

## PE 배수관의 누수에 미치는 영향인자 고찰

### Factors affecting the breakage of polyethylene(PE) pipes in drinking water distribution system

최재호\*, 안재찬, 장현정, 김원선, 오수영, 최영준

Choi, Jae-Ho\*, Ahn, Jae-Chan, Jang, Hyun-Jung, Kim, Won Sun, Oh, Soo Young, Choi, Young-June

#### 1. 서론

상수도관의 누수현상은 유수율 관리를 어렵게 하고 누수지점의 지반을 서서히 파괴하여 관망의 유지관리 비용 증가와 민원발생의 원인이 된다. 따라서 수도사업자는 누수방지를 위해 누수탐지와 노후관 교체에 주력하고 있으나 관종별 노후도, 관 재질의 물리·화학적 특성, 장·단기 내구성 평가, 관로 내·외부의 영향인자에 대해서는 조사 및 연구가 부족한 실정이다. 특히 기존에 주로 매설되었던 금속관(DCIP, STS 등)에 비하여 근래 유럽에서 부식, 전식에 대한 강점으로 사용량이 증가하고 있는 상수도용 PE관에 대해서는 일반적인 장·단점 외에 국내의 적용사례로 알려진 바가 거의 없다. 고분자재료는 상수도에서 배관뿐만 아니라 금속관의 라이너, 도복장 재료로 광범위하게 사용되고 있어 고분자재료의 열화현상을 이해하고 평가하는 것은 수질의 안정성과 본관의 내·외부 부식제어 측면에서 중요하다. 고분자재료의 열화현상에 영향을 미치는 인자에는 빛, 열, 기계적 작용, 방사선, 약품, 미생물, 수분, 대기와 오염물 등이 있고 자연환경에서 이들 요인이 단독으로 작용하는 경우는 거의 없으며 복합적으로 작용하기 때문에 열화기구는 매우 복잡하다. 고분자의 열화는 본질적으로 각각의 고분자 사슬의 화학반응에 의해 일어난다. 빛·열등의 작용에 의해 고분자사슬 위에 활성화한 반응점(라디칼)이 일단 생성되면 산소가 유입되어 화학반응이 연쇄적으로 진행된다. 이와 같이 산소는 고분자 열화반응에서 가장 중요한 요인 중 하나이며 그 농도와 확산속도에 의해 고분자의 열화 거동이 현저하게 영향을 받는다. 열화가 발생하게 되면 변색, 균열, 박리, Chalking, 결정영역, 밀도의 증가 등 외관·형태의 변화와 열적성질, 광학특성, 전기 절연성 등의 저하 등 물성변화와 주쇄절단(분자량 감소), 가교반응, 측쇄의 반응, 산소를 함유한 관능기의 생성과 증가, 관능기 이탈 등의 화학구조변화 등 크게 세 가지 영역에서 관찰된다. 수도용 PE배관에 이러한 열화현상이 발생됨에 따라 초기 고유물성에서 서서히 변화가 발생 한다. 주쇄절단, 산화반응에 의한 물성의 저하현상은 결국 누수의 발생빈도를 증가시키는 원인으로 작용하고 증가된 누수현상은 관망유지관리 비용을 증가시킨다. 그러므로 수도용 PE관의 노후도 평가는 누수통계와 관련지어 경제성을 고려한 교체주기 설정에 중요한 자료로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 누수에 영향을 줄 수 있는 수압, 매설년도, 교통량 등의 배관 외적요인과 산화유도시간, 내환경응력균열성 등 배관자체 물성값들을 누수통계와 관련하여 평가하였다.

#### 2. 연구방법

\* 서울시상수도연구소 배급수과 (02-2049-1128, gibbs1@hanmail.net.)

**2.1. 자료조사**

서울시 Y구에 매설된 PE배관의 누수자료를 분석하였다. 최근 4년(2003~2006년)간의 PE배관의 월별·부위별 누수발생건수를 조사하였다. 또한 1980년대 중반매설되어 배급수관 정비공사 중인 관내 33개 각 구간에서 노후 PE시편을 채취하고 매설환경(수압, 도로현황, 매설년도 등)을 조사하여 누수건수와 상관을 살펴보았다.

**2.2. 물성실험**

33개 구간에서 채취한 노후 PE시편을 평가하기 위해 9개 물성시험항목을 설정하였다. 각 항목은 표 1의 시험방법에 의해 실시하였고, 각 항목의 결과값은 PE 80 신관의 평균 물성 값을 참고하여 노후현상이 PE관의 물성에 미칠영향을 고찰하였다. 산화유도시간(Oxidation induction time)은 폴리머의 산화 분해에 대한 저항의 상대적 정도를 측정하기 위한 가속화 시험으로 시차주사열량분석기(differential scanning calorimeter)의 DSC열량곡선으로부터 산화유도시간을 결정한다. PE배관 균열의 한 원인으로 제품을 압출을 통하여 생산 할 경우 가공 중에 응력이 제품 내에 갖히게 되고, 이렇게 내부에 잠복되어 있는 응력이 밖으로 빠져 나오면서 균열이 일어날 수 있다. 이러한 환경 응력에 대한 저항성(ESCR)은 노닐-페닐-폴리옥시에틸렌-에틸알코올 10% 수용액에서 시편의 50% 균열 발생 시간을 통해 측정한다. 용융질량흐름률(melt flow index) MI는 열가소성수지의 유동성을 표시하는 것으로 용융지수가 높을수록 유동성이 좋다는 것을 의미하며 따라서 가공이 용이하고 토출량은 많게 된다. 즉 MI 증가에 따라 고분자의 분자량이 작다는 것을 의미한다. 측정은 일정 온도(PE : 190℃), 일정하중(2.16kg)에서 용융체가 규정된 오리피스(내경 2.09mm, 높이 8mm)을 이동하여 10분간 압출되는 수지의 중량(g)을 말한다. 일반적으로 분자량과 용융지수와의 관계는 반비례하므로 분자량이 높은 폴리에틸렌은 용융지수 값이 낮으며, 반대로 낮은 분자량의 폴리에틸렌은 용융지수 값이 높다.

표 1. 노후 PE관 물성시험항목 및 시험방법

시 험 항 목	시 험 방 법
단기 내압 시험	KS M 3408-3 (부속서 F)
내환경 응력 균열 시험	ASTM D 1693
용융 질량 흐름률	KS M ISO 1133
인장 항복 강도	KS M ISO 6259-1
파단점 신장율	
밀 도	KS M ISO 1183
회 분	ISO 3408-2
카본농도	ISO 6964
산화유도시간	KS M ISO 11357-6



그림 1. 내환경응력균열시험장비

**3. 실험결과 및 고찰**

**3.1. 누수율에 미치는 매설환경과의 영향**

서울시 Y구에 매설된 PE관로의 총길이는 16.8km이고 최근 4년(2003~2006년)간 총 누수건수는 346건으로 매년 km당 5.15건/km·yr 발생하여 주철관(0.2~0.5건/km·yr) 및 서울시 전체의 평균 PE관 누수율(2건/km·yr)보다도 높은 값을 보였다(그림2). 월별 누수건수현황에서는 5~10월 사이에 전체 누수건수의 58.4%가 발생하였고, 이 기간동안 Y구 PE관의 월평균누수건수는 10.1건으로 그 외의 월 평균누수건수 5.1건에 비해 2배 가까이 누수가 발생하였다. 누수발생부위는 최근 4년간 전체 누수건수의 82.1%가 직관부에서 발생하였다. 직관부의 누수형태는 그림 3과 같이 길이 방향의 취성파괴가 대부분이었다. 매설환경과 누수건수와의 상관성을 조사하기 위해 33개 소구간(100m내외)의 누수건수와 매설년도, 수압, 도로폭(교통량에 의한 반복하중)과의 상관성을 조사했

으나 연관성이 없는 것으로 나타났다(그림4,6,7).

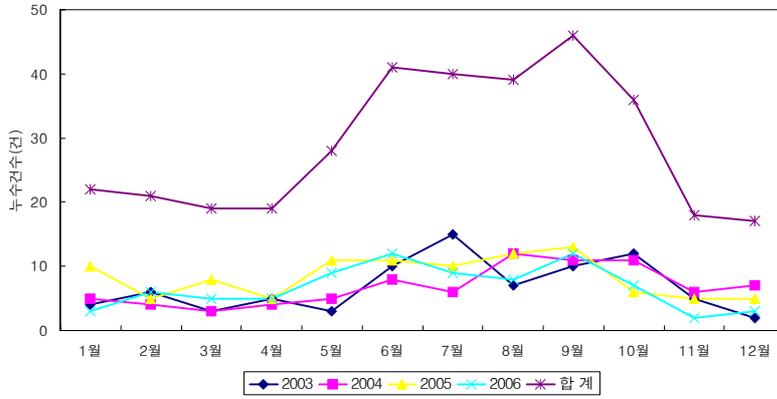


그림 2. 서울시 Y구 월별, 연도별 PE관 누수건수

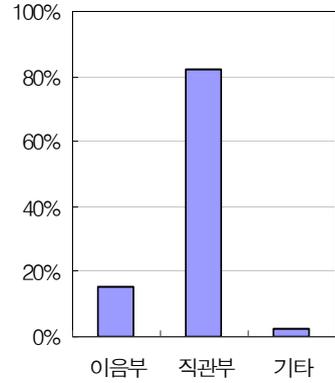


그림 3. 부위별 누수건수

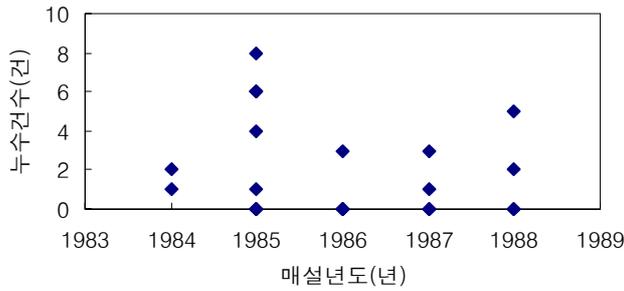


그림 4. 매설년도별 누수건수



그림 5. PE관 누수 현장사진

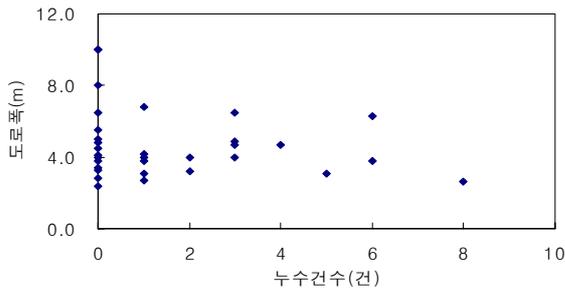


그림 6. PE관 구간별 도로폭과 누수건수

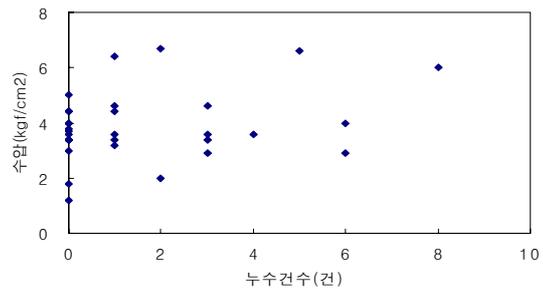


그림 7. PE관 구간별 수압과 누수건수

### 3.2. 물성실험 결과

각 항목의 실험결과 표 2와 같은 결과를 얻었다. 노후관의 산화유도시간은 평균 6.4분으로 KS 성능기준인 20분 및 신관의 80~200분과 비교해 산화에 대한 저항성이 매우 낮았다(그림8). 내환경응력균열성은 8시료 중 7개의 시료에서 120시간 내 모두 파괴되어 균열에 대한 저항성도 매우 낮았다. 과단점신장율은 평균 544%로 연성관의 특징인 신장률이 노후에 따라 저하되는 특성을 보였다(그림10). 이러한 저하된 낮은 물성수치는 외부응력, 균열, 전단력, 반복하중에 누수가 발생할 확률이 증가하는 요인으로 작용한다. 파괴수압, 인장항복강도 등 강도 측면에서는 신관과 비슷하거나 오히려 높은 값을 나타냈다. 용융질량흐름률은 신관대비 높은 값을 나타내 상대적으로 낮은 분자량을 갖을 것으로 판단된다(그림9).

표 2. 노후 PE관 물성시험결과 및 KS성능기준

시 험 항 목	KS성능기준	PE80 신관	노후 PE관			
			평균	표준편차	최대	최소
단기내압시험(MPa)	3.2 이상	4.0 ~ 5.0	<b>4.50</b>	1.09	5.30	1.67
내환경응력균열시험(hr)	240 이상	240 이상	총 8시료중 5개는 72시간내 모두파괴. 2개는 120시간내 모두파괴, 1개는 정상			
용융질량흐름율(g/10min)	-	0.2 ~ 0.8	<b>1.06</b>	0.29	1.51	0.81
인장항복강도(MPa)	19.6 이상	22.0 ~28.0	<b>28.56</b>	0.84	30.50	27.80
파단점신장율(%)	350 이상	700 ~ 900	<b>544</b>	97	666	327
밀도(g/cm <sup>3</sup> )	0.937 이상	0.95 ~ 0.97	<b>0.959</b>	0.002	0.962	0.957
회분(%)	0.07 이하	0.05 ~ 0.07	<b>0.11</b>	0.07	0.28	0.06
카본블랙농도(%)	2.0 ~ 3.0	2.1 ~ 2.3	<b>0.09</b>	0.23	0.70	0
산화유도시간(min)	20 이상	80 ~ 200	<b>6.4</b>	5.48	14.30	1.60

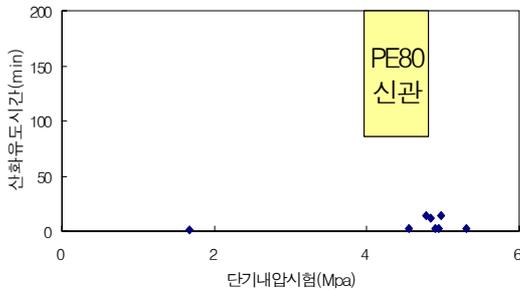


그림 8. 노후PE관의 산화유도시간과 단기내압시험

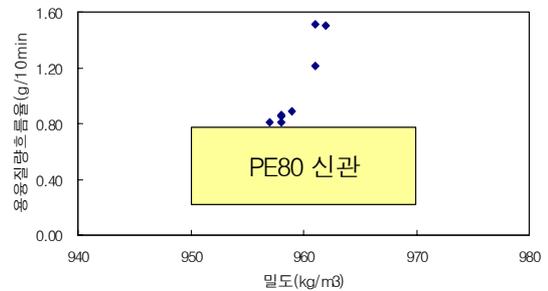


그림 9. 노후PE관의 용융질량흐름률과 밀도

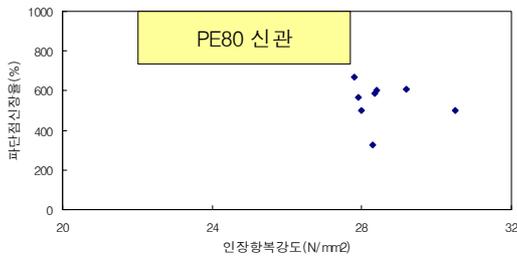


그림 10. 노후PE관의 인장항복강도와 파단점신장율

#### 4. 결론

누수자료 분석 결과 서울시 Y구에서 수도용 PE관의 누수건수는 5~10월 사이에 전체누수건수의 58.4%가 발생하였고, 그 외 달에 비해 2배 가까운 누수건수가 발생했다. PE관의 누수부위는 82.1%가 직관부에서 발생해 15.6%의 이음부보다 발생빈도가 높았다. 노후 PE관의 물성분석결과 산화유도시간이 평균 6.4분으로 산화안정성이 매우 낮았고, 균열에 대한 저항성(내환경응력균열성)도 매우 낮았다. 파괴수압, 인장항복강도 등 강도 측면에서는 신관과 비슷하거나 오히려 높은 값을 나타냈다. 용융질량흐름률은 신관대비 높은 값을 나타냈다. 이러한 물성변화는 폴리에틸렌의 열화에 따른 산화, 분자량감소 등 구조변화에 기인한 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. W. Schnabel,(1980) Polymer Degradation-Principles and Practical Applications 14~21
2. 일본화학회 · 일본고분자학회,(2001) 고분자첨가제-폴리올레핀의 기능화를 중심으로 11~22
3. 서울시상수도사업본부, 상수도통계연보(2003~2006)
4. 한국산업규격 KS M 3408-2 “수도용 플라스틱 배관계-폴리에틸렌(PE)-제2부:관”
5. R.J. Young, P.A. Lovell,(1995) Introduction to Polymers 305~317