

BWIM 시스템을 사용한 사장교의 차량하중 분석

Vehicle Load Analysis using Bridge-Weigh-in-Motion System in a Cable Stayed Bridge

박민석¹⁾ · 이정휘²⁾ · 김성곤³⁾ · 조병완⁴⁾

Park, Min-Seok · Lee, Jung-Whee · Kim, Sung-Kon · Jo, Byung-Wan

국문 요약 >> 본 논문에서는 교량 모니터링 시스템의 일부분으로 서해대교에 설치된 교량 하중측정 시스템(BWIM system)으로부터 획득한 신호를 분석하여 통행차량의 정보를 추출하기 위한 알고리즘의 개발 과정과 이를 위해 수행한 현장 차량주행시험에 대하여 기술하였다. 개발된 BWIM 시스템은 포장층에 매설하는 축감지기가 없는 형태로, 바닥판과 가로보에 설치된 변형률계로부터 측정된 시간이력 변형률신호만을 이용하였다. 이들 측정신호로부터 추출하고자 하는 차량의 정보는 통과차로, 통과속도, 차 축수 및 총 중량이며, 이들 정보의 추출을 위해 패턴인식기법의 일종인 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN) 기법을 사용하였다. 현장 차량주행시험을 통하여 지지차량 및 미지차량 통행시의 BWIM 응답 데이터를 측정하였으며, 이들 실측데이터를 사용하여 인공신경망의 학습 및 성능검증을 수행하였다. 개발된 기법을 사용하여 추출되는 차량의 정보들은 현재의 교량상태 및 피로수명 평가시 활용될 수 있을 것이며, 향후 설계트럭 하중모델의 개정시 기초자료로도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 교량 하중측정 시스템, 사장교, 인공신경망, 시간이력 변형률신호

ABSTRACT >> This paper describes the procedures developing the algorithm for analyzing signals acquired from the Bridge Weigh-in-Motion (BWIM) system installed in Seohae Bridge as a part of the bridge monitoring system. Through the analysis procedure, information about heavy traffics such as weight, speed, and number of axles are attempted to be extracted from time domain strain data of the BWIM system. One of numerous pattern recognition techniques, artificial neural network (ANN) is employed since it can effectively include dynamic effects, bridge-vehicle interaction, etc. A number of vehicle running experiments with sufficient load cases are executed to acquire training and/or test set of ANN. Extracted traffic information can be utilized for developing quantitative database of loading effect. Also, it can contribute to estimate fatigue life or current health condition, and design truck can be revised based on the database reflecting recent trend of traffic.

Key words bridge weigh-in-motion system (BWIM system), cable-stayed bridge, artificial neural network (ANN), time history strain signal

1. 서론

산업발달로 인한 물류이동의 증가로 도로에는 화물트럭의 증가가 두드러지고 있다. 이러한 화물트럭들은 교량에 직접적인 영향을 주는 지배 하중으로 시방서에 설계 활하중

으로 정의되어 있으며, 이를 토대로 교량의 설계 및 유지관리시 사용되어 왔다. 그러나 현행 도로교설계기준에서 제시한 설계 차량하중은 주로 외국의 과거자료를 토대로 만들어진 기준을 국내에 그대로 도입한 것으로 국내의 실정과는 상이할 수가 있다. 특히 기준된 측정 자료가 수십년 전의 자료라면 오차의 범위는 더욱 커질 수가 있다. 따라서, 본 연구에서는 실제 교량상을 주행중인 차량하중의 속도, 중량, 축간격 등의 정보를 알아 낼 수 있는 분석기법을 개발하고자 하였다.

현재 이러한 목적을 위해 사용중인 방법은 WIM(weigh-in-motion) 시스템을 이용하는 방법이다. 가장 많이 사용하는 것은 고정식 WIM 시스템으로 일정한 장소의 도로 포장

¹⁾ 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, 한양대학교 토목공학과 박사 수료

(대표저자: BMS@freeway.co.kr)

²⁾ 정회원·RIST 강구조연구소 선임연구원, 공학박사

³⁾ 정회원·서울산업대학교 구조공학과 교수, 공학박사

⁴⁾ 정회원·한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 10. 10 / 심사종료일 : 2006. 11. 14)

층에 축중계를 매설한 후 이곳을 지나는 화물트럭에 대해 저속 또는 정지 상태에서 차량의 중량을 측정한다. 이러한 방식은 정확한 차량의 중량을 측정할 수 있는 장점이 있어 과적단속용으로 많이 사용하고 있지만 교량이나 포장공학 측면에서 보면 통계자료로서는 편중된 자료를 얻게 되는 단점이 있다.

WIM 시스템은 고속도로 톨게이트나 국도 과적단속검문소 같은 측정 위치가 화물차 운전자의 눈에 쉽게 띄는 장소에 설치가 되어 운전자가 과적단속을 회피하고자 하는 노력을 보이게 된다. 축 조작이나 우회도로 이용 등으로 인해 신뢰할 수 있는 실제 주행중인 차량의 하중자료 획득이 어렵고 차량 속도, 차축 거리, 차간 거리 등의 교통 통행 정보도 얻을 수가 없다.

이러한 단점을 해결하고자 고정식 WIM 시스템을 개선하고자 하는 연구가 이루어지고 있는데 대표적인 것이 고속용 WIM 시스템이다. 과적단속을 위하여 일정한 장소로 화물트럭을 유도하여 계측하는 것이 아니라 도로상 포장층에 고속 축중계를 매설하여 주행중인 화물트럭의 중량을 바로 측정하고 루프 검지기 등을 통해 차량 속도, 차축 거리, 차간 거리 등을 계산하게 된다. 이러한 고속용 WIM 시스템은 차량과 도로면(또는 교량)의 동적인 상호작용을 정밀하게 반영하여야 하므로 개발하기가 쉽지 않고 아직은 정확도가 높지는 않아 이를 향상시키고자 하는 연구가 1990년대부터 유럽을 중심으로 진행되고 있다(COST 323 Project, 1993~1996; WAVE Project, 1996~1999 등).

이러한 포장층에 직접 축중계를 매설하여 차량의 중량을 계측하는 방법 외에도 교량을 저울로 이용하여 주행중인 차량의 중량을 계측하는 방법이 있는데 이를 BWIM(Bridge weigh-in-motion) 시스템이라고 한다. 교량 거더 하부에 설치한 변형률계를 통해 얻은 변형률 신호를 이용하여 교량에 주행중인 차량의 중량을 계측하는 방법으로 1979년 미국의 F. Moses 등(1972)에 의해 처음 시도된 후 여러 나라(호주 Peters, 1986; 슬로베니아 Znidaric, 1991; 아일랜드 Dempsey, 1995 등)에서 개발하여 사용하였다. 고속 WIM시스템과 BWIM시스템 모두 주행 중인 차량에 대한 하중정보를 실시간으로 획득하는데 있어서는 같은 목적을 갖고 있으나 포장층에 설치한 축중 센서를 통해 차량하중정보를 수집하는 고속 WIM시스템과 달리 BWIM시스템은 교량 자체를 저울로 이용함으로써 접근방식에는 큰 차이가 있다. 전통적인 BWIM 시스템은 축중 측정을 위하여 교량 거더에 설치한 종방향 변형률계를 이용하였으며 차량 속도, 차축 거리, 차간 거리 등을 계산하기 위해서 축감지기를 포장층에 설치하였다. 축중 계산시 교량의 영향선을 이용하는데 이때

교량과 차량의 동적거동의 영향을 전혀 고려하지 않게 되므로 오차를 수반하게 되어 정확도가 높지 않은 단점이 있다.⁽¹⁻³⁾

이러한 초기 BWIM 시스템의 정확성을 향상시키기 위하여 유럽연합의 18개국 연구소, 미국의 NCHRP, 호주의 ARRB, 일본의 토목연구소 등에서 많은 연구를 수행하였다. 이중 슬로베니아 ZAG 연구소 등에서 수행한 BWIM 편차조정에 대한 연구, 프랑스 LCPC에서 수행한 다중센서 BWIM 연구, 아일랜드 TCD/UCD 연구소에서 수행한 동적모형 및 최적화 알고리즘 연구 등이 주목할 만하다.⁽⁴⁾ 이밖에도 연행 차량의 운행시 정확성 향상을 위한 2차원 교량모델연구, 변형률계이지 대신에 광섬유센서를 사용한 연구 등이 진행되고 있다.

축감지기가 포함된 BWIM 시스템의 경우에는, 상당한 양의 데이터를 축적하여 통행특성분석⁽⁵⁻⁷⁾ 및 피로하중 모형을 제안한 사례가 있었다.⁽⁸⁾ 그러나, 기존의 연구는 주로 단경간의 단순교를 위주로 수행되어 왔으며, 기본적으로 영향선의 개념으로부터 출발하고 있기 때문에, 사장교와 같이 구조적으로 복잡하고 경간이 긴 구조물에 적용하기에는 어려움이 있었다.

이에 본 연구에서는 하드웨어적으로는 기존의 교량 거더 종방향 변형률과 축감지기를 사용하는 방법⁽⁹⁾을 개선한 교량 가로보의 횡방향 변형률과 바닥판의 종방향 변형률을 이용하고, 소프트웨어적으로는 신호의 분석시 사용한 알고리즘을 기존의 정적방법인 영향선 적용 대신에 동적 특성을 고려할 수 있는 패턴인식 기법의 일종인 신경망기법을 적용한 새로운 개념의 축감지기 없는 BWIM 시스템(FAD-BWIM : Free of Axle Detector BWIM)을 개발하였다. 이를 통해 전통적인 BWIM 시스템에서 문제가 되었던 포장층 축감지기의 설치 및 관리에 따른 어려움이 해소될 수 있고, 교량-차량 상호작용을 포함한 동적효과가 반영됨으로써 보다 정확한 분석이 가능하다. 이러한 방법은 사장교와 같이 거더와 바닥판의 강성이 상대적으로 크지 않은 구조물에 적용하기에 더욱 효과적인 것으로 볼 수 있다.

2. 계측 시스템의 구축

서해대교는 서해안고속도로 중 아산만 상에 놓인 총연장 7,310km의 왕복 6차선의 교량으로, 사장교(990m), PSM교(5,820m), FCM교(500m) 등으로 구성되어 있다. 서해대교의 모니터링 시스템 및 교량 유지관리시스템에 관한 자세한 내용은 이전의 논문에서 소개된 바 있으므로^(9,10), 여기서는 BWIM 시스템과 관련하여 설치된 계측 시스템에 대하여 다

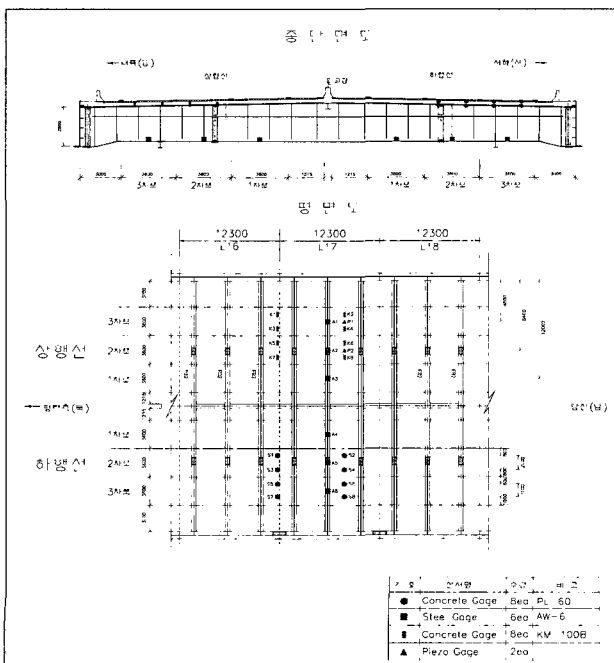
음의 표 1 및 그림 1에 간략히 정리하였다.

계측시스템은 센서와 데이터 획득시스템으로 이루어진다. 센서는 바닥판의 2, 3차로 해당 위치에 총 16개 설치되었으며(K1~K8, S1~S8), 일정 간격을 두고 2열로 배치하여 차량의 통과속도에 따른 시간차를 관찰할 수 있도록 하였다. 가로보에 설치된 6개의 변형률계는(A1~A6) 차량의 통행에 따른 가로보의 휨 변형을 관찰하고 이로부터 통과차량의 중량을 추정하기 위한 목적으로 설치되었다.

〈표 1〉 센서 배치 및 수량

방향	센서 위치		수량	센서ID*
	단면	차선		
상행선	L16	1차선	-	-
		2차선	2	K5, K7
		3차선	2	K1, K3
	L17	1차선	1	A3
		2차선	4	K6, K8, A2, P2
		3차선	4	K2, K4, A1, P1
하행선	L16	1차선	-	-
		2차선	2	S1, S3
		3차선	2	S5, S7
	L17	1차선	1	A4
		2차선	3	S2, S4, A5
		3차선	3	S6, S8, A6

* K: 콘크리트 매립형, A: 스틸 용접형, S: 박막형, P: 압전형



〈그림 1〉 센서 위치도

3. 현장 차량주행시험

3.1 시험차량 주행시험

시험차량을 사용한 주행시험은 서해대교 사장교 구간의 상행선과 하행선에서 수행하였으며, 사전에 하중을 적재하고 계량이 완료된 3축, 4축, 및 5축의 대형 덤프트럭을 사용하였다. 시험차량은 서해대교 사장교에 진입하기 위해 서해안 고속도로의 서평택IC와 송악IC를 경유하여 왕복 주행하였으며, 주행상황은 현장에서 캠코더로 녹화하여 측정자료의 분석 시 참고하였다. 주행속도는 각 차선별로 60km/h, 70km/h, 및 80km/h로 하였다. 시험차량의 제원을 다음의 표 2에 예시하였다.

시험차량의 주행은 크게 속도별, 차선별로 구분하여 실시하였으며, 3대의 차량이 일정 간격으로 주행차선을 통과하도록 유도하여 시험을 수행하였다. 각 주행 형식별 측정횟수는 표 3과 같다. 1차 주행시험은 2005년 9월 13일~15일에 수행되었으며, 이 때 획득하지 못한 시험 케이스는 2005년 10월 11일~12일 수행된 2차 시험에서 보충하였다.

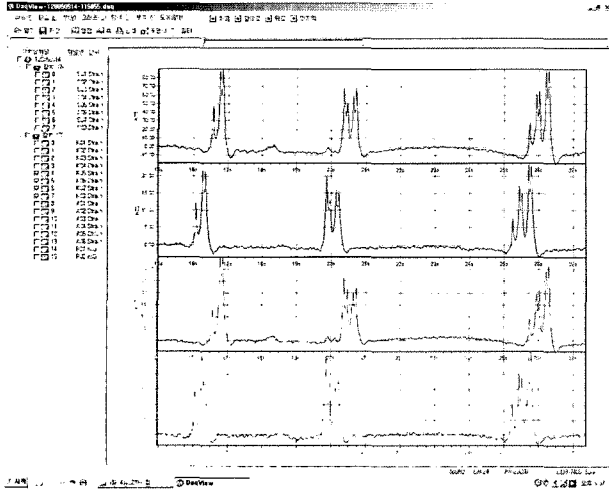
주행차선 및 속도별 측정을 통해 얻어진 측정 자료들은 실시간으로 현장에서 확인이 가능하며, 디지털 데이터로 저장하여 추후에 분석하였다. 다음 그림 2~그림 3에 대표적

〈표 2〉 시험차량 제원 (1차 주행시험)

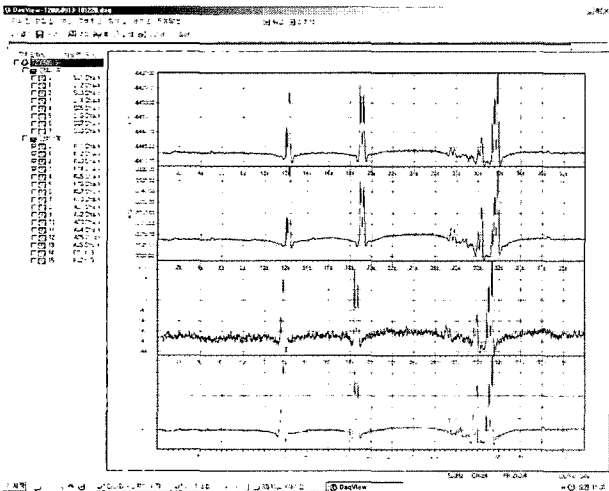
차축 구성	차량 외형	총 중량
3축		24,550kgf
4축		30,600kgf
5축		40,760kgf

〈표 3〉 시험차량 주행시험 획득 데이터 수량(괄호는 단독주행인 경우)

통과 차로	2005년	2006년	계
상행 2차로	45 (34)	-	45 (34)
상행 3차로	45 (29)	26 (13)	71 (42)
하행 2차로	51 (35)	-	51 (35)
하행 3차로	45 (26)	24 (6)	69 (32)



〈그림 2〉 상행선 2차로 60km/hr 주행 측정 자료 예



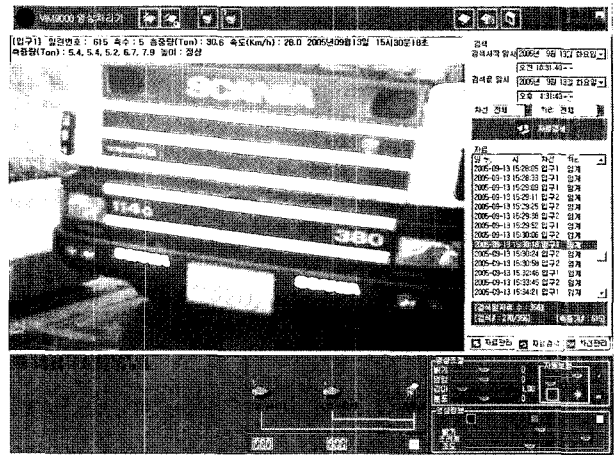
〈그림 3〉 상행선 3차로 60km/hr 주행 측정 자료 예

인 데이터의 형태를 보였다.

3.2 임의차량 주행시험

시험차량의 반복주행을 통하여 얻어지는 데이터만으로는 다양한 중량, 축수, 및 속도 등의 자료를 확보하기 어려우므로, 임의차량이 통과할 때에도 신호의 측정을 수행하여 자료의 일반성을 높이도록 하였으며, 이 경우에는 송악 및 서평택 IC의 톨게이트에 설치된 고정식 축중계 자료를 활용하여 BWIM 시스템의 분석결과와 비교하였다.

2005년도의 시험차량 주행시험 수행 시 임의차량에 대한 측정도 병행하였으나 충분한 수를 확보하지 못하여, 2006년 4월 26일~28일 3일간 임의차량에 대한 측정을 위주로 하는 3차 시험을 수행하였다. 다음의 표 4에는 2005년(1차, 2차) 및 2006년(3차) 주행시험 시 획득한 임의차량 데이터의 수량을 정리하여 나타내었다.



〈그림 4〉 송악C 고정식 축중계 측정자료 예

〈표 4〉 임의차량 주행시험 획득 데이터 수량(괄호는 단독주행인 경우)

통과 차로	2005년	2006년	계
상행 2차로	5 (5)	26 (16)	31 (21)
상행 3차로	21 (21)	107 (64)	128 (85)
하행 2차로	-	4 (4)	4 (4)
하행 3차로	-	26 (20)	26 (20)

4. 차량 통행정보 추출 알고리즘

수집된 데이터로부터 통과차량의 정보를 추출하는 알고리즘을 개발하기 위해 3장에 기술한 과정을 통하여 수집된 시험차량과 임의차량의 데이터 중 독립주행인 경우만을 전처리 과정에서 따로 분류하여 활용하였다. 여기서 독립주행은 분석하고자 하는 2초간의 측정 데이터 구간 내에 분석대상인 차량 1대 이외에 다른 차량의 통과에 의하여 발생된 신호가 포함되어있지 않은 경우를 뜻한다. 전처리 과정에서 분석대상 차량의 앞이나 뒤에 다른 차량이 근접하여 주행한 경우(연행)나 다른 차선에 주행한 경우(병행)로 분류된 데이터는 분석 알고리즘의 개발에 사용하지 않았다.

개발된 알고리즘의 프로그래밍에는 Matlab을 사용하였다.⁽¹¹⁾

4.1 통과차로의 판별

통과차로의 판별은 콘크리트 바닥판에 설치된 16개의 변형률계 신호의 분석을 통하여 수행하며, 인공신경망 기법을 사용하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이, 16개의 변형률계는 상행선 2, 3차로와 하행선 2, 3차로에 각각 4개씩 배치되어 있으므로, 통과차로의 판별기능은 신호가 검출되는 채널을 확인하는 간단한 과정을 통하여 어려움 없이 구현이 가능하였다.

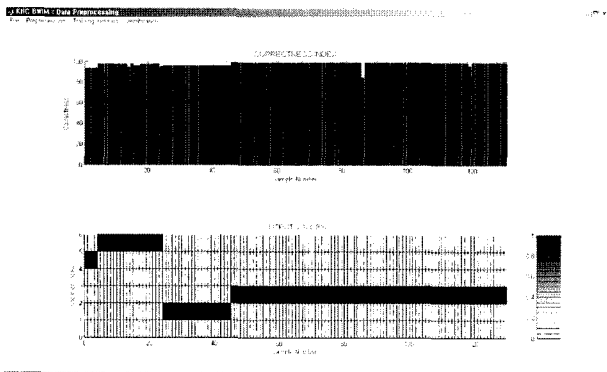
신경망의 입력값은 16개 변형률계 각각에서 측정된 최대 변형률 값으로 하였으며, 10개의 절점을 갖는 1개의 은닉층과 6개의 절점을 갖는 출력층으로 신경망을 구성하였다.

신경망의 학습을 위해 시험차량 통과시 획득한 총 120set (차선당 30set)의 데이터를 사용하였으며, 학습이 완료된 신경망의 성능은 학습에 사용하지 않은 시험차량 데이터 및 임의차량 데이터를 사용하여 확인하였다. 다음의 그림 5에 총 130set의 임의차량 데이터에 대한 통과차로 판별 결과를 보였으며, 그림에서 판별의 정확도는 이전의 논문에서 사용하였던 정확성 지수(correctness index)를 사용하여 표시하였다.⁽¹²⁾ 그림에 나타난 바와 같이 전체 130회의 판별에 대하여 모두 정확한 결과를 나타내었다.

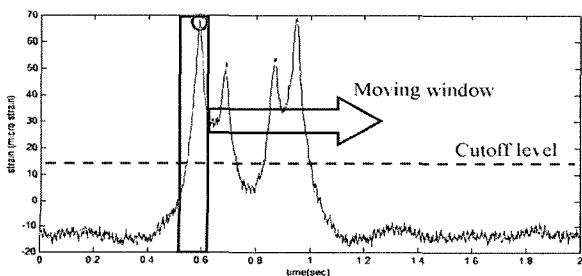
4.2 차속 수의 판별

통과 차량의 축 수를 판별하기 위해 피크 검출 알고리즘을 사용하였다. 다음의 그림 6에 보인 바와 같이 피크 검출 알고리즘은 일정한 폭의 윈도우가 Δt 간격으로 이동하며 매 시간 최대값의 위치를 기록하고, 연속적으로 윈도우 폭과 같은 수의 피크 위치가 기록되면 그 지점을 피크로 인식하게 된다.

피크인식의 정확도를 향상시키기 위해 cutoff level을 설정하여 이 값보다 작은 피크값이 검출될 경우 이를 피크로



〈그림 5〉 임의차량에 대한 통과차로 판별 결과



〈그림 6〉 피크검출 알고리즘 개념

인식하지 않도록 하였다.

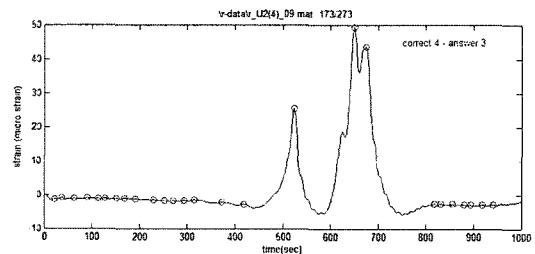
피크인식의 정확도는 윈도우의 폭과 cutoff level에 따라 달라지며, 이 연구에서는 여러 번의 시행을 통해 윈도우의 폭은 20 sample(0.4초), cutoff level은 최대값의 20%로 설정하였다.

독립주행인 시험차량과 임의차량의 데이터에 대하여 차속수의 판별을 수행하였으며, 시험차량의 경우 총 143회의 판별 중 9회의 잘못된 판별결과가 나타났으며, 임의차량의 경우는 총 130회 중 14회의 잘못된 판별결과가 나타났다. 따라서 전체적으로 90%이상의 정확성이 얻어졌다. 차속수를 잘못 판별하는 경우의 대표적인 예를 그림 7에 나타내었다.

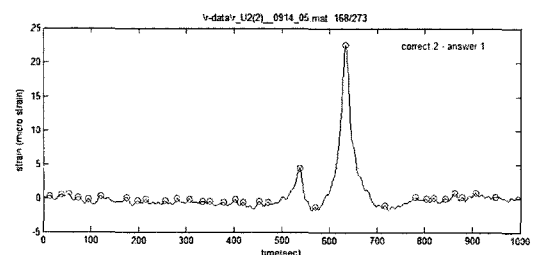
4.3 통과 속도의 계산

4.1절의 통과차로 판별 신경망을 사용하여 차량이 통과한 차로가 판별되면, 해당 차로의 두 채널의 신호 사이에서 나타나는 시간차이와 각각의 채널에 연결된 센서 사이의 거리로부터 통과속도의 계산이 가능하다.

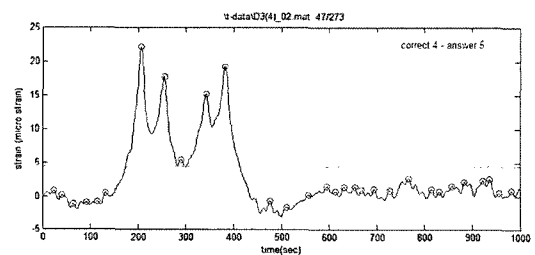
두 채널의 시간차를 계산하기 위해 한 채널을 고정시키고



(a) 인접한 축중이 매우 작은 경우

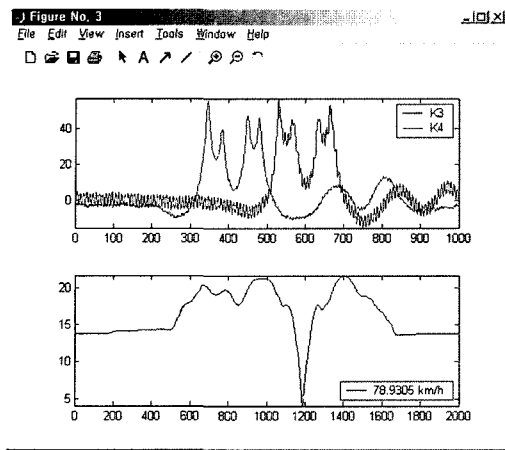


(b) 축중이 cutoff-level 이하인 경우



(c) 노이즈의 영향이 심한 경우

〈그림 7〉 축 수를 잘못 판별하는 데이터 사례



(그림 8) 통과속도의 계산

다른 한 채널을 시간축에서 이동시키며, 두 채널 사이의 오차가 최소가 되는 시점을 찾는 방법을 사용하였다. 이러한 방법을 사용하여 시차가 얻어지면, 두 센서사이의 거리 8.2m와 얻어진 시차를 사용하여 다음의 식으로부터 통과속도를 계산할 수 있다.

$$v(\text{km/hr}) = \frac{8.2 \times 10^{-3}(\text{km})}{\Delta t(\text{sec})} \times 3600(\text{sec/hr})$$

4.4 총 중량 계산

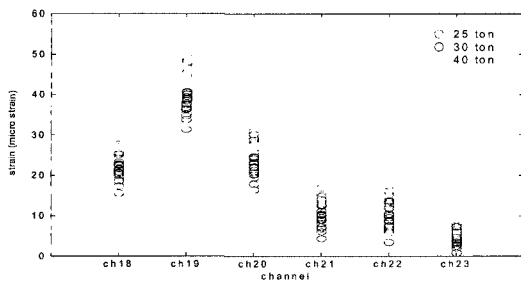
총 중량의 계산을 위해 사용한 신호는 기본적으로 가로보의 하부플랜지에 부착된 6개의 변형률계로부터 얻어지는 동

적 변형률 신호이며, 이에 추가로 콘크리트 바닥판의 변형률, 차량의 통과속도, 그리고 피크지속시간을 보조적으로 사용하였다.

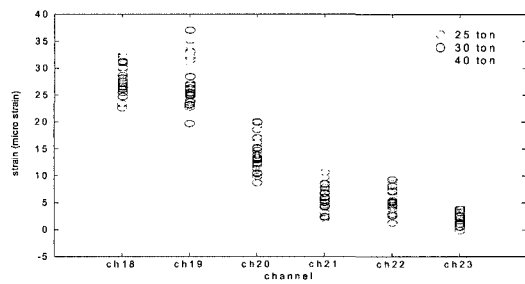
가로보의 변형률은 바닥판의 변형률과는 달리 통과차량의 차륜하중에 덜 민감하게 반응하여 총 중량의 검출에 보다 효과적으로 활용될 수 있다. 다시 말해, 바닥판 변형률의 경우는 각각의 차축에 대하여 각각의 침두값이 검출되고, 침두값의 크기는 차축의 중량(축중) 뿐만 아니라 센서에 대한 차량의 상대적 위치에 의해서도 영향을 받게 되어, 같은 축중의 차량이 통과하더라도 다른 크기의 침두값이 얻어질 가능성이 많다. 반면에 가로보의 변형률은 가로보의 휨 거동에 의해 지배를 받기 때문에 통과차량의 총 중량에 가장 큰 영향을 받게 된다.

다음의 그림 9에 각 주행 차로별 통과차량의 총중량과 가로보 변형률계의 최대값 분포를 나타내었다. 그림에서 보인 바와 같이 통과차로에 설치된 변형률계에서는 이외의 차로에 비해 더욱 큰 변형률 값이 검출되며, 그 값이 총중량과 비례하여 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 상행선과 하행선에 대하여 서로 대칭의 응답을 보임을 확인할 수 있다.

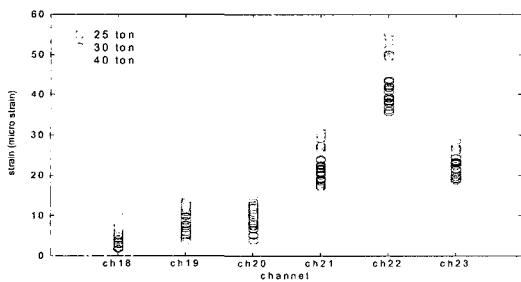
가로보의 변형률 응답은 주행차량의 속도 및 그에 의한 동적효과에 의해 증폭될 수 있으며 이러한 영향을 반영하기 위해 차량의 통과속도를 신경망의 입력변수에 추가하였다. 또한, 축간 거리가 특히 긴 트레일러와 같은 차량이 통과하는 경우 총 중량을 과소평가하는 문제를 해결하기 위하여



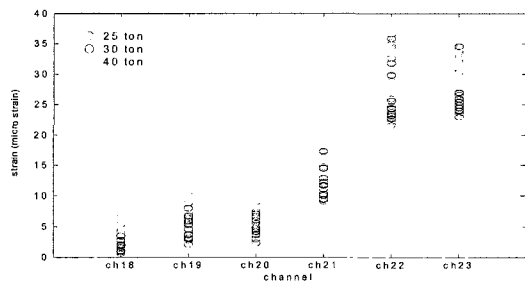
(a) 상행선 2차로 주행



(b) 상행선 3차로 주행



(c) 하행선 2차로 주행



(d) 하행선 3차로 주행

(그림 9) 총중량에 따른 가로보 변형률 응답변화

그림 10에 나타난 것과 같은 개념의 피크지속시간을 입력변수에 추가하였다. 피크지속시간의 계산을 위한 첨두값에 대한 응답비율은 60%로 하였으며, 최적의 중량판별 성능을 얻기 위한 응답비율의 결정은 추가의 변수연구를 통하여 가능할 것으로 판단된다.

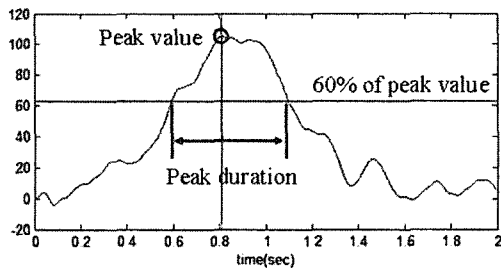
최종적으로 결정된 중량판별 신경망의 입력은 다음의 표 5에 정리한 바와 같이 총 6개의 값으로 구성되는 벡터이다. 따라서 최종적으로 사용된 신경망은 6개의 절점을 갖는 입력층과, 10개의 절점을 갖는 1개의 은닉층, 그리고 1개의 절점을 갖는 출력층을 갖도록 하였으며, 출력층의 1개 절점에서는 통과차량의 총 중량이 출력되도록 구성하였다.

제안된 중량판별 알고리즘 검증에 위해 사용한 데이터 세트는 표 6에 나타난 것과 같이 상행선 3차로를 통과한 시험차량 및 임의차량에 대한 2005년, 2006년 측정자료이며, 2005년 임의차량 데이터(R-05)를 사용하여 학습을 수행한 경우와 2006년 임의차량 데이터(R-06)를 사용한 경우에 대한 성능을 비교하였다.

그림 11은 2005년 임의차량 데이터(R-05)를 사용하여 학습을 수행한 경우에 대한 결과이다. 그래프에서 x축은 고정식 축중계 또는 계량소에서 얻은 총 중량이며, y축은 이 연구의 중량판별 알고리즘으로부터 얻어진 총 중량을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 R-05를 사용하여 학습을 수행한 경우 T-05와 R-05에 대해 대부분의 판별결과가 20% 오차

선(빨간색 선) 안쪽으로 들어오는 것을 확인할 수 있다. 이러한 판별오차는 송악 및 서평택 영업소에 설치된 고정식 축중계에서 얻은 총중량과 BWIM 시스템에서 얻은 총중량 사이의 오차이다. 사용한 고정식 축중계가 속도에 따라 5~10% 오차범위를 가지고 있으므로, 이 결과만을 가지고 BWIM 시스템의 정확도를 언급하기는 어려워 이에 대한 보정이 필요하다.

또한, 05년 임의차량 데이터를 사용하여 학습된 신경망으로 06년 데이터의 중량분석을 수행한 결과, 06년 데이터에 대해서는 전체적으로 고정식 축중계의 값보다 낮게 판별하는 경향을 보였으며, 2006년 임의차량 데이터(R-06)를 사용하여 신경망을 학습한 경우(그림 12)는 이 경우와 반대로, 05년 데이터에 대해 전체적으로 고정식 축중계의 값에 비해 크게 평가되는 경향을 보였다. 이로부터 05년과 06년 데이터 사이에 데이터 변화가 발생된 것을 확인할 수 있으며, 이에 대한 원인은 계절적 요인 또는 센서의 장기 열화 등에 인한 것으로 추정할 수 있다. 따라서, 이러한 연간 데이터 변화의 원인을 정확하게 파악하고, 장기 예측에 본 기법을 활용하기 위해서는 분기당 1회 이상의 임의차량 주행시험을 수행하여 그 결과의 비교 분석을 수행할 필요가 있다. 바닥판 변형률신호를 이용하여 축 중량을 산정하는 연구가 진행중이다.



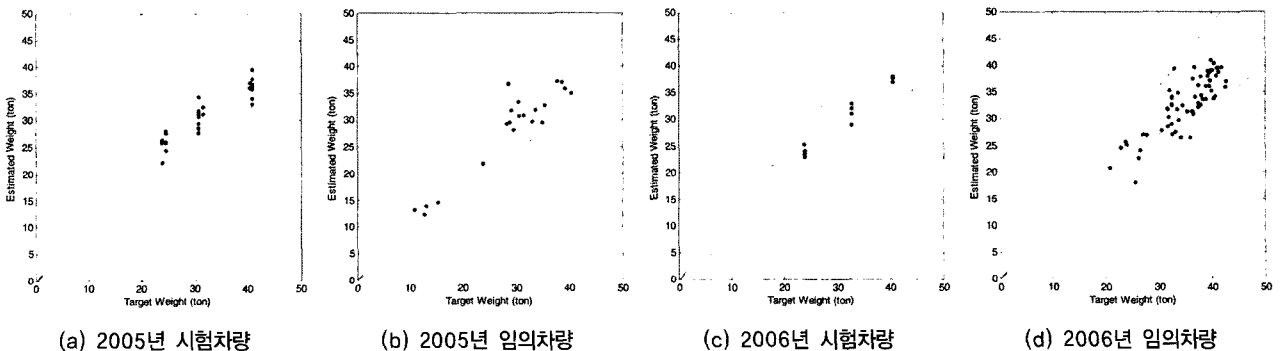
〈그림 10〉 피크지속시간의 개념

〈표 5〉 중량판별 신경망의 입력변수

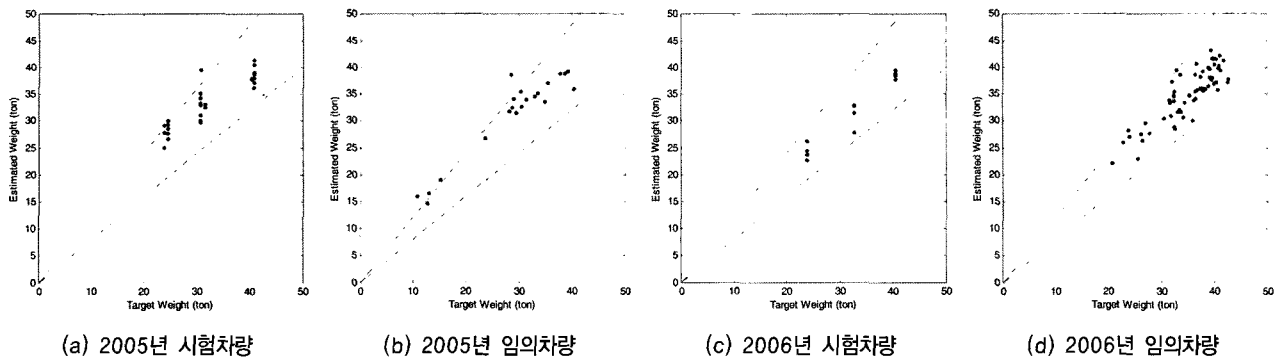
변수 종류	데이터 수
통과 행선의 가로보 변형률	3
통과 속도	1
피크 지속시간	1
각 축의 최대 바닥판 변형률 합	1

〈표 6〉 중량판별에 사용한 데이터 set(상행선 3차로 통과)

구분기호	측정연도	차량구분	데이터 수
T-05	2005	시험차량	29
R-05	2005	임의차량	21
T-06	2006	시험차량	13
R-06	2006	임의차량	64



〈그림 11〉 2005년 임의차량 데이터로 학습한 신경망을 사용한 중량판별 결과



〈그림 12〉 2006년 임의차량 데이터로 학습한 신경망을 사용한 중량판별 결과

5. 결론

이 논문에서는 교량 모니터링 시스템의 일부분으로 서해대교에 설치된 교량 하중측정 시스템(BWIM system)으로부터 획득한 신호를 분석하여 통행차량의 정보를 추출하기 위한 알고리즘의 개발 과정에 대하여 기술하고, 개발된 알고리즘을 사용하여 주행시험의 데이터를 분석한 결과를 논하였다.

본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 서해대교와 같은 형식의 케이블교량의 경우 가로보에 부착된 횡방향 동적 변형률 신호를 사용하여 평균 오차를 10% 수준의 총중량 측정이 가능함을 확인하였다.
- (2) 슬래브에 부착된 변형률 신호를 사용하여 통과차량의 주행차로와 축수 및 통과속도를 정확하게 파악할 수 있었다.
- (3) 교량 및 차량의 동적거동에 의한 영향을 반영하기 위해 통과속도를, 축간 거리의 영향을 반영하기 위해 피크지속시간을 입력변수에 추가하였으며, 이에 의해 중량 판별의 정확도가 향상되었다.
- (4) 2005년도와 2006년도 측정 데이터를 사용한 중량 판별 결과, 두 해의 측정 데이터 사이에 차이가 있는 것으로 나타났으며, 이에 대한 추정원인은 계절적 요인 또는 센서의 장기적인 열화 등이다. 정확한 분석을 위한 추가의 주행시험이 수행 중에 있다.

본 연구에서 제안된 기법을 서해대교 모니터링 시스템에 연계하기 위한 후속 연구가 진행 중에 있고 축간 거리를 고려한 합리적인 차종 분류 및 축중 계산을 위한 연구가 수행 중에 있다. 본 시스템을 통하면 화물트럭 운전자의 사전 인식 없이 차량하중 정보가 수집 가능하므로, 기존의 WIM 시스템에 비해 왜곡이 적은 데이터의 축적이 가능할 것으로 기대된다. 차량하중 자동분석 프로그램이 개발되어 현장에 적용되면 장기적인 데이터의 축적 및 분석이 이루어져 향후 설

계 활하중의 개정시 유용한 데이터를 제공할 수 있으며 또한 교량 성능 평가시에도 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. Moses, F., "Weigh-In-motion System Using Instrumented Bridge," *Transportation engineering journal*, ASCE, Vol. 105, TE3, 1979.
2. Peters, R.J., "CULWAY-an Unmanned and Undetectable highway speed vehicle weighing system," in *Proceedings of the 13th ARRB Conference*, Australian Road Research Board, 13/6, 1986.
3. Snyder, R. E., "Field Trials of low cost Bridge Weigh-In-Motion," FHWA, DTFH 61-89-C-00048, June 1991.
4. COST 323., *Weigh-in-Motion of Road Vehicles*, Final Report, August 1999.
5. 황의승, 배두병, 정경섭, 조재병, "BWIM시스템을 이용한 중차량의 통행특성 분석", 한국강구조학회 논문집, Vol. 11, No. 2, 1999, pp. 223-232.
6. 박민석, 조병완, "주행중인 차량하중 측정을 위한 BWIM 시스템 개발", 한국구조물진단학회지, Vol. 10, No. 2, 2006, pp. 111-122.
7. 김윤기, 조재병, 정경섭, 배두병, 황의승, "강교의 변형률 측정값을 이용한 통과 차량의 축중량 산출방법에 관한 연구", 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, 1998, pp. 278-281.
8. 배두병, 황의승, "강교량 설계를 위한 피로 하중 모형", 대한토목학회논문집, Vol. 24, No. 1A, 2004, pp. 225-232.
9. 박민석, 조병완, 배두병, "BWIM 시스템을 이용한 고속도로 교량 차량하중 모형 개발", 대한토목학회 논문집, Vol. 26, No. 1A, 2006, pp. 143-153.
10. 김성근, "구조물 모니터링 시스템의 개발", 한국강구조학회지, Vol. 7, No. 4, 1995, pp. 21-24.
11. The MathWorks., *Using MATLAB*, version 5.3. Natick, MA: USA, 1999.
12. Chang, S.-P., Lee, J. and Kim, S., "Damage Detection in a Steel Bridge using Artificial Neural Network and Signal Anomaly Index," *Proc. of the 1st European Workshop on Structural Health Monitoring*, Ecole Normale Supérieure, Paris:France, 2002.