

SUV 차량용 전동식 능동 룰 제어 시스템의 성능 평가 기술 연구[§]

전광기^{*†}, 최성진^{*}, 김준태^{**}, 이경수^{***}

* 자동차부품연구원 차체샤시기술연구센터, ** (주)한화, *** 서울대학교 기계항공공학부

Study on Vehicle Dynamics Performance Evaluation of Electric Active Roll Control System for SUV

Kwangki Jeon^{*†}, Sungjin Choi^{*}, Joontae Kim^{**} and Kyongsu Yi^{***}

* Body & Chassis System Research Center, KATECH,

** Aerospace & Automotive Division, Hanwha Co.,

*** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received April 27, 2012 ; Revised September 4, 2012 ; Accepted September 4, 2012)

Key Words: Roll Control(룰 제어), Stabilizer Bar(스테빌라이저바), ARC(Active Roll Control, 능동 룰 제어), SUV(Sports Utility Vehicle), Evaluation and Validation Test(평가 및 검증 시험)

초록: 차량 선회 시 조종안정성과 주행 승차감을 향상시키기 위하여 능동적으로 차체의 룰(roll)을 줄이기 위한 연구가 진행되고 있다. 전동식 능동 룰 제어(ARC) 시스템은 전후 스테빌라이저바 중앙에 위치한 전동 모터 방식의 구동기에 의해 차량의 차체 룰을 제어한다. 본 연구에서는 이러한 전동식 ARC 시스템의 제어 성능 및 차량 동역학적 특성을 평가하고 검증하기 위한 해석, 벤치 시험, 실차 시험의 3단계 절차와 방법을 제안하였다. ARC 제어로직의 성능 및 타당성을 위한 Matlab/Simulink와 CarSim 간의 연동-해석 방법을 제안하였고, ARC 구동기 및 시스템의 성능을 평가하기 위한 벤치 시험 방법과 실차 시험 방법을 제안하였다.

Abstract: Cornering maneuvers with reduced body roll and without comfort loss are important requirements for car manufacturers. An electric active roll control(ARC) system controls the body roll angle by using motor-driven actuators installed at the centers of the front and rear stabilizer bars. Co-simulation using the Matlab/Simulink controller model and the CarSim vehicle model was proposed to evaluate the performance of the ARC control algorithm. To validate the performance of the ARC actuator and system, bench tests and vehicle tests were proposed.

1. 서 론

차량 선회 시 원심력에 의한 차체의 룰(roll)은 선회력(cornering force)을 감소시켜 조종안정성(handling 성능)에 악영향을 주며, 운전자의 주행 자세에 불편을 주어 주행승차감(ride 성능)을 감소시킨다.⁽¹⁾ 이러한 특성은 차체중심이 높은 SUV(Sports Utility Vehicle), 픽업트럭 등에서 특히 자주 발생한다.

스테빌라이저바(stabilizer bar)에 유압식 구동기

를 장착한 유압식 능동 룰 제어(active roll control, ARC) 시스템에 대한 연구는 1990년대부터 진행되었고, 최근 일부 고급 승용차량을 중심으로 실용화 되고 있다.⁽²⁾

최근에는 친환경 전기자동차(HEV, EV, FCEV) 등에 대한 연구 개발이 본격화 되면서, 유압식에 비해 에너지 소모율이 적고, 친환경적이며, 고전압 환경에 적합한 전동식 ARC 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽³⁻⁸⁾

본 연구에서는 주행 시 룰 거동이 특히 심한 SUV 차량을 대상으로 스테빌라이저바 중심부에 전기 모터로 구동되는 로터리(rotary) 방식의 구동기가 장착된 전동식 ARC 시스템에 대하여, 개발된 제어로직과 전체 시스템 시제품의 차량 동역

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회(2012. 4. 11.-13., 제주KAL호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, kkjeon@katech.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

학 성능 및 제어 성능을 평가하고 검증하는 방법과 절차를 제안하였다.

이러한 ARC 시스템의 성능 평가 및 검증 절차는 해석 평가, 벤치 시험 평가, 실차 시험 평가의 3단계로 구성되었다.

2. ARC 시스템 개요

2.1 ARC 시스템 기본 개념

차량 선회 시 ARC 시스템의 작동은 Fig. 1과 같다. 차량이 선회 시 원심력에 의한 rolling force가 발생되고, 내측의 로워암(lower arm)은 들려지고 외측 로워암은 내려가게 된다. ARC 시스템은 원심력(횡가속도)에 따라 스테빌라이저바의 비틀림각(torsion angle)을 제어하여 로워암의 거동을 제한하게 되고 차량의 롤 각을 줄여주게 된다.^(4,8)

선회 시 기존 수동형 스테빌라이저바에 발생되는 힘과 변형 형태는 Fig. 2와 같으며 A와 B 지점은 차체와 연결되는 부쉬(bush)이다.⁽⁷⁾

스테빌라이저바의 비틀림-강성과 롤-강성은 식 (1)과 같이 정의되고, 스테빌라이저바의 중앙부에서의 비틀림-토크와 롤-모멘트와의 관계는 식 (2)와 같다. 이러한 이상적인 Γ -자형 구조인 스테빌라이저바의 경우 중앙부에 위치한 전동식 ARC 구동기에서 발생된 비틀림-토크는 선형구간 내에서 일정 비율의 차량 롤-모멘트로 작용한다.⁽⁸⁾

$$K_T = \frac{\Delta M_T}{\Delta \theta} = \frac{GI_p}{L}, \quad K_\phi = \frac{\Delta M_R}{\Delta \phi} \quad (1)$$

$$F_{rod} = \frac{M_R}{L} = \frac{M_T}{b} \Rightarrow \therefore M_T = \left(\frac{b}{L} \right) M_R \quad (2)$$

여기에서, M_T : 비틀림-토크, G : 전단탄성계수(shear modulus), I_p : 극관성모멘트(polar moment of inertia), M_R : 롤-모멘트, ϕ : 롤각이다.

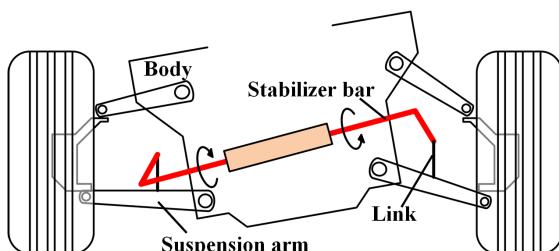


Fig. 1 Behavior of active roll control system

2.2 ARC 시스템 구동기

로터리 방식의 전동식 ARC 구동기는 대부분 Fig. 3과 같이 두 개로 단절된 스테빌라이저 중앙부에 장착된다. 전동식 ARC 구동기는 스테빌라이저바 및 감속기(reduction Gear)와의 연결이 용이하고, 효율이 높은 BLDC 모터를 주로 사용하며, 감속비가 높은 감속기를 사용하여 모터의 용량과 크기를 줄인다. 모터는 로터(rotor)와 스테이터(stator)로 구성되며, 스테이터는 하우징(housing)에 고정되고 로터는 감속기와 연결되어 토크를 스테빌라이저바로 전달한다. 반대편의 스테빌라이저바는 하우징에 연결되어 동일한 토크가 스테빌라이저 양쪽 끝으로 전달된다.

2.3 ARC 시스템 제어 알고리즘

전동식 ARC 시스템을 이용해 차량의 롤각을 최소화하기 위해서는 구동기의 크기와 용량이 증가해야 하는데, 구동기 용량이 커지면 차량 장착 성에 문제가 생긴다. 따라서 횡가속도에 따른 롤각 제어목표치를 결정하기 위해서는 구동기 용량과 개선하고자 하는 차량의 롤 성능을 동시에 검토해야만 한다.

본 연구에서 대상으로 하는 전동식 ARC 시스템은 횡가속도에 따른 목표 롤각(roll angle)을

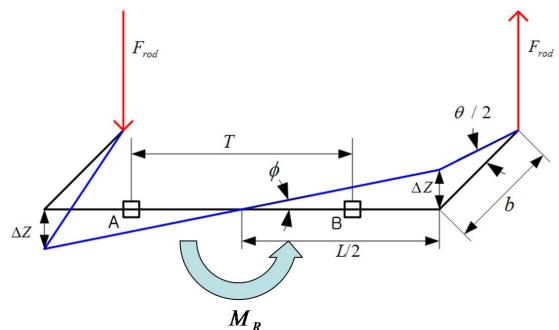


Fig. 2 Schematic diagram of passive stabilizer bar

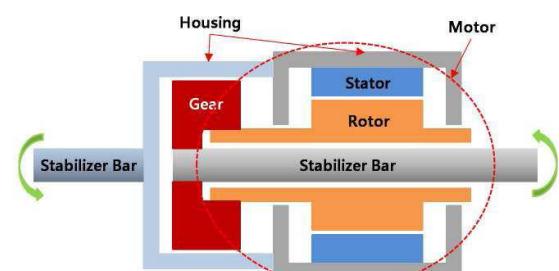


Fig. 3 Structure of electric ARC actuator

Fig. 4와 같이 0.55g 이하의 횡가속도 구간(선형 구간)에서는 기존 수동형 스테빌라이저바를 장착한 차량의 롤각 수준 대비 50% 줄이는 것으로 선정하였고, 0.55g 이상의 비선형 구간에서는 롤각변화율(roll gradient)을 기존 차량과 유사하도록 선정하였다.

또한 대상 전동식 ARC 시스템은 다른 센서나 추정기 모델을 추가하지 않고, 기존 ESP(Electronic Stability Control) 시스템의 센서들을 사용하기 위해 Fig. 5와 같이 추정 횡가속도를 제어 입력으로 사용하고 선형 롤 모델을 사용하는 비교적 간단하고 실용적인 ARC 제어로직을 사용하였다.⁽⁸⁾

ARC 제어기는 상위제어기와 하위제어기로 나뉘어지는데, 상위제어기는 CAN 통신을 통해 차속, 조향각, 횡가속도를 받아 제어입력으로 사용할 제어용 횡가속도를 추정하고 이를 통해 목표 롤각과 롤모멘트(roll moment), 구동기의 목표 토크 등을 계산한다. 하위제어기는 입력받은 목표 토크를 구현하도록 전/후륜에 배치된 ARC 구동기의 모터를 제어한다.

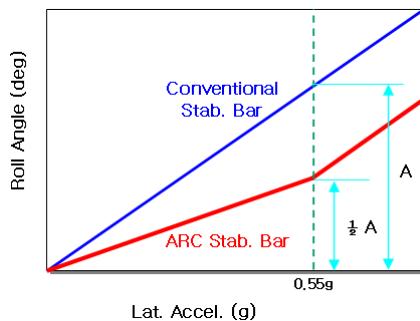


Fig. 4 Control target of ARC system

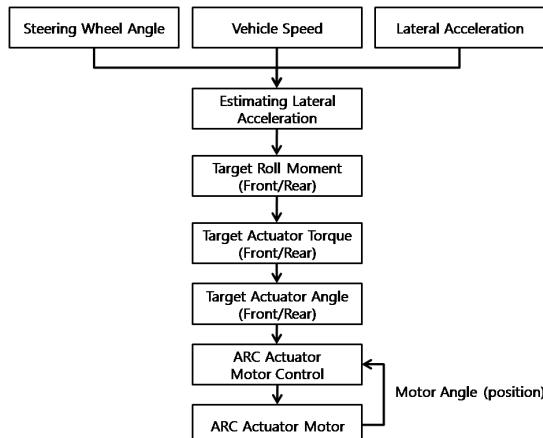


Fig. 5 ARC control block diagram

3. ARC 시스템 성능 평가 방법

전동식 ARC 시스템 개발 시제품에 대한 제어 성능 평가 및 검증 절차는 Table 1과 같이 해석 평가, 벤치 시험 평가, 실차 시험 평가의 3단계로 진행할 것을 제안하였다.

각 단계별로 cornering, slalom, lane change, J-turn, sine wave, sine sweep 등의 시험모드에 따라 해석 또는 시험을 진행하고, 차량 속도는 저속(30kph), 중속(60kph), 고속(80kph) 3가지로 구분하였다. 또한 Passive, ARC Off, ARC On 3가지 상태에서의 차속, 조향각, 횡가속도, 롤각, 롤각속도, 요각속도, 페치각을 측정하여 ARC 시스템의 제어 유무에 따른 차량 동적 성능을 비교, 분석한다.

3.1 ARC 제어로직 해석 평가

ARC 제어로직의 성능 및 타당성 평가는 Fig. 6과 같이 Matlab/Simulink로 구현된 제어기 모델과 대상 SUV 차량 모델인 CarSim 간의 연동-해석(Co-Simulation) 방법으로 평가하였다.

Table 1 Evaluation and Verification Procedure of ARC System

Step	Test Mode	Stab. Bar Condition	Measured Values
1) Step 1 : Analysis (Co-Sim.)	Cornering (0~Max. Speed)	Passive, ARC Off, ARC On	Vehicle Speed, S/W Angle, Lat. Accel., Roll Angle, Roll Rate, Yaw Rate, Pitch Angle
	Slalom (30/60/80kph)		
2) Step 2 : Bench Test	Lane Change (30/60/80kph)		
	J-turn (30/60/80kph)		
3) Step 3 : Vehicle Test	Sine Wave (30/60/80kph)		
	Sine Sweep (30/60/80kph)		

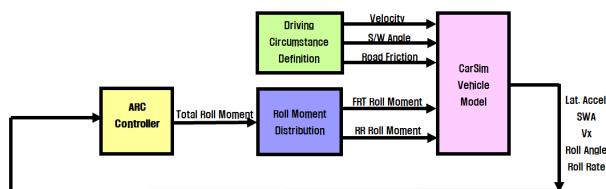
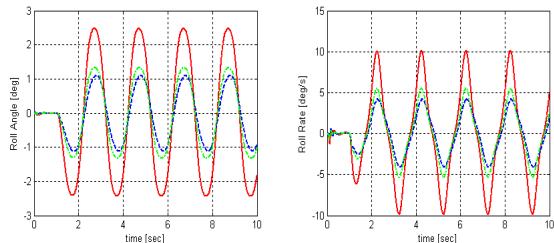
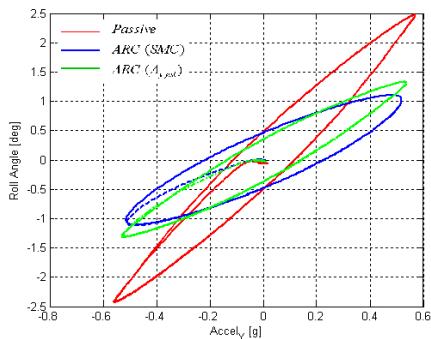


Fig. 6 Co-simulation of ARC control algorithm



(a) Roll angle and roll rate



(b) Lateral acceleration vs. roll angle

Fig. 7 Co-simulation analysis results(sine wave)

해석 조건은 Table 1에서와 같이 cornering, sine wave, lane change, slalom, J-turn(step input), sine sweep 등의 모드로 'Passive', 'ARC Off', 'ARC On' 3가지 상태에 대한 해석을 수행하였고, 각 해석 결과 데이터 중 횡가속도별 롤각과 롤각속도(roll rate) 등을 비교 분석하였다.

Fig. 7과 같이 sine wave (80kph) 주행 조건에서 기존 수동형 스테빌라이저바를 사용한 결과와 2 가지 ARC 제어로직(sliding mode controller, 추정 횡가속도 적용 controller) 적용 결과를 비교한 결과, 두 가지 ARC 제어로직 적용 시 롤각과 롤각 속도가 기존 대비 약 50%로 감소되는 것을 확인하였다.

3.2 ARC 시스템 벤치 시험 평가

해석적인 방법으로 검증된 ARC 제어기를 구현한 H/W, 개발된 ARC 구동기, 전원부 등을 조합한 ARC 시스템은 실차 시험 이전에 실험실 내 벤치 시험을 통하여 시스템의 문제점 여부를 사전 검토하고 성능을 평가하였다.

ARC 성능 평가용 벤치 시험기는 Fig. 8과 같이 ARC 구동기 고정용 지그, 변위센서(LVDT), 하중 센서(로드셀, load cell), 데이터 수집 및 저장하는 DAQ 장비, 유압 구동기와 제어기 등으로 구성된

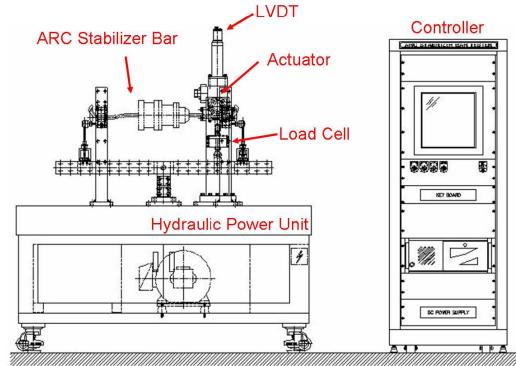


Fig. 8 Structure of ARC test bench

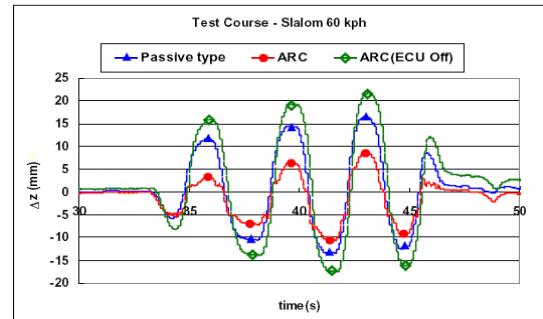


Fig. 9 Displacement of slalom in test bench

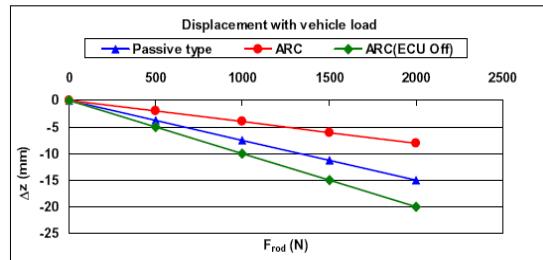


Fig. 10 Displacement with load in test bench

다.

벤치 시험기에서의 시험 평가는 기존 수동형 스테빌라이저바를 장착한 SUV 차량에 대해 Table 1에 제시된 시험모드로 실차 주행시험을 수행하며 수집한 스테빌라이저바 링크(link)부 하중값을 벤치 시험기의 load cell에서 재현하고, ARC 제어 유무에 따른 변위값을 LVDT로 계측하였다.

Fig. 9, Fig. 10과 같이 수동형 스테빌라이저바 장착 시에 비해 ARC 제어 시 변위값은 약 50% 감소하며 ARC ECU off 시에는 변위값이 약 25% 더 크게 발생하였다. ARC ECU Off 시 강성이

25% 감소한 것은 ARC 시스템 결함 시에도 수동형 스테빌라이저바의 기능을 일부 담당할 수 있음을 보여준다.

3.3 ARC 시스템 실차 시험 평가

ARC 개발 시제품에 대한 실차 적용 가능성과 실차 상태에서의 최종 검증을 위한 실차 시험을 진행하였다.

대상 SUV 차량에 창작이 가능하도록 Fig. 11과 같이 제작된 ARC 구동기와 제어기, 전원부 등을 장착하고, CAN 통신을 연결하였다. 또한 ARC 제어 유무에 따른 차량 동적 거동을 계측하기 위해 RT3100 센서와 DAQ 장비를 장착하였다.

실차시험에서 사용한 ARC 시스템은 기존 수동형 스테빌라이저바가 장착되었던 SUV 차량에 장착하기 위해 벤치 시험에서 사용했던 이상적인 L-자형 구조의 ARC 시스템 형상 중 양쪽 바(bar) 형태를 수동형 스테빌라이저바의 형상대로 다시 제작하였다.

실차시험은 Table 1에 제시된 cornering, slalom, lane change, J-turn, sine wave, sine sweep 시험을 수행하였고, Fig. 12는 그 중에서 slalom(60kph) 시험에서의 ARC 효과를 보여주는 시험 장면이다.

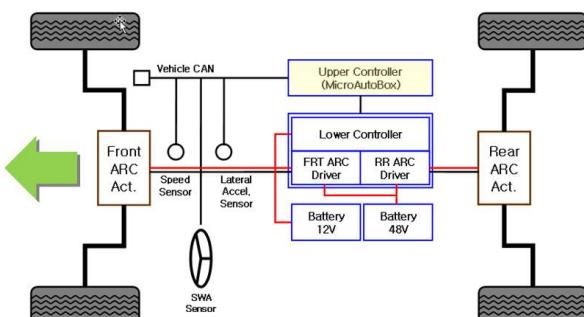


Fig. 11 ARC system configuration in vehicle test



Fig. 12 ARC On/Off snapshots in the slalom test

Table 2는 다양한 실차 시험 모드에서 스테빌라이저바 상태에 따른 최대 롤각 계측 결과이고, Fig. 13과 Fig. 14는 각각 slalom(60kph)과 sine wave(60kph)에서의 횡가속도와 롤각 시험 결과 그래프이다.

다양한 시험 결과 'ARC On' 상태에서의 최대 롤각은 'Passive' 상태에서의 최대 롤각에 비해 약 37~45% 감소되었고, 'ARC Off' 상태에서의 최대 롤각은 'Passive' 상태에 비해 약 4~10% 감소되었다.

'ARC On' 상태의 롤각 감소 결과가 해석 평가나 벤치 시험 평가 때보다 약 10% 정도 떨어지고, 'ARC Off' 상태에서 'Passive' 상태에 비해 롤각이 더 크게 나온 이유는 수동형 스테빌라이저바의 형상으로 제작된 실차 검증용 ARC 시스템을 기존 SUV 차량에 장착하는 과정에서 ARC 시스템의 바(bar) 부분이 비틀림을 미리 받았기 때문으로 사료된다. 이러한 점은 신규 차량 설계 시부터 ARC 시스템 장착을 고려하여 이상적인 L-자형 ARC 시스템이 장착되도록 장착부 주변 레이아웃(layout)을 설계한다면 해결될 것으로 보인다.

또한 Fig. 15는 개발된 ARC 시스템의 동적 반응성을 평가하기 위해 동일한 조향각 입력이 점점 빨라지는 sine sweep(60kph) 시험 시 횡가속도와 롤각 결과 그래프이며, 일반적인 조향조인 0.48Hz 조향 입력 시의 롤각에 비해 0.7Hz 조향 입력 시 롤각은 약 14% 증가하였고, 0.88Hz 조향 입력 시 롤각은 약 57% 증가하였다. 따라서 본 연구에서 시험한 ARC 시스템 개발 시제품의 경우 0.5Hz 이상 조향 입력 시 성능이 감소되는 점은 추후 수정이 필요하다고 사료된다.

Table 2 Comparison of maximum roll angle(deg)

Test Mode	Passive	ARC Off	ARC On
Slalom (60kph)	2.68	2.55 (4.8% ↓)	1.66 (38.1% ↓)
DLC (60kph)	2.01	1.82 (9.5% ↓)	1.11 (44.8% ↓)
J-turn (60kph)	2.88	2.67 (7.3% ↓)	1.63 (43.4% ↓)
Sine wave (60kph)	2.35	2.32 (1.27% ↓)	1.47 (37.4% ↓)

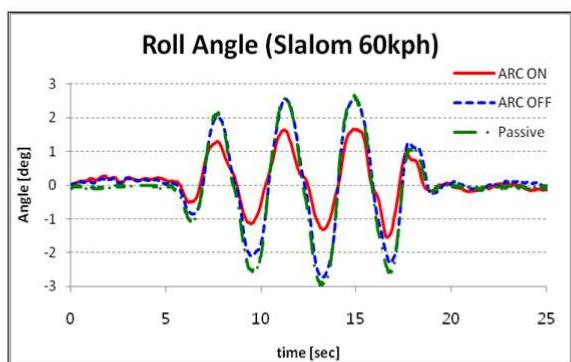


Fig. 13 Slalom(60kph) test result

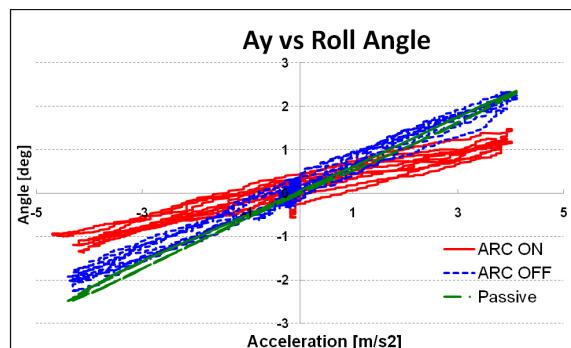


Fig. 14 Sine wave(60kph) test result

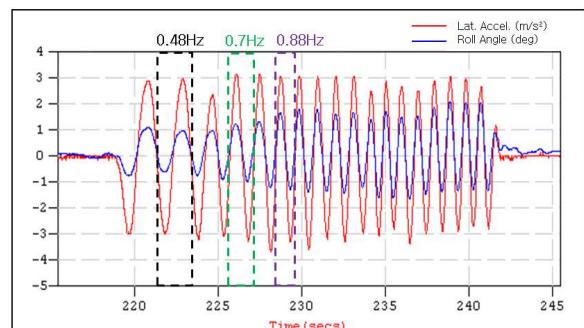


Fig. 15 Sine sweep(60kph) test result

4. 결 론

본 연구에서는 주행 시 룰 거동이 특히 심한 SUV 차량을 대상으로 로터리(rotary) 방식의 전동식 ARC 시스템의 제어 성능과 차량 동역학적 거동 특성을 평가하고 검증하기 위한 방법과 절차를 제안하였다.

이러한 ARC 시스템의 성능 평가 및 검증 절차는 제어기 simulink 모델과 대상차량 CarSim 해석 모델을 이용한 연동-해석(Co-Simulation) 평가, 실험실 내의 벤치 시험기를 이용한 벤치 시험 평가, 주행시험장에서의 실차 시험 평가의 3단계로 구성된다.

이러한 3단계 성능 평가 및 검증 절차를 통하여, SUV용으로 개발된 ARC 시스템 시제품을 실차에서 최종 평가한 결과 기존 수동 스테빌라이저바 장착 시에 비해 ARC 시스템 장착 시 37~45%의 롤각 감소 효과를 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부(No. 10029856)에 의해 지원되었다.

참고문헌

- (1) Mizuta, Y., Suzumura, M. and Matsumoto, S., 2008, "Ride Comfort Enhancement Using Active Stabilizer System," AVEC 2008, pp. 379~384.
- (2) Konik, D., 2002, "Development of the Dynamic Drive for the new 7 Series of the BMW Group," *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 28, No. 1/2/3, 131~149.
- (3) Kim, H. J., Lee, C. R., 2002, "Hybrid Roll Control using Electric ARC System Considering Limited Bandwidth of Actuating Module," *Int. J. Automotive Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 123~128.
- (4) Ohta, Y., Kato, H., Yamada, D., Sato, K., Fukino, T., Nobuyama, E. and Buma, S., 2006, "Development of an Electric Active Stabilizer System Based on Robust Design," SAE paper No. 2006-01-0758.
- (5) Suzuki, S., Buman, S., Urababa, S., Nishihara, A. and Taneda, A., 2006, "Development of Electric Active Stabilizer Suspension System," SAE paper No. 2006-01-1537.
- (6) Gaffney III, E. F., Keane, J. C., Nicols, J. T., 2009, "High Efficiency 2 Channel Active Roll Control System," SAE paper No. 2009-01-0222.
- (7) Sorniotti, A., 2006, "Electro-Mechanical Active Roll Control : A New Solution for Active Suspensions," SAE paper No. 2006-01-1966.
- (8) Jeon, K., Choi, S., Kim, J., Jang, K. and Yi, K., 2012, "Development of an Electric Active Roll Control(ARC) Algorithm for a SUV," *Int. J. of Automotive Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 247~253.