

불확실 신뢰도 기법을 이용한 부식된 강구조물의 안전도평가

Safety Assessment of Corrosion-damaged Steel Structure using Imprecise Reliability

최현호* · 조호남** · 서종원*** · 선종완****

Choi, Hyun Ho · Cho, Hyo Nam · Seo, Jong Won · Sun, Jong Wan

Abstract

There is a high degree of uncertainty in measurements of the thickness or the loss of thickness of corroded elements. Generally the thickness of corroded elements varies from one location of the element to another depending on the degree of corrosion, which makes the safety assessment difficult. Therefore, a procedure for safety assessment of corrosion-damaged steel structures using an imprecise reliability is proposed in this paper. The proposed safety assessment procedure using the imprecise reliability was also applied to a cable-stayed bridge in Korea to demonstrate its effectiveness and applicability. Since there is a large variation in measurements of the thickness of corroded elements, the thickness of corroded elements was considered as the imprecise element. This variation was found to be directly related to the degree of corrosion. Therefore, the variation increases as the degree of corrosion increases. Based on the comparative observations between the conventional reliability and the imprecise reliability, it is suggested that the imprecise reliability analysis derived based on the subjective or statistical judgment of conditional independence could be successfully utilized for the risk or safety assessment of corrosion-damaged structures.

Keywords : imprecise reliability, safety assessment, corrosion, steel structure

요 지

일반적으로 부식된 부재의 두께를 측정하는 데는 많은 불확실성이 존재하며, 부식의 진행도에 따라 부재의 부식 두께는 측정 위치마다 다르므로, 기존의 신뢰성 해석 방법을 사용하여 모든 불확실성을 고려한 정량적인 안전도를 평가하는 것은 실질적으로 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 불확실 신뢰도 기법을 적용한 안전도 분석 절차를 제안하였으며, 효율성과 적용성을 검토하기 위하여 국내 공용중인 사장교에 적용하였다. 심하게 부식된 부재의 잔존 두께의 불확실성은 부식이 진행되는 정도에 따라 증가하므로 부재의 부식 두께를 불확실 정도로 표현되는 불확실 구간으로 표현하였으며, 기존의 신뢰성 기법과 불확실 신뢰도 기법의 비교를 수행하였다. 이러한 불확실 신뢰도 기법은 주관적이거나 조건부 독립에 대한 통계적 판단을 이용하여, 부식된 구조물의 안전도 평가나 위험도 평가를 하는 경우에 유용하여 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 불확실 신뢰도, 안전도 분석, 부식, 강구조물

1. 서 론

최근 들어 산업 발달과 기술의 증가로 교량, 지하철, 고층 빌딩 등 다수의 사회 기반시설들이 건설되고 있다. 그러나 구조물의 안전 점검과 유지관리를 소홀히 한 결과 최근 10년 동안 수차례에 걸쳐 교량, 지하철, 고층빌딩과 같은 사회 기반시설들이 붕괴되고 파손됨으로서, 천문학적인 경제 및 인명 손실을 가져왔다. 이러한 건설 사고들은 재료의 열화나 시공오류 등에 의해 강도나 사용성 면에서 구조물의 성능기준을 만족하지 못하거나, 자연재해나 충격하중 등과 같이 예기치 않았던 하중조건에 의해 발생한다.

그 중에서 특히 강구조물은 재료적 특성상 부식에 의해

열화할 가능성이 크고, 부재의 위치, 환경 등에 따른 불확실성이 크다 할 수 있으며, 또한 구조적 특성상 여러 요소가 조합되어 강성을 발휘하므로 불확실성으로 취급해야 하는 요소가 특히 많기 때문에, 부재의 열화가 시스템의 안전에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 힘들다. 최근 들어 전문가들의 실험이나 직관에 의해 추정된 불확실성에 근거하여 확률모수를 추정하고 이 결과를 바탕으로 구조 시스템의 확률적 안전성을 평가하는 기법에 대한 광범위한 연구가 진행되고 있지만, 수많은 구조부재의 불확실한 부식 상태에 따른 복잡한 거동 특성 때문에 부식에 따른 확률적 안전도 해석을 실질적으로 수행하기에는 어려움이 있다. 또한 객관적, 주관적으로 평가되는 불확실

*한양대학교 공학대학 토목환경공학과 BK 연구교수 · 공학박사(E-mail: padre@hanyang.ac.kr)

**정회원 · 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 교수 · 공학박사(E-mail: ryfid@hanyang.ac.kr)

***정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 조교수 · 공학박사(E-mail: jseo@hanyang.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 박사과정(E-mail: powersun77@hanyang.ac.kr)

성에 근거하여 확률 모수를 추정하는 기존의 신뢰성 방법은 확률모수를 잘못 추정한 경우에 분석 결과를 신뢰할 수 없으며 잘못된 의사결정을 초래 할 수 있다는 문제가 있다.

최근에 이러한 이전의 신뢰성 해석 기법의 결점을 피할 수 있는 불확실 확률의 수학적 기초가 Walley(1991)와 Kuznetsov(1991) 등에 의해 제안되었으며, Coolen FPA (1994, 1997), Kozine 등(2000), Utkin(2002) 등은 간단한 시스템에 불확실 신뢰도 기법을 적용하였으나, 실제 구조물에 적용한 예는 찾아보기 힘들다.

따라서 본 논문에서는 부식된 강구조물에 대해 불확실신뢰성이론을 이용하여 실제 구조물의 안전도를 평가하는 절차를 제안하였으며, 국내 공용중인 ○○대교에 적용하였다. 제안된 안전성 평가 절차는 점검결과 등의 불확실성을 고려하여 구조물의 정상적인 안전도를 신속하게 평가하는데 효율적으로 적용할 수 있다.

2. 불확실 신뢰도 이론

불확실 확률이라는 용어는 일반적으로 상·하한 확률(probability), 상·하한 예측(prevision), 가능성(possibility), 필요성(necessity), 믿음(belief) 그리고 가능성(plausibility)을 표현해주는 수학적 모델로 사용된다. 불확실 확률은 사건 A의 불확실성에 대해 두개의 표현방법 즉, 상·하 확률($P(A)$ 와 $\bar{P}(A)$)을 갖는 특성을 지니고 있다(Kozine 등, 2000).

본 논문에서 사용한 불확실신뢰성 이론은 Kozine 등(2001)에 의해 잘 정리되어있으며, 본 논문에서는 이를 요약 정리하였다. 불확실 신뢰도 기법은 전통적인 확률 이론과 달리 X, Y 의 상·하한 확률에 따른 합집합과 교집합의 상·하한 확률을 조건부 독립인지 의존인지에 대한 판단 없이 얻을 수 있다. 이러한 점은 특히 조건부 독립인지 아닌지 여부에 관해 완벽히 몰랐을 때 중요하다. 또한 논리적 독립에 대한 판단은 시스템에서 발생한 사건에 대해 적용하기에 가장 구속력이 약하며, 시스템을 구성하는 데 좀 더 신뢰성 있는 구조적 판단에 근거한 결과가 있는 경우에 민감하게 변한다.

두 개의 요소 X, Y 로 구성된 시스템 S 는 각각의 요소의 두 상태인 $\Omega_X = \{X, X^C\}$, $\Omega_Y = \{Y, Y^C\}$ 로 구성되며, 시스템 $\Omega_S = \Theta_X \times \Theta_Y = \{XY, XY^C, X^CY, X^CY^C\}$ 을 구성한다. 사건 $X \cap Y, X \cap Y^C, X^C \cap Y, X^C \cap Y^C$ 는 공집합이 아니다. 이러한 경우를 두 개의 사건 X, Y 가 논리적 독립이라고 부르며, 아래의 식 (1)을 정의할 수 있다(Walley, 1991).

$$\begin{aligned} P_l(X \cap Y) &= \max[0, P(X) + P(Y) - 1] \\ \bar{P}_l(X \cap Y) &= \min[\bar{P}(X), \bar{P}(Y)] \\ P_l(X \cup Y) &= \max[P(X), P(Y)] \\ \bar{P}_l(X \cup Y) &= \min[1, \bar{P}(X) + \bar{P}(Y)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 정의한 P 에서 l 은 논리적 독립을 의미한다. 시스템에 두 종류의 불확실 확률이 있는 경우에 대한 일반적인 표현은 n 개의 요소가 직렬 및 병렬로 연결되어 있는 경우에 다음 식 (2), (3)와 같은 두 종류의 불확실 확률모델을 얻을

수 있다(Kozine 등, 2000).

$$P_l\left(\bigcap_{i=1}^n X_i\right) = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{i=1}^n P(X_i) \leq n-1 \\ \sum_{i=1}^n P(X_i) - (n-1) & \text{if } \sum_{i=1}^n P(X_i) > n-1 \end{cases}$$

$$\bar{P}_l\left(\bigcap_{i=1}^n X_i\right) = \lim_{1 \leq i \leq n} [\bar{P}(X_i)] \quad (2)$$

$$P_l\left(\bigcup_{i=1}^n X_i\right) = \lim_{1 \leq i \leq n} [P(X_i)]$$

$$\bar{P}_l\left(\bigcup_{i=1}^n X_i\right) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \bar{P}(X_i) & \text{if } \sum_{i=1}^n \bar{P}(X_i) \leq 1 \\ 1 & \text{if } \sum_{i=1}^n \bar{P}(X_i) > 1 \end{cases} \quad (3)$$

두개의 독립적인 사건 X, Y 가 조건부 독립 이라면 일반적인 베이지정리를 이용하여 직렬과 병렬 조건에 대해 다음 식 (4)과 (5)를 얻을 수 있다.

$$P_c(X \cap Y) = P(X)P(Y) \quad (4)$$

$$\bar{P}_c(X \cap Y) = \bar{P}(X)\bar{P}(Y)$$

$$P_c(X \cup Y) = P(X) + P(Y) - P(X)P(Y)$$

$$\bar{P}_c(X \cup Y) = \bar{P}(X) + \bar{P}(Y) - \bar{P}(X)\bar{P}(Y) \quad (5)$$

여기서 정의한 P_c 에서 c 은 조건부 독립을 의미한다.

3. 강구조물의 부식 모델

일반적으로 부식된 부재의 두께는 위치에 따라 다르고, 또한 심하게 부식된 부재는 변동성이 크기 때문에 부식된 부재의 두께 손실을 측정하거나 육안 관찰하는 것은 불확실성이 크다고 할 수 있다. 일반적인 신뢰성 해석에서는 불확실성을 적절한 분포함수로 표현하지만, 본 연구에서는 간단하게 부식된 부재의 잔존 두께를 불확실 신뢰도 모델로 표현하기 위하여 부식정도를 나타내는 부식두께에 대해 불확실 확률의 범위로 표현하였다(Sarveswaran, 1998).

부식된 요소의 두께를 \bar{T}_c 라고 하면 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{T}_c = [\bar{T}_{ca}, \bar{T}_{cb}] \quad (6)$$

여기서 $\bar{T}_{ca}, \bar{T}_{cb}$ 는 부식된 두께의 상·하한 범위를 나타낸다.

Sarveswaran(1998)은 다양한 부위의 두께 손실의 정도를 표현하기 위해 아래 식 (7)에서 주어진 상수 C 를 사용하였으며, C 는 상부플렌지의 경우에 0.7, 하부 플렌지의 경우에 1.3, 복부 상부(복부 높이의 0.75)는 0.25, 복부 하부(복부 높이의 0.25)의 경우는 1.25로 제안하였다. 따라서 부재의 부식정도에 따라 부재의 두께는 새로운 두께의 함수로 표현되며, 플렌지 두께는 다음 식 (7)로 표현할 수 있다.

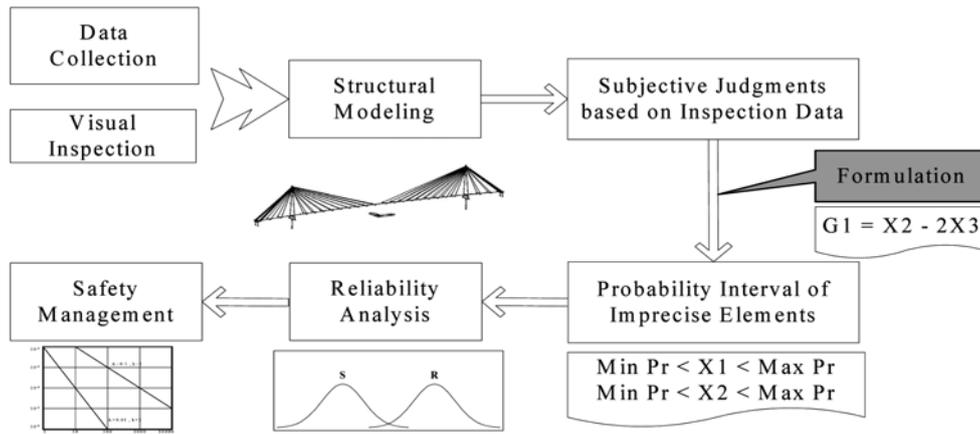


그림 1. 불확실 신뢰성 기법을 이용한 안전도 평가 절차

$$\bar{T}_c = \bar{T}_N - c\xi\bar{T}_N \quad (7)$$

여기서 \bar{T}_N 는 부재의 원 두께; c 는 상수(0.7~1.3); $\xi = \%LT/100$, 그리고 $\%LT$ 는 두께의 평균 퍼센트 손실이다.

4. 불확실 신뢰도 기법을 이용한 안전도 평가 절차

불확실 신뢰도 기법을 이용한 안전도 평가는 다음 그림 1과 같은 절차를 통하여 수행된다.

그림 1에서 보는 바와 같이 첫 번째 절차는 선택된 구조물의 일반적인 사항, 열화의 정도, 이전의 점검사항 등과 같은 데이터를 수집한다. 두 번째 단계에서는 구조 모델링을 수행한다. 다음 단계에서는 부식된 두께를 결정하기 위해 불확실 요소를 결정한 후 점검 데이터를 기반으로 주관적인 판단을 내리게 된다. 그 후 불확실 요소의 확률적인 구간을 이용하여 신뢰성 해석이 수행된다. 그리고 이 단계에서는 구조해석을 위해 무작위 변량의 수치와 한계상태함수 등에 대한 자료를 수집하게 된다. 마지막으로 신뢰성 해석의 결과와 본 논문에서 인용된 위험 허용 기준에 따라 구조물의 안전을 보장하기 위한 유지보수 행위가 필요한지 필요하지 않는지를 결정하게 된다.

제안된 절차는 안전도 해석을 위한 데이터가 불충분하거나, 안전 관리를 위한 의사결정이 시급하게 필요한 경우에 대부분의 부식된 구조물에 대해 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 부식된 모든 지점에 대해 NDT와 같은 정확한 측정이 불가능하기 때문에 가까운 지점의 NDT 측정 결과를 바탕으로 전문가는 육안조사를 할 수 있다. 그 때 그림 1과 같은 절차를 통해 정성적인 전문가의 추정 결과를 정량적인 항으로 바꾸어 줌으로서 체계신뢰성 기반의 안전도를 근사적으로 추정할 수 있으며, 열화 등에 대한 자료수집이 매우 어려운 경우에 구조물의 안전도를 안전도의 범위로 추정할 수 있다. 즉, 본 논문에서 제안한 절차를 적용하면, 전문가의 경험이나 가까운 지점의 NDT의 이전 데이터를 바탕으로 체계신뢰성 기반의 안전도 평가를 합리적이고 쉽게 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

대부분의 신뢰성 응용분야에서 객관적이고 신뢰성 있는 확률을 이용하여 현 상태를 신뢰성 있게 모델링 한다는 것은 관련 자료가 극히 드문 국내 현실을 감안할 때 매우 어려운

일이라 할 수 있다. 특히 복잡한 상황에 대해 의사결정을 내려야 하는 경우에 어느 대안이 더 우월한지 결정내리는 것은 매우 힘든 일이며, 문제에 대해 많은 지식이 없을 경우에는 더욱 그렇다. 정확한 확률 해석은 확정적인 결론을 얻을 수 있게 하지만 확률모수의 평가에 오류가 있을 때에는 정확한 확률해석이 불가능하다. 그러나 본 논문에서 제시한 불확실 확률을 이용하면 확정적으로 상세하게 모델링하기는 불가능하지만 개략적으로 단시간에 해석할 수 있으며, 해석 결과는 불확실성의 상·하 확률로 표현되므로 좀 더 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다고 할 수 있다.

5. 적용예

5.1 데이터 수집과 구조 모델링

본 논문에서 제안한 불확실 신뢰도 기법을 이용한 체계 신뢰성 해석 기법을 국내 공용중인 ○○대교에 적용하여 보았다. 그림 2에서 보는 바와 같이 ○○대교는 폭 11.7m, 길이 484m의 강상자형 주형과 69m 높이의 A 타입 강상자형 주탑 2개 그리고 68개의 locked coil type cable로 구성되어 있다. 교량은 설계활하중이 우리나라의 DB18하중에 해당하는 AASHTO의 HS-20-44하중인 2등급교이다.

신뢰성 해석을 위한 하중효과를 산정하기 위하여 Midas civil ver. 6.1을 사용하였으며, 대상교량은 DB-/DL-18하중으로 설계된 교량이지만 현재의 교통사항을 고려하여 1등급수준인 DB-/DL-24 하중에 대해 검토하였다. 영향선 해석을 통해 선택된 단면의 최대응력이 발생할 수 있는 하중재하위치를 선정하고, 재하된 하중에 대해 단면력을 산정하였다. 적용된 사장교의 구조 모델링은 다음 그림 3과 같으며, 강 박스 거더, 주탑은 3차원 프레임 요소로 모델링 하였으며, 케이블은 케이블 요소로 모델링 하였다.

5.2 주관적 판단과 확률 구간

앞에서도 언급하였듯이 부식된 부재의 두께를 측정하는 것

표 1. 대상교량의 일반사항

구조형식	3경간 연속 강상자형 사장교
연장 및 교폭	484 m (= 70 + 344 + 70) / 11.7m
설계하중	DB-18(AASHTO HS-20-44)

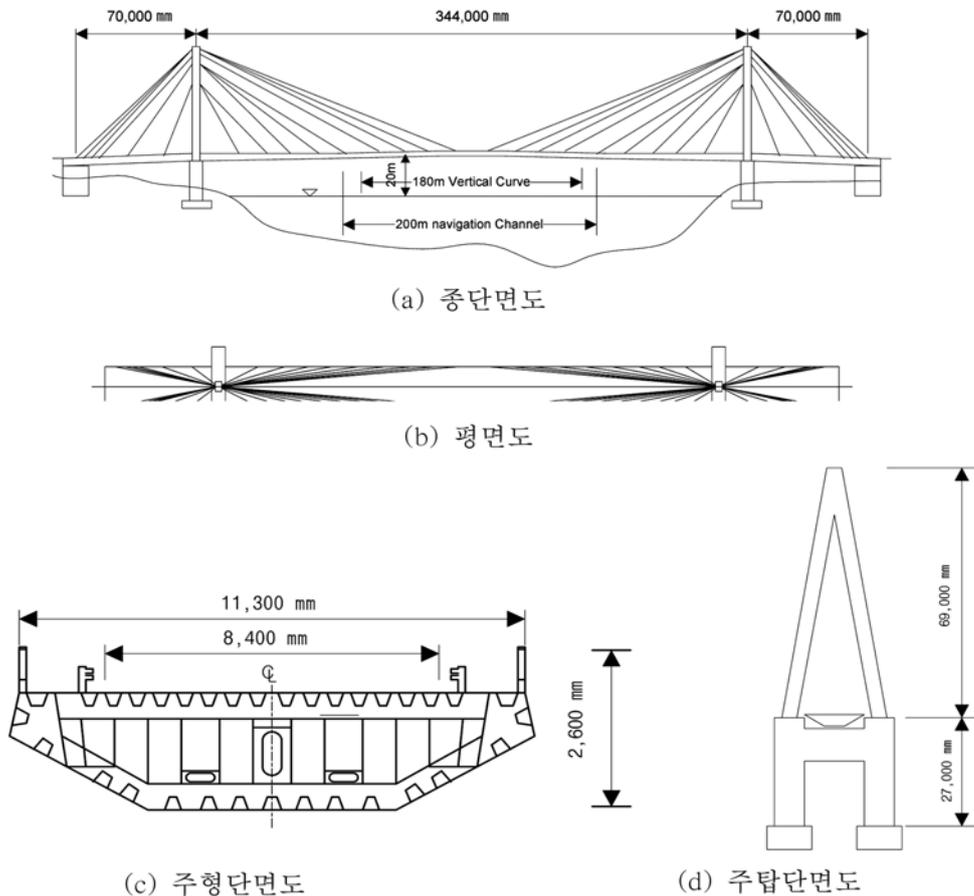


그림 2. 대상교량의 단면제원

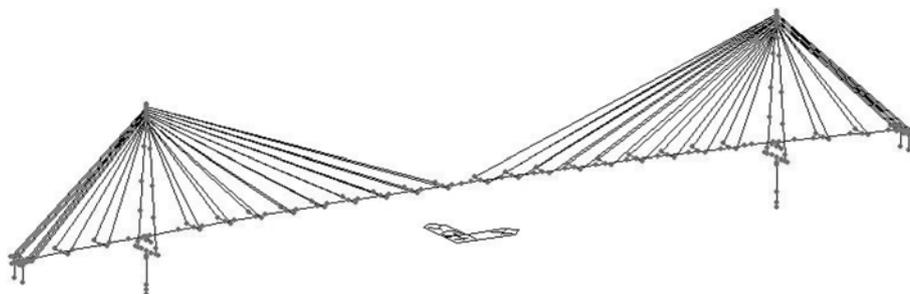


그림 3. 적용된 대상교량의 구조 모델링

은 많은 불확실성을 가지고 있기 때문에, 부식된 부재의 두께는 불확실 요소로 모델링 되어야 한다. 이와 같은 불확실성은 부식이 진행되는 정도에 따라 증가하며, 두께 손실에 대한 육안조사 결과에 따라 불확실성의 정도로 고려될 수 있다. 심하게 부식된 부재의 잔존 두께는 두께의 불확실 정도로 표현되는 불확실 구간으로 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 다음과 같은 몇 가지 점검 결과 및 전문가의 판단 등의 가정 사항을 통하여 값을 추정하는 실제적인 접근이 가능하도록 하였다.

1. 그림 4 C점에서 평균 두께 손실률은 점 E의 두께손실률보다 적어도 2배 이상이다.
 2. 그림 4 E점에서 두께의 평균 두께 손실률은 점A의 평균 두께 손실률보다 1.5배 덜 심각하다.
 3. 그림 4 A점에서의 평균 두께의 손실은 0.075이상이다.
 4. 그림 4 C점에서의 평균 두께 손실은 0.3이하이다.
- 이와 같은 가정은 다음과 같이 형상화 할 수 있다.

1. $G1 = X_2 - 2X_3 \geq 0$
2. $G2 = 1.5X_3 - X_1 \geq 0$
3. $G3 = X_1 - 0.075 \geq 0$
4. $G4 = 0.3 - X_2 \geq 0$

여기서 G 는 판단 함수이며, $X_{1,2,3}$ 는 심하게 부식된 부재의 지점 A, B, C의 두께 손실의 평균 퍼센트 손실이다.

5.3 신뢰성 해석

정정구조계를 제외하고는 대부분의 구조계는 단 하나의 구성부재의 파괴로 인하여 완전히 붕괴되는 일은 극히 드물다. 일반적으로 사장교와 같은 고차 부정정구조물의 파괴는 구조계를 구성하는 여러 요소들의 점진적이고 축차적인 파손의 결과로 발생한다. 더구나 이러한 고차 부정정구조물은 구조 시스템의 특성상 여유성이 높으므로 교량체계의 파괴는 단 한 개의 부재나 요소의 파괴로 이루어지지 않는다. 그러

표 2. 불확실량

항목	공칭비	변동계수	분포형태	참고문헌	
저항	(주탑, 주형)	1.10	0.12	Normal	Bruneau, 1992
	(탄성계수)	1.08	0.10	Normal	Bruneau, 1992
하중효과	사하중	1.05	0.10	Normal	조효남, 1989
	활하중	1.24	0.25	Lognormal	조효남, 1989

므로 교량과 같은 대형 구조 시스템의 파괴는 요소의 파괴와는 상당히 다르다. 이러한 구조계의 특징을 고려하여 본 논문에서는 광범위한 비선형구조해석을 수행하지 않으면서 보다 실질적이고 효율적인 수치해석을 위해, 모든 가능한 파괴경로를 전부 고려한 것이 아니라 요소신뢰성 해석을 통하여 파괴확률이 높은 몇몇 지배단면을 설정하여 각 지배단면들의 파괴로 형성되는 파괴메카니즘을 지배적인 파괴경로로 고려하였다. 다시 말하면, 시스템 파괴상태에 대한 시스템 모형화에 있어서, 사장교의 체계신뢰성 문제를 지배적인 파괴경로만을 고려한 부분 ETA(partial Event Tree Analysis)모형으로 정식화하였다(조효남, 1998).

5.3.1 사장교 케이블 요소의 한계상태방정식

사장교의 케이블요소와 같이 축력(인장력)이 지배적인 부재의 인장파괴에 대한 한계상태 방정식은 다음 식 (8)과 같다.

$$g(\cdot) = P_n N_p D_F - (p_D D_n N_D + p_L L_n K N_L) \quad (8)$$

여기서, P_n =공칭인장강도; D_F =노후손상계수; $N_p=M, F, P, D$ 의 불확실량 중 P_n 과 D_F 의 추정에 관련된 불확실량을 내포하는 랜덤변량이며, F =재료강도관련 랜덤변량; P =제작시공 관련 랜덤변량; P =해석과 모델링 관련 랜덤변량; D =노후손상 추정관련 랜덤변량; P_{TD}, T_{TL} =사하중과 활하중 각각에 의한 인장력; p_D, p_L = 단위사하중 및 활하중에 의한 영향계수; D_n, L_n = 공칭 사하중 및 활하중 효과; $K=K_s(1+i)$ =응답비이며, K_s =측정응력/계산응력 i =충격계수 $N_D, N_L=D_n, L_n$ 의 추정에 관련된 불확실 변량이다.

5.3.2 주형 및 주탑에 대한 한계상태방정식

사장교에 있어서 주형과 주탑은 휨과 축방향력의 조합하중에 의한 영향을 무시할 수 없으므로 휨과 축력을 동시에 고려할 수 있는 조합상관식에 기초하여 안전도 및 내하력을 평가하여야 한다. 본 연구에서 사용한 조합상관식에 기초한 한계상태방정식은 다음 식 (9)와 같다.

$$g(\cdot) = 1 - \left\{ \frac{P_{CD} + P_{CL} + C_{ML}}{P_{CR}} \frac{M_D + M_L}{M_{CR} \left(1 - \frac{P_{CD} + P_{CL}}{P_e} \right)} \right\} \quad (9)$$

여기서, P_{CR}, M_{CR} =단면의 실좌굴강도 및 실저항모멘트, P_e =Euler 좌굴강도 C_m =등가모멘트계수 P_{CD}, M_D =축력 및 모멘트에 대한 사하중 효과 P_{CL}, M_L =축력 및 모멘트에 대한 활하중 효과이다.

5.3.3 불확실성

구조물의 저항과 하중에 관련된 불확실성은 기존의 연구

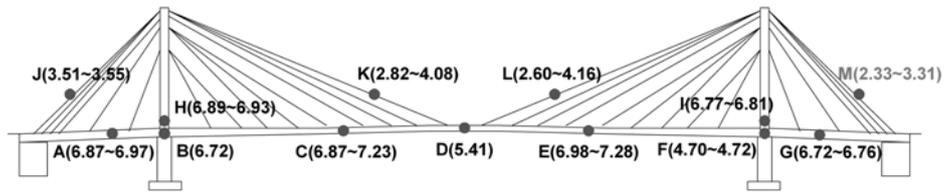
문헌(조효남 등, 1989; Bruneau, 1992) 등을 참조하여 가정하였으며, 이를 표 2에 요약 정리하였다. 본 연구에서는 주요한 하중과 저항을 무작위 변량으로 취급하였으며 이와 같은 불확실성은 재료적 성질, 단면 성질 등의 기본적인 무작위 변량의 함수이다. 적용된 하중과 저항에 대한 불확실성은 부식된 강구조물의 안전도를 감소시키는 요소로 사용되며 신뢰성으로 표현될 수 있다.

5.4 불확실 신뢰도 기법을 사용한 안전도 평가의 결과

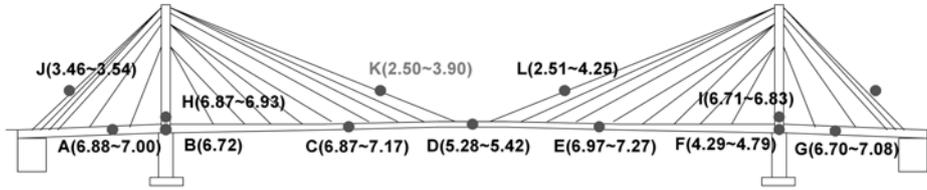
본 연구에서는 먼저 부식이 진행되지 않은 무손상 교량에 대해서 신뢰성해석을 수행하였고, 부식을 고려한 경우에 대해서는 앞에서 언급한 두께손실모형을 이용하여 불확실 신뢰도해석을 수행하였다. 무작위 변량의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석을 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용하였다. 부식을 고려한 경우와 부식을 고려하지 않는 경우를 비교하기 위하여 각각의 경우에 대해 요소 신뢰성 해석을 수행하였으며, 이를 표 3에 요약하였다. 표 3의 결과를 살펴보면 알 수 있듯이 부식을 고려한 경우 M부재의 신뢰도가 가장 낮게 나왔으며, 신뢰성 지수는 $\beta_e=2.33\sim3.31$ 로 나타났다. 이는 E점의 신뢰성 지수인 $\beta_e=6.98\sim7.28$ 과 비교하였을 때 매우 낮은 값을 알 수 있다. 이와 같은 해석 결과를 고려해 볼 때 M지점이 이 구조물의 붕괴 유발 부재라고 할 수 있다. M지점이 붕괴된 후에 구조물의 요소신뢰성을 고려한 결과가 Level 2이다. 부식을 고려한 경우의 level 2를

표 3. 부식을 고려한 요소신뢰성 해석 결과

위치	부식 미고려 (Conventional Reliability)		부식 고려 (Imprecise Reliability)			
	Level 1	Level 2	Level 1		Level 2	
			Lower	Upper	Lower	Upper
A	6.97	6.88	6.87	6.97	6.88	7.00
B	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72
C	7.23	7.17	6.87	7.23	6.87	7.17
D	5.41	5.28	5.41	5.41	5.28	5.42
E	7.28	7.27	6.98	7.28	6.97	7.27
F	4.70	4.30	4.70	4.72	4.29	4.79
G	6.76	7.09	6.72	6.76	6.70	7.08
H	6.89	6.87	6.89	6.93	6.87	6.93
I	6.77	6.83	6.77	6.81	6.71	6.83
J	3.51	3.46	3.51	3.55	3.46	3.54
K	4.22	4.10	2.82	4.08	2.50	3.90
L	4.40	4.56	2.60	4.16	2.51	4.25
M	3.42	-	2.33	3.31	-	-



(a) 요소신뢰성 해석(Level 1)



(b) 케이블 M 파단 후 신뢰성 지수(Level 2)

그림 4. 부식을 고려한 체계신뢰성해석 결과

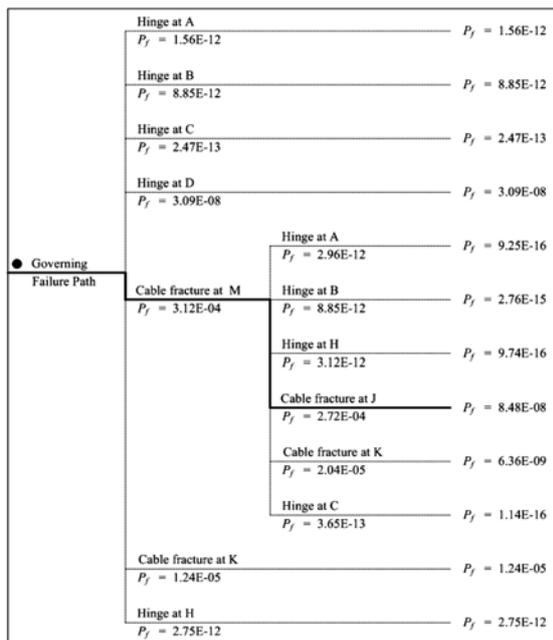
표 4. 부식을 고려한 구조물의 체계신뢰성 해석 결과

부식고려여부	위험단면		파괴모드	요소신뢰성지수	체계신뢰성지수
부식 미고려	거더	중앙부	Single	5.41	5.23
		지지부	Combined	4.70	
	주탑		Combined	6.77	
	케이블		Single	3.42	
부식고려	거더	중앙부	Single	5.28~5.42	3.84~5.48
		지지부	Combined	4.70~4.72	
	주탑		Combined	6.77~6.81	
	케이블		Single	2.33~3.31	

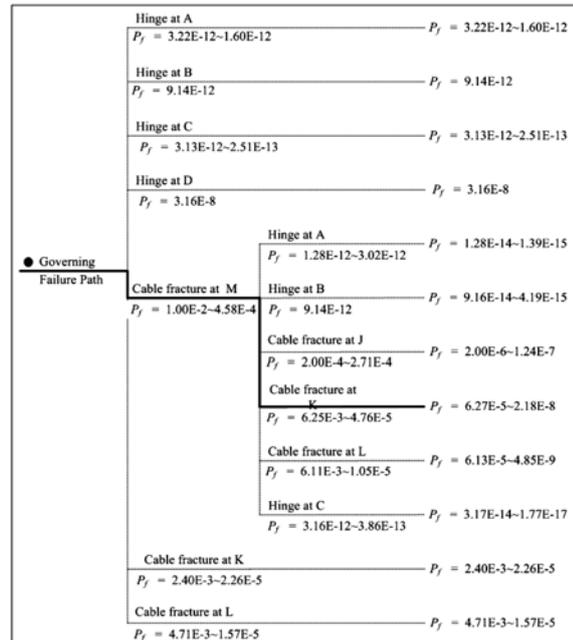
살펴보면 M지점이 파괴된 후에, 가장 파괴확률이 낮은 K지점으로 붕괴가 진행될 것이라는 것을 알 수 있다.

불확실 신뢰도 모델을 고려하여 사장교의 체계신뢰성 해석을 수행한 결과는 표 4와 같다. 표 4를 살펴보면, 부식을

고려하지 않았을 경우 구조물의 파괴확률은 $8.48E-8(\beta_s=5.24)$ 로 나타난다. 한편, 상태평가의 결과로 발견된 부식의 정도를 불확실신뢰성모델을 이용하여 해석한 결과는 $6.27E-5 \sim 2.18E-8(3.84 \leq \beta_s \leq 5.48)$ 로 부식을 고려하지 않은 기



(a) 부식 미고려시



(b) 부식고려시

그림 5. 체계신뢰성 해석을 위한 부분 ETA 해석 결과

표 5. 부식을 고려한 구조물의 체계신뢰성 해석 결과

안전도관리비용 \ 붕괴결과	작다	보통	크다
높음	$\beta=2.3(Pf=10^{-2})$	$\beta=3.1(Pf=10^{-3})$	$\beta=3.7(Pf=10^{-4})$
보통	$\beta=3.1(Pf=10^{-3})$	$\beta=3.7(Pf=10^{-4})$	$\beta=4.3(Pf=10^{-5})$
낮음	$\beta=3.7(Pf=10^{-4})$	$\beta=4.3(Pf=10^{-5})$	$\beta=4.7(Pf=10^{-6})$

존의 신뢰성 해석 결과와 차이가 있는 것을 알 수 있다. 기존의 신뢰도 분석 방법을 이용한 부식을 고려하지 않은 해석에서는 하나의 확정적인 값이 산정되나 불확실 신뢰도 모델을 적용한 결과 안전도가 구간으로 결정되는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 방법을 이용하여 하나의 정확한 결과 값을 추정하기 위해서는 많은 비용(시간, 실험비용 등)이 요구되며, 구조물의 성능에 관한 불확실 수준은 부식과정 본연의 불확실성 때문에 점점 더 증가하므로, 많은 실제적인 상황에서 정확한 데이터를 얻기는 더욱 힘들다. 따라서 데이터가 부정확하게 추정된 경우에는 많은 비용을 투자하고도 부정확한 결과를 추정할 수 있다. 그러나 불확실 신뢰도 기법은 이처럼 불확실성이 큰 정보를 취급하는 경우에 전문가의 주관적 판단과 객관적인 통계적인 판단을 불확실 구간으로 처리하여 대략적인 위험도를 빠르게 추정할 수 있으며, 보수보강 여부나 안전도 판단을 위한 추가적인 실험을 수행할 것인가 하는 등의 의사결정을 적은 비용으로 수행할 수 있다는 장점이 있다.

5.5 안전도 관리 단계

부식에 대해 방지 할 것인가 보수할 것인가에 대한 의사결정을 하기 위해 위험도를 판단의 기준으로 사용하였으며, 사용한 위험허용기준은 표 5와 같다. 목표 파괴 확률이나 목표 신뢰성지수는 강도에 대한 한계상태에 근거하여 JCSS(2001)의 추천 값에 근거하여 표 5와 같이 제시하였다. JCSS(2001)가 제안하는 목표 신뢰성 지수를 본 예제 교량에 적용해 보면, 교량을 유지 관리하는 비용은 보통으로 평가되며, 섬과 육지를 연결하는 교량의 사회적 가치를 고려하였을 때 교량의 붕괴 여파는 클 것으로 판단되므로 위험허용기준은 4.3이다. 이 예제에서 고려하였던 안전도 평가의 결과는 표 4에서 보듯이 3.84~5.48이며 시스템 신뢰성의 결과는 JCSS(2001)의 세 가지 기준(Intolerable, ALARP(As Low As Reasonably Practicable), Negligible) 중 ALARP로 판단되며 이는 비용-이익 해석을 통하여 안전도 관리를 해야 한다는 것을 의미한다. 이와 반면에 참을 수 없는 수준의 위험도(Intolerable)는 확실히 제거되는 것이 필요하다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과로 종합해 보면 교량의 위험 수준을 위험허용기준과 비교하였을 때 낮은 수준이므로 교량은 안전한 수준이며 비용-이익 해석을 통하여 유지보수 혹은 보강이 되어야 한다는 것을 의미한다.

6. 결 론

본 연구는 부식된 강구조물에 대해 불확실신뢰도이론을 이용하여 실제 구조물의 안전도를 평가하는 절차를 제안하였으며, 국내 공용중인 ○○대교에 적용하였으며, 연구 결과를

요약하면 다음과 같다.

1. 위험허용기준은 구조물의 안전도나 위험도를 고려하여 현 시점의 위험 수준을 허용할 것인지, 허용하지 않을 것인지에 대한 의사결정을 내리기 위한 유용한 판단기준이 될 수 있다. 본 연구에서 적용한 예에 위험허용기준을 적용해 보면, 대상구조물은 아직까지는 안전한 수준으로 판단되지만, 생애주기비용해석(LCCA)을 통하여 보수나 보강 등이 이루어져야 한다는 결정을 얻을 수 있었다.
2. 기존의 신뢰성 해석 결과와 비교하여 볼 때, 전문가의 주관적인 판단과 조건부 독립이라는 통계적인 판단으로 유도되는 불확실 신뢰도기법은 안전도 평가에 실제적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 본 연구에서 제안한 불확실 신뢰도 기법은 데이터가 제한되어 얻지 못하거나 또는 전혀 예상하지 못한 상태에서 안전도 관리 수행 여부에 대한 의사결정을 급하게 결정해야 하는 경우에 특히 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 본 논문에서는 제안한 모델을 특정 사장교에만 한정지어 적용하였지만, 조금만 수정한다면 빌딩이나 도로, 타 형식 교량 등에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

건설교통부(1996) 도로교표준시방서 하중저항계수설계편
 조효남, 임종권, 박경훈(1998) 체계신뢰성방법에 기초한 강사장교의 안전도평가, 한국전산구조공학회 논문집, 한국전산구조공학회, 제11권 4호, pp.351-360.
 최현호(2004) 퍼지 및 불확실 신뢰도를 이용한 대형토목구조물의 위험도 및 안전도 분석방법, 박사학위논문, 한양대학교
 Ang, A. H-S. and Tang, W.H. (1984) Probabilistic concepts in engineering planning and design: Vol. 1 & 2, John Wiley & Sons Inc., New York.
 Bruneau, M. (1992) Evaluation of System-Reliability Methods for Cable-Stayed Bridge Design, Jour. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 4, pp. 1106-1120.
 Cho, H.N. and Ang, A. H-S. (1989) Reliability Assessment and Reliability-Based Rating of Existing Road Bridges, 5th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSAR '89), San Francisco, Calif., USA, pp. 2235-2238.
 Cho, H.N., Lim, J.K., and Park, K.H. (1997) System reliability and system reliability-based carrying capacity evaluation of long span bridges, Proc. 7th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR'97), pp. 1927-1934.
 Coolen, F.P.A. and Newby, M.J. (1994) Bayesian reliability analysis with imprecise prior probability, Reliability Engineering and System Safety, 43, pp. 75-85.
 Coolen F.P.A. (1997) An imprecise Dirichlet model for Bayesian analysis of failure data including right-censored observations, Reliability Engineering and System Safety, 56, pp. 61-68.
 Kozine, I.O. and Filimonov, Y.V. (2000) Imprecise: experiences and advances, Reliability Engineering & System Safety, Vol 67, pp

75-83.

JCSS (2001) Probabilistic Model Code, The Joint Committee on Structural Safety.
Kuznetsov, V.P. (1991) Interval statistical models, Moscow: Radio and Communications.
Utkin, Lev V. (2003) A second-order uncertainty model for calculation of the interval system reliability, Reliability Engineering & System Safety 79, pp. 341-351.
Utkin, Lev V. and Gurov, Sergey V. (2003) Imprecise reliability for some new lifetime distribution classes, Journal of statistical planning and inference 105, pp. 215-232.
Ministry of Construction and Traffic (1996) The Korea Design

Bridge Code (KBDC).

Sarveswaran, V., Smith and J.W., and Blockley, D.I. (1998) Reliability of corrosion-damaged steel structures using interval probability theory, Structural Safety, 20, pp. 237-255.
Tabsh, S.W. and Nowak, A.S. (1991) Reliability of Highway Girder Bridge, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No.8, pp. 2372-2388.
Walley P. (1991) Statistical reasoning with imprecise probabilities, London: Chapman and Hall.

(접수일:2005.2.25/심사일:2005.6.15/심사완료일:2006.1.16)