

400km/h 고속철도 대규모 계측데이터 사용자 중심 확장성 계측시스템

황경훈¹, 박선규², 송병근², 양옥렬^{3*}

¹승화프리트, ²성균관대학교 사회환경시스템공학과, ³해전대학교 보건의료정보과

User-centric Scalability Measurement System of Large-Scale Measurement Data for 400km/h High-Speed Railway

Kyung-Hun Hwang¹, Sun-Kyu Park², Byung-Keun Song² and OK-Yul Yang^{3*}

¹SeungHwa Pre Tech Corp.,

²Dept. of Civil&Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ.,

³Dept. of HMID, Hyejeon College

요 약 본 논문은 동력분산식 차세대고속열차가 최고속도 400km/h 이상으로 개발됨에 따라 차량의 최고속도 시험에 대비하여 호남고속철도 건설구간에서 인프라시스템 기술개발이 필요하여 국내에서는 유일하게 현재 호남고속철도 건설구간 중 28km 구간에서 400km/h급 고속철도 인프라를 구축하였다. 또한 계측장비의 설치 및 모니터링 시스템을 설치하여 선로의 지속적인 모니터링이 가능하도록 설계하였다. 이를 통해, 보다 포괄적이며 장기적인 관점에서 통합모니터링의 요구사항과 향후 연구방향을 확인할 수 있었다.

Abstract Needs for a new technologies of infrastructure systems arose, following the development of next generation EMU(Electric Multiple Unit) train with maximum speed over 400km/h. For high-speed operation tests of the new EMU, a high-speed railway infrastructure test-bed was constructed in a 28km long section of the Honam High-speed Railway. Diverse sensors and monitoring system was installed for continuous monitoring of the railway. Due to such effort, further demands and needs of the integrated monitoring system was derived in a more comprehensive and long-term perspective.

Key Words : EMU, Integrated Monitoring System, High-Speed Railroad, TPS railroad

1. 서론

현재 개발된 세계 고속열차의 최고속도는 프랑스가 574.8km/h(2007.4.), 중국 486.1km/h (2010.12.), 일본 443km/h(1996.7.)의 순으로 달성되었다. 국내에서는 2010년부터 국토교통부를 중심으로 교통연구개발 토론회에서 세계 고속철도의 속도 및 성능향상에 발맞추어 목표속도를 향상 조정하는 인프라선진화사업에 대한 연구가 시작되는 계기를 마련했다. 국내에서는 현재 동력분산식 차세대고속열차가 최고속도 400km/h이상으로 개발(2007~2012년)됨에 따라 차량의 최고속도 시험에 대비하여 그

에 적합한 인프라시스템 기술개발이 필요하며 국내에서는 유일하게 현재 호남고속철도 건설구간이 400km/h 운영이 가능한 선로구간이다. 이 구간에서 400km/h급 이상의 운영 선로인프라를 구축한다면 이는 세계 최초의 시행이 되는데 의미를 둘 수 있다.

또한 국가연구 개발 사업으로 추진하고 있는 400km/h급 고속철도인프라시스템 개발은 연구개발의 성과물이 사장되지 않고 철도현장에서 실용화에 집중되어 있다. 따라서 호남고속철도 건설구간에 약 28km(편도 28km, 상·하행선 왕복기준 56km)을 대상으로 기술적인 검토와 첨단 센싱기술과 모니터링기술을 통해 선로구축물, 전차선

*Corresponding Author : Ok-Yul YANG(Hyejeon College)

Tel: +82-010-6220-6885 email: cache@hj.ac.kr

Received December 18, 2013

Revised February 4, 2014

Accepted February 5, 2014

로시스템, 환경시스템, 전기신호시스템과 향후 열차(시험 및 운영차량) 운행 시 적합성 및 성능평가를 수행하여 인프라 및 인터페이스 시연을 구축하였다.

2. 연구방법 및 결과분석

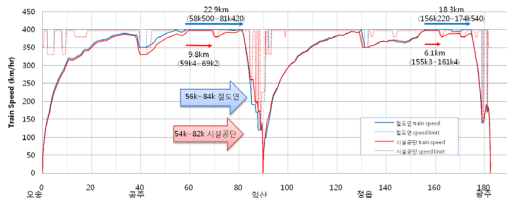
2.1 시험 구간 선정

시험구간은 호남고속철도 구간 내 선형 및 운행하게 될 차량인 HEMU-430x의 차량성능 등을 고려한 최적의 400km/h 운행구간 선정 및 각종 연구 성과물의 현장설치 구간을 설정하였다. 이 수립에는 국토해양부, 철도시설공단, 철도공사, 건설기관 등이 참여하였다. 테스트베드 선정단계는 아래 Table 1과 같은 순서로 진행하였다.

여기서 TPS(Train Performance Simulation) 분석은 한편성의 열차가 일정한 선로구간을 주행하는데 따른 시각별 위치, 속도, 전력소비 등의 제반 성능을 분석하는 과정으로 400km/h 운행이 가능한 구간을 판별하기 위하여 차세대 고속철도 기술개발사업으로 개발되는 HEMU-430x와 호남고속철도 노선조건을 바탕으로 TPS분석이 이루어졌다.

[Table 1] Steps for Selection of 400km/h Test-bed Section Steps Activities

Steps	Activities
Step 1	<ul style="list-style-type: none"> TPS(Train Performance Simulation) Analysis -Analysis of Honam High-speed Railway alignment and HEMU performance
Step 2	<ul style="list-style-type: none"> Cross checking of TPS Analysis Results - Cross check TPS Analysis results of the KRRI and KR
Step 3	<ul style="list-style-type: none"> Consultation with KR -Select candidate sections for test-bed
Step 4	<ul style="list-style-type: none"> Compatibility evaluation and test-bed application plan of technical components -environmental noise reduction, railway structures, railway systems, etc.
Step 5	<ul style="list-style-type: none"> Consultation with KR -Finalization of test-bed plan and subjects for mutual cooperation



[Fig. 1] Comparison of TPS Analysis Result<Honam line Northbound(Ohsong→ Kwangju Songjung)>

이러한 테스트베드를 통해 호남고속철도에 처음 적용된 Extradosed교에 대한 정밀 계측이 요구됨에 따라 정지 고가교(56k933~66k248)에 별도의 계측장치 설치하고, 전차선의 경우 상행과 하행을 분리하여 400km/h 운행이 가능한 상행선 100~128km (28km)와 하행선 54~82km(28km)로 선정하였다.

2.2 분야별 테스트베드 설치

2.2.1 환경소음

400km/h급 고속철도의 경우 증속에 따른 소음특성(소음레벨, 주파수 특성 등) 및 설치조건(증속에 따른 부차성, 내구성 등)의 변화로 인해 새로 개발될 방음시설에 대한 현장 성능평가가 이루어져야 한다. 이를 위해 개발하는 핵심방음시설을 400km/h 운행구간에 시험 설치하여 현장 성능평가 및 적용성 평가를 수행하기 위한 테스트베드의 구축하였다. 환경소음 제거를 위한 설치물로는 터널 및 방음벽을 설치하였으며 설치에 필요한 근거는 아래 Table 2와 같다.

[Table 2] Causes for Noise Control System Improvement

Issues	Causes											
Height of noise barrier	<ul style="list-style-type: none"> 7dB increase in noise with speed of 400km/h Noise barriers of 1-3m height fail to satisfy environmental noise standard Increased measure needed to reduce noise by more than 7dB 											
Basis for considering 7dB noise increase	<ul style="list-style-type: none"> In case of ICE, difference of noise between operation speed of 300km/h and 400km/h is 7dB 											
Environmental noise analysis conditions	<ul style="list-style-type: none"> Applied CadanaA program for analysis Sound power level of the noise source is assumed to increase by 7dB by operation speed increase from 300km/h to 400km/h Input design components and topographical data used in environmental impact assessment 											
Environmental impact assessment	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Operation speed</th> <th>Noise barrier</th> <th>Noise barrier+ Upper barrier</th> <th>Evaluation Result</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>300km/h</td> <td>3.0m</td> <td>-</td> <td rowspan="2">Satisfies 60dB(A) Limit</td> </tr> <tr> <td>400km/h</td> <td>8.0m</td> <td>5.0m+ upper barrier</td> </tr> </tbody> </table>	Operation speed	Noise barrier	Noise barrier+ Upper barrier	Evaluation Result	300km/h	3.0m	-	Satisfies 60dB(A) Limit	400km/h	8.0m	5.0m+ upper barrier
	Operation speed	Noise barrier	Noise barrier+ Upper barrier	Evaluation Result								
300km/h	3.0m	-	Satisfies 60dB(A) Limit									
400km/h	8.0m	5.0m+ upper barrier										

2.2.2 선로구축물

호남고속철도 선로구축물(궤도, 노반, 교량)은 최고속도 350km/h로 설계, 시공된 노선이다. 호남고속철도 구간에 대하여 350km/h 이상으로의 속도향상에 따른 인프라에 대한 영향검토와 보강이 필요한 주요 요구사항에 대하여 일부 선행 연구과제를 통해 일부 이론적 검토, 해외 기준준용, 사례분석 및 시험자료를 통해 검토되었다. 이

에 대한 규명을 위해 현재 열차속도 350km/h에 최적 설계되어 있는 호남고속철도에서 400km/h 최고속도시험이 이루어짐에 따라 이 구간에 최적의 테스트베드를 선정하여 선로구축물(궤도, 노반, 교량)의 성능을 첨단 센서 모니터링 기법을 이용하여 검증하였다. 선로구축물에 대한 모니터링 센서 설치 항목은 Table 3과 같다.

[Table 3] Monitoring factors for railway system of test-bed

Components	Monitoring factors
Track	Monitoring on forces of tracks in straight, transition curve, circular curve sections and critical points(high speed turnouts, junction points), synchronous monitoring
Track bed	Monitoring on forces, deformation, settlement, usability of track bed
Bridges	Monitoring on deflection of bridges(cable supported/general bridge) and rail forces

선로구축물(궤도, 노반, 교량)의 경우 고속선 구간인 경우 곡선반경에 대한 기준이 매우 중요한데, 궤도에 있어서 증속에 따라 영향을 받는 설계인자는 최소곡선반경과 부족캔트량 및 완화곡선 길이 등이다. 최소곡선반경에 관한 국외기준은 아래 (Table 4.)와 같으며, 국내 건설규칙에서는 EN 13803을 준용하고 있으며, 200km/h이상 고속철도의 경우 최소곡선반경의 한계 값을 Table 5와 같이 제시하고 있다.

[Table 4] Foreign specifications on curve radius

Countries	Specification on curve radius
Europe (ENV 13803-1-2002)	$\frac{11.8 V_{min}^2}{C - C_e} \geq R \geq \frac{11.8 V_{max}^2}{C + C_d}$
Germany (RIL 800.0110)	$R = \frac{11.8 V_e^2}{C_{eq}} \text{ (m)}$
Europe (TSI)	C_d Should be under limit
Japan	Dependent on curve running performance and operation speed of train

[Table 5] Korean specification for minimum curve radius

Design speed V(km/h)	Minimum curve radius(m)	
	Gravel ballast	Concrete ballast
350	6,100	5,000
200	1,900	1,700

(footnote) Other values are set and the lack of CANT calculated by applying the following formula.

$$R \geq \frac{11.8 V^2}{C_{max} + C_{d,min}} \quad (1)$$

cf) R : Radius(m) $C_{d,min}$: Maximum Shortage CANT(mm)
 C_{max} : Maximum Setup CANT(mm) V : Design speed(km/h)

또한, 교량의 연직변위 제한은 열차가 교량 위를 주행할 때 주행안전성 및 승차감을 확보하기 위해 제한된 400km/h급 연직변위 제한은 기존의 350km/h급 연직변위 제한에 비하여 최소 10% 이상 보수적으로 접근할 필요가 있는 것을 알 수 있으며, 교량 모니터링 구간에서의 실측 및 이론적 분석을 통해 400km/h급 주행에서도 주행안전성과 승차감을 확보할 수 있는 변위기준 도출하였다 [Table 6].

[Table 6] Deflection specifications of bridges with 40m long span length

Korean Railway Specification	270km/h	350km/h	11.8% conservative
	L/1700	L/1900	
Eurocode	300km/h	350km/h	5.9% conservative
	L/1700	L/1800	
Sinkansen	300km/h	360km/h	10.0% conservative
	L/2000	L/2200	

2.2.3 전차선로

운영속도가 400km/h 정도의 고속으로 증가하게 되면 전차선 진동과 파동전파반사가 격렬히 일어나고 공력이 집전성능에 의한 미치는 영향이 증대되어 안정적인 전력 공급이 곤란하며, 장시간 고속으로 운영하게 되면 전차선로 부품 등이 조기에 파손될 것으로 예상되어 고속 철도의 안전 운영에 지장을 초래할 수 있다. 따라서, 최고시속 400km/h 운행에 적합한 새로운 고속 전차선로 시스템을 개발하여야 한다.

또한, 개발한 전차선로 시스템 상세사양 및 부품에 대한 현장 검증 및 신뢰성 확보를 위하여 테스트베드 건설은 필수적이다. 전차선로의 경간길이는 50m~55m로 제한하였고, 절연구분 장치의 경간길어도 제한하였다[Table 7].

[Table 7] Bridge types within catenary system test-bed

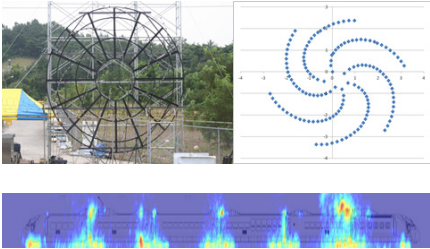
Section	Zone	Bridge superstructure type
Southbound (54k~82k)	Honam line 2-2	- PSC box girder (25m, 30m, 35m) - Rationalized plate girder (50m)
	Honam line 2-3	- Steel arch (80m) - PSC box girder (35m, 55m) - Extradosed (50m+80m+50m)
	Honam line 2-4	- PSC box girder (30m, 35m, 40m)
	Honam line 3-1	- PSC box girder (35m, 40m)
	Northbound (100k~128k)	Honam line 3-4
Northbound (100k~128k)	Honam line 4-1	- PSC box girder (25m, 30m, 35m, 40m) - Steel arch (70m) - Rationalized plate girder (50m)
	Honam line 4-2	- PSC box girder (40m)
		- 3 span continuous steel arch (130m) - Extradosed (75m+75m)

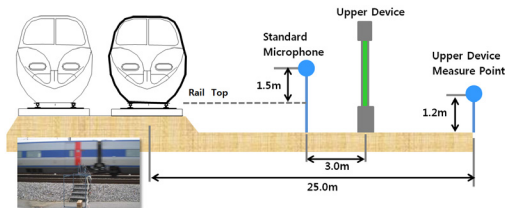
2.3 모니터링 계획

2.3.1 환경소음 모니터링

환경소음 저감을 위한 개발성과물의 성능평가를 위해서는 설치 전·후 소음측정 및 분석을 수행할 수 있는 주파수분석기와 음향측정센서를 가지고 400km 고속열차 음향특성을 규명 하였다. Table 8 같이 설치하여 모니터링하였다.

[Table 8] Description of environment noise monitoring system

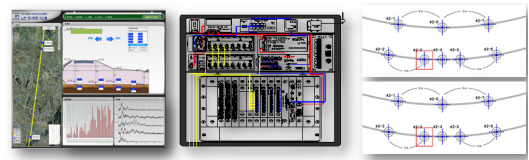
Items	Microphone
Use	Noise measurement sensor
Spec.	-frequency range: 20-10kHz, -dB range: 50-120dB -1/2 inch condenser type
Picture	



[Fig. 2] Noise barrier and upper barrier evaluation plan

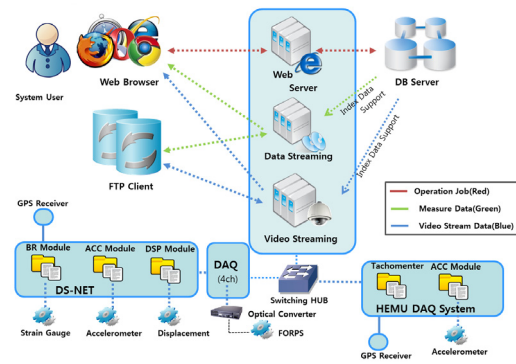
2.3.2 선로구축물 모니터링

궤도부의 측정은 테스트베드 직선구간 및 원곡선 구간(R=7,000m)에 대한 궤도거동특성 데이터를 수집하기 위한 센서를 부착하였으며 Fig. 3, 노반부는 성토부, 연약지반, 접속부 노반에서 실시되는데 증속을 위한 하중평가에 토압계가 매립되고 침하평가를 위해서는 지하수위계, 함수량계, 크로스홀 시험(crosshole test), 침하계를 센서로 선정하였다. 또한, 교량부는 처짐, 면틀림 등의 센서가 적합하지 않아 간접적인 변위 추정을 이용하였다.



[Fig. 3] Sensor installation plan of circular curved track section

고속으로 운행하는 열차하중에 응답하는 선로구축물의 동적인 거동을 계측하기 위해서는 경험상 1,000회/초 이상의 샘플링이 필요하다. 온도 등 정적 계측은 시간 당 1회 등 필요에 따라 측정되되, 선로구축물의 동적계측을 위해 설치되는 변형률계, 변위계, 가속도계 등은 모두 1,000회/초 만큼의 샘플링 속도 수준을 만족해야 하며, 이에 따라 각 시각별 센서 응답값을 파일 또는 DB에 기록한다.



[Fig. 4] Integrated monitoring plan of railway system

2.3.3 전차선로 모니터링

지상에서 측정되는 항복은 압상량 및 전차선의 변형률과 전차선로의 결합 검사가 있으며 압상량 측정에는 줄 변위계가 사용되면 비파괴 검사에는 열화상(Infrared) 진단 기술, 초음파 측정기술, 자외선 진단기술을 이용하여 전차선로의 결합 등을 측정한다. 차상 측정에는 접촉력과 이선아크를 측정하며 접촉력은 로드셀과 가속도계가 사용된다.

2.4 시범운영 관리방안

2.4.1 환경소음 운영 및 서비스 계획

수동으로 계측되는 소음측정시스템은 총 4개소(104k600, 107k400, 109k700, 121k800)에서 개별적으로 운영되며, 분석결과는 개별적으로 PC의 분석프로그램을

이용하여 수행되며 FTP를 통해 관리 서버시스템으로 전송된다. 서버시스템으로 전송·수집된 측정데이터는 대용량 저장장치와 DB로 관리된다. 데이터 저장단위는 1초/5분/1시간/1일 단위로 별도 테이블에 집계·저장한다[Fig. 5].



[Fig. 5] Monitoring System

2.4.2 선로구축물

궤도 모니터링 시스템은 선형별로 대표성을 갖는 원곡선부, 완화곡선부, 직선부에 대해 구축하며, 노반 모니터링 시스템은 노반특성별로 4개 단면으로 구분하여 토압계, 진동가속도계, 침하계, 온도계, 함수량계, 변형률계, 변위계, 강우량계, 등을 센서를 이용하여 모니터링 하였다. 교량 모니터링 시스템은 대표성을 갖는 PSC Box 교량 및 동적인 거동이 영향을 많이 미치는 Extradosed교와 소수주형교에 대해 링게이지, 변위계, 가속도계 등의 센서를 이용하여 모니터링 하였다.

2.5 통합상황실 구축

일반응용시스템은 클라이언트/서버 구조로 구성하고, 계측데이터 확인은 C/S로 구성하여 관제사가 신속하게 계측 데이터베이스에 접근하도록 하였다[Fig. 6].



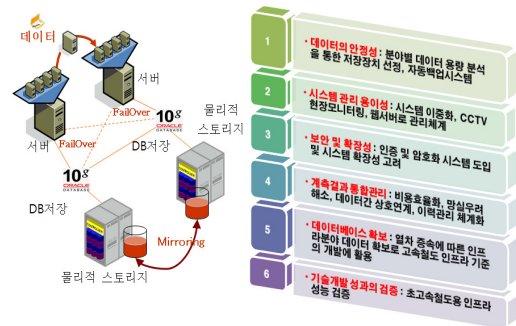
[Fig. 6] Maintenance application program layout

테스트베드 구간에 분야별로 구축 예정인 현장모니터링 시스템의 관리 용이성을 위하여 통합 모니터링 시스템 계획을 수립하였다. 통합 모니터링에 대한 계측관리는 한국철도기술연구원을 중심으로 이루어지며, HEMU-430x 차량의 시험 운행 계획은 철도기술연구원에 우선 통보 후 전파되도록 계획하였다.



[Fig. 7] Operation/maintenance scenario for the integrated monitoring system

통보된 시험운행 계획은 분야별 계측 주체 및 기관(철도공사, 철도시설공단 등)에 전파되며, 알려진 운행 계획을 기반으로 수립된 계측계획은 연구원으로 보고되어 승인 후 현장모니터링에 적용하도록 하였다.



[Fig. 8] Total Integrated Monitoring System

분야별 현장 측정과 동시에 통합 모니터링 DB에 시험 운행 계획에 따른 기본 데이터 입력과 등록을 연구원에 수행하고, 분야별 현장 계측 데이터 및 분석 데이터를 추후에 통합 모니터링 DB에 입력하도록 계획하였다. Fig. 7은 통합 모니터링의 계측 관리 계획에 대한 시나리오를 도식화 하였다.

3. 결론

호남고속철도 건설공정에서 HEMU-430x 차량의 시험 운행 계획 맞춰 분야별(환경소음, 선로구축물, 전차선) 성과물의 검증을 위하여 테스트베드 구간을 선정하였다. 테스트베드 구간은 TPS분석 결과 400km/h 운행이 가능하며, 모니터링이 필요한 구조물의 포함여부를 검토하여 선정하였다. 선정된 구간은 상행선(100~128km), 하행선(56~84km)을 선정하였으며, 모니터링 위치는 환경소음 분야 4개 지점, 선로구축물(궤도, 노반, 교량) 분야 9개 지점, 전차선 분야 등으로 설계하였다.

환경소음 분야는 400km/h 운행을 위한 소음 저감장치(방음벽 상단장치, 흡음블록), 소음 예측모델, 기여도 분석 시스템의 성능검증 및 평가를 위하여 4개 지점, 6개소에 대하여 구축하였으며, 통합테스트베드 모니터링 시스템을 구성하였다.

References

- [1] Yang Ok-Yul, et., 'Development of large-scaled integrated measurement database middleware on 400km/h speed', 4th WCSE2013, 3-4th, November, 2013.
- [2] Yang Ok-Yul, et., 'A Study of Integrated Monitoring System for High-Speed Railway Infrastructure Test-bed.', 8th ICCCT2013, 14-16th, September, 2013.
- [3] Darmstadter, J. 'High-Speed Rail Passions California is planning the construction of a high-speed rail link between San Francisco and Los Angeles, but transforming the Northeast Amtrak Corridor into the first US test case for high-speed rail may be a smarter option', RESOURCES–WASHINGTON DC-, Vol. No.181, RESOURCES FOR THE FUTURE, 2012.
- [4] Hyoung-Hoon Kim, 'Comparison of design characteristics on highspeed trains in Korea and Germany : with focus on KTX and ICE', Dept. of Railroad Culture, Design & Technology, Graduated School of Railroad Culture & Technology, Seoul National University of Technology.
- [5] Yang Jun, 'Chinese Sustainable Development and Prospects of High-speed Railway', Dept. of Civil and Environment Engineering Railway Structure & Track, Graduate School of Paichai University, 2009.
- [6] High-Speed Rail, Federal Railroad Administration Retrieved 2007-05-02.
- [7] The Line, HSL-Zuid, Retrieved on 2009-07-05.
- [8] Type N700 bullet train goes services. The Japan Times

Online, July 2, 2007, Retrieved.

- [9] Great Speed Off The Central ; Empire State Express Engine Travels at the Rate of 112 1-2 Miles and Hour, Retrieved 2007-12-13.
- [10] C.Mellet, 'High speed train noise emission', Journal of sound and vibration 293, p542

황 경 훈(Kyung-Hun Hwang)

[정회원]



- 2004년 2월 : 원광대학교 석사 졸업
- 2004년 3월 ~ 현재 : (주)승화프리카 재직 중

<관심분야>

토목구조, 교량공학, IT

박 선 규(Sun-Kyu Park)

[정회원]



- 1994년 10월 : 독일 TU BERLIN (공학박사)
- 1995년 9월 ~ 현재 : 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수

<관심분야>

토목구조, 교량공학

송 병 근(Byung-Keun Song)

[정회원]



- 2012년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교 초고층장대교량학과 재학 중

<관심분야>

토목구조, 교량공학

양 옥 렬(Ok-Yul Yang)

[정회원]



- 1997년 2월 : 원광대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)
- 2010년 8월 : 경희대학교 의료경영대학원(Medical MBA)
- 2002년 2월 : 원광대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)
- 1998년 3월 ~ 2000년 8월 : BNS Media Tech.(대표)
- 2000년 8월 ~ 2003년 2월 : (주)휴먼미디어테크(연구소장)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 해전대학교 보건의료정보과(부교수)

<관심분야>

신호처리, 의료정보, HIS, OCS, EMR