

엔진 회전수와 엔진룸 내의 전자파 세기의 관계에 대한 실험적 연구

최 광 제*

한라대학교 전기전자공학부

An Experimental Study on Relationship of the Engine rpm and the Strength of Electro-magnetic Waves in the Engine Room

Gwangje Choe*

Department of Electrical Engineering, Halla University, Gangwon 220-712, Korea
(Received 7 October 2005 / Accepted 28 October 2005)

Abstract : In this paper, we presented experimental data of the strength of the electro-magnetic waves in the engine room of automobiles. Measured frequency ranges are 145~380MHz and 844~1044MHz. Experimental studies are conducted by measuring the radiated power of the frequency spectrum for above frequency bands. The $\lambda/2$ dipoles used for measurement are fabricated to comply with the COMMISSION DIRECTIVE 95/54/EC. Experimental results confirm that the level of radiated power in the engine room at idling rpm is about 3dB higher than that of 1500rpm.

Key words : Electro-magnetic wave(전자파), dB(데시벨), Idling(공회전), rpm(분당 회전수)

1. 서론

불꽃 점화 엔진(spark ignition engine)을 탑재한 자동차는 전자파를 발생한다. 왜냐하면 점화 플러그에서 발생하는 불꽃은 고전압에 의한 불꽃 방전을 이용하기 때문이다. 또한 점화 플러그에서 발생하는 불꽃은 주기적으로 발생되어야 하므로 점화 플러그에 공급되는 전압 파형은 펄스(pulse) 형태로 된다.¹⁾ 불꽃 점화 엔진에서는 고전압 펄스가 배전기(distributor)에서 고압 케이블을 통하여 점화 플러그로 공급되는 구조이다. 이러한 구조에서 배전기는 무선주파를 발생하는 송신기의 역할을 하고, 고압 케이블과 점화 플러그는 선단이 개방(open)된 전송선로인 안테나의 역할을 하게 된다. 즉 송신기에 안테나가 연결된 송신장치와 유사한 구조이기 때문에 전자파를 발생하게 되고, 복사되는 전자파의 주파

수는 고압 케이블과 점화 플러그의 구조와 관계가 있으며, 엔진룸에서 복사되는 약100MHz 이상의 고주파 복사의 주된 원인이 된다.²⁾

불꽃 점화 엔진을 탑재한 차량에서는 강한 전자파가 복사되기 때문에 이러한 종류의 자동차에 대하여 자동차의 형식 승인을 할 때 전자파 복사와 관련된 시험을 하도록 규정하고 있다. 이러한 시험과 관련된 규정인 COMMISSION DIRECTIVE 95/54/EC에는 시험을 할 때 엔진 상태(engine condition)는 1500rpm±10%에서 시험을 하도록 규정하고 있다.³⁾

이 연구에서는 COMMISSION DIRECTIVE 95/54/EC에 규정된 엔진 상태인 1500rpm 정도에서 발생하는 전자파와 공회전(idling) 상태에서 발생하는 전자파를 측정하는 실험을 행하였다. 실험결과 엔진 상태가 공회전하는 경우에 발생하는 전자파의 세기가 엔진 상태가 1500rpm 정도에서 발생하는 전자파의 세기보다 약 3dB(약 2배) 이상 크고, 발생하는 전

*Corresponding author. E-mail: kjchoi@hit.halla.ac.kr

자파의 주파수 대역은 거의 변화가 없음을 확인하였다.

펄스와 같은 비정현파(non-sinusoidal wave)의 스펙트럼은 펄스의 진폭과 주기의 비에 따라 스펙트럼의 진폭과 주파수 분포 대역이 함께 변화하는 것⁴⁾으로 되어있다. 그러나 본 논문의 실험 결과, 공회전과 1500rpm에서 측정된 스펙트럼은 주파수 분포 대역의 변화는 거의 없으며 스펙트럼의 진폭만 크게 변화하였다. 이러한 결과에 의하면 배전기에서 고압 케이블로 공급되는 펄스의 진폭과 주기의 비는 엔진의 상태와 관계없이 거의 일정한 관계를 유지하는 것이라고 할 수 있다. 스펙트럼의 진폭이 1500rpm에서 감소하는 것은 펄스 형태의 전압을 점화 플러그에 공급하는 배전기의 구동 임피던스가 1500rpm에서 부하 임피던스의 역할을 하는 점화 플러그의 임피던스와 정합(matching) 상태가 개선되어 고압 케이블에 생성되는 정재파의 진폭을 감소시키는 것으로 추정할 수 있으며, 이러한 현상에 대한 정확한 원인을 규명하여 활용하면 엔진룸에서 복사되는 전자파의 세기를 감소시키거나 제거할 수 있을 것으로 예상된다.

2. 배경이론

송신 안테나에서 복사된 전자파가 수신 안테나에 도달하는 관계는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 송신 안테나에서 복사되어 수신 안테나에 도달하는 전자파의 세기 E 는 송신 안테나의 급전점 전류 I 에 비례($E \propto I$)하기 때문에 급전점 전류 I 가 클수록 수신 안테나에 도달하는 전자파의 세기는 크게 된다. 또한 수신 안테나에서 전자파의 세기 E 와 측정장치(수신기)에 나타나는 수신전력 P 사이의 관계는 전자파 세기의 제곱에 비례($P \propto E^2$)하기 때문에 수신 안테나에 도

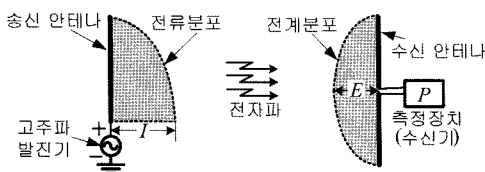


Fig. 1 Transmitting and receiving antenna system

래하는 전계의 세기가 클수록 수신전력은 크게 된다.⁵⁾

3. 측정 및 결과 분석

3.1 측정 장치의 설치

자동차의 배전기는 Fig. 1의 고주파 발전기와 같은 역할을 하며, 고압 케이블과 점화 플러그는 송신 안테나의 역할을 하기 때문에 Fig. 1과 같은 송수신 안테나 시스템과 유사하다. 이러한 사항을 고려하여 자동차의 엔진룸에서 복사되는 전자파를 측정하기 위한 측정장치 설치는 Fig. 2와 같다.

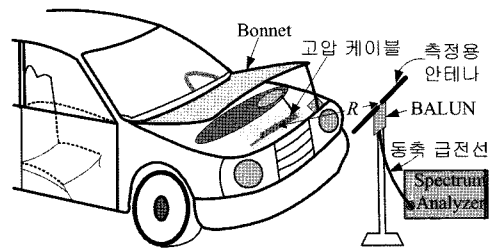


Fig. 2 Layout of measurement equipments

Fig. 2에서 고압 케이블과 측정용 안테나 사이의 거리 R 은 약 2[m] 정도이고, 측정에 사용된 안테나는 COMMISSION DIRECTIVE 95/54/EC에 규정된 측정 안테나의 조건을 만족하는 평형형 반파장 공진 다이폴(a balanced half wave resonant dipole)이다. Fig. 2에서 보닛(bonnet)을 열고 측정하는 것은 엔진룸 내부에서 전자파의 반사를 최소화하고, 측정에 필요한 전자파의 세기를 확보하여 실험의 목적에 부합하는 측정을 하기 위한 것이다.

3.2 측정 실험 방법

고압 케이블에 의하여 발생하는 전자파의 주파수 대역은 100MHz 부근이고, 각 케이블에서 발생하는 전자파의 주파수는 고압 케이블의 길이와 관계가 있다.²⁾ 이러한 점을 고려하여 측정 대역폭(bandwidth)을 500MHz로 하여 측정하여 주 발생 대역을 확인한 후, 145~380 MHz의 범위에서 대역폭을 200MHz로 하여 적절한 측정 대역을 선정하고, 엔진의 상태가 공회전인 경우와 1500rpm인 경우에 대하

여 각각 측정 실험을 하였다. 측정 주파수 대역을 145~380MHz의 범위에서 선정한 것은 88~108MHz 대역은 FM 라디오 방송대역이므로 일상의 공간에서 이 대역을 측정하는 경우 측정값이 방송파를 수신한 것인지 자동차에서 발생한 전자파 성분인지를 구분할 수 없고, 차종에 따라 발생 주파수 대역이 다르지만 대부분의 차량에서 발생하는 대역인 점을 고려하여 설정한 것이다. FM 방송대역인 88~108MHz 대역은 측정에서 제외하거나 측정을 한 경우에도 측정결과 분석에서는 제외하였다.

안테나의 직렬공진은 기본파의 홀수 배로 되는 특성이 있음을 고려하여 제3차 고조파(harmonics)가 복사되는 차량인 경우에는 844~1044MHz의 범위에서 대역폭을 50MHz로 하여 측정하였다. 대역폭을 50MHz로 선정한 것은 셀룰라(cellular) 주파수인 869~894MHz와 셀룰라 이동국(휴대전화) 주파수인 829~849MHz 및 무선 데이터 통신의 기지국 주파수인 936~938MHz대역을 피하기 위한 것이다.

3.3 측정 실험 결과 및 분석

실험에 사용한 차량은 2005년에 생산된 2개의 신차와 2005년 이전에 생산된 8개의 차량에 대하여 시행하였다.

실험 결과는 피변조파(modulated wave) 또는 펄스 등과 같은 비정현파에 포함된 주파수 성분의 특성을 해석하기 위하여 사용하는 스펙트럼의 포락선 모양^{4,6)}에 의하여 분류하면 세 가지의 경우로 되었다. 세 가지 경우에 대하여 No.1~No.3 차량으로 구분하여 그 결과를 나타내기로 한다. 즉 No.1 차량의 스펙트럼은 넓은 대역에 걸쳐서 분포되고 고차의 고조파 성분이 존재하는 경우, No.2 차량의 스펙트럼은 스펙트럼 분포가 특정한 대역에서 크게 나타나 하나의 산 모양을 형성하고 기타의 대역에서는 작은 크기의 분포를 나타내며 고차의 고조파 성분의 세기가 대단히 작은 값인 경우, No.3 차량의 스펙트럼은 특정한 두 대역에서 다소 크게 나타나 두 개의 산 모양을 형성하고 기타의 대역에서는 비교적 작은 크기의 분포를 나타내며 고차의 고조파 성분이 대단히 작은 값인 경우로 분류할 수 있었다.

Fig. 3은 No.1 차량에서 복사되는 전자파 대역을

확인하기 위하여 중심 주파수를 245MHz, 대역폭을 500MHz로 하여 공회전 상태에서 측정된 결과이다.

Fig. 3에서 80~495MHz 대역에 걸쳐서 전자파가 존재하고 있으며, 포락선 1~4에 해당하는 주파수 대역은 4개의 고압 케이블에서 발생하는 주파수 대역이고, 포락선 5는 포락선 1의 3차 고조파 성분, 포락선 6은 포락선 2의 3차 고조파 성분, 포락선 7은 포락선 3의 3차 고조파 성분으로 고려할 수 있다.²⁾

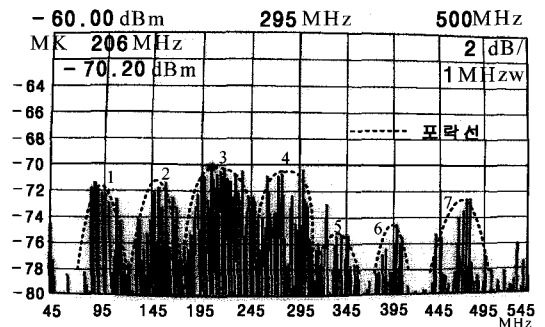


Fig. 3 Measured result for No.1 vehicle (Idling rpm/CF: 295MHz, BW: 500MHz)

Fig. 3에서 포락선 1의 주파수 대역은 대략 80~115MHz로 FM 라디오 방송 대역이 포함되기 때문에 순수한 라디오 방송파 성분인지 자동차에서 발생한 전자파와 FM 라디오 방송파가 혼합된 것인지는 일상의 공간에서 측정된 결과로는 구분할 수 없으므로 이 대역에 대한 자세한 측정과 분석은 제외하기로 한다. Fig. 3에서 그 세기가 큰 포락선 2~4는 No.1 차량에서 발생하는 것이라고 할 수 있지만, 1-2-5 스텝(step)을 사용하는 계측기의 특성을 고려하여 자세한 측정을 위한 측정 대역은 145~345 MHz 정도의 범위로 설정하였다. 이러한 사항을 고려하여 중심 주파수를 245MHz, 대역폭을 200MHz로 하여 공회전 상태에서 측정된 결과는 Fig. 4(a)와 같고, 1500rpm 정도에서 측정된 결과는 Fig. 4(b)와 같다.

Fig. 4(a)와 (b)의 스펙트럼 분포를 비교하여 보면, (a)에서 -81dBm 이상의 포락선과 (b)의 포락선은 거의 유사함을 알 수 있다. 이것은 공회전에서 발생하는 전자파의 주파수 대역과 1500rpm 정도에서 발생하는 전자파의 주파수 대역이 거의 유사하다고 할

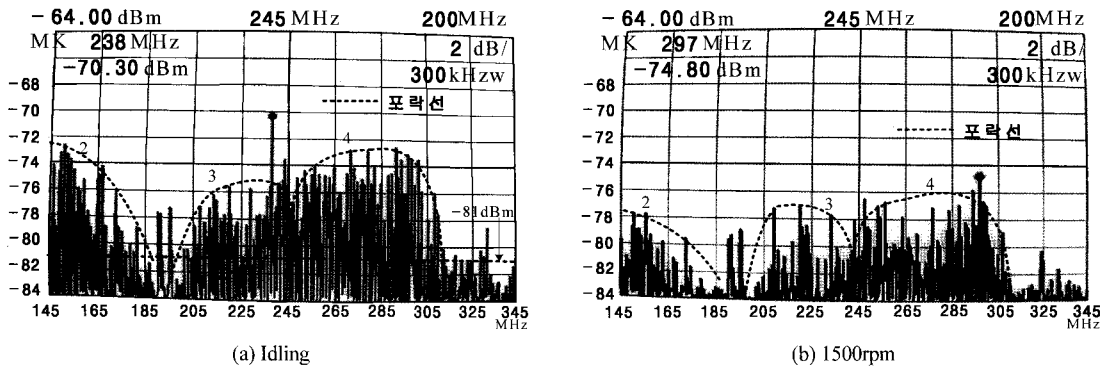


Fig. 4 Measured results for No.1 vehicle(CF: 245MHz, BW: 200MHz)

수 있다. 그러나 Fig. 4(a)와 (b)의 스펙트럼의 세기를 비교하여 보면, (a)의 스펙트럼의 세기보다 (b)의 세기가 전체적으로 3dB(2배)정도 작음을 알 수 있다. 또한 포락선 내의 스펙트럼의 변화는 전자파의 상호간섭이나 엔진의 회전수의 변화에 따라 배전기에서 고압 케이블로 공급되는 펄스의 폭과 주기 비의 미미한 변화에 기인하거나 엔진의 회전수가 증가함에 따라 임피던스 정합이 개선되어 감소되는 것으로 추정할 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 3에서 포락선 4(254~310MHz의 범위)의 제3차 고조파 대역중 일부를 측정된 결과이다. 측정주파수 대역을 895~945MHz로 선정한 것은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 280~310MHz 부근에서 다소 큰 전자파 성분 존재하고, 상용통신인 셀룰라 이동 통신(829~894MHz 주파수 대역 사용)에 의한 방해가 피하기 위함이다.

Fig. 5(a)와 (b)에서 스펙트럼의 세기를 비교하여

보면, (a)의 스펙트럼의 세기보다 (b)의 세기가 전체적으로 3dB(2배)정도 작음을 알 수 있다. 또한 포락선 내의 스펙트럼 분포의 변화가 Fig. 4보다 다소 심한 것은 고차 고조파이므로 그 세기가 약하고 Fig. 3에서 포락선 1~3에 포함된 주파수의 제5차 고조파 등과의 상호간섭에 기인하는 것이라고 할 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 엔진룸에서 발생되는 전자파의 세기는 전체적으로 엔진이 공회전인 경우보다 엔진의 회전수가 1500rpm 정도에서 3dB(2배)정도 감소함을 알 수 있다. 즉, 고차의 고조파에서도 기본파의 경우와 동일한 결과로 됨을 알 수 있다.

측정 차량 10대중 5대에서 이와 거의 같은 결과를 얻었다.

Fig. 6은 No.2차량에서 복사되는 전자파 대역을 확인하기 위하여 스펙트럼 분석기의 중심 주파수를 350MHz, 대역폭을 500MHz로 설정하여 공회전 상태에서 측정된 결과이다.

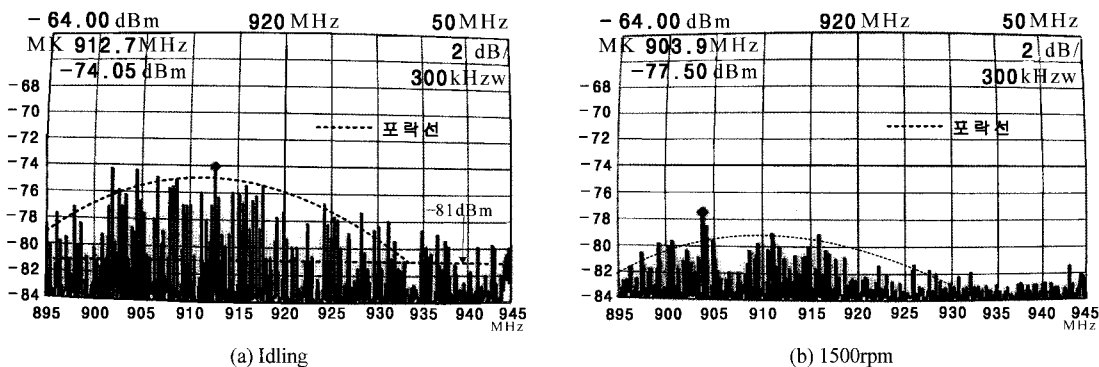


Fig. 5 Measured results for No.1 vehicle(CF: 920MHz, BW: 50MHz)

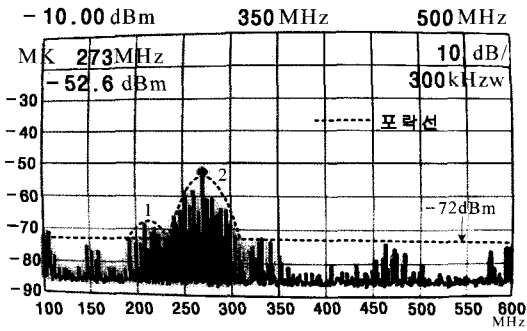


Fig. 6 Measured result for No.2 vehicle(Idleing rpm/CF: 350MHz, BW: 500MHz)

Fig. 6에서 보는 바와 같이 No.2 차량에서 발생하는 전자파의 대역은 대략 180~360MHz대역에서 상당히 강한 전자파 성분이 존재하고, 이 대역 이외에서는 비교적 약한 전자파 성분이 존재함을 알 수 있다. 특히 180~310MHz대역은 No.1 차량의 최대값과 비교할 때 약 20dB(100배) 정도 큰 값이다. 이러한 사항과 실험의 목적을 고려하여 측정 주파수의 범위를 스펙트럼의 레벨이 -72 dBm 이상인 180~310MHz대역의 전자파에 대하여 자세히 측정하고 분석하기로 한다. 강한 전자파 성분이 존재하는 이 대역을 측정하기 위하여 중심 주파수를 285MHz, 대역폭을 200MHz, 측정 레벨의 최저값을 -72dBm으로 변경하여 측정을 실시하였다. 공회전 상태에서 측정한 결과는 Fig. 7(a)와 같고, 1500rpm 정도에서 측정한 결과는 Fig. 7(b)와 같다.

Fig. 7(a)와 (b)에서 스펙트럼의 포락선은 유사한 형태를 유지하지만, Fig. 7(b)의 포락선 2의 스펙트

럼의 세기는 Fig. 7(a)의 포락선 2의 스펙트럼의 세기 보다 4dBm 이상 감소되었음을 알 수 있다. 즉, 엔진의 회전수가 1500rpm인 경우 공회전 때보다 엔진룸에서 발생하는 전자파의 세기는 4~5dB(2.5~3배)정도 감소하지만 발생 전자파의 주파수 대역에는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 즉, 실험 결과가 No.1 차량의 경우와 동일한 상황이므로 그 원인 또한 No.1 차량의 경우와 동일하게 고려할 수 있다.

Fig. 7(a)와 (b)에서 기준 레벨의 설정을 달리한 것은 파형의 분포 형상과 변화량을 보다 정확히 파악하기 위한 것이다.

Fig. 7(a)에서 300MHz 부근의 전자파의 세기가 대단히 크기 때문에 제3차 고조파인 900MHz 부근의 전자파를 측정한 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 스펙트럼의 최대 레벨은 -84.70dBm으로 대단히 미약하기 때문에 전파 암실에서 정밀한 측정을 하여야만 분석할 수 있기 때문에 분석 대상

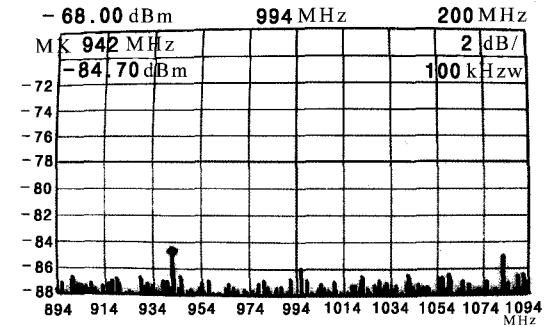
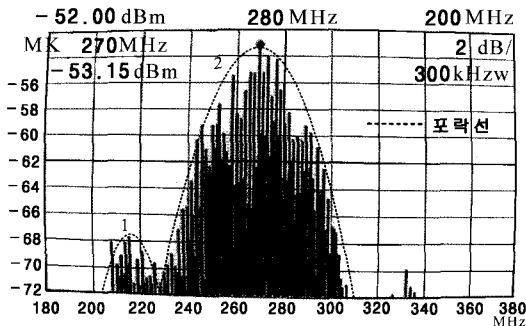
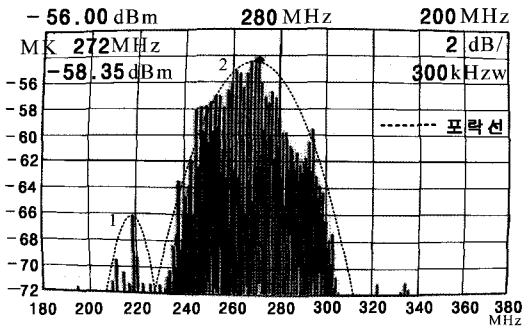


Fig. 8 Measured result for No.2 vehicle(Idleing rpm/CF: 994MHz, BW: 50MHz)



(a) Idleing



(b) 1500rpm

Fig. 7 Measured results for No.2 vehicle(CF: 280MHz, BW: 200MHz)

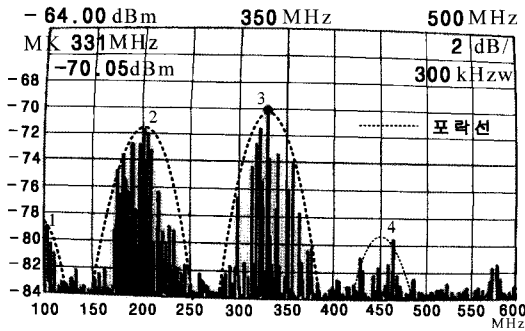


Fig. 9 Measured result for No.3 vehicle(Idleing rpm/CF: 295MHz, BW: 500MHz)

에서 제외하기로 한다.

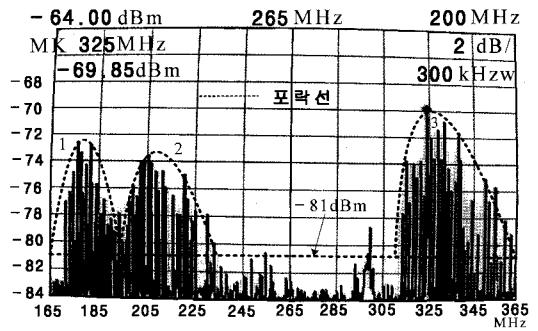
No.2 차량과 같은 스펙트럼 변화는 측정 차량 10 대중 3대(이들 중 1대는 2005년 이후 생산 차량)에서 나타났다.

Fig. 9는 No.3차량에서 복사되는 전자파 대역을 확인하기 위하여 중심 주파수를 350MHz, 대역폭을 500MHz로 하여 공회전 상태에서 측정된 결과이다.

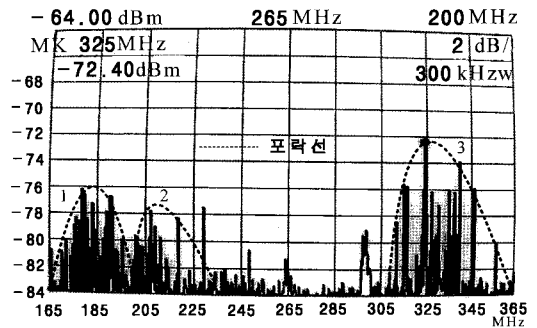
Fig. 9에서 보는 바와 같이 No.3 차량에서 발생하는 전자파의 대역은 포락선 2에 해당하는 160~250 MHz의 범위와 포락선 3에 해당하는 300~375MHz의 두 대역에서 다소 강한 전자파 성분이 존재하고, 포락선 1에 해당하는 100MHz이하의 부분과 포락선 4에 해당하는 425~475MHz대역에서는 약 -80dBm 이하의 미약한 전자파 성분이 존재함을 알 수 있다.

실험의 목적을 고려하여 미약한 전자파가 존재하는 포락선 1과 4의 범위를 제외하고, 다소 강한 전자파 성분이 존재하는 포락선 2와 3의 범위를 측정하기 위하여 중심 주파수를 265MHz, 대역폭을 200 MHz로 변경하여 공회전 상태에서 측정된 결과는 Fig. 10(a)와 같고, 1500rpm에서 측정된 결과는 Fig. 10(b)와 같다.

Fig. 9에서 포락선 2는 190MHz 부근에서 작은 값의 스펙트럼을 무시하고 하나의 포락선으로 나타내었으나 대역폭을 200MHz로 하여 측정된 Fig. 10(a)에서는 스펙트럼의 진폭이 작은 190MHz 부근을 고려하여 포락선을 그리면 Fig. 10(a)에 나타난 바와 같이 쌍 봉으로 고려할 수 있다. 이와 같이 쌍 봉으로 변형하여 고려한 것은 실험의 목적인 스펙트럼의 분포를 보다 자세히 고려하기 위한 것이다.



(a) Idleing



(b) 1500rpm

Fig. 10 Measured results for No.3 vehicle(CF:265MHz, BW: 200MHz)

Fig. 10(a)에서 -81dBm 이상의 포락선과 Fig. 10(b)의 포락선을 비교하여 보면, 포락선 2의 쌍 봉과 포락선 3은 유사한 형태를 유지하지만, 스펙트럼의 세기는 Fig. 10(b)가 Fig. 10(a)의 스펙트럼 레벨 보다 3 dBm 정도 감소되었음을 알 수 있다. 즉, 엔진 회전수가 1500rpm인 경우 공회전 때보다 엔진룸에서 발생 전자파의 주파수 대역은 유사하다는 점에서 No.1 차량의 실험 결과와 동일함을 알 수 있다. 즉, 실험 결과가 No.1 차량의 경우와 동일한 상황이므로 그 원인 또한 No.1 차량의 경우와 동일하게 고려할 수 있다.

Fig. 10(a)에서 포락선 3의 대역중 325MHz 부근의 전자파의 세기가 크기 때문에 제3차 고조파인 900 MHz 부근의 전자파를 측정된 결과는 No.2 차량의 측정 결과인 Fig. 8과 유사하게 측정되어서 분석 대상에서 제외하기로 한다.

이와 같은 스펙트럼 변화는 측정 차량 10대중 2대 (1대는 2005년 이후 생산 차량)에서 나타났다.

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 7 및 Fig. 9의 측정 결과에서 차량의 엔진 상태가 공회전일 때 발생하는 전자파의 세기가 1500rpm에서 발생하는 전자파의 세기보다 3 dB(2배) 이상 큰 것을 알 수 있다.

이상의 실험 결과를 안테나 이론⁵⁾에 의하여 안테나 동작 상태와 관련한 등가회로로 나타내면 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 고압 케이블은 송신 안테나, 배전기는 고주파 발전기의 대응 관계로 나타낼 수 있으며, 복사되는 전자파의 세기가 엔진의 상태에 따라서 변화되는 것은 안테나의 급전점에 공급되는 전류가 변화하는 것으로 나타낼 수 있다.

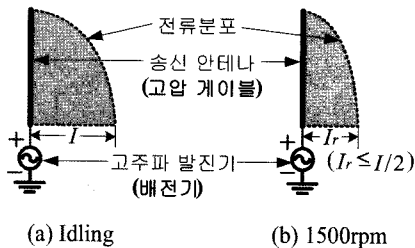


Fig. 11 Equivalent circuits for distributor and high-voltage cable

Fig. 11(a)와 (b)는 각각 공회전인 경우와 1500rpm인 경우일 때의 동작상태를 나타낸 것이다. 즉, 공회전 상태인 경우에 송신 안테나(고압 케이블)의 급전점 전류를 I 라고 하면, 1500rpm에서 급전점 전류를 I_r 이라고 할 때, $I_r \leq I/2$ 의 관계가 있음을 나타낸 것이다.

4. 결론

자동차의 성능 실험을 할 때 혹한의 조건을 고려하여 시험을 하는 것과 같이, 전자파의 유해성 논란을 고려한다면 자동차에서 발생하는 전자파에 대하여도 그 세기가 최대로 복사되는 조건에서 시험을 하는 것이 타당하다고 본다. 그러나 본 연구를 통하여 시험에 규정된 1500rpm은 복사 전자파의 세기가 최대인 조건이 아니고 공회전 상태에서 보다 강한 전자파가 복사됨을 확인하였다. 즉 시험 조건인 엔진 회전수가 1500rpm인 경우보다 엔진 회전수가 낮

은 공회전일 때 엔진룸 내에 발생하는 전자파의 세기가 3dB(2배) 이상 강한 전자파가 복사된다는 것이다.

실험 결과에서 나타난 바와 같이 공회전 상태에서 발생하는 전자파와 엔진 회전수가 1500rpm으로 되는 경우 발생하는 전자파의 주파수 대역은 거의 변화하지 않고 전자파의 스펙트럼의 세기가 전체적으로 3dB(2배) 이상 감소한다는 점을 고려하면, 펄스 형태의 전압을 점화 플러그에 공급하는 배전기의 구동 임피던스가 1500rpm에서 부하 임피던스의 역할을 하는 점화 플러그의 임피던스와 정합(matching)의 정도가 개선되어 고압 케이블에 나타나는 정재파의 진폭을 감소시키는 것으로 추정할 수 있다. 이러한 추정을 근거로 하여 엔진 상태에 따라 Fig. 11에 나타낸 것과 같은 상태로 동작하는 원인을 규명하면, 자동차 엔진룸에서 복사되는 전자파의 세기를 상당히 감소시키거나 엔진룸에서 복사되는 전자파를 제거할 수 있는 기술을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- 1) T. Denton, Automobile Electrical & Electronic Systems, Arnold, pp.110-120, 1997.
- 2) G. J. Choe, S. G. Jho, W. L. Jeung, S. K. Jang and S. H. Kang, "Analysis of Electro-magnetic Wave Radiating from an Ignition Plug and High-voltage Cable inside an Engine Room," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.201-215, 2004.
- 3) Council Directive 95/54/EC, Official Journal of the European Communities, No. L.266, pp.1-64, 1995.
- 4) M. E. Van Valkenburg, Network Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, pp.495-493, 1974.
- 5) S. A. Balanis, Antenna Theory, John Wiley & Sons, New York, pp.133-195, 1997.
- 6) U. L. Rohde, T. T. N. Bucher, Communications Receivers, McGraw-Hill, New York, pp.14-37, 1988.