

용융아연 도금강관으로 제조된 파형강관의 내구수명예측

김종상

포항종합제철주식회사 기술연구소 광양연구팀

Estimation of Durability of Corrugated Steel Pipes Made of Hot-Dip Galvanized Sheet Steels

J. S. Kim

Kwangyang Research Team, Technical Research Laboratories

Pohang Iron and Steel Company, 699 Keumho-dong

Dongkwangyang-city, Korea 544-090

Abstract

Estimation of durability for corrugated steel pipe(CSP) has been evaluated by using several analytical methods. This study, using a plain hot-dip galvanized CSP as the base line, addresses additional coatings such as polymers and bituminous coatings that may be used to achieve a desired design life of at least 50years. The behavior of both the soil side and the effluent side of the pipe have been studied. It is estimated that CSP generally provides outstanding durability with regard to soil side effects, and that virtually any required service life can be attained by selecting appropriate coatings and/or thickness of steel substrate. This study is limited to storm drainage systems carrying naturally occurring surface water only. The recommendation in this report do not apply to sanitary or industrial waste sewers or other conduits used to carry corrosive effluents.

1. 서 론

파형강관(corrugate steel pipe : CSP)은 1896년 미국 인디애나주의 한 시청 토목기사인 Simpson에 의해 처음 개발되어 약 100년간 미주 전역과 유럽지역에서 적용범위가 확대되고 있다¹⁾. 특히 1, 2차 세계대전시 각종 군사도로와 활주로 공사에 사용되어 좋은 성과를 얻게 됨을 기회로 수요가 크게 확산되어, 현재 미국의 경우 1989년 기준으로 전체 배수관(drainage pipe) 수요의 40% 이상을 점유하고 있다.

최근 국내의 급속한 경제산업 발전은 부존자원

의 부족과 노동임금의 상승을 초래하여 배수관 제품의 선진화와 첨단화를 요구하고 있다. 즉 다양한 배수구조물에서 적합한 배수관의 선택은 수리보수와 구조강도의 안정성, 충분한 내구성, 간편한 시공성 및 저렴한 경제성 등의 복합조건을 만족하는 특성을 요구하고 있다. 이러한 수요추세에 대처하기 위해 포항종합제철에서는 1990년 12월 열연강관에 용융아연 도금처리(hot-rolled galvanized iron : HGI)를 하는 산세도금설비(pickling & galvanizing line : PGL)를 광양제철소내에 준공하여 국내 토목공사의 배수관 용도로 용융도금 피복처리한 파형강관을 보급하기 위해 파형강관

제작업체와 공동으로 소재개발 및 수요확대를 추진하고 있다.

파형강관의 특징은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 용융아연 도금강판을 나선형으로 가공하여 외압 강도를 지지하고, 관연결부는 커플링밴드(coupling band) 처리하여 용접처리를 하지 않기 때문에 기존의 배수관으로 널리 사용되고 있는 콘크리트涵관과 비교할 때 운반비, 노무비 절감등의 경제적 효과와 시공이 매우 간편한 장점이 있다. 또한 강관의 두께를 조절하여 충분한 강도를 유지할 수 있고, 아연도금층의 희생방식 작용과 부가적인 다양한 피복기술의 발달로 반영구적 내구수명을 갖게 되었다. 파형강관의 내구수명에 대해서는 미국내 각 주정부 및 연구기관에서 조사한 보고서가 현재 약 250여종을 넘고 있다²⁻⁷⁾.

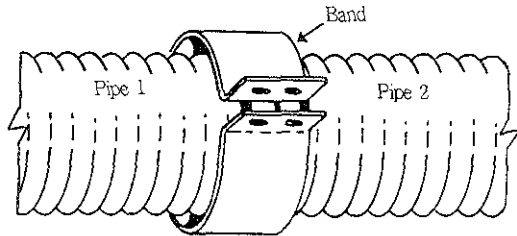


Fig. 1. Schematic diagram of corrugate steel pipe.

그러나 국내에서는 파형강관을 생산하여 설치한 연수가 1~2년에 불과하여 국내 사용환경에 적용시 내구수명에 대한 관찰결과가 전무한 상태이며, 파형강관의 최종 수요처에서는 순수한 용융아연 도금처리(도금부착량 : 양면기준 600 g/m^2)한 파형강관을 국내 사용환경에서 사용시 적정 수준의 내구수명 예측년수의 도출을 요구하고 있다.

본 연구에서는 HGI파형강관을 사용시 기존에 개발된 대표적인 내구수명 예측기법들을 고찰하고, 국내환경에 적용시의 내구수명 예측년수를 도출함으로써 관련 수요업체의 배수관 시공시 기초자료로 제시하고자 하였다.

2. 이 론

2.1 내구수명의 정의

파형강관은 고속도로의 횡배수관(culvert) 및 주택단지 등의 우수관(storm sewer)으로 널리 사용되고 있으며 다양한 토양 및 수온액조건하에서 장시간의 수명을 유지하고 있다. 내구수명(durability)이란 사용중 배수관의 제기능을 충분히 할 수 있는 능력을 의미하는 것으로 단순히 재료측면의 약화뿐만 아니라 고려되어야 할 모든 설계인자(예 : 부식, 마모, 균열, 침식, 부정합등)를 포함한다. 그러나 현재까지 배수관 또는 하수관의 내구수명 한계에 대한 명확한 정의는 없다. 상수도관과 같이 공식(pitting)에 의해 내부 강관벽이 침식되는 것을 내구수명 기준으로 하는 것은 비정상적인 토양조건을 제외하고는 배수관에 적용할 수 없다. 즉 강관내부가 부식 또는 마모로 심하게 공식(pitting)이 발생되고 구멍부식(perforation corrosion)이 있더라도 뒷채움재(backfill)를 지지할 능력이 있는 강관은 신속히 보수 또는 교환하면 된다. 따라서 배수관의 내구수명을 정의하는 다른 방법은 보수를 할 필요가 없는 시점까지의 연수로 나타내는 것이다. 비록 배수관이 내구수명에 도달했다라도, 파괴시까지 더 장시간이 필요하다. 예를 들면 도로설계자들은 보수가 필요없는 내구수명을 적어도 2차 도시설망의 경우 25년, 고속도로, 도시 교통수단의 경우 40년 이상을 필요로 하고 있다. 더 장시간의 내구수명을 요구하는 곳은 배수관을 매설하기 어려운 도시지역, 제한된 내부공간에 작고 긴 관을 매설하는 장소등이다. 일반적으로 파형강관에서 요구되는 내구수명은 미국 남동부 14개 주의 고속도로 설계담당자들에 대한 설문조사 결과 약 50년으로 나타났는데, 이는 장기간에 걸친 인플레이션과 직접경비의 변화가 서로 균형을 이룰 수 있는 시간을 고려한 경제적인 설계수명으로 추정된다⁸⁾.

2.2 내구수명 예측기법

지하에 매설된 배수관재료의 손상속도는 매설 환경에 크게 의존한다. 환경인자에는 토양, 수질 및 대기에 속하는 많은 인자들로 구성되어 있다. 여러 연구결과에 따르면 한 장소에서 관련된 인자가 다른 곳에서는 관련되지 않는 경우가 많다. 따라서 파형강판 설계자들은 주어진 환경에서 재료의 부식손상속도를 정확히 예측하기 위해서, 다양한 야외조사 및 실험실적 분석방법을 채택하고 있다.

현재까지 파형강판의 내구수명을 예측할 수 있는 많은 접근방법이 개발되었는데, 다음은 이러한 예측기법을 개발하는 데 있어 고려할 사항을 나타낸 것이다.

1) 내구수명 또는 파괴한계는 어떤 측정할 수 있는 양, 기계적성질의 감소, 공식깊이 또는 도금층 손실량등을 기준으로 한다.

2) 매개변수의 측정속도는 잔존 사용수명을 예측할 수 있도록 평가시스템을 만든 후 시간경과에 따라 측정하여야 한다.

3) 야외환경의 부식성은 토양측면의 변수인 pH, 전기저항등 또는 수질의 화학특성등으로 특성화시켜야 하고 실제 야외성능과 상호 연관성을 가져야 한다.

4) 개발기법은 주기적인 검사와 평가를 통해서 서로 다른 야외분위기에 사용시에도 유용성을 갖도록 해야 한다.

현재까지 다양한 환경하에서 배수관 및 강판재료의 내구수명 예측기법이 개발되어 왔다. 이때 사용된 방법은 다음과 같은 4가지의 서로 다른 접근방식을 채택하고 있다. 그러나 다른 지역에 내구수명 예측기법을 사용할 때, 이 방법들이 특정지역의 환경하에 맞도록 개발되었다는 것을 항상 유념하여야 한다.

1) 야외성능 조사

1931년 Crum⁹⁾에 의해 수행된 초기 연구의 하나는 캘리포니아, 조지아, 테네시, 텍사스 및 버지니아주에 매설된 약 3,000개소 이상의 야외조사

에 기초한 여러 종류의 배수관의 사용특성을 통계 분석한 결과이다. 이것은 부식-마모(abrasion)과정에 의한 배수관의 점진적인 파손과정을 정의하고 분류한 첫번째 시도였다. 금속강판의 경우 공식깊이 또는 잔존두께를 측정하여 총두께의 어느 정도가 손상되었는지를 결정하는 것이 일반적인 방법이다. 즉 구멍부식까지의 잔존시간을 의심하면 특정환경하에서 어떤 재료의 내구수명을 유추할 수 있다. 그러나 Romanoff¹⁰⁾는 부식이 일정속도로 진행되지 않으며, 일반적으로 점진적인 감소하는 부식속도를 나타내므로, 내구수명의 일직선적인 외삽은 보수적인 방법이 된다고 하였다.

2) 야외시험 조사

야외조사시 마모감수성은 서로 다른 종류의 강판에 대해, 유사한 길이와 크기를 갖는 강판을 모아서 부식인자 또는 마모유속이 모든 시편에 일정하게 하여 매설한 후 확인할 수 있다. 통상 야외조사는 보통 가혹하고 가속적인 환경의 효과를 얻을 수 있는 위치를 선택하여 행해진다. 그러나 이 시험방법은 기후조건에 따라 측정값이 변동되며, 정상적인 계절주기의 효과를 얻기 위해서는 장시간이 소요되는 문제점이 있으나, 자연환경하에서의 결과이므로 가장 큰 신뢰성을 줄 수 있다. 따라서 최선의 방법은 외관관찰과 병행하여 실험실적 분석을 행함으로써, 동일한 토양, 수질환경 및 기후조건에서 최대의 실용적인 결과를 얻는 것이다.

3) 실험실적 가속시험

실험실적 가속시험은 서로 다른 재료의 내구수명을 상대비교 또는 다양한 부식매개체의 상대적 효과를 알아보는 데 유용하다. 여러가지 금속, 합금, 도금시편을 매설위치의 수질 또는 토양에서 발견되는 인자에 대해 다양하게 농도를 조절하여 장기간 노출시킬 수 있다. 어떤 화학반응은 온도 또는 농도를 증가시킴으로써 가속될 수 있다. 유사한 방법으로 강판 또는 도금층이 여러가지 마모하중(모래, 자갈, 돌맹이 또는 이들의 혼합물)에 대한 상대적 저항성을 결정하는데 가속시험을 행할 수 있다. 그러나 부식전문가들은 실험실적 결

과를 전개하는데 있어 야외에서의 박테리아 작용 또는 토양 및 수질의 효과를 재현할 수 없다는 사실을 간과해서는 안된다는 사실을 지적하고 있다. 즉 현재까지 장기간의 결친 야외조사를 단기간의 가속실험을 통해 배수관재료의 수명을 예측할 수 있는 기구가 없다. 그러므로 다양한 환경하에 노출시, 어떤 한 재료의 내구수명을 다른 것과 비교할 수 있는 가속시험을 개발하는 것이 필요하다. 또한 그 시험방법은 신속하고 경제적이며 신뢰할 수 있는 방법이어야 한다. 실험실적 가속부식 방법으로 채택하고 있는 방법에는 1)전기화학적 방법에 의한 분극곡선(polarization curve)으로부터 부식속도를 구하는 방법¹¹⁾, 2)고압의 산소(500 psi)용기에서 3일간 거치후 잔존하는 아연부착량을 측정하여 부식속도를 구하는 방법¹²⁾, 3)염수분무시험(ASTM B117)에 의한 상대적인 내식성 비교시험 방법, 4)ASTM D1654에 의한 부식환경하에서의 도장 및 도금강판의 평가법등이다. 그러나 이들 가속부식환경은 야외성능과 정확히 일치하지 않는다는 단점이 있다.

4) 해석적 방법

특정 사용환경하에서 내구수명의 예측 및 특정 재료의 선택에 대한 일부 중요한 내구수명 예측기법에 대해서는 아래에 요약하여 기술하였다.

2. 2. 1 초기 캘리포니아 기법

초기 캘리포니아 기법은 1957년에 Stratfull등²⁻³⁾이 북부 캘리포니아주 약 7,000개소의 파형강관 성능을 조사하고, 토양 또는 수용액의 pH와 전기저항에 기초하여 파형강관의 수명을 예측하는 최초의 기법으로 가장 널리 사용되는 방법이다. 캘리포니아주의 조사결과는 특별한 보수처리를 하지 않은 파형강관의 내구수명에 있어 토양부식, 수용액부식 및 마모의 복합적인 효과를 포함하고 있다. 그러나 Fig.2에 나타낸 초기 캘리포니아 도표는 pH가 주로 7.3이하인 곳으로 심각한 마모문제의 위험성이 내재되어 있는 고산지역의 강관에 기초하여 평가한 것으로서, 실제 마모문제가 크지

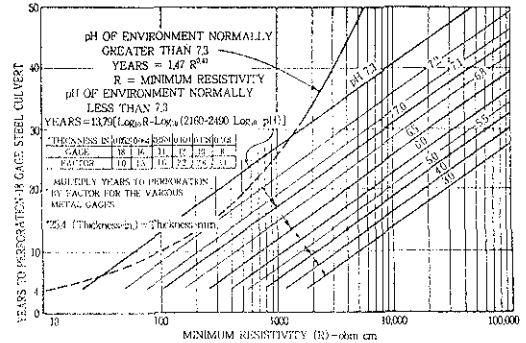


Fig. 2. California method chart for estimating the years to perforation of 18 gauge steel culvert.

않은 장소에 매설한 배수관은 상대적으로 내구수명이 증가한다. 이들 문제점에도 불구하고 캘리포니아기법이 아직까지 내구성 예측기법으로 가장 널리 사용되고 있다.

초기 캘리포니아기법은 금속배수관의 사용수명을 예측하는데 토양 또는 수질측면의 pH와 최소 전기저항을 사용한다. 또한 Fig. 2의 도표는 18 gauge(1.3mm 강관두께)기준으로 금속배수관의 구멍부식까지의 년수를 나타낸다. 다른 강관두께에 대해서는 두께보정상수(gauge factor)를 곱하여 보정한다. 또한 pH가 7.3이상인 곳의 환경하에 있는 강관의 구멍부식 년수를 예측하는 계산식이 별도로 있다. 예로서 pH 및 전기저항이 각각 6.8, 1,000ohm-cm인곳의 첫번째 구멍부식까지의 시간은 15년이 된다. 이 캘리포니아기법의 장점은 신속하고 경비가 저렴하다는 점이다. 그러나 이 기법의 단점으로는 토양 또는 수질측면환경 사용시 불확실성이 포함되는 것으로, 이는 보통 토양과 용액측면에서 더욱 보수적(짧은 쪽)인 곳을 선택함으로써 해결된다. 또 다른 단점으로 초기 캘리포니아기법이 부식반응에서 스케일링(scaling)효과를 인식하지 않은데 있다.

1978년 미국철강협회(American Iron and Steel Institute : AISI)에서는 플로리다, 유타, 캘리포니아, 오크하이오 등에 위치한 약 81개의 하수관을 조사한 결과 약 77개소가 여전히 양호한 조건

을 나타냄을 확인하였다¹⁾. 이때 하수관의 연령은 16~65년으로, 보수를 필요로 하는 4개소의 평균 연령은 32년이었으며 부식이 가장 극심한 지역의 전기비저항은 260ohm-cm로서 일반적인 최소값보다 매우 낮은 값을 나타내었다. 또한 AISI에서는 강관의 내부(invert)의 상당량이 손실될 때까지 배수관으로 사용할 수 있다는 가정에 입각한 도표를 개발하였다. 이것은 총금속 손실량이 첫번째 구멍부식에 약 2배 되는 시점으로 초기 캘리포니아기법의 2배를 곱하면 된다. 미국표준협회(National Bureau of Standards : NBS)에서는 사용수명이 평균 13.8년인 강관시편의 부식무게감량과 공식사이의 관계를 조사한 결과 평균 금속손실 길이로 환산하면 대부분의 장소에서 구멍부식이 일어날 때 평균금속 무게손실량은 원래 두께의 약 13%로 나타났다⁹⁾.

2. 2. 2 미국파형 강관협회 기법

1986년 NCSPA에서는 AISI와 공동으로 파형 배수강관의 부식실태를 조사하였다. 조사지역은 미국의 약 22개주로서 평균연령은 20~74년 된 곳을 조사한 결과 토양의 전기저항은 1,326~77,000ohm-cm, pH는 5.6~10.3으로 나타났다¹³⁾. 또한 조사대상 강관의 대부분이 토양에 의한 부식은 비교적 적게 나타난 반면, 심각한 부식현상이 강관내부에 한정되어 있음을 확인하였다. 파형강관의 부가적인 내구성 향상을 위하여 강관내부의 부가적인 피복처리방법이 개발되었으며, 그 결과 파형강관은 다양한 토양 및 수용액조건에서 약 100년이상 사용수명을 유지할 수 있음을 확인하였다.

1991년 NCSPA에서는 미국전역에 설치된 162개의 파형강관의 야외조사 및 실험실적 분석을 통해 토양의 pH, 전기저항외에 수분함량, Cl농도를 매개변수로 한 파형강관의 내구수명 예측기법을 발표하였다⁷⁾. 이 방법은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 파형강관 외부의 토양부식에 국한하여 아연도금층이 약 25% 잔존시까지를 내구수명한계로 한

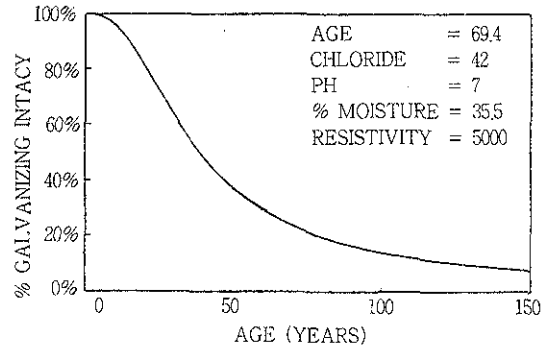


Fig. 3. NCSPA study condition of galvanized coating.

정하여 컴퓨터 통계분석한 결과로 초기 캘리포니아방법 보다 매개변수 추가로 자료의 신뢰성은 향상되었으나, 측정개소가 매우 적게 국한되어 있고, 수용액부식에 의한 파형강관 내부의 내구수명 예측기법은 현재 개발중에 있다.

2. 2. 3 캘리포니아 수정기법

이 기법은 초기 캘리포니아기법의 수용액부식에 대한 문제점을 보완한 것으로 미국 Armco사의 Bednar⁵⁾는 미국 및 남미의 다양한 기후조건하의 야외조사를 통해 캘리포니아 수정기법의 적용가능성을 조사하였다. 이 기법은 부식반응을 제어하는데 있어 수용액/토양의 화학성질에 기초하고 있다. 그러나 캘리포니아 수정기법은 몇가지 중요한 차이점을 제외하고는 초기 캘리포니아기법의 설계와 유사하다. 캘리포니아 수정기법은 대부분의 부식이 강관내부의 수용액에 의해서 발생한다고 가정하고 있다. 또한 강관의 내구수명에는 전기화학적 과정인 부식 및 기계적인 마모가 기여하나, 대부분 지역에서는 강관내부의 수용액부식반응이 가장 중요한 인자이다. 이는 부식문제가 다양한 형태를 나타내며 발생하나, 마모는 강우기간 동안 또는 고속으로 암석 또는 모래가 주기적으로 이동하는 산악 또는 언덕지역에서 발생하기 때문이다.

파형강관의 수용액부식은 강관내부 원주의 1/4~1/2지역내에서 주로 발생하는 것이 야외조사결

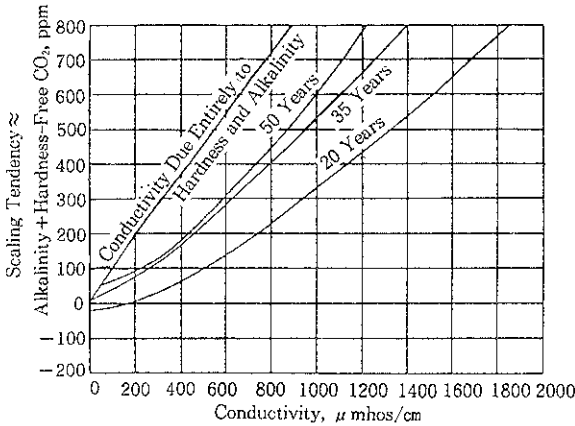


Fig. 4. Modified California chart for estimating the service life of 14 gauge steel pipe.

과 관찰되었다. 이때 가장 중요한 인자는 수용액의 화학성질로서 pH, 총용해염, 경도 및 알칼리도 등을 포함한다. 비화학적 인자에는 수용액의 온도 및 수용액 접촉시간 등이 있다. 초기 캘리포니아기법과의 유사성은 스케일형성도(Scaling tendency)표현시 pH를 포함하고 있는 것으로부터 알 수 있다. 즉 pH는 free CO₂계산시 포함되며, 알칼리도는 HCO₃⁻, 경도는 Ca⁺²로 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{스케일형성도} &= \text{알칼리도} + \text{경도} - \text{free CO}_2 \\ &= \text{알칼리도} + \text{경도} - \text{알칼리도}/\text{antilog}(\text{pH}-6.22) \end{aligned}$$

이 식에 의하면 물의 부식성에 미치는 pH의 효과는 알칼리도와 경도에 따라 변환을 알 수 있다. 즉 pH증가에 따른 스케일형성도가 증가하는 양에 따라 내구수명이 증가한다. 또한 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 캘리포니아 수정도표는 낮은 전도도를 갖는 연수(soft water)의 내구수명측면에서 불리한 효과를 나타냄을 알 수 있다. Free CO₂농도를 고정시 알칼리도의 감소는 pH감소를 필연적으로 동반하므로, 연수의 경우 통상적으로 낮은 pH 및 높은 전기저항의 복합효과를 나타내어 부식속도가 증가하게 된다.

2. 3 내구수명 예측기법의 활용방법

2. 3. 1 예측기법 활용시 유의사항

특정지역에서 파형강관의 내구수명을 예측하기 위해서는 다음 3개 인자의 상세한 자료를 필요로 하는데, 수질화학(water chemistry), 마모하중(bed load) 및 토양화학(soil chemistry)으로 예측기법 활용시 이들 인자의 조사방법은 다음과 같다.

1) 수질검사

매설위치의 수용액의 유동이 충분하여 부식 또는 스케일링 형성에 필요한 용존산소를 제공할 수 있으며, 온도변화는 최소 내구수명 50년 보증을 줄 수 있는 온화한 기후조건으로 한정한다. 건조 기후에 따른 강우의 중단이 없을 때는 표면수의 수질화학 성분을 사용하며, CSP내부의 수용액부식에 의한 내구수명 예측은 캘리포니아 수정기법을 사용하여 계산한다. 만일 이 방법으로 계산된 CSP의 내구수명이 50년이하라면 강관두께를 증가시키거나, 부가적인 피복처리를 행하여 내구수명을 증가시킨다.

2) 마모인자

매우 심각한 마모위험성을 갖는 장소에 CSP를 매설시는 내구수명이 크게 단축된다. 마모는 유속 및 마모하중(bed load)의 함수로서 마모하중이 없다면 마모는 중요한 인자가 되지 못한다. 또한 마모하중은 유속이 5ft/sec이하일때 운반되지 않는다. 그러므로 마모하중이 존재하고 그것들을 운반할 수 있을 정도의 큰 유속이 있을때 내구수명에 미치는 주요 인자가 된다. 마모하중의 종류에 따른 부가적인 피복처리 선정기준은 다음과 같다.

- (a) None/모래/진흙/조약물 : CSP의 내구수명 계산결과 50년이하일 때 어떤 부가적 피복처리도 가능하다.
- (b) 자갈(gravel/cobble) : 금속피복(metal liner plate) 및 smooth flow피복(paving, lining)을 사용한다.
- (c) 둥근 돌(boulders) : 50년 이상의 내구수명을 만족할 만한 피복재료가 현재로는 없다.

3) 토양검사

토양화학 검사는 일반적으로 건조한 기후지역

에서만 필요하다. 초기 켈리포니아 기법을 이용하여 토양측면의 내구수명을 결정하기 위해서는 토양의 pH 및 전기저항이 사용된다. 이때 예측수명이 50년이하인 곳은 부가적인 비금속피부처리를 하면 50년 이상 보증된다.

2. 3. 2 내구수명 예측도표의 사용예제

50년 내구수명을 요하는 곳에 파형강관을 매설할 때 기후는 온화하며, 강관내부에 마모하중이 거의 없다고 가정하자.

- 토양조건 : pH 6.0, 전기저항 17,000ohm-cm
- 수질조건 : dry weather flow, pH 6.0, 전도도 600 μ mhos/cm, CaCO₃로서의 경도 950ppm, CaCO₃로서의 알칼리도 100ppm일때 16-gauge의 CSP를 적용시 내구수명을 계산하시오.

1) 수용액부식 측면

스케일형성도 = 알칼리도 + 경도 - free CO₂에서 이때 경도는 [Ca⁺²], 알칼리도는 HCO₃⁻, Free CO₂는 알칼리도/antilog(pH-6.22)로 계산할 수 있다.

HCO₃⁻로서 알칼리도 = 1.22 × CaCO₃로서의 알칼리도 = 1.22 × 100 = 122ppm

Ca⁺²로서 경도 = 0.4 × CaCO₃로서의 경도 = 0.4 × 950 = 380ppm

HCO₃⁻로서 알칼리도 = 1.22 × CaCO₃로서의 알칼리도 = 1.22 × 100 = 122ppm

Free CO₂ = 122 / antilog(6.0 - 6.22) = 202ppm

스케일형성도 = 380 + 122 - 202 = 300

Fig. 4에서 스케일형성도 = 300, 전도도 600 μ mhos/cm에 해당되는 수치를 읽으면 14-gauge(2.0mm)pipe의 경우 약 40년이므로 18-gauge(1.3mm)에 대해 보정하면 40/1.6 = 25년이 된다. 18-gauge에서 16-gauge로 변경시는 1.3 × 25 = 32년이 되나, 이는 50년 내구수명 요구조건에 미달한다. 강관내부의 마모하중은 무시할 정도로 경미함

으로 50년 보증을 위해서 용융아연 도금처리한 파형강관위에 어떤 부가적인 피복도 가능하다. 예로서 폴리머피복은 내구수명을 30년 연장시키므로 총 예상 내구수명 = CSP수명 + 부가적수명 = 32 + 30 = 62년이 된다.

2) 토양부식 측면

pH 6.0, 최소 전기저항 17,000ohm-cm인 조건에서 18-gauge강관의 구멍부식까지의 시간은 약 26년으로 초기 켈리포니아기법에 의한 다음 계산식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{내구수명} &= 13.79[\text{Log}_{10}R - \text{Log}_{10} \\ &\quad (2160 - 2490\text{Log}_{10}\text{pH})] \\ &= 13.79[\text{Log}_{10}17,000 - \text{Log}_{10} \\ &\quad (2160 - 2490\text{Log}_{10}6.0)] \\ &= 25.9 = 26\text{년} \end{aligned}$$

18-gauge에서 16-gauge로 변경시는 1.3 × 26 = 34년이 되나 50년 요구조건에 미달 한다. 그러나 폴리머피복시 CSP의 수명이 30년 연장되므로 총사용수명은 34 + 30 = 64년이 된다.

2. 4 부가적인 피복기술

파형강관의 내구수명을 향상시키기 위해 여러 가지 보호피막(금속 또는 비금속)이 사용되고 있다. 다양한 야외조사를 토대로 작성된 문헌조사를 통해 부가적인 사용수명을 아래에 요약하였다.

2. 4. 1 비금속피복

1) 역청질피복

역청질피복(bituminous coating)은 수용액부식이 주요 원인인 곳의 내구수명을 8~10년 증가시킨다. 즉 역청질피복은 AISI의 조사결과 강관의 토양부식에 의한 내구수명을 증가시키는데 유용하였다. 또한 토양부식이 치명적인 곳에서 초기 켈리포니아기법에서 예상되는 수명에 비해 최대 25년까지 내구수명을 연장할 수 있다. 그러나 최근에 환경오염문제 및 역청질피복층이 soft하여 쉽게 벗겨지는 문제점때문에 부적절하다고 판단되어 사용량이 감소하고 있다.

2) 콘크리트 라이닝

1960년 아스팔트피복한 CSP위에 콘크리트 라이닝하여 매설한 후, 1986년에 조사한 결과 대부분 양호하게 나타났다. 따라서 아스팔트피복한 CSP위에 콘크리트 라이닝시 부가수명은 약 26년 이상으로 추정된다.

3) 폴리머피복

부식성이 강한 환경하에서 가장 널리 사용되고 폴리머피복재료인 에틸렌 아크릴필름(ethylene acrylic acid film)을 약 10mils 두께로 피복한 CSP를 매설한 장소를 조사한 결과 일부는 마모 하중을 받고 있음에도 불구하고, 약 14년 이상된 곳에서도 우수한 상태로 존재하였다. 1개 매설 장소에서 3mils두께의 강관외부의 선단부에서 폴리머 피복층의 박리(delamination)현상이 발견되었으나, 강관자체의 부식은 발생하지 않았다. 기타의 조사결과에서도 이 피복방법이 가장 내구수명이 우수하다고 알려져 있으며, 약 10mils의 피복시 마모에 의해 피막이 손상되지 않으면 약 28~30년의 부가수명을 기대할 수 있다고 보고되고 있다¹⁴⁾. 그러나 심한 마모환경에서 사용시 대략 2년 정도에서 폴리머피복층의 박리가 발생하고, 가격이 비싼 단점이 있다.

2. 4. 2 금속피복

용융아연도금한 CSP이외에 내구수명을 증가시키기 위한 방법으로 다음의 2가지 금속피복이 사용되는데 55%Al-Zn(Galvalume) 및 Al도금강판이 있다.

1) Al-Zn

도금강판 Al-Zn도금강판은 용융아연 도금강판과 동일한 내구수명을 나타낸다. 이때 Al-Zn도금강판의 도금부착량은 양면기준으로 210 g/m²이다.

2) Al도금강판

일반적인 사용환경내에서는 Al도금강판이 용융도금한 CSP 대비 2배의 내구수명을 나타내나 예측수명이 유효한 설계한계가 있다. 이러한 제한은 토양 및 수용액의 환경조건과 같은 조업환경의 부

식성에 의존한다. 일반적인 Al도금강판의 제한범위는 토양 및 물의 pH가 5~9, 최소전기저항이 1,500ohm-cm이상인 곳에 적용한다. 이러한 제시 기준은 수용액의 pH가 기준하한치 아래에 놓일 수 있는 오수관(sanitary storm sewer) 및 공업용 하수관(industrial storm sewer) 용도로의 사용을 금지한다. 이때 Al도금강판의 도금부착량은 양면기준 300 g/m²이다.

3. 결 과

국내의 파형강관 사용실적이 미비하여 파형강관 매설개소에서 내구수명 예측에 필요한 부식인자의 측정자료가 부족하고, 관련 측정자료의 입수가 곤란하였다. 따라서 실사용개소에서 정확한 내구수명의 예측은 어려우나, 일부 입수한 자료를 토대로 향후 파형강관 설계시 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다.

3. 1 토양부식

국내토양은 크게 깊이방향으로 사토, 사양토, 양토 및 식토로 구분되며, 사양토 및 양토가 각각 36, 50%를 점유하고 토양내 수분함량은 20~25%로 조사되었다. 전국적인 논 617,000개소에 대한 토양의 pH측정값을 종합한 결과에 의하면 평균 pH는 5.5~6.1로 나타났다. 또한 전국적인 토양의 평균적인 전기비저항 및 염소이온농도는 각각 3,500~5,000ohm-cm, Cl이온농도가 10~20 ppm로 보고되고 있다. 일반적으로 논토양의 경우 지속적인 비재배 및 화학비료 사용등으로 인해 산성토양을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 파형강관 배수관이 매설되는 고속도로 근처의 pH는 논토양보다는 pH가 높게 나타날 것으로 추정되므로 내구수명이 증가할 것으로 추정된다. 참고적으로 전형적인 토양 및 수용액의 종류에 따른 전기비저항은 Table 1에 나타내었다.

이러한 자료를 토대로 1.6mm두께의 파형강관을

농수로관으로 사용시 NCSPA기법과 초기 캘리포니아기법에 의해 예측된 토양부식에 의한 내구수명을 계산한 결과를 Table 2에 나타내었다.

NCSPA기법으로 계산된 내구수명은 51~150년으로 초기 캘리포니아기법에 의해 예측된 33~96보다 높게 나타났다. 그러나 일반적으로 논토양

은 산성토양이므로 고속도로 매설시의 토양대비 내구수명이 다소 단축된다는 점을 유념할 필요가 있다. 반면 바다를 매립한 전남 보성의 간척지의 경우 높은 Cl함량 및 낮은 전기저항으로 인해 내구수명이 20년 이하로 크게 단축되는 문제점이 있으므로 추가적인 피복처리를 하여야 한다. 동일

Table 1. Typical resistivity values

토 양	전기 비저항(ohm-cm)	수 용 액	전기 비저항(ohm-cm)
진흙(clay)	750~2,000	해 수	25
양토(loam)	2,000~10,000	염 수	2,000
자갈(gravel)	10,000~30,000	음 료 수	4,000+
모래(sand)	30,000~50,000	표 면 수	5,000+
암석(rock)	50,000~무한대	증 류 수	무한대(이론적)

Table 2. Predicted age of CSP under domestic soil environments

수분함량 (%)	pH	전기저항 (ohm-cm)	Chloride (ppm)	NCSPA기법 (년수)	초기 캘리포니아기법 (년수)	
20	5.1	3,500	10	66.4	33.5	
			20	51.2	33.5	
		5,000	10	69.8	39.4	
			20	54.6	39.4	
		6.5	3,500	10	108.6	50.6
				20	83.3	50.6
	7.3	5,000	10	115.3	56.1	
			20	88.3	56.1	
		3,500	10	145.7	90.7	
			20	111.9	90.7	
		5,000	10	150.2	96.3	
			20	118.7	96.3	
25	5.1	3,500	10	66.4	33.5	
			20	51.2	33.5	
		5,000	10	69.8	39.4	
			20	54.6	39.4	
		6.5	3,500	10	108.6	50.6
				20	83.3	50.6
	7.3	5,000	10	115.3	56.1	
			20	88.3	56.1	
		3,500	10	145.7	90.7	
			20	111.9	90.7	
		5,000	10	150.2	96.3	
			20	118.7	96.3	
35 (보성간척지)	6.9	227.2	1,542	14.1	17.8	

Table 3. Predicted age of CSP under domestic river environments by california method

구 분	한 강			낙 동 강			금 강			영 산 강		
	의 압	충 주	팔 당	안 동	고 령	구 포	옥 천	대 청	부 여	담 양	광 주	나 주
pH	7.7	8.0	8.1	7.6	7.4	7.9	7.0	7.1	7.0	8.2	7.9	7.7
전 도 도	81	198	233	143	150	200	241	447	244	163	253	245
전기저항	12376	5,050	4,292	6,993	6,667	5,000	4,149	2,237	4,098	6,135	3,953	4,082
예측수명	182	126	118	144	141	126	67	63	67	137	114	116

Table 4. Predicted age of CSP for domestic irrigation canal by california method

시 설 명	위 차	pH	전 기 전 도 도 ($\mu\text{mhos/cm}$)	전 기 저 항 (ohm-cm)	예 측 내 구 수 명 (년수)
노 양 양 수 장	경기 평택	7.5	1005	995	65
고 삼 저 수 지	안성	7.1	510	1960	61
임 진 저 수 지	파주	7.5	192	5208.3	128
신 행 양 수 장	이천	7.2	240	4166.7	80
보 통 저 수 지	화성	7.1	178	5617.9	77
장 현 저 수 지	강원 강릉	6.8	99	10101	74
금 정 저 수 지	음성	9.5	242	4132.2	116
강 경 양 수 장	충청 논산	7.0	206	4854.4	70
미 호 저 수 지	진천	7.5	136	7352.9	147
대 음 양 수 장	아산	7.7	835	1197.6	70
제 통 저 수 지	공주	8.3	121	8264.5	154
조 심 보	홍성	7.8	492	2032.5	87
대 산 양 수 장	서산	8.3	1630	613.5	53
월 존 양 수 장	전라 김제	6.8	171	5847.9	66
내 장 저 수 지	정주	7.7	87	11494.2	177
영 수 정 보	함평	7.7	152	6578.9	141
산 호 양 수 장	영암	7.5	960	1041.6	66
대 포 저 수 지	여천	8.2	74	13513.5	188
해 평 양 수 장	승주	8.3	182	5494.5	131
송 곳 저 수 지	경상 창녕	7.2	485	2061.8	69
가 산 저 수 지	밀양	7.3	108	9259.3	106
윤 내 양 수 장	함안	7.2	355	2816.9	73
식 만 양 수 장	김해	7.3	999	1001.0	71
원 창 보	금릉	8.3	248	4032.2	115
고 아 양 수 장	선산	7.4	188	5319.1	129
내 야 저 수 지	칠곡	7.1	247	4048.6	72
연 저 수 지	경산	8.4	465	2150.5	89
송 선 저 수 지	경주	8.6	98	10204.1	168

조건에서 토양의 pH가 5.1에서 7.3으로 변화되면 내구수명은 33년에서 91년으로 크게 증가하나, 전기저항이 3,500에서 5,000ohm-cm로 변화시 33년에서 39년으로 증가폭이 적음을 알 수 있다.

국내의 토양부식에 의한 파형강관의 내구수명에측결과를 요약하면 간척지를 제외한 대부분의 토양부식에 의한 내구수명(1.6mm 강관두께 기준)은 50~100년으로 추정되어 큰 문제가 없을 것으로 추정된다.

3.2 수용액부식

일반적으로 파형강관 내부를 흐르는 수질은 크게 하천수,공장폐수, 농업용수, 강우, 공장폐수 및 생활하수 등으로 분류할 수 있다. 1993년에 환경처에서 조사한 국내 4대강 수질의 평균 pH는 7.0~8.2, 전기저항은 2,237~12,376ohm-cm로 나타났다. 이때 1.6mm강관두께 기준으로 초기 캘리포니아기법에 의한 내구수명을 예측한 Table 3의 결과에 의하면 파형강관의 내구수명은 63~182년으로 매우 높게 나타났다.

Table 4는 국내 농업용수로 사용하고 있는 전국 28개소의 저수지 및 양수장에서 측정한 수질 자료로서, 국내 농업용수의 pH는 6.8~9.5, 전기저항은 995~13,513ohm-cm범위의 편차를 나타

내었다. 이때 초기 캘리포니아기법에 의해 국내 농업 용수로관으로 사용시의 내구수명을 예측한 결과(1.6mm강관기준)에 의하면 내구수명이 61~188년으로 높게 나타나는데, 이는 수질성분 중의 스케일형성도와 관계되는 인자를 고려하지 않았기 때문으로 추정된다.

최근에 채택되고 있는 캘리포니아 수정기법을 사용하여 국내 주요 하천댐의 수질을 기준으로 소재두께별 내구수명을 예측한 결과를 Table 5에 나타내었다. 14guage강관(2.0mm두께) 기준으로 계산한 내구수명은 초기 캘리포니아기법을 사용시 66~167년이나, 캘리포니아 수정기법을 채택시는 33~50년으로 현저히 감소하였다. 그러나 강관두께를 3.5mm(16guage)로 증가시 내구수명이 58~88년으로 향상되며, 또는 부가적인 피복처리시 내구수명을 크게 향상시킬 수 있다. 그러나 이 예는 스케일형성도가 매우 낮은 연수를 기준으로 했기 때문에, 매우 가혹한 부식조건에 해당된다. 따라서 국내의 파형강관 실사용개소에서 내구수명은 이보다 더 클 것으로 추정되며, 강관두께를 약간 낮추어도 50년 이상 보증이 가능하다고 판단된다. 그러나 생활오수관 및 공업용 폐수관용도로의 파형강관의 사용은 제한되고 있으며, 강관내부에 유속이 크고 마모물질이 있는 장소 및 pH가 4

Table 5. Predicted age of CSP under domestic river environments by modified california method vs. thickness of CSP

구 분	pH	전경도 (ppm) (CaCO ₃)	알칼리도 (ppm) (CaCO ₃)	전도도 (μ mhos)	스케일 형성도 (ppm)	소재두께(mm)별 내구수명(년)					
						1.3	1.6	2.0	2.8	3.5	4.3
소 양 강 댐	7.4	22	18	45	29.4	25	33	40	55	70	85
안 동 댐	7.8	75	21	173	55.3	21	27	33	45	58	70
대 청 댐	6.7	31	27	65	35.6	24	31	38	52	67	81
충 주 댐	7.7	86	64	143	110.1	31	41	50	69	88	106
섬 진 강 댐	6.9	27	22	59	32.8	24	32	39	54	68	83
영 천 댐	6.9	30	17	26	28.4	26	34	42	58	74	89
형 산 강	7.5	75	44	170	81.2	31	41	50	69	88	106
수 어 천	7.1	65	15	100	42.2	22	28	35	48	61	74

이하 또는 12이상과 같이 가혹한 부식환경하에서는 역청질피복, 콘크리트피복 및 폴리머피복 등의 부가적인 피복처리가 필요하다.

4. 결 론

이상과 같이 파형강관의 내구수명 예측기법에 대한 자료조사결과를 토대로 일부 입수한 국내 사용환경인자를 대입하여 내구수명을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 파형강관의 내구수명은 대부분 토양에 의한 부식보다는 강관내부의 수용액부식에 의해 결정되는 것으로 나타났다.

2) 파형강관의 내구수명 예측기법으로 토양부식의 경우 캘리포니아기법 및 미국파형 강관협회 기법이 사용되며, 강관내부의 수용액부식은 수용액성분의 스케일형성도를 고려한 캘리포니아 수정기법을 활용하여 예측할 수 있다.

3) 간척지를 제외한 국내 토양부식에 의한 내구수명은 1.6mm 강관두께 기준으로 50~100년으로 추정되어 별 문제가 없을 것으로 추정된다.

4) 강관내부의 수용액부식에 의한 내구수명은 3.5mm 강관두께 기준으로 부식성이 강한 연수를 사용할때 약 58~88년으로 예측되었다.

5) 강관내부에 유속이 크고 마모물질이 있는 장소 및 pH가 4이하 또는 12 이상과 같이 가혹한 부식환경하에서는 역청질피복, 콘크리트피복 및 폴리머피복 등의 부가적인 피복처리가 필요하다.

후 기

본 연구는 1992년도 포항제철의 특별지원사업

(2415M)으로 수행되었으며 연구지원을 해주신 포항제철 및 산업과학기술연구소에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. AISI : Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products, Fourth ed. AISI, Washington, (1993) 336
2. R. F. Stratfull : Corrosion, 17 (1961) 115
3. J. L. Beaton and R. F. Stratfull : HRB Bull., 223 (1957) 1
4. B. H. Welch : Utah State Hwy. Dept. Report, November (1974) 72
5. L. Bednar : TRB Record, 1231 (1989) 70
6. D. Ray and J. Croteau : New Jersey DOT Report, February (1974) 30
7. J. B. Bushman and C. L. Tracy : NCSPA Final Report, March (1991) 1
8. T. J. Wonsiewicz : NCSPA Report, January (1988) 16
9. R. W. Crum : HRP Proc., 2 (1932) 338
10. M. Romanoff : NBS Cir., 579, April (1957) 227
11. J. S. Dana and R. J. Peters : Arizona DOT Report, January (1975) 1
12. J. D. Garber and J. H. Lin : FHWA Report /LA-87/206, June (1987) 1
13. J. B. Bushman and C. L. Tracy : NCSPA First Report, March (1986) 1
14. G. W. Ring : TRB Record, 1001 (1984) 1