

전원선에서의 광대역 EMC 필터의 설계 및 제작

*김동일 · *구동우 · *양은정 · *김도연 · **예병덕

*한국해양대학교 전파공학과, **한국해양대학교 해사수송과학부

Design and Fabrication of Broad-Band EMC Filter for Power Line

*Dong Il Kim · *Dong Woo Ku · Eun Jung Yang · *Do Yearn Kim · **Byeong Deok Yea*

* Dept of Radio Sciences & Engineering, Korea Maritime University

** Division of Maritime Transportation Science, Korea Maritime University

요약 제안된 EMC 필터는 높은 투자율의 페라이트 비드와 관통형 콘덴서로 구성되어 제작하였고, 10 MHz ~ 1.5 GHz에서 전원선에서 광대역 노이즈 신호에 대한 EMC 요구를 만족시킨다. 최적의 필터를 설계하기 위하여 페라이트 비드의 임피던스를 계산하여 찾았다. 그 결과, 광대역 EMC 필터는 차동모드 노이즈와 공통모드 노이즈에 대해 10 MHz ~ 1.5 GHz대역에서 30 dB 이상의 필터 특성을 나타내었다. 그리고, DC ~ 1.8 GHz 주파수 대역에서 10 ~ 30 dB 이상의 내성 특성을 향상시켰다.

핵심용어 EMC, 공통모드, 차동모드, 관통형 콘덴서, 페라이트 비드

Abstract : The proposed EMC filter composed with feed-through capacitors and ferrite beads of high permeability was prepared which satisfy the EMC standard for a wide-band noise signal in the frequency of 10 MHz to 1.5 GHz in power supply line. The optimum structure of ferrite bead was found by calculating the load effect of ferrite beads. As a result, the filter showed excellent differential- and common-mode noises filtering characteristics above 30 dB in the frequency band from 10 MHz to 1.5 GHz. The immunity characteristics are improved more than 10 to 30 dB over the frequency band from DC to 1.8 GHz.

KEY WORDS : EMC, common-mode, differential-mode, feed-through capacitors, ferrite beads

1. 서 론

최근 전기·제어 장비가 급속하게 보급됨에 따라 전자파로 인한 인체유해 등 전자파 환경이 중요한 논의의 대상이 되고 있으며, 이로 인하여, 전자파 방해(EMI)와 전자파 내성(EMS)에 대한 대책이 필요하게 되었다. 또한, EMI/EMS 규제의 범위와 범규의 강화로 인해, 또 다른 무역장벽으로 작용하게 되었다(F. D. Martzloff and T. F. Leedy, 1990). 1970년부터 시작된 전자파환경대책의 규제는 CISPR(국제 무선 방해 특별 위원회), FCC(미연방통신위원회)와 일본의 VCCI(정보처리장비 및 전자파 방해자주 규제 협의회) 및 CE mark등에 의해 확립되었다(C63-Electromagnetic Compatibility, 1989)(정, 1996).

오늘날에는 EFT에 대한 대책이 다양하게 연구되고 있다. 특히, 프로세서 제어기기 및 전기 장비에서 오동작의 주요 원인은 EFT이다(M. Lutz and J. P. Lecury, 1992). 그러나, 고전압과 광대역 특성을 가지는 EFT를 대책하는 것은 매우 어렵다. 과거에는, 이러한 이유로 인하여 EFT 대책 방법에 대한 충분한 연구가 이루어지지 못했다(Henry W. Ott, 1988).

본 논문에서는 전원선에 새로운 형태의 EMC필터를 삽입하는 개선된 대책 방법을 제안한다. 제안된 EMC 필터는 10 MHz ~ 1.5 GHz대역에서 15 ~ 25 dB의 우수한 필터 특성을 가진다. 더불어, 개발된 EMC 필터는 DC ~ 1.8 GHz대역에서 기존의 필터 보다 15 dB ~ 25 dB의 EFT 효과를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, IEC 61000-4-4를 만족한다.

* 종신회원. dikim@kmaritime.ac.kr 051)410-4314

* ejyang@bada.hhu.ac.kr 051)410-4932

** 종신회원. byea@hanara.kmaritime.ac.kr 051)410-4233

* dwku75@kmaritime.ac.kr 051)410-4932

* onionking@hanmail.net 051)410-4932

2. EMC 필터의 설계

기존의 필터들은 IEC 61000-4-4의 레벨 2에 대해서만 유용할 뿐이었다. 또한, 기존의 필터들은 Fig. 8에 보여지는 것처럼 EFT에 대한 특성이 레벨 3보다 높은 레벨에서는 제 역할을 하지 못한다. 더욱이, EFT로부터 전기·제어 장비의 안전성에 있어서, EMC 대책은 무선통신 기기나 공장 자동화 시스템 제어인 경우 레벨 4까지 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

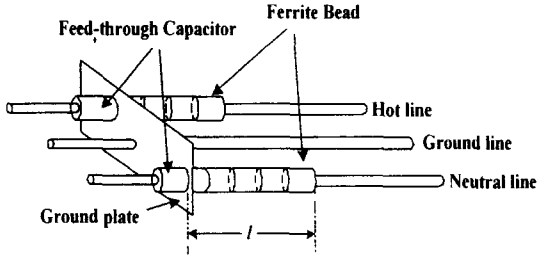


Fig. 1 Construction of EMC filter

지금까지는 컨덴서와 페라이트 비드를 사용한 필터 또는 isolation transformer가 EFT 대책에 이용되었다. 그러나, 컨덴서와 페라이트 비드를 사용한 필터는 광대역 주파수에서 대책이 될 수 없고, isolation transformer는 고가이고, 무거우며, 부피가 큰 결점을 가지고 있기 때문에 대책 방법으로는 적절하지 않다.

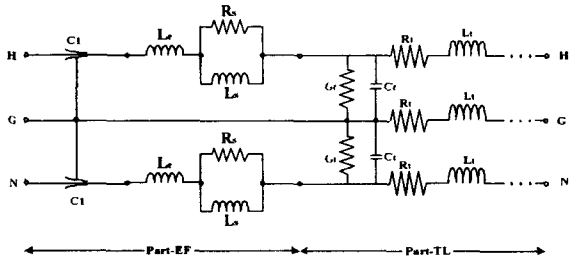
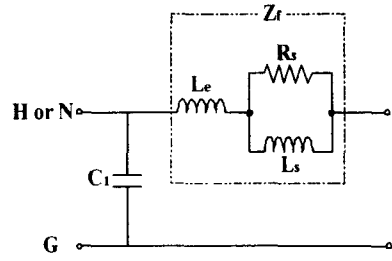


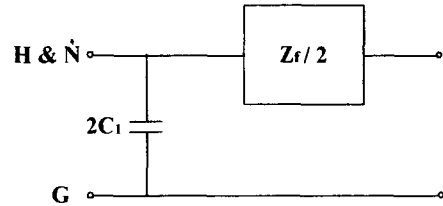
Fig. 2 Equivalent circuits of the EMC filter(Part-EF) and transmission line(Part-TL).

위의 문제들을 해결하기 위한 방법으로, 본 논문에서는 관통형 컨덴서와 높은 투자율을 가지는 Ni-Zn 페라이트 비드를 사용하는 새로운 EMC 필터를 설계하였다. 제안된 EMC 필터는 Fig. 1에 나타내었다. 여기서, 관통형 컨덴서는 1 GHz이상의 공진 주파수를 가지기 때문에 고주파수 대역에서도 좋은 특성을 가진다.

Fig. 2는 EMC 필터와 전원전송선로의 간단한 등가회로를 보여준다. Fig. 3(a)는 차동모드 노이즈에 관한 것으로서 EMC 필터 부분의 신호선(H)과 접지선(G), 중성선(N)과 접지선(G) 사이의 등가회로를 보여준다. 차동모드에 관한 ABCD 매트릭스는 식 (1)에 의해 구할 수 있다.



(a) 차동모드(Differential-Mode)



(b) 공통모드(Common-Mode)

Fig. 3 Equivalent circuits of the EMS filter (Part-EF)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_{DM} & B_{DM} \\ C_{DM} & D_{DM} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{C1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & Z_f \\ Y_{C1} & Y_{C1}Z_f + 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $Y_{C1} = j2\pi fC_1$

$$Z_f = j\omega L_e + \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{j\omega L_s} \right)^{-1} \quad (2)$$

그 반면, 공통모드에 관한 등가회로는 Fig. 3(b)에 보여지는 것과 같다. 그리고, 공통모드 노이즈에 관한 ABCD 매트릭스는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_{CM} & B_{CM} \\ C_{CM} & D_{CM} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2Y_{C1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_f/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & Z_f \\ 2Y_{C1} & Y_{C1}Z_f + 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

비투자율 μ_r 은 식 (4)에 의해 표현될 수 있다(Yoshiyuki Naito, 1976).

$$\mu_r = 1 + \frac{\mu_i}{1 + jf/f_m} \quad (4)$$

여기서 μ_i 는 초 투자율, f_m 은 완화주파수, 그리고 f 는 측정 주파수이다. 본 논문에서는 $\mu_i = 2,000$, $f_m = 3.12$ MHz의 페라이트 비드를 사용하였다. 또한, 페라이트 비드의 임피던스를 구하기 위한 다른 파라미터들은 식 (5)에 주어진다.

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 2,000 [pF] \\
 L_e &= 2 \times 10^{-8} \mu_i \ln(b/a) \times l [H/m] \\
 R_s &= 2 \pi f_m \mu_i \mu_0 l K [\Omega/m] \\
 L_s &= \mu_i \mu_0 l K [H/m]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서, a 와 b 는 페라이트 비드의 내경과 외경이고, l 은 페라이트 비드의 길이이며, K 는 페라이트 비드의 치수에 의해 결정되는 값이며, 그 값은 0.003이다

식 (1)과 (3)에 의해, 전달계수 T 는 식 (6)에 의해 얻을 수 있다

$$T(dB) = 20 \log \left| \frac{2}{A_i + B_i + C_i + D_i} \right| + \alpha_i \tag{6}$$

여기서, $i = DM \text{ or } CM$ 이고, α_i 는 전원선에서의 손실(dB)이다

3. 실험 결과

3.1 필터 특성

Fig 4와 5는 제작한 EMC 필터와 네트워크 분석기 (Hewlett Packard Model 8753D)를 사용하여 제작한 필터의 주파수 특성을 측정하는 장면을 보여준다

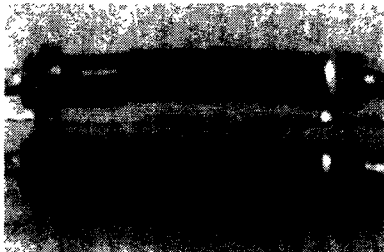


Fig 4 The photograph of the fabricated broad-band EMC filter

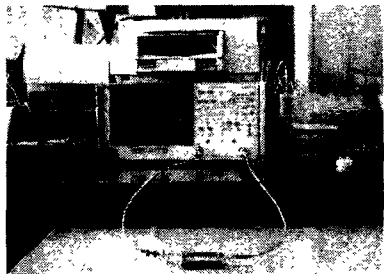


Fig. 5 Set-up to analyze the frequency characteristics of broad-band EMC filter.

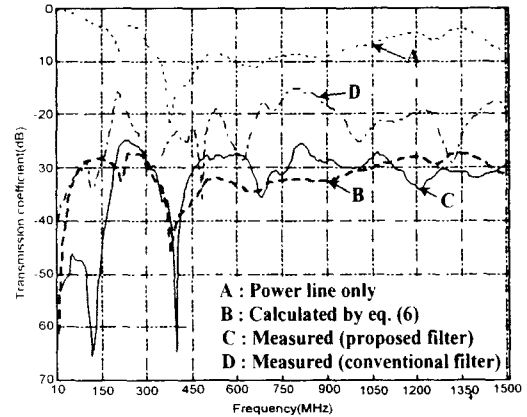


Fig 6 Insertion loss for differential-mode.

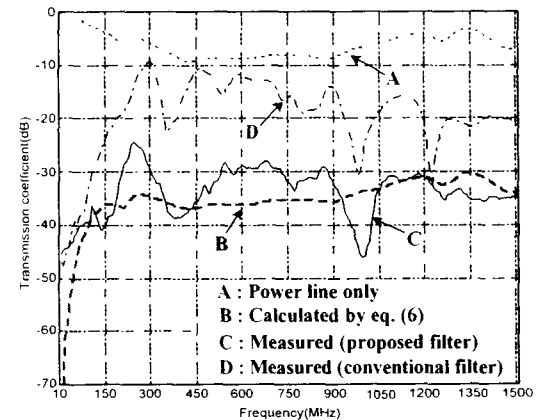


Fig 7 Insertion loss for common-mode.

Fig 6과 7은 제작한 광대역 EMC 필터에 대한 차동모드와 공통모드 노이즈 측정에 대한 것이다.

실험 결과로부터, 제안된 간단한 모델에 의해 이론상의 전달 계수 (Fig. 6과 7의 B)는 측정된 전달 계수 (Fig. 6과 7의 C)와 비슷함을 알 수 있다

그 반면, 제안된 필터의 측정된 감쇠 특성은 Fig. 6과 7에서 보여지는 것처럼 10 MHz ~ 15 GHz대역에서 기존의 필터보다 15 ~ 25 dB만큼 개선되었다.

3.2 EFT 특성

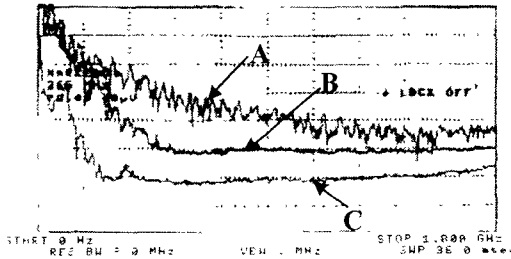
IEC 61000-4-4에 EFT테스트 펄스 파형은 식 (7)에 의해 얻을 수 있다

$$V(t) = A V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2} \tag{7}$$

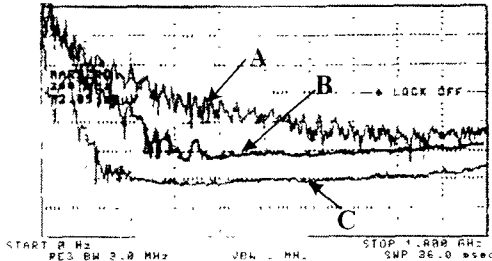
더불어, EFT/Burst 테스트에 대한 IEC 61000-4-4에 서술된 테스트 파라미터들은 (V. Prasad Kodali, 1996)에 설명되어 있다. A가 정수일 때, V_p 는 $t_1 = 3.5 \text{ ns}$, $t_2 = 55.6 \text{ ns}$ 에서 개방

회로 전압의 최대 값을 가진다

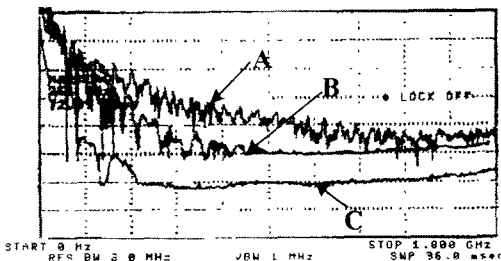
본 논문에서는 EMC 분석기 (Hewlett Packard Model 8591EMD)와 burst-generator (EMV-Systeme Schder GmbH Model SFT 4000)를 이용해 IEC 61000-4-4에 대한 내성 측정 시스템을 구성하였으며, EFT 감쇠 특성을 측정하였다(Richard Lee Ozenbaugh, 1996)(F D Martzloff and T M Gruz, 1988)



(a) IEC 61000-4-4의 level 2



(b) IEC 61000-4-4의 level 3



(c) IEC 61000-4-4의 level 4

Fig 8 The measured results of immunity test (A Without filter, B With conventional filter, C With proposed filter)

Fig. 8(a) ~ (c)는 레벨 2 ~ 4에서의 실험결과이다 Fig. 8의 A(필터가 없는 경우), B(기존의 필터), C(제안된 필터)는 각 레벨에서 EFT입력에 대해 전달되는 전원의 스펙트럼 레벨을 나타낸 것이다 Fig 8(a) ~ (c)에 보여지는 것처럼, 제안된 필터는 기존의 필터보다 8 ~ 25 dB의 EFT 효과를 줄일수 있다

더불어, 기존의 필터와 제안된 필터를 동적 특성을 테스트를 하기 위해 컴퓨터에 연결하여, EFT 레벨 2 ~ 4에 적용한 결과, 기존의 필터를 사용했을 때 IEC 61000-4-4의 레벨 3 이상에서 작동되지 않던 PC가 제안된 필터에서는 각 레벨에서 안전하게 동작하였다

4. 결 론

전원선에서 우수한 성능을 가지는 광대역 EMC 필터는 캐라이트 비드와 관통형 컨덴서로 구성되어 제작하였다 EMC 필터는 10 MHz ~ 15 GHz의 넓은 주파수 대역에 걸쳐 차동 모드, 공통모드 노이즈에서 높은 감쇠 특성을 가진다는 것이 실험에 의해 확인되었다 더불어, 제안된 필터는 기존의 필터보다 EFT 효과가 8 ~ 25 dB 감쇠되는 매우 좋은 특성을 나타낸다 그리고, IEC 61000-4-4를 만족하였다

새롭게 개발된 EMC 필터는 산업용 설비, 군용 기기, 의료기기에 효과적으로 이용될 것으로 기대된다

사 사

본 연구는 학술진흥재단(KRF-2001-005-F00015) 지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] 정인호 (1996), EMI/EMC 개념과 규제 동향, 전자공학회지 특집호, pp 10~15
- [2] C63-Electromagnetic Compatibility(1989), New York The Institute of Electrical and Electronics Engineers
- [3] F D Martzloff and T F Leedy (1990), "Electrical fast transients, application and limitation", IEEE Trans Industry Applications, Vol IA-26, pp 151~159
- [4] F D Martzloff and T M. Gruz(1988), "Power quality site surveys: facts, fiction and fallacies," IEEE Trans Industry Applications, Vol. 24, pp. 1005~18.
- [5] Henry W Ott(1988), Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, John Wiley & Sons, pp. 137~157.
- [6] M Lutz and J. P. Lecury(1992), "Electrical fast transient IEC 801-4. susceptibility of equipment and systems at higher frequencies and voltages," in Proc IEEE International Symp EMC, pp. 189~94
- [7] Richard Lee Ozenbaugh(1996), "EMI Filter Design", Marcel Dekker, INC., pp. 56~100
- [8] R Perez (1995), "Handbook of Electromagnetic Compatibility". New York, Academic Press, pp.58~65.
- [9] Shunji Satoh, Toshiki Shimasaki, Masatoshi Komatsu, Hideki Yaegashi, Shigeki Kirino(1998), "EMI reduction technologies for transmission equipments", NEC Technics Vol.5, No.6, pp 36~41
- [10] V Prasad Kodali(1996), Engineering Electromagnetic Compatibility, IEEE press, pp 171~176.
- [11] Yoshiyuki Naito(1976), "Formulation of frequency dispersion of ferrite permeability", IECE of Japan, Vol J59-C, No.5, pp 297~304