

산업용 폭약을 이용한 폭발용접, 폭발성형과 충격분말고화에 관한 실험 및 수치해석적 연구

김영국¹⁾, 강성승²⁾, 조상호³⁾*

Experimental and Numerical Studies on Application of Industrial Explosives to Explosive Welding, Explosive Forming, Shock Powder Consolidation

Young-Kook Kim, Seong-Seung Kang, Sang-Ho Cho

Abstract Theoretical backgrounds on the experimental methods of explosive welding, explosive forming and shock consolidation of powders are introduced. Explosive welding experiments of titanium (Ti) and stainless steel (SUS 304) plate were carried out. It was revealed that a series of waves of metal jet are generated in the contact surface between both materials; and that the optimal collision velocity and collision angle is about 2,100~2,800 m/s and 15~20°, respectively. Also, explosive forming experiments of Al plate were performed and compared to a conventional press forming method. The results confirmed that the shock-loaded Al plate has a larger curvature deformation than those made using conventional press forming. For shock consolidation of powders, the propagation behaviors of a detonation wave and underwater shock wave generated by explosion of an explosive are investigated by means of numerical calculation. The results revealed that the generation and convergence of reflected waves occur at the wall and center position of water column, and also the peak pressure of the converged reflected waves was 20 GPa which exceeds the detonation pressure. As results from the consolidation experiments of metal/ceramic powders ($\text{Fe}_{11.2}\text{La}_2\text{O}_3\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$), shock-consolidated $\text{Fe}_{11.2}\text{La}_2\text{O}_3\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$ bulk without cracks was successfully obtained by adapting the suggested water container and strong bonding between powder particles was confirmed through microscopic observations.

Key words Explosive welding, Explosive forming, Shock powder consolidation, Shock wave, Explosive

초 록 본 논문은 폭약의 폭발현상을 이용한 폭발용접, 폭발성형과 충격분말고화기술의 기본적 원리와 실험방법, 실험결과에 대하여 기술한다. 타이타늄(Ti)과 스테인레스 강(Stainless steel, SUS 304) 판재의 폭발용접 실험결과, 두 재료 접촉면의 단면에서는 연속적인 젯(jet)모양의 파형이 관찰되었고, 두 금속판재의 설치 경사각도가 15~20° 이고 접촉속도가 2,100~2,800 m/s인 경우에 최적의 접합조건을 보였다. 알루미늄(Al) 판재를 이용한 폭발성형 실험과 전형적인 가압성형 실험 결과를 비교분석하여, 폭발성형의 경우가 큰 곡률변형을 보여 가공성이 우수한 것으로 확인되었다. 끝으로 금속과 세라믹의 혼합분말($\text{Fe}_{11.2}\text{La}_2\text{O}_3\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$)에 대한 충격고화 실험법을 제안하고 실험을 수행한 결과, 고화체의 표면과 내부에 균열이 확인되지 않았으며 세라믹입자와 금속입자들의 강한 미세 조직 결합이 형성되었다. 또한 충격분말고화실험에서 발생하는 폭약의 폭발에 의한 폭평파와 수중 충격파의 전파 및 간섭현상을 분석하기 위하여 LS-Dyna 3D를 이용한 동적해석을 수행하였다. 그 결과, 물용기 내 벽면에서 반사된 수중충격파가 중앙부에서 중첩되어 폭약의 폭발압력보다 높은 20 GPa의 수중 충격압을 보여, 물용기 내부형상의 중요성을 입증하였다.

핵심어 폭발용접, 폭발성형, 충격분말고화, 충격파, 폭약

¹⁾ 구마모토 대학 충격극한환경연구센터 연구원

²⁾ 조선대학교 에너지자원공학과 조교수

³⁾ 전북대학교 자원에너지공학과 부교수

* 교신저자 : chosh@jbnu.ac.kr

접수일 : 2012년 2월 15일

심사 완료일 : 2012년 2월 25일

게재 확정일 : 2012년 2월 25일

1. 서론

AD 1000 년경 중국에서 흑색화약(Black powder)이 세상에 처음으로 알려졌으며, 그 이후 전 세계로 널리 퍼져 군사용 및 다양한 분야에 적용되어 오다, 19세기 이후 다이내마이트 등의 위력이 강한 폭약의 등장으로 군사적 목적 이외에 광산개발, 터널굴착 등 민간분야에 널리 사용하게 되었다. 20세기 중반 이후에는 폭약의 폭발력을 이용한 산업재료의 제조생산 분야에 응용되었으며, 대표적인 분야로는 폭발용접(Explosive welding), 폭발성형(Explosive forming), 충격분말고화(Shock powder consolidation) 등이 있다. 폭약을 이용한 산업응용연구의 이론적 및 실험적 연구는 지금까지 활발하게 진행되고 있으며 새로운 소재 개발의 실험을 가능하게 하였다. 특히 폭발용접 및 폭발성형에 대해서는 이론과 실험적 연구가 병행되었다(Rinehart and Pearson, 1963, Ezra, 1973, Crossland, 1982, Deribas et al. 1967). 폭발용접과 폭발성형에 비해 다소 늦게 연구가 시작된 분말의 충격고화기술은 다이아몬드 합성(Diamond synthesis)과 전기전자재료인 초전도체, 자성체, 기능성 세라믹 등의 제조에 유리하여 미래 신소재 개발에 있어 매우 중요한 기술이라 할 수 있다(Prummer, 1988, Chiba et al. 1992).

본 논문에서는 폭발용접, 폭발성형과 충격분말고화에 대한 기본적 원리와 연구방법 및 결과를 기술한다. 구체적으로는 타이타늄과 스테인레스 강판재의 최적접합을 위한 폭발용접실험, 알루미늄 판재에 대한 폭발성형 실험, 금속과 세라믹의 혼합분말에 대한 충격분말고화 실험을 수행하였다. 또한 충격분말고화실험에서 발생하는 폭약의 폭발에 의한 폭굉파와 수중 충격파의 전파 및 간섭현상을 분석하기 위하여 LS-Dyna 3D를 이용한 동적해석을 수행하였다.

2. 폭발용접 실험

폭약의 폭발력을 이용하여 이종 금속을 접합시키는 기술을 폭발용접법이라 한다. 일반적인 용접방법으로 접합시키기 어려운 금속재료의 코팅 또는 접합이 가능하다는 장점을 가지고 있다(성상철 등, 1997). Fig. 1은 폭발용접을 위한 실험시스템 개념도를 나타낸 것이다. 본 시스템의 구성은 전기뇌관, 모재(Base plate), 부재(Flyer plate), 고성능 폭약 그리고 폭약의 폭발 시, 부재를 보호할 목적으로 사용되는 버퍼(Buffer)로 이루어져 있다. 장치는 수중에 설치되며 모재와 부재의 접촉경사각(Collision angle)에 따라 접합상태가 결정되므로 부

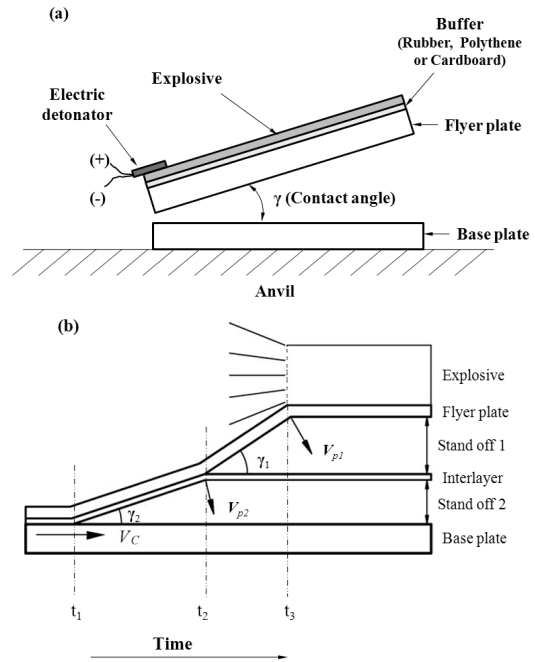


Fig. 1. Schematic illustrations of (a) explosive welding device and (b) explosive welding mechanism

재를 모재에 대하여 경사지게 놓는다. 폭발용접법의 기본원리는, 전기뇌관에 의해 폭약이 폭발하면 폭발력에 의해 부재는 매우 빠른 속도로 모재와 충돌하게 된다. 이 때, 모재와 부재사이의 접촉면은 강한 충격에 의해 접성이 높아져 용융되어 로켓의 젯(jet)처럼 연속적인 금속젯(Metal jet)이 발생되면서 두 금속은 강하게 접합된다. Fig. 2는 폭발용접법으로 얻어진 타이타늄(Ti, 두께 5 mm)과 스테인레스 스틸(SUS 304, 두께 15 mm)의 사진과 두 재료의 접촉경계면에 대한 광학현미경 사진을 나타낸 것이다. 폭발용접에서 발생하는 충격파는 매우 중요한 요소이다. 모재와 부재가 충돌 시 충격파는 입사파(Incident wave)와 반사파(Reflected wave)의 형태로 모재와 부재에서 동시에 나타나며 접촉되는 점을 기준으로 연속적으로 생긴다. 두께가 같은 재료라면 입사파는 하나의 동심원으로 나타나고, 반사파는 접촉면에서 서로 만나 재료의 표면변형에 영향을 미친다. Fig. 2(b)에서, 두 재료의 접촉경계면에서 연속적으로 발생된 금속젯의 형태가 선명하게 보여지고 있다. 젯의 파형은 모재와 부재의 접촉속도 V_c 와 접촉경사각에 따라 달라지며, 이상적인 접합을 위해서는 소용돌이(Vortex)의 크기가 작을수록 좋다. 두 재료의 접촉경사각에 따른 충격압착속도 V_p (Plate collision velocity)는 식 (1)로부

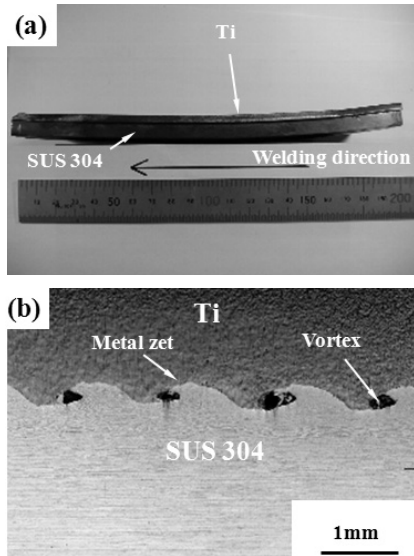


Fig. 2. Photographs of (a) explosive-welded Ti-SUS 304 plates with 5 mm and 15 mm thickness, respectively and (b) interlayer taken by optical microscope

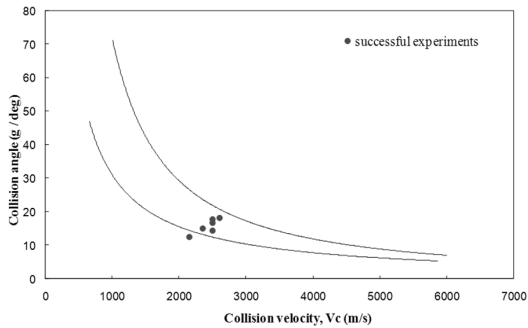


Fig. 3. Optimal collision velocity and collision angle conditions for the successful experiment of Ti-SUS 304 plates

터 얻을 수 있다.

$$V_p = 2V_c \sin \frac{\gamma}{2} \quad (1)$$

여기서 γ 는 충돌각도(Collision angle)이다. 부재의 충격압착속도는 폭약의 종류와 사용량에 따라 결정되고, 접촉속도는 두 재료의 밀도와 관련이 있다. 충격압착속도가 너무 빠르면 과도한 용융으로 접합이 잘 이루어지지 않고, 너무 느리면 금속젯이 일어나지 않아 접합이 잘 되지 않는다. 따라서 양호한 접합이 되도록 적절한 속도를 찾는 것이 매우 중요하다. Fig. 3은 Ti과 SUS 304의 폭발용접 시 발생하는 접촉속도를 접촉경

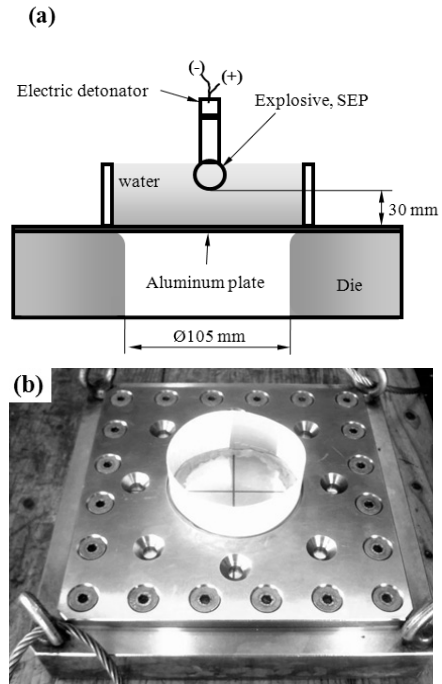


Fig. 4. Schematic illustration of (a) explosive forming device of aluminum plate and (b) its real photograph

사각의 변화에 따라 나타낸 것이다. 성공적으로 접합이 이루어지는 속도범위는 2,100~2,800 m/s, 경사각도는 15~20°으로 확인되었다.

3. 폭발성형 실험

폭발성형법은 폭약의 폭발력을 이용하여 금속판을 원하는 모양으로 성형하는 기술이며, 수중에서 금속판을 성형시키는 원리가 폭발용접법과 유사하다. Fig. 4는 폭발성형장치의 장치도와 사진을 나타낸 것이다. 성형시킬 금속판재를 다이(Die)에 올려놓고, 그 위에 고성능 폭약을 물용기에 넣어 설치한 후, 수중에서 폭발시킨다. 폭약의 폭발로 인해 발생한 고압의 수중충격파가 아래쪽에 놓여있는 금속판재에 강하게 충격가압을 시켜 다이의 형상으로 성형시키는 기술이다. 이 기술은 종래의 가압식 성형기술과 비교해서, (1) 성형시간이 매우 빠르고, (2) 재료의 절감이 가능하고, (3) 다이의 형상에 따라 완전한 성형이 가능하고, (4) 매우 어려운 곡면성형도 가능할 뿐만 아니라 (5) 제조비용이 저렴하다. Fig. 5는 폭발성형장치에 의해 반구형상으로 만들어진 Al 금속판재의 사진을 종래의 가압성형방식으로 제작된 반구형상의 Al 금속판재와 비교해서 나타낸 것이다. 수

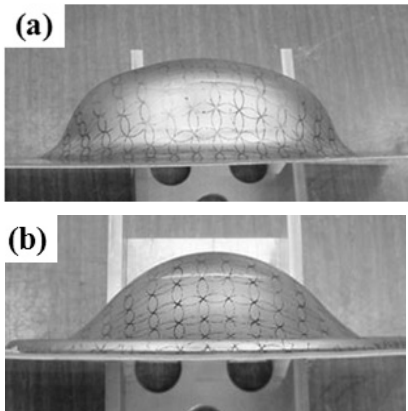


Fig. 5. Photographs of (a) explosive-formed Al plate and (b) press-formed Al plate

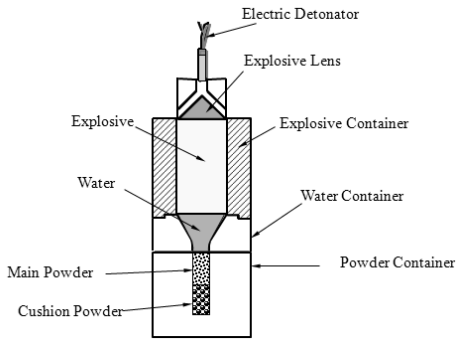


Fig. 6. Schematic illustration of shock consolidation device

중충격파에 의해 변형된 재료의 곡률형상이 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다. 근래에는 항공기의 전면부 및 엔진노즐(Ghizdavv and Marin, 2010)등과 같은 3차원적 모양의 제작이 가능하여 미래 우주항공 산업에 전망이 매우 밝다.

4. 충격분말고화실험

4.1 실험개요

분말의 충격고화는 폭약의 폭발력에 의해 발생된 고속고압의 충격파를 이용하여 난소결성 금속이나 세라믹 분말 등을 덩어리로 고화시키는 기술이다. 최근에는 수중충격파를 이용한 분말고화 연구들이 많이 보고되고 있다(Kim et al. 2009, Kim et al. 2010). 이 방법은 폭약의 폭발에 의해 발생하는 폭굉파를 수중에서 수중충격파로 변환시켜 사용한다. 수중용기의 형상에 따라 충격압력조절이 가능하다는 특징을 가지고 있다. Fig. 6

은 수중충격파를 이용한 충격분말고화장치의 개념도를 나타낸 것이다. 이 장치는 기본적으로 전기뇌관(Electric detonator), 평면파발생장치(Explosive lens), 그리고 폭약이 장약되는 폭약용기, 수중충격파를 발생시키기 위한 물용기와 분말을 충전시키는 분말용기로 구성되어 있으며, 각각의 용기 안에는 폭약, 물, 분말 등이 채워진다. 충격고화실험에 주로 사용 되는 폭약은 고성능 폭약으로써, SEP(PETN 65wt.% + Paraffin 35wt.%, (주)Asahi-Kasei, Japan) 폭약이 사용된다. SEP 폭약은 폭발속도가 6,970 m/s, 15.9 GPa의 C-J(Chapman-Jouguet) 압력을 가진다. 충격고화기술의 기본 원리는, 전기뇌관에 의해 폭약이 폭발하게 되면 충격파의 일종인 폭굉파(Detonation wave)가 발생된다. 이 폭굉파는 물용기로 들어가면서 수중충격파로 전환되어 분말을 강하게 충격압축시킨다. 충격파는 분말을 통과하면서 분말입자간의 소성변형 및 급랭응고 과정을 만들고 분말입자 간에 강한 결합을 유도하여 분말들을 고화시킨다. 충격파의 빠른 속도와 높은 압력 때문에 고밀도의 고화재료를 얻을 수 있고, 장시간의 열처리가 불필요 하며, 공정이 간단해서 제조비용이 저렴하다.

4.2 실험결과

충격분말고화실험에 사용된 분말은 금속과 세라믹의 혼합물($Fe_{11.2}La_2O_3Co_{0.7}Si_{1.1}$)이고, 금속분말입자와 세라믹분말입자의 결합상태를 알아보기 위해 실험을 실시하였다. 혼합물의 분말은 아르곤(Ar) 가스분위기의 글러브박스(Glove box) 내에서 분말용기에 넣어 유압압축기를 이용하여 혼합물 분말의 이론밀도의 60%가 되도록 압축시켰다. 반사파에 의한 분말의 비산과 균열을 예방하기 위해 쿠션역할을 하는 금속분말(SUS 304)은 혼합물 분말을 압축시키기 전에 선행적으로 압축시켜 충전된다. 그 다음, 물용기에 물을 채우고 폭약을 폭약용기에 장약한 후, 전기뇌관과 연결시키면 고화실험준비는 완료된다. Fig. 7(a)은 충격고화 전 $Fe_{11.2}La_2O_3Co_{0.7}Si_{1.1}$ 혼합분말의 확대화상을 보여주고 있으며, Fig. 7(b)는 충격고화 후 $Fe_{11.2}La_2O_3Co_{0.7}Si_{1.1}$ 고화체 내 조직사진을 나타낸 것이다. 고화된 재료의 표면에 강한 충격에 의한 균열은 보이지 않았다. 충격분말고화에서는 강한 충격에 의해 재료내부에 크고 작은 균열이 쉽게 발생된다. 충격고화체가 가지는 균열발생문제는 산업적 생산에 있어 불리한 것이 사실이다. 하지만, 분말재료의 물성에 따라 쿠션역할을 해주는 금속분말의 양과 충격압력을 조절한다면 재료 내부에 발생하는 균열은 억제시킬 수 있다. 분말과 고화재료의 조직사진에서, 고화된 재료의 입도 변화가 분말상태와 크게 차이가 없음을 확인되었

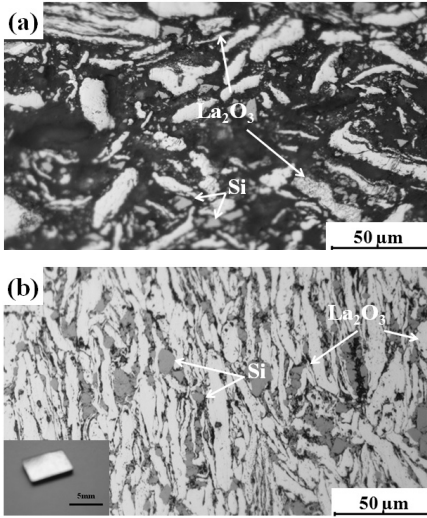


Fig. 7. Optical microscope pictures of (a) $Fe_{11.2}La_2O_3Co_{0.7}Si_{1.1}$ starting powder and (b) shock-consolidated $Fe_{11.2}La_2O_3Co_{0.7}Si_{1.1}$

고, 세라믹분말과 금속분말이 충격파의 영향으로 서로 표면적결합(Surface bonding)이 되어 조밀한 조직을 보여주고 있으며, 세라믹과 금속의 혼합분말도 충격분말 고화기술로 쉽게 제조성형이 가능함이 확인되었다.

4.3 충격고화에서 고압의 폭발 충격압력 생성에 관한 고찰

충격고화실험에서 균열이 없는 양질의 고화재료를 얻기 위해서는 수중충격파가 금속분말에 충격을 가할 때, 완전평면파로서 충돌하는 것이 가장 이상적이다. 따라서 실제실험을 하기 전에 선행적으로 수치해석을 행하여 수중충격파가 수중에서 전파되는 과정을 이해하고, 물용기의 내부형상에 대하여 최적설계를 행한다. 본 연구에서는 LS-DYNA 3D 프로그램을 이용하여 폭발에 의한 충격파의 전파과정을 수치적으로 해석하였다. Fig. 8은 수치 해석에 사용된 모델을 간략히 나타낸 것이다. 계산시간에 대한 경제성을 확보하고자 계산모델을 단순화시켰다. 초기속도는 폭약의 입자속도(1,711 m/s)로써 적용하였고, x, y, z 방향의 각 면에 대하여 구속조건을 설정해 폭발 시 회전, 이동 등의 움직임이 없도록 하였다. 물리적 힘에 의한 분말의 움직임에 대해 수치계산을 하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라, 알고자 하는 것은 분말에 충격을 가하는 수중충격파의 압력과 분포이므로 분말을 물과 같은 재료로 가정하여 충격이 가해지는 분말 상부 표면까지만 계산하였다. 폭발가스의 체적, 에너지, 압력에 대한 수치해석을 행할 때에

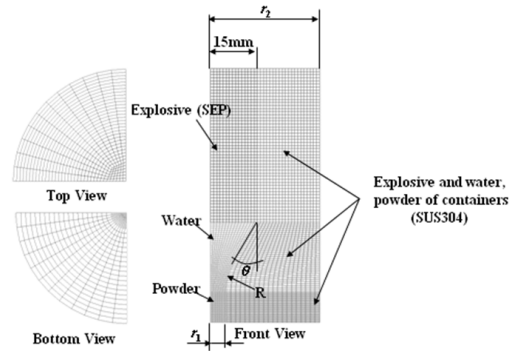


Fig. 8. Simplified numerical simulation model

Table 1. JWL coefficients and C-J values of SEP

A(GPa)	B(GPa)	R ₁	R ₂	ω
364	2.31	4.3	1.00	0.28

Table 2. Mie-Grüneisen parameter

	ρ ₀ (kg/m ³)	Co(m/s)	s	Γ ₀
Water	1,000	1,489	1.79	1.65
SUS304	7,900	4,570	1.49	2.17

는 일반적으로 JWL(Jones-Wilkins-Lee) 상태방정식이 많이 적용된다. JWL 상태방정식에 관한 수식은 식 (2)와 같으며, 고성능폭약 SEP의 JWL 계수와 C-J 특성 값은 Table 1에 표시하였다.

$$P_{JWL} = A \left[1 - \frac{\omega}{VR_1} \right] \exp(-R_1 V) + B \left[1 - \frac{\omega}{VR_2} \right] \exp(-R_2 V) + \frac{\omega e}{V} \quad (2)$$

폭약의 폭발거동에 관한 해석 방법으로서 C-J Volume burn 방법이 사용되었다. 이 방법은 폭발생성물(Detonation products)들에 대한 상태방정식만 요구하므로 폭약의 폭발거동에 대해 자주 사용되는 방법이다. 수치계산 내에서 초기상태의 폭약에 대한 어느 한 요소의 체적이 C-J상태 내에서 폭발생성물의 체적과 같을 때, 고체폭약은 완전한 가스상태의 생성물로 분해된 상태라고 가정을 하여 계산을 수행한다. 만약 V₀가 폭약의 초기체적을 나타낸다면, V_c는 C-J상태에서 폭발생성물의 체적이 된다. 폭약의 분해율 W는 요소의 비체적과 함께 계산되고, 각 요소의 분해율에 의해 요소의 폭발상태를 결정한다. 폭약의 분해율 W에 대해서 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

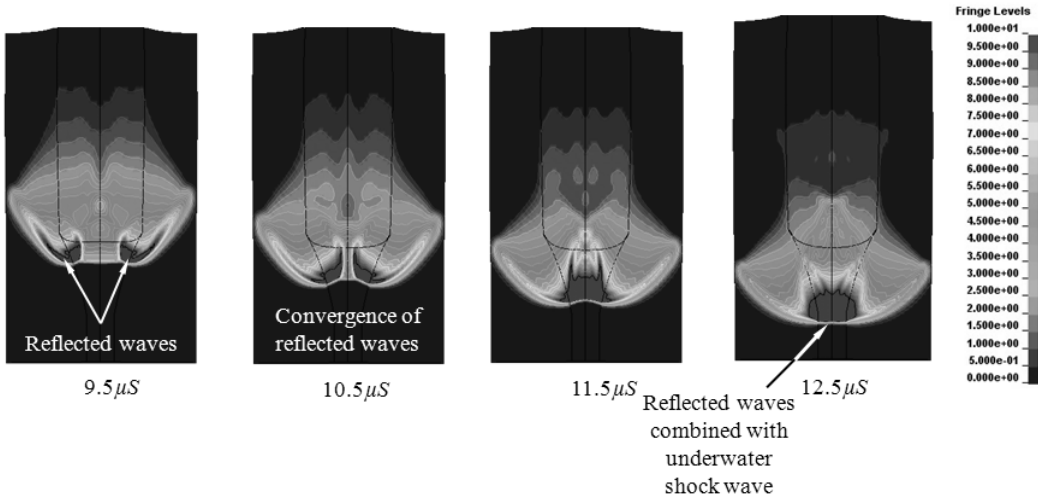


Fig. 9. Propagation behaviors of underwater shock wave and reflected waves

$$W = 1 - \frac{V_0 - V}{V_0 - V_{CJ}}, \quad V_0 \leq V \leq V_{CJ} \quad (3)$$

$$P = (1 - W)P_{JWL} \quad (4)$$

P_{JWL} 은 완전하게 재생된 폭약의 폭발생성물의 압력을 나타내며 JWL 상태방정식으로부터 얻을 수 있다. 폭굉 파에 의해 수중에서 발생하는 수중충격파의 전파과정을 해석하는 경우에는 물의 상태방정식이 매우 중요하다. 일반적으로 20GPa 정도까지는 식 (5)의 Mie-Grüneisen 상태방정식이 적용된다. Table 2는 물에 대한 Grüneisen 파라메타를 나타낸 것이다.

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left[1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (5)$$

위 식들에서, P_{JWL} 는 압력, e 는 내부에너지, V 는 폭발 생성가스와 폭약의 초기밀도와의 비를 나타낸다. A , B , R_1 , R_2 , ω 은 JWL계수이고, C_0 는 음속, η 는 밀도비($1 - \rho_0/\rho$), Γ_0 는 Grüneisen 파라메타이며, s 는 재료상수이다. 수중충격파를 이용하여 금속분말을 덩어리재료로 만들기 위해서는 분말에 작용하는 수중충격파의 균일한 압력 분포가 필요하다. 이 압력분포는 물용기의 내부형상에 많은 영향을 받는다. Fig. 9는 물용기 내부에서 발생하는 수중충격파와 반사파에 대한 수치해석결과를 나타낸 것이다. 수중충격파와 반사파의 거동에 대하여 살펴보면, 폭굉파가 수중충격파로 전환하면서 물용기의 벽면으로부터 반사파들이 발생된다. 이 반사파들은 중앙부분으로 이동하면서 물용기 중심에서 서로 중첩되

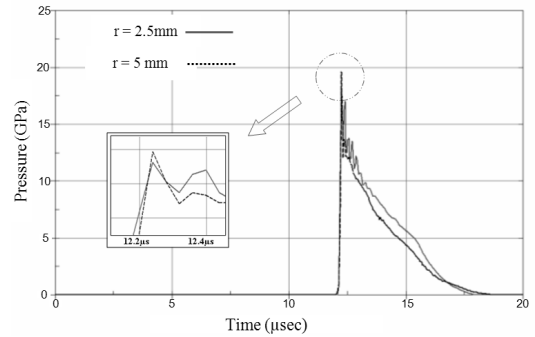


Fig. 10. Peak shock pressure impacting on the powder surface at 2.5 mm and 5 mm from the central position of water container.

어 매우 큰 압력을 가지는 고압력파가 된다. 결국 고압력파는 수중충격파의 뒤를 쫓아 전파하면서 수중충격파와 거의 같은 시간에 분말의 상부표면에 도달하여 충격을 가하게 된다. 분말에 작용하는 충격압력은 물용기의 내부 각도에 따라 변화하는 반사파의 압력에 따라 결정된다. Fig. 10은 금속분말의 상부표면에 도달한 충격압력을 물용기의 중심축으로부터 반경 2.5 mm, 5 mm 부근에 대한 압력값들을 시간진행에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 폭약의 폭발이 시작된 후, 대략 12.2 μs 부근에서 수중충격파는 금속분말의 상부표면에 도달하는 것으로 나타났으며, 2.5 mm와 5 mm 지점에서 수중충격파의 압력값은 각각 18.1 GPa과 19.8 GPa를 나타냄이 확인되었다.

5. 결론

본 논문에서는 폭발용접, 폭발성형과 충격분말고화에 대한 기본적 원리와 연구방법 및 결과를 기술하였다. 먼저 알루미늄 판재에 대한 폭발성형 실험, 금속과 세라믹의 혼합분말에 대한 충격고화 실험을 수행하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. Ti(두께 5 mm)과 SUS 304(두께 15 mm) 금속판재의 최적접합을 위한 폭발용접실험으로부터, 접촉경계면에서 연속적인 금속젯이 생성됨이 확인되었고, 설치경사각은 15~20°, 최적의 접촉속도 V_c 는 2,100~2,800 m/s 임이 확인되었다.
2. 알루미늄 판재에 대한 폭발성형 실험으로부터, 수중충격파에 의해 만들어진 곡률형상이 종래의 가압성형방식에 의해 만들어진 곡률형상보다 훨씬 크고, 구석진 부분까지 압력의 전달이 가능하다는 것이 확인되었다.
3. 금속과 세라믹 혼합분말 $Fe_{11.2}La_2O_3Co_{0.7}Si_{1.1}$ 의 충격고화실험에서는 균열없는 고화체를 성공적으로 얻을 수 있었고, 금속과 세라믹 분말입자간의 표면적 결합과 조밀한 조직을 가짐이 확인되었다. 충격고화 실험에서 발생한 충격파 거동을 분석하기 하기 위하여 LS-DYNA 3D을 이용한 폭발 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 수중충격파에 의해 반사파가 물용기 벽면에서 발생되고, 용기 중심에서 서로 중첩되어 고압력파로 전환됨이 확인되었다. 또한, 분말에 작용하는 충격압력은 반사파와 수중충격파가 결합되어 하나의 큰 압력파로써 작용하는 것이 확인되었다.

본 논문에서 기술한 폭발용접, 폭발성형과 충격분말고화는 폭발음에 의한 환경문제로 인하여 특수 제작된

실험 돔에서 이루어지고 있다. 지하공간은 안정성 및 밀폐 성능이 뛰어나 향후 폭약응용분야 적극적으로 활용될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 성상철, 심상한, 이병일, 1997, 폭발용접의 원리와 응용, 대한용접접합학회지, Vol. 15, No. 6, pp. 13-23
2. Rinehart J. S. and J. Pearson, 1963, Explosive working of metals, pergamon press, London.
3. Ezra, A. A., 1973, Principles and practice of explosive metal working, Vol. I, Industrial Newspaper Limited, London.
4. Crossland, B., 1982, Explosive welding of metals and Its applications, Clarendon, Oxford.
5. Derivas, A. A., V. M. Kudinov and F. I. Maveenkov, 1967, Explosive welding, Combustion, Explosion, and Shock Waves, 3, 111-118.
6. Prummer, R., 1988, Explosive compaction of metallic glass powders, Materials Science and Engineering 98, 461-463.
7. Chiba, A., M. Fujita, M. Nishida, K. Imamura and R. Tomoshige, 1992, Underwater-Shock Consolidation of Difficult-to-consolidate Powders, in: M. A. Meyers, L. E. Murr, K. P. Staudhammer (Eds.), Shock-wave and high-strain-rate phenomena in materials, Marcel Dekker, New York, pp. 415-424.
8. Ghizdavu V. and N. Marin, 2010, Explosive forming-Economical Technology for Aerospace structures, INCAS BULLETIN, 2, 107-117.
9. Kim Y., T. Ueda, K. Hokamoto and S. Itoh, 2009, Electric and microstructural characteristics of bulk ZnO fabricated by underwater shock compaction, Ceram. Inter. 35, 3247-3252.
10. Kim Y., H. Wada, Y. Lee, S. Itoh, 2010, Magnetization, magnetic transition and magnetic entropy changes of bulk $MnAs_{1-x}Sb_x$ fabricated by underwater shock compaction, Mater. Sci. Eng B, 167, 114-118.



김영국

1998년 부경대학교 기계설계학과 공학사
2002년 부경대학교 대학원 기계공학과
공학석사
2008년 일본 구마모토대학 자연과학 연
구과 공학박사

Tel: 010-7150-6333

E-mail:

kim@shock.smrc.kumamoto-u.ac.jp

현재 구마모토 대학 충격극한환경연구
센터 특별연구원



강성승

1993년 조선대학교 자원공학과 공학사
1996년 강원대학교 자연대학 지구물리
학과 이학석사
2000년 Kumamoto University 토목공
학과 Ph.D.

Tel: 062-230-7112

E-mail: kangss@chosun.ac.kr

현재 조선대학교 에너지자원공학과 교수



조상호

1998년 전북대학교 공과대학 자원공학
과 학사
2000년 전남대학교 대학원 자원공학과
석사
2003년 북해도대학교 대학원 공학연구
과 박사

Tel: 063-270-4636

E-mail: chosh@chonbuk.ac.kr

현재 전북대학교 자원·에너지공학과 교수