

# 품질 기능 전개법과 위험 부담 관리법을 조합한 설계 최적화 기법의 용접 품질 감시 시스템 개발 응용

## Weld Quality Monitoring System Development Applying A Design Optimization Approach Collaborating QFD and Risk Management Methods

손 중 수, 박 영 원  
(Joong-Soo Son and Young Won Park)

**Abstract** : This paper introduces an effective system design method to develop a customer oriented product using a design optimization process and to select a set of critical design parameters. The process results in the development of a successful product satisfying customer needs and reducing development risk. The proposed scheme adopted a five step QFD(Quality Function Deployment) in order to extract design parameters from customer needs and evaluated their priority using risk factors for extracted design parameters. In this process, we determine critical design parameters and allocate them to subsystem designers. Subsequently, design engineers develop and test the product based on these parameters. These design parameters capture the characteristics of customer needs in terms of performance, cost, and schedule in the process of QFD. The subsequent risk management task ensures the minimum risk approach in the presence of design parameter uncertainty. An application of this approach was demonstrated in the development of weld quality monitoring system. Dominant design parameters affect linearity characteristics of weld defect feature vectors. Therefore, it simplifies the algorithm for adopting pattern classification of feature vectors, and improves the accuracy of recognition rate of weld defect and the real time response of the defect detection in the performance. Additionally, the development cost decreases by using DSP board for low speed because of reducing CPU's load adopting algorithm in classifying weld defects. It also reduces the cost by using the single sensor to measure weld defects. Furthermore, the synergy effect derived from the critical design parameters improves the detection rate of weld defects by 15% when compared with the implementation using the non-critical design parameters. It also results in 30% saving in development cost. The overall results are close to 95% customer level showing the effectiveness of the proposed development approach.

**Keywords** : customer needs, QFD, critical design parameter, risk management, weld quality, neural network

### I. 서론

개발단계에서 고객의 요구사항을 철저히 반영하기 위해서는 모든 설계변수를 고려하여 설계최적화를 해야 하지만 현실적으로 불가능하다. 이러한 이유에서 제품개발의 효율성을 극대화하여 최소의 설계변수로 고객의 요구사항을 최대로 만족시키기 위한 제품개발 공정체계가 요구된다. 오늘날과 같이 기능의 복합화와 학제간 합성을 수용해야 하는 제품의 특성으로 인해 고려해야 할 설계변수가 증가하고, 제품 개발 목표 달성중대가 제품의 전수명주기에 걸쳐 위협적인 요인이 되고 있다. 따라서, 복합화와 다기능의 제품을 개발하기 위해 요소기술 합성의 시너지효과 달성을 체계적으로 관리하는 개발 접근방법의 패러다임 변화가 요구된다. 이러한 관점에서 개발목표(고객의 요구사항)달성에서 파생되는 불확실성의 최소화과 최대의 중요성을 동시에 내포한 핵심설계변수를 도출하여 초기 개발 단계에서 중점관리하여 궁극적으로 고객의 요구사항을 만족시키며, 동시에 성공 가능성을 극대화하는 최적의 방법론과 절차가 필요하다. 일반적으로, 고객의 요구사항인 제

품의 성능, 제품의 개발일정, 그리고 제품의 가격 등을 만족시키기 위해 내재된 불확실한 요소에 대한 위험부담 분석과 평가에는 많은 이견이 있어 왔고, 이를 해결하기 위한 다양한 접근 방법론과 평가기준을 확립하기 위한 노력이 꾸준히 전개되어왔다[1][2][17]. 그러나, 이러한 접근방법의 결과로 도출된 설계인자를 제품개발에 반영하는 체계적인 접근방법의 부족으로 다양한 고객의 요구사항을 제품개발에 효과적으로 반영하지 못함으로써 보다 효율적이고 압축된 개발체계의 필요성이 요구된다. 따라서, 본 논문에서 제안된 설계 최적화 방법은 품질 기능 전개법[1][2]과 위험부담 평가[3][4][5][16]의 연속적인 적용으로부터 도출된 핵심설계변수 중심의 집약된 재원으로 고객의 요구사항을 최대로 반영하고 개발 구현의 위험부담이 고려된 제품을 개발할 수 있는 방법론이다. 제안된 방법의 효과성은 실제 제품 개발의 적용결과로부터 평가하였으며, 적용 대상은 "레이저 용접 품질 감시 시스템 개발"로 레이저 용접 공정시 용접부의 결함률 100% 전수 검사하는 장치로써 자동차 및 철강 등의 생산공정 자동화를 위해 갖추어야 하는 핵심기술이다. 현재 일부 선진자동차국가(미국, 일본 등)의 산업현장에서 제한적으로 활용되고 있지만, 고

비용(\$30,000~\$50,000)과 용접공정 생산성의 향상을 위한 성능한계(판정의 정확도, 판정의 속응성 등) 등으로 관련 기술의 개발이 시급하다. 그러나, 관련기술의 결과가 생산공정의 생산성에 미치는 과급효과로 인해서 선진 개발업체에서 관련 기술보호의 심화로 제품개발에 많은 어려움이 있다[6][7][8]. 또한, 종래의 용접 품질 관리[9]는 용접 후, 비드(bead)의 균일성이나 두께를 간이로 측정, 비파괴 검사, 그리고 성형해석(stamping)을 통하여 샘플에 의한 통계적인 방법으로 품질검사를 실시해왔으나, 신뢰성과 경제성 측면에서 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 논문은 상기한 문제들을 효과적으로 최소화하여 고객의 핵심요구사항 만족을 극대화할 수 있는 제안된 기법의 효과성을 검증하고, 제안된 방법론의 논점에 대한 정확한 이해를 돕기 위해 실제 제품 개발에 적용하였다.

II. 제안된 설계 최적화 방법

1 문제접근의 기본 개념

제안된 최적화 기법은 그림 1의 설계 목표달성 오차( $\Delta e$ )를 QFD와 위험부담 관리의 연속적인 적용과정을 통해서 도출된 핵심설계변수를 이용하여 개발초기 개념 설정 단계에서 효과적으로 감소시키기 위한 방법론이다. QFD는 제품을 처음 개발시 복잡한 다수의 고객 요구사항으로부터 해결책을 찾기 위해서 복잡성을 단계적으로 나누어 분석하여 해결책을 제시하는 방법으로 복잡한 고객의 요구사항으로부터 직접 설계를 행함으로써 발생하는 불명확한 개발문제 정의로 일어나는 시행착오를 감소시켜 설계 자체의 문제를 최소화한다. 위험부담 관리는 QFD과정에서 간과할 수 있는 제품의 전 수명에 걸쳐 잠재된 불확실성과 개발실패의 심각성을 고려하여 핵심설계변수군의 우선 순위를 결정한다.

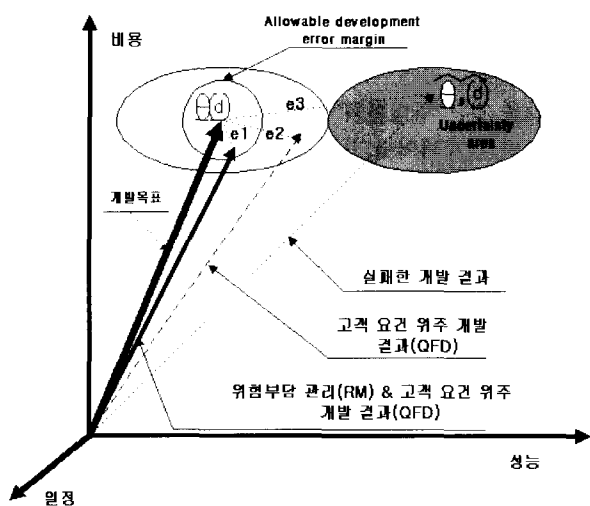


그림 1. QFD와 위험부담 평가를 조합한 제품 설계 개념.

Fig. 1. Product development approach collaborating QFD and risk management.

그림 1의 설계오차는 여러 가지 요소들에 의해 발생한다. 품질 기능 전개법은 이해 당사자들의 요건들을 분석하고 평가하여 설계변수들과의 관계와 요건들의 우선 순위의 정보가 모든 개발 당사자에게 의사 소통될 수 있게 해주지만, 설계변수 구현과 관련된 불확실한 요소들의 영향을 고려해 주지는 않는다. 따라서, 불확실성 공간을 함께 고려한 설계 최적화 문제는 개념적으로 (1)로 표현된 Bayes risk  $B[\hat{d}]$ 를 최소화하는 문제로 모형화할 수 있다.

$$B = E\{\|\hat{\theta}(\hat{d}) - \theta(d)\|\} \quad (1)$$

즉, 고객의 모든 요구사항에 대해서 (1)의 설계 목표달성 오차의 크기와 산포도 특성이 최소가 되도록 위험부담이 큰 핵심설계변수의 벡터  $\hat{d}$ 를 결정하고, 집중 관리하여 위험부담이 최소화가 되는 설계방안을 선정하여 개발함으로써 궁극적으로 고객의 필수요구사항을 만족시킬 수 있다는 것이다. 여기서,  $\hat{\theta}(\hat{d})$ ,  $\theta(d)$ 는 각각 구현된 목표설계벡터와 목표설계벡터를 나타내며, 이들은 각각 채택된 설계변수  $\hat{d}$ 와 이상적인 핵심설계변수벡터  $d$ 의 비 선형함수로 볼 수 있다.  $E\{\|\cdot\|\}$ 는 정상분포의 설계오차 확률 공간에서 설계오차 분산 메트릭스(Covariance matrix)를 나타낸다.  $\theta(d)$ 는 그림에서 보듯이 비용, 일정, 그리고 성능을 나타내는 요소들의 모임을 나타내는 벡터이며, 각각의 요소들이 많은 설계변수요소  $d$ 의 함수이므로 실제 완전한 수학적 모형을 개발하기는 큰 노력이 필요하며, 근사적 모형화가 되더라도 여러 학제 요소들이 혼합된 상태에서 설계 최적화를 수행하는 기술에는 제한이 있다. 따라서, 이를 근사적으로 모형화하고, 다목적 최적화(Multi objective optimization)을 수행하게 해주는 품질 기능 전개법이 많이 쓰이고 있다. 하지만, QFD는 (1)에서 확정적인(deterministic) 요소들에 대해서만 근사적 최적화가 이루어지고 불확실성 공간에 대한 배려가 없을 경우 그림 1에서와 같이 개발결과가 목표에 근접하지 못하고 실패할 수 있게 된다. 본 연구에서는 불확실한 요소들에 의한 위험부담 식별과 우선 순위의 조정을 품질 기능 전개법에 의

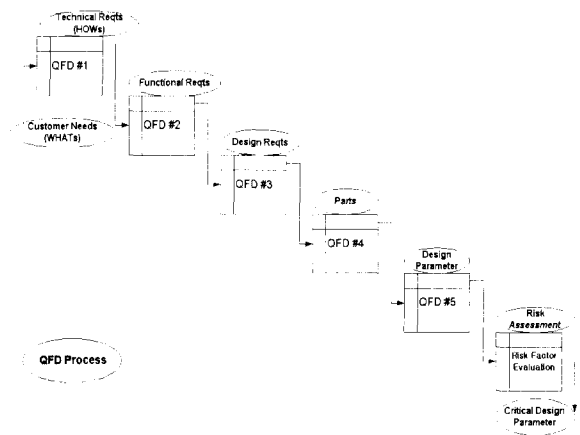


그림 2. QFD를 이용한 핵심설계변수 도출.

Fig. 2. Critical design parameter extraction using QFD.

해 선정된 설계변수들에 적용하여 (1)에서 요구되는 설계 오차 산포도 행렬의 대각선(diagonal) 값들의 합이 최소가 되며, 설계방안  $\theta$ 가 얻어 지도록 설계변수벡터  $q$ 가 정해지는 과정을 근사적으로 단계별로 수행하게 된다.

2. 핵심설계변수군 도출

그림 2는 5단계의 QFD를 적용하여 고객의 요구사항으로부터 핵심설계변수군을 도출하기 위한 과정을 나타낸다. QFD 기법은 WHATs vs HOWs 관계로 구성된 차트 매트릭스로 구성되며, 고객의 요구사항으로부터 핵심설계변수군을 도출한다.

3. 위험부담 평가에 의한 순위결정[3][4][5]

핵심설계변수군의 순위결정은 QFD결과인 핵심설계변수군에 대한 위험부담 지수를 계산하여 평가하며, 우선 순위는 (2)에 의해서 5단계(고, 중·상, 중, 중·하, 하)로 나누어진다.

$$RF = P_i \times C_i \quad (2)$$

여기서,  $P_i$ 는 각 핵심설계변수 구현에 문제가 발생하여 실패할 확률(0~1)로서 총 순위에 걸쳐 잠재된 위험부담에 대해서 설계자의 경험과 지식에 기초하여 확률 값을 결정한다.  $C_i$ 는 다양한 고객의 요구사항을 반영하고 있는 핵심설계변수군의 QFD 가중치를 사용한다. 우선 순위의 결정은 위험부담 지수의 가중치를 상대 평가하여 가장 큰 값을 핵심설계변수로 선정한다. 핵심설계변수의 선정 기준은 Pareto principle[10]에 의해서 결정되며, 위험부담 지수가 0.8이상 초과하는 설계변수를 대상으로 한다. Pareto principle은 새로운 경제학 이론으로써 이태리인의 20%가 이태리 부(wealth)의 80%를 소유한다는 개념에서 출발했으며, 20%와 80%의 정확한 가치는 의미가 없다. 이러한 경제학 이론을 제품설계의 최적화 방법론에 적용해보면 제품설계의 80%의 위험부담이 20%의 설계변수에 의해 좌우된다는 개념아래 이들 핵심설계변수를 선정하여 이 설계변수 중심으로 제품개발을 진행함으로써 고객의 요구사

표 1. 위험부담 평가 매트릭스.

Table 1. Matrix of risk management.

1.0										
0.9										
0.8										
0.7						중·상 20~40%				
0.6										
0.5					중 40~60%					
0.4										
0.3			중·하 60~80%							
0.2										
0.1	하 80~100%									
0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

실제 결과의 심각성

함을 대부분 달성하며, 실패 위험부담을 최소화할 수 있다는 점이다. 이러한 관점에서 핵심설계변수후보군의 위험부담 지수를 계산하여 표 1의 평가 매트릭스에 기록하여 우선 순위를 표시하였다.

III. 레이저 용접 품질 감시 시스템 개발의 적용

레이저 용접 품질 감시 시스템은 레이저 용접 공정에서 방출되는 신호들을 계측, 신호 처리하여 용접공정현상의 이해와 신호와 용접성, 용접품질과의 상관관계를 파악하여 용접부의 용접성을 100% 자동 전수 검사하여 사용자에게 그 결과를 알려주는 시스템이다.

1. 용접부의 시편 결함 판정 기준

그림 3은 용접부의 비드상태를 나타내는 광학사진이며, 모니터링 대상은 용접부 시편부의 성형시 기계적 인장특성에 직접적인 영향을 미치는 용입결함과 기포결함으로 한정하였다[9][11]. 또한, 이들 결함을 감시하기 위한 방법은 용접공정시 발생하는 빛신호를 탐지하여 용접결함을 감시하는 광분석법을 사용하였다.

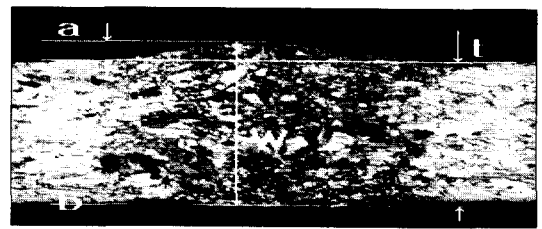


그림 3. 정상용접시의 용접 비드의 광학사진.

Fig. 3. Optical photography of weld bead at normal weld status.

박판 용접부의 양호한 용접 품질 기준은 국제 표준 규격 [9]에 기초한다. 그 기준은 용입결함의 경우 상부비드와 하부비드의 크기가 시편두께의 10%를 초과한 상태를 나타내며, 각각 (3)과 (4)로 표현된다. 여기서,  $t$ 는 시편의 두께이고,  $a$ ,  $b$ 는 각각 상부비드와 하부비드의 두께를 나타낸다. 또한, 기포결함은 (5)에서 나타낸 것처럼 기포의 직경(D)이 0.5mm 이상이 되면, 용접부의 성형성에 영향을 주는 것으로 나타났다.

$$\frac{a}{t} \leq 0.1 t \quad (3)$$

$$\frac{b}{t} \leq 0.1 t \quad (4)$$

$$D \leq 0.5 \text{ mm} \quad (5)$$

2. 핵심설계변수군의 도출

2.1 1단계 : 고객의 요구사항 & 설계 요구사항 비교

그림 4는 고객의 요구사항을 실제 설계를 위한 요구사항으로 변환하였을 때의 상관관계를 나타낸 것으로 우선 순위로 분류하면 크게 두 그룹으로 나뉘어진다. 첫째 그룹 특성은 자동화에 필수적인 성능과 비용측면(판정의 신속성, 시스템의 자동화 정도, 그리고 설계비용) 등의 요인이며, 둘째 그룹은 센서민감도와 센싱인자의 S/N비, 용접결

합의 판정율과 정확도 등 성능에 직접적인 영향을 미치는 요소들이다. 이 단계 내에는 고객의 복잡한 요구사항으로부터 설계요건의 해결책을 도출하기 위해서 설계 요건과 기능적 요건들을 단계적으로 적용하고 있으며, 그 상관관계는 WHATs와 HOWs형태로 표현하고 있다. 고객의 요구사항과 설계 요구사항과의 상관관계에서는 자동화 정도, 설계비용, 그리고 시스템이 동작하는 실험 환경과의 조화 등이 중요한 요소로 나타났다. 그리고, 설계 요구사항과 이를 구현하기 위한 기능적 요구사항과의 상관관계에서는 용접 공정시 발생하는 신호들의 미세 변화를 감지하기 위한 센싱부의 민감도가 가장 중요한 것으로 나타났으며, 신호의 고속처리와 기존 인프라시스템과의 인터페이스 또한 중요한 인자로 나타났다.

WHATs Vs HOWs	Design requirements														
	시스템 구조	센싱 인자 강인성	신호 특성 민감도	판정 정확도	판정 분류율	판정 정확도	판정 정확도	판정 정확도	판정 정확도	판정 정확도	판정 정확도	판정 정확도	판정 정확도	판정 정확도	판정 정확도
Strong relation : □-(9)															
Medi. relation : △-(3)															
Weak relation : ○-(1)															
Customer needs	M														
품질 공정 모니터링 자동화	10	3	3	3	9	3	9	3	1	3	3	3	1	3	3
가격이 저렴할 것	9	3	9	1	9	1	1	1	3	3	3	3	1	3	3
기존 시스템과 조화가 될 것	7	9	3	3	3	3	1	3	3	9	1	1	1	3	3
판정의 정확도가 높을 것	10	3	9	9	3	9	9	1	1	3	1	3	3	3	3
시스템이 안정할 것	7	3	1	1	1	1	1	3	9	1	3	3	3	3	1
유시보수가 용이할 것	6	3	3	1	3	3	3	9	9	1	3	3	9	1	1
모니터링 번위가 넓을 것	7	9	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	9
시스템 작동이 간편할 것	8	1	3	1	1	1	1	9	3	3	1	9	3	1	1
가능한 판정 시간이 짧을 것	8	1	1	9	9	9	3	1	1	1	3	3	1	1	9
실험실 환경에서 동작 가능	4	3	1	1	1	1	1	3	1	3	9	3	3	1	1
Column weight %		4.	6.8	5.9	8.7	5.7	5.7	3.4	5.4	5.4	7.1	3.9	4.	2.1	7.4
Rank		10	4	5	1	6	6	15	14	8	10	2	16	13	17

그림 4. 고객의 요구사항 & 설계 요구사항 관계.  
Fig. 4. QFD evaluation of customer needs versus design requirements.

2.2 2단계 : 설계 요구사항 & 구성요소 비교

그림 5는 그림 4에서 도출된 중요 설계요건들을 모니터링 시스템을 구성하는 요소기술로 변환했을 때 얻은 결과로써, 용접 공정현상의 미세한 동적 특성을 관측하기 위한 센싱 특성과 용접결합별 특징벡터 도출이 중요한 것으로

WHATs vs HOWs	Weight	System elements													
		용접현상 관측	신호 감지 센서	신호 증폭기	센싱장치 구조	신처리 보드	신분석 영역	특징벡터 분류	스터드 설계	분류기	IF 통신모듈	판정결과 표시부			
Strong relationship : □-(9)															
Medi. relationship : △-(3)															
Weak relationship : ○-(1)															
Design requirements	M2														
시스템 H/W 구조	4.7		1	1	3	3	1	1	1	1	3	3			
센싱 인자 강인성	6.8	9	9	3	9	1	1	3	1	3					
신호 특성 민감도	5.9	9	9	3	3		1	9	3	1					
실시간 판정 : 0.5초	8.7	3	1	1	1	9	3	9	3	3	3				
판정 분류율: ≥95%	5.7	9	9	1	1	3	9	9	9	9	1	1			
판정 정확도: ≥98%	5.7	9	3	1	1	1	9	9	9	9	1	1			
탐부착 재현성: ≥98%	3.9		1	1	9								3		
제작시간 : 30분/대	4.0					3								3	
데이터 전송률: 100%	5.3					3	3							9	3
가구부 부착시 절연실	4.7		1	1	3	1								1	
4대/인 동시 운영	7.9	3	3	3	3	9	9	9	9	9	3				
속련자 10분내 작동	3.9					3								3	9
부품 공정지수(CP) 불량률 : ≤ 5%	4.1		9	9	3	9								3	
센싱 장치 무게 : ≤ 1kg	2.8	9	3	3	9	3								1	
설계비용: < 2천만원	7.2	9	9	3	9	9	9	9	9	9	3	1			
물량시 문자/음성 신호 발생	4.8					3								3	9
무게 동/이중 적용	4.5	9	9	3	3	3	9	9	9	9	1	1			
Column weigh %		12.5	12.1	5.9	10.	11	9.8	14	10.2	8.9	5.5				
Rank		2	3	9	5	4	7	1	6	8	10				

그림 5. 설계요구사항 & 구성요소 상관관계.  
Fig. 5. QFD evaluation of design requirements versus system elements.

나타났다.

2.3 3단계 : 구성요소 & 설계변수 비교

그림 6은 그림 5의 요소기술들 중에서 고객의 요구사항 만족에 절대적인 영향을 미치는 중요 설계변수 군들을 도출하는 과정이다. 그 결과, 결합별 특징벡터특성과 분류기 선정, 용접결합 반영 센싱인자, 그리고 광신호의 특정파장 대역 등이 핵심설계변수군으로 평가되었다.

그림 6은 그림 5의 요소기술들 중에서 고객의 요구사항 만족에 절대적인 영향을 미치는 중요 설계변수 군들을 도출하는 과정이다. 그 결과, 결합별 특징벡터특성과 분류기 선정, 용접결합 반영 센싱인자, 그리고 광신호의 특정파장 대역 등이 핵심설계변수군으로 평가되었다.

3. 핵심설계변수군의 우선 순위 결정

핵심설계변수군의 우선 순위는 (2)의 위험부담 지수에 의해서 결정되며, 선정기준은 핵심설계변수의 위험부담 지수가 0.8이상 초과하는 설계변수를 그 대상으로 한다. 이러한 과정을 통해서 12개의 설계변수후보군의 위험부담 지수를 계산하면 표 2와 같다. 표 2에서 1, 2번의 설계변수는

WHATs vs HOWs	Weight	Design parameters											
		용접현상 반영인자	센싱 유효 영역	신호 처리기 선정	도출 분석 영역	도출 특성 배터	분류기 선정	관정 결과 일치율	관정 실시간 반응속도	센싱 시스템 설계 비용	신호 처리기 CPU 비용	부품 불량률 손실비용	관정 오류 손실비용
Strong relationship □ (9)													
Medium relationship △ (3)													
Weak relationship ○ (1)													
System elements	M3												
용접 현상 관측 결과	12.3	9	9	1	3	9	9		3	9	3	3	3
신호 감지 센서	12.1	9	9	1	3	9	9		3	9	3	9	9
신호 증폭기	5.9	1	3	3	3	1	1	1	1	9	3	9	1
센서 장치 구조	10.5	3	9	1	1	3	3	1	3	3	1	1	3
신호 처리 보드	11	1	1	9	3	1	1	3	9		9	3	1
신호 분석 영역	9.8	9	9	3	9	9	9	3	1				3
특징벡터도출 알고리즘	14	9	9	3	9	9	9	1	3		3		9
분류기 설계 알고리즘	10.2	9	9	3	9	9	9	1	3		3		3
LF 통신 모듈	8.9	3	3	3	3	1	1	3	3	1	3	3	3
관정 결과 표시부	5.5	1	1	3	1	1	1	9	3	1	1	1	1
Column weight %		20.24	58.2	12.5	17.2	17.2	4.7	7.9	5.6	6.3	5.1	10.3	
C <sub>r</sub> weight		1.0	1.0	0.4	0.6	0.8	0.8	0.2	0.35	0.25	0.3	0.2	0.5
Rank		2	1	8	5	3	3	12	7	10	9	11	6

그림 6. 요소부품 & 설계변수 상관관계.

Fig. 6. QFD evaluation of parts versus design parameters.

표 2. 핵심설계변수군의 위험부담 지수 평가.

Table 2. Risk evaluation of critical design parameters.

설계변수	평가	위험 부담 평가			
		C <sub>r</sub>	P <sub>r</sub>	RF	Priority
1		1.0	0.8	0.80	2
2		1.0	0.9	0.90	1
3		0.4	0.7	0.28	7
4		0.6	0.7	0.42	5
5		0.8	0.9	0.72	3
6		0.8	0.8	0.64	4
7		0.2	0.5	0.10	11
8		0.35	0.6	0.175	9
9		0.25	0.6	0.15	10
10		0.3	0.7	0.21	8
11		0.2	0.3	0.06	12
12		0.5	0.6	0.30	6

\* 핵심설계변수후보군 :

- ① 용접현상 반영인자
- ② 센싱 유효 파장대역
- ③ 신호 처리기 성능
- ④ 분석 영역 선정
- ⑤ 특징벡터 선정
- ⑥ 분류기 선정
- ⑦ 관정 결과인자 용이성
- ⑧ 관정 실시간 반응속도
- ⑨ 센싱 시스템 설계 비용
- ⑩ 신호 처리기 CPU 비용
- ⑪ 부품 불량률 손실비용
- ⑫ 관정 오류 손실비용

0.8~1.0의 높은 위험부담을 나타내며 4, 5, 6번은 중·상 정도의 위험부담(0.6~0.8)이고, 3, 12번은 중간정도의 위험부담(0.4~0.6)이고, 8, 9는 중·하 정도의 위험부담(0.2~0.4)이고, 7, 11은 비교적 수용 가능한 낮은 위험부담(0~0.2)을 나타낸다. 따라서, 유효 파장대역과 용접현상 반영인자는 위험부담 수준이 0.8이상으로 핵심설계변수로 선정하였다.

4. 핵심설계변수 중심의 제품 설계

3.3절에서 도출된 핵심설계변수의 구체적인 특성을 실험적으로 관측하여 그 결과를 모니터링 시스템 설계에 반영하고, 시너지 효과를 성능과 비용측면에서 집중 분석하였다.

4.1 핵심설계변수의 특성 분석

본 실험에 사용된 장치의 구성은 3가지로 대별되며, 개략도는 그림 7과 같다. 모니터링의 발광원은 최대출력이 4.0kW인 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였고, 광센싱부는 광신호를 집중하기 위해 모리텍스사의 광섬유를 사용하였다. 입력된 광신호의 특성을 분석하기 위해 grating level이 500groove/mm(max.)인 분광기를 사용하였고, 분광기의 calibration lamp는 Mercury-Neon lamp를 사용하였다.

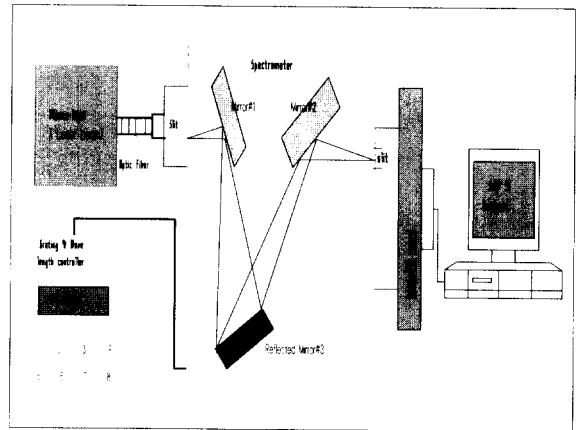


그림 7. 측정장치의 구성도.

Fig. 7. Configuration of measuring system.

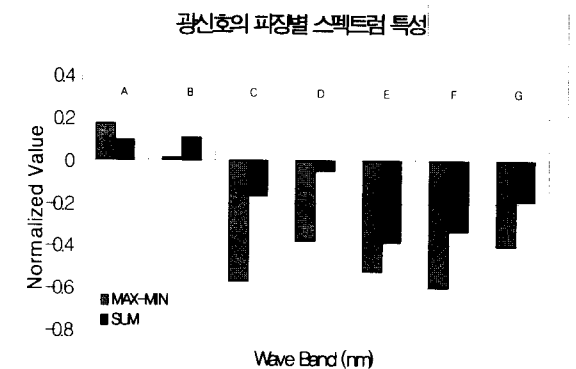


그림 8. 핵심설계변수의 특성 분석.

Fig. 8. Characteristics analysis of critical design parameter.

그림 8은 광신호의 특성과 용접품질과의 상관관계로부터 핵심설계변수를 구체적으로 도출하기 위하여 용접결함 발생조건( $C_1 \sim C_3$ )과 개별적 가공조건들의 가변( $C_4 \sim C_9$ )에 따른 용접공정 현상을 관측하였다. 그림에서,  $C_1$ 과형은 정상 용접상태를 나타내고,  $C_2$ 는 레이저 출력과 초점위치 가변에 따른 용입결함 발생시 스펙트럼이다.  $C_3$ 은  $C_1$ 에서 보조 가스봉의 지향위치 가변에 의한 기포결함 생성시 광신호의 특성이다. 그리고, 표 3는 그림 7의 그래프상에 있는 첨자에 대한 설명으로 구체적인 실험조건( $C_1 \sim C_9$ )을 나타낸다.

표 3. 그래프상의 실험조건 설명.

Table 3. Description of experimental condition on the graph.

분류	조건	실험 조건
C 1		Normal weld
C 2		$C1 + \Delta L + \Delta Z$
C 3		$C1 + \Delta M + \Delta P$
C 4		$C1 + \Delta B$
C 5		$C1 + \Delta L$
C 6		$C1 + \Delta M + \Delta MI$
C 7		$C1 + \Delta K$
C 8		$C1 + \Delta G$
C 9		$C1 + \Delta S$

L : Laser power, S : Welding speed, G : Flow rate of assist gas, P : Position of assist gas bar, Z : Focal length, M : Status of material shearing, MI : Containment of material B : Gap size, K : Artificial scratch of material

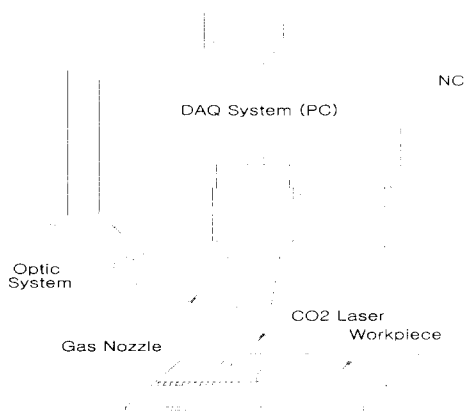


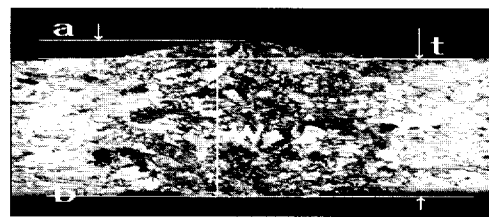
그림 9. 용접 결함 감시를 위한 실험장치.

Fig. 9. Experimental setup for monitoring weld defects.

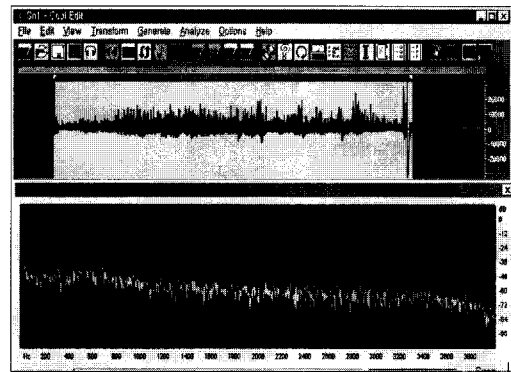
그림 8은 획득한 광신호의 스펙트럼 특성을 분석한 결과로써 신호의 변화를 7개의 구간으로 나누어서 각 구간에 대한 Max-Min 특성과 에너지의 면적을 계산하여 용접부

의 미세한 변화특성을 가장 민감하게 반영하는 C와 F 구간의 과장대역을 핵심설계변수로 도출하였다. 여기서 도출된 핵심설계변수의 특성을 광필터로 구현하여 광센싱장치에 내장하였고, 이 장치를 그림 9의 모니터링 시스템 입력단에 부착하여 그 핵심설계변수의 효과성을 실험적으로 규명하였다.

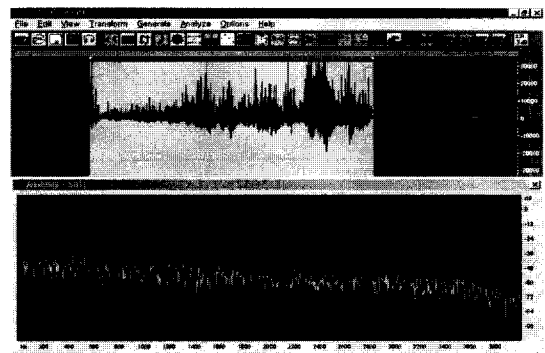
그림 9는 실험장치의 개략도이며, 레이저빔 조사부, 광센싱장치부, 그리고 센싱신호를 획득하여 처리하기 위한 신호처리부로 구성되어 있다. 광센싱장치는 레이저 용접기에 부착하여 레이저빔의 이송부와 함께 움직이며, 용접부에서 발생하는 광신호를 계측한다. 이때 센서의 지향점은 실험의 신뢰성과 반복성을 높이기 위해서 레이저빔의 중심과 센싱장치에 내장된 레이저 다이오드의 초점을 맞추어 항상 일정한 거리(15cm)와 각도( $25^\circ$ )를 유지하도록 설계되어 있다.



(a) 비드 형상



(b)



(c)

(b), (c) 핵심 / 비 핵심설계변수

- 상 : 광센서 출력, 하 : 신호처리 데이터

(b), (c) Critical / non-critical design parameter

- above : optical sensor output, below : FFT processing data

그림 10. 정상 용접시의 신호특성.

Fig. 10. Signal characteristics of normal welding status.

4.2. 핵심설계변수의 적용 결과 분석

4.2.1. 성능 측면

4.2.1.1 용접결함별 신호특성

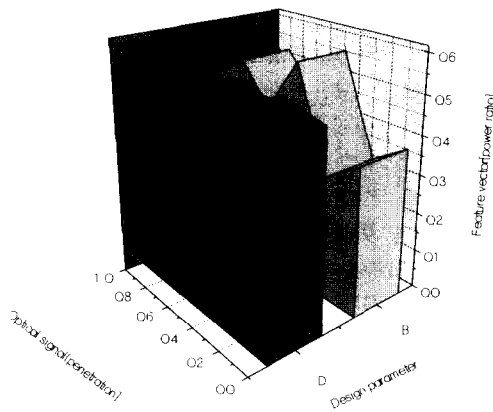
그림 10은 표 5의 정상용접(C<sub>1</sub>)에 대한 용접 비드 형상, 센서출력신호, 그리고 고속 푸리에 변환된 신호 파형을 나타내며, 용입결함(C<sub>2</sub>), 기포결함(C<sub>3</sub>)에 대해서도 동일한 실험을 하였다. 또한, 각각에 대한 분광기로 관측한 광신호는 그림 7에 나타내었다. 여기서, 센서출력신호와 고속 푸리에 변환 신호의 파형은 신호처리 전용 S/W인 Cool96을 사용하였으며, 주파수 축상에서 각 주파수에 대한 진폭과 자기 상관 함수를 통한 신호간격에 따른 유사성, 그리고 포락선의 파형을 용이하게 해석하기 위해서 대수단위(log scale)로 신호크기를 설정하였다.

4.2.1.2. 분석 내용 및 결과

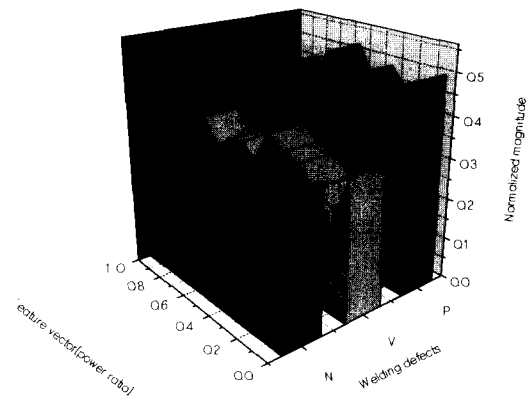
3.4.1절에서 실험적으로 구체화된 핵심설계변수(특정파장대역)의 모니터링 시스템 성능에 미치는 영향을 비 핵심설계변수(전체 파장 대역)의 그것과 비교하여 고찰하였다.

분석의 주 내용은 1) 광신호의 미세변화에 대한 설계변수의 민감도를 용접 결함별로 비교하였고, 2) 설계변수의 민감도 영향이 결함별 특징벡터와 용접결함 분류율에 미치는 상관관계를 분석하였다.

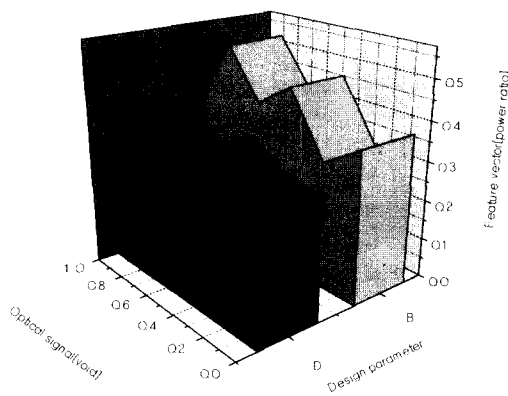
그림 11은 용접 결함별(용입, 기포) 광신호의 미세 변화에 반응하는 민감도를 설계변수별로 분석한 결과이다. 그 결과, 핵심설계변수(B)가 비 핵심설계변수(D)에 비해서 4개의 특징벡터(CPN: Cross Point Number, ME: Maximum Energy, FB: Specific Frequency Band, PSR: Power Spectrum Ratio) 모두가 용접부의 미세 변화에 대해 민감도 특성이 훨씬 우수한 것으로 나타났다. 그림에서 핵심설계변수인 특정파장대역을 광 필터로 구현하여 관측한 신호특성(B)은 용접부의 용접성에 따른 동적인 변화를 잘 추종해서 변화의 특성이 잘 반영되고 있지만, 비 핵심설계변수인 경우는 용접성이 실제로 다양하게 바뀌고 있음에도 불구하고 추종성능이 둔감하여 미세한 변화특성을 구분하지 못하여 신호특성이 포화된 형태로 나타나고 있다. 이 결과의 의미는 핵심설계변수가 고객의 필수 요구사



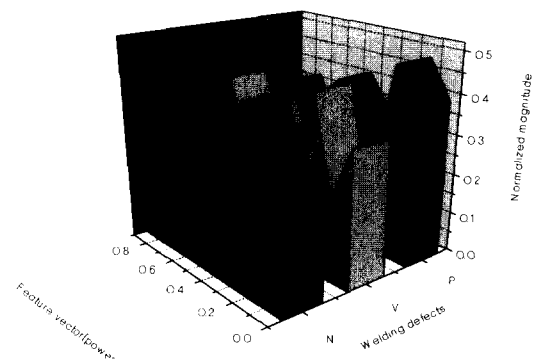
(a) 용입 불량 (a) Penetration defect



(a) 핵심설계변수 (a) Critical parameter



(b) 기포 불량 (b) Porosity defect



(b) 비 핵심설계변수 (b) Non-critical parameter

(가) 광신호 & 설계변수  
 (D: 비 핵심변수, B : 핵심변수) / 특징벡터(CPN)  
 (가) Optical signal versus design parameter for feature vector(CPN)

(가) 특징벡터(PSR) & 용접결함  
 (N: 정상, V : 기포, P : 용입)  
 (가) Feature parameter(PSR) versus weld defect  
 (N: Normal, V: Porosity, P: Penetration)

그림 11. 광신호와 설계변수와의 상관관계.

Fig. 11. Correlation between optical signal and design parameters.

그림 12. 특징벡터와 용접결함과의 상관관계.

Fig. 12. Correlation between feature vectors and welding defects.

항 중 용접결합 분류율 및 정확도에 주요인자인 결합별 특징벡터의 고유특성에 영향을 미칠 것으로 예측할 수 있다.

그림 12는 설계변수별 용접결합의 특징벡터(PSR)들이 각각의 용접결합에 대한 고유특성 유지정도를 분석한 결과로써, 나머지 특징벡터(CPN, ME, FB)에 대한 결과도 유사한 경향을 보여주며, 지면상 생략되었으나 참고문헌 [12]에서 모두 볼 수 있다. 분석결과를 보면, 핵심설계변수에서 도출된 특징벡터들의 특성이 비 핵심설계변수의 경우 보다 변화의 정도가 상대적으로 훨씬 적게 나타나고 있다. 이 의미는 특징벡터가 결합별 신호특성을 상징하는 대표성으로서 얼마나 고유특성을 잘 유지하고 있는지의 문제이다. 변화 폭의 정도는 특징벡터의 고유특성 유지 산포도를 나타내며, 설계변수에 상관없이 특징벡터(FB)>특징벡터(PSR)>특징벡터(ME)>특징벡터(CPN) 순서로 적게 나타났다. 따라서, 용접결합 분류에 적용할 특징벡터의 우선 순위는 특징벡터의 고유특성이 우수한 변화 폭이 적은 순서대로 선정하는 것이 용접 결합별 분류율을 향상시킬 수 있으므로 1순위 특징벡터로 FB를 선정하였다.

4.2.1.3 설계변수(핵심, 비 핵심)에 따른 결합 분류율 분석

3.4.2.1-1, 2의 분석 결과를 기초로 하여 용접 결합별 분류결과를 분석하여 핵심설계변수의 효과성을 실험적으로 검증하였다. 그림 13는 그림 12의 각 경우에 대한 주파수 영역에서 추출한 특징벡터 상위 4개 FB(A), PSR(B), ME(C), CPN(D)를 순위에 따라 하나씩 조합하여 증가시키면서 분류율을 분석한 결과이다. 그래프상의 첨자 N, N.P, N.V는 각각 정상용접, 용입결합, 그리고 기포결합 상태를 의미하고, A>B>C>D는 특징벡터의 우선 순위를 나타낸다.

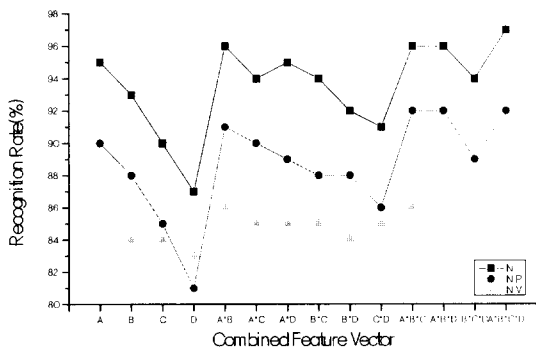


그림 13. 특징벡터에 따른 인식률.  
Fig. 13. Detection rate according to the feature vector.

그림 13의 결과로부터 핵심설계변수를 적용시 용접결합 인식률로써, 비 핵심설계변수에 비해서 평균 15%(정상 : 10%, 용입결합 : 15, 기포결합 : 20%) 높은 인식률을 나타내고 있으며, 특징벡터의 수를 하나씩 점차적으로 증가시키면 설계변수에 상관없이 결합별 분류율은 증가하지만

큰 차이를 보이지 않는다. 특히, 4개의 특징벡터 조합에서는 인식률이 거의 변화가 없었다. 따라서, 용접부의 용접결합을 실시간[13]으로 감시하기 위해서 특징벡터의 수를 최소화하는 것이 필요하며, 1순위의 특징벡터(A)만을 사용하여 분류시킨 결과 신경회로망 분류기[14][15]의 평균 인식 성공률은 90%로 나타났다.

4.2.2. 핵심설계변수의 시너지 효과 분석

그림 14는 제안된 방법론의 단계적인 주요 시너지효과(성능측면, 비용측면)의 발생과정을 보여주고 있다. 성능측면에서 고객 요구사항의 핵심내용은 용접 공정 자동화와 밀접한 관계가 있는 용접결합 분류율과 판정의 속응성이며, 각각 평균 15% 향상과 실시간 판정을 가능하게 하였다. 그 과정은 그림 14의 1~3단계에서 보여주고 있는데, 1~2단계에서의 QFD와 위험부담 평가로부터 용접공정현상을 감지하는 센싱인자를 핵심설계변수로 선정하였고, 설계자가 직접적으로 구현하기 위한 구체적인 설계인자를 도출하기 위하여 분광기 실험을 하였다. 그 결과 광신호의 특정과장대역이 용접결합의 미세한 동특성과 밀접한 상관관계가 있음을 실험적으로 규명하였다. 3단계에서는 설계변수별(핵심, 비 핵심)로 용접결합의 고유특성을 나타내는 주요 특징벡터를 추출하여 그 특성을 비교한 결과, 결합별 특징벡터의 고유특성이 비 핵심설계변수 적용시보다 훨씬 우수한 선형성을 가진 것으로 나타났다. 이러한 특징벡터의 선형특성으로 인해서 결합 분류 알고리즘이 간단해지고, 신호처리기의 부하경감으로 저속의 CPU로도 충분한 신호처리 및 알고리즘 처리가 가능하다. 그 결과 4단계서는 제안된 기법의 고객 만족 달성도 결과를 시스템 개발측면, 제품성능측면, 그리고 개발비용 측면으로 나누어 나타내었다. 결론적으로 결합 분류율은 비 핵심설계변수보다 평균 15%가 향상이 되었고, 판정의 실시간 구현과 판정의 정확도 향상으로 용접공정의 자동화가 가능해졌다. 비용측면에서는 3단계서의 특징벡터 선형특성으로 인한 분류 알고리즘의 간단화로 CPU의 부하가 경감됨으로써 저가의

(a) 1단계 : 핵심설계변수 도출 단계

단계	분석	시너지 효과 분석		
		새로운 특성 및 효과	단점 상쇄	장점 부각
1. 핵심설계 변수도출 (결과 1)	위험부담 수준 : $\geq 0.8$ : 유효 과장대역과 용접현상 반영인자 도출	모호한 고객의 요구사항 단계적 근에 의한 문제해결 방법 체계 구축 $\rightarrow$ 설계정보 손실 최소화	시스템 전체에서의 설계 핵심요소 이해 $\rightarrow$ 최소의 제한	
시스템 개발측면	· 시스템구조 형태 선정 (Dual CPU 방식) · 기존 용접 시스템의 공간 크기 고려 $\rightarrow$ 구성 모듈들의 중앙/외기	· 기구부 부착시 선연성 방지 설계 용이 $\rightarrow$ 유지 보수 용이성	사용 편의성 고려한 시스템의 구성 모듈 역할 구체적 정의	
제품 성능 측면	데이터 전송률 효율분석( $\leftarrow$ 전기적 노이즈방지 위한 모듈 설계)	시스템의 성능관련 인자간의 영향 추적 가능	모니터링 대상의 범위 구체화	
개발비용 측면	시스템의 구성모듈 환경 친화적 고려 재질 선택	시스템 방식에 의한 분담 $\rightarrow$ 저속 신호처리기가 가능 $\rightarrow$ 제어장치 대비 절감	개발부표달성을 위한 구성모듈 비용 산정 가능	



(b) 2, 3단계 : 핵심설계 변수의 실험 검증 및 구현, 용접 결합 특징벡터도출 및 분류기설계

단계	분석	시너지 효과 분석		
		새로운 특성 및 효과	단절 상태	장점 부각
2. 핵심설계 변수의 실험 검증 및 구현 (결과 2)	용접 공정현상과 핵심설계변수와의 상관관계 규명	센서개수 감소 (1~2개) → 광센싱장치치의 설계비용 감소	분광기 분석 실험 : 모니터링 대상인 광신호의 특성분석 → 특정과장대역 추출	
시스템 개발 측면	단일센서를 사용한 광센싱장치의 설계	· 실험실내 주변광의 영향 감소 방지 · 광센싱장치 설계 · 광센싱장치 원부와 제어장치 전원부 단일 설계 · 시스템의 안정성 확보	· 광센싱장치로 과상별 광신호 관측가능 · 용접부 근접거리의 관측가능도로 광신호 추종유	
제품 성능 측면	용접현상 기동 특성 → 특정 과장대역에서 집중 반영 나타남.	기존의 다중센서 채용방식 불필요	단일센서로 용접부 용접공정현상 관측가능 · 관성의 속응성 향상	
개발비용 측면	센서 증폭기 및 센서수 감소	전기적 노이즈 발생 감소	· 센싱 민감도 특성 개선 · 센서 수명 단축가능	
3. 용접결합 특징벡터도출 및 분류기설계(결과 3)	용접공정 자동화 가능 ← 실시간 판정, 저 분류 정확도, 저 비용	고속의 신호 처리 불필요 → 저속 신호처리기로 사용으로 제작비용 감소	· 용접결합 판정 정확도 향상 · 판정의 속응성 (실시간)	
시스템 개발 측면	핵심설계변수의 과감효과성 상관관계 도식화	설계변경 횟수 최소화 ← 고객만족을 위한 경쟁력 제고 · 설계 방법 제시	용접결합 발생시 원인 추적 · 핵심설계변수로 용접결합별 신호추적가능	
제품 성능 측면	· 용접 결합별 특징벡터의 선형특성 추종 · 판정 정확도 15% 향상	용접결합 분류 위한 복잡한 알고리즘 불필요	· 신호처리 및 알고리즘 처리 시간 단축 · 결합 분류율 및 정확도 향상 가능	
개발비용 측면	신호처리 및 알고리즘 계산 위한 신호처리 부담 경감 → 저속 CPU 사용 가능	고속의 신호처리 불필요	설계비용 30% 절감	

(c) 4단계 : 고객 만족도 평가 단계

단계	분석	제안된 방법의 적용 결과		
		목표	실적	단성율(%)
4. 고객 만족도 평가		100	95	95
시스템 개발 측면	· 설계 최적화 · 공정 모형 정립 · 제품 전수 명주기 고려 · 제안된 기법 적용 · 효과성 검증 적용	· QFD & 위험부담 관리 기법 · 설계 최적화 방법 제안 · 품질 모니터링 시스템 개발 적용	· 목표달성 (100)	
제품 성능 측면	결합 판정 정확도 결합 판정 속응도	95% 이상 실시간	85%(±5) 0.5초	지속적 개선 요구 · 목표달성 (100)
개발 비용 측면		1,500만원	1,000만원	· 목표달성 (100)

그림 14. 핵심설계변수 중심의 제품설계 시너지효과.  
Fig. 14. Synergy effects observed from critical design parameter dependent development.

DSP사용으로 신호처리 제작비용이 감소되었다. 또한, 핵심설계변수가 용접조건의 가변특성을 잘 추종함으로써 몇 개의 센서특성을 조합하여 용접조건의 가변특성을 분석하는 기존 방식의 문제점이 해결되어 1~2개를 센서개수를 줄일 수 있었다. 그 결과, 상기한 단계적 시너지효과와 발생과정으로부터 전체 제품비용의 30%절감 효과를 가져왔고, 고객의 핵심요구사항을 평균 95% 정도 달성하였다.

IV. 결론

본 논문은 고객이 요구하는 제품을 효과적으로 개발할 수 있는 핵심설계변수 중심의 개발방법을 제안하였고, 실제 적용사례 결과로부터 아래와 같은 결론을 얻었다.

가. 제안된 근사 개념적 최적화 방법은 제품 개발시 설계변수 우선 순위의 조정과 내재된 불확실한 요소들에 의한 위험부담 식별로 구성되어 있으며, 각각 QFD에 의한 확정적인(deterministic)요소의 평가(C<sub>i</sub>)와 불확실성 공간에서의 설계변수 구현의 어려움과 개발실패의 심각성(P<sub>i</sub>)을 고려한 Bayes risk B를 최소화하는 문제로 모형화하였다.

나. 고객의 요구사항에서 설계변수 도출과정을 체계적으로 접근하기 위하여 QFD 기법을 사용하였으며, 실제 모니터링 시스템 개발에 적용하여 12개의 핵심설계변수군을 도출하였다. 상위 핵심설계변수는 용접현상반영인자, 신호 획득 과장대역, 그리고 특징벡터의 선정 등으로 나타났다.

다. (나)항에서 도출된 설계변수들의 위험 부담 평가는 개발비용, 일정, 성능측면, 그리고 불확실성을 평가기준으로 하여 분석하였다. 품질 모니터링 시스템 개발에서 핵심설계변수는 "유효 과장대역과 용접현상 반영인자"로 위험부담 수준의 기준은 Pareto principle에 의거하여 0.8 이상을 선정대상으로 하였으며, 구체적인 핵심설계변수는 광신호의 특정과장대역임을 실험적으로 확인하였다.

라. (다)항의 구체적인 핵심설계변수를 반영한 실제 광센싱장치를 구현하여 결합별 패턴 분류한 결과, 핵심설계변수로부터 도출된 특징벡터가 비 핵심설계변수의 특징벡터에 비해서 선형특성을 가짐으로써 결합 분류율이 평균 15% 이상 향상되었고, 분류 알고리즘의 간단화로 처리시간이 단축됨으로써 실시간 판정이 가능해졌다.

마. 핵심설계변수에 의한 특징벡터 선형특성으로 인해서 적용 분류 알고리즘이 간단화로 신호처리의 부하경감으로 인한 저속의 CPU사용 가능과 적용 센서수 및 증폭기수의 감소(1~2개)로 전체 제품 개발비의 30% 절감효과를 가져왔다. 따라서, (라)~(마)의 결과로부터 설계된 모니터링 시스템의 구성요소에서 합성 효과를 확인하였고, 그 결과 고객의 핵심 요구사항을 95%정도 달성할 수 있었다.

사. (가)~(마)항의 과정을 통해서 제안된 최적화 설계기법의 효과성을 평가하였다. 결과적으로 핵심설계변수 중심의 집약된 재원으로 고객의 요구사항을 최대도로 반영하고 개발 구현의 위험부담이 고려된 제품을 개발할 수 있다는 점에서 제안된 방법론의 가치를 평가할 수 있다.

**참고문헌**

- [1] L. Doukas and G. Pollock, "A spreadsheet implementation of qfd and systems engineering approaches to support concurrent engineering", *NCOSE Annual International Symposium*, 1995
- [2] Quality Function deployment: release 1.0, *NCOSE system Handbook*, Jan., 1998.
- [3] S. Booth, "Risk management and mitigation planning early in the development life cycle", *NCOSE Annual International Symposium.*, 1995.
- [4] B. B. Roberts and R. J. Winterlin Integrated Risk management : A Case Study *Proceedings of the Sixth Annual International Symposium*.
- [5] L. T. Brekka and G. J. Vlay-TIFF, "Life cycle risk management" *Proc. of the fifth Annual International Symposium of NCOSE*.
- [6] A. P. Sage and J. L. Melsa, "Estimation theory with application to communication and control", pp. 175-195, McGraw-Hill Co., Inc, 1971.
- [7] K. Shibata, "Laser welding of tailored blanks at nissan", *ICALEO '96*, pp. 12-20, 1996.
- [8] L. R. Johnson, "On-line monitor ensures strong laser beam welds", *Trans Form*, spring, 1998.
- [9] General Motors Engineering Standards 4485 M/ISO 13919 - 1: 1996
- [10] "The new theories of economics by vilfredo pareto," *Journal of political economy*, vol 5. 189?.
- [11] D. M. Roessler et al, "Laser material processing in general motors corporation", *Proc. of 25th International Symposium on Automotive Technology and Automation*, pp. 37-51, Jun., 1992
- [12] 고등기술연구원, "지능형 용접결합 감시기법 개발 연구보고서," 1998.
- [13] C. M. Krishna and K. G. Shin, "Real-time systems", pp. 223-359, McGraw-Hill Co., Inc, 1997.
- [14] 이창석, "뉴로 컴퓨터," 지성출판사, pp. 68-158, 1997
- [15] N. E. Longinow et al, "Development of a neural network based real time control for laser welding", *SPIE*, vol. 1094 Thermosense XI, pp.93-102, 1989.
- [16] 조희근, 박영원, "시스템 위험관리와 새로운 평가방법", 한국군사과학기술학회 춘계학술대회, 1999.
- [17] 조희근, 박영원, "다 학제간 설계 최적화의 시스템 프로세스 개발", 제어·자동화·시스템공학회 추계학술대회, 1999.

**손 중 수**



1989년 경북대학교 전자공학 공학사.  
1992년 동대학원 전자공학 석사. 2000년 2월 공학박사. 현재 대우고등기술연구원 생산기술연구실 제어기술팀 선임 연구원. 관심분야는 시스템 아키텍팅,

자동차전자, 특히 ITS 분야.

**박 영 원**



1968년 한양대학교 전자공학 학사.  
1973년 Oklahoma 주립대 전기공학 석사. 1976년 Oklahoma 주립대 전기공학 박사. 1976년 ~ 1986년 맥도넬 더글러스 우주공학회사 선임 수석 연구원.

1986년 ~ 1998년 고등기술연구원 초빙연구위원, 현재 아주대학교 시스템공학과 교수. 관심분야는 상태추정 이론, 항법 시스템, 시스템 아키텍팅, 시스템해석과 설계, 시스템 공학.