강인 확률제어의 동향

원창희

한국전자통신연구소

1. 서 론

현재 LQG, 게임이론, 적응제어, H_∞, Risk-Sensitive, 그리고 Minimal Cost Variance 제어 등의 다양한 강인제어(robust control)방법들이 활발히 연구/분석 되고 있다. 간단히 설명하면 강인 제어기 설계는 여러 입력, 외란, 파라미터 변화에도 만족할 만한 성능을 보여 주는 제어기 설계를 의미한다. 강인제어 중 잘 알려진 방법으로는 시스템에 잡음 (noise)을 입력 하고 미리 정해진 코스트를 최적화시키는 LQG 방법이 있다. 또 다른 강인제어 방법으로는 게임이론이 있는데, 이는 최악의 외란이 있다는 가정하에 코스트를 최적화시키는 것이다. 이것을 하나의 게임으로 보면 입력은 코스트를 최소화하려 하고, 외란은 코스트를 최대화하려 한다고 볼 수 있다.[1] 70년대에 개발된 적응 제어에서는 미지의 외란이나 파라미터 등을 근사적으로 설계한 피드백 또는 피드포워드 루프를 통하여 추정하고, 그 값을 사용하여 성능의 점근적 최적화 (asymptotic optimality)를 얻는다. 80년대에 소개되어 요즘까지 활발히 연구가 진행 중인 강인 제어 방법 중에는 H_∞제어 방법이 있다.[2] H_∞방법의 기본 개념은 안정된 (stabilizing) 제어기들 중에서 입/출력 오퍼레이터의 H_∞노옴(norm)을 최소화하는 제어기를 찾는 것이다. 그 밖에 확률제어(stochastic control) 방법인 Risk-Sensitive 와 Minimal Cost Variance 방법 등이 있는데, 이 방법들은 후의 절(節)에서 좀 더 상세히 다루려고 한다.

흥미롭게도 이러한 제어 방법들 사이에는 상호 연관성이 있다. 연구 결과 에 따르면 시간 영역에서의 H_∞제어기 도출 과정중 게임이론이나 Risk-Sensitive 제어와 비슷한 Riccati 종류의 식이 나온다는 것이 알려졌으며, 이는 모든 방법들이 서로 연관이 있다는 것을 의미한다. 현재 까지, H_∞, 게임이론, Risk-Sensitive 이론 등의 연관성이 밝혀졌고, 앞으로도 이러한 방향으로 연구가 더 진행될 것이다(그림 1) [3]. 근래에 다양한 강인제어 방법들이 통합 되고 있으며 멀지 않은 미래에 종합적인 강인제어 방법이 도출될 것으로 예측된다.

본 고의 취지는 강인 제어 방법 중 하나인 확률제어의 동

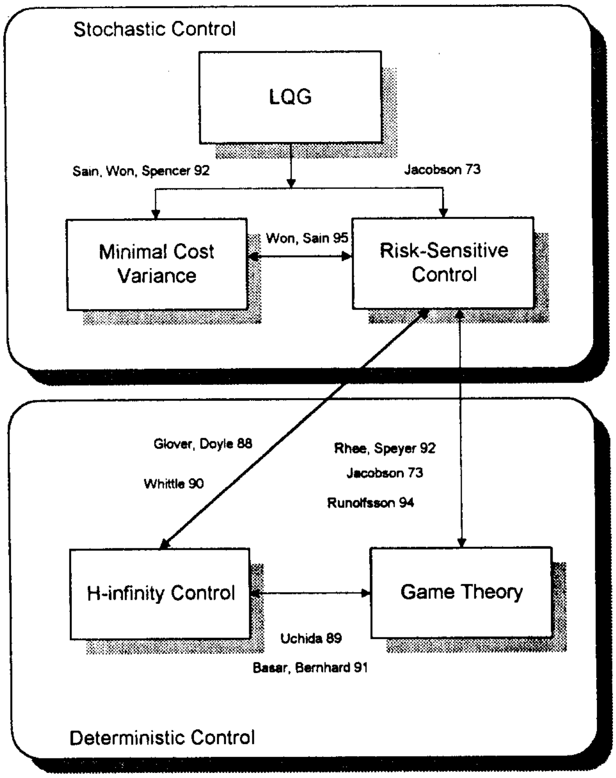


그림 1. 여러 종류의 강인제어 방법과 서로의 연관성.

향(動向)을 정리 하여 보는 것이다. 다음 절에서는 확률적으로 모델을 할 때 기본이 되는 Brownian 운동과 마코프 프로세스에 대하여 간단히 설명하고, 3절에서는 여러 확률제어 방법들을 논의 한다. 4절에서는 이 방법을 항공, 건축제어, 경제 분야 등에 응용한 예를 들어 본다. 마지막으로 결론과 앞으로의 연구 방향을 제시해 보고자한다.

2. 브라우니안 운동과 마코프 프로세스

Brownian 운동은 1827년 당시 유명한 식물학자인 로버트 브라운 (Robert Brown) 박사에 의하여 발견되었다. 그는 자그마한 꽃가루 낱알들이 물속에서 활발하게 불규칙적으로 움직이는 모습을 관찰, 기록하였다. 그 후 이 운동은 수학적으로 연구되었고, 브라우니안 운동이란 이름을 갖게 되었다. 이 브라우니안 운동이 충분히 설명되기 까지는 칠십여년이 더 걸렸다. 당시 별로 잘 알려지지 않은 알버트 아인슈타인 (Albert Einstein) 박사에 의하여 그 운동의 성질이 연구되었고 그의 논리에는 브라우니안 운동의 모든 중요한 개념이 들어 있었다[4, 5]. 마코프 프로세스 (Markov Process)의 일종인 브라우니안 운동은 1923년 노버트 위너 (Nobert Wiener) 라는 사람에 의하여 좀더 정확하게 수학적으로 해석이 되었고, 그 후 이 운동은 위너 프로세스 (Wiener Process)라고도 불리우게 되었다. 공학에서는 브라우니안 운동의 시간 미분을 백색 잡음 (White Noise) 이라고 지칭하지만 브라우니안 운동은 미분을 할 수 없으므로 수학적으로 정확히 쓸 때에는 백색 잡음보다 브라우니안 운동이라 쓰는 것이 바람직하다.

브라우니안 운동은 마코프 프로세스 중 가장 중요한 프로세스이다[6]. 마코프 프로세스는 현재의 상태만으로 앞으로의 시간적 전개(time evolution)를 하는데 필요한 모든 통계치(sufficient statistics)를 알 수 있는 중요한 성질을 가지고 있다. 마코프 확산(diffusion) 프로세스는 백색 잡음이 입력으로 포함된 확률적 미분 방적식의 해이다. 그리고 이 미분 방정식은 많은 시스템의 모델로 쓰이고 있다.

3. 강인 확률제어

확률제어의 시작은 2차 대전중 노버트 위너에 의하여 연구된 mean-square filtering 방법 이라고 할 수있으며, 그리고 확률제어의 대표적인 방법은 50년대 부터 꾸준히 연구된 LQG 제어라 할수있다. LQG 제어 방법은 기존의 제어기 디자인으로 다룰수 없었던 plant uncertainty 와 sensor noise 모델을 다루었다. 또한, 이 방법에서는 모델을 아래와 같은 선형 확률적 미분 방정식으로 나타낸다.

$$dx(t) = A(t)\,x(t)\,dt + B(t)\,u(t)\,dt + E(t)\,dw(t) \qquad (1)$$

여기서 x(t)는 상태 벡터, u(t)는 입력 벡터, w(t)는 브라우니안 운동, $E\{dw(t)\}=0$, $E\{dw\, dw^T\}=W\,dt$ 이다. LQG 최적화 문제는 코스트,

$$J=\int_0^{t_F}(x^T \Omega x+u^T R u)\ dt$$

를 최소화하는 것이다. 1960년대에 full state 궤환 LQG 제어는 무한한 이득여유와 60도의 위상여유가 있는 것으로 증명이 되었지만, 70년대에 Doyle은 output 궤환 시스템은 임의로 작은 안정여유를 가질 수 있다는 것을 발견하였다. 더 나아가1979년에 Doyle과 Stein은 LQG/LTR 이라하여 output 궤환에서 점근적으로 full state궤환 의 성능을 되 찾을 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 1987년에는 파라미터, A(t), B(t)등이 불확실할때 쓸 수 있는 강인 파라미터 (Parameter Robust) LQG 이론도 나왔다[7].

최적 확률제어를 하기 위해서는 여러 변수 들을 코스트 함수에 넣고, 이 코스트 함수를 최소화 해야 한다. 그래서 LQG 제어는 최적 확률제어의 한 종류이다. 다른 최적 확률제어 방법으로는 Minimal Cost Variance와 Risk-Sensitive 제어 등을 들 수있다. LQG 제어가 코스트 함수의 평균을 최소화시키는 반면, Minimal Cost Variance 제어는 코스트의 평균이 일정할 때 코스트 분산을 최소화하는 것이다. Risk-Sensitive 제어란 말은 1981년에 위틀(Whittle)에 의하여 처음 쓰여지기 시작 하였는데 이것은 무한의 cost cumulants의 선형 조합을 최소화하는 것을 일컫는 것이었다[8]. 그러나 지금은 어떠한 유한이나 무한의 코스트 cumulant또는 모멘트 (moment)의 선형 조합을 최적화하는 방법을 Risk-Sensitive 제어 방법이라 부르는 경향이 있다. 그러므로 LQG, Minimal Cost Variance 제어는 Risk-Sensitive 제어의 특별한 경우로 볼 수 있다. 바꾸어 말하면 Risk-Sensitive 제어는 LQG 제어 이론 등을 포함하고 있는 종합적인 이론이다.

요 근래에 활발히 연구되고 있는 강인 확률제어 방법인 Risk-Sensitive 제어와 Mimimal Cost Variance 제어 방법들을 다음 절 부터 좀더 상세히 다루려 한다.

3.1 Risk-Sensitive 제어

Risk-Sensitive 제어는1973년 제이콥슨(Jacobson)에 의하여 시작되었다[9]. 그는 Linear Exponential Quadratic Gaussian (LEQG)라 하여 기존의 LQG 와 같은 동적방정식 (1) 로 시스템을 모델하고, 코스트를 자연지수 함수와 합성하여 새로운 코스트,

$$J_{LEQG} = \exp(J) = \sigma E \exp \left(\frac{\sigma}{2}\int_o^T (x^T Q x + u^T R u)dt + \frac{1}{2}\ x^T(t_F) Q_F\, x(t_F) \right),$$

를 만들어 그것을 최소화 하였다. 여기서 σ는 싸인 연산자 (sign operator) 이고 E는 expectation 이다. Full state feedback이라는 가정하에 제이콥슨은 다음과 같은 제어기를 구하였다.

$$u(t) = -R^{-1}B^{T}S(t)x(t)$$

여기서 S(t)는 리카티 방정식에서 찾는다.

$$-\dot{S} = A^{T}S + SA - S(BR^{-1}B^{T} - \sigma EWE^{T})S + Q$$
$$S(t_F) = Q_F$$

또한, 제이콥슨은 그의 논문에서 LEQG 방법이 게임 이론과 연관이 있다는 것도 제시하였다. 이 새로운 코스트 함수는 여러 측면에서 분석할 수 있는데, 무한급수 전개 측면에서 보면 코스트 함수의 모멘트값의 무한한 선형 조합을 최소화시키는 것이다. 또한 이 코스트 함수는 엔트로피 (entropy)의 한 종류로 볼수있다는것이 Doyle등에 의하여 밝혀지었다. 마지막으로 Risk-Sensitive제어는 코스트 함수의 분포를 바꿀수 있다는 측면에서도 볼수 있다.

1976년에는 Speyer가 output 궤환 경우중 가중 행렬, Q가 포함되지 않았을때를 다루었다. 총괄적인 output 궤환 문제는 이산시간 (discrete time)의 경우 1981년 위틀에 의하여 그 해법이 제시되었고, 이 때 부터 Risk-Sensitive 제어란 용어가 사용되었다. 연속시간(continuous time)의 경우는 1985년에 Bensoussan 과 van Schuppen에 의하여 해법이 제시되었다[10].

Bensoussan과 van Schuppen은 시스템을 다음과 같은 수식으로 나타내었다.

$$dx = (Fx + Bv)\,dt + Gd\dot{w}, \qquad x_0 = \mu_0,\ y_0 = 0,$$
$$dy = Hxdt + R^{\frac{1}{2}}\,db,$$

여기서 x(t)는 상태 벡터, v(t)는 입력 벡터, w(t)는 브라우니안 운동, E{dw(t)}=0, E{dw dw^T}=W dt이다. 최적화 문제는 코스트,

$$J(v) = E\left\{\mu \exp \frac{\mu}{2}\left[\int_0^{t_F}(x^{T}Qx + v^{T}Nv)\,dt + x^{T}(t_F)Mx(t_F)\right]\right\}$$

를 최소화하는 것이다. 그들의 최적제어기는 기존의 LQG 제어기와 비슷한 모양을 한 다음의 식으로 나타낼수 있다.

$$v^{*}(t) = -N^{-1}B^{T}S(t)\,\hat{r}(t)$$

여기서 S(t)와 $\hat{r}(t)$는 아래의 리카티식과 방정식에서 구한다.

$$d\hat{r} = [F - PH^{T}R^{-1}H + \mu PQ - BN^{-1}B^{T}S]\,\hat{r}dt + PH^{T}R^{-1}dy$$
$$\dot{S} + S(F + \mu PQ) + (F^{T} + \mu QP)S + Q - S(BN^{-1}B^{T} - \mu PH^{T}R^{-1}HP)S = 0$$

경계조건 들은

$$S(t_F) = \frac{1}{2}[\ (I - \mu MP(t_F))^{-1}M + M(I - \mu P(t_F)M)^{-1}],$$
$$\hat{r}(0) = \mu_0.$$

마지막으로 P(t)는 상태벡터의 공분산으로, 다음의 리카티식에서 구한다.

$$\dot{P} - FP - PF^{T} + P(H^{T}R^{-1}H - \mu\Omega)P - GG^{T} = 0,$$
$$P(0) = P_0$$

연속시간 output 궤환 Risk-Sensitive 제어기는 편 미분방정식인 Hamilton-Jacobi-Bellman 식을 써서 얻어낸것이다. 더 나아가 Risk-Sensitive 제어에서 Risk-Sensitive 상수를 이용하면 기존의 LQG 제어와 같아질 수 있으므로, Risk-Sensitive 제어는 LQG 제어기를 포함하는 보다 포괄적인 제어기라 할 수 있다. 그리고 Risk-Sensitive 제어기는 Risk-Sensitive 제어기의 성능과 안정도는 신뢰성 분석(reliability analysis) 방법을 이용하여 조사되었다[11].

근래의 Risk-Sensitive 연구 상황에 대하여 잠깐 언급하고자 한다. Runolfsson은 1994년에 선형 시스템이고 quadratic 코스트일때 infinite horizon full state feedback Risk-Sensitive문제를 풀었다. 또한 그는 Risk-Sensitive 제어와 게임이론의 동치관계를(equivalence relation) 증명하였다. 더 근래인 1995년 11월에 Bensoussan은 "Finite Dimensional Risk-Sensitive Control Problem"이란 논문을 *Siam Journal on Control and Optimization*에 발표 하였고, 같은 저널에 Fleming 과 McEneaney는 "Risk-Sensitive Control on an Infinite Time Horizon"이란 논문을 발표 하였다.

3.2 Minimal Cost Variance 제어

Minimal Cost Variance 제어는 1966년경 세인 (Sain)에 의하여 시작 되었고, 그방법은 다음과 같이 요약될 수 있다[12]. Risk-Sensitive 제어는 무한한 cumulant를 사용하지만 Minimal Cost Variance 제어는 제일 중요한 처음 두 개의 cumulant (평균과 분산)만 사용한다. 코스트 함수를 수식으로 나타내면 J_{MCV}=E{J}+γ Var{J}가 된다. Minimal Cost Variance 제어는 코스트 함수의 평균이 주어 졌을 때 코스트 함수의 분산을 최소화시킨다. 코스트 함수의 분산을 최소화시키는 방법에는 상태궤환과 출력 궤환(output-feedback) 이 있는데, 이 두 경우 모두 최적임이 증명 되었다[13].

세인과 Liberty 는 개루우프 Minimal Cost Variance 문제를 풀어 1971년에 발표하였다. 그리고 5년뒤 Liberty와 Hartwig는 코스트의 cumulant들을 시간영역에서 계산하는 방법을 연구/발표 하였다. 수십년뒤인 1992년이나 되어서야 이 Minimal Cost Variance 문제가 Risk-Sensitive 문제

와 관련이 있다는 것을 알게되었다. Minimal Cost Variance 제어와 Risk-Sensitive 제어의 히스토리 비교는 표 1 에서 잘 보여주고있다.

표 1. Minimal Cost Variance제어와 Risk-Sensitive 제어의 히스토리 비교.

Minimal Cost Variance 제어	Risk-Sensitive 제어
[Sain] 1966	
[Sain and Souza] 1968	
[Sain and Liberty] 1971	
	1973 [Jacobson]
	1974 [Speyer, Deyst, and Jacobson]
[Liberty and Hartwig] 1976	1976 [Speyer]
	1981 [Whittle]
	[Kumar and van Schuppen]
	1985 [Bensoussan and van Schuppen]
	1990 [Whittle]
[Sain, Won, and Spencer] 1992	
	1993 [Won, Sain, Spencer]
	1994 [James, Baras, and Elliott]
	[Runolfsson]
[Won] 1995	1995 [Bensoussan]
	[Fleming and McEneaney]

Minimal Cost Variance 제어도 LQG 와 같은 시스템 모델로 나타낸다.

$$dx(t) = A(t)x(t)dt + B(t)u(t)dt + E(t)dw(t)$$

여기서 $x(t)$는 상태 벡터, $u(t)$는 입력 벡터, $w(t)$는 브라우니안 운동, $E\{dw(t)\} = 0$, $E\{dw\, dw^T\} = W\, dt$ 이다. 그리고 LQG 최적화 문제처럼 코스트 J를 아래와 같이 정의 한다.

$$J = \int_0^{t_F} (x^T Qx + u^T Ru)\, dt + x^T(t_F)\, Q_F x(t_F)$$

그러면 Minimal Cost Variance 문제는 이 코스트의 평균,

$$E\{J\} = M,$$

이 정해져 있을때 이 코스트의 분산,

$$J_{MV} = VAR\{\ J\ \},$$

을 최소화 하는 것이다. 여기서 Lagrange multiplier인 μ를 써서 다음과 같은 함수를 정의할수있다.

$$J_{MV} = \mu(E\{J\}-M) + VAR\{\ J\ \}$$

그러면 위의 함수를 최소화 하는 것은 아래의 코스트 함수를 최소화 하는것과 같은 문제가 된다.

$$J_{MV} = \mu E\{J\} + VAR\{\ J\ \}$$

개루우프 제어기는 벌써 이십여년전에 Sain에 의하여 구하여지었고 궤환 제어기는 근래에와서 연구/발표 되고있다. 궤환 제어로는 full-state 궤환경우와 output 궤환경우가 있는데 최적의 full state 제어기는

$$u(t,x) = -R^{-1}B^T(M + \gamma V)x,$$

로 나타낼수 있다. 여기서 M 과 V 는 아래의 리카티 종류의 식에서 구한다.

$$\begin{aligned} \dot{M} &+ A^T M + MA - MBR^{-1}B^T M \\ &+ \gamma^2 VBR^{-1}B^T V + Q = 0 \\ \dot{V} &+ A^T V + VA + 4MEWE^T M \\ &- MBR^{-1}B^T V - VBR^{-1}B^T M - 2\gamma\, VBR^{-1}B^T V = 0 \end{aligned}$$

그리고 경계조건은 $M(t_F)Q_F$와 이다. 여기서 해는 Hamilton-Jacobi-Bellman 식을 써서 구한것이다. Output 궤환경우에는 조금더 복잡하긴 하지만 비슷한 Hamiton-Jacobi-Bellman 식을 구하는 방법으로 해를 구할수있다 [13].

4. 응용 분야

확률 최적화 제어는 항공 우주, 신호 처리, 통신, 금융 경제, 건축물 제어 등 많은 응용 분야를 가지고 있다. 항공 우주 분야에서는 이미 60년대 부터 우주선 이나 위성 관제에 사용되어 왔다. 또한 우주선이나 위성에서 원격측정(telemetry)이 들어올 때 더해지는 잡음은 가우스 백색 잡음으로 모델할 수 있기 때문에 원격측정 추정 (estimation) 등에서 널리 쓰이고 있다(그림 2). 또다른 응용 분야는 공학자의 시각으로 볼 때 좀 특이한 분야인 주식 시장이다. 금융 경제에서 주식 시장의 변동을 확률적으로 모델하고 확률제어 방식을 적용 할 수 있다는 것이다. 끝으로 잘 알려져 있지 않은 건물 제어에 대하여 좀 더 상세히 설명하고자 한다.

최근, 일본과 미국에서는 지진에 진동하는 건물 제어 연구가 활발히 진행 중에 있다. 건물 제어 연구는 68년 주크(Zuk) 박사에 의하여 처음 거론 되었고 72년이나 되서 야오 (Yao) 박사가 제어 이론을 이용한 체계적인 연구를 하였다. 수웅(Soong) 교수는 88년에 "State-of-the-Art Review, Active Structural Control in Civil Engineering" 이란 논문에서 당시의 건물 제어 연구 동향에 대하여 상세히 기술하였다[14].

건물을 선형 확률적 미분 방적식으로 나타내고, 지진을 부라우니안 운동으로 모델하면 PID, LQG, Risk-Sensitive 제어기등을 써서 건물의 진동을 제어할수 있다. 따라서 지진에 의한 건물의 진동을 확률제어 하는 효과를 알기위해서

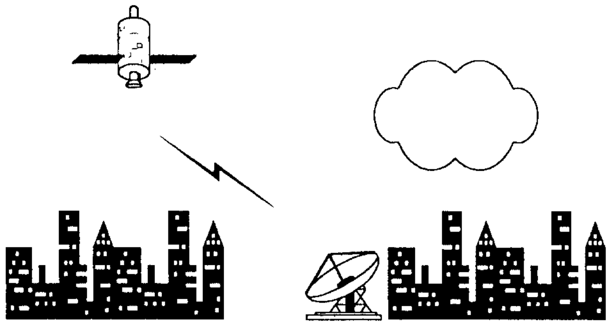


그림 2. 항공 우주 분야의 확률 제어 응용.

는 컴퓨터 시뮬레이션을 수행 한다. 그리고 시뮬레이션 결과가 좋으면 그림 3와 같은 실험실에서 실험을 하게 된다. 그림 3은 삼층 건물을 모델한 것이다. 건물 밑에 받침을 흔들리게 하여 지진과 같은 효과를 내고, 컴퓨터에 제어 방법을 입력시키고 액추에이터 (actuator)를 써서 건물의 진동을 제어 한다.

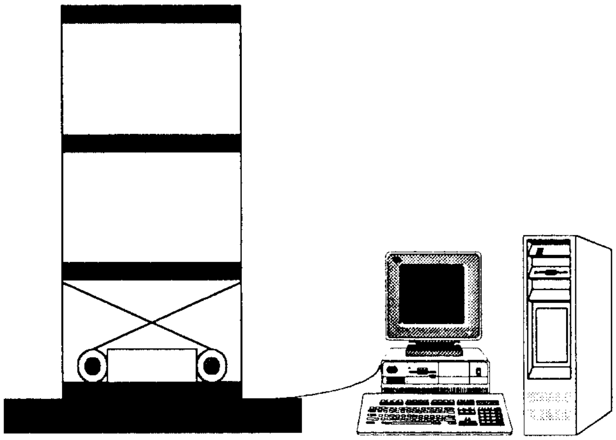


그림 3. 지진에 진동하는 건물 제어 실험실 모델.

시뮬레이션과 실험 결과 LQG 제어기는 기존의 제어기보다 훨씬 좋은 성능을 보여 주었고, 실험은 아직 실행되지 않았지만 Risk-Sensitive 제어기와 Minimal Cost Variance 제어기는 컴퓨터 시뮬레이션 에서 LQG 제어기보다 성능과 안정도에서 우월함을 보여 주었다[11].

5. 결론 및 앞으로의 연구 방향

현재, 강인제어(robust control)분야 속의 H_∞ 제어기, 게임 이론, LQG, 그리고 Risk-Sensitive 확률제어 등이 활발히 연구됨과 동시에 서로의 연관성이 밝혀지고 있다. 여기서는 그 연관성을 간단히 소개 하였으며, 특히 확률제어의 히스토리와 동향을 좀 더 구체적으로 적어 보았다. 한 시스템을 확률적으로 모델할 때 수학적 바탕이 되는 브라우니안 운동과 마코프 프로세스에 대한 간단한 설명도 언급하였다. 그리고, 확률제어의 가장 중요한 부분으로 생각되는 LQG, Minimal Cost Variance, 및 Risk-Sensitive 제어에 대하여 설명하였다. 마지막으로 현재 항공 우주와 건물 제어 분야 등의 확률제어 응용 상황을 고찰해 보았다.

앞으로도 좀 더 진보적인 확률제어 이론과 응용이 활발해 지길 바란다. 여기서 거론된 Minimal Cost Variance 방법이나 Risk-Sensitive 방법 등이 적절히 쓰이게 될 것이라 본다. 또한 체계적인 비선형 시스템 연구도 활발히 진행되고 있고, 앞으로는 더 많은 연구 결과가 나오리라 믿는다[15].

참 고 문 헌

[1] R. Isaacs, *Differential Games*, New York : John Wiley & Sons, 1965.

[2] J. Doyle, B. Francis, and A. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, New York : Macmillan Publishing Co., 1992.

[3] I. Rhee and J. Speyer, "A Game Theoretic Approach to a Finite-Time Disturbance Attenuation Problem," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 36, no. 9, September 1991.

[4] A. Einstein, "Concerning the Motion as required by the Molecular-Kinetic Theory of Heat of Particles Suspended in Liquids at Rest," Ann. Phys. (Leipzip), 17, p. 549, 1905.

[5] A. Einstein, *Investigation on the Theory of the Brownian Motion*, New York : Dover, 1956.

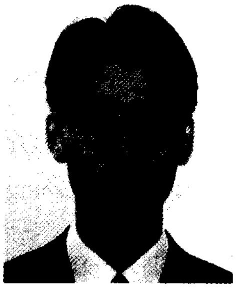
[6] W. H. Fleming and R. W. Rishel, *Deterministic and Stochastic Optimal Control*, New York : Springer-Verlag, 1975.

[7] M. Tahk and Speyer, "Modelling of Parameter Variations and Asymptotic LQG Synthesis," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-32, no. 9, September 1987, pp. 793-801.

[8] P. Whittle, "Risk-Sensitive Linear/Quadratic/Gaussian Control," *Advances in Applied Probability*, vol. 13, pp.764-777, 1981.

[9] D. H. Jacobson, "Optimal Stochastic Linear Systems with Exponential Performance Criteria and Their Relationship to Deterministic Differential Games," *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-18, pp. 124-131, 1973.
[10] A. Bensoussan, J. van Schuppen, "Optimal Control of Partially Observable Stochastic Systems with an Exponential-of-Integral Performance Index," *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 23, pp. 599-613, 1985.
[11] C.-H. Won, M. Sain, B. Spencer, Jr., "Performance and Stability Characteristics of Risk-Sensitive Controlled Structures Under Seismic Disturbances," *Proceedings American Control Conference*, Seattle, Washington, pp. 1926-1930, June 21, 1995.
[12] M. K. Sain, "Control of Linear Systems According to the Minimal Variance Criterion-A New Approach to the Disturbance Problem," *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-11, no. 1, pp.118-122, January 1966.
[13] C.-H. Won, "Cost Cumulants in Risk-Sensitive and Minimal Cost Variance Control," *Ph.D. Dissertation*, Department of Electrical Engineering, University of Notre Dame, 1995.
[14] T. T. Soong, "State-of-the-Art Review, Active Structural Control in Civil Engineering," *Eng. Struct.*, vol. 10, April, 1988.
[15] J. S. Kim, "Nonlinear Multivariable Control Using Statistical Linearization and Loop Transfer Recovery," *Ph.D. Thesis*, *Dept.* of Mech. Eng., MIT, 1987.

저 자 소 개



원 창 희

1967년 출생 1989년 노트르담 대(미국)전기/컴퓨터 공학과 졸업(학사),
1992년 노트르담 대(미국)전기공학과 졸업(석사),
1995년 노트르담 대(미국) 전기공학과 졸업(박사),
1995~현재 한국 전자 통신 연구소, 위성통신 시스템 연구부, 관제기술연구실.
관심분야 강인한 추계적 제어, 위성 관제 및 조정, 칼만 필터 추정, 최적화 제어, 비선형 시스템, 진동하는 건물제어, 인공지능 등.
(305-600)대전시 유성우체국 사서함 106.
TEL. 042) 860-4876 / FAX. 042) 860-6430.