박격포 포판 파손에 대한 원인 분석 및 검증

윤성호*, 박영민*, 황석재**
*국방기술품질원, **현대위아
e-mail: engineer_ysh@dtaq.re.kr
parkym@dtaq.re.kr
sjhwang@hyundai-wia.com

An Analysis and Validation of the Mortar Baseplate Breakage

Seong-ho Yun*, Young-min Park*, Seok-jae Hwang**
*Defence Agency for Technology and Quality
**Hyundai-Wia

요 약

본 논문에서는 박격포 사격 도중 파손된 포판에 대해 단면, 소재, 공정, 설계 측면으로 나누어 원인을 분석하였다. 파단면과 비파단면을 각각 광학장비를 이용하여 관찰한 결과 특정 부위에서 단류선 및 금속조직 형상 변화를 확인할 수 있었다. 또한 Lap(겹침)으로 인한 선형결함이 다수 발견되었다. 생산공정 중 변경점 확인 결과 특정 로트에서 금속의 흐름을 개선하고자 사상 깊이에 변화를 주었으나 오히려 금속의 흐름을 방해하여 겹침의 깊이를 증대하게 하였다. 단류선 생성과 Lap의 발생 원인을 확인하기 위해 Deform 프로그램을 사용하여 유동해석을 실시하였고 그 결과에 따라 Lap 검출품, 미검출품, 제거품에 대해 Drop test 실시하여 포판 파단의 추정 원인에 대한 검증을 수행하였다.

1. 서론

박격포는 근거리용 곡사포로 주로 보병의 전투지원용으로 사용된다. 박격포는 포신, 포판, 포다리로 구성되며 그중 포판은 지면에 설치되어 포 사격 시 가해지는 충격을 지면에 분산시켜 전달하는 역할을 담당하는 구성품으로 표적에 대한 정확한 사격, 포의 자세 유지, 운용 인원의 안전을 위해서는 포판의 강도가 필수적인 요소이다. 그러나 생산중인 제품의 보증사격 중 포판 파손 현상이 발생되어 원인분석 및 그 결과에 대한 검증을 실시하였다.

포판 파손 발생원인 분석을 위해 제품의 단면, 소재, 공정, 설계측면에서 검토를 실시하였다. 파단이 발생한 Arm의 단면과 비파단 Arm의 단면을 각각 광학장비를 이용하여 금속조직의 변형 상태 및 파단면 형상 관찰을 통해 파단원인을 추정하였다. 규격 대비 소재의 적합여부에 대해서도 확인 후 생산공정 중 포판의 파단에 영향을 줄 수 있는 요인을 분석하였다. 생산 공정 중 변경점을 식별하고 해당공정의 영향성을 확인하기 위해 Deform 프로그램을 이용한 유동해석을 실시하였으며, 실사격 충격량과 유사한 Drop test를 통해 추정원인에 대한 검증을 수행하였다.

2. 본론

2.1 포판 균열 형상 분석

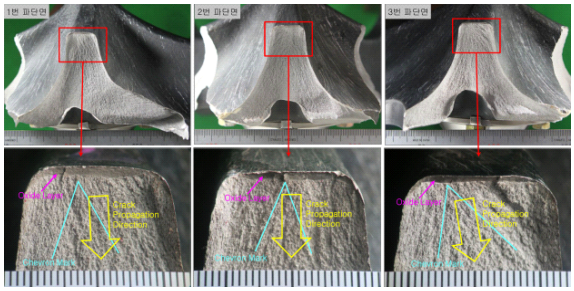
박격포판의 파손현상을 설명하기 위해 [그림 1]과 같이 Rim(포판 가장자리), Arm, 소켓조립부(포판 중심)로 나누어 명명한 후 포판의 5개 Arm 중 파손 여부에 따라 구분하여 단면 형상을 분석하였다. 파손된 3개의 Arm을 우측에서 좌측방향으로 각각 1번, 2번, 3번 Arm으로 명명하고, 파손되지 않은 2개의 Arm은 좌측부터 4번, 5번으로 명명하였다. 보다 상세한 포판 균열 발생 원인을 분석하기 위해 제품 단면, 제품 소재, 제작 공정, 제품 설계측면으로 나누어 분석하였다.

[그림 1] 포판의 구조 및 형상

2.1.1 파손 단면 육안 검토

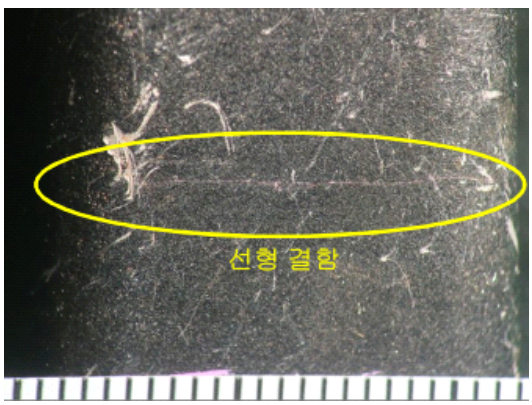
우선 육안 및 저배율에서 파단면을 관찰하여 파손의 양상 및 응력의 작용방향에 대해 분석하였다. 파손된 3개의 Arm 파단면에서 [그림 2]와 같이 동일한 파단형상이 관찰되었으며, 모두 파손 단면에서 V자 형태의 융기된 패턴이 관찰되었다. 이는 Chevron Mark로 포판 하단 표면측에서부터 사격 충격으로 인해 취성균열이 급속전파된 흔적이며 내부 균열이 복수개 발생 및 성장하여 파단에 이르는 것으로 추정된다.

Chevron Mark는 일반적으로 금속의 압출 및 인발 공정에서 볼 수 있으며 제품의 표면이 아닌 중심부에서 결함이 발생하여 육안으로 식별이 되지 않는다. 압출 및 인발 공정에서 FEM 해석을 통해 Chevron crack을 연구하고 예측하여 미연에 방지하고자 하는 사례는 많이 찾아볼 수 있다. [1],[2],[3]



[그림 2] 파단부 단면 육안확인

파손되지 않은 4번, 5번 Arm에 대해서도 단면을 절단하여 관찰한 결과 [그림 4]와 같이 파단된 Arm과 동일한 위치에서 선형결함이 발견되었다.

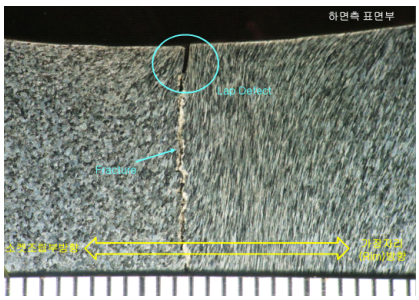


[그림 3] 비파단부 단면 육안확인

2.1.2 파손 단면 정밀 분석

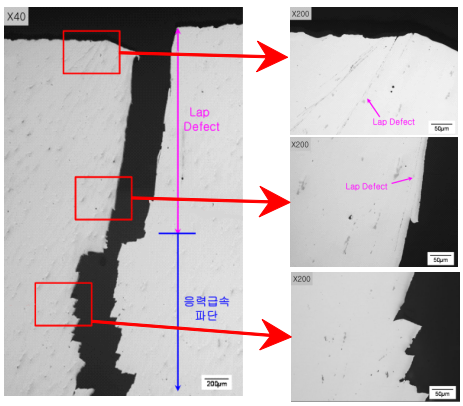
포판의 5개 Arm 중 파손된 1번 Arm과 파손되지 않은 5번 Arm 단면에 대해 정밀광학장비를 통한 관찰 및 분석을 실시하였다.

파손된 1번 Arm에 대해 단면절단 후 Macro조직 관찰 결과 파단발생부위 인근에서 소성변형된 조직이 관찰되었다. 소켓조립부 방향의 조직은 등축정조직이 관찰되나 Rim 방향의 조직은 길게 연신되어 있는 모양을 확인할 수 있었다.



[그림 4] 파단부 단면 정밀 분석

파단면에 대해 폴리싱 후 OM(Optical microscope) 미세조직 관찰 결과 하부 표면으로부터 매끈한 절단면 이후 거친 파단면이 이어지는 것을 관찰할 수 있었다. 파단면 외에 다른 부분을 관찰하더라도 Lap으로 인한 선형 결함이 발견되었다. 단조 공정 중 외력으로 인해 소재 간 간섭이 발생하면서 Lap이 발생하게 되고 외력의 크기와 간섭의 정도에 따라 결함의 깊이는 표면에서 얕게 발생하기도 하고 깊은 위치까지 발생하기도 한다. [4]

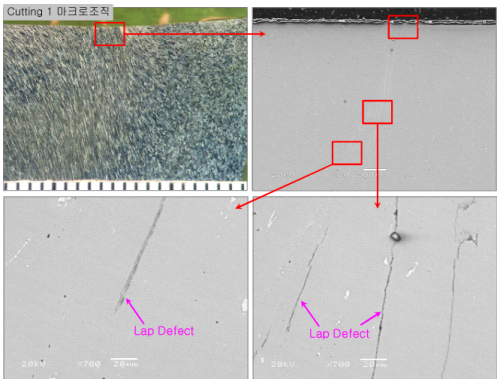


[그림 5] 파단면 OM 미세조직 관찰결과

2.2 포판 비파손부 형상 분석

2.2.1 비파손부 단면 정밀 분석

파손되지 않은 5번 Arm에 대해서도 단면 형상을 관찰하기 위해 Macro 조직 관찰을 실시하였다. 관찰결과 파단은 일어나지 않았으나 파단이 일어난 Arm과 동일 부위에서 Metal flow가 엉켜있는 형태가 관찰되었다. 마찬가지로 Metal flow가 엉켜있는 부분을 기점으로 소켓조립부는 등축정조직이 관찰되었고 Rim 부분으로는 길게 연신된 조직이 관찰되었다. Metal flow가 엉켜있는 부분을 SEM 미세조직 확인 결과 [그림 6]과 같이 다수의 Lap defect가 발견되었다.



[그림 6] 파단면 Macro 조직 관찰결과

2.3 포판 소재 및 물성치 분석

박격포판의 소재 및 물성치가 규격 미달일 경우 사격 시 파손현상이 발생할 가능성이 있다. 이를 확인하기 위해 파손된 포판의 소재 성분별 분석 및 시험편을 통한 물성치 시험을 실시하였다. 규격 상 재질은 KS D 6701 A7475이며 성분 분석 결과 [표 1]과 같다.

[표 1] 포판의 소재 성분 분석결과

구분	Al	Si	Fe	Cu	Mn
A7475	나머지	0.10↓	0.12↓	1.2~1.9	0.06↓
시료1	90.76	0.03	0.12	1.4	0.01
구분	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
A7475	1.9~2.6	0.18~0.25	-	5.2~6.2	0.06↓
시료1	2.2	0.22	-	5.3	0.02

또한 항복강도 및 인장강도의 규격 만족여부를 확인하기 위해 파손품(#84)을 이용하여 시험편을 제작하였다. 시험편 제작 규격은 ASTM E8 Subsize specimen을 따라 제작하였다. 물성 시험 결과는 [표 2]와 같다. 시험 결과 포판 소재 및 물성치는 규격을 만족하는 것으로 확인되었다.

[표 2] 포판 물성치 시험결과

구 분		항복강도 (N/mm^2)	인장강도 (N/mm^2)	연신율 (%)	비고
규 격		460 이상	530 이상	10 이상	KS D 6701 A7475-T651
시료2	1차	511.4	566.4	13.8	시험편 제작 규격 ASTM E8 Subsize specimen
	2차	470.9	560.3	14.8	
	3차	519.7	575.9	15.0	
	평균	500.7	567.6	14.5	

2.4 포판 생산공정 변경점 분석

박격포판 파손 현상의 원인을 분석하기 위해 단조, 단조열처리, 비파괴검사, 표면처리 과정 중 변경점을 분석하였다. 확인결과 특정로트 생산 중 단조사상공정에서 외곽부 단조 흐름개선을 위해 파손이 발생한 부위에 사상작업을 기존 대비 증대하여 적용하였다. 기존에는 표면흑피제거 수준으로 0.2mm 정도 사상작업을 실시하였으나, 해당로트에서는 4~5mm의 사상작업을 실시하였다.

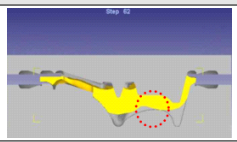
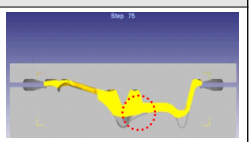
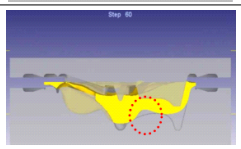
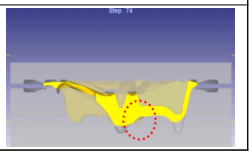
복잡한 형상의 단조공정에서 Lap 현상은 흔히 발견할 수 있다. 비 가공부위는 단조공정 간 사상으로 Lap부분을 제거하는 것이 일반적인 결함 제거방법이다. 그러나 과도한 사상으로 인해 정상적인 Metal flow가 진행되지 못해 결함이 발생한 것으로 추정된다. 일반적으로 단조 시 재료의 흐름에 방해가 있거나 비정상적으로 이동하게 되면 표면에서는 확인되지 않으나, 내부의 균열 현상이 발생하게 된다. [5]

2.5 포판 유동해석을 통한 파손분석

사상 깊이 증대에 따른 Metal flow의 차이를 분석하기 위해 Deform 프로그램을 사용하여 유동해석을 수행하였다. 동일 조건에서 표면 흑피제거 수준의 정상적인 사상을 실시한 모델과 사상 깊이를 증대하여 실시한 모델로 나누어 해석을 진행하였다. 그 결과, 정상적인 사상을 한 경우 형단조 시 재료가 미충진된 중공부가 소켓조립부로 열려있어 단조흐름이 자연스럽게 흐르는 것을 확인하였다. 단조 특성 상 공정 중 표면의 Lap은 흔히 형성되나 Metal flow를 따라 비교적 얕은 깊이에서 형성된다.

반면 사상 깊이를 증가하였을 경우 형단조 시 소켓조립부 방향이 먼저 닫히면서 미충진된 중공부가 소켓조립부로 이동하지 못하였다. 이로 인해 Metal flow가 엉키게 되어 깊은 Lap이 형성되는 것이 확인되었다. [6]

[표 3] Deform 프로그램을 이용한 유동해석 결과

구분	사상작업 후	단조 시 중공부 이동
정상적 사상		
사상 깊이 증대		

2.6 Lap 유무에 따른 파단영향성 검증

Deform 프로그램을 이용한 유동해석 결과 사상 깊이의 차이가 Metal flow에 영향을 주었고, 이로 인해 Lap 생성이 깊

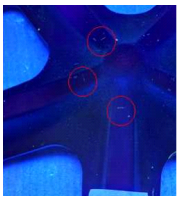
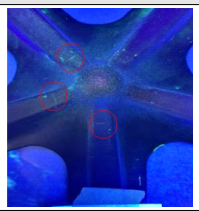
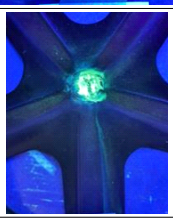
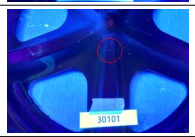
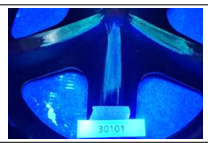
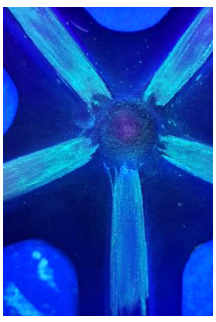
이 이루어지면서 포판의 파손이 발생한 것으로 추정하였다. 이를 검증하기 위해 1) Lap이 발견되는 포판, 2) Lap이 발견되지 않는 포판, 3) Lap이 발견되나 사상작업을 통해 제거한 포판을 준비하였다. 각각의 포판에 실사격 시 전달되는 충격량과 유사한 추를 낙하하는 Drop test를 실시한 후 형광PT검사를 실시하여 Lap의 유무가 포판 파단에 주는 영향성을 검토하였다.

Drop test의 기준은 사격 시 포판에 전달되는 충격력을 측정한 후, 유사한 충격력이 나오기 위해 000kg의 추의 낙하위치를 계산한 뒤 실시하였다.

Lap 발견 포판의 경우 Drop test 후 형광PT검사결과 Lap이 더욱 성장한 것을 확인할 수 있었다. Lap 미발견 포판의 경우 Drop test 후 형광PT검사결과 Lap이 발견되지 않았다. Lap을 제거한 포판의 경우 동일하게 실험한 결과 Drop test 후에도 Lap이 발견되지 않았다.

이를 통해 단조작업 시 완전하게 제거되지 않고 잔존해 있는 Lap이 Drop test 간 발생하는 충격력에 의해 Crack으로 성장하여 파손에 영향을 끼친다는 것을 확인하였다.

[표 4] Drop test 후 형광PT검사 결과

	Drop test 전	Drop test 후
Lap 발견 포판		
Lap 미발견 포판		
Lap 제거 포판	 Lap 발견  Lap 제거(사상)	

3. 결 론

본 연구에서는 박격포 사격 도중 포판 파손이 발생한 2문에 대해 제품의 단면, 소재, 공정, 설계 측면에서 각각 분석을 실시하였다.

제품 단면에서 Metal flow가 엉켜있는 현상을 발견할 수 있었고 파손부 주변으로 다수의 Lap defect를 확인할 수 있었다. 소재 분석 결과 규격과 동일함을 확인하였고 공정 간 변경점을 검토해본 결과 기존 작업 방식과 달리 더 깊은 사상작업을 실시한 점이 식별되었다.

Metal flow 개선을 위하여 기존 대비 사상작업을 더 깊이 실시하였으나 실질적인 개선 효과는 얻을 수 없었으며, 오히려 과도한 사상으로 인해 단조 시 미충진부의 흐름이 원활하지 못하게 되었다.

사상작업으로 인한 Metal flow의 영향성을 확인하기 위해 Deform 프로그램을 사용하여 유동해석을 수행하였다. 그 결과 사상깊이가 깊어지면 Metal flow가 원활하게 진행되지 못하면서 수직방향으로 Lap이 더 크게 발생되었으며, 제거되지 못한 Lap이 사격 충격량을 견디지 못하여 포판 파손으로 까지 진행된 것으로 추정되었다.

이에 대한 검증을 위해 Lap 존재하는 포판, Lap을 제거한 포판, Lap 없는 포판 3가지 시료에 대해 각각 Drop test를 수행하였고, 첫 번째 시료에서만 Lap이 성장하는 것을 확인할 수 있었다.

추가적으로 본 연구에서는 사격 충격량과 유사한 Drop Test로 검증을 수행하였으나, 이후 Lap을 완전히 제거한 포판에 대한 실제사격 결과 데이터가 확보된다면 분석 결과에 대한 신뢰성이 더욱 높아질 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] 황현석, “유한요소법을 이용한 4단 개방냉간압출시 발생하는 세브론 크랙에 관한 연구”, 한국소성가공학회지, 제26권 제 4호, pp. 210-215, 7월, 2017년)

[2] P.Petrov, "Prevention of lap formation in near net shape isothermal forging technology of part of irregular shape made of aluminium alloy A92618", Journal of Materials Processing Technology, Volume 177, Issues 1 - 3, pp. 218-223, July, 2006

[3] 김준형, “열간단조 플랜지 금형의 형상에 따른 충전 및 응력해석 : 알루미늄 열간단조 시”, 대한기계학회논문집 A권, 제34권 제4호, pp. 423-430, 2010

[4] F.C. Campbell, "Inspection of Metals-Understanding the basics", ASM International, pp. 370-371, 2013

[5] C. Hellier, "Handbook of Nondestructive Evaluation", McGraw Hill Professional, pp. 15-30, 2001

[6] T.Atlan, "Cold and Hot forging : Fundamentals and Applications", ASM International, pp. 197-198, 2004