

• 특집 • 방산제품 설계 및 시험 II

도파관 플랜지의 형상과 연결구조에 따른 PIM 성능 개선에 대한 연구

The Study on Improvement of Performance about PIM at Shape and Mechanical Interface of Waveguide Flange

김상현^{1,#}, 권순형¹, 김병준¹, 이증¹, 이휘승²
Sang Hyun Kim^{1,#}, Soon Hyeong Kwon¹, Byung Jun Kim¹, Jeung Lee¹, and Hwee-Seung Lee²

¹ LIG 넥스원 기계연구소 (Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd.)

² 국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

Corresponding Author / E-mail: kimsh1207@lignex1.com, TEL:  개인정보 표시제한 FAX: +82-31-8026-7084

KEYWORDS: Passive intermodulation (수동소자상호변조), Waveguide (도파관), Flange (플랜지), X-band (X대역), Satcom (위성통신)

Recently, with the development of the IT industry, technology for satellite communication network systems using multi-channel, high-capacity data is getting increasingly popular. Especially in the field of defense, experts emphasize the necessity for research and development (R&D) to improve communication quality in order to facilitate Network-Centric Warfare (NCW) and increase mission efficiency through the use of satellite communication network systems. High power is required for the implementation of this technology, and its quality is greatly affected by Passive InterModulation Distortion (PIMD). In order to improve PIMD levels, the leakage characteristics of the system were analyzed with knowledge of the strong influence of the state of the flange joint that has been confirmed by years of experience and previous studies. In this paper, we analyzed various problems from the mechanical point of view in order to improve the radio frequency (RF) performance by minimizing PIMD in the X band, which is used for the satellite communication. Based on our findings, we propose the flange shape to achieve the test result of -150 dBm, which is an improvement from the existing PIM performance and reference level.

Manuscript received: June 15, 2017 / Revised: August 10, 2017 / Accepted: August 10, 2017

NOMENCLATURE

NCW = Network-Centric warfare
IM = Intermodulation
PIM = Passive intermodulation
PIMD = Passive intermodulation distortion
RF = Radio frequency
OMT = Orthomode transducer
g = Gravity acceleration

1. 서론

최근 IT 산업이 발전함에 따라 급변하는 정보를 빠르게 대처하기 위해서는 실시간으로 대용량의 정보를 송·수신하는 네트워크 기술이 점점 각광받고 있다. 특히, 국방분야에서는 위성 통신 네트워크 시스템을 이용하여 임무 효율성이 증대되는 네트워크중심 작전(Network-Centric Warfare, NCW)을 구현하기 위해 통신 품질 향상에 대한 연구 개발 필요성을 강조하고 있다. 이러한 기술을 구현하기 위해서는 무선주파수(Radio Frequency, RF)의 출력을 높이고 수동상호변조(Passive Intermodulation, PIM) 특성을 개선하여 통신 품질을 향상시키는 연구가 중요시되고 있다.

PIM이란 수동소자에 두 개의 주파수 신호를 입력할 경우 두

신호 외에 원치 않는 다른 주파수 신호가 발생하는 현상으로 수동 소자 상호변조 왜곡(Passive Intermodulation Distortion, PIMD)을 발생시켜 입력신호의 하모닉 성분 및 시스템 내에 비선형 성분의 원인이 된다. 또한, 상호변조란 두 개 이상의 신호 주파수들을 사용할 때, 이 주파수들이 서로 간섭을 일으켜 원하지 않는 불요신호를 발생시키는 현상을 말한다.

이러한 PIM은 X대역을 사용하는 위성통신 시스템에서 RF 성능 보장에 큰 영향을 미친다. 그러나 그 원인이 다양하고 복잡적이며, 위성통신 시스템 자체가 구성의 복잡도가 높은 체계이기 때문에 시행착오를 많이 겪는 성능규격이다.

본 논문은 PIM을 발생시키는 다양한 원인 중 도파관 플랜지의 형상과 체결 토크 및 도파관과의 연결방법이라는 기계적인 인자에 집중하여 연구하였으며, 그 연구 결과를 바탕으로 도출해낸 도파관 형상들이 PIMD 개선 효과에 어떠한 영향을 끼치는지 시험 결과를 통해 제시하고자 한다.

2. PIM 개선을 위한 도파관 플랜지 형태 검토

2.1 수동상호변조 왜곡 모델

수동상호변조 왜곡 모델은 Seo¹에 의해 연구된 바와 같이 비선형 특성을 반영하여 식(1)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$V_0 = G_1 V_i + G_2 V_i^2 + G_3 V_i^3 + \dots + G_n V_i^n \quad (1)$$

수동 소자는 식(1)과 같은 전달 함수를 가지며 서로 다른 두 개의 주파수가 입력된다고 가정하면,

$$V_i = E_a \cos A + E_b \cos B \quad (2)$$

여기서 $A = 2\pi f_a t$, $B = 2\pi f_b t$,

$$\begin{aligned} V_0 = & G_2 \left[\frac{1}{2} E_a^2 + \frac{1}{2} E_b^2 \right] \\ & + \left[G_1 E_a + G_3 \left(\frac{3}{4} E_a^3 + \frac{3}{2} E_a E_b^2 \right) \right] \cos A \\ & + \left[G_1 E_b + G_3 \left(\frac{3}{4} E_b^3 + \frac{3}{2} E_a^2 E_b \right) \right] \cos B \\ & + G_2 \left[\frac{1}{2} E_a^2 \cos 2A + \frac{1}{2} E_b^2 \cos 2B \right. \\ & + E_a E_b \cos(A+B) + E_a E_b \cos(A-B) \\ & + G_3 \left[\frac{1}{4} E_a^3 \cos 3A + \frac{1}{4} E_b^3 \cos 3B \right. \\ & + \frac{3}{4} E_a^2 E_b \cos(2A+B) + \frac{3}{4} E_a E_b^2 \cos(2A-B) \\ & \left. \left. + \frac{3}{4} E_a E_b^2 \cos(A+2B) + \frac{3}{4} E_a^2 E_b \cos(A-2B) \right] \right] \end{aligned} \quad (3)$$

식(2)를 식(1)에 대입하면 두 신호에 대한 비선형 특성에 대한

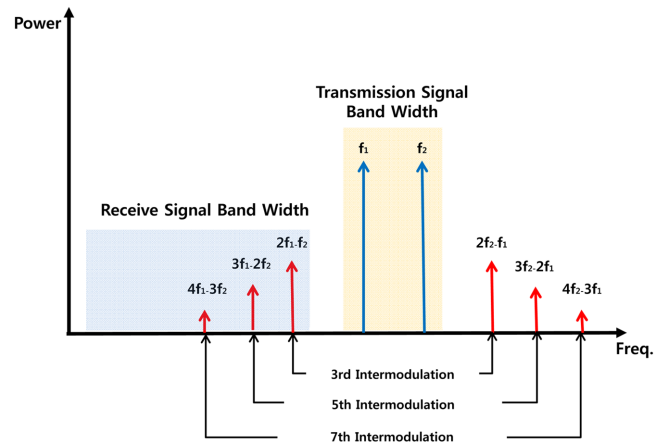


Fig. 1 Classification of signal

출력을 얻을 수 있으며, 식(3)에서 볼 수 있듯이 두 신호에 대한 이득 G_2 , G_3 에 대해 입력 신호에 대한 정상적인 배수의 주파수 이외에 입력에 없었던 고조파 성분들끼리의 합과 차에 의한 $\cos(A \pm B)$ 와 같은 2nd Order IM (Intermodulation) 성분과 $\cos(2A \pm B)$ 또는 $\cos(A \pm 2B)$ 와 같은 3rd Order IM 성분이 나타난 것을 확인할 수 있다.

2.2 상호변조 성분의 문제점

위성통신체계가 사용하는 X대역의 송신 주파수와 수신 주파수의 간격은 150 MHz로서 Ku대역(1250 MHz) 대비 매우 협소한 차이 밖에 나지 않기 때문에 PIM 성분을 충분히 감쇄시키지 못하면 인공위성으로부터 수신되는 미약한 신호보다 상대적으로 높게 되고 식(1)부터 식(3)과 같이 출력에 의한 IM 성분이 발생하게 된다. 특히, 앞서 언급한 바와 같이 송신주파수와 수신주파수의 대역폭 간격이 협소하여 Fig. 1과 같이 송신 신호에 의한 3rd Order IM성분이 수신 대역에서 발생할 수 있으므로 원래 신호와 매우 가까워 필터링이 매우 어렵고 까다롭게 된다. 특히, Lui², Hoerber³, Boyhan⁴은 미래 위성통신 개발시에 한정된 자원(출력 전력 레벨, 대역폭, 채널 수)으로 인해 PIMD 개선을 통한 효율성이 강조되고 있다. 따라서, 디지털 신호를 주고받는 위성 통신 시스템의 경우 이러한 상호변조 성분을 최소화 하도록 해야한다.

2.3 수동상호변조의 발생 원인

위성통신시스템의 경우 지표면에서 약 35,786 km 떨어진 인공 위성고 통신해야 하기 때문에 대용량 데이터를 송수신하기 위해서는 출력이 매우 높아야 한다. 또한, Park⁵의 연구결과와 같이 수동상호변조 값은 출력값이 높아질수록 선형 로그 스케일로 증가하게 되므로 통신 품질에 있어서 수동상호변조 성분의 영향이 중요하다.

이러한 수동상호변조에 의한 신호 왜곡 현상은 주로 접촉 비선형성에 의한 것으로 알려져 있으며, Fig. 2와 같이 두 금속 도체가 갖는 표면 오염상태와 표면 조도에 의한 미세공간이 많아질수록

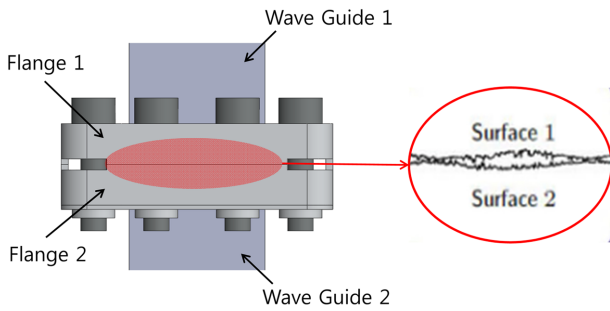


Fig. 2 Contact nonlinearity

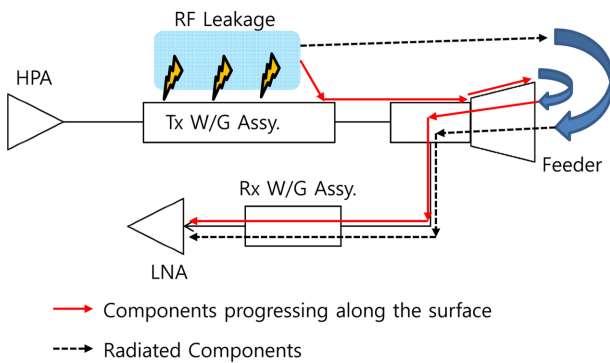


Fig. 3 Path of RF leakage

접촉면에서의 비선형 성분이 많아지고 결국 수동상호변조왜곡이 발생하게 된다.

즉, 수동상호변조왜곡을 개선하기 위해서는 두 금속간의 접촉 비선형성분을 최소화해야 한다. 특히, Vicente⁶의 연구결과와 같이 접촉면에서의 결합력과 압력분포가 비선형접촉을 줄일 수 있다.

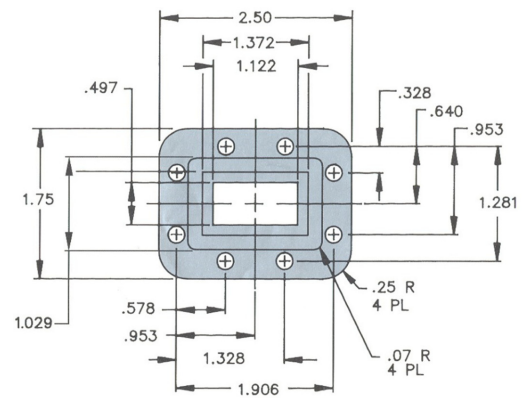
추가적으로 Seo¹의 시험결과처럼 금속 도체간의 체결 시 버닝 탭을 이용하여 접촉 면적을 최소화하는 것은 체결 간격을 줄이는 것보다 우수한 효과를 보인다.

이것은 접촉 면적을 최소화를 통한 비선형 성분을 감소는 접촉면에 대한 높은 결합력이 PIMD 개선에 효과적이라는 것을 나타내고 있다.

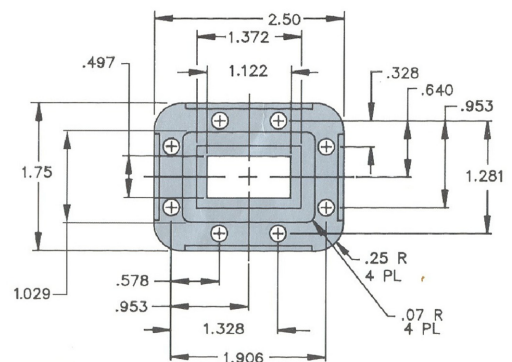
2.4 상호변조성분 발생 원인 및 기존 플랜지의 문제점

상호변조성분의 신호는 안테나를 기준으로 고출력증폭장치까지의 송신 경로와 저잡음증폭장치까지의 수신 경로 사이에서 송신 도파관 경로를 따라 진행하게 되며 필터, OMT (Orthomode Transducer)를 경유시 감쇄되어 결국 기준 부위인 저잡음증폭장치 입력단에서 -135 dBm 이하로 작아져야 한다.

이러한 도파관은 Fig. 3과 같이 고출력증폭장치(HPA)에서 발생하는 상호변조성분을 포함한 RF신호를 전달하는 터널의 역할을 하는데 플랜지 상호 연결부위를 통하여 미세한 Leakage가 발생하게 되면 도파관 내를 통과 중인 상호변조성분의 일부가 밖으로 새어 나와 도파관 등 금속 기구물 표면을 따라 진행하거나



FLANGE, GROOVED
CPR 112 (DES-10)



Continental Microwave & Tool Company, Inc.
A Chelton Microwave Company
FLANGE, CONTACT
CPR 112 (DES-16)

Fig. 4 General CPR 112 flange

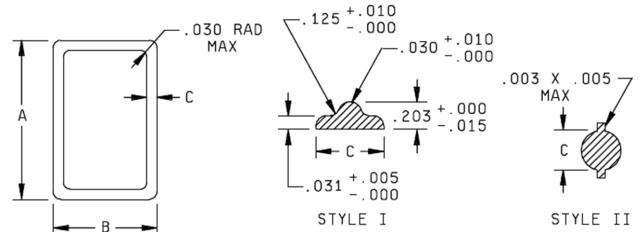


Fig. 5 Gasket type of MIL-DTL-3922

대기 중에서 복사되어 급전혼(Feeder)으로 유입됨으로서 결국 저잡음증폭장치(LNA)로 입력되게 된다.

그러나 RF신호가 지나가는 도파관은 시스템의 형상에 따라 그 형태가 다양하며, 다양한 RF구성품 간의 연결을 위해 반드시 필요하다. 이러한 도파관의 연결을 위해서는 기계적인 인터페이스가 요구되며 그러한 연결부위에는 표준 규격에 따른 플랜지를 적용하고 있다. 이러한 표준 규격 플랜지도 다양한 형태가 있으나 X대역에는 일반적으로 WR 112 또는 Fig. 4와 같이 CPR 112 형태를 한 쌍으로 많이 적용하고 있다.

Table 1 Empirical factors and improvements about flange

Factor	From	To
Poor align	WR-112 Flange	CPR-112 flange
	Hex. Nuts	Nut plates
Contact area	General surface	Improvement of flatness
Contact pressure	Undesignated	Designated
Balance of torque	Undesignated	Designated of torque and symmetric assembly

기존 플랜지 형태는 내측에 Fig. 5와 같이 특정 단면의 가스켓을 사용하게 되어 있다.

플랜지 연결부위의 Leakage 원인에 대해 각종 문헌 및 경험 등을 통해 살펴보면 도파관 플랜지의 연결 부위의 체결불량, 표면 산화물, 접촉 압력 부족, 도파관 이음매 브레이징 불량, 플랜지 접합부 일치 불량, 체결토크 불균형 등 다양하게 제기하고 있다.

2.5 PIM 개선 인자 분석

과거 유사사업의 개발 경험을 통해 PIM 원인은 양측 도파관 플랜지의 접촉면 일치 불량, 접촉면의 평탄도 및 표면조도 불량, 플랜지 체결나사의 적정 토크와 나사 체결력 균형 등으로 분석하였으며, Table 1과 같은 개선을 통하여 일정한 개선 효과를 보였다.

이는 앞서 Seo¹와 Vicente⁶의 연구결과와 같이 접촉면을 최소화하고 접촉응력을 균등하고 높게 전달하기 위해 CPR 112형태를 사용하는 것이 효과적임을 확인할 수 있었다.

따라서, 위성통신시스템의 PIM 특성 개선을 위해서는 CPR 112를 기본 형태로 응력 분포 개선 및 가공 방식 개선 등 형상의 수정/보완을 통하여 PIMD를 개선할 수 있을 것이다.

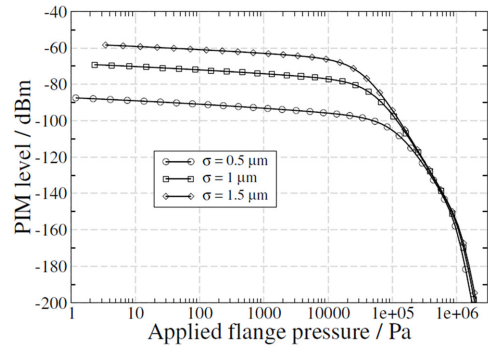
2.6 선행연구

2.5항의 PIM 개선 인자들을 보면 모두 기계적인 항목임을 알 수 있다. Quiles⁷에 따르면 일반적인 경우에 PIM 레벨은 적용하는 토크의 증가에 따라 서서히 감소하는 경향을 보인다고 하였다. 이것은 접촉면의 분리가 직접적으로 관련되어 있으며, 접촉면 압력이 증가할수록 접촉력과 압축저항이 접합면의 전기적 응답을 제공하기 때문이라고 하였다. 실제로 본 과제 수행기간에도 나사 토크 수준을 규정 대비 상승시키거나 플랜지 체결구멍 확장 후 인위적으로 한 단계 높은 크기의 나사를 적용함으로써 토크 수준을 증대시킬 경우 PIM 성능이 개선되는 것을 경험하였다.

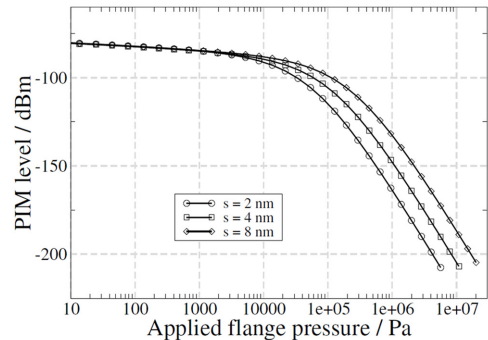
Quiles⁷의 또 다른 연구결과로는 PIM 수준은 비선형 저항을 통해 흐르는 전류와 전압 사이의 비선형 관계에 의해 야기되며, 관계식은 식(4)와 같다.

$$J(V) = a_3[V_1^2 V_2 \sin((2\omega_1 - \omega_2)t) + V_2^2 V_1 \sin((2\omega_2 - \omega_1)t)] \quad (4)$$

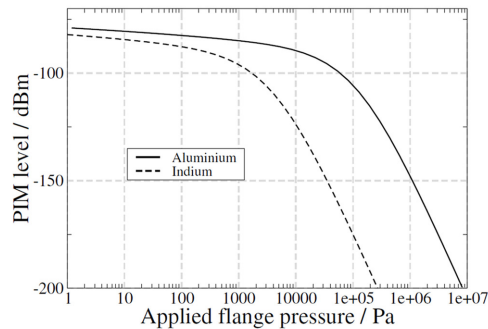
이를 이용하여 입력주파수가 9.75 GHz와 10 GHz일 경우 표면



(a) For three different surface topologies



(b) As a function of the covering layer thickness



(c) For the case of a standard waveguide on a coated material

Fig. 6 PIM level for each factors

조도, 오염물질층 두께, 표면처리 재질 등에 대해 적용토크에 대한 경향을 연구하였으며 그 결과는 Fig. 6과 같다.

(1) 표면조도와 PIM 수준의 상관관계는 플랜지간 접촉압력이 낮은 영역에서는 표면조도가 정밀할수록 PIM 수준이 개선되나 실제적인 체결토크에 해당하는 접촉압력 수준에서는 표면조도의 차이는 없다.

(2) 오염층의 두께는 두꺼울수록 PIM 수준은 높아진다는 것을 알 수 있다. 오염층의 두께에 대한 영향은 접촉압력이 낮은 영역에서는 동일하게 나타나지만 접촉압력이 높아질수록 PIM의 수준이 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 기본적으로 접촉면간 비접촉 상태의 전위차 비는 오염층 두께와 독립적이기 때문이다.

(3) 크래킹 파라미터나 산화물 층의 두께는 사용간 변화하지 않으며 재질에 따라 다르다. 따라서, 표면처리는 적용유무가

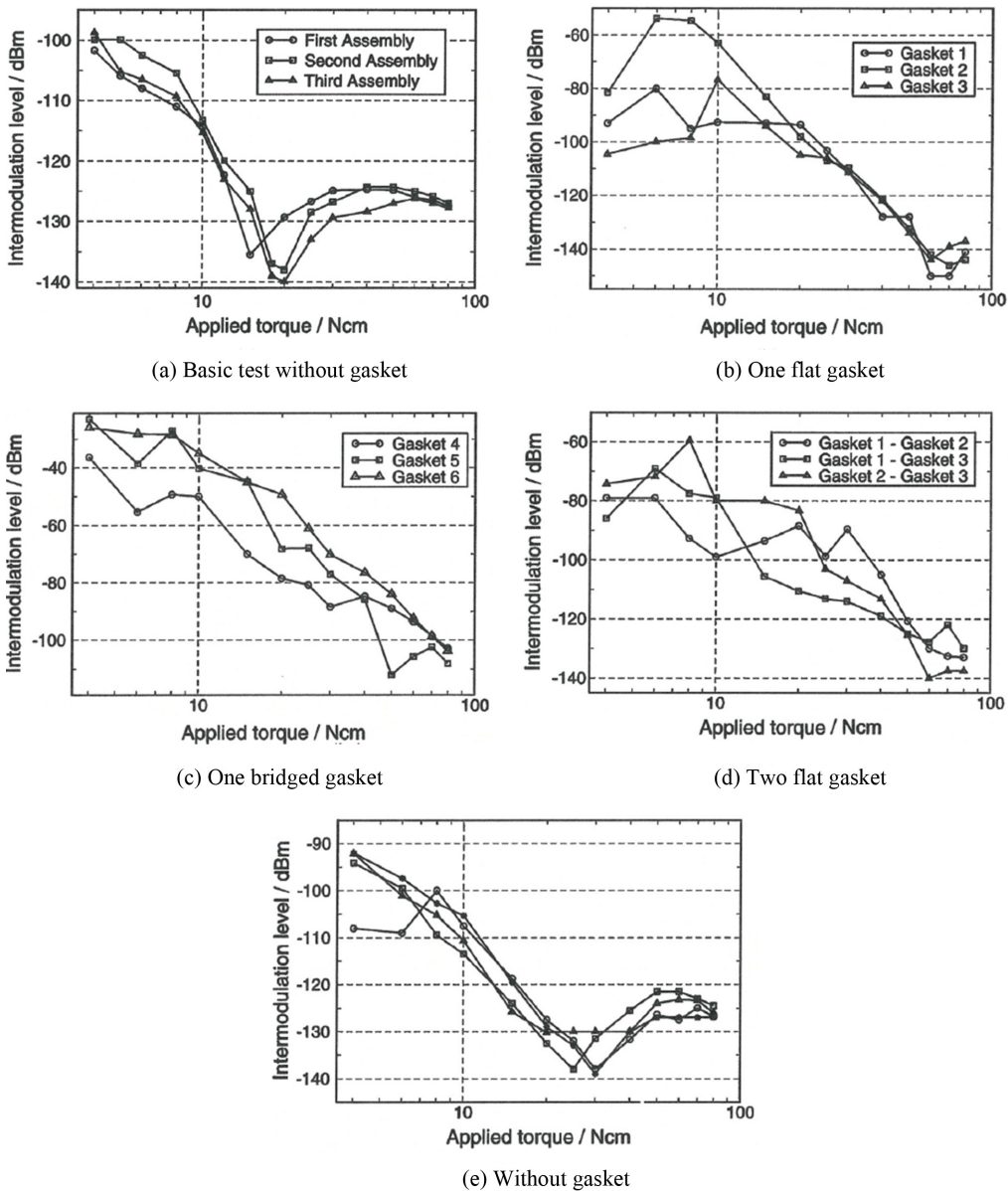


Fig. 7 PIM level for each case

아니라 충분한 두께일 때 표면처리 재질에 따라 접촉부의 반응이 달라진다.

이렇게 도파관 플랜지에 가해지는 광범위한 접촉압력에 따른 인자별 영향성은 각기 다름을 알 수 있었다. 그러나 실제 사용시에는 체결토크에 의한 접촉압력 구간에서 PIM 수준을 개선시킬 수 있는 지배적인 인자를 알아야 개발에 적용할 수 있다.

한편 Vicente⁶는 WR-90 플랜지 형태에 있어서 입력 주파수가 11.21 GHz와 11.895 GHz일 경우 플랜지의 재질과 가스켓의 변화에 따른 PIM 수준의 변화를 연구하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다.

도파관 플랜지 사이의 가스켓 적용에 대한 실험적 연구는 기존 선행연구의 이론적 계산식이 보여준 비선형 경향을 유사하게 보여

주고는 있으나 체결토크에 해당하는 영역에서 접촉압력과 재질의 소성변형 등과 관련된 영향으로 인해 PIM 수준에 Peak 영역이 존재한다는 것을 알 수 있었다. 이렇듯 도파관 플랜지의 PIM 수준에 영향을 미치는 수많은 인자들 중 접촉압력은 가장 직접적인 영향을 미치고 있으며 적용하고자 하는 플랜지의 형태와 주파수에 따라 적절한 형상과 체결토크를 적용해야 한다.

2.7 Case별 구조해석 분석

앞에서 검토한대로 접촉면의 압력이 높을수록 PIM 수준을 좋게 하지만 기계적 성질의 응력 제한(항복응력, 극한응력)을 넘어가게 되면 하중이 해소된 후에도 재료는 영구 변형 또는 파손이 발생하게 된다.

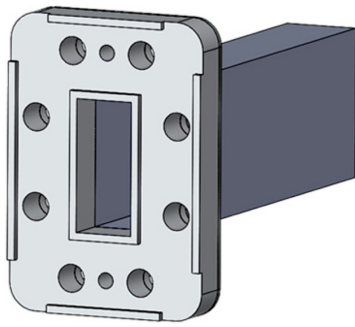


Fig. 8 Improved CPR 112 flange

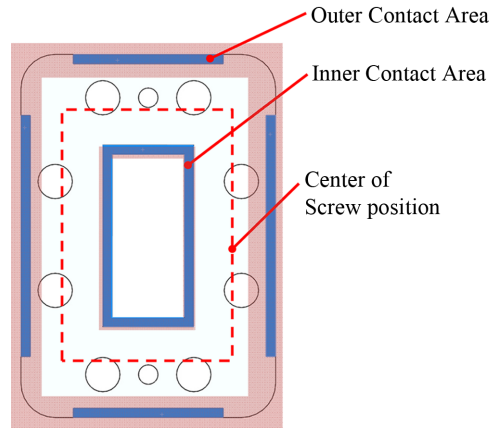
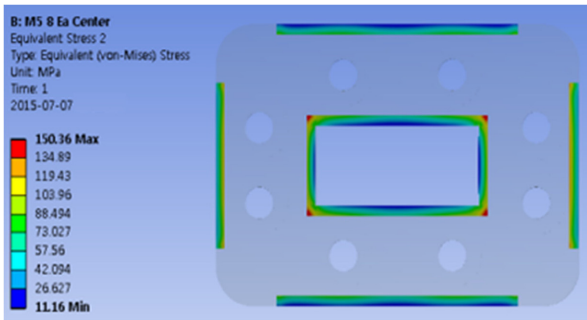
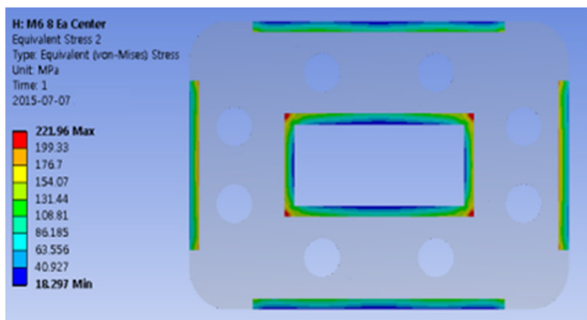


Fig. 10 Contact area & screw position



(a) Case #1 : M5 screw is adopted



(b) Case #2 : M6 screw is adopted

Fig. 9 Improved CPR 112 flange stress on crew size

Table 2 Calculative verification of analysis results

	Items	Values
Case #1	Calculation	68.4 MPa
	Analysis (Average)	64.65 MPa (▽ 5.5%)
Case #2	Calculation	103.3 MPa
	Analysis (Average)	95.3 MPa (▽ 7.7%)

본 연구는 표준 규격 플랜지에서 경험적으로 개선하여 적용 중인 개선된 CPR 112 플랜지 형태에 대한 기계적 특성 분석에서 출발하여 보다 더 개선된 형태를 도출하고자 한다. 최초 검토는 체결 나사를 변경 적용하여 나타나는 기계적 응력 차이를 검토하고 해석의 신뢰성을 검증한다.

개선된 CPR 112 플랜지는 AL6061P-T651 재질이며, Groove Butt & Flat Butt에 의한 한 쌍의 조합이 아니라 Fig. 8과 같이 가스켓용 Groove Butt이 없는 돌기 형태의 동일한 도파관 플랜지 한 쌍으로 직접 체결된다.

기존 M5 나사 적용 조건을 M6 나사로 변경 적용시 응력의 변화를 살펴보면 Fig. 9와 같다. 해석결과 접촉면의 응력 분포는 유사하나 RF가 관통하는 중앙 접촉면의 Stress는 AL6061의 일반적인 항복응력이 270 MPa이라고 할 때 150.36 MPa(항복응력의 56%) → 221.96 MPa(항복응력의 82.2%)로 증가하게 된다. 경험적인 PIM 개선은 항복응력의 약 80% 수준일 때 규정 나사 및 토크 대비 개선되었다는 결론을 얻을 수 있다. 상기 해석결과와 신뢰성은 아래 식(5) 및 Table 2와 같이 계산적 방법으로 검증한 결과 최대 7.7% 내에서 양호한 응력값을 보이고 있음을 확인하였다

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\text{Axial force per screw} \times 8ea}{\text{Contact area}} \quad (5)$$

다음은 플랜지의 형상이 접촉압력에 영향을 미칠 수 있는 인자를 식별하여 해석적 검토 Case를 도출하였다. 플랜지의 접촉압력은 체결나사의 크기, 개수, 토크값, 접촉 면적 총 4개의 인자가 주요하며, Fig. 10과 같이 나사 체결력에 의해 발생된 응력은 접촉면(Contact Area)에서 높고 고르게 분포되어야 한다.

체결나사의 크기 및 개수는 플랜지 내에서 가용할 수 있는 공간을 고려하여 M5, M6 나사에 대해 각각 8 EA, 10 EA로 적용하였다. 체결구멍의 위치는 Fig. 10과 같이 체결구멍의 위치가 내측 접촉면(Inner Contact Area)과 외측접촉면(Outer Contact Area)사이의 거리에 대한 체결중심선(Center of Screw Position)을 기준으로 나사 체결시 간섭 및 조립성을 고려하여 체결중심선을 기준으로 내측(Inner)으로 2 mm, 외측(Outer)로 2 mm를 적용하여 각각의 형상을 도출하였다.

특히, 플랜지의 적용 나사 위치 변경은 Vicente⁶ 와 Song⁸의 연구 결과 기준식(6)과 식(7)을 적용하여 Fig. 11의 조립 인터페이스 및 조건을 만족하는 범위 내에서 개선하였다.

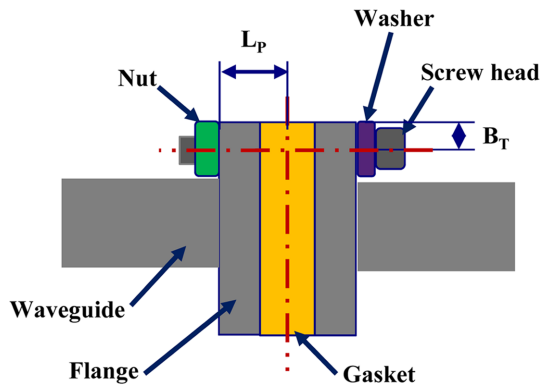


Fig. 11 Diagram of flange assembly

Table 3 Case of research for improvement

Case	Screw size	Screw count	Screw position	Inner max. stress (MPa)	Std. deviation (MPa)	
#3	M5	8 EA	Center	150.4 (55.7%)	28.8	
#4			Inner	156.8 (58.1%)	30.7	
#5			Outer	144.2 (53.4%)	28.3	
#6			Center	175.9 (65.1%)	32.3	
#7			10 EA	Inner	184.6 (68.4%)	34.7
#8			Outer	166.3 (61.6%)	32.4	
#9			Center	222.0 (82.2%)	42.0	
#10	M6	8 EA	Inner	231.8 (85.9%)	44.6	
#11			Outer	214.8 (79.6%)	41.1	
#12			Center	260.7 (96.6%)	47.5	
#13			10 EA	Inner	271.8 (100.7%)	50.5
#14			Outer	250.3 (92.7%)	47.5	

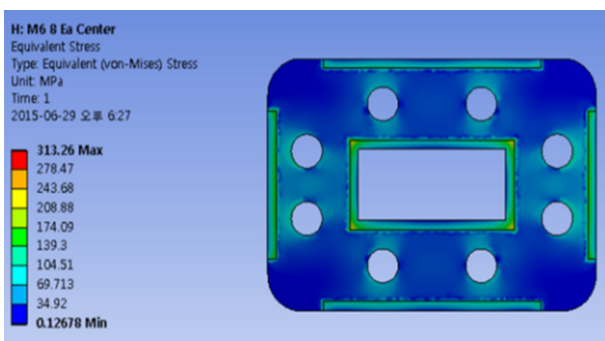


Fig. 12 Result of analysis (Case #9)

$$r_c = B_T + L_p / 2 \tag{6}$$

$$Dist. \text{ between screws } \leq 2 \times r_c \tag{7}$$

상기 방법으로 도출한 플랜지 형상을 12가지로 정리할 수 있었고 해석 후 내측 접촉면에서의 최대응력값(Inner Max Stress)과

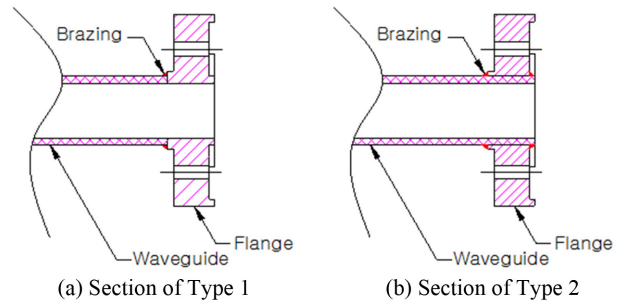


Fig. 13 Section of Type 1, Type 2

접촉면에서의 각 Node점에 해당하는 응력값들의 산술평균에 대한 표준편차(Std. Deviation)를 이용하여 응력분포를 정량적으로 분석한 결과는 Table 3과 같다.

해석결과 M5 나사 적용 Case의 표준편차는 M6 대비 상대적으로 낮으나 내측 접촉부의 면압이 최대 68% 이하로 낮은 결과를 보이고 있다. 반면에 M6에서는 표준편차가 다소 높게 나왔지만 내측접촉면에서의 응력이 전체적으로 항복응력 대비 80% 수준으로 나타났다.

경험적으로 항복응력의 80% 수준일 때 PIM이 개선되었기 때문에 Case #9부터 #14 중에서 표준편차가 가장 낮은 Case #9를 적정 형상으로 선정하며 해석 결과는 Fig. 12와 같다.

2.8 도파관 플랜지 시편 시험 및 분석

다음은 해석적 검토에 의해 선정된 플랜지 형태를 시제품으로 제작하여 M6나사의 중간 수준 체결토크(56 kgf·cm)를 중심으로 ± 50%의 구간 내에서 PIM 수준을 측정하였다.

시제품 설계시 플랜지의 제작 공정간 개선 방안으로 Fig. 13과 같이 도파관의 후면 편측 브레이징(기존 방식 / Type 1)과 관통 브레이징(신규 방식 / Type 2) 2가지로 구분하여 제작하였으며, 동일 조건 비교를 위해 기준형상은 개선된 CPR 112 플랜지에 체결 구멍 확장을 통한 M6 나사 적용 형태로 반영하였다. 시편 및 각각의 플랜지 형상은 Fig. 14와 같다.

PIM 시험은 본 연구의 시스템 구조와 환경을 고려하여 Fig. 15와 같이 구성하였다.

Fig. 14의 시편 형상과 동일하게 제작된 실물로 Fig. 15의 시험 세트에서 PIM 수준을 측정된 결과는 아래 Fig. 16과 같다. 시스템에서 요구되는 PIM 기준은 -135 dBm이며, 플랜지와 같이 나사 체결에 의한 접촉점 부위에서는 이보다 ‘-’ 방향으로 더 높은 값을 나타낼수록 시스템 레벨의 성능을 보장하게 된다.

시험결과 모든 Case는 시스템 요구규격 -135 dBm보다 좋게 나왔으며 특히 기준 형상도 나사의 상향 적용을 통해 -140 dBm을 상회하였다. 이것은 서두에서 동일 조건 비교를 위해 나사 크기를 M5(약 -125 dBm부터 -135 dBm)에서 M6으로 상향 조정하면서 접촉압력이 증가한 결과로 판단된다.

나사 체결구멍의 위치와 배치를 조정한 Type 1은 기준 형상보다 최소 2 dBm 이상 개선되었다. 또한 플랜지 접촉면을

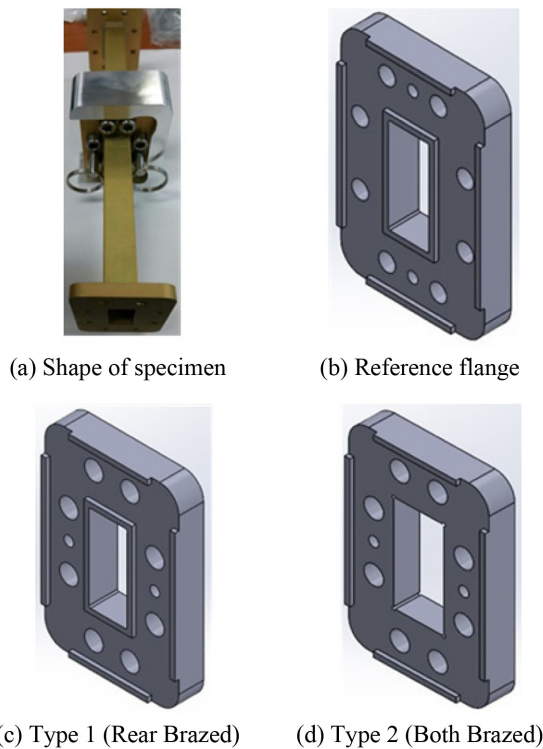


Fig. 14 Flange shapes for PIM test

플랜지를 관통한 도파관으로 설계한 Type 2의 경우 기준 체결토크(56 kgf·cm) 이상 영역에서 약 -150 dBm을 상회하는 좋은 특성을 보이고 있으며, 체결토크를 약 67 kgf·cm으로 적용시 PIM 수준 편차가 안정되면서 -150 dBm 이상의 좋은 성능을 보장할 수 있다.

3. 결론

본 연구는 다양한 변수가 존재하는 RF 성능 개선에 있어서 기계적 분석 내용을 RF 성능으로 환산하여 개선할 수 있는 지배적 인자를 X대역의 주파수와 플랜지 기준으로 검토하였다.

구조해석적 검토를 통해 신규 플랜지 형태를 도출하고 시편을 제작하여 PIM 수준이 개선됨을 확인 하였다. 또한 제작공정상 개선 형태를 적용하여 기존 대비 -20 dBm 이상의 향상된 PIM 성능을 얻을 수 있었다.

향후에는 실제 제작된 플랜지를 정밀한 해석 모델링으로 구현하여 측정된 PIM 수준 그래프를 추정하는 결과 인자를 분석하여 시편 제작없이 시뮬레이션으로만 플랜지의 개선 형태를 검토할 수 있는 연구 진행시 다른 주파수 형태에서도 효율적이고 향상된 개발 프로세스를 정립할 수 있을 것으로 예상되며, 나아가 목적에 맞는 대역폭 선택 후 위성을 통해 다양한 정보를 주고 받는 무인 자율주행 시스템 또는 위성 통신 시스템 분야에 많은 활용이 될 것으로 사료된다.

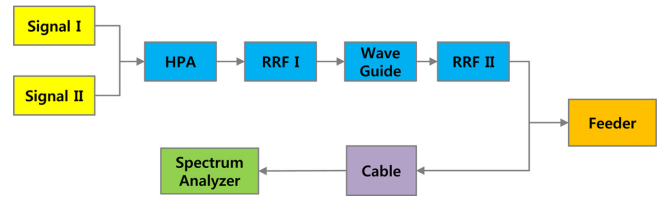


Fig. 15 Block diagram of PIM test setup

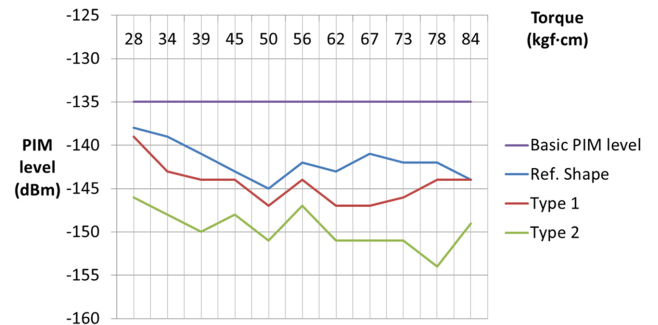


Fig. 16 Results of PIM Level measurement

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 군 위성통신체계-II 다대역위성단말 개발사업의 지원에 의하여 수행된 연구이다.

REFERENCES

1. Seo, C.-J., Cheon, C.-Y., and Chung, Y.-S., "A Study on the Improvement of PIMD in the Mobile Communication Base Station Antenna," Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 21, No. 11, pp. 1201-1207, 2010.
2. Lui, P., "Passive Intermodulation Interference in Communication Systems," Electronics & Communication Engineering Journal, Vol. 2, No. 3, pp. 109-118, 1990.
3. Hoeber, C. F., Pollard, D. L., and Nicholas, R. R., "Passive Intermodulation Product Generation in High Power Communications Satellites," Proc. of the 11th Communications Satellite Systems Conference, pp. 361-374, 1986.
4. Boyhan, J., Henzing, H., and Koduru, C., "Satellite Passive Intermodulation: Systems Considerations," IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems, Vol. 32, No. 3, pp. 1058-1064, 1996.
5. Park, J.-S., Jung, S.-Y., and Lee, Y.-S., "Effects of Vibration on Passive Intermodulation Distortion in Mobile Base Station Antennas," The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 19, No. 12, pp. 1394-1401, 2008.

6. Vicente, C., Wolk, D., Hartnagel, H. L., Gimeno, B., Boria, V. E., et al., "Experimental Analysis of Passive Intermodulation at Waveguide Flange Bolted Connections," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 55, No. 5, pp. 1018-1028, 2007.
7. Quiles, V. and Pascual, C., "Passive Intermodulation and Corona Discharge for Microwave Structures in Communications Satellites," Technische Universität, 2005.
8. Song, S., Moran, K., and Lee, S., "Thermal and Electrical Resistances of Bolted Joints between Plates of Unequal Thickness," Proc. of Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, pp. 28-34, 1993.