

## 계절적 수요과정을 고려한 2단계 공급사슬의 채찍효과의 계량화 및 감소

Quantification and decreasing of bullwhip effect in two-stage  
supply chains based on seasonal demand process

발표자 조동원

한양대학교 산업공학과

## 공급사슬경영

- 공급사슬경영은 원재료의 생산에서부터 제품이 최종 고객에게 전달되는 모든 과정을 통합하고, 이를 최적화하려는 경영패러다임
  - Supply Chain Management is the management of material and information flows both in and between facilities, such as vendors, manufacturing and assembly plants and distribution centers (Thomas and Griffin(1996)).
  - Supply Chain Management is defined as the systematic, strategic coordination of the traditional business functions and tactics across these business functions within a particular company and across business within the supply chain, for the purpose of improving the long-term performance of the individual companies and the supply chain as a whole(Zacharia(2001)).

# 채찍효과

- 채찍효과란 공급사슬에서 주문량의 변동이 공급사슬을 거슬러 올라가면서 증가하는 현상( Lee et al.(1997a))

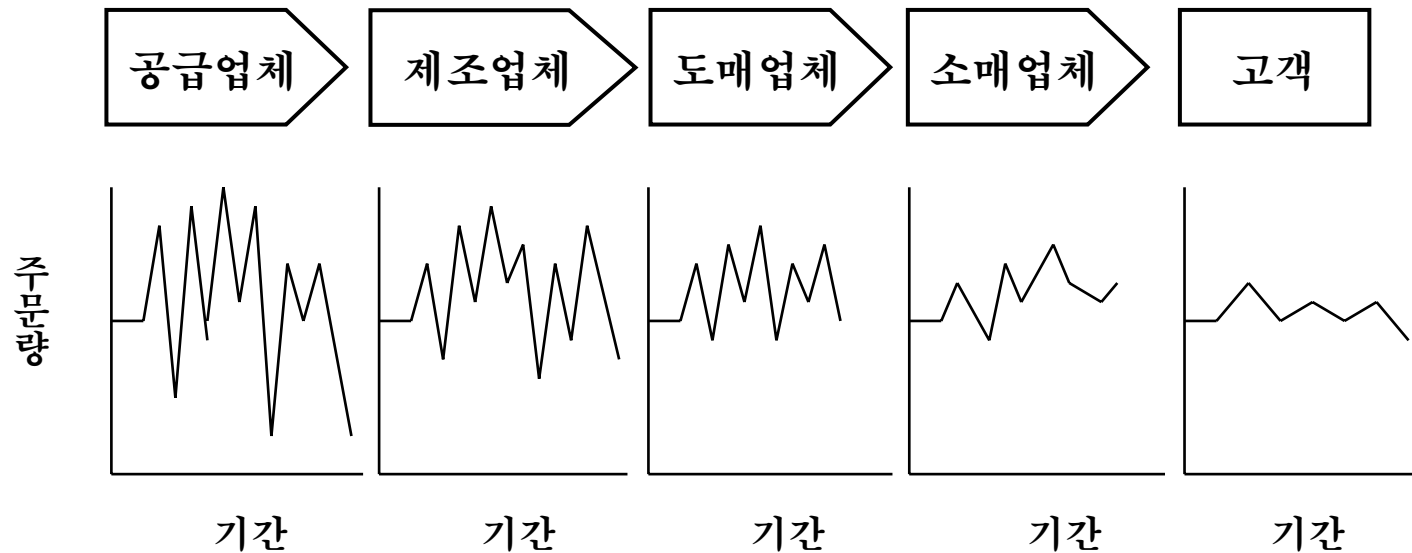


그림 1. 공급사슬 단계별 주문량 변화

## 채찍효과

- 채찍효과로 인해 공급사슬에서 발생하는 문제점(Chopra and Meindl(2007))
  1. 생산비용의 증가
    - 고객 수요의 변동에 비해 판매자가 주문하는 변동이 증가로 인해 과도한 생산 용량, 생산계획의 잦은 변경과 현상 발생
  2. 재고비용의 증가
    - 증가한 수요 대비 주문의 변동성에 대응하기 위해 과도한 재고 유지와 함께 창고의 공간과 재고 취급 비용의 상승
  3. 재고 보충 기간의 증가
    - 지속적으로 변동하는 고객의 수요에 대응에 맞추어 생산 스케줄링의 안정화를 위해 생산 용량 및 재고를 증가함으로써 재고 보충기간의 증가
  4. 수송 및 선적 비용의 증가
    - 고객 서비스의 향상을 위해 수송 및 선적의 심한 불균형이 초래
  5. 제품별 가용성의 감소
    - 수요의 변동성의 증가로 인한 제품별 공급이 원활히 이루어지지 않기 때문에 제품별 품절 증가
  6. 공급사슬 구성원간 관계 악화
    - 채찍효과로 인해 공급사슬을 구성하고 있는 구성원간 서로의 불신이 증가로 인해 공급사슬 전체의 협조와 협력이 감소

# 기존연구

## ■ 채찍효과의 원인

- 공급사슬 구성원들간에 주고 받는 제품, 정보 및 자금의 흐름의 역동적인 현상의 결과로 발생: Forrester(1969)
- 공급사슬의 역동적 환경에서 의사결정자의 시스템적 오류로 인식: Sterman(1989)
- 채찍효과의 발생 원인을 수요예측의 갱신, 배치식 주문, 가격 변동, 할당과 부족분 게임에 의해 규정하고 이를 분석적인 방법을 통해 증명: Lee et al.(1997b)

## ■ 채찍효과 발생 사례

- 공급사슬에 발생하는 채찍효과의 실제 사례:  
Chopra and Meindl(2007), Fransoo and Wouters(2000), Lee et al.(1997a), McCullen and Towill(2002)

# 기존연구

## ■ 채찍효과와 측정

- AR 시계열 모형 기반의 측정: Chen et al.(2000a, 2000b), Luong(2006), Alwan et al.(2003)
- IMA 시계열 모형 기반의 측정: Graves(1999)
- ARIMA 시계열 모형 기반의 측정: Gilbert(2005), Gilbert & Chatpattananan(2006)
- 수요예측기법의 선택에 따른 측정: Zhang(2004)
- 재고정책의 선택에 따른 측정: Kelle and Milne(1999)

## ■ 채찍효과와 감소 및 제거

- 수요예측기법의 비교 : Chandra and Grabis(2005)
- 채찍효과를 줄이기 위한 재고정책 : Su & Wong(2006), Disney & Towill(2003)
- 정보공유를 통한 채찍효과와 제거: Lee et al.(2000), Lin & Lin(2006), Hong Yan & Cheng(2001)
- 기타: McCullen & Towill(2002)

## 기존연구의 한계

- 계절적 수요과정 (seasonal demand process)를 고려한 공급사슬에서의 채찍효과 측정에 관한 연구 미흡
  - 공급사슬에서 다양한 산업에서 계절적 수요과정을 발생하고 있음:  
Chopra and Meindl(2007), McCullen and Towill(2002)
  - 기존연구에서는 계절적 수요의 시계열 모형에 대한 채찍효과에 관한 연구 미흡
- 채찍효과를 측정하기 위해서는 공급사슬에서 발생하는 일련의 프로세스를 통합적으로 고려 - 수요발생과정, 수요예측기법 및 재고정책을 통합하여 측정
  - 계절적 수요과정을 고려하여 이에 적합한 수요예측기법과 적절한 재고정책을 통합한 채찍효과를 측정에 대한 연구가 필요

## 연구목적

- 계절적 수요과정을 고려한 공급사슬의 채찍효과를 측정할 수 있는 모형의 개발
- 개발된 모형을 기초로 채찍효과가 발생하는 확률적 특성을 규명



## 연구목적

- 계절적 수요과정을 고려한 공급사슬의 채찍효과를 측정 할 수 있는 모형의 개발
- 개발된 모형을 기초로 채찍효과가 발생하는 확률적 특성을 규명
  - 공급사슬의 채찍효과를 감소하기 위해서는 선행적으로 채찍효과에의 정확한 측정이 필요
  - 채찍효과를 측정하기 위해서는 고객의 수요발생과정, 수요예측기법 및 재고정책을 종합적으로 고려해야 함으로 상정된 가정에 따라 상이한 측정 모형의 개발이 필요
  - 고객의 수요발생과정에 대응하는 판매자의 주문발생과정에 대한 확률적 특성을 분석하여 채찍효과에의 발생원인에 대한 근거를 제시

# 연구 방법

## ■ 공급사슬의 채찍효과 측정의 기본 과정

$$\text{채찍효과 측정치} = \frac{\text{공급업체의 기간별 주문량 변동}}{\text{고객의 기간별 주문량 변동}}$$

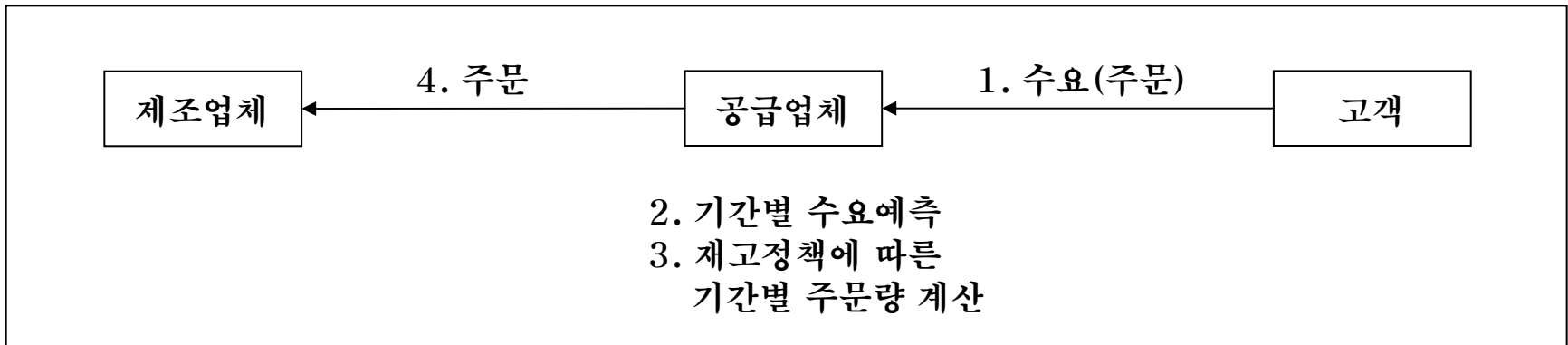


그림 2. 2 단계 공급사슬의 주문 프로세스

# 연구 방법

## ■ 본 연구의 채찍효과의 측정 모델의 구성 요소

- 최소평균제곱오차예측(minimum mean square error forecast)는 고객의 실제 수요값과 예측값의 오차가 가장 적은 예측값을 생성하기 때문에 채찍효과에 의 감소에 가장 우수함: Alwan et al.(2003)
- Order-up-to-target policy의 재고정책은 현재 가장 많이 이용되고 있는 재고정책: Gilbert(2005)
- 제품 조달기간 : 확정적

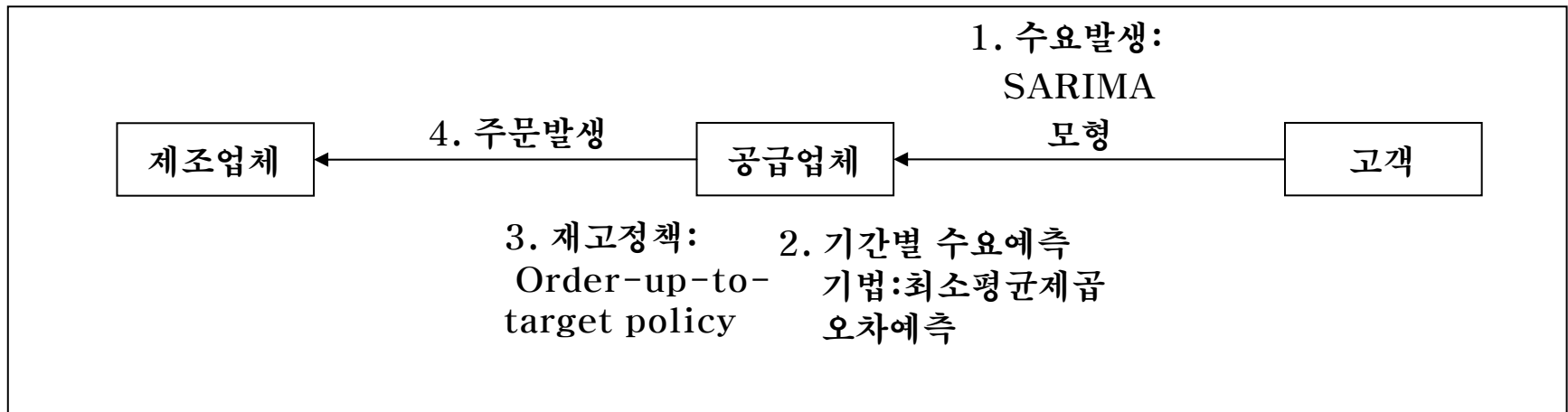


그림 3. 2 단계 공급사슬에 대한 채찍효과 측정 모형의 구성 요소

# 공급사슬 채찍효과 측정 수리 모형

## ■ 색인

$t$  : 관측치의 순서( 1, 2, ... )

$p$  : 자기회귀모형의 차수(1, 2, ... )

$q$  : 이동평균모형의 차수(1, 2, ... )

$k$  : 시차연산자의 차수(1, 2, ... )

$d$  : 차분연산자의 차수(1, 2, ... )

$P$  : 계절변동 자기회귀모형의 차수(1, 2, ... )

$Q$  : 계절변동 이동평균모형의 차수(1, 2, ... )

$D$  : 계절차분의 수(1, 2, ... )

$s$  : 계절변동의 주기(1, 2, ... )

## 계속)

### ■ 기호

$Z_t$  : 시계열 모형에서  $t$  시점의 고객 수요의 확률변수

$\mu$  : 시계열의 평균

$\phi_p$  :  $p$  차의 자기회귀모형계수

$\theta_q$  :  $q$  차의 이동평균모형계수

$\Phi_P$  : 계절변동  $P$  차의 자기회귀모형계수

$\Theta_Q$  : 계절변동  $Q$  차의 이동평균모형계수

$a_t$  :  $t$  시점의 오차항( 평균 0, 분산  $\sigma_a^2$  인 iid한 확률변수)

$B^k$  :  $k$  차의 시차연산자

$B^s$  : 계절변동 주기  $s$  의 시차연산자

## 계속)

### ■ 기호

$\nabla^d$  :  $d$  차의 차분연산자

$\nabla_s^D$  : 계절변동 주기  $s$ 와 계절변동  $D$  차의 차분연산자

$I_t$  :  $t$  기간말의 기말재고량

$O_t$  :  $t$  기간말의 주문량

$L$  : 주문조달기간

$T$  : 기말 목표재고수준

$\hat{Z}_t(L)$ :  $t$  시점에서  $t + L$  기간 수요의 예측치

$e_t(L)$ :  $t + L$  기간 수요의 예측오차

## 계절통합혼합(SARIMA, autoregressive integrated moving average) 시계열 모형

- SARIMA( $P, D, Q$ ) $_s$ :  $D$ 번의 차분과 계절자기회귀모형의 차수  $P$ 와 계절이동평균모형의 차수  $Q$ 의 모형

$$\begin{aligned} Z_t = & \Phi_1 Z_{t-s} + \Phi_2 Z_{t-2s} + \dots + \Phi_p Z_{t-Ps} + a_t \\ & - \Theta_1 a_{t-s} - \Theta_2 a_{t-2s} - \dots - \Theta_Q a_{t-Qs} \end{aligned} \quad (1.1)$$

식(1.1)을 다음의 계절차분 및 시차 연산자를 이용하여 나타내면 식(1.2)와 같다.

$$B^s Z_t = Z_{t-s}; \quad B^{ks} Z_t = Z_{t-ks}; \quad \nabla_s Z_t = (1 - B^s) Z_t; \quad \nabla_s^D Z_t = (1 - B^s)^D Z_t$$

$$\begin{aligned} \Phi(B^s) \nabla_s^D Z_t &= \Theta(B^s) a_t \quad \text{또는} \\ \varphi(B^s) Z_t &= \Theta(B^s) a_t \quad \therefore \varphi(B^s) = \Phi(B^s) \nabla_s^D \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \text{단,} \quad \Phi(B^s) &= 1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{Ps} \\ \Theta(B^s) &= 1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_Q B^{Qs} \end{aligned}$$

## 계속)

### ■ 백색잡음의 선형결합을 이용한 계절적 시계열 모형

$$\begin{aligned} Z_t &= a_t + \Psi_1 a_{t-s} + \Psi_2 a_{t-2s} + \dots \\ &= \Psi(B^s) a_t = \sum_{j=0}^{\infty} \Psi_j a_{t-js} \end{aligned} \quad (1.3)$$

단,  $\Psi(B^s)$ 는 다음과 같은 시차다항식이다.

$$\Psi(B^s) = 1 + \Psi_1(B^s) + \Psi_2(B^{2s}) + \dots$$

$\Psi(B^s)$ 는 식(1.26)를 이용하여 계산될 수 있다.

$$\Psi(B^s) = \Theta(B^s) / \phi(B^s) \quad (1.4)$$



# 재고정책

## ■ order up to target policy

- Veinnott(1965)에 의해 개발된 재고정책
- 기간별로 동일한 기말재고수준의 목표를 설정하고 기간말에 목표재고수준을 지속적으로 유지할 수 있도록 주문하는 방식
- 본 연구에서는 주문조달기간  $L$ 이 있기 때문에  $t$  기간에  $t+1$ 부터  $t+L$ 기간 말까지 수요량을 예측하여 주문하기 때문에 실제의 기말재고량은 목표재고수준을 초과 또는 부족이 가능

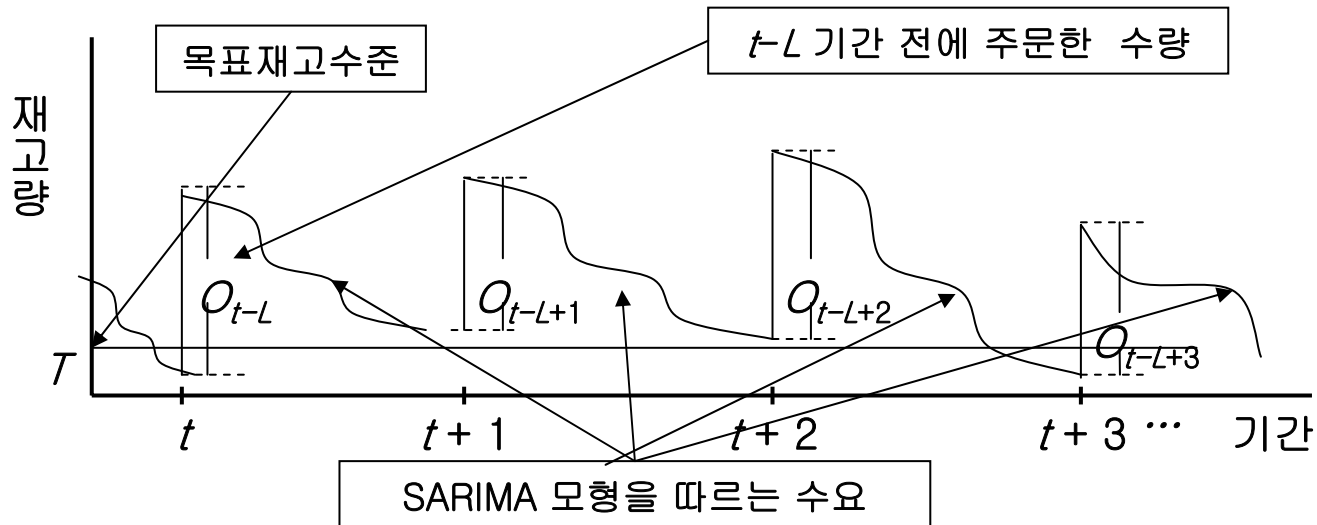


그림 4. order up to target policy

## 계속)

### ■ 목표재고수준 발주(order up to a target)정책

목표재고수준 발주 방식에 있어서 주문량은 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$I_t = I_{t-1} + O_{t-L} - Z_t, \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} O_t = T - I_t + \hat{Z}_t(1) + \hat{Z}_t(2) + \dots + \hat{Z}_t(L) \\ - O_{t-1} - O_{t-2} - \dots - O_{t-L+1}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\text{단, } \hat{Z}_t(l) = E_t(Z_{t+l} | Z_t, Z_{t-1}, \dots) = E_t(Z_{t+l} | \mathbf{Z}_t)$$

$$\mathbf{Z}_t = (Z_t, Z_{t-1}, \dots)$$

$E_t(Z_{t+l} | \mathbf{Z}_t)$ 은  $t$  시점의  $\mathbf{Z}_t$ 를 조건으로 하는  $Z_{t+l}$ 의 기대값이다.

# 계속)

## ■ [정리 1]

- SARIMA 시계열 데이터를 생성하는 고객 수요 발생 과정에서 목표재고수준 발주 정책에 따라 주문 할 경우에 재고 시계열 데이터는 계절변동  $s$ 에 따라 다음과 같은 시계열을 따른다.

$$1 \leq s \leq L - 1,$$

$$I_t = \left\{ \begin{array}{ll} T + a_t^I + \cdots + \sum_{k=0}^{n-2} \Psi_k a_{t-ks}^I + \cdots + \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor - 1} \Psi_k a_{t-ks}^I + \sum_{k=0}^{n-1} \Psi_k a_{t-ks}^I, & n = (L/s) \in \mathbb{N}^+ \\ T + a_t^I + \cdots + \sum_{k=0}^{n-1} \Psi_k a_{t-ks}^I + \cdots + \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor - 1} \Psi_k a_{t-ks}^I + \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor} \Psi_k a_{t-ks}^I, & n = (L/s) \geq 0 \text{ 이고 } n \notin \mathbb{N}^+ \end{array} \right\} \quad (1.7)$$

$$s \geq L,$$

$$I_t = T + \sum_{i=1}^L a_{t-L+i}^I \quad (1.8)$$

## 계속)

### ■ [정리 1]

- 식(1.7)과 식(1.8)은 다음과 같은 시계열 모델을 따른다.

$$1 \leq s \leq L-1,$$

$$\begin{aligned} & \text{SARIMA } (0, 0, n-1)_s, & n = (L/s) \in \mathbb{N}^+ \\ & \text{SARIMA } (0, 0, n)_s, & n = (L/s) \geq 0 \text{ 이고 } (L/s) \notin \mathbb{N}^+ \end{aligned}$$

$$s \geq L,$$

$$\text{ARIMA } (0, 0, L-1)$$

## 계속)

### ■ [정리 1]

➤ 평균재고수준  $T$  이고 표준편차는  $\sigma_I = K_I \sigma_a$  이다.

$$1 \leq s \leq L-1,$$

$$K_I = \left\{ \begin{array}{ll} \left[ 1 + \cdots + \left( \sum_{k=0}^{n-2} \Psi_k \right)^2 + \cdots + \left( \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor - 1} \Psi_k \right)^2 + \left( \sum_{k=0}^{n-1} \Psi_k \right)^2 \right]^{1/2}, & n = (L/s) \in \mathbf{N}^+ \\ \left[ 1 + \cdots + \left( \sum_{k=0}^{n-1} \Psi_k \right)^2 + \cdots + \left( \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor - 1} \Psi_k \right)^2 + \left( \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor} \Psi_k \right)^2 \right]^{1/2}, & n = (L/s) \geq 0 \text{ 이고 } n \notin \mathbf{N}^+ \end{array} \right\}$$

$$s \geq L,$$

$$K_I = \sqrt{L}$$

## 계속)

### ■ [정리 2]

- SARIMA 시계열 데이터를 생성하는 고객 수요 발생 과정에서 목표재고수준 발주 정책에 따라 주문 할 경우에 주문 시계열 데이터는 계절변동  $s$ 에 따라 다음과 같은 시계열을 따른다.

$$s = 1,$$

$$O_t = \sum_{j=0}^L \Psi_j a_t \quad (1.9)$$

$$2 \leq s \leq L-1,$$

$$O_t = a_t + \begin{cases} \Psi_1 a_t + \Psi_2 a_t + \cdots + \Psi_k a_t + \sum_{j=n}^L \Psi_j a_{t+L-js}, & [(L-1)/s] \in \mathbf{N}^+ \text{ 이면 } k = (L-1)/s \text{ 이고 } n = \lceil L/s \rceil \\ \Psi_1 a_t + \Psi_2 a_t + \cdots + \Psi_k a_t + \sum_{j=n}^L \Psi_j a_{t+L-js}, & [(L-1)/s] \notin \mathbf{N}^+ \text{ 이면 } k = (L-s)/s \text{ 이고 } n = (L/s) \end{cases} \quad (1.10)$$

$$s \geq L,$$

$$O_t = a_t + \sum_{j=1}^L \Psi_j a_{t+L-js} \quad (1.11)$$

## 계속)

### ■ [정리 2]

- 식(1.9), 식(1.10)과 식(1.11)은 다음과 같은 시계열 모형을 따른다.

$$s = 1, \quad \text{ARIMA} \quad (p, d, q^{(o)}) \times (0, 0, 0)_s$$

$$\text{단, } q^{(o)} = \max(p + d, q - L).$$

$$2 \leq s, \quad \text{SARIMA} \quad (p, d, q) \times (P, D, Q)_s$$

## 계속)

### ■ [정리 2]

➤ 평균재고수준  $T$  이고 표준편차는  $\sigma_I = K_I \sigma_a$  이다.

$$1 \leq s,$$

$$K_I = \left[ 1 + (\psi_1)^2 + (\psi_2)^2 + \dots + (\psi_L)^2 \right]^{1/2}$$

$$2 \leq s \leq L - 1,$$

$$K_I = \begin{cases} \left[ 1 + (\psi_1)^2 + (\psi_2)^2 + \dots + (\psi_k)^2 + (\psi_n)^2 + \dots + (\psi_L)^2 \right]^{1/2}, & [(L-1)/s] \in \mathbf{N}^+ \text{ 이면 } k = (L-1)/s \text{ 이고 } n = \lceil L/s \rceil \\ \left[ 1 + (\psi_1)^2 + (\psi_2)^2 + \dots + (\psi_k)^2 + (\psi_n)^2 + \dots + (\psi_L)^2 \right]^{1/2}, & [(L-1)/s] \notin \mathbf{N}^+ \text{ 이면 } k = (L-s)/s \text{ 이고 } n = \lceil L/s \rceil \end{cases}$$

$$L \leq s,$$

$$K_I = \left[ 1 + (\psi_1)^2 + (\psi_2)^2 + \dots + (\psi_L)^2 \right]^{1/2}$$



# 결론 및 향후 연구

## ■ 결론

- 계절적 수요과정을 고려한 공급사슬의 채적효과를 측정 할 수 있는 모형의 개발
- 개발된 모형을 기초로 채적효과가 발생하는 확률적 특성을 규명

## ■ 향후 연구

- 계절적 수요과정을 고려한 채적효과의 측정 모형에 이용한 모수간의 관계에 실험 및 분석
- 공급사슬에서 계절적 수요과정을 고려한 채적효과의 감소 또는 제거 방법에 대한 연구가 필요
- 2단계 이외에  $n$ 단계로 확장할 수 있는 연구가 필요

# Reference

- Alwan, L. C., J. Liu, and D-Q. Yao, Stochastic characterization of upstream demand processes in a supply chain, *IIE Transactions*, Vol. 35, No. 3, pp. 207-219, 2003.
- Chandra, C., and J. Grabis, Application of multi-steps forecasting for restraining the bullwhip effect and improving inventory performance under autoregressive demand, *European Journal of Operational Research*, Vol. 166, No. 2, pp. 337-350, 2005.
- Chen, F., Z. Drezner, J. K. Ryan, and D. Simchi-Levi., Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead times, and information, *Management Science*, Vol. 46, No. 3, pp. 436-443, 2000a.
- Chen, F., J. K. Ryan, and D. Simchi-Levi, The impact of exponential smoothing forecasts on the bullwhip effect, *Naval Research Logistics*, Vol. 47, No. 4, pp. 269- 286, 2000b.
- Chopra, S., and P. Meindl, Supply Chain Management: Strategy, Planning & Operations, *Pearson Education*, 2007.
- Disney, S. M., and D.R. Towill, Vendor-managed inventory and bullwhip reduction in a two-level supply chain, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 23, No. 6, pp. 621-651, 2003.
- Forrester, J. W., Industrial dynamics, *MIT Press, Cambridge*, 1969.
- Fransoo, J. C., and M. J. F. Wouters, Measuring the bullwhip effect in the supply chain, *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 78-89, 2000.
- Gilbert, K. C., An ARIMA Supply Chain Model, *Management Science*, Vol. 51, No. 2, pp. 305-310, 2005.
- Gilbert, K. C., and V. Chatpattananan, An ARIMA supply chain model with a generalized ordering policy, *Journal of Modeling in Management*, Vol. 1, No. 1, pp. 33-51, 2006.

# Reference

- Graves, S. C., A Single-Item Inventory Model for a Nonstationary Demand Process, *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 1, No. 1, pp. 50-61, 1999.
- Hong Yan, Z. Yu., and T. C. E. Cheng. Benefits of information sharing with supply chain partnerships, *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 101, No. 3, pp.114-119, 2001.
- Kelle, P., and A. Milne, The effect of (s, S) ordering policy on the supply chain, *International Journal of Production Economics*. Vol. 59, No. 1-3, pp. 113-122, 1999.
- Lee, H. L., K. C. So, and C. S. Tang, The Value of Information Sharing in a Two-Level Supply Chain, *Management Science*, Vol. 46, No. 5, pp. 626-643, 2000.
- Lee, H. L., V. Padmanabhan, and S. G. Whang, The bullwhip effect in supply chain, *Sloan Management Review*, Vol. 38, No. 3, pp. 93-102, 1997a.
- Lee, H. L., V. Padmanabhan, and S. G. Whang., Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect, *Management Science*, Vol.43, No. 4, pp. 546-558, 1997b.
- Lin, C-H., and Y-T. Lin, Mitigating the bullwhip effect by reducing demand variance in the supply chain, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, No. 3-4, pp. 328-336, 2006.
- Luong, H. T., Measure of bullwhip effect in supply chains with autoregressive demand process, *European Journal of Operational Research*, Available online 11, 2006.
- McCullen, P., and D. Towill, Diagnosis and reduction of bullwhip in supply chains, *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 7, No. 3, pp. 164-179, 2002.
- Sterman, J. D., Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment, *Management Science*, Vol 35, No. 3, pp. 321-339, 1989.
- Su, D-T., and J-T. Wong, Design of a replenishment system for a stochastic dynamic production/forecast lot-sizing problem under bullwhip effect, *Expert Systems with Application*, Available Online, 2006.
- Veinott, A. F., Optimal policy for a multi-product, dynamic, nonstationary inventory problem, *Management Science*, Vol. 12, No.3, pp. 206-222, 1965.
- Zhang, X., The impact of forecasting methods on the bullwhip effect, *International Journal of Production Economics*, Vol. 88, No. 1, pp. 15-27, 2004.