

공기압에 따른 타이어의 안전성 및 경제성에 관한 실험적 연구

홍 승 준¹⁾ · 이 호 근^{*2)}

삼성교통안전문화연구소¹⁾ · 대덕대학 자동차학부²⁾

An Experimental Study of Tire Safety & Economical Efficiency with Respect to Inflation Pressure

Seungjun Hong¹⁾ · Hogueen Lee^{*2)}

¹⁾Samsung Traffic Safety Research Institute, 7th Fl. Samsung Bldg., 50 Euljiro-1 ga, Jung-gu, Seoul 100-191, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Daeduk College, Daejeon 305-715, Korea

(Received 6 November 2008 / Accepted 29 June 2009)

Abstract : Many vehicles have significantly under-inflated tires, primarily because drivers infrequently check their vehicles' tire pressure. When a tire is used while significantly under-inflated, its sidewalls flex more and the tire temperature increases, increasing stress and the risk of failure. In this study we evaluated tire safety and economical efficiency at various inflation pressure. For tire safety we performed FMVSS indoor durability test, measurement of rolling tire temperature, braking performance at dry/wet road condition, and rolling resistance test for economical efficiency. Results show that low pressure decreases tire durability of both speed-increase condition and load-increase condition. Heat temperature of rolling tire increases as pressure decreases and significantly under-inflated tires cause increase of vehicle's stopping distance at wet road condition. Also Under-inflation increases the rolling resistance of a tire and, correspondingly, decreases vehicle's fuel economy.

Key words : Tire pressure(타이어 압력), Safety(안전성), Durability(내구성), Rolling resistance(회전저항), Economical efficiency(경제성)

Nomenclature

- A : area, m²
- B : sonic velocity, m/s

Subscripts

- A,B,C,P : nodal point
- L,R : left, right

1. 서론

현재 북미 지역의 자동차들은 부분적으로 TPMS (Tire Pressure Monitoring System)를 장착한 상태로 운행되고 있다. TPMS는 타이어의 공기압 상태를 운전자가 확인할 수 있는 장치로서 자동차 제조사 협회에 의하면, TPMS 장치를 장착한 자동차의 경우 교통사고 확률이 낮아진다고 밝힌바 있다. 미국의 교통성 산하 NHTSA에서 제정하는 FMVSS의 TPMS 규정에 의하면 2006년 11월 이후 생산되는 차량 총 무게(GVWR) 10,000pounds 이하의 차량은 의무적으로 TPMS를 장착해야 한다. 이러한 규정이 제정된 직접적인 원인은 대량의 인명피해를 가져왔던 2000

*Corresponding author, E-mail: leehg@ddc.ac.kr

년도의 Firestone타이어 파열사고이다.¹⁾ 사고의 원인은 대부분 벨트부의 고무층 분리로 인한 파열 및 이로 인한 자동차 전복인 것으로 분석되었으며, 고무층 분리는 제조상의 문제 및 타이어의 구조적인 문제 등이었지만, 타이어가 적정 공기압 이하의 압력상태였던 것도 원인 중 하나인 것으로 조사되었다.²⁾

미국의 정부기관 조사에 의하면 상당수의 운전자들이 차량 제조사의 추천 공기압 이하 상태로 타이어를 사용하고 있는 것으로 조사되었으며, 타이어의 공기압 관리도 소홀한 것으로 나타났다.³⁾

2002년에 한국소비자보호원에서 조사한 결과에 의하면 국내에서 운행 중인 차량의 절반 이상이 타이어 공기압이 부적절한 것으로 나타났으며, 2001년에 조사한 자가운전자 자동차 안전관리 실태조사에 의하면 운행 전에 타이어의 공기압 상태를 점검하는 운전자는 13%에 불과한 것으로 조사되어 타이어의 공기압 상태에 대한 점검이 매우 소홀한 것을 알 수 있다.

타이어의 공기압은 누출로 인해 일정 수준의 자연 감소가 발생하며 특히 낮은 공기압의 타이어는 육안으로 쉽게 확인이 되지 않기 때문에 운전자의 공기압 점검이 주기적으로 필요하다. 일반적으로 공기압이 낮아지면 하중에 의한 변형량이 커지기 때문에 내구성이 감소하게 되고 회전저항의 증가로 인해 차량의 연료 효율성도 떨어지는 것으로 알려져 있다.^{4,5)}

또한 미국의 타이어 제조사인 Goodyear에서 실시한 내부시험보고서에 의하면 공기압이 감소함에 따라 타이어의 쇼울더부에 작용하는 압력이 커지기 때문에 트레드 마모가 불균일하게 발생하고 마모량도 증가하는 것으로 나타났으며, NHTSA 보고서를 인용하면 압력이 35psi에서 17psi로 감소하면 트레드 수명이 정상수명의 68%로 감소하는 것으로 나타났다.⁶⁾

본 연구에서는 실험적 방법을 통해 타이어 공기압과 안전성 및 경제성의 관계를 규명하기 위해 공기압 수준별 실내 내구 주행시험 및 발열측정시험, 접지형상측정 및 제동성능시험, 회전저항 시험을 수행하여 상관관계를 규명하였다.

2. 안전성 평가

타이어의 안전성 평가를 위한 실내 내구 시험은 시험조건에 따라 타이어를 지그에 장착한 후 주행시켜 타이어 파손 시까지의 주행시간을 측정하는 방법으로 실시하였다. 실차 조건에서의 안전성 평가는 마른 노면과 젖은 노면 조건에서 공기압 수준별 제동성능을 평가하였다. 경제성 측면에서는 타이어의 회전저항을 공기압 수준별로 측정하여 회전저항과 실차 연비와의 상관 관계를 규명하도록 하였다. 대상 타이어는 현재 승용차에 가장 일반적으로 사용되는 205/65R15 규격을 사용하였으며 공기압 수준은 승용차 타이어의 적정 공기압인 30psi를 기준으로 27psi, 24psi, 21psi, 18psi로 구분하여 평가를 수행하였다.

2.1 실내 내구성 평가

실내 내구성은 가장 기본적인 타이어의 성능으로 모든 타이어의 범규 시험에 포함되는 평가 항목이다. 시험 방법은 Fig. 1과 같이, 스틸드럼을 주행노면으로 하여 여러 가지 주행조건을 부가하여 내구성을 평가한다. 주행 조건은 크게 두 가지로 분류되며 한 가지는 일정한 조건에서 속도를 증가시키는 고속성능 시험법이고 다른 한 가지는 하중을 증가시키는 부하성능 시험법으로 Fig. 2에 이를 나타냈다.⁷⁻¹⁰⁾

본 연구에서는 미국 타이어 안전 규정의 고속성능 내구성과 부하성능 내구성의 2가지 조건에 대하여 5가지 공기압 수준으로 시험 평가하여 공기압과

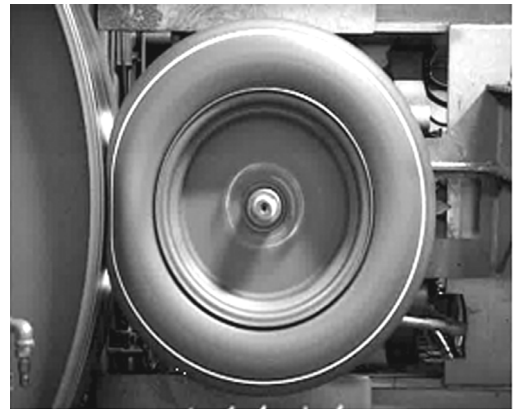
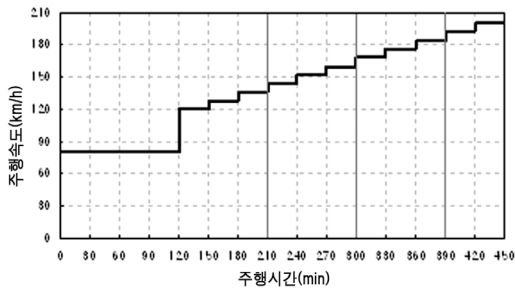
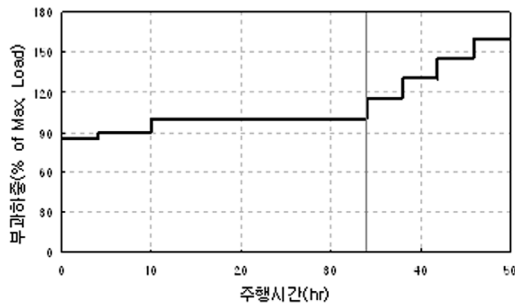


Fig. 1 Indoor durability test of tire



(a) Speed-increase condition



(b) Load-increase condition

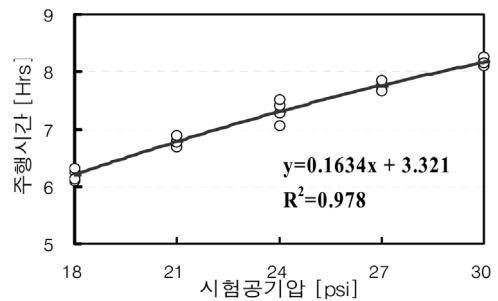
Fig. 2 Indoor durability test conditions

내구성과의 상관성을 분석하였다. 각 공기압 수준 별로 4개의 샘플타이어를 주행시험 하였으며, 내구성은 타이어 파손이 발생하기까지의 주행시간을 비교 분석하였다. 공기압 수준별로 실내 내구성 시험을 실시한 결과 공기압이 감소할수록 주행성능이 떨어지는 일정한 경향을 고찰하였다.

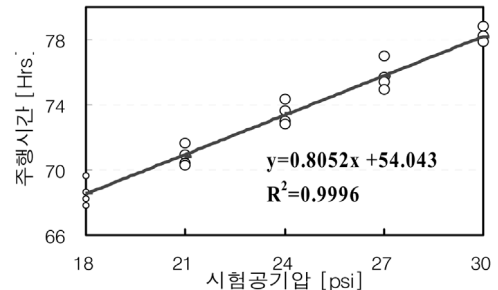
시험 특성 상 고속성능 시험은 6시간에서 9시간 사이에서 모두 사고가 발생하였고 부하성능 시험은 60시간에서 80시간 사이에서 사고가 발생하였으며, 사고 형상은 고속 시험의 경우 벨트분리 사고였으며 부하 시험의 경우 비드부 사고가 발생하였다. 그 결과를 Table 1과 Fig. 3에 나타냈다. 공기압 수준별 주행시간을 분석한 결과 30psi 기준으로 18psi에서 고속성능 시험의 경우 약 24%의 주행시간이 감소하였으며, 부하성능 시험의 경우 12%의 감소를 보였다. 고속 성능 시험의 경우 특히 급격하게 내구성이 감소하는 원인은 공기압 감소로 인해 standing wave가 발생하는 임계속도가 낮아지기 때문인 것으로 분석된다. Standing wave가 발생하면 타이어의 변형이 급격히 커지며 온도가 상승하여, 고무물성이 약해지고 이는 타이어 파손으로 이어진다.

Table 1 Indoor durability test results

시험 항목	공기압 수준별 주행시간 [hrs]				
	18psi	21psi	24psi	27psi	30psi
고속 성능	6.1	6.7	7.3	7.8	8.2
	6.3	6.8	7.4	7.7	8.3
	6.1	6.8	7.5	7.7	8.1
	6.3	6.9	7.1	7.9	8.2
부하 성능	68.6	71.0	73.7	75.7	78.8
	67.8	70.4	73.0	75.4	78.2
	69.6	70.3	72.8	74.9	77.9
	68.2	71.7	74.4	77.0	77.9



(a) Speed-increase test result



(b) Load-increase test result

Fig. 3 Indoor durability test results

2.2 발열 특성

타이어의 주재료는 고무이며 카본블랙 등을 혼합하고, 비드로 보강하여 제조한다. 기초 고무층을 여러층으로 접합시켜 만든 복합재료 형태이기 때문에, 고온에서는 고무 물성이 저하되고, 접합층이 약화되어 파손 발생 확률이 높아지게 된다. 즉 타이어에서 발생하는 사고의 직접적인 원인은 고온으로 인한 고무물성 악화 및 고무층간의 접촉력 약화라고 판단할 수 있다. 특히 벨트 끝단은 전단 변형량이 가장 크게 발생하는 부분으로 노면과의 반복적인

접지로 인해 가장 높은 발열이 발생하여 벨트분리 사고의 시작이 되는 위치이다. 이러한 이유로 승용 차량의 경우 벨트부의 온도가 가장 높고, 과적 주행이 많은 트럭의 경우에는 비드부의 온도가 가장 높게 나타난다.

본 연구에서는 공기압 수준별로 벨트 끝단에서의 온도를 측정하여 공기압과 타이어 발열과의 관계를 규명하였다. 평가방법은 타이어의 벨트 끝단에 온도센서를 연결하여 실시간 온도를 측정하였다. 시험 장치를 그림 Fig. 4에 도시하였다. 주행조건은 속도 100km/h, 하중은 타이어 최대 하중의 80% 조건으로 평가하였으며 공기압 수준은 내구성과 동일한 5가지 수준에 대하여 평가하였다.

Fig. 5와 Table 2에 나타난 평가 결과를 살펴보면, 주행이 시작 되면서 발열온도가 상승하기 시작하여 약 15분 경과 후에는 온도의 변화가 없는 평형상태에 도달하는 것으로 나타났다. 공기압 수준별로는

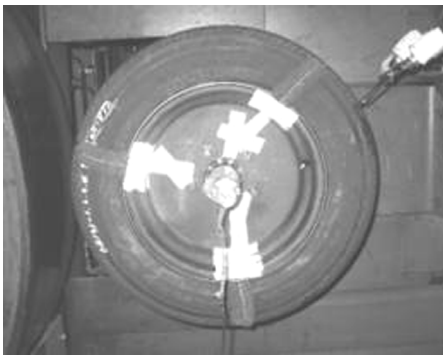


Fig. 4 Temperature measurement of tire

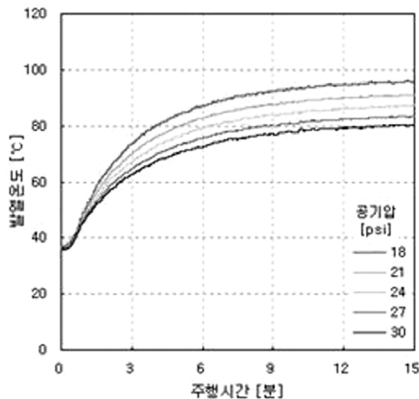


Fig. 5 Temperature of tire with respect to pressure

Table 2 Measurement result of tire temperature

공기압 (psi)	평형상태 발열온도 (°C)	증가치 (°C)
18	95.56	15.4
21	90.89	10.73
24	87.06	6.90
27	83.27	3.11
30	80.16	-

공기압이 감소할수록 일정한 형태로 타이어의 온도가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 타이어의 공기압이 낮을수록 그 증가폭은 커지는 것으로 나타났다. 이는 재료의 열적인 특성변화에 의하여 사고 위험성이 증가함을 확인할 수 있는 것이다.

2.3 제동 성능

타이어의 공기압 변화는 접지면적 및 접지단위 면적에 작용하는 접지력의 변화를 발생시켜 제동성능을 변화시킨다.

본 연구에서는 실차 조건에서 공기압 수준별로 제동성능 시험을 통해 공기압의 영향을 평가하였다. 평가방법은 마른 노면과 젖은 노면 상태에서 각각의 공기압 조건에서 6회 시험을 실시하였다.

Fig. 6은 공기압 변화에 따른 접지면적 변화를 나타낸 것이고, 시험결과는 Fig. 7에 도시하였다. 평가

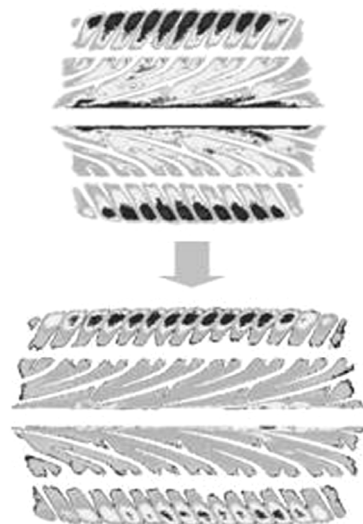


Fig. 6 Contact shape variation (30 psi vs. 18 psi)

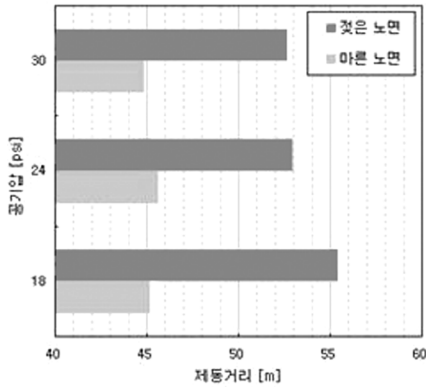


Fig. 7 Braking distances with respect to pressure (100km/h)

결과 마른 노면에서는 공기압의 영향이 크게 나타나지 않은 반면, 젖은 노면에서는 18psi 공기압에서 제동성능이 급격히 떨어지는 것으로 나타났다. 원인은 마른 노면의 경우 공기압의 변화로 인한 접지면적의 변화와 접지력의 변화가 상쇄되기 때문에 큰 차이가 발생되지 않지만, 젖은 노면에서는 타이어와 노면사이의 한계 접지력이 급격히 떨어지기 때문인 것으로 분석된다.

3. 경제성 평가

1993년 발표된 자료에 의하면 타이어 회전저항은 실차 연비와 직접적인 상관성이 있는 것으로 실험적 규명이 되었으며, 이를 Table 3에 나타냈다.¹¹⁾

본 연구에서는 공기압 수준별 경제성 평가를 위하여 속도 40km/h~120km/h 구간에서 공기압 수준별로 회전저항을 평가하였다. Fig. 8에 시험기의 개략도를 나타냈다.

Fig. 9에 나타난 평가결과를 살펴보면, 공기압이 감소할수록 회전저항이 급격히 증가하는 경향성을 보였으며 속도 영역별로는 저속에서 상대적으로 공기압의 영향이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 회전저항이 공기압에 민감하게 반응하는 원인은 회전

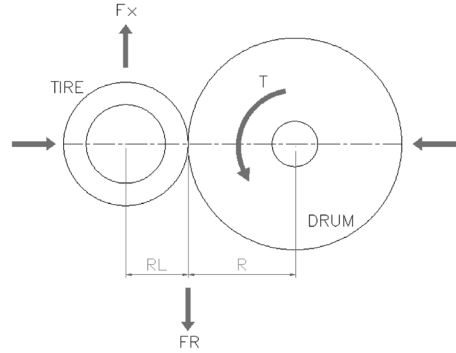


Fig. 8 RR(rolling resistance) tester

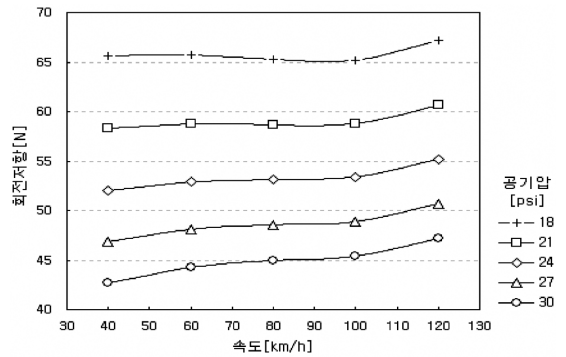


Fig. 9 Comparison of RR with respect to pressure

저항 발생 요인이 주로 타이어 변형에 의한 내부 손실에너지 때문인 것으로 판단된다. 회전저항과 실차 연비와의 관계는 패턴이나 차종 혹은 차량의 스펙에 따라서도 차이가 크기 때문에, 대부분 회전저항 10% 차이가 연비 1~2.5% 차이 정도라는 결과를 기초로 비교 계산하고 있다. 또한 그 연비차이도 운행 속도에 따라 다르다. 60~80km/h에서는 회전저항 16~18% 차이가 실차연비 4~7%, 차량속도 100km/h에서 회전저항 12~16% 차이는 실차에서 2%의 연비 차이가 있는 것으로 타이어 업계에서 제시하고 있다. 또한 외국의 자료를 살펴보면 차량속도 30km/h에서는 연비의 40%가 타이어 회전저항에 의해 소모되고, 150km/h에서는 연비의 15%가 타이어의 회전저항에 의해 소모된다고 한다.^{12,13)} 이들 데이터를 기초로 예측한 연비차이를 Table 4에 나타냈다. 공기압 30psi를 기준으로 18psi에서는 타이어 회전저항의 증가로 인해 연비가 약 6.3% 감소하는 것으로 추정된다.

Table 3 Fuel efficiency variation

차종	회전저항 10% 상승 시 연비변화
승용차, 밴, 경트럭	1.4% ↓
트럭(공차)	1.1% ↓
트럭(만차)	2.8% ↓

Table 4 Fuel efficiency variation with respect to RR(80km/h)

공기압 (psi)	회전저항 (N)	연비감소율 (%)
18	65.2	about 6.3
21	58.7	about 4.3
24	53.1	about 2.6
27	48.5	about 1.1
30	44.9	-

4. 결론

본 연구에서는 타이어 공기압이 타이어 및 차량의 안전성과 경제성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다. 타이어의 안전성은 실내주행 내구성, 타이어 발열, 실차 제동 성능으로 평가하였고, 경제성은 타이어의 회전저항시험으로 연비 변화를 예측하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

타이어의 압력변화에 대한 발열특성은 30psi 이하에서 공기압이 낮아질수록 발열온도가 높아지고 압력감소량 대비 온도증가량의 비율은 낮은 공기압에서 크며, 회전저항 또한 증가하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 타이어의 공기압 변화에 대하여 30psi 기준 18psi의 내구성능은 고속 내구성능 시험의 경우 24%, 부하성능 시험의 경우 12%가 감소하였으며, 경제성 측면에서는 6.3%의 차량 연비가 감소하는 것으로 예측되었다.

실차 조건에서 실시한 제동성능 평가에서는 마른 노면 조건에서는 공기압에 따른 성능 차이가 미비한 반면, 젖은 노면에서는 공기압이 매우 낮은 수준인 18psi에서 제동성능이 급격히 떨어지는 결과를 보였다.

이상과 같이 공기압 수준별로 타이어 및 차량의 대표적인 안전성 및 경제성을 실험적으로 평가한 결과 낮은 공기압은 타이어의 파괴 위험성 증가 및 차량의 제동거리증가, 차량의 연비 감소 등의 원인으로 작용함을 확인하였다.

최근 판매되는 타이어들은 과거에 비해 공기기밀성이 우수하지만 누출에 의한 자연감소, 주행 중 돌기물에 의한 충돌로 발생하는 누출, 계절적 온도 변화로 인한 공기압 변화로 인해 공기압 상태의 철저한 관리가 요구된다.

References

- 1) Tire, KOTMA Journal, pp.42-43, 2005.
- 2) NHTSA, Engineering Analysis Report and Initial Decision Regarding Firestone Wilderness AT Tires, U.S.DOT. 2001.
- 3) O. J. Viergutz and H. G. Wakeley, "Automobile In-Use Tire Inflation Survey," SAE 780256, 1978.
- 4) The Aerospace Corporation, Evaluation of Techniques for Reducing In-use Automotive Fuel, 1978.
- 5) G. D. Thompson and M. E. Reinman, "Tire Rolling Resistance and Vehicle Fuel Consumption," SAE 810168, 1981.
- 6) NHTSA, FMVSS; Tire Pressure Monitoring Systems; Controls and Displays, U. S. DOT. 2000.
- 7) NHTSA, Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 109 New Pneumatic Tires-Passenger Cars, U. S. DOT. 1996.
- 8) D. M. Coddington, "Inflation Pressure Loss in Tubeless Tires - Effects of Tire Size, Service, and Construction," American Chemical Society, pp.905-919, 1979.
- 9) R. N. Dodge II, S. K. Clark and M. Loo, "Pressure Loss Mechanisms in Pneumatic Tires," Symposium of ASTM, 1982.
- 10) S. K. Clark, Mechanics of Pneumatic Tires, U. S. DOT, pp.237-247, 1981.
- 11) D. J. Schuring, Effect of Tire Rolling Loss on Vehicle Fuel Consumption, Tire Society, 1993.
- 12) S.-J. Hong and H.-G. Lee, "Investigation of Market Status of Imported Tires and Quality Evaluation," Transactions of KSAE, Vol.13 No.6, pp.1-6, 2005.
- 13) N.-J., Kim and K.-W. Kim, "New Tire Contour Theory, Uniform Swelling Contour Theory, and Its Application on Passenger Car Tires," Transactions of KSAE, Vol.7 No.3, pp.234-240, 1999.