

탈황설비용 부스터팬 블레이드의 코팅재질 선정에 관한 연구

정병용, 유호선*, 문승재**†

한국남동발전(주), *승실대학교 기계공학과, **한양대학교 기계공학부

Selection of the Protective Coating Material for Blades of a Booster Fan in Desulfurization Plant

Byeong-Yong Jeong, Hoseon Yoo*, Seung-Jae Moon**†

KOSEP, Seoul 135-791, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

**School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received May 7, 2009; accepted September 21, 2010)

ABSTRACT : This study investigated the coating failure of the blades of booster fans for the 200 MW flue gas desulfurization plant. Although the arc sprayed SM8222 have been tried as blade coating materials aimed to apply as alternatives of Metcoloy®2 due to better corrosion-erosion resistance but it is failed. Bond strength tests and practical field experiences have demonstrated high velocity oxy-fuel(HVOF) coating method with Diamalloy 3004 as an alternative to Metcoloy® 2 arc spray.

Key words : Booster fans, erosion, corrosion, blade, coating, HVOF

1. 서론

최근 전력산업현장에서는 계획예방정비를 위한 예정된 정비기간을 연장하는 것이 점점 중요해지고 있다. 이와 동시에 전력산업 운영자나, 정비를 담당하는 기술자들은 플랜트 효율을 올리고, 정지기간과 운영비를 절감하는 한편, 엄격한 환경규제 정책을 준수해야 하는 책임을 담당하고 있다.

부식-침식문제는 많은 공업 운영분야에서 흔히 일어나고 있다. 육상이나 제트엔진 터빈 블레이드에서부터 석탄 전환과정 등에서 볼 수 있다. 그러한 운전상황에서의 감육의 진행은 넓은 범위의 변수들의 조합에 의해 좌우된다. 온도, 환경, 물질, 충돌입자 등이 그것이다. Levy^[1]는 스케일의 형성과 제거에 동시에 존재하는 갈라지거나 부서지는 작용 또는 스포링(Spalling) 과정을 통해서 메탈표면에서의 부

식-침식에 대해 보고해오고 있다. 보통 침식은 물질의 경도가 증가할수록 줄어든다. 그러나, 어떤 물질그룹들에서는 그 반대가 참이기도 하다. 수년 전 Chacon Nava^[2]는 침식, 침식-부식, 부식상황에서의 경도 효과에 대해 조사했다. 낮은 온도영역에서의 침식상황에서는 감육과 경도간에 분명한 연관성이 없다고 보고했다. 반면, 높은 온도영역에서 산화 분위기에서는 경도가 증가할수록 감육률이 증가하는 것으로 나타났다.

플랜트 구성부품의 침식과 부식문제는 플랜트를 관리하는 사람들에게는 매우 성가신 문제가 되어 오고 있다. 값비싼 부품의 교체를 유발하고, 비용과 불편함이 수반되는 정지를 유발하여 매출을 감소시키는 문제이기 때문이다. 진보된 내마모 기술을 가스팬, 저 낙스(NOX) 버너부품, 보일러 튜브, 축의 쉴슬리브 등의 부품에 적용한다면 발전소의 계획된 정지시간을 연장할 수 있기 때문에 정비비를 절감하고, 애기치 못한 정지를 줄일 수 있다.

여수화력 탈황설비용 부스터팬 블레이드는 초기 건설당시엔 구상흑연주철로 설계되었지만 설치공간

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0450

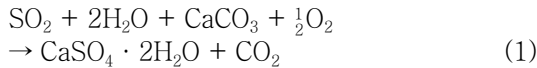
E-mail address: smoon@hanyang.ac.kr

상의 제약으로 인해 부스터팬의 크기가 축소되면서 알루미늄 블레이드로 제작되었다. 따라서, 응력이나 충격하중에 취약한 기계적 성질 및 내마모성을 보강하기 위해 내마모 코팅재로 Sulzer사의 Metcoloy® 2를 사용했지만, 지난 10년 동안 블레이드 코팅손상 및 블레이드 절손등으로 인해 운전기간이 2년도 채 넘지 못하는 실정이다. 설상가상으로, 설치 당시의 예상치를 훨씬 능가하는 황산 농축 폐액에 의한 저온부식 및 노후화되고 효율이 낮은 전기집진기를 통과하는 회 입자로 인한 침식환경에의 노출은 상황을 더욱 악화시키고 있는 실정이다. 따라서 내부식 및 내침식 보호코팅재질의 선정을 통한 블레이드의 운전기간을 연장하는 것이 필요하다.

2. 탈황설비용 부스터팬

2.1 탈황설비 개요

국내 화력발전소에서 운영되고 있는 탈황설비는 보일러에서 석탄이나 중유 연소시 대량의 아황산가스가 발생하여 대기를 오염시키므로 이를 제거하는 것이 목적인데 국내에 도입된 것은 석회석을 이용하는 습식법으로 반응 원리는 다음 (1)식과 같다.



탈황설비는 순차적으로 건설해야 했으나 전력생산

에 직접 관련이 없고 막대한 건설비가 필요한 관계로 건설을 미루어 오다가 공해방지법의 강화로 전국적으로 30여기에 동시에 탈황설비에 대한 경험 없이 탈황설비를 건설하게 되어 다음과 같은 많은 문제점이 발생하고 있다.

탈황설비가 기존의 발전설비보다 부식 환경이 매우 가혹하여 내식성이 매우 우수한 소재가 필요하나 이들 재료는 고가이면서 국내에서는 사용된 경험이 짧고, 설계상에서 미처 생각하지 못했던 여러 가지 문제가 발생하고 있다. 그런데, 외국의 탈황설비 기별 사용사례를 조사해보면 세계적으로 너무 다양하고 각국의 발전설비 연료조건이나 운전조건이 매우 다르며, 이들의 평균적 성능을 바탕으로 적용한 국내 발전소의 경우에도 각각에 대한 다양한 환경과 운전상황을 고려하지 못한 채 건설된 경우가 많아, 길게는 10 ~ 11년, 짧게는 3 ~ 4년 운전된 이들 설비에서 이미 상당한 문제들이 발생하고 있다.

특히, 중유화력의 경우 탈황설비 일부 구간에서는 설계당시 예상했던 황산 농축 폐액의 산도를 훨씬 뛰어 넘어 어떠한 내식성 특수강이나 코팅재 및 라이닝재도 견디기 힘든 고온의 극산성 환경을 보여주고 있는데, 이는 발전소 특성상 잦은 주말 기동·정지에 의한 저온부식환경의 조성도 한 원인이다. 이러한 부식 문제로 인해 현장에서는 짧게는 3개월에서 길게는 1년 정도 무조건 보수를 전제로 설비를 운영하고 있는 실정이다. 이는 설비의 불안정 요인이 될 뿐만 아니라, 많은 유지보수비용을 필요로 한다.

Table 1 Specification of booster fans

Power plant		Dangjin #1,2	Seocheon #1,2	Ulsan #1,2	Yeosu	
					#1	#2
Capacity	Motor[kW]	2,300	1600	900	1,500	2,300
	Fan[m³/min]	18,543	10,276	10,122	18,740	29,770
Type		Axial Flow	Centrifugal	Centrifugal	Axial Flow	Axial Flow
Method of Impeller Control		-	Backward	Backward	Adjustable Pitch	Adjustable Pitch
Impeller Tip Diameter[mm]		3,043	2,720	2,330	2,230	2,995
Impeller Tip Speed[m/min]		8,528	7,605	6,516	138	140
Blade Thickness[mm]		50	12	9	37	37
Blade Material		GCD40	HT60	HT60	RR50	RR50
Number Of Blades		18	16	11	19	25
Inlet/Outlet Temp.[°C]		117/120.7	148/156.5	165/171.1	160/163	160/163
In/Discharge Pressure [mmH₂O]		-5.3/286.6	-28/530	-28.3/356.3	-81/359.1	-78.7/361.4
Fan Speed[rpm]		890	890	890	1190	890

2.2 부스터팬의 구성

Table 1은 국내에 설치된 탈황설비 부스터 팬들의 주요 사양을 나타낸다. 석탄화력발전소인 당진화력과 여수화력을 포함하는 중유화력 발전소 탈황 부스터팬의 사양을 비교하였다. 블레이드 피치 조절 등에 의해 유량과 압력을 조절할 수 있으며, 블레이드 재질은 일반적으로 강도가 좋은 고장력강 등을 사용하는데, 여수화력의 경우에는 알루미늄 합금을 사용하고 있다. 부스터팬 입구온도의 경우 석탄화력인 당진화력발전소는 120℃ 내외이나, 중유화력발전소는 160℃ 이상으로 높은 것은 황성분이 함유된 배기가스로 인한 저온부식을 방지하기 위함이다.

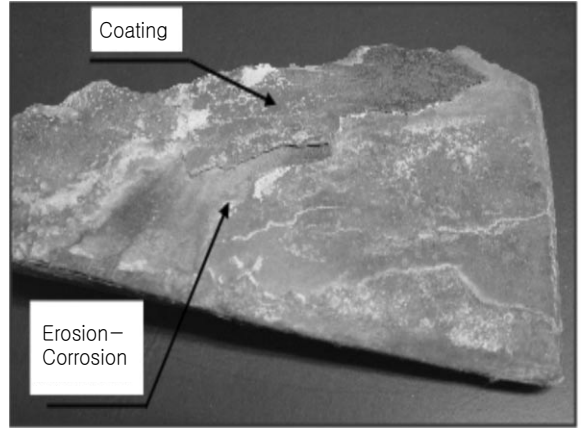


Fig. 1 Part of broken blade.

3. 블레이드의 고장

3.1 블레이드 파손 진행과정

1999년 건설 이후에 사용기간이 2년이 되지 못한 Metcoloy®2로 코팅된 부스터팬 블레이드의 파손(Fracture)현상들이 있었다. 알루미늄 합금인 블레이드 모재가 인장응력에 취약한 점이 원인이 될 수도 있으나, 강도가 보다 큰 주강 블레이드도 유사발전소인 중유화력에서 파손현상이 보고되었다.

블레이드의 파손은 다음과 같은 현상들의 일련의 과정을 통해서 진행된다. 보호 코팅의 박리, 알루미늄 블레이드의 침식 및 감육, 피로 균열의 시작 및 성장, 과도한 인장응력에 의한 파손 과정이다.

Fig. 1에서는 보호 코팅층의 탈락으로 인한 알루미늄 블레이드 모재에서의 침식-부식현상을 보여준다. Fig. 1은 파손사고 당시 파편조각의 일부로써 보호 코팅층의 손상 이후 모재의 침식현상을 육안으로 확인할 수 있다.

실질적으로 이러한 블레이드 파손의 근본원인은 Metcoloy®2 보호코팅의 파손에 따른 알루미늄 블레이드의 초기 부식에 원인이 있으며, 이후의 추가

적인 박리현상을 보이는 것은 코팅의 접착력에 문제가 있다고 볼 수 있다. 알루미늄 모재에 스테인레스계 고크롬강인 Metcoloy®2가 아크 스프레이 형식으로 코팅되었기 때문에 이종재질간의 접착력이 취약하기 때문이다. 실제로 코팅층이 쉽게 박리되는 현상이 자주 목격되었다. 그리고 기존 블레이드의 표면에 나타나는 기공이나, 구조결함에 따른 모재 표면의 크랙도 한 원인이 될 수 있다.

4. 블레이드 코팅 개선

4.1 코팅 방법 비교

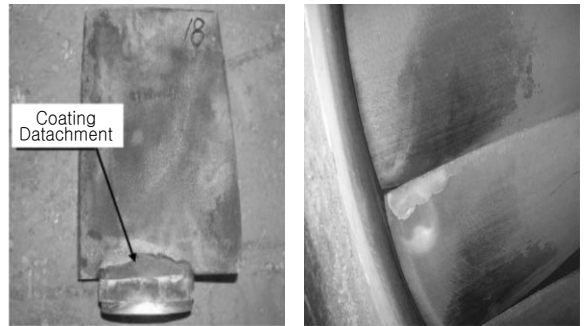
Table 2에 비교적 저온에서 작업하는 코팅 방법중에 주요 방법별 특징을 나타내었다. 코팅층의 품질을 나타내는 부착력과 기공을 측면에서 HVOF(high velocity oxy-fuel) 방식이 제일 우수한 것을 알 수 있다. 단, HVOF 방식은 기존의 아크 스프레이 방식에 비해 가격이 약간 높은 단점이 있다.

Table 2 Characteristic of coating method

Description	Heat source/ Temperature	Gas	Velocity (m/s)	Bond Strength (kgf/mm ²)	Porosity (%)
Flame Spray	Flame 3,000℃	O ₂ , Acetylene	150	4 ~ 6	4 ~ 9
Arc Spray	Electricity 6,000℃	Air	180	7 ~ 8	3 ~ 5
Plasma Spray	Electricity 10,000℃	Ar, H ₂ , He, N ₂	300~400	5 ~ 7	1 ~ 3
HVOF	Flame 2,000℃	O ₂ , Kerosene	1,200~2,100	10	1이하

4.2 코팅 재료의 교체

기존 블레이드에서 나타나는 보호코팅층 손상문제를 개선하기 위해 제작사에서 제안한 새로운 코팅재인 SM8222을 적용하여 현장에 설치하게 되었다. Sulzer Metco 8222의 화학성분은 Fe-28Cr-5C-1Mn이다. 고크롬 스테인레스 스틸 복합재 와이어로 아크 스프레이 방식으로 코팅된다. 제작사 사양에 따르면 경도가 높은 내마모 내부식재료 기계류 부품의 보수나, 농업, 제지, 프린팅, 방직 또는 발전 산업 부품의 용적 복원용으로 추천되는 재질이다. Fig. 2는 국내에서 제작된 블레이드로 LM23 모재에 아크 스프레이 방식의 SM8222를 코팅한 제품이다. 약 17개월의 실운전 적용 평가 결과 블레이드 19개중에 11개가 루트부 곡면부위에서 코팅층이 박리되는 문제점이 발견되었다. 이 제품은 제작시 코팅층 두께를 0.8 ~ 1.0 mm로 결정하였으나 실제 제품의 코팅 두께는 약 1.5 ~ 2.0 mm 정도로 확인되었다. 이 현상은 수작업으로 하는 코팅 작업 특성상 두께를 정확히 관리할 수 없는 조건과 코팅 후 각각의 블레이드에 대한 중량을 맞추는 과정에서 특히, 곡면부의 코팅 두께가 두꺼워진 것으로 보이며 실운전시 사용온도에 따른 모재와 코팅층의 각 재질별 열팽창계수 등이 달라 모재와 코팅층이 분리되면서 코팅층 박리가 발생한 것으로 분석되고 있다. 이는 코팅 재질 및 방법의 문제 외에도 코팅층 두께를 최적으로 결정해야 할 필요성을 보여주고 있다. Fig. 3은 국내에서 제작된 블레이드 중에서 약 17개월간 실제 탈황설비에 운전적용을 하였으나, 코팅층에 전혀 문제가 없는 것을 보여주는 제품으로 전체적으로 코팅층 박리 등의 문제는 없으며, 코팅 표면에도 부식등 문제점은 발견되지 않았다. 따라서 기존에 적용하였던 아크 스프레이 SM8222 코팅 방법으로도 최적의 방법을 선정하면 코팅층 박리 문제는 해결 가능성이 있는 것으로 판단되어진다. 기존 코팅 재질인 SM8222 사양으로 마모, 부식 등의 문제는 없는 것으로 보인다. 그러나 수입품 및 수입품과 동일한 방법으로 제작된 국내 제품에서도 코팅층의 박리 현상이 발생하고 있는데, 기존의 코팅재를 탈황 블레이드에 적용하는 것은 문제가 있고, 반드시 개선이 필요한 것으로 판단되었다. 따라서, 금번 탈황 블레이드 코팅 개선시에도 지금까지 적용되었던 아크 스프레이 코팅방법을 사용하는 것은 코팅층 박리 문제를 근본적으로 해결하는 방법이 될 수 없다. 블레이드의 사용환경을 고려하고 코팅 품질을 좀더 개선하여 사용기간을 연장하기 위해 아크 스프레이 코팅



(a) part (b) coating failure at tailing edge

Fig. 2 Arc sprayed SM8222 coating failures (after 17months); coating failure at root.

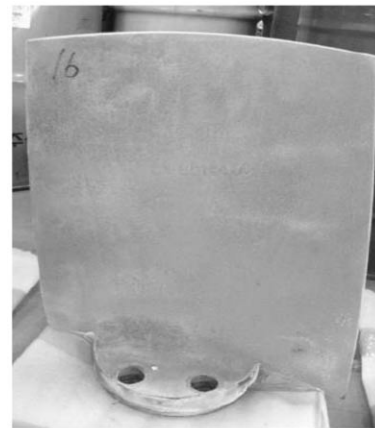


Fig. 3 blade of arc sprayed SM8222.(after 17months)

방법의 SM8222 재질보다 접착력과 기공율이 우수한 방식을 적용하는 것이 좋다고 판단된다. 코팅 재질은 기존의 SM8222에서 부식등 문제가 없었으나 코팅 방법이 변경됨에 따라 최적의 코팅 재료를 선정할 필요가 있다.

또한 코팅층 두께에 대해서는 지금까지의 수입품 및 국내 제품에서 발생된 코팅층 박리 문제를 개선하기 위해 지금까지 적용한 두께 1.0 ~ 2.0 mm 수준보다 얇은 두께를 검토 할 예정이다.

기존 블레이드의 SM 8222 재질을 적용한 아크 스프레이 코팅방법을 개선하기 위해 Table 3에 HVOF 코팅방식의 Diamalloy3007, Diamalloy 3004 재질에 대한 특성을 비교하였다. 블레이드에 적용하기 위한 HVOF 코팅 재질을 선정하기 위해

코팅재료 전문 공급업체인 Sulzer사의 코팅 재료 사양을 검토하였고 HVOF 코팅재질로 가장 많이 사용되고 있고 Sulzer사가 추천하는 황산성분에 강한 Diamalloy 3004 재질을 검토 하였다. Diamalloy 3004는 서멧(Cermet, ceramic-metallic)인 Cr₃C₂-NiCr의 일종이다.

일반적으로 서멧 코팅은 금속 접합체(binder) 속에 WC 또는 Cr₃C₂ 등의 세라믹 입자들이 끼워져있는 구조이고, Cr₃C₂의 평균 크기는 25 μm 정도이다.^[3]

J.H., Bulloch 등^[4]은 니크롬 등의 코팅재를 중유보일러의 부스터팬 디퓨저(Diffuser)에 부착하여 시험한후 감옥율을 조사하였다. 실험결과 니크롬은 다른 코팅들보다 3 ~ 4배 적은 감옥율을 나타냈다.^[4] 현장 실험 조건은 여수화력과 매우 유사한 3.5%의 황을 함유하는 벙크 "C" 중유보일러이다. 퇴적 성분들에서 70%이상의 황산염을 포함하고 있었고, pH1.9 정도를 나타내며, 배기가스는 정화되거나 집진되지 않기 때문에 CO₂나 CO, SO₂와 NO_x와 습분을 함유하고 있다. 검댕이나 아주 작은 양의 회입자도 함유하고 있으며 배기가스의 온도는 150℃이고, 속도는 40 m/s이다.

D., Toma 등^[5]은 HVOF 방식에 의한 서멧 코팅의 침식-부식 환경의 연구를 통해 Cr₃C₂-NiCr이 모래를 포함하는 0.1M 황산 실험조건에서 훌륭한 내

침식 부식성을 나타낸다고 보고했다. 기존 블레이드의 저온부식 및 침식에 대한 저항성을 향상시킬 수 있는 특성이다.

4.2.1 코팅 접착력 시험

HVOF 코팅 방법을 적용하기 위해 코팅재질 3가지 및 코팅 두께 2가지에 대한 시편을 제작하여 각각의 시료에 대해 접착력 및 경도 시험을 실시하였다. 시험은 포항산업과학연구원에서 진행되었다. 인장시험은 ASTM A370 (2007)기준으로 시행하였고, 독일 ZWICK사의 10 ton 인장 시험기를 사용하였다. 경도시험은 KS B 0811(2003)을 표준으로 시행하였다.

Table 4에 시험 결과를 나타내었으며 지금까지의 코팅기술 기초연구와 업체의 추천 및 사양서를 바탕으로 실시한 접착력 시험결과를 바탕으로 블레이드 코팅방법은 기존 아크 스프레이 방법보다 발전된 기술이고 접착력이 사양적으로 1.3배 우수한 HVOF 방식을 선정하였다. 코팅 재질은 Sulzer사의 사양서 및 추천의견 그리고 접착력 시험결과를 바탕으로 Diamalloy 3004를 선정하였다. 또한 코팅 두께는 시접착력 시험 평가를 기초로 0.2 ~ 0.3 mm로 결정하였다.

Table 3 Characteristic of coating material(SM8222, Diamalloy 3007, 3004) per each method

Classification	SM 8222	Diamalloy 3007	Diamalloy 3004
Coating method	Arc spray	HVOF	HVOF
Main chemical composition [%]	Fe_28Cr, 5C, 1Mn	Cr ₃ C ₂ _20Ni, 20Cr	Cr ₃ C ₂ _20Ni, 20Cr
Micro hardness[Hv]	484 ~ 513	832	595
Tensile bond strength[MPa]	65	90	83
Coating weight [kg/m ² · 0.1 mm]	0.68	0.68	0.64

Table 4 Test results per each coating method and material

Coating Material	Specimen		Bond strength [MPa]	Hardness (Hv)
	Coating method	Thickness (mm)		
SM 8222	Arc spray	0.80	21.87	751
Diamalloy 3007	HVOF	0.25	36.24	795
		0.40	33.58	
Diamalloy 3004		0.25	36.06	754
		0.40	37.57	

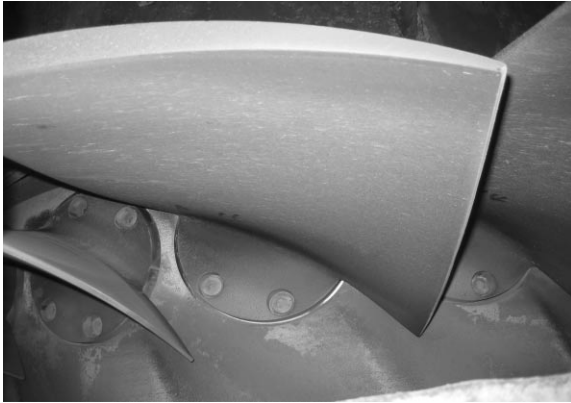


Fig. 4 New blades after 200 h operation.

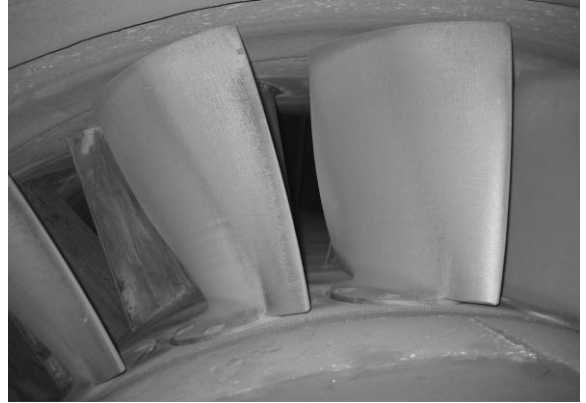


Fig. 5 New blades after 1,526 h operation.

5. 코팅개선 효과

장착성 및 초기 성능을 평가하기 위하여 개발품 1세트 19개의 블레이드를 2008년 11월 5일 탈황설비 1호기에 장착하였다.

블레이드 장착시 각각의 블레이드별 측정 웨이트 밸런스 결과를 기준으로 조립한 후 부스터팬의 진동을 확인하는 과정을 거치게 되는데, 개발품 블레이드에 대해서도 장착 후 설비의 진동 수준이 양호함을 확인 하였다.

이번에 개발된 블레이드는 금형주조 방법을 선택하였기 때문에 블레이드 주조품의 전체적인 형상이 균일하고 가공시에도 양산용 지그를 별도 제작하여 사용하였기 때문에 블레이드 각각의 중량을 균일하게 유지할 수 있었다. 그리고, HVOF 코팅적용에 따른 코팅 두께가 균일하여 완제품 블레이드 각각의 중량을 균일하게 관리할 수 있어서 초기 장착 운전시 진동 수준이 양호하였던 것으로 보여진다. 탈황설비용 부스터팬 블레이드는 황성분 등 유해가스 성분에 노출되어 운전되는 부품으로 초기 시험운전으로는 진동 및 성능은 확인할 수 있지만 코팅층 내마모 및 내황산 특성 등은 확인하기 곤란하다. 따라서 장기간의 실운전 시험을 통해 종합적으로 신뢰성 평가를 진행하기로 한 계획에 따라 중간 점검을 아래와 같이 실시하였다.

5.1 200시간 중간점검

설비 운전 후 200시간 시점에서 설비를 정지하여 개선 블레이드의 이상 유무를 점검하였다. Fig. 4는 블레이드 장착상태의 모습이다. 19개 전체에 대해

장착상태 이상유무와 외관 손상여부를 육안으로 확인하였으며, 블레이드 상태가 양호함을 확인할 수 있었다. 또한 블레이드 3개를 분해하여 손상여부를 상세히 확인하였고, 코팅표면 손상여부도 확인하였으나 이상이 없었다.

5.2 1,526시간 중간점검

1,526시간 운전시점에서 블레이드 상태를 확인하였다. Fig. 5는 블레이드 장착상태의 모습이다. 블레이드 3개를 분리하여 코팅층 내부의 결함을 확인하기 위해 블레이드 루트부위에 별도의 X-Ray 검사를 실시하였으며, 검사결과 코팅층이 모재와 분리되지 않고 부착상태가 양호함을 확인할 수 있었다. 샘플링된 3개의 블레이드 모두 코팅표면의 전체적인 상태는 이상이 없었고, 기준에 박리 등으로 문제가 되었던 블레이드 루트부도 코팅층의 탈락이나 부식 등의 이상이 발견되지 않아 고속화염용사 방법의 Diamalloy 3004 코팅이 우수함을 확인 했다.

6. 결론

본 연구에서는 탈황설비용 부스터팬의 블레이드 코팅을 개선하기 위해 새로운 코팅방법 및 재질을 선정하고 현장 적용 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

기존의 Metcoloy®2 아크 스프레이 방식을 대체하기 위해 SM8222 아크스프레이 방식을 적용하였으나, 17개월 운전기간동안 코팅의 박리현상이 나타나므로 따라 Metcoloy®2를 대체할 수 없음을 확인할 수 있었다.

블레이드 표면 코팅기술은 기존의 아크 스프레이

방식에서 접착력 시험평가를 통해 HVOF 방식이 접착력이 우수함을 확인하였고, 최적의 코팅두께를 0.2 ~ 0.3 mm로 선정하였다. 서멧 재질인 Diamalloy3004 재질을 실설비 적용 운전시험 평가를 통해 코팅이 박리되지 않음을 확인하고, Metcoloy®2를 대체할 수 있는 코팅재질임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Levy A.V., 1995, Corrosion 51, 872~883.
2. Chacon Nava J.G., Stott F.H., and Stack M.M., 1993, Corrosion Sci. 35 1045-1051.
3. Guilemany J.M., Espallargas N., Suegama P.H., and Benedetti A. V., 2006, Corrosion Science 48, 2998-3013.
4. Bulloch J.H., and Callagy A.G., 1999, Wear 233-235, 284-292.
5. Toma D., Brandl W., and Marginean G., 2001, Surface and Coating Technology 138, 149-158.