

초고주파 구형도파로를 이용한 엔진 오일의 유전율 측정

김기훈[†] · 김영주[‡]

홍익대학교 전자 전기 공학과

Microwave Rectangular Waveguide Measurement of the Engine Oil Dielectric Constant

Ki hoon Kim[†] and Young ju Kim[‡]

Dept. of Electronics and Electrical Engineers Hongik University

(Received February 18, 2011; Revised April 25, 2011; Accepted April 27, 2011)

Abstract – The rectangular waveguide technique can be used to measure the complex permittivity of dielectric material of various thickness and cross section. This paper presents the analysis system of engine oil permittivity at which deterioration of engine oil is measured at the X-band(8-12.5 GHz). The middle of the rectangular waveguide has engine oil case and is connected with VNA(Vector Network Analyzer) for the measurement of the transmission(S_{21}) and reflection(S_{11}) and then the permittivity is extracted. The deterioration of engine oil is proved by the comparison with both the extracted data and reference data. As the additional research, This paper suggest that an accurate permittivity is considered by not only the wave guide length but the air gap between oil case and the waveguide.

Keywords – rectangular waveguide(구형 도파로), oil deterioration(오일 열화), complex permittivity(복소 유전율), engine oil(엔진오일)

1. 서 론

엔진오일의 내구성을 나타내는 수명이나 사용환경은 산화 및 이물질의 유입에 따라 정해지게 된다. 이는 양질의 엔진오일이라 할지라도 사용 중에 변질되어 그 성질이 저하되는 열화현상이 나타나기 때문이다. 엔진오일의 열화 중 가장 큰 원인은 공기 중의 산소에 의한 산화작용이며, 산화속도는 온도, 촉매, 공기와 접촉하는 엔진오일의 종류 및 첨가물의 종류에 따라 달라진다. 엔진오일이 산화되면 케톤, 알데히드, 알코올 등과 같은 유용성의 산소화합물이 먼저 생성되고 다음으로 이것이 유기산으로 바뀌며, 최후에는 오일에 용해되지 않는 수지상의 물질을 생성하게 된다[1]. 실험에 의하면, 엔진 오일이 열화

될수록 유전율과 전기 전도도가 증가함이 밝혀졌다[2].

엔진 오일의 전기적인 특성인 유전율과 전기 전도도의 변화와 밀접한 관계가 밝혀지면서 최근에는 엔진 오일의 전기적 특성을 측정하여 엔진오일의 상태를 감지하는 연구를 진행중이다[3]. 엔진오일의 열화 정도에 따른 유전율을 측정하는 방법에는 open-ended rectangular waveguide technique[4], coaxial guide technique[5], resonant cavity technique[6], 등 여러 가지 방법이 있지만 본 실험에서는 open-ended rectangular waveguide를 이용한 reflection / transmission technique[7]을 사용하였다. 열화된 상태에 따라 sample case를 A, B, C, D로 나누었고, 구형도파로 중앙에 엔진오일이 담긴 sample case를 장착하였다.(Fig. 1)

VNA(Vector Network Analyzer)를 이용하여 획득한 투과계수(S_{21})와 반사계수(S_{11})의 값을 이용하여 복소상대유전율 ϵ 과 손실계수인 $\tan\delta$ 를 구하였다.

[†]주저자 : lastmy@naver.com

[‡]책임저자 : yjkim1@wow.hongik.ac.kr

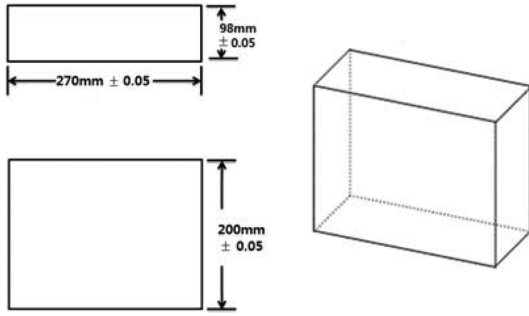


Fig. 1. dimension of oil case.

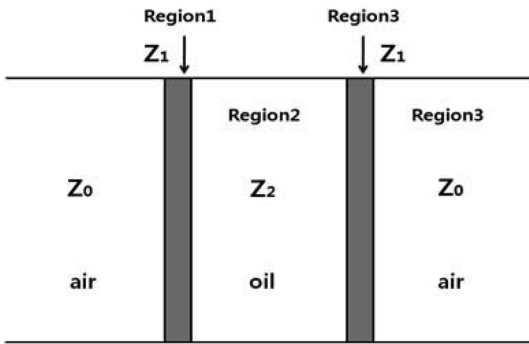


Fig. 2. four boundary cell in the waveguide.

2. 유전율 측정의 이론적 고찰

2-1. 구형 도파로의 구조

제작된 엔진오일 case가 waveguide 내부에 삽입되면 Fig. 2 와 같이 엔진오일을 담고 있는 case의 양쪽 (Region 1, Region 3)과 엔진오일이 담겨있는 공간 (Region 2)에 따라 4개의 boundary를 형성한다.(Fig. 2)

하지만 본 실험에서 사용한 엔진오일 case두께가 매우 얇기 때문에 엔진오일 case가 차지하는 Region을 무시하고 진행하였다. 따라서 Fig. 3과 같은 경계조건을 가지게 된다.

2-2. Transmission and Reflection Method(T/R)

T/R 측정에서 oil case는 구형 도파로내에 삽입되고, oil case에 초고주파가 입사하게 된다.(Fig. 3)

구형도파로에서 air-oil에 입사하는 unit amplitude wave의 multiple reflection을 이용하여 측정된 S-parameter와 permittivity의 연관된 수식을 고려한다.

첫 번째 air-oil의 경계면에서 반사파의 합은 Γ_{IN}

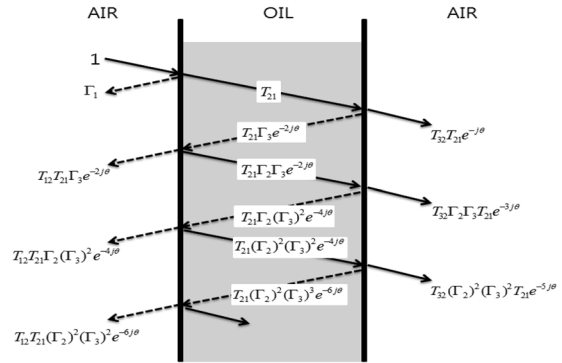


Fig. 3. multiple reflections at the air-oil interfaces within a filled waveguide.

이다.

$$\Gamma_{IN} = \Gamma_1 + T_{12}T_{21}\Gamma_3 e^{-2j\theta} \sum_{n=0}^{\infty} \Gamma_2^n \Gamma_3^n e^{-2jn\theta} \quad (1)$$

여기서, $(\sum_{n=0}^{\infty} r^n = \frac{1}{1-r})$ 을 이용하면 다음과 같다.

$$\Gamma_{IN} = \Gamma_1 + \frac{T_{12}T_{21}\Gamma_3 e^{-2j\theta}}{1 - \Gamma_2\Gamma_3 e^{-2j\theta}} \quad (2)$$

식(2)에서 $T_{12}, T_{21}, \Gamma_2, \Gamma_3, e^{-j\theta}$ 의 항을 S-parameter로 표현하기 위하여 물질의 propagation constant γ 를 포함하는 지수 함수와 무한한 두께를 는 oil Γ_1 에 입사하는 전자파에 대한 정규화된 복소 반사계수의 항으로 대체 할 수 있다.

$$\Gamma_2 = \Gamma_3 = -\Gamma_1 \quad (3)$$

$$z^2 = e^{-2j\theta}, \quad \theta = \gamma d \quad (4)$$

$$T_{12} = 1 + \Gamma_2, \quad T_{21} = 1 + \Gamma_1 \quad (5)$$

식(2)에 식(3), 식(4), 식(5)를 대입하면 다음과 같다.

$$S_{11} \equiv \Gamma_1 = \frac{\Gamma_1(1-z^2)}{1 - \Gamma_1^2 z^2} \quad (6)$$

유사한 방법으로 oil case를 통과하는 전송된 전자파 성분의 합을 계산 하면

$$Total\ Transmitted = \frac{T_{32}T_{21}e^{-j\theta}}{1 - \Gamma_2\Gamma_3 e^{-2j\theta}} \quad (7)$$

$$여기서\ T_{32} = 1 + \Gamma_2 \quad (8)$$

$$S_{21} \equiv \text{Total Transmitted} = \frac{(1 - \Gamma_{12}^2)z}{1 - \Gamma_{12}^2 z^2} \quad (9)$$

NRW(Nicolson-Ross-Weir) algorithm을 이용하여[8,9] 측정된 S_{11} 과 S_{21} 을 Γ_{12} 에 대한 항으로 확장한다.

$$V_1 = S_{21} + S_{11}, \quad V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (10)$$

$$X = \frac{1 - V_1 V_2}{V_1 - V_2} \quad (11)$$

X에 식(10)을 식(11)에 대입하여 아래의 수식을 얻을 수 있다.

$$\Gamma_{12} = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (12)$$

위와 유사한 방법으로 측정된 S_{11} 과 S_{21} 을 z 에 대한 항으로 확장한다.

$$V - \Gamma_{12}, \quad 1 - V_1 \Gamma_{12} \quad (13)$$

$$z = \frac{V_1 - \Gamma_{12}}{1 - V_1 \Gamma_{12}} = \frac{(S_{11} + S_{21}) - \Gamma_{12}}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma_{12}} \quad (14)$$

여기서, TEM 모드인 경우 $z = e^{-j\gamma d} = e^{-j(\omega/c_0)\sqrt{\mu_r \epsilon_r} d}$ 이다. 하지만 구형도파로는 TE_{10} 모드 이므로

propagation constant $\gamma = \sqrt{\frac{w^2}{c_0^2} \mu_r \epsilon_r - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}$ 이다.

$$z = e^{-j\gamma d} = e^{-j \sqrt{\frac{w^2}{c_0^2} \mu_r \epsilon_r - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} d}$$

양변에 자연로그를 취하면[10]

$$\ln(x) = \ln|z| - j \arg(z) \quad (15)$$

$$= \ln \left| e^{\sqrt{\frac{w^2}{c_0^2} \mu_r \epsilon_r - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} d} \right| - j \arg \left[e^{\sqrt{\frac{w^2}{c_0^2} \mu_r \epsilon_r - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} d} \right]$$

만약에 엔진오일에 투과한 전자파의 손실이 없다면

$$|z| = \left| e^{\sqrt{\frac{w^2}{c_0^2} \mu_r \epsilon_r - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} d} \right| \approx 1 \quad (16)$$

$$\ln(z) = 0 - j \sqrt{\frac{w^2}{c_0^2} \mu_r \epsilon_r - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \cdot d \quad (17)$$

식(17)에서 $\mu_r \cdot \epsilon_r$ 의 항으로 정리하면 다음과 같다.

$$\mu_r \cdot \epsilon_r = \left\{ \left(\frac{j \ln(z)}{d} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \right\} \times \left(\frac{c_0}{w} \right)^2 = C_1 \quad (18)$$

두 개의 매질 사이에서의 반사계수는 다음과 같다.

$$\Gamma_{12} = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0} = \frac{\sqrt{\mu_r} / \sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r} / \sqrt{\epsilon_r} + 1} \quad (19)$$

$$\frac{\mu_r}{\epsilon_r} = \left(\frac{1 + \Gamma_{12}}{1 - \Gamma_{12}} \right)^2 = C_2 \quad (20)$$

식(18)과 식(20)를 연립하면 물질의 유전율을 구할 수 있다.

$$\epsilon_r = \sqrt{C_1 / C_2} \quad (21)$$

따라서 엔진오일에서 측정된 $\Gamma(S_{11})$ $\Gamma(S_{21})$ 에 따라서 엔진오일의 유전율을 구할 수 있다. 하지만 식(21)는 이상적인 유전율 값이기 때문에 다음의 보정과정을 거쳐야 한다.

3. 보정 과정(Calibration)

T/R방법에서는 구형도파로의 길이는 고려하지 않았다. 따라서 실제로 측정된 S-parameter에 다음과 같은 wave-guide 길이에 따른 보정치를 넣어주어야 한다. (Fig. 4)

$$S_{11} = \frac{E_{REF}}{E_{INC}} = S_{11}' e^{j2\beta_0 L_1} \quad (22)$$

$$S_{21} = \frac{E_{TRN}}{E_{INC}} = S_{21}' e^{j\beta_0(L_1 + L_2)} \quad (23)$$

뿐만 아니라 oil case와 waveguide 사이의 air gap 고려를 해야 한다.

$$\epsilon_r' = \epsilon_m' \frac{d}{b - (b - d)\epsilon_m'} \quad (24)$$

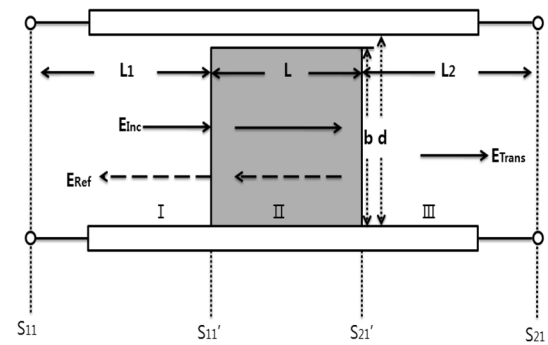


Fig. 4. Dimension of waveguide and oil case.

Table 1. Dimension of waveguide

L_1 (mm)	L (mm)	L_2 (mm)
1966	27	1723

Table 2. Dimension of waveguide and oil case

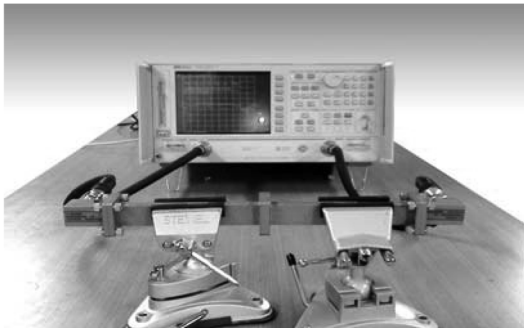
b(mm)	d(mm)
21	27

여기서 ϵ_m' , b, d는 측정된 유전율(permittivity), Oil case 크기, 구형도파로 크기이다.

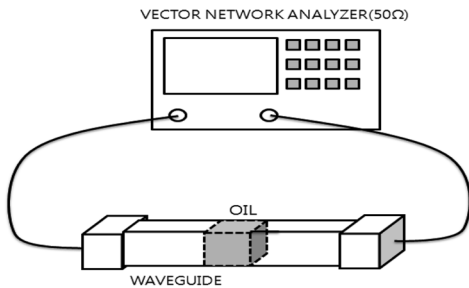
3. 실험 과정 및 유전율 측정결과 비교

3-1. 실험 과정(experiment)

Fig. 5(a)는 실제 실험에 사용된 구형도파로와 VNA의 연결상태를 보여 주고 있다. 구형도파로의 견고한 결합을 위하여 별도의 고정 장치를 마련하였다. 엔진 오일 case의 재질은 1.0 mm 두께의 아크릴이다. 구형도파로는 U-300Q waveguide와 U-300N waveguide to coaxial adaptor 2쌍으로 구성되며 조립이 가능하므로

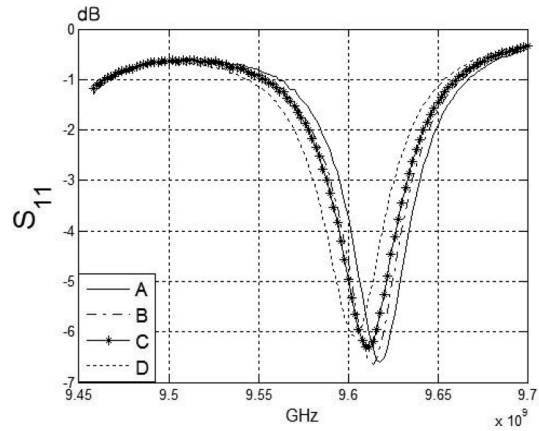


(a)

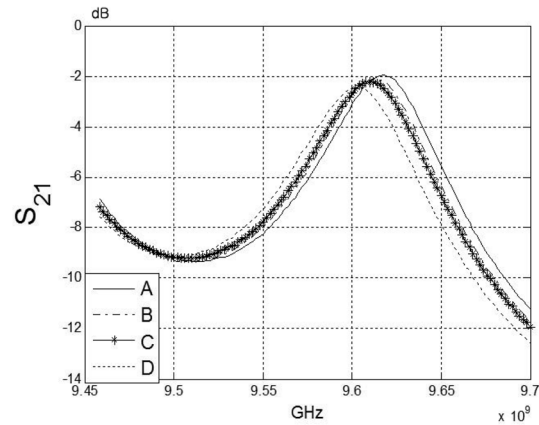


(b)

Fig. 5. waveguide into the oilcase and VNA (a) BLOCK DIAGRAM (b).



(a)



(b)

Fig. 6. Measured S_{11} data(a), S_{21} data(b): A(clean), B(25%), C(50%),D(dirty).

oil case를 구형도파로 내부에 삽입하기가 용이하다. VNA의 calibration은 full two-port calibration을 통해 9.3 GHz부터 9.7 GHz까지 실시하였고, VNA는 HP 8719D vector network analyzer를 사용하였다.

측정한 엔진오일의 상태는 가솔린 엔진으로, 사용하기 전의 깨끗한 엔진오일(oil A)과 약 1년 정도 사용하여 교환시기가 된 폐오일(oil D), 그리고 이 두 가지 엔진오일을 각각 3:1, 1:1 만큼 혼합하여 제작한 오염도 25%(oil B), 50%(oil C), 이렇게 4가지 상태의 엔진오일을 준비하였다. 엔진오일 주입 시 case 내부에서 발생 할 수 있는 기포는 모두 제거하였고 주입구는 기포가 없는 상태에서 아크릴 본드로 막았다. 각각의 오일은 동일한 실온(25°C) 조건에서 측정 되었으

며 VNA의 측정 주파수 범위는 calibration 주파수와 동일한 9.3 GHz부터 9.7 GHz로 설정하였다. 측정된 S-parameter는 다음과 같다.(Fig. 6)

3-2. 유전율 측정결과

구형 도파로 안에 엔진오일 구조물이 있을 경우에는 구조물에 의해서 공진 현상이 일어난다. 공진이라는 것은 특정 주파수는 잘 통과 한다는 말과 같다. 따라서 S_{11} 의 값이 가장 작은 부분과, S_{21} 이 가장 큰 부분에서 공진이 일어난다. Fig. 6에서 S_{11} , S_{21} 값을 보게 되면 대략 9.6 GHz에서 공진이 일어난다는 것을 알 수 있다.

측정된 S_{11} , S_{21} 값을 앞절의 수식에 대입하여 유전율(permittivity)을 추출하였고, 유전율의 loss 성분을

Table 3. Dielectric constant of the deterioration

측정 주파수	오염정도	ϵ_r	$\tan \delta$
9.652 GHz	A	0.855	0.2614
9.652 GHz	B	1.126	0.3644
9.652 GHz	C	1.408	0.3704
9.652 GHz	D	2.831	0.5865

파악하기 위하여 $\tan \delta$ 값을 추출하였다. 이러한 과정은 수치 해석 프로그램인 MATLAB을 이용하였다.(Fig. 7) 계산 결과 9.65 GHz에서 유전율 값의 변화가 있는 것을 볼 수 있다. 이를 요약한 것이 Table 3이다. 측정된 엔진오일에 따른 유전율은 유전상수 측정기를 사용하여 측정된[11]의 데이터와 비교했을 때 일치함을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 구형도파로에서 T/R 방법을 이용하여 oil의 열화에 따른 유전율 산출법을 제시 하였다. 이 논문에서의 핵심은 구형도파로에서 T/R 방법을 이용한 수식전개, 구형도파로의 길이, 그리고 구형도파로와 oil case 사이의 air gap을 고려하여 그에 따른 유전율을 산출한 것이다.

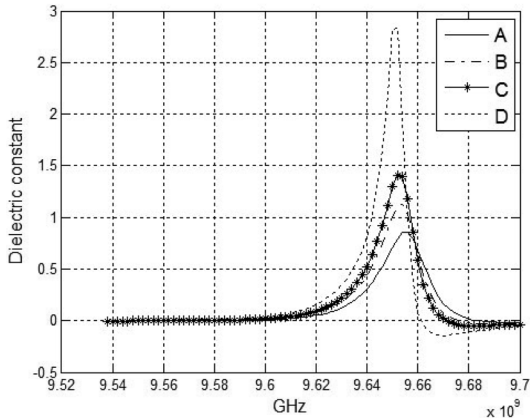
따라서 초고주파를 이용한 도파로에서는 엔진오일의 오염도에 따른 유전율 변위를 측정할 수 있다. 구형도파로측정의 이점은 다른 기술 빠르고, 정확하고, 단순하며 비파괴적 특징을 가진다.

후 기

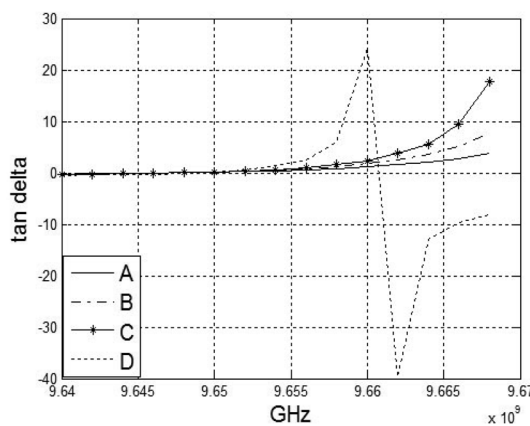
이 논문은 2008년도 홍익 대학교 학술 연구 조성에 의하여 연구 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. C.Pu et al, *IEEE Photonics Technol. Letters*, Vol. 12, No.12, pp. 1665-1667, 2000.
2. Jangannathan, S and Raju, GV.S. "Remaining Useful Life Prediction of Automotive Engine Oils using MEMS Technologies", American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000, Vol. 5, 28-30, pp. 3511-3512, 2000.
3. Simon S. Wang and Yingjie Lin, "A New Technique



(a)



(b)

Fig. 7. Extracted permittivity of measured S-parameter(a) and tan delta(b) :A(clean), B(25%), C(50%), D(diirty).

- for Detecting Antifreeze in Engine Oil During Early Stage of Leakage”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 96, Issues 1-2, 15, 2003.
4. Bois, K.J., Benally, A.D., and Zoughi, R., “Microwave Near-field Reflection Propertyanalysis of Concrete for Material Content Determination”, *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. 49, pp. 49-55, 2000.
 5. Anderson, J.M., Sibbald, C.L., and Stuchly, S.S., “Dielectric Measurements using a Rational Function Model”, *IEEE Trans. MTT*, Vol. 42, pp. 199-204, 1994.
 6. Kraszewski, A.W. and Nelson, S.O., “Observations on Resonant Cavity Perturbations by Dielectric Objects”, *IEEE Trans. MTT*, Vol. 40, pp. 151-155, 1992.
 7. Arthur D. Haigh, Frank Thompson, and Andrew A. P. Gibson, “Complex Permittivity of Liquid and Granular Materials using Waveguide Cells”, *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, Vol. 2, No. 4, 2001.
 8. A. M. Nicolson and G. F. Ross, “Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time Domain Techniques”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 19, no. 4, pp. 377-382, 1970.
 9. W. B. Weir, “Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 1, pp. 33-36, 1974.
 10. Clifton Carthelle Courtney, “Time-Domain Measurement of the Electromagnetic Properties of Materials”, *IEEE Trans. MTT*, Vol. 46, 1998.
 11. 전상명, “엔진오일의 화학적 및 물리적 변화에 의한 퇴화정도와 유전상수 변화에 관한 상호관계 연구”, *Journal of the KSTLE*, Vol. 22, 2006.