

자동차의 점화 플러그와 고압 케이블에서 발생하는 전자파에 대한 해석

최 광 제^{*1)} · 조 시 기²⁾ · 정 원 락²⁾ · 장 성 국²⁾ · 강 신 한²⁾

한라대학교 전기전자공학부¹⁾ · 한라대학교 기계자동차공학부²⁾

Analysis of Electro-magnetic Wave radiating from an Ignition Plug and High-voltage Cable inside an Engine Room

Gwangje Choe^{*1)} · Shigie Jho²⁾ · Weolrark Jeung²⁾ · Sungkuk Jang²⁾ · Shinhan Kang²⁾

¹⁾School of Electrical Engineering, Halla University, Gangwon-do 220-712, Korea

²⁾School of Mechanical and Automotive Engineering, Halla University, Gangwon-do 220-712, Korea

(Received 9 December 2002 / Accepted 16 August 2003)

Abstract : This paper presents the frequency range and an analysis method to find the dominant source of electro-magnetic wave which originates from a spark ignition in engine room. Applying the distributed constant equivalent circuit theory the radiation of probable electro-magnetic wave around an ignition plug and a high voltage cable is studied analytically. Experimental studies are also conducted by measuring the frequency spectrum to obtain the radiating characteristics of electro-magnetic wave. Results from both analytical and experimental studies confirm that an ignition plug and a high voltage cable are dominant sources of electro-magnetic wave and that the radiating frequency is ranged from 1.3[GHz] to 2[GHz] band.

Key words : Electro-magnetic source(전자파 발생원), Ignition plug(점화 플러그)

1. 서 론

라디오 방송에는 AM(amplitude modulation) 방송과 FM(frequency modulation) 방송이 있다. 자동차에서 라디오 방송을 수신하는 경우 AM 방송은 수신시 음질이 FM 방송에 비하여 좋지 않다. 이것은 AM 방송이 잡음의 영향을 많이 받는 무선 통신방식이라는 점과 자동차에는 잡음의 원인이 되는 다수의 전자파 발생원이 있는 것에 그 원인이 있다고 할 수 있다. 자동차에서 발생하는 전자파의 발생원은 엔진룸(engine room) 내에 있는 시동 모터(starter motor), 점화 플러그(ignition plug), 발전기(alternator) 등이라고 할 수 있다.

이러한 장치들 중에서 점화 플러그와 배전기 및 점화 플러그를 잇는 고압 케이블은 15,000~30,000[V]의 고전압이 인가되므로 전자파를 복사할 확률이 매우 높다. 이 연구에서는 이러한 장치들에 의하여 발생될 것으로 예상되는 전자파의 주파수대를 고주파 전송선로 이론에 근거하여 해석하고, 실험을 통하여 규명하였다.

실험을 통하여 엔진룸 내에서 발생되는 전자파를 수[MHz]~3,500[MHz] 범위에서 측정하고, 이 주파수 성분들 중에서 점화 플러그와 배전기 및 고압 케이블에서 발생될 수 있는 전자파는 그 주파수 범위가 대단히 넓지만 복사 에너지가 상대적으로 큰 값을 갖는 주파수 범위는 1.3[GHz]~2[GHz]의 범위임을 확인하였다.

*To whom correspondence should be addressed.

kjchoi@hit.halla.ac.kr

2. 점화 플러그와 플러그 전원선

2.1 분배기의 출력 신호와 점화 플러그의 입력 신호

4기통 자동차의 배전기에서 점화 플러그까지의 구조를 단순화하면 Fig. 1과 같이 된다.

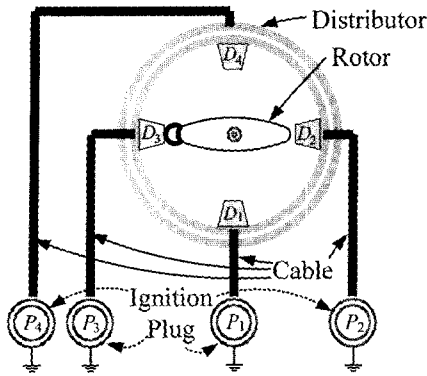


Fig. 1 Configuration of a spark ignition system

자동차 엔진의 회전수가 일정하다고 가정하면 Fig. 1과 같은 배전기의 각 접점 D_1, D_3, D_4, D_2 에서 발생하는 신호는 Fig. 2와 같이 진폭(A)과 폭(τ) 및 주기(T)가 일정한 펄스라고 할 수 있다.

SWR의 측정결과는 Fig. 2의 (a)와 같으며 입력 임피던스 측정 결과는 Fig. 2의 (b)와 같다.

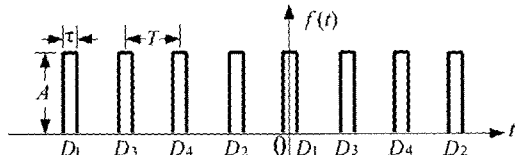


Fig. 2 Output signal at the distributor

Fig. 2와 같이 진폭과 폭 및 주기가 일정한 펄스에 대하여 푸리에 급수를 적용하여 해석하면 식 (1)과 같이 된다.

$$f(t) = \frac{\tau A}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{\sin(n\omega_0 \tau)}{n\omega_0 \tau / 2} \right] e^{jn\omega_0 t} \quad (1)$$

단, $\omega_0 = 2\pi / T$

식 (1)에 의하면 Fig. 2와 같은 주기성 펄스의 주파스펙트럼은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

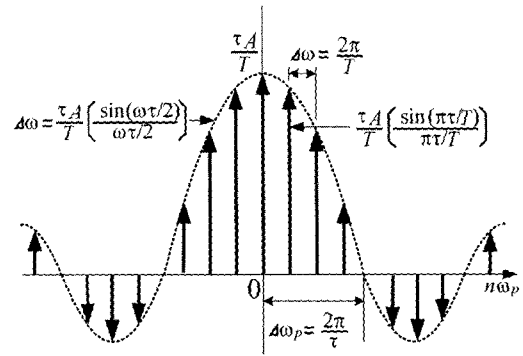


Fig. 3 Frequency spectrum of the pulse signal

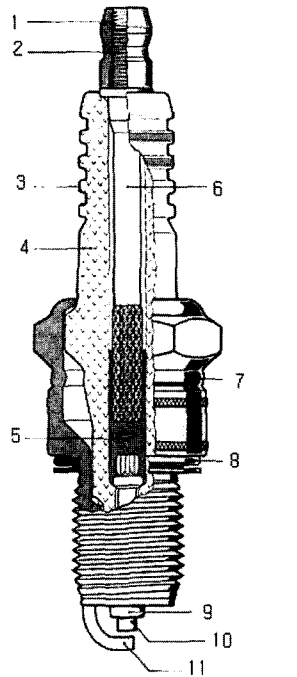
식 (1)에 의하여 Fig. 2와 같은 주기성 펄스는 Fig. 3과 같이 진폭이 서로 다르고 주파수가 기본파의 정수배인 무수한 정현파 성분이 중첩된 것으로 나타내게 된다. 그러므로 Fig. 2와 같은 펄스가 점화 플러그에 공급되는 경우에는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 진폭과 주파수가 다른 무수한 정현파 성분을 공급한 경우로 생각할 수 있다. 이러한 정현파 성분들 중에는 점화 플러그에서 발생하는 불꽃 방전에 기여하지 못하고 그 에너지를 외부로 방출하는 특정한 범위의 고차 고조파(고주파) 성분이 존재한다고 가정할 수 있다. 다시 말하면 점화 플러그에서 발생하는 불꽃 방전에 의하여 에너지가 소멸되지 않고 고압 케이블을 통하여 그 에너지를 전자파의 형태로 복사하는 주파수 성분이 존재한다고 할 수 있다.

또한 고압 케이블의 길이는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 접점 D_1 과 점화 플러그 P_1 사이가 가장 짧고, $D_2 - P_2, D_3 - P_3, D_4 - P_4$ 순으로 길어진다 ($D_2 - P_2$ 와 $D_3 - P_3$ 사이의 케이블의 길이 차이는 미미함). 고압 케이블의 길이가 서로 다르기 때문에 이들로부터 외부로 복사되는 전자파의 주파수는 서로 다르게 된다.

2.2 점화 플러그와 고압 케이블의 등가회로

점화플러그의 일반적인 구조는 Fig. 4와 같다.

과 같고, 그 사양이 Table 1과 같은 로딩 슬리브 모노폴을 실험실에서 측정된 SWR의 측정결과는 Fig. 2의 (a)와 같으며 입력 임피던스 측정 결과는 Fig. 2의 (b)와 같다.¹⁾



1 Terminal nut, 2 Connection thread,
3 Leakage-current barrier, 4 Insulator,
5 Special conductive glass seal,
6 Terminal stud,
7 Swaged and heat-shrunk fitting,
8 Captive outer gasket, 9 Insulator tip,
10 Center electrode, 11 Ground electrode

Fig. 4 Configuration of ignition plug

Fig. 4의 점화 플러그 구조에서 저주파에 대한 해석과 고주파에 대한 해석에 있어서 그 특성이 다르게 나타날 수 있는 부분은 금속 재료로 구성된 6(Terminal stud)과 10(Center electrode)의 사이에 있는 금속 이외의 재료로 형성된 5의 특수 도전성 유리용기(Special conductive glass seal)이다. 이 부분은 저주파인 경우 도체로 동작하지만 고주파인 경우에는 유전체로 작용할 수 있으며, 두 금속 도체 사이에 끼여 있는 형태이기 때문에 하나의 커패시터로 작용할 수 있다. 따라서 점화 플러그와 연결되어 있는 고압 케이블 부분에 대하여 분포정수 이론을 적용하여 등가회로로 표현하면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 5와 같은 분포정수회로는 회로의 분포 인덕턴스 L [H/m]과 분포 커패시턴스 C [F/m]에 의하여

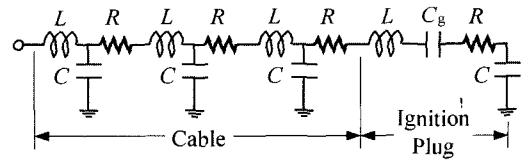


Fig. 5 Distributed equivalent circuit for ignition plug and cable at high frequency

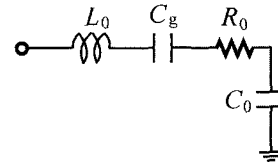


Fig. 6 Lumped equivalent circuit for Fig. 5 at the resonant frequency

특정한 공진주파수가 결정되면 Fig. 5의 회로는 Fig. 6과 같은 집중정수회로로 나타낼 수 있다.

Fig. 6에서 도전성 유리 용기에 의하여 형성된 커패시터 C_g 가 없는 경우의 공진주파수를 f_c 라고 하면 f_c 는 다음 식과 같이 된다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

반면에 커패시터 C_g 가 있는 경우에는 C_g 와 C_0 가 직렬로 연결된 회로이므로 공진주파수는 식 (2)의 f_c 보다 높은 주파수로 된다. 이 때의 공진주파수를 f_0 라고 하면 f_0 는 다음 식과 같이 된다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 \left(\frac{C_0 C_g}{C_0 + C_g} \right)}} \text{ [Hz]} \quad (3)$$

도선에 있어서 단위 길이 당 분포 커패시턴스 관계식을 이용하여 구한 도선의 총 커패시턴스 C_0 와 평판 커패시턴스 관계식²⁾을 이용하여 구한 C_g 를 비교하면, C_0 가 C_g 보다 200~400배 정도 큰 값으로 된다. 따라서 식 (3)의 f_0 는 식 (2)의 f_c 보다 14~20배 큰 값으로 된다($f_0 = 14f_c \sim 20f_c$).

이상의 이론과 선단이 개방된 전송선로에서 최대의 전자파를 복사하는 가장 짧은 도선의 길이는 $\lambda/4$ (λ :파장)임을 적용하여 플러그를 포함하는 고압 케이블(실험 차량)에 대한 공진주파수 f_c 와 f_0 ($= 17f_c$ 를 적용)를 각각 구하면 Table 1과 같이

Table 1 Resonant frequencies at each cable with ignition plug

구분	길이[cm]	f_c [MHz]	f_0 [GHz]
$D_1 - P_1$	65	115.4	1.96
$D_2 - P_2$	81	92.3	1.57
$D_3 - P_3$	82	91.5	1.56
$D_4 - P_4$	95	78.9	1.34

된다.

Table 1의 계산값 f_0 는 인덕턴스 L_0 의 변화가 작기 때문에 그 변화를 무시하고 커패시턴스 C_s 를 중앙값으로 선정하여 구한 대략의 값이다. 따라서 실제의 값과는 약간의 차이가 있을 수 있지만 실험의 측정 기준으로 활용이 가능한 값이라고 할 수 있다.

3. 실험 및 결과 분석

3.1 실험방법

측정하고자 하는 소요 대역(1.34~1.96[GHz])과 지면 및 보닛 사이의 반사파의 영향을 무시할 수 있어야 적절한 측정결과를 얻을 수 있다. 이러한 측정 조건을 만족하는 안테나³⁾를 제작하여 실험 차량(M

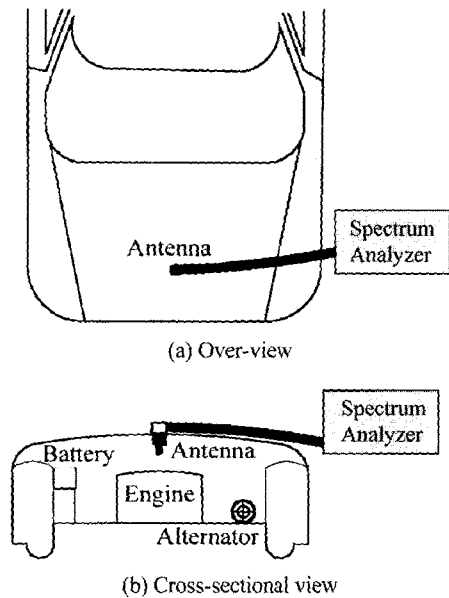


Fig. 7 Schematic diagram of test equipment

사의 E차)의 보닛에 Fig. 7과 같이 설치하였다. 실험은 시동에서 5초 간격으로 소인(sweep)되는 출력 주파수를 약 1분 정도 스펙트럼 분석기를 이용하여 반복 측정하는 방식으로 진행하였다.

3.2 측정 및 분석

0~3.5[GHz]의 범위(측정에 사용된 스펙트럼 분석기의 최대 측정범위)에서 측정된 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8의 측정에 사용된 안테나의 특성에 의하여 1.3[GHz]~2.2[GHz]의 측정값은 신뢰할 수 있으나 1.3[GHz]이하와 2.2[GHz]이상의 주파수에 대한 측정값은 신뢰할 수 없다. 그러나 임피던스 부정합에 의하여 손실된 에너지를 고려하면 측정된 값보다는 큰 에너지의 전자파임은 예상할 수 있다.

또한 Table 1의 주파수(f_0)에서 예상한 바와 같이 최대 진폭의 주파수는 정확하게 일치하지 않지만 어느 정도 일치하고 예상한 3개의 주파수군 및 주파수 대역폭은 예상과 상당히 일치하고 시간이 경과하여도 스펙트럼의 진폭은 다소의 변동을 나타내지만 3개의 주파수군은 거의 동일한 상태를 유지함을 알 수 있다.

이러한 측정과 이론적인 해석의 타당성을 검증하기 위하여 다른 전자파원(발전기와 시동 모터)을 차폐하고, 점화 플러그를 순번에 따라 전원을 차단하는 실험을 한 결과는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9의 측정결과는 고압 케이블과 점화 플러그의 연결 부분을 분리하여 점화 플러그가 동작하지 않도록 한 후 엔진을 구동시키는 방식으로 실험한 결과이다. Fig. 9의 (a)는 고압 케이블의 길이가 가장 짧은 $D_1 - P_1$ 의 동작만을 중지시키고 측정된 결과이고, (b)는 고압 케이블 $D_2 - P_2$ 의 동작만을 중지시키고 측정된 결과이고, (c)는 고압 케이블 $D_4 - P_4$ 의 동작만을 중지시키고 측정된 것이다.

Fig. 9의 (a)에서 2[GHz] 대역의 스펙트럼 성분이 거의 존재하지 않는 것은 Table 1에서 $D_1 - P_1$ 에서 약 1.96[GHz]의 전자파가 발생되는 것으로 예상한 것과 일치하는 결과이고, 그림(c)에서 1.4[GHz]대역의 스펙트럼이 (a)와 (b)의 경우보다 대단히 작으므로 되는 것은 Table 1에서 $D_4 - P_4$ 에 의한 전자

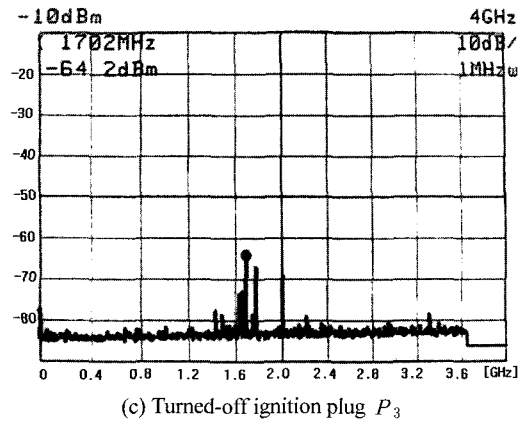
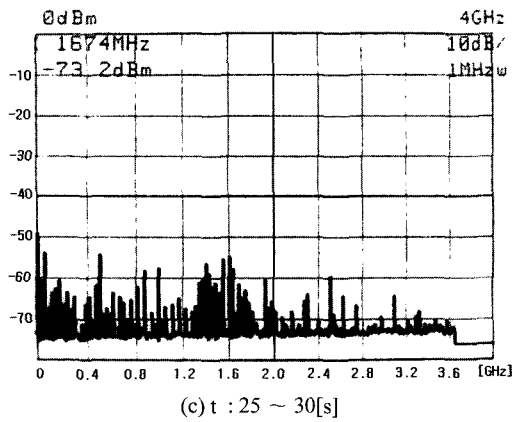
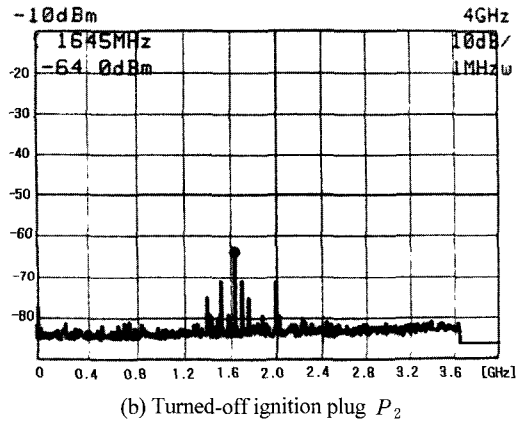
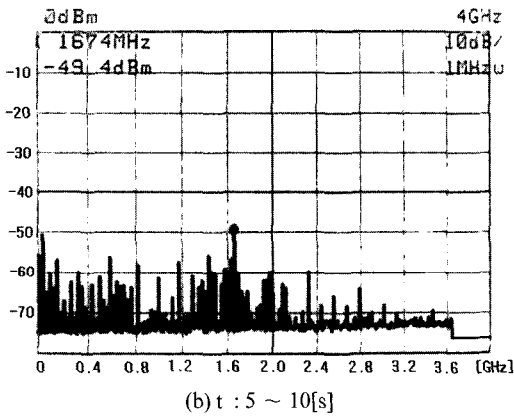
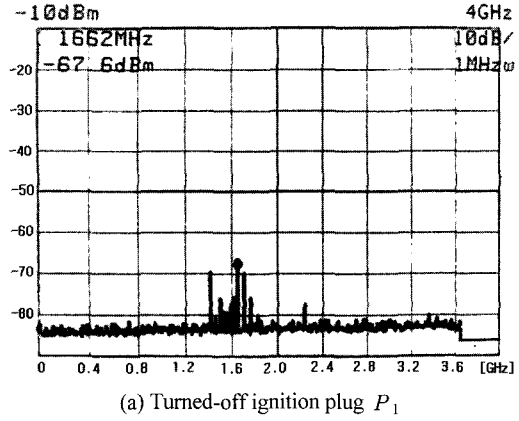
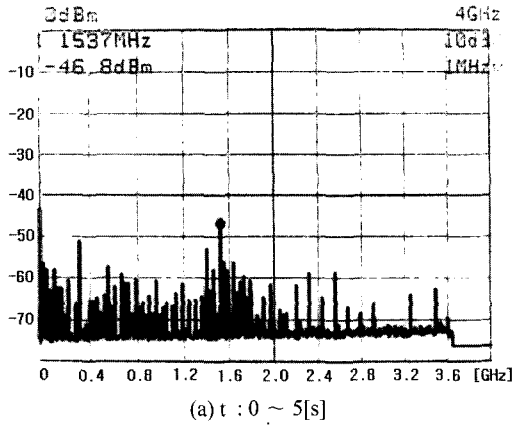


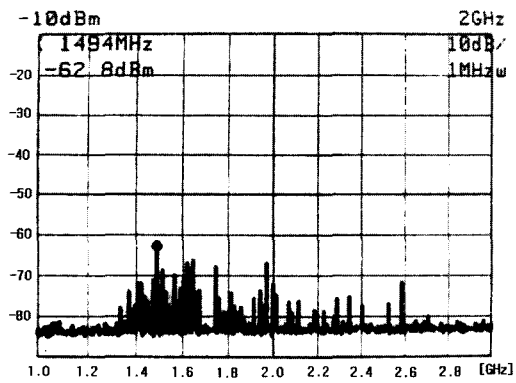
Fig. 8 Measured results of 0-3.5[GHz] range

Fig. 9 Measured results turned-off ignition plug

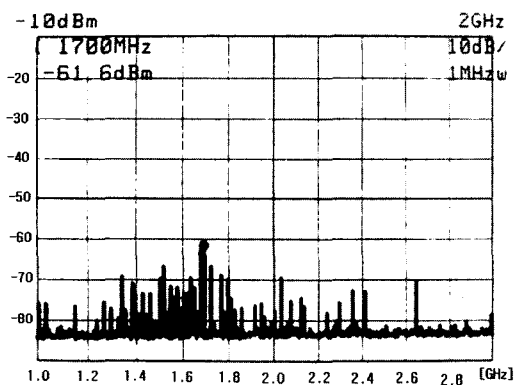
파는 약 1.34[GHz]의 전자파가 발생되는 것으로 예상한 것과 상당히 일치한다고 할 수 있다. 또한 그림 (b)에서 1.5[GHz]~1.8[GHz] 대역의 스펙트럼 분포가 (a)와 (c)에 비하여 밀하지 않고 소하게 분포되는 것은 Table 1에서 $D_2 - P_2$ 와 $D_3 - P_3$ 에 의하여 발

생될 수 있는 주파수가 비슷하기 때문에 $D_2 - P_2$ 를 제거함에 의하여 발생하는 전자파가 감소한 것으로 고려할 수 있기 때문에 이 또한 이론에 근거한 예상과 일치한다고 할 수 있다.

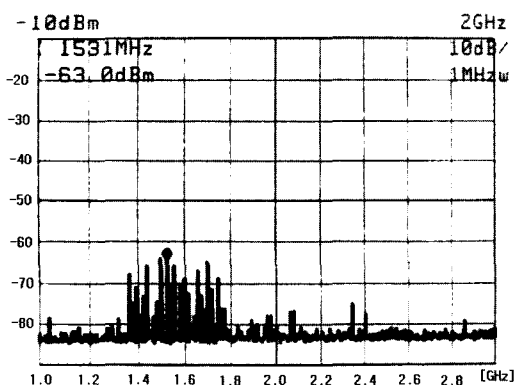
Fig. 9의 측정 결과와 Fig. 8의 측정 결과를 비교할



(a) t : 0 ~ 5[s]



(b) t : 5 ~ 10[s]



(c) t : 25 ~ 30[s]

Fig. 10 Measured results of 1.0~3.5[GHz] range

때, Fig. 9의 스펙트럼 진폭이 감소된 것은 차폐 재료로 사용한 총판에 전자파 흡수 및 다른 전자파원과 상호 간섭이 제거됨에 기인하는 현상이라고 할 수 있으며, 측정할 때마다 주파수가 약간씩 변화하는 것은 엔진을 구동시킬 때마다 엔진의 회전수가 약

간씩 다름에 기인하는 현상으로 볼 수 있다.

이상의 측정 결과를 재확인하기 위하여 스펙트럼 분석기의 측정 주파수 대역을 1.0[GHz]~3.0[GHz]로 조정하여 측정한 결과는 Fig. 10과 같다.

Fig. 10과 Fig. 8의 측정에서 엔진의 구동을 반복하는 방법에 의하여 측정된 스펙트럼 분포이지만 스펙트럼의 진폭은 시간이 경과함에 따라 감소하고, 주파수 대역중에서 2[GHz]이상의 스펙트럼의 진폭은 시간의 경과에 따라 감소폭이 크며, 이와 같은 성향은 반복되고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

자동차의 엔진룸 내에서 발생하는 전자파의 주파수 대역을 측정한 결과 3.5[GHz]이하의 넓은 대역(대역폭 3.5[GHz])에서 발생되고 있음을 확인하였으며, 발전기, 시동 모터, 고압 케이블과 점화 플러그와 같은 전기장치들은 각기 다른 주파수대의 전자파를 발생시키는 전자파 발생원임을 실험적으로 증명하였다고 할 수 있다.

다수의 전자파 발생원들 중에서 고전압에 의하여 동작하는 점화 플러그와 고압 케이블에서 상당한 전자파가 복사될 것이기 때문에 이 부분에 대하여 고주파 전송선로 해석법인 분포정수 이론을 적용하여 해석하고 실험하였다.

고압 케이블과 점화 플러그에 대하여 고주파 전송선로 해석에 사용하는 분포정수 이론을 적용하여 해석한 결과 코압 케이블과 점화 플러그에서는 그 중심주파수가 1.34[GHz], 1.57[GHz], 1.96[GHz]로서 다른 3개의 주파수 균을 형성하는 전자파가 복사될 것으로 해석되었고, 실험을 통하여 증명하였다. 즉 1.3[GHz]~2[GHz] 대역의 전자파를 생성하는 주된 전자파원은 고압 케이블과 점화 플러그 부분임의 확인하였다.

본 논문에서 점화 플러그와 고압 케이블에서 발생하는 전자파를 해석하기 위하여 사용한 해석 방법과 측정 방법은 엔진룸 내의 다른 전자파원을 해석할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있으며, 측정된 스펙트럼 분포는 엔진의 동작상태 등을 점검할 수 있는 자료로 활용할 수 있을 것이다.

References

- 1) T. Denton, Automobile Electrical & Electronic System, Arnold, p.126, 1997.
- 2) C. Bowick, RF Circuit Design, Howard W. Sams & Co., Inc., pp.9-42, 1985.
- 3) G.-J. Choe, "Development of PCS and IMT-2000 Frequency Bands antenna for Automobile using Sleeve Monopole," Transactions of KSAE, Vol.11, No.2, pp.190-195, 2003.