

LCC분석을 통한 철도 교량의 최적 대안 선정에 관한 연구

A Study on the Optimum Selection of Railroad Bridge Using LCC Analysis

신태균* 구정산** 이승훈*** 홍태훈**** 구교진**** 현창택****
Shin, Tae-Kyun Koo, Jeongsan Lee, Seung-Hoon Hong, Taehoon Koo, Kyo-Jin Hyun, Chang-Taek

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a LCC analysis model for selecting railroad bridge type as both of quantitative and qualitative factors to increase the effectiveness in the selecting design alternatives and is to select the optimum alternatives through a case study. This LCC analysis model adapts deterministic and probabilistic approach for increasing the reliability and includes AHP analysis considering the qualitative factors.

Keyword : LCC, AHP, MonteCarlo-simulation, Railroad, Bridge

1. 서 론

국내 철도는 1899년 경인선 개통 이래로 100여년간의 역사를 가지고 있고, 철도의 고속화로 인해 철도투자가 확대되고 있으며, 남북 및 대륙철도 연결의 향후 발전계획에 따른 철도국제화시대에 도래하고 있다. 이런 시대적 흐름 속에서 최적의 기술 및 대안 개발을 통해 국가적인 기술경쟁력을 향상시키고 자원을 효율적으로 사용하는 것은 중요한 과제이다. 특히 최근 들어 BTL사업이 활발히 진행되면서 운영 및 유지관리에 대한 관심이 증대되고 있다. 따라서 본 연구에서는 설계단계에서부터 초기투자비 및 유지관리비를 고려한 최적의 대안을 선정하기 위한 LCC(Life Cycle Cost: 생애주기비용)분석 모델을 제안하고, 이 모델에 기초하여 실제 대상교량에 적용하여 LCC측면에서 대안선정을 검토하고자 한다.

철도시설물 중 교량은 설계시 또는 시공시뿐만 아니라 정기점검 및 정밀진단 등의 유지관리시에 시설물의 손상정도에 따라 보수·보강 및 교체가 이루어지며, 이는 지속적인 비용지출로 이어진다. 이러한 점을 고려하여 계획 및 설계단계에서부터 건설기술의 선진화와 합리적인 설계를 위해 교량에 대한 생애주기 전반에 대한 비용검토가 필요하다. 따라서 본 연구는 철도시설물의 설계단계에서 교량의 대안선정 단계로 범위를 한정하여 연구를 진행하고자 한다.

본 연구는 LCC분석에 문헌연구를 통해 분석에 대한 방향을 설정하여 철도시설물 설계에 있어서 LCC 분석 모델을 제시하고자 한다. 마지막으로 LCC분석 모델을 실제 BTL사업의 교량 설계 사례에 적용하여 연구를 진행하고자 한다.

2. LCC분석 모델 개발

2.1 LCC분석 개념

모든 시설물은 기획, 설계 및 건설공사로 구분되는 초기투자단계와 운영·유지단계 및 폐기·처분단계로 이어지는 일련의 과정을 거치게 된다. 이를 시설물의 생애주기(Life Cycle)라고 하며, LCC는 시설물의 기획단계에서부터 폐기·처분단계까지 투입되는 모든 비용의 합계를 의미한다. LCC분석은 이러한 시설물의 생애주기동안 투입되는 모든 비용을 체계적으로 분석하는 것을 말하며, 나아가 각 대안에 대한 생애

* (주)청석엔지니어링, 철도사업부, 정회원, E-mail : tgshin@cse.co.kr, TEL : (02)4050-404, FAX : (02)4050-449

** 서울시립대학교 건축공학과 석사수료

*** 서울시립대학교 건축공학과 박사수료

**** 서울시립대학교 건축공학과 교수

주기비용을 비교 평가함으로써 설계단계에서 최적대안 선정을 위한 기법으로 널리 활용되고 있다. LCC 분석 기법은 각 대안의 경제적 측면의 평가뿐만 아니라 기능, 미관 등 정성적 요소도 고려하여 평가할 수 있다. 따라서 LCC분석은 여러 대안에 대하여 검토함으로써 최적대안을 선정할 수 있는 주요 의사결정 도구로 활용할 수 있다.

2.2 LCC분석 방법

일반적으로 LCC분석은 확정적방법, 확률적방법, 신뢰성방법 등으로 구분할 수 있다. 확정적방법은 수집된 데이터를 기초로 확정적 분석을 실시하므로 적용성이 용이하며, 하나의 결과를 얻을 수 있다. 확률적방법은 수집된 데이터를 기초로 확률적 분석을 실시하며, 수집된 데이터의 불확실성은 시물레이션 기법 등의 해석 방법에 의해 수행한다. 신뢰성방법은 유사한 형식 시설물에 대한 신뢰성 데이터(초기신뢰성지수, 열화개시시간, 신뢰성 저하율 등)를 활용하여 LCC를 분석하는 방법이다.

본 연구에서는 국내 통계자료가 미비하고 분석을 위한 데이터를 구축하는 단계이므로 LCC분석을 위한 방법으로 실용적이고 개념적으로 이해하기 용이한 확정적 LCC분석 방법을 적용하였다. 또한 확정적 LCC분석 결과의 신뢰도를 검증하는 민감도 분석을 실시한다. 민감도 분석은 확률적 LCC분석 방법에서 주로 사용하는 몬테카를로 시물레이션 기법을 활용하였다. 몬테카를로 시물레이션은 변수들의 선택된 분포특성과 입력된 변수 변동범위에서 변수들을 무작위 추출하여 산출된 대안별 LCC분석 결과를 비교·분석하며, 이러한 방법은 확정적 LCC분석의 민감도 분석에서 다루기 힘든 여러 변수들을 분석함으로써 확정적 LCC분석의 단점을 일부 보완한 것이다.

2.3 LCC분석시 비용통합 방식

시설물의 LCC의 산정과정에서 생애주기(Life-Cycle)동안 각기 다른 시점에서 발생하는 비용을 동일 기준에서 비교할 수 있도록 비용을 동일시점으로 통합 필요하며, 이를 위한 비용통합방식에서는 일반적으로 단순합계법(불변비용), 현재가치화법(Present Worth method, 할인비용) 및 연등가액법(Annualized method, 할인비용) 등으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 할인율을 고려하여 현재가치화법을 활용하여 분석을 실시한다.

2.4 교량시설물의 비용분류체계

LCC의 비용항목은 분석목표에 따라 결정되며, 본 연구에서 고려되는 비용항목은 일반적으로 고려할 수 있는 비용요소를 분석요소로 선정하였다.

시설물건설에 소요되는 비용을 파악하기 위해서는 체계적인 비용분류체계가 필요하다. 철도교량은 도로교량과 서로 활용되는 목적이 상이함에 따라 투입되는 자재와 비용발생항목에 있어서 다소 차이가 있다. 이러한 차이는 교량의 바닥판 시공 후 교면포장이 이루어지는 도로교량과 도상과 레일이 설치되는 철도교량의 차이라 할 수 있으며, 이로 인해 설치되는 교량받침이나 신축이음 등 활용되는 자재의 종류나 규격이 다르다. 따라서 본 연구에서는 상기와 같은 점을 고려하여 본 연구에서는 <그림 1>과 같이 철도교량에 적합한 비용분류체계를 적용하여 분석을 실시한다.

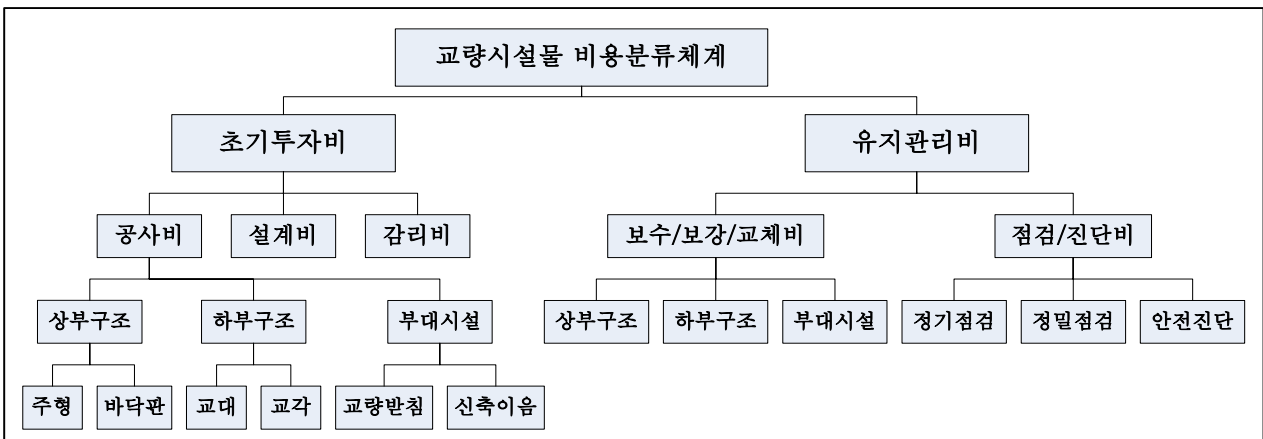


그림 1. 교량시설물 비용분류체계
- 2 -

(1) 보수/보강/교체비

유지관리비용은 교량이 건설된 후 지속적으로 소요되는 비용으로써 보수, 보강, 교체비용으로 구분되며 LCC 비용에서 매우 중요한 부분이다. 기존의 유지관리비 산출방식은 자료획득의 어려움 등을 이유로 공사비의 일정비율을 매년 유지관리비용으로 추정하는 방식이 주로 활용되어 왔으나, 보다 정확한 예측을 위해서 과거의 유지보수자료 또는 산정기준 등에 근거하여 주기, 보수(강)율, 비용에 대한 자료를 추정해야 한다. 국내의 경우, 철도교량에 대한 유지관리데이터는 도로교량에 비해 자료축적이 미미하고 축적된 자료의 형태도 부위별로 세분화되어 있지 않아 본 과업에서는 도로교량의 유지관리데이터를 활용하였다.¹⁾

(2) 점검/진단비

유지관리비 중 점검/진단비용은 정기점검, 정밀점검 및 정밀안전진단 등으로 구별되며, 각각의 대가산출은 건설교통부 고시 제2003-195호(‘03.8.2)의 안전점검 및 정밀안전진단대가(비용산정)기준에 의해 산정하였다.

2.5 LCC분석 기간 및 시점

분석기간은 LCC분석결과에 영향을 미치는 요소 중의 하나이며, 합리적인 분석기간을 설정하기 위해 다음 표와 같이 기존 문헌을 조사하였다. 대한교통학회(철도투자편람, 2003)는 철도시설물을 구성하고 있는 세부요소들에 대한 내구연한 자료를 제시하고 있으며, 본 과업의 대상이 되는 시설물인 교량은 60년의 내구연한을 보유하는 것으로 조사되었다.

그러나, 최근 급속한 기술발전으로 인해 시설물의 장수명화가 이루어지고 있으며 단적인 예로 미국의 경우 공용수명이 75년으로 설정되어 있다.²⁾ 마지막으로 아래 표에서 보듯이 교량의 경우 각국의 설계기준이나 기대수명이 약100년 정도로 설정되어 있으며, 본 연구에서는 교량시설물에 대한 LCC분석기간을 100년으로 설정하여 분석하고자 한다.

도표 1. 교량의 공용년수

국가	기대수명(년)
벨기에	50~100년
덴마크	설계기준에 없음. 평균 50~70년
핀란드	평균 70년, 콘크리트 70년, 강교 90년, 목표공용년수 70년
프랑스	100년에서 수세기 사이
일본	일반교는 50년으로 가정, 중요교량 100~200년
노르웨이	50~100년
스웨덴	100년
스위스	대략 80~100년
영국	설계 120년으로 가정
미국	일반교 56~60, 중요교 100년, AASHTO 설계기준 75년

자료 : 건설교통부, “교량의 LCC 분석모델 개발 및 DB 구축방안 연구”, 2002.12., p47.

2.6 할인율 및 민감도 분석

LCC분석에서 할인율의 합리적인 결정은 보다 정확한 비용을 산정하는데 중요한 영향을 끼치지만, BTL사업의 경우 할인율을 RFP에 명시한다. 따라서 본 연구에서는 BTL사업의 경우 정부지급금 산정시 수익률을 적용하기 때문에 유지관리비에 대한 할인율의 민감도 분석을 실시함으로써 이러한 분석결과를 검증하고자 하였다. 결과적으로 민감도 분석은 BTL사업의 규정에서 정하는 특정 할인율 이외에 실제 할인율을 적용할 경우를 감안한 대안별 평가에 목적이 있다. 할인율은 1990년부터 2005년까지의 명목 할인율(nominal discount rate)과 인플레이션을 적용하여 계산하였으며, 정기예금 금리 및 소비자 물가

1) 황윤국 외(2004), “강교량의 최적설계와 경제적 유지관리를 위한 Life Cycle Cost 분석 기법 및 시스템 개발(2차년도 중간보고서)”, 건설교통부

2) 전귀현 외(2002), “교량의 LCC 분석모델 개발 및 DB 구축방안 연구”, 건설교통부, p47

지수는 한국은행 경제통계연감의 자료를 적용하였다. 또한 명목할인율은 국내의 경우 장기정부채권의 시장규모가 적어 금리의 주도적 역할을 담당하지 못하므로, 본 LCC분석에서는 은행 이자율을 명목할인율로 사용하였다.

민감도 분석은 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용하였으며, 실질할인율의 확률분포를 분석하기 위하여 실제 1990년부터 2005년까지의 실질할인율을 산정하였으며 산정식은 다음과 같다.

$$Ir = \frac{1+n}{1+f} - 1 \quad Ir : \text{실질할인율}, n : \text{명목할인율}, f : \text{인플레이션}$$

1990년부터 2005년까지 명목할인율과 인플레이션을 고려하여 산정한 실질할인율을 정리하면 다음과 같다.

도표 2. 실질할인율(%)

년도	명목할인율	인플레이션	실질할인율	년도	명목할인율	인플레이션	실질할인율
1990	10.00	8.57	1.32	1998	13.39	7.51	5.47
1991	10.00	9.33	0.61	1999	7.05	0.81	6.19
1992	10.00	6.21	3.57	2000	7.08	2.26	4.71
1993	8.50	4.80	3.53	2001	5.46	4.10	1.31
1994	10.00	6.27	3.51	2002	4.71	2.70	1.96
1995	10.00	4.48	5.28	2003	6.17	3.60	2.47
1996	9.00	4.93	3.88	2004	5.92	3.60	2.23
1997	10.59	4.44	5.89	2005	5.65	2.70	2.87

2.7 정성적 영향요소를 고려한 최적대안 선정

LCC분석을 통한 경제성 평가 이외에 정성적 영향요소를 고려하여 최적대안을 선정하였다. 전문가를 대상으로 교량형식 선정시 고려해야할 평가 항목을 선정하여 계층분석적 의사결정방법(AHP:Analytic Hierarchy Process)을 통해 최종 평가를 실시하였다. AHP는 다수의 대안에 대하여 다면적인 평가기준과 다수 주체에 의한 의사결정을 위해 설계된 방법으로서, 의사결정자의 직관적이고, 합리적인 또는 비합리적인 판단을 근거로 정량적인 요소와 정성적인 요소를 동시에 고려하여 평가하게 된다. 따라서 AHP평가 결과는 의사결정문제의 해결을 위한 포괄적인 틀을 제공해 준다.

2.8 LCC분석 모델

앞서 언급한 내용을 토대로 본 연구의 LCC분석 모델을 다음 그림과 같이 제안한다. 사례로 적용하고자 하는 대상이 BTL사업임을 고려하여 할인율(6%)은 확정된 것으로 가정하며, 실제 할인율에 대한 민감도를 분석하기 위해 확률적방법을 통해 민감도 분석을 수행하는 것이 본 모델의 특징이다. LCC분석을 위한 사용한 프로그램은 Microsoft Excel, Crystal Ball 7.0, Expert Choice 11이다.

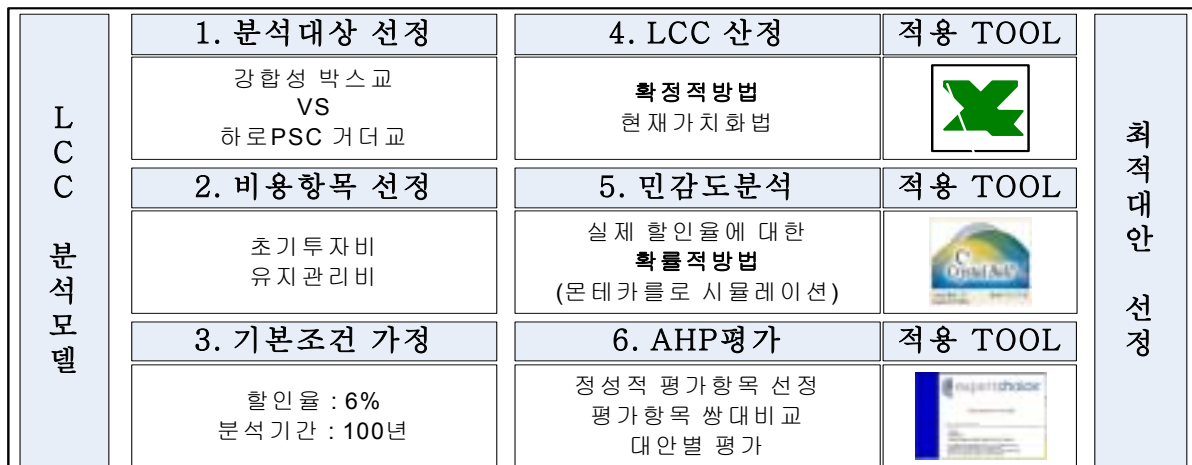


그림 2. LCC분석 모델

3. 사례 적용

3.1 분석 대상 및 LCC 산정 결과

본 연구는 BTL로 시행하는 경전선 복선전철 공사의 00구간에 적용될 교량에 대해 LCC분석을 수행하였다. 분석대상은 강합성박스교(3@40)와 하로PSC 거더교(3@40)로 총연장은 120m로 동일하다. 각 대안별 LCC분석 결과 하로PSC 거더교가 약 28%정도 비용절감효과가 있는 것으로 분석되었다.

도표 3. 분석대상 및 LCC 산정 결과

(단위 : 천원)

비용 항목	강합성박스교 (3@40=120m)	하로PSC 거더교 (3@40=120m)	절감액	절감율(%)
초기 투자비	4,413,571	3,125,683	1,287,888	29.2
유지 관리비	841,391	635,474	205,917	24.5
총 LCC	5,254,962	3,761,158	1,493,804	28.4

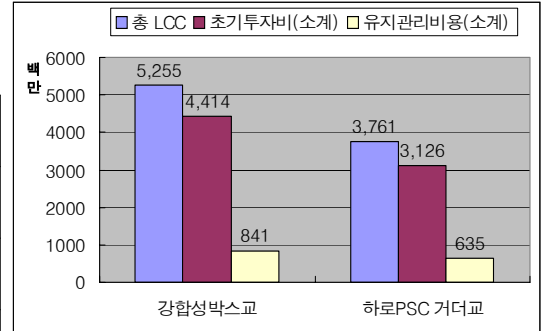


그림 3. 대안별 LCC분석 결과

다음 그림은 철도교의 건설년도부터 100년동안 발생하는 유지관리비용 대안별로 비교한 것이다. 그래프를 분석할 결과 시간이 지날수록 초기보다 유지관리비용의 발생량이 더 차이나는 것을 볼 수 있다. 경제적인 측면에서 하로PSC 거더교가 우수한 것을 나타낸다.

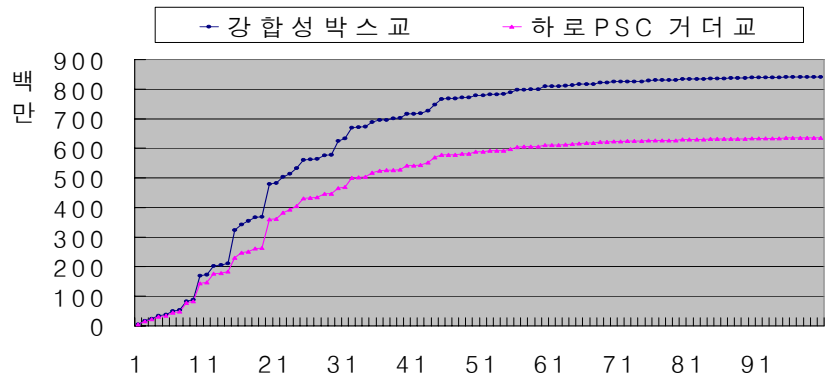


그림 4. 누적 LCC

3.3 민감도 분석

BTL사업의 경우 정부지급금 산정시 수익률을 적용하는 것을 감안하여 유지관리비에 관한 할인율의 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 확률적방법인 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하였으며, Cristal Ball 7.0 소프트웨어를 통해 1990년부터 2005년까지의 실질할인율 데이터(도표 3)의 변수 분포를 분석한 결과 실질할인율에 대한 변수 분포형태는 베타분포로 분석되었다. 이렇게 분석된 할인율의 확률변수에 대하여 강합성박스교와 하로PSC 거더교의 유지관리비에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 분석결과 하로PSC 거더교의 유지관리비가 강합성박스교에 비해 낮게 분포할 가능성이 높게 나타났다.



그림 5. 실질할인율 데이터의 분포형태

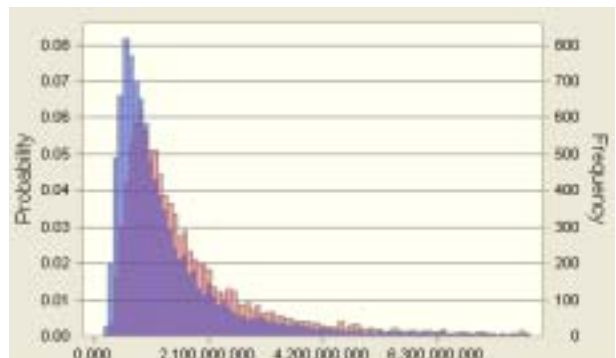


그림 6. 민감도 분석

3.4 최적대안 선정

두 대안의 LCC 산정 결과와 더불어 교량형식 선정시 고려해야할 평가 항목을 선정하여 AHP평가를 실시하였다. 먼저 최종 평가항목으로 도출된 7개의 항목에 대하여 Expert Choice 11 소프트웨어를 활용하여 항목간 상대비교를 통해 가중치를 산정하였다. 절대비교법을 활용하여 각 항목에 대한 비교안의 점수를 비교하여 종합적으로 평가한 결과, 경제성 및 시공성에서 우수한 하로형PSC 거더교를 최적의 안으로 선정하였다.

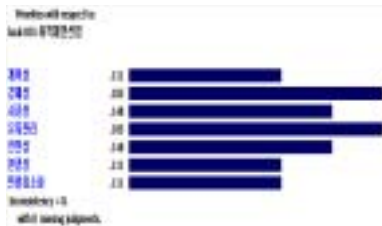


그림 7. 평가항목별 쌍대비교



그림 8. 강함성박스교 평가결과



그림 9. 하로PSC 거더교 평가결과

4. 결론

본 연구는 철도시설물중 교량을 대상으로 확정적 및 확률적방법을 통한 LCC분석 모델을 개발하고 실제 사례에 적용하였다. 그 결과 강함성박스교에 비해 하로PSC 거더교가 약 28%정도 비용절감효과가 있는 것으로 분석되었으며, 확률적 민감도 분석을 통해 분석한 결과 실제 할인율을 적용한 경우에도 하로PSC 거더교가 경제적으로 우수한 것으로 분석되었다. 정량적인 LCC를 비교한 경제성 평가와 더불어 정성적인 요인을 고려한 AHP평가를 추가로 실시하여 기술적·사회적 요인들을 고려한 결과, 역시 하로PSC 거더교가 우수한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 건설교통부(2004), “강교량의 최적설계와 경제적 유지관리를 위한 Life Cycle Cost 분석 기법 및 시스템 개발(2차년도 중간보고서)”
2. 건설교통부(2002), “교량의 LCC 분석모델 개발 및 DB 구축방안 연구”
3. 대한교통학회(2003), “철도투자편람”
4. 박미연 외(2005), "철도교량의 생애주기비용분석에 관한 연구", 한국철도학회 2005년도 춘계학술대회논문집, pp. 77 ~ 83
5. 한국도로공사(2003), “고속도로 교량형식별 생애주기비용(LCC)분석 연구”
6. Alphonse J. Dell'Isola and Stephen J. Kirk(2003), "Life Cycle Costing for Facilities", RSMears
7. Decisioneering, Inc (2005), "Crystal Ball 7.0 입문(Crystal Ball 7.0 Getting Started Guide), (주)이레테크 소프트웨어사업부
8. Expert Choice Korea, "Expert Choice Manual 선진 의사결정 지원 Software"