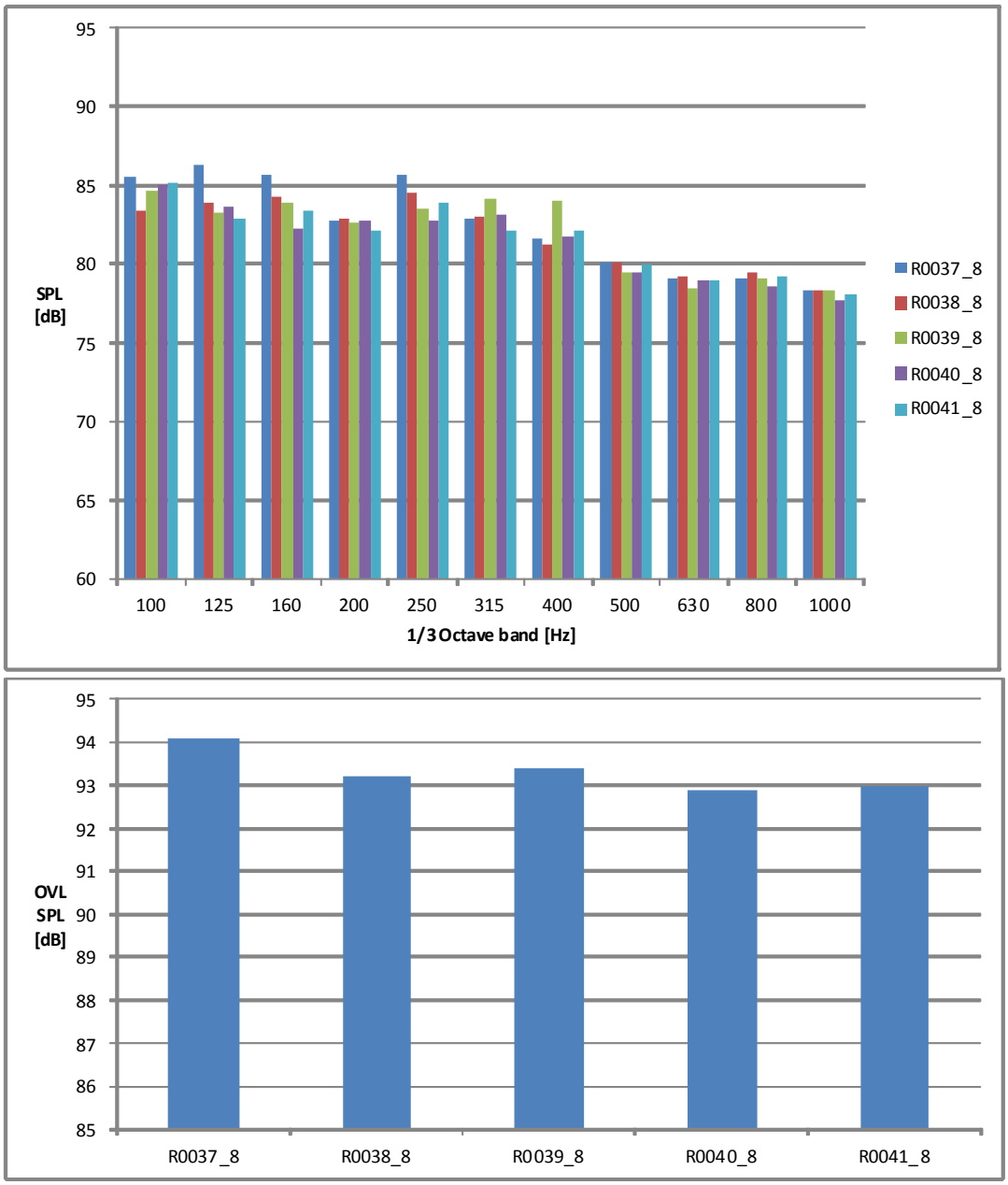


그림 2-1-172 팬헤드 부착물 영향 : Set4

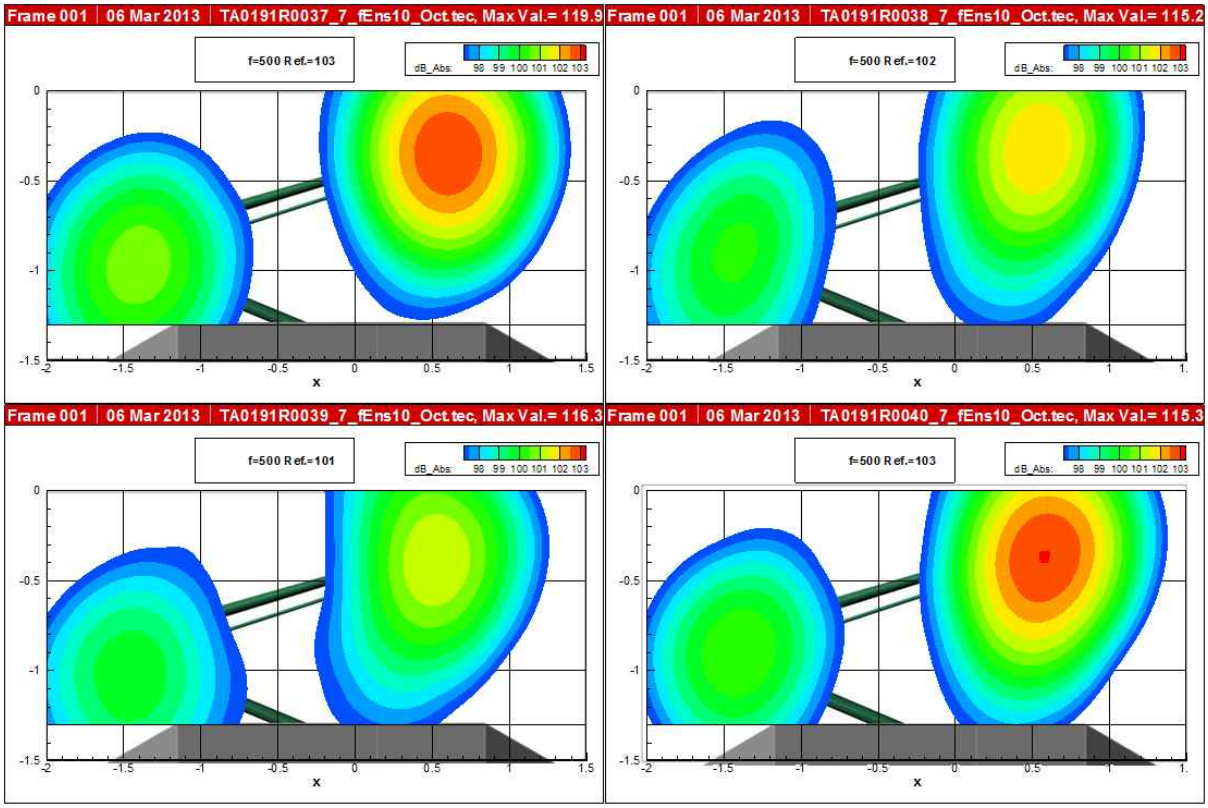


그림 2-1-173 팬헤드 부착물에 의한 소음원 변화 : f = 500Hz

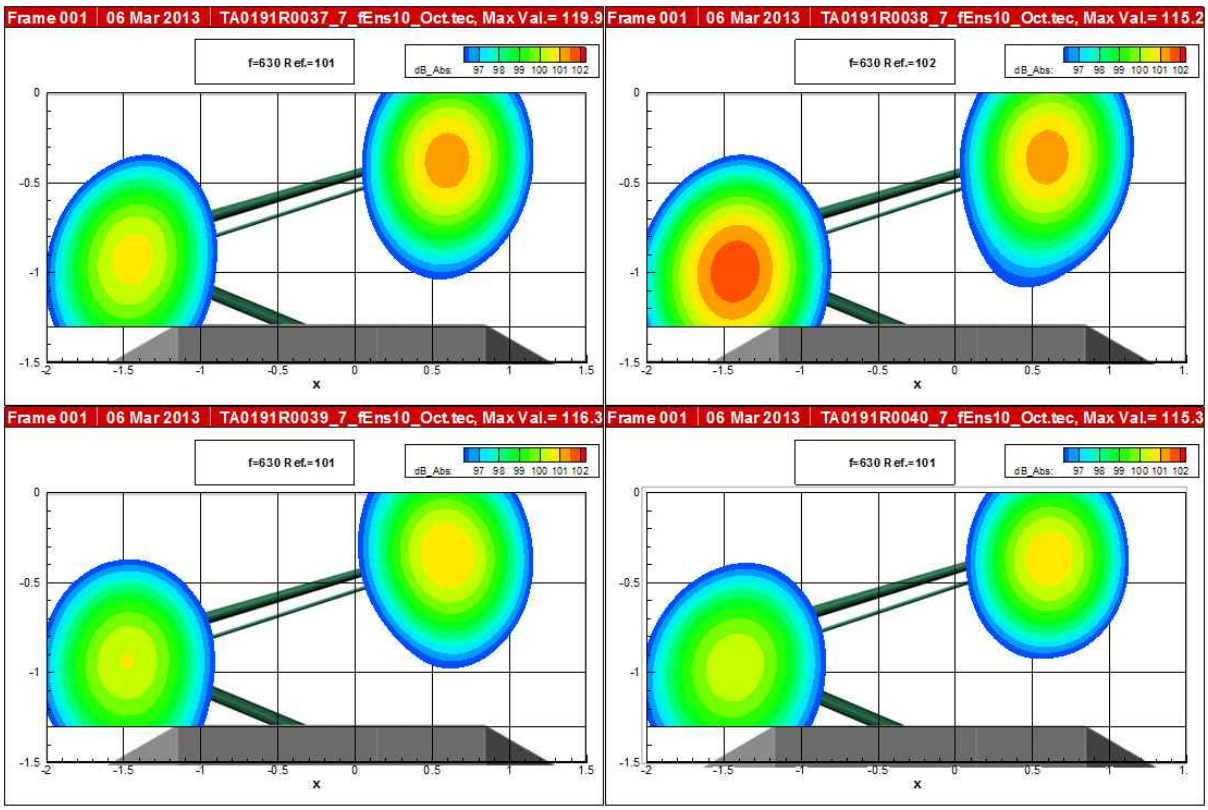


그림 2-1-174 팬헤드 부착물에 의한 소음원 변화 : f = 630Hz

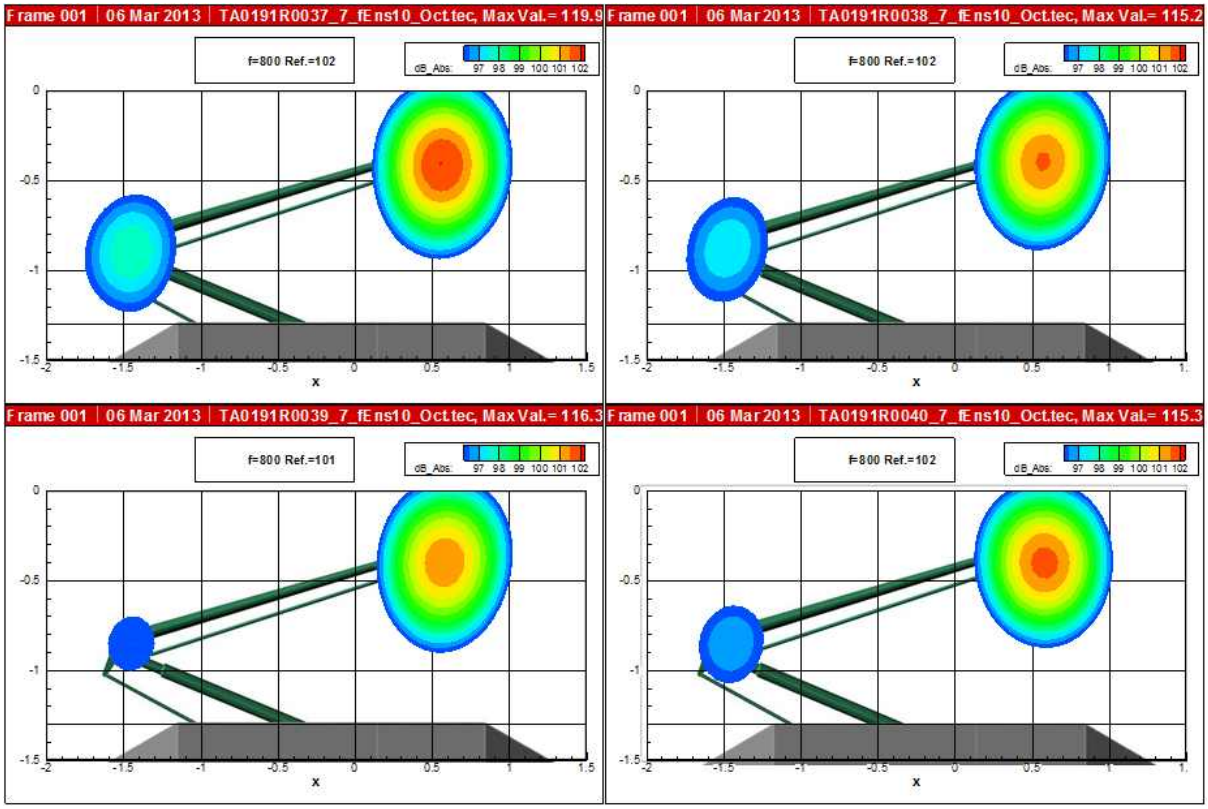


그림 2-1-175 팬헤드 부착물에 의한 소음원 변화 : f = 800Hz

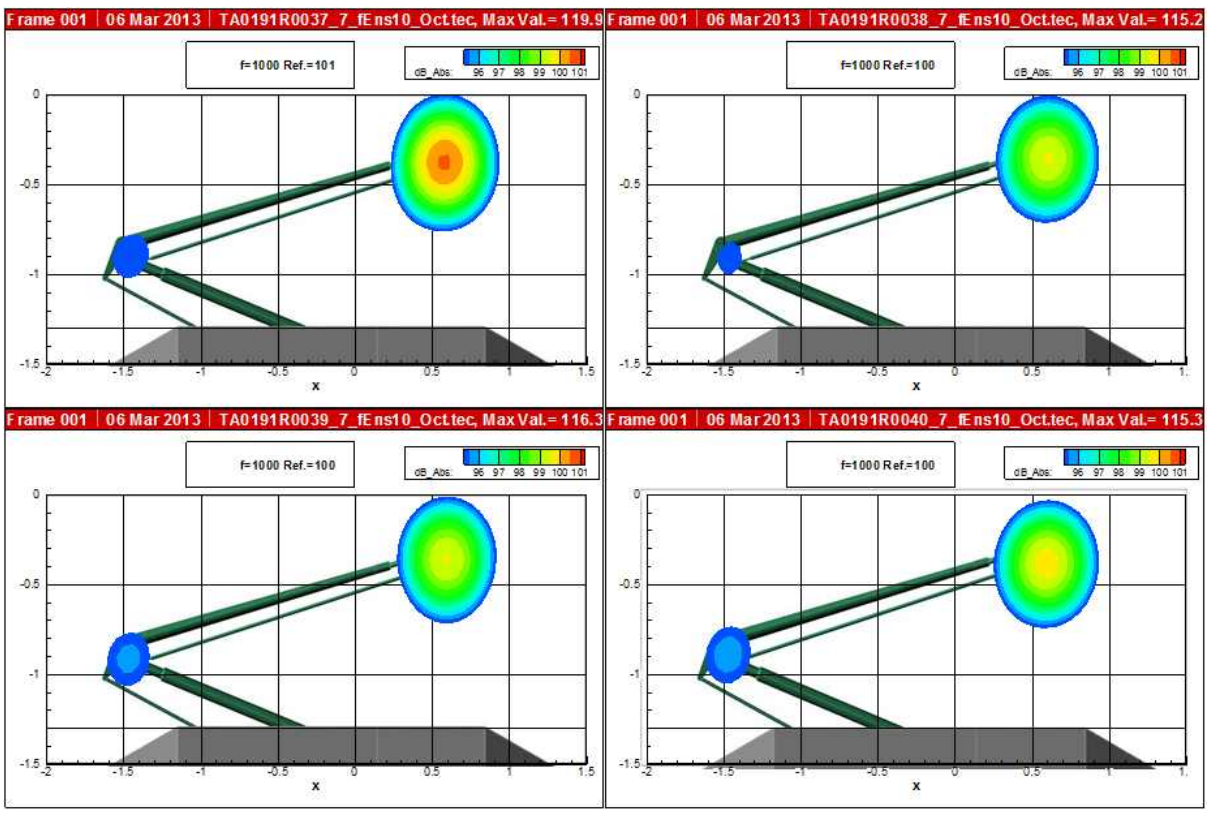


그림 2-1-176 팬헤드 부착물에 의한 소음원 변화 : f = 1000Hz

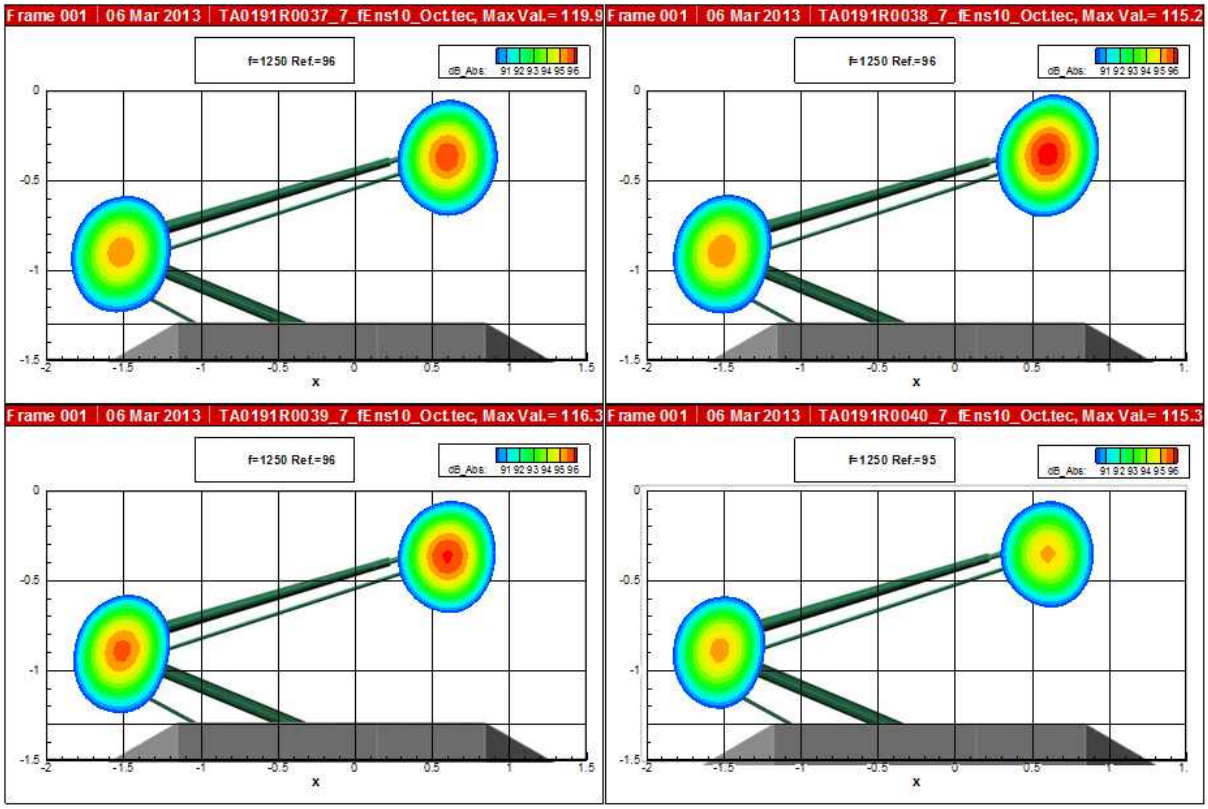


그림 2-1-177 팬헤드 부착물에 의한 소음원 변화 : f = 1250Hz

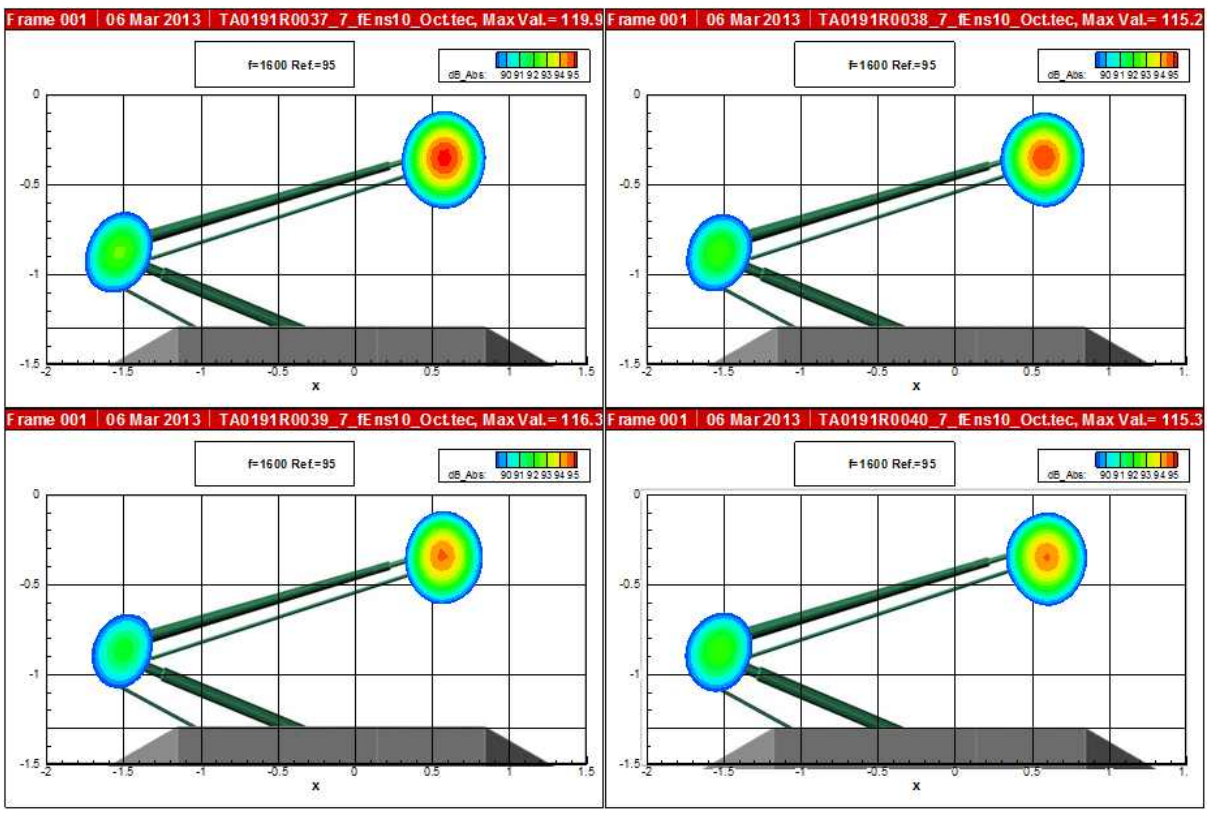


그림 2-1-178 팬헤드 부착물에 의한 소음원 변화 : f = 1600Hz

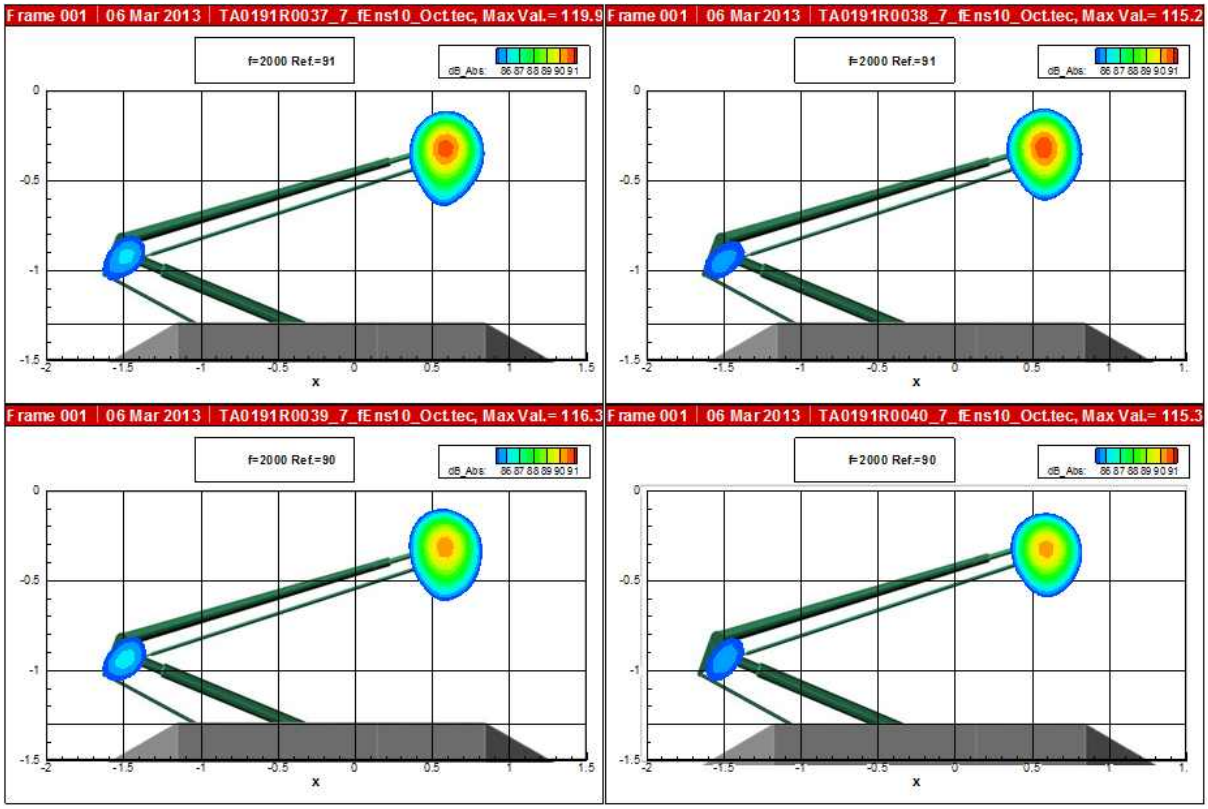


그림 2-1-179 팬헤드 부착물에 의한 소음원 변화 : f = 2000Hz

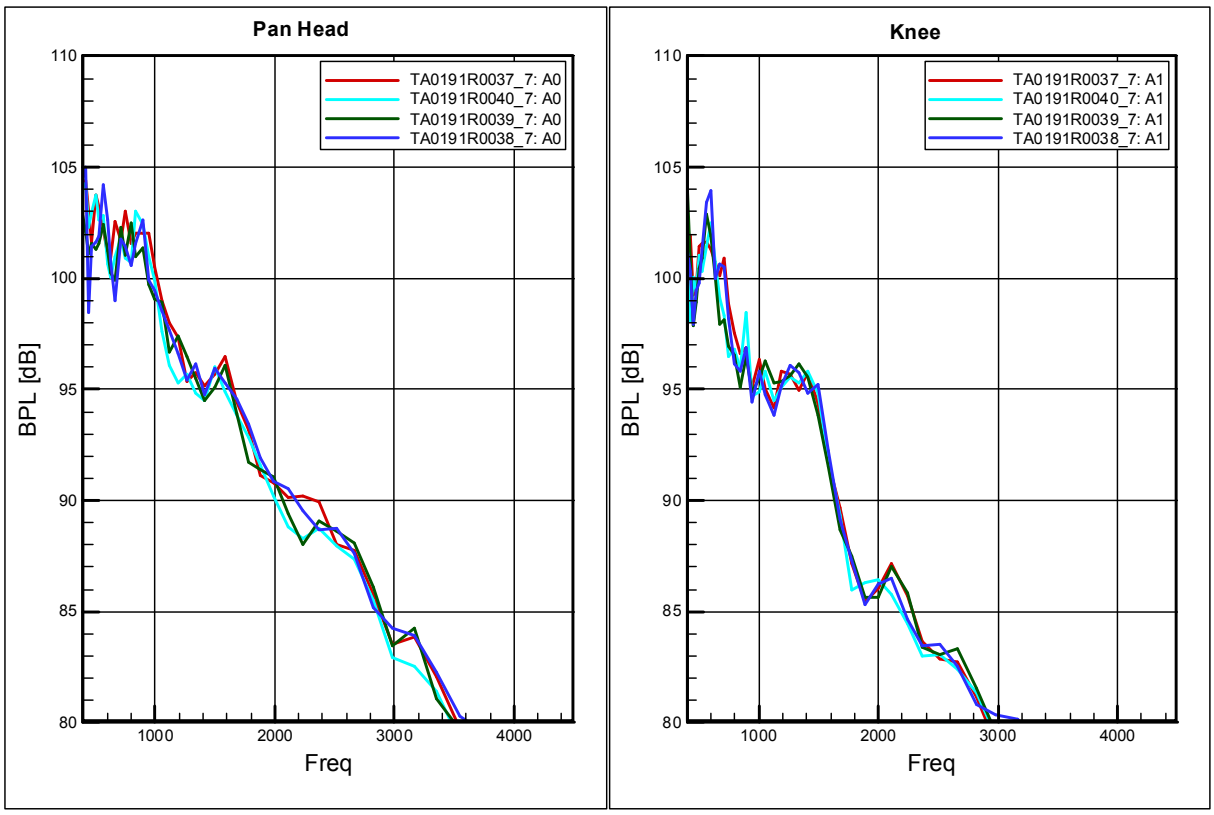


그림 2-1-180 팬헤드 부착물에 의한 최대빔함수 스펙트럼 변화

마. 결론

싱글암 타입의 상용 팬터그래프 풍동시험을 수행하여 팬터그래프 시스템의 공력 및 소음 특성 데이터베이스를 구축하였다. 풍동시험은 정상 운행조건 및 비상 운행 조건에 대해 수행되었으며, 총 314개의 시험조건에 대해 풍동시험이 수행되었다. 팬터그래프 시스템의 축방향 항력을 풍동저울을 사용하여 측정하였으며, 팬헤드에 부가되는 수직력을 wire 로드셀을 사용하여 측정하였다. 총 83개의 마이크로폰으로 구성된 마이크로폰 어레이 시스템을 활용하여 팬터그래프의 주 소음원에 대한 특성을 분석하였으며, 저주파수 소음특성 분석을 위해 팬헤드 높이에 설치된 기준 마이크로폰의 SPL을 분석하였다. 팬헤드 형상에 따른 팬터그래프의 소음, 공력 및 수직력 진동 특성을 분석하여 팬터그래프 저소음 설계를 위한 기초자료를 구축하였다. 팬터그래프 주요 시험결과는 1차년도 보고서 본문에 수록하였으며, 상세한 소음 시험결과는 1차년도 보고서의 부록에 수록하였다.

3. 고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 풀스케일 팬터그래프 형상 개발

고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프를 개발하기 위한 기초 연구로 기존 팬터그래프 모델의 요소별 공력 및 소음특성과 실제 주행속도(350km/h)에서의 공력 및 소음특성을 파악하는 작업을 수행하였다. 소음의 경우 로그단위로 측정되기 때문에 dominant한 소음원이 있다면 그 이외의 부재에서 발생하는 소음을 줄이더라도 전체 형상에 대한 소음에 크게 영향을 주지 않으므로 전체 형상의 소음을 줄이기 위해서는 반드시 요소별 주요 소음원을 파악할 수 있어야 한다. 또한 풍동시험을 실시한 한국항공우주연구원의 아음속풍동이 350km/h에 대해서는 풍동시험이 불가능하므로 대신 50m/s이하의 풍속에 대한 풍동시험 결과를 이용해 실제 주행속도인 350km/h에서의 팬터그래프의 공력 및 소음 특성을 보정 할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 요소별 공력 및 소음 특성에 대해서는 풍동시험용 팬터그래프 모델이 실물 모델로 분해가 불가능하였기 때문에 풍동시험을 통해 전체 형상에 대한 소음분석 및 빔포밍분석을 통한 요소 분석을 수행하고 전산해석을 통한 요소별 분석 결과와 비교 검증하였으며 전산해석과 풍동시험결과를 비교분석한 자료를 바탕으로 풍속 350km/h에서의 팬터그래프 공력 및 소음 성능을 예측하였다.

가. 팬터그래프 공력특성의 전산해석 결과 검증

전산 해석을 위해 도면을 바탕으로 3D CAD 형상을 제작하고 상용프로그램인 Gambit 및 ANSA, Tgird 등을 활용하여 수치해석용 격자를 만들었다. 보통의 유동 해석 모델과 비교해 팬터그래프의 형상이 매우 복잡하기 때문에 몇 단계로 나눠 격자 작업을 수행하

였다. 먼저 재현이 힘든 부분에 대한 1차적인 단순화 작업을 거쳐 3D CAD 형상을 제작한 후 표면격자를 심는다. 두 번째, 경계층 모사를 위한 얇은 prism layer를 쌓으면서 실제 유동에는 거의 영향을 주지 않으나 격자의 퀄리티를 떨어뜨리게 되는 작은 틈새, 모서리등을 부분적으로 수정하고 격자의 skewness낮추는 작업을 수행한다. 마지막으로 적절하게 낮은 수준의 skewness를 갖는 prism layer를 쌓는데 성공하면 형상 수정을 마치고 볼륨격자를 심는다.

(1) CAD프로그램을 이용한 3D full scale 팬터그래프 형상 제작

입수한 CX팬터그래프 도면을 바탕으로 3D full scale의 팬터그래프 형상을 제작한다. 이 때 단순화 작업을 통해 제거된 부분은 표현이 어려운 요철, 공기를 주입하기 위한 튜브 등이 있다. 작은 요철같은 경우 모두 재현해 내기 위해서 막대한 컴퓨팅 파워가 필요하고 공기를 주입하는 튜브는 재현하더라도 실제 팬터그래프 운행도중 형상이 시시각각 변하기 때문에 재현에 의미가 없다고 판단하여 수치해석용 모델에서는 재현하지 않았다. 완성된 팬터그래프 형상은 그림 2-1-181과 같다.

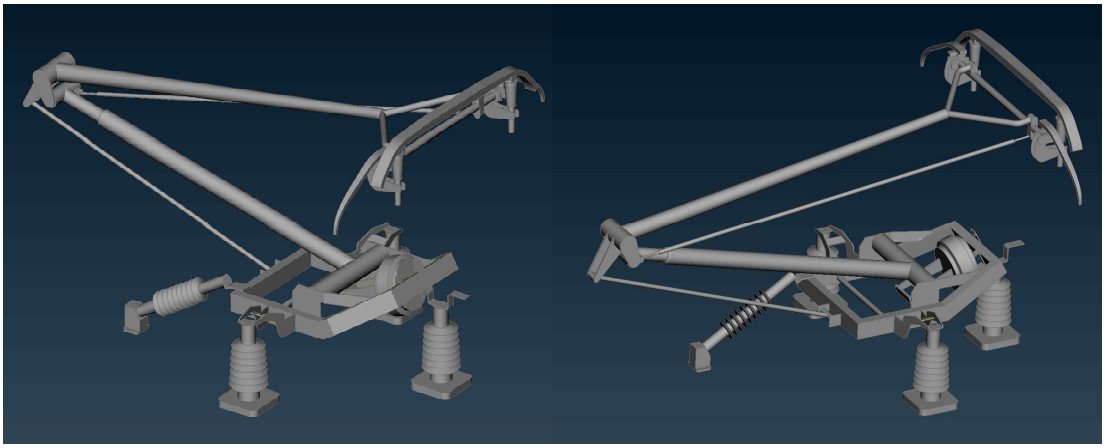


그림 2-1-181 3D 팬터그래프 형상

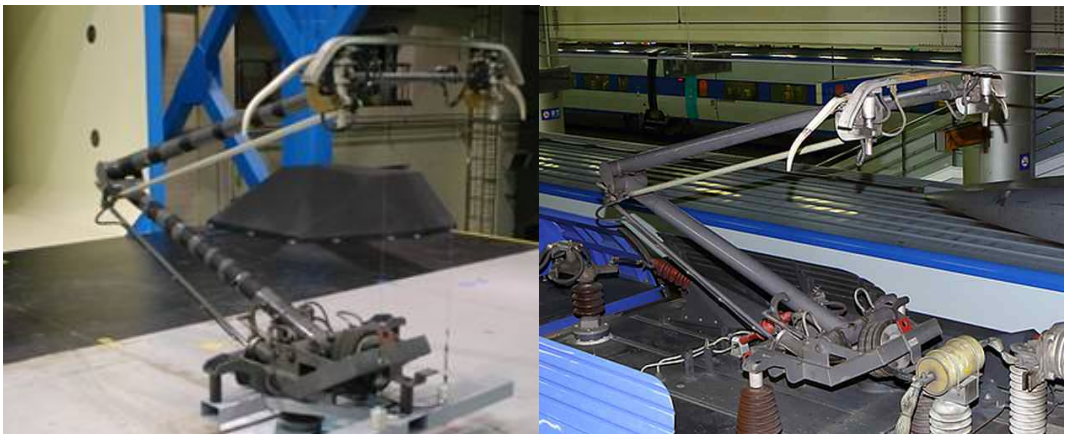


그림 2-1-182 풍동시험을 위한 팬터그래프(좌)와 열차 상부에 탑재된 실제 팬터그래프(우)



그림 2-1-183 실제 팬헤드 형상과 수치 해석용 팬헤드 형상

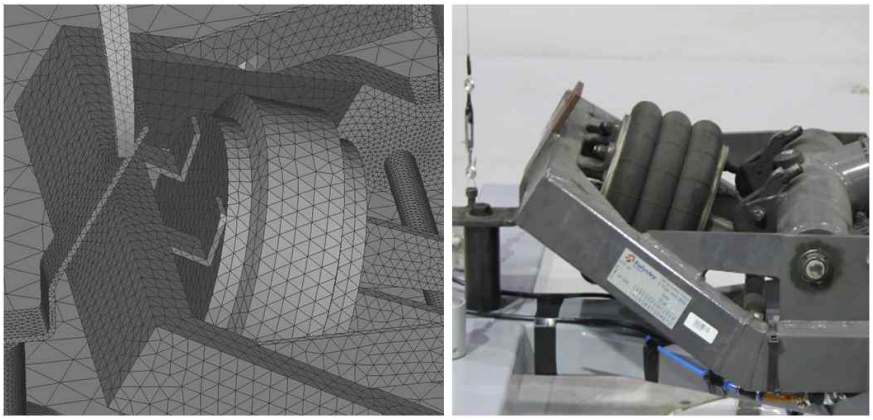


그림 2-1-184 수치해석용 격자에서 단순화된 부분

팬터그래프 형상 중에서도 가장 복잡한 형상을 가지고 있는 팬터그래프의 하부 지지대가 유동교란에 많은 영향을 줄 것이 예상되나 본 과제에서는 암과 팬헤드의 공력 및 소음 특성에 더 관심이 있기 때문에 팬터그래프 하부 지지대에 커버를 씌운 케이스를 추가하였다. 커버형상을 추가한 풍동시험용 팬터그래프와 수치해석용 팬터그래프 형상은 그림 2-1-185와 같다.

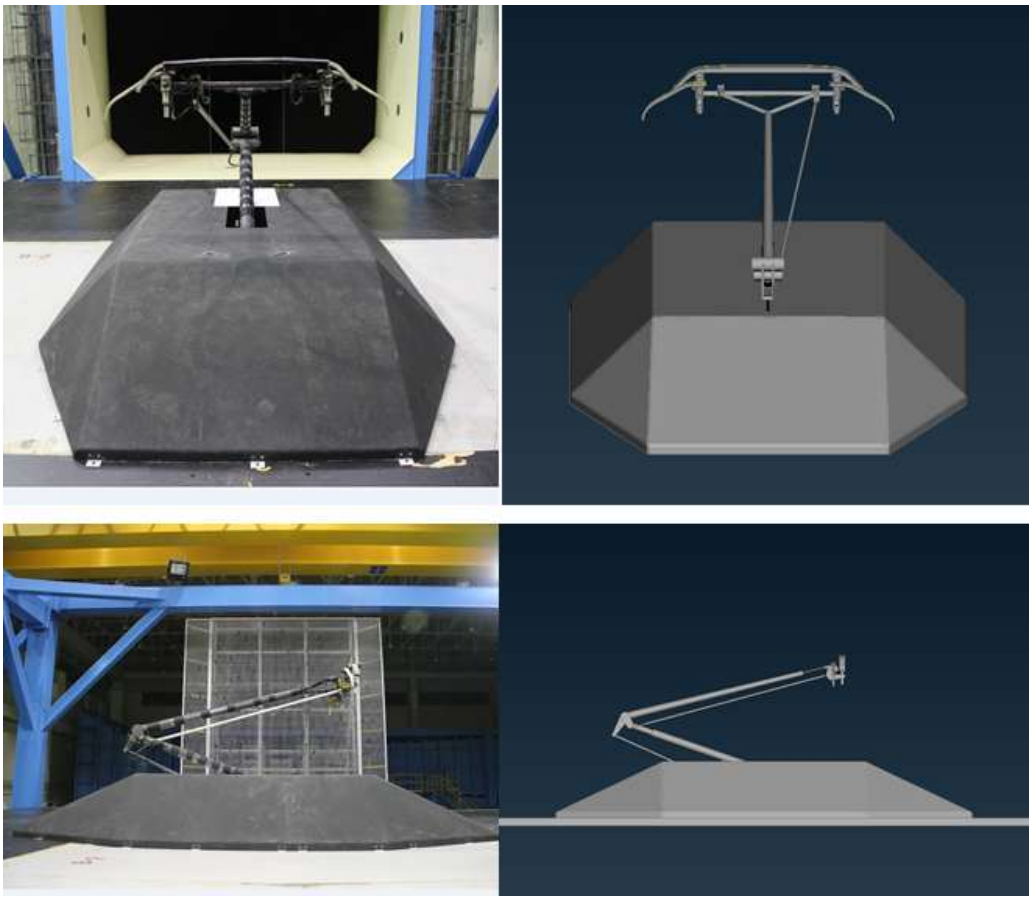


그림 2-1-185 하부 지지대에 커버를 씌운 팬터그래프 모델

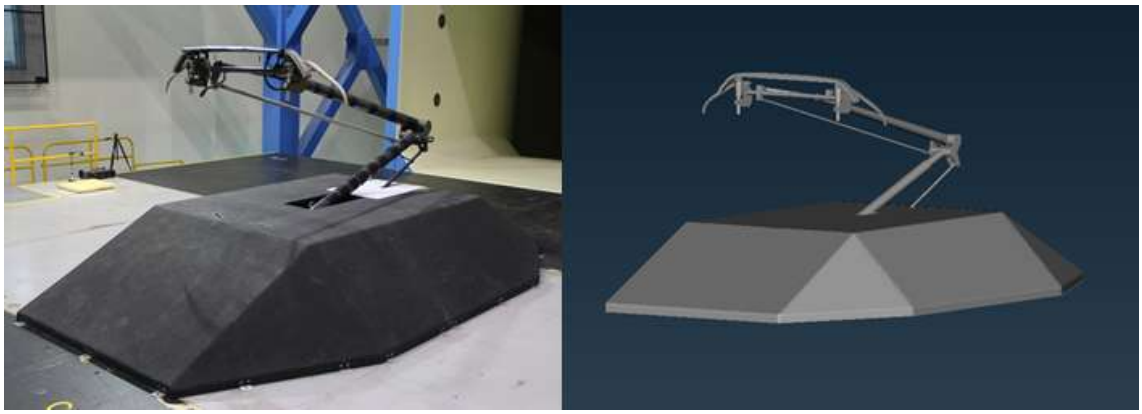


그림 2-1-186 하부 지지대에 커버를 씌운 팬터그래프 모델

(2) 전산해석을 위한 격자 시스템 구축

해석을 하기 위한 형상이 복잡할수록 계산 효율 및 정확도가 감소하므로 완성된 3D CAD 데이터와 Gambit을 이용해 표면격자 작업을 마친 후 ANSA를 이용해 2차적으로 형상을 단순화 하는 작업을 실시한다. 그림 2-1-187은 단순화 예시를 보여준다. 이 단계에서는 해석결과에 영향을 미칠정도의 큰 형상 수정은 이루어지지 않는다. 하지만 경계층 모사를 위한 얇은 prism layer를 쌓았을 때 격자의 skewness가 원하는 수준만큼 낮아질 때까지 계속적인 수정이 필요하다.

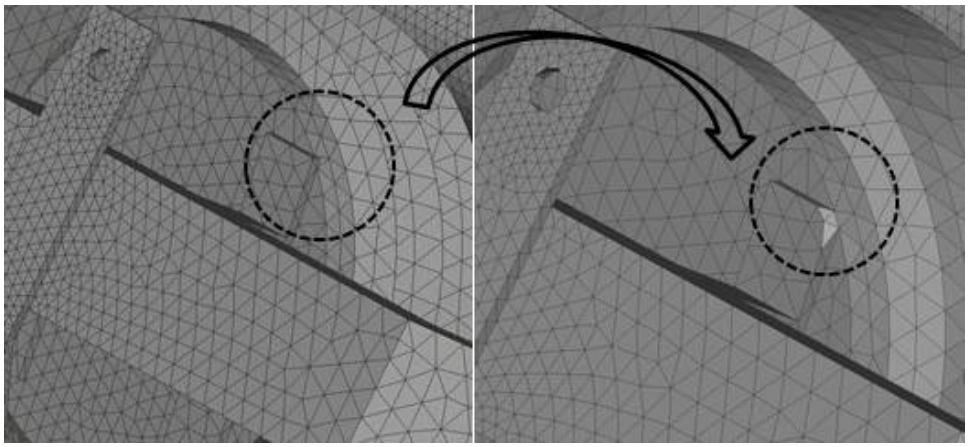


그림 2-1-187 2차 격자 수정 예시

2차 수정작업을 거친 표면격자를 이용해 완성한 볼륨격자는 그림 2-1-188 과 같다. 이렇게 완성한 수치해석용 격자수는 약 2200만개로 0.4초까지의 비정상 유동흐름을 계산하는데 열흘정도가 소요된다. 수치해석 결과의 정확도를 더 높이고 싶다면 전체 도메인의 크기를 키우고 격자개수를 늘릴 필요가 있지만 현재 보유한 computing resource가 처리 가능한 메모리의 수와 처리 속도를 고려하여 약 2000만개 근방에서 격자 개수를 결정하였다.

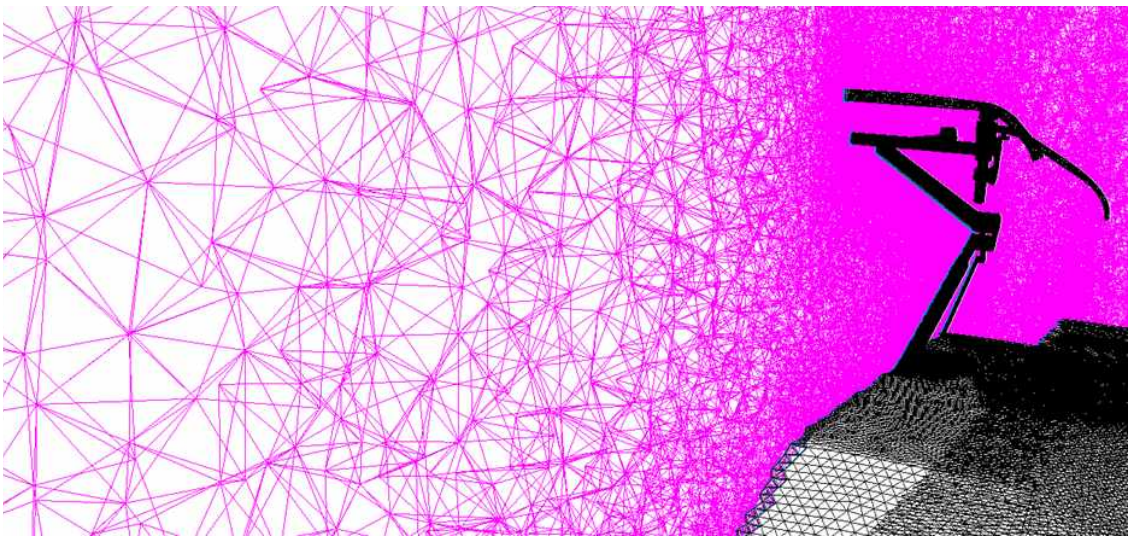


그림 2-1-188 팬터그래프 볼륨 격자

(3) 유동해석

본 과제에서는 상용 코드인 FLUENT를 이용하여 3차원 비압축성 유동에 대한 해석을 수행하였다. 비정상 유동의 해석을 위해 본 연구에서는 우선 정상 상태 유동에 대해 해석을 수행하여 유동을 어느 정도 수렴시킨 이후에 수렴된 유동을 초기 조건으로 하여 비정상 상태 유동에 대해 해석을 수행하였다. 비정상상태에서의 난류 모델로는 LES를 사용하였으나 우선 정상 상태 유동의 난류 계산에는 $k-\omega$ SST 난류 모델을 이용하였다. $k-\omega$

SST 모델은 wall 근처에서 $k-w$ 모델을, far field에서 $k-e$ 모델을 쓸 수 있도록 두 개의 모델을 결합한 형태이다. 또한 2방정식으로 난류를 계산하기 때문에 비교적 정확하면서도 효율적인 난류 계산이 가능하다. 따라서 비정상 유동 해석을 위한 수렴된 형태의 초기 조건을 얻는데 있어서 유용하다. 수렴된 유동 해석 data를 얻은 이후에는 LES 난류 모델을 적용하여 다시 비정상 유동 해석을 수행하였다. LES기법은 큰 스케일의 와류에 대해서는 직접 계산을 작은 스케일의 와류에 대해서는 난류 점성 모델을 사용하여, 계산을 수행한다. 따라서 뛰어난 박리 및 와류 예측이 가능하기 때문에 다른 난류 모델에 비해서 비교적 정확한 소음 예측이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 본 과제에서는 작은 스케일의 난류점성 계산을 위해 식 (1)과 같이 Smagorinsky-Lilly 모델을 이용하였다.

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \qquad (1)$$
$$L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3})$$

여기에서 L_s, κ, d, C_s, V는 혼합길이, von Karman상수, 가장 가까운 벽면거리, Smagorinsky 상수, 그리고 격자 체적을 나타낸다. Smagorinsky 상수는 광범위한 유동장 해석에서도 사용가능하도록 Lilly가 제안한 상수값 0.1을 적용하였다.

경계 조건의 경우에는 유동의 Inlet 부분은 Velocity inlet condition으로 설정하였다. 이때 실험 결과와의 비교 검증을 위해 유동 속도는 30m/s로 하여 Inlet condition을 선정하였다. Outlet 부분은 Pressure outlet조건으로 선정하였음, wall, inlet, outlet등을 제외한 나머지 영역은 symmetric condition으로 하였다.

앞서 언급한 것처럼 먼저 정상상태에 대해 유동 해석을 수행하고 수렴된 정상 상태 유동 data를 초기조건으로 dual time stepping기법을 이용해 0.4초까지 Δt=0.0001로 해석을 수행하였다.

(4) 소음분석

공력소음에 대한 최초의 이론적 연구는 Lighthill이 공간상에 분출하는 Jet 소음에 대해 기본적인 파동방정식을 유도한 연구에서 찾을 수 있다. 이러한 연구는 Curle에 의해 공간상에 정지하는 물체에 대해 공력소음을 계산할 수 있도록 확장되었으며 Ffowcs Williams와 Hawkins에 의해 공간상에서 움직이는 물체가 있는 경우에도 공력소음을 계산할 수 있도록 최종적인 FW-H모델이 완성되었다.

본 연구에서는 이러한 FW-H 모델을 이용하여 공력소음해석을 수행하였다. 질량 및 운동방정식의 FW_H 모델은 다음의 식과 같다.

$$\frac{1}{a_0^2}\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}[T_{ij}H(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i}[[P_{ij}n_j + \rho u_i(u_n - u_n)]\delta(f)] + \frac{\partial}{\partial t}[[\rho_0 v_n + \rho(u_n - v_n)]\delta(f)] \qquad (2)$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2(\rho - \rho_0)\delta_{ij}$$

$$P_{ij} = p\delta_{ij} - \mu[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}]$$

여기서,

p' =원방에서의 음압 ($p' = p - p_0$)
a_0=원방에서의 음속
u_i =물체 표면에서 x_i방향 유체 속도
u_n =물체 표면에서 수직 방향 유체 속도
v_i =물체 표면의 x_i 방향 속도
v_n =물체 표면의 수직방향 속도
$\delta(f)$ =Dirac delta function
$H(f)$ =Heaviside function
T_{ij}=Lighthill's stress tensor
P_{ij}=compressive stress tensor

이 때 식(2)의 우변의 첫째 항은 사극소음원, 둘째항은 이극소음원, 셋째 항은 단극소음원의 의한 소음항들을 나타낸다. 이러한 식(2)의 해는 Green 함수를 이용하여 얻을 수 있으며, 이 때 Mach 수가 작은 경우 사극소음원에 의한 공력소음은 작다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 사극소음원에 의한 영향은 고려하지 않으며, Fluent에 의한 비정상 유동 해석 수행 후에 다시 Fluent 의 FW-H모델을 이용하여 공력소음 해석을 수행하였다. 이 때 Nyquist frequency는 비정상 유동 해석의 시간 간격에 의해 결정되며 식(3)과 같다.

$$f_{\max} = \frac{1}{2\Delta t} \qquad (3)$$

풍동 시험 결과를 보았을 때 5000Hz이상의 소음 결과는 의미가 없는 것으로 판단되었기 때문에 최대 5000Hz까지 분석을 수행하기로 하고 time step을 10^{-4}sec로 결정하였다.

(5) 결과 분석

수치해석 검증 결과를 바탕으로 실제 팬터그래프가 운영되는 조건에서의 공력 및 소음 특성을 예측하였다. 더욱 정확한 보정식을 얻기 위해 30m/s이외에 35, 40, 45m/s에서 속도별 해석을 수행하여 풍동시험결과와 비교하였고 30m/s 조건에서 yaw각이 변할 때의 공력 특성역시 추가로 해석하였다. 이후 실제 주행조건(350km/h)에 대한 전산해석을 수행하고 풍동시험결과와 비교를 통해 얻은 보정데이터를 이용해 전산해석 결과에 대해 보정작업을 수행하여 실제 운영조건에서의 팬터그래프 공력 및 소음 특성 값을 구하였다.
그림 2-1-189는 결과 보정작업이 이루어지는 프로세스를 보여준다.

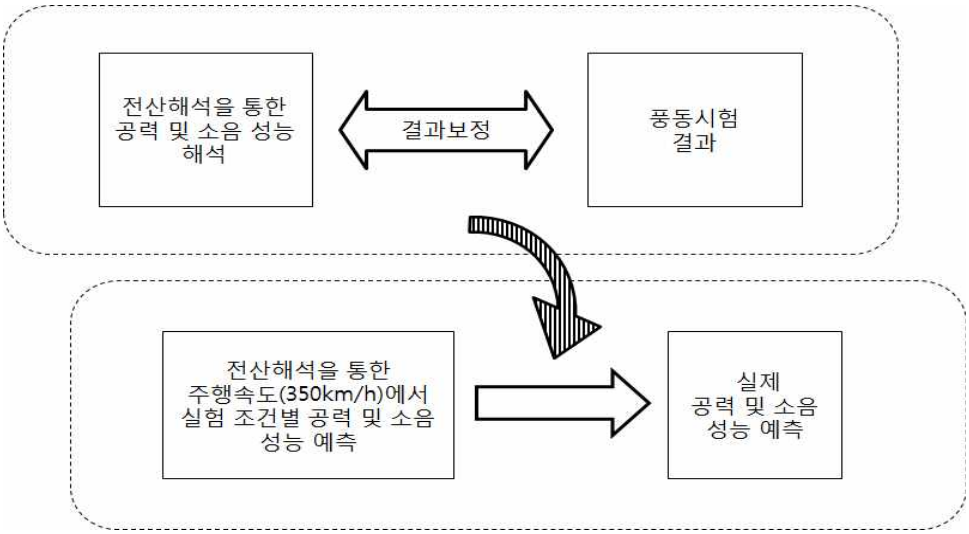


그림 2-1-189 전산해석 결과 보정 프로세스

다음 그림 2-1-190~193은 30m/s 유동조건에 대한 팬터그래프 주변의 압력 분포와 속도 분포를 나타낸 것이다.

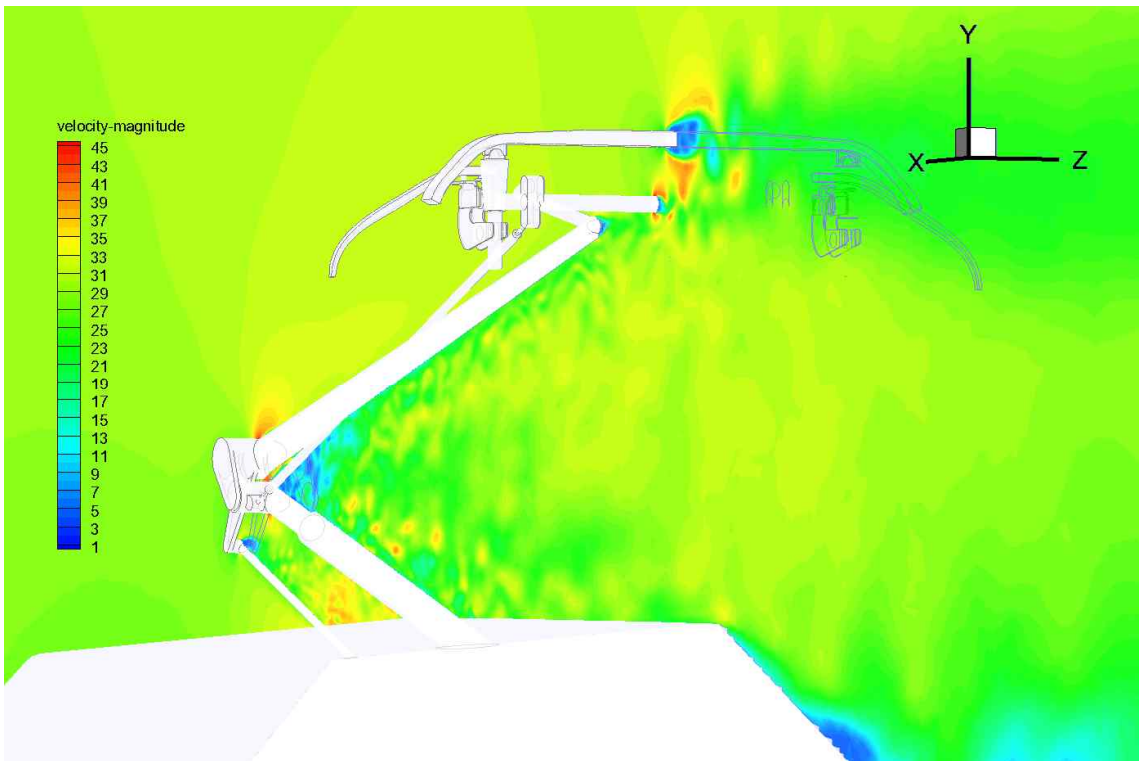


그림 2-1-190 팬터그래프 주위의 속도 분포

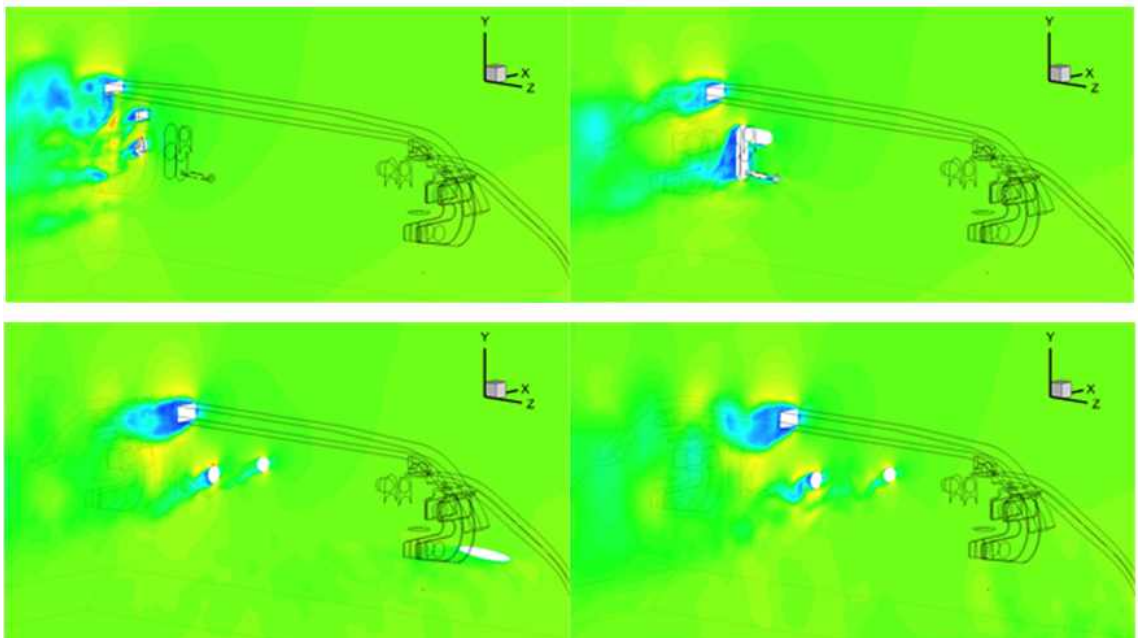


그림 2-1-191 팬헤드 주위의 속도 분포

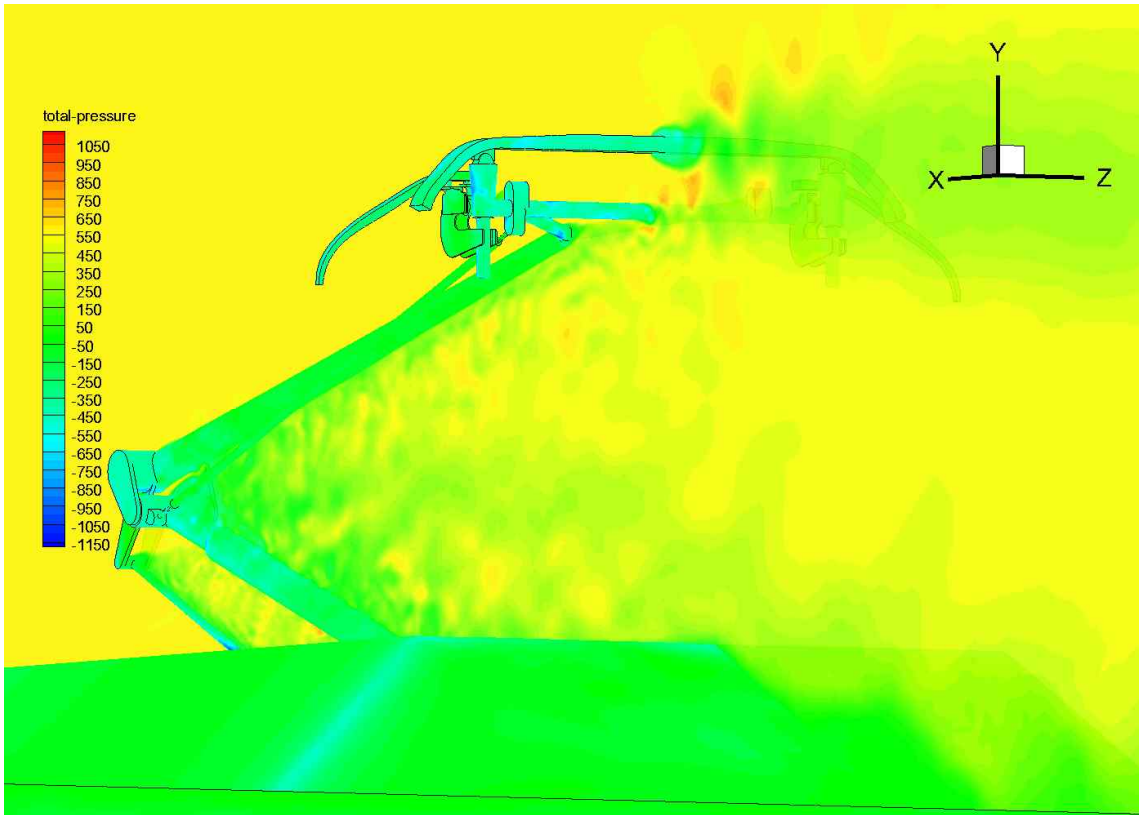


그림 2-1-192 팬터그래프 주위의 압력 분포

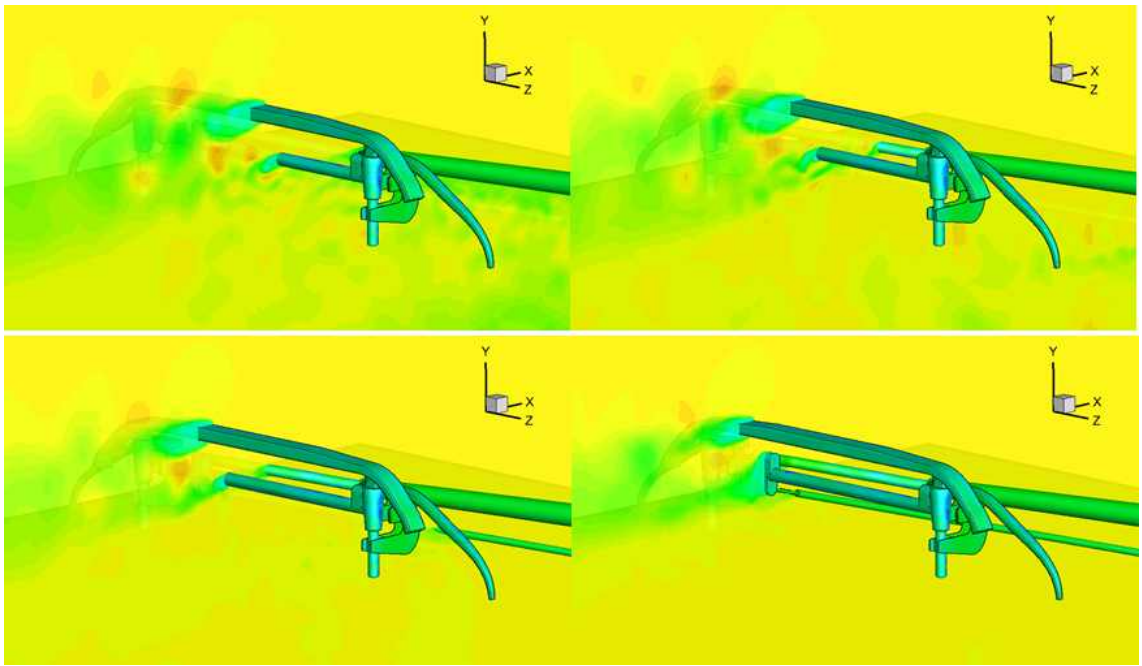


그림 2-1-193 팬헤드 주위의 압력 분포

이상의 그림들을 보면 암과 팬헤드를 지나면서 교란된 속도 및 압력장이 잘 모사되어 있는 것을 볼 수 있다.

표 2-1-11은 공력 및 소음특성에 대한 실험 치와 전산해석 값을 비교한 것이다.

표 2-1-11 속도별 공력 특성 비교

inlet condition	30m/s	35m/s	40m/s	45m/s
Lift-Exp. (N)	12.01	19.75	27.16	31.17
Lift-CFD. (N)	7.61	10.28	13.82	17.44
Δ	3.32%	5.19%	5.60%	4.75%
Drag-Exp. (N)	132.70	182.37	238.41	289.34
Drag-CFD (N)	92.19	126.40	165.07	200.61
Δ	30.52%	30.69%	30.76%	30.66%
overall Noise-Exp. (dB)	83.00	87.5	92.0	93.6
overall Noise-CFD (dB)	73.32	77.78	82.22	84.47
Δ (dB)	9.68	9.72	9.78	9.13

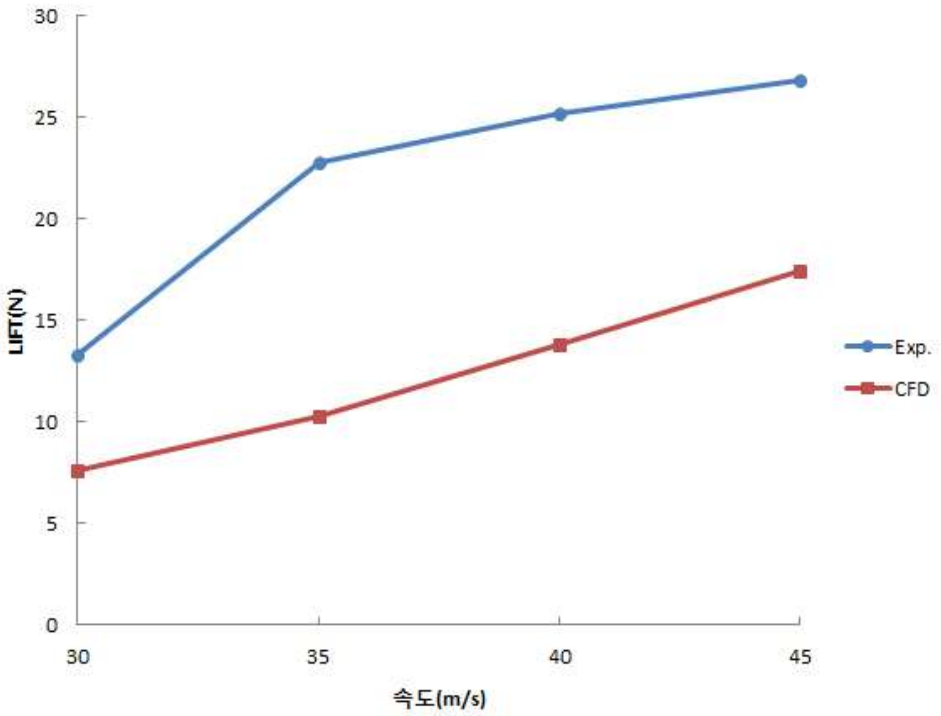


그림 2-1-194 속도에 따른 양력 값 비교

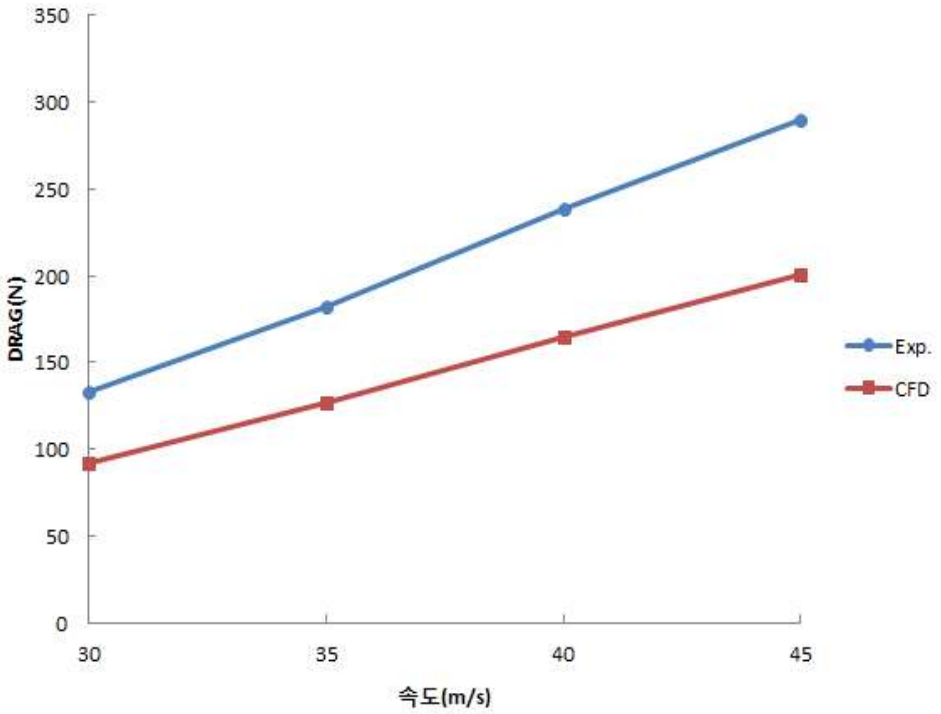


그림 2-1-195 속도에 따른 항력 값 비교

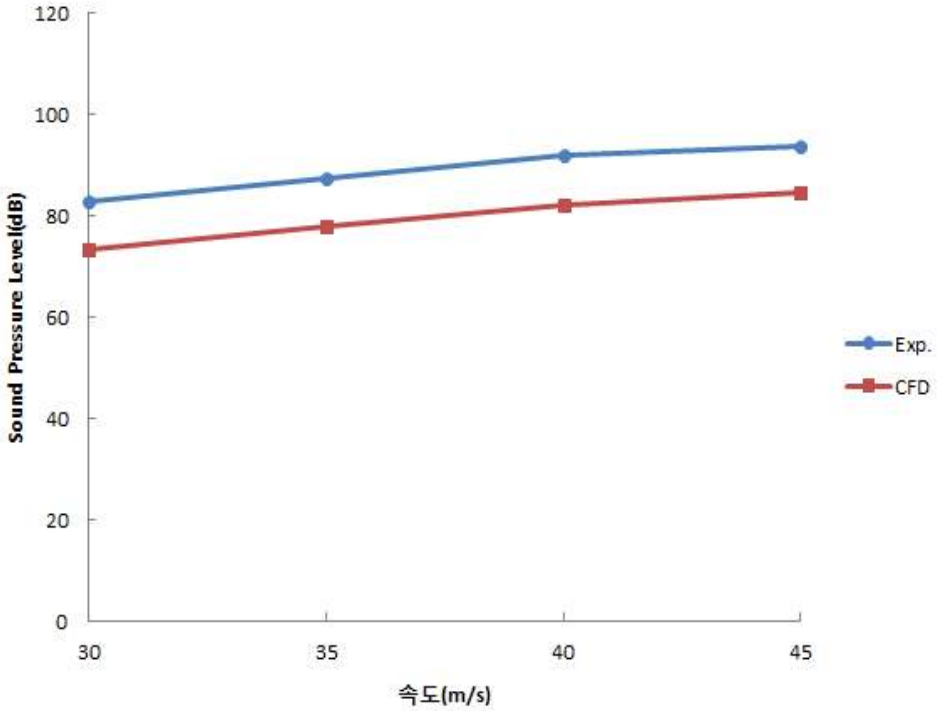


그림 2-1-196 속도에 따른 overall noise 비교

다음 표 2-1-12와 그림 2-1-197~199는 yaw각에 대한 조건별 풍동시험-전산해석 결과이다.

표 2-1-12 실험 조건 별 공력 특성 비교

operating condition	30m/s -2° yaw angle	30m/s 0° yaw angle	30m/s 2° yaw angle
Lift-Exp. (N)	11.03	12.01	15.28
Lift-CFD. (N)	6.51	7.61	9.31
Δ	3.48%	3.32%	4.61%
Drag-Exp. (N)	130.03	132.70	129.58
Drag-CFD (N)	90.09	92.19	89.93
Δ	30.71%	30.52%	30.6%
overall Noise-Exp. (dB)	83.4	83.00	82.8
overall Noise-CFD (dB)	73.32	73.32	72.79
Δ (dB)	10.08	9.68	10.01

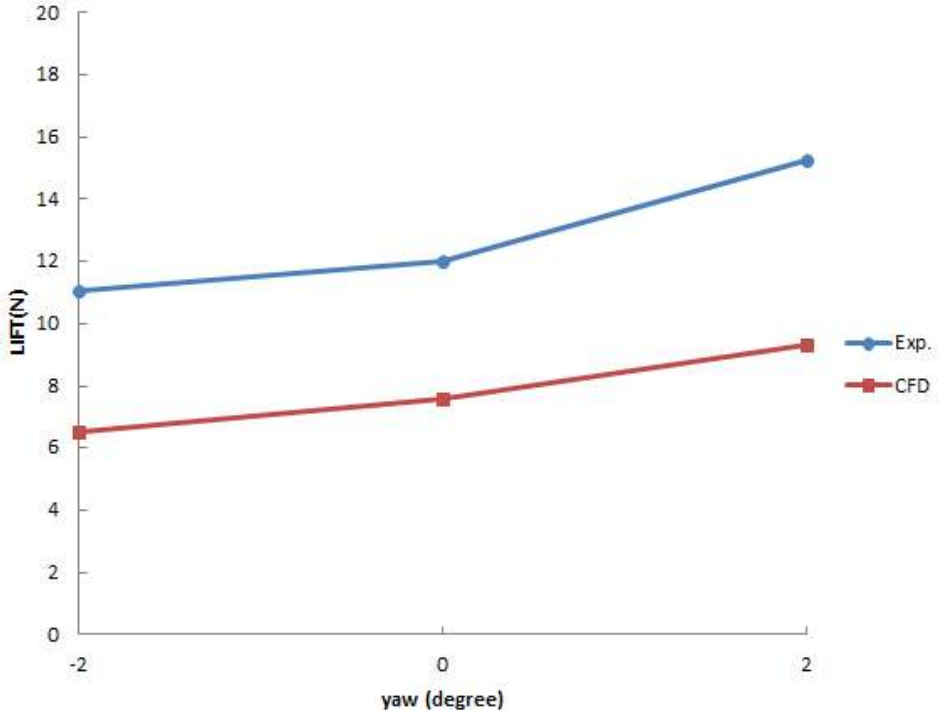


그림 2-1-197 Yaw각에 따른 양력 값 비교

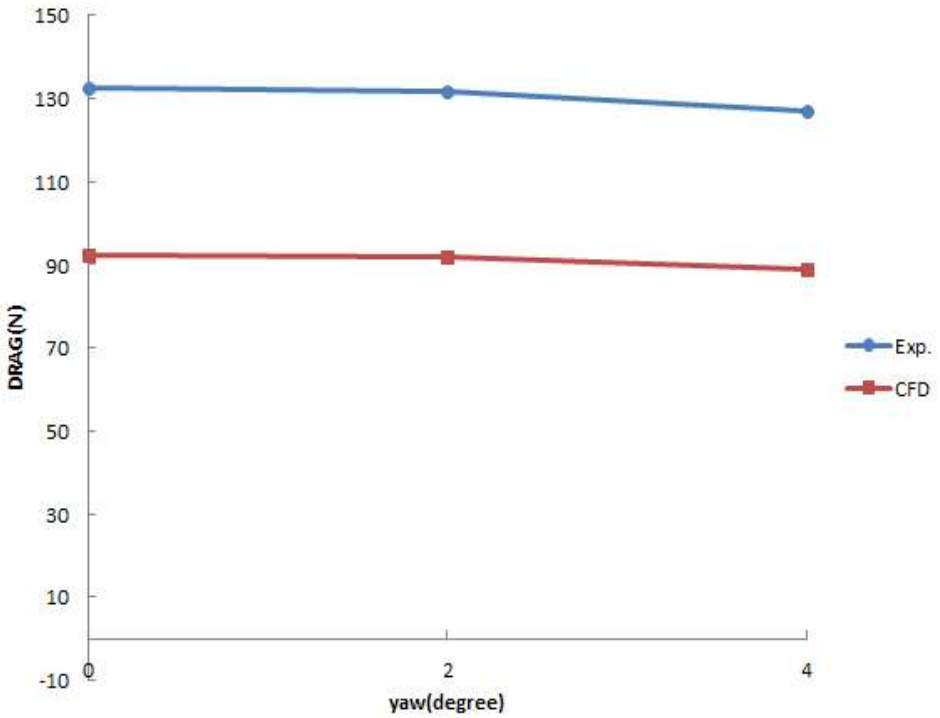


그림 2-1-198 Yaw각에 대한 항력 값 비교

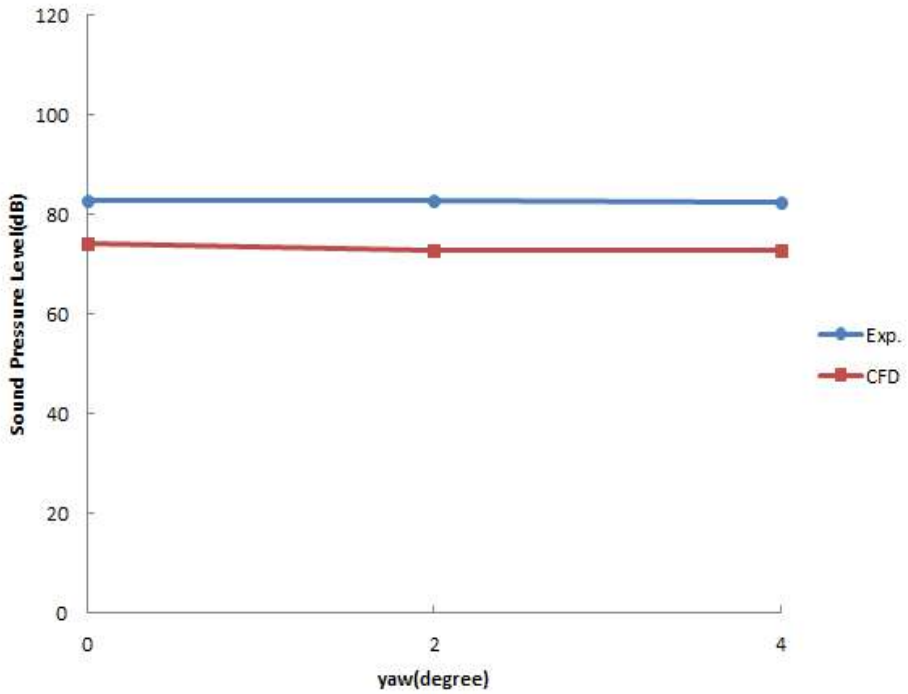


그림 2-1-199 yaw각에 대한 소음 특성 비교

양력의 경우 팬터그래프 전체에 대한 항력을 기준으로 Δ값을 구했을 때 평균 4.5%정도 양의 오차를 가지고 있었다. 하지만 속도에 따른 양력증가경향을 고려할 때 전산해석 오차는 항력의 3%정도가 타당할 것으로 판단된다. 항력 값의 경우에는 약 30%정도 전산해석 값이 풍동시험 값에 비해 낮게 예측되었다.

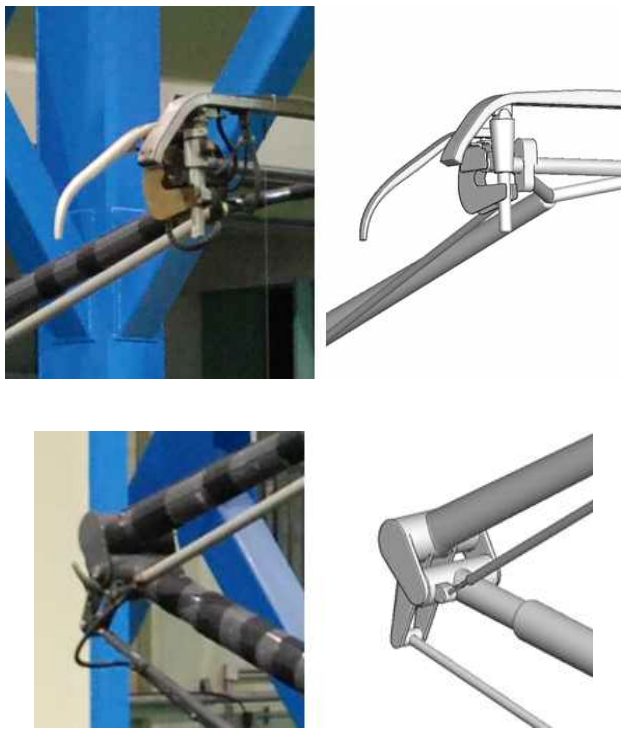


그림 2-1-200 전산해석 모델에서 생략된 공기 주입용 튜브

이는 실제 팬터그래프 형상을 단순화하면서 생긴 오차로 생각되며 실제로 그림 2-1-200에서 보는 것처럼 실제 팬터그래프 형상에 비해 모사가 힘든 부품, 튜브 등이 생략되어 전산해석용 팬터그래프 모델이 상당히 깔끔하다. 또한 풍동시험 시 양력측정을 위해 설치된 와이어도 적지만 항력 증가에 영향을 줄 수 있을 것이며 암의 테이핑등도 영향을 주었을 것으로 생각된다. 격자작업 중 경계층을 모사하기 위한 prism layer를 쌓기 위해 손질했던 부분들도 각진 모서리를 깍고 틈새를 메우는 작업이기 때문에 결과적으로 수치해석의 항력을 줄이게 되었을 것으로 예상된다. 하지만 모든 케이스에 대해 항력오차가 약 30%의 일관된 오차를 보이고 있으므로 전산해석 결과를 이용해 보정한 실제 공력 특성을 충분히 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

소음의 경우 풍동시험과 약 10dB정도의 차이가 있으나 역시 속도에 대해 같은 경향을 가지고 증가하고 있다. 이러한 오차는 1차적으로 무향풍동이 아닌 풍동시험 환경과 전산해석 환경사이의 차이에서 비롯되는 것으로 판단되며 더 조밀한 격자시스템과 수치해석용 모델의 세밀한 형상 재현이 가능하다면 개선이 가능할 것으로 생각된다.

다음 그래프는 30m/s조건에서 실험과 수치해석의 소음측정 결과를 주파수대별로 비교한 것이다.

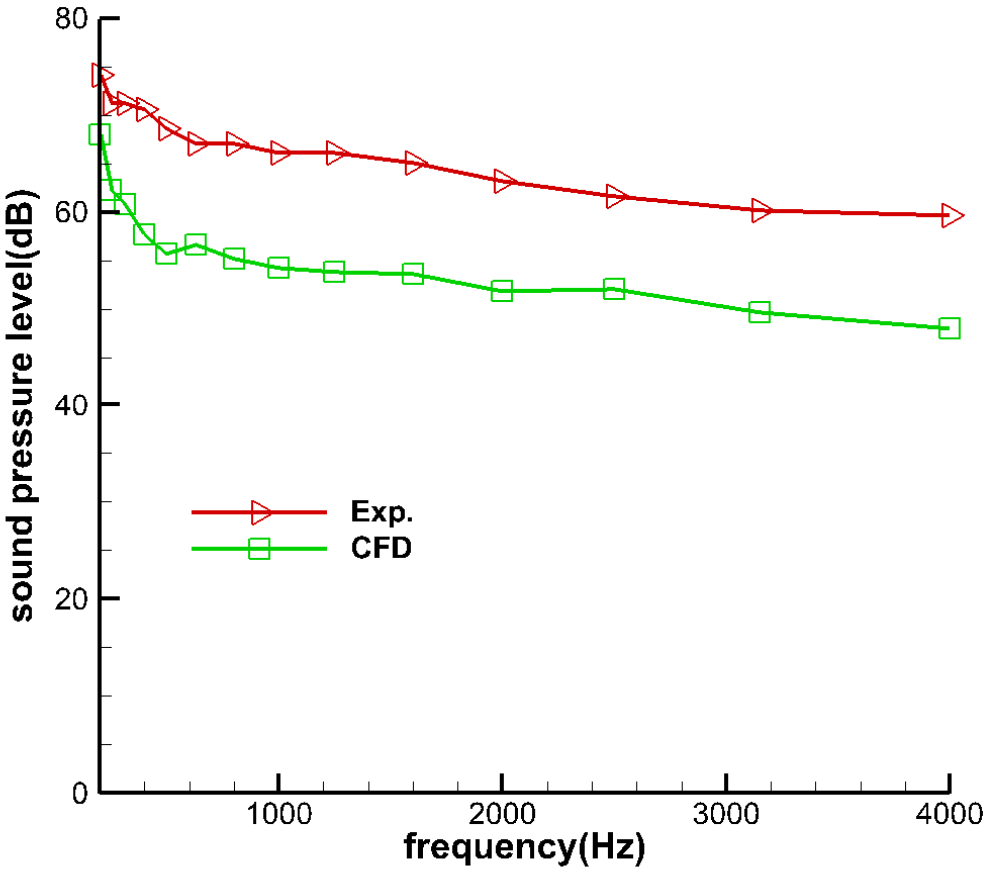


그림 2-1-201 풍동시험과 수치해석 소음 분석 결과

그래프를 보면 주파수별 소음특성이 실험 결과보다 낮게 예측되는데 이는 LES 모델 특성상 격자 크기보다 작은 난류 스케일에 대해서는 모사가 힘들기 때문에 고주파수대에서 일정량의 소음 수준이 차이를 보이는 것으로 생각된다. 하지만 주파수대별로도 정성적인 소음특성은 시험결과를 잘 따라가고 있음을 확인할 수 있었다.

나. 팬터그래프 요소별 공력 및 소음 특성 분석

앞에서 언급하였던 것과 같이 풍동시험을 통해서는 요소별 공력특성을 알기 어려웠기 때문에 전산해석을 통해 요소별 공력특성을 알아보았다. 그림 2-1-202처럼 팬터그래프를 팬헤드와 암으로 나누어 각각의 공력특성 및 소음 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

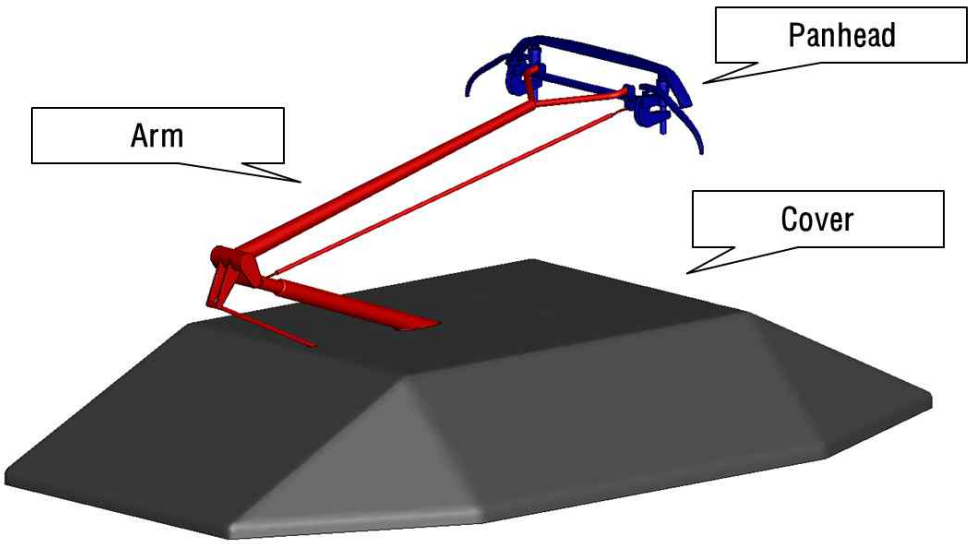


그림 2-1-202 팬터그래프 요소

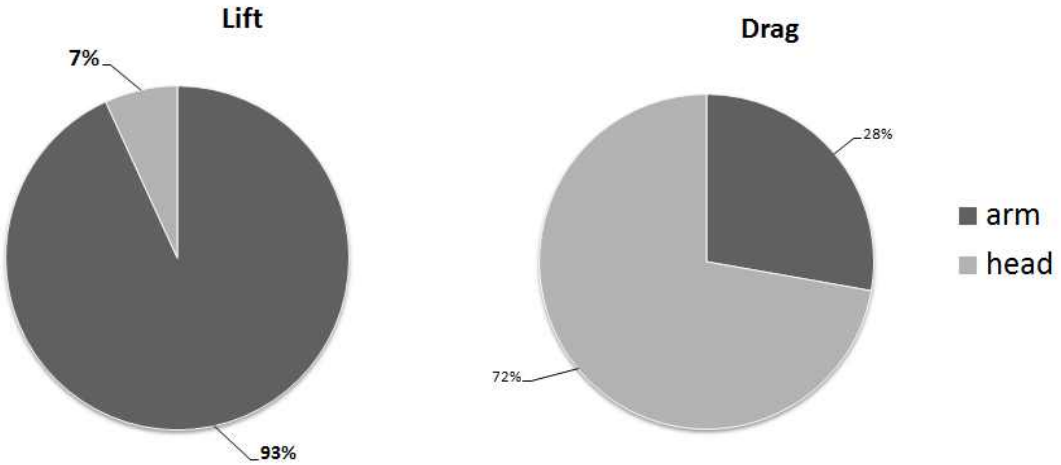


그림 2-1-203 팬터그래프 요소별 공력 특성

표 2-1-13 팬터그래프 요소별 공력 특성

	arm(N)	head(N)	total(N)
Lift	7.086	0.522	7.61
Drag	25.61	66.58	92.19

그림 2-1-203의 그래프와 표 2-1-13을 보면 양력을 더 발생시키는 부재는 암이지만 항력을 더 발생시키고 있는 부재는 팬헤드임을 알 수 있다. 하지만 시간에 따른 양력 값을 살펴보면 팬헤드에서 발생하는 평균양력 값은 암에서 발생하는 평균양력 값보다 작지만 진동폭이 크기 때문에 팬헤드의 공력성능이 집전성능에 영향을 미칠 가능성이 더 크다는 것을 알 수 있다.

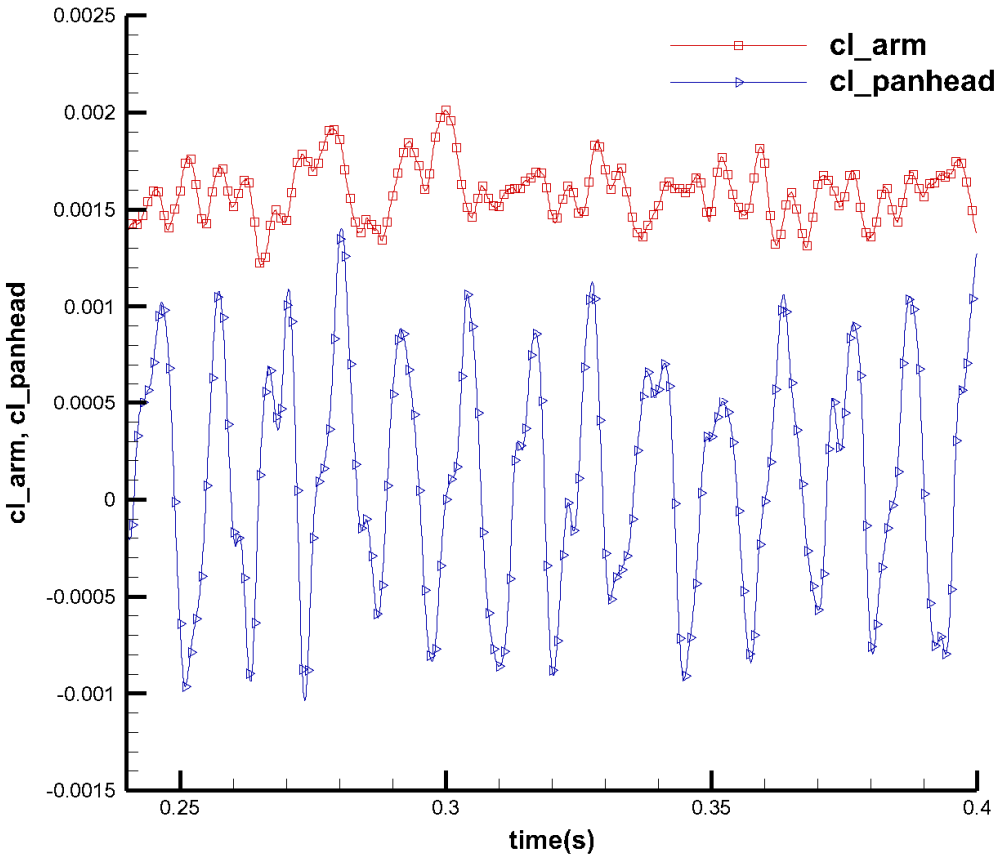


그림 2-1-204 시간에 대한 양력계수와 항력계수

다음 그림 2-1-205는 요소별 소음 특성을 나타낸 그래프이다. cover에서 발생하는 소음이 dominant하게 보이지만 이는 앞에서 살펴본 것처럼 실험결과와 비교했을 때 상대적으로 고주파수 영역의 소음을 발생시키는 팬헤드와 암에서의 소음 모사가 부족했기 때문으로 생각할 수 있다.

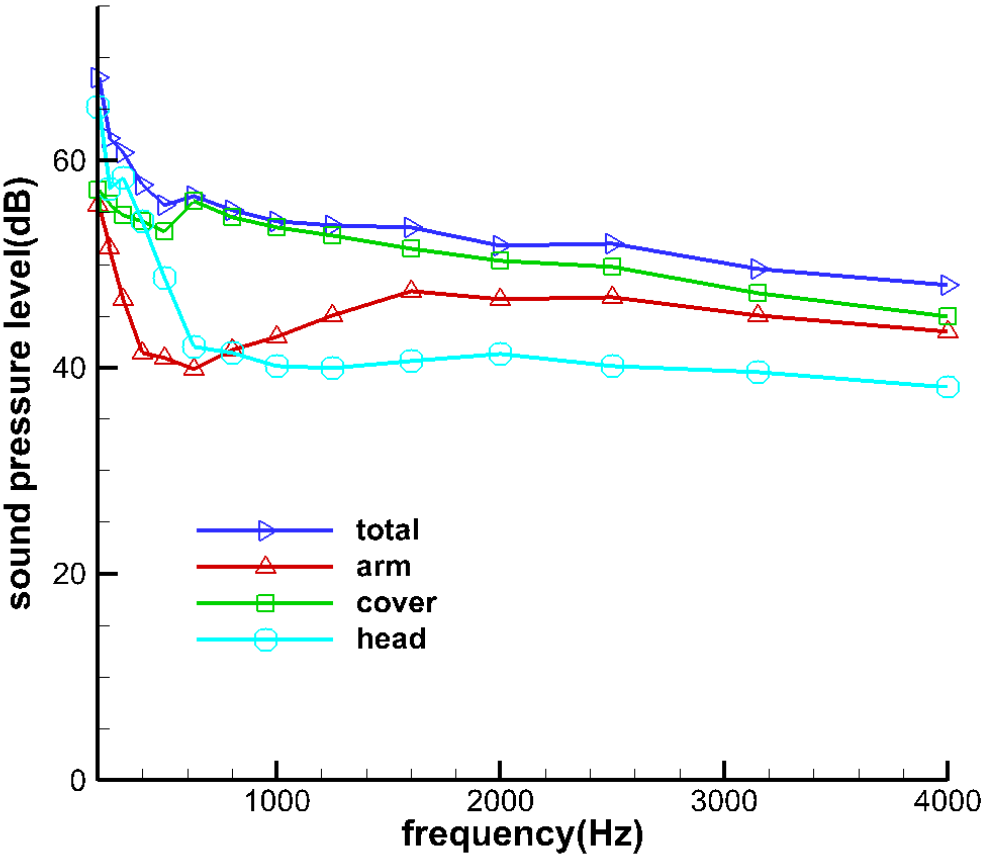


그림 2-1-205 팬터그래프 요소별 소음 특성

다. 실제 주행조건(350km/h)에서의 공력 및 소음 특성 예측

시험결과와 전산해석을 바탕으로 다양한 조건에 대한 실제 주행시 팬터그래프의 공력 및 소음특성을 예측하였다. 이때 풍속 조건은 주행속도인 350km/h와 열차 상부 경계층 조건을 고려한 280km/h로 하였다.

공력소음은 속도에 대해 약 6승에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있으며 약 300km/h이상으로 속도가 높아지게 되면 공력소음이 전체 고속철도 소음에서 가장 dominant해지게 된다[1]. 그림 2-1-206의 TGV 소음 실험 결과에서 그러한 경향이 잘 나타나 있다. 따라서 약 300km/h이상의 속도영역에서는 예측된 공력소음 값이 고속철도 전체의 소음 값이라고 봐도 무방하다.

1) *Railway Noise and Vibration*, David Thompson, Elsevier

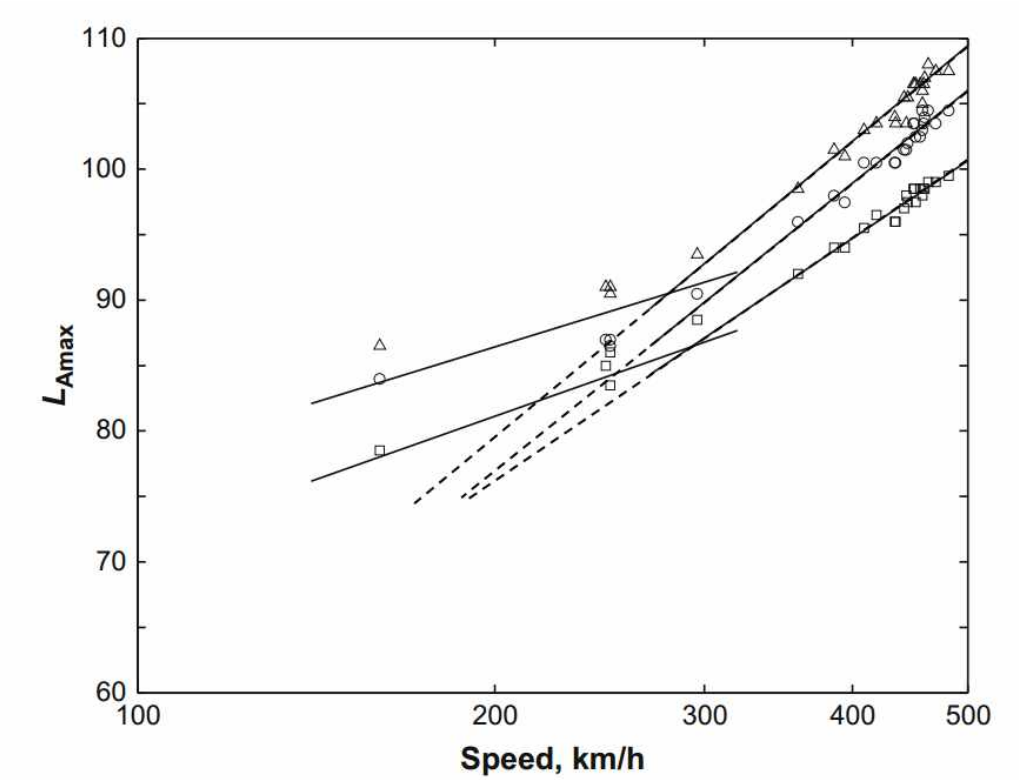


그림 2-1-206 Maximum sound level of TGV-A at 25m

그림 2-1-207을 보면 본 과제의 풍동시험 결과와 전산해석을 통한 소음 분석 결과역시 그러한 경향을 비교적 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 앞서 살펴본 것처럼 실험 소음 값과 전산해석 소음 값에 정량적인 차이는 나지만 전체적으로 약 9.8dB정도의 일정한 오차를 보이고 있으므로 350km/h에서도 전산해석 예측값인 104.8dB보다 약 9.8d높은 114.6dB정도 수준의 소음특성을 보일 것으로 예측할 수 있다. 280km/h 경우 같은 경향을 따른다고 가정했을 때 108.84dB이 예상된다.

일본 RTRI에서 실시한 더블암 모델 팬터그래프에 대한 풍동시험결과에서 주행시험시 소음을 측정하는 기차 측면에서 25m거리에서의 소음수준을 5m거리에서 측정한 풍동시험결과와 약 14dB차이가 나는 것으로 보고 있으며[2] 이러한 결과를 따를 때, 350km/h 주행시 25m 거리 측정점에서 소음 수준은 약 100.6dB정도가 될 것으로 예상되며 280km/h 주행시 25m 거리 측정점에서 소음 수준은 약 94.84dB이 예상된다.

2) 東洋轉機製造株式會社殿 委託 パントグラフの風洞試験　報告書

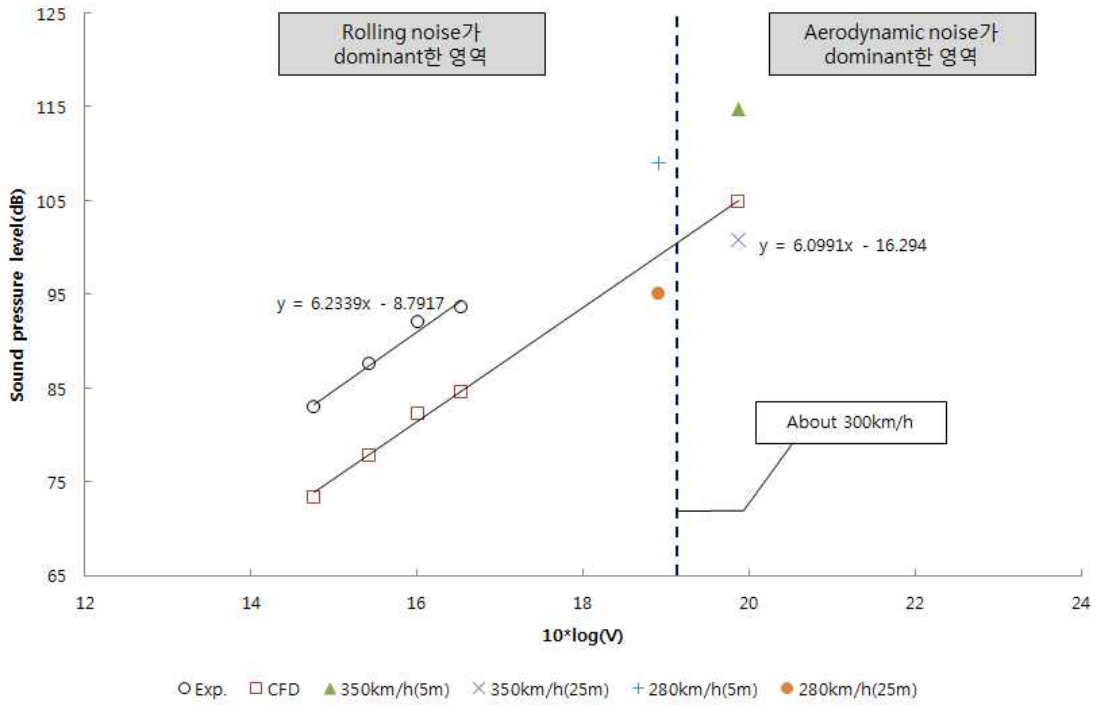


그림 2-1-207 전산해석 보정을 통한 주행 시 소음 특성 분석

이 때 주파수별 소음 특성을 살펴보면 그림 2-1-208과 같다. 저속일때는 보이지 않던 소음 피크점이 약 650Hz근방에서 보인다. 그림 2-1-209는 각 요소별 소음 특성을 살펴본 것이다. 팬헤드 및 암에서 발생하는 소음이 저속일 때와 비교해 비중이 커졌음을 알 수 있다.

그림 2-1-210, 211은 전산해석 및 풍동시험결과를 바탕으로 실 주행속도에 대한 양력 및 항력 값을 예측해 본 것이다.

풍동시험 시 팬터그래프에서 발생하는 양력은 항력값의 5% 수준에서 양의 오차를 가지고 있었고 항력은 30%의 오차를 가지고 있었으므로 이러한 경향을 반영하여 350km/h에서의 공력 및 소음특정을 예측 해 정리한 값들은 다음의 표 2-1-14와 같다.

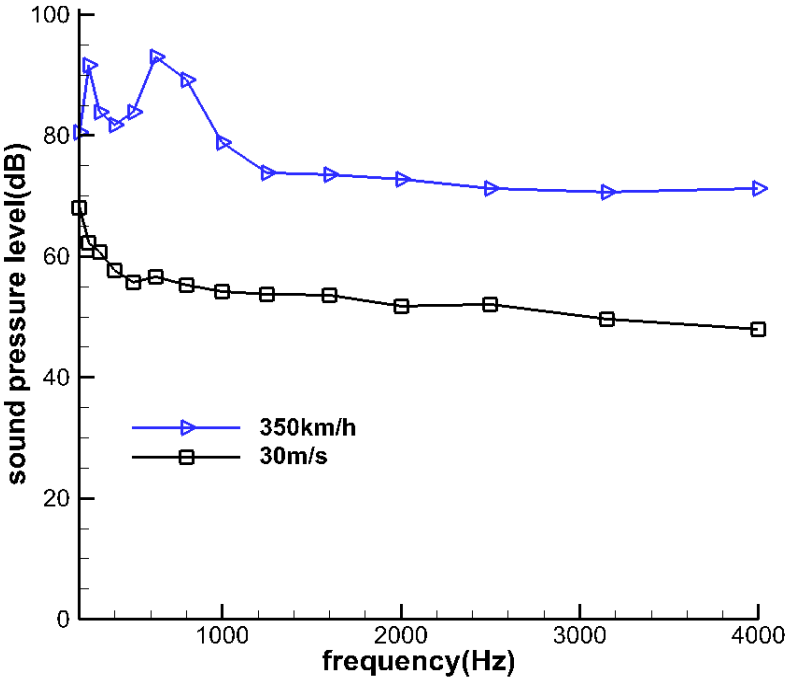


그림 2-1-208 30m/s 및 350km/h에서의 주파수별 소음 특성

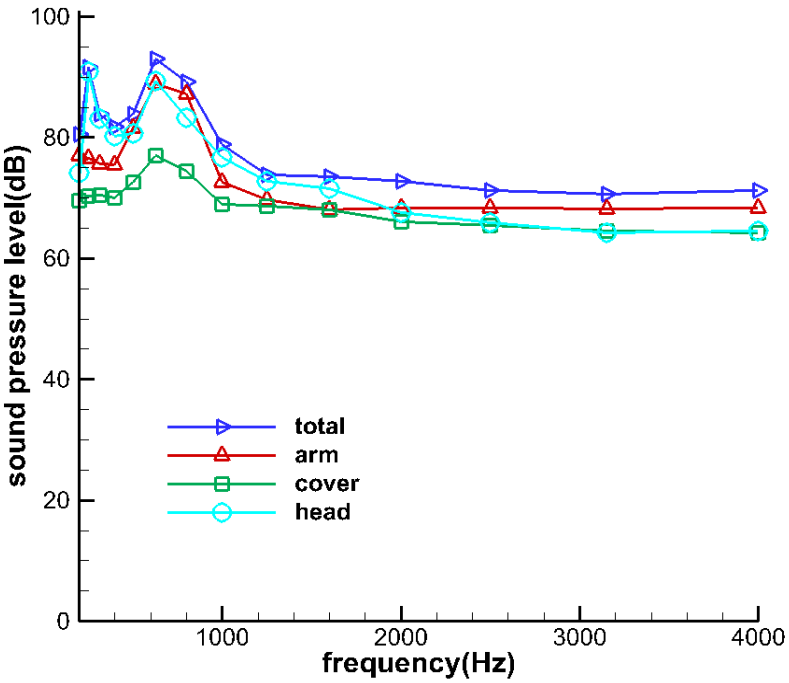


그림 2-1-209 350km/h 주행 시 주파수별 소음 특성

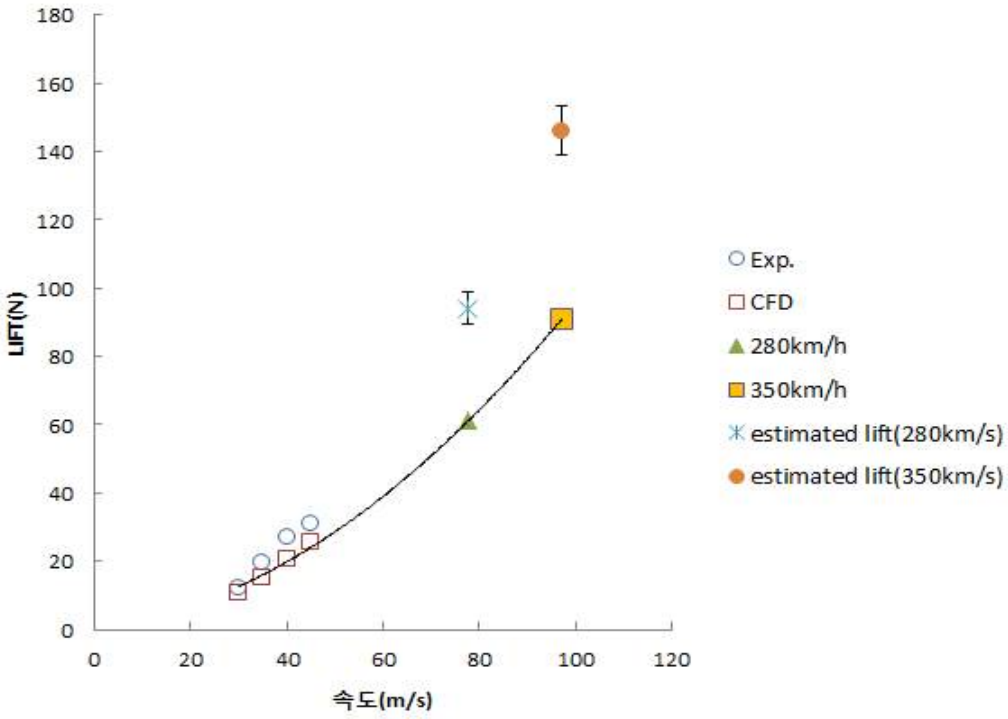


그림 2-1-210 전산해석을 통한 주행시 양력 특성 예측

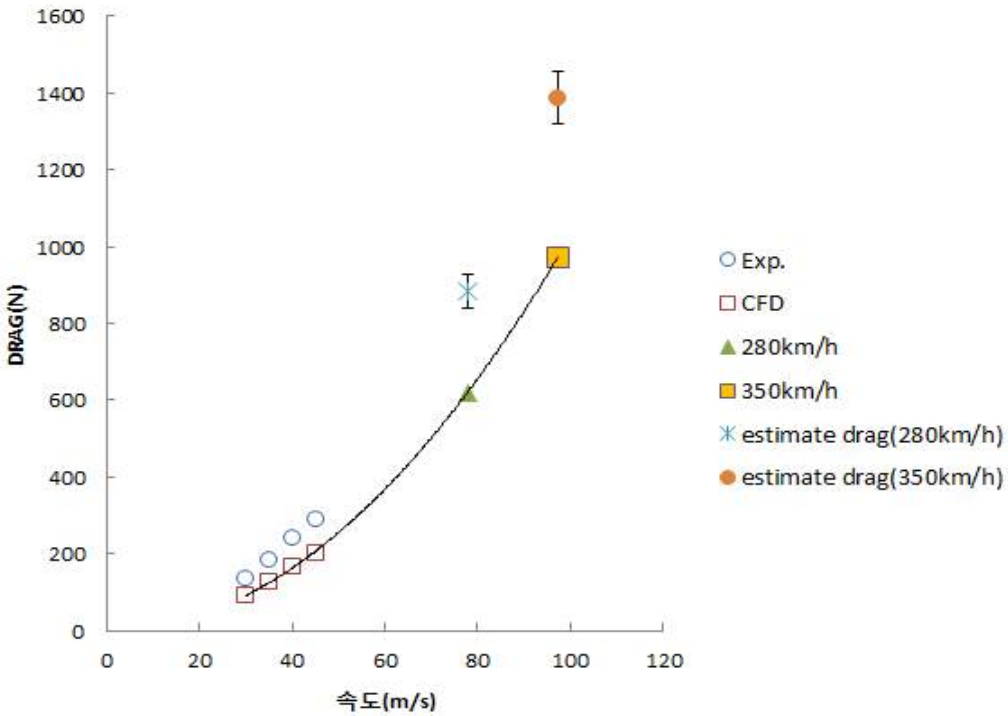


그림 2-1-211 전산해석을 통한 주행 시 항력 특성 예측

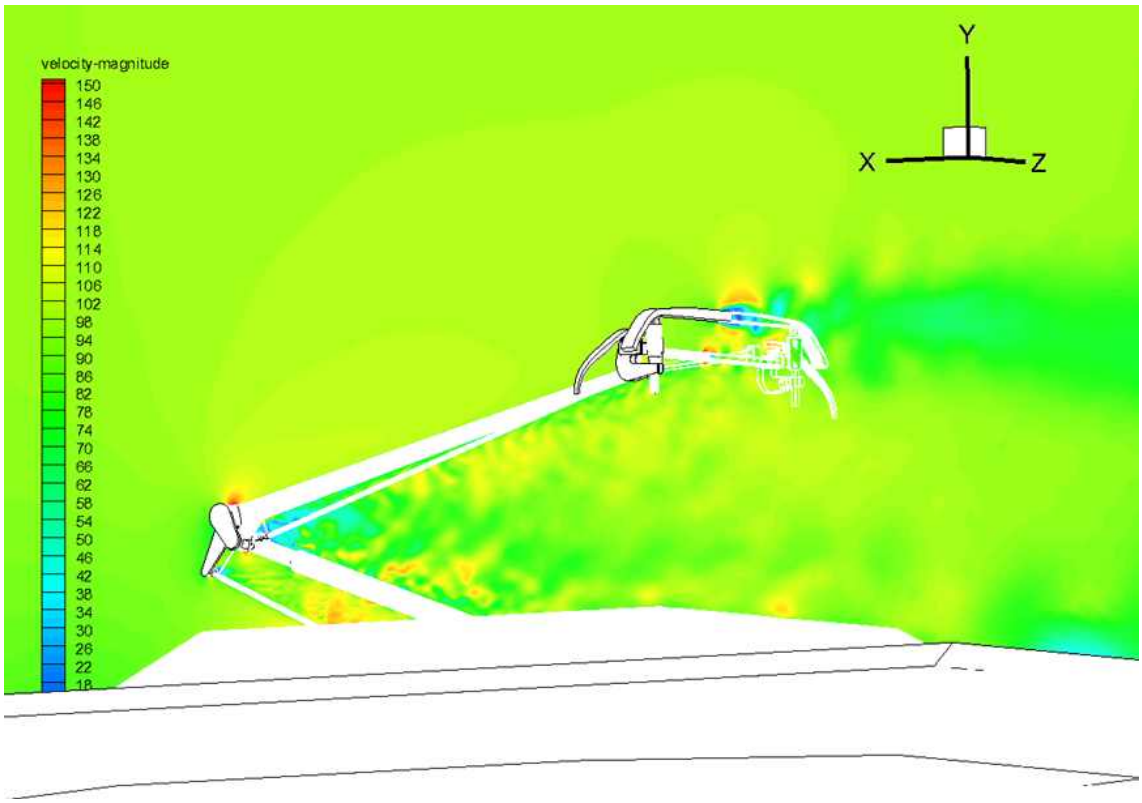


그림 2-1-212 350km/h로 주행 시 팬터그래프 주위의 속도 분포

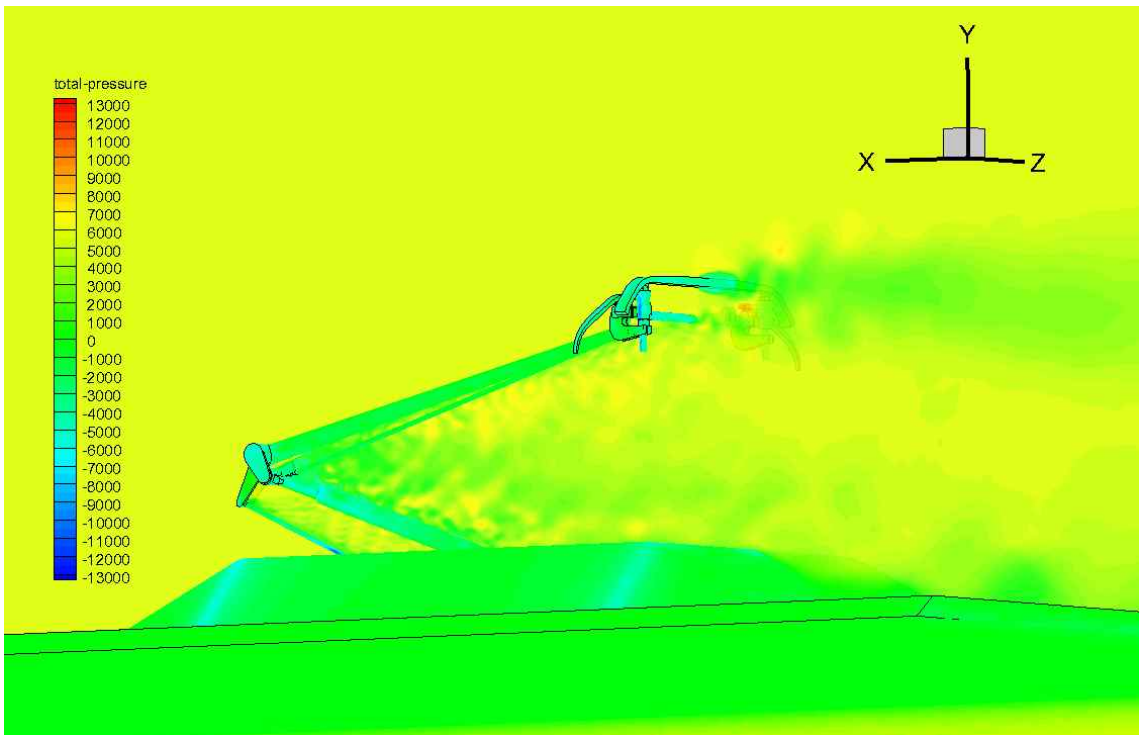


그림 2-1-213 350km/h 주행 시 팬터그래프 주위의 압력 분포

표 2-1-14 실제주행속도에서 공력특성 예측

operating condition	350km/h (close knee)	280km/h (close knee)
Lift -CFD (N)	90.86	61.17
Lift -Estimate (N)	132.0~ 160.2	85.2 ~102.8
Drag -CFD (N)	970.71	620.02
Drag -Estimate (N)	1352.0 ~1421.4	839.1 ~927.5
overall Noise -CFD (dB)	104.8	99.04
overall Noise -5m estimate (dB)	114.4 ~114.7	108.7 ~109.0
overall Noise -25m estimate (dB)	100.4 ~100.8	94.7 ~95.0

■ 주행방향, 팬헤드 높이, fairing 유/무 그룹

그림 2-1-214를 보면 주행방향에 대해서는 H1높이에서는 open knee case가 close knee case보다 35m/s이상에서 2~3dB정도 낮은 수준을 보이는데 H2높이와 fairing이 없는 case에서는 반대 경향이 나타난다. H2높이와 fairing이 없는 open knee케이스의 경우 기준모델 보다 3~4dB높은 수준의 소음 값을 가질 것으로 예상되고 H2높이, fairing이 없는 close knee케이스의 경우 1~2dB정도 높은 수준의 소음 값을 가질 것으로 예상된다.

표 2-1-15를 보면 항력의 경우 H1의 open knee case가 기준모델에 비교해 항력 값이 다소 높고 H2의 open knee case는 기준모델과 비슷한 수준이며 H2의 close knee case는 기준모델보다 약간 낮은 수준의 항력 값을 가진다. 양력의 경우 H1과 H2모두 open knee 케이스에서는 거의 발생하지 않고 H2의 close knee 케이스에서 기준형상보다 약간 낮은 수준의 양력값이 발생한다.

fairing이 없는 경우 주행방향에 관계없이 2배 이상의 항력이 발생하고 양력의 경우 close knee의 경우에만 fairing이 있는 경우와 비슷한 수준에서 발생할 것으로 예상된다.

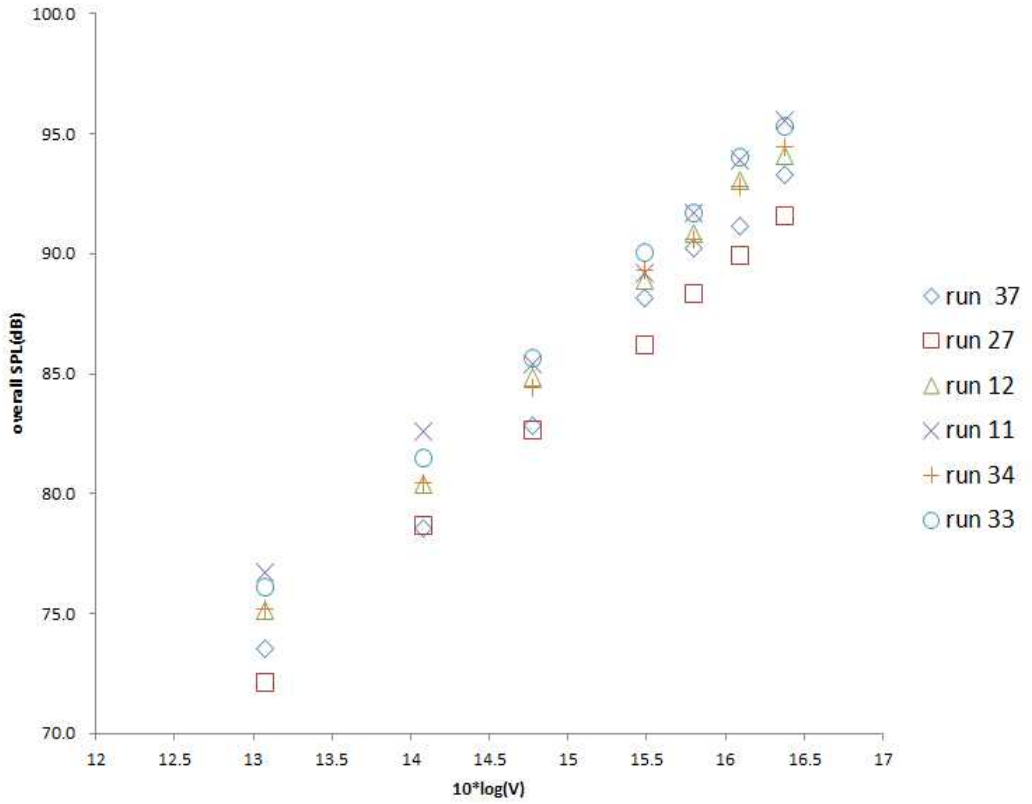


그림 2-1-214 주행방향, 팬헤드 높이 및 fairing 유/무에 따른 속도별 소음 특성

표 2-1-15 350km/h 조건에서 주행방향, 팬헤드 높이, fairing 유/무 따른 공력 성능 예측

operating condition	standard (H1 closeknee)	run27 H1 openknee	run12 H2 closeknee no cover	run11 H2 openknee no cover	run34 H1 closeknee no cover	run33 H1 openknee no cover
Lift (N)	132.0 ~160.2	0	66.0 ~80.1	0	132.0 ~160.2	0
Drag (N)	1352.0 ~1421.4	1303.4 ~1440.6	2817.0 ~3113.6	2914.0 ~3220.8	2914.0 ~3220.8	3011.0 ~3220.8
overall Noise -5m (dB)	114.4 ~114.7	112.8 ~113.2	116.8 ~117.2	118.3 ~118.7	116.8 ~117.2	118.3 ~118.7
overall Noise -25m (dB)	100.4 ~100.8	89.8 ~99.2	102.8 ~103.2	104.3 ~104.7	102.8 ~103.2	104.3 ~104.7

표 2-1-6 280km/h 조건에서 주행방향, 팬헤드 높이, fairing 유/무 따른 공력 성능 예측

operating condition	standard (H1 closeknee)	run27 H1 openknee	run12 H2 closeknee no cover	run11 H2 openknee no cover	run34 H1 closeknee no cover	run33 H1 openknee no cover
Lift (N)	85.2 ~102.8	0	42.6 ~51.4	0	85.2 ~102.8	0
Drag (N)	839.1 ~927.5	834.6 ~922.4	1803.0 ~1992.8	1865.2 ~2061.6	1865.2 ~2061.6	1927.5 ~2130.3
overall Noise -5m (dB)	108.7 ~109.0	105.5 ~105.9	109.5 ~109.9	111.0 ~111.4	109.5 ~109.9	111.0 ~111.4
overall Noise -25m (dB)	94.7 ~95.0	91.6 ~91.8	95.5 ~95.9	97.0 ~97.4	95.5 ~95.9	97.0 ~97.4

■ Yaw각 그룹

Yaw각에 대한 소음 특성은 뚜렷한 경향을 보이지는 않으므로 다른 각도에서도 기준형상(Yaw 0°)과 비슷한 수준의 소음을 발생시킬 것으로 예상된다. 표 2-1-17,18을 참고했을 때 속도에 대해 측풍의 영향에 관계없이 비슷한 수준으로 양력 및 항력이 증가하고 있으나 2°와 4°에서 측풍의 영향이 없을 때에 비해 약간 높은 양력이 발생할 것으로 보이며 측풍의 영향이 커지면서 항력은 조금씩 감소할 것으로 예상된다.

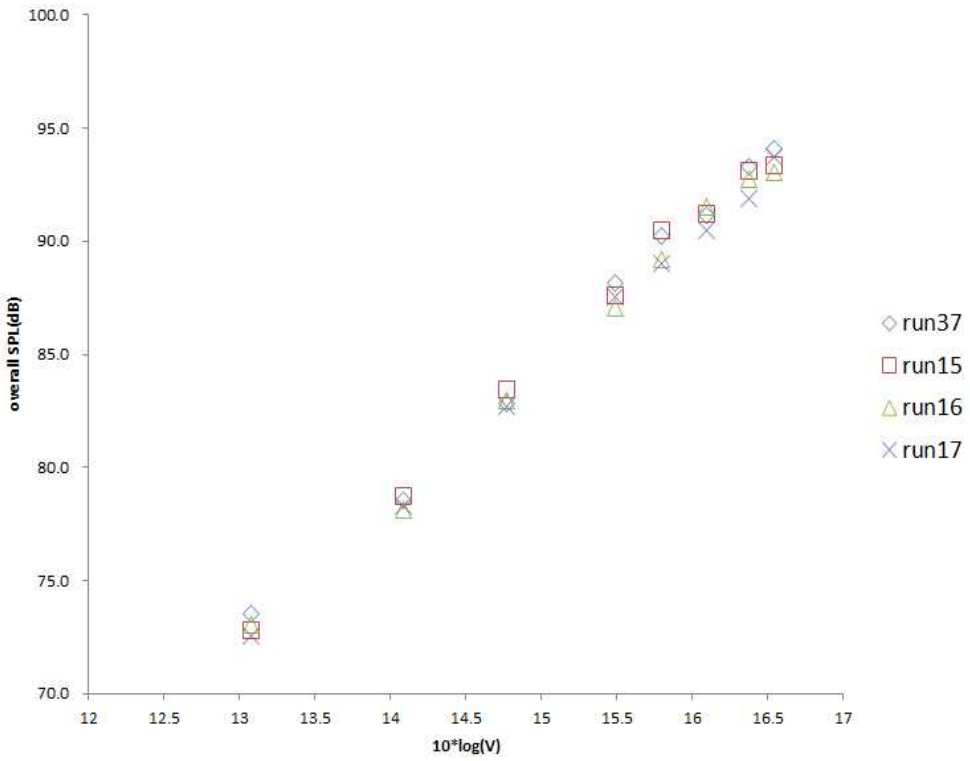


그림 2-1-215 yaw각에 대한 속도별 소음 특성

표 2-1-17 350km/h 조건에서 Yaw각에 따른 공력 성능 예측

operating condition	standard (0°)	run 15 -2°	-1°	1°	run 16 2°	3°	run17 4°
Lift (N)	132.0 ~160.2	122.2 ~135.1	130.3 ~144.0	134.6 ~148.8	130.8 ~144.6	123.0 ~135.9	111.2 ~123.0
Drag (N)	1352.0 ~1421.4	1270.0 ~1403.7	1260.8 ~1385.6	1353.6 ~1385.6	1255.7 ~1387.9	1261.5 ~1394.3	1271.1 ~1404.9
overall Noise -5m (dB)	114.4 ~114.7	114.4 ~114.7	114.4 ~114.7	114.4 ~114.7	114.4 ~114.7	114.4 ~114.7	114.4 ~114.7
overall Noise -25m (dB)	100.4 ~100.8	100.4 ~100.8	100.4 ~100.8	100.4 ~100.8	100.4 ~100.8	100.4 ~100.8	100.4 ~100.8

표 2-1-18 280km/h 조건에서 Yaw각에 따른 공력 성능 예측

operating condition	standard (0°)	run 15 -2°	-1°	1°	run 16 2°	3°	run17 4°
Lift (N)	85.2 ~102.8	78.65 ~86.93	83.95 ~92.67	86.6 ~95.7	84.15 ~93.00	79.13 ~87.47	71.58 ~79.12
Drag (N)	839.1 ~927.5	817.5 ~903.5	812.0 ~897.4	808.0 ~893.0	809.3 ~894.5	813.1 ~898.7	819.0 ~905.3
overall Noise -5m (dB)	108.7 ~109.0	108.7 ~109.0	108.7 ~109.0	108.7 ~109.0	108.7 ~109.0	108.7 ~109.0	108.7 ~109.0
overall Noise -25m (dB)	94.7 ~95.0	94.7 ~95.0	94.7 ~95.0	94.7 ~95.0	94.7 ~95.0	94.7 ~95.0	94.7 ~95.0

■ 팬헤드 부착물 그룹

풍속이 30m/s를 넘으면서 전체적으로 기준형상보다 약 1~2dB정도 소음 수준이 감소하는 모습을 보이나 팬헤드에 부착물을 부착한 그룹별로는 비슷한 소음수준을 가지고 있다. 350km/h에서도 팬헤드에 부착물을 부착한 케이스가 비슷한 경향을 보일 것으로 예상된다.

양력의 경우 표 2-1-19~20를 참고할 때 속도가 증가하면서 기준형상에 비해 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 약 45m/s의 풍속에 대해서는 모든 케이스가 기준형상보다 2배 이상의 양력을 발생시키고 있으며 순서는 P3>P2>P1>P5>P4이다. 이러한 경향을 고려할 때 350km/h에서도 기준형상에 비해 상당히 높은 수준의 양력이 발생할 것으로 예상된다. 항력의 경우에는 모든 케이스가 기준형상에 비해 약 20% 줄었고 순서는 P1, P4, P8>P2, P5>P3이다.

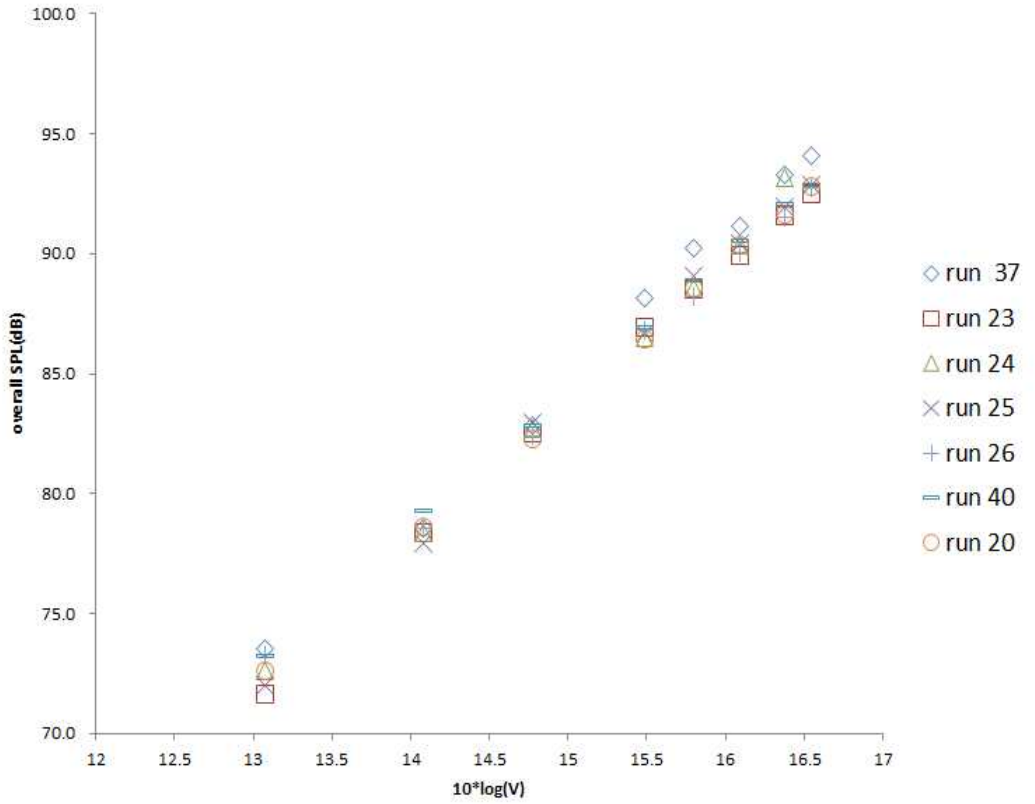


그림 2-1-216 팬헤드 부착물에 대한 속도별 소음 특성

표 2-1-19 350km/h 조건에서 팬헤드 부착물에 따른 공력 성능 예측

operating condition	standard (H1 closeknee)	run20 P1	run23 P2	run24 P3	run25 P4	run26 P5	run40 P8
Lift (N)	132.0 ~160.2	265.8 ~293.8	282.7 ~312.5	289.7 ~320.2	226.2 ~245.9	255.7 ~282.7	226.2 ~245.9
Drag (N)	1352.0 ~1421.4	994.1 ~1098.7	1041.8 ~1093.9	1075.9 ~1129.7	1012.9 ~1063.5	1013.3 ~1063.9	1012.9 ~1063.5
overall Noise -5m (dB)	114.4 ~114.7	112.4 ~113.7	112.4 ~113.7	112.4 ~113.7	112.4 ~113.7	112.4 ~113.7	112.4 ~113.7
overall Noise -25m (dB)	100.4 ~100.8	98.4 ~99.8	98.4 ~99.8	98.4 ~99.8	98.4 ~99.8	98.4 ~99.8	98.4 ~99.8

표 2-1-20 280km/h 조건에서 팬헤드 부착물에 따른 공력 성능 예측

operating condition	standard (H1 closeknee)	run20 P1	run23 P2	run24 P3	run25 P4	run26 P5	run40 P8
Lift (N)	85.2 ~102.8	171.0 ~189.0	181.9 ~201.0	186.4 ~206.0	145.5 ~160.8	164.5 ~181.8	145.5 ~160.8
Drag (N)	839.1 ~927.5	642.7 ~710.4	672.6 ~706.2	693.5 ~728.2	657.2 ~690.1	655.9 ~688.7	657.2 ~690.1
overall Noise -5m (dB)	108.7 ~109.0	106.7 ~108.0	106.7 ~108.0	106.7 ~108.0	106.7 ~108.0	106.7 ~108.0	106.7 ~108.0
overall Noise -25m (dB)	94.7 ~95.0	92.7 ~94.0	92.7 ~94.0	92.7 ~94.0	92.7 ~94.0	92.7 ~94.0	92.7 ~94.0

■ 암부착물 그룹

풍속이 30m/s이상을 넘어서면서 암에 부착물을 부착한 그룹이 기준형상에 비해 소음수준이 다소 낮은 경향을 보인다. 350km/h에서 0.5~1dB정도의 차이를 보이게 될 것으로 예상된다.

그림 2-1-21~22를 참고했을 때 주암 부착물을 부찬한 케이스(run19, 21)은 팬헤드 부착물을 부착한 기준 케이스(run 20)와 비교해 항력 및 양력에 큰 차이가 없었고 헤드암 부착물을 부착한 케이스는 모든 케이스에 대해 약간의 항력감소와 10N정도의 양력감소를 가져왔다.

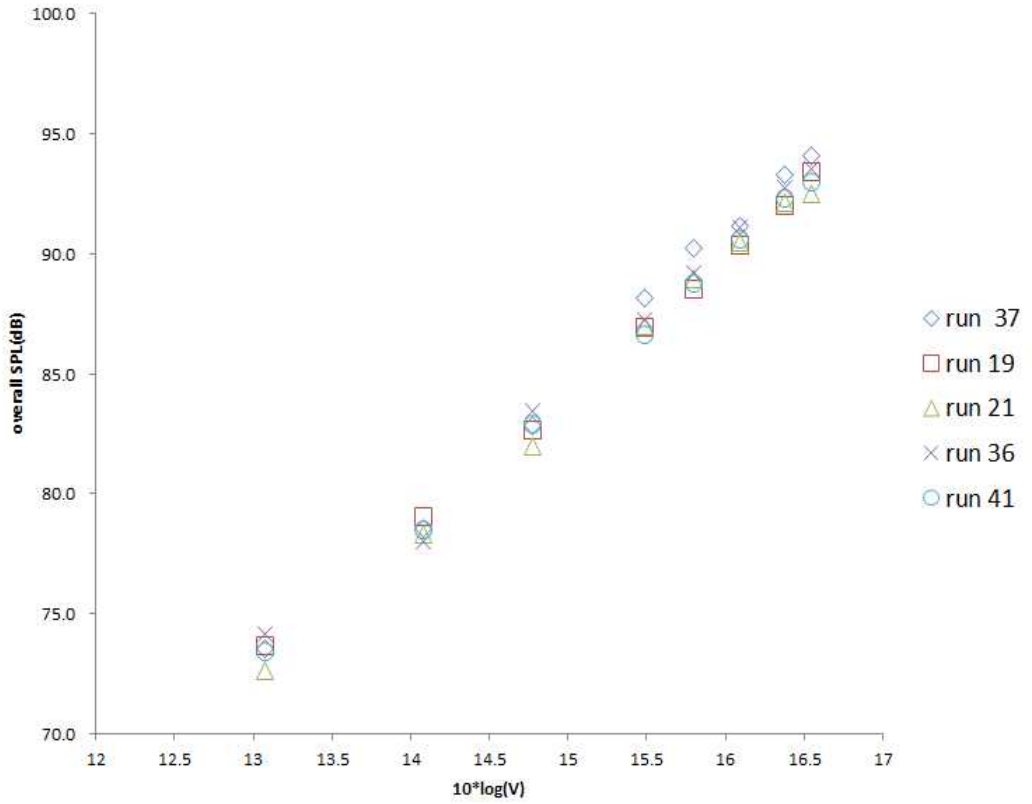


그림 2-1-217 암 부착물에 대한 속도별 소음 특성

표 2-1-21 350km/h 조건에서 암 부착물에 따른 공력 성능 예측

operating condition	standard (H1 closeknee)	run 19 A1, P1	run 21 A3, P1	run 36 B1	run 41 P8, B1
Lift (N)	132.0 ~160.2	277.5 ~306.7	269.2 ~297.6	122.2 ~150.4	216.4 ~236.1
Drag (N)	1352.0 ~1421.4	1016.2 ~1067.0	1003.2 ~1053.4	1007.0 ~1057.4	1007.9 ~1058.4
overall Noise -5m (dB)	114.4 ~114.7	113.4 ~114.2	113.4 ~114.2	113.4 ~114.2	113.4 ~114.2
overall Noise -25m (dB)	100.4 ~100.8	99.4 ~100.3	99.4 ~100.3	99.4 ~100.3	99.4 ~100.3

표 2-1-22 280km/h 조건에서 암 부착물에 따른 공력 성능 예측

operating condition	standard (H1 closeknee)	run 19 A1, P1	run 21 A3, P1	run 36 B1	run 41 P8, B1
Lift (N)	85.2 ~102.8	178.5 ~197.3	173.2 ~191.5	75.4 ~93.0	135.7 ~151.0
Drag (N)	839.1 ~927.5	655.9 ~688.8	647.9 ~680.2	650.8 ~683.3	652.7 ~685.3
overall Noise -5m (dB)	108.7 ~109.0	107.7 ~108.5	107.7 ~108.5	107.7 ~108.5	107.7 ~108.5
overall Noise -25m (dB)	94.7 ~95.0	93.7 ~94.5	93.7 ~94.5	93.7 ~94.5	93.7 ~94.5

라. 팬헤드 형상 최적설계

당해년도에는 팬터그래프의 여러 부재중에서도 팬터그래프의 압상력이 진동함에 있어 가장 큰 영향을 주는 팬헤드 형상에 대한 최적화를 수행하였다. 비용과 효율성을 고려하여 전체 3D형상이 아닌 2D 단면 형상에 대한 유동해석을 기초로 하였다. 그림 2-1-218에서 보는 것과 같이 팬헤드의 형상이 약 20대 1의 긴 가로세로비를 가지고 있기 때문에 2D해석을 통한 최적화 결과가 충분히 3D형상에도 유효할 것으로 예상할 수 있다.

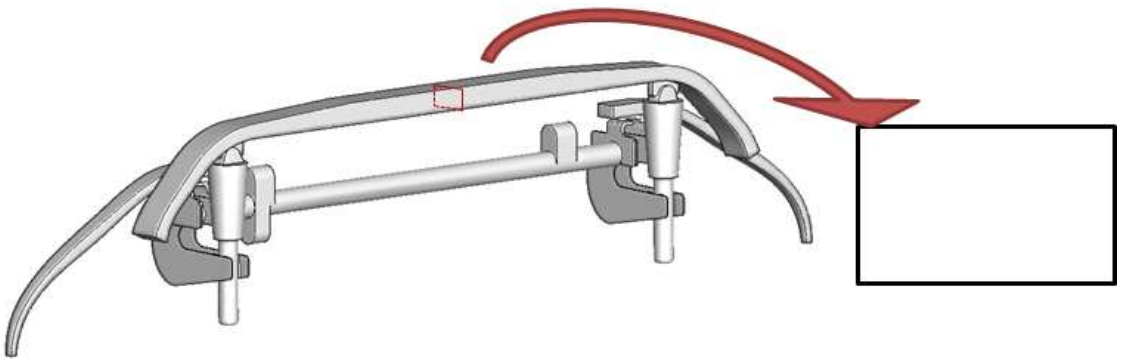


그림 2-1-218 팬헤드 단면 형상

본 과제에서는 근사모델을 이용한 최적화 방법을 선택하였는데, 전산유체해석을 통한 최적화 문제처럼 각 실험점에서의 해석시간이 긴 경우 막대한 양의 계산시간이 요구되기 때문이다. 일반적인 근사모델을 이용한 최적화 방법 과정은 그림 2-1-219의 순서로 이루어진다.

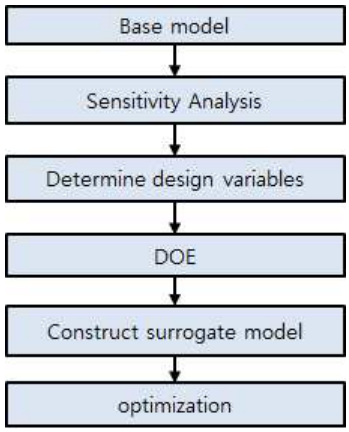


그림 2-1-219 최적화 과정

이중 설계변수가 많은 경우 목적함수와 제한조건에 유효한 영향을 주는 설계변수를 걸러내기 위한 민감도 해석(Sensitivity Analysis) 단계는 전체 설계 변수의 개수가 많지 않기 때문에 생략하였다.

(1) 최적 설계를 위한 설계 변수 및 목적 함수 정의

고속열차 팬터그래프 최적형상 설계를 위해서 본 연구에서는 설계 목적함수를 C_d 및 $\frac{dC_l}{d\alpha}$의 최소화로 선정하였다. 이를 통하여 공력 소음을 줄임과 동시에 받음각이 변하더라도, C_l의 변화를 최소화하여 설계의 강건성을 확보하고자 하였다. 본 연구에서는 그림 2-1-220와 같이 유선형이고 위아래가 대칭인 설계 형상을 선정하였으며, 이 형상을 정의하기 위해 4개의 설계 변수를 선정하였다. 설계 변수들을 고려한 형상 함수는 다음의 식 (1)과 같다.

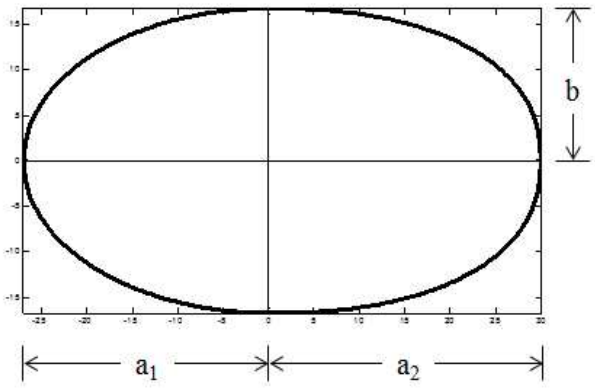


그림 2-1-220 팬헤드 단면의 설계변수 정의

$$(\frac{x}{a_1})^n + (\frac{y}{b})^n = 1, \ (x < 0) \qquad (1)$$

$$(\frac{x}{a_2})^m + (\frac{y}{b})^m = 1,\ (x > 0)$$

이때 각각의 설계 변수의 설계 범위는 식 (2)와 같이 정의하였다. 이 때 2b는 25mm이다.

$$17.5 \le a_1 \le 50,\ 17.5 \le a_2 \le 50 \qquad (2)$$
$$1.5 \le n \le 3.5,\ 1.5 \le m \le 3.5$$

(2) 최적 설계 수행

본 과제에서는 실험계획법(Design of Experiment)으로 Latin Hypercube Sampling을 수행하였고 근사모델로는 kriging모델을 사용하였다.

Latin Hypercube Samping이란 반복계산을 통해 설계공간내 실험점들의 분산이 최대가 되도록 실험점을 선정하는 방법이다. 설계공간이 비선형적인 특성을 지니고 있을 것으로 예상될 때 많이 쓰이는 기법으로 FFD(full factorial design) 기법이나 CCD(central composite decomposition)기법에 비해 비교적 적은 수의 실험점으로도 높은 정확도의 근사모델을 얻을 수 있는 이점이 있다.

kriging모델은 임의의 공간상의 특성치를 알기 위해 이미 알고 있는 주위 값들의 가중 선형 조합으로 그 값을 예측하는 기법이다. 다항함수를 이용해 근사모델을 구성하는 RSM(response surface model)과 달리 주어진 실험점을 반드시 지나는 근사평면을 구성하게 되기 때문에 비선형성이 강한 설계공간을 모사하는데 우수한 것으로 알려져 있다.

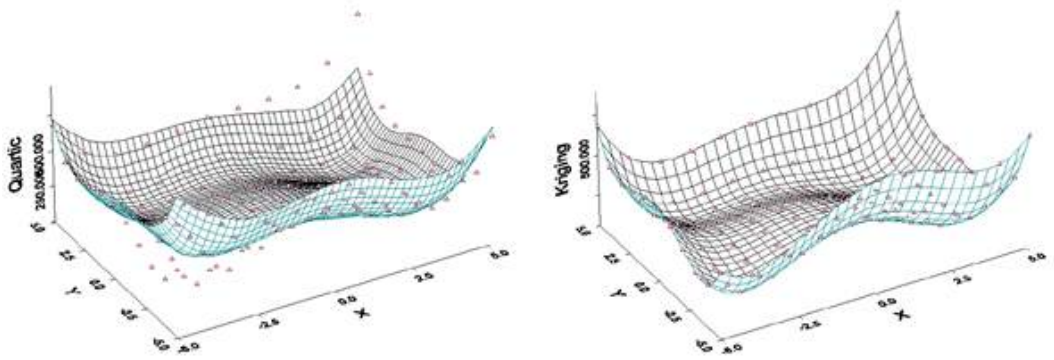


그림 2-1-221 4차 다항함수를 이용한 근사모델과 크리깅 모델을 이용한 근사모델

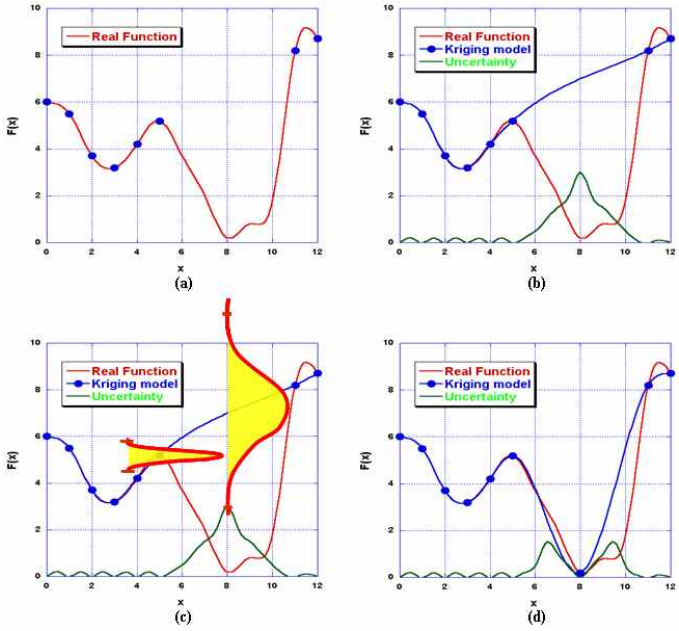


그림 2-1-222 Esimated Improvement (EI)

하지만 Kriging 모델의 경우 interpolation을 기반으로 하고 있기 때문에 전역해 주위에 실험점이 분포하지 않을 경우에는 전역 최적해를 구할 수 없게 된다. 즉 그림 2-1-222(a)의 경우와 같이 전역 최적해가 존재할 경우에 대해, 실험점이 전역최적해 주위에 존재하기 않기 때문에 그림 2-1-222(b)와 같이 Kriging 모델이 구성되게 된다. 그러나 Kriging 모델의 경우, 실험점이 존재하지 않는 곳에서 큰 불확실성이 존재하게 된다. 따라서 이러한 곳에 실험점을 추가하게 될 경우 보다 더 정확한 Kriging 모델의 구성을 통하여 전역최적해를 구하기가 용이하게 된다. 이러한 추가점을 Estimated Improvements (EI)라 한다.

본 과제에서는 이러한 EI를 통한 실험점의 추가 선정을 통하여 Kriging 모델의 정확성을 향상하는 작업을 수행한 후에 GA를 이용한 최적화 작업을 반복 수행하였다.

이상의 최적화 기법을 사용한 최적화 process는 그림 2-1-223과 같다.

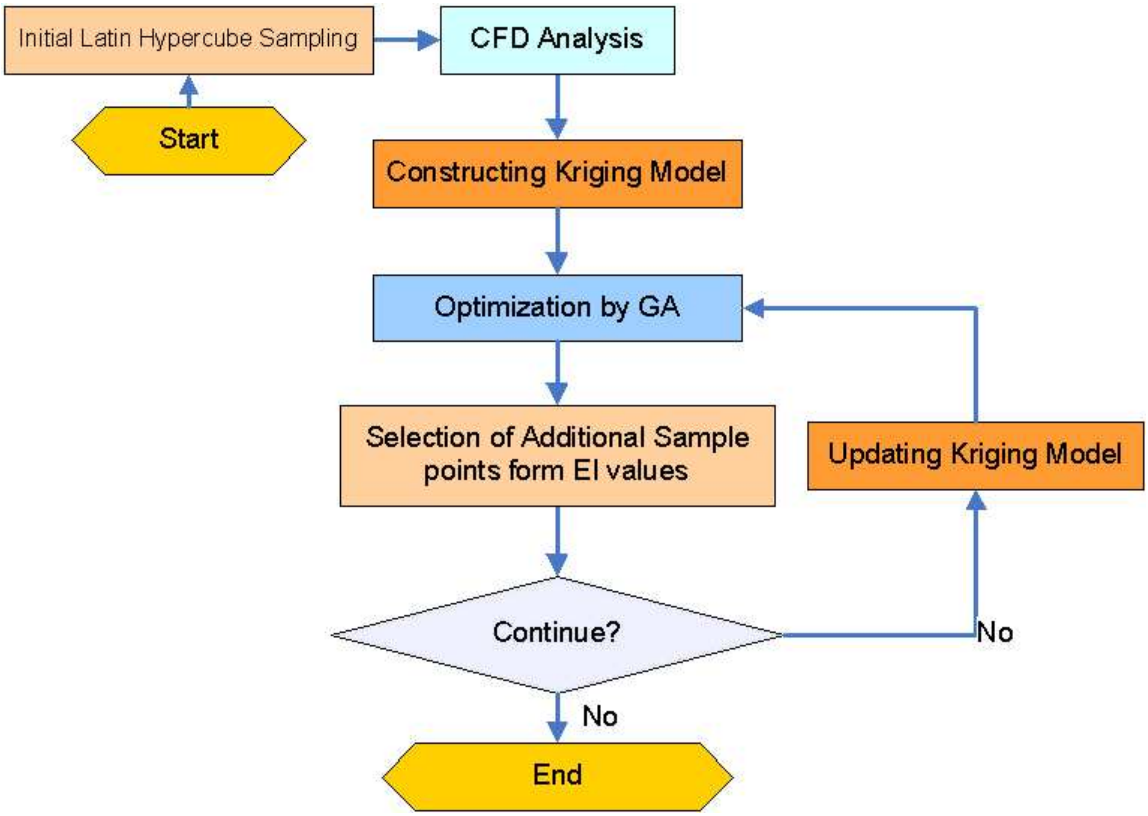


그림 2-1-223 팬터그래프 설계 과정

이와같은 process를 기반으로 Latin Hypercube Sampling을 수행하여 실험점을 선정하였다. 표 2-1-23은 선정된 30개의 실험점을 나타낸다.

각각의 선정된 실험점에 대하여 받음각은 각각 0도, 5도, 10도로 정하여 해석을 수행하였다. 따라서 총 90번의 비정상 계산을 수행하였다.

총 90번의 비정상 계산을 통하여 0도에서의 C_d 및 $\frac{dC_l}{d\alpha}$ 값을 구한 후에 Kriging model을 이용하여 반응면을 구성하였다. 이 때 반응면이 제대로 구성되어 있는지 확인하기 위해서 해당 실험점에서 반응면상의 예측치와 실제 해석값의 비교를 수행하였다. 그림 2-1-224에서는 각각의 목적함수에 대한 검증 결과를 도시하였다. 각각의 결과 값이 거의 일직선상에 분포함을 알 수 있다. 따라서 Kriging 모델이 신뢰성 있게 구성되었음을 확인할 수 있다.

표 2-1-23 선정된 초기 실험점

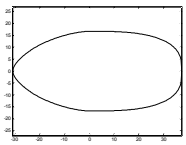
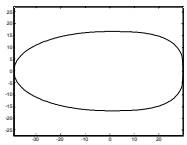
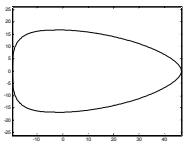
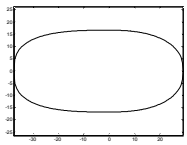
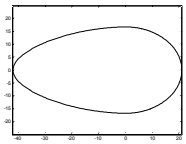
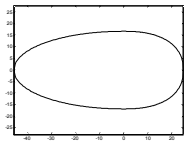
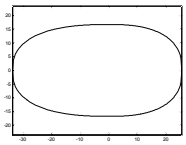
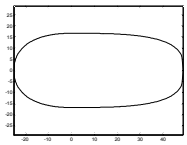
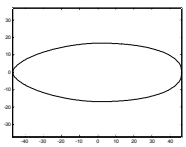
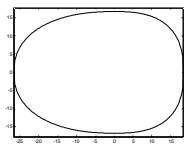
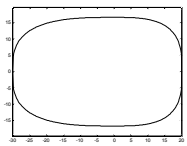
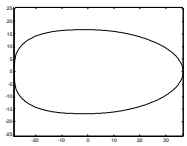
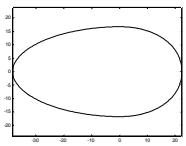
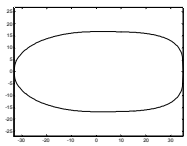
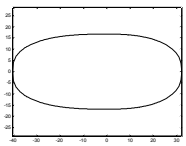
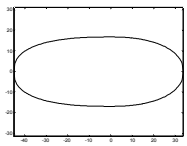
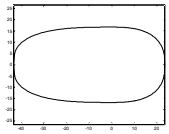
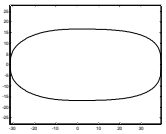
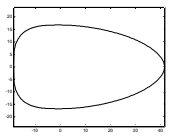
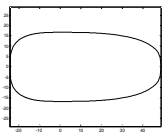
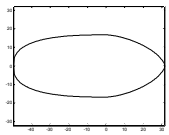
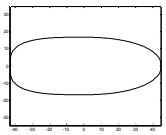
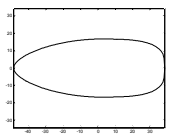
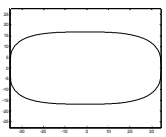
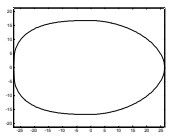
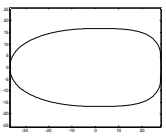
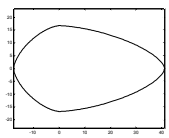
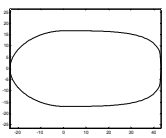
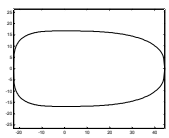
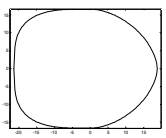
No.	a1	a2	n	m	geometry	No.	a1	a2	n	m	geometry
1	31.2	37.4	1.61	2.87		9	39.2	29.9	2.07	2.91	
2	19.8	46.8	3.43	1.63		10	37.7	29.2	2.91	2.39	
3	42.3	21	1.77	1.98		11	45.8	24.7	2.03	2.34	
4	33.9	25.7	2.5	2.53		12	25.1	48.7	2.31	3.17	
5	47.2	46.4	1.7	2.24		13	26.7	18.3	2.29	2.63	
6	30.3	20.1	3.01	3.14		14	28.5	36.7	2.82	1.95	
7	38.5	22.4	1.95	2.1		15	33.3	35.1	2.13	3.41	
8	40.6	32.3	2.59	2.45		16	45.2	33.7	2.54	2.23	

표 2-1-24 선정된 초기 실험점

No.	a1	a2	n	m	geometry	No.	a1	a2	n	m	geometry
17	43.6	23.6	2.87	2.63		24	31.6	39.4	2.37	3.06	
18	18.8	41.7	3.16	1.82		25	24.4	48.9	3.09	2.78	
19	49.8	31.6	2.69	1.58		26	43.2	44.9	3.21	2.16	
20	48.8	38.5	1.74	3.25		27	35.7	34.5	3.33	2.97	
21	27.5	26.4	2.76	1.84		28	36.8	28.2	2.2	3.33	
22	17.8	41.2	1.53	1.56		29	23.7	43.3	1.9	3.49	
23	22.7	44.4	3.47	2.76		30	21.4	18.8	3.29	1.73	

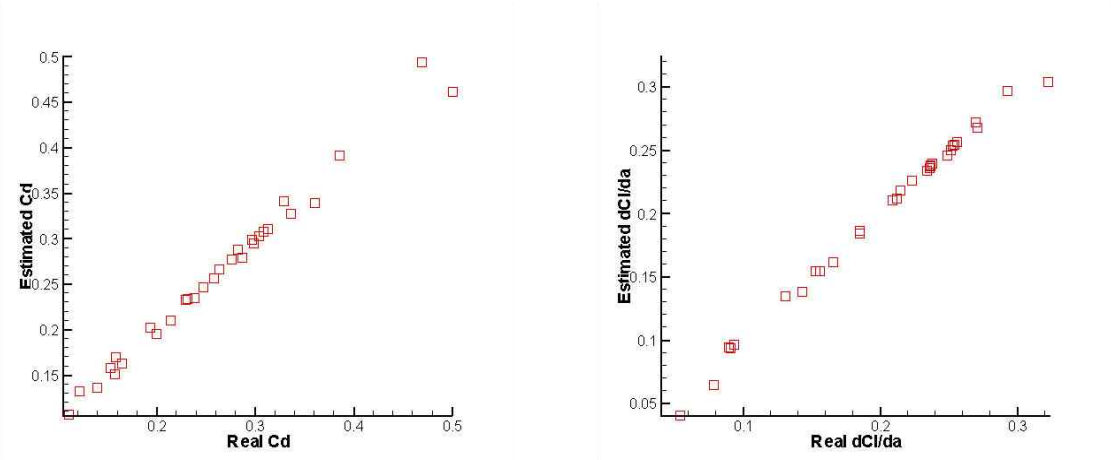


그림 2-1-224 첫 번째 Kriging 모델의 검증 결과

이러한 Kriging 모델을 이용하여 반응면을 구성한 이후에 본 연구에서는 GA를 이용하여 최적화를 수행하였다. 첫 번째 최적화에서의 EI 결과들은 그림 2-1-225와 같다. 이 때 값이 높은 점일수록 목적함수의 값이 좋아질 확률이 높아지게 된다. 즉 그림에서 EI-Cd의 값이 높은 점을 선정하게 되면, 그만큼 Cd가 최소화될 확률이 높은 점이 실험점으로 선정되게 된다. 본 연구에서는 우선 5개의 실험점을 재선정하여 Kriging 모델을 구성하였다. 선정된 5개 실험점에서의 설계변수값들은 표 2-1-25와 같다.

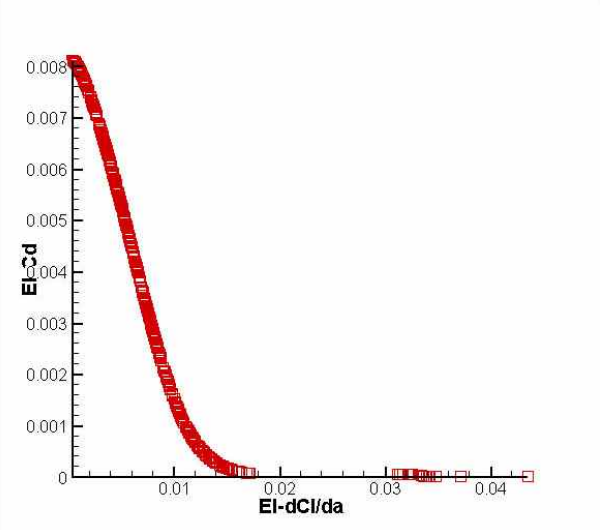
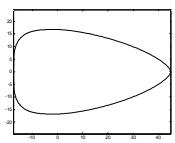
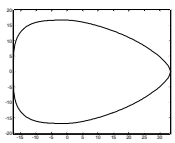
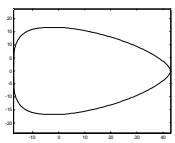
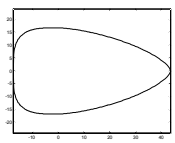
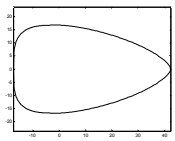


그림 2-1-225 첫 번째 최적화에서의
EI값 분포

표 2-1-25 재선정된 실험점

No.	a1	a2	n	m	geometry	No.	a1	a2	n	m	geometry
1	17.5	44.91	3.5	1.5		4	17.5	33.56	3.5	1.5	
2	17.5	43.04	3.5	1.5		5	17.5	43.65	3.5	1.5	
3	17.5	42.46	3.5	1.5							

이 때 30개의 실험점에 대하여 Self Organization Map (SOM)을 구성하여 재선정된 실험점들의 경향성을 파악하였다. 이 때 각각의 재선정된 실험점들은 그림에서 표시된 영역 근처에 분포하게 된다. 따라서 재선정된 실험점들이 최적해 주위로 분포되어 있음

을 확인할 수 있다.

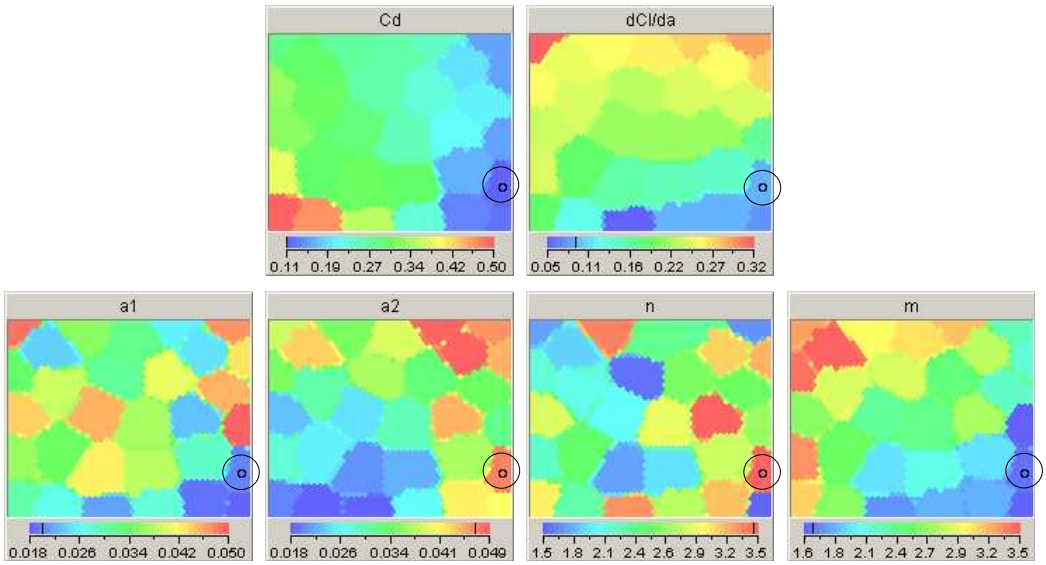


그림 2-1-226 첫 번째 설계 실험점들의 Self Organization Map (SOM)

이렇게 재선정된 실험점들에 대해서 동일하게 0도, 5도 및 10도에서의 비정상 해석을 수행한 이후에 해석 결과들은 첫 번째 설계 실험점들의 결과에 추가하여 다시 Kriging 모델을 구성 및 검증하였으며, 이를 이용하여 GA 최적화를 수행하였으며, 다시 총 4개의 EI를 선정하였다. 또한 SOM을 이용한 선정된 점들의 경향성을 파악하였다. 각각의 결과들은 그림 2-1-227 228 및 표 2-1-26과 같다.

다시 이를 바탕으로 3번째 최적화를 수행하였으며, 이를 통하여 Pareto solution을 구성하고 최적해에서의 설계변수값을 선정하였다. 각각의 Kriging 모델 검증 및 Pareto solution은 그림 2-1-230, 231과 같다. 그림 2-1-231에서 보는 것과 같이 solution들은 외란에 강건한 형상그룹과 공기저항이 작은 형상그룹으로 나눌 수 있다.

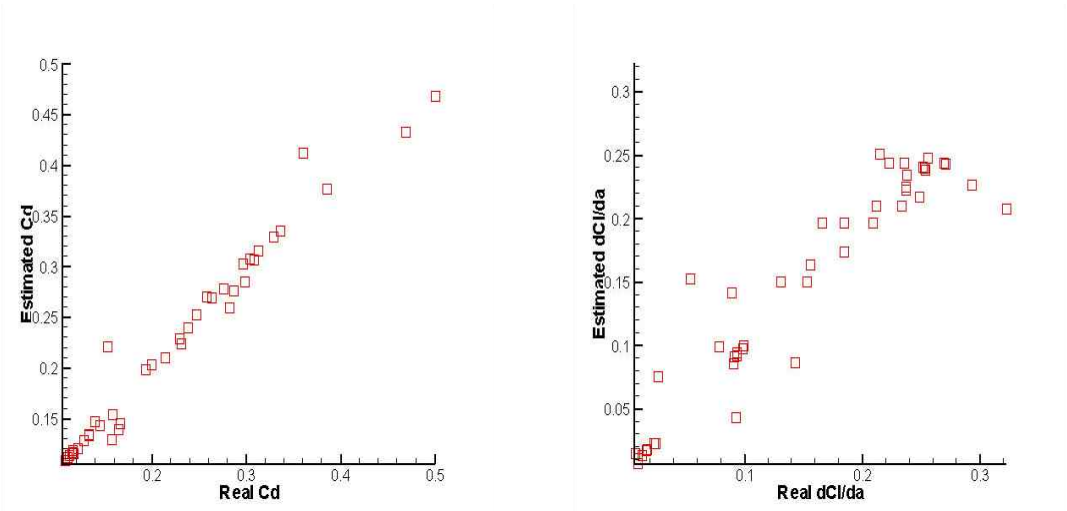


그림 2-1-227 두 번째 Kriging 모델의 검증 결과

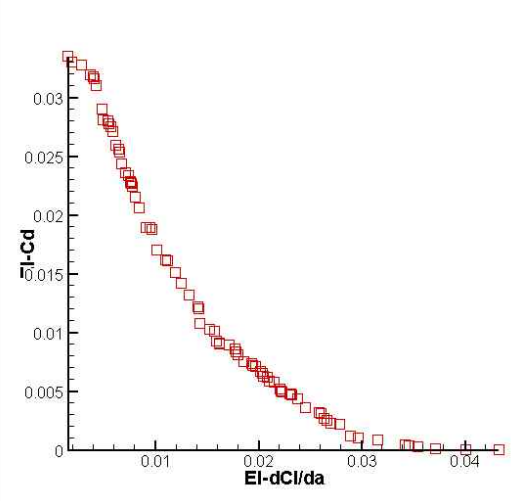
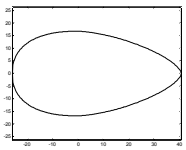
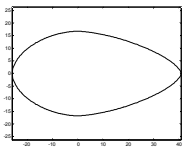
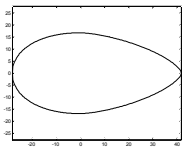
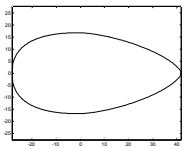


그림 2-1-228 두 번째 최적화에서의 EI 값들의 분포

표 2-1-26 재선정된 실험점

No.	a1	a2	n	m	geometry	No.	a1	a2	n	m	geometry
1	26.08	40.84	2.377	1.5		3	26.08	40.84	1.821	1.5	
2	28.24	41.79	2.129	1.5		4	28.24	41.79	2.480	1.5	

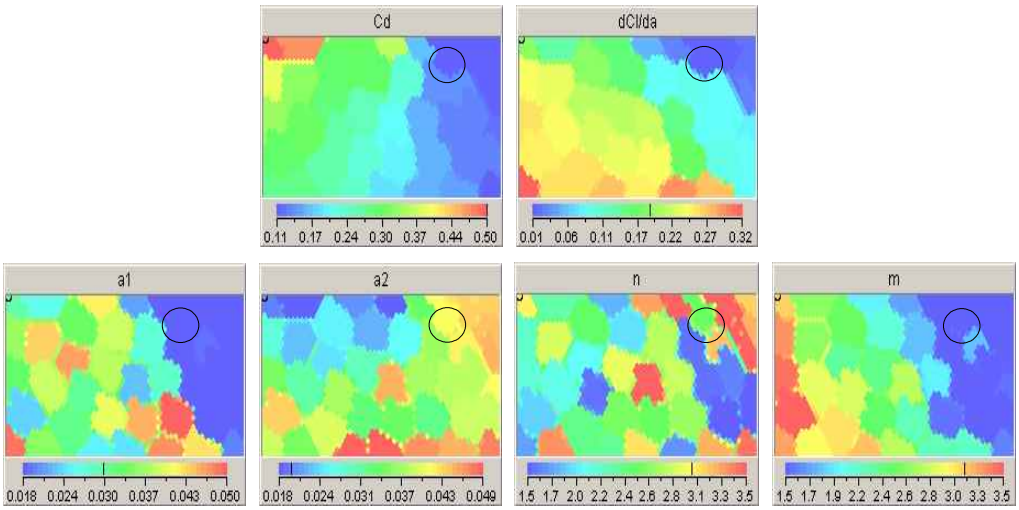


그림 2-1-229 두 번째 설계 실험점들의 Self Organization Map (SOM)

pareto front위의 값들은 모두가 최적값이지만 그 중에서도 공기저항에 대해 더욱 우수한 특성을 지닌 설계점을 선정하였다. 이 때 설계 변수의 값은 각각 $a_1 = 23.56,\ a_2 = 42.39,\ n = 1.5,\ m = 1.5$이다. 이를 통하여 결정된 Pantograph의 공력 소음 감소 및 받음각의 변화에 강건한 2차원 최적 형상은 그림 2-1-232와 같다.

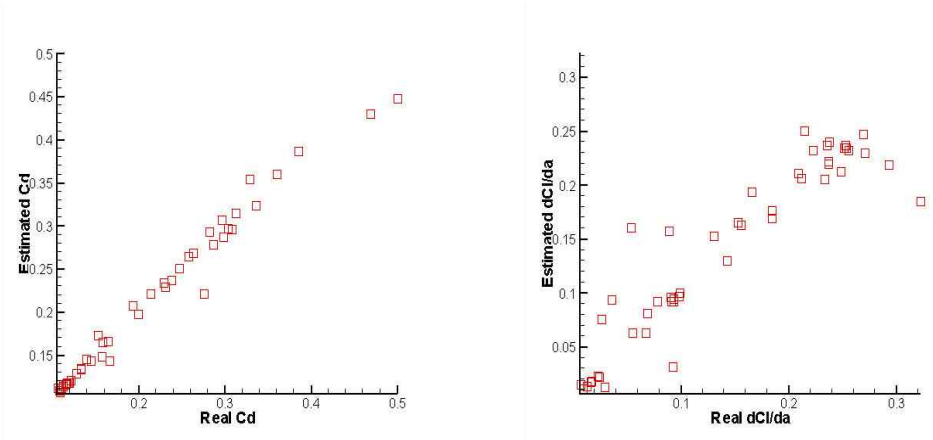


그림 2-1-230 세 번째 Kriging 모델의 검증 결과

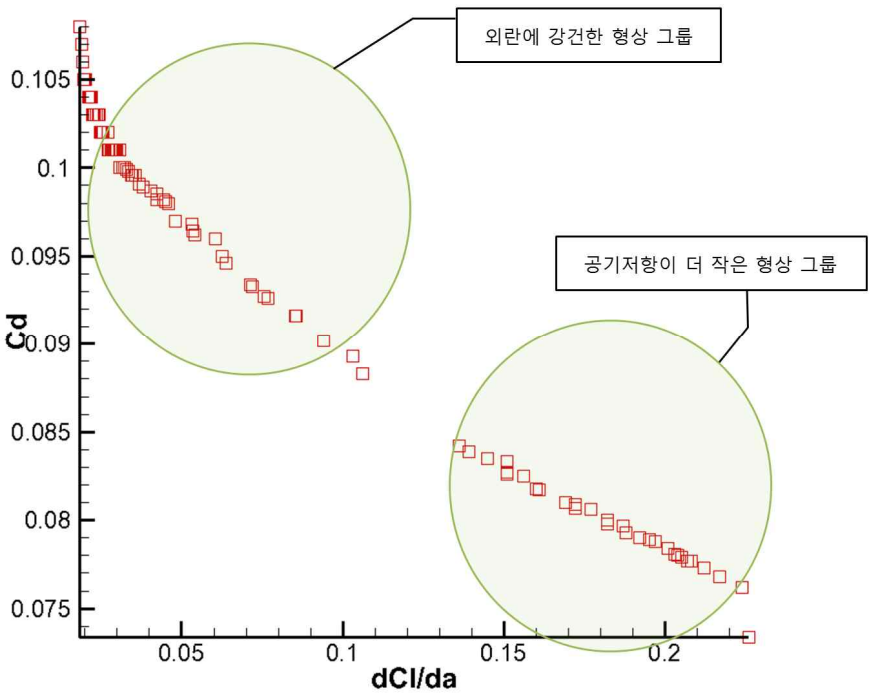


그림2-1-231 Pareto solution

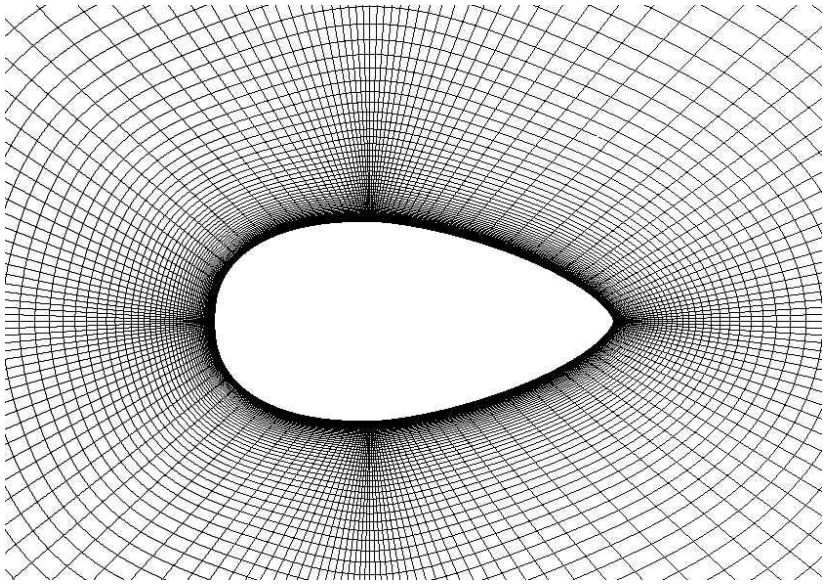


그림 2-1-232 최적화된 팬터그래프 단면형상 Grid

마. 결론

본 연구에서는 풍동시험을 통해서는 접근하기 힘든 실제 주행 속도(350km/h)와 주행 시 경계층 현상이 고려된 팬터그래프 유동 환경(280km/h)에서의 팬터그래프의 공력 특성과 소음 특성에 대해 전산해석을 수행하였다. 한국항공우주연구원에서 수행한 50m/s 이하의 풍동시험 결과를 바탕으로 전산해석 결과를 검증하였고 이때의 오차율을 바탕으로 고속주행 조건에서의 전산해석 결과를 보완하였다. 이러한 오차율은 복잡한 팬터그래프 형상을 재현하는 부분에서 발생하는 형상오차와 풍동시험을 전산해석 상에서 모사하는 기법에서 발생한다. 팬터그래프 단면 형상 최적화 연구에서는 저저항/저소음 팬터그래프 형상 개발 방향을 제시하였다. 최적화 기법으로는 Kriging 근사모델과 Estimated Improvement 기법을 이용하였으며 최적해 탐색법으로는 전역해 탐색법 중 하나인 유전 알고리즘을 사용하였다.

3절 2차년도 연구 수행 내용 및 결과

1. 고속열차 팬터그래프 공력설계 평가 검증 기술 개발

가. 팬터그래프 공력소음 비중 제시

(1) HEMU-430X 속도별 환경소음 측정결과 분석

350 km/h, 410 km/h 에서의 속도에서 소음 Array를 이용하여 HEMU-430x 주행 시 주파수별 소음원을 가시화하였다.

음장가시화 시 데이터의 신뢰성 확보에 가장 중요한 것은 도플러 효과와 음원의 이동에 따른 마이크로폰어레이와의 거리 변화에 대한 고려이다.

본 연구에서는 거리변화에 따른 신호저감과 도플러효과를 고려하기 위하여 다음의 식을 이용하였다.

$$p_j(t) = \frac{1}{R_{s,j}} s(t - \frac{\overrightarrow{R_{s,j}}}{c}), \text{여기서 } R_{s,j} = \left|\overrightarrow{r_s}(t) - \overrightarrow{r_j}\right| \quad (1)$$

이 때, 이동 중인 단극음원 신호 s(t)에 의해서 j번째 마이크로폰에 측정되는 신호는 음원의 위치($r_s(t)$)와 측정위치(r_j)사이의 거리 $R_{s,j}$를 고려하여 결정한다.

위 식(1)에서 음원에 위치에 따른 음원의 전파속도(c)의 보정을 통해서 도플러효과를 보정하게 된다. 또한 이를 바탕으로 빔출력(Beamforming output) 및 빔파워(Beamforming Power)를 구하고, 음원의 위치는 빔파워가 최대가 되는 지점으로 예측할 수 있다. 이때, 음원의 위치에서의 빔출력($z_s(t)$)과 빔파워($\vec{B}P(\overrightarrow{r_s})$)의 수식표현은 다음의 식 (2)와 (3)과 같다.

$$z_s(t) = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} p_j(t + \frac{\left|\overrightarrow{R_{s,j}}(t)\right|}{c}) \quad (2)$$

$$BP(\overrightarrow{r_s}) = \frac{1}{T}\int_0^T z_j^2(t)dt \quad (3)$$

소음 어레이 분석결과 다음의 그림과 같이 1000 Hz 이하 특히 500 Hz 이하의 주파수 대역에서 팬터그래프 소음이 강하게 나타나고 있음을 확인하였다. 또한 속도가 증가(350 kph -> 410 kph)에 따라 팬터그래프 부위의 소음이 더 강해지며, 속도에 따른 공력 소음 특성의 정성적 확인이 가능하다. 한편 HEMU-430X에는 두 개의 팬터그래프(M1,M4)가 존재하는 데, 진행방향 후미부의 팬터그래프를 상승시키고 운행하며, 팬터그래프를 상승하지 않은 쪽은 소음원이 존재하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 팬터

그래프 페어링에 의하여 팬터그래프가 주유동의 영향을 덜 받기 때문이다.

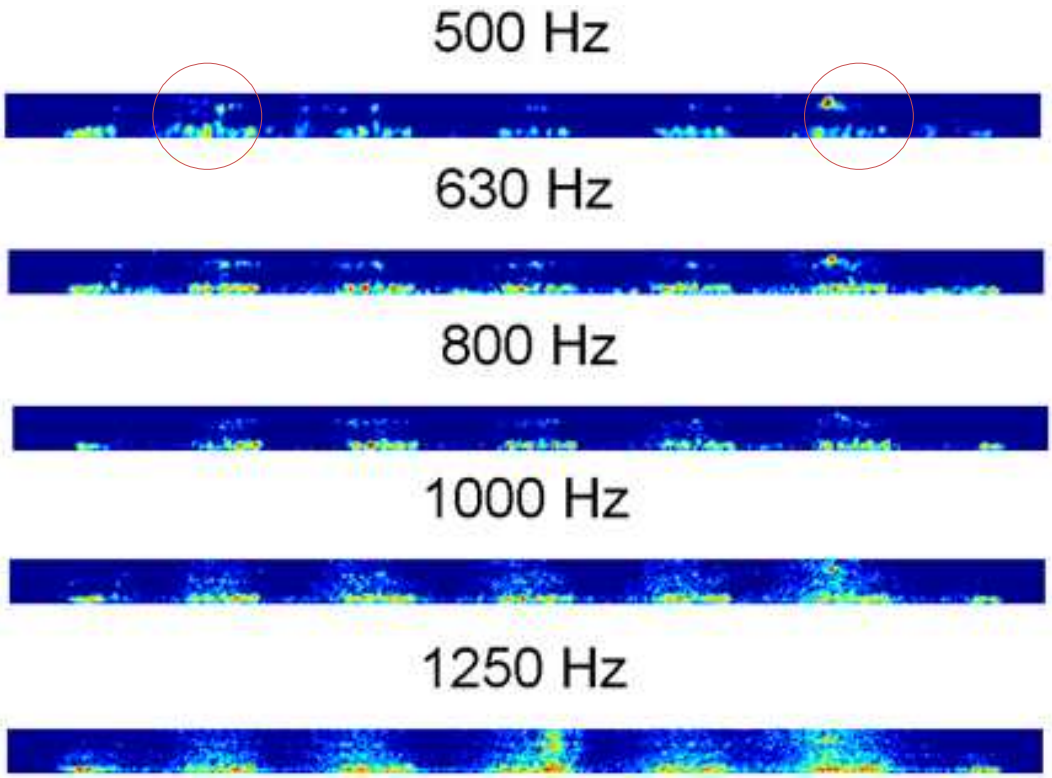


그림 2-2-1 350 km/h 음장가시화 결과

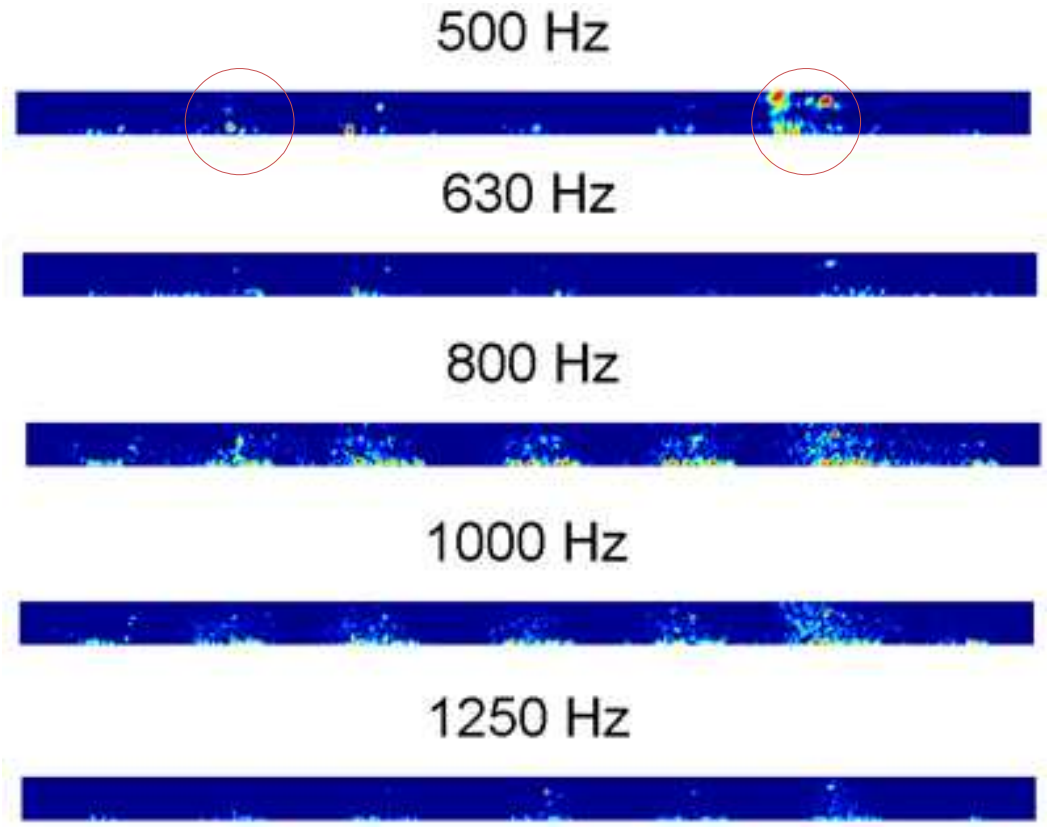


그림 2-2-2 410 km/h 음장가시화 결과



그림 2-2-3 팬터그래프 하강 시 영상



그림 2-2-4 팬터그래프 상승 시 영상

1차년도 연구결과에 의하면 팬터그래프에 작용하는 유속은 주유동의 80%에 해당하는 유동속도를 적용해야 함. 이 때 팬헤드 단면 높이를 기준으로 한 레이놀즈수는 300 km/h ~ 400 km/h의 주유동 속도에서 1.5E+5 ~ 2E+5의 값을 가지게 된다. 실린더형상에서 레이놀즈수에 대한 스트롤수의 관계를 이용하면 이 정도 속도영역에서 스토롤수가 약

0.19 ~ 0.2 수준임을 알 수 있고, 이를 근거로 하여 vortex shedding에 의한 주파수를 추정하면 300 km/h ~ 400 km/h 주행 시, 300 ~ 500 Hz 부근에서 팬헤드에 의한 소음이 발생한다고 추정 가능하다.

상기의 음장가시화 결과는 팬헤드에 의한 소음이 주 소음원임을 설명하는 근거가 될 수 있다. 그러나 빔포밍기법의 특성상 소음원의 정확한 소음을 측정하는 데 한계가 존재한다. 따라서 팬터그래프 공력소음의 정량화를 위해서는 다른 측정방안의 도입이 필요하였으며, 속도별 소음데이터의 경향을 분석하기 위해서는 좀 더 많은 속도별 소음시험이 필요함을 알 수 있었다. 또한 상기 음장가시화 결과로부터, 팬터그래프 상승/하강 시 같은 속도에서 소음을 비교하면 팬터그래프 소음기여도 평가가 가능함을 확인하였다.

(2) 해외 고속열차 팬터그래프 소음 가시화

프랑스 SNCF 연구진은 TGV-POS 열차에 대하여 소음 Array를 이용한 빔포밍 분석결과를 이용하여 팬터그래프의 소음을 평가하였다. (WCRR 2008, P.E.Gautier et al.) 그 결과 빔포밍기법에 의한 음장가시화 결과 320 kph 주행 시 TGV역시 250 ~ 315 hz 영역에서 팬터그래프에 의한 소음이 강하게 나타나고 있음을 다음의 그림에서와 같이 알 수 있다. 즉, 해외사례 역시 소음 Array를 이용한 음장가시화 기법이 팬터그래프에 의한 소음의 주파수를 평가하는 좋은 방법임을 알 수 있었다.

(3) 팬터그래프 상승/하강 가능성 평가

상기 소음 가시화 결과를 바탕으로 동일 속도 주행 시 팬터그래프 상승/하강 시 소음을 측정하고 비교하여 팬터그래프의 소음을 평가하는 것이 좋다고 판단되었다.

한편 고속철도 운행 시, 기존선과 고속선의 전차선 높이차이로 주행 중 팬터그래프를 하강했다가 다시 상승시키는 운용이 존재함을 확인하였고, 300 km/h 에서도 팬터그래프 상승/하강이 가능한지 확인하기 위하여 경부고속선 KP 308 지점에서 차량 MCB를 하강시키고 팬터그래프를 하강시키는 예비시험을 수행하였다.

그 결과 다음 페이지의 그림에서와 같이 팬터그래프 하강/상승 시 팬터그래프 압과 접촉력이 떨어졌다가 원복 되는 것을 확인하였음.

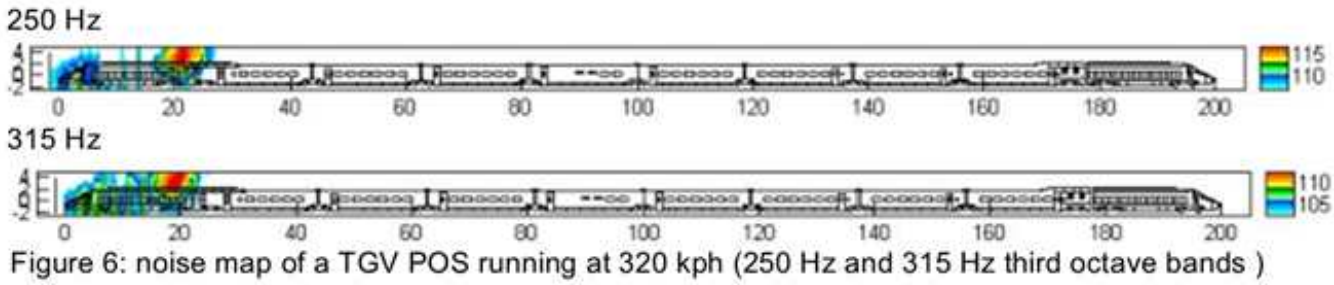


그림 2-2-5 TGV-POS 음장가시화 결과 (WCRR 2008)

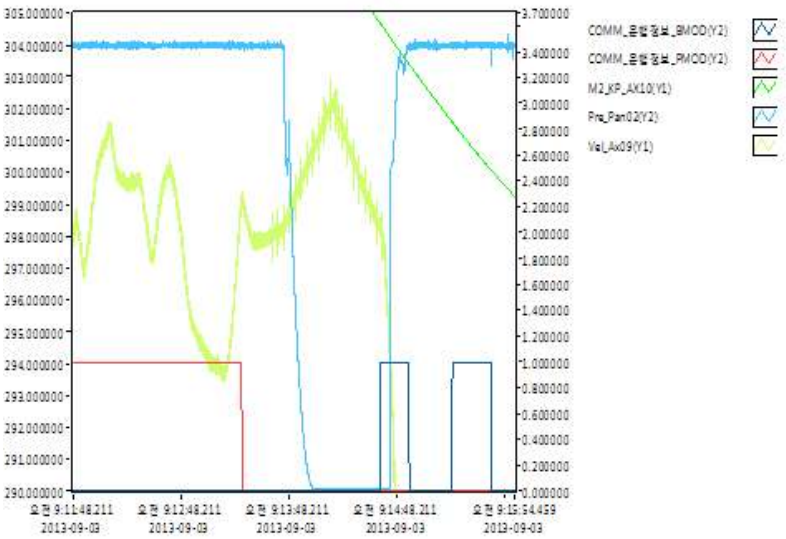


그림 2-2-6 팬터그래프 하강/상승 시 압력변화

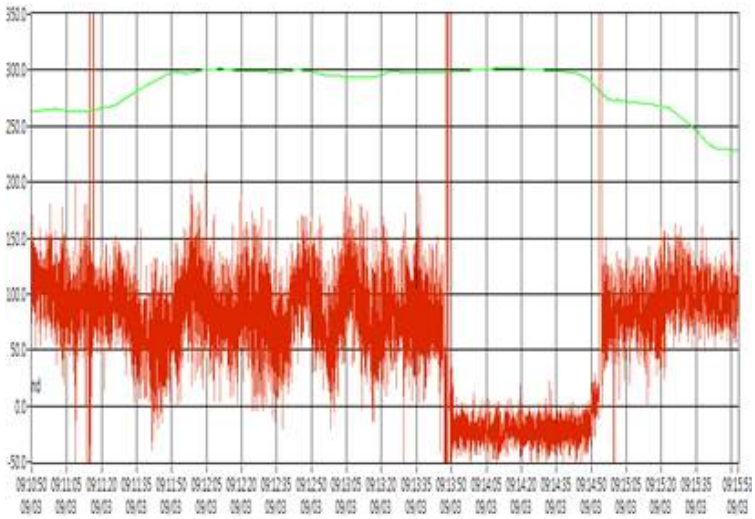


그림 2-2-7 팬터그래프 하강/상승 시 접촉력 변화

(4) 팬터그래프 상승/하강을 이용한 팬터그래프 소음기여도 평가

상기 예비시험을 바탕으로 팬터그래프 상승/하강 시 소음을 측정하기로 하고 다음과 같이 소음측정 위치 및 방법을 설정하였고, 이를 통하여 팬터그래프에 의한 소음기여도를 평가하였다.

(가) 소음측정위치

소음 측정위치는 경부고속선 KP 39.2 부근 하선 기준 송라터널 통과 후 개활지로 설

정하였다. 본 위치는 고속열차가 고속으로 주행하는 구간임에도 불구하고 방음벽이 설치되어있지 않아서 소음측정에 유리한 구간이다. 또한 소음을 측정할 수 있는 위치가 평지에 위치하여 ISO3095에 의거하여 7.5 m 거리에서 소음측정이 가능하다. 마지막으로 해당 구간은 하행 시 하구배 3퍼밀 구간으로 팬터그래프 하강 시 동력미공급 및 주행저항으로 인한 감속이 덜하기 때문에 이 구간으로 소음 측정위치를 설정하였다.

(나) 소음측정방법

팬터그래프의 소음을 측정하기 위하여 상기지점인 KP 39.2 부근 선로변 7.5 m, 15 m 위치에 마이크로폰을 설치하였고, 휴대용 DAQ 및 노트북을 이용하여 HEMU-430x 통과 시 소음을 측정하였다. 마이크로폰의 설치높이는 선로로부터 7.5 m, 위치에서는 1.2 m, 15 m 위치에서는 2.7m 높이에 설치하였다.



그림 2-2-8 소음 측정위치(KP 39.2)부근 KTX 운전선도

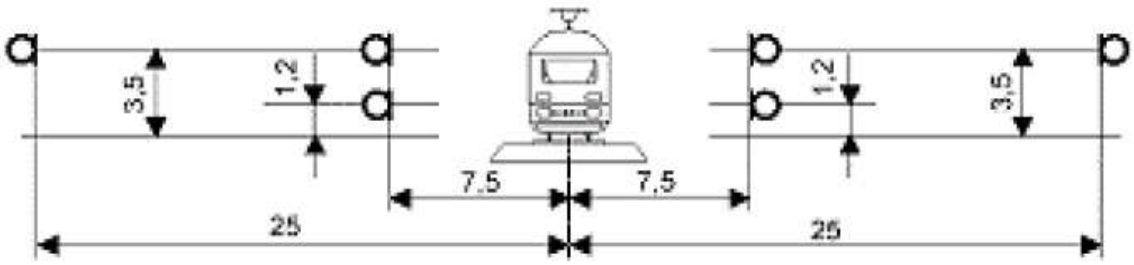


그림 2-2-9 마이크로폰 설치위치

(다) 소음측정결과를 통한 팬터그래프 소음 비중 제시

아래의 그림에서와 같이 상기 구간을 290 km/h 주행 시 팬터그래프 하강 시 해당부분

의 소음이 7.5m 위치에서 약 4 dB 감소(100.9 dB -> 96.9 dB)하는 것을 확인하였다. 즉 290 km/h에서 팬터그래프에 의한 소음증가는 약 4dB 수준임을 확인가능하다. 또한 그림에서와 같이 비상 팬터그래프 (선두부 차량 위치) 하강 시 선두부의 소음이 감소하는 것을 확인할 수 있다는 점에서 팬터그래프에 의한 소음평가가 가능함을 확인할 수 있었다.

한편 7.5m 와 15m 소음측정결과의 주파수특성을 분석한 결과, 7.5m 측정 결과과 보다 명확하게 팬터그래프 소음 감소를 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

마지막으로 팬터그래프 하강 시 300 ~ 500 Hz 대역의 소음이 큰 폭으로 감소(6dB)함을 확인하였으며, 500 ~ 1000Hz의 소음도 소폭 감소함(2dB)을 아래의 그림들로부터 확인할 수 있다.

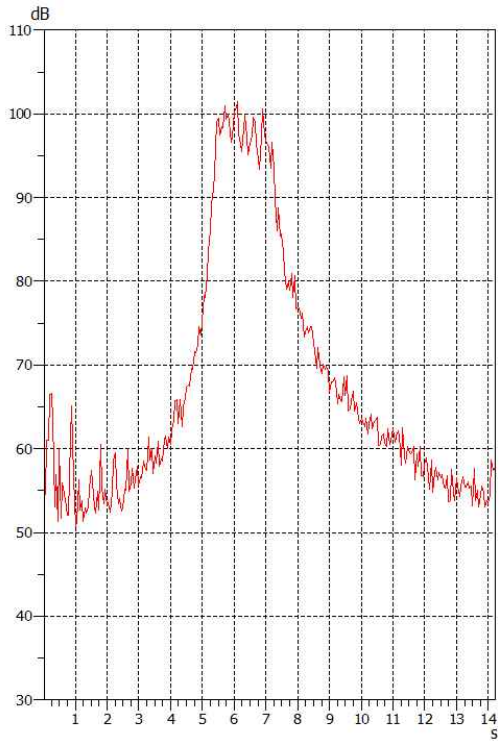


그림 2-2-10 팬터그래프 상승 외부소음, 292 kph

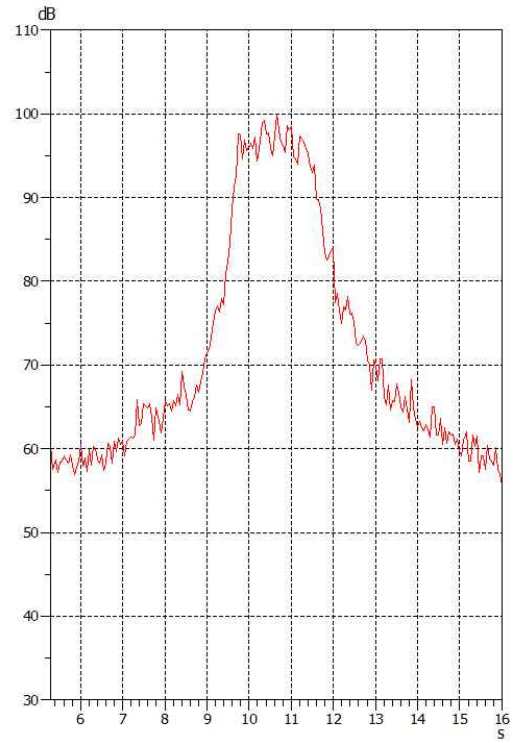


그림 2-2-11 팬터그래프 하강 외부소음, 289 kph

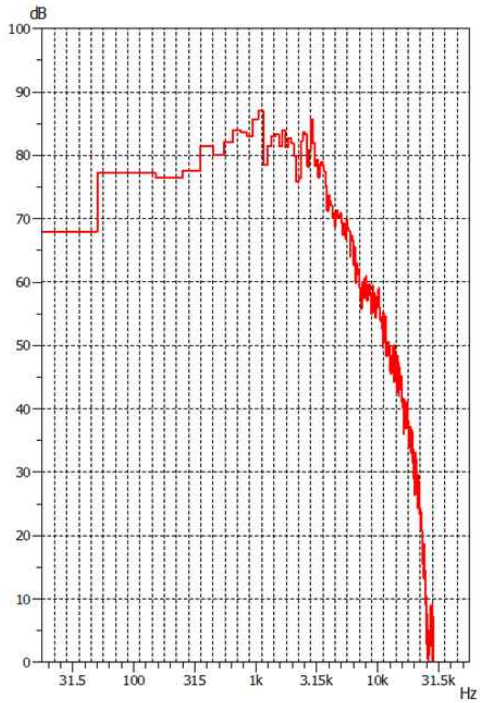


그림 2-2-12 팬터그래프 소음 주파수 15.0 m

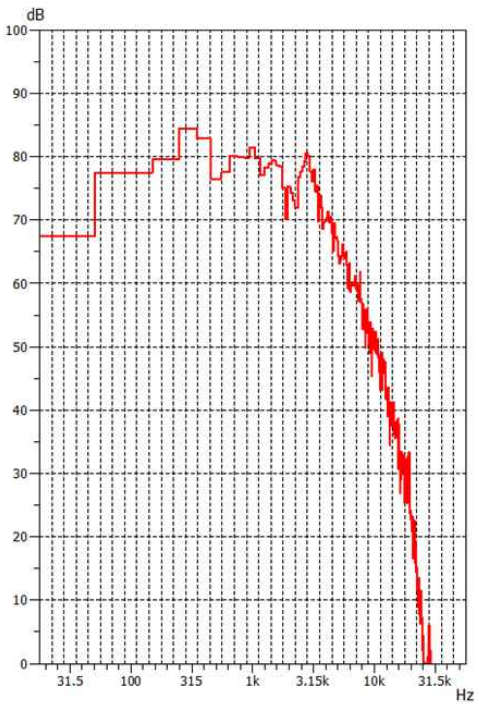


그림 2-2-13 팬터그래프 소음 주파수 7.5 m

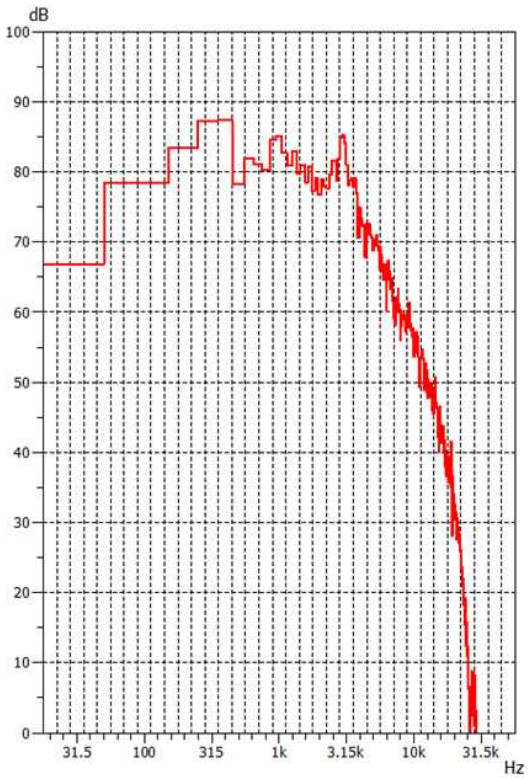


그림 2-2-14 팬터그래프 상승 소음 주파수 7.5 m

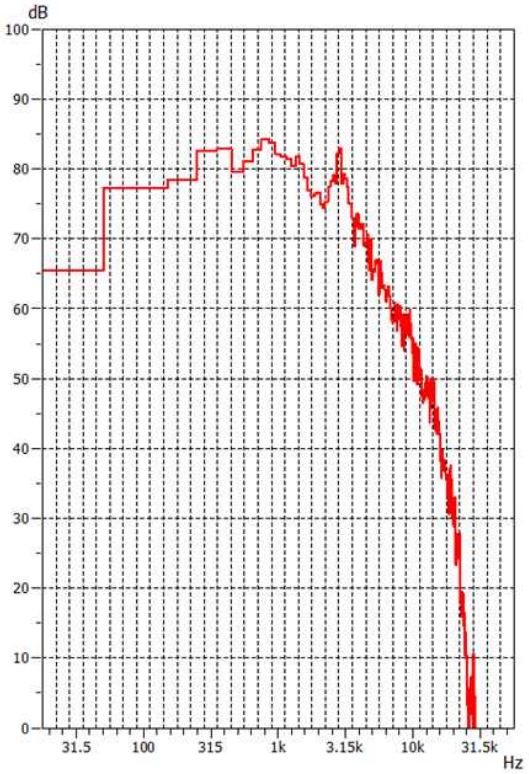


그림 2-2-15 팬터그래프 하강 소음 주파수 7.5 m

나. 팬터그래프 공력소음 평가절차

(1) 개요

상기의 측정결과들을 바탕으로 팬터그래프의 공력소음 평가절차를 수립하였다. 팬터그래프에서 발생하는 소음을 평가하기 위해서는 팬터그래프에 의한 소음의 주파수 특성 파악 및 해당소음의 크기를 정량적으로 측정하여야 한다. 따라서 팬터그래프 소음 주파수의 특성 파악은 소음 Array를 이용한 음장가시화 방법으로 수행하는 것이 바람직하다. 또한 음장가시화 방법의 단점인 소음의 크기측정의 부정확성을 보완하기 위하여, 팬터그래프 상승/하강 시 마이크로폰을 이용한 소음의 실제크기(dB)를 비교하는 것이 좋을 것이다. 즉 이를 요약하면 마이크로폰을 이용하여 측정한 소음 데이터를 음장가시화 방법을 통하여 평가된 주파수 대역과 비교하여, 주파수 대역별 소음의 크기(dB)를 평가하면 팬터그래프 소음을 정량적으로 평가할 수 있을 것이라고 기대된다. 다음은 실차에서의 팬터그래프 소음평가절차서이다. 단 이 절차서는 팬터그래프 커버가 충분히 커서 팬터그래프 하강 시 커버에 의하여 유량이 차단이 되는 경우에 한해서이다. 하지만 최근의 고속열차는 대부분이 팬터그래프 소음 및 상부 애자류 및 MCB 보호를 위하여 팬터그래프 커버 혹은 페어링이 설치가 되기 때문에 하기 평가절차서는 의미가 있다고 판단된다.

(2) 소음평가절차서

○1단계 : 소음 Array를 이용한 팬터그래프 소음의 주파수 특성 파악

1) 실차 소음 측정위치 선정

- 차량이 운영최고속도를 낼 수 있는 개활지 직선 구간선정 (교량제외)
- 선정된 구간 중 방음역이 없고 선로 옆 30 m 까지 장애물이 없는 구간선정

2) 소음 Array 설치

- 설치위치: 주행시 고속철도 차량의 주변에서 발생하는 열차풍으로 인한 압력파로 인해서 어레이가 선로변으로 넘어지더라도 열차운행에 장애가 없는 거리를 감안하여 설치위치를 선정함. 96채널의 방사형 어레이를 기준으로는 선로로부터 5m 이격된 위치가 효과적으로 판단됨
- 설치높이: 레일상면으로부터 어레이 중심 위치가 열차의 높이에 따른 중심에 위치하도록 설치하여야 함. 96채널의 방사형 어레이의 경우에는 레일상면으로부터 어레이의 중심이 2.3m의 위치가 되도록 설치하는 것이 효과적으로 판단됨
- 속도측정: 어레이 측정을 통해서 구현된 음장가시화 결과를 차량의 위치에 투영하기 위해서는 측정된 신호에서의 열차의 위치를 정확하게 파악하는 것이 중요함. 이를 위해서 양 선로의 기둥에 포토센서를 설치하여 고속철도 차량이 주행 시 측정 위치 파악 및 속도를 파악하는데 활용함. KTX과 HEMU-430X의 경우에는 선로 양 쪽 기둥면에서 레일방향으로 1.4m와 레

일 상면을 기준으로 높이 1m 지점에 포토센서가 위치하도록 하는 것이 효과적으로 판단됨

- 측정장비: 다채널 데이터 수집 장치 및 분석 장치가 필요함
- 측정방법: 고속열차에서 발생하는 소음의 주파수 특성 및 가정주파수의 가중치를 고려하여 볼 때, 샘플링 주파수 6.4 kHz 와 주파수 분해능 5 Hz가 적당한 것으로 판단됨

3) 소음 Array 측정시험 절차

- 측정 위치 선정 (어레이 및 포토센서 설치 위치 선정)
- 어레이 설치 및 포토센서 설치 및 측정

4) 소음 Array 측정결과 분석

- 분석방법: 다수의 센서에서 측정된 신호를 바탕으로 빔형성 방법에 기반한 음장가시화를 수행함. 이때 각 센서상의 위치 차이와 움직임은 음원에 따른 도플러 효과를 보정해야 함. 또한 설치된 어레이의 분해능에 대한 검토를 통해서 분석 가능한 주파수 영역을 파악함
- 주파수 영역에 따른 어레이의 음장가시화 결과를 통해서 팬터그래프의 음원 발생에 대한 주파수 영역을 파악함

○2단계 : 마이크로폰을 이용한 팬터그래프 상승/하강 시 소음특성 비교

1) 마이크로폰 설치

- 설치위치: 선로변에서 7.5m 또는 25m 지점
- 설치높이: 레일상면에서 1.2m 높이에 마이크로폰을 설치함. 팬터그래프의 소음을 중심으로 분석을 하기 위해서는 레일상면에서부터 3.5m 지점에 설치함
- 측정센서: 마이크로폰으로 열차의 주행 소음을 측정함.
- 측정장비: 데이터 수집 및 분석 장비를 활용함
- 측정방법: 고속열차에서 발생하는 소음의 주파수 특성 및 가정주파수의 가중치를 고려하여 볼 때, 샘플링 주파수 6.4 kHz 와 주파수 분해능 5 Hz가 적당한 것으로 판단됨

2) 소음측정시험 절차

- 팬터그래프에서 발생하는 소음의 영향을 간접적으로 분석하기 위해서 팬터그래프의 상승/하강 상태에서의 열차의 주행 소음을 각각 측정함. 이때, 열차의 속도, 선로의 상태, 측정 주변의 배경소음 등 동일한 조건에서 측정하는 것이 중요함

3) 소음측정결과 분석

- 열차의 주행 소음에 따른 시간 이력을 살펴보게 되면, 차량의 주행에 따른 차량의 위치별 발생 소음의 크기를 파악할 수 있음. 이를 바탕으로 팬터그래프의 상승상태와 하강상태에서의 열차소음에 미치는 영향을 간접적으로 비교할 수 있음

- 열차의 통과소음에 대한 시간이력 중에서 팬터그래프 영역에서의 주파수 특성을 도출하고, 음장가시화를 통해서 도출된 팬터그래프의 주파수 영역에서의 상승상태 대비 하강상태에서의 음원의 크기변화를 비교분석함

(3) 팬터그래프 소음평가절차 요약

○1단계 : 소음 Array를 이용한 팬터그래프 소음의 주파수 특성 파악

1) 소음 Array 설치위치 : 선로변 5 m 이격, Array 중심 높이는 2.3 m
2) 속도측정 포토센서의 설치위치 : 선로 양쪽 기둥면 1.4 m 내측, 높이 1 m
3) 측정장비주파수설정 : 샘플링 주파수 6.4 kHz, 주파수 분해능 5 Hz
4) 측정결과 분석 : 빔형성 방법이용 및 도플로 보정 수행
5) 측정결과물 : 팬터그래프 음원에 대한 주요 주파수 영역 파악

○2단계 : 팬터그래프 상승/하강 시 소음특성 비교

1) 마이크로폰 설치위치 : 선로변 7.5 m 이격, 설치 높이는 1.2 m 혹은 3.5 m
2) 측정장비주파수설정 : 샘플링 주파수 6.4 kHz, 주파수 분해능 5 Hz
3) 팬터그래프 상승/하강 시 소음측정 : 동일지점 및 동일속도 유지 각각 측정
4) 측정결과 분석 : 팬터 상승/하강 시 주요 주파수 영역에 대한 소음 dB 비교
5) 측정결과물 : 팬터그래프 음원의 차량소음 기여특성 평가

(4) 팬터그래프 소음평가절차를 이용한 풍동에서의 팬터그래프 소음특성 검증안

○ 풍동시험결과와 실차시험결과의 비교분석

1) 풍동시험 조건: 1차년도에 제시된 팬터그래프 운영시나리오에 근거하여 팬터그래프 높이, 팬터그래프 정상/비상 모드, 정적압상력을 실차와 동일하게 세팅. 또한 실차와 같이 팬터그래프 페어링 설치
2) 풍동시험결과와 실차측정 간 소음 array 데이터 비교: 소음원 위치 및 주파수 비교를 통한 연관성 도출
3) 팬터그래프 상승/하강 시 소음의 크기(dB 특성)를 실차와 풍동시험 결과 간 주파수 분석을 통하여 연관성 도출

○ 개발 팬터그래프의 소음특성 검증

1) 최적설계 팬터그래프를 속도별로 소음 array 시험 및 팬터그래프 상승/하강 시 소음측정 시험 실시
2) 실차시험결과와 풍동시험결과간의 연관성 결과를 통하여 최적설계 팬터그래프의 소음특성을 검증하고, 실차에서의 소음특성을 예측함

다. 공력에의한 팬터그래프 접촉력 영향 평가

(1) 접촉력 평가 개요

팬터그래프의 압상력이 전차선에 주는 평균접촉력, 가선과 팬터그래프간의 이선을 제한하는 최소접촉력, 지난친 압상력으로 인한 가선 마모를 제한하는 최대접촉력이 중요하며, 이 때, 최대접촉력과 최소접촉력은 측정된 접촉력 결과를 통계적으로 처리하여 평가된다. (평균접촉력:Fmean, 최소접촉력:Fmean-3σ, 최대접촉력:Fmean+3σ)

열차가 고속으로 운행될수록, 팬터그래프와 전차선간의 접촉력의 진폭이 커기게 되고, 그 결과 접촉력의 표준편차(σ)가 커지게되어 집전성능의 문제가 발생하게 되므로, 접촉력의 표준편차를 최소화하는 것이 고속열차의 안정적인 운행 및 시설물의 유지보수를 위하여 필요하다. 일반적으로 팬터그래프 팬헤드의 단면은 사각형 형태로서 고속주행 시 유동의 Vortex shedding에 의한 진동(접촉력 변동) 및 소음이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 공력에 따른 접촉력의 진동특성을 주파수 분석을 이용하여 분석하였다.

(2) HEMU-430X 접촉력 분석 결과

아래 그림에서와 같이 일반적으로 접촉력은 속도가 증가함에 따라 진동의 폭이 커지게 됨. 이 때 특정속도 영역의 접촉력을 통계적으로 분석하여 접촉력의 표준편차의 평가 및 최대/최소 접촉력을 측정하게 된다.

특히 다음에서 보이는 바와 같이 접촉력의 표준편차는 속도에 대하여 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 특히 터널구간에서는 접촉력 표준편차가 큰 폭 (10N)으로 증가하는 경향을 보인다. 따라서 터널구간에서의 접촉력 표준편차의 증가는 터널에서의 상대유동속도 증가에 따른 공력의 영향이라고 추정하고 있으나, 명확한 원인파악이 필요하다.

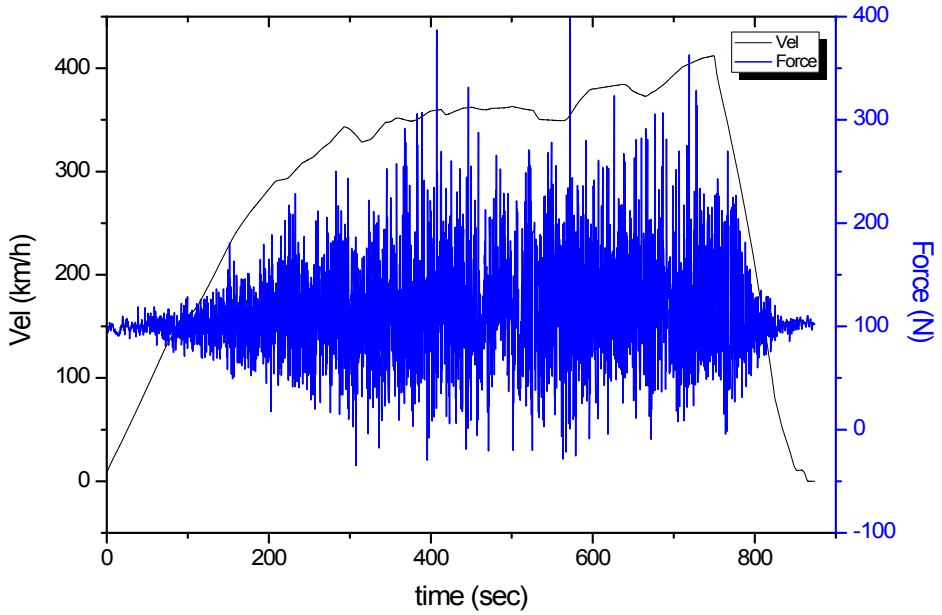


그림 2-2-16 전체 주행구간에서의 팬터그래프 접촉력 특성

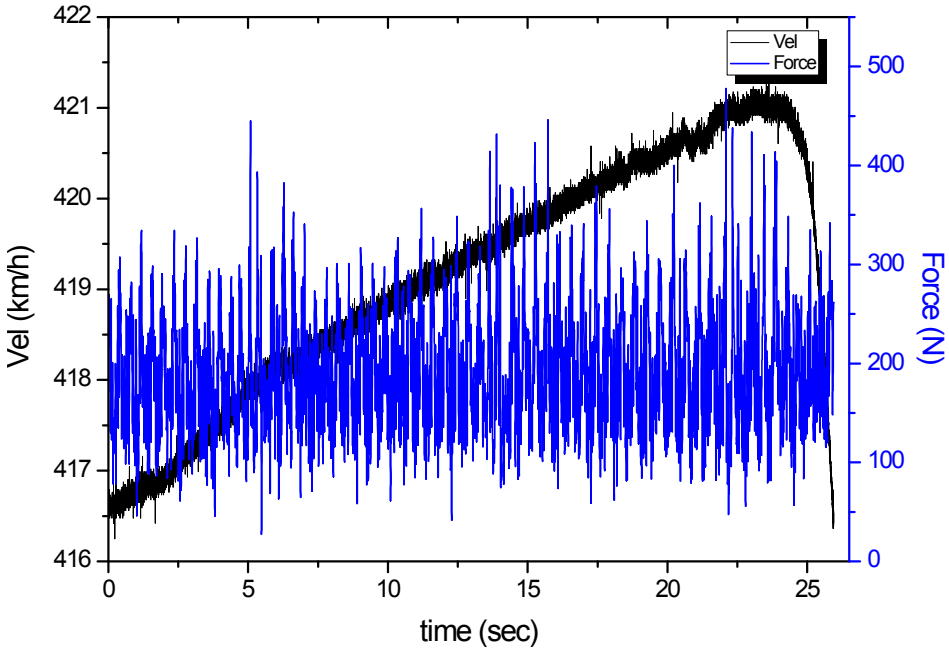


그림 2-2-17 특정속도구간의 접촉력 특성

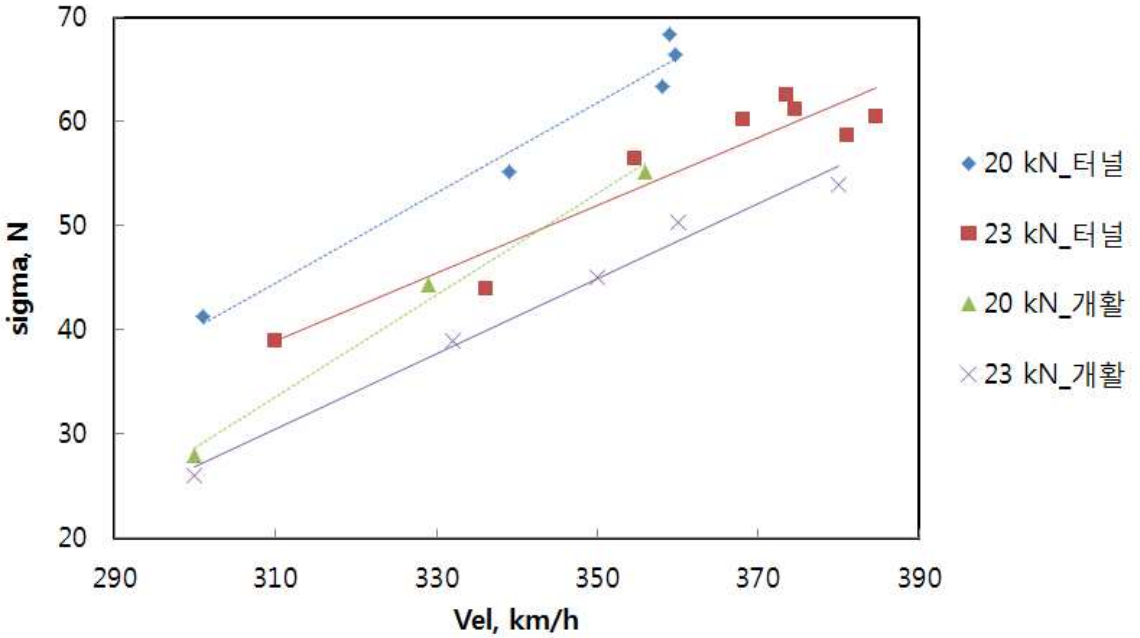


그림 2-2-18 속도에 따른 접촉력 표준편차 변화

(3) HEMU-430X 접촉력 주파수 분석 결과

판토그래프 접촉력 표준편차의 증가원인을 알아보기 위하여 판토그래프의 접촉력에 대하여 주파수(FFT) 분석을 수행하였다. 그림 2-2-19은 300 km/h 주행 시 접촉력의 0~100Hz까지의 주파수분석 결과이며 그림 2-2-20는 이를 바탕으로 0~20Hz 까지 좀 더 상세하게 분석한 결과이다. 300 km/h 개활지 주행 데이터를 이용하여 분석 한 결과 1.35 Hz에서 가장 큰 진동성분이 나오며, 5.5 Hz, 7.5 Hz, 12 Hz의 진동들이 접촉력에 기여하고 있음을 알 수 있다. 그림 133에서 보이는 60 Hz는 전원 노이즈이다. 전차선의 경간(63m)과 열차속도(300 km/h → 83 m/s)를 고려하였을 때 경간에 의한 진동주파수는 1.3 Hz 정도이다. 따라서 판토그래프 접촉력 진동의 가장 큰 성분인 1.35 Hz 진동은 경간에 의한 영향이라고 판단된다. 이는 또한 접촉력 표준편차가 속도에 따라서 선형적으로 증가한다는 것 역시 경간에 의한 영향이 매우 큼을 설명할 수 있는 부분이다. 또한 주파수 분석에서 주요한 기여도를 보이는 12 Hz 성분은 드로퍼를 통과하면서 생기는 진동 성분이라 판단되는 데, 이는 63 m 경간에서 드로퍼간의 간격이 6.75 m로 300 km/h 주행 시 주파수로 환산하면 12.3 Hz 이기 때문이다. 나머지 주파수 성분들(5.5 Hz, 7.5 Hz)은 동적보정시험을 통하여 확인된 그림 135의 리셉턴스 분석결과와 비교해보면 판토그래프의 고유진동수 성분으로 추정된다.

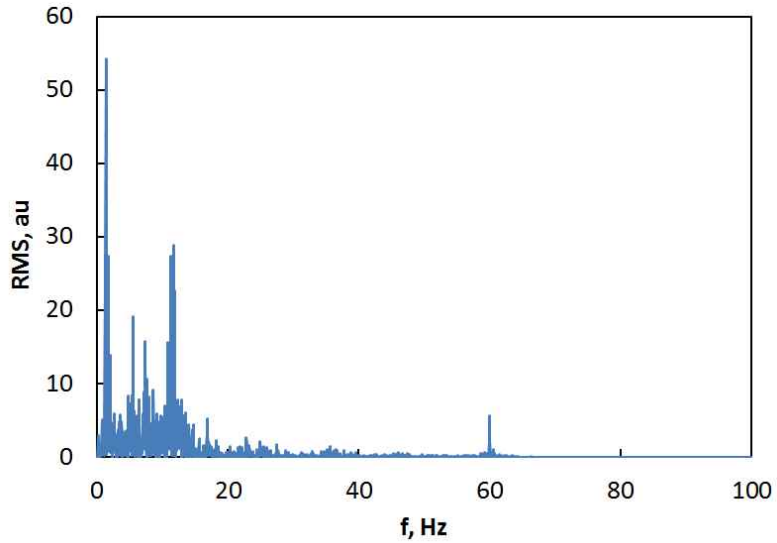


그림 2-2-19 300 km/h 주행시 접촉력 FFT 결과

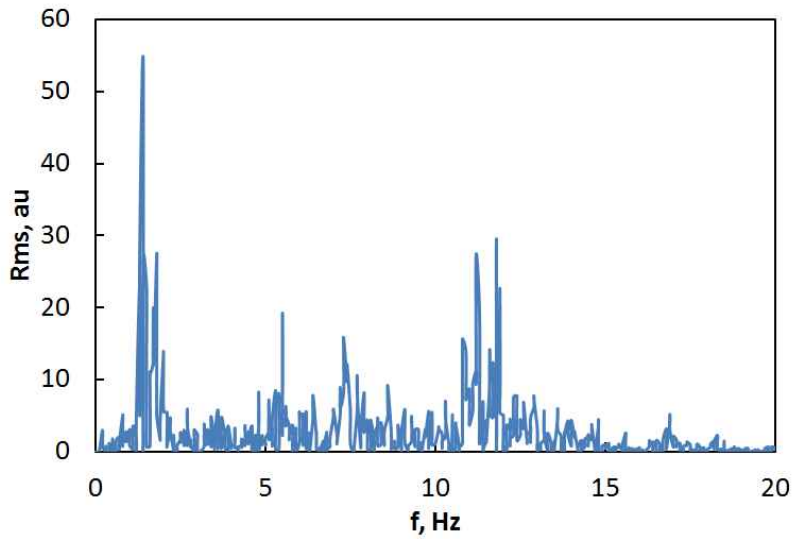


그림 2-2-20 300km/h 주행 시 접촉력 FFT 상세분석 결과

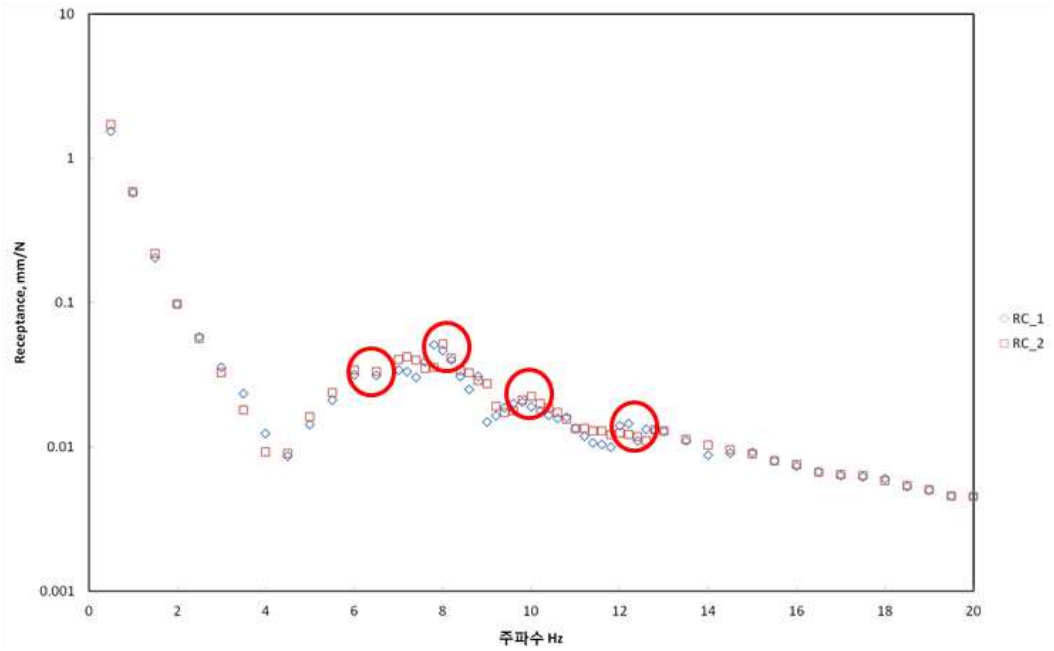


그림 2-2-21 HEMU-430X 팬터그래프 Receptance 분석결과

그림 2-2-22~23은 터널구간 300 km/h 접촉력 주파수 분석결과이다. 해당구간 경간(50 m)길이에 대응하는 1.65 Hz 진동이 주성분이며, 개활지 대비 6.5 Hz 부근에서 큰 진동이 발생하고 있음을 알 수 있고 또 다른 진동인 11.5 Hz 성분은 드로퍼 통과 시 발생하는 성분으로 추정된다. 6.5 Hz 진동 특성은 판토그래프의 고유주파수 영역에 해당이 되나 개활지 대비 그 영향이 커졌다는 점에서 6.5 Hz주파수에 해당하는 유동특성이 터널에서 나타나고 있다고 추정되나 향후 유동특성을 고려한 추가적인 분석이 필요하다. 한편 HEMU-430X 판토그래프 팬헤드의 공력에 의한 vortex shedding 주파수는 풍동 시험결과에서 약 250 Hz 정도로 평가되고 있기 때문에 팬헤드 주위의 vortex shedding이 접촉력 표준편차 증가의 원인은 아닐 것으로 판단된다. 따라서 향후 터널에서의 접촉력 특성의 상세한 분석을 위해서는 터널 내 유동특성에 대한 해석 및 실험이 필요하며, 해당 유동특성의 판토그래프 동특성에 미치는 영향에 대해서도 추후 연구가 필요하다.

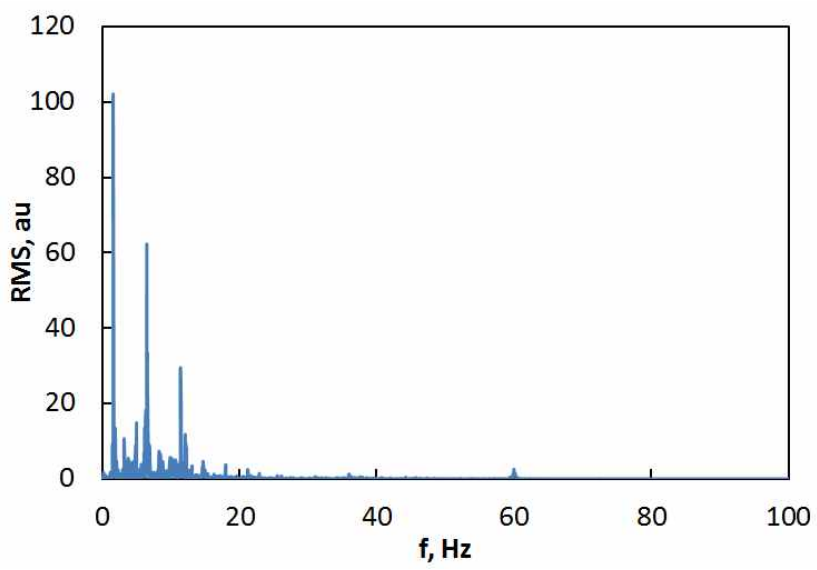


그림 2-2-22 300 km/h 터널 접촉력 FFT 결과

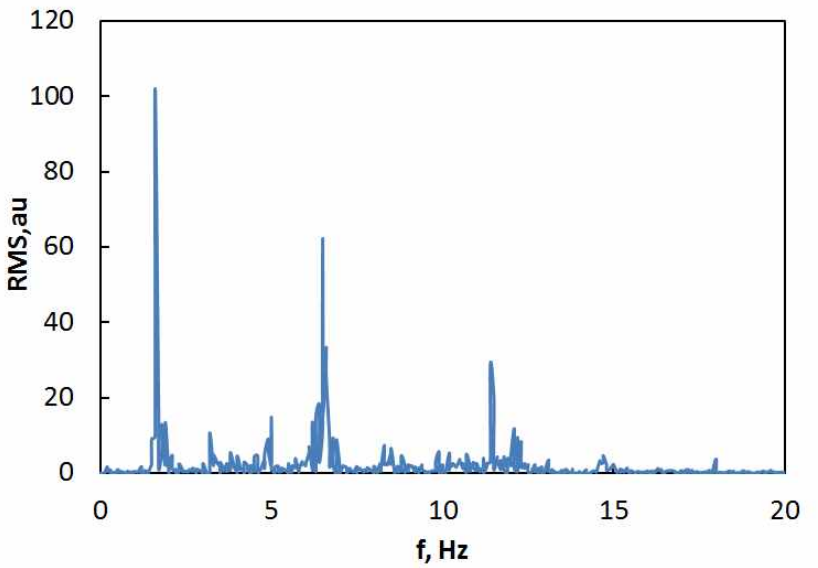


그림 2-2-23 300 km/h 터널 접촉력 FFT 상세분석 결과

라. 팬터그래프 주습판 유선형 설계 시 접촉력 영향 간접 검토

팬터그래프 주습판 유선형 설계 시 접촉력 영향을 검토하기 위하여 430 km/h 급 고속열차 시운전시험 연구 1차년도 연차실적 계획서 중 일부 내용을 검토하였다. 주습판의 유선형 설계 시 주습판의 질량은 늘어나게 된다. HEMU-430x 시험 시 주습판의 질량이 변화되었을 때 접촉력의 특성을 검토하였고 그 결과는 다음과 같다.

가. 주습판 경량화 효과 검토

팬터그래프의 접촉력 표준편차 최소화를 위하여 HEMU-430X 에서는 다음 그림과 같

이 집전판 경량화를 적용하여 주습판의 질량을 6.4 kg에서 4.8 kg으로 변경하였다. 이 때 집전판 교체에 따른 접촉력 센서의 동적보정을 시행 그림 2-2-26 ~27과 같이 시행하였다. 접촉력 측정결과 주습판 경량화 효과는 접촉력 표준편차 1N 개선 수준으로 매우 미미함을 확인하였다. 따라서 주습판 유선형 설계에 따른 주습판 질량 증가의 접촉력 표준편차에 대한 영향을 작을 것으로 판단되나, 3차년도에 수행되는 “최적설계 팬터그래프 동특성 및 집전성능 해석”을 통하여 비교/검증할 예정이다.



그림 2-2-24 기존 집접판 (6.4kg)



그림 2-2-25 경량 집전판 (4.8kg)

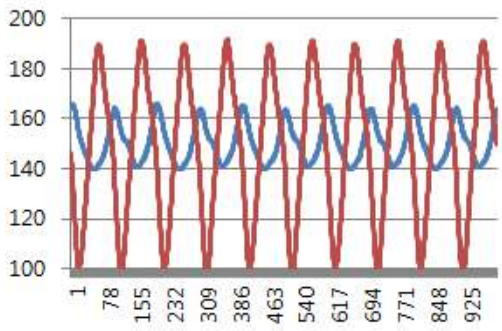


그림 2-2-26 동적 보정전, 10Hz

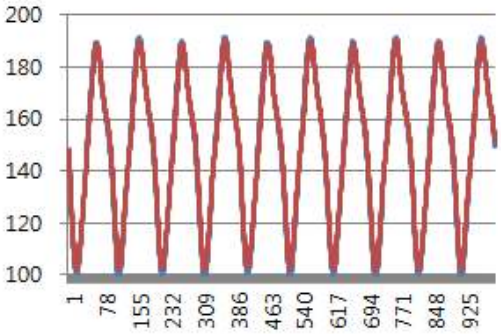


그림 2-2-27 보정후, 10Hz

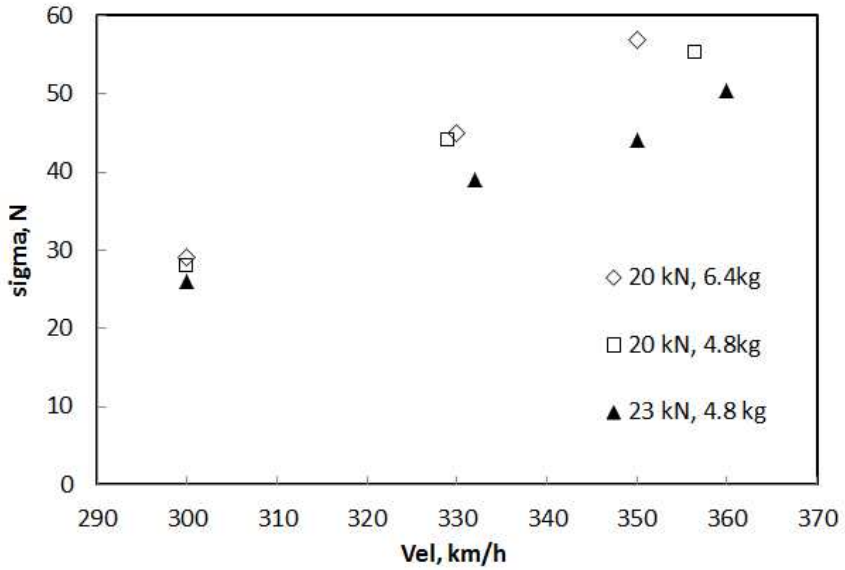


그림 2-2-28 HEMU-430X 팬터그래프 접촉력 표준편차 영향도 분석

2. 풀스케일 팬터그래프 형상의 공력 소음 시험 장치 구축 및 검증

가. 폐쇄형 시험부 공력소음 시험장치 개발

풍동 시험을 통해 고속철도 팬터그라프의 공력 소음 특성을 연구하기 위해서는 400km/h(111m/s) 의 고속 유동 조건이 필요 하며, 이를 위해 고속 유동 재현이 가능한 폐쇄형 시험부에서 공력 소음을 측정하여야 한다. 폐쇄형 시험부에서의 공력 소음 측정을 위하여 시험부 벽면에 마이크로폰 어레이를 설치하기 위한 방안이 연구되었다.

시험부 벽면에서 발생되는 경계층에 의한 소음 간섭을 줄이기 위해 마이크로폰을 벽면 외각에 배치하고 벽면 표면에 케블라 덮개를 설치하였다. 케블라 덮개가 측정 소음에 미치는 영향을 파악하기 위하여 표준 소음원을 사용하여 주파수별 소음투과특성을 측정하였다.

빔형성 기법을 활용하여 소음원을 파악하기 위해서는 마이크로폰의 배열이 적절하게 설계 되어야 한다. 전체 시험부 벽면 중 관측창 내부에만 마이크로폰이 배치 될 수 있는 환경이므로, 이러한 제한 조건을 반영한 마이크로폰 어레이를 설계해야 한다. 소음원 측정에 주로 활용되고 있는 나선형 어레이 구조와 랜덤 배열 모의 시험을 통하여 결정된 핸덤 어레이 구조를 상호 비교 하였다.

설계 · 제작된 소음 측정 시스템을 검증하기 위하여 기준 소음원 검증 시험이 수행되었다. 표준 음원 발생장치를 활용한 검증 시험과 실린더 모델을 활용한 섬증시험이 수행되었다. 개방형 시험부에서 수행된 소음 시험 결과와 상호 비교를 위하여 1/2 팬터그라프 축소 모델을 활용한 풍동 시험이 추가로 수행되었다.

나. 폐쇄형 시험부 소음 시험 장치 설계 및 제작

(1) 마이크로폰 어레이 시스템 설계

폐쇄형 시험부에 마이크로폰 어레이를 설치하는 방법은 그림 2-2-29와 같이 벽면 표면에 마이크로폰을 삽입하거나, 그림 2-2-2과 같이 판형 마이크로폰 어레이를 제작하며 표면에 부착하는 방법이 있다. 판형 마이크로폰 어레이를 사용하기 위해서는 2~3mm 두께를 갖는 dielectric type 마이크로폰을 사용하여야 하나, 이러한 마이크로폰은 수백Hz 영역의 낮은 주파수 영역에 대한 응답특성이 좋지 않으므로 설계대상에서 제외하였다. 벽면에 마이크로폰을 삽입하는 방법의 경우 전체 벽면표면에 직접 마이크로폰을 설치하는 방안과 벽면과 외곽에 마이크로폰을 설치하는 방안이 검토되었다. 벽면에 직접 마이크로폰을 설치하기 위해서는 시험부 벽면 전체를 직접 가공하여야 하므로 많은 비용과 시간이 필요하며, 마이크로폰이 벽면에서 발생하는 경계층에 직접 노출되므로 최근에는 벽면외곽에 마이크로폰을 설치하는 방법이 주로 활용되고 있다.

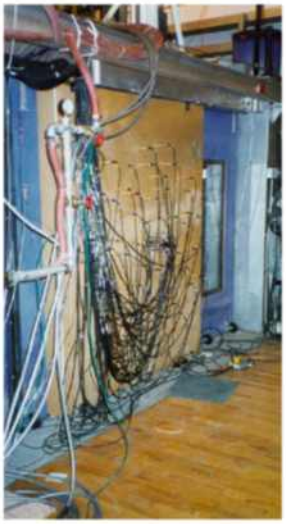



그림 2-2-29 시험부 벽면표면에 삽입한 마이크로폰 사례



그림 2-2-30 시험부 바닥면표면에 마이크로폰 어레이판을 설치한 사례

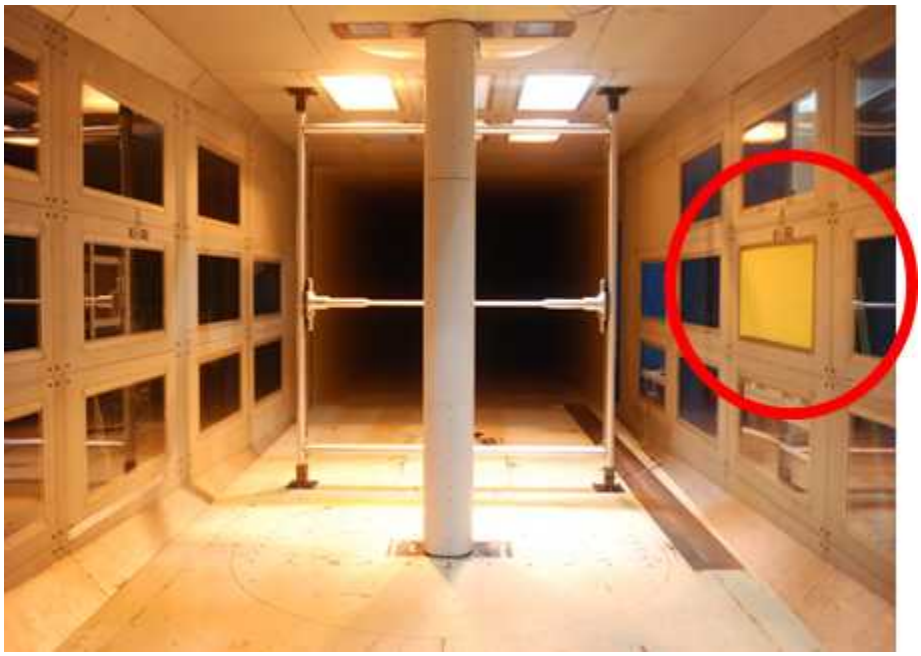


그림 2-2-31 시험부 벽면 관측창을 사용한 마이크로폰 어레이 설치

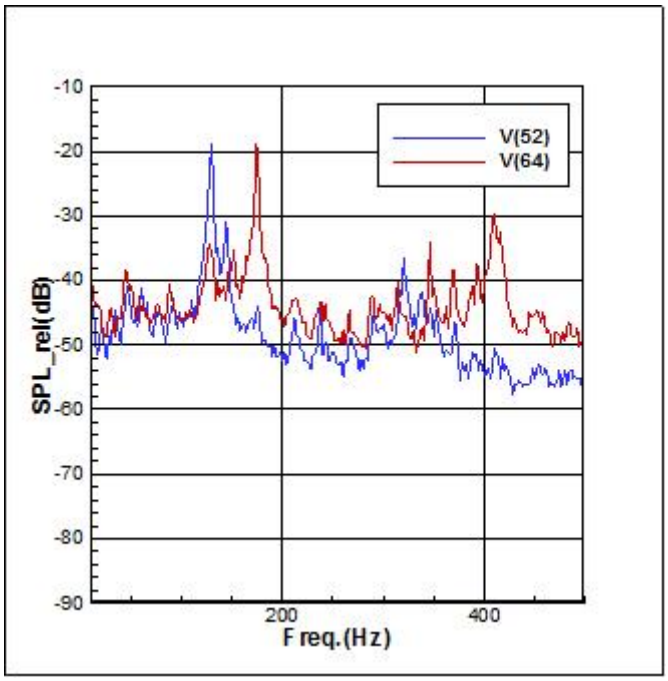


그림 2-2-32 시험부 벽면 관측창을 사용한
소음측정 사례

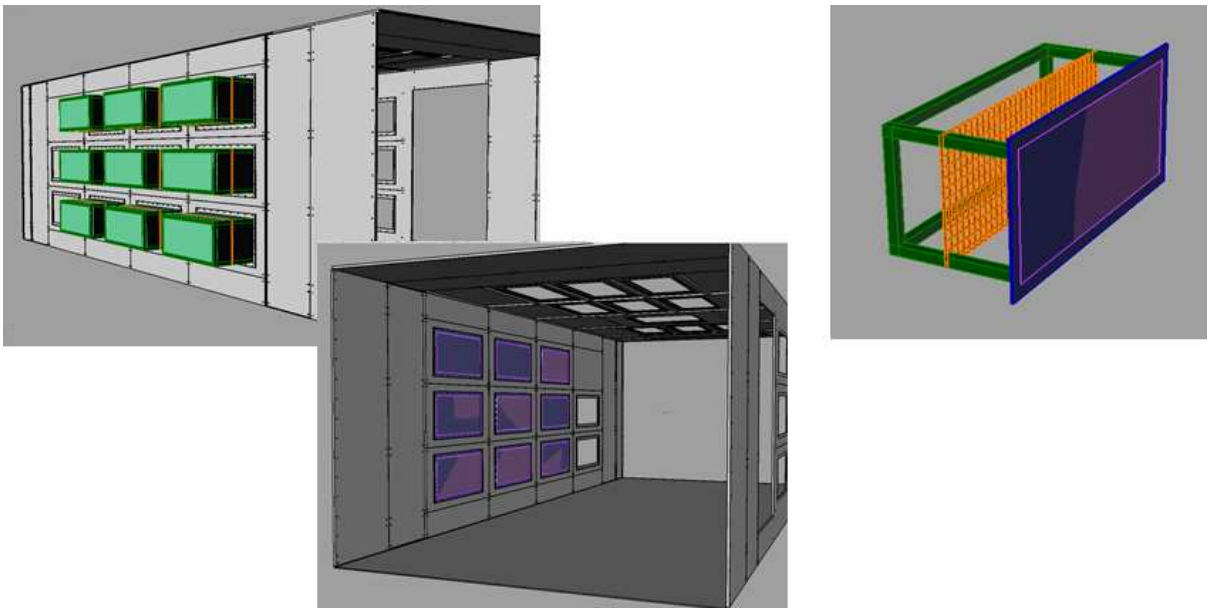


그림 2-2-33 관측창을 사용한 소음원 측정시스템 개념도

한국항공우주연구원 중형아음속풍동은 그림 2-2-33과 같이 시험부 벽면에 탈/부착이 가능한 다수의 관측창이 설치되어있다. 또한, 관측창을 활용한 소음측정 방안에 대해 수행된 2012년 사전시험에서 그림 2-2-32와 같이 시험모델의 소음특성이 측정 가능한 것을 확인하였다. 사전시험 사례를 바탕으로 폐쇄형 시험부 소음원 측정 시스템은 그림 2-2-33 우측면에 나타난 것과 같은 마이크로폰 어레이 모듈을 제작한 후, 총 9개의 관측창을 어레이 모듈로 대체하는 방법을 선정하였다.

다. 폐쇄형 시험부 공력 소음 시험장치 개발

(1) 마이크로폰 어레이 시스템 설계

한국항공우주연구원의 아음속 풍동 폐쇄형 시험부의 왼쪽 벽면에는 9개의 높이 0.5m, 길이 1m 인 내부 관측용 창이 있다. 관측창을 대체하여 마이크로폰 어레이 모듈을 설치하기 위하여 마이크로폰 어레이 시스템을 설계하였고, 그 개념도는 그림 2-2-34 와 같다.

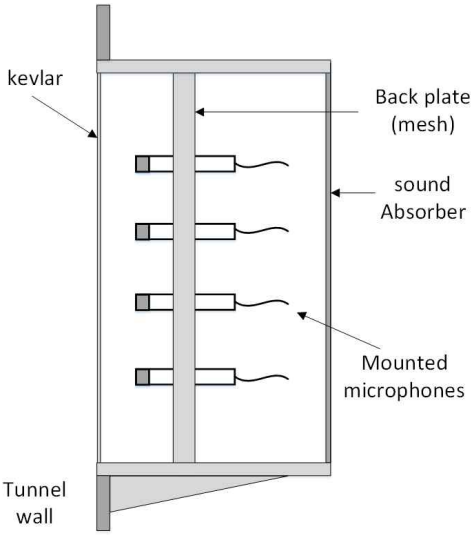


그림 2-2-34 케블라 덮개를 장착한 마이크로폰 어레이 개념도

마이크로폰 어레이 모듈은 유체에 의한 소음의 영향을 최소화 하기 위하여 전면에 케블라 덮개가 설치되어있으며, 중간에는 마이크로폰을 설치할 수 있도록 격자틀이 설치되어있다. 또한 소음이 격자판 후면에 있는 구조물에 반사되지 않도록 하기 위하여 흡음재를 부착하였다. 부가적으로 케블라에 가해지는 장력을 조절하기 위하여 케블라와 연결된 부분과 구조물을 볼트로 고정하였다. 또한 그림 2-2-35 와 같이 풍동 벽면에 마이크로폰 어레이를 고정 하기 위하여 판과 판의 양쪽 부분에는 판을지지 할 수 이는 지지대 2개를 설치하였다.

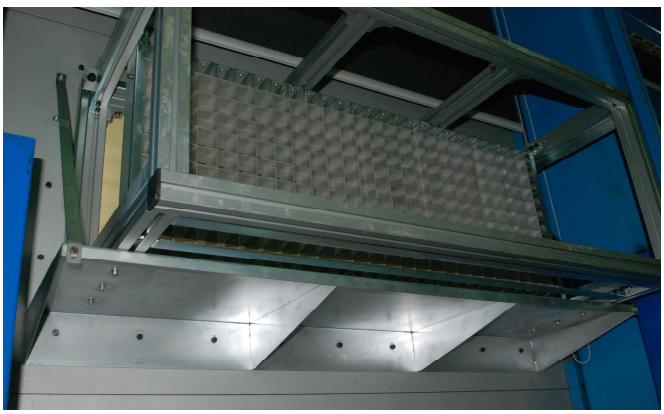


그림 2-2-35 마이크로폰 어레이 지지대

초기에 완성된 마이크로폰 어레이의 모습은 그림 2-2-36 와 같으며, 그 크기는 0.52 × 0.56 × 1.21 m 이다. 그러나 장력에 따른 케블라 투과성 실험을 하기 위하여 케블라의 장력을 조절하던 도중 높은 장력에서 케블라와 구조물 연결하던 실이 손상되어 원하는 장력에 도달하지 못하는 것과 케블라 전면에 균일한 장력이 작용하지 못하는 문제점을 확인하였다. 또한, 높은 장력이 케블라에 부가되면서 마이크로폰 어레이의 구조물이 휘는 변형이 발생함을 확인 하였다.



그림 2-2-36 초기 완성된 마이크로폰 어레이 모습

이러한 문제점을 해결하기 위하여 실로 연결되는 케블라 덮개부와 구조물 부분을 면접촉 방식으로 보완하여 볼트로 고정 할 수 있도록 하였다. 케블라에 균일한 장력을 부가 하기 위하여 장력을 조절하는 부분에 추가적으로 빔을 설치하여 전면에 고루 장력을 조절 할 수 있도록 하였으며, 외부 구조물의 변형을 방지하기 위하여 추가적 지지대를 설치하였다. 완성된 마이크로폰 어레이의 모습은 그림 2-2-37 와 같고, 관측창을 대체하여 설치한 모습은 그림 2-2-38 와 같다.

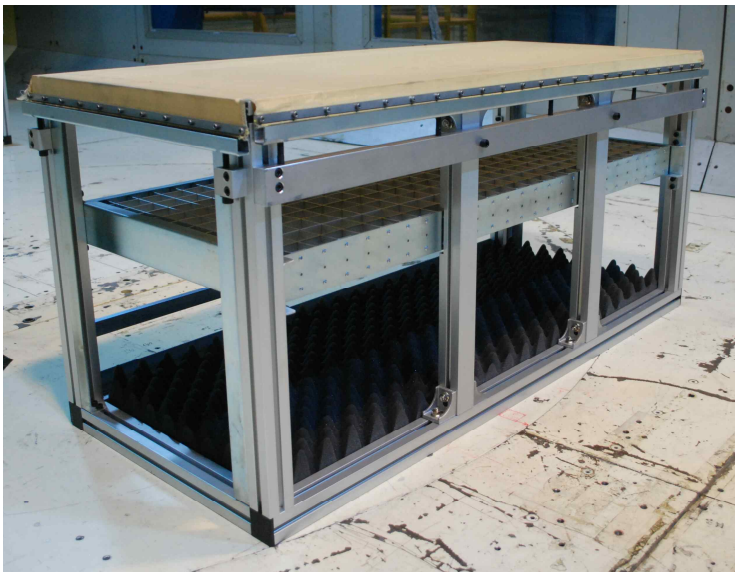


그림 2-2-37 수정된 마이크로폰 어레이

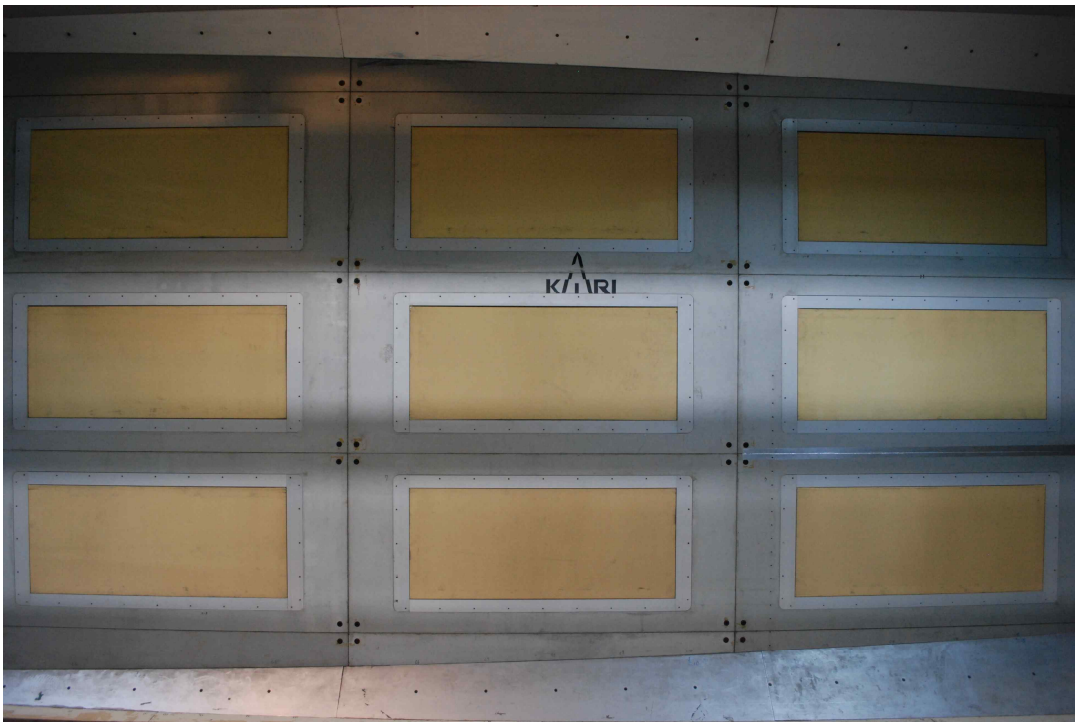


그림 2-2-38 9개의 마이크로폰 어레이가 설치된 시험부 벽면

(2) 케블라 덮개에 의한 특성 확인

마이크로폰 어레이 모듈에 설치된 케블라 섬유와 설치된 마이크로폰 사이의 간극이 소음 측정 결과에 미치는 영향을 확인하기 위한 시험을 수행하였다.

먼저 마이크로폰 어레이 모듈의 케블라 덮개에의 영향을 확인하기 위하여 다양한 주파수의 소음원에 대한 케블라의 특성을 확인하기 위하여 그림 2-2-39과 2-2-40과 같이 시험 장치를 구성하였다. 마이크로폰은 그림 2-2-41과 같이 총 32ch. 로 구성하여 배치하였다.

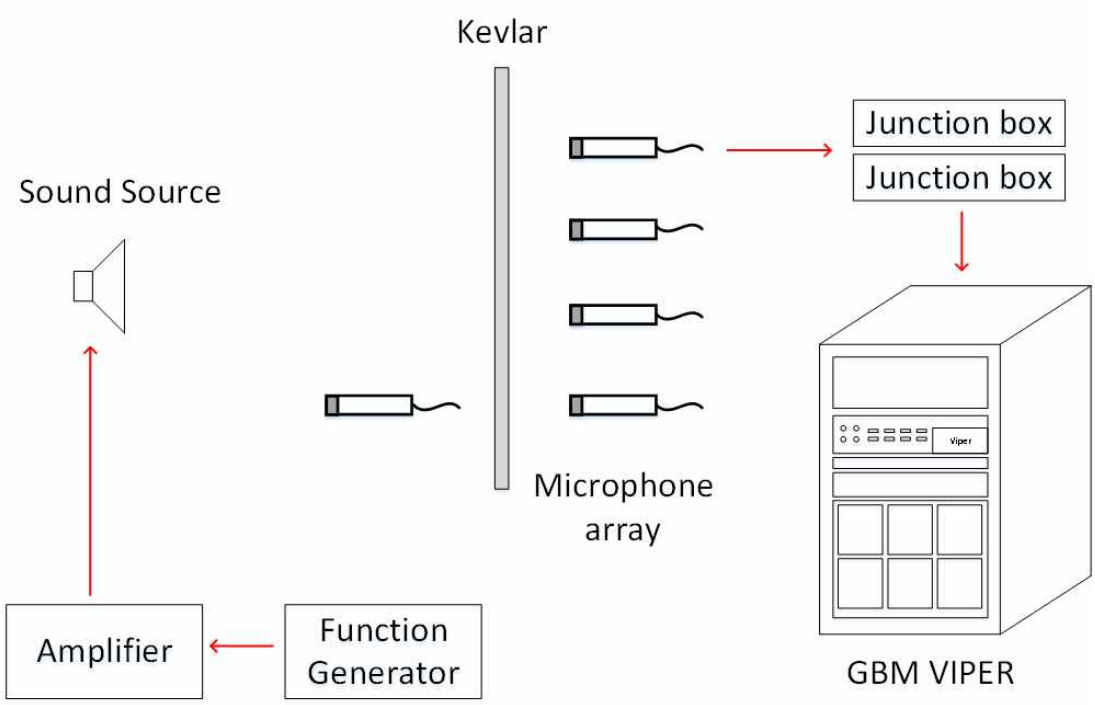


그림 2-2-39 시험 장치도 : 케블라 덮개가 장착된 마이크로폰의 주파수 특성 확인



그림 2-2-40 시험 설치 형상 : 케블라 덮개가 장착된 마이크로폰의 주파수 특성 확인

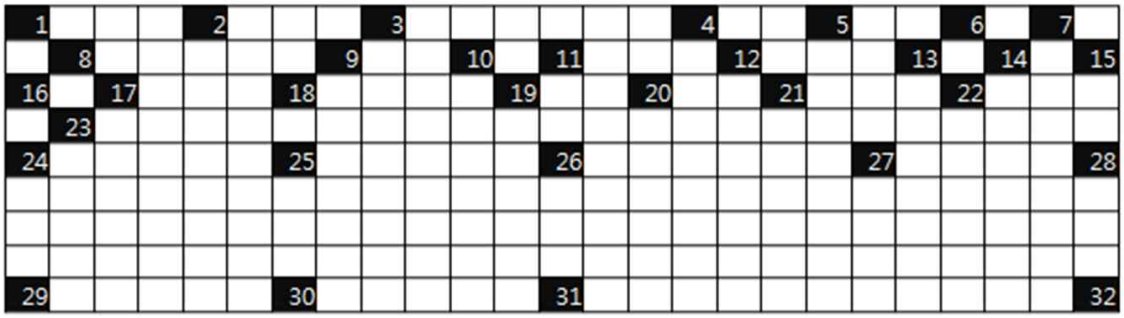


그림 2-2-41 32개의 마이크로폰 배치 : 케블라 덮개가 장착된 마이크로폰의 주파수 특성 확인

음원 발생은 함수발생기와 신호 증폭기 (B&K power amplifier 2716)를 연결한 스피커 (B&K Omni-source 4295)를 사용하였다. 스피커는 풍동 시험부 벽으로부터 1.6m 떨어진 위치에 설치하였으며, 어레이 모듈의 중심(Mic. #26) 과 일치하도록 설치하였다. 스피커 자체 신호를 확인하기 위하여 풍동 시험부 내에 기준 마이크로폰(Reference microphone)을 추가로 설치하였다. 어레이 모듈 내부 공간에서 소음 특성이 왜곡되지 않고 측정 될 수 있는 영역을 파악하기 위해 그림 2-2-41과 같이 모듈 외각부위에 마이크로폰을 집중적으로 배치하였다. 마이크로폰은 LinearX M51, 1/2″ 모델을 사용하였으며, 각 마이크로폰의 출력 신호는 어레이 후면에 설치된 Junction Box를 거쳐 자료취득장치(GBM VIPER)를 사용하여 측정하였다. 측정 시 신호의 DC 성분을 제거하기 위하여 AC 1.5Hz high pass filter를 적용하였다.

표 2-2-1 케블라 장력에 따른 실험 수행 내용

Tension of Kevlar	1) w/o Kevlar sheet 2) Low tension 3) Mid tension (40 kgf · cm) 4) High tension (60 kgf · cm)
Sound source	White noise

시험은 표 2-2-1과 같이 케블라 덮개의 유무와 부가 장력을 사전에 선정된 값으로 고정한 상태에서 수행하였다. 스피커를 사용하여 기준 소음(백색소음)을 발생시킨 후 어레이 모듈에 설치된 마이크로폰으로 신호를 측정하는 방식으로 실험이 진행되었다.

케블라 덮개는 구조물에 설치된 6개의 블록을 사용하여 고정되도록 제작되었다. 케블라 덮개에 전방향으로 균일한 장력을 부가 하기 위하여 6개의 블록에 동일한 힘을 부가하여야 한다. 이를 위하여 각 블록에 동일한 수치의 힘을 가할 수 있는 토크렌치를 사용하였다. 표 2-2-1에서 Low tension 은 특정한 장력없이 케블라가 구조물에 고정된 상태이며, Mid tension 과 High tension 은 각 블록에 해당되는 수치의 토크를 부가하여 덮개를 고정한 상태이다. 전 주파수 영역의 소음 특성을 파악하기 위하여 스피커에 백색 소음 신호를 부가하여 기준 음원을 발생시켰으며, 마이크로폰 신호 획

득은 40kHz의 획득속도로 1.6초동안 65536개의 데이터를 취득하였다.

시험에 사용된 마이크로폰, 케이블 및 측정 시스템은 교정기(B&K acoustic calibrator 4226) 를 사용하여 기준음(1kHz, 94dB)에 대해 감도 보정을 수행한 후 사용하였다.

실험 결과의 수렴성을 파악하기 위하여 측정 결과의 앙상블평균(Ensemble averaging) 횟수에 따른 평균값 변화를 비교하였다. 4096 개의 측정값을 기준 블록으로 선정하여 각 블록에 대해 FFT 연산을 수행하고, 앙상블 평균을 1회, 5회, 10회와 15회 수행한 결과를 같이 1/3 옥타브 밴드(1/3 octave band) 로 나타냈다. 그림 2-3-9는 케블라 덮개가 없는 상태에서 백색 소음을 발생시켰을 때 어레이의 중앙에 위치한 26번째 마이크로폰(Mic. #26)에서 측정한 신호의 앙상블 평균에 따른 평균값 변화를 비교한 결과이다. 앙상블 평균 횟수가 '5'이상인 경우에는 평균값이 0.5dB 이내에서 수렴하고 있으며, 횟수가 '10' 이상인 경우에는 그래프 상에서 동일한 값을 나타내고 있다. 이 결과를 바탕으로 실험 결과 분석은 앙상블 평균 15회로 수행하였다.

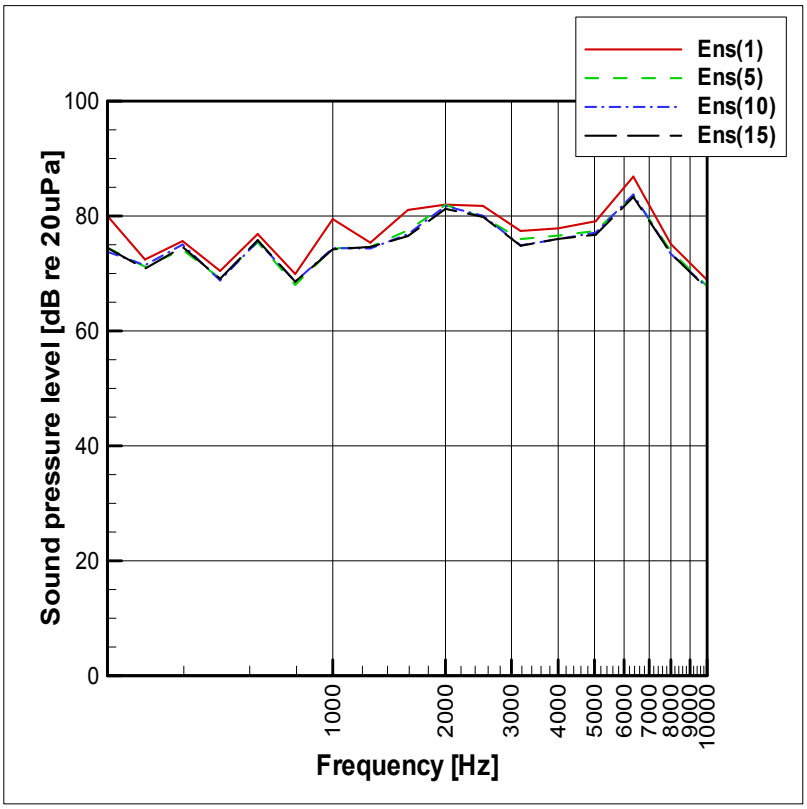


그림 2-2-42 앙상블 평균 회수에 따른 결과 비교

케블라 덮개로 인한 음향 신호의 전달 강도 감쇠 영향을 파악하기 위해, 스피커 주변에 설치한 기준 마이크로폰에서 측정된 신호와 마이크로폰 어레이 중심점에서 측정된 신호를 비교하였다.

그림 2-2-43은 백색 소음을 발생시켰을 때 기준 마이크로폰과 마이크로폰 어레이 중심에 위치한 마이크로폰에서 측정된 값의 음압 차이(ΔSPL[dB] =SPLref.-SPLcenter)를 1/3 옥타브 밴으로 나타낸 결과이다.

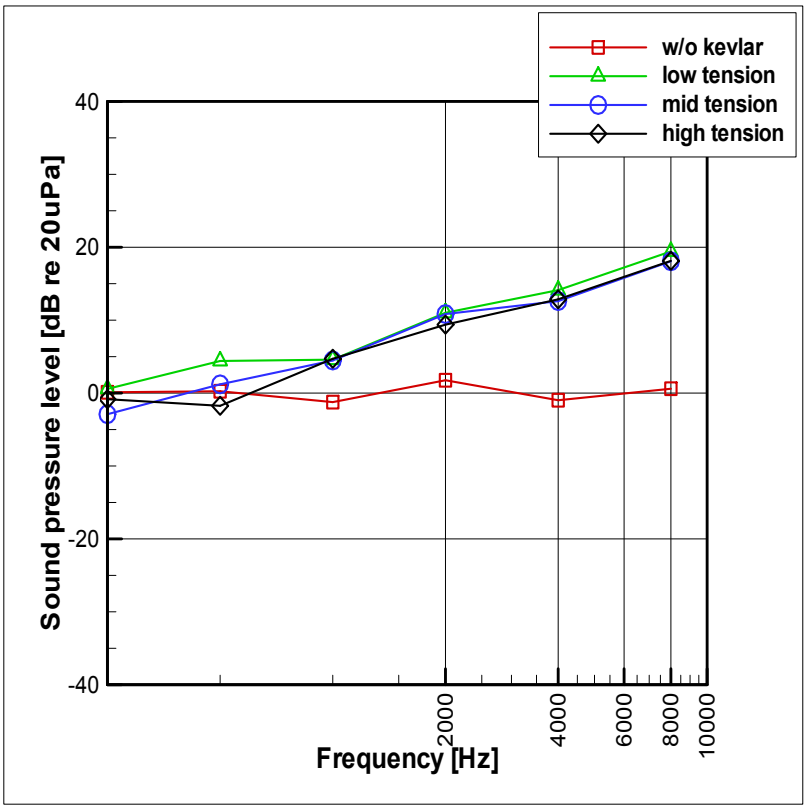


그림 2-2-43 ΔSPL[dB] =$SPL_{ref.}$-SPL_{center}

그림 2-2-43에서 1kHz 이상 소음 신호의 경우 부가장력의 세기는 시험 결과에 큰 영향을 미치지 않고 있다. 또한, 케블라 덮개가 없는 조건에 비해 덮개가 설치된 경우에는 소음 신호가 작게 나타나고 있다. 1kHz 조건에서는 60dB, 2kHz 조건에서는 12dB, 4kHz 조건에서는 14dB 8kHz 조건에서는 19dB 의 측정 신호 감소를 보이고 있다. 500 Hz 이하의 저주파수에서는 부가 장력 Mid tension 과 High tension 의 경우 두 마이크로폰의 음압 차이가 2dB 이내이며, Low tension 의 경우에는 5dB 차이를 보이고 있다.

케블라 덮개가 설치된 어레이 모듈의 공간 분포 특성을 확인하기 위하여 스피커에 백색 소음신호를 부가한 후, 각 채널(32 ch.)에서 소음신호를 측정하였다. 1/3 옥타브 밴드를 사용하여 정리한 측정결과가 그림 2-2-44 ~ 2-2-49 에 나타나 있다. 공간분포 특성을 파악하기 위해 측정 결과를 기준 마이크로폰(Mic. #26)에 대한 각 채널의 음압차이 (ΔSPL[dB] = SPLeach mic.-SPLcenter) 로 정리하였다.

500Hz 일 때 결과와 2kHz 일 때의 결과에서, 마이크로폰 위치에 따른 음압의 차이가 최대 8dB 로 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 케블라가 없는 경우와 케블라가 있는 경우 모두에서 확인되는 현상이며, 어레이의 중심에서 먼 위치에서 설치된 마이크로폰에서 측정된 결과일수록 음압의 차이가 커지는 결과와 일치한다. 이 결과를 바탕으로 향후 마이크로폰 배치 시 이 위치에는 마이크로폰을 배치하지 않아야 할 것으로 판단된다.

케블라 덮개가 있을 때와 없을 때의 결과를 비교 하였을 때, 두 결과의 경향이 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 마이크로폰의 위치에 따른 음압의 차이가 4dB 이내로 균일하게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 음원이 케블라를 통과함으로써 각 마이크로폰에서 측정되는 신호의 공간 분포 특성이 변하지 않는 것을 확인할 수 있다.

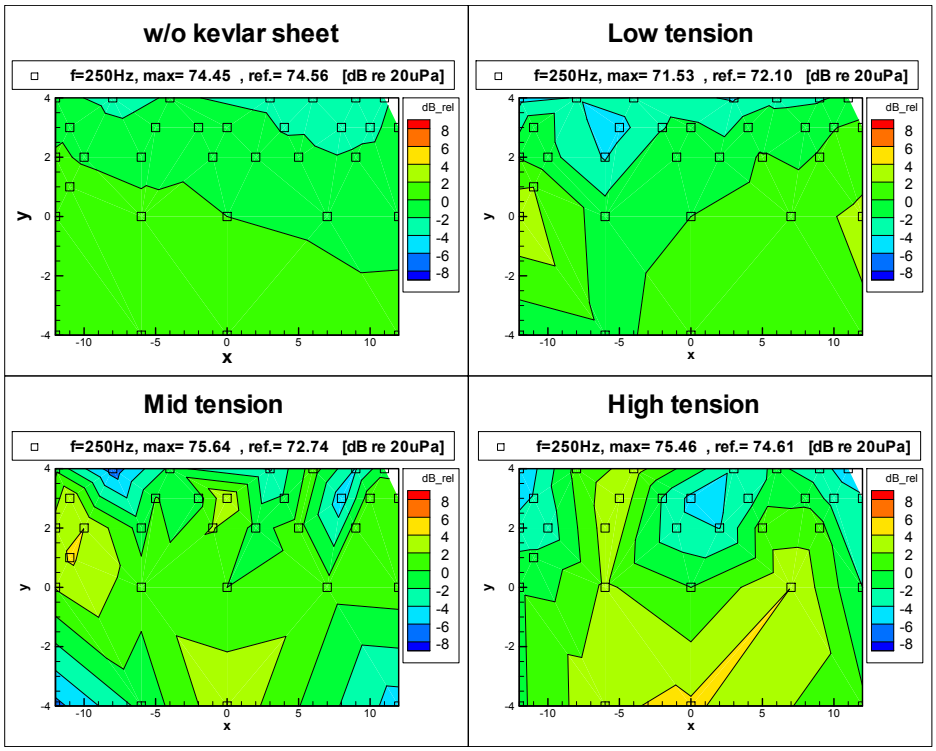


그림 2-3-2-2-44 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{cen} : 250 Hz

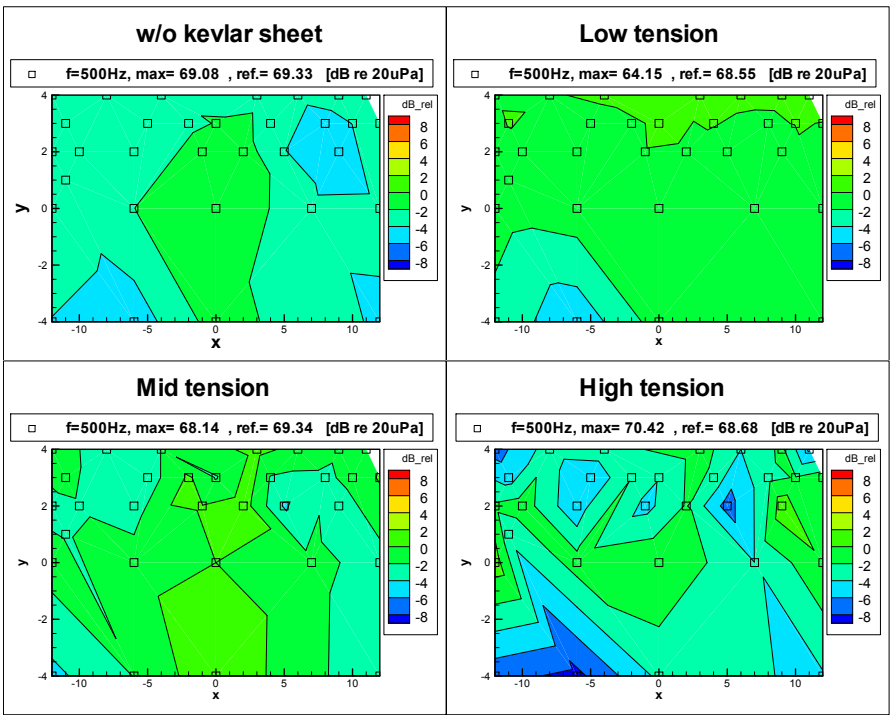


그림 2-3-2-2-45 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{cen} : 500 Hz

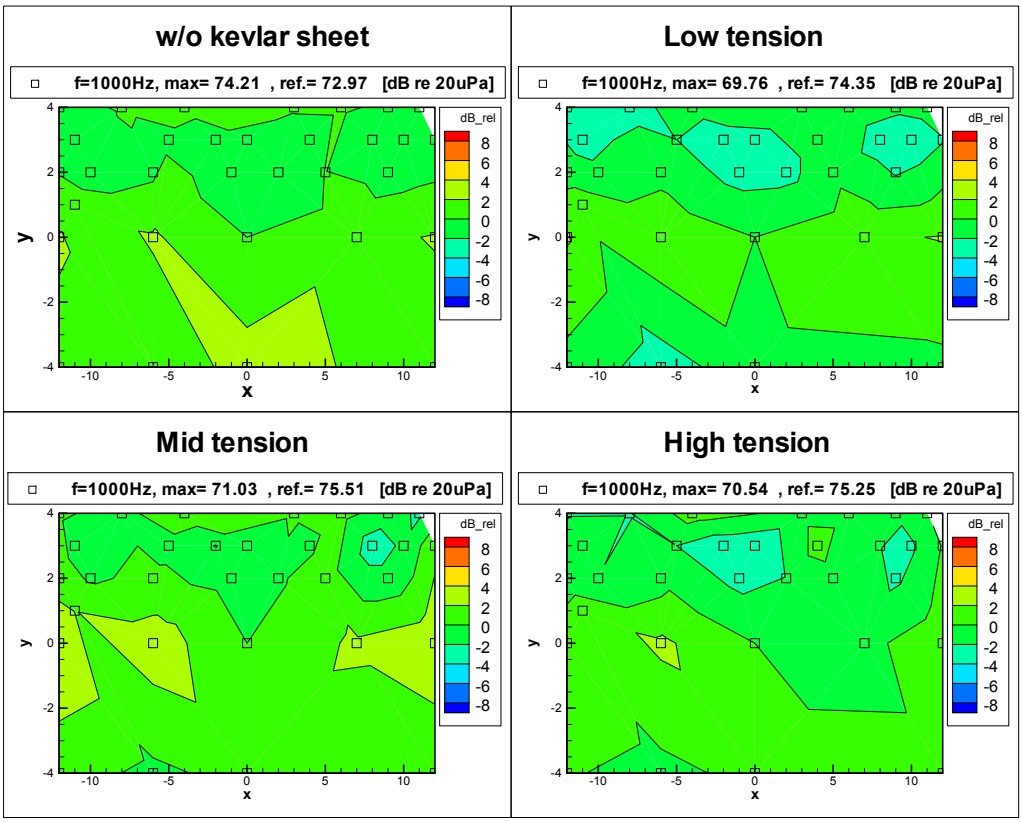


그림 2-2-46 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{cen} : 1kHz

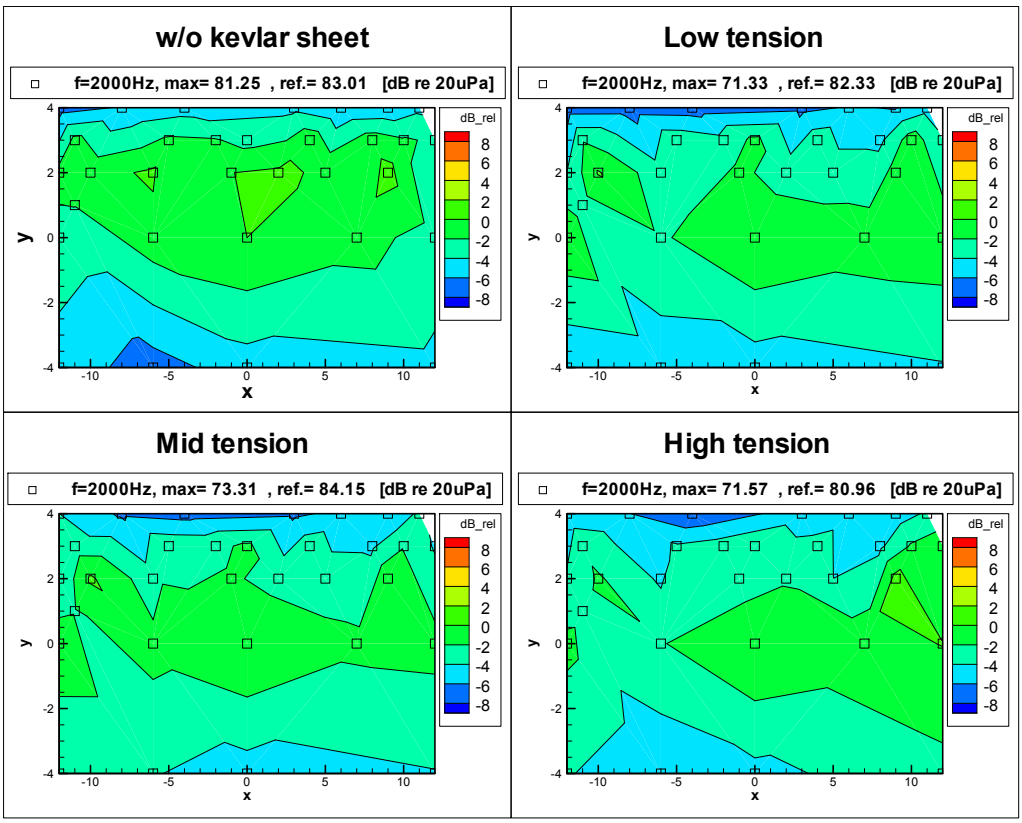


그림 2-2-47 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{cen} : 2kHz

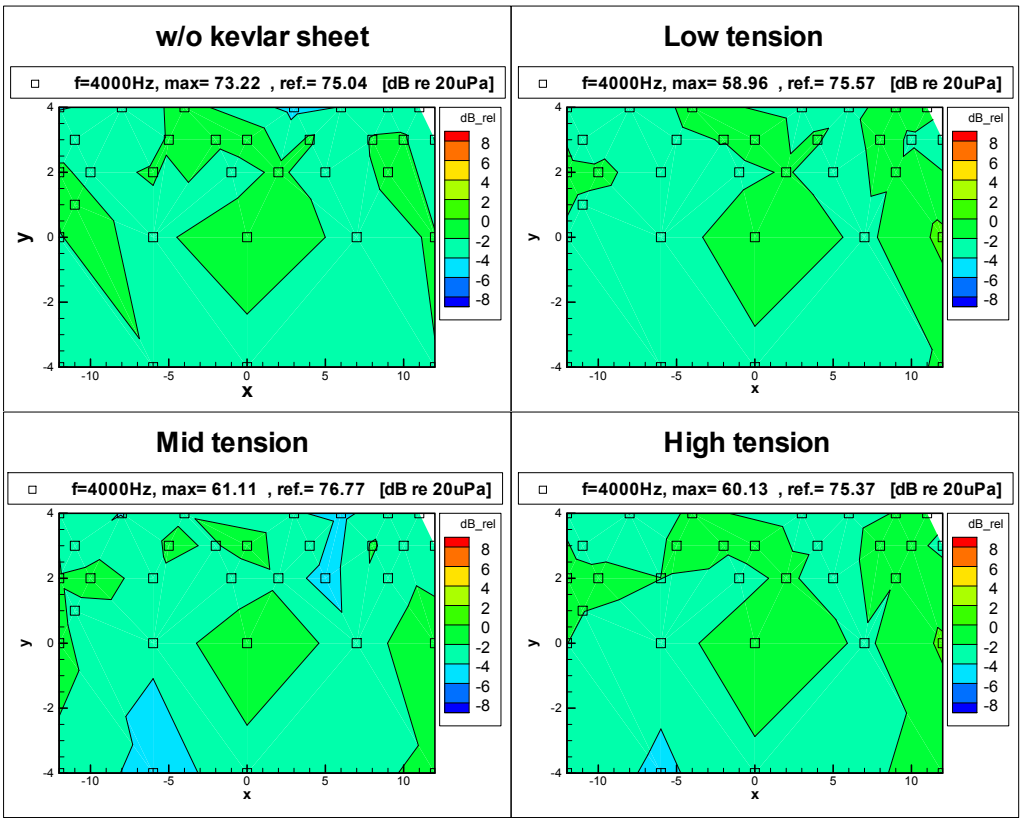


그림 2-2-48 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{cen} : 4kHz

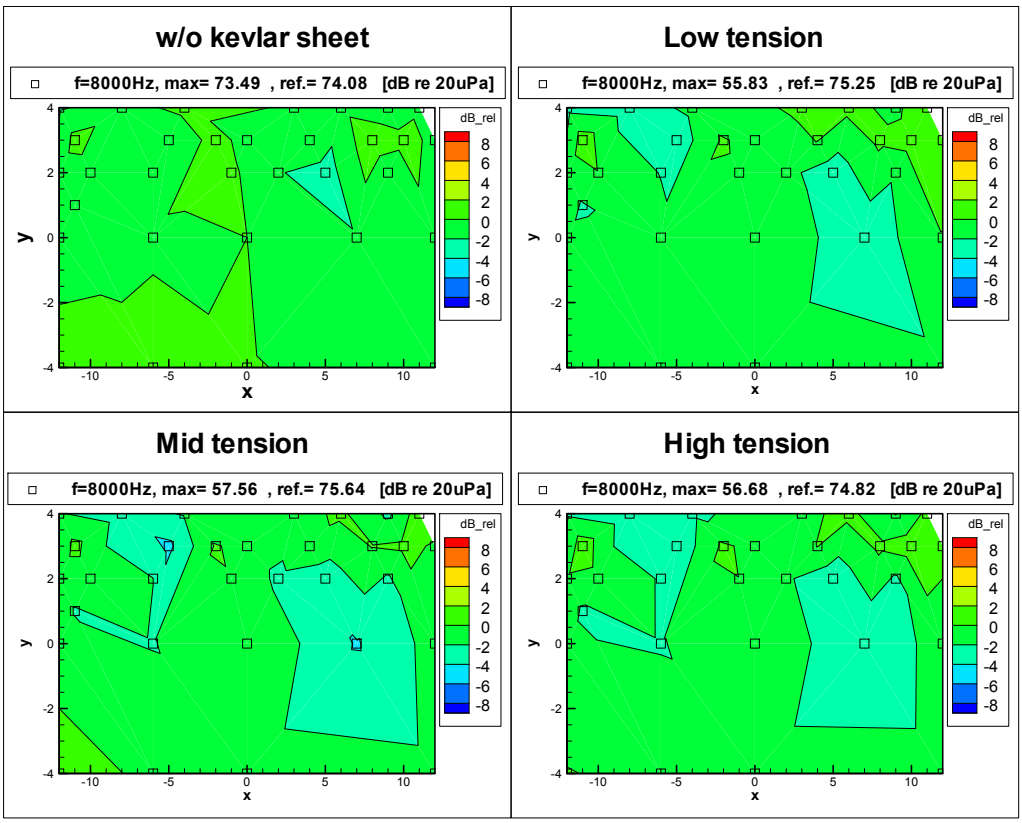


그림 2-2-49 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{cen} : 8kHz

그림 2-2-50 ~ 그림 2-2-55 는 케블라 덮개가 설치된 어레이 모듈의 케블라에 따른 주파수별 신호 전달 감쇠 특성을 확인하기 위하여 백색소음을 부가한 후 각 채널에서 측정한 소음 시험 결과이다. 각 마이크로폰에서 측정된 음압과 기준 마이크로폰(reference microphone)에서 측정된 음압 차이(ΔSPL[dB]=SPLeach mic.-SPLref)를 나타내었다. 결과를 비교해 보면 케블라의 유무에 따라 고주파수로 갈수록 투과율이 20dB 이상 차이나는 것을 확인할 수 있다. 그림 2-3-10의 결과와 일치하는 경향을 확인 할 수 있으며, 공간 부포 또한 균일 한 것을 확인 할 수 있다.

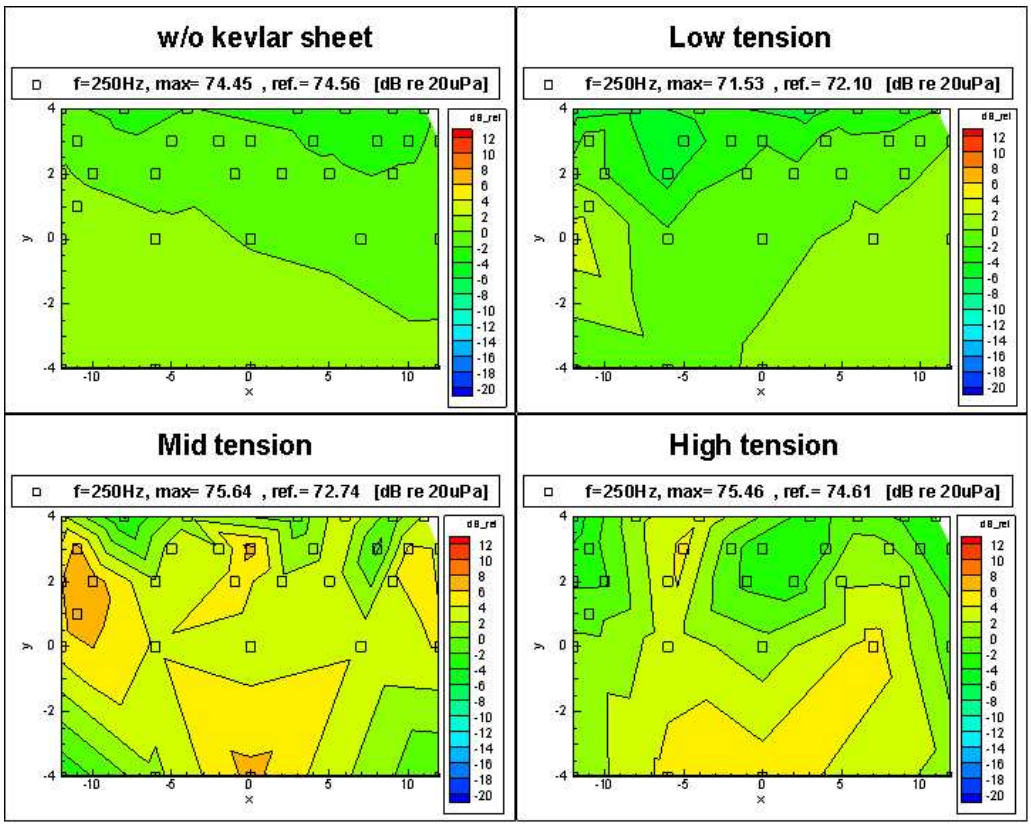


그림 2-2-50 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{ref} : 250Hz

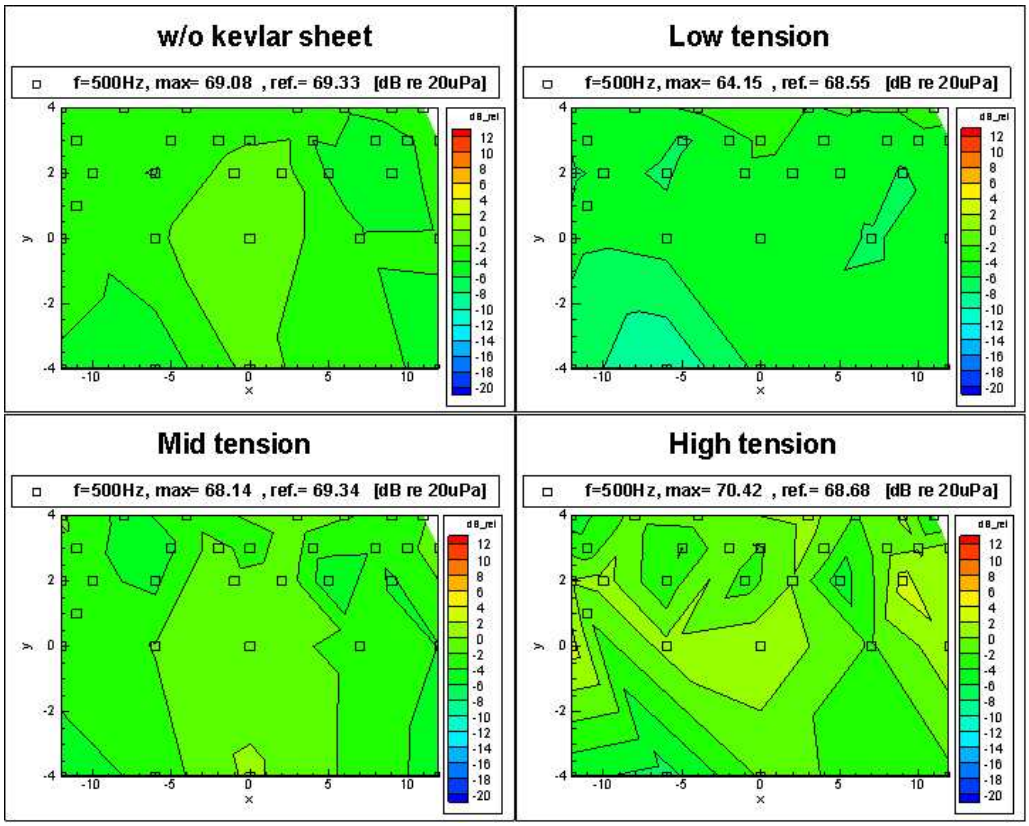


그림 2-2-51 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{ref} : 500Hz

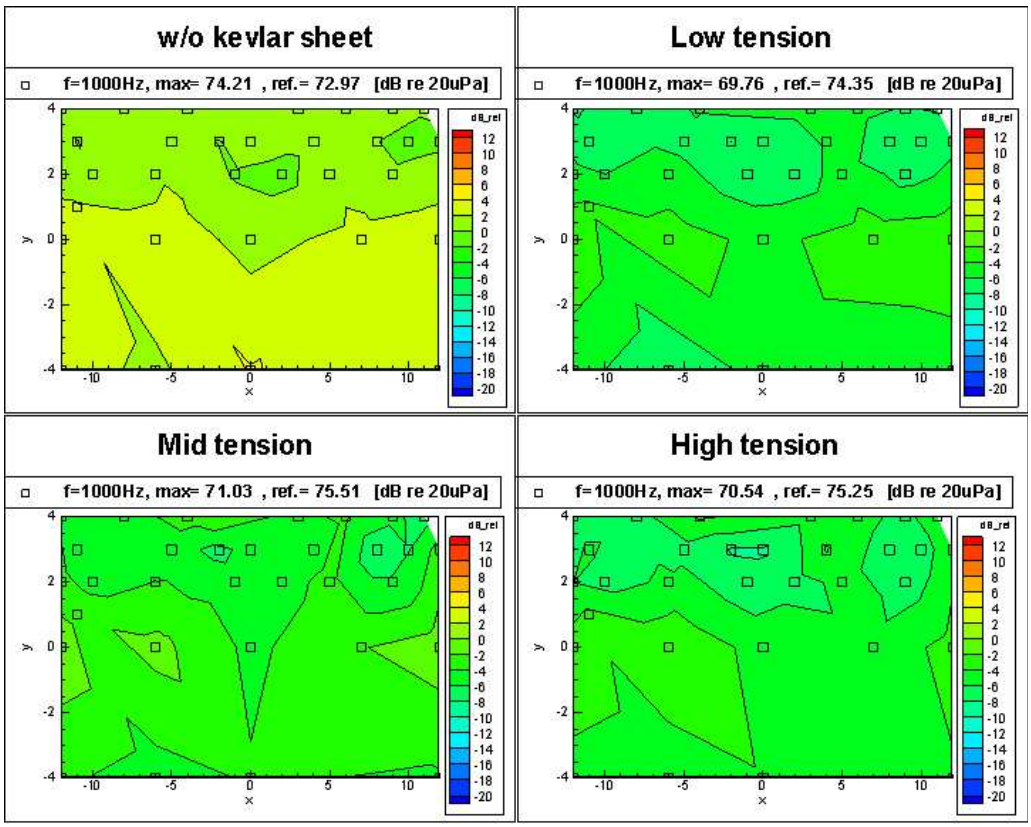


그림 2-2-52 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{ref} : 1kHz

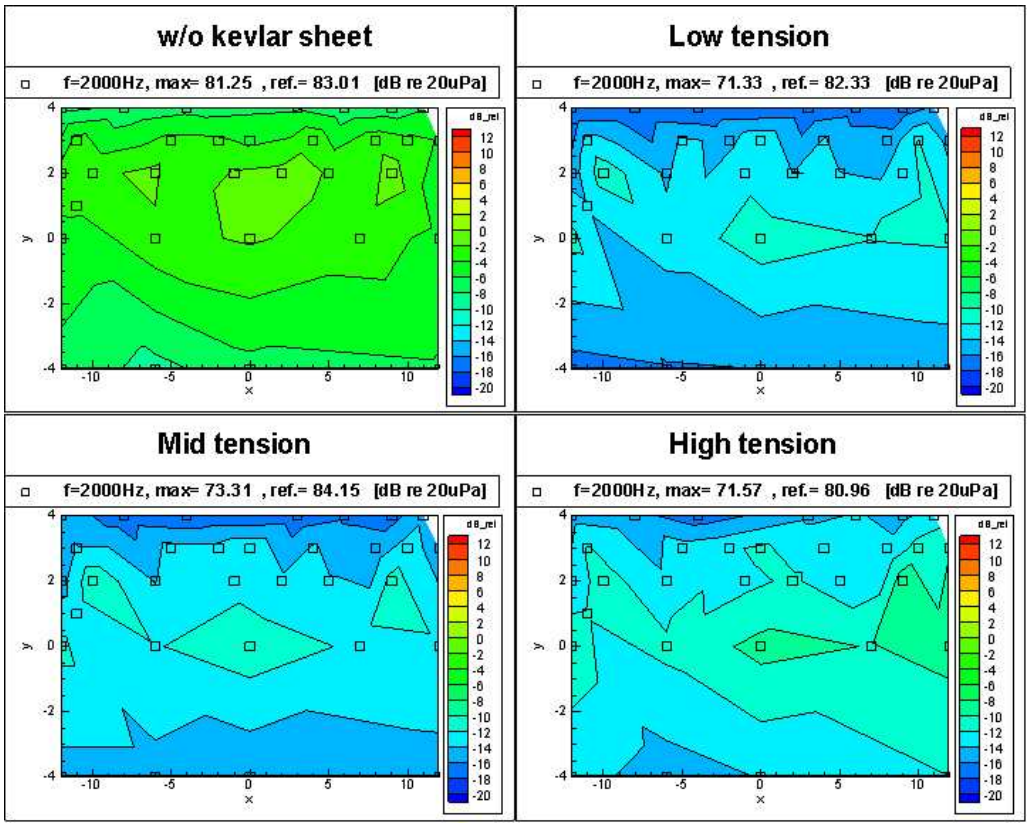


그림 2-2-53 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{ref} : 2kHz

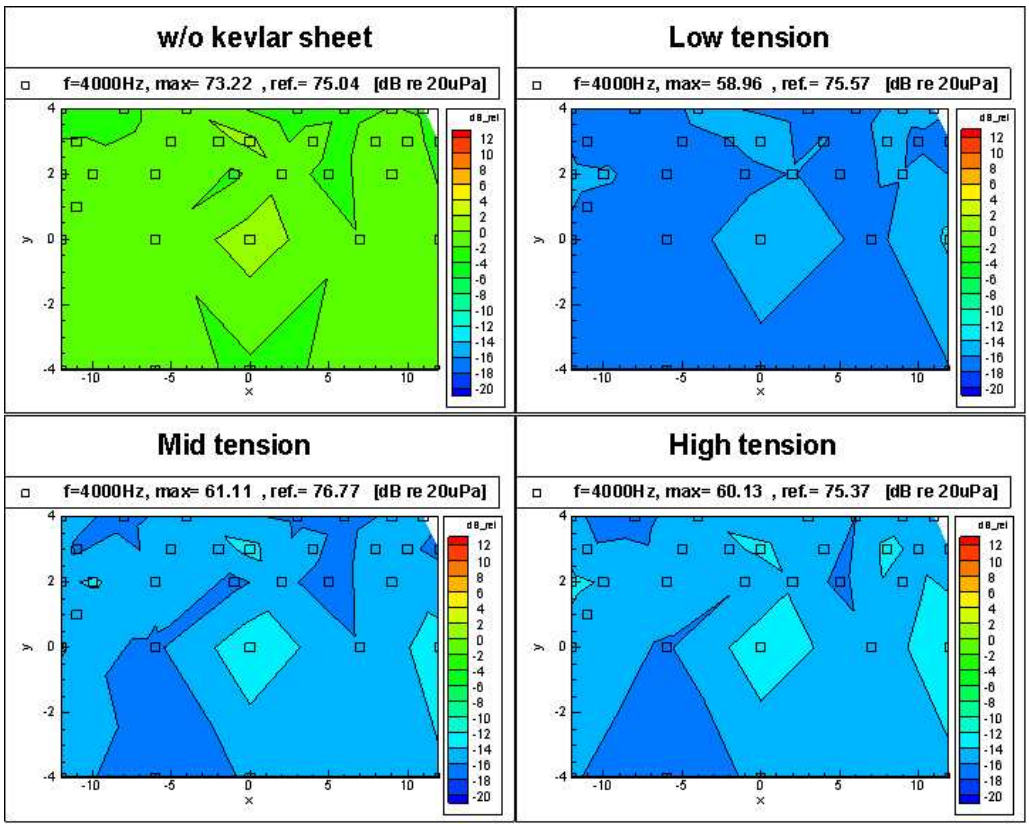


그림 2-2-54 ΔSPL[dB]=$SPL_{each\ mic.}$-SPL_{ref} : 4kHz

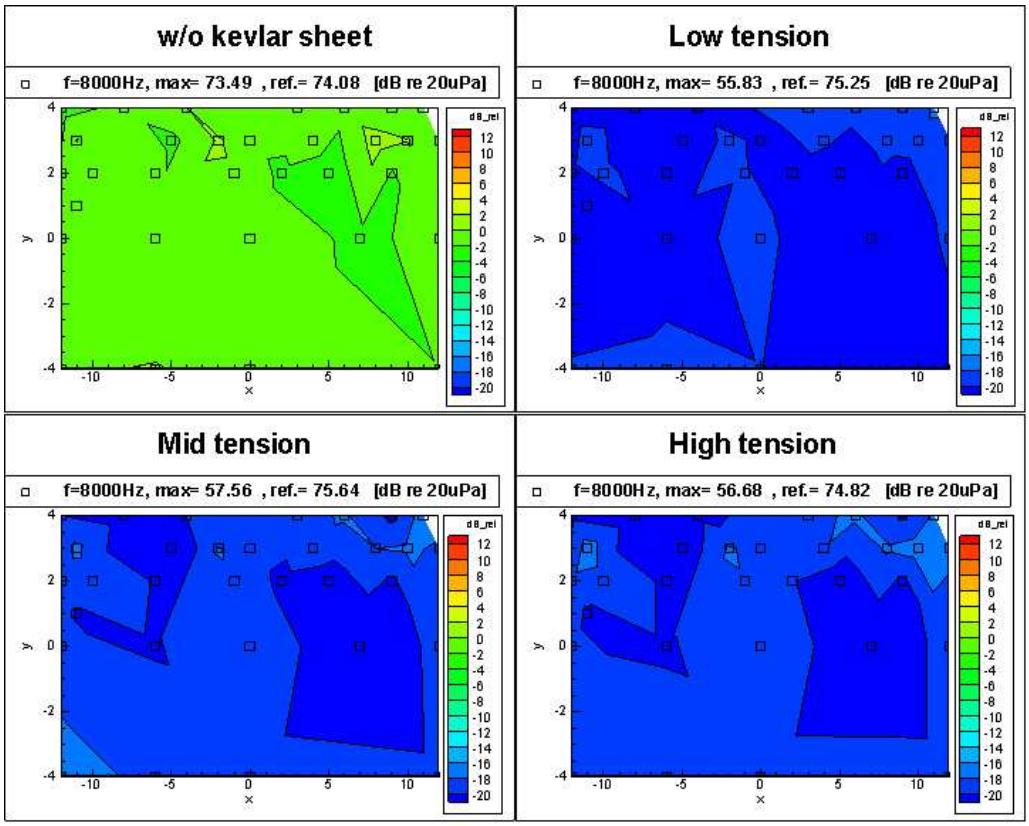


그림 2-2-55 $\Delta SPL[dB]=SPL_{each\ mic.}-SPL_{ref}$: 8kHz

다음은 마이크로폰 어레이에 설치된 케블라 덮개와 마이크로폰 사이의 간극에 따른 신호 감쇠에 대한 실험 내용이다.

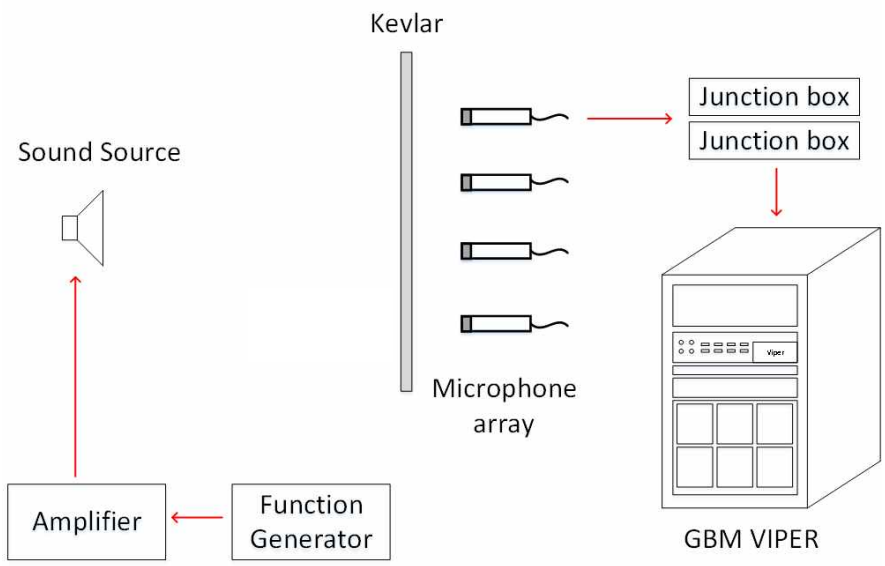


그림 2-2-56 시험장치도



그림 2-2-57 시험 수행

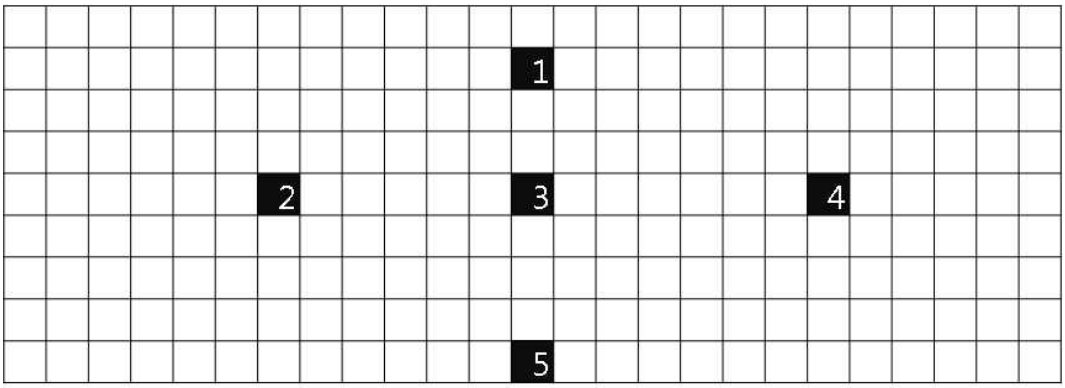


그림 2-2-58 5개의 마이크로폰의 배치

표 2-2-2 시험 수행 내용 : 케블라 덮개와 마이크로폰 사이 간극

Distance between Kevlar sheet and microphone [mm]	1) 5 2) 10 3) 15
Wind speed [m/s]	1) 0 2) 20
Source source	White noise

표 2-2-3 시험 수행 내용 : 속도 0, 20m/s 일 때 케블라 텐션에 따른 시험 수행

Tension of Kevlar	1) Low tension 2) Mid tension
Distance between Kevlar sheet and microphone [mm]	10
Wind speed [m/s]	1) 0 2) 20
Source source	White noise

시험은 풍속이 있는 경우 케블라 덮개와 마이크로폰 사이의 간격 및 덮개 부가 장력에 따른 영향을 확인하기 위하여 덮개 조건을 표 2-2-2 및 표 2-2-3과 같이 변경한 상태에서 수행되었다. 스피커에 백색 소음 신호를 부가 한 후 마이크로폰에서 수신된 소음 신호를 측정하였다. 마이크로폰 덮개 사이 간격은 표2-32-2와 같이 5mm, 10mm, 15mm 조건을 적용하였으며, 각 조건에서 유속이 있는 상태(20m/s)와 유속이 없는 상태 (0m/s) 에 대하여 측정을 수행하였다. 또한 표 2-3-3과 같이 케블라 덮개 부가장력을 변경한 상태에 대해서도 시험을 수행하였다. 데이터 획득은 40kHz 로 1.6 초동안 65536개의 데이터를 취하였으며, 4096개의 측정값을 기준블록으로 하여 총 15 회의 앙상블 평균을 취였다.

그림 2-2-59은 풍속이 없는 조건(0m/s)과 20m/s 인 조건에서 측정한 배경소음 결과와 백색 소음을 발생시켰을 때의 주파수에 대한 음압 결과이다. 어레이의 중심에 위치한 마이크로폰(Mic. #3)에서 측정된 결과를 1/3 옥타브 밴드로 정리하였다. 풍속이 없을 때와 있을 때 (20m/s) 의 결과를 비교해 보면, 풍속이 있는 경우 100 Hz 이하에서 약 70dB 의 배경소음이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 풍속이 없을 때 배경소음과 백색 소음 실험 결과를 비교해 보면, 50Hz 에서 7000Hz 주파수 범위에서 60dB 이상의 백색소음이 발생함을 확인할 수 있다. 따라서, 풍속 20m/s 조건에서 백색 소음을 발생시켰을 때 케블라에 의한 영향을 비교 할 수 있는 주파수 범위는 유동의 배경소음 구간을 제외한 100Hz ~ 7000Hz 구간이다.

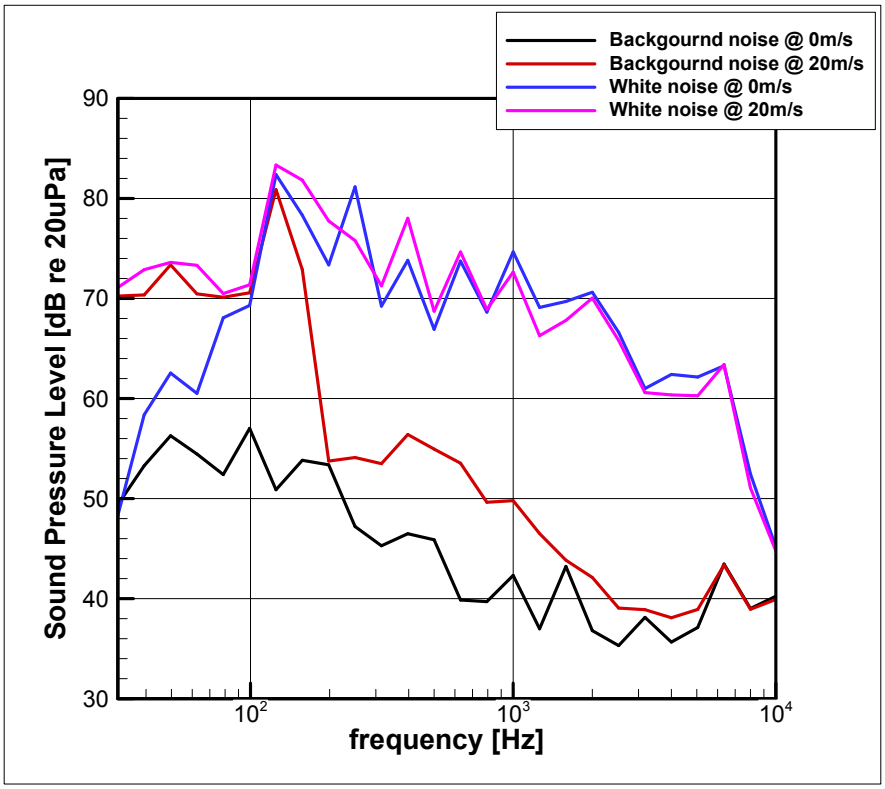


그림 2-2-59 유속 0m/s 과 20m/s 일 때 3번째
마이크로폰으로부터 측정된 배경소음 및 백색소음 결과

그림 2-3-27은 풍속 20m/s 인 조건에서 케블라와 마이크로폰의 간격이 5mm, 10mm 와 15mm 일 때 3번째 마이크로폰(Mic. #3) 으로부터 각각 측정된 신호를 1/3 옥타브 밴드로 나타낸 결과이다. 케블라 덮개는 다공성 섬유조직으로 구성되어 있으므로 덮개와 근접한 거리에 마이크로폰을 위치할 경우 유체에 의해 유발되는 자체소음 영향이 커질 것으로 추정되므로 마이크로폰 설치가 가능한 깊이위치를 시험 전에 판단하여야 한다. 이 결과에서 시험이 수행된 깊이 조건(5mm, 10mm 와 15mm)에서는 케블라 덮개와 마이크로폰 사이의 거리에 따른 큰 영향이 없는 것으로 확인되었다.

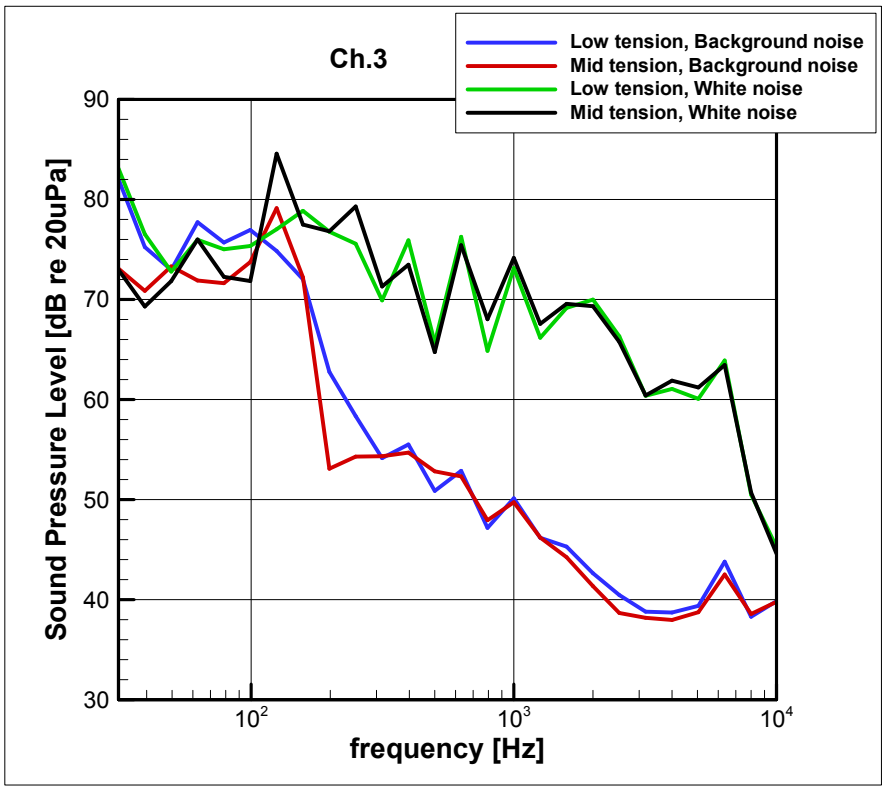


그림 2-2-60 풍속 20m/s 일 때 3번째 마이크로폰으로부터 측정된 배경 소음 및 백색소음 결과

그림 2-2-61은 풍속 20m/s 일 때, 케블라덮개 부가 장력에 따른 배경소음과 백색 소음 측정된 결과를 각 마이크로폰 별 1/3 옥타브 밴드로 나타내었다.

두 가지의 장력 조건에서 배경소음과 백색 소음 시험 결과를 비교해 보면, 100Hz 이하의 유동 소음 성분이 적게는 0dB, 크게는 8dB 의 차이를 가지며 Low Tension 의 결과가 비교적 크게 측정된 결과를 확인할 수 있다. 100Hz 이상의 주파수 결과에서는 장력에 따른 음압의 큰 차이는 없어 보인다.

배경 소음 주파수인 100Hz 이하의 소음 성분을 제외하고 특히 관심 주파수 성분인 500Hz~ 1500Hz에서 장력에 따른 큰 영향은 없는 것으로 판단된다.

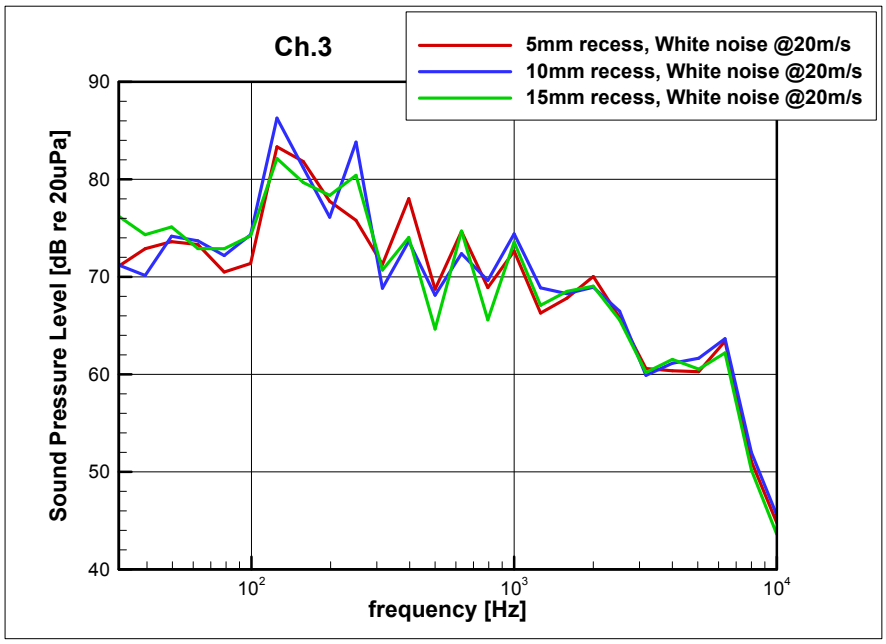


그림 2-2-61 풍속 20m/s 일 때 마이크로폰과 케블라 덮개 사이의 거리에 따른 3번째 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 결과

라. 폐쇄형 시험부 소음 시험 장치 검증 시험 수행 및 결과

(1) 마이크로폰 배열 설계

폐쇄형 시험부의 벽면 중 관측창 내부에만 마이크로폰이 배치 될 수 있으므로 이러한 제한 조건을 반영하여 마이크로폰 어레이 설계를 수행하였다. 폐쇄형 시험부의 크기는 가로 4m × 세로 3m× 길이 10m 이다. 시험부 왼쪽 벽면에는 세로 0.5m × 길이 1m 인 내부 관측용 창이 9개가 있으며, 시험 수행시 내부 관측용 창을 대체하여 크기 0.52 m × 0.56m × 1.21m 의 마이크로폰 어레이가 설치된다. 마이크로폰을 설치할 수 있는 공간은 그림 2-4-1 와 같이 제한되어있다.

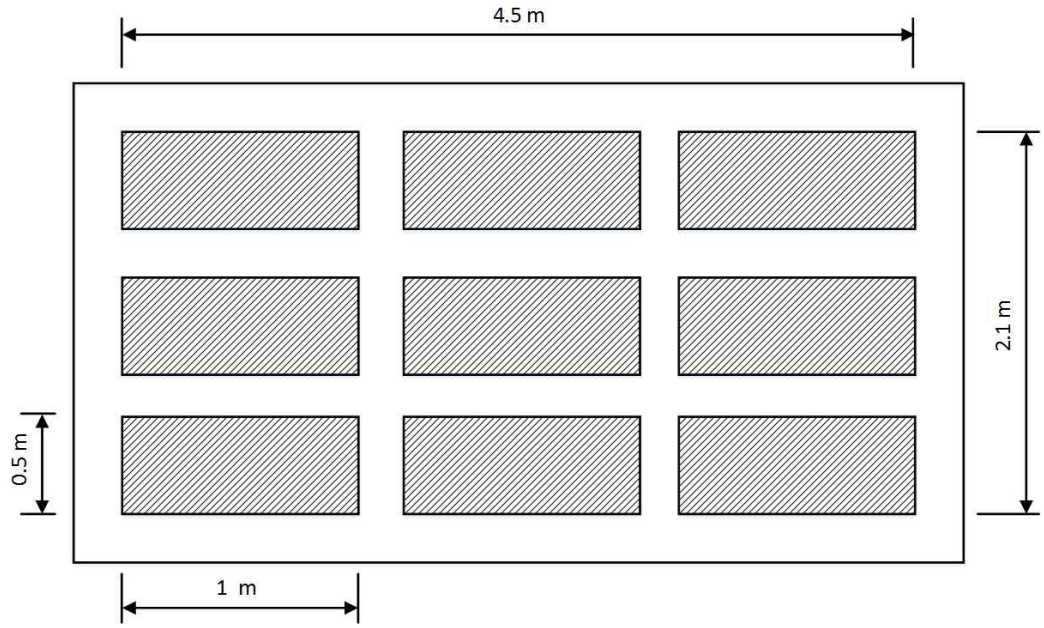


그림 2-2-62 폐쇄형 시험부의 왼쪽 벽면

마이크로폰 배열은 소음원 측정에 주로 활용되고 있는 나선형 어레이와 랜덤 배열을 구성하였고, 모의 시험을 통하여 구성된 어레이의 성능을 비교하였다. 모의 시험은 가상의 점음원을 발생시키고 빔형성 방법을 적용하여 수행하였다. 마이크로폰 어레이의 성능은 최대 음압(SPLmax)을 기준으로 나타낸 음압 ($10\log(\frac{SPL^2}{SPL_{\max}^2})$)의 -3dB 에서의 빔폭(Beam width)과 주엽(Main lobe)과 부엽(Side lobe)의 차이(Sidelobe rejection)의 값으로 비교하였다. 배치에 사용된 마이크로폰의 개수는 80 개 ~ 85 개다. 가상의 점음원은 주파수가 1kHz, 4kHz, 8kHz 인 사인파(sine wave)를 발생시켰다.

1) 다중 나선형 마이크로폰 어레이 (Multi-arm spiral microphone array)

공감 분해능이 우수하여 소음원 측정에 주로 활용되고 있는 나선형 어레이 구성 방법은 마이크로폰 크기 4.5m × 2.1m 의 공간 내에 배치되도록 하였으며, 풍동 벽면에 설치 할 수 있는 공간을 제외한 나머지 위치의 마이크로폰은 삭제 하는 방법으로 설계가 진행되었다. 나선형 마이크로폰 어레이 배치에 대한 절차는 그림 2-2-63 와 같다.

1. 나선형 어레이 구성 → 2. 풍동 벽면의 가로세로 비율 적용 → 3. 설치 불가능 공간에 배치된 마이크로폰 제거

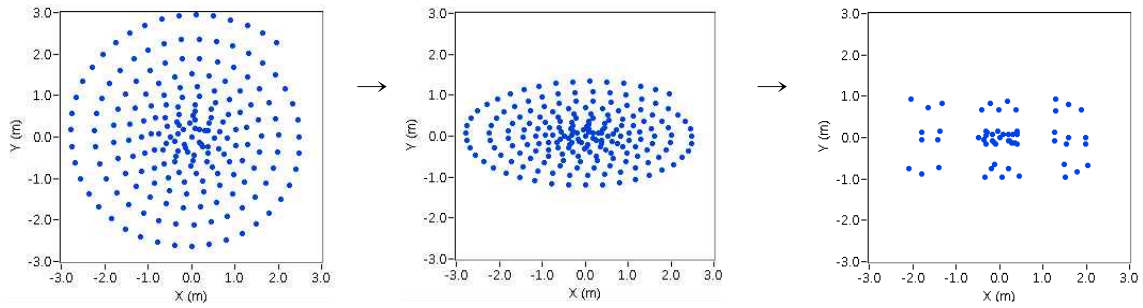


그림 2-2-63 나선형 어레이 구성 절차

그리고 마이크로폰은 그림 2-2-64 와 같이 다중 나선형 어레이와 두 가지로 구성된 다중 나선형 어레이로 배열하였다. 두 가지로 구성된 다중 나선형 어레이는 고주파수 분해능 향상을 위하여 어레이 안쪽의 마이크로폰 간격을 좁게 배치하고 저주파수 분해능 향상을 위하여 어레이 바깥쪽의 마이크로폰 간격을 넓게 배치하는 방법이다.

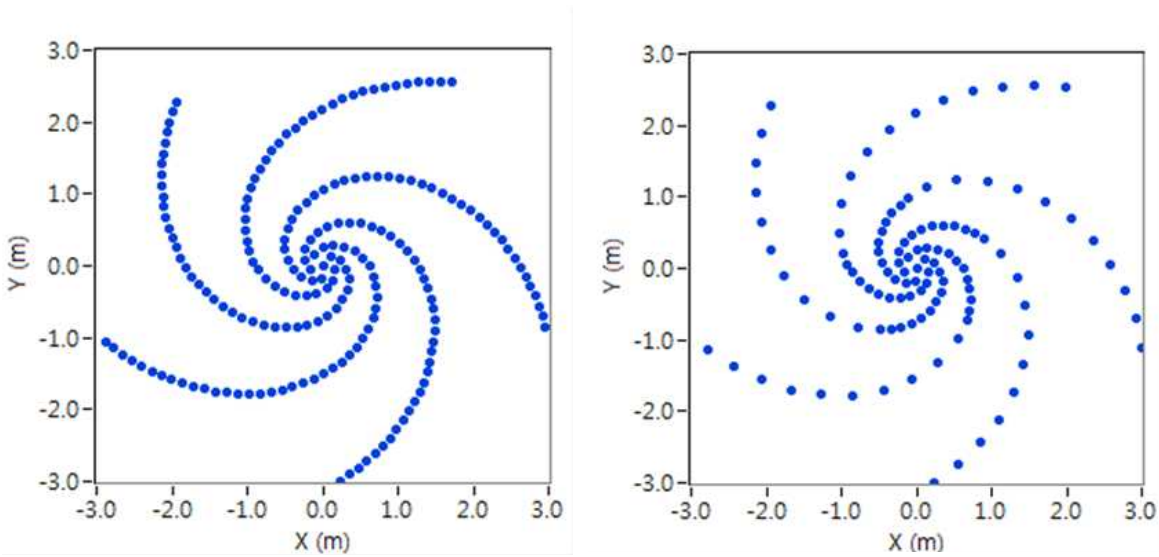


그림 2-2-64 나선형 어레이
: (왼) 다중 나선형 어레이 (오) 두가지로 구성된 다중 나선형 어레이

다음의 표 2-2-4 ~ 표 2-2-7 는 설계된 다중 나선형 마이크로폰 어레이의 모의 빔형성 결과이다. 다중 나선형 마이크로폰 어레이의 모의 시험 결과 마이크로폰 어레이의 가로 및 세로 크기가 제한되어 있어 가로 방향 및 세로 방향 빔폭이 크게 변하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 다중 나선형 어레이와 두가지로 구성된 다중 나선형 어레이의 결과를 비교해 보면, 8kHz 의 고주파수에서 부엽의 차이를 확인할 수 있으며, 어레이의 중심에 마이크로폰이 조밀하게 분포한 어레이의 결과에서 부엽이 확실히 감소 한 것을 확인 할 수 있다.

표 2-2-4 마이크로폰 배치에 따른 빔형성 결과(1) : 3중 나선형 어레이

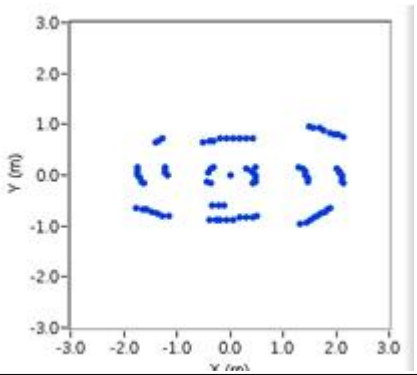
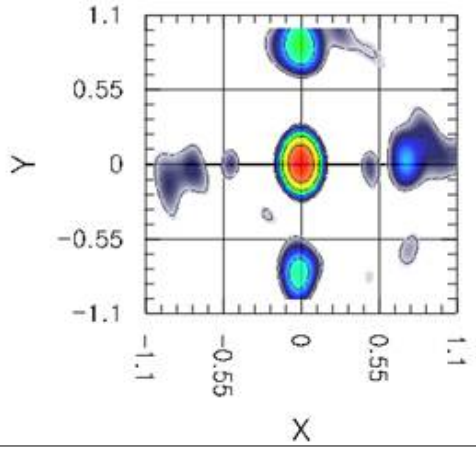
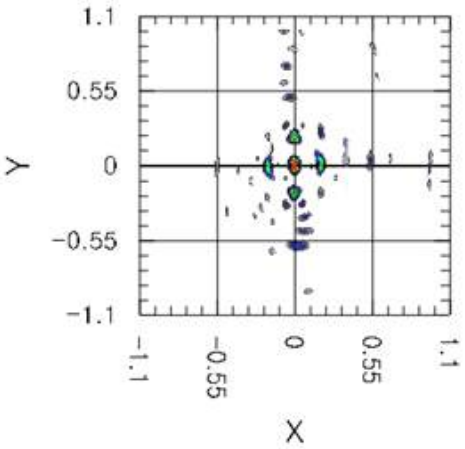
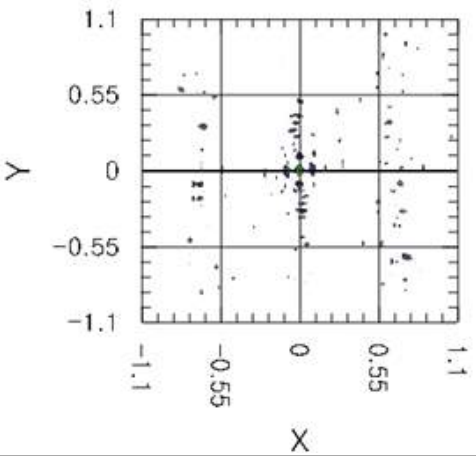
마이크로폰 어레이		3 arm array No. of Mic. = 85
1kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.299 m 2. Sidelobe rejection = 6.139 dB
4kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.075 m 2. Sidelobe rejection = 4.354 dB
8kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.037 m 2. Sidelobe rejection = 4.396 dB

표 2-2-5 마이크로폰 배치에 따른 빔형성 결과(2) : 5중 나선형 어레이

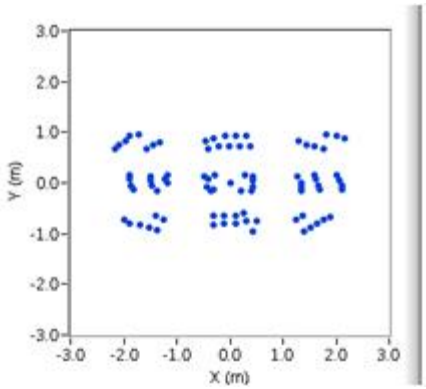
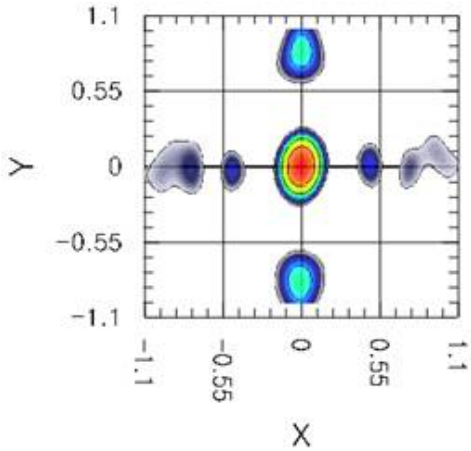
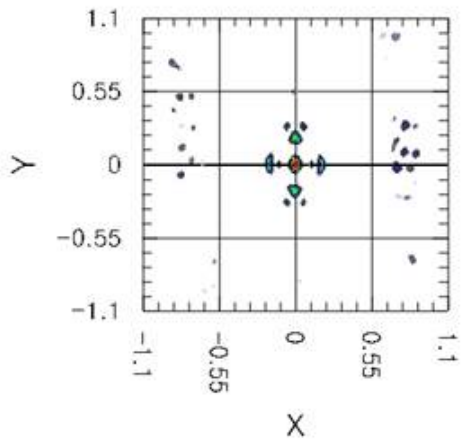
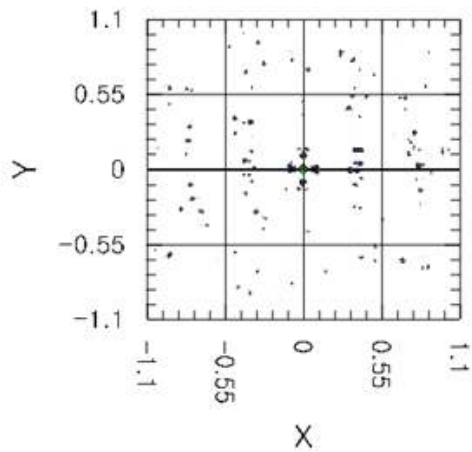
마이크로폰 어레이		5 arm array No. of Mic. = 85
1kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.293 m 2. Sidelobe rejection = 7.125 dB
4kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.072 m 2. Sidelobe rejection = 5.491 dB
8kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.035 m 2. Sidelobe rejection = 5.320 dB

표 2-2-6 마이크로폰 배치에 따른 빔형성 결과(3) : 7중 나선형 어레이

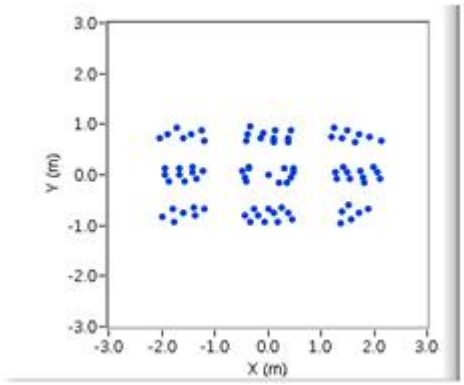
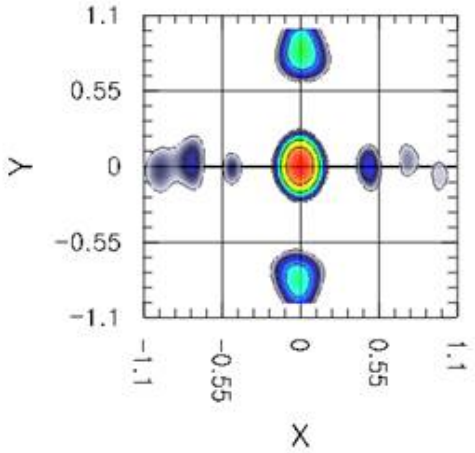
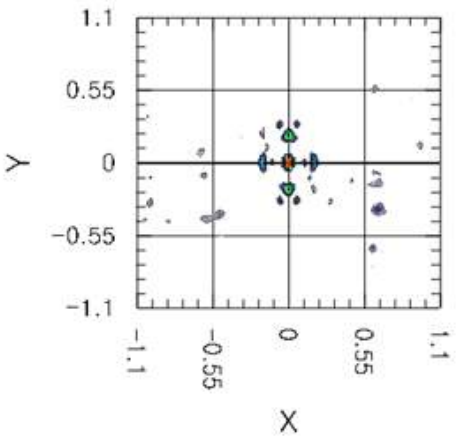
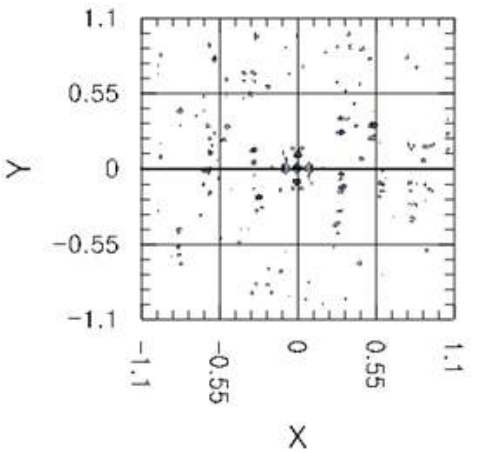
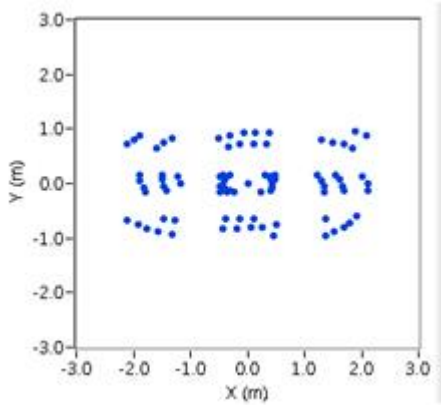
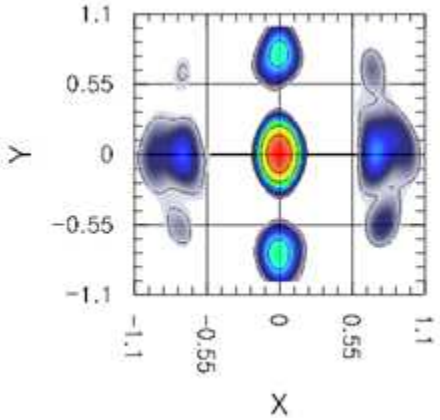
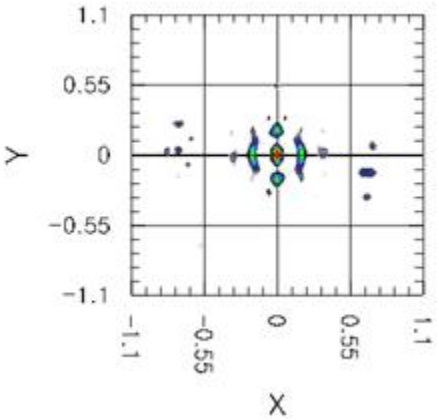
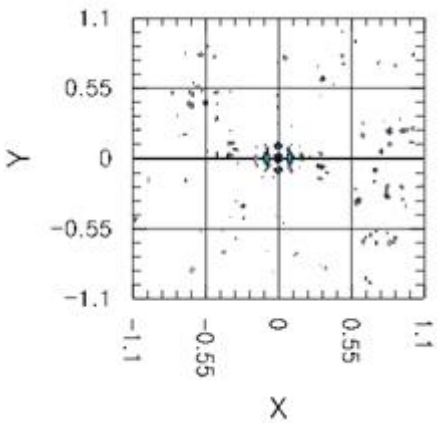
마이크로폰 어레이		7 arm array No. of Mic. = 83
1kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.279 m 2. Sidelobe rejection = 6.300 dB
4kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.069 m 2. Sidelobe rejection = 4.783 dB
8kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.033 m 2. Sidelobe rejection = 4.617 dB

표 2-2-7 마이크로폰 배치에 따른 빔형성 결과(4)
: 두가지로 구성된 5중 나선형 어레이

마이크로폰 어레이		5 arm array No. of Mic. = 85
1kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.330 m 2. Sidelobe rejection = 7.124 dB
4kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.083 m 2. Sidelobe rejection = 5.448 dB
8kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.041 m 2. Sidelobe rejection = 5.324 dB

2) 랜덤 마이크로폰 어레이 (Random microphone array)

랜덤 마이크로폰 어레이는 제약된 공간 내에 몇 가지 제약 조건을 설정하여 랜덤함수를 발생시켜 2000회 이상의 반복 처리를 통하여 구성하였다. 랜덤 함수 발생 시 제약조건을 아래와 같다.

· 제약된 공간 내에 마이크로폰이 분포 할 것
· 원점과 각 마이크로폰 간의 거리(Δr)가 중복되지 않을 것
· 빔폭(Beamwidth)이 0.3m 보다 작을 것
· 주엽과 부엽의 차이(Sidelobe rejection)가 6dB 이상일 것
· 마이크로폰의 개수가 80개 이상 85개 이하 일 것
· 조건 반복 시 현재의 결과 값이 이전 결과값 보다 주엽과 부엽의 차이가 크고, 빔폭이 작은 조건에서만 마이크로폰 어레이 저장할 것
· 반복 수행 조건(Iteration, N) : 2000회

위의 조건을 적용시켜 랜덤 마이크로폰 어레이를 구성하였으며, 다음은 구성된 랜덤 마이크로폰 어레이의 모의 빔형성 결과이다.

표 2-2-8 마이크로폰 배치에 따른 빔형성 결과(5) : 랜덤 어레이

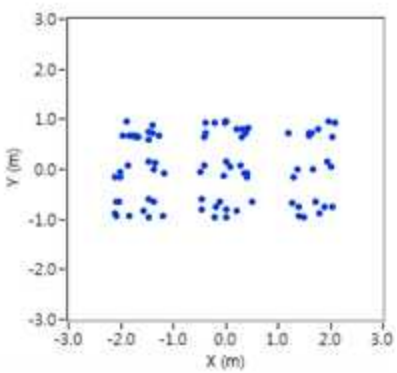
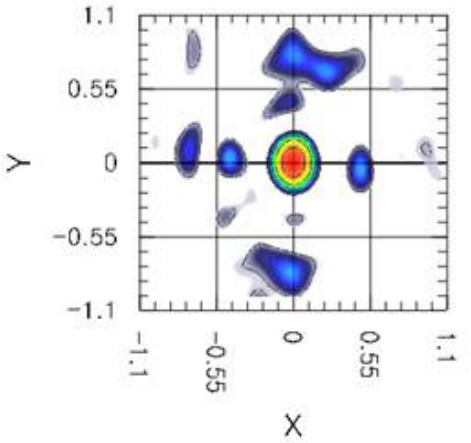
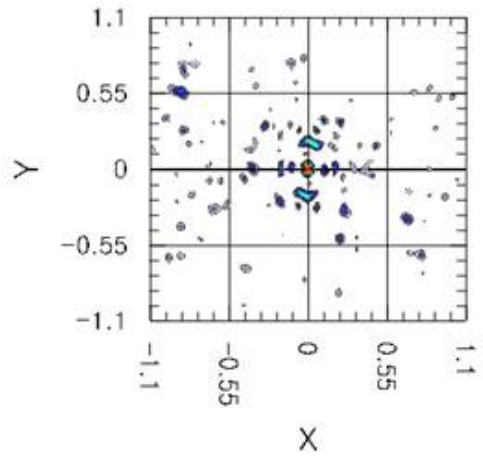
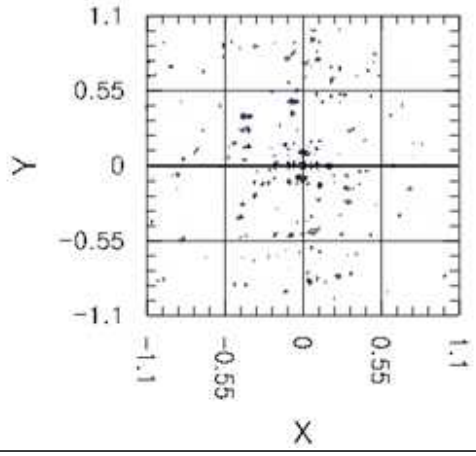
마이크로폰 어레이		Random array No. of Mic. = 83
1kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.259 m 2. Sidelobe rejection = 9.027 dB
4kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.064 m 2. Sidelobe rejection = 7.117 dB
8kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.030 m 2. Sidelobe rejection = 6.569 dB

표 2-2-9 마이크로폰 배치에 따른 빔형성 결과(6) : 랜덤 어레이

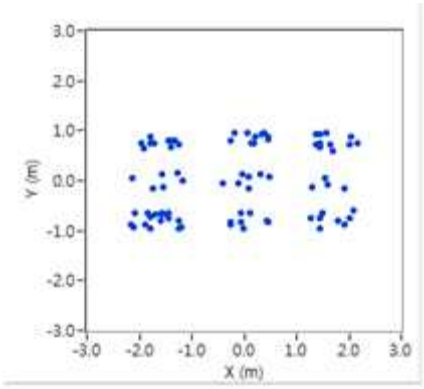
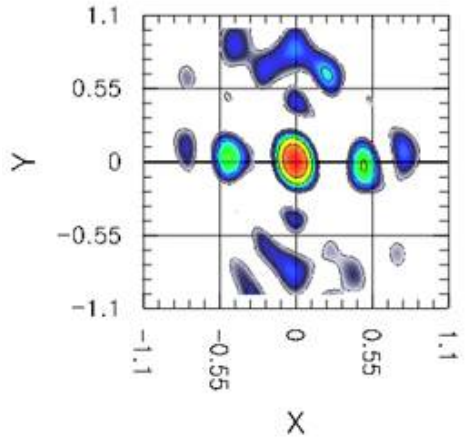
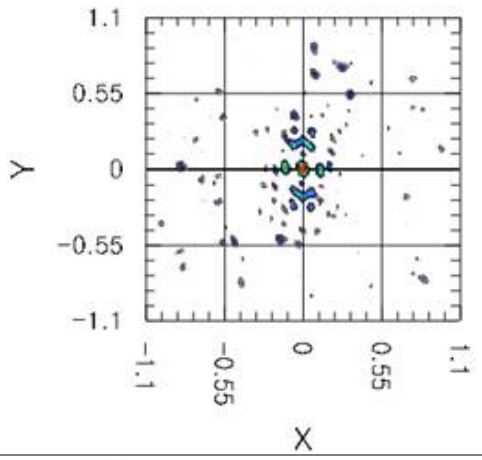
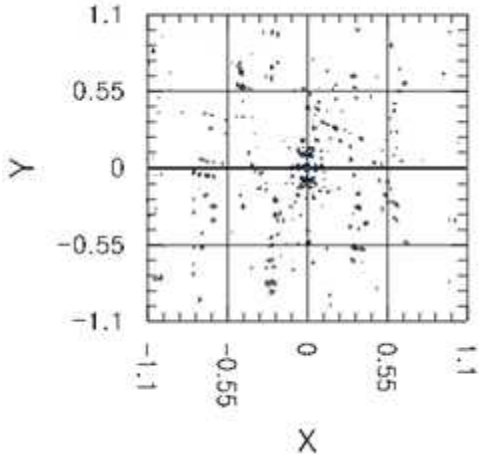
마이크로폰 어레이		Random array No. of Mic. = 81
1kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.253 m 2. Sidelobe rejection = 9.150 dB
4kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.062 m 2. Sidelobe rejection = 7.592 dB
8kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.029 m 2. Sidelobe rejection = 6.964 dB

표 2-2-10 마이크로폰 배치에 따른 빔형성 결과(7) : 랜덤 어레이

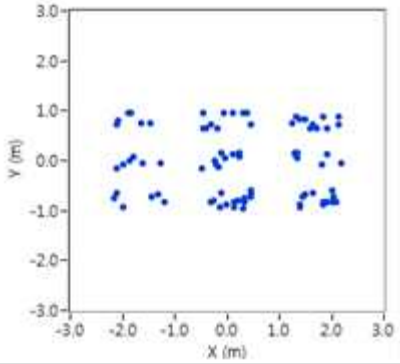
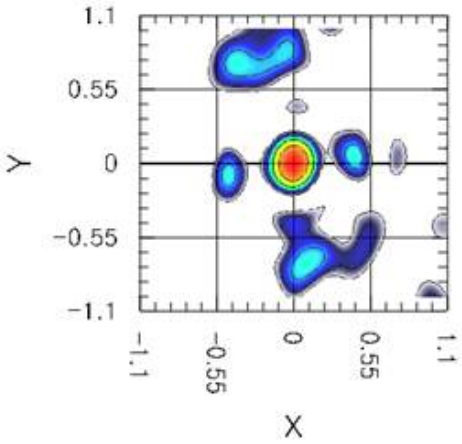
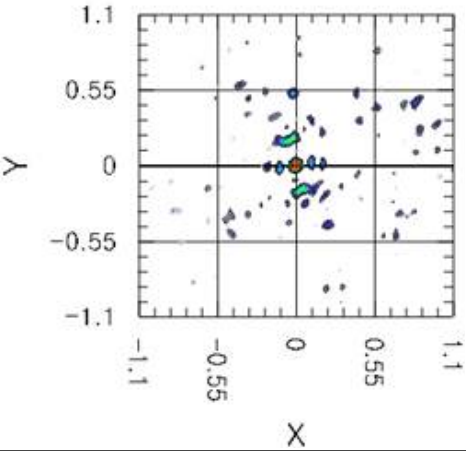
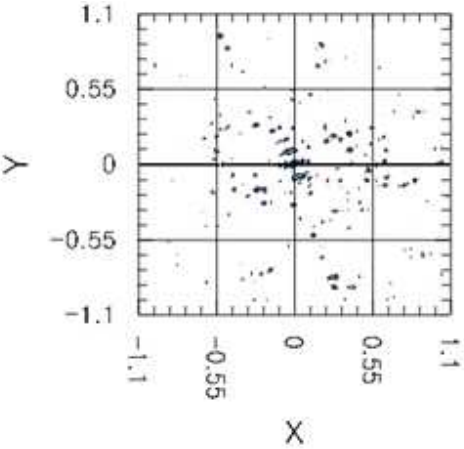
마이크로폰 어레이		Random array No. of Mic. = 82
1kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.255 m 2. Sidelobe rejection = 8.591 dB
4kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.063 m 2. Sidelobe rejection = 6.609 dB
8kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.030 m 2. Sidelobe rejection = 6.916 dB

표 2-2-11 마이크로폰 배치에 따른 빔형성 결과(8) : 랜덤 어레이

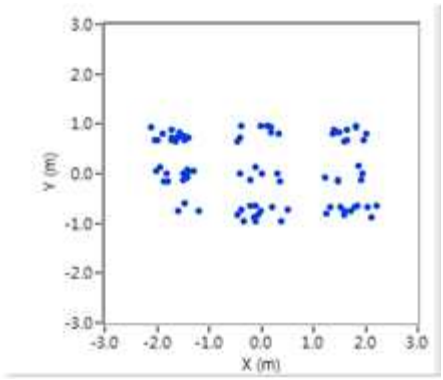
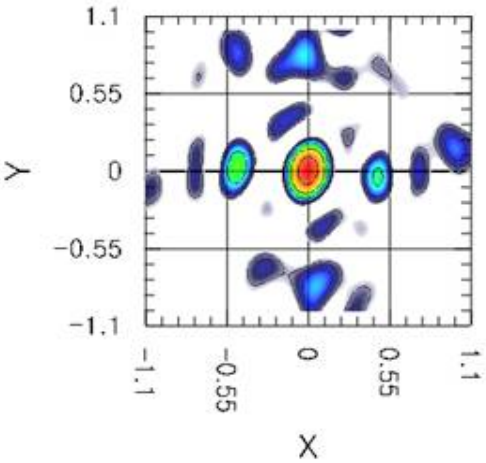
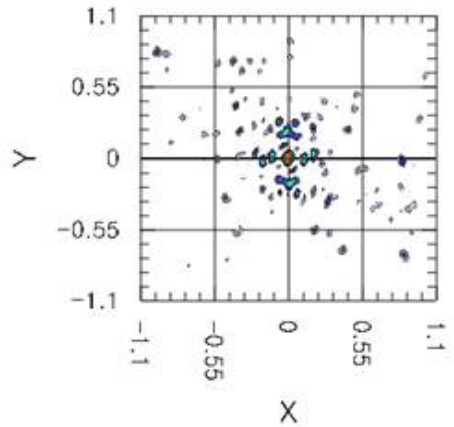
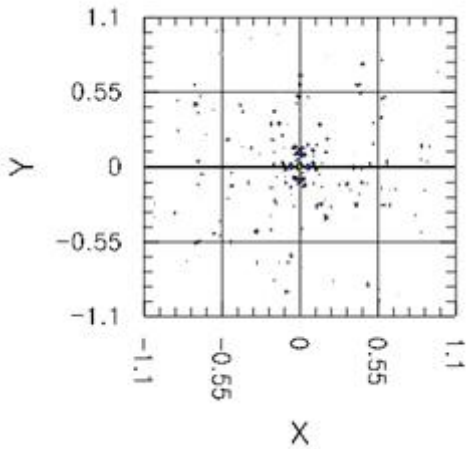
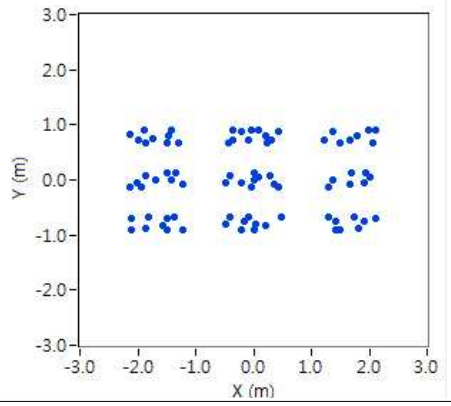
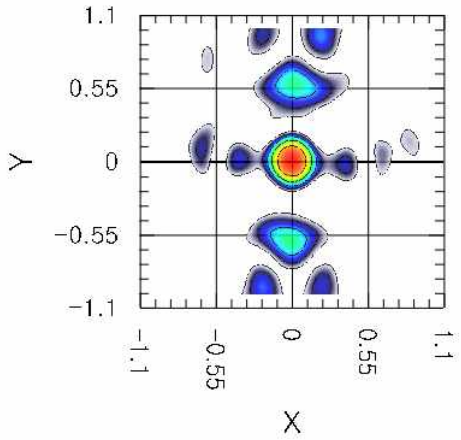
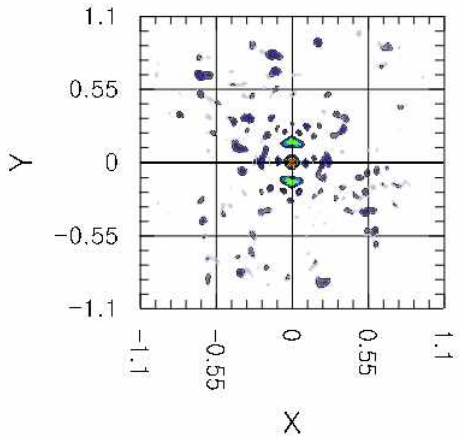
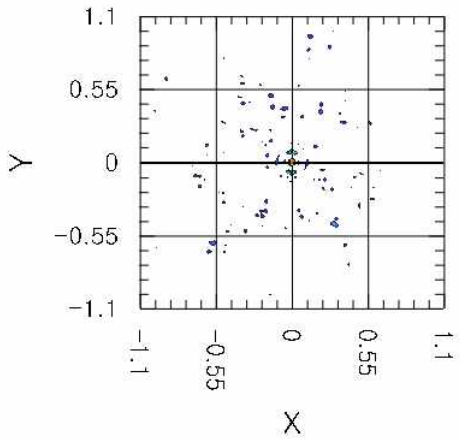
마이크로폰 어레이		Random array No. of Mic. = 82
1kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.255 m 2. Sidelobe rejection = 8.290 dB
4kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.064 m 2. Sidelobe rejection = 6.790 dB
8kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.030 m 2. Sidelobe rejection = 6.635 dB

표 2-2-12 마이크로폰 배치에 따른 빔형성 결과(9) : 랜덤 어레이

마이크로폰 어레이		Random array No. of Mic. = 80
1kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.222 m 2. Sidelobe rejection = 6.933 dB
4kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.055 m 2. Sidelobe rejection = 4.861 dB
8kHz 순음에 대한 빔형성 결과		1. BW = 0.026 m 2. Sidelobe rejection = 4.750 dB

4가지의 다중 나선형 어레이와 5가지의 랜덤 어레이의 결과 비교를 통하여 나선형 어레이는 공간 분해능이 우수하기로 알려져 있지만 마이크로폰 배치의 공간 제약이 큰 본 시험에서는 랜덤 어레이의 결과가 더 효과적인 것을 확인 할 수 있다. 각 주파수별 분해능을 비교하여 표 2-2-12 의 랜덤 어레이를 최종 선정하였다. 최종 선정된 마이크로폰 어레이는 80개의 마이크로폰 구성되어있으며 배치는 그림 2-2-65와 같고, 어레이의 주파수별 해당되는 그림 2-2-66 와 같다.

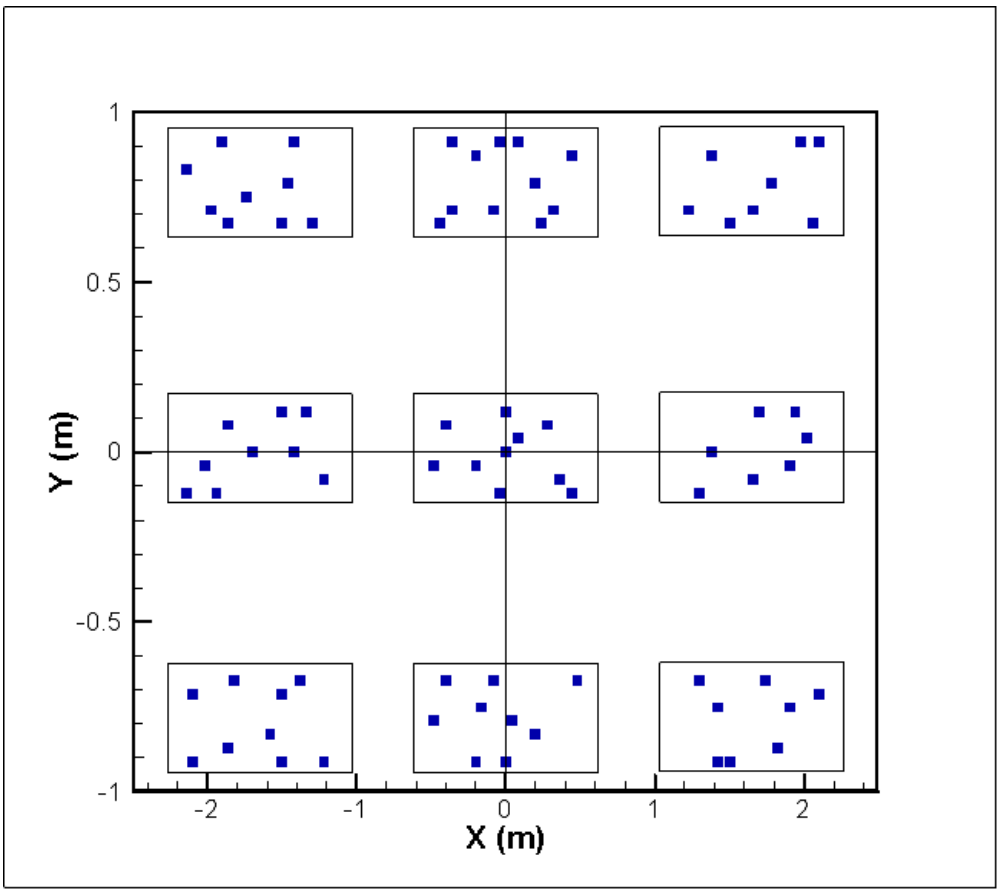


그림 2-2-65 80개의 마이크로폰으로 구성된 마이크로폰 어레이

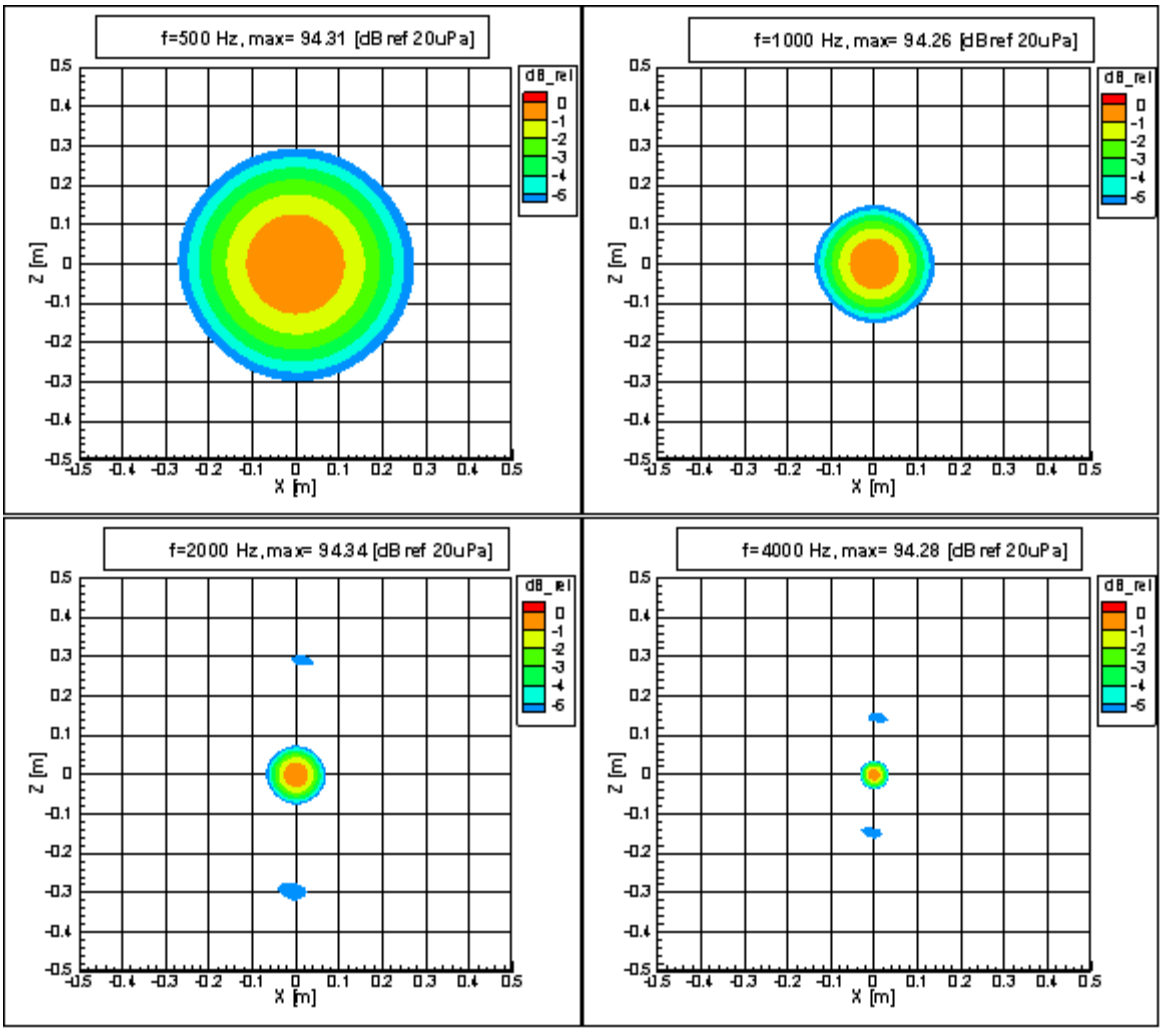


그림 2-2-66 스피커 시험 빔형성 결과

(2) 기준 소음원을 활용한 마이크로폰 어레이 시스템 검증

시험에 사용된 마이크로폰은 LinearX Systems Inc 의 1/2″ 인치 마이크로폰 M51 을 사용하였다. M51 마이크로폰의 비교정 특성은 주파수 50Hz~ 10kHz 범위에서 1dB 정도의 감도특성을 보이고 있으며, 측정 범위는 150dB 로 본 소음 시험에 적합한 특성을 가지고 있다. 시험에 사용된 마이크로폰, 케이블 및 측정 시스템은 교정기(B&K acoustic calibrator 4226)을 사용하여 1 kHz, 94 dB 에 대해 감도 보정을 수행하였다.

데이터 획득 시스템(DAQ)은 동시 샘플링이 가능한 GBM 사의 VIPER 가 사용되었다. 1대의 VIPER 에는 총 48 채널의 신호 수집이 가능하며, 총 2개의 VIPER 를 사용하여 데이터를 획득 하였다. 각 채널별 최대 데이터 획득률은 250kHz 이며, 외부 기준 입력 신호를 사용할 경우 최대 100kHz 이다. 또한, AC 1.5 Hz high pass filter 를 적용하여 DC 성분을 제거 하였다.

스피커는 마이크로폰 어레이 모듈의 중앙에 설치된 41번 마이크로폰과 평행한 위

치에 설치하였으며, 스피커 위치를 원점으로 선정하여 시험을 수행하였다.

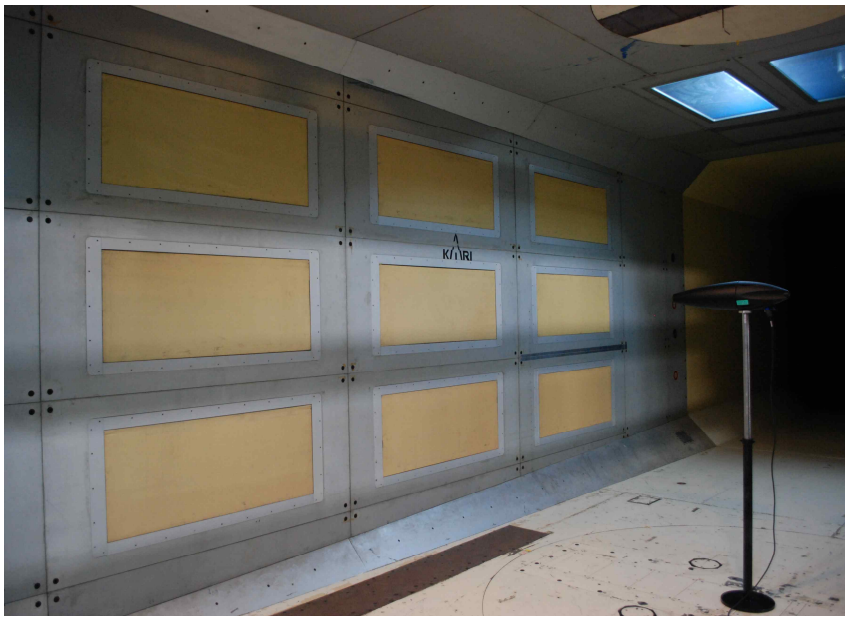


그림 2-2-67 기준 음원을 이용한 마이크로폰 어레이의 검증 시험

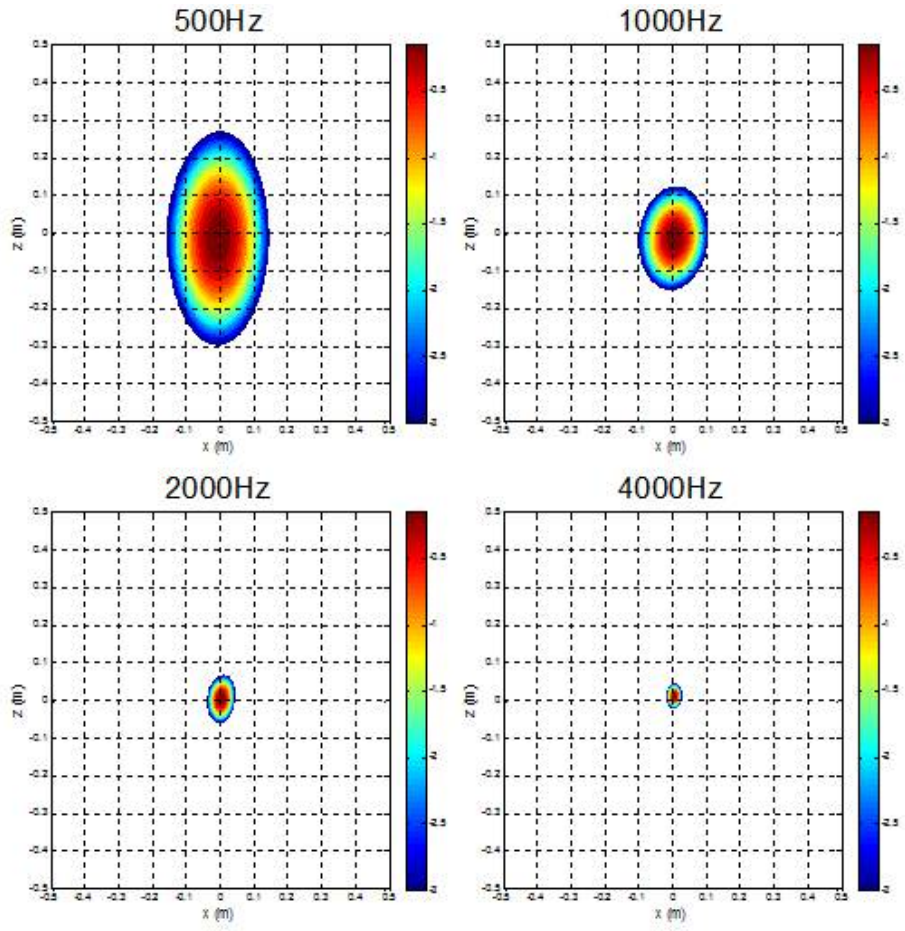


그림 2-2-68 기준 음원을 이용하여 측정한 빔형성 결과

그림 2-2-68 는 기준 음원을 발생시켰을 때 80개의 마이크로폰으로 취득한 신호를 빔형성 방법을 적용한 결과이고, 1/3 옥타브 밴드로 표현하였고, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz 에 대한 결과 이다. 각 주파수에서 (0,0) 에 위치한 소음원의 위치를 파악하는 것을 확인할 수 있고, 설계된 마이크로폰 어레이가 정확한 소음의 위치를 파악하는 것을 확인하였다.

(3) 원형 실린더를 활용한 마이크로폰 어레이 시스템 검증

풍속이 있는 조건에서 설계된 마이크로폰 어레이의 성능을 검증하기 위하여 단순 형상인 원형 실리더에 대한 공력 소음 시험을 수행하였다. 원형 실린더는 유동 특성이 잘 알려져 있고 유동에 의해 발생되는 소음의 주파수도 쉽게 예측 할 수 있는 특징이 있다. 실린더에서 발생되는 공력 소음은 유속(U, m/s)과 실리더 직경(D, m)의 비로 표현되는 흘림 주파수(Shdding frequency)와 밀접한 관계가 있다. 실린더에서 유동이 순차적으로 박리되면서 생기는 소음의 주파수는 다음식으로 예측할 수 있다.

$$f_S = \frac{S_t U}{D}$$

여기서 무차원수인 St(Strouhal number)는 Re(Reynolds number)가 3.0×10^5 미만인 실린더 형상의 경우 0.2로 알려져 있다. 실린더 시험에는 직경이 각 10, 20, 40mm 인 원형 실린더 모델이 사용되었으며 그 형상은 그림 2-2-69, 제원은 표 2-2-13 와 같다.

표 2-2-13 실린더의 크기

	Diameter (mm)	Length (mm)	Height (mm)
1	10	750	1500
2	20	750	1500
3	40	750	1500



그림 2-2-69 원형 실린더 모델
(좌 10mm, 중간 20mm, 우 40m)



그림 2-2-70 실린더 시험

시험은 두 가지 조건으로 진행되었다. 첫 번째 시험은 풍속 60m/s 로 고정한 후 실린더 모델을 변경하면서 진행하였고, 두 번째 시험은 실린더의 직경을 10mm 로 고정하여 풍속을 40, 50, 60m/s 로 변경하면서 시험을 수행하였다.

먼저 실린더 직경에 대한 영향을 파악하기 위하여 풍속을 60m/s 인 조건에서 실린더의 모델을 변경하여 실험을 수행하였다. 실험 결과를 그림 2-2-71과 같이 주

파수-음압 결과로 나타내었으며, 시험 조건에서 예상되는 주파수와 실험을 통하여 발생된 주파수를 표 2-2-72과 같이 정리 하였다.

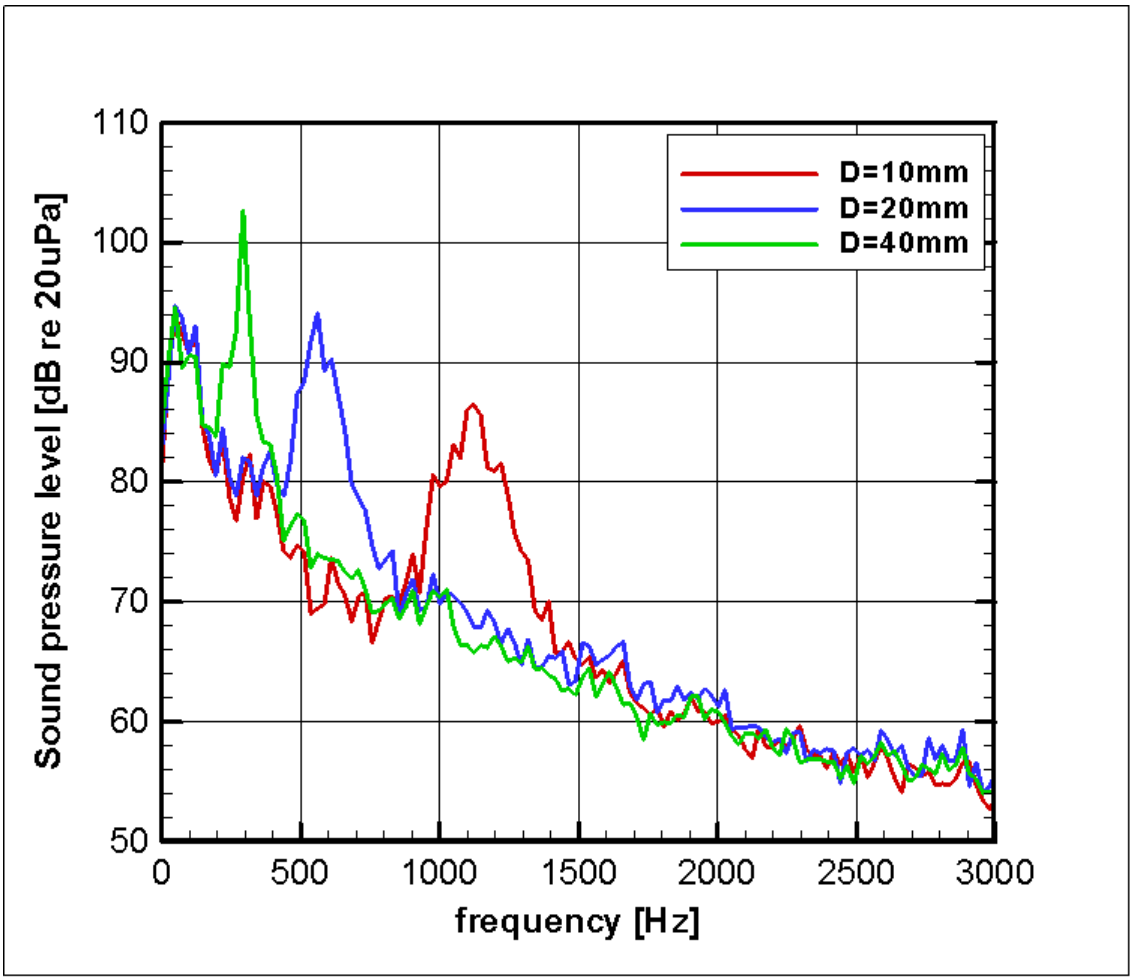


그림 2-2-71 실린더 시험결과에 대한 1/3 옥타브 밴드에서의 음압 결과

표 2-2-14 실린더 시험에서의 예상 주파수와 실제 주파수 값

Diameter of cylinder [mm]	10	20	40
Wind speed [m/s]	60	60	60
Expected frequency [Hz]	1200	600	300
Experimental frequency [Hz]	1120	560	290
Error	80	40	10

그림 2-2-71과 표 2-2-14 을 통하여 실린더 시험의 스펙트럼 결과 각 직경의 크기에 따른 소음 발생 주파수는 예상 주파수와 약간의 차이가 있지만 대체적으로 그 값이 비슷한 것을 확인 할 수 있다. 값의 차이는 스트로홀수를 0.2 로 가정하였지만 레이놀즈수에 때라 조금씩 변화가 있기 때문에 그 차이에서 발생된 것으로 판단된다.

실린더에서 발생하는 소음원의 위치를 확인하기 위하여 그림 2-4-10에서 확인된 각 조건에서의 피크 주파수가 1/3 옥타브 밴드 범위 내에 들어가는 중심주파수에 대해 빔형성 기법을 적용하여 그림 2-2-72~ 74과 같이 정리하였다.

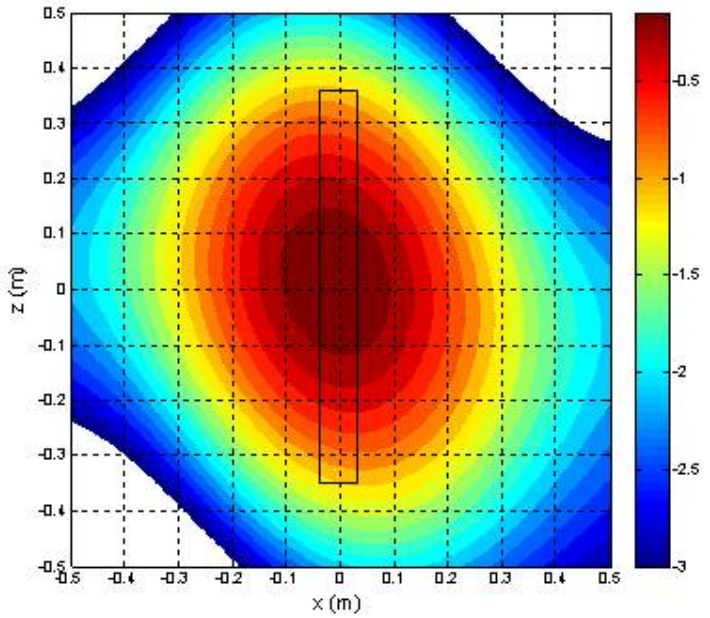


그림 2-2-72 U=60m/s, D=40mm 인 실린더의 f=315Hz 빔형성 결과

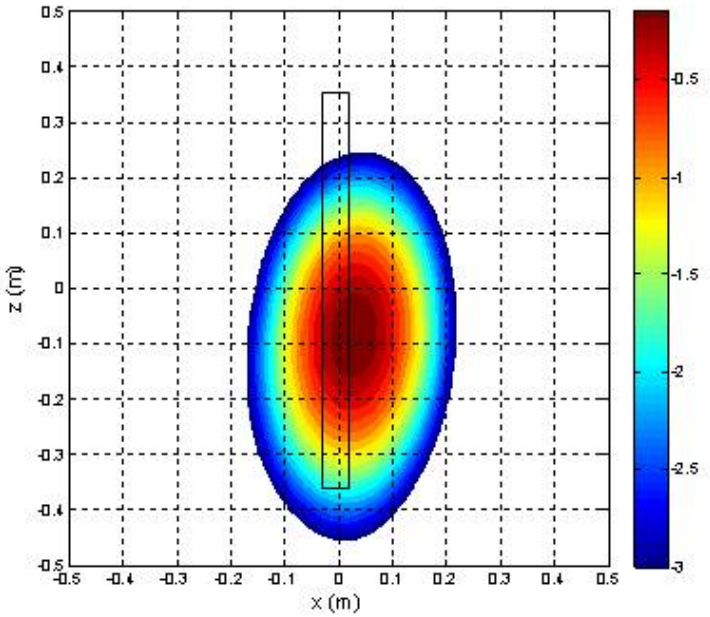


그림 2-2-73 U=60m/s, D=20mm 인 실린더의 f=630Hz 빔형성 결과

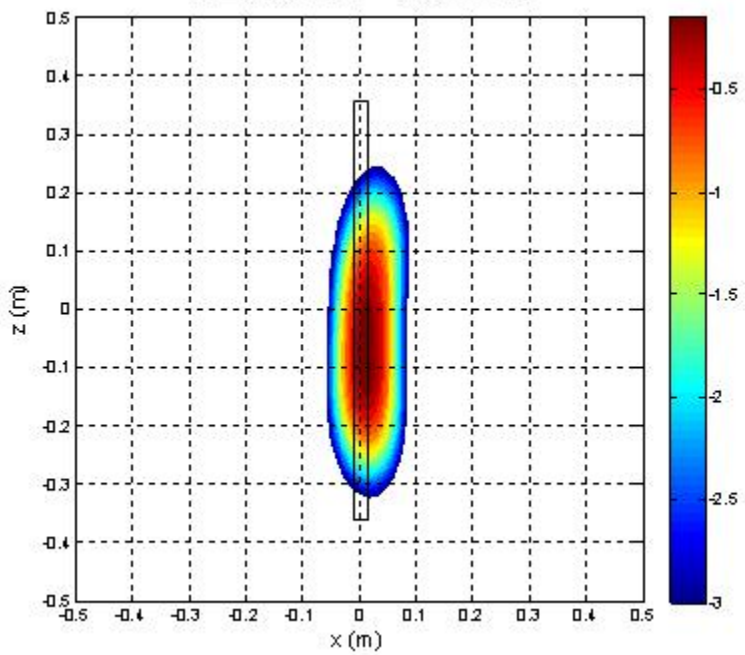


그림 2-2-74 U=60m/s, D=10mm 인 실린더의 f=1250Hz 빔형성 결과

그림 2-2-72~ 74 에서 실린더 직경이 변화함에 따라 소음원의 중심 주파수가 315Hz, 630Hz, 1250Hz 로 변화하는 것을 알 수 있고, 각 중심주파수에서 소음원의 위치와 실린더 위치가 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

다음은 풍속에 따른 영향을 파악하기 위하여 실린더 모델의 직경을 d= 10mm 로 고정한 상태에서 풍속을 40, 50, 60m/s 로 변화시키며 수행하였다. 실험 결과를 그림 2-2-75 와 같이 주파수-음압 결과로 나타내었으며, 시험 조건에서 예상되는 주파수와 실험을 통하여 발생된 주파수를 표 2-2-15 와 같이 정리 하였다.

앞선 실험 결과와 마찬가지로 예상주파수와 실제 발생 주파수는 어느 정도 오차가 있지만, 그 결과가 비슷한 것을 확인 할 수 있다.

각 실험 조건에서 실린더에서 발생하는 소음원의 위치를 확인하기 위하여 그림 2-2-75에서 확인된 각 조건에서의 피크 주파수가 1/3 옥타브 밴드 범위 내에 들어가는 중심주파수에 대하여 빔형성 기법을 적용하여 그림 2-2-76 ~ 78과 같이 정리 하였다. 그 결과 풍속이 변화함에 따라 소음원의 중심주파수가 800Hz, 1000Hz, 1250Hz 로 변화하고 있으며, 각 중심주파수에서 소음원의 위치와 실린더의 위치가 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

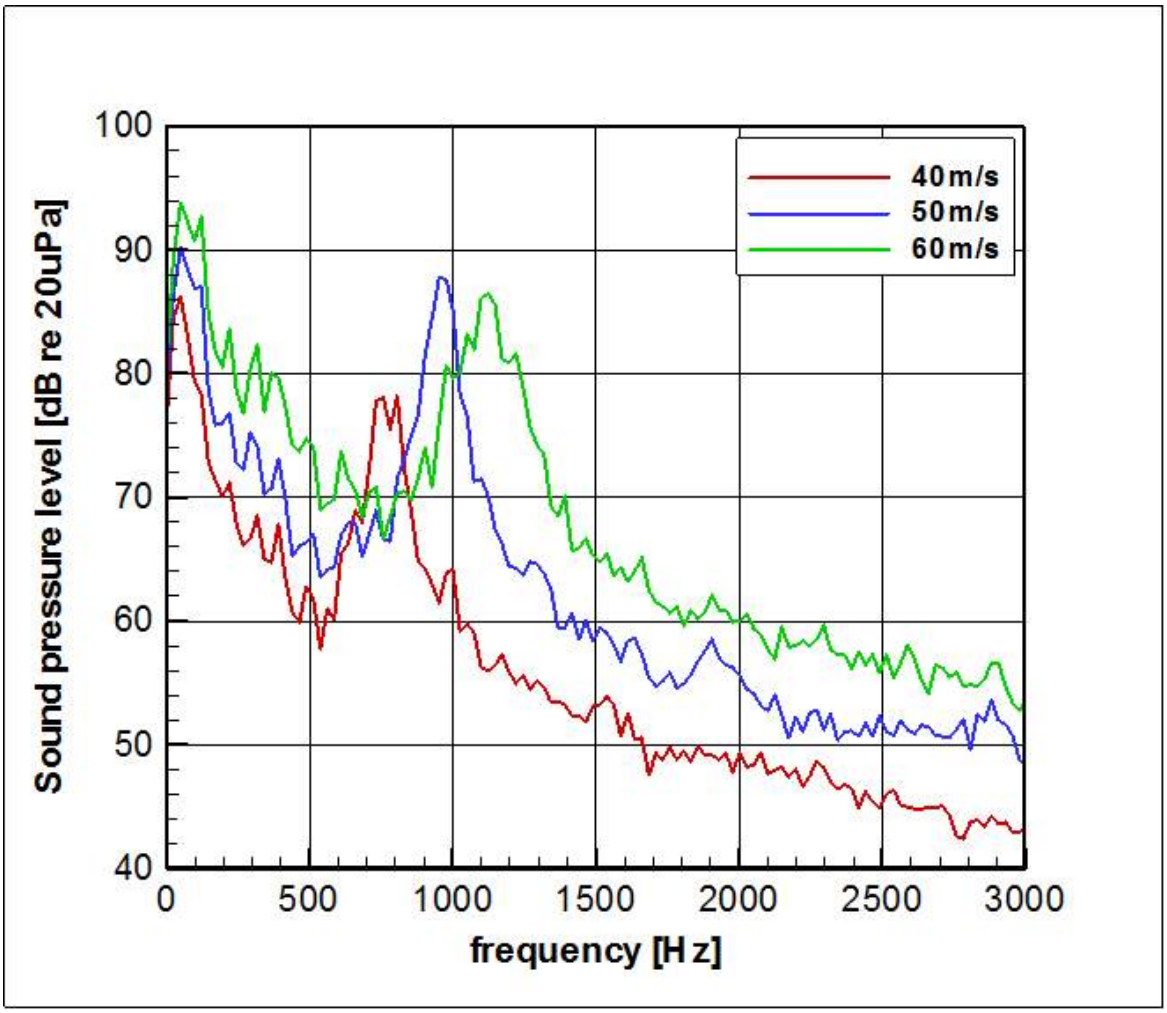


그림 2-2-75 실린더 시험결과에 대한 1/3 옥타브 밴드에서의 음압 결과

표 2-2-15 실린더 시험에서의 예상 주파수와 실제 주파수 값

Diameter of cylinder [mm]	10	10	10
Wind speed [m/s]	40	50	60
Expected frequency [Hz]	800	1000	1200
Experimental frequency [Hz]	750	950	1120
Error	50	50	80

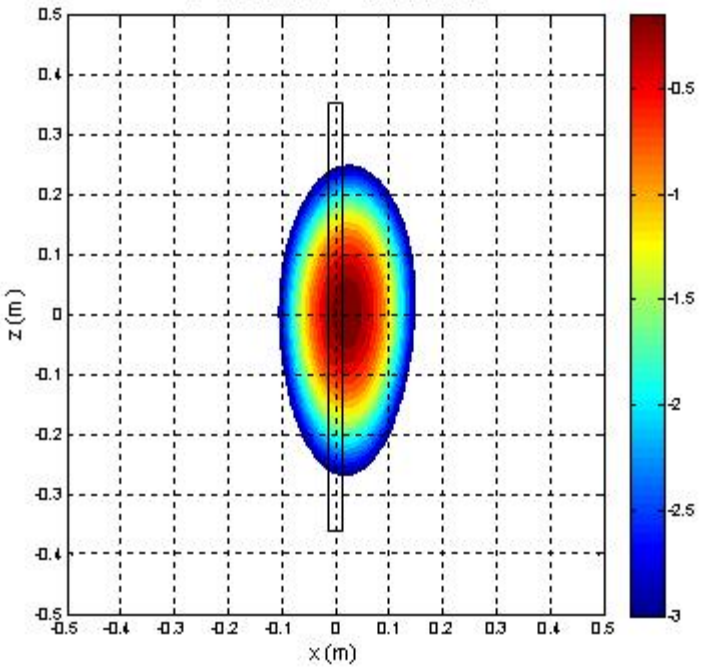


그림 2-2-76 U=40m/s, D=10mm 인 실린더의 f=800Hz 빔형성 결과

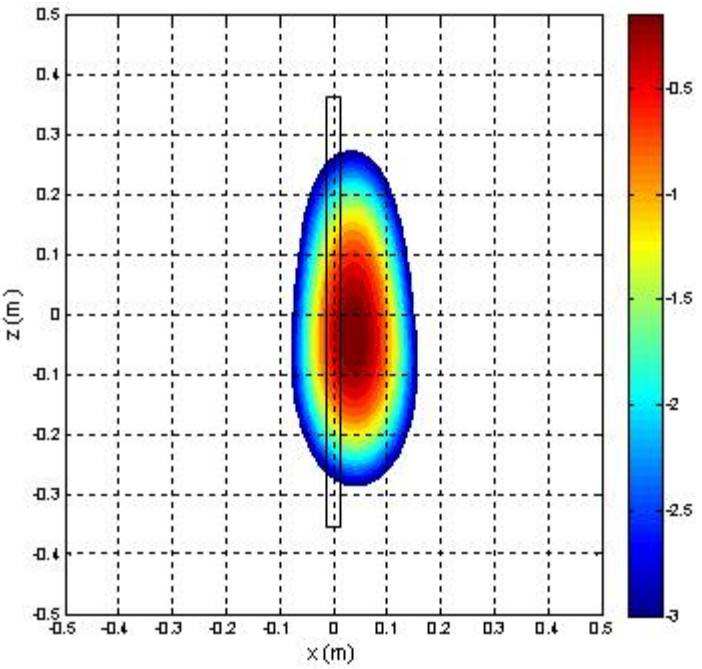


그림 2-2-77 U=50m/s, D=10mm 인 실린더의 f=1000Hz 빔형성 결과

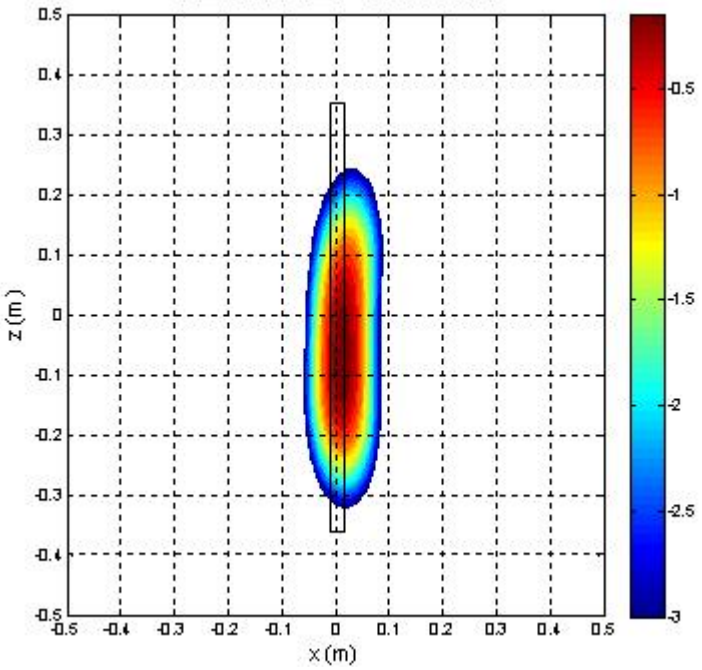


그림 2-2-7817 U=60m/s, D=10mm 인 실린더의
f=1250Hz 빔형성 결과

(4) 1/2 팬터그래프 소음 시험

개방형 시험부에서 수행된 소음 시험 결과와 상호비교를 위해 1/2 팬터그래프 축소모델을 활용한 풍동 시험이 추가로 수행되었다. 시험에 수행된 1/2 팬터그래프는 그림 2-2-79과 같고 시험은 풍속 60m/s 인 조건에서 수행하였으며, 시험 모델이 없는 조건에서 배경 소음을 측정하였다. 데이터는 100kHz 로 10초간 취득하였다.



그림 2-2-79 1/2 팬터그래프

다음 그림 2-2-80 는 60m/s 의 풍속조건에서의 배경소음과 1/2 팬터그래프의 주파수-음압 결과이다. 팬터그래프에서 발생되는 소음은 300 ~ 3000Hz의 주파수 범위 내에서 배경소음보다 약 10dB 높은 것을 확인 할 수 있다. 팬터그래프에서 발생되는 소음원의 위치를 확인하기 위하여 1/3 옥타브 밴드에 대하여 빔형성 기법을 적용하여 그림 2-2-81~88 와 같이 정리하였다. 대체적으로 600Hz와 800Hz의 낮은 주파수에서는 하부 프레임에서 소음이 발생하고, 1000Hz 이상의 높은 주파수에서는 팬헤드 부분에서 소음이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 다만, 400Hz, 와 500Hz의 저주파수에서 소음원이 팬터그래프 모델 이외의 부분에서 파악되는 것으로 확인할 수 있다.

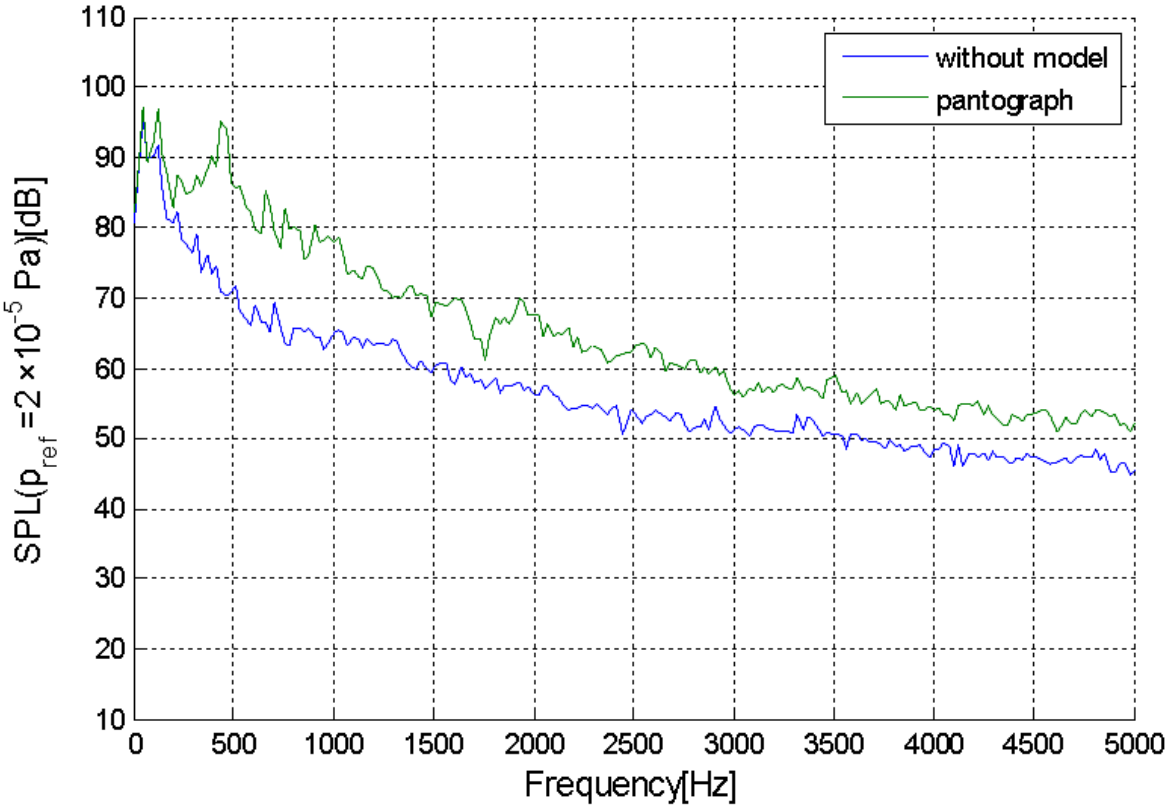


그림 2-2-80 U=60m/s 인 조건에서 팬터그래프와 배경소음 시험 결과

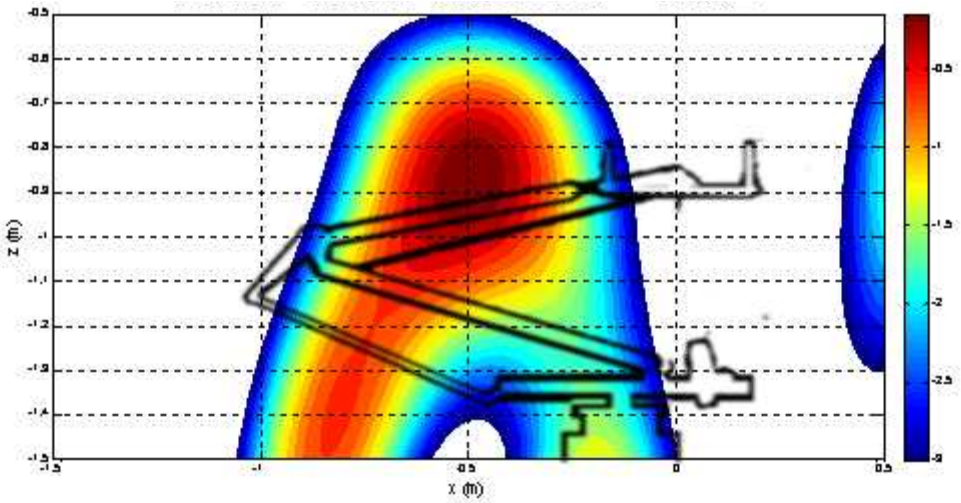


그림 2-2-81 60m/s 일 때 f=400Hz 일때의 빔형성 결과 (Max=106dB)

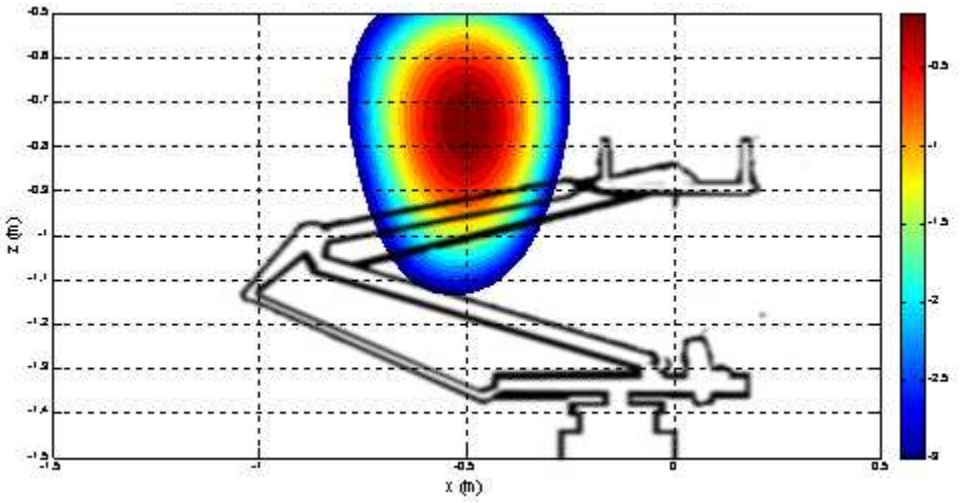


그림 2-2-82 60m/s 일 때 f=500Hz 일때의 빔형성 결과 (Max=107dB)

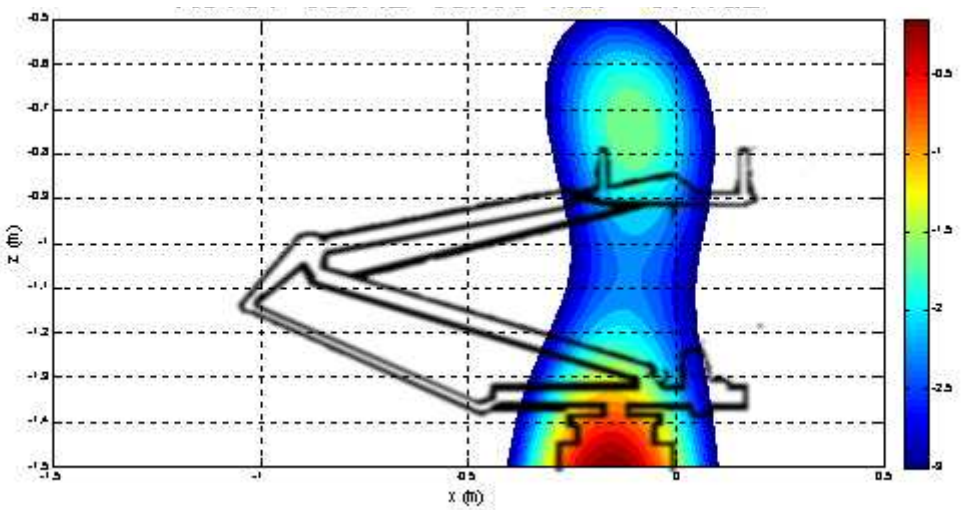


그림 2-2-83 60m/s 일 때 f=630Hz 일때의 빔형성 결과 (Max=97.4dB)

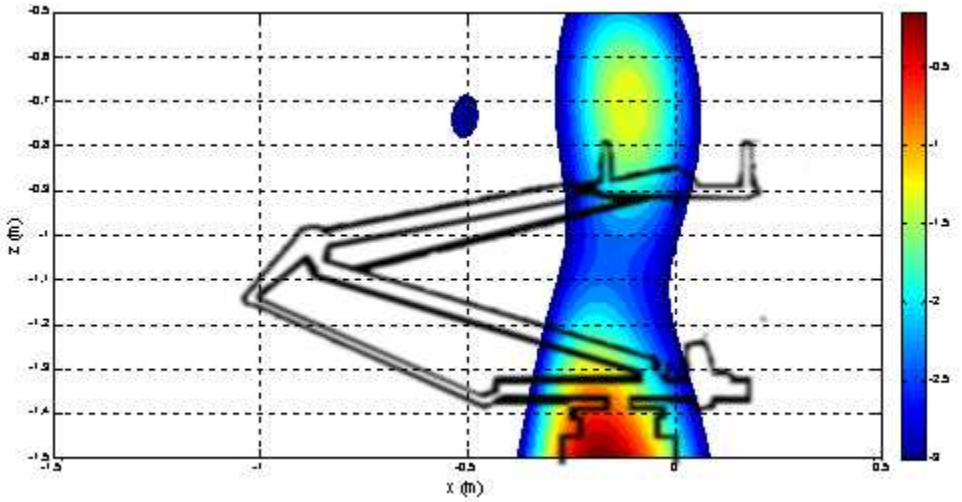


그림 2-2-84 60m/s 일 때 f=800Hz 일때의 빔형성 결과 (Max=92.7dB)

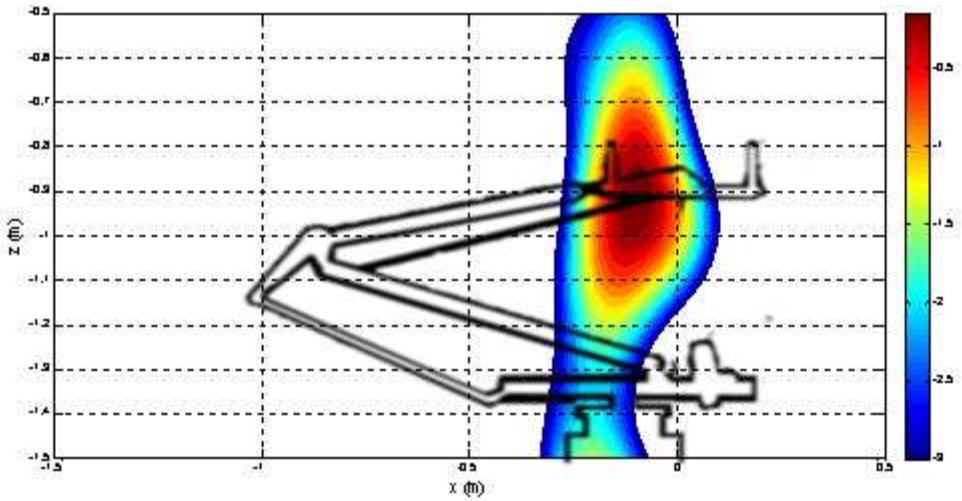


그림 2-2-85 60m/s 일 때 f=1000Hz 일때의 빔형성 결과 (Max=92.8dB)

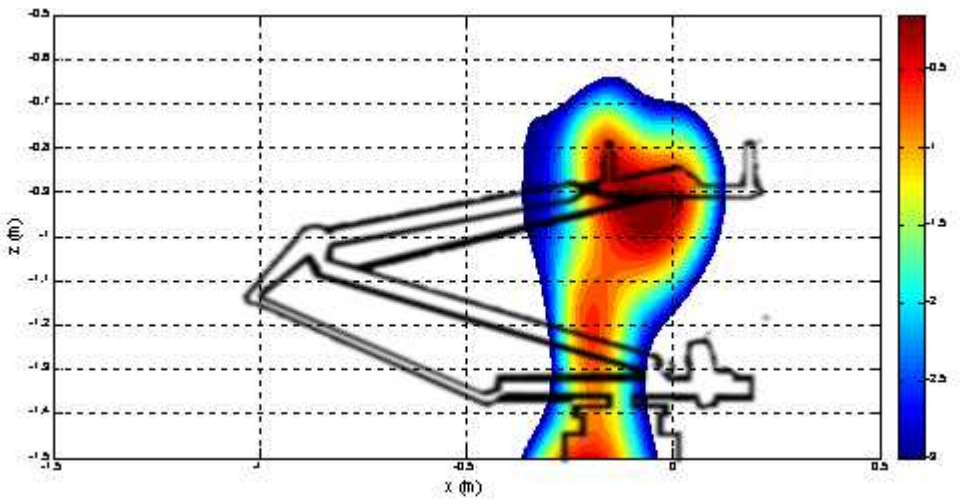


그림 2-2-86 60m/s 일 때 f=1250Hz 일때의 빔형성 결과 (Max=87dB)

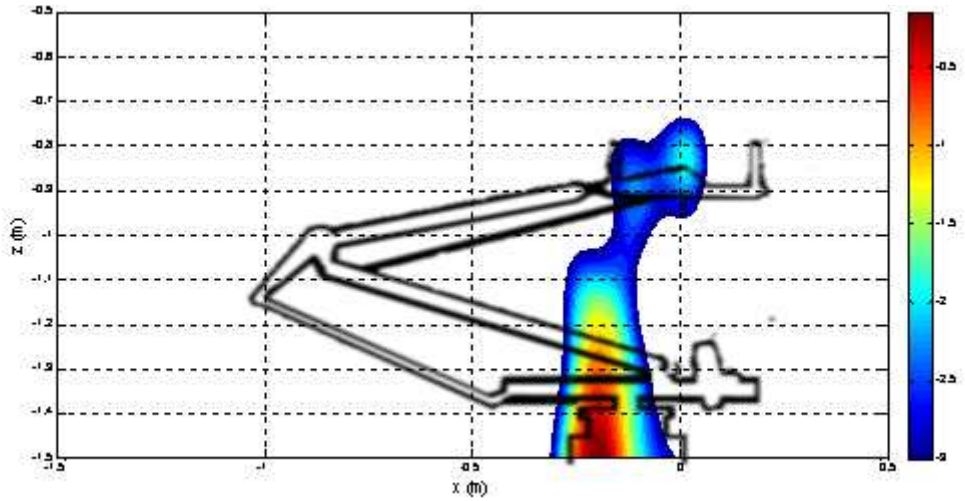


그림 2-2-87 60m/s 일 때 f=1600Hz 일때의 빔형성 결과 (Max=82dB)

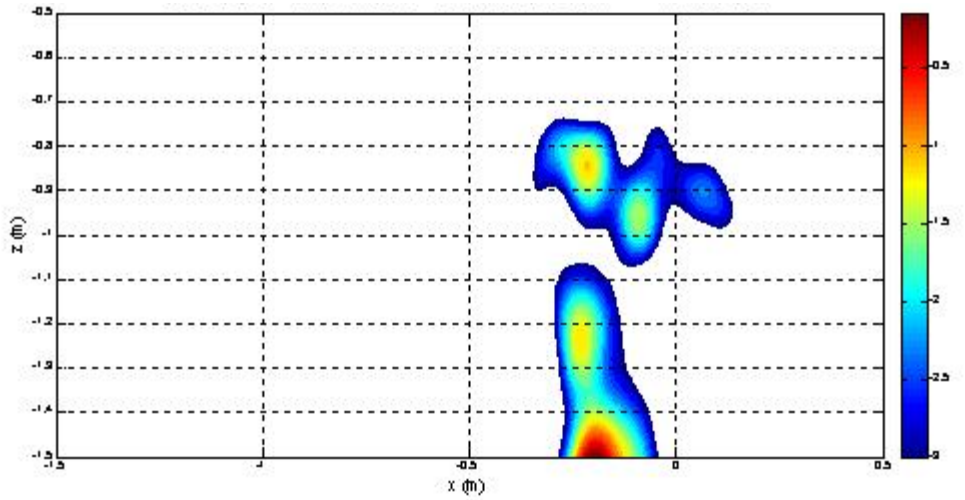


그림 2-2-88 60m/s 일 때 f=2000Hz 일때의 빔형성 결과 (Max=80.1dB)

폐쇄형 시험부에서 수행된 1/2 팬터그래프 축소 모델의 결과를 검증하기 위하여 이전에 개방형 시험부에서 수행되었던 시험 결과와 그림 2-2-89, 그림 2-2-90와 같이 비교하였다.

그 결과 대체적으로 그 결과의 경향이 비슷한 것으로 확인 되었다. 다만 이번 시험에서의 결과가 일부 소음원의 위치를 더 정확하게 나타냈기 때문에 분해능이 좋아진 것을 확인 하였다. 이는 마이크로폰 어레이와 모델 사이의 거리가 상대적으로 감소했기 때문에 분해능이 더 좋아졌다고 판단된다.

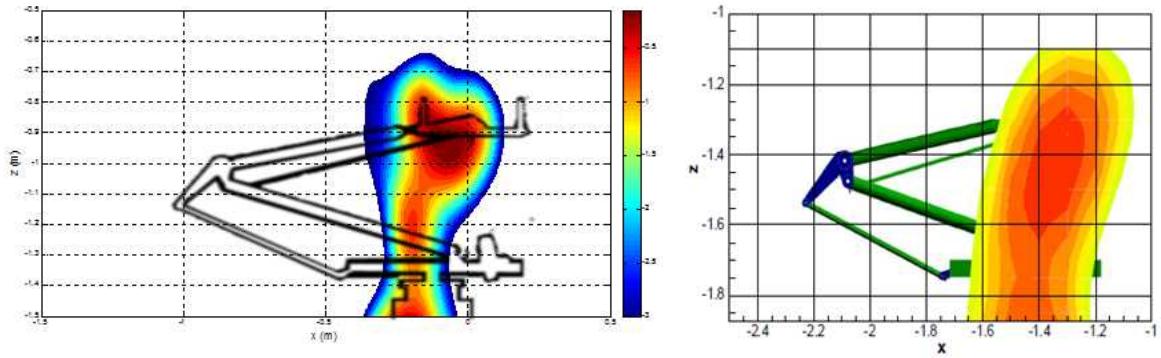


그림 2-2-89 U=60m/s 일 때 f=1250에서 빔형성 결과 (왼) 폐쇄형 시험부 시험 결과 Max = 87dB (오) 개방형 시험부 결과 Max = 101dB

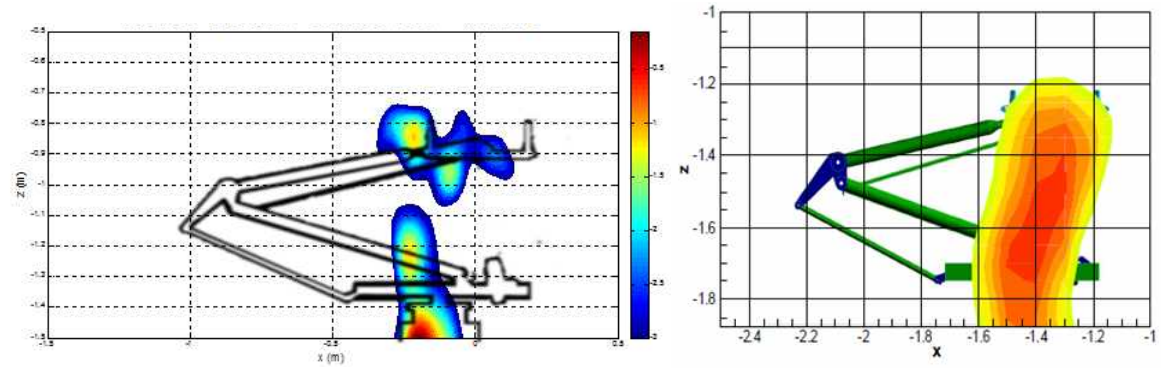


그림 2-2-90 U=60m/s 일 때 f=2000에서 빔형성 결과 (왼) 폐쇄형 시험부 시험 결과 Max = 80.1dB (오) 개방형 시험부 결과 Max = 97dB

마. 결론

풀스케일 팬터그래프 공력소음 풍동시험을 위해 폐쇄형 시험부에서 공력 소음 시험이 가능한 시험장치 개발 및 검증시험이 수행되었다. 고속주행조건 모사가 가능한 폐쇄형시험부에서 소음특성을 측정하기 위해, 9개의 마이크로폰 어레이 모듈을 설계/제작하여 시험부 벽면에 설치하였다. 센서가 설치될 수 없는 고정벽면을 반영한 마이크로폰 어레이 배열에 대한 연구를 수행하여, 팬터그래프 소음이 주요하게 나타나는 0.2~4kHz 이하 주파수 영역에서 소음원의 특성을 명확히 파악할 수 있도록 배열설계를 수행하였다. 또한, 시험장치의 주파수 및 풍속에 대한 특성을 파악하기 위해 표준 소음원 및 실린더 모델을 활용한 검증시험을 수행하였으며 1/2 팬터그래프 축소 모형 시험을 통하여 폐쇄형 시험부에서의 결과와 개방형에서 수행된 결과를 비교하는 연구를 수행하였다.

3. 고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 풀스케일 팬터그래프 형상 개발

1차년도에는 실험에 사용한 싱글암 타입 팬터그래프인 [그림 2-2-91]과 같은 CX팬터그래프의 도면을 바탕으로 [그림 2-2-92]와 같은 3D Full scale의 팬터그래프 전산해석모델을 제작하였다. 본 과제의 경우 팬터그래프의 하부 지지대보다는 팬헤드와 암, 그리고 암 연결부의 소음 및 공력 특성에 관심이 있기 때문에 [그림 2-2-93]과 같이 하부 커버 형상을 추가한 3D 전산해석모델을 제작하였다.

격자생성 및 공력 소음 해석에 대한 상세한 서술은 1차년도의 전산해석 수행과 동일하므로 생략하였다.

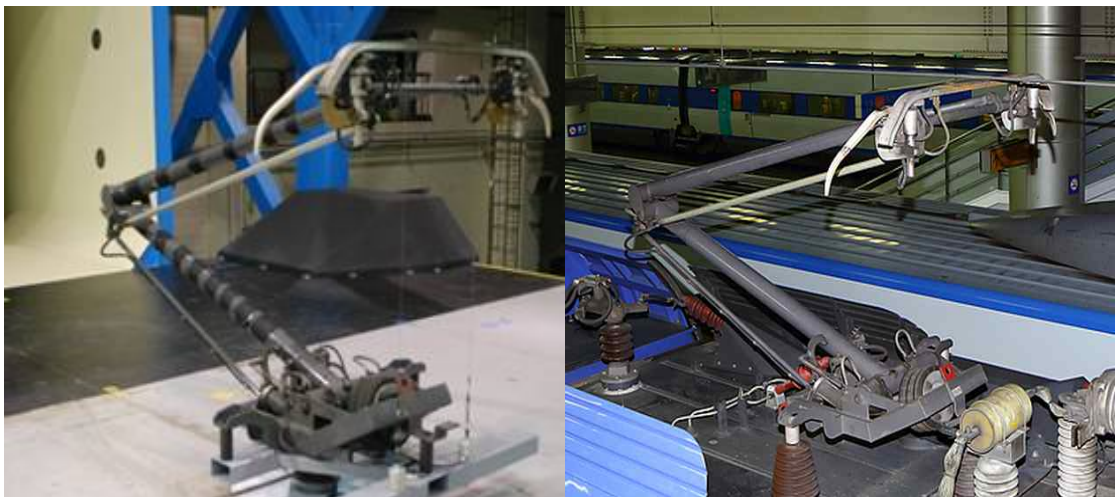


그림 2-2-91 풍동시험을 위한 팬터그래프(좌)와 열차 상부에 탑재된 실제 팬터그래프(우)

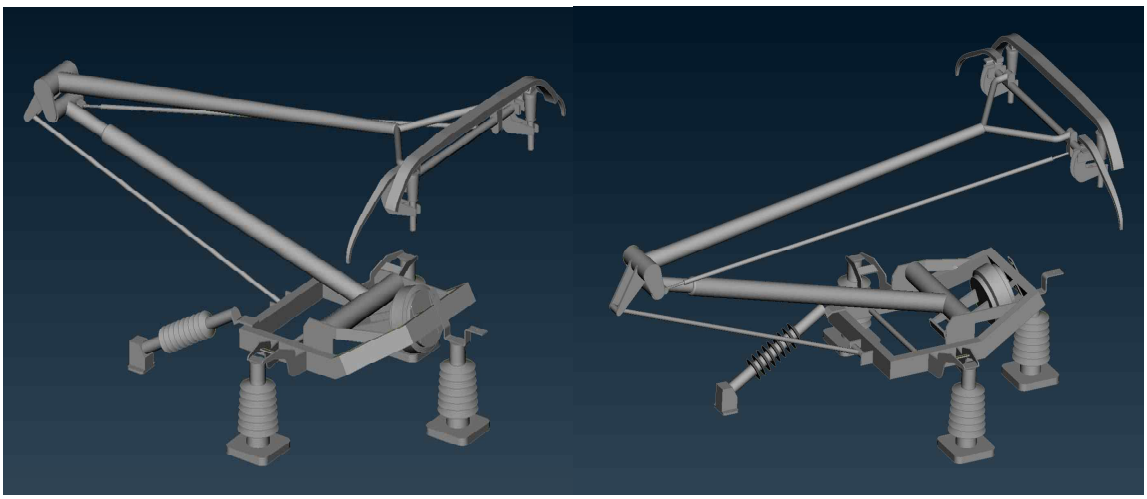


그림 2-2-92 3D 팬터그래프 형상

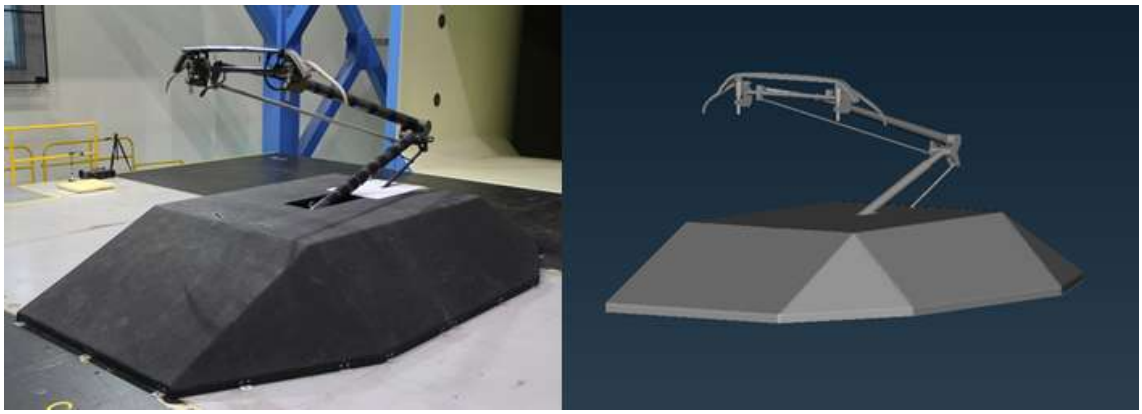


그림 2-2-93 하부 지지대에 커버를 씌운 팬터그래프 모델

가. 부재간 상호작용을 고려한 팬터그래프 최적화연구

(1) CAD프로그램을 이용한 3D full scale 팬터그래프 형상 전산해석모델 제작

1차년도에 풍동시험을 통해 주요 소음원을 분석한 결과 [그림 2-2-94]와 같이 주요 소음원이 팬헤드와 암 연결부(knee)에 집중됨을 확인 할 수 있었다.

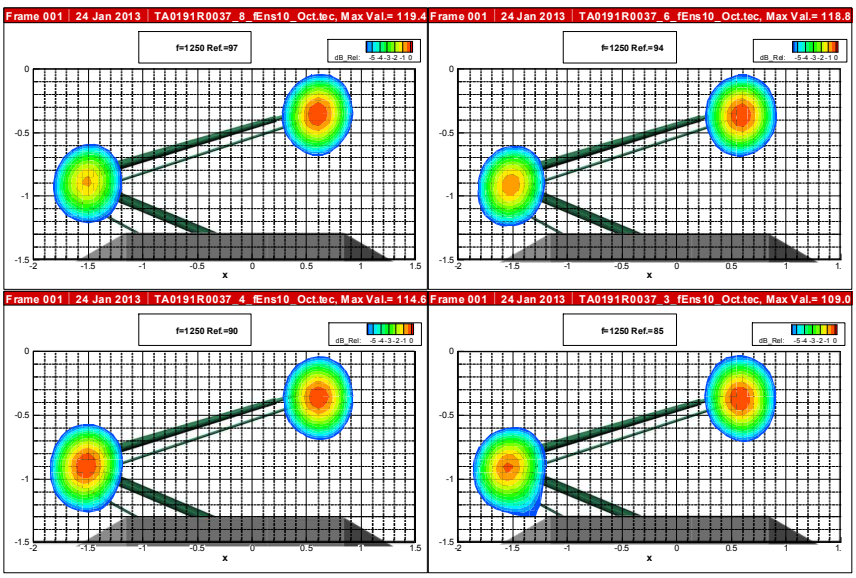


그림 2-2-94 빔포밍 분석결과 : R37(속도: 45, 40, 35, 30m/s), f = 1250Hz

1차년도에는 단면최적화와 팬헤드 부착물 실험을 통하여 팬헤드를 통한 소음 및 공력저항 저감에 대한 연구를 수행하였으므로 2차년도에는 암 연결부와 암 단면형상에 대한 최적화를 수행하였다.

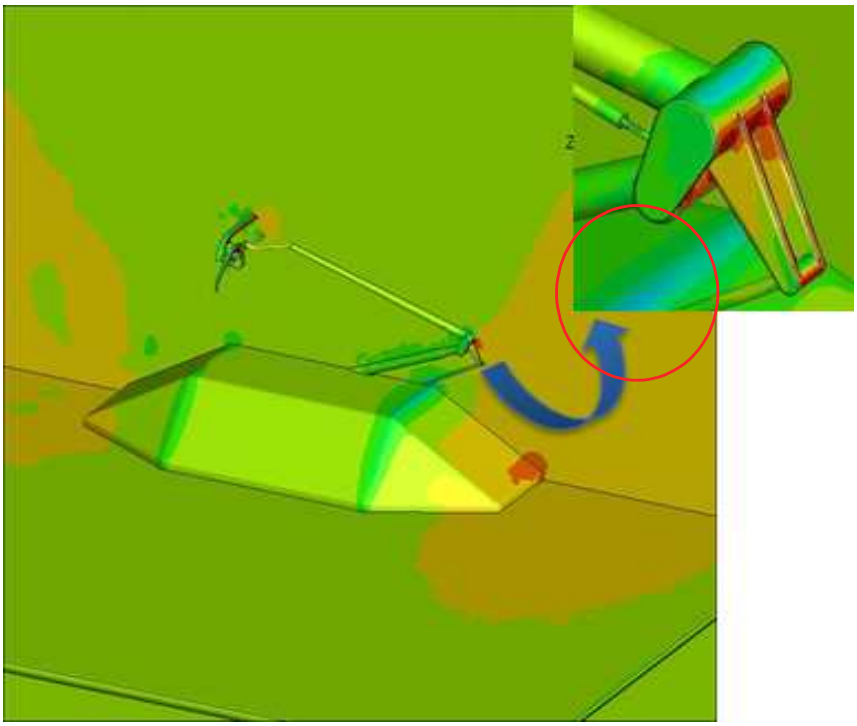


그림 2-2-95 CX 팬터그래프의 압력분포

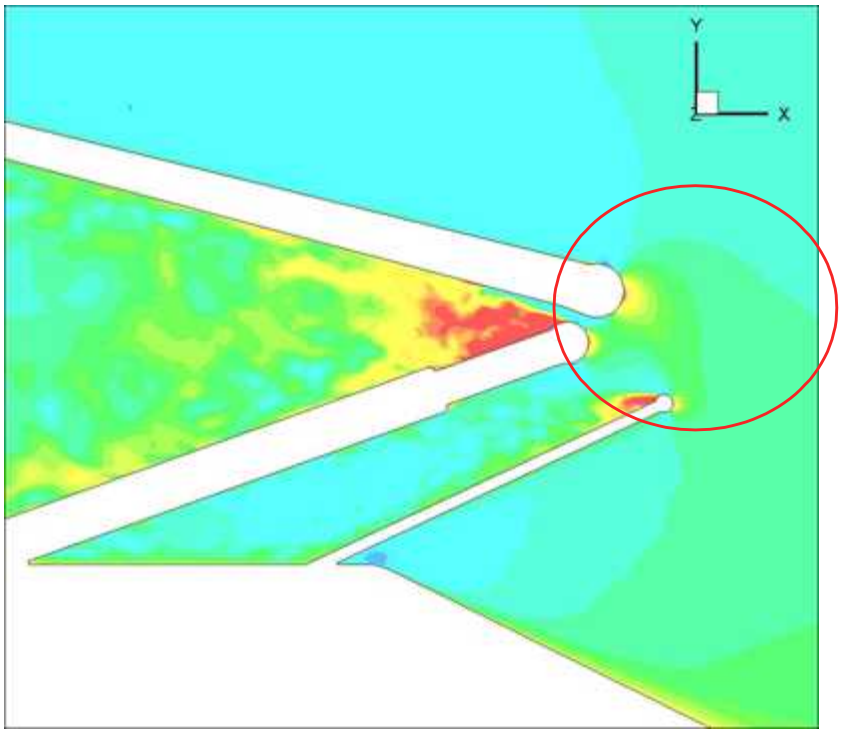


그림 2-2-96 CX 팬터그래프 암 연결부의 속도분포

[그림 2-2-95]을 보면 기존 팬터그래프의 경우 암 연결부 형상이 유동진행방향과 거의 수직으로 만나 표면에서 고압을 형성함을 확인할수 있는데 이는 팬터그래프 암의 압력저항이 크게 상승하는 요인이 된다. 또한 [그림 2-2-96]을 볼 때 연결부 틈새로 빠져나간 유동의 교란이 암 연결부 후방으로 크게 퍼져나면서 팬터그래프의 주요 소음원이

di-pole source 소음의 원인이 됨을 알 수 있다.

이를 해결하기 위해서 [그림 2-2-97], [그림 2-2-98]과 같이 암 연결부 전체를 덮을 수 있는 유선형의 캡을 설치하여 전산 모델을 제작하였다. 유선형 캡은 암 연결부의 각진 형상을 전부 덮으면서 최대한 유동진행방향에 바라보았을 때 전면적이 증가하지 않는 형태로 설계하였다.

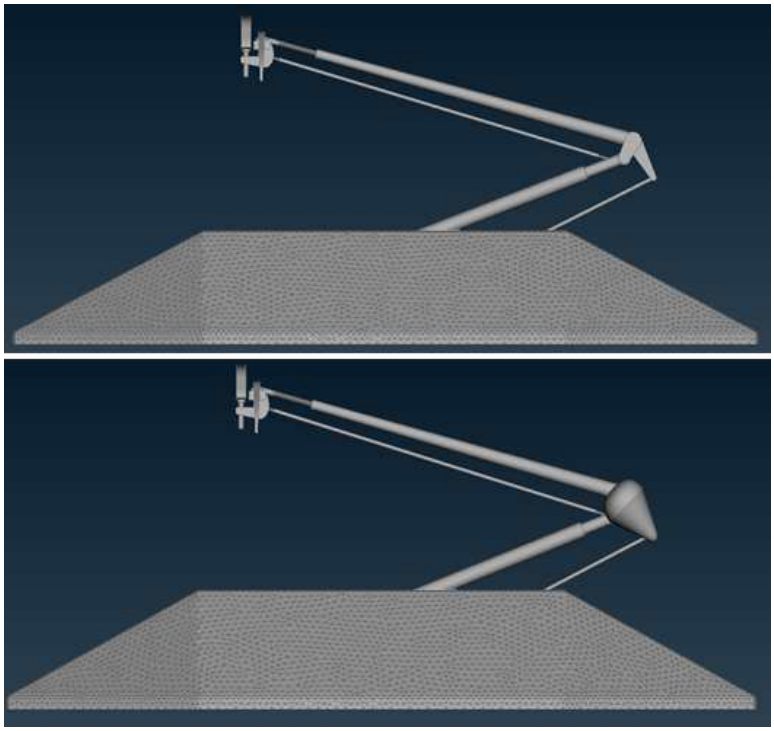


그림 2-2-97 기존 CX 팬터그래프 모델(위) / 암 연결부에 유선형 캡을 설치한 모델(아래)

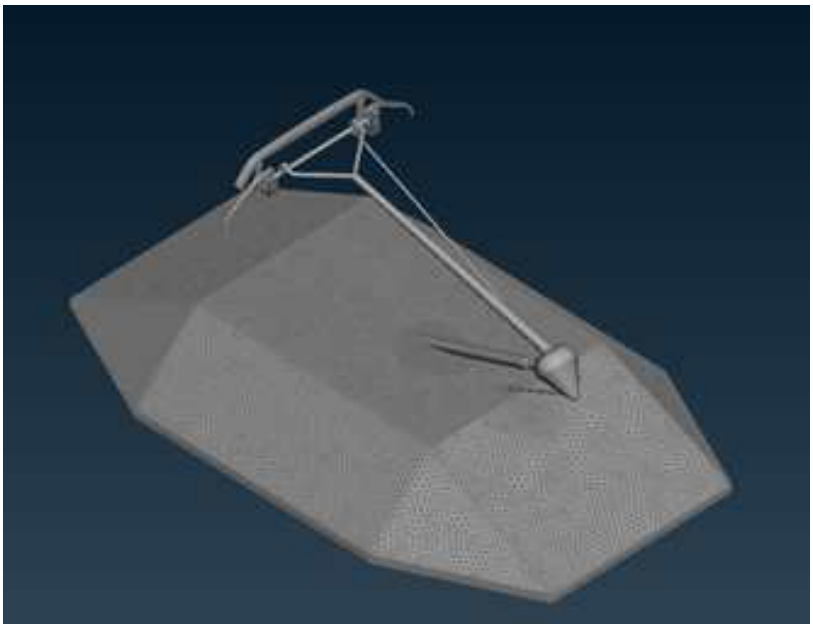


그림 2-2-98 암 연결부에 유선형 캡을 설치한 모델(등각시점)

(1) 결과 분석

수치해석은 1차년도에서 해석한 기존의 CX 팬터그래프의 전산해석 결과와 비교하기 위해서 동일한 속도대역인 30m/s, 35m/s, 40m/s, 45m/s의 4가지 속도대역에서 해석을 수행하였다.

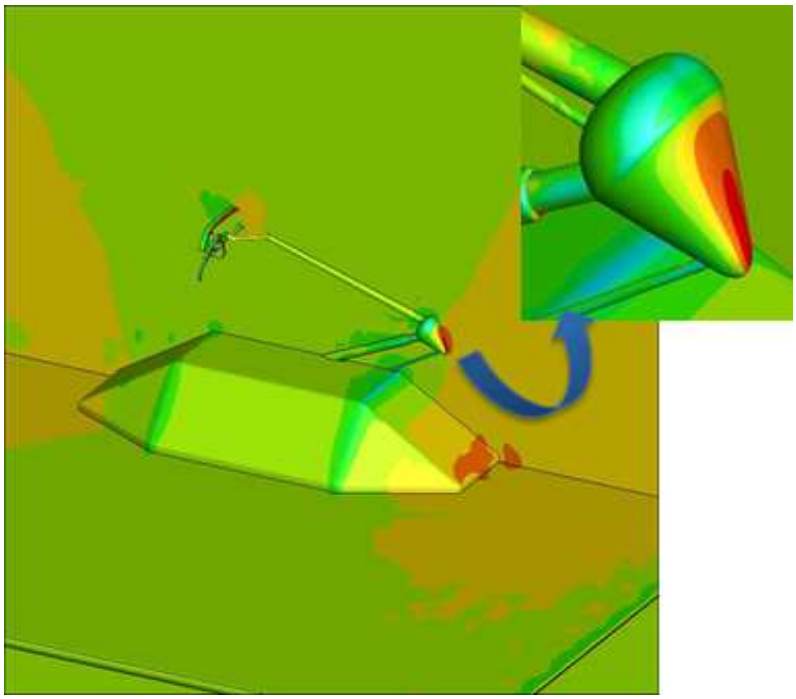


그림 2-2-99 유선형 캡을 설치한 팬터그래프의 압력분포

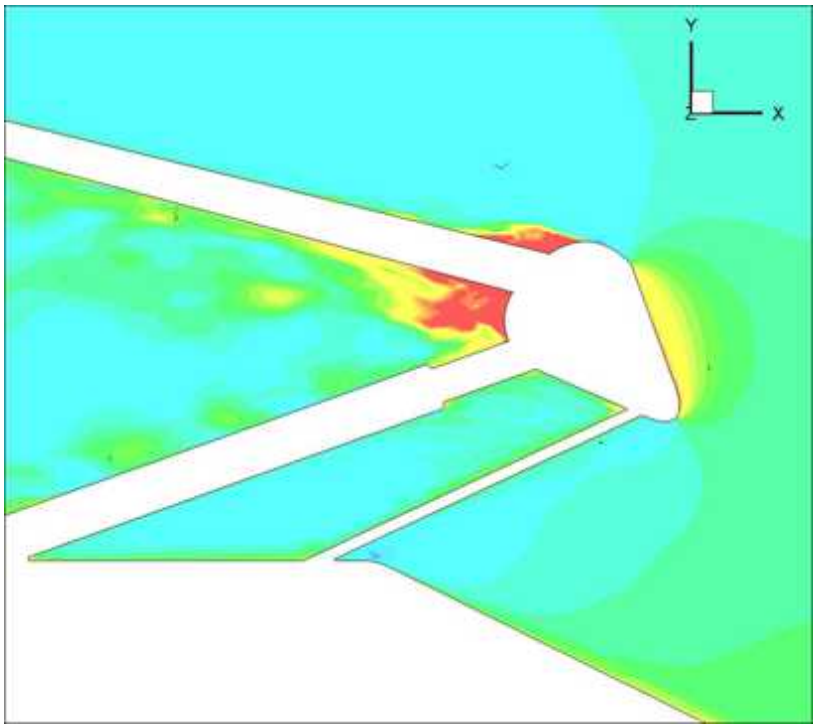


그림 2-2-100 유선형 캡을 설치한 팬터그래프 암 연결부의 속도분포

[그림 2-2-99]를 [그림 2-2-95]와 비교해보면 고압부가 형성되는 부분이 캡 설치 전보다 줄어들었으며 고압이 형성되는 면이 유동진행 방향과 평행을 이루지 않아 항력이 비교적 줄어들음 알 수 있다. 이는 [표 2-2-16]의 항력 결과에서도 볼 수 있는데 유선형 캡의 설치 후 팬터그래프 전체 항력이 최대 7.41%, 평균적으로 6.2% 가까이 감소함을 확인 할 수 있다.

또한 [그림 2-2-100]과 [그림 2-2-96]을 비교할 때 연결부 후방에 넓게 퍼져있던 유동교란 범위가 크게 줄어듬을 알 수 있다. di-pole source 소음의 소음원이 유동교란이 크게 줄었기 때문에 [표 2-2-16]에서 보듯이 각 속도대역별로 최대 1.59dB, 평균 1.54dB 가량 소음이 저감함을 확인 할 수 있다.

표 2-2-16 기존 CX 팬터그래프와 유선형 캡을 설치한 팬터그래프의 소음 및 항력 비교

inlet condition	30m/s	35m/s	40m/s	45m/s	평균
CX 팬터그래프 Drag(N)	92.19	126.40	165.07	200.61	-
캡 설치 후 Drag(N)	88.06	118.78	153.84	185.74	-
$\Delta(\%)$	4.48	6.03	6.80	7.41	-
CX 팬터그래프 Noise(dB)	73.32	77.78	82.22	84.47	-
캡 설치 후 Noise(dB)	71.79	76.27	80.63	82.95	-
Δ(dB)	1.53	1.51	1.59	1.52	1.54

나. 전산해석을 통한 저소음/저저항 팬터그래프 암 최적화 설계

(1) 암 단면형상 최적화

암 연결부에 유선형 캡을 설치한 후 추가적으로 암 형상에서 소음 및 저항을 저감하기 위해서 1차년도에 수행한 최적화 단면을 통해 팬터그래프 암 단면의 최적화를 수행하였다.

최적형상 설계를 위해서 본 연구에서는 설계 목적함수를 C_d 및 $\frac{dC_l}{d\alpha}$의 최소화로 선정하

였다. 이를 통하여 공력 소음을 줄임과 동시에 설계의 강건성을 확보하고자 하였다. 본 연구에서는 그림 2-2-101과 같이 유선형이고 위아래가 대칭인 설계 형상을 선정하였으며, 이 형상을 정의하기 위해 4개의 설계 변수를 선정하였다. 설계 변수들을 고려한 형상 함수는 다음의 식 (1)과 같다.

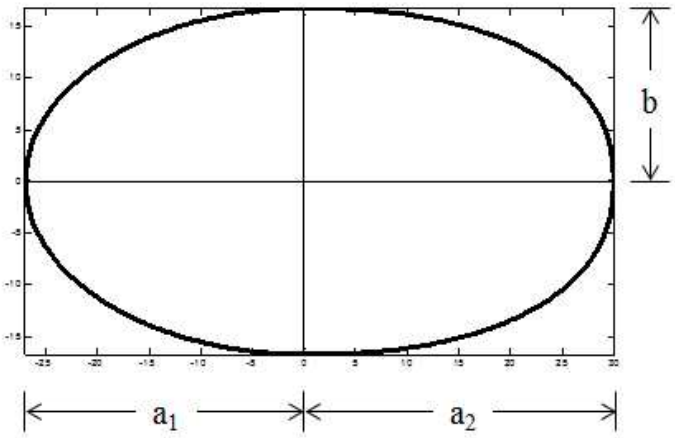


그림 2-2-101 단면의 설계변수 정의

$$(\frac{x}{a_1})^n + (\frac{y}{b})^n = 1, \ (x < 0) \qquad (1)$$

$$(\frac{x}{a_2})^m + (\frac{y}{b})^m = 1, \ (x > 0)$$

이때 각각의 설계 변수의 설계 범위는 식 (2)와 같이 정의하였다. 이 때 2b는 25mm이다.

$$17.5 \le a_1 \le 50, \ 17.5 \le a_2 \le 50 \qquad (2)$$

$$1.5 \le n \le 3.5, \ 1.5 \le m \le 3.5$$

본 과제에서는 실험계획법(Design of Experiment)으로 Latin Hypercube Sampling을 수행하였고 근사모델로는 kriging모델을 사용하였으며, GA를 이용한 최적화 작업을 반복 수행하였다. 최적화를 통해 [그림 2-2-103]와 같은 파레토를 구하였다.

[그림 2-2-102]를 보면 고속열차 주변의 유동을 살펴보면 평지에는 난류강도가 심하지 않지만 터널 내부로 들어가게 되면 터널 벽면쪽에서 강한 난류가 발생하고 팬터그래프 영역으로 가서는 비정상 유동이 강하게 발생한다. 이러한 강한 교란은 팬터그래프의 접촉력을 저해하는 요소가 되며, 터널이 많은 국내에서는 반드시 고려되어야 한다. 실제로 국내에서의 이선아크를 보면 개활지 대비 터널에서 더 많이 발생하고 있으며, 철기연의 팬터그래프 접촉력 결과를 보더라도 터널에서 접촉력 표준편차 더 커짐을 확인할 수 있었다. 따라서 팬터그래프의 암의 단면형상을 선정할 때에 외란에 강건한 형상 그룹 중에서 최적 암 단면 형상을 선택하였고 그 결과는 [그림 2-2-104]과 같다.

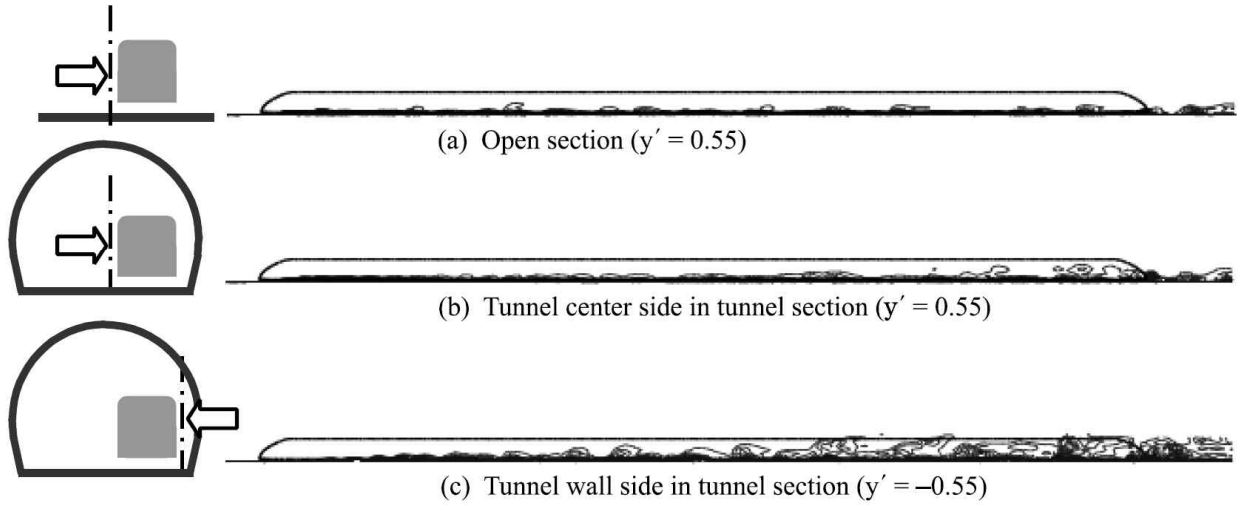


그림 2-2-102 터널내외부에서 고속열차 주변의 속도 분포

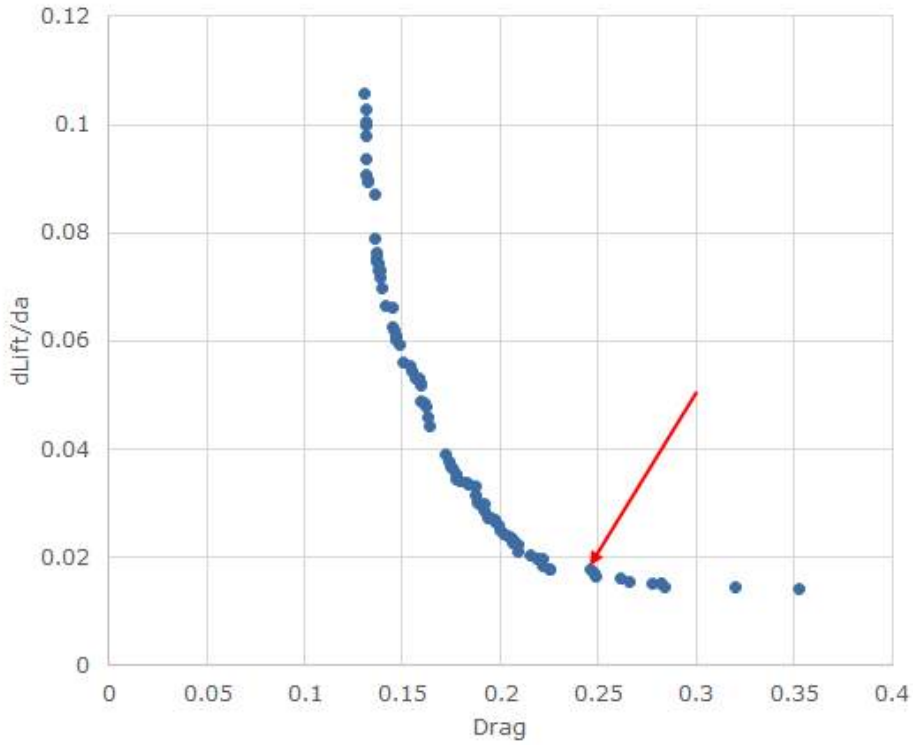


그림 2-2-103 Pareto solution

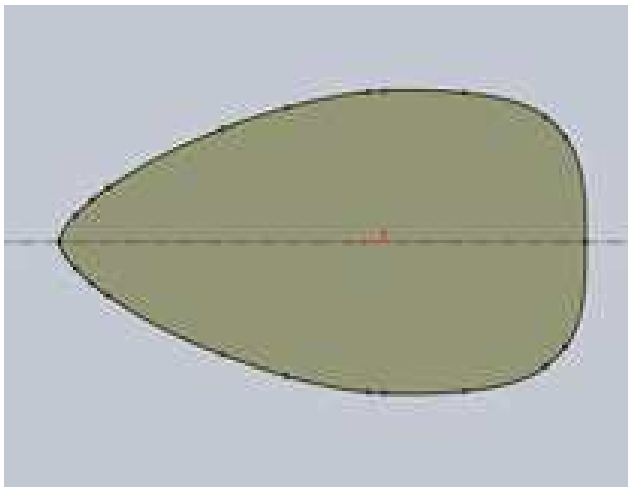


그림 2-2-104 최적화 암 단면형상

(2) CAD프로그램을 이용한 3D full scale 팬터그래프 형상 제작 및 격자 생성

위의 최적화 과정을 통해 구한 최적화 암 단면형상을 CAD 프로그램을 통해 앞서 설계한 유선형 캡을 적용한 CX 팬터그래프 3D 모델에 [그림 2-2-105]와 같이 적용하였다. 암 단면형상은 유동진행방향에서 바라보았을 때 전면적이 증가하지 않도록 폭을 기존 팬터그래프 암과 동일하게 설계하였다.

위와 같이 완성한 3D CAD 데이터는 이전 모델들과 마찬가지로 격자생성 프로그램인 Gambit과 ANSA를 이용해 표면격자를 완성하고 경계층 내에 20층 이상의 격자가 쌓이도록 Tgrid를 통해 Prism을 만든 후 격자를 생성하였다. 완성된 공간격자는 이전 해석결과들과 비교 검증을 위해 격자의 조밀성과 수를 유지하도록 하였다.

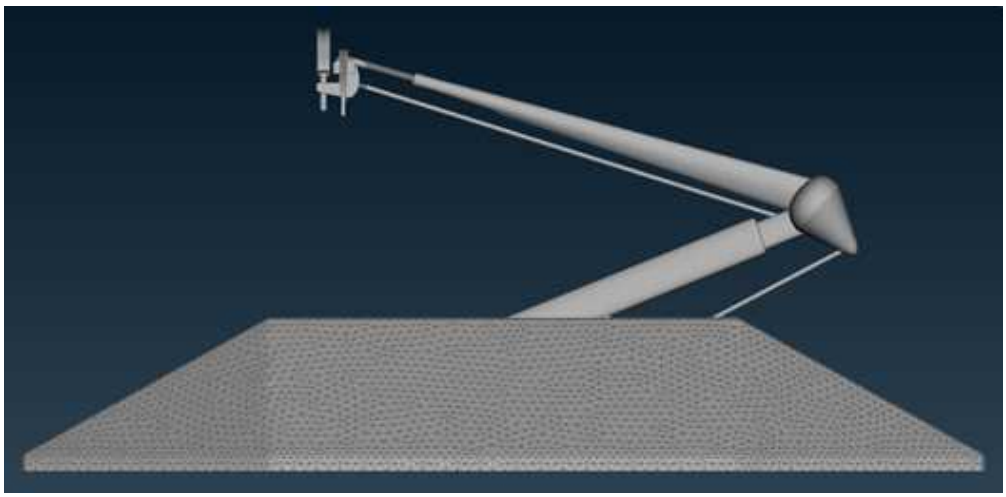


그림 2-2-105(a) 최적화 암 단면형상을 적용한 팬터그래프 모델

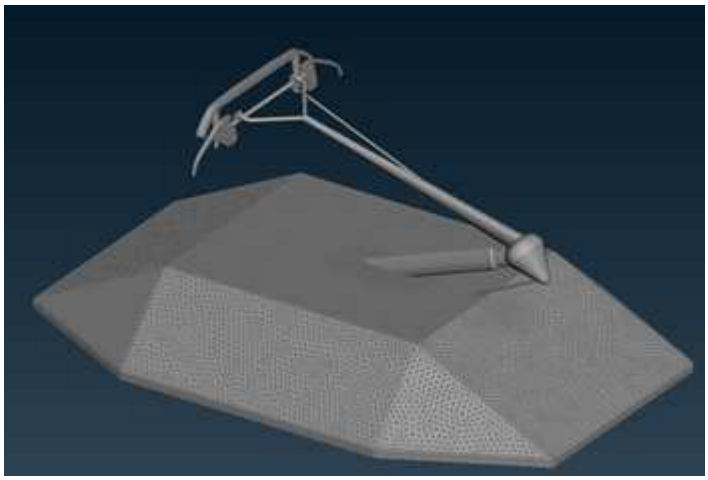


그림 2-2-105(b) 최적화 암 단면형상을 적용한 팬터그래프 모델

(3) 결과 분석

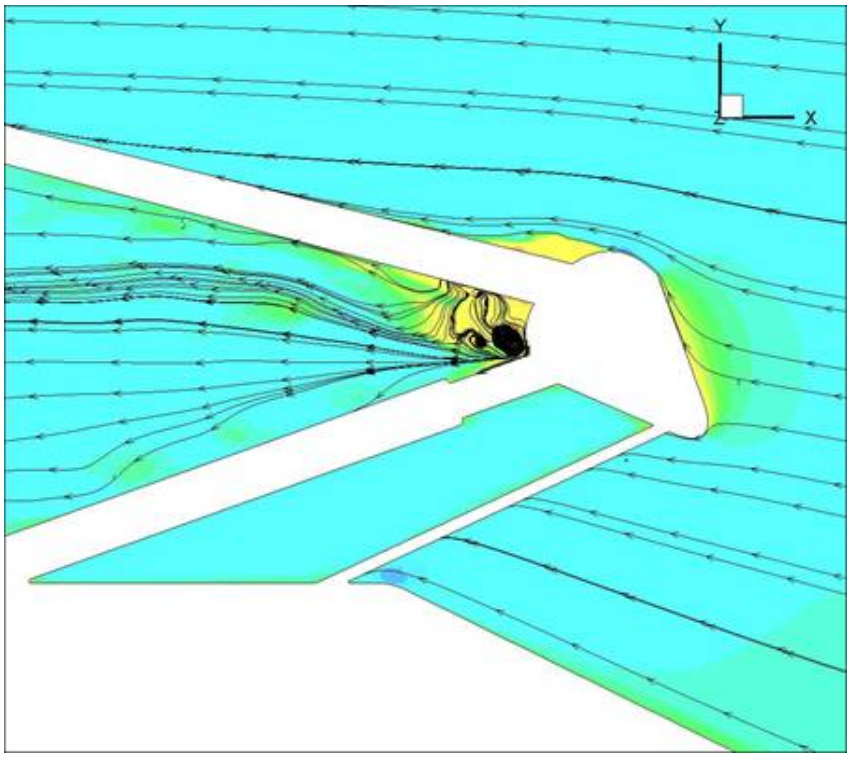


그림 2-2-106(a) 유선형 캡 팬터그래프(좌)의 속도 분포 및 유선

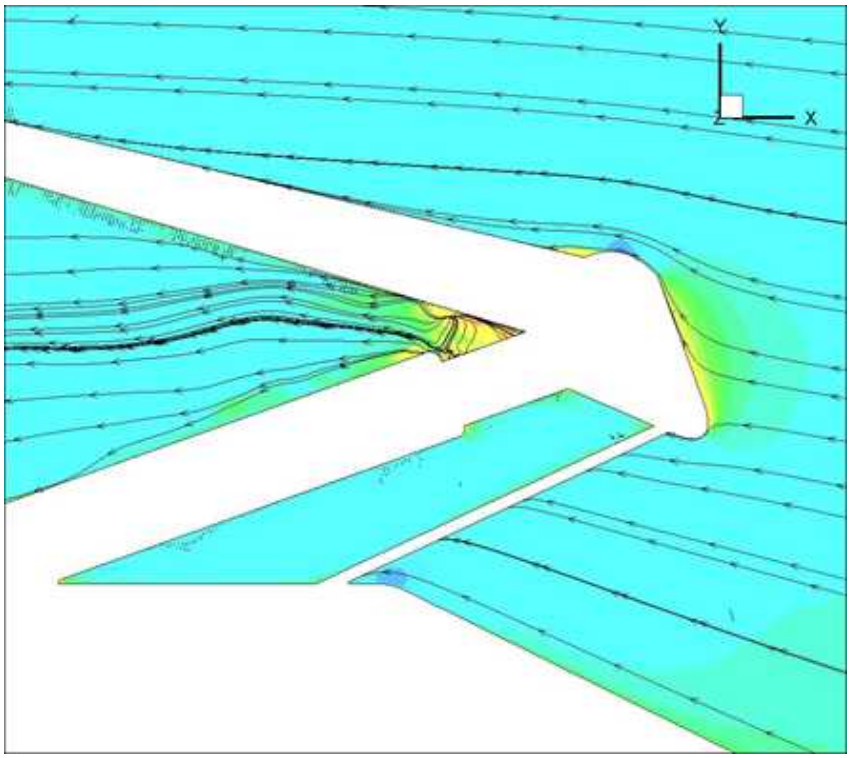


그림 2-2-106(b) 최적화 암 단면 적용 팬터그래프(우)의 속도 분포 및 유선

수치해석은 이전 해석들과 마찬가지로 1차년도에서 해석한 기존의 CX 팬터그래프의 전산해석 결과와 비교하기 위해서 동일한 속도대역인 30m/s, 35m/s, 40m/s, 45m/s의 4가지 속도대역에서 해석을 수행하였다. [2-2-106]를 살펴보면 최적화 암 단면을 적용하기 전후를 비교할 때 최적 암단면 적용 모델이 유선이 복잡하지 않고 암에서 떨어지는 유동 교란이 적음을 확인할 수 있다. 이는 [표 2-2-17]의 항력 및 소음 결과값을 통해서도 알 수 있다. 항력의 경우 최적 암단면을 적용하기 전보다 최대 4.28%, 평균 4.0% 저감한 것을 알 수 있으면 소음의 경우에도 이전 결과와 비교할 때 최대 1.68dB, 평균 1.63dB 감소함을 알 수 있다.

이는 최초 형상인 기존 CX 팬터그래프와 비교하였을 때 암 형상 최적 설계안을 통하여 소음은 총 3.17dB(Sound Pressure 30.6% 저감), 항력은 10.0% 저감한 것이다.

표 2-2-17 유선형 캡 팬터그래프와 최적화 암 단면을 적용한 팬터그래프의 소음 및 항력 비교

inlet condition	30m/s	35m/s	40m/s	45m/s	평균
캡 설치 후 Drag(N)	88.06	118.78	153.84	185.74	-
암 최적단면 후 Drag(N)	84.29	113.91	148.04	178.65	-
Δ(%)	4.28	4.10	3.77	3.82	-
캡 설치 후 Noise(dB)	71.79	76.27	80.63	82.95	-
암 최적단면 후 Noise(dB)	70.2	74.61	79.03	81.27	-
Δ(dB)	1.59	1.66	1.60	1.68	1.63

다. 전산해석을 통한 최적화된 팬터그래프 형상 소음 평가 및 검증

(1) 팬 헤드 단면형상 선정

2차년도에 수행한 암 연결부와 암 단면 최적화를 통해 최적화한 암 형상에 1차년도에 구한 팬헤드 단면형상을 적용하여 최적화된 Full-scale 싱글 암 타입 팬터그래프의 공력 소음 평가 및 검증을 수행하였다. 최적화 과정은 암 단면형상의 최적화 과정과 동일하며 팬헤드 형상의 경우 교란에 대한 안정성과 공력 소음 및 저항 모두 중요하므로 [그림 2-2-103]의 파레토에서 2개의 목적함수에 동일한 가중치를 가지는 [그림 2-2-107]과 같은 단면을 선정하였다.

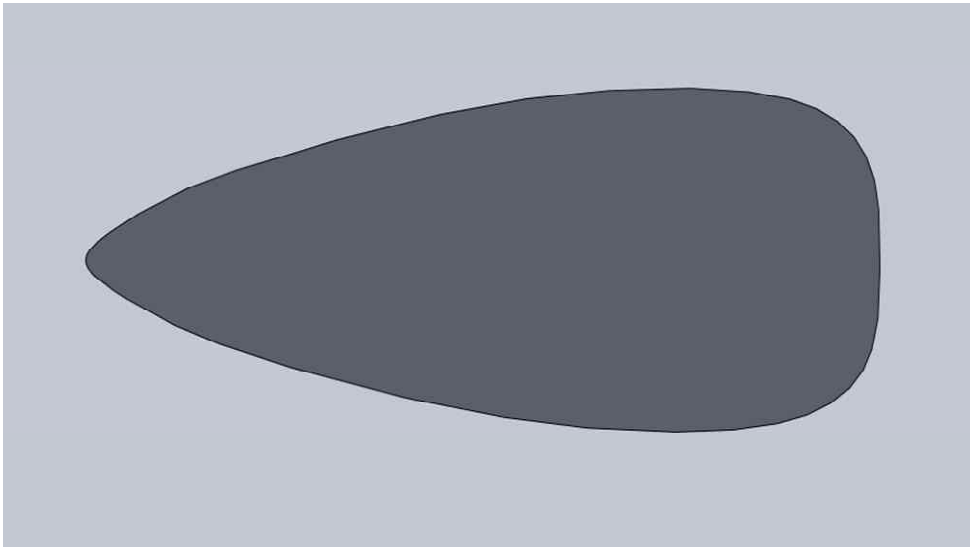


그림 2-2-107 최적화된 팬헤드 단면형상

(2) CAD프로그램을 이용한 3D full scale 팬터그래프 형상 제작

팬터그래프의 팬헤드의 경우 가장 중요한 기능은 전력공급이므로 최소한의 접전 면적이 보장되어야 한다. 때문에 앞서 구한 최적화 단면형상을 [그림 2-2-108]과 같이 고려하여야 한다.

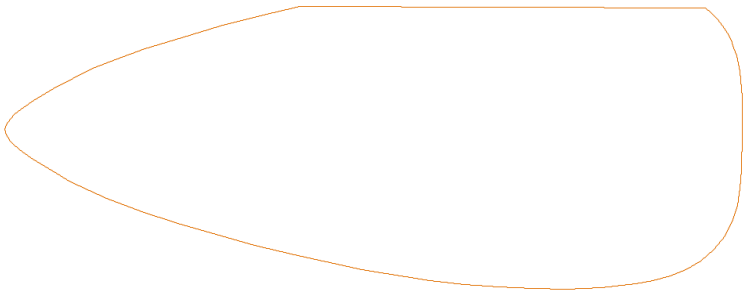


그림 2-2-108 접전 면적을 고려한 최적화 팬헤드 단면

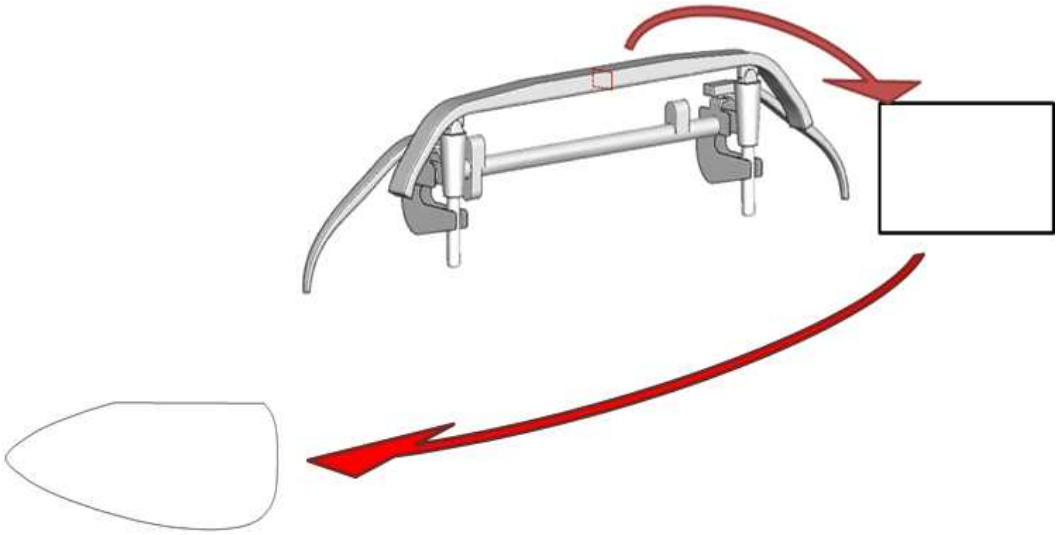


그림 2-2-109 팬헤드 단면 형상

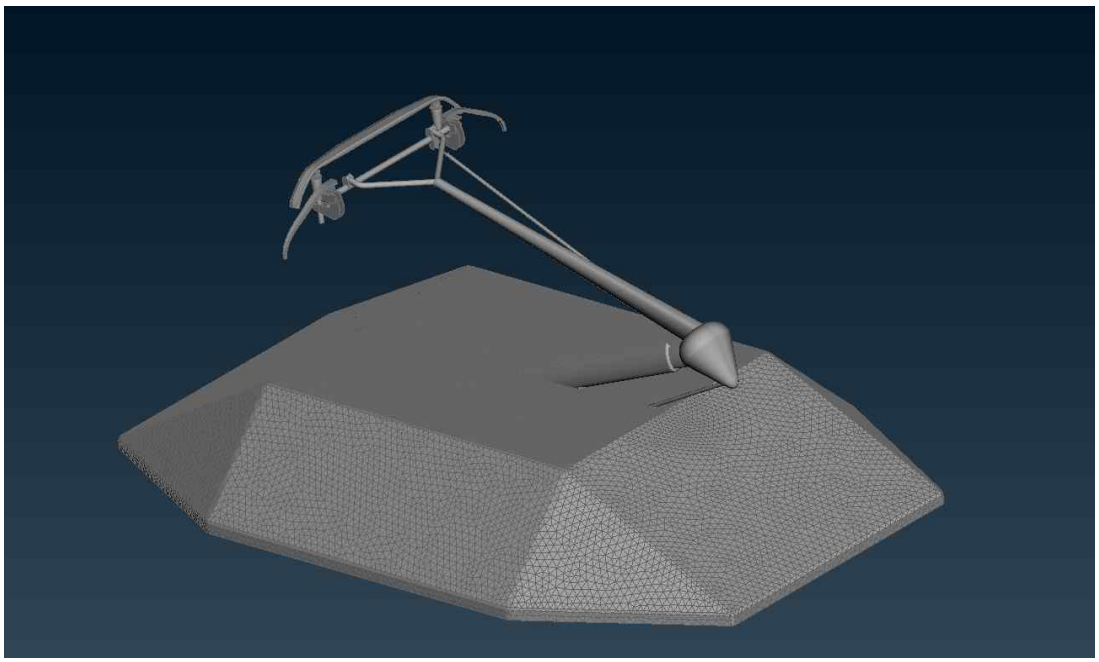


그림 2-2-110 최적화 팬헤드 단면을 적용한 팬터그래프 모델

이렇게 설계된 최적화 팬헤드 단면은 [그림 2-2-109]과 같이 기존의 직사각형인 팬헤드에 적용하여 [그림 2-2-110]와 같이 설계되었다.
이전 모델들과 마찬가지로 완성한 3D CAD 데이터는 격자생성 프로그램인 Gambti과 ANSA를 이용해 표면격자를 완성하고 경계층 내에 20층 이상의 격자가 쌓이도록 Tgrid를 통해 Prism을 만든 후 격자를 생성하였다. 완성된 공간격자는 이전 해석결과들과 비교 검증을 위해 격자의 조밀성과 수를 유지하도록 하였다.

(3) Air jet 타입 팬헤드와 성능비교

기존의 저소음 저저항 팬터그래프 연구들 중에서 팬헤드 형상을 변경하지 않고 [그림 4-21]과 같이 팬헤드에 노즐과 같이 구멍을 뚫어 유동을 뒤로 쏘아 팬헤드 후방의 볼텍스를 밀어내고 항력과 소음을 저감하는 Air jet 타입 팬헤드에 대한 연구가 있다. 본 연구에서 설계한 팬헤드 형상과 Air jet타입의 팬헤드 형상의 성능을 비교하기 위해서 [그림 4-22]과 같이 Air-jet타입의 팬헤드를 모사하여 전산해석을 수행하였다.

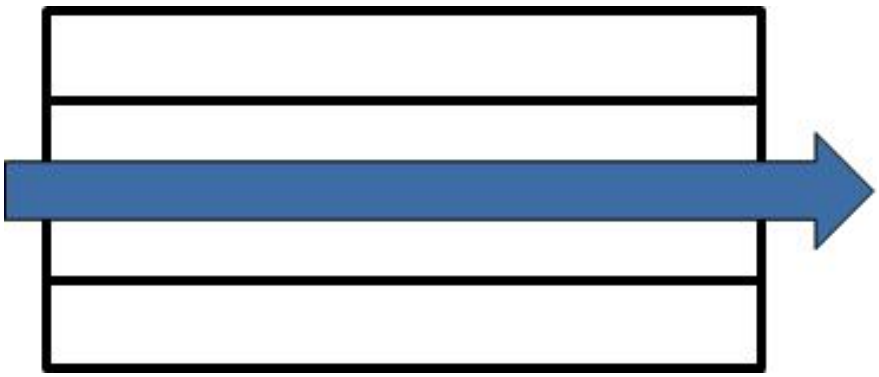


그림 2-2-111 Air-jet 타입 팬헤드 개요



그림 2-2-112 Air-jet 타입 팬헤드 전산해석 모사

(4) 결과 분석

수치해석은 이전 해석들과 마찬가지로 1차년도에서 해석한 기존의 CX 팬터그래프의 전산해석 결과와 비교하기 위해서 동일한 속도대역인 30m/s, 35m/s, 40m/s, 45m/s의 4가지 속도대역에서 해석을 수행하였으며 Air jet 타입의 팬헤드는 45m/s 속도대역에서만 해석을 수행하였다.

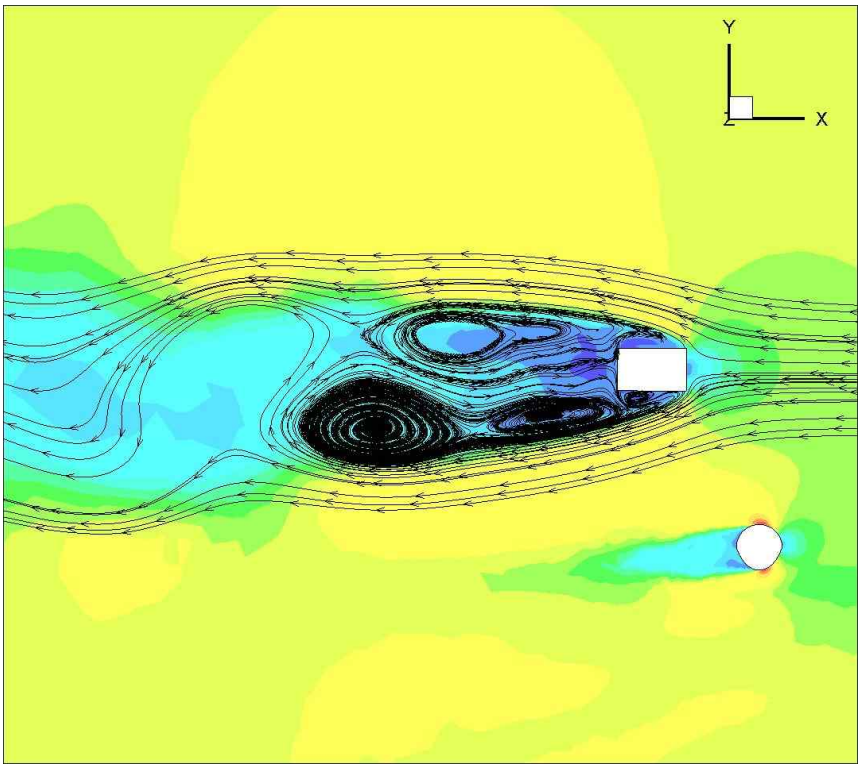


그림 2-2-114 기존 팬헤드 형상 팬터그래프의 속도분포 및 유선

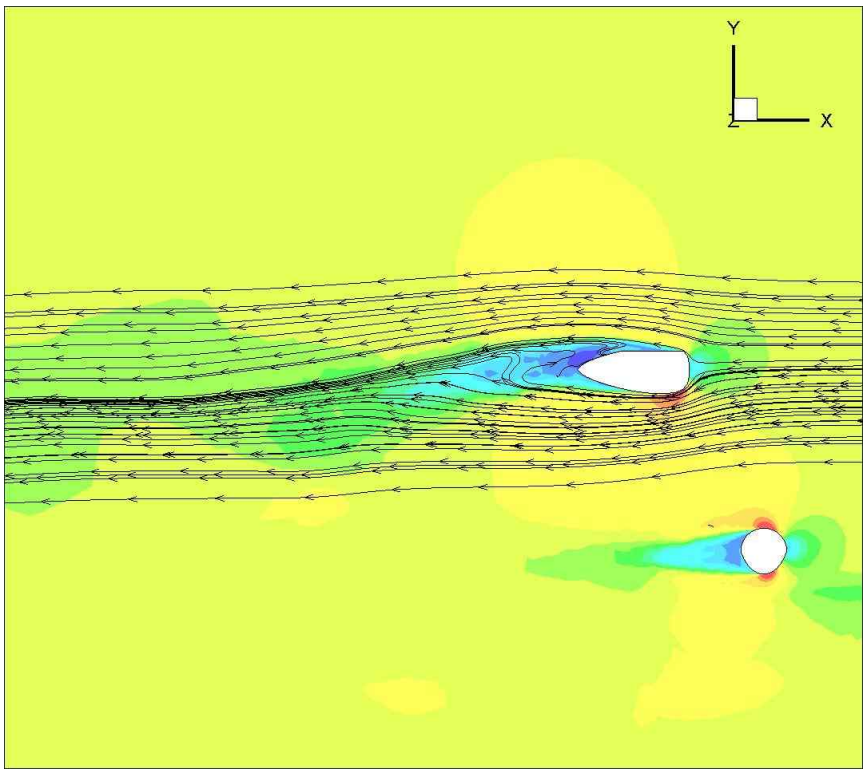


그림 2-2-115 최적화 팬헤드 형상 팬터그래프의 속도분포 및 유선

[그림 2-2-114]과 [그림 2-2-115]를 살펴보면 기존의 사각주형태의 팬터그래프 팬헤드는 유동의 교란이 후방으로 넓게 퍼져 나가며 동시에 팬헤드 바로 뒤에서 와류영역이 크게 형성됨을 확인 할 수 있다. 반면에 최적단면을 적용한 팬헤드 주변의 유동을 살펴보면 유동교란이 기존 팬헤드에 비해서 좁게 전파되며 팬헤드 후방의 와류영역도 기존 팬헤드에 비해서 거의 형성되지 않음을 확인 할 수 있다. 이는 와류에 의한 소음발생이 저감됨을 예측할 수 있으며 전후방 압력차이에 의한 항력이 저감됨도 예측할 수 있다. 이는 [표 2-2-18]의 항력 및 소음 결과값을 통해서도 알 수 있다. 항력의 경우 최적 팬헤드 단면을 적용하기 전보다 최대 18.5%, 평균 17.41% 저감한 것을 알 수 있으면 소음의 경우에도 이전 결과와 비교할 때 최대 3.38dB, 평균 3.33dB 감소함을 알 수 있다.

이는 최초 형상인 기존 CX 팬터그래프와 비교하였을 때 최적화된 팬터그래프 형상 설계를 통하여 소음은 총 6.5dB(Sound Pressure 52.7% 저감), 항력은 25.61% 저감한 것이다.

표 2-2-18 암 최적단면 적용 후 팬터그래프와 최적화 팬헤드를 적용한 팬터그래프의 소음 및 항력

inlet condition	30m/s	35m/s	40m/s	45m/s	평균
암 최적단면 후 Drag(N)	84.29	113.91	148.04	178.65	-
팬헤드 최적단면 후 Drag(N)	68.7	96	121.44	147.47	-
Δ(%)	18.50	15.72	17.97	17.45	17.41
암 최적단면 후 Noise(dB)	70.2	74.61	79.03	81.27	-
팬헤드 최적단면 후 Noise(dB)	66.93	71.32	75.65	77.91	-
Δ(dB)	3.27	3.29	3.38	3.36	3.33

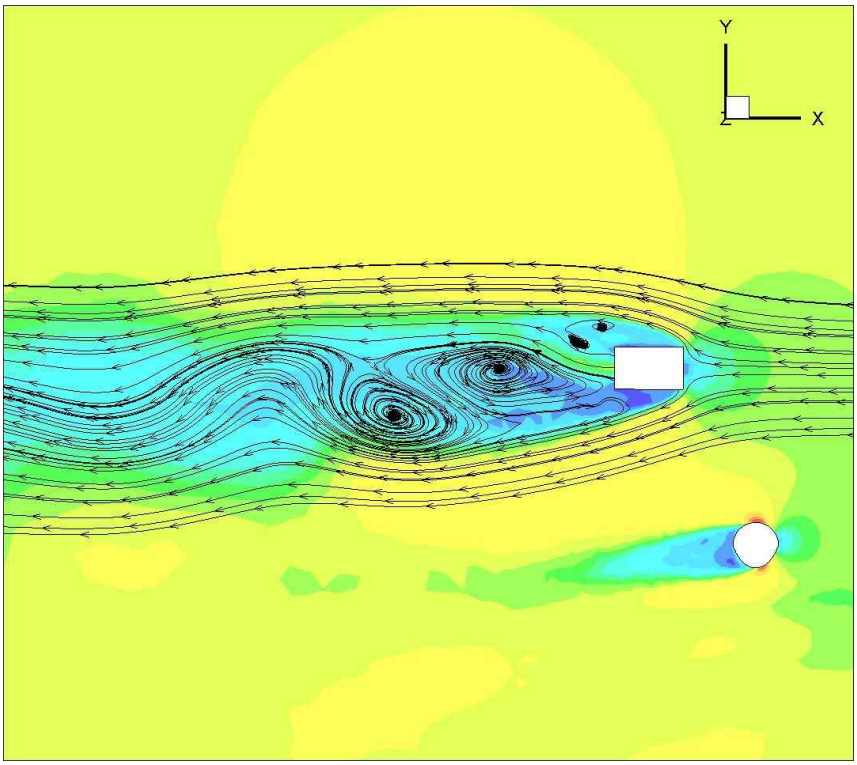


그림 2-2-116 Air jet 팬헤드 형상 팬터그래프의 속도분포 및 유선

표 2-2-19 기존 팬헤드와 Air jet 팬헤드, 최적화 단면 팬헤드의 항력 및 소음 비교

Panhead Type	기존 팬헤드	Air jet 팬헤드	최적화 단면 팬헤드
Drag(N)	178.65	174.13	147.47
Noise(dB)	82.27	81.04	77.91

기존의 저소음 저저항 팬터그래프 연구방법이 Air Jet을 모사한 팬터그래프의 경우에는 [그림 2-2-116]과 같이 기존 사각주 팬헤드에 비해서는 와류영역도 적고 유동교란도 좁게 전파되지만 최적 팬헤드 단면 형상에 비해서는 효과가 덜함을 확인할 수 있다. 이는 표2-2-19의 기존 팬헤드와 Air jet 팬헤드, 최적 단면 팬헤드의 항력 및 소음을 비교한 표에서도 확인 할 수 있다.

(5) 결론

1차년도에는 팬헤드 단면형상에 대한 최적화를 수행하였고 풍동실험을 통해 팬헤드를 통해 최대 4dB 가까이 싱글 암 팬터그래프의 소음을 저감할 수 있었다. 그러나 RTRI 풍동 실험결과를 통해서 환산한 결과 기존 KTX 수준으로 소음을 유지하기 위해서는 추가

로 소음저감이 필요하다. 따라서 당해연도에는 팬헤드 외에 암 연결부와 암 단면형상과 같은 팬터그래프 암 형상에 대한 저저항 저소음 설계를 진행하였다. 주요 소음원 중 하나인 암 연결부에는 유선형 캡을 설치하여 Full-scale 싱글 암 타입 팬터그래프 모델을 설계한 후 전산해석을 수행한 결과 각 속도대역별로 평균 1.54dB만큼 소음이 저감함을 확인하였고 항력의 경우에도 평균 6.18% 저감함을 확인하였다. 유선형 캡을 설치한 Full-scale 싱글 암 타입 팬터그래프 모델에 1차년도에 최적화를 수행한 단면형상을 암 단면에 적용하여 설계한 후 전산해석을 수행한 결과 각 속도대역별로 평균 1.63dB가 저감함을 확인하였고 항력의 경우 평균 3.9% 저감함을 확인하였으면 최초 형상인 기존 싱글 암 타입 모델과 비교하였을 때에는 소음은 3.17dB, 항력은 10.0% 저감함을 확인하였다. 유선형 캡과 암의 최적단면의 적용한 모델에 팬헤드 단면형상을 최적화한 최종 Full-scale 싱글 암 타입 팬터그래프 형상(그림 4-27)의 전산해석을 수행한 결과 소음은 평균 3.33dB 저감함을 확인하였고 항력의 경우 평균 17.4% 감소함을 확인하였다. 최초 형상인 기존 싱글 암타입 모델과 비교하였을 때에는 소음은 6.5dB, 항력은 25.61% 저감함을 확인하였다.

이렇게 최종적으로 나온 설계안을 실제 350km/h로 운행하였을 때 어떠한 공력 특성을 가지는지 확인하기 위해서 280km/h에서 해석을 추가로 진행하였다. 열차상층부의 유속은 1차년도의 연구결과 6량 열차를 기준으로 열차진행속도의 80%에 해당하므로 350km/h로 운행되는 6량 열차에서 팬터그래프가 받는 유속은 280km/h에 해당한다. [표 2-2-20]를 살펴보면 280km/h 조건에 항력은 25.5% 감소하며 소음은 6.5dB 저감함을 알 수 있다. [그림 2-2-117]는 최초 모델인 CX 팬터그래프와 최적 팬터그래프의 속도별 항력이고 [그림 2-2-118]는 Log scale 속도 별 소음에 대한 그래프이다. 각각 2차 다항식 추세선과 선형 추세선을 그렸을 때 경향성이 거의 일치하므로 유의미한 해석 결과라고 볼 수 있다.

이는 RTRI 풍동실험 결과와 1차년도 연구결과를 통해서 예측했던 기존 KTX의 운행속도에서의 팬터그래프 소음에 도달하기 위해 필요한 소음저감 크기와 거의 일치한다. 3차년도에 full-scale의 최적 팬터그래프 모델 제작 시까지 암 형상과 팬헤드 형상에 대한 추가적인 연구와 케이블 및 하부 커버와 같은 부가적인 요소들에 대한 연구를 진행하면 실 제작된 최적 팬터그래프 모델에서 원하는 목표에 도달할 수 있을 것으로 판단된다.

추가로 [표 2-2-21]에서 최종 팬터그래프의 양력을 기존 팬터그래프와 비교할 때 팬헤드 형상의 변화로 인해서 양력이 아래쪽으로 작용함을 알 수 있다. 따라서 최종 팬터그래프 형상에서 최대 접촉력이 기존 팬터그래프에 비해서 줄어듬을 예측할 수 있다.

표 2-2-20 기존 CX 팬터그래프와 최종 최적 팬터그래프의 소음 및 항력 비교

inlet condition	30m/s	35m/s	40m/s	45m/s	280km/h
CX 팬터그래프 Drag(N)	92.19	126.40	165.07	200.61	620.02
팬헤드 최적단면 후 Drag(N)	68.7	96	121.44	147.47	461.91
Δ(%)	25.48	24.05	26.43	26.49	25.50
CX 팬터그래프 Noise(dB)	73.32	77.78	82.22	84.47	108.7
팬헤드 최적단면 후 Noise(dB)	66.93	71.32	75.65	77.91	102.2
Δ(dB)	6.39	6.46	6.57	6.56	6.5

표 2-2-21 기존 팬터그래프와 최종 팬터그래프의 양력변화 (유속 45m/s)

inlet condition	기존 팬터그래프	최종 팬터그래프
팬터그래프 Lift(N)	17.44	-39.8

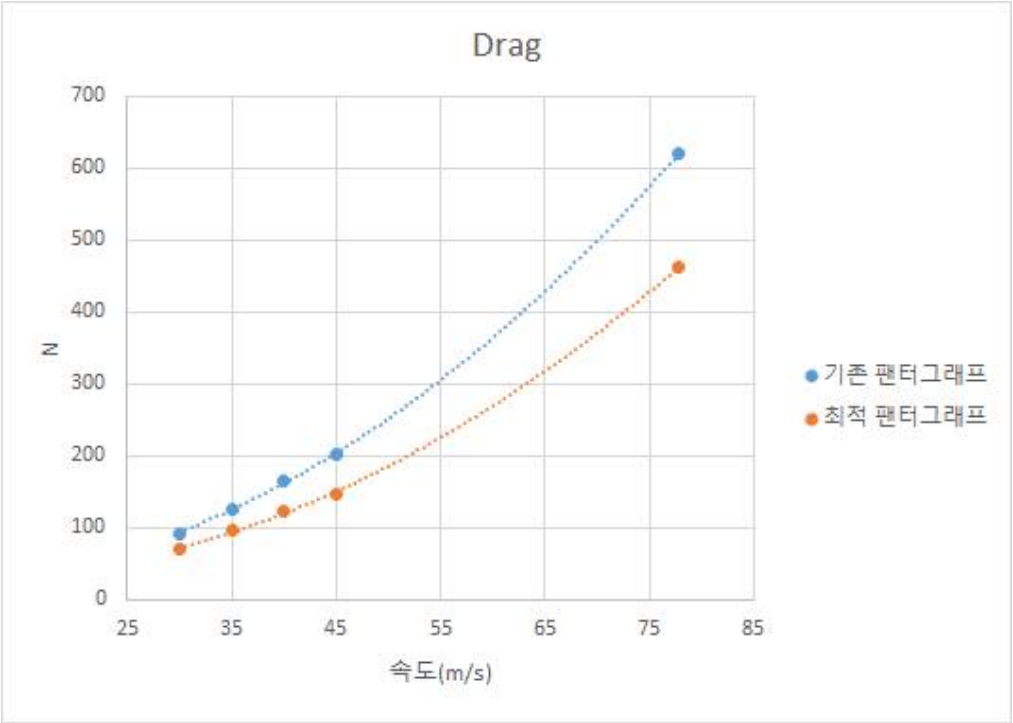


그림 2-2-117 기존 팬터그래프와 최적 팬터그래프 항력 비교

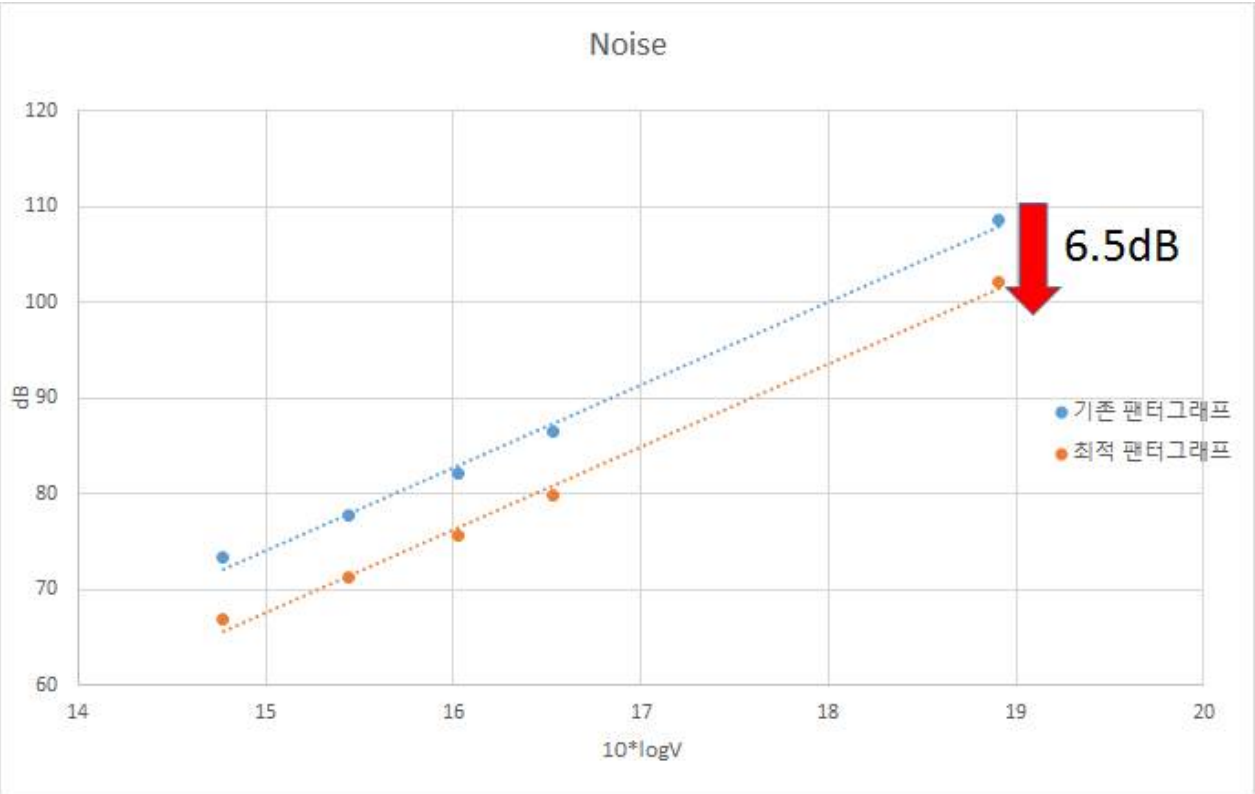


그림 2-2-118 기존 팬터그래프와 최적 팬터그래프 소음 비교

4절 3차년도 연구 수행 내용 및 결과

1. 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 모델의 공력 및 공력 소음 시험 및 해석

가. 폐쇄형 시험부 소음 시험 장비 개선

고속 유동 재현이 가능한 폐쇄형 시험부에서 팬터그래프의 공력 소음 시험 수행을 위하여 케블라 덮개를 부착한 마이크로폰 어레이 시스템이 구축 되었고 이를 검증 완료 하였다. 마이크로폰 어레이 시스템의 유동적 활용과 시험 진행 및 설치의 편의성을 위하여 시험 장비에 대하여 몇가지 개선 사항이 필요하여 개선을 수행하였다.

(1) 케블라 재선정

- 케블라 선정 개요

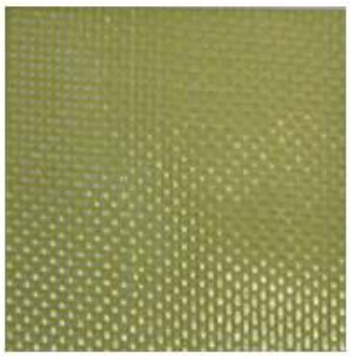
폐쇄형 시험부에서 케블라 덮개가 장착된 마이크로폰 어레이 시스템 구축을 통하여 케블라 덮개를 통한 음향 신호의 취득이 가능한 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 현재 마이크로폰 어레이 시스템에 장착되어있는 케블라 덮개는 그 두께가 두껍고 고주파수에서 음향 특성이 우수하지 못하여 지속적으로 사용하기에 여러 제한이 있다 판단되어 두께가 얇고 음압 및 위상의 차이가 가장 적게 발생하는 케블라를 선택하여 교체하는 내용이 진행되었다.

- 케블라 소음 시험 수행

케블라 덮개가 장착된 마이크로폰 어레이의 사용시 케블라 두께 혹은 조직의 차이에 따라 주파수에 대한 음압 투과 특성 및 위상 특성이 달라진다. 폐쇄형 시험부에서 사용하기 좋은 케블라 섬유는 풍동 시험 시 시험부 내부 정압 변동에 의한 형상 변형이 최소화 되어야 하고, 섬유의 두께 및 조직물의 구조로 인한 투과 손실을 최소화 할 수 있어야 한다. 따라서 현재 장착되어있는 케블라 섬유를 포함하여 총 5종의 샘플에 대한 시험을 수행하였다. 5종의 케블라에 대한 제원은 표 2-3-1 과 같다.

표 2-3-1의 케블라 섬유 5종은 음원이 케블라 투과시 투과 손실을 최소화하고 그 영향을 확인하기 위하여 다양한 두께와 다양한 섬유의 조직 형태를 선정하였다. Origin 은 현재 마이크로폰 어레이 시스템에 선정되어있는 케블라이고, 국내에서 제작된 케블라 섬유로써 내구성 및 장력 특성이 우수하나 그 두께가 두껍고 치밀한 섬유 조직을 가지고 있다. X-300 은 듀폰(Dupont)에서 제작된 케블라 섬유로 Origin 섬유에 비하여 두께가 얇으나 조직의 치밀함은 Origin 과 큰 차이가 없다. K111, K121과 K141은 The Composite Structures Technology에서 제작된 케블라 섬유로 K111 과 K121 은 그 두께가 매우 얇고 성긴 섬유 조직을 가졌다.

표 2-3-1 시험에 사용한 총 5가지 케블라 섬유

Model	Origin	X-300	
Figure			
Density [g/sq.cm]	0.0276	0.0163	
Thick [mm]	0.38	0.18	
Model	K111	K121	K141
Figure			
Density [g/sq.cm]	0.0036	0.0058	0.0170
Thick [mm]	0.05	0.07	0.21

케블라 섬유의 설치 유무와 섬유의 종류에 따른 주파수에 대한 투과 특성을 확인하기 위하여 다양한 주파수의 사인파를 발생시킬 수 있는 스피커와 백색 소음 발생이 가능한 공기충돌기를 사용하였다.

스피커를 이용한 음원 발생은 함수발생기(Function generator)와 증폭기(Power amplifier)을 연결하여 500Hz, 1000Hz, 1500Hz, 2000Hz, 2500Hz, 3000Hz, 3500Hz, 4000Hz, 8000Hz 의 주파수를 가지는 사인파를 발생시켰다. 백색 소음의 발생은 그림 3-1-1과 같은 공기 충돌 장치를 이용하여 공기 압력을 걸어줌으로서 그림 2-3-3와 같은 주파수 스펙트럼을 가지는 백색소음을 발생시켰다. 그림 2-3-2 는 마이크로폰 한 개로 공기충돌장치에서 발생되는 백색소음을 측정하여 1/3 옥타브 밴드에서 주파수별 스펙트럼를 나타낸 결과이다. 센서 자체의 배경소음(빨간선)을 측정하였고, 발생된 백색소음(파란색)을 측정한 결과이다.



그림 2-3-1 공기 충돌 장치(Air jet)

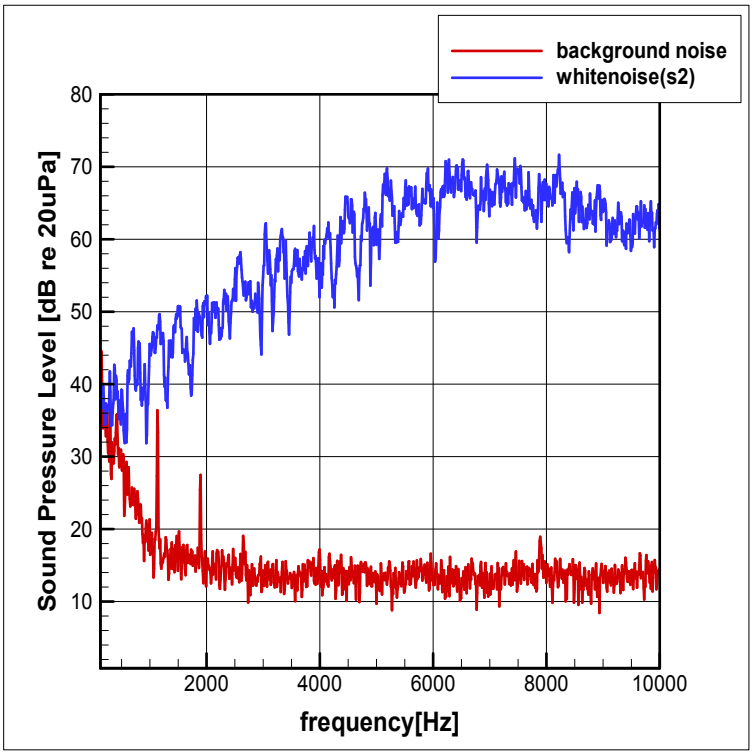


그림 2-3-2 공기충돌기로부터 발생된 백색소음의 스펙트럼 (1/3 옥타브밴드)

신호 수집에는 총 81개의 1/2“ LinearX M51 마이크로폰을 사용하였으며, 80개의 마이크로폰의 구성은 그림 2-3-3과 같이 배치하였고, 1개의 마이크로폰은 기준 음원 측정을 위하여 그림 2-3-4와 같이 외부에 설치하였다. 각 마이크로폰의 출력 신호는 어레이 후면에 설치된 Junction box를 거쳐 자료취득 장치(GBM VIPER)를 사용하여 측정하였다. 측정시 신호의 DC 성분을 제거하기 위하여 AC 1.5Hz high pass filter를 적용하였다. 데이터 취득은 200kHz로 1.6초간 측정하여 총 323584 데이터를 취득하였다. 마이크로폰과 기준 소음원과의 거리는 5m 로 설치하였다.

케블라의 유무와 각 케블라 섬유의 음향 투과 특성을 비교하기 위하여 케블라가 없는 경우와 표 2-3-1의 5종 케블라 섬유에 대하여 동일한 시험을 수행하였다.

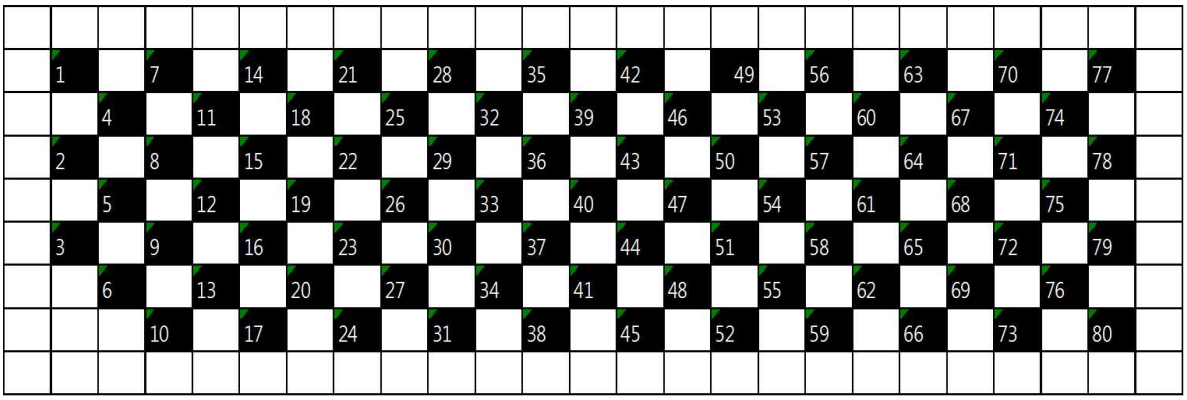
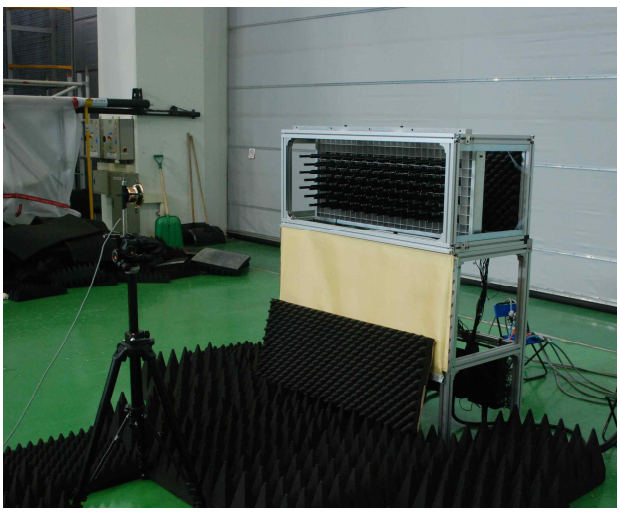


그림 2-3-3 80개의 마이크로폰 배치



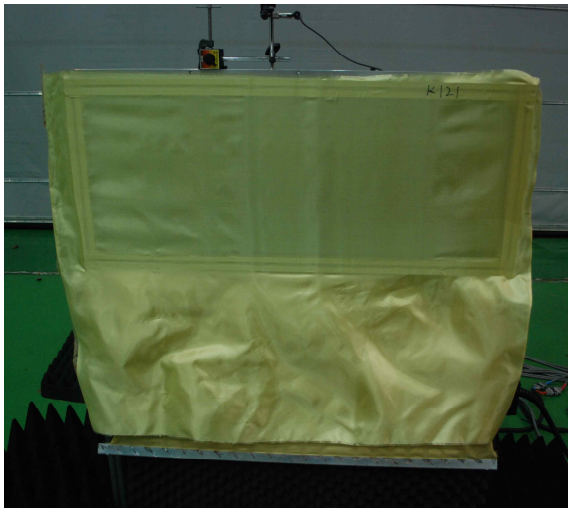


그림 2-3-4 시험 장치 (왼) 케블라가 없을 때 시험 모습 (오) 케블라가 있을 때 시험 모습

- 케블라 소음 시험 결과

시험에 사용된 마이크로폰, 케이블 및 측정 시스템은 교정기(B&K acoustic calibrator 4226)을 사용하여 기준음(1kHz, 94dB)에 대해 감도 보정을 수행한 후 사용하였다. 시험 결과는 16384개의 데이터를 한 블록으로 설정하여 총 15회의 앙상블 평균(Ensemble averaging)을 취한 후 사용하였다. (df=12.207Hz)

시험 결과는 케블라 섬유에 의한 전달강도 감쇠 및 위상의 변화를 확인하기 위하여 백색 소음 시험 결과를 이용한 음압 측면과 사인파 시험 결과를 이용한 위상 측면으로 시험 결과를 정리하였다. 먼저, 백색 소음 시험결과로부터 음압에 대하여 정리한 결과는 다음과 같다.

케블라 섬유의 종류 및 유무와 관계없이 발생 소음원 자체 특성을 확인하기 위하여 설치한 기준 마이크로폰(reference microphone)으로부터 측정된 결과를 그림 2-3-5와 같이 1/3 옥타브 밴드에서 음압레벨로 나타내었다. (P_{ref}=20μPa)

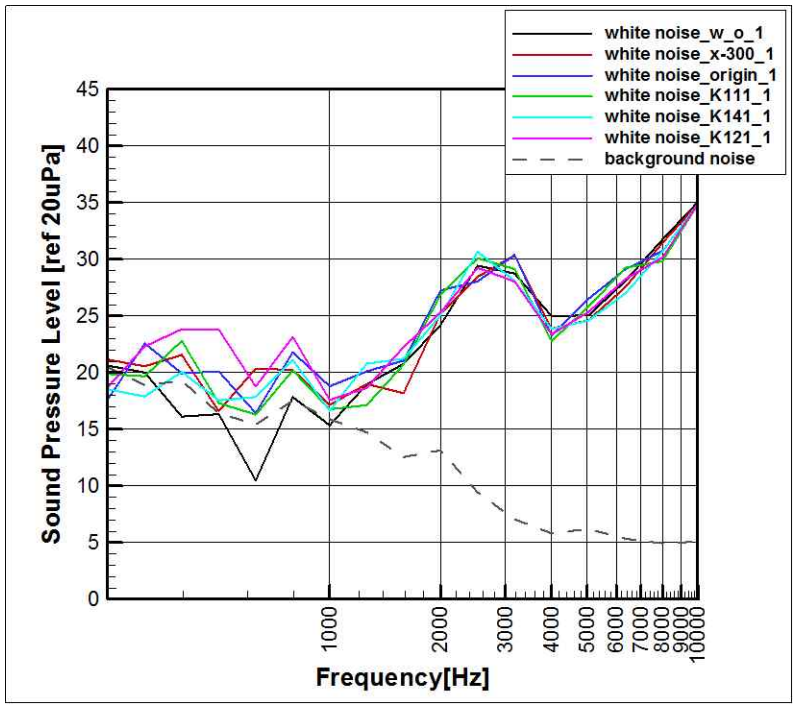


그림 2-3-5 기준 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 시험결과 (1/3 옥타브 밴드)

실험 결과는 케블라가 없는 경우, 케블라 5종 그리고 배경소음에 대하여 정리하였다. 점선으로 도시화된 배경 소음 결과를 확인해봤을 때 1kHz 이하의 주파수 구간에서 백색 소음을 발생시켰을 때의 결과와 음압의 차이가 크지 않아 케블라에 의한 영향을 비교 할 수 있는 주파수 범위는 1kHz 이상의 구간이다. 1kHz 이상의 주파수에서 발생된 음압 결과를 비교해보면 케블라가 없는 경우와 케블라 5종의 결과 전체적으로 비슷한 음압 레벨을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 각 케블라 섬유에 따라 1kHz 에서는 약 4dB 의 편차를 보이고, 1kHz 이상의 주파수에서는 최대 3dB 이내의 음압 편차를 확인 할 수 있다. 케블라의 영향을 확인하기 위하여 그림 2-3-3에서 임

의의 위치의 마이크로폰으로부터 측정된 결과 9개를 1/3 옥타브 밴드에서의 음압 결과로 그림 2-3-6 ~ 그림 2-3-14와 같이 정리하였다.

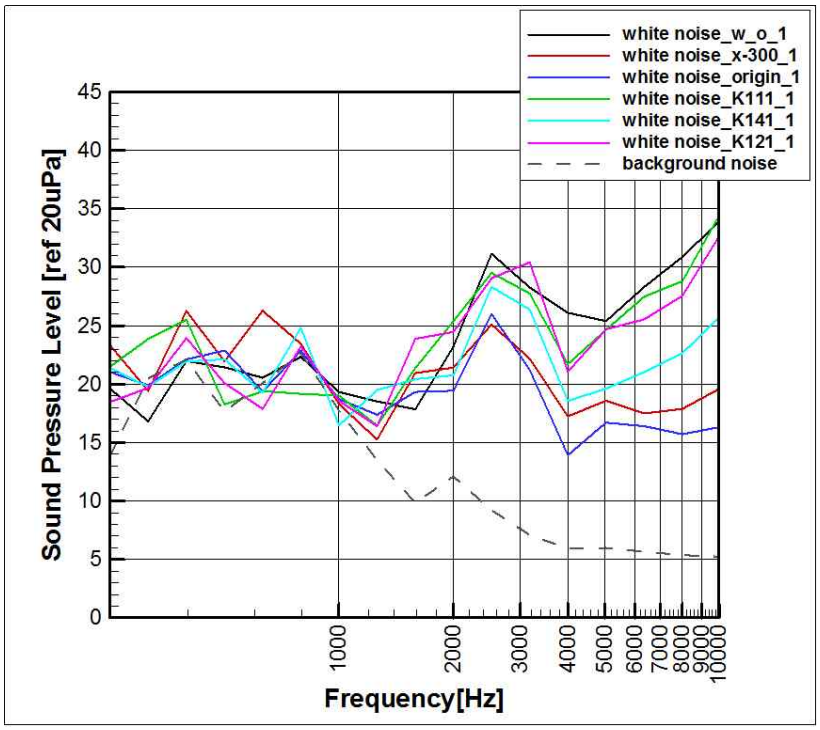


그림 2-3-6 1번째 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 시험결과 (1/3 옥타브 밴드)

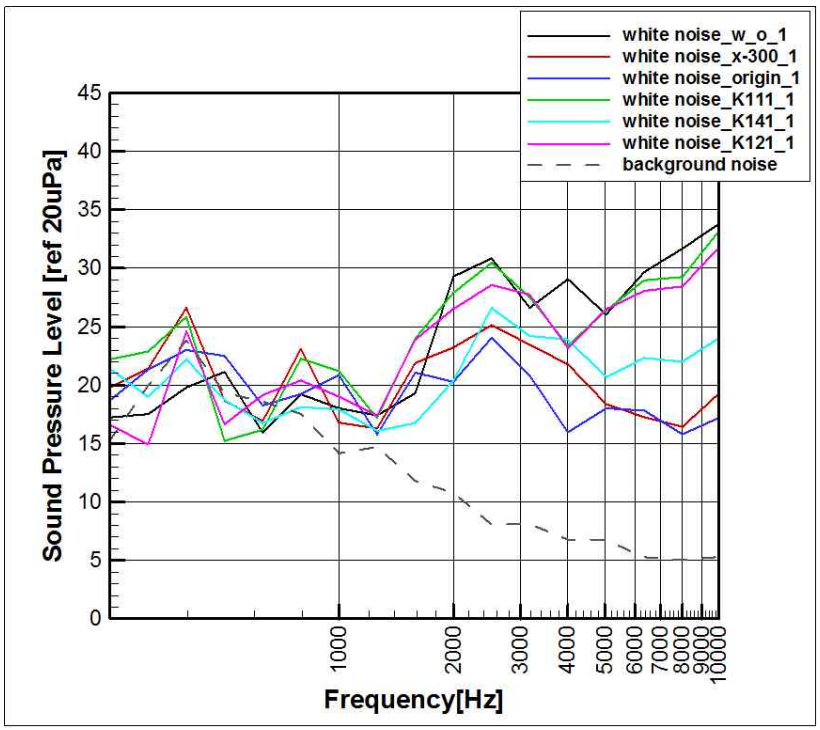


그림 2-3-7 9번째 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 시험결과 (1/3 옥타브 밴드)

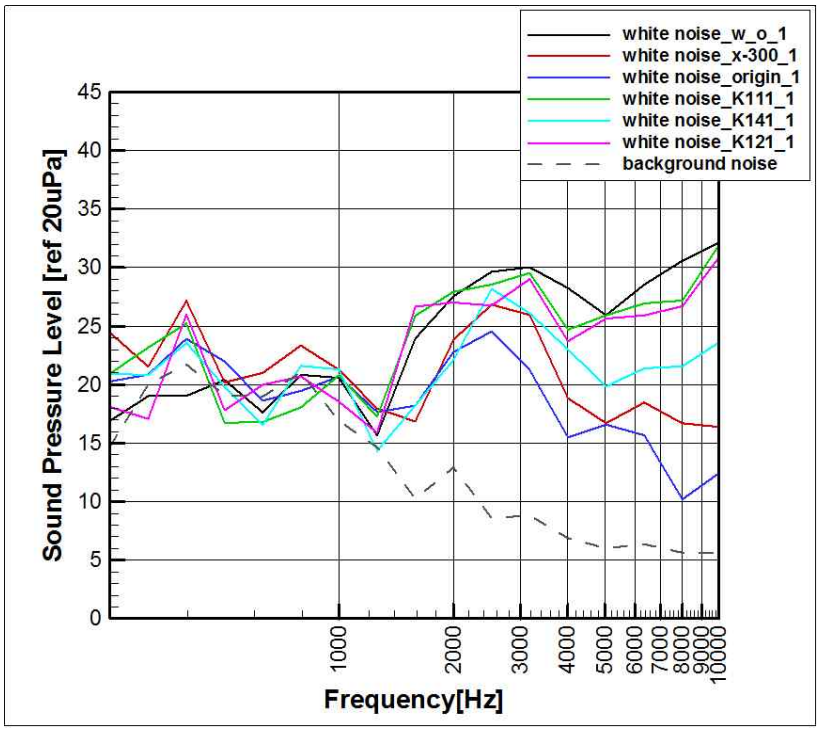


그림 2-3-8 18번째 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 시험결과 (1/3 옥타브 밴드)

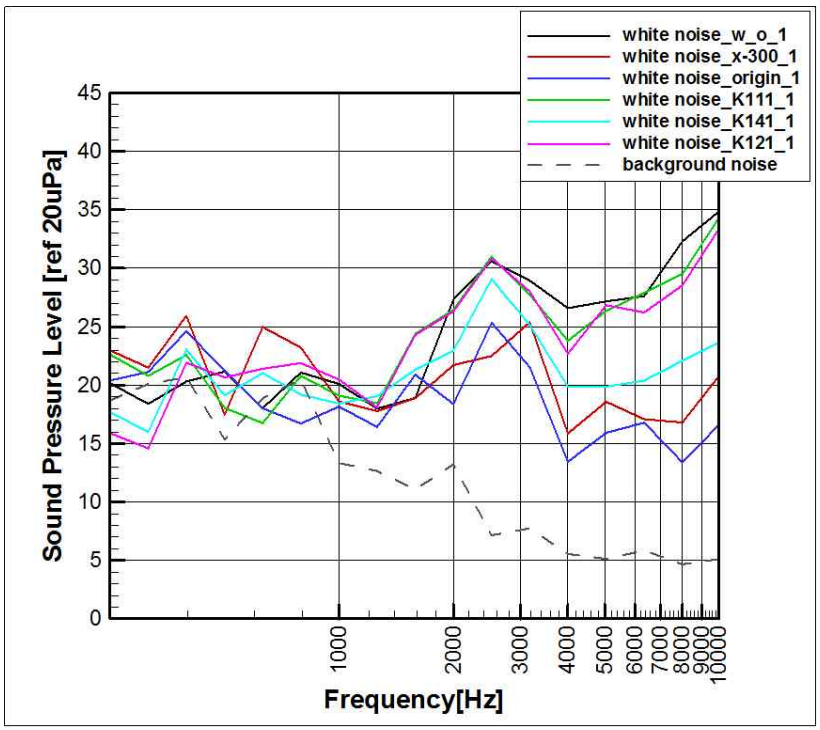


그림 2-3-9 31번째 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 시험결과 (1/3 옥타브 밴드)

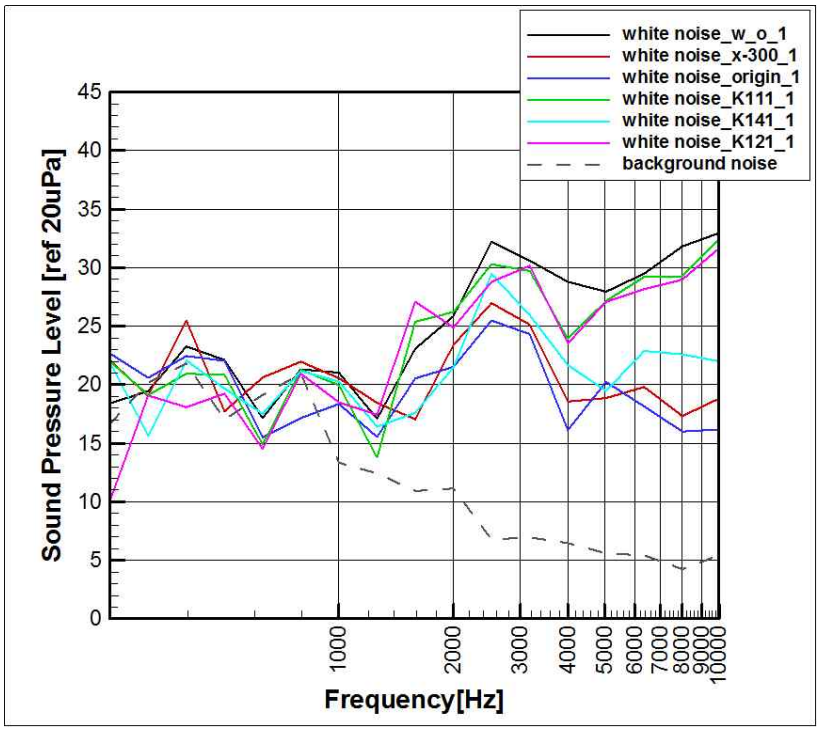


그림 2-3-10 40번째 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 시험결과 (1/3 옥타브 밴드)

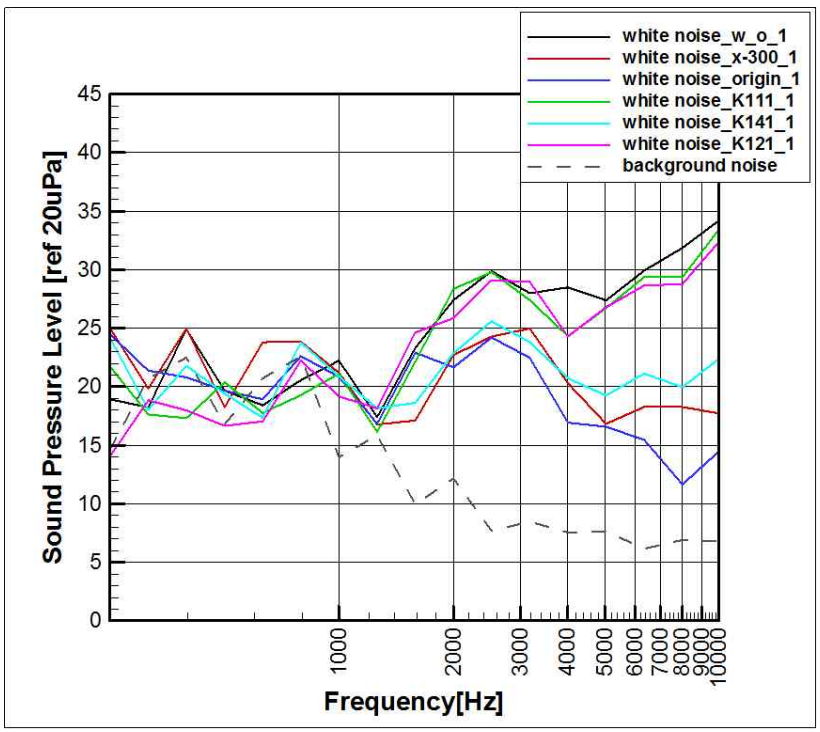


그림 2-3-11 50번째 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 시험결과 (1/3 옥타브 밴드)

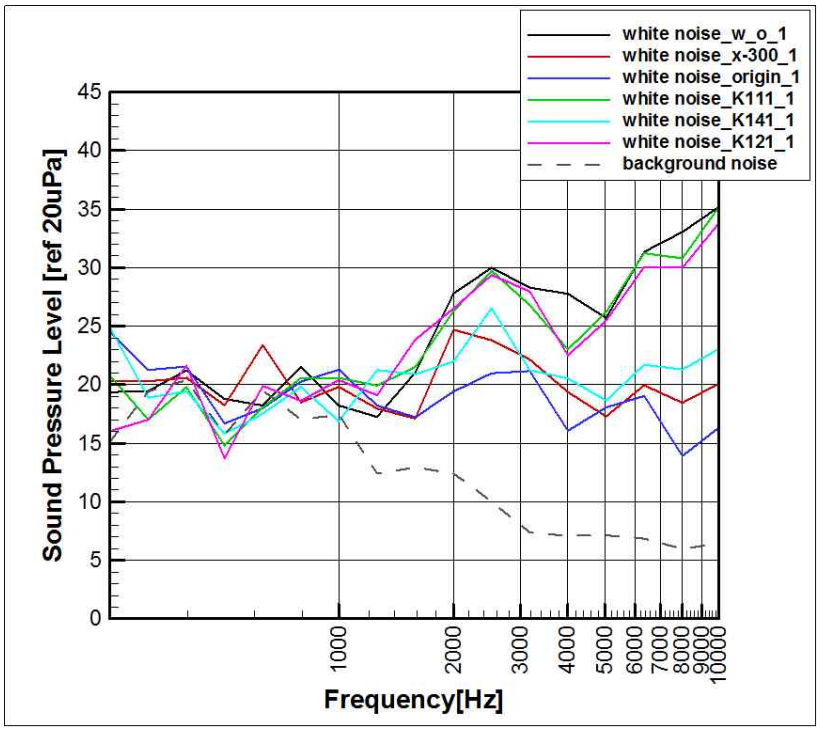


그림 2-3-12 62번째 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 시험결과 (1/3 옥타브 밴드)

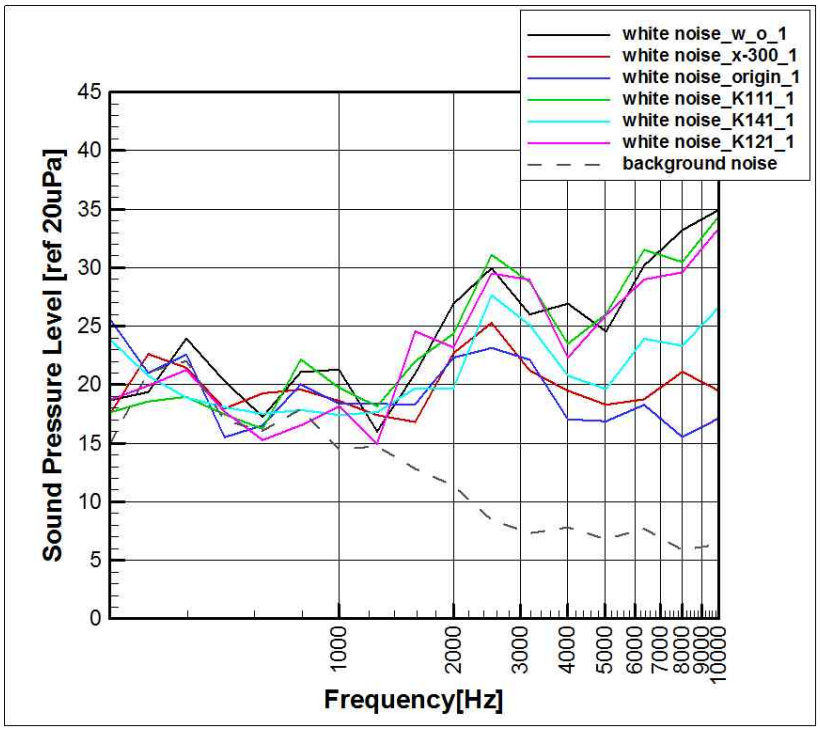


그림 2-3-13 67번째 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 시험결과 (1/3 옥타브 밴드)

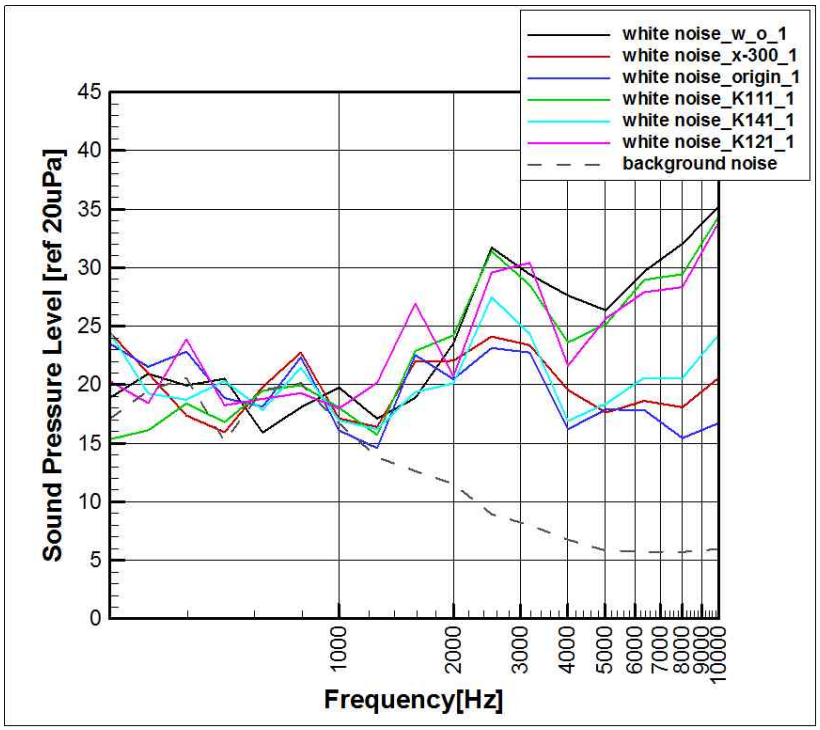


그림 2-3-14 80번째 마이크로폰으로부터 측정된 백색소음 시험결과 (1/3 옥타브 밴드)

그림 2-3-6 ~ 그림 2-3-14 의 9가지 결과를 비교해 보면, 1kHz 에서는 각 케블라 섬유에 따라 케블라가 없는 경우와의 음압의 편차가 최대 3dB 이내인 것을 확인 할 수 있고, 2kHz 에서는 적게는 3dB에서 크게는 10dB의 편차를 가지는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 K111 과 K121 의 경우 그 차이가 3dB 이내인 것을 확인 할 수 있다. 4kHz 와 8kHz 의 고주파수에서는 케블라가 없는 경우와 K111, K121의 결과는 최대 5dB 이내의 차이를 보이고 있지만, 그 외의 케블라 결과에서는 20dB 이상의 차이를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 전체적으로 K111과 K121의 케블라 섬유의 시험 결과가가 케블라가 없는 경우와 차이가 적게 나는 것을 확인 할 수 있다.

다음 그림 2-3-15 ~ 2-3-19 는 케블라 섬유로 인한 음향 신호의 전달 강도 감쇠 영향을 파악하기 위하여 케블라 섬유의 영향을 받지 않는 위치에 설치한 기준 마이크로폰(reference microphone)에서 측정된 신호와 각 마이크로폰에서 측정된 신호의 차를 비교하였다. 1/3 옥타브 밴드에서의 음압 결과를 바탕으로 음압차이를 나타내었다. (ΔSPL [dB] = SPL#N mic. - SPLref. mic.)

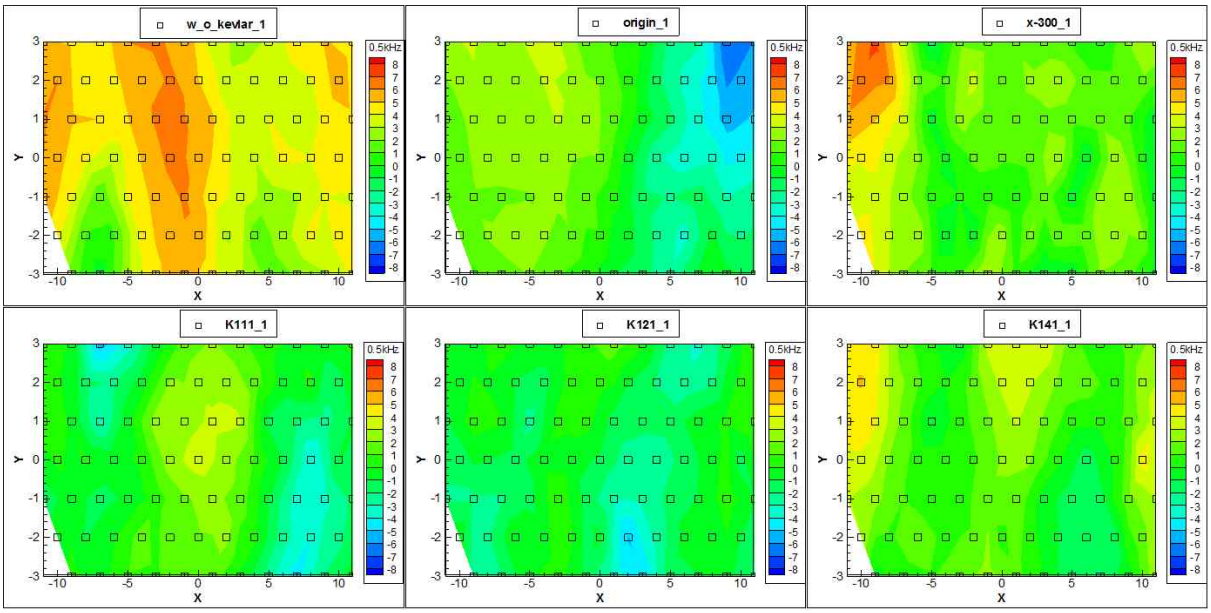


그림 2-3-15 500Hz (ΔSPL [dB] = $SPL_{\#N\ mic.}$ - $SPL_{ref.\ mic.}$)

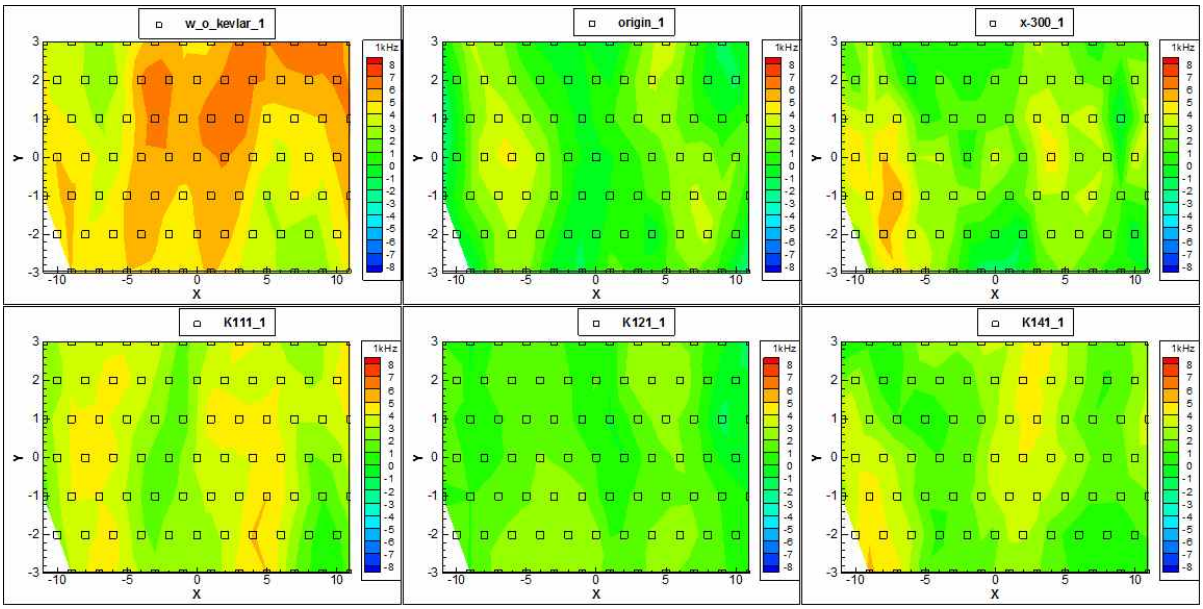


그림 2-3-16 1000Hz (ΔSPL [dB] = $SPL_{\#N\ mic.}$ - $SPL_{ref.\ mic.}$)

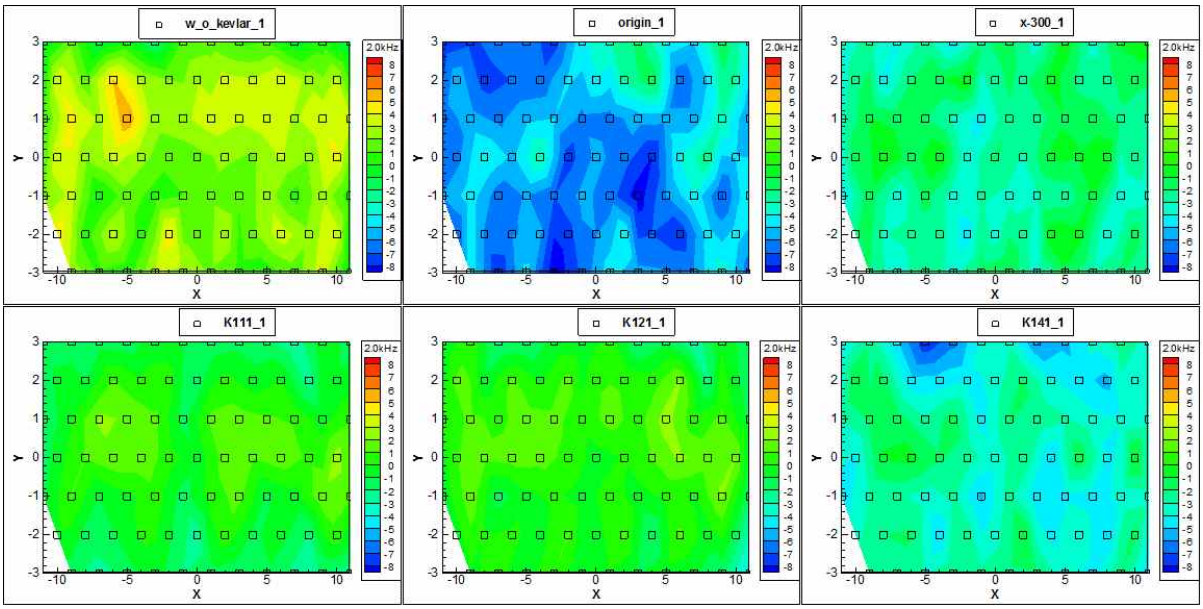


그림 2-3-17 2000Hz (ΔSPL [dB] = $SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}$)

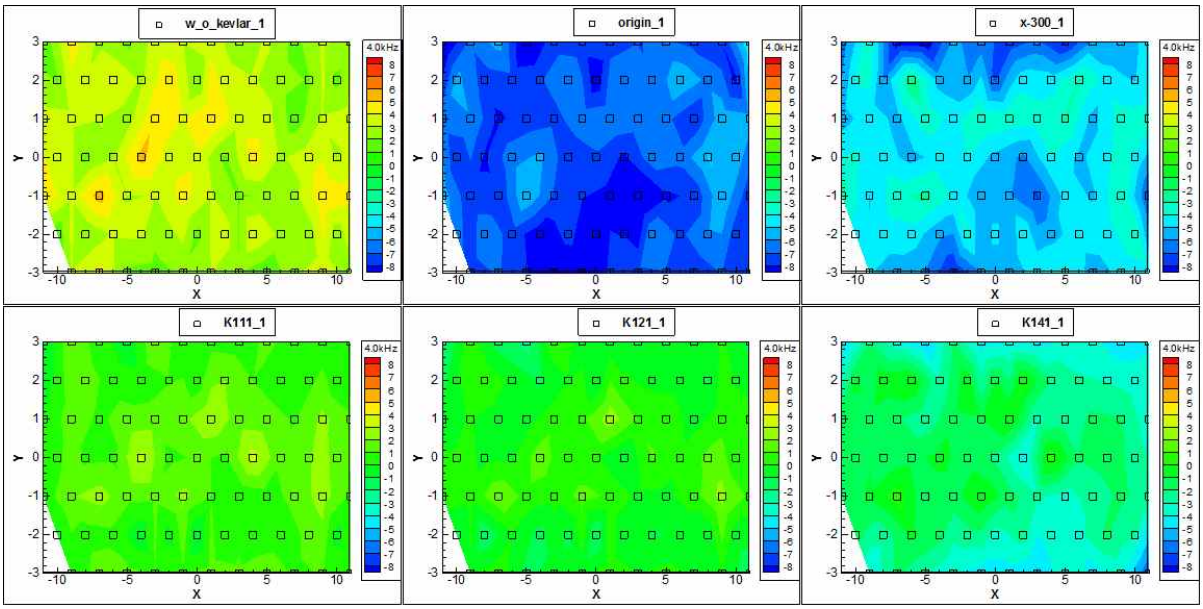


그림 2-3-18 4000Hz (ΔSPL [dB] = $SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}$)

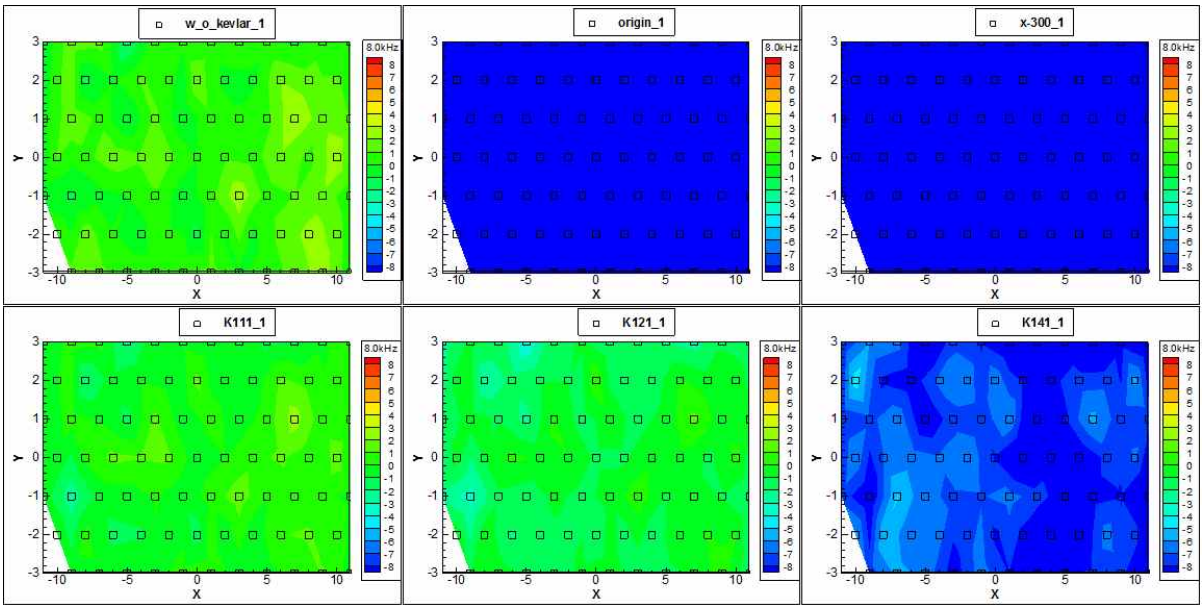


그림 2-3-19 8000Hz (ΔSPL [dB] = $SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}$)

그림 2-3-15 ~ 2-3-19 의 음압차이 결과에서도 그림 2-3-6 ~ 그림 2-3-14 에서의 결과와 마찬가지로 케블라 섬유의 두께와 섬유의 조직이 치밀한 Origin 과 X-300 의 경우 2kHz 이상의 고주파수로 갈수록 기준 마이크로폰에서 측정한 음압과 케블라를 통과하여 설치되어있는 마이크로폰에서 측정한 음압과의 차이가 커지는 것을 확인 할 수 있다. K111 과 K121의 경우 최대 4dB 의 음압 차이가 있지만 케블라가 없는 경우의 결과와 가장 유사한 결과를 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

다음은 케블라 섬유 통과시 음압 차이를 확인하기 위하여 케블라가 없을 때 각 마이크로폰에서 측정된 음압에서 기준 마이크로폰에서 측정된 음압을 빼준 값과 케블라가 있을 때 각 마이크로폰에서 측정된 음압에서 기준 마이크로폰에서 측정된 음압을 빼준 값과의 차이를 나타낸 결과이다.

(ΔSPL [dB] = $[SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}]_{w/o} - [SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}]_{w/}$)

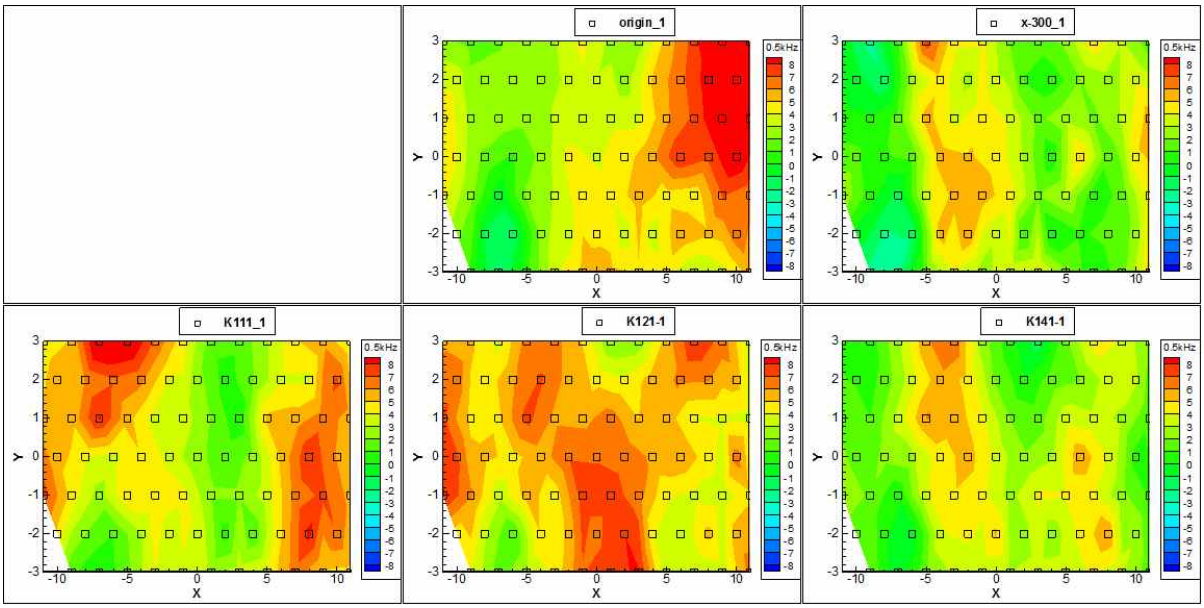


그림 2-3-20 500Hz (ΔSPL [dB] = $[SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}]_{w/o} - [SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}]_{w/}$)

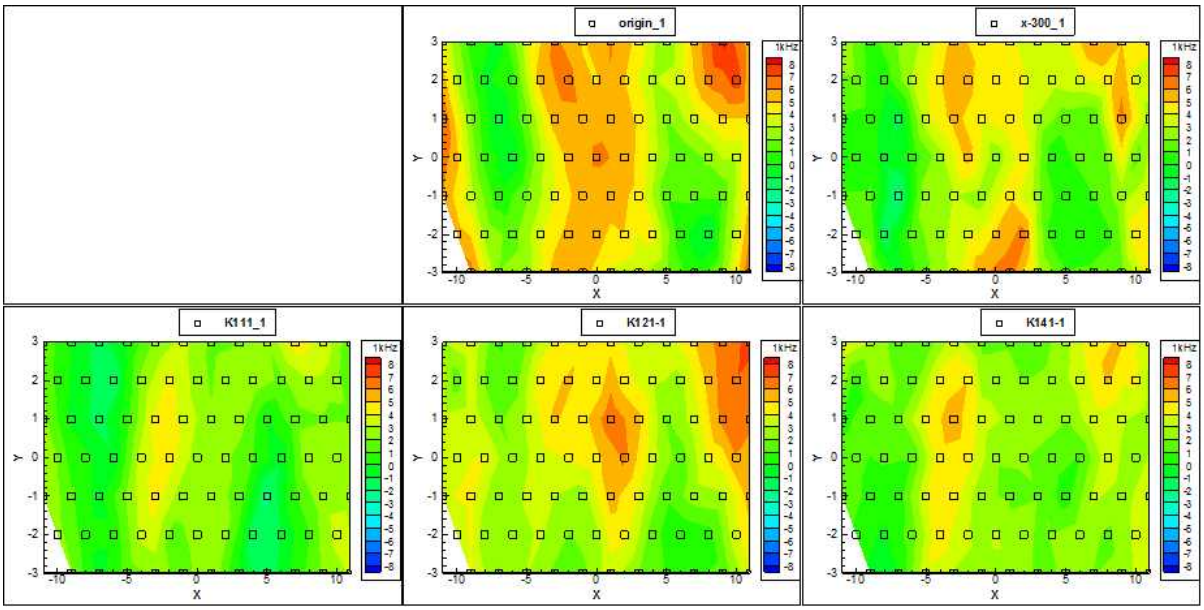


그림 2-3-21 1000Hz (ΔSPL [dB] = $[SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}]_{w/o} - [SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}]_{w/}$)

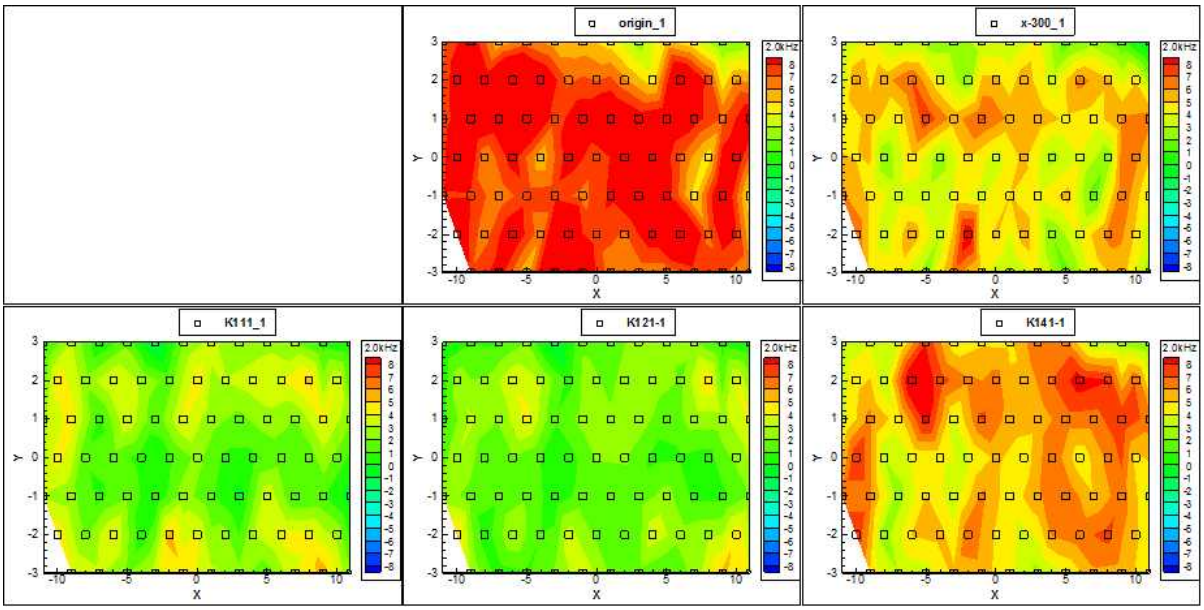


그림 2-3-22 2000Hz (ΔSPL [dB] = [$SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}$]$_{w/o}$ - [$SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}$]$_{w/}$)

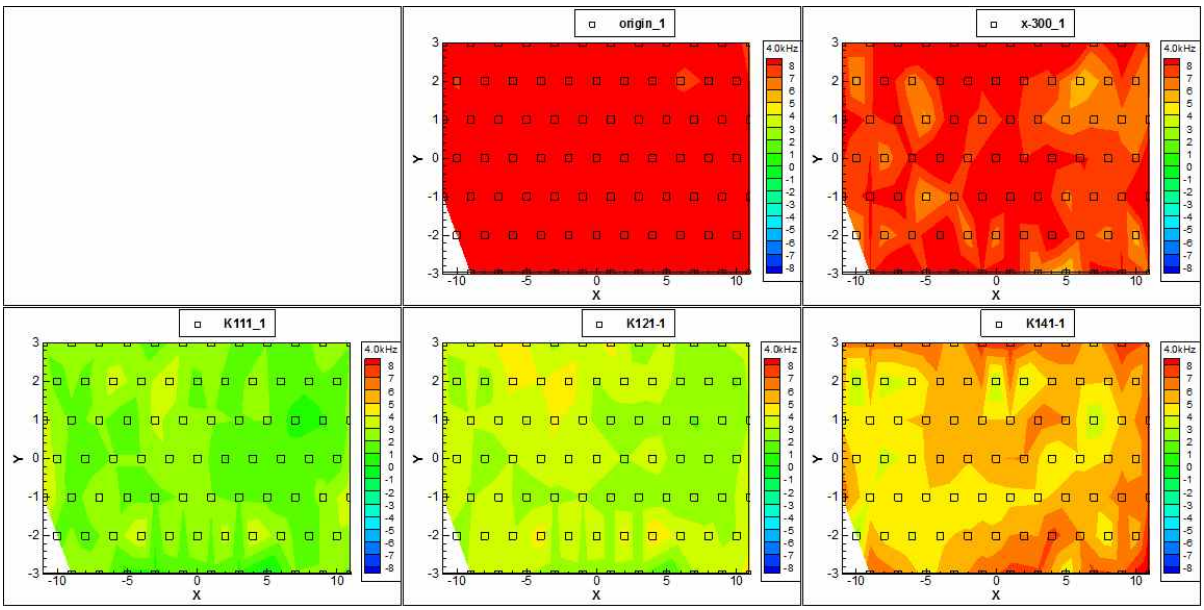


그림 2-3-23 4000Hz (ΔSPL [dB] = [$SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}$]$_{w/o}$ - [$SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}$]$_{w/}$)

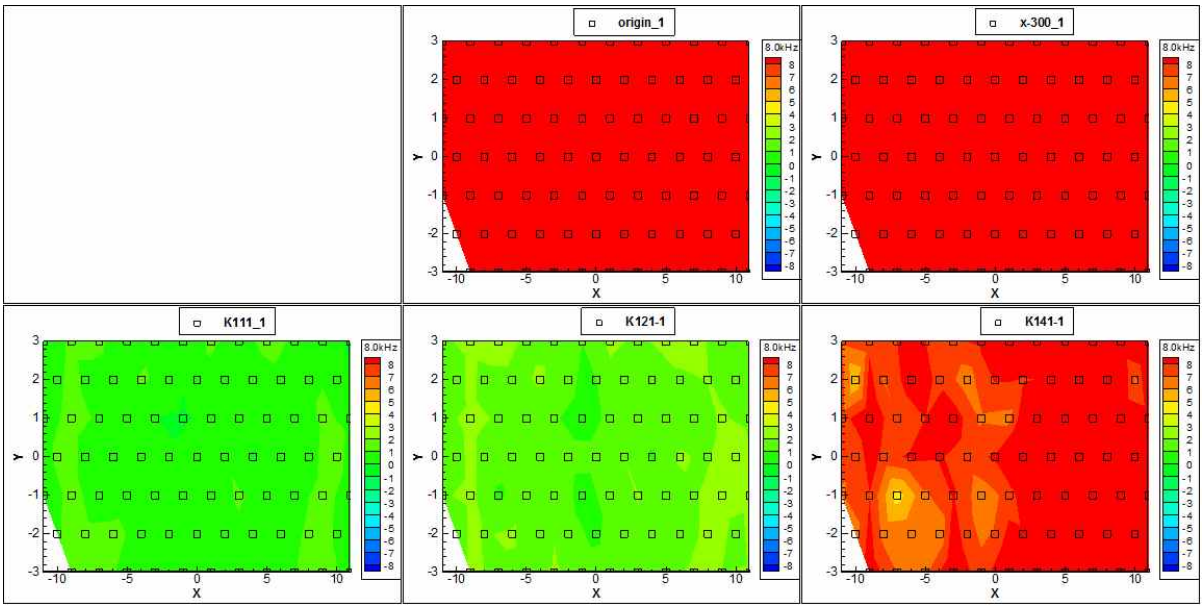


그림 2-3-24 8000Hz (ΔSPL [dB] = [$SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}$]$_{w/o}$ - [$SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{ref.\ mic.}$]$_{w/}$)

다음 그림 2-3-25 ~ 그림 2-3-29 는 소음원의 케블라 섬유 통과시 케블라에 의한 공간 분포 특성을 파악하기 위하여 각 마이크로폰에서 측정된 결과와 마이크로폰 어레이 모듈의 중앙에 위치한 40번째 마이크로폰에서 측정된 결과의 음압차이를 정리하였다. (ΔSPL [dB] = SPL#N mic. - SPLcen. mic.)

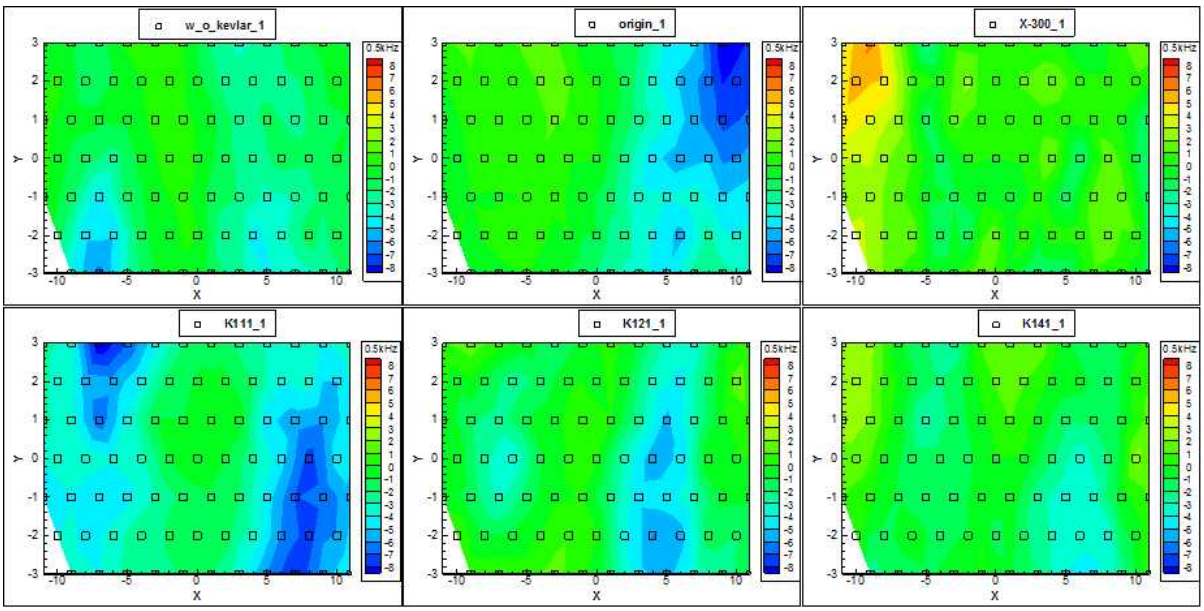


그림 2-3-25 500Hz (ΔSPL [dB] = $SPL_{\#N\ mic.} - SPL_{cen.\ mic.}$)

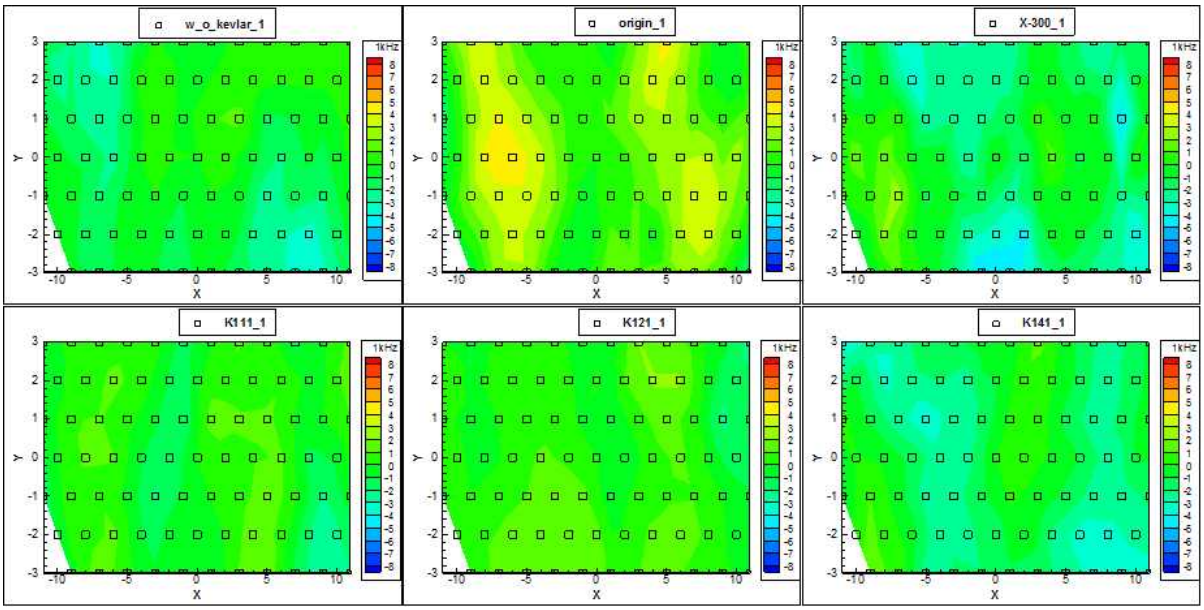


그림 2-3-26 1000Hz (ΔSPL [dB] = $SPL_{\#N\ mic.}$ - $SPL_{cen.\ mic.}$)

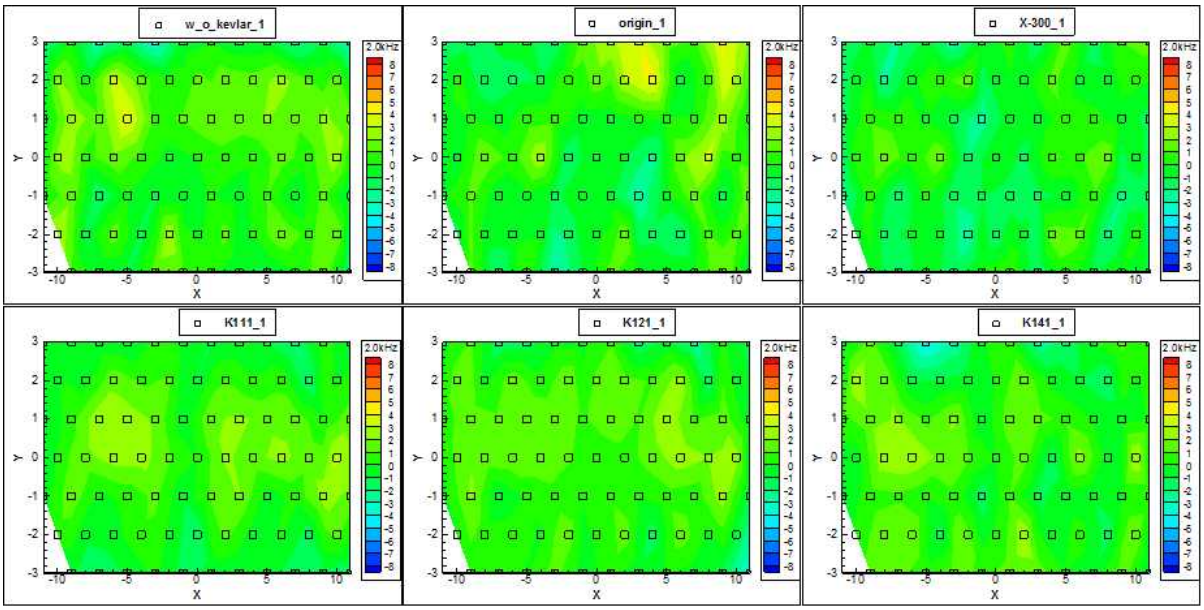


그림 2-3-27 2000Hz (ΔSPL [dB] = $SPL_{\#N\ mic.}$ - $SPL_{cen.\ mic.}$)

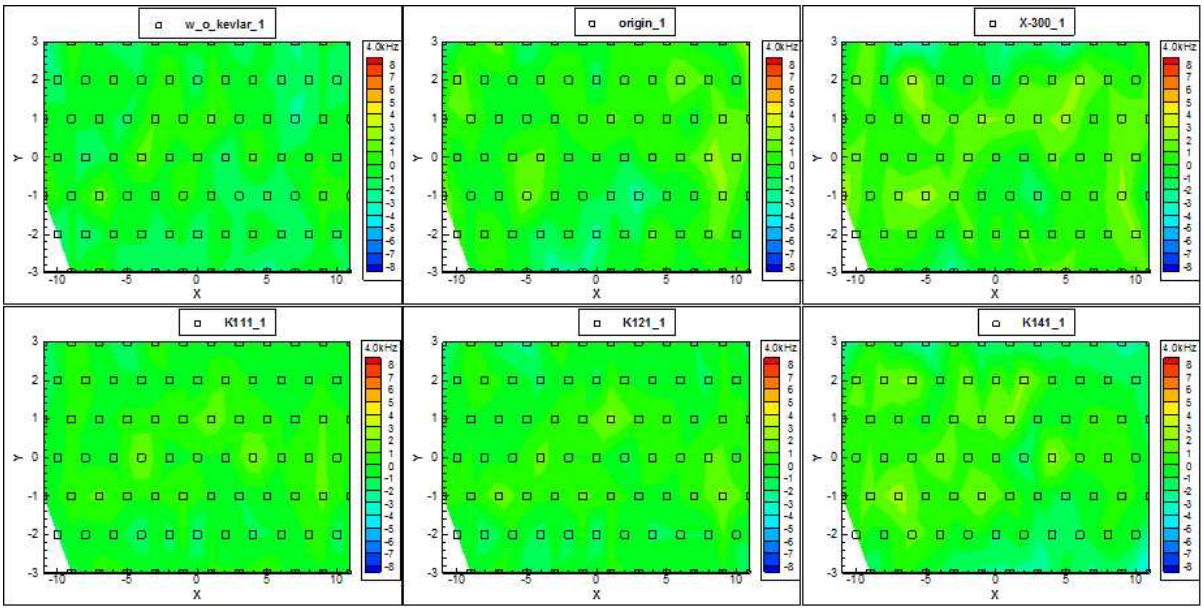


그림 2-3-28 4000Hz (ΔSPL [dB] = $SPL_{\#N\ mic.}$ - $SPL_{cen.\ mic.}$)

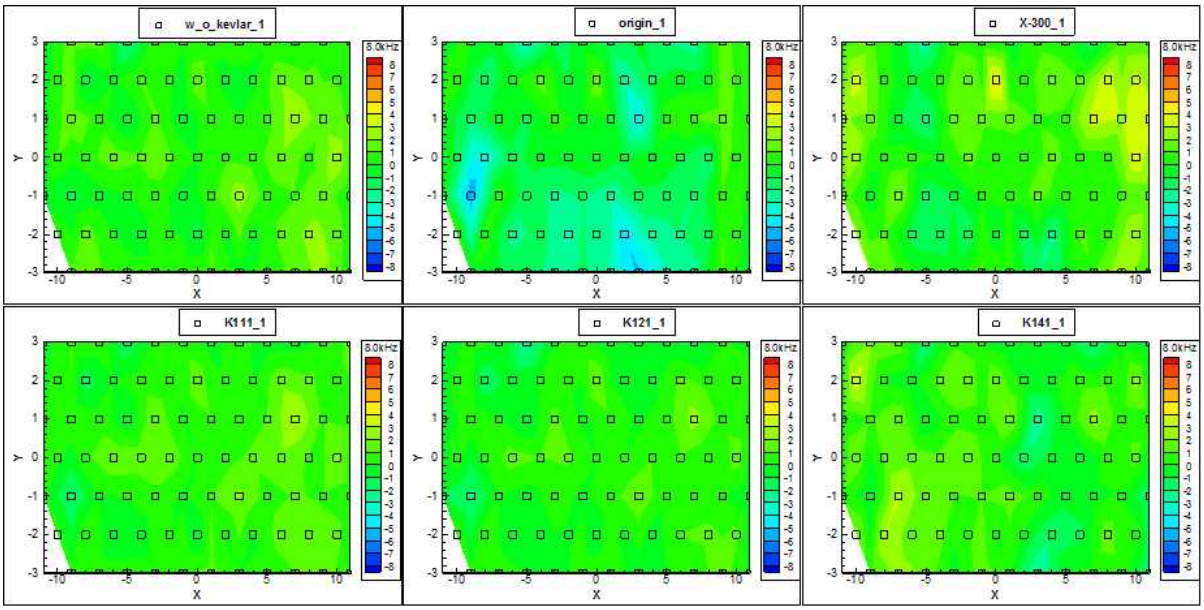


그림 2-3-29 8000Hz (ΔSPL [dB] = $SPL_{\#N\ mic.}$ - $SPL_{cen.\ mic.}$)

케블라가 있을 때와 케블라 5종의 결과와 비교해 보았을 때, 마이크로폰의 위치에 따른 음압의 차이가 500Hz 일 때 부분적으로 7dB 의 차이를 보이고 있고, 1kHz 이상의 공간분포 결과에서는 케블라가 없을 때의 결과와 케블라가 있을 때의 결과를 비교해보면 큰 차이가 보이지 않는다. 따라서, 음원이 케블라를 통과함으로써 각 마이크로폰에서 측정되는 신호의 공간 분포 특성이 변하지 않는 것을 확인 할 수 있다.

다음은 케블라의 유무에 따른 각 마이크로폰에서 측정된 위상 차이를 정리하였다. 마이크로폰과 음원의 거리가 5m 로 far-field 조건으로 실험이 수행되어 80개의 마이크로폰에는 위상이 동일한 평면파가 입사된다고 가정하였다. 각 주파수에 대한 결과

를 확인하기 위하여 500Hz, 1000Hz, 1500Hz, 2000Hz, 2500Hz, 3000Hz, 3500Hz, 4000Hz, 8000Hz 의 사인파에 대한 실험 결과를 위상 비교에 사용하였다.

케블라가 없는 경우와 위상 차이가 가장 적은 시험 결과를 확인하기 위하여 케블라가 있을 때의 위상 차이 결과에서 케블라가 없을 때 위상 차이 결과를 정리하였으며, 마이크로폰 어레이 모듈의 중앙에 위치한 40번째 마이크로폰의 신호를 기준으로 80개의 마이크로폰 간의 Cross power spectrum을 계산하여 시간영역에서 위상 차이를 나타내었다. [dt[s] = [ϕ#N mic. - ϕ#N cen mic.]w/ - [ϕ#N mic. - ϕ#N cen mic.]w/o]

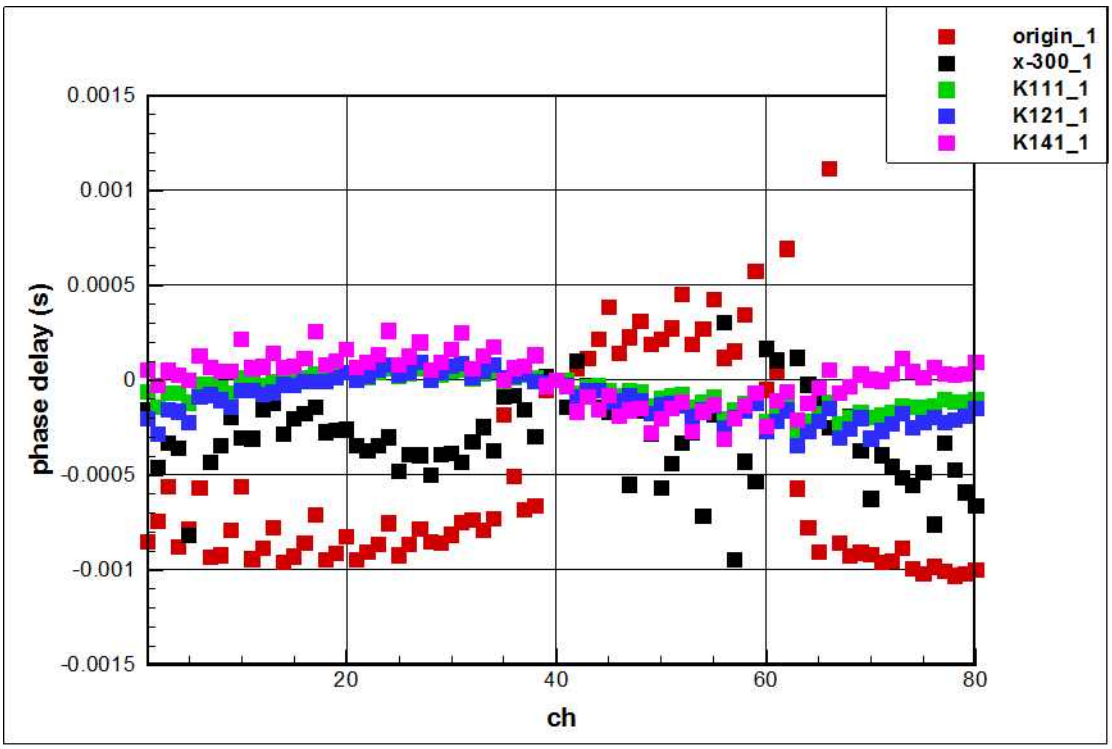


그림 2-3-30 phase difference at f=500Hz [[dt[s] = [$\phi_{\#N\ mic.} - \phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/} - [\phi_{\#N\ mic.} - \phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/o}$]

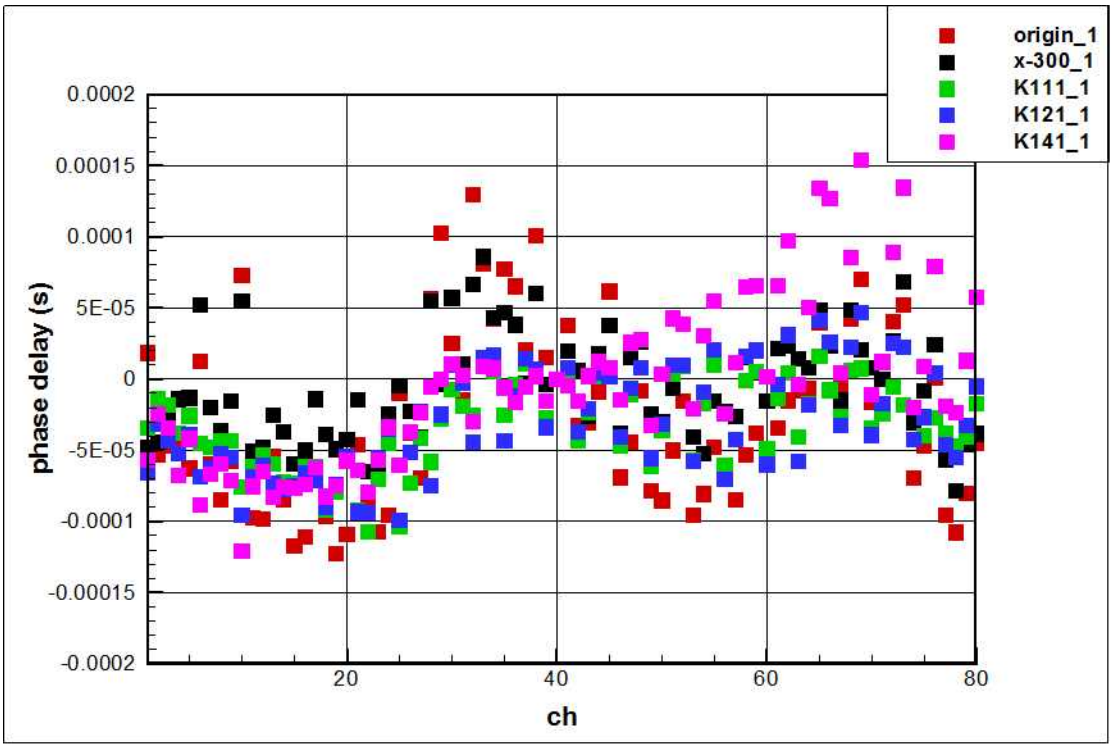


그림 2-3-31 phase difference at f=1000Hz [dt[s] = $[\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/} - [\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/o}$]

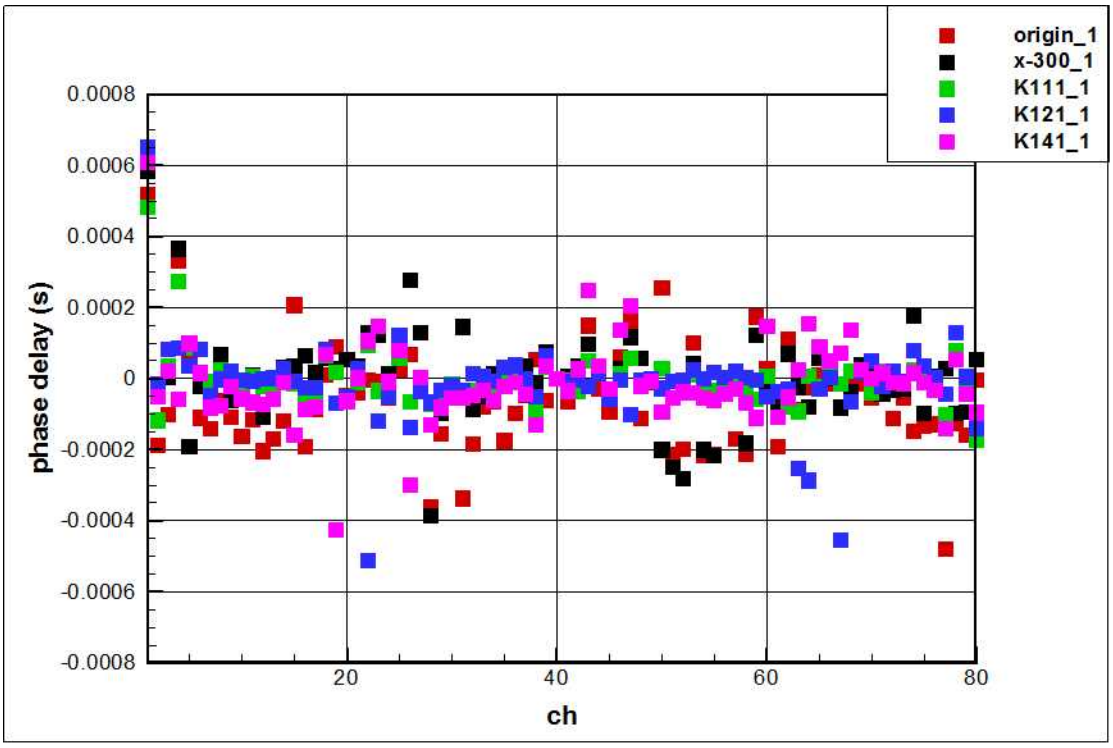


그림 2-3-32 phase difference at f=1500Hz [dt[s] = $[\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/} - [\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/o}$]

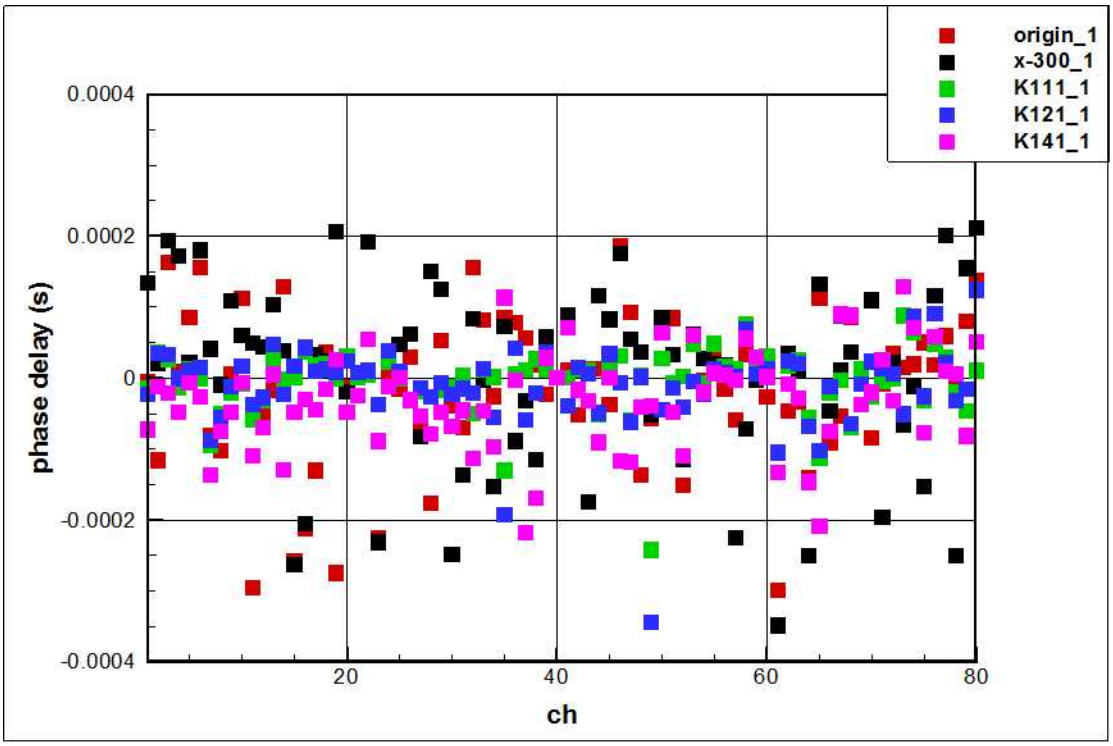


그림 2-3-33 phase difference at f=2000Hz [dt[s] = [$\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/} - [\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/o}$]

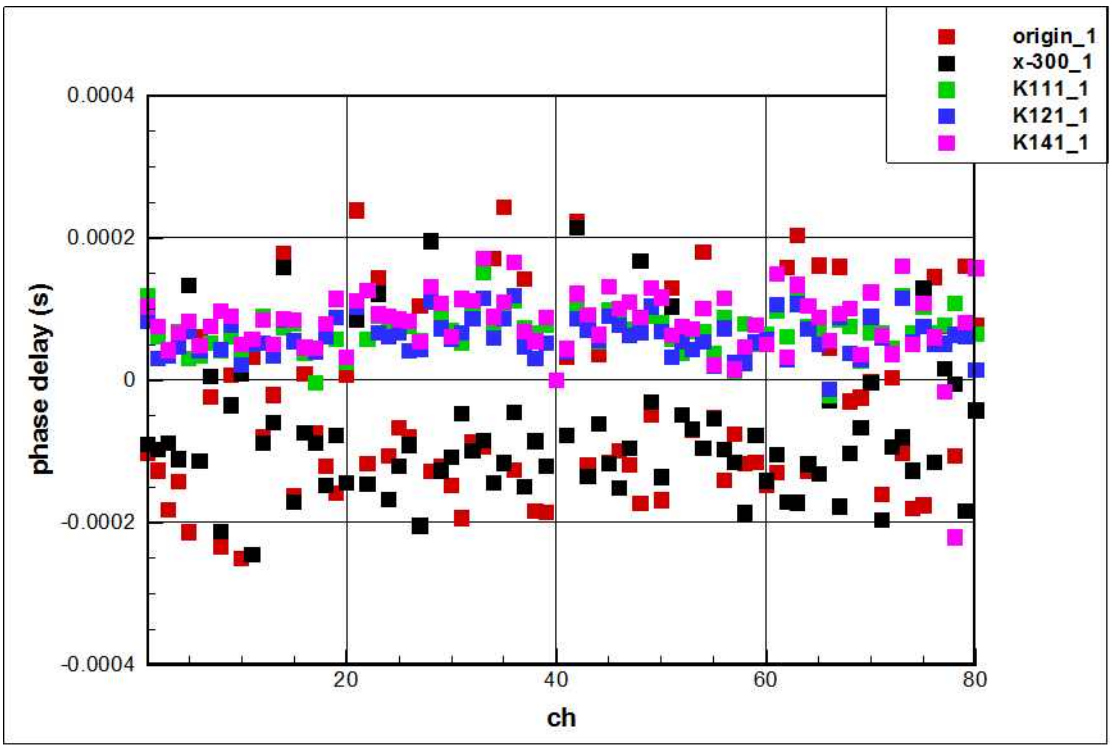


그림 2-3-34 phase difference at f=2500Hz[dt[s] = [$\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/} - [\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/o}$]

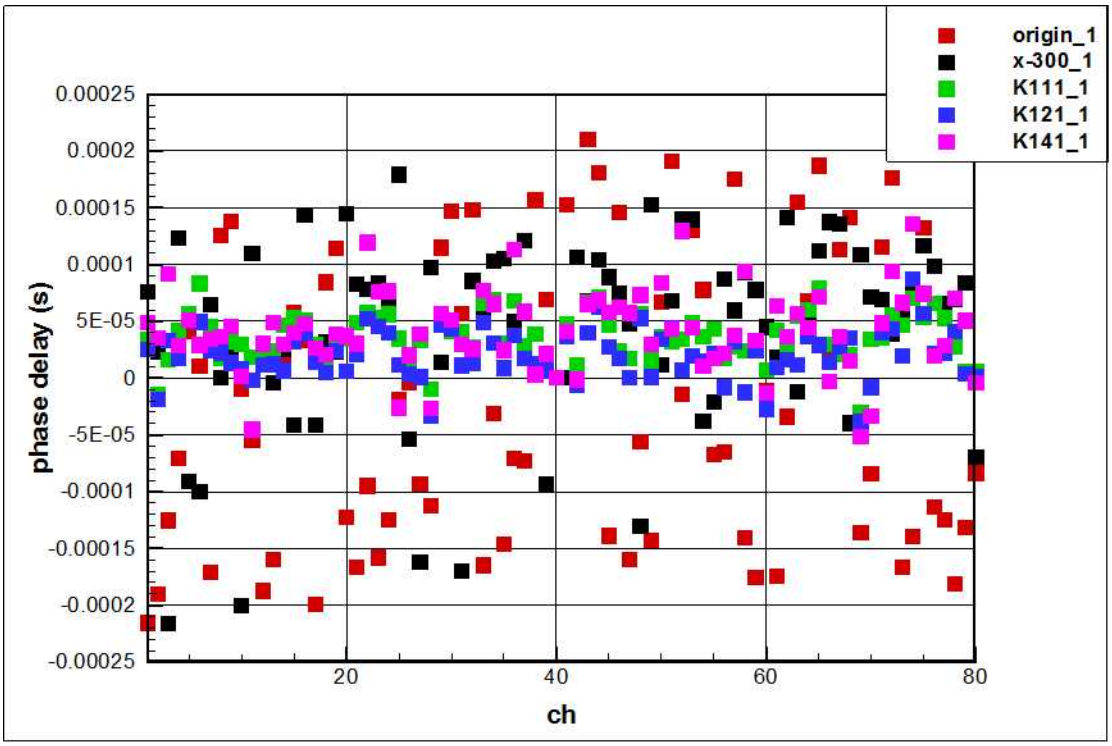


그림 2-3-35 phase difference at f=3000Hz [dt[s] = $[\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/} - [\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/o}$]

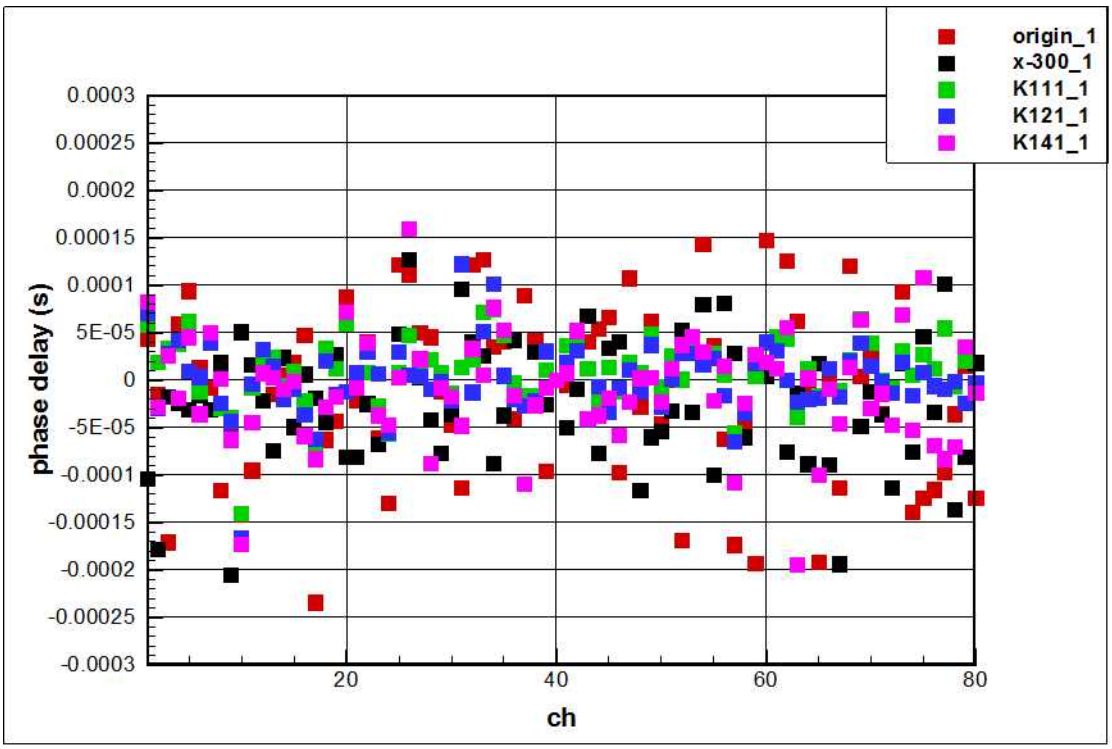


그림 2-3-36 phase difference at f=3500Hz [dt[s] = $[\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/} - [\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/o}$]

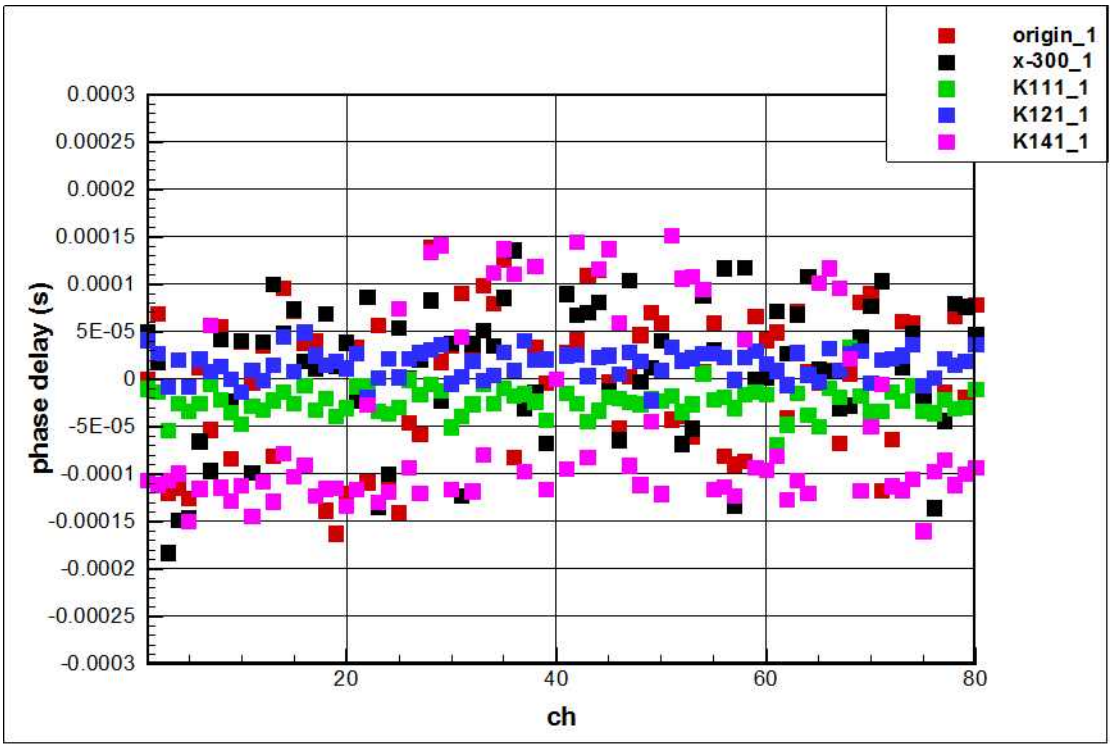


그림 2-3-37 phase difference at f=4000Hz [dt[s] = $[\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/} - [\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/o}$]

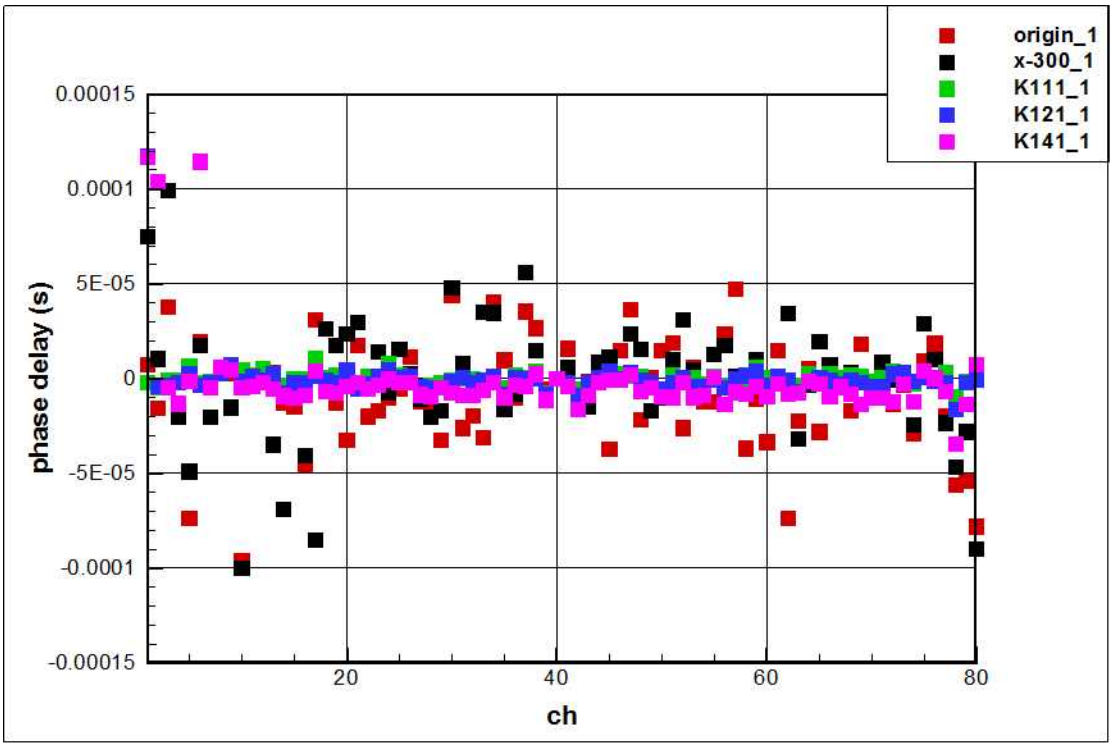


그림 2-3-38 phase difference at f=8000Hz [dt[s] = $[\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/} - [\Phi_{\#N\ mic.} - \Phi_{\#N\ cen\ mic.}]_{w/o}$]

80개의 마이크로폰에 동일한 위상을 가지는 평면파가 입사하는 것으로 가정을 하고 실험을 수행하였는데 그림 2-3-30 ~ 그림 2-3-38 의 결과에서는 위상차이가 발생

하는 것을 알 수 있다. 이는 입사파에 의한 영향뿐만 아니라 마이크로폰 자체의 특성, 케이블과 계측장비의 특성에 의한 위상 차이가 발생한다고 판단된다.

각 주파수별 위상차이 결과를 비교해보면, 500Hz 일 때 Origin 과 X-300의 경우 위상 분포가 ± 0.001초의 범위 내에 분포하는 것을 확인 할 수 있고, K111, K121 과 K141 의 경우 0.0003초 이내의 범위에서 위상차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 1kHz, 1.5kHz와 2kHz 일때 결과는 5가지 결과에서 비슷한 위상 차이의 분포를 보이는 것을 확인 할 수 있으며, 2.5kHz와 3kHz 의 결과에서는 Origin 과 X-300의 위상 차이는 ± 0.0002초로 차이가 큰것을 확인 할 수 있다. 3.5kHz 의 결과에서는 K111과 K121이 ± 0.0005 초의 범위 안에 위상차이가 분포하는 것을 확인 할 수 있고, Origin, X-300 와 K141의 경우 ± 1.00015초의 범위 안에 위상차이가 분포하는 것을 확인 할 수 있다. 4kHz의 결과에서는 K111과 K121의 위상 차이는 ± 0.0005초 내에 분포하는 것을 확인 할 수 있고, Origin, X-300 과 K141의 위상 차이는 ± 0.00015 초내에 분포하는 것을 확인 할 수 있다. 마찬가지로 8kHz의 실험 결과에서도 K111, 121의 결과에 비해 K141의 위상 분포 범위가 더 크고 Origin 과 X-300의 위상 분포 편차가 큰 것을 확인 할 수 있다. 각 주파수별 실험결과에서 케블라가 없을 때 측정된 위상 결과와 차이가 가작 적은 결과를 보이는 것은 K111과 K121 인 것을 확인 할 수 있다.

K111과 K121 두 개의 섬유를 비교해 보았을 때 조직의 치밀도는 K111 보다 K121이 높고 두께 또한 K121이 비교적 두꺼운 편이다. 음향 투과성 자체적으로 비교하였을 때 큰 차이는 없지만 K111 이 비교적 우수한 것으로 판단된다. 하지만 K111 섬유를 마이크로폰 어레이 시스템에 장착하여 풍속이 있는 조건에서 장기적으로 사용하기에 그 내구성이 K121에 비해 떨어질 것으로 판단되어 최종적으로 K121의 섬유를 마이크로폰 어레이 모듈에 장착하여 사용 하는 것으로 선정하였다.

표 2-3-2 최종 선정된 케블라

Model	K121
Figure	
Density [g/sq.cm]	0.0058
Thick [mm]	0.07

(2) 마이크로폰 어레이 시스템의 경량화

마이크로폰 어레이 시스템을 설치하기 위해서는 폐쇄형 시험부 벽면에 설치된 관측 창 제거 및 마이크로폰 어레이의 거치대 설치, 마이크로폰 어레이 설치, 마이크로폰 설치 등의 순서로 작업이 진행되어진다. 하지만 마이크로폰 어레이의 거치대의 무게가 커 작업하는데 불편함이 있고, 평평해야 할 거치대가 볼록해지는 등의 변형이 발생하여 마이크로폰 어레이 설치시 수평에 문제가 있어 이를 개선하였다. 또한, 마이크로폰과 케블라 덮개사이의 거리는 마이크로폰을 설치할 때 사용하는 봉의 위치로 조정할 수 있었는데 마이크로폰과 케블라 덮개사이의 간격을 자유로이 조정 할 수 있도록 슬라이딩 장치를 설치하여 사이 간격을 자유로이 조절 할 수 있도록 개선하였다.



그림 2-3-39 마이크로폰 어레이 모듈에 설치한 슬라이딩 장치



그림 2-3-40 경량화 된 마이크로폰 어레이 모듈

나. 개선된 폐쇄형 시험부 소음 시험 장비 검증

폐쇄형 시험부 소음시험 장비의 성능을 파악하기 위해 기존 음원을 사용하여 검증시험을 수행하였다. 검증시험은 풍속이 없는 상태에서 시험장비의 성능을 파악하기 위한 시험과 특정 풍속조건에서 음원의 위치를 파악하는 시험으로 구성하였다. 풍속이 없는 조건에 대한 시험은 가장 단순한 소음원인 스피커를 기준음원으로 사용하였으며, 특정 풍속조건에 대한 시험은 원통봉을 기준음원으로 사용하였다.

스피커를 사용한 검증시험은 그림 3-2-1과 같이 스피커를 시험부 중심점에 설치한 후, 스피커에 순음신호(0.51Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz, 8kHz) 또는 백색잡음신호를 부가하는 방식으로 진행하였다. 마이크로폰 신호는 100kHz 획득속도로 5초동안 측정하였다.

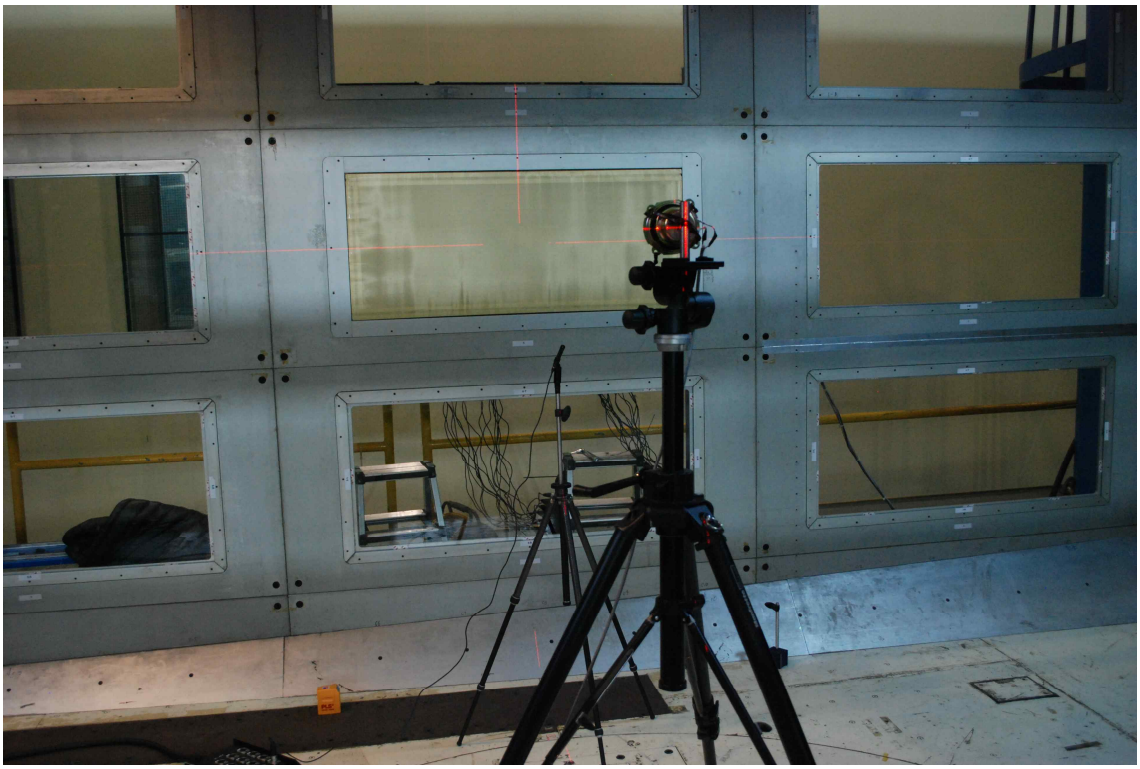


그림 2-3-41 스피커를 활용한 검증시험

그림 2-3-42에 시험장비에서 측정된 신호를 빔포밍 방법을 사용하여 분석한 결과가 나타나 있다. 분석결과에서 구축된 시험시스템은 각 주파수에서 음원의 위치를 정확히 파악하고 있음을 알 수 있다.

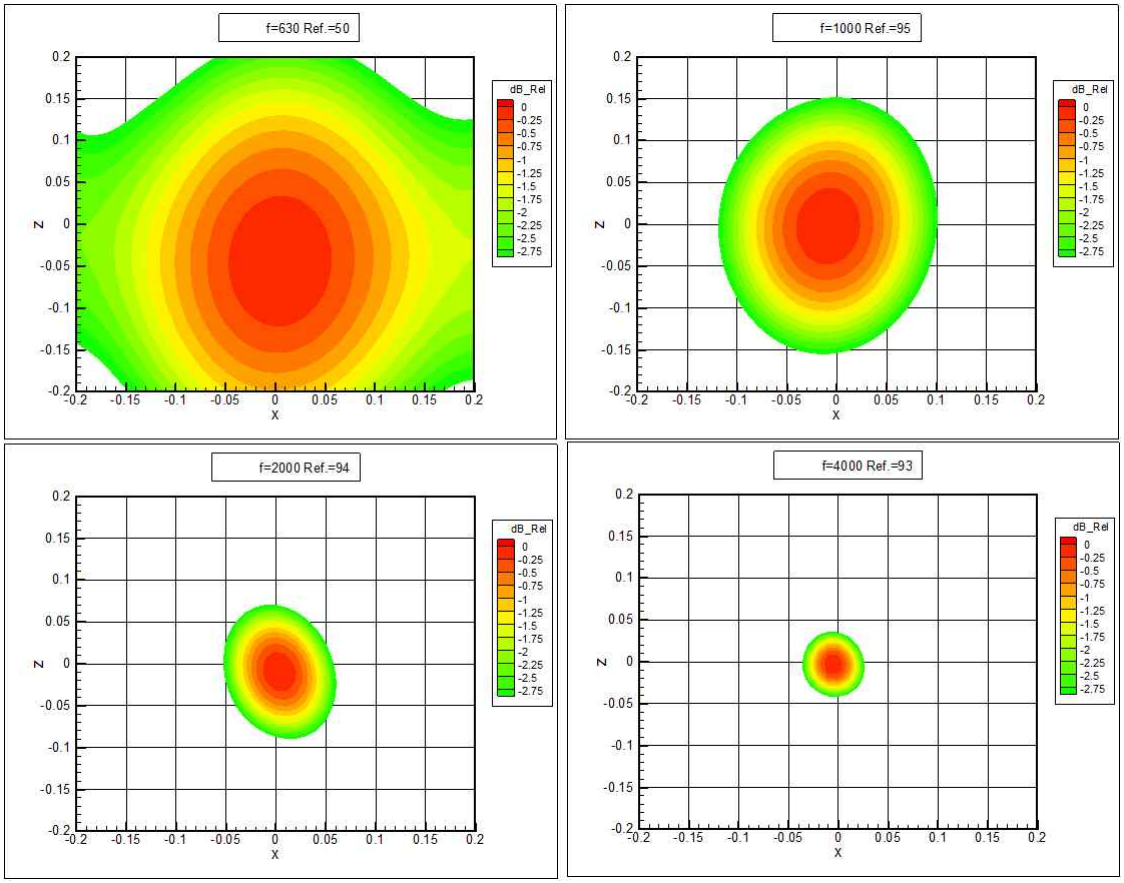


그림 2-3-42 스피커를 사용한 검증시험 결과

풍동이 운영중인 상태에서 소음시험장비의 성능을 파악하기 위해 그림 2-3-43과 같이 수직 원통봉을 시험부 중심에 설치한 후 검증시험을 수행하였다. 특정 풍속조건에서 서로 다른 주파수에 대한 검증을 수행하기 위해 3종의 원통봉(직경 10mm, 20mm, 40mm)을 음원모델로 사용하였다.



그림 2-3-43 수직 원통봉을 활용한 검증시험

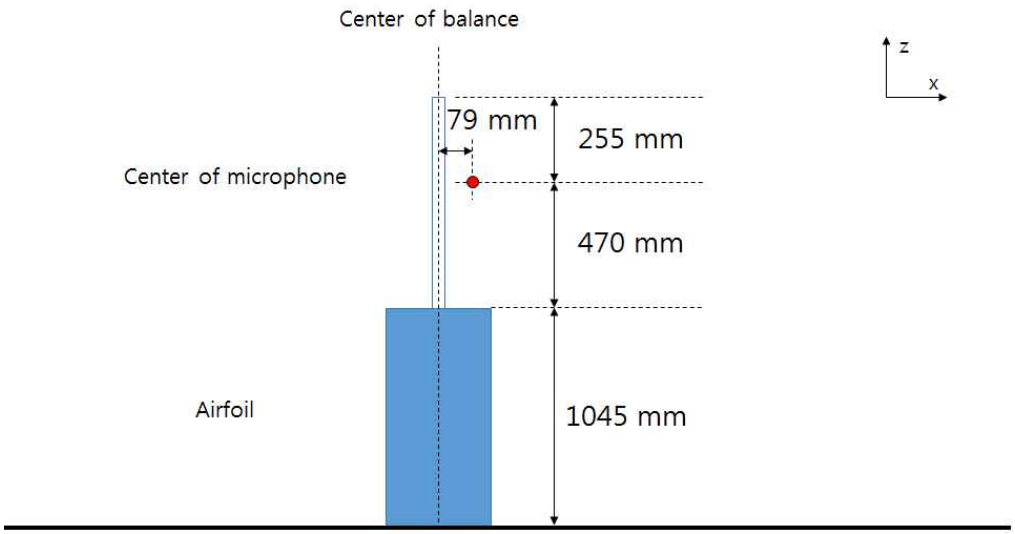


그림 2-3-44 수직 원통봉 모델 개요

표 2-3-3 수직 원통봉을 사용한 검증시험 조건

Model	Wind speed	40m/s	50m/s	60m/s	70m/s
V. Cylinder	Off	29	30	31	32
	직경 10mm	33	34	35	36
	직경 20mm	37	38	39	40
	직경 40mm	41	42	43	44

표 2-3-3에 나타난 것과 같이 검증시험은 풍속 40~70m/s 조건에서 수행되었으며, 배경소음과 비교를 위해 원통봉이 설치되지 않은 조건에서도 측정을 수행하였다. 원통봉에서 주요하게 발생되는 소음은 와류흘림에 의해 나타나며, 와류흘림 주파수는 스트라울 수를 사용하여 추정할 수 있다. 각 시험조건에서 예상되는 와류흘림 주파수가 표 2-3-4에 나타나 있다. 표 2-3-4는 스트라울 수 0.2를 사용하여 계산한 값이다.

표 2-3-4 수직 원통봉의 와류흘림 주파수

wind	직경 10mm	직경 20mm	직경 40mm
40m/s	800	400	200
50m/s	1000	500	250
60m/s	1200	600	300
70m/s	1400	700	350

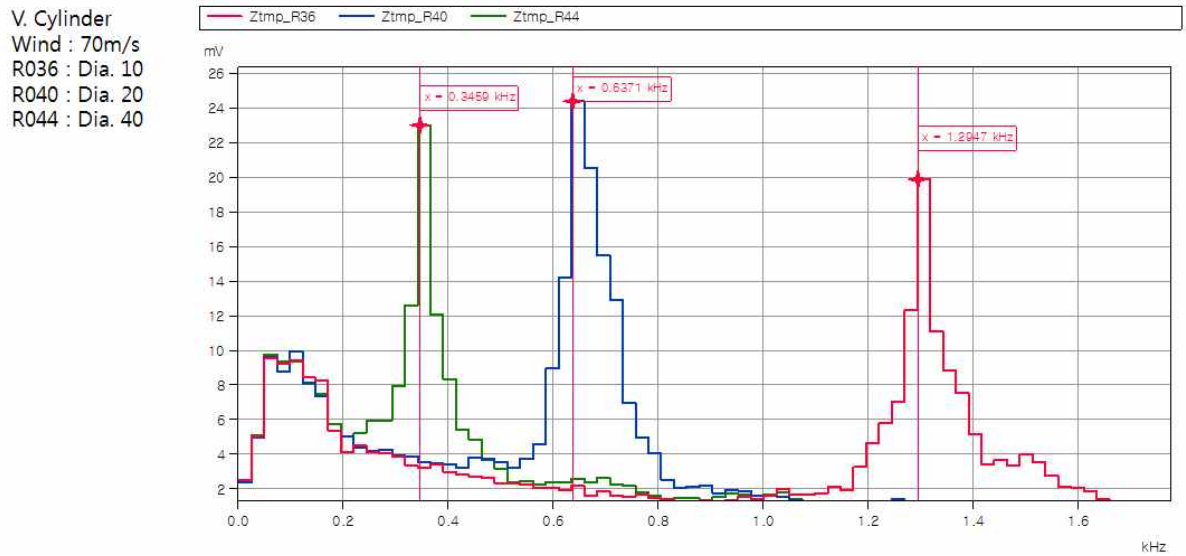


그림 2-3-45 수직 원통봉 시험 : 측정신호의 주파수 특성 검토

시험에 사용된 수직 원통봉에서 예상되는 소음이 발생하는가를 확인하기 위해 마이크로폰에서 측정된 신호의 주파수 특성을 분석하였다. 그림 2-3-45와 같이 스펙트럼 분석결과는 표 2-3-4에서 예상하였던 와류흘림에 의한 특정 주파수 소음이 잘 재현되고 있음을 알 수 있다. 상대적으로 발생소음의 크기가 가장 큰 풍속 70m/s 조건에서 수행된 시험결과가 그림 2-3-46 ~ 그림 2-3-48에 나타나 있다. 와류흘림 주파수에서 원통봉의 위치를 잘 파악하고 있으며, 그 외의 주파수 영역에서도 원통봉의 위치에서 백색소음이 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

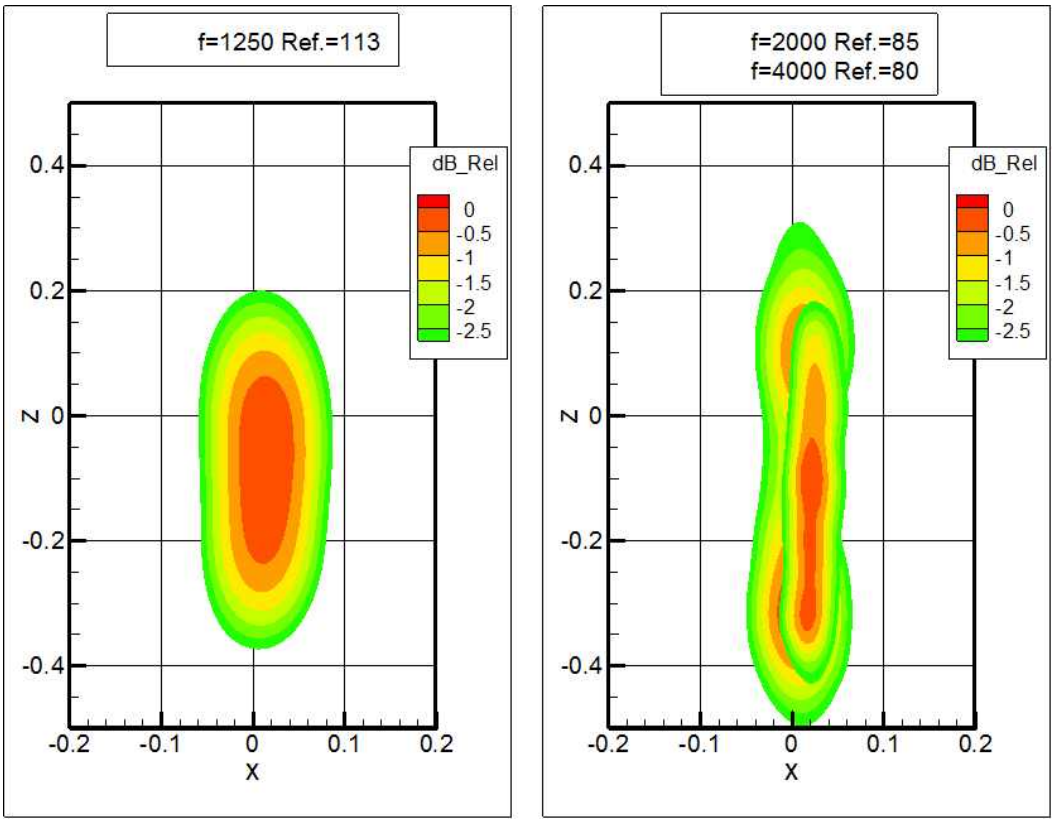


그림 2-3-46 직경 10mm 수직 원통봉 빔포밍 분석 결과

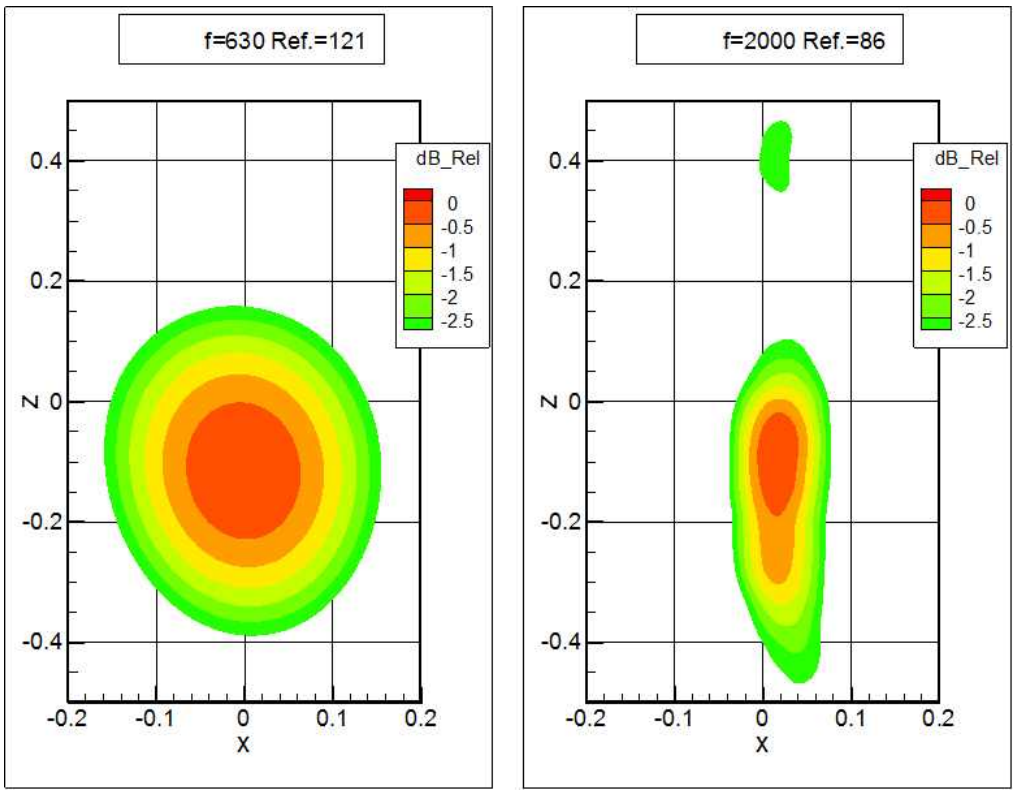


그림 2-3-47 직경 20mm 수직 원통봉 빔포밍 분석 결과

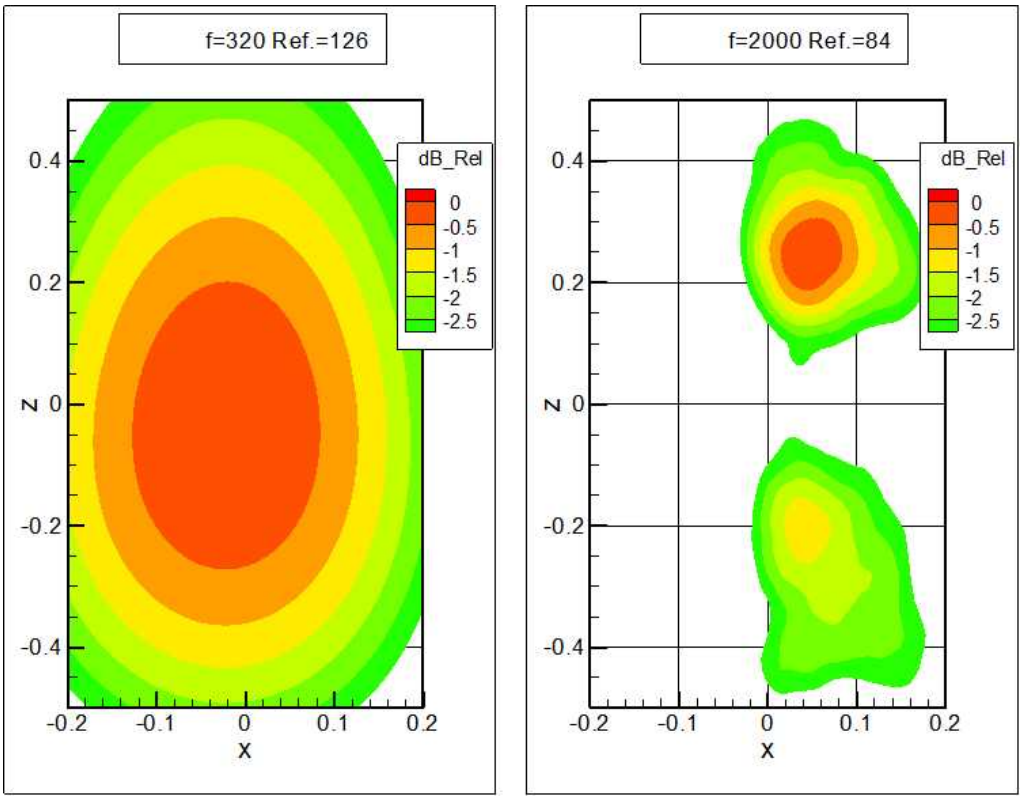


그림 2-3-48 직경 40mm 수직 원통봉 빔포밍 분석 결과

이상과 같이 스피커 및 수직 원통봉을 활용한 검증시험을 통해 구축된 폐쇄형 시험부 소음측정시스템을 사용하여 주음원의 위치 및 소음특성을 파악할 수 있음을 확인하였다. 단순한 형태의 모델이 아닌 팬터그래프와 같이 복잡한 모델에서 발생되는 소음에 대해서도 구축된 측정시스템이 활용될 수 있는가를 파악하기 위해 항우연에서 보유중인 팬터그래프 1/2 축소모델을 활용한 검증시험을 수행하였다. 시험에 사용된 팬터그래프 1/2 축소모델은 430km/h급 차세대고속철도(해무) 개발 사업에 사용된 모델로 2012년에 개방형시험부에서 기본형상에 대한 소음특성 시험이 수행된 모델이다.



그림 2-3-49 개방형시험부에서 수행된 1/2 팬터그래프 모델 소음풍동시험(2012년)



그림 2-3-50 폐쇄형시험부에서 수행된 1/2 팬터그래프 모델 소음풍동시험(2015년)

2012년에 수행된 소음시험(그림 2-3-49)은 개방형시험부에서 4m x 4m 대형 마이크로폰 어레이를 사용하여 수행되었으며, 2015년에 수행된 소음시험(그림 2-3-50)은 폐쇄형시험부에서 개발된 마이크로폰 어레이를 사용하여 수행되었다. 자료 비교를 위해 동일한 풍속조건인 60m/s 조건에서 수행된 측정결과를 분석하였다. 그림 2-3-51에 개방형시험부(TA0180R0400)와 폐쇄형시험부(TA0209R0029)에서 측정된 신호를 빔포

밍기법으로 분석한 결과가 나타나 있다. 빔포밍기법은 이론적으로 음원으로 추정되는 값을 출력하므로 측정위치 또는 시험부종류와 무관한 결과를 도출하여야 한다. 그림 2-3-51에서 개방형시험부 결과는 좀 더 주변 잡음신호가 작게 나타나고, 폐쇄형시험부 결과는 저주파수 영역에서 공간분해능이 좀 더 우수하다는 차이점은 있으나 전반적인 경향은 매우 유사하게 나타나고 있다.

마이크로폰 측정신호에 대한 직접적인 비교를 위해 그림 2-3-52와 같이 팬헤드 주변에 위치한 마이크로폰의 측정신호를 선택한 후, 동일거리 조건(폐쇄형시험부 거리 조건)으로 측정값을 환산하여 비교하였다. 그림 2-3-53에 나타난 것과 같이 개방형 시험부에서 측정된 소음값의 주파수 특성은 폐쇄형시험부에서 측정된 소음값의 주파수 특성과 유사한 결과를 보이고 있다.

이상의 분석결과에서 본 과제를 통해 구축한 고속철도 팬터그래프 소음풍동시험을 위한 폐쇄형시험부 소음측정 시스템의 성능에 대해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 구축된 소음측정시스템은 시험설비가 운영중인 조건에서 주 소음원의 위치를 적절하게 파악하고 있다.
- 구축된 소음측정시스템을 통해 구한 빔포밍 분석결과는 소음원의 위치정보 뿐만 아니라 세기정보도 개방형시험부 시험조건과 유사한 결과를 보여주고 있다.
- 구축된 소음측정시스템을 활용하여 340km/h 이상의 고속시험조건에서 팬터그래프 소음특성을 실험적으로 파악할 수 있다.

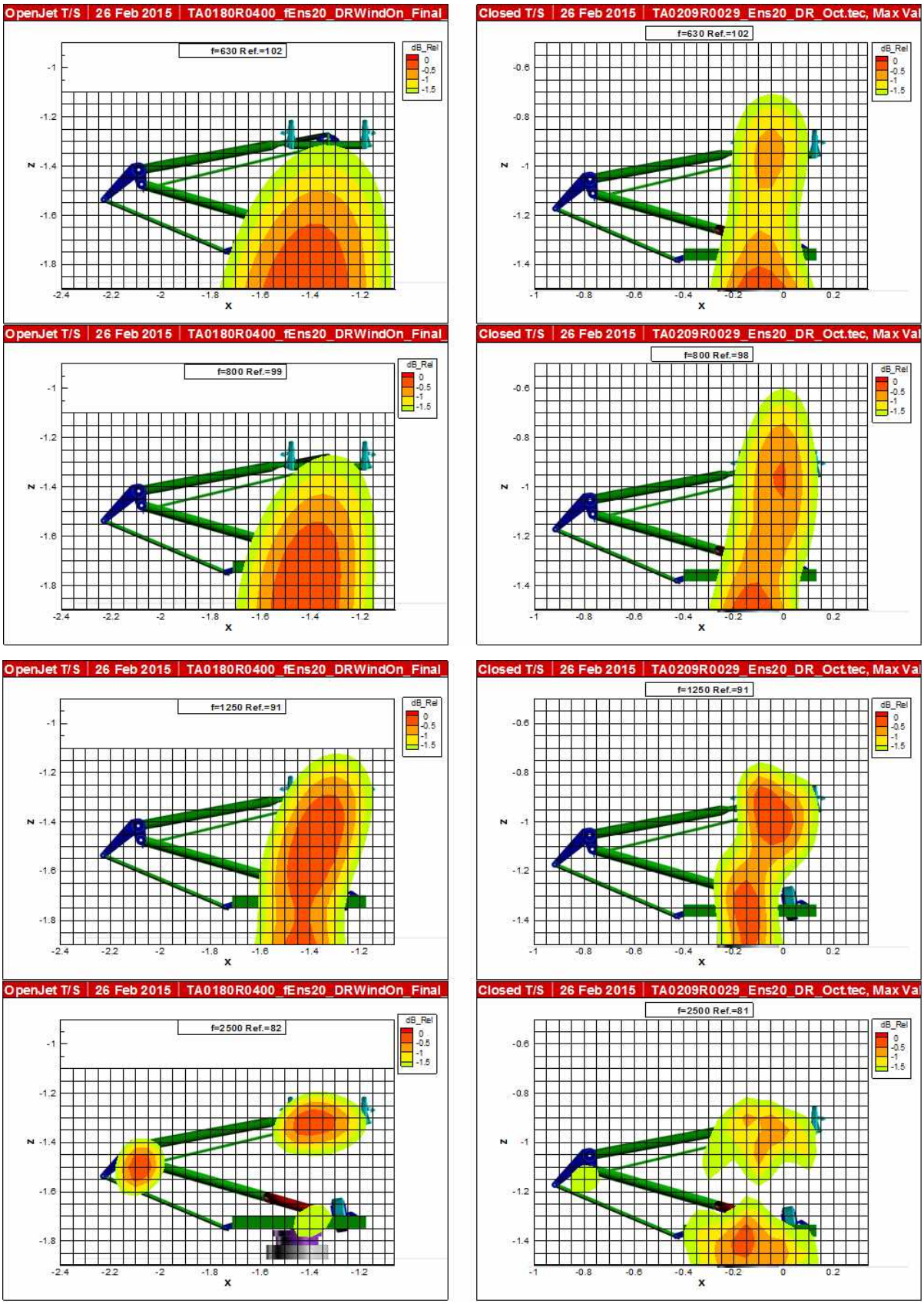
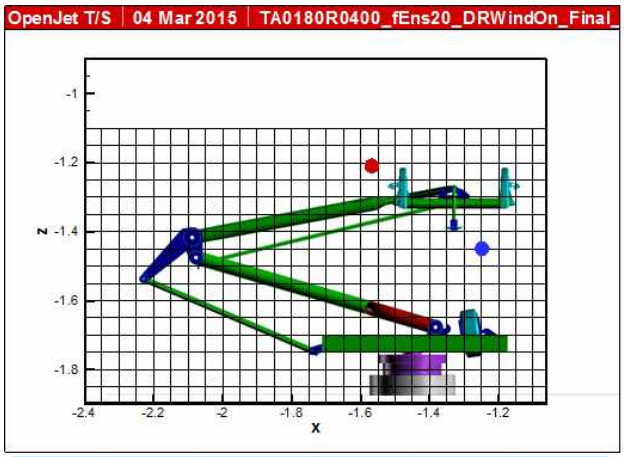
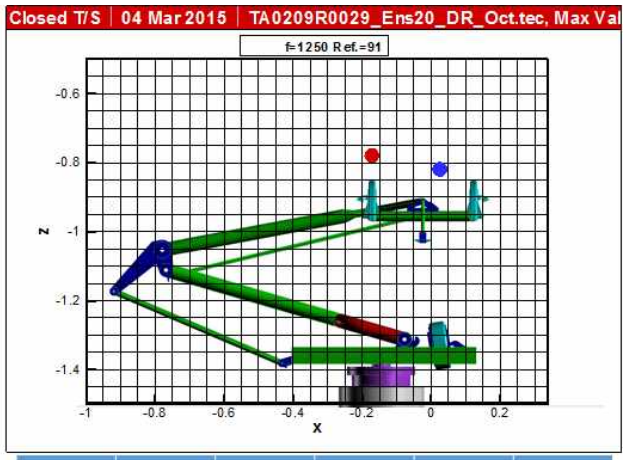


그림 2-3-51 1/2 팬터그래프 소음시험 결과 비교 : (좌) 개방형시험부 (우) 폐쇄형시험부



Ch. #	Amp.	X	Y	Z	r
31	73.6	-1.568	5.7	-1.209	5.70
32	82.2	-1.248	5.7	-1.449	5.70



Ch. #	Amp.	X	Y	Z	r
46	111.6	-0.172	-2.010	-0.779	2.01
55	124.9	0.025	-2.010	-0.819	2.01

그림 2-3-52 팬헤드 주변 마이크로폰 위치

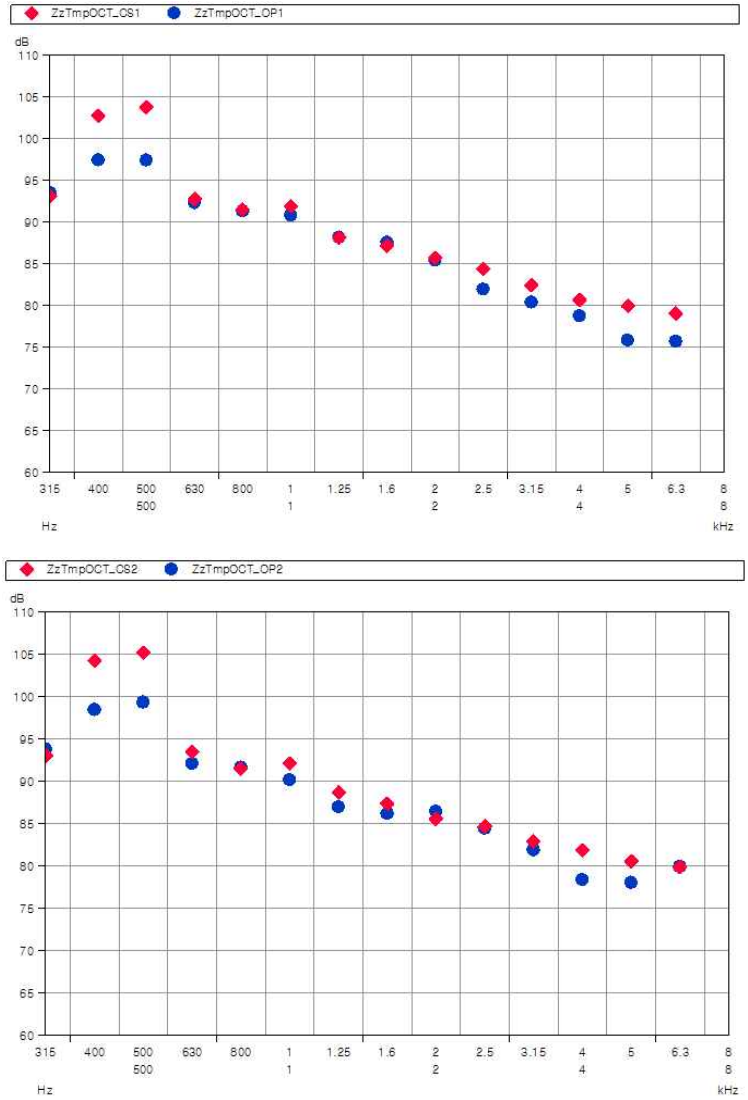


그림 2-3-53 마이크로폰 측정신호 비교 : (상) 1번 위치, (하) 2번위치
붉은 사각형(폐쇄형시험부), 파란 원(개방형시험부)

다. 최적 설계 풀스케일 팬터그래프 형상 제작

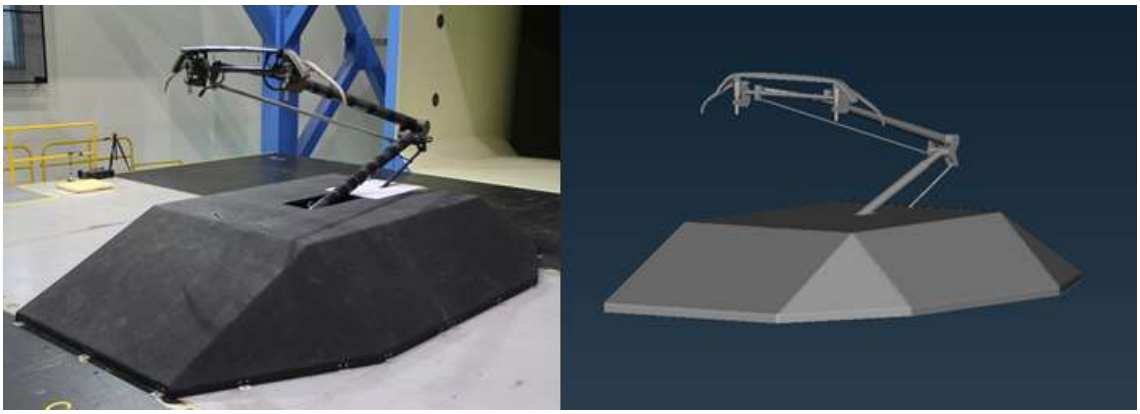


그림 2-3-54 KTX-2(KTX 산천)의 CX 팬터그래프

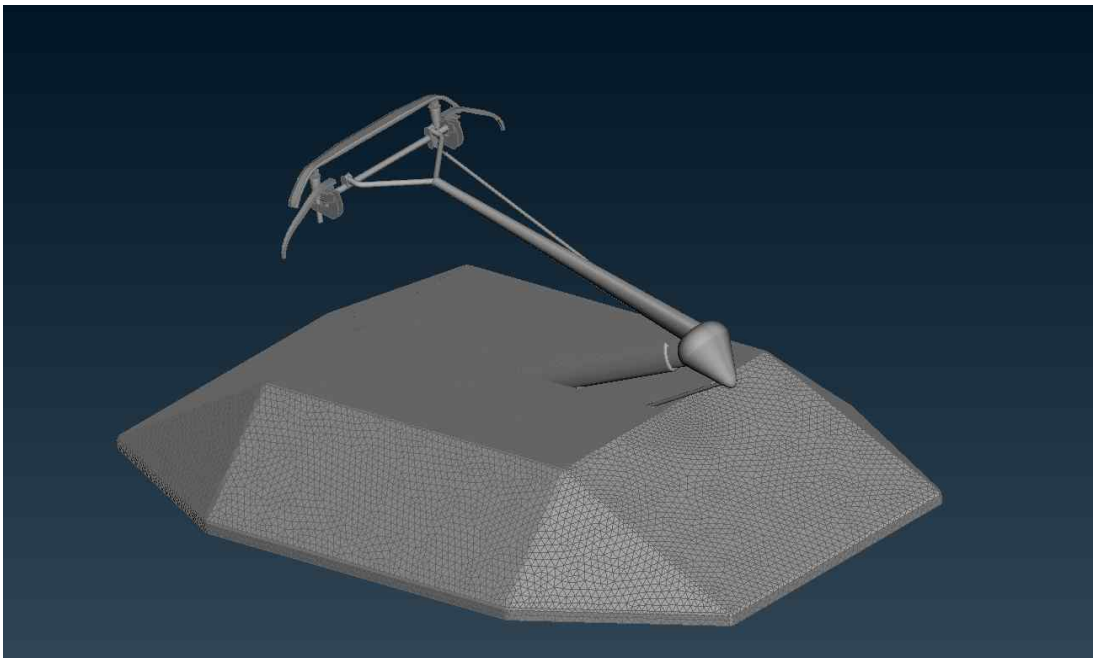


그림 2-3-55 2차년도 팬터그래프 최적설계안

1차년도와 2차년도의 연구에서 실험과 전산해석을 통해서 기존 KTX-2에서 사용되던 CX 팬터그래프의 공력저항과 공력소음의 주요 원인들을 파악하여 주 소음원 및 공력저항의 원인으로 생각되는 팬헤드, 팬터그래프 암, 팬터그래프 암 연결부(Knee)의 최적설계를 수행하여 그림 2-3-55와 같은 형태의 팬터그래프 최적설계안을 제시하였다. 3차년도에는 2차년도의 최적설계안을 바탕으로 풍동실험에서 사용할 풀스케일 팬터그래프 형상의 제작을 진행하였다.

(5) 팬터그래프 암형상 변경

2차년도에 설계된 팬터그래프 암형상의 경우 최적설계된 단면의 효과를 확인하기

위해서 기존 팬터그래프의 유입류 방향의 단면적을 유지한 상태에서 최적설계된 유선형 단면형상을 적용하였다. 그로인해 그림 2-3-56과 같이 암연결부에서 간섭이 발생하여 실제 모델제작이 불가능하며 전체 암의 질량증가로 인한 팬터그래프 동특성에서 문제가 발생하였다.

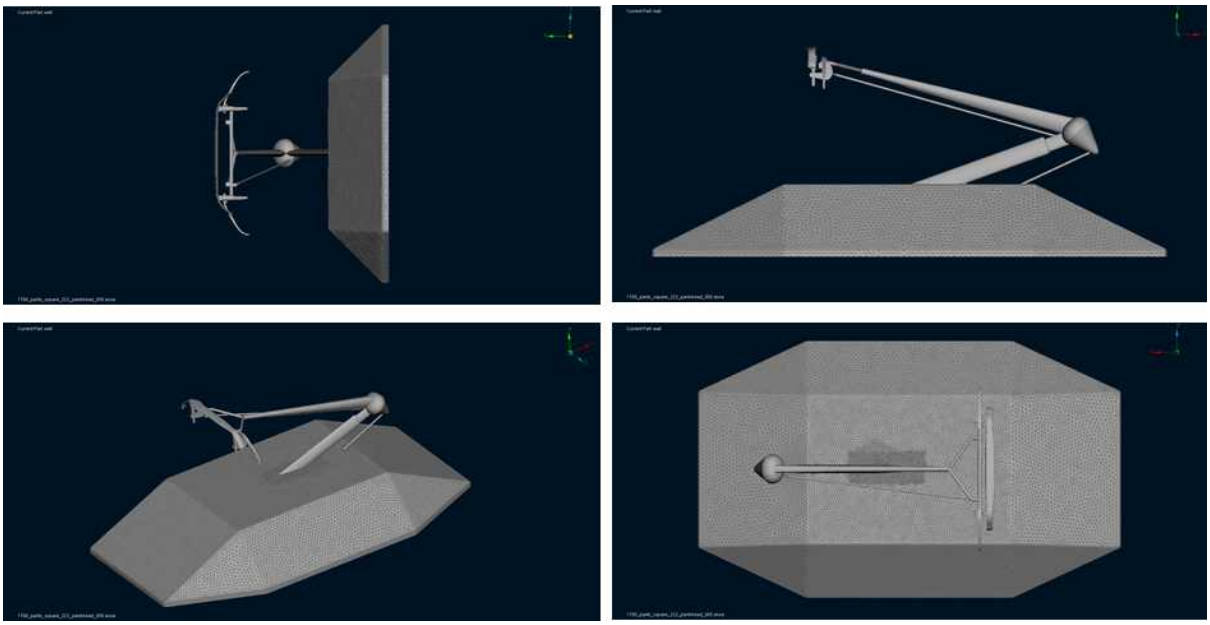


그림 2-3-56 2차년도 팬터그래프 최적설계안

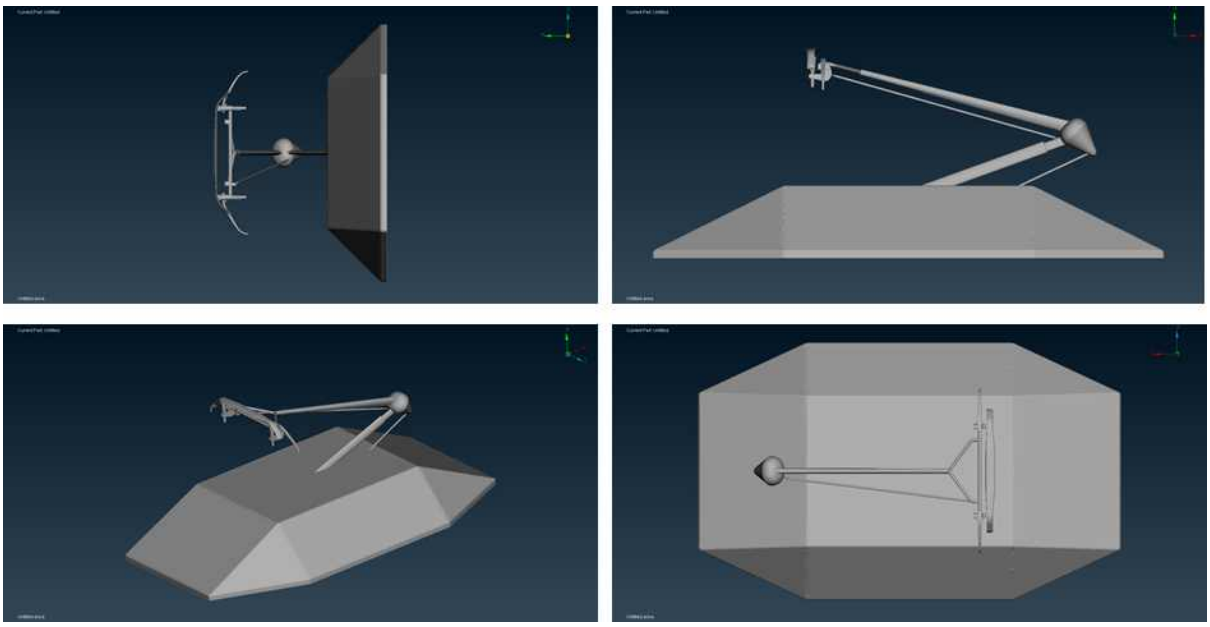


그림 2-3-57 암 형상이 변경된 팬터그래프 설계안

이를 해결하기 위해서 3차년도에 제작되는 팬터그래프 모델에서는 그림 2-3-57과 같이 암단면을 기존에 비해서 2/3로 축소된 설계를 사용하였다.

(6) 팬터그래프 암 연결부 캡 설계변경



그림 2-3-58 최적설계 풀스케일 팬터그래프 모델

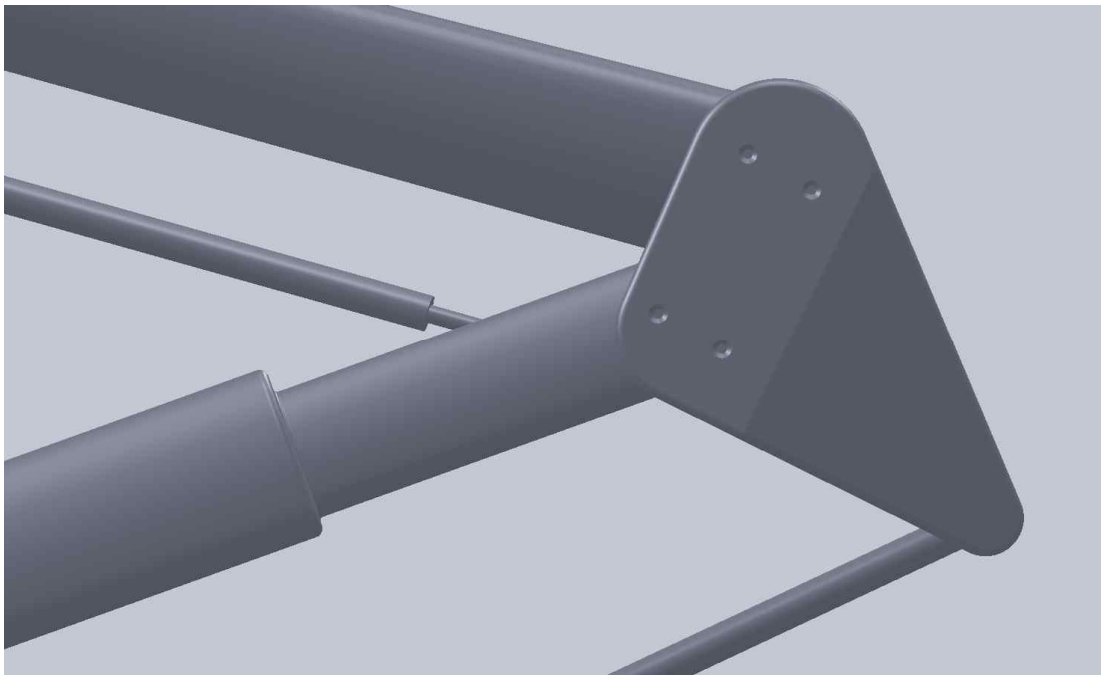


그림 2-3-59 최적설계 풀스케일 팬터그래프 모델 암 연결부 캡

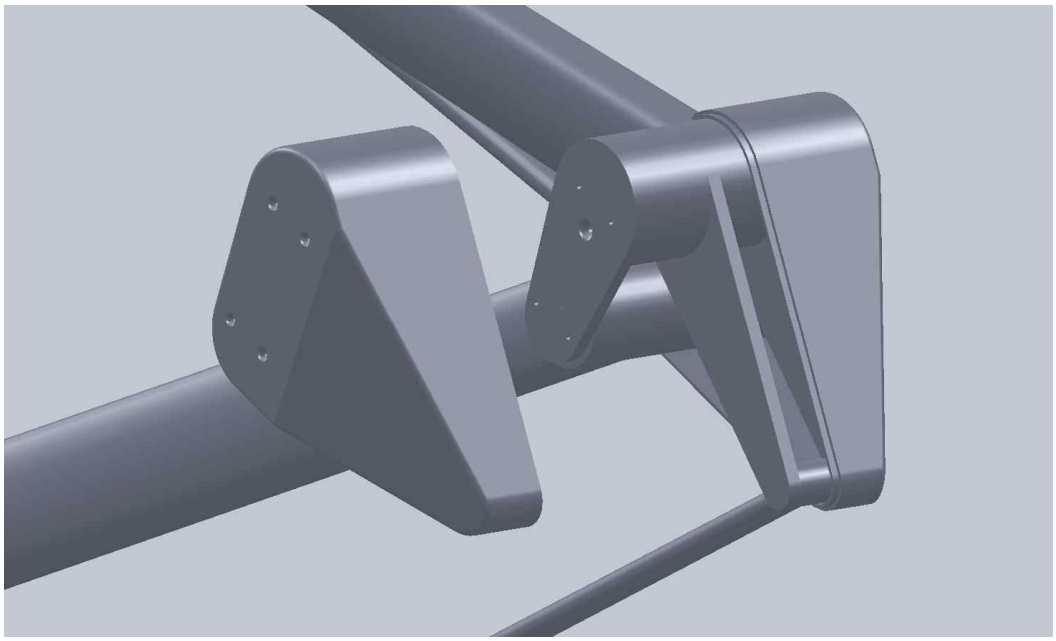


그림 2-3-60 최적설계 풀스케일 팬터그래프 암 연결부 조립도

변경된 암 형상을 적용하여 그림 2-3-58과 같이 풀스케일 팬터그래프의 3D 캐드모델을 제작하였다. 하부 암 아래의 하부형상의 경우 1차년도 실험과 마찬가지로 하부 페어링으로 가려질 예정이며 실제 고속열차에서도 하부 리세스에 의해서 하부암 아래의 형상을 유동에 노출되지 않으므로 고려하지 않고 형상을 설계하였다.

2차년도에 설계된 유선형의 암 연결부 캡의 경우 실제 제작이 어려워 그림 2-3-59와 같이 제작이 가능한 형태로 설계를 변경하였다. 그림2-3-60과 같이 2개의 파트로 구성되어 암에 체결되는 형태로 제작되었다.

그러나 이러한 형태의 연결부 캡의 경우 캡의 후방에서 그림2-3-61과 같은 삼각주 후방에서의 유동과 유사하게 강한 와류가 발생하여 공력소음과 공력저항에 악영향을 줄 수 있다. 실제 그림 2-3-62의 2차년도의 유선형 캡 주변 유동의 전산해석 결과를 보면 캡 설치 전보다는 후방의 유동교란과 와류가 약하긴 하지만 유선형 캡 뒤에서 와류가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 유동진행방향이 반대인 비정상상태인 open knee 상황에서는 연결부 캡 후방의 유동에 수직인 면적이 오히려 공력소음과 공력저항에 설치전보다 악영향을 줄 가능성이 높다.

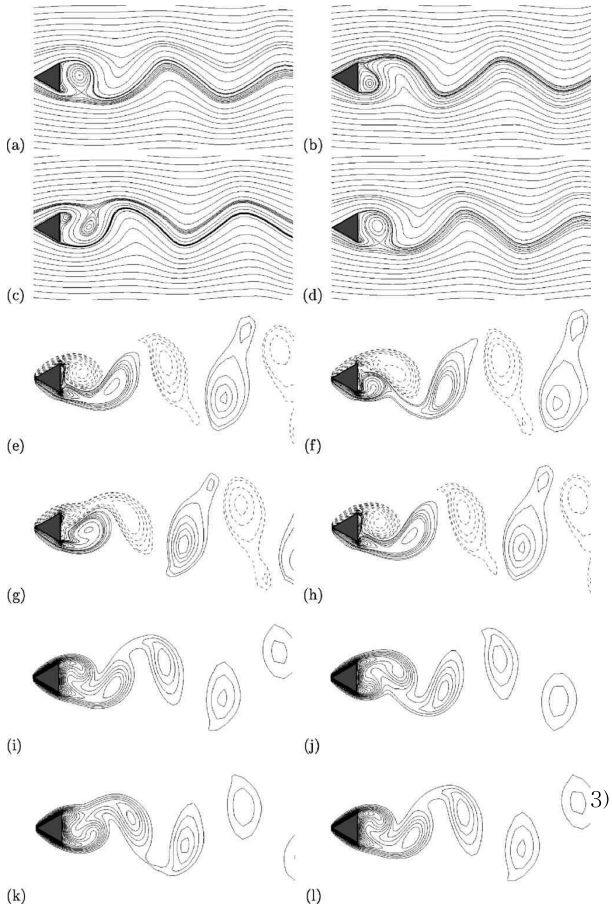


그림 2-3-61 삼각주 유동 후방의 유선[3]

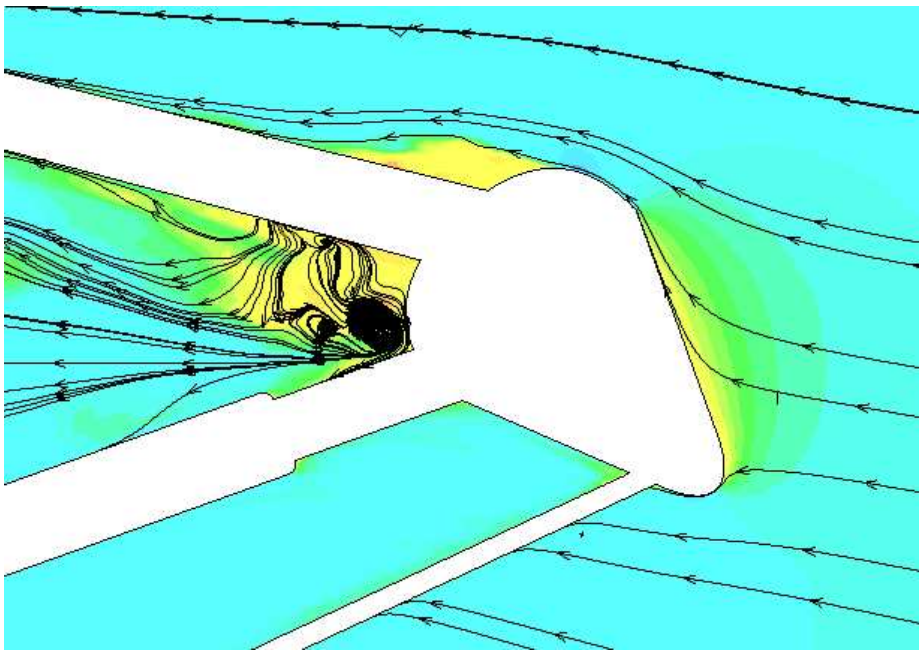


그림 2-3-62 2차년도 유선형 캡 전산해석 결과 (속도 contour 및 유선)

3) Arnab Kumar De, Amaresh Dalal, "Numerical Study of Laminar Forced Convection Fluid Flow and Heat Transfer From a Triangular Cylinder Placed in a Channel", journal of Heat Transfer 129(5), 646-656 (Jun 30, 2006)

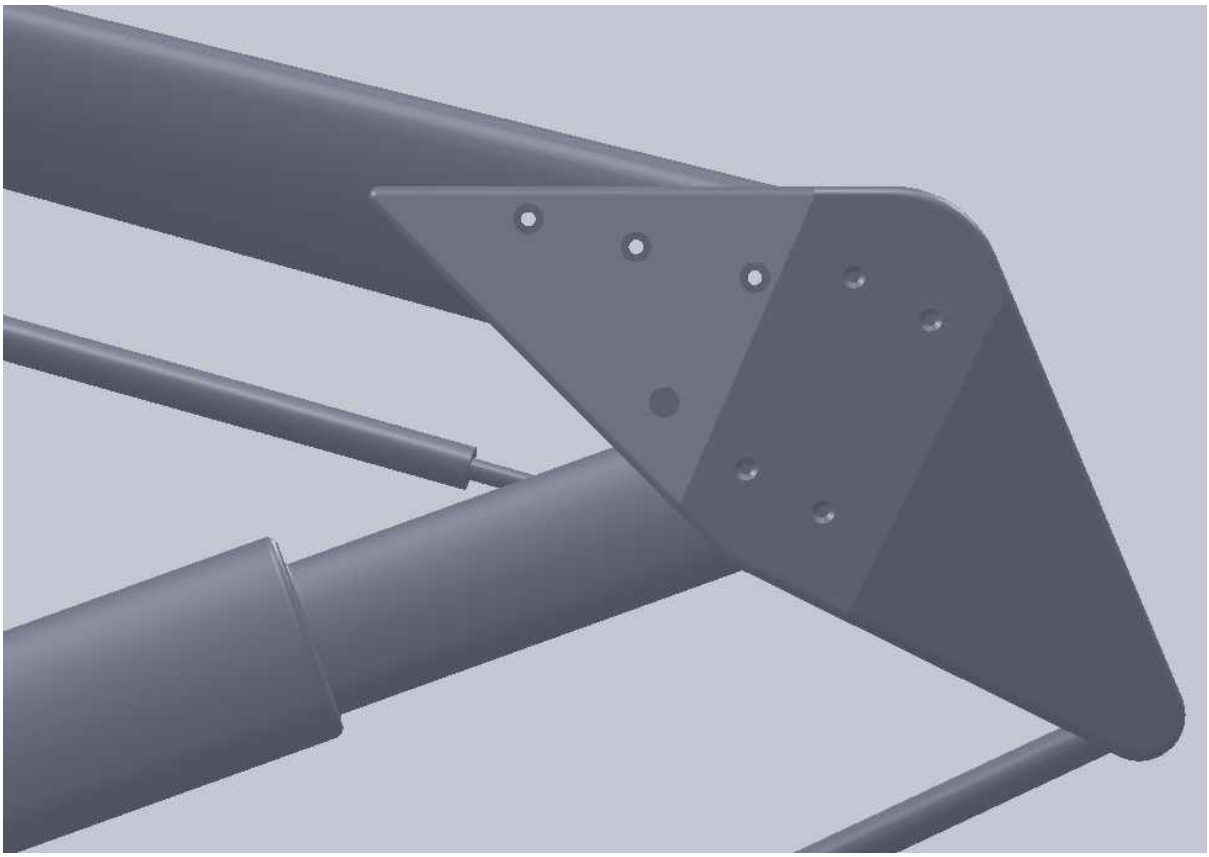


그림 2-3-63 3차년도에 재설계된 암 연결부 캡

이를 해결하기 위해서 그림 2-3-63과 같이 기존 팬터그래프 암 연결부 캡 형상 후방을 연장하여 암 연결부를 재설계 하였다.

(7) 팬터그래프 팬헤드 각도 조절

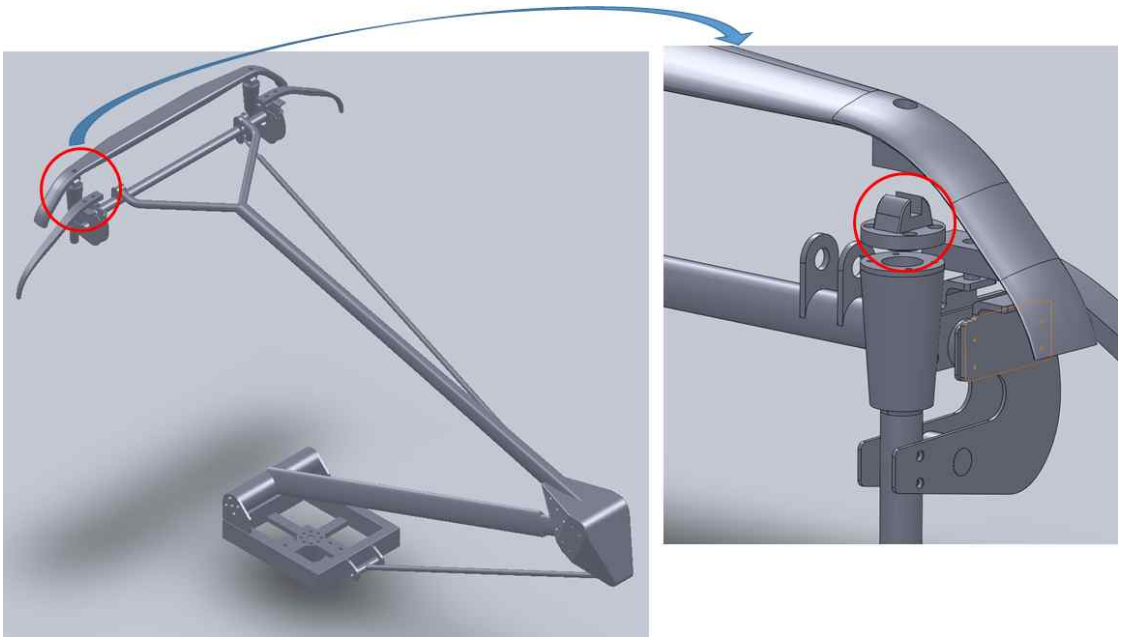


그림 2-3-64 팬터그래프 팬헤드 각도 조절 메커니즘

팬터그래프 팬헤드 각도에 따른 영향을 파악하기 위해서 팬헤드 각도를 조절할 수 있도록 형상을 설계하였다. 그림 2-3-64와 같이 팬헤드가 체결되는 하부에 체결되는 파트를 5도, 2.5도. 0도에 대해서 각각 제작하여 팬헤드 각도에 따른 풍동실험을 수행할 수 있도록 설계하였다.

(8) 팬터그래프 하부 덮개

1차년도 실험과 마찬가지로 실제 열차에서 유동에 노출되지 않는 하부 형상의 영향을 최소화 하기 위해서 추가로 하부 덮개를 제작하였다. 그림 2-3-65와 같이 유동이 진행되는 앞 뒤로 경사를 가지며 측풍 실험시의 영향을 최소화 하기 위해서 앞뒤 좌우 대각선의 8방향에서 경사를 가지는 형태로 설계되었다. 그림2-3-66과 같이 실제 실험모델에 적용된다.

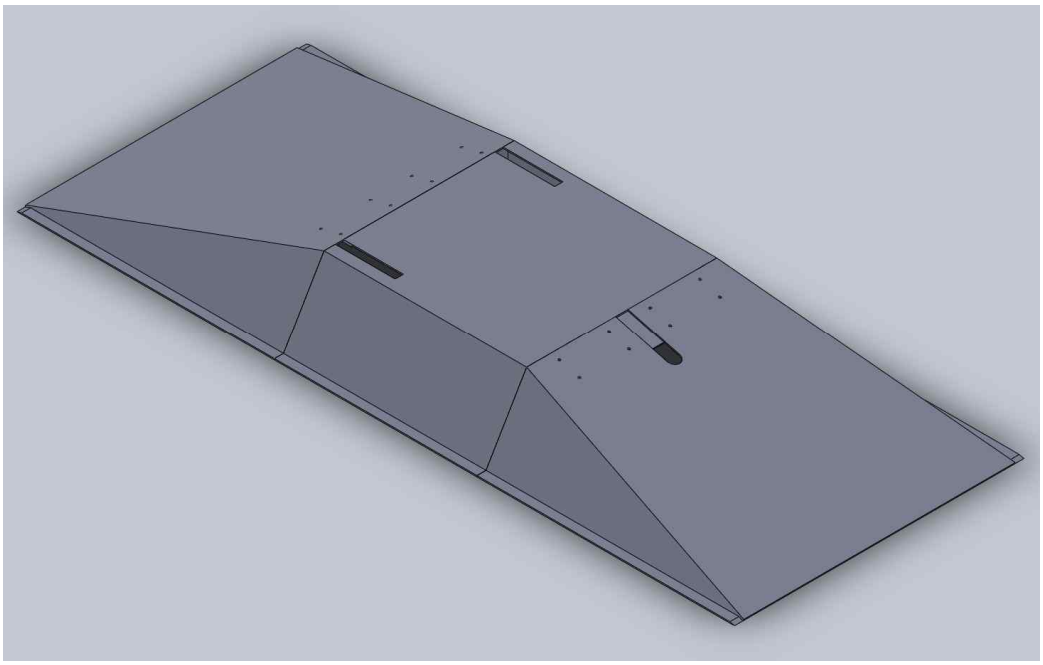


그림 2-3-65 팬터그래프 하부 덮개

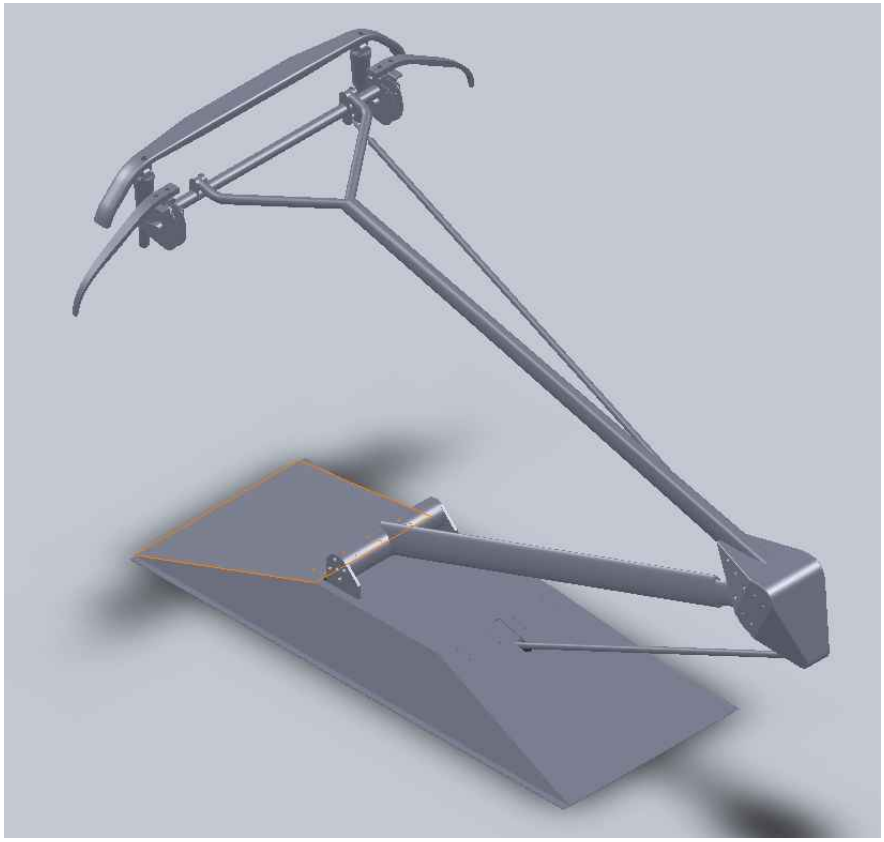


그림 2-3-66 하부덮개가 설치된 최적설계 팬터그래프 모델

라. 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 모델의 공력 성능 및 소음 시험

(1) 공력 성능 시험 장치

본 시험에 사용된 풍동은 중형 아음속 풍동으로서 그림 2-1-96과 같다. 시험 모델이 장착되는 시험부는 폭이 4m, 높이 3m, 길이 10m 이며, 시험부 최대풍속은 120 m/s이다. 시험 사용된 풍동저울은 그림 2-3-67과 같은 외장형 저울로 6분력을 측정할 수 있는 피라미드형으로 가상 중심(하중 측정 중심)이 시험부 중심에 위치해 있다.



그림 2-3-67 6분력 외장형 저울

시험에 사용된 6분력 외장형 저울은 최대하중범위에 적용할 수 있는 교정계수와 최대하중의 50% 범위에 적용할 수 있는 교정계수를 가지고 있다. 본 시험에서는 예상되는 하중범위가 최대하중의 50% 미만이므로 측정정밀도 향상을 위해 50%하중범위의 교정계수를 적용하였다. 시험에 적용된 풍동저울의 최대하중범위 및 교정정밀도는 표 2-3-5과 같다.

표 2-3-5 내장형 풍동저울(KARI-IB6-009) 하중범위 및 정밀도

	NF	PM	SF	YM	RM	AF
전체하중범위(FS)	1500	600	1500	600	600	400
Accuracy(% of FS)	0.005	0.008	0.004	0.008	0.015	0.012

(2) 공력 성능 및 공력 소음 시험 수행

앞 절에서 기술한 소음측정시스템을 활용하여 서울대에서 연구개발한 팬터그래프(이하 SNU 팬터그래프)의 소음특성을 측정하였다. SNU 팬터그래프는 그림 2-3-68과 같은 형상으로 KTX-2 팬터그래프를 기준으로 설계되었다. 소음저감을 위해 팬헤드의 형상을 저소음형상으로 변경하였으며, 관절부위에 소음저감 덮개를 설치하였다.

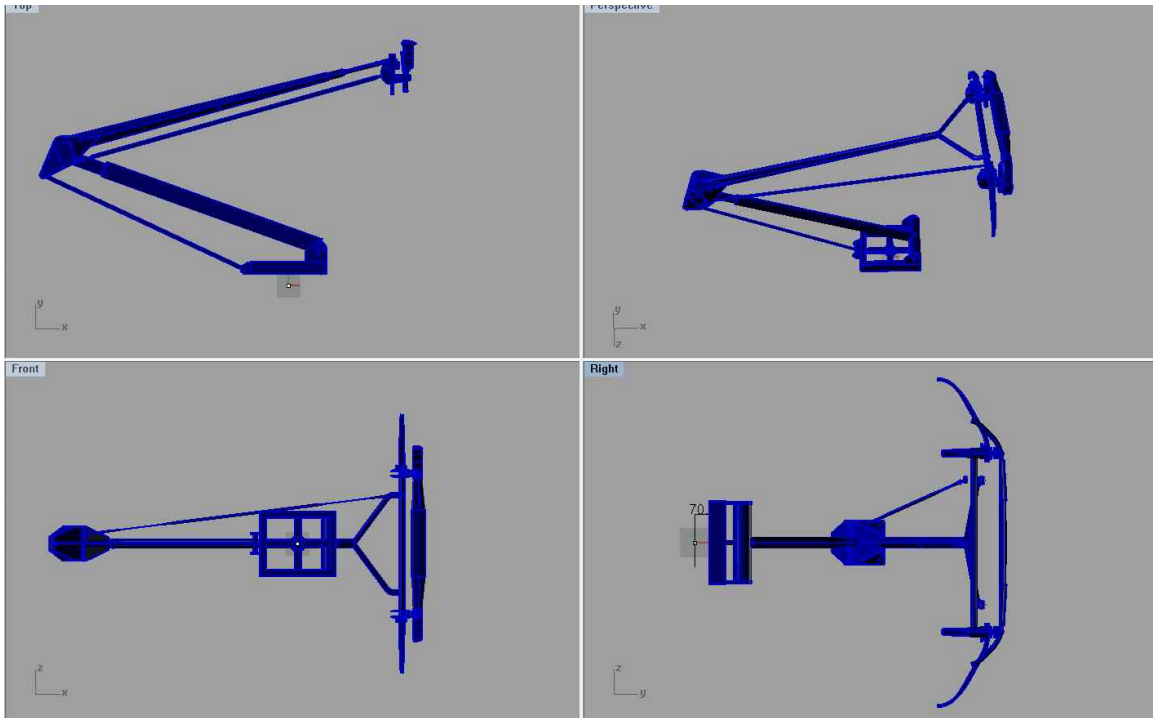


그림 2-3-68 설계된 팬터그래프 형상

설계된 팬터그래프를 풍동시험부에 장착할 경우 팬터그래프 하부 구조물이 흐름에 노출되기 때문에 이로 인한 공력소음이 추가로 발생하게 된다. 실제 철도차량의 경우 하부구조물은 매립 또는 덮개장착 등을 통해 흐름에 노출하지 않으므로, 풍동시험도 하부에 흐름이 유입되지 않도록 추가 덮개를 설치하여 진행하였다. 그림 2-3-69와 같이 하부덮개는 폭 700mm, 길이 1735mm, 높이 175mm의 쐐기형 구조물로 팬터그래프 하부구조물을 감싸고 있는 형상이다.

표 2-3-6에 풍동시험 조건이 나타나 있다. 기준 방향은 정상운행조건인 'Closed knee'조건이며, 요각 0도, 2도 4도 조건에 대해 시험이 수행되었다. 팬헤드의 각도가 미치는 영향을 파악하기 위해 헤드각도 -5, -2.5, 0, 2.5, 5도 조건에 대해 시험이 수행되었다. 비상운영조건인 'Open knee' 조건은 팬헤드 각도 0도에 대해서만 시험이 수행되었다. 모든 시험조건에서 풍속은 45m/s, 60m/s, 77m/s, 97m/s에 대해 측정이 수행되었다. 그림 2-3-71에 시험모델과 마이크로폰의 위치가 나타나 있다.

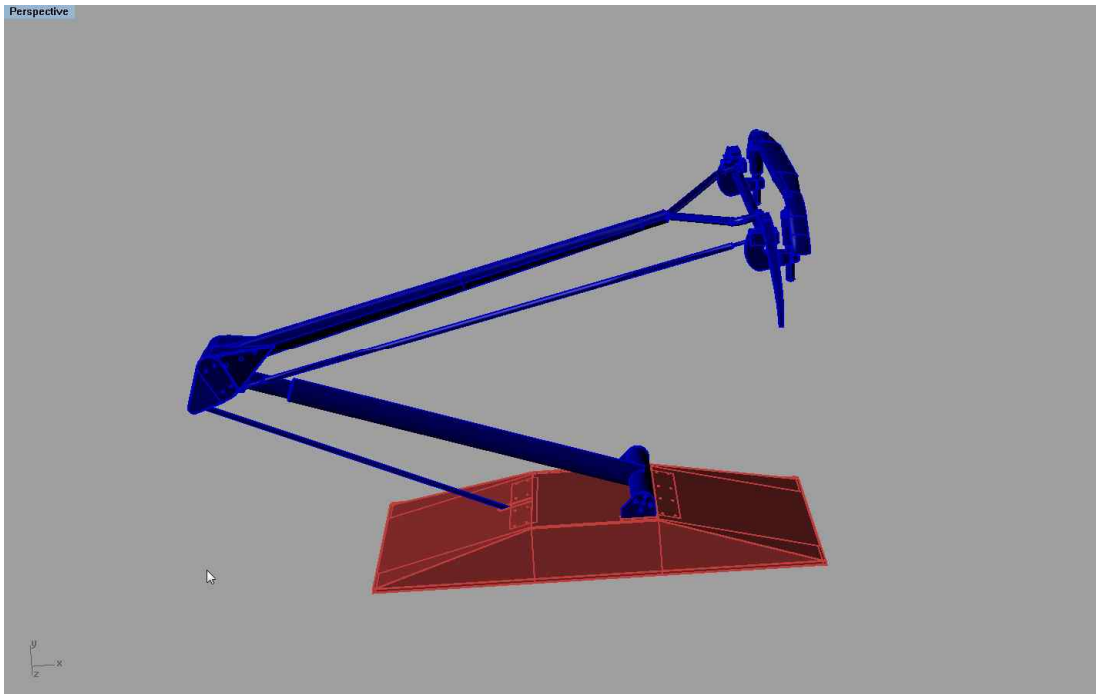


그림 2-3-69 하부 덮개가 장착된 시험모델



그림 2-3-70 시험 모델의 풍동 설치 모습

표 2-3-6 SNU 모델 풍동시험 조건

RUN	Direction	HeadA	Yaw
1	Closed knee	0	0
2			2
3			4
4			0
5		−2.5	0
6			2
7			4
8		2.5	0
9			2
10			4
11		−5	0
12			2
13			4
14		5	0
15			2
16			4
17			0
18	Open knee	0	0
19			2
20			4
21	N/A	Fairing	O
22		Fairing	C
23		X	X

표 2-3-7 시험풍속 조건

풍속 [m/s]	45	60	77	97
[km/h]	162	216	277	349

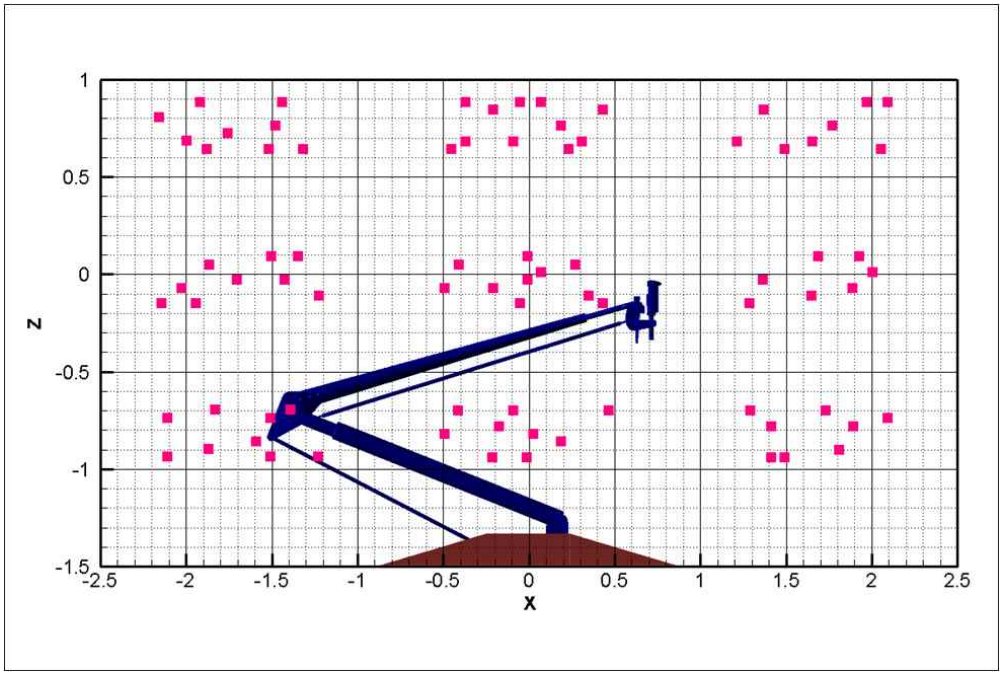


그림 2-3-71 마이크로폰과 시험모델의 위치

(3) 공력 소음 시험 결과

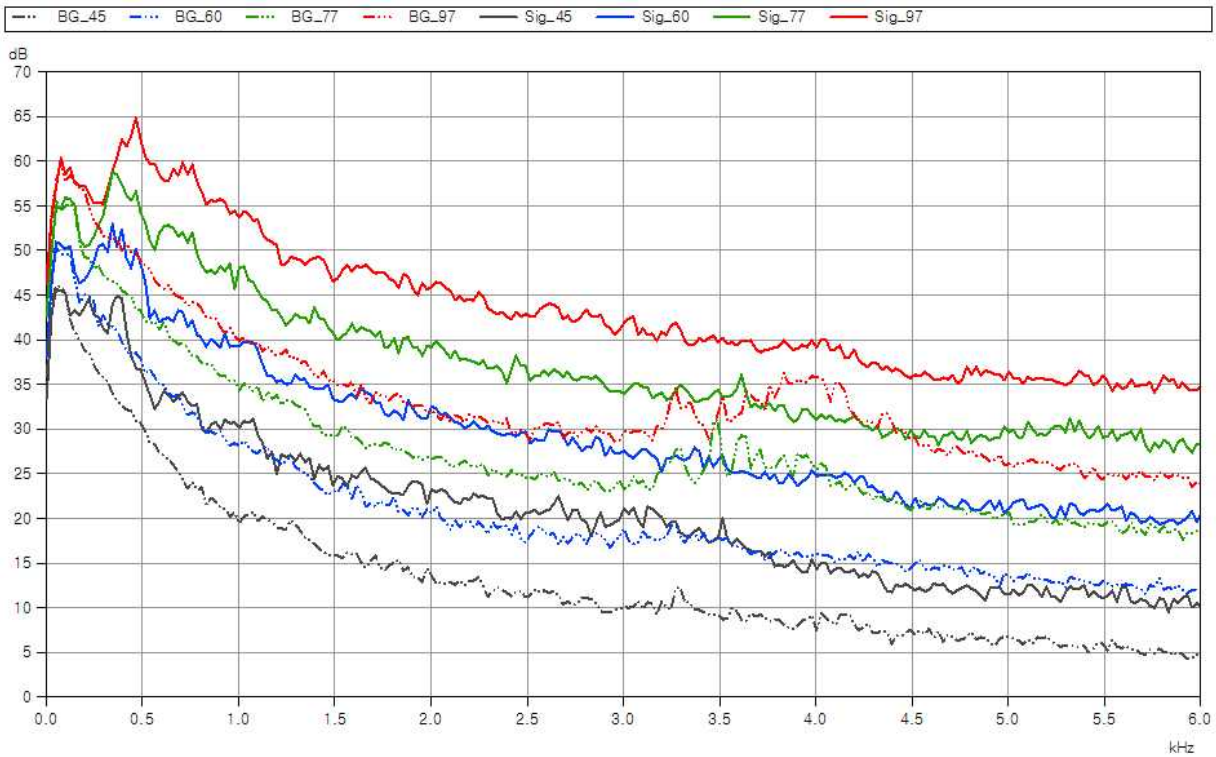


그림 2-3-72 배경소음 비교

그림 2-3-72에 각 풍속조건에서 배경소음과 모델이 설치된 상태의 소음을 비교하

였다. 500Hz 이상의 주파수 영역에서는 모델소음이 배경소음보다 5dB 이상 큰 값을 나타내고 있다.

기준 시험조건인 RUN 1(팬헤드 0도, 요각 0도)의 풍속별 빔포밍 결과가 그림 2-3-73에서 그림 2-3-76에 나타나 있다. 빔포밍 결과는 주파수별 등고선 형태로 나타내었으며, 분석영역에서 최대값에 대한 상대값으로 0 ~ -3dB 값까지를 표기하였다. 그림 2-3-73 에서 팬터그래프의 주소음원은 팬헤드 부위로 분석범위(0.5kHz ~ 3.15kHz)에서 가장 주요한 소음원으로 작용하고 있다. 관절부위 소음은 2kHz이상 주파수 영역에서 팬헤드 소음대비 -3dB 이내의 값을 보이고 있다. 풍속 60m/s 조건에서는 팬헤드 부위가 가장 주요한 소음원으로 작용하고 있으며, 800Hz 부근에서는 관절소음도 나타나고 있다. 77m/s 조건에 대한 시험결과는 그림 2-3-75에 나타나 있으며, 앞선 결과와 동일하게 팬헤드가 가장 주요한 소음으로 나타나고 있다. 1kHz 및 2kHz 이상 주파수에서 관절소음이 추가로 나타나고 있다. 풍속 97m/s 조건에 대한 해석결과인 그림 2-3-76도 동일한 결과를 보여주고 있다.

그림 2-3-77에 풍속에 따른 팬헤드 및 관절부위의 빔값 비교결과가 나타나 있다. 그림에서 1.6kHz 이하에서는 팬헤드 소음이 주요하나, 2kHz 이상의 고주파 영역에서는 관절부위에서 발생하는 소음도 팬헤드와 유사한 크기로 나타나고 있음을 알 수 있다. 풍속에 대한 반응은 팬헤드와 관절부위가 유사한 경향을 보이고 있다. 풍속에 대한 빔값의 기울기는 평균 4.3으로 나타났다.

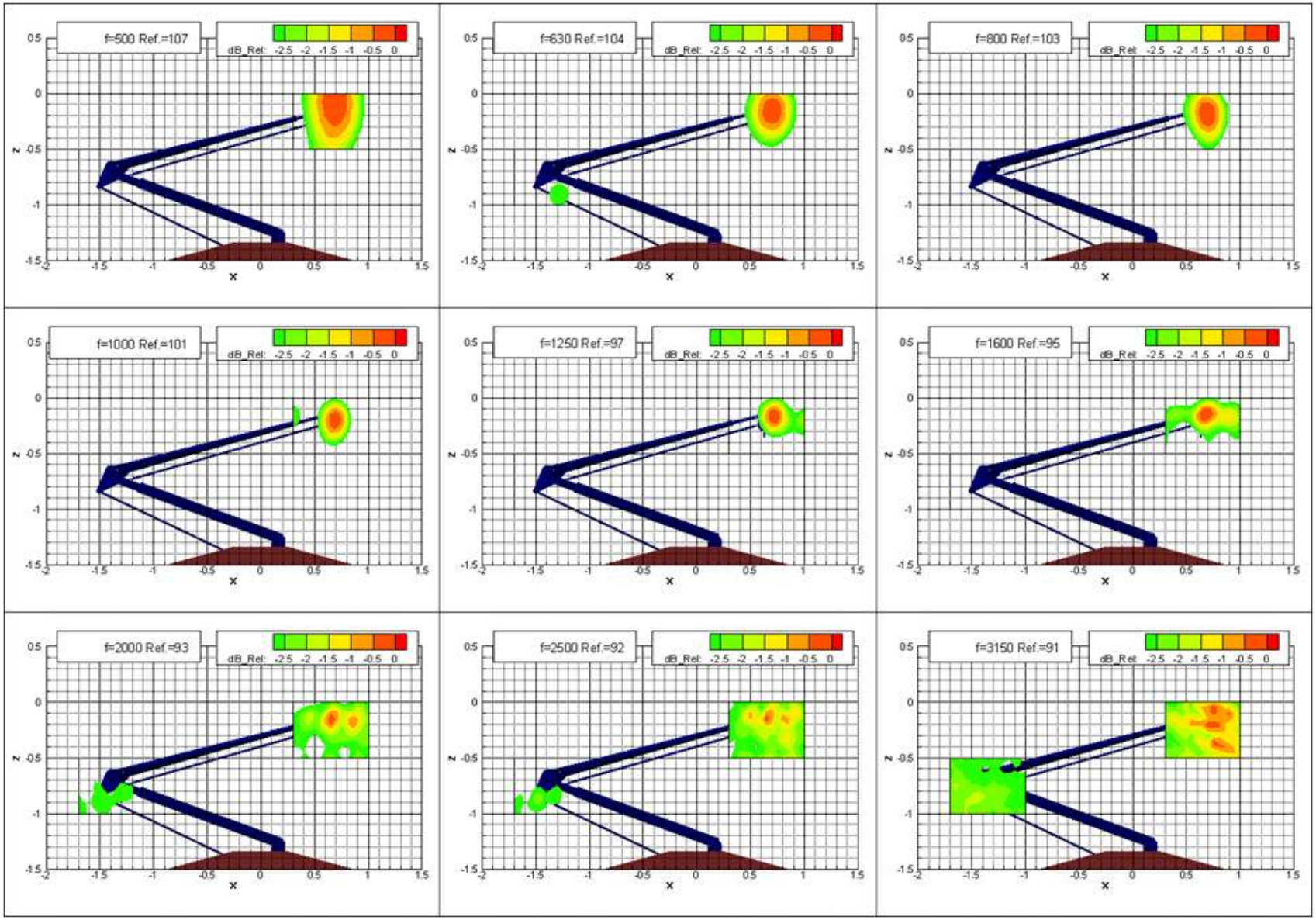


그림 2-3-73 시험결과 RUN1 ; 풍속 45m/s

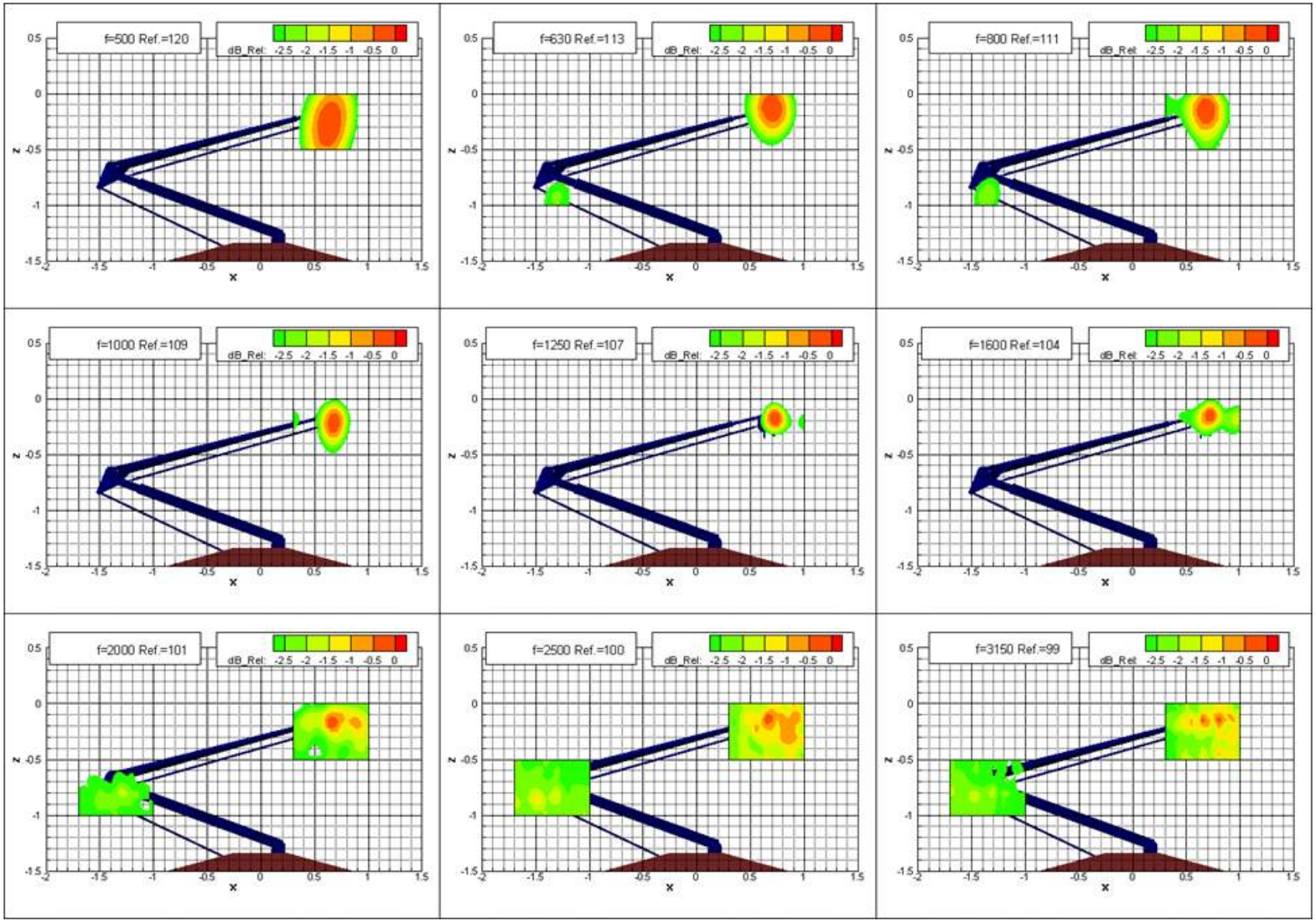


그림 2-3-74 시험결과 RUN1 ; 풍속 60m/s

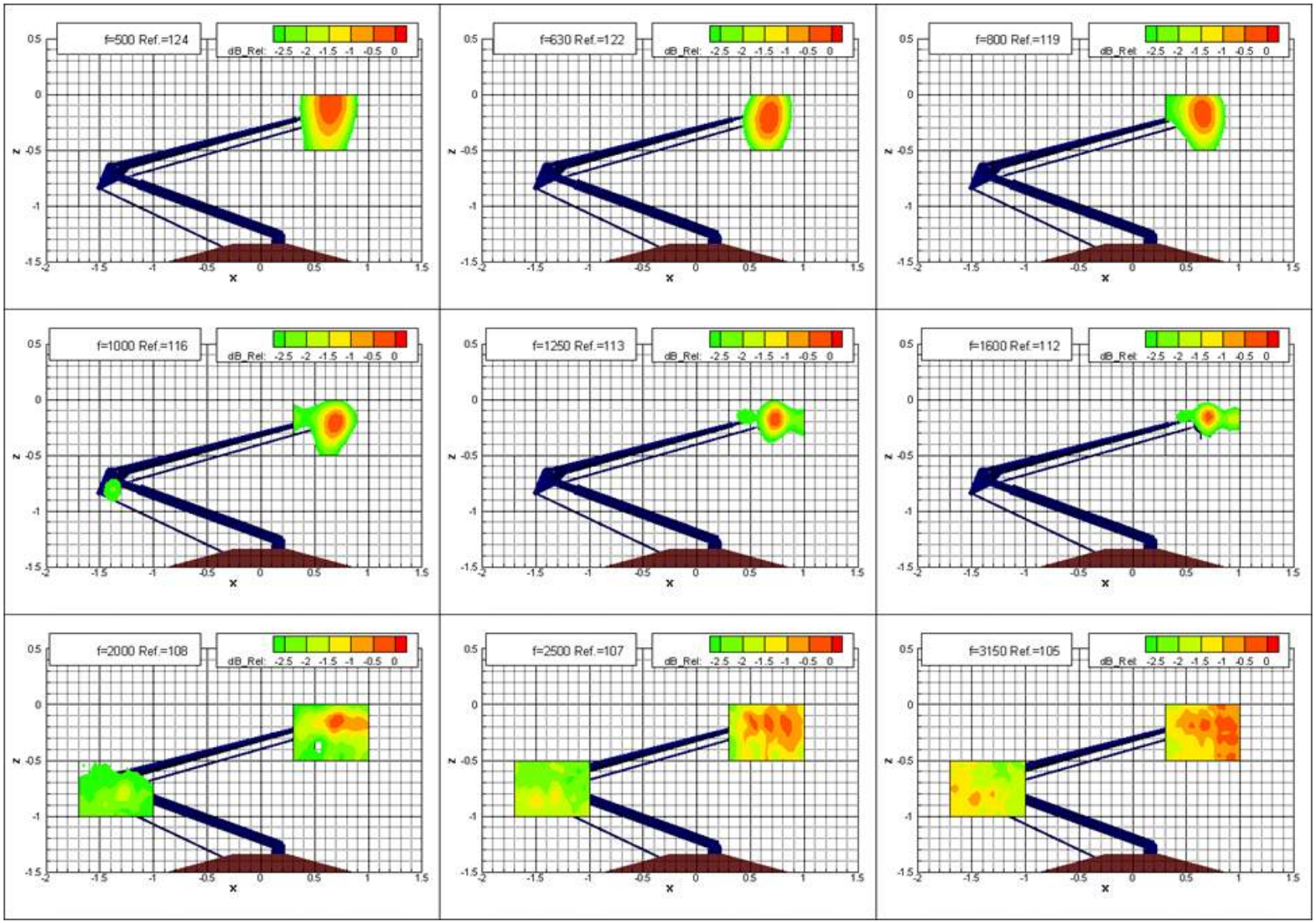


그림 2-3-75 시험결과 RUN1 ; 풍속 77m/s

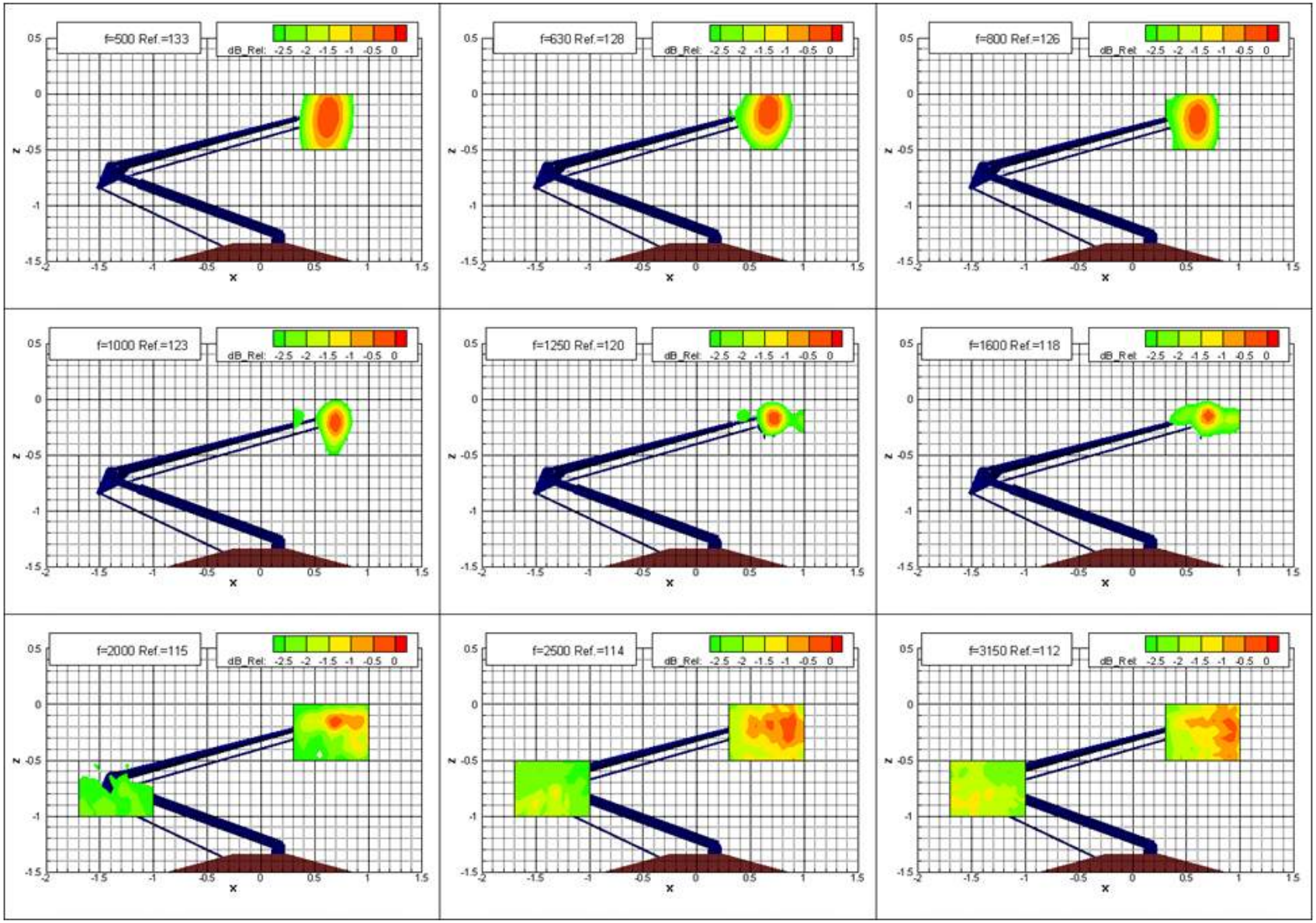


그림 2-3-76 시험결과 RUN1 ; 풍속 97m/s

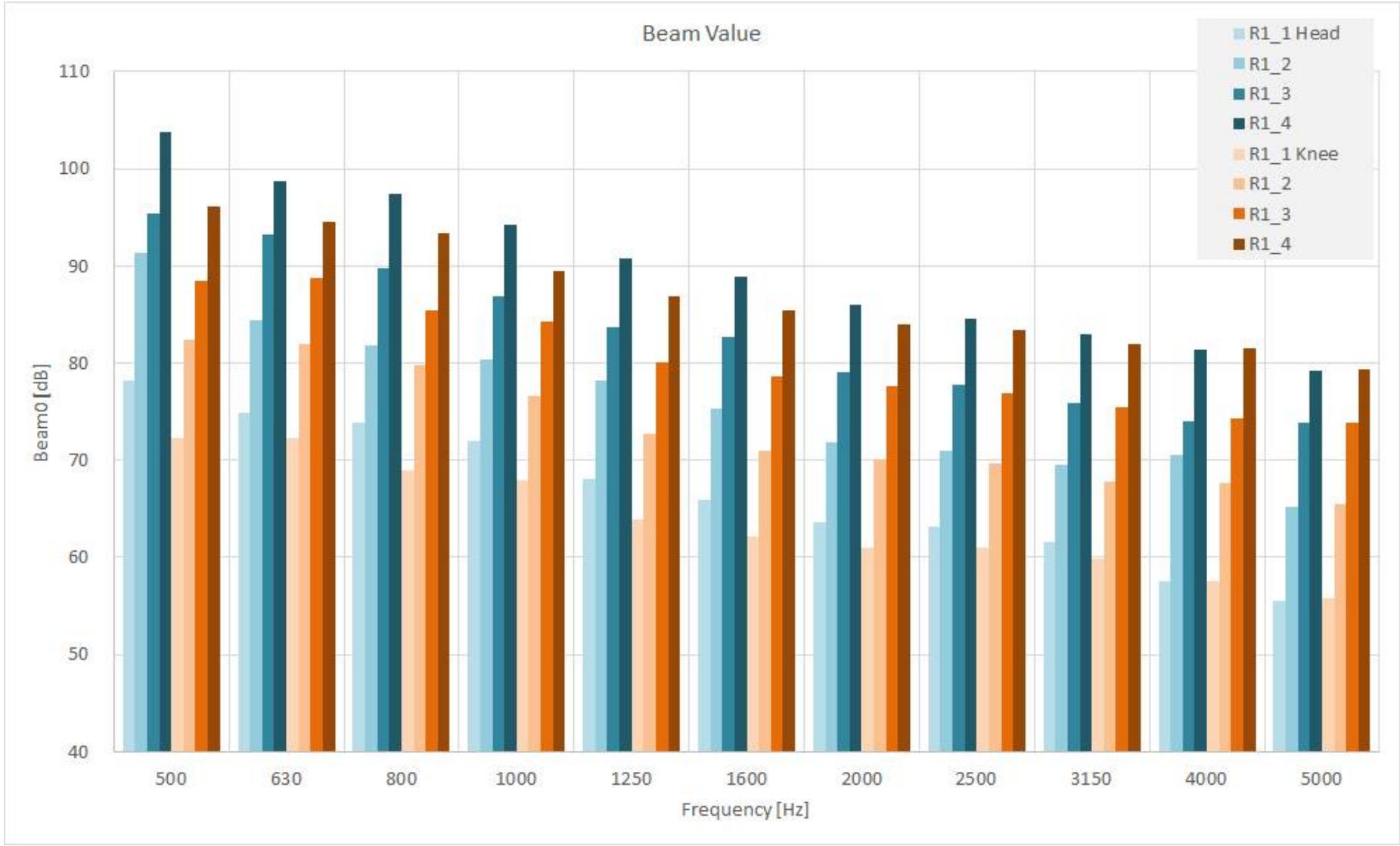


그림 2-3-77 풍속에 따른 빔값의 변화 : R1_1(45m/s), R1_2(60m/s), R1_3(77m/s), R1_4(97m/s)

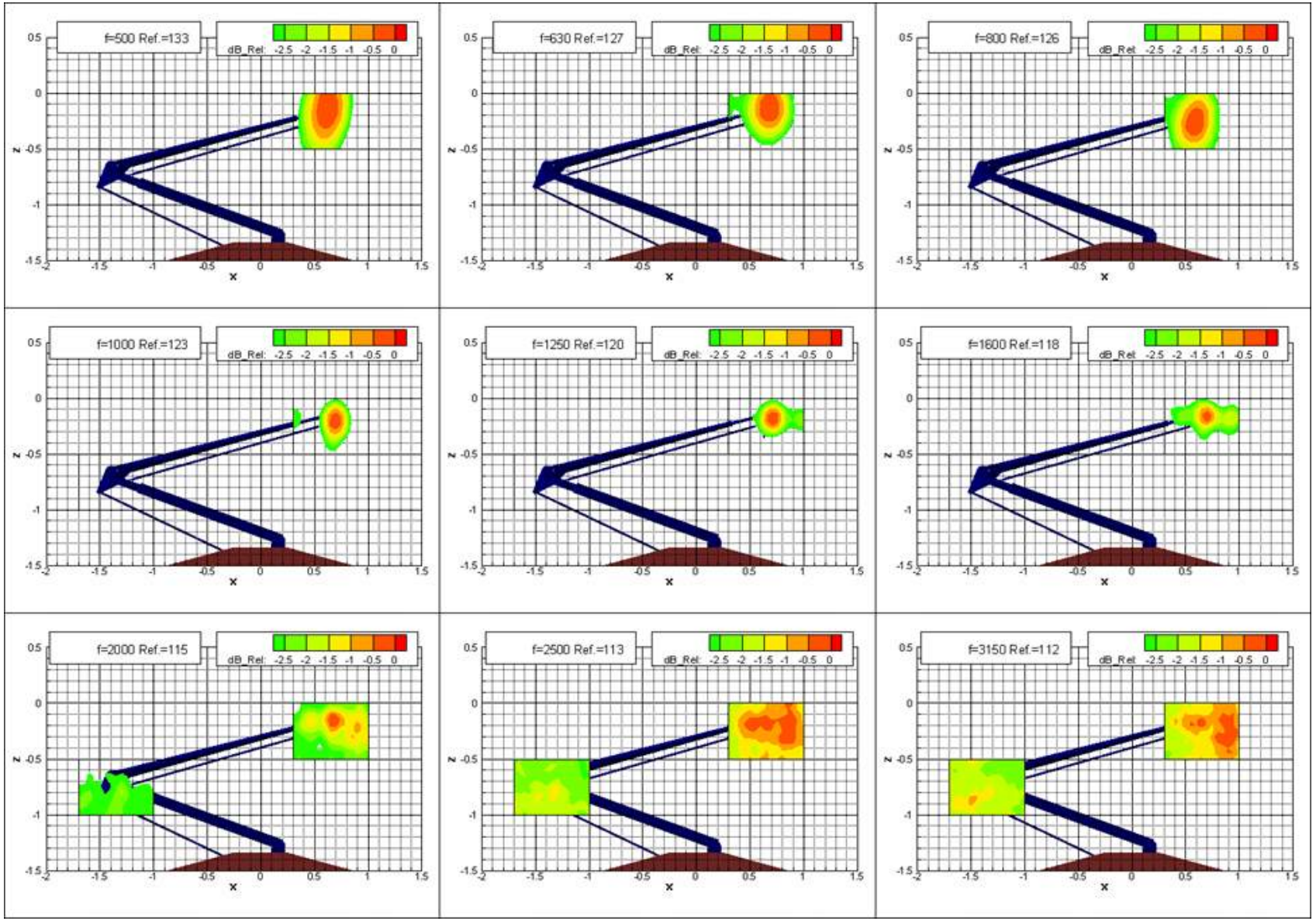


그림 2-3-78 반복성 시험결과 RUN4 ; 풍속 97m/s

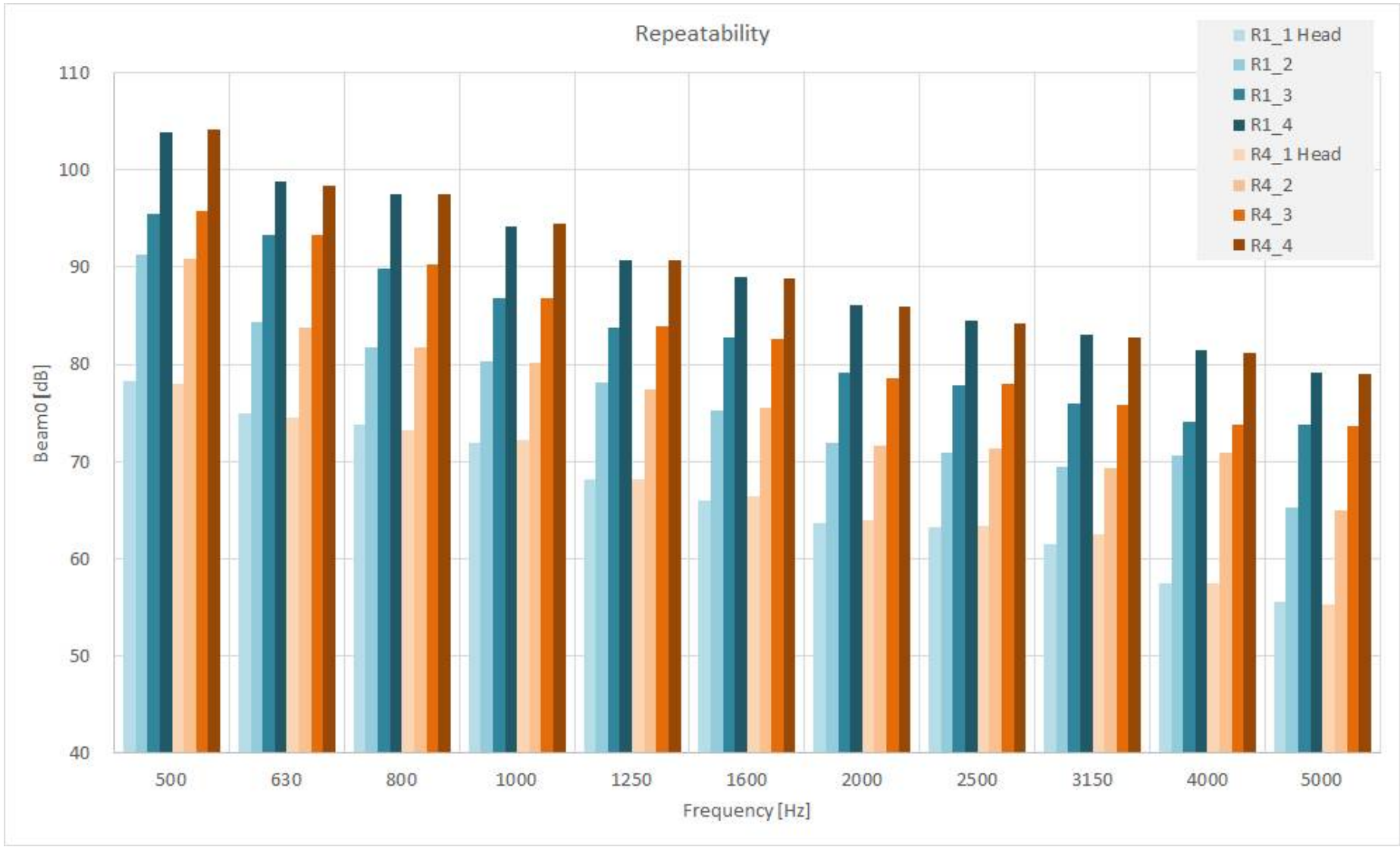


그림 2-3-79 반복성시험결과 비교 : RUN1 vs RUN4

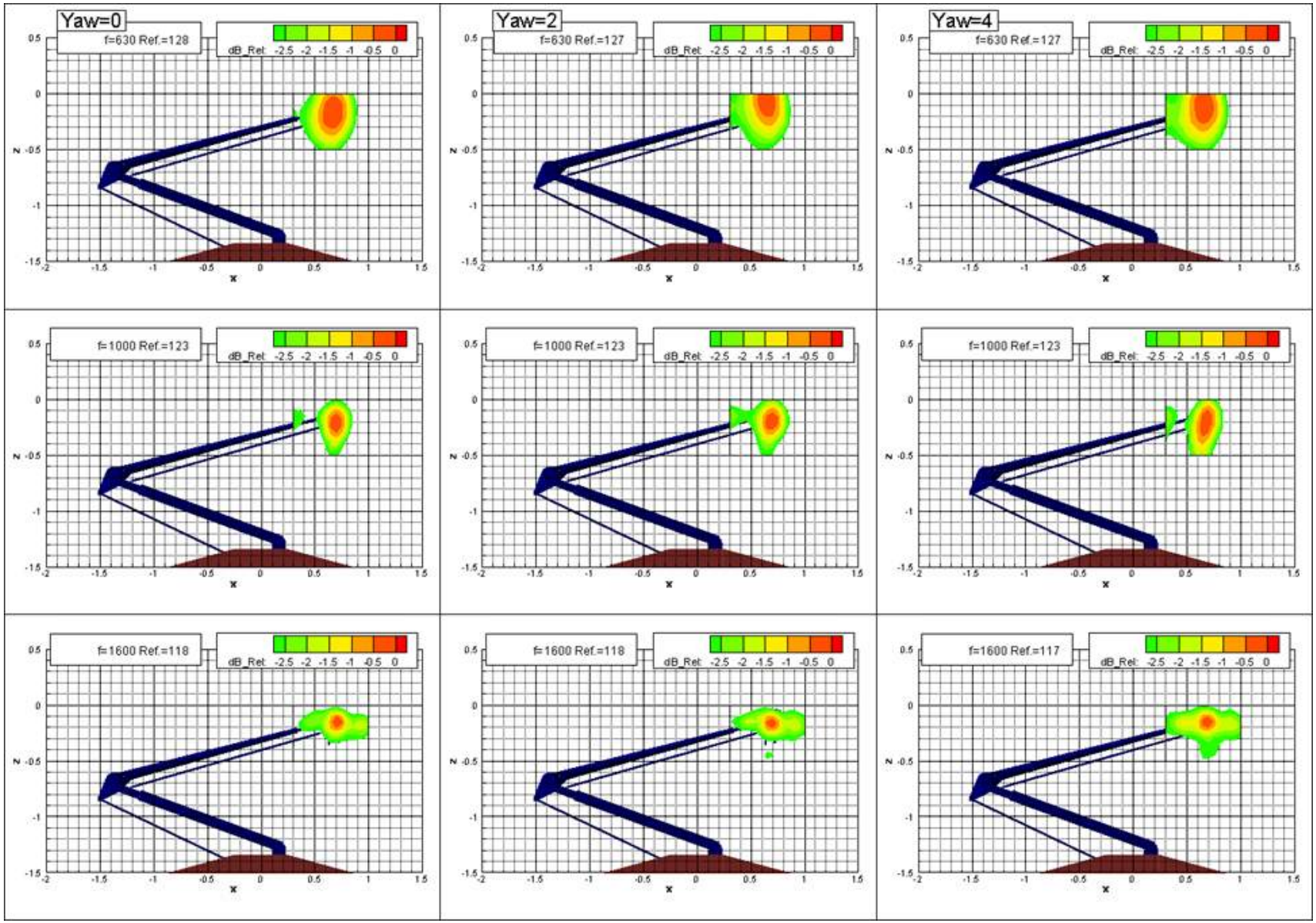


그림 2-3-80 요각에 따른 소음특성 변화

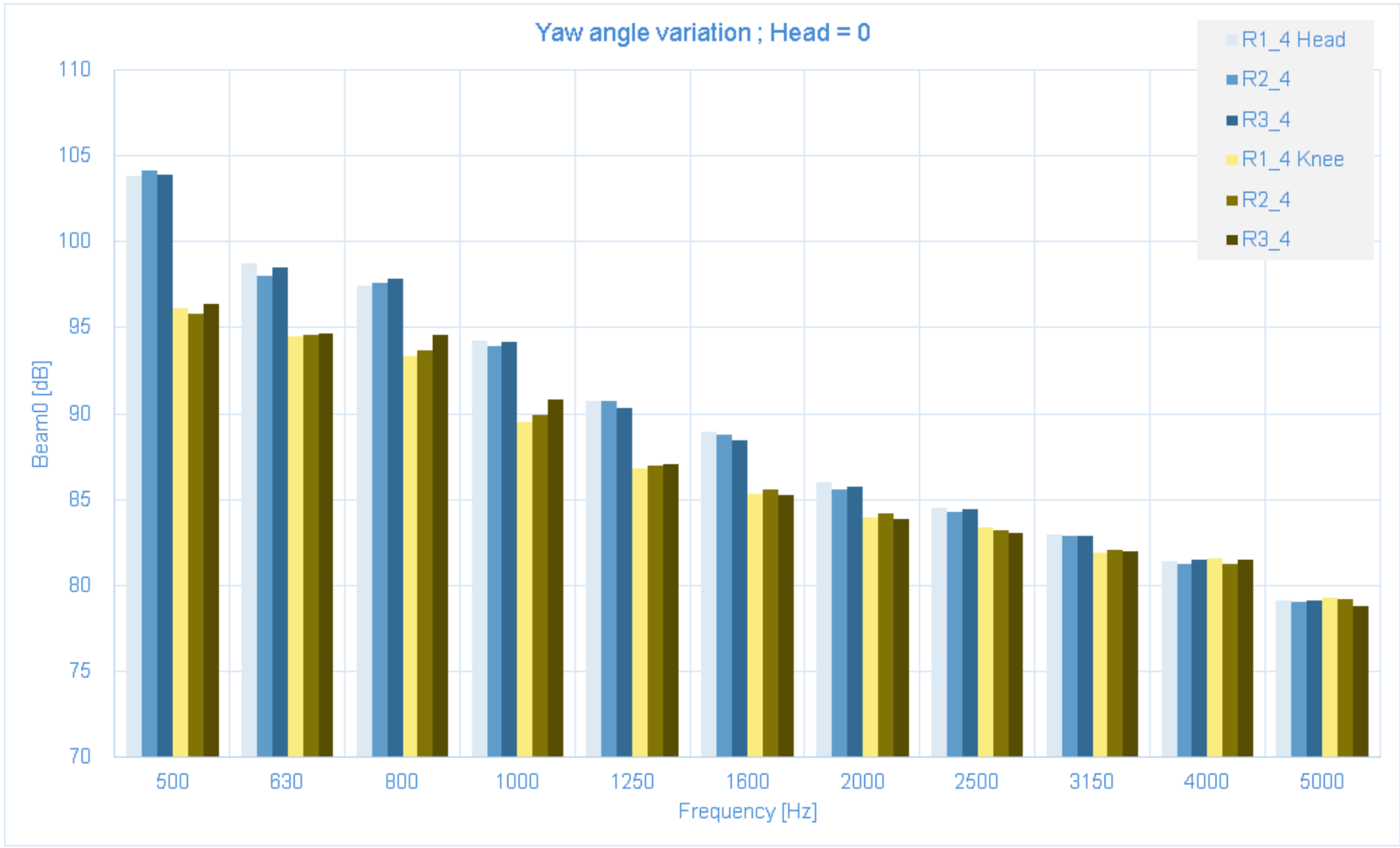


그림 2-3-81 요각에 따른 최대 빔함수 값 변화

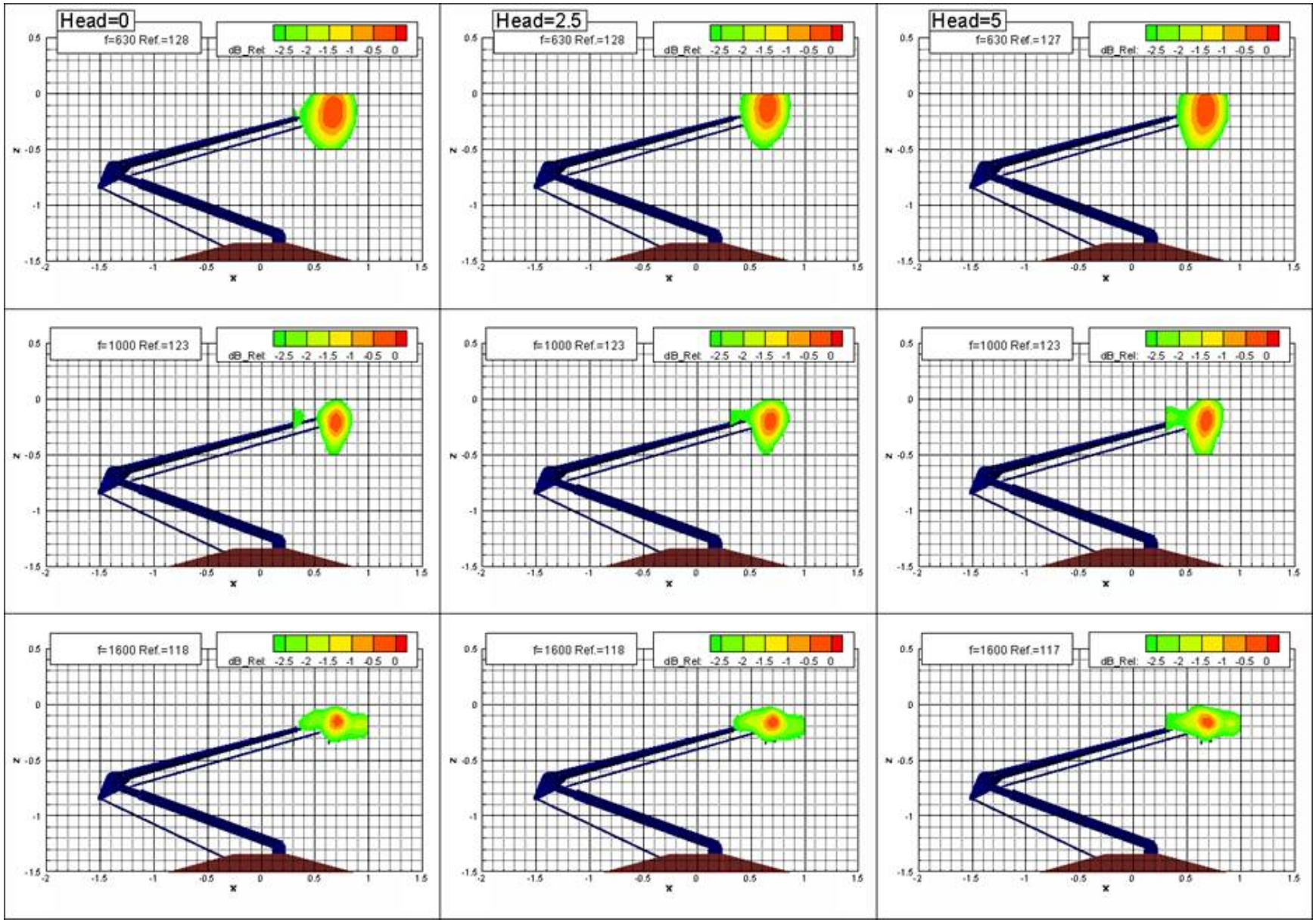


그림 2-3-82 팬헤드 각도에 따른 소음특성 변화 1

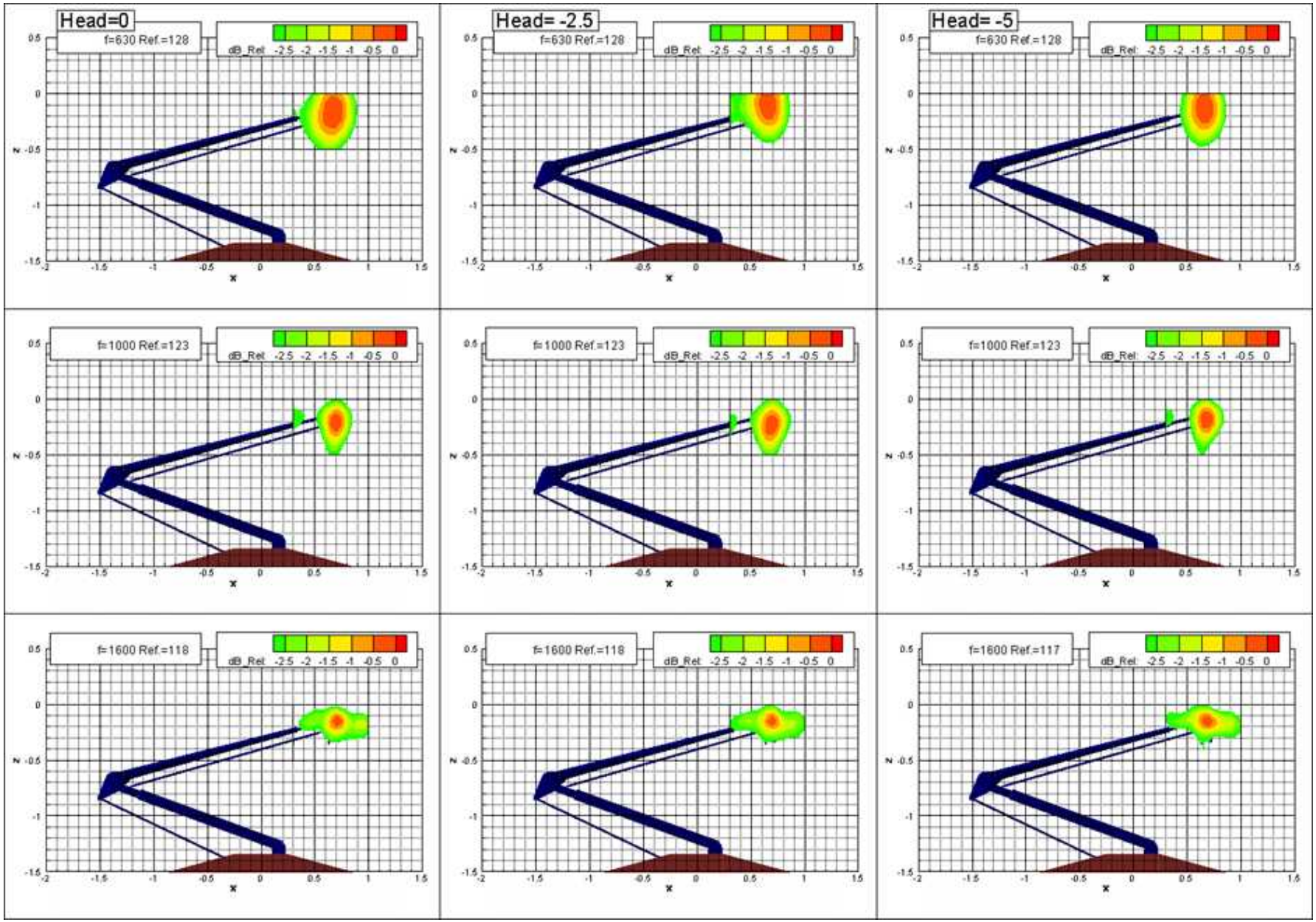


그림 2-3-83 팬헤드 각도에 따른 소음특성 변화 2

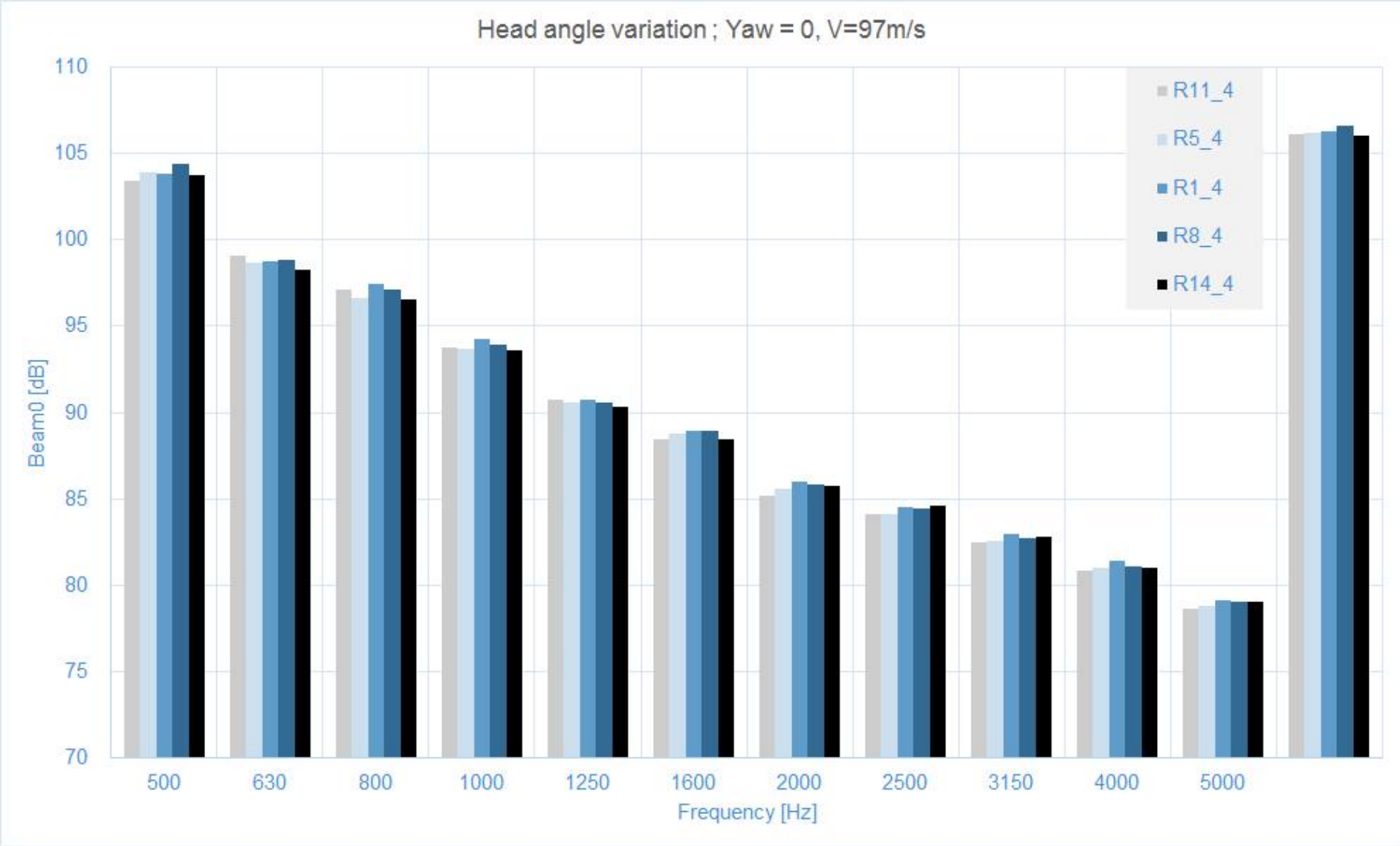


그림 2-3-84 팬헤드 각도에 따른 빔함수 최대값 변화

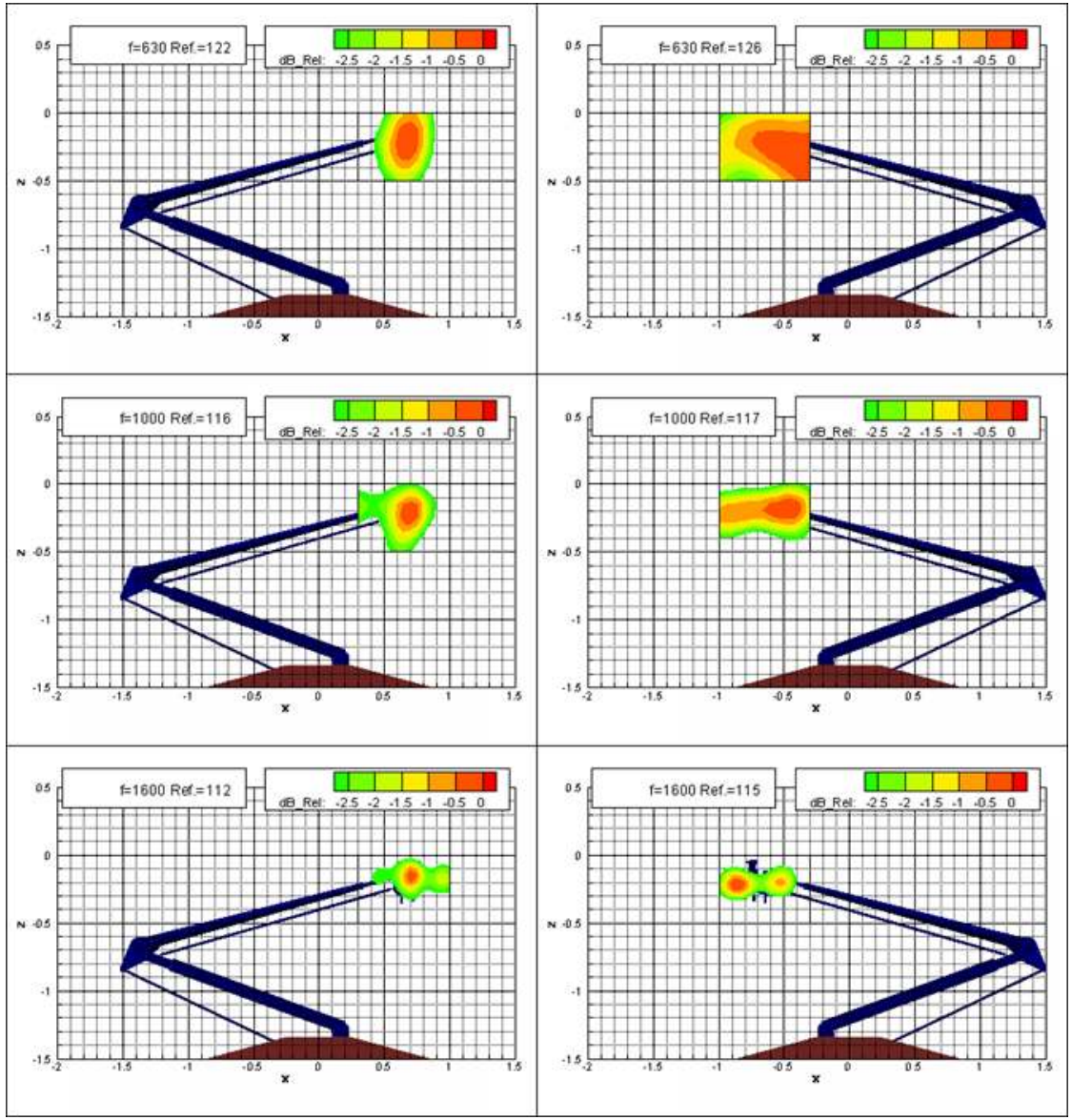


그림 2-3-85 주행방향에 따른 소음특성

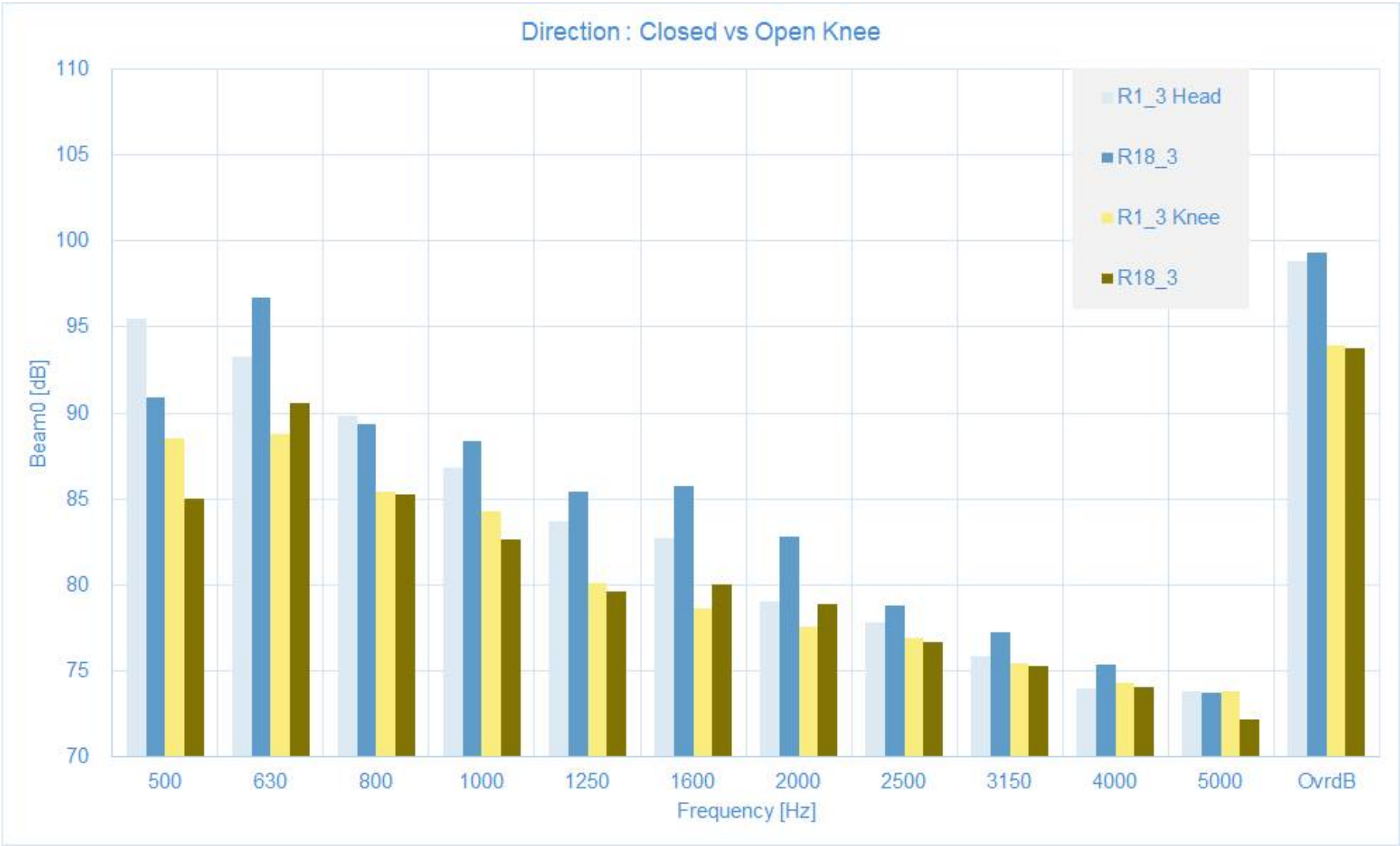


그림 2-3-86 주행방향에 따른 빔함수 최대값의 변화

그림 2-3-78과 그림 2-3-79에 반복성 시험결과가 나타나 있다. 측정결과를 빔포밍 기법으로 분석한 결과인 그림 2-3-76와 그림 2-3-78에서 알 수 있는 동일한 등고선 분포도를 보이고 있다. 분석영역내의 최대 빔함수 값을 비교한 그림 2-3-78에서 반복시험의 최대 빔함수 값 차이는 0.5dB 이내임을 알 수 있다.

요각에 따른 소음특성 비교가 그림 2-3-80에 나타나 있다. 요각 0도에서 4도 범위사이에서 주소음원의 등고선 형태에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 빔함수 최대값의 크기를 비교한 그림 2-3-80에서도 팬헤드와 관절부위의 빔함수 크기는 시험범위 요각에 의해 변화하지 않는 것으로 나타났다.

팬헤드 각도에 따른 소음특성 변화가 그림 2-3-82에서 그림 2-3-84에 나타나 있다. 빔함수 등고선 결과에서 팬헤드 각도가 주소음원의 위치특성에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 다만, 팬헤드 각도가 -5도인 경우에 -3dB 등고선 영역이 다른 시험결과에 비해 조금 작게 나타났다. 빔함수의 크기를 비교한 그림 2-3-84에서 1.6kHz 이상 주파수 영역에서 팬헤드 각도 -5도인 경우가 다른 조건에 비해 빔함수 최대값이 작게 나타났다.

주행방향에 따른 소음특성이 그림 2-3-85과 그림 2-3-86에 나타나 있다. 그림 2-3-85에서 역방향 주행조건도 팬헤드가 주요한 소음원을 작용하고 있음을 알 수 있다. 방향에 따른 빔함수 최대값을 비교한 그림 2-3-86에서 팬헤드의 경우, 대부분의 주파수 영역에서 역방향조건이 더 큰 값을 보이고 있다. 또한, 정방향에 비해 역방향이 팬헤드와 관절부위의 빔함수 값 차이도 더 크게 나타나고 있다.

(4) 공력 성능 시험 결과

팬터그래프의 공력 성능은 팬터그래프의 이동방향으로 가해지는 축력과 이에 수직으로 작용하는 수직력 및 피칭 모멘트로 구성된다. 본 결과에서 축력과 수직력은 각각 양력과 항력에 해당되는 값을 의미하며, 피칭 모멘트는 팬터그래프의 전방이 가라앉는 모멘트(nose down pitching moment)를 양의 값으로 간주한다. 다음은 각각의 조건에서 공력 시험을 수행한 결과를 보여준다.

- 반복성 점검

측정된 공력 성능의 반복성을 점검하기 위해 동일한 시험조건에서 수행한 두 시험 결과를 비교하였다. 그림 2-3-87~2-3-89은 각각 정상 주행조건에서 요각이 0도일 때의 축력, 수직력 및 피칭 모멘트에 대한 반복성 시험 결과를 보여준다. 축력과 수직력 및 피칭 모멘트가 각각 9.7N, 14.9N, 9.7Nm의 범위 이내의 차이를 보이는 것을 확인하였다.

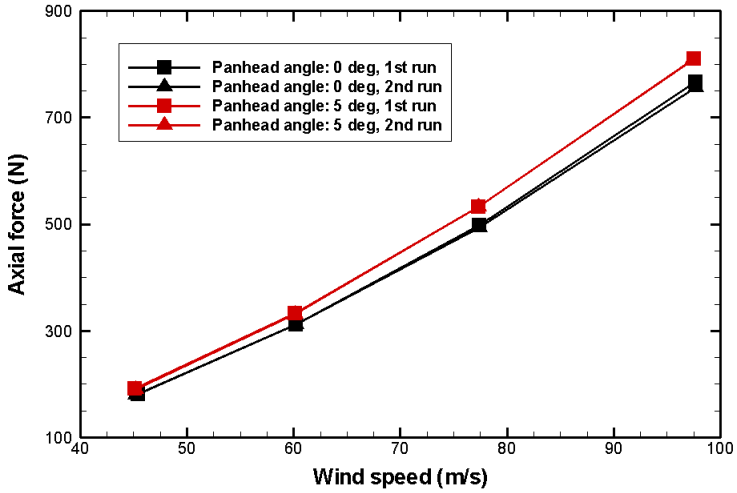


그림 2-3-87 반복성 시험: 축력

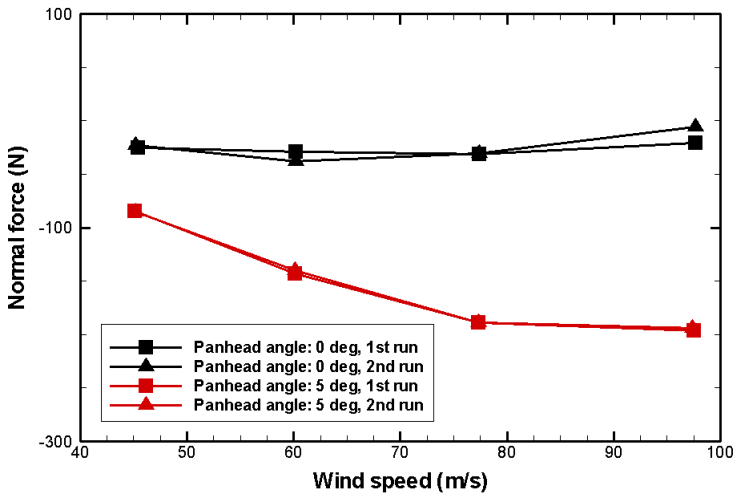


그림 2-3-88 반복성 시험: 수직력

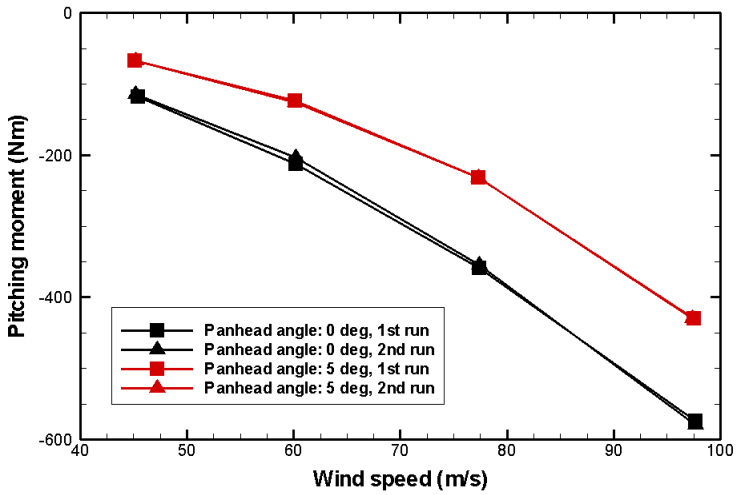


그림 2-3-89 반복성 시험: 피칭 모멘트

- 팬헤드 각도에 따른 공력 특성

그림2-3-90~92 은 각각 정상 주행조건에서 요각이 0도일 때의 축력, 수직력 및 피칭 모멘트 측정 결과를 보여준다. 먼저 풍속에 따른 공력 성능을 분석해보면, 축력은 풍속이 증가함에 따라서 점차적으로 증가하는 형태가 나타났다. 하지만 수직력의 경우는 풍속에 대한 변화가 크지 않았고, 피칭 모멘트는 풍속이 증가할수록 그 크기가 증가하였다.

다음은 팬헤드 각도의 변화가 공력 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 축력은 팬헤드 각도가 증가할수록 하중이 점차적으로 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 팬헤드 각도가 -2.5도 이하에서는 축력이 더 이상 감소하지 않는 형태가 나타났다. 수직력은 팬헤드 각도가 감소할수록 오히려 하중이 증가하는 형태가 나타났다. 이러한 결과가 나타난 이유는 팬헤드의 앞전 형상이 매우 뭉툭하여 일반적인 익형 형상과 상이하기 때문이라 판단된다. 피칭 모멘트의 크기는 팬헤드 각도가 증가할수록 감소하는 것을 확인하였다.

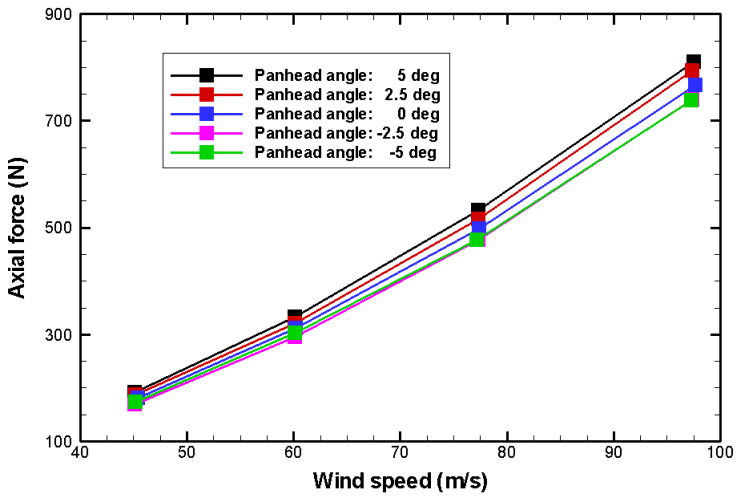


그림 2-3-90 팬헤드 각도에 따른 축력 변화

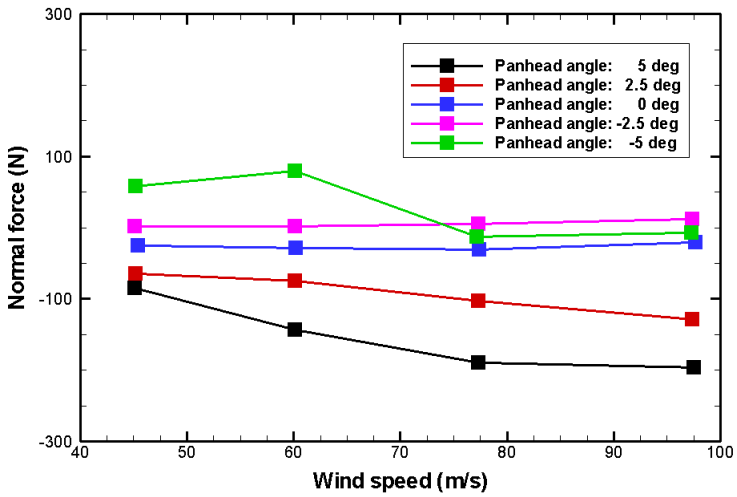


그림 2-3-91 팬헤드 각도에 따른 수직력 변화

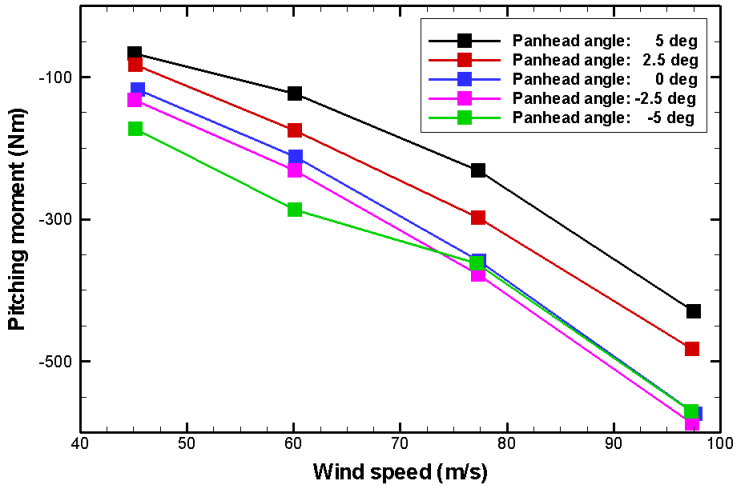


그림 2-3-92 팬헤드 각도에 따른 피칭 모멘트 변화

- 요각에 따른 공력 성능의 변화

요각의 변화에 따른 공력 특성의 변화를 살펴보았다. 그림 2-3-93~2-3-95는 요 각도가 변화할 때의 축력과 수직력 및 피칭 모멘트를 보여준다. 요각이 증가함에 따라서 축력과 수직력의 주목할 만한 변화는 발견되지 않았다. 하지만 풍속이 증가할수록 축력과 피칭 모멘트의 크기가 증가하는 경향이 나타났다. 또한 수직력의 경우는 특별한 경향성이 발견되지 않았다.

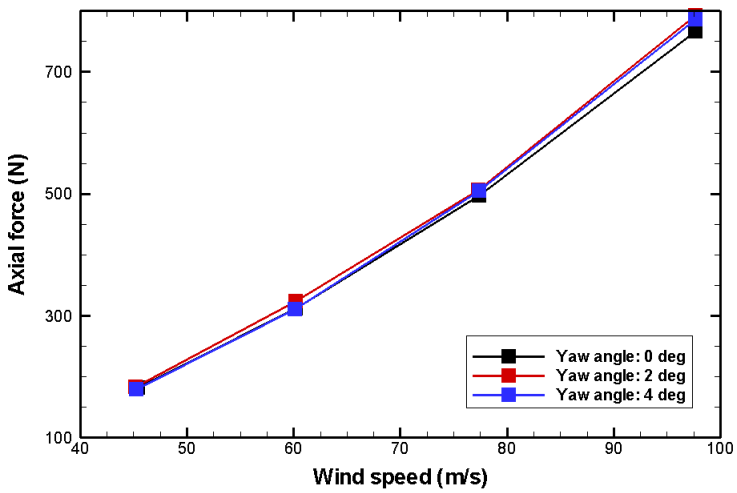


그림 2-3-93 요 각도에 따른 축력 변화

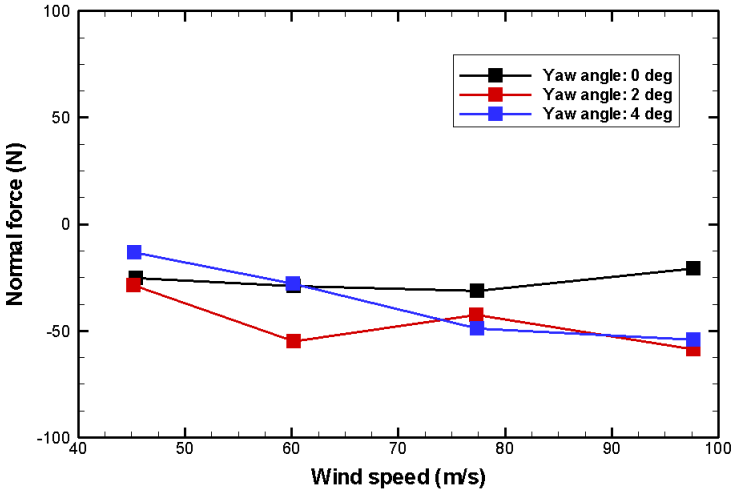


그림 2-3-94 요 각도에 따른 수직력 변화

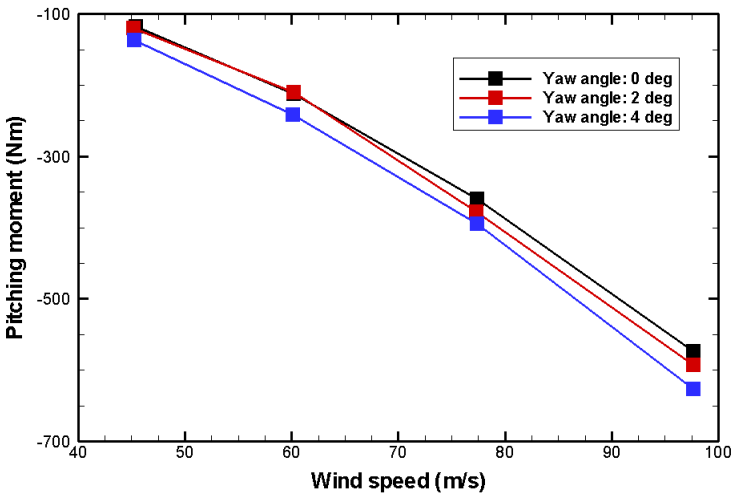


그림 2-3-95 요 각도에 따른 피칭 모멘트 변화

- 주행방향이 공력 성능에 미치는 영향

다음은 역방향으로 주행하는 경우의 공력 성능을 분석하였다. 역방향으로 주행할 때 팬터그래프에 가해지는 축력은 소폭 상승하였다. 그에 반해 수직력은 크게 증가하였고, 그 결과로 피칭 모멘트의 크기는 감소하는 결과를 가져왔다. 역방향으로 주행하는 경우 요각에 따른 공력 성능의 변화는 크게 발견되지 않았다.

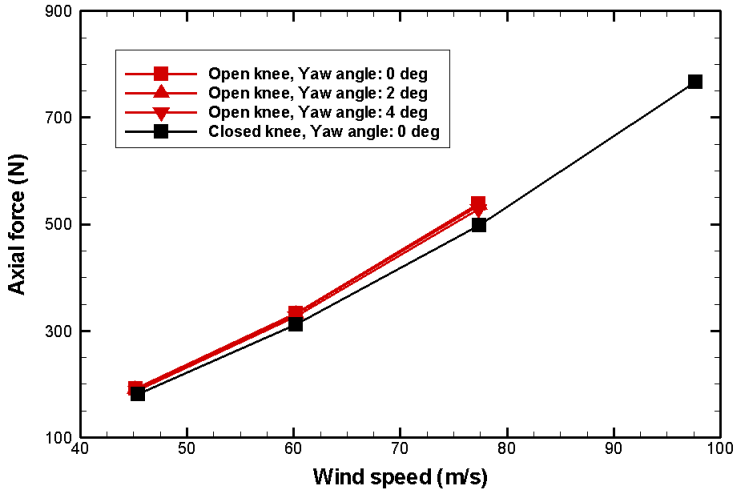


그림 2-3-96 주행방향에 따른 축력 비교

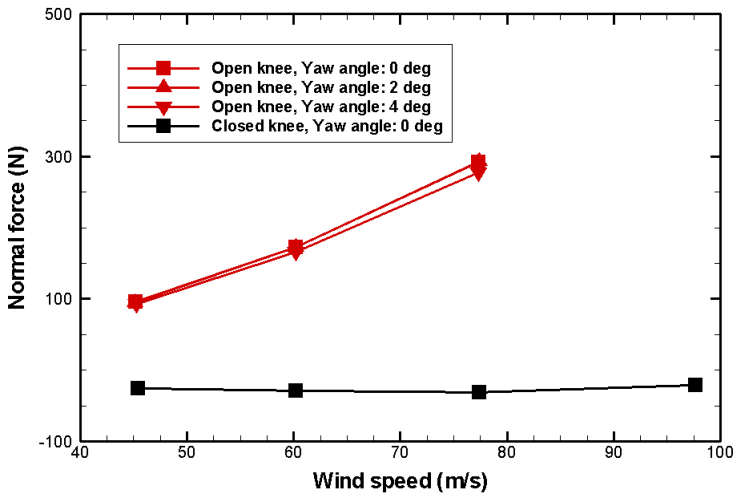


그림 2-3-97 주행방향에 따른 수직력 비교

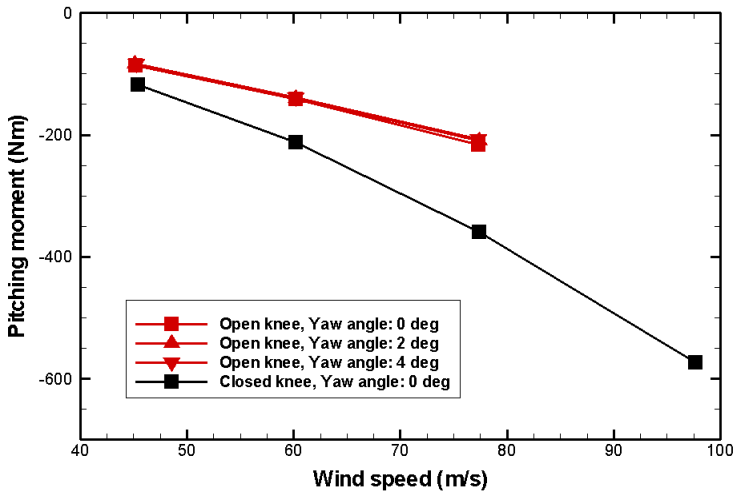


그림 2-3-98 주행방향에 따른 피칭 모멘트 비교

마. 풀스케일 팬터그래프 형상 모델의 시험 결과비교

연구 개발된 팬터그래프의 소음특성을 평가하기 위해 기존 팬터그래프와 소음특성을 비교하였다. 비교에 사용된 팬터그래프는 현재 운영중인 KTX-2 차량의 팬터그래프와 시험운행중인 해무차량의 팬터그래프이다. KTX-2 팬터그래프는 개방형시험부에서 시험이 수행된 자료를 사용하였으며, 해부 팬터그래프는 본 과제에서 사용된 시험장비를 활용하여 수행된 자료를 사용하였다.

각 팬터그래프의 형상이 그림 2-3-99에서 그림 2-3-101에 나타나 있다. 소음풍동시험이 수행된 형상조건을 명확히 하기 위해 각 팬터그래프별 시험에 사용된 하부덮개가 장착된 형상을 그림에 나타내었다.

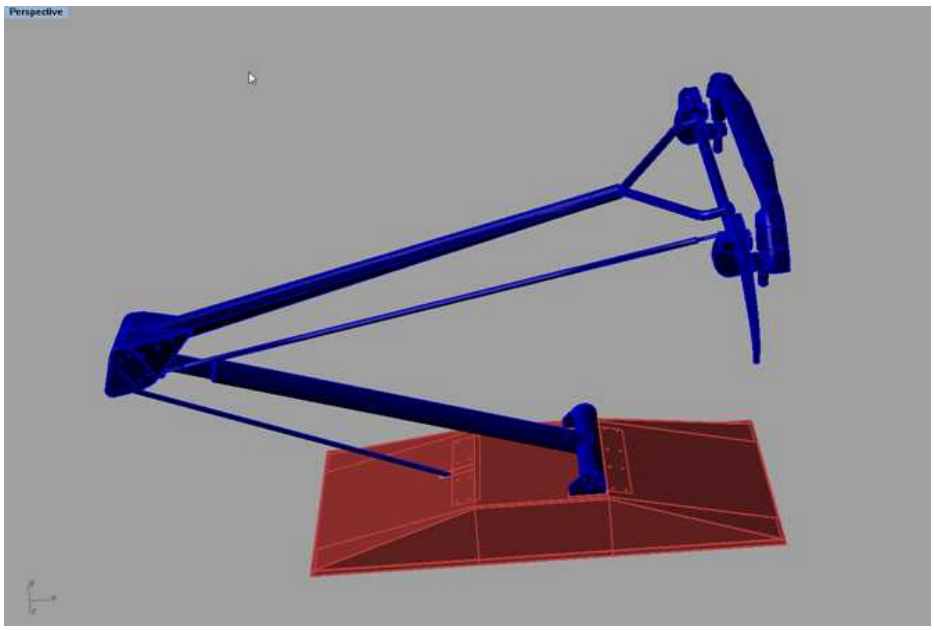


그림 2-3-99 연구 개발된 팬터그래프

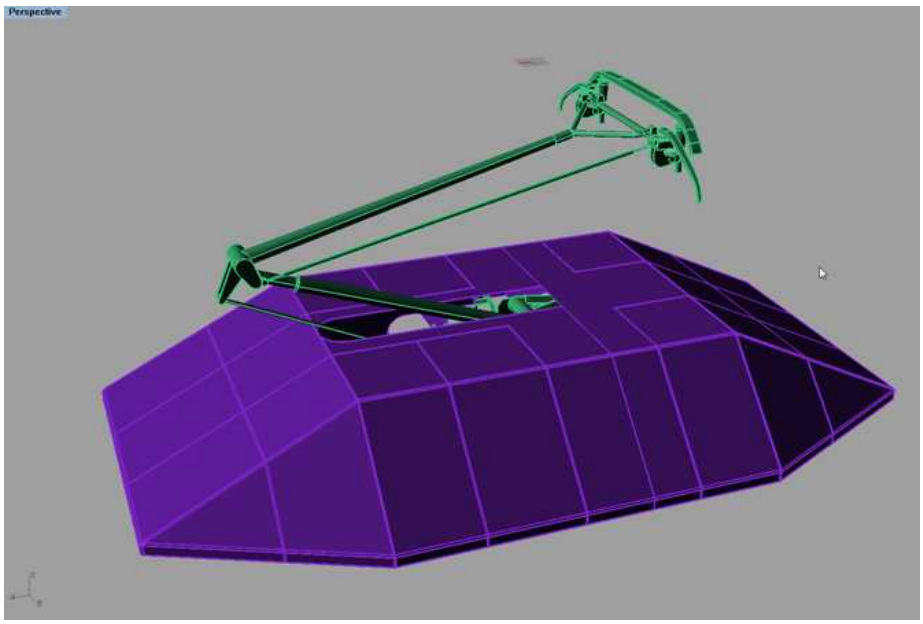


그림 2-3-100 KTX-2 팬터그래프

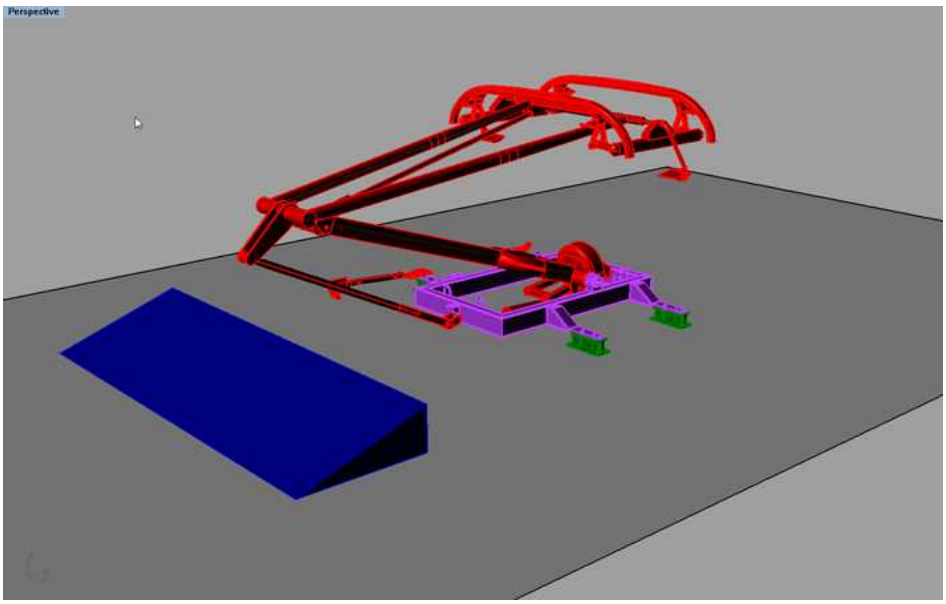


그림 2-3-101 해무 팬터그래프

KTX-2 팬터그래프는 팬헤드 1개와 중앙봉 1개를 갖는 구조이며, 해무 팬터그래프는 펜헤드 2개와 상부중앙봉 2개를 갖는 구조이다. 연구 개발된 팬터그래프는 KTX-2 팬터그래프를 기준형상으로 사용하였으므로 팬헤드 1개와 중앙봉 1개를 갖는 구조이다.

KTX-2 팬터그래프 풍동시험은 그림 2-3-102와 같이 개방형시험부에서 수행되었으며, 최대 시험풍속은 45m/s이다. 소음풍동시험 결과는 그림 2-3-103와 같이 팬헤드가 주요소음원으로 작용하고 있으며 특정 주파수(1.2kHz)에서는 관절소음도 주요한 소음원으로 역할하고 있음을 보여준다. KTX-2 팬터그래프와 연구 개발된 팬터그래프의 소음풍동시험결과를 그림 2-3-105에 비교하였다. 연구 개발된 팬터그래프는 KTX-2 팬터그래프에 비해 630 ~ 4000Hz 범위에서 2~11dB 작은 값을 보이고 있으며, 전체소음값으로는 6dB 작은 값을 보이고 있다.



그림 2-3-102 KTX-2 팬터그래프 풍동시험 : 개방형시험부

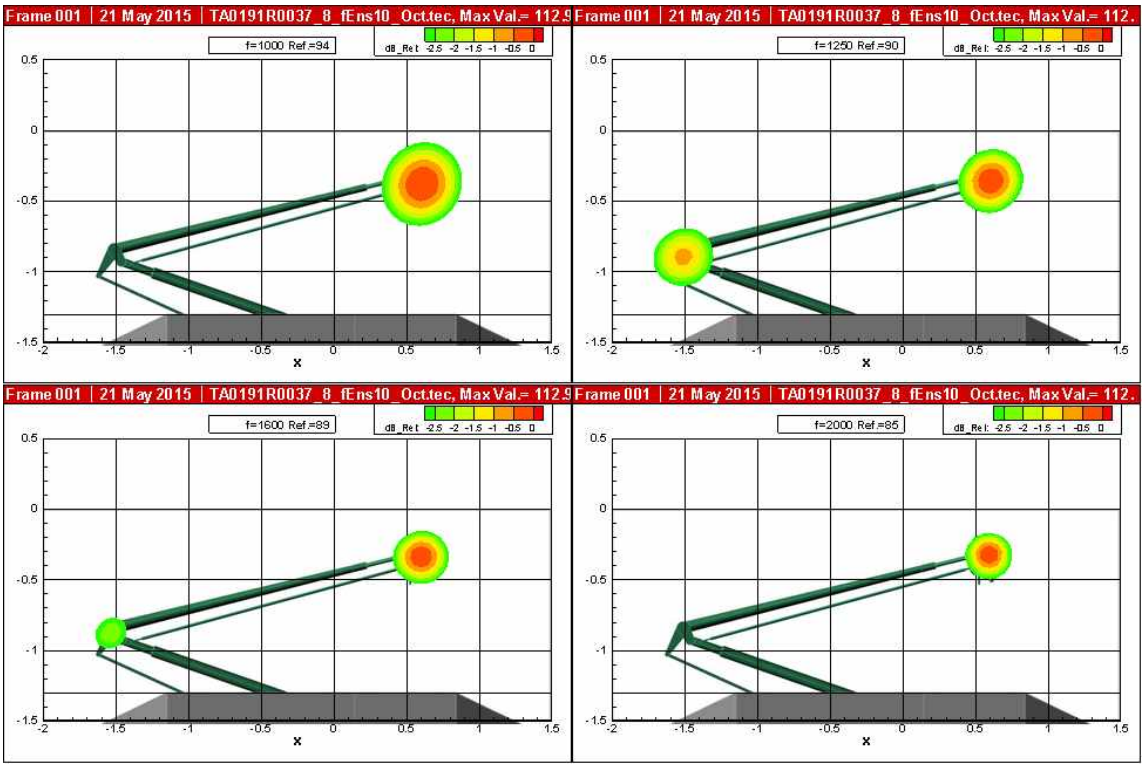


그림 2-3-103 KTX-2 팬터그래프 소음풍동시험 결과

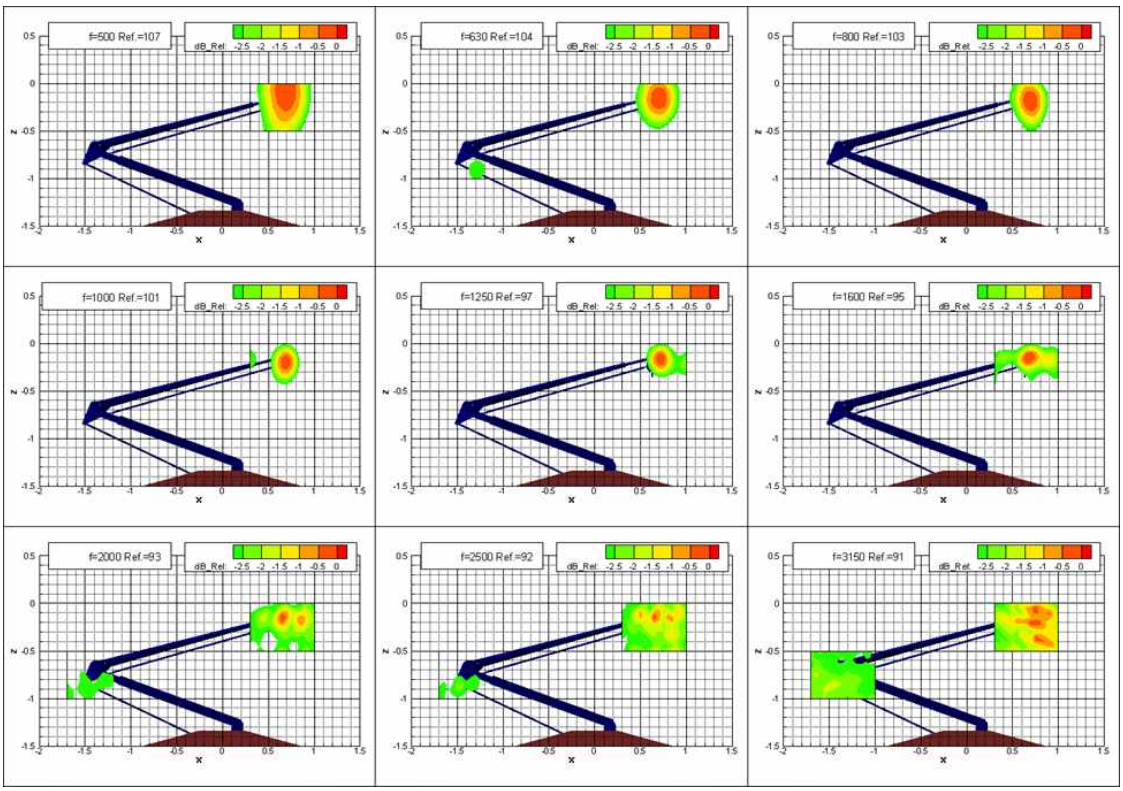


그림 2-3-104 연구 개발된 팬터그래프 소음풍동시험 결과

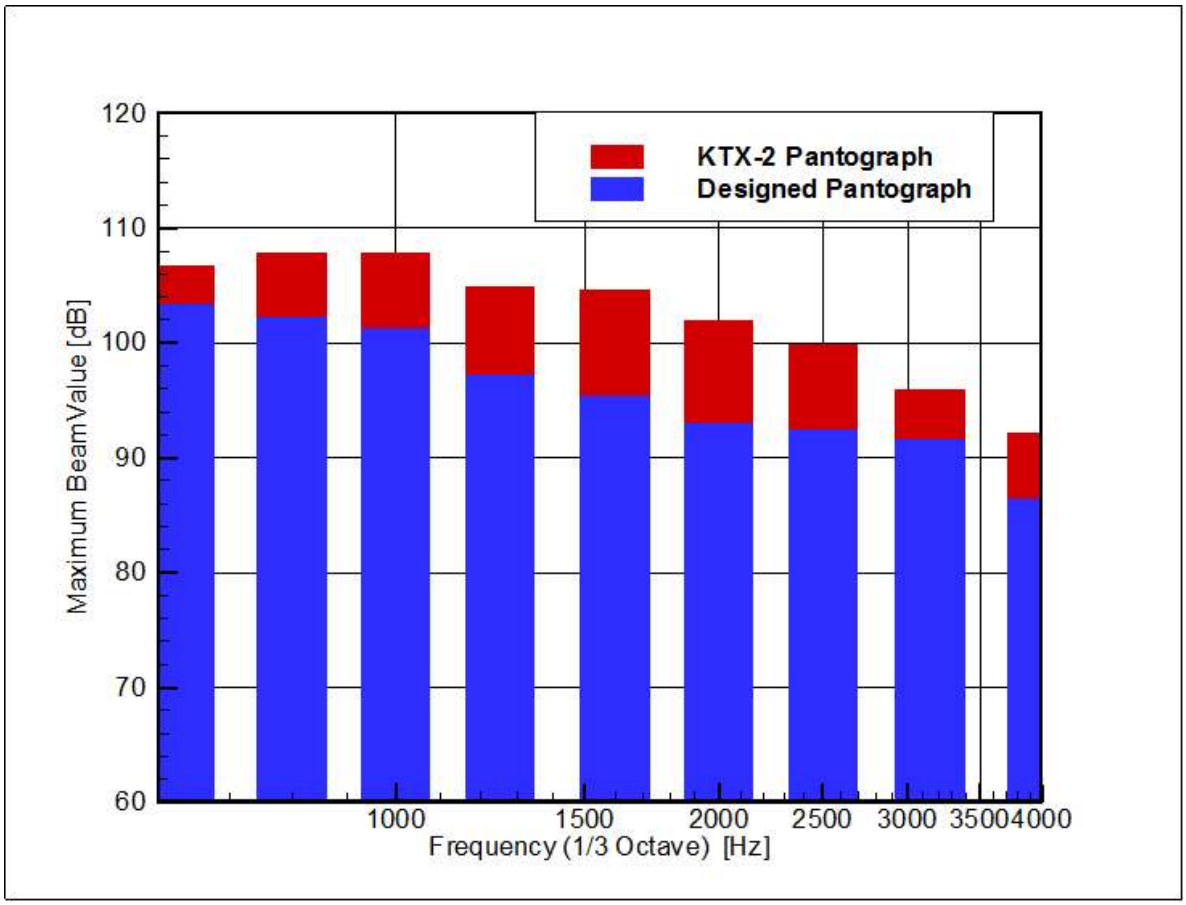


그림 2-3-105 KTX-2와 연구개발된 팬터그래프 소음특성(최대빔함수값) 비교

해무 팬터그래프 풍동시험은 그림 2-3-106과 같이 폐쇄형시험부에서 수행되었으며, 최대 시험풍속은 90m/s이다. 연구 개발된 팬터그래프의 소음풍동시험은 {45m/s, 60m/s, 77m/s, 97m/s}에서 수행되었으므로 두 시험결과를 비교하기 위해 우선 연구 개발된 패터그래프 시험결과를 90m/s 풍속시험조건으로 내삽하여 추정하였다. 해무 팬터그래프와 연구개발된 팬터그래프의 소음풍동시험결과를 그림 2-3-107에 비교하였다. 연구 개발된 팬터그래프는 해무 팬터그래프에 비해 630~ 4000Hz 범위에서 1.7~3.6dB 작은 값을 보이고 있으며, 전체 소음값으로는 2dB 작은 값을 보이고 있다.

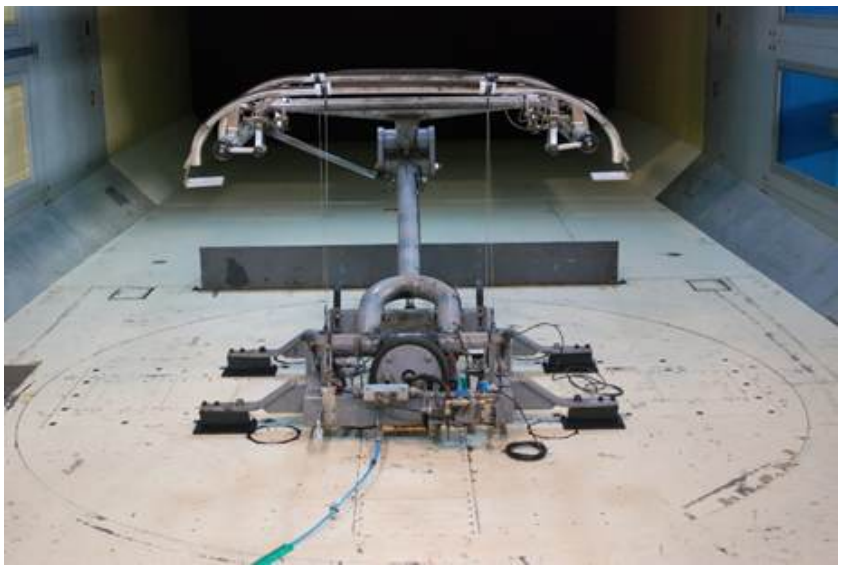


그림 2-3-106 해무 팬터그래프 풍동시험

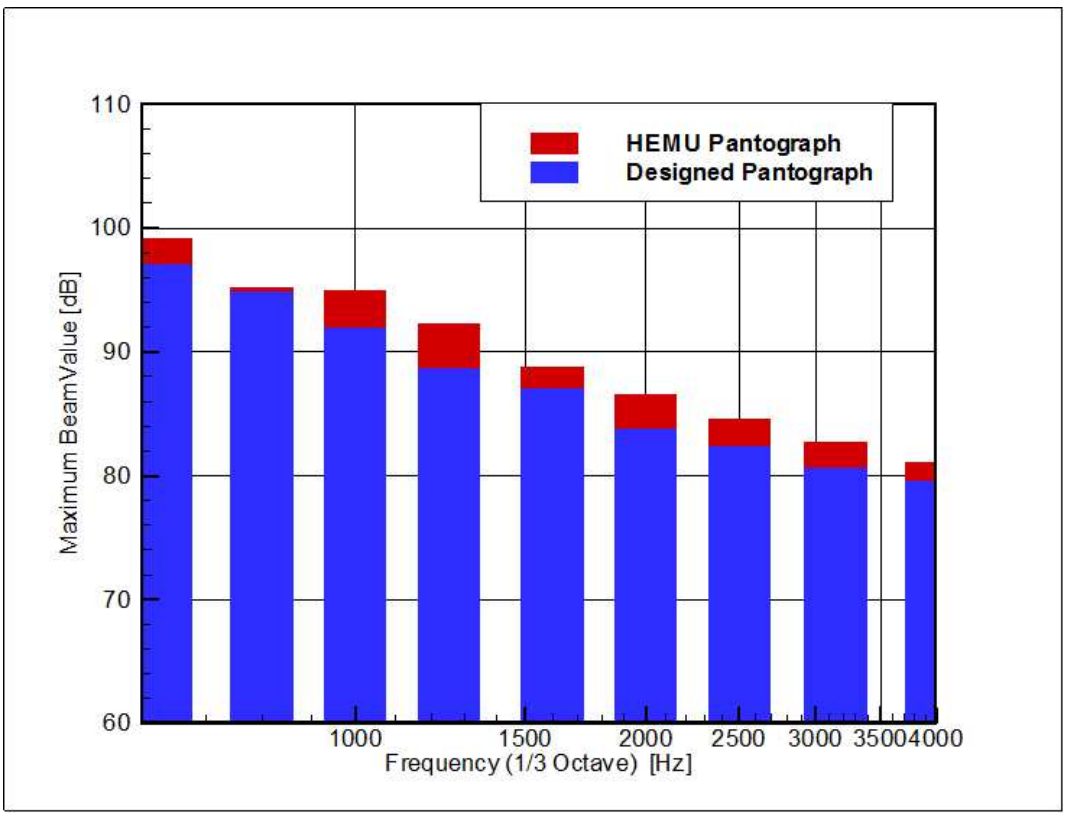


그림 2-3-107 해무 팬터그래프와 연구개발된 팬터그래프 소음특성(최대빔함수값) 비교

바. 전산해석을 통한 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상의 공력소음 및 공력성능 특성 정립

최적설계된 팬터그래프의 성능향상을 1차년도의 기존 KTX-2 팬터그래프의 실험결과와 해무 팬터그래프의 풍동시험을 통해서 확인하였다. 그러나 1차년도에 수행된 기존 팬터그래프 실험의 경우 개방형풍동에서 실제 운행에 사용되는 팬터그래로 실험이 진행되어 하부 덮개의 형상도 크게 차이나며 최대풍속 45m/s에서 수행하여 3차년도에 수행된 풍동실험결과와 절대적으로 비교하기 힘들다.

동일한 조건에서 기존 팬터그래프와의 성능을 비교하고 최적설계된 팬터그래프의 전산해석 데이터베이스 구축을 위해서 풍동시험과는 별개로 동일한 조건에서 기존 팬터그래프와의 성능비교를 위해서 전산해석을 수행하였다.

풍동시험과 동일한 조건에서 전산해석을 수행한 후 팬터그래프의 성능향상 목적인 공력소음과 공력저항 결과를 풍동시험과 비교하여 전산해석 결과의 신뢰성을 확인하고 동일조건에서 기존 팬터그래프의 전산해석을 수행하여 최적설계 형상의 성능향상을 확인하였다.

(1) 실험 run 케이스에 따른 해석 케이스 구성

표 2-3-8 최적설계 팬터그래프 전산해석 조건

Direction	Head angle	Yaw angle
Closed knee	0	0
		2
		4
	-2.5	0
		2
		4
	2.5	0
		2
		4
	-5	0
		2
		4
	5	0
		2
		4
Open knee	0	0
		2
		4

표 2-3-9 해석풍속 조건

풍속 [m/s]	45	60	77	97
[km/h]	162	216	277	349

한국항공우주연구원의 폐쇄형 풍동에서 수행한 실험 Run 케이스 중 반복성 시험과 배경소음 테스트한 케이스를 제외한 모든 케이스와 풍속조건에서 전산해석을 수행하였다.

해석방법은 1차년도 2차년도 동일하게 상용유체해석 프로그램은 Ansys사의 Fluent를 사용하였으면 소음해석을 위한 정확한 난류예측을 위해서 난류모델은 LES모델을 사용하고 소음해석모델은 FW-H모델을 사용하였다.

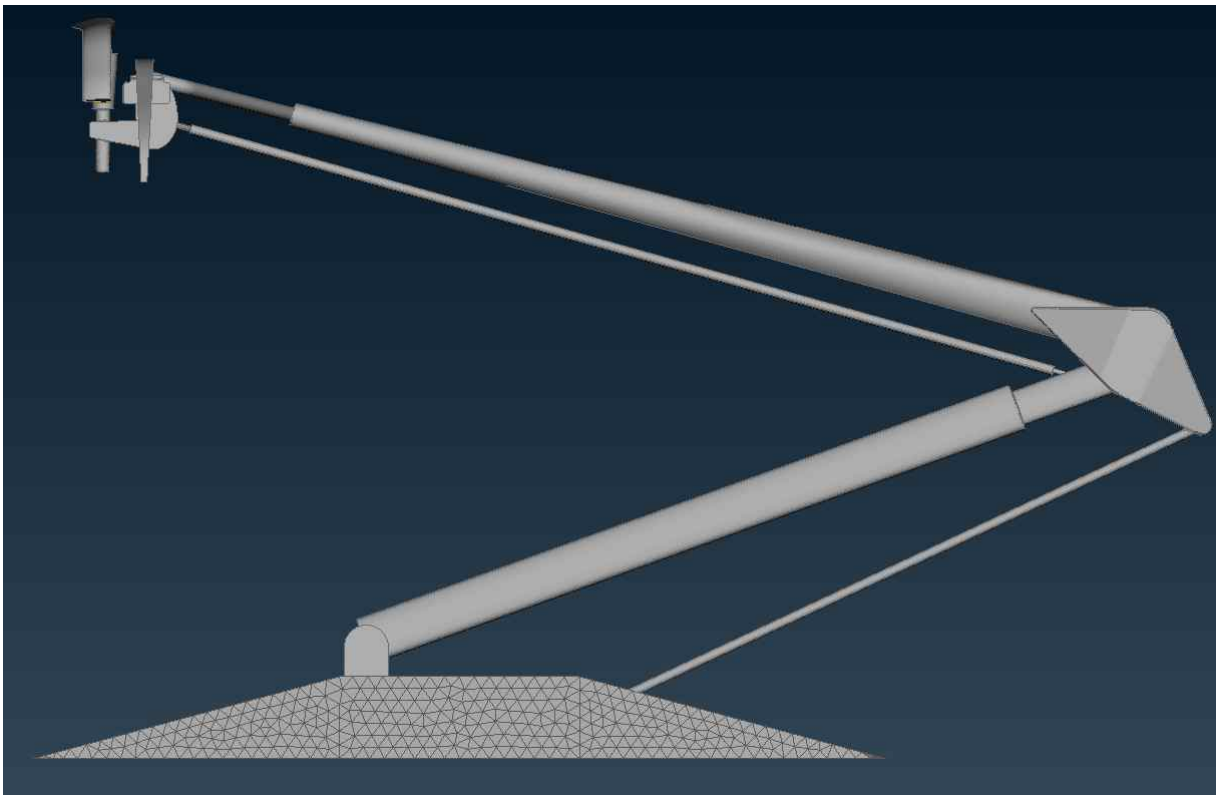


그림 2-3-108 최적설계된 팬터그래프의 전산해석용 격자

전산해석모델은 그림과 같이 풍동실험조건과 동일한 형상과 하부덮개 구성되었으면 난류예측을 위해서 경계층을 20층까지 쌓아 공간격자는 약 2000만개이며 0.4초까지의 비정상 유동흐름을 계산하는데 5~6일정도 소요되었다.

공력저항의 경우 풍동실험과 동일하게 하부덮개를 제외한 팬터그래프만의 공력저항을 측정하였으며 공력소음은 풍동실험 시에 소음 어레이에 사용한 마이크 중 팬헤드에 위치에 해당하는 마이크를 선정하여 동일한 위치에서 가상 리시버를 정하여 해석하였다. 팬터그래프 중심부로부터 마이크까지의 거리는 2m이다.

(2) 실험 데이터베이스와 해석 데이터베이스의 비교

(가) 정상상태, 팬헤드 각도 0도

① Yaw각 0도

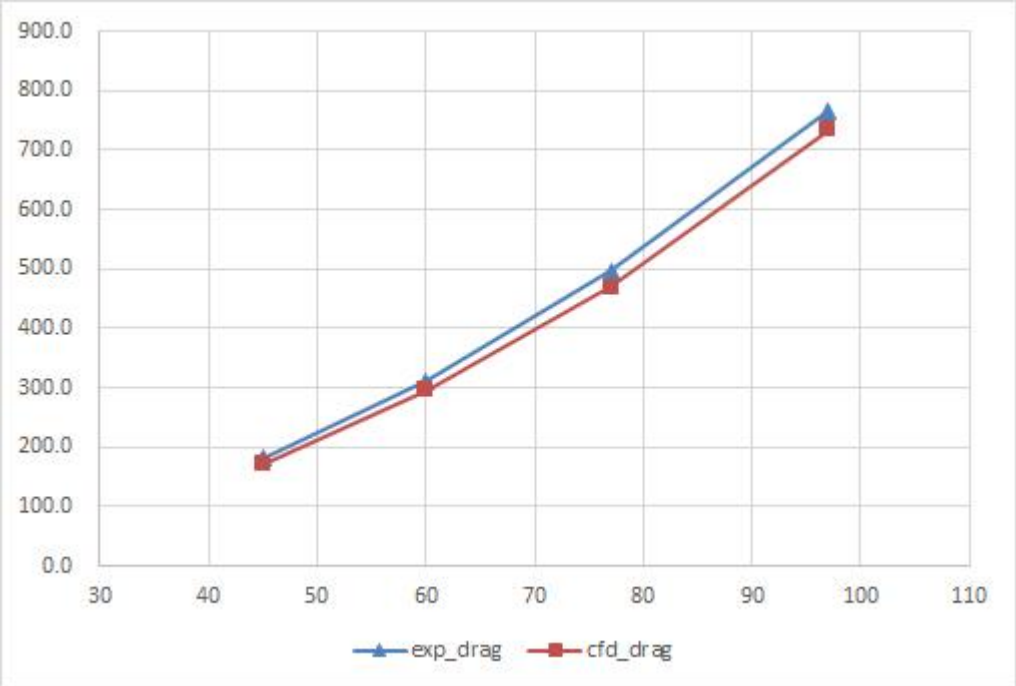


그림 2-3-109 정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

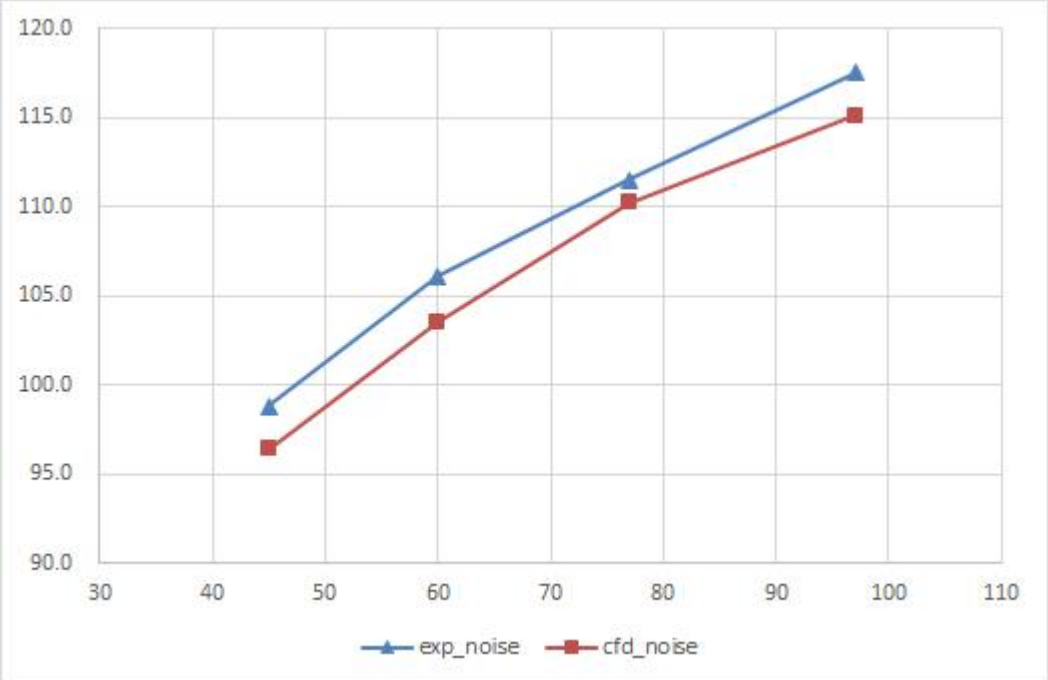


그림 2-3-110 정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

표 2-3-9 정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	181.9	311.1	497.5	766.4	-
전산해석 Drag(N)	171.7	296.7	470.3	734.5	-
Δ(%)	5.60	4.64	5.47	4.17	4.97
풍동실험 Noise(dB)	98.8	106.1	111.5	117.5	-
전산해석 Noise(dB)	96.4	103.5	110.2	115.1	-
Δ(dB)	2.4	2.6	1.3	2.4	2.2

② Yaw각 2도

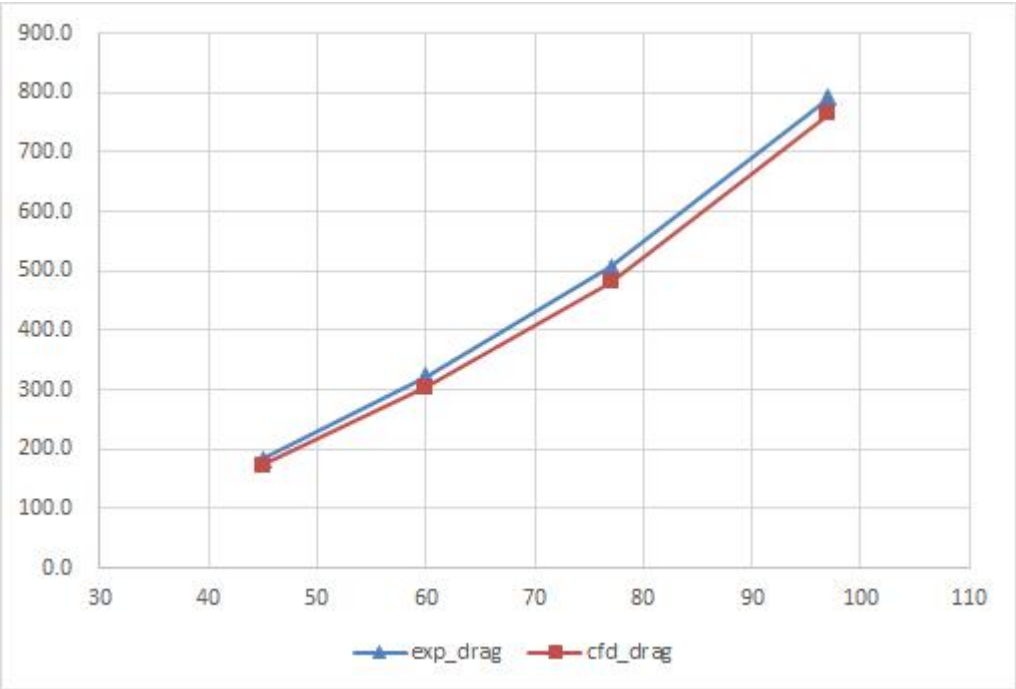


그림 2-3-111 정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

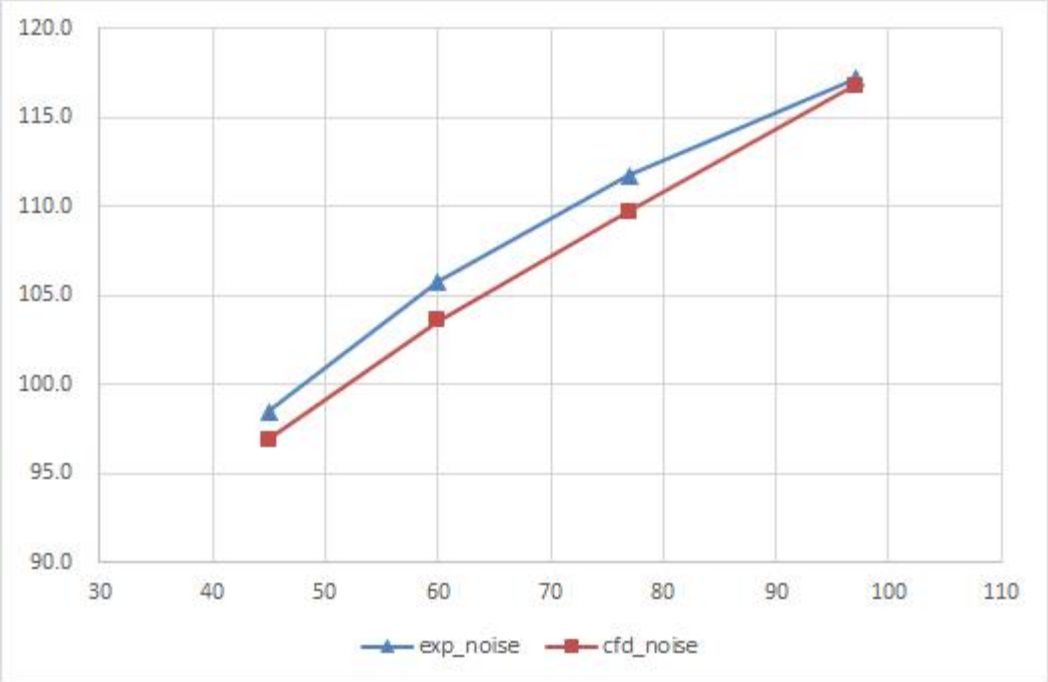


그림 2-3-112 정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-10 정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	183.2	323.0	506.3	792.1	-
전산해석 Drag(N)	173.5	304.4	481.7	764.4	-
Δ(%)	5.33	5.74	4.85	3.50	4.86
풍동실험 Noise(dB)	98.5	105.8	111.8	117.2	-
전산해석 Noise(dB)	96.9	103.6	109.7	116.8	-
Δ(dB)	1.6	2.2	2.1	0.4	1.5

③ Yaw각 4도

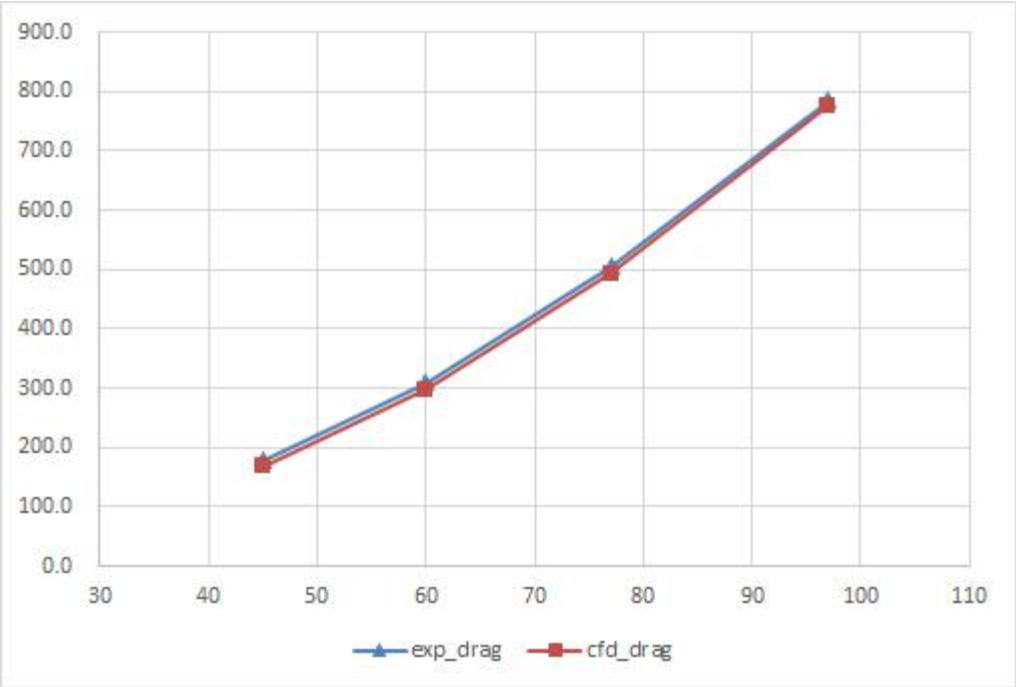


그림 2-3-113 정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

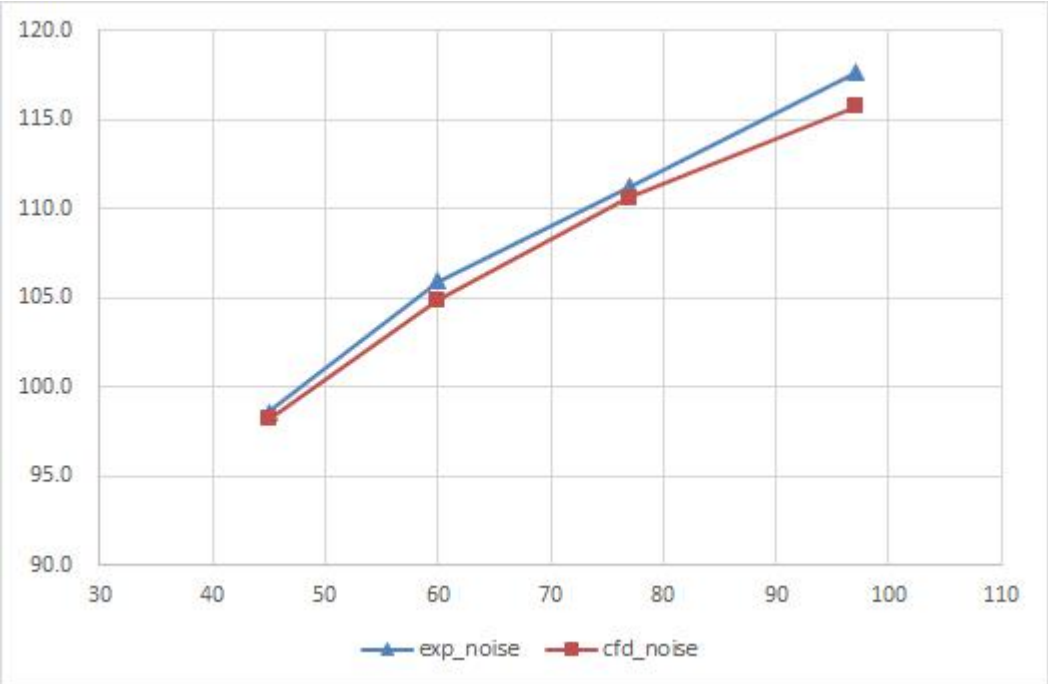


그림 2-3-114 정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-11 정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	178.4	310.3	505.3	785.8	-
전산해석 Drag(N)	168.3	297.3	493.0	776.3	-
Δ(%)	5.65	4.19	2.42	1.21	3.37
풍동실험 Noise(dB)	98.6	105.9	111.2	117.6	-
전산해석 Noise(dB)	98.2	104.9	110.6	115.7	-
Δ(dB)	0.4	1.0	0.6	1.9	1.0

(나) 정상상태, 팬헤드 각도 -2.5도

① Yaw각 0도

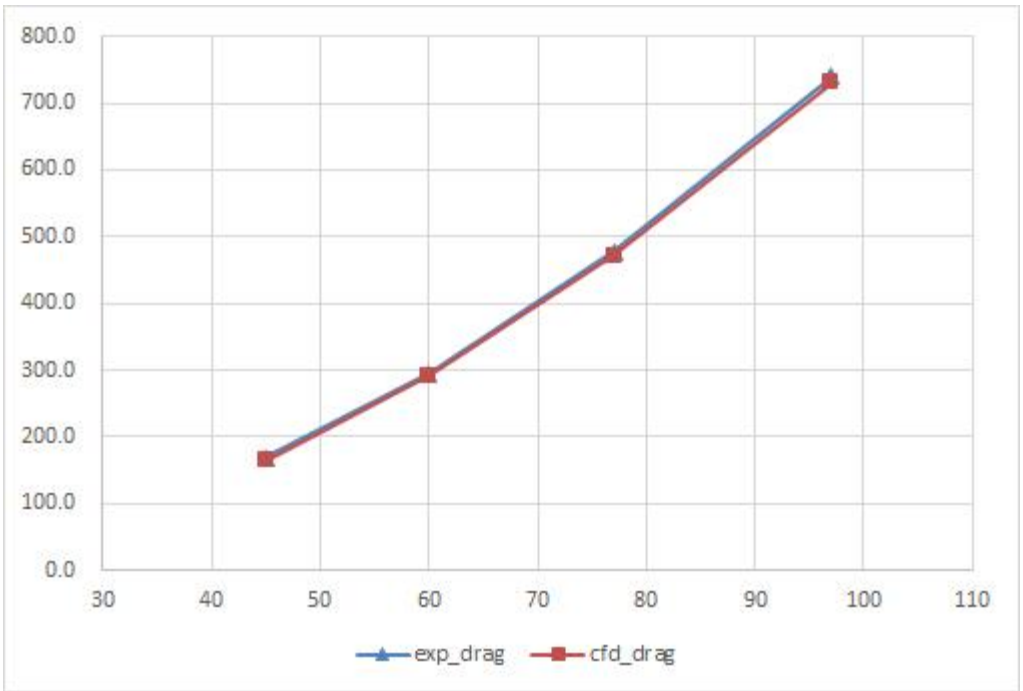


그림 2-3-115 정상상태, 팬헤드 각도 -25도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

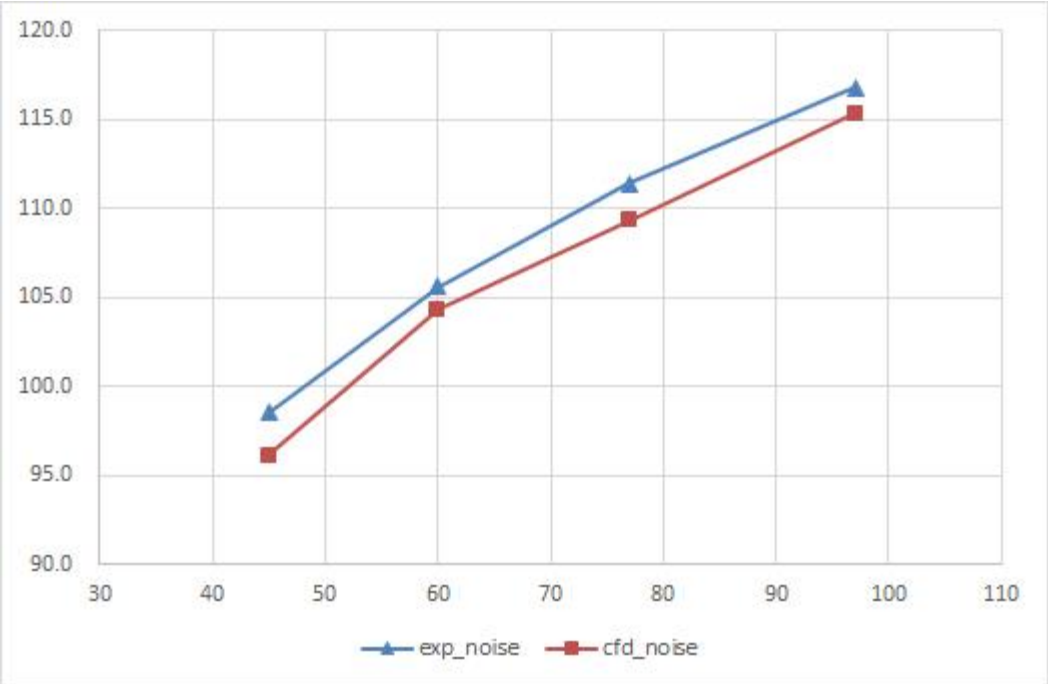


그림 2-3-116 정상상태, 팬헤드 각도 -25도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-12 정상상태, 팬헤드 각도 -2.5도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	168.9	295.3	477.1	739.9	-
전산해석 Drag(N)	164.2	291.1	471.4	730.2	-
Δ(%)	2.77	1.42	1.19	1.30	1.67
풍동실험 Noise(dB)	98.5	105.6	111.4	116.8	-
전산해석 Noise(dB)	96.1	104.3	109.3	115.3	-
Δ(dB)	2.4	1.3	2.1	1.5	1.8

② Yaw각 2도

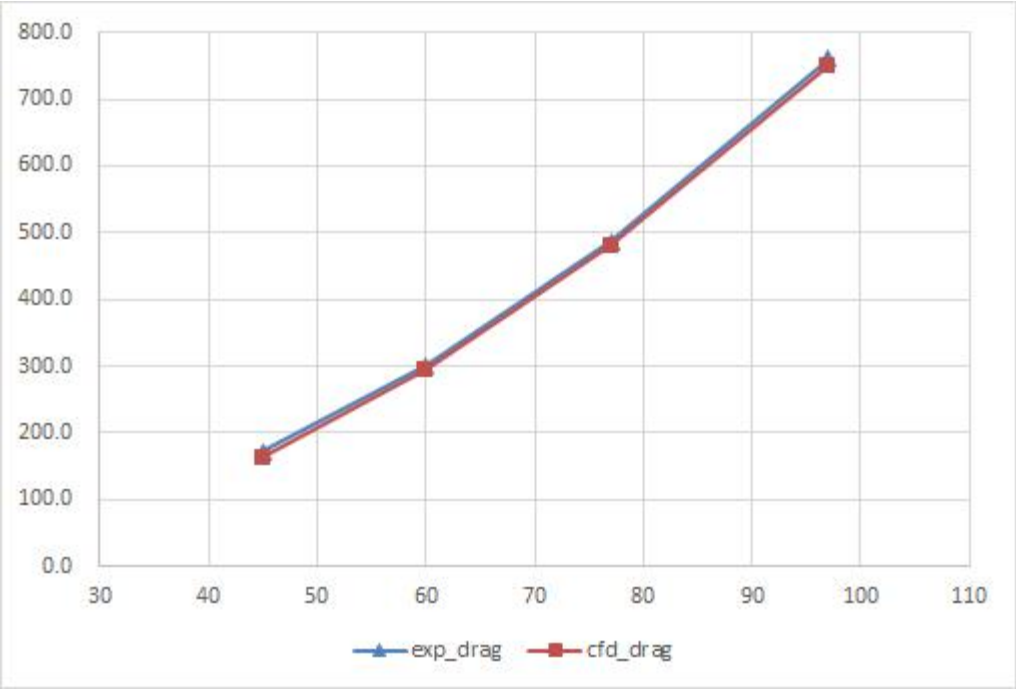


그림 2-3-117 정상상태, 팬헤드 각도 -25도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

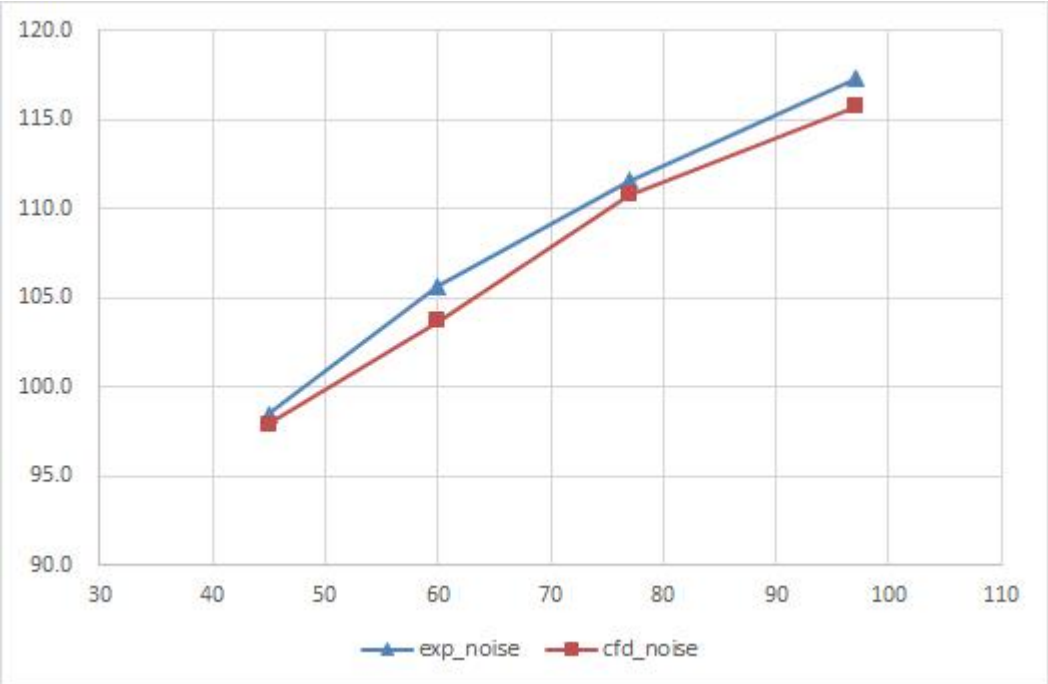


그림 2-3-118 정상상태, 팬헤드 각도 -25도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-13 정상상태, 팬헤드 각도 -2.5도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	171.4	300.7	487.0	760.4	-
전산해석 Drag(N)	162.3	294.2	481.1	750.2	-
Δ(%)	5.34	2.19	1.21	1.34	2.52
풍동실험 Noise(dB)	98.5	105.7	111.6	117.3	-
전산해석 Noise(dB)	97.9	103.7	110.8	115.7	-
Δ(dB)	0.6	2.0	0.8	1.6	1.2

③ Yaw각 4도

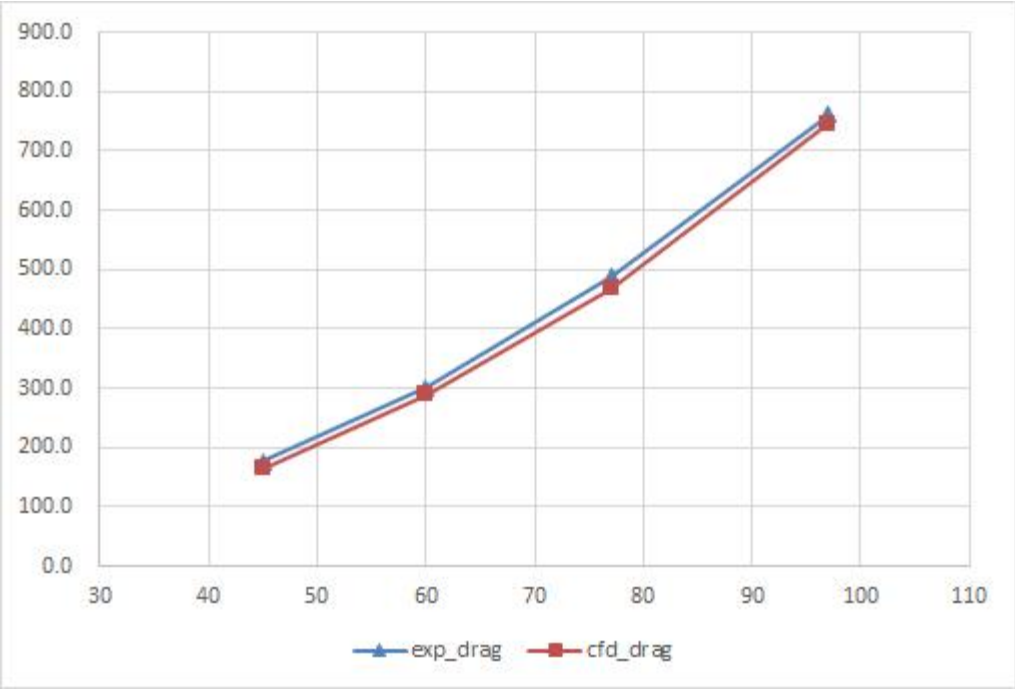


그림 2-3-119 정상상태, 팬헤드 각도 -25도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

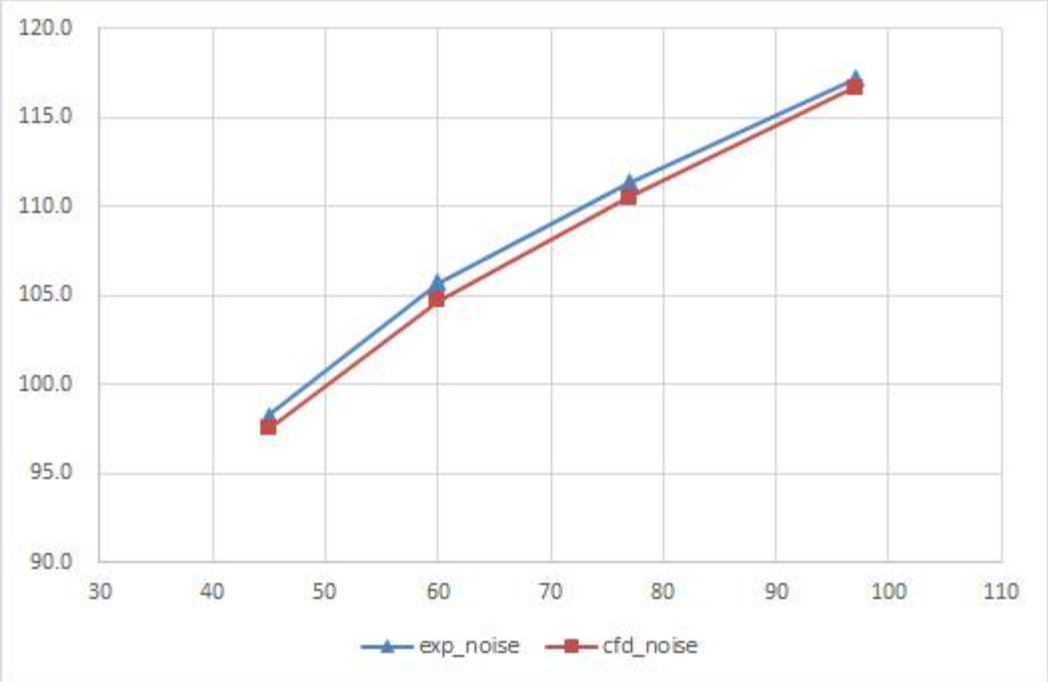


그림 2-3-120 정상상태, 팬헤드 각도 -2.5도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-14 정상상태, 팬헤드 각도 -2.5도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	176.1	301.1	488.4	762.3	-
전산해석 Drag(N)	163.8	289.6	468.5	745.7	-
Δ(%)	6.97	3.84	4.07	2.17	4.26
풍동실험 Noise(dB)	98.3	105.7	111.3	117.2	-
전산해석 Noise(dB)	97.5	104.7	110.5	116.7	-
Δ(dB)	0.8	1.0	0.8	0.5	0.8

(다) 정상상태, 팬헤드 각도 2.5도

① Yaw각 0도

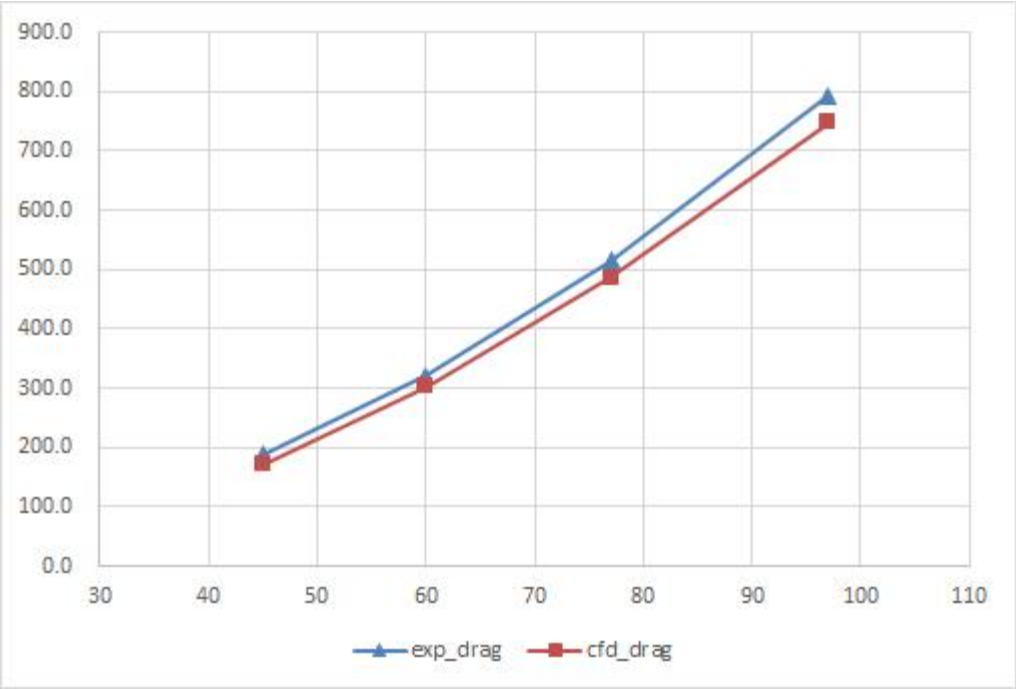


그림 2-3-121 정상상태, 팬헤드 각도 25도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

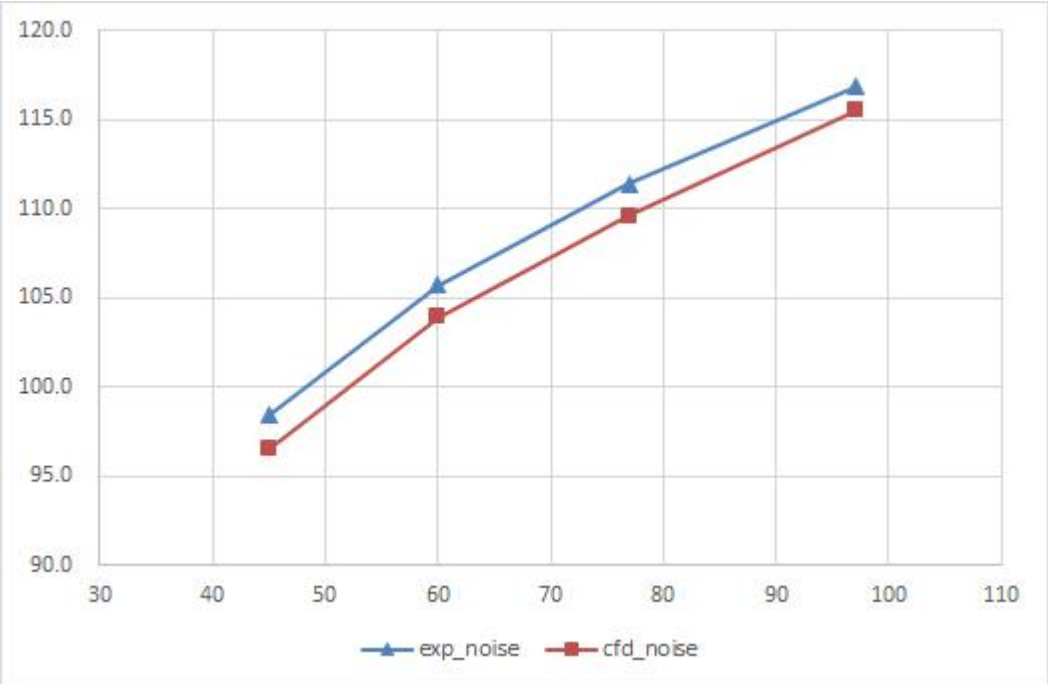


그림 2-3-122 정상상태, 팬헤드 각도 25도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-15 정상상태, 팬헤드 각도 2.5도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력 성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	187.8	321.4	516.1	794.3	-
전산해석 Drag(N)	172.1	302.0	486.8	747.6	-
Δ(%)	8.38	6.01	5.68	5.87	6.49
풍동실험 Noise(dB)	98.4	105.7	111.4	116.8	-
전산해석 Noise(dB)	96.5	103.9	109.6	115.5	-
Δ(dB)	1.9	1.8	1.8	1.3	1.7

② Yaw각 2도

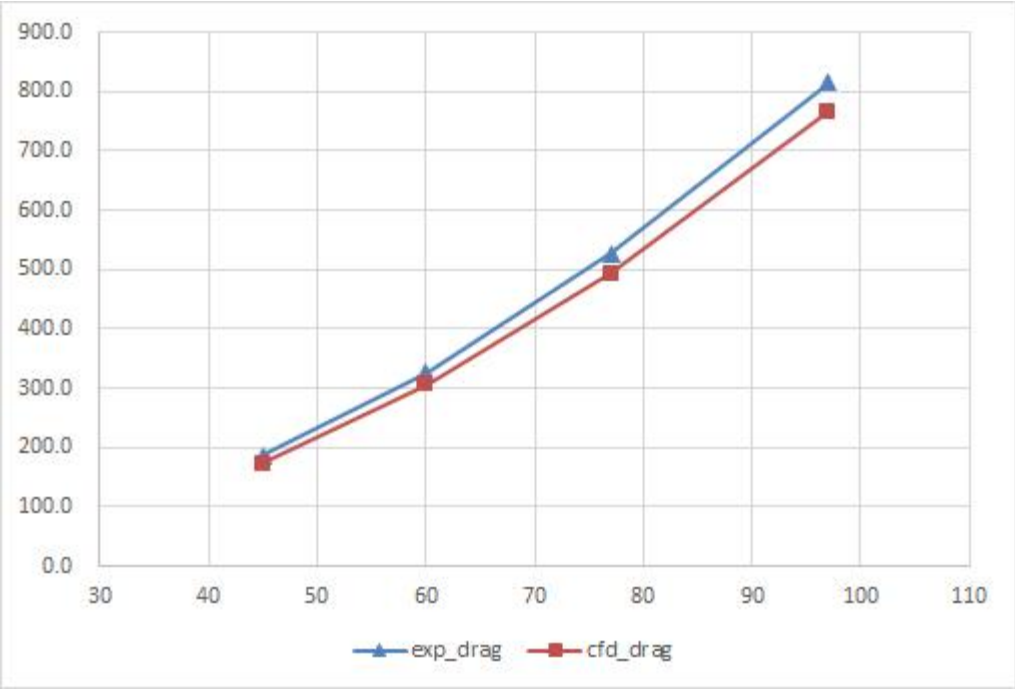


그림 2-3-123 정상상태, 팬헤드 각도 25도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

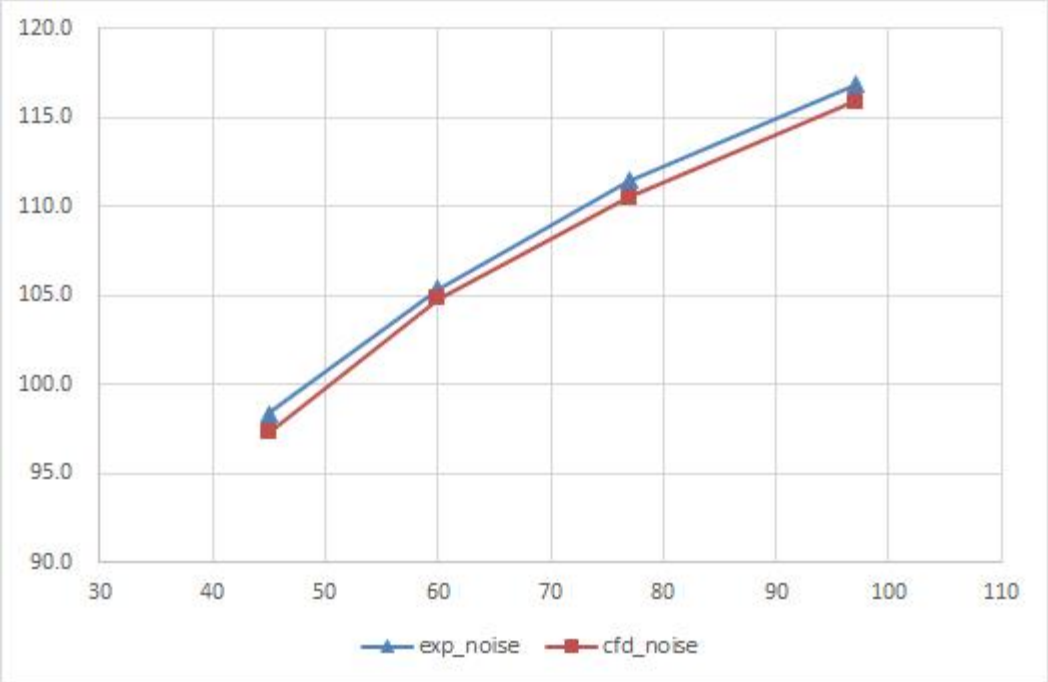


그림 2-3-124 정상상태, 팬헤드 각도 2.5도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-16 정상상태, 팬헤드 각도 2.5도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력 성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	187.2	326.1	527.7	815.3	-
전산해석 Drag(N)	173.8	305.4	493.3	766.0	-
Δ(%)	7.17	6.35	6.52	6.05	6.52
풍동실험 Noise(dB)	98.4	105.4	111.5	116.8	-
전산해석 Noise(dB)	97.3	104.8	110.5	115.9	-
Δ(dB)	1.1	0.6	1.0	0.9	0.9

③ Yaw각 4도

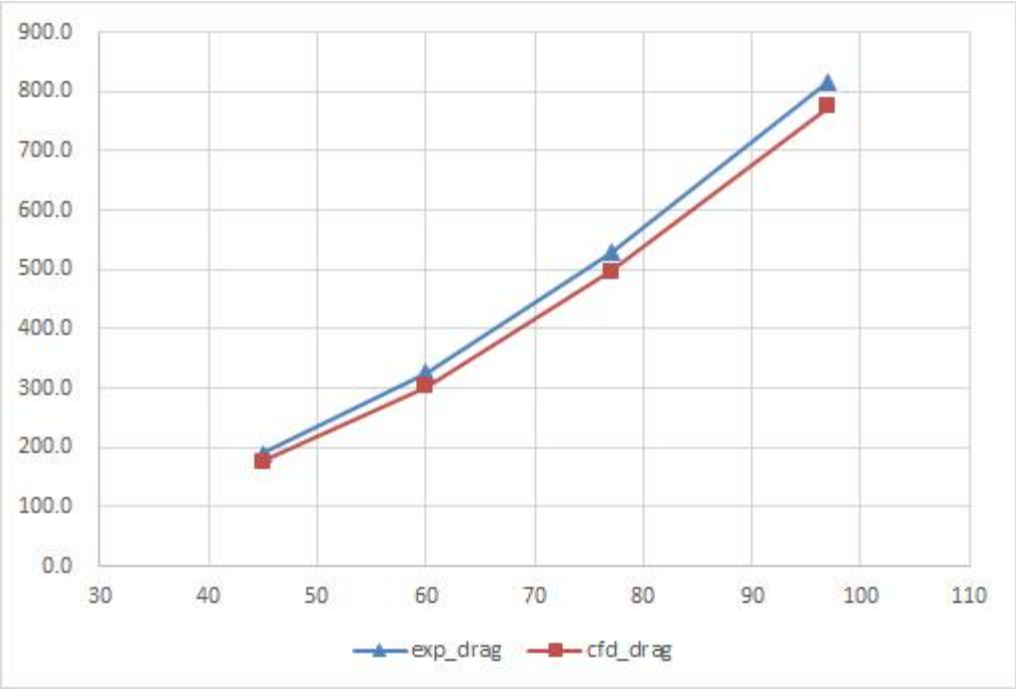


그림 2-3-125 정상상태, 팬헤드 각도 25도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

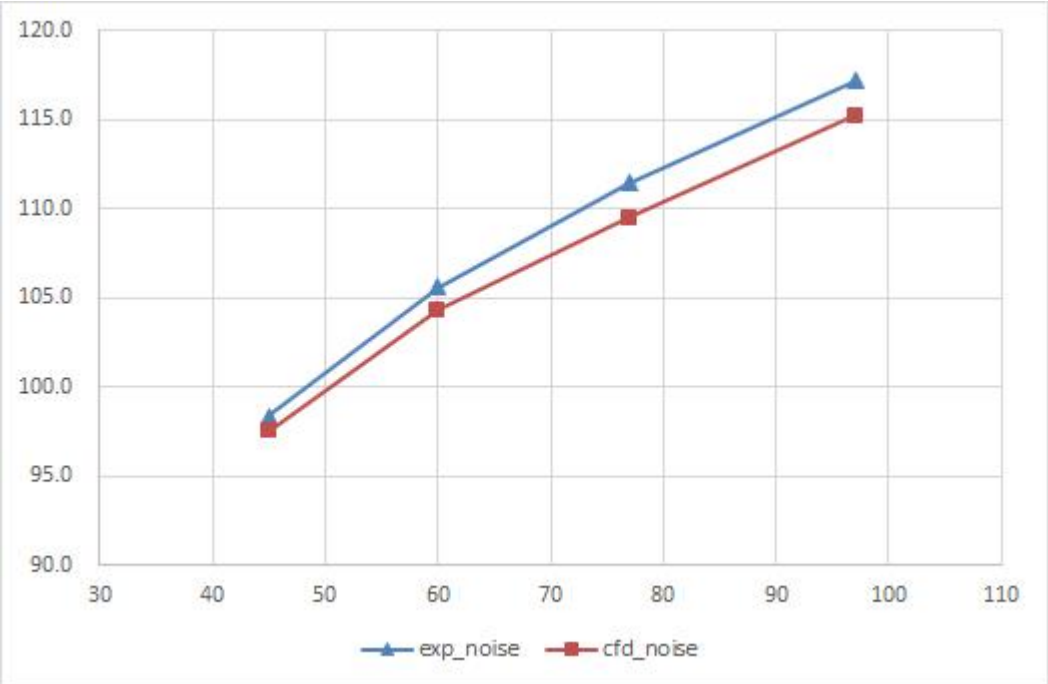


그림 2-3-126 정상상태, 팬헤드 각도 25도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-17 정상상태, 팬헤드 각도 2.5도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력 성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	189.4	326.9	528.6	817.8	-
전산해석 Drag(N)	176.6	303.2	496.8	774.3	-
Δ(%)	6.75	7.25	6.03	5.33	6.34
풍동실험 Noise(dB)	98.3	105.6	111.4	117.2	-
전산해석 Noise(dB)	97.5	104.3	109.5	115.2	-
Δ(dB)	0.8	1.3	1.9	2.0	1.5

(라) 정상상태, 팬헤드 각도 -5도

① Yaw각 0도

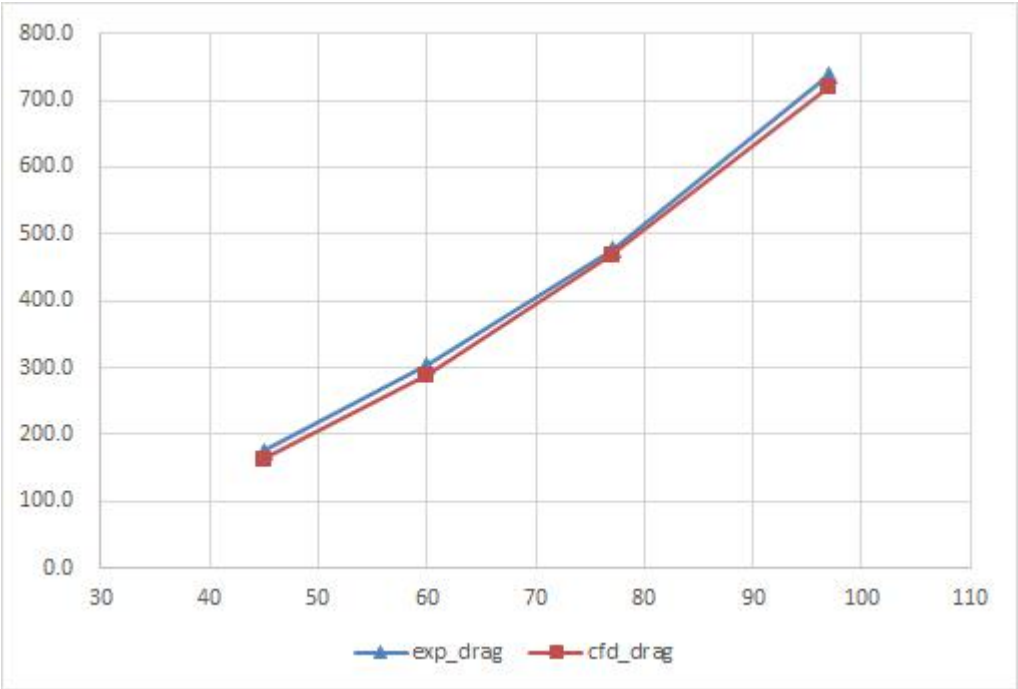


그림 2-3-127 정상상태, 팬헤드 각도 -5도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

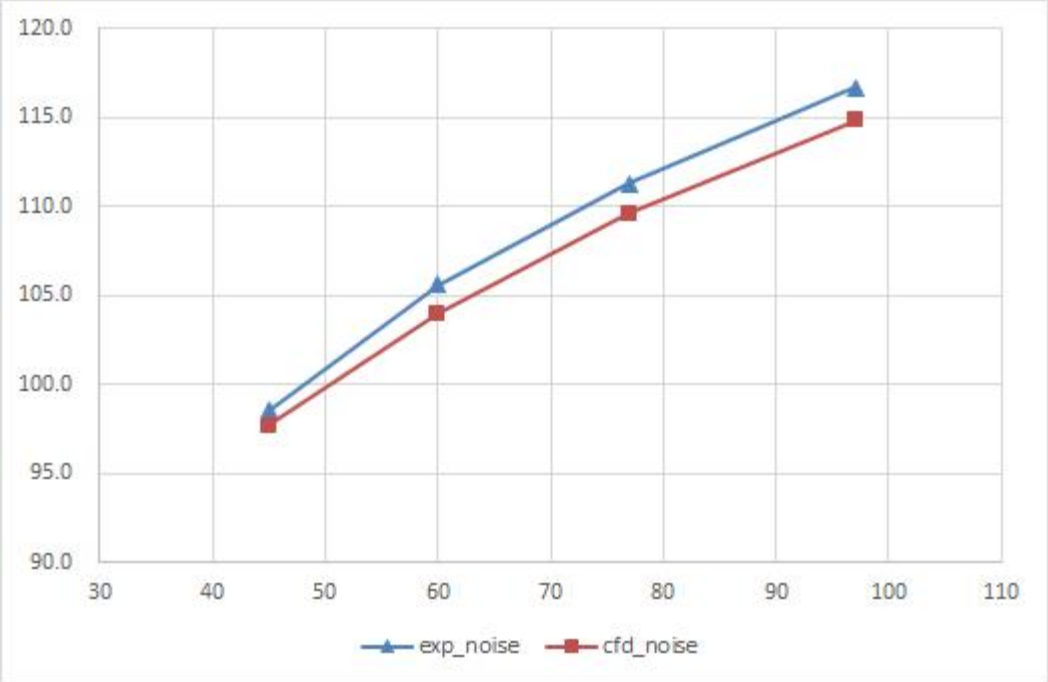


그림 2-3-128 정상상태, 팬헤드 각도 -5도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-18 정상상태, 팬헤드 각도 -5도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력 성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	174.3	303.4	476.3	738.0	-
전산해석 Drag(N)	162.7	289.3	469.0	719.8	-
Δ(%)	6.68	4.65	1.55	2.46	3.84
풍동실험 Noise(dB)	98.5	105.6	111.3	116.7	-
전산해석 Noise(dB)	97.7	104	109.6	114.8	-
Δ(dB)	0.8	1.6	1.7	1.9	1.5

② Yaw각 2도

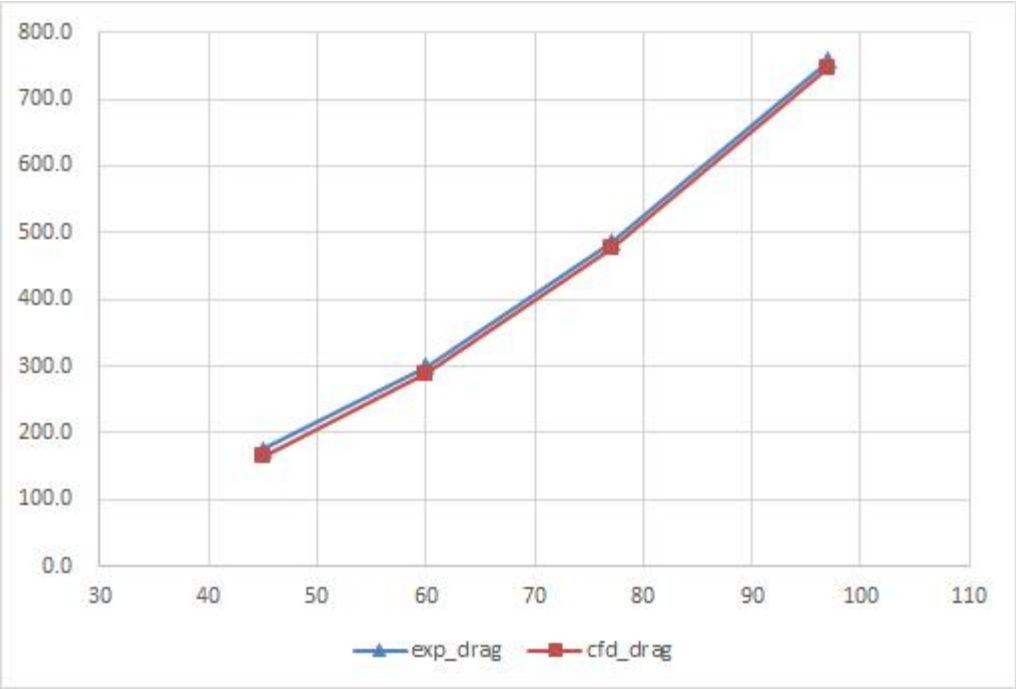


그림 2-3-129 정상상태, 팬헤드 각도 -5도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

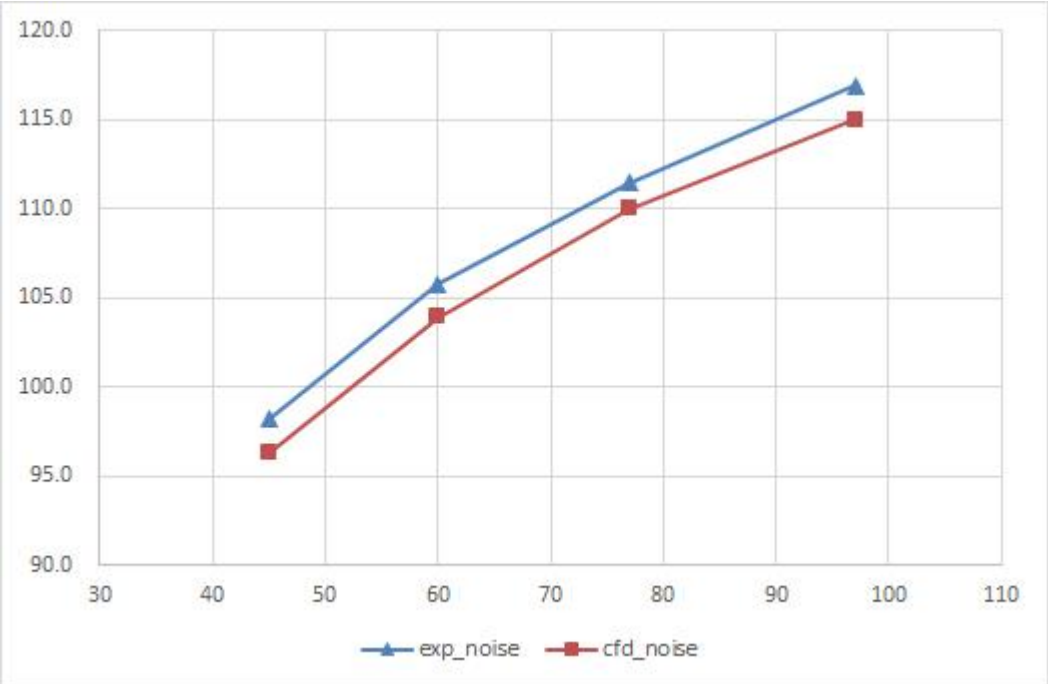


그림 2-3-130 정상상태, 팬헤드 각도 -5도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-19 정상상태, 팬헤드 각도 -5도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력 성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	175.1	299.2	485.4	758.2	-
전산해석 Drag(N)	164.3	288.4	476.4	747.8	-
Δ(%)	6.15	3.62	1.86	1.38	3.25
풍동실험 Noise(dB)	98.2	105.8	111.5	116.9	-
전산해석 Noise(dB)	96.3	103.9	110	115	-
Δ(dB)	1.9	1.9	1.5	1.9	1.8

③ Yaw각 4도

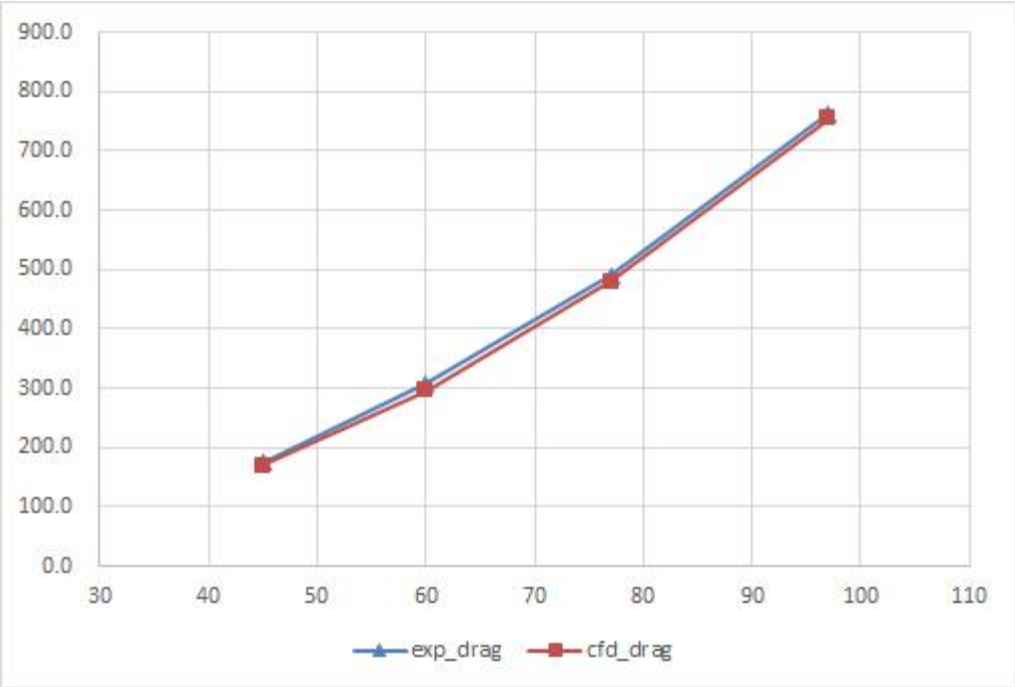


그림 2-3-131 정상상태, 팬헤드 각도 -5도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

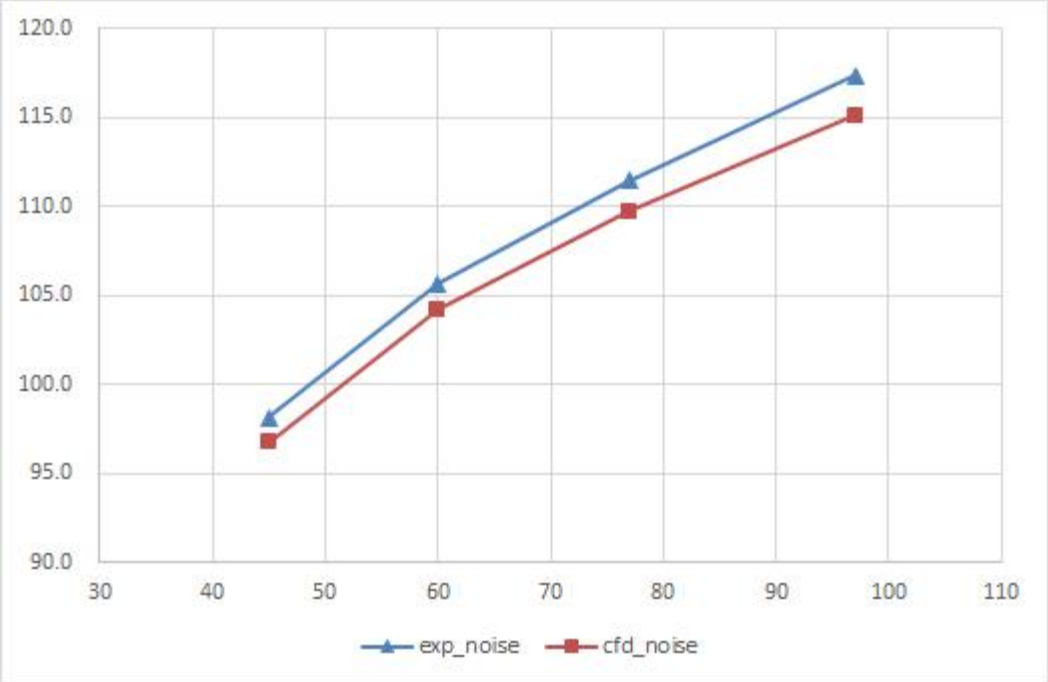


그림 2-3-132 정상상태, 팬헤드 각도 -5도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-20 정상상태, 팬헤드 각도 -5도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	175.2	308.5	489.2	764.0	-
전산해석 Drag(N)	169.9	296.9	480.3	754.4	-
Δ(%)	3.01	3.77	1.82	1.25	2.46
풍동실험 Noise(dB)	98.1	105.7	111.4	117.4	-
전산해석 Noise(dB)	96.7	104.2	109.7	115.1	-
Δ(dB)	1.4	1.5	1.7	2.3	1.7

(마) 정상상태, 팬헤드 각도 5도

① Yaw각 0도

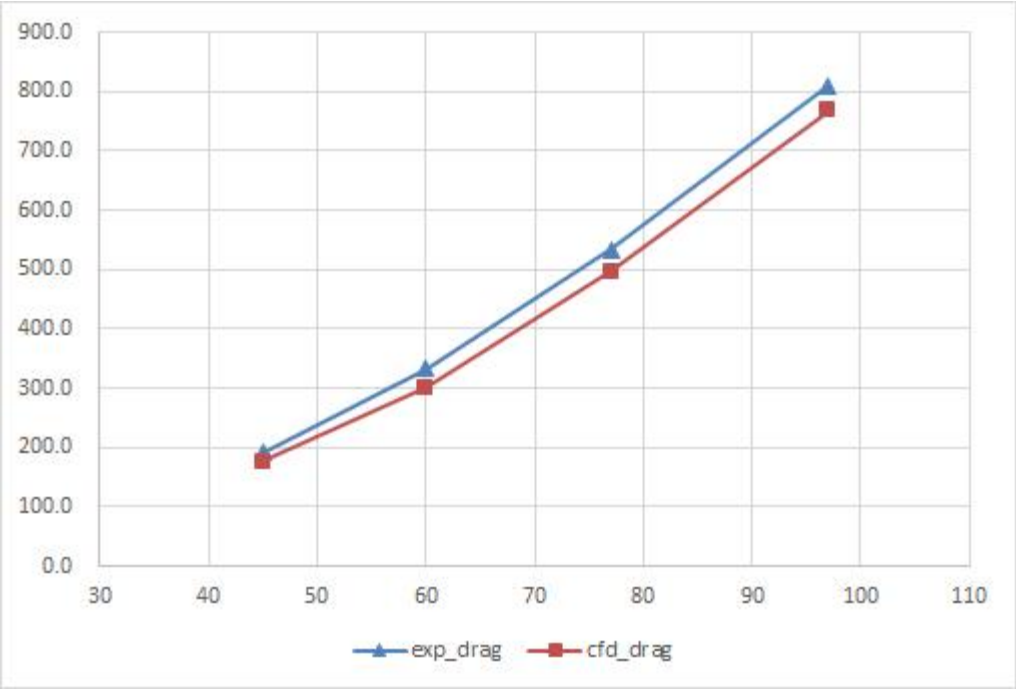


그림 2-3-133 정상상태, 팬헤드 각도 5도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

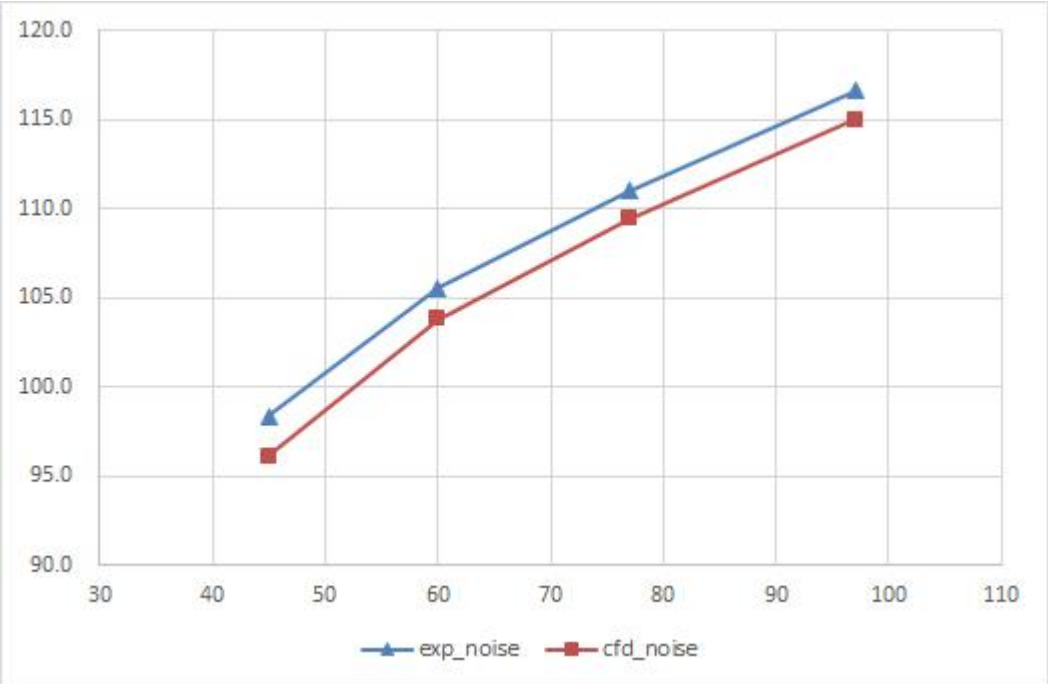


그림 2-3-134 정상상태, 팬헤드 각도 5도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-21 정상상태, 팬헤드 각도 5도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	191.1	332.8	533.3	810.6	-
전산해석 Drag(N)	176.3	301.0	496.8	768.6	-
Δ(%)	7.76	9.54	6.83	5.19	7.33
풍동실험 Noise(dB)	98.4	105.5	111.0	116.6	-
전산해석 Noise(dB)	96.1	103.8	109.4	115	-
Δ(dB)	2.3	1.7	1.6	1.6	1.8

② Yaw각 2도

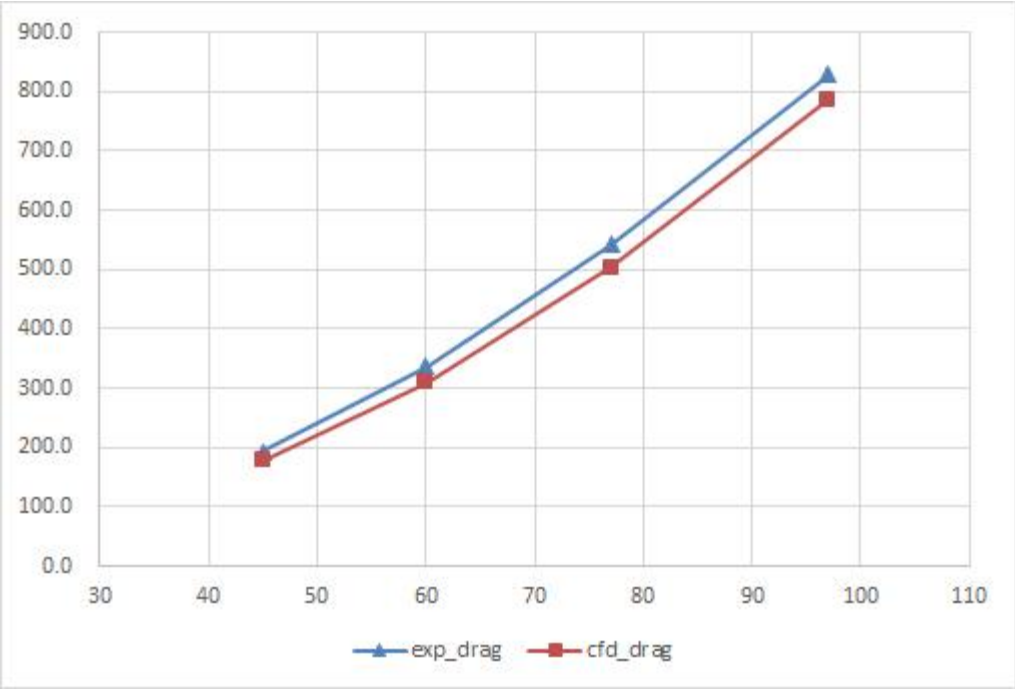


그림 2-3-135 정상상태, 팬헤드 각도 5도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

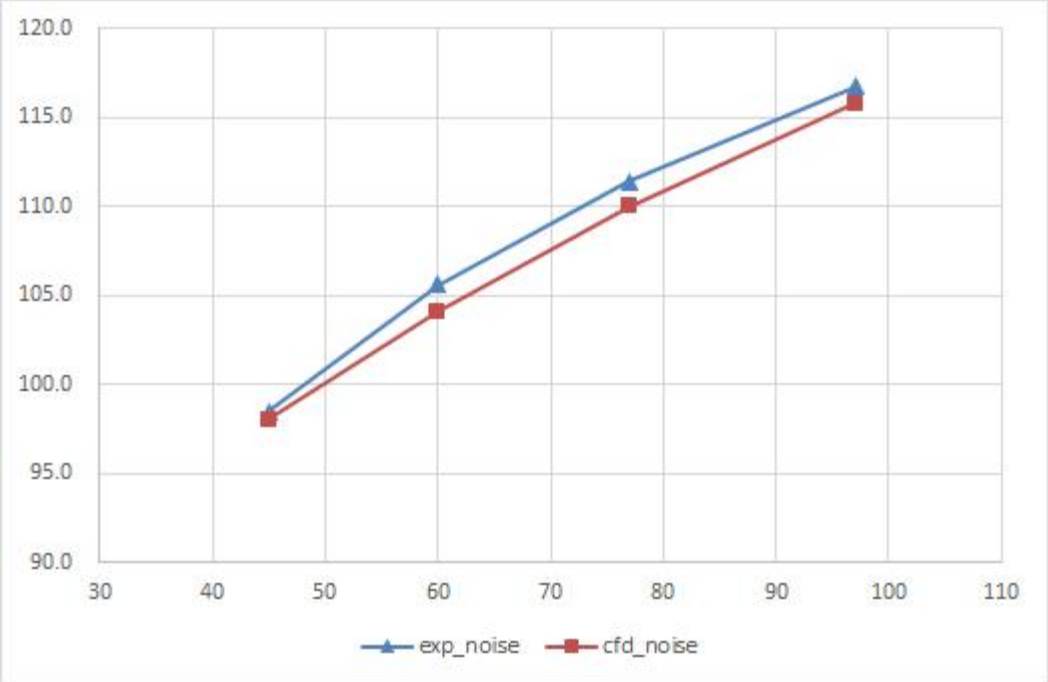


그림 2-3-136 정상상태, 팬헤드 각도 5도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-22 정상상태, 팬헤드 각도 5도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	192.6	337.3	541.6	829.0	-
전산해석 Drag(N)	178.4	309.2	502.9	786.6	-
Δ(%)	7.37	8.35	7.15	5.12	7.00
풍동실험 Noise(dB)	98.5	105.6	111.4	116.7	-
전산해석 Noise(dB)	98	104.1	110	115.8	-
Δ(dB)	0.5	1.5	1.4	0.9	1.1

③ Yaw각 4도

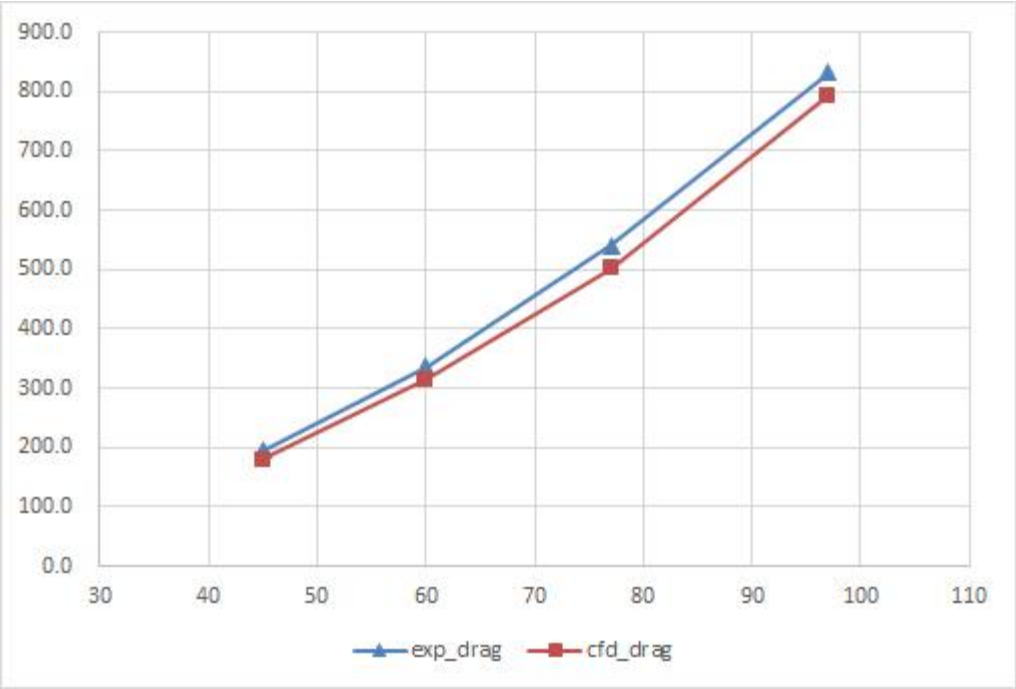


그림 2-3-137 정상상태, 팬헤드 각도 5도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

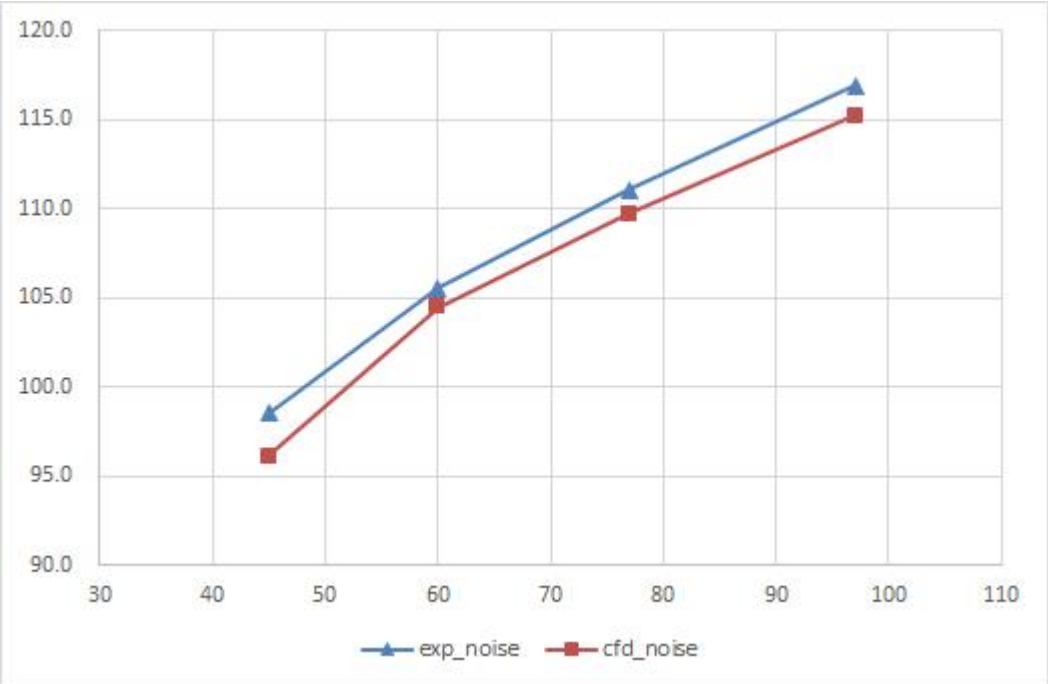


그림 2-3-138 정상상태, 팬헤드 각도 5도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-23 정상상태, 팬헤드 각도 5도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	195.3	337.3	541.2	832.1	-
전산해석 Drag(N)	179.8	313.9	501.6	793.7	-
Δ(%)	7.92	6.94	7.32	4.62	6.70
풍동실험 Noise(dB)	98.5	105.6	111.1	116.9	-
전산해석 Noise(dB)	96.1	104.5	109.7	115.2	-
Δ(dB)	2.4	1.1	1.4	1.7	1.6

(바) 비정상상태, 팬헤드 각도 0도

① Yaw각 0도

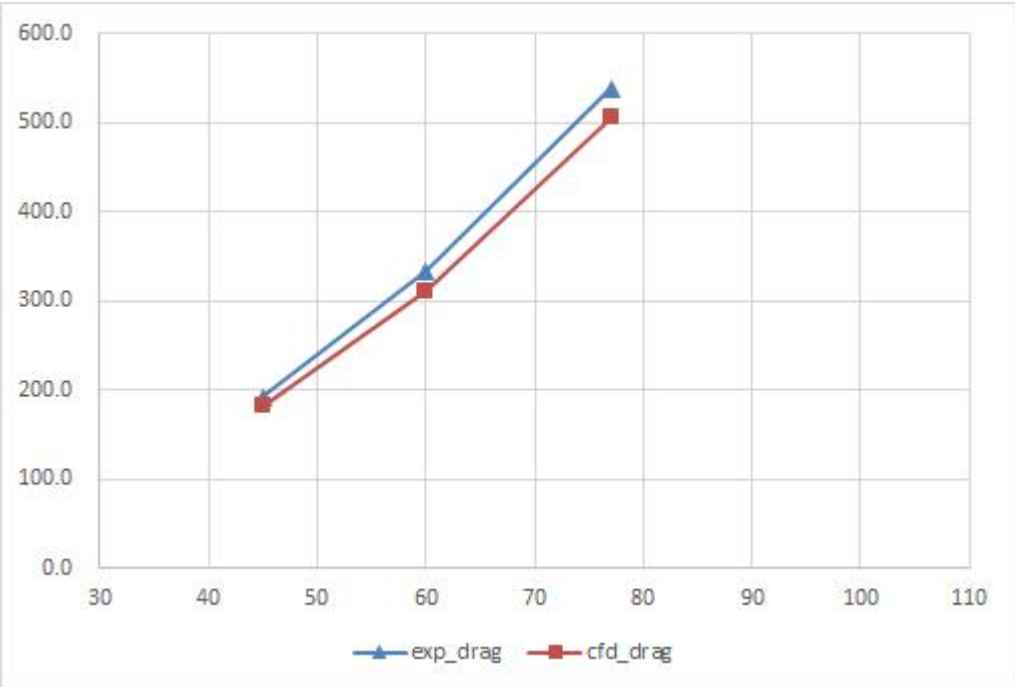


그림 2-3-139 비정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

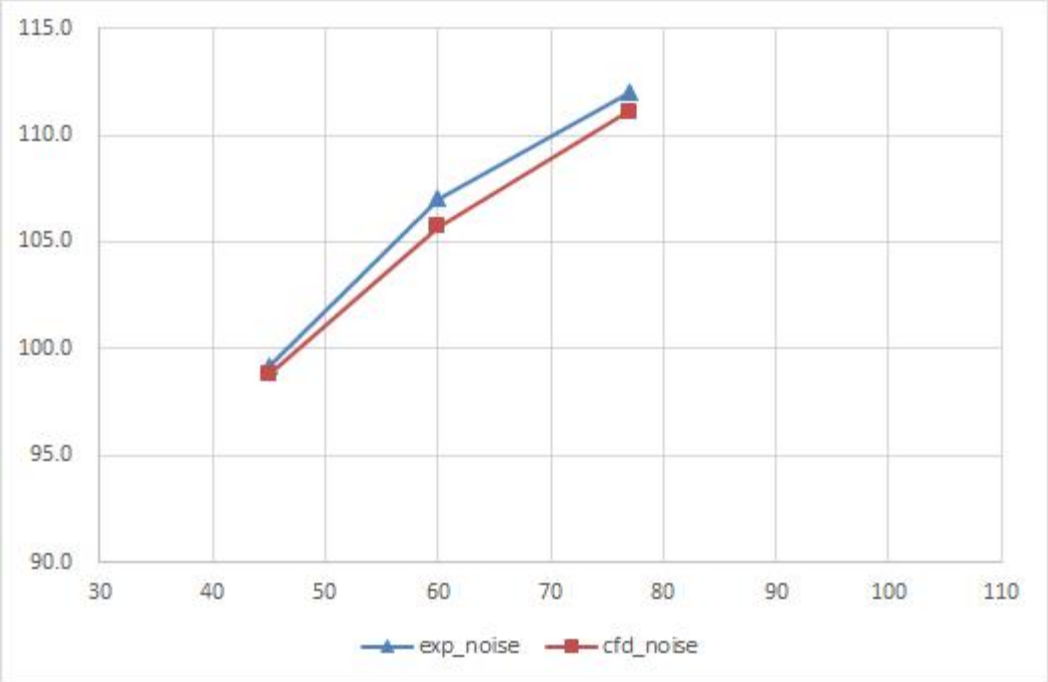


그림 2-3-140 비정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-24 비정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 0도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	191.7	333.1	537.9	-
전산해석 Drag(N)	181.3	311.2	505.7	-
Δ(%)	5.42	6.59	5.99	6.00
풍동실험 Noise(dB)	99.1	107.0	112.0	-
전산해석 Noise(dB)	98.8	105.7	111.1	-
Δ(dB)	0.3	1.3	0.9	0.8

② Yaw각 2도

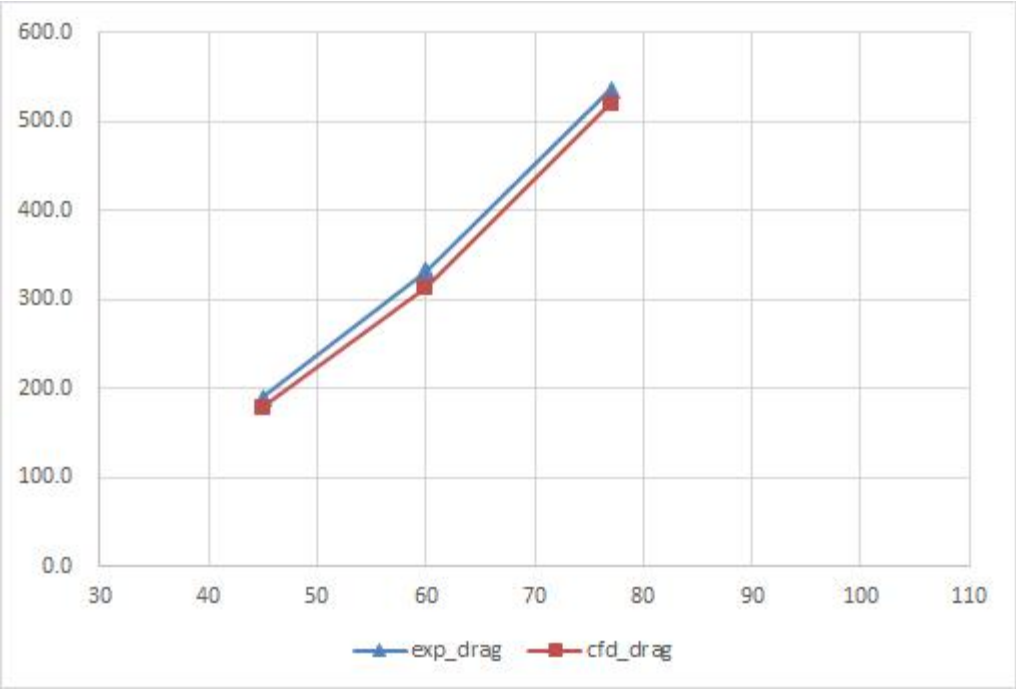


그림 2-3-141 비정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

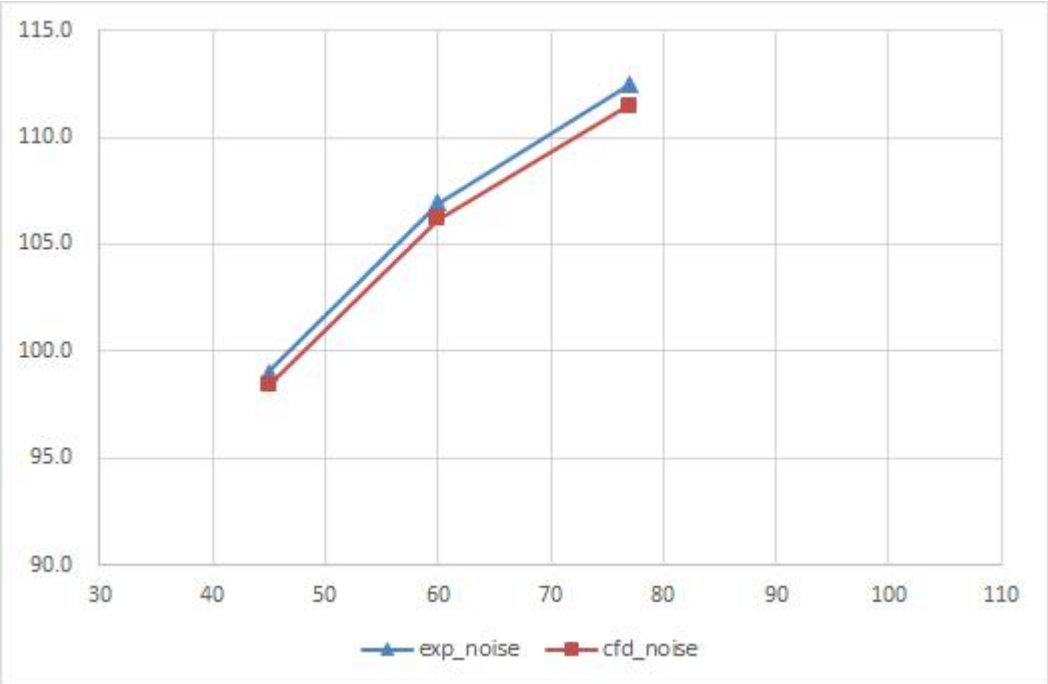


그림 2-3-142 비정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-25 비정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 2도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	189.8	331.8	535.3	-
전산해석 Drag(N)	178.0	313.1	520.3	-
Δ(%)	6.19	5.64	2.80	4.88
풍동실험 Noise(dB)	99.0	106.9	112.5	-
전산해석 Noise(dB)	98.4	106.2	111.5	-
Δ(dB)	0.6	0.7	1.0	0.8

③ Yaw각 4도

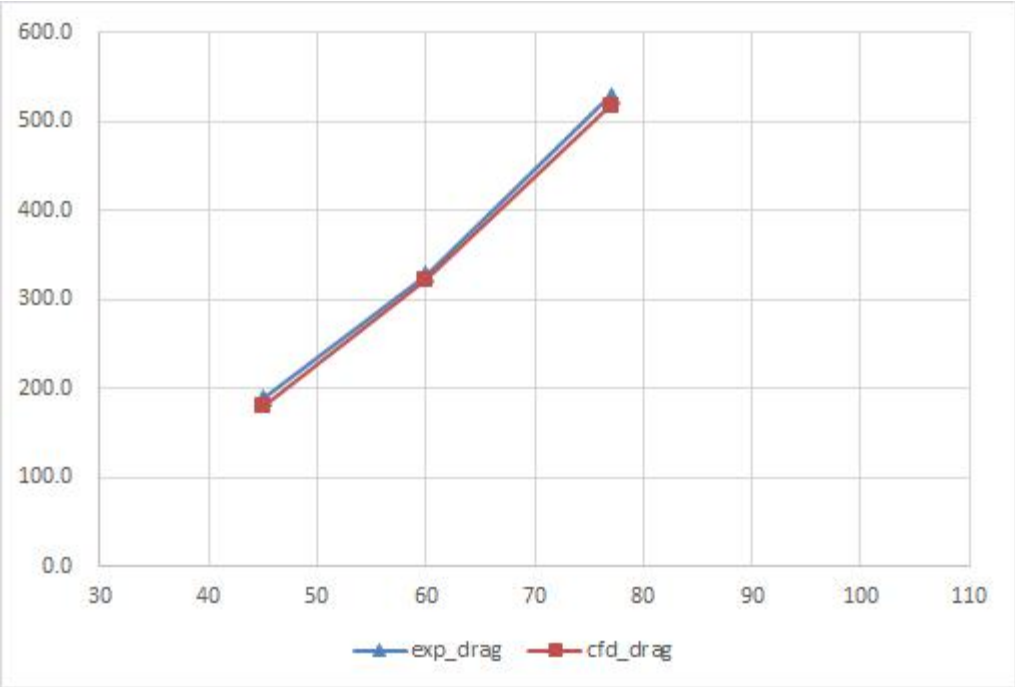


그림 2-3-143 비정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력저항

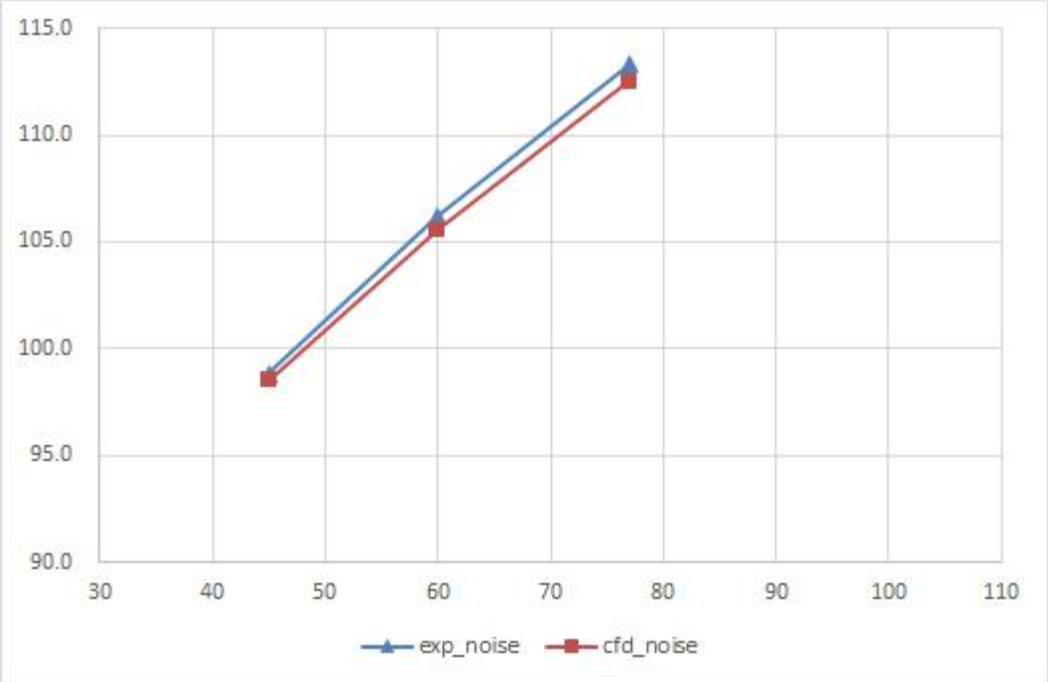


그림 2-3-144 비정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력소음

표 2-3-26 비정상상태, 팬헤드 각도 0도, Yaw각 4도 조건에서 풍동실험과 전산해석의 공력성능

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	평균
풍동실험 Drag(N)	187.9	327.3	528.7	-
전산해석 Drag(N)	179.8	322.1	517.5	-
Δ(%)	4.29	1.61	2.11	2.67
풍동실험 Noise(dB)	98.4	106.2	111.5	-
전산해석 Noise(dB)	98.5	105.6	112.5	-
Δ(dB)	0.3	0.6	0.8	0.6

(사) 결론

최적설계된 풀스케일 팬터그래프 모델의 풍동실험결과와 동일한 조건에서 해석을 수행한 전산해석 결과를 비교해 보았다.

공력저항의 경우 평균 4.74% 전산해석에서 작게 나타났지만 각 케이스에서의 오차정도가 일정하며 유속이 증가함에 따라 공력저항이 증가하는 경향이나 팬헤드 각도에 따른 공력저항 증가와 정상상태와 비정상상태의 공력저항 변화를 동일하게 나타남을 확인할 수 있다.

실험과 해석에서 Yaw각에 따른 공력저항의 변화는 눈에 크게 뛰기 않는 반면 팬헤드각도가 증가할수록 공력저항이 증가하는 경향을 파악할 수 있는데 일반적으로 유선형팬헤드와 같은 형상은 받음각이 0도일 때 공력저항이 가장작고 받음각의 절대값이 커질수록 공력저항이 증가하는 것과는 다른 경향성을 가진다. 이러한 경향성의 원인은 그림 2-3-145의 팬헤드 각도가 0도일때의 팬헤드 주변 유동장을 보면 알 수 있는데 팬헤드 주변의 유동의 경우 팬터그래프 암에서부터 타고온 유동이 상승하면서 팬헤드각도가 0일 때 팬헤드의 유동에 대한 받음각은 0이 아님을 확인할 수 있다. 이를 좀 더 확실하게 비교하기 위해서 그림 2-3-146과 그림2-3-147의 팬헤드각도가 -5도와 +5도일때의 팬헤드 주변 유동장을 살펴보면 -5도일때의 팬헤드 후방의 유동박리가 가장 적게 발생하고 팬헤드각도가 커질수록 후방의 유동박리영역이 크게 확장함을 확인할 수 있다. 이러한 유동박리영역은 팬헤드의 공력저항을 증가하는 원인이 된다.

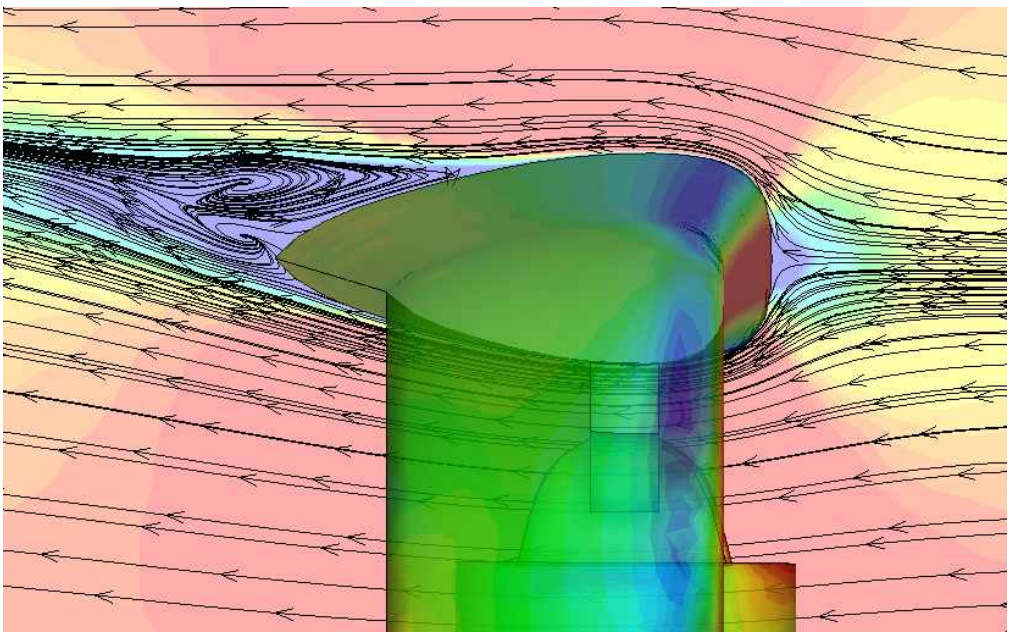


그림 2-3-145 정상상태, Yaw각 0도, 팬헤드각도 0도 일 때 팬헤드 주변 유동장

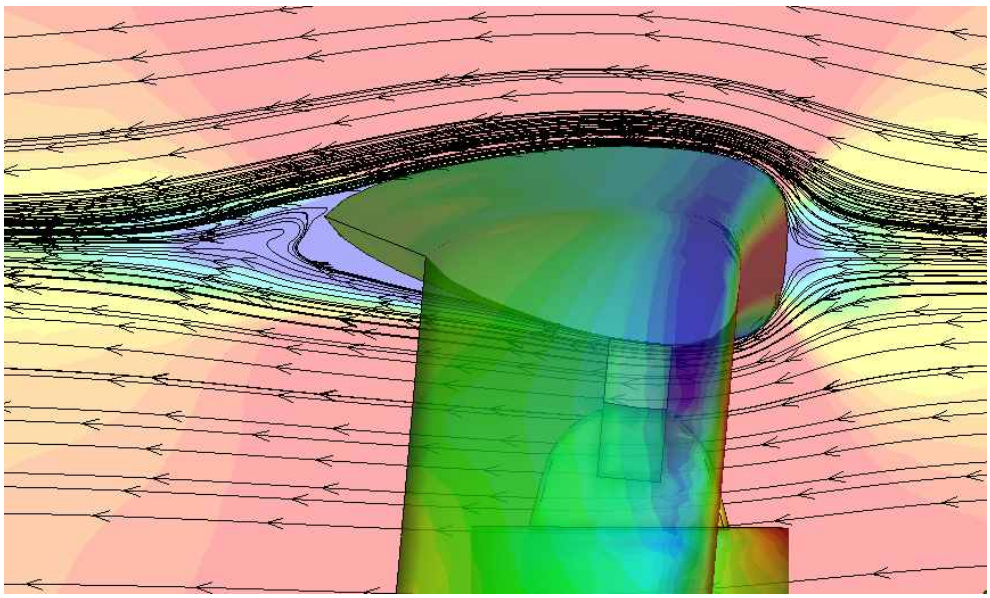


그림 2-3-146 정상상태, Yaw각 0도, 팬헤드각도 -5도 일 때 팬헤드 주변 유동장

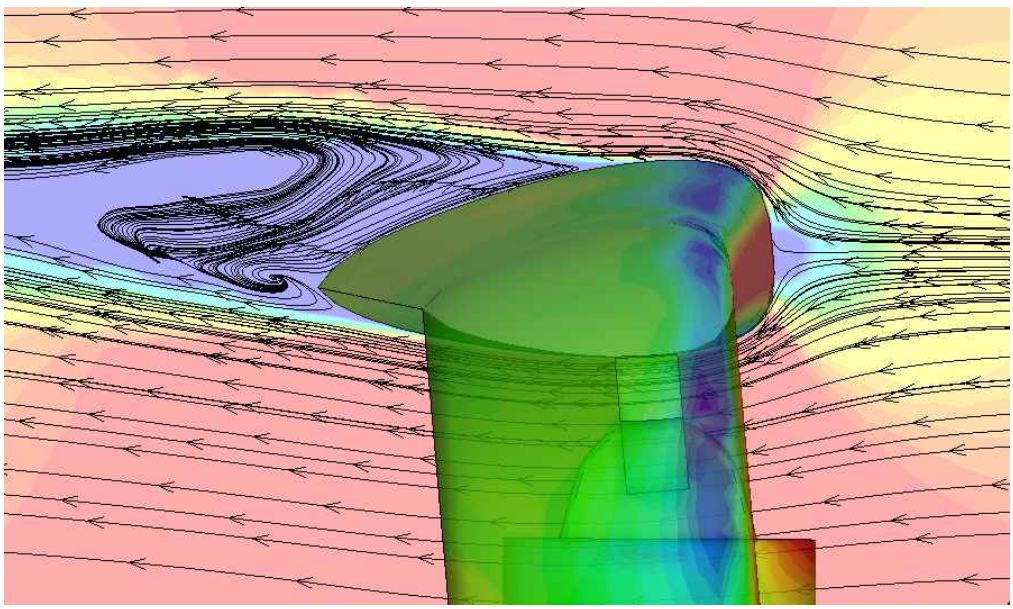


그림 2-3-147 정상상태, Yaw각 0도, 팬헤드각도 5도 일 때 팬헤드 주변 유동장

공력소음의 경우도 평균 1.4dB, 최대 2.6dB 전산해석이 풍동실험에 비해서 일정하게 작게 해석되었지만 오차정도가 비교적 일정하며 유속변화에 따른 소음변화와 정상상태와 비정상상태에서의 소음변화와 같은 공력소음의 경향성을 정확하게 보여주고 있다.

따라서 최적설계 팬터래프의 전산해석 결과와 풍동실험의 공력저항과 공력소음 결과를 비교할 때 전산해석 결과가 비교적 신뢰할 수 있고 이를 바탕으로 최적설계 팬터그래프의 전산해석 데이터베이스를 구축하여 풍동실험결과와 함께 공력성능을 파악하는데 사용할 수 있다고 판단하였다.

(3) 전산해석을 통한 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 성능 평가

개방형 풍동에서의 실험결과와 해무 팬터그래프의 풍동실험을 통해서 최적 설계된 팬터그래프의 성능을 비교하였지만 최적 설계된 팬터그래프와 실험조건이 동일하지 않아 기존 팬터그래프 대비 얼마나 성능이 향상되었지는 정확하게 판단하기 어렵다. 앞에서의 폐쇄형풍동실험과 동일한 조건의 전산해석 결과를 통해서 전산해석을 통한 공력 및 공력소음 해석이 비교적 신뢰할 수 있다고 판단하였으므로 동일한 조건에서 최적 설계가 진행되기 전의 KTX-2팬터그래프(CX 팬터그래프)의 성능을 비교하여 설계 전과 비교할 때 성능이 얼마나 향상되었는지 파악하였다.

(가) CX 팬터그래프의 해석조건 격자 및 해석조건 비교

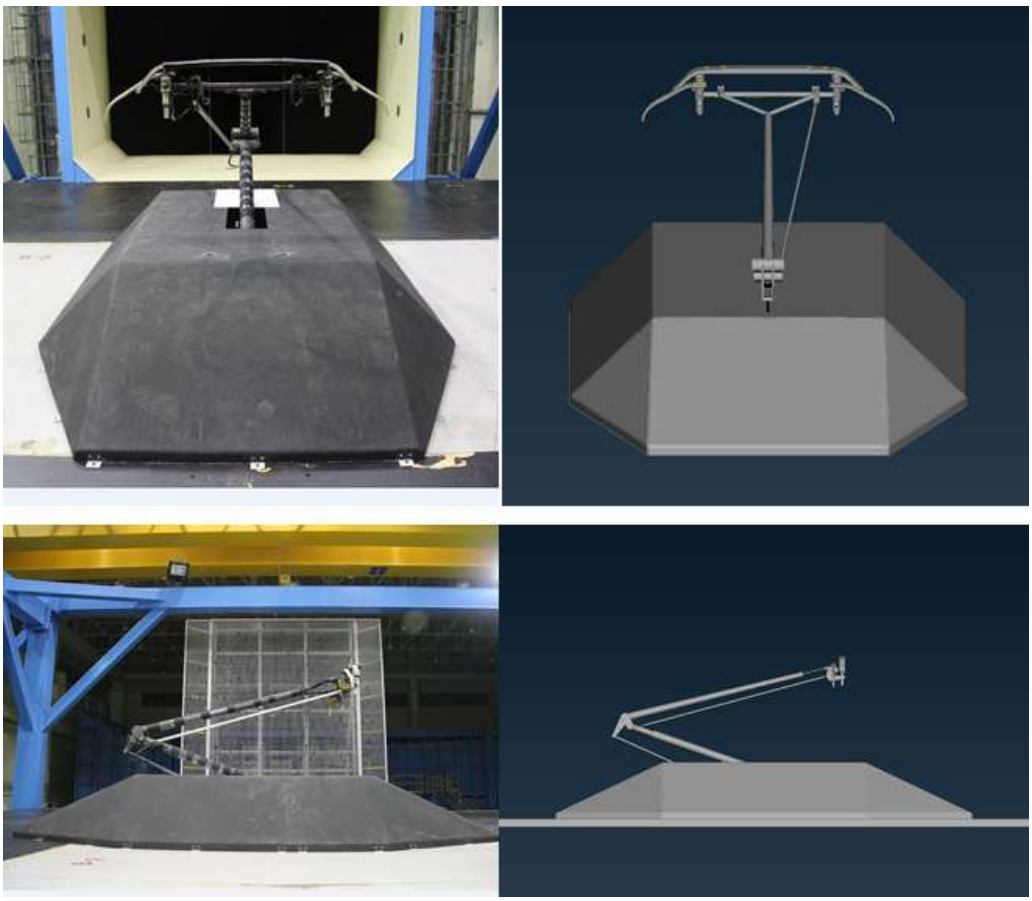


그림 2-3-148 개방형 시험부의 CX팬터그래프의 형상과 전산해석 격자 구성

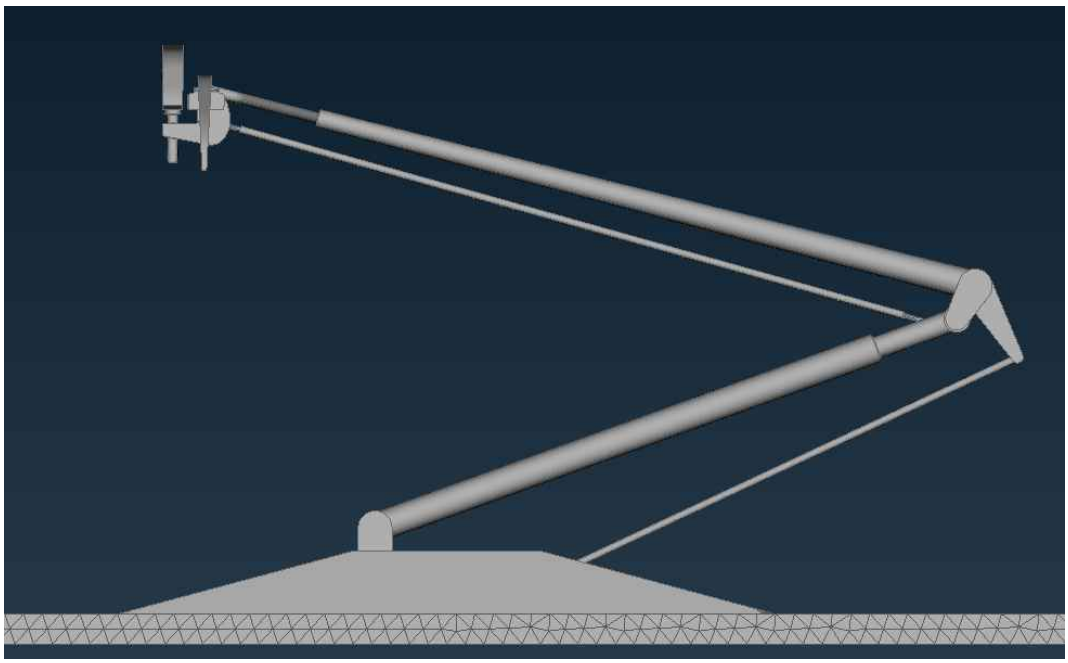


그림 2-3-149 폐쇄형 시험부의 CX팬터그래프의 전산해석 격자구성

폐쇄형 시험부에서 수행한 실험조건과 동일한 조건에서 기존 CX팬터그래프의 전산해석용 격자를 그림 2-3-149과 같이 구성하였다.

표 2-3-27 최적설계 팬터그래프 전산해석 조건

Direction	Head angle	Yaw angle
Closed knee	0	0
		2
		4
Open knee	0	0
		2
		4

표 2-3-28 해석풍속 조건

풍속 [m/s]	45	60	77	97
[km/h]	162	216	277	349

기존 CX팬터그래프의 경우 팬헤드 각도가 고정되어 있으므로 위의 표와 같은 조건에서 해석을 수행하였다.

(나) 전산해석을 통한 기존 CX팬터그래프와 최적 설계된 팬터그래프의 공력성능 비교

① 정상상태 Yaw 각 0도

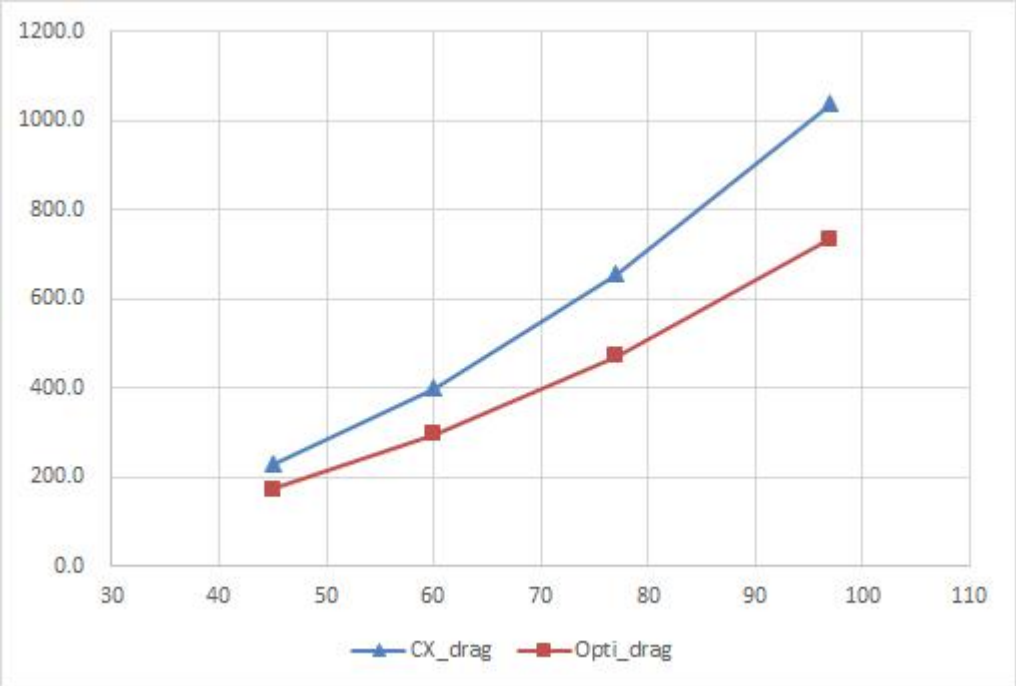


그림 2-3-150 정상상태, Yaw각 0도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력저항

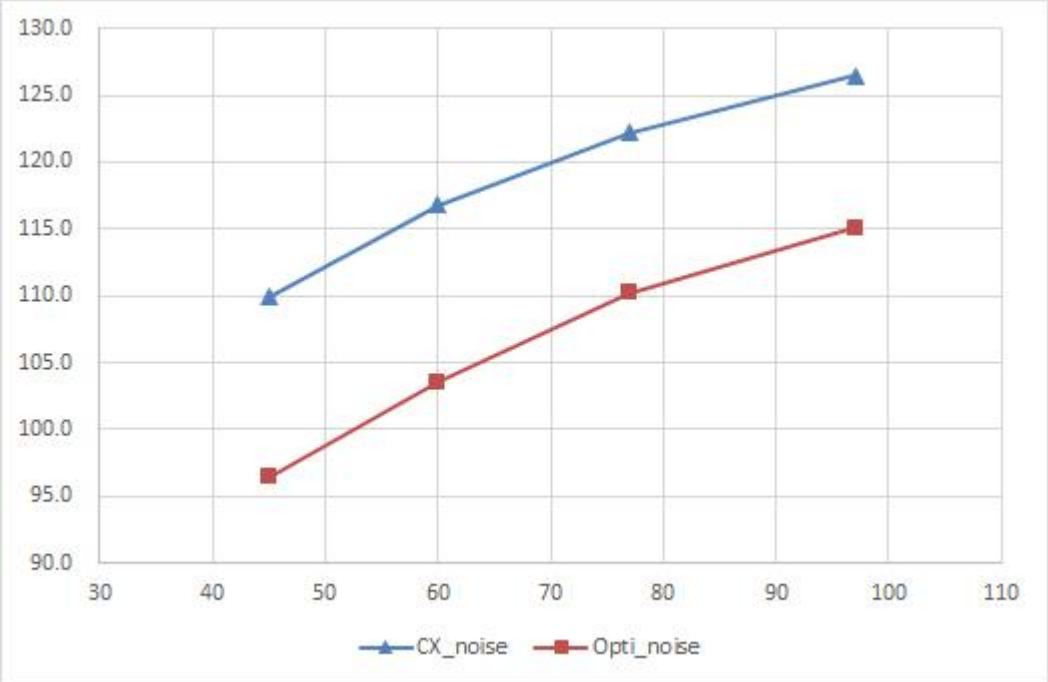


그림 2-3-151 정상상태, Yaw각 0도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력소음

표 2-3-29 정상상태, Yaw각 0도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력성능비교

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
CX 팬터그래프 Drag(N)	228.7	399.0	656.7	1038.4	-
최적설계된 팬터그래프 Drag(N)	171.7	296.7	470.3	734.5	-
Δ(%)	24.94	25.64	28.39	29.27	27.06
CX 팬터그래프 Noise(dB)	109.9	116.8	122.2	126.5	-
최적설계된 팬터그래프 Noise(dB)	96.4	103.5	110.2	115.1	-
Δ(dB)	13.5	13.3	12.0	11.4	12.6

② 정상상태 Yaw 각 2도

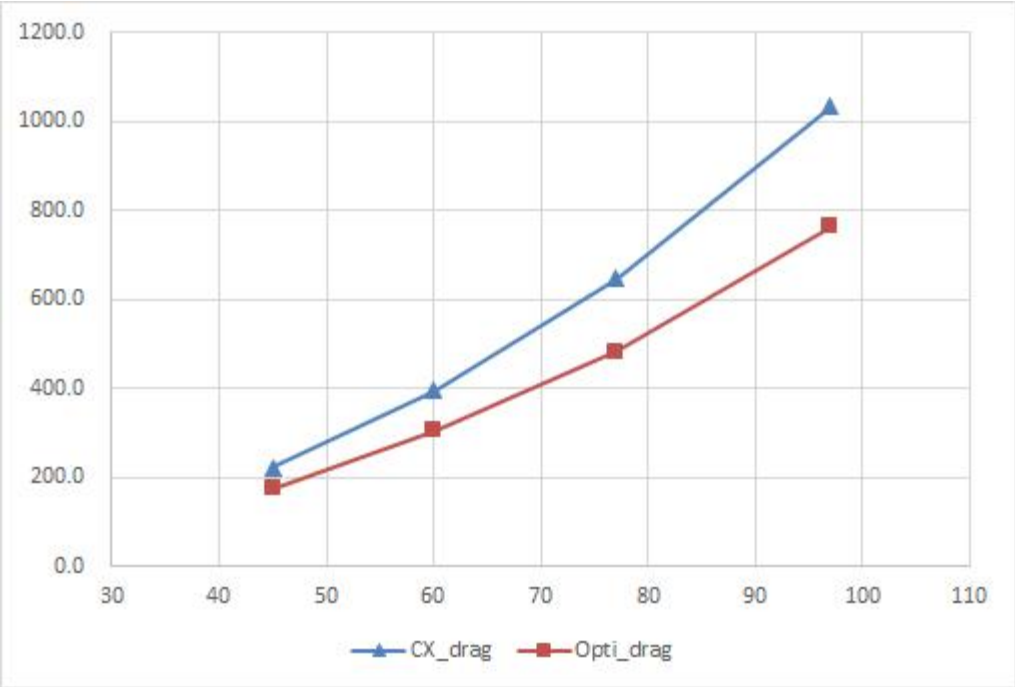


그림 2-3-152 정상상태, Yaw각 2도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력저항

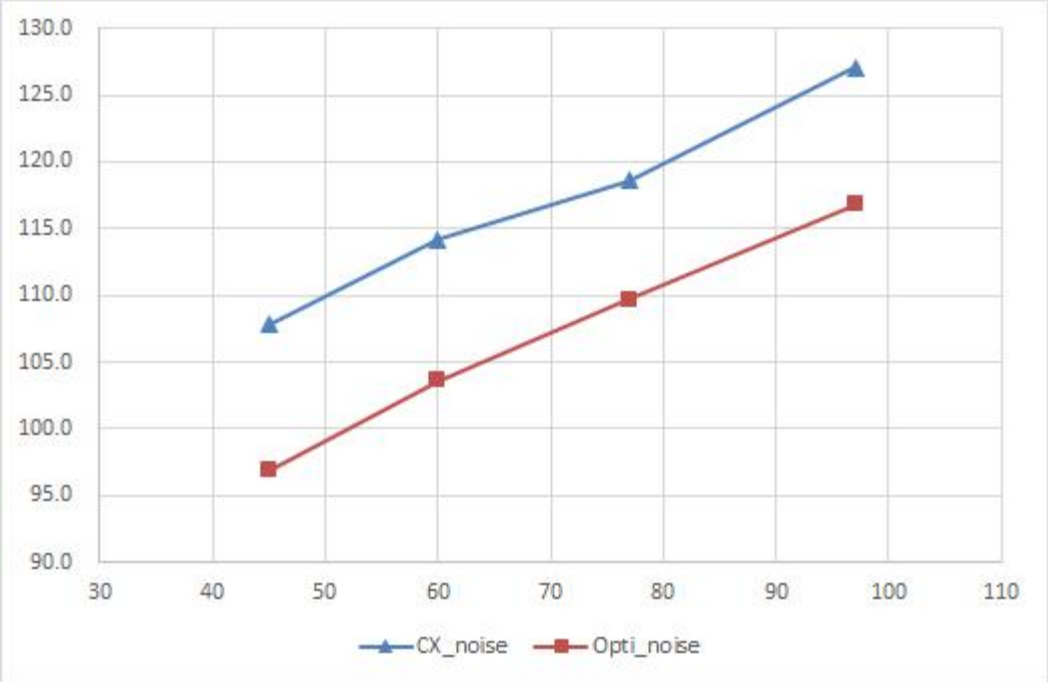


그림 2-3-153 정상상태, Yaw각 2도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력소음

표 2-3-30 정상상태, Yaw각 2도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력성능비교

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
CX 팬터그래프 Drag(N)	222.2	395.4	645.5	1033.2	-
최적설계된 팬터그래프 Drag(N)	173.5	304.4	481.7	764.4	-
Δ(%)	21.94	23.01	25.37	26.02	24.09
CX 팬터그래프 Noise(dB)	107.8	114.2	118.6	127.1	-
최적설계된 팬터그래프 Noise(dB)	96.9	103.6	109.7	116.8	-
Δ(dB)	10.9	10.6	8.9	10.3	10.2

③ 정상상태 Yaw 각 4도

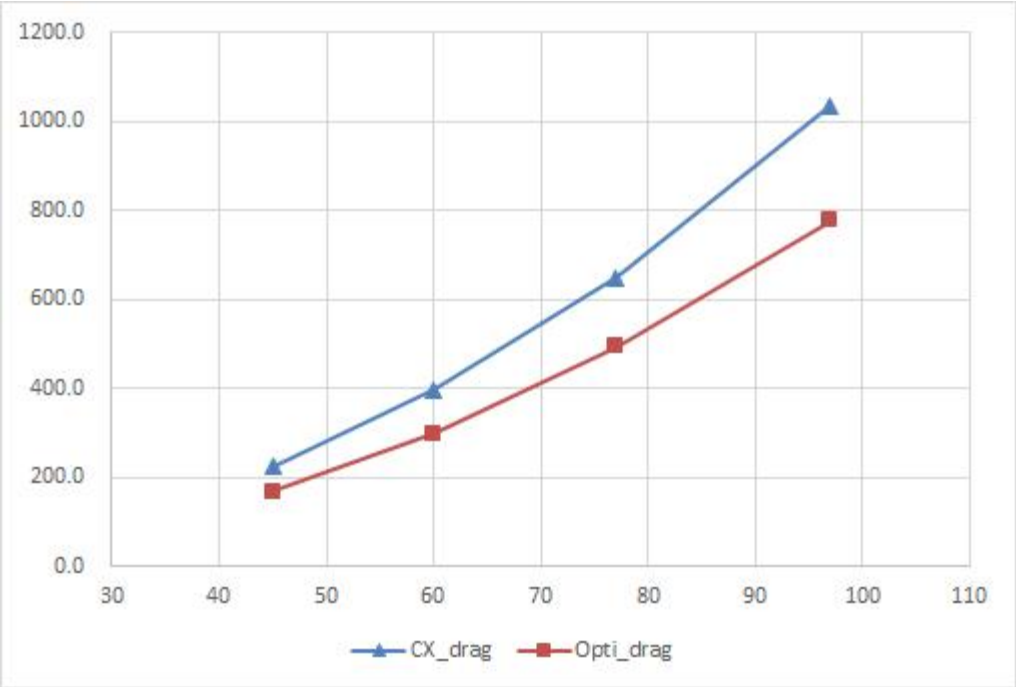


그림 2-3-154 정상상태, Yaw각 4도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력저항

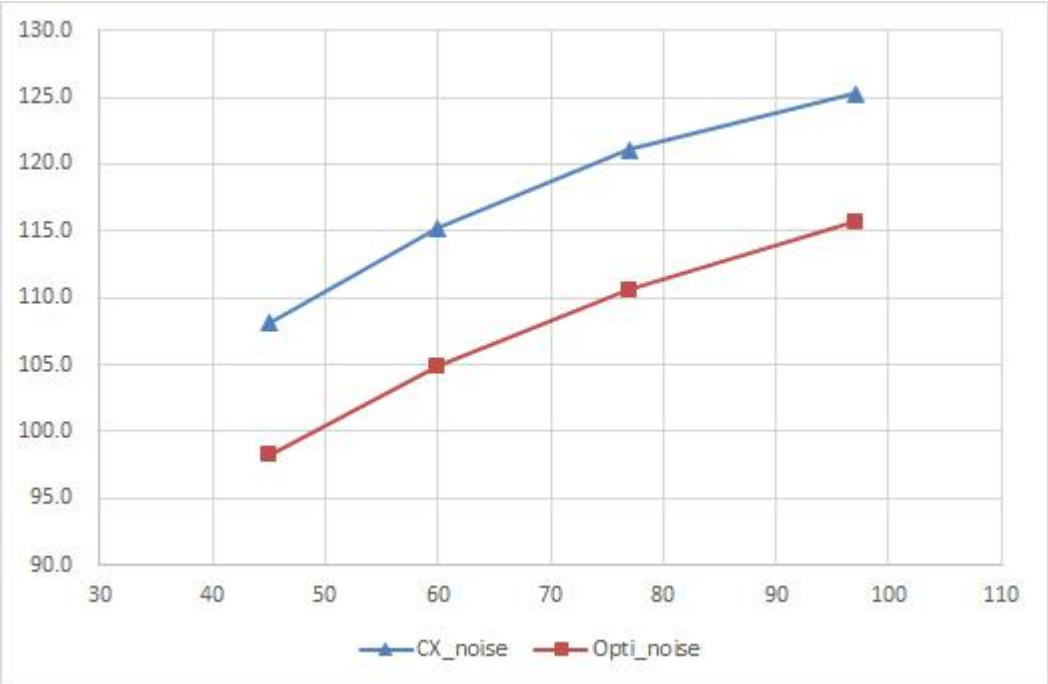


그림 2-3-155 정상상태, Yaw각 4도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력소음

표 2-3-31 정상상태, Yaw각 4도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력성능비교

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	97m/s	평균
CX 팬터그래프 Drag(N)	224.4	397.4	648.6	1036.5	-
최적설계된 팬터그래프 Drag(N)	168.3	297.3	493.0	776.3	-
Δ(%)	25.02	25.20	23.99	25.11	24.83
CX 팬터그래프 Noise(dB)	108.1	115.2	121.1	125.3	-
최적설계된 팬터그래프 Noise(dB)	98.2	104.9	110.6	115.7	-
Δ(dB)	9.9	10.3	10.5	9.6	10.1

④ 비정상상태 Yaw 각 0도

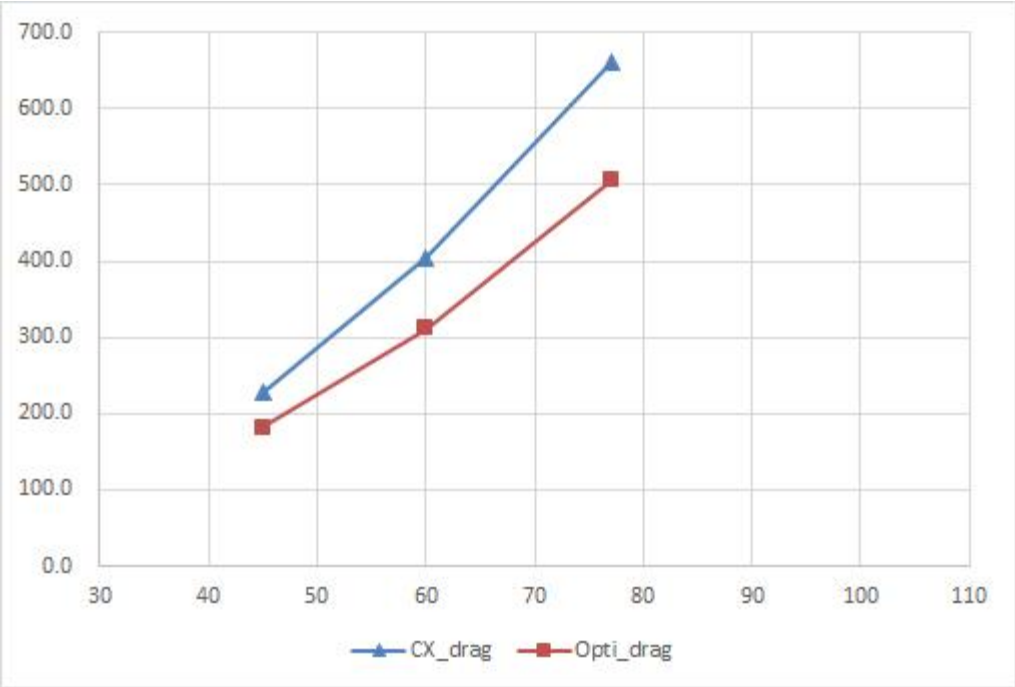


그림 2-3-156 비정상상태, Yaw각 0도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력저항

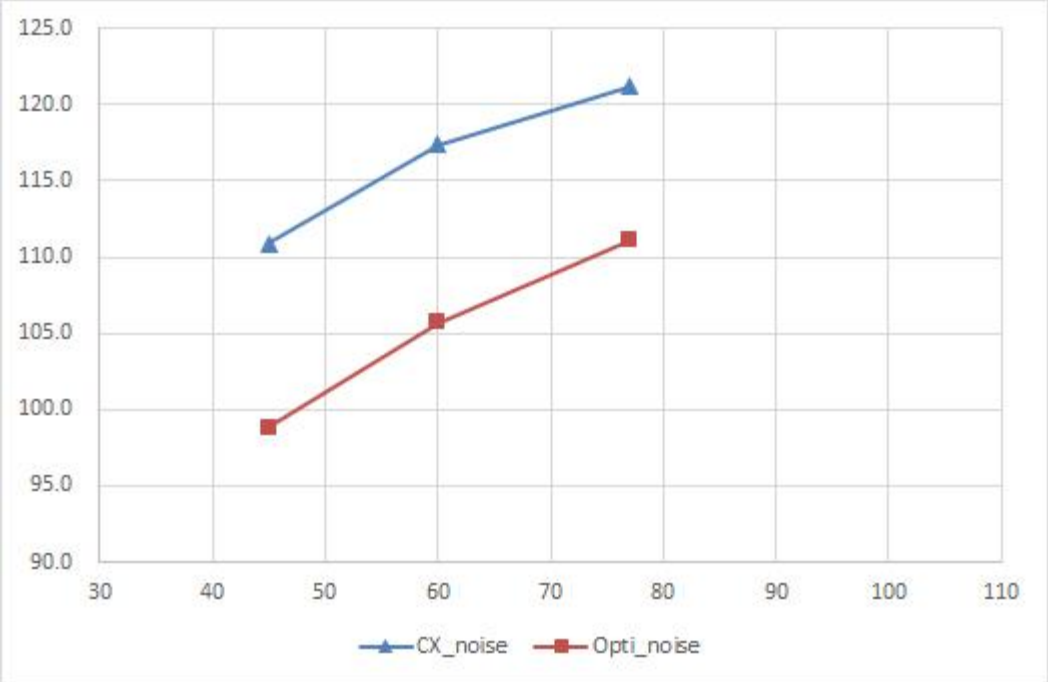


그림 2-3-157 비정상상태, Yaw각 0도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력소음

표 2-3-32 비정상상태, Yaw각 0도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력성능비교

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	평균
CX 팬터그래프 Drag(N)	227.4	404.4	661.0	-
최적설계된 팬터그래프 Drag(N)	181.3	311.2	505.7	-
Δ(%)	20.27	23.05	23.49	22.27
CX 팬터그래프 Noise(dB)	110.9	117.4	121.2	-
최적설계된 팬터그래프 Noise(dB)	98.8	105.7	111.1	-
Δ(dB)	12.1	11.7	10.1	11.3

⑤ 비정상상태 Yaw 각 2도

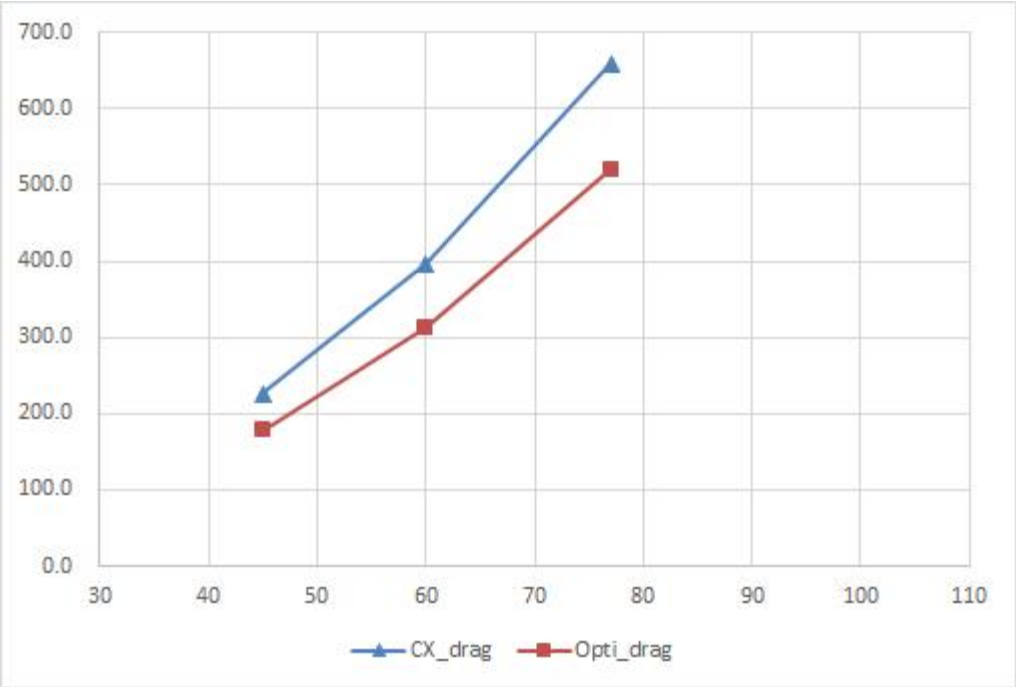


그림 2-3-158 비정상상태, Yaw각 2도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력저항

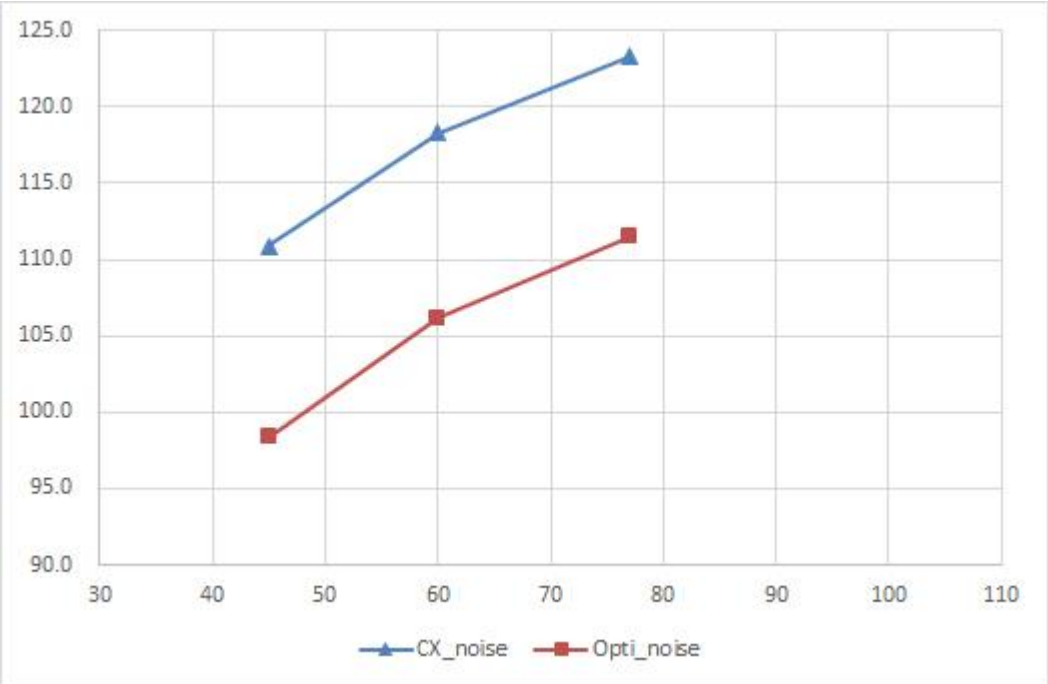


그림 2-3-159 비정상상태, Yaw각 2도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력소음

표 2-3-33 비정상상태, Yaw각 2도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력성능비교

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	평균
CX 팬터그래프 Drag(N)	225.8	397.4	659.1	-
최적설계된 팬터그래프 Drag(N)	181.3	311.2	505.7	-
Δ(%)	21.16	21.22	21.05	21.14
CX 팬터그래프 Noise(dB)	110.9	118.3	123.3	-
최적설계된 팬터그래프 Noise(dB)	98.8	105.7	111.1	-
Δ(dB)	12.5	12.1	11.8	12.1

⑥ 비정상상태 Yaw 각 4도

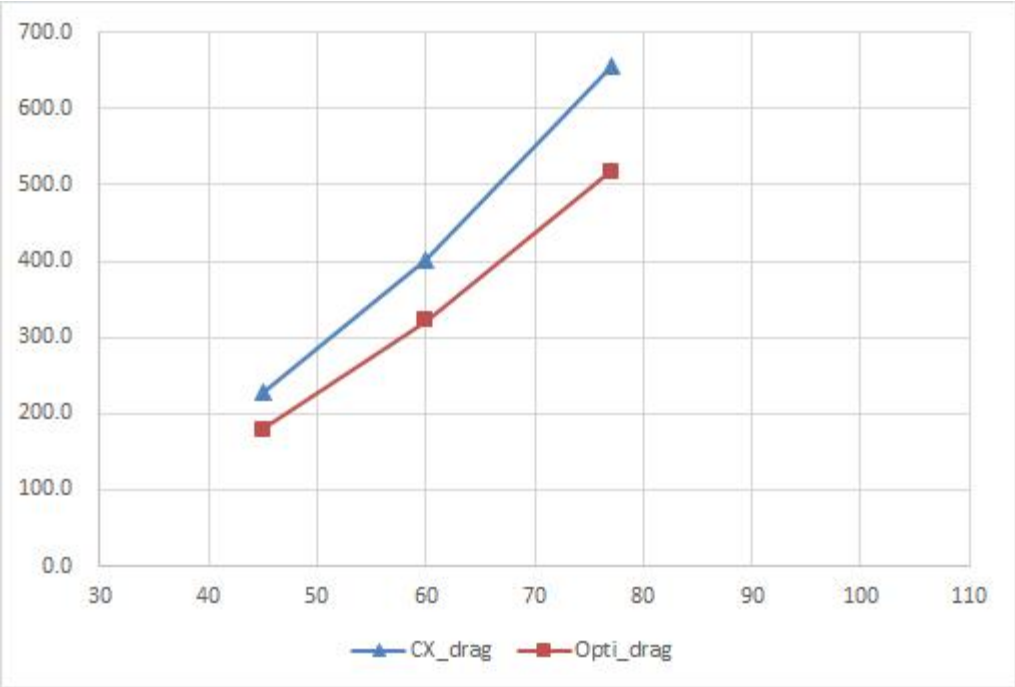


그림 2-3-160 비정상상태, Yaw각 4도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력저항

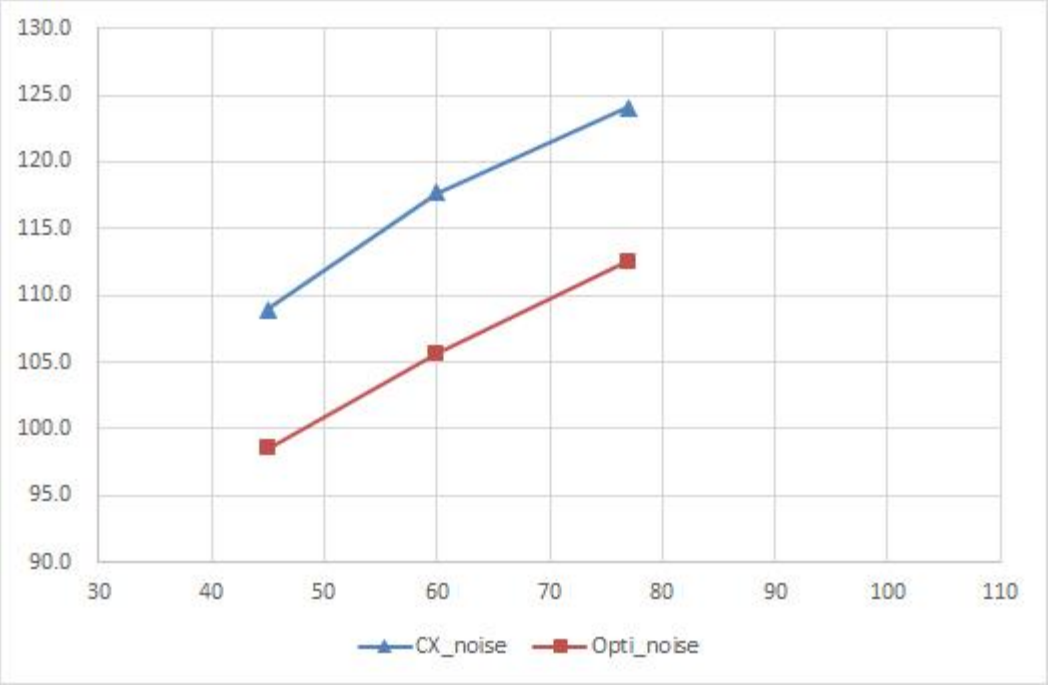


그림 2-3-161 비정상상태, Yaw각 4도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력소음

표 2-3-34 비정상상태, Yaw각 4도 조건에서 CX팬터그래프와 최적설계 팬터그래프의 공력성능비교

inlet condition	45m/s	60m/s	77m/s	평균
CX 팬터그래프 Drag(N)	227.7	402.4	655.5	-
최적설계된 팬터그래프 Drag(N)	179.8	322.1	517.5	-
Δ(%)	21.04	19.96	21.05	20.68
CX 팬터그래프 Noise(dB)	108.9	117.7	124.1	-
최적설계된 팬터그래프 Noise(dB)	98.5	105.6	112.5	-
Δ(dB)	10.4	12.1	11.6	11.4

(다) 최적설계된 팬터그래프의 공력성능 평가

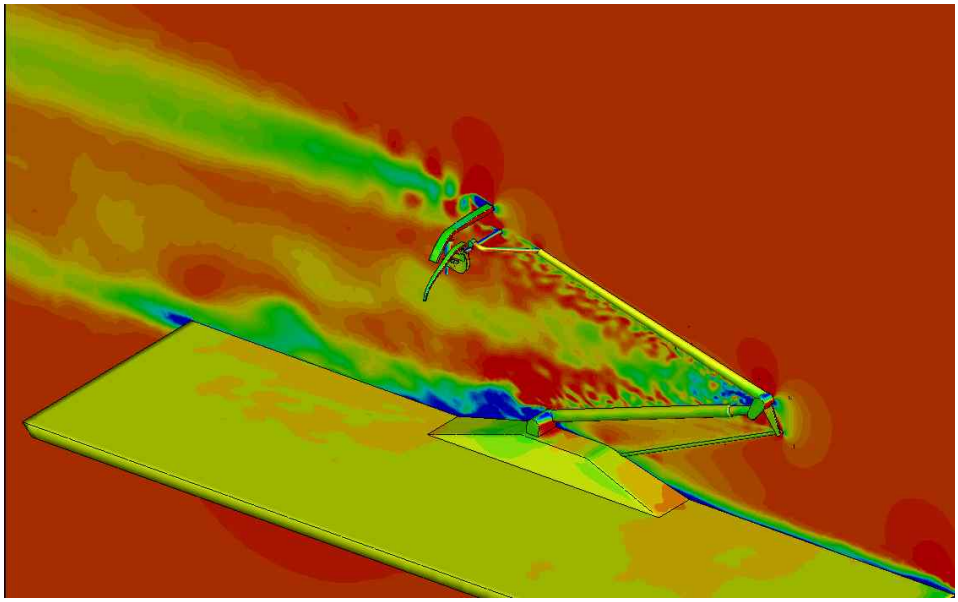


그림 2-3-162 정상상태에서 기존 CX팬터그래프의 유동장 속도분포 및 표면압력분포

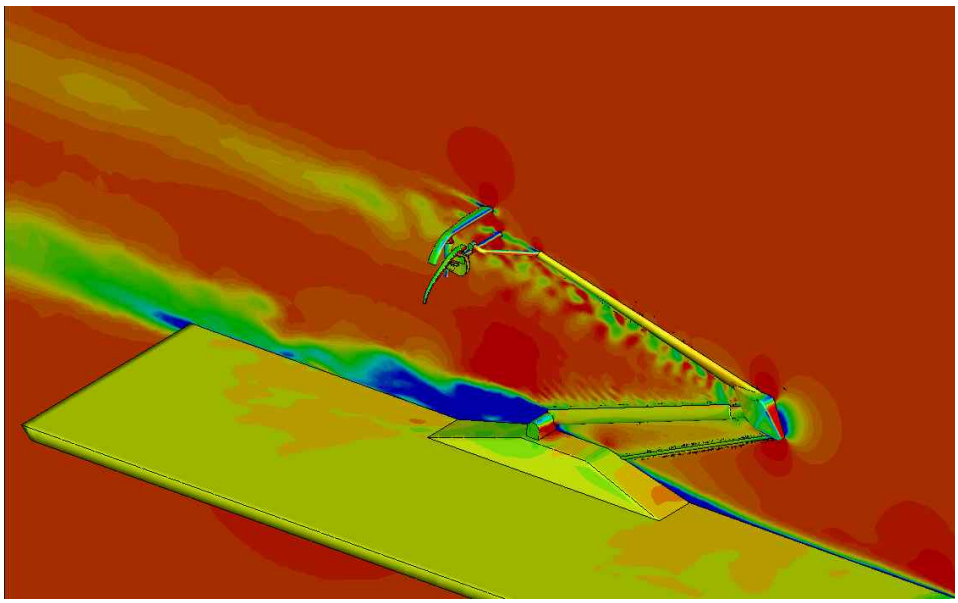


그림 2-3-163 정상상태에서 최적설계된 팬터그래프의 유동장 속도분포 및 표면압력분포

그림 2-3-162와 그림 2-3-163의 정상상태일 때 기존 CX 팬터그래프와 최적설계된 팬터그래프의 유동장을 살펴보면 기존 팬터그래프가 팬헤드와 암 연결부 이후에 유동의 교란이 매우 넓게 퍼져나가는데 반해서 최적설계된 팬터그래프의 경우 팬헤드와 암연결후 후방에 유동교란이 발생은 하지만 기존 팬터그래프에 비해서 매우 좁게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

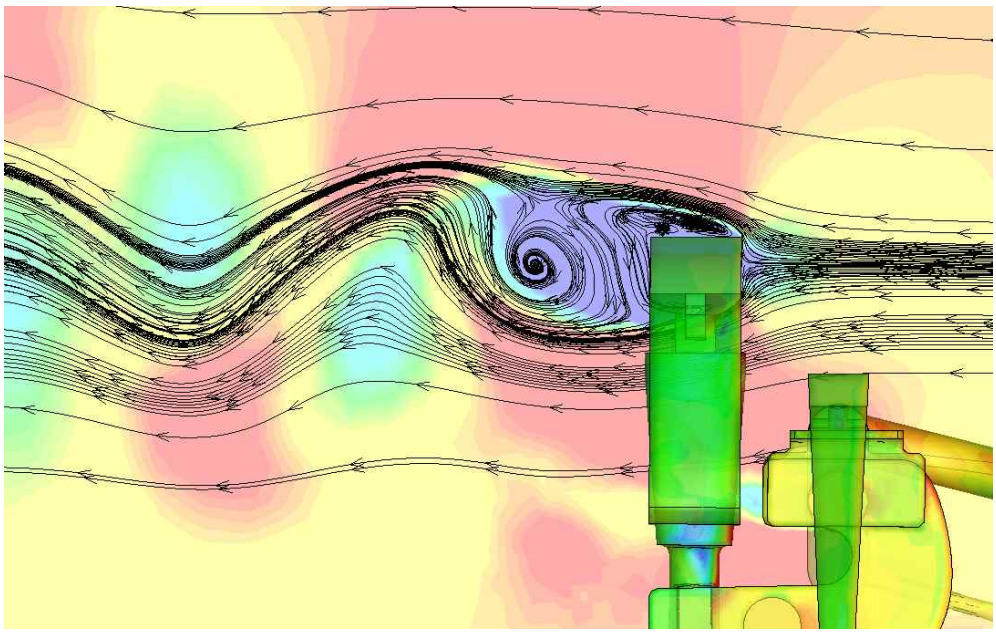


그림 2-3-164 정상상태에서 기존 CX팬터그래프 팬헤드 주변 유동장

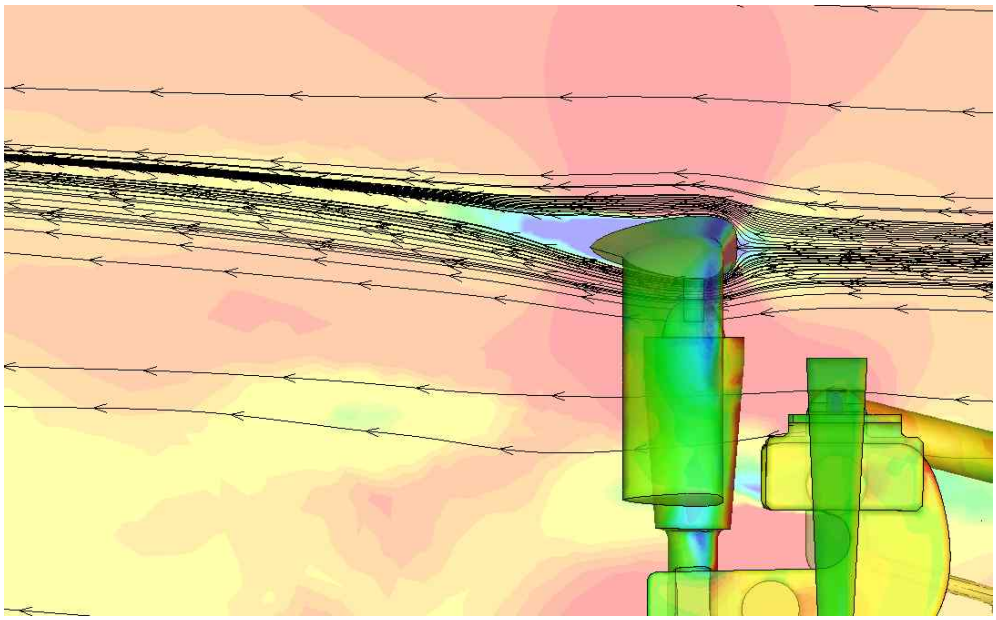


그림 2-3-165 정상상태에서 최적설계된 팬터그래프 팬헤드 주변 유동장

최적설계된 팬헤드의 성능을 확인하기 위해서 그림 2-3-164과 그림 2-3-165의 팬헤드 주변 유동장을 자세히 살펴보면 기존 팬헤드 단면형상의 경우 팬헤드 후방에서 와류영열이 크게 발생하고 유동교란이 넓게 퍼져가는 반면에 최적설계된 팬헤드에서는 유동교란이 크게 발생하기 않음을 확인할 수 있다.

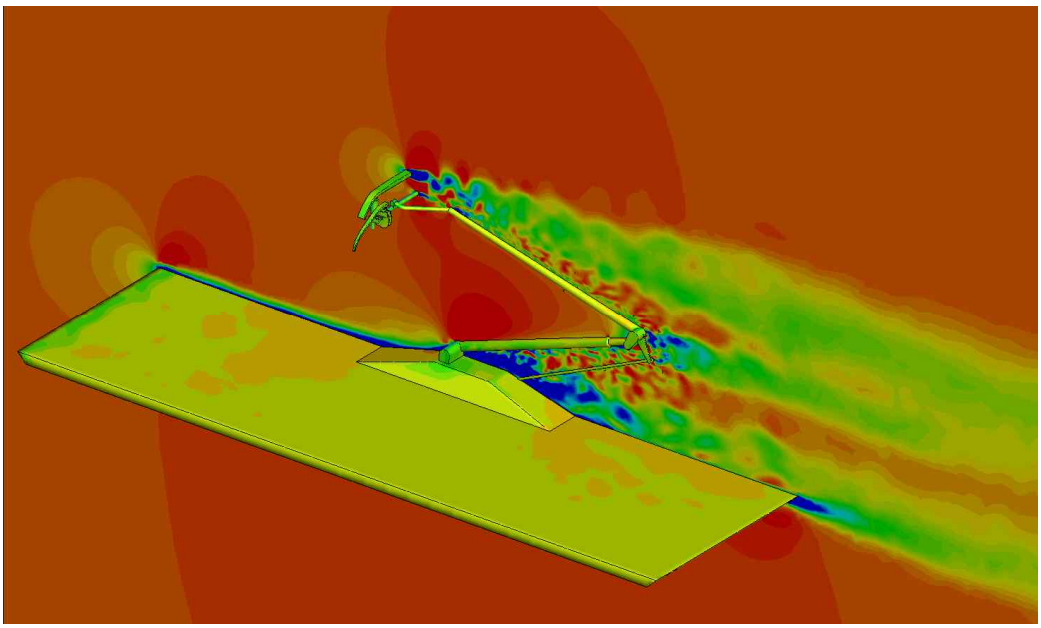


그림 2-3-166 비정상상태에서 기존 CX팬터그래프의 유동장 속도분포 및 표면압력분포

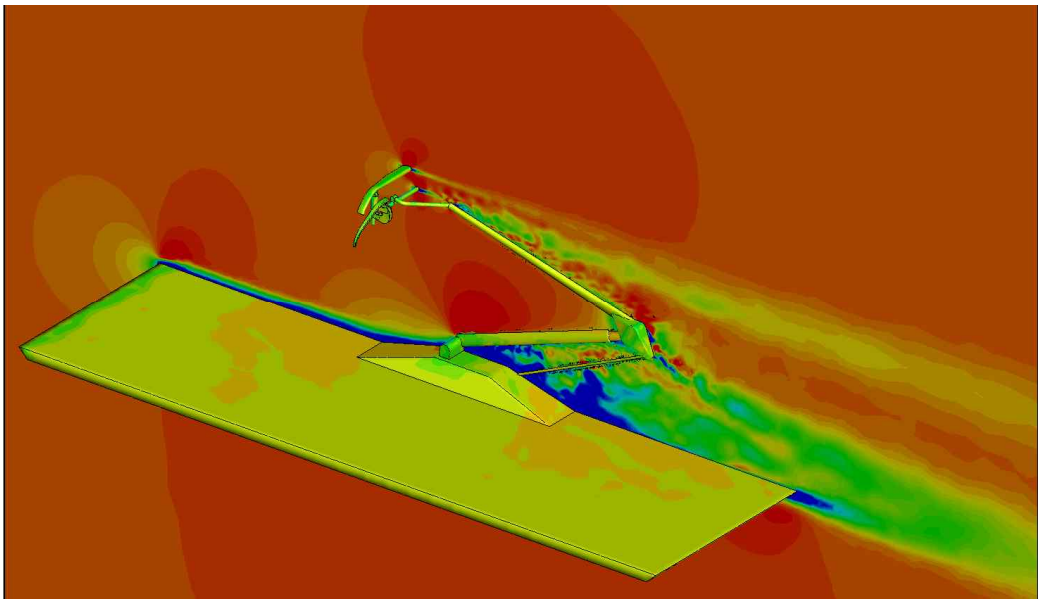


그림 2-3-167 비정상상태에서 최적설계된 팬터그래프의 유동장 속도분포 및 표면압력분포

유동진행방향이 반대인 비정상상태에서도 위와 같이 최적설계된 팬터그래프의 후방의 유동은 교란이 넓게 퍼지지 않음을 확인할 수 있다. 특히 암과 암연결부의 경우 정상상태에 대해서 최적화가 수행되어 비정상상태에서는 큰 효과를 보이지 않지만 팬헤드 후방의 경우 비정상상태에서도 효과가 크게 나타남을 확인할 수 있다.

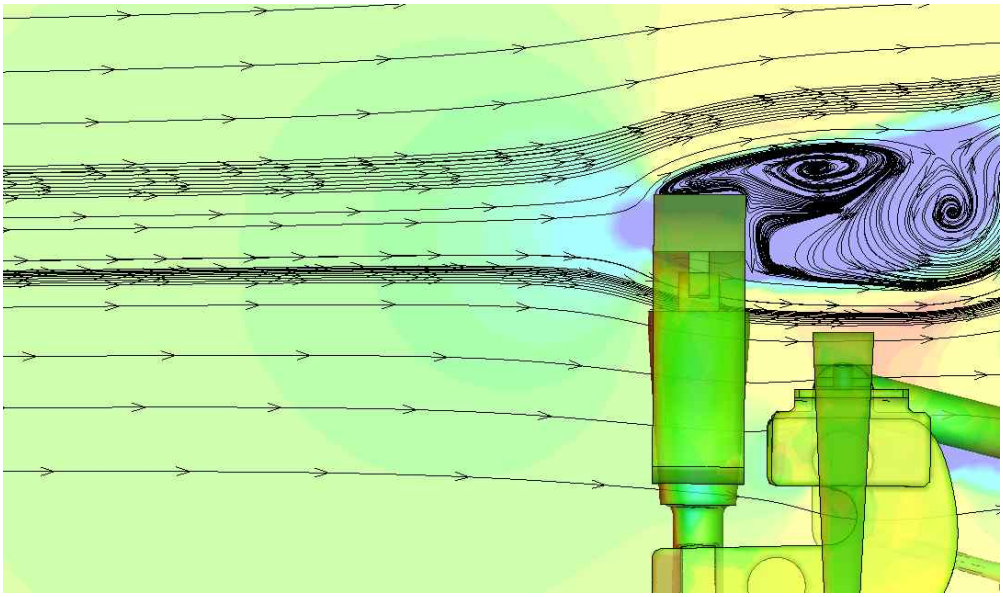


그림 2-3-168 비정상상태에서 기존 CX팬터그래프 팬헤드 주변 유동장

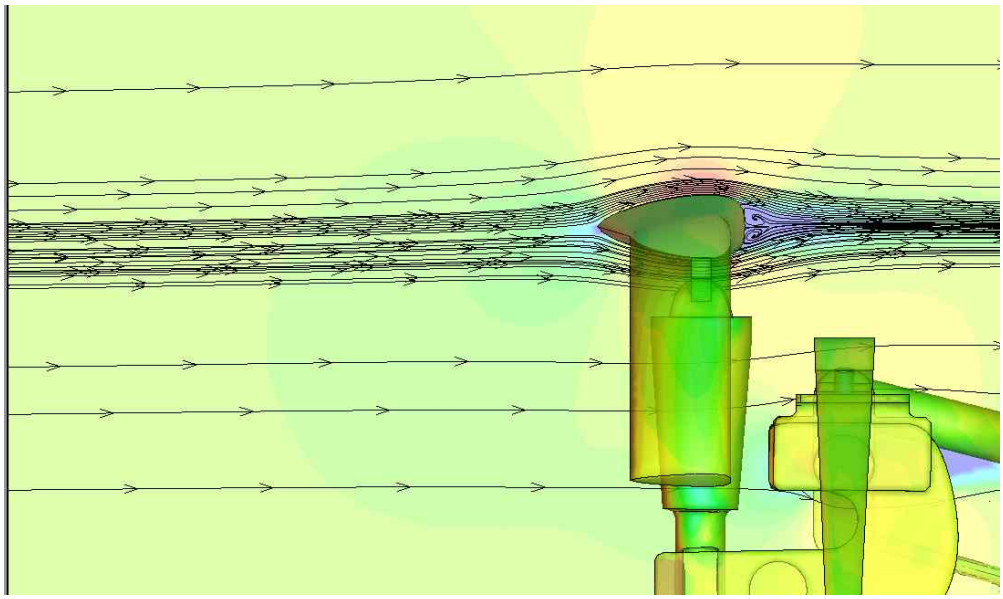


그림 2-3-169 비정상상태에서 최적설계된 팬터그래프 팬헤드 주변 유동장

비정상상태의 팬헤드 효과를 확인하기 위해서 위 그림과 같이 팬헤드 주변 유동을 자세히 살펴보면 기존 팬헤드 단면에서는 정상상태와 마찬가지로 후방 유동의 와류가 크게 발생하는 반면에 최적설계된 팬헤드의 경우 정상상태에 대해 최적화가 수행되었지 때문에 후방에 와류가 발생하긴 하지만 매우 좁은 영역에서 나타남을 확인할 수 있다.

전산해석결과를 비교할 때 **공력저항은 최적설계를 수행한 후 평균 23.63% 저감**된 것으로 확인되었다. 모든 케이스에서 비슷한 비율로 공력저항이 감소됨을 확인하였다.

공력소음은 최적설계를 수행한 후 평균 11.2dB 저감된 것으로 확인되었다.

폐쇄형 시험부에서 수행한 풍동실험과 동일한 조건에서 기존 CX팬터그래프와 최적설계된 팬터그래프의 전산해석을 수행하여 공력성능향상 목표인 공력저항과 공력소음 저감의 목표치를 달성하였음을 확인하였다.

사. 고주파 소음 분해능 향상을 위한 추가 시험

(4) 개요

앞 절에 기술한 공력 소음 시험을 통해 팬터그래프에서 방사되는 소음이 주로 발생하는 영역과 팬터그래프 상태의 변화에 따른 방사소음 레벨의 차이를 분석할 수 있었다. 하지만 이러한 결과로는 팬터그래프에서 방사되는 약 4kHz 이상의 고주파 소음의 특성에 대해서는 정확히 파악하기가 어려웠다. 기존 마이크로폰 어레이의 배치 형태로는 고주파 소음에 대한 높은 공간 분해능을 보장할 수 없었기 때문이다. 게다가 기존 마이크로폰 어레이 배치는 관측면의 측면만을 이용하였으므로 팬터그래프의 측면에 평행한 단면을 제외하고는 빔형성 결과에 대한 신뢰도가 낮을 가능성이 존재하였다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해서 고주파 소음의 분해능 향상을 위한 추가 시험을 수행하였다.

(5) 추가 시험을 위한 시험 장비 설계 및 검증

추가 시험을 수행하기 위하여 시험부 천장에 위치한 관측창에 마이크로폰 어레이를 추가적으로 설치하였다. 천장 마이크로폰 어레이는 총 3개의 관측창에 설치하였으며, 관측창 전체 크기의 1/2 영역에 마이크로폰 어레이를 설치할 수 있도록 설계하였다. 그 외의 천장 마이크로폰 어레이 모듈에 대한 형상은 기존의 마이크로폰 어레이 모듈의 형상과 흡사하였다. 천장 마이크로폰 어레이 모듈을 설치하는 과정은 그림 2-3-170에서 확인할 수 있다.

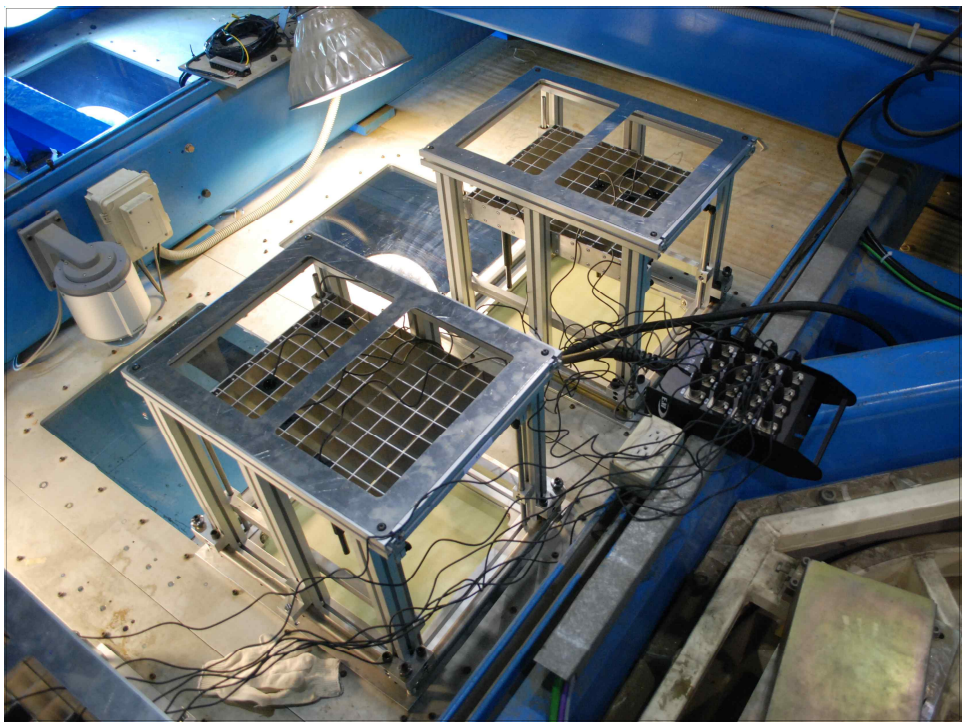


그림 2-3-170 상단부 관측창을 이용한 마이크로폰 어레이 모듈 설치

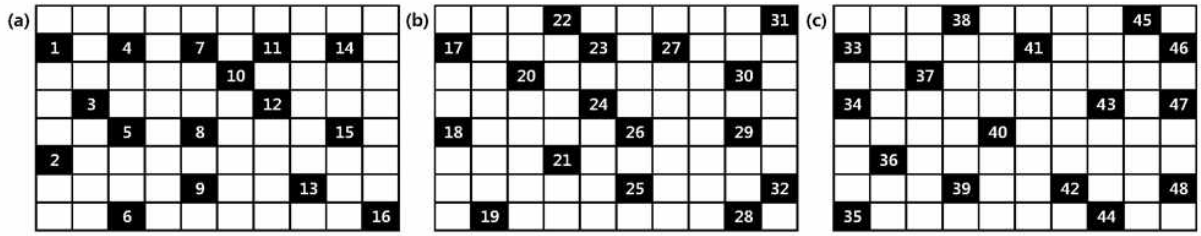


그림 2-3-171 상단부 관측창을 이용한 마이크로폰 어레이 모듈 배치

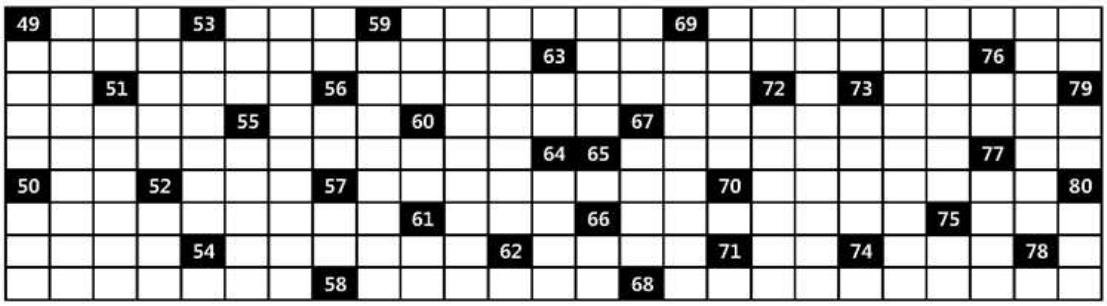


그림 2-3-172 측면부 관측창을 이용한 마이크로폰 어레이 모듈 배치

추가 시험에 사용할 마이크로폰 어레이는 기존에 수행한 빔형성 기법 시험과 동일한 방식으로 랜덤 마이크로폰 어레이 기법을 이용해 구성하였다. 시험부 천장에는 한 관측창에 16개씩 총 48개의 마이크로폰을 배치하였으며, 측면부 관측창에는 32개의 마이크로폰을 배치하였다. 이는 고주파 소음의 공간 분해능을 높이기 위하여 기존에 수행한 빔형성 시험에 비해 각 모듈에 배치되는 마이크로폰 수를 늘린 결과이다. 그림 2-3-171와 2-3-172은 각각 상단부와 측면부 관측창에 설치된 마이크로폰 어레이 모듈의 배치 결과를 보여준다.

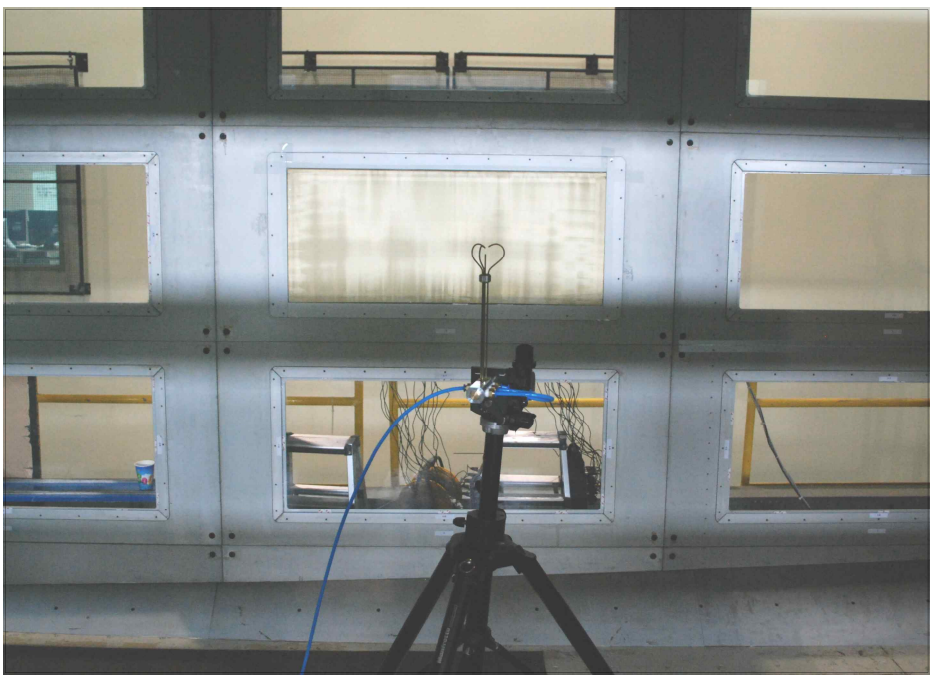


그림 2-3-173 공기 충돌기를 기준 소음원으로 하여 빔형성 기법을 통해 소음 시험장비 검증

추가로 구성한 측면 및 상단부 마이크로폰 어레이의 공간 분해능을 분석하기 위하여 공기 충돌기를 기준 소음원으로 사용하는 시험을 수행하였다. 그림 2-3-173는 본 검증에 사용한 공기 충돌기의 모습을 보여준다. 공기 충돌기는 시험부의 정중앙에 설치하였으며, 풍속이 없는 조건에서 공기 충돌기에 공압을 주입하는 방식으로 난류에 의한 광대역 소음을 발생시켰다.

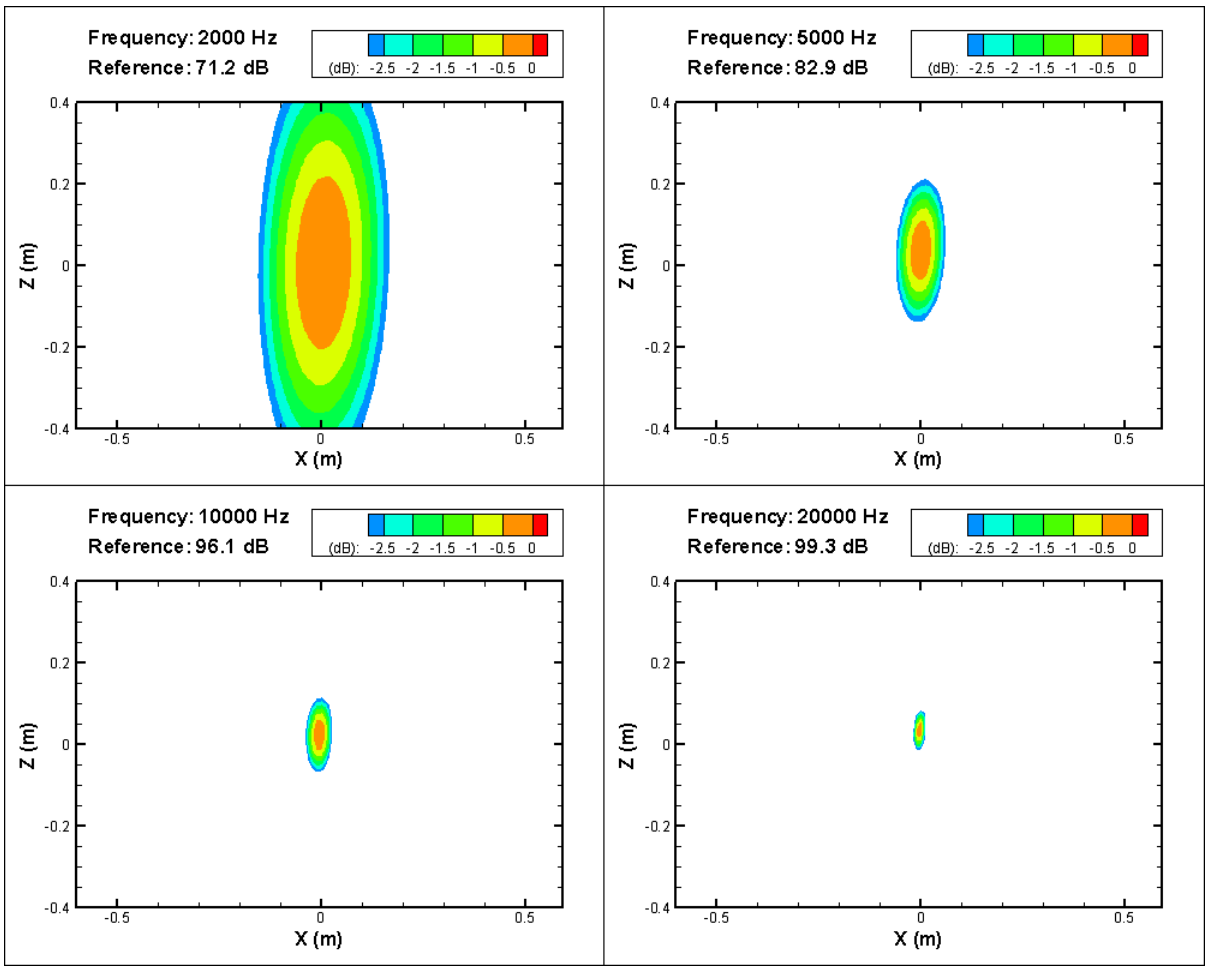


그림 2-3-174 측면부 마이크로폰 어레이를 이용한 공기 충돌기 빔형성 결과

그림 2-3-174는 공기 충돌기에서 발생하는 소음을 대상으로 측면부 마이크로폰 어레이를 이용하여 빔형성 분석을 수행한 결과를 보여준다. 본 추가 시험은 고주파의 소음을 정확히 예측하는 데에 그 목적이 있으므로 2kHz 이상의 고주파 소음만을 분석 대상으로 하였다. 그래프 내의 각 주파수는 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수로서, 각각의 주파수에 해당하는 영역의 빔함수 값을 모두 더한 값을 도시하였다. 빔형성 기법을 사용한 결과를 보면 2kHz 이상의 모든 주파수 영역에서 소음원의 위치를 정확히 예측하는 모습을 볼 수 있다. 다만, 주파수가 낮아질수록 빔폭이 증가하는 경향이 나타났으며, 마이크로폰 어레이 형상이 x축 방향으로 더 길게 설계된 이유로 빔폭은 x축 방향에 비하여 z축 방향으로 더 길게 나타나는 특성을 보였다.

상단부 마이크로폰 어레이를 이용하여 공기 충돌기 소음의 빔형성 분석을 수행한 결과는 그림 2-3-175에 나타나 있다. 상단부 마이크로폰 어레이의 경우는 마이크로폰 어레이의 중

심을 지나가는 축과 공기 충돌기와의 거리가 먼 관계로 소음원의 위치를 정확히 예측하지 못하는 한계가 있었다. 하지만 이러한 한계는 주파수가 높아질수록 점차적으로 감소하였고, 약 5kHz 이상에서는 소음원의 위치를 정확히 예측하는 모습을 확인할 수 있었다. 또한, 측면부 마이크로폰 어레이 빔형성 결과와 마찬가지로 빔폭은 x축 방향에 비하여 y축 방향으로 더 길게 나타나는 특성을 보이는 한계가 있었다.

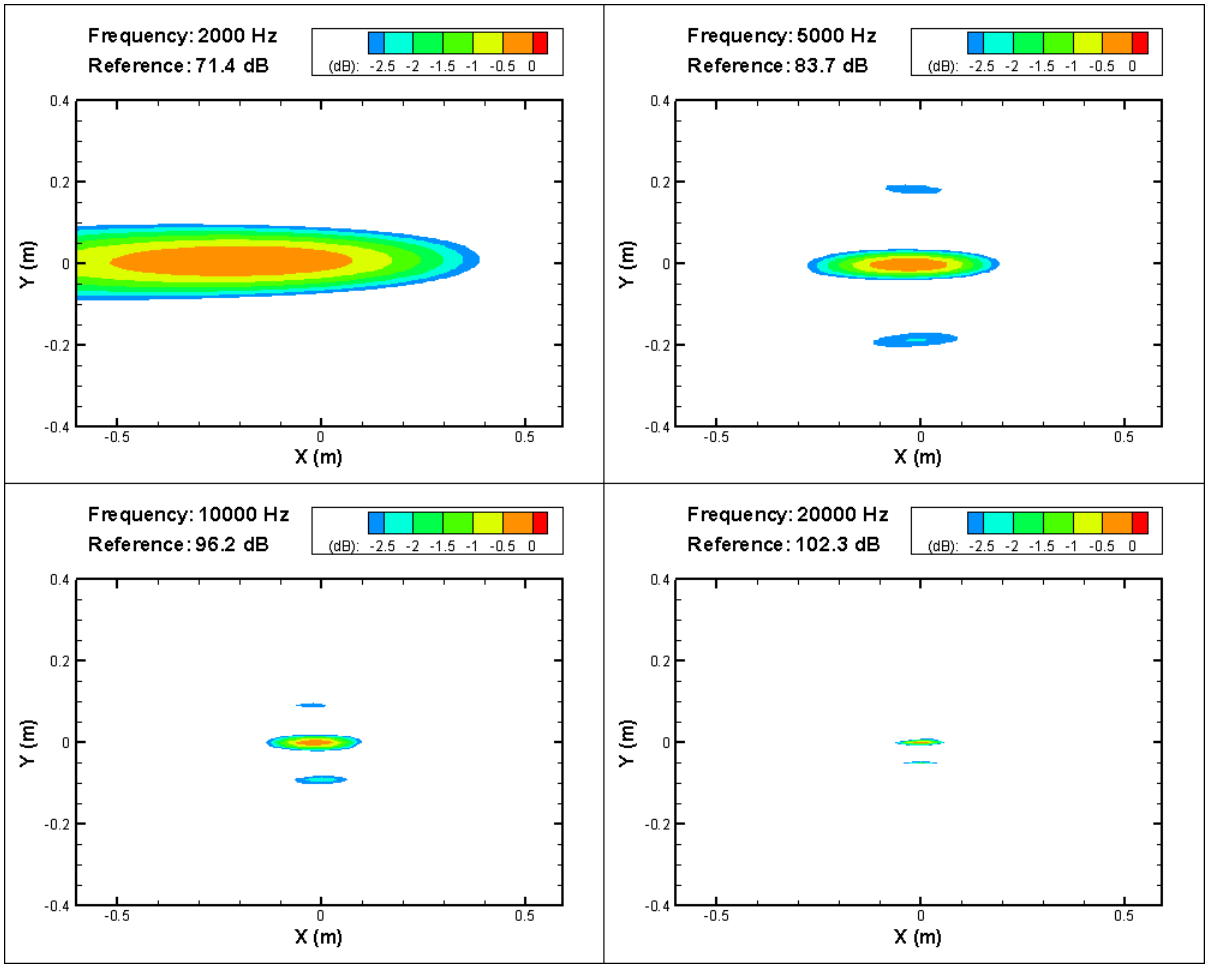


그림 2-3-175 상단부 마이크로폰 어레이를 이용한 공기 충돌기 빔형성 결과

(6) 풀스케일 팬터그래프 형상 모델의 추가 시험 결과

수정된 마이크로폰 어레이를 이용하여 풀스케일 팬터그래프 형상 모델에 대한 추가 소음 시험을 수행하였다. 팬터그래프는 정방향에 위치하고 요각과 팬헤드 각도가 모두 0도일 때의 방사 소음을 측정하였다. 유입 속도는 45, 60, 77, 97m/s인 총 4가지 조건에서 소음을 측정하였으며, 각각 동일한 조건에서 1회씩 반복 시험을 수행하였다. 본 추가 시험에서는 공력 성능에 대한 측정은 수행하지 않았다. 그림 2-3-176은 풀스케일 팬터그래프 형상에 대한 추가 시험을 수행하고 있는 모습을 보여준다.

그림 2-3-177은 유입 속도가 97m/s인 경우에 측면부 마이크로폰 어레이를 이용한 빔형성 결과를 보여준다. 빔형성 기법을 적용한 결과, 2kHz 이상의 고주파 소음은 팬헤드에서 주로 발생하는 것을 확인하였다. 하지만 8kHz부터는 팬헤드와 관절부위에서 발생하는 소음 레벨이 동등해지기 시작하였으며, 특히 10kHz부터는 관절부위에서 발생하는 소음이 팬헤드 소

음을 압도하기 시작하였다.



그림 2-3-176 풀스케일 팬터그래프 형상에 대한 추가 소음 시험

그림 3-5-9는 시험부 천장에 설치한 마이크로폰 어레이를 이용하여 빔형성 기법을 수행한 결과를 보여준다. 유동 속도는 종전과 동일한 97m/s이며, 팬헤드가 위치해 있는 단면에서 빔형성 기법을 적용하였다. 본 빔형성 결과는 고주파 소음의 공간 분해능을 향상시키기 위해서 시험부 천장에 설치된 3개의 마이크로폰 어레이 중에서 중앙의 한 어레이 모듈만을 사용하였다. 또한 시험부 벽면에서 반사되는 음파에 의해 빔형성 결과에 오차가 발생하는 현상을 최소화하기 위해서 빔형성 기법에 사용되는 신호 블록을 256개로 감소시켰다. 그 대신, 앙상블 평균을 3900회, 인접 신호와의 오버랩을 0.5로 설정하여 최대한 많은 신호를 이용해 평균값을 취하도록 설정하였다. 빔형성 기법 적용 결과 팬헤드의 중앙 부근에서 소음이 가장 주도적으로 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

본 추가 시험을 통해서 2kHz 이상의 고주파 소음에 대한 빔형성 결과를 성공적으로 확인할 수 있었다. 또한 팬터그래프의 측면에 평행한 단면 이외에도 팬터그래프의 상부에서 바라보았을 때의 빔형성 결과를 분석할 수 있었으며, 그 결과 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프에서 발생하는 고주파 소음의 발생 위치를 정확히 파악할 수 있었다.

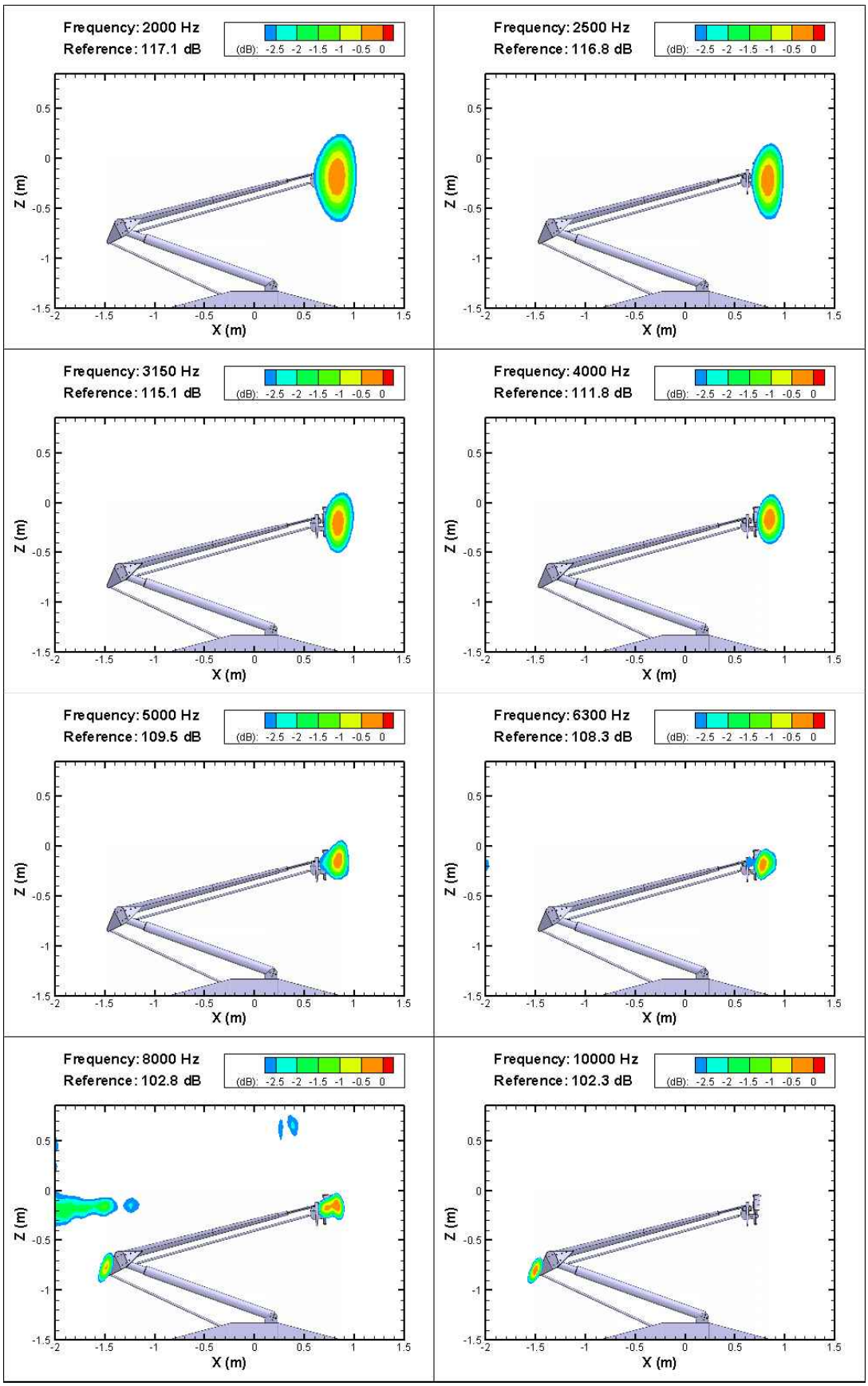


그림 2-3-177 풀스케일 팬터그래프 측면 빔형성 결과 ($U=97m/s$)

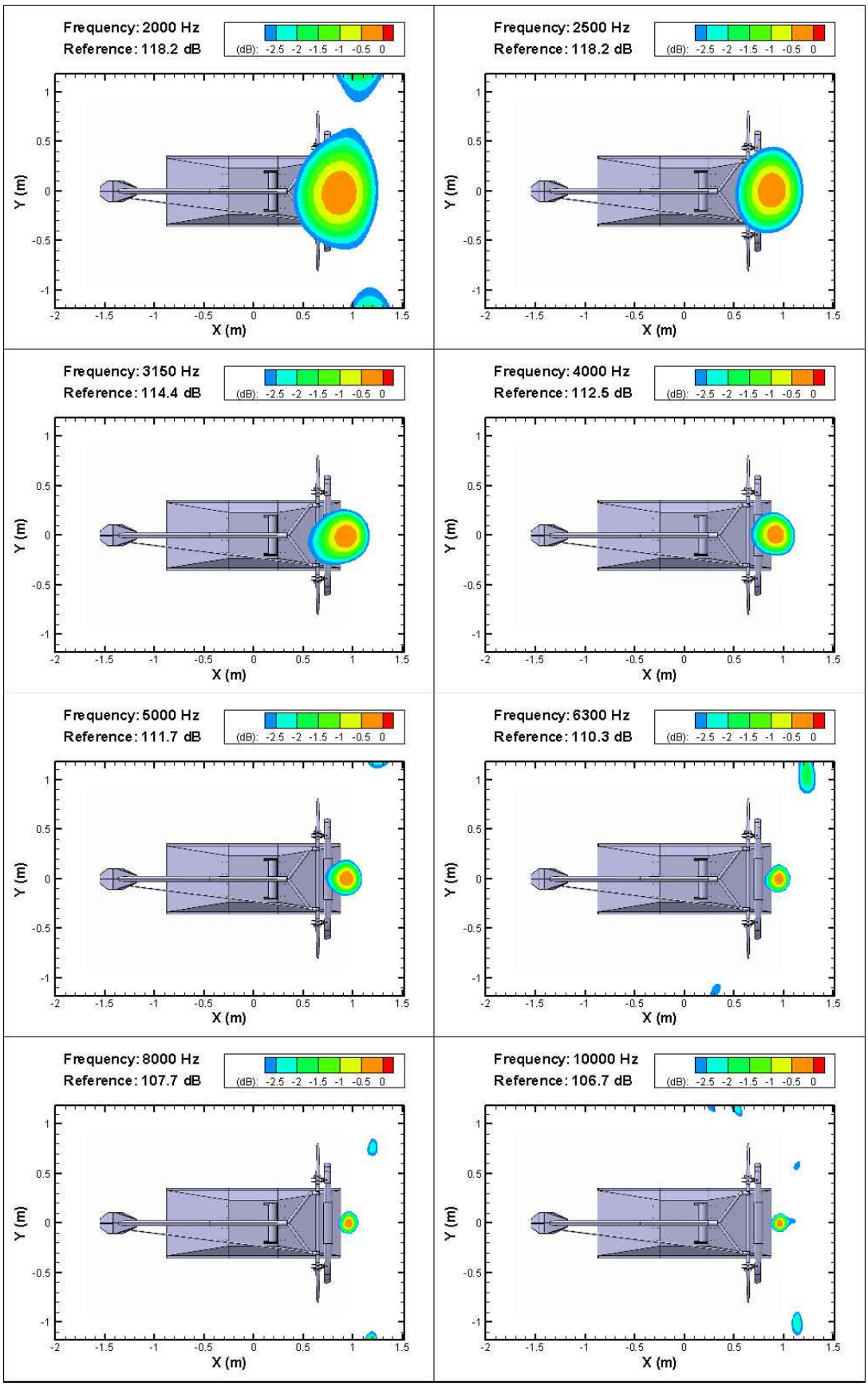


그림 2-3-178 풀스케일 팬터그래프 상단 빔형성 결과 ($U=97m/s$)

2. 고속열차 팬터그래프 공력설계 평가 검증 기술 개발

가. 팬터그래프 실차소음 측정결과와 풍동소음 측정결과 비교

(1) 개요

본 과제의 목표인 공력최적설계 팬터그래프의 실제 운영환경에서 공력소음을 예측하기 위해서는 실차에서의 팬터그래프에의한 소음을 정확하게 평가할 필요성이 있다. 따라서 본 절에서는 실차에서의 팬터그래프 소음을 소음 Array를 이용하여 그 주파수 특성을 정확하게 파악하고, 팬터그래프 상승/하강 시 환경소음의 차이를 이용하여 팬터그래프의 소음을 평가하고자 한다. 또한 측정된 팬터그래프 소음을 풍동 (개방형, 폐쇄형) 소음 측정결과와 비교하여 실차 팬터그래프 소음과 항우연 풍동 소음측정결과간의 관련성을 연구하고, 이를 통하여 항우연 풍동소음 측정의 신뢰성 및 최적설계 팬터그래프의 소음특성을 예측하는 데 활용하고자 한다. 소음 Array 및 소음측정은 300 km/h 이상에서 측정하기 위하여, 국내 유일의 300 km/h 이상으로 주행할 수 있는 HEMU-430X 차량을 활용하였고, 또한 350 km/h 급 신규 고속선로인 호남고속선에서 그 측정을 수행하였다. 소음 Array 측정은 350 km/h 팬터그래프 상승/하강, 400 km/h 팬터그래프 상승 모드에서 수행되었다. 또한 환경소음 측정은 350 km/h 팬터그래프 상승/하강, 330 km/h 팬터그래프 상승/하강으로 실시되어 속도별 팬터그래프의 소음을 측정하였다.

(2) 실차 팬터그래프 소음 측정

(가) 측정개요

실차에서의 팬터그래프 소음을 측정하기 위하여 330 km/h 주행 시 팬터그래프 상승/하강에 따른 환경소음을 선로변 5m 거리에서 마이크로폰을 이용하여 측정하였고, 350 km/h 주행 시 팬터그래프 상승/하강에 따른 환경소음 비교는 144 채널 소음 Array 시험 중 팬터그래프 높이에 해당하는 마이크로폰을 택하여 선로변 6.0m 거리에서 데이터를 취득하였다. 이를 통하여 속도별 팬터그래프 소음의 기여도 및 주파수 특성을 분석하였다.

(나) 측정위치

팬터그래프의 상승/하강을 이용하여 실차 팬터그래프의 소음 측정을 수행하기 위한 측정위치는 다음과 같다. 측정위치는 다음 그림과 같이 개활지 이면서 선로변에 근접하기 용이한 호남고속선 상선(T2) KP 109.4 위치에서 단일 마이크로폰을 설치하여 측정을 하고, 음장가시화를 위해 측정한 소음 Array의 마이크로폰 중 하나를 택일하여 소음 데이터를 수집하였다.

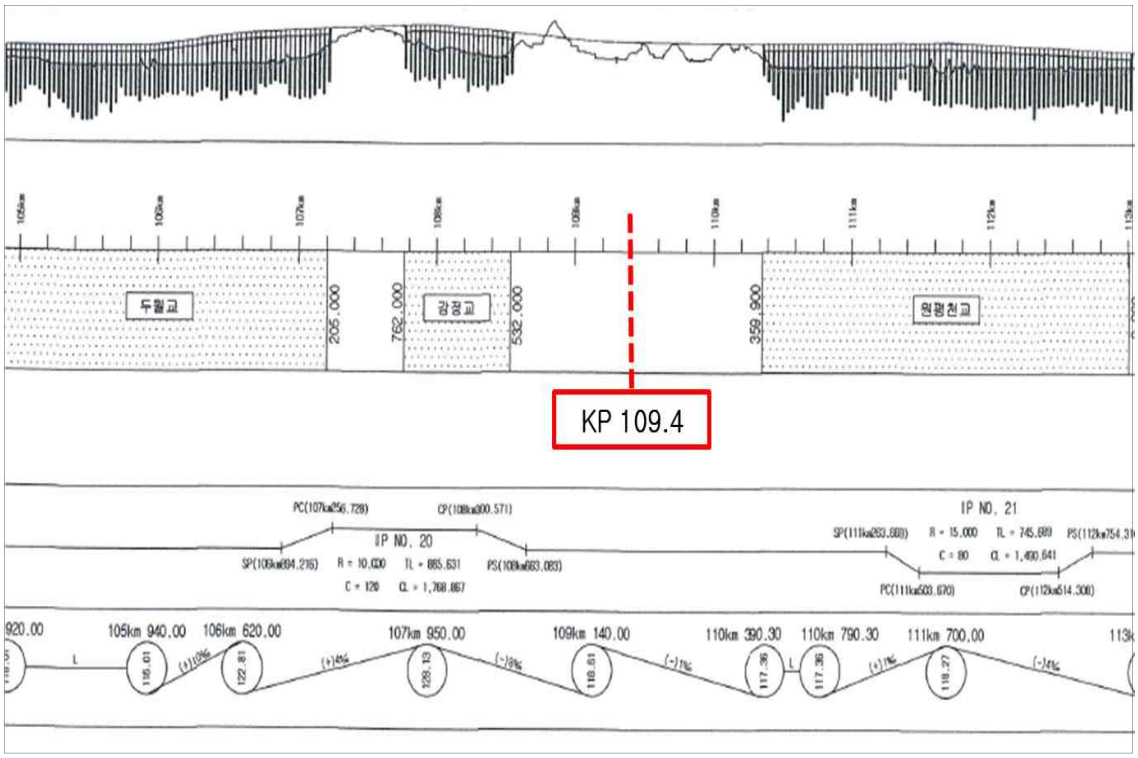


그림 2-3-179 호남고속선 소음 측정 위치 KP 109.4 (김제시 오정동)



그림 2-3-180 소음 측정위치 항공사진 KP 109.4 (김제시 오정동)

(다) 측정 및 분석 방법

① 소음 Array 측정방법

본 연구의 소음 Array 소음측정에서 사용한 장비는 다음과 같다.

- 측정센서 : PCB Piezotronics 사의 마이크로폰 및 증폭기 : 144ea
  (Model 378B02)
- 데이터 수집 장치 : National Instrument 사의 Signal Express
- 데이터 분석 : MATLAB, National Instrument 사의 DIAdem

위의 장비들을 사용하여 다음 그림 2-3-181와 같이 소음 Array 계측 시스템을 구성하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 스타트 트리거와 엔드 트리거를 통해서 열차의 속도를 측정하고, 소음 Array안의 144개의 마이크로폰의 소음 데이터는 데이터 케이블을 통하여 계측 장비로 속도데이터와 동기화 되어 전송된다. 또한 계측되는 데이터는 모니터를 통하여 실시간으로 계측 여부를 확인할 수 있다.

소음 Array는 다음 그림146과 같이 KP 109.4 부근 선로 중심에서 약 6.0 m 위치에서 지름이 양 6m인 소음 Array 기구에 144개의 마이크로폰과 방풍망(Wind Screen)을 설치하여 측정 및 수집한다. 수집 되어진 데이터는 MATLAB으로 연산과정을 거쳐 음압(Sound Pressure Level) 값으로 도출한다. 또한 소음 Array의 마이크로폰 중 택일하여 소음도 측정에 활용한다. 센서의 민감도 및 샘플링 주파수 그리고 dB reference는 다음과 같다.

- 측정 센서빌리티 : 50 mV/Pa
- 샘플링 주파수 : 12,800 Hz
- dB Ref. : 2e-5 Pa

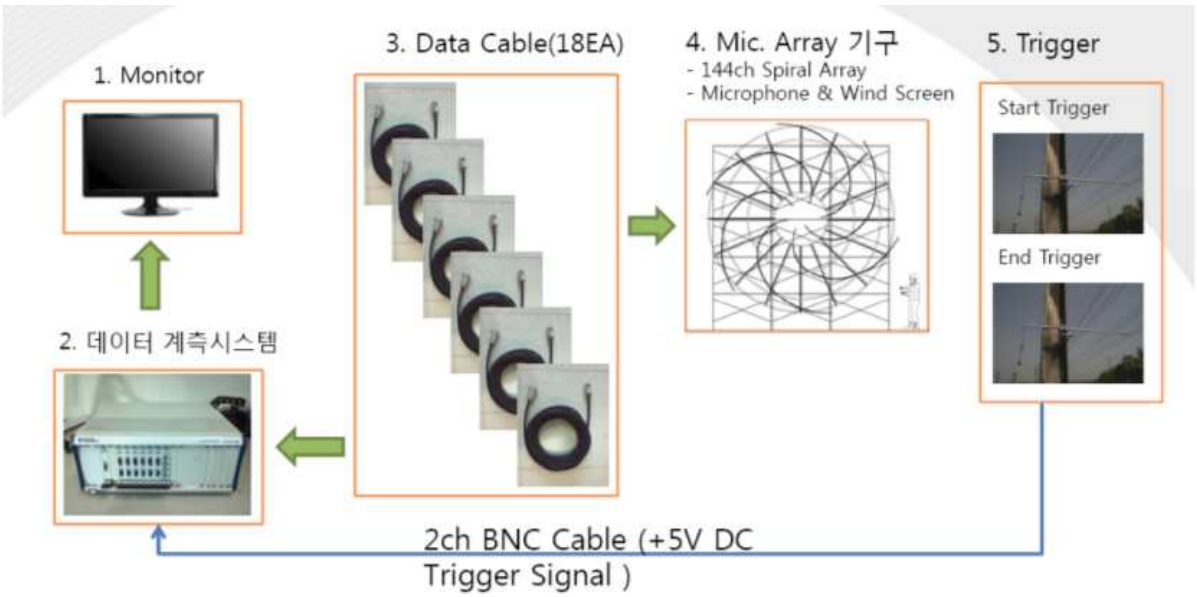


그림 2-3-181 소음 Array 계측 시스템 신호 처리 구성도





그림 2-3-182 소음 Array 현장 설치 사진

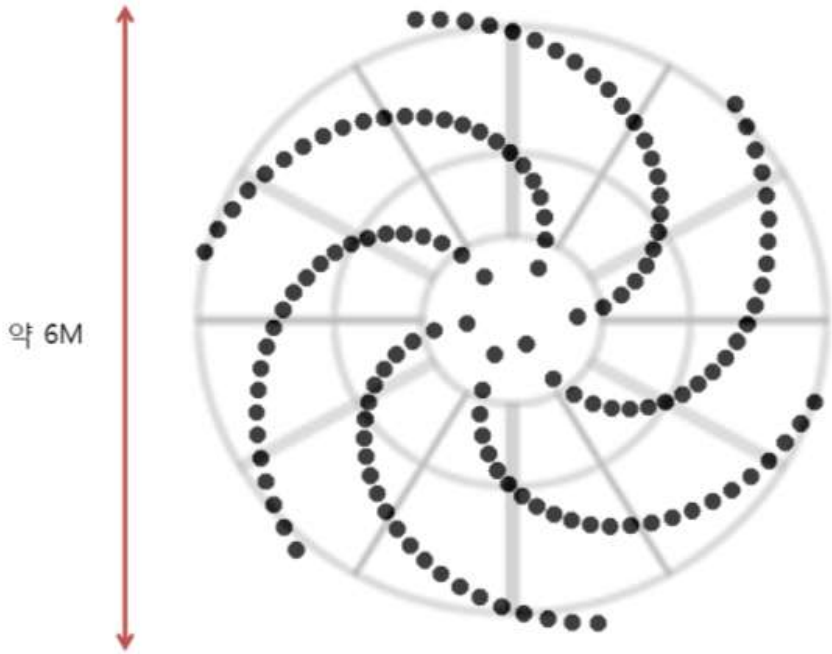


그림 2-3-183 144 ch 소음 어레이 마이크로폰 배열

상기 144 채널 소음 어레이는 철도기술연구원의 설계한 Spiral 형태로 배치되어있어서, 지름이 좁아짐에 따라 마이크로폰 간격이 좁아진다.

어레이는 선로로부터 6.0m 떨어진 곳에 수평방향으로 설치되어있으며, 높이는 KTX-산천 차량과 HEMU 차량의 높이를 고려하여 선로로부터 마이크로폰 중앙의 위치가 수직방향으로 2.85m가 되도록 설치하였다. 다음 그림 2-3-184은 실제 측정 시 마이크로폰 어레이의 설치 높이를 보여주고 있다.

앞서 언급한 바와같이 고속열차의 속도측정은 포토 센서를 이용하여 수행하였다. 포토센서는 발광센서와 수광센서가 한 쌍을 이루고있으며, 선로 양쪽 기둥면에 레일방향으로 1.4m와 레일레벨 기준으로 높이 1m 지점에 시작(start)과 끝(end)트리거 센서가 위치하도록 고정하였다. 열차의 속도는 열차가 진입쪽 선로 기둥면을 통과 시 트리거가 작동하게 되어 통과시간을 측정하고, 양 트리거 사이의 거리를 통해서 구하게 된다.

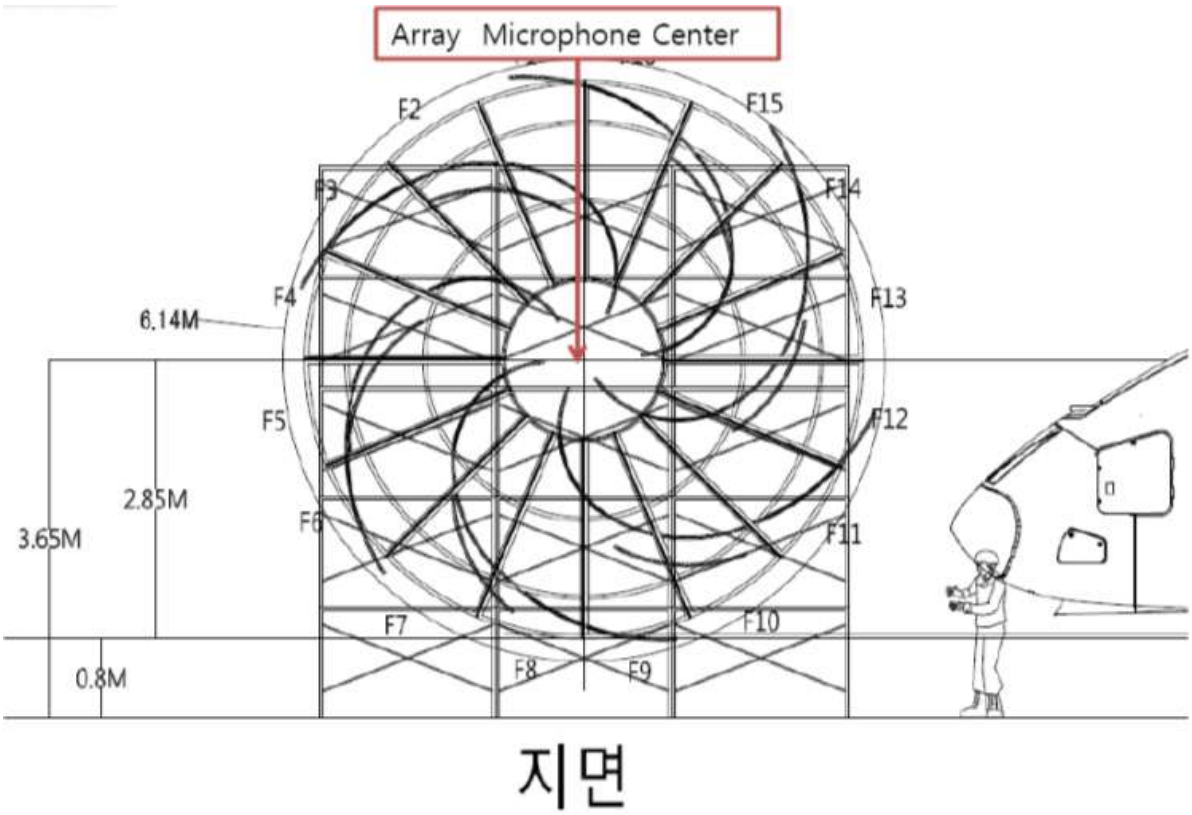


그림 2-3-184 소음 어레이 설치 높이

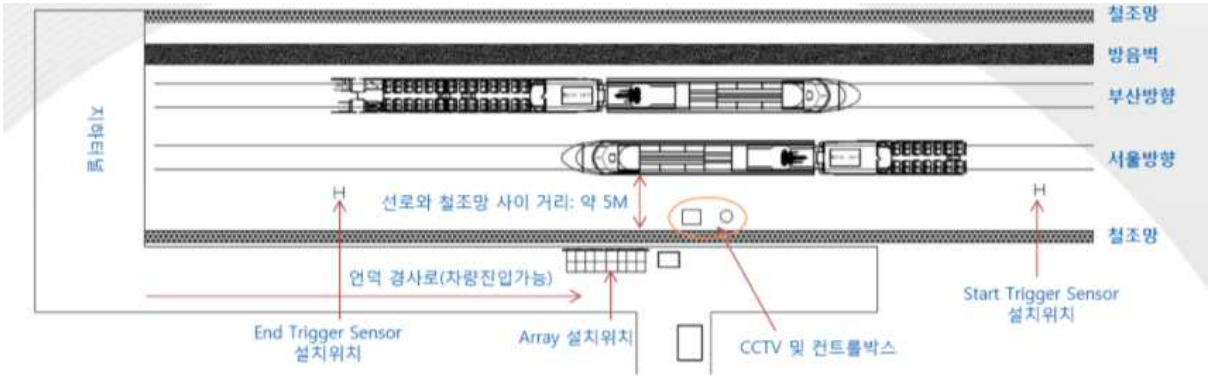


그림 2-3-185 소음 Array 계측 시스템 전체 조감도

② 마이크로폰 소음 측정방법

본 연구에서 마이크로폰에 의한 환경소음 측정방법은 두 가지로 구분된다. 우선 마이크로폰 소음 Array의 144개 마이크로 폰 중 팬터그래프 높이에 해당하는 마이크로폰 하나를 선택하여 소음도 측정에 활용한다. 다음 그림은 팬터그래프 소음 측정을 위한 마이크로폰의 위치이다. 데이터 취득은 저장된 소음어레이 결과로부터 해당채널만의 데이터를 추출하여 실행하였다.

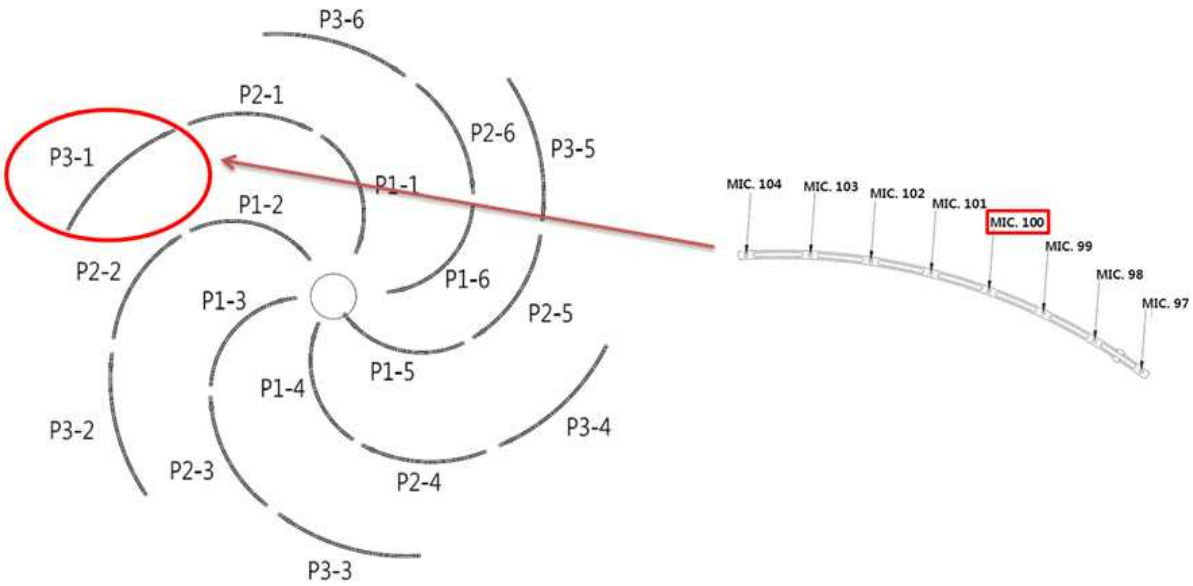


그림 2-3-186 팬터그래프 소음 측정을 위한 마이크로폰

두 번째 방법은 소음 Array 측정시험 외에 추가의 시험을 실시할 때 사용되었다. 이때는 단일 마이크로폰을 선로변에 설치하여 HEMU-430x 통과 시 환경소음을 측정한다. 이 때 사용된 장비는 다음과 같다.

- 측정센서 : PCB Piezotronics 사의 마이크로폰 및 증폭기 (Model 378B02)
- 데이터 수집 장치 : National Instrument 사의 Signal Express
- 데이터 분석 : MATLAB, National Instrument 사의 DIAdem

위의 장비들을 사용하여 다음 그림과 같이 KP 109.4 부근 선로 중심에서 5 m, 선로 바닥에서 1 m 위치에서 단일 마이크로폰을 설치하여 측정하여 수집한다. 수집 되어진 데이터는 MATLAB으로 연산과정을 거쳐 음압 (Sound Pressure Level) 값으로 도출한다. 센서의 민감도 및 샘플링 주파수 그리고 dB reference는 다음과 같다.

- 측정 센서빌리티 : 50 mV/Pa
- 샘플링 주파수 : 25,000 Hz
- dB Ref. : 2e-5 Pa

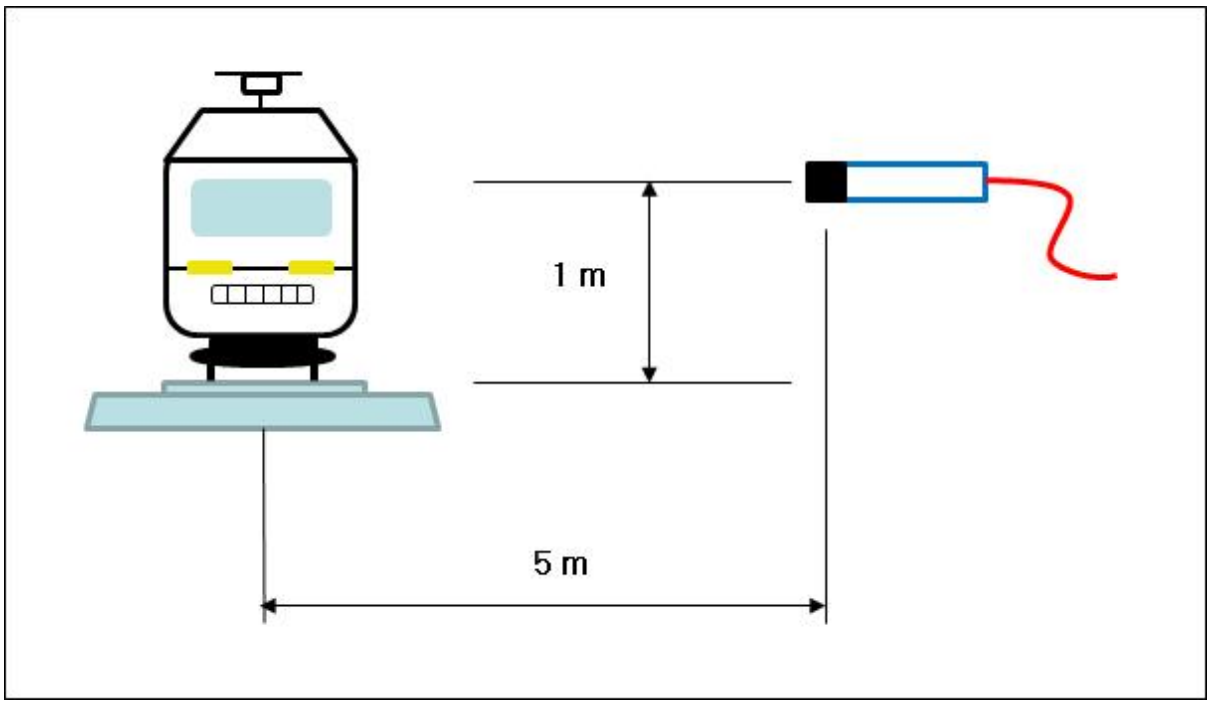


그림 2-3-187 마이크로폰 소음 측정 높이

③ 소음 어레이 데이터 분석 방법

소음 Array 시험은 고속철도 차량이 주행할 때 생기는 전동 소음, 공력 소음 등 다양한 소음들의 음압값을 다채널 DAQ 시스템에 144개의 마이크로폰을 이용하여 측정한다. 측정된 데이터들은 2차년도 보고서에 기술된 지연-합 빔 형성 이론(Delay-and-sum beamforming method) 을 적용하여 350 km/h와 400 km/h의 속도에서 소음특성 분석을 수행하여, 특정 주파수 영역에서의 소음지도를 바탕으로 주파수 영역별 음압의 특성을 구하였다. 고속철도 차량의 주행 중 발생하는 소음 지도 혹은 음장가시화 결과를 보기 위해서는 다음의 일련의 과정이 필요하다. 우선 측정 대상이 되는 고속열차의 주행속도 및 발생하는 소음을 측정한 후에 지연-합 빔형성 이론과 도플러 효과를 적용하여 빔파워를 구한다. 이 때 신호 처리의 유용성을 위해 빔파워의 값에 창함수를 이용하여 가중치를 부여한 후에, 앞서 구한 열차의 속도를 바탕으로 빔파워를 열차의 위치에 투영하면 음장 가시화 결과를 도출할 수 있다. 다음은 음장가시화를 위한 일련의 과정의 요약이다.

① Train speed calculation
② Pass-by noise measurement with 144 channel mircophone array
③ Delay and sum method
④ De-dopplerization
⑤ Train location calculation
⑥ Beam-power calculation
⑦ Window function application
⑧ Noise mapping

④ 마이크로폰 시험 분석방법

- 측정데이터: 개활지인 동일한 측정지점에서 음압 측정
- 주파수필터: 20 ~ 20,000 Hz의 A-Weighting Filter 적용
- 주파수필터가 적용된 데이터는 아래의 식에 의해서 음압(Sound Pressure Level)값으로 계산한다.

$$SPL = 20 \times \log_{10}\left(\frac{P}{P_{ref}}\right), \qquad P_{ref} = 2 \times 10^{-5}$$

- 음압 값으로 계산된 데이터를 일정한 거리의 구간으로 나뉜 후에 R.M.S.값을 해당 구간의 대표 값으로 정한다.
- R.M.S.값의 데이터로 팬터그래프 차량의 부근 구간을 선정한다.
- 선정된 구간의 raw데이터를 1/3 Octave 주파수 분석을 수행한다.
- 팬터그래프의 음압값을 도출한다.

(라) 소음 Array 측정결과

소음 Array 시험은 고속철도 차량이 주행할 때 생기는 전동 소음, 공력 소음 등 다양한 소음들의 음압값을 다채널 DAQ 시스템에 144개의 마이크로폰을 이용하여 350 km/h 팬터그래프 상승 및 하강 모드, 그리고 400 km/h 팬터그래프 상승모드에서 측정을 수행하였다. 측정된 데이터들은 지연-합 빔 형성 이론을 적용하여 350 km/h와 400 km/h의 속도에서 소음특성 분석을 수행하였으며, 주파수 영역에서 팬터그래프 부위의 음장가시화 특성을 상호 비교하였다.

① 350 km/h 팬터그래프 상승/하강 비교

호남고속선 KP 109.4 지점에서 측정된 데이터들은 음장가시화 시켜서 HEMU-430x 350 km/h 주행 시 팬터그래프 상승 및 하강 시 결과를 1/3 옥타브 주파수인 250, 315, 400, 630, 800 Hz 영역에 대해서 다음의 그림들과 같이 도시하였다. 음장가시화 결과를 보면 250, 315 Hz, 400 Hz의 영역에서 팬터그래프 위치에서 팬터그래프를 상승시킨 경우에 하강한 경우보다 분명한 소음강도의 차이를 확인할 수 있다. 따라서 팬터그래프에 의한 소음이 250 Hz~ 400 Hz의 저주파에서 주로 기여를 한다는 것을 확인할 수 있고, 이는 2차년도 소음 가시화 결과와 일치하는 경향이다.

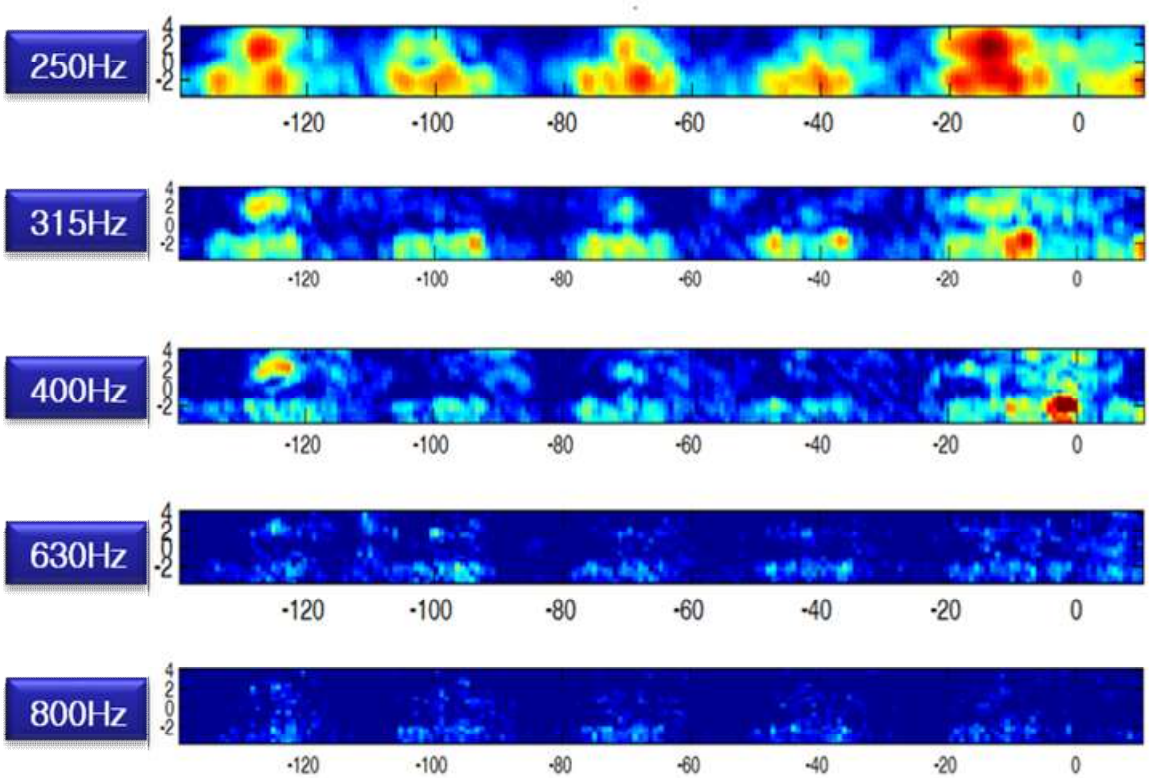


그림 2-3-188 350km/h 팬터그래프 상승모드 음장가시화 : 1/3 옥타브

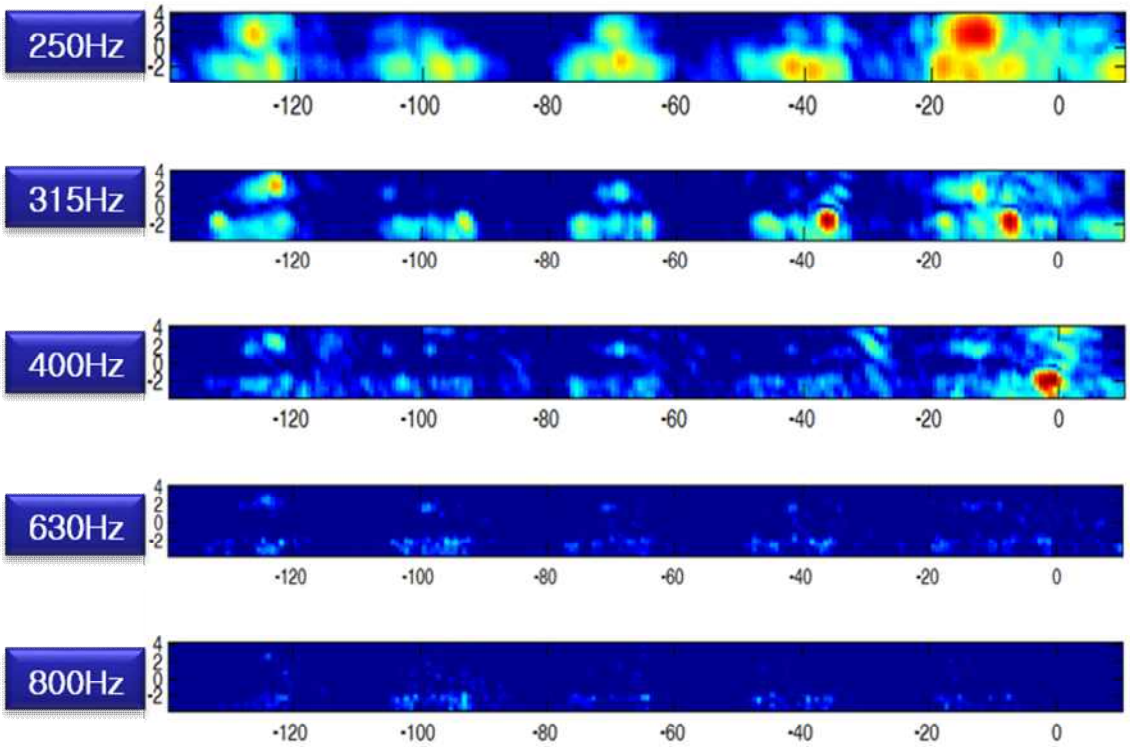


그림 2-3-189 350km/h 팬터그래프 하강모드 음장가시화 : 1/3 옥타브

② 400 km/h 팬터그래프 상승

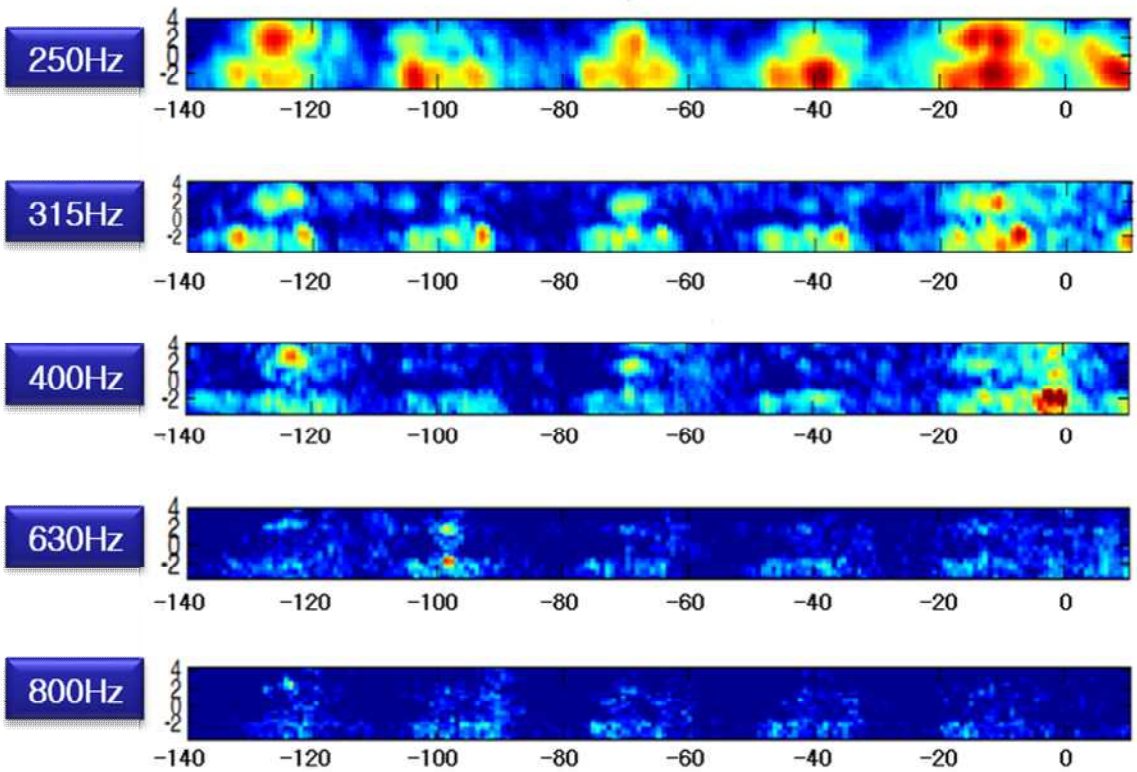


그림 2-3-190 400km/h 팬터그래프 상승모드 음장가시화 : 1/3 옥타브

350 km/h 와 마찬가지로 측정된 데이터를 음장가시화 시켜 그림 2-3-190에 도시화 시켰다. 400 km/h 역시 250 Hz ~ 400 Hz의 영역에서 팬터그래프 위치의 강한 소음원을 확인할 수 있다. 실제로 프랑스 SNCF에 의하여 TGV차량에 대하여 음장가시화 및 환경소음을 측정한 결과를 살펴보면 320 km/h 주행 시 250 ~ 315 Hz 대역에서 다음 그림과 같이 강한 팬터그래프 소음이 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 본 시험결과와 상당히 일치하는 경향이라고 판단된다.

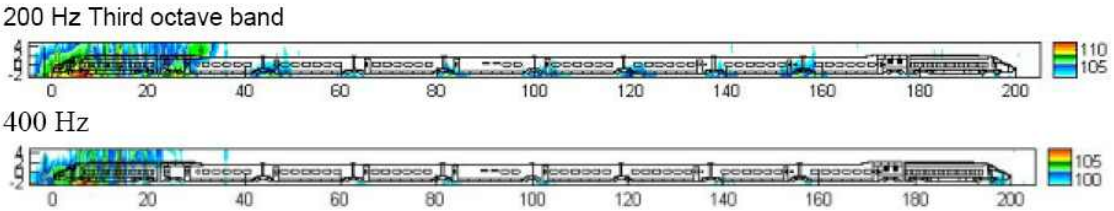


Figure 5: noise map of a TGV POS running at 320 kph (200 Hz and 400 Hz third octave bands)

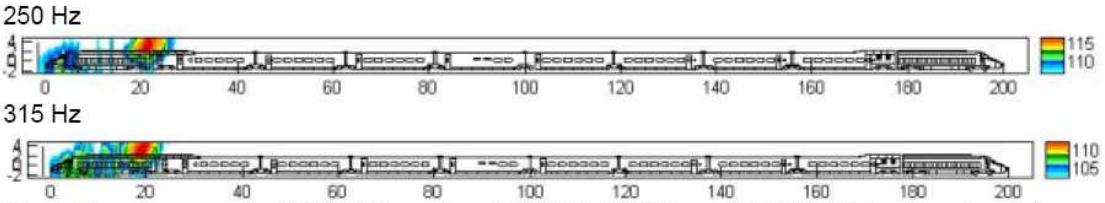


Figure 6: noise map of a TGV POS running at 320 kph (250 Hz and 315 Hz third octave bands)

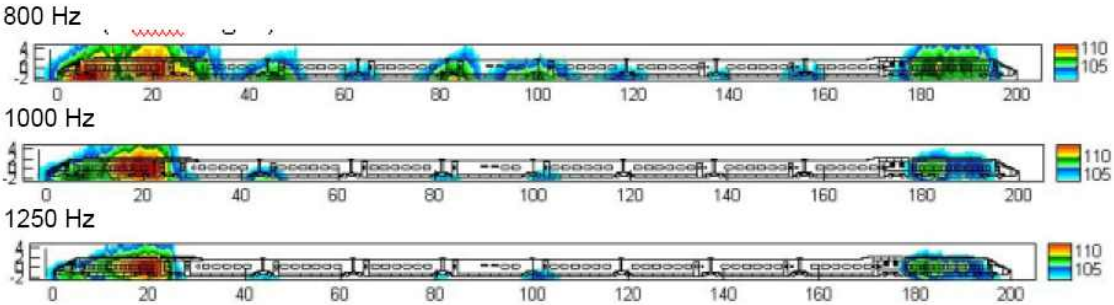


Figure 7:noise map of a TGV POS running at 320 kph (800 Hz to 12500 Hz third octave bands)

그림 2-3-191 프랑스 TGV 소음 어레이 측정결과 (P.-E Gautier et al, WCRR2008)

또한 두 속도 350 km/h와 400 km/h 일 때 음장가시화를 비교해본 결과 400 km/h일 때의 팬터그래프의 소음이 350 km/h 일때의 팬터그래프 소음보다 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이는 속도가 높아질수록 전동소음이 더욱 높아져서 상대적으로 팬터그래프의 공력소음이 작게 나타나는 것으로 사료된다. 또한 해당 연구결과에서는 전동 노이즈가 차량 소음의 가장 큰 소음원이며 팬터그래프는 두 번째로 큰 소음원이라고 명시하고 있기 때문에 본 시험결과를 잘 설명해줄 수 있는 근거이다.

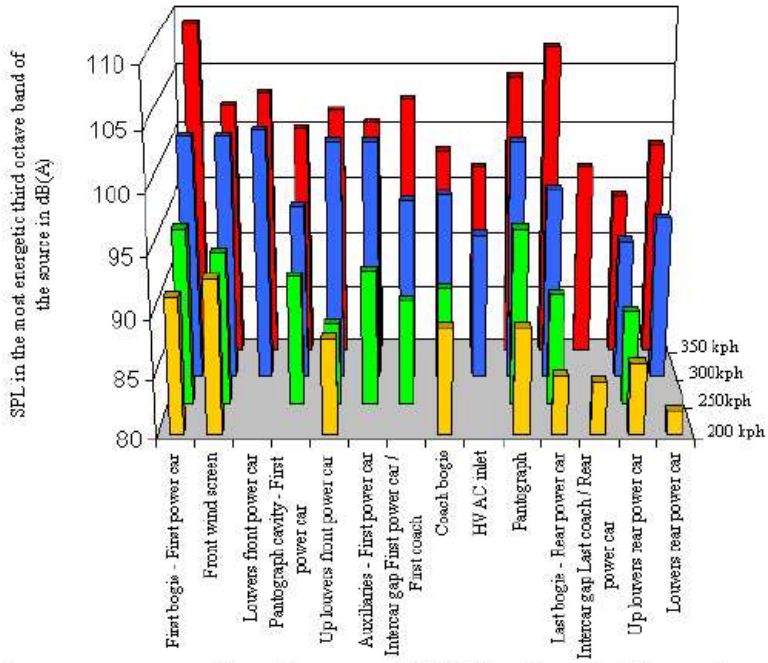


Figure 9:Source power estimation on a TGV Duplex at different speeds, from [4]

그림 2-3-192 프랑스 TGV-Duplex 속도대역별 소음원의 기여도 (P.-E Gautier et al, WCRR2008)

상기의 소음 Array 측정결과를 통해서 팬터그래프에의한 소음기여는 주로 250 ~ 400 Hz 대역에서 발생한다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 소음 Array 측정결과는 절대적인 소음강도 (dB)를 제시할 수는 없기 때문에 단일 마이크로폰 시험 결과를 바탕으로 팬터그래프에 의한 소음의 크기를 확인할 필요가 있다. 단 단일 마이크로폰에서 주요하게 검토할 주파수는 250 ~ 400 Hz 대역이라는 점은 분명하다.

(마) 마이크로폰 소음 측정결과

① 350 km/h 팬터그래프 상승/하강 비교

앞서 설명한 측정지점에서 350 km/h의 속도일 때 판토그래프 상승시와 하강시 소음측정을 진행하였고, 측정 된 압력 데이터는 다음 그림과 같다.

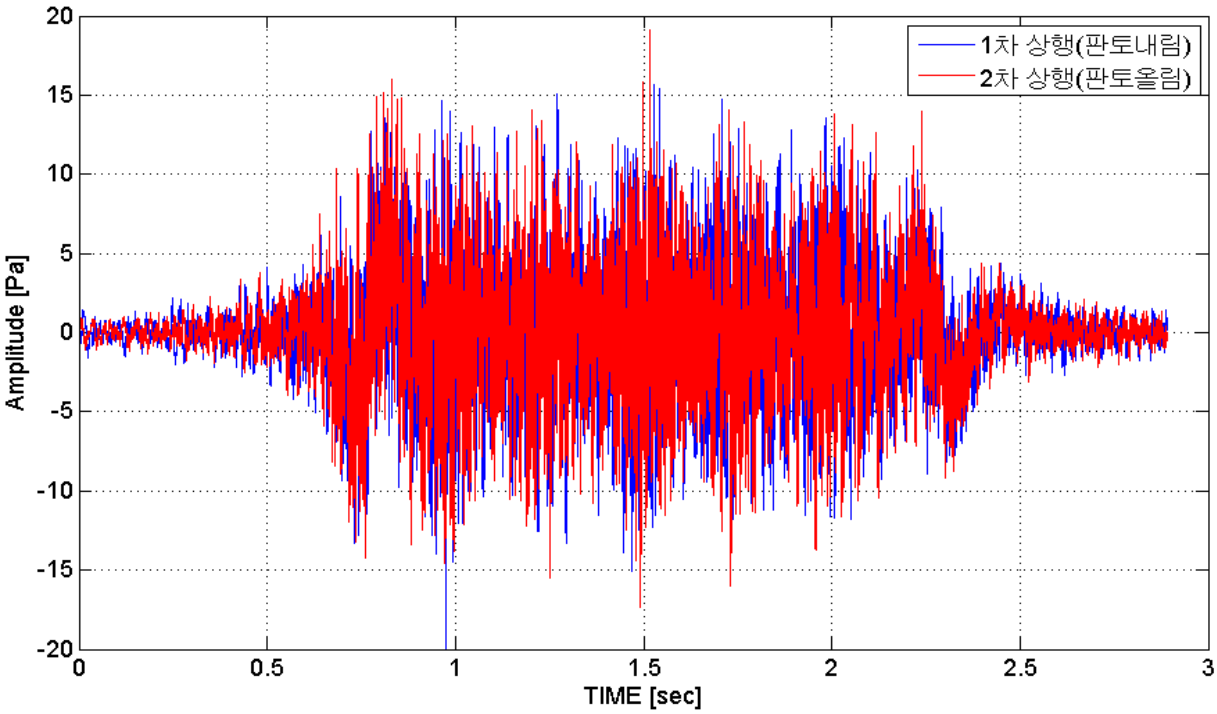


그림 2-3-193 350km/h HEMU-430x 팬터그래프 상승/하강 시 압력 비교

측정된 데이터는 시간영역에서의 압력값으로 사람의 청각 특성을 고려한 20~2000 Hz 사이의 주파수 영역에 대해서 고려한 A-Weighting Filtering을 통하여보정한 후 음압(Sound Pressure Level)값으로 연산한다. 연산 된 음압은 다음의 그림에 나타나 있다. 연산 된 결과 값을 토대로 판토차량 부근의 구간을 나누어 판토그래프의 상승시와 하강시의 음압을 비교하였다. 상승/하강시 비교한 결과 다음의 표와 같이 팬터그래프가 위치한 차량 부근에서 판토그래프 상승/하강시 1.2 dB(A) 의 차이를 보였다.

표 팬터그래프 상승/하강 시 소음도 비교

팬터상승	팬터하강
104.0 dB(A)	102.8 dB(A)

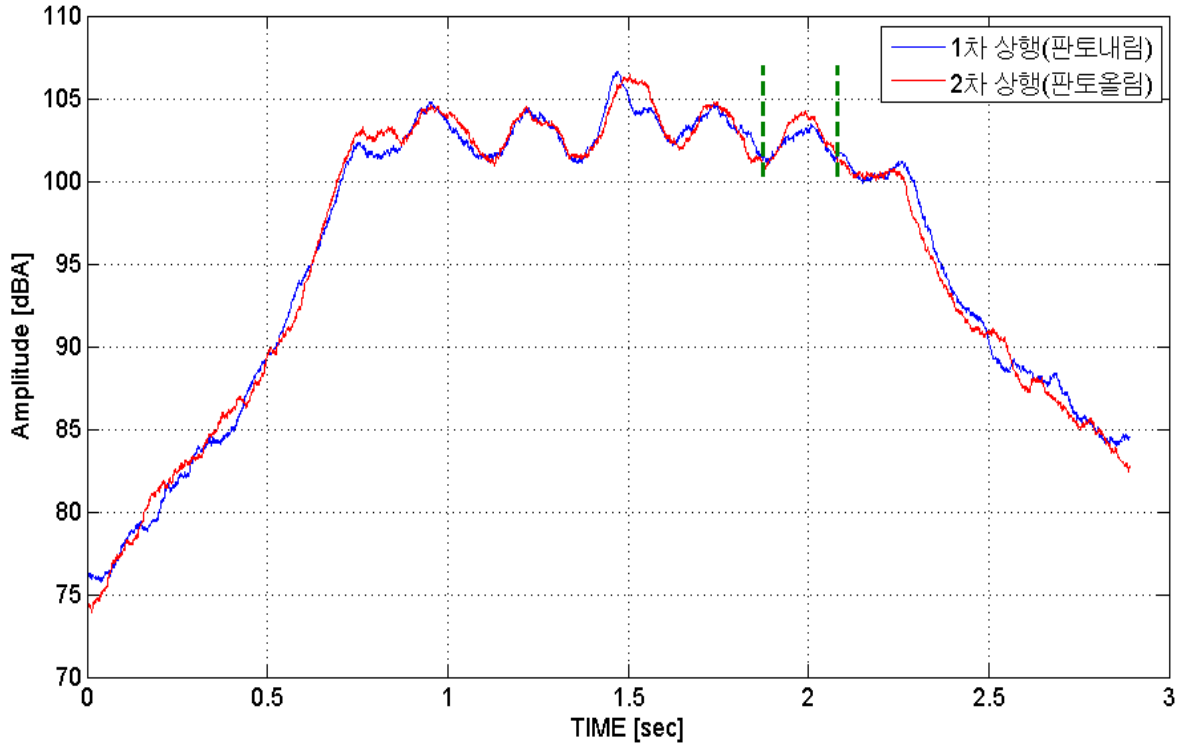
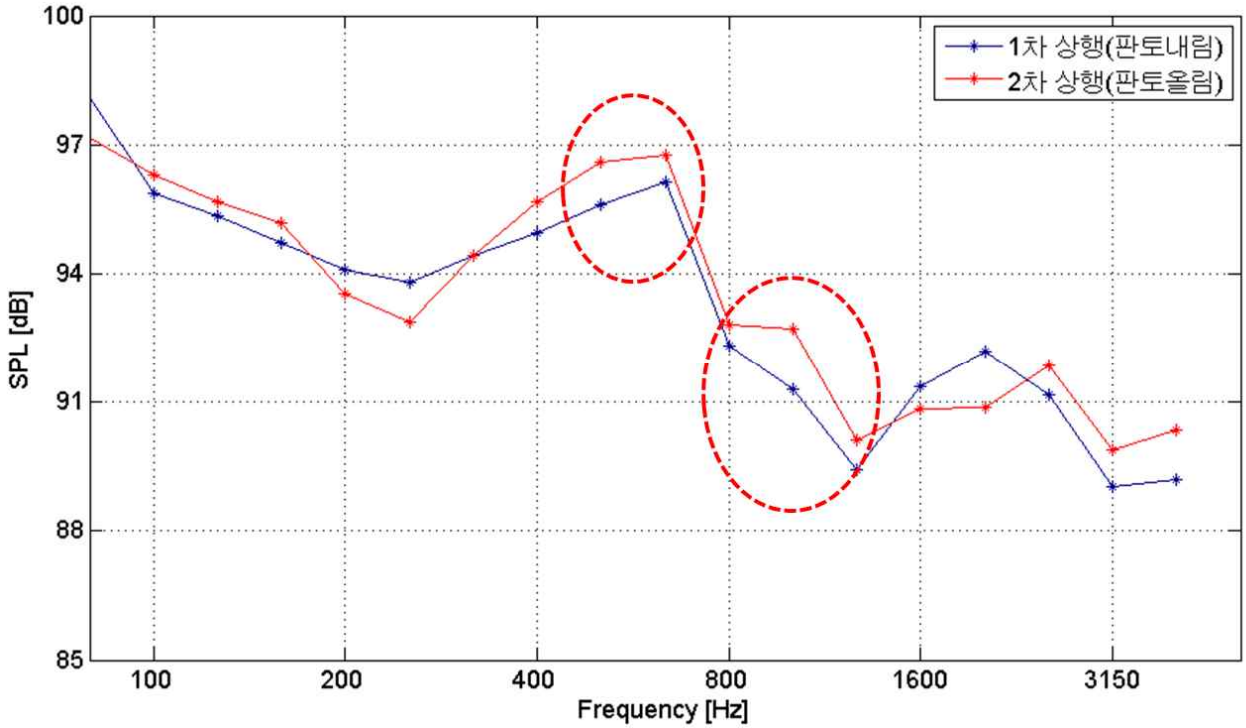


그림 2-3-194 350km/h 팬터그래프 상승/하강에 따른 음압 비교

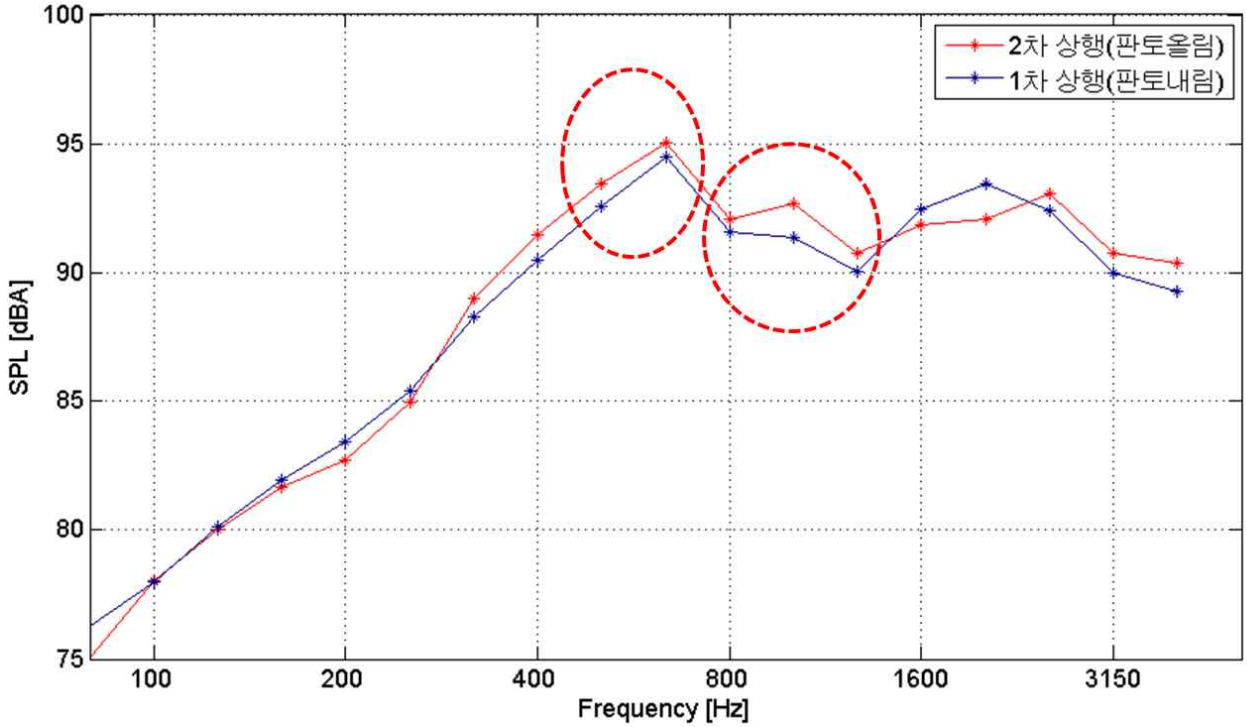
다음 그림 2-3-195의 (a)는 판토차량 부근의 측정데이터를 주파수 영역에 대해서 분석한 결과이고 (b)는 A-Weighting 보정한 주파수 영역의 분석 결과이다. 다음 표에는 각 주파수 영역에서의 판토그래프 상승/하강시의 음압의 비교치가 정리 되어있다. 비교결과 315~500, 1000~1250, 2500~4000 Hz 영역에서 상대적으로 높은 음압값의 차이를 보여주고 있다.

표 350 km/h 판토그래프 상승/하강에 따른 음압비교

Frequency [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
음압비교치 [dB]	0.41	0.33	0.47	-0.55	-0.92	0.01	0.73	0.96	0.64	0.51
음압비교치 [dBA]	0.05	-0.07	-0.30	-0.69	-0.41	0.69	0.99	0.88	0.58	0.50
Frequency [Hz]	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000			
음압비교치 [dB]	1.41	0.70	-0.54	-1.32	0.69	0.84	1.13			
음압비교치 [dBA]	1.32	0.74	-0.59	-1.36	0.68	0.76	1.14			



(a) 판토그래프 상승/하강시 주파수 분석



(b) 판토그래프 상승/하강시 주파수 분석(A-Weighted)

그림 2-3-195 350 km/h 주행 시 팬터그래프 부근 주파수 분석 결과

② 330 km/h 판토그래프 상승/하강 비교

측정지점에서 330 km/h의 속도일 때 팬터그래프 상승 및 하강 시 차량의 소음을 측정한 raw data는 다음 그림과 같다. 이 시험에서는 실제로는 별도의 팬터그래프 상승 및 하강은 실시하지 않았다. 첫 번째 주행에서는 앞쪽 팬터그래프는 올린 상태로 뒤쪽 팬터그래프는 내린 상태로 주행을 하고(비상 팬터그래프 모드), 반면에 두 번째 주행에서는 앞쪽 팬터그래프를 내린 상태로 뒤쪽 팬터그래프를 올린 상태로 주행을 실시하였다. (정상 팬터그래프 모드) 이렇게 되면 두 번의 주행에서 앞쪽 팬터그래프 차량을 비교하여 비상 팬터그래프의 소음특성을 측정할 수 있고, 또한 동시에 뒤쪽 팬터그래프 차량을 비교하면 정상 팬터그래프의 소음특성을 측정할 수 있기 때문이다.

이 경우 앞쪽 팬터그래프 차량에서는 첫 번째 주행에서의 소음이 두 번째 주행에서의 소음보다 크게 측정이 될 것이고, 뒤쪽 팬터그래프 차량에서는 두 번째 주행의 소음이 첫 번째 주행 소음보다 크게 측정이 될 것이다.

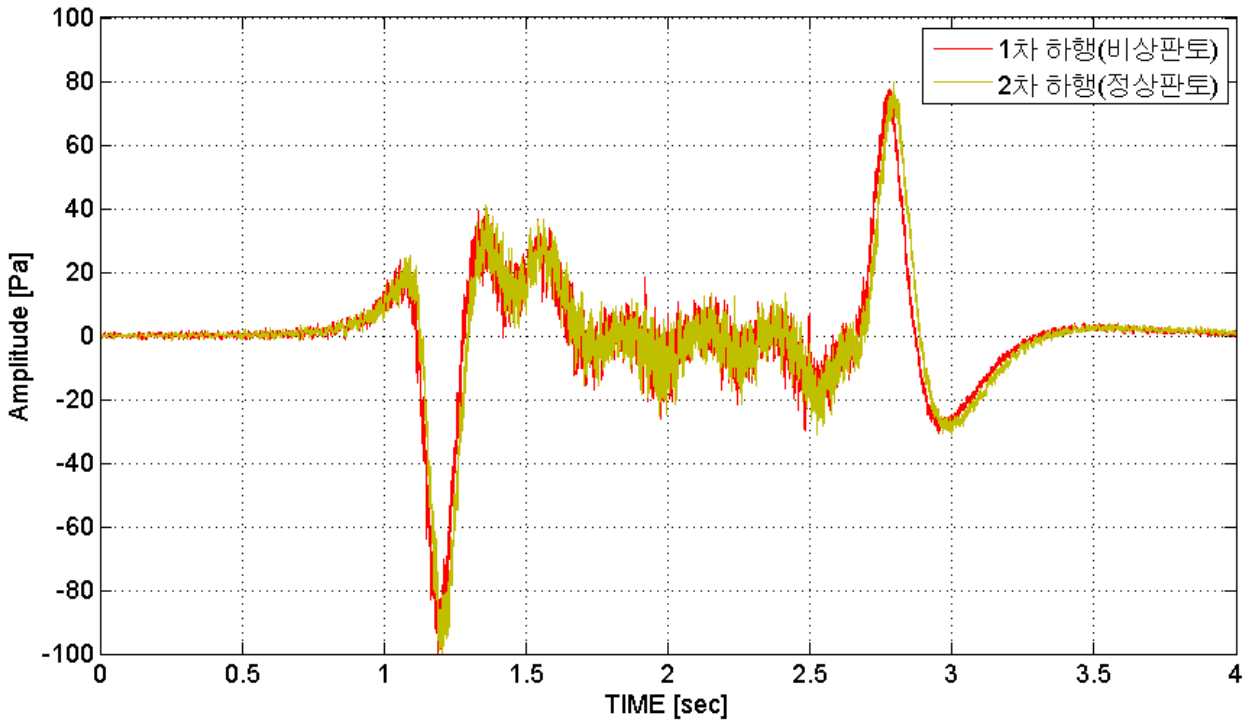


그림 2-3-196 330km/h 주행 시 정상팬터그래프 모드와 비상팬터그래프 모드 비교

위와 같이 측정된 데이터를 사람의 청각 특성을 반영한 A-Weighting Filtering을 통하여 보정 된 결과가 다음의 그림에 나타나 있다. 앞서 설명한 바와 같이 앞쪽 팬터그래프 차량에서는 첫 번째 주행에서의 소음이 두 번째 주행에서의 소음보다 크게 측정이 되었고, 뒤쪽 팬터그래프 차량에서는 두 번째 주행의 소음이 첫 번째 주행 소음보다 크게 측정이 되었다.

A보정 된 결과값을 토대로 비상판토 차량 부근(1st section), 정상판토 차량 부근(2nd section), 측정위치 진입전(3rd section)의 세 구간으로 나누어 판토그래프 상승/하강 비교를 진행하였고 그 결과 값은 다음과 같다.

표 330 km/h 주행 시 팬터그래프 상승/하강에 따른 소음도 차이 비교

	팬터 상승	팬터 하강
1st section	99.45 dB(A)	98.57 dB(A)
2nd section	97.65 dB(A)	95.85 dB(A)

위의 표에서 보이는 바와 같이 판토그래프의 상승/하강시 첫 번째와 두 번째 구간에서 0.88 dB(A), 1.80 dB(A)의 소음도 차이가 발생하였다. 두 번째 구간의 소음이 더 크게 차이가 나는 이유는 해당 팬터그래프 부근이 페어링 중 진행방향 쪽 페어링을 제거했기 때문이다. 페어링 제거를 통하여 팬터그래프 소음이 차량 진행 방향 쪽으로 전파되기가 용이해질 뿐 아니라 그 소음 기여도도 상대적으로 증가하기 때문이다. 해당 페어링의 제거 이유는 증속시험을 위한 공기저항 저감 때문이었다.

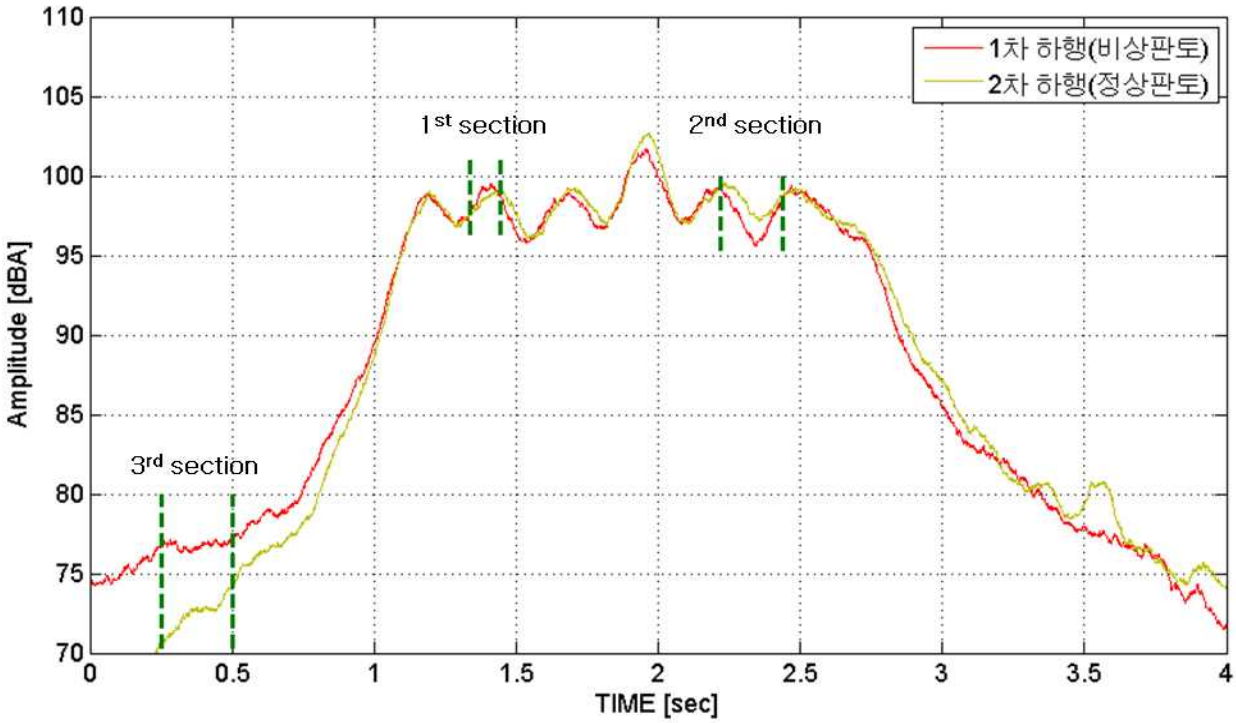
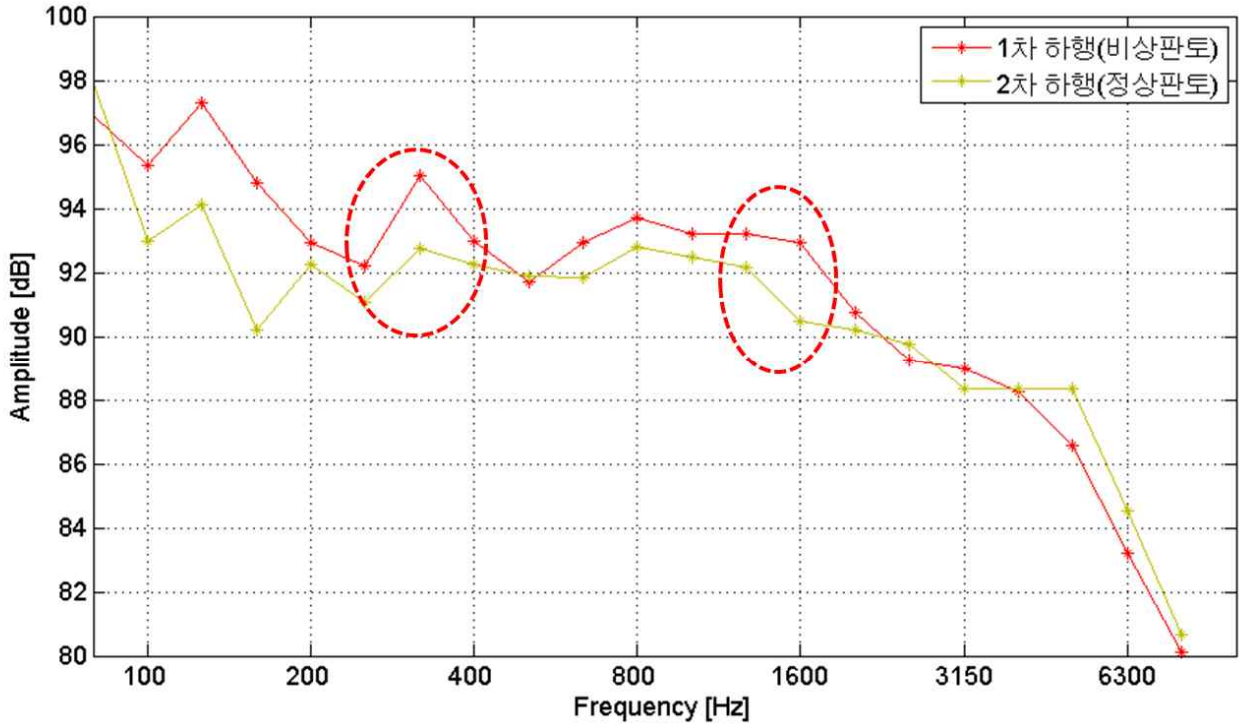
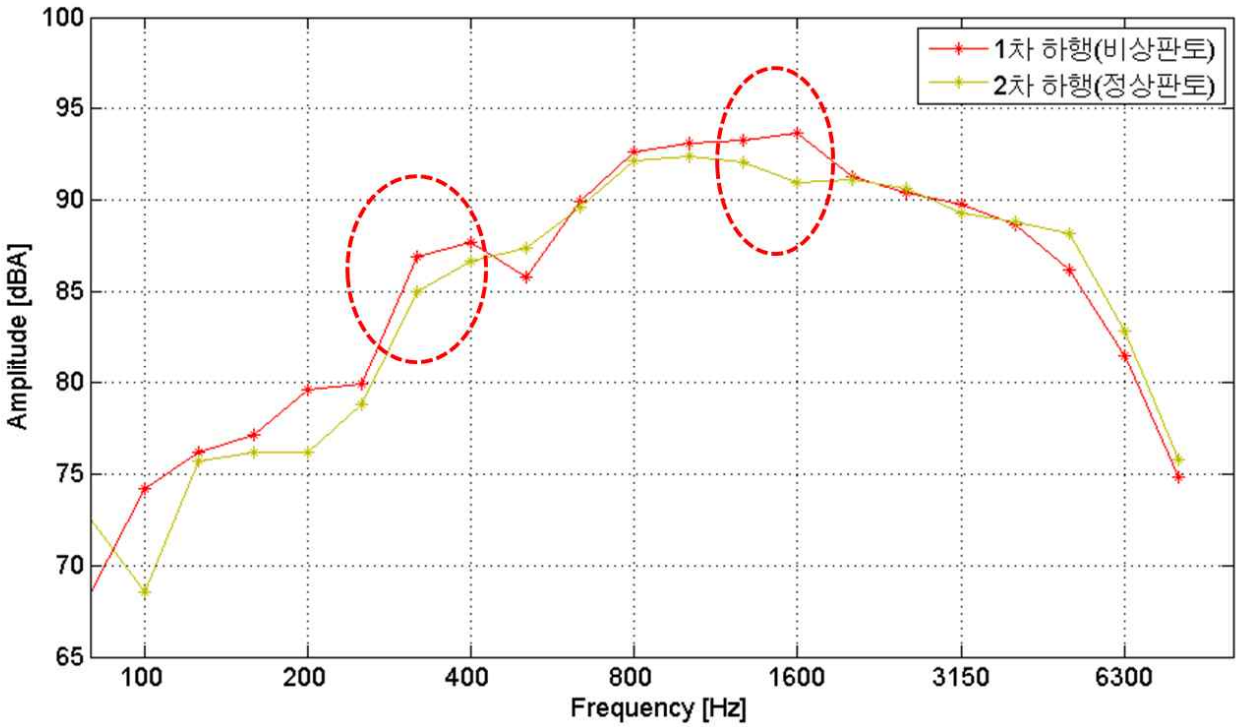


그림 2-3-197 330km/h 주행 시 정상팬터그래프 모드와 비상팬터그래프 모드 음압 비교

다음의 그림들은 팬터그래프 상승/하강 비교 구간인 첫 번째와 두 번째 구간에서의 음압 측정결과를 주파수 분석한 결과이다.

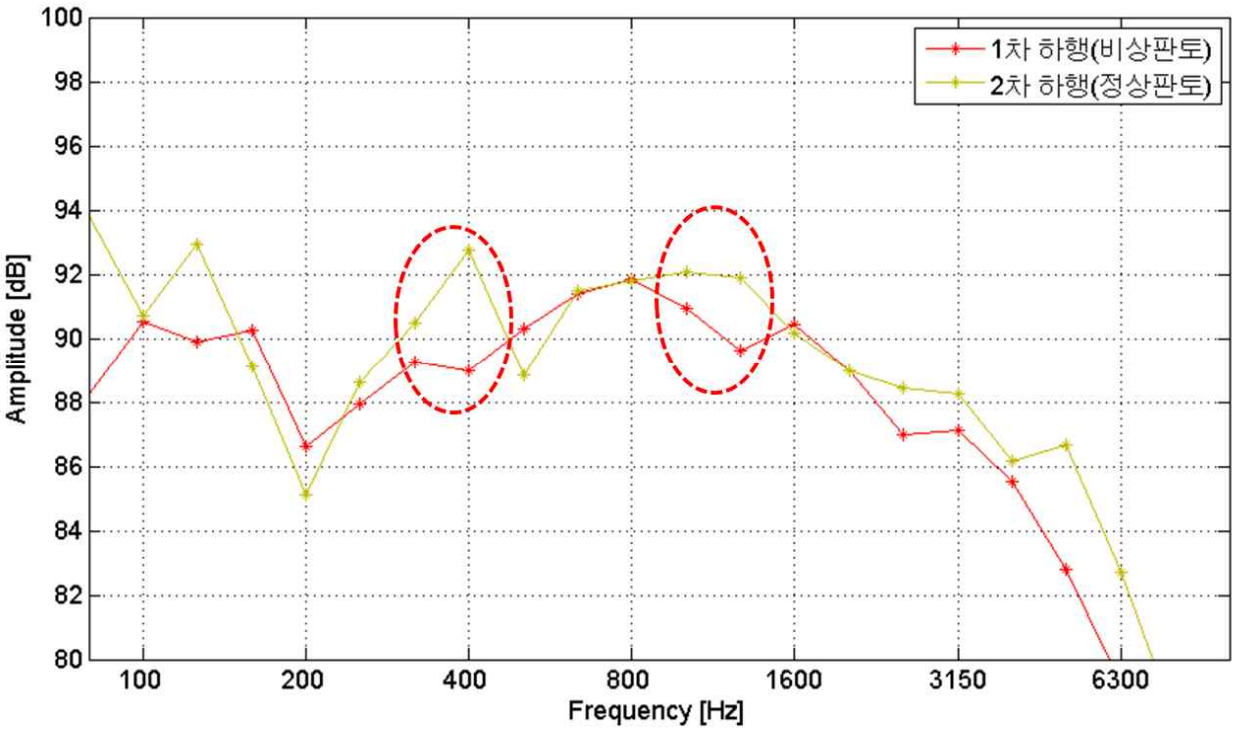


(a) 비상판토 부근 주파수 분석

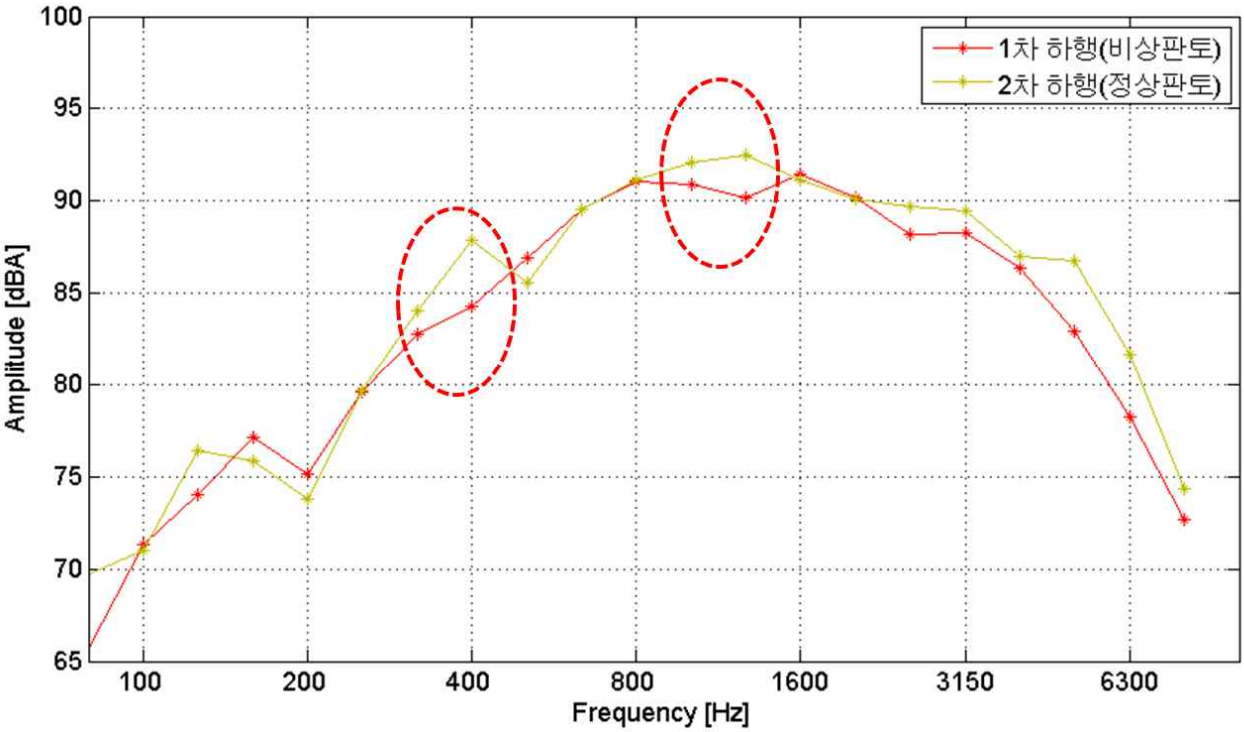


(b) 비상판토 부근 주파수 분석(A-Weighted)

그림 2-3-198 330km/h 비상판토 부근(1st section) 음압 주파수 분석 결과



(a) 정상판토 부근 주파수 분석



(b) 정상판토 부근 주파수 분석(A-Weighted)

그림 2-3-199 330km/h 정상판토 부근(2nd section) 음압 주파수 분석 결과

다음의 표들은 330 km/h 주행 시 각 주파수 영역에서의 판토그래프 상승/하강시의 첫 번째, 두 번째 구간의 음압 비교치가 정리 되어있다. 첫 번째 구간의 음압 비교결과 저주파수 영역에서 높은 음압의 차이를 보였으며, 500 Hz, 2500 Hz, 4000 ~ 8000 Hz 영역을 제외한 주파수 영역에서 판토그래프가 상승 하였을 경우에 음압값이 높은 것을 알 수 있다.

표 팬터그래프 상승/하강시 음압비교 (1st section)

Frequency [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
음압비교치 [dB]	**2.36**	**3.20**	**4.58**	**0.67**	**1.14**	**2.26**	**0.70**	-0.18	**1.07**	**0.91**
음압비교치 [dBA]	**5.63**	**0.43**	**0.95**	**3.44**	**1.09**	**1.91**	**1.02**	-1.61	**0.27**	**0.47**
Frequency [Hz]	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
음압비교치 [dB]	**0.74**	**1.07**	**2.45**	**0.56**	-0.49	**0.63**	-0.08	-1.77	-1.29	-0.55
음압비교치 [dBA]	**0.72**	**1.21**	**2.74**	**0.16**	-0.20	**0.45**	-0.15	-1.98	-1.39	-1.00

표 팬터그래프 상승/하강시 음압비교 (2nd section)

Frequency [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
음압비교치 [dB]	**0.18**	**3.05**	-1.18	-1.48	**0.68**	**1.22**	**3.76**	-1.47	**0.10**	-0.06
음압비교치 [dBA]	-0.27	**2.36**	-1.25	-1.35	**0.04**	**1.28**	**3.64**	-1.34	-0.02	**0.06**
Frequency [Hz]	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
음압비교치 [dB]	**1.11**	**2.28**	-0.28	-0.01	**1.48**	**1.15**	**0.64**	**3.89**	**3.45**	**1.66**
음압비교치 [dBA]	**1.12**	**2.27**	-0.29	-0.06	**1.44**	**1.17**	**0.61**	**3.83**	**3.45**	**1.69**

두 번째 구간의 음압 비교결과 250~400, 1000~1250, 2500~8000 Hz의 주파수 영역에서 상대적으로 높은 음압값의 차이를 보이고 있다. 이는 350 km/h 일 경우의 판토그래프 상승/하강시 비교 결과 값과 유사한 경향이 나타났다. 또한 비상판토일 경우와 350, 330 km/h의 정상 판토 상승/하강시의 경우 모두 315 ~ 400, 1000 ~ 1250 Hz에서 판토그래프 상승시 음압값이 높게 측정되었다.

마지막으로 세 번째 구간은 측정위치 진입 전의 음압 값이다. 비상판토의 경우 차량의 선두부 위치에서 판토그래프가 상승되어 있기 때문에 판토그래프에 의한 공력소음의 영향으로 음압의 차이가 발생하여 이러한 차이가 발생했다고 추정은 된다. 그러나 진입 전의 소음

에 대해서 주파수영역에서의 분석을 한 결과는 다음의 그림과같이 특별한 주파수에서의 차이는 계측되지 않고 전 주파수 대역에서 비상판토 차량이 정상판토 차량에 비해 최고 6 dB 차이가 나는 것을 알 수 있다.

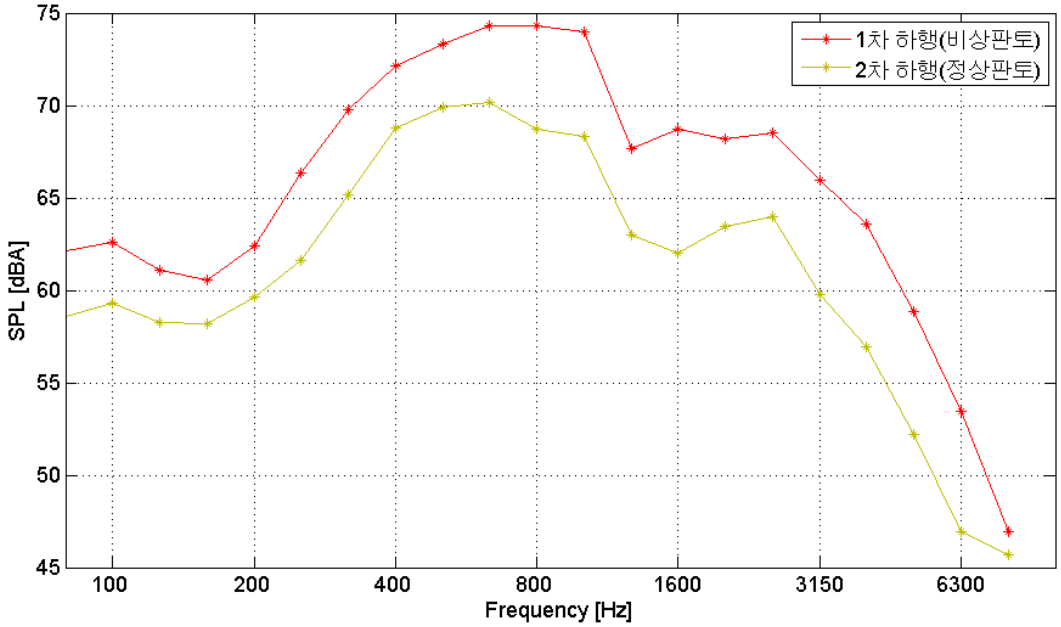


그림 2-3-200 진입전 소음(3rd section) 주파수 분석 결과

상기의 팬터그래프 상승/하강 시 소음 주파수 특성을 종합해보면 330 km/h ~ 350 km/h 주행의 경우 팬터그래프에 의한 소음은 주로 315 ~ 400 Hz 대역 그리고 1000 ~ 1250 Hz 대역에서 주요하다고 볼 수 있다. 특히 315 ~ 400 Hz 대역은 소음 어레이에서 팬터그래프 소음으로 판단되는 250 Hz ~ 400 Hz의 영역과 공통된다. 또한 앞서 언급한 TGV의 음장가시화 결과인 320 km/h 주행 시 250 ~ 315 Hz 대역의 강한 팬터그래프 소음과도 일치하는 경향을 보인다. 이는 팬터그래프 팬헤드에 의한 Vortex shedding의 영향이라고 판단되며 자세한 내용은 뒤에 다루도록 하겠다. 그러나 1000 ~ 1250 Hz 대역의 경우 음장가시화 결과에서는 팬터그래프에 의한 소음의 차이를 볼 수가 없는데, 이는 본 과제의 음장가시화 결과와 TGV 음장가시화 결과 공통적인 현상이다. 그러나 상기 마이크로 폰 시험결과에서는 1000 ~ 1250 Hz 대역에서 팬터그래프에 의한 peak를 관측할 수 있으며, TGV의 주파수별 소음원 기여도 해석결과에서도 320 km/h 주행 시 다음 그림과 같이 팬터그래프에 의하여 200 ~ 300 Hz, 1000 ~ 1250 Hz에서 peak이 나타난다고 보고되고 있다. 아래 그림에서 검은색 선이 팬터그래프에 의한 주파수별 소음 기여도이며, 저주파에서는 대차에 의한 공력소음(붉은색) 다음의 주요한 소음원이고, 고주파에서는 휠/궤도간 롤링노이즈(흰색)와 대차에 의한 공력소음(붉은색) 다음의 세 번째 주요한 소음원임을 알 수 있다. 따라서 본 측정방법에 의해서 평가된 팬터그래프 소음 특성은 비교적 정확한 결과라고 판단된다.

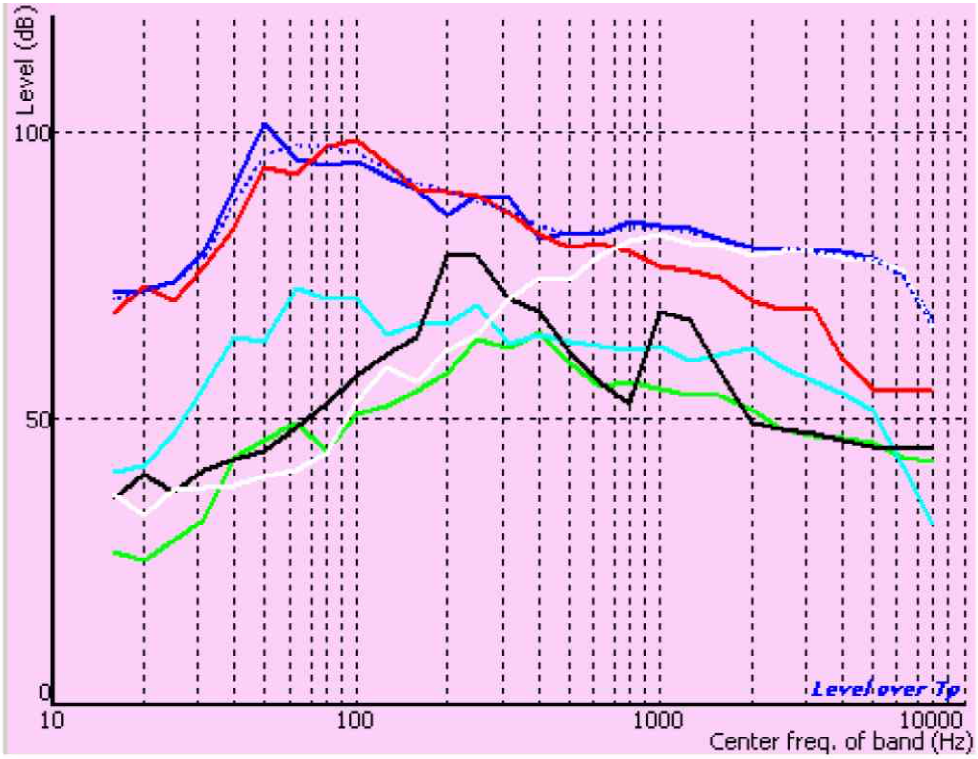


그림 2-3-201 프랑스 TGV 주파수별 소음원의 기여도 분석 결과

(바) 속도별 팬터그래프 소음 도출

① 팬터그래프 소음 도출 방법

팬터그래프의 소음(SPL_{Panto})을 도출하기 위하여 아래의 식과 같이 팬터그래프가 상승시의 음압($SPL_{Panto+Cab}$)의 소음과 팬터그래프 하강시의 음압(SPL_{Cab})의 차를 계산한다.

$$SPL_{Panto} = SPL_{Cab} + 10 \times \log_{10}\left[10^{\left(\frac{SPL_{Panto+Cab} - SPL_{Cab}}{10}\right)} - 1\right]$$

② 팬터그래프 소음 도출 결과

팬터그래프의 소음(=음압)값은 아래의 표에 정리되어 있다. 아래에서 보이는 바와 같이 속도가 증가함에 따라 팬터그래프 소음의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 다만 350 km/h 주행 시는 팬터그래프 높이에서 측정이 되었고, 330 km/h 주행 시는 선로에서 1m 높이에서 측정이 되어 다소 팬터그래프 소음이 낮게 측정되었을 가능성도 있다.

표 HEMU-430x 속도별 팬터그래프 소음 도출 결과

	350 km/h (6 m)	330 km/h 1st section (5m)	330 km/h 2nd section (5m)
$SPL_{Panto+Cab}$	104.00 [dBA]	99.45 [dBA]	97.65 [dBA]
SPL_{Cab}	102.80 [dBA]	98.57 [dBA]	95.85 [dBA]
SPL_{Panto}	**97.83 [dBA]**	**92.08 [dBA]**	**92.96 [dBA]**

(2) 팬터그래프 실차소음과 풍동소음간 비교

(가) 1/2 스케일 측정결과와 비교

본 연구에서는 실차소음 측정결과와 풍동소음 측정결과의 비교를 통하여 그 연관성을 분석하고자 하였다. 실차소음 측정에 이용된 차량이 HEMU-430X이므로 가능한 동일한 조건에서 비교를 수행하고자 HEMU-430X 팬터그래프 1/2 모델을 이용한 개방형 풍동에서의 시험결과를 이용하였다. 이 시험결과는 차세대고속철도 기술개발사업 중 항우연의 수행한 '차세대고속철도 공력소음저감 형상설계 기술개발'과제의 최종보고서를 참조하였다. 이 풍동시험에서 40, 50, 55, 60 m/s의 유속으로 1/2 스케일 HEMU 팬터그래프에 대한 소음측정시험을 실시하였었다.



그림 2-3-202 1/2 팬터그래프 공력소음 측정 풍동시험

공력 소음 중 물체 후류의 와류에 의한 소음은 주파수 특성을 나타내는 Strouhal Number (St=fL/V)와 상사성이 있다. 따라서 1/2 축소모델을 사용한 풍동 시험결과 중 와류에 의한 소음은 속도에 비례하여 peak 주파수가 증가하는 경향이 나타다며, 실차(1:1 scale)의 경우 동일한 주파수 특성이 풍동 소음 시험풍속의 2배 주행속도에서 나타나게 된다. 다음 그림은 풍동시험을 통해서 측정된 소음의 1/3 옥타브 밴드 기준 마이크로폰 측정결과이다. 그림에서 보이는 것처럼 300 ~ 500 Hz대역 소음이 속도가 증가함에 따라 그 주파수 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 STN (Strouhal number, 스트롤수)의 증가에 따른 특성으로 와류에의한 소음특성이라고 추정할 수 있으며. 소음 어레이를 이용한 음장가시화 결과 400 Hz 이하에서는 팬헤드 및 팬터그래프 하부시스템에 의한 소음임을 알 수 있었다.

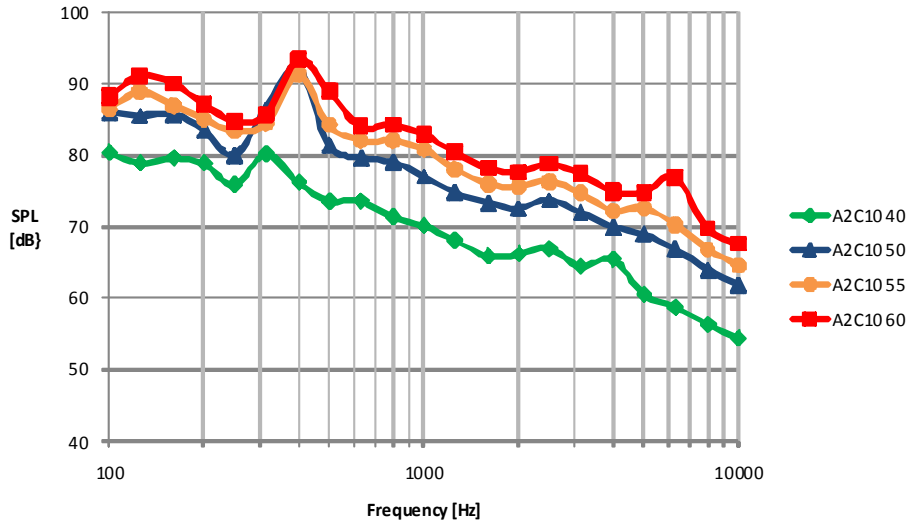


그림 2-3-203 1/2 스케일 팬터그래프 마이크로폰 측정결과(SPL)

특히 팬헤드의 L은 1/2 스케일에서 0.015m 로서 Re(Raynolds 수)가 105 ~ 106 영역에서 STN은 약 0.135의 값을 가지게 되고 이로부터 Vortex shedding)에 의한 주파수를 계산해 보면 위의 속도 범위에서 360 ~ 540 Hz 대역의 주파수를 가짐을 알 수 있다. 따라서 상기 주파수 특성은 팬헤드에 의한 특성임이 명확하다. 한편 1/2 스케일 모델인 점을 반영하여 실차에서의 350km/h 주행 시 팬터그래프 피크 소음은 300 ~ 400 Hz에서 발생할 것으로 예상된다. 그러나 팬터그래프에의한 소음의 크기(dB or dB(A))는 1/2 스케일 모델로는 그 비교에 한계가 있기 때문에 여기서는 그 피크 주파수만 비교를 하였다.

앞서 기술한 실차시험에서의 팬터그래프 상승/하강 시 주요 차이가 발생하는 주파수는 350 km/h 주행 시 315 ~ 500 Hz 이였고, 330 km/h 주행 시는 315 ~ 400 Hz 대역이었다. 이 때 팬터그래프로 유입되는 유속을 감안하여 팬터그래프 팬헤드에 대한 vortex shedding 주파수를 계산하면 (단, Strouhal number 0.135 가정) 350 km/h 주행 시 340 Hz, 330 km/h 주행 시 320 Hz 대역에서 팬헤드 소음이 나오게 된다. 즉 실차시험이나 Strouhal 수에 의한 이론적 계산이나 300 ~ 400 Hz 대역에서 팬터그래프 팬헤드에 의한 주소음이 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한 이 속도대역을 1/2 스케일 풍동시험 결과와 비교할 경우 풍동시험의 40m/s 시험이 350 km/h 실차시험과 동일한 조건임을 알 수 있다. 풍동시험에서 보이는 바와 같이 40m/s 유속 시 피크 주파수는 300 Hz에서 발생하고 있으며 이는 실차시험과 그 경향이 매우 유사하다고 판단할 수 있다. 따라서 팬터그래프 상승/하강에 따른 소음특성 비교는 팬터그래프 소음을 잘 분리할 수 있는 한 방법이 될 수 있다고 판단된다. 또한 반대로 이야기하면 풍동시험을 통하여 팬터그래프의 소음특성을 실차에 가깝게 파악이 가능하다. 또한 실차에서 보였던 1000 ~ 1250 Hz 대역소음은 풍동시험에서 관측되지 않는 것은 실차에서만 존재하는 팬터그래프 부근 Cavity의 영향인 것으로 판단된다.

(나) 항우연 폐쇄형 풍동 실제 팬터그래프 측정결과와 비교

본 연구에서는 실차소음 측정결과와 풍동소음 측정결과의 비교를 통하여 그 연관성을 분석하고자 하였다. 실차소음 측정에 이용된 차량이 HEMU-430X이므로 가능한 동일한 조건에서 비교를 수행하고자 HEMU-430X에 탑재된 실제 팬터그래프를 다음그림과 같이 또 다

른 공동연구기관인 항공우주연구원의 폐쇄형 풍동에 설치를 하여 속도별로 그 소음을 측정하였다. 실험 시 가장 유의할 점은 팬터그래프를 실제 운용환경과 최대한 유사하게 동작하도록 조절하는 것이다. 이를 위하여 팬터그래프의 상승을 위한 압축공기 투입 시 실차에서 사용되는 공압 레귤레이터를 이용하여 일정한 압력을 유지하도록 하였다. 또한 투입되는 압력값은 실차의 고속주행 시와 동일한 압력으로 설정하였으며, 팬헤드 높이는 레일바닥면에서부터의 고속선 높이인 5080mm 가 되도록 다음그림과 같이 4개의 와이어로프를 이용하여 조정한다. 또한 페어링에 의한 영향을 반영하기 위하여 다음그림과 같이 쐐기형의 팬터그래프 페어링 역시 설치하였다. 소음 측정 유속은 실제 차량의 속도의 80%에 해당하는 70 m/s, 80m/s, 90m/s 이다.

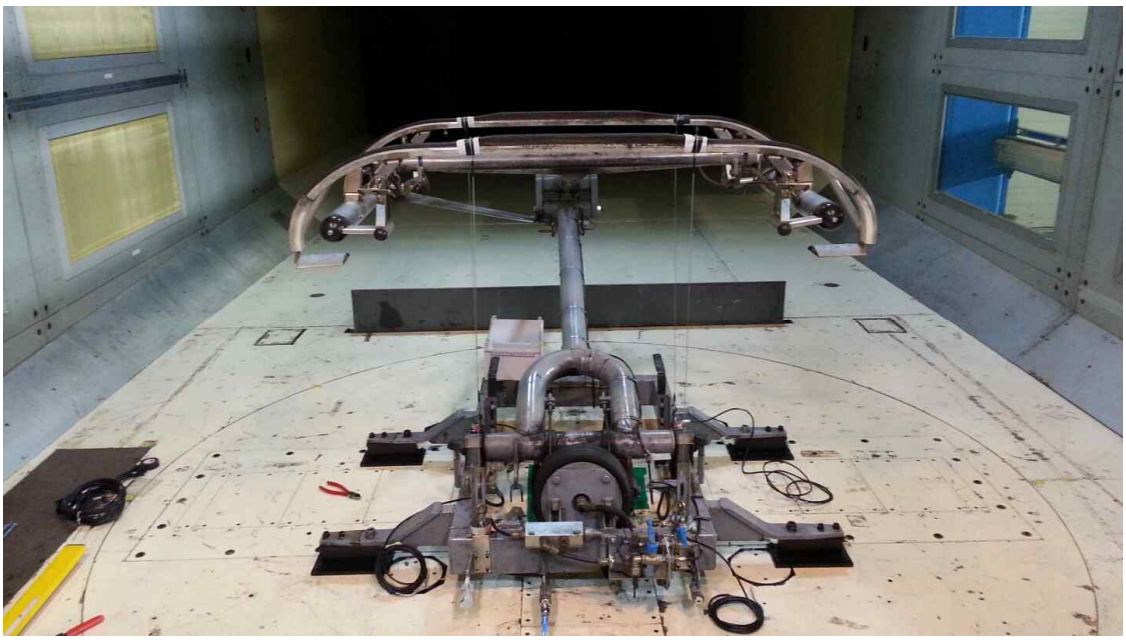


그림 2-3-204 항우연 폐쇄형 풍동 실제 팬터그래프 소음 측정시험

다음 그림은 실제 팬터그래프의 각 속도별에 따른 1/3 옥타브 밴드 풍동 소음 측정결과이다. 이 결과는 실차의 소음측정 결과 값과 비교를 위하여 측정거리(풍동소음측정 : 2 m, 실차소음측정 : 5 m)의 보정을 한 결과 값이다. 실제 팬터그래프의 폐쇄형 풍동소음 측정결과 풍속의 속도에 비례하여 피크 주파수가 증가하는 경향이 나타나고 있다(250 → 315 → 315 Hz). 이는 STN(스트롤수)의 증가에 따른 특성으로 와류에 의한 소음특성이라고 추정할 수 있으며 실제 팬헤드의 L값인 0.031m와 STN=0.135로부터 Vortex shedding)에 의한 주파수를 계산해보면 위의 속도 범위에서 305 ~ 390 Hz 대역의 주파수를 가짐을 알 수 있다. 따라서 상기 주파수 특성은 팬헤드에 의한 특성임이 명확하다. 또한 앞선 1/2 팬터그래프 소음측정결과와 비교하였을 경우에도 유사한 경향을 보여주고 있으므로, 실차 팬터그래프의 주소음원은 집전판임을 확인할 수 있다.

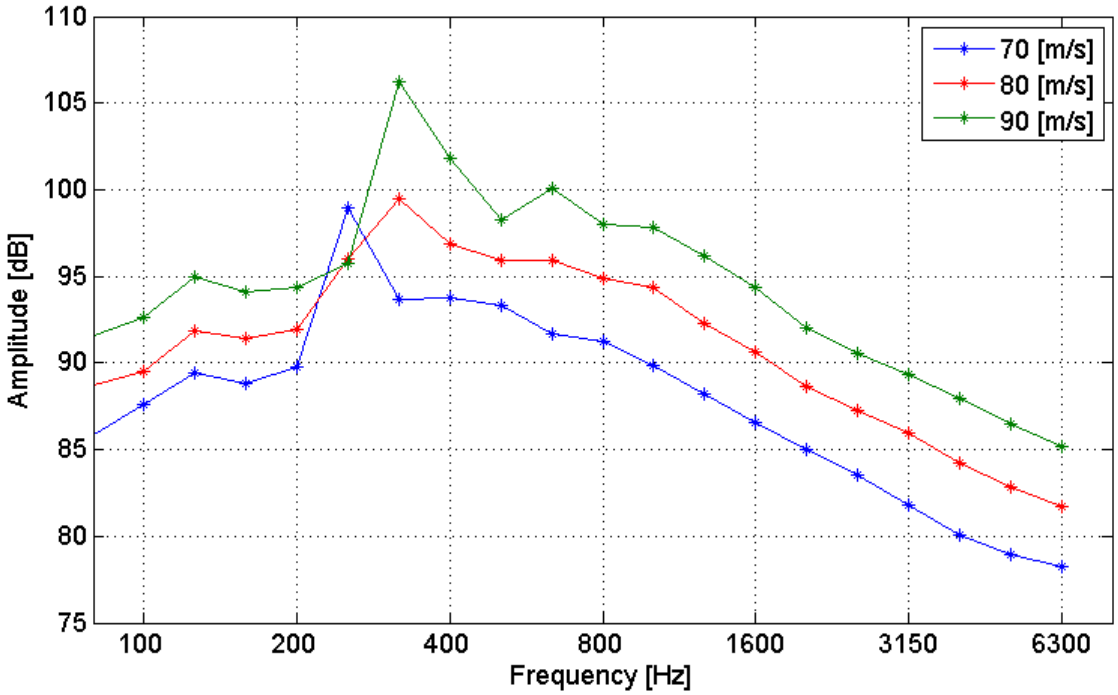


그림 2-3-205 실제 팬터그래프 풍동 공력소음 측정 결과

다음 그림은 실차와 풍동시험 측정 결과의 비교를 위하여 하나의 그래프로 도출을 하였다. 풍동소음과 비슷한 속도대역에서 검토를 위하여 상부경계층의 성장이 덜한 비상 팬터그래프 사용 시의 실차 팬터그래프 소음을 풍동소음 측정결과와 비교하였다. 두 결과 모두 315Hz 대역에서 피크주파수를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 특히 앞서 논의된 바와 같이 이 315Hz대역은 팬터그래프를 하강시켰을 때 가장 큰 소음의 차이를 보여주는 주파수이다. 또한 실차 팬터그래프 상승/하강 비교 시 주요 차이가 발생하는 주파수는 330 ~ 350 km/h 주행 시 전체적으로 315 ~ 400 Hz 대역이었다는 점에서 풍동소음의 측정결과와 매우 잘 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 풍동시험을 통하여 실제 팬터그래프의 소음 특성을 주파수 측면에서 매우 잘 평가할 수 있다고 판단된다. 또한 실차 팬터그래프 상승/하강 소음 측정 시 또 다른 차이가 발생한 주파수인 1000~1250Hz는 풍동시험에서는 관측되지 않는다. 이는 해당주파수가 팬터그래프 주위의 Cavity에 의한 소음이라는 주장이라는 결론을 뒷받침한다고 판단된다.

한편 실차소음 측정결과와 풍동소음 측정결과간의 소음크기의 직접적인 비교는 어렵다고 판단된다. 그 이유는 실차에서의 팬터그래프 소음은 상승/하강 시 차이가나는 부분만이 의미가 있기 때문이다. 실제로 팬터그래프 상승/하강 시 주요 차이가 나는 부분은 300 ~ 400 Hz 대역과 1000~1250 Hz 대역이고 나머지 부분은 큰 차이를 볼 수 없기 때문이다. 즉, 상기 주파수 이외의 대역은 차량자체의 소음특성 기여분이라고 보는 것이 타당하다. 그러나 현재 국내연구 중 실차에서의 팬터그래프 소음과 풍동소음의 특성을 비교분석한 연구나 데이터베이스는 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에 의한 실차 주행 시 팬터그래프 상승/하강 비교 소음 데이터와 풍동시험 소음데이터는 향후 관련 연구를 위한 귀중한 데이터베이스로의 활용이 가능하다고 판단된다. 다음 페이지의 표는 330 ~ 350 km/h 까지의 실차 팬터그래프 상승/하강 시 소음데이터 및 이를 70m/s ~ 90m/s 까지의 실제 팬터그래프에 대한 풍동소음 데이터와 비교분석한 데이터베이스이다. 또한 이 데이터베이스는 다양한 차량 및 속도대역에 대한 팬터그래프 상승/하강 시험 및 풍동시험을 병행하여 그 데이터베이스를 더욱 풍성하게 한다면 향후 초고속열차 개발을 위한 연구 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

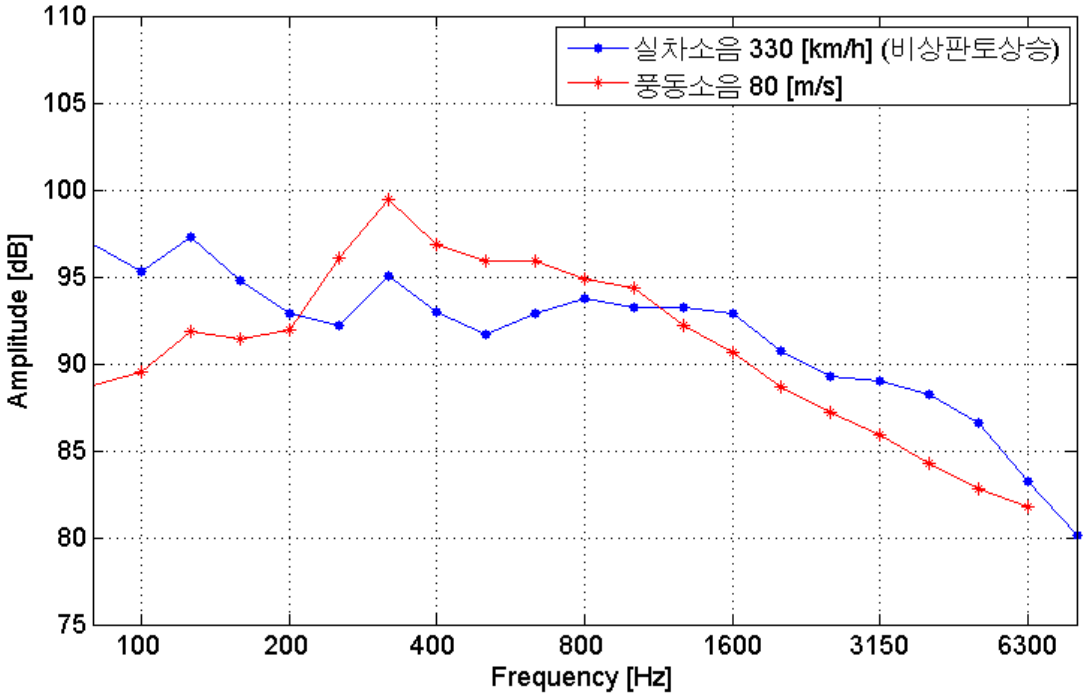


그림 2-3-206 실차/풍동 소음도

표 속도별 팬터그래프 실차소음 측정결과와 풍동소음 측정결과간 비교 데이터베이스

	Frequency [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
실차소음 [dBA]	비상판토상승 330 km/h	74.2	76.2	77.2	79.6	79.9	86.9	87.7	85.8	89.9	92.6	93.1	93.3	93.7	91.3	90.4	89.8	88.7	86.2	81.5	74.8
	판토하강 330 km/h	68.6	75.7	76.2	76.1	78.8	85.0	86.7	87.4	89.6	92.2	92.4	92.1	91.0	91.1	90.6	89.3	88.8	88.2	82.9	75.8
	정상판토상승 330 km/h	71.0	76.4	75.9	73.8	79.7	84.1	87.9	85.6	89.5	91.1	92.1	92.5	91.1	90.1	89.7	89.4	87.0	86.8	81.7	74.4
	판토하강 330 km/h	71.3	74.1	77.1	75.2	79.6	82.8	84.3	86.9	89.5	91.1	90.9	90.2	91.4	90.2	88.2	88.3	86.4	83.0	78.2	72.7
	정상판토상승 350 km/h	78.0	80.0	81.7	82.7	85.0	89.0	91.5	93.5	95.1	92.1	92.7	90.8	91.9	92.1	93.1	90.8	90.4	–	–	–
	판토하강 350 km/h	78.0	80.1	82.0	83.4	85.4	88.3	90.5	92.6	94.5	91.6	91.4	90.0	92.5	93.4	92.4	90.0	89.3	–	–	–
실차소음 [dB]	비상판토상승 330 km/h	95.3	97.3	94.8	92.9	92.2	95.0	93.0	91.7	92.9	93.7	93.2	93.2	92.9	90.8	89.2	89.0	88.3	86.6	83.2	80.1
	판토하강 330 km/h	93.0	94.1	90.2	92.2	91.1	92.8	92.3	91.9	91.8	92.8	92.5	92.2	90.5	90.2	89.7	88.4	88.3	88.4	84.5	80.7
	정상판토상승 330 km/h	90.7	92.9	89.1	85.1	88.6	90.5	92.7	88.9	91.5	91.8	92.1	91.9	90.2	89.0	88.5	88.3	86.2	86.7	82.7	78.2
	판토하강 330 km/h	90.5	89.9	90.3	86.6	87.9	89.3	89.0	90.3	91.4	91.9	90.9	89.6	90.4	89.0	87.0	87.1	85.5	82.8	79.3	76.6
	정상판토상승 350 km/h	96.3	95.7	95.2	93.5	92.9	94.4	95.7	96.6	96.8	92.8	92.7	90.1	90.8	90.9	91.9	89.9	90.3	–	–	–
	판토하강 350 km/h	95.9	95.3	94.7	94.1	93.8	94.4	94.9	95.6	96.1	92.3	91.3	89.4	91.4	92.2	91.2	89.0	89.2	–	–	–
풍동소음 [dB]	판토상승 70 m/s	87.6	89.4	88.8	89.7	98.9	93.6	93.7	93.3	91.6	91.2	89.8	88.2	86.5	85.0	83.5	81.8	80.0	78.9	78.2	–
	판토상승 80 m/s	89.5	91.8	91.4	91.9	96.0	99.4	96.8	95.9	95.9	94.8	94.3	92.2	90.6	88.6	87.2	85.9	84.2	82.8	81.7	–
	판토상승 90 m/s	92.6	94.9	94.1	94.3	95.7	106.2	101.8	98.2	100.0	98.0	97.8	96.1	94.3	92.0	90.5	89.3	87.9	86.4	85.1	–

나. 최적설계 팬터그래프의 집전성능 및 동특성 해석

(1) 개요

본 연구에서는 주관연구기관이 전산해석을 통해서 도출한 최적설계 팬터그래프의 집전성능 및 동특성을 해석하여 그 적절성을 평가하였다.

팬터그래프의 집전성능 및 동특성은 전차선로와 팬터그래프 사이의 기계적 상호작용을 해석하여 예측할 수 있다. 해석에 사용하는 프로그램은 차세대고속철도 기술개발 사업 및 HEMU-430x 시운전을 통해서 그 성능이 검증 된 아주대학교의 CPDYN이라는 코드이다. 이 코드의 장점은 대변형 탄성 다물체시스템 동력학을 적용했다는 점이다. 일반적으로 대변형 탄성 다물체시스템은 매우 유연한 케이블이나 로프, 와이어 등과 같은 매우 유연한 연속체를 포함하게 되는데 기존의 선형 탄성 다물체동역학 방법으로는 이러한 대변형 탄성체를 포함하는 시스템의 해석에는 한계를 가지고 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위하여 제안된 이론인 절대절점좌표계를 이용하여 본 프로그램은 더욱 정확성을 향상시켰다. 한편 이 프로그램은 HEMU-430x의 300km/h ~ 420 km/h 주행 시 계측된 팬터그래프 접촉력 특성과 해석결과를 비교하였을 때 그 경향을 매우 잘 예측하였고, EN50318 검증 예시모델에 대한 해석결과도 비교적 잘 일치한다. 따라서 본 연구에서는 상기 코드를 이용하여 최적설계 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 그리고 전차선 압상량 변위를 예측하였다.

주관연구기관이 제시한 최적설계 팬터그래프는 소음 및 공력을 감소시키기 위하여 팬헤드 및 Arm등을 유선형으로 설계하였다. 그 결과 팬헤드 및 Arm 의 질량변화가 발생하게 되고 이는 집전성능의 차이를 발생시킬 수 있기 때문에 반드시 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 팬헤드 및 Arm의 질량의 변화 시 팬터그래프 동특성 및 전차선 압상량 변위에 대한 해석을 수행하였다. 주행속도는 300~400km/h의 범위를 고려하였으며, 전차선 장력은 20, 23, 26kN을, 경간형식은 s40, s50, n63을 고려하였다. 팬헤드의 질량은 5.9 kg를 기본모델로 하여 7.34 kg, 7.7 kg까지 증가시켜 해석을 수행하였고, Arm의 질량은 17.5kg을 기본으로 하여 25.7 kg, 28.3 kg으로 증가시킨 경우와 16.9kg으로 감소시킨 경우도 고려하였다. 다만 유선형 형상으로 인한 공력의 Dynamic 특성은 동력학 모델인 해석프로그램의 특성상 반영할 수 없고, 공력에 의해서 발생하는 정적인 양력만을 팬터그래프에 대한 정적압상력 항목에 반영하였다. 다만 양력이 너무 크게 되면 평균접촉력 기준을 넘어서기 때문에, 정적압상력이 최대 180 N이 되지 않도록 조절하는 Semi-acitive 시스템이 적용되어 있다고 가정하였다. 실제로 CX 팬터그래프를 사용하는 KTX-산천이나 유진기공 팬터그래플 사용하는 HEMU-430x에는 속도에 따라 일정한 평균접촉력을 유지할 수 있도록 Semi-active장치가 설치되어 있다.

(2) 해석 프로그램

① 해석 프로그램의 구조

그린 2-3-207은 본 연구에서 사용된 집전성능 해석 프로그램의 구조도이다. 가선계-팬터그래프 동적 상호작용 해석 프로그램의 해석과정은 다음과 같다. 먼저 전처리기(pre-processor)에서는 해석 시간, 적분 관련 환경 변수들을 설정하고 해석 모델의 정보를 입력 받는다. 해석 모델의 정보는 질량, 관성모멘트, 강성계수, 댐핑계수, 탄성계수 등과 같은 가선계와 팬터그래프의 기본적인 물성치에서 부터 경간길이, 경간 당 행거선 개수, 행거선 위치, 장력(tension), 압상력(uplift force), 주행 속도(vehicle speed) 등 모델을 구성하는 모든 정보를 포함한다. 입력받은 정보를 바탕으로 강체 및 가선의 유한요소 모델의 일반좌표와 초기조건을 생성해 준다. 해석기(solver)에서는 앞 절에서 제시한 것과 같이 질량 행렬, 힘 벡터, 구속식의 자코비안과 가속도 우변항 등을 생성하고 이들을 조합하여 전체 시스템 운동방정식을 만든다. 운동방정식으로부터 추출한 가속도를 적분하여 최종적으로 변위와 속도를 얻어내고 이 과정을 최종 적분시간까지 수행하게 된다. 해석이 완료된 후 후처리기(post-processor)에서는 해석 결과로 산출된 가선과 팬터그래프 사이의 접촉력 등을 필터링 및 통계처리하여 제시하고 관련된 그래프를 출력해준다. 본 해석 프로그램은 크게 가선의 중력 처짐에 따른 사전이도 현상을 구현하는 모드와 팬터그래프와 상호작용하며 접촉력 등을 산출하는 주행 모드로 분리되어 있어, 전체 해석과정을 일괄적으로 처리하면서 발생하는 비효율성을 최소화하였다. 즉, 가선의 사전이도 현상 구현은 동일한 설계의 가선의 경우 단 1회만 실시하고 이후로는 저장된 초기위치를 사용하여 반복적인 초기 해석 수행과정을 최소화하였다.

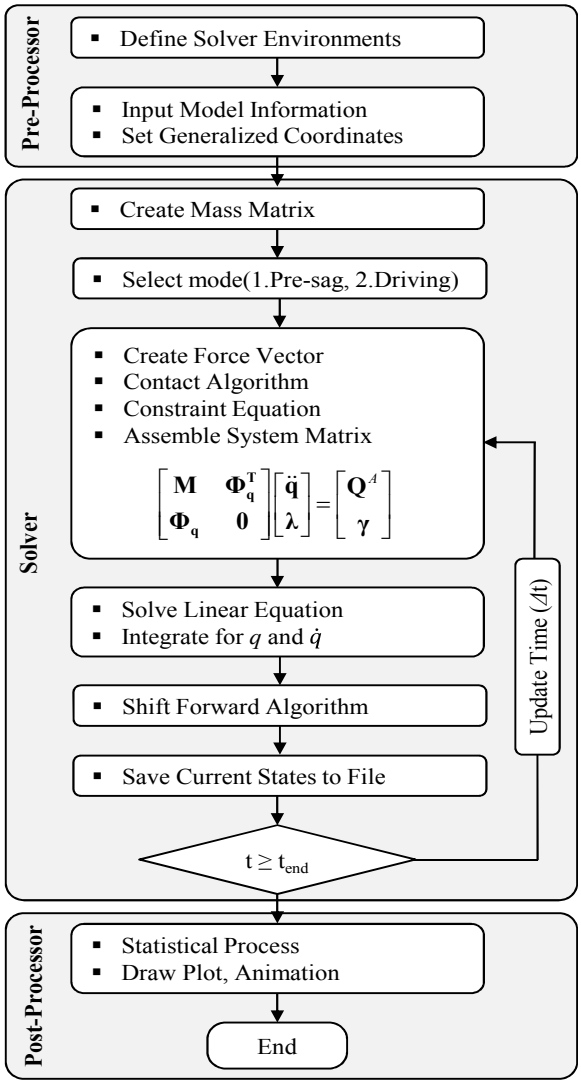


그림 2-3-207 해석 프로그램의 구조도

② 가선계-팬터그래프 동적 상호작용 해석 모델의 개요

그림 2-3-208는 가선과 팬터그래프로 구성된 동적 상호작용 해석 모델이다. 팬터그래프는 실제 기구학적 요소로 구성된 복잡한 구조의 모델 대신 질량, 스프링, 댐퍼, 기타 힘 요소로 구성된 2자유도 강체 모델로 구현하였다. 가선계는 크게 접촉선(contact wire)과 조가선(messenger wire), 다수의 행거선(dropper)로 구성되어 있다. 전차선은 팬터그래프와 접촉이라는 직접적인 상호작용을 통하여 철도차량에 전력을 공급하는 역할을 하고 있으며, 행거선는 전차선과 조가선을 상하로 연결시켜 접촉선의 하중을 조가선에 분산 전달하는 역할을 한다. 1 경간에서 전차선의 양 끝은 곡선지지금구(steady arm)로 지지되고 있으며, 조가선의 양 끝은 가동 브라켓(moving bracket)에 의하여 지지되고 있다. 곡선지지금구의 경우 실제 선로에서 가선의 편위(stagger)를 주는 역할을 하여 수직 방향으로는 저항력이 작기 때문에 강성이 상대적으로 작은 스프링으로 모델링할 수 있으며, 가동 브라켓의 경우 가선 전체를 지지하는 역할을 하기 때문에 강성이 매우 큰 요소

로 고려할 수 있다. 전체 10 경간의 전차선과 조가선의 양 끝단은 가선의 처짐을 최소화하기 위하여 일정한 장력이 인가된다. 가선은 절대절점좌표 기반의 빔 요소를 이용하여 구현하였으며, 본 과업에서는 해석의 용이성을 위하여 가선의 편위, 팬터그래프의 집전판 roll motion 등의 횡방향 거동을 제외하고 종 방향(주행 방향)과 수직 방향(중력 방향)의 거동만 고려한 2차원 요소를 사용하였다. 전체 동적 상호작용 해석 모델에서 탄성 대변형 요소는 접촉선과 조가선으로 나뉘어지는데 접촉선은 팬터그래프의 집전판과 직접 상호작용하기 때문에 결과의 정확도를 향상하기 위하여 각 행거선 사이마다 3개의 유한요소를 사용하였고, 조가선은 해석의 효율성을 감안하여 상대적으로 적은 개수인 2개의 요소를 사용하여 각각 모델링 하였다. 접촉선과 조가선의 양 끝단에는 실제 시험선과 동일한 조건으로 일정한 장력이 인가되었으며, 경간 이음부에 위치하여 접촉선과 조가선을 각각 지지하는 곡선당김금구와 가동브라켓은 해당 절점에 스프링 힘 요소를 이용하여 지지하여 주었다. 행거선은 본래의 비선형 특성을 고려하여 압축 시에는 탄성력이 작용하지 않고 인장 시에만 강성이 100,000N/m인 탄성력이 작용하도록 구현하였다. 가선 모델은 중력의 영향을 고려하였으며, 실제 가선과 같이 가선의 설계 특성과 경간 대 처짐 비율(sag to span ratio)을 이용하여 경간 내에 행거선 길이를 각각 계산한 후 모델 상에 적용하여 정적 평형 위치를 얻은 후, 주행 해석 시 이를 적용하였다. 동적 상호작용을 예측에 있어 가장 중요한 부분이 접촉선과 팬터그래프 집전판의 접촉현상인데, 해석 모델 상에서 이는 크게 접촉점 탐색과 접촉력 계산 과정으로 나눌 수 있다. 본 프로그램에서는 접촉점 탐색을 위하여 접촉점이 항상 집전판과 동일한 진행 방향에 위치해 있다는 가정 하에 해당 지점의 대변형체 수직 변위를 접촉점으로 간주하였다. 접촉력 산출은 강체-대변형 체 간의 접촉 요소와 페널티 방법(penalty method)을 적용하여 각각 구현하였다. 기본적인 알고리즘은 접촉점과 팬터그래프 집전판에 침투량(δ, penetration)이 발생하였을 시, 일정 페널티 요소(penalty factor)에 비례한 힘을 산출해 주는 것으로 다음식과 같이 계산한다.

$$F_c = \begin{cases} 0, & if\ \delta < 0 \\ k_c\delta, & if\ \delta \geq 0 \end{cases}$$

여기서, Fc는 접촉력이며, kc는 페널티 요소, δ는 침투량이다. 해석 모델은 가선계-팬터그래프 동적 상호작용 해석에 관한 국제 규정인 EN 50318에 제시된 대로 각 가선 형식에 대하여 총 10경간을 구현하였다. 접촉력 해석 결과는 양 경간 끝단에서의 파동전파 효과로 인한 결과 왜곡 범위가 최소인 5, 6번째 경간의 해석 결과를 20Hz의 저역통과 필터(low pass filter)로 필터링하여 통계처리 하여 평가하게 된다.

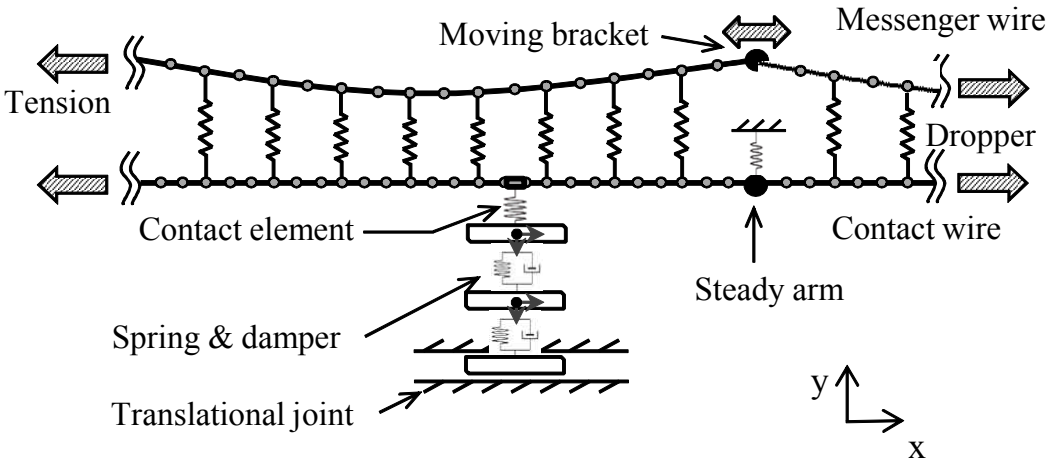
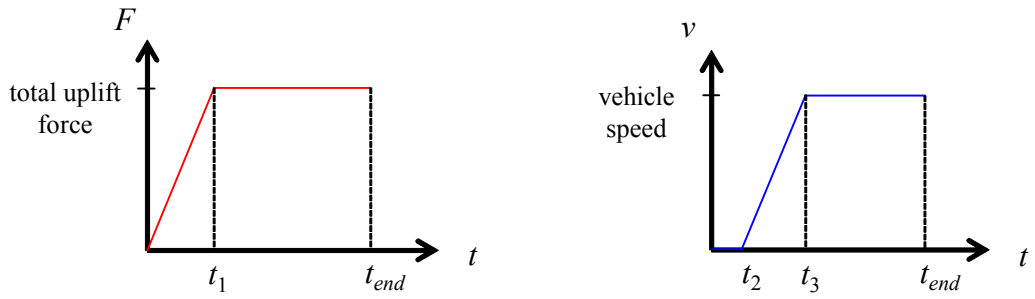


그림 2-3-208 가선계와 팬터그래프의 동적 상호작용 해석 모델

③ 주행 해석 과정 및 결과 후처리

앞에서 언급한 해석 모델을 이용한 주행 해석 과정은 다음과 같다. 먼저 저자유도 팬터그래프 강체 모델을 제외한 탄성 대변형 가선 모델을 이용하여 중력에 의한 가선의 목표 처짐량에 맞는 사전이도(presag) 해석을 수행한다. 이 때, 기본적으로 접촉선과 조가선의 양 끝단에는 장력이 인가되며, 원하는 처짐량을 얻기 위하여 1 경간 내에서 행거선의 길이를 각각 다르게 적용하여 준다. 이 때, 정적 평형 위치의 수렴점을 보다 빠르게 계산하기 위하여 artificial damping을 인가할 수도 있다. 일정 시간동안 가선의 평형 위치를 얻으면 이때의 절대절점좌표를 경간 형식, 인가된 장력별로 저장한다. 주행해석은 앞서 사전이도 해석을 통하여 얻는 가선의 정적 평형 위치를 초기조건으로 불러들여와 수행을 한다. 이때는 가선계 모델과 더불어 팬터그래프 모델을 포함하여 해석을 수행하며, 초기에는 팬터그래프에 압상력이 0이기 때문에 가선과의 접촉은 발생하지 않는다. 그림 2-3-209는 본 해석 모델의 총압상력 선도와 주행속도 선도로 초기값인 0부터 시작해서 일정 시간 후에 총압상력 및 목표 주행속도 및 압상력이 인가되도록 모델을 구성하였다. 초기 1~2번 째 경간을 지나면서 즉, t3초부터 정상적인 주행해석을 수행하여 접촉력 산출 및 결과 저장을 하게 된다.



(a) 총압상력 선도 (b) 주행속도 선도

그림 2-3-209 주행속도 및 총압상력 인가 선도

주행 해석이 완료된 후에는 접촉력 데이터를 국제규정 EN 50318등에 따라 20Hz의 저역통과필터(low pass filter)로 필터링 한 후 10경간 중 지지점에서의 파동반사 효과가 가장 미비한 5, 6번째 경간의 데이터를 대상으로 평균접촉력(Mean contact force, Fm), 접촉력의 표준편차(Standard deviation of contact force, σ), 통계적 최대 최소 접촉력(Statistical maximum/minimum contact force, Fm±3σ)를 산출하여 평가하게 된다.

(3) 해석모델 (팬터그래프 및 가선시스템)

(가) 팬터그래프 모델

실제 차량에 장착되는 팬터그래프는 다수의 링크와 조인트, 그 밖의 부속품들이 기구학적으로 연결되어 있는 형상이며, 매우 복잡한 구조로 이루어진 부품이지만, 해석모델에서는 동역학적 특성을 반영할 수 있는 모델이면 충분하므로 실제 시스템을 그림 2-3-210과 같은 수직방향의 병진 자유도를 갖는 2자유도의 질량-스프링-댐퍼 모델로 가정하여 모델링하였다. 실제 팬터그래프에 대한 동적 보정시험은 한국철도 기술연구원에서 수행 되었으며, 시험을 통하여 추정한 2자유도 팬터그래프 해석 모델의 제원은 제작사로부터 제공 받았다. 팬터그래프는 기본적으로 집전판(M1)과 하부의 프레임 등가질량(M2)으로 구성되어 있으며, 이들 간의 거동은 스프링(K1, K2), 댐퍼(C2)로 연결되어 상호작용하고 있다. 집전판과 Arm의 질량은 각각 초기(Base line) 5.9kg와 17.5kg가 적용되었으며, 공력 특성을 향상시키기 위해 변경된 팬터그래프 설계안의 질량은 다음 페이지 표에 제시되어 있다.

이 표에서 Case1은 주관연구기관에 의해서 제시된 초기 최적화 모델로서 유선형 집전판 및 Arm에 의한 질량증가를 반영하였다. 집전판 질량(M1)의 경우 순수 팬헤드 질량(4.8 kg)과 팬헤드를 연결해주는 서포트의 질량(1.1kg)으로 구성되어 있다. 이 때 유선형 집전판 설계 시 증가하는 단면적이 약 1.27 배이므로 Case1 의 M1 질량은 7.34kg이 된다. 또한 Arm은 속이 빈 관으로서 둘레길이의 변화만큼 질량이 변한다고 가정할 수 있다. 서울대에서 초기모델로 제시한 Arm의 둘레길이변화는 1.47배로서 Case1의 M2질량은 25.7kg이 된다. Case2는 Case1을 더욱 강화시킨 조건으로 팬헤드

의 질량은 1.4배로 7.7kg, Arm의 질량은 1.62배하여 28.3kg이다. Case3은 서울대에 의하여 제시된 최종모델로서 집전판의 질량은 Case1과 동일하고 Arm의 둘레길이가 251mm에서 244mm로 97%수준으로 감소하면서 Arm 질량 역시 97%수준인 16.9 kg으로 감소시킨 경우다.

상부 스프링의 경우 수직방향 인장/압축 변위에 대하여 0~34mm에서는 5,813N/m, 34~53mm에서는 12,340N/m의 비선형적인 특성을 가지며, 53mm 이상의 변위에서는 범프스톱 (bumpstop)으로 인하여 인장에 제약을 받는 특성을 가지고 있다. 댐퍼는 상부질량에 경우 0Ns/m, 하부 질량은 200Ns/m가 작용하고 있으며, 각 질량 사이에는 상부와 하부 각각 3N, 7N의 쿨롱마찰(coulomb friction)이 작용하고 있다. 쿨롱마찰은 마찰면의 면적 및 상대속도의 크기와는 무관하며, 수직력과 움직이는 방향과 관계된 요소로서 이를 모델상에 상세히 반영하였다. 강성, 댐핑, 마찰과 같은 팬터그래프의 기본 설계 제원 외에 팬터그래프에는 가선과의 접촉을 위한 압상력이 인가된다. 주행중에 작용하는 총 압상력은 팬터그래프의 하부 프레임에 인가되는 정적 압상력(static uplift force) 및 팬터그래프의 형상에 영향을 받으며 주행 속도와 밀접한 관련이 있는 공력(Aero dynamic lifting force)의 합으로 나타낼 수 있으며 이들은 해석 모델 상에서 하부 질량에 수직방향으로 총 압상력의 크기만큼 작용하는 것으로 고려되었다. 여기서 공력으로 인한 팬터그래프의 수직 상승력은 집전성능을 평가하는 데에 있어서 매우 중요한 사항인데, 특히 그 힘의 크기는 대략적으로 속도의 제곱에 비례하기 때문에 시속 300km/h 이상의 속도에서는 집전성능의 해석적 평가에 있어서 반드시 고려되어야 한다. 앞서 언급하였듯이 일반적으로 공력은 속도의 제곱에 비례하여 이차다항식 형태로 표현할 수 있으며, 전차선로가 개활지인지 터널인지 그리고 주행모드가 정상모드(Closed knee)인지 비상모드(Open knee)인지에 따라서, 팬터그래프 형상 변화에 따라 그 이차항의 계수가 달라지므로 이를 정확히 고려해 주어야 하나, 본 과업에서는 단순히 평균 접촉력을 총 압상력(정적 압상력+공력)으로 간주하고 모델에 초기조건으로 입력하였다. 팬터그래프 동역학 모델의 관점에서는 공력과 하부 프레임에 인가되는 압상력이 모두 총압상력이기 때문에 이와 같은 가정이 가능하다. 2자유도 팬터그래프 모델의 기계적 물성치는 표로 제시되어 있다.

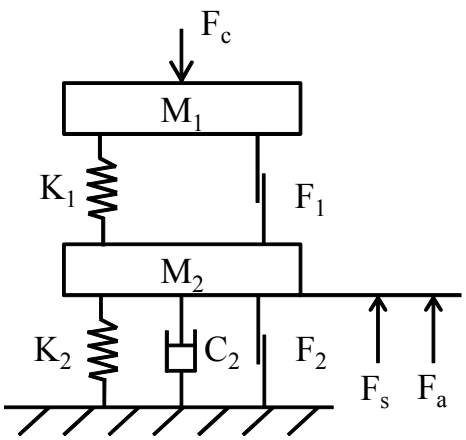


그림 2-3-210 고속열차 팬터그래프 2자유도 모델

표. 2자유도 팬터그래프 팬헤드 및 Arm 질량

Mass (kg)	Base line	Case 1	Case 2	Case3
Pan-head	5.9	7.34	7.7	7.34
Arm	17.5	25.7	28.3	16.9

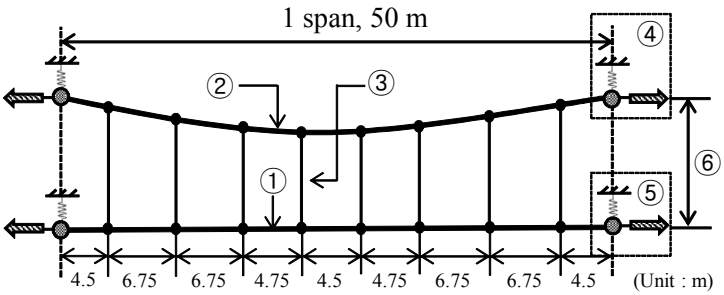
표. 2자유도 팬터그래프 기계적 물성치

	Stiffness (N/m)	Dampin g (Ns/m)	Coulomb Friction (N)
Upper	5,813 (0~34 mm) 12,340 (34~53 mm) ∞ (53~ mm)	-	3
Middle+Lo w	1	200(하강) -(상승)	7

(나) 고속선 가선계 모델

① 가선계 설계 제원

본 연구에서 적용된 전차선로 모델은 HEMU-430X의 증속 시운전 구간이었던 경부 고속선 선로(2단계 구간)이다. 경부 고속선의 가선 형식은 선로 내 설치 빈도가 가장 높은 경간형식인 s50(경간길이: 50m)를 중심으로 다양한 경간에서의 동적 상호작용을 예측하기 위하여 추가적으로 s40(경간길이: 40m)과 n63(경간길이: 63m)를 채택하여 모델링하였다. 경부 고속선의 가선형식은 모두 단순가선(simple catenary) 형태이며, 그 중 경간 형식 s50에 대하여 1 경간(span)의 모습은 그림 175과 같다. 해석 모델에서는 총 10경간을 고려하여 모델링하였다. 가선에 인가된 장력은 표에 나타나 있으며, 조가선 양 끝단에 14kN, 접촉선은 20kN, 23kN, 26kN을 인가하였다. 가고(emcumbrance)는 1.4m이며, 경간 내에서 드로퍼간의 간격은 표에 제시되어 있다. 추가적으로 해석 모델상에 적용된 전차선과 조가선의 기계적 물성치 역시 표에 나타내었다.



① : Contact wire – Initial tension
② : Messenger wire – Initial tension
③ : Dropper – Tension only spring (50 kN/m)
④ : Supporting bracket – Ground spring (1 MN/m)
⑤ : Steady arm – Ground spring (213 N/m)
⑥ : Encumbrance (1.4 m)

그림 2-3-211 가선계 설계 제원(s50)

표. 접촉선과 조가선에 인가된 장력

	tension information
Messenger wire	14kN
Contact wire	20kN, 23kN, 26kN

표. 각 경간 형식별 행거선 간격

Span type	Length (m)	Dropper number									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Distance between dropper (m)									
Gyeongbu high speed line											
s40	40	4.5	6.75	6.5	4.5	6.5	6.75	4.5	-	-	-
s50	50	4.5	6.75	6.75	4.75	4.5	4.75	6.75	6.75	4.5	-
n63	63	4.5	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	4.5

표. 가선계 기계적 물성치

Component	Sectional area	Elastic modulus	Mass density
Messenger wire	65.49 mm^2	110 GPa	0.605 kg/m
Contact wire	150 mm^2	180 GPa	1.334 kg/m

② 사전이도(pre-sag) 현상 구현

1) 행거선 길이 계산 공식

가선은 가늘고 길이가 길기 때문에 중력에 의한 처짐이 발생되게 된다. 하지만 안정된 집전성능을 확보하기 위해서는 전차선의 처짐량이 일정 수준을 유지하는 것이 바람직하다. 이 때문에 조가선과 행거선이 전차선의 하중을 지지하도록 되어있다. 전차선의 sag량은 행거선의 길이에 따라 달라지게 되며, 접촉력 변동에 영향을 미치기 때문에 해석 모델 상에서 이를 구현하는 것은 매우 중요하다. 사전이도가 주어지는 n개의 행거선을 가진 일반적인 전차선로에 대한 드로퍼 길이 계산 공식은 다음과 같다.

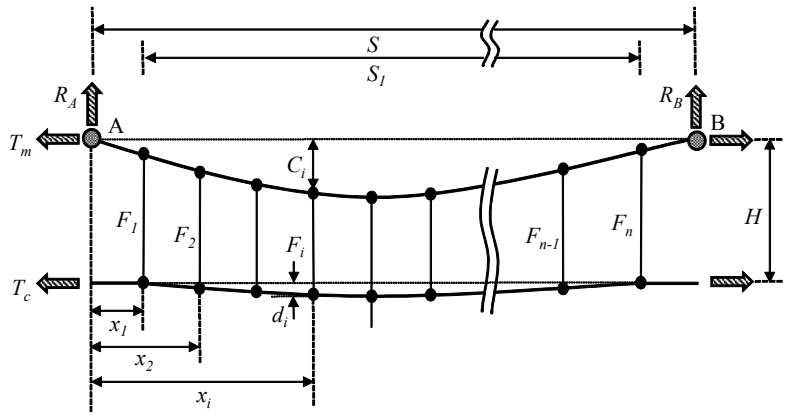


그림 2-3-212 단순 가선계 수학적 모델

아래에서 제시하는 공식은 양단 전주에서의 가고 및 전차선의 높이가 같을 때에 적용 가능하다. 또한 여기서는 애자와 같은 집중질량의 설비가 가설되어 있지 않은 것으로 가정하며, 경간의 설정은 경간 중앙에 대하여 대칭인 것으로 가정한다. 그림 2-3-212은 일반적인 전차선로의 수학적 모델이다. 먼저 전차선 sag는 사전 이도(pre-sag) 값인데 대부분의 경우 사전 이도는 첫 번째 드로퍼와 마지막 드로퍼 사이에만 주어지므로 이 경우는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$d_i = \frac{w_c}{2T}(x_i - x_1)(S_1 - x_i + x_1)$$

여기서, di는 i번째 드로퍼의 사전이도이며, xi는 수평거리, w는 단위길이당 무게를 나타낸다. 소첨자 c는 접촉선을 의미한다. 또한, T와 S1는 가선에 인가되는 장력과 사전이도가 주어지는 구간을 각각 나타낸다. 각 지지점에서의 행거선의 길이는 각 행거선에서의 지지하중 및 지지점에서의 반력, 모멘트 평형 방정식을 통해서 구할 수 있으며, 자세한 유도과정은 생략한다. 드로퍼 길이(li) = 가고(E) - 조가선 이도(ci) + 전차선 사전이도(di)를 적용하면 드로퍼 길이를 구하는 일반식을 얻을 수 있다.

$$l_i = E_1 - \frac{1}{T_m}\left(R_A x_i - \frac{w_m x_i^{\,2}}{2} - \sum_{k=1}^{i-1} F_k (x_i - x_k) \right) + \frac{4 d_c (x_i - x_1)(S_1 - x_i + x_1)}{S_1^2}$$

여기서, RA는 지지점 A에서의 반력, Fk는 k번째 행거선에서의 하중이며, 소첨자 m은 조가선을 의미한다.

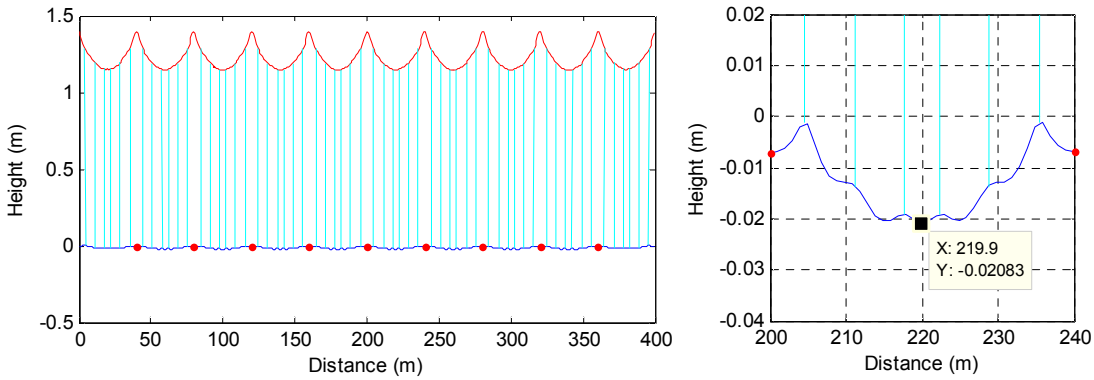
2) 전차선 사전이도 현상 구현

위에서 얻은 일반식과 가선의 설계 제원을 이용하여 경부 고속선의 행거선 길이를 다음 표와 같이 계산하였다. 행거선 길이는 인가된 장력에 따라 변화하기 때문에 해석 모델 상에 인가된 장력에 따라 행거선 길이를 제시하였다. 경간 대 처짐량 비율(sag to span ratio)은 각 전차선로의 설계 제원에 따라 1:2000으로 적용하였다.

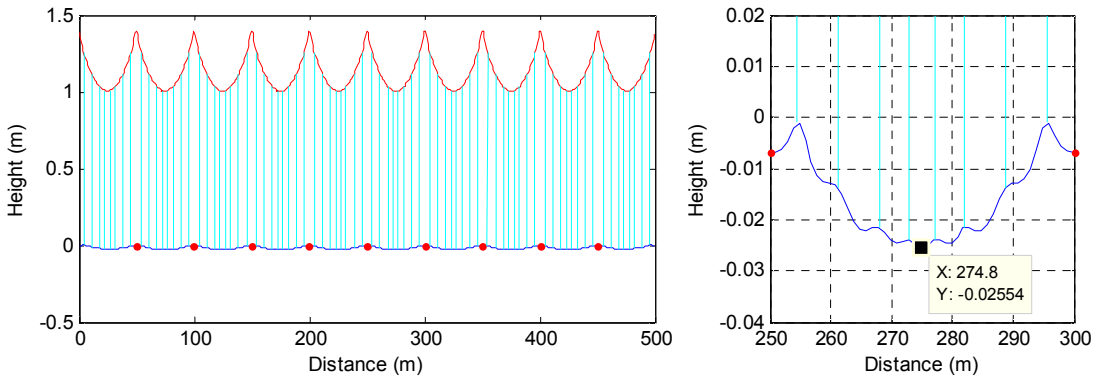
표 6 행거선 길이 계산 결과

Span type	T_c(kN)	Dropper number								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gyeongbu high speed line(sag to span ratio: 1:2000)										
s40	20	1.2810	1.2019	1.1673	1.1673	1.2019	1.2810	-	-	-
	23	1.2810	1.2049	1.1715	1.1715	1.2049	1.2810	-	-	-
	26	1.281	1.2078	1.1757	1.1757	1.2078	1.281	-	-	-
s50	20	1.2501	1.1249	1.049	1.0251	1.0251	1.049	1.1249	1.2501	-
	23	1.2501	1.1279	1.0538	1.0305	1.0305	1.0538	1.1279	1.2501	-
	26	1.2501	1.1309	1.0585	1.0358	1.0358	1.0585	1.1309	1.2501	-
n63	20	1.2102	1.0253	0.8932	0.814	0.7875	0.814	0.8932	1.0253	1.2102
	23	1.2102	1.0283	0.8983	0.8203	0.7943	0.8203	0.8983	1.0283	1.2102
	26	1.2102	1.0312	0.9033	0.8266	0.801	0.8266	0.9033	1.0312	1.2102

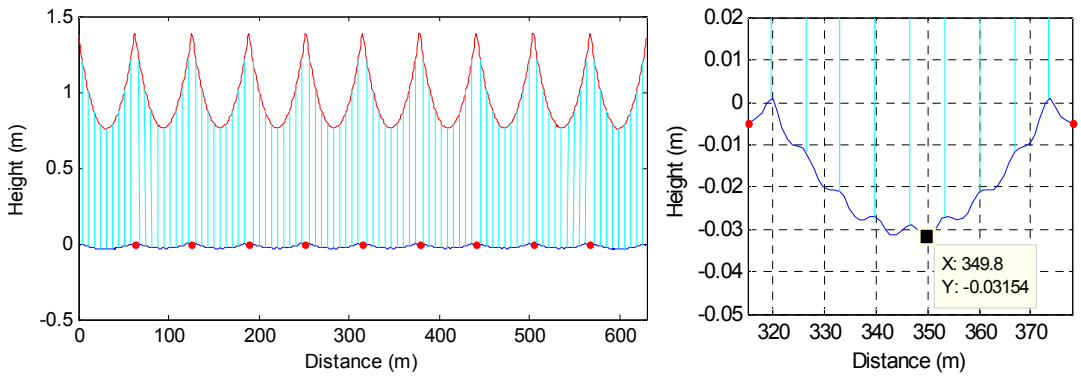
위에서 얻어진 행거선 길이를 모델상에 적용하여 사전이도 현상을 구현하였다. 10경간에 대하여 가선계에 정적평형위치는 그림2-3-213 (a)~(c)와 같다. 좌측 그림은 전체 10경간에 대한 모습이며, 우측 그림은 각 경간 형식에 대하여 6번째 경간의 접촉선을 확대한 그림이다. 전 경간 형식에 대하여 약간의 오차는 발생하지만 경부 고속선은 sag to span ratio가 1:2000을 만족하는 desired sag와 유사한 값을 얻을 수 있었다. 이로써 고속선 가선계-팬터그래프 동적 상호작용 해석을 위한 사전 작업이 완료 되었다.



(a) s40 (desired sag: 0.02m)



(b) s50 (desired sag: 0.025m)

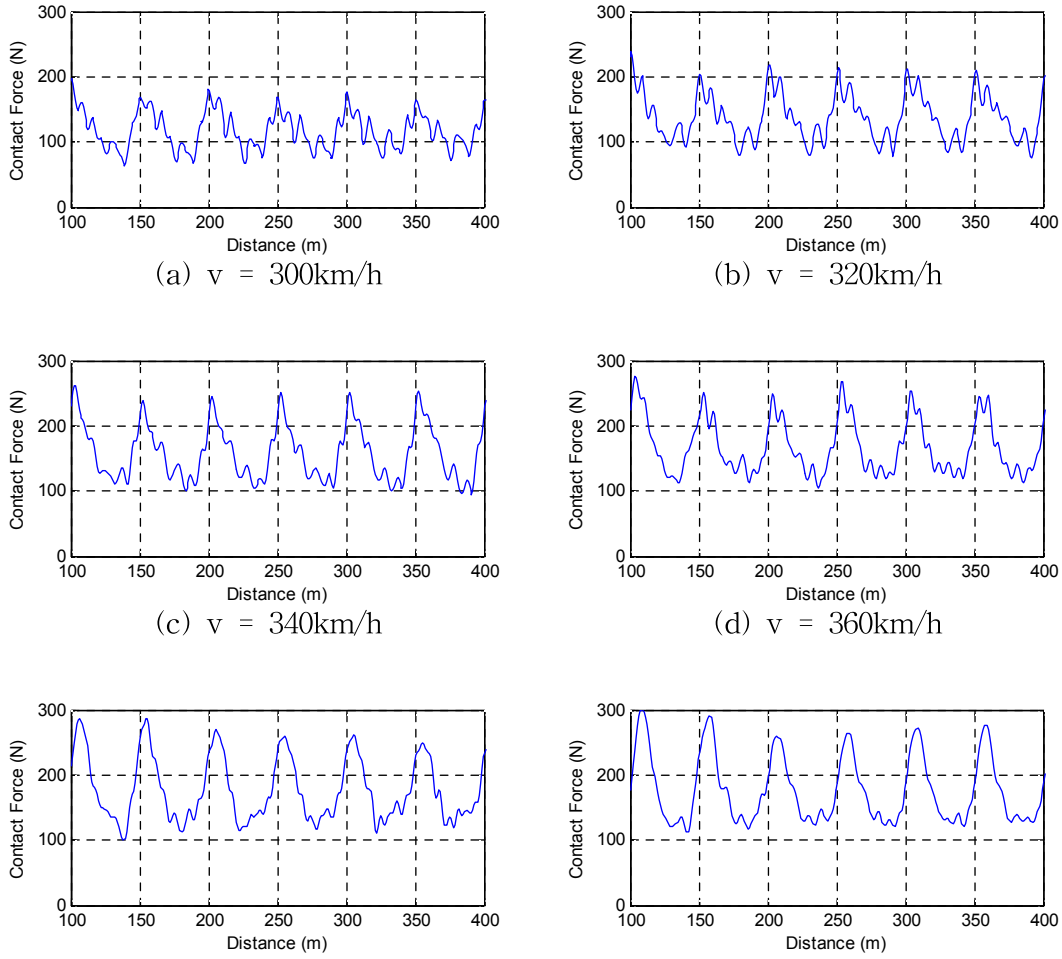


(c) n63 (desired sag: 0.0315m)

그림 2-3-213 각 경간 형식에 따른 사전 이도

(다) 해석결과 예시

Base model에 대해서 전차선 장력 23kN 및 경간 50m 구간에서 300km/h ~ 400 km/h까지 접촉력 및 전차선 변위를 해석하였다. 그림 2-3-214은 각 주행 속도에서의 가선계-팬터그래프 접촉력 해석 결과를 보여준다. 결과에서 보여지는 바와 같이 경간 50m에 따라 주기적인 접촉력의 변동을 볼 수 있으며, 이 결과를 통계적으로 처리하면 평균접촉력 및 접촉력 표준편차를 계산할 수 있고, 이를 통하여 통계적 최대/최소 접촉력을 평가할 수 있다.



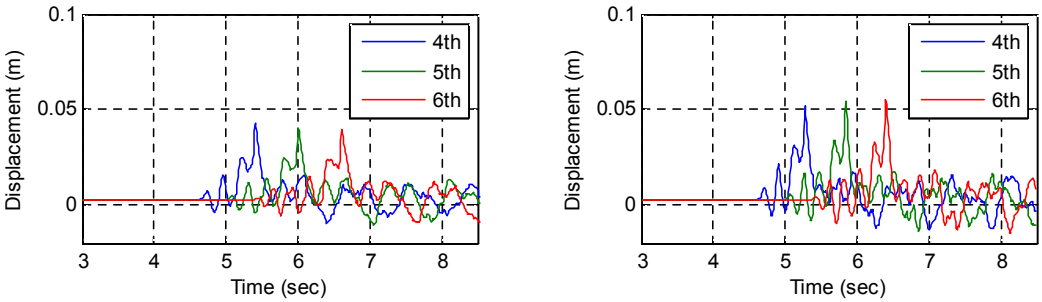
(a) v = 300km/h (b) v = 320km/h

(c) v = 340km/h (d) v = 360km/h

(e) v = 380km/h (f) v = 400km/h

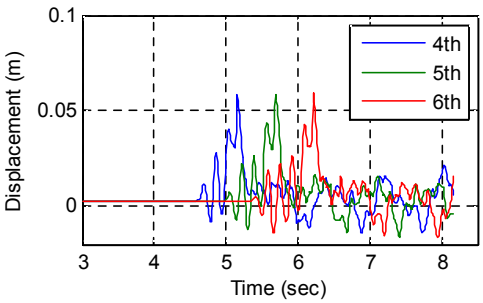
그림 2-3-214 접촉력 해석 결과 예시

한편, 그림 2-3-215은 각 주행속도의 해석 결과에서 10 경간 중 4, 5, 6번째 곡선당김금구의 수직방향 변화를 보여준다. 아래 결과를 활용하여 곡선당김금구 수직방향 변위의 최대값이 200mm 이하를 만족하여야 한다는 국내 규정의 만족여부를 판단할 수 있다. 해석 최소 주행속도 300km/h일 때 곡선당김금구의 최대 변위가 약 40 mm, 해석 최대 주행속도 400km/h일 때 최대 변위 약 80mm를 확인할 수 있다. 이는 해석 모델의 곡선당김금구의 강성과 관련되어 있다.

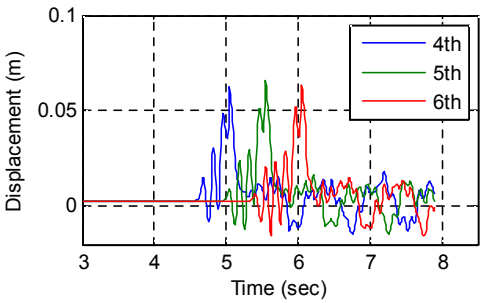


(a) v = 300km/h

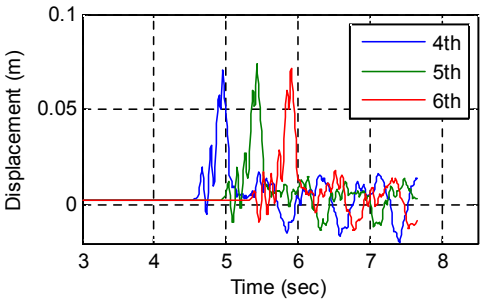
(b) v = 320km/h



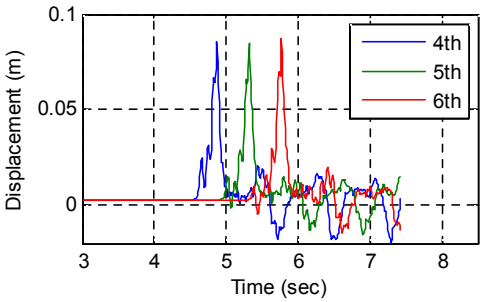
(c) v = 340km/h



(d) v = 360km/h



(e) v = 380km/h



(f) v = 400km/h

그림2-3-215 전차선 변위 해석결과 예시

(4) 해석결과

(가) 상세 해석 조건

팬터그래프를 구성하는 팬헤드와 암 모두의 질량 변경에 따른 동특성 변화를 파악하였다. 주행속도는 300~400km/h의 범위를 고려하였으며, 전차선 장력은 20, 23, 26kN을, 경간형식은 s40, s50, n63을 고려하였다. 암의 질량은 기존 팬터그래프의 제원과 앞에서 제시한 Case1, Case2와 Case3의 제원을 사용하였다. 상세한 해석 조건은 아래와 같다.

- 주행속도: 300, 320, 340, 360, 380, 400 (km/h)
- 총압상력: 120, 140, 160, 170, 180, 180 (N)
- 전차선 장력: 20, 23, 26 (kN)
- 팬터그래프 팬헤드 질량: 5.9, 7.34, 7.7. 7.34 (kg)
- 팬터그래프 암 질량: 17.5, 25.7, 28.3, 16.9 (kg)
- 경간 형식: s40, s50, n63

(나) 팬터그래프 동특성 및 집전성능 해석결과

위 조건에서 팬터그래프 팬헤드와 암 질량 동시 변화에 따라 Case1, Case2, Case3의 팬터그래프에 대하여 각 54회(속도 조건 6, 장력 조건 3, 경간형식 조건 3) 씩 총 162회의 해석을 추가적으로 수행하였다. 그림 2-3-188는 각 전차선 장력 조건과 경간 길이 조건에 대하여 판토그래프 설계 제원 변화에 대한 접촉력의 표준편차를 비교한 그래프이다. 아래 그림의 9개의 그래프에서 각 행은 경간 형식이며, 각 열은 전차선 장력을 의미한다. 또한 파란색, 녹색, 붉은색, 밝은 청색 실선은 각각 팬터그래프 설계 제원 Baseline과 Case1, Case2, Case3의 제원으로 변경된 모델의 결과를 나타낸다. 평균 접촉력은 앞서 언급한 것과 동일하게 위에서 제시한 주행 조건과 유사하기 때문에 결과제시를 생략하며, 설계변경에 따른 접촉력 표준편차의 변화를 각 Case에 대하여 비교검토하였다. 최적설계모델인 Case3의 접촉력 및 전차선 변위는 (4)최적설계 팬터그래프의 집선성능 및 전차선 변위 특성에서 상세하게 기술하였다. 다만 각각의 Case의 접촉력 특성은 평균 접촉력과 접촉력의 표준편차를 통해 간접적으로 가늠할 수 있다.

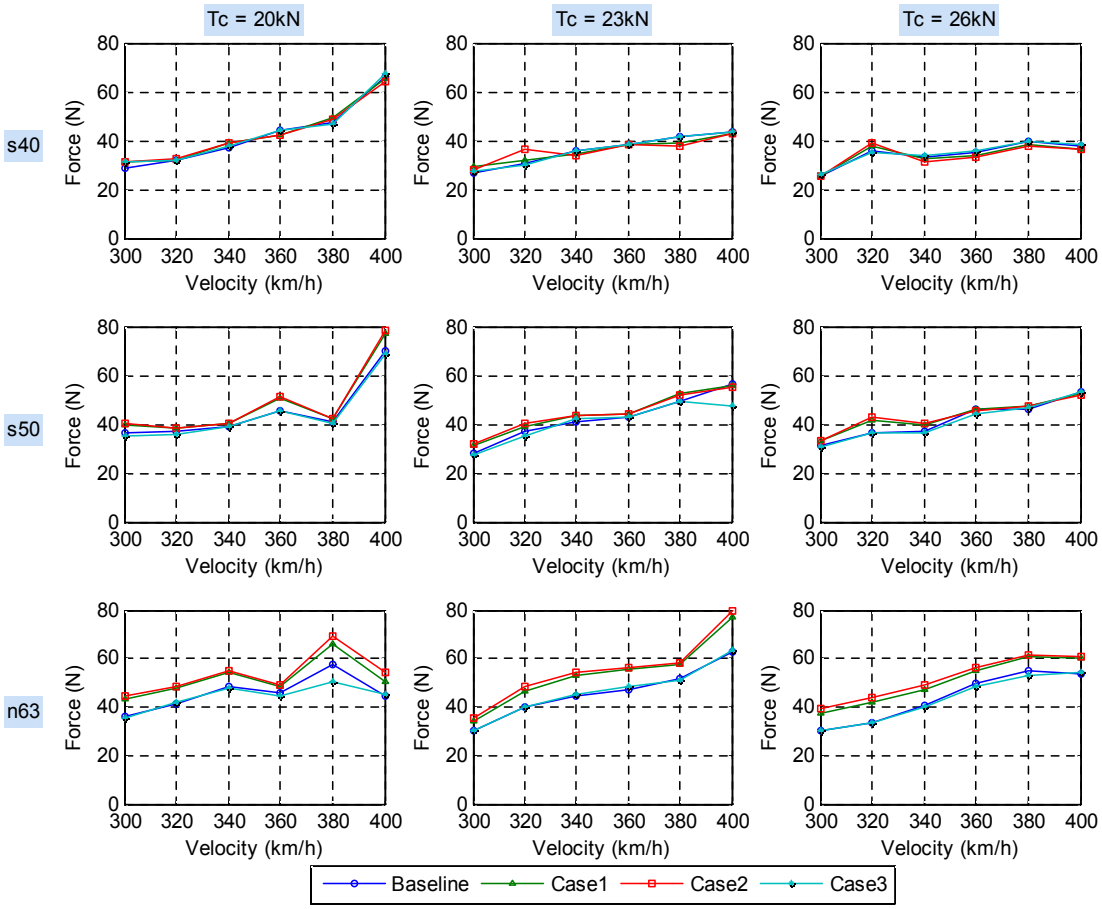


그림 2-3-216 팬헤드 및 암 질량 변경에 따른 접촉력의 표준편차(질량 변화 비교)

위 그림에서는 전차선 장력 및 경간 형식에 대한 비교보다는 3가지 종류의 팬터그래프 Baseline, Case1, Case2, Case3를 비교하는 것에 초점을 맞추어 파악한다. 각 그래프에서 확인할 수 있듯이, 팬헤드와 암의 질량이 변화한 4가지의 팬터그래프의 결과는 전차선의 장력 증가와 상관없이 경간형식 s40, s50에서는 거의 유사한 경향을 보이는 것을 볼 수 있다. 하지만, 경간의 길이가 3가지 경간 형식 중 가장 긴 n63의 경우에는 팬헤드와 암의 질량이 증가한 Case1과 Case2 모델이 접촉력의 표준편차가 최대 약 10N 가량 크게 산출되는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적으로 가선의 경간 길이 가 길수록 동특성이 악화되는 현상과 연관이 있을 것으로 파악된다. 이를 통해 경부 고속선의 주요 경간형식인 s50 및 s40에서는 팬터그래프 질량 증가에 따른 성능변화 폭이 미비하지만 경간 길이가 길어질수록 동특성에 대한 적정성 검토가 필요함을 알 수 있다. 반면 Case3의 경우 모든 경우에서 Baseline과 유사하다. 즉 집전판의 질량증가는 접촉력 특성에 크게 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다. 반면 Arm 의 질량증가는 경간이 긴 구간 동특성을 악화시킨다고 판단된다.

(다) 전차선 변위 해석결과

그림 2-3-217은 전체 해석 결과 중 Baseline과 암 질량 변경 팬터그래프 모델을 이용하여 주행해석을 하였을 때, 전차선 장력과 경간길이 별로 다섯 번째 곡선당김금구의 수직방향 변위를 비교한 그래프이다. 경간의 길이가 증가할수록, 전차선 장력의 크기가 감소할수록, 주행속도가 증가할수록 곡선당김금구의 최대 수직방향 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 2-3-218는 전차선 장력이 23kN일 때, Baseline과 암 질량 변경 팬터그래프 모델들을 이용한 주행 해석의 결과를 종합한 것이다. 팬터그래프 질량 변경에 따라 곡선당김금구의 최대 수직변위가 유사한 크기를 보이지만 Arm 질량이 증가할수록 변위가 미소하게 감소하는 경향 또한 확인할 수 있다. 또한 전차선 장력 20kN 구간에서 400 km/h로 주행하는 경우를 제외하고는 전차선 압상량이 기준인 120mm 이하인 것을 확인할 수 있다.

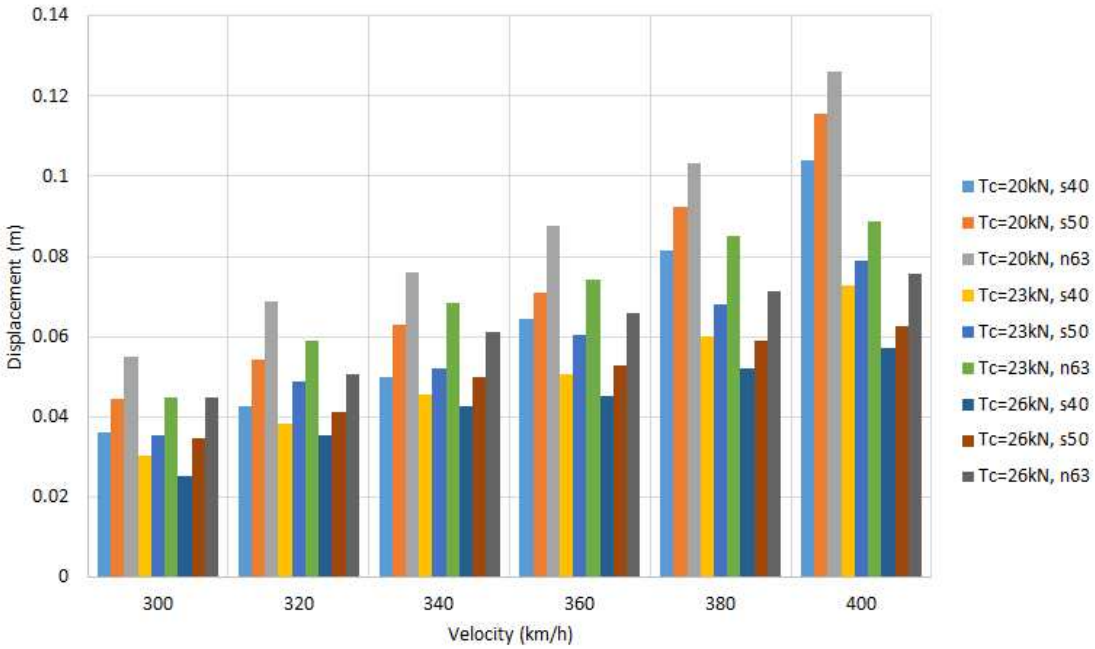


그림 2-3-217 곡선당김금구 최대 수직 변위(암 질량 증가 팬터그래프)

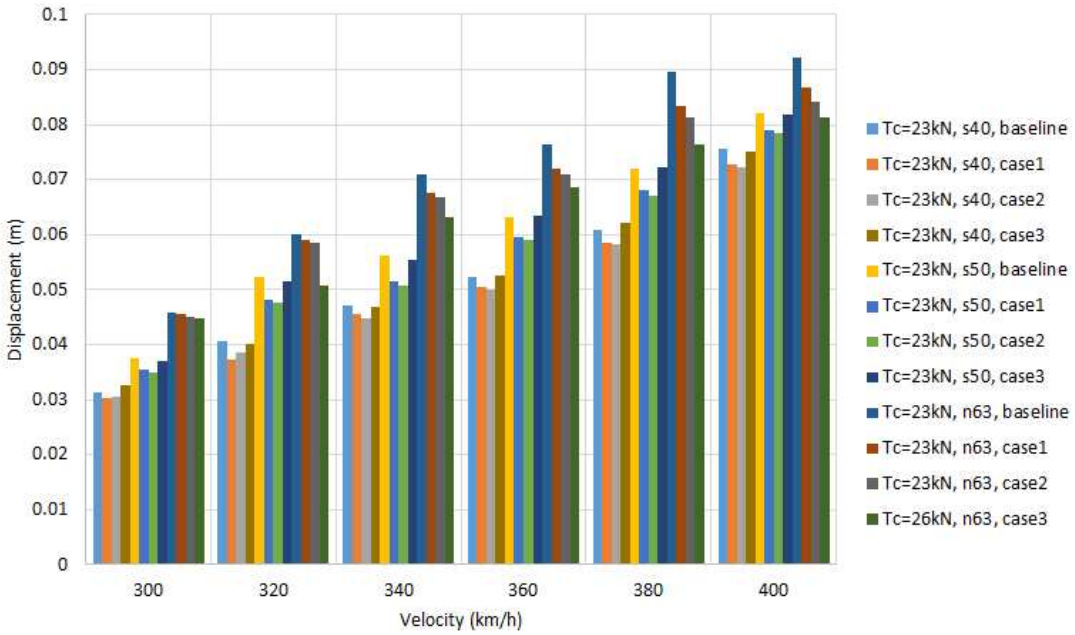


그림 2-3-218 곡선당김금구 최대 수직 변위(Baseline, Case1, Case2, Case3 비교)

(라) 최적설계 팬터그래프의 집전성능 및 전차선 변위 특성

① 장력 20kN 구간 300km/h 주행 (경부고속선)

본 연구과제의 실질적인 적용모델인 KTX-산천에 적용되는 CX 팬터그래프에 대하여 공력최적설계 팬터그래프인 Case3의 집전성능 및 전차선 변위 특성이 고속선 기준에 부합하는 지 확인하기 위하여, 경부고속선 (장력 20kN) 300km/h 주행 시 접촉력 특성 (평균접촉력, 통계적 최대/최소 접촉력) 및 전차선 변위를 동일조건의 Baseline 해석결과와 비교하였고, 경간은 50m와 63m의 2가지 경우를 나타내었다. 300 km/h에서 비교한 이유는 파동전파속도를 고려한 경부고속선의 설계속도가 300 km/h이기 때문이며, 영업최고속도 역시 300km/h이기 때문이다. CX 팬터그래프 모델에 대한 수학적 모델링 자료는 본 보고서의 1차년도 보고서 부분에 나타나 있다. 다음의 표는 CX 팬터그래프 baseline 과 개선모델 Case3의 질량 비교 부분이다. 앞서 HEMU-430x 팬터그래프와 다른 점은 집전판 질량인 m1 이HEMU의 5.9kg에서 CX에서 8.0kg으로 증가되어, m1 질량증가분(1.27배)이 더 크다는 점이며, Arm 질량인 m2는 HEMU나 CX나 17.5kg으로 동일하므로 개선모델 case3의 arm 질량 역시 16.9kg으로 HEMU와 동일하다.

표. 2자유도 팬터그래프 팬헤드 및 Arm 질량

Mass (kg)	Base line	Case3
Pan-head	8.0	10.1 (127 %)
Arm	17.5	16.9 (97 %)

해석결과는 다음 표와 그림들과 같이 Base line과 공력최적설계 팬터그래프의 평균 접촉력은 거의 유사하고 최대/최소 접촉력 역시 기준치를 만족하는 것을 알 수 있다. 다만 팬헤드 질량증가에 따라 접촉력 표준편차가 미세하게 약 2.5 N 정도 증가하여 최대 및 최소 접촉력이 약 8N정도 열화 되는 수준이다. 전차선 압상량 역시 압상량이 가장 큰 경간 63m에서 77 mm 정도로서 기준치인 120 mm 미만을 만족함으로서 최적설계 팬터그래프의 동특성은 양호하다고 판단된다.

표. 장력20 kN 구간 300 km/h 주행 시 CX 최적설계 팬터그래프 동특성

		Base line	최적설계 팬터그래프
s50	평균접촉력 <200 N	150.3	150.0
	최대접촉력 <350N	281.8	288.3
	최소접촉력 > 0 N	18.8	11.6
	접촉력 표준편차	43.8	46.1
	전차선 압상량 <120 mm	67.5	67.7
n63	평균접촉력 <200 N	149.4	149.4
	최대접촉력 <350N	284.5	292.8
	최소접촉력 > 0 N	14.4	6.0
	접촉력 표준편차	45.0	47.8
	전차선 압상량 <120 mm	76.7	76.6

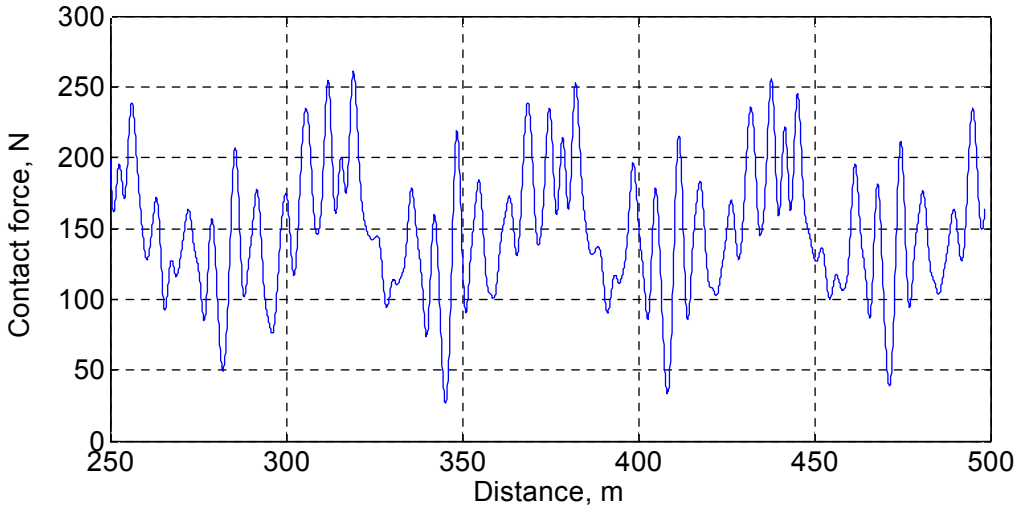


그림 2-3-219 300 km/h 63m경간 Baseline 팬터그래프 접촉력 특성

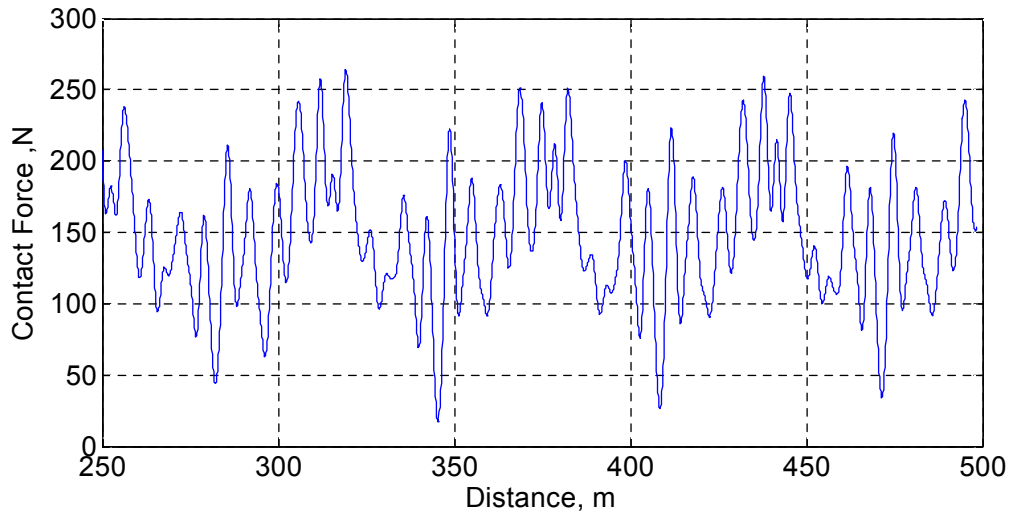


그림 2-3-220 300 km/h 63m경간 최적설계 팬터그래프 접촉력 특성

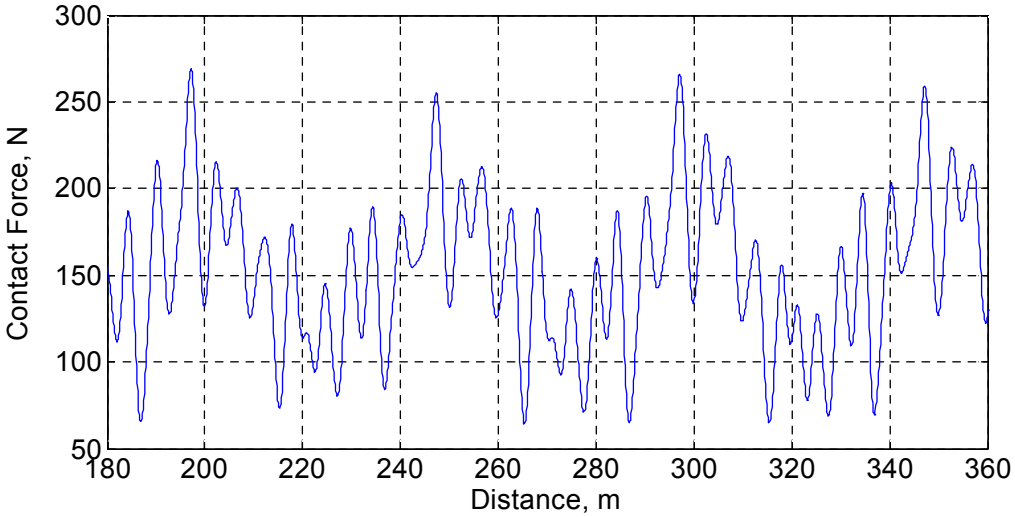


그림 2-3-221 300 km/h 50m경간 Baseline 팬터그래프 접촉력 특성

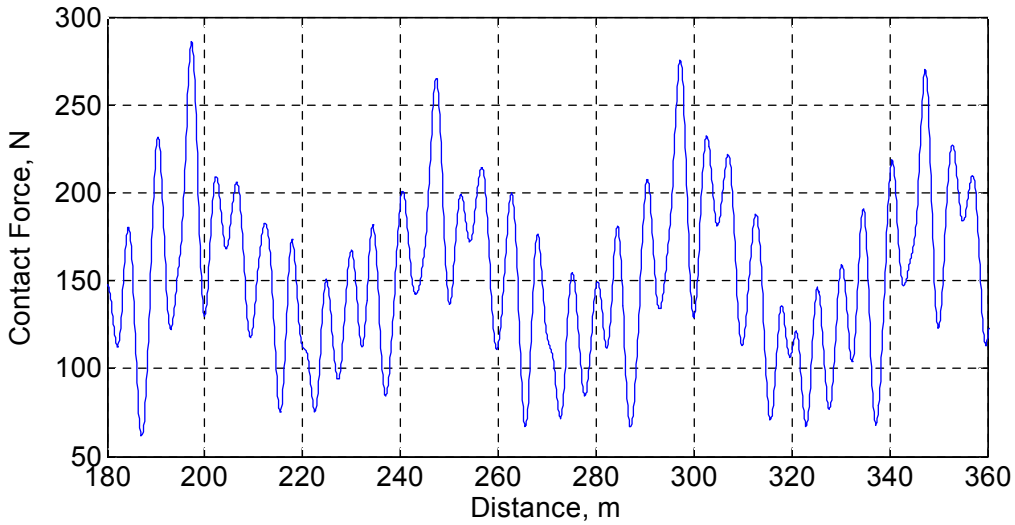


그림 2-3-222 300 km/h 50m경간 최적설계 팬터그래프 접촉력 특성

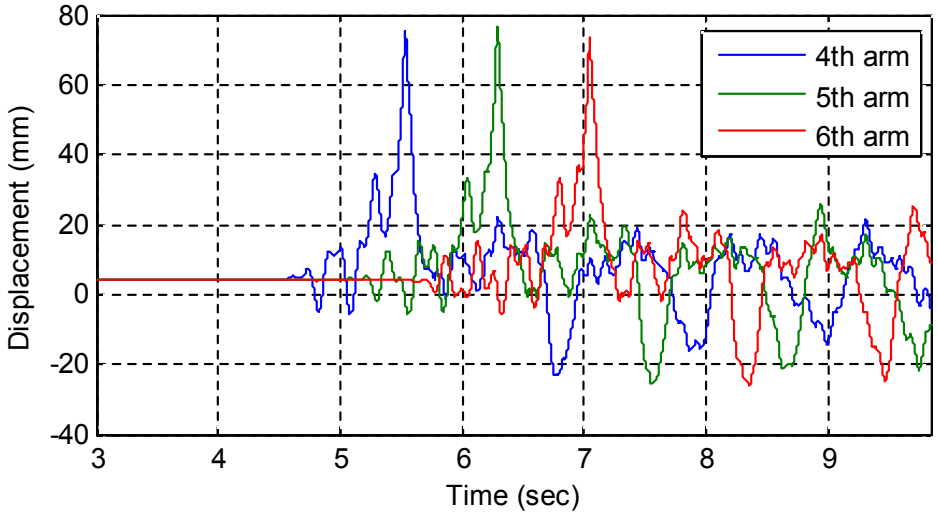


그림 2-3-223 300 km/h 63m경간 Baseline 팬터그래프 전차선 변위

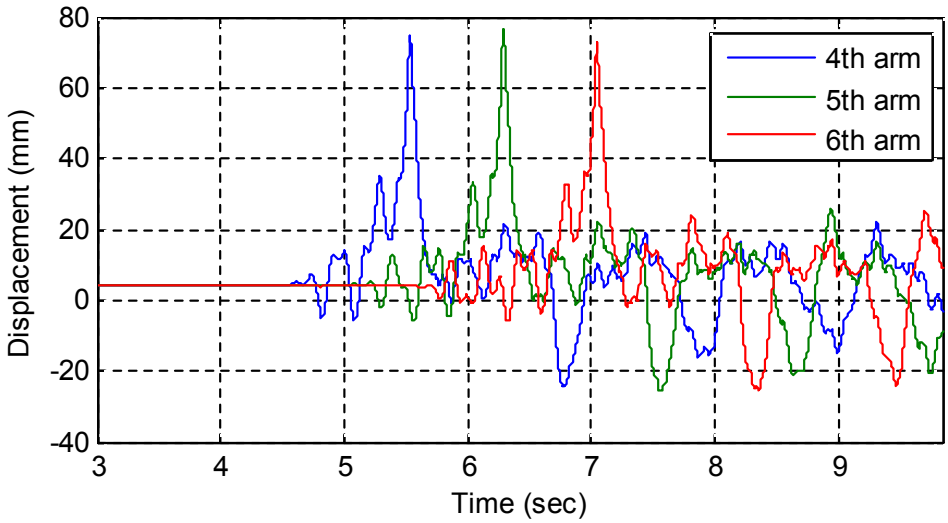


그림 2-3-224 300 km/h 63m경간 최적설계 팬터그래프 전차선 변위

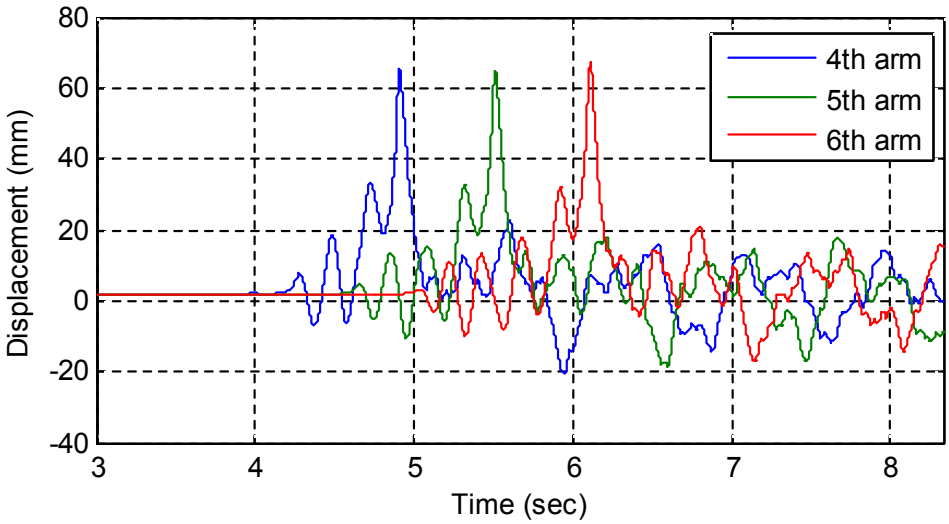


그림 2-3-225 300 km/h 50m경간 Baseline 팬터그래프 전차선 변위

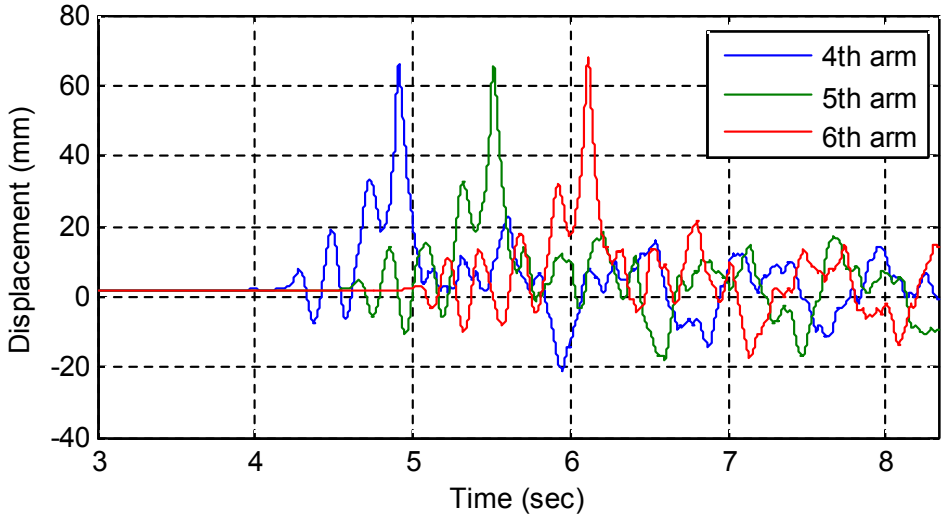


그림 2-3-226 300 km/h 50m 경간 최적설계 팬터그래프 전차선 변위

② (나) 장력 26kN 구간 350km/h 주행 (호남고속선)

CX 팬터그래프의 공력최적설계인 Case3의 집전성능 및 전차선 변위 특성이 고속선 기준에 부합하는 지 확인하기 위하여, 호남고속선 (장력 26kN) 350km/h 주행 시 접촉력 특성 (평균접촉력, 통계적 최대/최소 접촉력) 및 전차선 변위를 동일조건의 Baseline 해석결과와 비교하였고, 경간은 앞선 해석과 동일하게 50m와 63m의 2가지 경우를 사용하였다. 해석에 사용한 팬터그래프의 수학적 모델링자료는 1차년도 보고서와 동일하며, Baseline 및 Case3의 질량은 전차선 장력 20kN해석 조건과 동일하다. 단 호남고속선은 경부선과 전차선 재질 및 강성 등이 다르기 때문에 호남고속선의 전차선 조건을 반영하여 해석을 수행하였다. 아래의 표는 호남고속선 및 경부고속선의 전차선 설계 패러미터이다. 표에서 보이는 바와같이 호남고속선은 26kN의 고장력을 인가하기 위하여 전차선의 재질을 Cu에서 CuSn로 변경하였으며, 조가선 역시 경부고속선의 14kN 장력 대비 증가한 20kN 장력을 인가하기 위하여 Bz 65 mm2에서 CuMg 116mm2로 변경되었다.

표 경부고속선 및 호남고속선 전차선 설계 패러미터 비교

	경부고속선	호남고속선
전차선 선종	Cu 150 mm2	CuSn 150 mm2
전차선 장력	20kN	26kN
전차선 밀도	1.334 kg/m	1.334 kg/m
조가선 선종	Bz 65 mm2	CuMg 116 mm2
조가선 장력	14kN	20kN
조가선 밀도	0.605 kg/m	1.080 kg/m
운영속도	300 km/h	350 km/h

350 km/h에서 비교한 이유는 파동전파속도를 고려한 호남고속선의 설계속도가 350 km/h이기 때문이며, 본 팬터그래프의 운영속도 역시 350km/h이기 때문이다. 해석결과는 다음 표와 그림들과 같이 Base line과 공력최적설계 팬터그래프의 평균접촉력은 거의 유사하고 최대/최소 접촉력 역시 기준치를 만족하는 것을 알 수 있다. 다만 팬헤드 질량증가에 따라 접촉력 표준편차가 미세하게 약 2.5 N 정도 증가하여 최대 및 최소 접촉력이 약 8N정도 열화 되는 수준이다. 전차선 압상량 역시 압상량이 가장 큰 경간 63m에서 78 mm 정도로서 기준치인 120 mm 미만을 만족함으로서 최적설계 팬터그래프의 동특성은 양호하다고 판단된다.

표. 장력26 kN 구간 350 km/h 주행 시 CX 최적설계 팬터그래프 동특성

		Base line	최적설계 팬터그래프
s50	평균접촉력 <200 N	182.7	182.3
	최대접촉력 <350N	326.4	335.1
	최소접촉력 > 0 N	39.0	29.5
	접촉력 표준편차	47.9	50.9
	전차선 압상량 <120 mm	62.4	61.9
n63	평균접촉력 <200 N	180.3	180.5
	최대접촉력 <350N	342.7	348.8
	최소접촉력 > 0 N	17.9	12.2
	접촉력 표준편차	54.1	56.1
	전차선 압상량 <120 mm	77.3	77.8

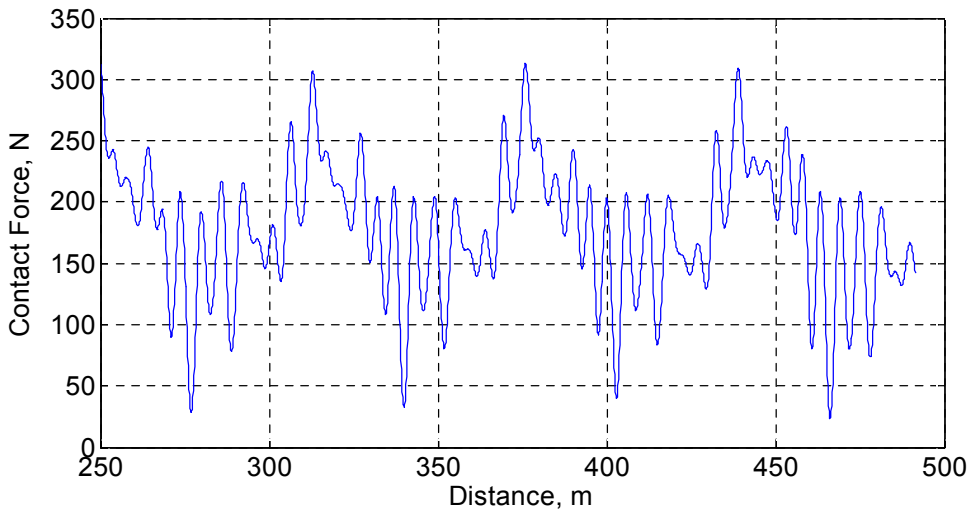


그림 2-3-227 350 km/h 63m경간 Baseline 팬터그래프 접촉력 특성

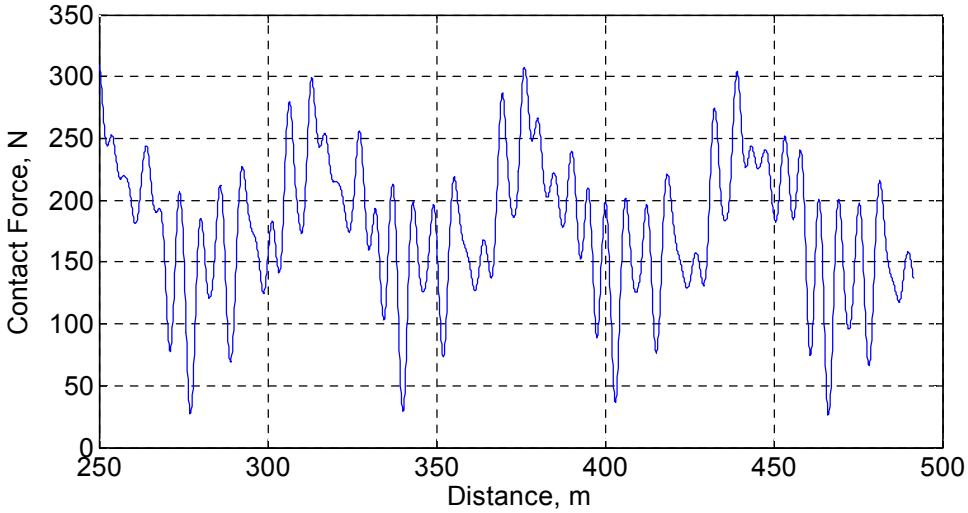


그림 2-3-228 350 km/h 63m경간 최적설계 팬터그래프 접촉력 특성

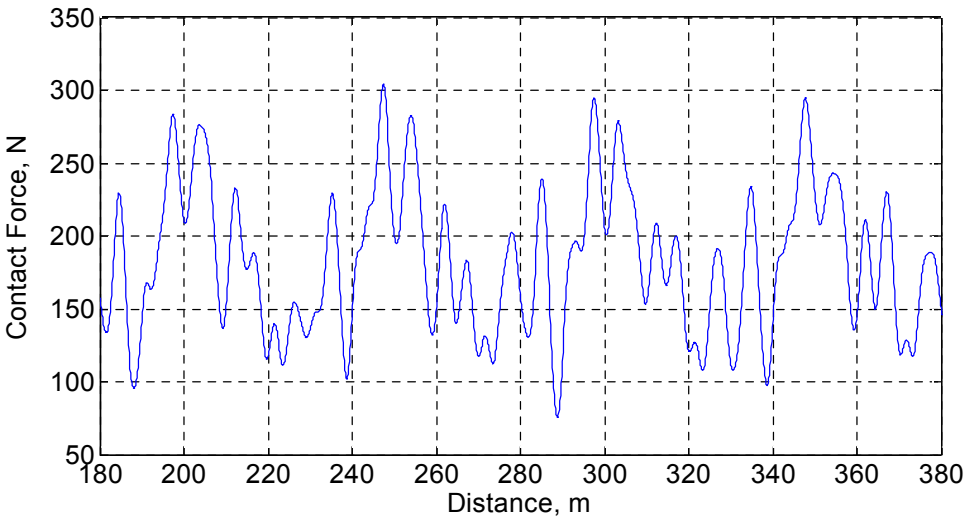


그림 2-3-229 350 km/h 50m경간 Baseline 팬터그래프 접촉력 특성

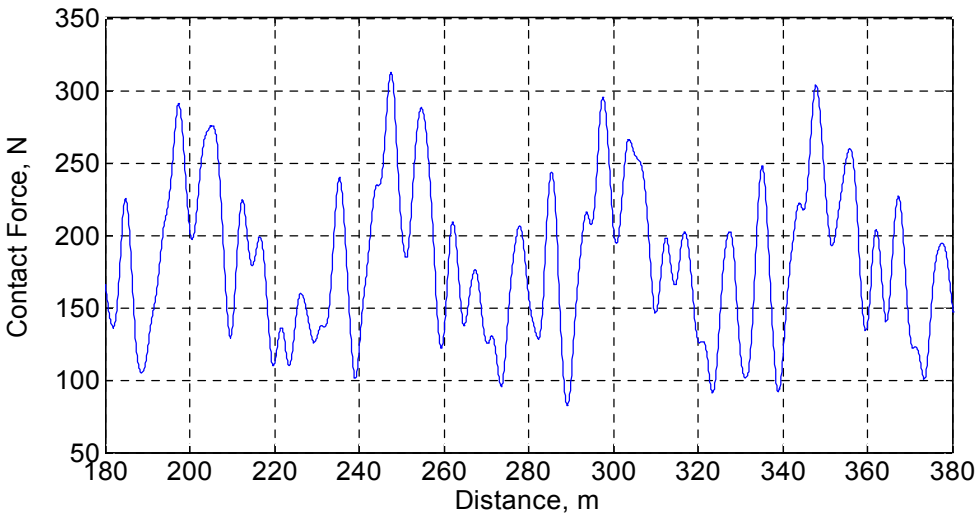


그림 2-3-230 350 km/h 50m경간 최적설계 팬터그래프 접촉력 특성

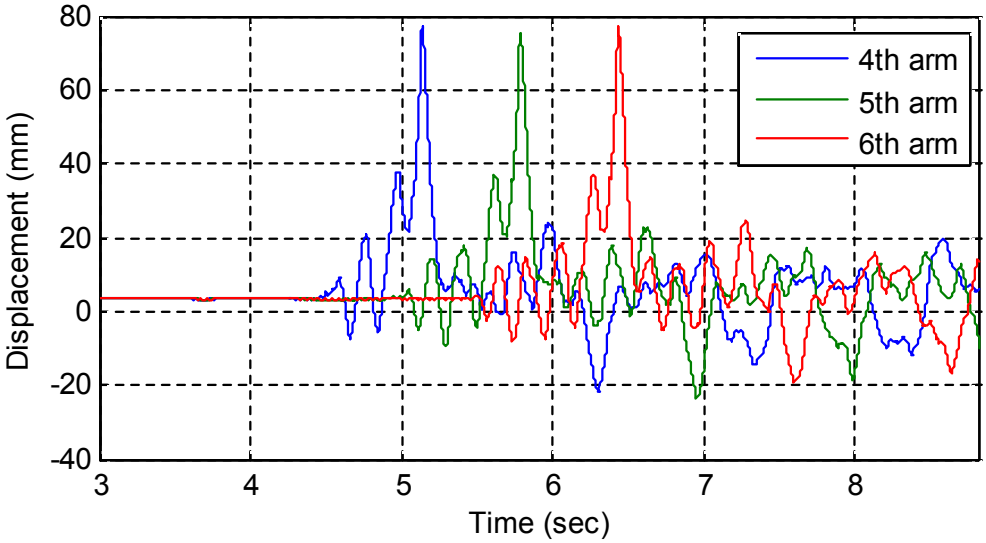


그림 2-3-231 350 km/h 63m경간 Baseline 팬터그래프 전차선 변위

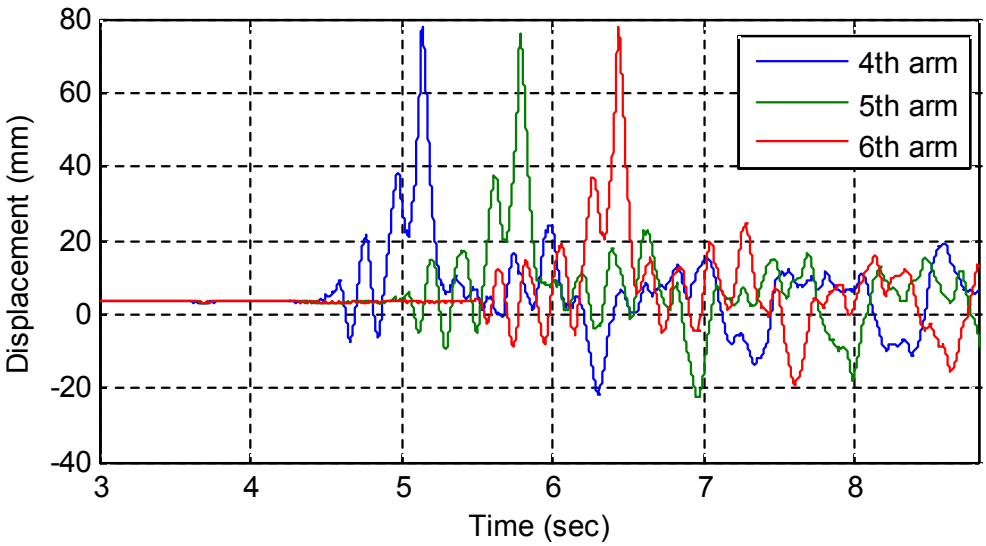


그림 2-3-232 350 km/h 63m경간 최적설계 팬터그래프 전차선 변위

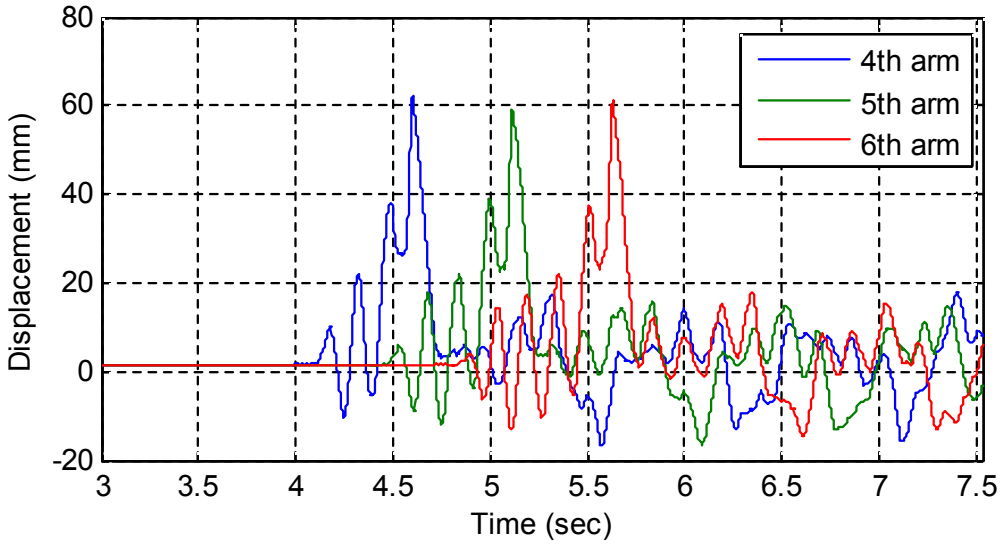


그림 2-3-233 350 km/h 50m경간 Baseline 팬터그래프 전차선 변위

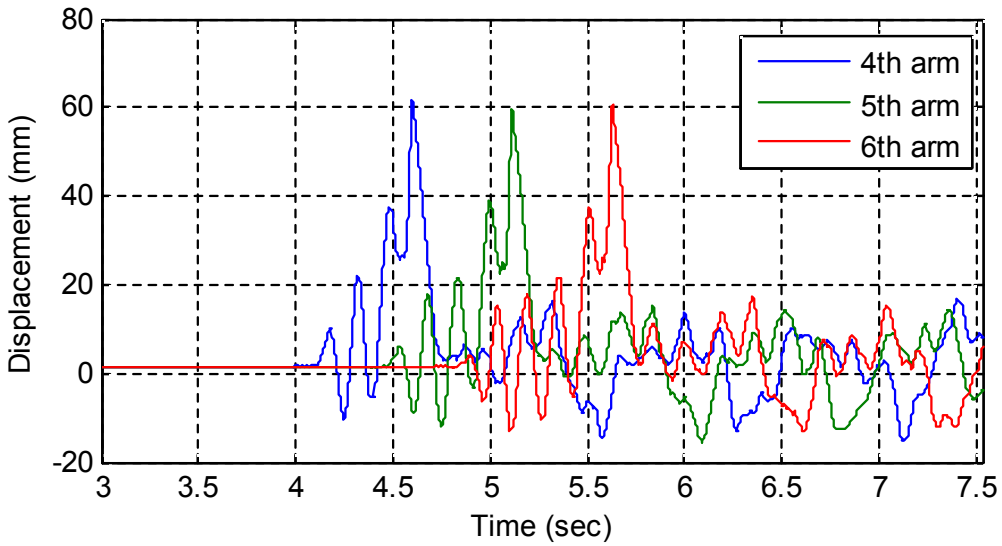


그림 2-3-234 350 km/h 50m경간 최적설계 팬터그래프 전차선 변위

③ 결론

CX 팬터그래프에 대하여 공력 최적설계안 적용 시 팬터그래프 동특성을 경부고속선 300 km/h 주행 및 호남고속선 350 km/h 주행 시 해석을 통하여 baseline 설계와 비교한 결과 접촉력 표준편차가 미세하게 증가하나 모든 특성이 기준치를 만족하는 것을 확인하였다. 과제의 목표는 접촉력의 범위가 5% 까지는 기준치를 초과해도 되는 것이었으나 본 해석결과 모든 결과가 기준치 이내를 만족하는 것을 확인하였으므로 공력최적설계 팬터그래프의 동특성은 충분히 양호하다고 판단된다.

다. 팬터그래프에 의한 공기저항 간접 평가

(1) 개요

열차의 주행저항은 견인력과 함께 철도시스템의 최고속도를 결정하는 인자임과 동시에 열차 주행 시의 에너지 소모를 결정하는 인자로서 철도시스템의 운영 계획과 성능 입증에 필수적으로 요구되는 항목이다. 주행저항은 열차의 고유한 특성으로서 열차의 외부 형상과 주행장치의 기계적 특성에 의해 결정되는데, 차량의 개념설계 단계에서는 예측에 근거한 주행저항식을 이용하여 열차의 최고속도, 추진장치의 용량, 에너지 소모 등 중요 시스템 파라메타를 결정하게 되며, 열차의 최종적인 주행저항식은 차량 제작 후 타행시험, 즉 실차에 외력을 가하지 않은 상태에서 타력으로 운행하는 동안의 열차의 속도 변화 또는 주행거리를 측정하여 주행저항을 계산하는 시험을 통하여 평가된다.

특히 속도가 증가함에 따라 주행저항 중 공기저항이 차지하는 비율은 300 km/h에서 최대 80%에 이른다고 알려져 있다. 열차의 공기저항을 저감하기 위해서는 열차의 형상을 최대한 유선형에 가깝게 설계를 해야 하나 각종 기기의 배치 등으로 인하여 형상적인 돌출물이 생기게 되고 이로 인한 공기저항 증가도 발생한다. 고속열차의 대표적인 돌출물은 열차하부의 대차시스템과 열차 옥상의 팬터그래프 및 애자류를 포함한 각종 25kV용 고압 전장품 들이다. 특히 팬터그래프는 열차 운행 중 전차선과 접촉을 통해서 전기를 열차로 공급해야 하기 때문에 열차에서 가장 많이 돌출이 되는 부품이다. 이로 인하여 팬터그래프는 공기역학적인 설계가 필요하게 된다. 하지만 실제 운행 중인 차량에서의 팬터그래프에 의한 공기저항을 정량적으로 평가한 연구는 거의 없다. 따라서 공력최적설계 팬터그래프의 공기저항을 평가하기 위해서는 팬터그래프의 공기저항이 실제 운행 중 어느 정도 수준인지 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 HEMU-430x의 타행시험을 통하여 팬터그래프가 주행저항에 미치는 영향도를 평가하고, 이를 통하여 팬터그래프에 의한 공기저항을 간접적으로 파악하고자 한다. 팬터그래프의 주행저항을 평가하기 위해서 앞에서 언급되었던 팬터그래프 상승 및 하강한 상태에서 각각 타행시험을 수행하여 그 차이를 팬터그래프에 의한 주행저항으로 판단하였다. 주행저항 시험은 경부고속선과 호남고속선의 개활지에서 실시하였고, 팬터그래프가 상승한 상태에서의 주행저항 데이터는 HEMU-430x 열차의 기본주행저항으로서 “430km/h급 고속열차 시운전시험연구” 과제 수행을 통하여 획득하였다. 그리고 타행시험을 통하여 취득한 시간 별 속도 및 주행 거리 데이터를 이용하여 차량의 가속도를 계산하였다. 계산된 가속도에 선로의 구배 효과를 보정한 후 열차의 질량을 곱하여 열차 속도 별 주행저항을 도출하였으며, 주행속도에 따른 주행저항의 근사식을 도출하였다.

(2) 주행저항 평가방법

(가) 타행시험법

① 열차의 운동 방정식

열차에 작용하는 힘과 열차 운동과의 관계는 뉴턴의 제2법칙에 따라 아래와 같이 표현할 수 있다

$$\sum F = (M+m)\frac{dV}{dt}$$

위 식에서 $\sum F$ 는 열차에 가해지는 합력, M은 열차의 질량, m은 전체 회전 관성의 등가 질량, V는 열차의 속도이다. 열차의 직선운동은 차축, 기어, 견인전동기 로터 등의 회전운동을 필연적으로 동반하므로 이를 고려하기 위하여 회전 관성모멘트를 등가의 질량으로 환산하여 고려하여야 한다. 회전 관성관성모멘트의 등가질량은 차량에 따라 달라지나, TGV열차의 경우 대략 열차 질량의 4% 정도로 알려져 있다. 본 연구에서는 회전관성을 고려하지 않고, 열차의 총 질량만을 이용하여 주행저항을 계산하였으므로 위 식에서 m은 생략하였다. 또한 가속도dV/dt 는 이후 a로 표기하기로 한다. 자연풍에 의한 외력이 없는 직선 선로에서 타행하는 경우, 열차에 작용하는 힘은 주행저항과 구배저항 뿐이므로 위 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$-R + Mgi = M \bullet a$$

위 식에서 R은 열차의 주행저항이며, g는 중력가속도, i는 선로의 구배로서 열차가 위로향하는 상구배를 (+)로 한다

② 주행저항 계산법

타행 시험으로 주행저항을 계산하는 방법은 다음과 같다. 먼저, 열차의 타행 시 열차의 속도 및 이동 거리를 측정한다. 본 연구에서는 시제차량에 구축된 종합 측정시스템에서 1000 Hz의 데이터 취득율로 측정된 열차의 속도, 거리 신호를 이용하였으며, 추진 신호와 가속신호를 이용하여 열차의 타행 여부를 확인하였다.

두번째로 타행 신호를 확인하여 도출된 타행 구간의 데이터를 선로 구배와 선로 조건에 따라 다시 분할한다. 선로구배 즉 i가 변화하는 경우 가속도가 변화하여 속도 곡선이 직선이 되지 않기 때문에 주행저항을 계산하기 힘들어진다. 또한, 터널에서는 공기역학적 효과로 인하여 개활지에 비해 공기저항이 증가하므로 이를 구분하여 계산하는 것이 필요하다.

세번째로 분할된 구간에 대해 가속도를 계산한다. 본 연구에서는 속도 곡선(time-velocity)에서 최소자승법을 이용하여 가속도를 직접적으로 계산하는 선형회귀법을 적용하여 가속도를 측정하였다. 선형회귀법은 시간-속도 곡선에서 가속도를 직접 구할 수 있으며, Excel 등과 같은 상용 프로그램에서 간단히 활용할 수 있다.

다음으로, 두 가지 방법으로 계산된 가속도에 대하여 선로 구배에 대한 보정을 다음 식과 같이 실시하여 평지에서의 가속도값을 추출한다. 이 때 추출된 가속값을

acorrect 한다.

$$a_{correct} = a + gi$$

마지막으로 구해진 가속도에 다음 식과 같이 열차 질량을 곱하여서 최종적인 주행저항을 구한다. 본 연구에서 HEMU-430X 열차의 중량은 330ton으로 적용하였다.

$$R(V_{mean}) = M \bullet a_{correct}$$

위 식에서 주행저항은 분할 구간 내의 평균속도이며, 본 계산 방법을 통하여 최종적으로 각 구간 별로 한 쌍의 평균 속도와 주행저항의 데이터가 도출된다.

③ 타행시험 데이터

다음 그림은 타행시험을 전후하여 측정된 열차의 시간에 따른 위치(KP), 속도, 제동 및 가속 신호를 나타내고 있다. 그림에서 제동 신호와 추진 신호가 모두 off이 되었을 때 열차는 타력으로 운전하고 있다고 볼 수 있다. 타행이 시작됨에 따라 열차의 속도는 감소하면서 서로 다른 기울기를 갖는 세 구간으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 선로의 구배가 변함에 따라 열차에 중력이 가해지기 때문에 일어나는 현상이다.

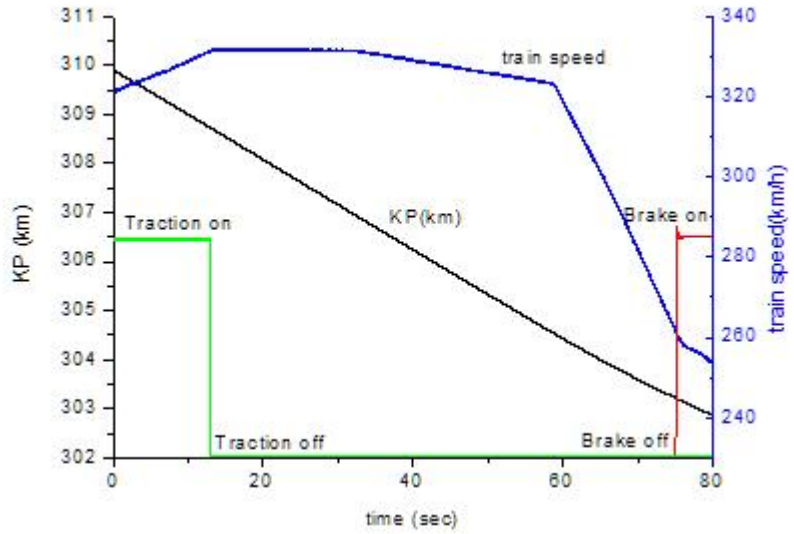


그림 2-3-235 타행 시험 시 시간에 따른 속도-KP 선도

아래 그림2-3-236에는 위의 그림 2-3-235 에 나타난 데이터들을 위치에 대한 속도 그래프로 나타내었으며, 덧붙여 선로의 구배 정보를 나타내었다. 본 타행 구간에서는 선로의 구배가 하구배 18‰, 9‰, 그리고 5‰로 차례로 변하게 되며, 이에 따라 속도의 기울기가 차례로 급해지고 있는 것을 알 수 있다. 이 때 동일 구배에서는 속도의 기울기가 거의 직선으로 보이는 것을 알 수 있다.

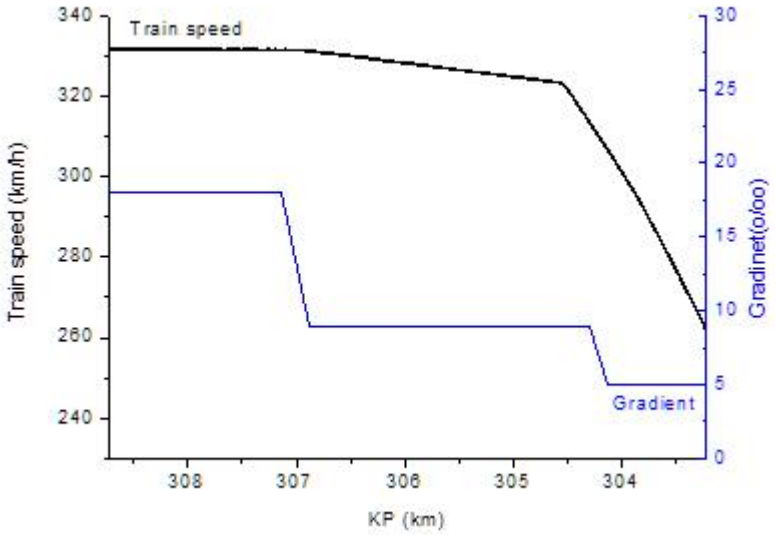


그림 2-3-236 구배에 따른 타행주행 시 열차속도 변화

또한 상기 KP 정보를 통해서 선로가 개활지에 있는 지 터널에 있는지 고속선 운전 선도를 통해서 확인이 가능하다. 다음 그림 2-3-237은 일정한 속도 기울기를 가지는 구간을 선형근사화한 결과이다. 측정된 속도곡선과 1차함수로 근사화된 곡선이 잘 일치함을 알 수 있다.

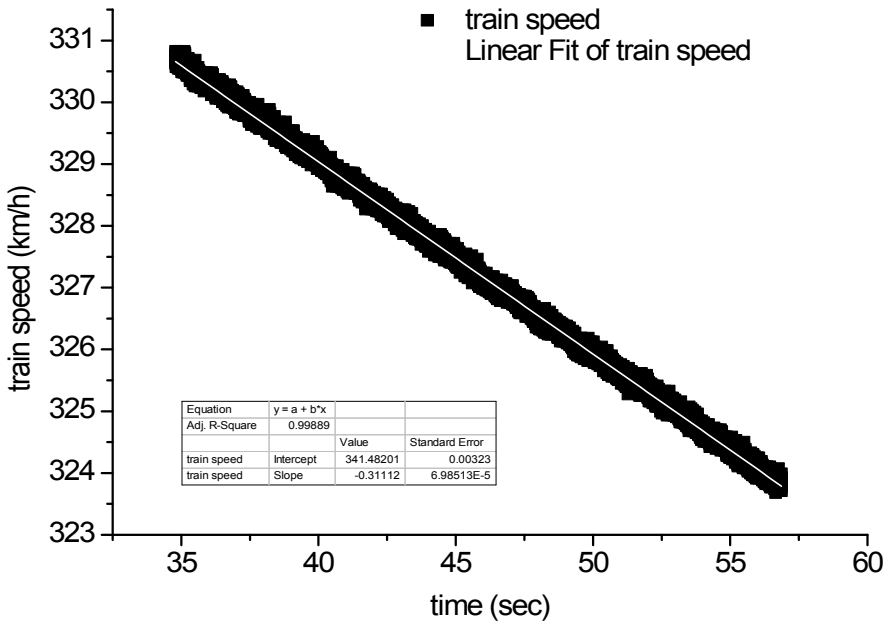


그림 2-3-237 근사화 방법을 이용한 가속도 계산 결과

(3) 팬터그래프 상승/하강 시 주행저항 비교

팬터그래프에의한 주행저항을 평가하기 위하여 본 연구에서는 경부고속선 2단계

콘크리트 궤도구간과 호남고속선 익산-광주송정 콘크리트 궤도가 구간에서 HEMU-430x의 타행시험을 실시하였다. HEMU-430X는 선두차량이 MC차량인 경우과 TC차량인 경우에 따라 조금씩 주행저항이 다르다. 다만 차량 증속시험 시 MC방향으로 주행을 하였고, 주행저항 역시 MC방향 위주로 측정이 되었다. 따라서 본 연구에서는 MC방향 주행 시 주행저항만 평가하였다.

정상 팬터그래프 (차량 뒤쪽 팬터그래프가 상승한 경우)를 사용할 때의 주행저항이 차량의 기본 주행저항으로서 “430km/h급 고속열차 시운전시험연구”과제의 일환으로 측정되었고, 150km/h ~ 410km/h 까지 타행시험을 15회 실시하여 그 주행저항을 획득하였다. 본 연구에서는 350 km/h 까지만의 데이터만을 사용하여 팬터그래프를 하강시켰을 때의 주행저항과 비교하였다. 다만 일상 주행 시 뒤쪽 팬터그래프가 올라가는 정산 팬터그래프 모드에서는 팬터그래프로 유입되는 유속이 경계층성장으로 인해 낮기 때문에, 앞쪽의 팬터그래프 올라가는 비상팬터그래프 모드 상태에서의 타행시험도 실시하여 팬터그래프에 의한 주행저항을 평가할 수 있도록 하였다. 또한 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해서 그 외의 모든 공기역학적인 조건은 동일하게 세팅하였다. 예를 들면 HEMU-430X 주행 시 주행저감을 위하여 돌출물인 M4차량의 페어링을 탈거하고, 또 다른 돌출물인 대차로 유입되는 유속을 차단하기 위하여 대차커버를 설치하였다. 이 상태는 모든 타행시험 시 동일하게 유지되었다.

다음의 그림은 경부 및 호남고속선에 실시된 타행시험의 결과로서 정상 팬터그래프 모드, 비상 팬터그래프 모드 그리고 팬터그래프 하강 시 주행저항을 각각 나타내고 있다. 또한 각각의 모드에 대해서 주행저항 근사식을 도출한 결과를 같이 도시하였다. 이 때 주행저항식 산출 시 사용되는 식은 다음의 2차식으로 표현되는 Davis식을 사용하였다.

$$R = a + bV + cV^2$$

위 식에서 a, b, c는 상수로서 열차마다 고유한 값을 가지는데, 통상적으로 a, b는 기계적 저항, c는 공기저항에 따라 결정되는 상수로 알려져 있다.

다음그림의 점선들은 개활지에서의 주행저항 데이터를 2차 다항함수로 근사화한 곡선이며, 각각의 모드에 대하여 나타내었다.

아래 그림에서 2차 다항식으로 근사화된 곡선은 측정된 주행저항 데이터와 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 이 때 근사화된 곡선에 대한 2차 다항식을 주행저항식이라 한다. 또한 각각의 주행저항식 fitting 시 기계적 저항에 해당하는 a, b값은 모드에 상관없이 일정한 값으로 두고 공기저항에 관계된 term인 c값만을 산출하여 상호 비교하였다.

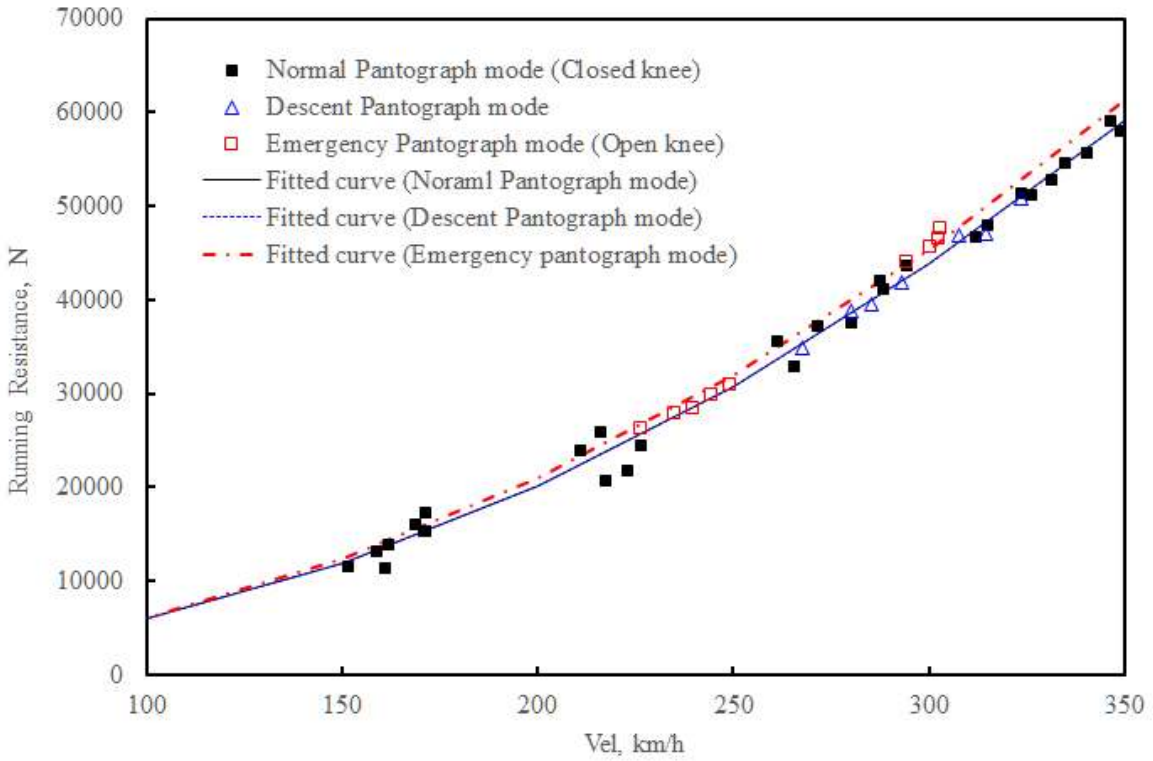


그림 2-3-238 팬터그래프 모드에 따른 타행시험 결과 및 주행저항 근사식

그림에서 보이는 바와 같이 정상 팬터그래프 모드와 팬터그래프 하강 모드에서는 주행저항이 거의 차이가 나지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 비상 팬터그래프 모드에서는 300 km/h 이상 고속영역에서 정상 팬터그래프 모드 대비 주행저항이 증가함을 알 수 있다. 정상 팬터그래프 모드와 팬터그래프 하강모드가 차이가 나지 않는 것은 앞서 설명한 바와 같이 팬터그래프가 차량 진행방향의 뒤쪽에 위치하고 있어서 경계층 성장으로 인하여 팬터그래프로 유입되는 유속이 작기 때문이다. 반면에 비상 팬터그래프 모드에서는 경계층의 성장이 아직 덜 되었기 때문에 팬터그래프로 유입되는 유속이 충분히 크기 때문이다.

다음의 표는 각각의 모드에 대한 차량 공기저항 계수 Cd값과 300km/h 와 350km/h 주행 시 차량의 전체 주행저항을 나타낸 값이다. 표에서 보이는 바와 같이 비상 팬터그래프 모드 시 Cd값은 팬터그래프 하강모드 대비 약 3.9% 증가함을 알 수 있다.

표. 팬터그래프 모드에 따른 HEMU-430X 주행저항 특성

	공기저항 계수	300 km/h	350 km/h
정상모드	1.008	43792 N	59128 N
비상모드	1.048	45439 N	61370 N
하강모드	1.008	43774 N	59103 N

(4) 팬터그래프에 의한 공기저항 평가

1차년도 연구결과에서 차량 상부경계층 두께를 차량 길이방향에 대해서 해석 및 풍동시험한 결과인 그림 2-1-37를 살펴보면 1번째 차량의 끝에서 경계층 두께는 대략 340 mm에서 370 mm 이다. 비상 팬터그래프 모드 시 팬터그래프는 2번째 차량의 처음에 위치해있으므로 상기 경계층 두께를 적용해도 무방하다고 할 수 있다. 실제로 팬터그래프는 차량 옥상에서 애자를 통해서 지지되고 있기 때문에 차량 옥상으로부터의 팬터그래프 하부의 높이는 HEMU-430X 차량에서 대략 350 mm 이다. 따라서 비상 팬터그래프 모드 시 팬터그래프로 유입되는 유속은 차량 운행속도와 동일하다고 볼 수 있다. 따라서 상기표와 그림 2-3-238을 이용하여 비상모드 주행저항에서 하강모드 주행저항만큼을 제거하면 속도대역별 팬터그래프의 공기저항을 계산할 수 있다. 다만 여기서 계산된 팬터그래프의 항력은 비상모드(Open knee)임을 감안해야 한다. 다음 그림 203은 팬터그래프의 속도에 따른 항력 특성을 그림 2-3-238의 주행저항식으로부터 추출한 결과를 CX 팬터그래프의 비상모드 풍동시험 항력과 비교하였다.

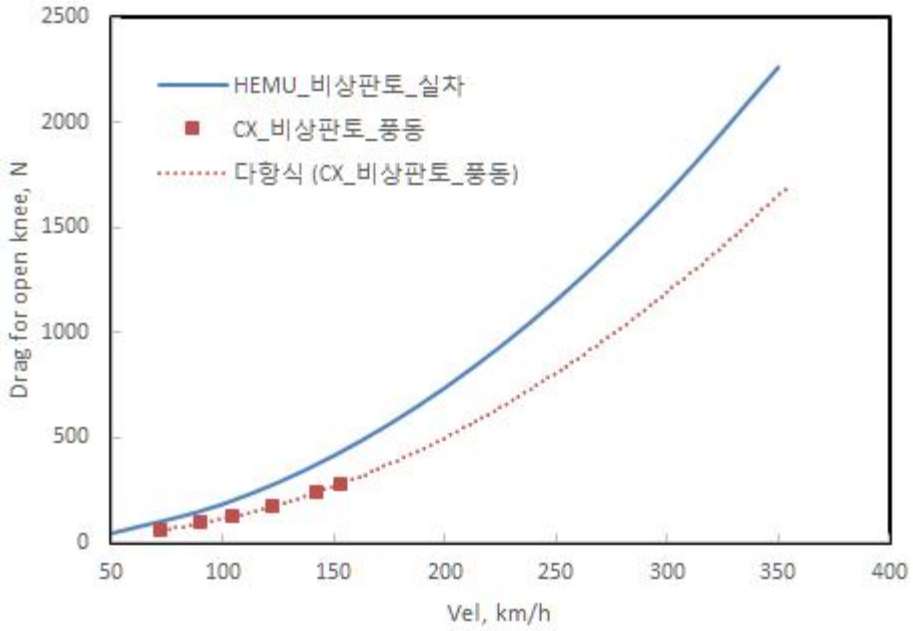


그림 2-3-239 HEMU실차 팬터그래프 항력과 CX팬터 풍동항력과의 비교

여기서 1차년도 항우연 풍동시험을 통해서 측정 된 CX 팬터그래프의 비상모드와 정상모드간의 항력차이인 9%를 반영하면 정상모드에서의 팬터그래프 항력을 주출할 수 있다. 한편 그림 2-3-238의 정상모드와 하강모드에서의 주행저항 차이를 계산하면 정상모드 팬터그래프의 항력을 구할 수 있다. 이 때 정상모드 팬터그래프로 들어가는 유속은 일단 열차속도의 80%라고 가정하였다. 이렇게 계산한 정상모드 팬터그래프의 항력은 비상모드 팬터그래프로부터 계산한 항력과 상당한 값의 차이를 다음 그림 2-3-240와 같이 보이게 된다. 이러한 차이의 원인은 데이터 개수의 부족에 따른 오차 및 팬터그래프가 주행저항에서 차지하는 비율이 매우 낮기 때문이라고 판단된다. 물론 정상모드 시 팬터그래프로 유입되는 유동 열차속도의 80%보다 훨씬 작을 수도 있

다. 그러나 팬터그래프에의한 주행저항 증가는 확실한 사실로 판단되며, 앞으로 추가적인 시험이 더욱 필요하다고 판단된다. 또한 풍동시험에서 사용한 팬터그래프는 CX 팬터그래프로서 HEMU-430x의 팬터그래프와는 그 형상이 차이가 있다 그러나 정확한 값이 아닌 팬터그래프 항력의 대략적인 크기는 유사할 것으로 판단되고 350km/h 유속 유입 시 대략 1000 N ~ 2000 N 정도의 크기를 가질 것으로 판단된다. 이는 HEMU-430x 기준으로 전체주행저항의 약 3% 수준이며, 공력최적설계를 통한 팬터그래프 항력의 감소분만큼은 차량 주행저항 향상에기여할 것으로 판단된다.

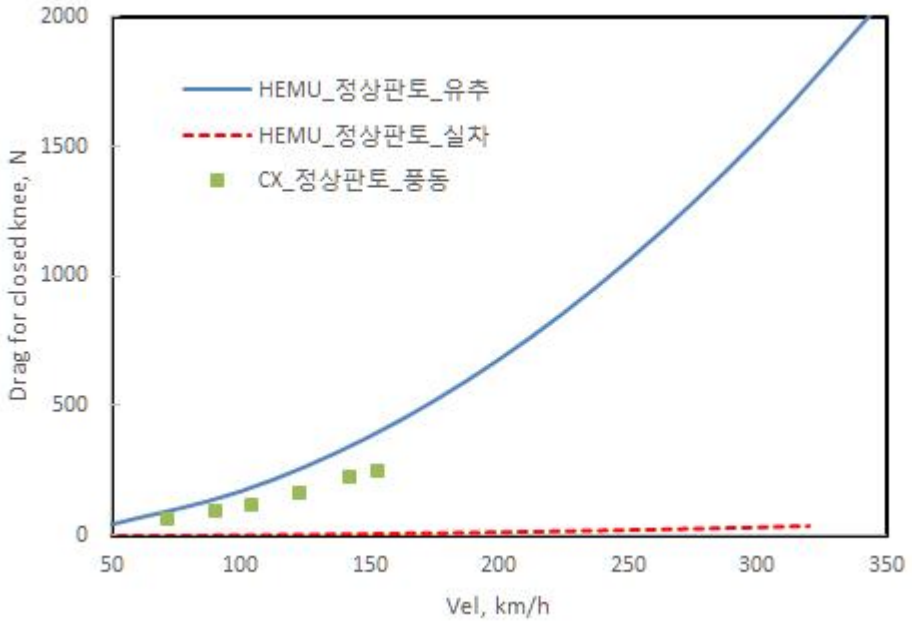


그림 2-3-240 HEMU 실차 정상모드 팬터그래프 항력과 CX 팬터그래프 항력간 비교

라. 최적설계 팬터그래프에 의한 실차소음 저감 기여도 평가

(1) HEMU차량에서의 소음저감 기여도 평가

앞서 서술된 바와 같이 HEMU-430x 차량이 350 km/h 주행 시 정상 팬터그래프의 상승/하강을 비교해보면 팬터그래프가 위치한 차량에서 소음이 5m 거리에서 104.0 dB(A)에서 102.8 dB(A)로 감소한 것을 알 수 있었다. 여기서 팬터그래프를 내렸을 때의 소음이 온전히 차량만의 소음만이라고 가정하면 350 km/h 주행 시 팬터그래프 소음은 약 97.8 dB(A)이고, 차량만의 소음이 약 102.8 dB(A)가 된다. 이 때 최적설계 팬터그래프 해석결과(77m/s, 팬터그래프 유입유동 속도를 차량속도의 80%라 가정)에 따라 소음이 최대 12 dB(A) 감소한다면 팬터그래프의 소음은 85.8 dB가 되고, 해당차량의 소음은 다음 식에 의하여 102.9 dB가 되어 전체소음은 약 1.1 dB 감소하게 된다.

$$L_{total} = 10\,log_{10}\left(10^{\frac{L_{cab}}{10}} + 10^{\frac{L_{panto}}{10}}\right)$$

이렇게 감소되는 소음이 적은이유는 해당차량만의 소음과 팬터그래프 소음의 비율을 $\frac{I_{panto}}{I_{cab}}$ 라고하면, 이 값은 0.318 로서 전체소음에서 차지하는 비율은 0.318/(1+0.318)= 24 %에 불과해진다. 따라서 공력최적설계 팬터그래프 설계를 적용하더라도 그 비율이 낮게 되는 것이다. 이렇게 HEMU 차량의 소음이 낮게 평가되는 이유는 팬터그래프 페어링에 의하여 소음이 차단되고 있기 때문이다. 다음의 그림은 HEMU 차량의 팬터그래프와 그 주위의 페어링 배치도이다. 그림에서 보이는 바와 같이 페어링에 의하여 전면/후면/측면이 모두 보호되고 있다. 이로 인하여 팬터그래프에서 발생한 소음이 차단되고 있는 것이다.

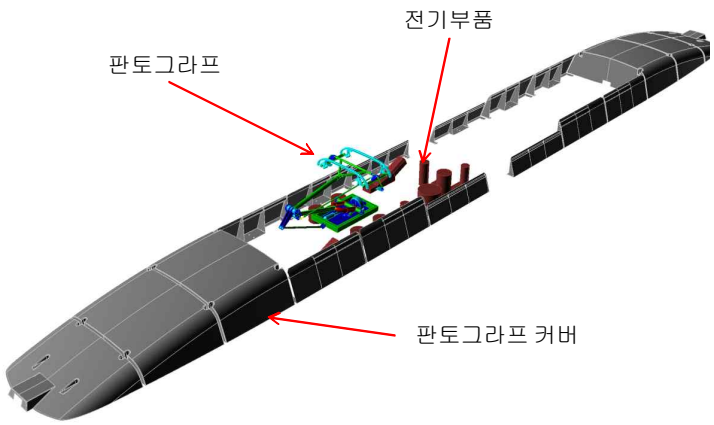


그림 2-3-241 HEMU-430X 팬터그래프 및 커버

이러한 팬터그래프 커버 설계의 장점은 소음의 전파는 잘 차단하지만, 열차의 주행 저항은 증가시키게 된다. 따라서 HEMU-430X는 400 km/h 이상의 증속시험을 위하여 다음그림과 같이 옥상 상부의 페어링(파란색 점선부)을 제거하였고 그 결과 421.4km/h라는 세계 4위 기록을 달성할 수 있었다. 그러나 이때도 아래그림의 빨간 점섬부분과 같이 팬터그래프 부분의 페어링은 소음 및 전장품 보호를 위하여 유지시켰었다.

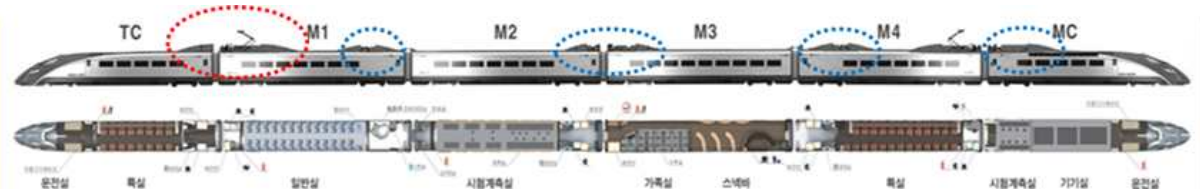


그림 2-3-242 HEMU-430x 증속시험 시 페어링 제거

다음 그림은 일본 신칸센과 HEMU-430x 열차의 passing noise 측정결과 비교이다. 그림에서 보이는 바와 같이 일본 신칸센은 두 개의 팬터그래프를 올리고 주행하며 팬터그래프 위치에서 강한 소음이 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 HEMU차량의 경우 팬터그래프에서 특별히 강한 소음이 발생하지는 않는다. 이는 신칸센 차량의 경우 공기저항 저감을 위하여 팬터그래프 전면과 후면에 페어링이 설치되어있지 않고 오직 측면에만 설치되어 있기 때문이다. 따라서 일본의 연구방향은 팬터그래프의 소음을 더욱 줄이기 위한 연구를 독일이나 프랑스 대비 활발하게 진행해왔다고 판단된다.

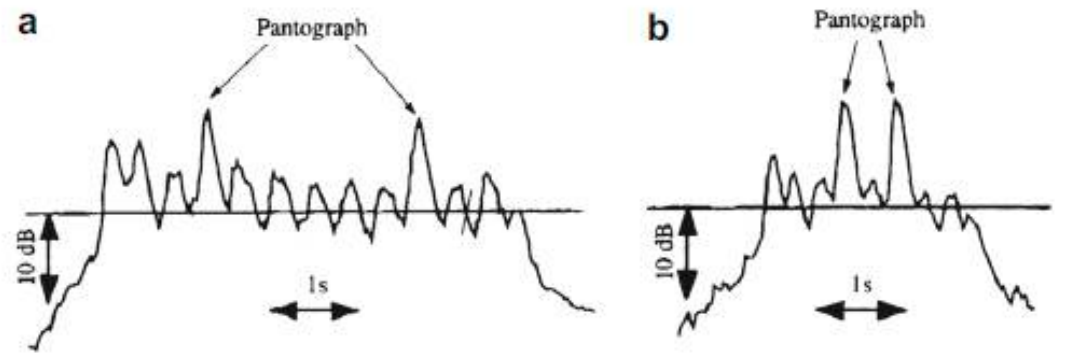


FIGURE 8-17 Time history of A-weighted sound pressure level from Shinkansen measured with a microphone array at 25 m from the track: (a) S-1 train, 235 km/h, (b) S-2 train, 312 km/h [8.33]

그림 2-3-243 신칸센 time history of noise

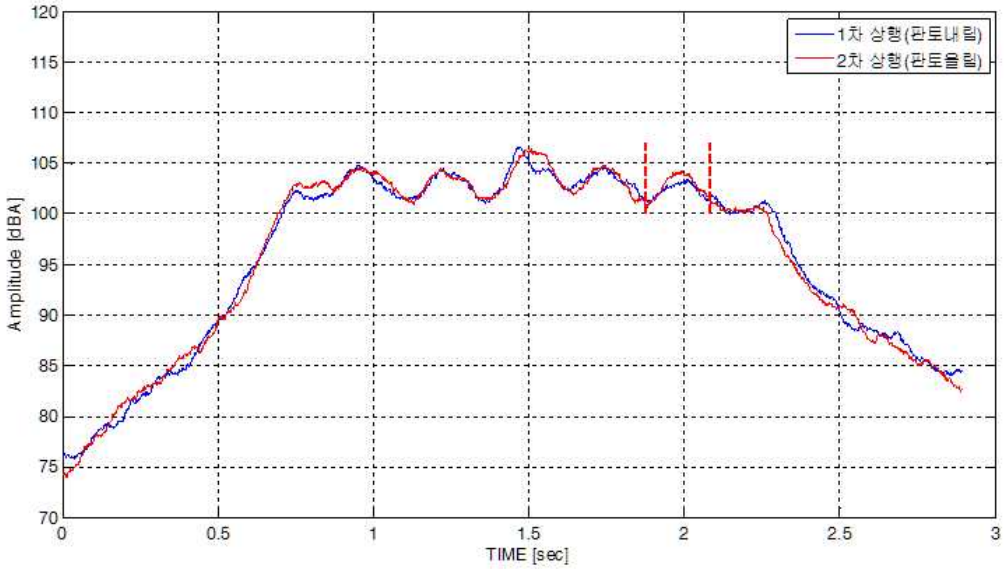


그림 2-3-244 HEMU-430x time history of noise



그림 2-3-245 일본 신칸센 E5계 팬터그래프 및 팬터그래프 커버



그림 2-3-246 일본 신칸센 N700 차간연결부



그림 2-3-247 HEMU-430X
차간연결부

또한 신칸센의 경우 강한 소음이 발생하는 차간 연결부가 다음 그림과 같이 잘 막혀있으나, HEMU-430x의 경우 연구 중 개선사항의 일부로서 다음 그림과 같이 간이 형태의 차간연결막 (side barrier)가 설치되어있다. 이로 인하여 개별차량의 소음이 신칸센 대비 크게 측정되고 있어 팬터그래프의 소음이 상대적으로 작게 측정이 되는 것일 수도 있다.

(2) KTX-산천 차량에서의 소음저감 기여도 평가

(가) KTX 및 KTX-산천의 소음특성

최적설계 팬터그래프 적용 시 KTX-산천의 소음저감 기여를 평가하기 위하여 KTX 및 KTX-산천 차량의 300 km/h 주행 시 pass-by noise를 측정하였다. 측정 위치는 2차년도 HEMU-430X의 소음을 측정하였던 경부고속선 하선 송라터널 인근 KP39.1 지점이다. 측정거리 및 높이는 선로에서 7.5m 위치에서 높이 1.2m 위치이며 해당위치에 마이크로폰을 설치하여 측정하였다. HEMU를 포함한 KTX 및 KTX-산천의 소음 측정결과는 다음과 같다. 이 때 KTX-산천은 중련편성임을 미리 밝혀둔다.

표 경부고속선 KP 39.1 지점 차량별 소음 측정결과

차량	7.5 m	측정속도
HEMU-430X (비상판토)	101.4 dB(A)	292km/h
HEMU-430X (팬터그래프 하강)	99.9 dB(A)	288km/h
KTX	102.5 ~ 107.2 dB(A)	~ 300 km/h
KTX-산천 (중련 편성)	102.0 ~ 106.3 dB(A)	~ 300 km/h

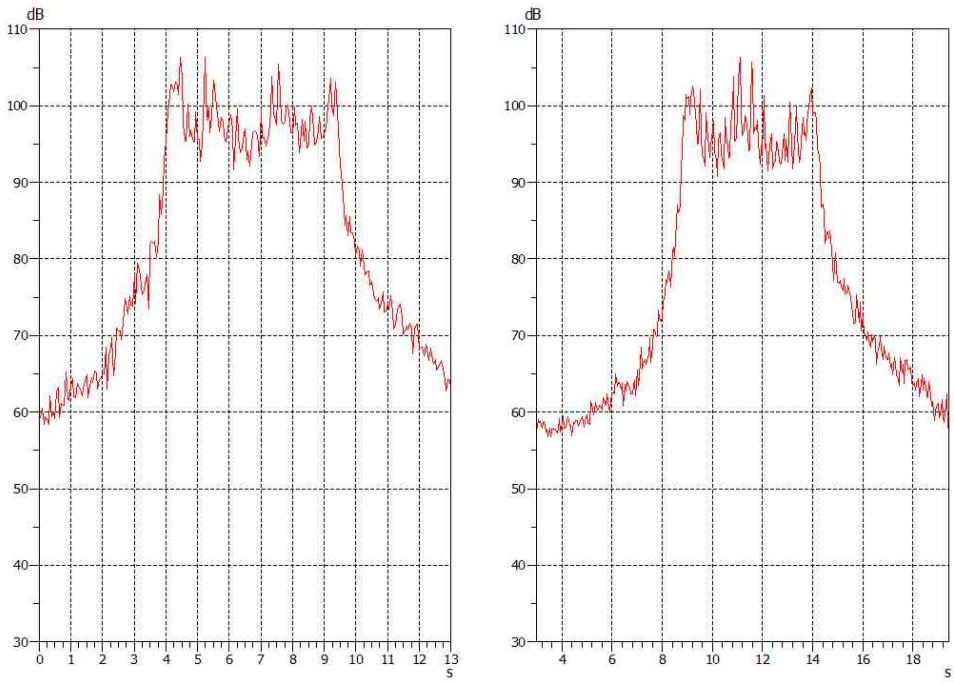


그림 2-3-248 KTX 및 KTX-산천 중련편성 소음 측정결과

KTX 및 KTX-산천의 팬터그래프 탑재차량(후미차량)의 7.5m 거리소음은 대략 102 ~ 102.5 dB(A) 수준으로 25m 거리로 환산해보면 대략 91.5 dB(A) 수준이다. 25m 거리에서 소음 환산 시 이용하는 식은 다음과 같고, 이는 RTRI에서 실시한 팬터그래프의 5m 풍동 소음 측정 시 25m거리로 환산할 때 이용했던 공식과 동일하다.

$$\Delta dB = 20 \times \log(25/7.5)$$

이는 유사한 동력집중식 설계인 TGV-Duplex 와 TGV一Reseau의 300 km/h 주행 시 25m 거리에서의 소음인 91 ~ 91.5 dB(A)인 결과와 매우 일치한다. 따라서 KTX-산천에 최적설계 팬터그래프가 적용되었을 때 환경소음 저감를 예상하기 위하여, 각각의 소음원의 기여도가 밝혀진 TGV-Duplex 와 TGV-Reseau의 결과를 이용하였다. 이 때의 주요한 가정은 KTX-산천의 각각의 소음기여도가 TGV - Duplex와 TGV - Reseau와 유사하다는 점이다. 이는 이들 세 차량이 동일한 동력집중식 차량이고 동일한 설계를 바탕으로 하고 있기 때문이며, 또한 TGV-duplex와 TGV-Reseau가 300km/h 주행 시 거의 동일한 소음을 내고 있기 때문이다.

(나) 최적설계 팬터그래프 적용 시 환경소음 저감 평가

KTX-산천의 350 km/h 주행 시 최적설계 팬터그래프 적용에의한 환경소음 저감을 예측하기 위하여, 각 소음원별 기여도가 밝혀진 TGV-duplex와 TGV-Reseau의 결과를 이용하였다. TGV-duplex 결과는 350 km/h 주행에서 활용하였으며, 320 km/h 주행에서는 TGV-Reseau의 결과를 활용하였다. 속도별로 다른 차량을 적용한 이유는 속도대역별로 각각의 소음원의 기여율이 다르고, 위 두 차량의 결과가 각각 350km/h와 320km/h에 대해서 주어져 있기 때문이다.

① 350km/h 주행 시 소음기여도 평가

문헌조사를 통하여 350 km/h 주행 시 TGV-Duplex의 25m 거리에서 팬터그래프 차량의 소음은 95 dB(A)로 측정되어졌다. 이 때 해당문헌에 나와 있는 각 소음원별 소음기여도는 다음의 표와 같고, 팬터그래프 소음(104 dB)이 대차에 의한 소음 (106 dB, Rolling noise와 Aerodynamic noise 포함) 다음으로 두 번째 기여를 하고 있다는 것을 알 수 있다. 각각의 소음원에 의한 소음도를 합산하여 계산한 Overall 소음은 5m 거리에서 108.9 dB(A)로 이를 5m거리로 환산하여 계산하면 94.9 dB(A)로 측정치인 95 dB(A)와 유사함을 알 수 있다. 이 때 팬터그래프 소음인 104 dB(A)를 서울대 해석결과(2m 거리)를 5m 결과로 환산하여 비교해보면 팬터그래프 유입 유동속도가 약 175 km/h 수준으로 주행속도의 50%수준이다.

표 TGV Duplex 350 km/h 주행 시 각 소음원별 기여도

5m	소음도 dB(A)	기여율 %
pantograph	104	32.3
bogie	106	51.2
inter-gap	96	5.1
up louver	94	3.2
down louver	98	8.1
Sum	108.9 (25m 환산계산 94.9, 실제측정치 95)	100.0

여기서 팬터그래프 소음이 공력최적설계에 의하여 서울대학교 제시결과인 12 dB(A)가 감소한다고 가정하면, 5m 거리에서 차량 환경소음은 107.3 dB(A)가 되어 약 1.6 dB(A)가 감소됨을 알 수 있다. 또한 이를 25m거리로 환산하면 차량 환경소음은 93.4 dB(A)로 감소된다. 감소된 1.6 dB(A)의 소음도는 HEMU-430X에 최적설계 팬터그래프가 적용될 때 감소한 소음도인 1.1 dB(A)와 같이 큰 값은 아님을 알 수 있다. 이는 TGV-Duplex 역시 팬터그래프 앞뒤로 큰 페어링이 설치되어 있기 때문이라 판단된다. 다만 HEMU-430X 대비 페어링의 크기가 상대적으로 작기 때문에 감소되는 소음도 역시 조금 더 큰 값으로 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 일본의 신칸센과 같이 주행저항을 위하여 전후방향 팬터그래프가 설치되어 있지 않다면 감소폭은 상당할 것으로 판단된다.

② 320km/h 주행 시 소음기여도 평가

문헌조사를 통하여 320 km/h 주행 시 TGV-Reseau의 25m 거리에서 팬터그래프 차량의 소음은 93.5 dB(A)로 측정되어졌다. 이 때 해당문헌에 나와 있는 각 소음원별 소음기여도는 다음과 같고, 팬터그래프 소음(85 dB)이 앞서와 마찬가지로 대차에 의한 소음 (Rolling noise: 90.5 dB, Bogie Aerodynamic: 89 dB) 다음으로 두 번째 기여를 하고 있다는 것을 알 수 있다. 각각의 소음원에 의한 소음도를 합산하여 계산한 Overall 소음은 25m 거리에서 93.5 dB(A)로 측정치인 93.5 dB(A)와 동일함을 알 수 있다. 이 때 팬터그래프 소음인 85 dB(A)를 서울대 해석결과(2m 거리)를 25m 결과로 환산하여 비교해보면 팬터그래프 유입 유동속도가 약 150 km/h 수준으로 주행속도의 47%수준이다.

표 TGV Reseau 320 km/h 주행 시 각 소음원별 기여도

25m	소음도 dB(A)	기여율 %
pantograph	85	14.0
bogie rolling	90.5	49.6
panto cavity	64	0.1
aero bogie	89	35.2
cooling	74	1.1
Sum	93.5 (실제측정치 93.5)	100

여기서 팬터그래프 소음이 공력최적설계에 의하여 서울대학교 제시결과인 12 dB(A)가 감소한다고 가정하면, 25m 거리에서 차량 환경소음은 92.9 dB(A)가 되어 약 0.6 dB(A)가 감소됨을 알 수 있다. 350 km/h 대비 그 감소폭이 작은 이유는 속도가 낮기 때문에 팬터그래프에 의한 공력소음 기여가 작기 때문이다. 따라서 속도가 증가함에 따라 팬터그래프 소음의 기여도는 더욱 더 증가한다고 볼 수 있다.

③ 최적설계 팬터그래프 적용 시 환경소음 저감도 예측

상기의 결과를 종합하면, KTX-산천이 350 km/h 주행 시 최적설계 팬터그래프에 의한 환경소음 저감은 최대 1.6 dB(A) 임을 알 수 있다. 이는 팬터그래프 주위의 대형 페어링에의한 영향으로 판단되며, 일본 신칸센과 같이 주행저항을 줄이는 설계로 전환되어 전후방향 페어링이 없어지면, 최적설계 팬터그래프에의한 환경소음 저감은 더욱 효과가 클 것으로 예상된다.

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

1절 연구개발 핵심성과

번호	핵심성과명	핵심성과 설명	성과유형※	성과달성 책임
1	최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 풍동시험모델 제작	최적 설계된 저저항 저소음 풀스케일 팬터그래프 형상 모델을 제작	장비장치	서울대학교
2	팬터그래프 공력/소음 특성 시험결과 자료	개발된 팬터그래프 형상에 대한 공력 및 소음 특성 시험결과 자료 (시험데이터 및 사진)	기타	항공우주연구원
3	실차소음측정과 풍동소음측정 결과간의 비교 분석	속도별 팬터그래프 풍동시험 결과와 실차시험 결과 특성 비교 데이터베이스	기타	철도기술연구원

2절 핵심성과별 세부설명

1. 최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 풍동시험모델 제작

고속열차가 고속화됨에 따라 열차의 주행속도가 증가할수록 다양한 요인들이 증속을 방해하게 되는데 그 중에서도 열차속도의 제곱에 비례하는 양력과 항력, 그리고 6~8승에 비례하는 공력소음은 열차의 주행속도가 300km/h 이상이 되면서부터 전체 열차 성능에 지배적인 영향을 끼치게 된다. 특히나 고속열차의 전력공급에 사용되는 상단부의 팬터그래프는 유선형의 고속열차형상으로부터 돌출된 형상이기 때문에 주요 소음원이자 열차 주행저항의 주요 요소가 되어 연구필요성이 높아지고 있다. 본 연구에서 1차년도 수행한 항공우주연구원의 개방형 풍동에서 실시한 기존에 KTX-2에서 사용되는 CX 팬터그래프의 소음 빔포밍 결과를 보면 고속열차 팬터그래프의 주요소음원이 팬터그래프의 팬헤드와 암 연결부임을 확인할 수 있다.

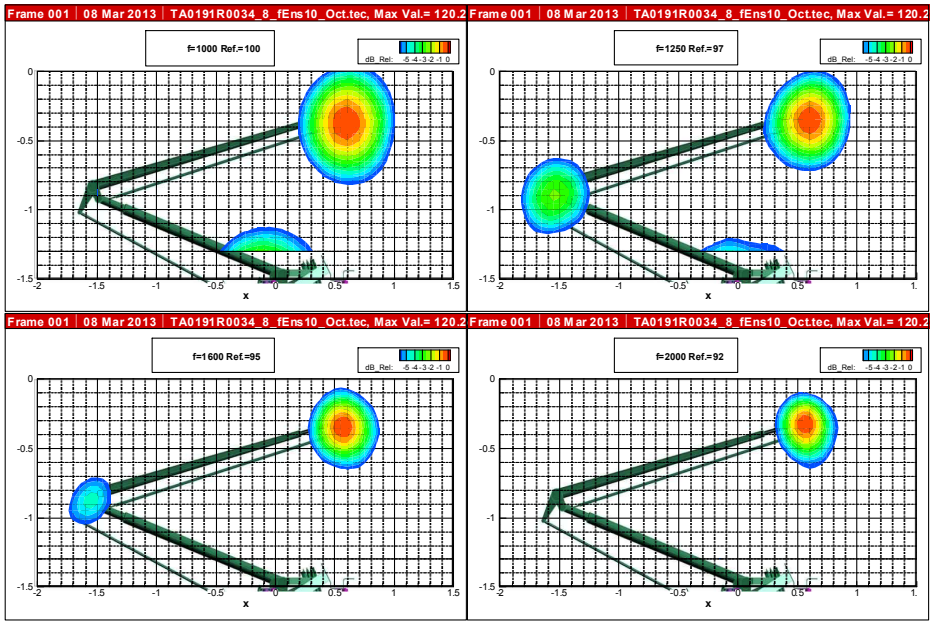


그림 3-2-1 기존 CX 팬터그래프 빔포밍 분석결과

이를 바탕으로 2차년도에는 팬터그래프 형상의 최적설계를 수행하였다.

우선 아래 그림과 같이 주요 소음원인 암 연결부의 유동을 개선하기 위해서 유선형의 캡을 설치하였다.

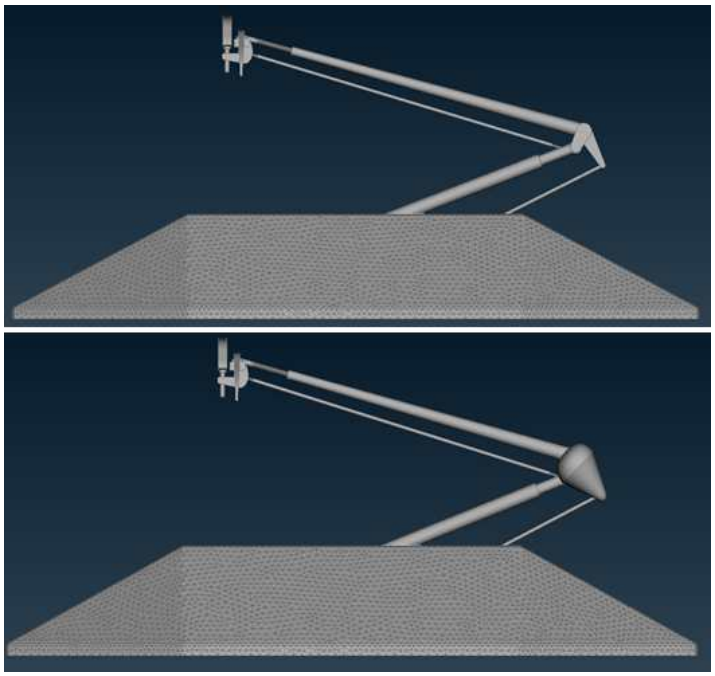


그림 3-2-2 기존 CX 팬터그래프 모델(위) / 암 연결부에 유선형 캡을 설치한 모델(아래)

그리고 기존의 원형의 암단면의 최적설계를 수행하여 아래그림과 같이 유선형의 단면형상을 적용하였다.

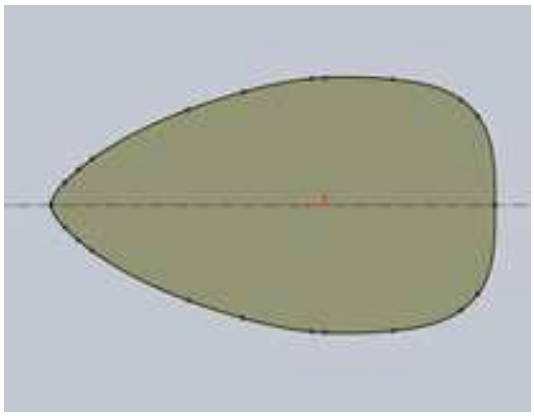


그림 3-2-3 최적화 암 단면형상

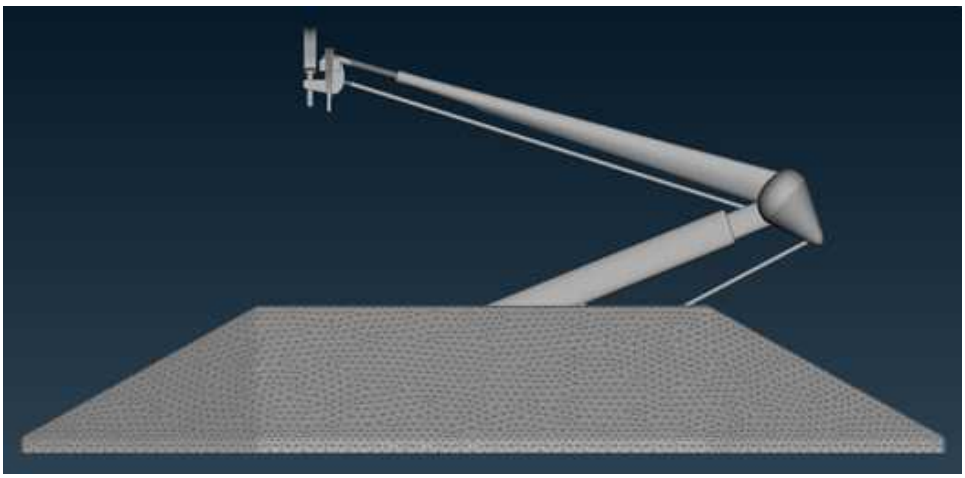


그림 3-2-4 최적화 암 단면형상을 적용한 팬터그래프 모델

그리고 마지막으로 가장 주요한 소음원 팬헤드 단면형상을 기존의 사각단면에서 아래그림과 같이 최적설계를 수행한 팬헤드 단면형상을 적용하였다.

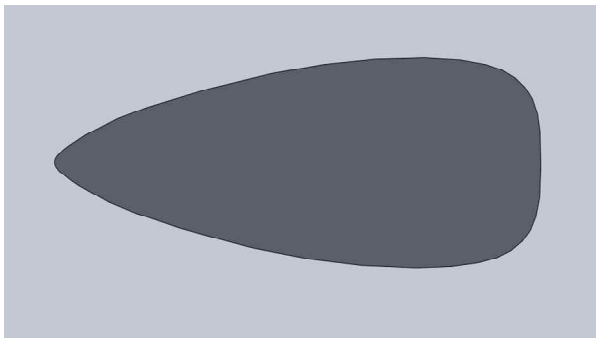


그림 3-2-5 최적화된 팬헤드 단면형상

2차년도에 최적설계를 수행한 결과를 바탕으로 3차년도에 실제 제작을 위해서 최종적으로 아래와 같은 최적설계 팬터그래프 설계안을 제시하였다.

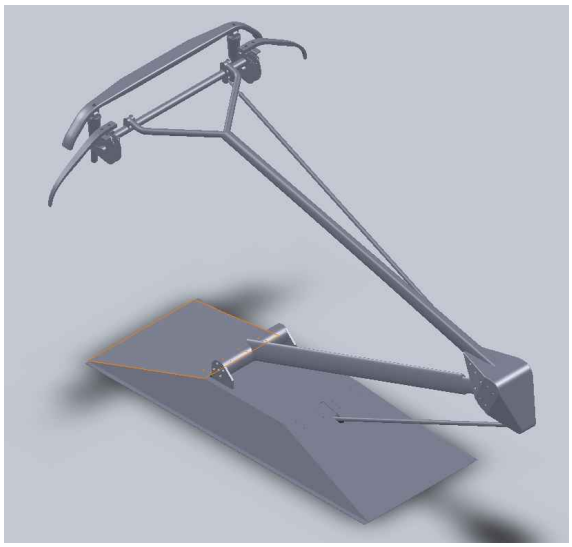


그림 3-2-6 최적설계 팬터그래프 모델

이 설계안을 바탕으로 아래 그림과 같이 풀스케일 풍동시험모델이 제작되어 폐쇄형 시험부에서 공력성능 및 공력소음 시험을 수행하였다.



그림 3-2-7 폐쇄형 시험부에 설치된 최적설계 팬터그래프 모델

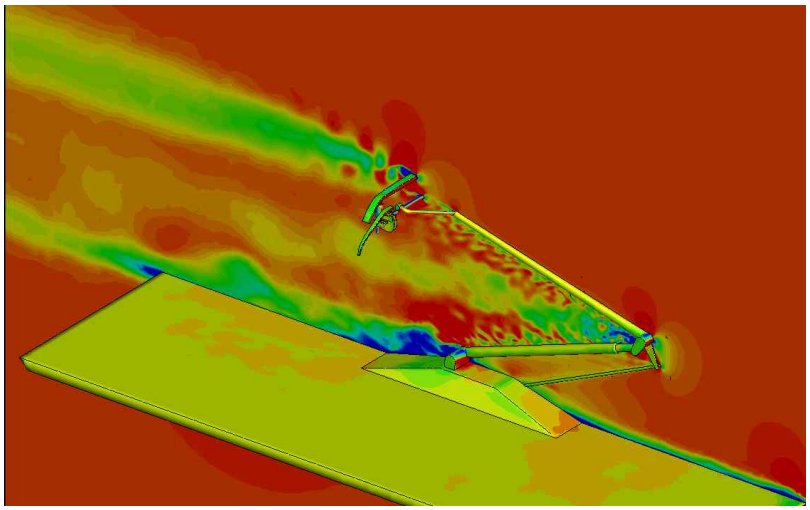


그림 3-2-8 정상상태에서 기존 CX팬터그래프의 유동장 속도분포 및 표면압력분포

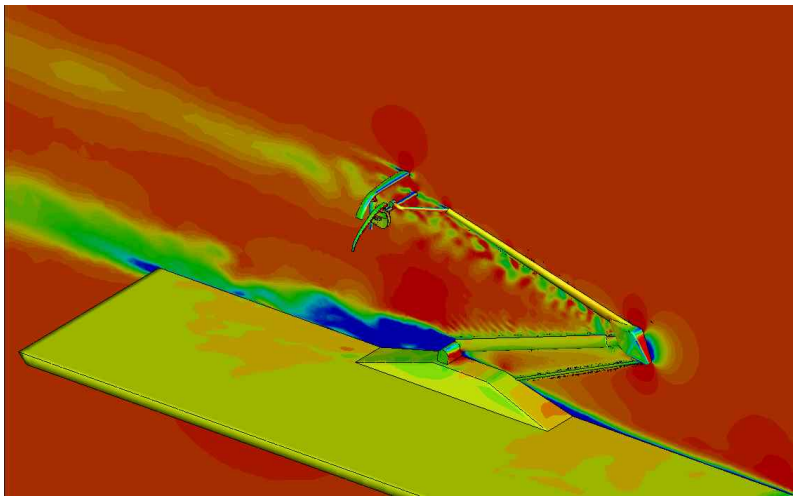


그림 3-2-9 정상상태에서 최적설계된 팬터그래프의 유동장 속도분포 및 표면압력분포

최적설계된 풀스케일 풍동시험모델의 풍동시험을 통한 공력 소음특성 DB구축과 함께 기존 CX팬터그래프 대비 얼마나 공력성능이 향상되었는지를 확인하기 위해서 기존 CX팬터그래프와 최적설계된 풀스케일 팬터그래프 모델 둘 다 풍동시험과 동일한 조건에서 전산해석을 수행하였다. 그 결과 위 그림과 같이 최적설계된 팬터그래프 모델이 **기존 CX팬터그래프에 비해서 유동교란이 적음을 확인하였으며 전산해석결과를 비교할 때 공력저항은 최적설계를 수행한 후 평균 23.63% 저감된 것으로 확인되었고 공력소음은 최적설계를 수행한 후 평균 11.2dB 저감된 것으로 확인되었다.**

2. 팬터그래프 공력소음 풍동시험 기법 및 공력/소음특성 DB

고속철도 차량에 장착되는 팬터그래프는 차량이 300km/h 이상의 속도로 주행할 때 발생되는 소음의 주요한 원인 중에 하나로 알려져 있다. 철도차량이 고속화 됨에 따라 팬터그래프에서 발생되는 소음을 저감하기 위한 노력이 일본, 독일 같은 철도차량 기술 선진국에서는 많이 진행되고 있다. 우리나라는 1990년대 중반 이후부터 고속철도 차량을 개발해오며, 많은 부품들을 국산화하여 왔으나, 고속차량 팬터그래프에 대한 국내 산업기반 및 연구기반은 여전히 취약한 상태이다.

고속차량 팬터그래프 기술자립화를 위해서는 저소음 형상 설계기술이 확보되어야 하며 개발된 형상의 공력 및 소음특성을 평가할 수 있는 설비 및 기술이 구축되어야 한다. 본 연구를 통해 (1) 팬터그래프 형상설계 기술개발 및 검증을 위한 공력 및 소음 특성 시험자료를 구축하였으며, (2) 자료구축을 위한 시험기법 연구개발을 통해 국내에서 고속철도 차량 팬터그래프의 소음특성을 시험 평가할 수 있는 기반을 구축하였다.

팬터그래프의 공력 및 소음특성을 파악하기 위해서는 주행조건을 모사할 수 있는 시험설비와 힘 및 소음을 측정할 수 있는 측정장비가 요구된다. 주행조건에 대한 모사는 고정된 팬터그래프에 상대속도에 해당하는 공기흐름을 재현시키는 방식을 사용하였다. 이 경우 시험설비는 공력소음이 주요하게 작용하는 300km/h 이상의 풍속을 재현할 수 있어야 한다. 개발형상에 대한 공력특성을 시험적으로 연구하기 위해 주요형상을 모사한 축소모델을 사용하기도 하나, 소음특성에 대한 연구를 위해서는 가능한 한 실물크기 모델을 사용하여야 한다. 철도차량에 사용되는 팬터그래프는 폭 2m, 높이 2m 정도의 크기를 가지고 있으므로 주행조건을 모사하기 위한 시험설비는 3m x 3m 이상의 시험부 단면을 가지고 있어야 한다. 1998년 국가연구개발사업을 통해 구축된 중형아음속풍동은 폐쇄형시험부에서 최대 풍속 430km/h 조건을 재현할 수 있으며, 시험부 단면적은 4m x 3m이므로 위에서 언급한 주행조건 모사장비가 갖추어야할 기본 조건을 만족하고 있다.

힘을 측정하기 위한 측정장비는 기 구축된 6분력 풍동저울을 활용하였으나, 폐쇄형시험부에서 소음특성을 측정하기 위한 측정장비 및 기법은 본 연구개발을 통해 구축하였다. 팬터그래프에서 발생되는 소음의 특성을 파악하기 위해 다수의 마이크로폰에서 측정된 정보를 활용하는 빔포밍 기법을 적용하였다. 빔포밍 기법을 통해 소음을 발생시키는 주요한 원인(위치)에 대한 정보를 파악할 수 있으며, 수음자가 아닌 소음원에 대한 분석이므로 서로 다른 환경에서 측정된 결과를 동일한 관점에서 비교할 수 있다.

기존 폐쇄형 시험부 내부에 마이크로폰을 설치할 경우, 유동이 마이크로폰에 직접적인 영향을 줄 뿐 만 아니라 마이크로폰 및 지지대에 의한 유동간섭으로 인해 시험모델 주변 흐름이 왜곡된다. 그러므로 마이크로폰을 시험부 벽면에 밀착하여 설치하는 것이 일반적이다. 이 경우 벽면에서 발생하는 경계층에 의한 신호가 소음측정신호와 혼합하여 측정되므로 이에 대한 적절한 고려가 필요하다. 경계층에 의한 영향을 줄이기 위해 그림 3-2-10과 같이 마이크로폰을 벽면 뒤쪽에 설치하고 벽면과 평행한

덮개를 전면부에 설치하는 방안이 도입되었다. 시험부 내부의 흐름에 영향을 주지 않기 위해서는 어레이 덮개가 내부압력에 의한 변형이 발생하지 않아야 하며, 측정하고자 하는 소음신호가 왜곡되지 않고 마이크로폰에 전달되기 위해서는 어레이 덮개의 음향학적인 투과율이 높아야 한다. 첫 번째 조건을 만족하기 위해서는 단단한 재질이 고려되어야 하며, 두 번째 조건을 만족하기 위해서는 얇고 성긴 재질이 고려되어야 한다. 서로 상충되는 이 두 조건을 만족시키기 위해 케블라 재질 섬유에 강한 장력을 부가하여 표면 덮개를 제작하였다.

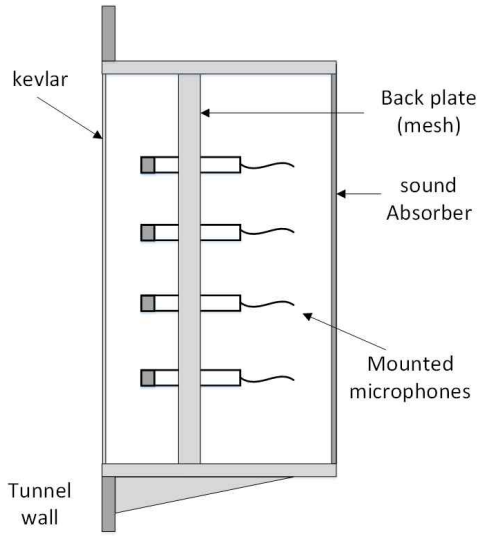


그림 3-2-10 케블라 덮개를 장착한 마이크로폰 어레이 개념도

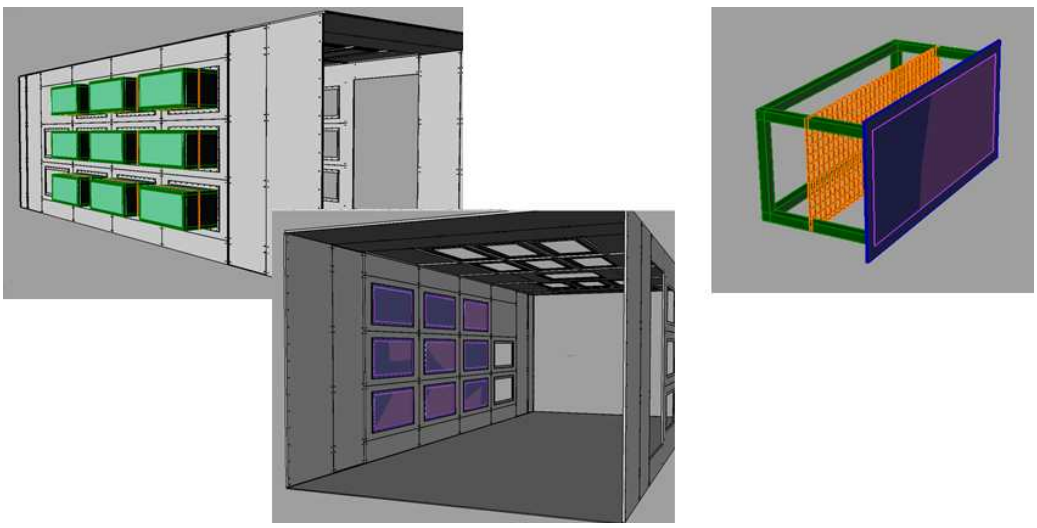


그림 3-2-11 관측창을 사용한 소음원 측정시스템 개념도

기존 폐쇄형시험부에 마이크로폰 어레이는 설치하기 위해서는 기존 구조물에 대해 충분히 고려하여야만 한다. 설비 변경에 소요되는 시간 및 비용에 대한 고려뿐 만 아니라 고정구조물로 인한 설치한계도 고려되어야 한다. 본 연구에서는 기존 구조물

에 대한 변경을 최소화하기 위해 그림 3-2-11와 같이 시험부에 설치된 9개의 관측창을 마이크로폰 어레이 모듈로 대체하는 방안이 적용되었다. 기존 구조물을 유지한 상태에서 관측창 만을 대체하는 방안은 시험 필요에 따라 어레이를 장착 또는 탈착할 수 있으므로 어레이 추가설치로 인한 설비변경을 최소화할 수 있다. 또한, 어레이의 소음특성 및 개선사항에 대한 점검을 주 시험설비와 별도로 진행할 수 있으므로 시험설비에 대한 효율성을 높일 수 있다.



그림 3-2-12 관측창을 마이크로폰 어레이 모듈로 대체한 모습

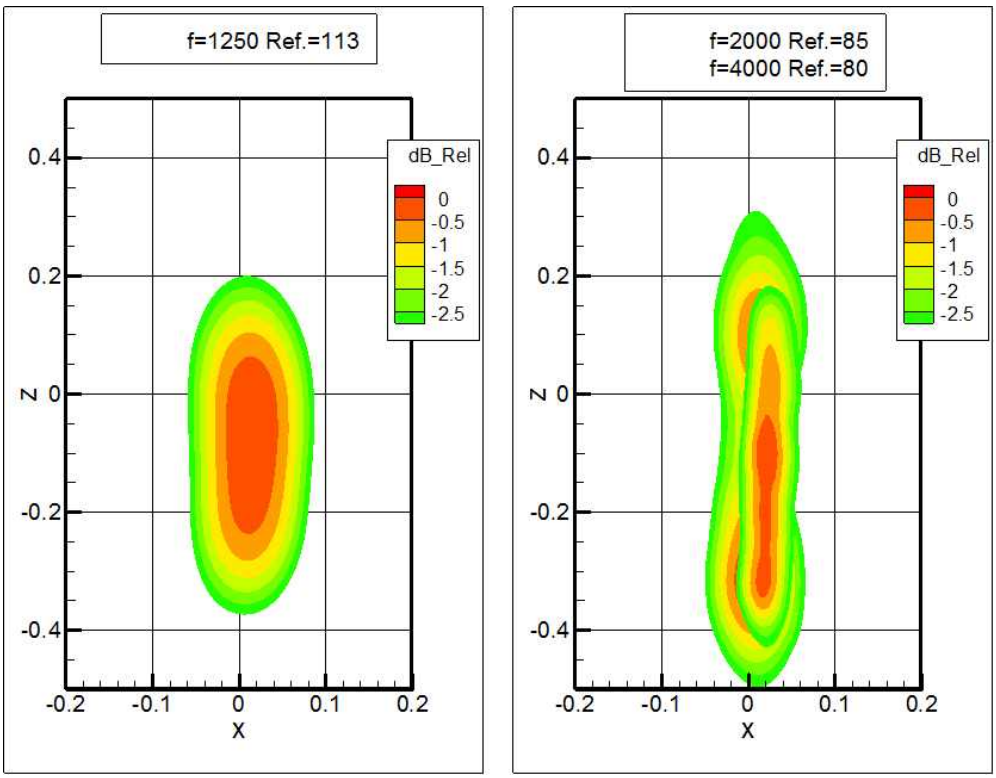


그림 3-2-13 소음시험시스템 검증시험 결과 : 직경 10mm 수직 원통봉

그림 3-2-12에 나타난 시험장비의 소음성능을 파악하기 위해 스피커 및 실린더를 활용한 검증시험을 수행하였다. 그림 3-2-13에 나타난 것과 같이 시험부 중심에 설치된 수직봉의 위치를 측정 주파수 영역에서 잘 파악하고 있다. 연구 개발된 소음측정 시스템은 최대 풍속 430km/h 조건 모사가 가능한 단면적 4m x 3m 폐쇄형시험부에서 시험체의 소음특성(주소음 발생 위치)을 잘 파악하고 있으므로 고속철도 팬터그래프의 소음특성 분석 및 평가에 활용할 수 있다.



그림 3-2-14 관측창을 마이크로폰 어레이 모듈로 대체한 모습

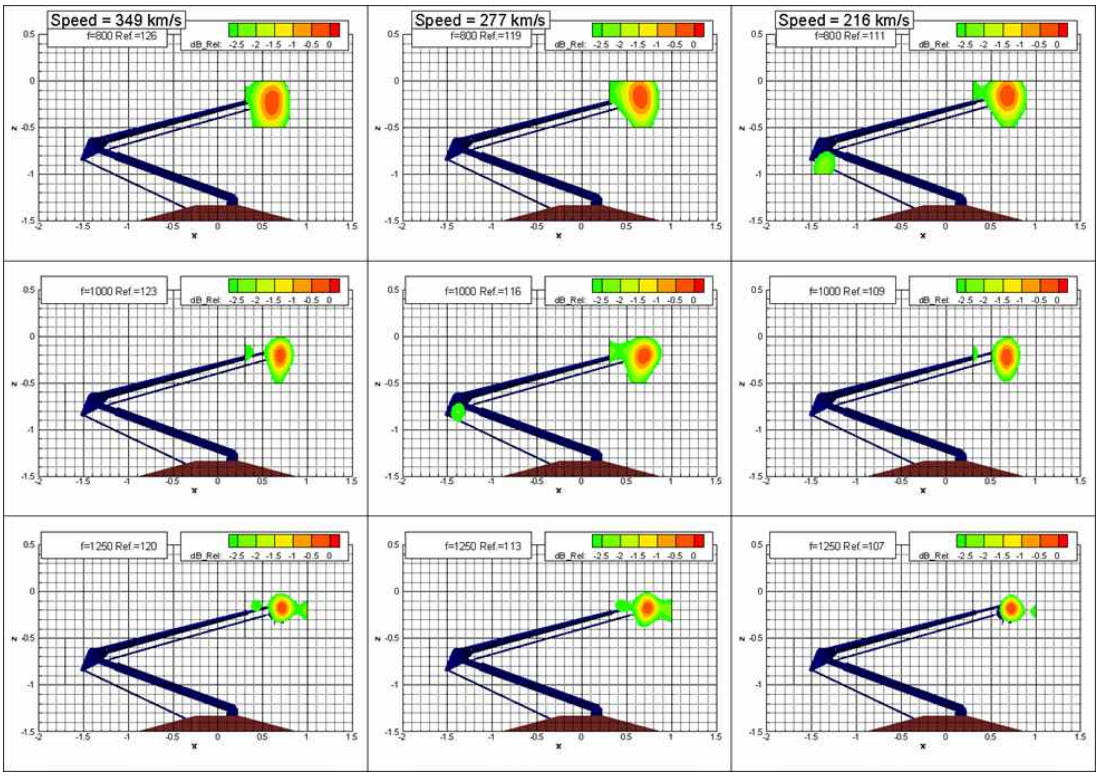


그림 3-2-15 팬터그래프 소음특성 빔포밍 결과

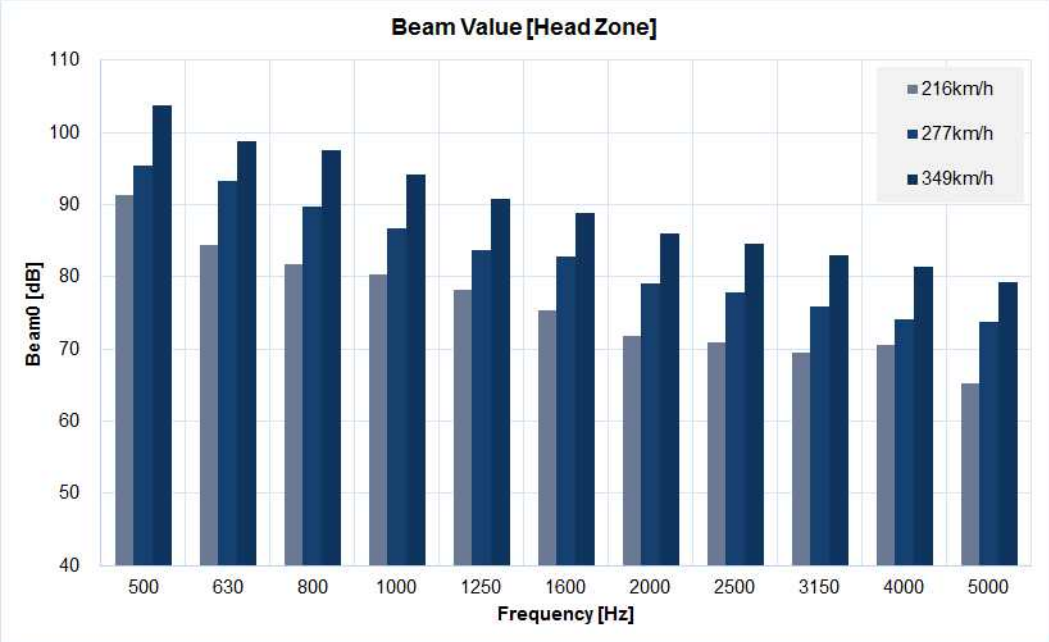


그림 3-2-16 팬터그래프 소음특성 : 속도에 따른 소음특성 변화

그림 3-2-14와 같이 연구 개발된 소음측정시스템을 활용하여 설계된 팬터그래프의 공력소음특성을 측정하였다. 그림 3-2-15과 같이 다양한 주행조건(주행속도, 측풍조건, 팬헤드 설치각도, 주행방향)에 대해 풍동시험을 수행한 후, 그 결과를 빔포밍 기법을 통해 분석하였다. 시험을 통해 구축한 자료는 설계기법 및 해석기법 검증에 활

용될 수 있을 것이다. 또한, 다양한 운영조건에 대해 시험을 수행하여 자료를 구축하였으므로 설계된 팬터그래프 형상을 실용화할 때 본 자료가 직접 활용될 수 있을 것이다.

우리나라는 고속전철의 운행속도를 5년 이내에 350km/h까지 증속시키는 것을 목표로 고속전철에 대한 활발한 연구 개발을 진행 중에 있다. 본 연구를 통해서 개발된 '팬터그래프 공력소음 풍동시험 기법 및 공력/소음특성 DB'는 향후 개발될 고속열차의 팬터그래프 공력 및 소음 설계 과정에서 적극 활용될 수 있으며, 이를 통해 시장 경쟁력이 있는 팬터그래프 형상 개발이 가능할 것으로 예상된다.

3. 실차소음측정과 풍동소음측정 결과간의 비교 분석

본 성과는 실제 차량에 탑재되는 팬터그래프에 대한 풍동소음 측정결과와 실차 주행 시 팬터그래프 소음측정 결과를 비교한 데이터베이스이다. 실차 팬터그래프 소음측정결과와 풍동소음 측정결과간의 1/3 octave band 주파수 분석을 통하여 팬터그래프 구성품의 주소음원을 규명하고 향후 관련 연구를 위한 기초 데이터베이스를 구축하는 것이 본 기술의 초점이다. 또한 본 연구를 통하여 도출된 실차 주행 시 팬터그래프 소음 측정 기법을 포함한다.

본 기술은 실차 주행 시 팬터그래프 소음과 풍동시험 소음측정결과의 비교 데이터베이스 구축을 위하여 각각의 측정방법 및 데이터 분석방법 그리고 데이터베이스 구축으로 구성되어 있다.

가. 실차 주행 시 팬터그래프 소음 측정

실차 주행 시 팬터그래프만의 소음을 분리하기 위하여 동일 지점 및 동일 속도에서 팬터그래프 상승모드 및 하강모드에서 각각 소음을 마이크로폰을 이용하여 측정한다. 이 때 열차 주행소음의 시간 이력을 살펴보게 되면, 차량의 주행에 따른 차량의 위치별 발생 소음의 크기를 파악할 수 있고, 이를 바탕으로 팬터그래프가 위치한 차량에서 팬터그래프의 상승상태와 하강상태에서의 열차소음에 미치는 영향을 간접적으로 비교할 수 있다. 그리고 이 때 발생하는 차이만큼을 팬터그래프에 의한 소음으로 평가한다. 측정된 소음을 1/3 Octave 분석을 통하여 팬터그래프 상승/하강 시 가장 차이가 크게나는 주파수 피크를 팬터그래프가 가장 큰 소음도 기여를 하는 주파수 대역으로 판단한다. 또한 열차 주행 시 소음 Array 시험을 병행 실시하여 열차 전체 소음에 대한 음장가시화를 실시하고 팬터그래프 상승/하강 시 팬터그래프 위치에서 특정주파수의 소음이 저감되는 것을 확인하여 마이크로폰 측정결과의 신뢰성을 확보한다.

이 방법의 장점은 기존에 열차의 소음원을 확인하기 위한 방법인 소음 Array 측정법의 단점을 보완한다는 점이다. 빔포밍 방법을 이용한 소음 Array측정방법의 장점은 소음의 공간적분포 (소음지도)를 주파수별로 생성하여, 특정 소음원의 위치 및 주파수 특성을 파악할 수 있다는 점이다. 그러나 이 방법의 단점은 소음 Array는 일종의 소

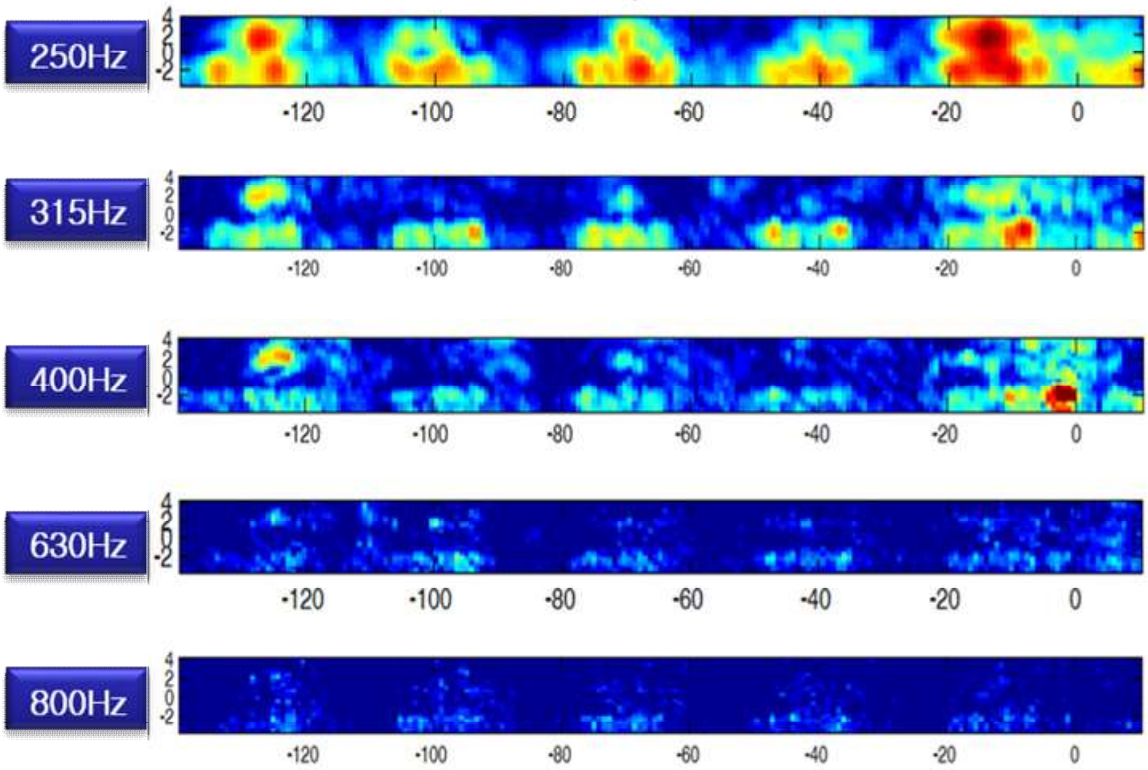
음에 대한 돋보기 역할을 하므로, 소음지도에서 나오는 소음의 크기가 절대적인 값이 아닌 상대적인 값이라는 점이다. 반면 단일 마이크로폰 시험은 소음의 절대적인 크기는 측정할 수 있으나 해당 소음의 정확한 위치를 파악할 수 없다. 그러나 팬터그래프 상승/하강 시 마이크로폰을 이용하여 그 소음의 크기의 차이를 절대적으로 평가하고, 소음 Array 시험을 이용하여 주파수 및 위치에 대한 신뢰성을 확보하게 되면 팬터그래프에 의한 소음을 정량적으로 평가할 수 있다. 단 이 방법은 팬터그래프 커버가 충분히 커서 팬터그래프 하강 시 커버에 의하여 유량이 차단이 되는 경우에 한해서이다. 하지만 최근의 고속열차는 대부분이 팬터그래프 소음 및 상부 애자류 및 MCB 보호를 위하여 팬터그래프 커버 혹은 페어링이 설치가 되기 때문에 충분히 의미가 있다고 판단된다. 본 측정방법의 상세한 내용은 본 보고서 2장의 2차년도 연구내용을 참조한다. 또한 본 측정방법은 숙련된 고속열차 운전기장, 차상시험총괄자(On Board Manager), 실외소음계측자간의 유기적인 협조가 필요하다는 점을 밝혀둔다. 예를 들면 측정지점에서 팬터그래프 상승/하강 시 동일속도를 유지하기 위해서는 적어도 측정 5km 전부터 KP별 목표속도를 설정 및 확인하고 측정 1km 전부터 타행주행을 통하여 측정지점에서 동일속도로 주행시험을 실시하는 노하우가 필요하다.

아래 그림들은 팬터그래프 상승/하강 시 차량옥상에서 찍은 영상 비교, 팬터그래프 상승/하강 시 소음 Array 측정결과 비교, 팬터그래프 상승/하강 시 마이크로폰 측정결과 1/3 octave 분석결과 비교이다.

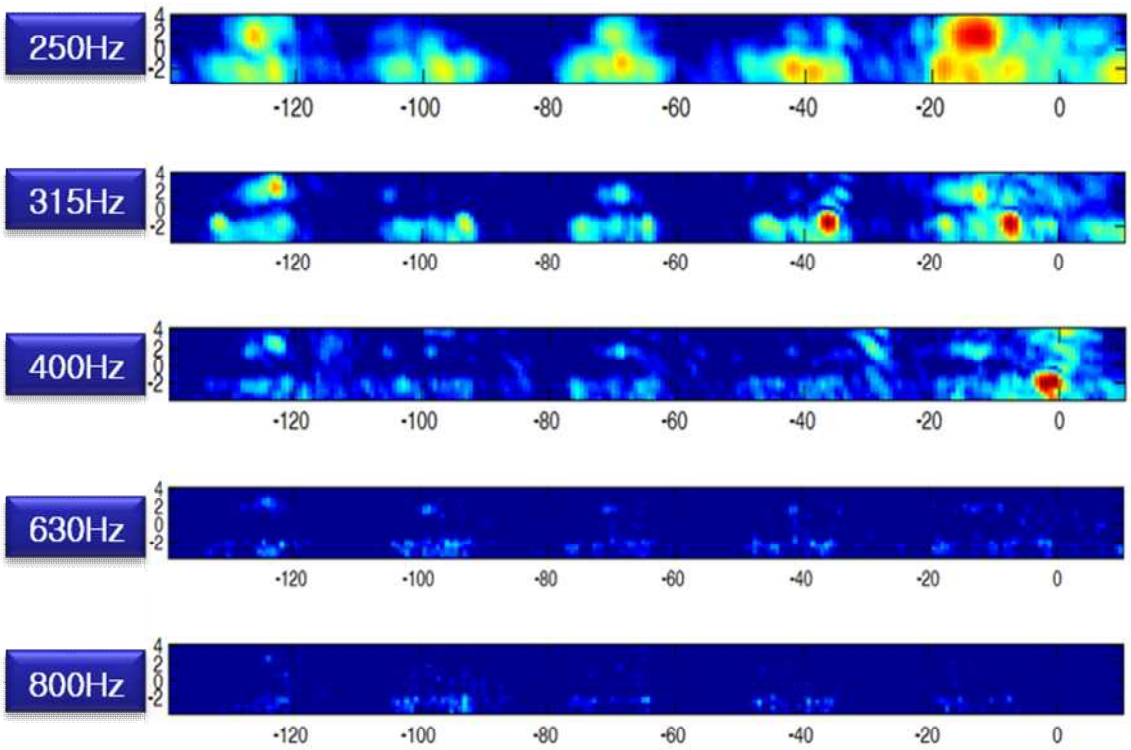


(a) 팬터그래프 하강 시 영상 (b) 팬터그래프 상승 시 영상

그림 3-2-17 팬터그래프 상승/하강 시 영상비교



(a) 350km/h 팬터그래프 상승모드 음장가시화 : 1/3 옥타브



(b) 350km/h 팬터그래프 하강모드 음장가시화 : 1/3 옥타브

그림 3-2-18 350 km/h 주행 시 팬터그래프 상승/하강 모드 음장가시화 비교

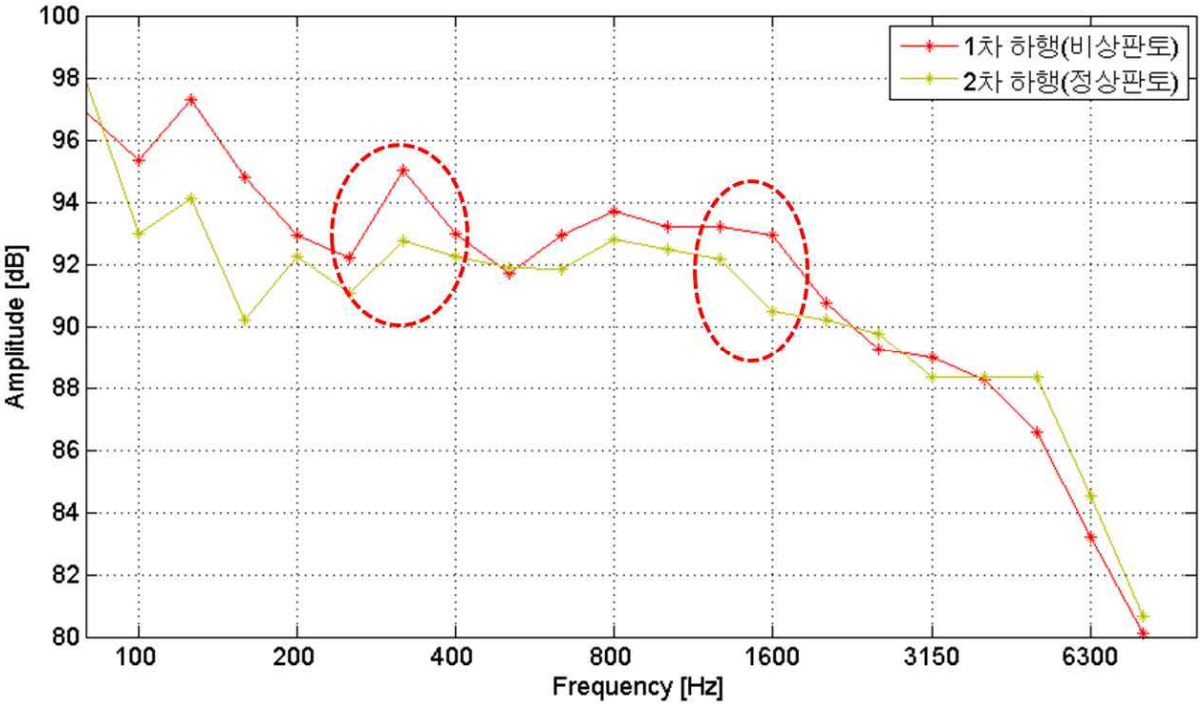


그림 3-2-19 330km/h 주행 시 팬터그래프 상승/하강 비교

나. 풍동 팬터그래프 소음 측정

본 연구에서는 공동연구기관인 항우연의 풍동을 이용하여 팬터그래프의 소음을 측정하였다. 본 시험의 목적은 실차시험을 통해서 측정된 팬터그래프의 소음 특성을 유사한 속도대역의 풍동시험 소음결과와 비교하여 실차시험결과와 풍동시험결과간의 상호 신뢰성을 확보하는 것이다. 팬터그래프에 대한 풍동에서의 공력소음 측정은 국내외에서 다양하게 진행되어왔고 그 측정기법 역시 많이 개발이 되었기 때문에 측정방법에 대한 상세한 기술은 생략하고 핵심내용만 기술한다.

앞서 측정된 팬터그래프 실차소음 측정결과와 풍동소음 측정결과간의 비교데이터베이스 구축을 위하여 실차에 장착된 팬터그래프를 풍동에 설치하여 속도대역별로 마이크로폰을 이용하여 소음을 측정한다. 또한 실제 스케일의 팬터그래프이므로 고속대역의 유속을 흘려줄 수 있는 아음속 풍동을 이용하는 것이 바람직하다. 실험 시 가장 유의할 점은 팬터그래프를 실제 운용환경과 최대한 유사하게 동작하도록 조절하는 것이다. 이를 위하여 팬터그래프의 상승을 위한 압축공기 투입 시 실차에서 사용되는 공압 레귤레이터를 이용하여 일정한 압력을 유지하도록 하였다. 또한 투입되는 압력값은 실차의 고속주행 시와 동일한 압력으로 설정하였으며, 팬헤드 높이는 레일바닥면에서부터의 고속선 높이인 5080mm 가 되도록 다음그림과 같이 4개의 와이어로프를 이용하여 조정한다. 소음 측정 유속은 실제 차량의 운영속도와 팬터그래프로 유입되는 유속을 고려하여 설정한다. 다음 그림은 상기조건을 설정한 후 유속에 따른 팬터그래프 소음을 1/3 octave band 주파수 분석을 수행한 측정결과이다.

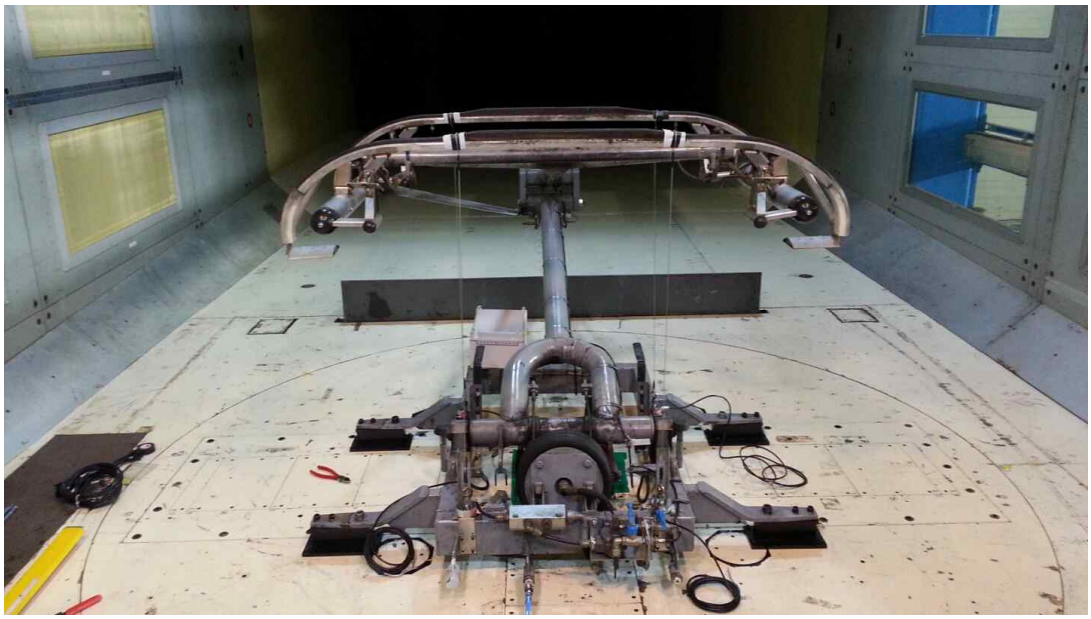


그림 3-2-20 풍동시험을 통한 실제 팬터그래프 소음 측정

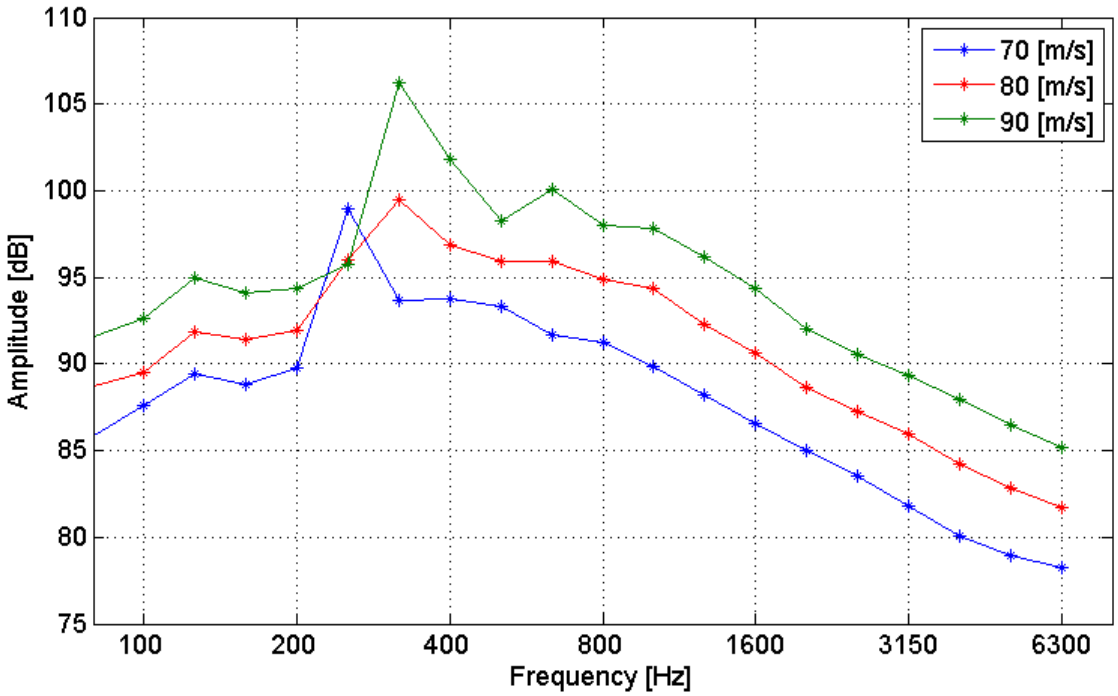


그림 3-2-21 실제 팬터그래프 풍동 공력소음 측정 결과

다. 실차 팬터그래프 소음측정결과와 풍동소음측정결과 비교 데이터베이스

앞서 수행한 실차 팬터그래프 상승/하강 시 소음측정결과와 풍동소음측정결과를 비교하기 위해서는 주파수 분석의 실행 및 그 결과를 데이터베이스로 구축하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 모든 속도대역별 측정결과를 1/3 Octave Band 주파수 분석을 수행하여 주파수별 소음크기(dB)를 하나의 데이터베이스로 구축하였다. 한편 이 데이

터베이스를 이용하여 실차주행 시 팬터그래프 소음과 풍동소음 측정결과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

우선 팬터그래프에 대한 풍동소음시험이나 실차시험 모두 315Hz 대역에서 피크주파수를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 특히 앞서 논의된 바와 같이 이 315Hz대역은 팬터그래프를 하강시켰을 때 가장 큰 소음의 차이를 보여주는 주파수이다. 또한 실차 팬터그래프 상승/하강 비교 시 주요 차이가 발생하는 주파수는 330 ~ 350 km/h 주행 시 전체적으로 315 ~ 400 Hz 대역이었다는 점에서 풍동소음의 측정결과와 매우 잘 일치한다고 볼 수 있다. 특히 315 ~ 400 Hz 대역은 소음 어레이에서 팬터그래프 소음으로 판단되는 250 Hz ~ 400 Hz의 영역과 공통된다. 또한 이 결과는 TGV의 음장가시화 결과인 320 km/h 주행 시 250 ~ 315 Hz 대역의 강한 팬터그래프 소음과도 일치하는 경향을 보인다. 이는 팬터그래프 팬헤드에 의한 Vortex shedding의 영향이라고 판단되며, 팬터그래프로 유입되는 유속을 감안하여 팬터그래프 팬헤드에 대한 vortex shedding 주파수를 계산하면 (단, Strouhal number 0.135 가정) 350 km/h 주행 시 340 Hz, 330 km/h 주행 시 320 Hz 대역에서 팬헤드 소음이 나오게 된다. 즉 실차시험이나 Strouhal 수에 의한 이론적 계산이나 300 ~ 400 Hz 대역에서 팬터그래프 팬헤드에 의한 주소음이 발생한다는 것을 알 수 있고 이는 풍동소음 시험을 통해서도 재현되는 것을 알 수 있다. 따라서 풍동시험을 통하여 실제 팬터그래프의 소음 특성을 주파수 측면에서 매우 잘 평가할 수 있다고 판단된다. 또한 실차 팬터그래프 상승/하강 소음 측정 시 또 다른 차이가 발생하는 주파수인 1000~1250Hz는 풍동시험에서는 관측되지 않는다. 이는 해당주파수가 팬터그래프 주위의 Cavity에 의한 소음이라는 주장이라는 결론을 뒷받침한다고 판단된다.

마지막으로 국내연구 중 실차에서의 팬터그래프 소음과 풍동소음의 특성을 비교분석한 연구나 데이터베이스는 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에 의한 실차 주행 시 팬터그래프 상승/하강 비교 소음 데이터와 풍동시험 소음데이터는 향후 관련 연구를 위한 귀중한 데이터베이스로의 활용이 가능하다고 판단된다.

3절 주요 연구성과

1. 학술적 성과

가. 논문게재 성과

(1) 국외논문

게재 연도	논문명	저자			학술지명	Vol.	국내외 구분	SCI구분
		주저자	교신저자	공동저자				

2014	Multi-resolution analysis for High accuracy and efficiency of euler computation	강형민	이도형	김규홍	International Journal for Numerical Methods in Fluids	74	국외	SCI
2013	Experimental Studies on the Aerodynamic Characteristics of a Pantograph Suitable for a High-speed Train	이영빈	김규홍	이동호	PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART F-JOURNAL OF RAIL AND RAPID TRANSIT	229(2)	국외	SCIE
2013	Effects of nose shape and tunnel cross-sectional area on aerodynamic drag of train traveling in tunnels	최중근	김규홍		Tunnelling and Underground Space Technology	41	국외	SCIE
2015	Investigation of passive flow control on the bluff body with moving-belt experiment	노주현	김규홍	이동호	International Journal of Aeronautical and Space Sciences	Submitted	국외	SCIE

2015	Optimal Shape of Contact Strip for High Speed Pantograph	노주현	김규홍		International Journal of Aeronautical and Space Sciences	Submitted	국외	SCIE
2015	Investigation on Aerodynamic Drag of Korean High Speed Train (HEMU-430X) due to Roof Apparatus for Electrical Device	이영빈	김규홍	노주현 권혁빈	Journal of Mechanical Science and Technology	Submitted	국외	SCIE

(2) 국내논문

게재 연도	논문명	저자			학술지명	Vol.
		주저자	교신저자	공동저자		
2013	유선형 형상 개선을 통한 고성능 EMU 열차의 공기저항 저감연구	권혁빈	권혁빈	홍재성	한국철도학회지	제16권 3호
2015	폐쇄형 시험부에서 케블라 덮개가 장착된 마이크로폰 어레이의 주파수 특성에 대한 실험적 연구	황은수	황은수		한국소음진동공학회논문집	제25권 제3호
2015	고속열차 외부장치에 의한 주행저항 기여도 연구	오혁근	권혁빈	곽민호 김상수 김석원	한국철도학회 논문집	심사중

2015	전산해석을 통한 고속철도 더블암 팬터그래프의 부재별 공력소음특성 연구	이상아	김규홍	이영빈 김철완	한국전산유체공학회 논문집	심사중
2015	전산해석을 통한 고속철도용 저소음 저저항 팬터그래프 형상설계 연구	정성민	김규홍	이상아 노주현	한국전산유체공학회 논문집	심사중

나. 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
12.10.18	공력특성을 이용한 팬터그래프 소음저감 예상 연구	이영빈	한국철도학회	국내
12.10.19	고속철도 팬터그래프의 부재별 공력소음특성 연구	이상아	한국철도학회	국내
12.11.1	KARI 중형 아음속 풍동에서 소음측정 시험 사례	조태환	2012 풍동 workshop	국내
13.04.10	고속철도 팬터그래프 시스템 1/2 축소모델 풍동시험	조태환	한국항공우주학회	국내
2013.11.25. ~ 2013.11.28	Decomposition and reduction of aerodynamic drag of high-speed train	권혁빈 오혁근	World Congress on Railway Research	국외
2014.4.17	KARI 개방형시험부에서 수행된 고속철도 차량 판토그라프 공력소음 풍동시험	조태환	한국항공우주공학회 춘계학술대회	국내
2014.4.24	폐쇄형 시험부에서 케블라 섬유가 장착된 마이크로폰 어레이를 이용한 주파수 특성에 대한 실험적 연구	황은수	한국소음진동공학회 춘계학술대회	국내
2013.05.23	고속용 팬터그래프에서 팬헤드 부가장치를 통한 공력소음 및 공기저항 감소연구	이영빈	한국철도학회	국내

2014.6.25	Study of High Speed Train Pantograph Arm for Aerodynamic Drag and Noise Reduction using Numerical Simulation	정성민	AEROVEHICLES 1	국외
2014.05.15	고속열차용 팬터그래프의 공력저항 및 공력소음 저감을 위한 팬터그래프 암 형상 전산해석연구	정성민	대한기계학회 유체부분 학술대회	국내
2014.11.11.~2014.11.14	고속열차용 팬터그래프의 공력저항 및 공력소음 저감을 위한 팬터그래프 팬헤드 형상 전산해석	정성민	대한기계학회 추계학술대회	국내

2. 특허성과

출원된 특허의 경우						등록된 특허의 경우					
해당차년	출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호	해당차년	등록연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
3	2015	공력소음 저감을 위한 팬헤드 부착물을 구비하는 고속열차용 팬터그래프	서울대학교 산학협력단	대한민국	10-2015-0075145	2	2013	팬터그래프 프레임 부가장치	서울대학교산학협력단, 한국철도기술연구원	대한민국	1012669800000

4절 기술실시 및 적용사례

본 연구는 실용화를 위한 전단계 수준의 연구로서 특별한 기술실시 및 적용사례는 존재하지 않는다. 그러나 본 연구를 통해서 개발된 팬터그래프의 저소음 저저항 최적 설계안은 국내에서 팬터그래프 개발 시에 적용가능할 것으로 판단된다. 그리고 항공우주연구원에서 구축한 폐쇄형 시험부는 팬터그래프 개발 시에 실차시험 전에 실제 고속열차 운행속도 대역에서 풀스케일 팬터그래프의 공력성능 및 공력소음에 대한 평가를 실시할 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 본 연구를 통하여 팬터그래프 소음의 평가방법을 도출하였으며, 향후 본 기법을 이용해서 실제 제작된 팬터그래프의 소음을 사전에 검토할 수 있다고 판단된다. 또한 본 연구를 통하여 실차에서의 팬터그래프 소음 중 300 ~ 500 Hz 대역의 집전판 소음이 가장 큰 기여를 한다는 것을 실험적으로 확인하였다. 따라서 향후 신규 팬터그래프 개발 시 소음저감을 위해서는 집전판 소음 저감 중심의 연구가 필요하다는 기술연구방향을 제시할 수 있었다.

5절 기술개발성과의 국내외 시장전망

1. 개요

고속철도용 팬터그래프는 전기 고속철도에는 반드시 들어가야 하는 핵심부품으로 전 세계 고속철도 시장전망과 그 시장전망이 비례한다. 따라서 본 연구에서는 국내 및 세계고속철도 시장전망을 통하여 본 기술개발 성과의 시장전망을 예측하고자 한다.

2. 국내고속철도 시장전망

가. 고속열차 이용실적 증대

현재(2014년 기준) 한국 고속철도 1일 이용객 15만명으로 2004년 7만2천명 대비 100% 이상 증가하였고, 1일 운행횟수 2004년 132회에서 232회로 증가하였다. 이에 따라 현재 국내 고속열차 운영 현황(발주완료 차량까지 포함)은 다음과 같다.

나. 국내 고속열차 운영현황 및 계획

- 국내 고속열차 운영 현황
  · KTX 920량(2004년 운행), KTX산천 240량(2010년 운행)
  · 호남고속열차 220량 운영 예정 (2015년)
  · 수서고속열차 100량 운행 예정 (2016년)
  · 원강선 고속열차 150량 운행 예정 (2017년)

한편 이와 별도로 국토교통부의 노선계획을 검토하고 신규고속차량의 수요를 예측하면 표 3-5-1과 같다. 국토부 철도차량 중장기 운영계획(철도산업위원회, 2014.9.4.)에 의하면 일반철도 7개 노선에 대하여 설계속도 200km/h이상의 고속선을 649km 연장/개량 건설예정이며, 이에 따라서 2020년까지 282량의 차량수요가 있을 것으로 예상된다. 또한 2020년 이후엔 경부고속선 개통전에 도입된 KTX 초도차량의 내구 연한인 30년이 지나면서 KTX를 대체하는 신규300 km/h급 고속철도 920량의 수요도 있을 것으로 기대된다. 아래는 국토교통부에서 계획하고 있는 250km/h 급 고속철도 수요를 정리한 결과이다. 따라서 고속열차 팬터그래프에 대한 수요는 최소 2020년까지는 총 46편성에 대하여 존재할 것으로 판단된다. 고속철도의 차량구입비용은 1편성당 약 350억원(KTX-산천 기준)이며 이중 팬터그래프의 구매비용은 팬터그래프 1개당 구매단가가 약 3300만원이며 1개의 편성 당 2개의 팬터그래프가 설치되므로 6600만원으로 전체 차량구매비용의 약 0.2%에 해당한다. 46편성이 될 경우 약 30억원의 팬터그래프 구매비용이 발생할 것으로 판단된다.

표 3-5-1 국토교통부 국내 신규 고속철도 건설계획 및 차량수요

노선	건설 구간(신선)	공사예정기간	차량계획 (수량)	차량 구매비용 (억원)	팬터그래프 구매비용 (천만원)
원 강 선	원주~강릉	~ 2018년	12편성 (72량)	4,200	79.2
중부내륙선	이천~문경	2015년 ~ 2021년	1편성 (6량)	350	6.6
중 앙 선	도담~신경주	2014년 ~ 2020년	15편성 (90량)	5,250	99
서 해 선	홍성~송산	2015년 ~ 2020년	13편성 (78량)	4,550	85.8
경 전 선	부전~마산, 보성~임성리	2014년 ~ 2020년	5편성 (30량)	1,750	33
합 계			46편성 (282량)	16,100	303.6

3. 해외고속철도 시장전망

가. 해외고속철도 시장 동향

고속철도 시장은 최근 환경에 대한 관심이 커지면서 저탄소 녹색성장을 위한 교통해법으로 부각되면서 시장 수요가 급격히 증가할 것으로 예상된다. 특히, 고속철도는 지속성장 가능한 녹색 교통의 대표 수송수단으로 주목받고, 미래 교통시장을 이끌 주역으로 급부상하고 있다.

WTO 및 정부조달협정 가입국이 늘어나면서 국제입찰에 부치는 공사가 많아 시장규모가 계속 확대될 예상되며, 특히, 고속철도를 건설할 때 경기부양 효과가 클 것으로 예상되어 미래형 교통수단으로 지목하며 관심이 높다. 실제로, 일본의 경우 개통후 3년째에 단기년도 흑자를 기록하였고 프랑스도 개통 후 12년 만에 투자비를 모두 회수한 바가 있다.

나. 세계철도시장 규모

고속철도를 포함한 전세계 철도시장의 규모는 표 3-5-2와 같다. 환경, 에너지 문제 해소를 위해 전 세계는 철도 중심으로 Modal Shift되고 있으며, 철도시장은 연간 성장률 4.5% 성장할 것으로 추정된다.

표 3-5-2. 세계 국가별 고속철도 현황(2014년 10월 기준) [4)]

국가	총연장	시험운행 최고속도	운행 최고속도	인구	총연장/인구
	(km)	(km/h)	(km/h)	(십만명)	(십만명/km)
벨기에	209	347	300	104	2.0
중국	19,369	487	300	13,570	1.4
프랑스	2,036	574	320	663	3.1
독일	1,334	406	300	809	1.6
이탈리아	923	368	300	617	1.5
일본	2,664	443	320	1,271	2.1
노르웨이	64	260	210	51	1.3
네덜란드	100	336	300	168	0.6
스위스	80	280	250	80	1.0
대한민국	819	421	305	514	1.6
스페인	3,100	404	310	477	6.5
영국	1,377	335	300	637	2.2
미국	362	264	240	3,189	0.1
러시아	1,496	290	250	1,425	1.0
우즈베키스탄	344	255	250	289	1.2
오스트리아	292	275	250	82	3.6
터키	1,420	303	250	816	1.7
대만	345	315	300	234	1.5

다. 세계 주요국가 고속철도 고속열차 구매 계획

현재, 일본의 신간선(500계), 프랑스의 TGV 군과 타리스, 유로스타, 독일의 ICE3, 스페인의 AVE, 한국의 KTX가 세계최고속도인 300km/h로 영업운전 하고 있다. 특히, 유럽과 아시아 지역의 고속철도가 전 세계 노선의 97% 이상을 차지하며 이중 유럽 56%, 아시아 41% 규모이며 미국, 캐나다, 러시아 등의 계획 노선까지 고려하면 세계 고속철도 노선망은 더욱 확대될 것으로 전망된다. 이와 함께, 인도네시아, 터키, 알제리, 이집트, 이란, 태국 등 많은 나라에서 고속철 프로젝트 진행 중이거나 구상 중이며, 2011년 개통된 핀란드의 헬싱키와 러시아의 상트페테르부르크 간 노선처럼 국경을 넘는 고속철도도 등장하였다.

4) "High Speed lines in the world", France, International Union of Railways, 1st September 2014.

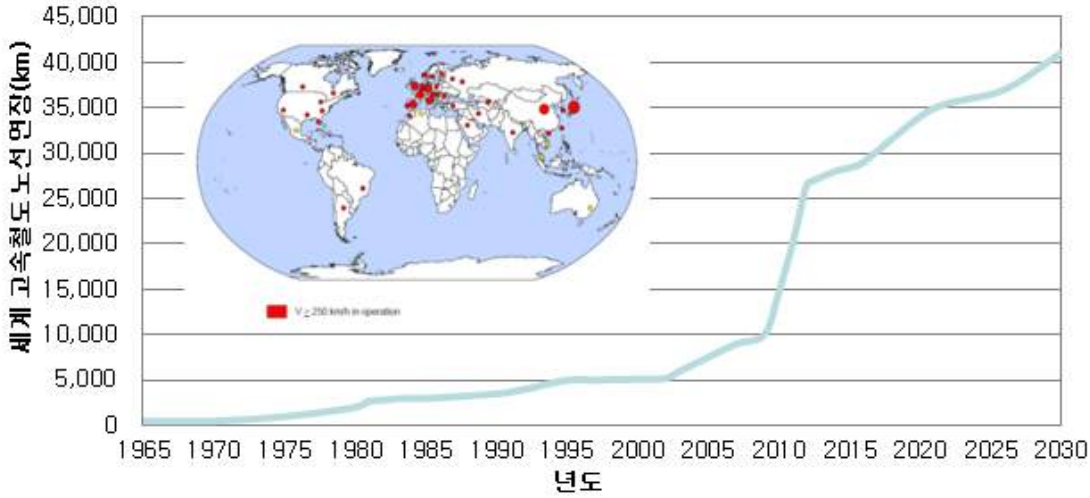


그림 3-5-1 세계 고속철도 노선 연장 추이 및 전망

미국과 브라질 등의 국가에서는 대규모 고속철도사업 발주계획에 따라, 국내 고속철도건설의 경험을 갖고 있는 우리나라 건설업체의 미래전략산업으로 고려되고 있다. 특히, 고속철도사업은 차량 표준의 결정에 따라 차량 및 시스템, 건설 등의 진출 가능성 여부가 달라지기 때문에, 고속철도 기술을 보유한 일본, 독일, 스페인, 중국, 그리고 우리나라의 경쟁이 치열이 치열할 것으로 예상된다. 이처럼, 시장개방과 경제활동의 세계화가 진행되면서 유럽과 아시아 간의 대륙철도 연계망의 확대에 대한 필요성이 증대되며, 중국과 러시아의 급속한 발전에 따라 그 확대 가능성이 더욱 높아진다.

(1) 국가별 고속철도 개발 동향 및 수요

○ 일본

- 국토종단 노선 포함해 2,459km의 고속철도망 보유 중.
- 하노이와 호치만을 연결하는 1,630km 구간(326억 달러)을 2020년 개통을 목표로 일본 업체가 착공할 전망이며 이중 약 6천만 달러는 팬터그래프 비용으로 예상됨.

○ 프랑스

- 프랑스국영철도(SNCF)는 2008-2014년까지 300개 전후의 고속철도 열차 구매를 진행 중
- 2020년까지 TGV파리~남동부 열차 현대화 계획

○ 독일

- 독일국영철도(DB)는 2036년까지 300개의 신형 ICE고속철도를 구매할 계획

○ 스페인

- 1992년 바르셀로나 올림픽과 세비야 엑스포 '92에 따른 국내 수송 장애 문제점 해결방안으로 고속철도가 건설.
- 마드리드~세비야 교통축의 코르도바~슈디드 릴 간 산악지대의 복선화 및 표준궤간화를 검토.

- 안달루시아 지역개발 촉진책의 목적으로 마드리드~세비야간 고속철도 건설계획 확정.

○ 중국

- 전국 7.7만km의 철도망 보유(최고속도 350km로 세계 1위 수준)

- 2010~2014년 사이에 사종사횡의 골격인 고속철도망이 기본적으로 형성되어, 대규모 고속철도의 건설·운영이 미래 중국경제의 지역·산업구조에 중요한 영향을 미칠 것이며 해당지역은 관련된 상장기업에 투자기회를 가져다 줄 전망.

- 현재 7,571km의 운용속도 200km/h 이상인 고속철도를 건설 중이며 장기적으로 3,777km 더 연장할 계획.

○ 미국

- 598억 달러의 비용(이 중 팬터그래프 구입비용 약 1.1억 달러)이 소요될 것으로 추정되는 캘리포니아 고속철도(1,280km, 450억 달러), 플로리다 고속철도(502km, 118억 달러) 건설 및 도시간 철도건설 투자 등 철도 인프라투자를 통해 경기 활성화 추진 계획.

- 31개 주에서 31개 노선, 13개 지역의 고속철도망 건설사업 추진 예정

○ 아프리카/중동지역

- 2010년 GCC 사무국이 걸프 6개국을 연결하는 총연장 2,177km의 GCC 고속철도 프로젝트를 2010년 12월 발주, 2016년에 완공을 목표로 추진(건설교통기술 글로벌 동향, 2011)

- GCC 6개국이 추진 중인 철도 프로젝트 규모는 1,135억 달러이며 이 중 팬터그래프 구입비용은 약 2.1억 달러로 예상됨.

- 중동과 아프리카(MENA) 지역의 연평균 철도시장 규모는 2005~2015년 20% 증가세.

○ 브라질

- 리우데자네이루~상파울루~캄피나스를 연결하는 총연장 511km, 190억 달러의 발주 계획이 있으며 이 중 팬터그래프 구입비용은 약 3천만 달러로 예상됨.

- 브라질 정부는 기술이전 등을 고려해 향후, 상파울루, 미나스 제라이스, 파라나주 등 인접지역을 연결하는 고속철도 추가 발주 계획.

(2) 세계 철도시장 규모 및 전망

세계 고속철도 시장 규모는 2010~2024년간 약 20,000km의 연장 증설 전망에 기반, 1km당 0.26억달러의 사업비 가정, 총 5,200억 달러, 연평균 350억 달러의 시장이 전망되며 이 중 팬터그래프의 구입비용은 총 9.8억 달러, 연평균 7천만 달러로 예상된다. 각국 경기부양에 따른 철도 예산 투입액은 프랑스 300만유로, 중국 1,250억 달러, 미국 130억 달러로 유럽과 아시아는 각각 CAGR(2006~2010)이 2.8%와 5.4% 성장하여 2010년 1,133억 달러와 1,117억 달러 규모로 예측된다.

그리고 그림 3-5-2에서 보듯이 2015년에서 2017년 사이에 고속철도 전체시장의 성장률이 2011~2012년의 성장률에 비해서 전 지역에서 상승하여 전체시장의 규모의 성

장이 가속화 될 것으로 전망된다.[5)]

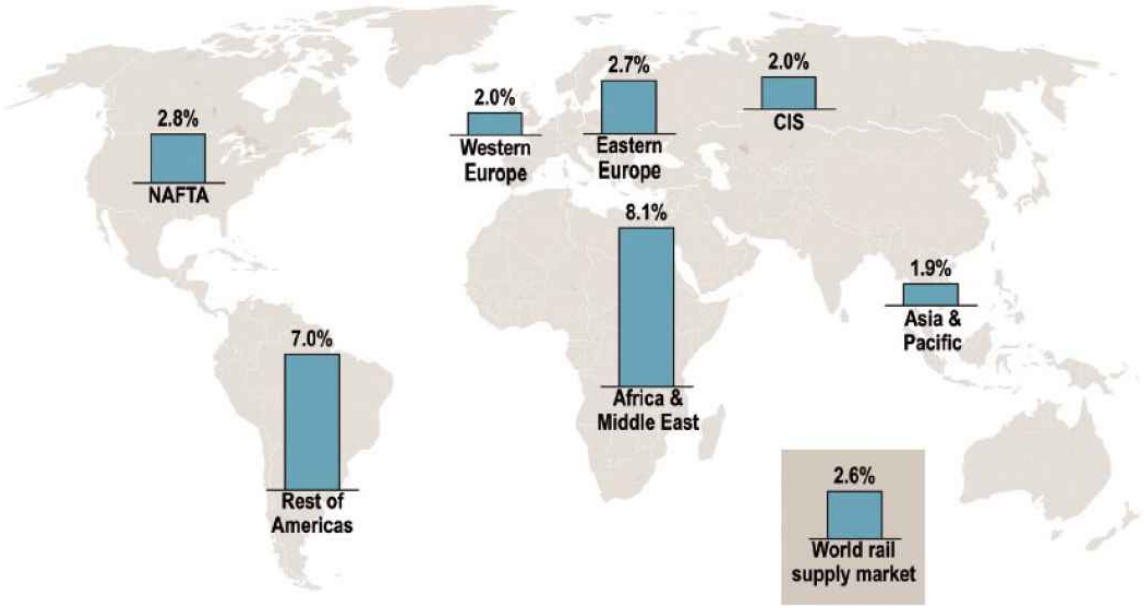


그림 3-5-2 지역별 세계철도시장전말(2011~2012년 대비 2015~2017년 성장률)

위의결과에서 알 수 있듯이 세계 고속철도 시장은 지속적으로 성장할 것이며, 이에 따라 고속열차 팬터그래프 시장도 지속적으로 성장할 것으로 예상된다.

5) 철도차량 제10호, 한국철도차량공업협회, 2014.1

제4장 연구목표 달성 및 효과

1절 연구개발 최종목표 달성도

1. 1차년도 최종목표 달성도

가. 서울대학교

목 표	달 성 도 (%)	내 용
팬터그래프 시스템의 요소별 공력특성 파악 및 분석	100%	전산해석을 통한 기존 싱글암타입 팬터그래프 격자 시스템 구성 전산해석을 통한 기존 싱글암 타입 팬터그래프 주위의 유동해석 팬터그래프 형상 공력설계를 위한 공력 특성 정립
공력성능 향상을 위한 파라미터 분석 및 선정	100%	팬터그래프 요소별 소음 및 공력 특성 분석 팬터그래프 공력 성능 향상을 위한 파라미터 선정
팬헤드 형상 최적설계	100%	전산해석을 통한 저소음/저저항 팬헤드 형상 최적화 설계

나. 철도기술연구원

목 표	달 성 도 (%)	내 용
열차 상부경계층 분석을 통한 팬터그래프 전방경계조건 연구	100%	기존 열차 상부경계층 수집 및 분석 열차상부경계층 분석을 통한 팬터그래프 전방경계조건 도출
팬터그래프 운용시나리오 및 설계요구조건 개발	100%	팬터그래프 운용시나리오 구축 팬터그래프 설계 요구조건 개발 팬터그래프 설계제약사항 분석
기존 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 분석	100%	기존 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 시뮬레이션 및 검증

다. 항공우주연구원

목 표	달 성 도 (%)	내 용
기존 싱글암 타입 팬터 그래프 시스템의 요소별 공력 특성 파악 및 분석	100%	장비 구축 및 예비 풍동시험 공력소음 및 공력성능 풍동시험 팬터그래프 형상 공력설계를 위한 공력 특성 정립 풍동시험을 통한 기존 팬터그래프 시스템의 소음특성 분석

2. 2차년도 최종목표 달성도

가. 서울대학교

목 표	달 성 도 (%)	내 용
전산해석을 통한 저소음/저저항 팬터그래프 암 최적화 설계	100%	전산해석을 통해 기존 싱글암타입 팬터그래프 형상에 단면최적화한 암형상을 적용하여 설계 후 전산해석하여 성능을 확인
부재 간 상호작용을 고려한 팬터그래프 최적화연구	100%	기존 싱글암타입 팬터그래프 암에서 주요 소음부에 해당하는 암 연결부 형상에 유선형 캡을 설치하여 전산해석을 수행한 후 성능을 확인
전산해석을 통한 최적화된 형상의 설계요구조건에서의 팬터그래프 소음 평가 및 검증	100%	1차년도에 선정한 팬터그래프 팬헤드 최적단면과 2차년도에서 설계한 암단면 및 연결부 유선형 캡을 모두 적용한 최적 팬터그래프 형상을 전산해석하여 공력 저항 및 소음을 평가

나. 철도기술연구원

목 표	달 성 도 (%)	내 용
팬터그래프 공력소음 비중 제시	100%	HEMU-430X 환경소음 분석을 통한 팬터그래프 공력소음 비중 제시
350km/h급 팬터그래프 소음평가절차 수립	100%	실차에서의 팬터그래프 소음평가절차 수립 : HEMU-430X 대상 소음 측정 시험 수행
공력에의한 팬터그래프 접촉력 영향 평가	100%	HEMU-430X 팬터그래프 접촉력 FFT 분석을 통한 공력에의한 접촉력 영향 평가

다. 항공우주연구원

목 표	달 성 도 (%)	내 용
3차년도 시험을 위한 폐쇄형시험부 소음시험장치 및 기법개발	100%	폐쇄형시험부 소음측정 어레이 시스템 구축 및 검증시험 완료

3. 3차년도 최종목표 달성도

가. 서울대학교

목 표	달 성 도 (%)	내 용
최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 제작	100%	2차년도에 설계한 최적설계 팬터그래프 설계안을 바타으로 풍동실험을 위한 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 제작 완료
최적 설계 풀스케일 팬터그래프 형상 모델 성능 평가	100%	3차년도 수행한 풀스케일 팬터그래프의 풍동실험과 전산해석의 데이터 비교를 통해서 전산해석의 신뢰성을 확인한 후 동일한 조건에서 최적설계 전의 기존 팬터그래프의 전산해석을 수행하여 공력소음 및 공력저항의 저감을 확인하였음

나. 철도기술연구원

목 표	달성도(%)	내 용
최적설계 팬터그래프의 환경소음 저감 기여도 평가	100%	HEMU-430X 팬터그래프 소음기여율 평가 및 문헌조사등을 통하여 최적설계 팬터그래프 적용 시 350km/h에서 환경소음 을 약 1.6dB 저감 가능함을 제시
실차소음측정과 풍동소음측정 결과 간의 비교 분석	100%	실차에서 300~350 km/h 주행 중 300~500 Hz 대역이 주 팬터그래프 소음원인을 확인하였으며, 이는 Closed 풍동소음 결과(항우연)와 비슷한 주파수 대역을 보임을 확인함
공력최적설계(서울대) 팬터그래프의 동특성 및 집전성능 예측	100%	공력최적설계 팬터그래프 (Arm 질량 및 팬헤드 질량 변화)의 동특성 및 집전성능을 해석을 통하여 분석하였음

다. 항공우주연구원

목 표	달 성 도 (%)	내 용
최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 형상의 공력소음 및 공력성능 특성 정립	100%	2차년도에 구축한 400km/h급 폐쇄형 시험부에서 풍동시험을 통해서 최적설계된 풀스케일 팬터그래프의 실험을 수행하여 공력소음 및 공력성능에 대한 특성을 정립하였으며 추가로 전산해석을 통해서도 데이터베이스 구축을 마침

2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

본 연구는 실용화를 위한 전 단계 수준의 연구로서, 기본 요소기술을 확립하는 연구이다. 본 연구를 통하여 팬터그래프 소음의 평가방법을 도출하였으며, 향후 본 기법을 이용해서 실제 제작된 팬터그래프의 소음을 사전에 검토할 수 있다고 판단된다. 이를 통하여 속도별 팬터그래프의 실차에서의 소음특성, 풍동에서의 소음특성에 대한 데이터베이스를 구축할 수 있었으며, 이를 전산유체해석결과와 비교 검토할 수 있게 되었다. 향후 새로운 팬터그래프를 설계할 때 본 기술을 통하여 실차에서의 소음을 예측할 수 있으며 이를 통하여 사전에 설계변경 등을 통하여 환경소음 목표 달성 및 개발비용의 절감 및 개발납기 등의 단축이 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 연구를 통하여 팬터그래프의 소음특성을 파악할 수 있었으며 이를 통하여 실차에서의 소음 저감을 위해서는 주요 팬터그래프 소음 주파수인 350 ~ 400 Hz 대역의 소음 저감이 필요함을 알 수 있었으며 팬터그래프의 주요 소음원이 유동 교란에 의한 쌍극자(di-pole) 소음임을 확인하여 항력 저감과 함께 소음을 동시에 저감할 수 있음을 알았다. 팬터

그래프의 소음을 저감하기 위해서는 서울대가 제안한 유선형 주습판의 적용이 필요하며 이를 개발하기 위한 실용화 연구가 수반되어야 한다. 또한 구축되어진 실차 팬터그래프 소음 데이터베이스와 폐쇄형 시험부는 400km/h 이상의 고속영역까지 확장하여 향후 초고속열차의 팬터그래프 설계에 활용하기 위해서 추가 보완연구가 필요하다

3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

본 연구는 앞서 설명한 바와 같이 실용화를 위한 전단계 요소기술 연구로서 실용화 시제품과 직접적으로 연결되는 연구는 아니다. 그러나 본 연구를 통하여 실차에서의 소음 저감을 위해서는 주요 팬터그래프 소음 주파수인 350 ~ 400 Hz 대역의 소음 저감이 필요함을 앞서 설명하였다. 이를 통하여 유선형 팬터그래프 주습판을 적용하게 되면 향후 해외 고속철도 수주에 있어서 한국의 비교우위를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 일본의 경우 가장 큰 장점이 다른 차량 대비 낮은 수준의 팬터그래프 소음이다. 현재 한국이 입찰할 것으로 알려진 말레이시아-싱가폴 고속철도(건설포함 13.2조) 및 터키 고속철도(80편성, 640량, 2.7조원) 수주에 있어서 본 기술을 적용하여 소음을 저감하고 이 효과를 통하여 고속철도 수주에 기여한다면 한국고속철도 기술의 세계시장 진출 및 확대에 기여할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 국내고속철도의 경우에도 표 4-3-1과 같이 2021년까지 46편성, 282량의 추가 차량계획이 있으며 약 30억원의 팬터그래프 구매비용이 발생될 것으로 판단되므로 본 연구에서 제안한 설계안을 통해서 경쟁력이 있는 팬터그래프를 국내에서 개발 시에 경제적으로 큰 효과가 있을 것으로 보인다.

표 4-3-1 국토교통부 국내 신규 고속철도 건설계획 및 차량수요

노선	건설 구간(신선)	공사예정기간	차량계획(수량)
원 강 선	원주~강릉	~ 2018년	12편성(72량)
중부내륙선	이천~문경	2015년 ~ 2021년	1편성(6량)
중 앙 선	도담~신경주	2014년 ~ 2020년	15편성(90량)
서 해 선	홍성~송산	2015년 ~ 2020년	13편성(78량)
경 전 선	부전~마산, 보성~임성리	2014년 ~ 2020년	5편성(30량)
합 계			46편성(282량)

4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

고속철도는 주거지역이나 상공업지역에서의 소음에 의한 민원에 민감한 편이다. 소음·진동 관리법 시행규칙 제25조에 따르면 현재 국내의 철도 소음규제는 주간에 주거지역에서 70dB이하, 상공업지역에서는 75dB이하, 야간에는 주거지역에서 60dB이하, 상공업지역에서는 65dB이하이다. 본 연구에서 수행한 풍동실험, 전산해석의 팬터그래프만의 소음시험결과를 볼 때 300km/h나 350km/h로 주행할 때 규제소음을 이미 초과하였으며 실차소음시험에서도 규제소음을 초과하였으므로 현재의 소음규제안은 고속열차개발에 있어서 기술적으로 엄격하다고 판단된다. 따라서 본 연구결과의 설계안을 적용하여 소음저감 시에 기존의 규제를 만족하기 용이하며 이후 HEMU-430x와 같은 운행속도가 증속된 고속열차 운행을 위해서 소음규제안이 완화될 필요성이 있다고 판단될 때 본 연구에서 구축한 팬터그래프 소음 DB를 참고할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 팬터그래프 개발단계에서 팬터그래프 소음성능을 평가하여 검증받도록 할 때 팬터그래프 소음 평가안을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

1절 연구성과 향후 활용방안

본 연구성과의 활용은 세가지 방안으로 접근 가능하다. 우선은 본 과제를 통해서 도출된 팬터그래프 소음에 대한 분석결과를 향후 고속열차 신규 팬터그래프 설계에 반영하는 것이다. 풍동소음과 실차시험을 통하여 본 연구에서는 팬터그래프의 주소음 특성이 집전판에 의하여 발생하는 Vortex shedding noise라는 것을 확인하였다. 이는 향후 팬터그래프 개발방향을 저소음 집전판 쪽으로 진행되어야 한다는 방향을 제시했다고 볼 수 있다. 즉 본 연구결과 성과를 활용하여 팬터그래프의 설계방향을 결정하는 것이 첫 번째 활용방안이다.

두 번째는 위의 연구결과 성과를 활용하여 설계방향을 결정하여 저소음 저저항 팬터그래프를 설계할 때에 본 연구에서 제시한 최적설계된 팬터그래프 형상 설계안을 활용하여 형상개발에 투자되는 시간과 비용을 크게 축소할 수 있을 것으로 보인다. 이를 위해서 본 과제에서 설계안을 풍동실험과 전산해석을 통해 검증하여 기술 개발단계는 마쳤으며 추후 실용화를 위해서 팬터그래프 제작사 및 운영기관과 협의하여 설계안을 실제 적용 가능하도록 개선하여 기술 보완단계를 진행할 계획이다.

세 번째, 풍동소음결과와 실차소음 측정결과간의 비교 데이터베이스의 활용이다. 본 연구를 실차소음 측정결과가 항공우주연구원 풍동소음 측정결과와 상당한 유사성이 있음을 확인하였다. 따라서 향후 신규 개발된 팬터그래프의 소음을 예측하기 위하여 항공우주연구원 풍동을 활용하면, 실차시험 전 팬터그래프의 설계변경을 조기에 실시하여 전체차량 개발납기를 단축하는 데 활용 가능할 것이다. 본 과제의 연구결과로 풍동시험을 통해서 데이터베이스를 구축하여 기술 개발단계를 마쳤으며 추후에 항공우주연구원에서 보완시험을 추가로 수행하여 풍동 내 소음측정 기법에 대한 보완 연구를 진행하여 기술 검증 및 보완단계를 진행할 예정이다.

2절 추가연구 필요성

본 연구과제를 통하여 도출된 최적설계 팬터그래프에 대한 실용화를 촉진하기 위하여, 최적설계 팬터그래프 형상을 적용한 새로운 팬터그래프를 제작 및 실차시험을 실시할 필요가 있다. 이를 위하여 유선형 팬터그래프 집전판의 제작기술을 연구할 필요가 있다. 또한 개발된 신규 최적설계 팬터그래프의 실차 적용 시 신뢰성을 검증하고 소음을 포함한 특성을 평가하고 성능을 입증하는 연구가 후속적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다. 그리고 팬터그래프 암 연결부의 유선형 캡의 경우 실제 차량에 적용하기 위해서 실용화를 위한 설계개선이 필요할 것이다.

그리고 본 연구과제에서는 공력적인 문제에 대하여 집중하여 형상설계가 이루어졌기 때문에 개발된 형상의 실용화를 위하여 철도운영기관가 제작사 등과 연계하여 강도 및 구조적 문제에 대한 추가연구가 필요할 것이다.

또한 본 과제를 통해서 구축된 팬터그래프 소음 데이터베이스를 더 높은 속도대역에서 대해서 확대할 필요가 있다. 현재 데이터베이스는 330km/h ~ 350km/h에 대해서만 구축이 되어있으나 이를 400km/h 까지 확장하여 향후 초고속 대역에서의 팬터그래프 소음 특성에 대한 연구진행이 필요하다고 판단된다.

마지막으로 2개의 고속차량을 연결하는 중련연결 시 각각의 차량에 팬터그래프가 올라가므로 1개의 팬터그래프가 올라갔을 때와 다른 특성을 보일 것이다. 최적 설계된 팬터그래프의 동적특성 열화가 미세하였으므로 큰 문제는 없을 것으로 판단되나 중련 편성시의 동특성 해석 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다. 그리고 중련편성에 따른 팬터그래프로 유입되는 유속조건이 변경될 수 있으므로 이에 따른 공기역학적 변화들을 예측하기 위해서 전산해석과 풍동시험의 연구가 추가로 필요할 것이다.

제6장 참고문헌

[01] Kozo Fujii, Takanobu Ogawa, "Aerodynamics of high speed trains passing by each other", Computers & Fluids Vol. 24, pp.897-908, 1995
[02] S. Aita, A. Tabbal, "CFD Aerodynamics of the French High speed train", SAE Technical Paper Series 920343
[03] Joseph A. Schetz, "Aerodynamics of High speed trains", Annu. Rev. Fluid Mech, 2001, 33:371-414
[04] Raghu S. Raghunathan, H.D. Kim, T. Setoguchi, "Aerodynamics of high speed railway train", Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) 469-514
[05] 한기홍, 박준서, "고속전철의 공력학적 주행특성", 한국소음진동공학회 1999년도 추계학술대회논문집, pp.108-113.
[06] B.P. Rochard, F. Schmid, "A review of methods to measure and calculate train resistances", Proc Instn Mech Engrs Vol 214 Part F
[07] Nicholas Paradot, Corinne Talotte, "High speed train running resistance analysis through numerical simulation and experimental investigation", WCRR 2001
[08] H.B. Kwon, Y.H. Park, D.H. Lee, M.S. Kim, "Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques", Journal of Wind Engineering and Industiral Aerodynamics 89 (2001) 1179-1195
[09] M.J. Siclari, R. Ende, G. Carpenter, " The application of Navier-Stokes Computaions to the Design of High-Speed, Low-Drag Magnetically Levitated Vehicle Shapes", AIAA-95-1908-CP
[10] 최성욱, 김인선, "고속전철 전두부 형상설계를 위한 전산유동해석"
[11] 권혁빈, 이관중, 이동호, "미기압파 저감을 위한 고속전철 전두부형상의 최적화설계"
[12] E. Lorriaux, N. Bourabaa, F. Monnoyer, "Aerodynmic Optimization of railway motor coaches"
[13] Takeshi Kurita, Yoichi Okumura, Tsuyoshi Ichigi, "Development of Train Nose Shape for Reducing Micro-pressure Waves", JR EAST Technical Review No.1
[14] Heine Ch., Matschke G., "The influence of the nose shape of high speed trains on the aerodynamic coefficients"
[15] Minoru Suzuki, Katsuji Tanemoto, Tatsuo Maeda, "Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003) 209-218
[16] Stephane Sanquer, Christian Barre, "Effects of cross winds on high speed trains: development of a new experimental methodology", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 (2004) 535-545
[17] C.J. Baker, J.Jones, "Measurements of the cross wind forces on trains", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 (2004) 547-563
[18] 정수진, Ming Zhi, "터널입구 현상이 고속전철의 공력특성 및 터널입구 압축파에 미

치는 영향“
[19] M.S. Howe, M. Iida, "Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal", J.Fluid Mech. (2000), Vol. 425, pp. 111-132
[20] Lutz Hermanns, J. German Gimenez, "Efficient computation of the pressures developed during high-speed train passing events", Computers and Structures 83 (2005) 793-803
[21] 고태환, 김남포, 한성호, “틸팅판토그라프의 틸팅 메카니즘 및 가이드 트랙 형상 설계에 관한 연구”, 한국철도학회지
[22] 조운기, 이종수, “유동안정성 및 유동소음을 고려한 팬터그래프 팬헤드 단면의 강건설계”, 한국소음진동공학회논문집 제13권 제2호, pp. 83-91, 2003
[23] 김휘준, 박수홍, “한국형 고속전철용 판토그라프의 설계 및 제작”, 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회논문집, pp. 1223-1228
[24] 고태환, 이수길, “틸팅 판토그라프 설계 및 성능 검증 연구”, 기계학회
[25] 황재호, 이동호, 정경렬, “판토그래프 가혹 공력 하중에 대한 연구”, 대한기계학회 춘계학술대회
[26] C.J. Baker and N.J. Brockie, "Wind tunnel tests to obtain train aerodynamic drag coefficients: Reynolds number and ground simulation effects", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 38, pp. 23-28, 1991
[27] 김인선, 정진덕, 최성욱, “고속전철 형상의 Navier-Stokes 유동해석 및 풍동시험”, 한국항공우주학회지 제25권 제6호, pp. 56-65, 1997
[28] E. Willemsen, "High Reynolds number wind tunnel experiments on trains", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 69-71, pp. 437-447, 1997
[29] Mitsuru Ikeda. "Passive Lift Suppression Mechanism for Low Noise Pantograph", WCRR 1999
[30] Akihiko Torii, Junichi Ito, "Development of the series 700 Shinkansen train-set(Improvement of noise level)", WCRR 1999
[31] J.L. Peters, "Optimizaing Aerodynamics to Raise IC Performance", Railway Gazette International pp. 817-819
[32] Hyeok-bin Kwon, Dong-ho Lee, Je-hyun Baek, "An Experimental Study of Aerodynamic Drag on High-speed Train", KSME International Journal, Vol.14, No.11, pp.1267-1275, 2000.
[33] Atsushi Ido, Yoshihiko Kondo, Tsuyoshi Matsumura, Minoru Suzuki, and Tatsuo Maeda, "Wind Tunnel Tests to Reduce Aerodynamic Drag of Trains by Smoothing the Under-floor Construction", QR of RTRI, Vol.42, No.2, pp.94-97, 2001.
[34] Giampaolo Mancini, Antonio Malfatti, Angelo G. Violi, and Gerd Matschke, "Effects of experimental bogie fairings on the aerodynamic drag of the ETR 500 high speed train", Proc. of the World Congress on Railway Research (WCRR 2001), 2001.
[35] V. V. Vytla, P. G. Huangy and R. C. Penmetsaz, “Response Surface Based

Aerodynamic Shape Optimization of High Speed Train Nose" 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, USA, 4-7 Jan 2010
[36]Yeongbin Lee, Joohyun Rho, Suhwan Yun, Kyuhong Kim, Dongho Lee, "Experimental Studies on Flow Characteristics around Circular Cylinder in Steady and Unsteady Flow", The 5th WSEAS International Conference on FLUID MECHANICS(FLUIDS'08), Acapulo, Mexico, January 25-27, 2008
[37]Yeongbin Lee, Joohyun Rho, Kyuhong Kim, Dongho Lee, "Aerodynamic characteristics of high speed train pantograph with the optimized panhead shape", International Conference on FLUID MECHANICS and Aerodynamics, Moscow, Russia, Aug. 20-22, 2009
[38]Joohyun Rho, Yeongbin Lee*, Kyuhong Kim, Dongho Lee, "Experimental Investigations on Aerodynamic Characteristics of scaled Pantograph System with various Panhead Shape for High Speed Train", 6th IUTAM Symposium on Bluff Body Wakes and Vortex Induced Vibrations, Capri Island, Italy, June 22-25, 2010
[39]Yeongbin Lee, Joohyun Rho, Minho Kwak, Jaeho Lee, Kyuhong Kim, Dongho Lee, "Experimental Studies on Aerodynamic characteristics of Various Types of Pantograph for High Speed Train", The 8th Euromech Fluid Mechanics Conference(EFMC8), Bad Reichenhall, Germany, September 13-16, 2010
[40]Yeongbin Lee, Minho Kwak, Kyuhong Kim, Dongho Lee, "Experimental Studies on Aerodynamic Characteristics of Pantograph System According to the Pantograph Cover Configurations for High Speed Train", Proceedings of the ASME/ASCE/IEEE 2011 Joint Rail Conference JRC2011, March 16-18, 2011, Pueblo, Colorado, USA
[41]이영빈*, 노주현, 곽민호, 이재호, 김규홍, 이동호, "차세대 고속열차(HEMU-400X)의 팬터그래프 시스템에 대한 공력특성 연구", 한국철도학회 춘계학술대회, 2010.6.10~2010.6.12
[42] 이영빈*, 노주현, 곽민호, 이재호, 김규홍, 이동호, "고속전철 팬터그래프의 다양한 형상에 대한 실험적 연구", 한국기계학회 유체부문 춘계학술대회, 2010.4.22~2010.4.23
[43] 노주현, 이영빈*, 곽민호, 김규홍, 이동호, '최적 팬헤드 형상을 가진 팬터그래프 축소모델의 3차원 공력특성에 대한 실험적 연구' 한국철도학회 추계학술대회, 2009.11.19~2009.11.20
[44] 곽민호, 이영빈, 이정욱, 김규홍, 이동호, 정형석, 장영일, 권혁빈, "대차 형상 변화에 의한 차세대 고속열차 항력 특성에 대한 실험적 연구", 2011년 한국항공우주학회 춘계학술대회, 2011년 4월 13-15일
[45] 이영빈*, 곽민호, 김규홍, 이동호, 정형석, 장영일, 권혁빈, "HEMU-400X 팬터그래프 시스템의 공력성능 개선을 위한 실험적 연구", 한국철도학회, 한국철도학회 2011년 춘계학술대회, 2011년 5월 26-28일, 현대성우리조트
[46] 곽민호, 이영빈*, 이정욱, 김규홍, 이동호, 정형석, 장영일, 권혁빈, "차세대 고속열차 대차 형상에 따른 공기저항 변화에 대한 실험적 연구", 한국철도학회, 한국철도학회 2011년 춘계학술대회, 2011년 5월 26-28일, 현대성우리조트
[47] 이영빈, 곽민호, 김규홍, 이동호,"팬터그래프 커버형상에 따른 HEMU-400X 항력의

실험적 분석", 2011년도 한국철도학회 정기총회 및 추계학술대회, 2011년 10월 20-22일 (10월 20일), 라마다 프라자호텔 제주
[48] C.Mellet, F. Letourneaux, F. Poisson, C. Talotte, High speed train noise emission : Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise cotribution, Journal of sound and vibration 293 (2006) 535-546
[49] P.-E.Gautier, F. Poisson, F. Letourneaux, High speed trains external noise: a review of measurements and source models for the TGV case up to 360 km/h, Proc. of the World Congress on Railway Research (WCRR 2008), 2008.
[50] 조태환, 김철완, 강형민, 김동하, 김양원, 강희탁, 차세대고속철도기술개발사업 시스템 성능평가 기술개발 과제 차세대 고속철도 공력소음저감 형상설계 기술개발 최종보고서, 2012.
[51] A.Sohankar, Flow over a bluff body from moderate to high Reynolds numbers using large eddy simulation, Computer & Fluids 35 (2006) 1154-1168

제7장 부 록

1절 정량적 성과와 정성적 성과

1. 차년도별 정성적 성과목표 및 정량적 성과목표 달성도

연차 (단계)	연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	달성여부
1차	저소음/저저항 팬터그래프 형상 설계를 위한 공력특성 정립	수치해석과 공력소음시험을 통한 기존 팬터그래프의 소음 및 공력특성 정립	소음/공력 특성 정립여부	여부	달성
		팬터그래프 운용시나리오 및 설계 요구조건 개발	운용시나리오에 따른 팬터그래프 설계 요구 조건	1식	달성
		팬헤드 최적설계안	기존 팬터그래프 팬헤드 대비 공력소음 및 공기저항 저감정도	-10%	달성
		국외 논문 게재	국제 학술지 게재 실적	2편	1편
		국내 논문 게재	국내 학술지 게재 실적	2편	1편
	소 계				

2차	저소음/저저항 팬터그래프 형상 상세설계	팬터그래프 암 최적설계안	기존 팬터그래프 대비 공력소음 및 공기저항 저감정도	-10%	달성
		팬터그래프 공력설계 소음평가 검증안	검증안 구축여부	1식	달성
		팬터그래프 공력소음 및 공력성능 시험기법	시험기법 구축 여부	1식	달성
		최적화된 팬터그래프 형상의 공력소음 및 항력저감 수준	기존 팬터그래프 대비 팬터그래프 공력소음 및 공기저항 저감정도	-10%	달성
		국외 논문 게재	국제 학술지 게재 실적	2편	2
		국내 논문 발표	국내 학술지 게재 실적	2편	0 (3차년도에 국내논문달성 2편 상향)
		국내외 지적재산권	국내외 지적재산권 출원	출원여부	등록완료
	소 계				

3차	고속용 저소음/저저항 풀스케일 팬터그래프 제작	최적 설계된 풀스케일 팬터그래프 공력특성 정립	공력소음, 양력, 항력, 데이터베이스 구축	여부	달성
		풀스케일 팬터그래프 공력성능 검증	기존 팬터그래프 대비 팬터그래프 공력성능(공력소음 및 항력) 대비	-10%	달성
		접촉력 범위해당여부	접촉력 범위 해당여부	5%이내	달성
		실차소음측정과 풍동소음측정 결과간의 비교 분석	실차소음측정과 풍동소음측정 결과간의 연관성 확보	여부	달성
		국외 논문 게재	국제 학술지 게재 실적	2편	2
		국내 논문 게재	국내 학술지 게재 실적	4편	4
		국내외 지적재산건	국내외 지적재산권 출원	출원여부	출원
	소 계				

2. 국외 논문게재

해당 차년	게재 연도	논문명	저자			학술지명	Vol.	국내외 구분	SCI구분
			주저자	교신저자	공동저자				
1	2014	Multi-resolution analysis for High accuracy and efficiency of euler computation	강형민	이도형	김규홍	International Journal for Numerical Methods in Fluids	74	국외	SCI

2	2013	Experimental Studies on the Aerodynamic Characteristics of a Pantograph Suitable for a High-speed Train	이영빈	김규홍	이동호	PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART F-JOURNAL OF RAIL AND RAPID TRANSIT	229(2)	국외	SCIE
2	2013	Effects of nose shape and tunnel cross-sectional area on aerodynamic drag of train traveling in tunnels	최중근	김규홍		Tunnelling and Underground Space Technology	41	국외	SCIE
3	2015	Investigation of passive flow control on the bluff body with moving-belt experiment	노주현	김규홍	이동호	International Journal of Aeronautical and Space Sciences	Submitted	국외	SCIE
3	2015	Optimal Shape of Contact Strip for High Speed Pantograph	노주현	김규홍		International Journal of Aeronautical and Space Sciences	Submitted	국외	SCIE
3	2015	Investigation on Aerodynamic Drag of Korean High Speed Train (HEMU-430X) due to Roof Apparatus for Electrical Device	이영빈	김규홍	노주현 권혁빈	Journal of Mechanical Science and Technology	Submitted	국외	SCIE

3. 국내 논문게재

해당 차년	게재 연도	논문명	저자			학술지명	Vol.
			주저자	교신저자	공동저자		

1	2013	유선형 형상 개선을 통한 고성능 EMU 열차의 공기저항 저감연구	권혁빈	권혁빈	홍재성	한국철도학회지	제16권 3호
3	2015	폐쇄형 시험부에서 케블라 덮개가 장착된 마이크로폰 어레이의 주파수 특성에 대한 실험적 연구	황은수	황은수		한국소음진동공학회논문집	제25권 제3호
3	2015	고속열차 외부장치에 의한 주행저항 기여도 연구	오혁근	권혁빈	곽민호 김상수 김석원	한국철도학회 논문집	심사중
3	2015	전산해석을 통한 고속철도 더블암 팬터그래프의 부재별 공력소음특성 연구	이상아	김규홍	이영빈 김철완	한국전산유체공학회 논문집	심사중
3	2015	전산해석을 통한 고속철도용 저소음 저저항 팬터그래프 형상설계 연구	정성민	김규홍	이상아 노주현	한국전산유체공학회 논문집	심사중

4. 국내외 지적재산권

출원된 특허의 경우						등록된 특허의 경우					
해당 차년	출원 연도	특허명	출원인	출원국	출원번호	해당 차년	등록 연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
3	2015	공력소음 저감을 위한 팬 헤드 부착물을 구비하는 고속열차용 팬터그래프	서울대학교 산학협력단	대한민국	10-2015-0075145	2	2013	팬터그래프 프레임 부가장치	서울대학교산학협력단, 한국철도기술연구원	대한민국	1012669800000

2절 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

○ Andreas Lauterbach, Klaus Ehrenfried, Stefan Krober, Thomas Ahlefeldt and Sigfried Loose, “Microphone array measurements on high-speed trains in wind tunnels”, Berlin Beamforming Conference, 24-25 Feb 2010.

본 연구에서는 풍동 내에서 고속철도의 공력소음을 식별하기 위해서 위상 마이크로폰 어레이 기법의 가능성을 평가하였다. 본 연구를 통해서 확인하고자 했던 점은 낮은 소음 레벨에서도 충분한 해상도를 얻을 수 있는지에 대한 여부였다. 실험은 DLR에 위치한 Aeroacoustic Wind Tunnel Brunswick (AWB)에서 수행되었으며, 1:25 축소된 모델을 사용하였다. 본 풍동은 무향 시설으로 둘러싸여있으며, 개방향 시험부를 가지고 있다. 마이크로폰 어레이는 총 143개의 마이크로폰으로 구성되어 있고 유동 외부에 위치해 있다. 빔형성 기법을 적용한 결과 팬토그래프에서 발생하는 소음이 적절히 식별되는 것을 확인하였다.

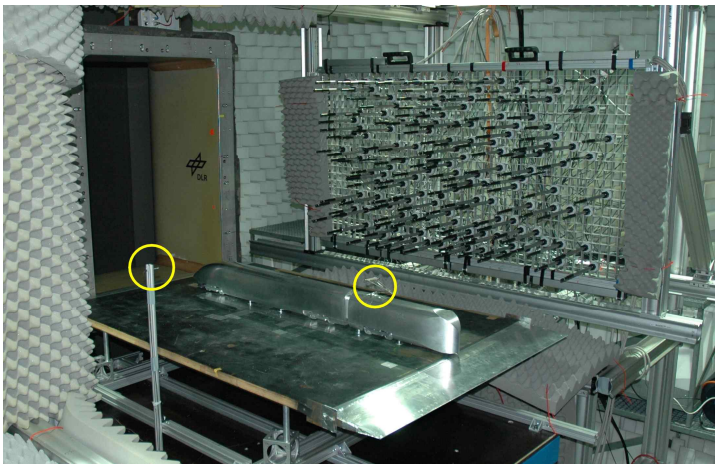


그림 110 고속철도 축소 실험 모습

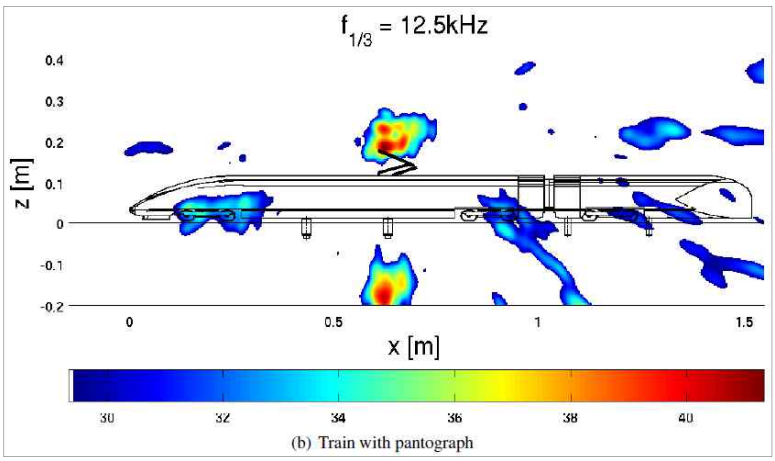


그림 111 고속철도 시험 빔형성기법 적용 결과

○ N. Yamazaki, T. Takaishi, M. Toyooka, K. Nagakura, A. Sagawa, H. Yano, “Wind Tunnel Tests on the Control of Aeroacoustic Noise from High Speed Train”, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Vol. 99, 2008, pp 33-39

본 연구에서는 풍동 시험을 통해 획득한 소음 측정 결과와 실차 소음 측정 결과를 비교하는 연구를 수행하였다. 정확한 소음원의 위치를 식별하기 위하여 열차 모델 가까이에 마이크로폰 어레이를 설치하였다. 소음원 분석 결과 차량 간의 간극이 주 소음원이라는 것을 확인하였고, 이에 대한 저감이 필요하다는 사실을 확인하였다.

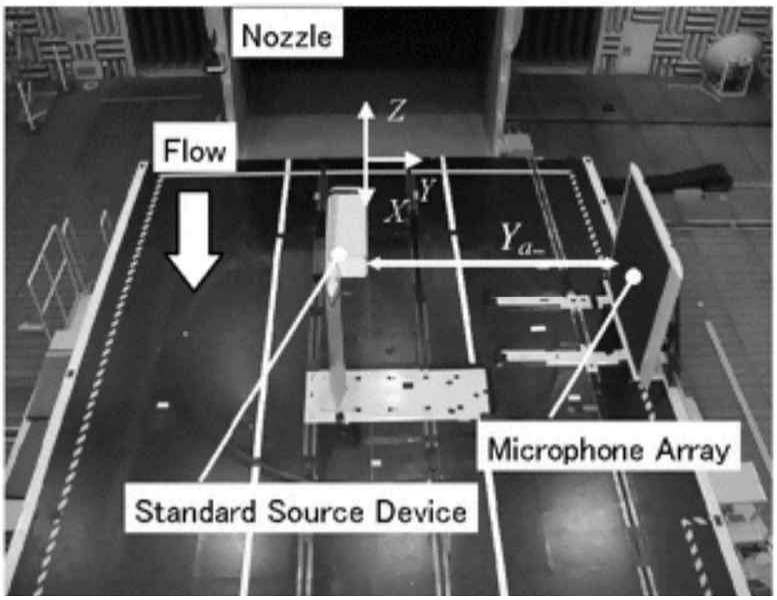


그림 112 고속철도 축소 실험 모델 및 마이크로폰 어레이 모습

○ Ennes Sarradj, Thomas Geyer, Haike Brick, Karl-Richard, and Torsten Kohrs, “Application of beamforming and deconvolution techniques to aeroacoustic sources at highspeed trains”, Noise and Vibration: Emerging methods 2012, 1-4 April 2012.

본 연구에서는 빔형성 기법과 디콘볼루션 기법을 이용하여 고속철도의 소음원을 식별하는 연구를 수행하였다. 개방향 시험부 내에서 다양한 크기(1:87 ~ 1:1)의 고속철도 축소모델을 이용하여 풍동시험을 수행하였다. 빔형성 기법을 이용하여 철도 팬터그래프와 보기, 차간 간극 등에서 발생하는 소음들을 분석하였다. 소음 분석에는 빔형성 기법과 CLEAN-SC 디콘볼루션 기법을 사용하였고, 그 두 해석 결과를 비교 분석하였다.



그림 113 풀스케일 판토그래프와 열차 상부 모델 시험 모습

○ V. V. Vytla, P. G. Huangy and R. C. Penmetsaz, “Response Surface Based Aerodynamic Shape Optimization of High Speed Train Nose” 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, USA, 4-7 Jan 2010

이 연구의 목표는 계산 비용이 많이 드는 최적화 문제에서 적용 가능한 반응면 기법을 사용한 최적화의 가능성을 확인하기 위함이다. 최적화 알고리즘의 강건성을 확인하고 개선하기 위한 시도로 팬헤드와 팬터그래프 암 단면의 최적화 수행에 참고하였다. 최적화를 위해 필요한 컴퓨터 시뮬레이션 수를 줄이기 위해서는 형상 최적화 알고리즘과 결합된 모델의 정확도를 판단할 수 있는 반응면기법과 크리깅기법을 사용하였다. 새로운 최적화 알고리즘인 하이브리드 GA-PSO 알고리즘은 원래의 GA와 PSO 알고리즘에 비해 더 정확하고 강건하다는 것을 확인할 수 있다. 공기역학적 저항을 예상하기 위해서는 전산유체역학 시뮬레이션이 필요하다. 초기 결과는 최적 형상을 구하는데 조합 형상 최적화 알고리즘을 사용하면 지난 방법들보다 적은 시간이 걸리는 것을 확인할 수 있었다. 새로운 최적화 방법은 필요한 시뮬레이션 수도 적고 결과도 더 강건하다.

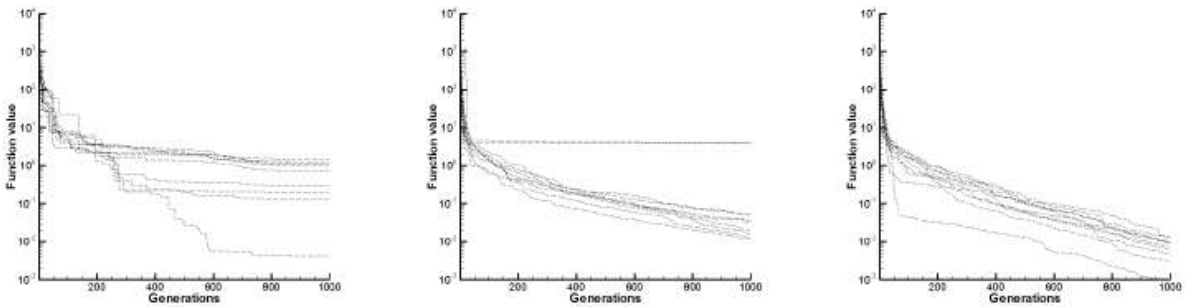


그림 114 최적 함수값 변화, Resenbrock with 5 variables

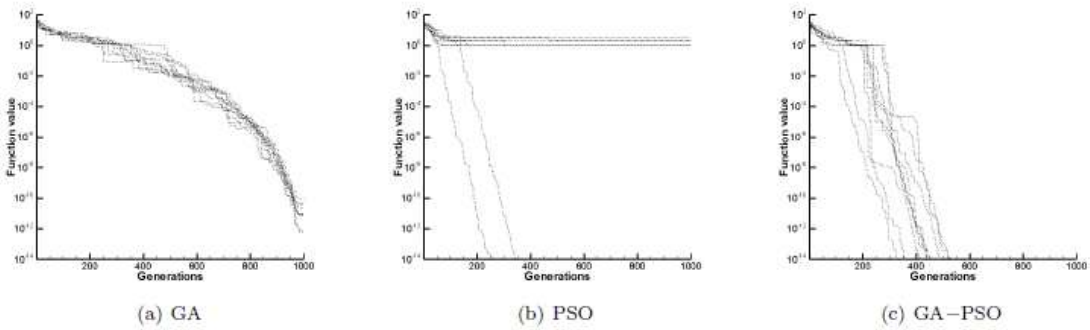


그림 115 최적 함수값 변화, Rastrigin with 5 variables

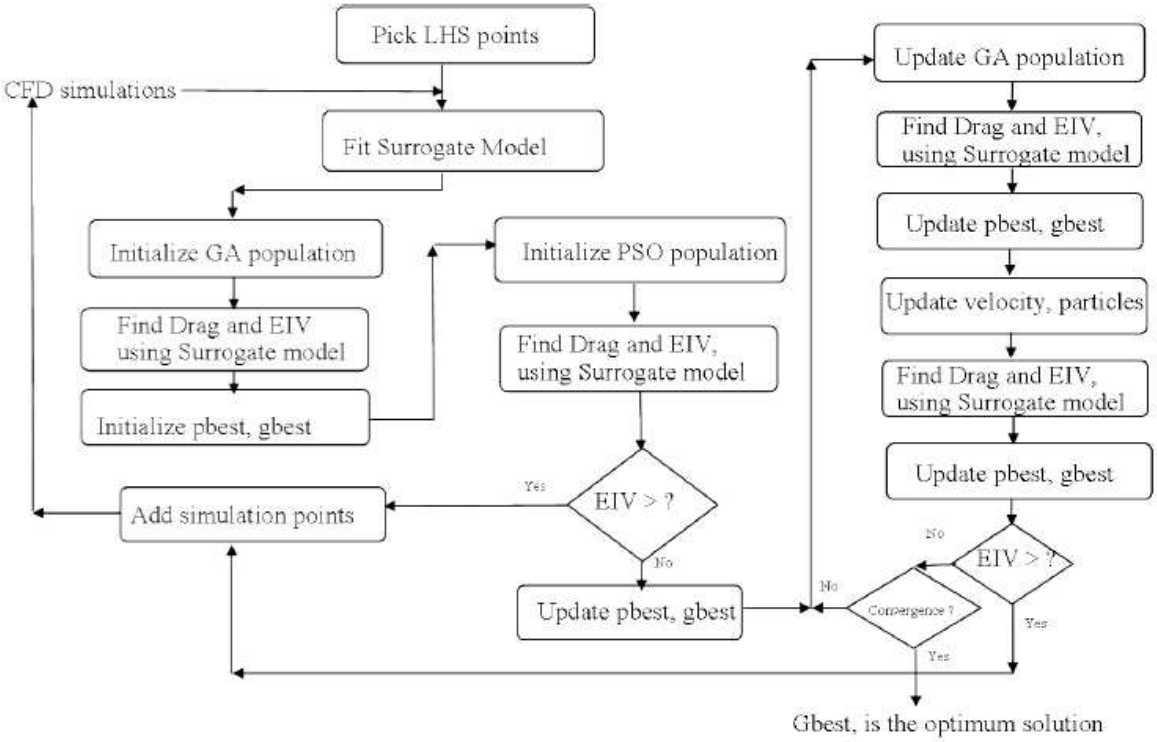
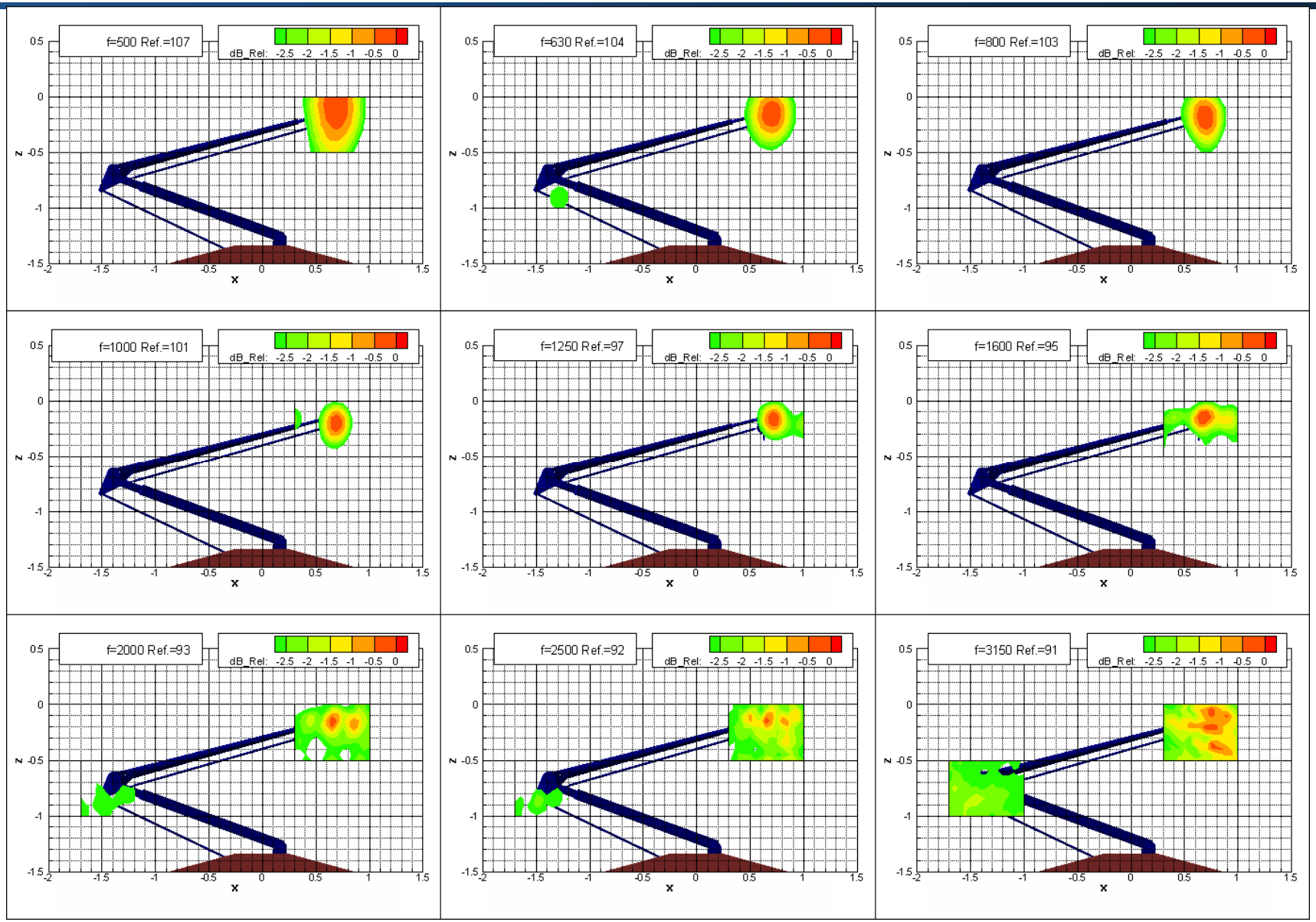


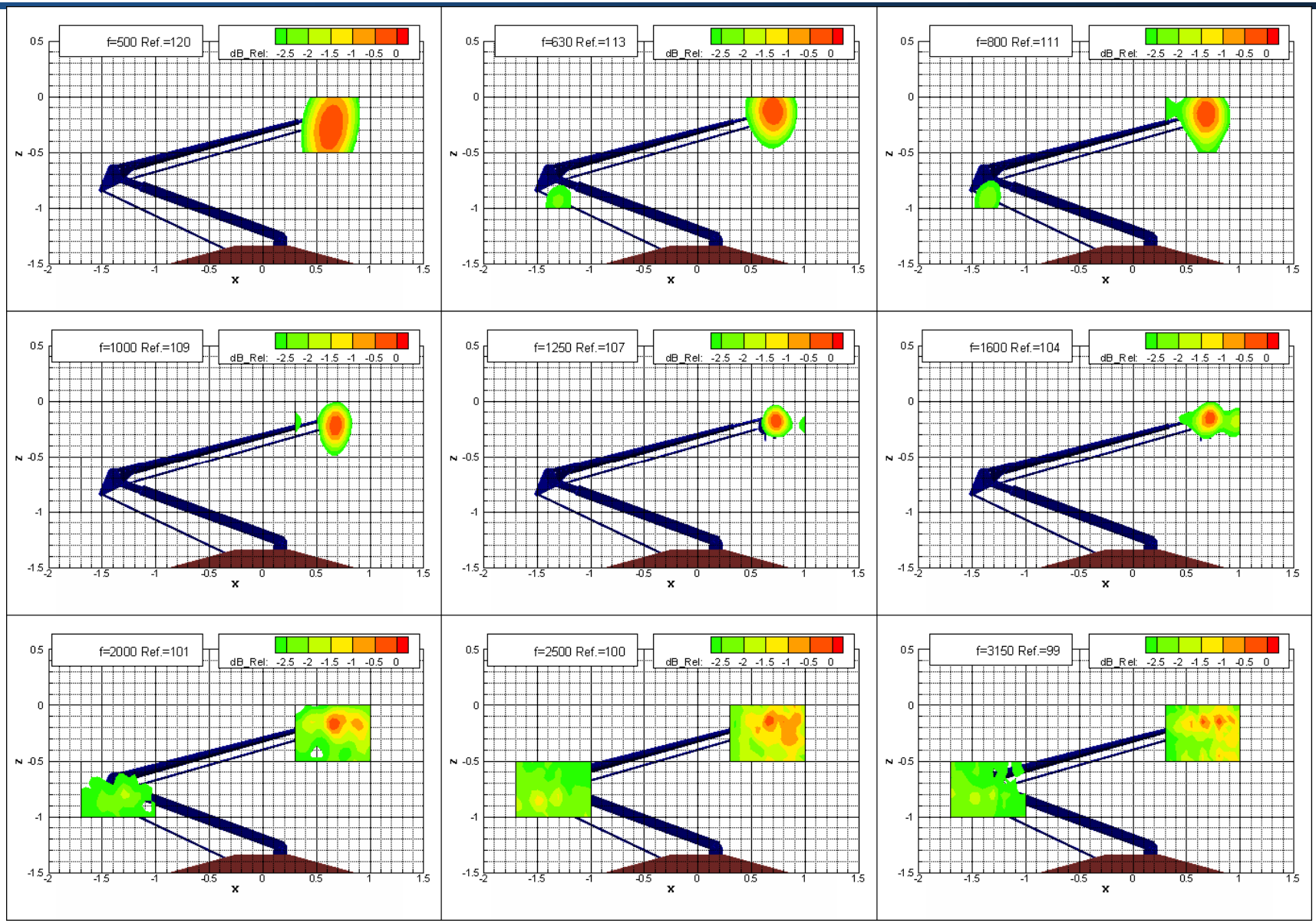
그림 116 최적화 과정 흐름도

3절 3차년도 최적설계 팬터그래프 풍동시험 결과

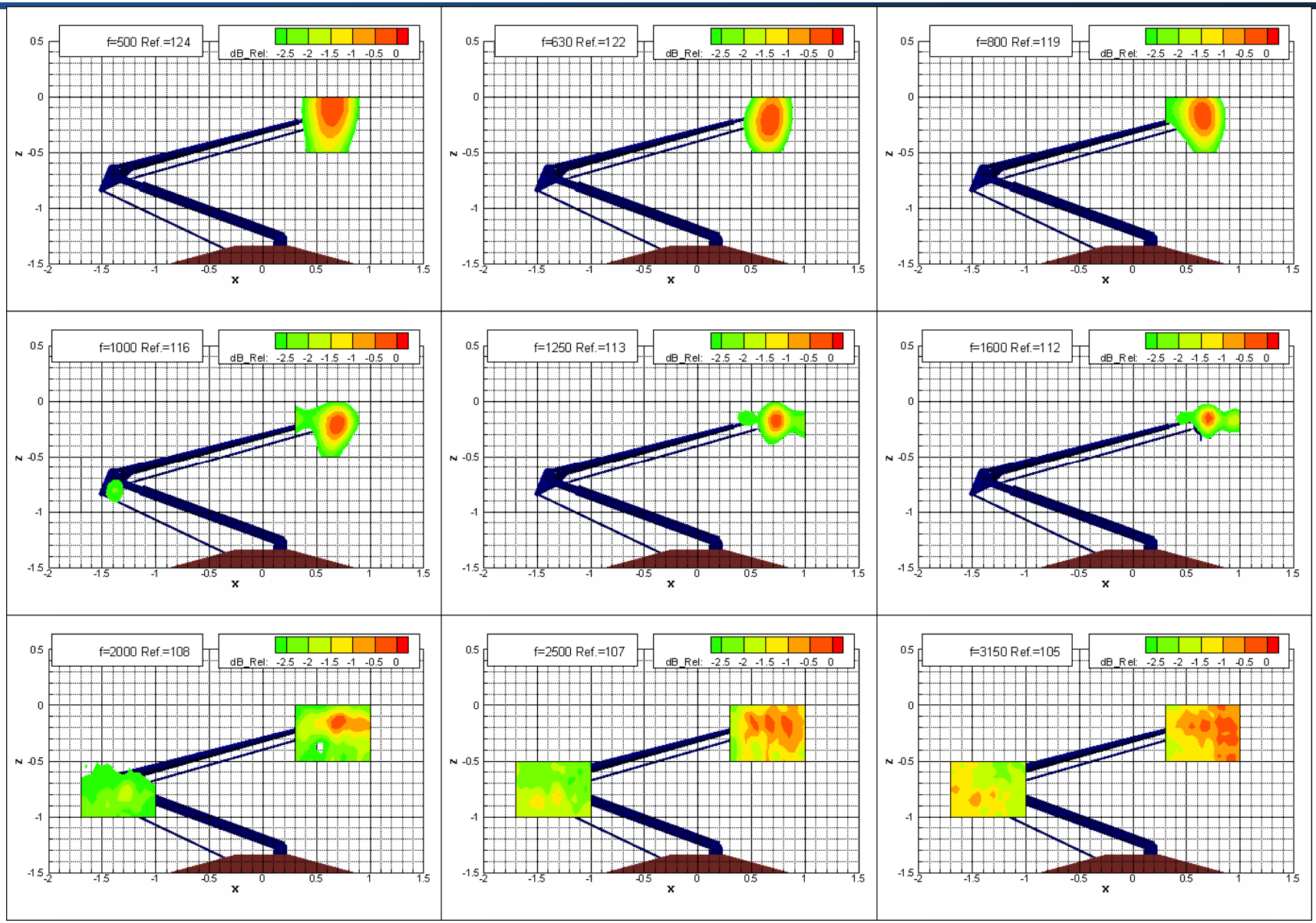
TA0210R0001_1
Wind 45m/s
Head : 0
Yaw : 0
Closed knee



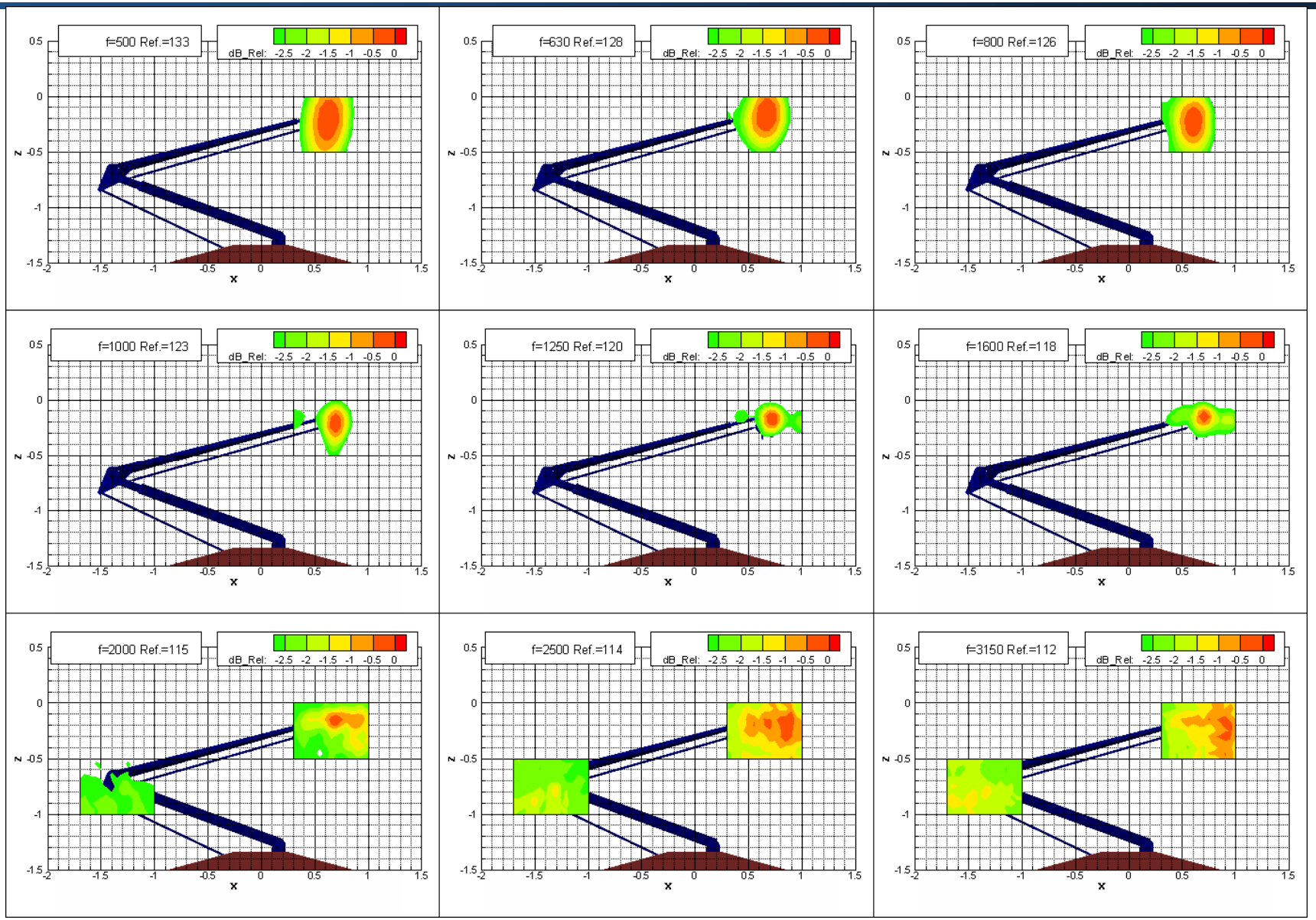
TA0210R0001_2
Wind 60m/s
Head : 0
Yaw : 0
Closed knee



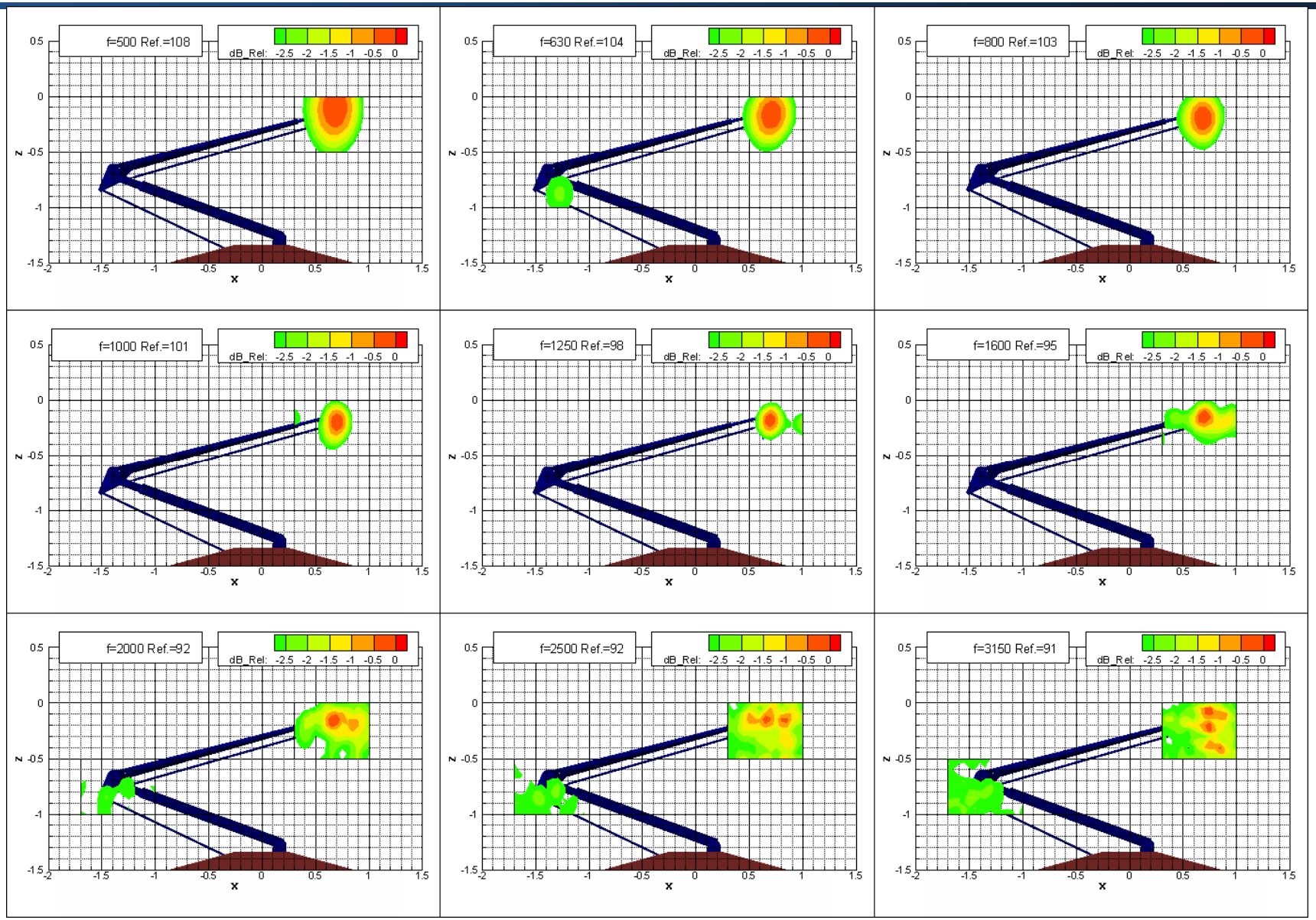
TA0210R0001_3
Wind 77m/s
Head : 0
Yaw : 0
Closed knee



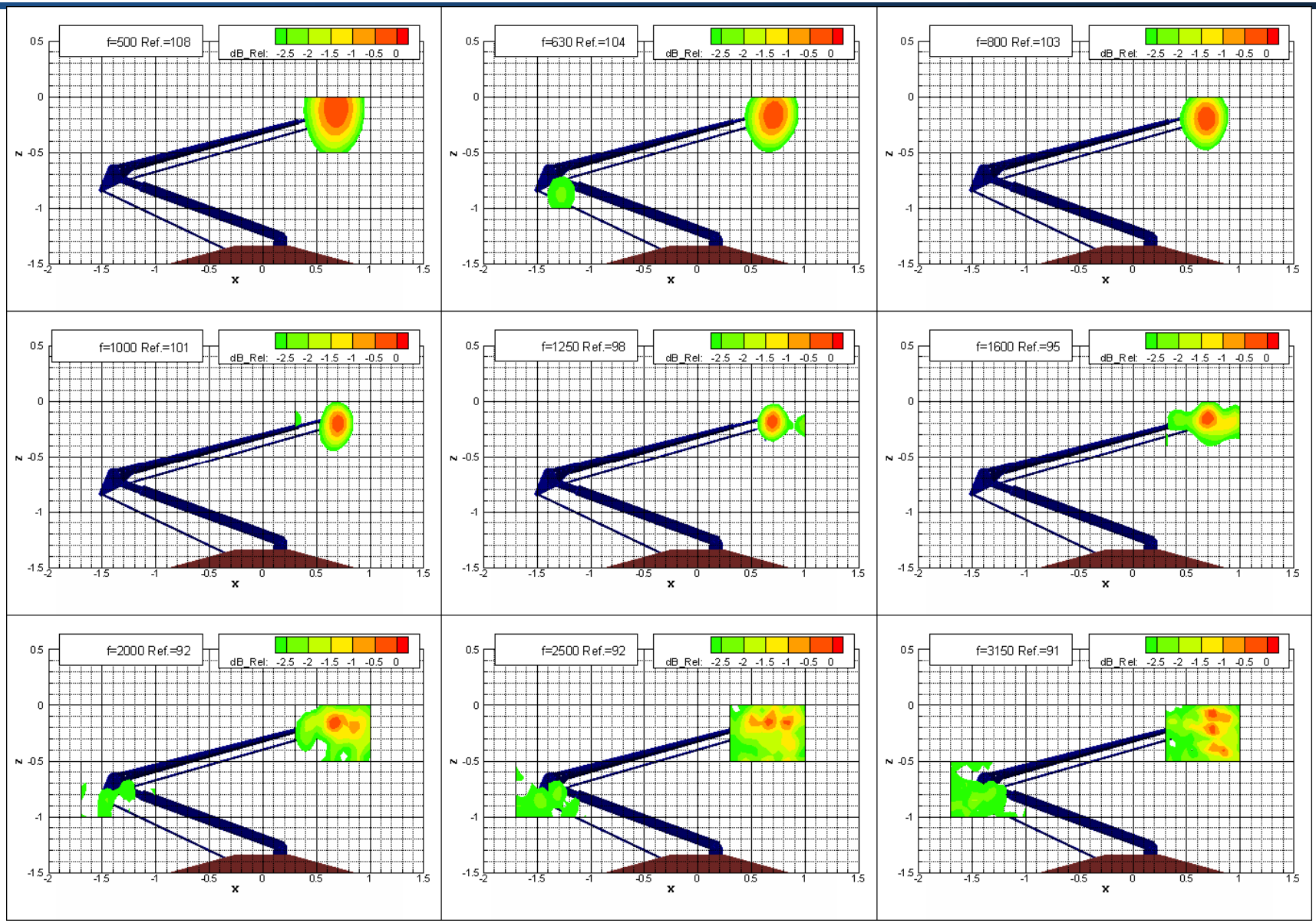
TA0210R0001_4
Wind 97m/s
Head : 0
Yaw : 0
Closed knee



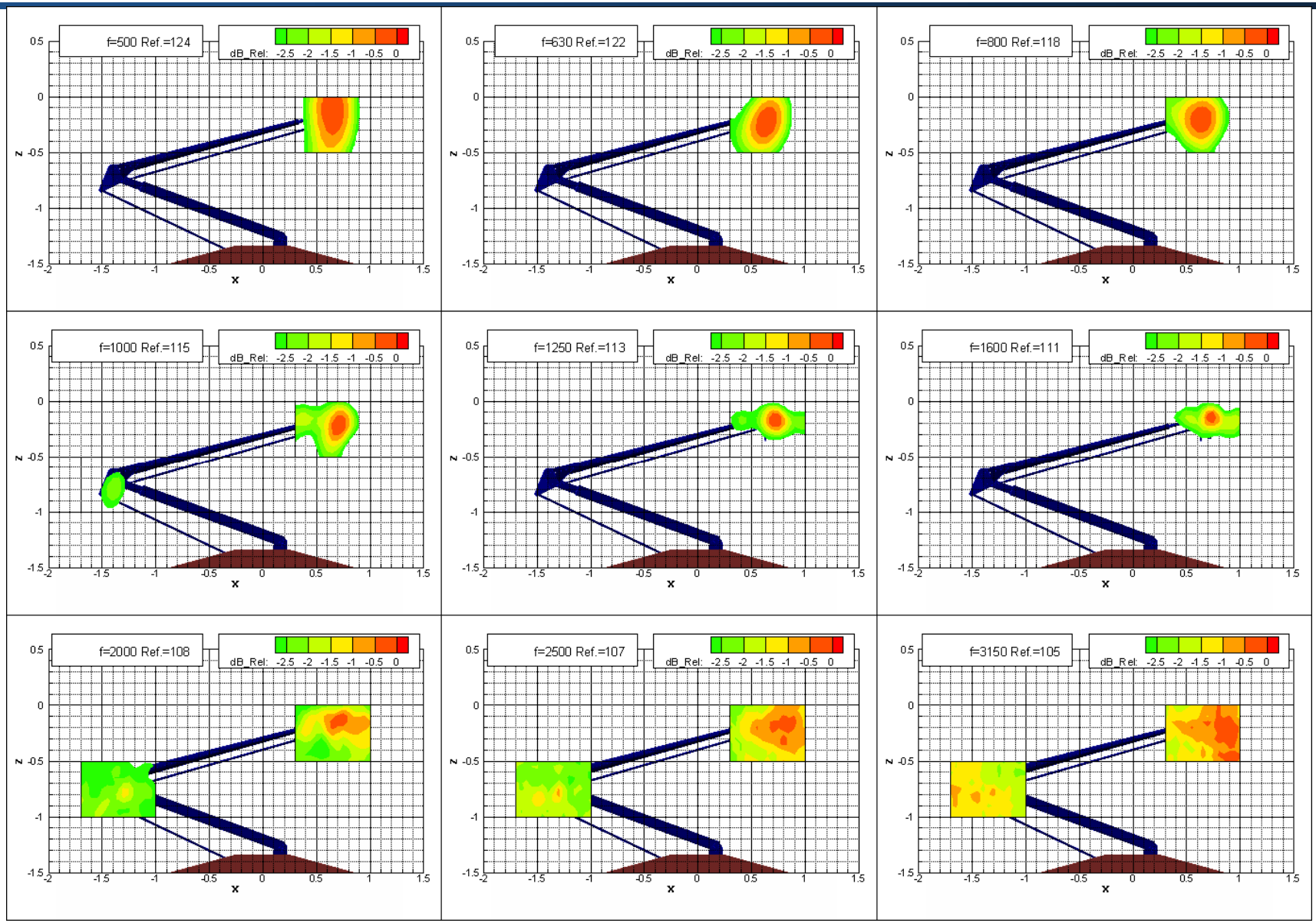
TA0210R0002_1
Wind 45m/s
Head : 0
Yaw : 2
Closed knee



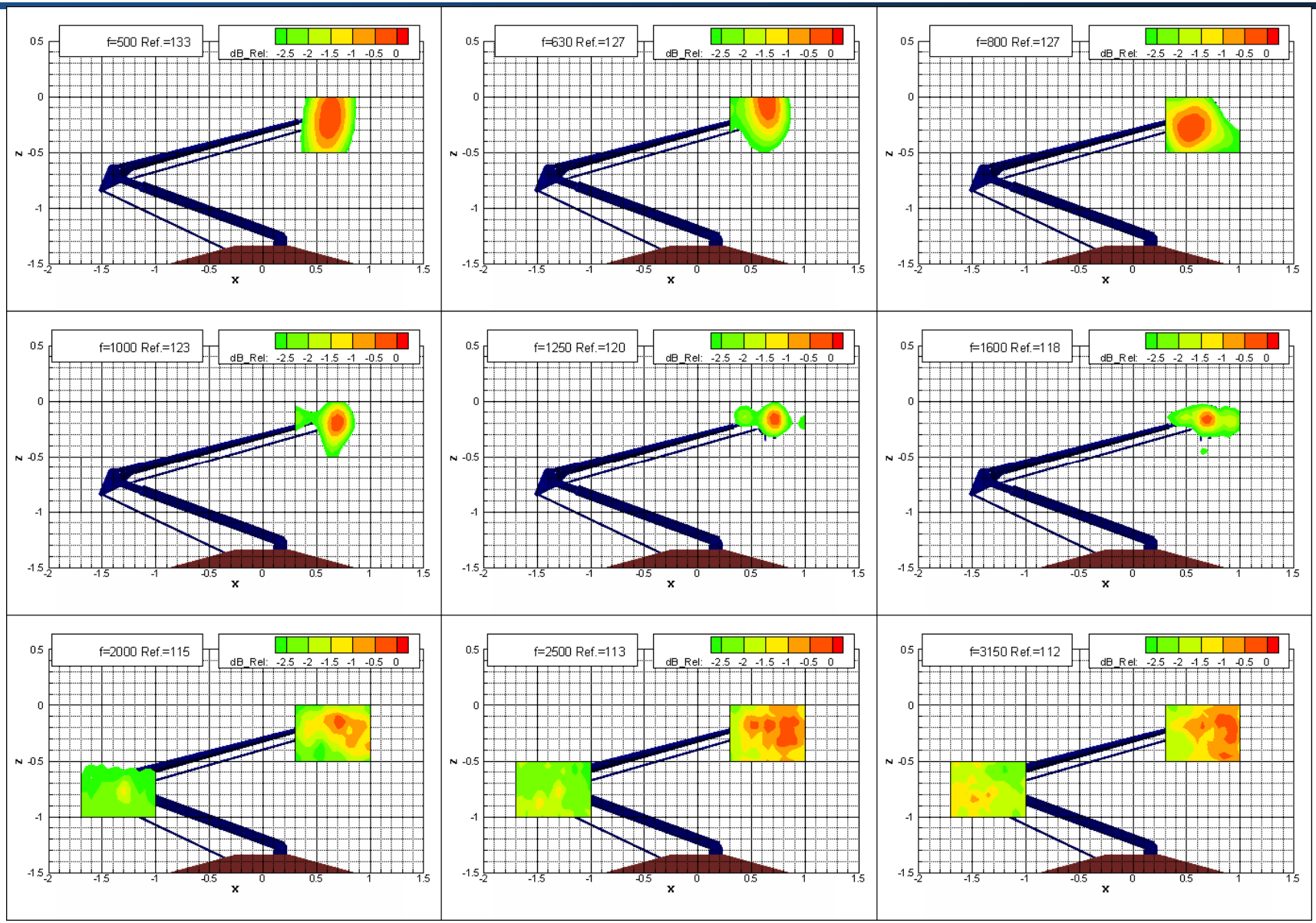
TA0210R0002_2
Wind 60m/s
Head : 0
Yaw : 2
Closed knee



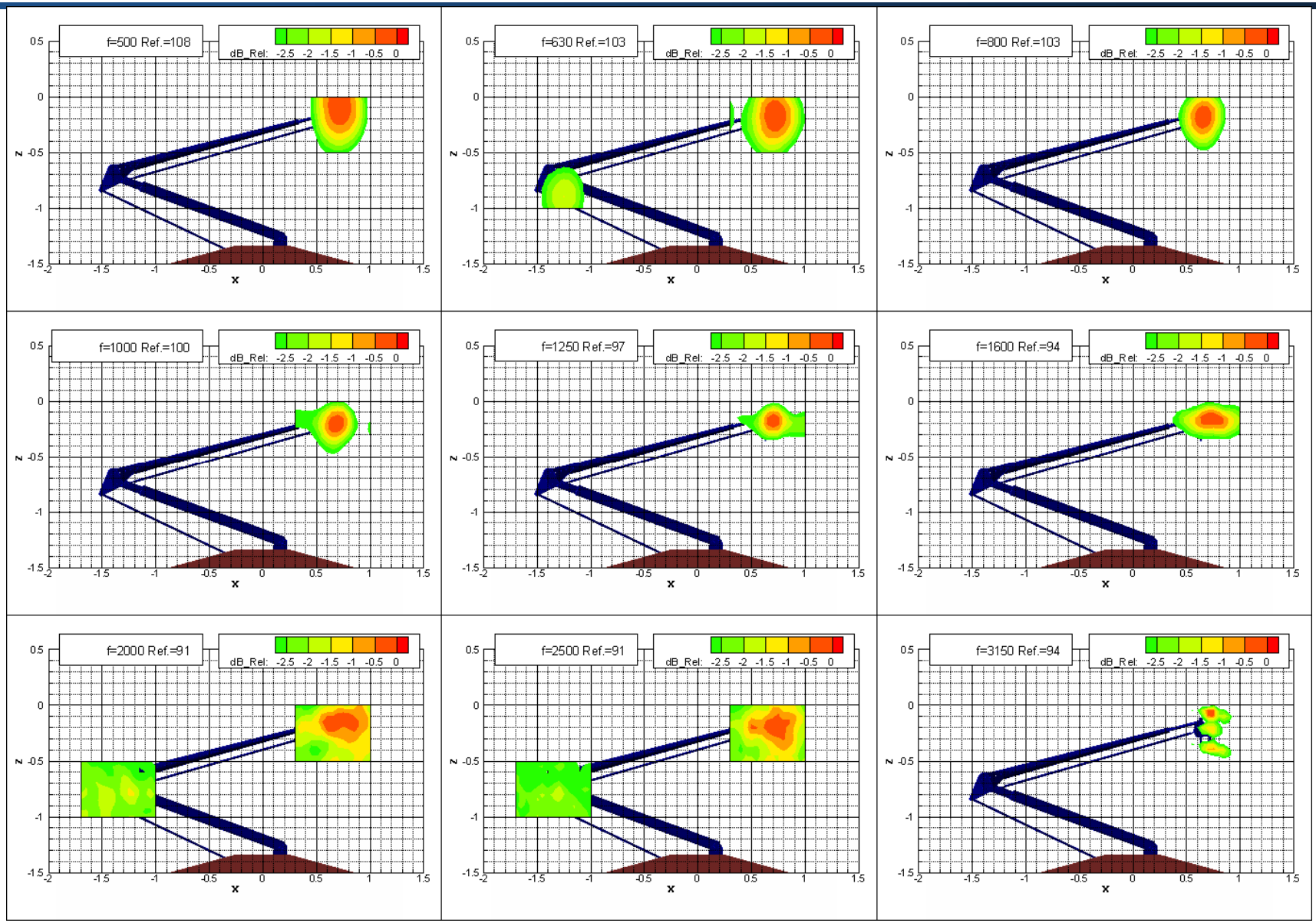
TA0210R0002_3
Wind 77m/s
Head : 0
Yaw : 2
Closed knee



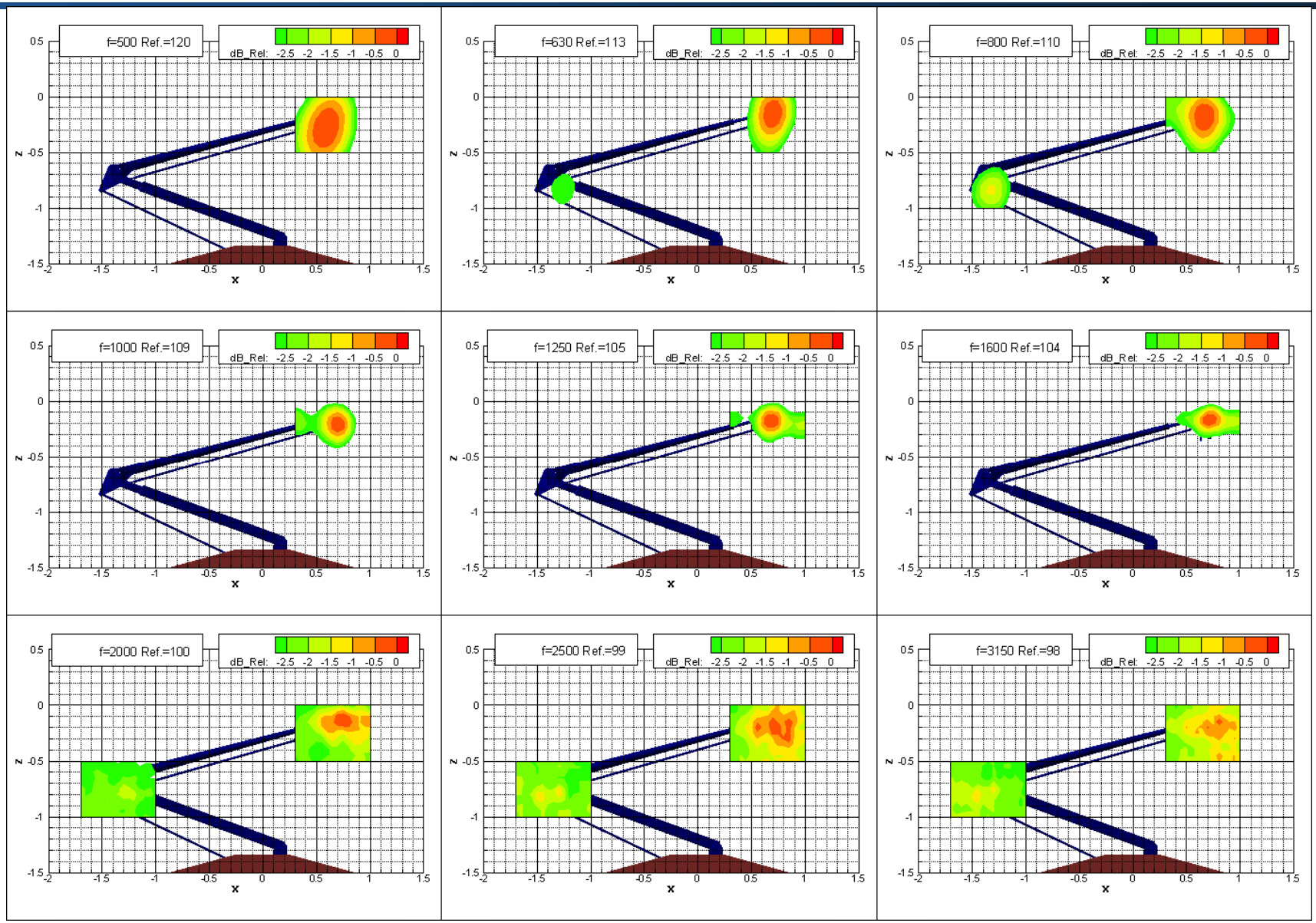
TA0210R0002_4
Wind 97m/s
Head : 0
Yaw : 2
Closed knee



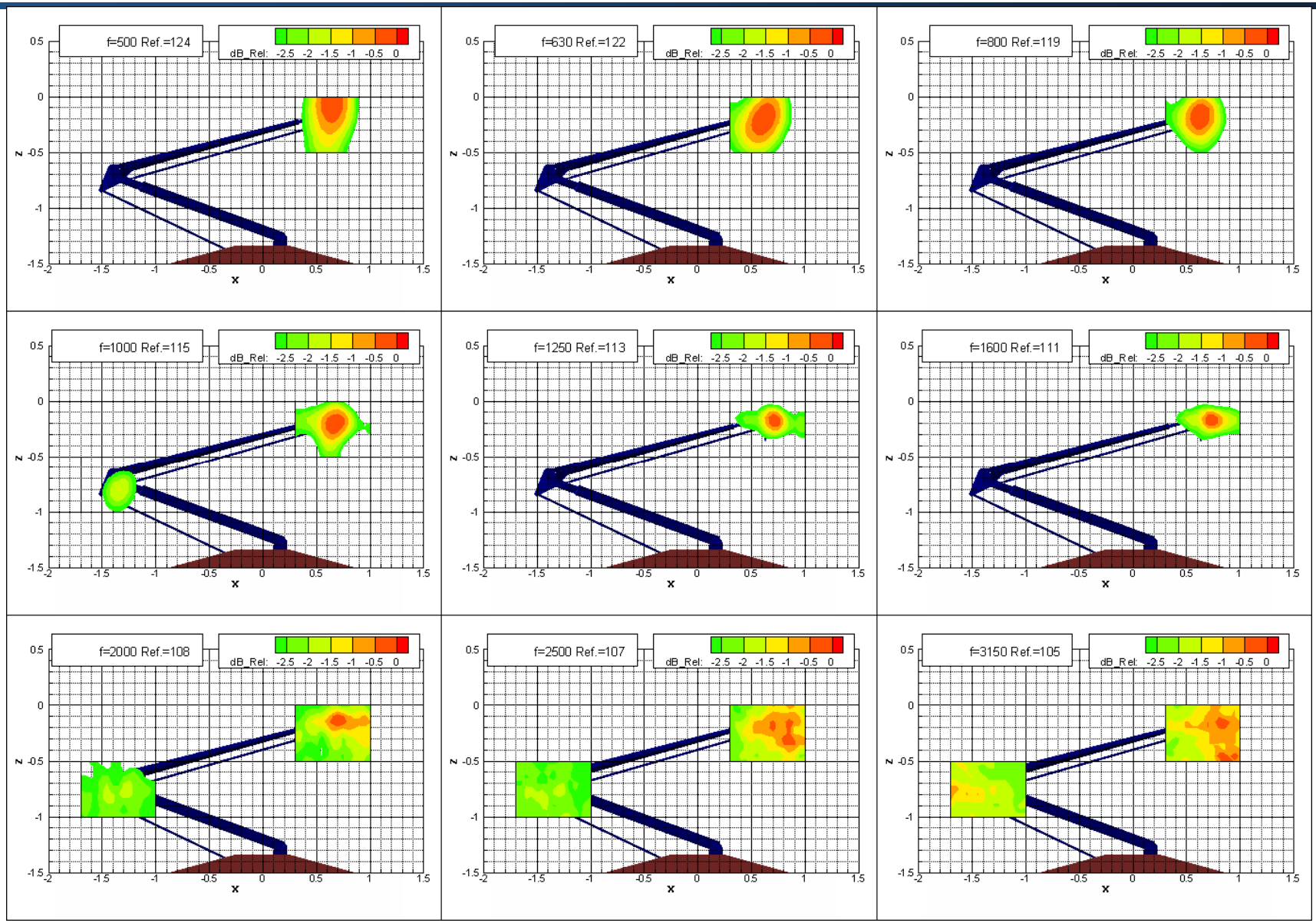
TA0210R0003_1
Wind 45m/s
Head : 0
Yaw : 4
Closed knee



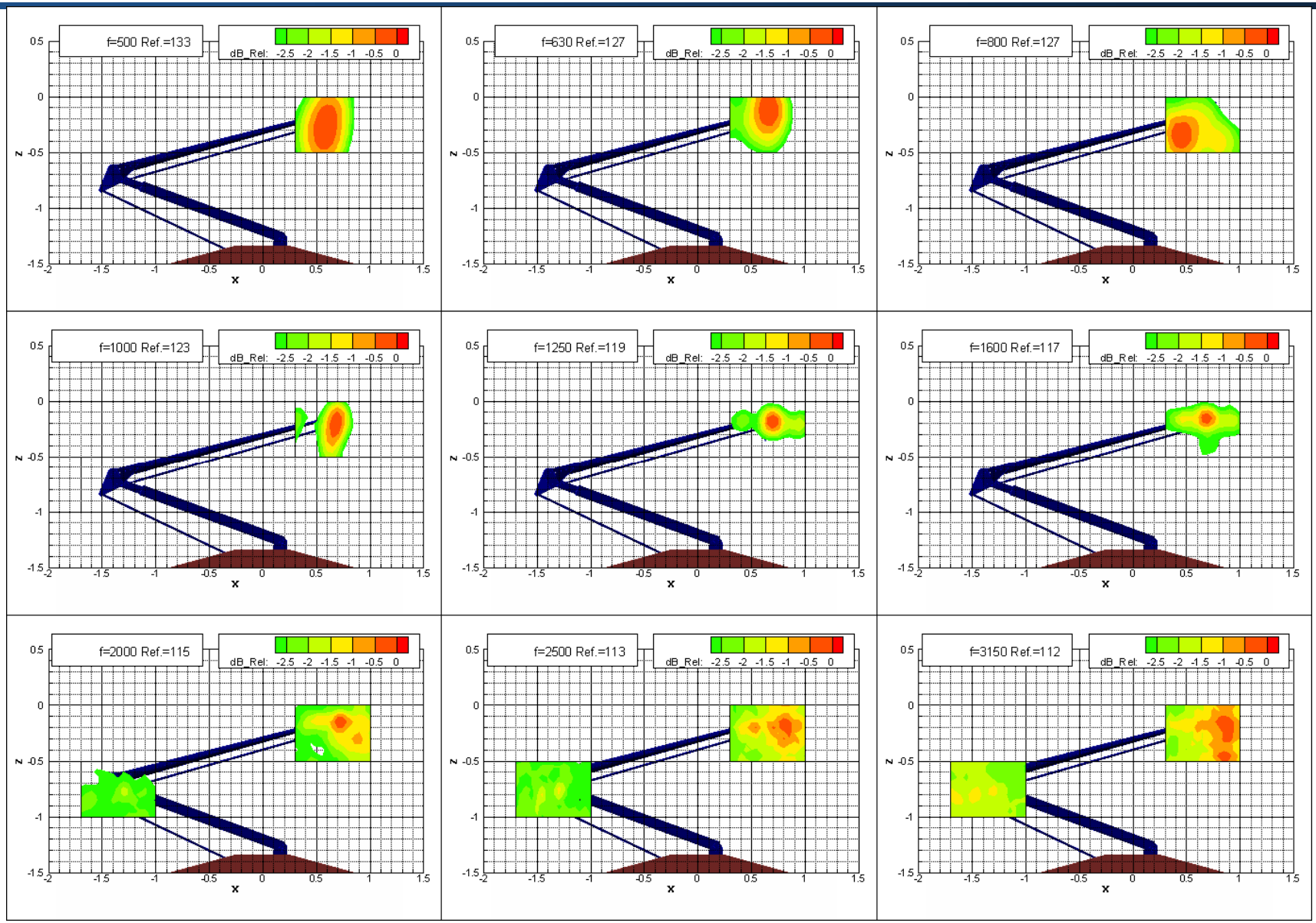
TA0210R0003_2
Wind 60m/s
Head : 0
Yaw : 4
Closed knee



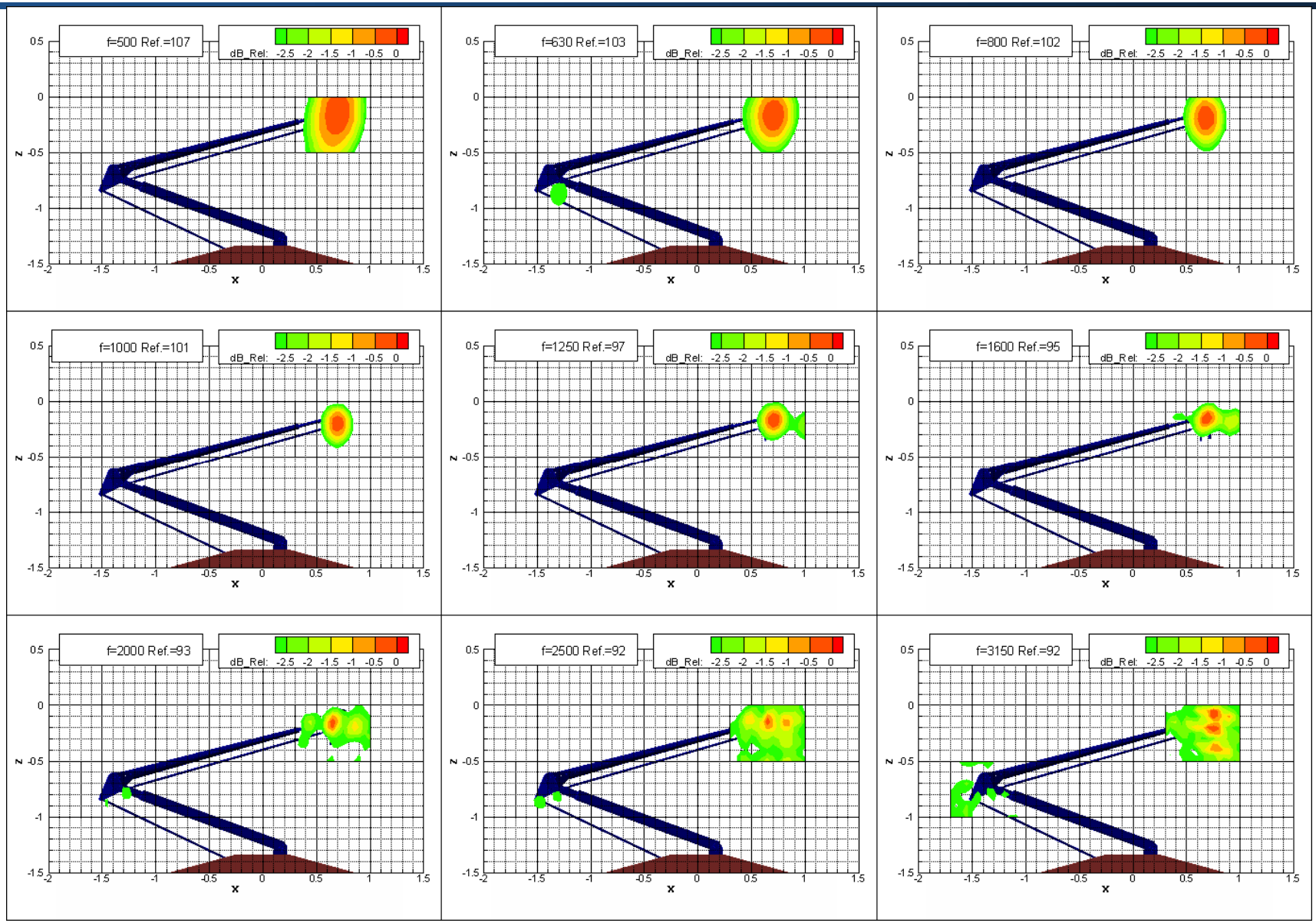
TA0210R0003_3
Wind 77m/s
Head : 0
Yaw : 4
Closed knee



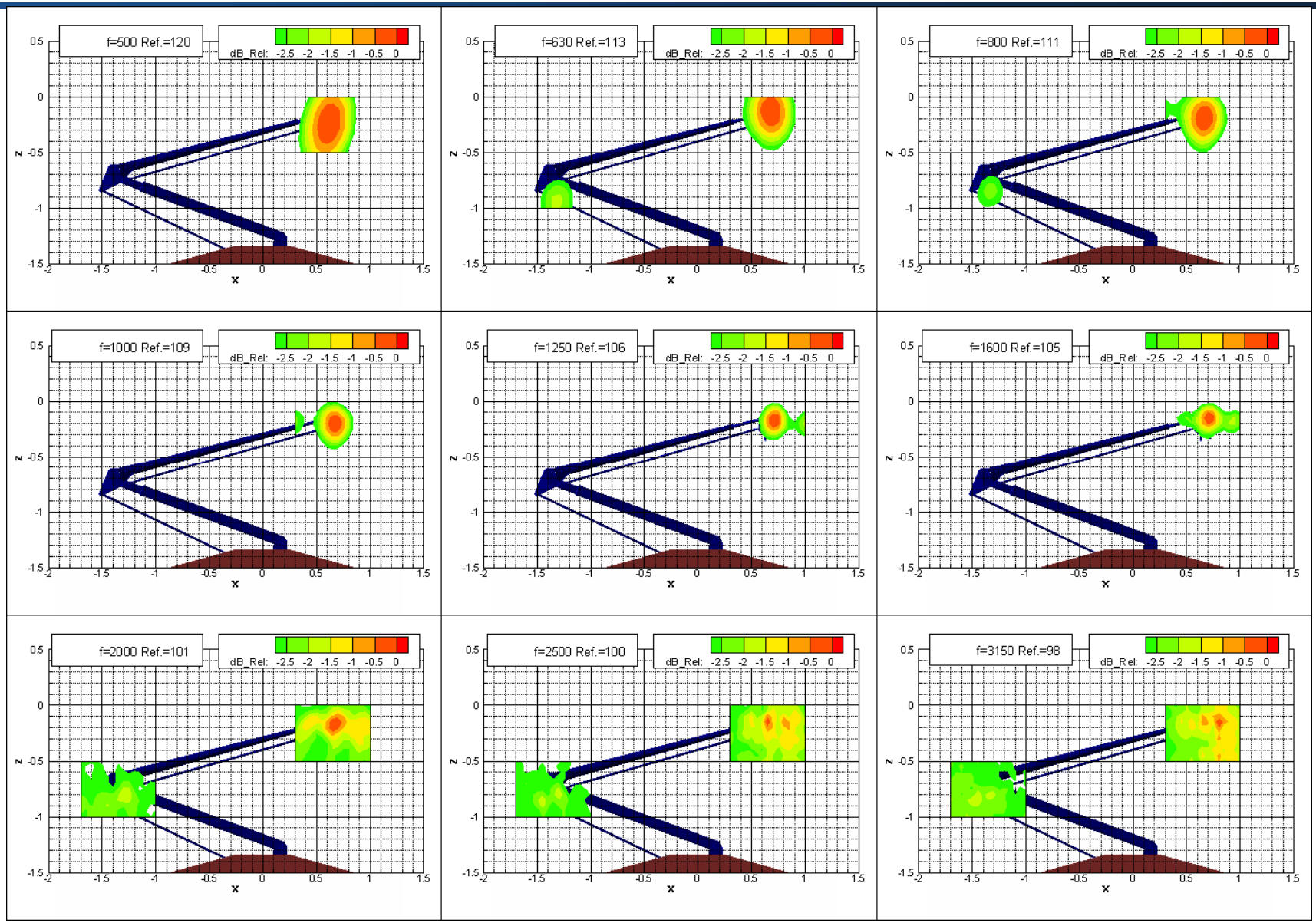
TA0210R0003_4
Wind 97m/s
Head : 0
Yaw : 4
Closed knee



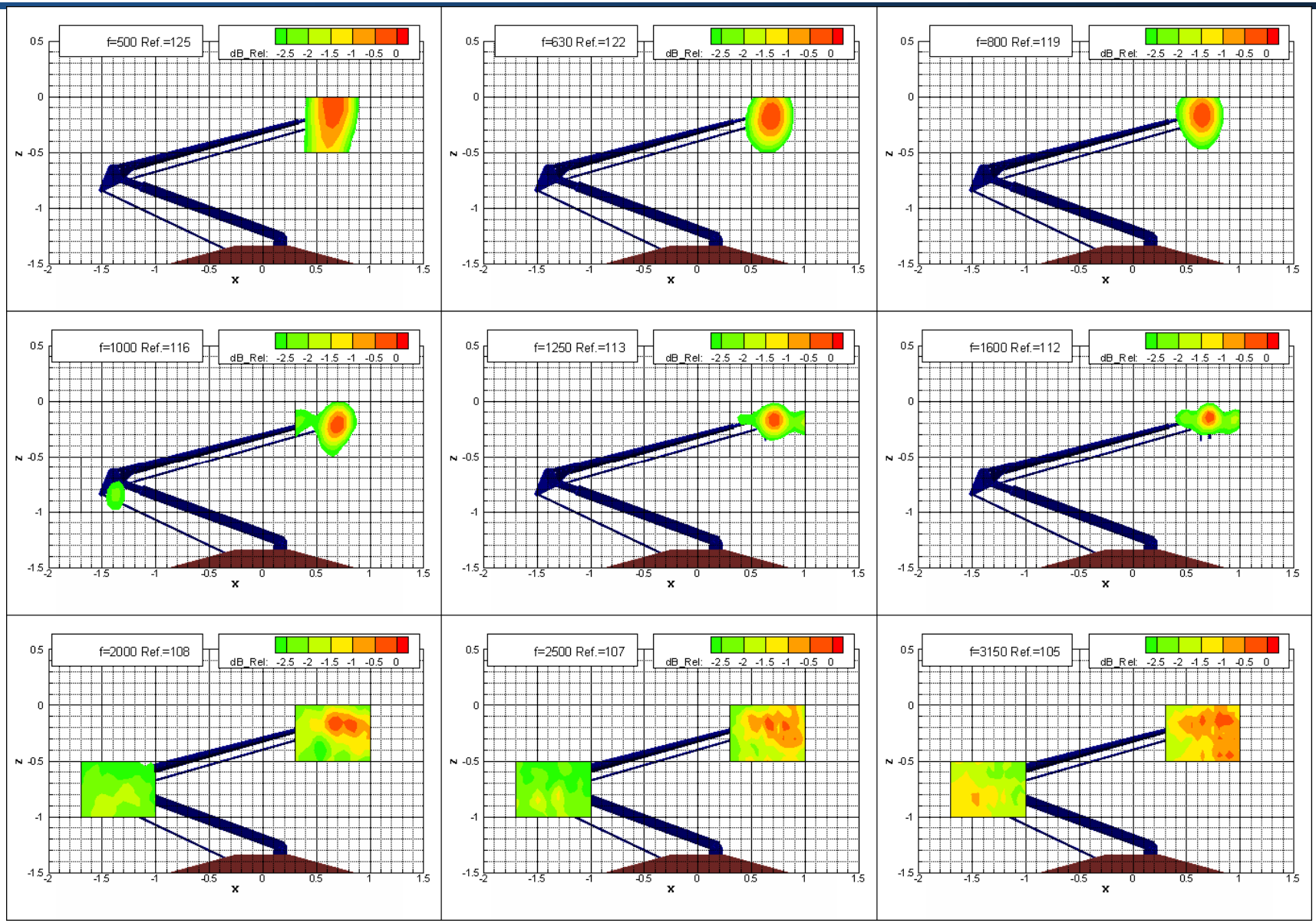
TA0210R0004_1
Wind 45m/s
Head : 0
Yaw : 0
Closed knee



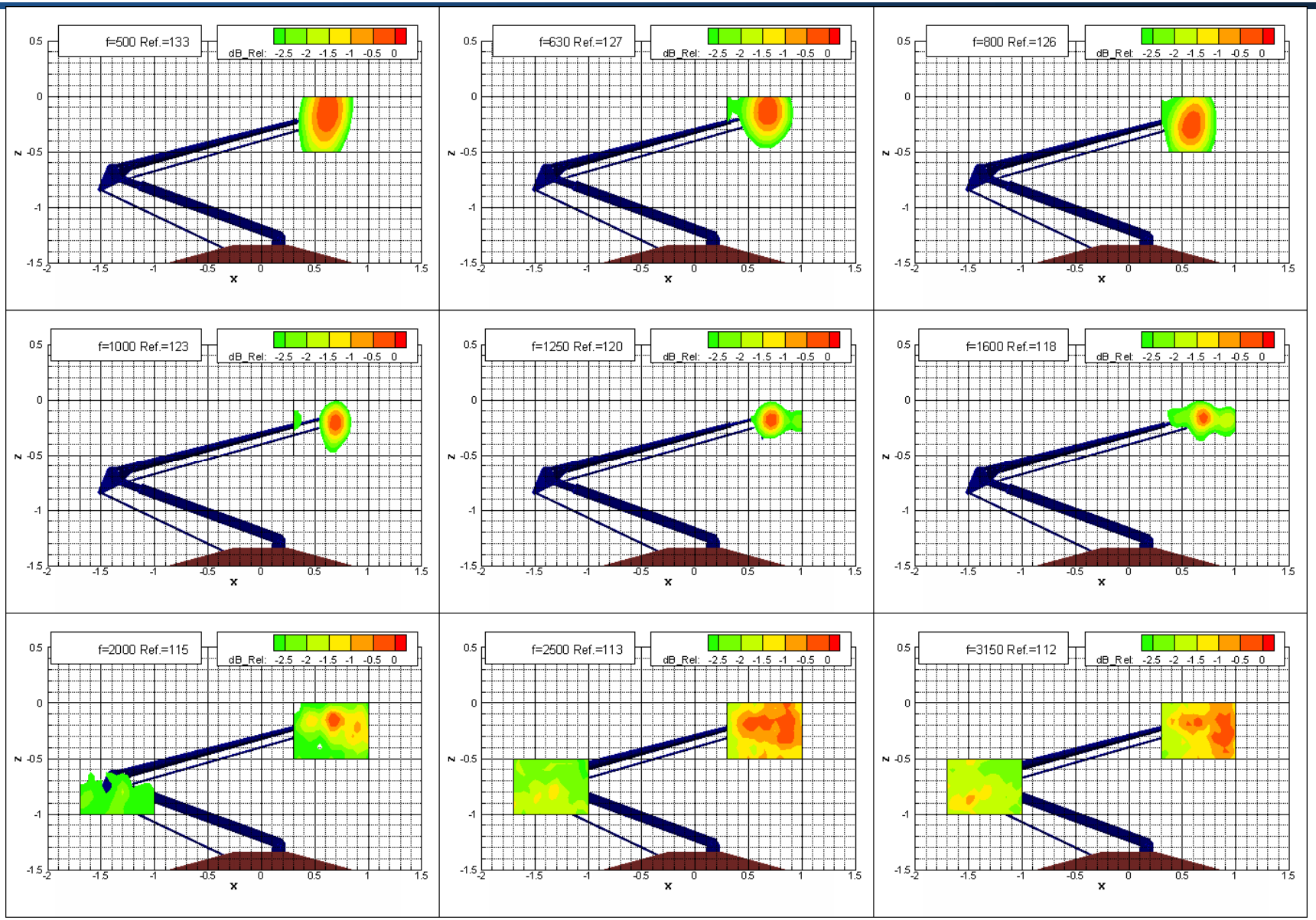
TA0210R0004_2
Wind 60m/s
Head : 0
Yaw : 0
Closed knee



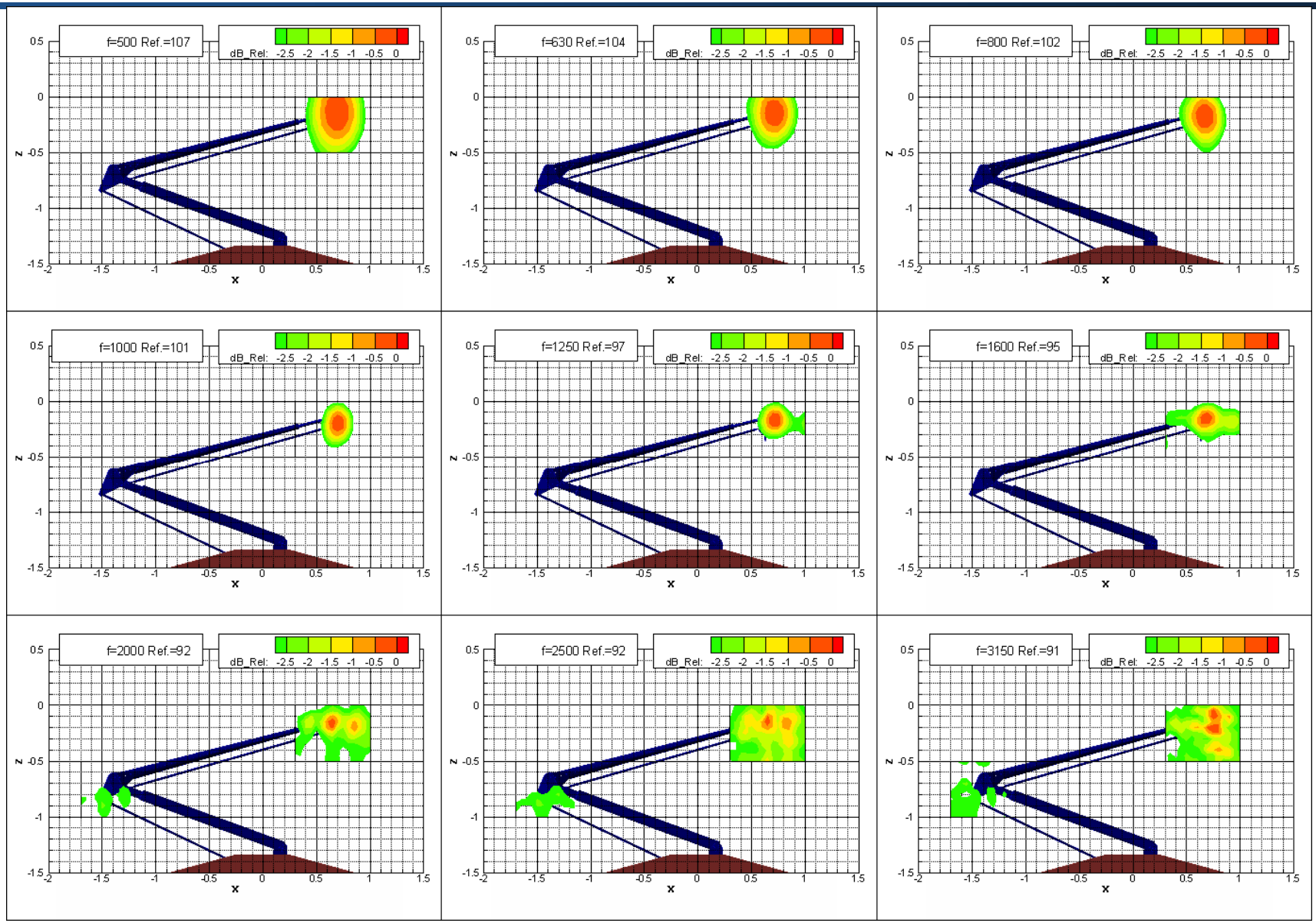
TA0210R0004_3
Wind 77m/s
Head : 0
Yaw : 0
Closed knee



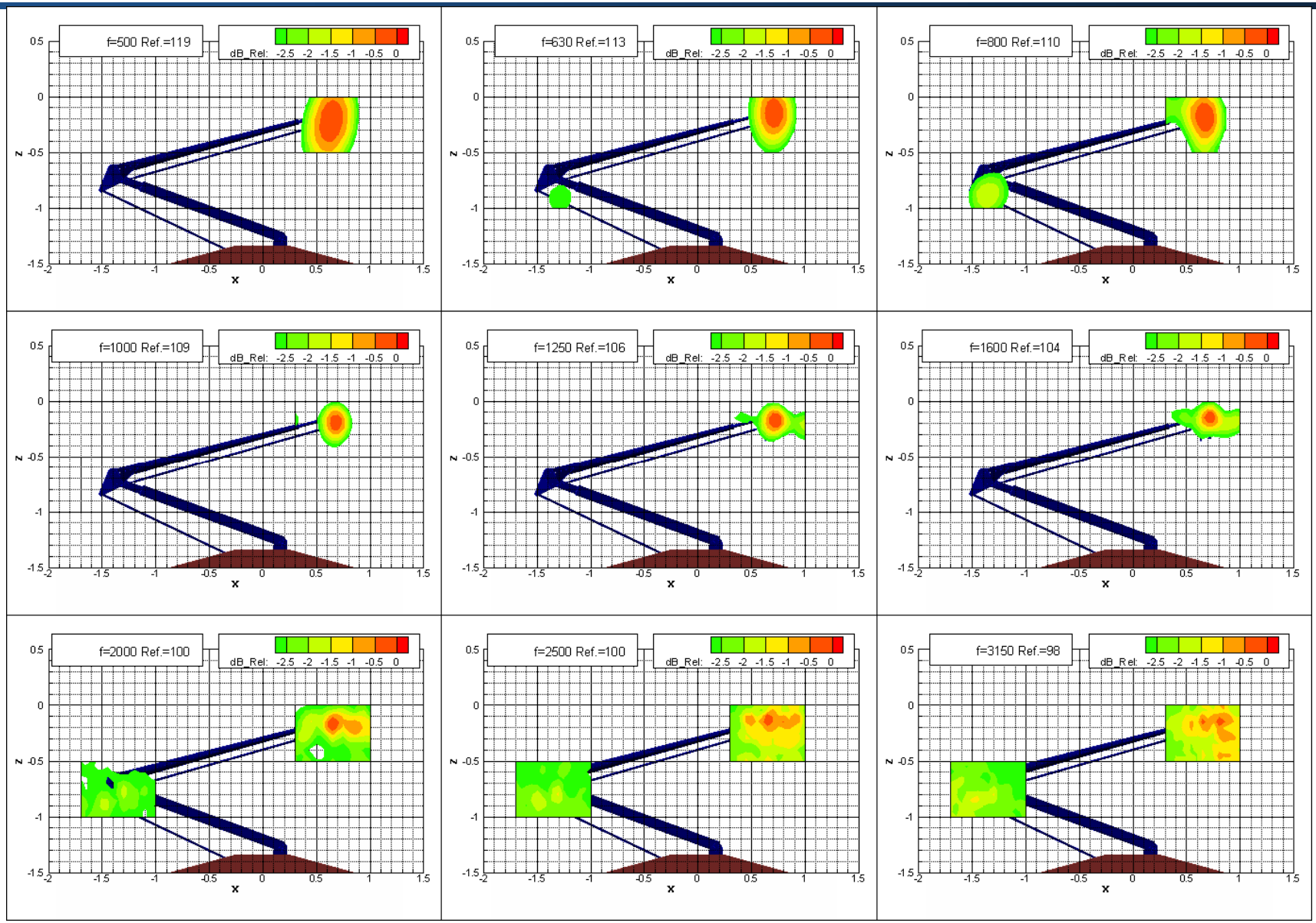
TA0210R0004_4
Wind 97m/s
Head : 0
Yaw : 0
Closed knee



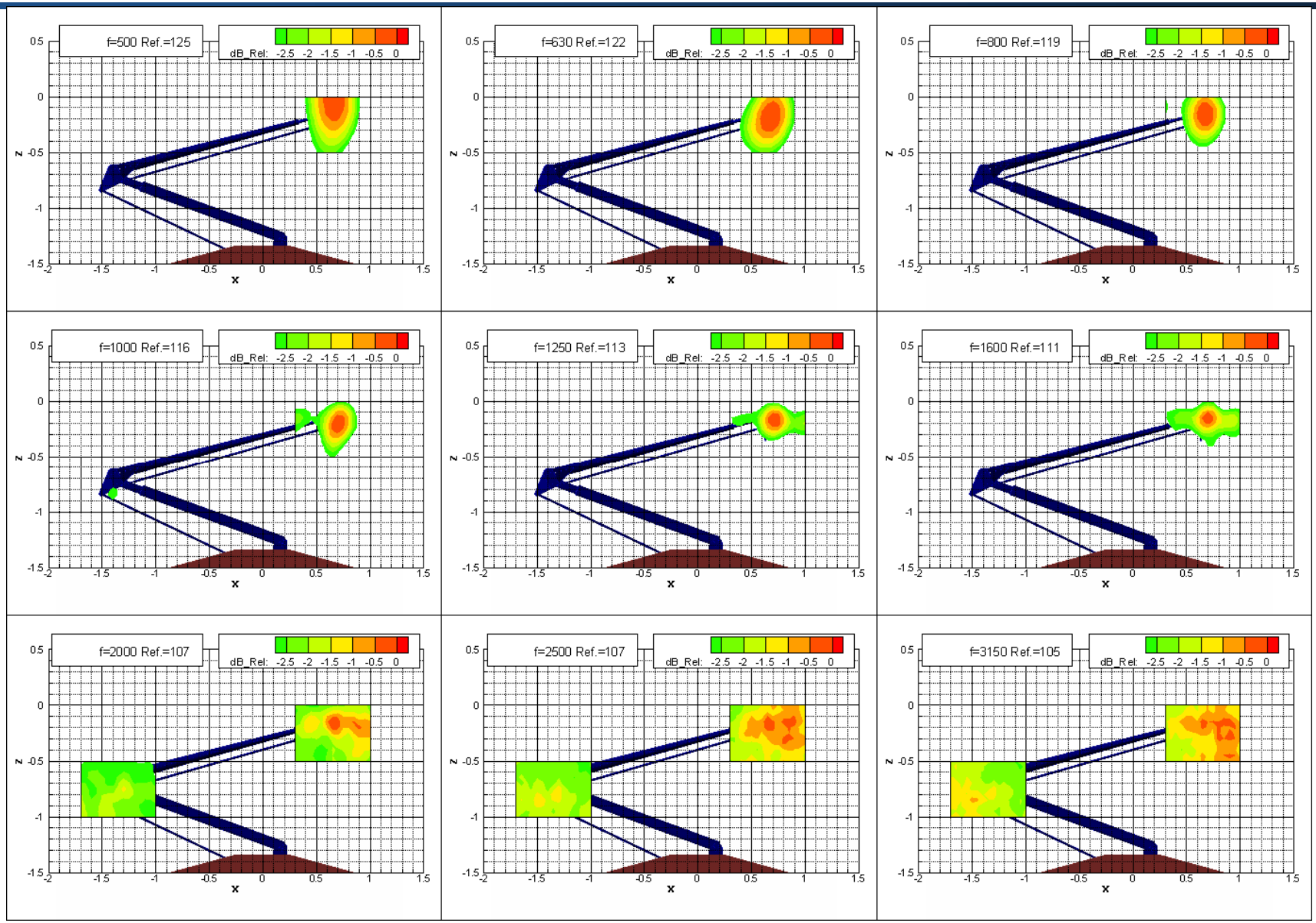
TA0210R0005_1
Wind 45m/s
Head : -2.5
Yaw : 0
Closed knee



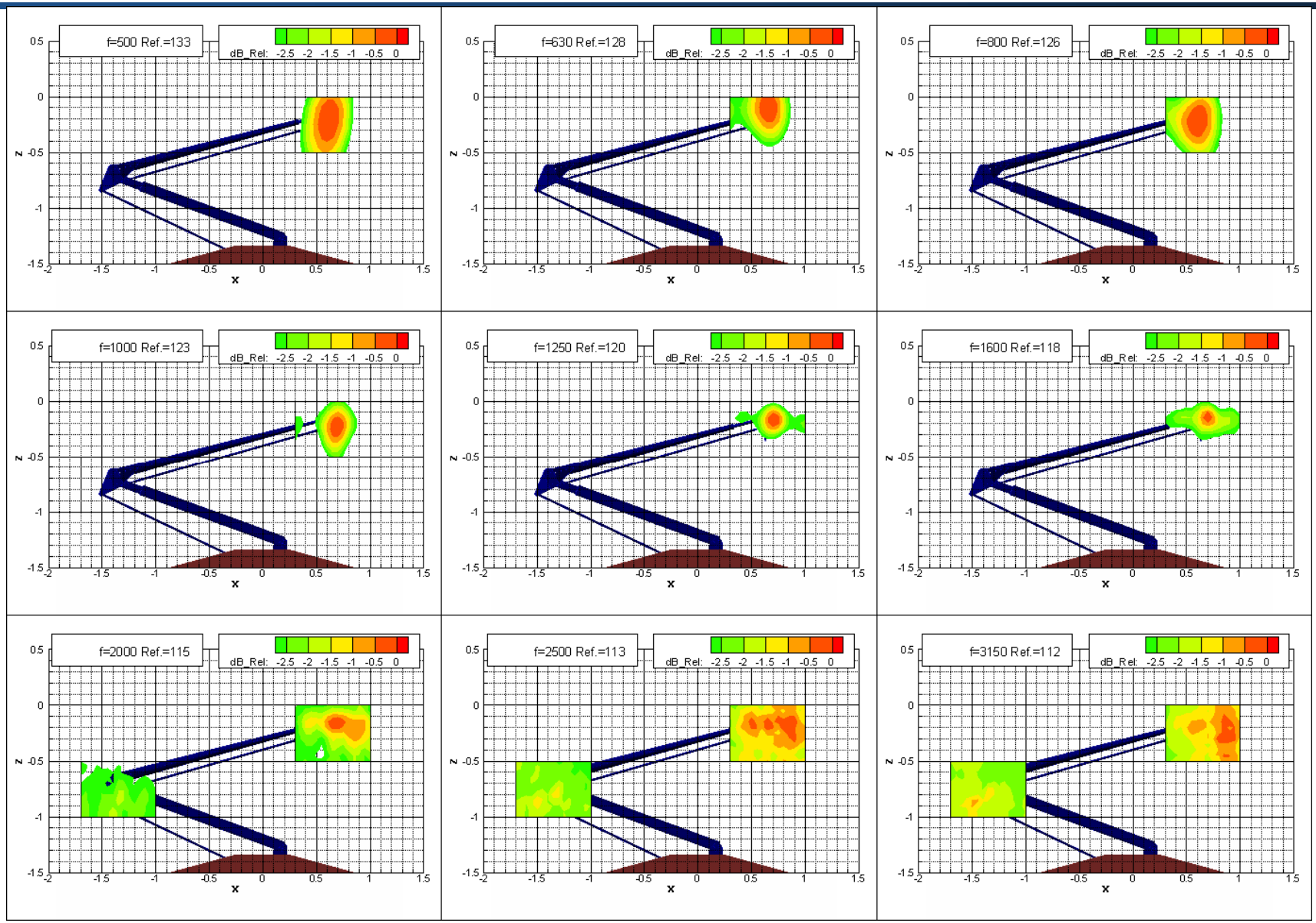
TA0210R0005_2
Wind 60m/s
Head : -2.5
Yaw : 0
Closed knee



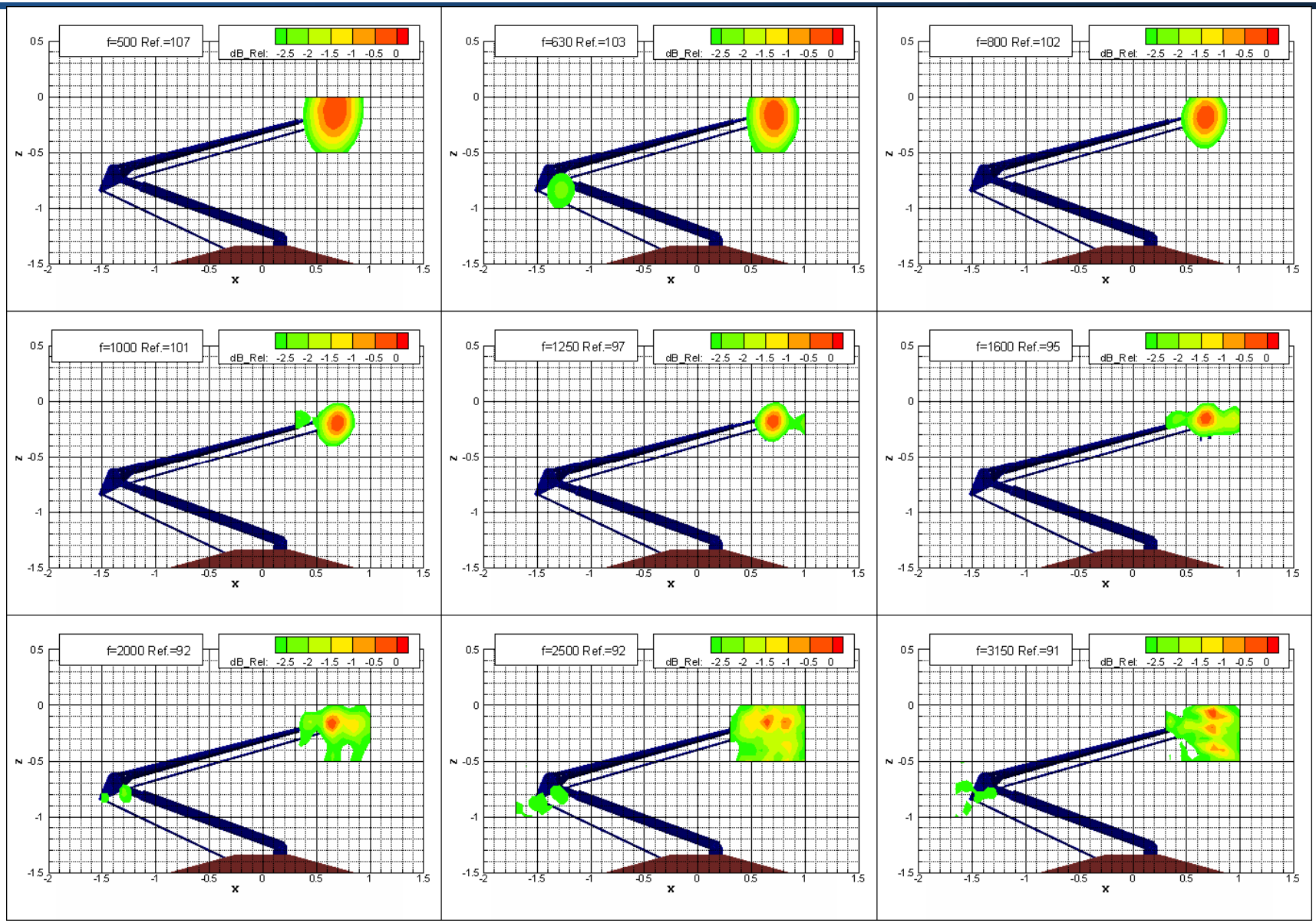
TA0210R0005_1
Wind 45m/s
Head : -2.5
Yaw : 0
Closed knee



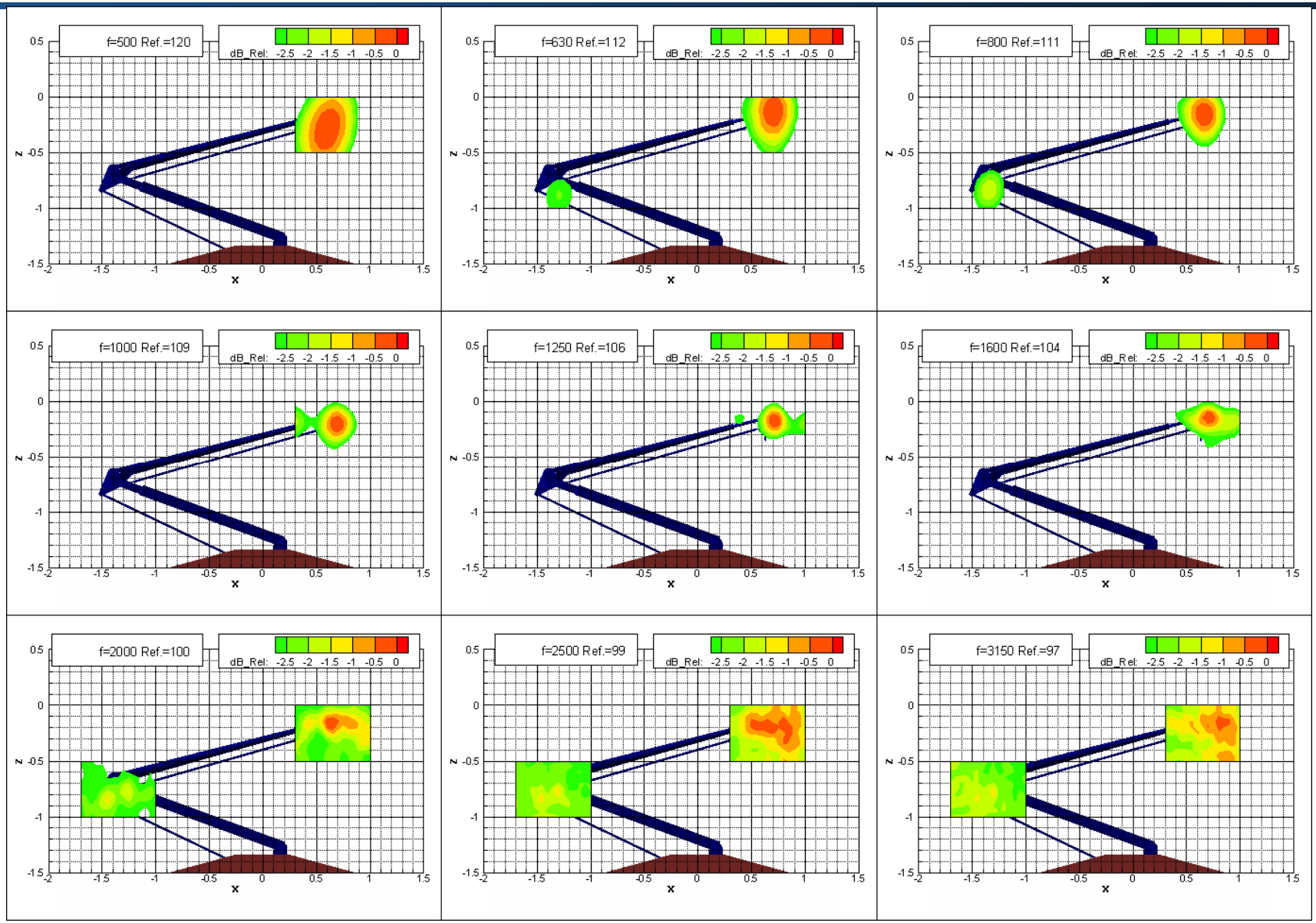
TA0210R0005_1
Wind 45m/s
Head : -2.5
Yaw : 0
Closed knee



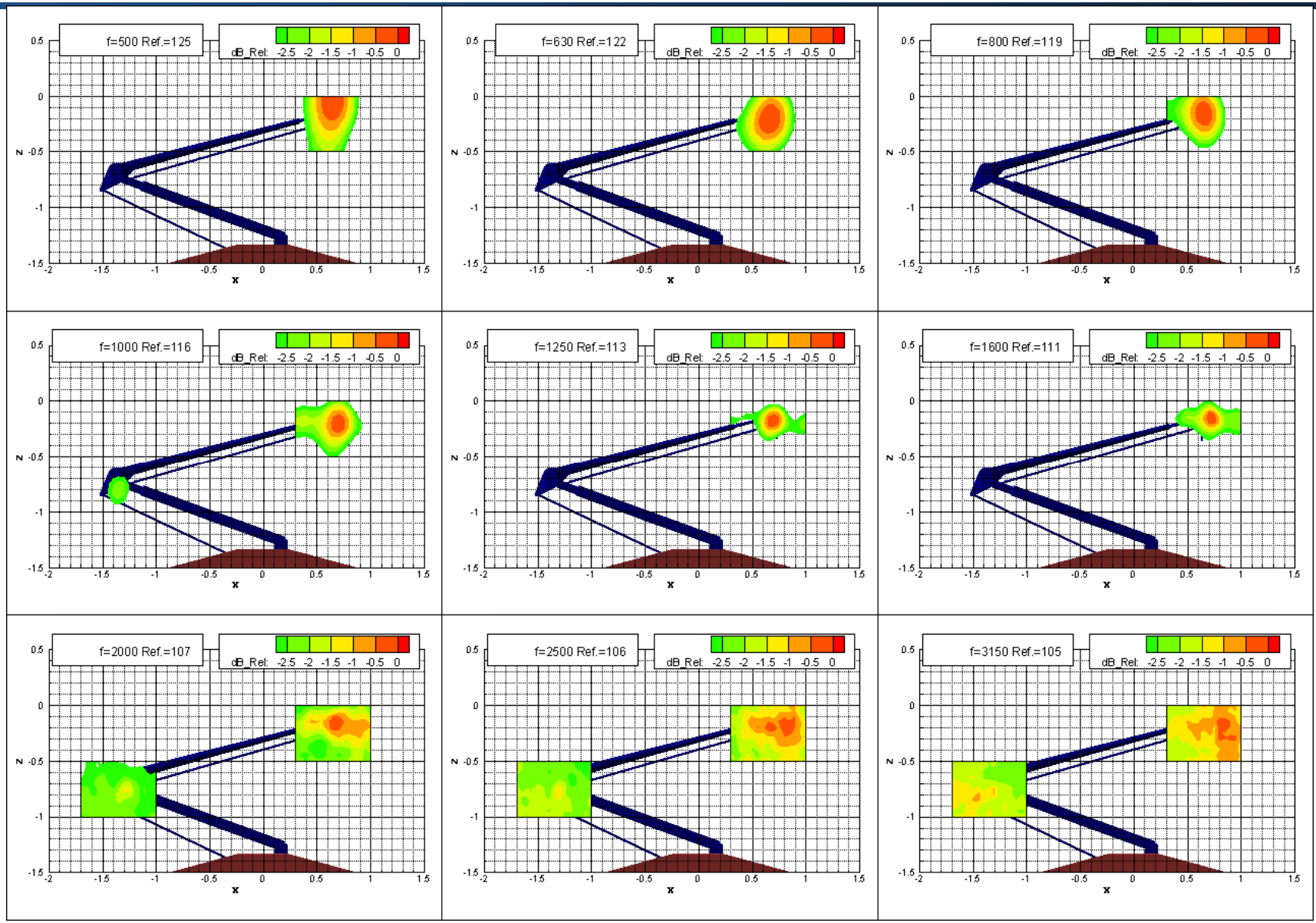
TA0210R0006_1
Wind 45m/s
Head : -2.5
Yaw : 2
Closed knee



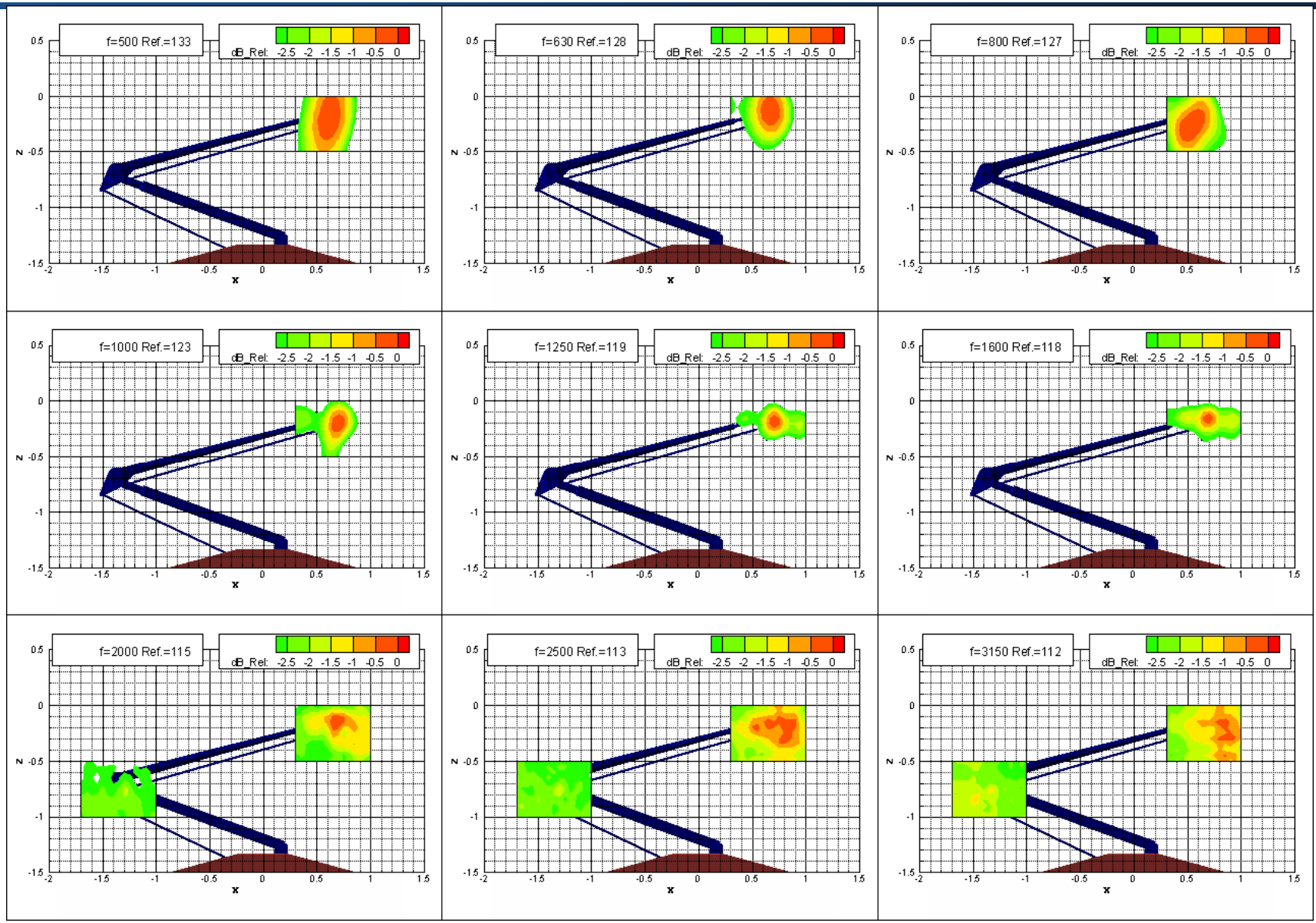
TA0210R0006_2
Wind 60m/s
Head : -2.5
Yaw : 2
Closed knee



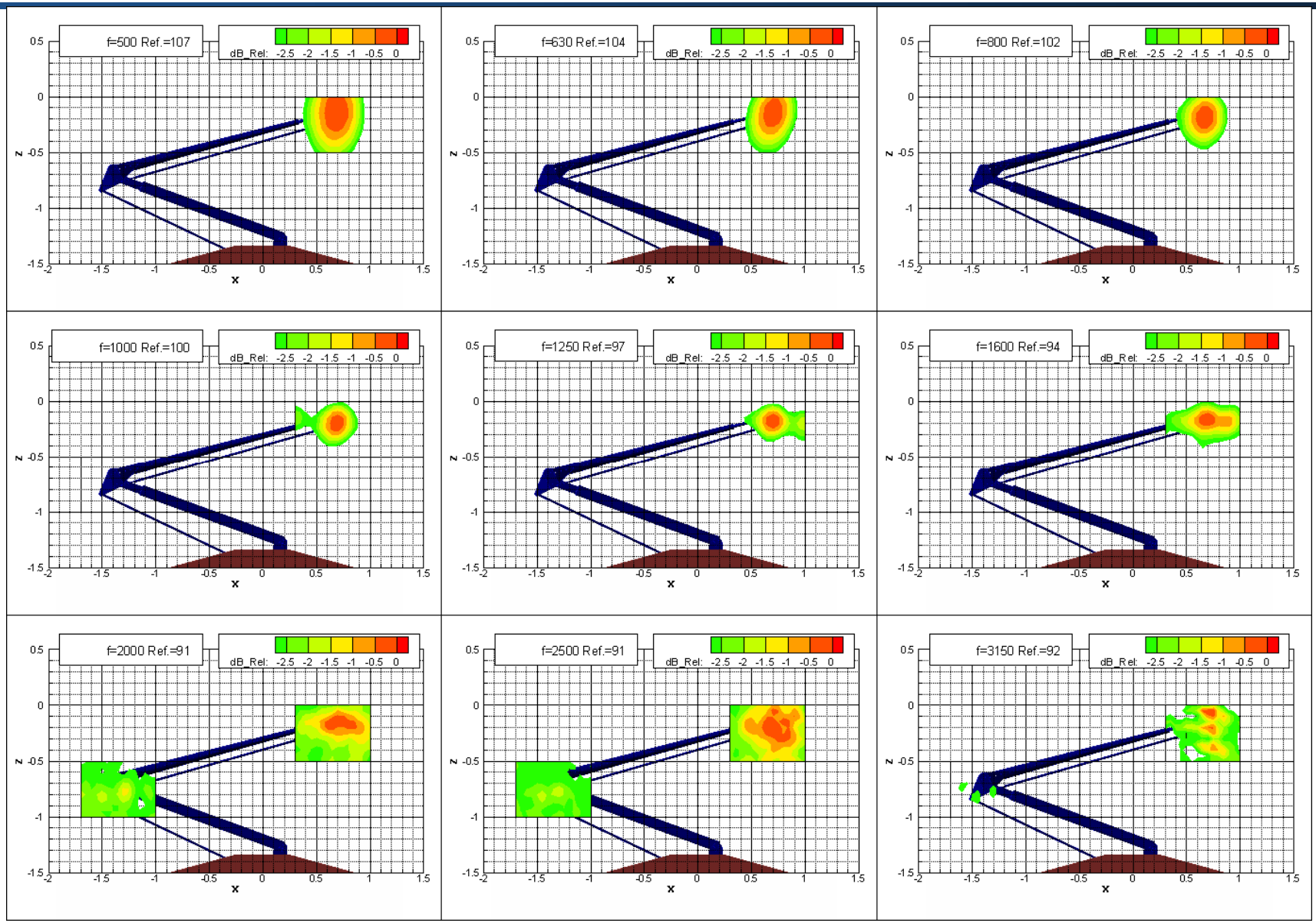
TA0210R0006_4
Wind 77m/s
Head : -2.5
Yaw : 2
Closed knee



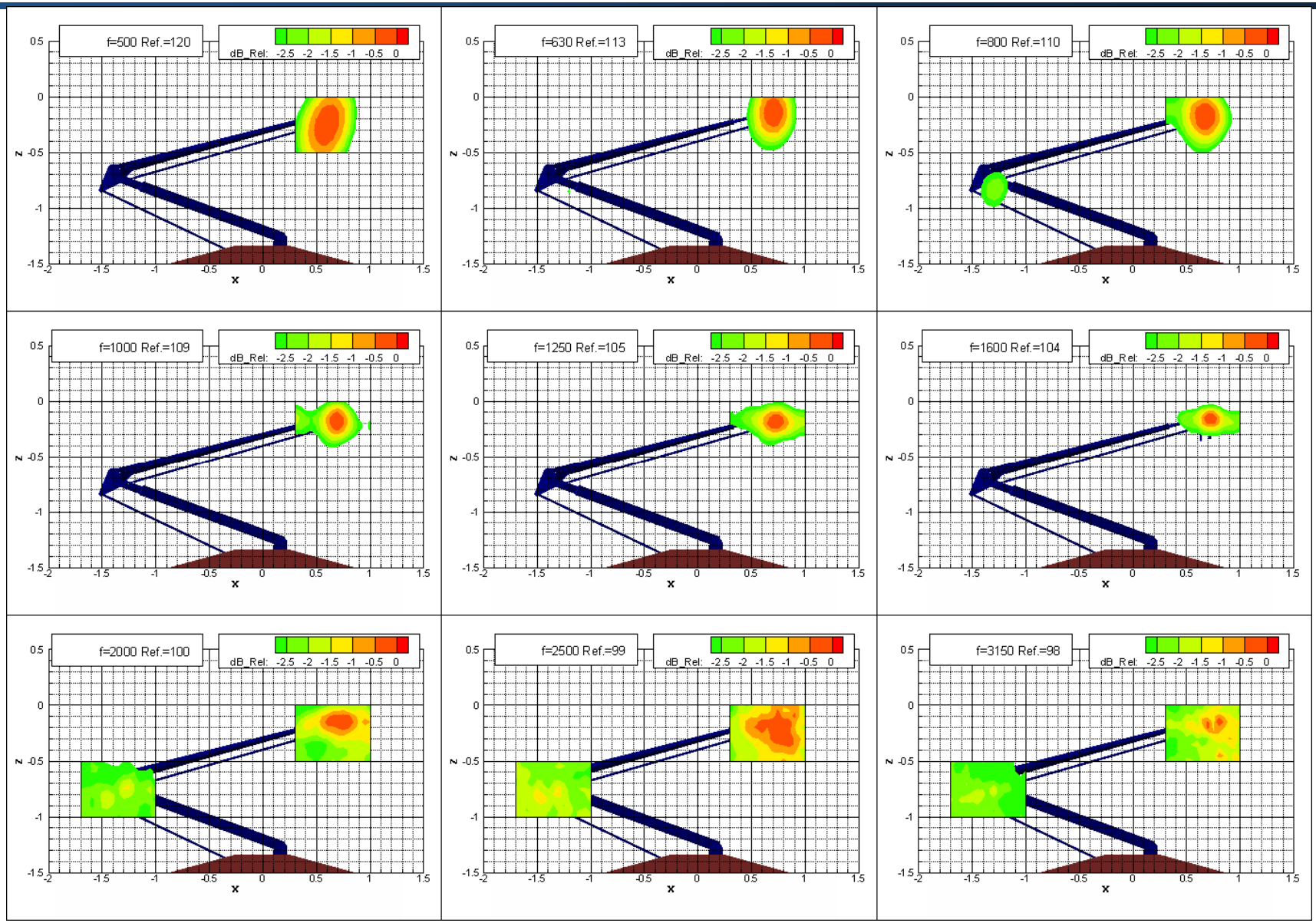
TA0210R0006_5
Wind 97m/s
Head : -2.5
Yaw : 2
Closed knee



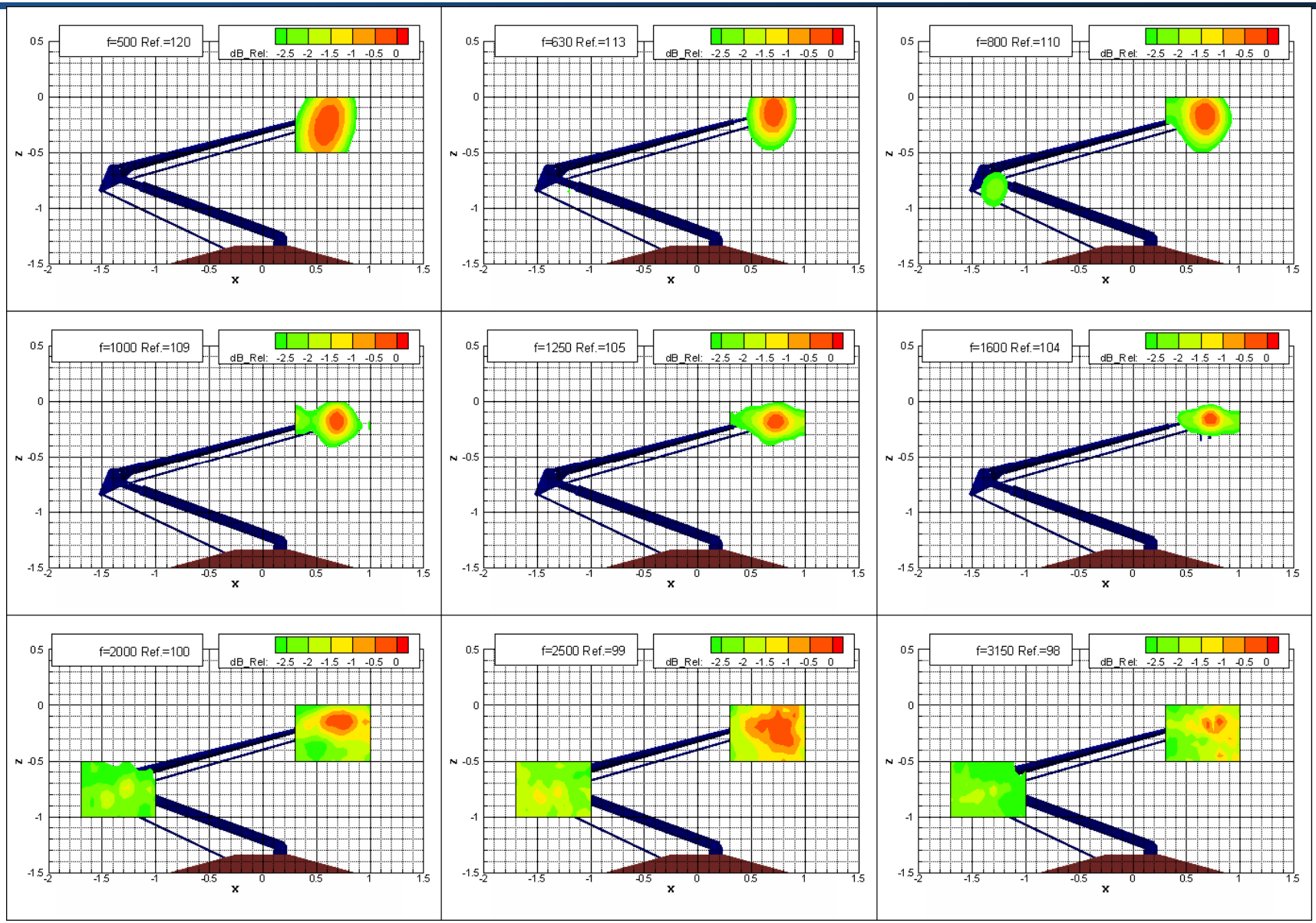
TA0210R0007_1
Wind 45m/s
Head : -2.5
Yaw : 4
Closed knee



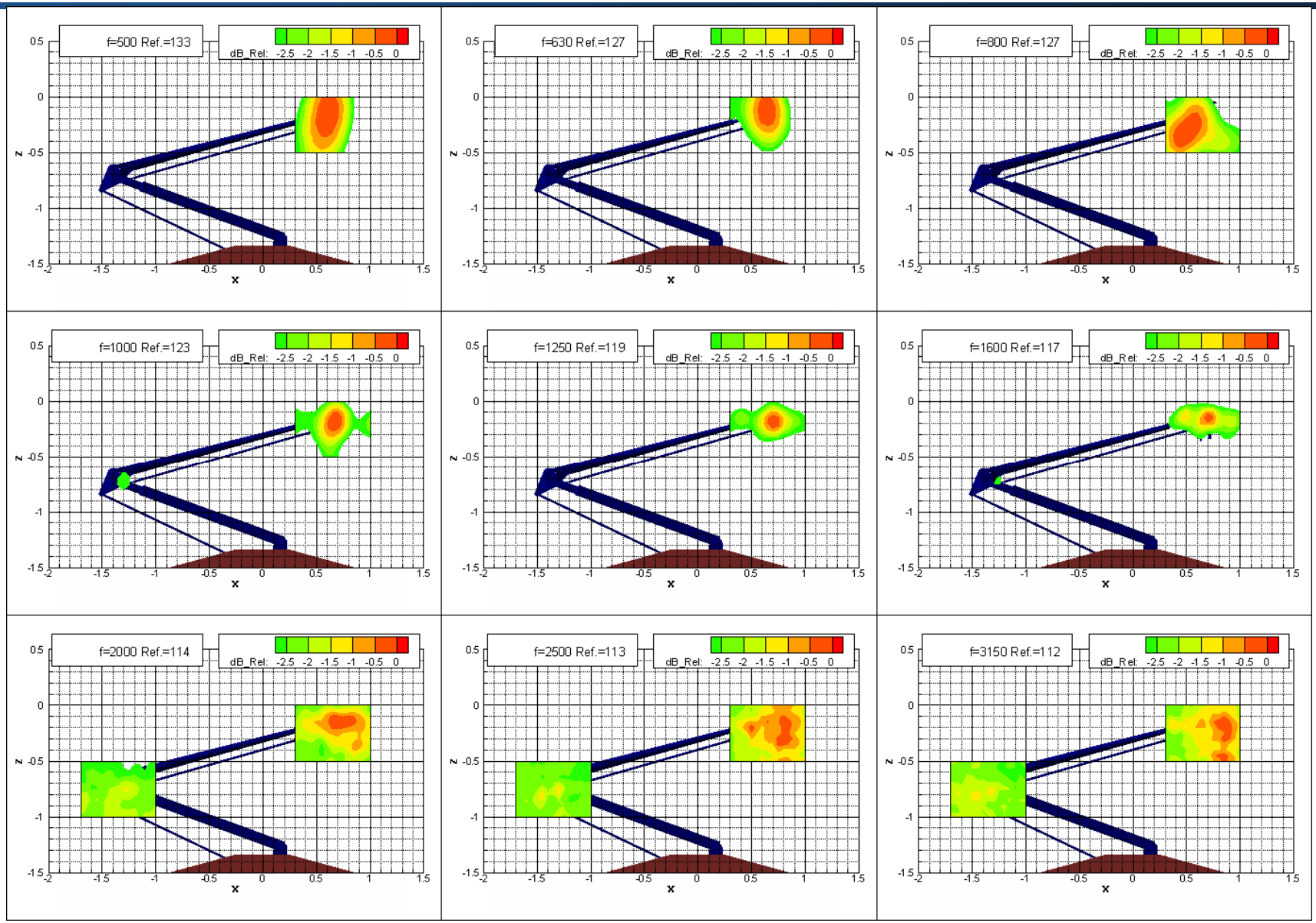
TA0210R0007_2
Wind 60m/s
Head : -2.5
Yaw : 4
Closed knee



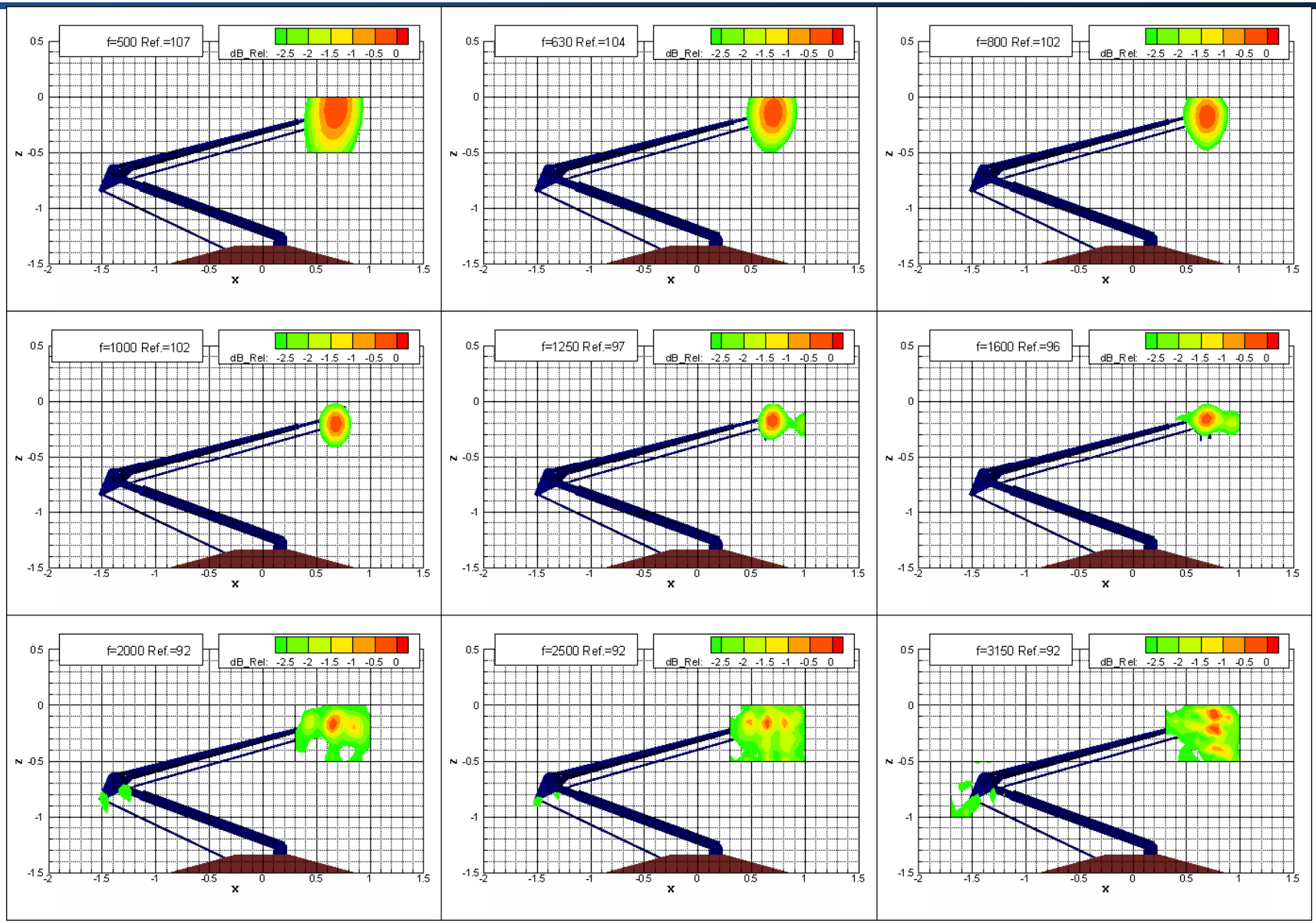
TA0210R0007_3
Wind 77m/s
Head : -2.5
Yaw : 4
Closed knee



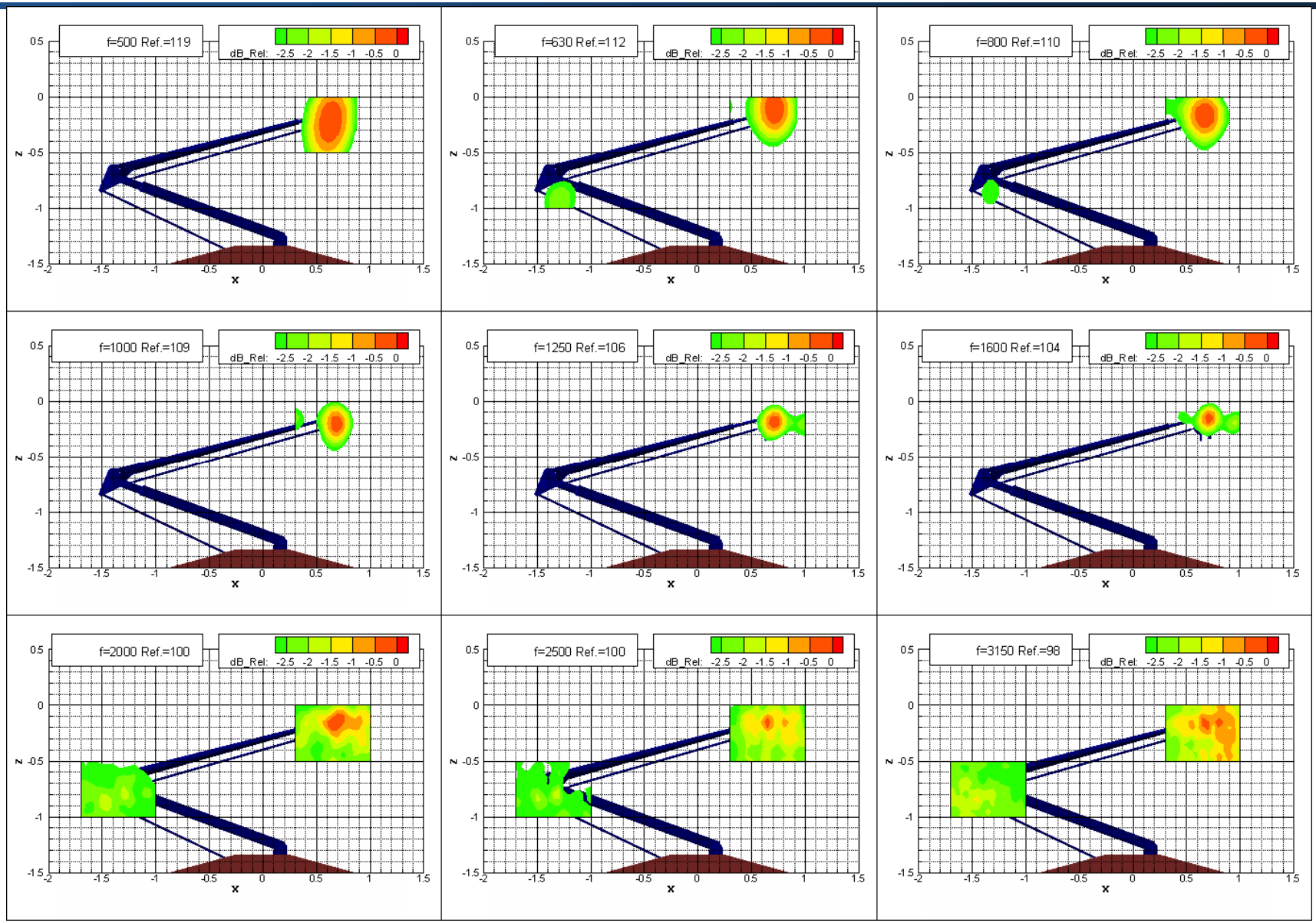
TA0210R0007_4
Wind 97m/s
Head : -2.5
Yaw : 4
Closed knee



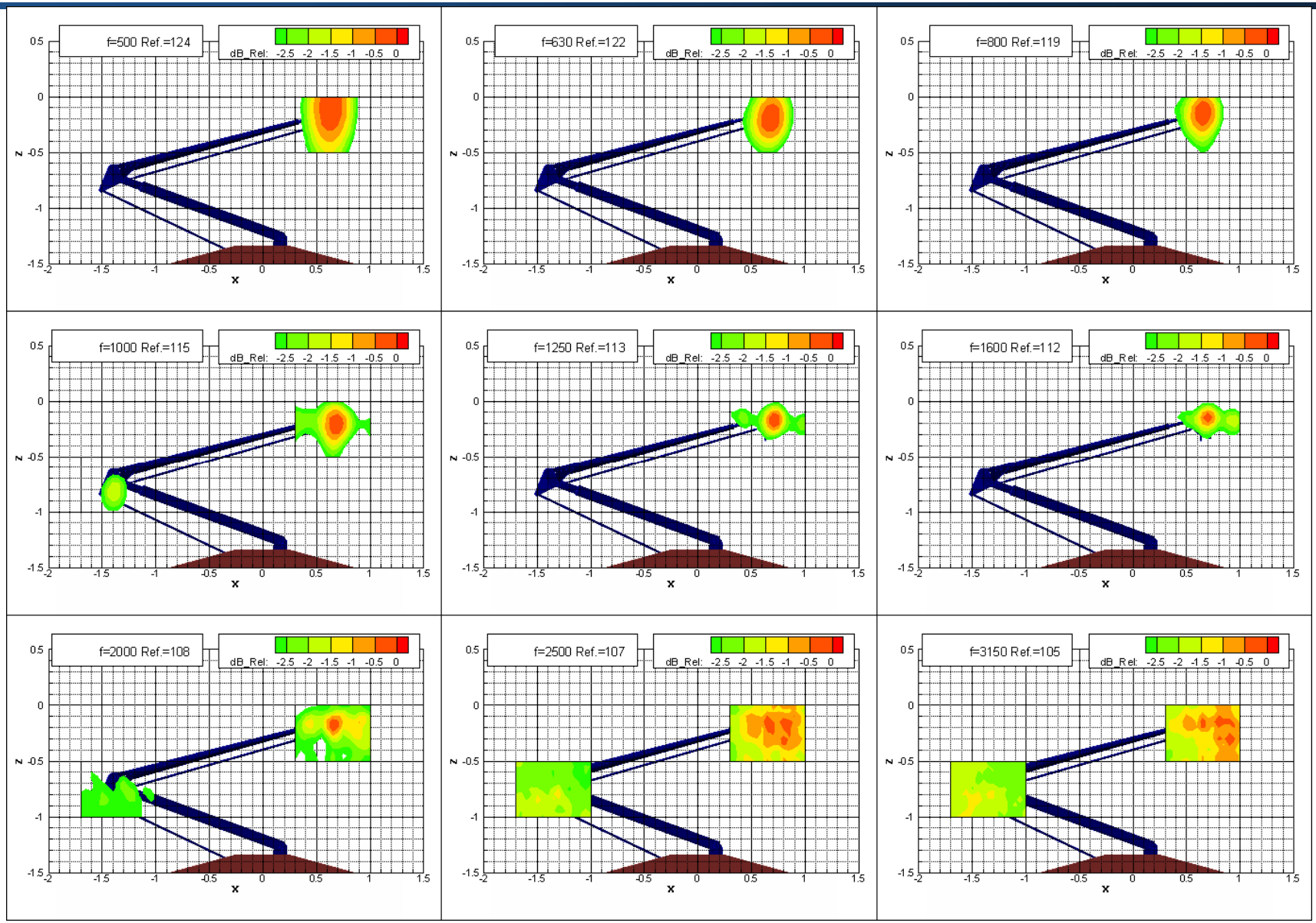
TA0210R0008_1
Wind 45m/s
Head : 2.5
Yaw : 0
Closed knee



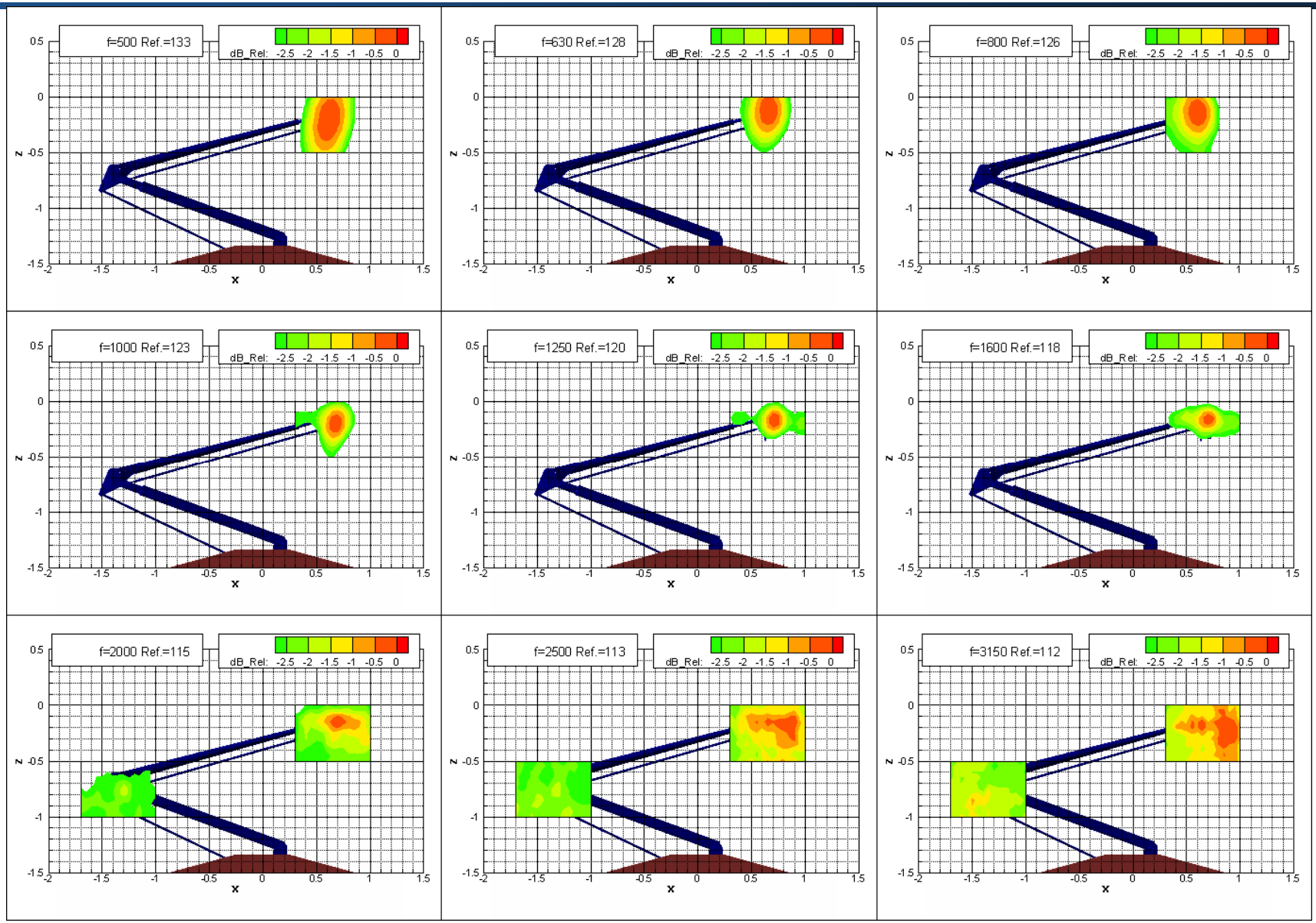
TA0210R0008_2
Wind 60m/s
Head : 2.5
Yaw : 0
Closed knee



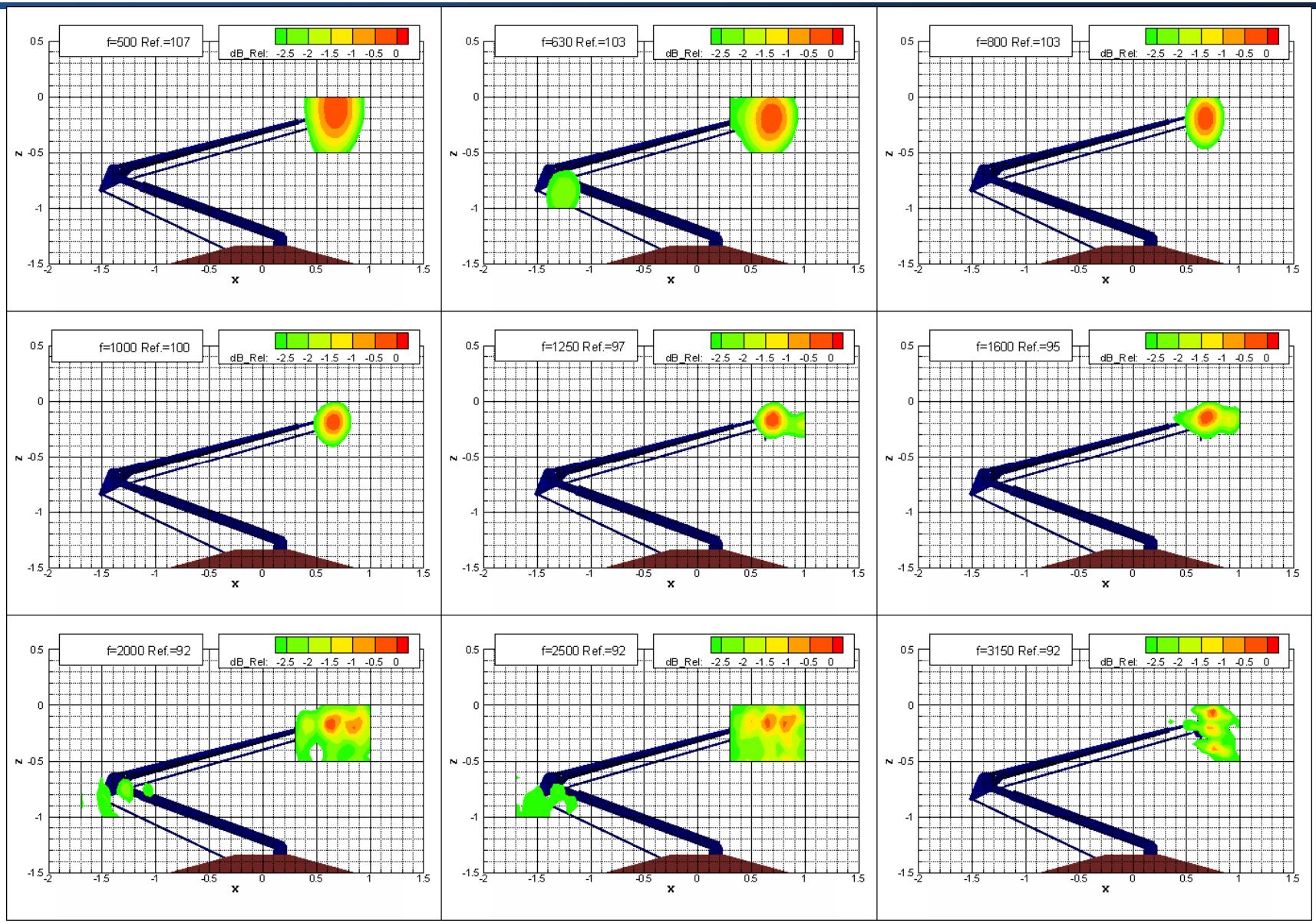
TA0210R0008_3
Wind 77m/s
Head : 2.5
Yaw : 0
Closed knee



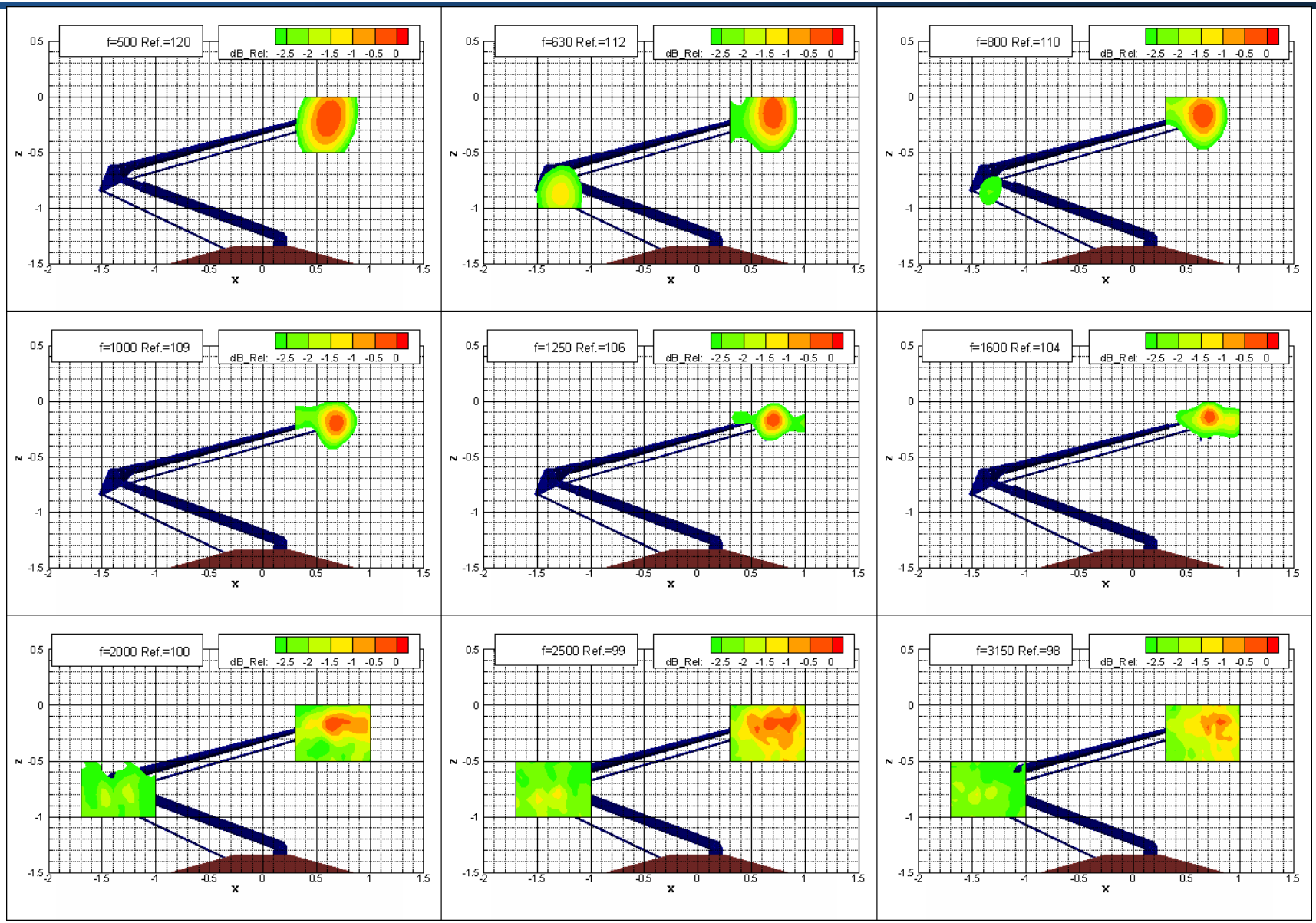
TA0210R0008_4
Wind 97m/s
Head : 2.5
Yaw : 0
Closed knee



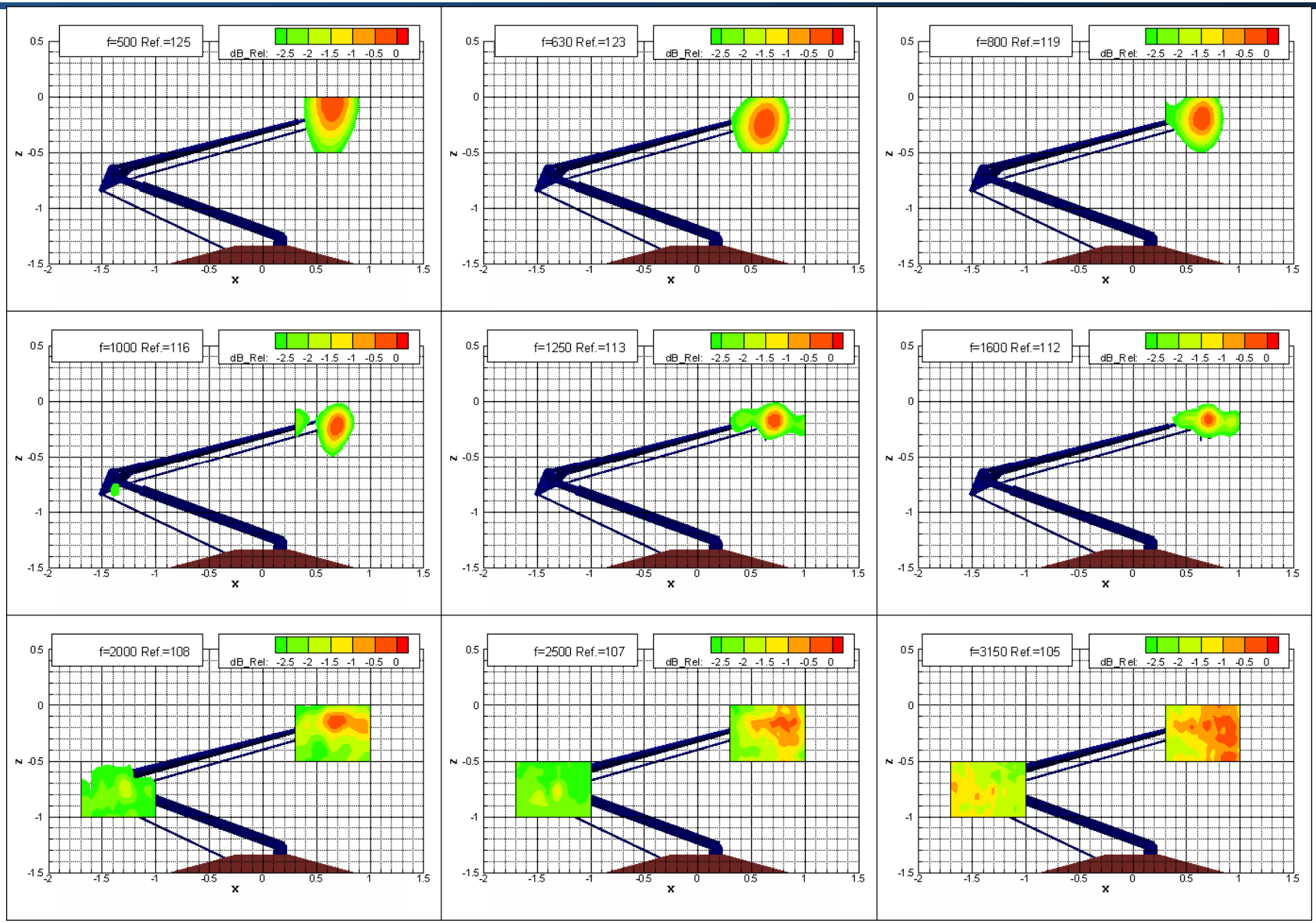
TA0210R0009_1
Wind 45m/s
Head : 2.5
Yaw : 2
Closed knee



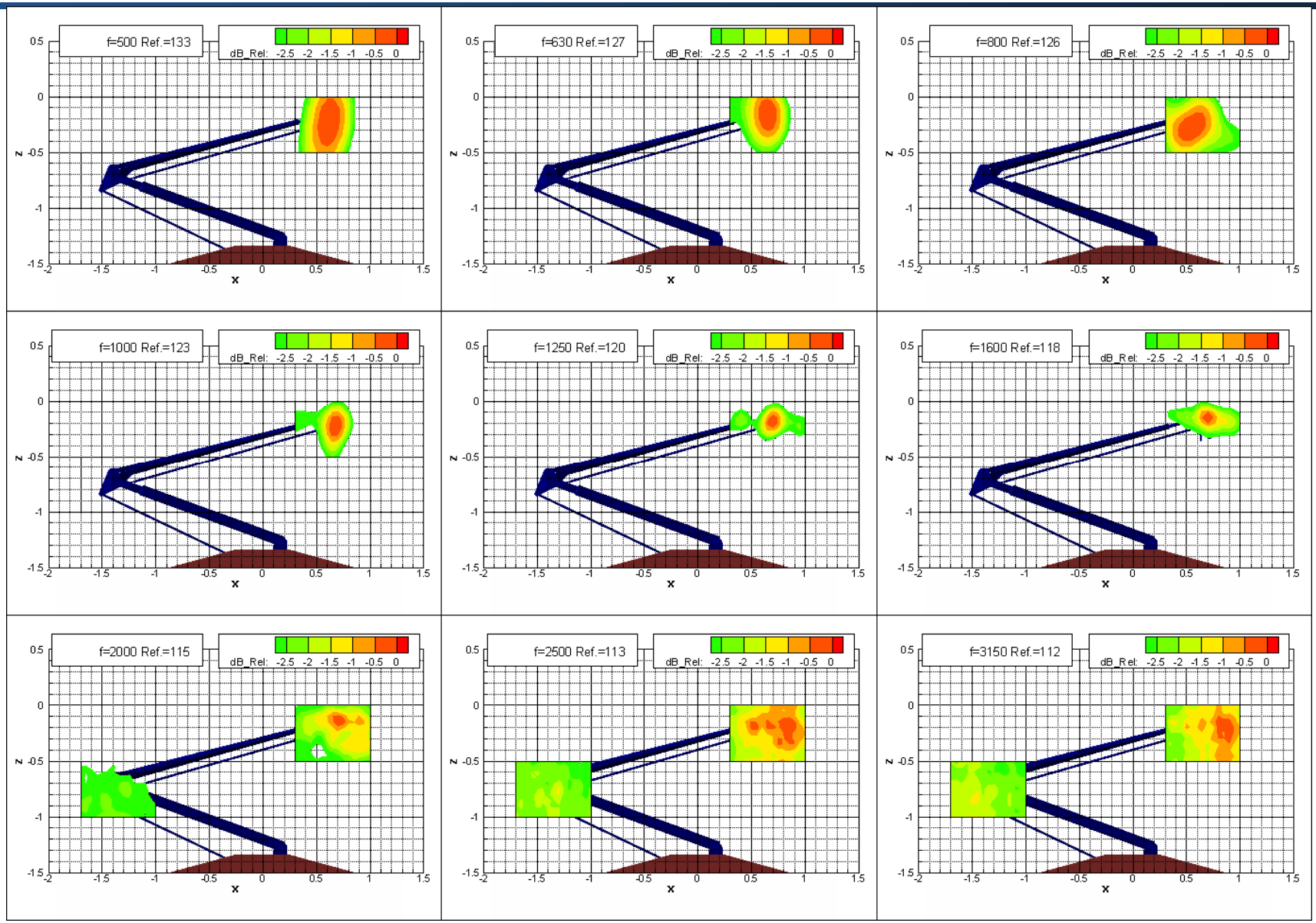
TA0210R0009_2
Wind 60m/s
Head : 2.5
Yaw : 2
Closed knee



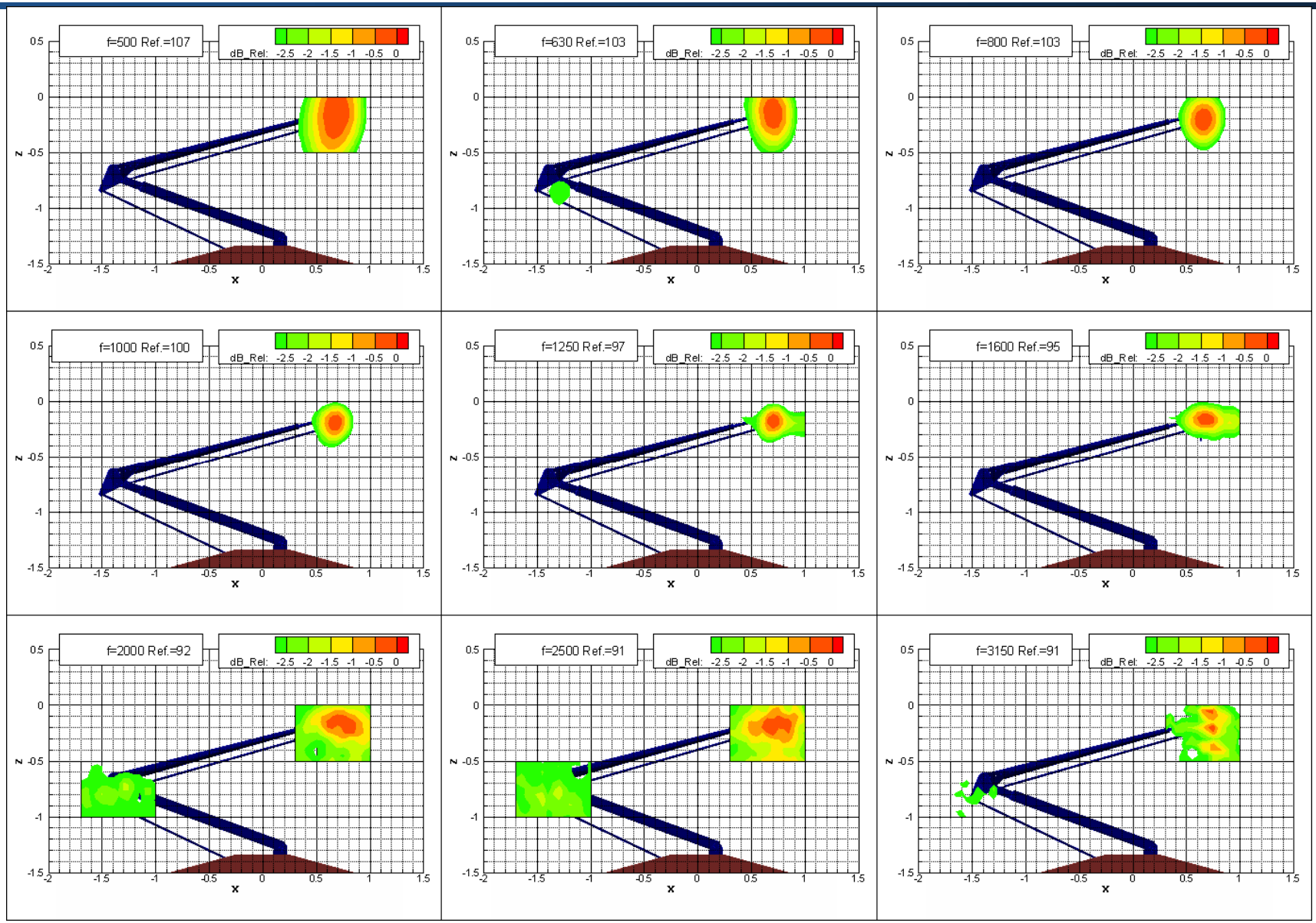
TA0210R0009_3
Wind 77m/s
Head : 2.5
Yaw : 2
Closed knee



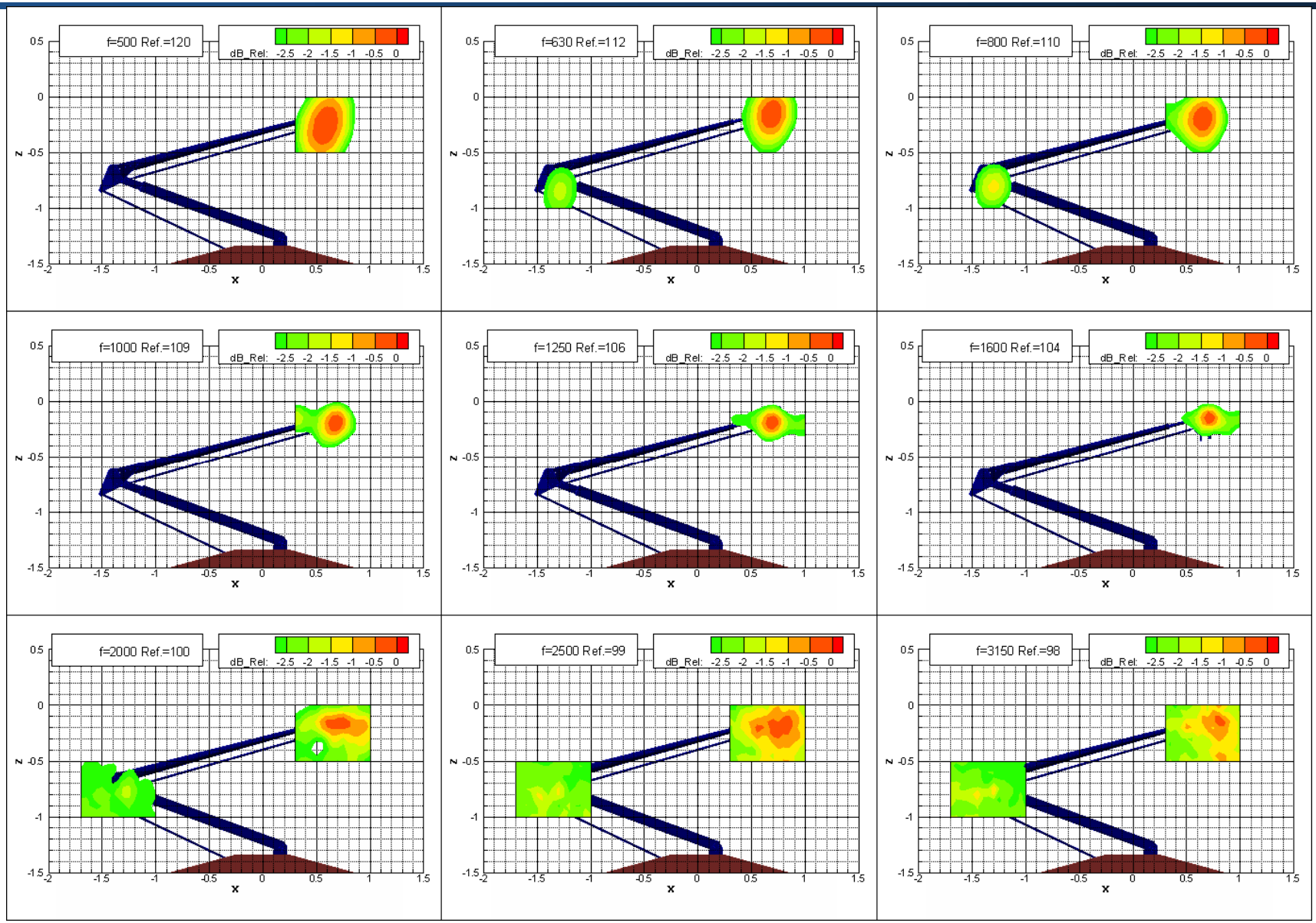
TA0210R0009_4
Wind 97m/s
Head : 2.5
Yaw : 2
Closed knee



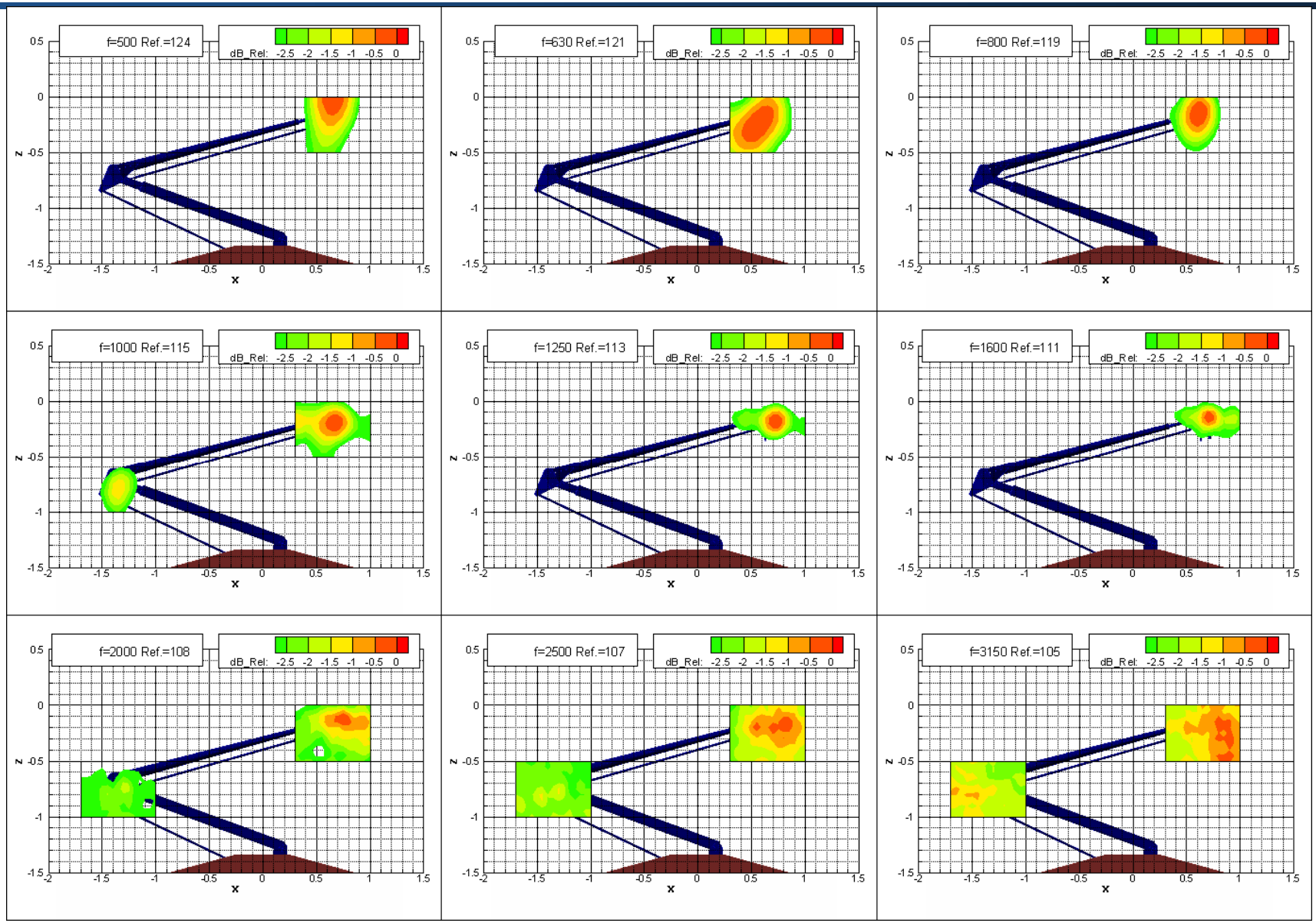
TA0210R0010_1
Wind 45m/s
Head : 2.5
Yaw : 4
Closed knee



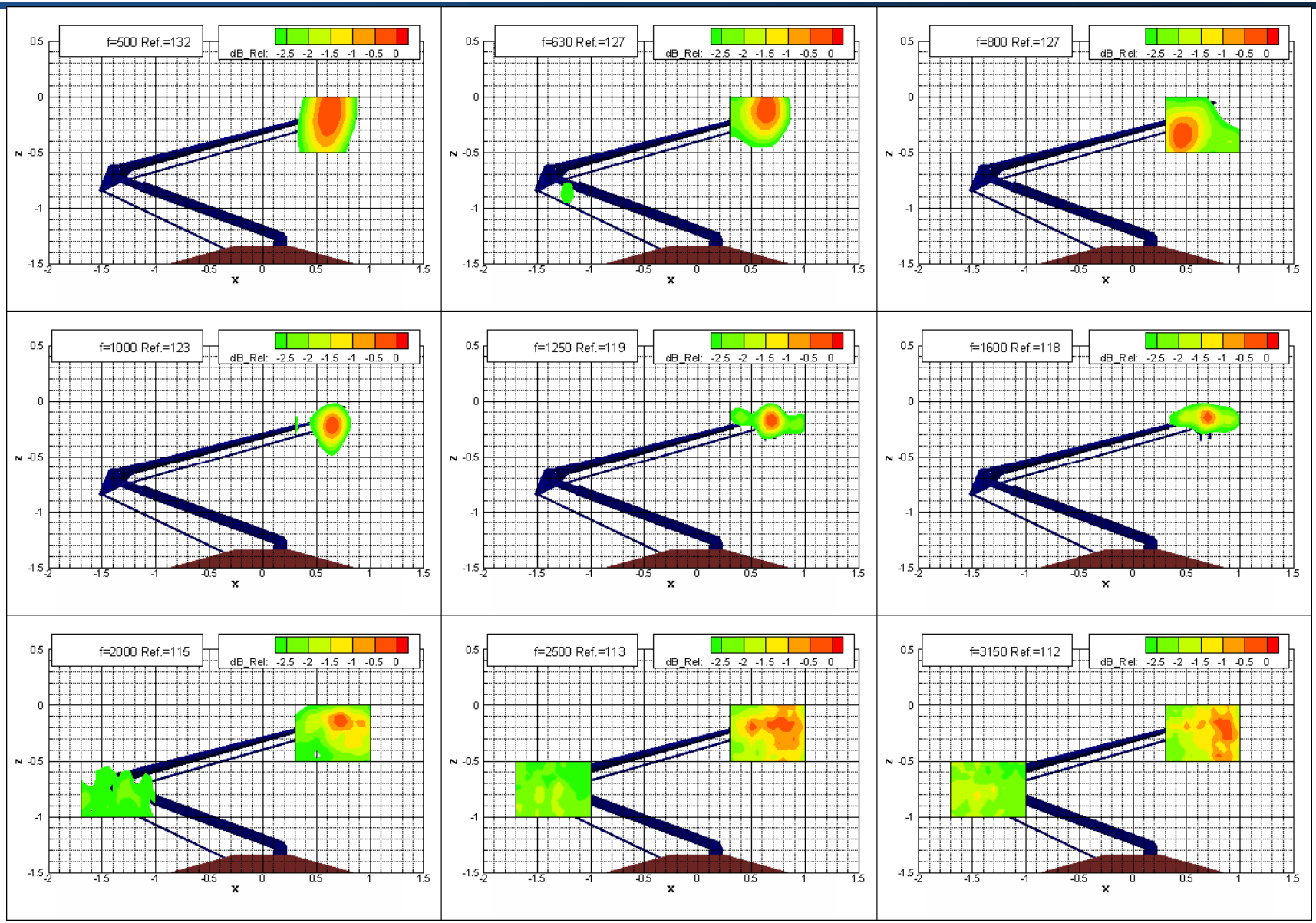
TA0210R0010_2
Wind 60m/s
Head : 2.5
Yaw : 4
Closed knee



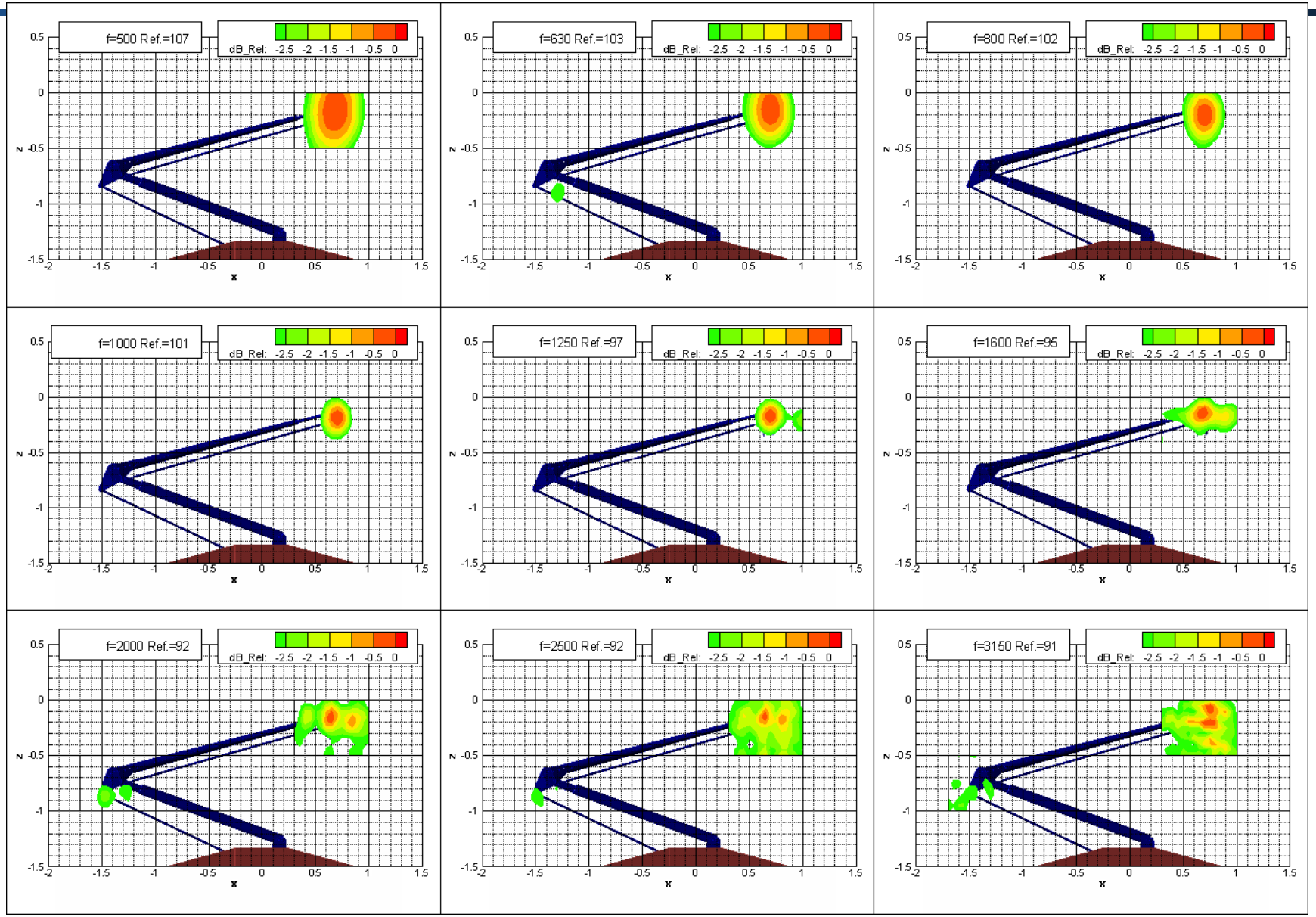
TA0210R0010_3
Wind 77m/s
Head : 2.5
Yaw : 4
Closed knee



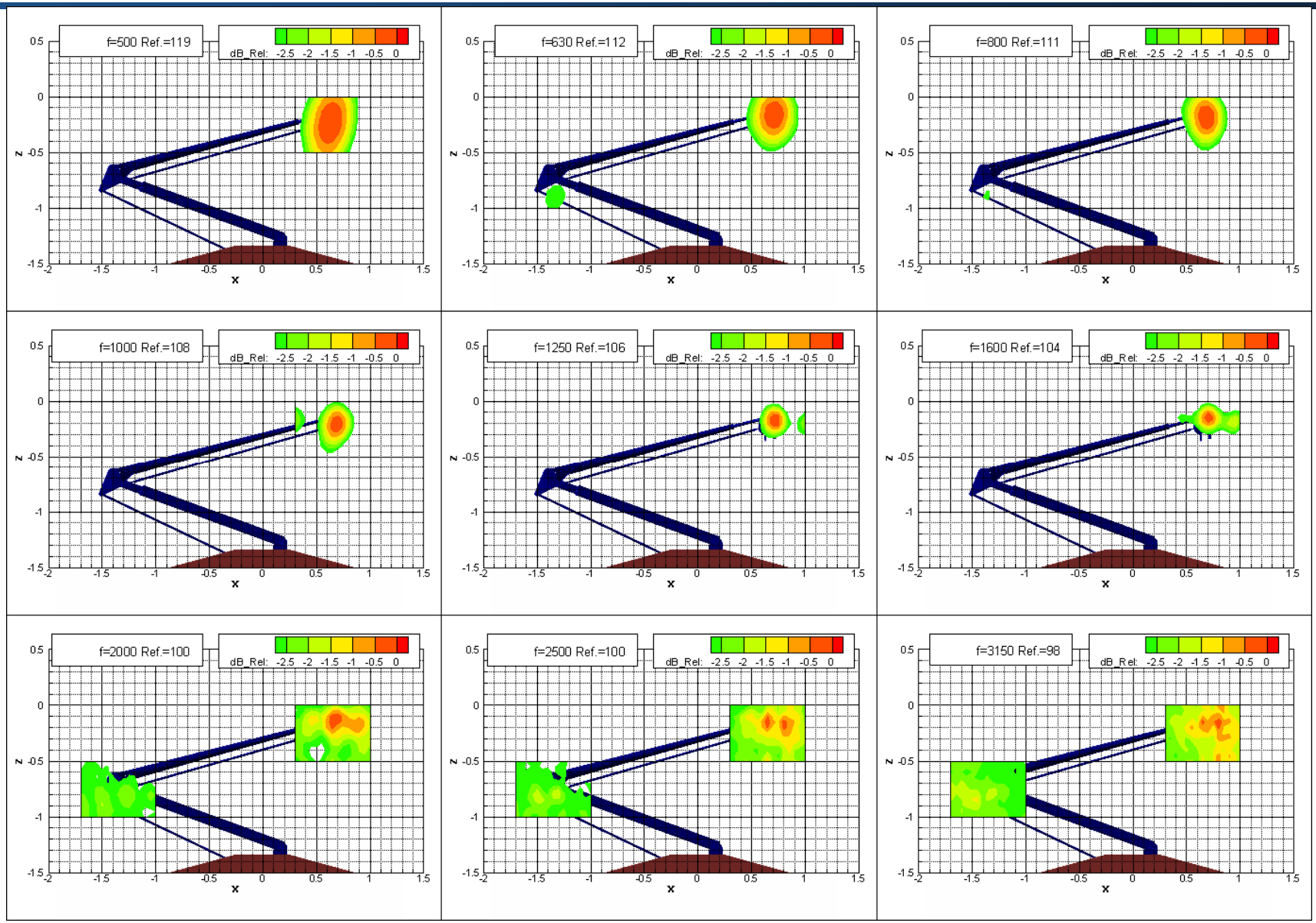
TA0210R0010_4
Wind 97m/s
Head : 2.5
Yaw : 4
Closed knee



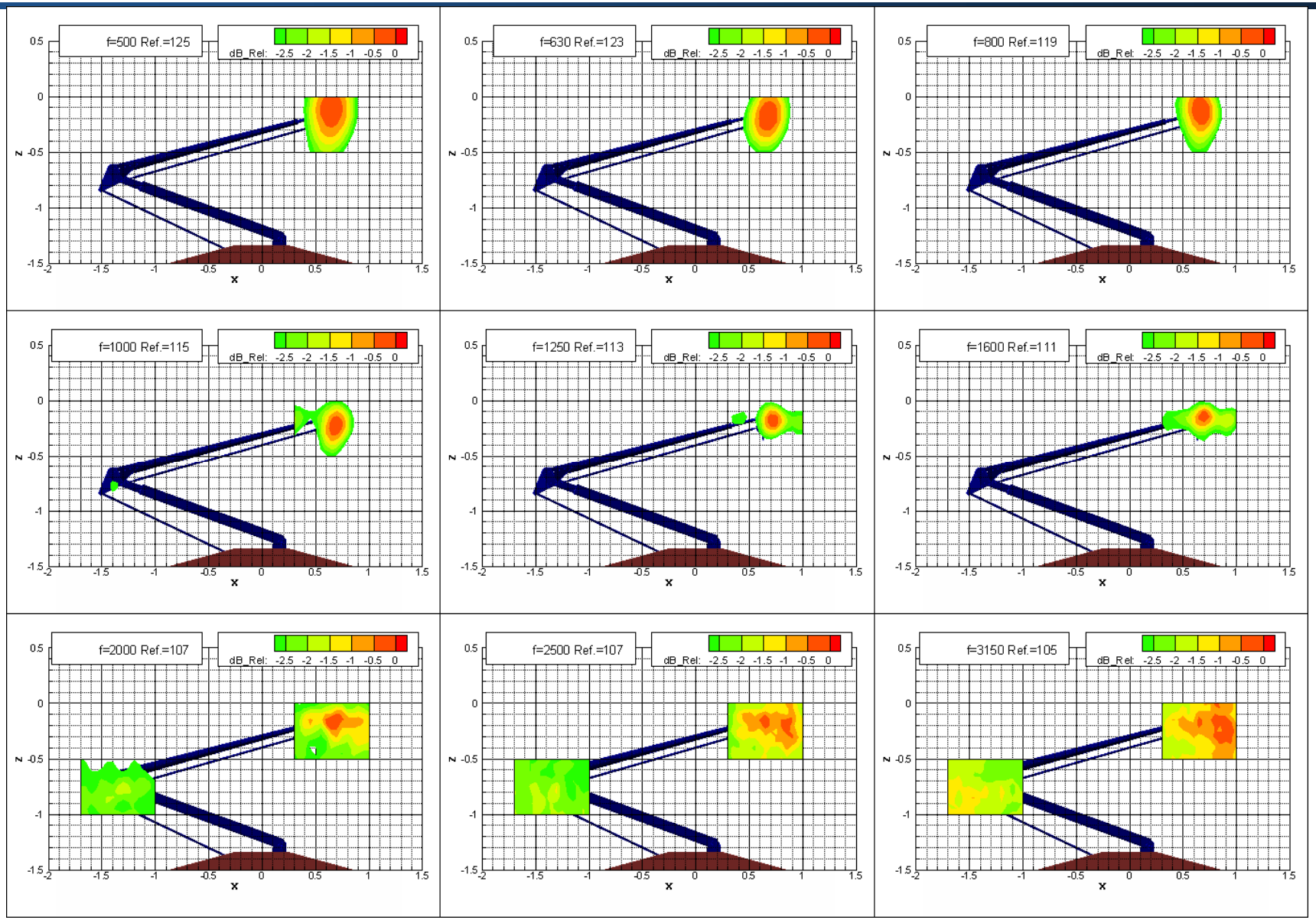
TA0210R0011_1
Wind 45m/s
Head : -5
Yaw : 0
Closed knee



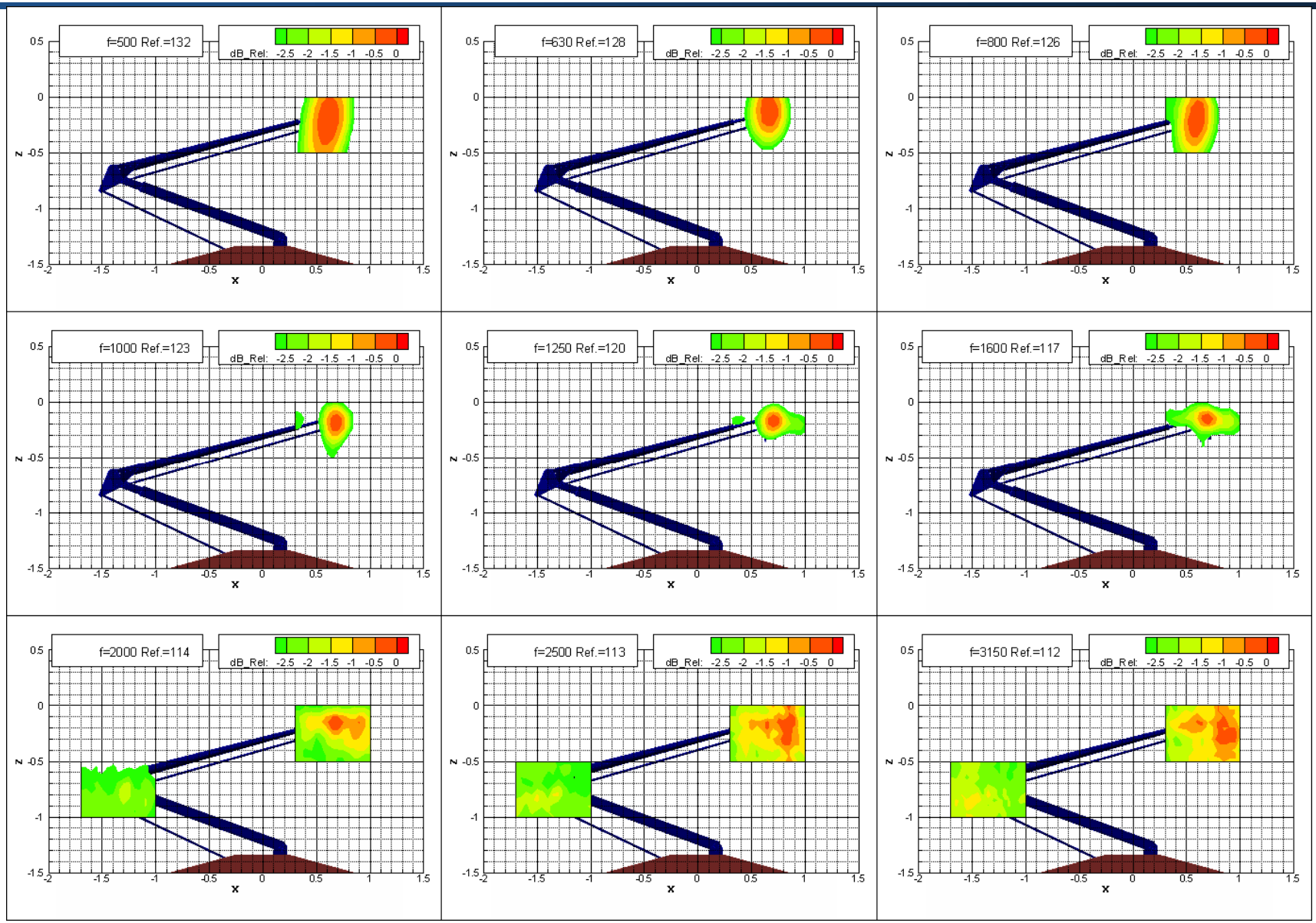
TA0210R0011_2
Wind 60m/s
Head : -5
Yaw : 0
Closed knee



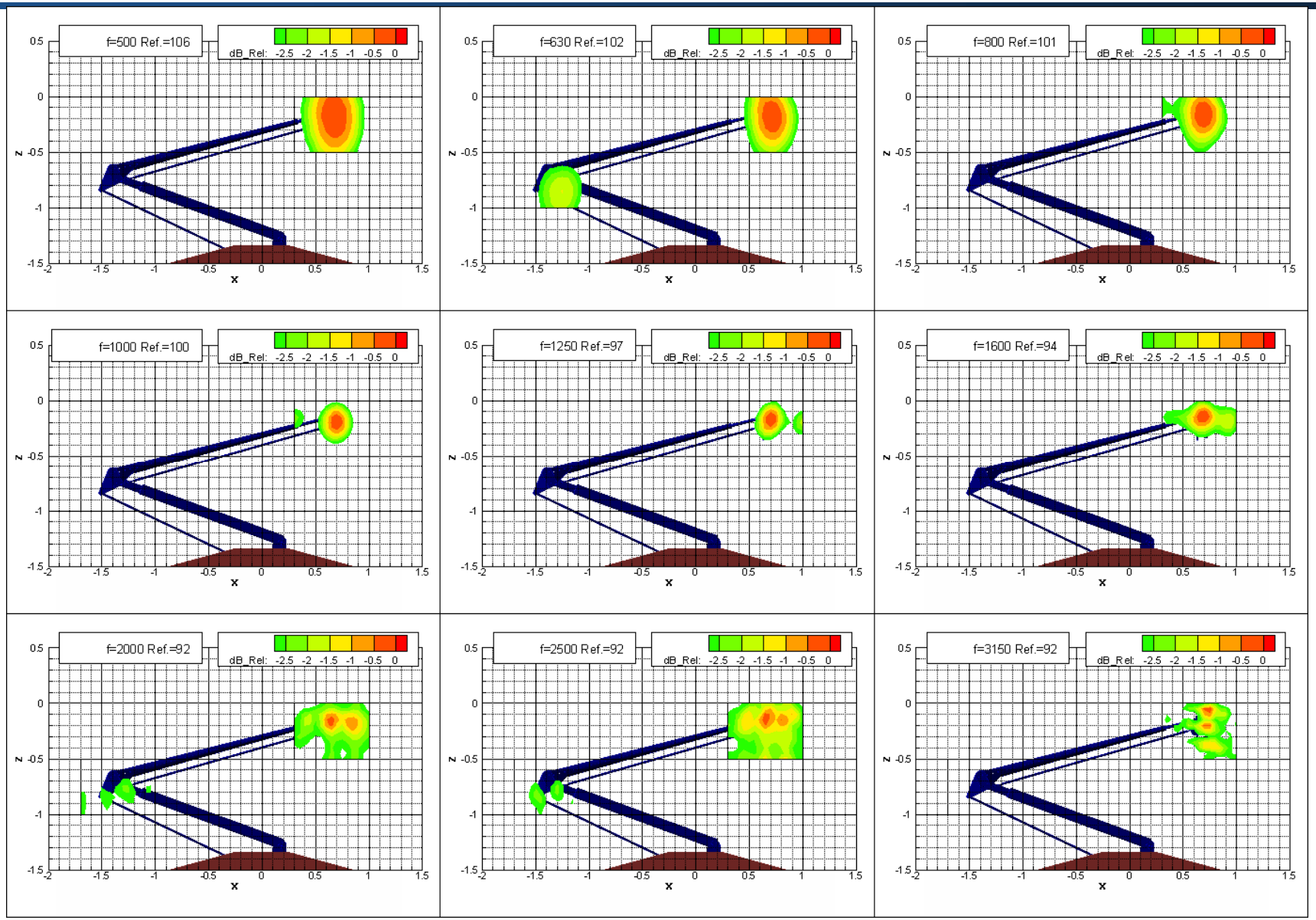
TA0210R0011_3
Wind 77m/s
Head : -5
Yaw : 0
Closed knee



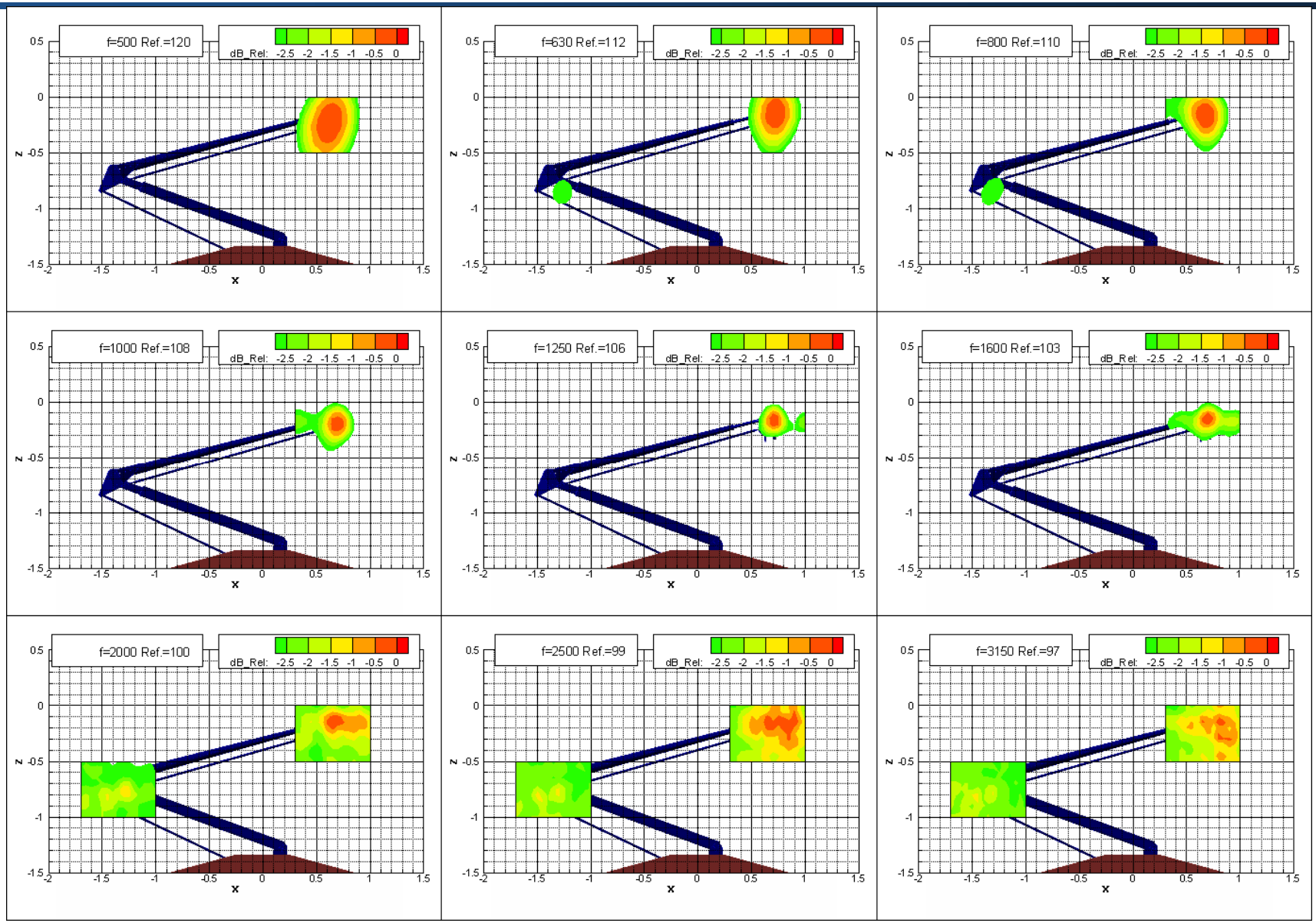
TA0210R0011_4
Wind 97m/s
Head : -5
Yaw : 0
Closed knee



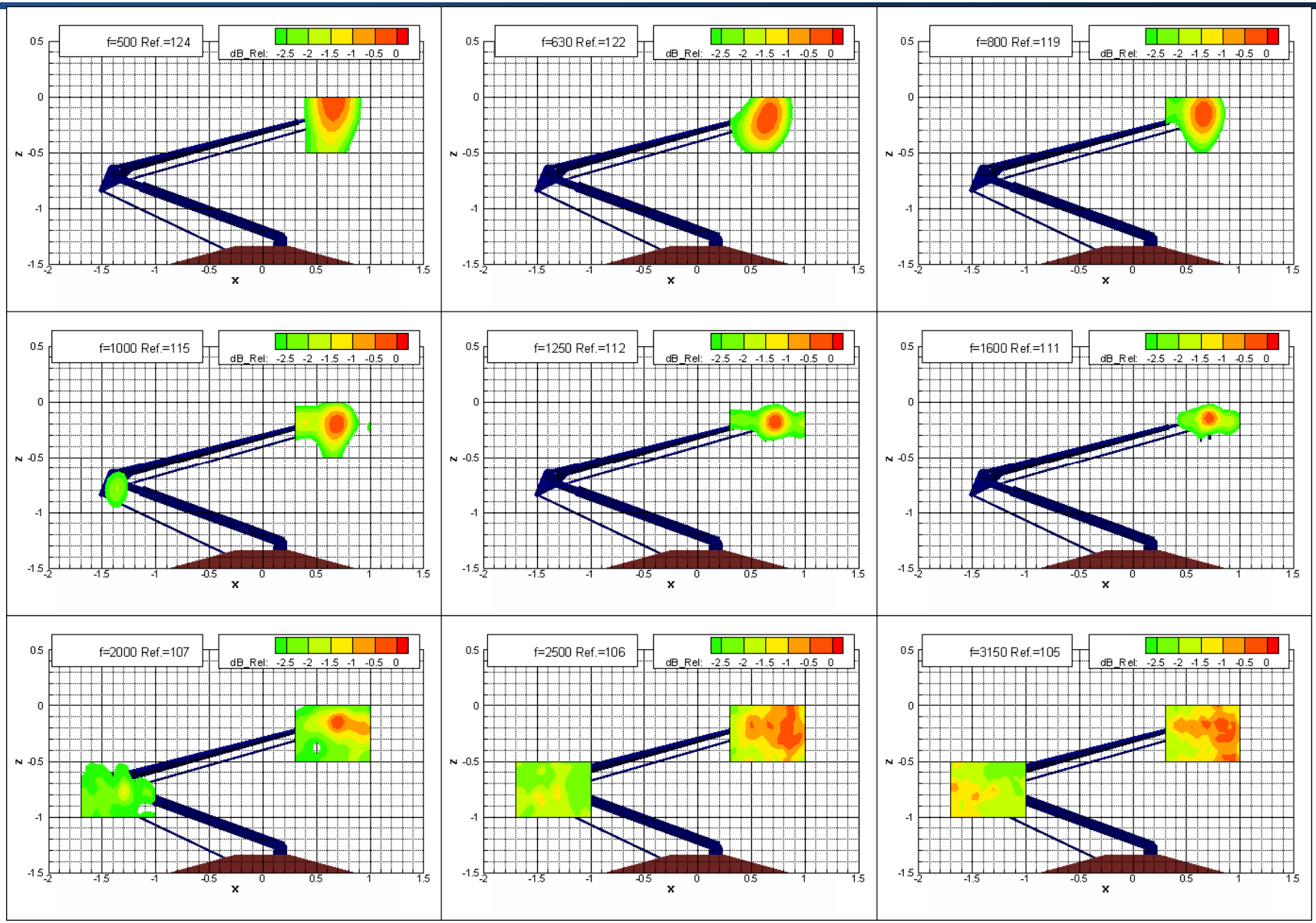
TA0210R0012_1
Wind 45m/s
Head : -5
Yaw : 2
Closed knee



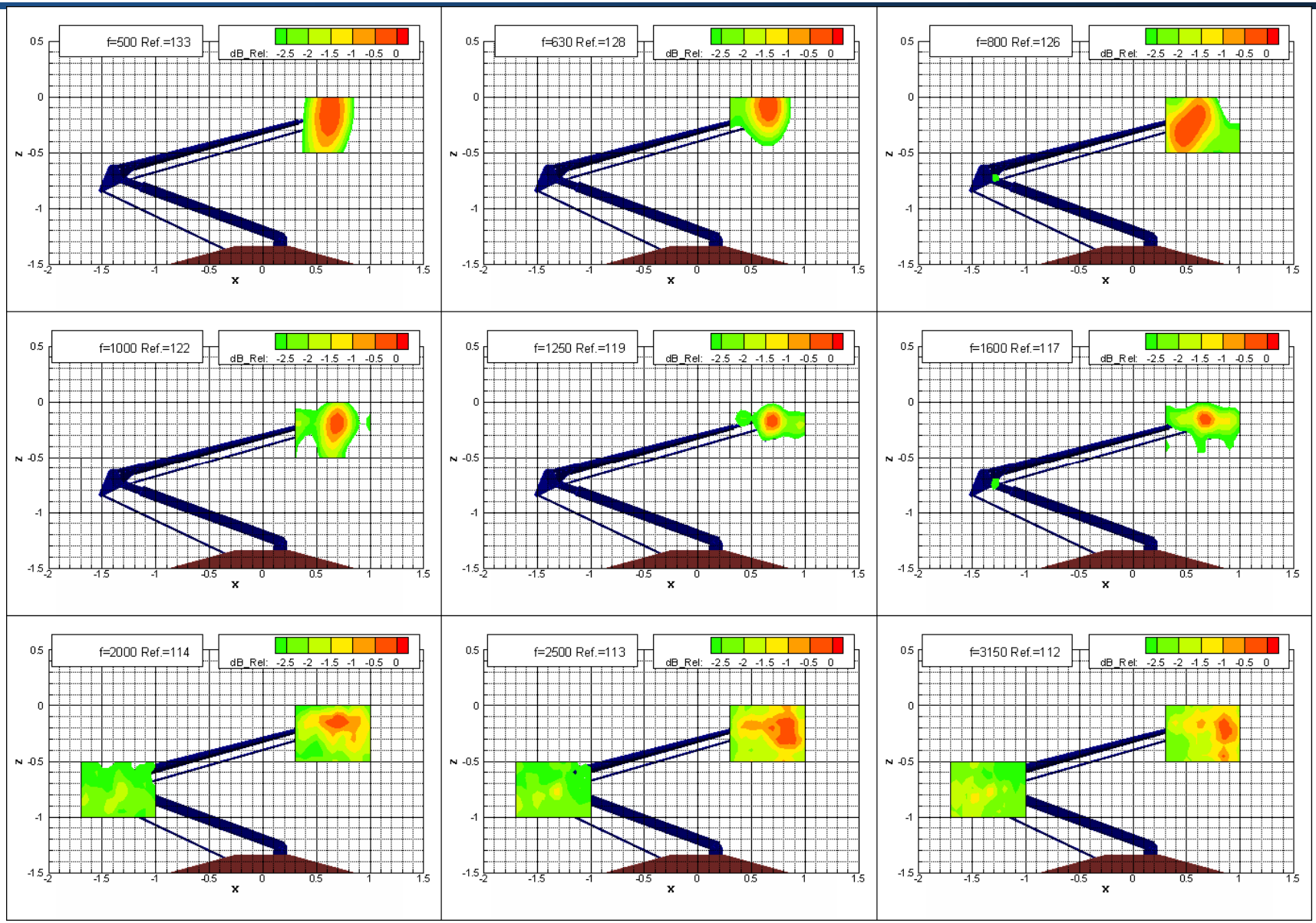
TA0210R0012_2
Wind 60m/s
Head : -5
Yaw : 2
Closed knee



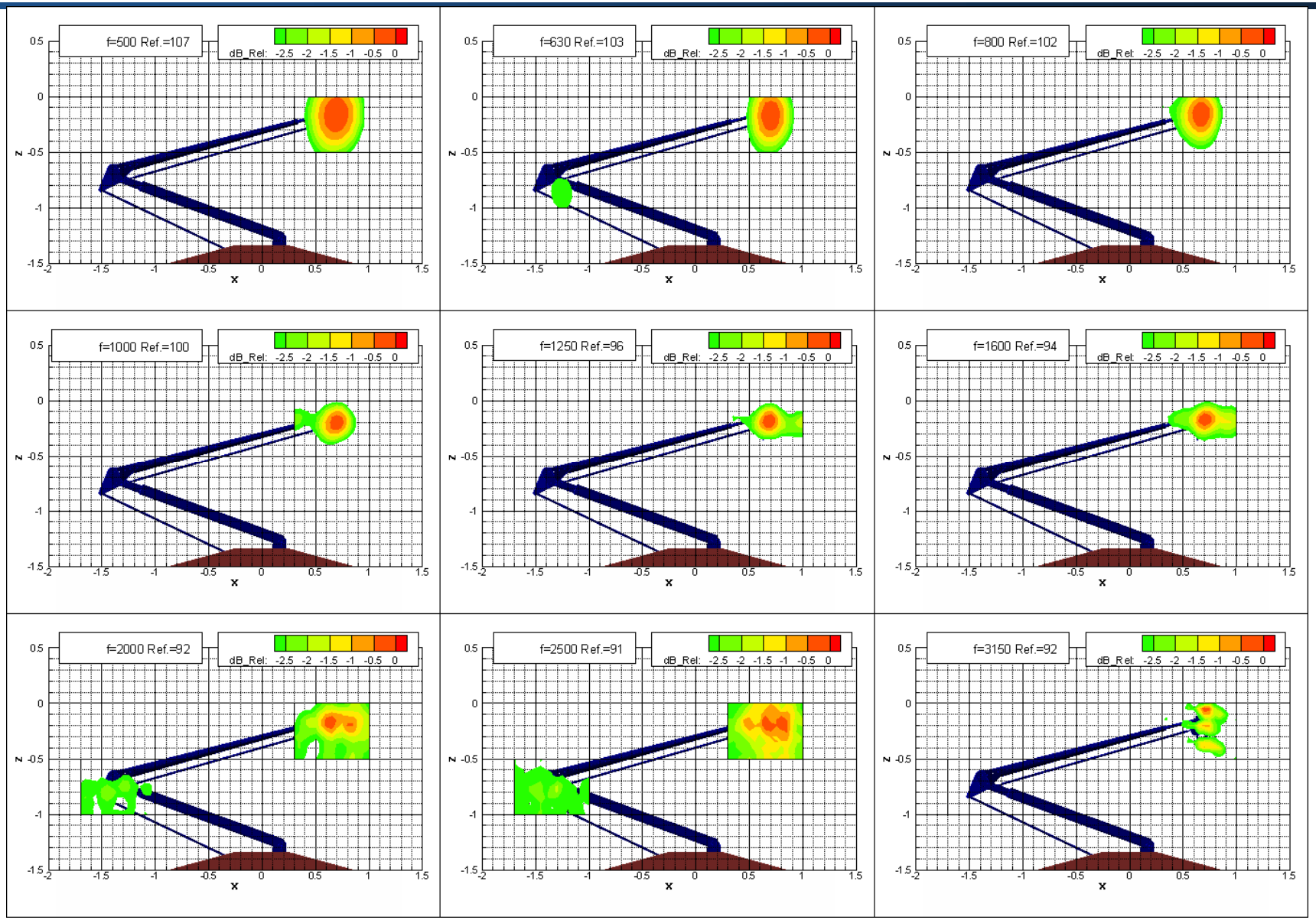
TA0210R0012_3
Wind 77m/s
Head : -5
Yaw : 2
Closed knee



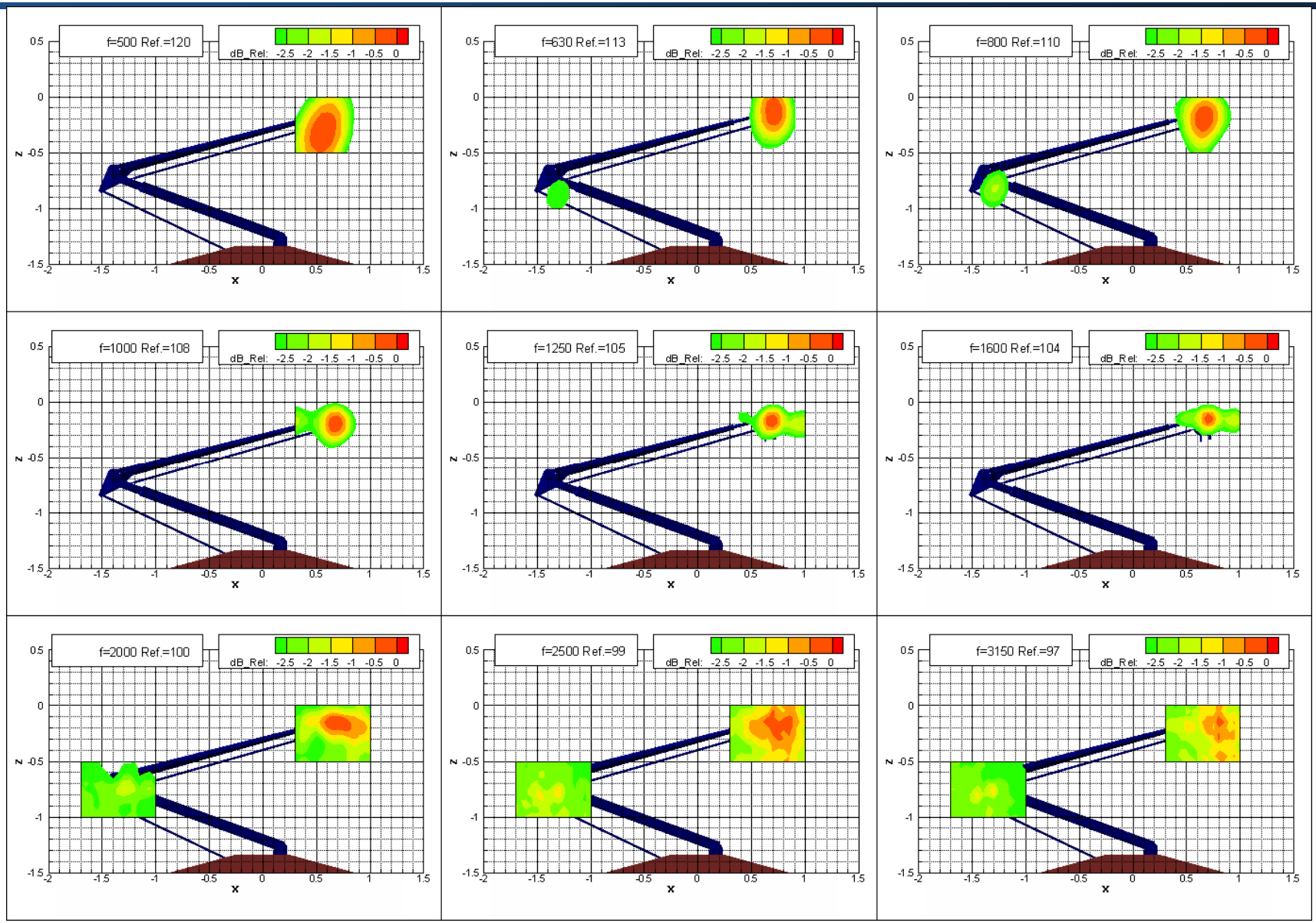
TA0210R0012_1
Wind 45m/s
Head : -5
Yaw : 2
Closed knee



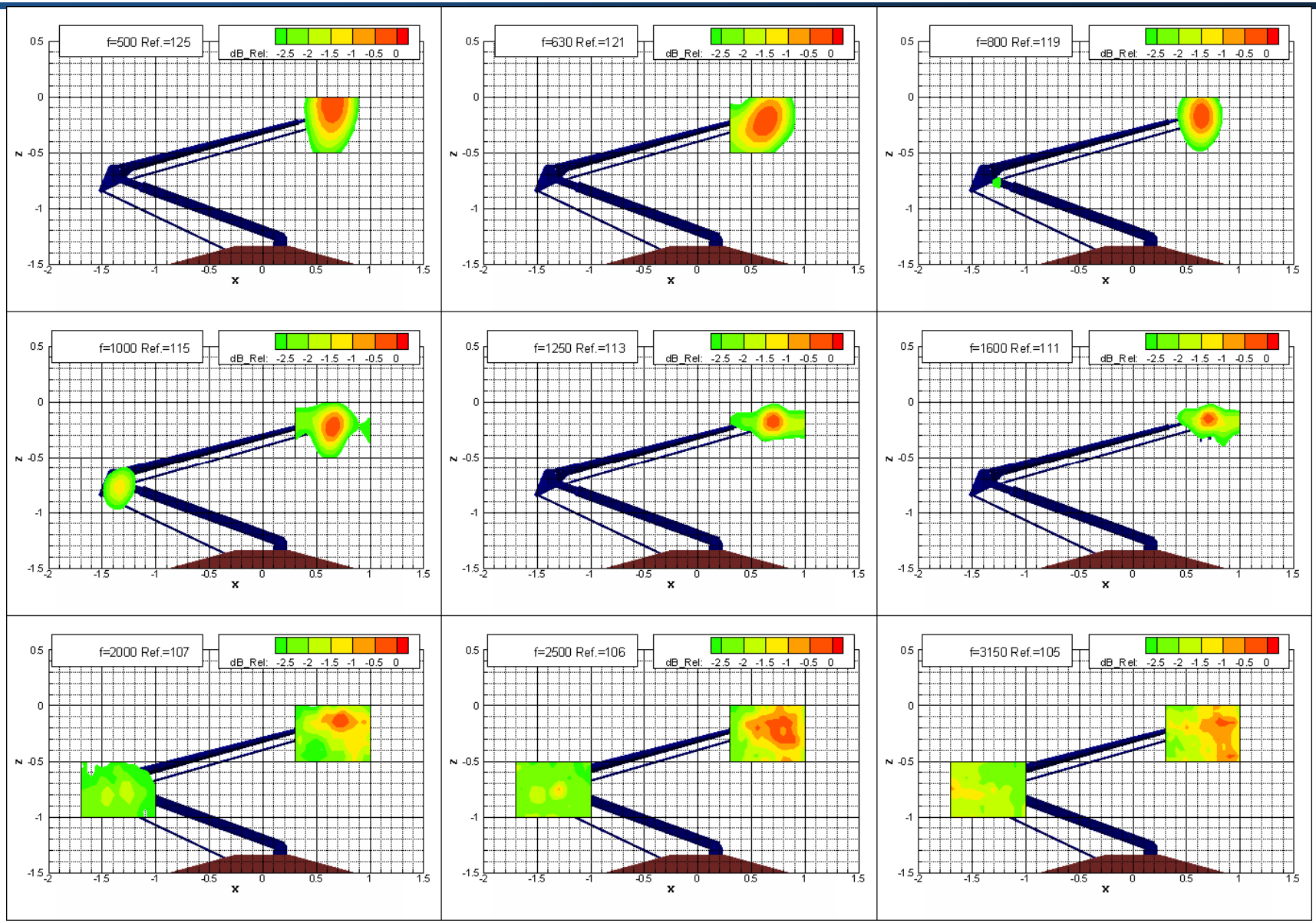
TA0210R0013_1
Wind 45m/s
Head : -5
Yaw : 4
Closed knee



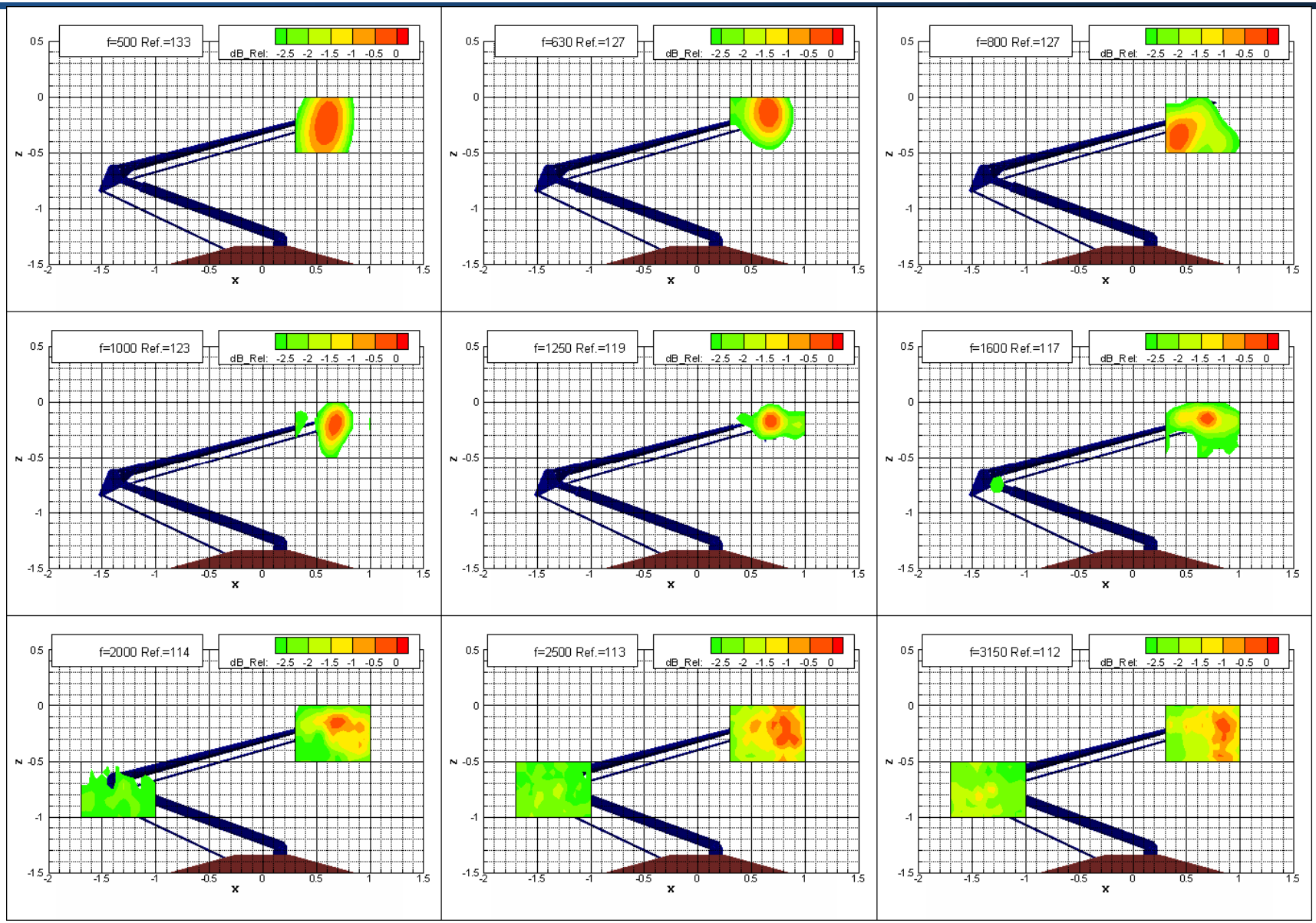
TA0210R0013_2
Wind 60m/s
Head : -5
Yaw : 4
Closed knee



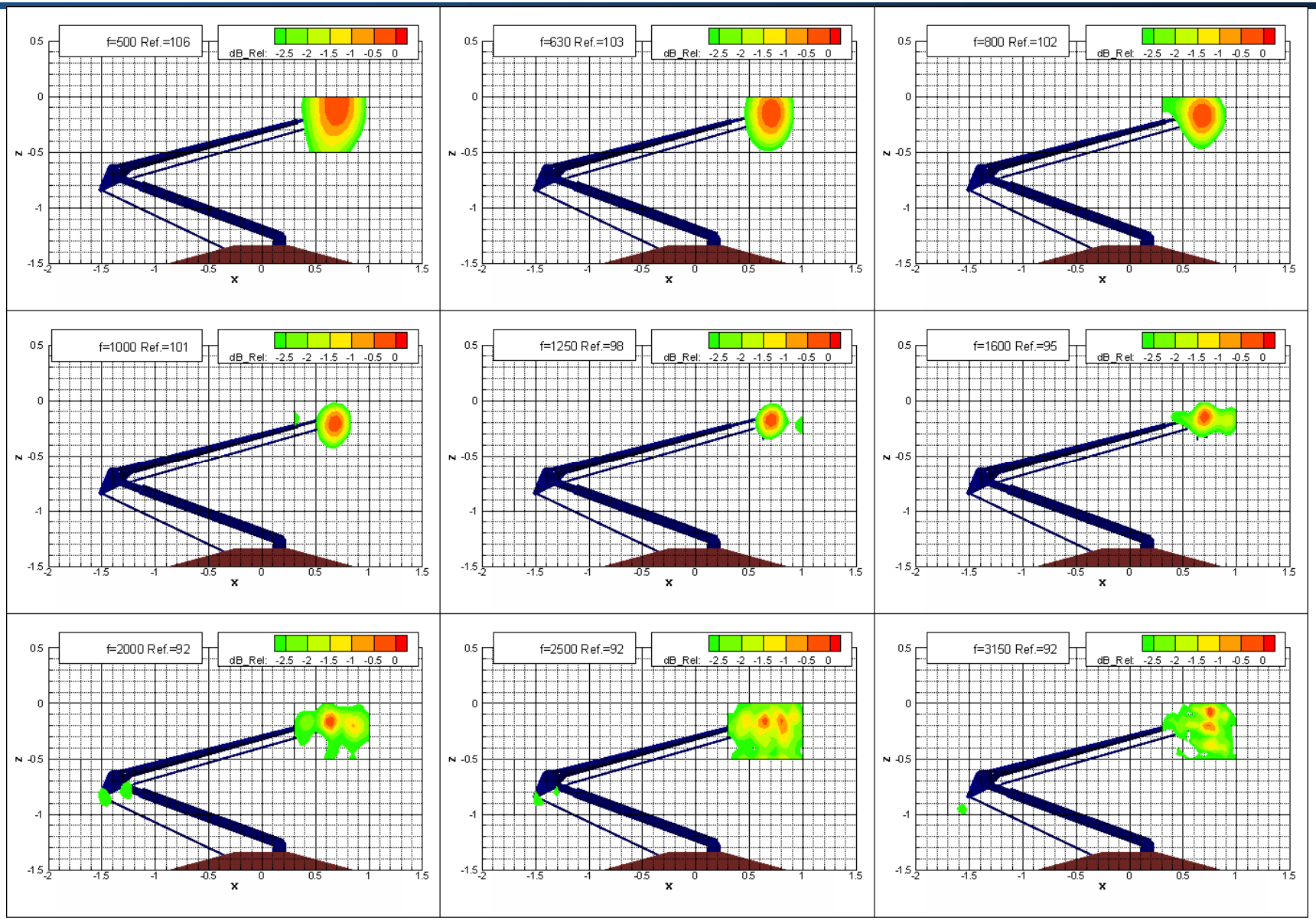
TA0210R0013_3
Wind 77m/s
Head : -5
Yaw : 4
Closed knee



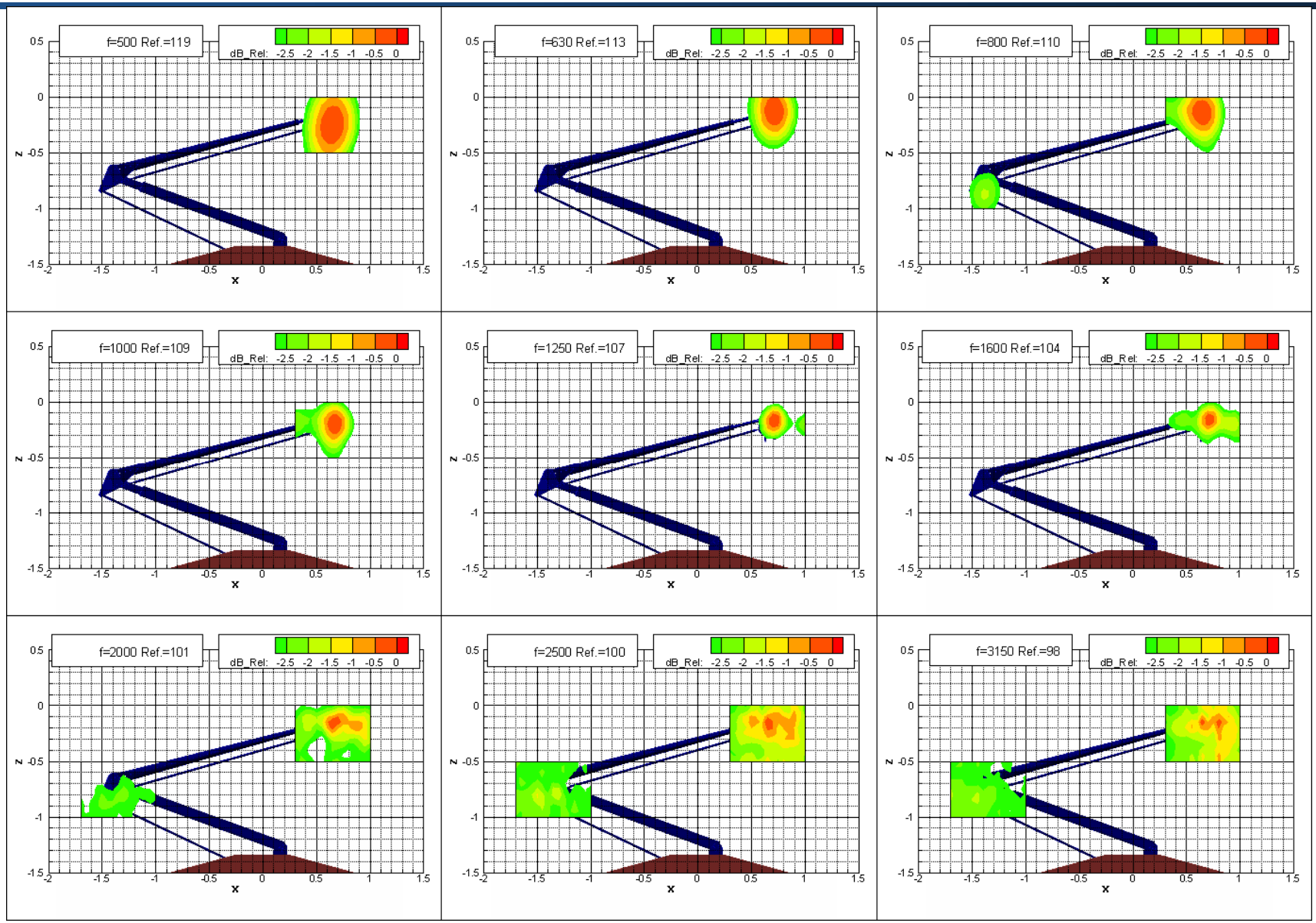
TA0210R0013_4
Wind 97m/s
Head : -5
Yaw : 4
Closed knee



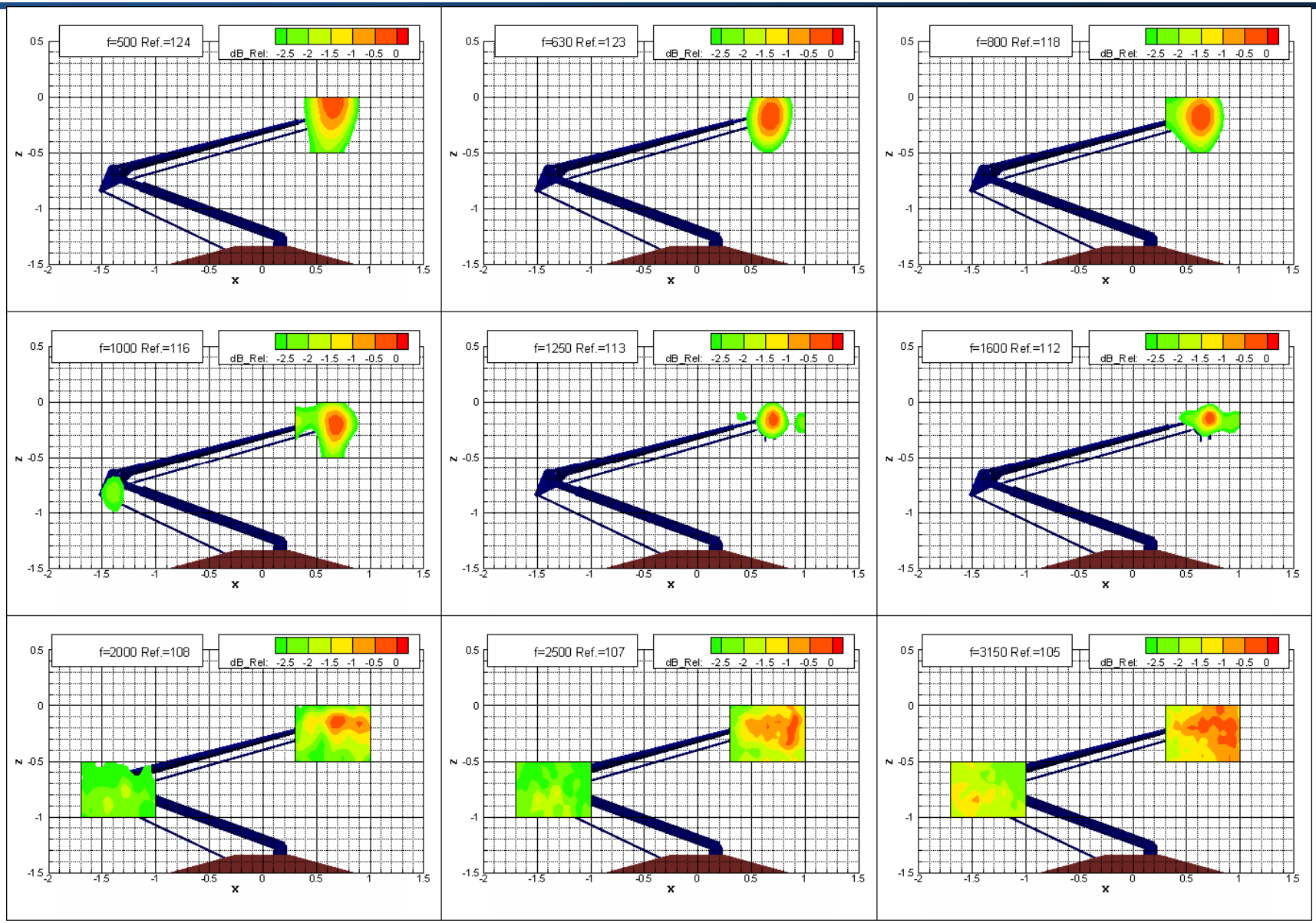
TA0210R0014_1
Wind 45m/s
Head : 5
Yaw : 0
Closed knee



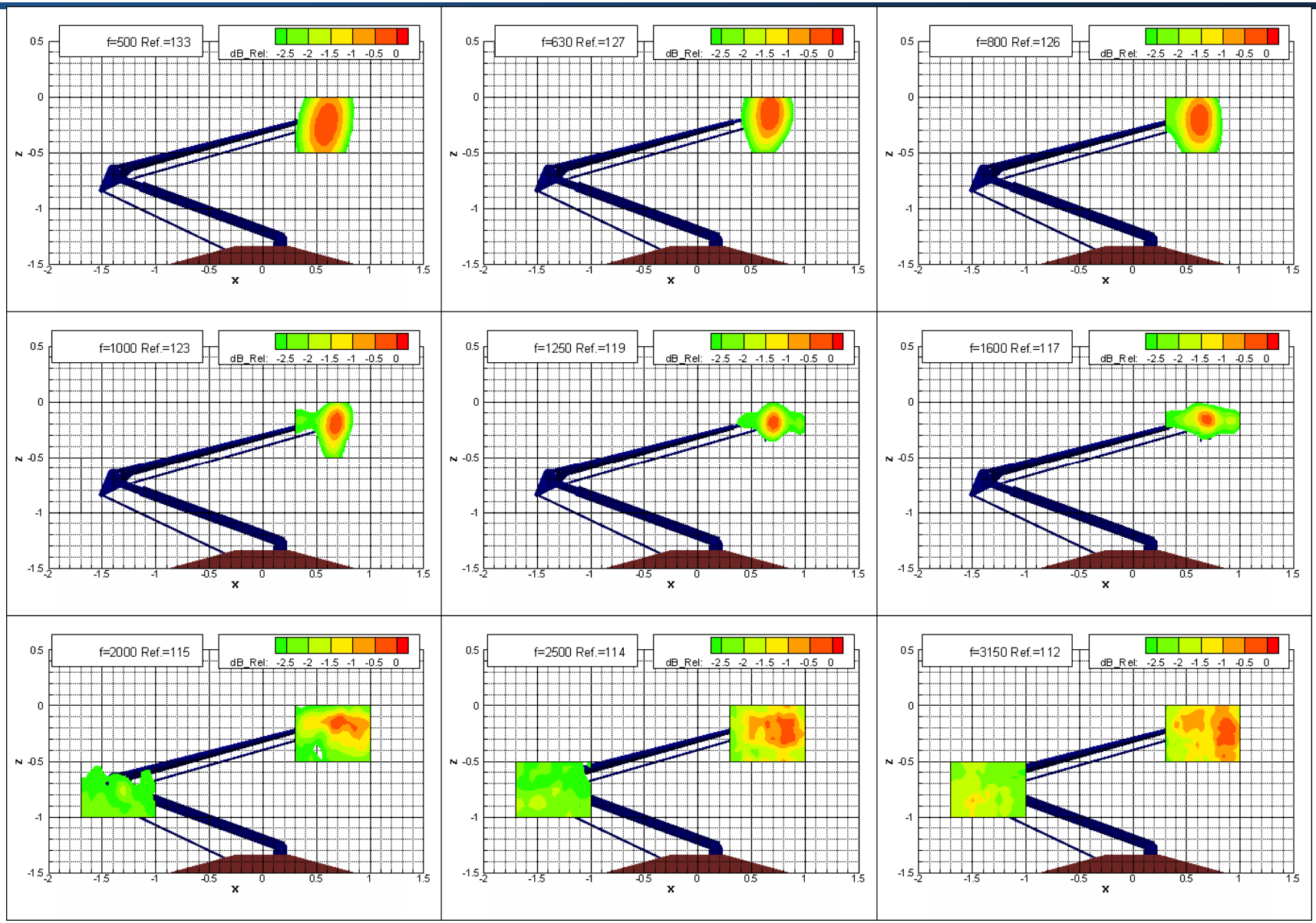
TA0210R0014_2
Wind 60m/s
Head : 5
Yaw : 0
Closed knee



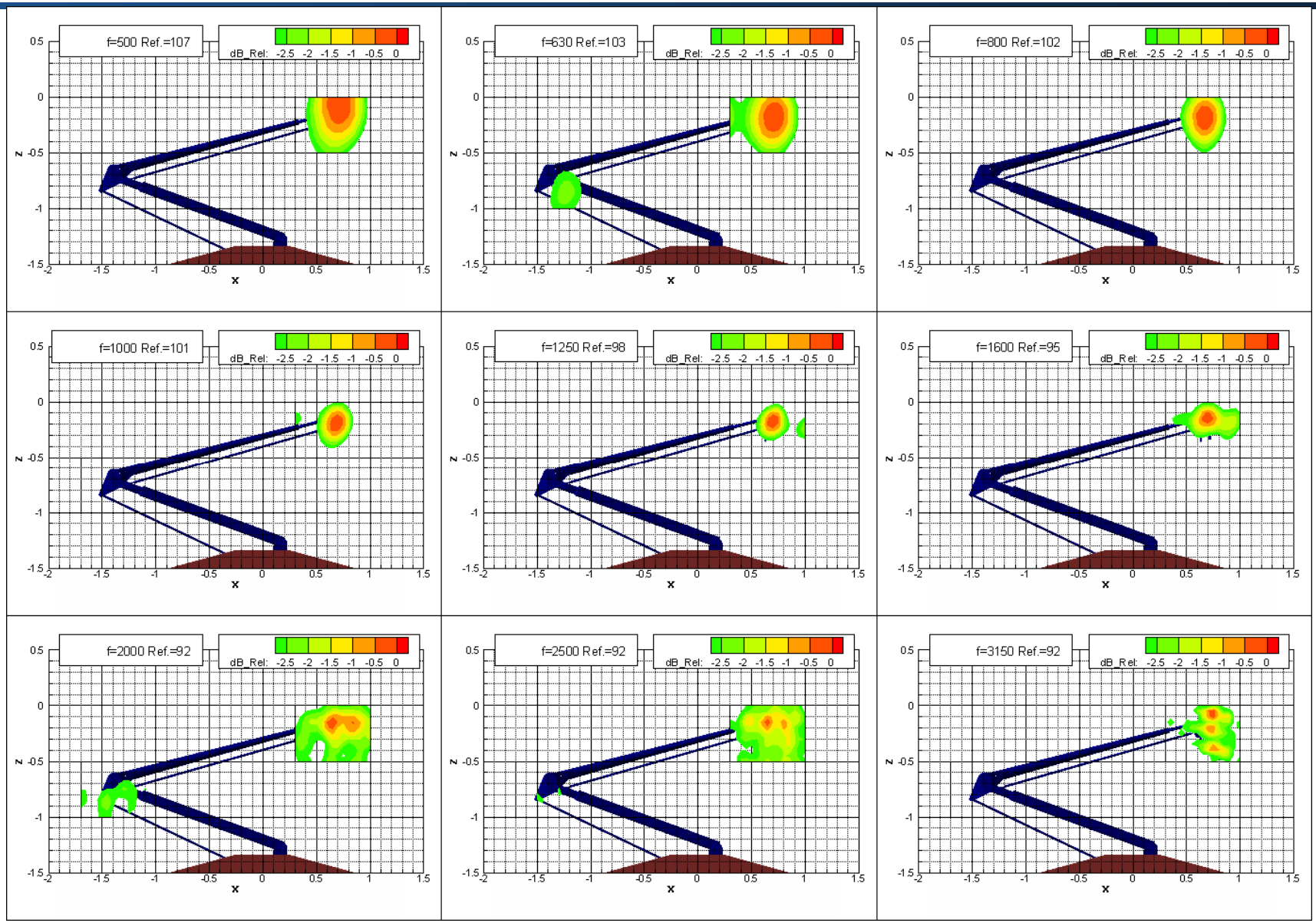
TA0210R0014_3
Wind 77m/s
Head : 5
Yaw : 0
Closed knee



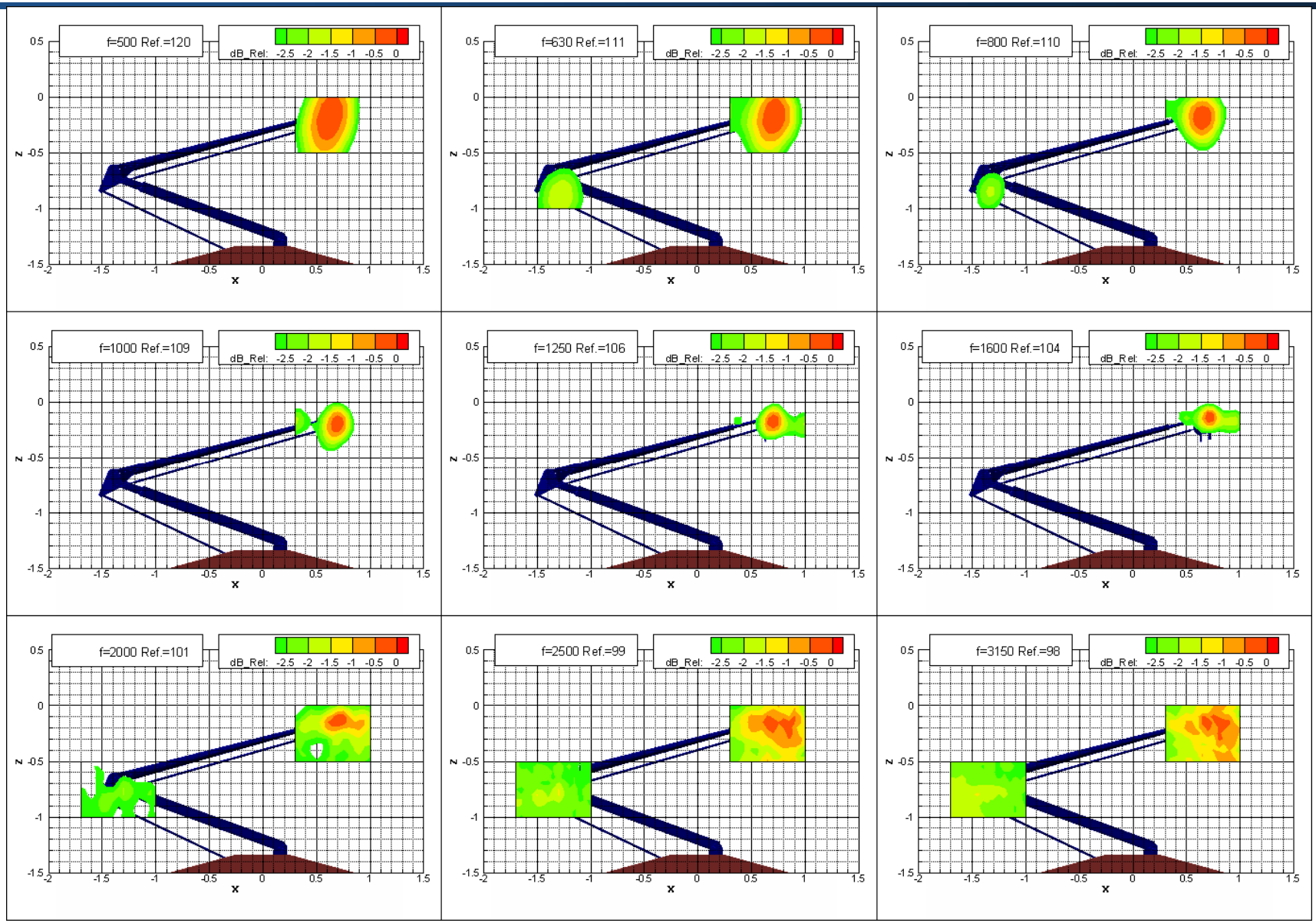
TA0210R0014_4
Wind 97m/s
Head : 5
Yaw : 0
Closed knee



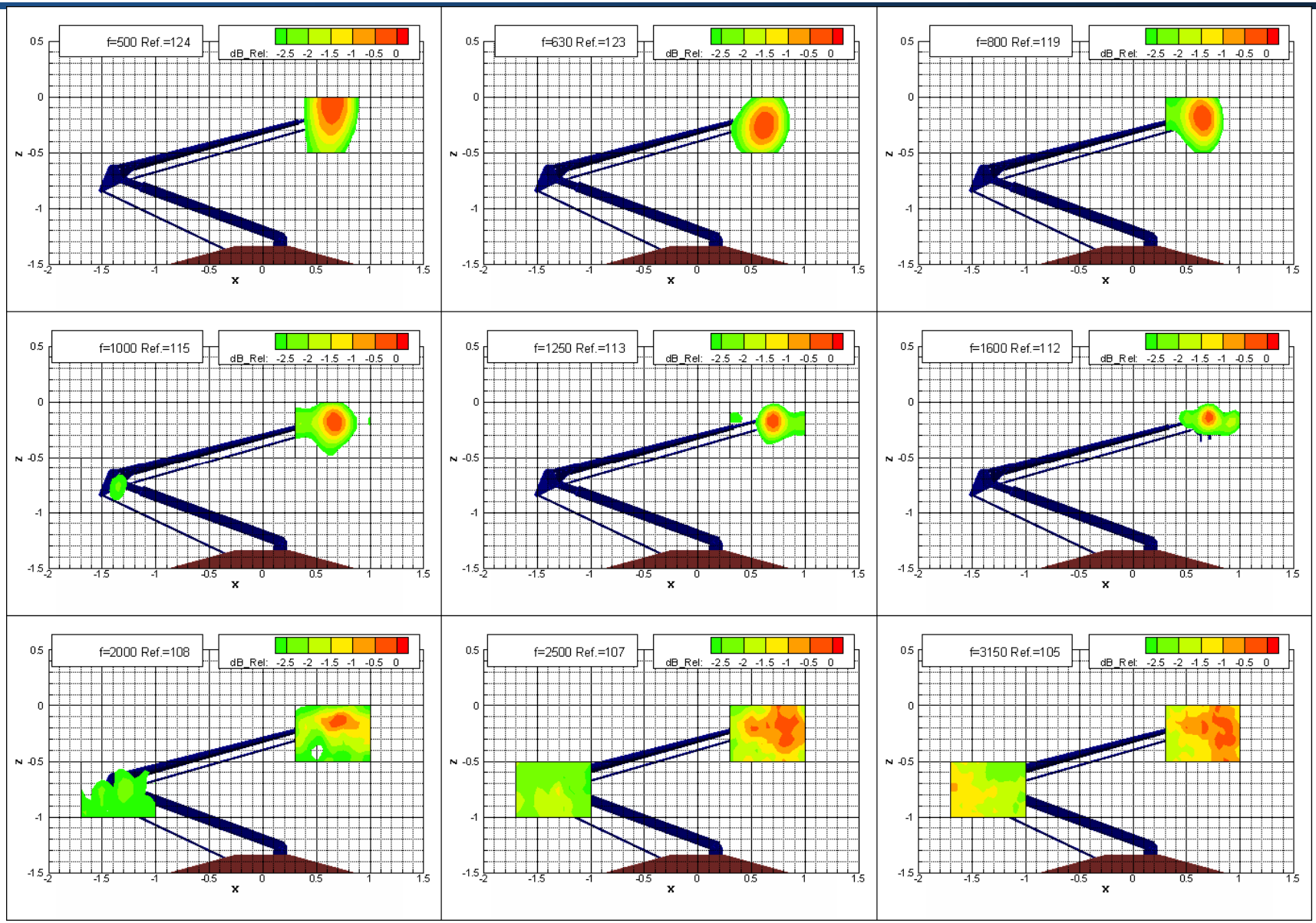
TA0210R0015_1
Wind 45m/s
Head : 5
Yaw : 2
Closed knee



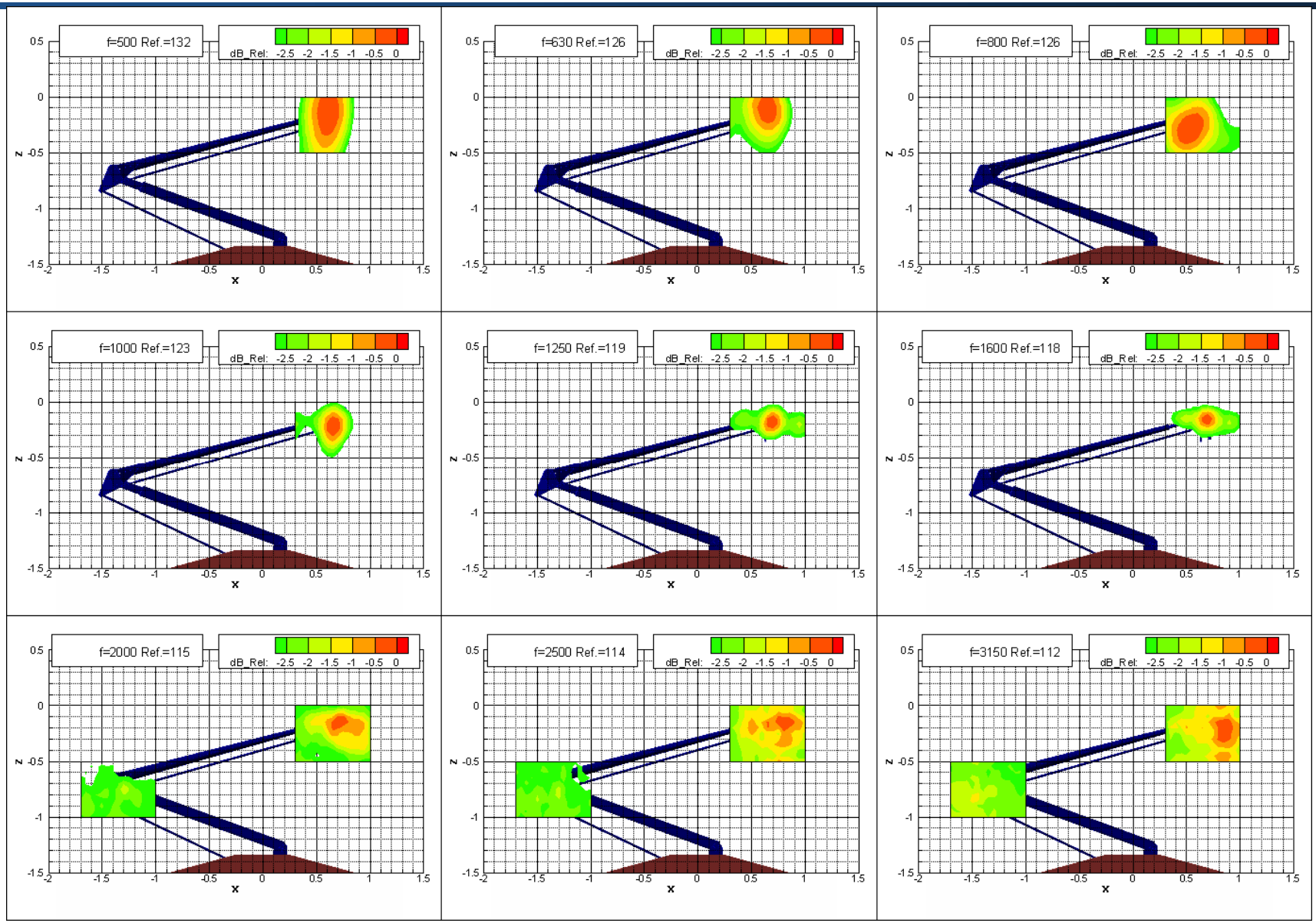
TA0210R0015_2
Wind 60m/s
Head : 5
Yaw : 2
Closed knee



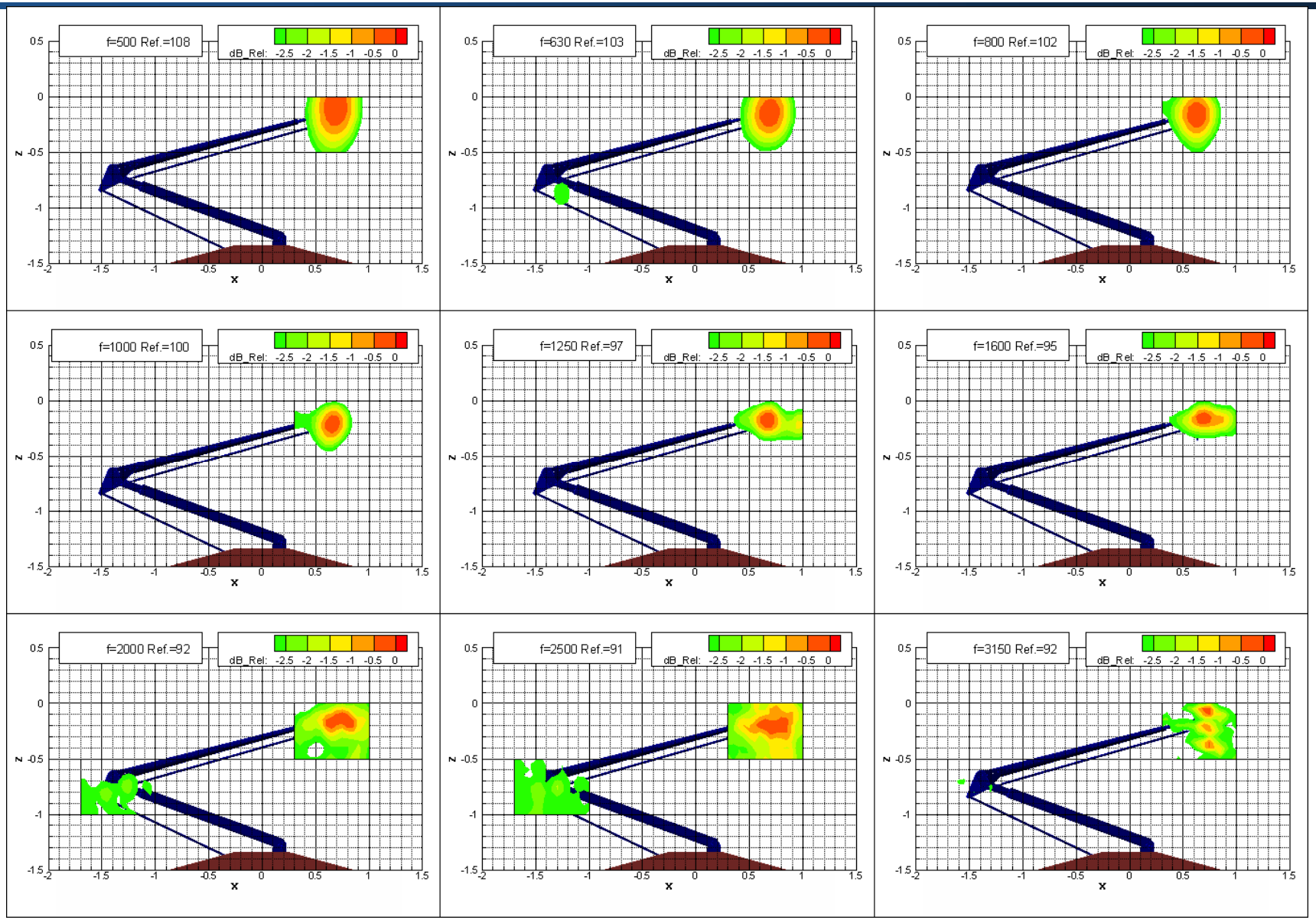
TA0210R0015_3
Wind 77m/s
Head : 5
Yaw : 2
Closed knee



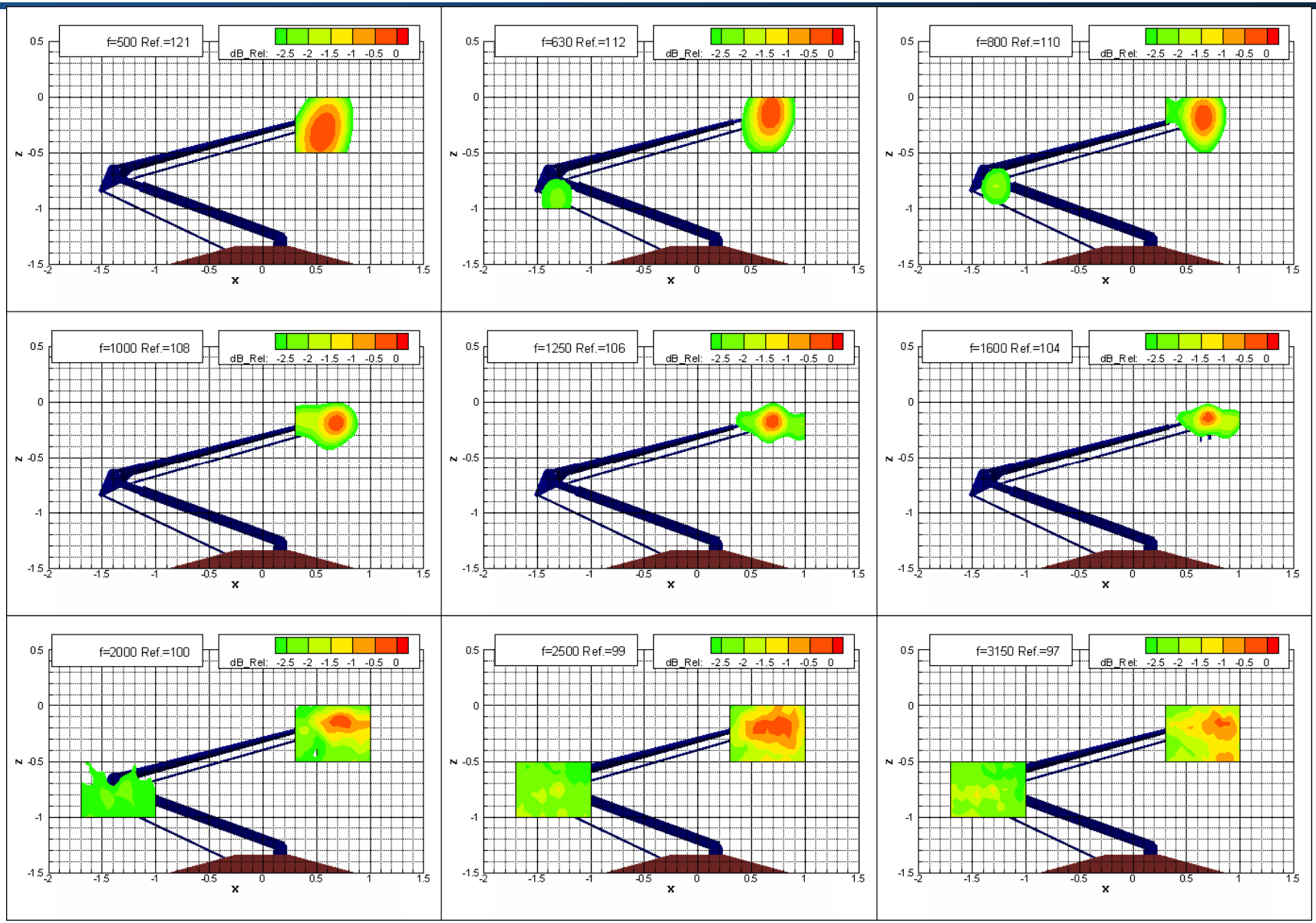
TA0210R0015_4
Wind 97m/s
Head : 5
Yaw : 2
Closed knee



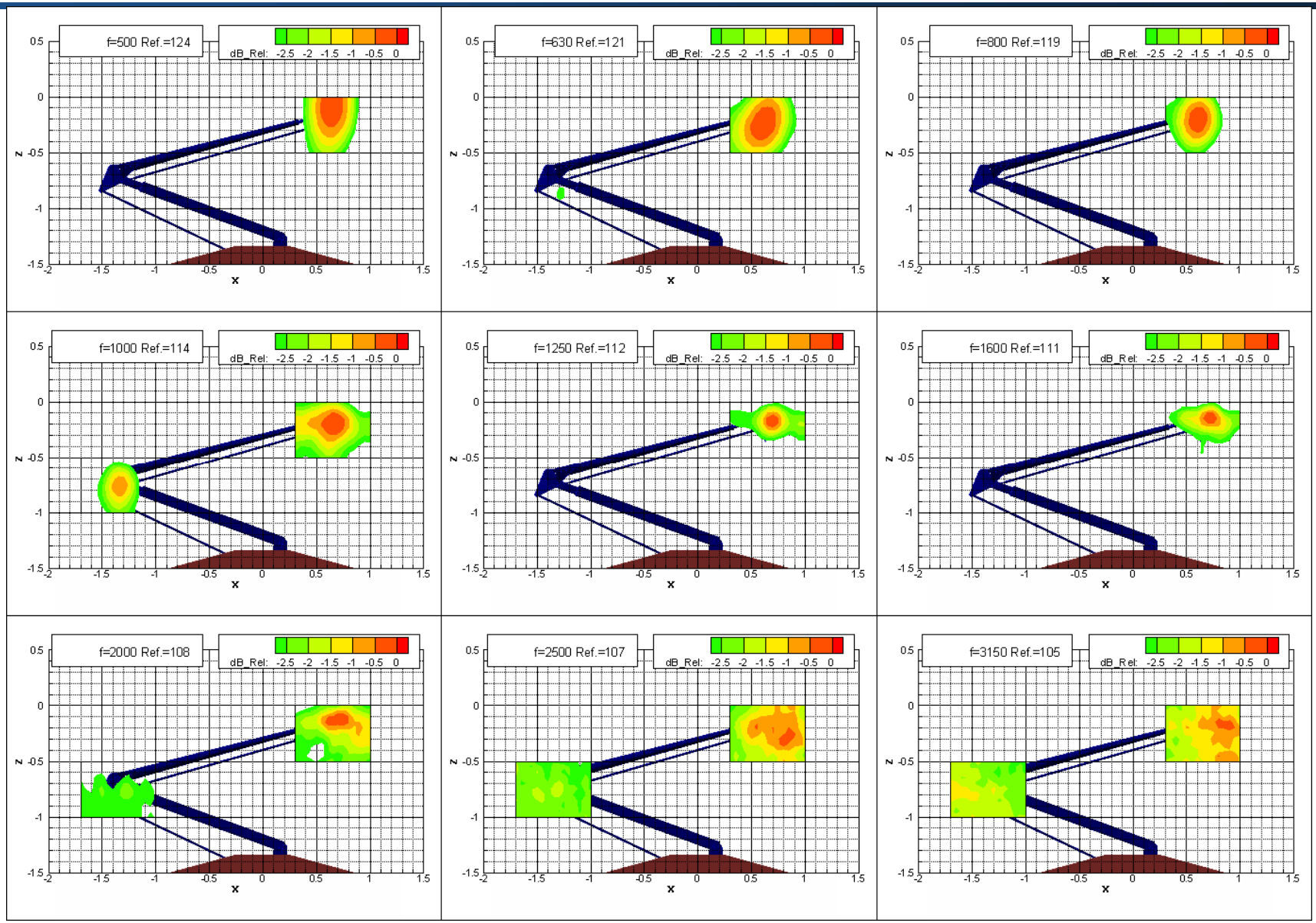
TA0210R0016_1
Wind 45m/s
Head : 5
Yaw : 4
Closed knee



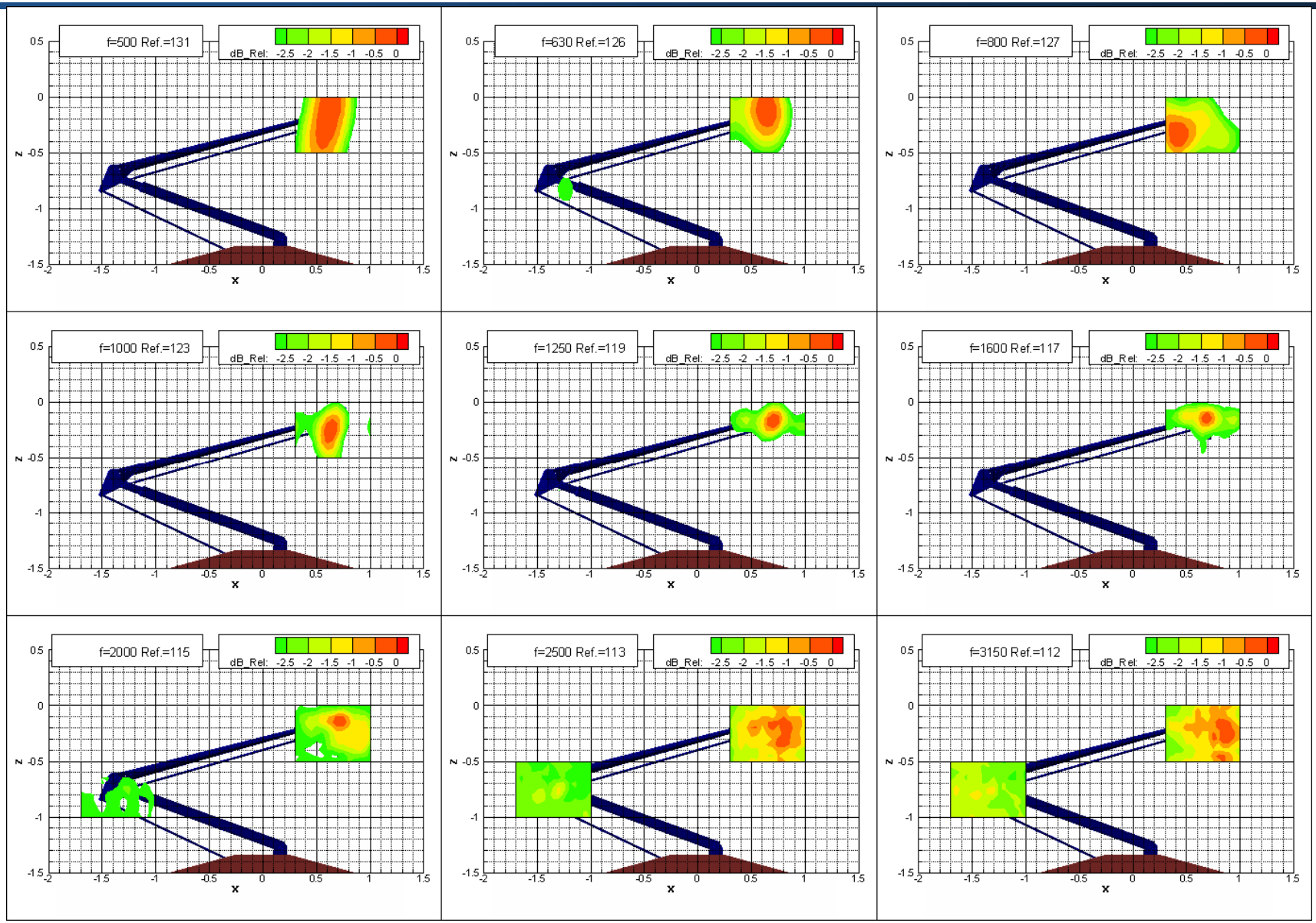
TA0210R0016_2
Wind 60m/s
Head : 5
Yaw : 4
Closed knee



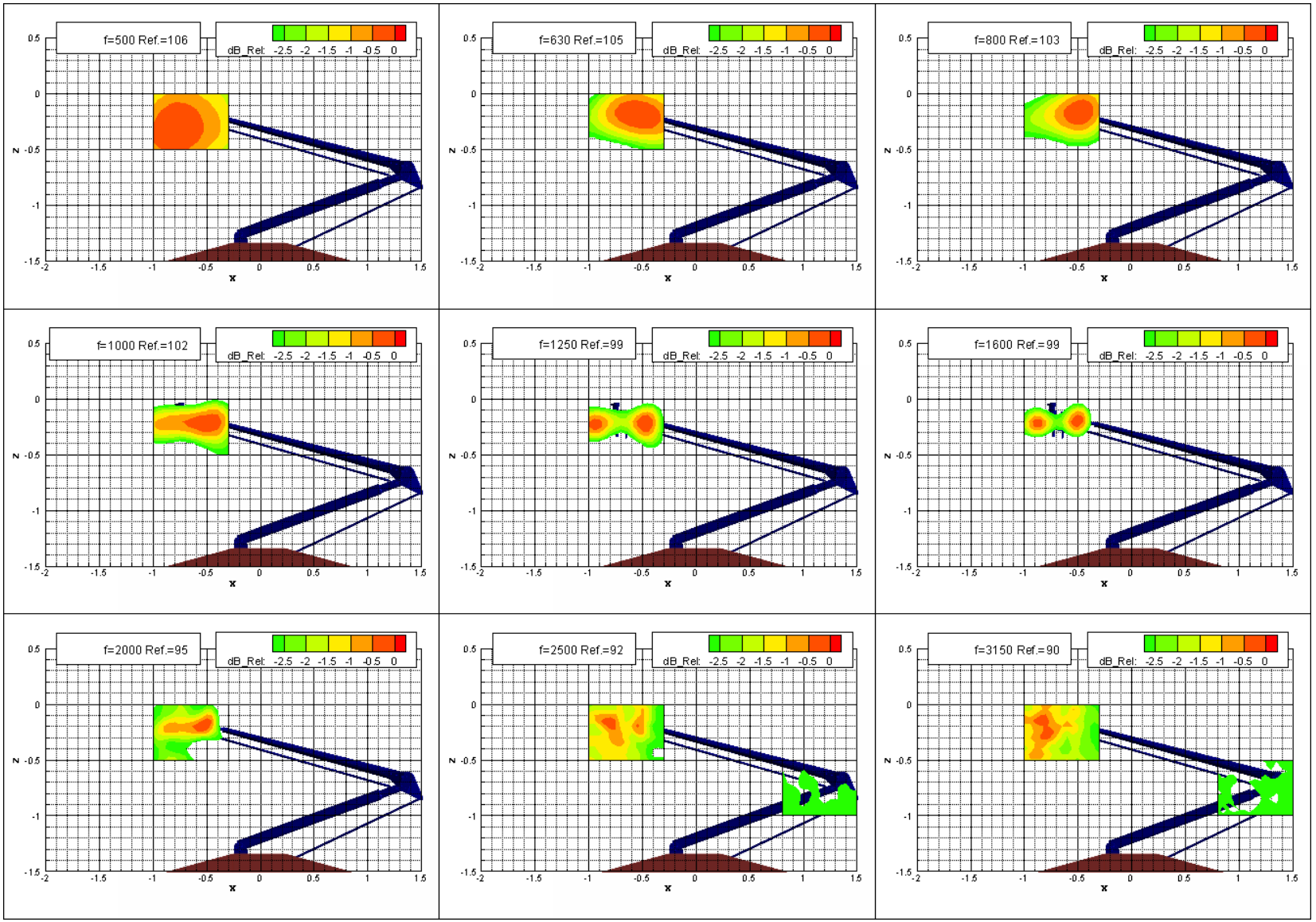
TA0210R0016_3
Wind 77m/s
Head : 5
Yaw : 4
Closed knee



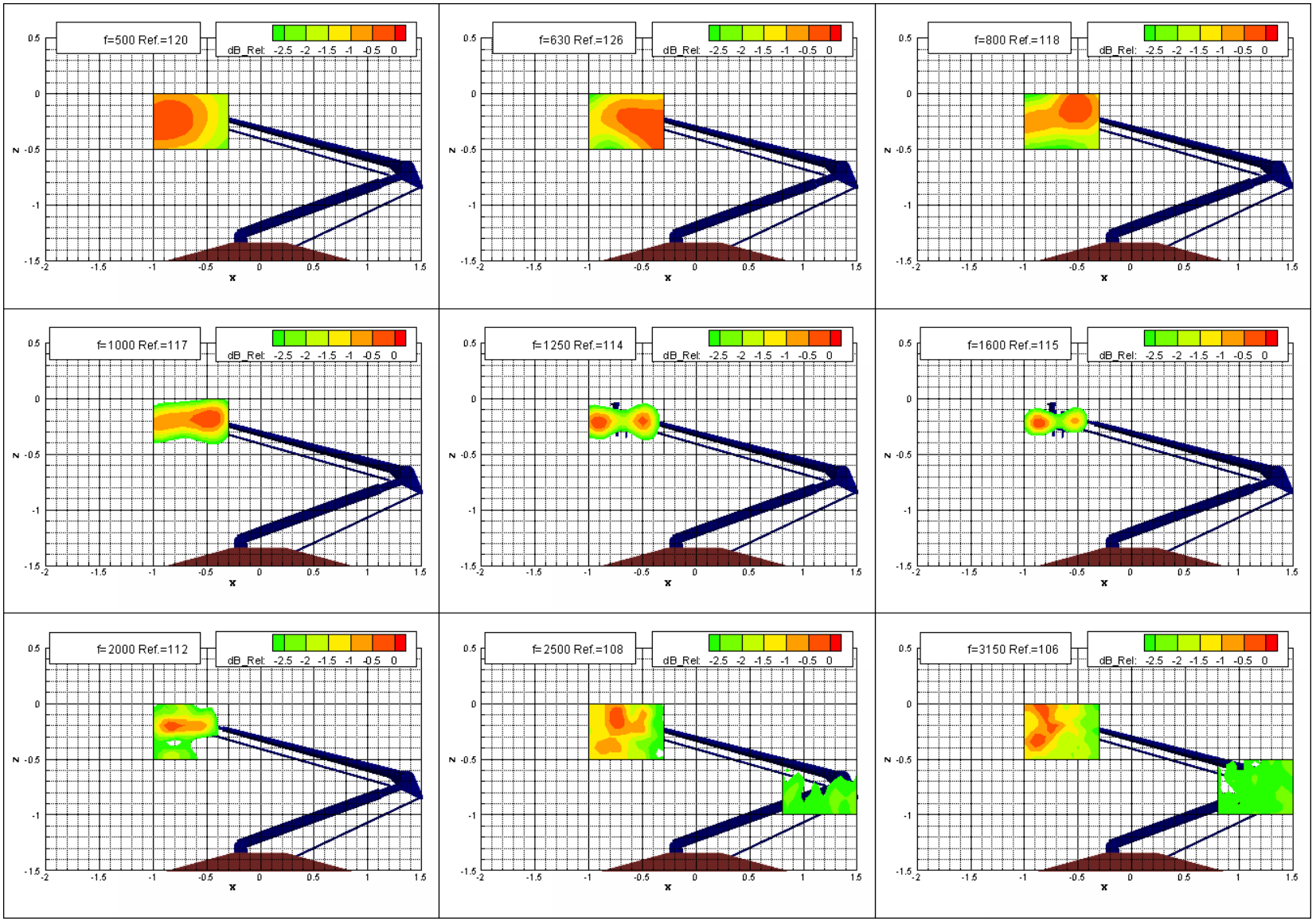
TA0210R0016_4
Wind 97m/s
Head : 5
Yaw : 4
Closed knee



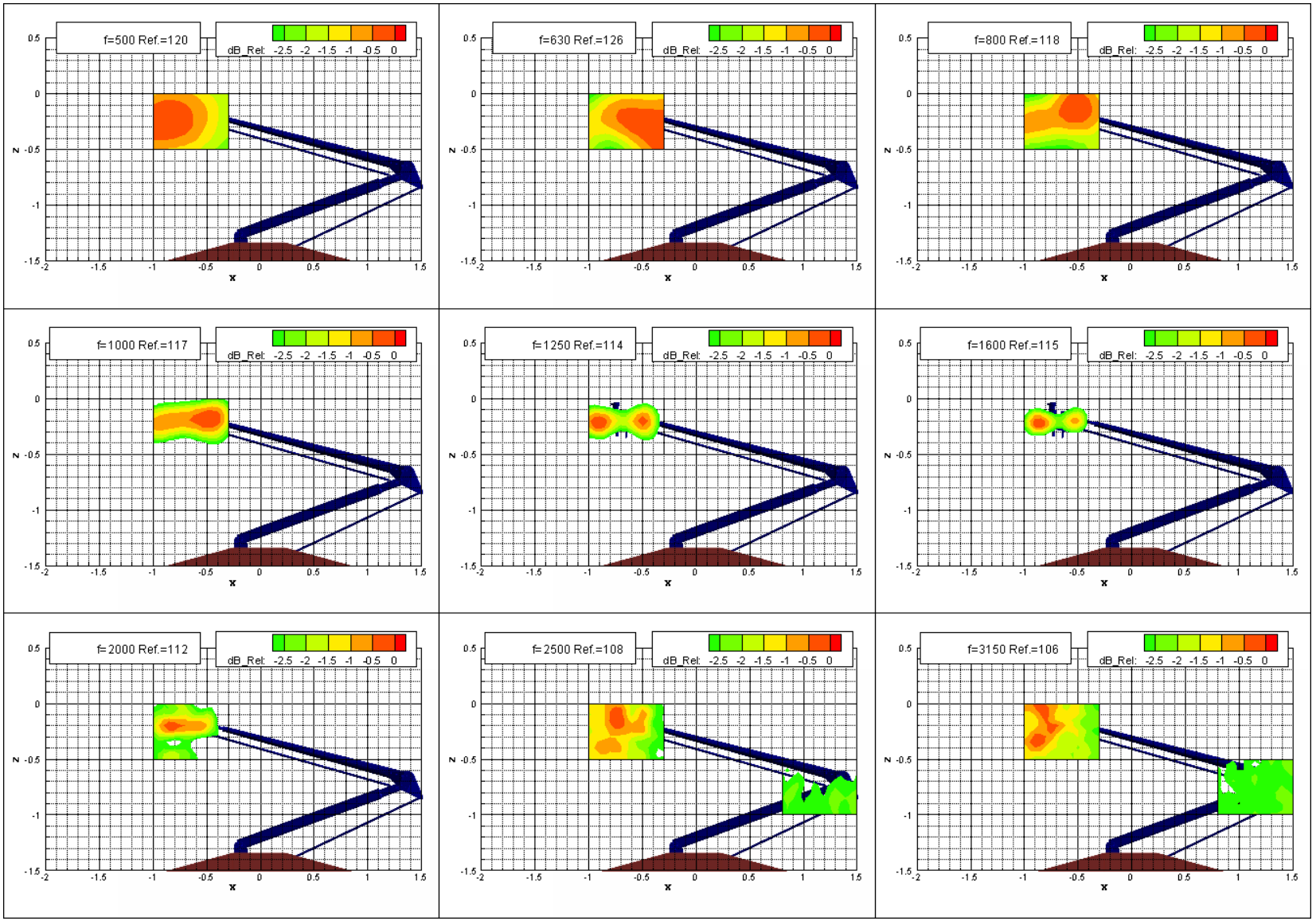
TA0210R0018_1
Wind 45m/s
Head : 0
Yaw : 0
Open knee



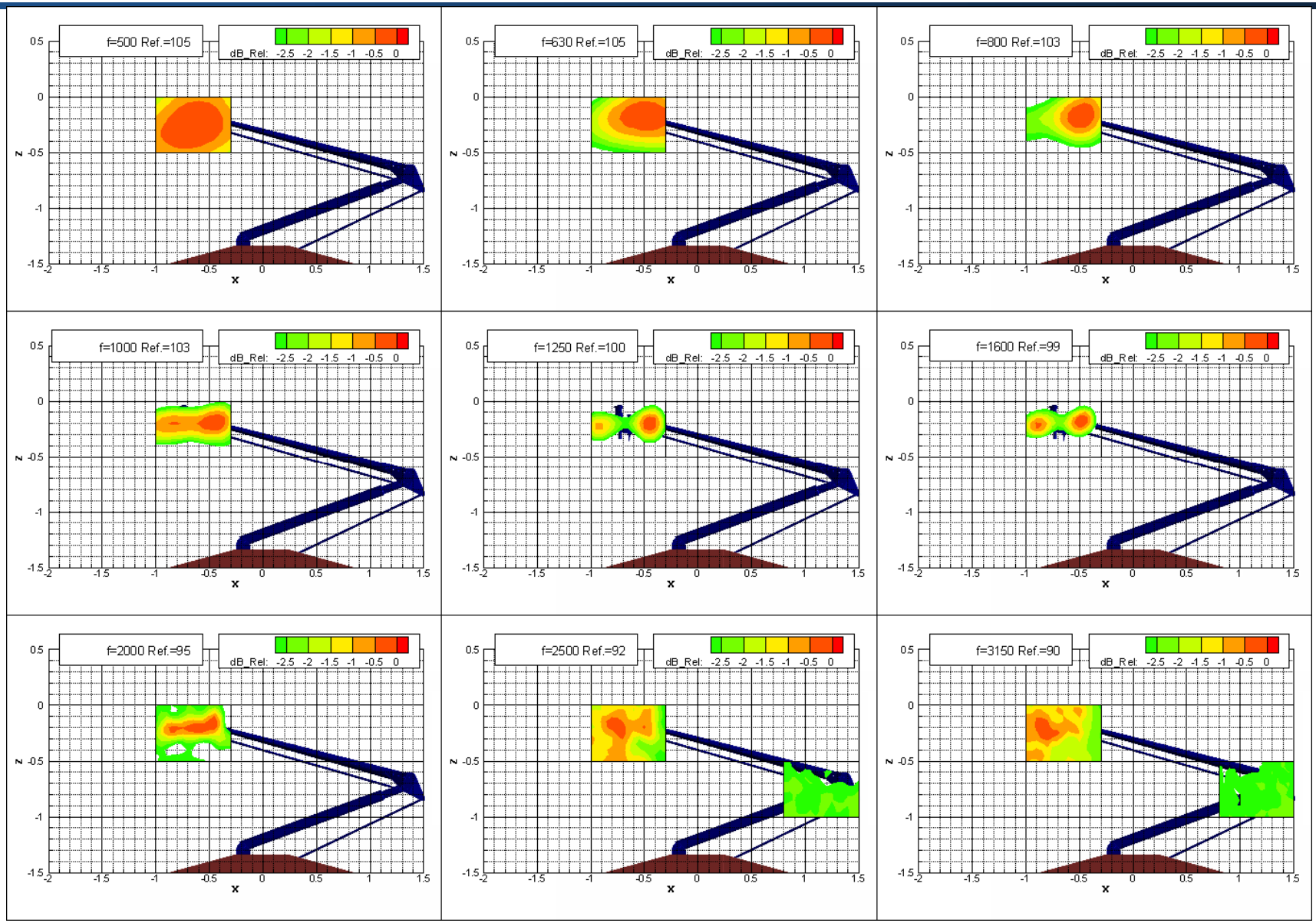
TA0210R0018_2
Wind 60m/s
Head : 0
Yaw : 0
Open knee



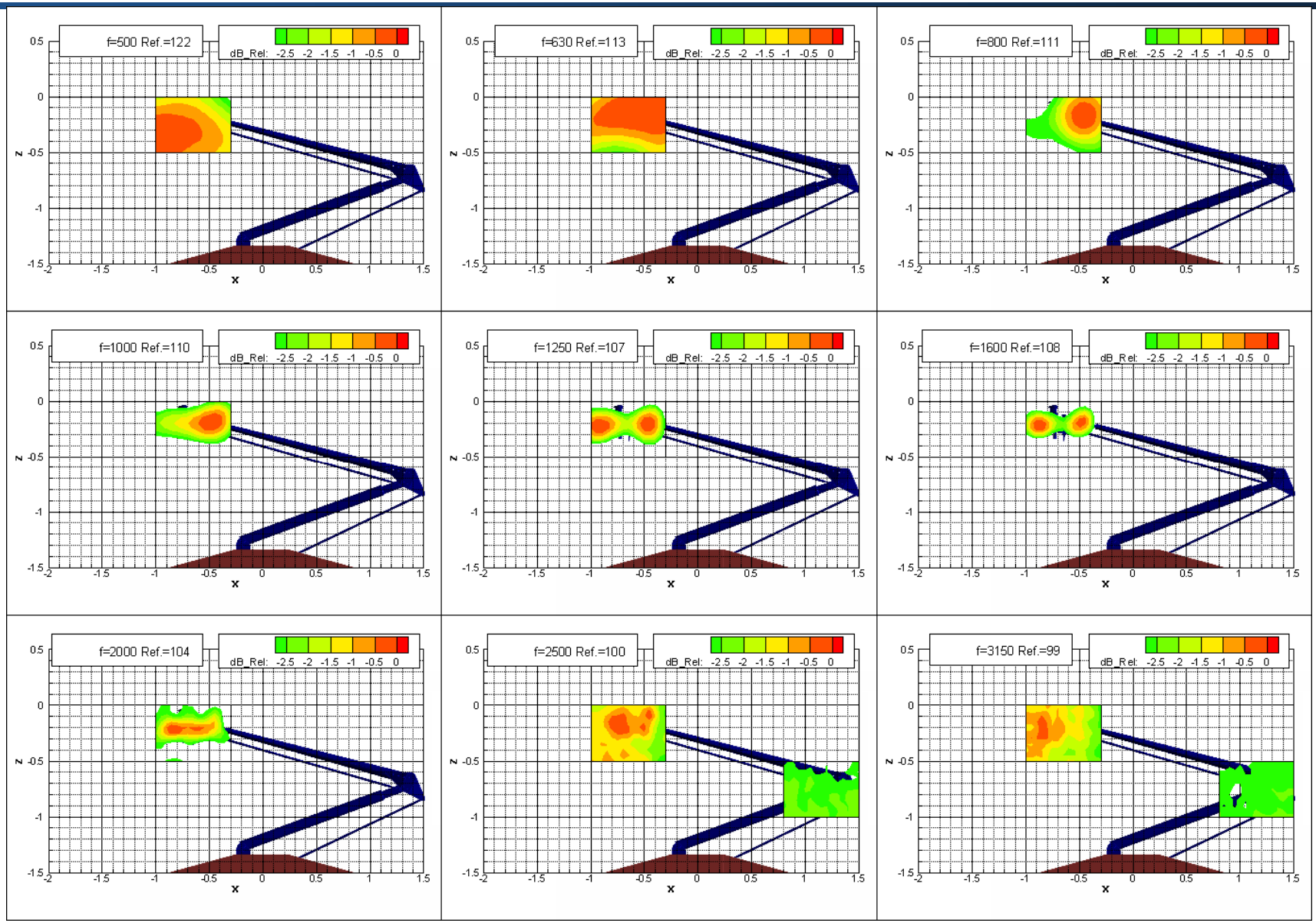
TA0210R0018_3
Wind 77m/s
Head : 0
Yaw : 0
Open knee



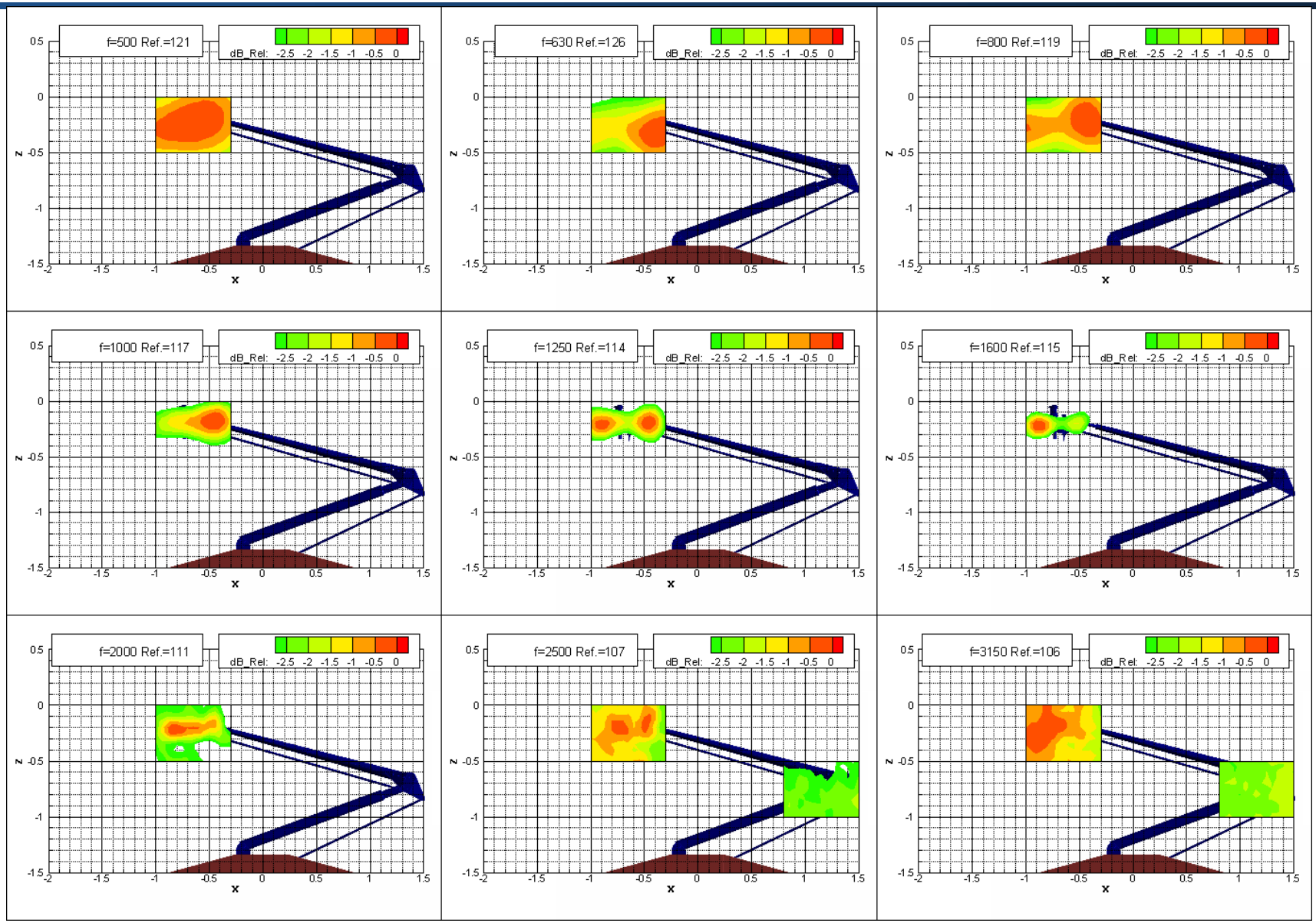
TA0210R0019_1
Wind 45m/s
Head : 0
Yaw : 2
Open knee



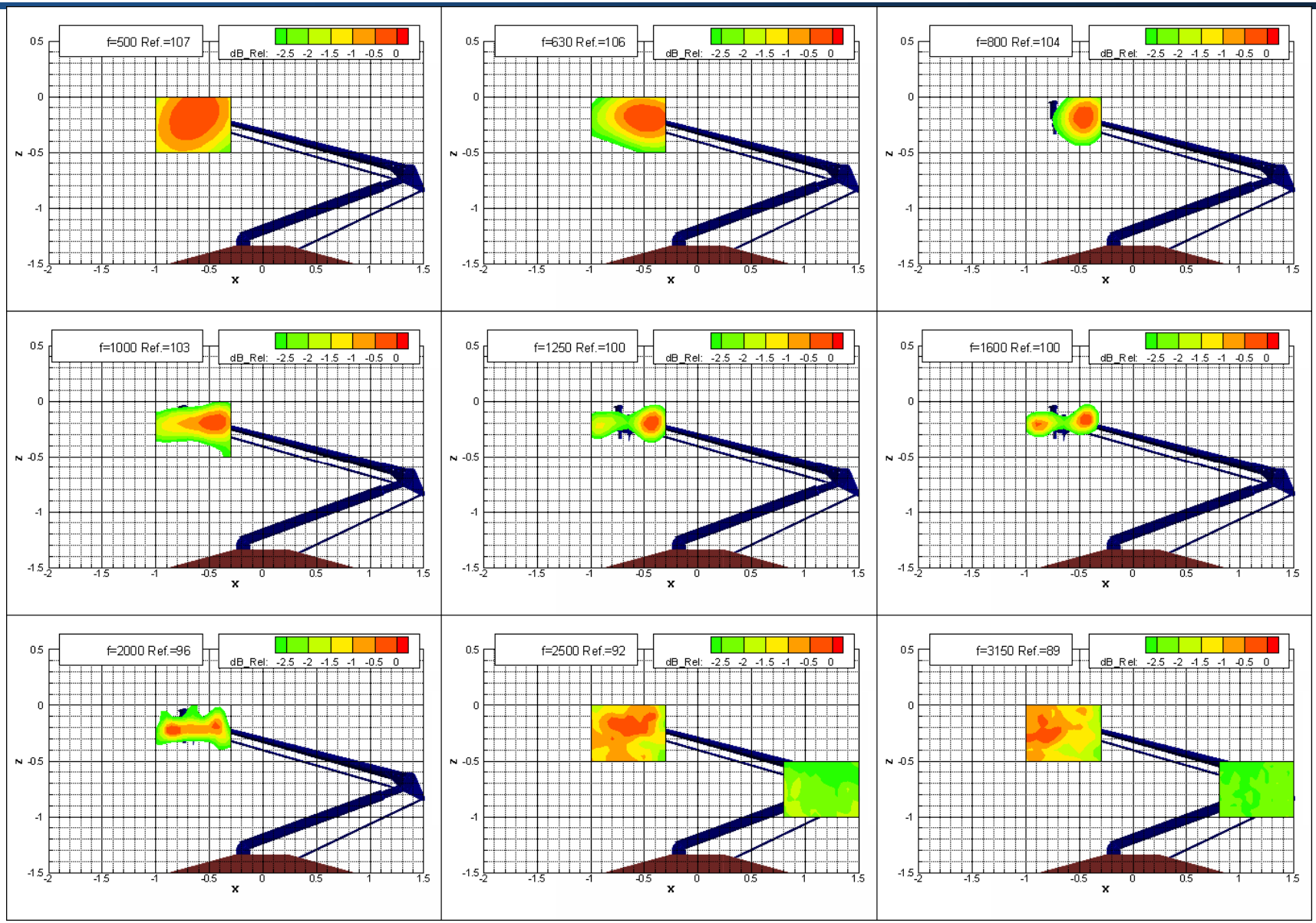
TA0210R0019_2
Wind 60m/s
Head : 0
Yaw : 2
Open knee



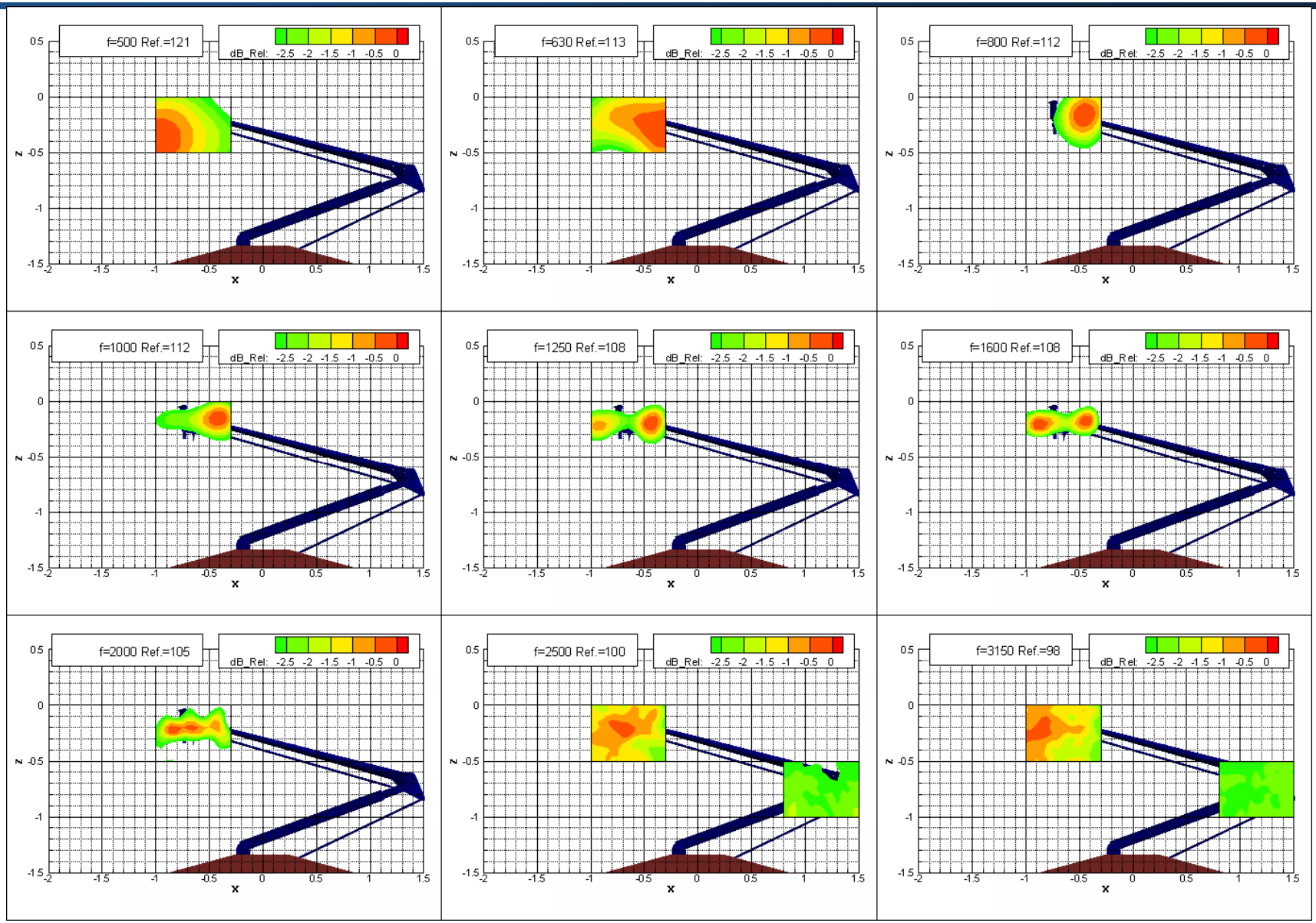
TA0210R0019_3
Wind 77m/s
Head : 0
Yaw : 2
Open knee



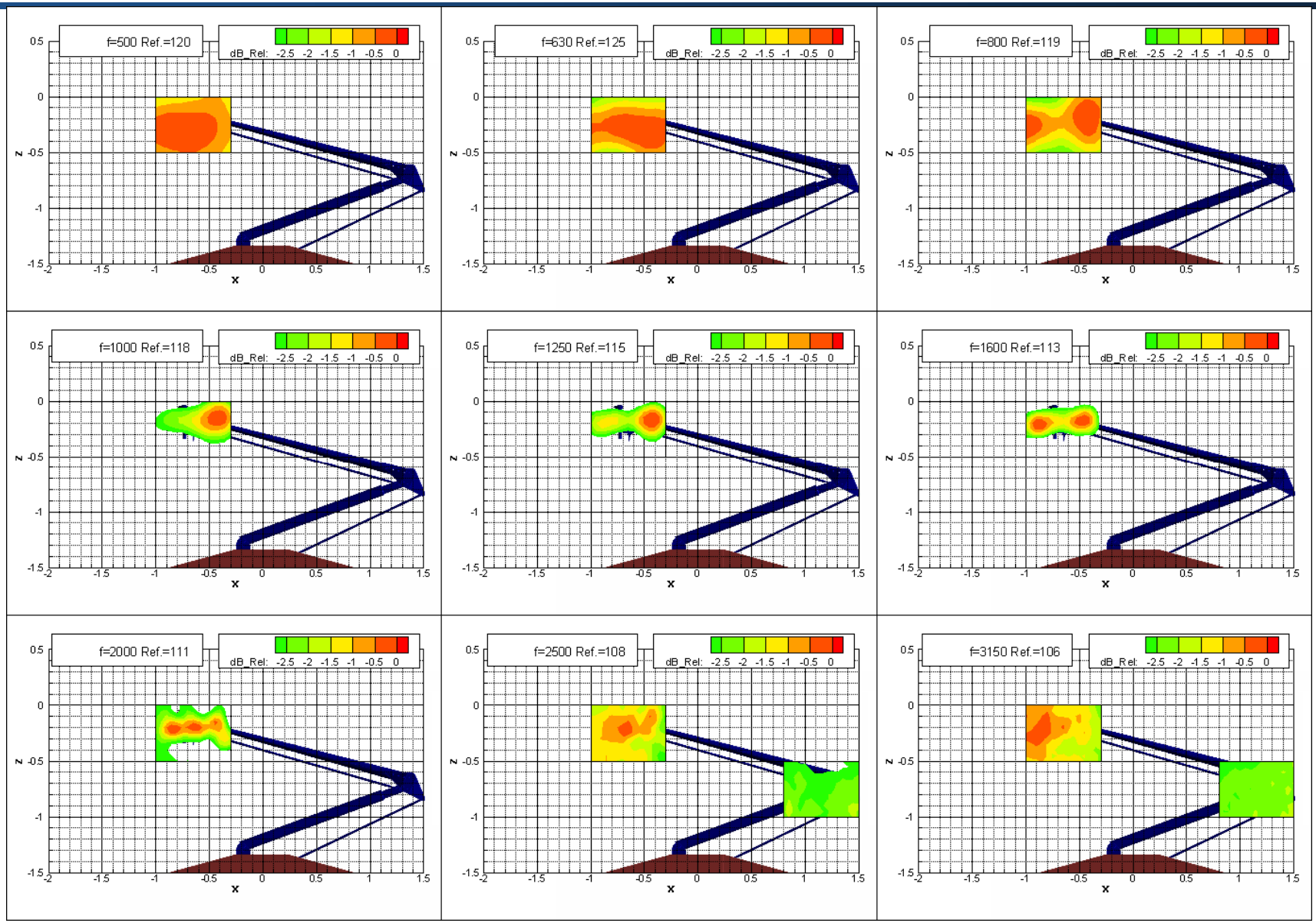
TA0210R0020_1
Wind 45m/s
Head : 0
Yaw : 4
Open knee



TA0210R0020_2
Wind 60m/s
Head : 0
Yaw : 4
Open knee

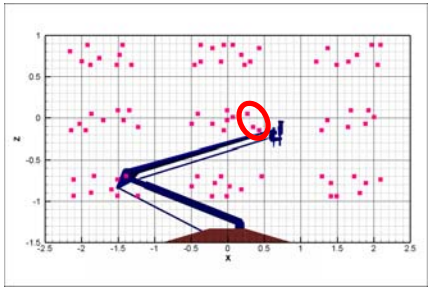


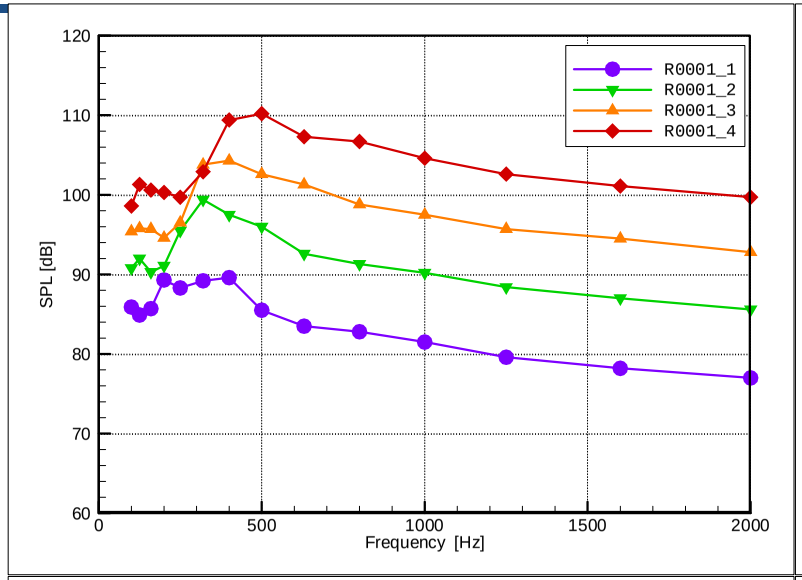
TA0210R0020_3
Wind 77m/s
Head : 0
Yaw : 4
Open knee

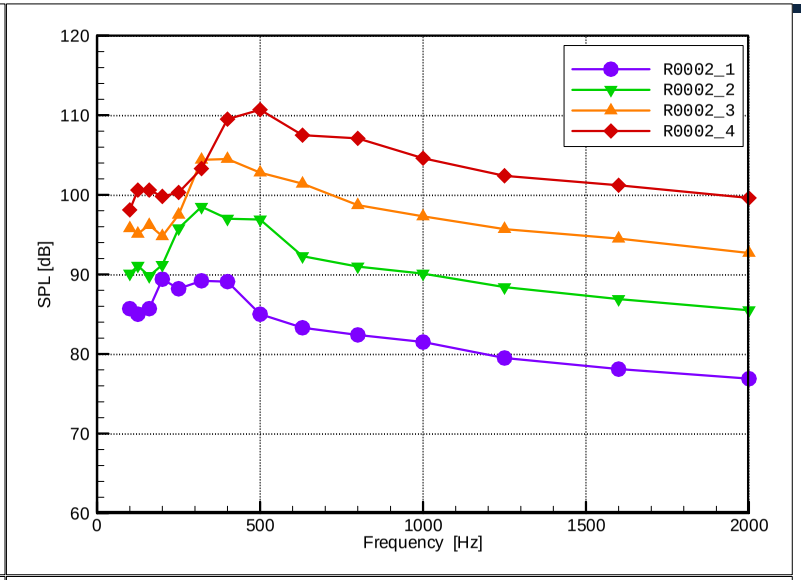


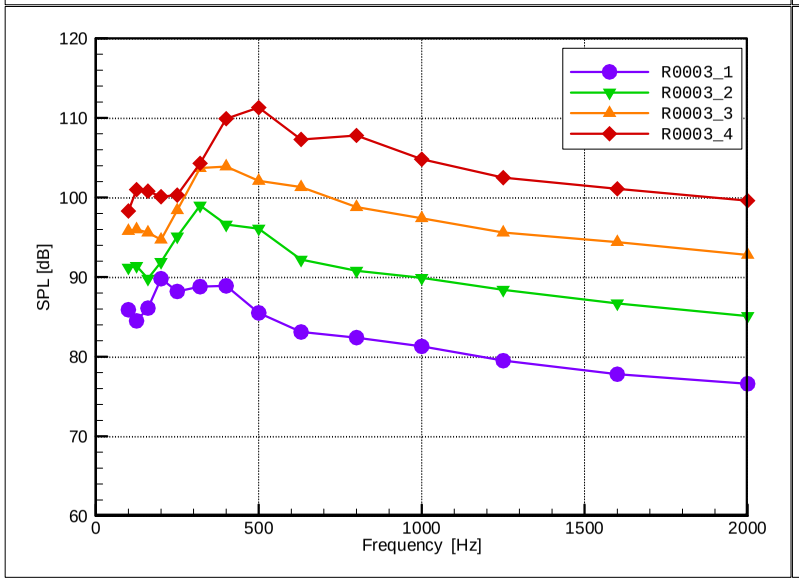
Spectrum analysis
1/3 octave band

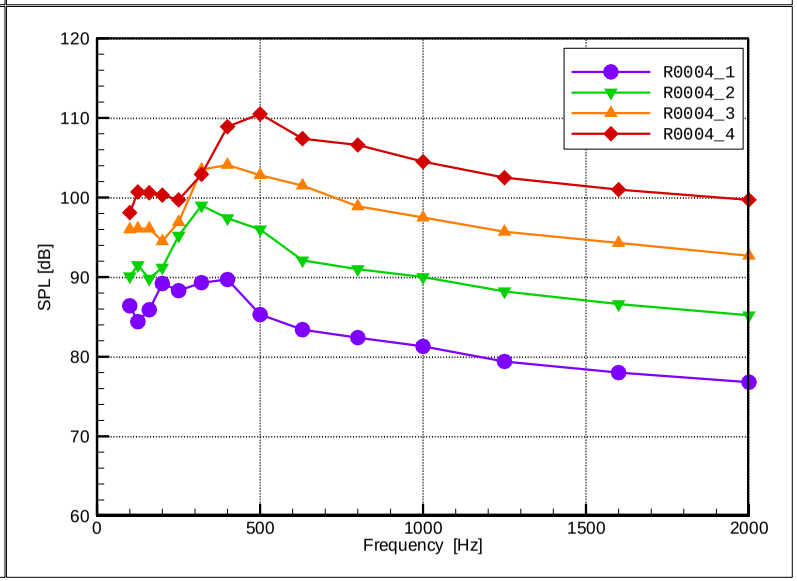
Averaged value of microphones around the pan head





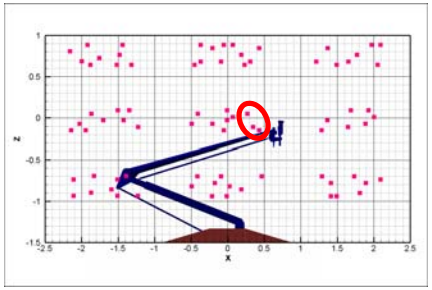


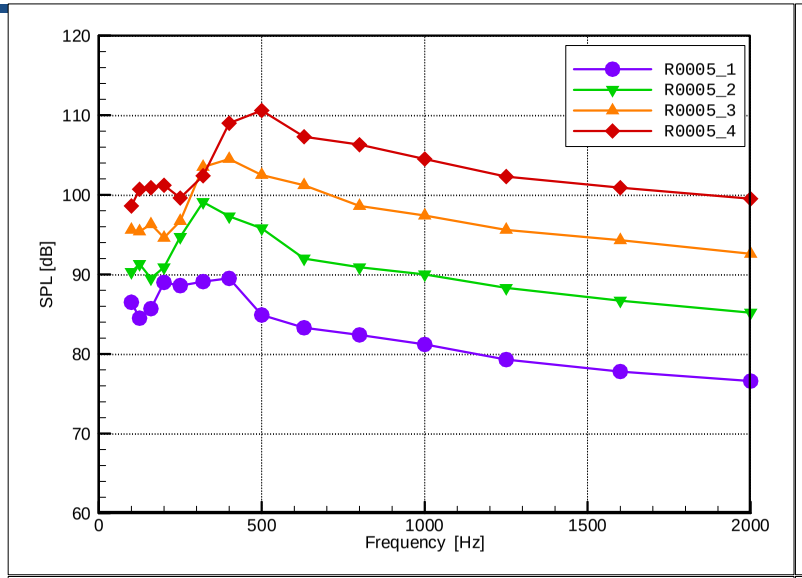


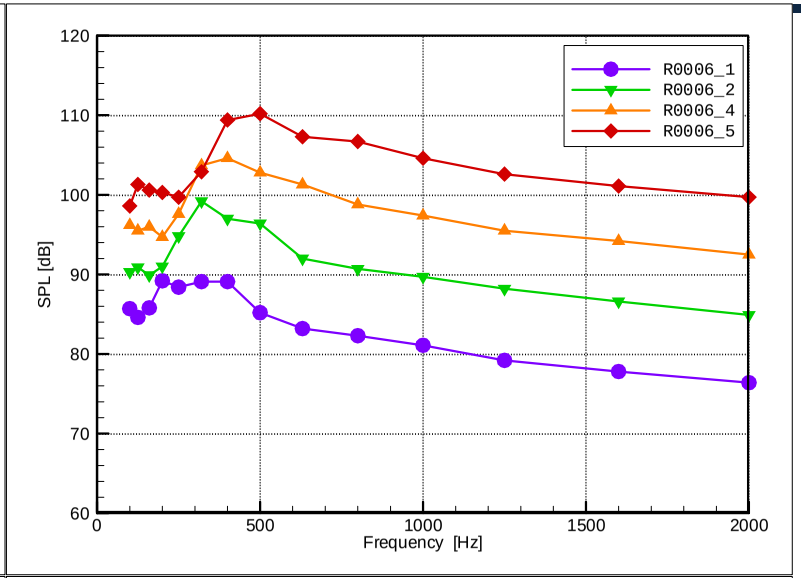


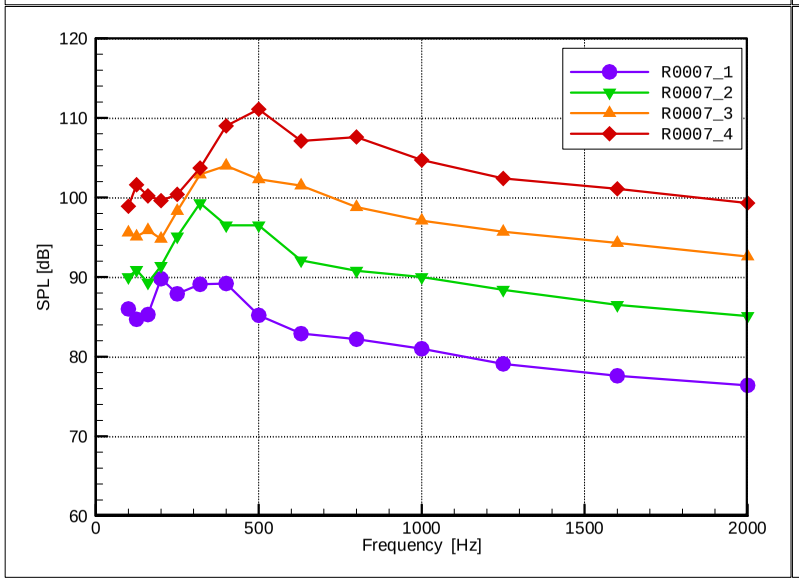
Spectrum analysis
1/3 octave band

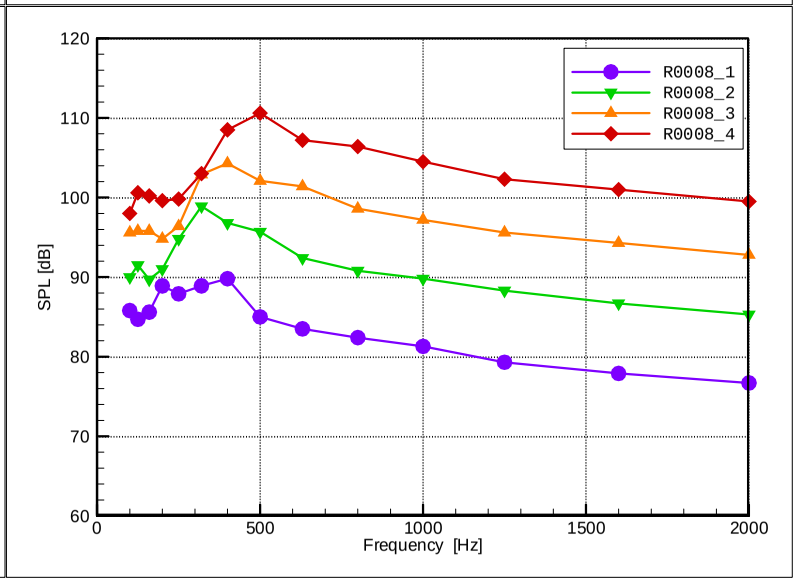
Averaged value of microphones around the pan head





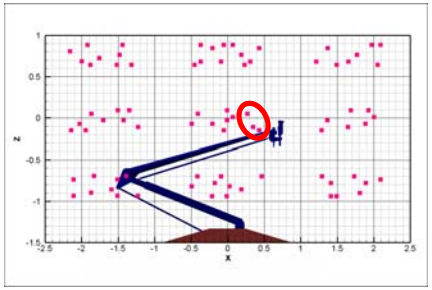


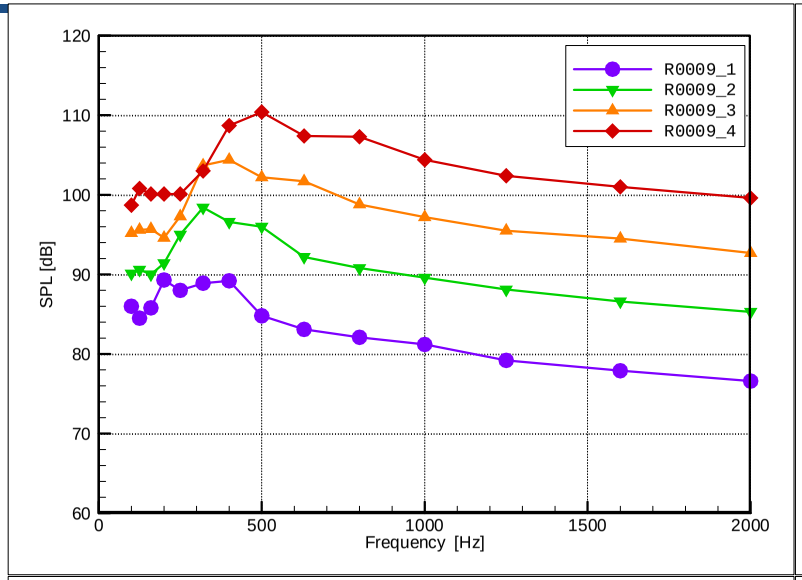


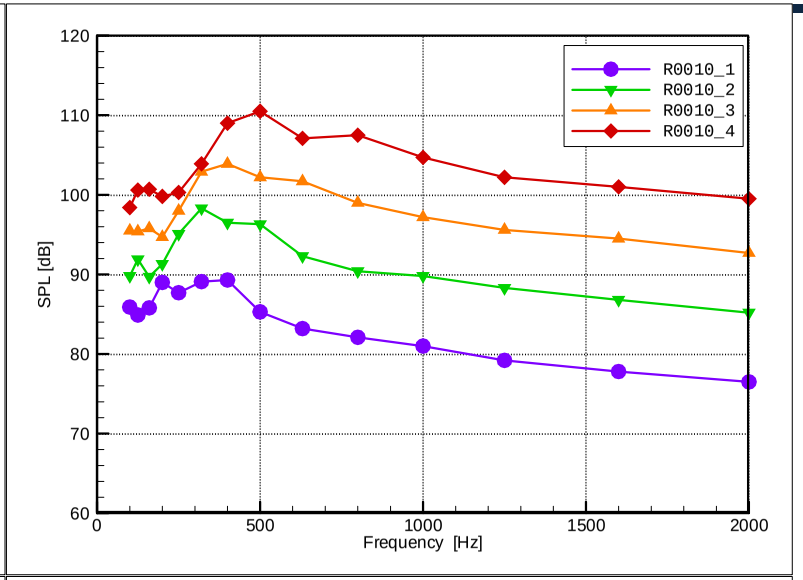


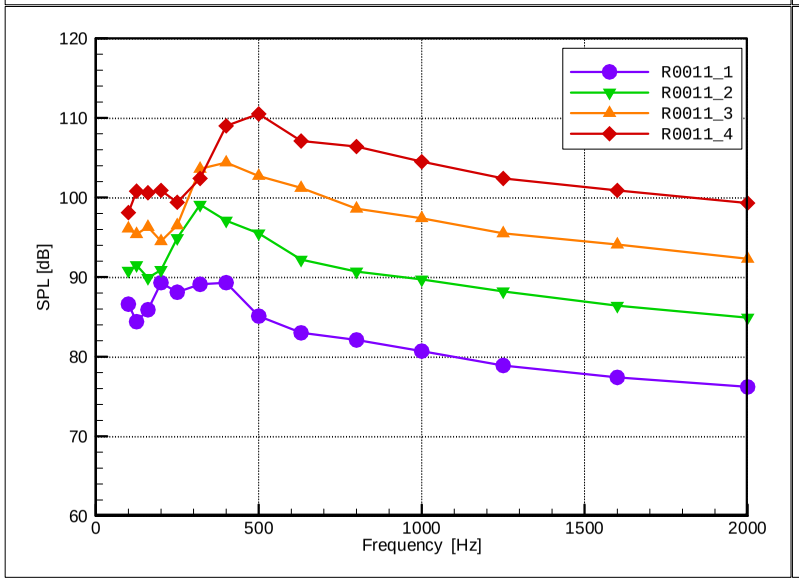
Spectrum analysis
1/3 octave band

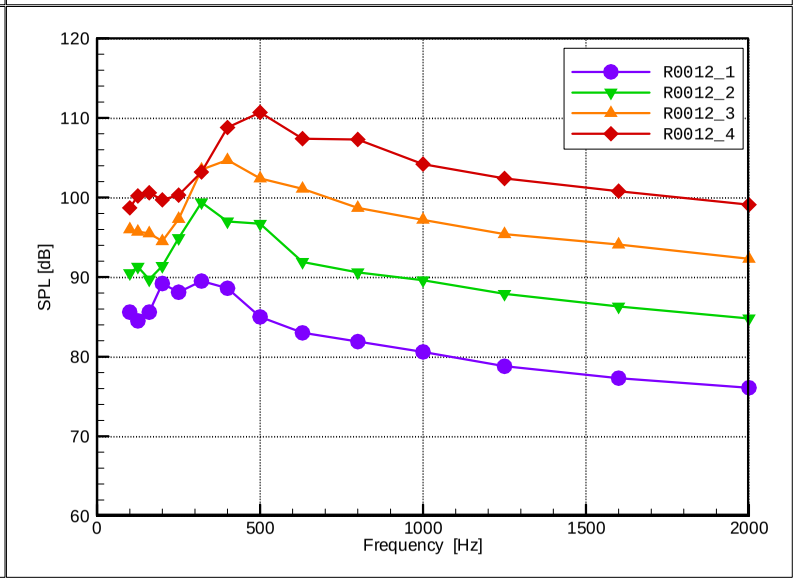
Averaged value of microphones around the pan head





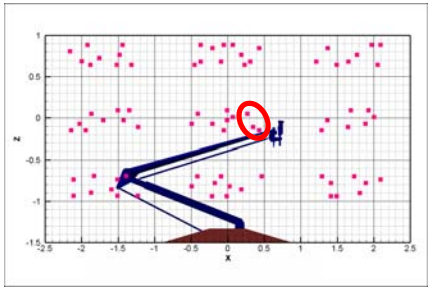


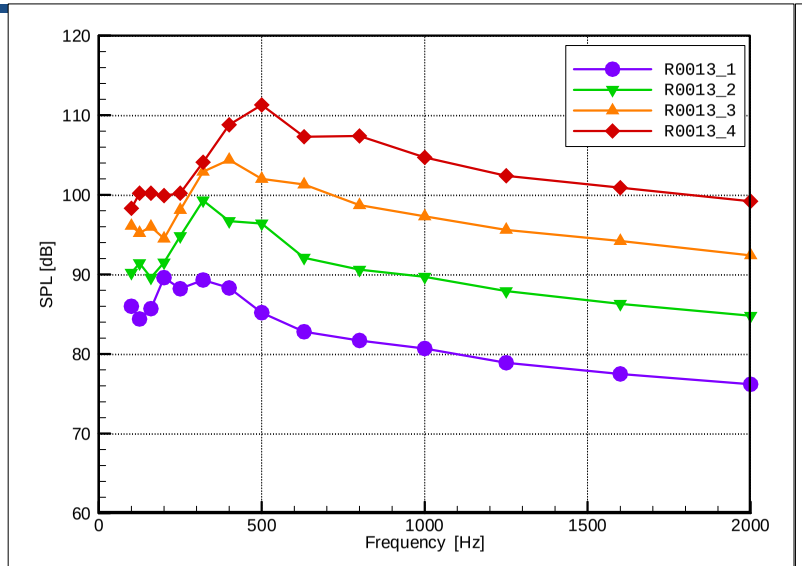


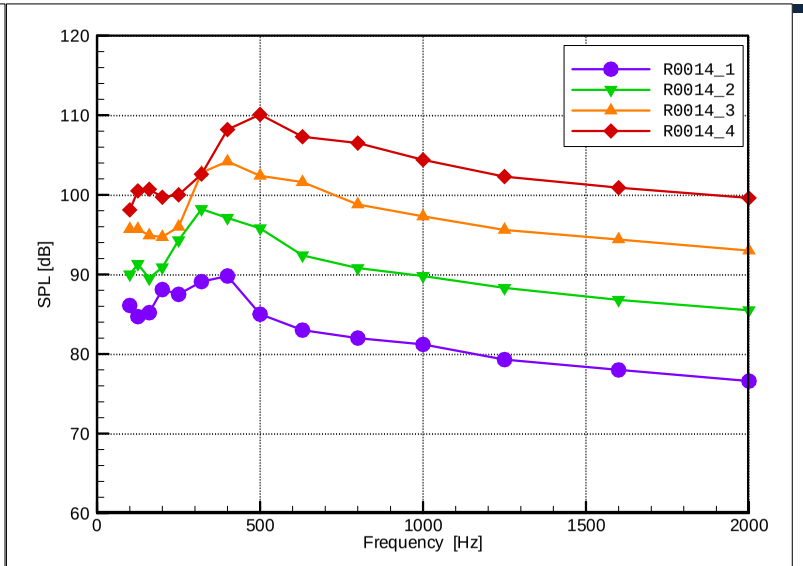


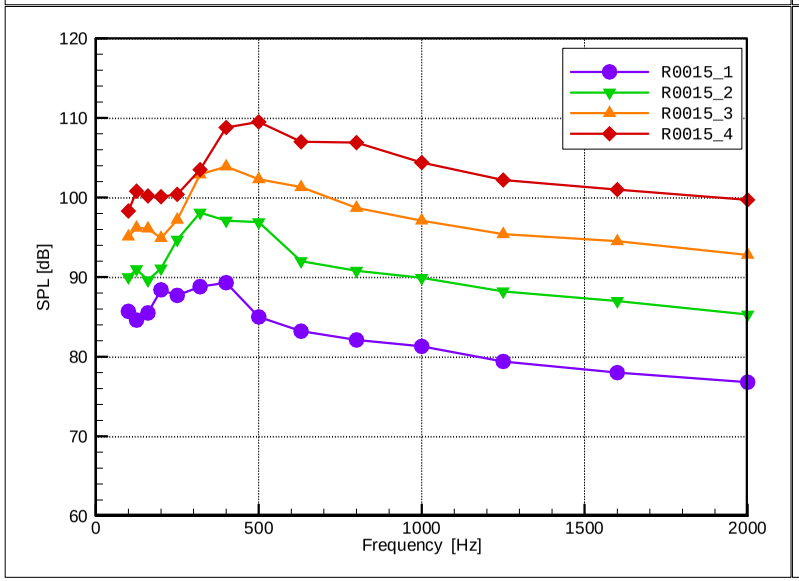
Spectrum analysis
1/3 octave band

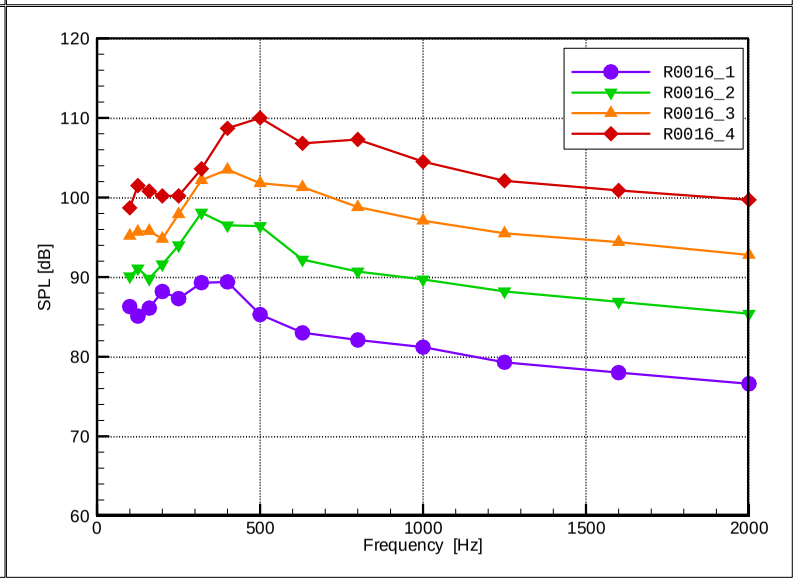
Averaged value of microphones around the pan head





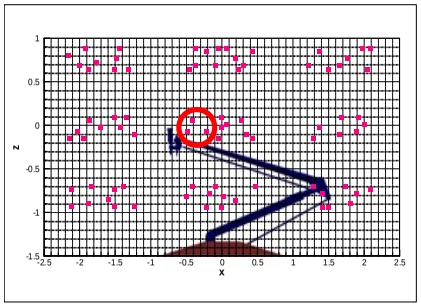


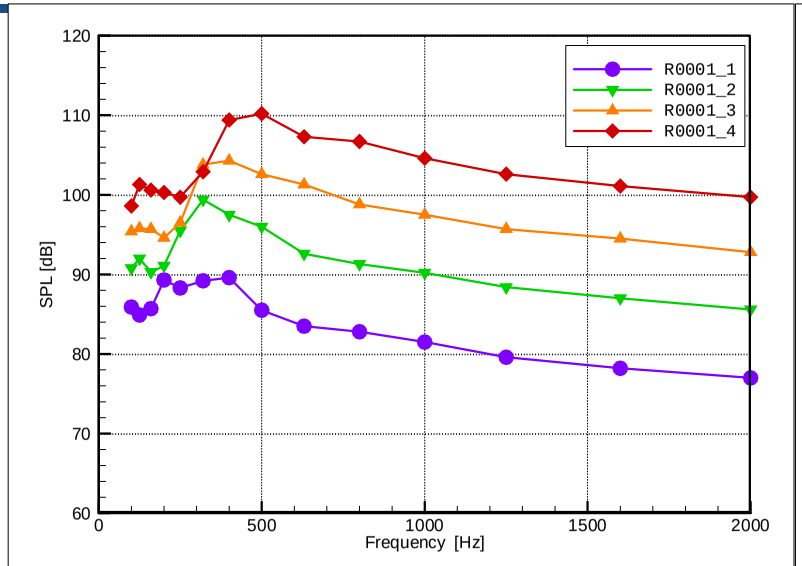


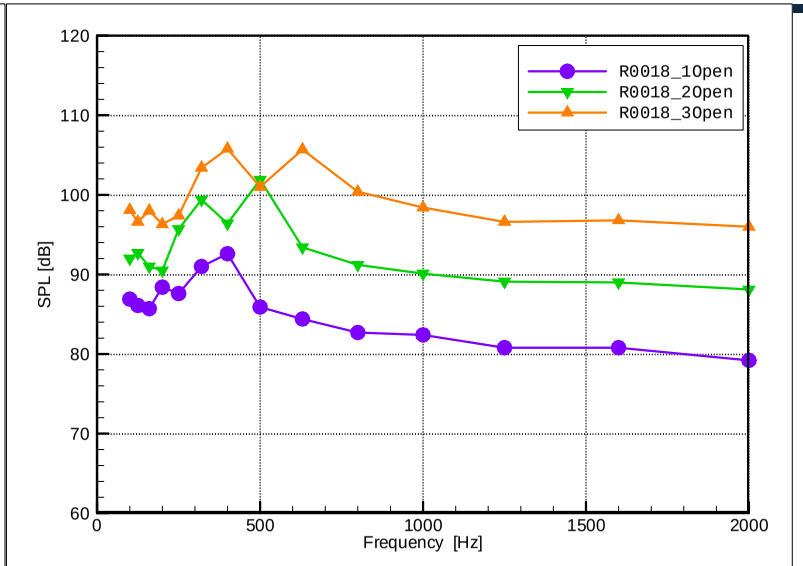


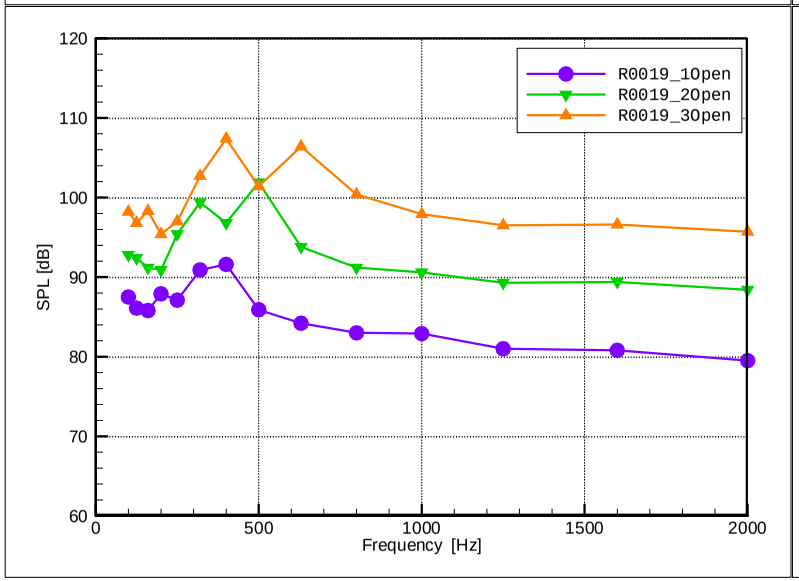
Spectrum analysis
1/3 octave band

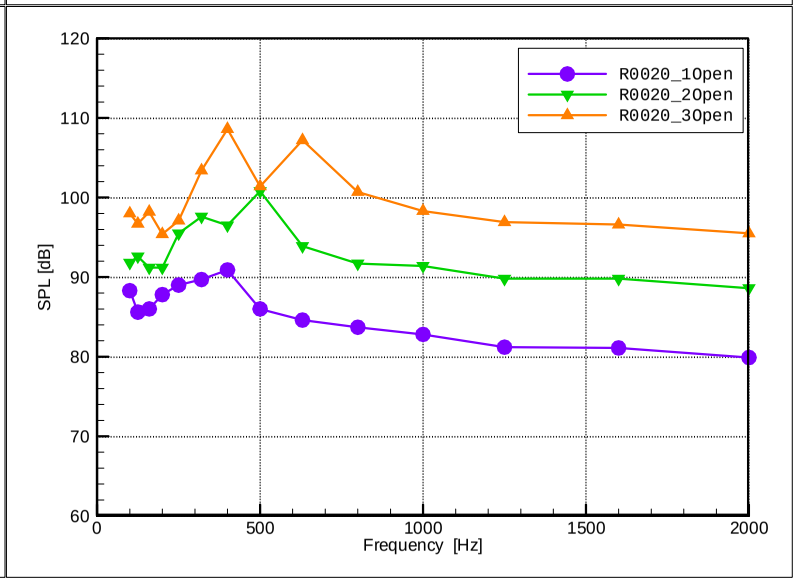
Averaged value of microphones around the pan head











주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.