

매설강관용 폴리에틸렌 피복재의 내구성

류근창, 이성민, 고영태, Colin Argent*
한국가스공사 연구개발원 배관연구센터, *McCaw Eng.

A Study on the Durability of the Polyethylene Coatings for Underground Pipeline

Keunchang Ryu, Seong-Min Lee, Youngtai Kho, Colin Argent*
Pipeline Technology Center, Korea Gas Corporation R&D Div.,
Ildong 638-1, Ansan city 425-790, Korea
*McCaw Eng., United Kingdom

요약

천연가스 수송배관은 매설환경시의 방식 및 외부충격 등에 대비하여 배관을 보호할 목적으로 폴리에틸렌(polyethylene)으로 피복(coating)되어 있다. 가스배관이 전국으로 확장됨과 더불어 배관피복 기술도 초기 사용하던 1층(one-layer), 2층피복으로 발전되어 현재는 3층피복시스템을 적용한 배관들이 전국에 매설되고 있다. 그러나 강관에 적용된 폴리에틸렌 피복이 경우에 따라 장기간 사용에 따른 자연균열등이 발생하여 피복의 안정성에 문제를 일으키기도 하므로, 그동안 전국에 매설되어있는 배관 피복재들의 물성변화 여부를 확인하여 천연가스수송용 배관의 내구성 데이터베이스를 구축, 향후 배관운영의 신뢰성 평가에 참고하고자 하였다. 이를 위하여 선진외국에서 폴리에틸렌 배관의 내구성과 장기사용 안정성 평가를 위해 오래전부터 활용되고 있는 저속균열저항성(slow crack growth resistance : SCGR) 측정과 배관 피복층의 산화유도시간(OIT : oxidation induction time)을 측정하여 국내 배관 피복재들의 내구성을 평가하고 이를 근거로 하여 국내사용환경에 적합하고 수출도 고려한 폴리에틸렌 물성치의 목표값을 제안하였다.

I. 서론

폴리에틸렌은 석유나 가스등의 수송을 위한 매설강관의 부식방지를 위하여 적용되는 유기피복재로서 널리 사용되어 왔다. 또한 전기방식기술과 결합하여 적용됨으로써, 피복재로서 갖추어야 하는 물성을 나름대로 합의된 표준물성으로 지금까지 적용하여 왔다[1-4]. 그러나 이들 피복재질을 사용한 이래 국내외적 경험에 의하면[5,6] 상업화된 피복공정에 의하여 강관에 적용한 폴리에틸렌 피복이 경우에 따라서 시간에 따른 자연균열 등이 발생하여 피복의 안정성에 문제를 일으키기도 하였다. 이러한 문제를 발생시키는 이유에는 원소재 물성, 피복공정 및 사용환경 등에 따라서 다양한 원인이 존재할 수 있지만, 특히 지하에 매설된다는 측면과 시간에 따른 내구성의 관점에서 요구되는 특징적 물성이 있다면, 그것은 바로 최근 가스공급용 폴리에틸렌관 자체에 대한 소재 물성으로 받아들이고 있는 저속균열저항성(SCGR)이라고 할 수 있다. 국내에서는 흔히 ESCR(environmental stress cracking resistance)이라고 하는 환경응력 균열저항성을 측정하여 이를 피복층의 내구성 평가에 사용하여 왔는데, 본 연구에서는 선진국에서 폴리에틸렌 배관평가를 응용하여 배관의 피복층 내구성 평가에 사용하고 있는 SCGR 시험을 채택하여 수행하였다.

SCGR은 소재에 응력이 집중 될 수 있도록 notch를 내어 일정한 응력을 가하였을 때 소재가 완전히 끊어지면(time to failure) 그때까지의 시간을 측정하는 실험으로서, 특히 시간에 따라 매설환경 등에서 내압 뿐 아니라 외부에서 작용하는 응력에 대해서 시간에 따라 균열의 성장을 억제할 수 있는 소재의 강인화도(toughness)라고 할 수 있으며, 사용 증가 추세에 있는 폴리에틸렌관의 경우 보다 더 큰 내압 등에 사용하기 위한 필수적인 필요물성으로 제안되고 있으며, 이를 폴리에틸렌 배관의 주요물성으로 받아들이고 있는 추세에 있다.

이러한 SCGR은 주로 Brown 등[7]이 제안한 소위 PENT 시험방법 (ASTM[8] 시험법과 동등) 과 ISO 13479 [9]에 의한 방법등으로 실시되고 있으나, Brown의 연구결과에 의하면[10], PENT 시험법이 ISO 방법에 비하여 비교적 빠른 시간에 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

한편 수지의 내구물성중에서 내열성과 관련된 산화유도시간(oxidation induction time: OIT)이 있는데, OIT는 피복 원소재 및 가공된 피복관의 산화안정성을 규명하는 실험으로 가속 thermal-aging test 이다. 주로 폴리에틸렌이 산화하는데 소요되는 시간을 가늠하여 피복층의 열적인 안정성을 정성적으로 비교할 수 있는 지수로 활용되며 UV 노출 및 마모에 대한 저항성을 나타내는 지수이기도 하다. 지금까지 물리적인 산화유도시간 값이 내구수명과의 관계를 정량적으로 해석하려는 시도는 많지 않았지만, ISO/CEN에서는 가스배관소재로서 OIT

는 최소 20 min 정도의 적절한 값을 갖아야 하는 것으로 규정되어있다[11].

고압가스 수송망 배관에서 발생한 바 있는 피복의 균열현상을 억제하기 위하여 이러한 폴리에틸렌관에서 규정한 내구성인자인 SCGR 및 OIT 등과 같은 물성값을 도입할 필요가 있다고 생각되며, 이러한 관점에서 본 연구에서는 주로 배관피복재로서 내구성을 언급한 이들 물성을 중심으로 상업용 피복재에 대하여 종합분석을 실시하였으며, 본 논문에서는 이들 물성 향상을 위한 일련의 결과를 제시하고자 한다.

II. 실험

1. 가스배관 사용 피복재의 종류

연구에서 사용한 배관 피복재의 제조사와 각 제조사별로 사용하고 있는 원소재(resin)들의 종류별 현황을 표1에 정리하였다.

Table 1. The status of domestic resin makers and coating applicators for polyethylene coated steel gas pipe.

One layer		Two layer				Three layer	
		P2S		PIH			
Applicator	Resin maker	Applicator	Resin maker	Applicator	Resin maker	Applicator	Resin maker
K,D,H,J, I,S,O	A, M	T	N	T,O	U	T,O	U,N
		T, C	Y				
KSD 3607		KSD 3589		KSD 3589		NT, KOGAS-GSM-2111	

2. SCGR 측정 실험

각 피복 원소재 및 완성피복층의 균열저항성을 측정하였고 공인된 실험법을 사용하기 위하여 ASTM F 1473의 실험방법을 따라 진행하였다.

시험과정은 대상 소재들을 140℃~160℃로 가열한 다음 3회정도 압력을 가해주고 제거하는 과정을 되풀이한다. 압력이 없는 상태에서 170℃~190℃로 15분간 온도를 가한 다음(피복재의 가공 열이력 제거) 압력을 가해주고 제거해주는 과정을 3회 반복한다. 이 과정을 되풀이하는 이유는 가공시에 발생가능한 시편내의 공극을 제거하여 실험의 정확성을 높이기 위한 것이다. 이후 온도를 더 이상 가하지 않는 상태에서 압력을 줄여가며 샘플두께에 따른 균질한 상형태를 유지하기 위하여 130℃에서 90℃로 최소 80분에 걸쳐 서서히 냉각시킨다. 가공시 초기 온도에서 부터 압력을 3단계로 조절하여 시편내의 공극을 가능한 제거하고 냉각시에는 1.7±10% MPa의 힘을 가해주며 서냉시킨다. 두께 10mm(표준두께)의 판상시편을 제작한 다음 이를 50×25×10(L×W×T)mm로 가공하여 notching rig에서 두께에 따라 notch를 정밀하게 가공(이때 가공속도는 0.25mm/min 이하로 유지)한

다음, 정하중 인장시험기에 80℃에서 설치한다. 한시간 정도의 안정화시간을 가진 뒤 철제 추를 사용하여 notch에 수직 방향으로 2.4 MPa의 응력을 시편에 가한다. 파단이 일어날때까지의 시간을 측정하는 방식으로 저속균열저항성 실험을 진행하였으며 시편제조장치인 notching rig와 자세한 시편형상을 그림1, 2에 나타내었고, 각 시편두께에 따라 2.4 MPa의 응력을 가할 수 있는 노치의 깊이를 표2에 정리하였다.

이때 무게후의 시험하중 P는 다음의 식과 같이 계산된다.

$$P = \sigma \times w \times t$$

여기에서 σ 는 응력, w 는 시편폭 t 는 시편두께를 나타낸다.

Table 2.

Specimen thickness (mm)	Notch depth (mm)
4	1.90
6	2.50
7	2.80
8	3.09
9	3.30
10	3.50
11	3.70
12	3.90
15	4.18
18	4.95
20	5.20

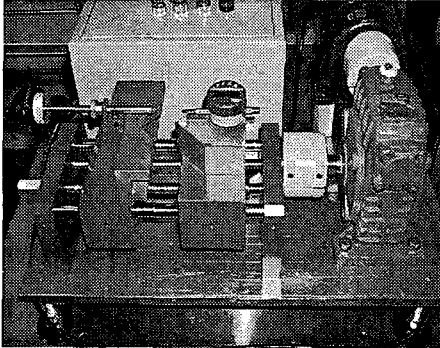


Figure 1. Notching rig with sharp blade under displacement control.

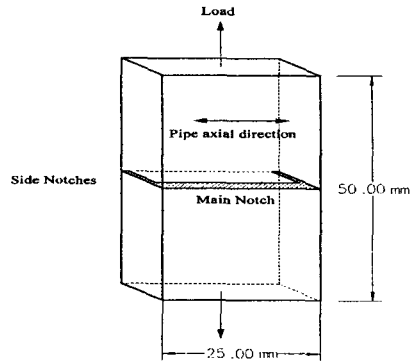


Figure 2. Test specimen with notch (shaded). Thickness may vary and side notch dimension has 1 mm offset.

3. 산화유도시간 측정 실험

OIT(oxidation induction time)는 기본적으로 폴리머의 열안정성을 측정하는 것으로서, 피복 원소재 및 가공된 피복판의 산화안정성과 풍화에 대한 저항성을 나타내며 실제 가설된 피복층의 수명(내구성)을 결정하는 인자이다. 시험은 시차 주사열량분석기(differential scanning calorimeter)에 대상시료(폴리에틸렌 resin)를 4~6 mg 정도 준비하고 이를 약 200°C까지 승온시킨 다음 질소분위기에서 산소분위로 전환시켜주며, 이때 약 5~10분 정도의 시간을 주어 완벽한 산소분위를 만든다. 피복소재가 가지고 있는 산화안정제들이 산소를 모두 취하여 산소가 과포화 상태가 되면 급격히 산화되는 현상을 관찰할 수 있는데, 이 시점에서의 산화시간을 측정하여 산화유도에 대한 안정성을 비교하는 것이다. 산화안정제는 첫째, 공장에서의 가공이나 압출시에 폴리머의 변형을 방지하고 둘째[12], 배관 가설 및 가설후의 UV 에 의한 노출이나 자연적인 풍화를 견딜 수 있게 첨가하는 것이다. 즉, 산화안정제가 충분하게 첨가되지 않은 폴리머의 경우는 가설후의 파모에 대한 저항성 뿐만 아니라 공장에서도 가공시에도 물성저하가 발생할 수 있기 때문에 충분한 양의 산화안정제가 주입되어야만 비로서 충분한 내구성을 갖는 피복재로서의 역할을 할 수 있다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 피복 소재 SCGR 측정 결과

피복 원소재(resin)와 배관에 적용된 공장피복의 특성비교를 위해 SCGR을 측정하였으며 그 결과를 표3에 수록하였다. 내구성 평가를 위한 공장피복 시편은 직접 배관에서 피복을 벗겨 이를 실험에 사용하였으며, 벗겨낸 피복시편을 초음파세척기에 isopropyl alcohol, acetone, toluene 용액을 1:1:1의 비율로 혼합하여 10분정도 처리한후 용매를 증발시켜 완성피복층내의 프라이머와 release agent를 제거한 후 원소재와 마찬가지로 compression moulding 하여 실험에 사용하였다. SCGR의 경우에 ASTM 1473 및 영국 PII 보고서에서 언급한 최소 요구값은 30 시간 이상인데, 본 연구에서 수행한 SCGR 측정결과(표3)를 살펴보면 대부분의 소재들이 기준값에 크게 못 미치는 측정치를 나타내어 전체적인 원료의 물성향상(내구성)이 시급히 필요한 것으로 판단된다. 표4.에 1965~1993까지 미국에서 수행한 소재별 정하중인장시험 결과를 보면(표4)[13] 국내소재들의 측정결과와 좋은 비교가 될것이다.

Table 3. SCGR test times of Resin and Coats.

Resin						
Rresin maker	Y1	Y2	U	M	A	N
Result						
SCGR (hr:min)	8:10 9:50 8:18	48:07 46:05	14:41 15:29 24:09	0:01 0:34 0:01 2:35	6:41 6:13	1:13 0:04 0:01
Mean (hr:min)	8:23	47:06	18:06	0:48	6:27	0:26
Complete Coating						
Complete Coater	D	I	G1	G2	-	-
Result	(one layer)	(one layer)	(two layer)	(three layer)		
SCGR (hr:min)	14:40 16:21	0:56	9:18 10:39 8:42	13:47	-	-
Mean (hr:min)	15:31	0:56	9:33	13:47	-	-

Table 4. Sample SCGR Test Data carried out in the USA between 1965 ~ 1993.

Co-Polymer type	Density g/cm ^z	Failure time hours
Ethylene-butene	0.9490	1.4
Ethylene-octene	0.9465	9
Ethylene-hexene	0.9476	14
Ethylene-butene	0.9560	35
Ethylene-octene	0.9393	159
Ethylene-hexene	0.9481	308
Ethylene-octene	0.9400	639
Ethylene-butene	0.9574	1247
Ethylene-hexene	0.9435	1290
Ethylene-hexene	0.9454	7517
Ethylene-hexene	0.9440	45000

2. 피복 소재 OIT 측정결과

원소재 및 공장피복재의 특성비교를 OIT를 측정한결과를 표5.에 정리하였으며, 원소재 U와 공장피복재 I의 OIT 그래프를 그림 3, 4에 나타내었는데 아주 안정된 형태의 산화과정을 보여주고 있다. 그러나, 전체적으로 약 50%정도가 SCGR측정치와 마찬가지로 기준 값에 크게 못미치는 결과를 나타내어, 기준에 적합한 원소재의 사용만이 배관의 안정성을 향상시킬 수 있으며, 현재까지 공사에서 전국 환상망 가스배관망 건설에 사용한 배관피복재들이 내구성 측면에서 약한 내성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

표 5. OIT value of Resins and Coats

Resin test						
Resin maker	Y1	Y2	U	M	A	N
Result						
OIT (min)	13.5	19.7	36.3	61.5	17.7	9.43
Coat test						
Applicator	D	I	G1	G2	-	-
Result	one layer	one layer	two layer	three layer	-	-
OIT(min)	3.1	30.7	24.7	35.7	-	-

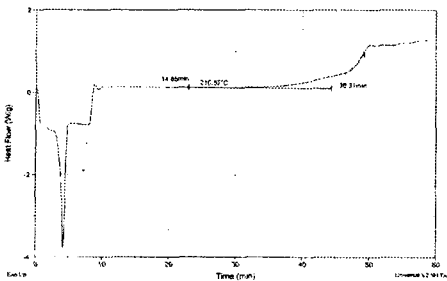


Fig 3. OIT of resin U

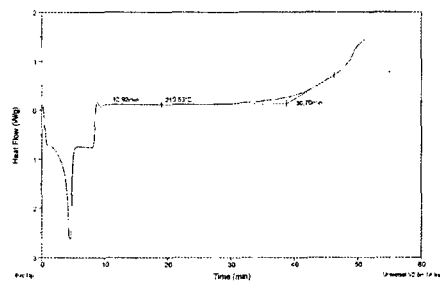


Fig 4. OIT of complete coat I

V. 결론 및 제언

PE resin은 피복 공정에서의 가공성 및 배관가설 후의 service-performance의 두가지 특성을 만족해 주어야 한다. SCG 실험 결과는 비록 많은 시행착오끝에 이루어졌지만, 국내 배관피복재의 장기사용내구성이 상당히 취약함을 알 수 있는 계기가 되었고, OIT 측정실험의 결과로는 피복재의 UV 및 마모(wear)저항성이 상당히 낮음을 알 수 있었다.

지금까지 가스수송용 배관코팅에 사용되는 폴리에틸렌 원소재 및 완성피복재에 대한 특성을 관찰한 결과 대부분의 소재들이 장기사용 측면에서의 최소한의 물성조차 확보하고 있지 못한 것으로 판명되었다. 물성이 떨어지는 원소재의 사용 및 이를 가공하여 완성피복재를 생산한 경우 가스배관의 사용기준에 크게 떨어지는 형태의 배관피복재가 생산되어 배관의 안전성에 치명적인 손상을 줄 수 있으며, 따라서 국내 PE coating의 품질등급(grade)이 대구경 배관피복재의 규격으로 적합하지 않다는 결론을 도출할 수 있었다. 실험수행결과와 Brown이 제시한 값을 기준으로 볼때 SCGR값은 30시간 정도가 최적일것으로 판단되며 이를 근거로 하여 현재 국내에서 생산, 사용되는 수지등급 재조정의 필요성을 실감케 하였다. 측정결과로 보아 현재 공사 및 국내 업체들이 사용하고 있는 피복재들의 저속균열 저항성이 대체적으로 낮으므로 이에 대한 대책을 수립하여 충분한 품질이 확보된 소재를 사용하는 것이 시급한 사항이라 판단된다. 내구성 향상을 위하여 피복수지 SCGR 값과 OIT의 도입이 필요하며 피복소재로서는 각각 20hr, 10min을 제시하고자 하며, 국내업체 및 한국산업표준규격 등에서 고려되어야 한다.

매설강관용 폴리에틸렌 피복재의 내구성 강화를 통한 신뢰성 확보를 위하여, 국내생산 PE 소재에 대한 SCGR 및 OIT실험을 전면적으로 재수행(각 메이커와 consortium을 이루어 객관적이고도 정확한 실험결과 도출)후 결과 데이터를 확보하고 이를 향상시킬 수 있는 방안을 수립하여 소재의 품질 향상(upgrade)을 통한 가스수송용 배관의 장기사용안전성을 확보하여야 할 것이다.

VI. 감사문

본 연구에 협력하여주신 수지기업 및 피복체조사, 특히 와 OIT 실험에 도움을 준 SK대덕연구원의 지원에 감사를 드립니다.

VII. 참고문헌

1. 한국산업규격 KS D 3589 “폴리에틸렌 피복 강관 - Polyethylene Coated Steel Pipes”
2. 한국산업규격 KS D 3607 “분말용착식 폴리에틸렌 피복강관 - Polyethylene Coated Steel Pipes by Powder Fusion”
3. EN ISO 13479 “Polyethylene(PE) Pipes for the Supply of Natural gas - Resistance to Crack Propagation - Method of Test for Slow Crack Growth on Notched Pipes”
4. DIN 30670 “Polyethylene Coatings for Steel Pipes and Fittings”
5. S.M. Lee, S. Shin, H.S. Song and Y.T. Kho, “Deformation and Fracture Behaviors of Polyethylene Coatings on the Natural Gas Transmission Line with Ultraviolet Exposure,” Proc. of the Intern. Pipeline Conference 1998, Vol.II, ASME, NY, 1998.
6. D. Fielder, Private communication, 1998.
7. X. Lu and N. Brown, Polymer Testing, vol.11, p.309 1992.
8. ASTM F 1473 “Standard Test Method for Notch Tensile Test to Measure the Resistance to Slow Crack Growth of Polyethylene Pipes and Resin”
9. ISO 13479 “Polyolefin Pipes for the Conveyance of Fluids - Determination of Resistance to Crack Propagation - Test Method for Slow Crack Growth on Notched Pipes (notch test)”
10. N. Brown and X. Lu, “Controlling the Quality of PE Gas Piping Pystems by Controlling the Quality of the Resin”, Proc. of 13th International AGA Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, p.327. 1-4th Nov 1993
11. ISO/TR 10837 “Determination of the thermal stability of polyethylene(PE) for use in gas pipes and fittings”
12. ASTM D 3895 “Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry”
13. N. Brown and X. Lu, “The Relative Merits of HDPE and MDPE Resins for Gas Pipes and Fittings”, Proc. of 13th International AGA Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, p.139. 1-4th Nov 1993