

# AL계 희생양극에 의한 2종스테인리스 강축의 음극방식 실용화 연구

## Study on Practical Cathodic Protection of 2nd Class Stainless Steel Shaft by means of Al Sacrificial Anode

손영태<sup>†\*\*</sup>, 이명훈\*, 이희준<sup>\*\*</sup>

Young-Tae Son<sup>†\*\*</sup>, Myung-Hoon Lee\* and Hee-Joon Lee<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

In the case of hull material, large sized merchant ships are made of steel, on the other hand FRP or wood are used for small sized fishing boats. At present in Korea approximately 88,500 fishing boats are in operation of which 70% are made of FRP

In the meantime, stainless steel is frequently used as shaft materials of the small-size FRP fishing boat. Namely, the kinds of shaft materials are STS 304(18Cr-8Ni), STS 316(18Cr-12Ni-2.5Mo steel) and STS 630(17Cr-4Ni-Nb steel) etc. Among these things, STS 304 which is the cheapest and having ordinary corrosion resistance is most widely used as 2nd class shaft material. But, using STS 304 for shaft system material of the small-size FRP fishing boat on seawater environments entails a severe corrosion which causes shaft system troubles. Particularly, the corruptions tend to be concentrated on the stern and bow side, propeller shaft surface of inside of stern tube and the boat having no stern cooling pipe line system.

As a solution for those problems, research on the ways to mitigate corrosion on the part of 2nd class stainless steel shaft have been undertaken. In the result, not only clarification for the reason of corrosion on the part of stainless steel shaft used mainly for the small-size FRP fishing boat was done, but also most optimal corrosion protection system was developed by experimenting shaft's protection simulation based on the electrochemical cathodic protection principle. In addition, verification through the field test on the optimal cathodic corrosion protection method by means of aluminum sacrificial anode was carried out. In this study, effective and economical shaft's protection system is suggested to the small-size FRP fishing boat operator by substantiating the results obtained from the research on the optimal cathodic protection.

※ **Keywords** : Sacrificial Anode(희생양극), Stainless steel shaft(스테인리스강축)  
Cathodic Protection(음극방식), 갈바닉 부식(Galvanic Corrosion), 캐비  
테이션 침식(Cavitation Erosion)

\*한국해양대학교 기관시스템공학부

\*\* 선박검사기술협회 기술연구팀

† 논문 주저자

## 1. 서 론

선체용 재료의 경우, 중대형 상선은 철강이 주종을 이루는 반면 소형인 어선은 FRP와 목재가 주종을 이루고 있다. 현재 우리나라에는 약 88,500척 정도의 어선이 운항·조업을 하고 있는데 이중 70% 정도가 FRP 어선이다. 또한 이 FRP 어선 중 약 87% 정도는 5톤 미만으로서 그 선박의 엔진은 평균 약 160마력 이하이며 회전수는 대략 약 1,200~2,000rpm 정도가 주류를 이루고 있다. 그리고 이들 어선 축계 재료의 대부분은 스테인리스강종을 사용하고 있다. 즉, 스테인리스강 축계의 종류로는 STS 304(18% Cr-8% Ni 강), STS 316(18% Cr-12% Ni-2.5% Mo 강) 및 STS 630(17% Cr-4% Ni-1% Nb 강, 석출경화계) 등이 있다. 이 중 가격이 저렴하고 내식성이 양호하여 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 축계재질은 STS 304 강이다. 그러나 이러한 STS 304와 같은 FRP 소형어선용 축계재료는 해수 환경에서 사용 중 극심한 부식발생으로 인하여 축계사고의 원인이 되고 있다. 특히, Stern tube 내 프로펠러 축 표면, 선미축 및 선수축 지면 사이, 선미냉각관이 없는 선박에 집중적으로 발생하여 안전 문제가 제기되어 왔다. Fig.1은 FRP 소형어선에 설치한 STS 304 프로펠러 축에 심한 국부적인 공식(Pitting) 현상이 발생된 사례를 나타내고 있다.

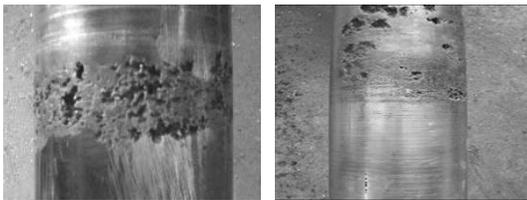


Fig. 1 FRP 소형어선에서의 제2종축(STS304)의 공식(Pitting)발생 사진

이와 같은 스테인리스강의 부식원인으로는 틈부식(Crevice Corrosion), 갈바닉 부식(Galvanic Corrosion) 그리고 경우에 따라서는 선박 내 발전기에서 유출하는 미주전류 부식(Stray Current Corrosion)에 의한 것으로 분석되었으며, 또한 때때로 부식의 원인이 주위의 여건에 따라 복합적으로 일어나는 경우도 있는 것으로 나타났다.

즉, 일반적으로 스테인리스강(STS)은 중성환경 중 크롬산화물( $Cr_2O_3$ )이라고 하는 치밀한 부동태(Passivity) 산화피막이 20~40 Å 정도 형성되므로 인해 환경 중 부식 없이 안정적으로 사용된다. 그러나 이 스테인리스강은 중성 환경이라고 할지라도  $Cl^-$  등과 같은 할로젠이온이 존재하는 해수 환경 중 놓여진 분위기의 조건에 따라서는 Fig. 1에서와 같이 스테인리스 강 표면에 형성된 부동태 산화피막이 파괴되며 국부부식(Localization Corrosion)이 발생한다는 것을 확인할 수 있었다.

그 동안 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 일환으로 '2종 스테인리스 강 축계의 부식을 저감시킬 수 있는 기술적 해결 방안'에 대한 연구를 진행하면서 FRP 소형어선에서 사용되어 지고 있는 STS 강축의 부식원인을 규명하는 한편 여러 가지 방식 방법 중 전기화학적 음극방식(Cathodic protection) 원리에 의한 축계방식 시뮬레이션을 통하여 최적방식시스템을 제시할 수 있었다. 또한 실제로 실선 축계 구성재료에 전기화학적 음극방식을 적용하기 위하여 Al계 희생양극(Sacrificial anode) 형상을 고안하여 직접 실선 실험을 통한 검증을 시도하여 왔다.

본 연구에서는 지금까지의 연구결과를 종합하여 실선의 스테인리스강 축에 직접 적용되어진 Al계 희생양극에 의한 음극방식의 검증 결과를 기술하는 한편, 시뮬레이션 및 현장 실험결과에서 도

출된 데이터를 분석하여 AI 희생양극의 소모량을 추산·제시함으로써 관련 어민들에게 유용하고 경제적인 축계방식 시스템을 제공하고자 한다.

## 2. STS강축의 방식 시물레이션 시험 결과

Fig. 2는 무방식 및 방식 시물레이션 실험 전경을 나타내고 있고 Table 1은 시험에 사용된 시험편의 종류를 나타내고 있다.

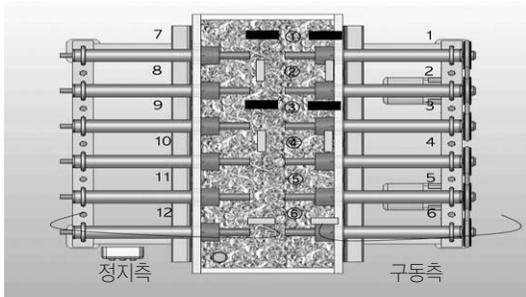


Fig. 2 축계 무방식 및 방식 시물레이션 실험

Table 1 시물레이션용 무방식 및 방식 조건의 축 시험편 종류

구분	시험편 종류별 번호 설명
구동부	1번 시험편 : Zn코팅 + 수중부 절연피복(Drive축)한 샤프트의 자연전위
	2번 시험편 : Ring Zn 연결(Drive축)한 샤프트의 자연전위
	3번 시험편 : 무방식 + 수중부 절연피복(Drive축)한 샤프트의 자연전위
	4번 시험편 : Ring Al연결(Drive축)한 샤프트의 자연전위
	5번 시험편 : 무방식(Drive축)한 샤프트의 자연전위
	6번 시험편 : 축 브러쉬 연결 + Al전선 연결(Drive축)한 샤프트의 자연전위
정지부	7번 시험편 : Zn코팅 + 수중부 절연피복(Drive축)한 샤프트의 자연전위
	8번 시험편 : Ring Zn 연결(Drive축)한 샤프트의 자연전위
	9번 시험편 : 무방식 + 수중부 절연피복(Drive축)한 샤프트의 자연전위
	10번 시험편 : Ring Al연결(Drive축)한 샤프트의 자연전위
	11번 시험편 : 무방식(Drive축)한 샤프트의 자연전위
	12번 시험편 : 축 브러쉬 연결 + Al전선 연결(Drive축)한 샤프트의 자연전위

이상의 방식시물레이션에 의한 약 619일 동안의 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

Fig. 3은 시물레이션용 소형선박 STS강 축 실험전경으로 619일이 경과한 결과이며 축의 끝단 부분과 양극의 형상을 나타내었다. 링 타입의 양극을 부착한 2, 4, 6, 8, 10, 12 시험편은 축의 끝단 부분에 골고루 부착되어 방식이 되고 있음을 시각적으로 확인할 수 있었다. 알루미늄을 부착한 4, 6, 10, 12번 시험편의 양극은 공식형태로 가장자리 부분에서 내부 쪽으로 부식이 진행되는 것을 알 수 있었다. 링타입의 알루미늄 양극과 판 형태의 알루미늄 양극의 부식 진행 형상은 거의 같은 형태로 진행하였다. 아연을 부착한 2, 8번 시험편은 알루미늄 양극 시험편과 달리 공식형태가 아닌 균일 부식형태로 일정하게 표면에서 이온화되어 STS 축계에 균일하게 부착된 것으로 판단된다.

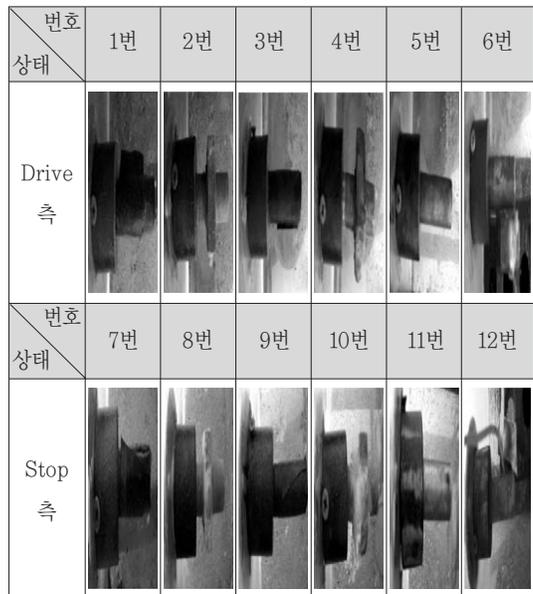


Fig. 3 시물레이션용 소형선박 STS 축 실험전경 (2006년 10월 17일 - 619일 경과)

또한, Fig. 4는 619일간 측정된 시뮬레이션 축 시험재의 자연전위 변화 그래프이다. 이를 검토하면 다음과 같다. 구동축과 정지축의 STS강 시뮬레이션 축계의 자연전위 변화값을 나타내고 있다. 자연전위 값의 변화는 초기에 산화피막의 영향에 따른 변화와 녹발생에 따른 변화의 영향으로 일부 값이 상승하다가 하강하는 변화값을 나타내지만 그 외의 안정된 전위변화 값을 가지게 된다. 양극을 부착하지 않은 시험편은 304 STS강의 일반적인 부식전위 값인  $-155\text{mV/SCE}$  값 근처에서 변화하는 것을 알 수 있다. 이러한 시험편은 부식이 심화하여 축계에 심각한 공식을 일으켜 축계절손 및 프로펠러의 비정상적인 회전을 초래하여 축계에 막대한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 반면 희생양극을 부착한 시험편은 초기에 귀한 전위값을 가진 후 비한 전위값으로 변화한다. 이러한 비 전위 값은 희생양극의 성능이 확실히 기능을 발휘 하고 있는 것을 알 수 있고, 표면전반에 양극 이온들이 부착하여 축계가 부식되는 것을 현저히 막을 수 있게 된다. 또한 그 전위값의 변화는 거의 있지 않게 되며 일정한 값으로 유지가 된다. 이러한 현상은 양

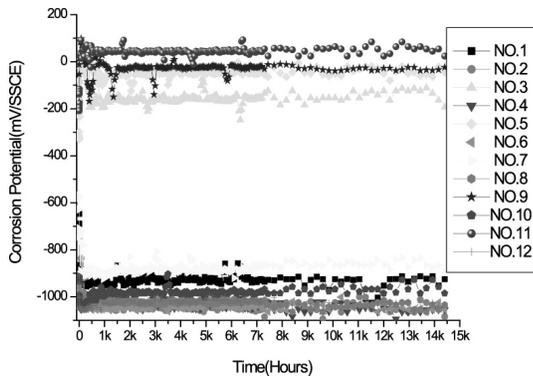


Fig. 4 619일간 측정된 시뮬레이션 축 시험재의 자연전위 변화

극이 소모되는 시점까지 계속적으로 유지될 것으로 판단된다. 이와 같이 희생양극을 축계에 부착하게 되면 축계를 보호할 수 있을 뿐만 아니라 주위의 프로펠러나 축계 내부의 선체 부위까지도 방식할 수 있는 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 AI의 희생양극으로 방식한 축 시험편과 무방식한 축 시험편의 부식진행을 619일 동안 실험한 것으로 [그림 3]에서 기술한 내용들을 뒷받침해주고 있으며 이에 대한 분석결과는 다음과 같다. 구동축의 AI양극을 부착한 시험편(4번시험편)의 경우, AI희생양극에 의한 음극 방식전류의 영향으로  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ 의 양극반응이 억제되며, 축 음극 표면에 전체적으로 용출한  $\text{Al}^{3+}$  희생양극이온이  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 생성물이 부착-보호되어 방식되고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 실제 FRP어선 STS축계에 이와 같은 원리의 음극 방식을 적용할 경우, STS축계의 부식문제를 해결할 수 있다는 것을 증명하는 것이다. 구동축의 무방식인 시험편(5번시험편)은 축이 많이 부식되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 유속 및 산소 농도에 의한 틈부식 및 갈바닉부식이 촉진되었다고 생각된다.

시험편	종류	시험편 사진
AI양극 (4번 시험편 구동축)		
표면관찰		표면 전반에 균일하게 AI양극이 코팅되어 있다.
무방식 (5번 시험편 구동축)		
표면관찰		녹이 전체적으로 형성되어 심각한 부식이 진행되고 있다.

Fig. 5 STS축에 AI희생양극으로 음극방식한 경우와 무방식한 경우의 비교 관찰 (위 : 2005. 11. 2 - 300일 경과, 아래 : 2006. 10. 17 - 619일 경과)

### 3. STS강축의 음극방식 응용실험분석

여기서는 전기화학적 음극방식을 이용하여 Al 계 희생양극이 축계 구성재에 미치는 효과를 조사하기 위해서 군산, 여수, 통영에 있는 FRP 소형어선의 STS강 축계에 각각의 양극을 제작하여 설치하였다. 설치지역을 다양화 한 것은 그 지역의 염분농도, 용존 산소농도, 오염도, 생물학적 유기체, 전류, 온도 등이 다른 것을 감안하여 그 영향을 파악하기 위한 것으로 그 형상은 다음과 같다. Fig. 6과 Fig. 7은 Al 희생양극재의 형상 단면도와 실선설치 모습을 보여주고 있으며, 유속의 영향을 고려하여 앞부분에 30도 정도의 앵글각을 두었고, 뒤쪽에는 사각형의 형태로 설계하였다. Fig. 8은 FRP 소형선에 설치된 축 브러쉬(추계단락장치, Shaft Device Grounding)양극 형상으로 양극은 직사각형 형태의 충분한 크기로 선미관 끝단의 선체부에 설치하였다.

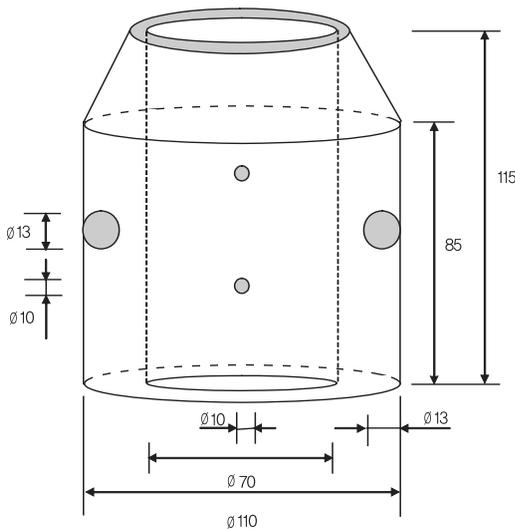


Fig. 6 Al희생양극재의 형상 단면도

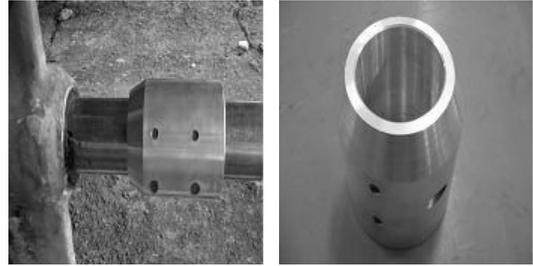


Fig. 7 FRP 소형선에 설치된 Al계 희생양극의 형상 - 팔찌형 양극형상 (3척설치 : 군산, 여수, 통영)

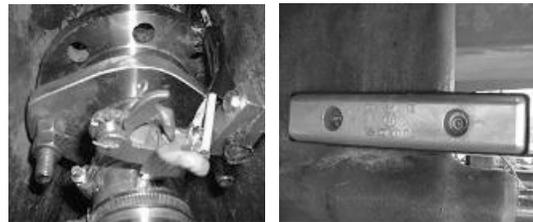


Fig. 8 FRP 소형선에 설치된 Al계 희생양극의 형상 - 축 브러쉬 양극형상(1척설치 : 경남고성)

한편, 위와 같이 현장에서 실제 FRP어선 STS 강 축계 구성재를 보호하기 위한 음극방식 응용 적용원리를 간략히 설명하면 다음과 같다.

일반적으로 부동태 산화피막으로 내식성을 갖는 금속은 틈부식에 특히 민감하다. STS, Al, Ti 등이 이러한 금속으로서  $Cl^-$ 이온,  $H^+$ 이온에 의해서 쉽게 부동태 산화피막이 파괴된다. 그러나 틈부식이 발생하기 위해서는 활성화 에너지 장벽을 넘어서야 한다. 즉 긴 잠복시간이 요구되고 일단 부식이 발생하게 되면 가속도적으로 증가하게 된다. 이러한 틈부식으로 인해 결국은 금속은 수명이 단축되는 결과를 가져오게 된다. STS축계에서는 틈부식으로 인해 금속( $Fe^{2+}$ )이 가속도적으로 부식이 진행되면 자기증식(Self-propagating)과정을 거쳐  $Cl^-$ 이온농도가 틈 바깥에 비해 3~10배정도 많아지고, pH는 2~3정도로 강산성으로 변화한다. 또한, 틈 내부에서는 부식속도가 증가할수록 그 인접영역의

표면에서는 산소 환원속도가 더욱 빨라진다. 결국 부식은 틈내부만 국한되고 다른 영역은 거의 또는 전면 부식이 발생하지 않게 된다. 이러한 금속용해로 인해서 발생한 전자는 산소환원반응에 의해서 즉시 소비된다. 따라서 금속의 이온화( $Fe^{2+}$ )를 방지하기 위해서는 앞서 전기화학적 음극방식 원리 응용에 대해서 기술한 것처럼 Fig. 9~Fig. 10에서 나타내는 바와 같이 축 주위에 희생양극(Al, Zn등)을 설치하여 축을 보호할 필요가 있다. Fig. 9는 FRP 소형선박의 구조에 따른 축계 음극방식 적용 예로서 해수와 직접 접하는 곳에서 축에 희생 양극을 설치하여 희생양극은 쉽게 수화되고 이때 발생하는 전자는 축 전체로 이동하여 산소환원반응 및 수산기 이온을 하나씩 생성하게 된다. 또한, 희생양극은 축 표면에 전착되어 축 표면을 보호하게 된다. 결국은 STS강 대신 희생양극이 부식이 진행되어 금속을 보호하게 되며 Fig. 10은 FRP 소형선박의 외관에 희생양극을 부착하는 방식으로서 선체외판과 축을 동시에 보호할 수 있는 원리이다.

Fig. 7와 Fig. 8의 Al희생양극이 축계 구성재에 미치는 효과를 조사하기 위해서 군산, 여수, 통영에 있는 FRP 소형어선에 설치한 각각의 양극에 대한 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

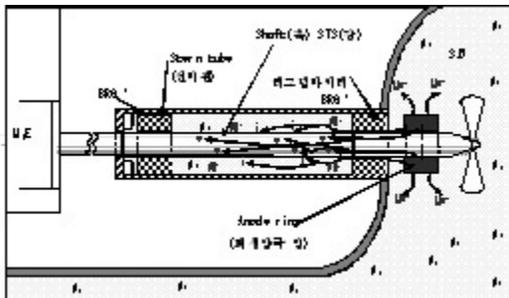


Fig. 9 FRP 소형선박의 구조에 따른 축계의 음극방식 적용 및 방식원리 예(A)

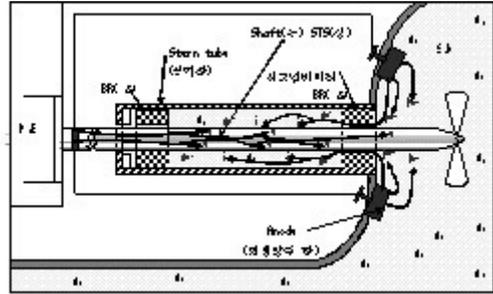


Fig. 10 FRP 소형선박의 구조에 따른 축계의 음극방식 적용 및 방식원리 예(B)

### 3.1 군산 만복호에 부착된 양극의 응용 실험 분석

군산에 있는 만복호는 양극의 소모량을 계산하기 위해서 원통형 Al희생양극 시험편을 STS축에 부착한 후 223일 경과한 것을 측정하였다. 90mm 직경의 Al 양극으로서 시험 전 무게는 2.74372kg이고 실험후의 중량은 1.30472kg으로 감소되었다. 계산 결과 약 1.439kg이 중량감소한 것을 알 수 있었다. 이러한 양극소모량으로부터 구한 발생전류 및 전류밀도를 계산할 수 있다. 발생전류는 양극의 소모중량에 Al의 이론발생 전기량인  $0.2967A \cdot y/kg$ 값을 곱하고 223일에 해당하는 연수인 0.6383y로 나누면 그 값을 계산할 수 있다. 계산된 발생전류 값을 이용하여 전류밀도 값을 계산하면 원통형의 STS축의 길이를 약 5m로 하고, 그 표면적을 구하는 식에 적용한 후 발생전류 값을 나누면 전류밀도 값을 계산할 수 있다. 계산하는 식은 아래 식에 나타내었다.

$$\text{발생전류} \cdots 1.439\text{kg} \times 0.2967A \cdot y/kg \div 0.6383y \approx 0.6688A$$

$$\text{발생 전류밀도} \cdots 9\text{cm}\pi(9\text{cm}/2+500\text{cm})$$

$$\approx 142517.17/0.6688 \approx 0.0469\text{mA/cm}^2$$

$$\begin{aligned} & * \text{무게감량} \times \text{이론발생 전기량} \div \text{소요된 년수} \\ & = \text{평균 양극 발생전류} \end{aligned}$$

M/E부근의 자연전위 측정은 엔진룸의 축과 엔진이 연결되는 플렌지 부분의 축에 멀티미터를 단락시키고, 기준전극은 후미의 프로펠러 부근으로 내린 후 측정하였다. 이때 측정된 평균 부식전위 값은 약  $-801\text{mV(SCE)}$  정도로서 STS축의 방식전위 범위에는 포함되지만, 그 한계 값 부근에 있기 때문에 축의 끝단은 부식의 가능성이 있는 것으로 보여지며, 프로펠러 부근의 자연전위 측정은 프로펠러와 축의 리그넘바이터 사이 부근으로 기준전극을 약 3m정도 내린 후 3번 정도 측정하였다. 그 평균값은 약  $-921\text{mV(SCE)}$ 로 나타났으며, 프로펠러 부근의 전위 값을 측정해 본 결과 이 부근의 부식은 전혀 일어나지 않는 것을 알 수 있으며, STS축 뿐만 아니라 프로펠러와 라다도 충분히 방식할 수 있다고 판단된다. 다만 이부분의 재질은 STS와 구리 합금이기 때문에 갈바닉 부식이 일어날 가능성이 충분히 있다. 즉 STS 304인 경우는  $-155\text{mV(SCE)}$ 이고, Cu합금의 경우는 부식전위가 약  $-400\sim-500\text{mV(SCE)}$  정도이기 때문에 두 금속사이에 갈바닉 부식이 진행될 가능성이 충분히 있다. 따라서 충분한 크기와 발생전기량을 발휘하는 양극이 필요하고, 그 방식전위가 약  $-775\sim-950\text{mV(SCE)}$ 으로 나타낼 수 있도록 해야 한다.

Fig. 11은 프로펠러에 부착된 양극의 형상을 나타낸 것이다. 양극은 프로펠러와 리그넘바이터 중간부근에 볼트로 조인 후 시멘트로 몰탈하여 단단하게 고정시켰다. 양극은 반원 형태로 두개 부분을 아래위로 부착되었고, 약 7개월 정도 부착한

결과 거의 볼트 부분은 거의 소모되어 탈착될 가능성이 있었다. 따라서 이 부분은 양극의 두께, 크기 등을 크게 하여 좀더 길게 사용할 수 있도록 설계가 필요하다.

Fig. 12는 프로펠러축에서 탈취된 양극의 형상을 나타내고 있다. 양극을 탈취한 자리에는 희생양극의 이온화에 따른 Al 양극이 표면에 부착되어 축계를 보호하는 것을 알 수 있고, 양극의 내면을 살펴보면 검은색의 표면 형상을 살펴 볼 수 있는데 이 부분은 양극과 축과의 회전의 불일치에 따른 비틀림 응력에 따른 마찰로써 생긴 것이다. 따라서 녹이 아닌 마찰에너지에 따른 찌꺼기라고 판단된다. 또한 볼트의 녹물이 내부로 흡착된 것으로도 생각되며, 양극의 표면에는 많은 박리를 보이고 있으며, 공식의 형태로 부식이 진행되고 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 13은 Stern tube 중앙부의 축계 표면 형상을 나타내고 있으며 표면에는 녹물이 전반적으로 부착되어 있었고, 이것은 축 전체의 부식이 된 것이 아니라 방식전위가 도달하지 않는 축계 끝단 부분에 일부 부식된 것이 전체적으로 퍼진 것으로 판단된다. 또한 축계를 둘러싸고 있는 보쉬 부분에 부식이 진행되어 이러한 녹물이 축계에 부착된 것으로 생각된다.

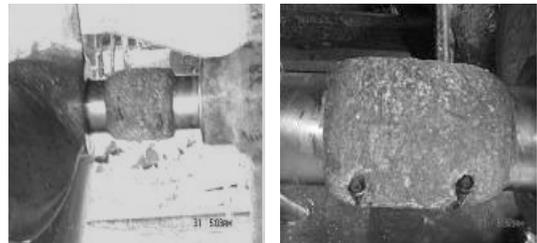


Fig. 11 프로펠러축에 부착된 양극 형상

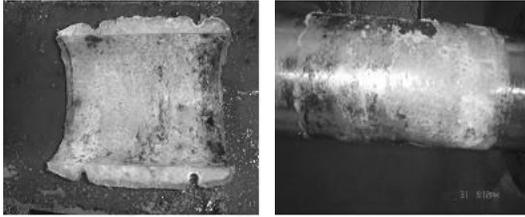


Fig. 12 축에서 탈취한 양극형상 및 축 표면

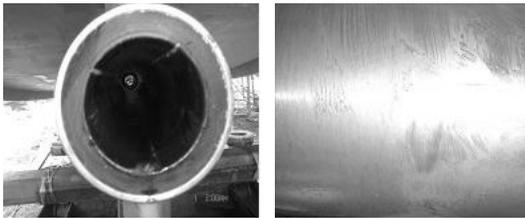


Fig. 13 Stern tube 중앙부의 축계 표면

### 3.2 통영 성천호에 부착된 양극의 응용 실험 분석

Fig. 14는 축계에 부착된 양극의 형상(통영 성천호)을 나타낸 것으로서, 선박을 일반 상가대에 올리지 않고, 바닷가에서 물때에 맞추어 축계를 발출하였다. 양극은 프로펠러축의 축계에 이상적으로 부착되어 있었으며, 실험기간이 2005. 10. 10~2006. 11. 23인 것에 비해 양극은 자체의 수명에 비해 오랫동안 축계에 부착되어 있었다. 또한 축계에 부착된 양극은 부착당시에는 리그넘바이트에서 프로펠러 쪽으로 2cm 위치에 부착하였으나, 축계 발주 당시에는 뒤쪽으로 5cm 위치에 부착되어 있었다. 이것은 선주의 말에 따르면 프로펠러에 걸린 그물제거 작업 시 양극을 일시적으로 빼낸 후 다시 끼워 넣었기 때문이라고 하였다. 이것으로 미루어 보아 축계에 부착된 양극은 안전하게 고정되어 있는 것으로 생각되며 해수

중에서 이온화된 양극이 축계의 전반에 고루 부착된 모습을 보이고 있다. 이러한 현상은  $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ 의 이온화 과정을 거친 Al이온이 축계에 부착되면서 일어나는 현상이다. 앞서 시물레이션 실험에서도 살펴 본 것처럼 이상적으로 축계에 골고루 부착되어 있었다. 이것으로 미루어 보아 Bracelet anode (팔찌형 양극) 형태의 양극은 축계의 공식이나 틈부식 등에 가장 이상적인 방식 대책이라고 할 수 있다. 또한, ICCP 등으로 미세한 전류를 흘려서 음극방식 하는 방법도 있을 수 있겠으나 경제성을 감안한다면 Bracelet anode(팔찌형 양극)으로도 충분할 것으로 판단된다. 축계에 부착된 양극의 일부를 벗겨 본 결과 내부에는 전혀 공식이 일어나지 않은 것도 확인되었다. 성천호에 부착된 Bracelet anode(팔찌형 양극, Ring type)의 전위를 측정해 본 결과 프로펠러축에서의 자연전위는  $-945mV(SCE)$ 로 나타났고, M/E축 자연전위는  $-887mV(SCE)$ 로 측정되었다. STS 304 재질의 일반적인 해수에서의 부식전위는  $-155mV(SCE)$ 이고, 최적방식전위의 범위는 약  $-775mV \sim -950mV$ 까지 이다. 따라서 이상적인 범위에서 전위값이 나타나고 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 15는 축계로부터 탈취한 양극과 양극이 부착되었던 축계의 형상의 앞, 뒷면 사진이다. 이러한 모습의 양극은 Bracelet anode(팔찌형 양극)으로서 반으로 나누어 축계에 부착하였다. Al 양극의 표면을 살펴보면 균일 부식 형태가 아닌 공식 형태의 표면형상을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 양극이 탈취된 축계의 모습을 보면 흰색의 양극의 잔존물이 남아 있는 것을 알 수 있었다.



Fig. 14 축에 부착된 양극 형상 및 양극이 부착되었던 축 표면

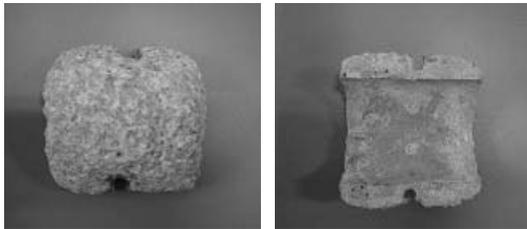


Fig. 15 축에서 탈취한 양극의 앞, 뒷면 형상

### 3.3 고성 청덕호에 부착된 양극의 응용 실험 분석

AMF type의 양극의 방식과 형상 등의 상황을 파악하기 위하여 고성에 있는 청덕호를 조사하였다. 청덕호의 경우는 프로펠러와 축계주위에 그물이 걸리는 것을 방지하기 위하여 그물방지용 장막을 설치하였다. 이 장막은 철재로 제작되었고, 그 형상은 V자 형태로 제작되었다.

Fig. 16은 AMF type(직사각형 형태)의 양극이 부착된 선체의 형상이다. 선체의 좌, 우현에 각각 1개의 양극을 부착하였으며, 축계의 표면에는 상당량의 조개류가 붙어 있는 것을 알 수 있었다. 이것은 선박 건조 시 축계의 표면에 양극을 부착할 때에는 전선을 축계단락장치(축 브러쉬)와 양극을 연결하였으나, 일정기간 선박 운항 후 그물이 축

계와 프로펠러 사이에 휘감겨서 제거하는 작업 중에 전선을 동시에 제거하는 결과를 초래하여 선체에 부착된 양극은 일정기간 동안 축계와 연결이 되지 않는 상태로 있게 되었다. 그러나 축계의 끝단을 살펴보면 희생양극의 일부분이 떨어져 나가 축계에 방식효과를 미친 것으로 판단된다. 프로펠러에는 케비테이션 형상과 부식된 부분이 현저하며 나타나 있지 않았다. 이것은 프로펠러자체의 영향은 생각할 수 있지만, 희생양극의 일부분이 프로펠러에 영향을 미쳐서 방식역할을 한 것으로 판단된다.

Fig. 17은 축계의 표면 사진을 나타내고 있다. 축계의 모습을 자세히 살펴 본 결과 축의 표면에서는 M/E에 근접한 축계 부분 및 리그남바이티 경계 부위에 약간의 부식변화를 볼 수 있었으나 극심한 공식은 나타나지 않았다. 이것으로 미루어 보아 AMF type의 형태도 훌륭한 희생양극의 역할을 하는 것으로 판단된다. Fig. 18은 축에서 탈취한 AMF type의 양극 형상을 나타내고 있다. 양극의 앞면에는 균일하게 공식 형태로 소멸된 것을 알 수 있었다.

Table 2에서는 지금까지 선박에 설치하여 현장 실험한 희생양극의 중량 변화표(g)로 실험 전·후의 중량감소량 및 실험기간 등에 대하여 나타내었다.



Fig. 16 AMF type(직사각형 형태)의 양극이 부착된 선체의 형상

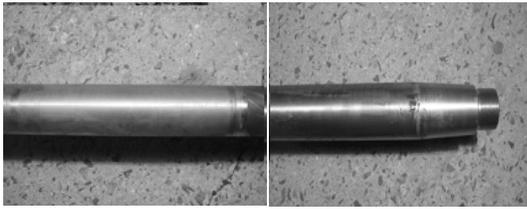


Fig. 17 축계의 표면

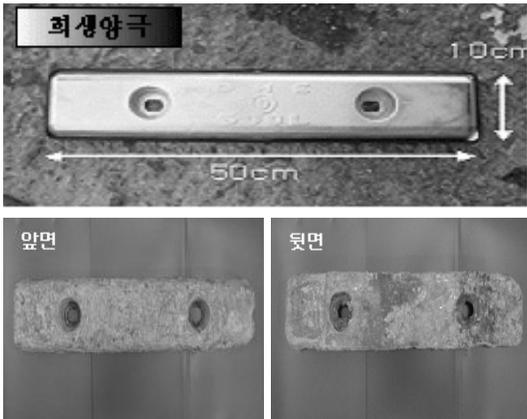


Fig. 18 선체에서 탈취한 AMF type의 양극 형상

Table 2 Al 희생양극 중량 변화표(g)

NO	직경 (mm)	실험 전 중량(g)	실험 후 중량(g)	감소량 (g)	실험 기간
1	90mm 군산 만복호	2,743.72	1,304.72	1,439	05. 10. 10 ~06. 5. 31
2	80mm 여수	2,330.21	-	-	현지사정으로 인해 희생양극 상태확인 못함
3	65mm 통영 성천호	1,385.55	819.56	565.99	05. 10. 10 ~06. 11. 23
4	70mm 고성 청덕호 (Slip type)	6,801.71	6,454.71	347	05. 10. 10 ~06. 11. 29

## 4. Al계 희생양극에 의한 실용 음극 방식 설계

Table 3에서 나타낸 바와 같이, 본 연구의 현장 설치 대상선박 중 방식이 유효한 것으로 사료되어 참고 가능한 것은 다음의 군산과 통영에서 각각 적용했던 만복호와 성천호의 경우이다. 따라서 이 두선박의 경우를 중심으로 하여 희생양극에 의한 음극방식 결과를 분석하기로 한다.

### 4.1 군산 만복호에 설치한 Al 희생양극의 음극방식 결과 분석

Al 희생양극을 군산 만복호 추진축계의 형상에 맞추어 제작하였다. 이러한 희생양극은 선박이 요

Table 3 군산 만복호 관련 Al 희생양극의 사양 및 사용정보

구 분	주 요 사 항	비 고
대상선박	군산 만복호(FRP어선)	-
피방식재	STS 강축계 90Ø × 4,000L(mm)	Cu 합금 프로펠러 연결 상태
방식방법	Al 합금 희생양극에 의한 음극방식	팔찌형 (Bracelet-type)
방식적용 기간	233일 (2005. 10. 10 ~ 2006. 5. 31)	-
Al 양극 소 모 량	1,439 kg/233일 ≒ 2,24 kg/year	-
환경 및 운전조건	35 ohm-cm (해수)	상기기간 중 고속 조건은 물론 정박위치에 따라 오염상태기간 있었음
AL 양극사양	- 소모율 : 3.8kg/A · Yr - 전기량 : 2,650 Ah/kg - 개로전위 : -1.10V (Ag/AgCl 기준)	-
축 방식 상태 관찰	Al 양극에 가까운 축 표면에는 용출한 Al <sup>3+</sup> 이 부착한 상태가 있었고 거의 부식이 없는 양호한 상태 효과를 확인함.	-

구하는 조건에 부합되도록 충분한 효과를 내어야 한다. 따라서 양극의 음극방식 설계는 선박에 필요한 양극의 개수와 방식소요밀도 등을 계산하여 양극 수명 예측 및 적절한 방식전위 등을 알 수가 있다. 또한, 군산 만복호 관련 AI 희생양극의 사양 및 사용정보를 정리하면 다음표와 같다. FRP 선박의 특징에 따른 실용음극방식 설계에 있어 먼저 몇 가지 고려할 사항들을 살펴보면 다음과 같다.

상기한 군산 만복호 관련 AI 희생양극의 사양 및 사용정보를 통해 음극방식설계를 분석하여 보면 다음과 같다 우선, 피방식체를 STS강축계에 국한하여 음극방식 설계에 의한 AI양극의 소모량 계산을 하면 다음과 같다.

즉, 방식대상 면적(S)은

$$S = \pi \times D \times L \quad (D: \text{관직경}, L: \text{관길이}) \\ = 3.14 \times 0.09 \times 4 = 1.1304\text{m}^2 \text{이다.}$$

또한, 방식소요전류를 구하기 전에 상기표에 작성한 바와 같이 환경 및 운전조건에 따른 유속이나 오염도를 감안하여 방식전류밀도(i)를 산정하여야 하는데 우선 정상 청정해수환경 및 유속이 없는 정지상태 조건을 고려하게 되면 해수 중 0.1A/m<sup>2</sup>로 산정한다.

따라서 이 경우의 방식 소요전류(IR)는 IR = S × i (S: 방식대상 면적, i: 방식전류밀도)의 관계식으로부터

$$IR = S \times i = 1.1304 \text{ m}^2 \times 0.1 \text{ A/m}^2 \\ = 0.11304 \text{ A가 된다.}$$

여기서 이 값에 대해 AI 양극의 소모율이 3.8kg/A·yr 임을 고려하여 1년 동안의 AI양극 소모량을 계산하여 보면, 1 : 0.11304 = 3.8 : x (소모량)의 관계로부터 약 0.43kg/yr의 값을 얻을 수 있다.

그러나 이 값은 앞서 언급한 바 있듯이 환경오염이나 유속조건에 따른 방식전류밀도나 이종금속인 Cu합금 프로펠러의 연결상태에 따른 피방식체 면적을 고려하지 않은 상태이다. 일반적으로는 환경오염도의 경우는 그 오염정도에 따라 정상 청정해수(0.1A/m<sup>2</sup>)에 대해 20~50% 정도를 증가시키는 것이 보통이고, 유속조건에 따른 피방식체에 미치는 유속정도에 따라 정상청정해수의 방식전류밀도(0.1A/m<sup>2</sup>)값에 2~3배정도 증가시켜 계산하는 것으로 보고 되고 있다. 또한, Cu 동합금 프로펠러에 표면적을 고려하면 STS 강축계를 포함하여 약 1.8~2(m<sup>2</sup>)로 산정되는 것으로 사료된다. 이것을 감안하면 실제 군산 만복호를 위한 AI 양극의 1년간 소모량은 실제 측정했던 값(2.24kg/yr)과 유사하게 약 2kg 정도의 값이 산출될 것으로 사료된다.

#### 4.2 통영 성천호에 설치한 AI 희생양극의 음극방식 결과 분석

AI희생양극을 성천호 축계의 직경(6.5cm)과 길이(2.25m)의 크기에 맞는 양극의 크기를 제작하였다. 제작된 양극은 축계에 부착 후 볼트 및 너트로 집을 하고, 시멘트로 볼트로 조인 부분에 보강처리 하였다. 양극은 방식소요 전류, 및 양극 1개당 발생전류 등을 구하여 양극의 설계수명을 계산할 수 있다.

또한, 통영 성천호 관련 AI 희생양극의 사양 및 사용정보를 정리하여 보면 다음의 Table 4와 같다.

상기한 통영 성천호 관련 AI 희생양극의 사양 및 사용정보를 통해 음극방식 결과를 분석하여 보

Table 4 통영 성천호 관련 Al 희생양극의 사양 및 사용정보

구 분	주 요 사 항	비 고
대상선박	통영 성천호(FRP어선)	-
피방식체	STS 강축계 65 $\phi$ × 2,250L(mm)	Cu 합금 프로펠러 연결 상태
방식방법	Al 합금 희생양극에 의한 음극방식	팔찌형 (Bracelet-type)
방식적용 기간	409일 (2005. 10. 10 ~ 2006. 11. 23)	-
Al 양극 소모량	0.556 kg/409일 ≒ 0.505 kg/year	-
환경 및 운전조건	35 ohm-cm (해수)	상기기간 중 고속 조건은 물론 정박위치에 따라 오염상태기간 있었음
AL 양극사양	- 소모율 : 3.8kg/A · Yr - 전기량 : 2,650 Ah/kg - 개로전위 : -1.10V (Ag/AgCl 기준)	-
축 방식 상태 관찰	축 표면에 전체적으로 Al 양극에서 용출한 Al <sup>3+</sup> 가 부착된 상태는 물론 부식이 전혀 없는 우수한 효과를 확인할 수 있었음.	-

면 다음과 같다. 우선, 피방식체를 STS강 축계에 국한하여 음극방식설계에 의한 Al 양극의 소모량을 계산하면 다음과 같다.

즉, STS 강축의 방식대상 면적(S)은  $S = \pi \times D \times L$  (D: 관직경, L: 관길이)의 식으로부터

$$S = 3.14 \times 0.065 \times 2.25 \approx 0.459(\text{m}^2) \text{이다.}$$

또한, 방식소모전류를 구하기 전에 이 경우를 우선 정상의 청정해수라고 가정하여 방식전류밀도값을 산정하게 되면, 0.1A/m<sup>2</sup>가 된다.

따라서, 이와 같은 경우의 방식소모전류(IR)는  $IR = S \times i$  (S: 방식대상면적, i: 방식전류밀도)의 관계식으로부터  $IR = S \times I = 0.459\text{m}^2 \times 0.1\text{A/m}^2 = 0.0459\text{A}$ 가 된다. 여기서 이 값에 대한 Al 양극

의 소모율 3.8kg/A · yr 임을 고려하여 1년 동안의 Al 양극소모량을 계산하여 보면,  $1:0.0459 = 3.8:x$ (소모량)의 관계로부터 약 0.175kg/yr의 값을 산출할 수 있다.

그러나 이 값은 앞서 언급한 바 있듯이, 환경오염이나 유속조건에 따른 방식전류밀도나 이종금속인 Cu 동합금 프로펠러의 연결상태에 따른 피방식체 면적을 고려하지 않은 상태이다. 일반적으로 환경오염도의 경우는 그 오염정도에 따라 정상 청정해수(0.1A/m<sup>2</sup>)에 대해 20~50% 정도를 증가시키는 것이 보통이고, 유속조건인 경우는 피방식체에 미치는 유속정도에 따라 정상 청정해수의 방식전류밀도(0.1A/m<sup>2</sup>)값에 2~3배 정도 증가시켜 계산하는 것으로 보고 되고 있다. 또한, Cu 동합금 프로펠러의 표면적을 고려하면 STS 강축계를 포함하여 약 0.7~0.8(m<sup>2</sup>)로 산정되는 것으로 사료된다. 이것을 감안하면 실제 통영 성천호를 위한 Al 양극의 1년간 소모량은 실제 측정했던 값(0.505kg/yr)보다는 약간 큰 약 1.2kg/yr 정도의 값이 산출될 것으로 사료된다.

반면, 실제의 Al 양극의 소모량이 적게 측정되었던 원인을 생각하여 보면 그동안 운전조건에 따른 해수의 오염정도나 유속 등의 영향차이도 있겠지만 이 배의 도장상태와 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다. 즉, 이 통영 성천호의 경우는 초기에 FRP선박 건조 후 그물과 축계의 힘을 고려하여 선박을 재차 상가(Docking)한 바 있었고, 이때 외부에 노출된 Cu 합금의 프로펠러 및 스테인리스 강축 일부를 도장을 하였다. 바로 이 도장이 Al 양극의 소모량을 적게 한 주 원인으로 사료된다.

본 연구에서 축계 조사를 하기 위해 상가하여 선내부분을 관찰한 바에 의하면, Cu합금의 프로

펠러의 대부분 및 스테인리스 강축의 일부분이 도장된 상태로 있었던 것을 확인할 수 있었다. 물론, 현재는 도장된 부분이 일부분이 열화 된 상태로 있었지만, 그 동안 AI 양극은 Cu 합금의 프로펠러 축에 방식전류를 흘려줄 필요 없이 스테인리스 강축의 도장되지 않은 표면적만을 중심으로 방식전류를 흘려주어 소모되었기 때문이라고 생각된다.

따라서 그 예상치와의 오차가 2배 이상 갖게 된 것으로 판단할 수 있다. 한편, 이 결과를 통해서 AI 희생양극에 의해 소모되는 방식전류가 STS 강축계 보다도 Cu합금 프로펠러축이 상대적으로 클 수 있다는 것을 추측하게 한다.

### 4.3 고성 청덕호에 설치한 AI 희생양극의 음극방식 결과 분석

AI 희생양극을 고성 청덕호(4.76ton) 가로(50cm), 세로(10cm)로 선미 축계의 상부 부분에 설치하였다. 축계에 군산 만복호나 통영 성천호와 같이 Bracelet(팔찌형 양극) 형태로 부착하지 않고, 선체에 직접 붙이는 AMF type(직사각형 형태)로 부착하였다. 선박의 엔진 부 측에는 축 브러쉬 형태로 축과 브러쉬는 전기적으로 접촉하게 설치하였고, 전선을 선박 건조 시에 양극과 연결되도록 하였다. 또한, 고성 청덕호관련 AI희생양극의 사양 및 사용정보를 정리하여 보면 다음 Table 5와 같다.

상기 고성 청덕호 관련 AI희생양극의 사양 및 사용정보를 통해 음극방식 결과를 분석하여 보면 다음과 같다. 우선, 피방식체를 STS강 축계에 국한하여 음극방식설계에 의한 AI양극의 소모량을 계산하면 다음과 같다.

Table 5 고성 청덕호 관련 AI 희생양극의 사양 및 사용정보

구 분	주 요 사 항	비 고
대상선박	통영 성천호(FRP어선)	-
피방식체	STS 강축계 700 × 2,775L(mm)	Cu 합금 프로펠러 연결 상태
방식방법	AI 합금 희생양극에 의한 음극방식	직사각형(AMF-type)이 2개설치됨 (M/E축 연결 브러쉬 타입)
방식적용 기간	414일 (2005. 10. 10 ~ 2006. 11. 29)	일정기간 방식하고 있었으나 부주의로 양극 연결 전선을 단락시켜 정확한 방식기간을 알 수 없는 상태임
AI 양극 소 모 량	0.347 kg/414일 ≙ 0.307 kg/year	-
환 경 및 운 전 조 건	35 ohm-cm (해수)	상기기간 중 고유속 조건은 물론 정박위치에 따라 오염상태기간 있었음
AL 양극사양	- 소모율 : 3.8kg/A · Yr - 전기량 : 2,650 Ah/kg - 개로전위 : -1,10V (Ag/AgCl 기준)	-
축 방식 상태 관찰	축 표면 중 M/E축과 리그넘바이트 경계부위 약간의 전면부식 형태가 일부 관찰되나 전반적으로 양호한 편임.	-

즉, STS강 축의 방식대상 면적(S)은  $S = \pi \times D \times C$  (D:관직경, L: 관길이)의 식으로부터  $S = 3.14 \times 0.07 \times 2.775 \approx 0.610(m^2)$ 이다.

방식 소요전류를 구하기 전에 이경우를 우선 정상의 청정해수라고 가정하여 방식전류밀도값을 산정하게 되면,  $0.1A/m^2$ 가 된다.

따라서, 이와 같은 경우의 방식소요전류(IR)는  $IR = S \times i$  (S: 방식대상면적, i: 방식전류밀도)의 관계식으로부터  $IR = S \times i = 0.610m^2 \times 0.1A/m^2 = 0.061A$ 가 된다.

여기서, 이 값에 대한 AI양극의 소모율 3.8kg

/A · yr임을 고려하여 1년동안의 Al양극 소모량을 계산하여 보면,  $1:0.061 = 3.8:X$ (소모량)의 관계로부터 약 0.232kg/A · yr의 값을 산출할 수 있다.

그러나 이 값은 앞서 언급한 바 있듯이, 환경오염이나 유속조건에 따른 방식전류밀도나 이종금속인 Cu 동합금 프로펠러의 연결상태에 따른 피방식체 면적을 고려하지 않은 상태이다. 일반적으로 환경 오염도의 경우는 그 오염정도에 따라 정상청정해수( $0.1A/m^2$ )에 대해 20~50% 정도를 증가시키는 것이 보통이고, 유속조건인 경우는 피방식체에 미치는 유속정도에 따라 정상청정해수의 방식전류밀도( $0.1A/m^2$ )값이 2~3배정도 증가시켜 계산하는 것으로 보고되고 있다. 또한, Cu동합금 프로펠러의 표면적을 고려하면 STS강 축계를 포함하여 약  $0.9m^2$ 로 산정되는 것으로 사료된다. 이것을 감안하면 실제 고성 청덕호를 위한 Al양극의 1년간 소모량은 실제 측정했던 값( $0.307kg/yr$ )보다는 훨씬 큰  $1.5kg/yr$  정도의 값이 산출될 것으로 사료된다.

#### 4.4 축계 종류별 희생양극의 연간 예상 소모량 산출

전술한 바와 같이, 실험대상 선박의 현장 음극방식 적용 실험결과에 의하면, Al양극의 소모량은 일반적으로 STS강 축계에 Cu합금 프로펠러가 연결되어 있는 경우에 그 크기나 구체적인 운전조건 및 환경 오염 조건 등에 따라 차이가 있겠으나 이론적인 Al양극 소모 산출 값의 5~8배 정도하여 적용하는 것이 적절한 것으로 사료된다. 물론, 이때 Al양극의 형태나 조립방법에 따라 Al양극이 희생되었을 때 사용효과가 가능한 이용률은

80~90%정도가 될 수 있을 것으로 판단한다. 또한 축계의 길이가 너무 길게 되는 경우(약 3~4m 이상)나 장기정박 등의 조건으로 인해 축계관내에 전해질은 해수가 STS강 축을 침식시키지 못하는 부분이 있게 되면 현재의 방식으로는 희생양극에 의한 방식전류가 충분히 유출되지 못할 수 있으므로 유의해야 할 것이다.

Table 6 Cu 프로펠러 연결 축계의 크기에 따른 희생양극의 연간 예상 소모량

No.	축계직경(D) (mm), 추정치	축계길이(L) (m), 추정치	축계의 표면적 $S = \pi \cdot D \cdot L$ ( $m^2$ )	Al양극 소모량 추산 (kg/yr)
1	150	6	2,826	$1.07 \times 5$
2	140	5.5	2,417.8	$0.92 \times 5$
3	130	5.3	2,163.5	$0.82 \times 5$
4	120	5	1,884	$0.72 \times 5$
5	110	4.5	1,554.3	$0.59 \times 5$
6	100	4.3	1,350.2	$0.51 \times 5$
7	90	4	1,130.4	$0.43 \times 5$
8	80	3.7	0,929.5	$0.35 \times 5$
9	70	3.0	0,659.4	$0.25 \times 5$
10	60	2.5	0,471	$0.18 \times 5$
11	50	2.1	0,329.7	$0.13 \times 5$
12	40	1.9	0,238.6	$0.09 \times 5$

※ Al양극의 이용률(80~90%)은 그 형상이나 조립조건에 따라 별도로 추가 계산해야 할 것임. 이것은 프로펠러의 크기나 운전 유속, 환경오염도 등에 따라 오차가 있을 수 있음. 또한, 축계 길이가 Al 양극 위치에서 3~4m 이상인 부위의 경우는 방식전류가 미치지 못하여 방식효과가 저감될 수 있으며, Al양극 부착 설치한 후에는 현장에서 전위(Potential) 측정을 통한 확인도 요구됨.

따라서 이와 같은 측면도 충분히 고려하는 것이 최적조건의 실용음극방식설계를 가능하게 하는 것이라고 생각된다. Table 6은 축계의 크기에 따른 희생양극의 연간 예상 소모량을 추정해 본 것이다.

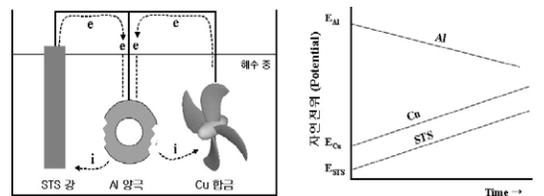
이상의 AI계 희생양극에 의한 실용 음극방식 설계를 하기위해 먼저 고려되어야 사항들을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 환경 및 운전 조건에 따른 소요방식전류밀도와 관련된 해수환경의 일반적인 부식영향인자(해수중의 용해성분, 용존산소, 유속, 온도 및 pH 등), 해수 오염도에 따른 용해성분 변화와 부식반응 특성, 환경 및 운전조건에 따른 소모방식전류 밀도의 영향 등이다. 그리고, 축 길이에 따른 방식분극전위 분포의 영향 및 선박에 설치된 설비 중 이종금속이 연결되어 있는 경우에 AI 희생양극의 방식전류에 의한 음극방식효과에 있어 각 금속의 전위변화 관계 유무에 따른 영향 등을 종합적으로 고려해야 할 것이다.

또한, Fig 19는 AI계 희생양극에 의한 실용 음극방식 설계를 위한 고려사항인 선박에 설치된 설비 중 이종금속이 연결되어 있는 경우에 AI 희생양극의 방식전류에 의한 음극방식효과에 있어 각 금속의 전위변화 관계 유무와 관련하여 나타낸 것으로 FRP 소형선박의 종류에 따라서는 스테인리스 강 축계가 동합금의 프로펠러와 절연된 상태로 연결되어 있는 경우도 있으나 현장실험을 통해서 확인한 바에 의하면, 스테인리스 강축계가 동합금의 프로펠러와 전기적으로 연결된 경우가 대부분이다. 이와 같이 이종금속의 프로펠러가 연결되어 있으면 그 프로펠러의 합금재질 종류에 따라 차이는 있으나 상대적으로 비전위의 경향을 갖는 Cu 합금의 프로펠러가 전기화학적 갈바닉 부식

(Galvanic Corrosion)작용으로 부식이 일어날 수 있다. 물론, 스테인리스강과 Cu 합금사이의 전위차(differential Potential)는 작은 편 이어서 상대적으로 갈바닉 부식작용에 의한 그 부식속도는 크지 않을 것으로 사료된다. 이때 Cu 합금의 프로펠러의 경우는 자체적으로 운전 중 캐비테이션 침식(Cavitation Erosion)부식이 동반되고 있으므로 그 정도에 따라 영향을 받게 될 것으로 사료된다.

그러나, 이와 같은 상황 속에서 본 실험에서와 같이 AI 합금양극에 의해 음극방식을 하게 되는 경우는 축계인 스테인리스강은 물론 연결되어 있는 Cu합금의 프로펠러에도 양극방식전류를 흘려주게 되어 방식효과를 주게 되는 것으로 보인다.

한편, 이상과 같은 관계를 통해서 알 수 있듯이 STS강축의 음극방식의 용도로 작용하고 있는 AI희생양극은 프로펠러의 영향으로 그 소모량이 훨씬 증가하게 될 것으로 사료된다. 이것은 앞에서 설명한 음극방식 시뮬레이션에 의한 양극소모량의 관계 또는 음극방식 현장실험결과를 통해서도 충분히 추측할 수 있게 된다. 따라서 향후 AI희생양극의 소모량을 설계할 때는 이와 같은 경우를 선별 고려하여 산정해야 할 것으로 사료된다.



(\* i : 방식전류 등)

Fig 19 이종금속 시 AI 양극의 방식효과 및 전위변화 관계

## 5. STS강 축의 최적방식시스템 실용화 방안에 대한 종합적 고찰

AI계 희생양극의 실용화에 따른 기대효과는 여러 가지 관점에서 볼 수 있을 것이다. FRP 소형어선에서 사용하는 STS강은 해수 중에서 극심한 부식으로 재해 안전적인 관점에서 사용상 곤란을 겪고 있는 현실에서 AI계 희생양극 사용으로 2종 STS 축의 공식부분을 완전히 해소함으로써 부식의 근본 문제를 해결하여 이에 대한 보완책으로써의 기대효과가 있을 수 있을 것이고 고효율 성능일 뿐만 아니라 실용적이고 선박운영자들의 경제적인 현실을 반영한 최적 방식시스템인 AI계 경량 합금제 개발을 통하여 STS강 축의 부식손상방지로 축의 수명연장은 물론 양극재의 내구 수명 보장이 가능하여, 축 제작비용으로 인한 가격부담을 느끼는 영세한 선박운영자들에게 축의 수명연장으로 인한 경제적인 측면의 효과가 있을 수 있을 것이다. 또한 한편으로는 선박운영자와 축계 수리업자를 대상으로 부식 원인 및 해결 방법에 대한 연구 결과의 설명회를 개최하여 STS강 축의 부식 방지 방안을 홍보함으로써 STS강축의 관리 및 수리 능력 향상을 기대해보기도 한다.

또한, 축계 연결용 희생양극의 형태(Ring-Type)를 설계 고안하여 시험하고 시험결과를 토대로 개발된 희생양극을 상품화할 수 있는 방안을 마련, STS강 축을 사용하는 FRP 어선에 널리 보급함으로써 현장에서의 STS강 축 부식관련 가이드라인으로도 활용할 수 있을 것이다.

이상 지금까지는 STS강 축에 희생양극을 사용하면서 부식방지의 결과로 발생하는 몇몇 기대효과와 내용을 중점으로 나타내면서 부식이 진행되

지 않는 한 지속적으로 축 사용을 연장 할 수 있고 이로 인한 기대효과 또한 큰 부분이라고 말하고 있으나 현실적으로 축을 교체하는 원인으로는 부식뿐만 아니라 여러 가지 요소를 포함하고 있다. 그러므로 희생양극 사용에 따른 경제성 등의 기대효과는 방식에 따른 효과뿐만 아니라 축과 관련된 여러 제반 사항을 고려하여 종합적으로 나타내어야 할 것이다.

프로펠러축(STS 강축)의 교체원인은 단순히 부식에 의한 공식 등에 의해서만 이루어지는 것이 아니며 선박에서 장시간 사용하면서 발생할 수 있는 금속의 피로도 및 마모도 등 여러 가지 요소를 포함해서 발생하는 것이다. 그러므로 단순히 방식을 유지하는 것만으로 STS강 축을 지속적으로 사용할 수 있는가 하는 문제를 고려해야 할 것이다. 현장 조사한 바에 따르면 통상 5년~8년 정도 사용하면 부식에 관계없이 프로펠러축을 교체해주는 것이 더 안전하다는 의견도 들을 수 있었다.

희생양극을 사용하면서 부식방지에 따른 축 사용횟수 연장으로 인해 발생하는 경제적 효과는 위의 경우를 고려해 볼 때 단편적으로 축계 사용을 연장하는 것에 대하여 국한해서 적용할 것이 아니라 연간 투자되는 희생양극의 비용(AI계 희생양극 중량 280g기준으로 50,000원 상당) 및 평균수명과 축을 새로이 제작하는 비용 및 평균수명 그리고, 방식을 할 경우 축의 평균수명이 어느 정도 연장 되는지 등 종합적으로 고려하여야 하므로 희생양극의 사용으로 인해 일괄적으로 어느 정도의 경제성 효과가 있다고 나타내기 보다는 현장에서 직접 선박을 운영하면서 상황에 맞게 적절히 사용하는 것이 바람직 할 것으로 보인다.

물론 희생양극 사용으로 인하여 무방식 된 축의

수리?정비 또는 축 교체 시 발생하는 비용과 희생 양극을 사용하면서 발생하는 비용을 단순 비교해 보면 어느 정도 경제적 이익이 발생 하지만 이는 절대적 이라기보다는 여러 상황 및 여건에 따라 상대적인 개념이 강하기 때문에 일률적인 경제적 효과를 나타내기에는 다소 무리가 있는 것으로 보인다.

STS강 축의 평균수명에 대한 현장조사를 하면서 앞에서 언급한 바와 같이 대부분의 STS강 축은 보통 5~10년(평균 8년) 정도를 보이고 있으나 일부에서는 1~2년 만에 심한 부식이 발생하여 폐기하는 사례를 접할 수 있었다. 이런 경우는 어느 정도 경제적 효과를 나타낼 수 있겠으나 실질적으로 극히 드물고 특수한 경우로써 전체 선박의 몇 %가 이에 해당하는지도 알 수가 없는 실정으로 이 또한 희생양극 사용에 따른 경제적 효과를 단편적으로 나타내어 전체의 효과로 보기에는 다소 무리가 있을 것으로 사료된다.

본 연구를 마무리 하면서 지금까지 다년간의 실험을 통해 STS강 축의 부식을 방지하기 위한 방법을 찾을 수 있었다. 하지만 축으로 인한 해양사고는 부식에 의해서만 이루어지는 것이 아니라고 앞에서 언급한 바와 같이 마모도 및 피로도 등 다양한 원인에 의해서 이루어진다.

특히 소형 낚시전용 어선에서 주로 사용되고 있는 STS 630의 경우 경도면에서 STS 304, 316비해 강하기 때문에 2종축의 형태를 취하고 있지만 1종축으로 간주하여 현장에서 사용되어 지고 있다. 하지만 절손 사고가 STS 630에서 가장 많이 발생되고 있는 것으로 파악되고 있다.

또한, 현장에서 가장 많이 사용되어 지고 있는 프로펠러축인 제2종 STS 304의 경우 해수운할방

식으로 장기간 사용 시 Bearing이나 Gland Packing 부위에 마모손상이 발생하여 선체진동이나 누수가 심해지면, 대부분 현장에서 육성가공하여 재사용하고 있는 실정이다. 하지만 관련기준 [선박기관기준 제8조제2항(구조 등)]에 의하면 '선박의 추진을 위한 동력을 전달하는 축, 축커플링 및 기어는 용접수리를 하여서는 안 된다고 규정되어 있으며 예외적으로 수리개소나 수리방법에 대하여 해양수산부장관이 인정하는 경우에는 그러하지 아니한다고 명시되어 있다. 하지만 육성과 관련한 수리개소나 수리방법에 대하여 해양수산부장관이 인정한 바도 없는 실정이다.

프로펠러축이 가공된 이후 용접으로 육성가공할 경우 축의 부분적인 재질 변화로 인하여 외부에서 가해지는 충격 등으로 인해 쉽게 절손 될 수 있는 문제들이 발생할 수 있어 현장 검사원들은 선박기관기준에 입각하여 선박검사 시 STS강 축의 육성가공을 하지 못하게 하고는 있지만 정확하게 어떠한 문제점 때문인지 정확하게 파악하지 못하고 있는 실정이다. 아울러 육성가공과 관련한 자료(화학적, 물리적 변화 등)가 아직 국내에 전문한 현실이기도 하다.

이상의 상황을 종합해 보면 STS강 축의 사용에 있어 두 가지 정도 문제점을 도출해 낼 수 있다. 먼저 STS 630을 경도가 강하다는 이유만으로 제1종축으로 간주할 수 있는나는 문제와 프로펠러축을 가공하기 이전에 원재료의 순수성질이 가공 후 혹은 가공 후 육성 등의 과정을 거치면서 원재료의 순수성을 그대로 유지할 수 있는가 하는 문제이다. 이처럼 STS강 축에 어떠한 영향으로 인해 발생하는 현상들을 종합적으로 연구하여 이러한 현상들이 축에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한

구체적인 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

AL계 희생양극에 의한 2종 스테인리스강축의 음극방식 실용화에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었으며 결론에서 언급된 내용들은 실제 본 연구과제에서 도출된 결과를 모두 포함하고 있다.

- 부식현황 조사 및 부식 시뮬레이션 실험 결과로 나타난 FRP 어선의 2종 STS강 축에 대한 부식원인은 틈부식(Crevice Corrosion), 갈바닉부식(Galvanic corrosion) 경우에 따라 선박 내 발전기에서 유출되는 미주전류부식(Stray Current Corrosion)에 의한 것으로 나타나고 있으며 때때로 부식의 원인이 주위여건에 따라 복합적으로 일어나는 경우도 있는 것으로 사료된다.
- FRP 어선의 1종 및 2종 축계 재료로 사용되고 있는 STS 630, STS 316, STS 304 재료에 대한 해수 환경 중 자연전위, 전기화학적 분극 및 정전위 측정 등의 부식특성실험 결과에 의하면, STS 316 > STS 304 > STS 630 순으로 내식특성이 양호한 것으로 나타났다. 특히, 여기서 1종 축계로써 사용하고 있는 STS 630은 고온·고강도적인 조건에서는 유리한 점이 있겠으나 해수 환경 중 직접적으로 노출되어 사용되는 경우에는 각별한 주의를 필요로 하는 것으로 사료된다.
- 최적음극방식이론 설계 및 방식 시뮬레이션 결과에 의하면, 피 방식체인 축계 STS 304

강재의 최적음극방식전위 구간은  $-775 \sim -995\text{mV/sec}$ 이고, 이 방식 전위를 유지하기 위한 희생양극(Sacrificial Anode)은 Zn합금 양극이 다소 효율적이라고 판단되나 소형 FRP 어선에 있어서는 Zn합금 양극보다 프로펠러 축계 구동에 있어 부하를 훨씬 감소시킬 수 있는 경량의 Al계 합금양극(Ring-type)을 사용하는 것이 상대적으로 유리하다고 사료된다.

- 619일 동안의 시뮬레이션은 물론 FRP 소형 선박의 음극방식을 직접 적용 시험하여 축의 상태를 비교분석한 결과, 무방식한 STS강 축은 많은 부식이 진행되었으나 음극방식한 축은 부식이 전혀 진행되지 않았음을 관찰 확인 할 수 있었다. 즉 희생양극에 의해 음극방식한 축의 경우는 그 음극방식전류의 영향으로  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$ 의 양극반응이 억제되었기 때문이라고 사료된다.
- STS 축계에 희생양극을 부착한 시험편과 부착하지 않은 시험편을 약 600일 동안 시뮬레이션 실험한 결과 양극을 부착하지 않은 시험편인 STS 304시험편은 부식전위인  $-155 \sim -100\text{mV/SCE}$ , 양극을 부착한 시험편은 약  $-900 \sim -1050\text{mV/SCE}$ 로 나타났다. 희생양극을 부착한 시험편은 방식전위에 도달하게 되어 안전하게 축계를 사용할 수 있는 전위 값을 나타내게 되었다.
- 반복호에 부착된 희생양극의 전위를 측정된 결과 프로펠러와 선미단 사이는 약  $-923\text{mV/SCE}$ , M/E과 발전기 사이 부분은 약  $-801\text{mV/SCE}$ 로 그 값의 차이를 보였다. 이것은 축계의 길이가 약 4M정도로서 양극이

부착된 부분의 전위는 안정된 영역에서 방식 전위 값을 보이고 있지만, 양극과 거리가 멀어질수록 그 값은 떨어져 방식과 비방식의 영역에 놓이게 된다. 따라서 거리에 따른 전압강하를 고려하여 방식설계를 하여야 된다.

- 희생양극을 실제 해양환경에 적용한 반복호의 경우 축계에 부착한 233일 동안 2.7437kg 중 약 1.439kg이 소모되었으며, 희생양극의 설계기준(NACE PR0176-94)에 따른 계산 결과 1.17년 정도의 수명이 예상되었다. 소모된 양을 기준으로 환산해 볼 때 현재의 무게로는 약 233일정도 활용이 가능하고, 1년 정도의 양극의 수명을 예상한다면 희생양극의 무게는 약 2.25kg이 필요하게 된다.
- 축계에 부착한 희생양극은 축계를 효과적으로 방식함은 물론 축계주위의 선체와 프로펠러 등에도 방식범주에 있게 된다. 이러한 것을 고려해 볼때 양극을 설계할 경우 필요한 양보다 좀더 많은 양의 희생양극이 필요할 것으로 사료되고, 선체의 유속과 해양의 오염정도, 계절에 따른 수온의 변화에 따라서도 양극의 소모량이 더 많게 된다. 따라서 양극 설계 시 계산된 양보다 어느 정도의 오차를 감안해서 설계하는 것이 바람직하다고 사료된다.

## 후 기

본 논문은 선박검사기술협회에서 시행한 2006년도 연구사업으로 이루어진 것이며 연구결과에 대해서는 특허등록 사항으로써 임의 사용을 금하며 사용 시에는 본 협회와 상의하시기 바랍니다.

## 참 고 문 헌

1. 일본학술진흥회 제 97위원회 전기방식 제 12분과회보고. [유전양극시험법 및 등 해설] 방식기술, 19, 190(1970)
2. 부식방식협회 54-1 유전양극시험법분과회보고, [유전양극시험법 및 등 해설] : 방식기술, 31, 612(1982)
3. '실용방식공학' ; 전대회(태화출판사), 1989
4. 부식방식협회 제 87회 부식방식 심포지움 자료 (1991)
5. Det Norske Veritas : Recommended practice RP B401 cathodic protection design, Mar 1986
6. 2중 스테인리스강 축의 부식원인 규명 및 최적 방식시스템 개발 ; 선박검사기술협회(최종보고서, 2004)
7. FRP 어선 2중 스테인리스강 축의 음극방식을 위한 실용설계 및 적용방안 연구 ; 선박검사기술협회(최종보고서, 2005)
8. 'Uhlig's Corrosion handbook', R. Winston Revie, (John Wiley & Sons Inc.), 2000
9. G.C.Wood, W.H.Sutton, J.A. Richardson, T.N.K. Riley and A.G.Malherbe ; Localized Corrosion, NACE, 526, 1974
10. Denny A. Jones, N. Ramachandran Nair, Corrosion NACE, Vol.41[6], 357, 1985
11. 'Aluminium' , Kent R. Van Horr, American Society for Metals, 209, 1982
12. 'Pitting corrosion of metal' ; Z.Szklarska-Smialowska, NACE, 39, 1986

13. Australian Standard, Association of Australia, 2239-1979
14. Nace Standard TM 0190-90(1990)
15. 알루미늄핸드ブック, (社)日本輕金屬協會, 1988
16. 杉本澤田, 森岡; 日本金屬學會, Vol.34, 312, 1970
17. '알루미늄 표면技術便覽', 日本輕金屬出版, 1980
18. 內山休男; 日本防食技術, Vol.39, 263~270, 1980
19. '防食技術便覽', p516, 日本腐食防食協會, 1985
20. 金子富士男, 柴田孝夫, 長坂孝雄, 日本金屬表面技術, Vol.32[2], 89, 1981
21. 系井康彦外2, 日本輕金屬學會, Vol.38[2], 114, 1988
22. 當摩; 日本金屬協會, Vol.46, 973, 1982
23. 高橋務; 日本防食技術, Vol.32, 424~425, 1983
24. 馬飼野信一; 日本防食技術, Vol.32, 712~717, 1983
25. '電氣化學便覽', 日本電氣化學協會(丸善(株)), 1985
26. 李明勳外2, 日本金屬學會, Vol.57[6], 686~691, 1993

이 논문은 선박검사기술협회 자체연구개발 사업으로 이루어진 것임을 밝힙니다.