

# Smart 무기체계 획득을 위한 시험평가 결합 및 보완요구사항의 신속, 안전, 저비용 시정 신기술(Adhesive-Bonded Fastener 기술)

최지원

(주)도일코리아

Email : jiwon.choi@dokor.com

## 요약

함정은 탐색개발의 설계 단계에서 많은 시행 착오와 Trade-off 과정을 거쳐 최적의 설계안을 도출해 내고 있지만, 100% 완벽할 수 없기 때문에 함정의 체계개발 단계에서 시험평가 과정에서 많은 결합 및 보완요구사항이 발생되고 있다. 미 해군의 함정을 해군에서 인수 한 이후에도 끊임없이 이러한 결합 및 보완요구사항을 식별하여 반영하고 있고, 이렇게 할 수 있는 이유는 결합 및 보완요구사항을 시정하기 위한 핵심 기술로서 적기에 신속, 안전, 저비용으로 시정할 수 있는 Adhesive-Bonded Fastener 기술을 적용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 함정에 탑재되는 장비 및 설비를 기존의 용접 방식이 아닌 접착 방식의 기술을 적용함으로써 결합 및 보완요구사항을 시정하는데 융통성을 부여할 수 있는 기술을 소개하고자 한다.

## 1. 서론

군의 요구성능을 만족하는 함정을 전력화 시기에 맞춰 적기에 경제적으로 인도하기 위해서는 연구개발주관기관의 기술 및 품질의 관리는 무엇보다도 중요한 요소이다. 함정은 일반무기체계와 달리 복합 무기체계로서 획득기간이 장기간 소요되고, 선도함이 실전배치되고 대부분 국내에서 설계, 건조되고 있다. 또한 소량, 고단가로 선도함의 연구개발과 동시에 후속함 양산을 수행하고 있다. 함정은 탐색개발의 설계 단계에서 많은 시행 착오와 Trade-off 과정을 거쳐 최적의 설계안을 도출해 내고 있지만, 100% 완벽할 수 없기 때문에 함정의 체계개발 단계에서 시험평가 과정에서 많은 결합 및 보완요구사항이 발생되고 있다. 미 해군의 경우 60,000명 이상의 기술조직인 NAVSEA와 1,000명 이상의 현장관리조직인 SUBSHIP을 보유하고 있음에도 불구하고 신조 함정의 심각한 품질문제를 겪고 있다. 특히 함정이 80%이상 건조된 상황에서 시험평가 시 결합 및 보완요구사항에 대한 시정 공사 시 불가피하게 발생하는 주변 장비/설비의 분리, 철거, 이전 설치, 분리 및 재설치 작업을 위한 안전상의 문제, 추가 예산 낭비 문제와 전력화 지연 등으로 인해 많은 결합 및 보완요구사항을 적기 시정하지 못한 채 해군에 인도되고 있다. 하지만 미 해군은 함정을 해군에서 인수 한 이후에도 끊임없이 이러한 결합 및 보완요구사항을 식별하여 반영하고 있다. 선도함에서 식별되는 수많은 결합 및 보완요구사항이 선도함은 물론 후속함에 반영하고 있다는 것이다. 이렇게 할 수 있는 이유는 크게 한국과 대별되는 함정 획득제도와 결합 및 보완요구사항을 시정하기 위한 핵심기술을 적용하고 있기 때문이다. 획득제도 측면에서는 미 함정 획득체계는 한국과 달리 실 환경에서의 운용시험평가를 함 인수 후에 실시하고 있고, 기술적인 측면에서는 적기에 신속, 안전, 저비용으로 시정할 수 있는 핵심 기술, 즉, Adhesive-Bonded Fastener를 소개하고자 한다. 이 기술은 함정에 탑재되는 장비 및 설비를 기존의 용접 방식이 아닌 접착 방식의 기술을 적용함으로써 결합 및 보완요구사항을 시정하는데 융통성을 부여할 수 있는 특징이 있다.

## 2. 본론

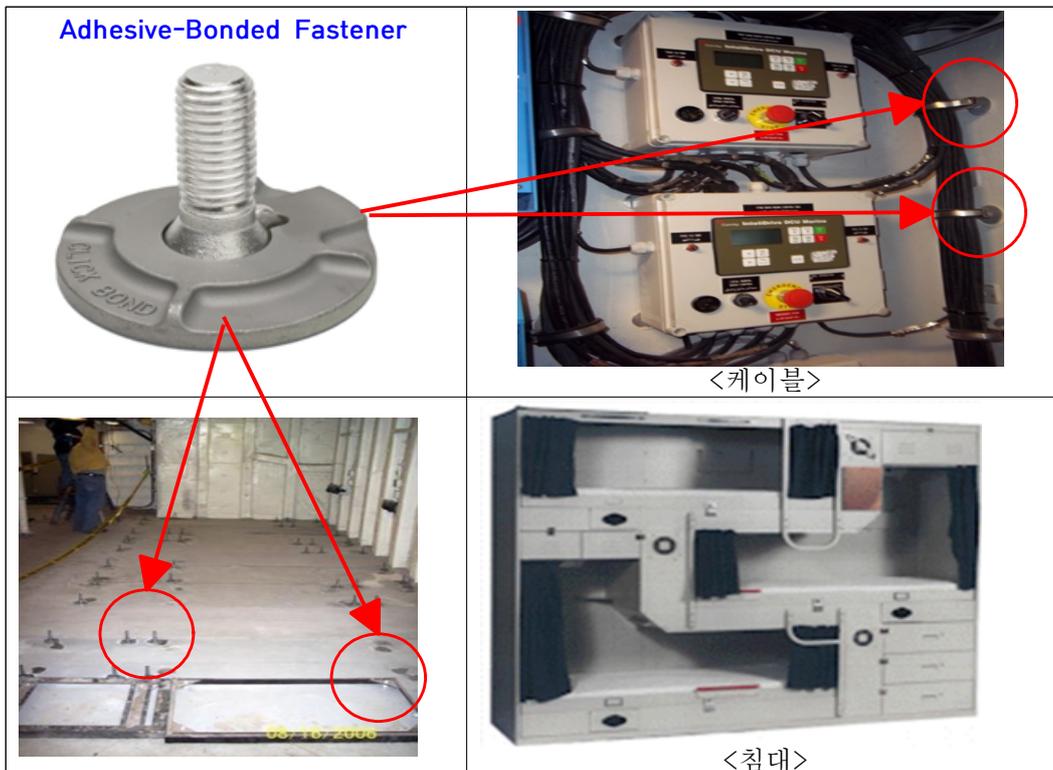
미국은 막대한 비용의 함정 획득사업에 있어서 끊임없이 제기되는 품질 저하 문제를 개선하기 위해 국회의 지시에 따라 회계청(GAO: Government Accountability Office)이 수행한 2013년 정책 연구보고서에서 2006년부터 2013년까지 해군이 인수한 신조 함정의 선체, 기계류 및 전기계통(H&ME)에 대해 품질 문제를 조사 분석하였다. DDG-1000 획득사업의 교훈으로 미 해군이 최초 예측한 함정 획득비용보다 약 56%가 증가하여 예상치 못한 엄청난 획득비용이 증가하였는데, 그 원인으로 새로운 신기술을 과대 적용했기 때문이라고 분석하였다. 이에 따라 급속도로 변화하는 기술집약적 시대적 패러다임의 변화로 함정 설계 및 건조

에 있어서도 창의성, 신속성, 유연성에 대한 요구도가 증대되고 있었다. 첨단 과학기술과 정보통신 기술의 발달로 변화속도가 가속화 되고, 함정에 탑재되는 신기술이 많아질수록 시험평가 기간 중 발생하는 결함 및 보완요구사항이 급속하게 증가됨에 따라 미 해군은 국방예산 확보여건 악화 상황속에서 이러한 결함 및 보완요구사항을 최대한 신속하고, 안전하게 특히, 저비용으로 시정할 수 있도록 함정 설계단계부터 탑재장비 및 설비 설치 방식에 있어서 기존의 선체 용접 방식 대신 유연성 있는 설치, 이전을 위해 Adhesive-Bonded Fastener이라는 기술을 개발, 적용하고 있다.

### 2.1 미 해군의 Adhesive-Bonded Fastener 기술 적용 필요성

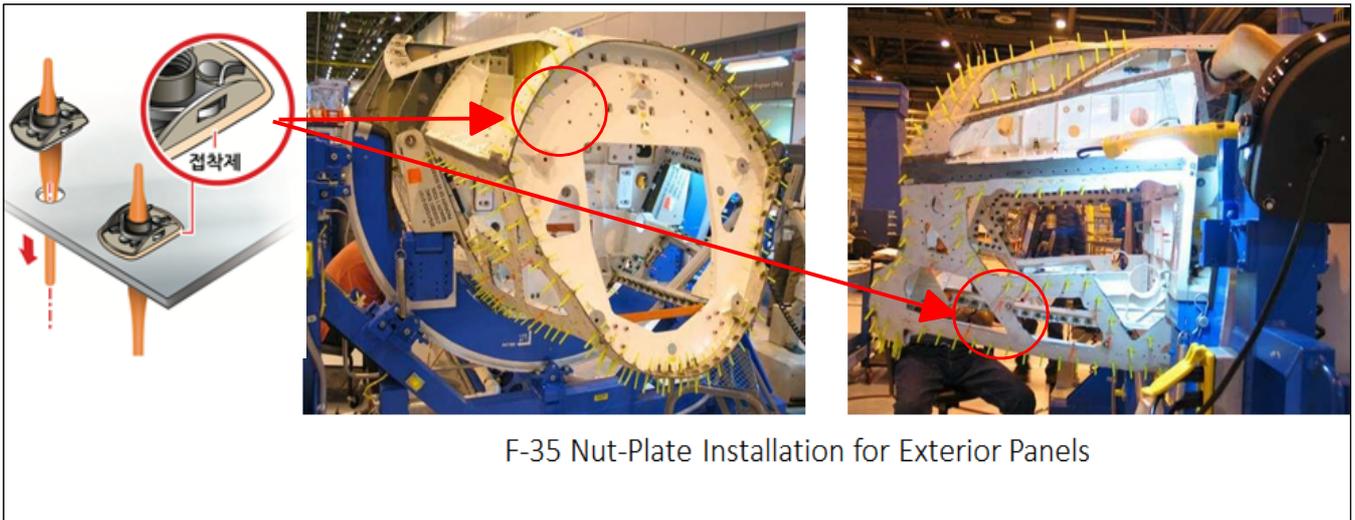
시스템 공학(SE : System Engineering) 획득제도에 따라 획득대상 함정을 단일 무기체계 및 추진체계 등 탑재체계와 동일하게 연구개발을 통해 획득하려면 선도함은 시제품(Prototype)이 되어야한다. 미 해군 차세대 구축함 DDG-1000나 LCS(연안전투함) 등과 같이 선체 및 추진체계 설계에 있어서 기존 기술 대비 현저한 신기술이 적용되는 경우에는 특히나 선도함을 연구개발 사업으로 시제품을 먼저 제작하고, 이에 대한 개발/운용시험평가를 거쳐 ‘기준 충족’ 즉, 성공하면 양산에 착수해야 할 필요성이 증대된다. 함정은 100여개 이상에 달하는 무기체계 및 장비를 탑재, 연동해야하는 요구조건이 있어 결함사항 다수 발생 불가피하다. 이에 따라 미 해군은 특히 함정사업 특수성을 고려 SECNAVINST 5000.2D와 같이 일반무기체계 연구개발절차와는 별도의 함정 획득 절차를 제정하여 적용중이다. 그럼에도 불구하고 미 해군 LPD-8의 경우도 다수의 결함사항(12,000건)이 발생하고 있으며, 다수의 결함사항이 미 해결된 상태에서 함정을 인수하고 있다. 특히, 美 해군은 SE 절차를 적용하여 함정을 설계하고, 또 약 1,000명 규모의 현장감독관실을 운영함에도 불구하고 선도함의 경우 중대/경미 결함이 수백~수천건 발생하고 있는 사례를 볼 때 선도함부터 전력화 해야하는 한국의 경우는 선도함에 다수의 결함이 발생할 수 밖에 없는 것이 현실이다.

함정은 Class나 Type별로 소품종 대량생산 이후 순차적으로 개선 및 성능 개량을 하기 위해 선도함 설계와 건조를 매우 중요시한다. 선도함 시험 평가나 전력화 기간 중에 많은 식별된 설계 및 건조 시 결함이나 보완요구사항 등을 Trial & Error 방식으로 해결방안을 찾고, 이를 유연성 있게 시정하기 위해 Adhesive-Bonded Fastener 기술을 적용중이다. 미 해군 또한 미 의회에 사업별 예산보고서를 제출하고 있고 예산 절감방안에 대한 지속적인 압박을 받고 있어 기존 설계/건조 방식에서 탈피하여 이 기술의 적용 필요성을 절감하게 되었다고 할 수 있다.



<그림 1. Adhesive-Bonded Fastener 적용 사례 1(케이블 및 침대 설치(2" Bulkhead Studs))>

미 해군은 초기 획득 단계인 1번함 설계단계부터 설계나 건조의 효율성, 융통성, 확장성을 얻기 위해 기존의 용접 방식을 탈피하여 이 기술을 적용중이다. 1번함은 물론 이후 건조되는 함정(후속함)에 신기술이나 결함 및 보완요구사항을 지속적으로 반영하고 향후 함정 수명주기 동안 성능개량까지 고려해야할 필요성이 절실했다. 함정 전투성과 관련되는 핵심 체계나 장비는 물론 발라스트 탱크내 호스, 배관, 흡/배기구, 전기/통신 케이블, 장비/설비, 승조원 거주성, 정비성과 관련되는 침대, 의자, 식탁, 의료 침대, Well Deck에 이르기까지 거의 모든 분야/부위에 적용중이다. DDG-1000, LCS 함정은 아직까지도 무수한 시행착오를 겪으면서 최고의 Smart 무기체계 성능 획득을 위해 개선하고 있는데, 그렇게 할 수 있는 이유는 이러한 유연성 있는 신기술인 Adhesive-Bonded Fastener를 적용할 수 있었기 때문이다. 그림 1과 같이 미 해군 함정 USS Wasp LHD-1(400 Studs), USS Bataan LHD-5(400 studs), USS Mesa Verde LPD-19(1000 studs), USS New York LPD-21(250 studs), USS Leyte Gulf CG-55(300 studs)을 적용하였다.



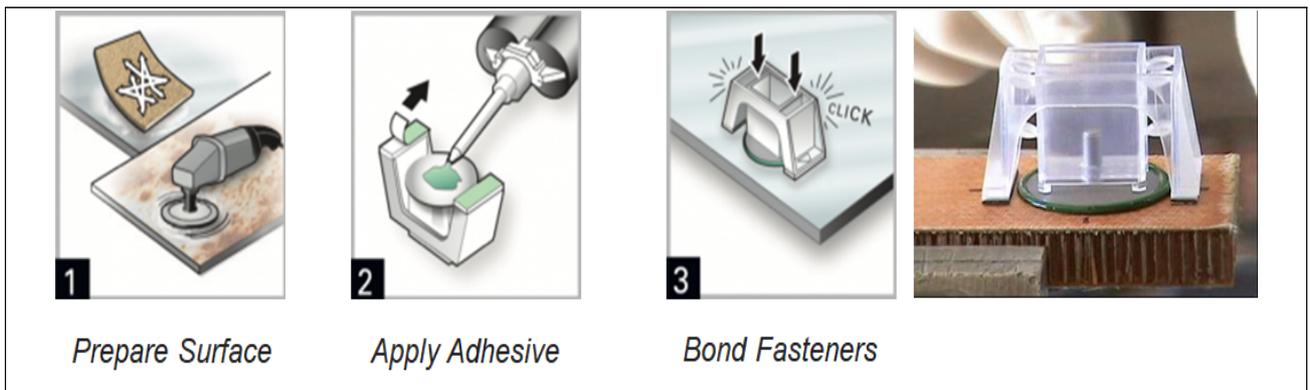
F-35 Nut-Plate Installation for Exterior Panels

<그림 2. Adhesive-Bonded Fastener 적용 사례 2(F-22 랩터 및 F-35에 적용)>

이러한 Adhesive-Bonded Fastener 기술은 그림 2와 같이 세계 최고 기술의 최선에 전투기인 F-22 랩터나 F-35에도 적용중이며, F-35 전투기에는 약 35,000개를 적용하여 수백 파운드의 무게를 감소시켰다.

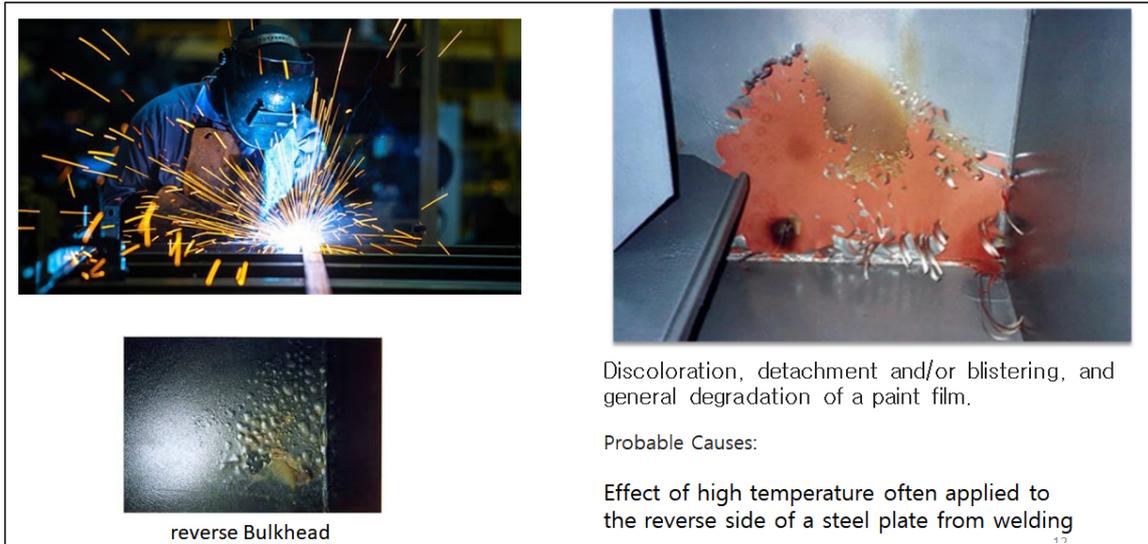
### 2.2 Adhesive-Bonded Fastener 특징

Adhesive-Bonded Fastener는 선체 등 모재에 구멍을 뚫거나 용접을 하지 않고 볼트, 너트, 케이블마운트 등의 다양한 파스너를 접착본드식으로 접합하는 기술이다. 민감한 전자장비나 유류, 가스탱크 등이 있는 장소의 체결에 적합하며 용접화기와 기존 이중금속간의 갈바닉 반응에 의한 부식을 일으키지 않는다. 특히 함정의 실 운용환경인 섭씨-45 ~ 125도에서 사용할 수 있으며, 염수 및 진동, 충격 등의 특수성능이 요구되는 부위에도 설치 제거가 용이하다. 그림 3과 같이 모든 Adhesive-Bonded Fastener는 설치 고정구가 있으며 고강도의 결함 부착을 보장하며 설치가 아주 쉽다는 장점이 있다.



<그림 3. Adhesive-Bonded Fastener 설치 방법>

그림 3과 같이 Adhesive-Bonded Fastener는 접착제 경화 과정에서 접합부에 일정한 압력을 가하기 위해 고정물 치구를 사용해야 한다. 그렇지 않으면 접합부에 공기/습기가 유입되어 결합력 저하, 부식 등으로 인한 내구성과 수명이 저하 될 수 있기 때문이다. 따라서 미 해군 NAVSEA(Department of the NAVY Naval SEA Systems command), ABS와 Lloyd's Register, RINA, DNV-GL 등 세계 주요 선급의 승인 인증되어 충격 (shock) 및 염수 분위기 및 노출 환경에서 내구성이 요구되는 곳에서 사용되고 있다. 해상에서 선박 운항중에 개조 및 수리에 용이하다는 장점이 있다. 그림 4와 같이 기존의 용접 방식은 선체에 부정적인 영향을 미치고 유류가 탱크내에 존재하면 작업이 불가하고 화재의 위험이 상존하나, 이것은 용접이 필요 없기 때문에 열에 민감한 장비 주변 및 인화성 가스가 심각한 안전 위험이 있는 곳에 부착 할 수 있다. 내구성(수명 : Long term durability) 또한 30일간 테스트 결과 약 30년간 견딜 수 있음이 증명되었다.



<그림 4. 용접 방식의 단점 >

CB 제품	적용 부위	적용 함정	시험 날짜 / 테스트	적용기준/시험장소
CB3200 Bulkhead studs	Bulkhead studs to 1/4" steel substrate, wire ways		9/16/1991 Shock and Vibration	MIL-S-901D
	wire ways, pipe runs	DDG1000	11/5/2004-2007 Accelerated Aging, Salt/Fog, Shock and Vibration, Fire and Toxicity	NAVSEA, ABS, Huntington Ingalls Industries I, Hi-Test
	3/16" and 1/2" Thick Steel Plate, Aluminum Plate, Stainless Steel Honeycomb Plate Wire runs junction boxes	LPD, DDG	10/22/2012 Shock and Vibration	MIL-S-901D /Huntington Ingalls Industries, NSRP
CB9522 Deck Studs	3/4" Thick Steel Plate-260 lbs. file cabinet, 4 studs	LPD	1/3/2005 Shock	MIL-S-901D /Shenandoah Labs, C-564
	3/4" Thick Steel Plate-190lb locker, 4 studs	LPD	3/8/2005 Shock MIL-S-901D	MIL-S-901D /Shenandoah Labs, C-567
		LPD, LHD	8/27/2007 30 Salt Water Immersion	Alion Science and Technology, NOO024-01-D-7023, DELIVERY OR DER NO. 007
	5/8" Thick Steel Plate-1600lb 3 man sit up berth, 8 studs	LPD	3/5/2007 Shock MIL-S-901D	Shenandoah Labs, C-614
	7/16/2009 Shock MIL-S-901D	LPD	7/16/2009 Shock MIL-S-901D	Shenandoah Labs, C-713

<표 1. 미 해군 함정에 적용 시험 및 성적서/인증서 획득 현황 >

특히, DDG-1000, LPD, LCS 등 최신 미 해군 함정에 사용하기 위해 집중적인 테스트를 통과했으며, 표 1 및 그림 5, 6과 같이 염수 환경에서의 충격과 진동(Hi-Impact Shock Test-Mil-S-901D, Vibrations of Shipboard Equipment MIL-STD-167), 및 fluid immersions, accelerated aging 테스트를 통과했다.



<그림 5. 충격(Hi-Impact Shock Test-Mil-S-901D) 및 진동(MIL-STD-167) 시험 장면 >



<그림 6. 미 해군 연안전투함(LCS Independence) Bumper Installation 장면 >

Adhesive-Bonded Fastener는 표 2과 같이 기존의 용접(welding) 방식 작업적 및 비용적 특성을 분석한 결과 기존 용접 방식 대비 작업시간 및 비용이 1/6(16%)로 획기적으로 절감 가능하다. 화재 및 격벽 이면의 damage가 없기 때문에 안전하며, 작업이 매우 단순하다. 특히 한국 해군 함정 획득에 있어서 주목해야 할 것은 함정을 부두에 정박하지 않고도 적은 인원으로 시공 가능하기 때문에 시험평가 기간 중 결함 및 보완요구사항을 적기에 시정 가능하다는 가장 큰 장점이 있다는 것이다.

구분	인원	시간	용접 비용	CB 점착 비용
필요 공구 준비	1	1	\$ 25.00	\$ 25.00
<b>용접 화재 안전작업승인</b>	1	1	\$ 25.00	0
<b>용접 장비 이동</b>	1	1	\$ 25.00	0
스터드 접합 장소 표면 클리닝	2	1	\$ 25.00	\$ 25.00
물품위치확인 및 표시	2	1	\$ 25.00	\$ 25.00
<b>화재안전 감시인</b>	1	16	\$ 400.00	0
<b>격벽 이면의 물품 제거</b>	3	48	\$ 1,200.00	0
<b>격벽 이면의 도장 제거</b>	1	8	\$ 200.00	0
용접 및 접착스터드 정위치	2	1	\$ 25.00	\$ 25.00
스터드에 품목 부착	2	1	\$ 25.00	\$ 25.00
<b>격벽 이면의 재 도장</b>	1	12	\$ 300.00	0
<b>격벽 이면의 보존자재부착</b>	1	8	\$ 200.00	0
<b>격벽 이면에 물품 재 부착</b>	3	12	\$ 300.00	0
구획 내면 도장 보수	1	12	\$ 300.00	\$ 300.00
서명	1	4	\$ 100.00	\$ 100.00
평균 총 작업 시간			<b>127 시간</b>	<b>21 시간</b>
평균 총비용			<b>\$ 3,175.00</b>	<b>\$ 525.00</b>

<표 2. 기존 용접(welding) 방식 대 Adhesive-Bonded Fastener 방식 설치 비용/시간 비교>

\* 출처 : A New Manufacturing Process That Utilizes Adhesive To Permanently Attach Fasteners To Structure-A Cost Saving Alternative to Welding, Larry R. Biggin.

### 2.3 Adhesive-Bonded Fastener 종류

Adhesive-Bonded Fastener의 종류는 설치되는 장비 및 설비의 설치 장소, 부위, 공간, 하중 등에 따라 표 3, 4, 5와 같이 종류가 다양하다.

CB image	Part #	Description	Performance	Approval / Certificate
	CB3019	Swivel Cable-Tie Mount	Click Bond Ultimate Load: Exceeds MS3367 50lbs (23Kg) requirement	ABS, Lloyd's
	CB9120	Low-Profile Cable-Tie Mount	Click Bond Ultimate Load: Exceeds MS3367 50lbs (23Kg) requirement	ABS, Lloyd's DNV-GL
	CB9151	Low-Profile Transverse Cable-Tie Mount	Click Bond Ultimate Load: Exceeds MS3367 50lbs (23Kg) requirement	ABS, Lloyd's DNV-GL
	CB9302	Miniature Cable-Tie Mount	Click Bond Ultimate Load: Exceeds MS3367 50lbs (23Kg) requirement	
	CB1937	Cable Mount	Contact Click Bond for specific application performance	
	CB9205	Strap Loop Mount	Click Bond Ultimate Load: 600 lbs. (272Kg) Tension 600 lbs. (272Kg) Shear	ABS, Lloyd's DNV-GL

<표 3. Cable mounts Type>

CB image	Part #	Description	Performance	Approval / Certificate
	CB4590	Turn Button	Click Bond Ultimate Load: 250 lbs. (113Kg) Tension 500 lbs. (226Kg) Shear	
	CB9788	Flush Tie-Down Ring 2.63"(66.8mm) Diameter Base	Click Bond Ultimate Load: 1000 lbs. (454Kg) Tension	DNV-GL
	CB9789	Fixed Tie-Down Ring 2.00"(50.8mm) Diameter Base	Click Bond Ultimate Load: 5000 lbs. (2268Kg) Tension 100 lbs. (454Kg) Lateral Pull	ABS, NAVAL, Lloyd's DNV-GL
	CS120	Insulation Blanket Mount Pin	Click Bond Ultimate Load: 25 lbs. (11Kg) Tension 25 lbs. (11Kg) Shear	ABS, Lloyd's
	CS125	Threaded Stud 1.25"(31.8mm) Diameter Base	ABS Design Load: 75 lbs. (34Kg) Tension 150 lbs. (68Kg) Shear Click Bond Ultimate Load: 1000 lbs. (454Kg) Tension 2000 lbs. (908Kg) Shear	ABS, Lloyd's, NAVAL, DNV-GL

<표 4. Tie-Down Ring Type>

CB image	Part #	Description	Performance	Approval / Certificate
	CB3200	Threaded Stud 2.00"(50.8mm)Diameter Base	ABS Design Load: 100 lbs. (45Kg) Tension 150 lbs. (204Kg) Shrear Click Bond Ultimate Load: 1700 lbs. (771Kg) Tension 4000 lbs. (1814Kg) Shear	NAVAL, ABS, Lloyd's ETR03-041
	CB9522	High-Shock Deck Stud 2.63"(66.8mm)Diameter Base	ABS Design Load: 500 lbs. (227Kg) Tension 900 lbs. (408Kg) Shrear Click Bond Ultimate Load: 6000 lbs. (2722Kg) Tension 9000 lbs. (4082Kg) Shear	NAVAL, ABS, Lloyd's MIL-STD-901C/D
	CB9784	Electrical Grounding Spacer Stud 2.00"(50.8mm)Diameter Base	Click Bond Ultimate Load: 1700 lbs. (771Kg) Tension 4000 lbs. (1814Kg) Shear	NAVAL, ABS, Lloyd's MIL-STD-1310
	CB3001	Threaded Standoff 1.25"(31.8mm)Diameter Base	ABS Design Load: 75 lbs. (34Kg) Tension 150 lbs. (68Kg) Shrear Click Bond Ultimate Load: 1000 lbs. (454Kg) Tension 2000 lbs. (908Kg) Shear	

<표 5. Threaded Stud>

### 3. 결론

한국도 미국과 같이 SE절차를 적용하고 있고 함정 체계개발 단계의 시험평가 과정에서 많은 결함 및 보완 요구사항이 발생하는 것은 불가피한 상황일 것이다. 하지만 함정이 80% 이상 건조된 상황에서 시정 공사 시 불가피하게 발생하는 주변 장비/설비의 분리, 철거, 이전 설치, 분리 및 재설치를 위한 안전상의 문제, 추가 예산 낭비 문제와 전력화 지연 등으로 인해 많은 결함 및 보완요구사항을 100% 시정하지 못한 채 시제함을 그대로 해군에 인도 및 전력화되고 있다고 예상할 수 있다. 일부 보완요구사항에 대해서는 전력화 시기나 보증수리 기간에 예산과 시정 소요기간이 허락되는 범위내에서 일부만 시정되고 있고 특히 선도함 시험평가 도중에 후속함 2~3척이 동시에 건조되고 있는 상황에서 선도함에서 식별된 결함 및 보완요구사항이 후속함에 반영되기는 사실상 불가능에 가깝다고 할 수 있다. 급속도로 변화하는 기술집약적 시대적 패러다임의 변화로 한국 해군 함정 설계 및 건조에 있어서도 창의성, 신속성, 유연성에 대한 요구도가 이미 증대되고 있다. 이 Adhesive-Bonded Fastener 기술은 함정 전투성과 관련되는 핵심 체계나 장비는 물론 발라스트 탱크내 호스, 배관, 흡/배기구, 전기/통신 케이블, 장비/설비, 승조원 거주성, 정비성과 관련되는 침대, 의자, 식탁, 의료 침대, Well Deck에 이르기까지 거의 모든 분야/부위에 적용 가능하다. 따라서, 한국 해군 함정의 성능보장을 위해 선도함에서 식별된 결함 및 보완요구사항을 최대한 반영하고 후속함에도 최대한 할 수 있도록 신속, 안전, 저비용의 신기술을 적용할 필요성은 충분할 것이다.