

알루미늄 2519 용접부의 충격거동에 관한 연구

A Study on the Shock Behavior of Aluminium 2519 Weldments

구 만 회* 이 창 현* 김 학 인* 우 호 길**
 Koo, Man-Hoi Lee, Chang-Hyun Gimm, Hak-In Woo, Ho-Gil

ABSTRACT

In order to evaluate the credibility of the welded joint design for combat vehicle using Al2519, the numerical analysis for the joint model has been studied and the results are compared with the experimental works by the impact projectiles. The numerical approach using LS-DYNA involves the process of the crack initiation and propagation as well as the applications of the failure criteria for both the ductile and brittle failures. The good agreement between the numerical and experimental works are proved.

주요기술용어(주제어) : Ballistic Impact Test(방탄 충격성 평가), GMAW(Gas-Metal Arc Welding, 가스메탈 아크 용접), HAZ(Heat Affected Zone, 열영향부), Brittle Failure(취성파괴), Ductile Failure(연성파괴), Crack Length(균열길이), Effective Plastic Strain(유효소성변형률), 용접부(Weldments)

1. 머리말

전투차량의 차체는 전통적으로 기동성능(Mobility Performance)과 방호성능(Ballistic Performance)을 동시에 만족시키기 위하여 금속재 혹은 알루미늄 구조물로 제작되어 왔다. 최근에는 방호성능을 만족시키면서 동시에 기동성능을 향상시키기 위한 경량화를 목표로 고 강도 신형 금속재나 알루미늄 소재, 복합재(Composite Material)와 같은 첨단 소재를 사용하여 구조물을 제작하고 있는 추세이다. 이들 개발된 소재를 적용하기 위해서는 소재 혹은 부품단위의 성

능평가는 물론 이들 소재를 이용하여 구조물을 제작하고 제작된 구조물에 대하여 성능평가를 통한 신뢰성 확보도 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히 금속재나 알루미늄 소재의 경우 구조물을 제작하기 위한 용접이음(Weld Joint) 기술은 소재 개발과 더불어 발전시켜야 하는 큰 과제이다.

이러한 용접이음 기술 개발의 일환으로 구조물의 초기설계 단계에서부터 용접에 대한 공정설계를 수행하고 개발된 용접공정(Welding Process)에 대한 신뢰성 평가를 위하여 미국 군사규격^[1]에서 별도로 정의한 절차에 의거하여 용접부에 대한 방탄충격성 평가(Ballistic Impact Test)를 수행하고 있으며 알루미늄 용접구조물인 경우에는 "I Plate"^[1] 시험을 수행하고 있다. 이는 초기 설계 단계에서 설정한 용접 공정을 적용하여 제작된 용접 시편을 통해 충격을 가한 다음 용접부에 발생된 균열길이(Crack Length)를

† 2004년 11월 30일 접수~2005년 3월 17일 게재승인
 * 국방과학연구소(Agency for Defense Development)
 ** 충남대학교(Chungnam National University)
 주저자 이메일 : kmh9kmh@add.re.kr

가지고 용접공정에 대한 신뢰성을 평가하는 방법이다. 이를 통하여 용접 공정에 대한 신뢰성을 확보한다. 다음 선정된 용접공정을 가지고 구조물 설계에 적용한다.

본 연구에서는 전투 차량의 차체 구조물 설계 및 제작에 적용하기 위한 용접공정의 신뢰성 평가를 위하여 알루미늄 2519 용접부에 발생하는 균열진전거동 (Crack Propagation Behavior)을 모사할 수 있는 동적 충격(Dynamic Impact) 모델을 설정하여 수치해석을 수행하고 동일 조건하에서의 용접부 충격시험을 통하여 설정된 모델의 신뢰성을 검증하였다.

2. 용접 설계

가. 모재 및 용접봉

모재(Base Material)는 알루미늄 2519 판재이며 용접성을 고려하여 용접은 모재와 동종계열인 알루미늄 2319 용접봉(Electrode)을 사용하였다. 모재 및 용접봉에 대한 화학적 조성은 표 1에 나타내었으며 규격에서 요구하는 최소한의 기계적 물성치는 표 2와 같다.

[표 1] 모재 및 용접봉의 화학적 조성^[2,3]

Composition (Max.)	Base Material (Al2519)	Electrode (Al2319)
Si	0.25	-
Fe	0.3	-
Cu	6.4	6.3
Mn	0.5	0.3
Mg	0.4	-
Ti	0.1	0.06
Zn	0.1	-
Zr	0.25	0.18
Va	0.15	0.1
Al	Remainder	Remainder

[표 2] 모재 및 용접봉의 기계적 성질^[2,3]

구 분	Tensile Strength (GPa)	Yield Strength (GPa)	Elongation (%)
Base Material (Al2519)	0.429	0.383	10
Electrode (Al2319)	0.240	-	-

나. 용접조건

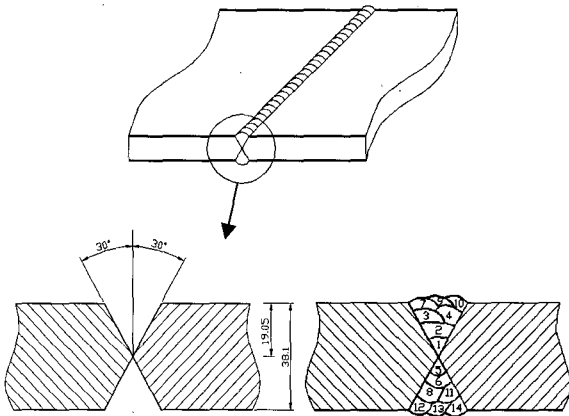
용접방법은 가스-메탈 아크 용접(GMAW : Gas-Metal Arc Welding)이며 최적의 용접조건(Welding Condition)을 찾기 위하여 각각의 항목에 대하여 다양한 조건을 분석하고 시험하였으며 최종적으로는 표 3과 같은 용접 조건을 설정하였다. 이를 적용하여 용접부 충격시험에 사용하기 위한 용접 구조물 시편을 제작하였다.

[표 3] 용접조건

항 목	적 용 값
Weld Type	GMAW
Shielding Gas	75% He ~ 25% Ar
Arc Voltage(V)	26
Current(A)	210 ~ 250
Weld Speed(mm/s)	7
Interpass Temp.(°C)	65 이하
Gas Flow(ℓ/min.)	25

다. 용접부 형상

용접부는 Double-V 형상으로 판재의 아래 및 윗면에 "V"형 홈을 가공하였다. 용접부의 치수 및 용접 순서는 그림 1에 나타내었다. 용접 순서는 초기 4 Pass 이후 뒷면을 치핑(Chipping) 등을 통하여 이물질을 제거하고 단면의 형상을 고르게 한 다음 후면 용접을 실시하였다.



[그림 1] 용접부 치수 및 용접순서

3. 이론분석

용접부는 크게 용접봉이 용착되어 있는 용착 금속부(Filler Metal Zone), 용착금속과 모재 사이의 열영향부(Heat affected Zone), 모재부(Base Material Zone)와 같이 나뉘어져 있으며 이들 각 영역에서의 기계적 혹은 물리적 특성과 거동이 매우 다양하게 나타난다. 이들에 대한 특성을 수치해석에 적용하기 위해서는 각 영역의 물성치 및 분포 크기 등이 적용되어야 하지만 실제적으로 실험에 의해 이들을 얻는 것은 매우 어렵다. 이러한 수치해석상 어려움 때문에 용접부에 대한 작용 하중을 분석하고 이를 적용하여 용접부의 신뢰성을 평가하는 방법이 널리 사용되고 있다.^[4~6] 따라서 본 연구에서도 용접부 단면에 작용하는 하중을 근거로 용접부 파손을 정의하는 방법을 사용하기로 한다.

가. 용접부 파손기준

용접부에 대한 파손기준(Failure Criteria)은 크게 변형률을 기초로 한 연성파괴(Ductile Failure)와 응력을 기초로 한 취성파괴(Brittle Failure)로 구분할 수 있다. 변형률을 이용한 연성파괴는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{eff}^p = \epsilon_{fail}^p \quad (1)$$

여기에서,

ϵ_{eff}^p = Effective Plastic Strain

ϵ_{fail}^p = Effective Plastic Strain at Failure

용접부에 대한 취성파괴를 모사하기 위하여 Feder^[4]등은 용접부 단면상에서 수직응력과 전단응력의 조합으로 표현되는 “ β -공식(β -Formula)”을 식 (2)와 같이 제안하고 있다. 용접단면에 대한 응력상태는 그림 2와 같다.

$$\sigma_c = \beta \sqrt{\sigma_n^2 + 3(\tau_n^2 + \tau_t^2)} \geq \sigma_f \quad (2)$$

여기에서,

σ_c = Weld Stress

σ_n = Normal Stress(Axial+Bending)

τ_n = Shear Stress in Direction of weld
(Local y)

τ_t = Shear Stress Normal to Weld
(Local z)

σ_f = Failure Stress

β = Constant

식 (2)의 β 는 맞대기이음(Butt Joint)이나 필렛이음(Fillet Joint)과 같이 용접부의 기하학적 형상 차이에 의해 나타나는 용접부의 강도변화를 보상해 주기 위한 상수로서 Soetens^[5]는 식 (3)과 같이 표현하고 있다.

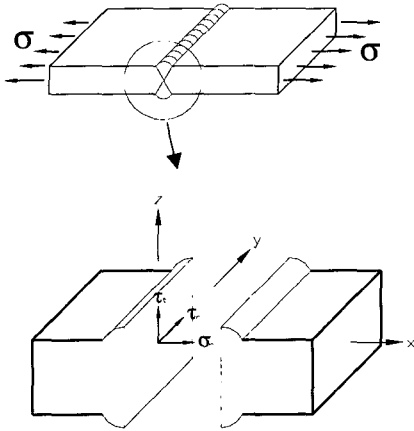
$$\beta = \frac{\sigma_{uw}}{\sigma_c / \beta} \quad (3)$$

여기에서,

σ_{uw} = Ultimate Strength of Weld Metal

σ_c / β = Actual Strength of Test

본 논문에서 제시된 맞대기 이음의 경우 필렛 이음과는 달리 기하학적 형상변화는 없으므로 시험결과로 얻은 용접강도를 적용하여 β 값은 1.0으로 정의하였다.



[그림 2] 용접 단면의 응력상태

나. 구성방정식

고속으로 충돌하여 변형을 일으키는 충돌체와 피 충돌체의 동적 변형 거동을 적절히 모사하기 위하여 Johnson-Cook^[7] 모델의 구성방정식을 적용하였으며 이 모델에 대한 구성방정식의 형태는 식 (4)와 같다.

$$\sigma_y = (A + B \overline{\epsilon}_p^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (4)$$

여기에서,

- A = Static Yield Stress
- B = Hardening Modulus
- n = Hardening Exponent
- $\overline{\epsilon}_p$ = Effective Plastic Strain
- C = Strain Rate Coefficient
- m = Thermal Softening Exponent
- $\dot{\epsilon}^*$ = $\frac{\dot{\epsilon}_p}{\epsilon_0}$, Effective Plastic Strain Rate
- ϵ_0 = Reference Strain Rate
- $T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$
- T_{melt} = Melting Temperature
- T_{room} = Room Temperature

식 (4)에서 나타난 바와 같이 Johnson-Cook 항복 모델에 나타난 응력은 변형률 속도(Strain Rate)와 온도(Temperature)에 의한 항복으로 표현된다. 그러나 일반적으로 충돌체가 모재의 두께 방향으로 진행하는 관통(Penetration) 모델인 경우 소성변형일 (Plastic Deformation Work)에 의한 열연화 (Thermal Softening) 현상을 고려할 수 있지만 본 연구와 같은 비관통(Non Penetration) 모델에 대해서는 그 영향이 적기 때문에 열 연화 현상은 무시하였다.

홉킨슨 봉 시험(Hopkinson Bar Test)을 통하여 피 충돌체인 알루미늄 2519 판재에 대한 Johnson-Cook 모델의 상수값을 획득하였다. 또한 충돌체의 물성은 재료물성 데이터베이스(Material Database)^[8]를 참고하여 표 3과 같이 설정하였다.

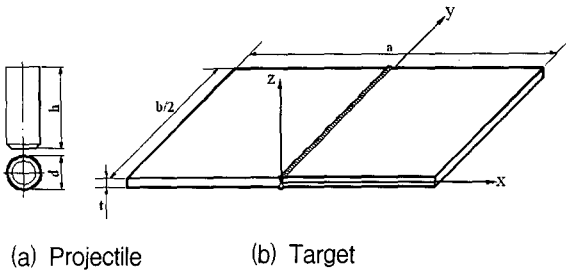
[표 4] Jonhson-Cook 모델의 재료상수

재질 물성	Base Plate	Impactor	
	Al2519	Al1100	Copper
A (GPa)	0.430	0.045	0.4
B (GPa)	0.541	0.020	1.2
n	0.898	0.58	0.31
C	0.00395	0.016	0.025

4. 수치해석

가. 해석 모델

해석모델은 크게 충돌체와 피 충돌체로 구성되어 있다. 충돌체는 순수 알루미늄 재질과 구리가 조합된 형상의 탄두(Projectile)이며 피 충돌체인 표적(Target)은 두 장의 알루미늄 2519 판재가 서로 맞대기 용접되어 있는 형상이다. 충돌체와 피 충돌체의 기하학적 형상 및 치수를 그림 3과 표 5에 나타내었다. 표적은 그림에서 x-z 평면상의 대칭(Symmetry)을 고려해 1/2형상만 나타내었다.



[그림 3] 총돌체와 피 총돌체의 형상

[표 5] 총돌체와 피 총돌체의 크기

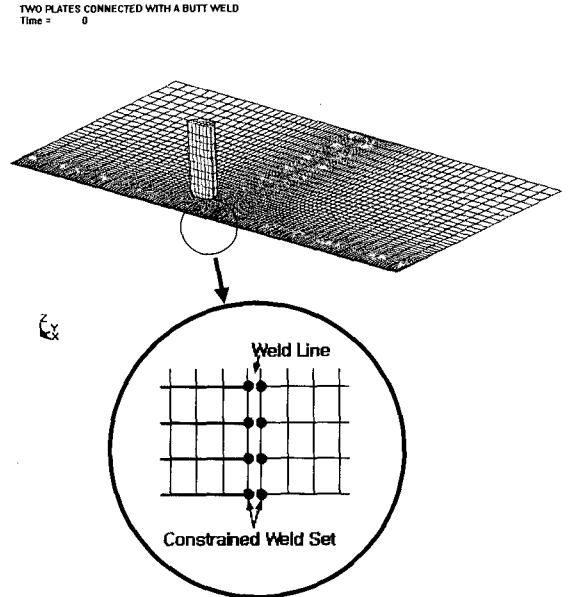
	a (mm)	b (mm)	t (mm)	h (mm)	d (mm)
Projectile	-	-	-	184	76
Target	1,220	1,220	38.1	-	-

나. 유한요소 모델

유한요소 모델은 모델의 대칭성을 고려하여 용접선(Weld Line)과 수직 방향으로 1/2 부분만 모델링하였다. 총돌체인 탄두는 솔리드 요소(Solid Element)를 사용하였고 피 총돌체인 판재는 셸 요소(Shell Element)를 사용하였다. 탄두와 판재의 접촉이 발생하는 부위와 용접부에서 크랙 발생이 예상되는 부위의 거동을 더욱 정확히 나타내기 위하여 이 부분의 요소를 더욱 세밀히 분할하였다. 탄두와 판재는 서로 접촉(Contact)을 정의하여 모델링하였으며 용접부의 파손을 모사하기 위하여 용접선은 별도의 셋(Set)을 구성하였다. 그림 4는 탄두와 표적에 대한 유한요소 모델 형상과 용접부에 대한 요소와 절점의 구성 관계를 나타낸다.

시험 결과와의 비교를 위하여 시험조건과 유사하게 판재의 3개의 끝 면을 모두 구속하였으며 탄두와 판재의 대칭되는 부위는 대칭조건을 적용하였다. 또한 탄두의 하중조건은 419mm/ms의 초기속도를 부여하였다.

용접부의 파손은 전절에서 나타난 바와 같이 변형률에 의한 연성파괴와 응력에 의한 취성파괴 중에서 두 값 중의 어느 한 값이라도 임계값(Critical Value)에 도달하였을 경우 파손이 발생되도록 하였으며 파



[그림 4] 유한요소 형상과 용접부 모델링

손이 발생된 셋에 대해서는 더 이상 하중을 지지할 수 없도록 모델링 되어있다. 표 6은 용접부에 대한 시편시험을 통하여 얻은 결과로서 수치해석에 적용된 변형률의 임계값과 용접부 응력계산을 위한 용접부 단면 치수(Dimension)를 나타낸다.

[표 6] 용접부 물성 및 크기

	σ_f (Gpa)	ϵ_{fail}^p	길이 (mm)	두께 (mm)
용접부	0.3083	0.0374	2~37	42

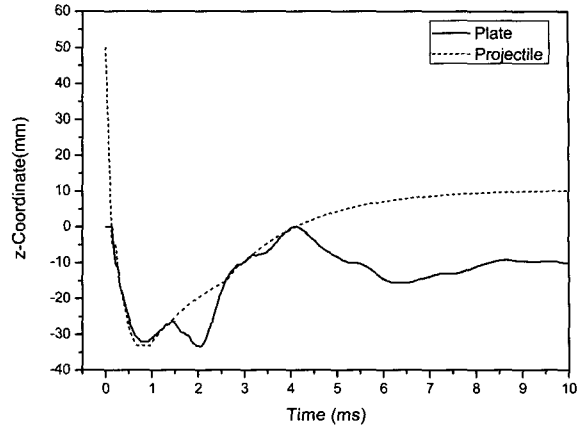
용접단면의 두께는 용접 덧살의 효과를 고려하여 42mm로 설정하였으며 요소 당 용접 길이는 요소의 크기를 고려하여 총돌지점에서는 최소 2mm, 총돌지점과 멀리 떨어진 위치에서는 최대 37mm로 설정하였다.

총 해석시간은 탄두의 변형 형상과 탄두의 분리 이후에도 발생하는 탄과 판재의 거동을 분석하기 위하여 10ms까지 충분히 길게 설정하였다. 해석은 양해법(Explicit) 유한요소 소프트웨어인 LS-DYNA를 사용하였다.

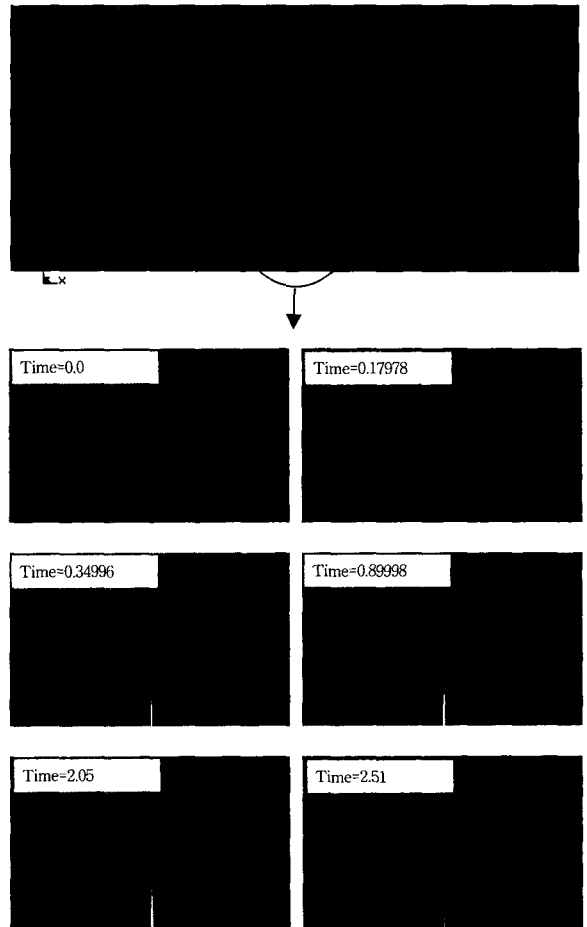
다. 해석결과

시간에 따른 탄두와 판재의 변형 형상은 그림 5와 같다. 충돌 전에 초기 형상을 유지하다가 판재와의 충돌이 시작되면서 탄두의 높이는 줄어들고 반대로 직경은 늘어나는 버섯꼴(Mushroom)변형이 시작되는 과정을 나타내었다. 대략 0.1ms 시점에서 탄두와 판재의 접촉이 발생되어 탄두와 판재의 변형이 시작되고 대략 0.9ms 시점에서 탄두와 판재의 변형이 최대가 되며 그 이후로는 탄두가 판재에 모든 충격량을 전달하고 더 이상의 변형 없이 판재로부터 분리되는 과정을 나타낸다.

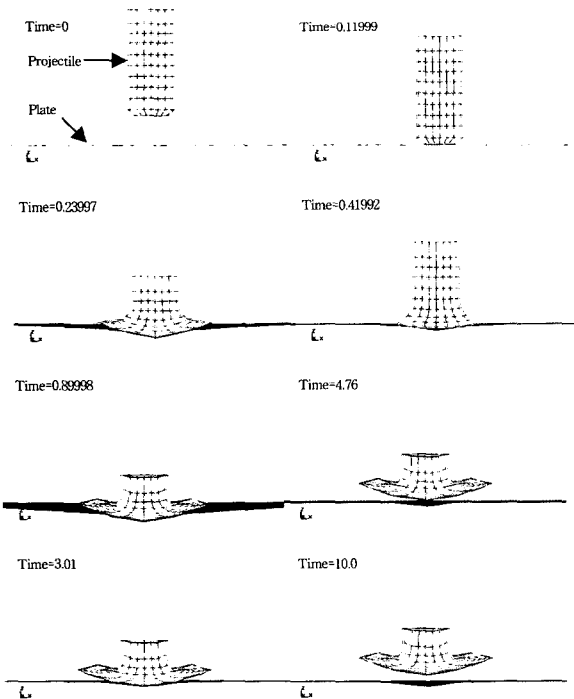
그림 6은 탄두와 판재간의 접촉부 중심 절점에 대한 시간별 z방향으로의 좌표를 나타낸다. 실선으로 표시된 부분은 판재의 절점, 점선으로 표시된 부분은 탄두의 절점에 대한 이동 및 변형 경로를 나타낸다. 탄두와 판재는 초기거리 50mm에서부터 이동하여 대략 0.12ms 지점에서 접촉이 발생된다. 0.12ms부터 판재와 탄두가 서로 접촉하여 같이 변형을 일으키는 단계이며 0.9ms에서 탄두는 최대로 이동된 상태이고 그



[그림 6] 판재와 탄두의 변형거동 이력



[그림 7] 판재의 변형거동과 균열진전 이력

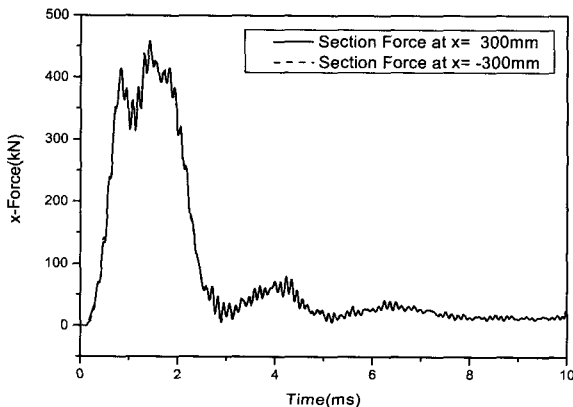


[그림 5] 탄두의 변형거동 이력

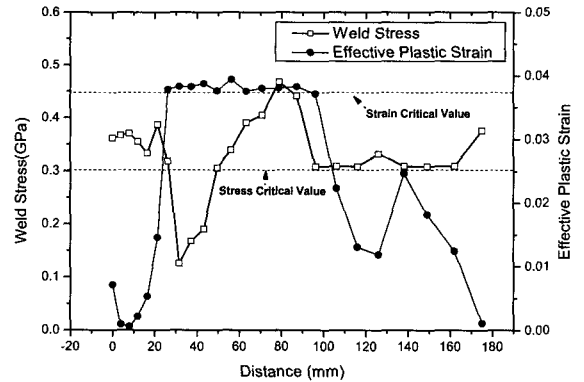
이후로는 판재와 서로 분리되는 이력을 보여준다. 판재의 경우 접촉 초기부터 전반적으로 탄두와 같이 이동하다가 균열발생으로 인하여 탄두가 분리되는 시점에서부터 다시 아래 방향으로 이동하는 국부거동이 나타남을 알 수 있다.

그림 7은 탄두 충돌에 의한 판재의 변형 거동과 균열발생 및 진전 이력을 나타내고 있다. 0.18ms 이전까지는 탄두만 이동되고 판재와의 접촉이 없는 시기이고 그 이후에는 탄두의 충돌로 인하여 판재의 변형과 동시에 크랙이 발생됨을 알 수 있으며 시간이 경과할수록 판재의 균열이 크게 진전하는 것을 나타내고 있다. 2.51ms 시점에서는 균열이 다소 줄어든 것 같이 보이지만 판재의 상하 방향으로의 변위 거동으로 인하여 균열이 단지 작게 보이는 것뿐이며 실제적으로는 균열이 더 크게 진전된 상태이다.

그림 8은 용접선을 기준으로 각 판재의 중심인 좌우 ±300mm 지점의 단면을 설정하고 탄두가 초기 운동을 시작한 시점부터 접촉이 발생하는 시점, 판재의 균열 발생으로 인한 하중 변화 시점, 마지막으로 탄두가 분리되어 더 이상 하중 전달이 없는 하중이력(Load History)을 나타내고 있다. 단면 하중이 0인 구간은 탄두와 판재가 접촉되기 전인 탄두의 강제운동 구간이며 접촉이 발생하는 시점부터 하중의 증가가 시작된다. 어느 정도 하중의 증가가 시작되다가 갑자기 하중의 변화가 심해지는 구간은 판재의 균열이 발생하는 시점에 순간적으로 하중이 낮아지는 과정이 반복적으로 나타난다. 마지막으로 하중의 크기



[그림 8] 판재 단면의 하중 이력



[그림 9] 균열발생 부위의 응력 및 변형률

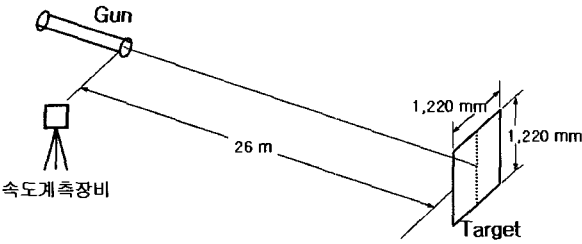
가 낮은 부분은 탄두가 판재와 분리되어 더 이상의 하중 전달이 없는 상황을 나타내고 있다.

그림 9는 판재의 균열이 발생된 절점에 대한 응력 및 변형률 이력을 나타내고 있다. 탄두가 판재의 변형이 없는 초기 접촉 시점에서는 응력에 의한 취성파괴가 주로 나타나며 그 이후에 탄두와 판재의 변형이 심한 구간에서는 일부 변형에 의한 연성파괴와 응력에 의한 취성파괴가 동시에 발생하는 구간이고 탄두와 판재의 변형이 끝난 시점에서는 응력에 의한 취성파괴가 지배적임을 알 수 있다. 그림 9에서 나타난 바와 같이 175mm 지점의 용접 셋이 파괴가 발생됨으로서 결국 최종 균열의 길이는 다음 번 용접 셋인 190mm로 나타났다.

5. 실험

가. 실험장치

시험 방법은 참고자료^[9]와 동일하다. 다만 시험 절차와 용접부 시험은 용접부 충격성 평가 규격^[1]을 준수하였다. 시험장치는 크게 충격탄(Impact Projectile), 충격탄을 발사시킬 수 있는 포(Gun), 시험을 견고히 지지할 수 있도록 제작된 시험고정기구(Fixture), 탄의 속도를 측정하기 위한 속도계측장비(MVRS : Muzzle Velocity Radar System), 용접 시험으로 구성되며 포와 시험의 거리는 탄의 비행안정성과 탄의 요구 속도를 만족시키기 위하여 26m로 설정하였다. 그림 10은 시험 구성 장치의 개략도를 나타낸다.



[그림 10] 충격시험을 위한 실험장치 개략도

나. 실험결과

용접부에 대한 충격시험은 탄두가 정확히 용접부에 충격을 발생시켜야 한다. 용접부 충격시험에 나타나는 용접부 균열의 형태는 크게 모재 균열(Base Plate Cracking)과 용접부 균열(Weld Area Cracking)로 나눌 수 있으며 용접부 충격시험에서 발생되는 균열의 형태는 대부분 용접부 균열이다. 용접부 균열도 용접비드(Weld Bead)의 균열, 열영향부(Heat Affected Zone) 균열, 용착금속과 모재 사이에 발생하는 용융선(Fusion Line) 균열 등으로 나누어진다. 그림 11은 용접부에 충격이 가해진 후 변형된 시편형상과 발생된 크랙을 나타낸다. 균열의 형태는 용융선 균열이며 균열의 크기는 370mm로 나타났다. 표 7은 용접부 충격시험 결과를 나타낸다.



[그림 11] 충돌 후 발생된 균열 크기 및 형상

[표 7] 알루미늄 2519 모재 시험 결과

판재두께 (mm)	충돌속도 (m/s)	용접부 형상	균열길이 (mm)
38.1	419	Double-V	370

6. 고찰

실험 결과로 얻은 용접부 균열길기와 수치해석의 결과로 나타난 예측 균열길기를 표 8에 나타내었다. 실험결과 용접부에 발생된 균열은 370mm이며 수치해석의 결과로 나타난 예상 균열 길이는 380mm로 나타나 오차 범위는 대략 3% 미만으로 나타났으며 비교적 일치하는 경향을 나타내었다. 따라서 수치 해석에 적용된 절차 및 기준이 비교적 타당함을 알 수 있었다.

[표 8] 시험과 해석의 균열길이 결과 비교

	판재두께 (mm)	탄속 (m/s)	균열길이 (mm)	오차 (%)
Experiment	38.1	419	370	-
Analysis	38.1	419	380	2.7

7. 맺음말

알루미늄 2519 용접부에 대한 충격거동을 분석하기 위하여 동적 충격 수치해석을 수행하고 해석의 타당성을 입증하기 위하여 용접부 충격시험을 수행하여 그 결과를 비교 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 동적충격 수치해석을 통하여 균열의 발생 및 진전 거동을 분석하였고 용접부에 발생되는 균열의 길이를 정량적으로 산출하였으며 시험결과와 비교하여 해석의 타당성을 입증하였다.
- (2) 용접부에 대한 파손의 형태는 응력과 변형률에 기초한 연성과파괴와 취성과파괴의 형태가 동시에 존재한다.
- (3) 용접부 강도 및 형상 설계에 적용할 수 있는 기초자료를 구축하였으며 추후 더욱더 신뢰성 있는 수치해석을 위해서는 최소한의 충격 시험데이터나 적절한 동적 물성의 확보 등이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] MIL-STD-1946, "Welding of Aluminum Alloy Armor", 1998.
- [2] MIL-DTL-46192C, "Aluminum Alloy Armor Rolled Plate(1/2 to 4 inches thick), Weldable (Alloy 2519)", 1998.
- [3] MIL-E-16053L, "Electrodes, Welding, Bare, Aluminum Alloys", 1982.
- [4] D. Feder, "Design Rules for Arc-Welded Connections in Steel Submitted to Static loads", IIS/IIW-504-76, 1976, pp.132~149.
- [5] F. Soetens, "Welded Connections in Aluminium Alloy Structures", PB87-226189, 1987.
- [6] B. G. Mellor, "The Static Strength of End and T Fillet Weld Connections", Materials & Design, 1999, pp.193~205.
- [7] G. R. Johnson, "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.
- [8] "MSC. Mvision Materials Software", MSC Software Corporation.
- [9] 구만희, 우호길, "알루미늄 2519 판재의 충격저항성 평가에 대한 수치 해석적 연구", 한국군사과학기술학회지, 제7권 제3호, 2004, pp.11~20.
- [10] "LS-DYNA User's Manual", Livemore Software Technology Corporation, 2001.