신소재의 용접·접합 연구동향

방 국 수

Research Trends in Welding and Joining of Advanced Materials

Kook-soo Bang

1. 서 론

신소재라는 용어를 사용할 때 가장 곤혹스러운 것 중의 하나는 아마 신소재라는 것의 정의가 명확하지 않다는 점일 것이다. 따라서 본 해설에서는 먼저 신소재의 정의와 종류에 대하여 살펴본 후 그들 재료의 용접·접합의 연구 동향과 향후 전망에 대하여 간단히 살펴보고자 한다. 본 기사는 條崎의 "신소재 붐의 그 후"[1], "신재료 용접·접합연구의 성과와 금후의 전개"[2] 그리고 田中의 "신소재라는 것은? 그리고 그 접합은?"[3]의 세 해설기사를 토대로 작성되었음을 먼저 밝힌다.

일본 통상산업성 산업구조연구회는 "신소재는 물성연구, 재료설계, 재료가공, 시험평가 등의 연구를 통하여 기존의 소재의 결점을 보완하든지, 혹은 우수한 특성을 나타내도록 하여 고도의 기능과 구조특성을 실현시킨 부가가치가 높은 재료"로 정의하고 있다. 이와 같은 정의를 토대로 일본의 기초신소재연구회에서는 지금까지 개발된 대표적인 신소재를 금속계와 무기계로 대별하여 그 기능과 용도에 따라 Table 1과 같이 분류하였다[4]. 금속계 신소재로서는 비정질합금, 형상기억합금, 초전도금속, 금속간화합물, 생체적합성금속 등 익숙한 재료를 포함하여 다양한 재료가 포함되어 있으나 비금속계 신소재로서는 고강도 세라믹스, 촉매성 세라믹스 등 태반이 세라믹스이다. 이런 점으로부터 신소재 중에서도 다양한 특성의 세라믹스 개발이 가장 현저함을 알 수 있다.

2. 신소재의 개발 추이

Fig. 1은 기원전부터 21세기 초반까지 기계·토목분야에 있어서 각종 재료의 상대적 중요성을 모식적으로 나타낸 佐野의 그림이다[5]. 신소재 개발이 본격적으로 시작된 (특히 일본에서) 1980년대부터 금속재료의 중요성이 급격히 감소하고 그에 대신하여 고분자재료, 복합재료, 세라믹스 등 비금속재료의 중요성이 증가하고 있다. 산업에 있어서 재료의 중요성을 판단하는 기준이 무엇인가 하는 점은 보는 관점에 따라 차이가 있을 수 있으나 향후 재료 개발의 추세를 나타낸다는 점에서 흥미 있는 그림이다.

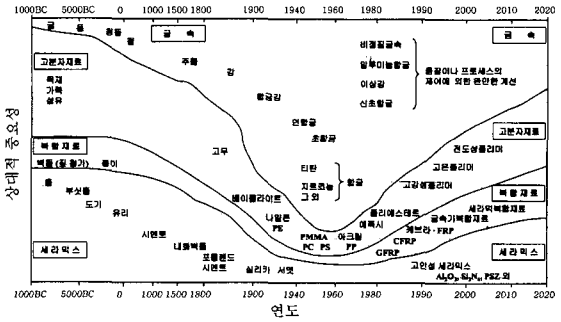

Fig. 1 각종재료의 개발과 중요성[5]

하지만 이러한 다양한 신소재의 개발과 그 실용화는 다른 문제이다. 즉 산업체의 요구로 개발된 신소재라도 가격이 너무 높거나 혹은 원하는 형상으로의 가공이 어려우면 당연히 실용화가 어렵다. 즉 신소재는 설계·제조기술, 가공·개질기술, 평가기술 등이 종합적으로 확립되지 않으면 실용화가 어렵다. 특히 구조용으로 사용되는 신소재에서는 용접·접합기술을 포함한 가공기술의 실용화가 불가결하다. 특히 금속과 세라믹스 혹은 세락믹스와 세라믹스간의 접합에서는 접합할 계면을 국부적으로 용융시켜 응고시키는 종래의 용접방법은 적용하기 어렵기 때문에 신소재 접합에는 종래의 용접기술과 다른 새로운 접합 혹은 접착 등의 기술이 필요하다. 그리고 새로운 접합·접착 기술개발과 동시에 접합부 성질, 즉 이음부성능을 시험하고 평가하는 시험·평가방법을 개발하고 표준화할 필요성도 있다.

3. 신소재의 용접·접합 연구

다양한 신소재 중에서 용접·접합의 주된 연구 대상

Table 1 중요한 금속계 및 무기계 신소재와 그 응용[4]

기능	금속계 신소재		주요 용도	무기계 신소재		주요 용도
1. 기계적 기능	초강력강	Ni-Cr-Mo강	자동차			
	고비강도합금	Al-Li합금	항공기			
	금속간화합물	TiAl	엔진	고강도세라믹스	알루미나	구조재료
	비정질합금		용수철	고인성세라믹스	지르코니아	절단재
	분말야금합금	Ni-Co-Cr-Mn계합금	엔진	고경도세라믹스	서멧	절삭공구
	초탄성합금	Ni-Ti합금	치열교정 · 바이메탈	윤활성세라믹스	그라파이트	윤활제
	형상기억합금	Ni-Ti합금	용수철(센서겸액츄에이터)	내마모성세라믹스	질화규소	베어링
	초소성합금	Al-Cu계합금	크랭크샤프트			
	제진강판		전기세탁기			
	초경도합금	Fe-Cr-W계합금	절삭공구			
2. 화학적 기능	비정질합금	Fe-Cr-Ni-P-C	산필터	내식성세라믹스	탄화규소	펌프
		Fe-Cr-Mo계합금		촉매성세라믹스	제올라이트이온	촉매
	수소저장합금	Fe-Ti합금	수소자동차	전도성세라믹스	β알루미나	대규모전지
	금속초미분	Pd, Pt	촉매	흡착성세라믹스	카본	탈취제
3. 전자 · 전기적 기능	초전도금속	Nb-Ti합금,Nb_3Sn	리니어모터 카	절연성세라믹스	알루미나	IC기판
	화합물반도체	GaAs, InP	레이저다이오드	반도성세라믹스	ZnO-Bi_2O_3	배리스터
	초격자소자	As-AlAs-GaAs	컴퓨터	초전도성세라믹스	이트리움계	컴퓨너
	비정질금속	비정질Si	태양전지	압전성세라믹스	니오븀산리튬	착화소자
	열전변환합금	CdSe	태양전지	레이저발진성세라믹스	갈륨 · 링	광디스크
4. 자기적 기능	자성합금	Al-Ni-Co계합금	자석			자심
	금속초미분	Fe-Co계합금	자기테이프	연자성세라믹스	망간아연	
	희토류금속	Sm-Co합금, Fe-Nd	자석		페라이트	자기테이프
	자기버블합금	Cd-Co합금, Cd-Ga가네트	버블메모리	경자성세라믹스	바룸페라이트	자기버블메모리
	비자성합금	고망간강	전기기기	자기버블세라믹스	가네트	자기헤드용슬라이더
	고투자합금	Ni-Mo계합금	트랜스	비자성세라믹스	티탄산바륨	컴퓨터
	자성유체	페라이트	자기실드	반도체	GaAs	
	홀효과금속	InSb, InAs	자기센스			
5. 열적 기능	초내열합금	Ni-Cr-Co계합금	엔진			
	금속간화합물	Ni_3Al계합금	엔진	초내열성세라믹스	질화규소	엔진
	일방향응고합금	Co-TaC계합금	가스터빈	전열성세라믹스	베리리아	IC기판
	발포금속	Al	건재(차음, 차열)	단열성세라믹스	알루미나섬유	소방복
	극저온합금	Ni-Cr계합금	액체탱크	적외선방사성세라믹스	아미노규산염	조리냄비
	발열성합금	Ni-Cr계합금	전열기			
6. 광학적 기능				도광성세라믹스	산화규소	광섬유
					다성분유리	
	광도전성금속	비정질 Si, Ce	태양전지, 감광체	감광성세라믹스	카르코겐화은	표시소자
	광자기합금	Fe-Tb계합금	광자기디스크	투광성세라믹스산화	이트륨	광학렌즈
				편광성세라믹스	PLZT	광셔터
				루미네선스	Y_2O_2S	TV브라운관
				레이저발진성	YAG	레이저발진기
7. 생체적 기능	생체적합성금속	Ti합금, Ni-Ti합금	인공치상	생체적합성세라믹스	알루미나	인공치근
		스테인리스합금	인공골 · 임플란트재		수산화아파타이트	인공관절
8. 방사선 기능	중성자감속금속	보론스테인리스강	원자로	중성자감속세라믹스	베리리어	감속재
	원자로용금속	Fe-Cr-W-V계합금	원자로	핵연료	산화우라늄	핵연료

으로 되는 것은 구조용 재료로서 세라믹스, 금속기 복합재료, 형상기억합금 등이다. Fig. 2에 지난 1986년부터 2000년 사이 본 학회지에 게재된 세라믹스, 금속간화합물, 복합재료, 형상기억합금, 비정질재료, Al-Li 합금, Mg합금, Ni기 합금, Ti합금 및 플라스틱 등의 용접 · 접합에 관한 논문 수를 조사한 결과를 나타내었다. 세라믹스를 대상으로는 1989년 용사법에 의한 지르코니아 세라믹스 코팅에 대한 연구를 시작으로 91년 3건, 92년 3건 등으로 90년대 전반에는 년 간 평균 3~4건이 게재되기 시작하여 증가추세를 보여 97년에 9건으로 최대를 보인 후 감소하여 다시 년 간 3~4건을 보이고 있으나 다시 증가추세를 보이고 있다. 일본의 경우는 1980년대 초반에 연구를 시작한 후 지속적으로 증가하여 1989년에 26건을 나타낸 후 (발표 포함) 감소하다 1990년대 후반부터 다시 증가하고 있다. 우리나라와 일본 모두 연구 대상 세라믹스는 알루미나

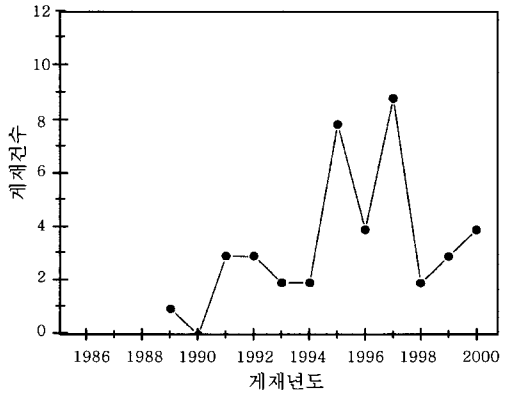

Fig. 2 1968~2000년 사이에 학회지에 게재된 신소재 관련 논문 수

로 대표되는 산화물계 세라믹스 및 비산화물계 세라믹스인 탄화규소, 질화알루미늄 등으로 비슷하나 연구의 다양성에는 차이를 나타내고 있다. 우리나라의 경우에는 접합부 계면반응의 관찰이 대부분을 차지하여 세라믹스와 금속간의 젖음성 평가, 접합이음부 특성 및 그 지배요인의 해명, 접합부의 역학적 특성 및 신뢰성 평가 등 다양한 연구가 행하여진 일본과 대조를 이룬다. 특히 우리나라에서는 세라믹스 접합 연구와 병행하여 지르코니아 세라믹 용사피막, 티타니아 세라믹 용사피막 등 세라믹스 분말을 이용한 용사피막의 연구가 눈에 많이 띈다. 표2는 세라믹스와 금속의 접합방법을 정리한 것으로 전자빔이나 아크용접보다 브레이징, 메탈라이징, 고상접합 등의 접합방법이 널리 사용되고 있음을 알 수 있다[1]. 이제까지 세라믹스와 금속의 접합에 관한 연구는 대부분이 기술개발을 중심으로 한 실용적인 연구로, 기초적이고 과학적인 연구는 상대적으로 많지가 않다. 이런 점에서 금후 기대되는 세라믹스와 금속 접합기술로서는 다음과 같은 분야를 들 수 있다. ① 고온에서 높은 접합강도를 유지하는 접합법의 개발로 고융점의 용가재를 이용한 브레이징이나 고상접합법의 개발 ② 접합부위의 대형화에 대응한 잔류응력 완화기술의 개발 ③ 접합부 응력해석의 고정도화와 잔류응력 측정정도의 향상 ④ 접합부 피로 데이터, 비파괴검사 데이터의 축적 ⑤ 접합부 강도평가의 표준화.

세라믹스 이외에 금속간화합물, 복합재료, 형상기억합금 등의 용접·접합에 관한 논문은 본 학회지에서 해설 기사 이외에는 보이지 않는다. 세라믹스에 비하여 이런 재료의 상대적으로 빈약한 연구실적은 일본에서도 마찬가지로, 세라믹스와 비교하여 형상기억합금을 제외하면 그 제조방법이나 기계적특성이 충분히 확립되어 있지 않기 때문에 용접·접합의 연구까지 힘을 쏟지 못한 것으로 판단된다. 금후 용접·접합연구가 크게 활성화되기 위하여서는 이들 재료에 대한 수요가 먼저 크게 창출되어야 할 것으로 생각된다. 섬유강화플라스틱 복합재료 (FRP)는 비강도와 비강성이 크고 성형성도 우수하여 항공우주기기 등 널리 사용되는 복합재료의 하나이다. 이 재료의 접합법은 크게 나누어 접착접합과 기계적접합으로 분류된다. 접착접합은 피접합재의 표면에 접착제를 사용하여 접합하는 방법이며 기계적접합은 볼트나 리벳 등을 사용하여 접합하는 방법이다. 두 방법 모두 접합부에서는 섬유에 의한 연속적인 보강효과가 단절되고, 또 응력집중의 장소가 되기 쉽기 때문에 이음부의 설계에 주의를 요한다. 접합제의 역학적 특성에 의존하는 접착접합에서는 접합제층 내의 전단응력이 최소로 되게끔 접합형식을 가능한 단순화하는 것이 중요하다. 이런 점에서 비교적 박판의 경우에는 single lap이 많이 사용된다. Fig. 3에 접합형식을 나타내었다[6]. 기계적접합의 경우에는 체결구멍의 배열이 문제로 된다. FRP의 가공, 강도와 파괴의 해석, 접합설계, 비파괴검사와 평가 등 FRP의 접합을 완성하기 위하여서는 해결하여야할 문제가 많다. 비정질재료에 관한 연구는 극저온 환경하에서 레이저 용접된 비정질재료의 특성에 관한 연구와 Ni-Cr-B-Si계 비정질 용사피막의 제조 및 특성에 관한 연구가 있으며 Al-Li 합금에 관하여는 Varestraint법에 의한 용접성 평가의 연구가 있다. 이들 재료와 비교하여 상대적으로 Ni기 합금에 관한 연구는 활발하여 Rene80의 액상확산접합, Inconel의 마찰용접 그리고 Ni계 초내열합금의 응고균열 등에 관한 연구가 보여진다. 이외에 플라스틱에 관한 연구로 플라스틱의 초음파 용접성, 플라스틱 IC 패키지 접합부 수명예측 연구, 솔더 접합부 신뢰성에 관한 연구가 있다.

이상의 연구경향에서 보는바와 같이 용접·접합연구의 대상으로 되는 신소재는 현재까지 세라믹스가 대부분이다. Table 2에서 보는 것처럼 세라믹스와 금속의 접합에는 용접보다 고상확산접합, 액상확산접합, 브레이징, 마찰압접 등의 접합방법이 널리 사용되고 있다. 따라서 신소재의 접합 가능성을 넓히는데는 신소재의 특성에 합치되는 여러 가지 접합방법을 적절히 선택하여 적정한 접합조건을 찾아내는 것이 중요하다. 예를 들면 근년 마찰압접법이 세라믹스와 금속의 접합, 금속

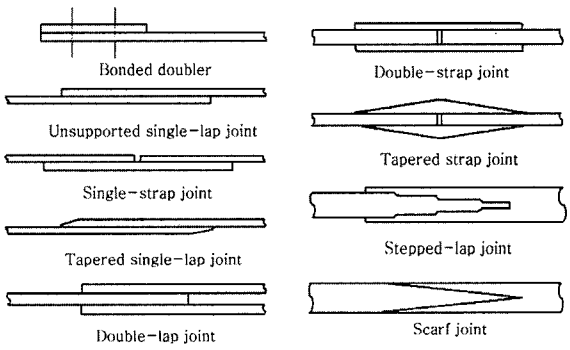

Fig. 3 접착접합에 있어서 접합형식[6]

Table 2 세라믹스와 금속의 접합 방법[1)]

분류		용가재, 인서트재 예, mass%	접합세라믹스 예	접합금속 예	접합조건/K	반응생성물 예	*
브레이징	활성금속	2Ti-(Ag-Cu공정) 28Ti-Cu, 47Zr-Cu, Ti-Cu-Sn, 35Ti-35V-30Zr, Ti-Al	Al_2O_3, Si_3N_4, AlN, Sic, C등 다수	철강, Cu, 인바형 합금, Mo, W등 다수	〉1073, ※V	활성금속의 산화물, 질화물, 탄화물	A
	금속	Al, Al-Si, 35Au-35Ni-Mo	Si_3N_4, Sic, C	Fe-WC-Co,Ti	〉833, ※V		C
	DBC		Al_2O_3	Cu	1336~1355	Cu-O공정	B
	글래스	50CaO-Al_2O_3-6MgO	Al_2O_3, Sialon	Nb, Mo	〉1623,		S
메탈라이즈	활성금속	Ti, 그외 브레이징과 동일	각종			브레이징과 동일	
	고융점금속	Mo-Mn	Al_2O_3(고순도제외)		〉1673, ※H		
	직접	Ni, Fe, Co(함유금속)	Si_3N_4		〉1503, ※V	Ni, Fe, Co의 실리사이드	
	탄산은	$AgCo_3$	MgO		〉1223		
고상접합	가열·가압	FeO	Si_3N_4	철강			A
	압접		Si_3N_4	Al			
용접	EB, 아크		Al_2O_3, C	Ta, W			
접착	유기	에폭시계	각종	각종			C
	무기	알루미나계, 실리카계					
기계적	열간삽입		Si_3N_4	철강			
피복	PVD		ZrO2	Ni합금			
	용재		ZrO_2, Al_2O_3	Ni합금, STS			

* : 접합강도(인장강도 목표),A: 100MPa이상, B: 50~100, C:50이하(단 응력완화층의 적용), S: 기밀성
※V: 진공, 불활성가스, ※H:가습 수소분위기 중

간화합물, 금속기복합재료, 형상기억합금 등의 접합에 사용되고 있다. 이것은 마찰압접이 접합계면부에서 용융없이 발열하여 커다란 소성유동을 수반하기 때문에 이종재료간의 접합을 용이하게 하는 특성을 갖고 있기 때문이다. Fig. 4에는 철기 산화물분산강화합금 MA956 마찰압접이음부의 고온기계적성질의 예를 나타내었는데 이음부가 고온에서도 충분한 강도를 나타내고 있음을 알 수 있다[1)]. 또 용접열원으로서 고출력레이저는 고밀도 에너지로 재료를 국부적으로 가열·용융시켜 모재의 용접열영향을 적게 하는 것이 가능하여 복합재료의 용접에도 적용된다. 한편 새로운 접합방법으로 마찰교반 접합법은 종래 용접이 곤란하다고 여긴 Al합금의 접합방법으로 주목받고 있다. 금후에도 많은 신소재가 그 필요에 응하여 개발될 것이다. 그 중에서도 특히 구조재료로서 유망한 금속간화합물 및 금속기복합재료에 대한 다양한 용접·접합방법을 개발하면 이들 재료의 특성을 넓혀 가는 것이 가능하기 때문에 세라믹스처럼 계통적인 연구가 필요하다 하겠다.

각종 산업에서의 사용량과 다양한 적용분야를 감안하면 철강재료는 여전히 가장 중요한 재료의 하나이다.

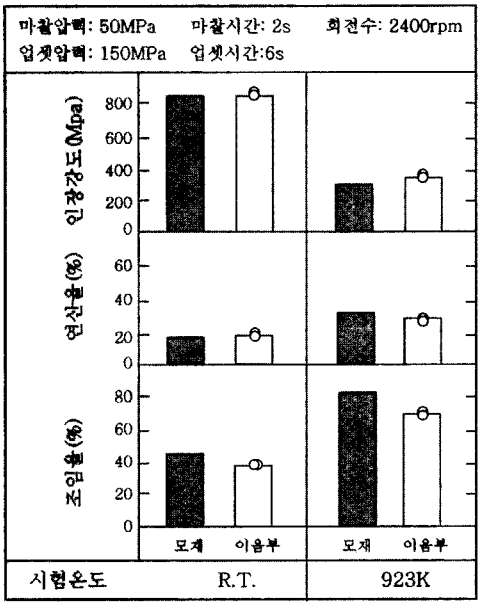

Fig. 4 철기 산화물 분산강화합금 MA956마찰 압접 이음부의 상온 및 923K에 있어서 기계적 성질[1)]

이러한 점에서 현재보다 강도와 수명이 획기적으로 개선된 새로운 철강재료가 개발되면 산업에 큰 영향을 미

칠 것이다. 이러한 인식하에 우리나라와 일본 등에서는 현재 여러 이름으로 새로운 철강재료의 개발연구가 진행되고 있다. 우리나라에서는 차세대 구조용강 개발의 이름으로 ① 초미세립 800MPa급 구조용강, ② 수소지연파괴 저항성이 우수한 1500MPa급 고장력 볼트용강, ③ 산화막 특성을 개선한 장수명 내후성강 등의 개발을 추진하고 있다. Fig. 5에서 보는 것처럼 페라이트 결정립의 크기를 1㎛로 미세화하면 항복강도는 약 800MPa로 증가하는 반면 파면천이온도는 약 -200°C까지 저하한다[7]. 따라서 초미세립강은 합금원소의 첨가 없이 고강도를 얻을 수 있어 우수한 용접성이 기대된다. 하지만 용접 열영향부에서는 결정립 성장이 일어나 강도와 인성이 모재 이하로 저하할 것으로 예상되기 때문에 이에 대한 대책이 필요할 것이다. 이를 위하여 질화물이나 산화물을 이용한 결정립 성장억제 연구, 레이저, 협개선용접법의 적용에 의한 열영향부의 최소화 연구 등 여러 측면에서의 연구가 진행되고 있다. Fig. 6에는 저주파 펄스전류로 폭 5mm의 초협개선용접을 행하여 모재의 용융폭을 0.5mm, 열영향부 폭을 1mm 이하로 억제한 실험결과를 나타내었다[1]. 기술이 이미 완성되었다고 생각하는 철강재료에서도 이와 같은 기술적인 혁신을 통하여 완전히 새로운 성질을 갖는 재료로 재탄생을 시도하고 있다.

4. 결 론

앞서 지적한 것처럼 신소재의 정의는 매우 포괄적이나 일반적으로 금속계로서는 금속간화합물, 복합재료, 형상기억합금, 비정질재료, 초전도금속, 생체적합성금속 등을, 비금속계로서는 다양한 기능의 여러 세라믹스들을 들 수 있다. 이들 재료 중 세라믹스, 특히 세라믹스와 금속간의 용접·접합에 관한 연구가 가장 활발하며

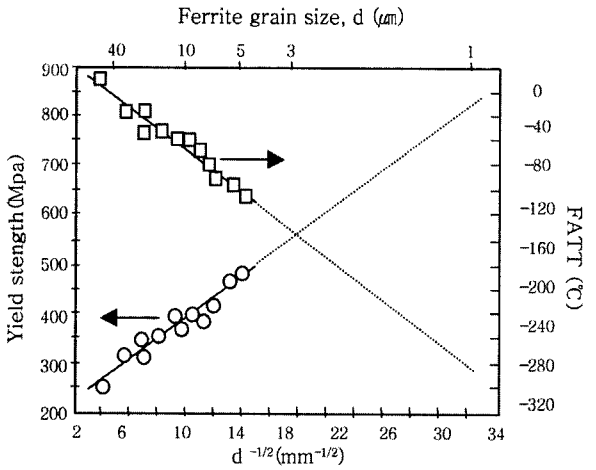

Fig. 5 페라이트 결정립 크기에 따른 항복강도와 천이온도의 변화[7]

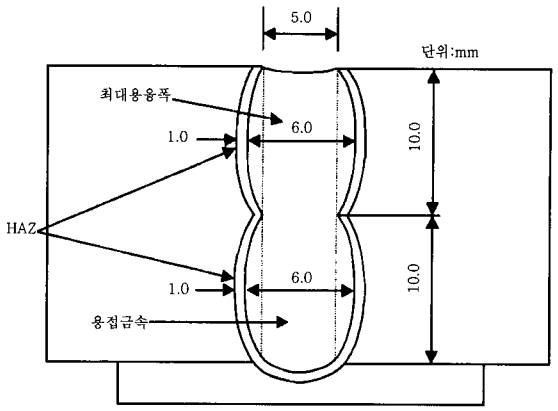

Fig. 6 직류 펄스 MIG용접에 의한 초협개선 용접법의 용입형상[1]

그 외의 재료에 대하여서는 연구실적이 미미하다. 이것은 이들 재료의 제조방법이나 기계적 특성이 충분히 확립되어 있지 않기 때문인 것으로 판단되어 금후 이들 재료에 대한 수요가 먼저 크게 창출되어야 할 것으로 생각된다. 세라믹스와 금속의 용접·접합의 연구도 우리나라의 경우에는 접합부 계면반응의 관찰이 대부분을 차지하여 접합이음부 특성 및 그 지배요인의 해명, 접합부의 역학적 특성 및 신뢰성 평가 등 다양한 연구가 필요하리라 생각된다. 이러한 관점에서 신소재에 대한 새로운 접합·접착 기술개발과 동시에 접합부 성질, 즉 이음부성능을 시험하고 평가하는 시험·평가방법을 개발하고 표준화할 필요성이 시급하다고 하겠다.

참 고 문 헌

1. 條崎: 新素材ブームのその後, 溶接技術, **47-8** (1999), 101-106 (in Japanese)
2. 條崎: 新材料の溶接·接合研究の成果と今後の展開, 溶接學會誌, **67-1** (1998), 39-43 (in Japanese)
3. 田中: 新素材とは?またその接合とは?, 溶接學會誌, **55-8** (1986), 466-468 (in Japanese)
4. 西口: 新版 接合技術總覽, 新版接合技術總覽編集委員會, 産業技術サービスセンター, (1994), 1008 (in Japanese)
5. 佐野: 金屬系新材料開發の現狀, 機械の研究, **49-1** (1997), 32-37 (in Japanese)
6. 坂本: 複合材料の接合, 第128回 西山記念技術講座, 日本鐵鋼協會, (1989), **235** (in Japanese)
7. 志賀: STX-21グロヅエクトにおける高張力鋼の開發とその課題, 溶接技術, **46-7** (1998), 81-87 (in Japanese)

• 방국수(方國守)
• 1955년생
• 부경대학교 재료공학부
• 재료의 용접성, 용접재료 개발, 용접부 모델링
• e-mail: ksbang@pknu.ac.kr