

〈 논문 〉

## 인공신경망을 이용한 계측응력 분류 및 피로수명 평가

정성욱\* · 장윤석\* · 최재봉\* · 김영진†

(2005년 7월 29일 접수, 2006년 3월 9일 심사완료)

### Stress Classification Using Artificial Neural Networks and Fatigue Life Assessment

Sung-Wook Jung, Yoon-Suk Chang, Jae-Boong Choi and Young-Jin Kim

**Key Words :** Adaptive Resonance Theory(적응공명이론), Artificial Neural Networks(인공신경망), Cumulative Usage Factor(누적 피로사용계수), Stress Classification(응력분류)

#### Abstract

The design of major industrial facilities for the prevention of fatigue failure is customarily done by defining a set of transients and performing a calculation of cumulative usage factor. However, sometimes, the inherent conservatism or lack of details as well as unanticipated transients in old plant may cause maintenance problems. Even though several famous on-line monitoring and diagnosis systems have been developed world-widely, in this paper, a new system for fatigue monitoring and life evaluation of crane is proposed to reduce customizing effort and purchasing cost. With regard to the system, at first, comprehensive operating transient data has been acquired at critical locations of crane. The real-time data were classified, by using adaptive resonance theory that is one of typical artificial neural network, into representative stress groups. Then the each classified stress pattern was mapped to calculated cumulative usage factor in accordance with ASME procedure. Thereby, promising results were obtained for the crane and it is believed that the developed system can be applicable to other major facilities extensively.

#### 1. 서 론

일반적으로 설계조건에 따라 정상적으로 운전되는 설비의 경우에는 구성재료가 받는 여러 특성 변화를 예측할 수 있으며, 안전성의 확보가 가능하다. 그러나 실제 가동조건이 설계조건과 상이한 경우 균열 발생 및 재료열화 등의 손상기구가 진행되어 이러한 특성변화를 적절하게 예측하지 못할 수 있다.<sup>(1)</sup> 따라서 가동중 발생하는 데이터를 취득하여 안전성 평가의 기초 자료로 활용하기 위한 연구가 국가 기간산업설비를 중심으로 진행되어 왔다.

대표적인 연구결과로서 설비 상태의 실시간 감시를 통해 사고를 미연에 방지하는 시스템이 다수 개발된 바 있다. 국외의 경우 미국의 FatiguePro,<sup>(2)</sup>

프랑스의 Fatiguemeter,<sup>(3)</sup> 독일의 FAMOS(Fatigue Monitoring System)<sup>(4)</sup>와 같은 시스템이 이미 가동중 원전에 설치되어 부품의 보수 및 교환시기의 최적화, 잔류수명 예측 및 수명연장 등에 적용되고 있다. 국내에서도 일부 진단감시시스템이 개발되었으나 실제 적용을 위해서는 추가적인 검증이 필요한 상황이다.<sup>(5-7)</sup>

본 연구에서는 제철소 제강공정 설비중 하나인 용선 기중기(crane)의 상태감시를 통해 피로수명 평가를 수행하고자 한다. 용선 기중기는 약 20년 동안 용선의 운반과정중에 발생하는 동하중과 같이 반복적으로 작용하는 가혹한 사용환경에 노출되어 왔다. 노화된 용선 기중기는 유지·보수를 위한 주기적인 부품교체와 같은 작업으로 인하여 생산성이 낮아지고, 비용상승과 같은 문제점이 발생하고 있다. 따라서 기중기의 상태감시 및 사용수명을 판단할 수 있는 시스템 개발이 요구된다.

일반적으로 설비의 상태를 파악하기 위해 설계자료, 운전자료 및 보수자료 등을 검토한다. 그러나 필요한 설계자료 및 운전이력이 확보되지 못함에 따라 실시간 감시를 통해 운전기간 동안 발생

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim50@skku.edu

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

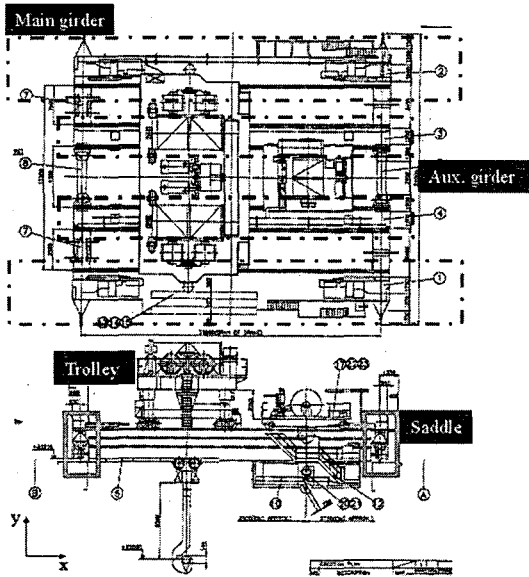


Fig. 1 Main components of the crane

하는 과도상태를 확보하고, 이를 분석 및 적용하여 기중기의 피로 건전성을 확인하고자 한다.

## 2. 데이터 취득 시스템

### 2.1 평가대상

본 연구의 대상인 용선 기중기는 Fig. 1과 같이 기본적으로 x-방향으로 2개의 주거더(main girder)와 2개의 보조거더(auxiliary girder)가 있으며, y-방향으로 양쪽 버팀장치(saddle)에 의해 지탱되는 구조를 가진다. 버팀장치와 연결된 구동휠(wheel)이 선로(rail)를 따라 이동하게 되며, 거더를 따라 수송장치(trolley)가 x-방향으로 이동한다.

따라서 용선을 수직방향으로 들어올릴 때 발생하는 권양하중(hoist load)과 기중기의 수평이동 및 주행의 가속도에 따른 수평하중(관성력) 등 기중기의 운전과 직접적으로 관련된 하중 외에도 용선에서 방출되는 열에 의한 영향, 바람의 영향 등 외부환경에 의한 하중이 복합적으로 작용하게 된다. 또한 작업자의 운전특성에 따라 작업순서의 다양한 조합이 발생할 수 있으며, 이로 인해 실제 기중기에 발생하는 응력은 더욱 복잡한 양상으로 나타난다.

### 2.2 측정부위의 선정 및 데이터 측정

기중기의 모든 부위에 대해서 변형률을 측정하는 것은 많은 제약조건으로 인해 현실적으로 불가능하기 때문에, 주요 취약부위를 도출한 후 그 지점의 변형률을 측정하는 것이 일반적이다. 취약부위 선정을 위해 유한요소해석을 이용할 수 있으며, 본 연구에서는 유태광<sup>8)</sup>이 수행한 연구결과를 활용하였다. 이에 따라 Fig. 2와 같이 주거더와 보조

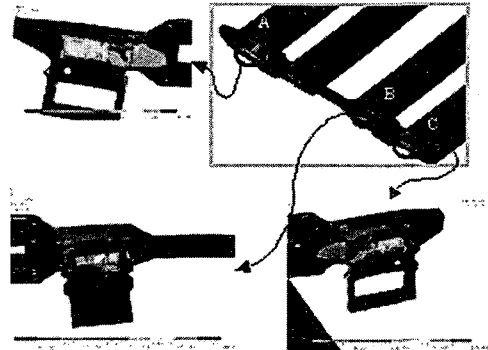


Fig. 2 The stress concentration locations

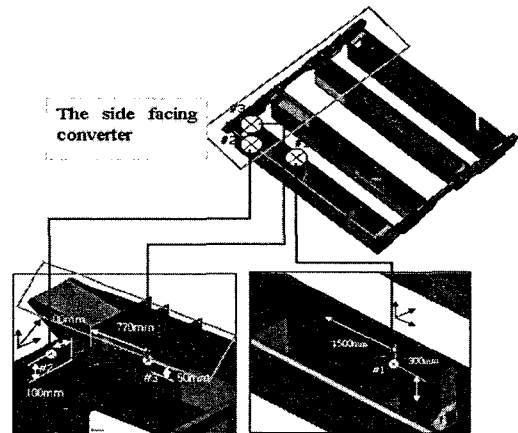


Fig. 3 The strain measurement locations

거더 모두 버팀장치와 인접한 부위(A, B, C 위치)에서 응력집중이 발생하는 것으로 나타났으며, 구체적으로는 수송장치가 전로(converter) 내부에 용선을 채워 넣는 과정에서 가장 큰 응력이 발생하였다. 따라서 Fig. 3과 같이 응력집중부로 예상되는 #1 및 #2, 그리고 유한요소 해석 결과와의 비교를 위한 #3 등 세 부위를 변형률 측정위치로 결정하였다.

### 2.3 데이터 취득 시스템 구축

측정에 사용한 실험장치의 구성을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3의 #1, #2 지점에 3축 직각 로제트 게이지(3-element rectangular rosette gage)를, 그리고 #3 지점에는 단축 스트레인게이지를 부착하였으며 리드선(lead wire)을 통해 증폭기(amplifier) 및 A/D 변환기를 거쳐 DAQ(Data Acquisition) 보드가 장착된 데이터베이스 서버에 측정된 데이터가 저장되도록 하였다. 측정된 데이터의 처리 및 각종 공학적 평가식을 적용하여 기중기의 피로수명을 계산하는 어플리케이션 서버(application server)와 데이터베이스 서버(database server)와의 통신은 유선연결이 어려운 기중기 내부의 조건을 고려하여 설치 유지보수 및 재배치가 간편한 무선랜(wireless LAN)을 이용하여 구현하였다.

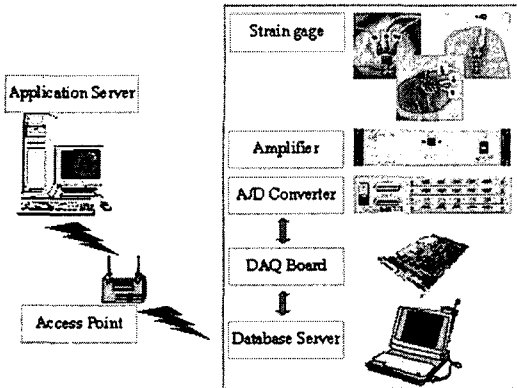


Fig. 4 Configuration of the data acquisition system

데이터의 적절한 샘플링 주기(sampling rate)<sup>(9)</sup>를 결정하기 위해 각각 50Hz, 10Hz 그리고 1Hz일 때의 데이터 측정결과를 비교하였으며, 샘플링 주기에 따른 위신호 오차(aliasing error)<sup>(10)</sup>가 발생하지 않음에 따라 저장용량 및 신호전송을 고려한 1Hz를 최종 샘플링 주기로 결정하였다.

한편 측정된 데이터를 저장하기 위한 서버는 관계형데이터베이스 관리시스템(Relational Database Management System; RDBMS)<sup>(11)</sup>을 이용하여 구축하였으며 각 지점에서 측정한 변형률 데이터로부터 식 (1)의 변형률-응력 관계식<sup>(12)</sup>을 이용하여 최대응력, 최소응력을 계산하고, 식 (2), (3)과 같이 교번응력(alternating stress,  $\sigma_a$ ) 및 평균응력(mean stress,  $\sigma_m$ )을 계산하여 함께 저장하였다.

$$\sigma_{1,2} = E \left[ \frac{\epsilon_A + \epsilon_C}{2(1-\nu)} \pm \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_A - \epsilon_C)^2 + (2\epsilon_B - \epsilon_A - \epsilon_C)^2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_a = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2} \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C$ 는 각각 게이지의  $0^\circ, 45^\circ$  및  $90^\circ$  위치의 변형률,  $E$ 는 재료의 탄성계수(Young's modulus),  $\nu$ 는 재료의 푸아송 비(Poisson's ratio),  $\sigma_{1,2}$ 는 최대 및 최소 주응력을 나타낸다.

### 3. 계측응력 패턴분류

#### 3.1 측정 데이터 경향분석 및 특징추출

패턴분류의 수행에 앞서 측정된 응력 데이터의 특징을 추출해 내기 위해 경향을 분석하였다. Table 1은 한달 동안 기중기로부터 측정된 데이터베이스 1스 레코드의 수를 일자별로 나타낸 것으로, 7개의 변형률 데이터, 4개의 응력 데이터가 하나의 레코드를 이루며 총 2,599,658개(30.09일)의 레코

Table 1 Data acquisition results for each date

Date	No. of record	day	Date	No. of record	day
2004/12/30	30309	0.35	2005/01/15	86398	1.00
2004/12/31	86395	1.00	2005/01/16	86398	1.00
2005/01/01	86399	1.00	2005/01/17	86397	1.00
2005/01/02	86400	1.00	2005/01/18	86399	1.00
2005/01/03	86377	1.00	2005/01/19	86400	1.00
2005/01/04	86400	1.00	2005/01/20	86366	1.00
2005/01/05	86396	1.00	2005/01/21	86400	1.00
2005/01/06	86377	1.00	2005/01/22	86400	1.00
2005/01/07	86399	1.00	2005/01/23	86399	1.00
2005/01/08	86399	1.00	2005/01/24	86400	1.00
2005/01/09	86399	1.00	2005/01/25	86399	1.00
2005/01/10	86400	1.00	2005/01/26	86400	1.00
2005/01/11	86399	1.00	2005/01/27	86398	1.00
2005/01/12	86380	1.00	2005/01/28	86399	1.00
2005/01/13	86400	1.00	2005/01/29	63877	0.74
2005/01/14	86399	1.00			

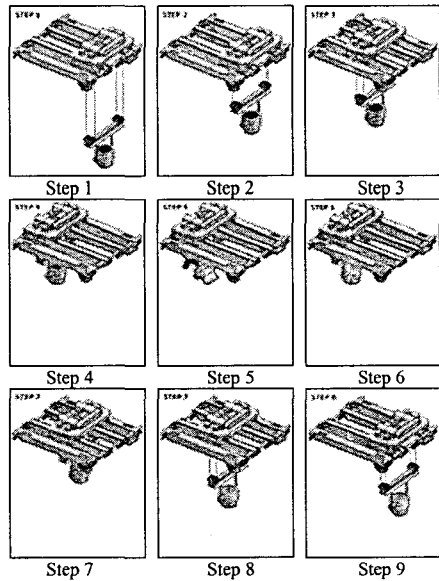


Fig. 5 Sequence of the crane operation

드가 저장된 것을 알 수 있다. 측정의 시작일과 종료일에는 각각 0.35일, 0.74일의 레코드만이 측정되었다.

기중기는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 용선의 주입단계(Step 1)에서 시작하여 전로에 용선을 채운 뒤 다음 작업을 위한 대기상태(Step 9)를 유지하기 까지 일정한 순서에 따라 반복적으로 운전되며, 운전시간은 작업자의 운전특성에 따라 평균 대기시간이 약 10~15분, 한 번의 작업 사이클이 약 20~25분 정도 소요된다. 이러한 특성을 고려하여 기중기의 가동중 발생응력을 유사한 형태의 그룹으로 분류하고, 분류된 그룹의 대표적인 응력의

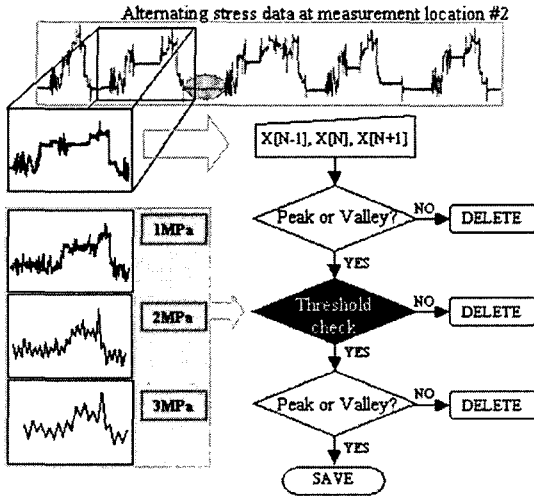


Fig. 6 The flowchart of feature extraction

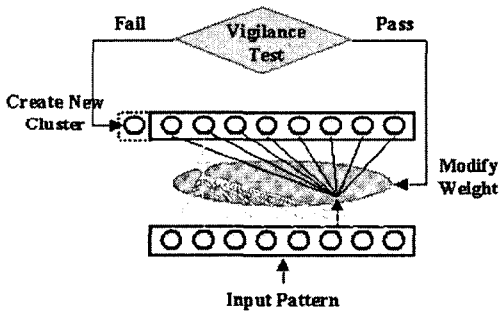


Fig. 7 The ART network algorithm

발생횟수를 산정함으로써 평가에 필요한 기초 데이터를 생성하였다.

변형률 데이터로부터 계산된 교변응력을 분석한 결과, Fig. 3의 #1 지점에서는 기중기가 대기상태일 때의 응력이 2~5MPa 이고 최대응력은 약 10MPa 로 나타났다. #2 지점에서는 대기상태일 때의 응력이 6~8MPa 이고 최대응력은 약 25MPa 로써, #1 지점에 비해 상대적으로 응력집중이 큰 것으로 나타났다. 따라서 #2 지점에 발생하는 응력을 기준으로 패턴분류 및 기중기 건전성 평가를 수행하였다.

Fig. 6은 임의의 시간 동안 측정된 데이터로부터 특징을 추출하는 과정을 도식적으로 나타낸 것이다. 하나의 작업 사이클로 분리된 데이터를 입력으로 연속된 3개의 데이터를 비교하여 극대(peak) 및 극소(valley) 값으로 판단한다. 또한 시간지연(time delay)으로 발생하는 데이터와 같이 기중기의 피로수명에 미치는 정도가 미미한 데이터들은 임계값(threshold)을 설정하여 제거하였다. 마지막으로 극대 및 극소 값으로 재정리하였다.

최적의 임계값을 결정하기 위해 1MPa부터 3MPa까지 1MPa씩 증가시키면서 임계값에 따른

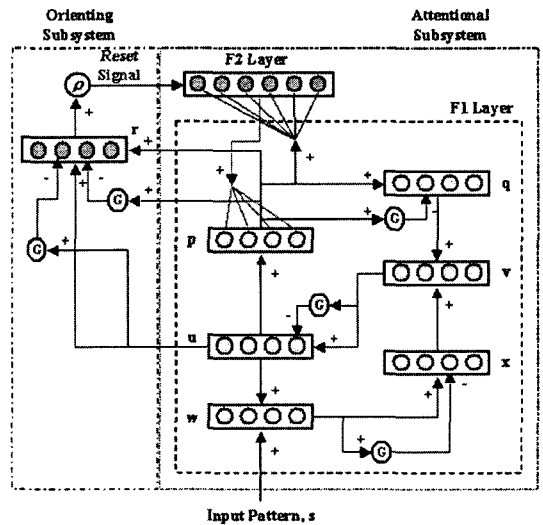


Fig. 8 The ART-2 network architecture

데이터 경향의 변화를 분석하였다. 특징값으로 추출된 데이터와 실측된 데이터(raw data)의 경향을 비교하고 데이터 저장용량의 효율성을 고려하여 2MPa을 최적의 임계값으로 결정하였다.

### 3.2 적응공명이론

특징값으로 추출된 데이터의 패턴분류를 위해 미국 보스턴 대학의 Gail. A. Carpenter와 Stephen Grossberg<sup>(13)</sup>에 의해 고안된 인공신경망 모델의 하나인 적응공명이론-2(ART-2)<sup>(14)</sup>를 적용하였다.

Fig. 7은 일반적인 적응공명이론의 알고리즘을 나타낸 것으로, 하나의 입력패턴이 들어오면 상위층에 이미 존재하는 기본형 패턴(cluster)과 비교를 수행한다. 여기서 경계변수(vigilance parameter,  $\rho$ )를 기준으로 분류되는 정도가 달라지게 되는데, 경계변수란 불일치 정도에 대한 민감도로서 이 값이 크면 클수록 입력패턴과 기본형 패턴간의 상대적으로 작은 차이에 대해서도 서로 다른 그룹으로 분류하게 된다.

Fig. 8은 적응공명이론-2의 네트워크 구조를 나타낸 것이다. 크게 입력층(F1)과 출력층(F2)의 2개의 층으로 구성되어 있으며, 상향(bottom-up)과 하향(top-down)의 양방향 연결이 이루어져 있다. F1층은 정규화(normalization)를 위한  $w, u, p, q, v, x$ 의 절점(node)으로 구성되어 있는 것이 특징이다. 여기서 정규화는 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Let } \bar{x} &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ N(\bar{x}) &= \text{Normalize}(\bar{x}) = \frac{\bar{x}}{\|\bar{x}\|} \\ \|\bar{x}\| &= \sqrt{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \end{aligned} \quad (4)$$

구체적인 적용단계는 다음과 같다.

## (1) 단계 0: 매개변수 초기화

신경망의 주요 매개변수로는 앞서 언급한 경계 변수 외에도 각각의 연결강도를 조정하는 변수들이 있다. Fig. 8에서 절점  $u$ 와  $w$  사이의 가중치를  $a$ , 절점  $q$ 와  $v$  사이의 가중치를  $b$ , 리셋 테스트에서 사용되는 가중치를  $c$ , F2층에서의 활성화값을  $d$ 라 하였을 때 다음과 같이 초기화한다.

$$a = 10; b = 10; c = 0.1; d = 0.9; \alpha (\text{학습률}) = 0.6$$

for  $i = 1$  to  $n$  (F1층의 절점수)

$j = 1$  to  $m$  (F2층의 기본형 패턴의 수)

$t_{ij} = 0$  (하향 가중치, F2 to F1)

$$b_{ij} \leq \frac{1}{(1-d)\sqrt{n}} \quad (\text{상향 가중치, F1 to F2})$$

여기서  $n$ 은 입력패턴의 차수이다.

## (2) 단계 1: 신호함수의 결정

신호함수(signal function)는 F1층에서 일어나는 잡음을 감소시키는 역할을 하고,  $q, x$  절점으로부터  $v$  절점의 출력값을 계산하는데 사용되는 것으로 다음과 같이 결정하였다.

$$f(x) = \begin{cases} x & x \geq \theta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $\theta$ 는 0.1로 초기화하였다.

## (3) 단계 2: F1층의 초기화

F1층의 각 절점은 새로운 입력벡터  $s$ 에 대하여 식 (6)에 의해 초기화된다. 따라서 새로운 입력벡터가 네트워크에 입력되면 이전 벡터에 대한 기억은 F1층으로부터 삭제된다. 이러한 특성 때문에 F1층을 단기성 메모리(Short Term Memory: STM)<sup>(15)</sup>라 부른다.

$$\begin{aligned} u = 0, w = s, p = 0, x = N(s), q = 0, v = f(x); \\ u = N(v), w = s + au, p = u, x = N(w), q = N(p), \\ v = f(x) + bf(q) \end{aligned} \quad (6)$$

## (4) 단계 3: F2층의 전체 입력 계산

식 (6)에 의해 F1층의 초기화가 끝나면 각  $j$  절점의 실제 입력을 다음과 같이 계산하여 F2층의 전체 입력을 결정한다.

$$y_j = \sum_i^n b_{ij} p_j \quad \text{for } j = 1, \dots, m \quad (7)$$

(5) 단계 4: 리셋(reset)<sup>(16)</sup>

Fig. 9의 적응공명이론-2 네트워크 구조는 크게 주의 서브시스템(attentional subsystem)과 적응 서브시스템(orienting subsystem)으로 구성되어 있다. 주

의 서브시스템은 입력패턴과 기본형 패턴과의 비교를 수행하고, 적응 서브시스템은 입력패턴과 기본형 패턴간의 불일치의 정도가 충분히 클 때 F2층에 리셋 신호를 보내어 이전에 활성화된 F2층의 입력신호가 차단될 때까지 선택적이고 지속적으로 억제하는 역할을 한다. 즉 입력패턴과 가장 유사한 F2층의 절점은 그 출력값이 최대가 되는데, 이때의  $j$  값을  $J$ 라 하고 경계변수 값과 비교를 통해 리셋 조건을 만족하는지 판단한다.

$$\begin{aligned} u = N(v), \\ \text{For } i = 1 \text{ to } n \\ p_i = u_i + dt_x \\ r_i = \frac{u_i + cp_i}{\|u\| + c\|p\|} \end{aligned} \quad (8)$$

불일치에 의한 리셋 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\rho}{\|r\|} > 1 \quad (9)$$

식 (9)의 리셋 조건이 만족될 경우 단계 4를 반복하고 그렇지 않을 경우 다음과 같이 매개변수를 설정하고 단계 5로 넘어간다.

$$w = s + au, x = N(w), q = N(p), v = f(x) + bf(q) \quad (10)$$

(6) 단계 5: 절점  $J$ 의 가중치 갱신

단계 4에서의 리셋 조건을 만족할 경우 다음 식에 의해 상향 및 하향 연결강도를 수정하여 새로운 입력패턴의 특징을 전체 네트워크에 반영한다.

$$\begin{aligned} t_{ji} = adu_i + \{1 + ad(d-1)\}t_{ji} \\ b_{ij} = adu_i + \{1 + ad(d-1)\}b_{ij} \end{aligned} \quad (11)$$

## (7) 단계 6: F1 절점 값의 계산

새롭게 수정된 연결강도를 반영하여 다음의 입력패턴 학습을 위해 F1층의 각 절점들의 값을 계산한다.

$$\begin{aligned} u = N(v), w = s + au, p = u + dt_x, \\ x = N(w), q = N(p), v = f(x) + bf(q) \end{aligned} \quad (12)$$

학습과정을 통해 절점  $J$ 는 입력벡터를 기억하게 된다. 이러한 기억은 새로운 벡터가 입력되어도 F2층에 의해 지속적으로 유지되는 특성을 가지는데, 이를 장기성 메모리(Long Term Memory: LTM)<sup>(15)</sup>라 부른다.

## 3.3 패턴분류 및 결과

한달 동안 측정된 데이터의 대기상태를 기준으로 각각의 작업 사이클별로 구분한 결과 총 1,270 회의 작업 사이클(하루 평균 약 42회)이 발생하였

다. 한 번의 작업에 소요되는 시간은 약 35분으로 전술한 기증기의 평균 작업시간과 유사하게 나타났다. 특징추출 알고리즘 적용후 68,237개(0.79 일)의 특징 데이터로 추출되어 약 97%의 데이터 감소율을 보였다. 패턴분류시 적절한 분류의 강도를 결정하기 위해 경계변수는 0.75로 결정하였으며, 이때 9개의 그룹으로 분류되었다.

Table 3에 분류된 그룹별 대표응력패턴의 특징과 각각의 발생횟수를 함께 정리하여 나타내었다. 대부분 기증기의 작업으로부터 발생할 수 있는 응력패턴으로 판단되나 그룹 H는 유일하게 20MPa의 높은 평균응력이 기증기에 작용되고 있는 것으로 나타났다. 이에 실측된 데이터를 재확인하는 작업을 수행하였고, 그 결과 2005년 1월 13일 09시 54분 55초부터 17시 26분 22초까지 약 18~23MPa 정도의 응력이 기증기에 발생하였으며, 이는 작업도중 주기적 점검에 의한 일시정지 상태로 판단되고 있다.

#### 4. 응력패턴별 피로수명 평가

##### 4.1 피로곡선 및 재료물성치 결정

ASME Code, Section III<sup>(17)</sup>에 제시된 피로해석 절차에 따르면 식 (2), (3)의 평균응력과 교변응력을 재료의 피로파괴 특성인 피로한도( $S_e$ ) 및 인장강도( $S_u$ )와 비교하여 피로수명을 평가한다.

본 연구에서는 재료의 피로곡선(S-N curve)을 결정하기 위해 SS400 재료시편에 대한 피로시험결과를 활용하였다. 피로시험은 제철소의 여러 가지 주위 환경을 고려하여 수행되었으며 다양한 조건하의 시험결과로부터 하나의 피로곡선을 결정하기 위해 Fig. 9와 같이 95%의 신뢰구간 범위 내로 선

형 근사하고, 하한경계(lower boundary)에 따른 식 (13)을 최종적인 피로곡선으로 결정하여 보수적으로 평가하였다.

$$\text{Log}(S_n) = -0.0983\text{Log}(N) + 2.638 \quad (13)$$

또한 구조물의 안전성을 평가하기 위한 항복강도나 인장강도는 보수적인 평가를 위해 시험 데이터 중 가장 작은 값을 사용하였으며, 피로한도는 식 (13)으로부터  $10^6$  cycle에 해당하는 응력수준으로 결정하였다. 평가 수행에 필요한 재료물성치를 Table 2에 정리하였다.

##### 4.2 기증기 피로수명 평가절차

평균응력과 응력진폭을 실험에 의해서 측정하고 피로한도와 인장강도를 계산하면 피로파손의 한계를 나타내는 피로평가선도를 결정할 수 있다. 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 Goodman이 제안한 관계식을 사용하였다<sup>(18)</sup>.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (14)$$

피로시험은 평균응력이 0인 완전역전조건(fully reversed condition; R=-1)에서 수행되었다. 그러나 기증기에 작용되는 피로하중은 평균응력이 0이 아니므로 Goodman 관계식을 적용하여 교변응력을 동일한 수명의 완전역전 응력수준으로 변환하였다.

$$\frac{\sigma_a}{S_n} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (15)$$

식 (15)로부터 결정된 응력변화 데이터  $S_n$ 과 재료의 피로곡선을 통해 누적손상계수를 계산함으로써 피로손상의 정도를 결정할 수 있다. 본 연구에서는 잘 알려진 Miner's rule을 이용하여 다음과 같이 누적손상계수를 계산하였다.

$$UF_i = \frac{n_i}{N_i}, \quad CUF = \sum UF_i \quad (16)$$

여기서  $n_i$ 는 각 응력범위에 따른 사이클 수,  $N_i$ 는 피로곡선으로부터 얻어지는 각 응력기준에 대한 허용 사이클 수이다.

Table 2 Material properties of SS400

(a) Chemical composition				
Component	C	Mn	P	S
%	-	-	0.050 Max.	0.050 Max.
(b) Mechanical properties				
Tensile Strength [MPa]	Yield Strength [MPa]		Fatigue Limit [MPa]	
328	175		124	

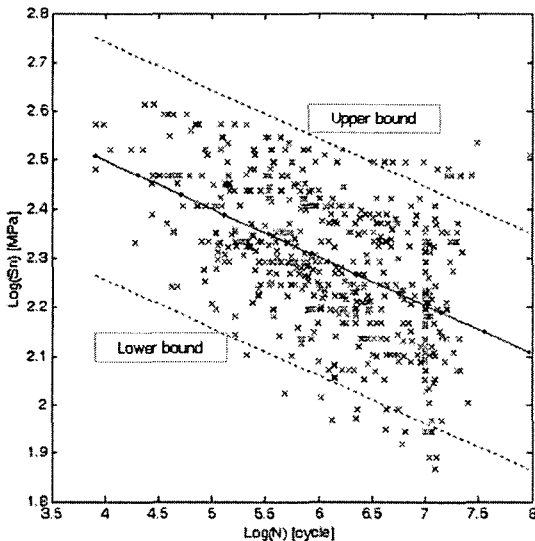


Fig. 9 S-N diagram from fatigue test data

4.3 용접부의 잔류응력을 고려한 피로수명 평가 기준기는 수많은 판재(plate)들을 용접하여 제작하게 된다. 이 때 용접부 잔류응력을 감소시키기 위해 열처리를 수행하게 되는데, 기준기의 경우 비교적 두껍지 않은 판재로 제작되기 때문에 잔류응력의 크기가 우려할 만한 정도는 아니라고 판단된다. 그러나 용접부 잔류응력의 영향이 명확하게 밝혀지지 않은 관계로 잔류응력의 영향을 평균응력으로 고려하여 전술한 절차에 따라 피로수명을 평가하였다.

보수적 평가를 위해 먼저 모재의 항복강도(175MPa)를 용접부의 잔류응력으로 고려하여 피로수명을 평가하였으나, 모든 응력수준에 대해 피로한도 이하의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이에 따라 인장강도의 80% 수준인 262.4MPa를 용접부의 잔류응력으로 고려하여 피로수명을 평가하였다. 그 결과 한달 동안의 누적손상계수는  $6.35 \times 10^{-19}$ 로 나타났다.

4.4 분류된 계측응력별 피로수명 평가

분류된 각각의 대표 응력패턴에 대한 손상계수와 발생횟수를 이용하여 각 그룹별 전체 손상계수의 결과를 Table 3에 정리하였으며, 인장강도의 80% 수준을 용접부의 잔류응력으로 고려하여 평가하였다. 각각의 그룹별 전체 손상계수를 합산한

결과 한달 동안의 누적손상계수는  $2.27 \times 10^{-18}$  이었다. 이는 계측된 모든 데이터를 고려한 일반적 피로수명 평가결과에 비해 약 3.5배 정도 큰 값이나, 평가지점의 누적손상계수가 크지 않은 점과 평가방법의 보수성을 감안할 때 패턴분류에 의한 피로수명 평가결과는 타당한 것으로 판단된다.

한편 기준기는 도입 당시 40년의 수명을 갖도록 설계되었으며, 약 15년간 가동되어 왔다. 한번에 기준기가 운반하는 용선량이 일정하다는 가정 하에 현재까지 소진한 수명과 앞으로 남은 수명을 외삽법(extrapolation)을 이용하여 추정한 결과 15년 동안의 누적사용계수는  $4.08 \times 10^{-16}$ , 40년 동안의 누적사용계수는  $1.09 \times 10^{-15}$ 로 나타났다. 따라서 기준기 3 지점의 피로 건전성은 설계수명 기간 동안 충분히 유지될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 개발한 데이터 취득 시스템과 패턴분류 기법 및 이를 이용한 피로수명 평가방법은 적용이 용이하므로, 향후 현장 전문가와의 협의를 거쳐 타 부위로 확대하는 방안을 모색할 예정이다.

5. 결론

본 연구에서는 용선 기준기에 작용하는 하중에 의해 발생하는 응력을 패턴별로 분류하고, 발생 횟수를 산출하여 기준기의 피로수명을 평가하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 초당 1개의 샘플링 속도로 측정된 데이터로부터 특징값을 추출하기 위하여 특징추출 알고리즘을 적용, 임계값을 비교 분석하였으며, 그 결과 2.0MPa를 최적의 값으로 결정하였다.

(2) 데이터베이스에 저장된 총 2,599,658개(30.09 일)의 레코드를 분석한 결과 해당기간 동안 1,270 회의 작업 사이클이 발생하였으며, 패턴분류 알고리즘을 이용하여 계측된 응력패턴을 9개의 그룹으로 분류하였다.










(3) 대표응력패턴을 이용한 피로수명 평가결과는 계측된 모든 데이터로부터 피로수명을 평가하였을 때에 비해 약 3.5배 정도 크게 나타났으며, 이는 계측된 응력패턴을 보수적으로 그룹화하였기 때문이다. 그러나 누적사용계수가 충분히 작고 특징 추출후 97%의 데이터 감소율을 얻을 수 있는 점을 감안할 때, 인공신경망을 이용한 계측응력 분류 및 피로수명 평가는 타당한 것으로 판단된다.

(5) 계측된 데이터를 효율적으로 관리할 수 있는 관계형데이터베이스를 구축하였으며, 이는 기준기 주요부위의 상태감시 및 피로수명 평가를 위한 실시간 관리시스템으로 활용될 수 있다.

참고문헌

(1) Jung, D.K., et al., 2000, " The Development of Boiler Life Monitoring System," Korea Heavy

Table 3 Results of stress classification

Class	Stress [MPa]			UF <sub>raw</sub>	UF <sub>raw</sub> ×Count
	Max.	Min.	Avg.	Count	
A 	23.9	5.4	12.3	$2.06 \times 10^{-21}$ 267	$5.50 \times 10^{-19}$
B 	22.1	5.2	11.3	$2.21 \times 10^{-21}$ 165	
C 	23.2	5.8	17.1	$6.89 \times 10^{-21}$ 51	$3.51 \times 10^{-19}$
D 	24.3	1.9	14.3	$1.29 \times 10^{-20}$ 25	
E 	18.5	7.8	13.2	$1.12 \times 10^{-22}$ 482	$5.40 \times 10^{-20}$
F 	13.4	3.5	8.3	0.00 24	
G 	22.1	3.2	9.9	$1.22 \times 10^{-21}$ 241	$2.94 \times 10^{-19}$
H 	25.0	7.2	20.0	$3.22 \times 10^{-19}$ 1	
I 	21.4	7.0	15.4	$7.90 \times 10^{-22}$ 14	$1.11 \times 10^{-20}$

- Industries Co.
- (2) Ricardella, P.C., et al., 1988, "FatiguePro: On-Line Fatigue Usage Transient Monitoring System," EPRI NP-5835M.
  - (3) Aufort, P., et al., 1991, "On-line Fatiguemeter: A Large Experiment in French Nuclear Plants," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 129, pp. 177~184.
  - (4) Huttner, C. and Kroiss, G., 1993, "Operational Monitoring of the Long-Time Characteristics of Components - Computing Algorithm for Determining the Current Degree of Fatigue," SMI RT-12, pp. 301~306.
  - (5) Yoo, B., Goo, K.H. and Lee, H.Y., 1993, "Development of K-FAMS Fatigue Damage Monitoring System," *1st Piping Integrity Assessment Technology Workshop*, pp. 89~106.
  - (6) Jin, T.E., et al., 1996, "A Study on the Development of Diagnostic Monitoring System for Life Assessment of Nuclear Power Plants," *Korea Power Engineering Company, INC.*
  - (7) Lee Kang Yong, Kim Jong Sung, et al. 1997, "Residual Life Evaluation of Pressurizer Surge Line Nozzle in Nuclear Plant," *Transaction of the KSME Spring Annual Meeting (B)*, pp. 727~732.
  - (8) Yoo, T.K., 2002, "A Study on Fatigue Life Evaluation for Steel-making Ladle Crane," Master's Thesis, Sungkyunkwan Univ.
  - (9) McClellan, J.H., Schafer, R.W. and Yoder, M.A., 1997, "DSP First: A Multimedia Approach," Prentice Hall, p. 98.
  - (10) McClellan, J.H., Schafer, R.W. and Yoder, M.A., 1997, "DSP First: A Multimedia Approach," Prentice Hall, pp. 96~97.
  - (11) Silberschatz, A., Korth, H.F. and Sudarshan, S., 2002, "Database System Concepts 4th Edition," McGrawHill, New York, pp. 3~4.
  - (12) Dally, J.W. and Riley, W.F., 1991, "Experimental Stress Analysis," 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill, pp. 313~315.
  - (13) Carpenter, G. A. and Grossberg, S., 1998, "Adaptive Resonance Theory," MIT Press.
  - (14) Carpenter, G.A. and Grossberg, S., 1987, "ART2: Self-Organization of Stable Category Recognition Codes for Analog Input Patterns," *Applied Optics*, Vol.26, No. 23, pp. 4919~4930.
  - (15) Carpenter, G. A. and Grossberg, S., 1987, "A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine," *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol.37, pp. 54~115.
  - (16) Lankalapalli, K., Chatterjee, S. and Chang, T.C., 1997, "Feature Recognition Using ART2: A Self-Organizing Neural Network," *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.8, pp. 203~214.
  - (17) ASME, 1989, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code," Section III, division 1, NB-3200.
  - (18) Bannantine, J. A., Comer, J.J. and Handrock, J.L., 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," 1st Edition, Prentice Hall, pp. 5~30.