



연산회로로 간섭을 소거하는 분력계 개발

김효철¹·신창환^{2,†}·성세진³·류재문⁴·신지환⁵·함연재⁶·유극상⁶
서울대학교 조선해양공학과·서울대학교 공학연구원¹
다셀 주식회사²
충남대학교 전기공학과³
충남대학교 선박해양공학과·선박해양시스템기술협동조합⁴
국방과학연구소⁵
(주)시즈⁶

Development of Interference Eliminating Circuit Embedded Multi-component Sensor

Hyochul Kim¹·Changhwan Shin^{2,†}·Sejin Seong³·Jaemoon Lew⁴·Jihwan Shin⁵·Younjae Ham⁶·Keucksang Yoo⁶
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, SNU · Institute of Engineering Research, SNU¹
Dacell Co., Ltd.²
Department of Electric Engineering, Chungnam National University³
Department of Ship and Ocean Engineering, Chungnam National University·The Cooperative of Ship and Ocean Engineering Technology⁴
Agency for Defense Development⁵
Ciiz Co., Ltd.⁶

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Multi-component force sensors often encounter to undesirable interference between force and moment components due to design limitation and manufacturing capabilities. Although iterative design can reduce interference, it is difficult to eliminate completely, and conventional commercial sensors generally allow about 5% interference. In certain applications, sensors exceeding this limit are still used, with numerical post-processing of measurement data employed to eliminate interference. This approach, however, provides only intermittent results with sacrificing real-time continuity. In this study, we propose and demonstrate a novel interference-elimination system that processes the real-time output signals of Wheatstone bridge for each component forces through an eliminating circuit consisting of multiplying, summing, and amplifying processors. By directly implementing the linear equations of sensor performances, the system enables real-time elimination of interference without numeric calculation. This method improves accuracy without iterative design of sensor accommodate within limited space provided in a slender underwater models. The developed approach is experimentally validated through calibration tests, showing effectiveness in elimination of dominant interference and improving the measurement precision. The results confirm that the proposed analog circuit is an efficient and practices for real-time force/moment measurement in experiments.

Keywords : Multi-component force sensor(다분력계), Interference elimination(간섭 소거), Multiplying processor(곱셈연산 소자), Summing processor(합산연산 소자), Amplifying processor(증폭연산 소자), Analog computation circuit(아날로그 연산 회로)

1. 서 론

선박이나 해양구조물의 유체 중 성능을 실험으로 평가하려면 모형에 작용하는 힘과 모멘트를 분력계로 계측할 수 있어야 한다.

실험에 사용하는 분력계는 계측 기준점 위치와 분력계 설치조건, 설치 방법과 방수 요구 등에 적합한 조건을 설계에 미리 반영하여야 한다. 특히 세장형 수중운동 모형일 때는 제한된 모형 내부 공간에 분력계를 설치해야 하는 제약이 있어 분력계는 가능한 한

최소 치수로 설계하여야 한다.

수중에서 고속으로 직진하는 세장형 물체에 작용하는 유체력을 정밀하게 계측하려면 수밀을 유지하며(Kim et al., 2021) 측정 범위 내에서 사용할 수 있는 적합한 용량의 분력계가 필요하다. Kim et al. (1997)은 순수 굽힘 모멘트를 측정하는 분력계를 설계하였으며 Kim et al. (2024)은 세장체 모형의 진행 방향이 x 인 직교 좌표계에서 모형 내부에서 $F_x = F_y = F_z = 3,000N$, $M_x = M_y = M_z = 150N \cdot m$ 용량의 6-분력계를 설계하였으며 허용범위를 넘는 간섭은 데이터 처리장치에서 분리하였다. 그리고 Lee et al. (2013)은 공간제약을 해결하려 동력 전달 축 일부 구간에서 다분력을 감지할 수 있는 구조를 제안하였다.

세장체가 수중에서 고속으로 선회하면 분력계는 세장체에 고정되어 있으므로 직교좌표계를 기준으로 분력을 측정하며 유체력 뿐 아니라 선회운동으로 발생하는 원심력의 영향도 포함된다. 원심력과 유체력의 작용점은 서로 다르고 분력계의 측정점과도 다르므로 분력계에는 유체력과 원심력의 벡터 합성된 힘이 작용한다. 실험하려는 모형의 형상, 선회속도와 선회반경 그리고 분력계 설치 위치를 가정하고 분력계 용량을 추정하였다. 회두각과 피치각이 있는 실험에서는 모형 설치 단계에 모형 중량이 초기 하중으로 작용하므로 F_y , F_z , M_y , M_z 는 값이 크고 F_x , M_x 는 상대적으로 작은 값이다.

물체에 작용하는 분력의 차이가 클 때는 분력 간 간섭을 피하기 어려우므로 Laun (2010)은 동등 수준의 변형도가 발생하는 하중 검출 요소를 분산 배치하는 피라미드형 6-분력계를 제안하였다. 이 방법은 제한된 공간에서는 사용에 제한이 있어 최소한의 간섭을 허용하고 발생하는 간섭을 제거하도록 하였다. Chao and Chen (1997)은 분력 검출 스트레인 게이지 수와 배치를 변경하고 있으며 계측 결과를 수치화하여 해를 구하는 과정에 출력 신호의 연속성이 상실되므로 단속적 계측 정보가 얻어진다.

계측에서 나타난 큰 간섭부터 수치화하여 분리하는 Kim et al. (2024)의 방법을 연산회로로 직접 분리하는 방법으로 개선하였다. 이 방법은 수치 연산 과정에서 나타나는 곱셈 연산과 합산 연산 그리고 종속 연산을 연산회로에서 실시간으로 처리하는 새로운 방법이다. 이 방법은 분력계 설계와 제작 그리고 설치와 측정 과정에 발생하는 간섭을 모두 제거할 수 있어서 분력계의 계측 정도를 높일 수 있다. 또한, 분력계의 교정 성적서에서 탁월한 간섭부터 분리하여 분력계의 측정 정도를 높일 수 있어서 공학적으로 가치가 매우 높다.

2. 다분력계의 설계조건

2.1 실험 모형과 측정 하중의 특징

시험 모형의 기본 형상은 최대지름이 $0.32m$ 이고 세장비가 10인 회전대칭 주상체로서 코닝 타워와 자세 안정과 조종을 위한 각종 날개와 추진 장치들이 부가물로 첨가되어 있다. 따라서 분

력계를 시험 모형 내부에 설치하려면 치수 제약이 뒤따른다. 난류 영역에서 모형시험을 하려면 모형의 길이 L 과 속도 V 그리고 점성계수 ν 라 할 때 레이놀즈수 $Re = (VL)/\nu \geq 1.0 \times 10^7$ 이 되어야 하므로 모형의 전진 속도는 $3.56m/s$ 이상이어야 한다. 모형의 선회반경을 수상선의 시험 계측자료의 최소 선회반경 값과 동등 수준이라고 보면, 선박의 최소 선회직경은 모형 길이의 2.5배 이상이어야 하므로 길이 $3.2m$ 모형의 최소 선회직경은 약 $8m$ 이며 이에 따른 최소 선회반경은 약 $4m$ 이상이 되어야 한다. 선회시험에서 사용하는 분력계는 모형에 작용하는 유체력과 원심력을 측정점 위치에서 측정할 수 있어야 한다. 그리고 모형 시험 상태뿐 아니라 모형의 중량과 부력으로 인한 모멘트도 함께 측정할 수 있어야 한다.

2.2 분력계의 설계용량 추정

길이가 $3.2m$ 이고 지름이 $0.32m$ 인 세장형 회전체가 선회반경 $4m$ 이고 $1rad/s$ 로 선회할 때 모형 중앙에 설치한 분력계에 작용하는 유체력과 원심력을 포함하여 최대 하중을 1차로 추정하면 $F_x = 1,000N$, $F_y = F_z = 3,000N$, $M_x = 500N \cdot m$, $M_y = M_z = 3,000N \cdot m$ 가 얻어진다. 여기에 모형을 설치하는 과정에 모형의 중량과 부력 그리고 모형을 이동할 때 안전을 추가로 고려하여 F_z 용량을 증가시키면 $F_x = 1,000N$, $F_y = 3,000N$, $F_z = 12,000N$, $M_x = 500N \cdot m$, $M_y = M_z = 3,000N \cdot m$ 로 계측 용량을 정할 수 있다.

공간적 제약 없이 분력계를 피라미드형으로 설계하면 균등한 강성을 가지는 감지 부재를 최적 위치에 배치하여 간섭을 최소화할 수 있다. 하지만 실험 대상인 회전대칭 세장체일 때는 설치 공간과 설치 위치에도 제약이 있다. 특히 큰 모멘트를 측정하는 감지 부재는 충분한 강성을 가지며 제한된 공간에 배치할 수 있도록 치수를 결정하여야 한다.

시험 모형의 외형 치수가 $\phi 0.32m \times 3.3m$ 이고 분력계를 설치할 공간은 모형과 동심인 $\phi 0.176m$ 원통형 공간이라고 잠정 결정할 수 있다. 고속 선회 모형에서는 큰 모멘트가 발생하고 상대적으로 작은 축 방향 힘이 작용하므로 제한된 설치 공간은 모멘트 감지 부재와 축 방향 힘을 감지하는 부재가 적정 강성도를 유지하며 분력 간의 간섭을 피하기가 어려워진다. 모형의 선회 선회속도를 $3.56m/s$ 이상으로 유지하여야 하므로 모형을 시험 속도로 가속할 때 필요한 관성력을 추가하면 $F_x = 3,000N$ 이 되어야 한다. 또 힘과 모멘트 사이 간섭을 줄여주기 위하여 선회시험 반경을 $12m$ 이상으로 설정하면 각속도가 줄어들며 원심력이 줄어들므로 분력계 용량을 $F_x = F_y = 3,000N$, $F_z = 12,000N$, $M_x = 1,000N \cdot m$, $M_y = M_z = 2,000N \cdot m$ 로 정할 수 있다.

2.3 분력계 좌표계와 감지 부재의 배치 계획

분력계로 측정점에 원점이 있는 직교 좌표계를 Fig. 1과 같이

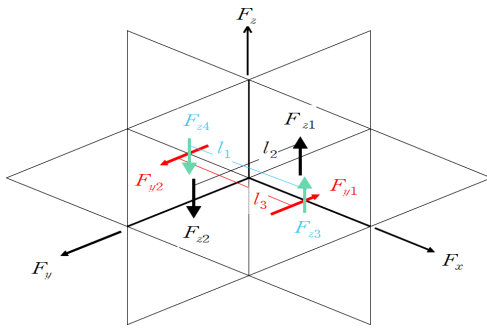


Fig. 1 Coordinate system of multi-component sensor

결정하였다. 축 방향 힘은 F_x , F_y , F_z 로 표시하고 축에 직교하는 평면에서 크기가 같고 방향이 반대인 힘이 평행한 방향으로 작용할 때 원점에서는 모멘트 $M_x = l_2(F_{z1} + F_{z2})/2$, $M_y = l_1(F_{z3} + F_{z4})/2$, $M_z = l_3(F_{y2} + F_{y1})/2$ 가 발생한다. 따라서 2.2절에서 검토한 결과를 바탕으로 분리계 설계용량은 Fig. 1을 기준으로 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x &= 3,000N \\ F_y &= 3,000N \\ F_z &= 12,000N \\ M_x &= l_2(F_{z1} + F_{z2})/2 = 1,000N \cdot m \\ M_y &= l_1(F_{z3} + F_{z4})/2 = 2,000N \cdot m \\ M_z &= l_3(F_{y2} + F_{y1})/2 = 2,000N \cdot m \end{aligned} \quad (1)$$

수중 운동체의 중앙에 원점이 있고 모형의 진행 방향이 x 축인 직교 좌표계의 좌표 원점에서 힘을 측정하는 분력계를 생각한다. 모든 분력은 감지 부재를 좌표계에 대칭으로 배치하여 측정하기로 한다. F_x 와 F_y 는 한 쌍의 감지 부재로 측정하고, F_z 는 두 쌍의 감지 부재로 측정하기로 한다. 분력계 내부 공간의 제약으로 감지 부재의 간격을 $l_2 = 0.1m$, $l_1 = l_3 = 0.2m$ 로 결정하고 대칭 부재의 치수를 결정하도록 하였다.

위의 조건을 적용하면 F_x 와 F_y 를 감지하는 하나의 부재는 $1,500N$ 을 전달하고 F_z 를 감지하는 부재는 $3,000N$ 을 전달한다. 모멘트는 크기가 같고 방향이 반대인 하중으로 생성되므로 M_z 를 감지하는 부재는 $10,000N$ 을 전달하여야 하고 M_y 와 M_z 를 감지하는 부재도 $10,000N$ 의 하중을 전달할 수 있어야 한다. 큰 모멘트를 좁은 간격으로 배치한 감지 부재로 검출하여야 하므로 부재는 $10,000N$ 의 힘을 전달할 수 있어야 한다.

3. 감지 부재의 형상설계

3.1 분력계 감지 부재의 생성

분력계의 감지요소로 편심하중을 받는 기둥 요소를 Kim et al. (2024)에서 제안하는 방법으로 2-부력 감지 부재의 형상을 결정

하고 감지 부재의 간격을 $l_2 = 0.1m$, $l_1 = l_2 = 0.2m$ 로 결정하고 부재 치수를 구하면 Fig. 2와 같은 감지부재가 얻어진다.

수직 하중 F_v 와 수평 하중을 F_h 를 감지하는 2-분력 감지 부재 한 쌍을 $X-Z$ 평면에 $\pm 0.05m$ 대칭 배치하고 부재의 수평 방향 감지요소로 $F_x = 3,000N$ 을 측정하도록 하면 하나의 수평 방향 2차 감지요소에는 $\pm 1,500N$ 의 편심하중이 작용한다. F_y 는 한 쌍의 2-분력 감지 부재를 $Y-Z$ 평면에 $\pm 0.1m$ 대칭으로 배치하고 $F_y = 3,000N$ 을 측정하므로 수평 방향 2차 감지요소에는 $\pm 1,500N$ 의 편심하중이 작용한다. F_z 를 계측하는 부재를 $X-Z$, $Y-Z$ 평면 각각에 대칭으로 배치하면 수직 방향으로 $\pm 12,000N$ 이 작용하므로 하나의 2차 감지 부재에는 $\pm 3,000N$ 이 작용한다.

$M_x = \pm 1,000N \cdot m$ 는 $F_z = \pm 10,000N$ 을 전달하는 한 쌍의 수직부재를 $X-Z$ 평면에 $\pm 0.05m$ 대칭 배치하여 계측한다. $M_y = \pm 2,000N \cdot m$ 는 $F_z = \pm 10,000N$ 을 전달하는 한 쌍의 감지 부재를 $Y-Z$ 평면에 $\pm 0.1m$ 떨어지게 대칭으로 배치하여 계측한다. $M_z = \pm 2,000N \cdot m$ 는 $F_y = \pm 10,000N$ 을 감지하는 부재를 $Y-Z$ 평면에 $\pm 0.1m$ 떨어지게 대칭 배치하여 계측한다.

따라서 $F_v - F_h$ 감지 부재는 수직 부재가 $F_z \pm 3,000N$ 의 수직 하중과 $F_z = \pm 10,000N$ 의 반대 방향 힘이 형성하는 모멘트를 감지해야 한다. 수평부재는 균일 분포하중 $F_y = \pm 1,500N$ 과 $F_y = \pm 10,000N$ 의 반대 방향 힘이 형성하는 모멘트를 감지한다. $F_v - F_h$ 감지 부재의 수평 방향 감지요소는 $\pm 11,500N$ 을 전달하고 수직 부재는 $\pm 13,000N$ 을 전달할 수 있어야 한다.

3.2 분력계 감지 부재 치수의 간이 결정

본력계의 소재로서 AI 2024-T3를 선정하면 소재의 탄성 계수는 80 GPa 이고 항복점 응력은 345 MPa 이다. 변형도 측정에는 MM 사의 스트레인 게이지 J2A-13-S181N-350을 선정하면 게이지 접착 후 변형 피로한도는 $1,200\mu\text{m}/\text{m}$ 이 된다. 이는 설계에서 감지부의 허용응력을 96 MPa 로 결정하였으므로 감지 부재 안전율을 3.6으로 설정한 효과가 있다. 선정한 스트레인 게이지의 형상 치수와 감지 부재 치수를 생각하여 스트레인 게이지 접착 면의 치수를 0.012 m 로 결정하면 Kim et al. (2024)의 방법에 따라 치수는 Fig. 2와 같이 정할 수 있다.

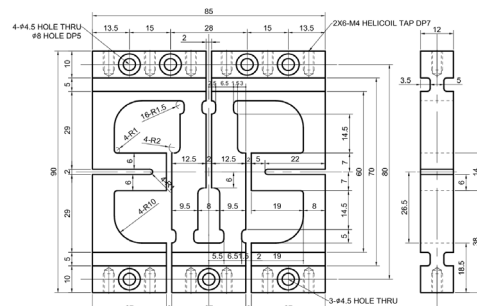


Fig. 2 Dimension of F_n and F_b force sensing element

Fig. 2의 부재를 Fig. 3과 같이 $X-Z$ 평면에 $\pm 0.05m$ 떨어지게 대칭 배치하면 F_x 와 M_x 를 측정할 수 있다. 그리고 감지 부재를 $Y-Z$ 평면에 $\pm 0.1m$ 떨어지게 대칭 배치하면 F_y , F_z , M_y , M_z 등을 측정할 수 있다. 다만 스트레인 측정 위치 선정과 Wheatstone bridge 회로 구축에서 F_y , F_z 를 측정할 때는 M_y , M_z 의 영향을 받지 않도록 하여야 한다. 또, M_y , M_z 를 측정하는 Wheatstone bridge 회로 구축에서는 F_y , F_z 의 영향이 상쇄되도록 회로를 구성하여야 한다.

4. 분력계 감지부 구조해석

4.1 분력계 구조의 유한 요소 해석

Fig. 2와 같은 2-분력 감지 부재가 수직 하중을 받으면 중앙에 수직 방향으로 배치한 한 쌍의 점 대칭형 2차 감지요소의 좁아진 상부 바깥쪽 표면은 압축 변형이 일어나고 넓어진 하부 바깥쪽 표면에는 인장 변형이 일어난다. 그리고 수평으로 배치한 한 쌍의 상하 대칭형 2차 감지요소에는 위쪽과 아래쪽 표면에 압축 변형과 인장 변형이 서로 바뀌어 나타난다. 수직과 수평 하중이 작용하는 평면의 교차점은 분력계의 계측 원점이 된다. 2-분력 감지 부재에는 편심하중이 인장 또는 압축으로 작용하며 부재의 표면 대부분 구간에서 일정한 값을 유지한다. 이와 같은 특성으로 게이지 배치와 회로 구성에서 뛰어난 작업성을 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 다만 게이지 위치는 대칭성이 유지되어야만 간섭을 최소화할 수 있으므로 주의해야 한다.

4.2 다분력계 구조의 유한 요소 해석

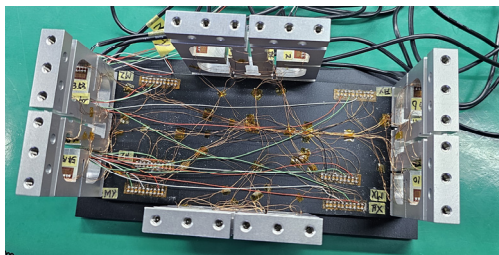


Fig. 3 Sensing element arrangement

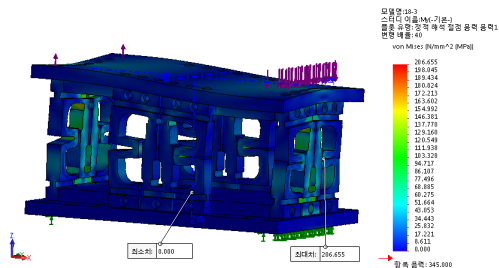


Fig. 4 Example of structural analysis of multi-component sensor

분력계 감지 부재를 설계하고 게이지 작업 편의성을 생각하며 변형 측정 위치를 선정하였다. 편심하중을 받는 기둥 요소에 스트레인이 최대 하중일 때 측정 위치에서 게이지의 최대 변형도가 발생하도록 감지부 치수를 Timoshenko의 이론으로 결정하였다. 다만 스트레인 게이지 치수는 제조자의 제품규격에 따라야 하므로 감지부 치수를 결정전에 게이지를 미리 선정해야 한다.

간이 계산으로 감지 부재의 치수를 Fig. 2와 같이 결정하면 설계하려는 분력계는 Fig. 3과 같이 형성할 수 있다. 실제 분력계는 여러 감지 부재가 하나로 조립된 상태에서 하중을 받으므로 조립 상태의 구조해석이 필요하다. 분력계 구조 전체를 설계 최대 하중 상태에서 상용 프로그램 SOLIDWORKS로 유한요소 해석하였으며 대표적인 계산 예를 Fig. 4에 보였다.

분력계 치수를 결정하며 스트레인 게이지 위치에서 $1,200\mu m/m$ 의 변형도를 허용하였다. 따라서 게이지 위치에는 항복점 응력의 27% 정도가 작용한다. 계산 예에서는 수직부재의 게이지 위치에는 적정 수준의 응력이 발생하며 수평부재의 의도적으로 형성한 연약 구간에 최대 응력이 나타났다. 최대 응력

발생점의 von Mises 응력을 기준으로 연약 구간에 발생하는 응력이 항복점 응력보다 낮아지도록 연약 구간의 치수를 수정하도록 하였다.

4.3 분력계 출력 특성의 추정

분력계를 설계하며 MM사의 2중 1축 게이지 J2A -13- S181N -350를 선정하였다. 측정점의 스트레인을 계산하여 Wheatstone bridge에서 출력 신호를 추정한 후 예상 최대 출력으로 무차원화하면 Table 1이 얻어진다. 분력계는 설계와 가공 그리고 조립에서 예측하지 못한 요인으로 간섭이 발생하고 있어서 통상적으로 5% 정도의 분력 간 간섭을 허용하고 있다.

분력계 구조를 유한요소 해석한 Table 1을 보면 $F_x - M_y$ 간섭과 $F_y - M_x$ 간섭이 23.1% 정도이고 $F_z - M_y$ 간섭이 5.2% 정도로 계산되었다. 간섭은 제한된 공간에서 분력을 측정할 때 측정하려는 축 방향 힘보다 큰 축 방향 힘이 모멘트를 일으킬 때 간섭이 일어나기 때문이다. 허용범위를 넘어서는 간섭을 피하려면 공간적 제약을 지키며 반복 재설계하기보다는 간섭소거 방법이 효과적인 문제 해결 방법이 될 수 있다.

Table 1 Normalized interference between forces and moments

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
SF _x	1.0000	0.0002	-0.0042	-0.0014	-0.2306	-0.0082
SF _y	-0.0001	1.0000	-0.0004	0.2311	0.0031	0.0044
SF _z	0.0162	-0.0007	1.0000	-0.0026	0.0521	-0.0344
SM _x	-0.0001	-0.0185	-0.0006	1.0000	-0.0003	-0.0025
SM _y	0.0390	-0.0002	-0.0027	0.0003	1.0000	-0.0014
SM _z	0.0003	-0.0001	0.0001	0.0006	0.0009	1.0000

Table 2 Calibration results of devised 6-component balance

	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
SFx	100.0%	-2.0%	0.9%	0.3%	-25.0%	7.8%
SFy	0.6%	100.0%	-2.3%	-2.9%	-1.1%	10.8%
SFz	3.0%	0.0%	100.0%	6.1%	-17.0%	0.4%
SMx	0.2%	-0.4%	1.2%	100.0%	0.6%	2.8%
SMy	0.9%	-0.2%	-1.5%	0.1%	100.0%	0.7%
SMz	0.5%	1.4%	0.5%	0.0%	0.5%	100.0%

4.4 분력계 출력의 간섭 현상 확인

분력계 전체를 하나의 구조로 보아 구조해석을 하고 있으나 실제 제작에서는 4개의 2차 감지 부재를 가공, 조립하여 제작하였다. 가공과 조립에 오차가 발생하며 볼트 조립 방식을 채택하였으므로 계산값과 다른 변형이 나타날 수 있다. 분력계를 제작하고 교정 시험으로 Table 2와 같은 결과를 얻었다. 수치 계산에서는 M_x 와 M_y 가 간섭의 주원인이었으나 조립구조 채택으로 모멘트 M_z 가 새로운 간섭 원인이 되었다고 판단된다.

5. 분력계 간섭 특성과 간섭 분리

5.1 분력 측정 과정의 수식 표현

분력계에 하중이 작용하였을 때 출력 신호 SF_x , SF_y , SF_z , SM_x , SM_y , SM_z 와 하중 F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z 사이의 관계는 (2) 식과 같은 선형 연립 방정식으로 표시할 수 있다. 여기서 a_{ij} 는 분력계에 하중이 작용할 때 특정 방향의 출력 신호와 하중 성분 사이의 관계를 나타내는 비례상수이다. 따라서 식 (2)의 해를 구하면 작용하고 있는 힘을 출력 신호로 나타낼 수 있다. 그런데 식 (2)의 좌변은 분력계에 인가하는 전압에 따라 변동하는 출력 전압 신호이며 우변의 F_x , F_y , F_z 는 N 단위이고 M_x , M_y , M_z 는 단위가 $N \cdot m$ 이다. 따라서 위의 선형 연립방정식의 해를 구할 때는 차원 해석을 병행하여야 한다.

$$\begin{aligned} SF_x &= a_{11}F_x + a_{12}F_y + a_{13}F_z + a_{14}M_x + a_{15}M_y + a_{16}M_z \\ SF_y &= a_{21}F_x + a_{22}F_y + a_{23}F_z + a_{24}M_x + a_{25}M_y + a_{26}M_z \\ SF_z &= a_{31}F_x + a_{32}F_y + a_{33}F_z + a_{34}M_x + a_{35}M_y + a_{36}M_z \\ SM_x &= a_{41}F_x + a_{42}F_y + a_{43}F_z + a_{44}M_x + a_{45}M_y + a_{46}M_z \\ SM_y &= a_{51}F_x + a_{52}F_y + a_{53}F_z + a_{54}M_x + a_{55}M_y + a_{56}M_z \\ SM_z &= a_{61}F_x + a_{62}F_y + a_{63}F_z + a_{64}M_x + a_{65}M_y + a_{66}M_z \end{aligned} \quad (2)$$

5.2 수치 계산을 이용한 공학적 간섭 분리

분력계의 출력 신호와 하중을 수치화한 후 식 (2)로 표시되는

6×6 선형 연립방정식을 풀면 간섭이 제거된 해를 얻을 수 있다. 식 (2)를 측정하중과 출력 사이의 비례상수 a_{ij} 가 $i=j$ 일 때 a_{ii} 로 무차원화 하면 좌변은 $SF_{xn} = SF_x/a_{ii}$ 이 되고 우변의 $C_{ij} = a_{ij}/a_{ii}$ 는 $i=j$ 일 때 $C_{ij} = 1$ 이 되므로 공학적 활용도가 높은 무차원 관계식 식 (3)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} SF_{xn} &= F_x + C_{12}F_y + C_{13}F_z + C_{14}M_x + C_{15}M_y + C_{16}M_z \\ SF_{yn} &= C_{21}F_x + F_y + C_{23}F_z + C_{24}M_x + C_{25}M_y + C_{26}M_z \\ SF_{zn} &= C_{31}F_x + C_{32}F_y + F_z + C_{34}M_x + C_{35}M_y + C_{36}M_z \\ SM_{xn} &= C_{41}F_x + C_{42}F_y + C_{43}F_z + M_x + C_{45}M_y + C_{46}M_z \\ SM_{yn} &= C_{51}F_x + C_{52}F_y + C_{53}F_z + C_{54}M_x + M_y + C_{56}M_z \\ SM_{zn} &= C_{61}F_x + C_{62}F_y + C_{63}F_z + C_{64}M_x + C_{65}M_y + M_z \end{aligned} \quad (3)$$

실제 분력계에서 특정 분력 사이에 집중하여 나타나는 허용범위를 넘는 간섭을 소거법으로 분리하기로 한다. Table 2의 교정 시험 결과를 보면 F_x 는 M_y 와 25% 그리고 M_z 와 7.8%의 간섭을 일으키고 있다. F_y 는 M_z 와 10.8% 간섭이 있으며 F_z 는 M_x 와 6.1% 그리고 M_y 와 17%의 간섭을 일으킨다. 이들 간섭을 큰 간섭부터 차례로 소거법으로 분리하기로 한다.

5.3 두 성분 사이의 간섭 분리

가장 간섭이 큰 $F_x - M_y$ 간섭을 소거법으로 분리하는 데 필요한 두 식을 식 (3)에서 선정하면 다음 식 (4)가 얻어진다.

$$\begin{aligned} SF_{xn} &= F_x + C_{12}F_y + C_{13}F_z + C_{14}M_x + C_{15}M_y + C_{16}M_z \\ SM_{yn} &= C_{51}F_x + C_{52}F_y + C_{53}F_z + C_{54}M_x + M_y + C_{56}M_z \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 M_x 와 F_x 를 소거하여 식 (5)를 얻고 식 (6)의 관계로 바꿔 쓰면 식 (7)이 얻어진다. 식 (7)의 좌변은 간섭이 제거된 무차원 출력 항이며 우변의 C_{ij}^* 는 간섭을 분리하며 수정된 C_{ij} 이다. 따라서 식 (7)을 식 (3)의 해당 항과 바꾸면 식 (8)로 표시된다.

$$\begin{aligned} \frac{SF_{xn} - C_{15}SM_{yn}}{1 - C_{15}C_{51}} &= F_x + \frac{C_{12} - C_{15}C_{52}}{1 - C_{15}C_{51}}F_y + \frac{C_{13} - C_{15}C_{53}}{1 - C_{15}C_{51}}F_z \\ &\quad + \frac{C_{14} - C_{15}C_{54}}{1 - C_{15}C_{51}}M_x + \frac{C_{16} - C_{15}C_{56}}{1 - C_{15}C_{51}}M_z \\ \frac{SM_{yn} - C_{51}SF_{xn}}{1 - C_{15}C_{51}} &= \frac{C_{52} - C_{51}C_{12}}{1 - C_{15}C_{51}}F_y + \frac{C_{53} - C_{51}C_{13}}{1 - C_{15}C_{51}}F_z \\ &\quad + \frac{C_{54} - C_{51}C_{14}}{1 - C_{15}C_{51}}M_x + M_y + \frac{C_{56} - C_{51}C_{16}}{1 - C_{15}C_{51}}M_z \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} SF_{xn}^* &= \frac{(SF_{xn} - C_{15}SM_{yn})}{(1 - C_{15}C_{51})}, \quad C_{12}^* = \frac{(C_{12} - C_{15}C_{52})}{(1 - C_{15}C_{51})}, \\ C_{13}^* &= \frac{(C_{13} - C_{15}C_{53})}{(1 - C_{15}C_{51})}, \quad C_{14}^* = \frac{(C_{14} - C_{15}C_{54})}{(1 - C_{15}C_{51})}, \quad C_{16}^* = \frac{(C_{16} - C_{15}C_{56})}{(1 - C_{15}C_{51})} \end{aligned}$$

Table 3 Decomposition results of Fx-My interference

	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
SFx	100.0%	-2.0%	0.5%	0.3%	0.0%	8.0%
SFy	0.6%	100.0%	-2.3%	-2.9%	-1.1%	10.8%
SFz	3.0%	0.0%	100.0%	6.1%	-17.0%	0.4%
SMx	0.2%	-0.4%	1.2%	100.0%	0.6%	2.8%
SMy	0.0%	-0.2%	-1.5%	0.1%	100.0%	0.7%
SMz	0.5%	1.4%	0.5%	0.0%	0.5%	100.0%

Table 4 Decomposition results of Fz-My interference

	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
SFx	100.0%	-2.0%	0.5%	0.0%	0.0%	8.0%
SFy	0.6%	100.0%	-2.3%	-2.9%	-1.1%	10.8%
SFz	2.8%	-0.3%	100.0%	6.1%	0.0%	0.5%
SMx	0.2%	-0.4%	1.2%	100.0%	0.6%	2.8%
SMy	0.0%	-0.1%	0.0%	0.2%	100.0%	0.7%
SMz	0.5%	1.4%	0.5%	0.0%	0.5%	100.0%

$$SM_{yn}^* = \frac{(SM_{yn} - C_{51}SF_{xn})}{(1 - C_{15}C_{51})}, \quad C_{54}^* = \frac{(C_{54} - C_{51}C_{14})}{(1 - C_{15}C_{51})},$$

$$C_{52}^* = \frac{(C_{52} - C_{51}C_{12})}{(1 - C_{15}C_{51})}, \quad C_{53}^* = \frac{(C_{53} - C_{51}C_{13})}{(1 - C_{15}C_{51})}, \quad C_{56}^* = \frac{(C_{56} - C_{51}C_{16})}{(1 - C_{15}C_{51})} \quad (6)$$

$$SF_{xn}^* = F_x + C_{12}^*F_y + C_{13}^*F_z + C_{14}^*M_x + C_{16}^*M_z$$

$$SM_{yn}^* = C_{52}^*F_y + C_{53}^*F_z + C_{54}^*M_x + M_y + C_{56}^*M_z \quad (7)$$

$$SF_{xn}^* = F_x + C_{12}^*F_y + C_{13}^*F_z + C_{14}^*M_x + C_{16}^*M_z$$

$$SF_{yn} = C_{21}F_x + F_y + C_{23}F_z + C_{24}M_x + C_{25}M_y + C_{26}M_z$$

$$SF_{zn} = C_{31}F_x + C_{32}F_y + F_z + C_{34}M_x + C_{35}M_y + C_{36}M_z \quad (8)$$

$$SM_{xn} = C_{41}F_x + C_{42}F_y + C_{43}F_z + M_x + C_{45}M_y + C_{46}M_z$$

$$SM_{yn}^* = C_{52}^*F_y + C_{53}^*F_z + C_{54}^*M_x + M_y + C_{56}^*M_z$$

$$SM_{zn} = C_{61}F_x + C_{62}F_y + C_{63}F_z + C_{64}M_x + C_{65}M_y + M_z$$

식 (8)의 교정 상수들은 분력계에서 $F_x - M_y$ 간섭을 소거할 때 Table 3과 같이 변화한다. 즉 C_{16} 이 7.8%에서 8.0%로 2.5% 정도 변화하며 나머지 간섭 계수 변화는 무시할 수 있다.

이어서 $F_z - M_y$ 간섭을 소거할 때는 $F_x - M_y$ 간섭을 소거하며 변화한 간섭 계수를 사용하여야 한다. 따라서 식 (8)에서 식 (9)를 선정하고 Table 3의 간섭 계수를 사용하여야 한다.

$$SF_{zn} = C_{31}F_x + C_{32}F_y + F_z + C_{34}M_x + C_{35}M_y + C_{36}M_z$$

$$SM_{yn}^* = C_{52}^*F_y + C_{53}^*F_z + C_{54}^*M_x + M_y + C_{56}^*M_z \quad (9)$$

앞에서와 같은 방법으로 간섭을 분리하면 좌변의 출력 신호는 식 (10)으로 변화하며 교정 상수는 Table 4와 같이 변화한다.

$$SF_{zn}^* = (SF_{zn} - C_{35}SM_{yn}^*)/(1 - C_{35}C_{53}^*)$$

$$SM_{yn}^* = (SM_{yn}^* - C_{53}^*SF_{zn}^*)/(1 - C_{35}C_{53}^*) \quad (10)$$

Table 5 Decomposition results of Fy-Mz interference

	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
SFx	100.0%	-2.0%	0.9%	0.1%	0.0%	8.0%
SFy	0.6%	100.0%	-2.3%	-2.9%	-1.1%	0.0%
SFz	2.8%	-0.3%	100.0%	6.1%	0.0%	0.5%
SMx	0.2%	-0.4%	1.2%	100.0%	0.6%	2.8%
SMy	0.0%	-0.1%	0.0%	0.2%	100.0%	0.8%
SMz	0.5%	0.0%	0.5%	0.0%	0.5%	100.0%

두 차례 분리하면 분력계 특성 방정식은 식 (11)로 변환다.

$$SF_{xn}^* = F_x + C_{12}^*F_y + C_{13}^*F_z + C_{14}^*M_x + C_{16}^*M_z$$

$$SF_{yn} = C_{21}F_x + F_y + C_{23}F_z + C_{24}M_x + C_{25}M_y + C_{26}M_z$$

$$SF_{zn}^* = C_{31}^*F_x + C_{32}^*F_y + F_z + C_{34}^*M_x + C_{36}^*M_z$$

$$SM_{xn} = C_{41}F_x + C_{42}F_y + C_{43}F_z + M_x + C_{45}M_y + C_{46}M_z$$

$$SM_{yn}^* = C_{51}^*F_x + C_{52}^*F_y + C_{54}^*M_x + M_y + C_{56}^*M_z$$

$$SM_{zn} = C_{61}F_x + C_{62}F_y + C_{63}F_z + C_{64}M_x + C_{65}M_y + M_z \quad (11)$$

세 번째로 $F_y - M_z$ 간섭을 분리하기로 하고 식 (11)에서 관련 항을 선정하여 2차 방정식을 구성하면 식 (12)가 얻어진다.

$$SF_{yn} = C_{21}F_x + F_y + C_{23}F_z + C_{24}M_x + C_{25}M_y + C_{26}M_z$$

$$SM_{zn} = C_{61}F_x + C_{62}F_y + C_{63}F_z + C_{64}M_x + C_{65}M_y + M_z \quad (12)$$

SF_{yn} 과 SM_{zn} 은 간섭 분리 영향을 받지 않았으므로 위첨자 *를 붙이고 같은 연산을 반복하면 식 (13)과 Table 5가 얻어진다.

$$SF_{yn}^* = (SF_{yn} - C_{26}SM_{zn}^*)/(1 - C_{26}C_{62})$$

$$SM_{zn}^* = (SM_{zn} - C_{62}SF_{yn}^*)/(1 - C_{26}C_{62}) \quad (13)$$

간섭을 세 차례 분리하면 특성 방정식은 식 (14)로 바뀐다.

$$SF_{xn}^* = F_x + C_{12}^*F_y + C_{13}^*F_z + C_{14}^*M_x + C_{16}^*M_z$$

$$SF_{yn}^* = C_{21}^*F_x + F_y + C_{23}^*F_z + C_{24}^*M_x + C_{25}^*M_y$$

$$SF_{zn}^* = C_{31}^*F_x + C_{32}^*F_y + F_z + C_{34}^*M_x + C_{36}^*M_z$$

$$SM_{xn} = C_{41}F_x + C_{42}F_y + C_{43}F_z + M_x + C_{45}M_y + C_{46}M_z$$

$$SM_{yn}^* = C_{51}^*F_x + C_{52}^*F_y + C_{54}^*M_x + M_y + C_{56}^*M_z$$

$$SM_{zn}^* = C_{61}^*F_x + C_{63}^*F_z + C_{64}^*M_x + C_{65}^*M_y + M_z \quad (14)$$

네 번째로 $F_x - M_z$ 간섭을 분리하기로 하고 식 (14)에서 관련 항을 선정하여 2차 방정식을 구성하면 식 (15)가 얻어진다.

$$SF_{xn}^* = F_x + C_{12}^*F_y + C_{13}^*F_z + C_{14}^*M_x + C_{16}^*M_z$$

$$SM_{zn}^* = C_{61}^*F_x + C_{63}^*F_z + C_{64}^*M_x + C_{65}^*M_y + M_z \quad (15)$$

SF_{xn}^* 는 $F_x - M_y$ 간섭을 분리하며 수정된 값이며 SM_{zn}^* 은 앞에서 $F_y - M_z$ 간섭을 분리하며 수정된 값이다. 각각의 간섭 계

Table 6 Decomposition results of Fx-Mz interference

	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
SFx	100.0%	-2.0%	0.9%	0.1%	0.0%	0.0%
SFy	0.6%	100.0%	-2.3%	-2.9%	-1.1%	0.0%
SFz	2.8%	-0.3%	100.0%	6.1%	0.0%	0.5%
SMx	0.2%	-0.4%	1.2%	100.0%	0.6%	2.8%
SMy	0.0%	-0.1%	0.0%	0.2%	100.0%	0.8%
SMz	0.0%	0.0%	0.5%	0.0%	0.5%	100.0%

수들도 분리 과정에서 수정된 항으로 위치자 *를 붙여서 나타내었다. 식 (15)의 해를 구하면 식 (16)이 얻어지므로 이를 반영하면 Table 6이 얻어진다.

$$\begin{aligned} SF_{xn}^0 &= (SF_{xn}^* - C_{16}^* SM_{zn}^*) / (1 - C_{16}^* C_{61}^*) \\ SM_{zn}^0 &= (SM_{zn}^* - C_{61}^* SF_{xn}^*) / (1 - C_{16}^* C_{61}^*) \end{aligned} \quad (16)$$

네 차례의 간섭 분리 후 특성 방정식은 식 (17)로 변화한다.

$$\begin{aligned} SF_{xn}^0 &= F_x + C_{12}^0 F_y + C_{13}^0 F_z + C_{14}^0 M_x + C_{15}^0 M_y \\ SF_{yn}^* &= C_{21}^* F_x + F_y + C_{23}^* F_z + C_{24}^* M_x + C_{25}^* M_y \\ SF_{zn}^0 &= C_{31}^0 F_x + C_{32}^0 F_y + F_z + C_{34}^0 M_x + C_{36}^0 M_z \\ SM_{xn}^0 &= C_{41}^0 F_x + C_{42}^0 F_y + C_{43}^0 F_z + M_x + C_{45}^0 M_y + C_{46}^0 M_z \\ SM_{yn}^0 &= C_{51}^0 F_x + C_{52}^0 F_y + C_{54}^0 M_x + M_y + C_{56}^0 M_z \\ SM_{zn}^0 &= C_{62}^0 F_y + C_{63}^0 F_z + C_{64}^0 M_x + C_{65}^0 M_y + M_z \end{aligned} \quad (17)$$

마지막으로 $F_z - M_x$ 간섭을 분리하기로 하고 식 (17)에서 관련 식을 선정하여 2차 방정식을 구성하면 식 (18)이 얻어지고 식 (18)의 해를 구하면 식 (19)와 Table 7이 얻어진다.

$$\begin{aligned} SF_{zn}^0 &= C_{31}^0 F_x + C_{32}^0 F_y + F_z + C_{34}^0 M_x + C_{36}^0 M_z \\ SM_{xn}^0 &= C_{41}^0 F_x + C_{42}^0 F_y + C_{43}^0 F_z + M_x + C_{45}^0 M_y + C_{46}^0 M_z \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} SF_{zn}^{++} &= (SF_{zn}^0 - C_{34}^0 SM_{xn}^0) / (1 - C_{34}^0 C_{43}^0) \\ SM_{xn}^{++} &= (SM_{xn}^0 - C_{43}^0 SF_{zn}^0) / (1 - C_{34}^0 C_{43}^0) \end{aligned} \quad (19)$$

허용범위를 넘는 간섭을 모두 분리한 후에는 분리계의 특성 방정식은 식 (20)으로 변화한다.

$$\begin{aligned} SF_{xn}^0 &= F_x + C_{12}^0 F_y + C_{13}^0 F_z + C_{14}^0 M_x + C_{15}^0 M_y \\ SF_{yn}^* &= C_{21}^* F_x + F_y + C_{23}^* F_z + C_{24}^* M_x + C_{25}^* M_y \\ SF_{zn}^{++} &= C_{31}^{++} F_x + C_{32}^{++} F_y + F_z + C_{35}^{++} M_y + C_{36}^{++} M_z \\ SM_{xn}^{++} &= C_{41}^{++} F_x + C_{42}^{++} F_y + M_x + C_{45}^{++} M_y + C_{46}^{++} M_z \\ SM_{yn}^0 &= C_{51}^0 F_x + C_{52}^0 F_y + C_{54}^0 M_x + M_y + C_{56}^0 M_z \\ SM_{zn}^0 &= C_{62}^0 F_y + C_{63}^0 F_z + C_{64}^0 M_x + C_{65}^0 M_y + M_z \end{aligned} \quad (20)$$

5.4 수치 연산을 이용한 공학적 간섭 분리

분리계 교정 시험으로 $C_{15} = -0.250$, $C_{16} = 0.078$, $C_{26} = 0.108$,

Table 7 Decomposition results of Fz-Mx interference

	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
SFx	100.0%	-2.0%	0.9%	0.1%	0.0%	0.0%
SFy	0.6%	100.0%	-2.3%	-2.9%	-1.1%	0.0%
SFz	2.8%	-0.3%	100.0%	0.0%	0.0%	0.5%
SMx	0.2%	-0.4%	0.0%	100.0%	0.6%	2.8%
SMy	0.0%	-0.1%	0.0%	0.2%	100.0%	0.8%
SMz	0.0%	0.0%	0.5%	0.0%	0.5%	100.0%

$C_{34} = 0.061$, $C_{35} = -0.170$ 으로 확인되었으며 나머지 값들은 모두 $|C_{ij}| \leq 0.03$ 으로 나타났다. 통상적으로 보급형 분리계에서 허용하는 5%보다 큰 간섭은 분리하고 그보다 작은 간섭을 무시하면 식 (20)은 식 (21)로 간단히 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{xn} &= SF_{xn}^0 = (SF_{xn}^* - C_{16}^* SM_{zn}^*) / (1 - C_{16}^* C_{61}^*) \\ F_{yn} &= SF_{yn}^* = (SF_{yn}^* - C_{26}^* SM_{zn}^*) / (1 - C_{26}^* C_{62}^*) \\ F_{zn} &= SF_{zn}^{++} = (SF_{zn}^0 - C_{34}^0 SM_{xn}^0) / (1 - C_{34}^0 C_{43}^0) \\ M_{xn} &= SM_{xn}^{++} = (SM_{xn}^0 - C_{43}^0 SF_{zn}^0) / (1 - C_{34}^0 C_{43}^0) \\ M_{yn} &= SM_{yn}^0 = (SM_{yn}^0 - C_{53}^0 SF_{zn}^0) / (1 - C_{35}^0 C_{53}^0) \\ M_{zn} &= SM_{zn}^0 = (SM_{zn}^0 - C_{61}^* SF_{xn}^*) / (1 - C_{16}^* C_{61}^*) \end{aligned} \quad (21)$$

보급형 분리계가 허용하는 5%보다 큰 간섭만을 대상으로 큰 간섭부터 차례로 분리하였다. 간섭 소거 과정에 계수 변화량이 매우 적으므로 이를 무시하면 $C_{ij} \approx C_{ij}^* \approx C_{ij}^0 \approx C_{ij}^{++}$ 이 되고 최종으로 Table 7과 같이 $C_{ij} \leq 0.03$ 으로 확인되었다. 따라서 식 (21)을 식 (3)의 변수로 나타내면 식 (22)의 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{xn} &\approx ((SF_{xn} - C_{15} SM_{yn}) / (1 - C_{15} C_{51}) - C_{16} SM_{zn}) / (1 - C_{16} C_{61}) \\ F_{yn} &\approx (SF_{yn} - C_{26} SM_{zn}) / (1 - C_{26} C_{62}) \\ F_{zn} &\approx ((SF_{zn} - C_{35} SM_{yn}) / (1 - C_{35} C_{53}) - C_{34} SM_{xn}) / (1 - C_{34} C_{43}) \\ M_{xn} &\approx SM_{xn}^{++} \approx SM_{xn} \\ M_{yn} &\approx SM_{yn}^0 \approx SM_{yn}^* \approx SM_{yn} \\ M_{zn} &\approx SM_{zn}^0 \approx SM_{zn}^* \approx SM_{zn} \end{aligned} \quad (22)$$

식 (22)의 첫 번째 식은 F_x 와 간섭을 일으키는 M_y 와 M_z 중에서 더욱 큰 간섭을 일으키는 M_y 간섭을 먼저 소거한 후 이어서 M_z 간섭을 소거하였을 때의 F_x 값을 나타낸다. 두 번째 식에서 F_y 는 M_z 와 간섭을 소거하여 얻어진 식이고 세 번째 식은 간섭의 크기 순서에 따라서 M_y 간섭을 분리한 후 M_x 간섭을 분리한 F_z 를 나타낸다. 이들 세 식을 살펴보면 두 번째 식이 기본형이며 첫 번째와 세 번째 식은 기본형을 반복 적용한 형식이다.

5.5 연산회로를 이용한 공학적 간섭 분리

수식으로 간섭을 소거하는 과정을 연산회로로 바꾸는 문제는 기본형인 식 (22)의 두 번째 식을 연산회로로 바꾸는 문제가 된다.

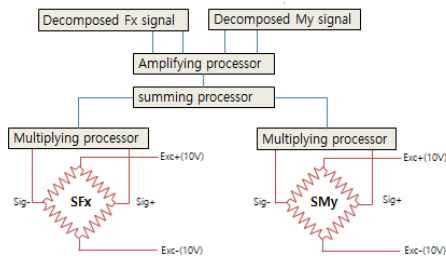


Fig. 5 Schematic diagram of decomposition processor

Fig. 6 6-component sensor ($F_x=F_y=3000\text{N}$, $F_z=12000\text{N}$, $M_x=1000\text{N}\cdot\text{m}$, $M_y=M_z=2000\text{N}\cdot\text{m}$)

Table 8 Decomposition results of 6-component sensor

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
SF _x	100.0%	-1.1%	1.5%	-0.5%	-2.4%	0.0%
SF _y	0.0%	100.0%	-1.6%	-2.7%	-2.5%	0.6%
SF _z	-1.4%	0.0%	100.0%	2.9%	0.5%	-1.9%
SM _x	0.1%	0.8%	2.4%	100.0%	0.9%	-0.1%
SM _y	0.9%	-0.2%	0.6%	-0.1%	100.0%	-1.2%
SM _z	0.1%	0.7%	1.1%	0.2%	0.5%	100.0%

즉, $F_{yn} \approx (SF_{yn} - C_{26}SM_{zn}) / (1 - C_{26}C_{62})$ 을 연산회로로 처리하는 내용이 된다. 식의 분자는 두 항의 합산 연산인데 두 번째 항은 곱셈 연산 결과이다. 직류로 출력되는 계측 신호를 통합하는 합산 연산은 회로의 연결 방향을 선택하는 단순 선택 연결 회로로 연산회로를 구성할 수 있다. 그리고 곱셈 연산회로는 가변저항을 이용하여 구성할 수 있다. 그리고 연산식의 분모는 1.0 보다 작은 값일 때 증폭 효과를 주므로 표준화된 증폭 소자를 사용할 수 있다. 예로서 $F_x - M_y$ 간섭을 분리하는 회로는 Fig. 5와 같이 곱셈 연산 소자와 합산 연산 소자 그리고 증폭 연산 소자로 구성할 수 있다.

분력계의 출력 신호 SF_{xn} 와 SM_{yn} 을 Fig. 5에 보인 연산회로와 연결하면 간섭이 제거된 출력 신호 SF_{xn}^* 이 얻어진다. 새로운 출력 신호 SF_{xn}^* 과 출력 신호 SM_{zn} 사이에 같은 연산회로를 구축하면 출력 신호 SF_{xn}^* 에 포함된 M_{yn} 과 M_{zn} 사이의 간섭을 제거할 수 있다. 이는 식 (22)의 첫 항에 해당한다. 마찬가지로 SF_{zn} 과 SM_{yn} 을 연산 처리하고 얻어진 결과와 SM_{zn} 사이에 같은 형식의 회로를 구축하면 식 (22)의 세 번째 항을 연산할 수 있다.

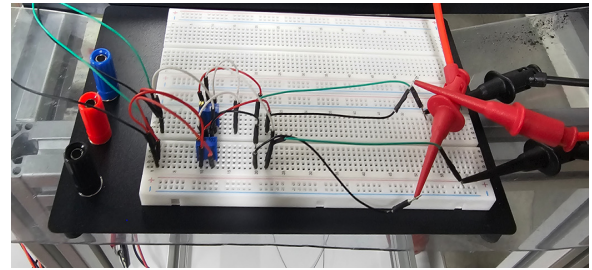


Fig. 7 Temporary decomposition circuit design

Table 9 Calibration test results of 6-component sensor

	Full scale	Non-linearity	Hysteresis
F_x	0.4053	-0.05%	0.18%
F_y	0.4007	0.00%	0.18%
F_z	0.1750	-0.07%	-0.23%
M_x	1.0789	0.02%	0.08%
M_y	1.0752	-0.01%	0.09%
M_z	2.3543	0.03%	0.03%

5.6 분력계의 제작과 교정 시험

분력계 감지 부재는 방전 가공으로 0.02mm의 정밀도로 가공하였으며 기타 소재는 MCT에서 $\pm 0.05\text{mm}$ 정밀도를 유지하며 가공하였다. 조립에는 정밀 토크 렌치를 사용하여 균등한 힘으로 체결하였다. 스트레인 게이지는 방수 실리콘을 도포하였으며 Tajimi R04 방수 커넥터를 사용하여 1 Bar 수압에서 2시간 실험을 보장할 수 있도록 하였다. 완성된 분력계는 Fig. 6과 같으며 교정 시험 결과는 Table 8과 같다. 또한, 교정 시험 결과를 통하여 비직진성, 히스테리시스를 계산한 결과를 Table 9에 나타내었고, 모두 0.3% 이내의 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

6. 분력계 간섭 분리 검토

분력계에 발생한 간섭을 큰 간섭부터 차례로 분리하는 과정에 나타나는 간섭 계수의 변화를 반영하며 분리하면 Table 7의 결과가 얻어진다. 이 결과를 보면 큰 간섭은 모두 제거되었으며 나머지 간섭 계수에 미치는 영향은 무시할 수 있는 것으로 나타났다. 연산회로를 이용한 간섭 소거 과정에 미소 항을 무시하여 얻어진 식 (22)을 연산회로로 바꾸었으므로 Table 8에는 무시하였던 미소 항의 영향이 되살아나 있다. 하지만 미소 항을 무시한 영향이 되살아나서 불완전 간섭 분리가 되었으나 최대 간섭은 해석적 분리일 때와 같이 2.9%를 넘지 않는 것이 확인되었다. 즉 간섭 계수가 0.3보다 작을 때 간섭 분리를 하기로 하면 0.05 보다 작은 간섭 계수는 무시하여도 좋다.

Fig. 7과 같은 회로 기판에 임시 연산회로를 구성하고 교정시험을 수행하여 미세 조정하면 간섭 분리 정밀도가 높은 부품 용량을 확정할 수 있다. 또 간섭 분리에 사용하는 식 (22)에 포함되

는 분모 항 $1 - C_{ij}C_{ji}$ 의 크기에 따라 연산을 분력계의 인가전압 조정 또는 데이터 로거의 연산으로 대체하고 생략할 수 있다. 임시 기판에서 확정한 회로를 간결하게 처리하면 연산회로를 분력계 내부 또는 단자함에 설치할 수 있다.

7. 결 론

수중 운동체의 제한된 내부 공간에 설치하여 유체력을 측정하는 6-분력계를 설계하였다. 측정할 하중과 모멘트 용량의 큰 차이로 여러 차례 반복 설계로도 허용범위를 넘는 간섭을 피할 수 없었다. 다분력계의 간섭을 교정 시험으로 확인하고 허용범위를 넘는 간섭을 선택하여 소거법으로 차례로 분리하는 방법을 제안하였다. 특히 다분력계 특성을 나타내는 선형 연립방정식에서 간섭항만을 선택하여 소거법으로 분리할 수 있음을 입증하였다. 이 연산 과정을 연산회로로 치환하는 방법을 창안하여 측정 결과를 수치화하지 않고 간섭을 소거하도록 하였다. 연산회로를 사용하는 새로운 간섭 소거 방법은 출력 신호가 회로를 지나며 간섭이 소거된 신호로 바뀌므로 신호의 연속성이 유지된다는 장점이 있다. 특히 이 방법은 사용자가 다분력계의 요구 정밀도에 맞추어 간섭을 분리할 수 있으며 교정 시험과 병행하여 부품의 용량을 확정하면 높은 정밀도로 분리할 수 있음이 입증되었다. 이 방법은 다분력계의 설계 시간을 단축할 수 있을 뿐 아니라 사용 중인 다분력계도 간섭 분리로 성능을 향상할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2025년 대한조선학회 추계학술대회에서 발표한 내용을 다듬어 논문 형식으로 정리한 것입니다. 본 연구가 성공적으로 이루어질 수 있도록 서울대학교 공과대학 공학연구원, 다셀 주식회사, 충남대학교 공과대학, 선박해양시스템기술협동조합 그리고 주식회사 시즈에서 격려하여 주시고 지원하여 주셨음을 밝히며 깊이 감사드립니다.

References

- Chao, L.P. and Chen, K.T., 1997. Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors. *Sensors and Actuators A*, 63, pp.105–112.
- Kim, H., Kim, J.S., Song, M. and Rhyu, S.S., 1997. A design and manufacture of 6 component load cell. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 34(2), pp.20–26.

Kim, H., Lee, M.A., Rhyu, S.S., Ham, D.B. and Shin, C.H., 2021. Waterproof type multi-component load cell for tank test. Korean Intellectual Property Office, Patent No. 10-2021-0135738.

Kim, H., Shin, C.H., Rhyu, S.S. and Ham, Y.J., 2024. Development of a multi-component waterproof type force sensor devised with column elements under eccentric load. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 61(3), pp.200–207.

Laun, A.W., 2010. Design and analysis of a six-axis, single-strut towing dynamometer for the subsequent evaluation of submerged hull-forms. Technical report.

Lee, Y.J., Rhyu, S.S., Lee, K.J., Seo, J.S. and Lew, J.M., 2013. Development of new experimental devices and methods to measure shaft forces of ships. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), pp.138–144.

Authorship Contribution Statement

Hyochul Kim: Conceptualization, Methodology, Writing – Original Draft, Supervision; **Changhwan Shin:** Validation, Investigation, Data Curation, Writing – Review & Editing, Visualization; **Sejin Seong:** Formal analysis, Data Curation; **Jaemoon Lew:** Software, Formal analysis; **Jihwan Shin:** Resources, Project administration, Investigation; **Younjae Ham:** Resources, Investigation; **Keucksang Yoo:** Methodology, Writing – Review & Editing.



김 효 철



신 창 환



성 세 진



류 재 문



신 지 환



함 연 재



유 극 상