

독립공리 설계기법을 이용한 LCD 세정노즐의 최적설계

신현석* · 이종수†

Optimal Design of Water Jet Nozzles Utilizing Independence Design Axiom

Hyunsuk Shin, Jongsoo Lee

Key Words : Water Jet Nozzle(워터노즐), Axiomatic Design(공리설계), Bubble Dynamic(공기방울 이론), Computational Fluid Dynamics(전산유체해석), Cavitation(캐비테이션), Neural Network(신경망), Regression Analysis(회귀분석)

Abstract

Water jet nozzle for LCD has been used as a wet cleaning process in many industries. It is necessary for the nozzle to consider cleaning effect and flux. In this paper, we applied the bubble dynamic theory(Rayleigh-Plesset equation) to improve the cleaning efficiency. Generally, Rayleigh-Plesset equations for cavitation bubbles are used in analyzing computer simulation for cavitating flows. Burst of bubbles causes potential energies and we can use these energies to remove organic and inorganic compounds on the LCD. Therefore, it is necessary to analyze the bubble generations and axiomatic design by computational fluid dynamics(CFD). By comparing the weight matrix of neural networks to the design matrix of axiomatic design, we propose methods to verify designs objectively. The optimal solution could be deduced by the regression analysis using the design parameters.

1. 서론

생활수준의 향상과 각종 멀티미디어의 발달로 인해 디스플레이장치는 소비자들에게 있어서 생활 필수품으로서 자리잡았다. 그러나, 디스플레이 장치의 제조에 있어서 높은 수준의 생산 공정과정을 필요로 하게 되었다. 이 논문에서는 세정 공정을 향상 시키기 위한 중요 부품인 노즐의 개발에 관심을 두고 있다. 제조 과정에서 LCD 기판표면에는 각종 유기물과 무기물이 존재한다. 이러한 물질들로 인해 불량률이 높아지고 이는 생산력 저하와 가격의 향상을 야기시킨다. 이러한 이유로 LCD 기판의 세정력을 향상시키기 위한 많은 방법들이 제시 되었다. 이러한 방법들 중에서 유체의 사용량을 줄이고 세정력을 향상시키기 위해, 노즐 최적설계의 중요성이 대두 되었다. 최적설계를 위하

여 노즐을 상부노즐과 하부노즐, 두 부분으로 나누어서 설계하였다. 펌프에서 가압된 유체가 상부노즐에 빠른 유속으로 공급되고, 외부의 공기가 상부노즐의 내부 요인에 의해 유입되는 방식을 적용하였다. 그리고, 하부 노즐에서는 상부 노즐에서 형성된 공기방울(bubble)이 유지되면서 유출되는 공기방울량이 더욱 증가하도록 설계하였다. 공기방울이론을 바탕으로 공리설계를 이용하여 공기방울의 생성에 관련된 주요한 파라미터들을 도출 하였다. 공리설계는 사용자가 요구하는 제품의 초기설계에 이론적 바탕을 체계적으로 제공해 준다. 또한, 기존에 개발되지 않은 제품의 설계에 있어서 사용자의 요구에 따른 창조적인 설계 방법론을 제시해 준다. 이 논문에서는 사용자가 요구하는 세정력의 증가를 위해 공기방울의 생성과 소멸을 물리적인 요소로 판단하고, 이를 노즐의 설계에 접목시키는 순차적인 흐름을 제시하였다. 즉, 사용자가 바라는 요구사항을 물리적인 언어로 변환하고 이를 다시 노즐의 파라미터(parameter)로 변환하는 작업을 수행 하였다. 이를 통해 세정 효과의 향상에 관계된 설계행렬을 유추해 낼 수 있었다.

† 책임저자, 정회원, 연세대학교 기계공학부
E-mail : jleej@yonsei.ac.kr
TEL : (02) 2123-4474 FAX : (02) 362-2736

* 연세대학교 대학원 기계공학과

그리고, 신경망의 가중치(weight)분석을 통한 정량적인 값과 공리설계의 설계행렬의 요소들을 비교하였다. 가중치행렬은 물리적 요구사항(DP: design parameter)과 기능적 요구사항(FR: functional requirements)의 상호간의 영향 관계를 정의해 주기 때문에, 공리설계의 설계행렬과 유사한 개념을 가진다. 그러나, 설계행렬이 DP와 FR의 영향도를 설계자의 직관에 의해 추측하는 반면, 가중치는 이를 수치적으로 정량화 한다. 여기서, 신경망의 입력자료는 직교배열표(table of orthogonal array)에 의한 실험계획법(design of experiments)을 이용하였다. 또한, 회귀분석(regression analysis)에 의해 구한 식을 이용하여 설계행렬(design matrix)과 가중치행렬(weight matrix)의 비교가 타당함을 증명할 수 있었다. 이러한 타당성 검증에 의한 파라미터를 이용하여 노즐 세정력의 최적화를 수행하였다. 노즐의 유체적 해석은 상용 소프트웨어인 CFD-ACE를 이용하였다. 이를 이용하여, 3차원 형상설계를 수행하였고, 실제 제품에 적용하여 공기방울의 생성을 확인해 보았다.

2. 공기방울 이론(Bubble Dynamics)

2.1 캐비테이션 공기방울(Cavitation Bubble)이론

Rayleigh(1917), Plesset(1949)은 공기방울의 표면에서 외부의 유체공간과 내부의 기체공간 사이에서 질량유동이 없는 것을 이용하여 공식을 유도하였다. 그리고, 이 공식을 이용하여 유체 내부에서 유동하는 캐비테이션 공기방울에 대한 문제에 적용하였다. 대부분의 원형 공기방울의 해석은 이들의 이론을 바탕으로 한다. 다음은 기체와 유체 사이의 관계에 대한 식을 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} f) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla f) + R_e - R_c \quad (1)$$

식 (1)에서 ρ 는 혼합 밀도(mixture density)를 나타내며, f 는 기체 질량비(vapor mass fraction)를 \vec{v} 는 속도 벡터, Γ 는 계수(effective exchange coefficient)를 의미한다.

Brennen(1995)는 식 (1)에서 R_e 와 R_c 를 유도하였다. 그는 모든 유동에서 캐비테이션의 초기에 수많은 미세한 핵(nuclei)이 발생하여 그 핵이 발전해 나가는 것이라고 주장했다.

$$R_e = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2 P_{sat} - P}{3 \rho_l}} (1 - f) \quad (2)$$

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2 P - P_{sat}}{3 \rho_l}} f \quad (3)$$

여기서 R_e 는 공기방울의 생성과 팽창에 관계된 계수이며, R_c 는 공기방울의 소멸과 붕괴에 관련된 계수이다. 이 계수들을 이용하여 공기방울의 생성률을 나타낼 수 있다. C_e , C_c 는 상 변화 계수(phase change rate coefficient)이고, σ 는 포화 액체 표면 응력, V_{ch} 는 속도(characteristic velocity), ρ_v 는 기체밀도, ρ_l 는 액체밀도, P_{sat} 는 포화압력을 나타낸다.

2.2 캐비테이션 공기방울의 파라미터

V.S Moholkar, A.B. Pandit(2001)는 캐비테이션에 영향을 미치는 파라미터를 벤투리(Venturi) 실험을 통해 분석하였다. 실험의 결과, 주요한 파라미터들은 하부의 회복 압력과 벤투리 관의 폭의 비, 유체내부에서 초기 공기방울의 비율과 초기 공기방울의 크기이다. 회복 압력의 증가는 공기방울의 지속성을 방해한다. 그리고, 벤투리 관의 폭 비와 초기 공기방울의 비율은 캐비테이션의 활동에 큰 영향을 미친다. 즉, 벤투리 관의 폭이 클수록 초기 공기방울의 비율이 클수록 캐비테이션 활동이 활발이 발생한다. 그러므로, 이 논문에서의 연구 결과와 식 (2), (3)를 바탕으로 워터노즐에서 공기방울 생성에 영향을 미치는 파라미터들을 도출해 낼 수 있다. 여기서 V_{ch} 는 난류에너지로 나타낼 수 있다.

$$V_{ch} = \sqrt{K} = \sqrt{\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)} \quad (4)$$

모든 물리량은 300K의 온도에서 정의하고, 그 물리량들을 식(2), (3)에 대입한 결과, 압력 P와 난류에너지에 의한 식으로 정리됨을 알 수 있다. 최종적으로 공기방울의 생성과 소멸에 관계된 파라미터들은 노즐 내부 유동의 압력과 난류에너지 측면에서 접근할 수 있다 하겠다. 이러한 이론적인 접근을 통해 노즐 내부의 기본적인 형상을 설계하였다. 상부노즐에 위치한 미세한 원형 오리피스(orifice)는 노즐 내부의 압력을 낮추어주는 역할을 하며, 압력저하로 인한 외부 공기의 유입을 증가시킨다. 즉, 초기 공기방울의 비율을 늘려주는 역할을 한다. 하부노즐의 난류에너지와 균등한 세정력을 위해 하부노즐에 일정 치수(1.5×1.5mm)의 메쉬망(mesh)을 추가 하였다. 이 논문에서는 이러한 기본적인 형상과 공리설계 이론을 이용하여 구체적인 디자인 파라미터들을 구하고자 한다.

3. 공리설계

공리란 항상 옳다고 간주되고, 또 반증이나 예외가 없는 기본적인 진리이다. 또한, 어떤 현상에 대한 수많은 관찰을 통해 나타나는 현상이 발생할 때에도 정의 할 수 있다. 이 경우 공리는 증명되거나 유도될 수 없지만, 반증이나 예외로 인하여 무효화 될 수도 있다. 이러한 공리의 기본적인 정의를 이용하여 Suh(1990)는 좋은 설계 여부를 판단할 수 있는 방법론인 공리설계 이론을 제시하였다. 이는 제품의 개발에 있어서 사용자(기업, 소비자)의 요구사항을 설계자가 물리적 언어로 변환하여 설계의 목적에 부합하는 효과적인 제품의 생산 방법을 제시한다.

3.1 공리설계의 기본 개념

3.1.1 설계 공리(Design Axioms)

올바른 설계여부를 판단하기 위한 설계공리로 두 가지 공리가 있다. 공리 1 은 기능과 물리적 변수 사이의 관계를 설명하고, 공리 2 는 어떤 설계가 보다 더 나은 설계인지 판단하는 방법을 제시해 준다.

공리 1 : 독립공리 (FRs 의 독립성 유지)

공리 2 : 정보공리 (설계의 정보량 최소화)

공리 1 은 기능적 영역의 FRs 에 대하여 물리적 영역의 DPs 로 진행되는 과정에서 특정한 FRs 에 대하여 관련된 DPs 만 영향을 주도록 정의해야 한다는 것이다. FRs 와 DPs 사이의 관계는 설계행렬 [A]를 통해서 판단할 수 있다.

$$\{FRs\}=[A]\{DPs\}$$

FRs 와 DPs 가 독립성의 입장에서 서로 관계가 있을 경우 'X'로 표기하고, 관계가 없는 경우는 'O'로 표기한다. 그리고 'x'는 FRs 와 DPs 와의 관계가 조금 있을 경우를 의미한다. 만일 설계행렬이 대각행렬의 형태로 나타날 경우 이를 비연성 설계라 하며 이상적인 최적 설계행렬이다.

공리 2 는 FRs 와 DPs 의 설계행렬이 어떤 형태로 되어야 올바른 설계인지를 제시한다.

$$[A]=\begin{bmatrix} X & X \\ X & X \end{bmatrix} \quad [A]=\begin{bmatrix} X & O \\ X & X \end{bmatrix}$$

연성설계 비연성화 설계

연성설계(Coupled design)는 각각의 DPs 의 인자들이 FRs 의 인자들에게 복합적으로 영향을 주는 설계로서 비연성화 설계(Decoupled design)로 바뀌어야 한다. 이를 위해 초기 설계단계에서 FRs 와

그에 상응하는 DPs 를 적절히 선택해야 한다. 부득이하게 연성으로 설계가 된 경우에는 행렬요소 순서 변화를 통해 비연성화 설계가 되도록 해야 한다. 이러한 비연성화 설계는 DPs 를 순차적으로 구하는 방식에 의해 해를 구할 수 있다.

3.2 워터노즐에서의 공리적 접근

3.2.1 설계행렬(Design Matrix)

유체의 유동현상은 하나의 파라미터 변화에 의해서도 전체 결과가 영향을 받는다. 이러한 변화를 공리설계를 이용하여 완전히 분석하기는 불가능하다. 그러나, 공리설계를 이용하여 파라미터들 중에서 설계자가 원하는 결과에 영향도가 큰 파라미터의 선정과 분석이 가능하다.

공리설계의 이론을 바탕으로 워터노즐의 세정력을 향상(FRs)시키기 위한 인자(DPs)를 도출해 보았다. 세정력 향상이라는 사용자의 요구에 대한 FR 와 DP 는 다음과 같다.

FR1 : 상부 노즐의 공기방울 생성률을 높인다.

FR2 : 하부 노즐의 공기방울 생성률을 높인다.

DP1 : 상부 노즐의 내부 요인

DP2 : 하부 노즐의 내부 인자

FR 은 세정효과에 대한 요구사항이고, 이에 상응하는 DP 는 노즐의 물리적 인자들이다. 이 설계는 식(5)와 같이 비연성화 설계로서 올바르게 정의하였음을 알 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

설계자가 FR1 와 DP1 의 관련성을 높이고, DP2 와는 관련이 적도록 임의로 파라미터를 조정하였다. 이와 같은 방법으로 FR1 을 FR11 와 FR12, FR13 로 분해하고, 연관된 DPs 를 선정하였다. 여기서 DP 들은 세정력 향상의 가장 큰 요인인 Re 값과 초기공기방울의 크기에 관련된 파라미터를 선정하였다. 유량은 거의 모든 FR, DP 들과 연성되어있다. 그러므로 설계에서 모든 DP 와 교호관계(interaction)가 있다. 상부노즐의 폭과 상부노즐의 길이는 상부 노즐의 난류에너지와 압력에 많은 영향이 있다. 그리고, 공기유입부(air intake)에 유입되는 공기의 양을 증가시켜서, 초기 공기방울의 크기 증가를 유도하였다. 이렇게 선정된 상부 노즐의 FR 들과 DP 들은 하부 노즐에 영향을 끼친다. 하부노즐의 폭과 하부노즐의 길이는 하부노즐의 파라미터로서, 하부 노즐의 난류에너지와 압력에 큰 영향이 있다고 설계하였다. 여기서, 하부 노즐

의 FR 들은 상부노즐의 파라미터에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 파라미터간의 관계를 이용한 전체 설계행렬은 식(6)과 같다.

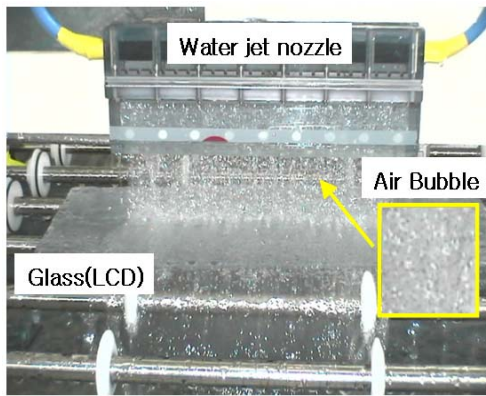
$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{21} \\ FR_{22} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & x & O & O & O \\ X & X & x & O & O \\ X & X & X & O & O \\ X & X & X & X & O \\ X & X & X & x & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{21} \\ DP_{22} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Table 1 Functional Requirements in water jet nozzle

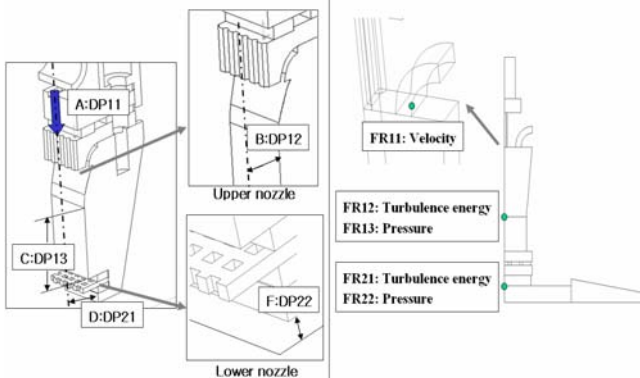
Functional Requirements		
FR ₁	FR ₁₁	Increase the velocity at the air intake
	FR ₁₂	Increase turbulence energy in the upper nozzle
	FR ₁₃	Increase pressure in the upper nozzle
FR ₂	FR ₂₁	Increase turbulence energy in the lower nozzle
	FR ₂₂	Increase pressure in the lower nozzle

Table 2 Design Parameters in water jet nozzle

Design Parameters		
DP ₁	DP ₁₁	The Flux of the inlet(A)
	DP ₁₂	The width of the Upper nozzle(B)
	DP ₁₃	The length Upper nozzle(C)
DP ₂	DP ₂₁	The width of the lower nozzle(D)
	DP ₂₂	The length between lower nozzle and LCD(F)



(a) Water jet nozzle in the process



(b) DPs and FRs of the nozzle

Fig. 1 Design and Parameters of water jet nozzle

앞 절에서, 최적 설계를 위한 파라미터들을 도출하였다. 실제로 공리설계에 의해서 제작된 노즐은 Fig. 1 (a)에 나타내고 있다. (b)는 실제 노즐의 DP 와 FR 을 표시하고 있으며, 이는 공리설계와 공기방울이론에 의해서 도출된 것이다.

4. 최적설계의 이론과 방법

4.1 최적설계 방법과 순서

Fig. 2 는 본 논문에서 제시하는 최적설계의 순서이다. 앞 절에서 공리설계에 의한 DP 와 FR 을 구하였다. 공리설계에 의한 파라미터들을 이용하여, 실험계획법에 적용하였다. 이를 CFD 분석을 통하여 분석 결과를 추출하였다. 이 결과를 바탕으로 신경망의 BPN(backpropagation)에 적용하여, 가중치행렬을 구하였다. 여기서 구한 가중치행렬과 공리설계의 설계행렬을 비교하여 공리설계가 올바르게 적용되었는지 검증하였다. 이러한 결과를 바탕으로 영향도가 큰 파라미터들을 구할 수 있었다. 파라미터들을 이용하여, 반응표면분석(response surface analysis)을 사용한 회귀모델을 제시하였다. 이를 데이터 분석을 통해 추정되는 반응표면(response surface)식을 이용하여 노즐의 세정력 향상을 위한 최적화에 적용하였다. 다음 절에서 최적화 방법을 자세히 설명하고자 한다.

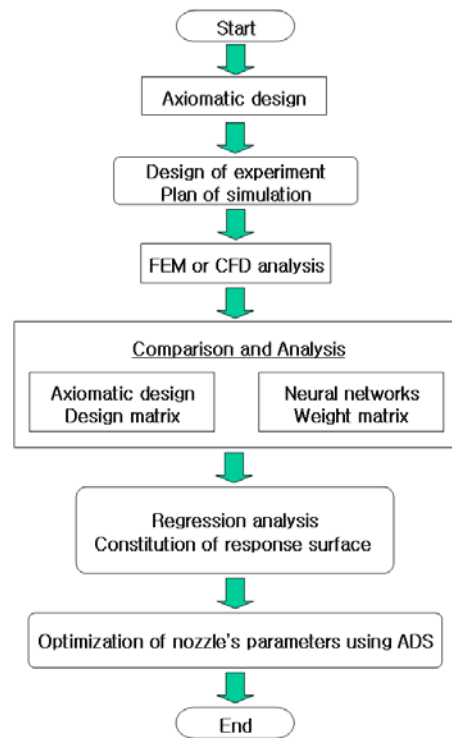


Fig. 2 The schematic of optimal design process

Table 3 Values of DPs and FRs(A(y-direction velocity): m/s , B~F(length): m , FR11(velocity): m/s , FR12
FR21(pressure): N/m^2 , FR13 FR22(kinetic energy): m^2/s^2)

# of Exp.	DP11	DP12	DP13	DP21	DP22	FR11	FR12	FR13	FR21	FR22
1	-0.3202	0.0032	0.004	0.0032	0.0024	-0.488295	0.160782	-139.659	0.019458	362.859
2	-0.3202	0.0032	0.005	0.004	0.003	-0.652882	0.147094	-261.26	0.00800336	233.022
3	-0.3202	0.0032	0.006	0.0048	0.0036	-0.754894	0.138034	-336.834	0.00433081	147.774
⋮										
26	-0.48077	0.0048	0.005	0.0032	0.0036	-0.842567	0.425021	-531.21	0.0700217	179.488
27	-0.48077	0.0048	0.006	0.004	0.0024	-0.64509	0.441001	-404.687	0.0617228	548.952

Table 4 Result of BPN training

	DP&FR	DP11	DP12	DP13	DP21	DP22	FR11	FR12	FR13	FR21	FR22
Result of D.O.E	Min	-0.48077	0.0032	0.004	0.0032	0.0024	-1.33613	0.138034	-616.64	0.004331	135.2
	Max	-0.3202	0.0048	0.006	0.0048	0.0036	-0.37185	0.462255	-139.659	0.080376	721.754
CASE #1	CFD result	-0.44871	0.0035	0.0055	0.0042	0.0028	-0.95772	0.366057	-448.124	0.041009	459.51
	Neural N.						-0.9159	0.3763	-411.890	0.0389	453.0170
CASE #2	CFD result	-0.36859	0.0042	0.0048	0.0045	0.0034	-0.6986	0.2123	-394.380	0.0329	189.2590
	Neural N.						-0.6512	0.1927	-382.566	0.0312	214.6420

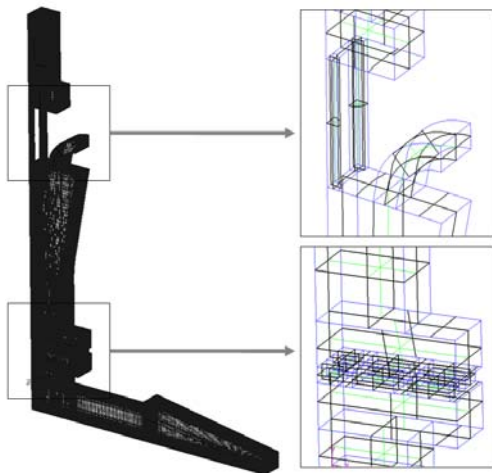


Fig. 3 Mesh generation of the 10th of experiments

4.2 실험 계획법(Design Of Experiments)

공리설계에서는 상부노즐의 유량이 모든 FR 들과 교호관계가 있다고 가정하였다. 이러한 교호작용에 의해, 실험계획법의 방법 중에서 3 수준의 직교배열표를 사용하였다. 3 수준의 $L_{27}(3^{13})$ 형 직교배열표는 27 회의 실험으로 13 개의 요인배치가 가능하다. 직교배열표에 의해 지정된 수준(level 0, 1, 2)에 따라 DPs 를 대입하여 CFD 분석을 행하였다. 이때 대입한 DP 의 값과 CFD 분석후의 값인 FR 은 Table 3 와 같다.

4.3 전산유체해석(Computational Fluid Dynamics)

Fig. 3 은 CFD-ACE 라는 상용프로그램으로 작업한 10 번째 3 차원 메쉬(Mesh) 형상이다. 이 메쉬는 314,755 개의 셀(Cell), 349,882 개의 노드(Node)로 구성되어 있다. 모듈(Module)은 난류와 케비테이션 유동을 기반으로 하였다. 유량의 변화(DP11)

는 입력부의 길이에 대한 유체의 입력 속도로 바꾸어 주었다. 그리고, 공기 유입부와 노즐의 유출부는 대기압으로 가정하였다. 해석은 완전수렴하였다고 가정하였고, 식(2)-(4)를 이용하여 공기방울의 생성률을 구하고, 이를 Re(evaporation phase)라 하였다.

4.4 신경망과 가중치행렬(Weight matrix)

Table 3 의 실험결과를 이용하여, 신경망의 BPN training 을 수행하였다. 공학 해석모델의 결과로부터 얻어진 다수의 해석 결과를 이용하여 실제 결과와 신경망에 의한 예측결과의 차이를 최소화하는 과정을 거치는 과정을 행한 것이다. 이때, 입력층(input layer)에는 DPs 를 대입하고, 출력층(output layer)는 각 FRs 를 대입하였다. 은닉층(hidden layer)은 2 개이고, 각 은닉층은 9 개의 노드를 가지고 있다. 기준은 1%로 하였으며 학습률 파라미터는 0.6, 모멘텀 파라미터는 0.8 로 두었다. 그리고, 시그모이드(sigmoid)의 기울기는 0.9 로 하였다. Table 4 에서는 이러한 BPN training 에 의한 결과를 나타내고 있다. 결과의 검증을 위해서, 임의의 DPs(최소에서 최대값 사이의 임의 값)를 대입하였을 때의 CFD 분석결과와 BPN training 후의 결과를 경우 1 과 경우 2 에서 비교 하였다. 이때, 각 경우의 결과(FR)가 거의 차이가 없으므로, 신경망이 올바르게 적용 되었음을 알 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 입력과 출력의 관계를 정량적으로 구할 수 있다. 네트워크 사이의 인과관계(causality)를 정량적으로 분석함으로써 전역민감도(global sensitivity)에 대한 정보를 제공하는 가중치행렬을 생성할 수 있다.

가중치해석방법을 전개하기 위해 은닉층이 하

나만 있는 경우의 BPN 을 고려한다. 여기서 w_{ij} 및 u_{jk} 는 각각, 입력-은닉층 및 은닉-출력층간의 상호연결 가중치이다. 상호연결 가중치의 크기는 데이터정보의 흐름을 나타내기 위해 사용되는데, i-번째 입력층 뉴런으로부터 j-번째 은닉층 뉴런에 전달되는 신호인 f_{ij} 는 다음과 같다.

$$S_j = \sum_{i=1}^N |w_{ij}| \quad (7)$$

$$f_{ij} = \frac{|w_{ij}|}{S_j} \quad (8)$$

여기서, s_j 는 입력층의 모든 뉴런과 은닉층의 j-번째 뉴런 사이에 존재하는 가중치 크기의 합이다. 이를 이용하여 입력층의 i-번째 뉴런으로부터 전달된 신호의 결과는 다음과 같다.

$$\eta_{ik} = \sum_{j=1}^J \frac{|w_{ij}| \cdot |u_{jk}|}{S_j} \quad (9)$$

입력층의 전체 뉴런에 대한 신호의 합은 식(10)과 같고, 입력층의 i-번째 뉴런과 출력층의 k-번째 뉴런 사이의 관계인 가중치 행렬은 식(11)로 나타낸다.

$$H_k = \sum_{i=1}^N \eta_{ik} \quad (10)$$

$$T_{ik} = \frac{\eta_{ik}}{H_k} \quad (11)$$

식(11)를 정규화(normalization)시키면 입력층의 i-번째 뉴런과 출력층의 k-번째 뉴런 사이의 정량적인과관계를 나타내는 가중치행렬이 얻어 지는데, 그 결과는 식 (12)로 주어진다.

$$t_{ik} = \frac{T_{ik}}{\sum_{i=1}^N T_{ik}} \quad (12)$$

여기서 구한 가중치행렬은 공리설계에서 구한 설계행렬과 유사한 개념을 사용한다. 즉, FR 에 대해

서 DP 의 연관관계를 설명해주고 있다. 가중치행렬의 요소[t]에 의해 공리설계의 요소와 비교할 수 있으며 이는 초기 설계에 있어서 공리설계가 올바르게 적용한 것인지 검증할 수 있게 되는 것이다. Fig. 4 에서는 공리설계에 의한 설계행렬과 BPN training 을 통한 가중치행렬을 비교하고 있다. 설계행렬의 ‘X’가 가중치행렬의 정량적인 수치로 표현되는 것을 알 수 있다. 하나의 FR 에 대한 DP 들의 [t] 합이 100 으로 일정하다. 즉, 이를 각 FR 에 대해 정규화가 되었으므로 비교 기준으로 작용할 수 있음을 의미한다. Fig. 6 (b)에서 $[t_{ik}]$ 의 값이 10 보다 큰 값이면 인과관계가 크다고 가정한다. 그러므로, DP11 과 DP12, DP13 가 주요 파라미터라고 가정할 수 있다. 즉, 유량과 상부노즐의 파라미터의 조정을 통해서 설계자가 원하는 세정효과의 증대를 달성할 수 있다는 결론에 도달한다. 즉, 가중치행렬의 DP21 과 DP22 의 인과관계가 다른 파라미터보다 작다. 이는 공리설계의 설계행렬에서 인과관계가 작다는 것(‘O’)을 의미하므로 이러한 파라미터는 결과에 적은 영향을 주는 것을 알 수 있다.

4.5 중회귀분석(Multiple Regression Analysis)

중회귀분석은 설계요소들 사이의 관계에 대한 모델을 설계하는데 사용된다. Table 5 은 노즐의 회귀분석에 의한 결과를 나타내고 있다. FR11 에서 Adj R-square 가 0.9891 의 신뢰관계를 가지고 있고, 같은 방법으로 FR13 와 FR21, FR22 에서도 Adj R-square 가 0.95(95%)보다 큰 것을 알 수 있다. Table 5 에서 P-value 가 0.05(5%)보다 작으므로 이 회귀식(식(13))이 적합함을 알 수 있다.

식(13)에서의 계수(coefficient)들을 Fig. 4(b)의 가중치행렬의 $[t_{ik}]$ 와 비교해 보았다. 식 (13)에서 DP11 과 DP12, DP13 가 연성(couple)된 항의 계수가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러므로, 식 (13)이 설계행렬 그리고, 가중치행렬의 성질과 유사함을 알 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{21} \\ FR_{22} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X & x & O & O & O \\ X & X & x & O & O \\ X & X & X & O & O \\ X & X & X & X & O \\ X & X & X & x & X \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{21} \\ DP_{22} \end{Bmatrix}$$

(a) Design matrix

	DP11	DP12	DP13	DP21	DP22	SUM
FR11	12.39354	52.34575	17.72499	9.84748	7.68824	100
FR12	12.45528	52.59085	17.79767	9.34062	7.81559	100.00001
FR13	12.29007	52.76733	16.24175	10.82016	7.8907	100.00001
FR21	13.79889	51.19388	17.39752	9.76039	7.84933	100.00001
FR22	11.91814	53.33311	17.23952	9.15211	8.30313	100.00001

(b) Weight matrix

Fig. 4 Design matrix and Weight matrix

$$\begin{aligned}
 FR_{11} &= -4.934 \times DP_{11}^2 - 701.001 \times DP_{11}DP_{12} + 476.192 \times DP_{11}DP_{22} \\
 &\quad - 6856713 \times DP_{12}DP_{13} - 14560 \times DP_{12}DP_{21} - 0.097 \\
 FR_{12} &= -67.471 \times DP_{12} - 73.542 \times DP_{21} + 2.222 \times DP_{11}^2 \\
 &\quad + 16543 \times DP_{12}DP_{21} + 0.21740 \\
 FR_{13} &= -871.765 \times DP_{11} + 322534 \times DP_{21} + 68352304 \times DP_{12}^2 \\
 &\quad - 46769680 \times DP_{12}DP_{13} + 14021782 \times DP_{13}^2 \\
 &\quad - 80352873 \times DP_{12}DP_{21} + 51054 \times DP_{11}DP_{22} \\
 &\quad + 187809 \times DP_{11}DP_{21} - 355.438 \\
 FR_{21} &= 0.525 \times DP_{11} + 5.775 \times DP_{12} - 11.07 \times DP_{13} \\
 &\quad + 4.156 \times DP_{22} + 1.052 \times DP_{11}^2 + 0.09479 \\
 FR_{22} &= -5787307 \times DP_{11} + 522057 \times DP_{12} - 114887 \times DP_{13} \\
 &\quad + 327036 \times DP_{21} + 212512 \times DP_{22} \\
 &\quad + 544702 \times DP_{11}DP_{12} - 236979 \times DP_{11}DP_{13} \\
 &\quad - 92952865 \times DP_{12}DP_{21} + 1199114 \times DP_{11}DP_{22} \\
 &\quad - 2132488
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

4.6 ADS 를 사용한 노즐의 최적설계

위의 절에서 공리설계에 의한 파라미터가 객관적으로 타당한지 판별하였다. 이러한 파라미터들과 물리적 언어로 세분화된 FR 들을 통합하여 최적화에 적용하였다. 그러므로, FR11 과 Re_upper, Re_lower 의 3 개의 목적함수로 유도식을 도출할 수 있었다. FR11(y 방향속도)의 최소값을 구하여 유입되는 공기의 양을 늘여주었다. 이는 초기공기방울의 크기를 크게 만들어 준다. Re_upper 는 상부노즐의 공기방울 생성량으로, FR12 과 FR13 에 의한 함수이다. 또한 Re_lower 는 FR21 과 FR22 의 함수이다. 즉, Re 는 난류에너지와 압력의 조합으로 측정되는 무차원 계수이고, 이의 최대값을 구하는 것에 의해 공기방울의 생성력이 향상됨을 알 수 있다. CFD 를 이용하여 결과를 추출하였다. 그리고 그 결과를 이용하여 회귀모델을 도출하였다. 그 결과는 식(14)와 같다. FR11 과 Re_upper, Re_lower 의 최적값은 상호간의 물리량의 기준이 다르다. 그러므로, 이를 비교하기 위해 정규화시켜야 한다. 먼저 식(14)의 각 물리량의 최적값을 구한다. 최적화의 결과인 (FR₁₁^{*}, Re_{upper}^{*}, Re_{lower}^{*})는 각각 (-1.33840, 7.8290143, 3.0971259) 이다. 이렇게 구한 상수를 바탕으로 정규화된 새로운 목적함수 (Y)를 구할 수 있다. 목적함수의 최적화는 ADS 를 사용하였다. 이때 구해지는 DPs 의 상수값을 DPs^{*} 라고 하고, 그 결과 최적화된 파라미터를 table 6 에서 나타내고 있다.

Minimize

$$\begin{aligned}
 FR_{11} &= -4.934 \times DP_{11}^2 - 701.001 \times DP_{11}DP_{12} \\
 &\quad + 476.192 \times DP_{11}DP_{22} - 6856713 \times DP_{12}DP_{13} \\
 &\quad - 14560 \times DP_{12}DP_{21} - 0.097
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{Re_{upper}} = 1 / (-18.341 \times DP_{11} - 224.292 \times DP_{12} - 40.585 \times DP_{13} - 92.981 \times DP_{22} - 612.147 \times DP_{11}DP_{12} - 6073.413 \times DP_{12}DP_{13} - 0.855)$$

$$\frac{1}{Re_{lower}} = 1 / (205.239 \times DP_{12} - 1054.38 \times DP_{13} + 178.627 \times DP_{22} - 1752.8 \times DP_{11}DP_{13} + 2.32)$$

Minimize (14)

$$\begin{aligned}
 Y &= \frac{FR_{11}^*}{FR_{11}} + \frac{Re_{upper}^*}{Re_{upper}} + \frac{Re_{lower}^*}{Re_{lower}} \\
 &= \frac{-1.33840}{FR_{11}} + \frac{7.8290143}{Re_{upper}} + \frac{3.0971259}{Re_{lower}}
 \end{aligned}$$

Subject to

$$\begin{aligned}
 -0.48077 &\leq DP_{11} \leq -0.3202 \\
 0.0032 &\leq DP_{12} \leq 0.0048 \\
 0.004 &\leq DP_{13} \leq 0.006 \\
 0.0032 &\leq DP_{21} \leq 0.0048 \\
 0.0024 &\leq DP_{22} \leq 0.0036
 \end{aligned}$$

Table 5 Result of regression analysis in FR11

Root MSE	0.02486	R-Square	0.9912
Dependent Mean	-0.72917	Adj R-Sq	0.9891
Coeff var	-3.40927		

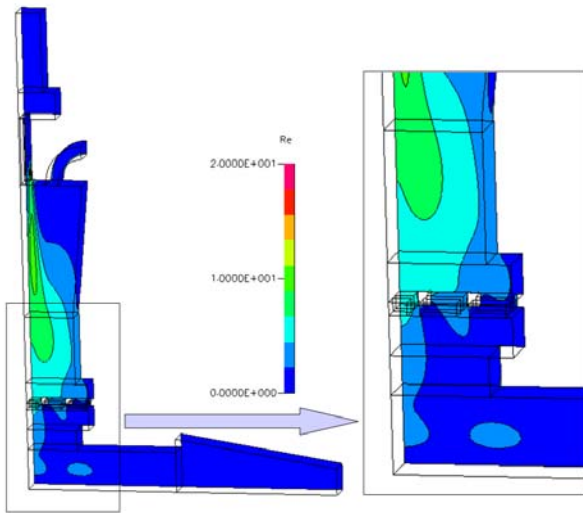
Variable	DF	Estimate	Error	t value	Pr > t
Intercept	1	-0.09694	0.03599	-2.69	0.0136
DP ₁₁ ²	1	-4.93388	0.19679	-25.07	<.0001
DP ₁₁ × DP ₁₂	1	-701.001	32.37186	-21.65	<.0001
DP ₁₁ × DP ₂₂	1	476.1915	24.29896	19.60	<.0001
DP ₁₂ × DP ₁₃	1	-6856.71	1452.9481	-4.72	0.0001
DP ₁₂ × DP ₂₁	1	-14560	1816.1851	-8.02	<.0001

Table 6 Design variables optimized by ADS

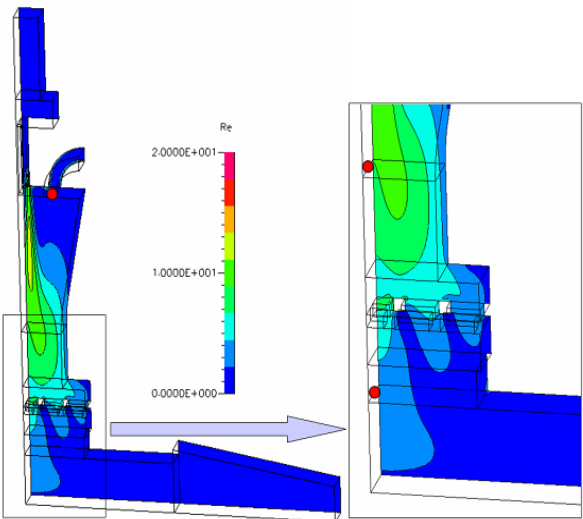
	DP ₁₁ [*]	DP ₁₂ [*]	DP ₁₃ [*]	DP ₂₁ [*]	DP ₂₂ [*]	Obj. func.
Lower bound	-0.4808	0.0032	0.004	0.0032	0.0024	3.184
Upper bound	-0.3202	0.0048	0.006	0.0048	0.0036	
ADS	-0.4808	0.0032	0.004	0.0048	0.0036	

Table 7 CFD result of optimized variables (DPs)

	FR11	Re_upper	Re_lower
Optimized result	-1.31793	7.51794	2.93382
Initial design	-0.744879	5.13609	2.00906



(a) Initial design



(b) Optimized design

Fig. 5 CFD result(Re) of optimized variables(DPs)

Table 7에서는 최적화된 파라미터를 대입한 CFD 분석 결과를 보여주고 있다. 초기 공기방울의 유입량과 상부 노즐의 공기방울 생성률, 하부노즐의 공기방울 생성률들(FRs)이 증가 된 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해서 최적화가 올바르게 수행 된 것임을 알 수 있다.

5. 결론

이 논문에서는 제품의 초기 설계 과정에서 공리설계의 적용을 제시하고 있다. 그리고, 제품의 성능을 향상시키기 위한 파라미터들과 물리적 요소들을 선택하고 이러한 인자들의 관계를 규명하였다. 공리설계의 설계행렬과 신경망의 가중치행렬, 그리고 회귀모델의 계수 비교를 통하여, 파라미터의 연관성을 판별하였다. 특히 정량적으로 파

악하기 어려운 공리설계의 설계행렬을 수치적으로 표현한 가중치행렬로 정규화 하였다. 이를 통해 독립공리(independence axiom)의 관점에서 DP와 FR의 관계를 논리적으로 판별할 수 있다. 파라미터들을 도출하고 이를 이용한 최적화는 FR들을 하나의 목적함수로 통합하여 최적의 값을 구하였다. 이 논문에서는 제품의 초기 설계단계에서부터 최적화된 완성품에 이르는, 전체적인 설계 방식을 제시하고 있다. 이를 통해 초기 설계에서부터 공학적인 이론을 적용하여, 설계 시간을 줄일 수 있다 하겠다. 이러한 설계방법은 향후 다른 분야에서도 유사하게 적용할 수 있을 것으로 예상된다. 특히 파라미터들간의 관계가 명확히 들어나지 않고, 파라미터의 수가 많을 경우에 유용하게 사용될 것으로 판단된다. 이를 통해 설계의 파라미터의 수를 줄이고, 이를 최적화 하는데 많은 도움을 줄 것이다.

참고문헌

- (1) Brennen, C. E., 1995, *Cavitation and Bubble Dynamics*, Oxford University Press, New York, pp. 34~98.
- (2) Brennen, C. E., 1994. *Hydrodynamics of Pumps*, Oxford University Press, New York, pp.99~120.
- (3) Mohokar, V. S., Pandit, A. B., 2001, "Numerical investigations in the behaviour of one-dimensional bubbly flow in hydrodynamic cavitation," *Chemical Engineering Science* 56, pp.1411~1418.
- (4) CFD Research Corporation, 2000, "CFD-ACE(U) modules," pp.7.1~7.22.
- (5) Suh, N. P., 1990, *The Principles of Design*, Oxford University Press, New York, pp.25~146.
- (6) Jeong, P. J., Cha. S. W., 2000, "Developing Microcellular Foamed Vibration Isolator for DVD by Axiomatic Approach," *KSPE International Journal*, Vol. 17, No. 12, pp.101~106.
- (7) Park, G. J., Do S. H., Suh, N. P., 1999 "Design and Extension of Software Systems Using the Axiomatic Design Framework," *KSME International Journal*, Vol.23, No.9, pp.1536~1549.
- (8) Douglas C. Montgomery, 2001, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, INC., New York, pp.363~500.
- (9) Kim, W. S., Lee, J. S., 1999, "System Decomposition Techniques in Multidisciplinary Design Optimization Problems Using Genetic Algorithms and Neural Networks," *COSEIK*, Vol.12, No.4, pp.619~627.