

알루미늄 2519 판재의 충격저항성 평가에 대한 수치 해석적 연구

A Numerical Study on the Shock Resistance Test of Aluminium 2519 Plate

구 만 회* 우 호 길**
Koo, Man-Hoi Woo, Ho-Gil

ABSTRACT

In this paper, the acceptance criteria(Striking Velocities) for the Al2519 weldments have been developed. Dynamic impact simulation of Al2519 plate was achieved by using LS-DYNA, and predict the projectile velocity and the crack length. Also, Ballistic impact tests of Al2519 plate have been performed, and compared with analysis results. Critical velocities of Al2519 plate were acquired respectively, and striking velocities of Al2519 weldments were calculated. Present work data will be used by basic data in ballistic impact test for Al2519 weldments.

주요기술용어(주제어) : Ballistic Impact Test(방탄 충격성 평가), Critical Velocity(임계속도), Striking Velocity(충돌 속도), Projectile Velocity(탄속), Crack Length(균열길이), Effective Plastic Strain(유효소성변형률), 용접부(Weldments)

1. 머리말

지상 전투차량의 차체구조물은 일반적으로 금속 혹은 알루미늄 용접 구조물로 제작되어 있으며 현재까지 개발된 용접 이음 기술은 이음 효율적인 측면에서 모재 대비 다소 떨어지는 것이 사실이다. 따라서 이러한 구조적 취약부위인 용접부에 대한 신뢰성을 평가하기 위하여 차체 구조물 초기 설계 단계에서부터 제작완료 시점 이후까지 각종 구조시험(Structual Test)과 내구도 시험(Durability Test)을 통하여 용

접부에 대한 안정성을 평가하고 있다. 또한 용접 공정설계 초기단계에서 수행하는 용접공정(Welding Process)에 대한 신뢰성 평가를 위하여 미국 군사규격^[1,2]에서 별도로 정의한 절차에 의거하여 용접부에 대한 방탄충격성 평가(Ballistic Impact Test)를 수행하고 있으며 금속재 용접구조물인 경우 "H Plate"^[1] 시험을, 알루미늄 용접구조물인 경우에는 "I Plate"^[2] 시험을 수행하고 있다. 이는 초기 설계 단계에서 설정한 용접 공정을 적용하여 제작된 용접부 시편을 통해 충격을 가한 다음 용접부에 발생된 균열길이(Crack Length)를 가지고 용접공정에 대한 신뢰성을 평가하는 방법이다. 이를 통하여 용접 공정에 대한 신뢰성을 확보한 다음 선정된 용접공정을 가지고 차체 구조물 설계에 적용한다.

그러나 최근 들어 기존의 시험절차에 대한 규격^[2]

† 2004년 8월 5일 접수~2004년 9월 17일 심사완료

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

** 충남대학교(Chungnam National University)

주저자 이메일 : kmh9kmh@add.re.kr

이 취소되고 또한 이러한 기존규격이 용접성(Weldability)을 고려하지 않은 매우 가혹한 조건임을 나타내는 자료^[3]가 보고되고 있는 실정이다.

특히, 본 연구 대상인 알루미늄 2519와 같이 최근에 개발된 소재를 이용하여 전투차량에 적용할 경우, 용접부의 충격 저항성을 보강하기 위한 새로운 용접 공정 및 용접부 형상 개발과 함께 이에 상응하는 평가기준(Acceptance Criteria)을 새롭게 마련하여야 하는 상황에 이르고 있다. 새로운 평가기준을 마련하는 일은 수많은 시험과 분석을 토대로 얻어져야 하는 비용과 노력이 많이 소요되는 힘든 작업이다.

본 연구에서는 많은 시험 횟수와 비용을 줄이고 용접부에 대한 충격저항성 평가 기준을 마련하기 위한 기초 단계로서 충격에 의해 알루미늄 2519 모재(Base Plate)에 발생하는 균열진전 거동을 모사할 수 있는 동적 충격해석(Dynamic Impact Analysis) 모델을 개발하고 충격시험을 수행하여 개발한 모델의 신뢰성을 검증하였다. 이로부터 알루미늄 2519 소재 두께 변화에 따른 용접부의 충격저항성 평가 기준 속도를 도출하였다.

2. 수치해석

탄두(Projectile)의 변형 형상(Deformed Shape)과 알루미늄 판재에 발생하는 균열길이를 얻기 위하여 양해법(Explicit) 유한요소 소프트웨어인 LS-DYNA를 이용하여 동적충격해석을 수행하였다. 해석은 탄과 판재 간에는 접촉(Contact)을 정의하고 판재에 발생하는 균열을 모사하기 위한 모델링을 수행하였다.

가. 해석조건

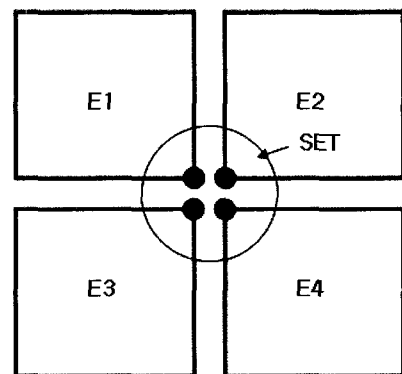
해석에 사용된 요소는 알루미늄 판재의 경우 셸 요소(Shell Element)를 사용하였으며 충돌체인 탄두의 경우 3차원 솔리드요소(Solid Element)를 사용하여 모델링하였다. 탄두와 탄체 결합 부분의 실제 형상은 매우 복잡하지만 탄두의 변형보다는 판재의 거동에 관점을 두었기 때문에 탄두의 충격량을 판재에 그대로 전달될 수 있도록 중량을 맞추어 단순히 모델링하였다. 판재에 대한 요소수는 가로 세로 각각 40

개씩 모델링 하였다. 판재의 강체 운동(Rigid Body Motion)을 없애기 위하여 판재의 네 모서리 부분의 자유도를 모두 구속하였으며 탄두의 속도(Projectile Velocity)를 적용하기 위하여 탄두의 절점을 셋(Set)으로 구성한 다음 초기속도(Initial Velocity)를 부여 하였다.

알루미늄 판재는 균열을 모사하기 위하여 각각의 요소가 공유하는 절점과 동일 위치에 새로운 절점을 생성하고 이들 절점은 요소가 공유하지 않도록 다음에 서로 묶어(Tied)주고 파손유효소성변형률(Effective Plastic Strain at Failure)을 정의한 다음 파손유효소성변형률이 어느 정도 이상이 되면 균열이 요소를 따라 전파되게 모델링하였다. 이상과 같이 모델링하기 위하여 별도로 작성된 프로그램을 이용하여 판재 전체에 나타나는 절점들의 셋(Set)을 만들고 이를 이용하여 해석 소프트웨어의 입력 데이터를 구성 하였다.

그림 1에 판재의 모델링에서 요소와 절점의 구성 관계를 나타내었다.

판재의 균열발생은 일반적으로 판재의 압연방향으로 발생되기 때문에 판재의 수평방향을 압연 방향으로 가정하고 균열 발생이 예상되는 절점의 파손유효소성변형률은 탄의 충돌 시 판재의 균열이 충격지점으로 부터 수평방향으로 1%로 적용하였다. 참고자료^[4]에서는 금속재인 경우 균열을 유발시키는 파손유효소성변형률이 대략 0.6%로 나타나 있으며 이러한 파손 소성 변형률을 결정하기 위하여 값을 변화시켜가면서 반복 해석을 수행하여 시험결과와 비교적 일치



[그림 1] 판재의 요소와 절점 셋(Set)

하는 경향이 나타나는 파손유효소성변형률 값을 선정하였다.

Al2519 판재의 동적 물성(Dynamic Material Property)을 얻기 위하여 홉킨슨 봉 시험(Hopkinson Bar Test)을 통하여 Johnson-Cook^[5] 모델에 대한 동적 물성을 구하였다. 해석에 적용된 Johnson-Cook의 항복모델의 이론식은 식 (1)과 같다.

$$\sigma_y = (A + B \overline{\epsilon}^{p^n})(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

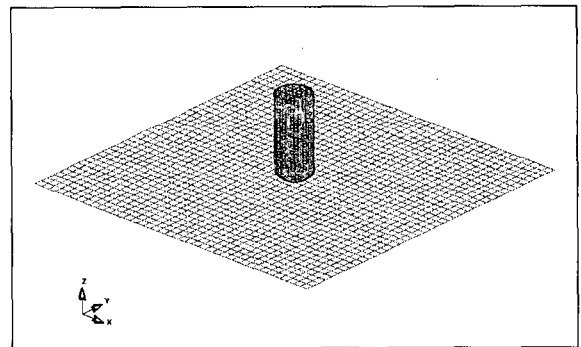
- 여기에서, A = Static Yield Stress
- B = Hardening Parameter
- n = Hardening exponent
- c = Strain Rate Parameter
- m = Thermal Softening Exponent
- $\overline{\epsilon}^p$ = Effective Plastic Strain
- $\dot{\epsilon}^*$ = $\frac{\overline{\epsilon}^p}{\epsilon_0}$, Effective Plastic Strain rate
- $T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$
- T_{melt} = Melting Temperature
- T_{room} = Room Temperature

식 (1)에서 나타난 바와 같이 Johnson-Cook 항복모델에 나타난 응력은 변형률 속도(Strain Rate)와 온도(Temperature)에 의한 항복으로 표현된다. 일반적으로 충격탄이 모재 두께 방향으로 진행되는 관통(Penetration) 모델인 경우 소성변형일(Plastic Deformation Work)에 의한 열연화 현상을 고려할 수 있지만 본 연구와 같은 비관통(Non Penetration) 모델에 대해서는 그 영향이 적기 때문에 열 연화 현상은 무시하였다.

따라서 온도의 영향이 배제된 단순화된 Johnson-Cook 항복모델을 사용하였으며 프로그램에서 이를 나타내 주는 *MAT-SIMPLIFIED-JOHNSON-COOK 재료 모델을 적용하였다. 또한 탄두에 대한 동적물성이 없기 때문에 시험에서 얻은 탄두의 변형 형상과 반복해석을 통한 변형 형상을 비교하고 재료물성 데

[표 1] 소재별 기계적 물성과 동적물성

물 성 \ 재 질	Base Plate	Projectile	
	Al2519	Al1100	Copper
Elastic Modulus(Pa)	7.24E10	6.9E10	1.2E11
Poisson's Ratio	0.33	0.33	0.33
Density(kg/m ³)	2,823	2,705	8,860
A(Pa)	4.3E8	4.5E7	4.0E8
B(Pa)	5.41E8	2.0E7	1.2E9
n	0.898	0.58	0.31
C	0.00395	0.016	0.025



[그림 2] 판재와 탄두의 유한요소 모델

이터베이스(Material data)^[6]를 참고하여 설정하였다. 해석에 적용된 알루미늄 2519 판재 및 충격탄두의 기계적 물성 및 동적 물성은 표 1에 나타내었다.

총 해석시간은 5ms까지 수행하였으며 탄의 거동이 대략 0.9ms까지 판재에 모든 충격량을 전달하고 그 이후에는 판재로부터 이탈된다. 또한 판재의 균열이 그 이상 진전되지 않는 것을 감안할 때 적용된 해석 시간은 타당함을 알 수 있다. 그림 2는 해석을 위한 유한요소모델 형상을 나타낸 것이다.

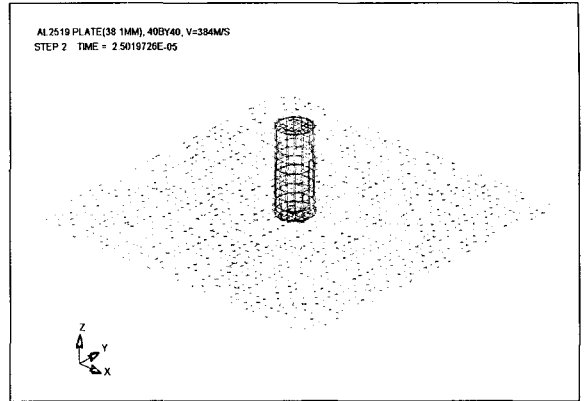
나. 해석결과

탄두의 변형은 본 해석의 관심 대상은 아니지만 탄두에 적용된 동적물성과 해석의 타당성을 입증하기 위하여 시간에 따른 탄두의 변형형상을 그림 3에 나

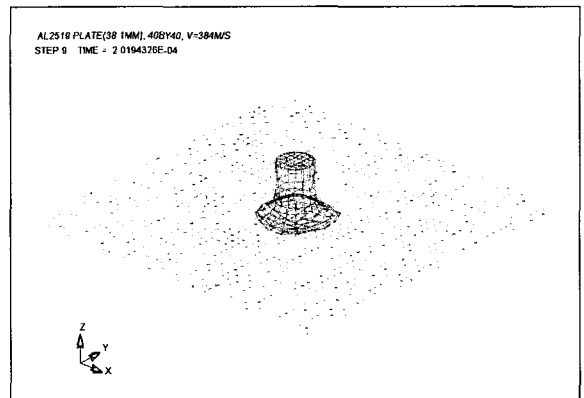
타내었다. 그림 3에서 나타났듯이 충돌 전에 초기 형상을 유지하다가 판재와의 충돌이 시작되면서 탄두의 높이는 줄어들고 반대로 직경은 늘어나는 버섯꼴(Mushroom)변형이 시작되는 과정을 0.1ms 단위로 나타내었다. 탄의 재질은 순수 알루미늄 계열인 Al1100으로서 변형이 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 대략 0.9ms 이전에 계속적으로 변형이 이루어지다가 0.9ms 이후에는 탄두의 변형형상은 더 이상 변화가 없음을 나타낸다.

시간에 따른 탄두의 거동은 그림 4와 같다. (a)는 탄두와 플레이트에 접촉이 발생하는 초기단계이며 (b)는 탄두와 플레이트의 접촉에 의해 변형이 발생하는 과정 나타내고 있다. (c)는 탄두가 플레이트에 모든 충격량을 전달하는 시점으로 시간은 대략 0.8ms 이다. 이때 탄두의 변형은 최대가 되며 그 이후로는

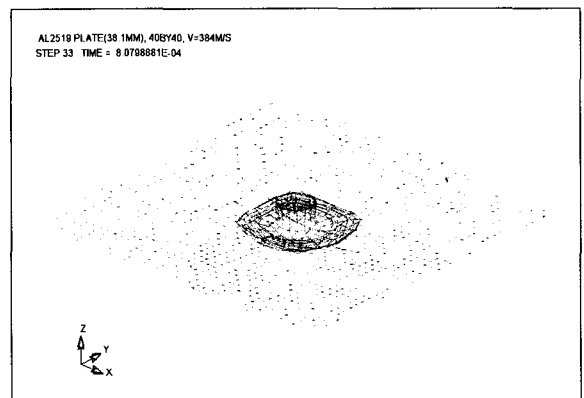
더 이상의 변형을 일으키지 않으며 탄두가 플레이트에서 분리되는 과정을 그림 (d)에 나타내고 있다.



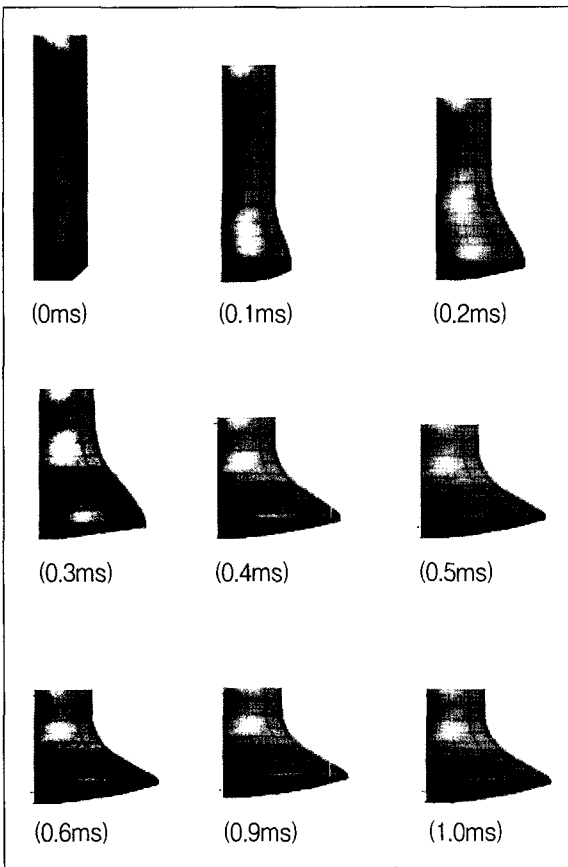
(a) 0.025ms



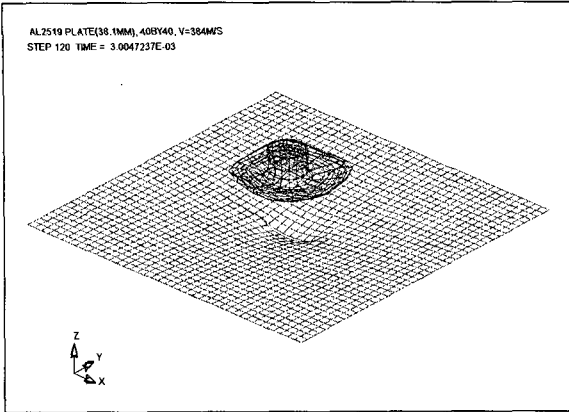
(b) 0.202ms



(c) 0.808ms



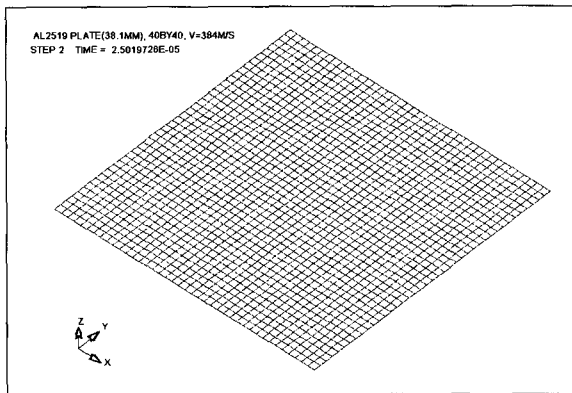
[그림 3] 시간에 따른 탄두의 변형형상



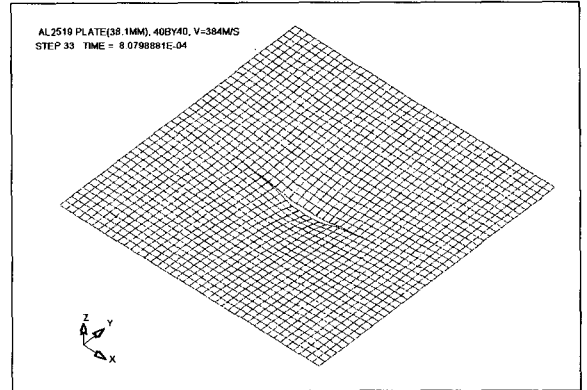
(d) 3.005ms

[그림 4] 탄두의 거동

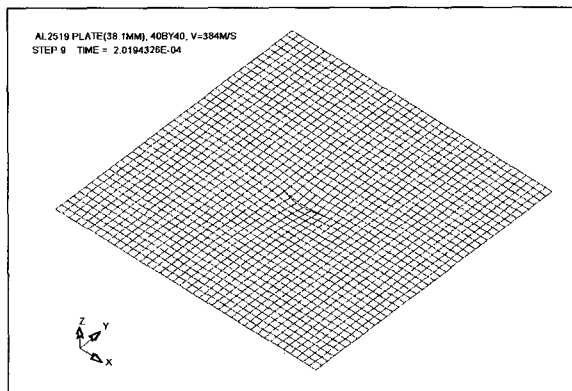
그림 5는 탄두를 제외한 시간별 판재의 거동을 나타내고 있다. (a)는 탄두와 플레이트의 초기 접촉단계로서 플레이트의 변형은 거의 없는 시점이다. (b)는 탄두가 플레이트에 충돌하면서 플레이트에 변형과 크랙이 발생되고 시간이 지남에 따라 플레이트의 변형이 점점증가하면서 마찬가지로 크랙이 진전됨을 알 수 있다. (c)는 탄두에 의해 플레이트에 발생하는 변형이 최대가 되는 시점으로 크랙의 발생 역시 최대가 됨을 나타내고 있다. (d)는 탄두가 플레이트로부터 분리되는 시점으로 (c)와 비교하여 변형의 정도는 다소 줄어드는 것으로 나타내고 있다. 이는 탄성변형으로 인하여 나타난 결과이며 크랙의 진전은 더 이상 없는 것으로 나타났다.



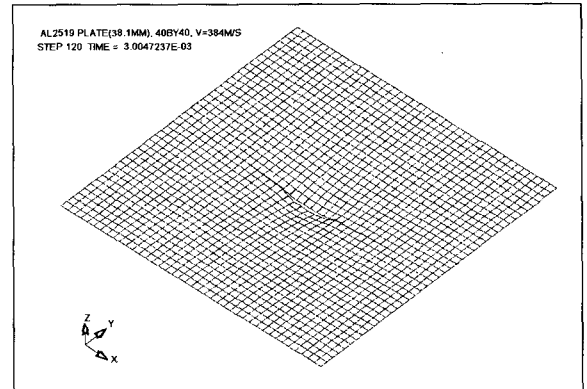
(a) 0.025ms



(c) 0.808ms

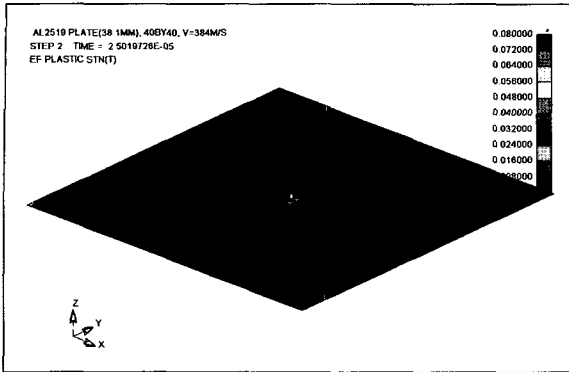


(b) 0.202ms

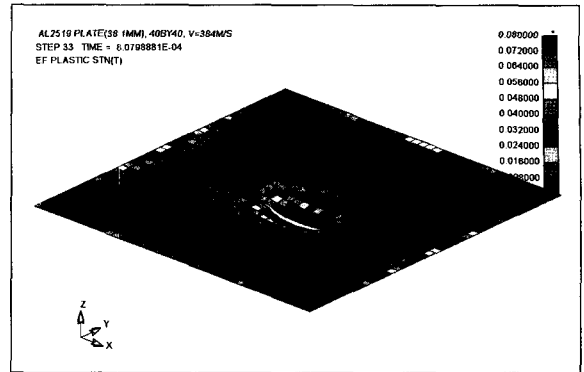


(d) 3.005ms

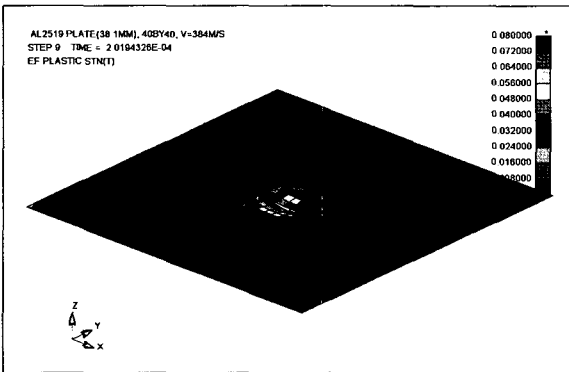
[그림 5] 플레이트의 균열발생 및 진전



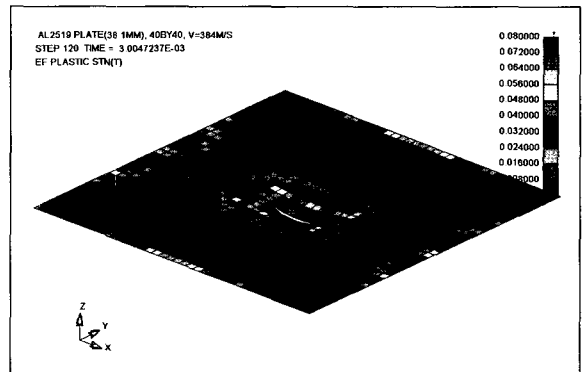
(a) 0.025ms



(c) 0.808ms



(b) 0.202ms



(d) 3.005ms

[그림 6] 플레이트의 유효소성변형률

그림 6은 판재에 발생하는 유효소성변형률을 나타내고 있다. (a)는 충돌 초기에 판재의 중심부에 발생하는 유효소성변형률을 나타내고 있으며 충돌부위에 변형률이 집중되는 것을 알 수 있다. (b), (c)는 시간이 지남에 따라 충돌초기에 발생되던 유효소성변형률의 분포 영역이 다소 확장되는 것을 나타내고 있다. 탄의 분리 이후에도 플레이트의 유효소성변형률은 누적되어 그림 (d)와 같이 유효소성변형률의 크기가 증가하는 것으로 나타났다. 전반적으로 균열이 발생하는 시점 이후부터는 균열 발생으로 인하여 더 이상의 하중을 전달할 수 없기 때문에 균열 주위의 요소에 대한 유효소성변형률은 작게 나타났으며 균열의 위치와 다소 떨어진 부위는 탄두가 접촉되어 하중을 전달하기 때문에 균열 주위의 요소는 소성 변형률이 크게 나타나 해석의 타당성을 알 수 있다.

[표 2] 플레이트의 속도별 예측균열길이

판재 재질/두께 (mm)	탄두 속도 (m/s)	균열길이 (mm)
Al2519/ 38.1	250	210
	300	280
	350	385
	384	420
	400	455
	450	525

이상과 같은 해석 과정을 통하여 알루미늄 2519

38.1mm 판재와 탄두의 속도를 변화시켜 가면서 해석을 수행하였으며 표 2는 해석 결과를 정리한 것이다.

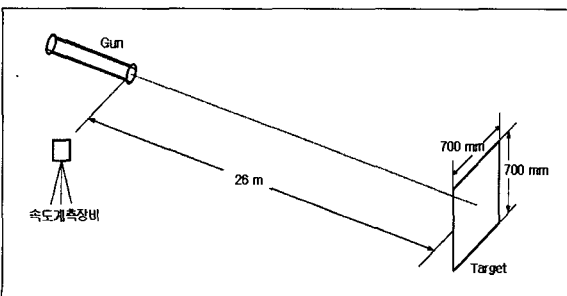
3. 실험

알루미늄 2519 판재의 동적 균열 발생 현상을 모사하기 위해 개발된 수치해석 모델의 타당성을 검증하고 이로부터 다양한 두께 변화에 대한 용접부의 충격저항성 평가 기준을 예측하기 위해 방탄충격시험(Ballistic Impact Test)을 수행하였다.

가. 시험장치

알루미늄 2519 모재에 대한 충격시험은 충격탄(Impact Projectile)을 발사시킬 수 있는 포(Gun), 시편을 견고히 지지할 수 있도록 제작된 시편고정치구, 탄속 측정을 위한 속도계측장비로 구성된다. 시편은 용접부가 없는 알루미늄 2519 판재로 크기는 700×700×38.1(mm)이며 포와 시편의 거리는 탄의 비행안정성과 탄의 요구 속도를 만족시키기 위하여 26m로 설정하였다. 그림 7은 시험 구성 장치의 개략도를 나타낸다.

시험은 먼저 시편을 고정치구에 견고히 고정시킨 후 탄의 충격지점(Impact Point)을 명확히 표기한 다음 포와 판재의 충격면이 서로 수직이 되도록 시편을 조정하고 포와 시편의 거리를 맞춘다. 탄속 측정을 위하여 탄속 측정 장비를 설치하고 요구 탄속을 맞추기 위하여 탄의 추진제의 양을 조절한 다음 시편에 발사하여 탄속을 계측하고 시편에 발생하는 균열길이를 측정한다.

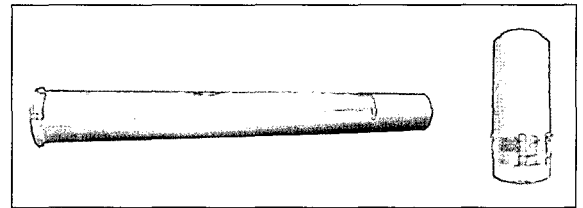


[그림 7] 충격시험을 위한 시험장치 개략도

나. 충격탄

미국 군사규격^[1]에서 제시한 알루미늄 2519 용접부의 충격시험에 사용되는 충격탄은 직경이 75mm로서 순수 알루미늄인 1100 소재로 규정되어있는 판재 가공탄(Plate-Proofing Projectile)이다. 그러나 국내에서 가용한 화기는 76mm 강선포이기 때문에 75mm급 충격탄과 동일 중량을 갖도록 설계 제작하여 본 시험에 사용하였다. 충격탄의 비행안정성을 위하여 구리(Copper)밴드를 부착하였다.

시험에 사용된 탄체 조립체 및 탄두의 형상은 그림 8과 같다.



[그림 8] 탄체 조립체 및 탄두 형상

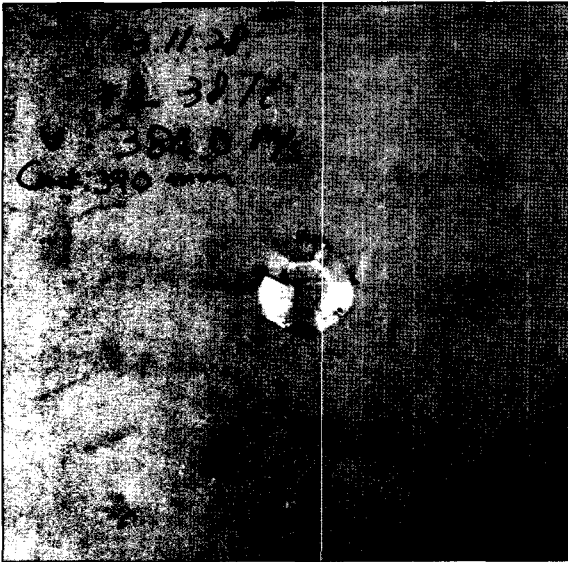
다. 시험결과

충격시험결과 탄의 충돌속도(Striking Velocity)와 모재에 발생하는 균열길이와 탄두의 충돌 전후의 변형 형상을 얻었다. 그림 9는 시편에 발생한 균열과 충돌 시 변형된 탄두의 형상을 나타낸다. (a)는 탄두가 직접 충돌하는 충돌면의 형상을 보여주고 있으며 원형의 소성변형이 발생된다. (b)는 충돌면의 후면으로서 발생크랙은 전면보다 약 50mm가량 크게 나타났으며 (c)는 충돌 후 탄두의 변형을 나타낸다. 변형 형상은 해석 결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다.

표 3은 알루미늄 2519 모재에 대한 충격시험결과 발생한 균열 길이를 나타낸다.

[표 3] 알루미늄 2519 모재 시험 결과

두께 (mm)	충돌속도 (m/s)	균열길이(mm)	
		전면	후면
38.1	384	390	440



(a) 충돌면(Impact Side)



(b) 충돌 후면(Backside)



(c) 탄두 변형 형상

[그림 9] 충돌 후 플레이트와 탄두 형상

4. 고찰

수치해석의 타당성을 입증하기 위하여 알루미늄 2519 판재 충격 시험 시 발생된 탄두의 변형 형상과 해석결과를 표 4에 나타내었다. 표 4의 결과는 탄두의 초기 높이를 H , 변형 후 높이를 h 로 표현하고 또한 탄두의 초기 직경을 R , 변형 후 직경을 r 로 표현하며 각각에 대한 결과를 무차원화 시킨 것이다. 시험결과와 비교하면 탄두의 변형형상은 해석치와 정확히 일치하지 않으나 비교적 유사한 경향을 나타낸다. 이는 탄두에 대한 정확한 동적 물성치를 물성 시험을 통하여 얻고 이를 해석에 적용하여야 하나 이들 재료에 대한 정확한 동적 물성 데이터가 없기 때문에 나타난 오차라 판단된다.

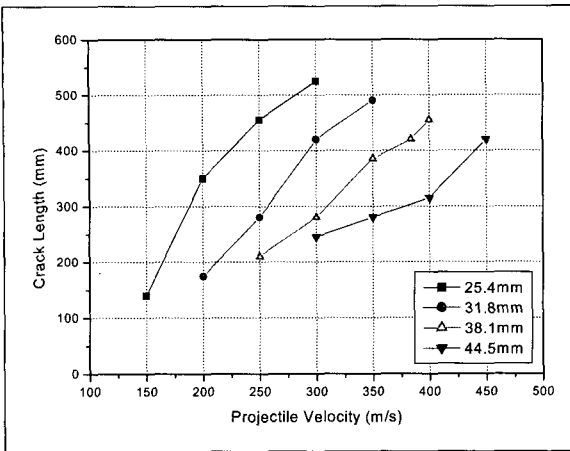
시험결과로 얻은 판재의 발생균열길이와 수치해석의 결과로 나타난 균열길이를 표 5에 나타내었다. 시험과 해석의 오차가 대략 20mm 정도 차이가 나타났는데 이는 해석상 하나의 요소가 17.5mm로 실제 균열길이를 정확히 나타내기에는 다소 크기 때문에 발생한 오차라 판단된다. 플레이트에 발생하는 크랙은 해석 요소의 크기를 작게 할수록 정확히 모사가 되겠지만 반복해석을 위한 해석시간을 고려하고 요소의 크기가 해석결과에 영향을 주지 않는 범위 내에서 요소의 길이를 17.5mm로 선정하였다.

[표 4] 시험과 해석의 충돌 전후 탄두 형상비교

	두께 (mm)	탄속 (m/s)	높이 비(h/H)	오차 (%)	직경 비(r/R)	오차 (%)
Experiment	38.1	384	0.45	-	2.7	-
Analysis	38.1	384	0.47	4.4	2.4	11.1

[표 5] 시험과 해석의 균열길이 결과 비교

	판재두께 (mm)	탄속 (m/s)	균열길이 (mm)	오차 (%)
Experiment	38.1	384	440	-
Analysis	38.1	384	420	4.5



[그림 10] 판재 두께 및 속도별 예측 균열길이

이상과 같이 해석에서 얻은 결과를 시험결과와 비교하여 해석의 신뢰성을 입증할 수 있었으며 이를 바탕으로 판재 두께와 탄속을 변경시켜가면서 해석을 수행하여 판재에 발생하는 균열길이를 얻었다.

해석에 이용된 판재의 두께는 각각 25.4, 31.8, 38.1, 44.5mm이며 속도변화에 대한 해석의 결과로 얻어진 예측된 균열의 길이를 그림 10에 나타내었다.

그림 10에서 가로축은 탄의 속도로서 판재 두께별로 150~450m/s의 범위에서 반복 해석을 수행하여 나타난 결과이다. 세로축은 예측된 균열길이를 나타내고 있다. 대략적으로 예측된 균열길이는 주어진 속도범위에서 판재 두께에 따라 다르지만 140~530mm의 범위에 있는 것으로 예측되었다.

그림 10에서 나타났듯이 전반적으로 탄의 충돌속도가 증가할수록 발생하는 균열의 길이도 어떠한 특이한 경향을 보이지 않고 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 특히 판재 두께가 증가할수록 그래프의 기울기가 완만해지므로 속도에 대한 크랙길이의 민감도는 판재 두께가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 이상과 같이 각 판재 두께 및 속도변화에 대하여 판재에 발생하는 균열길이를 얻었으며 얻어진 균열길이를 이용하여 판재의 임계속도를 구하고자 한다.

임계속도(Critical Velocity)란 균열이 없는 건전한 모재에 충격탄두의 충돌에 의해 12인치 혹은 그 이상의 균열을 유발시키는 탄두의 속도로 정의된

[표 6] 두께별 임계속도 및 용접부 충돌속도

재질	판재두께 (mm)	모재의 임계속도 (m/s)	용접부의 충돌속도 (m/s)
Al2519	25.4	190	171
	31.8	259	233
	38.1	313	282
	44.5	390	351

다. 따라서 최소 균열길이 12인치를 적용한 임계속도를 얻고 이를 이용하여 알루미늄 2519 용접구조물의 충격성 평가를 위한 용접부 충돌속도를 계산하였다.

용접부 충돌속도는 용접부의 구조적 취약성을 고려하여 참고문헌^{[3][8]}에서도 임계속도의 90%를 제시하고 있다. 그러나 이렇게 적용된 값이 많은 시험을 통하여 획득된 통계치 이거나 혹은 정량적으로 분석된 값을 나타내는 자료는 보고되지 않고 있어 적용된 값이 기존 용접부 충격시험에서 수행되었던 경험에서 획득된 경험치라 판단된다. 이들 관계에 대한 분석은 추후 과제로 남겨두고 본 연구에서도 임계속도의 90%를 적용하여 용접부 충돌속도를 계산하였다. 표 6은 판재 두께별 모재의 임계속도와 계산된 용접부의 충돌속도를 나타낸다.

이상과 같이 시험과 수치해석을 통하여 나타난 균열길이를 비교 검토하여 해석의 신뢰성을 입증하였고 최종적으로는 각 판재 두께별 임계속도 및 용접부 충돌속도를 도출하여 알루미늄 2519 용접부 충격시험을 위한 기초자료를 획득하였다.

추후, 기존 규격 및 용접부 충격시험에 대한 관련 자료와 본 연구에서 이루어진 해석절차 등의 정량적 관계를 도출한다면 많은 시험을 통하지 않고서도 알루미늄 2519 용접부 충격시험에 대한 새로운 허용한계(충돌속도)를 도출할 수 있을 것으로 예측된다.

5. 맺음말

알루미늄 2519 용접구조물에 대한 용접부 충격속도를 구하기 위하여 탄과 모재에 대한 동적 충격 수치 해석을 수행하고 해석의 타당성을 입증하기 위하여 모재에 충격시험을 수행하여 그 결과를 비교 분석하였다. 알루미늄 2519 모재 두께별 임계속도를 구하고 임계속도를 이용하여 추후 용접부 충격시험에 적용될 충돌속도를 계산하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 동적충격 수치해석을 통하여 균열의 발생 및 진전 거동을 분석하였고 판재에 발생하는 균열의 길이를 정량적으로 산출하였으며 시험결과와 비교하여 해석의 타당성을 입증하였다.
- 2) 알루미늄 2519 모재에 대한 임계속도를 두께별 판재에 대하여 얻었다. 이를 바탕으로 용접부 충돌속도를 도출함으로써 용접부 충격시험에 적용할 수 있는 기초자료를 구축하였다.
- 3) 추후 더욱더 신뢰성 있는 수치해석을 위해서는 최소한의 시험데이터, 요구 균열길이에 대한 세부분석, 적절한 동적물성의 확보, 충돌속도 계산을 위한 정량적 근거확보, 세밀한 수치해석 모델링 등이 수행된다면 알루미늄 용접부에 대한 새로운 평가기준을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] MIL-STD-1941, "Metal-Arc Welding of Homogeneous Armor", 1991.
- [2] MIL-STD-1946, "Welding of Aluminum Alloy Armor", 1998.
- [3] Scott M. G, "Mechanical and Ballistic Data for Al2519 Plate, Forgings, and Weldments", ADA388407, 2001.
- [4] 이정민 외, "용접부 충격실험용 40mm Shock Slug 개발", GWSD-419-950983, 국방과학연구소, 1995.
- [5] Johnson G. R, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures", 7th Int. Symp. on Ballistics, The Hague, Netherlands, 1983.
- [6] "MSC. Mvision materials software", MSC Software Corporation.
- [7] MIL-P-12235, "Projectiles, Plate-Proofing(For Impact or Shock Testing)", 1976.
- [8] Thomas. D. W, "Weldability of 2219-T851 and 2519-T87 Aluminum Armor Alloys for Use in Army Vehicle Systems", ADA184296, 1987.
- [9] "LS-DYNA Keyword User's Manual", Livemore Software Technology Corporation, 2001.