

위험도평가에 기초한 예방유지관리 계획  
- 부산지하철 반송선의 설계 예 -  
**Development of Preventive Maintenance Plan based on PRA**  
**- Case Study of Pansong-Line Railway in Pusan -**

김재원\*                  최영민\*\*                  김대성\*\*\*                  김교훈\*\*\*\*                  박향우\*\*\*\*\*  
Kim, Jae-Won          Choi, Young-Min          Kim, Dae-Sung          Kim, Kyo-Hun          Park, Hyang-Woo

**ABSTRACT**

In the most current Turn-key bidding and Alternative design, is going to establish maintenance plan along with a economical assessment (VE/LCC assessment etc). Generally, establishment of maintenance plan is based on past experiences that are decided upon sensor position and amount with analytic or mechanical control section. But, it is more reasonable that maintenance plan based on level of significance for Probabilistic Risk, with presuming damage probability assessment of structural fracture scenarios. Therefore, in this study it is considered about the technique that an improved maintenance plan of railroad structures using PRA (Probabilistic Risk Assessment) on the basis of structural reliability theory. For this, in the paper, Preventive maintenance plan based on PRA is suggested with an application example of Pansong-Line (Line number 3) railway in Pusan works that actually executed Turn-key design.

**1. 서론**

최근 대규모 건설공사들이 터키, 대안설계 및 민자 BTL사업 등으로 상당수 수행되고 있으며, 이러한 설계에서는 VE/LCC 평가에 의한 경제성 분석의 수행과 유지관리계획의 수립이 반드시 요구되고 있다. 이중 설계단계에서 유지관리계획의 수립시 대부분 과거의 경험과 이론적 해석을 바탕으로 한 해석적 지배단면에 대해 유지관리계획용 센서의 설치 및 계획과 유지관리방안 등을 수립하고 있다. 그러나 이와 같은 유지관리계획은 구조물의 손상, 파괴의 발생가능성에 기초하여 수립되어야 하며, 이러한 손상, 파괴가능성은 구조물이 공용수명 간에 받게 되는 하중과 구조물이 가지고 있는 저항에 관한 각종 불확실성 등을 고려한 파괴확률에 기초하여야 한다. 특히 구조물의 손상, 파괴를 고려할 때 각 구조요소의 파괴가 아닌 구조물 시스템으로서의 파괴를 고려하는 붕괴 기구(collapse mechanism)에 기초하여 분석하는 것이 보다 합리적이다.

따라서 본 논문에서는 설계단계에서 유지관리계획을 수립함에 있어 주요부재의 손상 및 그 발생 경로, 또한 그로인한 경제손실의 추정 등과 아울러 구조물 유지관리의 우선순위와 그에 따른 설계 개선사항 등을 적용하기 위해, 확률적 위험도평가(PRA; Probabilistic Risk Assessment) 기법을 활

\*        자람기술(주) 분석평가사업부, 대리  
\*\*      자람기술(주) 대표이사, 서울산업대학교 겸임교수, 공학박사, 정회원  
\*\*\*     자람기술(주) 분석평가사업부, 대리  
\*\*\*\*    (주)신성엔지니어링 상무, 구조기술사  
\*\*\*\*\* (주)신성엔지니어링 기술연구소 부장, 구조기술사

용하여 구조물의 유지관리계획이 보다 체계적이고 경제성을 고려하며 수행될 수 있도록 하는 개선된 예방유지관리계획(preventive maintenance plan)을 제안하였다.

적용예는 실제 터키공사로 설계된 부산지하철 3호선 2단계(반송선) 건설공사 7공구를 대상으로 하였으며, 해당 공구는 반송교회(부산광역시 해운대구 반송동)에서 고촌마을(부산광역시 기장군 철마면)을 잇는 총연장 2,180m의 경전철 구간으로서 정거장 2곳(상반송정거장, 고촌정거장,  $\Sigma L=130m$ )과 고가본선 2,050m로 구성되어 있다. 본선의 고가교량은 일반적 철도교 형태인 Steel Box교로 설계되어 있으나, 해안지역임을 감안할 때 부식 및 염해의 가능성이 있고 2곳의 정거장 역시 Steel Plate Girder형식으로서, 접합부의 피로 및 열차의 시·제동하중, 열차 충돌 등에 의해 부재가 손상될 가능성이 있어, 공용 중의 유지관리가 중요함을 알 수 있다.

## 2. 본 론

본 연구에서 제안하고자 하는 설계단계의 개선된 예방유지관리계획 수립을 위해서는 위험도평가가 요구되므로, 이에 대한 전반적인 이해를 돕기 위해 적용 대상구조물인 반송선의 설계과정을 바탕으로 그 방법 및 절차를 살펴보았다.

### 2.1 위험도사상 및 사건수분석 기법

위험도사상(risk mapping)이란 과거 경험에 의해 분류된 위험사건이나 예비조사로부터 얻어진 자료를 바탕으로 추정된 위험사건의 발생가능성과 중요도의 관계곡선(그림 1 참조)을 분석하여 발생사건의 중요도를 정성적 또는 전문가에 의한 주관적 평가를 통해서 위험도분석에 필요한 주요 위험사건을 판정하는 방법 및 과정이다. 즉, 부재의 손상이라는 하나의 사건에 대하여 그 발생가능성과 그 부재가 갖는 중요도는 그림 1에서 보여주는 것처럼 역비례의 관계에 있다. 이 관계를 이용하여 여러 가지의 발생 가능한 많은 사건들에 대해 그 중요도를 정성적인 과정을 통하여 판별할 수 있고, 이것을 바탕으로 그림 2와 같은 대표적인 구조물의 손상(또는 붕괴)경로 시나리오를 구성할 수가 있게 된다. 이와 같은 시나리오를 바탕으로 그림 3과 같은 사건수분석(ETA; Event Tree Analysis)을 위한 사건수를 구성하여 사용한다. 그림 3은 다양한 사건수 중 일부분만을 보여주는 것으로 사건수분석 기법은 시나리오에 포함된 각 사건의 발생확률로부터 시나리오의 발생확률( $P_{fi}$ )을 추정하는 것이다.

여기서 발생확률에 의해서는 각 시나리오의 경제성을 고려한 위험도를 판별할 수 없으므로 본 연구에서는 각 시나리오의 발생에 따른 경제손실( $L_i$ )을 추정하고 이를 발생확률과 곱하여 산정되는 위험지수( $RF_i$ )를 제안하였다. 이 세 가지 항목은 각 시나리오의 중요한 factor로서 차후 예방유지관리계획을 수립하는 데에 있어서 필수적인 항목이 된다.

### 2.2 사건발생확률( $P_{fi}$ ) 분석

위험도사상에 의해 작성된 주요 손상경로 시나리오 별 발생확률( $P_f$ , Probability of Failure)은 신뢰성해석과 MCS(Monte-Carlo Simulation) 기법으로 구할 수 있다. 대상구조물의 각 하중 및 저항 파라미터의 불확실변량으로 인한 분포형태를 고려하여, MCS를 통해 발생확률의 근사 값을 얻는다. 시나리오를 구성하는 각 사건의 하중 및 저항의 주요 파라미터 값을 표 1에 나타내었다.

### 2.3 경제손실( $L_i$ ) 분석

Case별 경제손실은 손상에 따른 보수·보강 및 재시공에 소요되는 비용과 1일 교통평균량과 보수·보강·교체별 소요시간 및 그로인한 지연시간과 우회철로가 없는 철도임을 감안한 VE/LCC의

간접비용 중 시간지연비용 항목을 공사기간에 적용하여 사용하였다(철도학회, 2004). 또한 연간 열차의 지연에 의해 발생하는 시간가치손실비용은 여객열차지연비용과 화물열차지연비용을 구분하여 제시하였다(표 2 참조).

$$C_{MD} = C_1 + C_2 \quad (1)$$

여기서,  $C_D$  : 여객열차지연비용,  $C_1$  : 연간업무시간가치,  $C_2$  : 연간비업무시간가치

$$C_1 = V_{WT} \times R_{WT} \times N_Y \times T_{YD} \quad (2)$$

여기서,  $V_{WT}$  : 업무시간가치,  $R_{WT}$  : 업무통행비율,  $N_Y$  : 연장이용인원,  $T_{YD}$  : 연간지연시간

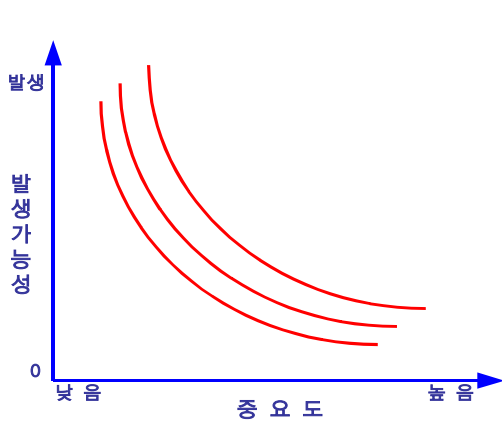


그림 1 사건 발생가능성과 중요도의 관계

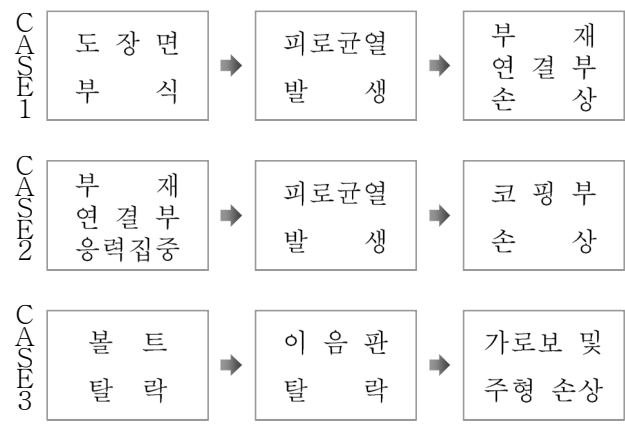


그림 2 구조물의 주요 손상경로 시나리오

유발사건	발생가능사건			발생확률 ( $P_{fi}$ )	경제손실 ( $L_i$ )	위험지수 ( $RF_i$ )
$T_9$	$E_{15}$	$E_{16}$	$E_{17}$			
$P(T_9)$	$P(E_{15})$	$P(E_{16})$	$P(E_{17})$	$P_{f1}$	$L_1$	$RF_1$
			$1-P(E_{17})$	$P_{f2}$	$L_2$	$RF_2$
		$1-P(E_{16})$	$P(E_{17})$	$P_{f3}$	$L_3$	$RF_3$
			$1-P(E_{17})$	$P_{f4}$	$L_4$	$RF_4$

그림 3. 사건수분석(ETA) 기법

표 1. 각 CASE의 파라미터 별 주요 불확실변량

번호	파라미터	분포.	평균 공칭비	C.O.V	참고문헌	파라미터	분포.	평균 공칭비	C.O.V	참고문헌
1	$a_0$	Exp.	0.110	1.000	Shabakhty (2002)	$R_S$	Log-N	1.120	0.100	Nowak (2000)
2	$L_{girder}$	Log-N	1.030	0.080	Nowak (1985)	$X_S$	Log-N	1.000	0.100	Shabakhty (2002)
3	$D_S$	Log-N	1.030	0.080	Nowak (1985)	$M_R$	Log-N	1.100	0.130	Ellingwood (1980)

$$C_2 = V_{NWT} \times R_{NWT} \times N_Y \times T_{YD} \quad (3)$$

여기서,  $V_{NWT}$  : 비업무시간가치,  $R_{NWT}$  : 비업무통행비율

$$C_{LD} = V_{YLT} \times Q_Y \times T_{YD} \quad (4)$$

여기서,  $C_{LD}$  : 화물열차지연비용,  $V_{YLT}$  : 연간화물시간가치,  $Q_Y$  : 연간수송량

표 2. 철도이용에 따른 통행시간비율과 시간비용

구 분		통행시간비율(%)	통행시간비용
여 객	업무시간	16.8	11,946원/인·시간
	비업무시간	83.2	2,401원/인·시간
화 물		100.0	500원/톤·시간

또한 지역경제 간접손실비용은 다음과 같이 나타내었다(Seskin, 1990).

$$C_E = \Phi C_U \quad (5)$$

여기서,  $C_E$  : 지역경제 간접손실비용,  $C_U$  : 총손실비용이며 손실비용계수( $\Phi$ )는 표 3과 같이 규정한다.

표 3. 지역경제 간접손실비용

손실비용계수	대도시	중소도시	소도시
$\Phi$	150%	100%	50%

#### 2.4 반송선의 사건발생확률( $P_{fi}$ ) 및 경제손실( $L_i$ ) 분석

부산지하철 3호선 2단계(반송선) 건설공사 7공구의 설계에 있어서 위험도평가에 의한 각 시나리오별(그림 2 참조) 분석결과는 표 4와 같다.

각 사건의 중요도를 나타내는 위험지수(Risk Factor)는 전술한 바와 같이 발생확률( $P_{fi}$ )과 경제손실( $L_i$ )의 곱으로 표현한다. 위험지수의 값이 클수록 경제성을 고려한 중요도가 높다고 할 수 있다. 따라서 분석결과 CASE 2 > CASE 3 > CASE 1의 관계가 성립되므로, 유지관리계획은 CASE 2 → CASE 3 → CASE 1의 순서로 중요도를 고려하여 수행해야 함을 알 수 있다.

표 4. 반송선의 사건발생확률 및 경제손실

CASE	시나리오 내용	발생확률( $P_{fi}$ )	경제손실( $L_i$ )	위험지수( $RF_i$ )
1	도장면 부식에 의한 연결부 손상	7.8E-05	109.3	0.85
2	피로에 의한 교각 코핑부 손상	1.3E-03	24.9	3.24
3	연결부재 탈락에 의한 주형 손상	5.3E-04	45.2	2.40

## 2.5 반송선의 예방유지관리계획

구조물의 공용 중 손상에 대해 사전조치를 취하여 공용수명을 증대시키는 것을 「예방유지관리」라 하지만, 본 연구에서처럼 각 붕괴시나리오별 위험도분석을 기초로 설계시에 유지관리의 우선순위를 결정하고, 대상구조물의 설계단계에서 미리 손상 가능성을 감소시킬 수 있는 구조물을 설계하는 것은 「개선된 예방유지관리」라 할 수 있다. 표 5에는 위험지수에 따른 관리등급을 제안하였고, 또한 개선된 예방유지관리에 따라서 아래와 같이 설계 개선을 통해 발생확률을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

표 5. 관리등급에 따른 개선된 예방유지관리계획의 결과

관리등급	$RF_i$	CASE	발생확률( $P_{fi}$ )	
			당초설계시	설계 개선시
특별집중관리	$3.0 \leq RF_i$	CASE 2	1.3E-03	1.4E-04
집중관리	$1.0 \leq RF_i < 3.0$	CASE 3	5.3E-04	8.3E-07
주의관리	$RF_i < 1.0$	CASE 1	7.8E-05	1.1E-05

### (1) 특별집중관리대상(CASE 2)

피로에 의한 교각 코핑부 손상은 균집하중 및 열차의 시·제동하중 등이 많이 발생하는 정거장부의 Steel Plate Girder 구조에서 주로 발생하며, 특히 교각의 우각부에 집중된 응력으로 인하여 피로균열이 발생하기 쉽다. 이러한 위험요인을 설계단계에서 제거하기 위한 설계 개선사항으로 응력집중을 완화하기 위해 우각부의 단면을 곡선으로 완화시키고 부재의 현장이음부를 이동시켜 응력집중의 위치를 피하였다.

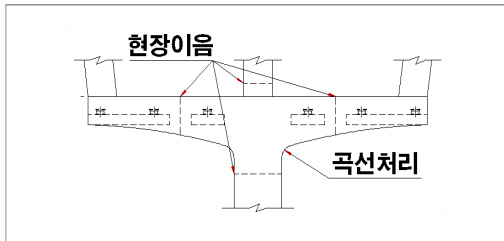


그림 4. 강교각 우각부 개선

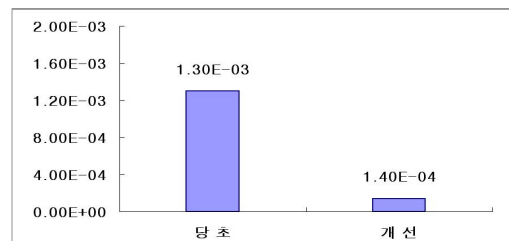


그림 5. 발생확률의 감소

### (2) 집중관리대상(CASE 3)

연결부재 탈락에 의한 주형손상은 충격과 진동이 큰 철도하중에 의하여 현장이음면에서 주로 발생한다. 교량의 종방향 및 횡방향으로 모두 발생가능하며, 반송선에서는 하중에 의해 발생하는 전단력이 집중되는 단면을 피하여 현장이음을 실시하였다.

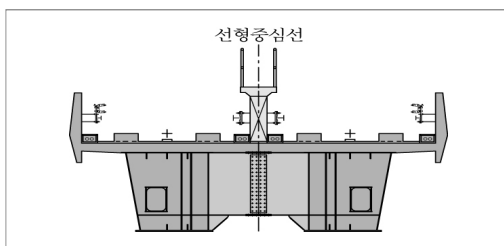


그림 6. 연결부 개선

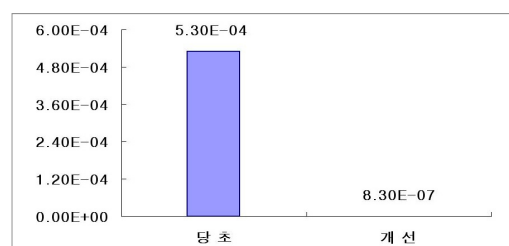


그림 7. 발생확률의 감소

### (3) 주의관리대상(CASE 1)

도장면 부식에 의한 연결부 손상은 일반적으로 대상구조물이 해안과 가까운 지역이므로 쉽게 발생할 수 있는 위험요소 중의 하나이다. 이를 대비하여 반송선의 도장은 일반 방청 프라이머 및 염화고무계 도료가 아닌 접착력 및 내부식성이 우수한 세라믹 코팅 및 우레탄 세라믹계 도료를 적용하여 향후 유지관리비용의 저감효과를 가져올 수 있도록 내구성을 증진시켰다.

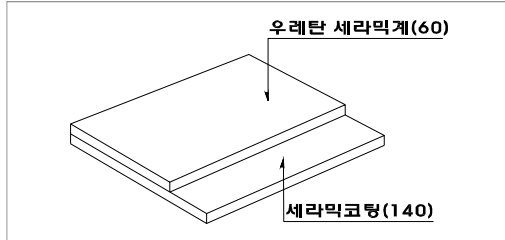


그림 8. 도장면 개선

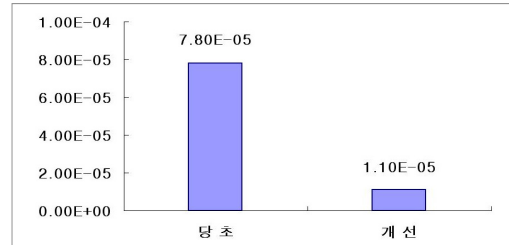


그림 9. 발생확률의 감소

### 3. 결 론

본 논문은 이 연구에서 제안하는 확률적 위험도평가(PRA)에 기초한 개선된 예방유지관리계획 기법을 실제 턴키설계가 수행되었던 부산지하철 반송선의 설계에 대해 적용하여 제안된 기법의 타당성 및 효율성을 검증하였다.

철도구조물인 반송선에 적용하여 본 결과, 개선된 예방유지관리기법에 기초하여 설계의 개선을 수행함으로써 파손발생확률을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 그에 따른 위험지수(RF)를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 단순한 파손발생확률로 구조물의 위험도를 평가하지 않고 구조 요소의 중요도에 따른 경제손실을 고려하는 위험지수로서 판정, 설계 개선을 함으로써 보다 경제적인 유지관리를 수행할 수 있다. 이를 VE/LCC 평가와 접목하여 살펴보면 개선된 예방유지관리로 인해 총기대수명비용의 관점에서 보다 경제적임을 확인할 수 있다. 결과적으로 본 연구에서 제안하는 PRA에 기초한 개선된 예방유지관리계획기법은 턴키, 대안설계 및 BTL사업에서 실용적으로 사용할 수 있을 것이라고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 고려개발과 신성엔지니어링의 턴키설계 중 용역발주에 의해 수행되었으며 용역 중 아낌없는 기술적 지원에 진심으로 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. 대한교통학회(2004), 철도투자편람.
2. 한국개발연구원(2002), 2001년도 예비타당성 조사 연구보고서, “철도부분사업의 예비타당성 조사 표준지침 연구, 제3판.
3. 소병춘, 최영민, 조선규, 신경철, 정재동, “확률적 방법에 의한 철도시설물의 LCC분석, 한국철도학회, 2004년 추계학술대회 논문집.
4. Eamon, C.D. and Nowak, A.S.(1985), "Effects of Edge-Stiffening Elements on Bridge Structural System Reliability," Report 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability PMC2000-315, University of Michigan, Ann Arbor, MI.
5. Shabakhty, N., Gelder, P.V., Boonstra, H.(2002), "Reliability Analysis of Jack-up Platforms Based on Fatigue Degradation," report 21th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE2002- 28360.