

비회 운송관의 수명연장을 위한 유리섬유 복합재의 개발: 내마모성 평가

정규상,[†] 장윤상*

수원대학교 기계공학과
445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산 2-2

[†](주)길광 그린텍 기술연구소
445-914 경기도 화성시 팔탄면 월문리 55-1

(2009년 3월 4일 접수; 2009년 3월 15일 수정본 접수; 2009년 3월 17일 채택)

Development of Glass Fiber Composite Material to Extend the Life of Fly Ash Transport Pipe: Wear Test

Gyusang Jeong[†] and Yoonsang Chang*

Department of Mechanical Engineering, University of Suwon
San 2-2 Wau-ri, Bongdam-eup, Hwasung City, Gyeonggi 445-743, Korea

[†]R&D Center, Gilgwang Greentech Co., Ltd.
55-1 Wolmun-ri, Paltan-myon, Hwasung City, Gyeonggi 445-914, Korea

(Received for review March 4, 2009; Revision received March 15, 2009; Accepted March 17, 2009)

요 약

본 연구에서는 화력발전소에서 마모 및 주기적인 파손으로 문제가 발생하는 저회 운반용 주철관을 대체하기 위하여 내마모 성능이 우수한 FRP관을 개발하였다. 불포화 폴리에스테르, 비닐에스테르, 에폭시, 페놀 등 4종의 수지와 탄화규소 내마모재를 사용하여 시편을 제작하고 ASTM D4060 마모시험 및 분사식 마모시험을 수행하였다. ASTM D4060 마모시험에서는 최적의 수지 종류와 내마모재 크기, 내마모재와 수지의 혼합 비율을 찾고 내마모성을 극대화하였다. FRP와 주철을 비교한 시험에서는 FRP 시편이 주철 시편에 비하여 작은 마모량을 보여 주철관의 FRP 파이프로의 대체 가능성을 보여 주었다. 현장시험을 위하여 시제품 파이프를 제작한 후 기존 회처리라인에 적용한 결과 FRP관이 내마모성에서 기존의 주철관보다 우수함을 보여주었다.

주제어 : 복합재료, 유리섬유, 비회관, 내마모성, 주철

Abstract : In this study, a fiber reinforced plastic (FRP) pipe with superior wear resistance was developed to replace the fly ash pipe of cast iron. Wear test was performed with various combinations of SiC filler and resin materials of unsaturated polyester, vinylester, epoxy, and phenol. Test results of ASTM D4060 showed the optimal combinations of resin, filler size, and resin/filler ratios. Test results of comparison between FRP and cast iron showed the possibility to replace cast iron pipe with the FRP pipe. Field test executed to compare the wear resistance between cast iron pipe and developed FRP pipe showed the superiority of the FRP pipe.

Key words : Composite material, Glass fiber, Fly ash pipe, Wear resistance, Cast iron

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail : yschang@suwon.ac.kr

1. 서 론

석탄은 풍부한 매장량, 저렴한 가격, 공급원의 안정성 등의 이유로 화력발전의 주요 연료로 세계적으로 널리 사용되고 있다. 석탄발전소에서 석탄을 미분기로 200 mesh 70~80% 통과 정도 크기로 분쇄하고 뜨거운 공기와 함께 로 안으로 주입하면 1,500±200℃ 온도 범위에서 부유 상태로 순간적으로 연소하게 된다. 이때 무연탄의 경우 26~50%, 역청탄의 경우 8~15% 정도가 발생하는 연소 후 남은 물질을 석탄 회(ash)라고 하며, 연소 후 모이는 장소에 따라 저회(bottom ash), 비회(fly ash) 등으로 구분한다.

절탄기나 공기예열기 아래에 있는 호퍼에 모이는 저회의 입경은 0.3~1.0 mm이고 그 주성분은 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, SO₃, TiO₂ 등 여러 가지 혼합물로서 발생회의 약 10~25% 정도이다. 전기집진기 하부의 호퍼에 모이는 비회의 직경은 탄의 종류나 연소조건에 따라 다르나 보통 10~30 μm이며, 발생회의 75~90% 정도로서 대부분의 비회가 재활용되고 있다. 재활용을 위해서 공기이송설비(pneumatic system)에 의해 비회 사일로(silo)로 이송된다.

현재 산업용 플랜트 설비 고온부의 회 처리 및 슬러리 이송에 사용되는 주철(cast iron alloy) 관은 해수(염분)에 의한 부식, 고 중량으로 인한 설치/교체작업성 난이도, 탄소강관 취성에 따른 파손, 원자재 가격상승에 따른 수급불량, 업체에서의 제작기피에 의한 자재조달의 수급불안, 국가기반 시설의 안정적 유지관리의 어려움 등 문제점들이 존재한다. 특히 주철관은 사용시간이 경과하면서 곡관부 근처에 심한 마모가 발생하면 시스템 작동을 중지하고 내부에 바잘트(basalt) 또는 세라믹 코팅을 하여 마모에 보다 잘 견딜 수 있도록 처리한 관으로 교체한다. 바잘트나 세라믹의 경우 재료비가 상당히 고가이므로 발전소 측에서는 보다 저렴하고도 성능이 뛰어난 파이프 내지는 재료에 많은 관심을 가지고 있다. 이런 문제점들을 해결하기 위하여 제작의 용이함을 갖춘 내열·내마모 섬유강화 복합재(FRP)[1]를 이용한 회처리 이송용 배관이 회 처리 설비의 안정적 운영을 도모하고 정비비용의 획기적인 절감을 위하여 주목받게 되었다. FRP 배관은 부식저항이 탁월하고 높은 비강도, 높은 비강성, 가벼운 무게, 경제성, 낮은 열 전도성, 낮은 보수비용 등의 장점을 갖고 있다.

외국의 경우 내마모재를 이용하여 복합재료관의 내마모성을 향상시키기 위하여 다양한 연구가 수행되고 있다. 예를 들면, 유리섬유와 에폭시 수지로 된 복합재료를 탈황설비용 배관에 적용하기 위하여 관 내부를 통과하는 입자의 속도, 충돌각도, 내부 온도 등을 바꾸어가면서 실험을 수행하였다[2]. 60℃ 이하의 조건에서 수지 3가지, 침가제 7가지, 그리고 섬유 3가지 종류에 대해 다양한 조합으로 관을 제작하고 ductile/brittle transition에 대해 심도 있게 연구를 진행하였다. 열가소성 수지와 유리섬유로 만든 복합재료 시편에 대해 내마모성 실험을 수행한 연구도 있다[3]. 섬유를 절단하여 무 방향으로 쌓은 매트(chopped strand mat)와 내마모재의 중량비가 내마모성에 미치는 영향에 대해 심층적으로 조사하였는데, 내마모재의 함량

이 늘수록 내마모 효과가 감소하였으며 극한인장강도 및 파괴연신을 또한 감소하였다. 내마모성을 증대시키기 위하여 내마모재를 많이 투입하는 것이 적절치 못함을 보여주고 있다. 또한 내마모성을 증대시키기 위한 최근의 시도들에 대해 자세하게 소개하고, SiC를 내마모제로 사용하였을 경우, glass-epoxy composites가 내마모성에 있어서 탁월함을 실험을 통하여 보여 준 연구도 있다[4]. Klemm[5]은 운송용으로 사용되는 steel pipe system에 대해 소개하고 있는데, 마모의 종류, 경도, 파이프의 재료, 시스템 설계, 부품 등에 대해 소상하게 언급하고 있으므로 기존의 재료를 새로운 재료로 대체하는 경우에 알고 있어야 할 기본적인 내용이 수록되어 있다.

본 연구에서는 화력발전소 현장에서 마모 및 주기적인 파손에 의하여 사용 수명이 짧은 주철관을 대체하여 폐기물을 저감할 수 있고 유지비용을 절약할 수 있는 청정기술을 적용하여 새로운 재료를 개발하였다. 일반적으로 사용하는 FRP관은 고온에서 내마모성이 약하므로 비회 운송 환경인 90℃에서 손상, 변형 및 내마모 성능의 저하가 없는 내마모재가 함유된 FRP관을 개발하였다. 여러 가지 재료에 대하여 시편을 제작하고 제작된 시편에 대한 기계적 특성을 검증하기 위하여 ASTM D4060 시험법에 의한 마모 시험과 비회와 마모재 혼합에 의한 분사식 마모시험을 수행하였다. 시험결과를 분석 및 평가하고 SEM 등을 사용하여 입자의 분포도, 수지의 접착성 등 미세구조를 관찰함으로써 최적의 내마모재 크기 및 내마모재와 수지의 혼합비율을 찾고 내마모성을 극대화하였다. 마지막으로 시제품 파이프를 제작한 후 기존 회처리 라인에 현장 적용하고 마모량을 계속 분석하여 시제품 파이프의 성능을 검증하였다.

2. 내마모성 시험

복합재료(composite material)는 두 가지 이상의 서로 특성이 다른 재료를 배합하여 각각의 재료적인 특성은 보유한 채로 서로 결합된 상태 또는 합성상태에서 강도향상 및 구조형상을 유지하는 등의 이점을 가지는 혼합재료이다. 내마모성 실험에 사용된 실험조건은 Table 1과 같다. 복합재료 구조물에 고강도 특성 및 경제성으로 인해 현재 가장 많이 사용하는 섬유재(fiber)는 규사를 주성분으로 하는 유리섬유(glass fiber)로서, 용융 노즐에서 연속 섬유상으로 뽑아낸 직경 수 μm의 필라멘트(filament)를 통상적으로 수십 본에서 수천 본의 다발로 구성하여 여러 가지 형태로 가공하여 제작한다. 본 실험에서는 한국 오웬스코닝의 CSM (chopped strand mat) 형태의 CM225-104

Table 1. Wear test conditions

Composite	Fiber	E-Glass (38 wt%)
	Matrix	Unsaturated polyester, Vinyl ester, Epoxy, Phenolic
Powder	Material	SiC
	Size (mesh)	46, 80, 100, 120, 150, 180, 320, 400
	Ratio (%)	20 ~ 60

Table 2. Data for resin materials

Resin	Unsaturated polyester	Vinylester	Epoxy	Phenolic
Model	HG-3689FWT	RF-1001	SS-2013W	GP5018
Maker	Cray Valley	Cray Valley	SNS	Georgia-Pacific
Gel time	25 min	25 min		
GTP	15 min	13 min		
Pot life			5 hrs, 25°C	90 min, 25°C
Post-cure			2 hrs, 120°C +4 hrs, 140°C +4 hrs, 160°C	1 hr, 90°C +60 hrs, 110°C
Catalyst	MEKP55 1%	MEKP55 1%	SS-2013H 4/9	GP4839 6 pph

모델을 사용하였다. 플라스틱 기지재(matrix)는 여러 가지가 사용될 수 있으나 제작업체에서 그동안 사용하여 왔고 비교적 가격이 저렴한 unsaturated polyester, vinylester와 기계적 성질이 우수한 epoxy, 고온의 비회 운송환경을 고려한 난연성의 phenolic 수지 등 4종류를 문헌[2,4]을 참조하여 선정하였다. 내마모성을 증진시키기 위하여 첨가하는 내마모재에는 일반적인 연마제로 사용하는 알루미늄(Al_2O_3), 탄화규소(SiC), 다이아몬드 등이 있다. 본 연구에서는 46~400 mesh 사이 8종류의 탄화규소 분말을 비율 20~60%로 수지와 혼합하여 유리섬유 매트 각 층 사이에 균일하게 도포하여 소량생산에 적합한 FRP 생산방식인 수작업(hand lay-up) 방식으로 시편을 제작하였다. Unsaturated polyester, vinylester 수지는 상온에서 시편을 제작/경화하였고 phenolic 수지, epoxy 수지는 상온에서 시편 제작 후 전기로를 통하여 후경화(고온경화)를 하였다. 경화조건은 사용된 수지의 제작업체에서 제공한 자료(technical data sheet)의 권장 값을 따랐으며 그 밖의 물질정보들이 Table 2에 설명되어 있다.

마모시험(wear test)은 Figure 1과 같은 Taber사의 마모시험기 Model 5130을 사용하였다. ASTM D4060에 의거하여 100 mm × 100 mm × 5 mm의 크기로 절단한 시편을 H-10 및 CS-17 wheel을 사용하여 1,000 g의 하중 하에서 1,000회 회전 시험하였다. 일반적으로 H-10 wheel은 철 금속, CS-17 wheel은 플라스틱의 시험에 사용되는데, 본 시험에서는 복합재료가

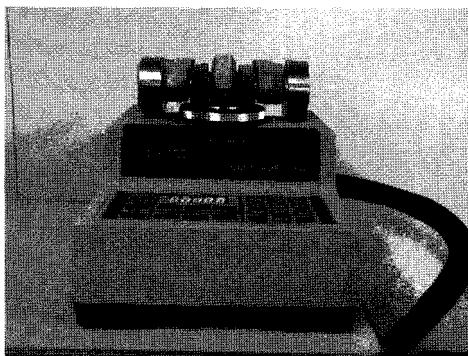


Figure 1. Wear tester (Taber Model 5130).

Table 3. Wear test of unsaturated polyester matrix

Resin	Mixing ratio (wt%)		Powder size (mesh)	Wear size (mg)
	Powder	Resin		
70	30		46	51
50	50		46	39
70	30		80	28.2
60	40		80	28
55	45		80	24
50	50		80	26.5
60	40		100	41
60	40		120	41.5
60	40		150	74.6
80	20		180	155
60	40		180	129
80	20		320	194.5
60	40		320	207
40	60		320	200

리 성능을 비교할 경우에는 CS-17 wheel을 사용하고 주철과 복합재료를 비교할 경우에는 두 가지 wheel을 모두 사용하였다. 5회 반복 실험하여 마모량은 시험 전 시편의 중량과 시험 후 시편의 중량을 측정하여 변화량을 나타낸 평균값이다.

Table 3에는 불포화 폴리에스터 수지와 SiC 46~320 mesh, 20~60 wt% 첨가한 시편의 조성과 마모량의 관계를 나타내었다. 마모량을 보았을 때 내마모재의 입자크기가 큰 120 mesh 이하에서는 전반적으로 내마모 성능이 우수하였으며, 150 mesh 이상에서는 급격한 마모량의 증가를 보였다. 내마모재 크기 80 mesh에서 마모량은 24~28.2 mg으로 함유량(30~50 wt%)에 관계없이 작은 마모량을 나타내고 있다. 데이터의 분포 경향으로 보아 46 mesh에서 마모량이 더 작아야 하나 그렇지 못한 이유는 시편의 제작에서 나타나는 내마모재의 불균일한 분포 때문이다. Hand lay-up 방식에서 FRP를 롤러로 밀어 혼합되는 수지의 양을 짜내는 롤링공정에서 내마모재의 크기가 클 경우 롤러에 밀려 고르게 분포하지 못하는 것이다. 내마모재의 불균일한 분포는 적층작업을 어렵게 하고, 내마모성 반복 실험 시 데이터의 편차를 크게 하며 평균값도 커졌다. 따라서 분

Table 4. Wear test of vinylester matrix

Mixing ratio (wt%)		Powder size (mesh)	Wear size (mg)
Resin	Powder		
70	30	80	22.5
55	45	80	23.8
60	40	100	28
60	40	120	43.6
60	40	150	78.3
80	20	180	101.3
60	40	180	120.6
80	20	320	146.1
60	40	400	169.7

Table 5. Wear test of phenolic matrix

Mixing ratio (wt%)		Powder size (mesh)	Wear size (mg)
Resin	Powder		
60	40	80	22
55	45	80	23
60	40	100	24.6
60	40	120	47
60	40	150	78.3
80	20	180	132.6
60	40	180	150
80	20	320	221
60	40	400	262.5

말의 크기가 클수록 내마모 성능은 좋지만 0.5~1 mm 이상의 직경을 갖는 46 mesh 이하의 경우 hand lay-up에 의한 작업 시 성형이 어렵고 내마모성이 저하한다고 예측할 수 있다.

Table 4는 비닐에스터 수지와 SiC 80~400 mesh, 20~45 wt% 첨가한 성능시험 결과이며, 불포화 폴리에스터 수지의 마모경향과 유사하다. Table 5와 Table 6은 페놀수지와 에폭시수지를 내마모제 크기에 따라 혼합하여 제작한 마모시험 결과이다. 마모시험 결과를 보면 내마모제 크기는 불포화 폴리에스터 수지와 비닐에스터 수지의 시험 결과와 같이 80 mesh의 크기에서 우수하며 페놀수지와 에폭시수지에 내마모제를 30~45% 혼합하였을 때 혼합비율에 무관하게 내마모성이 우수한 것으로 측정되었다.

Figure 2의 (a), (b)는 내마모성이 우수한 SiC 80 mesh 분말을 6:4 비율로 불포화폴리에스터 수지에 첨가한 SEM 사진이다. 마모시험 전(a)과 후(b)를 비교하였을 때 시편 표면 손상은 거의 없었으며 SiC 입자 또한 비교적 균일하게 분포되어 있고 내마모제 입자가 수지에 충분히 함침되어 그 접착성이 다른 혼합 비율에 비해 우수하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Figure 2의 (c), (d)는 SiC 320 mesh 분말을 수지에 40 wt%의 비율로 첨가하였을 때의 SEM 사진이다. 시편 표면에 기공이 적고 전체적으로 내마모제가 상당히 균일하게 분포되어 있으나 내마모성 시험결과 성능이 저하되는 것으로 나타났다. 내마모제 크기가

Table 6. Wear test of epoxy matrix

Mixing ratio (wt%)		Powder size (mesh)	Wear size (mg)
Resin	Powder		
70	30	80	21
55	45	80	21.5
60	40	100	23.6
60	40	120	35
60	40	150	43.5
80	20	180	73.4
60	40	180	91.7
80	20	320	113.9
60	40	400	173.7

Table 7. Comparison of wear size

	Wear size (mg)	
	H - 10	CS - 17
FRP	34	25
Cast iron	720	72

미립자 형태로 인해 내마모제의 성능을 발휘하지 못한 것으로 판단된다.

내마모성이 가장 우수한 에폭시 수지 FRP와 주철관의 내마모성을 비교하기 위하여 앞에서 언급한대로 H-10, CS-17 wheel을 모두 사용하여 마모시험을 실시하였다. 평가결과 Table 6과 같이 H-10 wheel을 사용한 경우 FRP 시편의 마모량은 34 mg, 주철 시편의 마모량은 720 mg으로 측정 되었으며, CS-17 wheel을 사용한 경우 FRP 시편의 마모량은 25 mg, 주철 시편의 마모량은 72 mg으로 측정되었다.

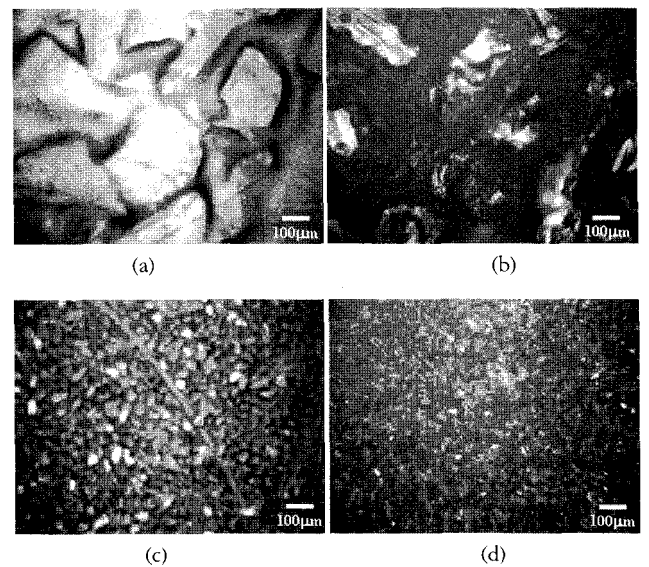


Figure 2. SEM pictures of FRP with unsaturated polyester and SiC.

3. 분사식 마모시험

ASTM D4060 시험법에 의거한 1차 마모시험 후 비회 유동 상황에서 주철관과 복합재료관의 내마모성을 비교 및 검증하기 위하여 분사식 마모시험을 2차로 진행하였다. 실제 현장조건과 유사한 미세입자 충돌식 마모환경에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 분사식 마모시험기를 Moumakwa and Marcus[6]를 근거로 하여 Figure 3 및 Figure 4와 같이 제작하였다. Figure 4의 우측 사진이 마모시험기 내부이다.

제2장의 내마모성 시험에서 FRP 재료 중 에폭시 기지재와 SiC 80 mesh 분말을 7:3의 비율로 혼합하였을 때 가장 적은 마모량을 보였다. 따라서 에폭시 기지재의 FRP 시편과 주철 시편을 100 mm × 100 mm × 5 mm로 절단하고 분사식 마모 시험을 실시하였다. 마모시험 시간의 단축을 위해 실제 사용 환경인 비회와 경도가 큰 내마모제(SiC) 분말을 7:3으로 혼합하여 분사하는 방법으로 마모시험을 진행하였다. 비회와 SiC 분말의 크기는 125-180 μm이며 1기압의 조건하에서 시편과의 충돌각을 약 70도, 5 m/s의 속도로 48시간 마모시험을 진행하였다.

분사식 마모시험 후 각 시편들의 마모량을 확인한 결과 에폭시 FRP와 주철의 마모량은 각각 0.039 g과 0.09 g 이었다. 또한 시편 표면의 마모상태를 SEM을 사용하여 관찰한 결과는 Figure 5 및 6과 같다. 이 결과는 마찰마모에 의한 내마모성 시험이 아닌 비회가 지나가는 FRP관의 사용 환경과 유사한 분

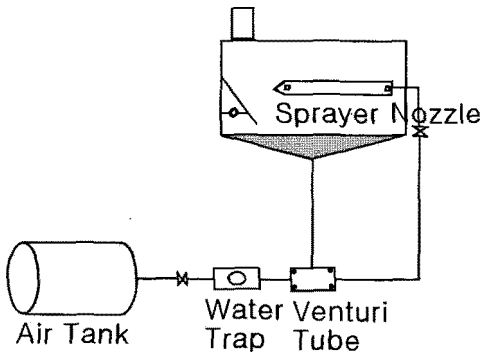


Figure 3. Structure of spray wear tester.

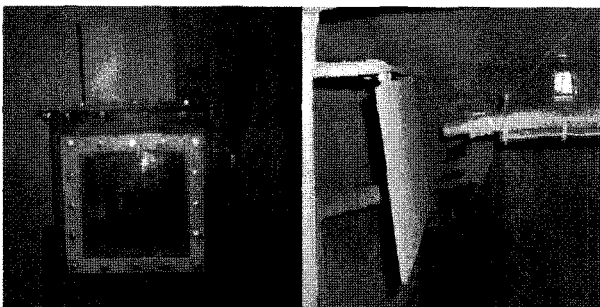


Figure 4. Spray wear tester.

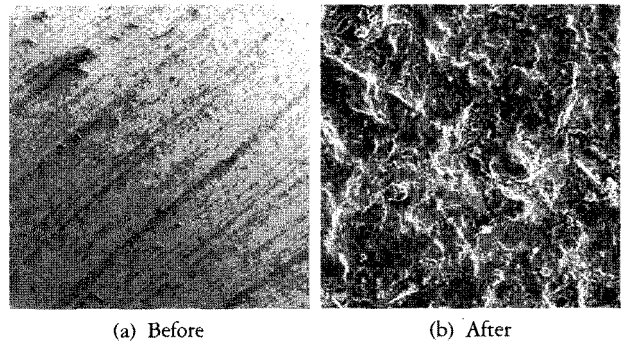


Figure 5. Wear test results of cast iron (SEM).

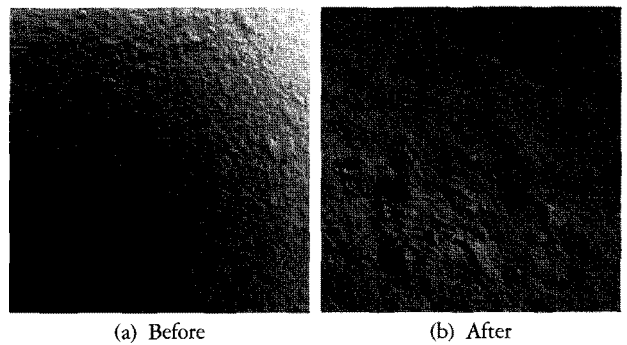


Figure 6. Wear test results of epoxy composite (SEM).

사식 마모시험에서도 FRP관의 마모에 대한 우수한 성질을 보여주는 것이다.

4. 현장 성능시험

실험실에서의 내마모성 및 분사식 마모시험 결과를 바탕으로 화력발전소 현장설치를 통한 3차 검증을 수행하여 FRP 배관의 내마모 성능에 대한 시험을 하였다. 발전소 현장의 비회 처리계통은 공기동력원인 blower 또는 air compressor의 공기압으로 적정 크기의 배관을 통해 비회를 회 저장조(ash silo)로 수송한다. 기존의 회 처리 계통의 배관을 2차례에 걸쳐 조사하고 현장 담당자들과의 회의를 거쳐 다음과 같은 사실을 확인하였다.

- 비회 처리용 배관의 두께는 8 mm이며 연결부 플랜지는 ANSI 150이다.
- 곡관을 통과한 직후의 직관의 입구 상부에서 발생하는 심각한 마모로 인하여 basalt lining으로 처리된 관을 사용하고 있다.
- 기존 관과 복합재료 관의 연결 시 내경을 일치시켜야 회 흐름에 문제가 없다.
- 비회관의 고온부 온도를 측정된 결과 최고 90℃ 정도이다.

따라서 시제품 FRP 배관과 비교할 대조군 배관은 화력발전

Table 8. Specifications of epoxy FRP pipe

Filler	SiC	
Mesh size	80	
Mixing ratio (wt%) (resin : filler)	70 : 30	
Layering method	Filament winding	
Length (mm)	990	
Diameter	Inner (mm)	305
	Outer (mm)	337
Connection	Adapter	

소에 설치된 주철관과 동일한 신규 배관으로 하고, 두 배관을 비회 carbon valve 후단 라인(고온부)에 설치하기로 하였다.

1, 2차 시편실험을 통한 성능시험에서 내마모성의 경우 에폭시 수지와 SiC 80 mesh를 혼합하였을 때 우수한 성능을 보인 결과에 근거하여 에폭시 내열·내마모 FRP 배관을 Table 8과 같이 제작하였다. 에폭시 배관과 주철관의 상호 비교를 위해 발전소 현장조건에 따라 에폭시 배관의 경우 길이 990 mm, 직경 305 mm (12")로 제작하였으며 주철관의 경우 화력발전소에서 사용되고 있는 같은 크기의 배관을 사용하였다.

에폭시 배관의 제작방법은 다음과 같다.

- ① Mold 제작
- ② Mold/에폭시 배관 분리를 위한 이형제 부착
- ③ 내식층/내마모층 제작: hand lay-up / filament winding
- ④ 구조층 제작: filament winding
- ⑤ 플랜지 제작 및 접합에 의한 연결부 제작
- ⑥ 자외선 차단제 도포 및 외면 코팅

FRP 배관의 현장설치에 따른 내마모 성능 및 내열성을 검증하기 위하여 138일간의 기간 동안 발전소 라인 후단에 FRP 배관을 설치하여 총 13차의 측정을 진행하였다. 설치위치는 지상으로부터 6.5 m 높이에 있는 비회 이송용 배관으로서 내경 305 mm, 전장 1 m이며 폭관부에서 직관부로 연결되는 구간으로 마모와 파손이 빈번하게 발생하는 구간이다. 설치 시 coupling 방식으로 제작되어 있는 주철관을 flange 연결방식으로 된 발전소의 배관과 연결하기 위하여 어댑터를 사용하였다. FRP 배관의 경우도 flange 방식으로 제작하여 설치 시 발전소에 이미 설치된 배관(탄소강관)의 비틀림으로 인하여 FRP 배관

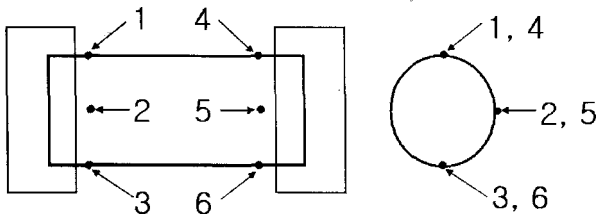


Figure 7. Wear measuring points.

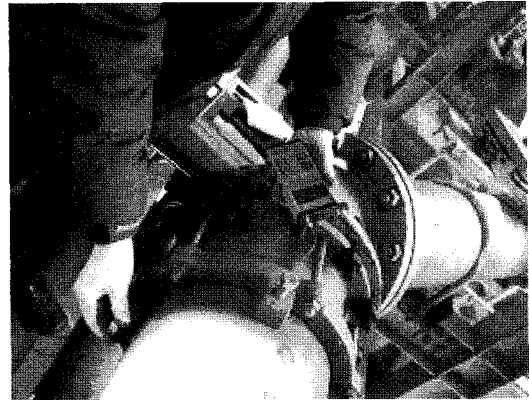


Figure 8. Measuring the wear at the #2 point of FRP pipe.

의 Flange 부분에서 크랙이 발생하여 주철관과 같은 어댑터 연결 방식을 취하였다.

마모량 계측은 Figure 7과 같이 측정 point 6개 지점을 중점적으로 측정하였다. 설치 후 초기에는 7일을 주기로 측정하였으며 21일 이후에는 10일 주기로 마모량을 측정하였다. Figure 8은 각 배관의 마모량 측정 방법을 보여준다. 배관의 마모량 측

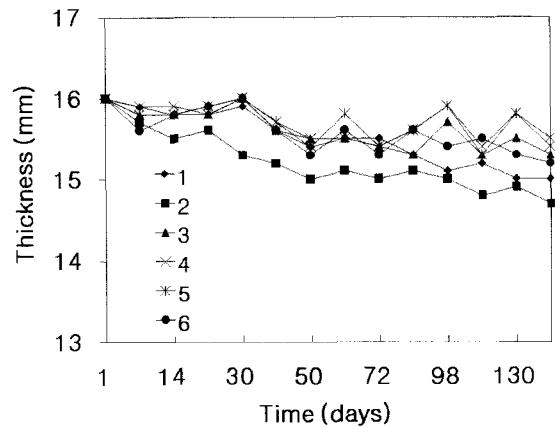


Figure 9. Thickness change of FRP pipe for 6 points.

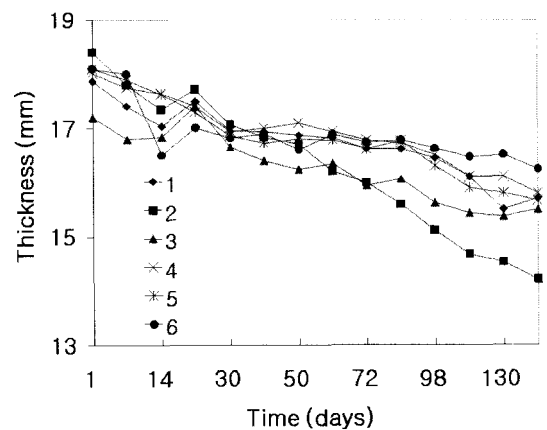


Figure 10. Thickness change of cast iron pipe for 6 points.

정 시 주위 환경조건과 마모량으로 인한 배관의 두께 감소를 측정하기 위하여 디지털 초음파 두께측정기를 사용하였다[7]. 또한 이중 재질의 배관으로 인한 측정오차를 감소하기 위하여 금속용 초음파측정기와 plastic용 초음파측정기를 주철관과 FRP 배관에 대하여 독립적으로 사용하였다. FRP용 초음파측정기의 최소 측정단위는 0.1mm이며 금속용 초음파측정기의 최소 측정단위는 0.01 mm이다.

측정결과는 Figure 9 및 Figure 10과 같다. FRP 배관과 주철관 모두 엘로우 부분과 연결되는 비회 유입구 2번 위치에서 마모가 가장 많이 발생되는 것으로 측정되었다. FRP 배관의 6개소 마모량은 0.3~1.3 mm이며 주철관의 6개소 마모량은 1.7~4.21 mm로 측정되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 화력발전소의 저회 운송을 위한 내마모재 함유 FRP관을 개발하고 저회 운송관의 수명연장을 위하여 가장 중요한 성질인 내마모성을 평가하였다. 평가 방법은 비용과 시간이 많이 드는 현장시험 전에 최적의 FRP 재료를 찾는 내마모성 시험에서부터 비회 운송 환경과 유사한 분사식 마모시험을 거쳐 그 시험 데이터를 기초로 실제 제품의 제작조건과 동일한 FRP관의 현장 적용을 통한 검증은 실시하였다.

ASTM D 4060에 의한 마모시험에서 예폭시 수지와 SiC 80 mesh를 7:3으로 혼합한 FRP의 내마모성이 가장 우수하였다. FRP와 주철을 비교한 시험에서는 회전식 마모시험(H-10 wheel), 분사식 마모시험에서 각각 FRP 시편이 1/20, 4/10의 마모량을 보여 주철관의 FRP 파이프로의 대체 가능성을 보여주었다.

90℃ 고온의 카본밸브 후단 라인에 설치된 현장시험에서는 비회 유입구 위치에서 마모가 가장 많이 발생되는 것으로 측정되었다. FRP 배관은 전 구간에서 약 0.3~1.3 mm 정도의 마모가 진행되었고 주철관은 전 구간에서 약 1.7~4.2 mm의 마모가 진행되었다. 따라서 비회 이송을 위한 파이프의 가장 중요한

성능인 내마모성에서 FRP 관이 기존의 주철관보다 우수함을 보여주었다.

감 사

본 연구는 2006년 중소기업청에서 시행한 구매조건부 신제품 개발사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. Friedrich K., Friction and Wear of Polymer Composites, Technical University Hamburg-harburg, Elsevier, Hamburg, 1986.
2. Jaeger, M., Schneider, G., and Gauthier, C., "Abrasion and Erosion Resistance of Fiberglass Reinforced Vinylester Composites," Proceedings of the 2nd Biennial International Composites Africa, Johannesburg, 291-303 (2004).
3. Rajesh, J., Bijwe, J., Tewari, U. S., and Venkataraman, B., "Erosive Wear Behaviors of Various Polyamides," *Wear*, **249**(8), 702-714 (2001).
4. Suresha, B., Chandramohan, G., Prakash, J. N., Balusamy, V., and Sankaranarayanan, K., "The Role of Fillers on Friction and Slide Wear Characteristics in Glass-Epoxy Composite Systems," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, **5**(1), 87-101 (2006).
5. Klemm, R., "Abrasion Resistant Steel Piping Systems for Slurry Transport in Mining Applications," Internal Tech Literature, UltraTech, Port Washington, 1999.
6. Moumakwa, D., and Marcus, O., "Tribology in Coal-Fired Power Plants," *J. Tribol. Int.*, **38**, 805-811 (2005).
7. Scarponi, C., and Briotti, G., "Ultrasonic Technique for the Evaluation of Delaminations on CFRP, GFRP, KFRP Composite Materials," *J Compos: Part B*, **31**, 237-243 (2000).