

# 자주포 궤도 너트에 미치는 우발적 수소취성 현상의 영향

길현준\*, 김병호\*<sup>#</sup>, 강현제\*, 서재현\*

\*국방기술품질원

## Analysis of the Accidental Hydrogen Embrittlement Affecting the Track Nut of Self-Propelled Howitzer

Hyeon-Jun Gil\*, Byeong-Ho Kim\*<sup>#</sup>, Hyeon-Jae Kang\*, Jae Hyun Seo\*

\*Defense Agency for Technology and Quality

(Received 8 March 2016; received in revised form 5 April 2016; accepted 12 April 2016)

### ABSTRACT

In this study, we analyzed the accidental hydrogen embrittlement affecting the track nut on a self-propelled howitzer. Tracks are key components to maintain a high degree of confidence in the operation of the self-propelled howitzer and the safety of the crew. This study analyzed the fractured surface using SEM to review accidental damage of the wedge nut. In addition, we conducted revival tests and analyzed the results to identify the cause of the wedge nut damage from hydrogen embrittlement. We should carry out factor analysis and continuous improvement of the manufacturing process to determine the accidental breakage mechanism for future enhancement of the self-propelled howitzer. This study will be the useful reference for enhancing process designs in similar products.

**Key Words** : Self-Propelled Howitzer(자주포), Track Nut(궤도 너트), Hydrogen Embrittlement(수소취성)

### 1. 서 론

궤도형 자주포는 군단중심 작전에 대한 화력지원이나 화력전 수행능력을 향상시키기 위해 신속하게 움직여 후방에서 사격 할 수 있도록 무한궤도 등을 차체에 탑재한 야전포를 말하며, 2차 세계대전에서 전차와 함께 작전을 수행하면서 화포에 기동력을 부여하기 위해 개발되었다.

궤도형 자주포의 중량은 40톤 이상으로 이를 지지하기 위한 현수장치 및 궤도에는 큰 부하가 걸린 상태이다. 특히, 국내의 야전은 지형적으로 습지나 수렁 등이 많기 때문에 궤도의 신뢰성은 자

주포 임무수행 및 기동성능에 큰 영향을 미친다.

또한, 궤도는 자주포의 기동 및 안전에 있어 높은 신뢰도를 요구하는 핵심부품이며, 이러한 궤도 조립체는 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. Fig. 1에서 보듯이 각 궤도조립체는 궤도 몸체, 패드 너트, 웨지 볼트 및 웨지 너트로 연결되어 있다. 특히, 웨지 너트는 1대당 400여 개가 사용될 정도로 궤도 조립체의 핵심 구성부품 중 하나이다.

하지만 자주포의 기동 중 궤도의 과도한 응력집중 현상으로 Fig. 2와 같이 궤도조립체의 구성품인 웨지 너트가 파손하는 사례가 가끔씩 발생하여 내구수명과 신뢰도에 문제가 제기되고 있다. 간단한 기계적 구조로 체결된 웨지 너트지만 파손되는 순간 기동에 치명적인 결함을 초래해 전시상황에서 승무원의 생존율이 급격하게 저하된다.

# Corresponding Author: [kjbshh@dtqa.re.kr](mailto:kjbshh@dtqa.re.kr)

Tel: +82-55-279-4035, Fax: +82-55-279-4780

## 2. 본 론

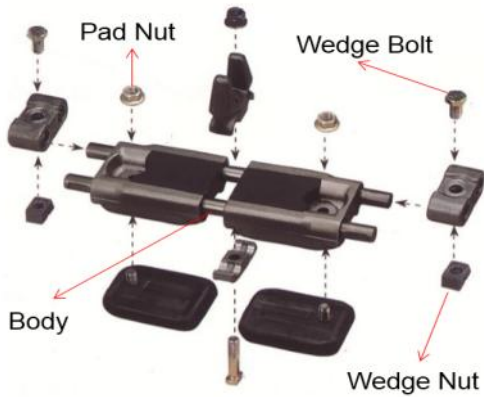


Fig. 1 Components of track assembly



Fig. 2 Crack of wedge nut

그러나 현재까지 이러한 궤도 웨지 너트에 대한 우발적 파손에 대한 연구는 전무한 실정이며, 만약 웨지 너트 파손 시 사용자는 이유도 모른 채 교체만 할 수 밖에 없는 실정이다.

그래서 본 연구에서는 이러한 우발적인 자주포 궤도용 웨지 너트 파손에 대해 전자주사현미경 (SEM, Scanning Electron Microscope)을 이용한 파 단면 분석과 동일한 Lot의 웨지 너트를 이용하여 재현성 시험을 실시하였으며, 비파괴검사의 하나 인 자분탐상검사를 실시하여 건전성(Soundness)를 확인하였다. 이를 통해 자주포 궤도용 웨지 너트의 우발적 파손 및 취성파괴에 대한 분석과 이를 미연에 방지할 수 있는 방안을 제시하고자 한다<sup>[1]</sup>.

### 2.1 파손품 분석

#### 2.1.1 화학성분 및 기계적 성질 분석

본 연구에서 사용한 자주포 궤도의 재질은 합금강인 SCM440이며, SCM440 재질에 대한 화학성분 분석 결과는 Table 1과 같다.

SCM440의 화학성분 규격치와 파손된 웨지 너트의 성분분석 결과를 비교해본 결과, 모든 성분이 규격치를 만족하였다. 또한 기계적 성질 중의 하나인 경도를 Fig. 2와 같이 3곳의 포인트를 지정하여 시험해 본 결과도 Table 2와 같이 규격치를 만족하였다. 따라서 파손된 웨지 너트의 화학적 성분 및 기계적 성질은 파손의 원인으로 추정할 수 없었다.

Table 1 The chemical composition of SCM440

Composition		SPEC	Result	
C		38 ~ 43	40	Good
Si	x100	15 ~ 35	23	Good
Mn		75 ~ 100	79	Good
P	x1000	35 Max	20	Good
S		40 Max	15	Good
Ni		25 Max	6	Good
Cr	x100	80 ~ 110	106	Good
Mo		15 ~ 25	20	Good
Cu		35 Max	15	Good

Table 2 The hardness of heat treated SCM440

SPEC	Point	Result	
HRC 40 ~ 45	P1	44.0	Good
	P2	42.9	Good
	P3	43.0	Good
	Avg.	43.3	Good

### 2.1.2 파단면 분석

Fig. 3은 SEM을 이용하여 파손된 웨지 너트의 파단면을 촬영한 것이다. 크랙의 진행은 그림과 같이 A영역에서 시작하여 C방향으로 진행되었으며 각 영역별 파단부위의 파괴 메커니즘을 확인하기 위해 고배율로 확대 하였다. 기본적으로  $\gamma$ -Fe는 FCC(Face-Centered Cubic) 구조이고,  $\alpha$ -Fe는 상온에서 BCC(Body-Centered Cubic)로 합금강의 Q/T(Quenching/Tempering) 처리 시  $\gamma$ -Fe까지 가열 후 급냉 및 뜨임을 수행하기 때문에 상온에서 주로 연성파괴가 발생한다. 하지만, 제강 과정에서 다른 개재물 혼입, 과열처리, P와 S 농도 증가 그리고 수소혼입에 의해 우발적인 취성파괴가 발생하게 되어 재료의 수명은 예측이 불가능하게 되므로 이러한 요인들은 미리 숙지하고 합금설계 및 제조를 해야 한다.

우선 파단의 시작점인 A파단부 확대 파면은 Fig. 4에서 보여주고 있으며, Fig. 4에서 보듯이 ①과 ②부위는 표면부위로 취성파괴의 전형적인 특징인 입계파괴 현상을 관측할 수 있다. ③부위는 입계파괴 양상과 더불어 HCP 구조에서 발생하는 취성현상인 벽개파괴 양상이 혼재하여 나타난다.

파단의 진행 중간점인 B파단부 확대 사진은 Fig. 5와 같으며, 저배율로 관찰 시 취성파괴의 양상인인 River pattern이 관찰된다.

또한 고배율(x3000)로 관찰 시 덩플에 의한 전형적인 연성파괴 양상이 나타난다. 파단의 종료지점인 C파단부 확대 파면은 Fig. 6과 같으며, 덩플에 의한 전형적인 연성파괴 양상이 나타난다.

파단의 시작점부터 종료지점까지의 파단부 확대 파면 분석을 통해 파손의 진행방향은 A에서 B를 거쳐 C로 진행되었음을 알 수 있었으며 파손의 시작부인 A의 상층부에서만 입계파괴 양상이 발견되는 것으로 보아 우발적 취성파괴에 의한 웨지 너트의 내구성 저하가 파손의 주원인으로 판단된다. 또한, 이러한 우발적 취성파괴의 원인으로서는 앞서 기술한 것과 같이 다른 개재물 혼입, 과열처리, P와 S에 의한 청열취성 및 적열취성 그리고 수소 혼입 등에 의한 수소취성에 의한 것으로 발생된다. 하지만 본 연구에서는 화학성분이 규격에 일치하고 파괴부위에 다른 개재물 혼입이 없었

며, 열처리 정도 또한 규격에 일치하였다. 또한 SEM을 이용한 파단면 분석 결과를 볼 때, 파손의 원인은 수소취성에 의한 영향이 주요한 원인으로 판단된다.

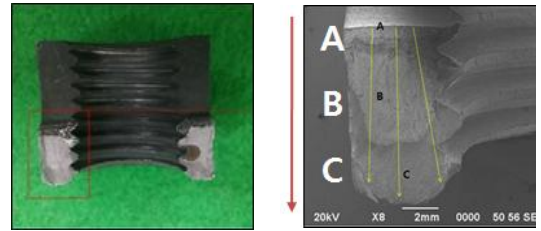


Fig. 3 Fracture of wedge nut

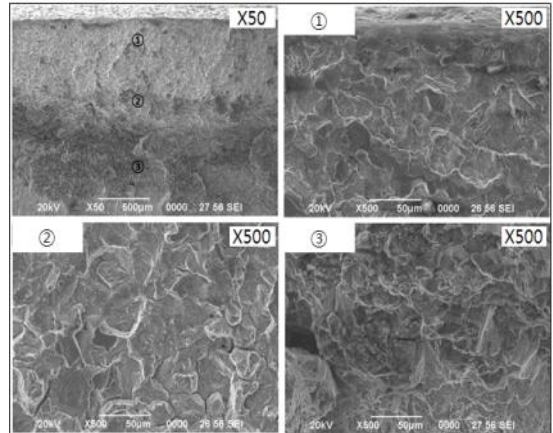


Fig. 4 Fractography of A region

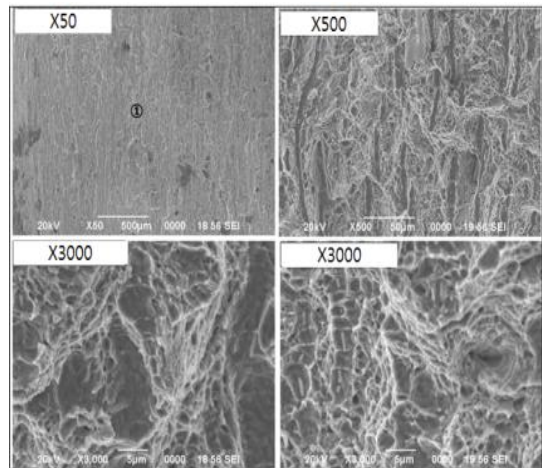


Fig. 5 Fractography of B region

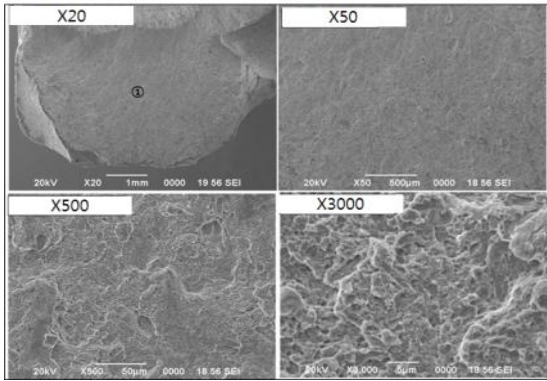


Fig. 6 Fractography of C region

수소취성은 강 내부의 수소에 의해 연성을 잃고 취약하게 되는 성질로 수소의 양이 많을수록 취화의 정도는 심해지게 된다. 전위론에 의하면 원자 상의 수소는 전위 등의 격자결함의 주위에 집결하는 경향이 있으며, 소성변형 중 전위가 이동함에 따라서 수소도 이동하여 이 틈에 침입, 국부적으로 또는 일시적으로 과포화 상태가 되어 수소 압력의 증가로 틈새 주변에 취화를 일으킨다. 그러나 수소취성에 의한 파손은 조립 후 완제품 상태에서나 발견이 가능하므로 적극적 대응방안을 갖고 있지 않을 경우 엄청난 손실이 발생된다.

수소 유입의 발생원인은 금속 표면의 스케일, 러스트 제거를 위한 산세척과 수용액 내의 보호피막처리 과정에서 발생할 수 있다. 이 때, 자주포 케도용 웨지 너트의 경우에도 보호피막처리를 위해 인산염피막 처리를 하며, 수소 제거를 위해 베이킹 열처리를 수행하고 있다. 그러나 인산염피막의 경우 외부 스크래치나 충격에 의해 잘 벗겨지기 때문에 부식이 발생할 수 있으며, 녹 제거를 위해서 2회에 걸쳐 인산염피막 처리를 하는 실정이다. 하지만 이 경우에는 본 실험에서 알 수 있듯이, 베이킹 열처리 후 수소제거가 불완전 할 경우에는 제품 Lot에 따라 수소취성 현상이 발생할 수 있다.

일단, 웨지 너트 표면에 수소가 침투하면 금속 결정 경계면, 개재물 등 주위에 모여 있다가 일정 하중조건 아래 팽창하여 크랙이 전파하게 된다.

앞서 서술한 SEM 파면에서도 크랙 주변에서는

주로 입계파괴 현상이 관찰되었는데 이 역시 수소의 혼입으로 입계가 쉽게 취화되는 것으로 판단된다.

수소취성에 의한 파손은 이와 같은 메커니즘을 통해 이루어지므로 제조공정에서의 수소함량이 가장 주요 요인이 된다. 침입 수소의 제거방법은 베이킹 열처리가 있는데 ISO(국제표준)에서는 수소취성을 제거하는 베이킹 방법으로 1,050MPa 이상의 철강부품은 190~220℃에서 8~24시간의 열처리를, 표면경화부품은 130~150℃에서 2시간의 열처리를 규정하고 있다. 또한 1,200MPa 이상의 철강부품에 대해 ASTM(미국재료시험협회)에서는 190℃, JIS(일본국가표준)에서는 190~230℃의 베이킹 처리를 규정하고 있다. 베이킹은 수소가 침입된 시점에서 빠를수록 좋다. 통상적으로 베이킹은 도금이 끝난 즉시 시행하여야 하며, 부득이한 경우 1시간 이내로 투입, 베이킹 시간을 길게 할수록, 온도를 높일수록 수소의 배출 효과가 좋다<sup>2)</sup>.

## 2.2 재현성 시험

### 2.2.1 조임토크시험

자주포 케도용 웨지 너트 파손의 원인 추정을 위해 조임토크시험(screw torque test)을 실시하였다. 전체 시료는 Fig. 7과 같이 5개이며, 제조된 웨지 너트 중 비파괴검사 결과에 의한 미 균열제품 2개, 균열 발생품 3개로 구성되었다. 특히 1개의 시료는 1.2mm의 균열 발생품을 사용하였다. 각 시료의 조임토크시험은 Fig. 8과 같이 진행되었으며 자세한 시험결과는 Table 3과 같다.

체결 토크의 규격은 380 lb.ft(515 N.m)이나 50%의 토크를 더 가하여 시험하였다. 재현성 시험 결과 미 균열제품은 380 lb.ft에서 파괴가 발생하지 않았지만 균열제품 중 1.2mm의 크랙이 발생된 시료는 220 lb.ft에서 파손되었다. 하지만 균열제품 중 1.2mm 미만의 크랙이 발생된 시료는 380 lb.ft의 토크에서도 파괴가 발생 하지 않았다. 이 결과는 수소취성에 의해 크랙을 포함하고 있는 모든제품에서 파손이 발생되는 것이 아니라 특정 깊이의 크랙을 가지고 있을 경우 우발적으로 파손이 발생되는 것임을 알 수 있다.

### 2.2.2 인산염피막처리

파손된 웨지 너트의 공정을 확인한 결과 파손이 발생된 로트는 장기보관 등으로 인산염피막처리 후 녹이 발생하여 표면처리(인산염피막) 공정을 2회 실시한 것을 알 수 있었다. Fig. 9는 파단된 표면 부위의 SEM-EDS 사진을 보여 주고 있다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 파단면 주위에 인산염피막에 의한 P와 Zn 성분이 검출 되고 있으며 검출된 화학성분은 Table 4와 같다. 또한, 표면처리 공정이 파손에 미치는 영향을 파악하기 위하여 100개의 시료를 동일한 조건으로 2회 인산염피막처리 후 재현성 시험을 실시하였으며, 이 중에서 약 7%의 시료가 크랙이 발생한 것을 알 수 있었다.

크랙 판정은 비파괴검사의 한 종류인 자분탐상검사를 통해 확인하였다[3]. 자분탐상검사를 실시한 크랙 발생부는 Fig. 10의 화살표로 나타내었다. 결론적으로 과도한 인산염피막 등 표면처리에 의한 수소원자는 제품 표면에서 전위 등 격자결함의 주위에 집결될 가능성이 커지며, 이는 우발적인 취성파괴를 초래하는 것으로 판단되며, 이를 위한 심화된 연구는 계속 수행되어야 할 것이다.



Fig. 7 The specimens of screw torque test

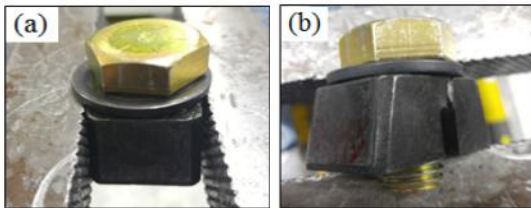


Fig. 8 Screw torque test of wedge nut:  
(a) Normal wedge nut and (b) Crack wedge nut

Table 3 The screw torque test results of specimens

	#1	#2	#3	#4	#5
Mark	5	5	1	1	1
State (mm)	Normal	Normal	Crack (1.2)	Crack (1.2<)	Crack (1.2<)
SPEC	380 lb.ft x 1.5 = 570 lb.ft(780 N.m)				
Torque	780	780	300	780	780
Result	OK	OK	Crack	OK	OK

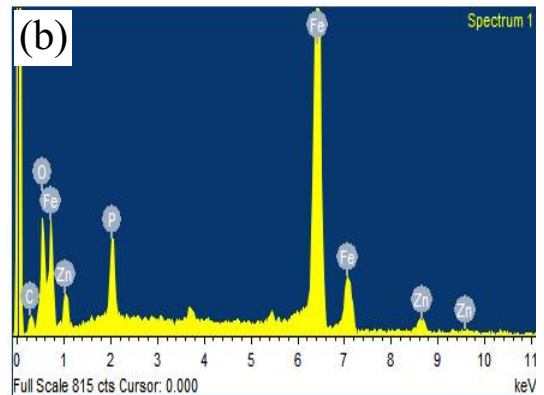
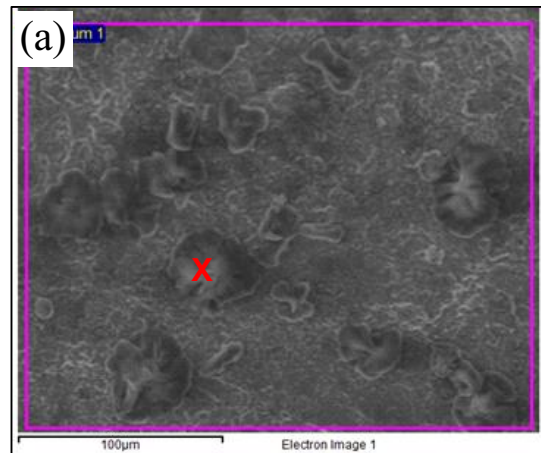
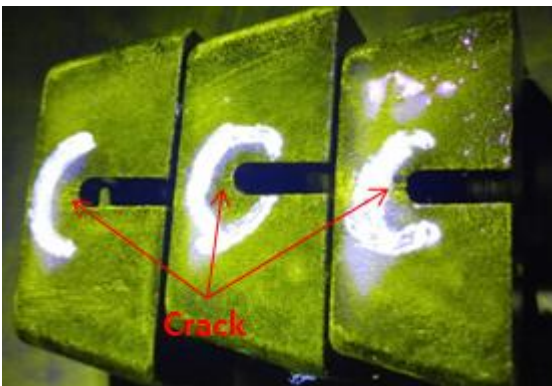


Fig. 9 Result of SEM-EDS for fracture surface:  
(a) SEM micrograph and (b) EDS of X region

**Table 4 Result of EDS for surface**

Composition (%)	Result
	Surface
C	7.12
O	11.99
<b>P</b>	<b>4.95</b>
Fe	70.45
<b>Zn</b>	<b>5.50</b>



**Fig. 10 Result of magnetic particle inspection**

### 3. 결 론

본 연구에서는 자주포 궤도 웨지 너트에 미치는 우발적 수소취성의 영향을 검토하기 위해 전자주사현미경인 SEM을 이용하여 파단면을 심층 분석하였으며, 정확한 원인 도출을 위해 재현성 시험을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 파손된 웨지 너트 분석결과 화학성분 및 경도는 규격을 만족 하였으며, 파면분석 결과 균열 개시점에서 취성파괴인 입계파괴 및 벽개파괴 현상이 관측되었다.
2. 재현성 시험을 위해 웨지 너트에 대한 조임토크시험 및 인산염피막처리 시험을 수행한 결과 1.2mm 균열이 관측된 웨지 너트에서는 조기

파괴가 발생되었으며, 2회 인산염피막처리를 통해 7% 시료가 균열된 것을 관측할 수 있었다.

3. 이를 종합적으로 분석해보면, 궤도용 웨지 너트 파괴의 원인은 수소취성으로 귀결된다. 이를 해결하기 위해서는 최적의 베이킹 처리를 통해 발생된 수소의 완전한 제거가 필요하며, 또한 인산염피막 처리 후 자분탐상검사를 통한 균열 발생 여부를 확인하는 과정이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

향후 자주포 궤도용 웨지 너트뿐만 아니라 유사한 제품의 공정 설계에 유용한 참고자료로 활용될 수 있으며, 무결점 자주포 부품 품질 및 신뢰성을 향상하기 위해 제조공정 및 우발적 파손 메커니즘에 대한 요인분석과 지속적인 개선활동을 수행해야 할 것이다.

### 후 기

“이 논문은 국방기술품질원의 지원을 받아 작성하였음.”

### REFERENCES

1. LS Mtron, Report of Track Nut Failure Analysis for The Track Nut of Self-Propelled Howitzer, pp.1-15, 2015.
2. Kim, Y. S., Jeong Y. M., and Im, G. S., “Review on Delayed Hydride Cracking and Stress Corrosion Cracking of Metals”, Transactions of the Korean Hydrogen and Energy Society, Vol. 15, No. 4 pp. 266-273, 2004.
3. Kim, B. H., Seo, J. H., Gil, H. J., Kim, S. H., and Seo, S. C., “A Study on the Nondestructive Test Optimum Design for a Ground Tracked Combat Vehicle”, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 35, No. 5 pp. 358~366, 2015.
4. Cho, J. U. and Han, M. S., “Study on Fracture at Material under Dynamic Load”, Journal of the

Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 7, No. 2 pp. 16-22, 2008.

5. Park, K. D. and Ryu, H. J., "A Study on Corrosion Fatigue Characteristics Based on Welding Methods of Structural Steel", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 5, No. 3 pp. 58-64, 2006.