하천 통과배관의 수리학적 안전성 검토

박문형, 최성욱, 김문겸, 김형식*, 김철만*
연세대학교, *한국가스공사

Hydraulic Analysis of the Safety at River-Crossing Pipelines

M. Park, S.-U. Choi, M. K. Kim, H.-S. Kim*, C.-M. Kim*
*Yonsei University, *Korea Gas Corporation*

1. 서론

라이프라인으로서 가스관로는 중요한 사회기반시설 중의 하나이다. 라이프라인이란 인간 활동의 근간이 되는 통신, 전력, 에너지, 상·하수도, 운송 및 교통 망 등 선 형태의 구성을 갖는 사회기반시설을 의미한다. 사회를 인체에 비유하면 가스관로는 인간의 정·동맥으로 생각할 수 있으므로, 이의 파손시 인체에 미치는 영향은 가히 치명적이라고 할 수 있다. 따라서 라이프라인으로서의 가스관로는 파손시 엄청난 인명 및 재산 피해를 야기할수 있어 사회적으로 재난상황을 만들 수 있다. 또한 파손에서 복구에 이르는 기간 중 가스 공급의 중단으로 인한 2차 피해도 발생하여 경제적으로 어려움을 가중시킨다.

대부분의 가스관로는 지상에 노출이 되어있기 보다는 지하에 매설되어 있어 관로의 유지관리 및 교체에 어려움이 있다. 또한 하천 통과 배관의 경우 하상변동 및 하천환경 변화에 따른 영향을 고려하여 관로의 안전성을 검토/감시하여야 한다. 즉, 하천은 홍수시와 갈수기에 흐르는 유량이 다르므로 하상은 항상 변화하기 마련이다. 홍수시에는 많은 유량을 흘려보내므로 하상에 작용하는 소류력 (tractive force)이 증가하여 하상이 하강하며 홍수가 종료하는 시기에는 유속이 느려져 유사의 퇴적으로 인해 하상이 상승하게 된다. 지하에 매설된 관로는 하상이 상승하는 경우 표토로 인한 상재하중이 늘어나게 된다. 반면, 하상이 하강하는 경우 상재하중이 줄어드는데, 하상하강이 심각한 경우 관로는 유수에 노출되게 된다.

일단 관로가 유수에 노출되게 되면, 관로 주위를 흐르는 유수가 국부적으로 가속하게 되어 관로 주위로 국부세굴 (local scour)이 촉진될 수 있는데 이는 하상의 불안정을 더욱더 가속시키게 된다. 이러한 상황을 방지하려면 관로가 유수에 노출되는 경우 급속한 응급조치를 취해줘야 한다.

O'Dnnell (1978)은 광범위한 문헌조사를 통하여 하천 통과배관의 입지선정, 설계기준, 시공방법, 그리고 유지관리 등에 대하여 정리한 바 있다. Joyco와 Adrian (2001)은 하천 통과배관 주변 하상변동을 예측하는 간단한 공식을 비교하였으며, 하상저하가 예측되는 통과배관의 보호공설계방안을 제시한 바 있다. 그러나 국내에서는 하천 통과배관의 하상변화 예측에 대한 연구가 전무한 실정이다.

본 연구에서는 하천 통과 배관의 수리학적 안전성 검토절차를 제시하였다. 또한, 실제 하천에 적용하여 현재 상황의 검토와 앞으로의 전망, 그리고 안전에 대한 공학적인 대책을 제시하였다.

2. 수리학적 안전성 검토 절차

하천을 통과하는 매설 배관은 접근이 용이하지 않고 예기치 못한 하중이 발생할 수 있다. 현재 한국가스공사에서 관리하는 매설배관의 경우 매설심도를 4 m로 규정하고 있으나 하천 개수 및 교량건설 등으로 인하여 하상의 변화가 일어날 경우 매설심도가 변화하게 된다. 하천을 통과하는 매설 배관 주변의 지형 관측을 통하여 침식이 진행 중이거나 예상되는

경우 수리학적인 검토 절차를 그림 1과 같이 정리할 수 있다. 먼저 장기 하상변동을 예측하기 위한 기초자료(수문자료, 지형자료, 유사량자료)를 수집하여 장기하상변동을 예측하여 평형하상고를 결정한다. 결정된 평형하상고로부터 관로 매설심도를 계산할 수 있으며, 매설심도와 여유고를 비교하여 하상유지시설 설치 및 관로 재시공 등을 결정한다. 장기 하상변동 예측을 위하여 일반적으로 일차원 수치모형이 이용된다. 70년대 처음으로 개발된 장기 하상변동에 관한 수치모형으로 프랑스의 SOGREAH에서 개발된 CHAR-series (Cunge와 Perdreau, 1973)를 들 수 있다. 그리고 미 공병단의 HEC (Hydrologic Engineering Center)에서 개발된 HEC-6 (Thomas와 Prashun, 1977)는 본격적인 하상변동 예측모형으로서 현재까지 가장 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 미 공병단에서 개발된 HEC-6 모형을 이용하여 대상구간의 장기 하상변동을 예측하고자 한다.

3. 적용 사례

3.1 유역 개황

적용 대상 하천은 국가 2급 하천에 해당한다. 건설교통부의 하천정비기본계획에 따르면, 유역면적은 737.7 km^2이고 유로연장은 50 km이다. 유역의 평균폭 (유역면적/유로연장)은 14.75 km이고 형상계수 (유역면적/유로연장의 제곱)는 0.295로서 유출현상의 집중성향이 약해져서 첨두홍수량이 크게 나타나지 않는 경향을 보일 수 있다.

그림 2는 적용 대상 하천의 개요도를 나타낸다. 그림에서 물의 흐름 방향은 위에서 아래이며 하천이 상당한 사행을 보이는 것을 알 수 있다. 특히 통과배관의 상류 지점에서 첩수로 형태의 샛강이 발달하여 있으며 통과배관 직상류에서 다시 합류하는 것으로 나타나고 있다. 이는 통과배관이 위치하는 지점이 수리학적으로 매우 복잡한 유동장을 형성할 것을 암시한다.

그림 3은 통과배관 주변의 실측된 횡단면의 변화를 보여준다. 통과배관 측선상의 좌안으로부터 약 170 m 지점에 관상고가 하상의 위치보다 높아 관로가 노출되어 있음을 알 수 있다. 통과배관 상류에 위치한 측선의 하상고를 살펴보면 좌안으로부터 약 250 m 에 위치한 샛강이 있음을 알 수 있다. 이 첩수로 형태의 유로가 통과 배관 측선상에서 관을 노출시키고 있으며 통과배관 측선과 통과배관 하류 측선에도 계속 연결되다 본류와 합류되는 것으로 나타나고 있다.

그림 4는 통과배관 지점에서의 시간에 따른 하상 변동 상황을 보여준다. 준공당시에는 하천 개수가 완료되어 단단면의 하천 형태와 우안의 제방이 보이나 이후의 자료에서는 제방이 보이지 않으며 좌안으로부터 약 170 m 떨어진 지점에 첩수로에 의한 새로운 물길이 만들어졌음을 알 수 있다. 이것이 통과 배관이 유수에 노출되는 직접적인 계기가 된 것으로 판단된다.

3.2 장기 하상변동 예측

적용대상 하천의 장기적인 하상변동의 경향을 살펴보기 위하여 일차원 하상변동 수치모형인 HEC-6를 이용하여 수치모의를 실시하였다. 수치모의를 위하여 2001년 1월 1일부터 2003년 12월 31일까지 대상구간 상류의 수위표지점에서 측정된 유량이 20년간 반복된다고 가정하여 상류 경계조건으로 사용하였다 (그림 5). 2002년 8월 7일 발생한 1,389 m^3/s의 홍수량이 이 기간 중의 최대홍수량으로서 대상 하천의 100년빈도 설계홍수량인 3,300 m^3/s의 약 30 %에 해당하는 유량이다.

하류단 경계조건을 위하여 홍수추적 결과로부터 내삽 (interpolation)하여 수위를 부여하였다. 수치모의 대상구간에서 하상토의 입도분포를 그림 6에 제시하였다(건설교통부, 2002). 대상구간의 하상토는 굵은 모래 (coarse sand)로부터 가는 자갈 (fine gravel)로 구성되어

있으며 평균 입경이 상류에서 하류로 갈수록 줄어드는 양상을 보여 장갑화가 진행되었음을 알 수 있다. 평균입경은 약 2.5 mm로서 가는 자갈에 해당되어 유사이동량과 하상변동이 작을 것을 예측할 수 있다.

HEC-6를 이용하여 2000년 하상고를 기준으로 5년, 10년, 20년까지의 장기하상 변동을 예측하였다. 수치모의 대상구간 전반에 걸쳐 하상의 변화는 크지 않을 것으로 예상되었으며, 통과배관 구간은 미소하게 퇴적되는 경향을 나타내었다.

HEC-6 모형은 유입유사량에 따라 계산 결과가 상당히 달라질 수 있기 때문에 유입 유사량의 결정은 매우 중요한 문제이다. 일반적으로 유입 유사량은 실측자료를 이용하거나 검정된 공식을 이용한다. 그러나 본 과제의 대상 구간에서 하상변동 계산을 위한 유사량 자료가 존재하지 않으므로 유입 유사량 산정 공식을 이용하여 유입 유사량을 산정하였다. 공식 또한 유사량 자료가 없기 때문에 검정없이 사용하였다. 유입 유사량 산정 공식은 다음과 같은 Yang (1973) 공식을 이용하였다. 한국건설기술연구원 (1989)은 Yang 공식이 국내 하천에 가장 적합한 공식이라고 밝힌 바 있다.

$$\log C_t = 5.435 - 0.286\log\frac{wd}{\nu} - 0.457\log\frac{u_*}{w} + \left(1.799 - 0.409\log\frac{wd}{\nu} - 0.314\log\frac{u_*}{w}\right)\log\left(\frac{VS}{w} - \frac{V_{cr}S}{w}\right) \quad (1)$$

여기서 C_t = 총유사량(ppm), VS = 단위 stream power, u_* = 전단속도, w = 입자의 침강속도, d = 유사의 입경이다.

일반적으로 장래에 발생할 하상변동을 예측하기 위해서는 구축된 모형의 검증 절차가 필요하다. 즉, 일정기간 과거에 실측된 수문자료를 이용하여 수치모의를 실시한 후 하상변동 측정치와 비교를 통하여 모형을 검증한다. 이후 검증된 모형을 가지고 향후 발생할 하상변동을 예측하는데, 본 과제의 대상구간은 2000년에 수립된 계획하상고 이외의 자료는 찾아볼 수 없기 때문에 모형의 검증은 생략하였다.

그림 7은 HEC-6를 이용하여 2000년부터 2020년까지 대상 하천의 하상변동을 수치모의한 결과이다. 전반적으로 전 구간에 걸쳐 하상이 안정되어 있어 향후 큰 변화가 없을 것으로 예측되었다.

4. 결론

적용대상 하천 통과 배관의 개황을 살펴보고 장기하상변동의 수치모의를 실시하여 장기적인 하상변동의 추이를 검토하였다.

대상 통과 배관의 경우 관로의 하천 통과 지점 선정에서부터 문제가 있는 것으로 보인다. 일반적으로 관로를 매설하여 하천 등을 통과 시킬 경우 수리학적으로 유동현상이 복잡할 것 같은 지점은 피하는 것이 바람직하다. 예를 들어 두 하천이 만나는 합류점이나 유심선이 자주 변화하는 만곡부 등은 매설 위치로 좋지 않다. 그러나 연구대상 통과배관의 지점은 상류에서 형성된 첩수로 형태의 물길이 다시 합류되는 지점으로 홍수가 발생할 경우 기존의 수로보다는 연장이 짧은 새로운 물길을 따라 많은 양이 통과될 수 있다. 따라서 이 지점은 수리학적으로 유동이 복잡하며 이에 따른 하상 변동도 국부적으로 미묘한 양상을 보일 수 있다.

94년 준공이후 하천 단면의 형태가 변화하였고 2001년 자료에 의하면 우안측에 첩수로 형태의 새로운 물길이 형성되어 통과 배관이 유수에 노출된 직접적인 원인을 제공한 것으로 판단된다. 현재 지형상 첩수로를 통하여 홍수시 상당한 양의 유량이 통과될 것으로 보여 그대로 방치할 경우 통과 배관 주변으로 심각한 세굴이 발생할 수 있다.

HEC-6 프로그램을 이용하여 대상 하천에 대한 장기 하상변동을 검토하였다. 전 구간에

걸쳐 하상이 비교적 안정되어 있음을 확인하였다. 따라서 상류지역의 급격한 도시화 및 난개발 등과 같은 토사유입량의 심한 변화를 촉발할 사건이 없다면 향후 하상은 크게 변화하지 않을 것으로 보인다.

현재 유수에 노출된 관로의 보호를 위하여 두 가지 독립된 방안을 제시하고자 한다. 먼저 홍수시 우안측의 샛강으로 유입되는 유량과 수세를 줄이기 위하여 수제 등의 수공구조물을 설치한다. 그러나 이는 하류에 매설된 관로를 보호할 수는 있으나 홍수 발생시 상류 및 주변의 홍수위를 높일 수 있으므로 수리학적으로 신중히 검토하여 시공하여야 한다. 또한 유수에 노출된 관로를 직접 보호하기 위하여 게비온 메트릭스 등을 시공하여 세굴의 진행을 차단한다. 그러나 이러한 방안은 관로 보호를 위한 항구적인 대책은 될 수 없으며 홍수시 망실의 위험이 있다, 따라서 수시로 게비온 메트릭스의 유무를 점검하고 세굴 (관로의 노출) 상태를 확인하여 관로 보호에 최선을 다해야 한다.

5. 참고문헌

1. 건설교통부, 안성천 수계 하천정비기본계획, 건설교통부, (2002)
2. 한국건설기술연구원 하천 유사량 산정방법의 선정기준 재발, 기본연구과제 보고서, 한국건설기술연구원, (1989)
3. Cunge, J. N. and Perdreau, N., "Mobile bed fluvial mathematical models." La Houille Blanche, 28(7), (1973)
4. Joyce, S. and Chantler, A., A method for the analysis of scour potential and protective works design at pipeline crossing of mobile-bed river, Pipeline 2001: Advances in Pipelines Engineering & Construction, in CD, (2001)
5. O'Donnell, H. W., Considerations for pipeline crossing of rivers, Transportation Engineering Journal, 104(TE4), 509-524, (1978)
6. Thomas, W. A., and Prasuhn, A. L. (1977). "Mathematical Modeling of Scour and Deposition," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 103(HY8).
7. Yang, C. T. (1973). "Incipient Motion and Sediment Transport." Journal of Hydraulic Division, ASCE, 99(HY10).

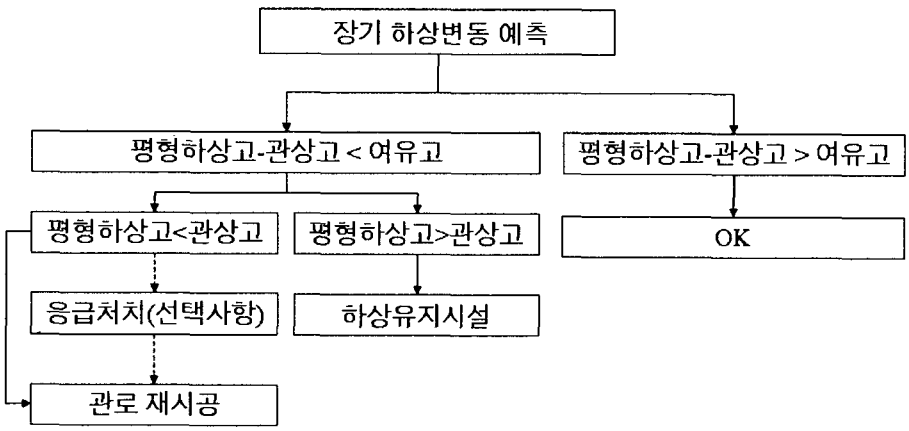

그림 1. 통과 배관의 수리학적 안전성 검토 절차

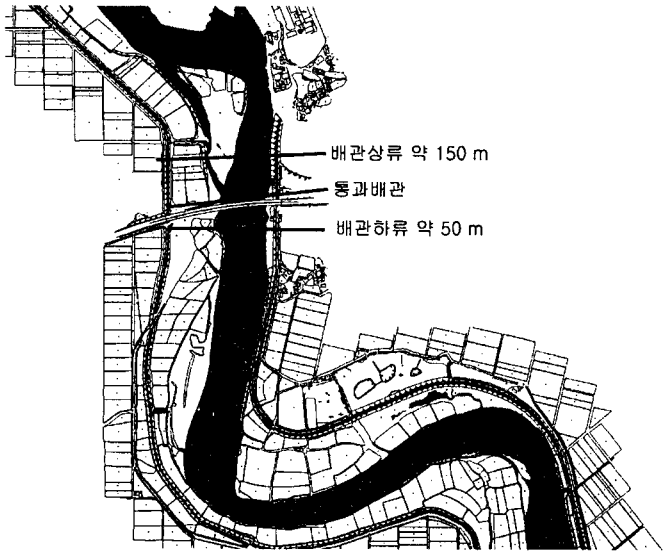

그림 2. 적용대상 통과배관 유역 개황

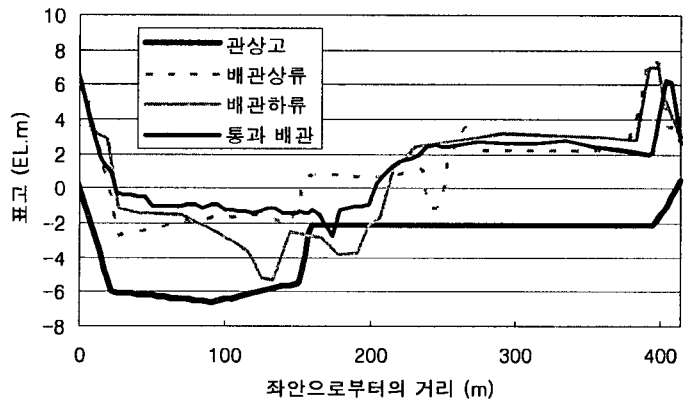

그림 3. 적용대상 유역의 공간적 하상 변화 (2000년)

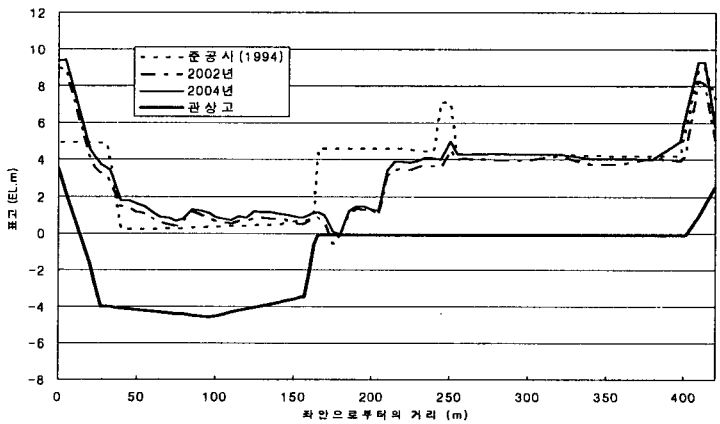

그림 4. 적용대상 통과배관의 시간적 하상 변화 (1994년 - 2004년)

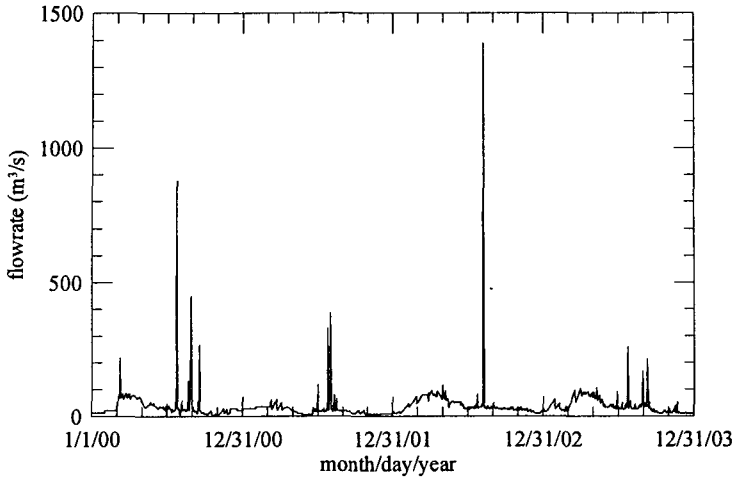

그림 5. 상류단 유입유량

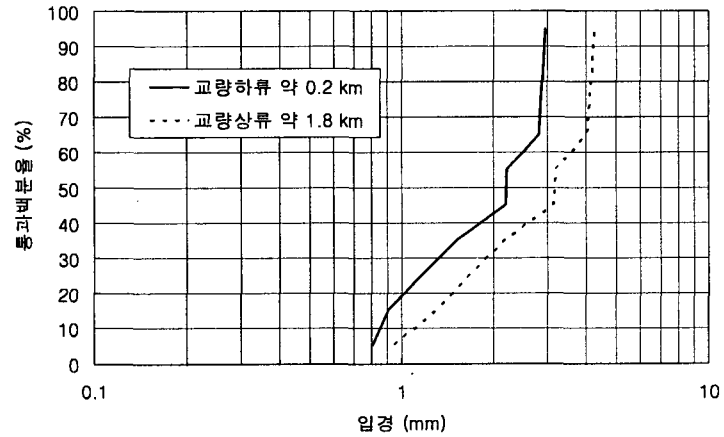

그림 6. 통과배관 주변 입경분포

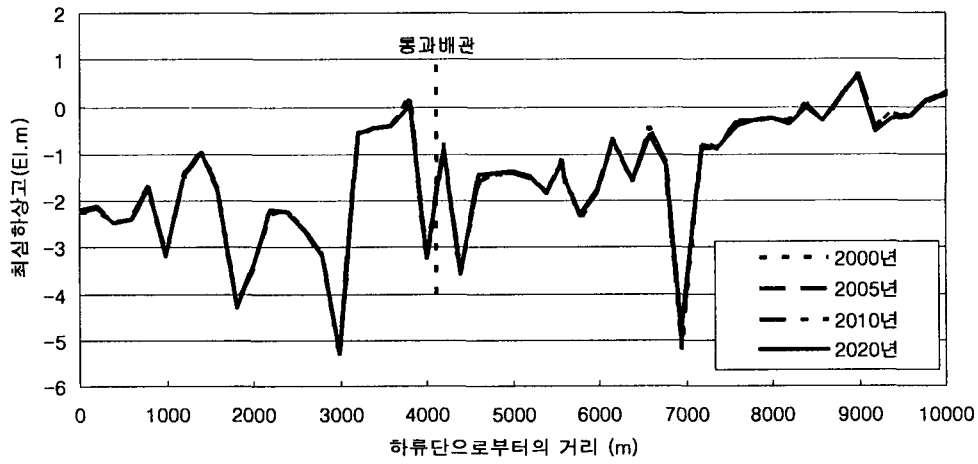

그림 7. 적용대상 하천 장기 하상 변동 예측 (2000년 - 2020년)