

자주포 발전기 스플라인 축 내구성 향상을 위한 최적 설계 기법

김병호^{*,1)} · 강현제¹⁾ · 박영일¹⁾ · 서재현¹⁾

¹⁾ 국방기술품질원 창원센터

The Optimal Design Technique for Improving Durability of Spline Shaft of the Self Propelled Artillery' Generator

Byeong Ho Kim^{*,1)} · Hyen Jae Kang¹⁾ · Young Il Park¹⁾ · Jae Hyun Seo¹⁾

¹⁾ Changwon Center, Defense Agency for Technology and Quality, Korea

(Received 21 May 2015 / Revised 19 August 2015 / Accepted 4 September 2015)

ABSTRACT

In this study, the experimental and analytical investigation on structural integrity evaluation of spline shaft of self propelled artillery' generator were carried out. For this work, macro and microstructure fractography of spline shaft were observed. According to the results of the structure analysis and simulation, the shaft was redesigned and optimized. To improve the stiffness and shear stress, the material was changed from the SNCM220 to SNCM439 and surface roughness and protective coating treatment are changed to increase the stress relaxation, respectively. From the result of the torsion test of shaft and accelerated life test of generator, the shaft of a SNCM439 with heat-treatment(Q/T) and electroless nickel plating was superior quality reliability and durability than the others. Therefore, modeling and simulation corresponded well with the experimental result and structural safety was confirmed by generator performing.

Key Words : Self Propelled Artillery(자주포), Spline Shaft(스플라인 축), Structure Analysis(구조해석) Shear Stress(전단 강도)

1. 서론

자주포(Self propelled artillery)는 스스로 움직여 사격할 수 있도록 무한궤도 등의 차체에 탑재한 야전포를 말하며, 제2차 세계대전에서 전차와 작전행동을 함께

하면서 대포에 기동력을 부여하기 위해 개발되었다.

이러한 자주포는 종전의 견인포에 비해 기동력이 월등히 뛰어나며, 최근에는 40 km 이상의 긴 거리를 사격할 수 있는 자주포가 국내기술로 전력화됨으로써 국내 방위산업의 기술력이 세계적인 수준에 이르고 있는 추세이다. 국내 연구 개발된 K9 자주포 체계는 크게 무장장치, 동력장치, 사통장치 및 통신장치 등으로 구성되어 있으며, 이 중에서도 자주포의 운용 특성상 포

* Corresponding author, E-mail: kjbshh@dtqa.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

의 핵심인 무장기술과 기동력의 핵심인 동력장치(엔진 + 변속기) 기술이 매우 중요하다. 또한 최근에는 전자식 기술로의 고도화로 작동전원을 공급하는 발전기 시스템 기술이 요구되고 있다. 최근 국내에서 개발된 K9 자주포용 발전기는 종래의 K55, K77용 발전기에 대비하여 오일 냉각방식을 채택하여 단위 체적당 발전용량을 획기적으로 증대시켰으며, 계자공급에서 Brushless 방식을 적용함으로써 인해 EMI/EMC에 대한 성능을 향상시켰다^[1].

발전기는 변속기에 장착되어 엔진의 회전동력이 변속기를 거쳐 발전기에 전달되어 구동하게 되며, 구동된 발전기는 삼상의 교류전원을 발전시킨다. 발전기 내부에는 일체형으로 장착된 정류기를 통해 DC 전원으로 변환 출력하여 차량에 탑재된 구성품의 운용전원 및 축전지에 충전전원을 공급하는 기능을 한다. 발전기의 내부 구성품은 변속기에서 구동동력을 전달받는 스플라인 축, 회전자, 정류기 등으로 되어있다. 한편, 기술의 발전에 따라 자주포에서 필요로 하는 발전용량은 점차 증가되는 추세이며, 이에 따라 전자 소자 및 기계 부품 체결의 복잡성과 호환성으로 인해 구조적인 안정성과 내구수명에 대한 문제가 제기되고 있다. 이 중에서도 변속기의 구동동력을 전달받는 핵심부품인 발전기의 스플라인 축은 이론적인 구조해석 및 적절한 강도설계가 필요한 부품이다. 만약 이 부품의 신뢰성 및 내구도가 낮으면 자주포의 발전기 시스템 고장을 유발하게 되고 발전기와 연결된 동력장치의 손상을 초래함으로써 최종적으로는 기동성에 치명결함이 발생되어 전시상황에서 생존율이 급격하게 저하된다.

본 연구에서는 자주포 핵심부품인 발전기 스플라인 축에 대해 파단면 조직분석, 모델링 및 해석프로그램을 이용한 이론 전단파괴강도를 분석하여^[3,4] 새로운 축을 설계/제작하였고, 개발된 스플라인 축과 기계적 특성 및 발전기의 가속수명시험을 통해 신뢰성을 비교 분석하여 설계 안전성을 검토하고자 한다.

2. 자주포 발전기 스플라인 축 구조와 설계 방안

2.1 스플라인 축 미세조직 관찰

현재 적용되는 자주포의 발전기 스플라인 축은 칩탄 처리된 SNCM220 합금강 소재를 사용하고 있으며, 조기 파괴된 스플라인 축에 대해 광학현미경(OM) 및 전자주사현미경(SEM)을 이용하여 관찰한 파단부의 거시

조직 및 미세조직을 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타내었다.

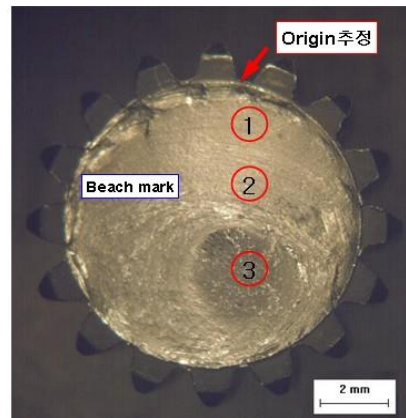


Fig. 1. OM fractography of spline shaft

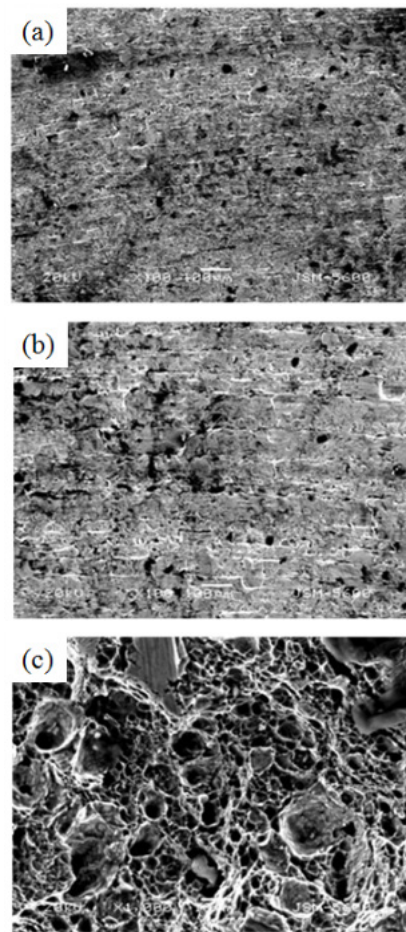


Fig. 2. SEM fractography of spline shaft

Fig. 1의 스플라인 축 파단면 거시조직에서는 반복적인 인장/압축 응력으로 인해 발생하는 피로파괴의 현상인 비치마크(beach mark)가 관찰되며, ① 위치는 균열 초기단계, ② 위치는 균열 중간단계, 그리고 ③은 균열 최종단계를 나타낸다. Fig. 2에서는 피로파괴의 기점에서 시작되어 Fig. 2(a) 균열 초기단계에서 스트라이에이션(striation, 줄무늬)이 나타나며, Fig. 2(b)에서는 스트라이에이션 간격이 넓어지면서 Fig. 2(c) 축의 중심부에서는 인장응력으로 인한 연성파면인 딥플렉(dimple pattern)이 관찰된다. 따라서 스플라인 축의 미세파면사진을 통해 기존의 축의 조기파괴 현상은 실제로 가해지는 전단응력에 비해 축의 강도가 낮아 피로파괴가 발생한다는 것으로 판단 할 수 있었으며, 실제로 이를 분석하기 위해 축의 정적강도를 분석 하였다.

2.2 스플라인 축 정적강도 분석

본 연구에서 수행한 자주포의 발전기 스플라인 축에 가해지는 하중은 반경 방향으로 가해지는 하중만 존재한다고 가정하여 최대부하에서의 하중을 설계하여 이론적 전단강도를 계산 하였다. 이때 사용된 자주포 발전기는 2,350 rpm, 28 VDC, 650 A에서 최대부하가 발생하므로 이때의 출력 및 비틀림에 의한 전단강도를 구하면 Table 1과 같다.

또한, 정적강도 검토를 위해 스플라인 축 해석 프로

그램인 3G를 사용하여 최대 등가응력을 산출하였다. 실제 스플라인 부를 완전 고정할 경우, 치형부 끝에 가장 큰 응력이 작용하는 것으로 해석됨에 따라 노치 부에 응력이 많이 걸릴 수 있도록 그 뒷부분을 고정하여 해석하였고 해석 시 경계조건은 Fig. 3에 나타내었다. 이를 통해 스플라인 부 응력해석 결과는 Fig. 4와 같으며, 응력분석으로부터 경계조건인 경우 등가응력 411.98 N/mm²(Fig. 4(b))으로 산출되었고, 정적강도의 안전율(n_r)은 아래와 같이 1.3임을 알 수 있다.

$$n_r = \sigma_r(\text{항복강도}) / \sigma_{e_{\max}}(\text{등가응력}) = 54.5 / 42.0 = 1.3$$

이 때, 축 스플라인 축의 항복강도는 심부 경도 Hrc 20(실축값)을 통해 인장강도로 환산하여^[5], 70 %로 적용하였다.

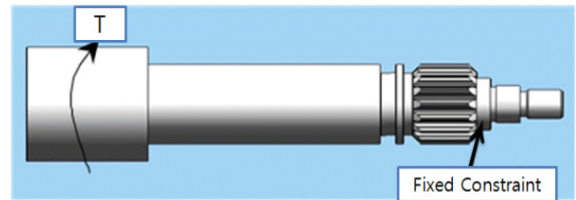
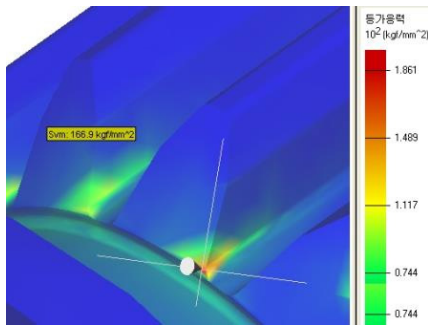


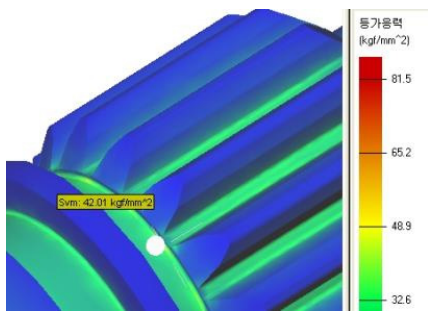
Fig. 3. 3D model and boundary condition of spline shaft

Table 1. Shear stress of spline shaft

| Classification | Theoretical Value | Calculation |
|-------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Maximum Power (P) | 37.55 HP | $V \times I / \text{efficiency} = 28 \times 650 / 0.65$ (efficiency : 65 %) $= 29 \text{ kW} = 37.55 \text{ HP}$ (1HP = 0.735 kW) V : Maximum Voltage (28 VDC), I : Maximum Ampere (650 A) |
| Maximum Torque (T) | 11,444 kgf·mm (112,227 N·mm) | $P/\omega = 716,200 \text{ HP/N (kgf}\cdot\text{mm)}$ $= 716,200 \times 37.55 / 2,350$ P : Maximum Power (37.55 HP), ω : Angular Velocity (rad/sec), Conversion Factor : 716,200, N : Rotation Velocity (2,350 rpm) |
| Shear Stress (τ) | 11.87 kgf/mm ² (116.40 N/mm ²) | $\tau = T \times r/J = (11,444 \times 8.5) / (\pi 17.0^4 / 32)$ T : Maximum Torque (11.444 kgf·mm), r : Fracture Radius (8.5 mm) J : Polar Moment of Inertia of Area = $\pi d^4 / 32$ |



(a) Fix of toothing



(b) Boundary condition

Fig. 4. Stress result of the spline shaft

2.3 스플라인 축 피로한도 분석

스플라인 축 재료의 피로강도를 검토하기 위해 다음 식을 적용하여 측정된 시편을 이용하여 피로한도를 산출하였다.

일반적으로 소재의 피로한도를 결정하기 위해서 시험편은 매우 정밀하게 가공하고, 제어된 조건에서 시험이 된다. 그러나 실제 기계가공품의 피로한도는 피로한도에 영향을 미치는 표면계수 및 노치 민감도 등의 인자를 고려하여 수정 값을 사용해야하기 때문에, 본 연구에서는 수정된 피로한도를 계산식에 적용하여 분석하였다.

* 수정된 피로한도(S_e)

$$\begin{aligned}
 &= C_f \times C_r \times C_s \times C_t \times S'e \times 1/K_f \\
 &= 0.75 \times 1.0 \times 0.85 \times 22.6 \times (1/1.9) \\
 &= 7.6 \text{ kgf/mm}^2 = 74.53 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

이 때,

S_e : Modified endurance limit (수정된 피로한도)

C_f : Surface finish factor (표면처리 계수)

C_r : Reliability factor (신뢰도 계수)

C_s : Size factor (크기 계수)

C_t : Temperature factor (온도 계수)

$S'e$: Endurance limit of test specimen
(시편에 측정된 피로한도)

K_f : Fatigue notch factor (피로노치계수)

이 때, $K_f = 1+q(K_t-1)$:

K_t , Stress concentration factor (응력집중계수),

q , Notch Sensitivity (노치 민감도)

자주포 발전기 스플라인 축 구조와 모델링 결과 축에 걸리는 최대전단강도(116.40 N/mm²)에 비해 축 재료의 피로강도(74.53 N/mm²)가 낮아 축의 피로파괴에 직접적인 원인으로 분석되며, 이 외 압축/인장 잔류응력 등 피로강도에 영향을 주는 축 소재, 열처리방법 및 보호피막처리를 개선하여 시험하였다.

3. 자주포 발전기 스플라인 축 개선방안 및 신뢰성 평가

3.1 스플라인 축 개선방안

자주포 발전기 스플라인 축 구조와 모델링 결과를 통해 스플라인 축에 대한 피로한도를 증가시키기 위해서는 표면 거칠기(표면계수)를 감소시키고, 노치부의 응력집중 해소를 위해 Table 2과 같이 재설계하여 피로한도를 산출하였다. Table 2에서 표면 거칠기가 6.3a에서 3.2a로 개선될 경우, 표면계수 C_f 가 0.75에서 0.85로 증가되는 것으로 계산된다. 노치반경(r)이 클수록 노치효과(Notch effect)에 의해 응력 집중의 영향이 작아지므로, 노치반경(r)이 0.2에서 1.0으로 증가하면 곡률반경과 응력집중계수의 반비례 관계에 의해 피로응력 집중계수 K_f 가 1.9에서 1.18로 감소되는 것으로 계산된다. 따라서 아래의 식으로부터 개선된 피로강도는 262.81 N/mm²로 스플라인 축에 걸리는 최대 전단강도(116.70 N/mm²) 보다 향상되어 피로수명은 증가될 것으로 판단된다.

* 수정된 피로한도(S_e)

$$\begin{aligned}
 &= C_f \times C_r \times C_s \times C_t \times S'e \times 1/K_f \\
 &= 0.85 \times 1.0 \times 0.85 \times 1 \times 43.8 \times 1/1.18 \\
 &= 26.8 \text{ kgf/mm}^2 = 262.81 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Table 2. Redesign of the spline shaft

| 구분 | 개선 전 | 개선 후 | 비고 |
|--------------|---------|----------|---------------------|
| 표면 거칠기 | 6.3a | 3.2a | 표면계수 개선 (0.75→0.85) |
| 노치부 | 0.2 | 1.0 | 응력집중 해소 |
| 표면처리 | 흑색산화 피막 | 무전해 니켈도금 | 표면산화 제거 및 부식방지 |
| 직경(D) (파단부위) | ∅17.0 | ∅17.8 | 직경증가 |

또한, 안전성 및 신뢰성을 고도화하기 위해 구조설계와 더불어 재질설계를 수행하였다. 이전의 스플라인 축의 재질은 내마모성에 적합한 SNCM220 합금강을 적용하였지만, 축 재질로는 피로강도 및 강성이 요구되므로 SNCM220 합금강 보다 열처리 특성 및 강성이 뛰어난 SNCM439 합금강으로 변경하였다. 그리고 열처리방법은 표면경화처리인 침탄처리에서 담금질 및 뜨임 열처리로 하여 재질 표면 및 심부에 대해 인성을 부여하도록 설계하였다. 최종적으로 피막처리는 금속의 표면에 산화층이 발생되어 피로수명을 감소시킬 수 있는 흑색산화피막에서 표면조도 및 내마모성을 향상시키기 위해 무전해 니켈도금으로 변경하여 각각의 시험편에 대해 2개씩 제작한 설계조건을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Experimental specimen of the spline shaft

| 시험편 | 소재 | 열처리구분 | 피막구분 |
|------------------|---------|----------|----------|
| # 1 (#1-1, #1-2) | SNCM220 | 침탄경화 | 흑색산화피막 |
| # 2 (#2-1, #2-2) | SNCM439 | 침탄경화 | 흑색산화피막 |
| # 3 (#3-1, #3-2) | SNCM439 | 침탄경화 | 무전해 니켈도금 |
| # 4 (#4-1, #4-2) | SNCM439 | 담금질 및 뜨임 | 무전해 니켈도금 |

3.2 스플라인 축 신뢰성 평가

3.2.1 비틀림 시험

스플라인 축의 비틀림 시험을 위해 Fig. 5처럼 지그를 제작하여, 스플라인 고정지그 1(잇수 16)에 스플라

인을 고정하고 반대편 스플라인 고정지그 2(잇수 24, 토크렌치 장착용)에 토크렌치(686.5 N·m)를 조립하여 파단이 발생할 때까지 토크를 서서히 인가하고 각 시험편에 대해 2개씩 파단 값을 측정하였다. 이 때, Table 4는 비틀림 시험 결과를 나타내었다. SNCM439 합금강은 개선 전 상태인 침탄경화, 흑색산화피막을 동일사양으로 적용하였을 경우 SNCM220 합금강 비틀림 강도(299.0 N·m) 보다 평균적으로 약 6.4%(323.5 N·m) 증가하였고, 흑색산화피막을 무전해 니켈도금으로 변경 시는 약 19.3%(362.5 N·m)가 증가하였다.

또한 소재 SNCM439 합금강을 사용하여 담금질 및 뜨임처리를 하였을 경우는 이전 상태보다 약 51.6% 비틀림 강도가 크게 증가됨을 알 수 있었다.

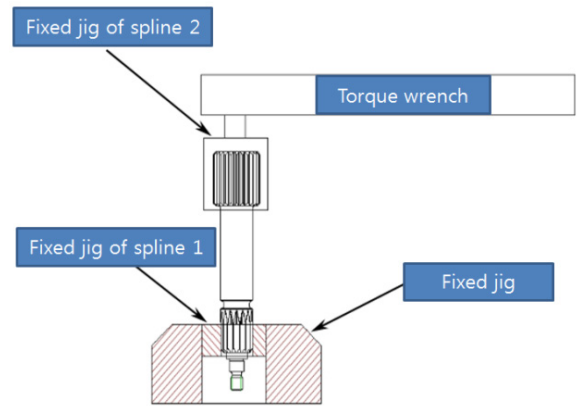


Fig. 5. Schematic of the torsion test

Table 4. Fracture torque result of the spline shaft

| 구분 | 개선 전 파단토크 (N·m) | 개선 후 파단토크 (N·m) | 변화율 |
|------|-----------------|-----------------|--------|
| #1-1 | 294 | - | - |
| #1-2 | 304 | - | - |
| #2-1 | - | 314 | 3.2 % |
| #2-2 | - | 333 | 9.6 % |
| #3-1 | - | 343 | 12.9 % |
| #3-2 | - | 382 | 25.8 % |
| #4-1 | - | 461 | 51.6 % |
| #4-2 | - | 461 | 51.6 % |

3.2.2 내구도 시험

최적화 설계된 스플라인 축에 대한 신뢰도 입증을 위해 실제 적용되는 자주포 발전기에 장착하여 100시간의 가속수명시험을 수행하였으며, 시험에 사용된 장비는 Fig. 6에 나타내었다. Table 5는 발전기 내구도 시험조건을 나타낸 것으로 25시간을 1주기로 동작 조건 100시간 동안 발전기를 동작한 후 전기적 성능 및 스플라인 축 비파괴검사 (MT, 자분탐상)을 통해 파손여부를 관찰 하였다. Table 6은 내구도 시험 후 발전기 성능결과를 나타내며, Fig. 7은 내구도 시험 후 발전기에 나타내고 있다. 발전기 내구도 시험 결과, 출력력인 및 내압 모두 규격을 충족 하였으며 분리된 스플라인 축을 자분탐상에 의한 비파괴 시험한 결과 어떠한 미세균열 및 손상된 부분은 발견되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 구조해석 및 설계 시 적용한 해석방법은 타당하며, 최적화 된 자주포 발전기 스플라인 축에 대한 신뢰성 및 안전성은 증대되었다.

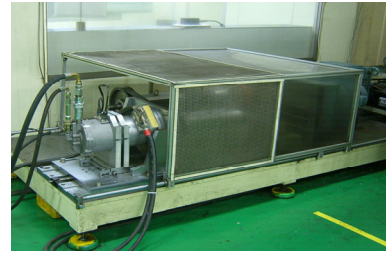


Fig. 6. Picture of a accelerated life test of the generator

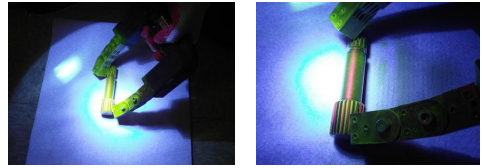


Fig. 7. Picture of magnetic particle test(MT) of the spline shaft after a accelerated life test of the generator

Table 5. Loading conditions of generator

| 단계 | 시간 (HR) | 회전수 (RPM) | 고정부하 (A) | 변동부하 (A) | 총 부하 (A) | 변동부하 인가주기(초) | |
|----|---------|-----------|----------|----------|----------|--------------|-----|
| | | | | | | ON | OFF |
| 1 | 2.5 | 2600±26 | 320 | 330 | 650±50 | 8 | 52 |
| 2 | 7.5 | 5120±51 | 320 | 330 | 650±50 | 8 | 52 |
| 3 | 15.0 | 3520±35 | 320 | 330 | 650±50 | 8 | 52 |

Table 6. Results of accelerated life test of generator

| 구 분 | 규 격 | | 측정치 | 결과 |
|-----------------------|-------------------------------------|------------------|----------|------|
| 출력확인 (2400±24 rpm) | 출력전류 50±20 A | 출력전압 27.3~28.7 V | 27.9 V | 규격충족 |
| | | 여자전류 6.0 A 이하 | 0.7 A | 규격충족 |
| | 출력전류 600±20 A | 출력전압 27.3~28.7 V | 27.8 V | 규격충족 |
| | | 여자전류 6.0 A 이하 | 3.2 A | 규격충족 |
| 출력확인 (8000±80 rpm) | 출력전류 50±20 A | 출력전압 27.3~28.7 V | 28.0 V | 규격충족 |
| | | 여자전류 6.0 A 이하 | 0.2 A | 규격충족 |
| | 출력전류 600±20 A | 출력전압 27.3~28.7 V | 27.8 V | 규격충족 |
| | | 여자전류 6.0 A 이하 | 1.9 A | 규격충족 |
| 내압 | 50.0±5.0 psig 5분간 인가 분당 5.0 psig 이하 | | 0.4 psig | 규격충족 |

4. 결론

본 연구는 자주포 발전기 스플라인 축의 안전성 증대에 대한 연구를 위해 스플라인 축의 미세조직 관찰 및 강도 분석을 통해 설계방안을 도출 및 제작하였고, 실제 발전기에 장착하여 내구성시험을 수행한 결론은 다음과 같다.

- (1) 스플라인 축의 파단면 관찰 결과 거시조직에서는 비치마크가 관찰되었고 미세조직에서는 파괴 기점에서 축의 중심부로 스트라이에이션(striation, 줄무늬)이 확대되어 최종적으로 중심부에서 인장응력에 의한 딴플(Dimple)파괴가 발생되어 전형적인 파괴 현상임을 관찰하였다.
- (2) 스플라인 축 구조 설계에 대한 피로강도 측면에서 분석한 결과 기존 축 재료의 전단 피로강도(74.53 N/mm²)는 축에 걸리는 최대 전단강도(116.40 N/mm²)보다 낮아 전단피로파괴가 발생하였고, 표면조도 및 피로응력 집중계수가 향상된 스플라인 축의 전단피로강도는 262.81 N/mm²로 기존대비 약 250 % 향상된 것으로 설계되었다.
- (3) 스플라인 축에 대한 파단시험 결과 최적화된 제품이 기존 제품에 비해 비틀림 강도가 약 51.6 % 향상되었으며, 자주포 발전기에 조립하여 100시간 내

구도 시험을 수행한 결과 발전기 성능을 모두 만족하였고, 스플라인 축의 미세균열은 발생하지 않았다.

References

- [1] Jung J. W., Jung U. H., Kim C. S., Yu Y. S., Park K. C. and Park K. C., "Structural Integrity Evaluation for Crane Bracket of Armored Recovery Vehicle," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 16, No. 5, pp. 653-658, 2013.
- [2] DTaQ, "A Report on Durability Improvement for Spline Shaft of Alternator of K9," 2011
- [3] Chu S. H and Liu C., "Finite Element Simulation of Fracture Toughness Test," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 37, No. 4, pp. 491-496, 2013.
- [4] Chu S. J. and Liu C., "Determination of True Stress-True Strain Curves from Tensile Tests with the Aid of Finite Element Analysis Simulation," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 35, No. 1, pp. 25-31, 2011.
- [5] ASTM A370 "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products," 2014.